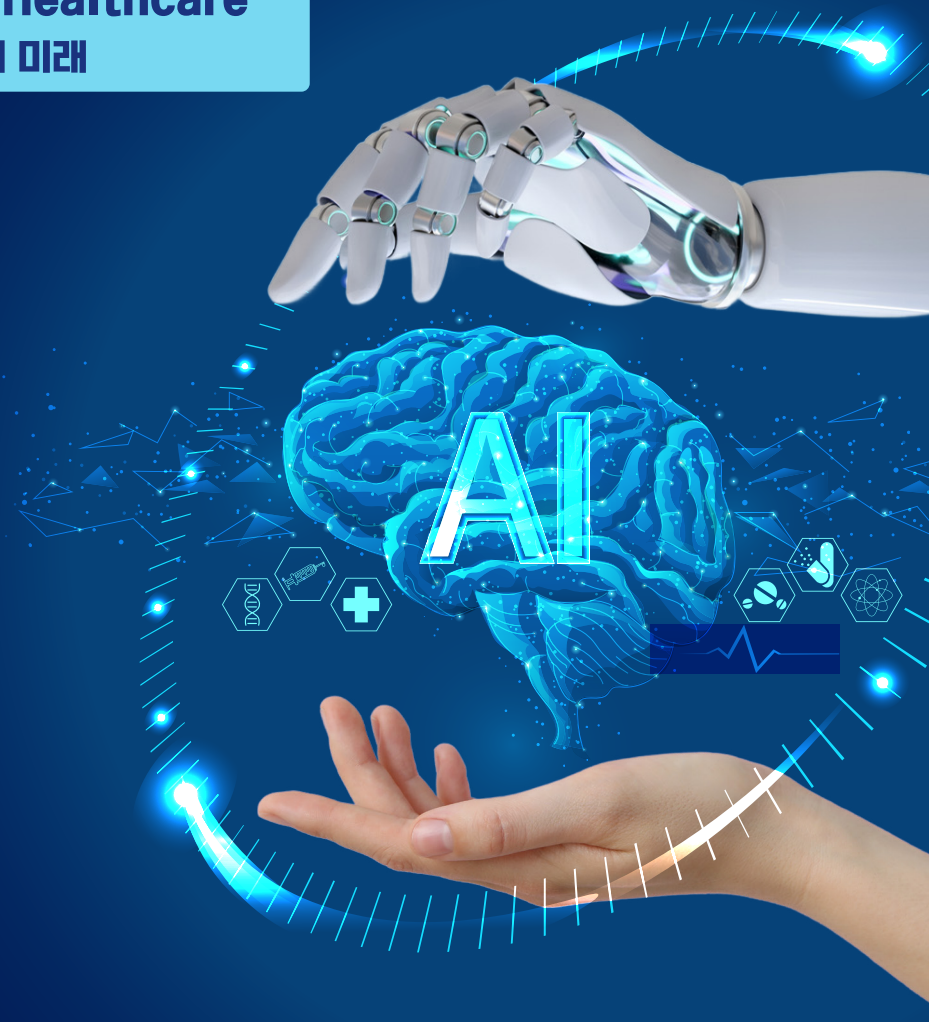
2025년
대한의용생체공학회
추계학술대회

2025.11.6(Thu) – 8(Sat)
인제대학교(김해)

"AI-Driven Horizons in Healthcare"
AI가 여는 헬스케어의 미래



Program Book

|주최| 대한의용생체공학회 The Korean Society of Medical & Biological Engineering

|주관| 대한의용생체공학회 The Korean Society of Medical & Biological Engineering, 김해의생명산업진흥원 Gimhae Biomedical Industry promotion Agency, 인제대학교 INJE UNIVERSITY, KOFST 한국과학기술단체총연합회

|후원| 한국의료기기협동조합 Korea Medical Devices Association, INSUNG INSUNG MEDICAL CO., LTD., (주)우영메디칼, dongguk UNIVERSITY 의료기기 산업 특성화 대학원, 연세대학교 미래캠퍼스 의료AI반도체 전문인력양성 사업단, CTT 사용성평가연구센터, Core Motion MOTION CREATES DRIVE, GHLAB 지에이치랩, WELLMATIX, Inception LAB, MERIHAND, YONSEI 글로벌 혁신의료기술 실증지원센터 YONSEI Global Innovative Medical Technology Evaluation and Development Center, 연세대학교 의과대학 의료기기산업학과, 메타하트 Meta Heart, 연세대학교 원주산학협력단, wmit (재)원주의료기기산업진흥원, RKnD Med., KETI 한국전자기술연구원 Korea Electronics Technology Institute, newpong, TESSOL, K-BIO HEALTH 오송첨단의료산업진흥재단, 인제대학교 RISE사업본부, NIDS 한국의료기기안전정보원, OPENIT, DEEP NOID, 식품의약품안전처 식품의약품안전평가원

인·사·말



존경하는 대한의용생체공학회 회원 여러분께,

열정을 담은 의공학 분야의 연구결과들과 미래 연구 방향을 논의하기 위한 정기학술대회를 개최하게 되었습니다. 의용생체공학 분야 명문학교인 인제대학교에서 11월 6일부터 8일까지 개최됩니다.

뇌공학, 바이오센서&바이오칩, 생체계측, 생체소재, 생체역학 및 의료로봇, 의광학, 의료영상처리 및 시스템, 의료인공지능, 의료초음파, 의료기기 규제과학, 바이오반도체, 의사공학자, 여성의공학자, 젊은의공학자 등 14개 분과에서 열정적인 발표와 열띤 토론이 펼쳐질 예정입니다.

이번 학술대회는 의공학 분야의 정부지원사업을 총괄 담당하시는 단장님, PM님들이 참여하시어 2026년도 정부지원사업에 대한 핵심적인 내용과 연구자들이 나아갈 방향에 대하여 논의하는 자리를 마련하였습니다.

또한 김해의생명산업진흥원, 대구경북첨단의료산업진흥재단, 오송첨단의료산업진흥재단, 한국의료기기협동조합과 의료기기산업협회의 회원사들과 연세대학교 의료원, 인하대병원 등 의료단체에서의 전시회 및 특별세션이 준비되어 있습니다.

삼성전자, 네이버, 아마존, 루닛, 디캐릭 등 인공지능 기반의 의료 분야 IT 업체들의 무료 튜토리얼도 개최됩니다.

이번 학술대회를 위해 조직위원회, 학술위원회를 비롯하여 많은 학회 임직원분들이 열정적으로 세세하게 준비해 왔습니다. 겨울을 향하는 길목에서 인제대학교에 오셔서 뜨거운 열정과 번뜩이는 아이디어와 가슴에 남는 추억을 만들어 가시길 권유 드립니다.

참석하시는 모든 분들께 즐거운 추억과 값진 학술활동으로 기억될 수 있기를 기원하며 끝까지 최선을 다하겠습니다.

감사합니다.

대한의용생체공학회
회장 **이 상 민**

인·사·말



안녕하십니까.

2025년 대한의용생체공학회 추계학술대회 조직위원장을 맡고 있는 연세대학교 구성욱 수석부회장입니다.

깊어가는 가을, 아름다운 김해 인제대학교에서 추계학술대회를 개최하게 되어 매우 뜻깊게 생각합니다.

바쁘신 일정에도 불구하고 학문 교류를 위해 이 자리를 함께해 주신 모든 분들께 진심으로 환영과 감사의 말씀을 드립니다.

대한의용생체공학회는 1979년 창립 이래 의공학과 생체공학 분야의 연구와 산업 발전을 선도하며, 헬스케어 혁신을 이끄는 대표 학회로 성장해 왔습니다.

이번 추계학술대회는 의공학의 현재와 미래를 폭넓게 담아내는 열린 장으로 마련되었습니다.

의료인공지능 기조강연을 비롯해 뇌공학, 의료영상, 바이오센서&바이오칩, 의료로봇, 바이오반도체, 의료기기 규제과학, 의사과학자 세션 등 다양한 프로그램이 준비되어 있습니다.

또한 학생과 산업계가 직접 소통할 수 있는 채용 및 전시 프로그램도 함께 진행됩니다.

이번 학술대회가 새로운 지식을 나누고 산·학·연이 협력의 기회를 모색하며, 미래 의공학의 도약을 함께 그려가는 소중한 시간이 되기를 기대합니다.

학술대회 준비에 세심한 노력을 기울여주신 이상민 회장님과 조직위원회, 학술위원회, 그리고 후원기관 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다. 아울러 학회의 발전을 위해 늘 관심과 성원을 보내주신 모든 회원님들께도 진심으로 감사드립니다.

깊어가는11월, 인제대학교 캠퍼스에서 학문적 열정과 따뜻한 교류가 어우러지길 바라며, 여러분 모두가 값진 학문적 성과와 아름다운 추억을 함께 가져가시기를 기원합니다.

감사합니다.

대한의용생체공학회
수석부회장 **구 성 욱**

인·사·말



학술위원장 **박 성 민**



학술이사 **김 대 유**



학술이사 **유 홍 기**



학술이사 **구 자 현**



학술이사 **양 세 정**



학술이사 **황 재 윤**



학술이사 **박 기 주**

안녕하십니까?

2025년 대한의용생체공학회 학술위원장 박성민, 학술이사 김대유, 유홍기, 구자현, 양세정, 황재윤, 박기주입니다.

제65회 대한의용생체공학회 추계학술대회를 “AI-Driven Horizons in Healthcare”(AI가 여는 헬스케어의 미래)라는 주제로 개최하게 되어 매우 뜻깊게 생각합니다.

지난 춘계 학술대회는 회원 여러분과 의공학에 관심 있는 많은 분들의 적극적인 성원과 참여 덕분에 성공적으로 마무리될 수 있었습니다. 학회에서는 의공학 기술의 임상 적용 가능성, 최신 연구 동향, 그리고 기술 상용화 사례를 공유하며 풍부한 학문적 통찰을 나눌 수 있었습니다. 특히 연구자와 학생들의 열정적인 참여는 학회장 곳곳에서 확인할 수 있었으며, 이는 의공학 발전의 핵심 동력이자 학문 공동체의 저력을 보여주는 계기가 되었습니다. 이러한 성과를 바탕으로 이번 학술대회 또한 실질적이고 심도 있는 논의가 이루어질 수 있도록 면밀히 준비하였습니다.

의공학의 궁극적인 목표는 연구실에서 탄생한 혁신적 성과가 상용화를 거쳐 실제 의료 현장에서 활용됨으로써 인류의 건강 증진과 삶의 질 향상에 기여하는 데 있습니다. 이번 학술대회는 이러한 목표를 바탕으로, AI 기술이 선도하는 헬스케어와 생명과학의 혁신적 변화, 인공지능 기반 의공학 기술의 발전, 그리고 미래 의료 시장에서의 역할을 집중적으로 다루고자 합니다. 또한 뇌공학, 바이오센서&바이오칩, 생체계측, 생체소재, 생체역학 및 의료로봇, 의광학, 임상의료기기, 의료영상처리 및 시스템, 의료인공지능, 의료초음파, 의료기기규제과학, 바이오 반도체, 의사공학자, 여성의공학자, 젊은의공학자 등 13개 분과에서 국내외 저명한 연구자들을 모셔, 이론적 고찰뿐 아니라 현실적 문제 해결과 임상 적용 가능성에 대한 심

인·사·말

층적 논의를 이어갈 예정입니다. 이를 통해 연구 성과의 실질적 응용과 상용화 과정에서 얻은 교훈을 공유하는 뜻깊은 시간이 되리라 확신합니다.

특히 미래 의공학을 이끌어갈 학부 및 대학원생들에게는 포스터 발표 및 학생 구연 세션을 통해 연구 성과를 발표할 기회를 제공하며, 의공학 관련 기업들과의 교류를 위한 전시 부스를 마련하여 실질적인 진로 탐색과 네트워킹의 장을 열고자 합니다.

아울러 특별 세션으로는 춘계 학술대회에 이어 젊은 의공학자 세션을 마련하여, 우리나라의 미래를 책임질 젊은 연구자들이 연구 성과를 공유하고 교류할 수 있는 소중한 기회를 제공하고자 합니다.

이번 추계 학술대회의 성공적인 개최를 위해 애써주신 기조 강연자와 좌장, 참여 및 후원 기업과 연구소, 이상민 회장님을 비롯한 학회 임원진과 조직위원, 그리고 학술 프로그램 구성을 위해 헌신해주신 각 분과 위원장님과 위원 여러분께 깊이 감사드립니다.

앞으로도 학회 회원 여러분과 산•학•연•병•관 관계자 여러분의 변함없는 관심과 참여를 부탁드리며, 이번 학술대회가 모든 참석자에게 의미 있고 보람된 시간이 되기를 진심으로 기원합니다.

감사합니다.

대한의용생체공학회 학술위원장 **박 성 민**
학술이사 **김대유·유홍기·구자현·양세정·황재윤·박기주**

제32대(2025년) 임원진

직 책	성 명	소 속
명예회장	이 규 백	고려대학교
회 장	이 상 민	인하대학교
수석부회장	구 성 욱	연세대학교
부회장	이 영 규	한국의료기기협동조합
	이 종 민	한양대학교
감 사	유 문 호	전북대학교
	이 원 진	서울대학교
총무이사	신 항 식	울산의대 서울아산병원
재무이사	이 정 현	경북대학교
	이 기 현	전남대학교
기획이사	서 종 모	서울대학교
	임 창 환	한양대학교
	장 원 석	연세대학교
편집이사	태 기 식	건양대학교
	이 재 성	서울대학교
학술이사	박 성 민	POSTECH
	구 자 현	고려대학교
	김 대 유	인하대학교
	양 세 정	연세대학교
	황 재 윤	DGIST
	유 홍 기	KAIST
	박 기 주	경희대학교
산학협력이사	김 광 기	가천대학교
	기 재 홍	연세대학교
	이 충 근	분당서울대병원
	남 기 창	동국대학교
	이 종 하	계명대학교
	권 대 규	전북대학교
	이 상 우	㈜네이버 클라우드
	김 준 환	㈜카카오헬스케어
	최 종 민	㈜삼성전자
	조 민 성	AWS
	황 동 훈	원주의료기기테크노밸리
	임 용 훈	오송첨단의료산업진흥재단
	김 헌 태	대구경북첨단의료산업진흥재단
	차 병 열	김해의생명산업진흥원
	황보원주	주식회사 라드빔

직 책	성 명	소 속
정보전산이사	김 도 원	전남대학교
홍보이사	정 윤 경	인제대학교
	하 서 정	상지대학교
회원관리이사	권 보 미	세종대학교
교육이사	신 현 정	KAIST
	김 형 식	건국대학교
	윤 대 성	고려대학교
	손 영 돈	가천대학교
	강 신 애	강남세브란스병원
	최 성 용	한양대학교
국제협력이사	김 철 홍	POSTECH
	최 영 빈	서울대학교
법제이사	정 상 태	법무법인 율촌
융합특임이사	김 법 민	고려대학교
	박 종 애	한국연구재단
	정 재 승	고려대학교병원
	김 성 훈	울산의대 서울아산병원
	손 영 민	삼성서울병원
	조 영 창	한국전자기술연구원
	박 영 진	한국전기연구원
	박 세 훈	재활공학연구소
	김 형 민	KIST
의공학 학술진흥이사	정 병 조	연세대학교
	변 경 민	경희대학교
	이 레 나	이화여자대학교
	이 보 름	GIST
	강 태 건	고려대학교
	오 정 환	부경대학교
	안 원 식	경희대학교
	장 진 호	DGIST
	남 윤 기	KAIST
	최 민 주	제주대학교

학술위원회

직 책	성 명	소 속
학술위원장	박 성 민	POSTECH
학술이사	구 자 현	고려대학교
	김 대 유	인하대학교
	유 홍 기	KAIST
	양 세 정	연세대학교
	황 재 윤	DGIST
	박 기 주	경희대학교
뇌공학	임 창 환	한양대학교
	전 상 범	이화여자대학교
	정 지 훈	충북대학교
	박 영 균	KAIST
	한 창 희	고려대학교(세종)
	이 승 우	KAIST
	김 도 형	POSTECH
생체계측	황 한 정	고려대학교(세종)
	박 인 수	연세대학교
	심 미 선	한국공학대학교
	장 원 두	부경대학교
	이 제 연	한양대학교
	박 은 경	순천향대학교
	박 정 우	경북대학교
	최 안 렬	충북대학교
	에르덴바야르	연세대학교
	조 영 욱	인천대학교
	백 현 재	순천향대학교
의료영상 처리 및 시스템	김 민 우	부산대학교
	염 정 열	고려대학교
	최 준 열	연세대학교
	우 명 균	울산대학교
	이 옥 균	DGIST
	차 보 경	전기연구원
	김 병 형	인하대학교
	박 은 영	KAIST
의료인공지능	황 성 재	연세대학교
	감 태 의	고려대학교
	공 현 중	서울대학교병원
	김 재 일	경북대학교
	양 세 정	연세대학교
	전 수 민	동아대학교
	정 규 환	성균관대학교
	최 장 환	이화여자대학교
	김 경 수	서울대학교
바이오센서& 바이오칩	정 세 훈	세종대학교
	정 아 람	고려대학교
	곽 봉 섭	동국대학교
	성 혜 정	KIST
	정 윤 경	인제대학교
	김 현 수	광운대학교
	엄 경 식	부산대학교
	이 금 비	경북대학교
	이 원 령	KIST
	서 민 호	부산대학교
	유 재 영	성균관대학교

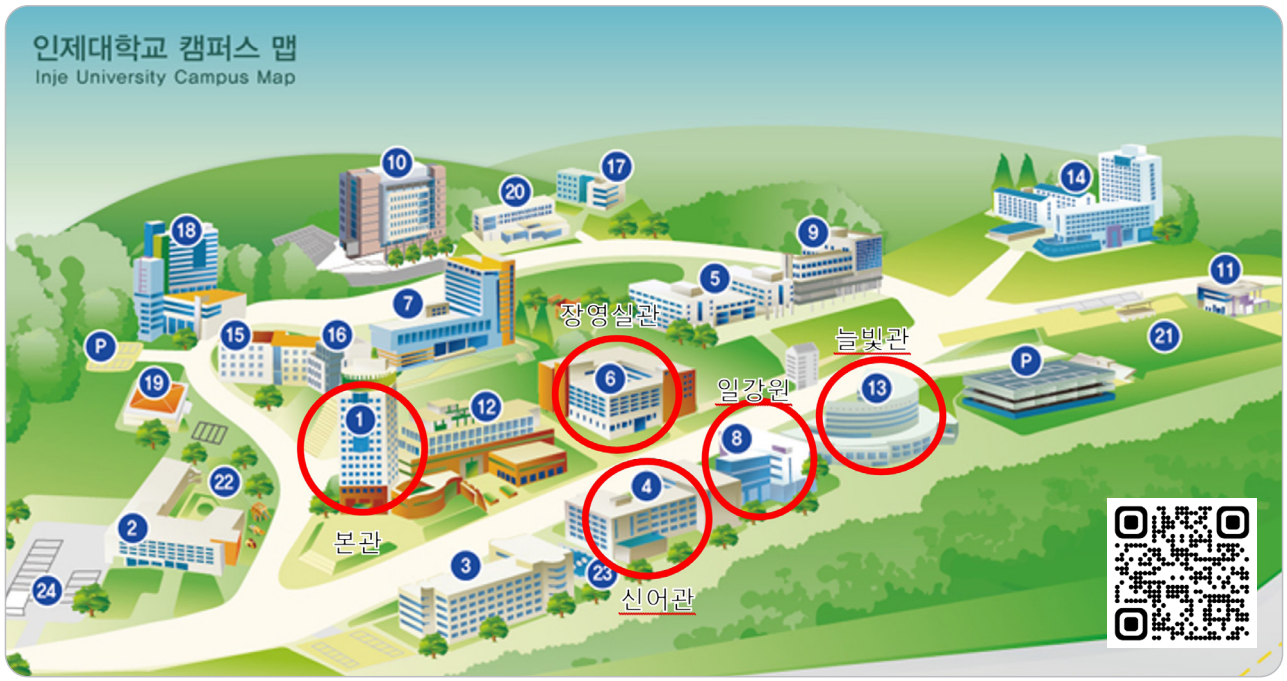
직 책	성 명	소 속
의광학	이 창 호	전남대학교
	김 재 관	GIST
	고 태 식	전북대학교
	김 필 한	KAIST
	이 동 령	숭실대
	김 준 기	아산병원
	유 홍 기	KAIST
	이 휘 돈	부산대학교
	박 별 리	성균관대학교
생체소재	주 진 명	UNIST
	황 석 원	고려대학교
	박 천 권	성균관대학교
	김 혜 진	연세대학교
	유 기 준	연세대학교
생체역학 및 의료로봇	안 송 이	KAIST
	권 보 미	세종대학교
	태 기 식	건양대학교
	임 도 형	세종대학교
	박 기 원	인천대학교
	오 건 영	경북대학교
	이 길 용	세종대학교
의사공학자	강 신 애	연세대학교
	구 태 윤	KAIST
	김 병 훈	연세대학교
	안 용 주	POSTECH
	김 태	GIST
	임 민 혁	UNIST
의료기기규제 과학	김 영 모	건양대학교
	이 사 람	서울대학교병원
	이 종 록	한국의료기기안전정보원
	이 충 근	분당서울대학교병원
	최 낙 의	팀누비즈
바이오반도체	유 호 천	한양대학교
	이 병 훈	한양대학교
	김 영 준	가천대학교
	이 영 준	KAIST
	손 동 희	성균관대학교
	윤 홍 준	가천대학교
	이 경 태	DGIST
	강 지 훈	인하대학교
의료초음파	박 수 현	이화여자대학교
	이 현 주	KAIST
	임 해 균	부경대학교
	유 재 석	DGIST
	윤 희 철	단국대학교
	박 진 형	성균관대학교
	윤 창 한	인제대학교
	김 형 민	KIST
	최 원 석	카톨릭대학교
	윤 경 호	연세대학교

조직위원회

직 책	성 명	소 속	학회 직책
고 문	이 상 민	인하대학교	회장
공동조직위원장	구 성 욱	연세대학교	수석부회장
	김 정 구	인제대학교	
공동조직부위원장	정 윤 경	인제대학교	홍보이사
	차 병 열	김해의생명산업진흥원	산학협력이사
	장 원 석	연세대학교	기획이사
운영지원위원장	신 항 식	울산의대 서울아산병원	총무이사
재무관리위원장	이 정 현	경북대학교	재무이사
재무관리부위원장	이 기 현	전남대학교	
학술프로그램위원장	박 성 민	포항공과대학교	학술이사
학술프로그램부위원장	김 대 유	인하대학교	
대외협력위원장	김 광 기	가천대학교	산학협력이사
대외협력부위원장	기 재 홍	연세대학교	
홍보관리위원장	김 도 원	전남대학교	정보전산이사
홍보지원위원장(겸)	정 윤 경	인제대학교	홍보이사
회원등록위원장	권 보 미	세종대학교	회원관리이사
조직위원	최 홍 진	인제대학교	
조직위원	송 용 근	김해의생명산업진흥원	

인제대학교, 김해

● **주소_** 경상남도 김해시 인제로 197 인제대학교



⑥ 장영실관 대강당	개회식, 총회, 기조강연 I, 생체계측, 의료인공지능
⑧ 일강원 101호	Tutorial I & IV, 뇌공학, 바이오센서&바이오칩, 의료영상 처리 및 시스템, YONSEI 글로벌 혁신의료기술 실증지원센터 특별세션
⑧ 일강원 102호	Tutorial II & V, 생체소재, 의사공학자
⑧ 일강원 103호	Tutorial III, 의광학, 생체역학 및 의료로봇, 의료기기규제과학, 지역기반 의생명 ICT · SW, 의료기기산업 특성화대학원 스페셜 세션
⑧ 일강원. 104호	바이오반도체, 의료초음파, 여성의공학자, Dr. Lee Jong-wook Fellowship Program Research Outcome Presentation
④ 신어관 101호	국가연구개발사업단 특별세션
④ 신어관 226호	한국전자기술연구원 특별세션, BMEL Lectureship
⑬ 늘빛관 이태석홀	기조강연 II, 폐회식/시상식, 젊은의공학자I, 젊은의공학자II, 의료기기 허가심사 및 연구개발 방향
① 본관 1F 및 2F 대회의실 로비	포스터세션
⑧ 일강원 앞마당	기업전시
⑥ 장영실관 104호	VIP/커미티룸
⑥ 장영실관 103호	현장사무국
⑥ 장영실관 로비	등록데스크
아이스퀘어 호텔	만찬 및 의공학인의 밤

Program at a Glance

11월 6일 목요일

	일강원 101	일강원 102	일강원 103	일강원 104	신어관 226	늘빛관 이태석홀
09:15						
09:30						
09:45						
10:00						
10:15						
10:30						
10:45						
11:00						
11:15						
11:30						
11:45						
12:00						
12:15						
12:30						
12:45						
13:00						
13:15						
13:30	Tutorial I 삼성전자	Tutorial II 루닛	Tutorial III AWS			
13:45						
14:00						
14:15						
14:30						
14:45						
15:00	Tutorial IV 네이버클라우드	Tutorial V 디캐릭	특별세션 지역기반 의생명 ICT·SW	의료초음파	특별세션 한국전자기술연구원 특별세션	특별세션 의료기기 허가심사 및 연구개발 방향
15:15						
15:30						
15:45						
16:00						
16:15						

11월 7일 금요일

	장영실 대강당	일강원 101	일강원 102	일강원 103	일강원 104	신어관 101	신어관 226	늘빛관 이태석홀	본관
09:15	생체계측	의료영상 처리 및 시스템		생체역학 및 의료로봇				젊은의공학자	
09:30									
09:45									
10:00					평의원회 (10:00~10:50)				
10:15									
10:30									
10:45	Coffee Break					Coffee Break			
11:00	개회식								포스터 부착
11:15									
11:30									
11:45									
12:00	기조강연 1 (김용덕 대표 GE헬스케어코리아)								
12:15									
12:30									
12:45	총회	Lunch							
13:00									
13:15									
13:30		특별세션 YONSEI 글로벌 혁신 의료기술 실증지원센터		특별세션 의료기기산업 특성화대학원 스페셜 세션	특별세션 Dr. Lee Jong-wook Fellowship Program Research Outcome Presentation				포스터 발표
13:45									
14:00									
14:15									
14:30									
14:45									
15:00									포스터 탈착
15:15									
15:30	의료인공지능	뇌공학	생체소재	의광학	바이오반도체	특별세션 국가연구개발 사업단 (15:10~17:00)	BMEL Lectureship	젊은의공학자	
15:45									
16:00									
16:15									
16:30									
16:45									
17:00	만찬이동								
17:15									
17:30									
17:45									
18:00	만찬 (18:00~20:00) & 의공학인의 밤(20:00~)								

Program at a Glance

11월 8일 토요일

	늘빛관 이태석홀	일강원 101	일강원 102	일강원 103	일강원 104
09:15	기조강연 2 (최병욱 교수 연세의대)				
09:30					
09:45					
10:00		바이오센서 & 바이오칩	의사공학자	의료기기 규제과학	여성의공학자
10:15					
10:30					
10:45					
11:00					
11:15					
11:30	폐회식 시상식				
11:45					

본 사업은 기획재정부의 복권기금 및 과학기술정보통신부의 과학기술진흥기금으로 추진되어 사회적 가치 실현과 국가 과학기술 발전에 기여합니다.

This work was supported by the Korean Federation of Science and Technology Societies(KOFST) Grant funded by the Korean government.

11월 6일 목요일

튜토리얼 I (삼성전자) — 일강원 101호 (13:30-14:30)

좌장: 김대유(인하대학교)

Health Technologies in Wearables and Samsung Health SDK Partners — 서진우(삼성전자)

튜토리얼 II (루닛) — 일강원 102호 (13:30-14:30)

좌장: 신항식(울산의대 서울아산병원)

The Next Era of Medical AI & Global Trend — 이형선(루닛)

튜토리얼 III (AWS) — 일강원 103호 (13:30-14:30)

좌장: 황재윤(DGIST)

Medical Agentic AI on AWS — 김경윤(AWS)

튜토리얼 IV (네이버클라우드) — 일강원 101호 (15:00-16:00)

좌장: 박기주(경희대학교)

클라우드와 헬스케어AI — 이상우(네이버클라우드)

튜토리얼 V (디캐릭) — 일강원 102호 (15:00-16:00)

좌장: 김병형(인하대학교)

Google 생성형 AI 솔루션을 활용한 의용생체공학 혁신 — 최인호(디캐릭)

Program in Detail

지역기반 의생명 ICT·SW

일강원 103 (15:00–16:00)

좌장: 유원규(인제대학교)

디지털 리더쉽	한석영(㈜토탈웰니스)
저작훈련용 기기와 어플리케이션을 활용한 대학생의 체중군별 저작습관 비교 및 개선 연구	박세린(경남대학교)
고령자의 인지 기능과 지남력 향상을 위한 애플리케이션 개발 및 사용성 평가: 작업치료사를 대상으로	김민직(인제대학교)
딥러닝을 활용한 혈당 반응 예측 알고리즘 개발	김나영(경남대학교)
The Role of Neuromuscular Junction Biomarkers Particularly C-Terminal Agrin Fragment (CAF) in Early Diagnosis of Sarcopenia: A Systematic Review and Meta-Analysis.	Rida Fatima(인제대학교)
Theranostic Cu-Prussian Blue Nanozyme for Neuroprotection and Real-Time ROS Monitoring in Ischemic Stroke	Anik Kumar Kar(인제대학교)

의료초음파

일강원 104 (15:00–16:00)

좌장: 윤창한(인제대학교), 박진형(성균관대학교)

Invited 의료용 초음파 소자의 일회용 및 착용형 개념	이병철(KIST)
Invited 투명 초음파 트랜스듀서의 최근 연구 동향	조성희(POSTECH)
Multiparametric Ultrasound Imaging for Diagnosing and Monitoring Steatotic Liver Disease	이동현(POSTECH)
Verasonics Vantage 256 시스템을 위한 GPU Direct 기반 실시간 초음파 영상화 파이프라인 설계	김명찬(DGIST)
Development of a Noninvasive Machine Learning Ensemble Model for Predicting Renal Allograft Rejection Using Integrated Ultrasound and Clinical Variables	류지승(연세대학교)

한국전자기술연구원 특별세션

신어관 226 (15:00–16:00)

좌장: 조영창(한국전자기술연구원)

전통적 신호처리 기반 기침 검출·카운팅: RMS-EMA와 이중 임계치	정찬희(한국전자기술연구원)
호흡기 이상 조기 감지를 위한 사운드 분석 기술개발	홍혁기(한국전자기술연구원)
불안장애 환자의 디지털 표현형 분석 연구	박진호(한국전자기술연구원)
MV50 범용인공호흡기의 생체신호 분석을 통한 중환자 관리(SmartPSV) 모드의 임상적 유효성 및 안전성 평가	이상학(맥아이씨에스)
구급상황에서의 데이터 수집을 위한 디바이스 연동 프레임워크 설계	김현우(한국전자기술연구원)
현장 신속 마약 검출을 위한 면역분석 기반 휴대용 센서의 최적화	곽연화(한국전자기술연구원)

의료기기 허가심사 및 연구개발 방향

늘빛관 이태석홀 (15:00–16:00)

좌장: 박해대(식품의약품안전평가원)

(의료기기) 의료기기 최신 허가심사 제도 소개	**백성인**(식품의약품안전평가원)
(디지털의료기기) 디지털의료기기 최신 허가심사 제도 소개	**김현수**(식품의약품안전평가원)
(사전상담과) 의료기기 사전 상담을 통한 제품화 지원 소개	**차지훈**(식품의약품안전평가원)
식품의약품안전평가원 의료기기 연구사업 소개	**김현정**(식품의약품안전평가원)

Program in Detail

11월 7일 금요일

생체계측 — 장영실 대강당 (09:15-10:45)

좌장: 조영욱(인천대학교), 박정우(경북대학교)

Invited Deep Learning Based Wearable Device for Silent Speech Recognition and Sign Language Recognition)	**강교원**(한국외국어대학교)
Invited **초음파 기반 의료 광학 영상 및 치료: 광학적 한계 극복**	**전진우**(한국로봇산업진흥원)
Pupillometry-based Fully Non-invasive Closed-loop Transcutaneous Tibial Nerve Stimulation System for Bladder Control	**홍성욱**(POSTECH)
Association between Heart Rate Variability (HRV) and Natural Killer (NK) Cell Status: An Exploratory Study for Non-invasive Immune Monitoring	**박주안**(고려대학교)
Development of an Accelerometer-Based Silent Speech Interface Robust to Head Motion Artifacts Using a Denoising Autoencoder	**손장재**(한양대학교)

의료영상 처리 및 시스템 — 일강원 101 (09:15-10:45)

좌장: 박은영(KAIST)

Contact-Mode Fluorescence Microscopy for Multi-Region Quantification of Conjunctival Goblet Cells in Humans	**연지은**(POSTECH)
하이브리드 Diffusion 모델을 통한 3차원 PACT 시스템의 공간 및 시간 해상도 향상	**오승훈**(POSTECH)
T1 강조 영상을 활용한 딥러닝 기반 정량적 T1 맵 추정	**김재승**(연세대학교)
Invited **지질학 최적화 기법을 활용한 치료 초음파 정밀 모니터링 시스템**	**박준홍**(한국외국어대학교)
Invited **직업적 특성과 뇌 구조 관찰 연구 및 협업 기회**	**이완형**(중앙대학교)

생체역학 및 의료로봇 — 일강원 103 (09:15-10:45)

좌장: 태기식(건양대학교), 오건영(경북대학교)

Invited **하지절단 장애인을 위한 로봇의족 연구 소개**	**우현수**(세종대학교)
Invited **체외/컴퓨터 통합 전임상 모델 기반 피하 약물 분포 예측 연구**	**김승규**(고려대학교)
스마트 인솔과 Openpose 기반 기능적 분석을 통한 인공 고관절 전치환술(THRA)과 내고정술(CRIF)의 조기 회복 양상 비교	**김정길**(인하대학교)
Design and Development of a Seat-to-Stand Walker Device for the Elderly	Eugene Asare Mensah(연세대학교)

젊은 의공학자 I

늘빛관 이태석홀 (09:15-10:45)

좌장: 윤홍준(가천대학교), 이영준(KAIST)

Invited	의공학 이미징 및 센싱을 위한 메타표면 나노광학	조용재(성균관대학교)
Invited	저반복률 광원을 이용한 SNR 향상 단일 대물렌즈 이광자 사선 광시트 현미경 개발	송정근(KAIST)
Invited	동맥경화반정밀 진단과 치료를 위한 통합형혈관 내 근적외선 카테터플랫폼 개발	김연훈(KAIST)
Invited	광전자 난수 소자를 활용한 의공학 응용	박태현(한양대학교)

기조강연 I

장영실 대강당 (12:00~12:45)

좌장: 유홍기(KAIST)

AI and the Future of Healthcare: Vision 2025+ — 김용덕(GE헬스케어코리아)

YONSEI 글로벌 혁신의료기술 실증지원센터 성과 교류 및 실증연구 세미나

일강원 101 (13:30-15:00)

좌장: 장원석(연세대학교), 정희교(김앤장 법률사무소)

YONSEI 글로벌 혁신의료기술 실증지원센터 실증연구 지원 사업 및 선정 기업 소개	송미원(YONSEI 글로벌 혁신의료기술 실증지원센터)
의료기기 실증연구란 무엇인가 – 의료기기의 임상시험과 실사용평가 –	김유림(YONSEI 글로벌 혁신의료기술 실증지원센터)
디지털의료제품법 시대, 임상시험은 어떻게 바뀌는가 – 디지털의료제품법에 따른 임상시험 전략의 변화 –	전은정((주)메디팁)
디지털의료제품법 시대, 임상시험은 어떻게 바뀌는가 – 디지털의료제품법에 따른 임상시험 사례 소개 –	전은정((주)메디팁)

Program in Detail

의료기기산업특성화대학원 스페셜 세션 — 일강원 103 (13:30–15:00)

좌장: 권지연(동국대학교)

Diagnostic Accuracy of qPCR, ddPCR, and NGS Based on Liquid Biopsy in Colorectal Cancer Patients: A systematic Review	**유승원**(동국대학교)
Exploring Predictive Models and Metrics for Maximum Current Density Estimation of TENS Pulse Trains Using Measured Surface EMG	**이성훈**(동국대학교)
Creepage and Clearance Design Strategies for Wearable and Portable Medical Devices	**김한별**(성균관대학교)
Proving the Value of Digital Pathology and Proposing a Reimbursement Strategy	**고보명**(성균관대학교)
A Cybersecurity Framework for Software as a Medical Device: Integrating Alternative CIA Triad Models and Threat Modeling Methodologies	**한혜리**(연세대학교)
Enhancing Clinical Effectiveness and Usability of Patient Monitoring Systems in ICU through Evaluation of Arrhythmia Alarms	**오지윤**(연세대학교)

Dr. Lee Jong-wook Fellowship Program Research Outcome Presentation — 일강원 104 (13:30–15:00)

좌장: 기재홍(연세대학교), 이다솔(연세대학교)

A Policy Study on Developing a Customized Medical Device Localization Model for Uganda Healthcare System	Agnes Scovia Auma(연세대학교)
Fluid Flow Analysis of Cell Culture Chamber in Microgravity Using Computational Fluid Dynamics	Linda Akorfa Abotsigah(연세대학교)
Float Assembly Techniques for Fabricating Conductive and Insulating Membranes in Skin Electrodes	David Delanyo Khiki Ayedzi(연세대학교)
Cellulose Paper-Based Colorimetric Disposable Multisensor for Non-Invasive POCT Platform	Francisca Ernestine Botwe(연세대학교)
Development of a Hybrid Diabetes Prediction Platform Bridging No-Code and Code Based AI for Multidisciplinary Use	Henry David Mupati(연세대학교)
Bioinformatics-Inspired Palm Print Recognition System Using Visible Light and Machine Learning	Jenifa Donald Sitta(연세대학교)
Fabrication of Air Filtration (Nose Mask) Using Nanofilter Prepared with Zein and Polyvinyl Alcohol	Lawrence Naatey Terkper(연세대학교)
Development of Decellularized Extracellular Matrix Hydrogel for Skin Wound Healing	Mehret Tesfaye Nake(연세대학교)
Design and Development of a 3D Serpentine-Helix ECG Electrode for Flexible Chest-Worn Biopatches	Gabriel Joseph Mlingi(연세대학교)

의료인공지능 — 장영실 대강당 (15:30–17:10)

좌장: 황성재(연세대학교)

Invited Physics-Informed Neural Network based Quantitative MR Imaging: IVIM MRI and Oxygen Saturation MRI	**김기수**(경희대학교)
Invited 강건한 의료영상 AI를 위한 제어 가능한 적대적 공격	**김원화**(POSTECH)
자동화 치아 정렬의 정확도 향상을 위한 3D 치아 데이터의 국소·전역 특징 결합 및 성능 평가	**김근혜**(연세대학교)
MRI 기반 척추관 협착 부위 탐지와 중증도 분류 파이프라인 개발	**이소현**(가천대학교)
양자화학 기반 다중 모달 분자 표현을 활용한 약물 간 상호작용 및 처방 예측 연구	**박서은**(한동대학교)
Multi-variate Time Series Transformer 기반 패혈증 조기 예측 모델 개발	**최예은**(울산대학교 의과대학)

뇌공학 — 일강원 101 (15:30–17:00)

좌장: 정지훈(충북대학교)

Invited 인간-AI 협업을 위한 멀티모달 AI 기반의 임상 및 인지 기능 해석	**정동화**(가톨릭대학교)
Invited 연결성으로 본 뇌의 원리 – 구조에서 인지 역학까지	**이병욱**(KAIST)
Denoising Performance of High-Frequency Neuronal Spike Signal Super-Resolution Reconstruction for Long-Term in Vivo Recording	**Dwivedi Kriti**(서울대학교)
A Cross-Modal Attention-Based Fusion Framework for Emotion Recognition from Facial Images and EEG, ECG	**이정환**(광운대학교)
Exploring EEG-Based Biomarkers for Body Composition Estimation Using Resting-State Functional Connectivity	**김나리**(고려대학교)

생체소재 — 일강원 102 (15:30–17:00)

좌장: 주진명(UNIST)

Invited Bioelectronics for Physiological Fluid Monitoring	**김지혜**(아주대학교)
Invited Nonimmunogenic Ultrathin Hydrogel Thin Films for Extended Neural Activity Recording	**성혜정**(KIST)
인체 호흡 모니터링을 위한 생체소재 기반 생체반도체 경피패치	**권남영**(한양대학교)
Tendency of Biodegradable Materials In Vitro	**고은별**(삼육대학교)
광용적맥파 측정을 위한 바이오소재 기반 초박막 전자문신 플랫폼	**이수훈**(한양대학교)

Program in Detail

의광학 — 일강원 103 (15:30–17:00)

좌장: 박별리(성균관대학교), 이휘돈(부산대학교)

Invited 플라즈모닉 나노소재의 바이오의공학 응용	정호상(고려대학교)
Invited 초고속 OCT 및 AdamW 최적화 기반 임상 적용 가능한 세포 수준 분해능 망막 영상법	이병권(DGIST)
Label-Free Endoscopic Hyperspectral Imaging for Differentiation of Metastatic and Inflammatory Lymph Nodes in Breast Cancer Models	문나은(전남대학교병원)
무표지 중적외선 이색성 민감 광음향 현미경을 이용한 인공 심장 조직 구조적 분석	박은우(POSTECH)
SNR Enhancement Technique in Swept-Source Optical Coherence Tomography through Intended Saturation and Restoration	김경호(KAIST)

바이오반도체 — 일강원 104 (15:30–17:00)

좌장: 이영준(KAIST), 윤홍준(가천대학교)

Invited Medical Image Synthesis Using Generative AI by Harnessing Noise of Memristor	장병철(경북대학교)
Invited 반도체 소자를 통한 생체 신호 감지와 페이크 데이터 탐지	유호천(한양대학교)
Negative Photoconductance-Driven Neuromorphic-Photodetector in Low-Power ZnON TFTs Integrated with PCB Systems	이원우(한양대학교)
초고감도 금 도핑 실리콘 나노멤브레인 기반 온도 센서	상민규(가천대학교)
피지컬 AI 기반 차세대 생체 진단을 위한 대면적 소프트 센서 어레이	백상훈(한양대학교)

국가연구개발사업단 — 신어관 101 (15:10–17:00)

좌장: 김광기(가천대학교)

사업단 소개 Ⅰ : 범부처 첨단 의료기기 연구개발사업 추진(안)	남기환 팀장(범부처전주기의료기기연구개발사업단)
사업단 소개 Ⅱ : 산업통상부 의료기기 헬스케어 연구개발 사업	박지훈 PD(한국산업기술평가관리원 바이오헬스실)
사업단 소개 Ⅲ : National Strategic R&D Program for K-Brain Project and Biomedical Technology	김성현 단장(한국연구재단 뇌·첨단의공학단)
사업단 소개 Ⅳ : 2026년도 한국연구재단 기초연구 사업 소개 (ICT·융합연구단)	박종애 단장(한국연구재단 ICT·융합연구단)

BMEL Lectureship

신어관 226 (15:30–17:00)

좌장: 최장환(이화여자대학교), 박철수(광운대학교)

BMEL 소개	박철수(광운대학교)
Vision–Language Foundation Models for Medical Imaging: A Review of Current Practices and Innovations	양세정(연세대학교)
Hybrid EEG–Based Multimodal Human–Computer Interfaces Using Deep Learning: Applications, Advances, and Challenges	황한정(고려대학교)

젊은 의공학자 II

늘빛관 이태석홀 (15:30–17:00)

좌장: 한창희(고려대학교(세종)), 박준홍(한국외국어대학교)

Invited 세포 이동분석으로 본 세포의 집단적 행동 형성	정현태(Brown University)
Invited 다기능 의료 영상 구현을 위한 새로운 생물학적 동역학 모델	조송현(KAIST)
Invited 저강도 경두개 초음파 자극을 통한 글림패틱 기능의 향상 및 뇌 노폐물의 배출	최태원(성균관대학교)
Invited 6–퍼들 페이퍼 플레이트(96–PPP): 고처리량 아밀로이드 감지 및 현장 진단용 종이 플랫폼	이태하(고려대학교)

Program in Detail

11월 8일 토요일

기조강연 II — 늘빛관 이태석홀 (09:15~10:00)

좌장: 김대유(인하대학교)

의료 인공지능: 연구에서 임상, 임상에서 상용화 — 최병욱(연세의대)

바이오센서&바이오칩 — 일강원 101 (10:00-11:30)

좌장: 정윤경(인제대학교), 서민호(부산대학교)

Invited 외부 자극 없이 동작 프로그래밍 가능한 마이크로스위머 — 박철헌(전북대학교)

Invited 유연소자를 활용한 무선 바이탈 사인 센싱 플랫폼 — 정하욱(고려대학교)

Invited 실시간 생체 적합 압력 모니터링 기반 압력성 질환 진단 및 예방 — 유성광(인제대학교)

의사공학자 — 일강원 102 (10:00-11:30)

좌장: 김태(GIST), 강신애(연세대학교)

Invited 첨단기술 및 AI를 통한 보건의료 혁신 — 유승찬(연세대학교)

Invited AI-Powered Drug Development Platforms: Discovering New Therapeutic Indications — 김이랑(온코크로스)

Invited AI-Enabled ECG Innovation: Bridging Clinical Unmet Needs, Real-World Applications, and Commercialization — 김중희(서울대학교)

의료기기규제과학 — 일강원 103 (10:00-11:30)

좌장: 김영모(건양대학교), 고동현(식품의약품안전처)

Invited 디지털의료제품법의 취지 및 법체계 소개 — 이종록(한국의료기기안전정보원)

Invited 디지털의료제품법에서의 GMP 규제 시스템 소개 및 운영 방향 — 김은철(한국의료기기안전정보원)

Defining a Life-Cycle Risk Management Process for AI-Based Medical Devices — 윤수빈(동국대학교)

X-ray 기술문서 오류 분석을 위한 LLM 기반 피드백 시스템 개발에 관한 연구 — 김윤호(건양대학교)

인공무릎관절의 경골부가 받는 최대 응력(Stress) 시뮬레이션의 신뢰성 평가 — 이태희(식품의약품안전평가원)

여성의공학자

일강원 104 (10:00-11:30)

좌장: 전수민(동아대학교), 박은영(KAIST)

Invited 신경 및 근육 재생을 위한 의료용 전도성 접착제 — 신미경(성균관대학교)

Invited 오가노이드 모델과 생물정보학 분석 기술을 통한 혈관 발달 과정에서의 대식세포 역할 규명 — 박현지(아주대학교)

Invited 3차원 세포군집의 집단침윤에서 나타나는 규칙성 — 김지원(Brown University)

Poster Presentation

Poster Presentation 본관(11월 7일 13:30-15:00)

▸▸ 뇌공학

발표순서	성 명	소 속	초록제목
Poster-001	송지윤	대진대학교	DLPFC 자극을 위해 40mm 깊이에 0.4mT 이상의 자기장 펄스를 생성하는 비침습적 자기자극 웨어러블 기기
Poster-002	민창희	서울대학교	뇌 조직 내 물질의 방향성 전달을 위한 이온영동법
Poster-003	권도형	연세대학교	MRI 기반 회백질의 자유수분율과 비만의 연관성에 대한 연구
Poster-004	김철운	연세대학교	뇌졸중에서 혈류 점성도와 뇌 회백질 부피의 연관성
Poster-005	김예찬	연세대학교	MRI 기반 장시간 근로에 따른 뇌 구조적 연결성의 변화 관찰
Poster-006	장원필	연세대학교	Deep Learning-Based Brain Age Prediction in Traumatic Brain Injury: A Pilot Study
Poster-007	성민지	계명대학교	인지 재활 적용을 위한 SSVEP 기반 EEG 신호의 학습 방해 상태 딥러닝 분류 연구
Poster-008	이종훈	연세대학교	Association Between Symptom Severity and Gray-to-White Matter Intensity Contrast in Patients with Post-Traumatic Stress Disorder
Poster-009	김태희	한양대학교	Explainable AI Approach to EEG-Based Deception Detection to Enhance Explainability in the Forensic Context
Poster-010	박윤진	고려대학교	뇌파 기반 뇌-컴퓨터 인터페이스를 위한 측정-재측정 안정성 성능을 고려한 최적 정신 심상 작업 조합 탐색
Poster-011	천재훈	한양대학교	Classification of Sustained Attention States in e-Learning Using Machine Learning-Based EEG Analysis
Poster-012	정지혁	KIST	A Hierarchical Subject-Session Transfer Learning Strategy for Lower-Limb Motor Imagery Brain-Computer Interface in Individuals with Spinal Cord Injury
Poster-013	박성아	POSTECH	감마대역동기화자극을 통한 니코틴중독개체의 보상회로 신경생리학적 균형회복
Poster-014	인현서	한양대학교	A Connectome-Based Artificial Neural Network Model Elucidates the Functional Advantages of Drosophila Olfactory Circuit Architecture

발표순서	성 명	소 속	초록제목
Poster-015	최수인	한국표준과학연구원	뇌자도 기반 고주파 진동촉각 및 청각 자극에 대한 감각 특이적 반응 연구
Poster-016	허채원	POSTECH	Effects of Noninvasive 30 Hz Light-Sound Stimulation on Transcriptomes and Relapse Behavior in Chronic-Exposure and Self-administration Models of Addiction
Poster-017	이승원	고려대학교	뇌졸중 환자와 건강인에서 운동상상 기반 뇌-컴퓨터 인터페이스 성능과 관련된 과제 수행 전 알파 활동의 신경생리학적 차이
Poster-018	김나현	POSTECH	Dynamic Control of Neural Activity via Real-Time Brain-Machine Interface Across Brain Regions
Poster-019	송요셉	KAIST	시공간적으로 조합된 전기 자극 기반 생물학적 신경망의 시공간적 통합 특성 정량화를 위한 분석 플랫폼 개발
Poster-020	김정희	전남대학교	개인 최적 주파수 경두개교류자극에 의한 안정상태시각유발전위 반응 향상
Poster-021	서은비	KAIST	폐루프 피드백을 통한 배양된 신경네트워크의 학습 유도 플랫폼 개발
Poster-022	김지승	고려대학교	Development of GSR and NIRS-Based Physiological Biomarkers for Predicting Occupational Stress in High-Risk Workers
Poster-023	한효정	한양대학교	Development of a Novel Attention Index for Quantification of Attentional States Using Magnetoencephalography
Poster-024	문정주	부산대학교	Miniaturized Dual-Channel Wireless Pain Modulation System Using a Single Tapped Coil
Poster-025	김준모	고려대학교	Brain-Inspired Dual-Stream Fusion for EEG-to-Image Retrieval
Poster-026	제갈욱	KAIST	A Tunable In Vitro Spheroidal Astrocyte Platform for Immune-Glial Interface Studies
Poster-027	남혜린	한양대학교	Time Delay Stability Analysis of Polysomnography in Patients with REM-Sleep Behavior Disorder and Healthy Controls During Sleep
Poster-028	이효정	GIST	Spectral Graph Theoretical Characterization of Cortical Neuronal Networks Using HD-MEA
Poster-029	임현미	계명대학교	증강현실 기반 거울시각피드백과 말초전기자극이 뇌 활성화에 미치는 영향
Poster-030	엄태인	DGIST	Improving Brain Activity Classification Accuracy using a Spatially Constrained MUSIC-based Subspace Method for fNIRS-BCI

Poster Presentation

▸▸ 바이오반도체

발표순서	성 명	소 속	초록제목
Poster-031	정현우	인하대학교	Hybrid Electrical-Optical 2D FeFETs for Neuromorphic Biomedical Devices
Poster-032	최왕명	한양대학교	Biosignal Classification Using DPP-DTT Nanowire Synaptic Devices with Optical and Electrical Plasticity
Poster-033	한용빈	가천대학교	Electrospun P(VDF-TrFE) Nanofibrous Membrane Based High Performing Energy Harvesting Devices
Poster-034	박기윤	가천대학교	Optimization of Energy Harvesting Characteristics in a Metal Mesh-Based Ultrasound Triboelectric Nanogenerator
Poster-035	이준석	가천대학교	Wearable Sweat Sensor with a Porous Active Thermal Layer for Enhance Signal Repolarization and Amplification
Poster-036	김종문	인하대학교	PVA/PVP 이용한 2주 분해성 디졸빙 마이크로니들의 개발 및 안구 약물 전달 응용
Poster-037	김예민	한양대학교	신경 조절을 위한 사각파 기반 시간 간섭 자극 시스템
Poster-038	유영우	가천대학교	노이즈 레벨 조절 가능한 포토다이오드를 이용한 PPG 암호화
Poster-039	김동림	한양대학교	경골 신경 자극을 위한 대역 내 데이터 원격 측정 기능을 갖춘 무선 마이크로컨트롤러 기반 전류 제어 자극기

▸▸ 바이오센서&바이오칩

발표순서	성 명	소 속	초록제목
Poster-040	김경섭	인하대학교	임상 진단을 위한 2D TMDC 기반 JFET-커패시터 플랫폼을 이용한 고감도 알부민 바이오센싱
Poster-041	손한규	경희대학교	MnO2@Au@Ag 나노프레임 기반의 현장형 황화수소 비색 분석법 개발
Poster-042	황철진	인하대학교	단일 마이크로니들을 활용한 다점 근전도 기반 정밀 모션 인식 인터페이스
Poster-043	김현준	국립한국교통대학교	인듐 도핑 텔루륨 나노와이어 기반 화학저항식 이산화탄소 감지센서
Poster-044	이두현	연세대학교	초박형 금 도핑 실리콘 나노멤브레인 센서를 이용한 전기 임피던스 단층촬영 기반 뇌 표면 실시간 온도 매핑

발표순서	성 명	소 속	초록제목
Poster-045	민병언	부산대학교	상용 PPG와 전도성 고분자 온도센서 기반 저비용 휴대용 생체신호 모니터링 시스템
Poster-046	김덕용	부산대학교	정확한 심폐소생술 수행을 위한 표피 근전도 기반 팔 자세 모니터링 기기 개발
Poster-047	한지욱	전북대학교	멀티 웰 분자진단 장치를 위한 3D 프린터 기반의 시약 분주기
Poster-049	이태무	한국생산기술연구원, 순천향대학교	전기화학 기반 타액 내 알코올 검출 센서 시스템 개발
Poster-050	방승민	한동대학교	파열·비파열 뇌동맥류 환자의 정량 뇌파 비교: 탐색적 분석
Poster-051	곽권률	홍익대학교	HFSS 시뮬레이션을 활용한 바이오임피던스 센싱의 주입 주파수 및 전극 정렬 허용오차 최적화 연구

▸▸ 생체계측

발표순서	성 명	소 속	초록제목
Poster-052	계슬아	순천향대학교	홀로그램 거울 치료 기반 뇌졸중 환자의 뇌파 재활 반응 분석
Poster-053	박은빈	주식회사 인셉션랩	Development of Deep Health LifeCam: An AI-Based Contactless Biometric Bodycam System for Emergency Medical Responders
Poster-054	문재희	(주)브레인유	뇌파 기반의 동물용 마취 심도 모니터링 시스템을 이용한 Isoflurane 마취에서의 마취 심도 평가
Poster-055	조민근	POSTECH	미주신경자극술에 의한 동공 변화 검증을 위한 설치류용 동공 계측 알고리즘 개발
Poster-056	양은선	한림대학교	안면 MDRPI 예방을 위한 3D scan data 기반 곡률 측정 및 분석
Poster-057	Thar Htet Nyan	순천향대학교	Effects of Electrode Placement on Temporal Interference Stimulation: Phantom Model and Simulation Study
Poster-058	박재순	국립한밭대학교	실시간 맥파 감지 및 혈압측정이 가능한 MEMS 공정 기반 정전용량형 압력센서 시스템 개발
Poster-059	강영환	국립한밭대학교	흉부 기반 cECG와 PPG 신호 동시 측정을 위한 통합형 웨어러블 센서 개발

Poster Presentation

발표순서	성 명	소 속	초록제목
Poster-060	심형진	국립한밭대학교	Real-Time Vital Signs Monitoring Device for Obstructive Sleep Apnea
Poster-061	유다영	고려대학교	Implicit Biometrics in Virtual Reality Using Multimodal EMG-IMU Signals
Poster-062	하서정	상지대학교	A Methodological Protocol for Assessing the Reliability of a Pressure-Sensor-Based Training Program for Korean Medicine Pulse Diagnosis
Poster-063	홍예진	연세대학교	음파 진동을 이용한 이명 완화 프로토콜 설계를 위한 선행 연구: 이명 현상 개선을 위한 음파 진동 자극에 의한 주파수 스펙트럼 분석
Poster-064	안진수	건국대학교	조직 온도에 따른 전기천공 소작의 임피던스 및 병변 특성 변화
Poster-065	홍종현	상명대학교	Effects of R-R Interval Normalization on Parasympathetic Nerve Activity During Sleep
Poster-066	조우형	인하대학교	관성 센서 기반 보행자 식별에 관한 연구
Poster-067	고정민	상명대학교	피크 기반 적응형 임계값을 이용한 심탄도 신호의 아티팩트 검출
Poster-068	김상록	고려대학교	Exploration of EEG-Based Indices for Estimating Mental Fatigue during Motor Imagery Tasks
Poster-069	최희진	한양대학교	Investigation of Effective Sensor Configurations for an Accelerometer-Based Silent Speech Interface
Poster-070	정지우	계명대학교	웨어러블 기기 교정을 위한 저비용 심혈관계 다중 생체신호 시뮬레이션 시스템 개발
Poster-071	이재혁	국립부경대학교	On Device AI Based Bio-Signal Analysis System for Mobile
Poster-072	손효원	순천향대학교	Development of a Smart Glasses-Based Around-Ear EEG System and Validation
Poster-073	윤채린	전북대학교	Longitudinal Analysis of Sensory and Balance Changes According to Cognitive Change Patterns in Older Adults
Poster-074	유상흔	순천향대학교	커프리스 혈압 추정을 위한 인공 혈관 모델 기반 다중 LED PPG 신호 측정 및 비교
Poster-075	이지호	건국대학교	A Study on Airway Obstruction Degree Analysis in a Microphone-Based Endotracheal Tube

발표순서	성 명	소 속	초록제목
Poster-076	김령아	인천대학교	발끝 움직임의 위상 분석을 통한 보행 안정성 비교
Poster-077	이건준	한국공학대학교	Modeling Arterial Pulse Waves in Healthy Female: In Silico Analysis of Pulse Waves
Poster-078	유상규	순천향대학교	아날로그 EOG 회로 설계 및 PSpice 시뮬레이션을 통한 눈 깜빡임 제어연구
Poster-079	박소영	동서울대학교	가속도 신호의 파워 스펙트럼 밀도 분석을 활용한 라이프로깅 데이터의 모션 아티팩트 검출 알고리즘 개발
Poster-080	박기현	건국대학교	Wide-Band Gap 반도체 기반 Flyback 컨버터의 스위칭 주파수 별 전력 효율 비교
Poster-081	이상원	계명대학교	심음 S1, S2 신호 추출에 대한 최적화된 PCG 청진 위치 선정에 관한 연구
Poster-082	양혜정	국립부경대학교	3D 프린팅을 이용한 생체신호 측정용 유연 배열 전극 시스템 개발
Poster-083	최수현	한양대학교	In Silico Model-Based Analysis of Pulse Wave Characteristics under Cardiovascular Parameter Variations
Poster-084	이다혜	상명대학교	자기 보고식 일주기 성향과 무구속 수면 데이터의 비교 분석: 일주기 리듬 평가 지표의 타당성 검증
Poster-085	조민성	국립금오공과대학교	광열 효과를 이용한 비침습 혈류 측정 가능성 평가
Poster-086	신채윤	한양대학교	수면 단계 전이: 노화 및 OSA로 인한 자율신경계 기능 저하의 탐지 지표
Poster-087	김민성	한국전자통신연구원, DGIST	운동 부하 조건에서 PPG-노치 파형의 기하학적 지표를 이용한 연령별 혈관 반응 분석
Poster-088	이성재	POSTECH	Spinal Cord Neural Signals as Digital Biomarkers for Chronic Pain Detection in Contusive Spinal Cord Injury of Rats
Poster-089	윤희진	순천향대학교	Reflectance Consistency Analysis of a Multi-Wavelength Distance-Based Reflection-Type Optical Sensor for Skin Tone Correction
Poster-090	이은주	순천향대학교	Prediction of Sleep Apnea Events Using Combined Time-Frequency and Morphological Features of PPG Signals
Poster-091	최원준	순천향대학교	Optimization of Electrode Placement Robust to Variations in Subcutaneous Fat Dielectric Properties

▸▸ 생체소재

발표순서	성 명	소 속	초록제목
Poster-092	최현서	서울대학교	Study on Functional Hydrogel-Based Treatment for Chronic Tympanic Membrane Perforations
Poster-093	김경중	국립금오공과대학교	헤르페스 바이러스 치료를 위한 아시클로버 함유 전분 기반 마이크로니들 패치
Poster-094	김재흥	고려대학교	Micropattern-Guided Fusion of Cell Membranes for Scalable Biomimetic Electronics
Poster-095	황윤호	연세대학교	AI 기반 re-screening을 통한 신규 MEK5 억제 후보물질의 효능 평가와 이를 활용한 지질 나노입자 개발
Poster-096	조혜연	연세대학교	실크 단백질 복합체를 활용한 원반형 미세입자의 제작 및 폐 표적 항암 효과 평가
Poster-097	임정영	인천대학교	Transparent, Metal-Free PEDOT: PSS Neural Interfaces for Simultaneous Recording of Low-Noise Electrophysiology and Artifact-Free Two-Photon Imaging
Poster-098	최선민	연세대학교	삼중음성 유방암의 국소 화학요법을 위한 독소루비신 적재 실크 피브로인/알지네이트 복합 스펀지 개발
Poster-099	이서연	전북대학교	Tantalum-Doped Surface Modification for Enhanced Osteogenesis Bioactivity and Controlled Corrosion Rate for Biodegradable Magnesium Mini-plates
Poster-100	Rumana Ferdushi	연세대학교	Developing Fucoidan/SPIONs Nanoparticles for Enhanced Otoprotective Therapy

▸▸ 생체역학 및 의료로봇

발표순서	성 명	소 속	초록제목
Poster-101	김상훈	서울대학교	구급이송침상 공기기류조절 시스템 개발 및 감염제어 효과 평가
Poster-102	김령아	인천대학교	고강도 인터벌 트레이닝과 중강도 지속 트레이닝이 파킨슨 보행에 미치는 영향
Poster-103	곽기영	전북대학교	Longitudinal Changes in Joint Moments of Lower-limb during Level-Walking in the Older Adults, depending on Functions of Cognition and Delayed Recall

발표순서	성 명	소 속	초록제목
Poster-104	신의철	세종대학교	Contact-based Interactions and Morphological Responses of HeLa Cells to Different Extracellular Matrix Compositions
Poster-105	김성우	인제대학교	의약품 배달 로봇을 위한 웹 기반 인터랙티브 네비게이션 시스템
Poster-106	이신영	전북대학교	지연회상 기능 수준에 따른 고령자의 인지기능, 균형 및 보행기능의 종단적 변화
Poster-107	오지우	경북대학교	뇌전도 기반 자기 주도 트레드밀에서 보행 의도 파악
Poster-108	강승훈	경북대학교	Identification of the Optimal Perceived Joint Angle in Vibration-Induced Proprioceptive Illusion
Poster-109	노병욱	경북대학교	러닝화 굽힘 강성에의 적응기간에 따른 인체 동역학 및 러닝효율 변화
Poster-110	박건우	경북대학교	착용형 센서를 활용한 딥러닝 기반 보행 동작 의도 파악 기법 및 성능 비교
Poster-111	윤정은	전북대학교	고령자의 인지기능 변화에 따른 하지 관절의 종단적 변화
Poster-112	채현찬	경북대학교	자율 보행 트레드밀 재활에서 뇌졸중 환자의 뇌전도 기반 뇌 연결성 활성도 비교
Poster-113	권대규	전북대학교	착용형 Exosuit를 이용한 들어올리기 동작 중 요추부담 시점의 정량적 평가
Poster-114	손주영	대구한의대학교	보행 재활을 위한 하지 운동 상상 훈련의 운동 피질 활성도 비교
Poster-115	서재민	대구한의대학교	카페인에 따른 운동조절 능력
Poster-116	최준열	세종대학교	A Flexible Shoulder Exoskeleton System for Co-contraction Control and Joint Stiffness Assistance
Poster-117	정세희	세종대학교	Optimization-Based Passive Lower-Limb Exoskeleton for Gravity Compensation with Knee Overcompensation Correction Mechanism
Poster-118	이장원	세종대학교	Human Balance Assistance Based on Center of Mass Shifting Using a Wearable Exoskeleton
Poster-119	전영우	KAIST	전분화능 줄기세포 군집 가장자리의 구조적 특성에 따른 분화운명 이질성dml 조절

발표순서	성 명	소 속	초록제목
Poster-120	공희경	건양대학교	Proposal of a Hybrid-Sized Locking Compression Plate (LCP) for Fixation of Elderly Clavicle Fractures Based on Biomechanical Evaluation of Screw Loosening
Poster-121	공희경	건양대학교	The Optimal Fibular Strut Bone Graft Fixation Angle for Unstable Proximal Humerus Fractures: A Finite Element Analysis

▸▸ 의광학

발표순서	성 명	소 속	초록제목
Poster-122	김주현	순천향대학교	햅틱 촉감 계수 생성을 위한 피부 초분광 영상의 고속 푸리에 주파수 변환 기반 유효 밴드 비교 분석
Poster-123	장채령	순천향대학교	잔차 보정을 통한 초분광 영상 기반 조직 산소포화도 추정 안정화
Poster-124	Thanh Dat Le	전남대학교	High-Resolution Longitudinal Imaging of Tumor Vasculature Using GPU-Accelerated Photoacoustic Microscopy
Poster-125	남상우	DGIST	Optomechanical Ultrasound Sensor for Air-Coupled Photoacoustic Imaging Diagnosis of Damaged & Vulnerable Tissue: in-Vitro Study
Poster-126	Agnes Scovia Auma	연세대학교	A Policy Study on Developing a Customized Medical Device Localization Model for Uganda Healthcare System
Poster-127	계현준	성균관대학교	Label-Free Drug Response Evaluation in Organoids via Ultraviolet Photoacoustic Microscopy
Poster-128	김민성	POSTECH	광음향 이미징을 이용한 비침습적 피부 과색소 분석
Poster-129	Linbin Zha	성균관대학교	Label-Free Ultraviolet Photoacoustic Microscopy of 3D Epithelial Wrinkle Tissues in Vitro
Poster-130	김동준	가천대학교	유연 유기 발광 광검출 소자 기반 대사 활성화 및 혈당 저감형 웨어러블 디바이스
Poster-131	정민주	부산대학교	Wavelength Segmentation-Based Phase Range Extension for Full-Field Optical Coherence Microscopy
Poster-132	김성현	DGIST	건선 및 지루성 피부염 분류를 위한 멀티모달 영상 분석 Transformer-KAN 기반 융합 네트워크
Poster-133	구슬빛나	바이오메듀스	소형·저가형 Real-time PCR 시스템의 형광 신호 안정화를 위한 기준선 및 음영 보정

발표순서	성 명	소 속	초록제목
Poster-134	황혜지	전북대학교	혈소판 제제의 정량적 스월링 분석을 위한 저비용 인공지능 기반 프레임워크 개발
Poster-135	조용재	성균관대학교	Photoacoustic Microscopy Reveals Deep Angiogenic Responses in 3D Bioprinted Tumor-Vessel Models
Poster-136	박창현	부산대학교	인지기능이 정상인 고령자의 수면무호흡증에 대한 fNIRS 및 PSG 동시 측정 연구
Poster-137	김하영	경북대학교	Real-Time Intra-Oral Optical Imaging System for Diagnosis of Early Dental Structural Defects
Poster-138	김보성	경북대학교	Dental Caries Diagnosis Based on Swept Source Optical Coherence Tomography
Poster-139	범정윤	전북대학교	스마트폰 현미경 왜곡 보정을 위한 모델 비교
Poster-140	Nchumpeni Chonpemo Shitiri	전남대학교	Quantitative Assessment of Stress-Induced Changes in Human Cardiac Organoid Using Dynamic OCT
Poster-141	안준호	POSTECH	In Vivo Multiparametric Photoacoustic and Ultrasound Imaging for Stratifying Fine-Needle Aspiration Biopsy Necessity in Thyroid Nodules
Poster-142	김준형	성균관대학교	Development of a Photoacoustic Live Imaging Chamber System for Evaluating Human Midbrain Organoids in Parkinson's Disease
Poster-143	Thi Kim Chi Tran	화순전남대학교 병원	Enhancement of Tumor Classification Algorithms for Orthotopic Pancreatic Cancer via Endoscopic Hyperspectral Imaging

▸▸ 의료기기규제과학

발표순서	성 명	소 속	초록제목
Poster-144	민찬홍	동국대학교	Risk Management of AI-Based Devices: An International Regulatory Comparison for Promoting Innovation and Ensuring Safety
Poster-145	김윤주	성균관대학교	고위험 의료기기 치료재료 제조업체의 글로벌 시장 진출 전략 연구: 미국, 유럽, 일본, 중국 시장의 허가 이후 유통 및 마케팅 구조 분석
Poster-146	한지승	계명대학교	선형 가중합 모델 기반 환자 맞춤형 의료 교육 영상 시청 앱 개발에 관한 기초 연구
Poster-147	정래현	국립금오공과대학교	Development of a Real-Time Multi-Biosignal Measurement and Visualization System Using Raspberry Pi and OpenBCI

발표순서	성 명	소 속	초록제목
Poster-148	이주연	건양대학교	AI 기반 의료기기 규제의 주요국 비교와 국내 표준 제고 및 대응 전략
Poster-149	정민혁	건양대학교	Corporate response strategies through Comparative Analysis of IEC 62304 Editions 1.1 and 2.
Poster-150	Batdelger Ankhnybayar	국립창원대학교	Study of a TADF Blue OLED Device for Non-Invasive Dermatological Light Therapy
Poster-151	이주선	식품의약품안전평가원	ASME V&V 40에 따른 의료기기 컴퓨터 모델링 및 시뮬레이션(CM&S)의 신뢰성 평가 연구: MR 환경에서 담관용스텐트 주변의 RF 유도 발열 예측
Poster-152	김형민	연세대학교	초음파 기반의 혈역학 모니터링 기기의 사용자인터페이스 설계 최적화를 위한 위해요인 분석
Poster-153	강준철	제주대학교	한의사의 진단용 의료기기 사용에 관한 법적 쟁점과 정책적 개선방안 일본·중국·미국 사례 비교를 중심으로

▸▸ 의료영상 처리 및 시스템

발표순서	성 명	소 속	초록제목
Poster-154	박소윤	국립금오공과대학교	광학현미경 기반 암세포 진단 보조를 위한 GAN 생성 영상의 유효성 평가
Poster-155	박영욱	순천향대학교	딥러닝 기반 계층적 손톱주름 모세혈관 분석 파이프라인
Poster-156	Rediet Alemu	국립금오공과대학교	GAN을 이용한 유방암 조직병리학 이미지 증강 및 분류 기술
Poster-157	Nazrawit Teshome	국립금오공과대학교	피부 병변 합성 이미지 생성을 위한 GAN 모델의 비교 평가
Poster-158	최영선	UNIST	조현병 특이적 fMRI 초저주파 전파 패턴 연구
Poster-159	민지희	순천향대학교	주관적 비폐색 정도의 정량화를 위한 열 영상 기반 비강 기류 특징 분석
Poster-160	김도현	연세대학교	외상성 뇌손상 환자에서 병변 기반 뇌혈관 반응성과 임상 결과 간의 연관성
Poster-161	박민제	국립금오공과대학교	생성적 적대신경망을 활용한 데이터 증강 기반 말라리아 생애주기 진단 분류 연구

발표순서	성 명	소 속	초록제목
Poster-162	김철운	연세대학교	비병변 수초 관련 지표를 활용한 딥러닝 기반 뇌졸중 예후 예측 모델
Poster-163	강인구	강원대학교	스마트 미러 기반 비침습적 생체 신호 모니터링 알고리즘 개발
Poster-164	강유비	강원대학교	데이터 희소성 문제 해결을 위한 생성형 AI 기반 의료영상 증강 기법 및 분할 성능 최적화
Poster-165	이종훈	연세대학교	Analysis of Cortical Gray-to-White Matter Signal Intensity Ratio in Individuals with Overwork
Poster-166	박재성	충북대학교	웹캠 기반 심박수 측정
Poster-167	권순용	KAIST	Autofluorescence Lifetime Imaging for Label-Free Capsule Assessment in Thyroid Cancer
Poster-168	우상욱	경북대학교	학대 경험과 관련된 기본 모드 네트워크에서의 글루타치온 수준에 대한 자기공명분광법 연구
Poster-169	신수빈	대구가톨릭대학교	알츠하이머병과 특발성 정상압 수두증의 피질 두께 패턴 구별을 위한 주성분 분석
Poster-170	김지웅	POSTECH	다중파라미터 광음향 단층 촬영 시스템 기반 질병 모델 전임상 연구
Poster-171	김현수	경북대학교	강박 장애에서 계층적 클러스터링을 적용한 미세 공동 활성화 패턴 분석
Poster-172	박신영	POSTECH	3차원 광음향-초음파 자동 유방 스캐너와 임상연구
Poster-173	조성우	인제대학교	ResNet18-CBAM 기반 혈액세포 암 검출의 실시간성 평가
Poster-174	이희재	연세대학교	Fairness Supervisor: 사전 정의된 방향 벡터를 이용한 분류 모델의 성별 편향 억제
Poster-175	성민식	POSTECH	경동맥의 플라크 내출혈에 대한 다중변수 광음향 분석
Poster-176	문현	연세대학교	Precise Detection of Landmarks in Cephalometric Images of Mixed Dentition
Poster-177	송덕미	강남대학교	Evaluation of Hybrid Synthetic Aperture and Coherence-Enhanced Beamforming Methods in Scanning Acoustic Microscopy

발표순서	성 명	소 속	초록제목
Poster-178	손상원	UNIST	Development of Automated Patient Detection Model
Poster-179	최영석	한양대학교	파킨슨병에서 도파민 신경퇴행과 피질 저관류의 시공간적 진행 양상 분석
Poster-180	정수현	인제대학교	LoRA 및 강화학습 기반 Lingshu-7B 모델을 활용한 흉부 X-ray 판독문 자동 생성 성능 비교 연구
Poster-181	Chea Senghuy	인제대학교	에이전트 기반 다중모달 임상 질의응답: 영상과 텍스트로부터 도출한 근거 기반 답변
Poster-182	Maryam Naqvi	인제대학교	다기관 병리학을 위한 CNN 및 파운데이션 모델 표현 비교 연구
Poster-183	최재형	인제대학교	안면 이미지를 활용한 딥러닝 기반 생체신호 측정 시스템에 대한 연구

▸▸ 의료인공지능

발표순서	성 명	소 속	초록제목
Poster-184	오성일	아이디비에스	LLM-based Platform for Automated Protein Structure Analysis and Drug Development
Poster-185	박준영	가천대학교	생성형 AI 기반 무표시자 광음향 영상의 H&E 및 Pap 가상 염색
Poster-186	김수정	서울대학교	Diffusion Probabilistic Models for Tumors and Cysts Segmentation in Dental Panoramic Radiographs
Poster-187	김은빈	순천향대학교	비침습적 피부 진단을 위한 근적외선 초분광 영상의 계층적 도메인 적응
Poster-188	길태연	순천향대학교	PRISM: 단일 모달리티 입력으로부터 결측 모달리티 표현의 복원
Poster-189	박찬민	UNIST	HSSW: Hybrid Signal Analysis with Multi-Scale Sliding Window for BPPV Diagnosis
Poster-190	파우잔	국립금오공과대학교	Adaptive MRI-Guided Digital Twin for Personalized and Intelligent Simulation of Breast Tumor Progression and Therapy Response
Poster-191	이준범	연세대학교	nnU-Net 기반 교차검증 앙상블을 이용한 뇌졸중 병변 분할

발표순서	성 명	소 속	초록제목
Poster-192	황성현	인천대학교	Prediction of Parkinson's Disease Severity and Symptoms Based on Gait Video and Smartphone Touch Data
Poster-193	나신영	성균관대학교	Towards Interpretable Chest X-ray Visual Question Answering: A Group Relative Policy Optimization Approach
Poster-194	고재훈	연세대학교	설명가능 인공지능을 통한 심전도 신호의 우울증 특성분석 및 진단 알고리즘 개발
Poster-195	Doljinsuren Enkhbayar	연세대학교	Multimodal Artificial Intelligence-Enabled Screening for Parkinson's Disease from Nocturnal Physiological Signals
Poster-196	김도현	연세대학교	CycleGAN을 이용한 일반 안구 사진의 슬릿램프 이미지 변환 가능성 탐색
Poster-197	Indika Yasan Don Hettiarachchige	연세대학교	Proposal of AI Based Medical Equipment Spare Parts Inventory Management
Poster-198	김찬일	주식회사 인셉션랩, 계명대학교	스마트미러 기반 2차원 rPPG 분석을 통한 비접촉 혈압 추정 시스템 및 알고리즘
Poster-199	Henry David Mupati	연세대학교	Comparison Between No-code and Code Based AI in Diabetes Prediction
Poster-200	최호윤	서울대학교	Deep Learning-Based Alveolar Bone Defect Restoration Network for Bone Graft Volume Prediction in CBCT
Poster-201	오성호	서울대학교	Structure-Invariant Unpaired Image-to-Image Translation for Domain Adaptation in Panoramic Radiography
Poster-202	윤희진	서울대학교	Fully Automated Registration Between CBCT and 3D Intraoral Scan for Personalized Digital Dental Surgery Using DentalRegformer
Poster-203	김다희	서울대학교	Deep Curriculum Learning for TMJ Osteoarthritis Classification on Dental Panoramic Radiographs
Poster-204	김태현	울산대학교	Optimizing the Preictal Period Using Electroencephalography Before Seizure Onset
Poster-205	오소민	연세대학교	수면 뇌파를 활용한 알츠하이머 진단을 위한 딥러닝 모델
Poster-206	이태연	서울대학교	치과용 CBCT 영상을 이용한 치아 내부구조 자동 세그멘테이션 연구

Poster Presentation

발표순서	성 명	소 속	초록제목
Poster-207	김민수	한양대학교	FESTA-Net: An fNIRS-EEG Synchronized Temporal-Alignment Network for Brain-State Decoding with Robustness Across Tasks and Channel Configurations
Poster-208	박재성	충북대학교	자기지도학습을 이용한 파노라마 방사선 사진에서의 치아 표현형 비지도 학습
Poster-209	박재성	충북대학교	근감소증에 따른 자세 불안정성 정량 평가를 위한 감각-운동 반응 추정 딥러닝 전략
Poster-210	천민영	한양대학교	X-NIRSNet: A Novel Deep Learning Architecture Using Cross Residual Blocks for Decoding Brain States with Functional Near-Infrared Spectroscopy
Poster-211	윤치호	POSTECH	딥러닝 기반 향상된 광음향 영상을 이용한 자동 비표지 세포 병리 평가
Poster-212	정유빈	고려대학교	세부 질문 기반 근거 정제를 통한 의료 영상 질문응답의 신뢰적 추론 학습
Poster-213	이예린	연세대학교	Artificial Intelligence-Assisted Classification of Lower Extremity Clinical Images for Chronic Venous Insufficiency-Related Skin Lesions
Poster-214	Santanu Misra	성균관대학교	Deep Learning-Enabled Rapid Virtual Staining and Automated Cancer Classification using High Throughput Digital Slide Scanner
Poster-215	강현영	연세대학교	FPP-CVI Net: 파운데이션 모델 활용 자세 추정 기반 전처리 기반 하지정맥류 분류 알고리즘
Poster-216	정진교	연세대학교	Multi-Modal Cross-Attention Network for Non-invasive HVPG Prediction
Poster-217	이성재	POSTECH	Glucose-aware Large Language Model for Intelligent Nutrition Tailoring (GLINT) in Diabetes Self-care
Poster-218	이득주	한림대학교	Implementation and Performance Evaluation of an AI-based Fundus Image Identification Software
Poster-219	홍석호	인제대학교	경량 딥러닝 모델을 이용한 의료용 기기용 반도체 기판 결함 탐지 연구
Poster-220	김영돈	울산대학교	대규모 공개 수면다원검사(PSG) 데이터셋을 활용한 파운데이션 모델 개발
Poster-221	한유진	울산대학교	Cox를 넘어: 비선형 임상 변수 해석에서 드러난 인공지능 기반 생존분석의 가능성

발표순서	성 명	소 속	초록제목
Poster-222	김지현	계명대학교	ResNet 기반의 심음 및 맥파 신호 동시 분석을 통한 심장판막질환 예측 모델 개발
Poster-223	강민서	인제대학교	AI 의료 상담 웹 서비스의 기술 분석 및 발전 가능성 분석
Poster-224	강성호	국가수리과학연구소	인간 피드백 기반 슈뢰딩거 브릿지 확산모델을 이용한 CBCT영상에서 MDCT 변환 음영 인공물 억제
Poster-225	정성연	울산대학교	LLM 기반 임상화학검사 결과보고서 자동 생성
Poster-226	유지원	울산대학교	LLM 기반 임상화학검사 재검사 판정 시스템
Poster-227	Mobin Ahmadi	서울대학교	Hybrid Vision-Language Framework for Tooth-Level Dental Report Generation from Panoramic X-Ray
Poster-228	몬돌	인하대학교	Explainable Feature Selection for Speech Emotion Recognition Using SHAP
Poster-229	정재원	인제대학교	필적 분석 기반 알츠하이머병 진단 과제 난이도별 머신러닝 모델 성능 비교
Poster-230	우현진	인제대학교	위암 병리 이미지 분류를 위한 경량 딥러닝 모델의 효율성 비교
Poster-231	이소흔	연세대학교	3-Dimensional CT-Based Statistical Shape Analysis of Tibial Morphology Associated with Anterior Cruciate Ligament Rupture Using Machine Learning
Poster-232	한지용	서울대학교	Structure-Invariant Image-to-Image Translation for Realistic CT Synthesis from CBCT
Poster-233	이서준	인제대학교	심부전 데이터를 활용한 예측 모델 비교 및 하이퍼파라미터 조합 분석
Poster-234	전기헌	광운대학교	UWB 레이더 신호 기반의 SNN-CNN 하이브리드 모델을 이용한 비접촉 인체 위치 및 호흡 모니터링
Poster-235	양서은	광운대학교	단일 UWB 레이더를 이용한 하이브리드 CNN-Transformer 기반 수면 자세 분류
Poster-236	진재욱	울산대학교	수술 후 재원 기간 예측을 위한 BioclinicalBERT-DNN 융합 모델 개발
Poster-237	박영현	연세대학교	갑상선 세포병리 영상 특징 추출을 위한 반지도 학습 프레임워크

Poster Presentation

발표순서	성 명	소 속	초록제목
Poster-238	이찬근	한국기술교육대학교	Box-Aware SAM: Robust YOLO-Prompted Ultrasound Segmentation with HF Guidance
Poster-239	최시우	건양대학교	Top-k MIL 기반 경량 모델의 Diffusion 위내시경 위·변조 탐지 성능 분석
Poster-240	백영서	가천대학교	Generative AI-based Cervical Image Generation for Diagnostic Support of P3 Cervical Lesions
Poster-241	나승대	경북대학교병원	보청기에서 DNN 기반 음성 향상을 위한 품질 및 복잡성 균형 연구
Poster-242	이건	울산대학교	생리학적 및 환경적 잡음 증강을 통한 강건한 심폐음 잡음 제거 방법
Poster-243	Rahmafatin Nurul Izza	국립금오공과대학교	Cardiovascular Digital Twin via Optimization of a Windkessel-Baroreflex Model Using Blood Pressure Data
Poster-244	홍사강	전북대학교	크로스 모달리티 의료 세그멘테이션에 대한 SAM2 기반 베이지안 프롬프트 적응
Poster-245	김가현	한동대학교	사전학습 기반 개인화 CNN-BiLSTM-Attention 모델을 활용한 PPG 기반 혈압 추정
Poster-246	남현영	고려대학교	거대언어모델의 논리적 추론 보상과 세미-오프라인 학습을 통한 다목적 분자최적화 프레임워크
Poster-247	강동준	전북대학교	Anatomy-Aware Distillation with Memory-Augmented SAM2 for Fracture Detection
Poster-248	최준혁	한동대학교	움직임에 강인한 EIT 기반 실시간 1회박출량 추정 기법
Poster-249	원지환	광운대학교	팔 근전도 신호 기반 펜 동작 회귀 예측 가능성 탐색
Poster-250	고정환	한림대학교	A Comparative Study of Multimodal Fusion Strategies for Human Activity Recognition Using ECG and PPG Signals
Poster-251	조윤재	한림대학교	Optimizing CKD Classification from IMU Signals: Segment Length and PatientLevel Soft Voting in a CNN Framework
Poster-252	배현민	연세대학교	Multimodal Classification of Therapeutic Resectability in Endoscopic Images Using Prompt Separation
Poster-253	이서영	한림대학교	Speech-Based Stroke Classification and Interpretability Assessment Using 1-D Convolutional Neural Networks and DeepLiftShap

발표순서	성 명	소 속	초록제목
Poster-254	전익찬	영남대학교병원	Generation of Synthetic PET/MR Fusion Images from MR Images Using a Combination of GANs and cDDPMs Based on Simultaneous 18F-FDG PET/MR Image Data of Pyogenic Spondylodiscitis
Poster-255	전익찬	영남대학교병원	Cross-Modality Image-to-Image Translation from MR to Synthetic 18F-FDOPA PET/MR Fusion Images Using Conditional GAN in Brain Cancer
Poster-256	박세훈	인제대학교	HTP 검사의 신뢰도 향상을 위한 다중 AI 모델 앙상블 시스템 구축

▸▸ 의료초음파

발표순서	성 명	소 속	초록제목
Poster-257	문성빈	강남대학교	주파수 영역 압축 센싱을 통한 초음파 지역화 현미경 성능 향상
Poster-258	Godfrey Stephin Munyagwa	연세대학교	이차원 위상 배열 소자 구동 최적화
Poster-259	Nguyen Ngoc Cuc Phuong	이화여자대학교	Plane-Agnostic 3D Ultrasound Volume Reconstruction Using Deep Learning
Poster-260	Anika Tabassum Sejuty	이화여자대학교	Extended Analysis of Siamese Networks for Complex Ultrasound Data
Poster-261	Sothea Phann	이화여자대학교	Image-Based Multi-Axis Vascular Tracking in Robotic Ultrasound
Poster-262	이민규	단국대학교	유방 특성 모사 데이터 기반 딥러닝 정량 초음파 추정 기술
Poster-263	원소현	단국대학교	체내 삽입형 단일 초음파 변환자를 이용한 3차원 나선형 합성구경 영상 기법
Poster-264	임찬영	성균관대학교	실시간 혈류 모니터링을 위한 고주파 초음파 도플러 시스템 개발
Poster-265	김민성	DGIST	희소 초음파 원신호 기반 웨어러블 연속 방광 부피 추정용 End-to-End 딥러닝 모델

Poster Presentation

발표순서	성 명	소 속	초록제목
Poster-266	박세현	DGIST	스캐너 간 초음파 영상의 성능 향상을 위한 확산 기반 조화화
Poster-267	최현수	DGIST	깊이 유지형 구조화 조명을 이용한 내시경 초음파 초고해상도 영상
Poster-268	황시헌	대림대학교	분음 도플러 초음파 이미지를 이용한 임의 혈류 파형 구현 시스템의 평가
Poster-269	이창양	성균관대학교	수술 후 지속적인 혈류 모니터링을 위한 이식형 초음파 센서

기조강연 I

좌장: 유홍기(KAIST)

11월 7일 (금) **장영실 대강당 (12:00~12:45)**

김용덕(GE헬스케어코리아)

AI and the Future of Healthcare: Vision 2025+

AI and the Future of Healthcare: Vision 2025+

A bold exploration of how artificial intelligence is reshaping medicine. Cutting-edge trends, real-world clinical impact, and actionable strategies for healthcare professionals.

Yong-Duk Kim
CEO
GE Healthcare Korea

November 07, 2025



Agenda

1. Introduction
2. AI Technology & Clinical Applications
3. Market & Investment Trends
4. Regulatory Landscape
5. Clinical & ROI Evidence
6. Hospital Success Stories
7. Ethical Considerations
8. Outlook to 2030+
9. Conclusion

GE HealthCare

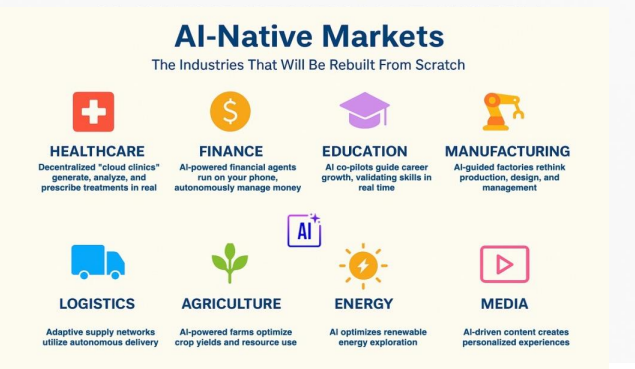
© 2025 General Electric Company - All rights reserved. GE and the GE Monogram are trademarks of GE.

Artificial Intelligence in Healthcare: Global Momentum

AI is now a **pillar** of healthcare innovation: **78% of organizations globally used AI** in 2024 (Stanford AI Index)

FDA authorized over **1,000 AI/ML-enabled devices** as of Sept 2024

$109B+ US investment in AI (2024) with healthcare a leading vertical.



AI-Native Healthcare System Architecture

Sources: Singh R, et al. npj Digit Med. 2025; Krups J, et al. Nature Digital Medicine. 2024; RSNA 2025; PMC 2025

© 2025 General Electric Company - All rights reserved. GE and the GE Monogram are trademarks of GE.

GE HealthCare

Why AI? Modern Imperatives for Medical Imaging

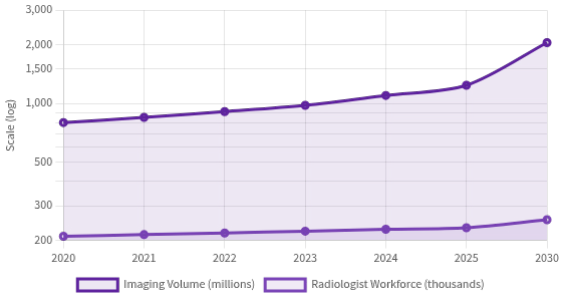
Clinical workflow bottlenecks: Radiologists interpret one image every 3-4 seconds in an 8-hour workday, creating significant pressure points in diagnostic pipelines

Global radiologist shortages: 47% of countries report insufficient radiologist staffing, with a projected shortfall of 42,000 radiologists by 2030

Increasing scan volumes: Medical imaging volumes growing at 13.2% CAGR (2024-2030), significantly outpacing workforce growth at 2.3%

Personalized medicine demands: 87% of clinicians report needing more precise quantitative imaging metrics for treatment selection and monitoring

> AI Impact Potential: Autonomous imaging AI could reduce reading time by up to 31% and improve diagnostic accuracy by 22% in routine studies (Ramli et al., 2025)



Global Medical Imaging Growth vs. Radiologist Workforce

The widening gap between imaging demand and expert capacity is driving the need for autonomous intelligence solutions

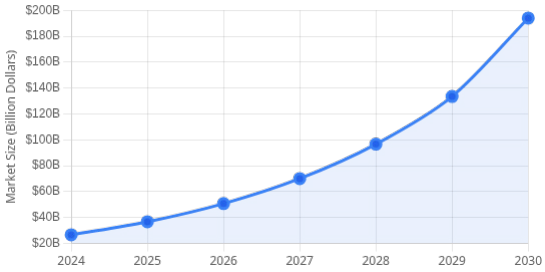
Sources: U.S. AI In Medical Imaging Market Report (2030), Healthcare AI Tools – 2025 Health IT Predictions, AJR 2024;216:478-493

© 2025 General Electric Company - All rights reserved. GE and the GE Monogram are trademarks of GE.

GE HealthCare

Market Size & Investment: AI as a Growth Engine

Global Healthcare AI Market Growth Forecast



Healthcare AI market is growing at a CAGR of 38% through 2030, positioning it as one of the fastest-growing segments in the technology sector.

$109.1B
US Private AI Investment (2024)

$200-360B
Expected Healthcare Cost Savings

Key Healthcare AI Investment Cases

Microsoft-Nuance Acquisition

$19.7B landmark healthcare AI acquisition (2021). Leading the medical auto-documentation market with DAX Express launch in 2024-25. Physician productivity increased by 30%+ in adopting hospitals.

Google Med-PaLM 2 & Mayo Clinic

Strategic partnership with Mayo Clinic deploying medical-specialized LLM. Achieved 86.5% accuracy in clinical Q&A, expanding deployment with HCA Healthcare.

Hippocratic AI - 2025 New Unicorn

$141M Series B funding (January 2025). Focused on healthcare-specialized AI for patient care and healthcare access. Kleiner Perkins-led investment valuing company at $1B+.

Q1 2025 Digital Health Trends

AI startups captured 60% of digital health funding ($3.2B) in Q1 2025. Sharp increase from 41% in 2024. Six new unicorns emerged in the quarter.

GE HealthCare

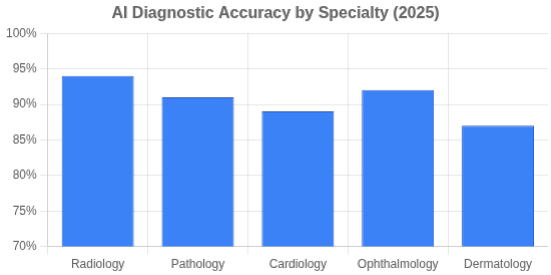
AI Technology Trends: What Matters for Clinicians

- Deep learning, multimodal AI, and generative models — rapidly advancing diagnostic and operational capabilities
- 2024: Multimodal models (imaging + EHR + genomics) offer decisive diagnostic value in cancer, neurology, cardiology
- Generative AI—large language models (LLMs) for clinical documentation, triage, patient Q&A, and more

AI and the Future of Healthcare: Vision 2025+

GE HealthCare

Breakthrough Use Cases: Real-World Clinical Impact



Stanford AI Index 2025: AI diagnostic accuracy shows average 18% improvement over traditional methods across specialties

Pancreatic Cancer Early Detection (2024)

Machine learning-based early detection system demonstrated 17 months earlier pancreatic cancer diagnosis compared to conventional methods - Nature Medicine research

94%
Early tumor detection accuracy

30%
Reduction in diagnostic time

Mayo Clinic

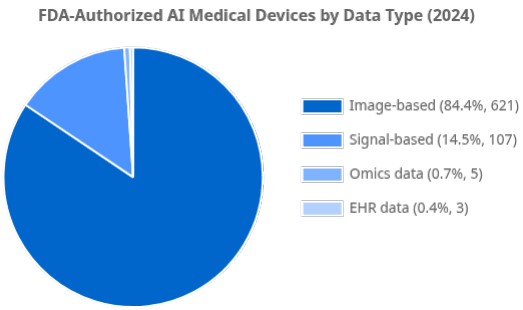
AI seizure localization model outperformed conventional EEG analysis, reducing hospital readmissions for drug-resistant epilepsy patients by 30% (2024)

Cleveland Clinic

AI-powered patient flow optimization system reduced wait times by 25% and decreased physician burnout, with first Chief AI Officer (CAIO) appointed (2025)

Digital Pathology:
Improved diagnostic efficiency, remote collaboration, and foundation models for rare disease recognition

FDA AI Medical Device Taxonomy—What's Deployed?



Analysis based on 1,016 FDA-authorized devices (736 unique products) as of September 2024

Authorization Trends:
35% increase in 2024 compared to 2023, with image-based AI decreasing from 81% in 2016 to 51% in 2024. Signal-based AI and analysis capabilities expanding.

84.4%
Image-based devices (621)

14.5%
Signal-based devices (107)

Functional Classification:
Assessment 84.1% vs. Intervention 15.9%, with imaging dominant in both areas

Analysis Subcategories:
65% focus on quantification/feature localization, 12.9% for patient triage

Key FDA-Authorized AI Medical Devices

IDx-DR (2018)
World's first autonomous diagnostic AI system. Camera-based image analysis for diabetic retinopathy diagnosis. 87.2% accuracy without specialist involvement. De Novo authorization.

Aidoc ICH Detection (2022)
Detects acute intracranial hemorrhage (ICH) in head CT scans. Worklist prioritization reduces average diagnostic time by 78%. 510(k) cleared.

AI in the Clinical Workforce: Augmentation, Not Replacement

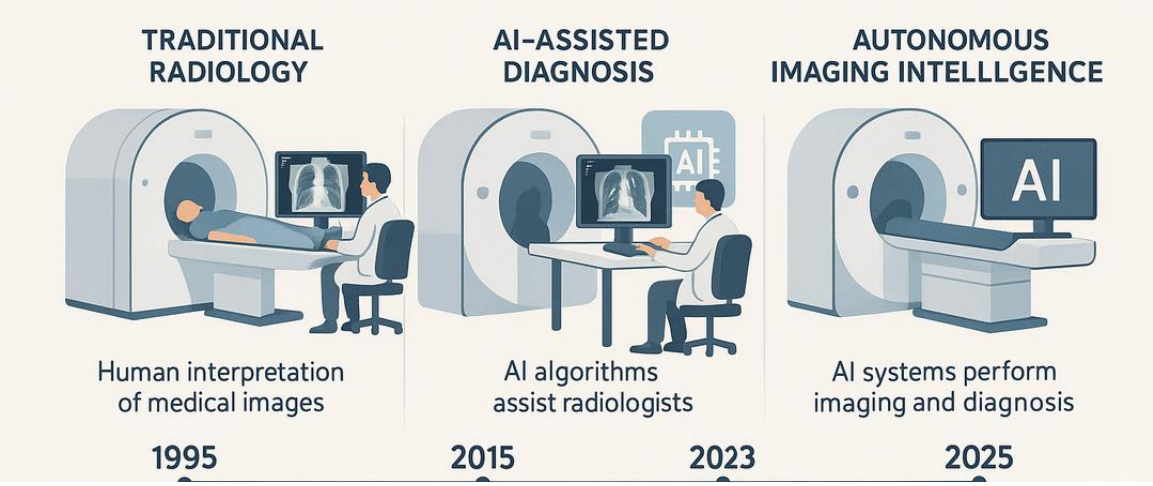
- 66% of US physicians use health AI tools (AMA Survey 2025)
- Most value: automation of administrative tasks, reduction of burnout, clinical decision support—not autonomous replacement (yet)
- Case: AI scribes in 80+ specialties improving documentation efficiency and patient communication

> "AI is most effective when it enhances clinician capabilities rather than attempting to replace human expertise and judgment."

AI and the Future of Healthcare: Vision 2025+

GE HealthCare

Evolution of Autonomous Imaging: Historical Timeline



Key Historical Milestones: From early diagnostic assistance tools to today's autonomous clinical decision systems, the evolution spans three decades of technological advancement

Source: FDA AI/ML-Enabled Medical Device List (2024), Nature Digital Medicine (2025), Evolution from Traditional Radiology to Autonomous Imaging Intelligence

자율형 영상 지능 | October 2025

© 2025 General Electric Company - All rights reserved. GE and the GE Monogram are trademarks of GE.

GE HealthCare

GE Healthcare Vision:
Trusted partner with strong global presence



Focused operating model with three regional leaders to take advantage of scale where it matters most

160+
Countries

~53K
Colleagues worldwide

~9,800
Global sales force

8,300
Field service engineers

40+
Manufacturing, assembly and pharmaceutical production sites

GE HealthCare

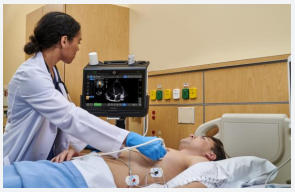
© 2025 GE HealthCare. GE is a trademark of General Electric Company used under trademark license. 11

Our business segments

Imaging



Advanced Visualization Solutions (AVS)



Patient Care Solutions (PCS)



Pharmaceutical Diagnostics (PDx)



GE HealthCare

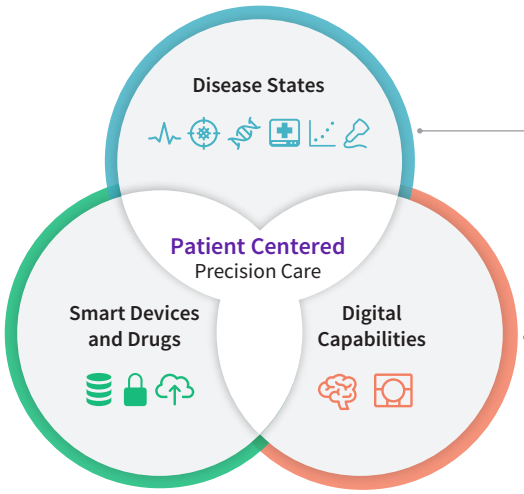
© 2025 GE HealthCare. GE is a trademark of General Electric Company used under trademark license. 12

D3: Our strategy to enable precision care

Smart Devices & Drugs

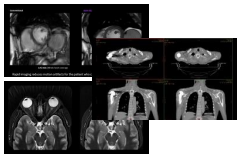
~5M+ installed base and
1B patients served annually.
85 AI-enabled device authorizations in U.S., top of recent list[1]





Disease States

Oncology, Cardiology & Neurology



Digital Capabilities

Intelligent data fabric, app orchestration, AI as enablers.



[1]U.S. Food and Drug Administration. Artificial Intelligence and Machine Learning (AI/ML)-Enabled Medical Devices. December, 2024
Available at: https://www.fda.gov/medical-devices/software-medical-device-samd/artificial-intelligence-and-machine-learning-aiml-enabled-medical-devices

GE HealthCare

© 2025 GE HealthCare. GE is a trademark of General Electric Company used under trademark license.

Aligning capital allocation to our precision care strategy

Investing in Organic revenue growth*

- Increasing R&D and Capex
- Focus on differentiation and digital/AI

$2.5B
Cumulative R&D Investment since 2022

Illustrative examples

BILL & MELINDA GATES foundation
MAYO CLINIC
NIH
BARDA
Mass General Brigham

*Non-GAAP financial measure.

Business development and M&A

- Disciplined investments
- Adjacent opportunities

5
Acquisitions announced since spin

Caption Health
INTELLIGENT ULTRASOUND for smarter scanning
IMACTIS
mim SOFTWARE
nihon medi+physics

Minority investments & strategic collaborations

- Augmented product pipeline
- Early engagement with companies for potential M&A

50+
Strategic partnerships and collaborations since 2024

Sutter Health
aws
deephealth
NVIDIA

GE HealthCare

© 2025 GE HealthCare. GE is a trademark of General Electric Company used under trademark license.

Revolution Vibe CT: Setting New Standards in Cardiac Imaging

Unlimited One-Beat Cardiac Imaging: Clear, full-heart images at low dose, even in challenging cases such as atrial fibrillation, heavily calcified coronaries, and in-stent restenosis

AI-Driven Workflow: TrueFidelity DL images for cardiac and SnapShot Freeze 2 offer exceptional image quality with motion-free visualization

ECG-less Cardiac Protocol: Improves patient access and simplifies exam preparation without ECG connection, ideal for time-critical scenarios

Effortless Workflow: AI-powered automatic protocol selection and patient positioning optimize scanning efficiency

Clinical Outcomes

- 50% reduction in exam time
- 4 minutes saved in radiologist reading time per study
- Up to 5 minutes reduction in patient preparation time
- Reduced dependence on beta blockers

Source: GE HealthCare case study. "Revolution Vibe: A new vision for heart at Radiomed." (2025)



Innovative Features

- **Unlimited One-Beat Cardiac imaging**
- **ECG-less cardiac scanning capability**
- **AI-driven workflow optimization**

"Revolution Vibe has significantly enhanced our cardiac imaging capabilities, doubling our CCTA capacity while reducing scan times and improving image quality."

- Dr. Christopher Ahlers, Radiologist and Managing Partner, Radiomed

© 2025 General Electric Company - All rights reserved. GE and the GE Monogram are trademarks of GE.

GE HealthCare

AI-powered features and automation

Enhance efficiency, ensure consistency and minimize reliance on user experience



Patient preparation	Pre-scan	Scan	Post-scan
	Intelligent Protocoling uses machine learning to automatically suggest a protocol for each exam.	**Auto Prescription** selects scan settings based on patient size, optimizing dose and image quality. It increases throughput by reducing the need for scan time adjustments.	**SmartPhase** intelligently analyzes coronary motion throughout the volume to automatically select the cardiac phase with the least motion.
	Auto Positioning uses deep learning to detect the scout scan range center, align it with the CT isocenter, and automatically position the patient at the start scan location.	**Cardiac Auto Gating** recommends optimal scan and reconstruction phases based on heart rates and rhythm.	**SnapShot Freeze 2** is an intelligent motion correction algorithm that reduces motion artifacts by freezing the motion of the heart.
		Smart Arrhythmia Management can automatically pause and trigger a re-scan within the same contrast bolus if significant heart rate variation is detected during the scan.	**CardIQ Suite** is an integrated suite of CT Cardiac AI-based post processing tools, designed for automation and workflow efficiency.

GE HealthCare

1. Morgan-Hughes, G. et al. Drugless and radiographer led: the start of a new era for CT coronary angiography. Open Heart 10, e002263 (2024). 1028 stable adult patients with chest pain referred for CCTA.

© 2025 GE HealthCare. GE is a trademark of General Electric Company used under trademark license.

LOGIQ™ E10

Ultrasound, the next level

Empowering you to make the difference



GE HealthCare

LOGIQ and Verisound are trademarks of GE HealthCare.
© 2024 GE HealthCare. GE is a trademark of General Electric Company used under trademark license.

Scan Assistant

A system that thinks the way you do

Assists the user with customizable automations

- Initiates and completes required measurements
- Automatically steers color Doppler
- Automatically sets up imaging controls and modes
- Automatically inserts comments
- Displays reference image for each step



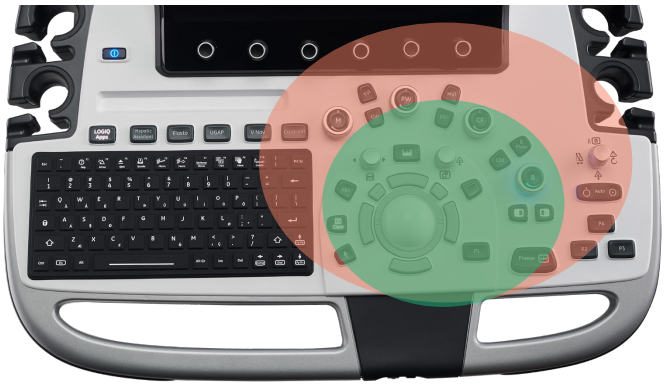
37% time savings using scan assistant

LOGIQ is a trademark of GE HealthCare.
© 2024 GE HealthCare. GE is a trademark of General Electric Company used under trademark license.

Harnessing the power of AI

AI-based Auto Doppler Assistant on the LOGIQ™ E10

Reduce time, keystrokes and reach



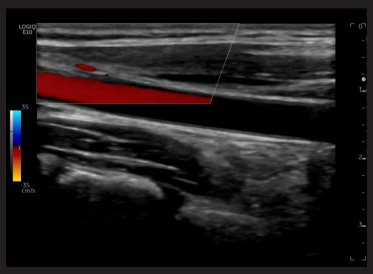
>20%
Time savings

>50%
Keystroke reduction

LOGIQ is a trademark of GE HealthCare.
© 2024 GE HealthCare. GE is a trademark of General Electric Company used under trademark license.

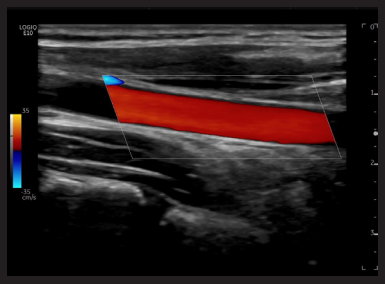
Harnessing the power of AI

AI-based Auto Doppler Assistant on the LOGIQ™ E10



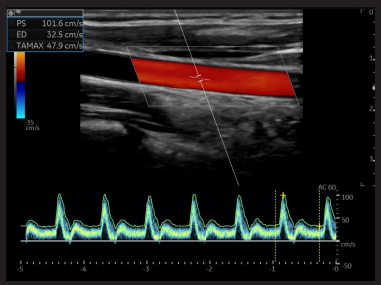
User guides system to the vasculature of interest and pushes a button

Benefit: Users scan as they normally would and control initiation of the algorithm



Doppler Assistant determines the location and direction of vessels

Benefit: Keystrokes are reduced as the color ROI and Doppler gate are automatically placed



Doppler Assistant determines the location and direction of vessels

Benefit: Results are appropriate for venous versus atrial exams even when both types of vessels are present

Manual view classification

Automated structure detection & classification

LOGIQ is a trademark of GE HealthCare.
© 2024 GE HealthCare. GE is a trademark of General Electric Company used under trademark license.

Auto Abdominal Suite 1.0

Auto Renal Measure Assistant

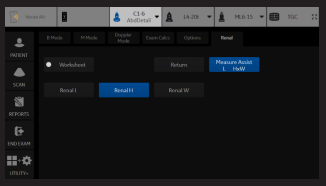
Efficiency, automation, standardization

Auto Measurement: Measure the length of the kidney fully automated with high accuracy, and the width and height of the kidney semi-automatically after the user selects hilum, very precisely.

Workflow simplification: Significantly reduce the number of the clicks (up to 10 clicks)[1] and usage of trackball on console by leveraging deep learning to automate measurement in a matter of seconds.

User-friendly exams: Makes interaction with the device intuitive and easy.





LOGIQ is a trademark of GE HealthCare.
© 2024 GE HealthCare. GE is a trademark of General Electric Company used under trademark license.

Harnessing the power of AI

AI-based Auto Renal Measure Assistant on the LOGIQ™ E10 Series



Renal manual measurements, C1-6-D



Long renal AI measurements 4 calipers, C1-6 –D

Renal Measure Assistant AI-based algorithm automatically places a for LxH

Benefit: User does not have to manually place each caliper.

Manual view classification

Automated structure detection & measurement

LOGIQ is a trademark of GE HealthCare.
© 2024 GE HealthCare. GE is a trademark of General Electric Company used under trademark license.

GE HealthCare

YOUR PATIENTS RELY ON **YOU**.

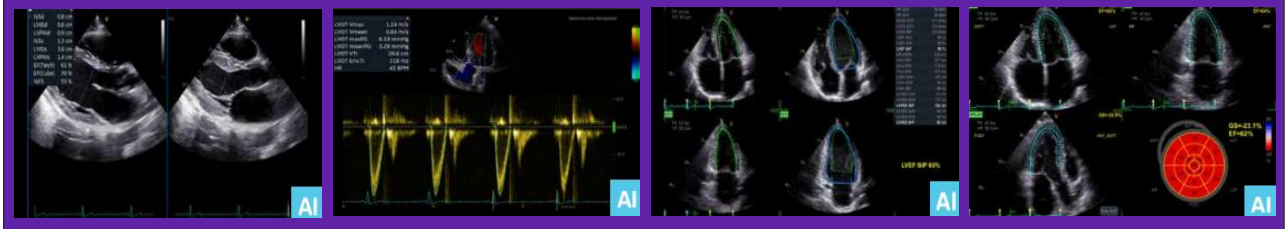
YOU CAN RELY ON **US**.

CardioVascular UltraSound (Vivid Platform)

gehealthcare.com/vivid

Vivid AI Measurement tool

Your time is precious. Save it.



AI Auto Measure 2D

Semi-automated LV dimension measurements in parasternal long axis view

LV Dimension 을 2D영상에서 자동 측정하는 기능으로 기존 manual 검사 대비 약 80% keystroke 를 줄여주는 자동화 기능.

AI Auto Measure Spectrum Recognition

Semi-automated selection of appropriate spectral Doppler measurement

단 한번의 클릭으로 해당하는 도플러를 인지하고 자동으로 측정해주는 기능으로 재현성있는 data를 제공.

Easy AutoEF

Automated one-click ejection fraction measurement

Modified Simpson's method를 자동으로 측정해주는 기능으로 AI-based의 ROI 를 자동으로 detection 해주어 EF 값을 빠르게 획득.

Easy AFI LV

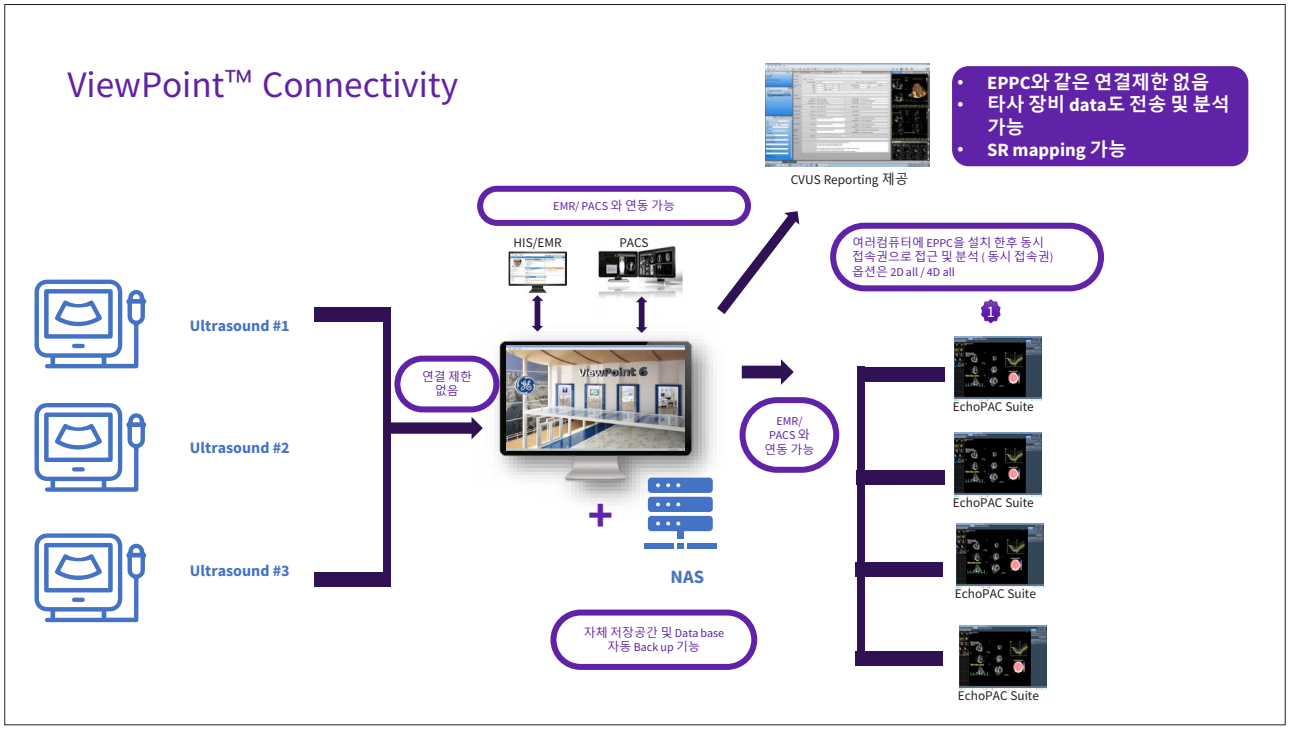
Automated one-click AFI LV analysis

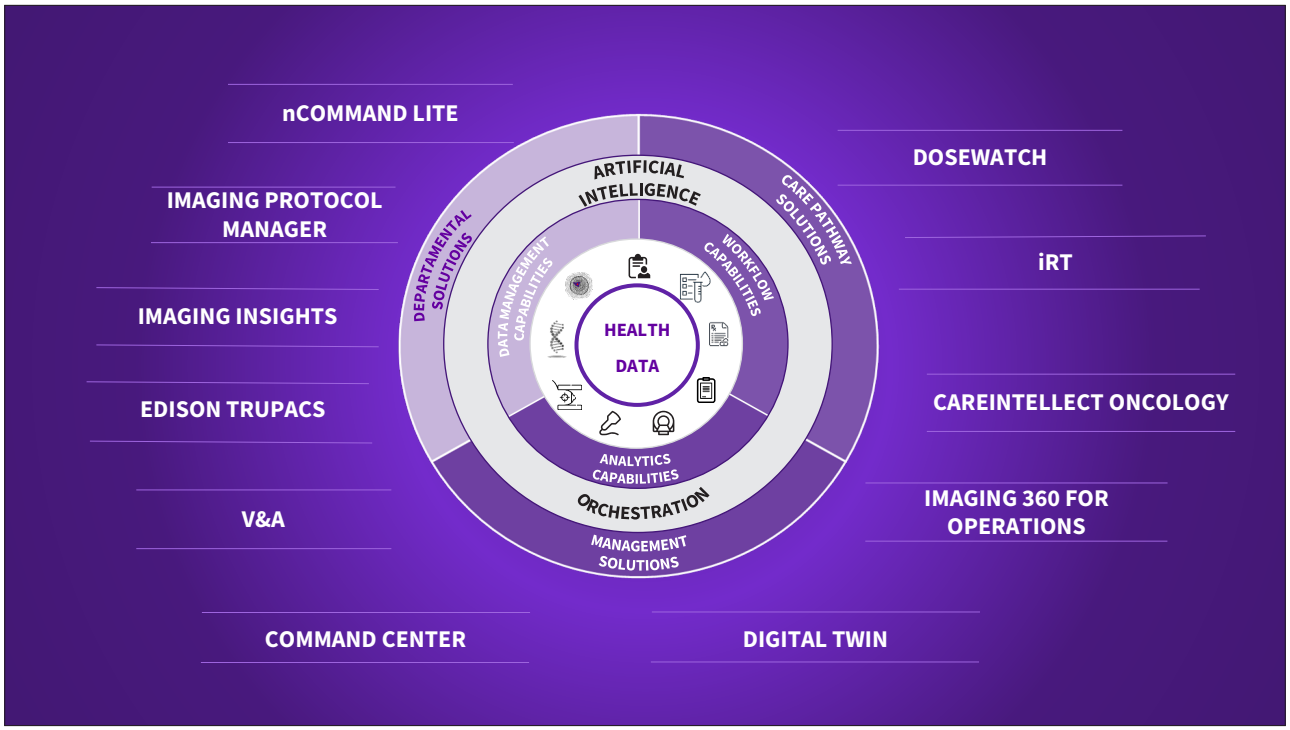
단 한번의 클릭만으로 심장의 기능을 평가하는 객관적인 수치인 Global strain 값을 제공하며, EF값도 함께 획득하는 two in one solution.

GE HealthCare

© 2024 GE HealthCare. GE is a trademark of General Electric Company used under trademark license.

24


ViewPoint™ Connectivity
CVUS Reporting 제공
EPPC와 같은 연결제한 없음
타사 장비 data도 전송 및 분석 가능
SR mapping 가능
EMR/ PACS 와 연동 가능
HIS/EMR
PACS
여러컴퓨터에 EPPC을 설치 한후 동시 접속권으로 접근 및 분석 (동시 접속권) 옵션은 2D all / 4D all
Ultrasound #1
Ultrasound #2
Ultrasound #3
연결 제한 없음
ViewPoint 6
EMR/ PACS 와 연동 가능
EchoPAC Suite
EchoPAC Suite
EchoPAC Suite
EchoPAC Suite
NAS
자체 저장공간 및 Data base 자동 Back up 기능


nCOMMAND LITE
IMAGING PROTOCOL MANAGER
IMAGING INSIGHTS
EDISON TRUPACS
V&A
COMMAND CENTER
DOSEWATCH
iRT
CAREINTELLECT ONCOLOGY
IMAGING 360 FOR OPERATIONS
DIGITAL TWIN
ARTIFICIAL INTELLIGENCE
CARE PATHWAY SOLUTIONS
WORKFLOW CAPABILITIES
ANALYTICS CAPABILITIES
ORCHESTRATION
MANAGEMENT SOLUTIONS
DATA MANAGEMENT CAPABILITIES
DEPARTAMENTAL SOLUTIONS
HEALTH DATA

Challenges and Ethical Considerations

Algorithmic bias: AI systems may perpetuate or amplify biases present in training data, potentially leading to healthcare disparities (Koak et al., 2025)

Transparency & explainability: "Black box" nature of complex AI models creates challenges for understanding decision-making processes critical for clinical adoption

Regulatory frameworks: FDA and EU regulatory pathways remain in flux for autonomous medical AI, particularly for continuously learning systems (AHA, 2025)

Data privacy & security: Federated learning approaches offer promise but healthcare data protection requires rigorous safeguards against emerging threats

Automation bias: Studies show clinician over-reliance on AI recommendations with 26% decreased vigilance when using AI-assisted diagnosis (Dratsch et al., 2023)

Sources: "Bias in artificial intelligence for medical imaging" (Diagnostic and Interventional Radiology, 2025); "Keep an Eye on Clinical Validation Gaps in AI-Enabled Medical Devices" (AHA, 2025)

Bias & Fairness
AI systems must work equally well across all patient demographics

Data Security
Protecting patient data throughout the AI lifecycle

Clinical Validation
Rigorous testing across diverse patient populations

Transparency
Understanding AI decision-making processes

"Ethical frameworks are as critical as technical excellence in ensuring AI benefits all patients equitably"

— Zhang & Zhang, BMC Medical Informatics & Decision Making, 2023

© 2025 General Electric Company - All rights reserved. GE and the GE Monogram are trademarks of GE.
GE HealthCare

Beyond 2025: Emerging Trends & Disruptions

Quantum Computing:

Providing exponential processing power for previously unsolvable biological problems, accelerating drug design, complex genomics, and nanoparticle development

Brain-Computer Interfaces:

Non-invasive AI co-pilot systems for neuroprosthetics, rehabilitation medicine, and treatment of neurological disorders

Neuromorphic Hardware:

Edge medical AI technology enabling continuous diagnostics even in resource-constrained environments with ultra-low power consumption

GE HealthCare

2030–2035: The Vision for AI-Driven Healthcare

- AI as core in **predictive, preventive, personalized care networks**—driven by genomics, omics, digital twin models
- **Autonomous robotic surgery:** 25–30% lower complication rates; telesurgery to remote regions
- **Interoperable AI:** Seamless integration with FHIR and HL7-based healthcare data ecosystems worldwide

The Future of AI in Healthcare: Vision Beyond 2025

GE HealthCare

From Vision to Action: Recommendations for Healthcare Leaders

1. Prioritize validated, explainable AI tools for real patient impact
2. Invest in workforce upskilling & AI literacy
3. Build partnerships for interoperable data & co-innovation
4. Develop an AI governance & ethics framework
   Monitor bias & outcomes across patient populations
5. Leverage pilot studies—measure ROI, iterate, scale proven solutions

AI and the Future of Healthcare: Vision 2025+

GE HealthCare

Future Directions & Innovations Pipeline

Generalist agent models: Evolution toward autonomous AI systems that can orchestrate multiple imaging tasks and modalities through complex reasoning capabilities (Nature, 2025)

Multimodal LLM+Vision fusion: Integration of large language models with medical imaging for enhanced contextual understanding and natural language interaction with radiological data

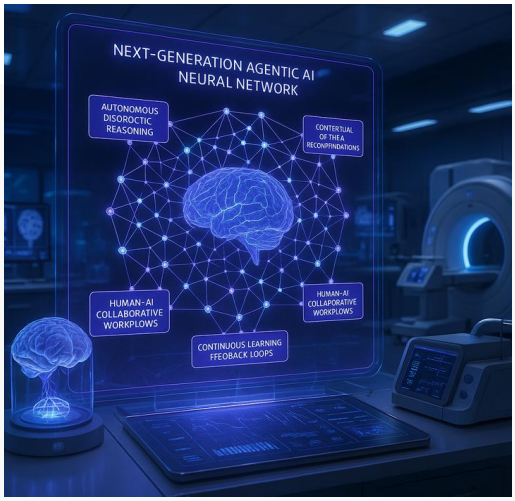
Explainable collaborative AI: Development of AI systems that transparently communicate reasoning processes, building clinician trust and enabling meaningful human-AI partnerships

Research trends: Expansion into autonomous triaging, predictive modeling, and real-time decision support across integrated clinical pathways (Xiong et al., 2025)

GE Healthcare Innovation Pipeline

Next generation **of Revolution™** and **Vivid™ platforms** with expanded autonomous capabilities, enhanced federated learning implementation, and multimodal AI integration across product portfolio.

Source: The future of multimodal artificial intelligence models for integrating imaging and clinical metadata (DIR Journal, 2024)



Next-Generation Agentic AI Medical Systems

- Autonomous multimodal diagnostic reasoning
- Contextual clinical recommendations
- Human-AI collaborative workflows
- Continuous learning from feedback

© 2025 General Electric Company - All rights reserved. GE and the GE Monogram are trademarks of GE.

GE HealthCare

GE HealthCare

기조강연 II

좌장: 김대유(인하대학교)

11월 8일 (토) **늘빛관 이태석홀 (09:15~10:00)**

최병욱(연세의대)

의료 인공지능: 연구에서 임상, 임상에서 상용화



최병욱/Byoung Wook Choi
교수/Professor
연세대학교/Yonsei University
(주) 팬토믹스/ Phantomics Inc.

의료 인공지능: 연구에서 임상, 임상에서 상용화로

Medical AI: From Research to Clinical Practice and Commercialization

Abstract

Medical artificial intelligence (AI) is entering a new phase—moving beyond technological innovation toward real-world adoption in clinical practice and the healthcare market. In this lecture, from the perspective of a radiologist and entrepreneur with hands-on experience in developing and commercializing AI-based medical devices, we will explore the current landscape and future directions of medical AI. Globally, the number of FDA-approved AI medical devices has surged from around 70 in 2018 to over 340 by 2025, with radiology accounting for approximately 70% of them —serving as a test bed for AI implementation. However, technical excellence alone is not sufficient for successful clinical adoption. Challenges encountered throughout the startup, development, and commercialization of AI medical devices include algorithm generalizability, limited access to medical data, difficulties in multi-center validation, and institutional barriers such as regulatory approval and reimbursement. The most critical factors for successful deployment are not merely "better algorithms" but effective integration into hospital workflows, building trust among clinicians, and establishing sustainable business models. Biomedical engineering researchers can play a pivotal role not only in developing innovative algorithms but also in transforming them into practical tools that can truly impact patient care. This lecture aims to offer realistic insights into the journey of translating research achievements from the lab to actual clinical benefit for patients.

Brief Biosketch

Byoung Wook Choi, MD, PhD, is a Professor of Radiology at Yonsei University College of Medicine and CEO of Phantomics Inc., a medical AI company. He specializes in cardiovascular imaging and artificial intelligence in medicine. After earning his MD and PhD from Yonsei University, he completed a research fellowship at Beth Israel Deaconess Medical Center, Harvard Medical School. Dr. Choi previously served as Director of the Department of Cardiovascular Radiology, the Research Institute of Radiological Science, and the Center for Clinical Imaging Data Science at Yonsei University, as well as Director of Health Technology R&D Planning at the Korea Health Industry Development Institute. With over 230 peer-reviewed SCI/SCIE publications, his research has advanced cardiac CT/MRI imaging, radiomics, and AI-driven diagnostic technologies. He has held leadership roles in multiple professional societies, including the Asian Society of Cardiovascular Imaging and the Korean Society of Artificial Intelligence in Medicine.

지역기반 의생명 ICT·SW

좌장: 유원규(인제대학교)

11월 6일 (목) **일강원 103 (15:00-16:00)**

한석영(㈜토탈웰니스)
디지털 리더쉽

박세린(경남대학교)
저작훈련용 기기와 어플리케이션을 활용한 대학생의 체중군별 저작습관 비교 및 개선 연구

김민직(인제대학교)
고령자의 인지 기능과 지남력 향상을 위한 애플리케이션 개발 및 사용성 평가: 작업치료사를 대상으로

김나영(경남대학교)
딥러닝을 활용한 혈당 반응 예측 알고리즘 개발

Rida Fatima(인제대학교)
The Role of Neuromuscular Junction Biomarkers Particularly C-Terminal Agrin Fragment (CAF) in Early Diagnosis of Sarcopenia: A Systematic Review and Meta-Analysis.

Anik Kumar Kar(인제대학교)
Theranostic Cu-Prussian Blue Nanozyme for Neuroprotection and Real-Time ROS Monitoring in Ischemic Stroke

저작훈련용 기기와 어플리케이션을 활용한 대학생의 체중군별 저작습관 비교 및 개선 연구

김나영[1] , 최미주[2] , 박세린[3] , 박은주[1, 3]

경남대학교 스마트융합학과[1], 경남대학교 식품생명학전공[2], 경남대학교 식품영양학과[3]

Comparison and Improvement of Masticatory Habits among University Students by Weight Group Using a Chewing Training Device and App

Nayoung Kim[1] , Mijoo Choi[2] , Serin Park[3], Eunju Park[3]

Department of Smart Convergence, Kyungnam University, Korea[1], Food and Biotechnology, Kyungnam University, Korea[2], Department of Food Science and Nutrition, Kyungnam University, Korea[3]

*kimnayoung99@student.kyungnam.ac.kr

Abstract

Changes in modern dietary habits and a reduction in physical activity have accelerated the risk of obesity, with previous studies reporting that obese individuals tend to consume food quickly and exhibit decreased masticatory activity. This inappropriate masticatory habit is a crucial factor contributing to the exacerbation of obesity. This study aimed to comprehensively analyze the characteristics of masticatory habits in university students by weight group and evaluate the efficacy of a smart device-based short-term intervention to improve these habits. The study sequentially involved 40 university students (normal-weight vs. overweight, 10 participants per subgroup) in a comparative analysis, followed by a 7-day intervention targeting the overweight group. The 'GoodBite' chewing training device (Miracleware Co.) was utilized for all quantitative measurements and the short-term training. Initial comparative analysis revealed that overweight students (OWG) generally exhibited faster eating speed and significantly lower total meal time and chew counts compared to normal-weight students (NWG). Overweight female students (OW-F) showed the most pronounced deficits in these behaviors. Subsequently, the 7-day masticatory training intervention confirmed significant improvements in target masticatory behaviors, such as chewing speed and count, even over the short duration. In conclusion, the chewing training device and application are proven to be a potentially effective tool for improving masticatory habits in overweight university students, supporting the establishment of healthy eating habits and the prevention of obesity. However, long-term studies are necessary to confirm changes in body composition (e.g., BMI).

1. 연구 배경

현대 사회의 경제 성장과 도시화는 식생활 구조에 심대한 변화를 가져왔다. 외식 및 가공식품 소비 증가와 더불어 기술 발전으로 인한 신체 활동량 감소는 고열량 식품 섭취 증가와 맞물려 대학생을 포함한 전 연령층에서 체중 증가 및 비만 위험을 가중시키고 있다. 특히 국내 비만율은 코로나19 팬데믹을 거치며 53%에 달하는 등 그 심각성이 사회적 문제로 대두되고 있다.

선행연구에서는 비만인이 음식을 잘 씹지 않고 빠르게 섭취하는 경향이 있음이 보고되었으며, 이러한 부적절한 저작 활동이 비만을 유발하고 악화시키는 주요 행동 특성으로 지목되고 있다. 불규칙한 식사 패턴과 패스트푸드 섭취가 증가한 대학생 집단에서 저작 활동의 감소 경향은 더욱 두드러진다. 따라서 저작 활동을 정량적으로 분석하고 이를 개선하기 위한 객관적이고 효과적인 중재 방안 마련이 시급하다.

이에 본 연구는 저작 훈련용 스마트 기기 및 애플리케이션이라는 첨단 기술을 활용하여 저작 행동을 정량적으로 분석하고 개선 효과를 검증함으로써, 스마트 기기가 건강한 식습관 정착 및 비만 예방·관리에 기여할 수 있는 실질적인 도구로서의 가능성을 확인하고자 하였다.

2. 연구 방법

본 연구는 총 40명의 대학생을 대상으로 진행되었다. 대상자는 BMI 기준에 따라 정상체중군(Normal Weight Group; NWG, BMI 18.5–22.9)과 과체중군(Overweight Group; OWG, BMI ≥ 25)으로 구분하였으며, 성별(남녀 각 10명)에 따라 NW-M, NW-F, OW-M, OW-F의 네 그룹으로 세분되었다.

모든 연구 과정은 ㈜미라클웨어의 얼굴 근전도(EMG) 센서가 탑재된 측두근 부착형 센서를 이용하는 저작 훈련용 기기 '굿바이트(GoodBite)'를 활용하여 진행되었다. 이 기기는 저작 횟수(chew counts)와 섭취 시간(consumption times)을 정확히 기록하며, 데이터는 모바일 애플리케이션으로 전송되어 시각화 및 분석되었다.

Study 1: 체중군별 저작 활동 특성 비교

먼저 모든 참여자에게 동일한 조건으로 조리된 실험식(샐러드, 주먹밥, 도넛)을 고정된 순서로 제공하였다. 동일한 환경에서 식사 중 저작 횟수, 저작 시간, 총 식사 시간 등을 측정하여 두 체중군 간 저작 활동의 차이를 정량적으로 분석하였다.

Study 2: 저작 훈련 개입을 통한 습관 개선 연구

과체중 대학생을 주요 대상으로 선정하여 저작 훈련용 기기와 어플리케이션을 활용한 7일간의 단기간 저작 훈련을 적용하였다. 개입 방법으로는 해당 기기가 저작 빈도와 강도를 정량화하고, 과도한 저작 강도가 감지되면 진동 알림을 제공하며, 저작 패턴을 시각화하여 행동 피드백 및 개선을 지원하는 모바일 애플리케이션을 통해 중재를 수행하였다. 이 개입은 저작 활동 지표의 즉각적인 변화를 유도하고 그 효과를 평가하는 데 중점을 두었다.

평가 항목: 훈련 전후 저작 횟수, 저작 시간, 총 식사 시간 등 저작 행동 지표의 변화를 측정하여 개입의 효과를

검증하였다. 또한, 저작 행동 개선이 식사 만족도에 미치는 영향을 확인하기 위해 포만감(Satiety Assessment)에 대한 주관적인 평가 항목도 함께 측정하였다. 단기간 개입의 한계점을 파악하기 위해 신체 구성 변화(BMI 등)도 함께 관찰하였다. 한편, 기기 사용 시 안경 및 모자를 벗어야 하는 점, 스킨 플레이트 접착으로 인한 불편감 등 편의성 측면의 개선 필요성 또한 논의되었다.

3. 연구 결과 및 의의

저작 행동 비교 분석 결과, 정상체중군(NWG)은 과체중군(OWG)에 비해 총 식사 시간은 물론 각 식품의 섭취 시간과 저작 횟수에서 유의하게 높은 값을 나타내며 전반적으로 천천히 섭취하는 습관을 가진 것으로 확인되었다(표 1).

표 1. 연구 대상자의 기본 인체 측정 특성

	NW-M	OW-M	NW-F	OW-F
Participant				
Age(years)	23.3±0.6	23.1±0.5	21.0±1.2	21.9±0.4
Height(cm)	174.5±1.7	178.8±2.3	165.2±1.6	167.5±2.0
Weight(kg)	68.7±2.1	93.2±7.3***	55.5±1.6$^{\#\#\#}$	77.4±4.3***$^{\#\#}$
BMI(kg/m^2)	22.6±0.7	28.9±1.7**	20.4±0.4$^{\#}$	27.9±1.8***

성별 및 체중군별 비교에서는 과체중 남성(OW-M)이 정상체중 남성(NW-M)에 비해 총 식사 시간이 유의하게 짧았으며(585.7±33.4초 vs 873.7±46.2초, p<0.001), 특히 정상체중 여성(NW-F)은 과체중 여성(OW-F)에 비해 유의하게 더 긴 섭취 시간과 높은 저작 횟수를 보였는데(p<0.05), 이는 과체중 여성에서 빠르게 먹고 저작이 적은 습관이 두드러지게 나타남을 의미한다. 이러한 결과는 저작 행동이 식이 습관 및 체중 상태와 의미 있는 연관성을 가짐을 정량적으로 입증하며, 비만 예방 전략 수립 시 저작 행동에 대한 성별 및 체중별 맞춤 접근의 필요성을 강조한다. 또한, 연구 참가자들을 대상으로 식사 횟수 및 운동 빈도에 대한 주관적 설문 조사도 함께 진행되었으며, 저작 행동 지표와 마찬가지로 체중군 및 성별에 따른 차이가 관찰되었다(표 2).

표 2. 정상체중군과 과체중군의 저작 행동 특성 비교

	NW-M	OW-M	NW-F	OW-F
Masticatory behavior				
Total eating time(sec)	873.7±46.2	585.7±33.4***	1188.4±72.2$^{\#\#}$	806.3±33.0$^{\#\#\#}$
Total chewing count	556.5±48.0	501.2±71.0	989.8±93.2$^{\#\#}$	558.7±54.7**
Total chewing rate(chews/min)	0.6±0.0	0.9±0.1**	0.8±0.1$^{\#}$	0.7±0.1***
Salad eating time(sec)	382.0±34.7	244.5±19.4**	522.3±36.1$^{\#}$	393.4±18.7**$^{\#\#}$
Chewing count for salad	266.7±36.3	279.9±52.2	550.4±50.1$^{\#\#\#}$	246.1±35.1***
Salad chewing rate(chews/min)	0.7±0.1	1.1±0.2	0.6±0.1	1.1±0.1**
Rice ball eating time(sec)	294.1±25.7	209.6±25.0*	409.9±58.5	274.7±17.8*$^{\#}$
Chewing count for rice ball	189.8±20.1	142.6±29.7*	266.3±51.3	211.6±41.1
Rice ball chewing rate(chews/min)	0.7±0.1	0.7±0.1	0.7±0.1	0.9±0.2
Donut eating time(sec)	197.6±13.9	131.6±8.3**	256.2±13.6$^{\#\#}$	144.2±12.8***$^{\#\#}$
Chewing count for donut	100.0±12.8	78.7±8.4*	173.1±14.8$^{\#\#}$	101.0±16.8**
Donut Chewing rate(chews/min)	0.5±0.1	0.7±0.1	0.7±0.0$^{\#}$	0.7±0.1

이러한 문제점이 확인된 과체중 대학생을 대상으로 7일간의 저작 훈련 개입을 시행한 결과, 저작 훈련용 기기와 애플리케이션 활용을 통해 저작 속도 및 횟수 등 저작 행동이 개선되는 가능성이 확인되었다(표 3).

이는 저작 훈련이 과체중 대학생의 식습관을 긍정적으로 변화시킬 수 있는 잠재력을 가짐을 입증한다.

표 3. 과체중 대상자의 저작 행동 교육이 미치는 영향

Table 1. Assessing the impact of chewing behavior education on overweight individuals

	Control		Δ	Experimental		Δ
	Pre	Post		Pre	Post	
Age(years)	22.5±0.3			22.5±0.3		
Height(cm)	173.1±2.0			173.1±2.0		
Weight(kg)	86.3±4.5	86.7±4.6^{a}	+0.4±0.1	86.4±4.5	86.2±4.5^{ns}	-0.2±0.0$^{\#\#\#}$
BMI(kg/m^2)	28.4±1.2	28.6±1.3^{ns}	+0.1±0.0	28.4±1.2	28.2±1.3^{ns}	-0.1±0.0$^{\#\#\#}$
Total eating duration(sec)	824.2±73.2	937.0±77.6^{ns}	+92.9±65.2	802.1±58.3	1478.7±130.1***	+676.6±135.9$^{\#\#\#}$
Total chewing count	796.1±59.1	894.6±76.4^{ns}	+89.4±77.8	675.5±48.5	1668.5±137.8***	+783.0±149.0$^{\#\#\#}$
Total chewing rate (chews/min)	1.1±0.1	1.0±0.3^{ns}	-0.0±0.1	1.1±0.0	1.2±0.5^{ns}	+0.1±0.1

Values are the mean±S.D.
^{a,b}Different superscript letters indicate statistically significant differences between Pre-education and Post-education groups by (DR_{α} $p \le 0.01$) based on Student's t-test.
^{ns}Different superscript letters indicate significant differences ($p \le 0.001$) between (Control and) intervention, according to Student's t-test.
ns: not significant

결론적으로, 본 연구는 저작훈련용 기기와 어플리케이션을 활용하여 체중군별 저작 습관을 정량적으로 비교하고, 단기간 개입의 효과를 검증하였다. 특히 저작 훈련용 기기와 애플리케이션은 과체중 대학생의 저작 습관을 개선할 수 있는 효과적인 도구로서의 가능성을 입증하였으며, 이러한 연구 결과는 건강한 식습관 정착 및 비만 예방·관리를 위한 실용적인 개입 전략을 수립하는 데 기초 자료를 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 다만, 이와 같은 단기간의 개입만으로는 신체 구성 변화(BMI 등)의 유의미한 효과를 확인하기 어려웠으므로, 저작 습관 개선이 체중 관리에 미치는 영향을 명확히 하기 위해서는 장기적인 개입 연구가 필요하다는 한계점을 도출하였다. 또한, 기기 사용 시 측두근 센서 부착 불편감과 같은 편의성 측면의 개선 필요성도 확인되어, 향후 연구에서는 기기의 상용화 가능성을 높이기 위한 설계 최적화가 요구된다.

4. Acknowledgements

본 연구는 정보통신기획평가원(IITP)의 지역지능화 혁신인재 양성 사업(과학기술정보통신부 지원)을 통해 지원을 받아 수행되었음. (IITP-2025-RS-2024-00436773)

5. 참고 문헌

[1] H. Nishiyama, Y. Kishimoto, Y. Suda, et al., "Effect of mastication evaluation and intervention on body composition and biochemical indices in female patients with obesity: a randomized controlled trial," BMC Women's Health, Vol. 23, Article No. 134, 2023

고령자의 인지 기능과 지남력 향상을 위한 애플리케이션 개발 및 사용성 평가 : 작업치료사를 대상으로

배병주[1*], 양영애[2,3], 김민직[2], 신종혁[2], 류시진[2], 강유나[2], 손현지[2]
인제대학교 일반대학원 재활과학과 [1]
과인제대학교 의생명보건대학 작업치료학과[2]
인제대학교 고령자라이프리디자인연구소[3]

Development and utilization evaluation for elderly people' cognitive functionality and improvement : for occupational therapist

ByungJu Bae[1*], YeongAe Yang[2,3], MinJik Kim[2], JongHyuk Shin[2], SiJin Ryu[2], YuNa Kang[2], HyunJi Son[2]
Inje University General Graduate School Rehabilitation Science Department[1]
Inje University Medical Life Health College Occupational Therapy Department[2]
Inje University Senior Citizen's Lifestyle Design Institue[3]
*qudwn2340@naver.com

Abstract

A "run on the map" application was developed to improve cognitive function and persistence of the elderly. Therefore, this study conducted a usability evaluation and satisfaction survey targeting a group of experts (job therapists) to verify the application developed to improve cognitive function and persistence of the elderly. As a result of usability and satisfaction evaluation targeting the literary group, the application showed high overall usability and satisfaction. In the usability evaluation, the 'easy to use' item recorded the highest score, and it was confirmed that some users needed initial guidance. In the satisfaction survey, an average of 4 or more points were recorded in all items, and in particular, satisfaction with 'content difficulty' and 'process and method' was high. These results show the possibility that the application can be effectively used by experts as well.

1. 연구 배경

고령화가 진행되며 인지 기능의 저하는 정도, 시기적 측면에서 개인적 차이가 있지만 자연스러운 과정으로 여겨진다[1], [2]. 기억력, 주의력과 같은 인지 저하는 삶의 다양한 영역에 영향을 미쳐 삶의 질과 연관되어 있을 수 있으며[3], 인지 저하에 대한 인식은 우울증과도 관련이 있다[4]. 이러한 증상들로 무기력을 느끼고 이로 인해 식사와 옷 입기 등의 기본적 일상생활 능력뿐만 아니라, 돈 관리와 지역사회 이동과 같은 수단적 일상생활 능력에서도 어려움을 겪는다[5], [6]. 인지 저하가 지속되면 치매로 발병할 확률이 높고, 치매 돌봄 부담자들은 삶의 질 저하, 우울, 스트레스 등 많은 문제를 나타낸다. 때문에 인지 기능에 문제가 발생하기 전 다양한 중재를 제공하는 것이 필요하다[7].

이러한 문제들을 예방하기 위해 치매 예방 운동프로그램, 인지-복합 운동프로그램 등[11], [12] 예방을 위한 다양한 프로그램들이 연구되고 있다. 하지만, 고령자 스스로 진행하기 어렵고, 시공간적 제약, 보조자의 도움 등 많은 제약이 존재한다[13].

모바일 기기의 대중화된 보급 및 이러한 문제를 해결하고자 인지 장애 예방 및 치료에서 스마트 기기를 사용한 연구가 늘어나는 추세이다. 스마트 기기를 활용한 중재는 학습지와 책과 다르게 쉽게 정보를 수용할 수 있고 다양한 흥미로운 콘텐츠로 인지 기능 증상 개선 및 일상생활 능력 개선에 효과적이다[8],[9],[10]. 이러한 장점을 기반으로 고령자에게 적용한 연구를 보면, 인지 기능 개선, 우울 감소 등 정신건강에 효과가 확인된 바 있다[15],[16],[17].

따라서 본 연구는 고령자의 인지 기능과 지남력 향상을 목적으로 "지도위를 달려라" 애플리케이션을 개발하고자 한다. 고령자와 전문가(작업치료사)를 대상으로 사용성을 체계적으로 평가하고, 애플리케이션 만족도 조사를 통해 검증하고자 한다.

2.연구 방법

본 연구에 사용된 "지도위를 달려라"를 개발한 후 임상에서 근무하는 전문가 집단(작업치료사) 15명을 사용성 평가 및 만족도 조사를 실시하였다. 사용성 평가 및 만족도 조사 전 애플리케이션의 목적과 사용방법에 대한 충분한 설명을 한 후 진행되었다.

3. 연구 결과

1) 전문가 대상 SUS 사용성 평가

사용성 평가의 총점수는 75.6점으로 나타났다. 고령자 사용성 평가와 동일하게 사용하기 쉽다는 항목이(4.47±0.13)으로 가장 높게 나왔고, 평균 4점대로 높게 나타났지만 다양한 기능의 통합에 관한 질문(3.93±0.23)으로 나타났다. 대부분 부정적 문항은 평균 1~2점대를 보였지만, 전문가의 도움이 필요하다는 질문

(3.33±0.27)에서 비교적 높게 나와 치료사들의 입장에서는 약간의 지도가 필요한 것으로 보인다.

2) 전문가 대상 만족도 조사

전체 문항은 고령자와 같이 평균 4점 이상으로 만족도가 높음을 확인하였다. 하위 항목을 보면 애플리케이션 내용의 난이도(4.73±0.12)가 가장 높았다. 과정 및 방법 (4.33±0.16), 애플리케이션 구성(4.27±0.15), 전체적 만족도(4.20±0.17), 재사용 의도(4.13±0.22) 순으로 나타났다.

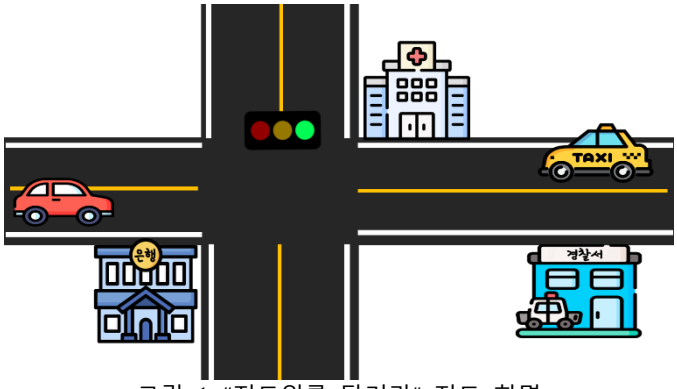


그림 1. "지도위를 달려라" 지도 화면

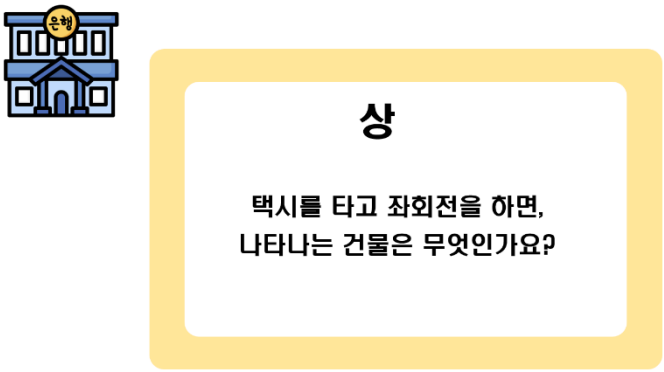


그림 2. "지도위를 달려라" 문제 (난이도 : 상)

5.참고 문헌

[1] Christensen, H. (2001). What cognitive changes can be expected with normal ageing?. Australian & New Zealand Journal of Psychiatry, 35(6), 768-775.
[2] Deary, I. J., Gow, A. J., Taylor, M. D., Corley, J., Brett, C., Wilson, V., ... & Starr, J. M. (2007). The Lothian Birth Cohort 1936: a study to examine influences on cognitive ageing from age 11 to age 70 and beyond. BMC geriatrics, 7(1), 28.
[3] Kiely, K. M., & Michalos, A. C. (2014). Encyclopedia of quality of life and well-being research.
[4] Jorm, A. F. (2001). History of depression as a risk factor for dementia: an updated review. Australian & New Zealand Journal of Psychiatry, 35(6), 776-781.
[5] Seong, H., & JONGMIN, P. (2022). The Effect of Social Contact and Participation in Social Activities on Health-Related Quality of Life of the Community-Dwelling Older Adults Who Experience Subjective Cognitive Decline: Based on the 2019 Community Health Survey. Global Health and Nursing, 12(1), 47-56.
[6] Kim, B. J., & Choi, Y. (2015). The relationship between activities of daily living (ADL), chronic diseases, and depression among older Korean immigrants. Educational Gerontology, 41(6), 417-427.
[7] Shin, C. R., Lee, Y. J., Kim, N. H., & Yang, Y. A. (2022). Cognitive Application Development to Improve the Daily Life of the Elderly and Usability Evaluation. Korean Aging Friendly Industry Association, 14(2), 61-71.
[8] Kang, S. H., Kim, Y. S., Kang, S. L., & Moon, J. H. (2018). The effects of cognitive training using application games of smart device on cognitive function in patients with mild traumatic brain injury. Journal of Korean Society of Neurocognitive Rehabilitation, 10(2), 9-18.
[9] Robert, P., Manera, V., Derreumaux, A., Ferrandez Y Montesino, M., Leone, E., Fabre, R., & Bourgeois, J. (2020). Efficacy of a web app for cognitive training (MeMo) regarding cognitive and behavioral performance in people with neurocognitive disorders: randomized controlled trial. Journal of medical Internet research, 22(3), e17167.
[10] Shake, M. C., Crandall, K. J., Mathews, R. P., Falls, D. G., & Dispennette, A. K. (2018). Efficacy of Bingocize®: A game-centered mobile application to improve physical and cognitive performance in older adults. Games for health journal, 7(4), 253-261.
[11] Hyun, J. M., & Kim, J. Y. (2023).The Meaning of Search for Exercise Adherence of the Elderly Participants in theDementia Prevention Exercise Program. Korean Journal of Leisure, Recreation & Park, 47(2), 67-80.
[12] Yoo, S. J. (2025). The Effects of Combined Exercise Program Based on Successful Aging Model on Fitness, Physical Performance, and Cognitive Function of Middle-aged People with Developmental Disabilities (Doctoral dissertation). Seoul National University, Seoul.
[13] Min, H. J., & Chang, J. K. (2020). Meta-analysis of the Effects of Dementia Prevention Program for Korean elderly: Focused on Cognition, Stimulation and Integration Programs. Korean Society of Gerontological Social Welfare, 75(3), 85-119.
[14] Ahn, J. H., & Park, S. J. (2016). The Effects of Serious Game for Elderly People - Focused on the Case of Development of 'Rejuvenesce Village'. The Journal of Korean Institute of Information Technology, 14(3), 195-206.
[15] Ahn, J. H., Lim, K. C., Lee, Y. J., & Kim, K. S. (2011). Effects of Computer/Internet Game Play on Depression and Life Satisfaction among the Elderly: Mediating Effects of Perceived Self-Control. Journal of Korea Contents Association, 11(7), 406-417.
[16] Ahn, J. H., & Park, S. J. (2016). The Effects of Serious Game for Elderly People - Focused on the Case of Development of 'Rejuvenesce Village'. The Journal of Korean Institute of Information Technology, 14(3), 195-206.
[17] Kim, J. Y. (2022). Effect of the Use of Smart Devices by the Elderly on Life Satisfaction: Focusing on the Mediating Effects of Self-esteem. Journal of Korea Contents Association, 22(5), 424-434.

딥러닝을 활용한 혈당 반응 예측 알고리즘 개발

최미주[1*], 김나영[2], 박은주[1, 2]

경남대학교 식품생명공학과[1], 경남대학교 스마트융합학과[2]

Development of a Deep Learning Based Algorithm for Predicting Glycemic Response

Mijoo Choi[1*], Nayoung Kim[2], Eunju Park[1, 2]

Department of Food Science and Biotechnology[1], Kyungnam University; Department of Smart Convergence[2], Kyungnam University

[*] mijjoo@kyungnam.ac.kr

Abstract

Diabetes is one of the leading causes of death in Korea, with its prevalence continuously increasing and imposing a substantial socioeconomic burden. This study aimed to investigate interindividual differences in postprandial glycemic response (PPGR) among Koreans and to develop a personalized predictive model for blood glucose response. Healthy and prediabetic participants consumed test foods containing 50 g of glucose or 20 g of carbohydrates, and blood glucose levels were monitored for 2 hours post-consumption. Associations between blood glucose responses, genetic polymorphisms, and gut microbiota composition were analyzed. The SLC30A8 (rs13266634) variant showed a significant negative correlation with PPGR after bread consumption, while the MTNR1B (rs10830963) variant exhibited a positive correlation following glucose intake ($p<0.05$). Among gut microbiota, Subdoligranulum was negatively associated with glucose-induced PPGR, whereas Parabacteroides showed a positive association with certain foods ($p<0.05$). Additionally, specific genera such as Prevotella, Bifidobacterium, and Faecalibacterium were differentially related to PPGR depending on the food type. These findings provide fundamental evidence for developing a Korean-specific predictive model of blood glucose response by integrating genetic and microbial factors and contribute to advancing precision nutrition.

1. 연구 배경

당뇨병은 우리나라 주요 사망 원인 중 하나로, 유병률이 지속적으로 증가하고 있는 대표적인 만성질환이다. 2020년 기준 성인 당뇨병 유병률은 16.7%로 보고되었으며, 약 526만 명이 당뇨병을 앓고 있는 것으로 추정된다. 당뇨병은 신경병증, 신부전, 시력 손실, 심혈관질환 등 다양한 합병증을 유발하여 삶의 질을 저하시킬 뿐 아니라, 의료비 증가와 생산성 저하를 초래하여 사회경제적 부담을 가중시키고 있다. 특히, 고혈당·고혈압·이상지질혈증 등 대사이상증후군의 동반 유병률이 높아지고 있어 효과적인 관리 전략이 절실하다.

이에 국제당뇨병연맹(International Diabetes Federation, IDF)은 환자 중심의 통합적 맞춤형 관리체계의 필요성을 강조하며, 혈당 측정, 데이터 분석, 피드백, 환자 맞춤형 관리지침을 통합한 기술 기반 관리 모델인 iPDM(integrated personalized diabetes management)을 제시하였다. iPDM은 환자의 자가 관리 능력을 향상시키고 장기적인 치료 효과를 개선하기 위한 전략으로 제안되고 있으나, 실제 임상에서는 여전히 목표 혈당에 도달하지 못하는 환자가 다수 존재하며, 단순한 생활습관 교정만으로는 충분한 치료 효과를 얻기 어려운 실정이다.

Zeevi 등[1]의 연구에서는 동일한 식사를 제공받은 사람들 간에도 식후 혈당 반응(Postprandial Glycemic Response, PPGR)이 크게 다름을 보고하였다. 이러한 차이는 개인의 유전적 요인뿐 아니라 식사 패턴, 수면, 신체활동, 장내 미생물, 생활습관 등 다양한 생물학적 요인에 의해 결정되는 것으로 알려져 있다. 이에 따라 개인의 대사적 특성을 고려한 맞춤형 식사 처방이 필요하다는 인식이 확산되고 있으며, 최근에는 기계학습(machine learning) 기법을 이용해 식후 혈당 반응을 예측하고 개인별 맞춤형 식단을 설계하려는 시도가 활발히 이루어지고 있다.

또한 연속혈당측정기(Continuous Glucose Monitoring, CGM)의 보급으로 개인의 혈당 반응을 실시간으로 추적할 수 있게 되면서, 다양한 식품 섭취 후 혈당 변화를 정밀하게 분석할 수 있는 환경이 조성되었다[2, 3]. 그러나 현재까지의 관련 연구는 대부분 서구인을 대상으로 수행되어 왔으며, 식습관, 유전적 배경, 장내 미생물 구성 등에서 서구와 차이를 보이는 한국인을 대상으로 한 연구는 부족한 실정이다. 실제로 국내 연구에서는 서구식 식단 기반의 예측 모델을 적용할 경우 예측 정확도가 낮게 나타나는 등, 한국인의 식습관과 대사 특성을 반영한 별도의 연구가 필요함이 제기되고 있다.

따라서 본 연구는 한국인을 대상으로 다양한 식품 섭취 후 혈당 반응을 분석하고, 식사 구성, 생리·생화학적 요인, 유전적 요인, 장내 미생물 등 복합적 요인을 통합적으로 평가함으로써 개인 간 혈당 반응의 차이를 규명하고자 하였다. 이를 통해 한국인 맞춤형 혈당 반응 예측 모델을 개발하고, 향후 개인 맞춤형 영양관리 및 정밀영양(precision nutrition) 실현을 위한 기초자료를 마련하는 것을 연구의 궁극적 목적으로 한다.

2.연구 방법

연구는 건강인 또는 반건강인을 대상으로 다양한 식품 섭취에 따른 혈당 변화 추이를 확인하고 개인의 혈당 민감도 및 혈액 생화학적 지표, 유전자, 장내미생물 등을 통한 개인맞춤형 식이접근법을 이용함으로써 개인의 혈당 변화를 예측하고 개인맞춤형 식단 제공을 위한 알고리즘을 개발하기 위해 임상시험을 실시하였다. 또한 과학적, 윤리적 연구 진행을 위해 경남대학교 생명윤리위원회(Institutional Review Board; IRB)의 승인을 받아 진행하였다(승인번호: 1040460-A-2021-050).

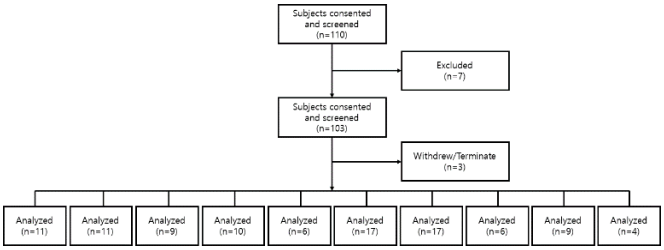


그림 1. CONSORT(임상시험 통합보고기준) 흐름도

식품 섭취 후 혈당 반응(postprandial glycemic response, PPGR)을 평가하기 위해 두 차례에 걸쳐 실시되었다. 1차 실험에서는 대상자가 10시간 이상 금식 후 포도당 50 g 또는 탄수화물 20g에 해당하는 시험식품을 섭취하였으며, 섭취 후 2시간 동안 모세혈 당을 측정하여 증가곡선하면적(incremental area under the curve, iAUC)을 산출하였다. 유전자 분석을 위해 참여자로부터 전혈 2 mL를 EDTA 처리 튜브에 채혈하여 냉동 보관 후 DNA를 추출하고 식생활 및 대사 관련 단일염기다형성(single nucleotide polymorphism, SNP)을 포함한 유전형(genotyping) 분석을 수행하였으며, 장내미생물 분석을 위해 참여자는 대변 1 g을 멸균 용기에 수집하여 제출하였으며, 16S rRNA 유전자 서열 분석을 통해 미생물 군집 구성과 다양성(α-, β-diversity)을 산출하였다.

3. 연구 결과

포도당 50 g에 상응하는 식품(포도당, 식빵, 식빵+무가당버터, 식빵+다크초콜릿, 과당)을 섭취한 후 2시간 동안 혈당 변화를 측정하였다. 평균(±SD) PPGR은 포도당 53.3 ± 24.2, 식빵 39.3 ± 16.4, 식빵+무가당버터 32.0 ± 15.2, 식빵+다크초콜릿 31.1 ± 14.8, 과당 12.8 ± 9.7 mg/dL·h로 나타났다. 동일한 탄수화물 함량임에도 포도당에 비해 다른 식품의 혈당 반응은 낮았으며, 이는 식품 내 지방 및 단백질이 위 배출을 지연시켜 혈당 상승을 완화한 결과로 해석된다. 과당은 GI가 낮고 간에서 대사되어 인슐린 분비를 직접적으로 자극하지 않아 가장 낮은 PPGR을 보였다(그림 2).

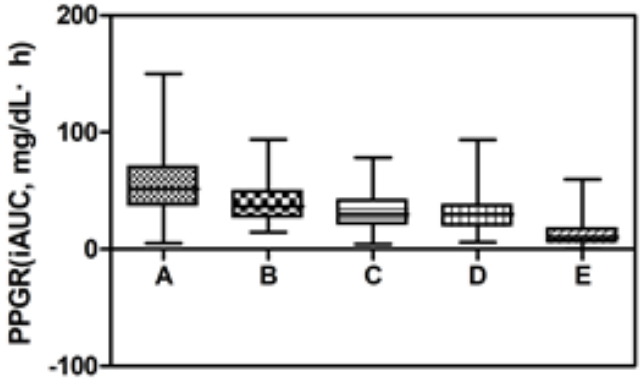


그림 2. 포도당 50 g 및 동일 포도당량 함유 식품 섭취 후 혈당 변화

포도당 및 포도당 50 g에 해당하는 식품 섭취 후 2시간 동안의 혈당 반응(iAUC)과 주요 유전자 변이 간의 연관성을 분석하였다. Pearson 상관분석과 회귀분석 결과, SLC30A8 유전자(rs13266634)는 식빵, 식빵+무가당버터, 식빵+다크초콜릿 섭취 후 혈당 반응과 유의한 음의 상관관계를 보였으며($p<0.05$), MTNR1B 유전자(rs10830963)는 포도당 섭취 후 혈당 반응과 유의한 양의 상관성을 나타냈다($p<0.05$). 반면 GCK(rs4607517) 및 KCNJ11(rs5219) 유전자는 유의한 연관성을 보이지 않았다(표 1).

표 1. 유전자 변이별 포도당 50 g 및 동일 포도당량 함유 식품 섭취 후 혈당 변화

SNP	Food	r	p-value
rs13266634	Glucose	−0.166	0.147
	White bread	−0.225	0.046
	White bread + butter	−0.344	0.002
	White bread + dark chocolate	−0.264	0.018
	Fructose	−0.068	0.553
rs4607517	Glucose	−0.021	0.853
	White bread	0.185	0.100
	White bread + butter	0.174	0.120
	White bread + dark chocolate	0.059	0.603
	Fructose	0.040	0.726
rs10830963	Glucose	0.377	0.001
	White bread	0.082	0.468
	White bread + butter	0.160	0.153
	White bread + dark chocolate	0.162	0.148
	Fructose	−0.001	0.992
rs5219	Glucose	0.033	0.799
	White bread	−0.035	0.783
	White bread + butter	−0.047	0.709
	White bread + dark chocolate	0.037	0.768
	Fructose	−0.083	0.518

포도당 및 포도당 50 g에 해당하는 식품 섭취 후 2시간 동안의 혈당 반응(iAUC)과 장내 주요 균속 간의 연관성을 분석하였다. 평균 상대 abundance 상위 10개 균속을 대상으로 Pearson 상관분석 및 회귀분석을 수행한 결과, Subdoligranulum의 상대 abundance는 포도당 섭취 후 혈당 반응과 유의한 음의 상관관계를 보였으며($p<0.05$), Parabacteroides는 식빵+무가당버터 섭취 시 혈당 반응과 유의한 양의 상관성을 나타냈다($p<0.05$)(표 2).

표 2. 장내미생물 구성별 포도당 50 g 및 동일 포도당량 식품 섭취 후 혈당 변화

Genus	Food	r	p-value
	Glucose	-0.047	0.655
	White bread	-0.085	0.410
Bacteroides	White bread + butter	0.079	0.447
	White bread + dark chocolate	-0.027	0.795
	Fructose	0.090	0.398
	Glucose	0.007	0.950
	White bread	0.085	0.414
Prevotella	White bread + butter	0.013	0.901
	White bread + dark chocolate	-0.036	0.727
	Fructose	-0.041	0.698
	Glucose	0.004	0.968
	White bread	-0.195	0.058
Bifidobacterium	White bread + butter	-0.193	0.061
	White bread + dark chocolate	-0.009	0.928
	Fructose	-0.055	0.603
	Glucose	-0.108	0.299
	White bread	0.058	0.575
Faecalibacterium	White bread + butter	-0.083	0.425
	White bread + dark chocolate	-0.111	0.285
	Fructose	0.049	0.644
	Glucose	0.131	0.209
	White bread	-0.085	0.415
Blautia	White bread + butter	0.013	0.901
	White bread + dark chocolate	0.004	0.973
	Fructose	0.022	0.833
	Glucose	0.073	0.484
	White bread	0.107	0.302
Parabacteroides	White bread + butter	0.281	0.006
	White bread + dark chocolate	0.046	0.660
	Fructose	0.058	0.588

총 24종의 간식을 대상으로, 섭취 전후 각각 2시간 동안 공복 상태를 유지하며 간식 섭취 후의 혈당 변화를 측정하였다. 각 식품 섭취에 따른 혈당 변화 곡선을 기반으로 개인별 식후혈당반응(Postprandial Glycemic Response, PPGR)을 분석하였다(그림 3).

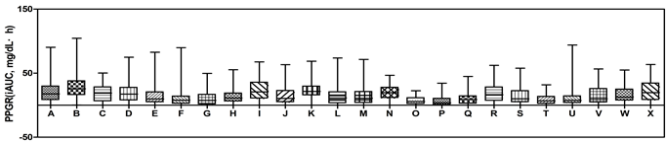


그림 3. 탄수화물 20 g에 해당하는 식품 섭취 후 혈당 변화

특정 유전자 다형성과 탄수화물 20 g을 기준으로 한 식품 섭취 후 혈당 반응 간의 상관성을 평가하기 위해 Pearson 상관분석 및 단순 선형 회귀분석을 실시하였다. 분석에 포함된 유전자는 총 4종(rs13266634, rs4607517, rs10830963, rs5219)이었다. Pearson 상관계수(r)는 -1에서 +1 사이의 값을 가지며, 0에 가까울수록 상관성이 약함을 의미한다. 분석 결과, 대부분의 유전자–식품 조합에서 상관계수의 절대값이 0.200 미만으로 나타나 전반적으로 낮은 수준의 선형 상관성을 보였다. 개별 항목을 살펴보면, rs4607517과 아이스크림 섭취 후 혈당 반응 간의 상관계수는 r=0.208, p=0.059로 다소 높은 상관성을 보였으나, 통계적으로 유의하지 않았다(p>0.05). 또한 rs5219와 씨리얼 섭취 후 혈당 반응 간의 상관계수는 r=0.201, p=0.066으로 역시 유의하지 않았다(표 3).

표 3. 유전자 변이별 탄수화물 20 g 함유 식품 섭취 후 혈당 변화

SNP	Food	r	p-value
	Potatoes	-0.048	0.663
	Sweet potatoes	0.084	0.432
	Granola	-0.050	0.651
	Sweet red bean bread	-0.063	0.572
	Cookies	0.190	0.098
	Bananas	0.140	0.189
	Cherry tomatoes	0.001	0.995
	Apples	-0.118	0.270
	Rice crisps	-0.080	0.459
	Sprite	-0.066	0.556
	Cereal	-0.052	0.636
rs13266634	Ice cream	-0.006	0.958
	Oranges	0.117	0.294
	Orange juice	-0.031	0.773
	Yogurt	0.004	0.973
	Milk	-0.094	0.406
	Chocolate	0.045	0.689
	Cheesecake	0.164	0.119
	Cola	-0.012	0.910
	Tomato	-0.078	0.479
	Grape	-0.113	0.311
	Grape Juice	-0.088	0.446
	Pizza	0.004	0.970
	Rye bread	-0.041	0.707

SNP	Food	r	p-value
	Potatoes	0.107	0.324
	Sweet potatoes	0.023	0.826
	Granola	0.070	0.522
	Sweet red bean bread	-0.040	0.717
	Cookies	-0.042	0.717
	Bananas	-0.057	0.589
	Cherry tomatoes	-0.069	0.529
	Apples	0.155	0.146
	Rice crisps	0.062	0.568
	Sprite	0.213	0.054
	Cereal	0.237	0.029
rs10830963	Ice cream	-0.106	0.341
	Oranges	0.126	0.253
	Orange juice	0.107	0.318
	Yogurt	-0.006	0.957
	Milk	0.023	0.834
	Chocolate	0.135	0.227
	Cheesecake	-0.115	0.276
	Cola	-0.102	0.352
	Tomato	-0.101	0.354
	Grape	-0.042	0.704
	Grape Juice	0.126	0.271
	Pizza	0.012	0.910
	Rye bread	-0.100	0.358

SNP	Food	r	p-value
rs4607517	Potatoes	0.028	0.794
	Sweet potatoes	-0.004	0.970
	Granola	0.177	0.105
	Sweet red bean bread	0.047	0.674
	Cookies	-0.079	0.493
	Bananas	-0.006	0.952
	Cherry tomatoes	0.220	0.042
	Apples	0.106	0.318
	Rice crisps	0.117	0.276
	Sprite	-0.025	0.823
	Cereal	-0.059	0.593
	Ice cream	0.208	0.059
	Oranges	-0.124	0.260
	Orange juice	-0.025	0.812
	Yogurt	0.134	0.213
	Milk	0.030	0.791
	Chocolate	0.102	0.360
	Cheesecake	0.010	0.924
	Cola	0.012	0.912
	Tomato	0.166	0.127
	Grape	0.147	0.183
	Grape Juice	-0.211	0.064
	Pizza	0.082	0.455
	Rye bread	0.063	0.561

SNP	Food	r	p-value
rs5219	Potatoes	0.048	0.658
	Sweet potatoes	-0.014	0.892
	Granola	-0.032	0.769
	Sweet red bean bread	0.056	0.615
	Cookies	0.046	0.686
	Bananas	0.103	0.334
	Cherry tomatoes	0.126	0.247
	Apples	0.113	0.288
	Rice crisps	-0.003	0.977
	Sprite	0.166	0.137
	Cereal	0.201	0.066
	Ice cream	0.130	0.241
	Oranges	-0.006	0.956
	Orange juice	0.162	0.128
	Yogurt	-0.054	0.618
	Milk	-0.027	0.811
	Chocolate	-0.104	0.354
	Cheesecake	-0.002	0.982
	Cola	0.065	0.551
	Tomato	-0.077	0.481
	Grape	-0.115	0.299
	Grape Juice	0.171	0.133
	Pizza	0.036	0.741
	Rye bread	0.189	0.080

일부 식품에서 특정 균속과의 유의한 상관관계가 관찰되었다. Prevotella는 바나나와 우유, Bifidobacterium은 오렌지, Faecalibacterium은 쿠키·우유·피자, Parabacteroides는 사과, Alistipes는 아이스크림과 오렌지주스 섭취에서 각각 양의 상관관계를 보였다. 반면, Sutterella와 Collinsella는 치즈케이크 섭취 시 음의 상관관계를 나타냈다($p<0.05$)(표 4).

표 4. 장내미생물 구성별 탄수화물 20 g 섭취 후 혈당 변화

Genus	Food	r	p-value
Prevotella	Potatoes	0.180	0.098
	Sweet potatoes	-0.091	0.393
	Granola	0.035	0.755
	Sweet red bean bread	-0.098	0.376
	Cookies	0.080	0.486
	Bananas	0.281	0.007
	Cherry tomatoes	0.062	0.573
	Apples	-0.048	0.655
	Rice crisps	-0.018	0.866
	Sprite	0.139	0.217
	Cereal	-0.041	0.712
	Ice cream	-0.008	0.940
	Oranges	0.053	0.633
	Orange juice	0.009	0.936
	Yogurt	0.118	0.275
	Milk	0.245	0.027
	Chocolate	-0.096	0.395
	Cheesecake	-0.011	0.916
	Cola	-0.035	0.749
	Tomato	-0.061	0.580
	Grape	-0.057	0.609
	Grape Juice	-0.092	0.422
	Pizza	-0.036	0.745
	Rye bread	-0.071	0.516

Genus	Food	r	p-value
Faecalibacterium	Potatoes	-0.026	0.809
	Sweet potatoes	0.203	0.055
	Granola	0.020	0.855
	Sweet red bean bread	-0.031	0.782
	Cookies	0.290	0.010
	Bananas	-0.052	0.623
	Cherry tomatoes	0.099	0.366
	Apples	0.032	0.767
	Rice crisps	0.025	0.819
	Sprite	0.095	0.401
	Cereal	0.103	0.351
	Ice cream	0.045	0.688
	Oranges	0.124	0.266
	Orange juice	-0.097	0.365
	Yogurt	0.034	0.754
	Milk	0.283	0.010
	Chocolate	-0.104	0.357
	Cheesecake	0.177	0.094
	Cola	0.059	0.589
	Tomato	0.050	0.648
	Grape	-0.068	0.542
	Grape Juice	0.015	0.898
	Pizza	0.289	0.008
	Rye bread	-0.087	0.427

Genus	Food	r	p-value
Collinsella	Potatoes	0.018	0.866
	Sweet potatoes	-0.165	0.119
	Granola	-0.011	0.923
	Sweet red bean bread	0.045	0.683
	Cookies	-0.162	0.157
	Bananas	-0.077	0.471
	Cherry tomatoes	-0.035	0.752
	Apples	-0.072	0.505
	Rice crisps	0.060	0.582
	Sprite	-0.116	0.301
	Cereal	-0.084	0.446
	Ice cream	-0.060	0.594
	Oranges	-0.031	0.784
	Orange juice	-0.125	0.244
	Yogurt	-0.115	0.288
	Milk	-0.046	0.684
	Chocolate	-0.166	0.139
	Cheesecake	-0.312	0.003
	Cola	-0.032	0.770
	Tomato	-0.084	0.446
	Grape	-0.128	0.249
	Grape Juice	-0.102	0.374
	Pizza	-0.110	0.319
	Rye bread	-0.169	0.119

Genus	Food	r	p-value
Sutterella	Potatoes	0.068	0.534
	Sweet potatoes	-0.101	0.345
	Granola	-0.178	0.106
	Sweet red bean bread	-0.052	0.642
	Cookies	-0.118	0.305
	Bananas	0.006	0.952
	Cherry tomatoes	-0.057	0.607
	Apples	-0.091	0.399
	Rice crisps	-0.131	0.226
	Sprite	0.144	0.200
	Cereal	-0.002	0.987
	Ice cream	-0.024	0.828
	Oranges	0.029	0.797
	Orange juice	-0.094	0.383
	Yogurt	0.011	0.923
	Milk	0.145	0.196
	Chocolate	-0.032	0.779
	Cheesecake	-0.222	0.035
	Cola	-0.019	0.866
	Tomato	0.030	0.784
	Grape	-0.055	0.620
	Grape Juice	-0.126	0.272
	Pizza	-0.124	0.261
	Rye bread	0.010	0.927

5.참고 문헌

[1] Zeevi D, Korem T, Zmora N, Israeli D, Rothschild D, Weinberger A, Ben-Yacov O, Lador D, Avnit-Sagi T, Lotan-Pompan M, Weinberger A, Segal E. 2015. Personalized nutrition by prediction of glycemic responses. Cell. 163(5):1079–1094. https://doi.org/10.1016/j.cell.2015.11.001

[2] Park H, Kim M, Kim H, Seo Y, Cho S, Lee J, Lee S. 2023. Individual variability in postprandial glucose response to macronutrient-balanced meals in healthy Korean adults. Clin Nutr Res. 12(3):201–210. https://doi.org/10.7762/cnr.2023.12.3.201

[3] Cho Y, Lee E, Choi H, Jang S, Kwon H, Kim SH, Park S, Kim HJ. 2024. Association between glycemic variability and dietary and lifestyle factors in healthy Korean adults using continuous glucose monitoring. Clin Metab Sci J. 4:e15. https://doi.org/10.51789/cmsj.2024.4.e15

근육감소증 조기 진단에 있어서 신경근 접합부 바이오마커, C-말단 아그린 단편(CAF)의 역할: 체계적 고찰 및 메타분석

리다 파티마[1], 홍용근[1,2*]

인제대학교 대학원 재활과학과[1], 인제대학교 의생명보건대학 물리치료학과[1,2*]

The role of Neuromuscular Junction Biomarkers, C-terminal Agrin Fragment (CAF) in Early Diagnosis of Sarcopenia: A Systematic Review and Meta-Analysis

Rida Fatima[1], Yonggeun Hong[1,2*]

[1]Department of Rehabilitation Science, Graduate School of Inje University, [2]Department of Physical Therapy, College of Biomedical Sciences & Health, Inje University, Gimhae 50834, Republic of Korea

*yonghong@inje.ac.kr

Abstract

Sarcopenia is a progressive loss of skeletal muscle mass and strength that commonly occurs with aging and chronic diseases. It leads to physical weakness, loss of independence, and an increased risk of falls and mortality. Despite its impact, diagnosing sarcopenia early remains a challenge because existing clinical tools are often costly or unavailable in routine care. This chapter focuses on one biological aspect of sarcopenia — the C-terminal Agrin Fragment (CAF), a circulating marker that reflects the degradation of the neuromuscular junction (NMJ). This research explores how CAF can be used as a biomarker for early detection and monitoring of sarcopenia, summarizing evidence from a systematic review and meta-analysis.

1. Research background

Sarcopenia has emerged as a major health concern in an aging world, affecting nearly half of individuals between 60 and 80 years of age. Traditionally, its diagnosis depends on measurements of muscle mass and strength using MRI, DEXA, or bioelectrical impedance analysis. However, these techniques are expensive, time-consuming, and not easily available in community settings.

Understanding the biological pathways involved in sarcopenia has led to the exploration of blood-based biomarkers. One such promising biomarker is C-terminal Agrin Fragment (CAF). Agrin is a protein essential for maintaining the integrity of the neuromuscular junction — the site where nerves communicate with muscles. With aging and muscle disuse, Agrin is broken down by an enzyme called Neurotrypsin, releasing CAF into the bloodstream.

Elevated CAF levels indicate instability at the NMJ and the early stages of muscle denervation, both of which are central features of sarcopenia. By measuring CAF levels, researchers aim to identify individuals at risk even before noticeable muscle loss occurs.

2. Research methods

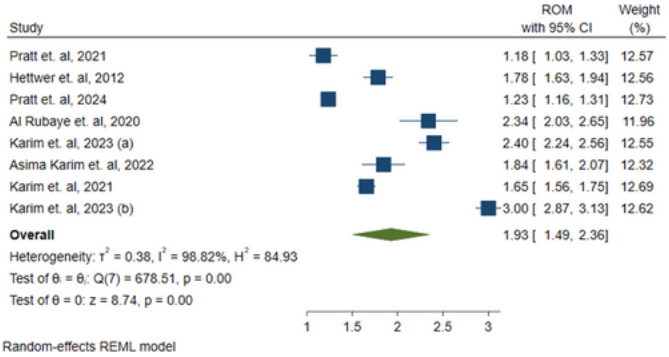
To establish the relationship between CAF and sarcopenia, systematic review and meta-analysis were performed according to PRISMA guidelines. The protocol was registered with the International Prospective Register of Systematic Reviews (PROSPERO: CRD42024551517).

Relevant studies published between 2014 and 2024 were retrieved from major databases including PubMed, EMBASE, ISI Web of Science, and the Cochrane Library. Studies were included if they measured CAF concentrations in the blood of sarcopenic and non-sarcopenic individuals aged 50 years or older.

The quality of the studies was assessed using the Joanna Briggs Institute (JBI) Critical Appraisal Tool. Statistical analysis was conducted using STATA software, where the ratio of mean (ROM) was calculated to compare CAF levels between groups. Subgroup, meta-regression, and sensitivity analyses were performed to explore possible sources of heterogeneity, and publication bias was evaluated using funnel plots and Egger's test.

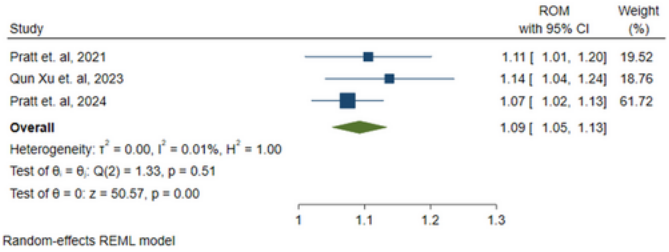
3. Result & conclusion

A total of 17 studies met the inclusion criteria for the review, of which 10 studies were included in the meta-analysis, representing over 3,000 participants worldwide. The results consistently showed that CAF levels were significantly higher in individuals with Sarcopenia compared to those without it. Quantitatively, the effect size indicated that CAF levels were nearly 1.9 times higher in sarcopenic individuals (ROM = 1.93, 95% CI 1.49–2.36).

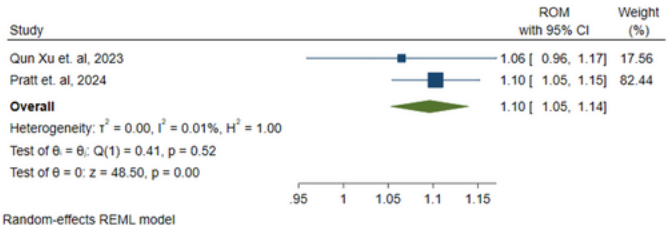


Moreover, elevated CAF levels were closely associated with reduced handgrip strength (HGS) and lower skeletal muscle index (SMI) two major indicators of muscle function.

a. CAF concentration in patients with low HGS compared with normal controls



b. CAF concentration in patients with low SMI compared with normal controls



Interestingly, although sarcopenia is more prevalent with age, the analysis revealed no significant statistical correlation between CAF levels and chronological age. This suggests that increased CAF concentration is more reflective of neuromuscular degradation rather than aging itself.

All included studies demonstrated a low risk of bias and high methodological quality, strengthening the reliability of the findings.

The findings of this review highlight C-terminal Agrin Fragment (CAF) as a valuable biomarker for identifying and monitoring sarcopenia. Elevated CAF levels strongly correlate with muscle weakness and decreased muscle mass, providing a potential tool for early diagnosis, especially in community or clinical settings where advanced imaging is not available. By offering a simple, blood-based indicator of neuromuscular health, CAF can support preventive strategies, guide rehabilitation programs, and improve outcomes in older adults. Future research should focus on establishing standardized reference ranges and exploring how CAF responds to interventions such as exercise, diet, and pharmacological therapy.

4. Acknowledgments

This study was an outcome of the "Gyeongsangnam-do Regional Innovation System & Education (RISE-202502990001 to YH)" Project, supported by the Ministry of Education and Gyeongsangnam-do, Republic of Korea. and Global Korea Scholarship (GKS-CS01220842), Republic of Korea.

5. References

1. A. J. Cruz-Jentoft, F. Landi, S. M. Schneider, et al., "Prevalence of and Interventions for Sarcopenia in Ageing Adults: A Systematic Review. Report of the International Sarcopenia Initiative (EWGSOP and IWGS)," *Age and Ageing* **43**, no. 6 (2014): 748–759.

2. E. Marzetti, R. Calvani, M. Lorenzi, et al., "Serum Levels of C-Terminal Agrin Fragment (CAF) Are Associated With Sarcopenia in Older Hip Fractured Patients," *Experimental Gerontology* **60** (2014): 79–82.

3. J. Pratt, G. De Vito, M. Narici, et al., "Plasma C-Terminal Agrin Fragment as an Early Biomarker for Sarcopenia: Results From the GenoFit Study," *Journals of Gerontology: Series A* **76**, no. 12 (2021): 2090–2096.

4. S. Hettwer, P. Dahinden, S. Kucsera, et al., "Elevated Levels of a C-Terminal Agrin Fragment Identifies a New Subset of Sarcopenia Patients," *Experimental Gerontology* **48**, no. 1 (2013): 69–75.

5. M. Drey, C. Sieber, J. Bauer, et al., "C-Terminal Agrin Fragment as a Potential Marker for Sarcopenia Caused by Degeneration of the Neuromuscular Junction," *Experimental Gerontology* **48**, no. 1 (2013): 76–80.

허혈성 뇌졸중에서 신경 보호 및 실시간 활성산소(ROS) 모니터링을 위한 치료-진단 융합형 구리-프러시안 블루 나노자임

아닉 쿠말 칼 [1], 라제쉬 마두빌라쿠 [1], 홍용근 [1,2,3*]

[1] 인제대학교 일반대학원 디지털항노화헬스케어학, [2] 인제대학교 일반대학원 재활과학, [3] 의생명보건대학 물리치료학과, 인제대학교, 대한민국

Theranostic Cu-Prussian Blue nanozyme for neuroprotection and real-time ROS monitoring in ischemic stroke

Anik Kumar Kar[1], Rajesh Madhuvilakku[1], Yonggeun Hong[1,2,3*]

[1]Department of Digital Anti-aging Healthcare, Graduate School of Inje University, [2]Department of Rehabilitation Science, Graduate School of Inje University, [3]Department of Physical Therapy, College of Biomedical Sciences & Health, Inje University, Gimhae 50834, Korea

Abstract

Ischemic stroke remains a major cause of mortality and long-term disability worldwide, largely driven by oxidative stress and excessive reactive oxygen species (ROS) generation following cerebral ischemia-reperfusion injury. In this study, we evaluated the neuroprotective potential of mesoporous Copper-Prussian Blue nanoparticles (Meso Cu-PB NPs), a potent ROS scavenging nanozyme, in both in vitro and in vivo models of ischemic stroke. In SH-SY5Y cells, Meso Cu-PB NPs exhibited no cytotoxicity up to 40 μg/mL (10, 20 and 40 μg/mL) and effectively protected against $CoCl_2$ induced hypoxic injury in a concentration-dependent manner. In a rat middle cerebral artery occlusion/reperfusion (MCAo/R) model, intranasal administration of Cu-PB NPs immediately after reperfusion significantly reduced infarct volume, improved neurological function, and enhanced locomotor recovery, with higher doses (10, 20 and 50 mg/kg) showing the most pronounced effects. Golgi-cox staining further demonstrated restoration of neuronal density and dendritic complexity, suggesting enhanced neuronal remodeling and plasticity. Building upon these therapeutic findings, a Cu-PB NPs based wearable sensor device is designed to enable real-time electrocatalytic monitoring of ROS in body fluids (e.g., interstitial fluid). This platform aims to provide continuous assessment of oxidative stress dynamics and support data-driven intervention strategies for stroke management. Collectively, this study highlights the potent neuroprotective efficacy of Meso Cu-PB NPs and introduces a next-generation theranostic platform that integrates nanozyme-based therapy with real-time oxidative biosensing to enable targeted neuroprotection in ischemic stroke.

Keywords: Ischemic stroke, Reactive oxygen species (ROS), Mesoporous Copper-Prussian Blue nanoparticles, Neuroprotection, Real-time ROS monitoring

1. Research background

Ischemic stroke, caused by reduced cerebral blood flow, leads to neuronal death and is the second leading cause of death globally by DALYs (Lin et al., 2023). From 1990-2021, stroke incidence rose 70%, mortality 44%, and disability 32%, costing approximately US$890 billion annually and projected to double by 2050 (Feigin et al., 2025). In South Korea, 8,992 new cases occurred in 2021, 98.5% ischemic, totaling 97,326 cases between 2008-2021, with ischemic stroke causing near about 0.88 trillion KRW in productivity loss (Park et al., 2024; Cha et al., 2018). Reperfusion therapies like tPA and thrombectomy are the only established therapeutic approach till now in the stroke research (Li et al., 2022). Re-establishment of blood flow to the brain causes cerebral ischemia reperfusion injury which leads to a series of pathological changes such as oxidative stress, apoptosis, ferroptosis, parthanatos, neuroinflammation, blood brain barrier breakdown which ends with death of neural cells. (Zhang et al., 2024). Among them oxidative stress plays a vital role after the ischemia reperfusion injury by producing reactive oxygen species (ROS) and reactive nitrogen species (RNS) which overpowers the endogenous scavenging activity and play as an important mediator for cerebral injury (Xue et al., 2017). This unavoidable reperfusion injury is the crucial steps in stroke treatment and becoming the prime target for the treatment of ischemic stroke.

Current approaches primarily utilizing various nanoparticle types such as polymeric nanoparticles, liposomes, cerium oxide nanoparticles, and carbon-based nanomaterials to enhance bioavailability and reduce stroke lesions (He et al., 2021). While nanotechnology offers promising avenues for ischemic stroke therapy, existing nanoparticle-based treatments still present limitations. While nanotechnologies hold considerable promise for treating ischemic stroke, current nanoparticle-based therapies encounter notable drawbacks. A primary concern is their potential neurotoxicity, posing significant safety challenges for brain applications. Beyond this critical health aspect, other general limitations include difficulties with nanoparticle aggregation and stability. (Ji et al., 2024). While, mesoporous-copper–Prussian blue nanoparticles (Meso-Cu-Pb NPs), a novel hybrid nanomaterial with superior and synergistic ROS scavenging capabilities. Prussian blue nanoparticles (PBNPs) are already recognized for their excellent biosafety, FDA approval as an antidote which suggest favorably low intrinsic neurotoxicity (He et al., 2021) and robust multi-enzyme mimetic activities, including catalase and superoxide dismutase-like functions, which effectively scavenge ROS in stroke models(Liu et al., 2023) Crucially, the integration of copper ions (Cu^{2+}) into this framework is anticipated to provide a synergistic enhancement in catalytic efficiency, as Cu^{2+} independently exhibits notable catalase-like behavior due to its redox cycling ability

(Kong et al., 2023) This combined catalytic power is expected to offer a more comprehensive and potent reduction of reactive oxygen species compared to single-component nanoparticle systems, directly addressing the multifaceted oxidative stress characteristic of cerebral ischemia-reperfusion injury. Furthermore, this project proposed intranasal delivery of Meso Cu-PB NPs offers a distinct advantage by bypassing the formidable blood-brain barrier, a major impediment for approximately 98% of small-molecule drugs and almost all large-molecule drugs (Jones et al., 2007), facilitating direct and efficient delivery of the therapeutic agent to the ischemic brain while minimizing systemic exposure and potential side effects (Bors et al. 2019). This innovative blend of a highly efficient, dual-action hybrid nanomaterial and a non-invasive intranasal delivery of Meso-Cu-Pb NPs offers a distinct advantage by directly targeting the brain, a strategy that fundamentally differentiates it from many current nanoparticle-based ROS scavenger approaches in ischemic stroke.

Reactive oxygen species (ROS) are central biomarkers of oxidative stress and cellular redox balance, with critical implications in both physiological signaling and pathological damage. The ability to detect and differentiate multiple ROS species, along with key redox partners such as reduced glutathione (GSH), is essential for advancing diagnostic and therapeutic strategies in diseases linked to oxidative dysregulation. Advances in wearable biosensing have enabled real-time, non-invasive tracking of clinically relevant molecules such as glucose and hydrogen peroxide via electrochemical detection in interstitial fluid (Liu et al., 2023). Building on these frameworks, Wang et al. (2024) developed a microfluidic patch (iCares) for continuous monitoring of ROS in wound exudate, and Singh et al., (2023) introduced a microneedle-enabled enzymatic sensor for in situ H_2O_2 detection in plant tissues—demonstrating translational potential for wearable ROS sensing in human clinical care. Together, these studies support the feasibility of a dual-platform innovation: 1) Therapeutic approach by using Meso Cu-PB NPs as ROS scavenger for ischemic stroke treatment (2) a novel, minimally invasive, wearable electrochemical sensor for real-time H_2O_2 monitoring in post-stroke patients-addressing both systemic redox profiling and continuous oxidative stress surveillance at the point of care.

2. Research methods

2.1 Synthesis of mesoporous copper Prussian blue nanozymes (Meso-CuPB nanozyme): The techniques for synthesizing mesoporous Cu-PB nanozymes are summarized from our prior study (Madhuvilakku et al, 2023) as follows:

Step 1: Synthesis of Prussian Blue Microcubes (PBMCs): 131.72 mg of $K_4[Fe(CN)_6]\cdot 3H_2O$ and 3 g of PVP were dissolved in 40 mL DI water containing 0.01 M HCl under stirring for 30 min. The solution was heated at 80°C for 20 h, and the resulting PBMCs were collected by centrifugation (13,000 rpm, 20 min), washed with ethanol and DI water, and dried at 25°C for 24 h.

Step 2: Formation of Mesoporous PBMCs (Meso-PBMCs): 20 mg of PBMCs and 100 mg of PVP were dispersed in 20 mL of 1 M HCl and stirred for 30 min. The mixture was hydrothermally treated at 140°C for 12 h, then centrifuged (13,000 rpm, 20 min), washed, and dried at 25°C for 24 h.

Step 3: Copper Incorporation (Meso-CuPB NPs): 20 mg of Meso-PBMCs, 10 mg of $Cu(NO_3)_2\cdot H_2O$, and 100 mg of PVP were dispersed in 20 mL DI water and stirred for 3 h. Then, 50 mg of $K_4[Fe(CN)_6]$ was added, and the reaction was aged at 80°C for 20 h. The final Meso-CuPB nanozymes were collected by centrifugation, washed with ethanol and DI water, and dried at 25°C.

2.2 Cell culture:

SH-SY5Y cells were maintained in modified eagle medium supplemented with 10% fatal bovine serum and 1% antibiotics (Penicillin, streptomycin) at 37°C in a humidified incubator with 5% CO_2. The media was replaced every 2-3 days. Cells were passaged when they reached approximately 80% confluency.

2.3 Cell Viability Assay:

Cell viability was assessed using the MTT assay SH-SY5Y cells (1×10^4 cells/well) were seeded in 96-well plates and incubated for 24 h at 37°C, followed by treatment with varying concentrations of Cu-Prussian Blue nanozymes (10-160 μg/mL) for another 24 h. For the oxygen-glucose deprivation model, cells were exposed to 300 μM $CoCl_2$ for 24 h (Zhang et al., 2019), then treated with Cu-PB NPs (10-40 μg/mL). Absorbance was measured at 540 nm using a microplate reader.

2.4 Establishment of the transient middle cerebral artery occlusion (tMCAo) model:

Transient cerebral ischemia was induced using the intraluminal suture method (Lee et al., 2014). Rats were anesthetized with 3% isoflurane (30% O_2, 70% N_2O) via mechanical ventilation (Harvard Apparatus, USA). Following a midline neck incision, the CCA, ECA, and ICA were exposed, and the STA and OA were cauterized. A silicone-coated monofilament (Doccol Corp., USA) was inserted through the ECA into the ICA (~18 mm) to occlude the MCA for 90 min, then withdrawn to allow reperfusion. The incision was sutured, and rats were housed individually post-surgery.

2.5 Experimental groups:

Rats were randomly divided into eight groups: Sham, MCAo/R, 1mg/kg Cu-Pb, 2 mg/kg Cu-Pb, 5 mg/kg Cu-Pb, 10 mg/kg Cu-Pb, 20 mg/kg Cu-Pb, 50 mg/kg Cu-Pb. In the Sham group, only a skin incision was made without inducing ischemia. The MCAo/R group underwent transient middle cerebral artery occlusion (tMCAo), followed by intranasal administration of normal saline at the time of reperfusion. For the treatment groups, Cu-PB NPs were intranasally administered at the time of reperfusion in their respective doses.

2.6 Measurement of infarct volume:

Brain infarct volume was assessed 24 h after tMCAo using 2% TTC. Brains were harvested, rinsed with PBS, and coronally sectioned at 2 mm thickness (+4 mm to −6 mm) using a rat brain matrix. Slices were incubated in 2% TTC at 37°C for 15 min, and infarct areas were analyzed using ImageJ. Infarct volume (%) was calculated by using the following formula: Percentage of the lesioned volume (%) = (Volume of the contralateral hemisphere- volume of the non-infarcted tissue in the ipsilateral hemisphere) / Volume of the contralateral hemisphere × 100%.

2.7 Neurological behavioral deficit assessment:

To assess the motor and sensory nerve impairment, we performed modified neurological severity score (mNSS) behavioral test 24 hours after the tMCAo surgery (Lee et el, 2014). The scoring scale varies from 0 (absence) to 18 (severe).

2.8 Open field test:

Locomotor activity was assessed 24 h after MCAo. Rats were placed in the center of an open field (1 m × 1 m) for 10 min in a light- and noise-controlled room. Movement was recorded by an overhead camera, and total distance traveled (cm) was analyzed using automated tracking software.

2.9 Golgi-cox staining and Sholl analysis:

Ipsilateral brain tissue was collected 24 h after MCAo and processed

using the FD Rapid GolgiStain™ Kit. Samples were immersed in Solutions A and B for 2 weeks, followed by Solution C for 1 week. Brains were sectioned at 100 µm using a vibratome, mounted on gelatin-coated slides, and air-dried overnight. Sections were then sequentially treated with distilled water, Solutions D and E, dehydrated with graded ethanol (50–100%), cleared in xylene, and coverslipped with permount. Neuronal images were captured using an Olympus microscope, and dendritic complexity was quantified by Sholl analysis in ImageJ.

2.10 Wearable electrochemical sensor patch for real-time H_2O_2 monitoring

A flexible, multilayered wearable biosensor patch is designed for real-time detection of hydrogen peroxide (H_2O_2) in interstitial fluid (ISF) following ischemia-reperfusion brain injury in rats.

Device Structure and Function:

The patch adheres to the skin and integrates:

- Microneedle array: Polyurethane microneedles (600-800 µm height, 20-50 µm tip, 200-300 µm base) fabricated by soft lithography enable painless, minimally invasive ISF extraction.
- Electrode layer: A three-electrode configuration (working, reference, and counter electrodes) detects H_2O_2 via electrochemical reactions. The working electrode is modified with Cu-Prussian Blue (Cu-PB), providing high catalytic activity and stability. The reference electrode (Ag/AgCl) maintains potential, and the counter electrode (carbon) completes the circuit.
- Capillary-active and hydrogel interface: Ensures uniform ISF contact, hydration, and stable signal transmission without complex microfluidics.
- Nafion membrane: Acts as a selective barrier, allowing H_2O_2 diffusion while blocking interfering species and stabilizing the sensing surface.
- Potentiostat circuit: Applies controlled potential (+0.3–0.6 V vs Ag/AgCl) to drive H_2O_2 redox reactions and converts resulting current into digital signals proportional to H_2O_2 concentration.
- Microcontroller: Digitizes, filters, and processes signals, converting them into quantitative concentration data.
- Bluetooth Low Energy (BLE) module: Enables real-time wireless transmission of data to external devices.
- Power source: A thin, flexible lithium battery powers all components for up to 72 h continuous operation.

This integrated system enables continuous, non-invasive, real-time monitoring of oxidative stress through ISF H_2O_2 levels in rodents model of stroke.

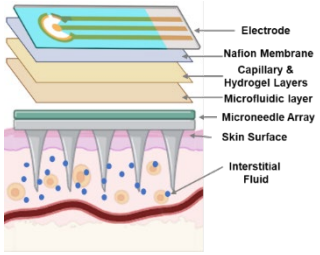


Figure 1: Proposed design of real time ROS monitoring sensor patch

2.11 Statistical analysis:

All data are expressed as mean ± standard deviation (SD). Statistical analysis was performed using t-test (unpaired two tailed) and one-way ANOVA followed by Tukey's post hoc test to determine significance, using GraphPad Prism software. Statistical significance was defined as a p-value below 0.05.

3. Results

3.1 Cytotoxic effect of Cu-PB NPs on SH-SY5Y cells:

To evaluate the potential cytotoxicity of Cu-PB nanoparticles, SH-SY5Y cells were treated with different concentrations 10, 20, 40, 80,160 µg/mL of Cu-Pb NPs for 24 h, and cell viability was assessed using the MTT assay. As shown in Figure 2A, Cu-PB nanoparticles exhibited no significant cytotoxic effect up to 40 µg/mL compared with the healthy control group. However, a gradual decrease in cell viability was observed at higher concentrations (80 µg/mL and 160 µg/mL), suggesting that Cu-PB nanoparticles are biocompatible and safe at concentrations below 40 µg/mL for subsequent experiments. Thus 10, 20 and 40 µg/mL concentration is further used to check the neuroprotective effects of Cu-Pb NPs on hypoxic condition.

3.2 Cu-PB nanoparticles protect SH-SY5Y cells against $CoCl_2$ induced hypoxic condition

To investigate the neuroprotective potential of Cu-PB nanoparticles under hypoxic stress, SH-SY5Y cells were exposed to 300 µM $CoCl_2$ for 24 h to mimic oxygen-glucose deprivation, followed by treatment with Cu-PB nanoparticles (10, 20, and 40 µg/mL). As shown in Figure 2B, $CoCl_2$ treatment markedly reduced cell viability compared with the healthy control ($p < 0.001$). Treatment with Cu-PB nanoparticles markedly improved cell survival in a concentration-dependent manner, indicating that Cu-PB effectively mitigates $CoCl_2$-induced cytotoxicity and provides neuroprotection to SH-SY5Y cells.

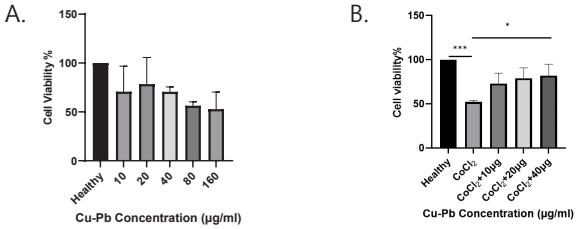


Figure 2: A) Cytotoxicity of Cu-PB NPs in SH-SY5Y cells. B) Neuroprotective roles of Cu-Pb NPs in SH-SY5Y cells against $CoCl_2$ stimulated hypoxia condition.

3.3 Meso-Cu-Pb NPs treatment attenuates the ischemia reperfusion injury:

Cu-PB NPs (1-50 mg/kg) were administered intranasally at reperfusion following 90 min of MCAo. The Sham group received only a skin incision, and the MCAo/R group received saline. After 24 h, brains were collected for infarct volume measurement using 2% TTC staining. The MCAo/R group showed a marked increase in infarction compared to Sham, while Cu-PB NPs treatment dose-dependently reduced infarct volume. Significant reductions were observed at higher doses (10, 20, and 50 mg/kg), whereas lower doses (1 and 2 mg/kg) showed modest effects (Fig. 3A, B).

We performed the Modified neurological severity scale (mNSS) to assess the neurological behavioral deficit. MCAo/R groups showed significant increase of neurological behavioral deficit compare to sham group. But with the treatment of Meso Cu-PB NPs showed significantly improvement of neurological function compare to MCAo/R group indicating neuroprotective effect of meso Cu-Pb NPs. (Fig. 3C)

Open field test assessed locomotor activity after ischemic stroke. The MCAo/R group showed markedly reduced mobility, indicated by shorter travel distance. Low doses (1, 2, and 5 mg/kg) of Cu–PB NPs showed no significant improvement, whereas 10 mg/kg treatment improved mobility. Higher doses (20 and 50 mg/kg) significantly

enhanced locomotor activity compared to the MCAo/R group (Fig. 3D).

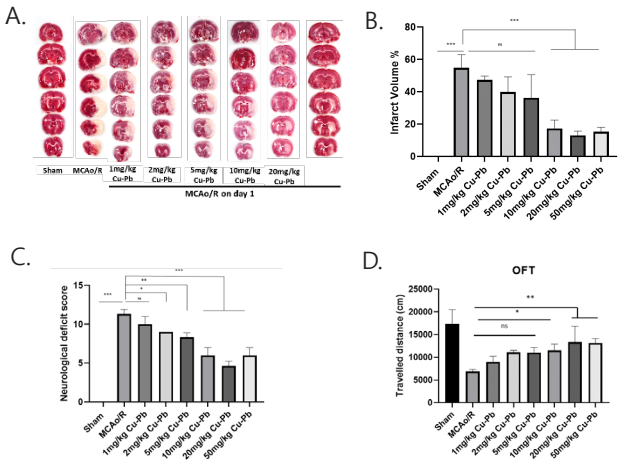


Figure 3: Meso Cu-Pb NPs treatment attenuates cerebral infarction and neurological dysfunction in MCAo/R rats. (A) Representative images of TTC stained brain sections 24 h after MCAo/R. (B) The percentage of infarct volume was calculated by image J software and statistically analyzed, n=3. (C) Quantification of neurological deficit score, n=3. (D) Representation of the total travelled distance (cm) in open field test.

3.4. Assessment of dendritic remodeling and neural density by Golgi-Cox staining:

Golgi staining was performed to measure the neuronal plasticity across the different treatment groups (Fig. 4) In the MCAo/R group showed the loss of dendritic intersection and neuronal density compared to the sham group. Which is restored by the different treatment groups of Cu-PB NPs. Moderate to higher dosage of treatment demonstrates the increase of dendritic intersection and neuronal density. This indicate that therapy with Cu-PB NPs was able to notably improve the dendritic remodeling and neural plasticity in the injured brain.

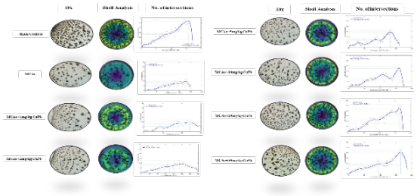


Figure 4: Golgi-cox staining and Sholl analysis provided quantitative assessment of dendritic intersection and neural density following MCAo and treatment with Cu-PB.

4. Acknowledgments

This study was an outcome of the “Gyeongsangnam-do Regional Innovation System & Education (RISE-202502990001 to YH)” Project, supported by the Ministry of Education and Gyeongsangnam-do, Republic of Korea.

5. References

1. Bors, L. A., & Erdő, F. (2019). Overcoming the blood–brain barrier. challenges and tricks for CNS drug delivery. *Scientia Pharmaceutica*, *87*(1), 6.

2. Cha, Y. J. (2018). The economic burden of stroke based on South Korea’s national health insurance claims database. *International journal of health policy and management*, *7*(10), 904.

3. Feigin, V. L., Brainin, M., Norrving, B., Martins, S. O., Pandian, J., Lindsay, P., ... & Rautalin, I. (2025). World Stroke Organization: Global Stroke Fact Sheet 2025. *International Journal of Stroke*, 17474930241308142.

4.He, W., Zhang, Z., & Sha, X. (2021). Nanoparticles-mediated emerging approaches for effective treatment of ischemic stroke. *Biomaterials*, *277*, 121111.

5. Ji, P., Xu, Q., Li, J., Wang, Z., Mao, W., & Yan, P. (2024). Advances in nanoparticle-based therapeutics for ischemic stroke: Enhancing drug delivery and efficacy. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, *180*, 117564.

6. Jones, A. R., & Shusta, E. V. (2007). Blood–brain barrier transport of therapeutics via receptor-mediation. *Pharmaceutical research*, *24*, 1759-1771.

7. Kong, J., Zou, R., Chu, R., Hu, N., Liu, J., Sun, Y., ... & Wang, Y. (2023). An ultrasmall Cu/Cu2O nanoparticle-based diselenide-bridged nanoplatform mediating reactive oxygen species scavenging and neuronal membrane enhancement for targeted therapy of ischemic stroke. *ACS nano*, *18*(5), 4140-4158.

8. Lee, S., Lee, M., Hong, Y., Won, J., Lee, Y., Kang, S. G., ... & Hong, Y. (2014). Middle cerebral artery occlusion methods in rat versus mouse models of transient focal cerebral ischemic stroke. *Neural regeneration research*, *9*(7), 757-758.

9. Li, X., Han, Z., Wang, T., Ma, C., Li, H., Lei, H., ... & Chen, G. (2022). Cerium oxide nanoparticles with antioxidative neurorestoration for ischemic stroke. *Biomaterials*, *291*, 121904

10. Lin, W., Zhao, X. Y., Cheng, J. W., Li, L. T., Jiang, Q., Zhang, Y. X., & Han, F. (2023). Signaling pathways in brain ischemia: Mechanisms and therapeutic implications. *Pharmacology & Therapeutics*, 108541

11. Liu, Y., Yang, L., & Cui, Y. (2023). Transdermal amperometric biosensors for continuous glucose monitoring in diabetes. *Talanta*, *253*, 124033.

12. Madhuvilakku, R., Hong, Y., Nila, I. S., Villagra Moran, V. M., Subramanian, P., Khan, Z. A., ... & You, S. G. (2023). Quantification of neuronal cell-released hydrogen peroxide using 3D mesoporous copper-enriched prussian blue microcubes nanozymes: a colorimetric approach in real time and anticancer effect. *ACS Applied Materials & Interfaces*, *15*(48), 55466-55485.

13. Park, T. H., Cho, Y. J., Park, J. M., Lee, K., Lee, M., Lee, J., ... & Bae, H. J. (2024). Contemporary statistics of acute ischemic stroke and transient ischemic attack in 2021: insights from the CRCS-K-NIH registry. *Journal of Korean Medical Science*, *39*(34).

14. Singh, N., Zhang, Q., Xu, W., Whitham, S. A., & Dong, L. (2025). A Biohydrogel-Enabled Microneedle Sensor for In Situ Monitoring of Reactive Oxygen Species in Plants. *ACS sensors*, *10*(3), 1797-1810.

15. Wang, C., Fan, K., Sani, E. S., Lasalde-Ramírez, J. A., Heng, W., Min, J., Solomon, S. A., Wang, M., Li, J., Han, H., Kim, G., Shin, S., Seder, A., Shih, C.-D., Armstrong, D. G., & Gao, W. (2024). A microfluidic wearable device for wound exudate management and analysis in human chronic wounds. *Science Translational Medicine*, 16(726), eadt0882.

16. Xue, Y., Qu, Z., Fu, J., Zhen, J., Wang, W., Cai, Y., & Wang, W. (2017). The protective effect of astaxanthin on learning and memory deficits and oxidative stress in a mouse model of repeated cerebral ischemia/reperfusion. *Brain research bulletin*, *131*, 221-228.

17. Zhang, M., Liu, Q., Meng, H., Duan, H., Liu, X., Wu, J., ... & Yuan, J. (2024). Ischemia-reperfusion injury: molecular mechanisms and therapeutic targets. *Signal transduction and targeted therapy*, *9*(1), 12.

18. Zhang, M., Liu, Q., Meng, H., Duan, H., Liu, X., Wu, J., ... & Yuan, J. (2024). Ischemia-reperfusion injury: molecular mechanisms and therapeutic targets. *Signal transduction and targeted therapy*, *9*(1), 12.

19.Zhang, K., Tu, M., Gao, W., Cai, X., Song, F., Chen, Z., ... & Tian, M. (2019). Hollow prussian blue nanozymes drive neuroprotection against ischemic stroke via attenuating oxidative stress, counteracting inflammation, and suppressing cell apoptosis. *Nano letters*, *19*(5), 2812-2823.

의료초음파

좌장: 윤창한(인제대학교), **박진형**(성균관대학교)

11월 6일 (목) **일강원 104 (15:00–16:00)**

이병철(KIST)
Invited 의료용 초음파 소자의 일회용 및 착용형 개념

조성희(POSTECH)
Invited 투명 초음파 트랜스듀서의 최근 연구 동향

이동현(POSTECH)
Multiparametric Ultrasound Imaging for Diagnosing and Monitoring Steatotic Liver Disease

김명찬(DGIST)
Verasonics Vantage 256 시스템을 위한 GPU Direct 기반 실시간 초음파 영상화 파이프라인 설계

류지승(연세대학교)
Development of a Noninvasive Machine Learning Ensemble Model for Predicting Renal Allograft Rejection Using Integrated Ultrasound and Clinical Variables



이병철 / Lee, Byung Chul
책임연구원 / Principal Researcher
한국과학기술연구원 / Korea Institute of Science and Technology (KIST)
기타소속: 과학기술연합대학원대학교 / University of Science and Technology (UST),
경희대학교 / Kyung Hee University

의료용 초음파 소자의 일회용 및 착용형 개념
Disposable and Wearable Concept of Medical Ultrasound Devices

Abstract

Ultrasound remains a core modality in medical diagnostics and is gaining traction in therapeutic applications. Yet, conventional probes are bulky, rigid, and costly, limiting their use in continuous or long-duration settings. Advances in soft electronics have led to thin, flexible, and stretchable wearable ultrasound devices that overcome these barriers. Among them, wearable CMUT (capacitive micromachined ultrasonic transducer) technologies—integrating soft materials with semiconductor fabrication—enable low-cost, disposable solutions while eliminating toxic lead found in traditional piezoelectric transducers. This talk introduces a novel CMUT patch powered by a silicon nanocolumn architecture, highlighting its structural advantages and clinical adaptability. Key aspects such as device form factor, performance, and disposability are discussed with a focus on scalable, eco-friendly medical implementation.

Brief Biosketch

Byung Chul Lee received the B.S. degree (Summa Cum Laude) from Korea University, the M.S. degree from Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), and the Ph.D. degree from Stanford University, all in electrical engineering, in 2003, 2005, and 2015, respectively. His research interests include MEMS/NEMS technology for diverse biomedical applications such as bioelectronics, biosensors, micro-nanofabrications, and novel micromachined ultrasonic transducers and their integrated systems. He was awarded the Presidential Citation, the Minister of Science and ICT Award, and the NST Chairman Award all in 2025.



(국문/영문)이름: 조성희 / Seonghee Cho
(국문/영문)직위: 연구조교수/Research Assistant Professor
(국문/영문)소속: 전자전기공학과/ Department of Electrical Engineering
(국문/영문)기타소속:

초음파 트랜스듀서의 최근 연구 동향

Recent advances in transparent ultrasound transducers for multimodal imaging

Abstract

Optical imaging offers high-resolution functional visualization but is limited by its shallow penetration depth due to tissue scattering. Ultrasound imaging provides safe, deep structural imaging but with lower resolution and no functional contrast. Combining the two yields complementary benefits, yet earlier integration faced challenges such as resolution loss, SNR degradation, and bulky designs. Transparent ultrasound transducers (TUTs) address these issues by enabling light and sound to share a single aperture, reducing mismatch and system complexity. In this talk, I will introduce the motivation for optical–ultrasound fusion, highlight recent TUT-based advances, and discuss future directions toward compact and clinically translatable multimodal imaging systems.

.

Brief Biosketch

조성희 박사는 2022 년 포항공과대학교에서 광음향/초음파 이중모드 영상 연구로 박사학위를 받았으며, 현재 전자전기공학과 연구조교수로 재직 중입니다. 주요 연구 분야는 투명 초음파 트랜스듀서, 초음파·광음향 영상, 실시간 영상 및 임상 적용이며, 최근 투명 초음파 트랜스듀서 연구를 활발히 진행하고 있습니다.

Seonghee Cho received his Ph.D. in Interdisciplinary Bioscience and Bioengineering from Pohang University of Science and Technology (POSTECH), South Korea, in 2022. He is currently a research assistant professor in the Department of Electrical Engineering at POSTECH. His research focuses on transparent ultrasound transducers, ultrasound and photoacoustic imaging, real-time imaging, and clinical translation, with ongoing active research on the development of transparent ultrasound transducers.

지방간 질환의 진단 및 모니터링을 위한 다중 지표 초음파 영상

이동현[1], 허진석[1], 문현지[1], 오동현[1*], 안용주[1*], 김철홍[1*]

포항공과대학교 IT융합공학과, 전자전기공학과, 의과학전공, 기계공학과, 의료기기 혁신센터[1]

Multiparametric ultrasound imaging for diagnosing and monitoring steatotic liver disease

Donghyun Lee[1], Jinseok Heo[1], Hyeonji Mun[1], Donghyeon Oh[1*], Yongjoo Ahn[1*], Chulhong Kim[1*],

Departments of Convergence IT Engineering, Electrical Engineering, Medical Science and Engineering, Mechanical Engineering, and Medical Device Innovation Center, Pohang University of Science and Technology (POSTECH), Pohang, Republic of Korea[1]

[*]lumin9219@postech.ac.kr; ahnyj@postech.ac.kr; chulhong@postech.edu.

Abstract

Ultrasound imaging is widely used for diagnosing steatotic liver disease (SLD), the most prevalent chronic liver disease, with an increasing global incidence. However, its clinical utility remains limited due to operator-dependent variability and suboptimal diagnostic performance. Given the hemodynamic impairment associated with SLD, detecting vascular alterations may offer additional value to conventional imaging approaches focused on tissue characteristics. Ultrafast Doppler imaging (UFD) provides markedly enhanced vessel detection sensitivity compared with conventional Doppler ultrasound, owing to its ultrafast frame rate. Furthermore, volumetric UFD acquisition through sequential scanning enables comprehensive visualization and quantitative assessment of the overall hepatic vascular network. Here, we integrated ultrafast Doppler imaging (UFD) with attenuation imaging (ATI) and acoustic structure quantification (ASQ), both quantitative ultrasound techniques, to establish a multiparametric hepatic ultrasound imaging system capable of in vivo scanning in rats for longitudinal monitoring SLD. Volumetric vascular images obtained using UFD revealed a reduction in the hemodynamic index, fractional moving blood volume (FMBV), and an elevation in the structural index, sum-of-angles metric (SOAM), during SLD progression. This integrated ultrasound platform, providing both tissue- and vessel-level information, offers diagnostic and monitoring capabilities for SLD and may be extendable to other liver disorders such as alcoholic liver disease, hepatitis B, and cirrhosis.

1. 연구 배경

지방간질환(SLD, steatotic liver disease)의 유병률은 생활 박식의 변화와 비만과 당뇨병 등 대사질환의 증가로 인해 꾸준히 상승하고 있다 [1]. SLD는 초기에는 단순 지방증(steatosis)으로 나타나지만, 이후 지방간염으로 진행되고 더 나아가 섬유화나 간경변증과 같은 비가역적 상태로 악화될 수 있어 조기 진단의 중요성이 강조된다. 간생검은 SLD 진단의 표준 방법으로 간주되지만, 침습성과 샘플링 오류에 취약하다는 한계로 인해 영상 기반 진단 방법의 의존도가 점차 높아지고 있다.

초음파 영상은 SLD 평가를 위한 주요 진단 수단으로, 기존 B-모드 초음파가 일상적인 선별검사 도구로 널리 사용되고 있다. 또한, 최근에는 간내 지방증과 관련된 조직 특성을 정량화할 수 있는 감쇠영상(ATI, attenuation imaging)과 음향구조정량(ASQ, acoustic structure quantification) 등의 정량적 영상 기술의 발전은 초음파 영상의 진단적 활용성을 확장시키고 있다. 그러나 초음파 영상은 한정된 영상 범위와 간내 지방 함량을 직접 정량화할 수 없는 한계로 인해, 임상적으로 실질적 표준으로 여겨지는 자기공명영상(MRI)과 비교했을 때 진단적 제약이 존재한다.

본 연구에서는 미세혈관 평가가 가능한 초고속 도플러(UFD, ultrafast Doppler) 초음파 영상을 기존 정량적 초음파 기법(ATI, ASQ)과 통합하여 초음파 영상의 진단 성능을 향상시키고자 한다 [2]. SLD는 초기 단계부터 간소엽 내 내피세포 기능장애를 수반하기 때문에, 이에 연관된 미세혈관 변화를 탐지하는 것은 SLD 진단에 새로운 관점을 제공할 수 있다 [3].

2.연구 방법

초음파 데이터는 프로그래머블 초음파 영상 플랫폼(Verasonics, 미국)에 연결된 18 MHz, 128-채널 선형 배열 트랜스듀서(Vermon, 프랑스)를 사용하여 획득하였다. 11개의 각도에서 평면파(planewave) 송신이 실시간 B-모드 초음파 기반 자동 호흡 게이팅(automated respiratory gating)에 의해 트리거되었으며, 1000 Hz의 프레임 속도로 총 600개의 초음파 프레임이 획득되었다. 이 영상 획득 절차는 3D 볼륨 이미징을 위해 탐촉자를 기계적으로 선형 이동시키며 반복 수행되었다.

UFD의 경우, 연속된 안정적인 초음파 프레임을 UFD 처리 과정을 통해 단면 파워 도플러(PD, power Doppler) 영상으로 변환하였다. B-모드 초음파 프레임 간 오차(interframe error)를 기준으로 선택된 150개의 앙상블 프레임에서, 특이값 분해(SVD, singular value decomposition) 기반 클러터 필터링을 이용하여 조직 신호를 억제하고 혈류 신호를 추출하였다. 이후 이러한 프레임들의 파워 평균화를 통해 PD 프레임을 생성하였다. 마지막으로, 연속적인 단면 PD 슬라이스의 혈관 모델링을 통해 3차원 PD 및 혈관 스켈레톤 영상을 재구성하여, 혈관의 부피적 시각화 및 정량화를 가능하게 하였다.

ATI의 경우, B-모드 초음파 영상에서 관심 영역을 설정한 뒤, 해당 영역의 원시 초음파 데이터를 분석하였다. 선택된 영역 내 감쇠를 정량화하기 위해 스펙트럼 시프트 기법이 사용되었다. 축 방향을 따라 동일 깊이에서 다중 윈도우를 이용해 파워 스펙트럼을 계산하고, 각 깊이에서 중심 주파수를 추출하였다. 이후 깊이에 따른 중심 주파수의 이동으로부터 감쇠값을 추정하였다.

ASQ 또한 B-모드 초음파를 이용해 관심 영역을 정의한 뒤, 해당 영역의 원시 초음파 데이터를 분석하였다. 이 관심 영역 내에서 더 작은 하위 관심 영역들을 샘플링하여 초음파 신호의 분포를 평가하였다. 마지막으로, 이러한 신호

분포가 레일리(Rayleigh) 분포로부터 얼마나 편차를 보이는지를 분석하여 간조직의 이질성을 정량화하였다.

SLD는 메티오닌–콜린 결핍 식이를 통해 Wistar 랫드의 간내 지방 축적을 유도함으로써 생성하였다. 질병 진행은 표준 사료를 급여한 대조군과 비교하며 모니터링하였다. 실험 동물에 대한 모든 절차는 포항공과대학교 동물실험윤리위원회(POSTECH-2023-0099, 2023년 8월 21일 승인)의 심사를 거쳤으며, 해당 위원회의 승인을 엄격히 준수하였습니다.

3. 연구 결과

생체 내 간 횡단면 UFD 영상은 좌외엽(left lateral)과 좌중엽(left median) 등 간엽의 경계를 명확히 구분하여 구획 식별을 가능하게 하였다 (그림. 1 좌측). 좌외엽은 영상 획득의 표적 영역으로 설정되었으며, 단면 PD 영상에서 분할되었다. 연속적인 단면 PD 영상을 기반으로 재구성된 3차원 PD 영상은 간의 혈관 네트워크를 정밀한 세부 구조로 시각화하였으며 (그림. 1 우측), 특히 단면 PD 영상에서는 식별되지 않던 입체 방향의 혈관 연결성을 명확히 보여주었다.

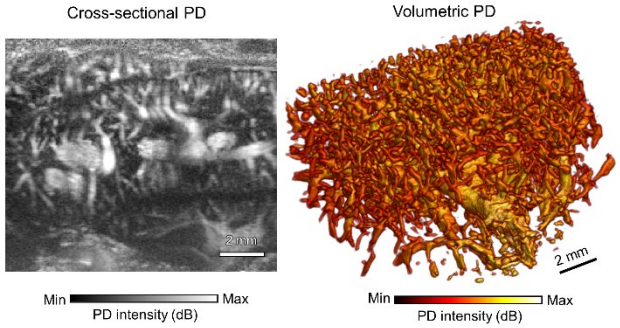


그림 1. 단면 및 3차원 PD 영상.

3차원 UFD 영상은 SLD의 진행 양상을 성공적으로 포착하였다. 메티오닌–콜린 결핍 식이를 통한 주차별 질병 유도 과정은 지방 축적의 조직병리학적 정량화를 통해 지방증 등급으로 평가되었다. 이러한 SLD의 점진적 진행은 3차원 PD 영상에서도 동일하게 확인되었다 (그림. 2). 정상 상태에 비해 SLD 상태의 간은 혈관 분포가 감소하고 혈관의 만곡이 증가하였으며, 이러한 변화는 높은 지방증 등급에서 더욱 두드러졌다.

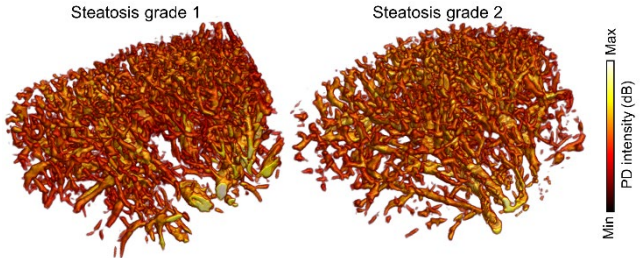


그림 2. 지방증 등급에 따른 3차원 PD 영상.

SLD 유도 8주차에는 정상군과 SLD군의 구분이 특히 뚜렷하게 나타났다 (그림. 3). SLD 상태의 랫드 간에서는 혈관 밀도 감소와 더불어 혈관 가지의 만곡이 뚜렷하게 증가하였다. 이러한 변화는 8주차의 정량적 혈관 지표에서도 반영되었으며, 여기에는 혈류역학적 혈관 지표인 혈관 관류 정도와 구조적 혈관 지표인 각도합 지표가 포함되었다. SLD 8주차에서 혈관 부피 점유율은 정상 상태보다 낮은 값을 보였고, 각도합 지표는 정상보다 높은

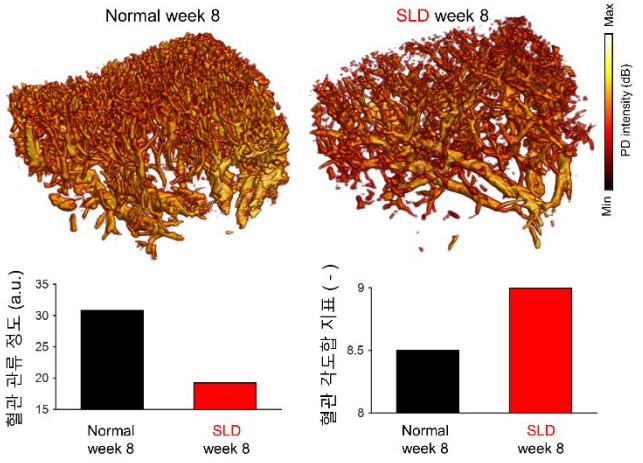


그림 3. 정상 및 SLD 8주차 3차원 PD 영상과 정량 지표. 값을 나타냈다.

3차원 UFD 영상은 랫드 간의 미세혈관 구조를 정밀하게 묘사하고, SLD와 관련된 혈관 변화를 시각화 및 정량화할 수 있게 하였다. SLD 상태에서는 혈관 분포가 감소하고 혈관 가지의 만곡이 증가하였으며, 이러한 변화는 각각 낮아진 혈관 부피 점유율과 높아진 각도합 지표로 반영되었다. UFD는 혈관 정보를 제공하면서 조직 특성을 정량화할 수 있는 기존 정량적 초음파 영상 기법(예: ATI, ASQ)과 상호보완적으로 활용될 수 있을 것이며, SLD를 비롯한 다양한 간질환에의 향후 적용 가능성이 높다.

4. Acknowledgements

본 연구는 교육부의 재원으로 한국연구재단 (NRF) 의 Basic Science Research Program (2020R1A6A1A03047902), 과학기술정보통신부 (MSIT) 의 재원으로 한국연구재단 (NRF) 지원 (2023R1A2C3004880), 과학기술정보통신부 (MSIT) 의 재원으로 Commercialization Promotion Agency for R&D Outcomes (COMPA) 의 지원 (No. 2710006567), 보건복지부의 재원으로 한국보건산업진흥원 (KHIDI) 을 통한 Korea Health Technology R&D Project의 지원 (RS-2024-00512879), 그리고 BK21 FOUR (Fostering Outstanding Universities for Research) 사업의 지원을 받았음.

5.참고 문헌

[1] Younossi, Z. M., Golabi, P., Paik, J. M., Henry, A., Van Dongen, C., & Henry, L. (2023). The global epidemiology of nonalcoholic fatty liver disease (NAFLD) and nonalcoholic steatohepatitis (NASH): a systematic review. Hepatology, 77(4), 1335-1347.

[2] Oh, D., Lee, D., Heo, J., Kweon, J., Yong, U., Jang, J., ... & Kim, C. (2023). Contrast agent-free 3D Renal ultrafast doppler imaging reveals vascular dysfunction in acute and diabetic kidney diseases. Advanced Science, 10(36), 2303966.

[3] Hammoutene, A., & Rautou, P. E. (2019). Role of liver sinusoidal endothelial cells in non-alcoholic fatty liver disease. Journal of hepatology, 70(6), 1278-1291.

Verasonics Vantage 256 시스템을 위한 GPU Direct 기반 실시간 초음파 영상화 파이프라인 설계

김명찬[1*] , 최수영[2,] , 유재석[2]

대구경북과학기술원 학제학과 인공지능전공[1] ,대구경북과학기술원 로봇기계공학과[2]

A GPU Direct–Enabled Real-Time Ultrasound Imaging Pipeline for the Verasonics Vantage 256 System

MyeongChan Kim[1*] , Suyoung Choi[2] , Jaesok Yu[2]

Department of Interdisciplinary Studies of Artifical Intelligence, DGIST, Korea[1], Department of Robotics and Mechatronics Engineering, DGIST, Korea[2]

[*]kimmc1228@dgist.ac.kr

Abstract

Real-time ultrasound Doppler imaging is essential for visualizing blood flow in clinical applications such as transplant monitoring and neurovascular assessment. However, the full Doppler imaging pipeline including data acquisition, transfer, beamforming, clutter filtering, and image reconstruction remains computationally intensive and memory-bound, limiting real-time performance. Conventional systems suffer from CPU–GPU data transfer latency and sequential processing, leading to structural bottlenecks, especially when long temporal ensembles (50–200 frames) are required.

To overcome these limitations, we propose an integrated real-time ultrasound imaging framework for the Verasonics Vantage 256 system that combines GPU Direct data transfer and GPU level parallel optimization. RF data are streamed directly to the GPU without CPU memory copying, and both Delay-and-Sum beamforming and Singular Value Decomposition based clutter filtering are executed entirely on the GPU. Memory hierarchy optimization (shared, constant, texture) further enhances beamforming efficiency, while parallelized SVD ensures real-time clutter suppression. This system-level integration eliminates interstage latency and enables a fully automated real-time Doppler imaging pipeline on a single GPU, demonstrating strong potential for clinical real-time ultrafast Doppler applications.

1. 연구 배경

실시간 초음파 도플러 영상은 비침습적으로 혈류의 속도 및 방향을 시각화할 수 있어, 이식 장기 기능 모니터링, 신경혈관 질환 평가, 종양 혈류 분석 등 다양한 임상 응용에서 필수적인 진단 도구로 활용되고 있다. 특히 미세혈관 및 저속 혈류의 정밀한 관찰을 위해서는 높은 시간 해상도를 확보하는 것이 중요하며, 이를 위해 초고속(ultrafast) 영상 기술이 널리 연구되고 있다 [1].

그러나 초음파 도플러 영상의 전체 처리 과정은 데이터 취득, 전송, 빔포밍(beamforming), 클러터 필터링(clutter filtering), 영상 재구성(image reconstruction) 등 여러 단계의 연산으로 구성되어 있으며, 각 단계에서 발생하는 높은 계산 복잡도와 대용량 데이터 이동이 실시간 구현의 주요 제약 요인으로 작용한다. 특히 기존 시스템에서는 RF(raw) 데이터가 CPU 메모리를 거쳐 GPU로 전송되는 구조적 한계로 인해 데이터 전송 지연이 발생하며, 빔포밍과 클러터 억제 과정이 순차적으로 수행되면서 전체 파이프라인의 처리 속도가 제한된다. 이러한 병목 현상은 수십~수백 프레임의 장시간 시계열(temporal ensemble)을 필요로 하는 초고속 도플러 영상에서 더욱 두드러진다 [2].

최근 GPU의 대규모 병렬 연산 성능을 활용하여 빔포밍 및 클러터 억제 단계를 가속화하려는 다양한 연구가 진행되어 왔으나 [3], 대부분의 접근법은 개별 연산 단계의 최적화에 국한되어 있으며, 시스템 전체 수준에서의 데이터 전송 및 처리 병목을 근본적으로 해결하지는 못했다. 이에 따라 데이터 취득부터 영상 재구성까지 모든 단계를 단일 GPU 내에서 효율적으로 처리할 수 있는 시스템 수준의 통합 프레임워크(system-level integration)가 요구된다.

본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 Verasonics Vantage 256 시스템을 기반으로 GPU Direct와 GPU 병렬 연산 최적화 기법을 결합한 실시간 초음파 도플러 영상 파이프라인을 제안한다. 제안된 프레임워크는 RF 데이터를 CPU 복사 과정 없이 GPU로 직접 전송하고, GPU 내부에서 Delay-and-Sum(DAS) 빔포밍, IQ 복조(IQ demodulation), 그리고 SVD(Singular Value Decomposition)기반 클러터 필터링을 모두 수행하도록 설계하였다. 특히 DAS 빔포밍 단계에서는 GPU의 메모리 계층 구조(memory hierarchy)를 효율적으로 활용하여 연산 효율을 향상시켰으며, SVD 단계에서는 대규모 행렬 연산을 병렬화하여 클러터 억제를 실시간으로 수행할 수 있도록 구현하였다.

2.연구 방법

본 연구에서는 Verasonics Vantage 256 시스템을 기반으로 GPU Direct를 활용하여 RF 데이터를 CPU 메모리 복사 없이 직접 GPU로 전송하고, 전체 도플러 영상 파이프라인을 GPU 상에서 실시간으로 처리할 수 있는 통합 파이프라인을 구현하였다. 데이터 취득 이후의 주요 단계인 DAS 빔포밍, IQ 복조, 그리고 SVD 기반 클러터 필터링을 모두 GPU 내부에서 수행함으로써, CPU와 GPU 간 데이터 전송 지연을 감소하고자 했다.

실험은 신장 혈류의 실시간 영상화를 위해, 3개 조향각(3 angles)과 60프레임(60 frames)으로 구성된 초음파 데이터를

192채널의 GE 9L-D 트랜스듀서를 이용하여 획득하였다.

특히 빔포밍 단계에서는 GPU의 메모리 계층 구조를 효율적으로 활용하여 연산 효율을 향상시켰다. 트랜스듀서 소자 좌표와 어퍼처 정보는 공유 메모리(shared memory)에 캐싱하여 블록 내에서 반복적으로 재사용하였으며, 음속 및 샘플링 주파수와 같은 고정 파라미터는 상수 메모리(constant memory)에 저장하여 빠른 접근을 구현하였다. 또한 RF 채널 데이터는 텍스처 메모리(texture memory)에 저장하여 하드웨어 보간 기능을 이용한 분수 지연(fractional delay) 계산과 공간적 지역성(spatial locality)을 최적화하였다. 이러한 메모리 구조 최적화를 통해 전역 메모리 접근을 최소화하고 데이터 접근 지연을 줄여, DAS 빔포밍 단계의 처리 속도와 전체 파이프라인의 실시간 성능을 향상시켰다. 전체 처리 흐름은 그림 1에 요약되어 있다.

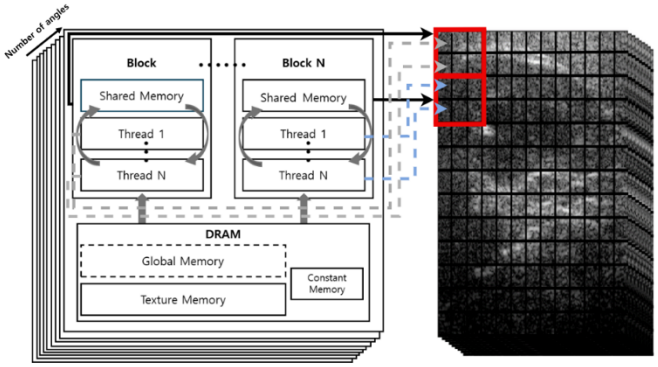


그림 1. GPU 메모리 계층 구조와 병렬 블록 기반 DAS 빔포밍 처리 구조

결과적으로, 데이터 취득부터 빔포밍, IQ 복조, 클러터 제거에 이르는 전 과정이 GPU 내부에서 완전 자동화되어 수행되는 실시간 초음파 도플러 영상 파이프라인을 구축하였다. 이러한 시스템 접근은 신장 혈류 영상을 포함한 초음파 도플러 영상의 실시간 구현 및 다양한 임상적 상황에 적용시킬 수 있다. 전체 과정은 그림 2.와 같다.

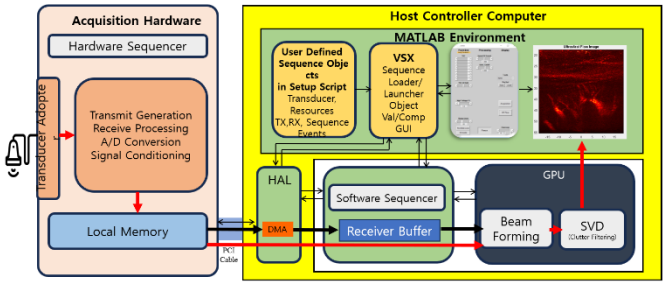


그림 2. Verasonics Vantage 256 시스템 기반 실시간 초음파 영상 파이프라인 구조도.

3. 연구 결과

본 연구에서는 제안된 GPU 기반 실시간 도플러 영상 파이프라인의 성능을 평가하기 위해, 기존의 non-GPU Direct 환경에서 비최적화된 빔포밍, SVD를 적용한 방식과 GPU Direct 및 메모리 최적화 빔포밍을 적용한 제안 방식을 비교하였다. 비최적화 구조에서는 데이터 전송 및 변환 단계에 21.2 ms, 전체 빔포밍에 100.7 ms, SVD 기반 클러터 필터링에 12.2 ms가 소요되어 총 134.1 ms의 처리 시간이 측정되었다. 반면, 제안된 구조에서는 GPU Direct를 통해 RF 데이터를 CPU 복사 없이 GPU로 직접 전송하고, GPU 메모리 계층을 최적화한 빔포밍을 적용함으로써 데이터 전송 및 변환 시간이 4.6 ms로 약 4.6배 단축되었으며, 전체 빔포밍 단계 또한 99.4 ms로 약 1.3% 개선되었다. SVD 기반 클러터 필터링은 13.1 ms로 안정적인 처리 성능을 보였다. 결과적으로 전체 파이프라인의 처리 시간은 134.1 ms에서 117.1 ms로 약 12.7% 단축되었으며, 이는 GPU Direct 전송 효율 향상과 메모리 최적화가 데이터 전송 병목을 완화하고, 전체 실시간 도플러 성능을 개선했음을 보여준다. 실시간으로 얻어진 영상은 그림 3.과 같다.

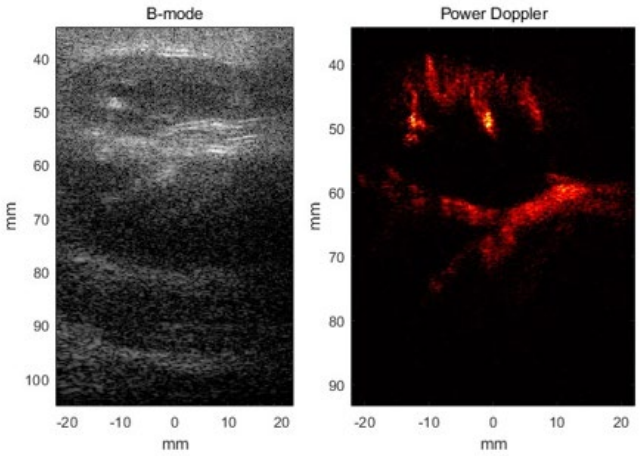


그림 3. 실시간 초음파 영상 (왼쪽: B-mode, 오른쪽: Power Doppler)

4. Acknowledgements

본 연구는 과학기술정보통신부(MSIT)의 재원으로 지원된 한국연구재단(NRF) 과제(NRF-RS-2023-00211941), 교육부의 재원으로 지원된 기본연구사업(RS-2025-25420118), 그리고 2025년도 정부(과학기술정보통신부) 재원으로 지원되는 2025 혁신기반 인공지능 데이터 융합사업(S2201-25-1002)의 지원을 받아 수행되었음.

5.참고 문헌

[1] J. Bercoff, G. Montaldo, T. Loupas, D. Savery, F. M´ezi`ere, M. Fink, and M. Tanter, “Ultrafast compound doppler imaging: Providing full blood flow characterization,” IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 58, no. 1, pp. 134–147, 2011.

[2]M. Tanter and M. Fink, “Ultrafast imaging in biomedical ultrasound,” IEEE Trans actions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 61, no. 1, pp. 102 119, 2014

[3]B. Y. S. Yiu, I. K. H. Tsang and A. C. H. Yu, "GPU-based beamformer: Fast realization of plane wave compounding and synthetic aperture imaging," in IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 58, no. 8, pp. 1698-1705, August 2011, doi: 10.1109/TUFFC.2011.1999.

초음파 기반 다중 변수와 머신 러닝 앙상블을 이용한 신장이식 거부반응의 비침습적 조기 예측 모델 개발

류지승[1], 안지현[2*], 양세정[1,3*]

연세대학교 원주의과대학 정밀의학 교실[1]

연세대학교 원주의과대학 영상의학 교실[2]

연세대학교 원주의과대학 의료정보통계학과[3]

Development of a noninvasive machine learning ensemble model for predicting renal allograft rejection using integrated ultrasound and clinical variables

Ji Seung Ryu[1], Jhii-Hyun Ahn[2*], Sejung Yang[1,3*]

Department of Precision Medicine, Yonsei University Wonju College of Medicine, Wonju, Republic of Korea[1]

Department of Radiology, Yonsei University Wonju College of Medicine, Wonju, Republic of Korea[2]

Department of Medical Informatics and Biostatistics, Yonsei University Wonju College of Medicine, Wonju, Republic of Korea[3]

ryujissss@yonsei.ac.kr[1], radajh@yonsei.ac.kr[2*], syang@yonsei.ac.kr[1,3*]

Abstract

Kidney transplantation is recognized as the optimal treatment for patients with end-stage renal diseas. However, graft rejection remains a major complication that critically affects long-term graft survival and function. Although the incidence of rejection has decreased with the development of immunosuppressants, acute rejection continues to be a key cause of graft dysfunction and poor prognosis. Early detection is essential for timely treatment, but current clinical indicators such as serum creatinine rise only after significant functional decline, and protocol biopsy is invasive and difficult to repeat. To address these limitations, this study proposes a noninvasive machine learning–based prediction model using contrast-enhanced ultrasound for early detection of renal allograft rejection.

1. 연구 배경

신장이식(Kidney Transplantation, KTx)은 말기신부전(End-Stage Renal Disease, ESRD) 환자에게 있어 생존율과 삶의 질을 동시에 향상시키는 최적의 치료 대안으로 평가된다. 그러나 이식 후 발생하는 이식 거부반응(graft rejection)은 여전히 이식 신장의 장기 생존과 기능 유지에 결정적인 영향을 미치는 주요 합병증으로 남아 있다. 최근 면역억제제의 발달로 거부반응의 빈도는 감소하였으나, 급성 거부반응(acute rejection)은 여전히 이식 신장의 기능 저하와 예후 악화의 주요 원인 중 하나이다. 이러한 면역학적 반응은 신장 기능을 급격히 손상시키며, 조기에 치료하지 못할 경우 이식 신장의 생존율을 낮추는 결과를 초래한다. 따라서 급성 거부반응의 조기 진단과 신속한 대응은 임상적으로 매우 중요하다[1]. 그러나 현재 임상에서 널리 활용되는 혈청 크레아티닌 수치는 신장 기능이 약 30~50% 이상 저하된 이후 에야 상승하는 경향이 있어, 급성 거부반응의 조기 진단에는 한계가 있다. 특히 무증상(subclinical)으로 진행되는 경우가 많아, 임상적 징후만으로는 조기 발견이 어렵다. 이에 따라 기능 변화와 무관하게 일정 시점에 시행되는 프로토콜 생검(protocol biopsy)이 무증상 급성 거부반응의 조기 진단에 유용한 방법으로 보고되고 있지만 이 방법은 침습적 시술로 인한 환자 부담, 출혈 등의 합병증 위험, 그리고 반복 시행의 어려움 등으로 인해 일상적 임상 적용에는 제한이 따른다[2].

신장이식 후 거부반응은 장기 생존을 위협하는 주요 합병증으로, 이를 조기에 진단하기 위한 비침습적 영상 기반 진단법의 개발이 점차 중요해지고 있다. 최근에는 혈액학적 지표나 생검 결과에만 의존하던 기존의 진단을 벗어나, 이식편의 미세혈류 변화와 조직 탄성 변화를 실시간으로 관찰할 수 있는 영상기술이 임상적 대안으로 부상하고 있다. 특히 초음파 영상기법은 방사선 노출이 없고, 검사 비용이 낮으며 반복 검사가 용이하다는 장점으로 인해 이식 신장의 상태 평가에 널리 활용되고 있다[3]. 과거에는 주로 컬러 도플러(Color Doppler)를 이용하여 혈류 패턴을 관찰했지만, 최근에는 기술적 발전을 통해 전단파 탄성 초음파(Shear-Wave Elastography, SWE), 초미세혈관영상(Superb Microvascular Imaging, SMI), 조영증강 초음파(Contrast-Enhanced Ultrasound, CEUS) 등 고해상도 정밀 영상기법이 임상에 도입되고 있다[4]. 이 중 CEUS는 미세혈관 구조를 시각화 할 수 있어, 기존 도플러 영상으로는 탐지하기 어려운 미세 순환의 변화를 정량적으로 평가할 수 있다는 점에서 주목받고 있다. 또한 사용되는 조영제는 신독성이 거의 없으며 신장 기능이 저하된 환자에서도 안전하게 적용한다는 점이 있다. 이러한 이유로 CEUS는 이식 후 발생할 수 있는 거부반응, 혈관 협착, 신장 내 종양 등 병리적 변화의 평가에 효과적인 영상 도구로 활용되고 있다.

최근에는 신장이식 후 급성 거부반응을 더 조기에, 더 정확하게 예측하기 위한 연구가 시도되고 있다. 기존에는 영상 판독이 숙련된 전문가의 경험적 판단에 의존하는 경우가 많았으나, 최근 발전한 머신 러닝(Machine Learning, ML) 및 인공지능(Artificial Intelligent, AI) 기술의 도입으로 초음파 영상을 데이터 기반으로 정밀 분석하는 접근이 가능해졌다. 이러한 데이터 기반 분석은 CEUS와 같은 초음파 영상에서 획득된 정보를 통합, 거부반응의 조기 생리학적 징후를 포착함으로써, 임상적 증상이 나타나기 전 단계에서 거부반응 위험을 사전에 예측할 가능성을 제시하고 있다.

본 연구에서의 연세대학교 원주 세브란스 기독병원에 내원 입원하여 신장 이식 및 조영제 초음파를 모두 받은 환자를 기반으로 비 침습적인 이식 거부 반응 조기 진단 예측 모델을 제안하였다. 모델을 통한 공헌은 다음과 같이 정리될 수 있다:

●시간-강도 곡선(Time–Intensity Curve, TIC)를 이용하여, 미세혈류 변화를 정량 반영할 수 있는 예측 모델을 제시함.

●Bootstrap LASSO 기법을 적용하여 이식거부반응 예측을 위한 안정성과 분류력이 높은 변수를 선정함.

●각 머신 러닝 모델의 결과를 기반으로 앙상블 조합 탐색 알고리즘을 구성. 내부 및 외부 검증 세트 모두에서 AUROC 0.8 이상의 우수한 일반화 성능을 달성함.

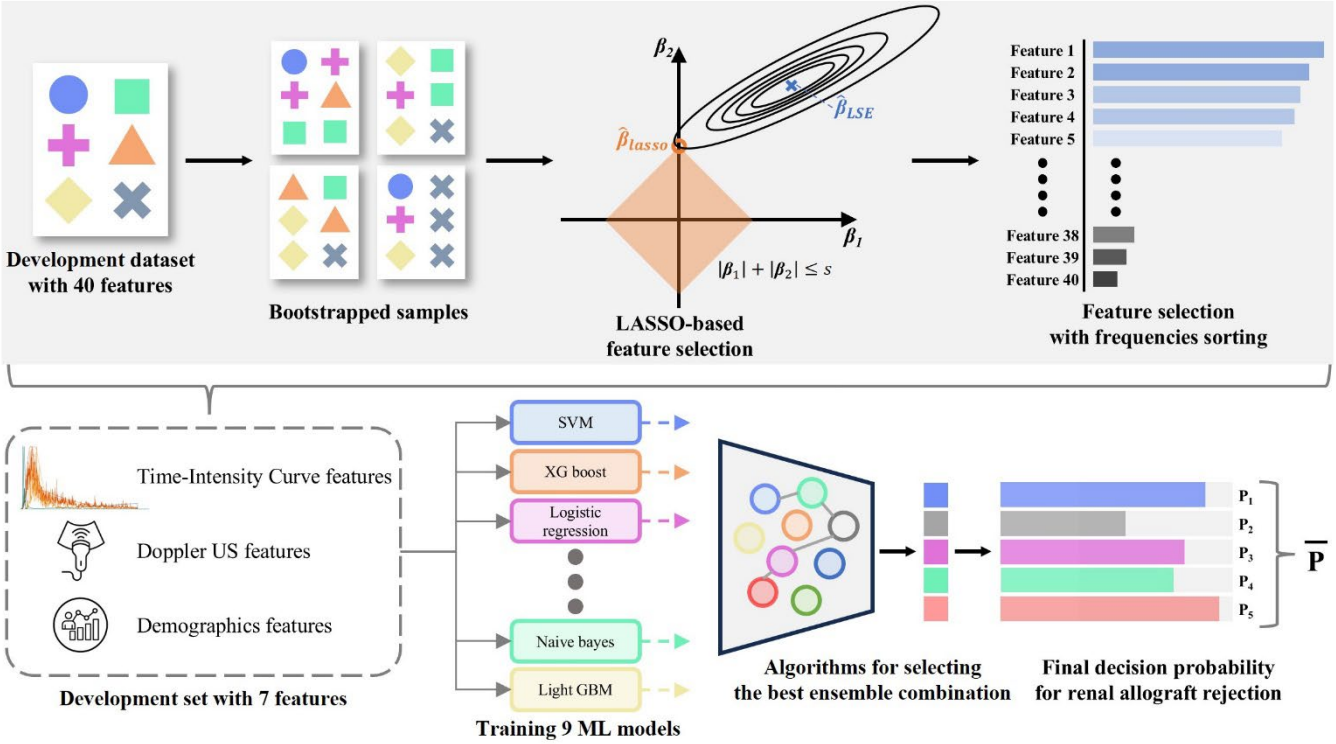


그림 3. 전처리 및 예측 모델 구조도

2.연구 방법

2-1) 데이터 수집

본 연구에는 2021년 1월부터 2024년 9월까지 연세대학교 원주 세브란스 기독병원에 내원 및 입원하여, 이식 후 3개월 또는 1년이 지난 시점에 동종 이식 생검과 초음파 검사를 모두 받은 101명의 환자가 후향적으로 수집되었다 (IRB-CR321136). 안정적인 동종 이식 기능의 기준은 혈청 크레아티닌 1.5 mg/Dl 이하로 정의되었다. 수술 당시 신장 혈관 손상, 요폐색, 동종 이식 기능 장애가 있는 환자는 제외되었으며, 총 100명의 환자가 연구에 사용되었다(그림1).

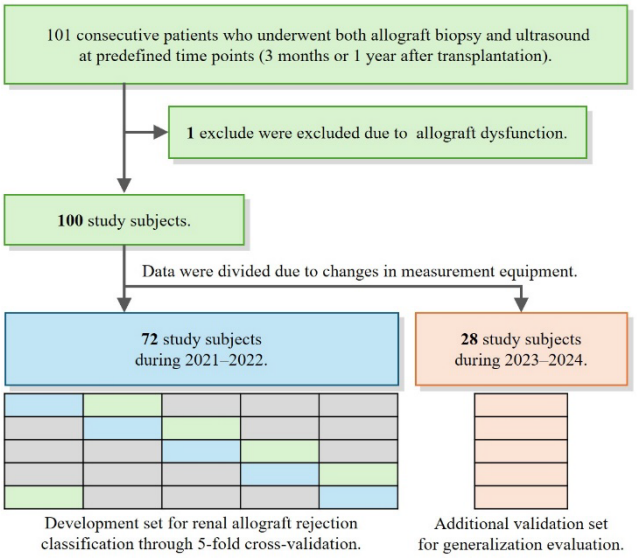


그림 1. 데이터셋 구성도

2-2) Time–Intensity Curve 분석

CEUS 는 조영제(SonoVue®, Bracco) 2.0 mL 를 말초정맥에 일시적으로 주입한 뒤, 10 mL 의 생리식염수로 플러시하여 시행하였다. 영상 획득은 고정된 신장 종단면에서 약 2 분간 연속적으로 수행하였다. 획득된 조영 초음파 영상은 분석 소프트웨어(ViewBox 6.1, Bracco)를 이용하여 TIC 분석에 활용되었다. 각 피검자에서 신피질, 수질, 그리고 두 영역을 모두 포함하는 부위를 관심영역으로 설정하였다. 측정은 신장 초음파 분야에서 15 년 이상의 경력을 가진 영상의학 전문의에 의해 일관된 조건하에서 시행되었다(그림 2).

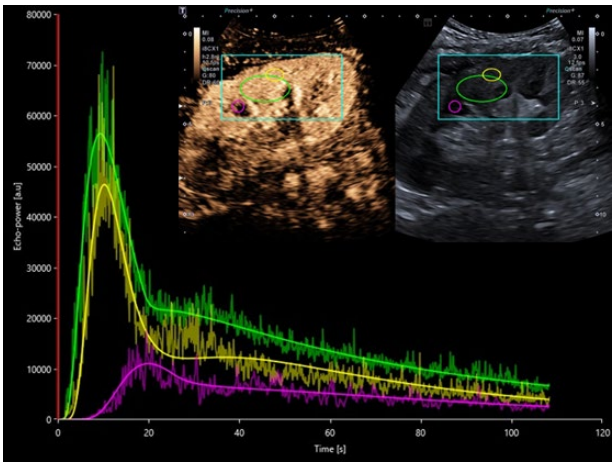


그림 2. 조영제 초음파 및 Time-Intensity 곡선

2-3) 모델 입력 및 전처리

환자 별 TIC 분석을 통해 총 24 개의 특징을 얻을 수 있었으며, 차트 리뷰를 통해 인구통계학적 특징 11 개, 초음파 검사 결과 기반 특징 5 개를 수집할 수 있었다. 총 40 개의 특징을 환자별로 정리하였으며, 누락된 값을 없었다. 수집된 40 개의 특징에 LASSO 회귀 기반의 변수 선택 알고리즘을 적용하여, 모델의 분류 성능에 큰 영향을 줄 수

있는 특징을 선별하고자 하였다. 이 과정에서 외부 데이터에 대해서도 일반화 능력을 갖출 수 있도록 Bootstrap 을 통한 데이터 증강이 적용되었으며, 총 1000 번의 반복을 통해, 각 특징별로 선별된 비율이 정리되었다. 일정 cut-off 비율 이상을 가진 4 개의 특징이 선정되었으며, 선행연구를 기반으로 임상적 중요성이 보고된 3 개의 변수가 전문의에 의해 추가되었다(그림 3).

2-4) 앙상블 모델

전처리를 통해 선정된 7 개의 특징을 기반으로 총 9 개의 머신 러닝 모델들(Cat boost, XG boost, Logistic regression, Decision Tree, Random forest, SVM, Naïve bayes, KNN, Light GBM)이 학습되었다. 각 모델의 예측을 종합하여 최종 예측을 내는 배깅 방식으로 앙상블이 수행되었다. 계산될 수 있는 모든 모델 조합에 대해서, 검증 데이터셋에 대한 성능이 정리되었으며, 이 중 가장 높은 성능을 달성한 조합이 최종 평가 데이터셋들에 사용되었다(그림 3).

3. 연구결과

본 연구에서는 본 연구에서는 이식편 거부반응에 대한 예측 모델의 주요 결과로 AUROC(Receiver Operating Characteristic)가 사용되었다. 예측 모델 내 각 모델의 출력 확률은 배깅되어 의사 결정을 위한 최종 확률로 사용되었다. 모델은 평가 데이터셋에 대해서 AUROC 0.8485, 다른 평가 데이터셋에 대해선 0.8661 의 성능을 보였다(그림 4,5).

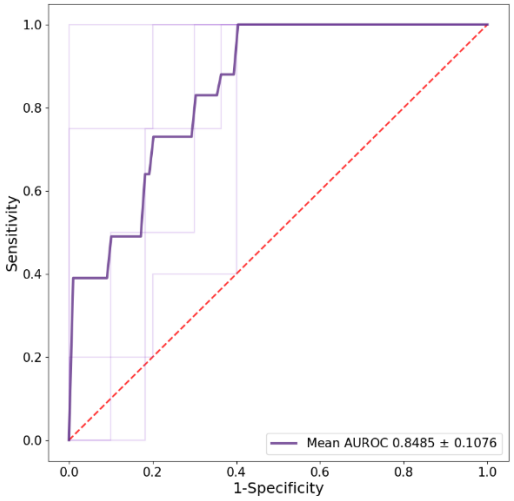


그림 4. 평가 데이터셋 1에 대한 AUROC

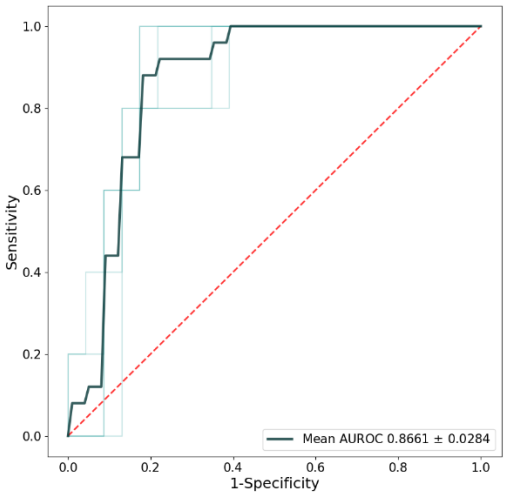


그림 5. 평가 데이터셋 2에 대한 AUROC

4. 결론

본 연구는 CEUS 를 이용하여 신장이식 거부반응을 비침습적으로 예측할 수 있는 머신 러닝 기반 예측 모델을 제안하였다. CEUS 로부터 추출한 TIC 을 기반으로 관류 지표를 계산하였으며, 여기에 도플러 초음파 결과 변수 및 환자의 인구학적 정보를 결합하여 분석에 활용하였다. Bootstrap LASSO 회귀 분석을 반복 적용하여 안정적인 변수 선택을 수행하였고, 분류 및 일반화 성능을 보장하는 핵심 예측 변수를 도출하였다. 이후 도출된 변수들을 이용해 9 가지 머신러닝 모델을 각각 학습시킨 뒤, 모델 조합 최적화를 통해 최적의 앙상블 조합을 구축하였다.

최종적으로 개발된 앙상블 기반 예측 모델은 모든 평가 데이터셋에서 높은 예측 성능과 우수한 일반화 능력을 보였으며, 본 연구에서 제안한 모델은 조영초음파 영상 바이오마커와 앙상블 머신 러닝 기법을 결합한 비침습적 거부반응 예측 접근법으로서, 임상 진단의 정확도를 향상시키고 조직 생검의 부담을 감소시키며, 이식 후 환자 관리에서 임상의의 의사결정을 지원하는 실질적인 도구로 활용될 가능성을 보여준다.

5. Acknowledgements

본 연구는 본 발표는 과학기술정보통신부 정보통신 진흥기금을 지원받아 작성한 것으로, 과학기술정보통신부의 공식의견과 다를 수 있습니다.

6.참고 문헌

[1] Gokalp, C., Oytun, M. G., Gunay, E., Tamsel, S., Sen, S., Sezer, T. O., & Toz, H. (2020, December). Acoustic radiation force impulse elastography may predict acute rejection in kidney transplantation. In Transplantation Proceedings (Vol. 52, No. 10, pp. 3097-3102). Elsevier.

[2] Setoguchi K, HyodoY,Tsujioka H et al (2022) Role of early serial renal transplant allograft protocol biopsies in living kidney trans plantations. Transplant Proc 54:325–328

[3] Radermacher J, Mengel M, Ellis S et al (2003) The renal arterial resistance index and renal allograft survival. N Engl J Med 349: 115–124

[4]ArmalyZ, AbuRahmeM, KinanehS, HijaziB, Habbasshi N,ArtulS (2022) An innovative ultrasound technique for early detection of kidney dysfunction: superb microvascular imaging as a reference standard. J Clin Med 11:925

한국전자기술연구원 특별세션

좌장: 조영창(한국전자기술연구원)

11월 6일 (목) **신어관 226 (15:00-16:00)**

정찬희(한국전자기술연구원)
전통적 신호처리 기반 기침 검출·카운팅: RMS-EMA와 이중 임계치

홍혁기(한국전자기술연구원)
호흡기 이상 조기 감지를 위한 사운드 분석 기술개발

박진호(한국전자기술연구원)
불안장애 환자의 디지털 표현형 분석 연구

이상학(맥아이씨에스)
MV50 범용인공호흡기의 생체신호 분석을 통한 중환자 관리(SmartPSV) 모드의 임상적 유효성 및 안전성 평가

김현우(한국전자기술연구원)
구급상황에서의 데이터 수집을 위한 디바이스 연동 프레임워크 설계

곽연화(한국전자기술연구원)
현장 신속 마약 검출을 위한 면역분석 기반 휴대용 센서의 최적화

전통적 신호처리 기반 기침 검출·카운팅: RMS-EMA와 이중 임계치

정찬희[1*], 홍혁기[1], 조영창

한국전자기술연구원 메디컬IT융합연구센터 [1]

Cough Detection and Counting via Classical Signal Processing: RMS-EMA with Dual-Threshold Hysteresis

Chan Hee Jeong[1*], Hyuck Ki Hong[1], Young Chang Jo[1]

Medical IT Convergence Research Center, Korea Electronics Technology Institute, Korea

[*]chjeong@keti.re.kr

Abstract

We present a classical signal-processing approach for cough detection and counting that delivers low latency, low computational cost, and high interpretability without large training datasets or specialized hardware. The method tracks the background noise level online via RMS exponential moving average (RMS-EMA), defines adaptive dual thresholds (high/low) relative to the tracked RMS, and confirms events through a two-state hysteresis machine with tolerance, padding, and minimum duration constraints. This design yields scale invariance to input gain changes, robustness against gradual noise shifts, and stable boundary decisions under fluctuating energies. The approach is practical for field deployment, supports reproducible parameterization, and can serve as a reliable baseline or annotation aid prior to integrating more complex learned models.

1. 서론

본 논문은 전통적 신호처리 기법에 근거한 기침 검출·카운팅 알고리즘을 제시한다. 제안 방법은 입력 신호의 에너지 수준을 지수이동평균(RMS-EMA)으로 추적해 배경 잡음에 실시간 적응하고, 추정 RMS를 기준으로 한 상·하한 이중 임계치와 히스테리시스 상태 전이를 통해 이벤트를 안정적으로 확정한다. 종료 판정에는 일정 샘플 수 동안의 하한 유지(*tolerance*), 시작·종료 주변 보정을 위한 *padding*, 최소 지속시간 제약을 함께 사용해 스파이크성 잡음이나 단발 충격음을 배제한다. 이 접근은 대규모 학습 데이터나 고성능 하드웨어 없이 낮은 지연·낮은 계산량·높은 해석 가능성을 달성하며, 입력 스케일 변화에 대한 스케일 불변성과 점진적 배경 변동에 대한 강건성을 보인다. 임상·현장 배치에서의 재현성과 품질관리 측면에서도 실무적 이점을 제공한다.

2. 기침 검출 알고리즘

제안한 검출기는 입력 신호를 프레임 단위로 순차 처리하면서 배경 잡음의 장기 레벨을 RMS 지수이동평균(RMS-EMA)으로 추정하고, 그 추정값을 기준으로 이중 임계치를 설정해 이벤트의 시작과 종료를 안정적으로 결정한다. 먼저 프레임 RMS를 다음과 같이 정의한다.

$$rms(x) = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_i x_i^2}$$

샘플링 주파수 f_s, 프레임 길이 N, 시간상수 τ에 따른 갱신 계수와 RMS-EMA 갱신식은 다음과 같다.

$$\alpha = 1 - \exp\left(-\frac{N}{f_s \tau}\right)$$

$$\widehat{rms} \leftarrow (1-\alpha)\widehat{rms} + \alpha rms(x)$$

상한·하한 임계치는 배수 m_h, m_l를 곱해 산정한다.

$$th_h = m_h \widehat{rms},\ th_l = m_l \widehat{rms}$$

실제 비교 연산은 계산량을 줄이기 위해 샘플 에너지(제곱값)와 임계치의 제곱 사이에서 수행한다. 이 방식은 입력 이득이 변해도 임계치가 같은 비율로 따라가므로 스케일 불변성을 확보한다.

이벤트 경계는 두 상태(*Idle, InCough*)를 가지는 히스테리시스 상태기계로 결정한다. 대기 상태에서 에너지가 상한 임계치를 넘는 순간을 이벤트 시작으로 간주하고, 시작 인덱스는 *padding* 만큼 과거로 당겨 선행부를 포함한다. 이벤트 내부에서는 에너지가 하한 임계치 아래로 떨어지는지를 감시하되, 일시적 하강에 의한 흔들림을 피하기 위해 *tolerance* 동안 연속적으로 낮은 상태가 유지될 때만 종료 후보로 인정한다. 종료가 성립하면 종료 인덱스는 *padding* 만큼 미래로 늦춰 잔향을 포함한다. 종료 후 유효 지속시간은 다음과 같이 계산하며, 사전 정의된 최소 지속시간 이상이고 스트리밍 초기의 워밍업 시간이 지난 경우에만 이벤트로 확정하여 카운트를 증가시킨다.

$$L_{eff} = (i_{end} - i_{start} + 1) - 2\,padding$$

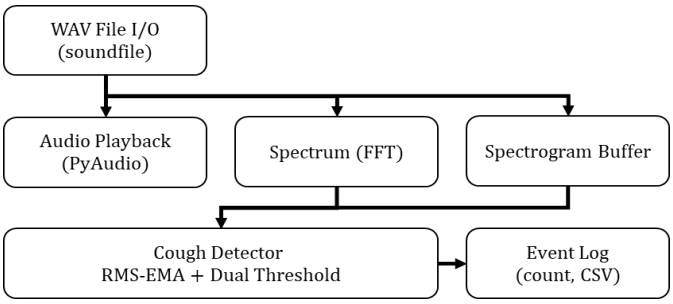


그림 1. 알고리즘 흐름도

알고리즘 지연은 *tolerance*와 *padding*에 의해 주로 결정되며, 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$\Delta t_{lat} \approx \frac{tolerance + padding}{f_s}$$

연산은 제곱, 1차 지수평활, 임계치 비교가 주를 이루므로 메모리는 상수 수준이고, 시간 복잡도는 스트리밍 길이에 선형으로 비례한다. 파라미터는 배수(m_h, m_l), 시간(τ , *tolerance, padding, warmup*), 길이(*min_len*)로 표현되어 민감도와 특이도의 균형을 의도적으로 조정할 수 있다. 실무적으로는 m_h 2~4, m_l 0.1~1.0 범위에서 시작하고, τ 0.3~1.0초로 배경 변동을 추적하게 하며, *tolerance* 수 밀리초, *min*_len 수백 밀리초, *padding* 수백 밀리초로 오탐 억제와 경계 보정을 병행한다. 이 구성은 급상승–완만감쇠라는 기침 파형의 전형을 포착하면서 클릭성 충격음, 짧은 무성 간극, 대화 중 파편적 발성 등 비목표 이벤트를 체계적으로 배제한다.

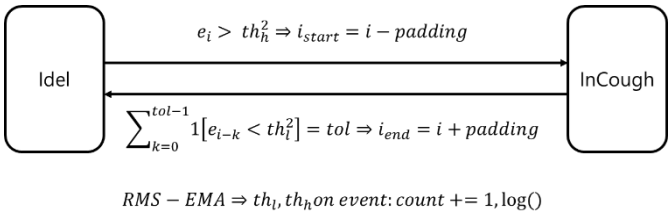


그림 2. 이중 임계치 히스테리시스 상태 머신

3. 연구 방법

평가 체계는 합성 데이터와 실제 녹음을 병행한다. 합성 세트는 백색 잡음과 협대역(narrowband) 톤을 중첩한 배경 위에, 밴드 제한 잡음에 지수 감쇠 포락선(envelope)을 곱한 버스트를 특정 시각에 삽입해 기침 유사 파형을 만든다. 한 버스트의 모델은 다음과 같다.

$$b(t) = (h * n)(t) \cdot e^{-\beta t} 1_{[0,L]}(t)$$

여기서 $n(t)$는 가우시안 잡음, h는 짧은 해닝 윈도우 필터, 베타는 감쇠율, L은 평균 지속시간이다. 이벤트 시각 집합은 간격과 중첩을 통제할 수 있도록 설계한다. 실제 데이터는 16kHz 단일 채널을 기준으로 실내·복도·야외 등 다양한 환경에서 수집하고, 독립된 주석자 두 명 이상이 시작, 종료, 확정 시점을 표기한 뒤 합의 절차로 기준 라벨을 마련한다.

정확도 평가는 이벤트 단위의 정밀도, 재현율, F1로 산출하며, 매칭은 검출 확정 시점과 라벨 시점의 절대 오차가 허용 범위 안에 있을 때 참양성으로 간주한다. 시점 정합도는 절대 오차의 중앙값과 95% 구간을 보고하여 경계 안정성을 확인한다. 지연 측정은 이벤트 종료 이후 확정까지의 시간으로 정의해, 파라미터가 실효 지연에 미치는 영향을 관찰한다.

강건성 실험에서는 SNR을 0, 5, 10, 20 dB로 변화시키고, 마이크 거리와 방향, 배경 소음 유형(대화, 충격음, 바람 소리 등)을 교차하여 성능 변동을 측정한다. 비교 대상으로는 배경 적응이 없는 고정 임계치 에너지 검출기, 히스테리시스가 없는 단일 임계치 방식, 간단한 수작업 특징(대역 에너지, 제로교차율, 스펙트럴 센트로이드)에 로지스틱 회귀를 적용한 경량 머신러닝 베이스라인을 포함한다. 이를 통해 적응형 RMS와 이중 임계치, 시간 제약의 결합이 각각의 단점을 어떻게 보완하는지 정량적으로 평가한다.

재현성을 위해 모든 파라미터(τ, m_h, m_l, *tolerance, padding, min_len, warmup*)를 실험 카드로 기록하고, 검출 결과는 이벤트 로그 CSV로 저장한다. 논문 도식은 코드로 자동 생성하며, 스펙트로그램 위에 이벤트 시각을 수직선으로 오버레이하여 시간–주파수 맥락에서 분절을 시각화하고, 확정 시점 기준 카운트의 계단형 증가와 플래시 윈도우를 함께 제시해 온라인 동작의 특성을 명확히 전달한다. 이러한 절차는 배치 전 튜닝 단계에서 파라미터 민감도를 빠르게 탐색하고, 데이터셋 간 이전성을 일관된 방법으로 점검하게 해준다.

4. 결론 및 향후 과제

본 논문은 RMS-EMA + 이중 임계치 히스테리시스 + 시간 제약을 결합한 경량 기침 검출·카운팅 절차를 정식화하고, 재현 가능한 평가 설계를 제안하였다. 이 방식은 낮은 지연/낮은 계산량/높은 해석 가능성을 동시에 확보하며, 입력 이득·환경 변화에 스케일 불변적으로 적응한다. 향후에는 (i) 대역별 에너지·스펙트럴 센트로이드·ZCR 등 다특징 결합, (ii) 준지도/소량학습으로 임계 배수·시간상수의 자동 최적화, (iii) 실제 임상 데이터셋에서 정밀도·재현율·지연의 체계적 보고와 파라미터 표준 운영절차(SOP) 정립을 진행할 계획이다. 또한 멀티채널·빔포밍과 간단한 후단 분류기를 가미해 오탐을 추가로 억제하는 경량 하이브리드 구성이 유망하다.

5. Acknowledgements

이 연구는 산업부 [No. 20023916, 하이브리드 근무환경의 감정노동자 감정위협 조기대응과 의사결정을 지원하는 AI 상담어시스트 시스템 개발 및 실증], 과학기술정보통신부-정보통신기획평가원의 핵심전략 R&D사업 지원을 받아 수행된 연구임(IITP-2025-RS-2025-02219190)

6.참고 문헌

[1] J. D. Hunter. "Matplotlib: A 2D graphics environment." Computing in Science & Engineering, Vol. 9, No. 3, p. 90–95, 2007.

[2] C. R. Harris, K. J. Millman, S. J. van der Walt, et al. "Array programming with NumPy." Nature, Vol. 585, p. 357–362, 2020.

[3] M. R. Schroeder. "Number Theory in Science and Communication." Springer, 2006.

[4] S. Mallat. "A Wavelet Tour of Signal Processing." Academic Press, 2009.

[5] PortAudio Project. "PortAudio: Portable Cross-platform Audio I/O." Online documentation.

[6] PySoundFile Developers. "PySoundFile (SoundFile) Documentation." Online documentation.

호흡기 이상 조기 감지를 위한 사운드 분석 기술개발

홍혁기[1*], 정찬희[1], 박진호[1], 이효기[2], 조에담[2], 이용훈[2]
한국전자기술연구원[1], ㈜에이앤티솔루션[2]

Development of Sound Analysis Technology for the Early Detection of Respiratory Abnormalities

Hyuckki Hong[1*], Chanhee Jeong[1], Jinho Park[1], Hyoki Lee[2], Aedam Cho[2], Yonghoon Lee[2]
Medical IT Convergence Research Center, Korea Electronics Technology Institute, Korea[1]
AnT Solution Corporation[2]

[*]hkhong@keti.re.kr

Abstract

Respiratory abnormalities manifested through cough can be broadly divided into upper airway (UA) and lower airway (LA) disorders. In addition, based on the duration of cough, they may be classified as acute cough—often caused by viral infections or allergies—subacute cough, such as post-infectious cough, and chronic cough, which is commonly associated with conditions including chronic obstructive pulmonary disease (COPD) and asthma. While previous research on cough sound analysis has mainly focused on the frequency of cough events, this study proposes a deep learning–based approach that not only quantifies the number of cough sounds but also classifies their duration. Using cough recordings from patients with viral infections, the model is developed and subsequently evaluated on sound data from patients with various respiratory disorders. The results suggest the potential of cough sound analysis as a non-invasive tool for the early detection and monitoring of respiratory abnormalities.

1. 연구 배경

호흡기 이상에 따른 기침 사운드는 폐와 기도를 보호하는데 도움이 되는 중요한 보호 반사 작용이다.[1] 기침은 주로 급성(≤3주), 아급성(3–8주), 만성(> 8주)으로 분류하는 임상적 기준이 있으며 바이러스나 세균에 의한 감염 상태에서의 기침은 급성으로, 이러한 질병에 의해서 잔류하는 기침을 아급성으로 분류한다.[2] 감염에 의한 급성 기침의 병태생리적 특징은 기도 점막의 염증 반응이 일어나고, 이로 인한 신경 수용기 자극이 기침 반사를 유도한다. 또한 점액 분비 증가 또는 점액의 변화, 점액 정체가 있을 경우 기침은 점액을 제거하는 역할을 하게 된다.[3]

본 연구에 중점은 감염성 기침 사운드의 연속성을 중심으로 임상적 중증도가 달라진다는 본 연구에서는 정상인의 기침 사운드와 감염성 상기도염(UA: upper airway) 및 하기도염(LA: lower airway)의 기침 사운드를 이용하여 기침의 회수와 정도에 따른 연속성의 차이를 분류하는 머신러닝 기술을 개발한다. 또한 실제 환경에서 발생할 수 있는 다양한 생활환경 노이즈가 있는 상태에서의 탐지를 비교한다.

2.연구 방법

개발에 사용된 기침 사운드는 오픈데이터 세트인 'CougVid'의 연령별, 성별, 지리적 위치, COVID-19 상태를 나타내는 25,000개 이상의 크라우드 소싱 사운드 데이터 중 4명의 숙련된 의사가 분류한 2,800개 사운드 데이터와 google에서 공개한 데이터 셋을 레이블한 fluSense project Audio set[4]을 이용하였다. 사용된 데이터에는 기침, 재채기, 콧물, 목 가다듬기, 대화, 다양한 환경 노이즈가 포함되어 있다.

개발에 적용된 사운드는 입력 사운드 비교를 위하여 PCM mono 16 bit와 PCM mono 8 bit 포맷의 사운드를 모든

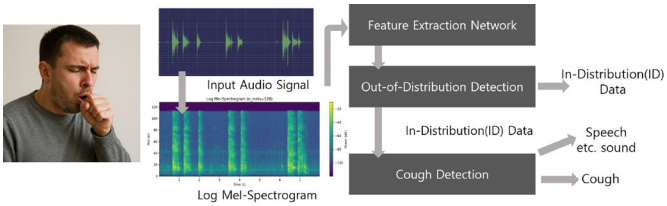


그림 1. 기침 검출을 위한 구성 흐름도

사운드에 적용하여 비교하였다. 이는 추후 실시간 저사양 인공지능 분류를 위한 성능비교를 위하여 수행하였다.

신호처리의 과정은 오디오 신호를 로그 멜 스펙트로그램(Log Mel-Spectrogram)으로 변환 후 특징을 추출하는 네트워크를 구축하였다. 멜 스펙트로그램을 이용한 변환의 경우 비선형적 특성을 보이나 1KHz 까지는 선형에 가까우며, 1KHz를 넘어서면 스케일이 압축되는 특성을 나타낸다. 이러한 특성을 이용하여 기준 값을 1KHz (임계 값보다 40dB 높은 주파수)로 설정하였다. 그 다음 OOD(Out-of-Distribution) 검출 기를 사용하여 ID 및 OOD 데이터를 인식하였다. ID 데이터는 기침과 음성으로 분류되고 OOD 탐지와 기침 탐지에 동일하게 사용되었다.FENet, ResNet 및 VGG는 이미지와 신호에서 특징을 추출하는 데 사용되는 대표적인 신경망 프레임이다. 개발에 사용된 시스템을 설계하기 위해 세 가지 모델이 내장된 시스템을 각각 사용하여 성능을 비교하였다. FENet은 다양한 주파수 특성을 추출할 수 있는 CNN 기반 모델로 오디오 데이터 분석에 자주 사용되고 ResNet은 훈련 효율성을 향상시키고 기울기 소실(gradient vanishing)문제를 최소화 하기 위해 잔여 블록을 추가하는 CNN 기반 모델이기도 하다. VGG Net에는 피라미드 모양의 후속 컨벌루션 레이어 (convolutional layers)도 포함되어 있어 컴퓨터 비전 작업에 서 좋은 결과를 얻을 수 있다.

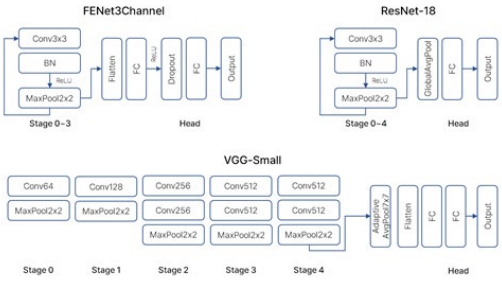


그림 2. 모델 아키텍쳐

3. 연구 결과

입력은 16 kHz 파형을 50% overlap 윈도우로 분할하고, STFT(25ms/10ms/FFT512)–Mel(64bins)–로그압축(40dB클리핑)–정규화를 적용하였다. 분류 대상(ID)은 기침 vs 비기침(또는 기침 vs 음성)이며, 재채기·목 가다듬기·대화·환경소음 등은 OOD로 정의하였다. 학습은 동일한 파라미터(AdamW, cosine LR, label smoothing 0.1)로 수행하였다.

ResNet-18이 소폭의 최고 F1/Acc를 보였으나, FENet-S는 파라미터 16배 감소, 연산량 3배 감소, 지연 38% 감소로 효율 대비 손실이 작다. VGG-Small은 견고한 기준선이나 지연·연산 비용이 크다.

표 1. 모델 별 분류 성능

Model	FENet-S	ResNet-18	VGG-Small
Acc [%]	92.6	**93.4**	91.8
F1_cough [%]	92.1	**93.0**	91.2
ROC-AUC	0.967	**0.972**	0.960
Prec/Rec [%]	92.8 / 91.4	**93.7 / 92.3**	91.9 / 90.5
Params [M]	**0.7**	11.7	19.0
MACs [G]	**0.20**	0.60	2.50
Latency [ms] *(FP32, BS=1)*	**7.8**	12.5	19.6

4. 결론 및 향후 과제

본 연구는 공개 데이터와 표준 멜 스펙트로그램 전처리를 기반으로 FENet-S/ResNet-18/VGG-Small을 비교하였다. FENet-S는 지연·연산 효율을 크게 확보하면서 ResNet-18과 경쟁적인 성능을 달성하였다.

향후 연구로는 (1) 도메인/장치 일반화를 위한 도메인 적응·테스트타임 적응, (2) 오디오 자기지도 사전학습(SSL) 기반 파인튜닝, (3) 라벨 합치도 보고 및 불확실성 정량화, (4) 고도화된 OOD, (5) 지표 표준화, (6) 온디바이스 최적화(QAT + distillation, structured pruning, 그래프 최적화)가 요구된다.

5. Acknowledgements

이 연구는 2025년도 산업통산자원부 및 한국산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임 (RS-2024-00420611)

6.참고 문헌

[1] Kian Fan Chung, Stuart B Mazzonec, Lorcan McGarveyd, Woo-Jung. “SongChronic cough as a disease: implications for practice, research, and health care.” *The lancet respiratory Medicine*, Vol 13, Issue 2, p.110-112, 2025

[2] Richard S. Irwin, Cynthia L, Anne B. Chang, Kenneth W. Altman. “Classification of Cough as a Symptom in Adults and Management Algorithms. “ *Chest journal*, Vol 153, Issue 1, p.196-209, 2018

[3] Richard S. Irwin, Michael H. Baumann, Donald. Bolser, “Diagnosis and Management of Cough Executive Summary” *Chest journal*, Vol 129, Issue 1, 1S-23S, 2006

[4] Yuhan Chen, Pankaj Attri, Jeffrey Barahona, Michelle L. Hernandez, Delesha Carpenter, Alper Bozkurt. “Robust Cough Detection with Out-of-Distribution Detection.” *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, Vol 27, Issue 7, 3210-3221, 2023

불안장애 환자의 디지털 표현형 특징 분석 연구

박진호[1*], 정찬희[1], 최연식[1], 홍혁기[1], 조영창[1]
한국전자기술연구원 [1]

An Analysis Study of Digital Phenotype Feature of Anxiety Disorder Patients

Jinho Park[1*], Chanhee Jeong[1], Yeonsik Choi[1], Hyuck-ki Hong[1], Youngchang Jo[1]
Medical IT Convergence Research Center, Korea Electronics Technology Institute, Korea
*parkjh@keti.re.kr

Abstract

Anxiety disorders affect up to 20% of adults and often worsen during adolescence, yet symptom dynamics are difficult to capture precisely using self-report scales and intermittent clinical interviews alone. In this study, we prospectively collect multimodal data from patients with anxiety disorders via a smartphone application and a Galaxy Watch—including mobility and phone-use patterns, sleep–activity rhythms, wearable physiological signals, and brief ecological momentary assessments. Focusing on app use and sleep among the collected digital phenotypes, we analyze the potential changes in usage patterns and sleep metrics associated with anxiety alleviation.

1. 연구 배경

최근, 불안장애를 가지고 있는 환자가 증가됨에 따라 성인 인구의 최대 20%가 불안장애의 영향을 받고 있다 [1]. 불안장애는 생물학적 요인과 심리, 사회적 요인이 함께 작용하며, 높은 스트레스, 정신질환의 가족력이 대표적인 위험요인으로 지목된다 [2]. 이 질환은 장기간에 걸친 포괄적 불안과 과도한 걱정을 보이며, 전반적인 시화 및 직업적 기능을 약화시킨다 [3]. 특히, 범불안장애는 증상이 모호하고 정상 범주의 불안과 경계가 명확하지 않아, 의료기관 내원시에도 주증상 대신 신체불편 또는 수면문제를 보여준다.

청소년은 발달 단계에서 다양한 스트레스에 노출됨에 따라 범불안장애 증상 악화의 가능성이 높다. 청소년이 사회적 관계에서 고립되는 경우 삶의 질 저하뿐만 아니라 학교 회피, 약물 남용등 심각한 문제로 이어진다. 따라서, 부정적 결과를 줄이기 위해 불안장애의 증상을 판단하고 조기 개입하여 예방이 이루어져야 한다 [4].

자가보고 척도 또는 간헐적 임상 면담은 늦은 시의성으로 인해 증상 변화를 민감하게 인지하기 어렵다. 디지털표현형은 스마트폰, 웨어러블 등 다양한 기기로부터 수집되는 데이터를 시간축에 따라 연속적으로 분석하여 개인 수전의 행동, 정서, 생리적 변화를 정향화하는 접근이다. 이 방법은 임상 현장에서 우울 증상의 조기 악화 탐지, 치료 반응 모니터링 등을 가능하게 하여 맞춤형 중재가 가능하다.

본 논문은 불안장애 환자 대상으로 스마트폰 앱과 갤럭시 워치를 통해 수집된 디지털 표현형을 이용하여 특징을 분석하는 연구를 진행한다.

2.데이터 수집

불안장애 환자 20명을 대상으로 디지털 표현형을 수집하였다. 수집 기간은 임상 참여 시작일부터 10주간 데이터를 수집하였다. 데이터 수집은 피험자의 안드로이드 휴대폰에 수집 어플리케이션을 설치하여 백그라운드에서 주기적으로 앱 사용시간, 조도, GPS, 통화, SMS, 가속도, 그리고 자이로 데이터를 수집한다. 또한, 피험자의 수면, 운동, 그리고 걸음 데이터를 수집하였다. 수집 데이터 중 수면, 운동, 그리고 걸음 데이터는

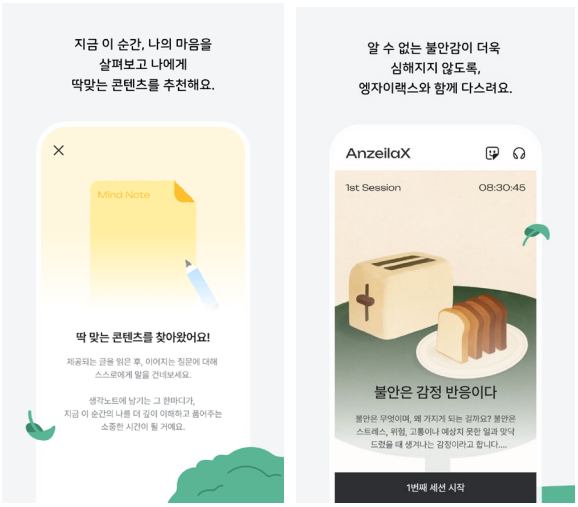


그림 1. HAII 社의 AnzeilaX 앱 화면 예시

불안장애 환자는 수집 기간 동안 1일 1회 불안감을 완화하기 위해 HAII 社의 AnzeilaX 앱을 사용하여 다양한 콘텐츠를 수행한다. 그림 1은 HAII의 AnzeilaX 앱 화면 예시를 보여준다. AnzeilaX 앱에서 제공하는 콘텐츠는 가이드와 함께 제공되는 호흡 명상, 시각적 이미지 제공, 생각노트 등이 있다. 본 논문에서 수집한 데이터 중 앱 사용 및 수면에 대한 분석 결과를 제시한다.

3. 데이터 분석

그림 2은 불안장애 환자의 휴대폰 앱 사용 비율 보여준다. OTT는 youtube, Netflix, spotify, 야누됴, primevideo, hulu, tving, wave, 그리고 watcha를 포함한다. SNS는 facebook, Instagram, twitter (X), snapchat, tiktok, watsapp, thread를 포함한다. Other는 OTT와 SNS에 포함되지 않은 모든 앱을 포함한다. 불안장애 환자의 OTT 사용률은 28%이며, SNS 사용률은 12%이다. OTT 사용률 중 88.5%는 youtube, 7.1%는 Netflix, 그리고 2.5%는 tving 사용을 보여준다. SNS 사용률 중 70.9%는 Instagram, 21.9%는 twitter (X), 그리고 4.5%는 facebook을 보여준다. 전체 환자의 OTT, SNS,

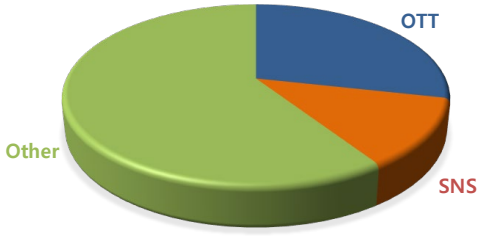


그림 2. 불안장애 환자의 휴대폰 앱 사용 비율

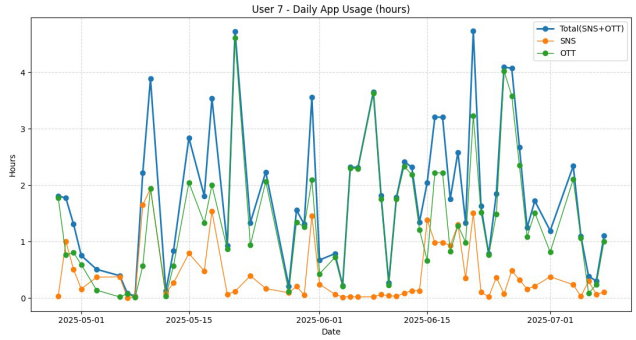


그림 3. 불안장애 환자의 앱 사용 변화

그리고 Other의 변화 추세를 나타내는 β_t는 0.011, -0.0122, 그리고 -0.0077을 보여준다. 또한, 각 카테고리의 증감 추세에 대한 p-value는 0.4464, 0.0478, 그리고 0.5543을 보여준다. 분석 결과에 따라 OTT와 Other의 증감은 통계적 유의성을 보여주지 못하지만 SNS의 p-value는 0.05보다 작아 통계적 유의성을 보여준다. 그림 3은 불안장애 환자 휴대폰 앱 사용 변화를 보여준다. 전체 휴대폰 사용 시간은 증가하는 추세를 보여준다. 전체 휴대폰 사용 시간 중 OTT와 Other의 시간은 증가하지만 SNS 사용시간은 감소하는 것을 보여준다.

그림 4는 불안장애 환자의 수면 비율을 보여준다. 수면은 Awake, Light, REM, 그리고 Deep 단계로 나뉜다. Awake는 수면 중 깨어있는 단계, Light는 얕은 잠, REM은 뇌는 활발하지만 몸의 근육의 움직임이 거의 없는 단계, 그리고 Deep은 깊은 잠을 의미한다. 건강한 수면은 전체 수면 시간 중 Deep 단계와 REM 단계가 각각 20%와 25%를 가지며 비렘수면인 Awake와 Light의 비중이 50%이상인 경우이다 []. 불안장애 환자는 전체 수면 단계 중 Deep 단계의 비중이 낮고 Light 단계의 비중이 높은 것을 보여준다. 그림 5는 불안장애 환자의 수면 변화를 보여준다. 불안장애 환자의 수면 시간은 불규칙한 것을 나타낸다. 불안감 완화를 위한 콘텐츠를 환자가 수행하며, Light 단계가 감소하는 추세를 보여주었으며, Deep 단계가 증가하는 추세를 보여주었다. 하지만, 전체 수면 시간이 감소하였으며 전체 수명 시간 중 REM 단계의 수면 시간이 감소하는 것을 보여주었다.

4. 결론

본 논문은 불안장애 환자의 디지털 표현형 중 SNS 및 수면에 대한 특징 분석을 수행하였다. 불안장애 환자는 불안 완화를 위한 콘텐츠를 수행함에 따라 SNS의 사용 비율이 감소하는 것을 확인하였으며, 전체 수면 중 Light 단계가 감소하고 Deep 단계가 증가하는 것을 보여주었다. 수면의 변화는 환자가 데이터 수집을 위한 워치의 착용이 불규칙하여 통계적 유의성을 확인하기 어렵다. 통계적

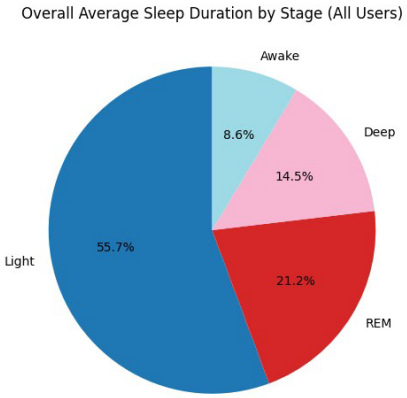


그림 4. 불안장애 환자의 수면 비율

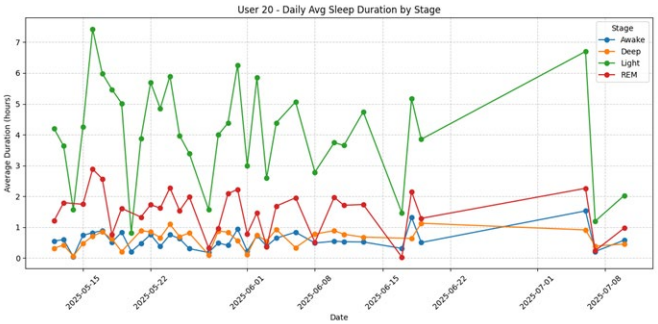


그림 5. 불안장애 환자의 수면 변화

유의성을 확인하기 위해 추가적인 임상 시험을 수행할 것이며, 앱 사용과 수면 외 다른 데이터의 변화도 분석할 예정이다.

5. Acknowledgements

이 연구는 산업부 재원으로 지원을 받아 수행된 연구임 ([RS-2024-00431485, 다종의 디지털 표현형 메타데이터 기반 청소년 및 청년 우울 장애, 불안 장애, 자살 자해 디지털 치료기기 개발], [No. 20023916, 하이브리드 근무환경의 감정노동자 감정위협 조기대응과 의사결정을 지원하는 AI 상담어시스트 시스템 개발 및 실증)

6.참고 문헌

[1] S. Munir, V. Takov, "Generalized Anxiety Disorder," *StatPearls, Treasure Island Statpearls Publishing*, Oct. 2022.

[2] S. Grenier, F. Desjardins, B. Raymond, M. Payette, C. Rioux, M. E. Landreville, P. Gosselin, P. Richer, M. J. Gunther, B. Fournel, H. M. Vasiliadis, "Six-month Prevalence and Correlates of Generalized Anxiety Disorder among Primary Care Patients Aged 70 years and Above: Results from the ESA-Services Study," *International Journal of Geriatric Psychiatry*, Vol. 34, No. 2., pp. 315-323, Feb. 2019.

[3] J. R. Kim, Y. Y. Choi, M. Y. Seo, S. S. Park, "Factors Associated with Generalized Anxiety Disorder among Older Adults: Korea National Health and Nutrition Examination Survey 2021," *The Korean Journal of Health Service Management*, Vol. 18, No. 3, pp. 49-60, Feb. 2024.

[4] K. Christian, H. Baker-Henningham, M. Belfer, G. Conti, I. Ertem, O. Omigbodun, L. A. Rohde, S. Srinath, N. Ulkuer, A. Rahman, "Child and Adolescent Mental Health Worldwide: Evidence for Action," *Lancet*, pp. 1515-1525, Oct. 2011.

MV50 범용인공호흡기의 생체신호 분석을 통한 중환자 관리(SmartPSV) 모드의 임상적 유효성 및 안전성 평가

이상학[1*], 조영재[2]

멕아이씨에스[1] 분당서울대학교병원[2]

Clinical Evaluation of the Effectiveness and Safety of the SmartPSV Ventilation Mode for Intensive Care Management Through Biosignal Analysis Using the MV50 Portable Ventilator

Sang-Hag Lee[1*], Young-Jae Cho[2*]

MEKICS Co., Ltd. [1] Seoul National University Bundang Hospital, Korea[2]

*shlee@mek-ics.com”

Abstract

This study was conducted as a prospective, randomized clinical trial in the intensive care unit of Seoul National University Bundang Hospital to evaluate the effects of the Smart Pressure Support Ventilation (SmartPSV) mode of the MV50 Portable ventilator (MEKICS Co., Ltd.) on weaning success rates and physiological stability in critically ill patients. The SmartPSV mode features an advanced system that continuously monitors key patient biosignals such as SpO_2, $EtCO_2$, and respiratory rate (RR), and automatically adjusts ventilatory pressure, volume, and oxygen concentration in real time. Eighteen ICU patients were enrolled, and major clinical variables were comparatively analyzed between the SmartPSV mode group and the conventional CPAP+PS mode group. The study prospectively registered cohorts and collected real clinical data to obtain feedback necessary for the initial design and development of the SmartPSV mode. Through this process, it established the foundational technology for implementing personalized mechanical ventilation support and suggested the potential for future clinical trials to verify its safety and effectiveness. The outcomes of this project are significant in that they laid the groundwork for developing an innovative ventilation mode aimed at improving the quality of critical care.

1. 연구 배경

기계환기(mechanical ventilation, MV)를 시작하게 되는 원인은 여러 가지가 있으며, 대표적으로 폐질환에 의한 가스 교환의 장애, 뇌신경계 이상에 의한 의식 및 호흡 중추의 기능 저하, 심혈관계 질환에 의한 혈역학적 불안정 등이 있다.1 기계환기는 중환자실에서 다양한 원인의 호흡부전으로 환자의 생명이 위협받을 때 생명을 구하기 위하여 이용되는 아주 중요한 치료 보조 수단 중 하나이지만, 장기화된 기계환기는 흉강내압 상승에 의해 정상적인 혈류 순환을 저해하며 기도의 손상과 환기량, 기도압력과 관련된 폐 손상, 폐렴, 호흡근 위축 등의 인공호흡기 관련 질환 및 치료 기간의 연장과 사망률, 이환율의 증가의 원인이기도 하다.[1]

중환자 호흡부전 치료에서 기계환기는 필수적 위치를 차지하며, 특히 효과적인 환기 이탈(weaning)은 환자 회복과 예후에 결정적 영향을 미칩니다. [2] 전통적인 기계환기 이탈 지원은 환자 상태에 따른 수동적 기계적 조절에 의존했으며, 환자의 실시간 생리변화에 신속히 대응하기 어렵다는 한계가 있습니다. 최근 AI 및 생체신호 기반 자동환기 기술이 주목받으면서, SmartPSV 모드는 환자 개개인의 호흡 상태를 분석해 자동으로 맞춤형 압력지원을 제공하는 혁신적 접근법으로 부상하였습니다. 이러한 접근은 치료 성과 개선 가능성을 내포하지만, 대규모 임상 근거는 아직 부족한 실정입니다. [3]

본 연구는 MV50 인공호흡기의 SmartPSV 모드기술이 인공호흡기 자동화 및 맞춤형 환기 분야의 대표적인 사례로서 임상적 유효성과 안전성을 종합적으로 평가하는 것을 목적으로 합니다.

2. 연구 목적

본 연구의 목적은 MV50 SmartPSV 모드가 기존 CPAP+PS 모드 대비 중환자실 기계환기 환자의 이탈 성공률을 높이고, 혈액가스 지표 및 생리학적 안정성을 개선하는지를 평가한다. 동시에 MV50 SmartPSV의 안전성 및 이상반응 발생률 차이를 분석하여 임상 적용 가능성을 탐색한다.

3. 연구 방법

본 임상시험은 분당서울대학교병원 단일기관에서 수행된 전향적, 무작위배정, 공개 비교 연구입니다. 대상은 48시간 이상 기계환기 및 이탈 중환자실 성인 환자 50명으로 설정하였고, 1:1 비율로 SmartPSV 모드군과 기존 CPAP+PS 모드군으로 무작위 배정하였다. 주평가 변수는 기계환기 이탈 성공률이며, 부평가 변수는 혈액가스 지표(pH, PaO_2, $PaCO_2$), 환자 생존율, 부작용 및 이상반응 발생률이다. 생체신호 데이터는 MV50 범용인공호흡기에 있는 내부의 압력 및 유량센서, 산소포화도, 호기말 이산화탄소 센서와 외부 모니터링 기기에서 실시간 수집하였다. 통계 분석은 Full Analysis Set 기준으로 수행했으며, 유의수준은 0.05로 설정하였다

4. SmartPSV 기술 개요 및 작동원리

MV50 SmartPSV는 MV50 범용인공호흡기를 동작시키면서 SmartPSV 진입조건에 부합할 때 SmartPSV 모드로 동작한다. (그림 1. MV50의 SmartPSV 설정화면)



그림 1. MV50 의 SmartPSV 설정화면

환자의 산소포화도, 호기말 이산화탄소, 호흡률을 실시간으로 감지한다. 환자의 산소포화도가 목표 범위(92-96%)를 벗어날 때 FiO2를 자동 조절하며, 환기량 및 압력지지도 환자의 호흡 패턴과 상태에 맞춰 실시간 보정한다. 발관구역(Extubation Zone)에 진입하면 자동 또는 의료진의 선택에 따라 환기 모드를 전환해 기계환기 이탈을 용이하게 지원한다. 본 시스템은 환자 맞춤형 자동 환기를 가능케 하여 임상 효율성을 높이며 불필요한 의료진 개입을 줄여 운영 부담을 완화한다.

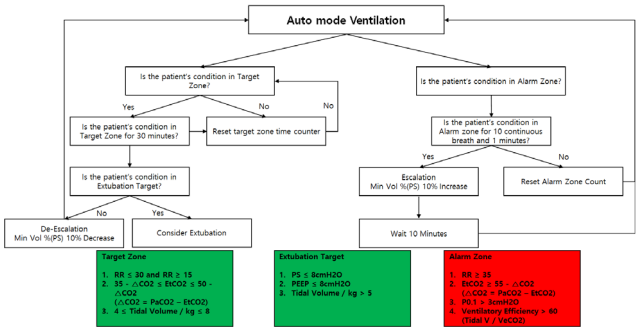


그림 2. SmartPSV 작동 흐름도

5. 연구결과

2025년 4월부터 6월까지 13명의 환자가 등록되었다. 연구 기계환기 적용 전에 기계환기가 중단된 2명의 환자는 제외되었다. 최종적으로 11명의 환자가 분석에 포함되었다.

Variables	N=11
Demographics	
Age, years	72 (51 – 85)
Sex, male	8 (72.7)
BMI, kg/m²	21.0 (17.6 – 24.5)
APACHE II score	30 (15 –37)
SOFA score	8 (3 – 12)
Comorbidities	
Asthma/COPD/Bronchiectasis	2 (18.2)
Interstitial lung disease	2 (18.2)
Lung cancer	5 (45.5)
Chronic heart disease	1 (9.1)
Chronic kidney disease	2 (18.2)
Hematologic malignancy	2 (18.2)

6. 고찰

SmartPSV 모드는 생체신호 기반 환기 조절로 기존 수동 환기 모드의 한계를 극복한 사례로, 중환자 맞춤형 기계환기 지원의 가능성을 보여준다. 데이터 기반 자동 조절은 환자 상태 변화에 민감하게 대응하여 부적절한 환기를 줄이고 치료 중단 시기를 적절히 판단하는 데 기여한다. 본 연구의 제한점은 단일기관 소규모 연구라는 점이나, 향후 대규모 다기관 연구를 통해 근거를 보강할 계획이다. 또한 장기 추적 관찰을 통해 환기 이탈 후 장기 예후 및 삶의 질 개선 여부도 평가할 예정이다.

7. 결론

MV50 SmartPSV 모드는 기존 환기 모드 대비 기계환기 이탈 성공률과 환자 안정성에서 우수성이 입증되었으며, 안전하게 적용 가능함을 확인하였다. 본 연구는 중환자 맞춤형 인공호흡기 자동 환기 기술의 임상적 유용성을 제시하며, 향후 다기관 확증 연구와 임상 현장 도입 확대를 위한 토대를 마련한다.

8. Acknowledgements

이 연구는 범부처전주기의료기기연구개발사업단(RS-2020-KD000032) 과제의 지원을 받아 수행하였고, 분당서울대학교병원 임상연구윤리심의위원회(IRB)의 승인(B-2501-950-002)을 받았다.

9. 참고 문헌

[1] 경규혁. 기계환기의 이탈. Journal of Acute Care Surgery. 2012;2(2):44-48. doi:10.17479/jacs.2012.2.2.44

[2] 대한중환자의학회. 2010 기계환기 이탈 진료지침, 2010.

[3] 대한의학회, 대한병원협회. 2022 인턴 수련교육 및 진료지침서, 2022.

구급상황에서의 데이터 수집을 위한 디바이스 연동 프레임워크 설계

안혜성[1*], 이현민[1], 김성윤[1], 조정찬[1], 김현우[1†]
한국전자기술연구원, 메디컬IT융합연구센터[1]

Design of a Device Integration Framework for Data Collection in Emergency Situations

Hyeseong An[1*], Hyunmin Lee[1], Seongyoon Kim[1], Jungchan Cho[1], Hyunwoo Kim[1†]
Korea Electronics Technology Institute[1]
*anhs@keti.re.kr

Abstract

This study designed a modular integration framework for unified management of emergency data generated from various heterogeneous wearable devices used by paramedics. The proposed framework consists of two layers: a device interface plugin layer and a platform integration layer. The plugin-based structure automatically detects multiple communication interfaces such as USB, Serial, Wi-Fi, and BLE, enabling standardized data processing across devices. The platform integration layer is designed with a Service Gateway–Service Broker–Service Binding architecture, which manages data registration, authentication, and status monitoring, while a message-broker-based streaming mechanism ensures stable and scalable data transmission. This design establishes a structural foundation that enables reliable integration of diverse wearable devices in emergency environments and supports both real-time data processing and system scalability.

1. 연구 배경

2023년 소방청 권고 기준에 따르면, 3교대(7/24/365) 근무 체계를 기준으로 구급차 1대당 최소 9명의 구급대원이 배정되어야 한다. 그러나 실제 현장에서는 평균 6.2명에 불과해 약 13%의 인력이 부족한 실정이다. 이러한 인력 부족은 구급대원의 업무 부담을 가중시키고, 이송 과정에서의 상황을 실시간으로 기록하는 데 제약을 초래한다. 결과적으로 대부분의 구급 기록은 이송이 완료된 후 불명확한 기억에 의존해 작성되며, 이로 인해 현장 대응 데이터의 정확성과 신뢰성이 충분히 확보되지 못하는 한계가 존재한다.

최근에는 구급대원의 대응 효율을 향상시키기 위해, 구급대원이 착용하는 카메라와 마이크, 그리고 응급환자에게 부착된 생체신호 센서 등 다양한 웨어러블 디바이스를 통합적으로 활용하려는 시도가 이루어지고 있다. 그러나 각 디바이스의 제조사, 통신 프로토콜, 데이터 포맷이 서로 달라 실시간 연동과 통합 관리에 어려움이 있으며, 특히 여러 디바이스가 동시에 동작하는 구급상황에서는 데이터 전송 지연, 포맷 불일치, 연결 불안정 등의 문제로 현장 대응의 효율성이 저하될 수 있다 [1][2].

이에 본 연구에서는 구급대원이 착용하는 디바이스에서 수집된 신호와 응급환자의 생체신호 데이터를 하나의 구급 대응 플랫폼에서 통합적으로 연동 및 관리할 수 있는 모듈형 프레임워크를 설계하고자 한다. 제안된 구조는 디바이스 간 이기종성을 최소화하며, 실시간 데이터 연계성과 시스템 확장성을 확보하도록 설계되었다. 이를 기반으로 구급 현장에서의 데이터 신뢰성과 운영 효율성을 향상시키는 것을 목표로 한다.

2. 연구 방법

본 연구는 구급상황에서 이기종 디바이스 간의 효율적 데이터 연동과 관리가 가능한 통합 프레임워크를 설계하였다.

먼저, 구급대원이 사용하는 카메라, 마이크, 생체신호 센서 등 다양한 디바이스의 통신 프로토콜과 데이터 구조를 분석하였다. 이를 기반으로 각 디바이스가 USB, Serial, Wi-Fi, Ethernet, BLE 등 다양한 인터페이스로 연결되더라도 동일한 처리 절차를 통해 통합될 수 있도록 모듈형 플러그인 기반 인터페이스 구조를 설계하였다.

설계된 시스템은 I/F 플러그인 모듈을 통해 디바이스 연결을 자동으로 감지하고, 연결된 인터페이스 유형을 식별한다. 이후 인터페이스 타입에 따라 적합한 플러그인을 자동 로드하여 디바이스 데이터를 연동한다. 또한 각 디바이스에서 수집된 신호에는 JSON 기반 공통 데이터 헤더를 적용하여 시간 정보, 디바이스 ID, 이벤트 타입 등의 메타데이터를 통합하고, 이를 플랫폼 내에서 일관성 있게 관리할 수 있도록 하였다.

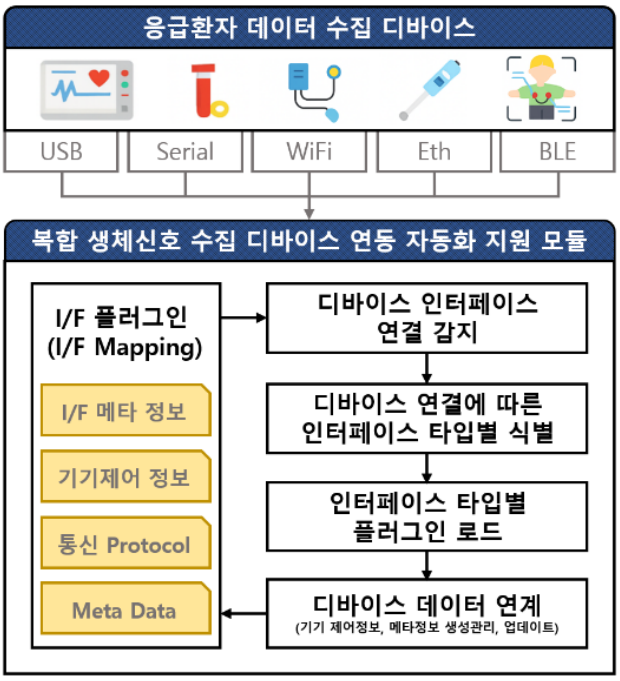


그림 1. 생체신호 수집 디바이스 연동 인터페이스 플러그인 기술 플로우차트

이후 플랫폼 간 연동 계층에서는 그림과 같이 Service Gateway – Service Broker – Service Binding 모듈 구조를 설계하였다. Service Gateway는 각 착용형 디바이스에서 발생한 데이터를 수집하여 서비스 카탈로그에 등록하고, 데이터 흐름을 표준화된 엔드포인트 형태로 관리한다. Service Binding은 게이트웨이와 브로커 간 연결을 담당하며, VM 및 컨테이너 서비스에서 요구되는 service account, connection credentials, secret key 등의 인증 정보를 관리한다. 이를 통해 플랫폼 간 서비스 접근 권한을 통일하고, 데이터 흐름의 신뢰성을 확보하였다. Service Broker는 관리형 서비스 인스턴스로서 수집된 데이터를 처리 및 저장하는 중추 역할을 수행하며, 브로커 내부의 상태 정보를 기반으로 각 데이터 스트림의 상태를 실시간 모니터링하도록 설계하였다.

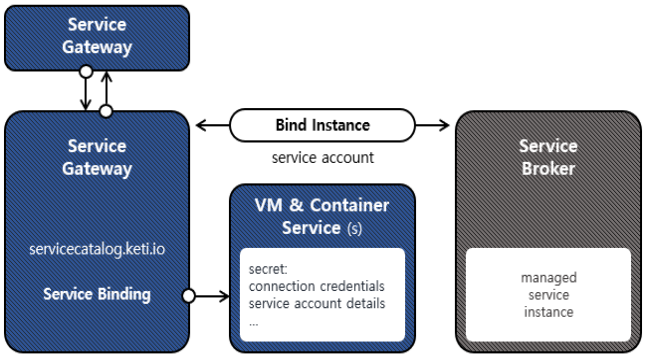


그림 2. 플랫폼 간 연동을 위한
서비스 브로커 바인딩 모듈 구조 설계안

또한, 데이터 전송 과정에는 메시지 브로커 기반 스트리밍 구조를 병행 설계하여, QoS(Quality of Service) 정책에 따른 전송 우선순위 설정과 패킷 손실 복원 기능을 지원하도록 하였다. 이를 통해 구급 데이터의 수집부터 전송, 저장에 이르는 전 과정을 계층적으로 관리할 수 있으며, 이기종 디바이스 간 연동성과 플랫폼 간 통합 운용의 안정성을 확보하였다.

결과적으로 제안된 프레임워크는 디바이스 연결 자동화와 플랫폼 연동 표준화를 동시에 달성할 수 있는 구조적 설계 방안을 제시한다.

3. 연구 결과

본 연구에서는 구급상황 대응을 위한 착용형 디바이스 연동 프레임워크를 두 계층인 디바이스 인터페이스 플러그인 구조와 플랫폼 간 Service gateway - Broker 구조로 나누어 설계하였다. 이를 통해 구급대원이 사용하는 다양한 디바이스 간 데이터 통합을 표준화하고, 수집된 데이터를 플랫폼 간 안전하게 교환 및 관리할 수 있는 기반을 마련하였다.

제안된 구조는 디바이스 추가나 통신 방식 변경에도 유연하게 대응할 수 있으며, 서비스 모듈별 기능이 분리되어 있어 시스템 확장성과 유지보수성이 용이할 것으로 기대된다. 향후에는 본 설계를 기반으로 실제 구급 현장 환경에서 프로토타입을 구현하고, 다양한 네트워크 조건에서의 안정성과 실효성을 검증할 예정이다.

4. Acknowledgements

이 연구는 2025년도 소방청 및 한국산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임. (RS-2023-00237687, 구급 현장 통합정보 연계 지능형 구급활동 지원 플랫폼 개발 및 실증)

5.참고 문헌

[1] Gathright, Rachel, et al. "Overview of Wearable Healthcare Devices for Clinical Decision Support in the Prehospital Setting." Sensors 24.24 (2024): 8204.

[2] Hegarty-Craver, Meghan, et al. "Wearable sensors for service members and first responders: considerations for using commercially available sensors in continuous monitoring." (2024).

[3] Damaševičius, Robertas, Nebojsa Bacanin, and Sanjay Misra. "From sensors to safety: Internet of Emergency Services (IoES) for emergency response and disaster management." Journal of sensor and actuator networks 12.3 (2023): 41.

[4] Baldini, Andrea, et al. "A real-time, open-source, IoT-like, wearable monitoring platform." Electronics 12.6 (2023): 1498.

"한국전자기술연구원 특별세션 논문임"

현장 신속 마약 검출을 위한 면역분석 기반 휴대용 센서의 최적화

곽연화*†, 전민지†, 김준섭, 김건년
한국전자기술연구원

Optimization of a Portable Immunoassay-Based Sensor for On-Site Rapid Drug Detection

Yeon Hwa Kwak*†, Minji Jeon†, Junsub Kim, Kunnyun Kim
Korea Electronics Technology Institute, Korea
*yhkwak@keti.re.kr, †Co-first authors

Abstract

Surface acoustic wave (SAW) immunosensing offers label-free, real-time screening but faces intrinsic challenges for low-molecular-weight drugs. We developed a portable SAW sensor and compared three immunosensing methods for Methamphetamine (MA): (i) a direct method with antibody-coated surfaces, (ii) a negative-competition method using a mass-amplifying MA–BSA conjugate after partial antibody occupancy, and (iii) a competitive assay with surface-immobilized MA–BSA after pre-incubating sample and antibody in solution. The direct method produced weak signals and the negative-competition increased apparent signal magnitude but remained variable. In contrast, the competitive assay yielded a robust inverse response to MA concentration, a wide dynamic range, and superior reproducibility, supporting reliable on-site detection of illicit drugs at crime scenes and in field investigations.

1. 연구 배경

마약 (불법 약물)의 신속 정확한 현장 검출은 공공안전에서 핵심이다. 범죄 현장에서는 채취 가능한 시료가 소량이거나 혼합 또는 오염되어 있는 경우가 많고, 시간 지연은 증거의 훼손이나 유실로 직결된다. 따라서 현장에서 곧바로 사용 가능하고(현장성), 숙련도 의존도가 낮으며(운용성), 결과의 객관성과 재현성이 확보된(신뢰성) 휴대형 센서의 필요성이 지속적으로 제기되어 왔다. 특히 마약과 같은 저분자 약물은 몰질량이 작아 비표지 측정에서 신호 자체가 미약하므로, 센서와 면역분석기법의 정교한 결합 최적화가 필수적이다.

현장에서 쓰이는 전통적 분석법은 GC–MS (Gas Chromatography-Mass spectrometry)가 대표적이며, 동정 정확도와 정량 신뢰도는 탁월하다 [1]. 그러나 장비가 크고, 시료 전처리 및 분석 시간이 길며, 숙련된 인력이 필요해 이동형 현장 운용에는 제약이 크다. 휴대형 라만은 비파괴 및 신속 측정이 장점이지만, 유사 구조물질 간 스펙트럼 간섭 문제가 발생한다. IMS (Ion Mobility Spectrometry) 기반 장비는 빠르고 민감하지만, 선택성 및 교차반응성 관리와 주기적 캘리브레이션이 관건이다. 이와 달리 면역분석법 (Immunoassay)은 항체 특이성을 활용해 현장성을 확보할 수 있으나, 일반적인 광학 표지 (형광 또는 금나노 입자) 방식은 신호 증폭이 가능하지만, 표지의 광표백과 온도 의존성 등 현장 사용성에 제약이 따른다.

이런 맥락에서 표면탄성파(Surface Acoustic Wave, SAW) 센서는 표지 없이(label-free) 표면의 질량·점성·탄성 변화를 주파수변화로 읽어낼 수 있어 면역센싱 플랫폼으로 주목받아 왔다. SAW—특히 액상에 적합한 Love-wave 구조—는 실시간 신호판독과 소형화가 가능하며, 차동(reference) 채널을 통해 환경 드리프트를 보정하기 쉽다. 다만 저분자 표적은 항체(≈150 kDa) 대비 질량이 수백 Da 수준으로 작아, 항체 고정 표면에 직접 결합시키는 direct method 만으로는 충분한 주파수 변화가 나오기 어렵다. 또한 저분자는 해리속도가 상대적으로 빨라 결합 안정성이 낮고, 표면 근방 전달(확산) 지배 현상에 민감해 신호-잡음비와 재현성이 저하되기 쉽다.

이 한계를 보완하기 위해 다양한 신호 증폭 전략이 제안되었다. 대표적으로 (1) 네거티브 경쟁방식 (negative-competition)은 저분자에 캐리어 단백질(BSA 등)을 결합해 유효 결합 질량을 키우는 방식, (2) 경쟁(competitive) 면역분석으로 표면에 결합하는 단위를 항체 자체(≈150 kDa)로 하여 신호 크기를 안정화하는 방식이다. 이 중 (2)는 표면에 마약–BSA 접합체를 고정하고, 시료(자유 마약)와 항체를 사전혼합하여 혼합액을 만든 뒤 센서에 주입하므로, 표면에 실제로 부착 및 기여하는 질량이 항체로 통일된다. 결과적으로 동적 범위가 넓고, 칩 제조 및 운용 편차에 덜 민감한 교정이 가능하다는 장점이 있다.

본 연구는 메스암페타민 (Methamphetamine, MA)을 모델로 세 가지 면역분석법을 동일 플랫폼에서 정량 비교하고, 특히 경쟁 포맷 (표면 마약–BSA 고정 + 항체–시료 사전혼합)에서 재현성 높은 성능을 확보하는 결론에 이르는 방법을 제시한다. 이는 범죄 현장과 같은 불법 약물의 존재 여부 파악에서부터 약물의 종류까지 신속 정확하게 검출 가능하게 하며, 저분자를 타겟으로 한 전반에 일반화 가능한 현장 실용화 방법으로 적용 가능할 것이다.

2. 연구 방법

본 연구에서는 표면탄성파 센서를 제작하기위해 압전 특성을 가지면서 온도 안정성이 높은 AT-cut quartz를 기판으로 사용하였다. 기판에 Al IDT (Interdigital Transducers) 전극을 만들기 위해 Ti/Al를 sputtering 방법으로 증착하였고, 초기주파수 318MHz를 갖도록 파장(wavelength, λ)을 16μm로 설계후 포토리소그래프 공정으로 패터닝하였다. SiO_2 가이딩레이어는 표면탄성파를 효과적으로 전달하고 감지할 있도록 하면서도 전극이 액체에 노출되는 것을 막는 역할을 하며, PECVD로 800nm 두께로 증착하였다. Au 감지막은 e-beam evaporation 방법으로 증착하였으며 포토리소그래피 공정과 O_2 플라즈마 공정으로 완성하였다. (Fig. 1)

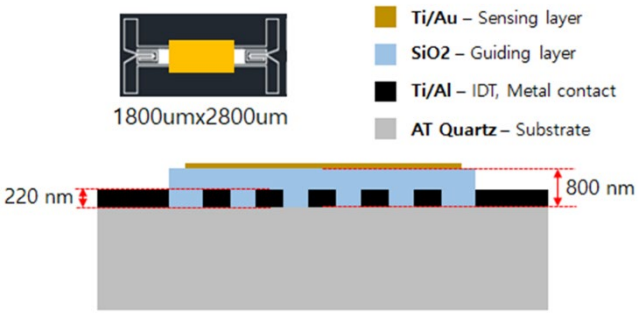


Fig. 1 Surface acoustic wave sensor structure

제작된 센서에 메스암페타민 검출을 위해서 3가지 접근법으로 실험하여 그 결과를 비교평가하였다. Fig. 2에서와 같이 첫번째 방법인 Direct method 측정에서는 감지막에 항체가 직접 고정화되는 형태이기 때문에 항체와 Au 기판의 연결을 위해 A/G Cystein을 사용하였다. 항체 고정후 MA가 주입될때의 주파수변화를 측정하였다. 두번째 방법인 negative competition 에서는 첫번째 방법진행후 MA-BSA가 추가 결합될때의 주파수 변화를 측정하였다. 세번째 방법인 competitive metnod는 먼저 MA-BSA를 Au 기판에 고정화해 놓은 상태에서 샘플을 항체와 별도로 혼합하여 결합하고 남은 항체가 최종적으로 MA-BSA와 결합하여 주파수 변화를 보이는 방식으로 측정하였다.

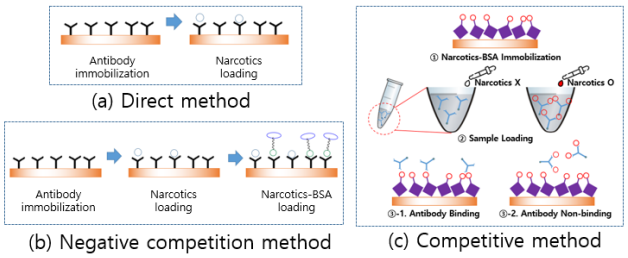


Fig. 2 Immunoassay methods

3. 연구 결과

세가지 방법의 측정결과를 Fig. 3에서 보여주며, 순서대로 direct method, negative competition, competitive method 의 결과이다. Direct method의 경우 항체와 항원의 반응량에 비례해서 주파수가 변화하지만 주파수변화량이 -Δf 이므로 우하향 그래프 결과를 예상하였다. 그러나, Fig. 3(a)에서와 같이 주파수변화량 자체가 매우적고 주파수 변화량의 일관성과 재현성이 보이지 않았다. 그 이유는 항체(~150kDa)의 크기에 비해 매우작은 MA (~150Da)가 항체에 부착하기 때문에 이때 발생하는 주파수 변화량이 미미하거나, 결합량이 항체의 orientation에 의해 의존될 수 있기 때문이다. 두번째 negative competition의 경우, 항체가 고정화된 센서 표면에 MA를 주입후 MA와 결합하지 않고 남아있는 항체에 MA-BSA가 부착하기 때문에 MA-BSA의 결합량에 비례해서 주파수가 변화하지만 주파수변화량이 -Δf 이므로 우상향 그래프 결과를 예상하였다. 이 방법을 적용한 이유는 단순 항체와 MA간의 결합신호는 MA 분자량이 매우 작아서 주파수 변화신호가 매우 작기 때문에 이후 남아있는 항체에 보다큰 분자량을 가지는 MA-BSA의 결합신호를 확인함으로써 MA 결합량을 추정하는 것이다. Fig. 3(b)에서와 같이 주파수 변화량이 direct 결합때보다는 증가하였지만, 농도대비 변화량(즉, 감도)이 작고 재현성 있는 결과 확보가 어려웠다. 세번째 측정법인 competitive method는 현장에서 발견되는 MA 마약의심 샘플에 대해 MA유무부터 MA 농도까지 파악 가능한 방법으로, MA-BSA를 기판에 고정후 MA 마약 의심샘플을 MA 항체와 별도로 섞은 후 MA-BSA 고정화 기판에 주입한다. 이때 샘플에 MA가 존재하지 않을경우는 결합하지 않은 항체가 MA-BSA에 붙기 때문에 주파수 변화량이 커지고, 샘플에 MA가 존재할 경우 이미 항체와 반응하여 잔존하는 항체만 MA-BSA에 붙기 때문에 주파수 변화량이 작아진다. 따라서 주파수변화량과 MA 농도와 반비례 그래프가 그려지며, 주파수변화량이 -Δf 이므로 우상향 그래프를 예상할 수 있다. Fig. 3(C)와 같이 MA 저농도 0.01μM에서도 구별가능한 신호를 확인할수 있으며 선형적인 신호를 확보하였다.

이러한 방법으로 최적화된 마약검출 센서는 현장에서 발견되는 미지의 샘플에서 의심마약 유무를 신속하게 판별하는 방법으로 사용 가능하다. 또한 다양한 항체가 혼합된 용액에 의심 샘플을 혼합 후 센서 어레이에 주입할 경우 마약의 유무뿐만 아니라 의심 마약의 종류도 판별 가능하다.

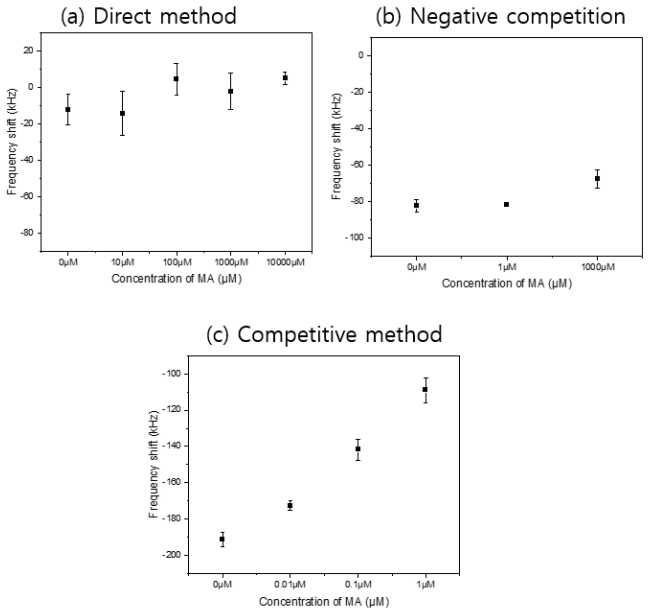


Fig. 3 MA detection results according to each method (n=3)

4. Acknowledgements

이 연구는 경찰청 및 과기정통부 과제의 지원을 받아 수행하였음. (RS-2025-02473063)

5. 참고 문헌

[1] R. Ahmed, M.J. Altamimi, M. Hachem, “State-of-the-Art analytical approaches for illicit drug profiling in forensic investigations”, *Molecules*, Vol 27, 6602, 2022

생체계측

좌장: 조영욱(인천대학교), **박정우**(경북대학교)

11월 7일 (금) **장영실 대강당 (09:15-10:45)**

강교원(한국외국어대학교)
Invited Deep Learning Based Wearable Device for Silent Speech Recognition and Sign Language Recognition

전진우(한국로봇산업진흥원)
Invited 초음파 기반 의료 광학 영상 및 치료: 광학적 한계 극복

홍성욱(POSTECH)
Pupillometry-based Fully Non-invasive Closed-loop Transcutaneous Tibial Nerve Stimulation System for Bladder Control

박주안(고려대학교)
Association between Heart Rate Variability (HRV) and Natural Killer (NK) Cell Status: An Exploratory Study for Non-invasive Immune Monitoring

손장재(한양대학교)
Development of an Accelerometer-Based Silent Speech Interface Robust to Head Motion Artifacts Using a Denoising Autoencoder



강교원/Kyowon Kang
조교수/Assistant Professor
한국외국어대학교 바이오메디컬공학부/Hankuk University of Foreign Studies, Department of Biomedical Engineering

딥러닝 기반 웨어러블 디바이스을 통한 침묵형음성인식 및 수화 인식 시스템
Deep learning based wearable device for silent speech recognition and sign language recognition

Abstract

Bridging communication gaps for individuals with speech or hearing impairments remains a critical challenge. This work presents a multidisciplinary approach combining advanced wearable bioelectronic devices with deep learning to realize two scalable and user-independent human-machine interfaces: a silent speech interface (SSI) and a sign language translation system.

For the SSI, we introduced an ultra-thin crystalline silicon-based stretchable strain sensor combined with a 3D convolutional neural network (CNN). This robust system, utilizing four biaxial strain sensors (eight channels) in a mesh-serpentine design, non-invasively tracks facial skin deformation. The system achieved a high word recognition accuracy of for a large 100-word vocabulary, demonstrating the high spatial resolution and robustness of this strain-gauge-based approach. In parallel, we developed a wirelessly-connected, modular ring-type sign language translator (WRSLT) to address the limitations of traditional glove-type systems. The WRSLT utilizes independent, flexible sensor rings with 3-axis accelerometers and Bluetooth multi-link technology to enable unrestricted finger movement and fully wireless inter-ring connectivity. By selectively using seven dominant fingers, the system demonstrated robust user-independent recognition performance on large datasets (100 ASL and 100 ISL words), achieving high accuracies of 88.65% under unseen-user conditions. A sequential word detection framework further enables real-time, sentence-level translation from continuous signing input.

These results highlight the significant potential of integrating advanced flexible/stretchable wearable bioelectronics with dedicated deep learning architectures to create scalable, robust, and user-independent platforms for real-time communication in diverse scenarios.

Brief Biosketch

- **현재 한국외국어대학교 바이오메디컬공학부 조교수**
- **연세대학교 전기전자공학부 석사, 박사**
- **다양한 wearable/implantable system 을 통한 손상된 인체 기능 대체에 관한 연구 수행**



전진우 / Jinwoo JUN
수석연구원 / Head Researcher
한국로봇산업진흥원 / KIRIA

글로벌 휴머노이드로봇산업 및 기술 동향과 전망
Global Humanoid Robot Industry and Technology Trends and Outlook

Abstract

The commercialization race for humanoid robots — human-like robots — which was triggered when Tesla began developing its "Optimus Bot," is rapidly accelerating worldwide against the backdrop of advances in artificial intelligence technology. This article examines the development trends and current status of humanoid robots and introduces technologies related to human motion and biomimicry that actively utilize AI. Based on State-Of-The-Art (SOTA) core technologies, it explores the trends of companies developing humanoid robots using foundation models. It also introduces robot learning through behavior cloning, data augmentation techniques based on robot foundation models, and discusses implications from a biomedical engineering perspective.

Brief Biosketch

한국로봇산업진흥원 창립 멤버로 지난 16 년 간, 로봇산업 및 기술정책, 로봇안전 표준인증 등 업무를 수행하며 한국의 로봇산업 발전에 기여하여 왔다. 한국 AI 윤리학회, 한국로봇학회, 한국재활로봇학회 이사로 활동하고 있고, 숭실대학교 안전융합대학원에서 로봇안전 분야 겸임교수로도 재직 중이다.

As a founding member of the Korea Institute for Robot Industry Advancement, he has contributed to the development of Korea's robotics industry over the past 16 years by working on robotics industry and technology policy, as well as robot safety standards and certification. He currently serves as a board member of the Korean Society for AI Ethics, the Korean Robotics Society, and the Korean Society for Rehabilitation Robotics. He is also an adjunct professor in the field of robot safety at the Graduate School of Safety Convergence at Soongsil University.

동공반응 기반 완전 비침습 폐회로 경피적 경골신경 자극 방광 조절 시스템

홍성욱[1] , 조민근[1], 박성민[1,2*]

포항공과대학교 기계공학과[1]

포항공과대학교 IT융합공학과[2]

Pupillometry-based Fully Non-invasive Closed-loop Transcutaneous Tibial Nerve Stimulation System for Bladder Control

Sunguk Hong[1] , Mingeun Cho[1], Sung-Min Park[1,2*]

Department of Mechanical Engineering, Pohang University of Science and Technology (POSTECH), Korea [1]

Department of Convergence IT Engineering, Pohang University of Science and Technology (POSTECH), Korea [2]

[*] sungminpark@postech.ac.kr

Abstract

Closed-loop (CL) neuromodulation can enhance therapeutic efficacy by delivering stimulation tailored to physiological states, but its clinical translation has been limited by reliance on invasive signal acquisition. To broaden clinical applicability, the development of CL systems based on noninvasive biomarkers is required. In this study, we focused on bladder control. Transcutaneous tibial nerve stimulation (tTNS) modulates bladder reflexes through the sacral nerve pathway and suppresses detrusor overactivity, yet clear guidelines for determining stimulation timing are lacking. We hypothesized that pupillary dynamics, a representative indicator of locus coeruleus (LC) activity known to increase immediately before micturition, could serve as a predictive biomarker. Based on this hypothesis, we developed a fully noninvasive CL bladder control system that detects frequent micturition via pupillometry and automatically delivers tTNS. Practical test results demonstrated that the system effectively detected frequent micturition events and autonomously applied therapeutic stimulation. This work establishes pupillometry as a reliable biomarker for CL neuromodulation and presents a new paradigm for noninvasive, clinically translatable CL bladder control.

1. 연구 배경

신경조절은 약물 치료의 한계를 극복할 수 있는 유망한 만성질환 치료 전략이지만, 기존의 개방형(Open-loop, OL) 제어 방식은 전문가가 환자의 상태를 수시로 점검하고 그에 맞는 자극 파라미터를 결정해야 하기 때문에, 광범위한 사용이 제한되는 명확한 한계를 갖고 있다. 이를 극복하기 위해 환자의 상태를 자율적으로 모니터링하고 그에 맞는 자극 파라미터를 스스로 결정하는 폐회로(Cosed-loop, CL) 제어 기술이 신경조절 분야에서 폭넓게 연구되고 있다. 하지만, 전문가의 개입 없이 환자의 상태를 정확히 모니터링하기 위하여 주로 신경전극 혹은 센서 등을 수술을 통해 체내에 삽입해야 하기 때문에, 임W상 적용이 제한되고 있다. 따라서 신뢰할 수 있는 비침습적 피드백 신호의 발굴이 폐회로 제어기술의 임상적 활용성을 극대화시키기 위한 중요한 과제로 떠오르고 있다.

동공측정법(Pupillometry)는 동공의 확장 및 이동에 관한 패턴을 분석하는 기법으로서, 최근 신경조절 분야에서 새로운 비침습 바이오마커로서 인정받고 있다. 동공은 빛과 각성 등의 요인에 반응하여 홍채의 괄약근과 확장근에 의해 조절됩니다. 중요한 점은 동공 직경이 뇌의 청반점(Locus coeruleus, LC)과 노르아드레날린(Noradrenergic, NA) 시스템의 신경 활동을 빠르고 민감하게 반영한다는 것이다. 최근에 발표된 연구들에서는 동공의 확장 패턴이 LC의 활성 패턴과 높은 관계성이 있다는 것이 확인되었으며, 이는 이는 동공 반응이 LC-NA 시스템 활동의 지표 역할을 할 수 있음을 시사한다

우리는 비침습적 바이오마커인 동공측정법과 경피적 신경자극 기술을 결합하면, 신경조절 기술을 완전 비침습적으로 전환함과 동시에 폐회로 알고리즘을 통한 자율형 시스템으로 발전시킬 수 있을 것이라는 가설을 세웠다. 우리는 우리의 가설을 증명하기 위해 경피적 경골신경자극(Transcutaneous tibial nerve stimulation, tTNS) 기술과 동공측정법을 결합한, 완전 비침습 폐회로 배뇨 주기 조절 시스템을 제시한다. tTNS는 천골신경(Tibial nerve) 경로를 통한 방광 반사 조절과 배뇨근 과활동 억제를 통해 방광 질환에 유의미한 치료 효과를 보이는 것으로 알려져 있다 [1]. 또한, 배뇨 10~30초 전에 뇌의 LC가 활성화되며, LC의 활성은 동공의 확장을 통해 표현된다 [2]. 제안한 시스템은 침습적 바이오마커 없이 배뇨 주기를 비침습적으로 정량화할 수 있으며, 동공의 급격한 확장을 신호로 활용하여 자율적으로 tTNS를 수행한다. 이러한 접근은 (i) 기술적용에 대한 환자의 접근을 극대화하고, (ii) 전문가의 개입없는 자율적 치료기기이며, (iii) 상용화된 장비를 기반으로 쉽게 구현할 수 있다는 장점을 가진다.

2.연구 방법

본 연구에서는 포항공과대학교 기관동물관리위원회의 승인(POSTECH-2025-0099)을 받아 Long-Evans 랫드(수컷, 300–350 g, 8–12주령)를 대상으로 실험을 수행하였다. 이소플루란으로 마취 후, 자율신경계 기능 유지를 위해 우레탄 마취를 적용하였다. 방광 노출 후 카테터를 삽입해 압력 변환기와 주입 펌프에 연결하고, 50–100 μl/min의 속도로 생리식염수를 주입하여 약 3분의 배뇨 간격을 유도하였다. 정상적인 배뇨가 나타나지 않거나 누출이 발생한 경우는 분석에서 제외하였다. tTNS는 스테인리스 전극으로 수행되었으며, 2.5 mA, 200 μs, 20 Hz 조건에서 20분간 자극을 주었고, 자극 전후 배뇨 간격 변화를 측정하였다.

3. 연구 결과

3.1. 배뇨 예측 바이오마커로서의 동공 반응

동공의 확장이 배뇨의 바이오마커로 기능할 수 있는지 분석하였다 (그림 1a). 그 결과 동공 패턴과 방광 압력 패턴 사이에서 피어슨 상관계수 0.71의 강한 상관관계가 확인되었으며, 이는 동공을 통해 방광의 패턴을 간접적으로 탐지할 수 있음을 시사했다.

또한, 배뇨 사건과 최대 방광 수축 시점의 관계를 분석한 결과, 동공 피크가 평균적으로 약 24초 지연되어 나타났다 (평균±표준편차; -24.61 ± 37.42초). 그러나 피크 기반 접근은 노이즈와 개인 간 변동성에 크게 영향을 받았다. 보다 정확한 예측을 위해 동공의 급격한 확장 시점 (Pupil dilation, PD)을 기준으로 분석한 결과, 평균적으로 실제 방광 수축 (Bladder contraction, BC)보다 13.5초 빠르게 배뇨를 예측할 수 있었다 (13.49 ± 15.75초). 이러한점은 LC의 반응이 배뇨 반응보다 10~30초 선행한다는 기존의 연구 결과와 부합한다. 또한, 배뇨 전후 동공 크기가 약 3배 증가하는 뚜렷한 변화를 보이며, 이는 배뇨로 인한 동공 패턴이 다른 동공 패턴과 명확히 구별됨으로써 배뇨 탐지의 오작동 가능성을 최소화할 수 있음을 시사한다 (Fig. 1b).

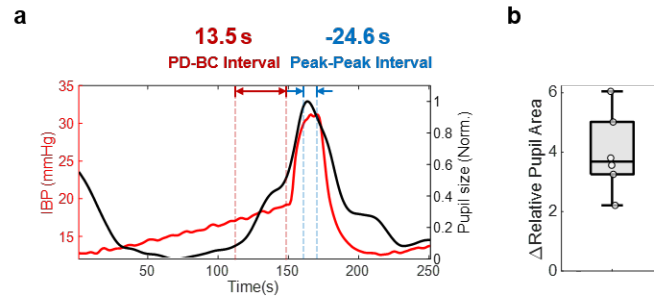


그림 1. 동공 반응은 배뇨를 예측할 수 있는 바이오마커가 될 수 있다. (a) 배뇨 주기 동안 방광내압 (IBP)과 동공 역학을 동시 기록한 결과. (b) 배뇨 전후의 평균 동공 확장.

3.2. tTNS의 배뇨 주기 지연 효과

tTNS의 효과는 5마리 Long-Evans 랫드를 대상으로 한 동물 실험에서 검증되었다. 20분간의 tTNS 후, 배뇨 간격이 20% 이상 유의하게 지연되었으며 (중앙값 [Q1, Q3] = 20.3 [16.6, 54.3]%, p = 0.03), 최대 수축 압력 또한 유의하게 감소하였다 (정상 = 39.5 mmHg, tTNS = 36.5 mmHg, p = 0.03). 반면, 배뇨 수축이 시작되는 역치 압력은 큰 변화가 없었다 (정상 = 22.1 mmHg, tTNS = 21.3 mmHg, p = 0.22) (그림 2). 이러한 배뇨 패턴은 이식형 전극을 사용해서 배뇨 주기를 지연시킬 때와 완전히 동일한 패턴이며, 우리의 시스템이 기존의 이식형 시스템과 동일한 배뇨 지연 효과를 발생시킬 수 있음을 보여준다.

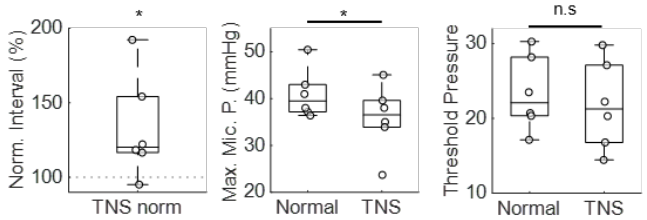


그림 2. tTNS가 방광 기능에 미치는 영향. (a) 배뇨 간격 변화. (b) 최대 방광 수축 압력 변화. (c) 역치 압력 변화.

3.3. 완전 비침습 폐회로 배뇨 주기 조절 시스템

우리는 동공측정법을 기반으로 빈번한 배뇨를 자동으로 탐지하고 치료하는 완전 비침습 배뇨 주기 조절 시스템을 개발하였다. 시스템은 동공 크기의 급격한 변화를 탐지하고 배뇨 간격을 자율적으로 계산한다 (그림 3a). 동공 확장으로 검출된 배뇨 패턴이 일반적인 배뇨 속도보다 빠르게 연속으로 발생되면 과민성 방광(Overactive bladder, OAB)으로 진단하며, 즉각적으로 tTNS를 수행하여 배뇨 주기의 조절을 실시된다 (그림 3b).

그림 3c는 실제 Long-Evans 랫드를 대상으로 수행한 실험을 보여준다. 쥐의 방광에는 일정한 속도 (50μl/min)로 생리식염수가 주입되며, 이에 따라 일정한 주기의 배뇨가 수행된다. 실험 시작 후 1600초가 되면 주입 속도를 100μl/min로 증가하여 유사 OAB 상태를 만들며, 이때 동공 패턴을 통해 배뇨 주기가 감소되었다고 시스템이 판단하면, 자율적으로 자극을 수행하였다. 본 실험에서는 일반적인 배뇨 간격이 271초, 유사 OAB 상태가 129초로 약 2.1배 속도가 증가하였다. 하지만 유사 OAB 상태에서 자극을 통해 배뇨 간격을 198초로 증가시켰다. 이는 동공 확장과 비침습적 자극 기술을 결합한 우리의 완전 비침습 폐회로 자극 시스템의 유효성을 보여준다.

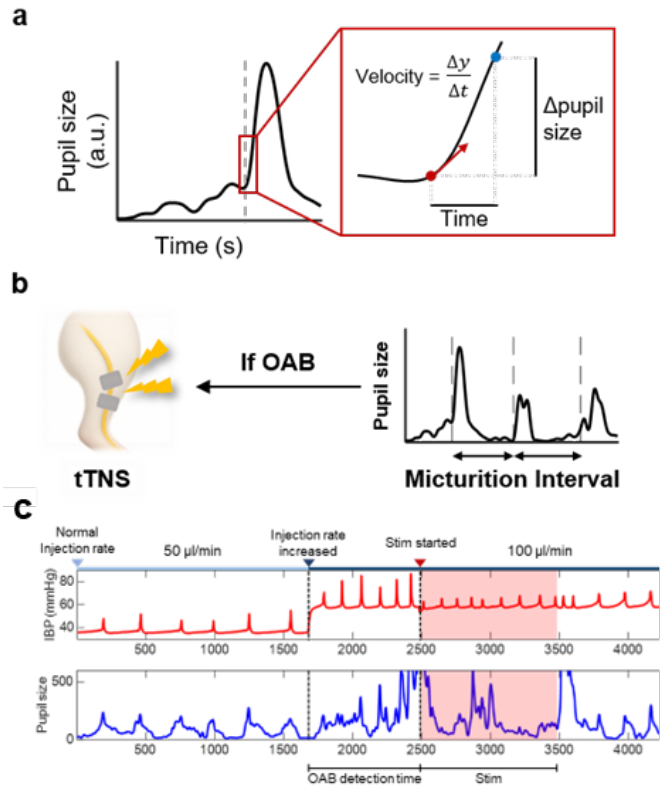


그림 3. 완전 비침습 폐회로 배뇨 주기 조절 시스템 (a) 동공 패턴 기반 배뇨 탐지. (b) 탐지된 배뇨 주기 기반의 자율형 tTNS. (c) 실제 동물을 대상으로 시스템 적용 결과.

4. Acknowledgements

이 연구는 2024년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원 (No. RS-2024-00412658)과 2025 포스텍 차세대 융합연구 파이오니어 프로그램의 지원을 받아 수행되었습니다.

5.참고 문헌

[1] Bhide, A.A., et al. “Posterior tibial nerve stimulation for overactive bladder-techniques and efficacy.” *International Urogynecology Journal*, 2020.

[2] Manohar, A., et al. “Brainstem network dynamics underlying the encoding of bladder information.” *eLife*, 2017.

심박변이도와 자연살해세포 상태의 연관성: 비침습적 면역 모니터링을 위한 탐색적 연구

박주안[1], 이준석[1,2], 김나리[1], 황한정[1,2,3*]

고려대학교 전자·정보공학과[1]

고려대학교 인공지능 스마트융합기술 융합전공[2]

고려대학교 미래전략산업연구원 디지털헬스케어센터[3]

Association between Heart Rate Variability (HRV) and Natural Killer (NK) Cell Status: An Exploratory Study for Non-invasive Immune Monitoring

Ju-An Park[1], Jun-Seok Lee[1,2], Na-Ri Kim[1], and Han-Jeong Hwang[1,2*]

[1]Dept. of Electronics and Information Engineering, Korea University, Republic of Korea

[2]Interdisciplinary Graduate Program for Artificial Intelligence Smart Convergence Technology, Korea University, Sejong 30019, Republic of Korea

[3]Digital Healthcare Center, Sejong Institute of Business and Technology (SIBT), Korea University, Sejong 30019, Republic of Korea

*hwanghj@korea.ac.kr

Abstract

This study aimed to investigate the relationship between heart rate variability (HRV) from electrocardiography (ECG) and immunity. The immune status of participants was evaluated by measuring natural killer (NK) cell activity and NK cell counts from fingertip blood. ECG signals were recorded using the standard limb lead-I configuration during a six-minute resting state from which 21 HRV features were extracted. Using Pearson's correlation analysis, we identified associations between immune parameters and HRV. The results indicated that eight HRV indices showed significant positive correlations with immune parameters. Notably, NK cell activity was strongly associated with SDNN and SD2, while NK cell count correlated with parasympathetic indices such as RMSSD and pNN50. In conclusion, this study provides evidence that specific HRV features hold potential as non-invasive biomarkers for monitoring immune function.

1. 연구 배경

인간은 면역계를 통해 외부 병원체로부터 자신을 보호하고 건강을 유지해왔다. 면역계의 균형이 무너지게 되면 감염성 질환뿐 아니라 암이나 만성질환 등 다양한 질환의 위험성이 증가한다. 최근 들어, 신종 바이러스의 출현이 잦아지면서 개인의 면역력 관리의 필요성이 더욱 부각되고 있다.

대표적으로 측정되는 면역력 지표인 자연 살해(Natural Killer, NK) 세포 활성도는 만성 염증 수치나 항암 치료 모니터링과 같은 임상적 관리 도구로써 활용된다. 기존의 NK 세포 활성도 측정에는 세포독성시험, 유세포분석법 등 여러 측정법이 존재하나, 방사성 동위 원소를 사용하거나 긴 분석 시간 및 많은 혈액량을 필요로 한다는 한계가 있다. 최근에는 렌즈 프리 그림자 이미징(lens-free shadow imaging) 기법을 활용한 면역력 측정 장비가 개발되어 기존 한계를 일부분 극복하였으나, 여전히 분석에 수 시간이 소요되며, 혈액 채취가 필수적이다. 이러한 한계점을 극복할 수 있는 비침습적 면역력 모니터링 기술 개발이 요구된다.

심전도(electrocardiography, ECG)는 비침습적으로 측정할 수 있는 생체 신호로, 손목형 웨어러블 기기로 손쉽게 취득이 가능하여 비침습적 면역력 모니터링에 적합하다. 특히 심전도로부터 추출할 수 있는 심박변이도(Heart Rate Variability, HRV)는 자율신경계의 활동을 나타내는 지표로, NK 세포와 밀접한 관련이 있다고 밝혀졌다. 실제로 선행 연구에 따르면 심박수가 높은 군에서 NK 세포 활성이 유의미하게 낮으며[1], 운동 전후의 심박변이도 변화량 역시 NK 세포와 밀접하게 연관되어 있음이 보고되었다[2].

하지만, 대부분의 선행 연구에서는 일부 심박변이도 지표만을 활용하고, 스트레스 전후의 NK 세포 활성도 및 심박변이도의 차이만을 조사하여 심박변이도와 NK 세포와의 관계를 체계적으로 조사한 연구는 아직까지 부족한 상황이다. 따라서 본 연구에서는 안정상태 심전도에서 추출한 다양한 심박변이도 특징과 면역력 지표 간의 상관관계를 조사함으로써 비침습적 면역력 모니터링 시스템의 개발 가능성을 확인하고자 하였다.

2. 연구 방법

본 실험은 건강한 성인 12명(남성 8명, 여성 4명; 21.75 ± 1.96세)을 대상으로 면역력 지표와 심전도 신호를 취득하였다. 면역력은 NK 세포 활성도와 NK 세포수 두가지 지표로 평가하였으며, 이는 손가락 끝에서 0.5 mL의 혈액을 채취한 뒤 Cellytics® NK (Meta Immune Tech, Korea) 장비를 통해 측정하였다(그림 1(a)). 심전도는 눈을 감고 뜨는 과제를 각 1분씩 3회 반복하는 안정상태 동안 표준 사지 유도 Lead-I 방식에 따라 전극을 부착하여 측정하였다(그림 1(b), 1(c)). 해당 연구는 고려대학교 기관생명윤리위원회 심의를 받아 진행되었다[KUIRB-2024-0107-04].

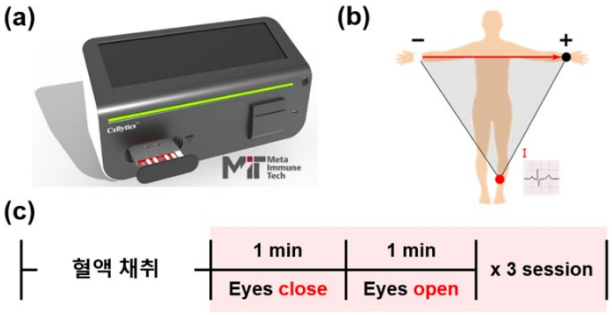


그림 1. 실험 장비 및 프로토콜 (a) 면역력 측정 장비 (b) Lead-I 전극 부착 위치 (c) 실험 패러다임

표 1. 21가지 심박변이도 지표

약어	지표	단위
RRI	RR interval	ms
SDNN	standard deviation of normal-to-normal (NN) intervals	ms
RMSSD	root mean square of successive differences	ms
pNN50	percentage of NN50	%
nuHF	normalized high-frequency power	%
HF	high-frequency power	ms^2
nuLF	normalized low-frequency power	%
LF	low-frequency power	%
LF/HF	ratio of low-frequency to high-frequency	%
TP	total power	n.u.
nuVLF	normalized very low-frequency power	%
VLF	very low-frequency power	ms^2
SD1	standard deviation 1	ms
SD2	standard deviation 2	ms
α1	short-term fluctuation exponent	n.u.
α2	long-term fluctuation exponent	n.u.
SampEn	sample entropy	n.u.
PIP	percentage of inflection points	%
IALS	inverse average length of segments	n.u.
PSS	percentage of NN intervals in short segments	%
PAS	percentage of NN intervals in alternation segments	%

획득한 6분의 심전도 신호는 잡음을 최소화하기 위해 5 – 40 Hz의 대역통과필터를 적용하였으며, 계산량을 줄이기 위해 200 Hz로 다운샘플링을 진행하였다. 이후, R 파를 검출하여 RR 간격(RR interval, RRI)을 계산하고, 육안 검사와 3x표준편차를 초과하는 이상치는 분석에서 제외하였다. 획득한 RR 간격은 MATLAB toolbox Physiozoo[3]를 이용해 시간 도메인, 주파수 도메인, 비선형 및 분절화 도메인 기반의 21가지 심박변이도 지표를 계산하였다(표 1). 얻어진 심박변이도 지표와 면역력 지표 간의 피어슨 상관관계 분석을 통해 지표 간 통계적 유의성을 검정하였다($p < 0.05$).

3. 연구 결과

표 2는 면역력 지표와 심박변이도 지표 간의 상관관계 분석 결과이다. 5개의 심박변이도 지표(SDNN, LF, TP, VLF, SD2)에서 NK 세포 활성도와 유의미한 양의 상관관계를 보였으며, 3개의 심박변이도 지표(RMSSD, pNN50, SD1)에서는 NK 세포수와 유의미한 양의 상관관계가 나타났다.

표 2. 면역력 지표와 심박변이도 지표 간의 상관계수(** $p < 0.01$, * $p < 0.05$)

	NK 세포 활성도	NK 세포 수		NK 세포 활성도	NK 세포 수
RRI	0.19	0.31	VLF	0.71**	0.20
SDNN	0.77**	0.28	SD1	0.38	0.62*
RMSSD	0.38	0.62*	SD2	0.82**	0.18
pNN50	0.32	0.68*	α1	0.14	-0.53
nuHF	-0.48	0.29	α2	-0.01	-0.02
HF	0.38	0.51	SampEn	-0.46	0.50
nuLF	0.14	-0.36	PIP	0.05	0.56
LF	0.63*	-0.17	IALS	0.05	0.56
LF/HF	0.25	-0.21	PSS	-0.06	0.56
TP	0.77*	0.27	PAS	0.44	-0.39
nuVLF	0.19	0.06			

이때, 높은 상관계수를 가진 지표 쌍의 산점도를 그림 2에 도식화하였다. NK 세포 활성도에서는 SDNN (r = 0.77, $p < 0.01$) 및 SD2 (r = 0.82, $p < 0.01$) 사이 유의미하게 높은 양의 상관관계를 보였으며, NK 세포수에서는 RMSSD (r = 0.62, $p < 0.01$)와 pNN50 (r = 0.68, $p < 0.01$)에서 높은 양의 상관관계를 보였다.

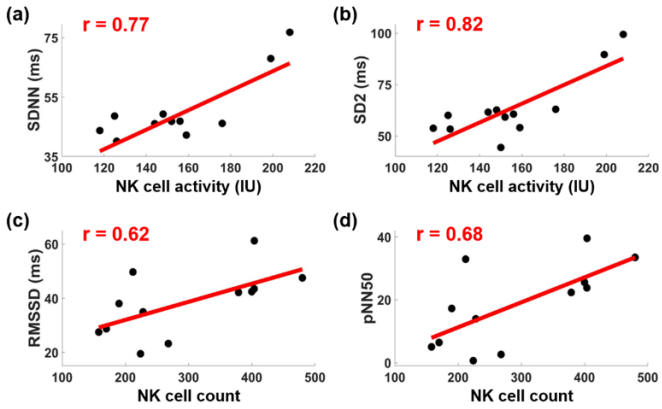


그림 2. 면역력 및 심박변이도 사이 산점도 (a) NK 세포 활성도 – SDNN (b) NK 세포 활성도 – SD2 (c) NK 세포수 – RMSSD (d) NK 세포수 – pNN50

본 연구에서는 심박변이도 지표와 면역력 지표인 NK 세포 활성도 및 NK 세포수 간의 상관관계 분석을 통해 심전도 기반 면역력 추정 가능성을 확인하고자 하였다. 그 결과, 8개의 심박변이도 지표에서 면역력 지표와의 유의미한 양의 상관관계가 나타났다. 선행연구에서는 안정 시 높은 심박수 군일수록 NK 세포 활성이 낮게 나타났으며, 이를 교감 항진과 부교감 억제가 동반된 스트레스 상태로 해석한다[2]. 본 연구에서는 부교감 지표인 RMSSD, pNN50 및 SD1이 하락할수록 NK 세포가 낮아지는 양의 상관관계를 보여 부교감 억제 상황에서 NK 세포도 하락하는 기존연구의 해석과 일치하는 결과를 보였다. 다만, 심박수 역수인 RRI 및 교감 지표인 LF/HF에서는 면역력과의 유의한 상관관계가 관찰되지 않았다. 이는 본 연구의 적은 표본 크기로 발생한 결과일 수 있으며, 선행 연구 피험자의 평균 연령(48.0 ± 11.6세)과 본 연구 피험자의 평균 연령(21.75 ± 1.96세)간에 차이가 존재하기 때문으로 사료된다. 따라서 향후 연구에서는 다양한 연령대의 대규모 표본을 통해 심전도와 면역력 지표 간의 상관성을 더욱 명확히 규명할 필요가 있다. 나아가, 본 연구에서 발굴된 바이오마커로 심전도 기반 비침습적 면역력 추정 시스템을 개발함으로써 일상생활에서의 면역력 추정이 가능할 것으로 기대된다.

4. Acknowledgements

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터사업의 연구결과로 수행되었음(IITP-2025-RS-2023-00258971).

5. 참고 문헌

[1] Oh, H., et al., “Association between resting heart rate and low natural killer cell activity: a cross-sectional study.”, *Frontiers in Immunology*, 2024, vol. 15: 1465953.

[2] Eda, N., et al., “Yoga improves immunosuppression after a prolonged intense exercise.”, *Physiology International*, 2025, vol. 112, no. 1, pp. 85-100.

[3] Behar, J. A., et al., “PhysioZoo: a novel open access platform for heart rate variability analysis of mammalian electrocardiographic data.”, *Frontiers in physiology*, 2018, vol. 9: 1390.

머리 움직임에 의한 동잡음에 강건한 잡음 제거 오토인코더를 활용한 가속도계 기반 무음발화 시스템 개발

Development of an Accelerometer–Based Silent Speech Interface Robust to Head Motion Artifacts Using a Denoising Autoencoder

Jangjay Sohn[1], Sungmin Jung[2], Heejin Choi[1], Hyeseong Jeon[2], Taehee Kim[3] and Chang-Hwan Im[1,2,3,4]*
[1] Department of Biomedical Engineering, Hanyang University, Seoul, Republic of Korea
[2] Department of Artificial Intelligence, Hanyang University, Seoul, Republic of Korea
[3] Department of Electronic Engineering, Hanyang University, Seoul, Republic of Korea
[4] Department of HY-KIST Bio-Convergence, Hanyang University, Seoul, Republic of Korea
jjaysohn@gmail.com

Abstract

This study presents a motion-artifact–robust silent speech interface (SSI) based on multi-channel accelerometers and a denoising autoencoder (DAE) that integrates Convolutional Neural Networks (CNN) and Bidirectional Long Short-Term Memory (BiLSTM) layers. Unlike conventional approaches trained solely on clean data, the proposed model was trained using artificially contaminated signals that simulate realistic head movements, amplitude variations, and temporal distortions. This augmentation strategy enables the DAE to separate articulatory patterns from motion-induced artifacts effectively. Experiments conducted with ten participants over six sessions showed that the DAE improved both signal quality and recognition performance under dynamic conditions. Specifically, the signal-to-artifact ratio (SAR) increased by 1.14 dB, and the average classification accuracy improved from 66% to 82%. These results demonstrate that the proposed CNN-BiLSTM-based DAE framework can maintain reliable performance even in environments affected by head motion, highlighting its potential for real-time, wearable silent speech communication systems.

1. 연구 배경

일반적으로 의사소통은 음성을 통해 이루어지지만, 발성이 불가능하거나 비현실적인 상황도 존재한다. 선천적 또는 후천적 언어 장애를 가진 환자, 군사·보안 분야에서의 무언 의사소통이 요구되는 상황, 혹은 소음이 심한 환경에서 작업하는 상황 모두는 언어적 의사소통에 어려움이 생긴다. 이러한 상황에서 무발성 음성 인터페이스(Silent Speech Interface, SSI)는 유망한 대안으로 주목받고 있으며, 현재 많은 연구들이 이뤄지고 있다. 기존 연구들은 단어 분류에서 문장 합성까지 다양한 SSI 응용을 시도해왔으며, 가속도계, 표면 근전도(sEMG), 초음파, 영상 기반 기법 등 다양한 센서 기반 기술이 사용되고 있는데, 특히 최근 발표된 가속도계를 활용한 방법은[1] 저전력 소형 센서와 실시간 처리 가능성이 높아 웨어러블 인터페이스에 적합하다는 장점을 가진다.

그러나 실제 사용에 있어서는 발화 중 고개 움직임에 의한 성능 변동성으로 인해 문제가 생기게 된다. 고개 움직임에 의한 신호의 진폭이 발화에 의한 신호의 진폭 보다 크기 때문에, 발화 도중에 좌우 혹은 상하로 고개를 끄덕이게 되면 신호의 왜곡이 분류에 끼치는 영향이 매우 커서, 무음발화 시스템의 실용화를 위해 해결해야하는 문제로 남아있다. 본 연구에서는 상하, 좌우 고개 움직임 으로 인한 성능 저하를 막기 위해 잡음제거 오토인코더를 훈련시켜 CNN-BiLSTM를 통해 분류한 SSI 시스템을 제안하였다. 잡음제거 오토인코더에서는 잡음제거를 위한 훈련을 위해 다양한 시점과 진폭을 고려한 순수 잡음 데이터를 깨끗한 데이터에 섞어 이로부터 깨끗한 데이터 내에 있는 정보를 복원하는 방향으로 잡음제거 오토 인코더를 훈련 시켰다. 본 연구는 가속도계 기반 SSI에서 동잡음을 제거하여 성능을 높인 최초의 사례로, 실제 응용 가능성을 크게 확장시킬 수 있을 것으로 기대된다.

2. 연구 방법

총 10명의 건강한 한국인 성인을 대상으로 가속도계 기반 무발성 음성 인식 실험을 수행하였다(남성 6명, 여성 4명, 평균 연령 27.1 ± 1.97세). 모든 참가자는 연구 참여 전 서면 동의서를 작성하였으며, 실험은 한양대학교 IRB의 승인을 받았다(IRB No. HYU-2019–11-007). 그림2. 1과 같이 센서는 턱, 뺨, 입 주위 총 5개 부위에 부착되었으며, 100Hz로 데이터를 수집하였다.

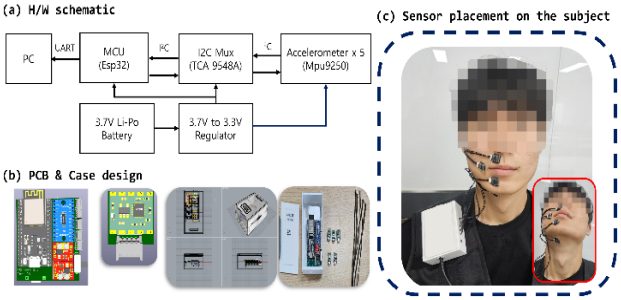


그림 1. 1 개발된 하드웨어와 실제 실험에 전극이 부착된 모습

실험은 총 여섯 세션으로 구성되었고, 이를 위해 실험 참가자들은 여섯 세션에 걸쳐서 30개의 단어를 발화하고, 첫번째 두번째 세션에서는 동잡음 없이 발화하고, 세번째 세션에서는 발화없이 노이즈만 측정하며, 네번째에는 수평 동잡음이 섞인 무음발화를, 다섯번 째는 수직 동잡음을 섞은 무음발화를 수행하게 하였다. 마지막에는 피험자가 임의로 수평, 수직 방향 중 하나를 택하게 하여 무음 발화 하게 하였다. 이를 통해 첫 번째 의 깨끗한 발화데이터와 세번째의 발화없이 동잡음만 측정한 신호를 통해 네트워크를 훈련시켜, 나머지 세션들의 발화 신호의 분류성능을 높이도록 네트워크를 설계하였다.

이를 통해 첫 번째의 깨끗한 발화데이터와 세번째의 발화없이 동잡음만 측정한 신호를 통해 네트워크를 훈련시켜, 나머지 세션들의 발화 신호의 분류성능을 높이도록 네트워크를 설계하였다. 그림 2.2는 잡음 제거 오토인코더의 구조를, 학습되는 과정에서 동잡음이 섞인 신호에서 깨끗한 신호의 정보를 복원하는 방향으로 학습이 진행되었고, 학습은 TensorFlow-Keras 환경에서 Adam 옵티마이저로 수행되었으며, 교차 엔트로피 손실 기준으로 200 에폭 동안 훈련되었다..

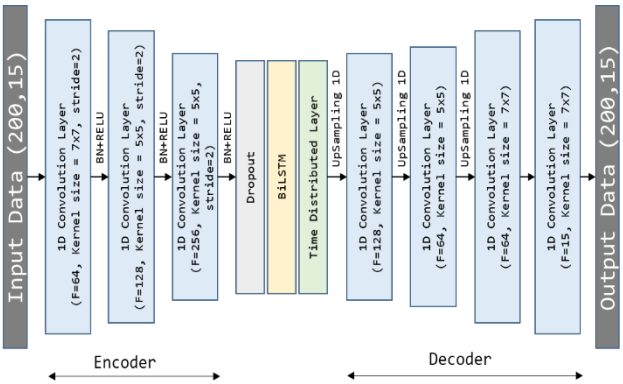


그림 2. 2 동잡음 제거를 위한 잡음제거 오토인코더의 구

3 연구 결과

잡음제거 오토인코더를 거친 신호와 거치지않은 신호를 비교하였을때, 거친 경우는 평균 66% 였는데, 거치고 나서는 82%로 정확도가 큰폭으로 향상되었다. 이는 잡음 제거 오토인코더가[2] 잡음속에 가려져 있는 발화정보를 정확하게 복원 했음을 시사한다.

또한 그림 3.1에서 보듯이 수직 동잡음과 수평 동잡음 모두에 효과가 있었지만, 수직 동잡음에서 훨씬 더 동잡음 제거로 인한 정확도 향상이 컸음을 보여준다. 가속도계 방향이 수직 잡음이 수평 잡음보다 가속도계 신호에 훨씬더 크게 영향을 끼친다는 것을 생각하며 본 연구에서 제안하는 딥러닝 네트워크가 실용화에 있어서 매우 유용하게 쓰일 수 있음을 암시하고 있다.

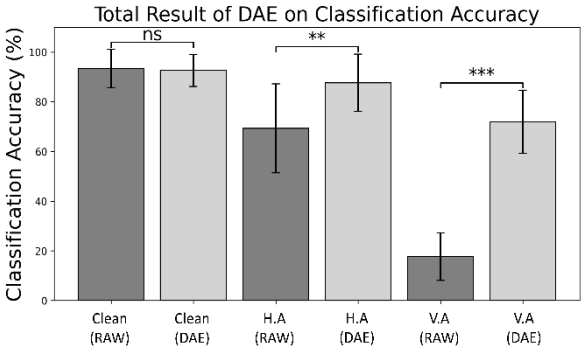


그림 3. 1 잡음제거오토 인코더 적용후의 정확도 향상

마지막으로 그림 3. 2에서 보듯이 복원된 신호로부터 우리는 잡음 제거 오토인코더가 원래 신호에 담겨있는 정보를 왜곡된 신호로부터 찾아낼 수 있음을 확인할 수 있었고, 실제 발화하면서 움직이는 데이터를 통해 훈련하지 않아도 보정과정을 통해 실용적으로 시스템을 사용할 수 있음을 본 연구를 통해 증명하였다.

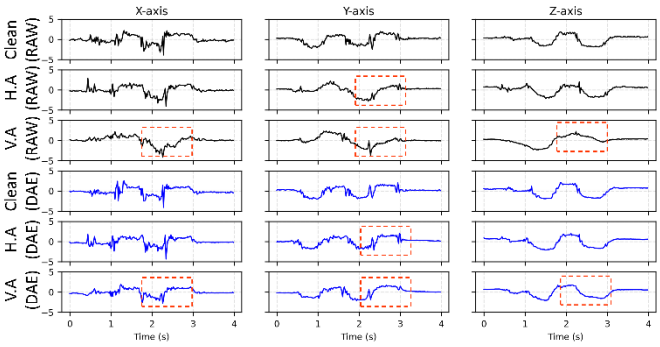


그림 3. 2 잡음제거 오토인코더가 복원한 원래 신호의 모습

4. Acknowledgements

이 연구는 National Research Foundation of Korea (NRF) 과제의 지원을 받아 수행하였음. (NRF-2024-00348497)

5.참고 문헌

[1] J. Kwon, J. Hwang, J. E. Sung, and C. H. Im, "Speech synthesis from three-axis accelerometer signals using conformer-based deep neural network," Comput Biol Med, vol. 182, p. 109090, Nov 2024,.

[2] M.-H. Sheu, Y.-S. Jhang, Y.-C. Chang, S.-T. Wang, C.-Y. Chang, and S.-C. Lai, "Lightweight Denoising Autoencoder Design for Noise Removal in Electrocardiography," IEEE Access, vol. 10, pp. 98104–98116, 2022,

의료영상 처리 및 시스템

좌장: 박은영(KAIST)

11월 7일 (금) **일강원 101 (09:15-10:45)**

연지은(POSTECH)
Contact-Mode Fluorescence Microscopy for Multi-Region Quantification of Conjunctival Goblet Cells in Humans

오승훈(POSTECH)
하이브리드 Diffusion 모델을 통한 3차원 PACT 시스템의 공간 및 시간 해상도 향상

김재승(연세대학교)
T1 강조 영상을 활용한 딥러닝 기반 정량적 T1 맵 추정

박준홍(한국외국어대학교)
Invited 지질학 최적화 기법을 활용한 치료 초음파 정밀 모니터링 시스템

이완형(중앙대학교)
Invited 직업적 특성과 뇌 구조 관찰 연구 및 협업 기회

Contact-Mode Fluorescence Microscopy for Multi-Region Quantification of Conjunctival Goblet Cells in Humans

Jieun Yun[1] , Arnab Shil[1], Seonghan Kim[1], Chang Ho Yoon[2], Ki Hean Kim[1*]
[1]Department of Mechanical Engineering, Pohang University of Science and Technology, Pohang, Republic of Korea
[2]Biomedical Research Institute, Laboratory of Ocular Regenerative Medicine and Immunology, Seoul National University Hospital, Jongno-gu, Seoul, Republic of Korea
[*]kiheankim@postech.ac.kr

Abstract

Accurate assessment of conjunctival goblet cells (GCs) requires imaging across multiple anatomical sites with markedly different densities. We introduce a compact contact mode moxifloxacin based fluorescence microscope (MBFM) with a narrow endcap that gently reaches nasal/temporal bulbar, inferior bulbar and fornix, and superior bulbar conjunctiva. The system acquires high contrast GC images (FOV 1.7 × 2.2 mm, ~1 μm resolution, 14 fps) and analyzes them with a segmentation-watershed pipeline to yield GC density maps. In healthy volunteers, we found reproducible regional heterogeneity (inferior fornix highest; nasal > inferior bulbar ≥ temporal/superior) and an age related decline. In a pilot drug response test, one week of rebamipide treatment increased GC density most in nasal and inferior bulbar sites. This new platform enables objective, multi region GC quantification and therapy monitoring at the point of care.

1. Introduction

Conjunctival GCs secrete mucins critical for tear film stability and play key roles for the ocular surface homeostasis [1]. GC loss accompanies dry eye disease, inflammation, and autoimmune conditions, motivating objective, site-resolved quantification as a clinically relevant biomarker [2, 3]. While non-contact MBFM has recently enabled in vivo GC imaging and density analysis in the inferior bulbar conjunctiva (IB) [4], marked by a yellow box in Fig. 1(a), many other conjunctival regions remain difficult to access by the current methods, limiting comprehensive GC status evaluation. In particular, robust examination of high-density regions such as nasal bulbar and inferior fornix in Fig.1(a) would be clinically valuable. We address this gap with a compact contact-mode MBFM designed for safe, gentle, multi-region imaging in humans.

2. Methods

The contact-mode MBFM is a compact wide-field fluorescence platform optimized for gentle access to multiple conjunctival sites. Excitation light is provided by a 405-nm LED coupled through an excitation filter and a dichroic mirror. A low magnification objective lens (10×/0.3-NA, dry) is used for uniform illumination and emission light collection. Images are recorded at a compact CMOS camera (MU196MR-ON, XIMEA) with small pixels via a bandpass filter and a tube lens. Effective magnification is 4.2×, yielding a 1.7 mm × 2.2 mm field of view (FOV) at ~1 μm lateral resolution. Imaging is 14 fps video acquisition for motion-robust sampling. A custom PMMA endcap with a narrow distal flat window, 4.6 mm in outer diameter and 0.5 mm in thickness, is fabricated and used to enclose the objective lens and to provide a stable, gently contacting surface, as shown in Fig. 1(b). The objective's focal plane is preset to lie slightly beyond the window, bringing the superficial epithelium into focus when the window touches the conjunctiva. The flat geometry minimizes pressure non-uniformity and allows consistent imaging on various conjunctival regions.

The device is mounted on a cross-slide base that enables 3D manual translation with subject feedback. Once positioned, acquisition sequences (~2 s per site) are then recorded as short videos with gentle lateral translations. 5 different conjunctival sites including IB, inferior fornix (IF), nasal bulbar (IB), temporal bulbar (TB), and superior bulbar (SB) are imaged. Acquired raw images go through local intensity normalization and light Gaussian-filtering to suppress shot noise while preserving punctate GC contrast. Sharp images with minor lateral drift are extracted and stitched to form a site-level mosaic, which is passed to the segmentation stage. We adopt a semi-automatic cell segmentation pipeline: (i) Trainable WEKA machine learning algorithm generates a probability map of GC-like pixels using intensity and local texture features [5]; (ii) cell clusters larger than ~50 pixels are split by Watershed algorithm to resolve touching cells [6]; (iii) binary masks are generated (hole fill, small-object removal) and used to count the segmented GCs and to obtain cell density. Per-site processing time is ~2 min on a laptop.

Images with motion blur or non-uniform contact (e.g., edge pooling of tear film) are flagged for reacquisition. Two independent sessions per site improve reproducibility; densities are averaged when both sessions meet quality control. The LED irradiance was measured at the window and duty-cycled exposure during 2-s acquisitions, radiant exposure was 0.24 J/cm², within ANSI ophthalmic safety limits for 405-nm ocular exposure [7]. No adverse events were observed.

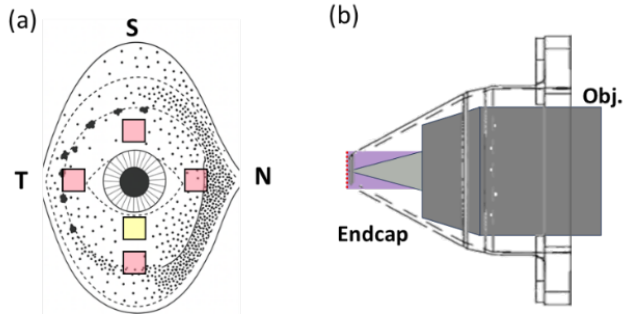
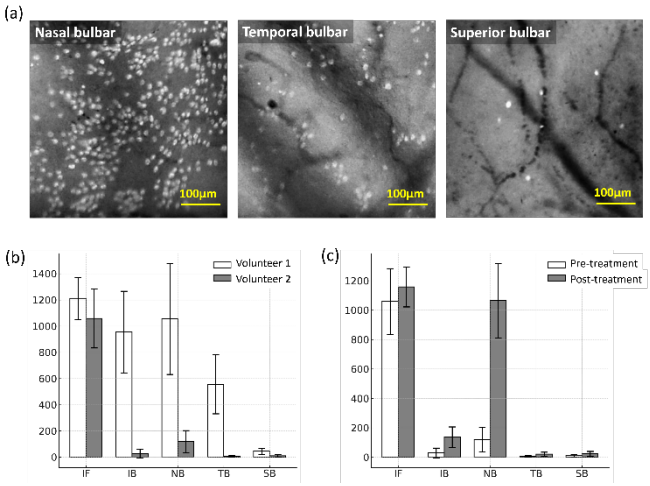


Figure 1. (a) Schematic illustration of the human conjunctiva regions and the distribution of GCs across different regions. (b) Cross-sectional schematic of the custom-designed endcap and the objective lens.

3. Results

The developed MBFM system was applied to multi-conjunctival site imaging of two healthy volunteers: a male volunteer of 56 years old and a female one at 25 years old. 5 conjunctival sites were imaged sequentially and the representative images are shown in Fig. 2(a). Acquired images were processed and GC densities were analyzed, and the results are presented as a bar chart in Fig. 2(b). Across subjects, GC density showed consistent site-dependent variations. IF exhibited the highest GC densities, followed by NB, then IB, with TB and SB lower. This ordering of GC density was reproducible across repeated acquisitions and matches the clinical expectation that mucin-rich regions (e.g., IF) host abundant GCs. The younger volunteer showed higher GC densities across all conjunctival regions than the older volunteer, indicating an age-dependent density variation. The current cohort is extremely small, and further investigation with more inclusion would be needed.

In addition to the inter-regional human study, a pilot study of observing drug effect (rebamipide, 4 times per day and one-week long) in the same subject (volunteer 2) was conducted and the results are shown in Fig. 2(c). GC density increased in most conjunctival sites after the treatment, indicating the efficacy of the drug. The largest post-treatment gains appeared at nasal and inferior bulbar sites, whereas the inferior fornix, already saturated at baseline, showed modest, non-significant changes. These findings suggest that high-density, but not fully saturated regions may provide greater dynamic range for therapy tracking.



(a) Representative GC images in the NB, TB, and SB conjunctiva with density variation. Scale bar = 100 μm. (b) Comparison of GC density across five conjunctival regions (IF, IB, NB, TB, SB) between two healthy volunteers (Volunteer 1: female, 20s; Volunteer 2: male, 50s). (c) Regional GC density variations before and after Rebamipide treatment for 1 week.

4. Acknowledgements

This work was supported in part by the Samsung Research Funding and Incubation Center of Samsung Electronics under Project SRFC-IT2101-05, by the National Research Foundation of Korea (NRF) grants (RS2023-00219421), and by the Korea Medical Device Development Fund (KMDF) (KMDF_RS-2023-00251073).

5. References

[1] Matsuzawa, M. et al. The protective role of conjunctival goblet cell mucin sialylation. Nat. Commun. 14, 1 (2023).
[2] Gipson, I. K. Goblet cells of the conjunctiva: A review of recent findings. Prog. Retin. Eye Res. 54, 49–63 (2016).
[3] Gipson, I. K. Goblet cells of the conjunctiva: A review of recent findings. Prog. Retin. Eye Res. 54, 49–63 (2016).
[4] Lee, J., Kim, S., Choi, W. J., Ryu, J. S., Yoon, C. H. & Kim, K. H. Surface tracking integrated extended depth-of-field microscopy for rapid non-contact examination of conjunctival goblet cells in humans. Biosens. Bioelectron. 116681 (2024).
[5] Arganda-Carreras, I. et al. Trainable Weka Segmentation: A machine learning tool for microscopy pixel classification. Bioinformatics 33, 2424–2426 (2017).
[6] Meyer, F. Topographic distance and watershed lines. Signal Process. 38, 113–125 (1994).
[7] Delori, F. C., Webb, R. H. & Sliney, D. H. Maximum permissible exposures for ocular safety (ANSI 2000), with emphasis on ophthalmic devices. J. Opt. Soc. Am. A 24, 1250–1265 (2007).

하이브리드 diffusion 모델을 통한 3차원 PACT 시스템의 공간 및 시간 해상도 향상

정현수[1], 오승훈[1], 최성욱[2], 김지웅[1], Jinge Yang[3], 김철홍[1*]

[1]포항공과대학교 인공지능대학원, 의과학대학원, 전자공학과, IT융합공학과, 기계공학과, 의료기기혁신센터

[2]Department of Radiology, Molecular Imaging Program at Stanford (MIPS), School of Medicine, Stanford University

[3]Departments of Medical Engineering, California Institute of Technology

3D Multiparametric Photoacoustic Computed Tomography Enhanced via Hybrid Diffusion Model

Hyunsu Jeong[1], Seunghun Oh[1], Seongwook Choi[2], Jiwoong Kim[1], Jinge Yang[3], Chulhong Kim[1*]

[1]Graduate School of Artificial Intelligence, Medical Science and Engineering, Departments of Electrical Engineering, Convergence IT Engineering, Mechanical Engineering and Medical Device Innovation Center, Pohang University of Science and Technology (POSTECH)

[2]Department of Radiology, Molecular Imaging Program at Stanford (MIPS), School of Medicine, Stanford University

[3]Departments of Medical Engineering, California Institute of Technology

[*]chulhong@postech.ac.kr

Abstract

Photoacoustic computed tomography (PACT) provides multiparametric biomedical information (e.g. structural, functional, and molecular). Even though a high-spec PACT system offers high-spatial resolution imaging, the system requires many ultrasound (US) transducers (> 1,000), inflating system costs and limiting temporal resolution. Here, we present hybrid diffusion PACT (HD-PACT), a diffusion-based deep learning framework that enhances dynamic multiparametric information from sparse- and cluster-view acquisitions with only using 128 or 256 US elements in premium PACT. HD-PACT improves structural images across different planes, organisms and wavelengths. In functional studies, HD-PACT allows 256-element PACT to track tumor hypoxia, carcinogenesis, and angiogenesis throughout tumor progression. Moreover, HD-PACT transfers to the lower-spec PACT, 128-element, capturing contrast-enhanced organ dynamics, brain responses under oxygen challenge, and cardiac motion with high spatiotemporal resolution *in vivo*. These results indicate that HD-PACT can facilitate cost-effective PACT and extends its reach into oncology, cardiology, pharmacology, and endocrinology.

1. 연구 배경

광음향 (Photoacoustic, PA)은 빛을 흡수한 조직이 열탄성 팽창을 통해 음파 신호를 생성하고, 이를 초음파 (ultrasound, US) 트랜스듀서가 감지하여 영상을 재구성하는 하이브리드 영상 기법이다. 이때 전방위로 방출되는 PA 파동을 효율적으로 검출하기 위해, 프리미엄 광음향 컴퓨터 단층촬영(Photoacoustic Computed Tomography, PACT) 시스템은 반구형 검출 배열을 채택하며, 그 결과 전임상 및 임상 연구에서 구조적·분자적·기능적 정보를 제공한다. 또한 나노초 레이저 펄스는 광대역 음향 신호를 유도하여 내인성 흡수체(예: 헤모글로빈, 지질)는 물론 외인성 조영제(예: Indocyanine-green, ICG)를 이용한 표적 분자 영상화까지 가능하게 한다. 더 나아가 다중 파장 조명(illumination)은 스펙트럼 분리(spectral unmixing)를 통해 산소 포화도와 같은 기능적 지표의 정량 추정을 지원한다. 그러나 이러한 이점에도 불구하고, 1,000개 이상의 US 트랜스듀서를 갖춘 프리미엄 반구형 PACT 시스템은 높은 공간 해상도를 제공하는 대신, 하드웨어 비용과 데이터 처리량이 크게 증가시켜 영상 속도를 저하시킨다.

2. 연구 방법

본 논문에서 이러한 문제를 극복하기 위해, 128 또는 256개 트랜스듀서만으로 다중 매개변수 (multiparametric) 다이나믹을 복원 및 향상시키는 확산 모델 기반 딥러닝 프레임워크인 하이브리드 확산 PACT(HD-PACT)를 제안한다. 그림 1. 은 HD-PACT의 전반적인 개요도다. HD-PACT는 256개의 희소 배열을 갖춘 PACT (256-sparse PACT)로부터 획득한 데이터를 사용하여 학습되었고, 3D context 정보를 효율적으로 활용하기 위해 인접한 세 장의 2D 슬라이스를

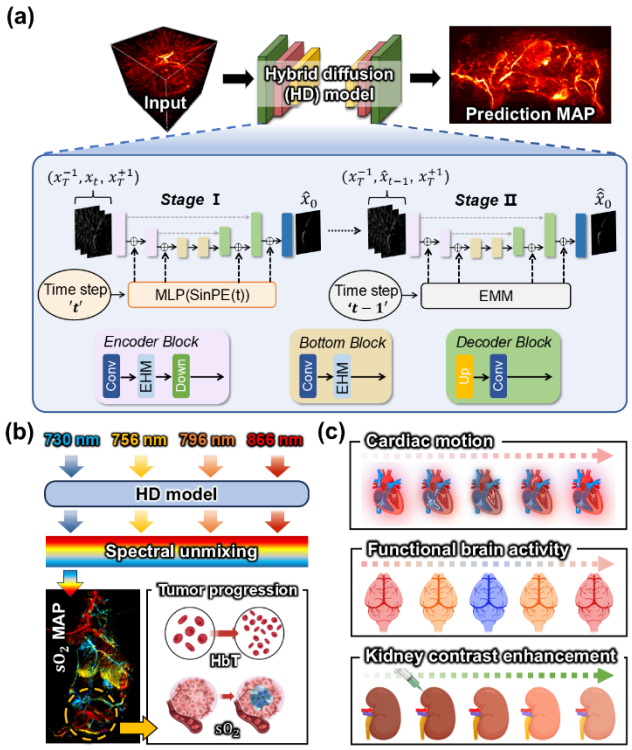


그림 1. HD-PACT 개요도. sO_2; 산소포화도, MAP; 최대 강도 투영, HbT; 총 헤모글로빈

모델의 입력으로 사용했다. 또한 PA 데이터의 특성을 반영한 전방 프로세스를 위해 가보르 (Gabor) 필터 기반의 열화 연산자를 사용하여 256-sparse 획득에서 관찰되는 streak 아티팩트 (artifact) 및 잡음을 모사하였다. Efficient-Hybrid Mamba (EHM) 모듈은 Efficient Channel Attention (ECA)[1], Mamba[2]로 구성되어, 채널 간 어텐션 정보와 더 중요한 정보를 선택적으로 추출하고, Efficient Self-Attention (ESA)[3] 구조를 활용하여, 효율적인 global 특징 추출을 수행하였다. 또한, HD 모델에 Error-Modulated Model (EMM)을 도입하여 시간 임베딩(time-embedding) 과정에서 발생할 수 있는 불일치를 보정하였다.

HD-PACT는 학습 과정에서 사용되지 않은 네 가지 파장 (730, 756, 796, 866 nm) 데이터를 이용한 스펙트럼 분리를 통해 산소포화도 MAP을 생성하고, 이를 통해 기능적 PACT에서도 우수한 일반화 성능을 입증하였다 (그림 1b).

뿐만 아니라, 128개의 클러스터 배열을 갖춘 PACT로 얻은 데이터로 전이 학습을 수행함으로써, 심장 주기 (cardiac cycle), 기능적 뇌 영상 (functional neuroimaging), 조영증강 신장 영상 (contrast-enhanced kidney imaging) 등 다양한 생리적 변화에 따른 다중 매개변수의 동적 변화를 고속으로 모니터링할 수 있음을 확인하였다 (그림 1c). 이로써 HD-PACT는 시스템 비용을 절감하고 자원 제약이 있는 전임상 및 임상 환경에서의 적용성을 확대할 것으로 기대한다.

3. 연구 결과

그림 2. 는 쥐 (mouse)에서 4T1 유방암 세포 접종 후 종양 진행 과정 동안 HD-PACT가 기능적 PACT 정보를 향상시킴을 보여준다. 프리미엄 PACT에 해당하는 1024-full의 결과를 보면 종양 유도 신생혈관(흰색 화살표)과 종양 중심부 저산소 (노란색 화살표)를 명확히 관찰되지만, 256-sparse PACT는 방사형 streak 아티팩트로 인해 세부 혈관 구조가 불명확하고 소실된다 (그림 2a). 반면 HD-PACT는 이러한 아티팩트를 효과적으로 억제하고 미세 혈관 연결을 복원하여, 종양 가장자리 (rim)와 중심부 (core)의 산소포화도 대비 경향성을 선명하게 재현한다 (그림 2b).

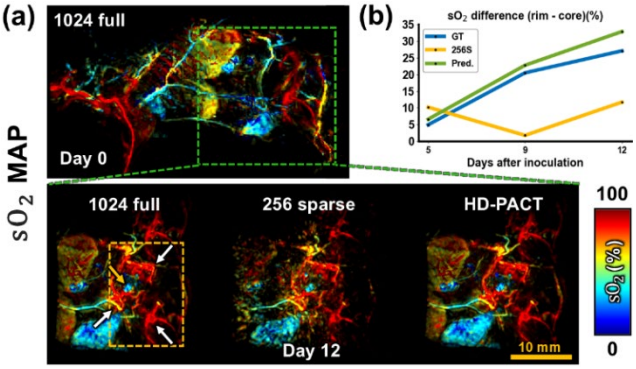


그림 2. 쥐의 종양 진행 중 기능적 PACT 결과

그림 3. 은 128개의 클러스터 배열을 갖춘 PACT (128-cluster PACT)로 획득한 데이터로 전이학습한 HD-PACT가 쥐 (mouse)에서 얻은 동적 PACT 정보를 성공적으로 복원 및 개선함을 보여준다. 그림 3a. 의 심장 (heart)과 신장 (kidney)의 MAP 결과에서 HD-PACT는 128-cluster PACT에서 두드러지는 streak artifact를 현저히 감소시키고, 혈관 구조 등의 해부학적 특징을 1024-fullF에 근접한 수준으로 선명히 복원한다. 그림 3b. 는 쥐에 ICG를 주입한 후, 간 (liver, 빨간 상자)에서 조영 동태를 추적하였을 때, HD-PACT가 대비증강 (contrast-enhancement) 신호 변화를 정확히 포착함을 보여준다. 또한, 그림 3c. 를 통해 쥐의 뇌에서 진행한 oxygen challenge 실험 중 HD-PACT의 산소포화도 곡선이 1024-full에서와 유사한 수준으로 과산소-저산소 전환 시의 추세를 재현함을 알 수 있다. 뿐만 아니라, 심장 신호의 경우, HD-PACT는 128-cluster PACT로부터 획득한 데이터에서 관찰되는 세밀한 심박 주기 패턴을 그대로 유지하며, 1024-full의 5 Hz보다 더 빠른 생리 패턴을 안정적으로 복원하여 시간 해상도에서의 이점을 보여준다 (그림 3d).

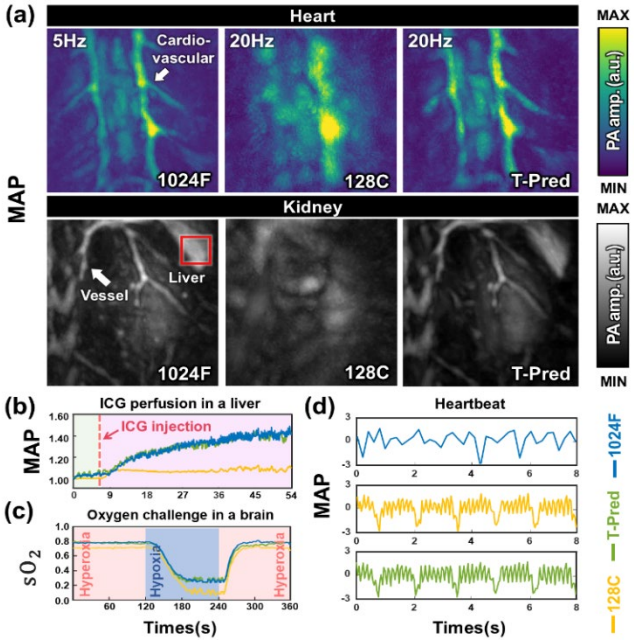


그림 3. 1024-full, 128-cluster, HD-PACT의 동적 결과 비교. 1024F; 1024-full, 128C; 128-cluster, T-pred; transfer HD-PACT

4. Animal & Human experiments

모든 실험 프로토콜은 포스텍 동물실험윤리위원회 (POSTECH-IACUC; 승인 번호: POSTECH-2022-0043, POSTECH-2023-0015)의 승인을 받았으며, 또한 사람 손바닥 데이터의 획득은 포스텍 기관윤리위원회(IRB)의 승인된 임상 프로토콜(PIRB-2022-E-26)에 따라 수행되었음.

5. Acknowledgements

본 연구는 교육부가 재원을 지원한 한국연구재단(NRF)의 기초과학연구 프로그램(RS-2024-00415450, 2020R1A6A1A03047902)과 과학기술정보통신부 (MSIT)가 재원을 지원하는 한국연구재단(NRF)의 연구과제 (2023R1A2C3004880, RS-2024-00410679), 과학기술사업화 진흥원(COMPA)의 지원사업 (No.2710006567), 정보통신기획 평가원(IITP)의 인공지능대학원지원사업(POSTECH, No.RS-2019-II191906), 그리고 BK21 FOUR 프로그램 및 Glocal 30 대학사업의 지원을 받아 수행하였음.

6. 참고문헌

[1] Wang, Q., et al. ECA-Net: Efficient channel attention for deep convolutional neural networks. Proc. CVPR 11534-11542, 2020

[2] Gu, A. et al. Mamba: Linear-time sequence modeling with selective state spaces. arXiv preprint arXiv:2312.00752, 2023

[3] Gao, Y. et al. UTNet: a hybrid transformer architecture for medical image segmentation., MICCAI 2021: 24th International Conference, Proc., **Part III 24** 61-71, 2021

T1 강조 영상을 활용한 딥러닝 기반 정량적 T1 맵 추정

김재승 [1], 한승환 [1], 김원진 [1], 김도현 [1], 김철운 [1], 이완형 [2], 최준열 [1*]

[1] 연세대학교 의공학과

[2] 중앙대학교 의과대학 예방의학교실

Deep Learning-Based Quantitative T1 Map Estimation from T1-Weighted Images

Jaeseung Kim[1], Seunghwan Han[1], Wonjin Kim[1], Dohyeon Kim[1], Cheol-Woon Kim[1], Wanhyung Lee[2], Joon Yul Choi[1*]

[1]Department of Biomedical Engineering, Yonsei University, Wonju, Republic of Korea

[2]Department of Preventive Medicine, College of Medicine, Chung-Ang University

[*]jychoi717@yonsei.ac.kr

Abstract

T1-weighted (T1w) MRI is widely used in the clinical setting, but lacks quantitative consistency across scanners. Quantitative T1 (qT1) mapping provides absolute relaxation times and serves as a promising biomarker for brain development, aging, and neurodegenerative diseases. However, its direct acquisition requires long scan times and specialized sequences, limiting routine clinical use. In this study, we developed a deep learning model to retrospectively generate qT1 maps from conventional T1-weighted images, comparing with a previously developed physics-based method (T1-REQUIRE). Model performance was evaluated using mean absolute error (MAE), root mean squared error (RMSE), concordance correlation coefficient (CCC), intraclass correlation coefficient (ICC), and square of Pearson correlation coefficient (r^2). The proposed deep learning model achieved MAE of 77.1 ± 11.6 ms, RMSE of 132.4 ± 16.9 ms, CCC of 0.974 ± 0.004, ICC of 0.974 ± 0.004, and r^2 = 0.960, demonstrating superior agreement compared with T1-REQUIRE (MAE = 268.9 ± 205.4 ms, RMSE = 338.4 ± 463.2 ms, CCC = 0.846, ICC = 0.846, and r^2 = 0.727). These results demonstrated the feasibility of the proposed deep learning method, supporting the reuse of T1w data for quantitative analysis and broader clinical applicability of qT1 mapping.

1. 연구 배경

자기공명영상(Magnetic Resonance Imaging, MRI)은 비침습적으로 높은 연조직 대조도를 제공하는 대표적 영상 기법으로, 임상 진단과 신경과학 연구에서 널리 활용되고 있다. 특히 T1-강조(T1-weighted, T1w) 영상은 임상에서 사용하는 구조적 뇌 영상의 표준이지만, 시퀀스, 파라미터, 장비 등에 따라 신호 강도와 대비가 달라지는 한계가 있다. 이로 인해 영상 간의 정량적 비교가 어려우며 신경퇴행성 질환의 조기 진단, 장기 추적 연구, 다기관 코호트 분석 등 임상 및 연구적 활용에 큰 제약이 된다 [1].

반면 정량적 T1(quantitative T1, qT1) 영상은 조직의 절대적인 이완 시간을 제공하여 이러한 한계를 극복하고, 발달·노화·신경질환 연구에서 중요한 바이오마커로 자리 잡아가고 있다 [2]. 그러나 qT1 획득은 특수 시퀀스와 장시간 촬영을 필요로 하여 임상 루틴에 적용하기 어렵다. 이 문제를 해결하기 위해 T1w 를 활용하여 물리 기반 역변환 모델과 딥러닝 기반 변환 기법이 제안되어 왔다 [3-4]. 그러나 기존 연구들은 임상에서 활용하기 충분할 정도의 성능에는 이르지 못했거나, 안정적인 결과를 얻기 위해서는 T1w 외의 여러 대비 영상을 함께 입력해야 하는 한계가 있었다.

따라서 본 연구에서는 단일 T1w 영상에서 얻을 수 있는 정보만을 입력으로 활용하여 qT1 을 예측하는 딥러닝 모델을 개발하고 기존의 물리기반의 역변환 모델과 비교하였다.

2.연구 방법

본 연구에서는 Magnetization-Prepared 2 Rapid Acquisition Gradient Echo (MP2RAGE) 시퀀스를 활용하여 총 116 명의 정상군에서 T1w 및 qT1 영상을 획득하였다. 모든 영상은 비두뇌 영역 제거(skull stripping) 후 좌표계 정렬과 1 mm^3 등방성 해상도로 공간 정규화를 수행하였으며, Statistical Parametric Mapping (SPM) 기반 조직 분할을 통해 백색질(white matter, WM), 회백질(gray matter, GM), 뇌척수액(cerebrospinal fluid, CSF) 마스크를 생성하였다.

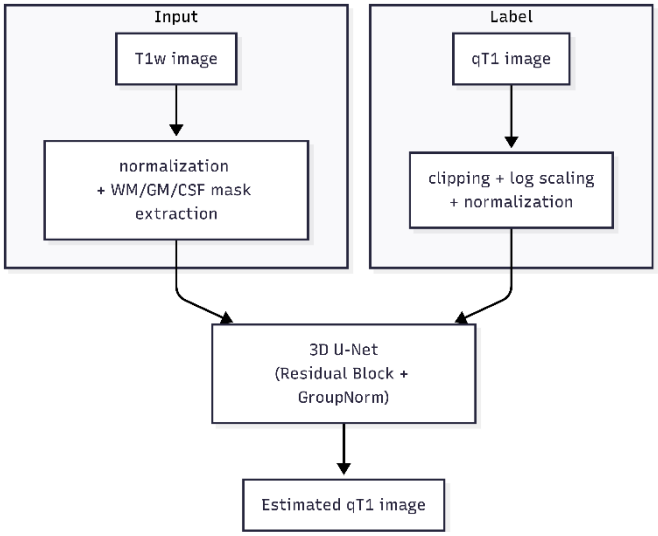


그림 1. T1 강조 영상 기반 qT1 추정을 위한 모델의 흐름도

전체적인 딥러닝의 플로우차트는 그림 1 과 같다. 학습 입력은 강도 정규화(intensity normalization)된 T1w 영상과 영역별(WM, GM, CSF) 마스크를 결합하여 다채널로 구성하였다. 학습 정답은 qT1 값을 일정 상한값에서 잘라내고 로그 변환과 정규화를 적용하여 사용하였다. 데이터셋은

무작위 분할하여 학습(60%), 검증(20%), 시험(20%) 집단으로 구분하였다. 학습 시에는 뇌조직 경계부 패치가 학습에 충분히 사용되도록 비경계부 대비 패치 비율을 조절하는 가중 샘플링(weighted sampling), 편향장(bias field) 왜곡 및 무작위 회전·반전 증강을 포함하여 일반화 성능을 강화하였다. 검증 및 시험 단계에서는 슬라이딩 윈도우 기반 추론을 수행하였다.

제안된 모델은 3 차원 U-Net 을 기반으로 residual block 과 그룹 정규화(Group Normalization)를 포함하여 학습 안정성을 높였다. 입력은 T1w 영상과 영역별 마스크이며, 출력은 실제 qT1 과 동일한 해상도의 예측 영상이다. 손실 함수는 L1 과 구조적 유사도 지수(SSIM)를 기본으로, concordance correlation coefficient(CCC) 및 경계 보존 항(gradient consistency loss)을 보조적으로 결합하였다. 학습은 AdamW 최적화와 cosine annealing 학습률 스케줄을 적용하였으며, gradient clipping 을 통해 수치적 안정성을 확보하였다.

본 연구에서는 기존에 개발된 물리 기반 방법(T1-REQUIRE)과 성능을 비교하였다 [3]. T1-REQUIRE 은 GM, WM, CSF 의 문헌상 T1 값을 내부 참조(anchor)로 삼아, T1w 영상과 qT1 영상의 픽셀 값 사이 관계 곡선을 추정한 뒤 이를 모든 픽셀에 적용하여 qT1 맵을 생성하는 물리 기반 방법이다.

모델의 성능은 평균 절대 오차(MAE), 제곱근 평균 제곱 오차(RMSE), concordance correlation coefficient(CCC), 급내 상관계수(ICC), Pearson r^2를 이용해 평가하였다

3. 연구 결과

그림 2 에서는 대표적인 케이스에서 T1-REQUIRE 과 제안한 딥러닝 모델의 결과를 보여준다. 시각적으로 ground truth 와 비교할 때 제안된 모델의 성능이 우수한 것을 알 수 있다.

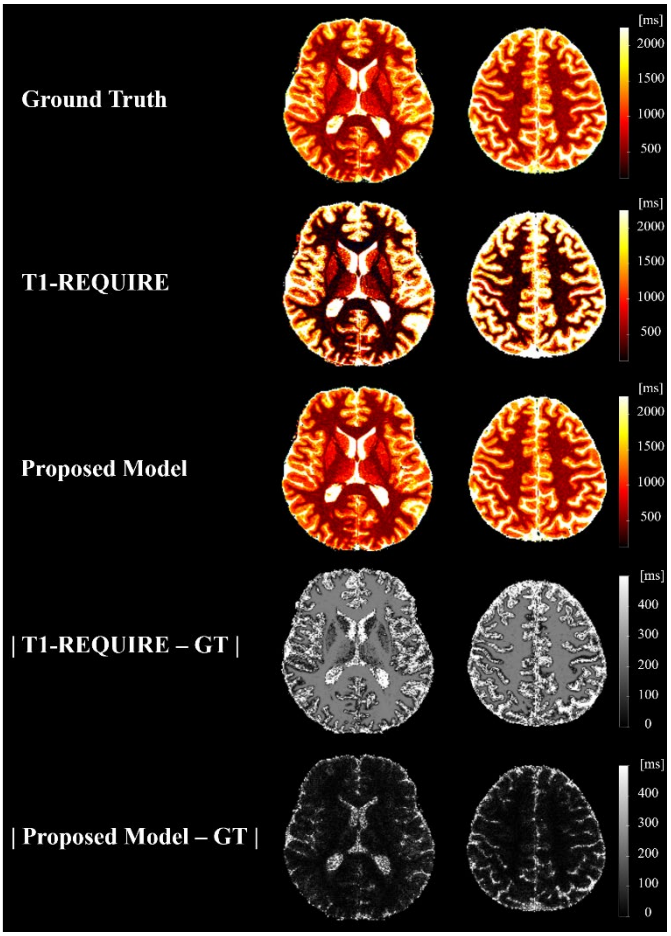


그림 2. 대표적인 사례에서의 T1-REQUIRE 과 제안된 딥러닝 모델을 이용하여 생성된 qT1 맵

정량적인 수치 결과는 다음과 같다. 전체 뇌 영역에서 제안된 딥러닝 모델은 MAE = 77.1 ± 11.6 ms, RMSE = 132.4 ± 16.9 ms, CCC = 0.974, ICC = 0.974, r^2 = 0.960 의 성능을 보였으며, 이는 T1-REQUIRE (MAE = 268.9 ± 205.4 ms, RMSE = 338.4 ± 463.2 ms, CCC = 0.846, ICC = 0.846, r^2 = 0.727)와 비교했을 때, MAE 는 71.3 % 감소, RMSE 는 60.9 % 감소, CCC 는 15.1% 향상, ICC 는 15.1 % 향상, r^2은 32.1 % 향상된 결과이다.

4. 연구 고찰 및 결론

본 연구는 단일 T1w 영상에서 얻은 정보만으로 qT1 을 추정하는 딥러닝 모델을 제안하였으며, 기존 물리 기반 기법 대비 대부분의 지표에서 일관된 성능 향상을 보였다. 향후 연구에서는 다양한 시퀀스와 벤더 간 차이를 아우르는 학습과 검증을 통해 범용성과 견고성을 확보하는 과정이 필요하다. 이번 연구 결과는 기존에 축적된 T1 강조 영상을 정량적 qT1 자료로 재활용할 수 있는 가능성을 보여준다. 또한 신경퇴행성 질환, 탈수초성 질환, 노화 연구 등에서 보다 정밀한 정량 분석을 가능하게 하고, 영상 기반 바이오마커의 표준화와 임상 적용 확대를 뒷받침할 수 있을 것으로 기대된다.

5.참고 문헌

[1] Seiler A, Kappos L, Sprenger T, et al. "Multiparametric quantitative MRI in neurological diseases." Front Neurol, Vol 12, No 640239, p1–13, 2021.

[2] Weiskopf N, Suckling J, Williams G, et al. "Quantitative multi-parameter mapping of R1, PD*, MT, and R2* at 3T: a multi-center validation." Front Neurosci, Vol 7, No 95, p1–11, 2013.

[3] Hasse A, Schmitt P, Dieringer MA, et al. "Application of a novel T1 retrospective quantification using internal references (T1-REQUIRE) for clinical MR images." Int J Imaging Syst Technol, Vol 32, No 1, p190–202, 2022.

[4] Qiu S, Chen Y, Ma S, et al. "Multiparametric mapping in the brain from conventional contrast-weighted images using deep learning." Magn Reson Med, Vol 87, No 1, p488–495, 2022.



박준홍/Jun Hong Park
조교수/Assistant Professor
한국외국어대학교 바이오메디컬공학부
Hankuk University of Foreign Studies Department of Biomedical Engineering

지질학 최적화 기법을 활용한 치료 초음파 정밀 모니터링 시스템
Geophysics Optimization–Based Precision Monitoring in Therapeutic Ultrasound

Abstract

Ultrasound therapy uses cavitation, the rapid formation and collapse of microbubbles, to induce localized therapeutic effects. For treatment to be safe and effective, it is essential to know exactly where these bubbles occur, but current methods often lack precision, particularly along the axial direction and in cases with multiple overlapping events. To address this challenge, we adapted a double-difference method from geophysics and applied it to ultrasound signals. This approach defines a loss function by comparing pairs of bubble signals and incorporates it into an optimization process, enabling more accurate localization. Our framework, validated in phantoms and a tumor model, demonstrated higher precision and reliability than conventional methods, and supports improved imaging quality and localization accuracy for safer, more effective therapeutic ultrasound.

Brief Biosketch

현재 한국외국어대학교 글로벌캠퍼스 바이오메디컬공학과 조교수로 재직 중이며, 포항공과대학교 기계공학과에서 학사(2015)와 박사(2021)를 취득하였다. 이후, 한국과학기술연구원 바이오닉스연구센터(2021-2022)와 미국 스탠퍼드 의과대학 영상의학과(2023-2025)에서 박사후연구원을 거쳤다. 주요 연구 분야는 진단 및 치료 초음파, 인공지능 기반 의료영상, 음향 및 열유체 역학이며, 초음파 영상과 치료 기술의 정밀도 향상 및 임상 적용 가능성 확대를 목표로 연구하고 있다.

Jun Hong Park is an Assistant Professor of Biomedical Engineering at Hankuk University of Foreign Studies. He earned his B.S. and Ph.D. in Mechanical Engineering from POSTECH and completed postdoctoral training at KIST and Stanford University. His research focuses on diagnostic and therapeutic ultrasound, AI-based biomedical imaging, and acoustics/thermo-fluid mechanics.



이완형 /Wanhyung Lee
조교수 / Assistant Professor
중앙대학교 의과대학 / Chung-Ang University

직업적 특성과 뇌 구조 관찰 연구 및 협업 기회
Occupational characteristics and brain structure research and collaboration opportunities

Abstract

Recent advances in neuroimaging have elucidated the brain's capacity for neuroplasticity—the ability to adapt and reorganize neural networks in response to environmental demands and occupational activities. Occupation-specific factors, including learning new skills, repetitive practice, and psychosocial stressors, can induce measurable changes in key brain regions through mechanisms such as cortical remapping and synaptic growth. For example, volume differences in serotonin- and melatonin-related structures (e.g., periaqueductal gray, pineal gland, dorsal raphe nucleus) have been observed among workers experiencing chronic overwork or shift working, highlighting the biological impact of occupational exposures.

Brain imaging offers translational opportunities not only for understanding disease risk, but also for the development of predictive tools and interventions tailored to human health. Advances in MRI analysis now enable precise mapping of occupational and environmental risk factors to neural changes, supporting early identification and prevention efforts. This expands medical collaboration possibilities: data sharing, protocol harmonization, and joint development of occupational neuroimaging cohorts will advance both research and practical health promotion.

₩Brief Biosketch

보건학 박사, 직업환경의학 전문의 / Doctor of Public Health, Occupational and Environmental Medicine Specialist

대한직업환경의학회 학술위원회 부위원장 / Vice-Chairman of the Academic Committee, Korean Society of Occupational and Environmental Medicine

노동부 안전보건공단 직업병 역학조사관 / Occupational Disease Epidemiologist, Korea Occupational Safety and Health Agency, Ministry of Labour

근로복지공단 질병판정심사위원 / Disease Assessment Review Committee Member, Korea Workers' Compensation & Welfare Service

생체역학 및 의료로봇

좌장: 태기식(건양대학교), **오건영**(경북대학교)

11월 7일 (금) **일강원 103 (09:15-10:45)**

우현수(세종대학교)
Invited 하지절단 장애인을 위한 로봇의족 연구 소개

김승규(고려대학교)
Invited 체외/컴퓨터 통합 전임상 모델 기반 피하 약물 분포 예측 연구

김정길(인하대학교)
스마트 인솔과 Openpose 기반 기능적 분석을 통한 인공 고관절 전치환술(THRA)과 내고정술(CRIF)의 조기 회복 양상 비교

Eugene Asare Mensah(연세대학교)
Design and Development of a Seat-to-Stand Walker Device for the Elderly

우현수/Woo Hyunsoo
부교수/Associate Professor
세종대학교/Sejong University
AI 로봇학과/Department of AI and Robotics



하지절단 장애인을 위한 첨단 로봇의족 기술 개발
Development of Advanced Robotic Prosthesis Technology for Lower-Limb Amputees

Abstract

Early commercial prosthetic limbs were primarily designed for cosmetic purposes rather than functional performance. However, with advances in linkage mechanisms and microprocessor-based control technologies, robotic prostheses capable of automatically recognizing gait phases and generating adaptive motions (e.g., Ottobock, Össur) have emerged, significantly improving real-world usability.

Robotic prosthetic limbs are generally classified into ankle-type and knee-type systems. The ankle type, though having a limited range of motion, requires a high torque of approximately 150 Nm or more, whereas the knee type must achieve a wide angular range exceeding 130° under relatively low torque conditions. Achieving such performance within human-like constraints of joint size and mass demands high power-density actuators and precise mechanical design, which remain critical technical challenges.

In this seminar, we present a new robotic prosthesis mechanism developed using a lightweight, integrated actuation module that minimizes overall mass while simultaneously providing the required torque and motion range for both the knee and ankle joints. The proposed system enables active joint torque generation, a feature difficult to realize in conventional electronically controlled prostheses, thereby supporting more natural gait not only on flat terrain but also on slopes and stair environments.

Brief Biosketch

2010~2022 한국기계연구원 책임연구원/KIMM Principal Researcher
2022~2024 한국산업기술기획평가원 로봇 PD/KEIT Robot PD



김승규/Seunggyu Kim
조교수/Assistant Professor
고려대학교 세종 디지털헬스케어공학과 / Korea University Sejong Campus Dept. Digital Healthcare Engineering
세종사업기술원 디지털헬스케어센터 / SIBT Digital Healthcare Center

체외/컴퓨터 통합 전임상 모델 기반 피하 약물 분포 예측 연구

Beyond Microphysiological Systems: An In Vitro/In Silico Hybrid System for Predicting Subcutaneous Drug Transport

Abstract

Although subcutaneous (SubQ) injection is an increasingly common route for administering biopharmaceuticals, predicting the bioavailability and pharmacokinetics of drugs administered subcutaneously remains challenging due to the complex nature of the subQ environment. We here introduce a hybrid system combining microphysiological systems (MPS) and digital twin (DT) technology, referred to as MPS-DT, to predict the biodistribution of peptide drugs in the subQ space and their absorption into systemic circulation. By incorporating these experimental and computational tools, our work provides a novel framework for predicting subQ drug transport and absorption, with implications for optimizing formulation strategies and improving translational relevance to human physiology.

Brief Biosketch

KAIST 기계공학과 ('22 Ph.D.) 및 MIT 기계공학과 ('23-'24 PostDoc)에서 미세생리시스템 및 디지털트윈 개발과 전임상모델 적용 연구를 수행하였음. 25 년도 3 월부터 고려대 세종에서 '혁신미세생리시스템 연구실'을 이끌며 전임상모델의 첨단화 연구를 수행하고 있음.

He received his Ph.D. in Mechanical Engineering from KAIST ('22) and conducted postdoctoral research at MIT ('23–'24), focusing on the development and preclinical application of microphysiological systems and digital twin models. Since March 2025, he has been leading his lab at Korea University Sejong Campus, conducting research on advanced preclinical models.

스마트 인솔과 Openpose 기반 기능적 분석을 통한 인공 고관절 전치환술(THRA)과 내고정술(CRIF)의 조기 회복 양상 비교

김정길[1] , 구본상[2], 김현수[3], 김현빈[3], Shivam Bhola[2], 유준일[2*]

인하대학교 의과대학부속병원 연구개발기획팀[1]

인하대학교 의과대학부속병원 정형외과[2]

인하대학교 바이오메디컬사이언스과[3]

Comparison of Early recovery Patterns Between Total Hip Replacement Arthroplasty(THRA) and Closed Reduction with Internal Fixation(CRIF) Using Functional Analysis Based on Smart Insoles and OpenPose

Junggil Kim[1], BonSang Ku[2], Hyeon Su Kim[2], Hyun-Bin Kim[2], Shivam Bhola[2], Jun-Il Yoo[3]

R&D Planning Team, Inha University Hospital, Incheon, Korea

Department of Biomedical Science and Engineerning College of Engineerning, Inha University, Incheon, Korea

Department of Orthopedic Surgery, School of Medicine Inha University Hospital, Incheon, Korea

*frime@daum.net

Abstract

Hip fractures are among the most prevalent geriatric injuries worldwide and are associated with persistent functional impairment even after surgery. This study investigated early outpatient recovery patterns following total hip replacement arthroplasty (THRA) and closed reduction with internal fixation (CRIF) by employing multimodal digital biomarkers derived from wearable smart insoles and OpenPose-based motion capture. Through quantitative assessments of balance, gait, and sit-to-stand (STS) performance, combined with patient-reported outcome measures (PROMs), the study characterized distinct biomechanical and temporal recovery trajectories between surgical approaches and identified key indicators for rehabilitation monitoring.

1. 연구 배경

고관절 골절은 고령층에서 발생 빈도가 매우 높으며, 인구 고령화로 인해 그 발생률은 지속적으로 증가하고 있다. 수술적 치료 이후에도 다수의 환자가 통증, 보행 불안정, 근력 저하, 삶의 질 저하등을 호소하며, 이는 사회·경제적 부담을 가중시킨다.

대표적인 수술 방법은 인공 고관절 전치환술(THRA)과 폐쇄정복 내고정술(CRIF)로, 각각의 수술은 고정 안정성, 체중 부하 허용 시점, 재활 접근법에서 차이를 보인다. 그러나 수술 후 기능 회복의 질적 측을 분석한 연구는 드물다.

기존 연구들은 주로 사망률, 재수술률 등 사건 중심의 지표에 초점을 맞추었으나, 환자의 실제 일상 기능을 반영하지 못하는 한계가 있었다. 이에 본 연구는 웨어러블 센서(스마트 인솔)와 비전 모션 캡처(OpenPose)기술을 통합하여, 수술 후 초기 외래 단계에서의 균형, 보행, 일어서기(STS) 기능을 정량적으로 평가하였다.

또한, EQ-5D, HHS, WOMAC, SARC-F 등 환자 보고 지표(PROMs)와의 연관성을 분석함으로써, 임상적 기능 회복뿐 아니라 환자가 체감하는 삶의 질 변화를 함께 탐색하였다.

2.연구 방법

본 연구는 2023년 8월부터 2025년 4월까지 대퇴경부 또는 전자간 골절로 수술을 받은 후 외래 추적검사를 완료한 60세 이상 여성 106명을 대상으로 하였다(THRA: 59명, 77.20±8.80세 & CRIF: 57명, 78.79±12.53세, p=0.431). 보행 불가능한 신경학적 질환자, 동측 재수술 병력자는 제외되었다. 본 연구는 인하대병원 윤리위원회의 승인을 받았다.

모든 대상자는 외래 방문시 다음과 같은 항목을 평가받았다.

1) SPPB 동적평가: 10-second trials in side by side, semi-tandem and tandem stance, 5STS(Sit-to-Stand), 4m gait, grip strength measurement

2) 설문평가: PROMs(EQ-5D-3L, HHS, WOMAC, SARCF).

동적 평가 수행 시 smart insole를 기반으로 하여 20종류의 균형 지표(CoP length, Ellipse Area, etc), 53종류의 보행 지표(speend, step length, cadence, etc), 28종류의 STS 지표를 수집하였다. 또한, OpenPose를 기반으로 하여 보행 시 관절 좌표 및 고관절 각속도를 계산하였다. 모든 신호는 4차 Butterworth 필터(bandpass, cutoff: 5-10Hz)로 전처리되었으며, 센서 오류로 인한 장기 결측값 및 IQR기반 outlier는 제거되엇다.

두 수술 그룹에 대하여 수술 직후 그룹간의 단편적 비교 및 수술 이후 외래 방문 추적 결과에 대한 비교를 수행하였다. 통계 분석은 Python 3.11에서 수행되었으며, 정규성은 Shapiro–Wilk, 등분산성은 Levene 검정으로 확인하였다. 군 간 비교는 ANOVA 검정, 사후분석은 Tukey를 적용하였다.

유의수준은 0.05, FDR 보정 후 $p<0.05$를 유의로 간주하였다. 효과크기(η^2, Cliff's δ)와 95% 신뢰구간을 제시하였다.

3. 연구 결과

SPPB 점수를 관찰하였을 때, 수술 방법에 따른 유의미한

차이는 확인되지 않았으며, 두 군 모두 유의한 상향이 관찰되었다(그림 1). 그러나 Smart insole을 기반으로 한 균형 기능 평가 결과는 THRA군의 경우 시간에 따라 CoP의 변동성과 중심 이동이 점진적으로 감소하는 반면, CRIF 군의 경우 3~6개월 구간동안 tandom stance에서 일시적으로 균형능력이 저하되는 경향이 확인된다(그림 2).

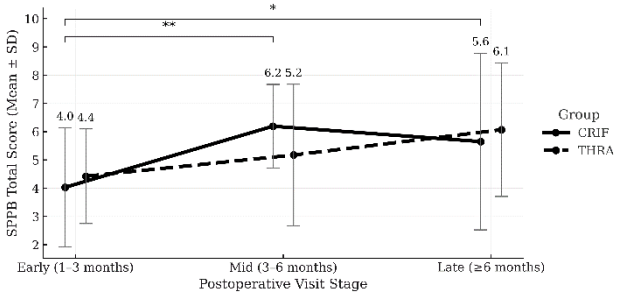


그림 1. 수술 후 시간 경과에 따른 SPPB score

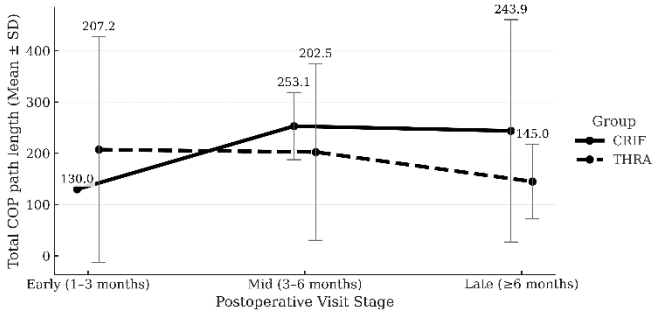


그림 2. 수술 후 시간에 따른 CoP Path Length

보행 지표를 관찰하였을때, 두 수술군 모두 Cadence가 증가하였다(그림 3).

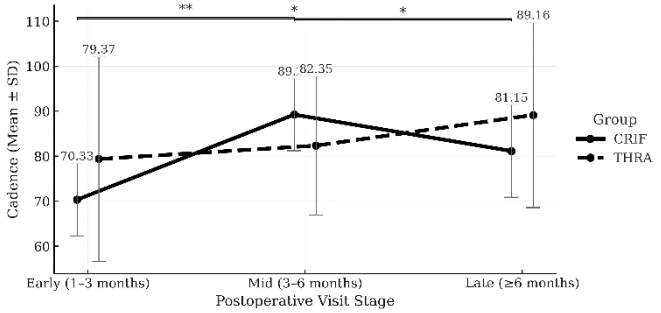
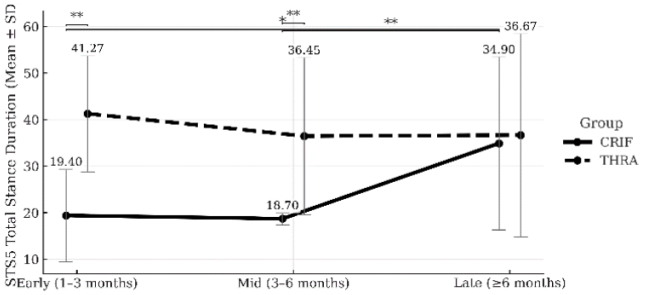


그림 3. 수술 후 시간 경과에 따른 cadence

OpenPose 기반의 관절각 분석 결과, THRA군은 수술 후 고관절 각속도가 점차적으로 증가한 반면, CRIF군은 6개월 이후 상승하지 않았다(그림 4).

STS5에서 모든 수술군이 시간에 따라 수행 시간의 감소를 보였다. 그러나 THRA군의 경우 STS5 수행 시 smart insole에 가해진 최대 및 평균 압력값이 점차적으로 감소한 방면, CRIF는 3~6개월에 일시적으로 증가하는 경향이 확인되었다(그림 5).

PROMs와 디지털마커의 상관분석 결과 THRA와 CRIF 두 그룹 유사한 경향을 보였으나 일부 항목에서 상반된 결과가 나타났다. RIF군에서 통증 관련 PROM과 균형·보행 지표는 강한 음의 상관관계(r: −0.9)을 보인 반면, THRA군에서는



동일 변수들이 약한 양의 상관(r: +0.3)으로 반전되었다(p diff < 0.01).
그림 4. 수술 후 시간 결과에 다른 hip angle velocity

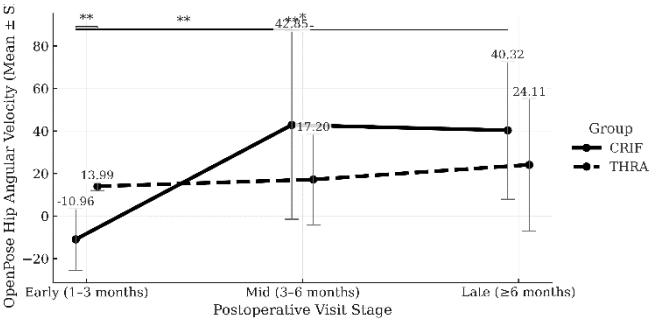


그림 5. 수술 후 시간 결과에 STS5 변인

스마트 인솔과 OpenPose로부터 도출된 디지털 바이오마커는 고관절 골절 수술 후 기능 회복을 평가하는 데 있어 민감하고 해석 가능한 지표로 활용될 수 있다.
THRA와 CRIF 간에는 명확한 생체역학적 및 시간적 회복 양상 차이가 관찰되었으며, 특히 CRIF 환자의 경우 수술 후 중기(3~6개월) 시점에서 보다 면밀한 임상적 모니터링이 필요함을 확인하였다.
객관적인 디지털 지표와 설문조사 기반 환자 보고 결과(PROMs)의 상관성 평가를 통하여 회복 과정을 다차원적으로 평가할 수 있었으며, 이러한 분석법은 개별화된 재활 전략 수립, 원격 모니터링, 환자 참여도 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.
그러나 본 연구에는 다음과 같은 제한점이 존재한다. 첫째, 연구 대상이 60세 이상의 여성 환자로 한정되어 있어 연구 결과를 다른 연령대나 남성 환자군에 일반화하기에는 한계가 있다. 둘째, 수술 전 기능적 baseline 평가가 부재하여, 수술 전 상태를 기준으로 한 절대적 회복 정도를 정확히 비교하기 어렵다. 셋째, 본 연구의 추적기간은 최대 1년 정도의 단기 추적임에 따라 보다 장기적인 관찰은 이루어지지 않았다. 그러나 이러한 한계에도 불구하고, 본 연구는 웨어러블 센서와 비전 기반 모션 분석을 활용하여 수술 후 조기 회복의 객관적 지표를 제시하였다는 의의를 가진다. 향후 더 큰 규모와 다양한 인구집단을 대상으로 한 전향적 종단 연구를 통해 본 연구 결과를 검증할 필요가 있으며, 혼합효과모형(mixed-effects modeling), 성향점수 보정(propensity score adjustment), 비용-효과 분석(cost-effectiveness analysis)등을 활용한 심층적 검증이 요구된다.

Acknowledgement

This research was supported by a grant of Korean ARPA-H Project through the Korea Health Industry Development Institute (KHIDI), funded by the Ministry of Health & Welfare, Republic of Korea (grant number : RS-2024-00507256)

DESIGN AND DEVELOPMENT OF A SEAT-TO-STAND WALKER DEVICE FOR THE ELDERLY

Eugene Asare Mensah, Jun won Choi, and Han Sung Kim
Department of Biomedical Engineering, Yonsei University, Republic of Korea
hanskim@yonsei.ac.kr

Abstract

This study presents the structural and biomechanical design of a seat-to-stand walker aimed at improving mobility, posture, and independence among elderly users. A static structural analysis was performed in ANSYS to assess the device's reliability under varying loading conditions. The walker safely withstood a 1320 N load with maximum von Mises stresses of 110.94 MPa (armrests) and 99.22 MPa (seat), remaining well below the 250 MPa yield strength of structural steel. The factors of safety (2.25 and 2.51, respectively) confirmed the design's structural integrity. These results demonstrate that the proposed walker can safely support twice the average body weight of Korean elderly users while maintaining high stiffness and ergonomic efficiency.

1.0 Introduction

Mobility impairments are common among older adults and individuals with neuromuscular or musculoskeletal conditions. Assistive devices such as canes, crutches, and walkers are often prescribed to enhance balance and reduce fall risk [1]. Traditional walkers, although stable, impose substantial upper-limb loads and encourage forward-leaning postures, increasing strain on the shoulders and wrists [2]. The seat-to-stand (STS) walker offers a hybrid solution by combining mobility support with assistance for postural transitions. By redistributing body weight during sit-to-stand movements, these designs reduce joint torque demands and promote upright posture [3]. However, few studies have combined ergonomic optimization with structural analysis to ensure safety and mechanical reliability. This study addresses that gap through finite element analysis (FEA) and ergonomic design of a seat-to-stand walker for elderly users.

2.0 Methodology

2.1 Design Overview

The design process consisted of three key stages:
(1) defining anthropometric and biomechanical requirements
(2) ergonomic and dimensional optimization
(3) simulation-based structural validation.

2.2 Anthropometric Data Collection

Anthropometric data for adults aged 70–84 years (average height: 145–170 cm; mass: 66.8 kg) were sourced from the National Anthropometric Survey of Korea (Size Korea, 2021) [4]. The walker geometry accommodates the 95th percentile of this population, ensuring usability and safety. Structural steel was selected for the frame due to its favorable strength-to-weight ratio, cost efficiency, and availability [5].

Table 1 summarizes its key mechanical properties.

Material	Density	Young Modulus	Poison Ratio	Tensile Yield Strength	Tensile Ultimate Strength
Structural steel	7850 kg/m^3	200GPa	0.30	250MPa	460MPa

2.3 Ergonomic and Dimensional Design

The walker was modeled in SolidWorks with adjustable parameters for seat height, armrest height, and frame width. Seat height (380–480 mm) matched the average knee height, minimizing effort during sit-to-stand movement. Armrest height (870–1020 mm) allowed 90° elbow flexion for optimal leverage and load transfer, while frame width (550 mm) balanced stability and maneuverability.

2.4 Biomechanical Rationale

The walker was designed to offload approximately 35–45% of the user's body weight through forearm supports, reducing lower-limb extensor demand [6]. Postural targets limited trunk flexion to under 20° and shoulder flexion to under 30°, maintaining comfort and stability.

Table 2 lists the walker dimensions supporting this biomechanical rationale, while **Figure 1** illustrates its geometric design.

Table 2. Dimensions of walker's components

Parameter	Dimension(mm)	Design Purpose/Description
Seat Height	380-480	Corresponds to average knee height, minimizing muscular effort during sitting and standing
Armrest Height	870 – 1020	Provides optimal leverage while maintaining 90^0 elbow flexion for efficient load transfer of about 35 – 45% of body weight
Frame Width	550	Balance stability with maneuverability

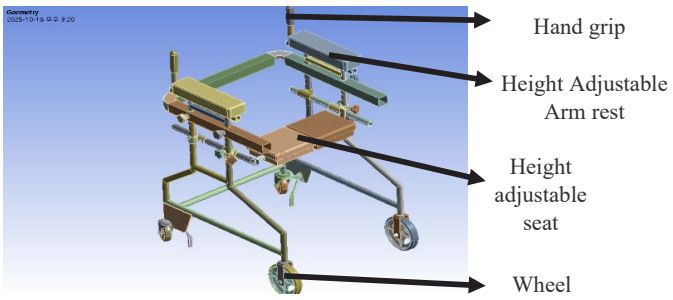


Figure 1. Geometry of the walker.

2.5 Structural and Stability Simulation

A load of 1320 N, equivalent to approximately twice the average body weight of a Korean elderly individual, was applied as boundary conditions at the armrest and seat. The wheelchair wheels were set as fixed points. The analysis was conducted in ANSYS Mechanical 2021 R1 using tetrahedral elements. Mesh refinement was performed near joints and support regions to improve accuracy. The simulation outputs included Von-Mises stress, total deformation.

3.0 Results & Discussion

Mesh convergence was achieved when changes in maximum Von-Mises stress and deformation fell below 5% (**Appendix 1**). The walker demonstrated a maximum von Mises stress of 110.94 MPa and total deformation of 0.62 mm at the armrests, and 99.22 MPa and 1.00 mm at the seat (**Figure 2 and 3**). The factor of safety, which determines the stability of an object [7], was generated using the equation:

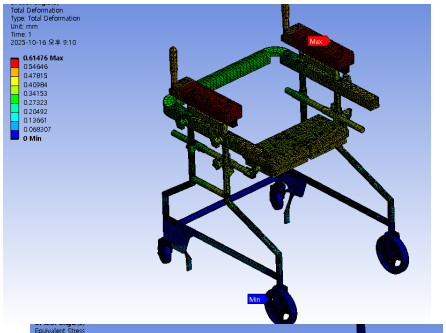
$\text{FoS} = \frac{\theta_y}{\sigma_{vmax}}$ where,

θ_y = yield strength of the material used (structural steel)

σ_{vmax} = maximum von – mises stress of each component (armrests and seat)

This resulted in a factor of safety of 2.25 for the armrest and 2.51 for the seat, both exceeding 2, indicating that the walker is safely designed to withstand the applied loads [7].

a)



b)

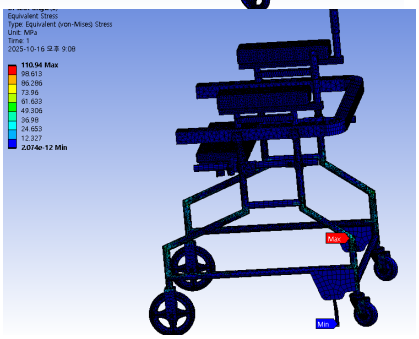
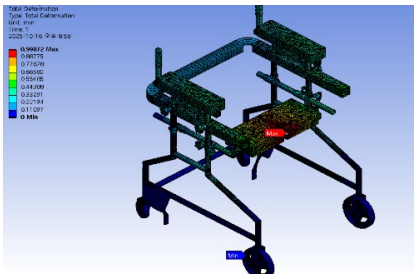
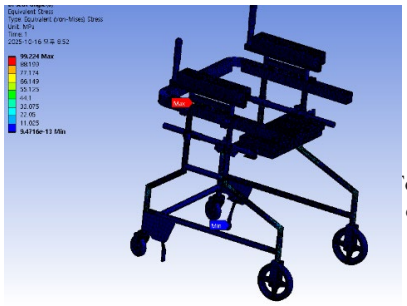


Figure 2. Structural Analysis of **a)** Total deformation of seat

a)



b)



otal
of seat

The maximum `von-mises stresses were well below the 250 MPa yield strength of structural steel, indicating elastic behavior throughout loading [8]. Deformations (≤1.0 mm) were less than 0.1% of the walker height, confirming high stiffness [9]. These findings suggest that the walker can safely sustain dynamic load shifts during sit-to-stand transitions and daily ambulation.

4.0 Conclusion

The structural and biomechanical design of the seat-to-stand walker demonstrated strong mechanical stability under a 1320 N load. FEA confirmed that stresses remained within safe limits (FoS > 2), and ergonomic parameters supported efficient posture and reduced limb strain. Future work will involve the design of the seat - to - stand transitional mechanism, dynamic load testing and user trials to validate functional and clinical performance.

5.0 Acknowledgement

This study was supported by the Ministry of Health and Welfare, Republic of Korea, through the Assistive Device Commercialization R&D Program for the Independent Living of Persons with Disabilities and the Elderly (Project ID: RS-2025-02634726).

6.0 References

1. [1] H. Bateni and B. E. Maki, “Assistive devices for balance and mobility: Benefits, demands, and adverse consequences,” Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, vol. 86, no. 1, pp. 134–145, 2005.
2. [2] L. Allet et al., “Effect of traditional walking aids on gait and posture: A review,” Gait & Posture, vol. 35, no. 3, pp. 480–487, 2012.
3. [3] C. K. Chang, H. C. Chen, and P. T. Cheng, “Improving elderly sit-to-stand performance using armrest modifications on standard walkers,” Assistive Technology, vol. 30, no. 5, pp. 244–251, 2018.
4. [4] Korean Agency for Technology and Standards, “8th Size Korea Anthropometric Survey Report,” 2021.
5. [5] N. T. Lestari, S. Susmartini, and L. Herdiman, “Redesign pediatric walker for children with spastic cerebral palsy using TRIZ Method,” Journal of Physics: Conference Series, vol. 1450, p. 012117, 2020.
6. [6] C. Jayaraman et al., “Postural and metabolic benefits of using a forearm support walker in older adults,” Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, vol. 99, no. 10, pp. 2049–2057, 2018.
7. [7] A. Stacey, “Safety factor requirements for the offshore industry,” *Ocean Engineering*, vol. 34, no. 2, pp. 176–182, 2007.
8. [8] Huaxiao Alloy Blog, "Yield Strength vs Tensile Strength - Professional Guidance
9. [9] R. H. Khajuria and M. P. Singh, “Evaluation of stiffness and strength characteristics of aluminum and steel walking aids,” International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, vol. 9, no. 7, pp. 1123–1130, 2020.

7.0 Appendix 1

Table 4. Verification of mesh convergence from maximum von Mises stress and total deformation below 5% for the armrests.

Element size (mm)	Maximum Von-Mises Stress (MPa)	% Change	Maximum Deformation	% Change
10	104.00	-	0.72	-
8	107.50	3.37%	0.67	6.94%
6	109.50	1.86%	0.64	4.48%
4	110.60	1.00%	0.63	2.34%
3	110.92	0.29%	0.62	0.80%

Table 5. Verification of mesh convergence from maximum von Mises stress and total deformation below 5% for the seat.

Element size (mm)	Maximum von-mises stress (MPa)	% Change	Total Deformation (mm)	% Change
10	95.80	-	1.08	-
8	97.60	1.88%	1.04	3.70%
6	98.60	1.02%	1.02	0.92%
4	99.00	0.40%	1.01	0.98%
3	99.20	0.20%	1.00	0.99%

젊은 의공학자 I

좌장: 윤홍준(가천대학교), **이영준**(KAIST)

11월 7일 (금) **늘빛관 이태석홀 (09:15-10:45)**

조용재(성균관대학교)
Invited 의공학 이미징 및 센싱을 위한 메타표면 나노광학

송정근(KAIST)
Invited 저반복률 광원을 이용한 SNR 향상 단일 대물렌즈 이광자 사선 광시트 현미경 개발

김연훈(KAIST)
Invited 동맥경화반정밀 진단과 치료를 위한 통합형혈관 내 근적외선 카테터플랫폼 개발

박태현(한양대학교)
Invited 광전자 난수 소자를 활용한 의공학 응용



조용재/Yongjae Jo
박사후 과정/Post-doctoral researcher
성균관대학교/Sungkyunkwan university
양자생명 물리 과학원
Institute of. Quantum Biophysics

의공학 이미징 및 센싱을 위한 메타표면 나노광학

Metasurface nanophotonics for biomedical imaging and sensing

Abstract

Metasurfaces, composed of planar nanostructure arrays that manipulate phase, amplitude, and polarization, are emerging as compact platforms for highly sensitive, efficient, and high-resolution bioimaging and biosensing. This presentation highlights application-oriented meta-optics for both point spread function (PSF) engineering and molecular detection. In the imaging domain, multifunctional PSFs are demonstrated, including multifocal arrays for super-resolution, needle beams for extended depth of field, and edge-enhanced label-free imaging, thereby enabling faster acquisition and robust feature extraction. In the sensing domain, metasurface nanostructures are utilized to enhance light concentration and spectral selectivity. Representative platforms include fluorescence correlation spectroscopy, surface-enhanced Raman scattering (SERS), and a metaphotonic PCR device, demonstrated for the detection of proteins and DNA. Collectively, these results provide a practical pathway toward multifunctional, high-performance systems and underscore the strong potential of metasurface-based biophotonics in advancing both imaging and sensing technologies.

Brief Biosketch

2013-2017	B.S. in Chemical Engineering, Sungkyunkwan University
2017–2021	Ph.D. in Biomedical Engineering, Sungkyunkwan University (Advisor: Myunghwan Choi, Seoul National University)
2021–2023	Postdoctoral researcher in CNIR, Sungkyunkwan University (Advisor: Seong-gi Kim, Sungkyunkwan University)
2023–present	Postdoctoral researcher in IQB, Sungkyunkwan University (Advisor: Inki Kim, Sungkyunkwan University)

[1] Yongjae Jo*, Hyemi Park* et al., “Image scanning microscopy based on multifocal metalens for sub-diffraction-limited imaging of brain organoids” Light: Science & Applications, 2025 (In press)
[2] Yongjae Jo*, Youngjun Kim*, Rian Kang* et al., "Monitoring the Dynamics of Alzheimer's Disease Biomarkers and the APOE-Tau Axis via Human Cerebral Organoids with Immuno-SERS." Advanced science, 2025
[3] Aleksandr Barulin*, Elena Barulina*, Dong Kyo Oh*, Yongjae Jo* et al., “Axially multifocal metalens for 3D volumetric photoacoustic imaging of neuromelanin in live brain organoid”, Science Advances, 2025
[4] Yongjae Jo* et al., “Spectral Hadamard microscopy with holographic metasurface” Nanophotonics, 2025



송정근/song Jeonggeun
박사후 연구원/Post-doctoral researcher
한국과학기술원/KAIST

저반복률 광원을 이용한 SNR 향상 단일 대물렌즈 이광자 사선 광시트 현미경 개발
Development of an SNR-enhanced single-objective two-photon oblique light sheet microscope using a low-repetition-rate laser source

Abstract

Three-dimensional fluorescence imaging has become an essential tool in biomedical research, enabling visualization of complex biological structures. Conventional methods such as confocal and nonlinear microscopy provide optical sectioning but suffer from slow acquisition and phototoxicity. Light sheet microscopy offers faster imaging with reduced photodamage through selective plane illumination, yet its orthogonal dual-objective configuration limits applicability to small samples. Two-photon excitation (TPE) microscopy provides deeper tissue penetration and reduced scattering, but integrating TPE with light sheet illumination remains challenging due to low excitation efficiency. To overcome these limitations, we developed a single-objective tow-photon oblique light sheet microscopy (TP-ob-LSM) employing a low repetition rate femtosecond laser. By redistributing pulse energy while maintaining the same average power, this system achieves efficient fluorescence excitation and high-quality 3D imaging. The oblique single-objective configuration further enhances sample compatibility, offering a promising tool for large-area, low-phototoxicity imaging of thick biological tissues.

Brief Biosketch

송정근 박사는 한국과학기술원(KAIST) 기계공학과에서 박사학위를 취득하였으며, 현재 박사 후 연구원으로 활동 중이다. 저반복률 펨토초 레이저를 이용한 이광자 사선 광시트 현미경 개발을 중심으로 연구활동을 하고 있으며, 고속·고품질 3 차원 이광자 형광 이미징 기술을 연구하고 있다.

Dr. Jeonggeun Song received his Ph.D in Mechanical Engineering from KAIST and is currently a Postdoctoral Researcher. His research focuses on developing two-photon oblique light sheet microscopy using low-repetition-rate femtosecond lasers for high-speed, high-SNR three-dimensional two-photon fluorescence imaging in biomedical application.



김연훈 / Yeon Hoon Kim
박사후연구원 / Post-doctoral researcher
한국과학기술원 기계기술연구소 /
Mechanical Engineering Research Institute, KAIST

동맥경화반 정밀 진단과 치료를 위한 통합형 혈관 내 근적외선 카테터 플랫폼 개발
Development of an Integrated Intravascular Near-Infrared Catheter Platform for Precision Diagnosis and Therapy of Atherosclerotic Plaques

Abstract

Atherosclerosis remains a leading cause of cardiovascular mortality, necessitating advanced imaging and therapeutic strategies for vulnerable plaque management. We present an intravascular near-infrared catheter platform that integrates optical coherence tomography (OCT), near-infrared fluorescence (NIRF) imaging, and photodynamic therapy (PDT) for comprehensive diagnosis and treatment of atherosclerotic plaques. An OCT system incorporating dual-spectrum NIRF was developed, employing modulated laser excitation to eliminate fluorescence crosstalk and enabling simultaneous acquisition of structural and multiplexed molecular signatures for detailed plaque vulnerability assessment. The diagnostic OCT-NIRF module was further combined with a therapeutic PDT channel within a single catheter, allowing a seamless transition from lesion identification to targeted phototherapy. This integrated multimodal platform enables precise, image-guided diagnosis, monitoring, and treatment of inflamed plaques, demonstrating potential for cardiovascular phototheranostics.

Brief Biosketch

김연훈 박사는 한국과학기술원(KAIST)에서 기계공학 박사 학위를 취득하고 현재 KAIST 기계기술연구소 박사후연구원으로 재직 중이다. 주요 연구 분야는 광간섭단층촬영(OCT)과 근적외선 형광영상(NIRF)을 결합한 혈관 내 다중 모달 영상 시스템을 활용하여 동맥경화반을 정밀 진단하고, 광역학치료(PDT)를 통한 병변 치료까지 통합할 수 있는 테라노스틱(theranostic) 카테터 시스템 개발이다.

Yeon Hoon Kim received his Ph.D. in Mechanical Engineering from KAIST and is currently working as a post-doctoral researcher at the Mechanical Engineering Research Institute, KAIST. His primary research focus is on developing theranostic catheter systems that integrate multimodal intravascular imaging combining OCT and NIRF for precise diagnosis of atherosclerotic plaques, with PDT for lesion treatment.



박태현/Taehyun Park
박사후 연구원/Postdoctoral Researcher
한양대학교 융합전자공학부/
Department of Electronic Engineering, Hanyang University

광전자 난수 소자를 활용한 의공학 응용
Optoelectronic Randomness for Biomedical Security

Abstract

As healthcare devices and AI-assisted diagnostics become more common, secure authentication and reliable data handling are emerging as critical issues. A central requirement for these functions is unpredictability, or "true randomness," which conventional software-based systems cannot guarantee. In this talk, I will present two recent approaches that use light to generate such randomness through optoelectronic devices. The first is a photoacoustic physically unclonable function (PA-PUF), which produces device-specific digital keys from random acoustic signals inside nanomaterials. This allows each device to be uniquely identified, even when attached to flexible surfaces such as human skin. The second is a light-induced true random number generator (TRNG), which creates continuous random signals from competing photocurrents. These random numbers can be applied not only to secure communication but also to biomedical AI. In particular, we demonstrate their use in generating synthetic chest X-ray images for training diagnostic networks, addressing data shortage and privacy challenges in medical imaging. These results suggest that light-driven randomness can be a new resource for biomedical engineering, supporting both trustworthy wearable devices and reliable AI-assisted diagnosis.

Brief Biosketch

Taehyun Park received his Ph.D. degree in Chemical and Biological Engineering from Gachon University in 2024. He is currently a postdoctoral researcher in the Department of Electronic Engineering at Hanyang University. His research interests include emerging optoelectronic devices, self-powered and low-power photodetectors, and hardware security devices such as physically unclonable functions and true random number generators.

2025년 대한의용생체공학회
추계학술대회

YONSEI 글로벌 혁신의료 기술 실증지원센터 성과 교류 및 실증연구 세미나

좌장: 장원석(연세대학교), **정희교**(김앤장 법률사무소)

11월 7일 (금) **일강원 101 (13:30-15:00)**

송미원(YONSEI 글로벌 혁신의료기술 실증지원센터)
YONSEI 글로벌 혁신의료기술 실증지원센터 실증연구 지원 사업 및 선정 기업 소개

김유림(YONSEI 글로벌 혁신의료기술 실증지원센터)
의료기기 실증연구란 무엇인가 – 의료기기의 임상시험과 실사용평가 –

전은정((주)메디팁)
디지털의료제품법 시대, 임상시험은 어떻게 바뀌는가 – 디지털의료제품법에 따른 임상시험 전략의 변화 –

전은정((주)메디팁)
디지털의료제품법 시대, 임상시험은 어떻게 바뀌는가 – 디지털의료제품법에 따른 임상시험 사례 소개 –

YONSEI 글로벌 혁신의료기술 실증지원센터 실증연구 지원 사업 및 선정 기업 소개

YONSEI 글로벌 혁신의료기술 실증지원센터

2025. 11. 07.

송 미 원

보건복지부

연세대학교 의료원
YONSEI UNIVERSITY HEALTH SYSTEM

무단 전재 및 재배포 금지

Strictly Confidential

1. 글로벌 혁신의료기술 실증지원센터 개요

국내외 시장진입 및 상용화 촉진을 위해 글로벌 실증지원 체계를 구축하여 실증연구 지원

연구개발의 배경

신기술 접목 제품 등장

첨단기술 융합제품의 인허가 및 신의료기술평가에서 의료기술의 안전성·유효성 검증 위한 임상자료 요구

의료기기 시장 진입 지체

- 국내 종합병원급 이상 국산 장비 사용률 여전히 저조
- 실증 데이터 확보에 따른 의료기관 구매 연계 필요

해외 안전성 요구수준 강화

- CE-MDR 시행으로 의료기기 안전성 요구 수준 강화
- 데이터 수집 및 분석 등을 위한 전문 인력 양성 필요

실증 인프라 구축 필요

- 국산 제품사용을 통한 검증 및 국내외 시장 진출과 기업과 의료진간 소통채널 확보하기 위한 병원기반의 실증센터 필요

연세 컨소시엄의 연구개발 방향성

국산 의료기기 신뢰성 확보

- 글로벌 혁신의료기술 임상실증센터 구축으로 임상근거 (임상시험, 실사용평가 데이터) 확보
- 영상·계측진단기기, 디지털헬스케어 의료기기에 대한 신뢰성 제고하여 구매 · 사용 활성화 유도

국산 의료기기 해외 진출 지원

- 글로벌 수준의 신뢰성 향상을 위한 실증지원 센터 구축
  - 의료기기 임상시험 실시기관 국제 인증(ISO 14155) 범위 확대
  - 글로벌 협력네트워크 구축 및 해외실증 시범연구 지원

보건복지부 1 연세대학교 의료원

Strictly Confidential

2. YONSEI 글로벌 혁신의료기술 실증지원센터 운영체계

연세의료원과 원주연세의료원 산하 병원으로 구성된 YONSEI 글로벌 혁신의료기술 실증지원센터 구축



Strictly Confidential

2. YONSEI 글로벌 혁신의료기술 실증지원센터

국산 의료기기 글로벌 실증지원 및 병원 구매·도입 연계 성과

YONSEI 혁신의료기기 실증지원센터 성과



스마트 환자케어 기술기반 의료기기

특화 지원분야 : 생체계측기기, 인공호흡기, AI 소프트웨어, 디지털치료기기

실증지원 및 시범보급 : 총 51건 수행(220% 초과 달성)

글로벌 인허가 (CE MDR, FDA)
진행 중 : 13개 제품 / 완료 : 4개 제품(MDR 3, FDA 1)

글로벌 실증지원 : 2개 기업

병원 구매·도입 연계 : 3개 기업



ISO 14155 인증 : 2개 병원



KOLAS (IEC 62366) 인증 : 2개 병원

Strictly Confidential

2. YONSEI 글로벌 혁신의료기술 실증지원센터 사업목표

국제 수준의 혁신의료기술 실증지원센터 고도화

YONSEI 글로벌 혁신의료기술 실증지원센터

『영상계측진단기기』 『디지털헬스케어 의료기기 』

영상진단기기 | 생체계측기기 | 의료기기 S·W | 웨어러블기기 | 전자약

기업 실증 전주기 지원

- **실증연구 컨설팅** 운영
- **실증연구 전문가 교육 프로그램** 운영

병원 - 기업 글로벌 실증 연구

- **임상시험, 실사용 평가** 등의 실증연구
- 글로벌 네트워크 협력을 활용한 **해외 실증 시범연구 지원**
- **글로벌 임상시험 실시기관 (ISO 14155) 인증 범위 확대**

후속 상용화 지원

- **국외 공동전시관 운영**을 통한 신시장 진출 지원
- 실증지원 **제품 도입**
- **RWD/RWE** 활용 지원

Strictly Confidential

2. YONSEI 글로벌 혁신의료기술 실증지원센터 운영현황

글로벌 혁신의료기술 실증지원센터 사업 수행 현황

YONSEI 글로벌 혁신의료기술 실증지원센터 개소식



❖ **일시** : 2024년 5월 29일(수) 16:00

❖ **장소** : 강남세브란스병원 대강당

시 간	식 순	연 자
16:00 – 16:05	개회사	구성욱 센터장
16:05 – 16:10	인사말	송영구 병원장
16:10 – 16:20	축사 I	윤동섭 총장
16:20 – 16:30	축사 II	곤기창 의료원장
16:30 – 16:40	축사 III	한국보건산업진흥원장
16:40 – 16:45	내빈 소개	사회자
16:45 – 17:00	사업 소개	구성욱 센터장
17:00 – 17:05	기념 촬영	다같이
17:05 – 17:15	커팅식 및 기념 촬영	다같이
17:15 – 17:30	라운딩	다같이

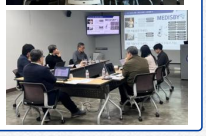
기업 실증지원 선정평가

❖ **(선정 평가) 신청 기업 대상 선정평가 진행**

✓ 선정평가 (16개 기업 신청, 9개 기업 선정)

구분		분야	
1	○○○	영상계측 진단기기	임상시험
2	○○○	디지털 헬스케어	임상시험
3	○○○	디지털 헬스케어	임상시험
4	○○○	영상계측 진단기기	임상시험
5	○○○	디지털 헬스케어	임상시험
6	○○○	디지털 헬스케어	실사용평가
7	○○○	디지털 헬스케어	실사용평가
8	○○○	디지털 헬스케어	실사용평가





기업 실증지원 공고/상시모집 공고



❖ **(지원 분야)**

: 영상·계측진단기기, 디지털 헬스케어 의료기기

❖ **(지원 규모)** : 과제당 4천만원 이내

✓ 실증 데이터 수집 및 결과 분석, 실증연구 제품 유지·관리, 성과 활용(학술발표 포함) 등 실증연구 소요 비용 지원

✓ 신청 기업은 제품을 현물로 부담해야 하며 지원금의 최소 30% 기업부담금 (현금) 매칭

✓ 지원 기업을 대상으로 국제 의료기기 전시회 공동전시관 지원 예정

기업 컨설팅 수행

❖ **산업계 지원 컨설팅 수행(34 건 완료)**

✓ 기업 실증지원 사업 사전 컨설팅, 임상 컨설팅

유형	업체명	품목명[등급]
임상시험	○○○	적외선 엑스선 골밀도 측정기[3]
임상시험	△△△	심혈관 영상 검출·진단 소프트웨어[3]
임상시험	◇◇◇	부위 한정용 전산화 단층 엑스선 촬영장치[2]
•••		
실사용 평가	□□□	정형외과 영상 검출·진단보조 소프트웨어[2]





Strictly Confidential

2. YONSEI 글로벌 혁신의료기술 실증지원센터 운영현황

글로벌 혁신의료기술 실증지원센터 사업 수행 현황

글로벌 협력 네트워크 구축

BENTLEY UNIVERSITY

THE UNIVERSITY OF UTAH (Center for Innovation)

실증연구 및 활용을 위한 글로벌 기관과의 협력 네트워크 구축 (MOU 체결)

산업계 실증 컨설팅 협력 구축

Synex Healthcare Market Access

PROMEDIS

wmit

글로벌 수준의 실증연구와 해외 의료기관 실증연구 수행을 위한 협력 네트워크 구축 (MOU 체결 진행 중)

국내 전시회 운영

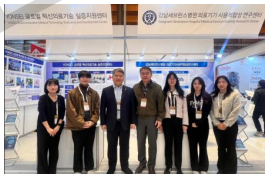
❖ KIMES 국제의료기기&병원설비전시회

✓ 일시 : 2025년 3월 20일 ~ 2025년 3월 23일

✓ 장소 : COEX 전시장, D330







국제 의료기기 전시회 공동전시관 지원

❖ 지원 기업을 대상으로 국제 의료기기 전시회 공동전시관 지원

✓ 일시 : 2025년 11월 17일 ~ 2025년 11월 20일

✓ 장소 : 독일, 뒤셀도르프 상설 전시장

CES Powered by The Consumer Technology Association

Arab Health By Informa Markets

MEDICA

Strictly Confidential

2. YONSEI 글로벌 혁신의료기술 실증지원센터 운영현황

기업 실증지원 사업 모집 공고

기업 실증지원 사업 모집 공고

❖ (과제 수행기간) **협약 체결일로부터 12개월 이내**

❖ (지원 대상)

실증지원센터(주관기관)와 의료기기 제조기업(참여기업)으로 구성된 컨소시엄

주관기관	컨소시엄		
	신청기업		참여기관
YONSEI 글로벌 혁신의료기술 실증지원센터 실증연구 운영비 지원 및 연구 설계 컨설팅, 의학회 및 세미나 통한 성과 발표 등	제조 기업 시험 제품 제공 및 민간부담금 지원	↔	강남세브란스병원 세브란스병원 용인세브란스병원 원주세브란스기독병원 실증 연구 수행, 결과보고서 및 논문 작성

❖ (지원 분야) 영상·계측진단기기, 디지털 헬스케어 의료기기

❖ (지원 규모) 과제당 **최대 4,000만원**

※ 과제 성격에 따라 지원 규모는 조정될 수 있음

신청 기업은 **제품을 현물로 부담**해야 하며,

과제지원금의 최소 30% 기업부담금(현금) 매칭

EX) 과제지원금 : 3,500만원
기업부담금 : 1050만원 (현금) 책정

❖ (지원 유형) **임상시험, 실사용평가** 구분하여 지원

구분	지원 유형
연세의료원	임상시험, 실사용 평가
원주연세의료원	임상시험, 실사용 평가

❖ 지원 기업을 대상으로 국제 의료기기 전시회 공동전시관 지원

CES Powered by The Consumer Technology Association

MEDICA

Arab Health By Informa Markets



보건복지부 7 연세대학교 의료원 YONSEI UNIVERSITY HEALTH SYSTEM

무단 전재 및 재배포 금지

Strictly Confidential

2. YONSEI 글로벌 혁신의료기술 실증지원센터 운영현황

기업 실증지원 사업 모집 공고

기업 실증지원 상시모집 공고

❖ (추진 절차)

사업 공고 및 신청서 접수 (상시 모집)	[신청기업] 신청서 및 제출자료 신청
↓	
지원대상 확인 (1주 소요)	[보건복지부 · 보건산업진흥원] 지원 대상 여부 논의 및 검토
↓	
과제평가단 구성 (1주 소요)	[실증지원센터] 신청기업 내외부 평가단 구성
↓	
서면 및 구두평가 (1주 소요)	[실증지원센터] 평가위원회 개최 및 신청서 \ 발표평가 ↓ [보건복지부 · 보건산업진흥원] 선정결과 검토 및 논의
↓	
최종 선정	[실증지원센터] 선정여부 최종확정 및 안내 [실증지원센터↔선정기업] 수정사업계획서 제출 및 협약체결
↓	
지원과제 수행	[실증지원센터] 과제 지원사업 수행 [선정기업] 과제수행 시작 및 지원금 입금
↓	
최종 보고	[선정기업 · 실증지원센터] 과제 수행에 따른 최종 결과물 및 보고서 작성 ↓ [실증지원센터↔보건복지부 · 보건산업진흥원] 최종 결과 공유

❖ (신청 기간) ~ 2025년 12월 31일

❖ (신청 방법)

센터 **홈페이지 컨설팅(사전면담) 신청 후,**

제출서류와 함께 **전자 우편**(YiMEC@yuhs.ac)으로 제출

연번	제 출 서 류	비고
1	신청서	필수
2	신청기업의 사업자등록증	필수
3	식품의약품안전처 제품 인증서 또는 허가증	해당시
4	공인시험기관 신청서 또는 성적서	해당시
5	식품의약품안전처 임상시험계획승인서	해당시
6	임상시험 기관 IRB 승인서*	해당시
7	혁신의료기기 기업 인증서 및 혁신의료기기 지정 사본	해당시

* IRB 승인서 제출 시, 지원 대상 우선 검토

❖ **(문의처)** YONSEI 글로벌 혁신의료기술 실증지원센터

연락처 : 02-2019-5461~5

E-Mail : YiMEC@yuhs.ac

무단 전재 및 재배포 금지

Strictly Confidential

2. YONSEI 글로벌 혁신의료기술 실증지원센터 운영현황

기업 실증지원 선정 기업 소개

실증지원 선정 기업

❖ (선정기업)

각 기업의 IRB 승인 후 협약 체결 진행

기관	구분	지원 분야	업체명	품목명[등급]	IRB 승인 여부	임상시험 현황
연세의료원	신촌	실사용 평가	△△△	비이식형 오실금 신경근 전기자극장치[3]	O	진행 중
연세의료원	신촌	실사용 평가	□□□	의료영상 치료계획 소프트웨어[2]	O	진행 중
연세의료원	신촌	임상시험	○○○	초음파 방광 용적 측정기[2]	O	진행 중
연세의료원	신촌	임상시험	△△△	의료영상 치료계획 소프트웨어[2]	O	종료 (다기관 전향적 관찰 연구)
연세의료원	강남	실사용 평가	◇◇◇	심혈관 위험 평가 소프트웨어[3]	O	진행 중
연세의료원	강남	임상시험	△△△	근골격계 재활 소프트웨어[2]	O	진행 중
원주연세의료원	원주	실사용 평가	□□□	뇌영상 분석 소프트웨어[2]	O	진행 중
원주연세의료원	원주	임상시험	△△△	호흡재활 소프트웨어[2]	O	진행 중
원주연세의료원	원주	실사용 평가	◇◇◇	귀 적외선 체온계[2]	O	진행 중

무단 전재 및 재배포 금지

Strictly Confidential

2. YONSEI 글로벌 혁신의료기술 실증지원센터 운영현황

병원 -기업 간 창구 일원화를 위한 통합 홈페이지 운영 (http://yimec-severance.kr/)

영상•계측진단기기, 의료기기 소프트웨어, 디지털헬스케어 의료기기

기업 지원
- 임상시험
- 실사용평가 지원 및 분석

전주기 실증지원
- 실증연구 임상 설계 컨설팅
- 실증연구 성과물 후속 활용을 위한 컨설팅

협력 네트워크
- 의료기기산업 실증연구 허브
- 글로벌 기관과 네트워크 구축





보건복지부 10 연세대학교 의료원 YONSEI UNIVERSITY HEALTH SYSTEM

무단 전재 및 재배포 금지

감사합니다

보건복지부

연세대학교 의료원
YONSEI UNIVERSITY HEALTH SYSTEM

의료기기 임상시험 및 실사용평가 소개

YONSEI 글로벌 혁신의료기술 실증지원센터

2025. 11. 07.

김 유 림

보건복지부

연세대학교 의료원
YONSEI UNIVERSITY HEALTH SYSTEM

무단 전재 및 재배포 금지

1. 실증연구의 개념과 범위

실증연구의 개념

제품개발 후 실제 사용 현장에서 제품을 검증하는 일련의 과정

실증연구의 범위

TRL1	TRL2	TRL3	TRL4	TRL5	TRL6	TRL7	TRL8	TRL9
기본원리	기술개념	개념검증	시작품 제작		전임상		임상	양산
기초이론 정립	개념 및 응용분야정립	특허출원, 기본성능검증	설계/제작	성능평가	초기안전성·유효성평가	GLP안전성·유효성평가	허가용 임상시험	시판 후 연구

[실증연구 지원 범위]

- TRL 8~9단계 임상 환경에서의 실증 연구(임상시험, 실사용 평가) 지원
- 영상계측진단기기, 의료기기 소프트웨어, 디지털헬스케어 의료기기, 웨어러블기기, 전자약, 인공호흡기 등

1. 실증연구의 개념과 범위

의료기기 개발 단계 별 임상시험

개발 중
탐색적 연구
(개념 입증, 타당성 연구)

품목허가용
안전성 · 유효성(성능)
확증 연구

시판 후
신의료기술평가 / 보험 등재용
안전성

시판 후
재심사(시판 후 조사용),
마케팅

시판 전 연구

- 허가 전 개발단계에서 초기 안전성 및 유효성 정보 수집 또는 허가를 목적으로 사용목적에 대한 안전성 및 유효성의 확증적 근거를 수집하기 위해 실시
- 비교적 제한된 수의 피험자를 대상으로 하며, 제한된 기간 내에 임상결과에 영향을 미칠만한 요인을 배제, 통제하는 제한된 환경에서 임상시험 수행

시판 후 연구

- 의료기기가 사용되는 환경을 인위적으로 배제하지 않고 실제 임상현장에서 사용되는 의료기기의 효과를 다양한 환자의 조건과 사용 환경에서 다수의 대상자를 장기간 평가
- 현존하는 최신 기술이나 임상현장에서 직접 경쟁이 되는 제품을 비교대상으로 선정하여 우월성을 입증하는 연구로 설계함으로써 시장에서의 경쟁력을 보여주는 자료로 활용할 수 있음

무단 전재 및 재배포 금지

1. 실증연구의 개념과 범위

Strictly Confidential
의료기기 임상시험 및 실사용평가 소개

임상시험과 실사용 평가

구분	임상시험과 실사용 평가 정의
임상시험	설계된 임상환경에서 의료기기의 안전성과 유효성을 증명하기 위하여 사람을 대상으로 하는 시험이나 연구
실사용평가	실사용정보(RWD)*를 가공·분석하여 의료기기의 사용 결과나 잠재적 이익 또는 위험성에 관한 임상적 증거를 도출하는 연구 * 의료기기를 사용하여 생성된 환자의 건강 상태나 전자의무기록, 국민 건강보험공단 의료정보 등 다양한 자료에서 일상적으로 수집된 의료와 관련된 자료

[실사용 정보]

❖ 실사용정보(RWD)는 의료기기의 안전성 및 유효성 확증 임상 시험을 위해 수집되는 데이터를 제외한 비중재적(Non-Interventional) 방법에 의해 일상적으로 수집되어지는 데이터

실사용정보(RWD) 예시

- 전향적 관찰 연구(Prospective Observational Studies)
- 후향적 데이터베이스 연구(Retrospective Database Studies)
- 전자의무기록(Electronic Medical Record, EMR)
- 행정 및 건강보험 청구데이터(Administrative and Healthcare claims)
- 건강 모니터링 의료기기(Health-Monitoring Medical Devices) 데이터

* 출처: 의료기기의 실사용증거(RWE) 적용에 대한 가이드라인(민원인 안내서)(2023.07)

무단 전재 및 재배포 금지

1. 실증연구의 개념과 범위

디지털의료제품법에 따른 실사용평가

디지털의료기기를 실제 사용하는 과정에서 수집 · 생성된 정보를 바탕으로 디지털의료기기의 안전성과 유효성을 평가

임상시험	데이터 임상시험	실사용 평가
디지털의료기기 및 디지털융합의약품의 안전성과 유효성을 증명하기 위하여 사람을 대상으로 수행하는 시험·연구	의료기기, 의약품 또는 디지털의료 · 건강 지원기기로부터 생성되었거나 수집 · 가공된 데이터를 사용하고 임상시험용 디지털의료기기를 임상시험 대상자에게 직접적으로 사용하지 않는 임상시험	디지털의료기기제조업자등은 디지털 의료기기를 실제 사용하는 과정에서 수집 · 생성된 정보를 바탕으로 디지털의료기기의 안전성과 유효성을 평가 시판 후 임상시험 일부 포함 * 허가범위 내 또는 변경관리 계획을 제출한 범위 내 사용

시판 후 임상시험은 실사용평가의 일부에 해당함

시판 전 임상시험 등	실사용 평가	
	시판 후 임상시험 등	그 외
허가·인증을 받지 않거나 신고되지 않은 디지털의료 기기의 안전성·유효성 또는 성능에 관한 사항을 증명	허가·인증·신고되거나 변경 관리 계획 승인된 범위에서 안전성·유효성 또는 성능에 관한 사항을 증명	• 디지털의료기기를 사용하여 수집된 보건의료데이터를 후향적으로 관찰 또는 분석* • 임상문헌, 부작용 사례를 종합적으로 분석

* 출처: 디지털의료제품 법령 시행에 따른 업무 안내서(2025.02)

무단 전재 및 재배포 금지

1. 실증연구의 개념과 범위

Strictly Confidential
의료기기 임상시험 및 실사용평가 소개

실사용 평가 인정 범위

진료환경에서 제품을 실제 사용하여 생성된 '실사용정보(RWD)'를 활용한 연구에 대해서만 성과로 인정

* 디지털 의료제품의 시판 후 임상시험의 경우 모든 피험자 대상으로 진료비 청구된 연구에 대해 실사용평가로 인정

기존	변경
대상 : 전 제품	대상 : 디지털의료제품 외
• 실제 임상 현장에서 진료나 처방 등을 통해 의료기기를 사용함으로써 얻어지는 실제 진료 기반 데이터를 활용하는 연구	• 실제 임상 현장에서 진료나 처방 등을 통해 의료기기를 사용함으로써 얻어지는 실제 진료 기반 데이터를 활용하는 연구
	대상 : 디지털의료제품
	• 데이터 임상시험, 실사용 평가, 시판 후 임상시험 일부 (식약처 허가 범위 내 사용 연구) * 단 시판 후 임상시험의 경우 모든 피험자 대상으로 진료비 청구된 연구에 대해 실사용평가 성과로 인정

* 출처: 실사용평가 과제 추진 안내<<보산진 의료기기화장품산업단, 2025.04>

2. 의료기기 임상시험

의료기기 임상시험 수행

- 의료기기 임상시험을 하려는 자는 임상시험 계획서를 작성하여 식품의약품안전처장의 승인을 받아야 함

  * 해당 연구가 식약처 의료기기 임상시험계획 승인에 해당하는지 여부에 대해 우선적으로 확인

식약처 임상시험계획 승인 제외 대상

1. 시판 중인 의료기기를 사용하는 다음 각 목의 어느 하나에 해당하는 임상시험
   가. 시판 중인 의료기기의 허가 사항에 대한 임상적 효과관찰 및 이상사례 조사를 위하여 하는 시험
   나. 시판 중인 의료기기의 허가된 성능 및 사용목적 등에 대한 안전성·유효성 자료의 수집을 목적으로 하는 시험
   다. 그 밖에 시판 중인 의료기기를 사용하는 시험으로서 안전성과 직접적으로 관련되지 아니하거나 윤리적인 문제가 발생할 우려가 없다고 식품의약품안전처장이 정하는 시험

2. 임상시험 대상자에게 위해를 끼칠 우려가 적은 다음 각 목의 어느 하나에 해당하는 임상시험
   가. 법 제19조에 따른 기준규격에서 정한 임상시험 방법에 따라 실시하는 임상시험
   나. 체외 또는 체표면에서 생체신호 등을 측정하여 표시하는 의료기기를 대상으로 하는 임상시험
   다. 의뢰자 없이 연구자가 독자적으로 수행하는 임상시험 중 대상자에게 위해를 끼칠 우려가 적다고 식품의약품안전처장이 인정하는 임상시험

* 의료기기법 시행규칙(제 20조, 임상시험계획의 승인 등)

Strictly Confidential
의료기기 임상시험 및 실사용평가 소개

2. 의료기기 임상시험

의료기기 임상시험 계획서 작성

- 선행연구자료 및 연구자 자문을 통해 임상전략을 수립하여 임상시험계획서 작성

1. 관련문서 검토	선행연구자료, 논문, 유사제품자료, 기술문서 등 검토
2. 임상전략수립	관련문서 검토를 바탕으로 제품의 사용목적, 적응증을 결정하고 임상의 구체적인 목표 및 접근전략을 수립 (연구자, 의뢰자와 함께)
3. 프로토콜 초안 작성	검토한 자료를 근거로 초안을 작성, 검토한 논문들 중 주요 근거자료를 선별하여 통계학자와 피험자 수 산출 및 통계가설을 설정
4. 프로토콜 1차 검토	연구자 검토를 통해 프로토콜에 명시한 임상시험방법 및 절차 등이 적절한지, 유효성 입증을 위해 가장 효율적인 방법으로 디자인이 되었는지 등을 확인
5. 프로토콜 보완	1차 검토 시 논의된 내용을 반영하여 프로토콜을 보완, 수정
6. 프로토콜 2차 검토	보완된 내용을 연구자, 의뢰자, 통계학자가 최종적으로 검토
7. 프로토콜 최종화	2차 검토 및 최종화

무단 전재 및 재배포 금지

2. 의료기기 임상시험

의료기기 임상시험 IRB 승인

- 임상시험심사위원회(IRB)는 임상시험에 참여하는 대상자의 '권리·안전·복지'를 보호하기 위해 임상시험 기관 내에 독립적으로 설치된 위원회로, 임상시험 수행을 위해 IRB 심의를 거쳐야 함

* 식약처 임상시험 계획서 승인과는 별개로 임상시험에 대한 임상시험심사위원회(IRB) 승인을 받아야 함

실시기관 요구 제출 서류

- 연구과제 신청서
- 임상시험계획서
- 계획서 요약
- 증례기록서
- 대상자 설명문 및 동의서
- 동의서 불필요 시 동의서 면제 사유서
- 대상자에게 제공되는 서면정보
- 임상시험자 자료집
- 안전성정보
- 연구비내역서
- 대상자에게 제공되는 보상/배상(보험 등)에 대한 정보
- 대상자 모집관련 서류(광고문안, 매체정보 등)
- 이해상충 서약서
- 시험책임자 의 최근 이력 또는 기타 경력에 관한 문서
- 식약처 또는 주관 연구기관 승인서(해당되는 경우)
- 심의면제 신청서(해당되는 경우)
- 심의면제 자가점검표(해당되는 경우)

* 각 기관마다 문서의 양식이나 내용이 다를 수 있으므로 해당 기관의 절차 및 세부내용 확인 필요

무단 전재 및 재배포 금지

3. 의료기기 실사용평가

의료기기 실사용평가 계획 승인

- 의료기기의 안전성 및 유효성을 입증하기 위한 목적으로 실사용 정보(RWD)를 새로 생성하고자 하는 행위는 의료기기 임상시험계획승인 대상이 될 수 있음

임상시험계획승인 대상

- 허가받지 않은 제품과 기존의 허가받은 제품의 새로운 사용목적 추가 등의 안전성 및 유효성을 입증하기 위해 실사용정보(RWD)를 생성하고자 하는 경우

* 허가범위 외에서의 안전성 유효성을 입증하기 위해 데이터 생성수집

임상시험계획승인 비대상

- 허가받은 의료기기를 허가범위 내에서 사용하였을 때의 실사용정보(RWD)를 수집하고자 하는 경우

* 허가범위 내에서의 정상적인 의료행위로써 데이터를 수집하는 경우

임상시험계획 승인 비대상 예시

- 우울증 환자의 우울 증상 개선을 위한 앱(허가 제품)의 사용횟수 변경을 위한 데이터 수집
- 불면증 환자의 불면 증상 개선을 위한 앱(허가 제품)에 수면의 질을 분석하기 위한 기능 추가를 목적으로 데이터(예 : 심박수, 걸음 수 등) 수집
- 24시간 이내 심정지 발생 위험도를 제공하는 인공지능 소프트웨어 제품(허가 제품)에 12시간 이내 심정지 발생 위험도 제공 기능의 추가 목적으로 데이터 수집

무단 전재 및 재배포 금지

3. 의료기기 실사용평가

의료기기 실사용평가 고려사항

■ 의료기기의 실사용정보를 이용하여 안전성 및 유효성을 검증하는 경우 관련성과 신뢰성 등을 고려해야 함

관련성

- 실사용정보(RWD)의 데이터 요소(data elements)가 연구 목적을 달성하기 위한 임상 및 통계 분석에 적합한지 여부
- 실사용정보(RWD)가 의료기기를 사용하는 전체 환자 및 평가 대상 모집단에 대한 대표성을 가질 수 있는지 여부
- 실사용정보(RWD)가 안전성 및 유효성을 평가하는데 필요한 추적성을 확보하고 있는지 여부

신뢰성

[데이터 생성]

- 환자의 선정 및 등록 기준이 편향(bias)을 최소화하고 실사용 환자의 대표성을 보장하는지 여부
- 환자(개인 정보 포함) 보호 방법이 적절히 마련되어 있는지 여부
- 적절한 데이터 수집 방법(도구) 사용 여부

[데이터 품질 보증 및 관리]

- 데이터 수집 및 기록 절차를 준수하였는지 여부

무단 전재 및 재배포 금지

Strictly Confidential
의료기기 임상시험 및 실사용평가 소개

3. 의료기기 실사용평가

의료기기 실사용평가 결과 활용

■ 실사용증거(RWE)는 의료기기 사용목적 추가, 안전에 대한 사항 확인, 과거 대조군 등으로 활용될 수 있음

* 실사용증거(RWE)를 적용하는 분야에 따라서 활용 가능한 실사용 데이터(RWD)에 대한 기준이 달라짐

번호	실사용증거(RWE)를 사용 분야
1	**기 허가(인증)받은 의료기기의 사용목적 구체화, 사용방법, 사용 시 주의사항 등 변경** - 허가범위 내의 의료행위로써 생성된 실사용정보(RWD)를 증거화하여 의료기기에 대한 허가사항 변경 - 범용으로 허가(인증)받은 제품의 구체화된 사용목적 추가
2	**시판 후 제품에 대한 안전(이상사례)에 관한 문제 등 확인** - 시판 후의 의료기기에 대한 안전에 문제가 있을 수 있음을 확인하고, 실사용증거(RWE)를 통해 적절한 시정조치
3	**의료기기의 안전성 및 유효성 평가에 필요한 객관적 기준 설정** - 새로운 의료기기의 안전성·유효성 입증을 위해 유사제품의 실사용증거(RWE)를 통한 객관적인 기준 설정
4	**의료기기 임상시험 시 대조군 설정** - 의료기기에 대한 임상시험 시 유사한 사용목적의 의료기기에 대한 실사용정보(RWD)가 있는 경우에는 대조군으로서 비교임상 수행
5	**의료기기의 재심사, 재평가 자료** - 국내 시판 후의 안전성 및 유효성에 관한 조사자료, 이상사례 및 안전성에 관한 국내·외 자료
6	**신의료기술평가/보험등재 자료** - 신의료기술평가 체계적문헌고찰과 경제성평가의 임상적 유효성 입증을 위한 근거자료

무단 전재 및 재배포 금지

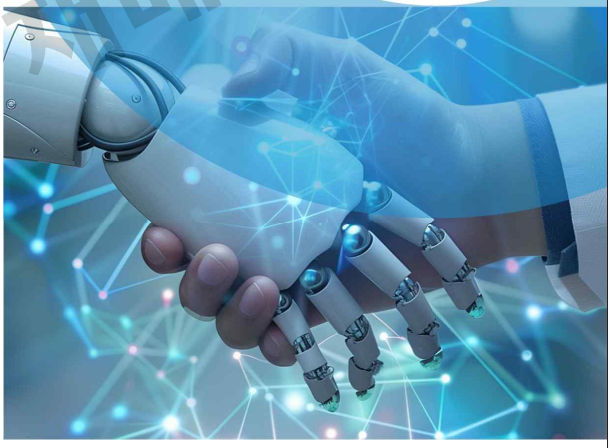


무단 전재 및 재배포 금지

디지털의료제품법 시대, 임상시험은 어떻게 바뀌는가

- 디지털의료제품법에 따른 임상시험 전략의 변화 -

Global Platform CRO with One Stop Full Service



㈜메디팁

전은정 Ph.D. / 프로메디스 임상본부장

010-4590-4147 / ejjeon9817@naver.com

무단 전재 및 재배포 금지

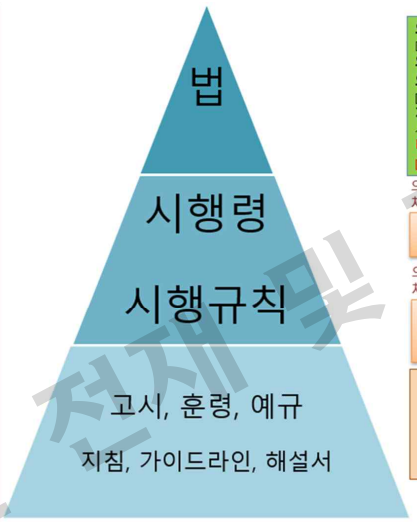
0 목차

- 디지털의료제품법에 따른 임상시험 전략의 변화 -

1. 의료기기법 VS. 디지털의료제품법
2. 디지털 의료제품 관련 규정
3. 디지털 의료제품 법적·제도적 변화의 핵심
4. 임상시험 설계

무단 전재 및 재배포 금지

01 의료기기법 VS. 디지털의료제품법



의료기기법
[시행 2025. 2. 9.] [법률 제20512호, 2024. 10. 22., 타법개정]
의료기기산업 육성 및 혁신의료기기 지원법
의료기기산업법)
[시행 2024. 7. 10.] [법률 제19990호, 2024. 1. 9., 타법개정]
체외진단의료기기법
시행 2024. 10. 22.] [법률 제20512호, 2024. 10. 22., 타법개정]
디지털의료제품법
[시행 2025. 2. 21.] [법률 제20331호, 2024. 2. 20., 타법개정]

의료기기산업 육성 및 혁신의료기기 지원법 시행령
체외진단의료기기법 시행령

의료기기법 시행령
[시행 2025. 2. 9.] [대통령령 제35250호, 2025. 2. 7., 일부개정]

의료기기산업 육성 및 혁신의료기기 지원법 시행규칙
체외진단의료기기법 시행규칙

의료기기법 시행규칙
[시행 2025. 1. 17.] [총리령 제1936호, 2024. 1. 16., 일부개정]
별표 3 의료기기 임상시험 관리기준 (제24조제1항 관련)

의료기기 임상시험계획 승인에 관한 규정
의료기기 임상시험기관 지정에 관한 규정
의료기기 임상시험 기본문서 관리에 관한 규정
의료기기 재심사에 관한 규정
의료기기 재평가에 관한 규정

생명윤리 및 안전에 관한 법률: 인간과 인체유래물 등을 연구하거나, 배아나 유전자 등을 취급할 때 인간의 존엄과 가치를 침해하거나 인체에 위해(危害)를 끼치는 것을 방지함으로써 생명윤리 및 안전을 확보하고 국민의 건강과 삶의 질 향상에 이바지함을 목적으로 한다. 보건복지부(생명윤리정책과),

개인정보보호법: 개인정보의 처리 및 보호에 관한 사항을 정함으로써 개인의 자유와 권리를 보호하고, 나아가 개인의 존엄과 가치를 구현함을 목적, 행정자치부(개인정보보호정책과)

무단 전재 및 재배포 금지

Confidential 3

02 디지털 의료제품 관련 규정

- **디지털의료제품의 용어 정의 1**

분류	주요내용	조항
디지털의료제품	디지털의료기기 , 디지털융합의약품 , 디지털의료·건강지원기기	법 제2조 제1호
디지털의료기기	지능정보기술, 로봇기술, 정보통신기술 등 디지털기술이 적용된「의료기기법」에 따른 의료기기 또는 이와 디지털의료·건강지원기기가 조합된 제품 디지털의료기기소프트웨어: 디지털의료기기의 일부를 구성하거나 그 자체로 디지털의료기기인 소프트웨어	법 제2조 제2호
디지털융합의약품	「약사법」에 따른 의약품과 디지털의료기기 또는 디지털의료·건강지원기기가 조합된 의약품 (단, 주된 기능이 디지털의료기기인 경우 제외)	법 제2조 제3호
디지털의료·건강지원기기	건강 유지·향상을 목적으로 생체신호 모니터링/측정/분석 및 생활습관 기록/분석을 통한 건강관리 목적의 디지털기기	법 제2조 제4호

무단 전재 및 재배포 금지

Confidential 4

02 디지털 의료제품 관련 규정

- 디지털의료제품의 용어 정의 2

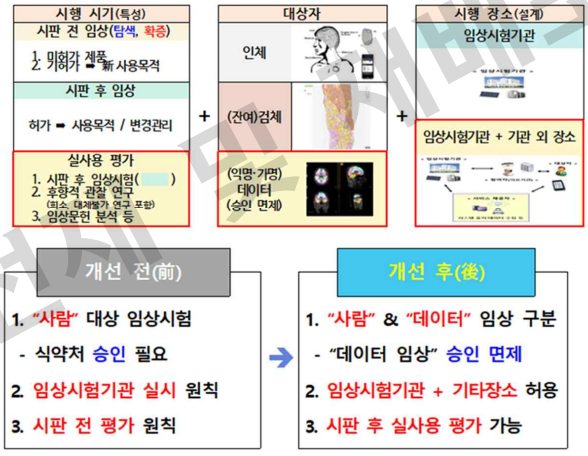
분류	주요내용	조항
임상시험	디지털의료기기 및 디지털융합의약품의 안전성과 유효성을 증명하기 위하여 사람을 대상으로 수행하는 시험·연구	법 제2조 제 5 호
임상적 성능시험	디지털의료기기의 성능을 증명하기 위하여 검체(「체외진단의료기기법」 제2조제2호에 따른 검체를 말한다. 이하 같다)를 분석하여 임상적·생리적·병리학적 상태를 예측하거나 그 결과를 확인하는 시험·연구	법 제2조 제 6 호
디지털의료기기소프트웨어	가. 내장형 디지털의료기기소프트웨어: 디지털의료기기에 설치 또는 유·무선으로 연결되어 그 디지털의료기기를 제어·구동하거나 그 디지털의료기기로부터 생성된 데이터의 저장, 신호·영상의 처리 등을 목적으로 사용되는 소프트웨어 나. 독립형 디지털의료기기소프트웨어: 전자·기계장치 등 하드웨어에 결합되지 아니하고 범용 컴퓨터 등과 동등한 환경에서 운영되며 그 자체로 디지털의료기기에 해당하는 독립적인 형태의 소프트웨어 다. 가목 또는 나목과 유사한 소프트웨어로서 식품의약품안전처장이 지정하는 소프트웨어	법 제2조 제 7 호
실사용 평가	디지털의료기기 사용 중 수집된 데이터를 근거로 안전성 및 유효성 평가 가능. 허가 절차 등에 활용 가능.	법 제15조

무단 전재 및 재배포 금지

02 디지털 의료제품 관련 규정

- 디지털의료제품법 및 시행규칙

<디지털의료기기 임상시험 규제 개선사항( )>



무단 전재 및 재배포 금지

02 디지털 의료제품 관련 규정

- **디지털의료제품법 및 시행규칙**

➢ **식약처 임상시험계획 승인 면제**

디지털의료제품법 제9조(임상시험계획의 승인 등)
① 디지털의료기기로 임상시험을 하려는 자는 임상시험계획서를 작성하여 식품의약품안전처장의 승인을 받아야 한다. 임상시험계획서를 변경할 때에도 또한 같다.
② 제1항에도 불구하고 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 임상시험은 제1항에 따른 승인을 받지 아니할 수 있다.
1. 시판 중인 디지털의료기기의 허가·인증사항에 대한 임상적인 효과를 관찰하는 임상시험
2. 인체에 미치는 위해도가 낮은 임상시험으로서 **총리령으로 정하는 임상시험**

디지털의료제품법 시행규칙 제14조(임상시험계획 승인 등)
③ 법 제9조제2항제2호에서 "**총리령으로 정하는 임상시험**"이란 다음 각 호의 임상시험을 말한다. 다만, 디지털융합의약품의 부분을 구성하는 디지털의료기기로 임상시험을 하려는 경우로서 이미 허가 또는 인증받은 디지털의료기기와 사용목적, 작용원리 등이 동등하지 않은 경우는 제외한다.
1. 의료기기, 의약품 또는 디지털의료·건강지원기기로부터 생성되었거나 수집·가공된 데이터를 사용하고 임상시험용 디지털의료기기를 임상시험 대상자에게 직접적으로 사용하지 않는 임상시험(이하 "데이터 임상시험"이라 한다)
2. 제7조제2항 또는 제9조제2항에 따라 제출한 변경관리 계획의 범위에서 실사용 평가를 위한 목적으로 실시하는 임상시험
3. 법 제17조제3항에 따라 우수 관리체계 인증을 받은 디지털의료기기제조업자 또는 디지털의료기기수입업자가 1등급 또는 2등급에 해당하는 독립형 디지털의료기기소프트웨어에 대하여 실시하는 임상시험
4. 법 제34조제2항에 따라 성능인증을 받은 디지털의료·건강지원기기를 법 제2조제2호 각 목의 어느 하나에 해당하는 목적으로 사용하는 임상시험(「의료법」 제5조에 따라 면허를 받은 의료인이 연구 목적으로 실시하는 경우만 해당한다)
5. 제11조제5호 및 제6호에 따라 디지털의료기기 제조업허가 등의 제외 대상인 디지털의료기기에 대한 안전성 및 유효성을 평가하기 위하여 실시하는 임상시험
6. 그 밖에 시판 중인 디지털의료기기를 사용하는 임상시험으로서 안전성과 직접적으로 관련되지 않는다고 식품의약품안전처장이 정하는 임상시험

무단 전재 및 재배포 금지

02 디지털 의료제품 관련 규정

- **디지털의료제품법 및 시행규칙**

➢ **식약처 임상시험계획 승인 제출자료 면제**

디지털의료제품법 제9조(임상시험계획의 승인 등)
① 디지털의료기기로 임상시험을 하려는 자는 임상시험계획서를 작성하여 식품의약품안전처장의 승인을 받아야 한다. 임상시험계획서를 변경할 때에도 또한 같다.
② 제1항에도 불구하고 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 임상시험은 제1항에 따른 승인을 받지 아니할 수 있다.
1. 시판 중인 디지털의료기기의 허가·인증사항에 대한 임상적인 효과를 관찰하는 임상시험
2. 인체에 미치는 위해도가 낮은 임상시험으로서 **총리령으로 정하는 임상시험**

디지털의료제품법 시행규칙 제14조(임상시험계획 승인 등)
① 법 제9조제1항 전단에 따라 임상시험계획의 승인을 받으려는 자는 별지 제9호서식의 디지털의료기기 임상시험계획 승인신청서에 다음 각 호의 서류 및 자료를 첨부하여 식품의약품안전처장에게 제출해야 한다.

1. 임상시험계획서
2. 임상시험용 디지털의료기기가 별표 3에 따른 시설과 제조 및 품질관리체계에서 적합하게 제조되고 있음을 증명하는 자료 (독립형 디지털의료기기소프트웨어는 제외한다)
3. 임상시험용 디지털의료기기의 안전성을 검토하기 위한 다음 각 목에 따른 자료
가. 작용원리에 관한 자료
나. 디지털의료기기소프트웨어 검증 및 유효성에 관한 자료
다. 전자적 침해행위로부터의 보호 조치에 관한 자료
라. 제품의 성능 및 안전을 확인하기 위한 시험규격 및 그 설정 근거와 실측값에 관한 자료로서 식품의약품안전처장이 정하여 고시하는 자료(소프트웨어 내장 디지털의료기기만 해당한다)
4. 디지털의료기기의 부분을 구성하는 디지털의료·건강지원기기에 대해서는 법 제34조제2항에 따른 성능인증에 관한 자료(디지털의료기기와 디지털의료·건강지원기기가 조합된 경우만 해당한다)
5. 법 제31조제2항에 따라 디지털융합의약품의 부분을 구성하는 디지털의료기기로 임상시험을 실시하는 경우에는 디지털융합의약품을 구성하는 의약품과 디지털의료기기의 조합적 특성에 관한 자료

무단 전재 및 재배포 금지

02 디지털 의료제품 관련 규정

- **디지털의료제품법 및 시행규칙**
  - ➢ **임상시험기관 외 실시 승인**

디지털의료제품법 제9조(임상시험계획의 승인 등)
④ 디지털의료기기로 임상시험을 하려는 자는 「의료기기법」 제10조제3항에 따라 지정된 임상시험기관에서 임상시험을 실시하여야 한다.
⑤ 제4항에도 불구하고 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 임상시험의 경우에는 총리령으로 정하는 바에 따라 임상시험기관 외의 기관에서 실시할 수 있다. 이 경우 미리 식품의약품안전처장의 승인을 받아야 하며 승인받은 사항을 변경할 때에도 또한 같다.
1. 통신이나 네트워크 등을 이용하여 다수의 사람으로부터 데이터를 수집하는 시험
2. 그 밖에 임상시험의 특성상 임상시험기관이 아닌 기관에서 실시할 수 있는 시험으로서 총리령으로 정하는 시험

디지털의료제품법 시행규칙 제15조(임상시험기관 외 실시 승인 등)
③ 법 제9조제5항제2호에서 "총리령으로 정하는 시험"이란 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 시험을 말한다.
1. 「의료기기법 시행규칙」 제21조의2에 따른 임상시험
2. 데이터 임상시험
3. 그 밖에 임상시험의 특성상 임상시험기관이 아닌 기관의 참여가 필요하다고 식품의약품안전처장이 인정하는 임상시험

[의료기기법시행규칙 제 21조의2]
임상시험의 특성상 임상시험기관이 아닌 기관의 참여가 필요한 임상시험
1. 건축물 또는 시설물에 고정식으로 설치되어 이동이 불가능한 의료기기를 대상으로 하는 임상시험
2. 다음 각 목의 어느 하나에 해당하는 기관에서만 대상자를 모집할 수 있는 임상시험
가. 「감염병의 예방 및 관리에 관한 법률」 제36조제1항 및 제2항에 따라 지정된 감염병관리기관
나. 「감염병의 예방 및 관리에 관한 법률」 제37조제1항 각 호에 따라 감염병관리기관으로 지정되거나 설치·운영되는 의료기관 또는 격리소·요양소·진료소

무단전재 및 재배포 금지

02 디지털 의료제품 관련 규정

- **디지털의료제품법 및 시행규칙**
  - ➢ **임상시험기관 외 실시 승인 제출 자료**

디지털의료제품법 제9조(임상시험계획의 승인 등)
④ 디지털의료기기로 임상시험을 하려는 자는 「의료기기법」 제10조제3항에 따라 지정된 임상시험기관에서 임상시험을 실시하여야 한다.
⑤ 제4항에도 불구하고 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 임상시험의 경우에는 총리령으로 정하는 바에 따라 임상시험기관 외의 기관에서 실시할 수 있다. 이 경우 미리 식품의약품안전처장의 승인을 받아야 하며 승인받은 사항을 변경할 때에도 또한 같다.
1. 통신이나 네트워크 등을 이용하여 다수의 사람으로부터 데이터를 수집하는 시험
2. 그 밖에 임상시험의 특성상 임상시험기관이 아닌 기관에서 실시할 수 있는 시험으로서 총리령으로 정하는 시험

디지털의료제품법 시행규칙 제15조(임상시험기관 외 실시 승인 등)
① 법 제9조제5항에 따라 임상시험기관 외의 기관에서 임상시험을 실시하려는 자는 별지 제11호서식의 디지털의료기기 임상시험기관 외 실시 승인신청서에 다음 각 호의 서류 및 자료를 첨부하여 식품의약품안전처장에게 제출해야 한다. 이 경우 임상시험기관 외 실시 승인 신청은 제14조제1항에 따른 임상시험계획의 승인 또는 같은 조 제2항에 따른 변경승인 신청과 동시에 할 수 있다.
1. 임상시험계획서
2. 임상시험기관 외의 기관에서 수집하거나 분석하는 데이터의 기록, 보관, 처리 또는 전송 등에 사용하는 제품(정보시스템을 포함한다)에 관한 자료
3. 임상시험기관 외의 기관에서 임상시험을 수행하는 자와 대상자를 위한 교육 자료
4. 임상시험기관 외의 기관에서 수행하는 업무에 대한 표준업무처리서

디지털의료제품법 시행규칙 제15조(임상시험기관 외 실시 승인 등)
④ 제1항제1호에 따른 임상시험계획서에 포함되어야 할 사항은 별표 5 및 다음 각 호와 같다.
1. 임상시험기관 외의 기관의 명칭, 소재지 및 임상시험이 실시되는 장소에 대한 정보
2. 제1항제2호에 해당하는 제품을 관리하는 관리자의 성명 및 직명
3. 임상시험기관 외의 기관에서 수집하거나 분석하는 데이터의 기록, 보관, 처리 및 전송 등에 사용하는 제품에 관한 사항
4. 임상시험기관 외의 기관에서 수집되거나 분석되는 임상자료의 활용이 유효성의 평가에 미치는 영향에 대한 분석
5. 임상시험기관 외의 기관에서 수집되거나 분석되는 데이터에 대한 처리(「개인정보 보호법」 제2조제2호에 따른 처리를 말한다) 및 보안에 관한 대책

무단전재 및 재배포 금지

02 디지털 의료제품 관련 규정

- **디지털의료제품법 및 시행규칙**

➢ **임상시험기관 외 실시 승인 제출 자료**

○ 임상시험기관 외 실시 임상시험 승인·실시기준 마련(안 제5조, 별표)

- (승인) 임상시험기관 외 실시계획서 요구사항 및 데이터(시스템)의 수집·분석에 사용되는 기기(시스템) 보안, 접근통제 등 기준 마련

* 제품의 설계, 기술적 특성, 사용방법, 데이터 유형(보호,보안) 및 보관기관, 접근통제 등

- (실시GCP) 기관, 참여자, (서비스)제공자, 의뢰자 등 추가 준수사항 마련

구분		식약처 + IRB 승인	추가 요구사항
임상시험 기관 외 실시 승인	대 상	기관 외 실시하는 경우	·(원칙) 개보법 준수(익명/가명), 데이터 위변조 금지 ·(기관) 계약체결, 참여자 관리, 데이터 적절성 확인 ·(참여자) 전자동의, 보안 대책 준수, 이상사례 보고 ·(제공자) 데이터 보관, 보안, 접근통제 오류 삭제/개선 등 ·(의뢰자) 제공자 조직분리(독립성), 추가 모니터링 등
	계획서	기관 외 실시정보 및 임상적 영향, 데이터 수집/관리 등에 관한 사항을 상세히 작성	
	데이터 기록·보관 처리 등 제품 정보	기술적 특성, 사용방법 데이터 유형/보안, 접근 가능한 사람, 보관기관 등 평가	
	기관 외 실시(참여자) 교육자료	O	
	기관 외 실시 업무처리서	O	

무단 전재 및 배포 금지

02 디지털 의료제품 관련 규정

- **디지털의료제품법 및 시행규칙**

➢ **식약처 승인 대상 체외진단 SW 임상적 성능시험**

제10조(임상적 성능시험계획의 승인 등)

① 디지털의료기기로 임상적 성능시험을 하려는 자는 임상적 성능시험계획서를 작성하여 「체외진단의료기기법」 제8조제2항에 따라 임상적 성능시험기관에 설치된 임상적 성능시험 심사위원회의 승인을 받아야 하며, 임상적 성능시험 계획서를 변경할 때에도 또한 같다. 다만, 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 임상적 성능시험의 경우에는 식품의약품안전처장으로부터 임상적 성능시험 계획서의 승인 또는 변경승인을 받아야 한다.

1. 인체로부터 검체를 채취하는 방법의 위해도가 큰 경우
2. 이미 확립된 의학적 진단방법 또는 허가·인증받은 디지털의료기기로는 임상적 성능시험의 결과를 확인할 수 없는 경우
3. 디지털융합의약품의 부분을 구성하는 디지털의료기기로 임상적 성능시험을 하려는 경우. 다만, 이미 허가·인증받은 디지털의료기기와 사용목적, 작용원리 등이 동등하지 아니한 경우로 한정한다.

② 제1항에 따라 승인을 받은 임상적 성능시험용 디지털의료기기를 제조·수입하려는 자는 총리령으로 정하는 기준을 갖춘 제조시설에서 제조하거나 제조된 의료기기를 수입하여야 한다. 이 경우 제8조제3항 및 제12조제2항에도 불구하고 허가 또는 인증을 받지 아니하거나 신고를 하지 아니하고 이를 제조하거나 수입할 수 있다.

③ 디지털의료기기로 임상적 성능시험을 하려는 자는 「체외진단의료기기법」 제8조제1항에 따라 지정된 임상적 성능시험기관에서 임상적 성능시험을 실시하여야 한다.

④ 제3항에도 불구하고 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 임상적 성능시험의 경우에는 총리령으로 정하는 바에 따라 임상적 성능시험기관 외의 기관에서 실시할 수 있다. 이 경우 제1항에 따라 임상적 성능시험을 승인한 임상적 성능시험 심사위원회 또는 식품의약품안전처장의 승인을 미리 받아야 하며 승인받은 사항을 변경할 때에도 또한 같다.

1. 통신이나 네트워크 등을 이용하여 검체에서 데이터를 수집하는 시험
2. 그 밖에 임상적 성능시험의 특성상 임상적 성능시험기관이 아닌 기관에서 실시할 수 있는 시험으로서 총리령으로 정하는 시험

③ 법 제10조제4항제2호에서 "총리령으로 정하는 시험"이란 다음 각 호 중 어느 하나에 해당하는 임상적 성능시험을 말한다.
1. 「체외진단의료기기법 시행규칙」 제14조의2에 따른 임상적 성능시험
2. 의료기기, 의약품 또는 디지털의료·건강지원기기에서 생성되었거나 수집·가공된 데이터를 사용하는 임상적 성능시험
3. 그 밖에 임상적 성능시험의 특성상 임상적 성능시험기관이 아닌 기관의 참여가 필요하다고 식품의약품안전처장이 인정하는 임상적 성능시험

제14조의2(임상적 성능시험 참여기관의 임상적 성능시험)
법 제7조제3항제1호 단서에 따른 임상적 성능시험의 특성상 임상적 성능시험기관이 아닌 기관의 참여가 필요한 임상적 성능시험이란 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 임상적 성능시험을 말한다.
1. 건축물 또는 시설물에 고정식으로 설치되어 이동이 불가능한 시설·장비를 갖추고 있는 기관에서의 검체 분석을 필요로 하는 임상적 성능시험
2. 다음 각 목 중 어느 하나에 해당하는 기관에서만 임상적 성능시험의 대상자를 모집할 수 있는 임상적 성능시험
가. 「감염병의 예방 및 관리에 관한 법률」 제36조제1항 및 제2항에 따라 지정된 감염병관리기관
나. 「감염병의 예방 및 관리에 관한 법률」 제37조제1항제1호에 따라 감염병관리기관으로 지정되거나 같은 항 제2호에 따라 설치·운영되는 의료기관 또는 격리소·요양소·진료소
3. 제2호 각 목(나목의 격리소·요양소·진료소는 제외한다) 중 어느 하나에 해당하는 기관에서만 법 제7조제3항제4호 본문에 따른 진단·치료 목적으로 사용하고 남은 검체를 제공할 수 있는 임상적 성능시험
4. 그 밖에 임상적 성능시험의 특성상 임상적 성능시험 참여기관이 해당 임상적 성능시험의 일부를 실시하는 것이 필요하다고 식품의약품안전처장이 정하여 고시하는 임상적 성능시험
[본조신설 2024. 12. 23.]

무단 전재 및 배포 금지

02 디지털 의료제품 관련 규정

- **디지털의료제품법 및 시행규칙**

➢ **디지털융합의약품 임상-1**

제29조(디지털융합의약품 제조업허가 등)
① 디지털융합의약품의 제조를 업으로 하려는 자는 대통령령으로 정하는 시설 기준에 따라 필요한 시설을 갖추고 식품의약품안전처장의 제조업허가를 받아야 한다. 이 경우 제조업허가를 받은 자(이하 "디지털융합의약품제조업자"라 한다)는 디지털융합의약품에 한정하여 「약사법」 제31조제1항에 따라 제조업허가를 받은 자로 본다.
② 디지털융합의약품제조업자가 그 제조(다른 디지털융합의약품제조업자에게 제조를 위탁하는 경우를 포함한다)한 디지털융합의약품을 판매하려는 경우에는 다음 각 호의 자료를 제출하여 품목별로 식품의약품안전처장의 제조판매품목허가(이하 "품목허가"라 한다)를 받아야 한다. 이 경우 품목허가를 받은 자는 「약사법」 제31조제2항에 따라 품목허가를 받은 자로 본다.
1. 안전성과 유효성에 관한 자료
2. 제조 및 품질관리기준에 관한 자료
3. 디지털융합의약품의 부분을 구성하는 디지털의료기기에 대하여는 제8조제5항에 따른 제조 및 품질관리체계 자료, 임상시험 자료 등 제조허가·제조인증을 받거나 제조신고에 필요한 자료. 다만, 해당 디지털의료기기가 제8조제3항에 따라 제조허가 또는 제조인증을 받거나 제조신고를 한 경우에는 허가증, 인증서 또는 신고수리서로 갈음할 수 있다.
4. 디지털융합의약품의 부분을 구성하는 디지털의료·건강지원기기에 대하여는 제34조제2항에 따른 성능인증에 관한 자료
5. 그 밖에 허가 및 안전관리에 필요한 자료로서 총리령으로 정하는 자료
③ 디지털융합의약품제조업자 외의 자가 디지털융합의약품을 디지털융합의약품제조업자에게 위탁제조하여 판매하려는 경우에는 식품의약품안전처장에게 위탁제조판매업신고를 하여야 하며, 품목별로 품목허가를 받아야 한다. 이 경우 위탁제조판매업신고를 한 자는 디지털융합의약품에 한정하여 「약사법」 제31조제3항에 따라 위탁제조판매업신고를 한 자로, 품목허가를 받은 자는 「약사법」 제31조제3항에 따라 품목허가를 받은 자로 본다.

Confidential 13

무단 전재 및 재배포 금지

02 디지털 의료제품 관련 규정

- **디지털의료제품법 및 시행규칙**

➢ **디지털융합의약품 임상-2**

제31조(디지털융합의약품의 임상시험)
① 디지털융합의약품에 대한 임상시험에 관하여는 「약사법」 제34조, 제34조의2부터 제34조의5까지를 적용한다.
② 제1항에도 불구하고 디지털융합의약품의 부분을 구성하는 의약품에 대한 임상시험과 디지털의료기기에 대한 임상시험, 임상적 성능시험을 구분하여 별도로 실시할 수 있다. 이 경우 의약품의 임상시험에는 제1항을 적용하고, 디지털의료기기의 임상시험, 임상적 성능시험에는 제9조·제10조를 적용한다.

제32조(디지털융합의약품의 부분을 구성하는 디지털의료기기에 대한 전자적 침해행위로부터의 보호 조치 등의 적용)
디지털융합의약품의 부분을 구성하는 디지털의료기기에 대하여는 제14조에 따른 전자적 침해행위로부터의 보호 조치, 제15조에 따른 실사용 평가, 제24조 및 제25조에 따른 디지털의료기기소프트웨어 품질관리기준 적합판정 및 적합판정 확인·조사를 적용한다.

Confidential 14

무단 전재 및 재배포 금지

02 디지털 의료제품 관련 규정

- **디지털의료제품법 및 시행규칙**
  - ➢ **지원기기 의료용 연구임상**

제34조(디지털의료 · 건강지원기기의 성능인증)
① 제33조제1항에 따라 신고한 디지털의료 · 건강지원기기를 제조 또는 수입하여 판매하려는 자는 식품의약품안전처장에게 성능인증을 신청하여 판매하려는 제품에 대한 성능인증을 받을 수 있다. 이 경우 성능인증 신청은 제33조제1항에 따른 신고와 동시에 할 수 있다.
② 식품의약품안전처장은 제1항에 따라 성능인증 신청을 받으면 제품의 성능을 검사하고, 식품의약품안전처장이 정하는 성능인증 기준에 적합하면 성능인증을 하여야 한다.
③ 식품의약품안전처장은 제2항에 따라 성능인증을 받은 제품의 포장 · 용기 및 홍보물 등에 식품의약품안전처장이 정하는 표지를 사용하게 할 수 있다.
④ 제2항에 따른 성능인증을 받지 아니한 자는 제3항에 따른 표지를 사용하여서는 아니 된다.
⑤ 식품의약품안전처장은 제품의 생산 조건이나 품질에 대한 심사를 주된 업무로 하는 법인 · 단체로서 식품의약품안전처장의 지정을 받은 법인 · 단체 또는 국가기관 소속 시험기관에 제2항에 따른 성능검사를 대행하게 할 수 있다.
⑥ 제1항부터 제5항까지에서 규정한 사항 외에 성능인증의 절차 및 기준, 성능검사 대행기관의 지정 기준 · 절차, 그 밖에 필요한 사항은 총리령으로 정한다.

무단 전재 및 재배포 금지

02 디지털 의료제품 관련 규정

- **디지털의료제품법 및 시행규칙**
  - ➢ **실사용 평가 대상 및 절차**

법 제15조

제15조(실사용 평가) ① 디지털의료기기제조업자등은 디지털의료기기를 실제 사용하는 과정에서 수집 · 생성된 정보를 바탕으로 디지털의료기기의 안전성과 유효성을 평가(이하 "실사용 평가"라 한다)할 수 있다.
② 실사용 평가를 하려는 디지털의료기기제조업자등은 실사용 평가에 필요한 자료를 수집하기 위하여 「의료기기법」 제13조제3항에도 불구하고 총리령으로 정하는 범위에서 의료인이나 의료기관 개설자(법인의 대표나 이사, 그 밖에 이에 종사하는 자를 포함한다) 및 의료기관 종사자에게 평가 대상 디지털의료기기를 제공할 수 있다. 이 경우 디지털의료기기제조업자등은 평가 대상 디지털의료기기를 사용하는 의료인이나 의료기관 개설자 및 의료기관 종사자에게 해당 디지털의료기기를 사용한 기록의 열람 또는 그 사본의 제공을 요청할 수 있다.
③ 식품의약품안전처장은 디지털의료기기제조업자등이 제출한 실사용 평가 자료를 제8조제3항에 따른 제조허가 · 제조인증 · 제조신고, 제11조에 따른 변경허가 · 변경인증 · 변경신고, 제12조제2항에 따른 수입허가 · 수입인증 · 수입신고 등에 활용할 수 있다.
④ 제1항부터 제3항까지에 따른 실사용 평가의 대상 · 절차, 제2항에 따른 기록의 열람 또는 사본의 제공 방법 · 절차에 관한 세부사항은 총리령으로 정한다.

디지털의료기기 임상시험등 계획 승인 및 실시·관리에 관한 규정

[시행 2025. 4. 24.] [식품의약품안전처고시 제2025-29호, 2025. 4. 24., 제정]

제2조(정의) ① 이 규정에서 사용하는 용어의 뜻은 다음과 같다. "시판 전 임상시험등"

"시판 후 임상시험등"

7. "실사용평가"란 법 제15조에 따라 실시하는 다음에 해당하는 시험 · 연구 또는 분석 등의 평가를 말한다.
가. 시판 후 임상시험등
나. 사전계획 없이 해당 디지털의료기기를 다음에 해당하는 방법으로 사용하여 수집된 진료기록 등 보건의료데이터를 후향적으로 관찰하는 시험 · 연구(이하 "후향적 관찰연구"라 한다)
1) 「의료법」 제5조에 따라 면허를 받은 의료인의 책임하에 허가 · 인증 또는 신고된 범위를 초과하여 사용하는 경우
2) 디지털의료기기 허가 · 인증 · 신고 등이 면제된 법위에서 사용하는 경우
3) 그 밖에 디지털의료기기 관련 법률에 따라 허가 · 인증 · 신고 등의 특례 등을 적용받아 사용하는 경우
다. 디지털의료기기를 사용하여 발간된 임상문헌, 부작용 사례 등을 종합적으로 분석한 결과

제30조(실사용 평가의 대상 및 절차 등) ① 실사용 평가의 대상은 다음 각 호와 같다.
1. 법 제8조제3항 또는 법 제12조제2항에 따라 제조허가 · 수입허가, 제조인증 · 수입인증을 받거나 제조신고 · 수입신고한 디지털의료기기를 다음 각 목의 어느 하나에 따라 사용하는 경우
가. 허가 · 인증 또는 신고된 범위에서 사용하는 경우
나. 제7조제2항(제25조제4항제1호에 따라 준용되는 경우를 포함한다) 또는 제9조제2항(제25조제4항제3호에 따라 준용되는 경우를 포함한다)에 따라 변경관리 계획을 제출한 범위에서 사용하는 경우
다. 다음의 어느 하나에 해당하는 경우로서 「의료법」 제5조에 따라 면허를 받은 의료인의 책임하에 허가 · 인증 또는 신고된 범위를 초과하여 사용하는 경우(질병의 진단, 치료 등에 관한 기능의 추가 또는 변경을 동반하지 않는 경우만 해당한다)
1) 질병의 진단 또는 치료의 직접 목적으로 사용되며 대체 가능한 디지털의료기기가 없는 경우
2) 말기암 등 중대한 질환 또는 희귀난치 질환을 진단하거나 치료하기 위한 목적으로 사용되는 경우
3) 대체 가능한 디지털의료기기보다 비용 대비 효과적이거나 부작용이 적고 임상적으로 치료 효과가 높을 것으로 기대되는 경우
2. 제11조제6호에 해당하는 디지털의료기기를 제조업허가 등이 제외된 범위에서 사용하는 경우
3. 그 밖에 식품의약품안전처장이 실사용 평가의 대상으로 적합하다고 인정하는 경우

③ 법 제15조제2항 전단에서 "총리령으로 정하는 범위"란 법 제15조제1항에 따른 실사용 평가를 수행하는데 필요한 최소 수량의 디지털의료기기를 무상으로 사용하게 하는 경우를 말한다.
④ 법 제15조제2항 후단에 따른 요청을 받은 의료인이나 의료기관의 개설자 및 의료기관 종사자는 평가 대상 디지털의료기기를 사용한 기록을 가명 처리하여 열람을 허용하거나 그 사본을 제공할 수 있다. 이 경우 디지털의료기기를 사용한 환자의 개인정보(「개인정보 보호법」 제2조제1호에 따른 개인정보를 말한다)의 처리에 관하여는 「개인정보 보호법」에 따른다.

개인정보 보호법 [시행 2025. 3. 13.] [법률 제19234호, 2023. 3. 14., 일부개정]
제28조의2(가명정보의 처리 등)

의료법 [시행 2025. 1. 22.] [법률 제20593호, 2024. 12. 20., 일부개정]
제21조(기록 열람 등)

무단 전재 및 재배포 금지

02 디지털 의료제품 관련 규정

- **디지털의료제품법 및 시행규칙**
  - ➢ 임상시험계획서 "사전검토" 가능

디지털의료제품법
[시행 2025. 2. 21.] [법률 제20331호, 2024. 2. 20., 타법개정]

제39조(허가·신고 등의 사전 검토)

① 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 자는 디지털의료제품에 대한 허가·인증·신고·승인·평가 등에 필요한 자료에 대하여 식품의약품안전처장에게 사전에 검토를 요청할 수 있다.
1. 제8조제3항에 따라 제조허가 또는 제조인증을 받거나 제조신고를 하려는 자
2. 제9조에 따라 임상시험을 하거나 제10조에 따라 임상적 성능시험을 하려는 자
3. 제12조제2항에 따라 수입허가 또는 수입인증을 받거나 수입신고를 하려는 자
4. 제29조제2항에 따라 품목허가를 받거나 제30조제1항에 따라 수입허가를 받으려는 자
5. 제34조에 따라 성능인증을 받으려는 자
6. 제40조에 따라 성능평가를 받으려는 자

② 식품의약품안전처장은 제1항에 따라 검토 요청을 받으면 이를 확인한 후 그 결과를 신청인에게 서면(전자문서를 포함한다)으로 알려야 한다.

③ 식품의약품안전처장은 제1항 각 호에 해당하는 허가·인증·신고·승인·평가 등을 할 때에 제2항에 따른 검토 결과를 고려하여야 한다.

④ 제1항에 따른 사전 검토의 대상·범위와 절차·방법 등 필요한 사항은 총리령으로 정한다.

디지털의료제품법 시행규칙
[시행 2025. 2. 28.] [총리령 제2025호, 2025. 2. 28., 제정]

제49조(사전 검토의 대상 등)

① 법 제39조제1항에 따른 사전 검토의 대상 및 범위는 다음 각 호와 같다.
1. 디지털의료제품의 분류 및 등급에 관한 자료
2. 변경관리 계획서
3. 임상시험계획 또는 임상적 성능시험계획에 관한 자료
4. 임상시험기관 또는 임상적 성능시험기관 외의 기관 실시 승인에 관한 자료
5. 임상시험 등 평가에 관한 자료
6. 전자적 침해행위로부터의 보호 조치에 관한 자료
7. 디지털의료기기소프트웨어 검증 및 유효성에 관한 자료
8. 전문가용 디지털의료기기소프트웨어에 관한 자료
9. 디지털의료제품의 구성요소에 대한 성능평가에 관한 자료
10. 사용적합성에 관한 자료
11. 디지털의료제품의 성능 및 안전을 확인하기 위한 시험규격 및 그 설정 근거와 실측값에 관한 자료
12. 그 밖에 디지털의료제품에 대한 허가·인증·신고·승인·평가 등에 필요한 자료로서 식품의약품안전처장이 인정하는 자료

② 법 제39조제1항에 따라 이 조 제1항 각 호의 자료에 관하여 사전 검토를 요청하려는 자는 별지 제43호서식의 디지털의료제품 사전 검토 요청서에 해당 자료를 첨부하여 식품의약품안전처장에게 제출해야 한다.

③ 식품의약품안전처장은 제2항에 따른 사전 검토 요청서와 해당 자료를 검토하고 별지 제44호서식의 디지털의료제품 사전 검토 결과 통지서를 발급해야 한다.

④ 제1항부터 제3항까지에서 규정한 사항 외에 사전 검토의 대상·범위, 절차 및 방법 등에 관한 세부 사항은 식품의약품안전처장이 정하여 고시한다.

임상시험계획서 "사전검토" 가능 ---> 임상시험계획서만 제출 ---> 심사자료 제출 불필요

무단 전재 및 배포 금지

02 디지털 의료제품 관련 규정

- **디지털법 민원인 안내서 임상 분야 Q&A**

Q 11
실사용평가와 시판 후 임상의 차이는 무엇인지?

- 시판 후 임상시험은 실사용평가의 일부에 해당함

시판 전 임상시험등	실사용 평가	
	시판 후 임상시험등	그 외
허가·인증을 받지 않거나 신고되지 않은 디지털의료기기의 안전성·유효성 또는 성능에 관한 사항을 증명	허가·인증·신고되거나 변경 관리 계획 승인된 범위에서 안전성·유효성 또는 성능에 관한 사항을 증명	· 디지털의료기기를 사용하여 수집된 보건의료데이터를 후향적으로 관찰 또는 분석 · 임상문헌, 부작용 사례를 종합적으로 분석

※ '후향적 연구'의 경우 식약처장 승인 면제 대상이며, 디지털의료기기 임상시험 관련 고시(안) 제9조(후향적 연구에 관한 특례)에 따라 임상시험등심사위원회(IRB)에서 정하는 바에 따라 실시

Q 12
실사용평가계획서 보고 시 내용을 검토하는지?

- 실사용평가계획서 보고 시 내용은 검토하지 않음
- 다만, 민원인이 요청하는 경우「디지털의료제품법 시행규칙」제45조에 따른 사전검토는 가능함

Q 13
허가 등 신청 시 실사용평가 자료를 '임상시험 등 평가에 관한 자료'로 제출할 수 있는지?

- 실사용평가 자료를 임상시험 등 평가에 관한 자료로 제출하려는 경우에는 시행규칙 제30조제1항에 따른 실사용평가 대상에 적합하여야 하며,

1. 법 제8조제3항 또는 법 제12조제2항에 따라 제조허가·수입허가, 제조인증·수입인증을 받거나 제조신고·수입신고한 디지털의료기기를 다음 각 목의 어느 하나에 따라 사용하는 경우
   가. 허가·인증 또는 신고된 범위에서 사용하는 경우
   나. 제7조제2항(제25조제4항제1호에 따라 준용되는 경우를 포함한다) 또는 제9조제2항(제25조제4항제3호에 따라 준용되는 경우를 포함한다)에 따라 변경관리 계획을 제출한 범위에서 사용하는 경우
   다. 다음의 어느 하나에 해당하는 경우로서 「의료법」 제5조에 따라 면허를 받은 의료인의 책임하에 허가·인증 또는 신고된 범위를 초과하여 사용하는 경우(질병의 진단, 치료 등에 관한 기능의 추가 또는 변경을 동반하지 않는 경우만 해당한다)
   1) 질병의 진단 또는 치료의 직접 목적으로 사용되며 대체 가능한 디지털의료기기가 없는 경우
   2) 말기암 등 중대한 질환 또는 희귀난치 질환을 진단하거나 치료하기 위한 목적으로 사용되는 경우
   3) 대체 가능한 디지털의료기기보다 비용 대비 효과적이거나 부작용이 적고 임상적으로 치료 효과가 높을 것으로 기대되는 경우
2. 제11조제6호에 해당하는 디지털의료기기를 제조업허가 등이 제외된 범위에서 사용하는 경우
3. 그 밖에 식품의약품안전처장이 실사용 평가의 대상으로 적합하다고 인정하는 경우

- 관련 규정에 따라 실시하여 결과가 도출된 자료만 인정
  - ▪ 디지털의료기기 허가·인증·신고·심사 및 평가 등에 관한 규정(식약처 고시 제2025-25호) 제27조 참고

03 디지털 의료제품 법적·제도적 변화의 핵심

구분	기존 의료기기법	디지털의료제품법
기반 철학	고정형 승인 중심	**변경관리(PCCP)** 기반의 순환형 승인
임상시험 유형	단회 허가용 임상	**실사용평가(RWE Study)** 병행 가능
갱신체계	변경 시마다 재심사	**사전 승인된 변경계획** 내 자율갱신 가능
증거 형태	RCT 중심	**Hybrid Evidence (RCT + RWE)**
감독 방식	사후보고·제재 중심	**모니터링·데이터 기반 실시간 관리**

무단 전재 및 재배포 금지

04 임상시험 전략의 변화



허가용 근거 확보 (Mini RCT / Pilot Trial)

- 소규모(30–80명) 전향시험: Minimal Viable Evidence (MVE)
- 핵심 알고리즘의 초기 유효성 입증
- Safety signal 확보 및 기초 PER 작성



실사용평가 (RWE Study → PER 갱신)

- 실제 사용환경(병원·가정)에서 데이터 수집
- EMR/앱로그/PRO 연계 → Hybrid 데이터 구축
- 성능검증보고서(PER) 업데이트 및 라벨 확장 (예: 단독요법, 청소년층)



변경관리(PCCP) 기반 지속 업데이트

- AI 모델 업데이트, 콘텐츠 교체, 알고리즘 조정 등
- 변경 범위(Scope)·검증프로세스·릴리즈관리 체계화
- 새로운 임상 없이 사전 정의된 검증계획으로 갱신 가능

Stage 1 → **Stage 2** → **Stage 3**

"임상은 이제 '한 번 하는 것'이 아니라,'데이터로 계속 증명해 나가는 과정'이 된다."

무단 전재 및 재배포 금지

T h a n k Y o u

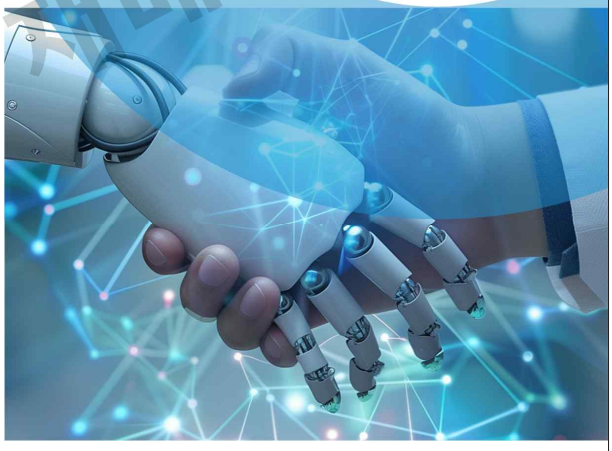
Confidential

무단 전재 및 재배포 금지

디지털의료제품법 시대, 임상시험은 어떻게 바뀌는가

- 디지털의료제품법에 따른 임상시험 사례 소개 -

Global Platform CRO with One Stop Full Service



㈜메디팁

전은정 Ph.D. / 프로메디스 임상본부장

010-4590-4147 / ejjeon9817@naver.com

무단 전재 및 재배포 금지

0 목차

- 디지털의료제품법에 따른 임상시험 사례 소개 -

1. 디지털의료제품법 시대, 임상시험의 재정의
2. 임상시험 설계의 패러다임 변화
3. RWE 기반 DTx 허가 및 라벨확장 예비사례
4. 임상시험 전략의 변화

무단 전재 및 재배포 금지

01 디지털의료제품법 시대, 임상시험의 재정의

의료기기법

- 고정된 시험 모델
- 임상시험
- 버전업 수용 어려움
- 허가 전(Pre-market) 근거

"허가 중심에서 지속적 검증 중심으로"



디지털의료제품법

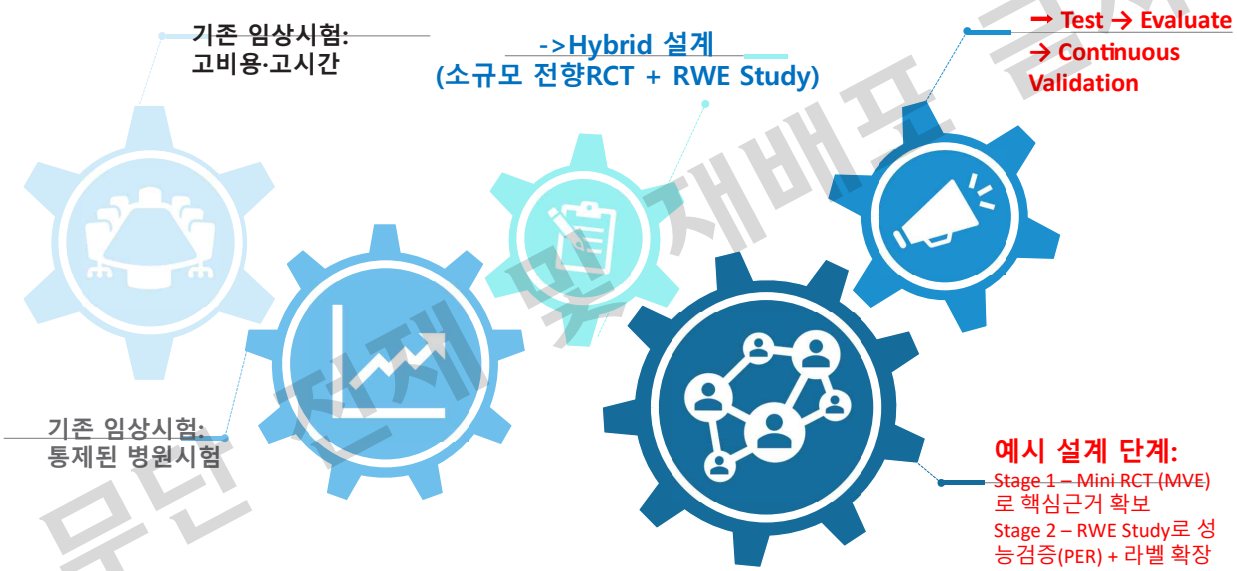
- 실사용평가
- 성능검증
- 변경관리(PCCP*)
- 허가 후(Post-market) 근거

*PCCP (Predetermined Change Control Plan)
디지털의료제품이 업데이트될 때마다 새 임상시험 없이, 사전에 승인된 변경계획에 따라 검증·보고하는 제도

-> 임상시험은 더 이상 '단발성 시험'이 아니라 '지속적 데이터 검증 프로세스'

무단 전재 및 재배포 금지

02 임상시험 설계의 패러다임 변화



무단 전재 및 재배포 금지

02 임상시험 설계의 패러다임 변화

- **Stage 1: Mini RCT (MVE: Minimal Viable Evidence)**

항목	설명
목적	제품의 초기 임상적 유효성·안전성 최소 근거 확보 (Full RCT 이전 단계)
규모	30–80명 수준의 전향 단일기관 또는 분산형 소규모 시험
설계특징	• Randomized/Controlled 가능 • App Log·PRO 등 디지털 데이터 병행 • 효능신호 및 사용성 중심
활용	허가 전 성능검증자료(PER)로 제출 또는 RWE Study 설계의 Seed Trial 역할
장점	• 비용·기간 단축 • 실제 사용환경 반영 • 이후 RWE Study와 연속적 연결 가능
핵심 메시지	'작지만 충분한 근거'로 실사용평가(RWE)와 이어지는 전략적 시험 단계

무단 전재 및 재배포 금지

02 임상시험 설계의 패러다임 변화

▪ Stage 2 – RWE Study로 성능검증(PER) + 라벨 확장 전략

항목	내용
목적	실사용환경에서 효과·안전성 검증 및 라벨 확장 근거 확보
설계 유형	전향적 Registry Study 또는 Pragmatic RCT (>1,000명)
데이터 소스	앱 로그 + EMR/청구데이터 + PRO (ISI, PHQ-9, GAD-7 등)
주요 변수	1차: 주요 임상지표(ISI/PHQ-9 변화량) 2차: 순응도·PRO·안전성
통계분석	ANCOVA, LMM, Subgroup / IPTW·PSM / E-value 감도분석
데이터 품질관리	결측률 <5%, QC지표 ≥3개(결측·정합성·이상치율)
결과보고	성능검증보고서(PER) + RWE Report + PCCP 변경계획 연계
핵심 메시지	Stage 1의 Mini RCT(MVE)는 신호를 제시 Stage 2의 RWE Study는 실사용근거로 허가·라벨 확장을 완성

무단 전재 및 재배포 금지

02 임상시험 설계의 패러다임 변화

▪ 성능검증보고서(Performance Evaluation Report, PER)란?

➢ **목적:**

- 제품이 의도된 용도(라벨) 에서 요구 성능을 실제로 달성하는지, 그리고 안전성·품질·신뢰성이 충분한지 증거기반으로 입증하는 규제 문서.

➢ **언제 제출?**

- 신규 허가/성능인증
- 적응증(라벨) 변경/확장
- 중대한 소프트웨어 업데이트(PCCP 범위 내) 시

➢ **데이터 출처:**

- 전향시험(RCT/소규모 전향)
- RWE(실사용 데이터: 앱 로그·EMR·청구·PRO)
- 사용성/사이버보안·품질 시스템 증적 등.

무단 전재 및 재배포 금지

02 임상시험 설계의 패러다임 변화

▪ PER 문서 구성

1. 행정정보: 제품명/버전, 제조사, 문서 버전·작성자, 관련 문서(프로토콜·SAP·DQP·PCCP).
2. 제품 개요·의도된 용도(Indications): 라벨 문구, 대상환자, 사용환경(병원/가정/원격), 치료기간.
3. 임상적 성능요구사항(CPR): 제품이 달성해야 할 성능 지표와 기준값(예: PHQ-9 Δ≥3점, ISI Δ≥4점, 순응도≥70% 등).
4. 임상 증거 전략(Evidence Strategy):
   - 전향 소규모 Mini RCT(MVE) 개요 + RWE Study 설계 요약(레지스트리/프라그마틱 RCT).
   - 증거 수준·한계·보완 계획(라벨 확장 로드맵).
5. 데이터 소스 & 품질관리(DQP): 데이터 모델(앱 로그/EMR/PRO/청구), 수집·정제·연계, 결측/정합성/시간동기화 지표와 허용한계.
6. 통계 분석 요약(SAP 핵심):1차/2차 변수, 분석집단(FAS/PPS), 보정(ANCOVA), 교란조정, 장기효과, 감도분석.
7. 주요 결과(효과성·안전성): 표·그림으로 사전 기준 대비 달성 여부 명확화(점추정 +95% CI, p값).
8. 하위군/일반화 가능성: 연령, 성별, 진료환경(병원/가정), 순응도≥80% 등 subgroup 분석.
9. 위험·안전성(임상): 이상사례(코딩: IMDRF), SAE/withdrawal, 위험완화(자살위험 에스컬레이션 등).
10. SaMD 고유 항목: -
    - SW 생명주기(검증·검증범위), 사이버보안, 사용성(HF)·휴먼팩터, 실배포 통제.
    - PCCP 연동: 변경 범위(Scope), 변경 전후 성능 재검증 프로토콜, 릴리즈 가드레일.
11. 논의와 결론: 임상적 유의성/실무적 의미, 한계, 사후 RWE 계획.
12. 부록: 프로토콜/IRB/e-ICF, SAP, DQP, 데이터사전, 균형표(PSM), 코드북, 원본 결과표, 라벨 문구 초안.

무단 전재 및 재배포 금지

02 임상시험 설계의 패러다임 변화

▪ PER 문서 -성능지표 설계(예시: 불면/우울 DTx)

구분	1차 변수(예)	성공 기준(사전)	근거/비고
불면 DTx	**ISI 변화량** (0→6주)	**Δ≤−4점**, 95% CI 하한 ≤−3	임상적으로 의미 있는 개선폭
우울 DTx	**PHQ-9 변화량** (0→6주)	**Δ≤−3점**, 반응률≥35%	최소임상유의차(MCID) 참조
공통	**순응도**(완료율)	**≥70%**	앱 로그 기반
안전성	**DTx 관련 ADR**	**<5%** (경미·중등)	IMDRF 코드

->포인트: “사전 기준값”을 PER 본문에 명시하고, 결과가 이 기준을 **충족/미달**했는지 명쾌히 표기.

무단 전재 및 재배포 금지

02 임상시험 설계의 패러다임 변화

▪ PER 문서 -자주 묻는 질문(FAQ)

Q1. Mini RCT 결과가 "경향"만 보이면 제출 가능?

→ 가능. 단, 사전 기준을 일부 충족하지 못한 항목은 RWE로 보완 계획(샘플 수·관찰기간·분석법)을 PER에 명시.

Q2. 앱 버전이 중간에 바뀌었는데?

→ 버전별 성능 분리 분석 + 변경 이력·검증 로그 제시.

-> PCCP 범위 이내면 새 임상 없이 재검증 결과로 커버.

Q3. 단독요법 라벨을 노리려면?

→ 초기 PER에서는 보조요법 중심으로 승인 받고, 단독 사용 하위군을 RWE에서 사전규정하여 분석

→ 라벨 변경 PER 업데이트.

무단 전재 및 재배포 금지

02 임상시험 설계의 패러다임 변화

▪ PER 문서 -최종 체크리스트(요약)

- **라벨 문구와 성능지표/분석집단 정의가 1:1 매칭되는가**
- **사전 기준값이 명시됐는가(표·박스로 강조)**
- **RWE의 적합성·신뢰성·편향보정 근거가 충분한가**
- **데이터 품질지표(결측/정합/이상치)가 수치로 제시됐는가**
- **버전/릴리즈 이력과 PCCP 재검증 결과가 연결됐는가 부록(SAP·DQP·IRB·데이터사전·코드북·균형표) 이 완비됐는가**

1차 결과 요약(예시):
"FAS(n=482)에서 PHQ-9 평균 변화는 −3.6(95% CI −4.1, −3.1)로 사전 기준(−3) 이상을 달성하였고, IPTW 적용 후에도 유사(−3.5, 95% CI −4.0, −3.0)하였다."

PCCP 연동(예시):
"알고리즘 경미 업데이트(Score v1.1)는 PCCP-A 범위로 분류되며, 부록 P-1의 재검증 스위트(accuracy, latency, stability)를 통과하였다."

무단 전재 및 재배포 금지

03 RWE 기반 DTx 허가 및 라벨확장 예비사례

No.	제품명 / 기업	적응증 / 허가 현황	RWE 활용 현황	라벨 확장 타깃
1	Rejoyn™ /(Otsuka × Click)	MDD 보조요법, FDA 510(k) Cleared (2024)	상용화 후 앱 로그·EMR 기반 RWE 설계 중 (단독요법/연령/기간 확장 가능성)	단독요법, 연령확대, 기간확대
2	Somryst™ /(Pear Therapeutics)	불면증, De Novo 승인 (2020)	DREAM RWE 연구 완료 (n≈350), 지속효과·수면제 감량 평가	경증 불면 단독사용, 8주 확대
3	reSET / reSET-O® /(Pear Therapeutics)	SUD / OUD 치료, FDA 승인	24주 RWE 분석에서 치료유지·병원이용감소 근거 확보	장기사용 허용, 재발예방 문구 추가
4	Sleepio® /(Big Health)	불면증 CBT-I, NICE MTG70 (2022)	NHS 실사용 12,000명 RWE, 수면제 사용량 50%↓	1차의료 단독사용, 약물감량 문구

무단 전재 및 재배포 금지

03 RWE 기반 DTx 허가 및 라벨확장 예비사례

No.	제품명 / 기업	적응증 / 허가 현황	RWE 활용 현황	라벨 확장 타깃
5	EndeavorRx® /(Akili Interactive)	ADHD (8–12세), FDA De Novo	상용 사용자군 RWE로 청소년·성인 주의력 개선 확인	연령확대(13–17, 성인), 단독요법
6	Kaia Health DTx	만성 요통, CE 인증·미국 상용화	실사용 코호트에서 통증·기능 향상 RWE 보고	급여확대, 재활/근골격 세분화
7	Regulora / Mahana IBS	과민성대장증후군 (IBS), FDA 승인	대규모 실사용 RWE 연구 진행 중 (앱 로그+EMR)	하위군 확장, 기간/재처방
8	NightWare®	PTSD 악몽 치료, FDA De Novo (2020)	군·재향군인 실사용 데이터 기반 장기추적 중	일반 악몽장애, 연령확대, 기간확대

무단 전재 및 재배포 금지

04 가상 임상시험 설계 전략

▪ 브랜드 스토리라인

➢ **"Re:Mind DTx Series는 단순한 치료가 아니라,마음의 회복 루틴을 설계하는 플랫폼입니다."**

① DREAMER™ — 불면증 환자에게 불면의 밤에서 다시 '꿈꾸는 밤'으로

② MOODUP™ — 우울증 환자에게 무너진 감정선을 '올려주는 힘'으로

-> 이 둘은 함께 "Sleep & Mood Recovery Loop"를 구성하며,Re:Mind의 핵심 철학인 "Reset → Reflect → Recover" 를 그대로 반영합니다.

구분	이름	설명	톤앤매너
시리즈명	**Re:Mind DTx Series**	마음의 리셋을 통한 디지털 치료 생태계	브랜드 일관성 유지
불면 DTx	**DREAMER™**	"다시 꿈꾸는 사람" — 수면 회복, 안정, 휴식	감성적·회복 중심 🌙
우울 DTx	**MOODUP™**	"기분을 올리다" — 정서 안정, 활력 회복	직관적·긍정적 🔷

무단 전재 및 재배포 금지

04 가상 임상시험 설계 전략

▪ 라벨 전략 개요

구분	DREAMER™ (불면 DTx)	MOODUP™ (우울 DTx)
적응증 (Stage 1)	만성 불면 성인 대상, 의사 처방 하 외래 보조요법	항우울제 복용 중인 MDD 환자 대상 외래 보조요법
핵심 치료 모듈	CBT-I 기반 6주 수면개선 프로그램	EFMT + CBT 기반 6주 감정조절 프로그램
치료환경	병원 또는 가정(의료진 모니터링 하)	병원 또는 가정(의료진 모니터링 하)
주의사항	단독 치료 불가 / 자살위험군 제외	단독 치료 불가 / 자살위험 시 즉시 내원 권고
확장 전략 (Stage 2 – RWE)	경증 불면 단독 사용 + 8주 프로그램 확장	경증~중등도 단독 사용 + 청년층(18–21세) 확장

무단 전재 및 재배포 금지


T h a n k Y o u
Tigermed
dreamcis
A TIGERMED COMPANY
MediTip
LCS
Leader of CRO Service
Confidential

무단 전재 및 재배포 금지

의료기기산업특성화 대학원 스페셜 세션

좌장: 권지연(동국대학교)

11월 7일 (금) **일강원 103 (13:30–15:00)**

유승원(동국대학교)
Diagnostic Accuracy of qPCR, ddPCR, and NGS Based on Liquid Biopsy in Colorectal Cancer Patients: A systematic Review

이성훈(동국대학교)
Exploring Predictive Models and Metrics for Maximum Current Density Estimation of TENS Pulse Trains Using Measured Surface EMG

김한별(성균관대학교)
Creepage and Clearance Design Strategies for Wearable and Portable Medical Devices

고보명(성균관대학교)
Proving the Value of Digital Pathology and Proposing a Reimbursement Strategy

한혜리(연세대학교)
A Cybersecurity Framework for Software as a Medical Device: Integrating Alternative CIA Triad Models and Threat Modeling Methodologies

오지윤(연세대학교)
Enhancing Clinical Effectiveness and Usability of Patient Monitoring Systems in ICU through Evaluation of Arrhythmia Alarms

대장암 환자의 액체생검 기반 qPCR, ddPCR, NGS의 진단 정확도: 체계적 문헌고찰

유승원[1], 강수림[1], 김성민[1*]

동국대학교 의료기기산업학과[1]

Diagnostic Accuracy of qPCR, ddPCR, and NGS Based on Liquid Biopsy in Colorectal Cancer Patients:A systematic review

Seungwon You[1], Sulim Kang[1], Sungmin Kim[1*]

[1]Department of Medical Device and Healthcare, Dongguk University, Korea

sungmin2009@gmail.com[*]

Abstract

Colorectal cancer (CRC) remains a leading cause of cancer-related deaths, underscoring the need for accurate and non-invasive diagnostic methods. This study systematically reviewed clinical research comparing three major technologies used for CRC detection: quantitative PCR (qPCR), droplet digital PCR (ddPCR), and next-generation sequencing (NGS). The quality and eligibility of included studies were independently assessed by two reviewers, with disagreements resolved through discussion and consensus. Among the diagnostic technologies, NGS demonstrated relatively high diagnostic accuracy, followed by qPCR. Conversely, ddPCR maintained high specificity but showed low sensitivity in some studies. These results are interpreted as being influenced by study designs that included a high proportion of early-stage patients or were limited to a single target. This study may introduce bias in the pooled comparisons due to heterogeneity among the included studies and the imbalance in the number of studies per technique. Therefore, a meta-analysis is needed to quantitatively compare the pooled diagnostic accuracy of each technique and to perform subgroup analyses based on biomarkers and sample types.

1. 연구 배경

대장암은 결장과 직장에서 발생하는 악성 종양으로, 주로 결장 상피세포의 비정상적인 증식에 의해 발생한다. 전 세계적으로 세 번째로 흔한 암으로 보고되며, 2022년 기준 약 192만 건의 신규 환자와 약 90만 명의 사망자가 발생하였다[1].

기존의 대장암 진단법으로는 대장내시경, CT 대장조영술(Computed Tomography Colonography), 분변잠혈검사(Fecal Occult Blood Test, FOBT) 및 분변면역화학검사(Fecal Immunochemical Test, FIT) 등이 있고, 차세대 핵심으로 부상하고 있는 진단법으로는 액체생검 기반 분자진단법이 있다. 대장내시경은 정확도가 높지만 침습적이고 환자 순응도가 낮으며[2], CT 대장조영술은 방사선 노출과 장 정결의 불편함이 존재한다. 한편, FOBT와 FIT는 저비용·비침습적 선별검사로 널리 활용되고 있으나, 위양성·위음성 가능성과 암의 위치에 따른 검출률 차이로 인해 조기 병변 진단에는 한계가 있다[3].

이러한 기존 검사법들의 한계를 극복하기 위한 방법인 액체생검을 이용한 분자진단 기술이 대안적·보완적 검사 방법으로 주목받고 있다[4]. 액체생검은 혈액 등 체액에서 순환 종양 DNA(ctDNA), 세포유리 DNA(cfDNA), 비암호화 RNA, 엑소좀 등 종양 유래 성분을 분석하는 비침습적 체외진단법으로, 반복 측정이 가능하고 종양의 분자적 변화를 실시간으로 추적할 수 있다[5].

액체생검 기반 분자진단에는 다양한 기술이 적용되며, 그중 대표적인 방법으로 정량적 중합효소연쇄반응(Quantitative polymerase chain reaction, qPCR), 드롭렛 디지털 중합효소연쇄반응(Droplet digital polymerase chain reaction, ddPCR), 차세대 염기서열분석(Next-Generation Sequencing, NGS)이 있다[6]. qPCR은 DNA 내 특정 유전자의 변이를 증폭하며 동시에 정량적으로 측정하는 기술이고[7], ddPCR은 DNA를 수십만 개의 액적으로 분할하여 PCR을 개별적으로 수행함으로써 극미량의 돌연변이를 정량적으로 검출하는 기술이며[8], NGS는 광범위한 유전자 영역을 동시에 분석하여, 유전체 정보를 탐지할 수 있는 기술이다[9]. 그러나 대부분의 연구는 특정 바이오마커에 국한되어 있어, 대장암 액체생검의 진단적 가치를 종합적으로 평가하기 어렵다.

따라서 본 연구는 다양한 바이오마커를 포함한 qPCR, ddPCR, NGS 기반 진단법의 정확도를 비교·분석하여, 대장암 액체생검의 임상적 활용 가능성에 대한 근거를 마련하고자 한다.

2.연구 방법

본 연구는 PRISMA(Preferred Reporting Items for Systemic Reviews and Meta-Analysis) 가이드라인에 따라 수행되었다. 문헌 검색은 PubMed, Embase, Cochrane Library를 통해 실시했으며, 총 4,573개의 문헌이 검색되었다. 검색 전략은 표 1과 같다.

검색된 문헌은 PICO (Population, Index test, Comparison, Outcome) 프레임워크에 따라 선정되었다. 여기서 Population은 대장암이 진단되었거나 의심되는 환자군이며, Index test는 액체생검 기반 분자진단기술(qPCR, ddPCR, NGS), Comparison은 병리조직검사 및 대장내시경, Outcome은 진단정확도 지표(TP, FP, FN, TN)로 설정하였다. 제외 기준으로는 연구대상이 다른 논문, case report, 검사법이 맞지 않는 연구논문이 선정되었다. 포함된 문헌으로부터 저자, 연도, 국가, 샘플 크기, 샘플유형, 병기, 검출 유형, 바이오마커, 진단기술, 기준검사, 진양성/위양성/위음성/진음성, 민감도, 특이도와 같은 주요 정보를 추출하여 연구특성표로 정리하였다. 포함된 문헌의 적합성과 질 평가는 두 명의 독립적인 검토자에 의해 수행되었으며, 의견 불일치 시 협의를 통해 합의하였다.

표 1. 검색 전략

질환	"Colorectal Neoplasms"[MeSH] OR colorectal cancer OR colon cancer OR rectal cancer
액체생검	"Liquid Biopsy"[MeSH] OR liquid biopsy OR "circulating tumor DNA" OR ctDNA OR "cell-free DNA" OR cfDNA
기술	(("Polymerase Chain Reaction"[MeSH] OR PCR OR qPCR) AND ("droplet digital PCR" OR ddPCR)) OR (("Polymerase Chain Reaction"[MeSH] OR PCR OR qPCR) AND ("Next-Generation Sequencing"[MeSH] OR NGS OR "massively parallel sequencing")) OR (("droplet digital PCR" OR ddPCR) AND ("Next-Generation Sequencing"[MeSH] OR NGS OR "massively parallel sequencing")))
성능	sensitivity OR specificity OR diagnostic OR accuracy OR detection OR "diagnostic accuracy" OR "diagnostic performance"

3. 연구 결과

문헌 선정 흐름도는 그림 1과 같으며, 총 41편의 문헌을 선정하였고. 최종적으로 43개의 연구가 분석에 포함되었다. 선정된 41편의 연구들은 주로 아시아 및 유럽 지역에서 수행되었다. 포함된 연구의 대상은 대장암 0–IV기 환자였으며, 대부분은 진행성 단계(III–IV기)에 해당하였다. 검체유형은 주로 혈장과 혈청이 사용되었고, 일부 연구에서는 타액 기반 분석이 수행되었다.

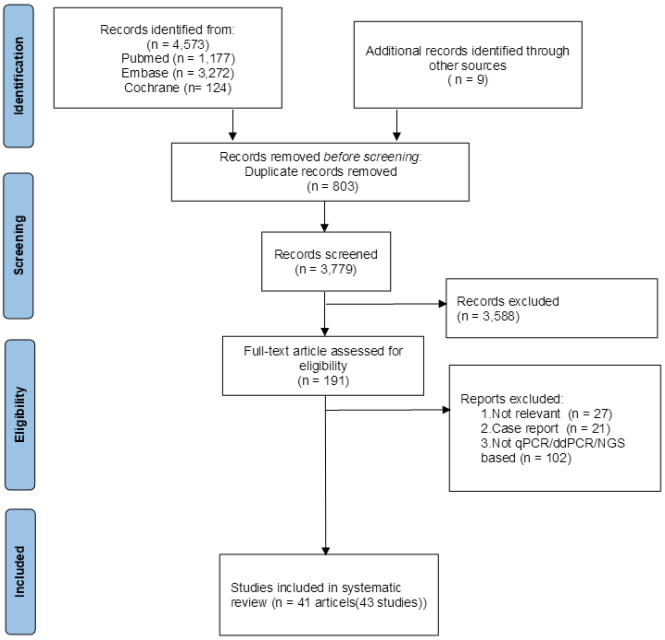


그림 1. Flow chart

아래 표 2는 연구특성표를 나타낸 것이다. 진단기술별로는 qPCR 27개, ddPCR 8개, NGS 8개로 qPCR 기반 연구가 가장 많았다. 검출유형은 cfDNA가 32개로 대부분을 차지했으며, ctDNA 5개, exosome 3개, miRNA 1개, cfRNA 1개, evDNA 1개였다. 주요 바이오마커는 mSEPT9(14개), KRAS(10개), mSDC2(4개)이었으며, 일부 연구에서는 BCAT1, BRAF 등의 다른 표적을 분석하였다.

표 2. 연구특성표(일부분)

Study	Population (n)	Sample type	Stage
[1]	125	Plasma	IV
[2]	351	Plasma	0–IV

Study	Detection type	Biomarker	Index test
[1]	cfDNA	KRAS	ddPCR
[2]	cfDNA	mSEPT9	qPCR

전체 연구의 평균 민감도는 73.7%, 특이도는 89.9%로 나타났다. NGS의 평균 민감도는 77.7%, 특이도는 95.4%로 가장 높게 나타났다. qPCR의 평균 민감도는 75.1%, 특이도는 87.5%이고, ddPCR의 평균 민감도는 65.4%, 특이도는 91.4%이다. NGS의 정확도가 상대적으로 높은 이유는 cfDNA를 대상으로 넓은 유전자 커버리지, 고감도 시퀀싱으로 극미량 변이도 안정적으로 검출한 것으로 판단된다[11]. ddPCR의 경우 조기 병기(I, II) 환자의 비율이 높고 제한 타깃 분석을 수행한 연구가 많아 상대적으로 낮은 민감도를 보이는 것으로 판단된다[10]. 본 연구는 포함된 연구 간의 이질성과 기술별 연구 수의 불균형으로 인해 질적 비교에 편향이 발생할 가능성이 있다. 따라서 향후 메타분석을 통해 기술별 통합 정확도를 정량적으로 비교하고, 바이오마커 및 검체유형에 따른 하위 분석이 수행될 필요가 있다.

4. Acknowledgements

본 연구는 보건복지부의 재원으로 한국보건산업진흥원의 2025년 의료기기산업 특성화대학원 지원사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

5.참고 문헌

[1] Hossain MS et al. Colorectal cancer: a review of carcinogenesis, epidemiology, risk factors and treatment strategies. Cancers (Basel). 2022;14:1732.

[2] Gimeno-García, A. Z., et al. “Role of colonoscopy in colorectal cancer screening: Available evidence.” *Best Pract Res Clin Gastroenterol* 66 (2023): 101838.

[3] Niedereiter, M., et al. “Colorectal cancer screening and prevention — pros and cons.” *Memo – Magazine of European Medical Oncology* 12 (2019): 239–243.

[4] Ziranu, P., et al. “Navigating the Landscape of Liquid Biopsy in Colorectal Cancer: Current Insights and Future Directions.” *Int J Mol Sci* 26.15 (2025): 7619.

[5] Zhou, H., et al. “Liquid biopsy at the frontier of detection, prognosis and progression monitoring in colorectal cancer.” *Mol Cancer* 21.1 (2022): 86.

[6] Deng, Z., et al. “Innovative technologies and their clinical prospects for early lung cancer screening.” *Clin Exp Med* 25.1 (2025): 212.

[7] Alexandrou G et al. Evolution of affordable technologies in liquid biopsy diagnostics: key to clinical implementation. Cancers (Basel). 2023;15:5434.

[8] Nikanjam, M., et al. “Liquid biopsy: current technology and clinical applications.” *J Hematol Oncol* 15.1 (2022): 131.

[9] National Cancer Institute. NCI Dictionary of Cancer Terms. “Next-generation sequencing.”

[10] Petit J et al. Evaluation of a multi-gene methylation blood test for colorectal cancer detection. Med Sci (Basel). 2023;11:60.

[11] Chen M, Zhao H. Next-generation sequencing in liquid biopsy: cancer screening and early detection. Hum Genomics. 2019;13:34.

실측 표면 EMG 기반 TENS 펄스열 전류밀도 예측 모델 비교 및 지표 탐색

이성훈[1], 김승희[2], 김성민[1,2*]

동국대학교 의료기기산업학과[1], 동국대학교 바이오헬스의료기기규제과학과[2]

Exploring Predictive Models and Metrics for Current Density Estimation of TENS Pulse Trains Using Measured Surface EMG

SungHun Lee [1], SeungHui Kim[2], Sungmin Kim[1,2*]

1. Department of Medical Device and Healthcare, Dongguk University, Korea

2. Department of Regulatory Science for Bio-Health Medical Device, Dongguk University, Korea

sungmin2009@gmail.com*

Abstract

TENS is a device that can alleviate pain and treat various disorders without medication, and its use is expected to expand with the increasing prevalence of musculoskeletal diseases due to aging. The electrical safety of TENS must be verified through thermal safety tests during performance evaluations, while its efficacy is generally assessed through clinical trials. However, clinical trials are costly and face issues of data variability and insufficiency. To address these limitations, previous studies generated virtual EMG signals based on actual EMG obtained after TENS stimulation, suggesting that simulation-based evaluations could serve as an alternative. Building on this, the present study developed a model to predict the current density of TENS using measured surface EMG and explored input features with high information gain. Experimental results showed that among the tested models, the Extra Trees model achieved the highest performance, and core features accounting for 80% of the total importance were identified.

1. 연구 배경

TENS(Transcutaneous Electrical Nerve Stimulation, 경피적 전기 신경 자극기)는 골관절염, 섬유근육통, 인대염증, 허리통증, 당뇨병 등에 의한 질환과 통증을 약물 없이 효과적으로 치료 및 완화할 수 있는 핵심 기술로 주목받고 있다. 또한, 고령화 사회가 진행됨에 따라 만성 통증, 근골격계 질환 유병률이 증가하여 TENS 기기의 활용이 확대될 것으로 기대되고 있으며, 병원용부터 가정용까지 다방면으로 연구 개발되고 있다 [1,2].

TENS는 전기적 요소(파형, 진폭, 주파수, 펄스 지속시간)를 조절하여 다양한 치료 목적에 맞는 전기자극을 발생시킨다 [3]. 이러한 전기적 요소가 인체에 안전한지 평가하기 위해 식품의약품안전평가원은 10[mA] 또는 10[V] 이상 출력 전달이 가능한 TENS는 성능평가 중 "열화상 안전성"을 시행하도록 권고하며, 최대 강도에서 출력되는 전기자극이 최대전류밀도가 2[mA/cm^2]을 초과하지 않도록 본 평가의 기준을 정하였다 [4,5].

TENS의 통증 완화 및 근육 기능 회복을 나타내는 효능 평가는 임상 시험을 통해 평가된다. 임상시험은 시간과 비용이 많이 소요되고 개인 특성에 따른 데이터 변동성과 부족 문제가 존재한다. 이를 해결하기 위해, TENS 자극 후 계측된 표면 EMG(ElectroMyoGraphy) 신호 기반으로 가상의 표면 EMG를 생성하는 연구가 진행되었으며, 생성된 신호가 실제 신호와 유사하게 평가되었다. 선행연구는 실제 데이터 확보와 부족 문제를 극복하기 위해 가상의 EMG 데이터를 대체 활용할 수 있는 가능성을 제시하였고, 생성한 표면 EMG 신호를 통해 효능 평가에 대한 임상 시험을 시뮬레이션으로 대체할 수 있음을 시사하였다 [6].

효능 효과에 대한 임상 시험을 시뮬레이션으로 대체함과 동시에 TENS의 열화상 안전성 시험을 동시에 수행할 수 있다면 연구 개발에 소요되는 비용 및 자원을 절감할 수 있을 것으로 기대한다. 따라서 본 연구는 실제 EMG를 활용하여 TENS의 전류밀도 값을 예측하는 모델을 개발하고, 이에 적합한 모델과 EMG 관련 지표를 탐색하고자 한다. 추후, 전류밀도 예측 모델을 실제 신호와 유사한 가상의 EMG 신호에 적용하여 열화상 안전성 평가를 시뮬레이션 기반 모델로 대체함으로써, 연구개발 과정의 경제적 부담과 인프라 소모 단축에 도움이 되고자 한다.

2. 연구 방법

본 연구는 동국대학교 생명윤리심의위원회(DUIRB-2024-10-02) 승인을 받아 수행하였다. 모집된 참여자는 총 32명(남성 17명, 여성 15)으로 모두 사전 동의를 한 후 연구에 참여하였다. 표면 EMG 데이터 수집에 사용된 장비는 BIOPAC MP36 시스템과 SS2LB Lead센서, Kendall 100 foam 전극을 사용하였고 샘플링 주파수는 1000Hz로 수행하였다.

본 연구에서 사용한 TENS 기기는 드웰사의 LT-1803이며, 4가지 펄스 자극과 각 자극별 3가지 강도를 [Figure 1]과 같이 왼쪽 요측수근굴근과 완요골근에 15분간 인가하면서 표면 EMG를 측정하였다. 이에 따라, 모든 참여자는 1인당 총 12회 실험을 수행하였다.

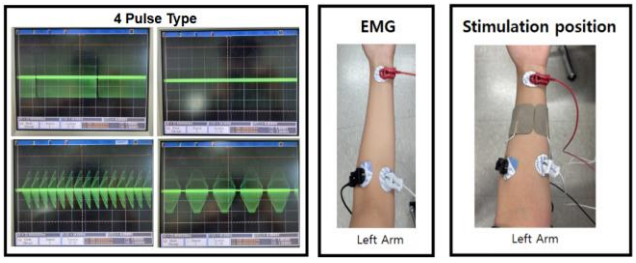


Figure 1. 4가지 펄스타입 및 측정, 자극 위치

TENS 자극 타입과 강도에 따른 펄스열의 전류밀도을 산출하기 위해, [Figure 2]처럼 실제 성능평가 시험을 재현하였다. 전류밀도는 전기 자극이 무유도 저항 500ohm에 적용될 때의 전류 값을 전극 단면적으로 나눈 값으로 계산된다.

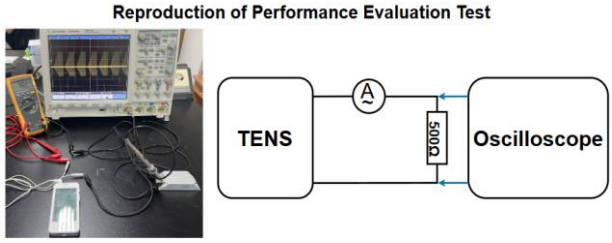


Figure 2. TENS 성능평가 중 열화상 안정성 시험 재현

전류밀도를 산출한 후 이를 Target 값으로 설정하였으며, 이에 따른 표면 EMG 지표와 인체특성을 입력 특성으로 선정하여 다양한 회귀 모델에 학습하였다. EMG 지표는 시간영역에서 RMS(근 수축 평균 에너지), MAV(근 활성 정도), ZC(근 수축 빈도), WAMP(근 활성 변동 정도), VAR(근 활성 불규칙성), IEMG(근 활성 총량), DutyCycle(근 활성 비율), RT(근 수축 속도), FT(근 이완 속도), Max Amp(EMG 최대 진폭), Min Amp(EMG 최소 진폭)를, 주파수 영역에서 Mean Frequency(평균 주파수), Median Frequency(중앙 주파수), Peak Frequency(최대 주파수), Spectral Entropy(주파수 복잡성)를 사용하였다. 인체특성은 나이, 성별, BMI, 몸무게, 신장으로 선정하여 총 20개의 입력 특성을 사용하였다.

설정한 입력 특성들은 정형적인 데이터이므로, 이에 적합한 머신러닝 회귀 모델을 탐색하기 위해 Multiple Linear, Random Forest, Extra Trees, Gradient Boosting, XGBoosting을 [Figure 3]과 같이 활용하였고, 각 모델마다의 성능을 평가하였다.

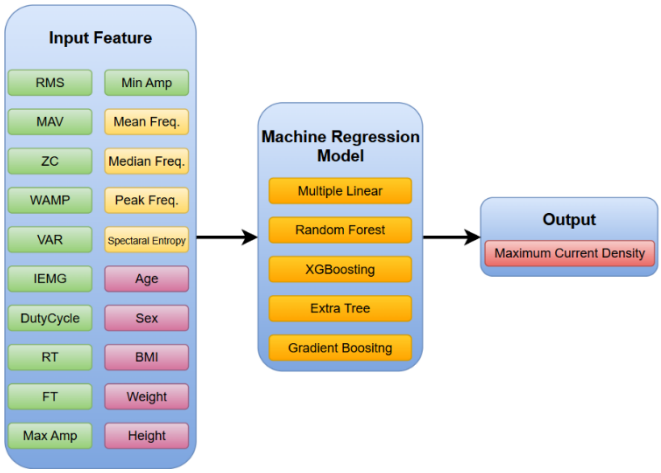


Figure 3. 입력 특성과 회귀 모델 개요

3. 연구 결과

각 모델의 성능은 R^2와 RMSE를 통해 평가하였다. R^2는 예측 데이터가 실제 데이터를 얼마나 잘 설명하는지를 나타내는 결정계수로, 1에 가까울수록 오차가 적다는 것을 의미한다. RMSE는 모델이 실제 회귀 분석 검증에 자주 사용되는 지표이며, 0에 수렴할수록 예측 정확도가 높다는 것을 나타낸다.

모든 모델의 R^2점수를 비교한 결과, Extra Trees 모델이 가장 높은 성능을 보였다. 그 다음으로는 XGBoosting, Gradient Boosting, Random Forest, Multiple Linear 모델 순으로 나타났다. RMSE 점수 기준으로 정확도가 가장 높은 모델 또한 Extra trees였으며, 그 뒤를 이어 XGBoosting, Random Forest, Gradient Boosting, Multiple Linear 순으로 [Tab 1]과 같이 평가되었다.

Tab 1. R^2 점수와 RMSE 결과

	Multiple Linear	RandomForest	XGBoosting
R2	0.895	0.975	0.981
RMSE(10^{-4})	2.76	1.33	1.18
	ExtraTrees	**GradientBoosting**	
R2	0.987	0.980	
RMSE(10^{-4})	0.97	1.46	

모든 점수를 종합적으로 평가하였을 때, 가장 우수한 성능을 보인 모델은 Extra trees 모델이다. Extra trees 모델은 학습 시 전체 데이터를 사용하며, 노드 분할 시 특성 분할 값을 무작위로 선택하여 다른 모델 보다 더 다양한 특성을 활용한다 [7]. 이러한 해당 모델의 특성은 비선형적이고 고차원적인 EMG 및 인체 특성의 간에 상호작용을 효과적으로 식별할 수 있어 가장 우수한 성능을 보인 것으로 판단된다.

결정트리 모델 기반인 Extra trees 모델은 학습 시 어떤 특성이 가장 유용한지를 나타내는 특성 중요도를 계산한다. 이를 통해, 전체 20개 특성 중 중요도 80% 이상를 차지하는 핵심 특성 순위별로 [Tab 2]과 같이 도출한다면 추후 시뮬레이션 과정에서 계산 자원을 절감할 수 있으므로 이를 고도화 연구에서 참고하고자 한다.

Tab 2. Extra trees의 특성 중요도 80%

Rate	Feature Name	Importance	Cumulative Importance
1	DutyCycle (%)	0.212	0.212
2	Mean Frequency (Hz)	0.169	0.381
3	Median Frequency (Hz)	0.155	0.536
4	Peak Frequency (Hz)	0.104	0.64
5	MAV (mV)	0.08	0.72
6	IEMG (mV)	0.075	0.795
7	MinAmp (mV)	0.058	0.853

4. Acknowledgements

본 연구는 보건복지부의 재원으로 한국보건산업진흥원의 2025년 의료기기산업 특성화대학원 지원사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

5. 참고 문헌

[1] Grand View Research, Transcutaneous Electrical Nerve Stimulation Market Size, Share &Trends Analysis By Product Type (Portable, Table Top), By Application (Chronic Pain, Acute Pain), By End-use (Hospitals, Physiotherapy Clinics), By Region, And Segment Forecasts, 2022 2030, 2023

[2] Journalist's Resource. Home health care: Availability, turnover, and consequences for patients. Journalist's Resource; 2022.

[3] 박래준 외 공역, 전기치료학 -근거중심 실무 - 정담미디어, 2008

[4] KS C IEC 60601-2-10 IEC 60601-2-10 510(k) FDA 가이던스 AAMI 규격

[5] 식품의약품안전처. 개인용전기자극기의 안전성 및 성능 평가 가이드라인 (민원인 안내서); 2014. 03

[6] 설재호. TENS 효능 평가를 위한 cVAE 기반 표면근전도(sEMG) 신호 특징 생성. 제65회 대한의용생체공학회 춘계학술대회 포스터 발표집. 2025년 5월; 한국.

[7] Geurts (2006). "Extremely randomized trees." Machine Learning, 63(1), 3–42.

웨어러블 및 휴대용 의료기기의 연면거리 및 공간거리 설계 전략

김한별[1*] ,백준호[2] , 류규하[1]

성균관대학교 의료기기산업학과[1]

유스테이션 주식회사[2]

Creepage and Clearance Design Strategies for Wearable and Portable Medical Devices

Hanbyeol Kim[1*] , Junho Baek.[2], Gyu Ha Ryu[1]

Department of Medical Device Management and Research, Sungkyunkwan University, Korea[1]

Ustation Inc., Korea[2]

[*]micael337@skku.edu

Abstract

Miniaturized wearable and portable medical devices require enhanced electrical safety despite limited internal spacing. However, satisfying the insulation requirements of IEC 60601-1 (3.2 edition, Clause 8.9) is challenging in small and battery-operated designs. In this study, five commercial Holter ECG devices were analyzed to evaluate creepage (≥ 3.4 mm) and clearance (≥ 1.6 mm) distances under 2×MOPP conditions. Only the ChoiceMMed MD100B partially met the requirements through PCB holes and isolated USB circuitry. Based on these findings, conservative design approaches were proposed, including structural reinforcement with slots and ribs, port insulation, and the use of high-efficiency isolated DC-DC converters with thermal-management considerations. The proposed methods provide a practical guideline for achieving IEC 60601-1 Clause 8.9 compliance and ensuring electrical safety in compact medical devices.

1. 연구 배경

웨어러블 및 휴대용 의료기기는 최근 몇 년간 급격히 성장하며 개인 맞춤형 헬스케어의 핵심 분야로 자리 잡고 있으며 심전도, 혈압, 체온 등 생체신호를 장시간 연속적으로 측정할 수 있는 소형 장비의 수요가 증가하고 있다[1].

이러한 수요를 만족시키기 위해 개인용 의료기기의 경량화와 배터리 구동 설계가 필수 요소가 되었다[2]. 그러나 이러한 소형화된 의료기기들은 내부 공간의 제약으로 인해 IEC 60601-1(3.2판)이 규정하는 전기적 안전성 요건을 설계단계에서 충족하기 어렵다.

IEC 60601-1은 의료기기의 안전성 확보를 위해 제정된 국제 표준으로, 전기적, 기계적, 열적, 방사선적 위험으로부터 환자와 사용자를 보호하는 것을 목적으로 한다. 본 표준은 보호수단(MOP, Means of Protection)의 개념을 기반으로 조작자 보호(MOOP)와 환자 보호(MOPP)를 구분하여, 절연의 수준과 방식에 따라 최소 요구거리를 정의한다. 이 중 제8장 '전기적 요구사항(Protection Against Electrical Hazards)'은 의료기기 설계에서 가장 중요한 절연 관련 규정을 포함하며, 특히 제8.9절(Creepage and Clearance Distances)에서는 전압, 오염등급, 고도, 재질 특성(CTI)에 따른 최소 절연거리 확보 기준을 수치로 명시하고 있다[3].

이 절연거리 규정은 절연 파괴, 전압 피크, 누설전류로 인한 감전 위험을 예방하기 위한 핵심 안전요소이다. 그러나 웨어러블 및 휴대용 의료기기의 경우, 고전압 전원 대신 배터리를 사용함으로써 전기적 위험이 상대적으로 낮다고 인식되어, 실제 설계에서는 이 조항의 적용이 생략되거나 축소되는 사례가 많다. 특히 배터리 일체형 구조에서는 부품 간 간격이 수 밀리미터 이하로 제한되어, 규격에서 요구하는 동작전압 17V d.c 이하일때 연면거리(예: 3.4 mm)나 공간거리(1.6 mm)를 확보하기 어려운 구조적 한계가 존재한다.

기존 연구는 대부분 단일 제품의 시험 절차나 이론적 규격 검토에 그쳤으며, 실제 상용 의료기기를 대상으로 IEC 60601-1 8.9절의 적용 실태를 실증적으로 분석한 사례는 거의 없다. 이에 본 연구는 이러한 공백을 해소하기 위해, 웨어러블 및 휴대용 의료기기 중에서도 대표적인 착용형 심전계인 홀터심전계(Holter Monitor)를 대상으로 IEC 60601-1 8.9절의 절연거리 기준 충족 여부를 분석하였다.

홀터심전계는 장시간 환자에게 부착되어 연속적으로 심전도를 측정하는 장치로, 사용자가 곧 환자인 구조이기 때문에 조작자 보호수단(MOOP)보다 더 엄격한 환자 보호수단(MOPP) 기준이 직접 적용되어야 한다. 또한 이 기기는 대부분 3.7–5 V 수준의 내부전원형 저전압으로 동작하지만, 측정 회로의 미세 신호를 안정적으로 유지하기 위해 절연 성능 확보가 필수적이다. 따라서 본 연구의 목적은 다양한 상용 홀터심전계의 설계 실태를 IEC 60601-1의 규격 관점에서 평가하고, 소형 의료기기의 설계 초기단계에서 제8.9절의 요구사항을 효과적으로 반영할 수 있는 현실적 절연 설계 가이드라인을 제시하는 데 있다.

2.연구 방법

연구는 IEC 60601-1 8.9절을 중심으로 절연거리의 정의와 측정방법을 분석하였다. 본 표들은 보호수단(MOP)의 수준(MOOP/MOPP), 오염등급, 전압구간, 재료군(CTI) 등에 따라 최소 요구치를 제시한다. 본 연구에서는 내부전원형(3.7–5 V), 오염등급 2, 해발 2 000 m 이하의 일반 사용환경을 가정하고, 2×MOPP 기준(연면거리 ≥ 3.4 mm, 공간거리 ≥ 1.6 mm)을 적용하였다. 또한 환자와 조작자가 동일한 기기의 특성을 고려하여 MOOP 기준은 별도로 적용하지 않았다.

IEC 60601-1 8.9절의 해석 절차에 따라, (1) 보호수단 경로(MOP path) 식별, (2) 동작전압·오염도·고도 조건 확정, (3) 표 선택 및 보간 계산, (4) 의도된 절연구조 인정, (5) 최종 요구치 산정의 단계를 거쳐 각 제품의 요구 절연거리를

계산하였다. 이후 국내외에서 시판 중인 5종의 상용 홀터심전계(VUNO HeartiV P30, UStation ER-2000 SMART, AliveCor KardiaMobile, EMAY EMG-20, ChoiceMMed MD100B)를 선정하였다. 각 제품은 제조국, 전원공급 방식, 충전 방식, 환자접속부 형태 등을 정리하였고, 기기를 분해하여 PCB 상의 절연 경로를 식별하였다.

측정은 그림1. 와 같이 IEC 60601-1에서 제시한 원칙에 따라 수행되었다. 공간거리는 두 도전부 사이의 공기 중 최단 직선거리로, 연면거리는 절연체 표면을 따라 측정한 최단 경로로 정의하였다. PCB 내의 홈(slot)이나 리브(rib) 같은 의도된 절연 구조는 연면거리 연장 요소로 인정하였으며, 바니시·도료 등 비의도성 피막은 산정에서 제외하였다. 모든 제품의 측정값은 IEC 60601-1 표 12~16의 최소 요구치와 비교하여 규격 충족 여부를 판정하였다.

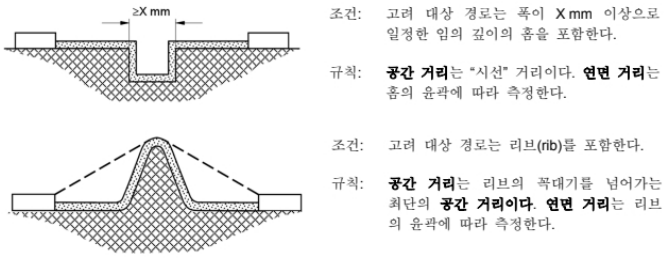


그림 1. 홈이 있을 시 IEC60601-1 연면거리 및 공간거리 측정 방식

3. 연구 결과

분석 결과, 다섯 제품 중 ChoiceMMed MD100B만이 IEC 60601-1 8.9절에서 요구하는 절연거리 요건을 일부 충족하였다. 나머지 제품에서는 전원부와 측정부 간의 연면거리 및 공간거리가 모두 불충분하였으며, 명확한 절연 경계 구조가 확인되지 않았다.

ChoiceMMed 제품 역시 전원부와 측정부가 완전히 분리된 형태는 아니었으나, PC와 연결되어 데이터 통신을 수행하는 USB 포트 주변 회로를 별도의 절연 영역으로 설계하여 일정한 절연거리를 확보한 것으로 나타났다. PCB에서 홀을 이용하여 연면거리를 확보하였으며 특정 영역에 패턴 및 부품을 비워두어 공간거리를 확보하였다.

반면, 규격을 미적용한 다수의 제품은 IEC 60601-1 제8.9절 절연거리 요건을 생략한 근거가 명확히 제시되지 않았으나, 구조적으로 볼 때, 기기 전체를 환자장착부로 간주하여 내전압 및 누설전류 시험을 합격함으로써 8.9절을 적용하지 않았거나 IEC60601-1의 규격 내 다른 해석으로 적용하지 않았을 것으로 추정된다.

그러나 이러한 접근은 향후 다양한 사용 환경(충전 중 사용, 노후화, 습도 변화 등)에서 전기적 안전성을 완전히 보장하기 어렵다. 특히 웨어러블·휴대용 의료기기는 사용자가 곧 환자이므로, 절연 파괴 시 감전이나 누설전류의 위험이 직접적으로 인체에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 이들 제품군은 시험 조건상 안전성이 확인되었다 하더라도, 보수적인 설계 접근이 필수적이다. 보수적 접근이 필요한 이유는 다음과 같다.

① 사용환경의 다양성과 장시간 인체 접촉으로 인한 누적 위험,
② 오염등급·습도·재질 변화로 인한 절연 성능 저하,
③ 향후 충전방식·전원 구조 변경 시 규격 재평가 부담 때문이다.

이에 따라 본 연구에서는 소형 의료기기 설계 시 IEC 60601-1 8.9절을 명시적으로 반영한 절연 확보 전략을 제시한다.

첫째, 모든 사용자 접촉 경로를 2×MOPP 기준으로 평가하여 최소 연면거리 3.4 mm, 공간거리 1.6 mm 이상을 확보해야 한다.

둘째, 전원부와 측정부 사이에는 소형 고효율 절연형 DC-DC 컨버터를 삽입하여 전기적 분리를 확보하는 것이 바람직하다.

셋째, PCB 기판 설계 단계에서 홈(slot)·리브(rib) 등 구조적 절연을 적용해 유효 연면거리를 확장하고, 하우징 내부에 절연벽(barrier)이나 포팅(potting) 처리를 통해 안정성을 향상시킬 수 있다.

넷째, 충전 및 외부 기기와 통신하는 포트도 전원부로 분류하여 연면거리 및 공간거리를 확보한다.

다섯째, 소형 절연형 부품들의 에너지효율 및 발열에 대해 검토해야 한다. 크기가 작은 PCB에 들어가는 만큼 절연 부품도 크기가 작아야 하며, 크기가 작아진 절연부품들은 발열이 크고 에너지효율이 낮아지는 경향이 있으므로 배터리 용량 및 발열에 대해 검토해야 한다.

상용 제품을 대상으로 IEC 60601-1 8.9절의 실제 적용 실태를 분석하고, 소형 의료기기의 현실적 제약을 고려한 절연거리 확보 가이드라인을 제시하였다. 배터리 기반 웨어러블 및 휴대용 의료기기에 이러한 설계를 반영하여 연면거리 및 공간거리를 확보하고 전기적 안전성을 내재화하며, 제품 인증과정에서의 재설계 리스크를 줄이는 데 기여할 것으로 기대된다.

4. Acknowledgements

이 연구는 Ministry of Science and ICT (MSIT)가 지원하고 Gangwon Information & Culture Industry Promotion Agency(GICA) and National IT Industry Promotion Agency(NIPA)가 주관하는 과제의 지원을 받아 수행하였음. (암 환자의 항암치료에 특화된 CDSS와 일상생활 데이터 통합형 AIoT 의료기기 실증)

5.참고 문헌

[1] Wall C, Hetherington V, Godfrey A. Beyond the clinic: the rise of wearables and smartphones in decentralising healthcare. *npj Digit Med.* 2023;6:219.

[2] Xue Z, Gai Y, Wu Y, Liu Z, Li Z. Wearable mechanical and electrochemical sensors for real-time health monitoring. *Commun Mater.* 2024;5:211.

[3] International Electrotechnical Commission (IEC). *Medical electrical equipment – Part 1: General requirements for basic safety and essential performance (IEC 60601-1:2005 + AMD1:2012 + AMD2:2020 CSV).* Geneva: IEC; 2020.

디지털 병리의 가치 입증과 수가 전략 제안

고보명[1*], 류규하[1]
성균관대학교 의료기기산업학과[1]

Proving the Value of Digital Pathology and Proposing a Reimbursement Strategy

Bomyoung Ko[1*], Gyu Ha Ryu[1]
Department of Medical Device Management and Research, Sungkyunkwan University, Korea
*bomyoung0953@skku.edu

Abstract

본 논문은 대한민국 병리 분야의 디지털 전환을 촉진하기 위한 보험 수가 책정 전략을 제시하는 데 목적이 있다. 현재 국내에서는 디지털 병리 기술에 대한 공식적인 수가 체계가 부재하여 기술 도입과 확산에 어려움을 겪고 있다. 이에 따라 본 연구는 디지털 병리의 진단의 임상적, 경제적 타당성을 분석하고, 주요 선진국의 보험 등재 사례를 비교 연구하여 한국 실정에 맞는 정책적 대안을 모색하고자 한다. WSI를 활용한 디지털 병리 진단은 기존 현미경 진단과 높은 일치율을 보이며 진단 소요 시간 단축, 진단 일관성 향상 등 임상적 가치를 입증했다. 또한, 슬라이드 보관 및 관리 비용 절감 등 경제적 효율성 증대 효과도 확인되었다. 수가 전략 분석에서는 일본이 디지털 병리 이미지를 이용한 진단에 대해 기존 병리 진단료를 산정할 수 있도록 제도를 개정한 사례와 미국이 AI 등 혁신 기술에 대한 별도 가치 평가를 위해 카테고리 III 코드와 같은 임시 수가를 신설한 사례를 고찰하였다. 이러한 분석을 바탕으로, 본 논문은 한국의 디지털 병리 수가 전략으로 두 가지 방향을 제안한다. 첫째, 단기적이고 현실적인 접근으로서 Full PACS 사례와 일본의 수가 개정 사례를 참고하여, AI가 결합되지 않은 일반적인 디지털 병리에 대해 기존 병리 진단료에 가산하는 방안을 제시한다. 둘째, 장기적이고 혁신적인 접근으로서 AI 기반 디지털 병리 기술이 제공하는 새로운 의학적 가치를 신의료기술평가를 통해 인정받고 별도의 수가를 신설하는 방안을 제안한다.

1. 연구 배경

최근, 암을 진단하기위해 병리학의 중요성은 높아지지만 여러 문제점들이 존재한다. 고질적인 인력문제와 여전히 아날로그 방식의 진단이 주를 이루고 있어 효율성과 정확성 면에서 한계를 보이고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 병리학 생태계의 디지털화가 가속될 것으로 예상된다.

디지털 병리(Digital Pathology, DP)는 기존의 현미경을 이용한 검경 방식 대신, 병리 슬라이드를 고배율로 스캔하여 디지털 파일로 변환하고 이를 판독하는 시스템이다. WSI 스캐너 개발과 병리진단 AI 소프트웨어의 FDA허가로 디지털병리 산업이 발전되고 있다[1][2]. 디지털 병리는 조직 표본샘플 영상의 디지털화, 기존의 물리적 슬라이드 없이 임상 워크플로우에 디지털 슬라이드를 통합하여 보다 효율적이고 높은 품질의 진단 및 치료를 제공할 수 있다. 또한, 슬라이드의 변색, 파손 및 분실 위험이 감소함에 따라 잠재적인 운영 비용 절감 효과를 기대할 수 있으며, 전문가 간 데이터 공유를 통해 판독 속도를 향상시키고 견해 차이를 줄이는 효과도 얻을 수 있다. 실제 미국 병리학자를 대상으로 실험한 결과 업무효율 13% 향상을 보여주었고[3] 기존의 TAT가 7.8일에서 4.9일로 감소하였다[4]. 스캐너와 AI 진단 보조 소프트웨어의 발전으로 더 높은 업무효율 증대 효과를 기대할 수 있다.

하지만 DP는 스캐너와 운영 프로그램, 스토리지 등 초기 비용 부담이 크다. 아직 국내의 경우 DP에 대한 보험수가가 적용되지 않기 때문에 제도적인 지원이 필요하다.

본 연구는 병리과의 디지털 전환에 대한 가치 입증 방향을 제안하고, 국내외 디지털 병리 현황 및 병리검사 수가 관련 전략을 제시하는 것을 목표로 한다.

2.연구 방법

1996년부터 2024년까지 출판된 관련 문헌을 대상으로 체계적 고찰을 수행하였다. 주요 문헌 검토 및 분석은 병리학 분야의 최고 권위 학술지들을 중심으로 이루어졌다. 구체적으로 Archives of Pathology & Laboratory Medicine, Modern Pathology, The American Journal of Surgical Pathology, Journal of Pathology Informatics를 포함한 15개 이상의 핵심 학술지를 선정하여, 해당 기간 발행된 모든 호를 직접 검토하고 핵심 연구들을 선별하였다.

또한, 이 과정에서 누락될 수 있는 관련 연구들을 보완하기 위해, 'Digital Pathology', 'Whole Slide Imaging' 'Artificial Intelligence', 'Diagnostic Concordance' 등의 주요 검색어를 활용한 전자 데이터베이스 검색과 선정된 문헌의 참고문헌을 역추적하는 연쇄 검색(citation searching)을 병행하여 연구의 포괄성을 높였다.

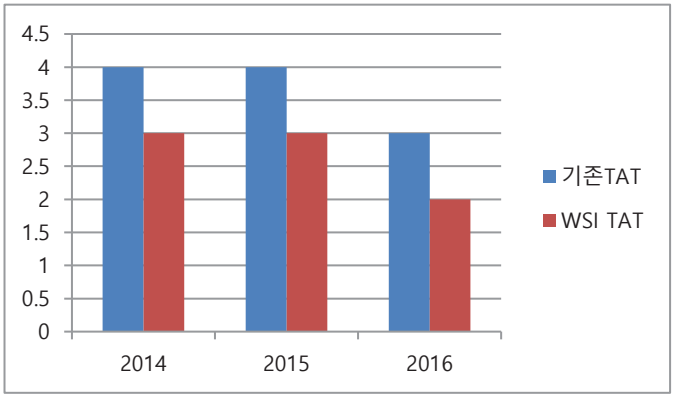
3. 연구 결과

1. 진단 정확도 및 효율성 향상

데이터 기반 분석 결과, 디지털 병리(WSI)의 진단 정확성과 효율성은 기술 발전에 따라 지속적으로 향상되었다. WSI와 전통적인 광학 현미경(LM) 판독 간의 진단 일치도는 1996년 62~64%[5] 수준에서 시작하여 2024년에는 96.3%[6]까지 크게 상승했다. 진단 결과의 일관성을 나타내는 Kappa 계수(κ) 역시 초기 0.38[7]에서 0.55~0.68[8]로 개선되었으며, 특히 진단 보조 AI를 활용한 연구에서는 0.90이라는 높은 수준의 일관성을 기록했다.

년도		일치율	κ계수
1996	세포병리	62~64%	0.20~0.34
2003	세포병리	84.1%	0.22~0.556
2019	세포병리	92.5	0.66
2024	조직병리	96.3%	X

진단 소요 시간(TAT) 또한 획기적으로 단축되어(9), 일반 진단은 평균 3.7일에서 약 하루가 감소했고 외부 자문은 평균 12일에서 1.4일로 크게 줄었다[10].



2. 운영 효율성 증대와 비용 절감

디지털 병리 시스템 도입은 운영 효율성과 비용 절감 측면에서도 명확한 이점을 보인다. 인력 구조 효율화, 유리 슬라이드 운송 및 관리 비용 감소, 판독 시간 단축(24~96시간) 등을 통해 장기적인 비용 절감이 가능하다. 또한, 슬라이드를 디지털 이미지로 영구 보관함으로써 물리적 변질, 파손, 분실의 위험을 원천적으로 차단하고 관련 보관 시설 운영 비용을 절감할 수 있다. 이는 데이터의 안정성과 품질을 보장할 뿐만 아니라, 물리적 제약 없이 온라인을 통한 실시간 원격 협업을 가능하게 한다.

3. 인공지능(AI) 기술의 임상적 활용 가능성

디지털 병리학에 AI 기술을 접목한 구체적인 연구는 이러한 잠재력을 뒷받침한다. 2017년 Hiroshi Yoshida 등의 연구에서 자동화 이미지 분석 시스템(e-Pathologist)은 두 병원의 이미지 1,328장을 분석한 결과, 보정 후 미검출 암종 약 1%, 미검출 선종 약 5%, 과다 검출 약 30%의 성능을 보였다. 해당 연구는 자동화 시스템이 병리학자와 유사한 수준의 진단 판단 능력을 갖추고 있음을 입증하며, AI 기반 진단 보조 기술의 임상적 활용 가능성을 제시했다[11].

본 연구는 디지털 병리의 임상적, 경제적 가치를 분석하고 국내외 수가 정책 사례를 고찰하여 한국 실정에 맞는 두 가지 수가 전략을 제안했다. 단기적 으로는 AI가 결합되지 않은 일반 디지털 병리에 대해 기존 병리 진단료에 가산하는 방안을, 장기적으로는 AI 기반 디지털 병리의 혁신 가치를 신의료기술평가로 인정받아 별도 수가를 신설하는 방안을 제시하여 디지털 병리 기술의 도입과 확산을 촉진하고자 한다.

5.참고 문헌

1. FDA, IntelliSite Pathology Solution (PIPS, Philips Medical Systems)), 2017.04.17.

2. FDA, FDA Authorizes Software that Can Help Identify Prostate Cancer, 2021.9.21.

3. Jonhan Ho 5, Stefan M. Ahlers 1,Curtis Stratman 2,Orly Aridor et al, Digital Pathology Result In Cost Savings? A Financial Projection For Digital Pathology Implementation At A Large Integrated Health Care Organization 2014.12

4. Thomas Chong,M. Fernando Palma-Diaz,Craig Fisher et al. The California Telepathology Service: UCLA's Experience in Deploying a Regional Digital Pathology Subspecialty Consultation Network, 2019.12

5.Stephen S. Raab, M. Sue Zaleski, Patricia A. Thomas, Theodore H. Niemann, Christina Isacson, Chris S. Jensen, Telecytology: Diagnostic Accuracy in Cervical-Vaginal Smears, American Journal of Clinical Pathology, Volume 105, Issue 5, 1 May 1996, Pages 599–603

6.McGenity, C., Clarke, E.L., Jennings, C. et al. Artificial intelligence in digital pathology: a systematic review and meta-analysis of diagnostic test accuracy. npj Digit. Med. 7, 114 (2024).

7.Gomes, D.S., Porto, S.S., Balabram, D. et al. Inter-observer variability between general pathologists and a specialist in breast pathology in the diagnosis of lobular neoplasia, columnar cell lesions, atypical ductal hyperplasia and ductal carcinoma in situ of the breast. Diagn Pathol 9, 121 (2014).

8.Kim T, Chang H, Kim B, Yang J, Koo D, Lee J, Chang JW, Hwang G, Gong G, Cho NH, Yoo CW, Pyo JY, Chong Y. Deep learning-based diagnosis of lung cancer using a nationwide respiratory cytology image set: improving accuracy and inter-observer variability. Am J Cancer Res. 2023 Nov 15;13(11):5493-5503. PMID: 38058836; PMCID: PMC10695775

9.Matthew G. Hanna, Victor E. Reuter, Jennifer Samboy, Christine England, Lorraine Corsale, Samson W. Fine, Narasimhan P. Agaram, Evangelos Stamelos, Yukako Yagi, Meera Hameed, David S. Klimstra, S. Joseph Sirintrapun; Implementation of Digital Pathology Offers Clinical and Operational Increase in Efficiency and Cost Savings. Arch Pathol Lab Med 1 December 2019; 143 (12): 1545–1555

10.Vergani, Anna BSc*; Regis, Barbara BSc*; Jocollé, Genny DSc*; Patetta, Roberta MD*; Rossi, Giulio MD*,†. Noninferiority Diagnostic Value, but Also Economic and Turnaround Time Advantages From Digital Pathology. The American Journal of Surgical Pathology 42(6):p 841-842, June 2018.

11.Yoshida H, Yamashita Y, Shimazu T, Cosatto E, Kiyuna T, Taniguchi H, Sekine S, Ochiai A. Automated histological classification of whole slide images of colorectal biopsy specimens. Oncotarget. 2017 Oct 12;8(53):90719-90729. doi: 10.18632/oncotarget.21819. PMID: 29207599; PMCID: PMC5710880

CIA Triad 확장모델 및 Threat 모델링에 기반한 소프트웨어 의료기기 사이버보안 프레임워크

한혜리[1*], 구성욱[2], 장원석[3]
연세대학교 대학원 의료기기산업학과

A Cybersecurity Framework for Software as a Medical Device: Integrating Alternative CIA Triad Models and Threat Modeling Methodologies

Hyeri Han[1*], Sung Uk Kuh[2], Won Seok Jang[3]
Department of Medical Device Engineering and Management, Yonsei University College of Medicine, Korea
*rihan@yonsei.ac.kr

Abstract

As cybersecurity threats continue to rise, highlighted by an average financial loss of $10.93 million per data breach in the healthcare sector, marking the highest figure for 13 consecutive years, the importance and urgency of cybersecurity in the SaMD domain have become more prominent. This research introduces a hybrid Cybersecurity Framework (hCSF) that can be applied throughout the entire lifecycle of SaMD, based on the alternative CIA Triad model and threat modeling methodologies. The proposed framework integrates CIA Triad models expanded such as the Parkerian Hexad and McCumber Cube, along with various threat modeling approaches including STRIDE, LINDDUN, and OCTAVE. This integration enables comprehensive management of cybersecurity requirements from technical, administrative, and operational perspectives. By implementing the principle of Security by Design, the framework would facilitate the inclusion of security considerations from the early stages of software design and development, offering a more cost-effective and efficient security approach compared to reactive methods. The study confirms that the proposed framework can be flexibly configured into various combinations tailored to the intended use, principle of operation, and cybersecurity regulatory policies of the target market for SaMD. Moving beyond the traditional checklist approach to technical cybersecurity requirements, this study presents a new framework that identifies cybersecurity threats and implements response strategies throughout the SaMD lifecycle. It provides a new theoretical perspective and direction in the field of SaMD cybersecurity. Ultimately, the research aims to contribute to the improvement of global competitiveness in the SaMD sector, serve as a foundational reference for cybersecurity policy development, and support the establishment of safer and more reliable digital healthcare and SaMD cybersecurity management strategies.

1. 연구 배경

고령화 및 만성질환의 유병률 증가, 환자맞춤형 의료서비스에 대한 수요 증가 및 클라우드 기반의 서비스형 소프트웨어(Software as a Service, SaaS) 플랫폼의 도입 증가 등과 같은 주요한 동인에 힘입어 디지털 헬스분야 기술의 급속한 발전과 함께 소프트웨어 의료기기(Software as a Medical Device, SaMD)의 활용이 크게 증가하고 있다[1]. 소프트웨어 의료기기(SaMD)는 의료 목적으로 범용 장비에서 사용되는 독립형 소프트웨어를 뜻하며, 일반적으로 진단, 치료 및 모니터링 등 다양한 의료 서비스를 제공한다. 해당 글로벌 시장 규모는 2025년 18억 달러에서 2033년 약 50억 달러의 가치가 있을 것으로 예상되며, 2033년까지의 예측 기간 동안 13.6%의 연평균성장률(Compound Annual Growth Rate, CAGR)로 성장할 것으로 예상된다[2].

한편 소프트웨어 의료기기(SaMD)의 확산은 의료데이터 보안 및 개인정보 보호에 대한 우려와 사이버보안 위협에 대한 취약점 증가로 이어지고 있으며, 미국 식품의약국(Food and Drug Administration, FDA)은 2023년 의료기기 사이버보안은 곧 환자 안전이며, 사이버보안 사고는 의료기기의 가용성과 성능에 심각한 위협이 될 수 있음을 시사한 바 있다[3]. 특히 환자 데이터 유출, 무단 접근, 의료기기 기능 변조 등의 사이버 위협이 증가하고 있으며, 이는 환자 안전(Patient Safety)과 직결되는 심각한 문제이다. 또한 국제 의료기기 규제당국자 포럼(International Medical Device Regulators Forum, IMDRF)은 소프트웨어 의료기기(SaMD)의 사이버보안이 제품 수명주기 전반에 걸쳐 고려되어야 할 핵심 요소임을 강조하고 있으나[4], 현재 지속적으로 발전하고 있는 소프트웨어 의료기기 (SaMD)와 사이버 위협을 고려하여 대응할 수 있는 사이버보안 프레임워크는 부족한 실정이다. 기존의 의료기기 사이버보안 가이드라인은 주로 하드웨어를 동반한 종속형 소프트웨어(Software in Medical Device, SiMD)와 혼용되어 개발되거나 기술적 보안 요구사항 체크리스트 방식에 국한되었다는 한계를 가지고 있다.

아울러, 최근 발표된 학술지에 따르면 2023년 의료 분야에서 발생한 대규모 보안침해 사례는 725건으로 보고되었으며, 의료 데이터 침해에 따른 사이버 보안사고가 매년 증가하는 추세이며, 2023년에는 매일 평균 2건의 대규모 의료 데이터 침해가 발생하였다[5]. 시간이 지남에 따라 더욱 정교해지는 사이버 공격에 대처하기 위한 효과적인 방법론의 일환으로 위협 모델링 기반의 소프트웨어 의료기기(SaMD)의 사이버보안 프레임워크를 통한 접근방식은 디지털 헬스분야의 기술 발전에 발맞춘 환자 안전의 확보 및 의료 시스템의 신뢰도 유지를 나아가 산업 및 국가의 경쟁력을 위해 중요한 과제로 대두되고 있다.

2.연구 방법

본 연구에서는 확장된 CIA Triad 모델 및 위협 모델링 기반의 소프트웨어 의료기기(SaMD)에 관한 사이버보안

프레임워크를 제안하기 위해 다음과 같은 연구 방법을 활용한다. 우선 국내·외 문헌조사를 통해 정보보안 및 사이버보안에 대한 내용을 전반적으로 파악하고, 관련된 국내외 사이버보안 정책자료 및 규제동향을 검토하여 사이버보안 관련 요구사항과 위협 모델링 적용사례 등을 면밀하게 분석한다. 또한, 적용 가능한 대표적인 보안 목표 모델 및 위협 모델링 방법론 등을 수집하고, 수명주기 전반에 걸쳐 사용할 수 있는 프레임워크를 분석 및 제시한다. 현재까지 소프트웨어 의료기기(SaMD) 분야에서 CIA Triad 이외의 보안 모델과 위협 모델링의 적용 사례가 다소 제한적이므로 다양한 분야의 적용 사례를 함께 조사하여 적절하게 조정하는 방안을 모색하도록 한다. 더불어, 의료기기 사이버보안 국제표준 등과의 조화를 위해 국제 의료기기 규제 당국자 포럼(IMDRF)과 국제 표준화 기구(ISO), 국제 전기기술 위원회(IEC) 등과 같은 기관의 관련된 발행자료를 심층적으로 이해하고 적용하여 새로운 프레임워크를 제안하고, 사례 연구를 수행하도록 한다.

3. 연구 결과

본 연구에서는 확장된 CIA Triad 모델과 위협 모델링 방법론을 기반으로 소프트웨어 의료기기(SaMD)의 수명주기 전반에 걸쳐 활용할 수 있는 하이브리드 사이버보안 프레임워크(hybrid Cybersecurity Framework, hCSF)를 개발하였다. 개발된 프레임워크는 기존의 전통적이고 획일화된 의료기기 위험관리 접근방식에서 벗어나 Parkerian Hexad 모델 및 McCumber Cube 모델 등의 CIA Triad 확장모델과 STRIDE, LINDDUN, OCTAVE, PASTA 및 VAST Threat Modeling 등과 같은 다양한 위협 모델링 방법론을 통합하여 설계되었으며, 소프트웨어 의료기기(SaMD)의 의도된 사용목적, 작용원리 및 진출하고자 하는 국가의 사이버보안 규제정책 또는 조직의 보안정책 등에 따라 다양한 결합으로 구성될 수 있는 유연성을 제공한다.



그림1. 하이브리드 사이버보안 프레임워크(hCSF)

특히 진료기록, 의료영상, 생체신호, 병리검사, 유전정보 등과 같은 민감한 개인 의료데이터를 수집, 전송, 저장 및 분석 처리하는 소프트웨어 의료기기(SaMD)의 특성을 고려하여 환자의 개인정보보호와 환자안전이라는 핵심 보안 요구사항을 동시에 실현할 수 있도록 설계되었으며, 설계 및 개발 초기 단계부터 보안 요소를 고려하는 Security by Design 원칙을 구현할 수 있어 품질비용 측면에서 효율적이고 효과적인 보안체계 구축을 가능하게 한다.

본 연구에서 제안한 하이브리드 사이버보안 프레임워크(hCSF)를 활용하여 설계한 예시로써 여러 확장된 CIA Triad 모델과 위협 모델링 방법론 중에서 McCumber Cube와 LINDDUN Threat Modeling을 선택적으로 결합하였다. 기본적으로 McCumber Cube 모델은 기밀성, 무결성 및 가용성과 같은 보안 목표(Security Goals)와 전송, 저장 및 처리와 같은 정보 상태(Information State) 그리고 기술, 정책과 관행, 교육훈련과 같은 보안 조치(Security Measures)라는 3가지 축으로 구성된 3차원 큐브 형태의 모델이다. 보안 위협 또는 취약점, 대응방안 등을 다각도로 분석하기에 적합하다. 한편, LINDDUN위협 모델링은 개인정보 보호분야에 중점을 두고 있기 때문에 개인 의료데이터와 관련된 보안을 위해 활용하기 적합하다.

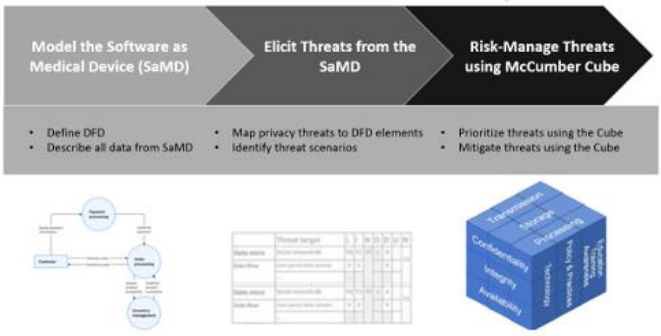


그림2. McCumber Cube + LINDDUN 프레임워크 프로세스

연결성(Linkability), 식별성(Identifiability), 부인 방지(Non-repudiation), 탐지성 (Detectability), 정보 공개(Disclosure of information), 인식 부족(Unawareness), 규정 미준수(Non-Compliance)와 같은 7가지 위협 유형에 대해 6단계의 프로세스를 따르는 방식이며, 개인정보 보호통제를 위한 체계적인 접근방식을 제공한다. 따라서 McCumber Cube + LINDDUN 프레임워크는 사이버보안 및 개인정보 보호를 동시에 만족할 수 있으며, 상기 그림 2와 같이 크게 3가지 단계의 프로세스로 이루어진다.

4. Acknowledgements

이 연구는 연세대학교 대학원 의료기기산업학과의 지원을 받아 수행하였음. (I804:11046-000000560742, 2025)

5.참고 문헌

[1] IQVIA, Digital Health Trends 2024, 2024
[2] Market.US, Software as a Medical Device (SaMD) Market Research Report, 2024
[3] Food and Drug Administration (FDA), Medical Device Cybersecurity Helping to Keep Patients and Medical Devices Safe, 2023
[4] International Medical Device Regulators Forum (IMDRF), IMDRF/CYBER WG/N60: Principles and practices for medical device cybersecurity, 2020
[5] The Health Insurance Portability and Accountability Act Journal, 2024 Healthcare Data Breach Report, 2025

중환자실 환자감시장치의 부정맥 알람 평가를 통한 임상적 유효성 및 사용적합성 향상에 관한 연구

오지윤[1*], 김유림[1,2], 이용주[3], 전대근[3], 최지수[4], 엄재선[5], 안철민[6], 장원석[1,2]

연세대학교 의료기기산업학과[1]

강남세브란스병원 의료기기 사용적합성 연구센터[2]

메디아나 환자감시장치 연구소[3]

연세대학교 의과대학 용인세브란스병원 호흡기·알레르기내과[4]

연세대학교 의과대학 세브란스병원 심장내과[5]

연세대학교 의과대학 연세의료원 세브란스심장혈관병원 심장내과[6]

Enhancing Clinical Effectiveness and Usability of Patient Monitoring Systems in ICU through Evaluation of Arrhythmia Alarms

Jiyoon Oh[1*], Yourim Kim[1,2], Yongju Lee[3], Daekeun Jeon[3], Jisoo Choi[4], Jae-sun Uhm[5], Chul-min Ahn[6], Wonseuk Jang[1,2]

[1]Department of Medical Device Engineering and Management, Yonsei University College of Medicine, Seoul, Korea

[2]Medical Device Usability Research Center, Gangnam Severance Hospital, Yonsei University College of Medicine, Seoul, Korea

[3]Patient Monitoring Lab, Mediana Co., Ltd, Gangwon-do, Korea

[4]Division of Pulmonology, Allergy and Critical Care Medicine, Department of Internal Medicine, Yongin Severance Hospital, Yonsei University College of Medicine, Yongin, Republic of Korea

[5]Department of Cardiology, Severance Hospital, Yonsei University College of Medicine, Seoul, Korea

[6]Division of Cardiology, Severance Cardiovascular Hospital, Department of Internal Medicine, Yonsei University Health System, Seoul, Korea

[*]5wldbs27@naver.com

Abstract

Patient monitoring systems are widely used in intensive care units(ICUs) to continuously monitor patients' conditions. However, a high false alarm rate can cause alarm fatigue among nurses, increasing their workload and stress. This study aimed to improve the accuracy of arrhythmia detection by enhancing the noise detection algorithm in patient monitoring systems and to evaluate whether this modification reduced false alarm rates and nurses' workload through clinical trials. The trials were conducted on adult ICU patients at Yongin Severance Hospital who required continuous electrocardiogram(ECG) monitoring for at least two days. After the first trial, the noise detection algorithm of the M50(investigational device) was improved, and a second trial with the same design was performed to assess its performance. During each study, the M50 and MX700 (comparator device) were applied simultaneously for three days, and arrhythmia alarms were independently reviewed based on ECG signals to identify false alarms. Comparative analysis using the chi-square test showed that the false alarm rate of the investigational device decreased from 71.75% to 27.61%, representing a statistically significant improvement($p < 0.001$). Both trials also demonstrated reductions in false alarm rate and NASA-TLX scores, indicating that the improved noise detection algorithm enhanced arrhythmia detection accuracy and reduced nurses' workload in the ICU setting.

1. 연구 배경

환자감시장치는 응급실, 수술실, 중환자실에서 심전도(ECG), 혈압, 산소포화도(SpO_2), 체온 등 주요 생체 신호를 측정하여 환자 상태를 모니터링한다[1]. 환자의 상태가 악화되었을 때 알람이 울리지만, 중환자실에서 울리는 부정맥 알람의 대부분은 false alarm인 것으로 나타났다[2]. 과도한 알람은 의료진의 alarm fatigue를 유발하고, 업무 효율과 환자의 안전에 부정적인 영향을 미친다[3]. False alarm의 주요 원인 중 하나는 ECG 신호의 품질 저하이다[4]. ECG는 심장의 전기적 활동을 기록하여 심장 질환 진단에 활용된다. 그러나 muscle noise, baseline wander, power-line interference와 같은 noise는 ECG 신호 분석을 방해할 수 있어, 정확한 분석을 위해서는 효과적인 noise 제거가 필요하다[5].

중환자실 간호사는 중증 환자를 돌보며 위급 상황에서 신속하게 의사 결정을 해야 하므로 업무 부담이 크며, 이는 중환자실 간호사와 환자에게 부정적인 영향을 미칠 수 있다[6]. 이를 해결하기 위해 부정맥 알람의 정확도를 개선하기 위한 다양한 연구가 진행되어 왔다[7-9]. 본 연구에서는 환자감시장치의 부정맥 검출 알고리즘을 개선하여 정확도를 높이고, false alarm rate과 간호사의 작업 부하 감소 효과를 평가하고자 한다.

2.연구 방법

본 연구에서는 MX700(Philips, USA)을 대조기기로, M50(Mediana, Korea)을 시험기기로 설정하였다. 두 차례의 임상시험을 통해 부정맥 알람의 정확도와 중환자실 간호사의 작업부하를 평가하였으며, 첫번째 임상시험 후 M50의 부정맥 검출 알고리즘을 개선하였다.

연구는 용인세브란스병원 IRB의 승인을 받아

수행되었다(승인번호: 9-2021-0080; 승인번호: 9-2022-0087).

중환자실에 2일 이상 입원하여 심전도 모니터링이 필요한 성인 환자를 대상으로 수행하였으며, 시험기기와 대조기기를 동시에 적용하여 3일동안 모니터링을 수행하였다. 발생한 알람과 ECG 파형을 비교하여 false alarm 여부를 결정하였으며, 중환자실 간호사는 근무 종료 후 NASA-TLX(National Aeronautics and Space Administration-Task Load Index)를 이용하여 작업 부하를 평가하였다.

발생한 알람 중 ECG 파형 판독 결과와 불일치한 비율을 false alarm rate으로 정의하였으며, NASA-TLX 점수는 정신적 요구, 신체적 요구, 시간적 요구, 수행, 노력, 불만 6개 항목을 통해 평가하였다. 통계 분석은 SPSS 27을 사용하였으며, false alarm rate 비교에는 카이제곱 검정, NASA-TLX 비교에는 Mann-Whitney U 검정을 적용하였다. P-value가 0.05 미만일 경우 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 판단하였다.

3. 연구 결과

두 차례 임상시험에 각각 17명, 11명의 환자가 참여하였으며, 평균 연령은 각각 78.2세와 78.6세였다. NASA-TLX 설문에는 각각 29명, 13명의 중환자실 간호사가 참여하였으며, 평균 경력은 각각 7.6년, 6.7년이었다.

Demographic characteristics		
	Patients	ICU nurses
1st clinical trial	17(78.2)	29(7.6)
2nd clinical trial	11(78.6)	13(6.7)

표 1. 임상시험에 참여한 환자와 중환자실 간호사의 인구학적 정보

첫 번째 임상시험에서 M50의 noise로 인한 false alarm은 65.63%로 나타났으며, MX700은 10.37%로 MX700이 통계적으로 유의미하게 낮았다($p<0.001$). 두 번째 임상시험에서는 M50의 noise로 인한 false alarm은 35.14%로 감소하였으며, MX700은 36.67%로 두 기기 간 통계적으로 유의한 차이는 보이지 않았다($p=0.897$). 두 임상시험에서 발생한 M50의 noise로 인한 false alarm을 비교한 결과 65.63%에서 35.14%로 감소하였으며, 통계분석 결과 유의하게 나타났다($p=0.001$).

False alarm rates caused by noise and comparison results		
1st clinical trial (n=17)	Observed frequency	105
	Ratio (%)	65.63
2nd clinical trial (n=11)	Observed frequency	13
	Ratio (%)	35.14
X^2		11.63
P value		0.001

표 2. M50의 노이즈로 인한 false alarm rate 및 비교 결과

중환자실 간호사의 NASA-TLX 평가에서도 두 번째 임상시험에서 M50 사용 시 총점이 38.32에서 17.67로 유의하게 감소($p<0.001$)하였다. 이는 개선된 부정맥 검출 알고리즘이 간호사의 작업부하에 긍정적인 영향을 미친 것으로 볼 수 있다.

개선된 부정맥 검출 알고리즘은 ECG 신호의 noise를 제거하여 정확도를 향상시켰으며, 그 결과 false alarm rate과 NASA-TLX 점수가 유의하게 감소하였다. 이러한 부정맥 검출 알고리즘의 개선은 환자감시장치의 성능과 중환자실 간호사의 업무 효율성 증대에 기여할 것으로 기대된다.

NASA-TLX scores and comparison results				
	1st clinical trial (n=29)	2nd clinical trial (n=13)	U	*P* value
mental demand	26.00 ± 16.25	19.67 ± 16.85	361.5	0.118
temporal demand	61.52 ± 22.07	15.33 ± 19.13	73.5	0.000
physical demand	23.52 ± 14.87	15.00 ± 16.26	297.0	0.021
performance	51.89 ± 23.10	16.67 ± 19.79	124.5	0.000
effort	31.69 ± 18.12	16.00 ± 12.98	236.5	0.002
frustration	29.74 ± 23.57	23.33 ± 23.88	337.5	0.372
overall	38.32 ± 14.44	17.67 ± 14.40	149.5	0.000

표 3. 중환자실 간호사를 대상으로 한 NASA-TLX 설문 결과

4. Acknowledgements

본 연구는 범부처전주기의료기기연구개발사업단 "인공지능 기반 중증악화 예측 가능한 고성능 환자감시장치 시스템 개발" 연구 과제의 지원을 받아 수행하였음.(RS-2020-KD000030)

5.참고 문헌

[1] Kim Y, Son J, Jang W. Usability Study on Patient Monitoring Systems: An Evaluation of a User Interface Based on User Experience and Preference. Med Sci Monit 29 (2023): e938570.

[2] Zhang Q, Chen X, Fang Z, et al. Reducing false arrhythmia alarm rates using robust heart rate estimation and cost-sensitive support vector machines. Physiol Meas. 2017;38(2):259-271.

[3] Dee SA, Tucciarone J, Plotkin G, et al. Determining the Impact of an Alarm Management Program on Alarm Fatigue among ICU and Telemetry RNs: An Evidence Based Research Project. SAGE Open Nurs. 2022;8:23779608221098713.

[4] Behar J, Oster J, Li Q, et al. ECG signal quality during arrhythmia and its application to false alarm reduction. IEEE Trans Biomed Eng. 2013;60(6):1660-1666.

[5] Chang KM. Arrhythmia ECG noise reduction by ensemble empirical mode decomposition. Sensors (Basel). 2010;10(6):6063-6080.

[6] Nasirizad Moghadam K, Chehrzad MM, Reza Masouleh S, et al. Nursing physical workload and mental workload in intensive care units: Are they related?. Nurs Open. 2021;8(4):1625-1633.

[7] Wang G, Lian Y, Yang AY, et al. Structured learning in time-dependent Cox models. Stat Med. 2024;43(17):3164-3183.

[8] Wung SF, Ogoo M, Chow JL, et al. False Crisis Alarms in Cardiopulmonary Monitoring:: Identification, Causes, and Clinical Implications. Crit Care Nurs Clin North Am. 2025;37(2):167-177.

[9] Qananwah Q, Ababneh M, Dagamseh A. Cardiac arrhythmias classification using photoplethysmography database. Sci Rep. 2024;14(1):3355.

의료인공지능

좌장: 황성재(연세대학교)

11월 7일 (금) **장영실 대강당 (15:30–17:10)**

김기수(경희대학교)
Invited Physics-Informed Neural Network based Quantitative MR Imaging: IVIM MRI and Oxygen Saturation MRI

김원화(POSTECH)
Invited 강건한 의료영상 AI를 위한 제어 가능한 적대적 공격

김근혜(연세대학교)
자동화 치아 정렬의 정확도 향상을 위한 3D 치아 데이터의 국소·전역 특징 결합 및 성능 평가

이소현(가천대학교)
MRI 기반 척추관 협착 부위 탐지와 중증도 분류 파이프라인 개발

박서은(한동대학교)
양자화학 기반 다중 모달 분자 표현을 활용한 약물 간 상호작용 및 처방 예측 연구

최예은(울산대학교 의과대학)
Multi-variate Time Series Transformer 기반 패혈증 조기 예측 모델 개발



김기수 / Kisoo Kim
조교수 / Assistant Professor
경희대학교 / Kyung Hee University
생체의공학과 / Biomedical Engineering

물리신경망 기반 자기공명영상 영상 복원 기술
Physical-Informed Neural Network-Based Magnetic Resonance Imaging Reconstruction

Abstract
Physics-Informed Neural Networks (PINNs) have recently emerged as a powerful framework that integrates physical modeling with data-driven learning for solving inverse problems in medical imaging. This lecture will present the principles and applications of PINN-based MRI reconstruction, focusing on how physical priors derived from the MRI signal equation can guide network training to improve quantitative accuracy. In particular, we will discuss its implementation for quantitative oxygen saturation (SO_2) mapping using the qBOLD model and for estimating intravoxel incoherent motion (IVIM) parameters that reflect diffusion–perfusion dynamics. The potential of PINN to enhance image fidelity, enable model-based quantitative MRI will be highlighted through simulation and in vivo examples.

Brief Biosketch

- MRI 유도하 치료초음파 분야에서 정확한 치료 평가를 위한 MRI 영상 복원 기술 및 영상 처리 기술에 대해 연구를 하고 있으며, 최근에는 의료인공지능 분야와 접목하여 물리신경망 기반 영상 복원, 빠른 조기 진단을 위한 under-sampled MRI 영상에서의 AI 진단기술을 개발하고 있음
- 국제 Focused Ultrasound Foundation 에서 MRI 유도 치료 분야 2020 년 젊은 과학자상 수상
- 2023 년 UCSF Radiology 에서 우수 젊은 과학자 1 인에게 수여하는 Bruce Hasegawa Award 수상
- 2023 년 미국국립보건원 K99/R00 과제 수주 이력
- 2024 년국제 자기공명영상 학회 ISMRM 에서 중개 MRI (Interventional MRI) 연구그룹의 연구생 대표 역임



김원화 / Kim, Won Hwa
부교수 / Associate Professor
포항공과대학교 / POSTECH

강건한 의료영상 AI 를 위한 제어 가능한 적대적 공격
Controllable Adversarial Attacks for Robust Medical Imaging AI

Abstract(영문):

Deep learning has achieved remarkable success in medical image analysis, yet it suffers from lack of data for real-world deployment. In this talk, I will present a series of studies from our group that leverage adversarial perturbations —originally studied as a security threat— can be reinterpreted as a powerful tool for data augmentation and robustness enhancement to improve the reliability of medical imaging AI. These approaches demonstrate how controllable adversarial perturbations can transform small changes into significant gains in model performance, from classification to segmentation, paving the way toward robust AI in clinical imaging.

Brief Biosketch

Won Hwa Kim is an Associate Professor in Graduate School of Artificial Intelligence (GSAI) / Computer Science and Engineering (CSE) / Medical Science and Engineering (MED) at Pohang University of Science and Technology (POSTECH). Prior to joining POSTECH, he was an Assistant Professor in Computer Science and Engineering at the University of Texas at Arlington (2018 – 2023, last 2 years on leave-of-absence), and he was a Researcher in Data Science Team at NEC Labs., America (2017-2018). He obtained his Ph.D. in Computer Sciences from University of Wisconsin-Madison in 2017, M.S. in Robotics from KAIST (2010) and B.S. in Electrical Engineering from Sungkyunkwan University (2008). He developed Hybrid Vehicles at Hyundai Motors Company in 2010-2011 before he dived into Artificial Intelligence. He is a recipient of prestigious grants such as NSF CISE CRII (2020) in the U.S., NRF Mid-Career Researcher Program (2021) and Basic Research Lab (2025) in South Korea.

자동화 치아 정렬의 정확도 향상을 위한 3D 치아 데이터의 국소·전역 특징 결합 및 성능 평가

김근혜[1], 이세나[1], 정주령[2], 진용규[3], 양세정[1,4*,]

연세대학교 원주의과대학 정밀의학과[1], 연세대학교 교정과학교실[2],

(주)디오코[3], 연세대학교 원주의과대학 의료정보통계학과[4]

Local and Global Feature Fusion and Performance Evaluation for Improving the Accuracy of Automated Tooth Alignment Using 3D Dental Data

Geunhye Kim[1], Sena Lee[1], Juryeong Jeong[2], Yongkyu Jin[3*], Sejung Yang[1,4*],

Department of Precision Medicine, Yonsei University Wonju College of Medicine, Wonju, Republic of Korea[1]

Department of Correctional Science, Yonsei University Seoul College of Medicine, Seoul, Republic of Korea[2]

Diorco, Yongin-si, Gyeonggi-do, 17095, Republic of Korea[3]

Department of Medical Informatics and Biostatistics, Yonsei University Wonju College of Medicine, Wonju, Korea[4]

kimgh0316@naver.com,*syang@yonsei.ac.kr

Abstract

In digital dentistry, reliable tooth-axis estimation is fundamental for prosthetic design, orthodontic planning, and automated labeling, yet most pipelines still rely on manual cues or costly registrations. We present a crown-only learning framework that predicts the relative rotation from an augmented pose to the ground-truth aligned pose as a quaternion. Five input configurations are explored: single tooth, single+neighbors (partial arch), full arch, single+neighbors (partial-arch) graph, and full-arch graph. Point-cloud inputs are encoded with DGCNN, graph inputs with GCN, and fused features are regressed by an MLP head. Using 10 patients from the MICCAI 3DTeethSeg22 dataset with patient-wise splits, our method shows that incorporating neighboring and global context markedly reduces error compared with single-tooth inputs, while qualitative overlays demonstrate close visual agreement with the ground truth. The results indicate that modeling inter-tooth spatial relations improves alignment accuracy and supports downstream clinical applications.

1. 연구 배경

치아 정렬은 저작 효율, 발음, 심미는 물론 치악간관계와 교합 안정성, 치주 건강, 턱관절 기능까지 좌우하는 핵심 치료 요소이다. 부정교합과 치열궁 불균형은 치아 마모와 치주염 위험을 높이고, 교정·보철·임플란트의 예후에도 직접적인 악영향을 준다. 따라서 정확한 정렬은 전반적인 구강 건강과 치료 성공을 위해 필수적이다[1]. 그러나 기존 임상에서는 숙련된 의료진의 경험과 수작업에 크게 의존하므로, 이러한 수동 치아 정렬 방식은 시간과 비용 부담이 크다는 한계가 있다.

자동화 치아 정렬은 위 한계를 보완하기 위한 대안으로, 3D 치아 스캔 데이터에서 분할된 치아 크라운을 입력해 딥러닝 모델이 각 치아의 회전값을 예측하고 이를 적용해 원래 정렬 상태로 복원한다[2]. 그러나 다수의 기존 방법은 개별 크라운의 국소 특징에만 의존해 치열궁의 전체 형태나 치간 관계와 같은 전역적 특징을 충분히 반영하지 못해 정확도가 제한된다.

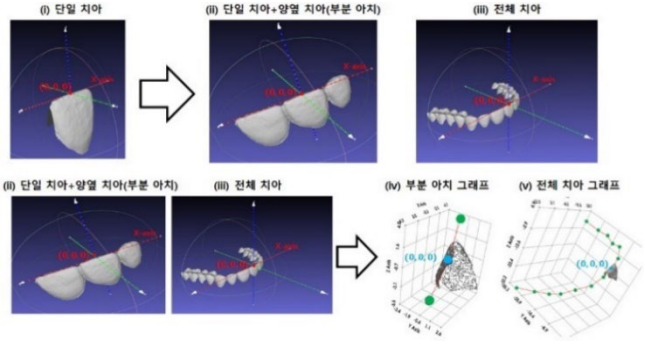
이에 본 연구는 다음과 같이 설계하였다. 먼저, 올바르게 치아가 정렬된 3D 치아 스캔에서 분할된 치아 크라운을 얻고 거기서 근심점과 원심점을 이은 선을 절대축 x축에 맞추는 정렬하고 이러한 정렬을 시킨 치아 크라운 데이터에서 다섯 가지 데이터—(i) 단일 치아, (ii) 단일 치아+양옆 치아(부분 아치), (iii) 전체 치아, (iv) (ii)에서 각 치아 중앙점을 노드로 한 그래프, (v) (iii)에서 각 치아 중앙점을 노드로 한 그래프—를 구축한다. 다음으로, 올바르게 치아가 정렬된 3D 치아 스캔의 각 단일 치아 크라운에 랜덤 회전 증강을 적용해 가지런하지 않은 치아 상태를 만들고, 각 단일 치아 크라운에서 생성된 다섯 가지 데이터에는 동일한 회전을 일괄 적용함으로써 학습용 입력과 정답 회전 레이블을 구성한다.

본 연구의 주된 목적은 3D 치아 스캔 데이터에서 얻은 치아 크라운에서 근심점과 원심점을 이은 선의 x축 정렬 후, 다섯 가지 데이터를 얻고 그 후에 회전 증강으로 생성된 치아 데이터를 바탕으로 모델 입력의 여러 조합을 구성해 치아 정렬 예측에 가장 효과적인 구성을 검증하고, 아울러 치간 그래프 및 전체 치아의 전역 특징을 단일 치아의 국소 특징과 결합하여 모델에 적용할 때 자동 치아 정렬의 정확도를 향상시키려 한다.

2. 연구 방법

2.1. 데이터셋

본 연구에서는 MICCAI 공개 데이터셋 3DTeethSeg22[3]를 사용하였다. 해당 데이터셋은 환자별 상·하악 메쉬와 치아별로 분할된 크라운 정보를 제공하며, 이 중 10명의 환자 데이터를 활용했다. 데이터 분할은 환자 단위로 수행하여 학습 8명, 검증 1명, 평가 1명으로 구성하였다. 크라운 전처리는 (1) 각 치아의 중심점을 원점(0,0,0)으로 이동하고, (2) 근·원심점을 잇는 선을 절대축의 x축에 맞추는 x축 정렬로 이루어진다. 이러한 x축 정렬을 바탕으로 다섯 가지 입력 데이터를 구축하였다: (i) 단일 치아, (ii) 단일 치아+양옆 치아(부분 아치), (iii) 전체 치아, (iv) (ii)에서 각 치아 중심점을 노드로 한 부분 아치 그래프, (v) (iii)에서 각 치아 중심점을 노드로 한 전체 치아 그래프. 이러한 데이터에 대해서는 그림 1번을 통해 확인할 수 있다. 여기서 (i),(ii),(iii)은 2,048개의 point cloud로 샘플링 하였다.



<그림1. 치아 정렬에 사용되는 데이터 구성>

2.2. 데이터 회전 증강

올바른 치아에서 정렬되지 않은 치아를 만들기 위해 x축 정렬 크라운에 ±45° 오일러 회전(x→y→z)만 적용했다. 그 결과 올바른 치아를 가진 10명의 환자에서 얻은 280개 치아 크라운을 10배 증강해 정렬되지 않은 치아 크라운 2,800개를 생성했다. 회전 증강은 치아 크라운 단위로 독립적으로 진행되며, 하나의 치아 크라운에서 적용되는 랜덤 오일러 각 회전을 앞서 먼저 만든 올바른 3D 치아 스캔에서 얻은 치아 크라운에서 파생된 5가지 데이터—(i) 단일 치아, (ii) 단일+양옆 치아(부분 아치), (iii) 전체 치아, (iv) 부분 아치 그래프, (v) 전체 치아 그래프—에 동일하게 일괄 적용하였다.

2.3 모델 및 학습

(i) 단일 치아, (ii) 단일+양옆 치아(부분 아치), (iii) 전체 치아는 딥러닝 모델인 DGCNN[4]으로 point cloud의 특징을 뽑고, (iv) 부분 아치 그래프, (v) 전체 치아 그래프에서는 GCN[5]으로 그래프의 특징을 뽑았다. 그리고 이 입력들로 얻은 특징들을 조합하여 MLP 회귀 헤드에 입력하고, 각 치아의 올바르게 정렬된 치아에서 회전 증강을 통해 만든 어그러진 치아와 비교했을때 어느 정도 틀어졌는지에 대한 회전값을 사원수($q = (w, x, y, z)$)[6]로 예측했다.

학습에서 Epochs은 100, 손실함수는 평균제곱오차(MSE, Mean Squared Error), 옵티마이저는 Adam를 사용해 모델 가중치를 갱신했으며, 학습률 1e-3으로 설정하였다.

3. 연구 결과

3.1. 정량적 결과

치아 정렬의 정량적인 평가는 정답 사원수(q_{gt})과 예측 사원수(q_p)을 가지고 1. Mean Squared Error(MSE), 2. Mean Absolute Error(MAE), 3. Angle Difference(AD)를 구하였다. MSE는 두 사원수의 각 성분 차이를 제곱해 평균한 값이며, MAE는 그 성분 차이의 절댓값을 평균한 값이다. 마지막으로 AD는 두 사원수를 정규화한 뒤 내적의 절댓값을 사용해 구하였다. MSE, MAE, AD를 구하는 식은 다음과 같다.

1. $MSE(q_p, q_{gt}) = \frac{1}{4} \sum_{k\in\{w,x,y,z\}} (q_{gt,k} - q_{p,k})^2$
2. $MAE(q_p, q_{gt}) = \frac{1}{4} \sum_{k\in\{w,x,y,z\}} |q_{gt,k} - q_{p,k}|$
3. $AD(q_p, q_{gt}) = 2\arccos\left(\frac{|q_p \cdot q_{gt}|}{\|q_p\|\|q_{gt}\|}\right)$

Case	MSE	MAE	Angle Difference(AD)			x-axis aligned
			mean	median	std	
(i)	0.0098	0.0755	18.54°	16.39°	10.24°	x
(i)	0.0056	0.0598	13.13°	11.81°	6.98°	o
(i)+(ii)+(iii)	0.0036	0.0423	11.69°	10.21°	7.22°	o
(i)+(iv)+(v)	0.0031	0.0414	11.14°	9.91°	5.82°	o
(iv)+(v)	0.0027	0.0385	10.58°	9.75°	5.44°	o
(i)+(ii)+ (iii)+(iv)+(v)	0.0029	0.0397	10.89°	9.68°	5.53°	o

<표1. 다섯 가지 입력 구성의 조합에 따른 성능 비교>

3.2. 정성적 결과

정렬 전 치아에 예측 사원수를 역회전(q^{-1})하여 치아 정렬을 시켰으며, 정성적 결과 그림에서 예측 사원수의 결과는 (i)+(ii)(iii)+(iv)+(v) 데이터를 합친 입력의 치아 정렬 결과를 그림2와 3을 통해 시각적으로 확인할 수 있다.

4. 고찰 및 결론

표 3에 따르면, 단일 치아 입력의 경우 x축 정렬을 적용했을 때 정렬시키지 않은 데이터보다 오차가 낮아 더 우수한 성능을 보였다 이는 입력 정렬로 회전 방향의 일관성을 확보한 뒤 수행한 회전 증강이 학습에 유리함을 시사한다. 더불어 부분 아치·그래프 기반 입력을 사용하면 단일 치아 입력보다 오차가 추가로 감소함을 확인하였다. 또한 그림 2와 그림 3의 정성적 결과에서도 국소적·전역적·인접 치아 간의 특징을 함께 고려한 예측 사원수로 정렬된 치아가 정답 정렬 치아와 거의 유사한 형태를 보였다. 이는 단일 치아 단위의 국소적 특징만을 이용한 치아 정렬보다, 치아 간 공간적 연관성과 전체 치아 아치 구조의 전역적 특징을 활용하여 학습하는 접근이 더 높은 치아 정렬 정확도를 달성할 수 있음을 본 연구를 통해 알 수 있다.

다만 본 연구는 10명의 환자 데이터만을 사용하였기에, 다양한 교합 형태나 보철 상태를 충분히 반영하기에는 한계가 있다. 향후 연구에서는 환자 수를 확대하고, 상·하악 간 상호작용을 통합한 확장 모델을 학습하여 일반화 성능을 검증할 계획이다. 또한 각 입력 특징의 상대적 중요도를 반영하는 가중치 계수 학습을 추가하여 모델의 해석력과 정밀도를 향상시킬 예정이다.



<그림2. 정렬 전 치아와 예측과 정답 정렬 치아 시각화>



<그림3. 예측과 정답 정렬 치아의 시각적 비교>

5. Acknowledgements

본 발표는 과학기술정보통신부 정보통신진흥기금을 지원받아 작성한 것으로, 과학기술정보통신부의 공식의견과 다를 수 있습니다.

6.참고 문헌

[1] Jafari, Amir Khashayar, et al. "Effect of malocclusion severity on oral health and its correlation with socioeconomical status in Iranian adolescents." BMC Oral Health 24.1 (2024): 1301.

[2] Wei, Guodong, et al. "TANet: towards fully automatic tooth arrangement." European conference on computer vision. Cham: Springer International Publishing, 2020.

[3] Ben-Hamadou, Achraf, et al. "3DTeethSeg'22: 3D Teeth Scan Segmentation and Labeling Challenge." arXiv preprint arXiv:2305.18277 (2023).

[4] Wang, Yue, et al. "Dynamic graph cnn for learning on point clouds." ACM Transactions on Graphics (tog) 38.5 (2019): 1-12.

[5] Kipf, T. N. "Semi-supervised classification with graph convolutional networks." arXiv preprint arXiv:1609.02907 (2016).

[6] Peretroukhin, Valentin, et al. "Probabilistic regression of rotations using quaternion averaging and a deep multi-headed network." arXiv preprint arXiv:1904.03182 (2019).

MRI 기반 척추관 협착 부위 탐지와 중증도 분류 파이프라인 개발

이소현[1], 김영재[2], 정준용[3], 김광기[1,4*]

가천대학교 의공학과[1]

가천대 길병원 가천의생명융합연구원[2]

가톨릭대학교 서울성모병원 영상의학과[3]

가천대학교 의과대학 의공학교실[4]

MRI-Based Pipeline for Detection and Severity Classification of Spinal Canal Stenosis

So Hyeon Lee[1], Young Jae Kim[2], Joon Young Jung[3], Kwang Gi Kim[4*]

[1]Department of Biohealth & Medical Engineering, Gachon University, Seongnam, Republic of Korea

[2]Gachon Biomedical & Convergence Institute, Gachon University Gil Medical Center, Incheon, Republic of Korea

[3]Department of Radiolgy, College of Medicine, The Catholic University of Korea

[4]Department of Biomedical Engineering, Gil Medical Center, Gachon University College of Medicine, Incheon, Republic of Korea

[*]kimkg@gachon.ac.kr

Abstract

Spinal stenosis is a common degenerative disease in the elderly. This study proposes a detection–classification pipeline using lumbar T2-weighted MRI to automatically localize central and nerve root canal stenosis and classify severity into four grades. The YOLOv11 detection model achieved mean precision of 0.987 (central) and 0.736 (nerve root), while the DINOv2 classification model showed accuracies of 0.66 and 0.76, respectively. These results demonstrate the feasibility of automated stenosis assessment and its potential as a clinical decision-support tool.

1. 연구 배경

척추관 협착증(spinal stenosis)은 고령 인구에서 흔히 발생하는 대표적인 퇴행성 척추 질환으로, 신경 구조물이 압박되어 허리 통증, 신경학적 증상, 하지 방사통 및 보행 장애를 유발한다[1]. 특히 중심관 협착과 신경근관 협착은 신경근 압박의 주요 원인이 되며, 적절한 진단과 등급화는 치료 방침 결정 및 예후 예측에 있어 매우 중요하다. 그러나 현재 임상에서는 MRI 영상에 기반한 전문의의 주관적 시각 판독에 크게 의존하고 있으며, 판독자 간 해석 차이와 변동성이 발생하는 한계가 있다[2]. 이는 진단의 표준화와 객관성 확보에 걸림돌이 되고 있다.

최근 인공지능기반 영상 분석 기술의 발전은 이러한 문제를 해결할 수 있는 대안으로 주목받고 있다. AI 모델은 방대한 영상 데이터를 학습하여 병변의 탐지 및 분류 작업을 자동화할 수 있으며, 의료 영상 판독 과정의 일관성과 재현성을 향상시키는 데 기여할 수 있다. 또한 임상적 경험이 적은 전공의나 지역 중소병원에서도 일관된 판독을 지원할 수 있어 의료 격차 해소에도 기여할 수 있다. 기존 연구에서도 객체 탐지 모델을 척추 MRI 영상 분석에 적용하여 디스크 병변이나 협착 부위를 검출한 사례들이 보고되고 있다[3]. 그러나 대부분의 연구는 병변 검출에 국한되거나, 협착의 중증도를 정량적으로 분류하는 시도는 제한적이었다.

따라서 본 연구에서는 T2 강조 MRI 영상을 대상으로, 중심관 및 신경근관 영역을 자동으로 탐지하고, 탐지된 영역에 대해 협착 정도를 네 단계로 분류하는 Detection–Classification 통합 인공지능 파이프라인을 제안한다. 이를 통해 협착증의 자동 진단 및 등급화를 실현하고, 임상의의 판독 부담을 경감하며 진단 표준화를 도모하고자 한다.

2.연구 방법

본 연구에 사용된 요추 T2 강조 MRI 영상은 가톨릭대학교 성모병원 기관생명윤리위원회(IRB)의 심의 및 승인을 받아 수집되었으며, 후향적 연구로서 사전 동의는 면제되었다.

데이터셋 분할은 환자 단위를 기준으로 하였으며, 학습:검증:성능 평가 = 8:1:1의 비율로 구성하였다. 학습 세트는 모델 훈련에, 검증 세트는 하이퍼파라미터 조정 및 모델 선택에, 성능 평가 세트는 독립적인 최종 검증에 사용하였다.

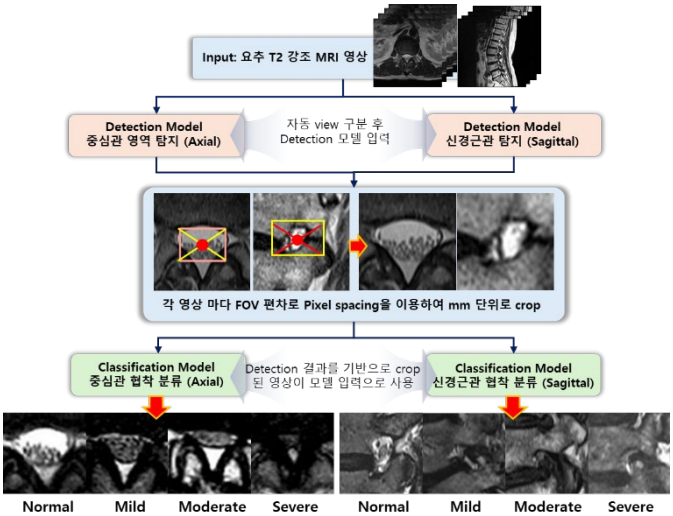


그림 1. 연구 전체에 대한 프로세스

연구 절차는 크게 탐지 단계와 분류 단계로 구성되었다. 먼저 첫번째 단계인 탐지 단계에서는 Axial 및 Sagittal T2 영상에서 척추 중심관과 신경근관 영역을 탐지하기 위해

YOLOv11 기반 객체 탐지 모델을 학습하였다. Bounding Box 라벨링은 영상의학과 전문의가 직접 수행하여 신뢰성을 확보하였다. YOLOv11은 최신 객체 탐지 네트워크로, 본 연구에서는 협착 부위의 위치를 자동 검출하는 데 활용되었다. 이때, Axial View에서는 중심관 영역을 Sagittal View에서는 신경근관 영역을 검출하여 영상별 특성에 최적화된 탐지 성능을 확보하였다. 탐지 모델의 학습 파라미터는 입력 크기 640×640, 학습률 0.0002, 배치 크기 64로 설정하였으며, 최적화 함수는 SGD를 사용하였다. 모델은 PyTorch 2.5.1 환경에서 학습되었고, NVIDIA A100 80GB GPU에서 구동되었다.

두번째 분류 단계에서는 탐지된 영역에 대해 pixel spacing 정보를 고려하여 일정 크기로 crop하였으며, crop된 영상은 분류 모델의 입력 데이터로 사용되었다. 분류 모델은 DINOv2 기반으로 구축하였으며, 협착 정도를 Normal, Mild, Moderate, Severe 네 단계로 분류하도록 학습되었다. 분류 모델의 학습 파라미터는 입력 크기 224×224, 학습률 1e-5, 배치 크기 16으로 설정하였으며, Backbone은 Vision Transformer(ViT)를 사용하였다. DINOv2 모델 또한 PyTorch 2.5.1 환경에서 동일한 GPU 자원을 활용하여 학습되었다.

3. 연구 결과

본 연구에서 개발한 척추관 협착 탐지–분류 파이프라인의 성능은 탐지 단계에서 Precision, Recall, mAP를, 분류 단계에서 Accuracy, Sensitivity, F1-score 지표를 통해 평가하였다. 각 단계별 성능 지표는 표 1와 2에 나타내었다. 탐지 단계에서는 중심관 탐지의 Precision 0.994, Recall 0.990, mAP 0.995을 기록하였으며, 신경근관 탐지는 Precision 0.751, Recall 0.862, mAP@0.5 0.833로 중심관에 비해 Precision이 다소 낮았다.

분류 단계에서는 중심관 협착 분류의 평균 Accuracy 0.6930, F1-score 0.6353을 보였으며, 신경근관 협착 분류에서는 평균 Accuracy 0.7834, F1-score 0.5714으로 상대적으로 높은 정확도를 나타냈다.

표1. Detection 모델 결과

Model	Location	Precision	Recall	mAP50
Detection	중심관	0.994	0.990	0.995
	신경근관	0.751	0.862	0.833

표2. Classification 모델 결과

Model	Location	Accuracy	Sensitivity	F-score
Classification	중심관	0.6930	0.6516	0.6353
	신경근관	0.7834	0.6246	0.5714

그림 2은 실제 환자 MRI 영상에서 본 연구의 파이프라인을 적용한 결과를 시각적으로 제시한 것이다. 중심관과 신경근관 영역이 자동으로 탐지되었으며, 탐지된 영역을 기반으로 정상(normal)과 중등도(moderate) 협착이 분류된 사례를 보여준다. 이는 본 연구 파이프라인이 임상 영상에서 협착 위치와 중증도를 동시에 제시할 수 있음을 확인한 결과이다.

본 연구에서 제안한 파이프라인은 중심관 탐지에서 매우 높은 성능을 기록하였으나, 신경근관 탐지에서는 Precision이 상대적으로 낮았다. 이는 신경근관 영역이 해부학적으로 협소하고 주변 구조물과의 경계가 불명확하여 라벨링과 학습 모두에 어려움이 있었기 때문으로 판단된다. 따라서 신경근관 탐지 성능을 향상시키기 위해서는 추가 데이터 확보와 다기관 영상 기반의 학습이 필요하다

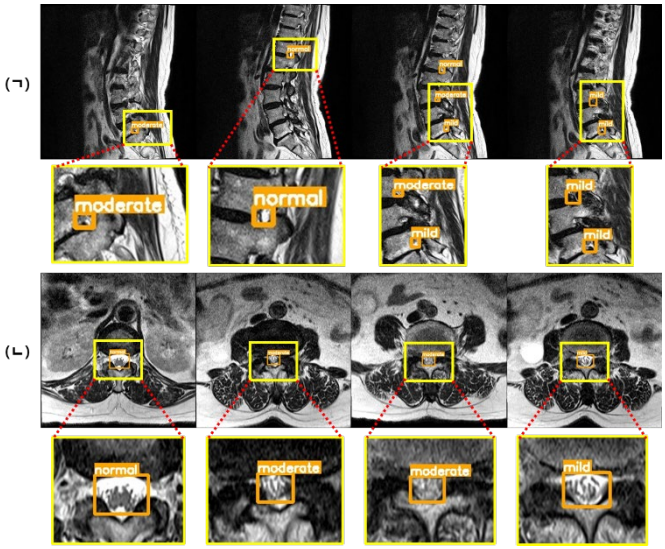


그림2. 요추 MRI를 본 연구 파이프라인에 적용한 결과 예시 (ㄱ)Sagittal영상에서의 결과, (ㄴ)Axial 영상에서의 결과

또한 분류 단계에서는 DINOv2 모델이 일정 수준 이상의 분류 성능을 보였으나, Accuracy와 F1-score가 0.7 미만으로 나타난 fold가 존재하였다. 이는 클래스 불균형, 영상 해상도의 차이, 환자별 해부학적 변이 등이 주요 요인으로 해석된다. 향후 데이터 증강(data augmentation) 기법을 통한 균형 보정, 세밀한 전처리 과정, 다중 모델 앙상블 접근 등이 성능 개선에 기여할 것으로 기대된다.

본 연구는 요추 MRI 영상에서 척추관 협착 부위를 자동 검출하고 중증도를 정량적으로 분류할 수 있는 탐지–분류 파이프라인을 구축하였다. 중심관 탐지는 높은 성능을 보였으나, 신경근관 탐지에서는 Precision이 낮아 추가적인 데이터 확보와 모델 개선이 요구되었다. DINOv2 기반 분류 모델은 임상 적용 가능한 수준의 성능을 보였으나, 일부 fold에서는 Accuracy와 F1-score가 낮아 라벨 불균형, 영상 해상도 차이, 해부학적 변이 등이 제한 요인으로 작용하였다. 제안된 파이프라인은 척추관 협착의 자동화된 탐지와 등급화를 가능하게 하며, 임상 진단 보조 도구로 활용될 잠재력을 지닌다.

4. Acknowledgements

이 연구는 정부 (과학기술정보통신부, 산업통상자원부, 보건복지부, 식품의약품안전처)의 재원으로 범부처전주기의료기기연구개발사업단의 지원을 받아 수행된 연구임. (과제고유번호: 1711196789, RS-2023-00252804)

5.참고 문헌

[1] S. Genevay, and S. J. Atlas. "Lumbar spinal stenosis." Best Practice & Research Clinical Rheumatology, Vol. 24, No. 2, p.253–265, 2010

[2] G. Andreisek, J. Hodler, and J. Steurer. "Uncertainties in the diagnosis of lumbar spinal stenosis." *Radiology*, Vol. 261, No. 3, p.681–684, 2011

[3] T. Wang, J. Li, and S. Zhang. "Machine learning and deep learning for diagnosis of lumbar spinal stenosis: systematic review and meta-analysis." Journal of Medical Internet Research, Vol. 26, No. 1, p.e54676, 2024

양자화학 기반 다중 모달 분자 표현을 활용한 약물 간 상호작용 및 처방 예측 연구

박서은* 김유진 홍참길

한동대학교 전산전자공학부

A Study on Drug-Drug Interaction Prediction and Drug Recommendation Using Quantum Chemistry-Based Multimodal Molecular Representations

Seoeun Park* Yujin Kim Charmgil Hong

School of Computer Science and Electrical Engineering, Handong Global University, Korea

{ *22201019, 22200150, charmgil }@handong.ac.kr

Abstract

Drug–drug interactions (DDIs) in polypharmacy remain a leading cause of preventable adverse effects. Existing recommendation models based on discrete or graph representations often fail to capture the electronic characteristics underlying molecular interactions. This study proposes a multimodal framework that integrates patient medical records, Electrostatic Potential (ESP) maps, and substructure-based molecular encoders to jointly predict therapeutic relevance and DDI risk. Experiments on the MIMIC-III dataset demonstrate substantial reductions in DDI rate and significant improvements in F1 and Jaccard scores, underscoring the potential of ESP-informed molecular representations for safer, more reliable prescriptions.

1. 서론

약물 간 상호 작용(Drug-Drug Interactions, DDIs)은 하나의 약물이 다른 약물의 약리 효과를 변화시켜 예기치 못한 부작용을 유발하는 현상으로, 의료 현장에서 빈번하게 발생하는 약물 관련 위해의 주요 원인이다. 2024년 3월까지 미국 식품의약국 부작용 보고 시스템(FDA Adverse Event Reporting System, FAERS)에 보고된 177,174건의 DDI 사례 중 44%가 입원으로 이어졌으며, 8.37%는 사망으로 귀결되었다[1]. 이러한 수치는 다중 약물 처방 시 DDI를 사전에 예측하고 예방하는 체계의 필요성을 보여준다. 이에 따라 최근 임상 데이터와 분자 정보를 활용하여 잠재적 DDI를 예측하고, 안전한 약물 조합을 제안하는 자동화된 약물 추천 모델들이 활발히 연구되고 있다[2, 3]. 그러나 이러한 모델이 실제 임상 환경에서 유효하게 활용되기 위해서는 치료적 적합성과 처방 안전성이라는 두 가지 목표를 동시에 달성해야 한다.

DDI는 분자 간의 전자적 상호작용, 즉 전하 분포와 전기적 인력이 서로 영향을 주는 과정에서 발생한다[4]. 그러나 대부분의 약물 추천 모델은 원자와 결합 정보를 이용한 그래프 신경망(Graph Neural Network, GNN) 구조에 기반하며, 분자 내 정전기적 특성이나 전하 분포와 같은 물리화학적 속성을 직접적으로 반영하지 못한다는 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해서는 단순한 구조적 표현을 넘어, 분자의 전자적 특성을 정량적으로 포착할 수 있는 방법이 필요하다. 또한, 처방의 개인화를 위해서는 환자의 임상적 맥락과 약물의 분자적 특성을 동시에 고려하는 통합적 접근이 요구된다.

이에 본 연구는 정전기 전위(Electrostatic Potential, ESP)[5] 정보의 약물 표현 학습을 새롭게 제안한다. ESP는 단위 양전하가 분자 표면에서 갖게 되는 전위를 수치화함으로써, 분자 간 인력과 반발 특성을 직접적으로 포착한다. 이를 통해 약물 분자 간 전기적 충돌 가능성이 높은 부위를 정밀하게 식별할 수 있으며, 이는 곧 DDI 발생 위험을 설명하는 핵심 단서가 된다. 따라서 ESP 기반 분자 표현은 단순한 구조적 표현을 넘어, 약물 간 상호작용 위험을 완화하고 임상적 처방의 안전성을 향상시킬 수 있는 유효한 대안으로 기대된다. 이를 바탕으로, 본 논문에서는 환자의 임상 기록과 약물의 전자 및 구조적 특징을 통합한 다중 모달리티 예측 방법을 제안한다(그림 1).

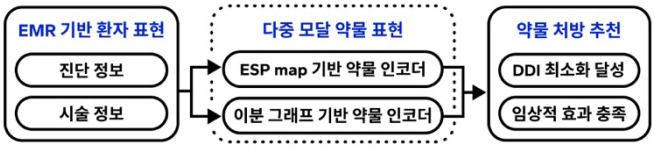


그림 1. 모델 개요도

2. 연구 방법

제안하는 접근 방법은 그림 1과 같이, 약물의 전자·구조적 표현과 환자의 임상 데이터를 통합하여 DDI 위험과 처방 적합성을 동시에 예측하는 다중 모달리티 프레임워크로 구성된다. 본 절에서는 모델의 주요 구성 요소와 학습 절차를 순차적으로 기술한다.

2.1. Electrostatic Potential (ESP) Map 생성

약물 분자의 전자적 특성을 반영하기 위해 양자화학 기반의 정전기 전위(Electrostatic Potential, ESP) 맵을 생성한다. 그림 2는 이러한 ESP 맵 생성 및 임베딩 추출 과정을 개략적으로 나타낸다. 먼저, 각 약물의 분자 구조를 3차원으로 최적화한 뒤[1], 밀도 범함수 이론(Density Functional Theory, DFT)[7] 계산을 수행[2]하여 분자 표면의 전위 분포를 산출한다. 이후, ESP 맵을 0.25Å 간격으로 분절(slice)하여 3차원 분자 구조를 근사하는 2차원 전위 이미지 시퀀스를 생성하고, 이를 비전 트랜스포머(Vision Transformer) 인코더에 입력하여 전자적 분자 특징을 추출한다.

[1] Avogadro[6]를 사용하여 SMILES 형태로 주어지는 분자 구조를 최적화.

[2] ORCA[8]를 이용해 B3LYP 수준의 DFT 계산을 수행하고, 결과는 Multiwfn[9]으로 시각화.

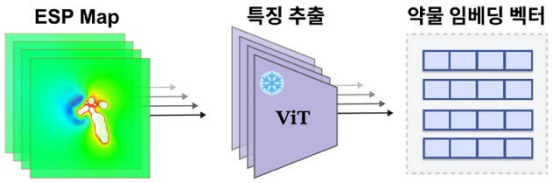


그림 2. ESP 맵 기반 약물 임베딩 추출 개요도

2.2. 다중 모달리티 기반 약물 상호작용 및 처방 예측

제안하는 모델의 입력은 세 가지 모달리티로 구성된다. 첫째, 전자의무기록 데이터는 환자의 진단, 시술, 처방 이력을 포함하며, 환자별 입원 단위로 시계열 입력을 구성한다. 둘째, 정전기 전위를 나타내는 ESP 맵을 통해 약물 분자 표면의 인력 및 반발 특성을 반영한다. 셋째, 이분 그래프(bipartite graph) 형태의 지식 기반을 활용하여, DDI 유발과 관련된 약물-부분구조 관계를 모델에 통합한다. 이는 SafeDrug[2] 방식의 확장으로, 약물의 지역적 화학 구조 정보를 효과적으로 반영한다. 두 약물 모달리티에서 추출된 임베딩은 요소별 곱(element-wise) 메커니즘을 통해 융합되며, 이를 기반으로 모델은 DDI 위험을 최소화하면서 환자 상태에 적합한 약물 조합을 도출한다.

3. 실험 결과 분석 및 결론

제안하는 다중 모달리티 모델의 성능을 검증하기 위해 임상 데이터를 활용한 처방 예측 실험을 수행하였으며, 약물 간 상호작용 위험(안전성)과 처방 유효성 측면에서 기존 그래프 기반 모델과의 성능을 비교하였다. 실험에는 공개 중환자실 전자의무기록 데이터베이스 MIMIC-III[10]를 사용하였다. 해당 데이터는 진단, 시술, 약물 처방 등 임상 정보를 포함하며, 연구에서는 환자 입원 단위를 기준으로 구성하였다. 표 1은 데이터셋의 주요 통계를 요약한다.

비교를 위해 그래프 기반 약물 추천 모델인 SafeDrug[2]와 MoleRec[3]을 베이스라인으로 사용하였다. SafeDrug은 분자 구조를 활용한 DDI 제어 모델이며, MoleRec은 약물 부분구조와 질환 간 연관성을 계층적으로 학습하는 접근이다. 성능 평가는 DDI 비율, Jaccard 유사도, F1 점수의 세 지표로 수행하였다. DDI 비율은 예측된 약물 조합 중 임상적으로 위험한 상호작용의 비율을 나타내는 안전성 지표이며, Jaccard 유사도와 F1 점수는 실제 처방과의 일치도를 측정하는 유효성 지표로, Anatomical Therapeutic Chemical 분류 3단계(ATC3) 기준으로 계산하였다. 모든 실험은 bootstrapped sampling으로 10회 반복 수행하였고, 통계적 유의성은 양측 paired t-test로 검증하였다.

3.1. 성능 평가 및 비교 분석

표 2는 제안 모델과 두 기준 방법과의 성능 비교 결과를 요약한다. 제안 모델은 DDI 비율 0.0656, Jaccard 0.7619, F1 0.8504으로 가장 우수한 성능을 기록하였다. MoleRec(DDI: 0.0762, Jaccard: 0.7362, F1: 0.8338) 대비 모든 평가 지표에서 유의미하게 개선되었으며(DDI: p=0.0079, Jaccard: p=0.0153, F1: p=0.0231), 약 14%의 DDI 비율 감소는 임상적 처방 안전성 향상에 기여할 가능성을 보여준다. SafeDrug(DDI: 0.0747, Jaccard: 0.7494, F1: 0.8440)와 비교해서는 DDI 비율과 Jaccard 유사도에서 통계적으로 유의미한 개선이 확인되었다(DDI: p=0.0343, Jaccard: p=0.0376). 약 12%의 DDI 비율 감소는 전자적 특성 반영이 DDI 위험 예측의 정밀도를 향상시켰음을 시사한다.

이러한 결과는 ESP 기반 분자 표현이 약물의 전자적 특성을 통합적으로 반영함으로써 그래프 중심 접근의 한계를 실질적으로 보완했음을 보여준다. 그 결과, 단순 구조 유사성에 의존하던 두 기준 방법보다 처방 안전성과 임상 유효성의 균형을 보다 안정적으로 달성하였다. 나아가 임상 데이터와 분자 표현의 결합은 지능형 처방 지원 시스템의 신뢰성과 확장 가능성을 높이는 방향을 제시한다.

항목	크기	항목	크기
총 환자 수 / 방문 수	5,413 / 14,057	방문당 평균 / 최대 시술 수	3.85 / 50
진단 / 시술 / 약물 개수	1,942 / 1,399 / 250	방문당 평균 / 최대 약물 수	7.67 / 68
평균 / 최대 방문 수	2.60 / 29	총 약물 상호작용 쌍 수	4,918
방문당 평균 / 최대 진단 수	10.38 / 128	총 부분구조 수	442

표 1. 데이터 통계

모델	DDI 비율	Jaccard 유사도	F1 점수
MoleRec	0.0762 ± 0.003	0.7362 ± 0.013	0.8338 ± 0.009
SafeDrug	0.0747 ± 0.003	0.7494 ± 0.009	0.8440 ± 0.007
제안 모델	**0.0656 ± 0.006**	**0.7619 ± 0.003**	**0.8504 ± 0.002**

표 2. MIMIC-III 기반 성능 비교 (데이터셋 DDI 비율: 0.2509)

4. Acknowledgements

본 연구는 2025년 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 SW중심대학사업(2023-0-00055)과 디지털분야글로벌연구지원사업(RS-2024-00431394)의 지원을 받아 수행되었음

5.참고 문헌

[1] Ahmed N, Fatani S, Alahmari A. Drug–drug interactions: A descriptive analysis of FDA Adverse Event Reporting System. Medicine. 2025.
[2] C. Yang, C. Xiao, et al. “Safedrug: Dual molecular graph encoders for recommending effective and safe drug combinations,” arXiv preprint arXiv:2105.02711, 2021.
[3] N. Yang, K. Zeng, et al. “Molerec: Combinatorial drug recommendation with substructure-aware molecular representation learning,” in Proceedings of the ACM web conference 2023, 2023, pp. 4075–4085.
[4] Ben D Snyder, Thomas M Polasek, and Matthew P Doogue. “Drug interactions: principles and practice.” Australian prescriber, 2012.
[5] P. Politzer and J. S. Murray, “The fundamental nature and role of the electrostatic potential in atoms and molecules,” Theoretical Chemistry Accounts, vol. 108, no. 3, pp. 134–142, 2002.
[6] Marcus D Hanwell, Donald E Curtis, et al. “Avogadro: an advanced semantic chemical editor, visualization, and analysis platform.” Journal of cheminformatics, 4:1–17, 2012.
[7] R. M. Dreizler and E. K. Gross, “Density functional theory: an approach to the quantum many-body problem.” Springer Science & Business Media, 2012.
[8] Frank Neese. “Software update: The orca program system—version 6.0.” Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Molecular Science, 15(2):e70019, 2025.
[9] Tian Lu and Feiwu Chen. “Multiwfn: A multifunctional wavefunction analyzer.” Journal of computational chemistry, 33(5):580–592, 2012.
[10] Alistair EW Johnson, Tom J Pollard, et al. “Mimic-iii, a freely accessible critical care database.” Scientific data, 3(1):1–9, 2016.

Multi-variate Time Series Transformer 기반 패혈증 조기 예측 모델 개발

최예은[1,2], 신항식[1,2*]

[1]울산대학교 의과대학 서울아산병원 정보통계의학교실

[2]울산대학교 의과학과

Early Sepsis Prediction Models with Multi-variate Time Series Transformer

Ye Eun Choi[1,2], Hangsik Shin[1,2,*]

[1]Department of Medical Informatics and Statistics, Asan Medical Center, Brain Korea 21 Project, University of Ulsan College of Medicine, Seoul, Korea

[2]Department of Medical Science, Graduate School, University of Ulsan, Seoul, Korea

[*]hangsik.shin@amc.seoul.kr

Abstract

Sepsis is a life-threatening immune response caused by infection, and its early detection is critical due to its high mortality. In this study, a Transformer encoder–based early prediction model for sepsis was developed using the 2019 PhysioNet Challenge dataset, which contains multivariate time-series data from approximately 40,000 patients. The model was trained to perform a classification task using hourly labeled data according to the presence or absence of sepsis occurring within six hours prior to onset. The proposed model achieved an area under the receiver operating characteristic curve of 0.924 and an area under the precision–recall curve of 0.182.

1. 연구 배경

패혈증은 감염에 대한 조절되지 않은 면역 반응으로 인해 발생하는 장기 기능 장애로, 세계 패혈증 사망률은 40~70%, 국내 패혈증 사망률은 24~39%로 집계될 만큼 높은 사망률을 지닌다 [1]. 패혈증 발생을 빠르게 의심하고 적절한 조치를 취하는 것은 환자의 생존율 향상에 중요하다. 따라서 환자의 여러 생체정보를 활용해 패혈증 발생을 조기에 예측하는 연구가 활발히 진행중이다. 그러나 증상 악화에 따른 생리적 변화가 점진적으로 발생하며, 이러한 변동이 임상적으로 중요한 판단 근거가 됨에도 불구하고 많은 조기 예측 모델들은 연속적인 시계열 변동을 반영하는 데 한계를 가진다 [2,3]. 따라서 본 연구는 다변량 시계열 특징을 반영할 수 있는 인공지능 모델인 Multi-variate time series Transformer (MTS-TR)[4]를 적용하여 패혈증 조기 예측을 수행하고 시계열 특성 반영 모델을 통한 성능 향상 가능성을 검증한다.

2.연구 방법

2.1 데이터

연구에 사용한 데이터는 2019 PhysioNet Challenge에 제공되었던 데이터로, 공개된 데이터는 두 기관의 중환자실에서 수집되었으며, set A와 set B로 구분되었다 [5]. set A는 훈련데이터로 사용되며, 20,336명(패혈증 1,790명)의 환자 정보를 포함하고, set B는 평가데이터로 사용되며, 20,000명(패혈증 1,142명)의 환자 정보를 포함한다. 환자 정보에는 6개의 인구통계 정보, 8개의 활력징후 정보, 26개의 임상화학검사 값이 제공되며, 데이터와 패혈증 레이블은 1시간 간격으로 기록되었다 (표1). 패혈증 환자의 패혈증 레이블은, 패혈증 발생 시점으로부터 6시간 전을 기준으로 이전은 '0'으로, 그 이후는 모두 '1'로 기재되어, 패혈증 발생 6시간 전에 예측하도록 설계되었다. 패혈증이 아닌 환자의 패혈증 레이블의 경우 모두 '0'으로 기재되었다.

본 연구에 사용된 데이터는 수집 시에 Beth Israel Deaconess Medical Center(set A), Emory University Hospital(set B) 각 해당 연구윤리위원회(Institutional review board, IRB)의 승인을 받아 수집되었다 [5].

2.2 데이터 전처리 및 결측값 대체

표1은 본 연구에 사용된 변수와 변수별 결측 비율을 보여준다. 전처리시 결측값은 모두 각 변수별 중앙값으로 대체되었다. 환자마다 측정된 시간 길이(sequence length)는 다르기 때문에, 입력데이터를 훈련데이터의 최대 길이인 336으로 zero-padding 하여 통일 후, masking되었다. 이때, 유효한 값이 존재하지 않는 시점의 레이블은 '-100'으로 두었으며, 이는 예외 처리되어 학습 및 평가에 반영되지 않는다.

표 1. 사용된 변수 및 결측 비율

Features	Description	Missing ratio	
		set A	set B
Demographics			
Age	Years (14-100, 100 for patients aged≥90)	0.000	0.000
Gender	Female (0), Male (1)	0.000	0.000
Unit1	Administrative identifier for MICU	0.489	0.296
Unit2	Administrative identifier for SICU	0.489	0.296
HospAdmTime	Hours between hospital admit and ICU admit	0.000	0.000
ICULOS	ICU length-of-stay (hours since ICU admit)	0.000	0.000
Vital signs			
HR	Heart rate (beats per minute)	0.077	0.121
O_2Sat	Oxygen saturation (%)	0.120	0.141
Temp	Body temperature (°C)	0.662	0.661
SBP	Systolic blood pressure (mmHg)	0.152	0.139
MAP	Mean arterial pressure (mmHg)	0.102	0.148
DBP	Diastolic blood pressure (mmHg)	0.481	0.139
Resp	Respiration rate (breaths per minute)	0.098	0.211
$EtCO_2$	End tidal carbon dioxide (mmHg)	1.000	0.924
Lab tests			
BaseExcess	Measure of excess bicarbonate (mmol/L)	0.896	0.998
HCO_3	Bicarbonate (mmol/L)	0.919	0.998
FiO_2	Fraction of inspired oxygen (%)	0.858	0.977
pH	pH	0.885	0.978
$PaCO_2$	Partial pressure of carbon dioxide from arterial blood (mmHg)	0.912	0.978
SaO_2	Oxygen saturation from arterial blood (%)	0.950	0.981
AST	Aspartate transaminase (IU/L)	0.985	0.982
BUN	Blood urea nitrogen (mg/dL)	0.918	0.945
Alkalinephos	Alkaline phosphatase (IU/L)	0.985	0.982
Calcium	Calcium (mg/dL)	0.950	0.932
Chloride	Chloride (mmol/L)	0.917	0.994
Creatinine	Creatinine (mg/dL)	0.934	0.945
Bilirubin_direct	Bilirubin direct (mg/dL)	0.999	0.998
Glucose	Serum glucose (mg/dL)	0.878	0.778
Lactate	Lactic acid (mg/dL)	0.966	0.981
Magnesium	Magnesium (mmol/dL)	0.922	0.952
Phosphate	Phosphate (mg/dL)	0.950	0.971
Potassium	Potassium (mmol/L)	0.891	0.923
Bilirubin_total	Total bilirubin (mg/dL)	0.988	0.982
TroponinI	Troponin I (ng/mL)	0.999	0.982
Hct	Hematocrit (%)	0.882	0.942
Hgb	Hemoglobin (g/dL)	0.912	0.941
PTT	Partial thromboplastin time (seconds)	0.952	0.990
WBC	Leukocyte count (count×10^3/μL)	0.925	0.947
Fibrinogen	Fibrinogen concentration (mg/dL)	0.992	0.994
Platelets	Platelet count (count×10^3/μL)	0.935	0.947

MICU: Medical Intensive Care Unit; SICU: Surgical Intensive Care Unit; ICU: Intensive Care Unit.

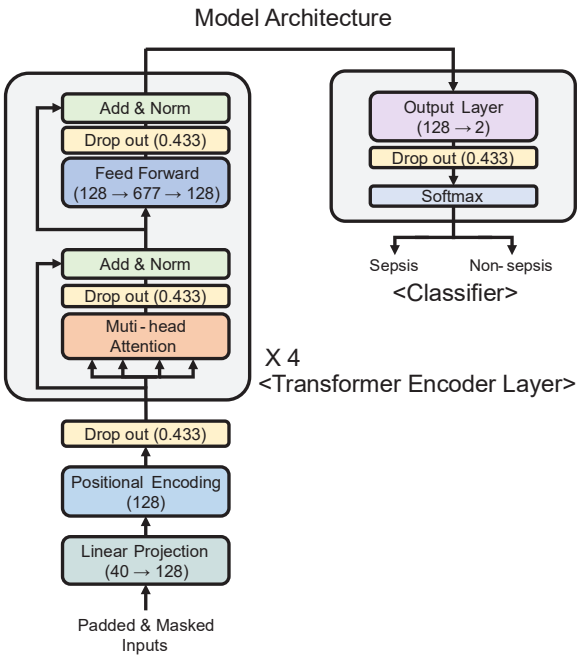


그림 1. Transformer-based 패혈증 조기 예측 모델 구조

2.3 모델 개발

패혈증 발생 6시간 전에 따라 레이블링이 된 데이터를 이용해, 패혈증 조기예측 모델은 그림 1과 같이 개발되었다. Transformer encoder와 Classification 작업을 수행하는 레이어를 연결하여 패혈증과 패혈증이 아님을 구분하였다. 입력데이터는 시계열의 길이에 따라 padding 및 masking 처리를 거쳤으며, 다변량 시계열(multi-variate time series) 특성을 반영하기 위해 feature 차원(40)을 embedding 차원(128)에 맞추어 선형 변환(linear projection)을 하였다.

모델의 학습을 위해, 훈련데이터와 검증데이터는 8:2로 나누었으며, 훈련데이터와 검증데이터는 서로 겹치는 환자 없이 비슷한 비율의 패혈증 환자가 포함되도록 설정되었다. 모델의 최적화 과정은 *Optuna 4.1.0* Python 패키지를 사용하여 50회 진행하였으며, 최적화된 hyperparameter는 다음과 같다; embedding 차원: 128; attention head 수: 4; encoder layers 수: 4; feed-forward 차원: 677; drop out rate: 0.433; 활성화 함수: 'ReLU'; batch 크기: 77; L2 정규화: 2.94; 학습률: 6.61 × 10^{-5}; optimizer: 'AdamW'. 모델 학습 시, 모든 batch에 패혈증 환자가 batch 크기의 8%만큼 존재하도록 stratified-batch를 도입하였으며, 검증데이터의 AUC가 20회 동안 성능 향상이 없을 경우 학습을 조기 중단하는 early-stopping을 도입하였다.

모델 평가를 위해, AUC (area under the receiver operating characteristic curve), AUPRC (area under the precision–recall curve), accuracy, sensitivity, specificity, F1 score를 계산하였다. 모든 모델 개발 과정은 Anaconda framework에서 *Python 3.10.16* 및 *Torch 2.5.1+cu118*을 사용하여 구현되었다.

3. 연구 결과

패혈증 6시간 전 예측 모델 성능은 AUC 0.924, AUPRC 0.182, accuracy 0.952, F1 score 0.597의 성능으로, 2019 PhysioNet Challenge에 당시 참가한 다른 연구 중 AUC 성능이 보고된 연구들의 성능과 비교하였을 때, 상대적으로 높은 성능임을 확인하였다 (그림 1, 표 2). 그러나, 보고되지 않은 지표들과, 대회의 Utility-score를 통한 직접적인 비교가 어려움에 한계가 있다 [5].

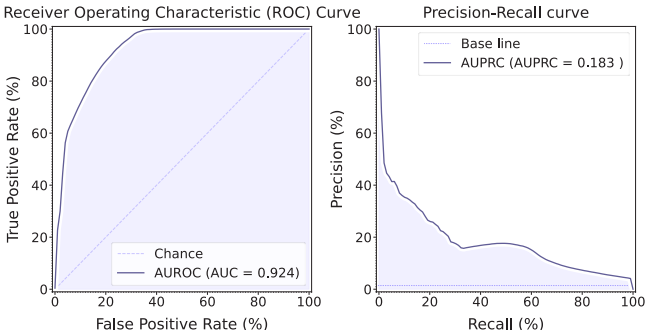


그림 2. 패혈증 조기 예측 모델 성능

표 2. 모델 성능 비교

Study	Base model	AUC	AUPRC	ACC	Sen	Spe	f1
Our study	MTS-TR	**0.924**	**0.182**	**0.952**	0.471	0.959	**0.597**
J. Morrill [6]	GBM	0.868	-	-	-	-	-
M. Zabihi [7]	EoXGB	0.833	-	0.844	-	-	-
B. Lee [8]	LSTM+TR	0.812	0.083	0.889	-	-	0.123
L. Tran [9]	AE+LSTM+RF	0.82-	0.08-	0.9-	-	-	0.16

AUC: area under receiver operating characteristic curve; AUPRC: area under precision-recall curve; Acc: accuracy; Sen: sensitivity; Spe: specificity; F1: F1 score; MTS-TR: Multi-variate time series transformer; GBM: gradient boosting machine; EoXGB: ensemble of XGBoost; LSTM: long short term memory; TR: transformer; AE: Auto encoder; RF: random forest.

4. 결론 및 토의

본 연구는 self-attention 메커니즘을 활용한 Transformer 기반 다변량 시계열 데이터의 학습 구조를 통해 우수한 성능을 확보하였다. 제안한 모델은 생체 정보의 시간적 연결성을 학습하여 예측 성능을 향상시켰으며, 이는 Transformer 구조의 적용이 시계열 기반 임상 예측 문제에서도 유효함을 확인한 결과로 볼 수 있다. 향후 연구에서는 DeepSHAP을 활용해 입력 변수의 기여도를 분석함으로써 임상적 해석 가능성을 검증하고, 외부 검증 데이터를 통해 모델의 일반화 성능 및 실제 임상 적용 가능성을 추가로 평가할 예정이다.

5. Acknowledgements

이 연구는 정부(과학기술정보통신부, 산업통상자원부, 보건복지부, 식품의약품안전처)의 재원으로 범부처전주기의료기기연구개발 사업단의 지원과 서울아산병원 아산생명과학연구원의 지원을 받아 수행하였음. (RS-2022-00141473 and 2024IP0021)

6.참고 문헌

[1] 질병관리청, "국내 패혈증 환자 관리 개선을 위한 심층조사 결과(1차년도).", *주간 건강과 질병*, Vol 13, No.37, p.2750-2760, 2020.
[2] C. Albert, et al., "Early prediction of sepsis using an XGBoost model with single time-point non-invasive vital signs and its correlation with C-reactive protein and procalcitonin: A multi-center study.", *Intelligence-Based Medicine*, Vol 11, 2025.
[3] L. Grinsztajn, et al., "Why do tree-based models still outperform deep learning on tabular data?", *NIPS'22: Proceedings of the 36th International Conference on Neural Information Processing Systems*, No. 37, p.507-520, 2022.
[4] Z. George, et al., "A Transformer-based Framework for Multivariate Time Series Representation Learning.", *Proceedings of the 27th ACM SIGKDD conference on knowledge discovery & data mining*, p.2114–2124, 2020
[5] M. Reyna, et al., "Early Prediction of Sepsis from Clinical Data: The PhysioNet/Computing in Cardiology Challenge 2019" (version 1.0.0). PhysioNet. RRID:SCR_007345, 2019.
[6] J. Morrill, et al., "The Signature-Based Model for Early Detection of Sepsis From Electronic Health Records in the Intensive Care Unit.", *2019 Computing in Cardiology (CinC)*, Singapore, p.1-4, 2019.
[7] M. Zabihi, et al., "Sepsis Prediction in Intensive Care Unit Using Ensemble of XGboost Models.", *2019 Computing in Cardiology (CinC)*, Singapore, p.1-4, 2019.
[8] B. Lee, et al., "Improving the Performance of a Neural Network for Early Prediction of Sepsis.", *2019 Computing in Cardiology (CinC)*, Singapore, p.1-4, 2019.
[9] L. Tran, et al., "Representation Learning for Early Sepsis Prediction.", *2019 Computing in Cardiology (CinC)*, Singapore, p.1-4, 2019.

뇌공학

좌장: 정지훈(충북대학교)

11월 7일 (금) **일강원 101 (15:30-17:00)**

정동화(가톨릭대학교)
Invited 인간-AI 협업을 위한 멀티모달 AI 기반의 임상 및 인지 기능 해석

이병욱(KAIST)
Invited 연결성으로 본 뇌의 원리 – 구조에서 인지 역학까지

Dwivedi Kriti(서울대학교)
Denoising Performance of High-Frequency Neuronal Spike Signal Super-Resolution Reconstruction for Long-Term in Vivo Recording

이정환(광운대학교)
A Cross-Modal Attention-Based Fusion Framework for Emotion Recognition from Facial Images and EEG, ECG

김나리(고려대학교)
Exploring EEG-Based Biomarkers for Body Composition Estimation Using Resting-State Functional Connectivity



정동화 (Dong-Hwa Jeong)
조교수 (Assistant Professor)
가톨릭대학교 인공지능학과 (The Catholic University of Korea, Department of Artificial Intelligence)

인간-AI 협업을 위한 멀티모달 AI 기반의 임상 및 인지 기능 해석
Multimodal AI-based Interpretation of Clinical and Cognitive Functions for Human-AI Collaboration

Abstract

In recent years, the importance of multimodal data, including electroencephalography (EEG), eye-tracking, and medical imaging, has grown significantly in clinical research and practice. While deep learning models effectively capture intrinsic information from complex multimodal data, most models function as "black boxes," making it difficult for clinicians or neuroscientists to trust and utilize their outputs. In this seminar, we introduce methodological efforts to overcome these limitations. We demonstrate interpretable AI approaches through diverse clinical applications: from predicting neurological diseases to assessing cognitive states in various populations by fusing multimodal biosignals.

Brief Biosketch

- **KAIST 정보통신공학과 공학사**
- **KAIST 바이오및뇌공학과 공학석사 및 공학박사**
- **(현) 가톨릭대학교 인공지능학과 및 의료인공지능학과 조교수**
- **(현) 가톨릭대학교 CUK GAIA AI 빅데이터센터 센터장**
- **(전) 가톨릭대학교 디지털새싹사업단장**



이병욱 (Byeongwook Lee)
조교수 (Assistant Professor)
뇌인지과학과, 카이스트 (Department of Brain and Cognitive Sciences, KAIST)

연결성으로 본 뇌의 원리 – 구조에서 인지 역학까지
Exploring brain connectivity: From Brain Architecture to Cognitive Dynamics

Abstract
The brain is an inherently multiscale complex network, spanning from neurons to circuits and large-scale systems. The recent era of connectomics has provided unprecedented opportunities to map structural and functional brain connectivity across multiple scales. However, mapping alone does not reveal how these networks are organized or how they give rise to brain function. To address this gap, computational and theoretical approaches have become indispensable for uncovering the organizational principles of brain networks and for probing how dynamic properties of neural activity emerge from structural connectivity patterns. Together, these advances have converged to form Network Neuroscience—an interdisciplinary field that integrates multiscale and multimodal data, methods, and theory to understand the brain as a networked system. In this talk, I will introduce the past and present of connectomics and network neuroscience, highlight recent progress in brain connectivity mapping and computational modeling, and discuss future directions and challenges for the field.

Brief Biosketch
Dr. Byeongwook Lee is an Assistant Professor in the Department of Brain and Cognitive Sciences at KAIST. Dr. Lee received his B.S. in Electrical Engineering and his M.S. and Ph.D. in Bio and Brain Engineering from KAIST, where he investigated the design principles of complex brain networks. He then completed his postdoctoral training at Stanford University, developing computational models to quantitatively characterize dynamic neural activity during cognitive task performance and applying them to real-world neuroimaging data. Dr. Lee's current research focuses on understanding the mechanisms underlying dynamic neurocognitive processes through computational approaches, with a particular emphasis on how these processes are maintained, compensated, or disrupted in aging populations.
이병욱 교수는 현재 KAIST 뇌인지과학과의 조교수로 재직 중이며, 계산 및 시스템 신경과학 분야를 연구하고 있습니다. 이병욱 교수는 KAIST 바이오및뇌공학과에서 뇌 연결성의 설계 원리 탐구를 주제로 박사 학위를 취득하였습니다. 이후 미국 스탠포드 대학교에서 박사후연구원으로 재직하며, 인지기능 수행 중 뇌에서 발생하는 동적 신경 활동을 정량적으로 분석할 수 있는 계산 모델을 개발하고, 이를 실제 뇌 영상 데이터에 적용하는 연구를 수행했습니다. 이병욱 교수는 이러한 계산 신경과학적 접근을 바탕으로 다양한 신경인지 과정의 뇌 회로 메커니즘을 탐구하고 있으며, 특히 노화 집단을 중심으로 인지 기능 수행 중 뇌의 동역학이 어떻게 보존, 보상, 또는 붕괴되는지를 규명하는 데 주력하고 있습니다.

장기 생체 내 기록을 위한 고주파 신경 스파이크의 초해상화 복원 기반 잡음 제거 평가

Dwivedi Kriti[1], 박성무[2], 강홍기[1*]
서울대학교 의과대학 의공학교실[1]
서울대학교 의과대학 생리학교실[2]

Denoising performance of high-frequency neuronal spike signal super-resolution reconstruction for long-term in vivo recording

Kriti Dwivedi[1], SungMoo Park [2], Hongki Kang[1,*]
Department of Biomedical Engineering, Seoul National University College of Medicine, Korea[1]
Department of Physiology, Seoul National University College of Medicine, Seoul, Republic of Korea[2]
*hongki.kang@snu.ac.kr

Abstract

With the increasing advancements of machine learning in biomedical applications, data complexity, and noise distortions over long-term recording become necessary subsidizations to consider. A supre-resolution reconstruction algorithm can reconstruct a high-frequency neuronal signal from its low-frequency sub-sampled component for lower bandwidth transmission to reduce data complexity. Since the reconstruction only requires small bandwith as input, when exploited with long-term recording and increased noise, the algorithm can also reduce the noise band of the expected output signal. Here, we will evaluate the performance and information retainability of this reconstruction algorithm with respect to conventional denoising algorithms.

1. 연구 배경(Background)

Brain Machine Interfaces (BMIs) are a communication pathway between the brain's neuronal signals and external devices. The BMI technologies can use both spike signals (mostly single-unit spiking activity) and local field potentials to fully understand the brain functions. Integrating machine learning with BMI systems has advanced their implementation across domains like data minimalization, precision of interpretation, and noise reduction. This has significantly improved the reliability of BMI technologies for neuro-prosthetics and rehabilitation processes where precision and dependability are paramount.

Long-term recording of a high-quality multi-channel neuronal signal requires great noise robustness for analysis and diagnostics. Long-term implants are at high risk of noise interference due to biological inference and transmission for prolonged times. These interferences vary the signal-to noise ratio (SNR) in long-term implants; denoising becomes an important task in bio-signal processing[2]. High-quality recorded data tends to be bulky due to higher sampling frequency and resolution causing complications during data transmission. This makes the importance of reducing data complexity necessary.

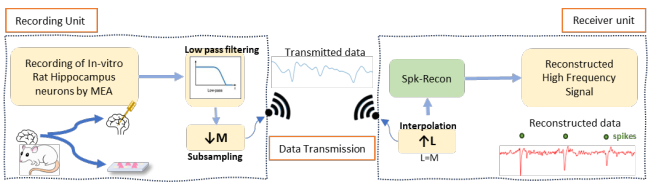


Figure 1. Architecture of Spk-recon application process.

A transformer-based super-resolution algorithm for reducing data complexity, Spk-Recon[1], can perform high-frequency reconstruction of neuronal spike recordings from subsampled low-frequency components of the neuronal data. The recordings were filtered through a 4th-order Butterworth low-pass filter with a cut-off frequency of 200 Hz, subsampled by a factor from 8X to 25X, which reduced the data volume and complexity. The resulting signal can be transmitted to a receiver unit that interpolates the signal upon receiving the data and uses the Spk-Recon algorithm to reconstruct the high-frequency component related to the transmitted subsampled low-frequency neuronal spike signal (Figure 1)[1].

For in-vivo and chronic implants, there is a high possibility of the introduction of noise due to prolonged implantation[2]. Hence, the robustness of the pre-trained Spk-recon algorithm need to be validated for long-term in vivo recording along with the introduction of random white noise. The denoising performance of Spk-Recon will be evaluated with results from conventionally used High-Pass Filtration(HPF) and wavelet transform-based denoising algorithms: Discrete Wavelet Transform(DWT) and Stationary Wavelet Transform(SWT).

In this study, the noise robustness of the recently developed high-frequency spike reconstruction algorithm from the low-frequency, low-sampled recordings, Spk-recon, will be investigated based on perfection in spike detection and shape reconstruction.

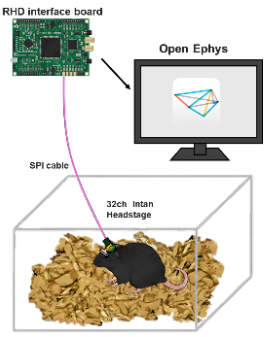


Figure 2. Expermeintal setup for long-term in vivo recording

2.연구 방법(Methodology)

For chronic *in vivo* recordings, a custom shuttle-drive was built by combining stereotrodes, electrode interface board (EIB) and a 3D-printed frame. Stereotrodes were fabricated by twisting and heat-bonding Formvar-coated nichrome wires (A-M Systems). The drive was implanted at least one week before recording. Recordings were conducted singly in home cage after 10 min habituation. Neural signals were acquired using a 32-channel Intan headstage with a wide-band filter (0.1–7,500 Hz) at 30 kHz sampling. The recording was procured from the cg1, cg2 brain region of a freely-moving BL6J mouse for a period of 4 weeks post-surgery. The data collection was approved by the IACUC of SNU: IACUC(SNU-250116-2-3).

The Spk-recon algorithm was trained on 140-channel recordings, primarily derived from the early phase of long-term implantation. Its performance was subsequently assessed using a 35-channel dataset acquired during the later phase of the chronic recording period.

The evaluation dataset was augmented with random white noise following the previously described procedure to add to the effects of intference due to long-term implant. The white noise is incrementally added to the raw recorded signal, starting from 10% of the recorded signal's SD and increasing in multiples of 10% up to 50% of the SD of the recorded signal contributing a change of 23% to the noise rms of the validation dataset. The wavelet denoising methods use the noise-added raw signals with high sampling rate, resulting in higher data size than the Spk-Recon. The wavelet transform was conducted up to 3 levels using bior 1.3 as the mother wavelet, using universal thresholding.

As the spike-related information is necessary to be kept intact with the noise, the evaluation parameters were chosen based on preserving the detected spikes and spike shape and sorting details. Table 2.1. shows the parameters chosen for the performance comparison where TP= True Positives, FP= False Positives, and FN = False Negatives.

Spike Detection		Spike shape
Hit Rate	$TP/TP+FN$	NRMSE* (average spike waveform) Deviation of the spike's average waveform from the GT.
Precision	$TP/TP+FP$	
Jaccard Index*	$\boldsymbol{TP/TP+FP+FN}$	

Table 2.1 Evaluation parameters.

3. 연구 결과(Results)

Jaccard Index best shows the correct reconstruction of spike timestamps by including every possibility of occurance of spike. This makes it the most influencial parameter to compare similarity to the ground truth. Having a higher Jaccard Index ensures robust correlation between the stimuli and the resultant signal reflection. For the Jaccard index and hit rate, the Spk-Recon results have the upper hand even in presence of increasing noise, complying with the ground truth's detected spike timestamps. In case of precision, the Spk-Recon results follow the trends of the wavlet transform-based denoising methods.

Spike shape is a significant parameter as it holds information about the type of data transferred among neurons. Even a minor alteration in the spike shape can significantly change the conveyed information, therefore the resultants should demonstrate minimal deviation from the average spike waveform shape of the ground truth. In contrast to the NRMSE of the conventional denoising methods, the Spk-Recon results were able to maintain a remarkably low NRMSE of the average spike waveform.

The Spk-Recon results are more consistently accurate without deviations through escalated addition of noise surpassing the wavelet denoising results (Figure 3).

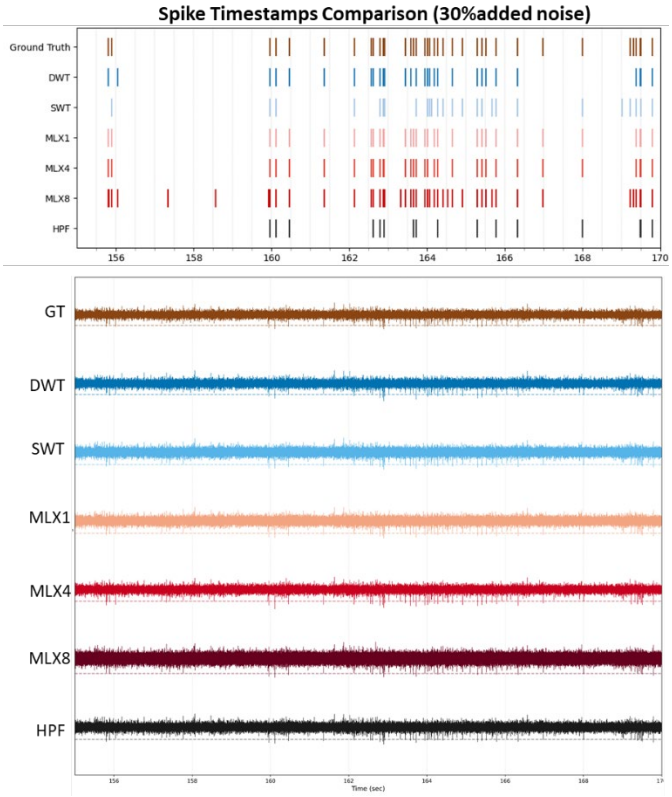


Figure 3. Comparison of spike timestamps using raster plot and signal traces for 30% added noise levels

As the noise level escalates, the Spk-Recon, designed for signal reconstruction, effectively reduces neuronal signal noise. As summarized in Table 3.1, has a clear advantage over the conventional denoising methods due to its consistently higher signal spike information retention and accuracy of sorting performance with the advantage of reducing the data complexity by subsampling (i.e. data compression ratio up to 12.5% of the original size).

Parameters		Conventional Denoising Algorithm			Spk-Recon Model (varying subsampling rate)		
		HPF	SWT	DWT	MLX1	MLX4	MLX8
Data compression rate (compared to original size)		None	None	None	None	25%	12.5%
Spike Detection	Hit Rate	X			⊙	⊙	⊙
	Precision	X	⊙		⊙	⊙	
	Jaccard Index	X			⊙	⊙	
Spike Shape	NRMSE				⊙	⊙	

Table 3.2 Summarization of the evaluation results where, ⊙ = Good performance and X = Exclusion from evaluation

4. Acknowledgements

This work was supported in part by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (No. RS-2024-00416319), and in part by the Interdisciplinary Research Initiatives Program from College of Engineering and College of Medicine, Seoul National University (grant no. 800-20250485).

5.참고 문헌 (References)

[1] Nari Hong, Boil Kim, Jaewon Lee, Han Kyoung Choe, Kyong Hwan Jin, and Hongki Kang. "Machine learning-based high-frequency neuronal spike reconstruction from low-frequency and low-sampling-rate recordings." *Nature Communications* 15, no. 1 (2024): 635.

[2] Ludwig, Kip A., Jeffrey D. Uram, Junyan Yang, David C. Martin, and Daryl R. Kipke. "Chronic neural recordings using silicon microelectrode arrays electrochemically deposited with a poly (3, 4-ethylenedioxythiophene)(PEDOT) film." *Journal of neural engineering* 3, no. 1 (2006): 59.

[3] Baldazzi, Giulia, Giuliana Solinas, Jaume Del Valle, Massimo Barbaro, Silvestro Micera, Luigi Raffo, and Danilo Pani. "Systematic analysis of wavelet denoising methods for neural signal processing." *Journal of Neural Engineering* 17, no. 6 (2020): 066016.

얼굴영상 및 생체신호를 융합한 Cross-Modal Attention 기반 감정 인식 모델

이정환[1†], 강영신[1†], 박철수[1*]

광운대학교 컴퓨터공학과[1]

A Cross-Modal Attention-based Fusion Framework for Emotion Recognition from Facial Images and EEG, ECG

Junghwan Lee[1†], Youngshin Kang[1†], Cheolsoo Park[1*]

Department of Computer Engineering, Kwangwoon University, Korea

*cheolsoopark@kw.ac.kr

†These authors contributed equally

Abstract

This study proposes a multimodal emotion recognition model that integrates Facial images and EEG, ECG. Beyond simple feature-level fusion, the model employs a cross-modal attention mechanism to effectively learn interactions and dependencies among modalities. Facial images and EEG, ECG were simultaneously collected from nine subjects, and experiments were conducted to classify four emotions (anger, happiness, neutral, and sadness). Evaluations using precision, recall, F1-score, and accuracy showed that the proposed multimodal model consistently outperformed unimodal baselines. In particular, the improvement in F1-score was effective in mitigating class imbalance among emotions.

1. 연구 배경

감정 인식은 인간-컴퓨터 사호작용, 정신건강 평가 등 다양한 분야에서 핵심적인 연구 주제로 주목받고 있다. 이러한 연구는 인간의 정서 상태를 파악하는데 그치지 않고, 지능형 시스템과의 상호작용을 통한 개인화된 서비스와 향상된 사용자 경험을 가능하게 하며, 더 나아가 인간의 심리적 건강을 이해하는 데에도 중요한 단서를 제공한다. 특히, 개인의 정서적 상태를 올바르게 이해하는 것은 스트레스, 불안, 우울과 같은 정신건강 문제를 조기 탐지·예방·관리하는데 중요한 역할을 한다. 기존 연구에서는 주로 뇌파(EEG), 심전도(ECG), 얼굴 표정과 같은 단일 모달 신호를 이용한 감정 인식 문제를 해결해 왔으며, 이러한 접근은 감정 상태를 정량적으로 평가하고 자동화된 인식 체계를 구축하는데 유의미한 성과를 보여주었다.

그러나 이러한 단일 모달 접근은 다차원적 특성과 복합적인 생리적 반응을 포함하는 인간의 정서 상태를 충분히 설명하는데 한계가 있다. EEG를 이용한 감정 인식 연구에서는 외 자극에 따른 신경학적 정보를 분석함으로써 정서적 상태에 따른 뇌파 패턴 차이를 효과적으로 규명하는 성과를 보였지만 [1], 피험자 간 변동성과 노이즈에 취약하다는 단점이 있다. ECG를 이용한 연구에서는 심박수 변이도 (Heart Rate Variability, HRV) 특징을 기반으로 한 감정 반응 추적이 이루어졌지만 [2], 미세한 정서적 차이를 파악하는데 한계가 있다. 얼굴영상을 이용한 감정 인식에서는 딥러닝 기반 표정 인식 알고리즘을 통해 감정 분류 정확도를 크게 향상시킨 연구가 보고되었으니 [3], 피험자의 문화적 차이나 가림(occlusion) 등의 영향을 받기 쉽니다.

본 연구에서는 얼굴영상 및 EEG, ECG를 통합한 멀티모달 감정 인식 모델을 제안한다. 기존의 단일 모달 신호를 기반으로 단순한 감정 분석을 수행했던 연구와 달리, 본 연구는 세 가지 이종 신호를 동시에 활용함으로써 감정 상태를 보다 정밀하게 분석할 수 있는 기반을 마련한다. 또한 단순 feature-level 융합을 넘어서 cross-modal attention을 적용하여, 서로 다른 특성을 지닌 모달 간의 상호작용과 의존성을 효과적으로 학습하도록 설계하였다.

본 연구의 제안은 다음과 같다.

- 얼굴영상 및 EEG, ECG를 동시에 활용한 멀티모달 감정 인식 모델
- Cross-Modal Attention을 적용한 feature-level fusion model 적용

2.연구 방법

2.1 데이터셋

본 연구에서는 얼굴영상 및 EEG, ECG가 동시에 수집된 감정 인식 데이터셋을 활용하였다. 데이터 수집은 흰 천과 가림막을 이용하여 외부 자극을 차단한 상태에서 진행되었으며, 피험자에게 4가지 감정("anger", "happiness", neutral", "sadness")을 유발하는 영상을 시청하게 하여 정서 반응을 유도하였다.

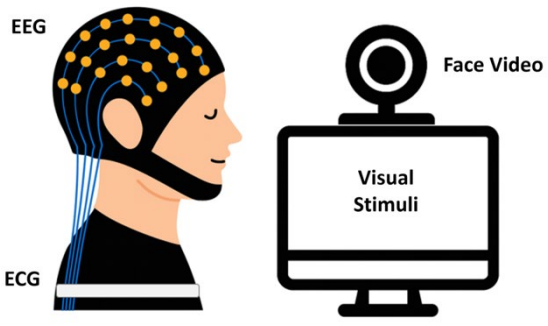


그림 1. 얼굴영상 및 EEG, ECG 측정 과정

실험 과정에서 얼굴영상 및 EEG, ECG를 동시에 기록하였으며, 연구 절차는 IRB 승인(승인 번호: 7001546-202301201-HR(SB)-011-03)을 받았다. EEG는 10-20 시스템을 기반으로 16채널, 600Hz 샘플링 레이트로 수집되었고, ECG는 표준 lead-II 방식으로 기록되었다. 얼굴영상은 정면에 설치된 Logitech C920 webcam을 통해 촬영되었으며, 실험 시작부터 종료 시점까지 연속적으로 수집되었다.

2.2 Feature Extraction

EEG 데이터는 bandpass filter를 거친 후 뇌파의 주파수 특성을 잘 반영하기 위해 θ(4–7 Hz), α(8–13 Hz), β(14–30 Hz), γ(30–45 Hz) 주파수 대역으로 분해하였다. 이후 각 대역에 대해 Common Spatial Pattern (CSP) 기반 특징을 추출하여 감정 상태 간 변별력을 높이고, 뇌파의 공간적 분산 특성을 효과적으로 반영하였다. ECG 신호에서는 peak detection을 통해 R-peak 기반 파생 지표를 추출하여 심박 주기의 미세한 변화를 반영하고 감정 상태에 따른 자율신경계 반응을 보다 정밀하게 분석하고자 하였다. 얼굴영상의 경우, 사전 학습된 모델을 이용해 얼굴 랜드마크를 추출하고, 눈과 입 영역의 미세한 변화를 표정 인식과 관련된 특징 벡터로 변환하였다.

2.3 Fusion Method

추출된 얼굴영상 및 EEG, ECG 특징 벡터는 Cross-Modal Attention 기반 융합 모듈의 [4] 입력으로 사용되었다.

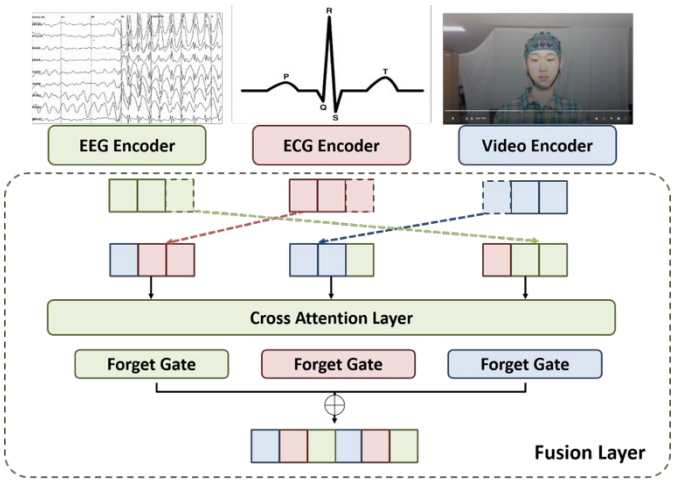


그림 2. Cross-Modal Attention 구조

서로 다른 모달 간 상호작용을 통해 학습된 각 모달의 feature는 Query, Key, Value로 변환되며, Cross-Attention은 다음과 같이 정의된다.

$$Attention\left(Q_j, K_j, V_j\right) = softmax(Q_i K_j^T / \sqrt{d_k}) V_j$$

여기서 Q_j, K_j, V_j는 각 Query, Key, Value 행렬이며 d_k는 Key 차원이다. Attention 결과는 Forget Gate로 전달되어 불필요한 정보는 억제되고 의미 있는 표현만 보존된다. Forget Gate는 시그모이드 활성화 함수를 통해 가중치를 산출하며, 감정 인식에 기여하는 핵심 표현이 강화된다. 본 연구에서는 3개 모달 환경이므로, 각 모달이 나머지 두 모달로부터 얻은 Cross-Attention 결과를 결합한 뒤 게이팅을 거쳐 모달별 정제 표현을 얻는다. 최종적으로 정제된 표현은 Fusion Layer에서 통합되며, 이를 통해 최종 예측값이 산출된다.

3. 연구 결과

본 연구의 결과는 9명의 피험자를 대상으로 세 모달(얼굴영상 및 EEG, ECG)을 동시에 측정하여 수행한 실험을 통해 감정 인식의 분류 성능을 제시한다. 제안된 모델의 성능을 평가하기 위한 지표로는 Precision, Recall, F1-score, Accuracy를 사용하였다 [5]. Precision은 모델이 긍정적으로 예측한 결과 중 실제로 맞은 비율을 의미하며, Recall은 실제 긍정인 사례 중 모델이 올바르게 찾아낸 비율을 나타낸다. F1-score는 Precision과 Recall 간 조화 평균이다. Accuracy는 전체 예측 중 올바르게 분류된 비율을 의미한다.

먼저 각 단일 모달에 대한 분류 성능을 살펴보면 EEG 기반 모델은 Precision ~%, Recall ~%, F1-score ~%, Accuracy ~%를 기록하였으며, 비교적 높은 성능을 보였으나 피험자 간 변동성과 노이즈에 따라 성능 편차가 존재하였다. ECG 기반 모델은 Precision 34.88%, Recall 34.72%, F1-score 34.16%, Accuracy 34.65%로 나타났으며, 안정적인 결과를 보였으나 미세한 감정 구분에서는 한계가 확인되었다. Facial image 기반 모델은 Precision 44.58%, Recall 45.11%, F1-score 44.5%, Accuracy 44.95%를 보였으며 표정 변화에는 민감하게 반응했지만 표정 강도의 차이에 따라 정확도가 저하되는 경향이 있었다.

표 1. 모달리티 별 성능 지표

	Precision	Recall	F1-score	Accuracy
EEG	0.6025	0.6023	0.5985	0.6050
ECG	0.3488	0.3472	0.3416	0.3465
Facial Image	0.4458	0.4511	0.4450	0.4495
EEG+ECG+Facial Image	**0.7251**	**0.6857**	**0.6868**	**0.7083**

다음으로 세 가지 모달을 통합한 멀티모달 모델 성능에서 제안된 Cross-Modal Attention 기반 융합 모델은 Precision 72.51%, Recall 68.57%, F1-score 68.68%, Accuracy 70.83%를 기록하며 단일 모달 모델 대비 전반적으로 향상된 분류 성능을 보여주었다. 이는 각 모달이 가진 고유한 특성과 한계를 상호 보완적으로 반영하여 감정 인식의 향상과 일반화 성능을 동시에 개선하였음을 보여준다. 또한 본 연구에서는 각 모달의 개별 성능과 융합 성능을 체계적으로 비교•분석함으로써, 멀티모달 기반 감정 인식 연구에서 제안된 모델의 실질적 개선 가능성을 실험적으로 검증하였다.

4. Acknowledgements

이 연구는 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원을 받아 수행된 연구임 (No.RS-2023-00229800, 비대면 환경 사용자의 정량적 감정-감성 평가모델 개발 및 양방향 디지털 콘텐츠 적용 상용화) 그리고 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.RS-2023-00244176).

5.참고 문헌

[1] Wang, Yuqi, et al. "EEG-based emotion recognition using a 2D CNN with different kernels." *Bioengineering* 9.6 (2022): 231.

[2] Guo, Han Wen, et al. "Short-term analysis of heart rate variability for emotion recognition via a wearable ECG device." *2015 International conference on intelligent informatics and biomedical sciences (ICIIBMS)*. IEEE, 2015.

[3] Ng, Hong-Wei, et al. "Deep learning for emotion recognition on small datasets using transfer learning." *Proceedings of the 2015 ACM on international conference on multimodal interaction*. 2015.

[4] Jiang, Ming, and Shaoxiong Ji. "Cross-modality gated attention fusion for multimodal sentiment analysis." *arXiv preprint arXiv:2208.11893* (2022).

[5] Yacouby, Reda, and Dustin Axman. "Probabilistic extension of precision, recall, and f1 score for more thorough evaluation of classification models." *Proceedings of the first workshop on evaluation and comparison of NLP systems*. 2020.

안정상태 뇌파의 기능적 연결성을 활용한 체성분 추정 바이오마커 탐색

김나리[1], 이준석[1,2], 박주안[1], 황한정[1,2,3*]

고려대학교 전자및정보공학과[1]

고려대학교 인공지능 스마트융합기술 융합전공[2]

고려대학교 미래전략산업연구원 디지털헬스케어센터[3]

Exploring EEG-Based Biomarkers for Body Composition Estimation Using Resting-State Functional Connectivity

Na-Ri Kim[1], Jun-Seok Lee[1,2], Ju-An Park[1], and Han-Jeong Hwang[1,2*]

[1]Dept. of Electronics and Information Engineering, Korea University, Republic of Korea

[2]Interdisciplinary Graduate Program for Artificial Intelligence Smart Convergence Technology, Korea University, Sejong 30019, Republic of Korea

[3]Digital Healthcare Center, Sejong Institute of Business and Technology (SIBT), Korea University, Sejong 30019, Republic of Korea

[*]hwanghj@korea.ac.kr

Abstract

The objective of this study was to investigate the relationship between the functional connectivity of resting-state electroencephalography (EEG) and body composition indices. In the experiment, we measured seven body composition indices, such as total body water, protein mass, mineral mass, skeletal muscle mass, body fat mass, body mass index (BMI), and body fat percentage. EEG data were recorded from 32 scalp channels while sixty-one subjects alternated between eyes-closed (EC) and eyes-open (EO) conditions for a total of six minutes. To identify EEG-based biomarkers for predicting body composition, Pearson correlation analyses were conducted between body composition indices and EEG coherence values. The results demonstrated that total body water, protein mass, mineral mass, and skeletal muscle mass were significantly negatively correlated with theta coherence in the EC condition, and with both theta and beta coherence in the EO condition. In addition, BMI showed a significant negative correlation with theta coherence in the EC condition, whereas body fat percentage had significantly positive correlations with theta coherence in both EC and EO conditions. These findings suggest that EEG coherence may serve as a potential neural correlate of body composition. Future research will aim to develop a deep learning–based model to predict multiple body composition indices using EEG-derived features.

1. 연구 배경

전 세계적으로 비만과 대사증후군 등 생활습관 관련 질환의 발병률이 꾸준히 증가하고 있다. 특히 비만은 심혈관질환, 당뇨병, 암 등의 주요 위험 요인으로 알려져 있으며, 개인의 수명과 삶의 질을 저하시키는 요인으로 작용한다. 이에 따라 단순한 체중 측정을 넘어 체지방량, 골격근량 등 세부 체성분을 정량적으로 파악하여, 보다 정밀하고 체계적으로 건강을 관리하고자 하는 수요가 증가하고 있다.

체성분 분석은 일반적으로 체내 수분의 전도 특성을 이용하여 제지방량과 체지방량을 추정하는 생체전기 임피던스 분석(Body Impedance Analysis, BIA)을 통해 이루어진다. 그러나 BIA는 체수분량 변화에 민감하게 반응하므로 정확한 측정을 위해 금식, 샤워 및 운동 제한 등 여러 사전 조건을 충족해야 하며, 고가의 특수 장비가 필요하다는 한계를 지닌다.

한편, 뇌파는 비침습적으로 측정이 가능하고, 신체의 다양한 생리적 변화를 민감하게 반영한다. 최근 웨어러블 기술의 발전으로 일상생활 중에서도 뇌파 측정이 가능해지면서 개인의 건강 상태를 모니터링할 수 있는 새로운 수단으로 주목받고 있다. 또한, 선행 연구에서는 뇌파가 비만과 관련된 신경생리학적 변화를 반영할 수 있음을 보고하였다[1-2]. 그러나 다양한 체성분 지표가 뇌파에 미치는 영향을 직접적으로 검증한 연구는 매우 드물다. 이에 본 연구에서는 별도의 행동 수행이 필요하지 않은 안정상태 뇌파와 체성분 지표 간 상관관계를 분석하여, 뇌파 기반 체성분 추정이 가능한 생체신호 지표를 탐색하고자 하였다.

2.연구 방법

본 연구에서는 건강한 성인 61명(남성 36명, 여성 25명; 21.3 ± 2.2세)을 대상으로, 7가지의 체성분 지표와 안정상태 뇌파를 얻었다. 이때, 체성분지표는 inbody 770(Inbody, Korea)을 통해 체수분량, 단백질량, 무기질량, 체지방량, 골격근량, BMI, 체지방률을 산출하였다. 신뢰도 높은 체성분 측정을 위해, 모든 피험자는 실험 전 음식 및 수분 섭취, 샤워, 운동을 제한하였으며, 동일한 시간대(오전 9시-12시)에 실험에 참가하였다. 뇌파 데이터는 국제 10-20 시스템에 따라 두피 32개 채널에서 측정되었으며, 피험자는 눈을 감은 상태(Eyes closed, EC)와 눈을 뜬 상태(Eyes open, EO)에서 각각 1분씩 세 차례 반복 수행하였다(그림 1). 해당 연구는 고려대학교 기관생명윤리위원회 심의를 받아 진행되었다[KUIRB-2023-0383-02, KUIRB-2024-0107-04].

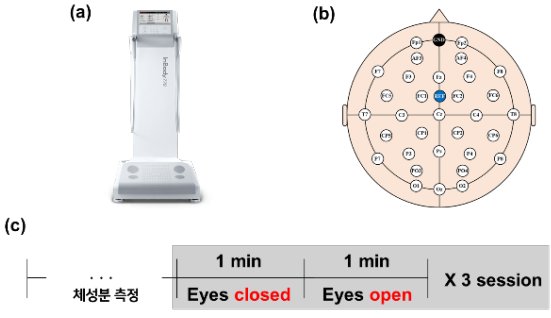


그림 1. (a) 체성분 측정 장비, (b) 뇌파 측정 전극 배치, (c) 실험 패러다임

측정된 원신호 뇌파 데이터는 동잡음 제거를 위해 1 – 50 Hz의 대역통과필터(band-pass filter)를 적용하였으며, 계산량 감소를 위해 200 Hz로 다운샘플링(down-sampling) 하였다. 이후, 공통 평균 참조를 적용하여 뇌파 데이터에 공통적으로 유입된 잡음을 제거하였으며, 독립 성분 분석을 활용하여 추가적인 잡음을 제거하였다. 전처리된 뇌파 데이터는 주파수 대역 별(delta: 1 - 3 Hz, theta: 4 – 7 Hz, alpha: 8 – 13 Hz, beta: 14 – 30 Hz, gamma: 31 – 50 Hz) 평균 코히어런스(coherence)를 계산하여 체성분 지표와의 피어슨 상관관계(Pearson's correlation) 분석을 진행하였다. 이때, 32개 채널 간 가능한 모든 채널 쌍에 대한 다중 비교 문제를 보장하기 위해 본페로니 교정(Bonferroni correction)을 적용하였다.

3. 연구 결과

그림 2는 EC 상태 뇌파의 theta coherence와 체성분 지표 간 상관관계 분석 결과 중 통계적으로 유의미한 쌍을 나타낸다. 이때, 체수분량, 단백질량, 무기질량, 골격근량은 전전두엽–전두엽 및 전두엽–후두엽 영역 간 theta coherence와 유의한 음의 상관관계를 나타냈다. 또한, 체지방률은 유사한 뇌 영역 쌍에서 theta coherence와 유의한 양의 상관관계를 보였다. 반면, theta 외의 다른 주파수 대역에서는 유의한 상관관계가 관찰되지 않았다.

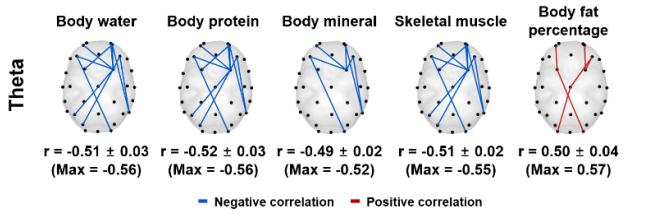


그림 2. 눈을 감은 상태 동안 theta 대역 coherence와 체성분 지표 간의 통계적으로 유의미한 상관관계(Red: negative, Blue: positive, Bonferroni corrected p < 0.05).

그림 3은 EO 상태 뇌파의 theta 및 beta coherence와 체성분 지표 간의 통계적으로 유의한 상관관계를 보인 전극 쌍을 나타낸다. 체수분량, 단백질량, 무기질량, 골격근량은 전전두엽–전두엽 및 전두엽–후두엽 영역 간 theta 및 beta coherence와 통계적으로 유의미한 음의 상관관계를 나타냈다. 또한, BMI의 경우 전두엽-측두엽 간의 theta coherence와 음의 상관관계를 나타냈으며, 체지방량의 경우 전전두엽–전두엽 및 중앙–후두엽 간의 theta coherence와 통계적으로 유의미한 양의 상관관계를 보였다. 반면, theta 및 beta 외의 다른 주파수 대역에서는 유의한 상관관계가 관찰되지 않았다.

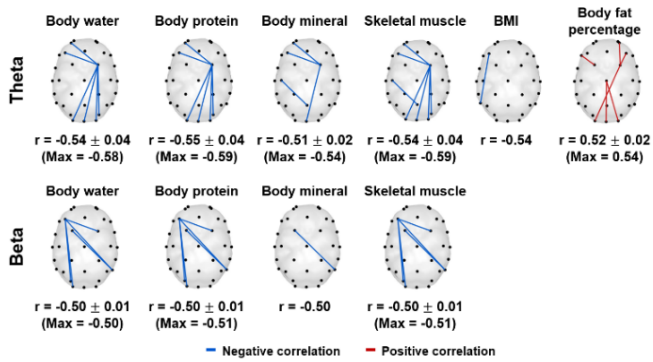


그림 3. 눈을 뜬 상태 동안 theta 및 beta 대역 coherence와 체성분 지표 간의 통계적으로 유의미한 상관관계(Red: negative, Blue: positive, Bonferroni corrected p < 0.05).

특히, EO 상태의 FC2-Oz theta coherence과 골격근량은 가장 높은 음의 상관관계 계수(r= –0.59, p < 0.001)를 나타냈으며, EC 상태의 FC2-AF4 theta coherence와 체지방률은 가장 높은 양의 상관계수(r = 0.57, p < 0.001)을 나타냈다(그림 4).

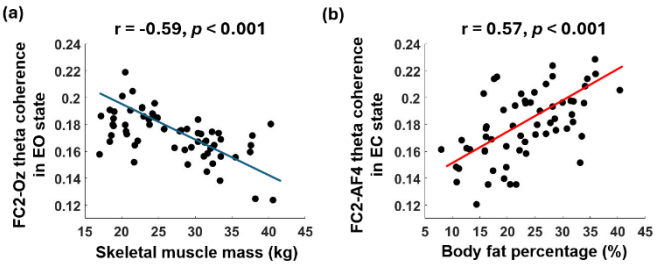


그림 4. (a) 골격근량과 눈을 뜬 상태의 FC2-Oz theta coherence 간의 산점도, (b) 체지방률과 FC2-AF4 theta coherence 간의 상관관계 산점도

본 연구에서는 뇌파와 체성분 간의 상관관계를 분석함으로써, 뇌파 기반의 건강 상태 추정 가능성을 탐색하였다. 선행연구에서는 MEG(magnetoencephalography) 기반의 휴식 상태 분석 결과, 비만 청소년이 정상 대조군에 비해 전두엽 및 후두엽 영역의 beta 대역 기능적 연결성이 유의하게 높은 것으로 보고되었다[2]. Beta 대역은 주의 및 각성에 관여하며, 과도한 동기화는 충동적 행동과 중독적 특성과 연관되어 있다. 또한, 음식 중독 증상을 가진 과체중 및 비만 환자에서 전두엽–두정엽 영역의 theta 연결성이 증가하는 것이 보고되었으며, theta 대역은 금단 및 갈망 상태와 밀접하게 관련되어 있다[3]. 이러한 연구 결과들은 의사결정과 충동 억제를 담당하는 전두엽의 기능적 연결성 변화가 비만 환자의 억제, 통제 상실과 폭식 행동과 관련될 수 있음을 시사한다. 그러나, 기존 선행연구는 주로 체지방률이나 BMI와 같은 지표에 집중되어 있으며, 체수분량, 단백질량 등의 다른 체성분 지표와 관련된 신경생리학적 연구는 상대적으로 부족하다. 따라서 향후에는 이러한 지표들과 뇌파 특성 간의 연관성을 확인할 필요가 있으며, 단순한 선형 상관관계 분석을 넘어 다중 회귀 분석 및 비선형 모델링 기법을 활용하여 뇌파와 체성분 간의 관계를 보다 정교하게 확인하고자 한다. 나아가, 뇌파 데이터를 입력으로 활용하는 건강 상태 예측 딥러닝 모델을 개발하여, 개인 건강 모니터링 시스템으로 확장하고자 한다.

4. Acknowledgements

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터사업의 연구결과로 수행되었음 (IITP-2025-RS-2023-00258971).

5.참고 문헌

[1] Geha, Paul, et al. "Reorganization of brain connectivity in obesity." *Human brain mapping* 38.3 (2017): 1403-1420.

[2] Olde Dubbelink, Kim TE, et al. "Increased resting-state functional connectivity in obese adolescents; a magnetoencephalographic pilot study." *PLoS One* 3.7 (2008): e2827.

[3] Imperatori, Claudio, et al. "Modification of EEG functional connectivity and EEG power spectra in overweight and obese patients with food addiction: An eLORETA study." *Brain imaging and behavior* 9.4 (2015): 703-716.

생체소재

좌장: 주진명(UNIST)

11월 7일 (금) **일강원 102 (15:30-17:00)**

김지혜(아주대학교)
Invited Bioelectronics for Physiological Fluid Monitoring

성혜정(KIST)
Invited Nonimmunogenic Ultrathin Hydrogel Thin Films for Extended Neural Activity Recording

권남영(한양대학교)
인체 호흡 모니터링을 위한 생체소재 기반 생체반도체 경피패치

고은별(삼육대학교)
Tendency of Biodegradable Materials In Vitro

이수훈(한양대학교)
광용적맥파 측정을 위한 바이오소재 기반 초박막 전자문신 플랫폼



김지혜/Jihye Kim
조교수/Assistant Professor
아주대학교 첨단바이오융합대학/Ajou University, Advanced College of Bio-convergence Engineering

체액 모니터링용 바이오 의료 디바이스
Bioelectronics for Physiological Fluid Monitoring

Abstract

Physiological fluids such as cerebrospinal fluid, breast milk, blood plasma, urine, and lymph are vital for maintaining homeostasis. Continuous monitoring of these fluids is crucial for disease management and recovery. This talk introduces bioelectronic systems that enable real-time and long-term physiological fluid monitoring through unconventional materials and device architectures. A wearable impedance-based platform monitors breast milk volume during lactation and has been validated in human trials. Furthermore, a fully implantable bladder monitoring system with a stretchable strain sensor enables long-term tracking in bladder cancer models. These bio-integrated technologies highlight the potential of flexible electronics for personalized and continuous healthcare.

Brief Biosketch

Jihye Kim is an Assistant Professor in the Advanced College of Bio-Convergence Engineering at Ajou University. She received her B.S. and Ph.D. degrees in Advanced Materials Science and Engineering from Sungkyunkwan University, Korea, in 2015 and 2020, respectively. She then joined Northwestern University as a postdoctoral scholar at the Center for Bio-Integrated Electronics (CBIE). Her research interests include wearable and implantable bioelectronics for physiological fluid monitoring.



성혜정 / Hyejeong Seong
선임연구원 / Senior Researcher
한국과학기술연구원 / Korea Institute of Science and Technology (KIST)

뇌 인터페이싱 기기를 위한 면역 억제 기능성 초박막 하이드로젤 개발

Nonimmunogenic ultrathin hydrogels for neural interfacing devices

Abstract

Neural interfaces have evolved from rigid designs to flexible, multifunctional platforms enabling neuromodulation, delivery, and high-fidelity recording. However, the biological response at device-tissue interfaces remains the challenge for long-term neural recording, with inflammatory cascades causing neuronal damage and glial encapsulation. This presentation explores nanoscale surface engineering approaches, photoinitiated chemical vapor deposition (piCVD), as a versatile platform for tailored neural probe functionalization. This solvent-free technique enables conformal coating on complex geometries while preserving electrical properties of neural probes. We demonstrate ultrathin hydrogels that combine optimal hydrophilicity and mechanical compliance, creating biocompatible interfaces that mitigate foreign body responses. Comprehensive *in vivo* studies reveal that nanoscale-engineered surfaces enhance neural recording performance, with up to 2-fold improvements in signal-to-noise ratio and extending functional recording lifetimes to three months and beyond.

Brief Biosketch

Hyejeong Seong received her B.S. (2007) and Ph.D. (2016) degrees in Chemical and Biomolecular Engineering from KAIST. She worked as a Research Associate in Department of Materials at Imperial College London from 2017 to 2020. Currently, she is a Senior Researcher in the Brain Science Institute at KIST. Her accolades include a Marie Skłodowska-Curie Fellow from the European Union, and an NRF-Fellowship from Republic of Korea. Her research interests focus on microfabrication of biomaterials for cell interfacing applications and biosensors.

인체 호흡 모니터링을 위한 생체소재 기반 생체반도체 경피패치

권남영[1], 정태길[1], 이병훈[1,2*] 김성환[1,2*]
한양대학교 융합전자공학과[1]
한양대학교 바이오메디컬공학과[2]

A Biomaterial-Based Biosemiconductor Skin Patch for Human Respiration Monitoring

Namyeong Kwon[1], Taegil Jeong[1], Byunghun Lee[1,2], Sunghwan Kim[1,2*]
Department of Electronic Engineering, Hanyang University, Korea[1]
Department of Biomedical Engineering, Hanyang University, Korea[2]
*skim81@hanyang.ac.kr

Abstract

This study presents a moisture-responsive bio-semiconductor-based electronic tattoo (e-tattoo) that enables non-invasive, long-term respiratory monitoring. Since the e-tattoo is composed of natural biomaterials, it possesses biocompatibility and incorporating melanin with silk can provide the semiconducting electrical properties. High porosity in the nano-fiberized e-tattoo helps to have high breathability, and therefore, along with the water-dependent electrical conductivity of melanin, monitoring human respiratory patterns in real-time is possible with no disturbing living things in controlling air flows. This enables natural tracking of human breathing patterns without complicated equipment or airflow control, allowing monitoring of respiratory status during sleep (including apnea), and physical activity states during exercise (walking, running, resting). This work presents a sustainable platform for personal healthcare that addresses the limitations of conventional monitoring methods.

1. 연구 배경

지속적인 호흡 모니터링은 인간의 건강 상태를 평가하는 데 필수적인 요건이다. 인간의 호흡 속도와 패턴의 미세한 변화는 심장 질환, 수면 호흡 장애, 운동 중 생리적 과부하 등을 정확히 예측할 수 있다. 이러한 중요성에도 불구하고 지속적인 호흡 모니터링은 기술적 격차에 의한 한계가 존재한다[1]. 웨어러블 디바이스의 광범위한 보급으로 지속적인 심박수 모니터링이 일상화되었지만, 복잡한 호흡 메커니즘을 정확히 감지하는 호흡 추적 기술은 현저히 뒤처져 있기 때문이다[2].

현재의 호흡 모니터링 방법은 장기간 사용이 어렵고, 복잡한 임상 시스템에 의존하기 때문에 임상적 신뢰성을 충분히 확보하지 못한다. 대표적으로 수면다원검사는 측정 시 20개 이상의 전선과 센서를 환자의 신체에 부착해야 하는데, 이는 환자의 수면의 질을 방해하여 측정의 정확성을 떨어트리고, 병원 내에서만 측정해야 하는 공간제약적 한계가 존재한다[3].

또한, 호흡 감지를 위한 착용형 웨어러블 디바이스는 측정 원리상 본질적인 한계를 지니고 있다. 이러한 기기는 흉부의 기계적 변형을 감지하여 간접적으로 호흡을 추적하지만, 동작에 의한 신호에 매우 취약하다. 흉부의 팽창을 감지하는 신호는 신체 활동 중 발생하는 움직임이나 수면 중의 사소한 자세 변화로 인해 노이즈와 쉽게 결합되며, 이로 인해 실제 호흡 신호와의 구별이 어려워 측정데이터가 왜곡될 가능성이 있다[4]. 결과적으로, 현재의 접근법은 여전히 호흡의 기계적 변형에 의존하는 특성을 보이며, 이는 다양한 외부 움직임에 의한 간섭에 취약하다. 이러한 한계를 극복하기 위해서는 기계적 변형 기반 모델을 넘어, 생리적 변화를 직접 감지할 수 있는 새로운 모니터링 패러다임으로의 전환이 필요하다.

본 연구에서는 실크–멜라닌 복합체로 제작된 피부 밀착형 전자문신(e-tattoo)을 통해 지속적이고 고신뢰성의 호흡 모니터링을 보여준다. 전기방사 나노섬유 기반의 e-tattoo를 코의 공기 흐름 경로에 인접한 인중 부위에 부착함으로써, 호흡 시 발생하는 수분 변화를 정밀하게 감지하는 동시에 신체의 움직임으로 인한 신호 간섭을 효과적으로 배제할 수 있었다. 또한, 본 시스템은 저전력 무선 구동 기반으로 측정 데이터를 스마트폰으로 실시간 전송하여 수 시간 동안 호흡 역학의 변화를 안정적으로 추적하였다. 이를 통해 격렬한 신체 활동 중에도 호흡 속도의 급격한 변화를 정확히 감지하였고, 수면 중 호흡 패턴을 장시간 모니터링하여 무호흡 및 저호흡을 식별할 수 있었다. 본 연구는 기존 호흡 모니터링 기술의 한계를 극복하는 견고하고 사용자 친화적인 차세대 생체신호 감지 플랫폼을 제시한다.

2. 연구 방법

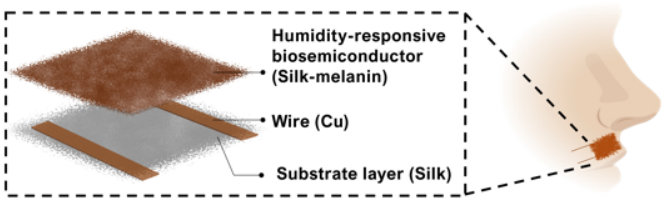


그림 1. 실크단백질과 멜라닌 기반 e-tattoo의 구조를 보여주는 개략도.

제작된 e-tattoo는 수분 반응성을 가진 바이오반도체 층과 피부 접착층 층으로 구성되었다. 먼저 실크 피브로인/PEO 용액을 전기방사공법을 통해 피부 접착층인 실크나노섬유 층을 제작하였다. 실크나노섬유 층에 기계적 강도와 소수성 처리를 위해 메탄올로 가교처리를 한 다음, 두 개의 얇은 구리선을 실크나노섬유 층 위에 배치하였다. 이후 동일 공정으로 상부층인 멜라닌-실크 나노섬유 층을 제조하였다. 제작된 e-tattoo는 전도성 젤이나 추가적인 접착제 없이 소량의 물을 이용하여 인중에 부착 후, 멜라닌의 수분반응성

특성을 바탕으로 인간의 호흡 속 수분 감지하여 다양한 상황에서의 호흡 모니터링을 가능하게 하였다[5].

3. 연구 결과

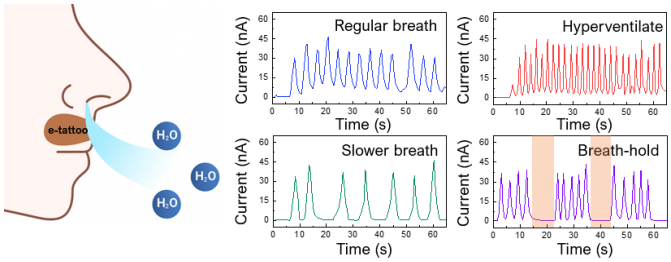


그림 2. 다양한 호흡 상태에 따른 e-tattoo의 전류-시간 측정 결과.

e-tattoo의 빠른 응답-회복 특성이 실시간 호흡 모니터링에 적합함을 입증하기 위해, 그림 2. 에서와 같이 인중 부위에 부착하여 비강 호흡 동안의 전류 변화를 관찰하였다. 호기 시 배출되는 공기는 거의 100% 포화 수증기로 이루어져 있어 e-tattoo가 호기에 노출 될 때 전류가 증가하고 이후 회복단계에서 급격하게 전류가 다시 감소하였다. 이러한 세서의 응답 특성을 바탕으로 정상호흡, 과호흡, 느린 호흡, 무 호흡 등 4가지 호흡 상태를 실시간으로 구분할 수 있었다. 과호흡 상태에서는 짧아진 호흡주기에 따라 피크 간격이 감소하였으며, 느린 호흡 시에는 흡기 및 호기 단계가 길어지면서 피크의 면적이 증가하였다. 무호흡 상태에서는 신호가 기준선 부근에서 안정적으로 유지 후, 재 호기 시작 시 급격한 전류 상승이 발생되었다. 이러한 결과는 e-tattoo 플랫폼이 의료용 호흡 모니터링 응용에 적합한 실시간 감지 성능을 지니고 있음을 입증한다.

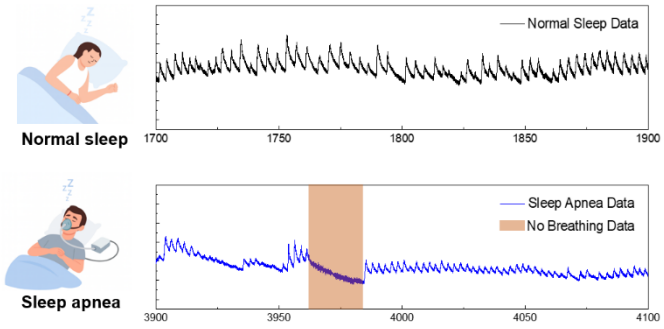


그림 3. 정상 수면 및 수면무호흡 상태에서의 e-tattoo 전류 응답

e-tattoo의 장기적인 수면 모니터링 가능성을 입증하기 위해 그림 3. 에서와 같이 6시간동안의 수면 중 정상 수면상태와 수면무호흡 상태에서의 전류 응답을 비교하였다. 정상 수면 시에는 규칙적인 호흡에 따라 전류 피크가 일정 주기로 반복되고, 안정적인 기준선 유지를 보여준다. 반면 수면무호흡 상태에서는 일정 시간 동안 호흡이 중단되면서 전류 신호가 급격히 감소하고, 무호흡구간 이후 재 호기 시점에서 다시 전류 상승을 보였다. 이는 e-tattoo가 호흡 중단 구간을 실시간으로 구별할 수 있음을 의미하며, 기존의 복잡한 장비 없이 수면 중 호흡 이상을 감지할 수 있는 가능성을 보여준다. 또한 장시간 착용 후에도 신호의 왜곡이 발생하지 않아 피부 부착형 플랫폼으로서 안정성과 내구성을 동시에 확보했음을 확인하였다.

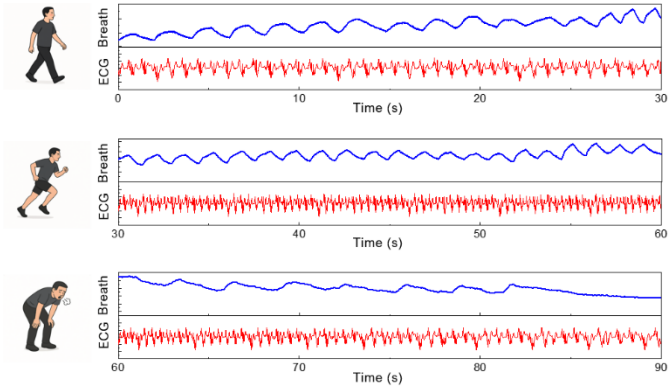


그림 4. 운동 강도 변화에 따른 호흡신호와 심전도 동시 측정 결과.

그림 4. 는 걷기, 달리기, 휴식의 세 가지 신체 활동 단계에서 e-tattoo로 측정한 호흡 신호와 상용 심전도(ECG) 센서를 통해 측정한 심전도 신호를 비교한 결과를 보여준다. 걷기 상태에서는 안정적인 호흡 주기 및 진폭과 규칙적인 심전도 파형을 보여준다. 달리기 상태로 전환되면 신체 활동의 증가에 따라 호흡 주기가 짧아지고 호흡 시 발생한 수분의 일시적 축적에 의해 신호 세기가 상승하는 경향이 나타났다. 동시에 ECG 신호에서도 심박수가 증가하여 운동으로 인한 생리적 반응을 명확히 보여주었다. 이후 휴식 단계에서는 호흡 신호의 주기와 진폭이 점차 감소하여 신호의 하강하는 경향을 보여주고 ECG 신호 또한 안정적인 리듬으로 회복되었다. 이러한 상호 연관된 신호 변화는 e-tattoo가 신체 활동 강도 변화에 따른 호흡 변화를 정밀하게 추적할 수 있고, 동시에 상용 ECG 센서와의 높은 상관성을 통해 신체 활동 시 실시간 모니터링의 가능성을 보여준다.

4. 참고 문헌

[1] T. Stuart, J. Hanna, and P. Gutruf. "Wearable devices for continuous monitoring of biosignals: Challenges and opportunities." *APL Bioengineering*, Vol 6, No.2, p.026101, 2022

[2] I. Costanzo, D. Sen, L. Rhein, and U. Guler. "Respiratory monitoring: Current state of the art and future roads." *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, Vol 15, p.103–121, 2020

[3] A. Kosmadopoulos, C. Sargent, D. Darwent, X. Zhou, and G. D. Roach. "Alternatives to polysomnography (PSG): A validation of wrist actigraphy and a partial-PSG system." *Behavior Research Methods*, Vol 46, No. 4, p. 1032–1041, 2014

[4] F. Q. Al-Khalidi, R. Saatchi, D. Burke, H. Elphick, and S. Tan. "Respiration rate monitoring methods: A review." *Pediatric Pulmonology*, Vol 46, No. 6, p.523–529, 2011

[5] S. R. Joshi, S. Lee, and S. Kim. "Semiconducting and environmentally responsive melanin-doped silk nanofibers for multifunctional electronic tattoos." *Materials Horizons*, Vol 12, No. 12, p.4444–4456, 2025

Tendency of Biodegradable materials In vitro

고은별 [1],조성현 1, 김예은, 김위 [2,3,*]

[1] 삼육대학교 화학생명과학과

[2] 주식회사 스태프프로젝트 개방연구소

[3] 아주대학교 일반대학원 의용공학과

Tendency of Biodegradable materials In vitro

Eun Byeol Go[1+], Sung Hyun Cho[1+], Ye Eun Kim[1+], Wi Kim[2,3,*]

[1]Department of Chemistry & Life Science, Sahmyook University, Seoul, Korea

[2]STUProject Open Research Institute, Gyunggido Suwon Korea

[3]Faculty of Graduate Studies. Department of Biomedical Engineering, Ajou University,Gyunggido Suwon Korea

[+]These authors are equally contributed

[*]Wi Kim is the corresponding author.

Abstract

The ability to precisely control the degradation time of polymeric biodegradable materials is crucial for various clinical applications, including surgical operations, sutures, and transplantable scaffolds. Unpredictable degradation can lead to severe adverse outcomes, making the study of material degradation kinetics essential for patient safety and effective treatment. This study compared the in vitro degradation characteristics of two distinct biodegradable polymers: Poly(lactic-co-glycolic acid) (PLGA), chosen for its expected hydrolytic degradation and potential for surface erosion, and Poly(butanedithiol-1,3,5-triallyl-1,3,5-triazine-2,4,6(1H,3H,5H)-trione) Pentenoic Anhydride (PBTPA), a composite polymer known for its high chemical and thermal resistance. The polymer films were cultured in media simulating the in vivo environment, including Phosphate Buffered Saline (PBS), DMEM, and RPMI-1640. PBTPA films exhibited an unfavorable degradation mode characterized by fracturing and tearing of the surface, particularly in PBS. This fragmented erosion suggests a high risk of mechanical damage to surrounding tissues in vivo, alongside an unacceptably slow overall degradation rate. Conversely, PLGA structures demonstrated a more favorable degradation process, showing progressive morphological changes and hydrolysis over time in culture media. This time-dependent structural collapse confirms the material's excellent biocompatibility and biodegradability and supports its high potential for use in drug delivery systems and endoscopic procedures. However, the PLGA structure also showed two critical drawbacks: an undesirable increase in volume (swelling) due to water absorption and an excessively long total degradation period. In conclusion, while the degradation mode of PLGA is superior to the fragmented erosion seen in PBTPA, both materials currently require further optimization of their density and size to achieve a faster, volume-stable degradation profile suitable for complex procedures like organ transplantation. Future studies will focus on observing the PLGA structure's behavior after actual cell implantation in vivo.

1. Background

Controlling the degradation rate of polymeric biodegradable materials in vivo is a critical characteristic essential for their functional performance in various medical applications, including surgical operations, sutures, transplantable scaffolds, and bone adhesives [1]. If clinicians cannot accurately predict the material’s degradation timeline and subsequent healing location, patients may be deprived of the appropriate recovery period or further targeted treatment. This lack of predictability can lead to severe adverse outcomes, such as tissue corrosion, cell death, or even multiple organ failure [2]. Consequently, determining the material’s time-dependent degradation tendency is a crucial factor for clinicians managing patient care [3]. For this study, we selected two distinct polymers with inherently differing degradation mechanisms to compare their characteristics: Poly(lactic-co-glycolic acid) (PLGA) and Poly(butylene terephthalate-co-adipate) (PBTPA) films. PLGA is a widely recognized biomedical polymer that primarily degrades via bulk erosion and hydrolysis, where water diffusion into the matrix is faster than the cleavage of the polymer bonds [4, 5]. Conversely, PBTPA, which is a semi-aromatic polyester often related to poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT), is expected to show a different degradation profile that can be influenced by enzymatic activity or heterogeneous erosion [1, 6]. This comparative study was conducted in vitro using various culture media and time points, both in the presence and absence of insulin, prior to any cell line or in vivo surgical application. The primary objective of this experiment is to determine how the intrinsic differences in the erosion mechanisms (bulk vs. surface) of these polymers are modulated by exposure to media that simulate the in vivo condition, thereby enabling the precise control of material resorption time.

2. Materials and Method.

Materials

1) PLGA (Poly(lactic-co-glycolic acid)) and PBTPA (Poly(butanedithiol-1,3,5-triallyl-1,3,5-triazine-2,4,6(1H,3H,5H)-trione) Film

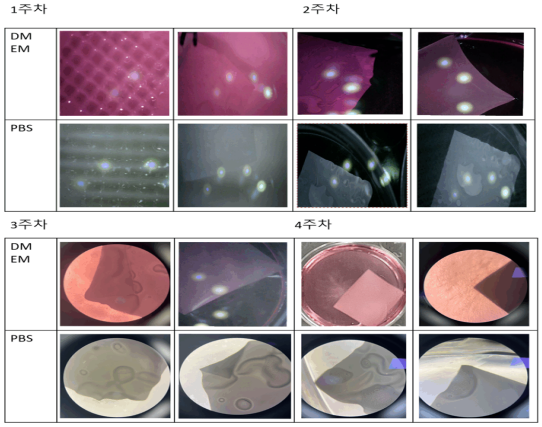
Poly(lactic-co-glycolic acid) (PLGA) is a representative medical-grade polymer that possesses both biocompatibility and biodegradability, making it widely used in various biomedical applications, including tissue engineering and drug delivery systems. PBTPA (Poly(butanedithiol-1,3,5-triallyl-1,3,5-triazine-2,4,6(1H,3H,5H)-trione) Pentenoic Anhydride) is a composite polymer comprising butanedithiol, triallyl triazine, and pentenoic anhydride. This complex exhibits a notable advantage over many other polymers due to its high resistance to elevated temperatures and various chemical agents.

2) Culture Media Components
Complete culture media were prepared using SPL products. The media formulation consisted of high-glucose Dulbecco's Modified Eagle Medium (DMEM) supplemented with 10% Fetal Bovine Serum (FBS) and 1% Penicillin-Streptomycin (Penicillin).

Method
PBS (Phosphate Buffered Saline) is an isotonic phosphate-buffered solution, similar to physiological saline, composed of phosphate, sodium ions, and chloride ions. It serves as an osmotic regulator to prevent cell lysis or shrinkage and acts as a buffering agent to maintain the pH of the cell environment. This solution maintains a pH of 7.2 to 7.4, mimicking the in vivo environment where target cells grow. DMEM (Dulbecco's Modified Eagle Medium) is a basal medium widely used for cell and tissue culture, being particularly suitable for adherent cells. RPMI-1640RPMI-1640 is a culture medium optimized for the cultivation of non-adherent cells and is designed to maintain a neutral pH. The study involved three different media conditions PBTPA film alone in a medium (details specified in results). PLGA film alone in a medium (details specified in results).RPMI-1640 Culture: PBTPA and PLGA films cultured in RPMI-1640 medium. (Fig 1.)
environment.

3. Results
PBTPA Culture Observations
PBTPA films cultured in Phosphate-Buffered Saline (PBS) exhibited degradation characterized by the fracturing and tearing of the surface. This fragmented degradation, regardless of the media used, presents a significant drawback. Such a mode of degradation within the body carries a high risk of damaging surrounding organs or tissues. (Fig 1)
PLGA Culture Observations
The experiment proceeded for two weeks without antibiotics. The subsequent four-week period, which included antibiotics, showed no significant change in the pattern of media discoloration. This suggests that the presence of the PLGA structure itself may slow the progression of contamination in an environment similar to the human body. (Fig 1)

Figure 1. Analysis of Structural Integrity Over Time.

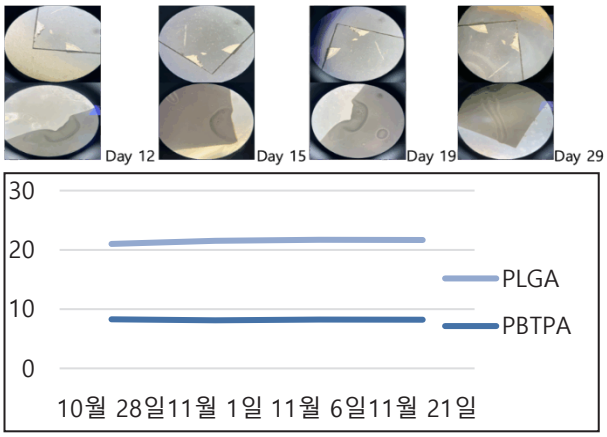


	1주차	2주차	3주차	4주차
DMEM1	1.72	1.72	1.67	1.73
DMEM2	1.76	2.18	2.11	2.37
PBS1	1.63	1.85	1.78	1.88
PBS2	1.69	1.79	1.77	1.91
	1주차	2주차	3주차	4주차
DMEM1	100%	100%	97%	101%
DMEM2	100%	124%	120%	135%
PBS1	100%	113%	109%	115%
PBS2	100%	106%	105%	113%

4. Discussion and Conclusion

In this study, the behavior of a structure fabricated from the biodegradable polymer PLGA (poly(lactic-co-glycolic acid)) was observed in a culture medium simulating the circulation of human bodily fluids. Biodegradability and Applications The experimental results demonstrated that the PLGA structure undergoes progressive morphological changes over time due to hydrolysis. This implies that PLGA can be degraded and absorbed in vivo, suggesting its excellent biocompatibility. Based on these findings, PLGA structures are anticipated to have high utility in medical fields, including endoscopic surgery and drug delivery systems. Specifically, controlling the structure's size and density could enable the precise regulation of the drug release rate, facilitating its use as a customized drug carrier. Furthermore, the use of vacuum packaging and UV sterilization ensures a sterile state, which secures its safety for use as a medical device. Limitations and Future Work. However, the experimental results revealed certain drawbacks: the structure's swelling (increase in size) as it dissolved, and an excessively long degradation period. The issue of the structure absorbing water and increasing in volume, which suggests the need to reduce its density, indicates that the current design may be unsuitable for organ transplantation experiments. Therefore, future research will require additional in vivo studies to observe the behavior of the PLGA structure after actual cell implantation. Considering the environmental conditions of the cell culture, it is recommended that the amount of antibiotic be increased in future experiments to prevent initial contamination.

Figure 2: Correlative analysis of polymeric film degradation.



5. Reference
[1] Ghalia, M., Nsib, J., & Boughalleb, H. (2024). Biodegradable Polymers: Properties, Applications, and Environmental Impact. Polymers, 16(12).
[2] Lobo, V., & Lencu, C. (2024). Biodegradable Polymers in Biomedical Applications: A Review—Developments, Perspectives and Future Challenges. Polymers, 16(1). [3] Makadia, H. K., & Siegel, S. J. (2011). Poly Lactic-co-Glycolic Acid (PLGA) as Biodegradable Controlled Drug Delivery System. Polymers, 3(3), 1377–1397[4] Sood, J., Rawtani, D., & Thool, B. K. (2018). Hydrolytic Degradation and Erosion of Polyester Biomaterials. ACS Macro Letters, 7(8), 940–944. [5] Siepmann, J., Faisant, N., & Benoit, J. P. (2005). Polyanhydrides and poly(ortho esters): surface eroding mechanisms. Advanced Drug Delivery Reviews, 57(3), 347-362. (PMID: 15694380)[6] Zan, X., Zhu, H., Song, R., et al. (2023). Complete bio-degradation of poly(butylene adipate-co-terephthalate) via engineered cutinases. Nature Communications, 14(1), 1640.

광용적맥파 측정을 위한 바이오소재 기반 초박막 전자문신 플랫폼

이수훈[1], 김성환[1,2,*]

한양대학교 융합전자공학과[1]

한양대학교 전기생체공학부 바이오메디컬공학전공[2]

Biomaterial-based ultrathin tattoo platform for photoplethysmography

Soohoon Lee[1], Sunghwan Kim[1,2,*]

[1]Department of Electronic Engineering, Hanyang University, Republic of Korea

[2]Department of Biomedical Engineering, Hanyang University, Republic of Korea

[*] skim81@hanyang.ac.kr

Abstract

Skin-conformable epidermal electronics are emerging as a next-generation healthcare platform for stable and long-term acquisition of physiological signals, suitable for continuous health monitoring in daily life. However, integrating highly conductive electrodes and electrical components while simultaneously preserving requirements for on-skin applications-flexibility, breathability, and biocompatibility- is still challenging. Here, we present a biomaterial-based electronic tattoo (e-tattoo) composed of an ultrathin silk film (USF) laminated onto a cellulose nanofiber (CNF) mat. The e-tattoo's porous CNF architecture, combined with a 1 μm–thick USF, provides high breathability, while the USF's low-roughness surface enables higher electrical conductivity than conventional nanomesh electrodes. Leveraging these advantages, we integrate a light-emitting diode (LED) and a photodiode (PD) on the e-tattoo to realize a photoplethysmography sensor, enabling stable and precise heart-rate measurements under realistic on-skin conditions. These results indicate that the proposed e-tattoo concurrently satisfies high conductivity, flexibility, breathability, and biocompatibility, suggesting its strong potential as a core technology for next-generation wearable healthcare and on-skin electronic systems.

1. 연구 배경

지속적인 건강 모니터링에 대한 관심과 공중 보건에 대한 우려가 커지면서, 일상에서의 건강 관리 플랫폼의 중요성은 더욱 부각되고 있다. 스마트 워치, 피트니스 트래커 등 다양한 웨어러블 디바이스의 사용이 급증했지만 일상 활동 중 센서-피부 밀착 불안정으로 인한 모션 아티팩트와 신호 왜곡은 여전히 정확한 생리 정보 획득을 방해한다. 이러한 문제는 광용적맥파(PPG)와 같은 광학 기반 센싱에서 특히 두드러지며, 측정 신뢰도 저하로 직결된다[1].

마이크로/나노 공정과 기능성 소재의 발전은 피부 부착형 웨어러블부터 생체 삽입형 장치에 이르기까지 다양한 전자 및 광학 플랫폼을 통한 생체 신호 모니터링을 가능하게 했다. 특히 전자문신(e-tattoo)으로 불리는 초박형 전자 플랫폼은 피부와의 밀착성이 우수하여 장시간 고품질 신호를 취득하는 데 이점을 가진다. 이러한 e-tattoo가 실제 사용 환경에서 생체 신호를 정확하게 수집하고 전달하기 위해서는 높은 전기전도성, 유연성, 통기성, 생체적합성과 같은 특성들을 만족해야 한다[2].

최근에는 다공성 나노메쉬 기반 전극이 우수한 통기성, 유연성, 피부적합성으로 주목받고 있으나, 절연성 폴리머와 다공성 구조의 거친 표면 때문에 균일한 전극 형성과 안정적인 전도도 확보가 어렵다는 한계가 있다. 이를 보완하기 위해 선행 연구에서는 편평한 초박형 실크 필름(USF)에 금 전극을 패터닝 한 뒤, 셀룰로오스 나노섬유(CNF) 위에 전사하여 높은 전도도를 구현하였다[3]. 다공성의 CNF와 전극 사이에 USF가 전사된 구조는 편평한 표면을 제공하여 나노메쉬에서 문제였던 불안정한 전극 형성과 높은 계면 저항을 줄이며, 동시에 높은 통기성을 확보할 수 있다.

본 연구에서는 1 μm 두께의 USF에 패터닝 한 은(Ag) 전극을 CNF 매트로 전사하여 높은 전기전도도를 구현하고, PPG 센싱을 위해 발광다이오드(LED)와 포토다이오드(PD)를 통합한 생체재료 기반 e-tattoo 플랫폼을 제안한다. USF의 평탄하고 균일한 표면은 전극 형성을 안정화하고 계면 저항을 낮추며, 높은 전기전도도의 Ag 전극은 안정적으로 LED를 구동하고 PD 출력 신호를 전송한다. 또한 다공성 CNF는 높은 통기성과 생체 적합성으로 장시간 부착 환경에서도 피부 자극을 최소화할 수 있다. PPG 성능은 모션 아티팩트와 피부–디바이스 결합 상태에 특히 민감하기 때문에, 이러한 e-tattoo 플랫폼은 광학 경로를 안정화하고 신호 안정성을 향상시킨다. 이 구조를 바탕으로 우리는 PPG 기반 심박 센서를 구현하고, 실제 피부 부착 환경에서 정밀하고 안정적인 생체신호 측정이 가능함을 확인하였다.

2.연구 방법

그림 1. 은 PPG 센싱을 위한 바이오소재 기반 e-tattoo 플랫폼의 제작 공정을 보여준다. 세척된 웨이퍼 위에 positive 포토레지스트를 스핀코팅하여 박막을 형성한 뒤, stencil mask와 e-beam evaporator를 이용해 포토레지스트 위에 50 nm 두께의 Ag 전극을 증착하였다. 이어 증착 된 전극 위로 실크용액을 200 nm 두께로 스핀코팅하고, 증기 처리를 통해 β-sheet 구조 형성을 유도하여 실크를 불용성으로 가교결합시켰다. 이 스핀코팅-가교결합 공정을 5회 반복하여 약 1 μm 두께의 실크 박막을 형성하였으며, 이후 메탄올 용액에 담가 가교결합을 추가로 강화함과 동시에 포토레지스트를 제거하여 Ag/USF 전극을 웨이퍼로부터 분리하였다. 분리된 Ag/USF 전극은 CNF 매트 위로 전사하여 CNF 위에 전극을 형성하였고, PPG 측정에 필요한 두 개의 LED와 하나의 PD를 패터닝 된 전극위에 집적하였다. 피부 부착 면의 개구부를 통해 LED와 PD가 피부와 직접 접촉하도록 설계하였으며, 나머지 영역은 CNF로 캡슐화하여 전극 보호와 피부 부착 시 디바이스

안정성을 향상시켰다.

제작한 e-tattoo는 피부 위에 부착한 뒤, LED에 구동 전압을 인가하고, PD로 맥파에 따른 반사광 신호 변화를 수집하여 PPG 신호를 획득하였다.

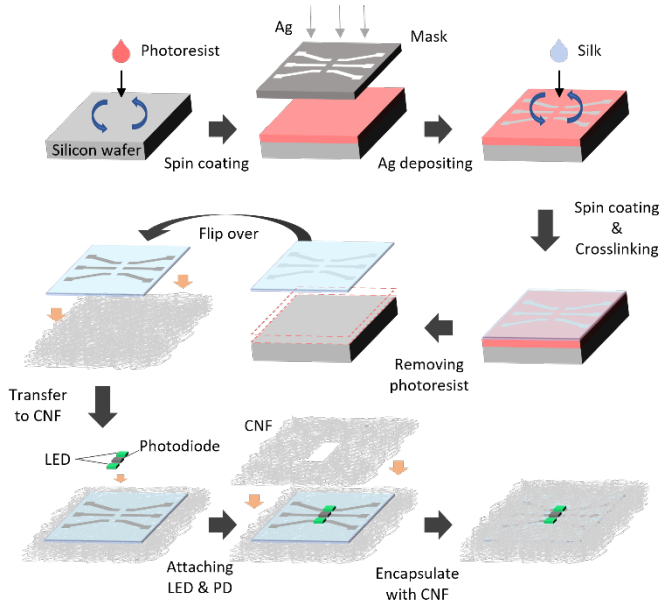


그림 1. PPG 센싱을 위한 바이오소재 기반 e-tattoo 제작 공정 모식도

3. 연구 결과

e-tattoo 플랫폼의 통기성을 평가하기 위하여 그림 2. 와 같이 수증기 투과율(WVTR)을 측정하였다. CNF 매트는 3463 $g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$의 값을 나타내었으며, 상부층에 USF를 추가하였을 때는 3229 $g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$로 약간 감소하는 것을 확인하였다. USF/CNF 매트는 USF로 인한 감소에도 불구하고 상용 의료 패치(반창고, 하이드로콜로이드 상처 드레싱)와 비교했을 때, 최소 1.7배 높은 WVTR 값을 나타냈다. 피부–디바이스 인터페이스에서 일반적으로 요구되는 최소 수치가 200 $g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$인 점을 고려할 때, 우리의 e-tattoo는 이 값의 16배 이상 높은 값을 나타냈으며, 우리의 e-tattoo가 우수한 투과성과 통기성을 나타냄을 보여준다[4]. 이는 지속적인 경피 수분 손실(transepidermal water loss) 하에서도 편안한 착용감을 제공하고, 수분으로 인한 자극을 완화하여, 장시간 사용에도 피부 자극을 최소화할 수 있음을 나타낸다.

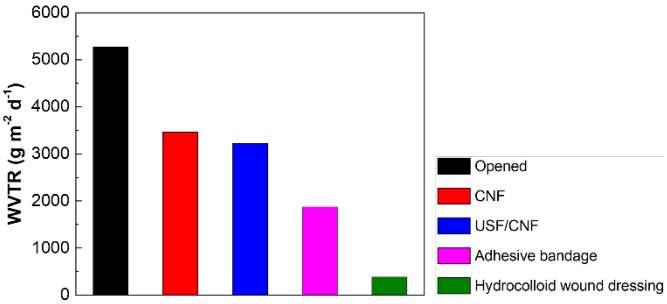


그림 2. 개방, CNF, USF/CNF, 반창고, 하이드로콜로이드 상처 드레싱의 수증기 투과도

전기적 특성 비교를 위해, 본 연구에서 제안한 Ag/USF/CNF 전극과 CNF 매트 위에 직접 증착한 Ag 전극(Ag/CNF)의 *I–V* 곡선을 측정하여 평가하였다(그림 3). 그 결과, Ag/USF/CNF 전극은 8.62 × 10^4 S/cm의 전도도를 보인 반면, Ag/CNF는 1.13 × 10^3 S/cm를 나타내어, Ag/CNF 전극 대비 약 76.3배 전도도가 향상된 것을 확인하였다.

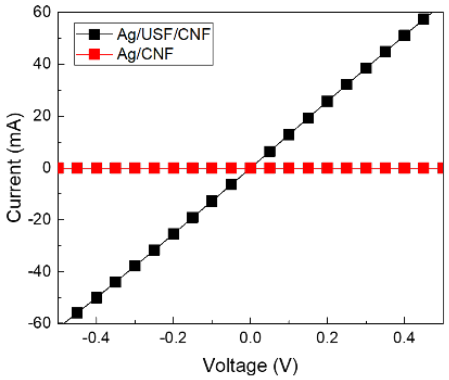


그림 3. Ag/CNF와 Ag/USF/CNF에 대해 측정한 *I-V* 곡선

전극의 우수한 전기 전도도는 LED에 안정적인 전력 공급과 PD를 통한 효율적인 신호 전달을 가능하게 한다. 그림 4. 는 e-tattoo에 LED와 PD를 집적하여 제작한 피부 부착형 PPG 센서를 통해 획득한 심박 신호를 보여준다. 측정된 신호는 뚜렷한 파형과 명확한 주기성을 나타내며, 생체 신호 모니터링에 요구되는 안정성과 정밀도를 만족시켰다. 이러한 결과는 본 e-tattoo 플랫폼이 실제 피부 부착 환경에서도 광전자소자의 안정적인 작동과 생체 신호의 정밀한 측정을 동시에 구현할 수 있음을 입증하며, 고성능 유연전자소자와 웨어러블 헬스케어 디바이스의 핵심 기술로서의 가능성을 보여준다.

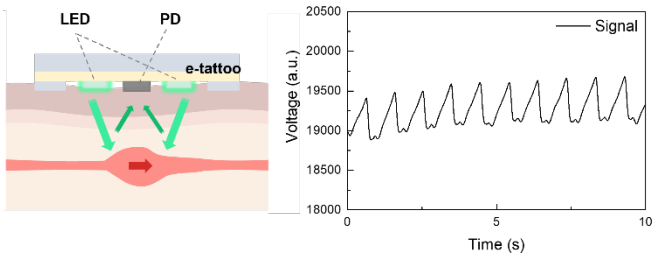


그림 4. e-tattoo 플랫폼을 통해 측정된 PPG 신호

4.참고 문헌

[1] Y. Lee, J. W. Chung, G. H. Lee, H. Kang, J. Y. Kim, C. Bae, H. Yoo, S. Jeong, H. Cho, S. G. Kang, J. Y. Jung, D. W. Lee, S. Gam, S. G. Hahm, Y. Kuzumoto, S. J. Kim, Z. Bao, Y. Hong, Y. Yun, and S. Kim. "Standalone real-time health monitoring patch based on a stretchable organic optoelectronic system." *Science Advances*, Vol 7, No.23, p.eabg9180, 2021

[2] S. R. Joshi, M. Lee, H. Y. Lee, M. Lee, and S. Kim. "Self-powered, multifunctional, and skin-compatible electronic-tattoos based on hybrid bio-nanomaterials as electrically functionalized skins." *Chemical Engineering Journal*, Vol 496, No.15, p.154160, 2024

[3] J. Choi, S. Lee, S. R. Joshi, and S. Kim. "Breathable and imperceptible on-skin electronic tattoos with a hybrid of silk and cellulose and highly conductive electrodes for monitoring skin hydration." *International Journal of Biological Macromolecules*, Vol 308, p.142707, 2025

[4] F. Chen, Q. Huang, and Z. Zheng. "Permeable Conductors for Wearable and On-Skin Electronics." *Small Structures*, Vol 3, No.1, p.2100135, 2022

의광학

좌장: 박별리(성균관대학교), **이휘돈**(부산대학교)

11월 7일 (금) **일강원 103 (15:30-17:00)**

정호상(고려대학교)
Invited 플라즈모닉 나노소재의 바이오의공학 응용

이병권(DGIST)
Invited 초고속 OCT 및 AdamW 최적화 기반 임상 적용 가능한 세포 수준 분해능 망막 영상법

문나은(전남대학교병원)
Label-Free Endoscopic Hyperspectral Imaging for Differentiation of Metastatic and Inflammatory Lymph Nodes in Breast Cancer Models

박은우(POSTECH)
무표지 중적외선 이색성 민감 광음향 현미경을 이용한 인공 심장 조직 구조적 분석

김경호(KAIST)
SNR Enhancement Technique in Swept-Source Optical Coherence Tomography through Intended Saturation and Restoration



정호상/Ho Sang Jung
부교수/Associate Professor
고려대학교/Korea University

플라즈모닉 나노소재의 바이오의공학 응용
Biomedical Applications of Plasmonic Nanomaterials

Abstract

Plasmonic nanomaterials offer remarkable optical amplification effects, particularly through surface-enhanced Raman scattering (SERS), enabling highly sensitive and label-free molecular detection. This study explores both the fabrication of plasmonic materials and their integration into biosensing platforms. The first section highlights disease diagnosis approaches utilizing various human biofluids, such as urine and saliva, in combination with artificial intelligence (AI) algorithms. Clinical spectral datasets are analyzed to construct patient classification models, while potential biomarker candidates are identified through mathematical frameworks including multivariate curve resolution–alternating least squares (MCR-ALS), cosine similarity mapping, and Pearson correlation analysis. The latter section focuses on wearable sensing technologies that incorporate plasmonic structures for real-time biological monitoring. The convergence of plasmonic materials and AI-based analytics is anticipated to advance the field of personalized and precision diagnostics in the near future.

Brief Biosketch

2025.09 ~ : 고려대학교 바이오의공학부 부교수/Associate Professor, Korea University
2016~2025: 한국재료연구원 선임연구원/Senior Researcher, KIMS
2023~2025: University of Science and Technology (UST) 부교수/Associate Professor, UST
2023~2025: 포항공과대학교 겸임교수/Adjunct Professor, POSTECH



이병권/ByungKun Lee
조교수
대구경북과학기술원(DGIST)

초고속 OCT 및 AdamW 최적화 기반 임상 적용 가능한 세포 수준 분해능 망막 영상법

Clinically Translatable Cellular-Resolution Retinal Imaging Using Multi-MHz SS-OCT and AdamW

Abstract

Three-dimensional (3D) cellular-resolution imaging of the human retina could revolutionize ophthalmology, revealing pathogenic mechanisms and biomarkers for early diagnosis. However, existing approaches have limited practical utility due to their restricted imaging fields, high cost, and inherent hardware complexity. Here, we demonstrate 3D depth-invariant cellular-resolution imaging of the living human retina over a 3-mm × 3-mm field of view using the intrinsically phase-stable multi-MHz retinal swept-source OCT and 3D k-space image processing methods. Single-acquisition imaging of photoreceptor cells, retinal nerve fiber layer, and retinal capillaries is presented across unprecedented imaging fields. The application of the AdamW optimizer to a singular-value-based image sharpness metric enabled quick and accurate estimation of aberration profile. By providing rapidly processed wide-field 3D cellular-resolution imaging in the human retina using a standard point-scan architecture routinely used in the clinic, this platform proposes a strategy for expanded utilization of high-resolution retinal imaging in both research and clinical settings.

Brief Biosketch

ByungKun Lee is an Assistant Professor at the Daegu-Gyeongbuk Institute of Science and Technology.
Prof. Lee received his SB, MEng, and PhD degrees at the Massachusetts Institute of Technology. His doctoral thesis focused on optical coherence tomography techniques for quantitative measurement of total retinal blood flow and high-speed ultrahigh-resolution imaging of the outer retina, under Prof. James G. Fujimoto’s supervision. Before joining DGIST, Prof. Lee has worked with Prof. Wang-Yuhl Oh at KAIST as a postdoctoral research associate.

Label-Free Endoscopic Hyperspectral Imaging for Differentiation of Metastatic and Inflammatory Lymph Nodes in Breast Cancer Models

Na Eun Mun [1,2,3], Thi Kim Chi Tran[1,2,3] and Su Woong Yoo[1,2,3*]
[1]Department of Nuclear Medicine, Chonnam National University Medical School and Hwasun Hospital, South Korea
[2]Biomedical Science Graduate Program, Chonnam National University, South Korea
[3]Institute for Molecular Imaging and Theranostics, Chonnam National University Medical School, South Korea
*yoosw.md@jnu.ac.kr

Abstract

We developed a label-free laparoscopic hyperspectral imaging system to distinguish metastatic from inflammatory lymph nodes in a breast cancer mouse model. Luciferase-expressing 4T1 cells and Complete Freund's Adjuvant (CFA) were used to generate metastatic and inflammatory nodes, respectively. Hyperspectral data (70 bands, 468–698 nm) were analyzed with machine learning algorithms, achieving over 90% classification accuracy. Significant spectral differences above 580 nm reflected distinct optical and pathological characteristics between the two lymph node types.

1. Background

Breast cancer is the most common malignancy among women in Korea, and surgical resection is the primary treatment. In early-stage breast cancer, evaluating sentinel lymph node (LN) metastasis is crucial for determining the extent of surgery and planning postoperative therapy. Current imaging techniques, such as those using dyes (e.g., methylene blue) or radiopharmaceuticals, can visualize lymphatic drainage but cannot confirm metastasis, which still requires histopathological examination after LN excision. However, surgical removal carries risks of complications, and conventional imaging modalities (CT, MRI, PET/CT) require the injection of contrast agents or radioactive tracers. Therefore, there is a need for a minimally invasive, label-free imaging technique that can assess LN metastasis without external agents. Hyperspectral imaging (HSI) captures reflectance signals across dozens of spectral bands, allowing tissue characterization based on spectral differences. As a non-contact, non-ionizing, and label-free method, HSI offers significant advantages over conventional imaging, and in this study, we applied it to a breast cancer mouse model to evaluate metastatic LN and classify them against inflammatory LN.

2. Method

An endoscopic HSI system was developed in our laboratory using a custom-built snapshot-based configuration. The system employs a VNIR snapscan hyperspectral camera utilizing a line-scan method, which captures one line of the image at a time, measures up to 150 spectral bands, and constructs a three-dimensional datacube by stacking scanned lines. This camera was integrated with a color CMOS RGB camera to form a dual-camera system.

An endoscope with a field of view suitable for LN imaging was incorporated into the HSI setup, and imaging was performed at a working distance of approximately 0.5 cm between the endoscope and the LN. Images were captured under 100% halogen illumination with an exposure time of 300ms, acquiring 70 spectral bands covering the wavelength range from approximately 468.89 nm to 697.53 nm. This configuration was adapted and optimized for in vivo LN imaging based on a previously reported endoscopic HSI framework applied to orthotopic tumor imaging [1].

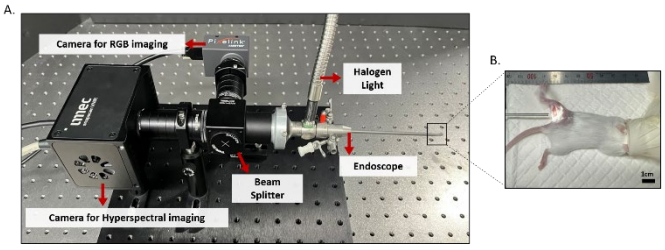


Figure 1. Endoscopic hyperspectral imaging (HSI) System for lymph node (LN) Imaging. (A) System components. The system is comprised of a dual-camera setup with a HSI camera and an RGB imaging camera. (B) Endoscopic HSI system and the distance to the mouse limb for LN imaging.

To evaluate the classification performance of metastatic and inflammatory LNs using machine learning algorithms, hyperspectral images acquired across 70 spectral bands were merged into a single ENVI file using MATLAB. The merged data were analyzed with Breeze software. Background removal was performed using pseudo-RGB representations derived from the hypercube within the software. Three categories—LN, muscle, and background—were defined for both training and testing datasets, and more than five regions of interest (ROIs) were manually annotated for each category. From each ROI, 500 pixels were sampled to generate representative spectra. Tissue classification was performed using multiple machine learning algorithms, including SDCA, LGBM, Fast Tree, Neural Network, and Support Vector Machine (SVM). The classification performance for LN differentiation was evaluated on test samples using precision, recall, and F-score as metrics [1].

For the mouse model, a luciferase-expressing 4T1 murine breast cancer cell line was used to monitor tumor progression [2]. The expression of the luciferase gene enabled bioluminescence imaging, allowing visualization of cancer metastasis from the primary tumor to adjacent LNs. As a control group, Complete Freund's Adjuvant (CFA), a well-known immunostimulatory agent that induces inflammatory responses, was administered to elicit immune activation and confirm inflammation within the LNs [3].

3. Results

In vivo bioluminescence imaging of the breast cancer mouse model with induced LN metastasis confirmed tumor spread to the LN regions adjacent to the primary tumor in all mice. In the mouse model with immune response induced by Complete Freund's Adjuvant (CFA), LNs exhibited inflammatory reactions such as swelling.

Spectral data extracted from HSI of metastatic and inflammatory LNs were analyzed by comparing the mean and standard deviation values for each wavelength. A significant spectral difference was observed at wavelengths above 580 nm. These differences suggest distinct optical properties arising from the compositional and pathological variations between metastatic and inflammatory LN tissues.

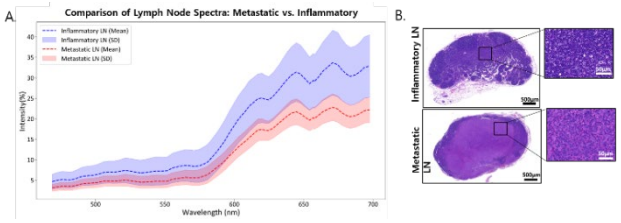


Figure 2. Assessment of the optical characteristics of lymph nodes (LNs) using spectral data. **(A)** Spectral comparison of LNs (Blue line shaded area: Mean and standard deviation (SD) values of the spectrum from inflammatory LNs, Red line with shaded area: Mean and standard deviation (SD) values of the spectrum from metastatic LNs). **(B)** Comparison of pathological findings in LNs.

The differentiation in reflectance spectra between inflammatory and metastatic LNs is primarily driven by five key biophysical parameters that together result in attenuated intensity in metastatic LNs. Chromophore concentration is moderately increased in inflammatory LNs due to immune activation but markedly elevated in metastatic LNs as a result of tumor-induced angiogenesis and dense tumor cell infiltration [4]. While tissue architecture remains largely preserved in inflammation, it becomes severely disrupted in metastasis, showing fibrosis and necrosis, leading to abnormally high cellular density [5]. Light scattering efficiency is maintained in the organized inflammatory structure but significantly reduced in the disorganized metastatic one [6]. Consequently, overall reflectance is higher in inflammatory LNs and noticeably diminished in metastatic LNs, reflecting their distinct optical and pathological properties.

We evaluated the classification performance of multiple machine learning algorithms, including SDCA, LGBM, Fast Tree, Neural Network (NN), and Support Vector Machine (SVM), based on the observed spectral differences. For metastatic LN classification, SVM (93.38 ± 3.64%) and NN (93.16 ± 3.69%) achieved the highest F-scores, showing an excellent balance between precision and recall, with all models performing above 90%. For inflammatory LN classification, LGBM (92.46 ± 3.55%) and SDCA (92.24 ± 3.04%) demonstrated the best performance, indicating high stability and accuracy, while all other algorithms achieved F-scores above 85%.

4. Acknowledgements

This research was supported by the grant of the Korea Health Technology R&D Project through the Korea Health Industry Development Institute (KHIDI), funded by the Ministry of Health & Welfare, Republic of Korea (grant number: RS-2022-KH128380, RS-2025-24536036, RS-2025-19252970) and supported by a grant (HCRI25010) of Chonnam National University Hwasun Hospital Institute for Biomedical Science.

5. Reference

[1] Mun, Na Eun, et al. Endoscopic hyperspectral imaging system to discriminate tissue characteristics in tissue phantom and orthotopic mouse pancreatic tumor model. *Bioengineering.* Vol 11, No.3, p208, 2024

[2] Luo, Xu-Liang, et al. Development and characterization of mammary intraductal (MIND) spontaneous metastasis models for triple-negative breast cancer in syngeneic mice. Scientific reports. Vol 10, No.1, p4681, 2020

[3] Kamala, T. Hock immunization: a humane alternative to mouse footpad injections. *Journal of immunological methods.* Vol 328, No.1-2, p204-214, 2007

[4] Sawada, Junko, et al. High endothelial venules accelerate naive T cell recruitment by tumor necrosis factor-mediated R-Ras upregulation. *The American journal of pathology*. Vol 191, No.6, p1151-1152, 2021

[5] Rivera-García, Luis G., et al. Anti-hyperalgesic and anti-inflammatory effects of 4R-tobacco cembranoid in a mouse model of inflammatory pain. *Journal of Inflammation.* Vol 21, No.1, p2, 2024

[6] Andriana, Putri, et al. "Macrophage mannose receptor CD206 targeting of fluoride-18 labeled mannosylated dextran: A validation study in mice." *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging.* Vol 51, No.8, p2216-2228, 2024

무표지 중적외선 이색성 민감 광음향 현미경을 이용한 인공 심장 조직 구조적 분석

박은우, 황동규, 최환용, 김동규, 안중호, 장진아, 김철홍*

포항공과대학교 IT융합공학과, 기계공학과, 전자전기공학과, 의과학대학원, 바이오프린팅 인공장기 응용기술센터, 의료기기 혁신센터

Label-free mid-infrared dichroism-sensitive photoacoustic microscopy for histostructural assessment of engineered heart tissue

Eunwoo Park, Dong Gyu Hwang, Hwanyong Choi, Donggyu Kim, Joongho Ahn, Jinah Jang, Chulhong Kim*

Department of Convergence IT Engineering, Mechanical Engineering, Electrical Engineering, Medical Science and Engineering, Center for 3D Organ Printing and Stem Cells, and Medical Device Innovation Center, Pohang University of Science and Technology, Republic of Korea

*chulhong@postech.ac.kr

Abstract

Structural alignment in fibrous tissues, such as myocardium and tendons, is a key biomarker for physiological integrity and pathological remodeling. However, conventional imaging relies on staining and indirect quantification, limiting its objectivity and throughput. Here, we present a novel label-free imaging modality—mid-infrared dichroism-sensitive photoacoustic microscopy (MIR-DS-PAM)—that integrates molecular specificity with polarization sensitivity for histostructural analysis. By leveraging anisotropic optical absorption in the mid-infrared band, this dual-contrast technique quantifies both protein content and extracellular matrix (ECM) alignment. Key parameters such as degree and angle of linear dichroism characterize ECM in engineered heart tissues (EHTs). MIR-DS-PAM successfully assesses tissue integrity and detects fibrotic disorganization in EHTs, providing intrinsic contrast without any staining. This analytical platform offers an objective, label-free assessment of tissue remodeling with strong translational potential in histopathology, regenerative medicine, and tissue engineering.

1. 연구 배경

근육 조직과 힘줄과 같은 섬유성 조직에서의 구조적 정렬은 생리학적 무결성과 병리학적 재형성의 핵심 지표이다. 그러나 기존의 조직학적 기법들은 외인성 염색과 간접적인 정량 분석에 의존하기 때문에, 조직 정렬도 평가에서 객관성과 처리 효율성이 제한적이다. 예를 들어, 조직화학 (histochemical) 혹은 공초점 형광현미경 (confocal fluorescence microscopy, CFM) 영상에서는 섬유 구조의 정렬도를 인접 픽셀 간의 2차원 그래디언트 (gradient)를 통해 비물리적으로 추정하는 한계가 있다.

광음향 현미경 (photoacoustic microscopy, PAM)은 내인성 색소의 광흡수를 기반으로 구조적 및 기능적 정보를 제공하는 대체 영상 기법으로 주목받고 있다. 최근에는 이방성 흡수 (anisotropic absorption)를 이용하여 이색성 대비를 구현한 이색성 민감 광음향 현미경 (dichroism-sensitive PAM, DS-PAM)이 개발되어, 복굴절 (birefringent) 조직의 구조적 방향성을 시각화 할 수 있게 되었다 [1].

본 연구에서는 중적외선 이색성 민감 광음향 현미경 (mid-infrared DS-PAM, MIR-DS-PAM)을 제안한다. 제안된 시스템은 분자적 특이성 (molecular specificity)과 편광 민감성 (polarization sensitivity)을 결합한 무표지 (label-free), 이중 대비 (dual-contrast) 이미징 플랫폼으로, 조직의 분자 조성과 미세 구조적 정렬을 동시에 분석할 수 있다. 선형 편광된 중적외선 빛의 이방성 흡수를 이용하여 단백질이 풍부한 세포외 기질 (extracellular matrix, ECM) 성분을 시각화하고, 두 가지 주요 지표인 선형 이색성 정도 (degree of linear dichroism, DoLD) 및 선형 이색성 각도 (angle of linear dichroism, AoLD)를 통해 정량적 분석을 수행한다. 이러한 이중 대비 이미징을 통해, 인공 심장 조직 (engineered heart tissue, EHT) 모델에서 ECM의 조성 및 미세구조적 특징을 동시에 평가할 수 있는 분석 방법을 제시한다.

2. 연구 방법

그림 1a는 MIR-DS-PAM 시스템의 개략도를 보여준다. 중심 파장이 6.0 μm인 중적외선 광원을 사용하여 단백질이 풍부한 ECM을 선택적으로 영상화하였다 [2]. 여기에 반파장판 (half-wave plate)을 이용하여 입사광의 선형 편광 각도를 회전시킬 수 있도록 하며, 생성된 광음향 (PA) 신호는 중심 주파수 30MHz의 초음파 트랜스듀서를 통해 감지하였다. 획득된 MIR-PAM 영상은 Stokes parameter로부터 유도된 다음 식에 따라 평균 PA 및 DS 파라미터 (DoLD와 AoLD)를 계산하여 MIR-DS-PAM 영상을 생성하는데 사용된다 (그림 1b):

$$\mathrm{DoLD} = \sqrt{Q_{PA}^2 + U_{PA}^2}/I_{PA}$$

$$\mathrm{AoLD} = 0.5 * \tan^{-1}(U_{PA}/Q_{PA})$$

여기서 $I_{PA} = p_0 + p_{90}$, $Q_{PA} = p_0 - p_{90}$, $U_{PA} = p_{45} - p_{135}$이다. p_θ는 입사광의 편광 각도 θ에서 획득된 PA 데이터를 의미한다.

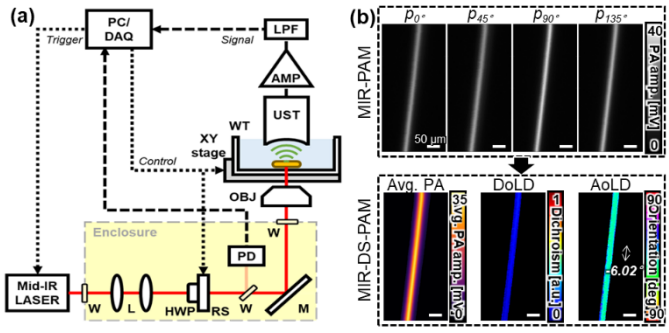


그림 1. (a) MIR-DS-PAM 시스템의 개략도. (b) 직경 20 μm의 단일 섬유를 이용하여 획득한 MIR-PAM 이미지와 이를 기반으로 계산된 MIR-DS-PAM 이미지.

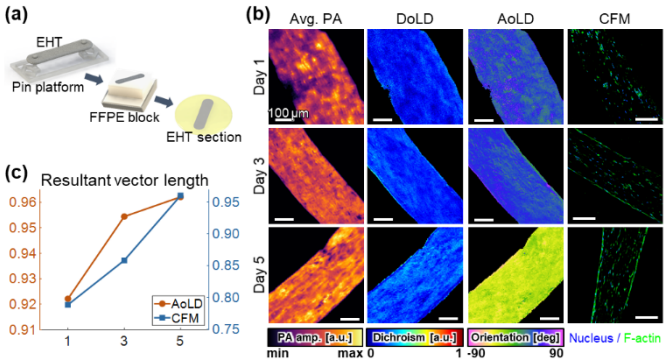


그림 2. EHT의 구조적 무결성 평가. (a) EHT 절편의 준비 과정. (b) EHT 성숙 단계별 MIR-DS-PAM 및 CFM 영상. (c) 성장 별 결과 벡터 길이의 비교

3. 연구 결과

EHT의 미세구조적 발달을 평가하기 위해, MIR-DS-PAM을 1일, 3일, 5일째에 포르말린 고정 파라핀 포매 (formalin-fixed paraffin-embedded, FFPE) EHT 절편에 적용하였다 (그림 2a) [3]. 평균 PA 진폭은 절편 두께나 레이저 변동에 따라 다소 변화하였으나, DS 파라미터는 조직의 구조적 완전성을 평가하는 데 있어 안정적인 지표를 제공하였다 (그림 2b). DoLD는 시간이 지남에 따라 점진적으로 증가하였으며, 이는 ECM 성숙 과정에서 섬유성 단백질의 정렬이 진행되고 있음을 반영한다. AoLD는 EHT이 놓여있는 배향각에 따라 국소 각도를 나타낸다. 더 나아가 AoLD의 표준편차는 시간이 지남에 따라 감소하였는데, 이는 섬유 정렬의 향상을 의미한다. 이러한 경향은 F-actin 염색을 이용한 CFM 이미지 분석에서도 확인되었으며, 세포 정렬의 향상이 시각적으로 관찰되었다. 추가적으로, AoLD로부터 계산된 결과 벡터 길이는 구조적 균일성을 정량적으로 나타낸다 (그림 2c). CFM 영상에서는 인접 픽셀간 계산을 통해 간접적으로 결과 벡터를 추정하는 반면, MIR-DS-PAM은 ECM의 고유한 물리적 특성을 정량화함으로써 전반적인 ECM의 구조적 특성을 포괄적으로 평가할 수 있다. 이를 통해 MIR-DS-PAM은 염색 과정 없이 ECM 발달의 조직 구조를 신뢰성 있게 분석할 수 있음을 보여준다.

MIR-DS-PAM의 병리학적 변화 감지 능력을 평가하기 위해 약물 유도 섬유화 모델을 분석하였다. 심장 섬유화를 유도하는 주요 사이토카인인 전환성장인자 베타 (transforming growth factor-beta, TGF-β)를 처리하여 섬유화를 유발하였다. EHT 섬유화에 대한 MIR-DS-PAM 결과는 PA 진폭의 증가와 AoLD 균일도의 감소를 보여주었으며 (그림 3a), 이는 ECM의 과도한 축적과 함께 정렬의 불규칙화를 나타낸다. 그림 3b는 이에 대응하는 면역형광 분석 결과로, 섬유화 환경에서 활성화된 섬유아세포의 표지자인 알파-평활근 액틴 (alpha-smooth muscle actin, α-SMA)의 발현이 증가함을 확인하였다. 또한 제 1형 콜라겐 (type I collagen, COL1)의 발현이 증가하였으며, 이는 MIR-DS-PAM의 감도 결과와 일치하였다. 이러한 결과는 세포가 TGF-β에 반응하여 ECM의 구성과 배열이 재구성됨을 시사한다.

결론적으로, 본 연구 결과는 MIR-DS-PAM이 염색 과정 없이 (label-free) ECM의 배열 및 재구성 과정을 정량적으로 분석할 수 있음을 확인하였다. 이를 통해 EHT 내 분자적 및 조직기계적 진단 정보를 동시에 포착할 수 있었다. 따라서 MIR-DS-PAM은 재생의학 및 병리학 연구를 위한 이중 대비 기능적 영상 기법으로서의 잠재력이 기대된다.

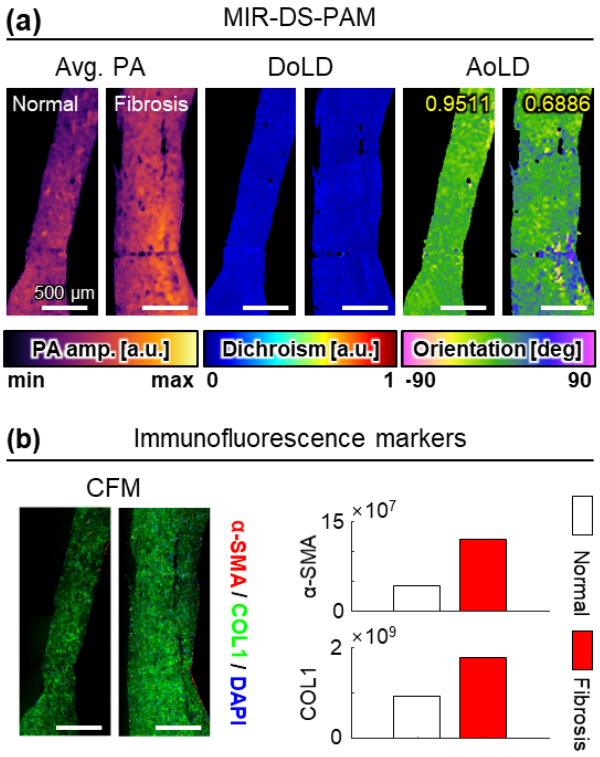


그림 3. 섬유화된 EHT에서의 MIR-DS-PAM 분석. (a) 섬유화된 EHT의 MIR-DS-PAM 영상과 (b) 이에 대응하는 면역형광 분석. 삽입된 노란색 글자는 각 AoLD의 결과 벡터 길이.

4. Acknowledgements

이 연구는 다음 과제의 지원을 받아 수행되었음: This work was supported by the following sources: National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Ministry of Science and ICT (MSIT) (RS-2023-NR077260), Basic Science Research Program through the NRF funded by the Ministry of Education (RS-2020-NR049599), Commercialization Promotion Agency for R&D Outcomes (COMPA) funded by the MSIT (RS-2025-02304660), a grant of the Korea Health Technology R&D Project through the Korea Health Industry Development Institute (KHIDI), funded by the Ministry of Health & Welfare, Republic of Korea (RS-2024-00512879), Korean Fund for Regenerative Medicine funded by MSIT, and Ministry of Health and Welfare (21A0104L1), the Bio Industry Technology Development Program (RS-2024-00448560) funded by the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE), and BK21 FOUR program.

5. 참고 문헌

[1] E. Park, et al. “Azimuth mapping of fibrous tissue in linear dichroism-sensitive photoacoustic microscopy.” *Photoacoustics*, Vol 31, p. 100510, 2023

[2] E. Park, et al. "Unsupervised inter-domain transformation for virtually stained high-resolution midinfrared photoacoustic microscopy using explainable deep learning.” *Nature Communications*, Vol 15, p.10892, 2024

[3] D. G. Hwang, et al. “Bioprinting-Assisted Tissue Assembly for Structural and Functional Modulation of Engineered Heart Tissue Mimicking Left Ventricular Myocardial Fiber Orientation.” *Advanced Materials*, Vol 36, Issue 34, p. 2400364, 2024.

의도적 포화 및 복원을 통한 파장 가변 광 간섭 단층 촬영의 SNR향상 기법

김경호[1], 남형수[1], 이우진[1], 유홍기[1*]

한국과학기술원 기계공학과[1]

SNR enhancement technique in swept-source optical coherence tomography through intended saturation and restoration

Gyeongho Kim[1], Hyeongsoo Nam[1], Woojin Lee[1], Hongki Yoo[1*]

Department of Mechanical Engineering, KAIST, Daejeon, 34141, Republic of Korea

*h.yoo@kaist.ac.kr

Abstract

Swept-source optical coherence tomography (SS-OCT) is widely used for high-resolution, non-invasive imaging of biological samples, but its sensitivity is fundamentally limited by restricted optical power and noise. To address this challenge, we propose a signal-to-noise ratio (SNR) enhancement strategy that intentionally saturates interference signals by amplifying reflected light from samples and restoring signals using a deep learning framework inspired by audio declipping. Experimental results showed that inserting a booster optical amplifier increased SNR by 13.7 dB compared with the baseline. Moreover, a network trained on simulated data successfully restored saturated OCT signals, outperforming conventional image-domain inpainting. These findings highlight the potential of our method to enhance SNR and extend imaging depth in highly scattering samples.

1. 연구 배경

Swept-source optical coherence tomography (SS-OCT)는 빠른 스캔 속도와 깊은 침투 깊이, 우수한 분해능과 감도를 가지는 비파괴적인 단면 영상 기법으로 의료 영상 분야에서 널리 활용되고 있다. 신호 대 잡음 비 (SNR)는 OCT 감도를 정의하는 핵심 변수로, 원리적으로는 balanced detection (BD) 조건에서 SNR이 소스의 파워에 비례한다 [1]. 그러나 안전상의 제한으로 인해 조직에 사용할 수 있는 광 파워에는 한계가 있습니다. 또, 과도한 광 파워는 검출기의 동적 범위를 초과하여 간섭 신호의 클리핑 (clipping)을 초래하며, 이는 Inverse fourier-transform (IFT)을 통한 깊이에 따른 반사율로 재구성하는 과정에서 고조파 (harmonic) 아티팩트를 발생시킨다. 이렇게 실질적으로 제한된 파워는 영상 깊이를 제약하는 원인이 되는데, 깊은 영역일수록 산란으로 인해 반사광이 더욱 줄어들어 SNR이 저하되기 때문이다. 이를 해결하기 위해 최근에는 딥러닝이 잠재적 해결책으로 주목받고 있는데, 포화된 신호를 단면 영상으로 재구성한 후에, 이미지 인페인팅을 통해 포화 아티팩트를 보정하는 원리이다 [2]. 하지만 인페인팅은 영상의 복원을 보장하는 방식이 아니므로, 원 영상의 복원 방법이 필요하다. 클리핑 된 SS-OCT 간섭 신호의 직접적인 복원을 시도한 연구는 없지만, 신호의 구성 형태가 유사한 오디오 신호의 경우 디클리핑 문제는 활발히 연구되고 있다 [3, 4]. 따라서 본 연구에서는 두 가지 방법을 통해 이러한 문제를 해결하고자 한다. 첫째, 오디오 디클리핑 연구 결과를 활용하여 SS-OCT 간섭 신호를 직접 복원해 검출기의 동적 범위 제한에서 기인하는 포화 아티팩트를 극복한다. 둘째, 시료 반사광을 증폭하여 시료에 허용된 최대 광 파워를 초과하는 효과를 구현한다. 이를 바탕으로 기존 SNR 한계를 극복할 수 있는 새로운 접근법을 제안한다.

2.연구 방법

BD조건에서 SNR은 다음과 같이 표현될 수 있다 [1].

$$SNR = \frac{P_{Samp} \cdot P_{Ref}}{[e/\rho(P_{Ref}+P_{samp})+RIN \cdot \zeta \cdot P_{Samp} \cdot P_{Ref}+\sum i_{Indep}^2]BW}$$

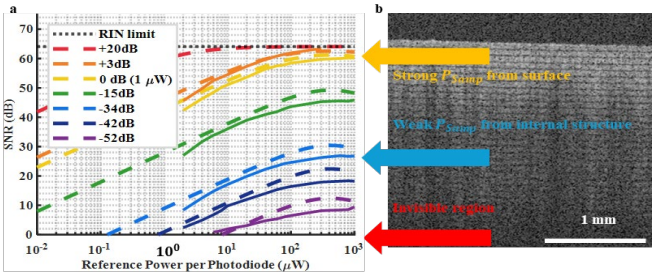


그림 1. a) SNR 시뮬레이션 및 측정 결과. b) Tape 이미지

여기서 분자는 신호 세기를 나타내며, 분모는 총 잡음을 나타내는데, 이는 각각 샷 노이즈, 상대 세기 잡음(RIN), 그리고 파워에 독립적인 잡음의 합으로 구성됩니다. 여기서 P_{Samp} 은 시료 암(sample arm)에서 반사된 광 파워, P_{Ref} 는 기준 암(reference arm)에서 반사된 광 파워, ρ는 검출기의 양자효율, RIN 은 상대 세기 잡음의 정규화 비율, BW 는 검출 대역폭, ζ는 공통 모드 제거비(CMRR)를 의미한다. 우리는 먼저 거울 이미징을 통해 시스템의 이론적 모델링과 실험적 측정 간의 일관성을 검증했다. 이후 시료 반사 신호를 증폭하는 것이 SNR 향상으로 이어지는지 조사했다. 마지막으로 증폭된 빛으로 이미징 한 후 포화 신호를 복원하여 결과를 분석했다. 포화 복원은 지도학습 (supervised learning)을 통해 수행되었는데 포화 신호의 정답을 얻기 위해서는 추가적인 하드웨어 구성이 필요하므로, 본 연구에서는 시뮬레이션 기반 데이터셋을 구축해 학습 후 실제 포화 데이터에의 일반화 성능을 평가하였다. 인위적 포화 신호는 원래 간섭 신호에 포화 시뮬레이션 알고리즘을 적용하여 생성했으며, 해당 정상 신호와 쌍을 이루어 네트워크 학습에 사용되었다. 네트워크 아키텍처는 오디오 신호 복원 및 이미지 인페인팅에서 제안된 방법들 [2-5]을 변형하여 적용했으며, 각 손실 항의 가중치는 본 연구의 데이터셋 검증 성능에 기반하여 경험적으로 결정했다.

3. 연구 결과

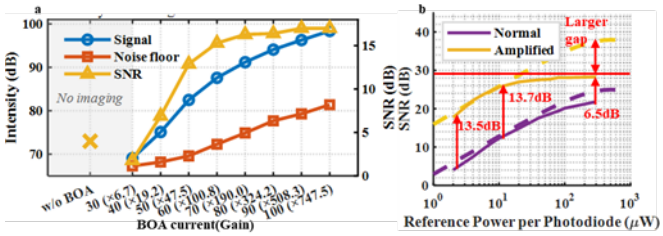


그림 2. a) 인가 전류에 따른 SNR. b) P_{Ref}에 따른 SNR

그림 1a는 기준광 및 시료광 파워에 따른 이론적 SNR 예측(점선)과 실험 측정값(실선)을 비교한 것인데, 예측과 실험 사이에 높은 정합성을 띄는 것을 통해, 이론적 모델링이 우리 시스템의 성능을 잘 예측한다는 것을 알 수 있다. 깊이에 따라 반사율이 일정한 시료(예: 테이프)의 경우, 반사광은 깊이에 따라 감소하므로, 서로 다른 시료 파워에서 측정된 SNR은 깊이에 따른 SNR로 해석할 수 있다(그림 1b). 이를 통해 표면 근처에서는 시료 파워가 증가하더라도 (붉은색 곡선으로의 변이) RIN 노이즈에 의해 최대 SNR이 제한되지만, 더 깊은 저반사 영역에서는 샘플 파워를 증폭시키면 뚜렷한 SNR 향상을 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다. 그림 2a는 BOA를 사용하여 반사광을 증폭했을 때 얻은 SNR 향상을 보여준다. 전류가 증가함에 따라 SNR은 향상되었으며, BOA를 사용하지 않았을 때 대비 약 13.7 dB의 향상으로 수렴했습니다. 또한 서로 다른 기준광 파워에서도 비교적 일관된 SNR 향상이 관찰되었으나, 최대 SNR은 이론적 기대치보다 낮은 수준에서 포화되는 것을 확인했다(그림 2b). 이러한 제한은 BOA에 의해 추가적으로 유입된 잡음 때문으로 해석된다.

그림 3. 복원 성능 비교

Classification	Model	PSNR(dB)	SSIM	Pearson Corr
	Saturated input	33.57	0.74	0.82
	Ground Truth	∞	1	1
Signal restoration	Ours	<u>36.72</u>	<u>0.93</u>	<u>0.98</u>
	DefTAN2	35.88	0.89	0.97
Image inpainting	U net	34.92	0.82	0.94
	ESRGAN	35.76	0.88	0.97

그림 3은 PSNR, SSIM, Pearson 상관계수를 사용하여 평가한 포화 신호 복원 성능을 보여준다. 모든 정량적 지표에서 제안된 간섭 신호 복원 방식은 영상 영역 인페인팅보다 우수했으며, DDD를 차용한 우리 모델 [3]이 가장 뛰어난 결과를 달성했다. DDD는 GAN 프레임 워크를 기반으로, 생성기는 RCNN(Recurrent Convolutional Neural Network) 아키텍처를 채택하고 있다. 여기서 합성곱 계층은 포화 영역을 탐지하고, RNN 계층은 인접한 비포화 신호로부터 시간적 문맥 정보를 활용하여 복원을 수행한다. 판별기는 다중 스케일 판별기(MSD)와 다중 주기 판별기(MPD)로 구성되며, 깊이가 주파수에 인코딩 된 다중 사인 성분으로 이루어진 SS-OCT 신호의 연속성과 주기성을 효과적으로 학습한다. 그림 4a는 시뮬레이션 된 포화 간섭 신호와 그 복원 결과를 보여준다. 복원된 신호(주황색)는

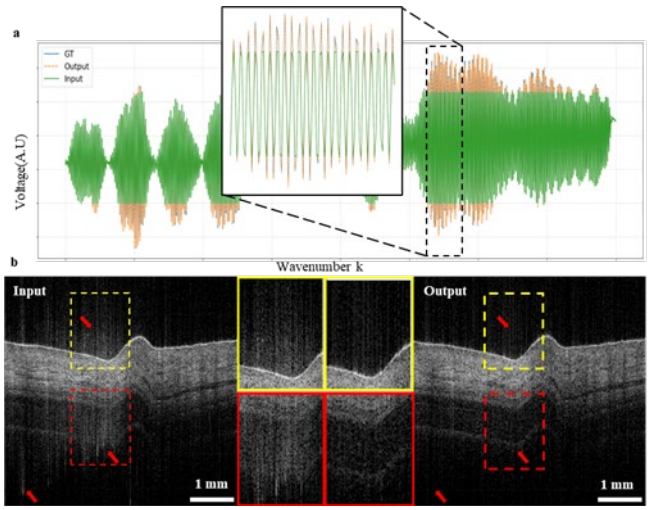


그림 4. a) 시뮬레이션에 의해 포화된 신호의 복원 결과. b) 실제 포화된 신호의 복원 결과

정답 신호(파란색)와 높은 일치를 보이며, 제안된 네트워크의 복원 성능을 뒷받침한다. 그림 4b는 실제 포화 간섭 신호를 복원한 뒤 재구성한 단면 영상을 비교한 것인데, 이는 제안된 네트워크가 실제 데이터에서도 강력한 일반화 성능을 유지함을 보여준다.

4. 결론

우리는 시료 암(sample-arm)의 반사광 증폭과 딥러닝 기반 포화 신호 복원을 결합해 SS-OCT SNR 향상 기법을 제시했다. 실험 결과, 시료의 반사광 증폭을 통해 13.7dB 의 SNR 향상을 확인했다. 또한, 오디오 디클리핑에서 차용한 네트워크는 포화된 OCT 간섭 신호를 효과적으로 복원했으며, 시뮬레이션 데이터로 학습된 네트워크가 실제 측정에도 강력한 일반화 성능을 보였다. 이러한 결과는 제안된 방법이 산란이 심한 생체 조직에서 포화나 안전상의 제약을 넘어서 더 높은 광 파워를 활용할 수 있게 함으로써, 영상 깊이를 확장할 수 있음을 시사하며, 향후 생의학 연구에서 높은 활용 가능성과 잠재력을 지니고 있음을 보여준다.

5. Acknowledgements

이 연구는 보스턴 코리아 혁신 연구 지원 과제의 지원을 받아 수행하였음. (RS-2025-16032976)

6. 참고 문헌

[1] Yun, S. H. et al. High-speed optical frequency-domain imaging. Opt. Express 11, 2953–2963 (2003)

[2] Hu, M. Deep learning-based inpainting of saturation artifacts in optical coherence tomography images. J. Innov. Opt. Health Sci. 17, 2350026 (2024)

[3] Yi, J. et al. DDD: A Perceptually Superior Low-Response-Time DNN-Based Declipper. ICASSP, 801-805 (2024)

[4] Kwon, Y. H. et al. Speech-declipping transformer with complex spectrogram and learnerble temporal features. arXiv: 2409.12416 (2024)

[5] Ronneberger, O. et al. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. MICCAI 9351, 234-241 (2015)

바이오반도체

좌장: 이영준(KAIST), **윤홍준**(가천대학교)

11월 7일 (금) **일강원 104 (15:30–17:00)**

장병철(경북대학교)
Invited Medical Image Synthesis Using Generative AI by Harnessing Noise of Memristor

유호천(한양대학교)
Invited 반도체 소자를 통한 생체 신호 감지와 페이크 데이터 탐지

이원우(한양대학교)
Negative Photoconductance-Driven Neuromorphic-Photodetector in Low-Power ZnON TFTs Integrated with PCB Systems

상민규(가천대학교)
초고감도 금 도핑 실리콘 나노멤브레인 기반 온도 센서

백상훈(한양대학교)
피지컬 AI 기반 차세대 생체 진단을 위한 대면적 소프트 센서 어레이



장병철/Byung Chul Jang
부교수/Associate Professor
경북대학교/Kyungpook National University

메모리스터의 잡음을 활용한 생성형 인공지능 기반 의료 영상 합성

Medical image synthesis using generative AI by harnessing noise of memristor

Abstract

Generative artificial intelligence (AI) has shown promise in predicting and visualizing skin laser treatment outcomes, thereby enhancing patient consultations in aesthetic dermatology. Yet, conventional generative adversarial networks (GANs) often face challenges in producing diverse and realistic outputs, largely due to mode collapse stemming from low-entropy noise generated by software-based pseudo-random number generators (PRNGs). In this study, we present a conditional GAN (cGAN) framework augmented with a quantized-memristive true random number generator (Q-mTRNG). The proposed Q-mTRNG employs a copper nanoscale filament embedded within a high-cross-linking-density polymer matrix to produce high-entropy, truly random signals through a stable quantum point contact mechanism. By leveraging this enhanced randomness, the cGAN effectively expands its latent space exploration capability, enabling the generation of diverse and lifelike post-treatment images from corresponding pre-treatment facial photographs.

Brief Biosketch

2025~현재: 경북대학교 전자공학부, 부교수
2021~2025: 경북대학교 전자공학부, 조교수
2018~2021: 삼성전자 메모리 사업부, Staff Engineer



유호천
부교수
한양대학교

반도체 소자를 통한 생체 신호 감지와 페이크 데이터 탐지
Semiconductor Devices for Biosignal Monitoring and Fake Data Detection

Abstract

Emerging edge AI applications need device-level solutions that are energy-efficient, reliable, and able to handle challenges in both security and healthcare. In this talk, I will share two recent directions from our work. First, we are developing optoelectronic synaptic devices for biosignal monitoring. These photonic synapses mimic neural processing, enabling low-power and adaptive sensing of optical biosignals such as PPG and multi-wavelength physiological signals. By combining photonic sensing with neuromorphic architectures, this approach opens a pathway toward real-time, intelligent healthcare monitoring. Second, we are building custom semiconductor devices for fake media detection. Gaussian transistors use intrinsic device variability to perform analog activation and probabilistic inference, enabling robust voice authentication. Photo-spike photodetectors convert light fluctuations into asynchronous spikes, producing physical randomness that can be used for deepfake image detection and secure watermarking. These efforts show how tuning the physics of emerging devices can tackle next-generation challenges in secure AI sensing and biosignal neuromorphic processing.

Brief Biosketch

Hocheon Yoo, PhD is an Associate Professor in the Department of Electronic Engineering at Hanyang University, South Korea, where he leads the We Design Devices (WeDD) Lab. His research focuses on the development of novel semiconductor devices for neuromorphic computing, secure hardware, and sensor-integrated AI systems. He pursues a material-device–application co-design approach, exploring how emerging materials and structures can directly enable new forms of intelligent behavior. He is the Korean principal investigator of a Korea–US project on foundational semiconductor technologies (NRF–NSF, 2024–2027), and also leads a Korea–Canada academia–industry collaboration with McGill University and 1-Material. His professional activities include:

- Vice Chair, Neuromorphic Device Standardization Roadmap Committee, Korea Semiconductor Industry Association (2024–present)
- Co-Chair, MEMS & Sensor Systems Division, Korean Conference on Semiconductors (KCS 2025)
- Division Chair, Bio-Semiconductor, Korean Society for Medical and Biological Engineering (2025–present)
- Secretary, Active Matrix Devices (AMD) Committee, Society for Information Display (2024–present)
- Chair, 10th TFT Short Course, SID Korea (2025)
- Focused Section Chair – Neuromorphic Devices and Systems, IEEE FLEPS 2025

PCB 시스템에 통합된 저전력 ZnON TFT의 음의 광전도도 구동 신경형 광검출기

이원우[1] , 유호천[1, 2, *]

한양대학교 인공지능반도체공학과[1]

한양대학교 융합전자공학과[2]

Negative Photoconductance-Driven Neuromorphic-Photodetector in Low-Power ZnON TFTs Integrated with PCB Systems

Won Woo Lee[1], Hocheon Yoo[1, 2, *]

[1]Department of Artificial Intelligence Semiconductor Engineering, Hanyang University, Korea

[2]Department of Electronic Engineering, Hanyang University, Korea

[*]hocheon@hanyang.ac.kr

Abstract

This study demonstrates ZnON thin-film transistors (TFTs) as multifunctional optoelectronic platforms capable of neuromorphic computation and photodetection within a single device. By tuning gate bias, the channel switches between synaptic and photodetector modes, operating reliably at sub-1 V and μW/cm² light intensities. A wavelength-dependent negative photoconductance effect enables red-light potentiation and green/blue-light depression, emulating excitatory/inhibitory synaptic responses. Integration with a PCB module enabled real-time object detection under ambient light without external IR sources, validating low-power and hardware-level applicability. These results establish ZnON TFTs as promising reconfigurable building blocks for next-generation neuromorphic–photonic systems.

1. 연구 배경

뉴로모픽 엔지니어링과 광전자공학의 최근 발전은 최소한의 전력으로 광 정보를 동시에 처리, 저장, 감지할 수 있는 차세대 소자에 대한 수요를 부각시키고 있다. 기존 광검출기는 영상 및 통신 분야에서 널리 사용되지만, 다기능성을 구현하기 위해 외부 바이어스나 추가 회로가 필요하여 확장성과 에너지 효율이 제한적이다. 반면, 생물학적 시냅스를 모방한 뉴로모픽 소자는 뇌와 유사한 정보 처리와 연산 능력을 제공하지만, 광학 감지와 시냅스 기능을 하나의 소자에 통합하는 것은 여전히 난제로 남아 있다. 산화물 반도체, 특히 ZnON은 높은 투명성, 전자적 특성의 조절 용이성, 저온·대면적 제조 호환성 덕분에 유망한 대안으로 떠오르고 있다.

본 연구에서는 ZnON 박막 트랜지스터(TFT)를 기반으로 게이트 바이어스를 조절하여 단일 채널을 뉴로모픽 모드와 광검출 모드로 전환 가능한 이중 동작 소자를 구현하였다. 해당 소자는 –1V의 낮은 전압에서도 안정적으로 작동하며 μW/cm² 수준의 약한 광 세기에서도 재현성 높은 응답을 보여 초저전력·휴대용 응용에 적합성을 입증했다. 또한 파장 의존적 음의 광전도도(NPC) 현상이 발견되었는데, 적색광은 시냅스 증강을, 청색 및 녹색광은 시냅스 억제를 유도하여 생물학적 흥분·억제 반응을 모사한다. 이러한 양방향 시냅스 제어는 인공 시각 인식 및 통합 메모리–센싱 아키텍처 설계에 중요한 가능성을 제시한다. 나아가 ZnON TFT를 PCB 기반 회로와 직접 연결하여 실시간 신호 처리가 가능한 하드웨어 모듈을 제작했으며, 형광등과 같은 주변광만으로도 물체의 이동을 안정적으로 감지할 수 있음을 보여주었다. 이 결과는 NPC 효과의 실용적 가치와 ZnON TFT의 차세대 다기능 광전자 소자로서의 잠재력을 동시에 입증한다.

2.연구 방법

실험에 사용된 ZnON 반도체는 magnetron sputtering 공정을 통해 제작되었다. 증착 시 Zn target (99.99%) 120W RF 전력하에 Ar, N2, O2 gas를 각각 3, 1, 100 sccm을 주입하여 reactive sputtering을 진행하여 30 nm 두께의 반도체 박막을 형성하였다. 반도체 증착 전 SiO_2 300nm가 형성된 기판은 Acetone, IPA, DI water를 사용하여 각 10분씩 클리닝 되었다. ZnON 반도체 필름은 250℃ 조건에서 1시간 어닐링하여 Zn_3N_2 나노결정을 형성하고 Oxygen vacancy와 Nitrogen Vacancy를 감소시켰다. Source/Drain은 Ar gas 50 sccm 조건에서 DC Power를 이용한 magnetron sputtering 공정을 통해 70 nm의 투명 전극을 형성하였다. 소자 크기는 width 1000 μm, length 100 μm로 고정했다.

모든 전기적 특성을 확인하기 위한 전류-전압 (I-V) 측정은 Keithley 4200A를 이용한 probe station을 사용하였다. 광학 특성을 확인하기 위한 광원은 Thorlabs의 LED를 사용하였으며, 455, 530, 660 nm 파장을 갖는 3가지 광원이 사용되었다.

3. 연구 결과

ZnON TFT는 파장에 따라 다른 빛 반응성을 보인다. 그림 1a에서 볼 수 있듯이 Light power density를 0.11 mW·cm^{-2}로 고정하였을 때, 적색광인 660 nm 파장에서 전류가 initial state보다 증가하였고, 녹색, 청색광인 530, 455 nm 파장에선 전류가 감소하는 특성이 관찰되었다. 이 때, V_{gs} = 0 V, V_{ds} = 1 V으로 고정한 상태에서 측정되었다. 녹색 및 청색광에선 광이 조사되었을 때 전도도가 감소하는 Negative photoconductance (NPC) 효과가 나타났다. 또한 백색광에 노출되었을 때 3가지 파장의 합의 current level을 갖는다. 이러한 빛 반응 거동을 명확히 하기 위해 V_{gs}를 -20 V부터 20 V까지 스윕하여 전달 특성을 확인하였다. 그림 1b, 1c, 1d는 각각 V_{ds} = 1 V일 때 파장에 따른 전달 특성을 보여준다. 빛이 조사되었을 때 적색광은 Photovoltaic effect으로 인한 V_{th} shift와 photo conductance effect이 동시에 일어나 기존에 보고된 phototransistor 거동이 관찰되었다[1]. 반면에 녹색 및 청색광에선 빛이 조사될 때

turn-on 영역에서 dark 상태보다 current가 감소하는 거동을 확인할 수 있었다.

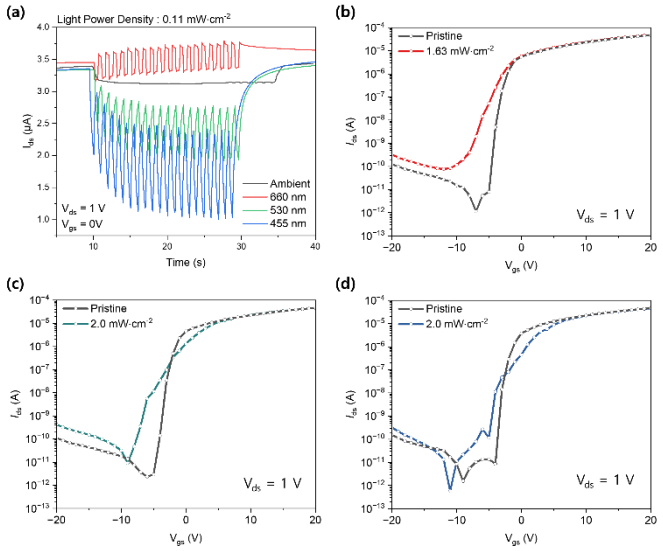


그림 1. (a) ZnON TFT의 0.11 mW·cm^{-2}의 빛이 조사될 때 파장에 따른 current 변화. (b) 660 nm, (c) 530 nm, (d) 455 nm 조건에서 Dark 상태와 빛이 조사될 때 전달 특성 비교

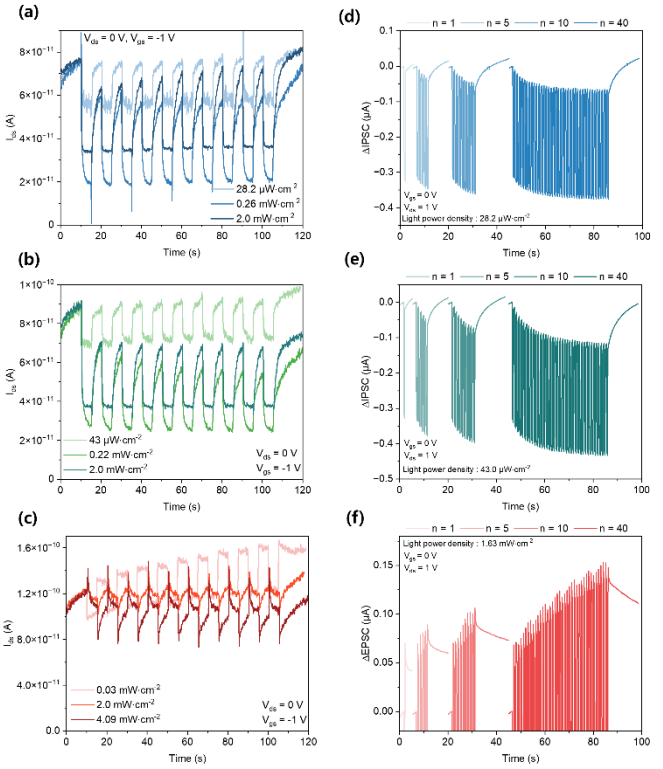


그림 2. (a-c) V_{gs} = -1 V, V_{ds} = 0 V일 때 빛의 파장 및 intensity에 따른 photodetector 특성. (d-f) V_{gs} = 0 V, V_{ds} = 1 Vd일 때 빛의 파장 및 pulse number (n)에 따른 Synapse 특성.

그림 2는 Vds 및 Vgs 조건에 따른 photodetecor 특성과 synapse 특성이 변화하는 것을 확인할 수 있다. V_{ds} = 0 V, V_{gs} = -1 V일 때 낮은 Intensity를 갖는 빛에서는 사각파형태의 전류 변화가 관찰되지만, 빛의 세기가 강하면 광생성 전자-전공 쌍이 절연체와 반도체 계면에 축척되어 약한 persistent photoconductance (PPC) 효과가 나타나 느린 recovery를 보였다[2]. V_{gs} = 0 V, V_{ds} = 1 V 조건에서 광을 조사하였을 때, photogating effect이 지배적으로 나타나며 시냅스 특성이 관찰되었다. 청색 및 녹색광에서는 자극이 증가할수록 전류가 감소하여 depression 행동을, 적색광에선 전류가 증가하여 potentiation 행동을 모방한다. 이것은 detector와 synapse 거동을 switching할 수 있음을 시사하며, in-sensor computing 및 multimodal sensor에 유망하게 사용될 수 있다.

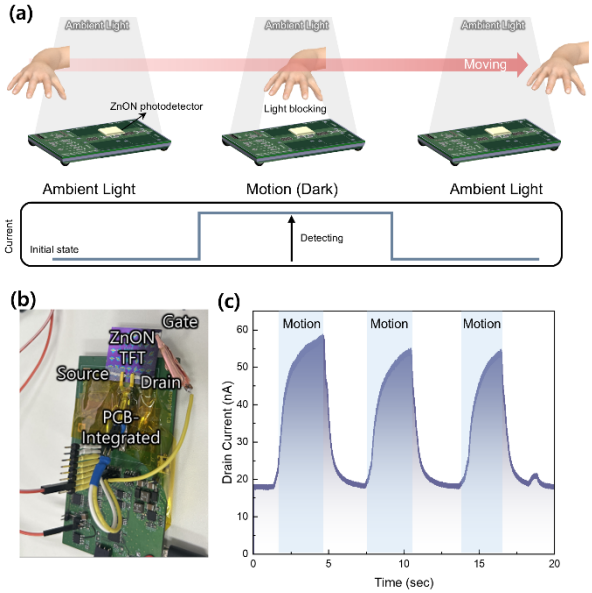


그림 3. (a) PCB-integrated detector system의 motion 인식 개략도. (b) PCB-integrated detector system 이미지 (c) ambient light과 motion 감지 전류 데이터.

백색광에서 전류가 감소하는 특성을 이용하여 motion을 감지하는 PCB-integrated detector를 구현하였다. 주변에서 사용하는 형광등에 반응하여, 기존의 IR 광원 없이 물체를 감지할 수 있으며, 그림 3a에서 볼 수 있듯이 빛을 차단하여 전류 변화를 감지한다. 그림 2b는 PCB-integrated detector 사진을 보여준다. 그림 3c와 같이 detector 주위에 물체가 움직일 때 흡수하는 빛의 차이로 인해 전류의 변화가 발생하는 것을 확인할 수 있다. NPC 효과를 이용한 detector는 별도의 광원 없이 저전력 구동 및 차세대 센서 통합 시스템에 기여할 것으로 기대된다.

4. Acknowledgements

이 연구는 National Research Foundation of Korea (NRF) 과제의 지원을 받아 수행하였음. (RS-2024-00438999). 또한, 본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보 통신 기획 평가원의 정보통신 방송 혁신 인재양성 (인공지능반도체 고급 인재양성)사업 연구 결과로 수행되었음(IITP-(2025)-RS-2023-00253914)

5.참고 문헌

[1] Yoo. H, et al. "A review of phototransistors using metal oxide semiconductors: Research progress and future directions." Advanced Materials 33.47 (2021): 2006091.

[2] Tan. P, et al. "Hysteresis-free Ga2O3 solar-blind phototransistor modulated from photoconduction to photogating effect." Applied Physics Letters 120.7 (2022).

초고감도 금 도핑 실리콘 나노멤브레인 기반 온도 센서

상민규[1,*]

가천대학교 전자공학과[1]

Ultra-high Sensitive Au-Doped Silicon Nanomembrane Based Temperature Sensor

Mingyu Sang[1,*]

Department of Electronic Engineering, Gachon University, 1342 Seongnamdaero, Sujeong-gu, Seongnam 13120, Republic of Korea [1]

Abstract

Continuous and precise body temperature monitoring provides valuable insights into human physiological conditions for medical diagnostics and health management. Here, we present an ultra-high sensitive and stretchable gold-doped silicon nanomembrane (Au–SiNM) epidermal temperature sensor array with a record temperature coefficient of resistance (TCR) of −37270.72 ppm °C^{-1}, approximately 22 times higher than that of conventional metal-based sensors. The ultra-sensitivity arises from the shift of the freeze-out region toward the intrinsic region and Fermi-level modulation achieved through controlled gold doping in p-type SiNMs.

The fabricated 4 × 4 sensor array, integrated on a 3.5 μm-thick serpentine polyimide (PI) mesh, exhibits excellent mechanical stability under 30% strain, fast response (< 9 ms), and minimal hysteresis (< 0.8%). The conformal attachment on human skin enables real-time thermal mapping with high spatial resolution and long-term reliability.

In-vivo and in-vitro demonstrations include continuous body temperature monitoring on the back and respiration tracking at the philtrum, showing clear temperature modulation corresponding to breathing cycles and exercise-induced body heat variations.

These results highlight the biocompatibility, precision, and flexibility of Au–SiNM-based epidermal electronics, establishing a new platform for medical diagnostics, physiological monitoring, and future silicon-based flexible systems.

1. 연구 배경

체온은 인체의 대사, 면역, 순환 상태를 반영하는 핵심 생리 지표로, 고정밀 연속 측정 기술은 질병 조기 진단 및 건강 관리에 필수적임. 기존의 적외선 (Infrared) 비접촉 방식은 정확도가 높지만, 피부 움직임과 외부 환경 변화에 민감하여 실시간 감지가 어렵다는 한계가 있음.

이에 따라, 피부에 직접 부착되어 기계적 순응성과 생체적합성을 동시에 확보한 에피더멀 (epidermal) 온도 센서 연구가 활발히 진행되고 있음. 그러나 유기소재 기반 센서는 내열성과 장기 안정성이 낮으며, 금속 기반 센서는 민감도 (Temperature Coefficient of Resistance, TCR)가 제한적임. [1-3]

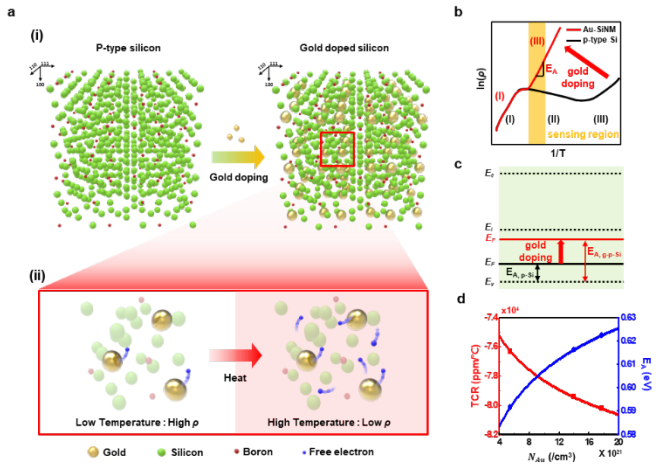


그림 1. 금도핑 실리콘 온도 센서 개요

본 연구에서는 금 (Au)을 깊은 준위 불순물 (deep impurity)로 도핑하여 실리콘의 페르미 준위를 조절하고 동결영역 (freeze-out region)을 내재영역으로 이동시킴으로써, 기존의 무기소재 한계를 극복하고 초고감도를 달성하는 새로운 접근법을 제안함. [4]

2.연구 방법

2.1 소자 제작:

p-type SOI 웨이퍼 위에 금을 10 nm 증착 후, 1000–1100 °C의 산소 분위기에서 열확산시켜 균일한 Au 도핑을 구현함. 도핑된 SiNM (두께 300 nm)을 폴리이미드 (PI, 1.5 μm) 기판에 전사하고, 서펜타인 (serpentine) 구조로 패터닝하여 4×4 어레이를 제작함.

2.2 전극 및 봉지층:

구리 (Cu, 400 nm) 전극을 증착 후, 상하층 PI로 완전 캡슐화하여 기계적 중립면 (neutral mechanical plane)에 SiNM이 위치하도록 설계함. 전체 두께는 약 3.5 μm.

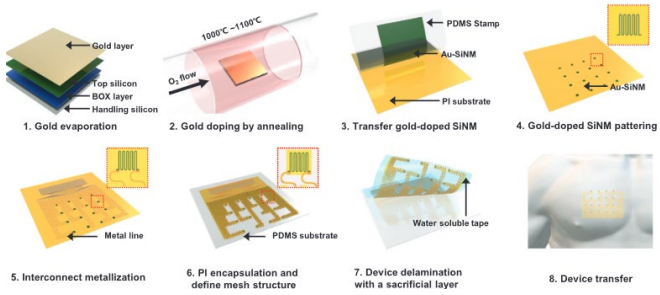


그림 2. 금도핑 실리콘 기반 온도 센서 제작 과정

2.3 성능 분석:
체온 범위의 온도 변화 (25–45 °C)에 따른 저항 변화를 측정하여 TCR 산출, 도핑 온도 (900–1100 °C)와 Boron 농도 (10^{18}–10^{19} cm^{-3})에 따른 특성 변화를 비교함. 또한 FEA (Finite Element Analysis) 및 in-vivo 부착 실험을 수행함.

3. 연구 결과
3.1 이론 및 도핑 특성:
분자동역학 (MD) 시뮬레이션과 SIMS 분석을 통해 Au 원자의 균일 확산 및 일정 농도(N_{Au})를 확인하였으며, 이로 인해 활성화 에너지(E_A)가 증가함에 따라 TCR의 절댓값이 증가함을 규명함.

3.2 전기적 민감도:
Au–SiNM 센서는 TCR = –37270.72 ppm $°C^{-1}$ 로, 금속 (1690 ppm $°C^{-1}$) 및 p-Si (1771 ppm $°C^{-1}$) 센서 대비 22 배 이상 높은 감도를 보임.

3.3 기계적 안정성:
30% 인장 하에서도 변형율 0.7% 미만, 5000회 사이클 후 저항 변화 < 0.7%로 우수한 신뢰성 확보.

3.4 실시간 생체 모니터링:
인체 피부 (등 및 인중)에 부착하여 운동 시 체온 상승 (32.3→34.1 °C)을 정확히 추적하였으며, 호흡 주기에 따른 온도 변화를 정밀히 감지하여 심박수 변화와 정합됨.
땀과 움직임에 의한 간섭을 최소화하며, 기존 금속 센서 대비 4.2% vs 0.23%의 상대 저항 변화를 보임

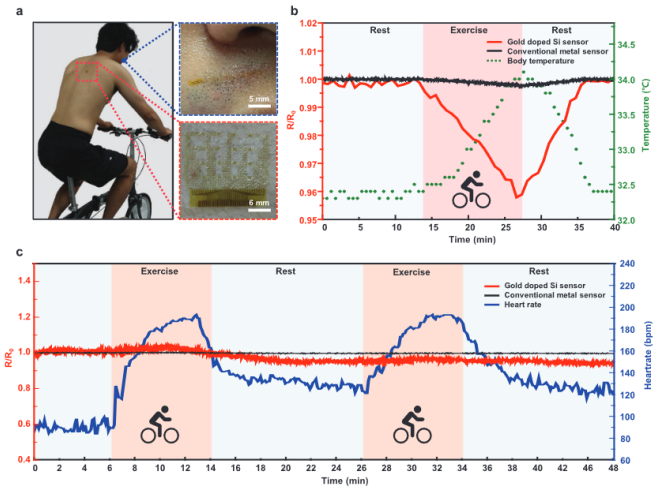


그림 3. 금도핑 실리콘 기반 온도 센서 in vivo 실험

4. Acknowledgements
This research was supported by Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT) grant funded by the Korea Government (Ministry of Education) (P0028100, Semiconductor Specialized University).

5.참고 문헌

[1] Kim, Dae-Hyeong, et al., Science, 333.6044, p. 838-843 (2011).
[2] Webb, R. Chad, et al., Nature materials, 12.10, p. 938-944 (2013).
[3] Lee, Jung Woo, et al. Proceedings of the National Academy of Sciences, 113.22, p. 6131-6136 (2016).
[4] Sang, M. *et al.* Ultrahigh sensitive Au-doped silicon nanomembrane based wearable sensor arrays for continuous skin temperature monitoring with high precision. *Advanced Materials* **34**, 2105865 (2022).

피지컬 AI 기반 차세대 생체 진단을 위한 대면적 소프트 센서 어레이

백상훈[1*]

한양대학교 생체의공학과[1]

Large-Area Soft Sensor Arrays for Next-Generation Biomedical Diagnostics Based on Physical AI

Sanghoon Baek[1*]

Department of Biomedical Engineering, Graduate School of Biomedical Science and Engineering, Hanyang University, Korea

[*]sh313baek@hanyang.ac.kr

Abstract

The growing demand for AI-driven healthcare highlights the need for large-scale, high-quality acquisition of physiological data directly from the human body. Soft, skin-conformal sensors are a promising solution, yet their translation into practical systems remains a major challenge. Here, we present an organic transistor–based sensor design strategy that exploits subthreshold operation to achieve ultra-low power consumption and enhanced sensitivity, thereby enabling seamless and prolonged integration with the skin. Leveraging inkjet printing as an additive manufacturing approach, we further establish ultrathin, large-area active-matrix sensor arrays through process optimization and design rule formalization, ensuring high yield and device uniformity across extended areas. Finally, we demonstrate spatiotemporal monitoring of multiple physiological signals on human skin, including pulse-wave mapping via cardiac sensor arrays, as well as decoupled pressure and temperature multisensing for robotic gripper applications. Together, these advances establish a transitional pathway toward next-generation healthcare systems and human-scale sensing platforms that can empower the era of physical AI

1. 연구 배경

피지컬 AI(Physical AI)는 인공지능이 물리적 세계와 직접 연결되어 작동하는 새로운 패러다임으로, 이를 생체의학 분야에 적용하기 위해서는 생체 신호를 정밀하게 수집할 뿐만 아니라 대규모 데이터를 확보할 수 있는 센싱 기술이 핵심적이다. 기존 바이오센싱 기술은 다양한 신호 측정 가능성을 보여주었으나, 데이터의 양과 질, 장기간 연속 모니터링 안정성에서 한계가 존재한다. 따라서 본 연구에서는 트랜지스터 기반 고성능 센서를 설계하고, 새로운 폼팩터의 전자기기를 구현할 수 있는 인쇄전자 공정을 개발하여 초박막·대면적 소프트 센서 어레이를 구현하고자 하였다. 이를 통해 기존 기술의 한계를 넘어서는 새로운 생체 진단 가능성을 제시한다.

2.연구 방법

본 연구의 기본 트랜지스터 소자는 잉크젯 인쇄 공정을 기반으로 제작되었다. 먼저 캐리어 글라스 기판에 CVD 방식으로 Parylene을 증착하여 유연 기판을 형성하였다. 이후 잉크젯 프린팅으로 AgNP 기반 게이트 전극을 인쇄하고, 절연층으로 Parylene을 증착하였다. 이어서 S/D 전극은 잉크젯으로 형성하였으며, 반도체층은 디스펜서 프린팅으로 고분자 반도체를 증착하였다. 최종적으로 Parylene 패시베이션 층을 형성하고, 레이저 드릴링을 통해 비아홀(via-hole)을 가공하여 배선을 완성하였다. 해당 소자는 최종적으로 캐리어 글라스 기판에서 분리함으로써 수 마이크로미터 수준의 초박막 소자로 개발하였다.

응용 측면에서, 압력 센서는 Polyvinylidene Fluoride(PVDF) 기반 소재를 마이크로 패턴 구조로 제작한 후, 샌드위치 형태로 적층하여 압력에 따른 접촉 저항 변화를 트랜지스터와 결합시켜 1T1R 구조로 구현하였다. 온도 센서는 반도체 물질의 고유 온도 특성을 이용하였으며, 광 센서는 P-/N형 고분자 물질을 인쇄하여 포토다이오드를 제작하였다.

3. 연구 결과

3.1. 저전력, 고민감도 생체 센서

본 연구에서는 소자 물리 현상을 이용하여 센서의 성능을 극대화 할 수 있음을 증명하였다. 먼저, 1T1R 구조 압력센서는 PVDF 기반 마이크로돔 구조체 간의 압력에 의한 접촉 저항 변화 (압저항 센서)가 트랜지스터의 드레인 전류 상승으로 관찰되는 것을 확인하였다. 이 때 드레인 전압 (V_{DD})에 따라 전류가 변하는 정도, 즉 센서의 민감도가 달라지는 결과를 보였다 (그림 1). V_{GS} = V_{DD} = -10 V (Saturation 영역) 구동 대비, V_{DD} = -0.2 V 수준으로 낮춤으로써 소자를 Linear 영역에서 구동시키고 이 때 압저항 센서의 저항 변화가 전체 트랜지스터 소자의 전류변화를 더 크게 변화시키는 것이 확인되었다. 따라서 저전압 구동을 통해 소비 전력은 낮추면서 동시에 센서의 민감도는 증가시킬 수 있어 웨어러블 소자에 적합한 방향으로의 성능 향상을 확인할 수 있었다.

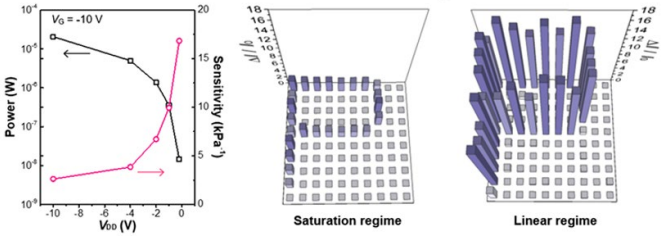


그림 1. 저전압 구동을 통한 민감도 향상 및 전력 감소

3.2. 대면적 트랜지스터 어레이 개발

싱글 포인트를 넘어 대량의 생체 데이터를 대면적으로 수집하기 위해 잉크젯 인쇄 공정 기반 트랜지스터 어레이를 개발하였다. 잉크젯 공정의 다양한 파라미터 (기판 온도, 노즐 속도, 용액 간격)를 조절하여 전도성 잉크가 부드러운 프

로파일을 가질 수 있는 최적의 조건을 도출하였고, 단위 셀 트랜지스터 및 대면적 어레이로 확장하기 위해 패턴간 간격, 엣지 보정 등 다양한 Design rule을 정립하고 공정을 최적화 함으로써 10 × 10의 트랜지스터 어레이를 초박막 기판에 성공적으로 구현하였다. 100개의 픽셀은 수율 97% 이상 및 10% 미만의 균일도를 보여 대면적 센싱 플랫폼으로서의 가능성을 보였다 (그림 2).

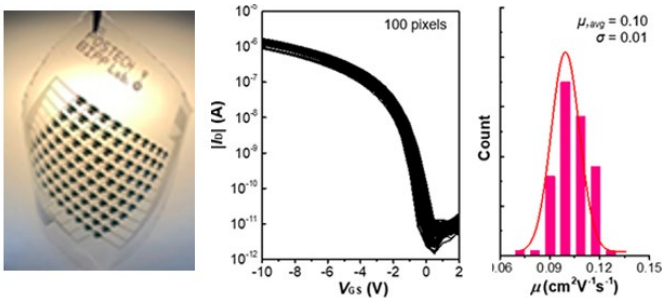


그림 2. 초박막 기판에 제작된 대면적 트랜지스터 어레이의 수율 및 균일도

3.3 압력 센서 어레이를 통한 2차원 맥파 신호 수집

맥파는 심장 박동에 의해 신체를 흐르는 혈액의 흐름으로써, 심장 및 혈관 건강에 중요한 척도가 된다. 압력센서를 혈관 위에 위치시키게 되면 맥파에 의한 물리적 압력을 읽음으로써 맥파 신호를 습득할 수 있으나, 이와 같은 방식의 기존 센서들은 센서 위치에 따라 압력이 전달되는 위치가 달라 신호가 다르게 읽히는 문제점이 있었다. 본 연구에서는 대면적 압력 센서 어레이를 통해 센서 위치에 상관없이 (position free) 맥파를 정확하게 수집할 수 있음을 증명하였다.

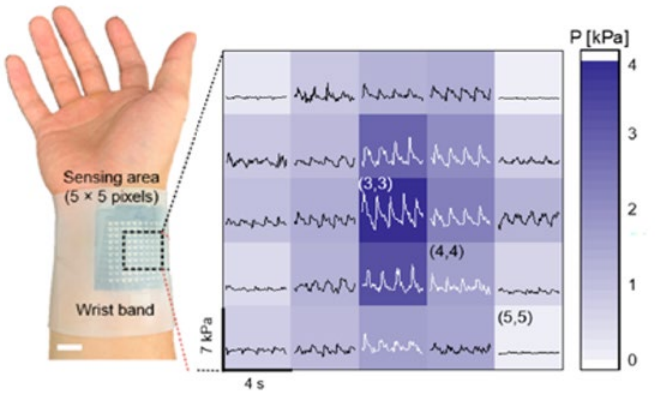


그림 3. 압력 센서 어레이를 통한 2차원 맥파 신호 수집

트랜지스터 어레이 위에 압저항 센서를 적층하여 압력센서 어레이를 구현하였고, 센서 어레이의 모든 픽셀이 각각 압력 신호를 습득함으로써 가장 큰 압력 값을 보이는 픽셀에서 가장 정확한 맥파 신호를 습득할 수 있음을 확인하였다. 또한 각 픽셀의 압력 분포를 통해 실제 동맥이 지나가는 위치를 파악할 수 있어 Catheter 삽입술 등 다양한 의료분야에 활용될 수 있음을 증명하였다.

3.4. 압력/온도 센싱 3차원 센서 어레이

대부분 압력 센서는 열에 의한 전자의 거동 변화로 인해 온도가 달라지면 압력 특성이 달라지는 문제를 갖는다. 본 연구에서는 잉크젯 인쇄 기술을 통해 트랜지스터 기반 압력 센서 및 온도 센서를 3차원 집적함으로써, 동일 픽셀에서 온도와 압력을 모두 검출할 수 있는 멀티센서를 구현하였다. 또한 온도에 의한 압력 신호 왜곡이 없도록 알고리즘을 개발함으로써, 온도에 상관없이 순수한 압력 값을 정확하게 검출할 수 있음을 보였다.

압력센서의 압력에 따른 전류 변화는 상온에서와 달리 고온 조건에서는 더 큰 상승폭을 보이며 왜곡되었다. 하지만 각 압력 조건에서 온도에 의한 상승율이 동일한 기울기의 선형 관계를 갖는다는 점을 이용하여 왜곡분을 상쇄시키도록 알고리즘을 개발하였고, 이로 인해 다양한 온도 조건에서도 정확하게 압력을 검출할 수 있음을 확인하였다. 또한 로봇 그리퍼에 멀티센서 어레이를 적용하여 뜨거운 물체도 파괴나 슬립 없이 정확하게 들어올릴 수 있음을 증명하였다. 물체의 온도에 의해 압력 신호가 왜곡되면 물체를 파괴/슬립 없이 정확하게 집을 수 있는 문턱 압력 (threshold pressure)가 왜곡되지만, 온도 보상을 통해 뜨거운 물체를 들어올릴 때도 정확한 문턱 압력까지 로봇이 작동하여 성공적으로 들어올릴 수 있음을 확인하였다. 따라서 본 연구를 통해 생체 신호를 정확하게 대량으로 수집함으로써 차세대 피지컬 AI 기반의 생체 센서의 방향을 제시하고 새로운 방식의 진단 및 활용이 가능함을 보였다.

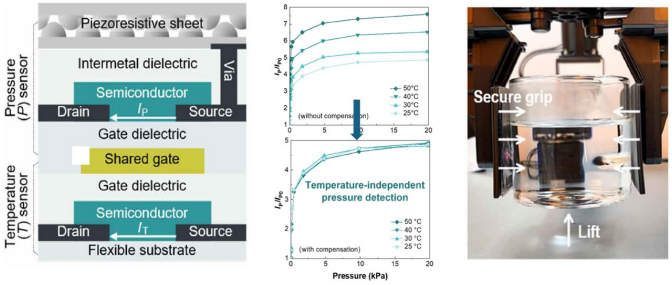


그림 4. 3차원 센서 어레이를 통한 그리퍼 구동

4. Acknowledgements

이 연구는 National Research Foundation of Korea (NRF) 과제의 지원을 받아 수행하였음. (2021R1A2C3009222 and 2022R1A2C2012272)

5.참고 문헌

[1] S. Baek, and Y. Lee. “Spatiotemporal measurement of arterial pulse waves enabled by wearable active-matrix pressure sensor arrays.” *ACS Nano* 16 (1), 368-377

[2] L. A. Ruiz, and S. Baek. “Monolithically printed all-organic flexible photosensor active matrix.” *npj Flexible Electronics* 7 (1), 6

[3] Y. Jo. “3D active-matrix multimodal sensor arrays for independent detection of pressure and temperature.” *Science Advances* 11 (3), eads4516

2025년 대한의용생체공학회
추계학술대회

국가연구개발사업단

좌장: 김광기(가천대학교)

11월 7일 (금) **신어관 101 (15:10-17:00)**

남기환 팀장(범부처전주기의료기기연구개발사업단)
사업단 소개 Ⅰ : 범부처 첨단 의료기기 연구개발사업 추진(안)

박지훈 PD(한국산업기술평가관리원 바이오헬스실)
사업단 소개 Ⅱ : 산업통상부 의료기기 헬스케어 연구개발 사업

김성현 단장(한국연구재단 뇌·첨단의공학단)
사업단 소개 Ⅲ : National Strategic R&D Program for K-Brain Project and Biomedical Technology

박종애 단장(한국연구재단 ICT·융합연구단)
사업단 소개 Ⅳ : 2026년도 한국연구재단 기초연구 사업 소개 (ICT·융합연구단)

남기환, Ph. D.



■ Contact Information

- ❒ (재)범부처전주기의료기기연구개발사업단 총괄1팀
- ❒ E-mail: knam@kmdf.org ; kihwannam@gmail.com
- ❒ Office: 02-6328-0368
- ❒ Mobile: 010-4558-3341
- ❒ 서울시 중구 세종대로 39 대한서울상공회의소 5층

■ 주요경력

- ❒ 2022.08 ~ 현재 : 범부처전주기의료기기연구개발사업단 총괄1팀 팀장/책임연구원
- ❒ 2021.08 ~ 2022.08 : 범부처전주기의료기기연구개발사업단 평가기획팀 팀장/책임연구원
- ❒ 2020.11 ~ 2021.08 : 범부처전주기의료기기연구개발사업단 성과확산팀 팀장/책임연구원
- ❒ 2020.05 ~ 2020.11 : 범부처전주기의료기기연구개발사업단 사업화지원팀 책임연구원
- ❒ 2022.08 ~ 2023.12. : 한국보건산업진흥원 의료기기 전문가자문위원회 전문위원
- ❒ 2018.01 ~ 2022.12. : 식품의약품안전처 IMDRF 운영추진단 위원
- ❒ 2017.06 ~ 2020.05 : 한국의료기기공업협동조합 회원지원팀 팀장/책임연구원
- ❒ 2015.03 ~ 2017.06 : 한국과학기술연구원 바이오닉스연구단 박사후연구원
- ❒ 2008.03 ~ 2015.02 : 연세대학교 의공학부 박사
- ❒ 2004.03 ~ 2008.02 : 연세대학교 의공학부 학사

■ 학위논문

- ❒ Characterization of Electrostatic Properties of Low-Dimensional Conducting Nanomaterials for Future Biosensor Applications *via* Kelvin Probe Force Microscopy
- ❒ 지도교수: 이상우교수(연세대학교 의공학부), 윤대성교수(고려대학교 바이오의공학부)

■ 담당사업

- ❒ 범부처 전주기 의료기기 연구개발사업(과기정통부/산업부/복지부/식약처, 2020.05. ~ 2025.12.)
- ❒ 감염병 방역기술개발사업(복지부, 2020.08 ~ 2023.12.)

■ 수상경력

- ❒ 2023. 11. 10. Commendation, Ministry of Science and ICT, Republic of Korea

Curriculum Vitae

PERSONAL INFORAMTION

Sung Hyun Kim, Ph.D.

Director,
Division of Neuroscience & Advanced Medical Technology
National Research Foundation of Korea

*Address : 201 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Deajeon, 34113, Korea
*Phone : +82-42-869-7706
*Fax : +82-42-869-7703
*Email : sunghyunkim@nrf.re.kr

EDUCATION

Sep. 2002 – Feb. 2007 **Ph.D.** Department of Life Science,
Gwangju Institute of Science and Technology (GIST), Korea

Mar. 2001 – Aug.2002 **M.S.** Department of Life Science,
Gwangju Institute of Science and Technology (GIST), Korea

Mar. 1994 – Aug.2000 **B.S.** in Genetic Engineering
SungKyunKwan University, Korea

PROFESSIONAL EXPERIENCES

July.2024-Present **Director**
Division of Neuroscience & Advanced Medical Technology, NRF

Sep.2022- Present **Professor**
Department of Physiology, School of Medicine, Kyung Hee University

Sep.2017- Aug.2022 **Associate Professor**
Department of Physiology, School of Medicine, Kyung Hee University

Apr. 2013- Aug.2017 **Assistant Professor**
Department of Physiology, School of Medicine, Kyung Hee University

Nov. 2011-Mar.2013 **Instructor**
Weill Cornell Medical College, New York

Mar. 2007- Oct.2011 **Postdoctoral fellow**
Weill Cornell Medical College, New York

HONORS AND AWARDS

2015 Travel Award for the 38th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society

2015 Invited Speaker, Korean Socitety for Molecular and Cellular Biology, Winter Conference

2011 Faculty. Summer Course for Neurobiology in Marine Biological Laboratory (MBL) at Woods Hole (Optical Imaging of Neuron)

2010 Invited Speaker, Gordon Research Conference 2010 (Cell Biology of The Neuron)

2009 Invited Speaker, New York Korean Biologist Annual Conference 2009.

2006 Award for Excellent Research, GIST, South Korea

Research Interest

The focus of my research is to gain a deeper understanding of the intricate workings of the brain by examining synapses. To achieve this, I have employed advanced molecular and cellular imaging technologies, including opto-physiology and various imaging sensors. My goal is to investigate how neurons establish connections and communicate with one another at synapses, and to uncover the ways in which this communication is disrupted in neural diseases.

My research primarily aims to address the following key questions:

- How do neurons form interconnected networks?
- What mechanisms enable communication between neurons at synapses?
- How are these fundamental processes impacted by neurological and psychiatric diseases, which can result in synaptopathies and altered functionality? (e.g.AD, PD, ASD, OCD)

PUBLICATIONS (Selected)

1. Lee BJ, Lee U, Ryu SH, Han S, Lee SY, Ju A, Chang S, Lee S, **Kim SH*,** Ho W* L-type Ca^{2+} channels mediate regulation of glutamate release by subthreshold potential changes. ***PNAS*** 2023 Mar 21;120(12):e2220649120. doi: 10.1073/pnas.2220649120.
2. Bae JR[1] , Lee W[1], Jo YO, Han S, Koh SM, Song WK, **Kim SH*** Distinct synaptic vesicle recycling in inhibitory nerve terminals is coordinated by SV2A, ***Prog Neurobiol*** 2020, Nov;194:101879. doi: 10.1016/j.pneurobio.2020.101879.
3. Kyung JW, Kim J-M, Cha S-H, Chung K-H, Choi D-J, Jou I, Song WK, Joe E-H, **Kim SH***, Park SM*. DJ-1 deficiency impairs synaptic vesicle endocytosis and reavailability at nerve terminals. ***PNAS*** 2018 Feb 13;115(7):1629-1634.
4. Lee T-S, Lee J-Y, Kyung JW, Yang Y, Park SJ, Lee S, Pavlovic I, Kong B, Jho YS, Jessen HJ, Kweon D-H, Shin Y-K, **Kim SH***, Yoon T-Y*, Kim S*. Inositol pyrophosphates inhibit synaptotagmin-dependent exocytosis. ***PNAS*** 2016 Jul 19;113(29):8314-9

2025년도 대한의용생체공학회

추계학술대회 초청강연 발표정보

▌발표자 정보

성명	박종애	**사진**	
소속(학교)	한국연구재단		
부서(학과)	기초연구본부/ICT·융합연구단		
직위	단장		
이메일	jongaepark@nrf.re.kr	**휴대번호**	010-2731-3637
발표분야			
약력	2023.12~ Division of ICT and Convergence Research, National Research Foundation of Korea 2022.2~2023.11 Dept. of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University 2009.3~2022.2 Mobile Healthcare Lab, SAIT(Samsung Advanced Institute of Technology), Samsung Electronics 2006.3~2009.2 Strategic Research Officer, SAIT, Samsung Electronics 2000.6~2006.2 Communication Lab, SAIT, Samsung Electronics		

▌초청강연 정보

제 목	**2026년도 한국연구재단 기초연구 사업 소개 (ICT·융합연구단)**
Abstract	한국연구재단의 기초연구 사업의 가장 큰 특징은 미래의 기술과 산업을 준비하고 만들어가는 연구자들을 대상으로 한다는 점이다. 이러한 특징은 기술과 산업 자체에 초점을 두는 다른 국가 연구 사업과는 큰 차이를 보인다. 따라서 발표에서는 연구자의 연구 생애주기 관점에서 바라본 기초연구 과제와 2026년도의 기초연구 사업을 소개합니다. 특히, 2026년도의 주요 변화 사항인 다수 연구자를 폭넓게 지원하기 위한 기본 연구의 복원, Top-Tier 리더 연구자에 대한 지원 강화, 연구의 성장 단계별 지원 체계로 전환, 일부 사업의 연구 기간 확대 등을 소개할 예정입니다. 마지막으로, 기초연구 사업의 시행 계획 공고, 연구 과제의 지원, 선정 평가 방식에 이르는 일련의 과정과 각 단계에서 다루어지는 주요 내용을 소개하고 연구 현장의 고견을 듣고자 합니다.

젊은 의공학자 II

좌장: 한창희(고려대학교(세종)), **박준홍**(한국외국어대학교)

11월 7일 (금) **늘빛관 이태석홀 (15:30-17:00)**

정현태(Brown University)
Invited 세포 이동분석으로 본 세포의 집단적 행동 형성

조송현(KAIST)
Invited 다기능 의료 영상 구현을 위한 새로운 생물학적 동역학 모델

최태원(성균관대학교)
Invited 저강도 경두개 초음파 자극을 통한 글림패틱 기능의 향상 및 뇌 노폐물의 배출

이태하(고려대학교)
Invited 6-퍼들 페이퍼 플레이트(96-PPP): 고처리량 아밀로이드 감지 및 현장 진단용 종이 플랫폼



정현태 / Hyuntae Jeong
박사후연구원 / Postdoctoral Researcher
브라운 대학교 / Brown University
공과대학 / School of Engineering

세포 이동분석으로 본 세포의 집단적 행동 형성

Social Behavior of Cells – in the Perspective of Cell Migration

Abstract

Cells, the fundamental units of life, exhibit “social behavior” through dynamic communication with neighboring cells and their surrounding environment. Rather than acting as isolated entities, cells form collective systems in which higher-order biological functions such as collective migration and tissue organization emerge. These collective traits are not simple sums of individual cellular properties but arise from complex interactions among cells, a "black box" that remains largely elusive. Here, we investigate the social behavior of cells through the lens of collective migration during the epithelial–mesenchymal transition (EMT). By inducing graded levels of EMT in epithelial cells, we generated heterogeneous populations encompassing epithelial, intermediate, and mesenchymal states. Using machine learning–based classification of molecular and morphological features, we predicted the migratory trajectories of individual cells. We found that while the motility of fully epithelial and mesenchymal cells could be explained by their individual functional traits, intermediate-state cells were poorly predictable. This unpredictability likely resulted from intermingled interactions among cells in different states, since intermediate state cells displayed with higher heterogeneity and plasticity. Notably, mixtures of heterogeneous cell states enhanced continuous collective migration, driven by various modes of collision between diverse cell–cell pairs. Together, these findings reveal that cell migration emerges as a form of cooperation among heterogeneous cells, linking single-cell plasticity and intercellular communication to the emergence of robust collective behavior.

Brief Biosketch

KAIST 신현정 교수 연구실에서 석·박사 학위를 취득한 후, 현재 브라운대학교 Ian Wong 교수 연구실에서 박사후연구원으로 재직 중입니다. 세포역학, 기계생물학, 수리생물학적 접근을 통해 세포가 생성하는 힘과 움직임을 연구하고 있습니다. 이러한 연구를 기반으로 세포의 물리적 특성과 동역학을 질병 진단 및 치료 방법과 연계하는 것을 목표로 하고 있습니다. / After receiving his M.S. and Ph.D. degrees in Prof. Jennifer H. Shin laboratory at KAIST, Hyuntae Jeong is currently a postdoctoral researcher in Prof. Ian Wong’s laboratory at Brown University. His research focuses on cell mechanics, mechanobiology, and mathematical biology, investigating how the physical forces and movements generated by cells can be linked to disease diagnosis and therapeutic strategies.



조송현, Song Hyun Jo
연구조교수, Research Assistant Professor
한국과학기술원, KAIST
의과학대학원, Graduate School of Medical Science and Engineering

다기능 의료 영상 구현을 위한 새로운 생물학적 동역학 모델

Multi-functional Medical Imaging Based on a Biologically Inspired Novel Kinetic Model

Abstract

Dynamic [18F]fluorodeoxyglucose (FDG) PET has the potential to provide detailed insight into glucose metabolism in vivo, yet existing kinetic models often lack physiological interpretability and robustness. We propose a novel dynamic [18F]FDG PET model that explicitly quantifies glucose transporter (GLUT) and hexokinase activities, the key drivers of cellular metabolism. By integrating these molecular mechanisms, the model enhances estimation of kinetic parameters (K_1*, k_2*, k_3*) and metabolic rate (MR) derived from irreversible two-tissue compartment analysis. Voxel-wise fitting to human brain data yielded high-resolution maps of GLUT, hexokinase, and derived rate parameters, clearly delineating brain structures and revealing region-specific metabolic patterns. This physiologically grounded framework improves the reliability and interpretability of dynamic FDG PET, potentially advancing quantitative imaging of neurological disorders and metabolic research.

Brief Biosketch

조송현 박사는 KAIST 의과학대학원의 연구조교수로 재직 중이다. 한양대학교를 졸업한 후 동 대학원에서 전자 및 컴퓨터 공학 박사학위를 받았다. LG 전자 CTO 부문에서 책임연구원으로 근무하며 자율주행 및 주행보조시스템을 위한 딥러닝 기반 컴퓨터 비전 기술을 개발했다. 현재는 이러한 산업계 AI 경험을 바탕으로 AI 기술을 바이오메디컬 이미징 시스템으로 확장하는 연구에 집중하고 있다. 대한의용생체공학회 및 Brain & Brain PET 학회 등에서 활발히 활동하고 있다.

Song Hyun Jo is a Research Assistant Professor at the Graduate School of Medical Science and Engineering, KAIST. He received his Ph.D. in electrical and computer engineering from Hanyang University. At LG Electronics CTO Division, he served as a Principal Research Engineer, developing deep learning-based computer vision technologies for autonomous driving and advanced driver assistance systems. Building on his industrial AI experience, his current research focuses on extending AI technologies to biomedical imaging systems. He actively participates in the Korean Society of Medical and Biological Engineering and Brain & Brain PET conferences.



최태원 / Taewon Choi
박사후 연구원 / Postdoctoral Researcher
성균관대학교 / Sungkyunkwan University
지능형 정밀 헬스케어 연구소 / Department of Intelligent Precision Healthcare Convergence

저강도 경두개 초음파 자극을 통한 글림패틱 기능의 향상 및 뇌 노폐물의 배출

Low-Intensity Transcranial Ultrasound in Glymphatic Function and Brain Waste Removal

Abstract

Low-intensity transcranial ultrasound has emerged as a promising strategy to enhance cerebrospinal fluid (CSF) circulation and facilitate clearance of neurotoxic metabolites. We investigated its effects on CSF dynamics, amyloid-beta (Aβ) clearance, and underlying mechanisms.

Magnetic resonance imaging after cisterna magna injection of gadolinium revealed accelerated CSF transport with earlier and stronger peaks in ultrasound-treated groups. Fluorescence imaging of deep cervical lymph nodes confirmed increased drainage of labeled Aβ, and hippocampal immunofluorescence demonstrated significant reduction of deposits following repeated sonication.

Mechanistically, ultrasound reorganized aquaporin-4 (AQP4) distribution, enriching AQP4 at perivascular astrocytic end-feet and increasing the M23/M1 isoform ratio, accompanied by transient transcript downregulation. Safety assessments indicated no neuronal damage or abnormal neuronal activation caused by ultrasound sonication.

These findings demonstrate that ultrasound accelerates CSF circulation and promotes Aβ clearance by modulating AQP4 localization, supporting its translational potential for Alzheimer's disease.

Brief Biosketch

I am a Postdoctoral Researcher at SonocareLab, Sungkyunkwan University. My research centers on developing ultrasound-based therapeutic systems for neuromodulation and glymphatic regulation in neurodegenerative diseases. I have published in *Advanced Science*, *Annals of Biomedical Engineering*, *IEEE Transactions*, and received multiple best awards in academic conferences. In 2023, I was selected as a research scholar at the University of Southern California, where I actively collaborated with faculty and students on international therapeutic ultrasound projects.



이태하/Taeha Lee
연구원(Ph.D.)/Researcher(Ph.D.)
고려대학교 생체나노공학 연구실/Biomedical Nanoengineering Laboratory
고려대학교 미래전략산업연구원 디지털헬스케어 센터
Korea University Sejong Institute for Business and Technology (SIBT) Digital Healthcare Cente)

96-퍼들 페이퍼 플레이트(96-PPP): 고처리량 아밀로이드 감지 및 현장 진단용 종이 플랫폼

96-Puddle Paper Plate (96-PPP): A High-Throughput Paper-Based Platform for Amyloid Detection and On-Site Biosensing

Abstract

We developed the 96-Puddle Paper Plate (96-PPP), a microplate-formatted lab-on-paper platform that enables high-throughput colorimetric and fluorescence analysis using conventional microplate readers. Each of the 96 hydrophobically confined puddles was patterned by PDMS coating on cellulose paper, providing uniform droplet retention and preventing cross-contamination. The 96-PPP allows quantitative analysis of multiple analytes, including Mg^{2+}, ascorbic acid, acetone, and ketone, with distinct colorimetric responses visible to the naked eye and precisely measurable by optical readout. Beyond chemical assays, Thioflavin T fluorescence measurements on the same platform enabled successful detection of amyloid fibril concentration, degradation, and secondary nucleation, which were further corroborated by morphological characterization of the fibril structures. The fluorescence intensity showed a concentration-dependent increase and high reproducibility with a coefficient of variation below 5%. The entire 96-well array produced spatially uniform signals, demonstrating its statistical robustness for multi-sample screening. With its compatibility with standard readers, minimal reagent use (10 µL per well), and potential integration with nucleic acid amplification assays such as LAMP, the 96-PPP establishes a versatile and scalable lab-on-paper system for on-site biomedical sensing and high-throughput diagnostics.

Brief Biosketch

Postdoc.	**Korea University** SIBT	Sejong, Korea	Sep 2025 – Present
Ph.D.	**Korea University** Biotechnology and Bioinformatics	Sejong, Korea	Mar 2021 – Aug 2025
BS	**Korea University** Biotechnology and Bioinformatics	Sejong, Korea	Mar 2015 – Feb 2021

25 publications (12 first author, 12 co-author, 1 corresponding author); h-index: 8
Total citations: 289 (as of Oct 17, 2025)

바이오센서&바이오칩

좌장: 정윤경(인제대학교), **서민호**(부산대학교)

11월 8일 (토) **일강원 101 (10:00-11:30)**

박철헌(전북대학교)
Invited 외부 자극 없이 동작 프로그래밍 가능한 마이크로스위머

정하욱(고려대학교)
Invited 유연소자를 활용한 무선 바이탈 사인 센싱 플랫폼

유성광(인제대학교)
Invited 실시간 생체 적합 압력 모니터링 기반 압력성 질환 진단 및 예방



박철헌/ Park Cheolheon
조교수/ Assistant professor
전북대학교/ Jeonbuk National University
전자공학부/ Electronic Engineering

외부 자극 없이 동작 프로그래밍 가능한 마이크로스위머
Photopatterned microswimmers with programmable motion without external stimuli

Abstract
We introduce highly programmable microscale swimmers driven by the Marangoni effect (Marangoni microswimmers) that can self-propel on the surface of water. Previous studies on Marangoni swimmers have shown the advantage of self-propulsion without external energy source or mechanical systems, by taking advantage of direct conversion from power source materials to mechanical energy. However, current developments on Marangoni microswimmers have limitations in their fabrication, thereby hindering their programmability and precise mass production. By introducing a photopatterning method, we generated Marangoni microswimmers with multiple functional parts with distinct material properties in high throughput. Furthermore, various motions such as time-dependent direction change and disassembly of swimmers without external stimuli are programmed into the Marangoni microswimmers.

Brief Biosketch
Cheolheon Park is Professor of the Department of Electric Engineering at Jeonbuk National University. He received his B.S from Kyunghee University in 2014, and Ph.D. in Kyunghee University in 2021. Since year, he joined Jeonbuk National University as a faculty member, where he is now Professor of Department of Electric Engineering. His research interests include diagnoisis, micro/nano fabrication.



정하욱 / Ha Uk Chung
조교수 / Assistant Professor
고려대학교/ Korea University

유연소자를 활용한 무선 바이탈 사인 센싱 플랫폼
Soft and Flexible Wireless Monitoring Platforms for Vulnerable Population

Abstract

Medical devices have seen limited innovation over the past few decades. Current systems are often too bulky, rigid, and tethered by multiple wires, which increase the risk of skin injury, complicate the clinical workflow, and limit the adaptability for remote patient monitoring. In addition, these systems are fundamentally designed with limited upgradability to integrate emerging innovations to integrate emerging innovations in biomedical engineering. Advances in medical monitoring using wireless communication, skin-interfaced multimodal sensing, interoperable and cloud-enabled software ecosystem, and AI/ML analytics for non-conventional biomarkers lead into innovation and modernization in patient monitoring across wide range of clinical applications from neonatal and pediatric monitoring, pregnancy monitoring, and older adults monitoring with neurological disorders. This seminar will cover related research advancement and commercialization pathways.

Brief Biosketch

2025 - Present: 고려대학교 바이오의공학부
2020 - 2024: 사이벨 인터내셔널 CEO
2018 - 2024: 사이벨 공동창업자, 기술개발부사장



유성광/Seonggwang Yoo
교수/Professor
인제대학교/Inje University

실시간 생체 적합 압력 모니터링 기반 압력성 질환 진단 및 예방
Real-Time Bio-Integrated Pressure Monitoring for Diagnosis and Prevention

Abstract

Continuous pressure monitoring is vital for preventing pressure injuries and detecting circulatory issues early. However, traditional pressure sensors often lack the flexibility, biocompatibility, and durability required for reliable use on the human body. This study introduces a soft, bio-integrated pressure monitoring system designed for real-time, continuous diagnosis and prevention. The device features a soft elastomer-based piezoresistive sensor that easily conforms to the skin, ensuring good contact and high-quality signals during daily activities. Its integrated wireless module enables continuous data collection and transmission, allowing remote analysis of pressure changes over time and across locations. The system shows excellent mechanical durability, minimal motion artifacts, and stable performance during extended wear. Additionally, experiments and FEA simulations confirm that the device maintains skin integrity and user comfort during long-term use. These findings highlight the potential of bio-integrated pressure monitoring systems as tools for diagnosis and prevention in clinical and home-care settings, especially for early detection of pressure ulcers and localized circulatory issues. The proposed platform paves the way for next-generation soft bioelectronics capable of continuously tracking physiological parameters and supporting personalized healthcare.

Brief Biosketch

2010-2014 광주과학기술원 물리학 학사 / B.S. in Physics, GIST
2014-2020 광주과학기술원 신소재공학 박사 / Ph.D. in Materials Science and Engineering, GIST
2020-2025 노스웨스턴 대학교 박사후연구원 / Postdoctoral Scholar, Northwestern University
2025- 인제대학교 글로컬아너스칼리지 글로컬리더스학부 조교수 / Assistant Professor, School of Glocal Leaders, Glocal Honors College, Inje University

의사공학자

좌장: 김태(GIST), **강신애**(연세대학교)

11월 8일 (토) **일강원 102 (10:00-11:30)**

유승찬(연세대학교)
Invited 첨단기술 및 AI를 통한 보건의료 혁신

김이랑(온코크로스)
Invited AI-Powered Drug Development Platforms: Discovering New Therapeutic Indications

김중희(서울대학교)
Invited AI-Enabled ECG Innovation: Bridging Clinical Unmet Needs, Real-World Applications, and Commercialization



유승찬 / Seng Chan You
조교수 / Assistant Professor
연세대학교 / Yonsei Univeresity

첨단기술 및 AI 를 통한 보건의료 혁신
Digital Innovation in Hospital

Abstract

The rapid advancement of artificial intelligence (AI), digital therapeutics (DTx), and real-world data (RWD) has transformed the landscape of modern healthcare. This presentation introduces practical applications of these technologies in clinical settings, focusing on examples from Severance Hospital.

The Severance Data Platform enhances the accessibility, connectivity, and exhaustiveness of medical big data; the VeNDI (Vendor-Neutral Deployment Infrastructure) provides a standardized environment for validating and integrating medical AI solutions; and the DTx Platform enables safe, interoperable data connections between hospitals, developers, and regulatory agencies. Furthermore, the Y-KNOT Project, a Korean-language large language model (LLM) for healthcare, demonstrates how on-premise generative AI can assist clinicians by automatically drafting structured medical records while preserving data sovereignty and workflow efficiency.

Together, these initiatives establish a hospital-centered ecosystem that ensures the safe use of medical data, standardized validation of AI solutions, and practical clinical integration of digital technologies. The core message is that true healthcare innovation lies not only in technological breakthroughs but also in building sustainable infrastructures that allow such innovations to be verified, disseminated, and trusted in real-world medical environments.

Brief Biosketch

2005 - 2011 연세대학교 의과대학 (의학사)
2016- 2021 아주대학교 의과대학의료정보학과 (박사)
2012 - 2015 연세의료원 세브란스 병원 내과 전공의
2022.3 - 연세의료원 의생명시스템정보학교실 조교수
2024 - Associate Editor, The Journal of the American College of Cardiology



김이랑/Yirang Kim
창업자 및 대표이사/Founder & Co-CEO
온코크로스/ONCOCROSS
AI 신약개발협의회 회장/Chairman of Council for AI Drug Discovery & Development

AI 로 찾아가는 약물의 새로운 적응증

AI-Powered Drug Development Platforms: Discovering New Therapeutic Indications

Abstract

A recent case in which a diabetes drug achieved indication expansion into obesity and became a blockbuster highlights the growing importance of this strategy. Conventional approaches, based on literature or known mechanisms of action, remain limited in uncovering novel opportunities. Oncocross has developed RAPTOR AI, an AI-driven platform that analyzes transcriptome-based gene expression changes to predict drug–disease associations independent of known mechanisms. This enables the discovery of entirely new therapeutic indications, including optimal or additional indications for drugs in development, alternative uses for failed assets, evergreening opportunities for near-patent-expiration drugs, and candidates for rare or intractable diseases. By reducing cost, shortening development timelines, and minimizing failure risk, RAPTOR AI supports more efficient drug development and is already being applied in collaborations with domestic and global pharmaceutical and biotech partners.

Brief Biosketch

서울아산병원에서 트레이닝 받은 Medical Oncologist 이자, 카이스트에서 박사학위를 취득한 의사과학자로, 온코크로스를 통해 암 및 희귀질환 진단 및 치료제 개발에 힘쓰고 있으며, AI 신약개발협의회 회장으로 AI 신약개발 저변확대에도 노력하고 있다.

He is a board-certified Medical Oncologist who received his clinical training at Asan Medical Center and earned his Ph.D. from KAIST as a physician-scientist. Through Oncocross, he is committed to advancing the development of diagnostics and therapeutics for cancer and rare diseases. In addition, as Chairman of Council for AI Drug Discovery & Development, he is actively working to promote and expand the role of AI in drug development.

김중희 / Joonghee Kim
교수 / Professor
분당서울대병원 응급의학과/Seoul National University Bundang Hospital
주식회사 알피 / ARPI Inc.

응급의학과 의사의 심전도 분석앱 개발 및 사업화 경험

A Clinician's Journey into Medical AI: Developing an ECG Analysis App from Clinical Experience

Abstract

With over two decades of experience as an emergency physician, I have often witnessed how timely and accurate ECG interpretation can make a critical difference in patient outcomes. This realization led me to explore how technology could better support frontline decision-making.

In this talk, I will share the story behind the development of ECG Buddy, an AI-based ECG analysis application created from daily clinical needs rather than from a technology-first approach. I will discuss the challenges and learnings along the way — from early prototype to clinical validation, regulatory clearance, and practical implementation in hospitals. My aim is to offer a clinician's perspective on how AI can complement, rather than replace, medical expertise, and how small, persistent steps can turn an idea from the bedside into a meaningful healthcare tool.

Brief Biosketch

저는 임상경험 20 년차인 응급의학과 의사입니다. 전문의 취득 후 분당서울대병원에서 계속 근무해왔고, 지금은 응급의학과 교수로 근무하고 있습니다. 원래 소생의학을 하다가 최근 심전도 분석 쪽으로 전향하여 ECG Buddy 라는 심전도 분석앱을 만들고 ㈜알피를 창업하여 스타트업 대표 업무를 병행하고 있습니다.

Joonghee Kim, MD, PhD is a Professor of Emergency Medicine at Seoul National University Bundang Hospital. With over 20 years of clinical experience, he founded ARPI Inc., a medical AI company developing ECG Buddy, an AI-powered ECG analysis tool. His current work focuses on applying artificial intelligence to support clinical decision-making and improve accessibility to cardiovascular diagnostics in real-world care settings.

의료기기규제과학

좌장: 김영모(건양대학교), **고동현**(식품의약품안전처)

11월 8일 (토) **일강원 103 (10:00-11:30)**

이종록(한국의료기기안전정보원)
Invited 디지털의료제품법의 취지 및 법체계 소개

김은철(한국의료기기안전정보원)
Invited 디지털의료제품법에서의 GMP 규제 시스템 소개 및 운영 방향

윤수빈(동국대학교)
Defining a Life-Cycle Risk Management Process for AI-Based Medical Devices

김윤호(건양대학교)
X-ray 기술문서 오류 분석을 위한 LLM 기반 피드백 시스템 개발에 관한 연구

이태희(식품의약품안전평가원)
인공무릎관절의 경골부가 받는 최대 응력(Stress) 시뮬레이션의 신뢰성 평가



이종록 / Jong Rok Lee
본부장 / Director
한국의료기기안전정보원 / NIDS

디지털의료제품법 및 규제지원 프로그램 소개

Introduction of Digital Medical Products and Regulatory Support Programs.

Abstract

인공지능(Artificial Intelligence), 로봇(Robot), 가상·증강현실(AR·VR) 기술 등 디지털 기술을 적용한 디지털의료제품의 발전과 국민안전을 제고하기 위해 제정한『디지털의료제품법』이 `25.1.24 부터 시행되었으며, 이와 함께 다양한 규제지원 프로그램도 추진 되고 있다. 본 발표에서는 국내 디지털의료기기 산업 현황을 살펴보고 디지털의료제품법의 제정 취지, 법에서 정하고 있는 내용을 간략히 살펴보고 법시행에 따른 의미를 알아보고자 한다. 또한, 디지털의료제품의 확산을 가속화 할 수 있도록 추진하고 있는 규제지원 프로그램을 알아보고 향후 산업확대와 국민안전 확보를 위한 방향에 대해 고찰하고자 한다.

The Digital Medical Products Act, enacted to enhance public safety and promote the development of digital medical products that apply digital technologies such as Artificial Intelligence (AI), Robotics, and Virtual/Augmented Reality (AR/VR), came into effect on January 24, 2025. Alongside its enforcement, a variety of regulatory support programs are also being implemented.
This presentation will examine the current status of the domestic digital medical device industry, review the purpose and key provisions of the Digital Medical Products Act, and discuss the implications of its enforcement. In addition, it will introduce the regulatory support programs designed to accelerate the adoption of digital medical products, and explore future directions for industrial expansion and the enhancement of People safety.

Brief Biosketch

(현)한국의료기기안전정보원 본부장(Director of NIDS)
(전)한국의료기기공업협동조합 연구개발팀장(R&D Team Leader of KMDICA)
(전)식품의약품안전청 의료기기품질과 연구원(Researcher of KFDA)



김은철 / Kim Euncheol
센터장 / Director
한국의료기기안전정보원 / National Institute of Medical Safety Information
디지털제품평가센터 / Digital Product Evaluation Center

디지털의료제품법 시행에 따른 디지털의료기기 품질관리 기준

Quality Management Standard for Digital Medical Devices in according with the enforcement of the Digital Medical Products Act.

Abstract

The purpose of Digital Medical Products Act is to contribute to the improvement of public health and the development of digital medical products by prescribing matters necessary for handling, managing, and supporting the manufacture, import, etc. of digital medical products, thereby ensuring the safety and efficacy of digital medical products and improving the quality thereof.

With the enforcement of the Digital Medical Products Act, a new regulatory framwork has been introducted to establish systematic quality management Standards for digital medical devices. This paper analyzes the key quality management requirements derived from the Act and their implications for the medical devices industry.

The proposed standards integrate digital technology-specific elements such as software lifecycle processes, artificaial intelligence(AI) validation, data security and cybersecurity risk management into conventional medical device quality systems.

인공지능 의료기기 위험관리를 위한 전주기 프로세스 정의

윤수빈[1], 성진영[2], 김성민[1,2], 권지연[1,2*]
동국대학교 의료기기산업학과[1], 동국대학교 바이오헬스의료기기규제과학과[2]

Defining a Life-Cycle Risk Management Process for AI-Based Medical Devices

Subin Yun, Jinyoung Sung, Sungmin Kim, Jiyean Kwon*
Department of Medical Device and Healthcare, Dongguk University, South Korea[1]
Department of Regulatory Science for Medical Device, Dongguk University, South Korea[2]
2025120024@dgu.ac.kr, 2024120384@dongguk.edu, sungmin2009@gmail.com, jykwon@dongguk.edu*

Abstract

This study identifies the limitation that existing life-cycle processes for medical devices do not adequately reflect the unique characteristics of AI-based medical devices, and proposes a new life-cycle risk management process by integrating relevant international standards. The proposed process is designed to systematically identify and manage risk factors at each life-cycle stage, including data engineering, to effectively control AI-specific risks such as data bias and drift. Through this approach, the study seeks to establish an integrated management framework that ensures the safety and reliability of AI medical devices while meeting regulatory requirements.

1. 연구 배경

최근 인공지능 기술의 발전은 의료 현장에도 빠르게 확산되고 있으며, 2024년 기준 전 세계 의료기관의 약 79%가 인공지능을 도입한 것으로 보고되었다. 이러한 확산은 방대한 의료 데이터 축적, 인력 부족, 정부 지원, 그리고 팬데믹 등의 영향으로 활용이 더욱 가속화되고 있다. 진단, 예측, 맞춤형 치료 등 다양한 영역에서 인공지능 의료기기가 상용화되고 있으며, 의료기관의 운영 효율성과 환자 맞춤형 의료 제공에 중요한 역할을 하고 있다. 따라서, 글로벌 헬스케어 인공지능 시장은 2023년 약 265억 7천만 달러에서 2030년 1,876억 9천만 달러로 성장할 것으로 전망되며, 연평균 성장률은 38.62%에 이를 것으로 예측된다[1].

시장의 급속한 성장에 따라 인공지능 의료기기의 활용 범위는 진단, 예측, 치료 등 다양한 영역으로 확장되고 있다. 활용 영역이 다양해짐에 따라 전통적인 소프트웨어 의료기기(SaMD)와 달리 새로운 위험이 발생하고 있다. 그러나 기존의 위험관리 접근법은 이러한 인공지능의 특성을 충분히 반영하지 못한다는 한계가 있다. 인공지능 의료기기는 방대한 데이터를 기반으로 학습하는 특성으로 인해 데이터 편향, 성능 드리프트, 설명 불가능성 등 잠재적 위험 요인을 내포한다.

이러한 위험에 대응하여, 주요 규제기관(FDA, EU, MFDS 등)과 국제 표준화 기구(ISO)는 인공지능 의료기기의 특수성을 고려한 전주기적 위험관리 체계를 요구하고 있다[4,6]. 그러나 인공지능 의료기기의 특수성을 반영한 전주기 프로세스의 정의는 아직 미흡하다. 따라서 본 연구에서는 ISO 국제 표준을 기반으로 인공지능 의료기기에 특화된 전주기 프로세스를 정의한다.

2. 연구 방법

1) 인공지능 의료기기의 위험관리 특성 분석

주요 규제기관은 전통적 의료기기와 SaMD의 위험관리에 범용 프레임워크인 ISO 14971:2019을 채택해왔다[4]. 그러나 인공지능 의료기기의 등장과 확산으로 ISO 14971:2019 규격만으로는 인공지능의 특성을 충분히 반영하기 어렵다는 한계가 드러났으며, 이를 보완하기 위한 지침이 제시되었다[4]. 이에 따라, ISO 14971:2019를 기반으로 한 ISO/TR 24971:2020과 ISO/TS 24971(Draft)은 데이터 편향, 성능 드리프트, 알고리즘 업데이트 및 적응형 학습, 설명가능성 부족 등 인공지능 특유의 위험 요인을 제시하고 있다[6,7]. 이러한 특성을 바탕으로 인공지능 의료기기의 위험관리에서 두 가지 주요 고려사항을 도출하였다.

① 데이터 품질 관리: 인공지능 의료기기의 성능과 안전성은 학습 데이터에 크게 의존한다. 데이터의 편향이나 대표성 부족은 안전성에 직접적인 위협이 되며, 데이터 분포 변화는 성능 드리프트를 초래하므로 초기 단계부터 데이터의 수집·관리·검증 절차가 강화되어야 한다.

② 모니터링 강화: 인공지능 의료기기는 알고리즘 업데이트와 적응형 학습으로 인해 성능이 지속적으로 변동한다. 따라서, 일회성 검증만으로는 충분하지 않으며, 시판 후 운영 및 모니터링을 통한 추적 관리가 요구된다.

따라서 인공지능 의료기기의 특성은 데이터 관리와 모니터링을 중심으로 한 전주기 위험관리가 필요하다. 앞서 도출된 고려사항을 반영하기 위하여, 본 연구에서는 의료기기 소프트웨어 전주기 프로세스를 정의하는 ISO 62304:2006과 AI 시스템 전주기 프로세스를 제시하는 ISO/IEC 5338:2023을 검토하였다[2,3]. 두 규격에서 제시하는 주요 특성과 한계를 비교하였으며, 그 결과는 표 1에 제시하였다. 또한, 데이터 품질 관리의 중요성을 보완하기 위해 ISO/IEC 5259-4:2024을 검토하여 데이터 편향 및 대표성 부족 등 학습 데이터 특유의 위험 요인을 관리하는 방안을 확인하였다[5].

이와 같은 ISO 규격 분석을 통해 인공지능 의료기기의 특성을 구체적으로 도출할 수 있었으며, 이를 전주기 위험관리 단계에 체계적으로 반영할 수 있음을 확인하였다.

2) 국제표준 통합 기반 인공지능 의료기기 전주기 프로세스

본 연구에서는 인공지능 의료기기의 고유한 특성을 전주기 단계에서 반영할 수 있도록, 기존 국제표준의 요구사항을 통합하여 새로운 인공지능 의료기기 전주기 프로세스를 정의하였다. 이를 통해 의료 인공지능의 특수성을 고려한 위험관리 체계를 마련하고, 규제기관이 요구하는 안전성과

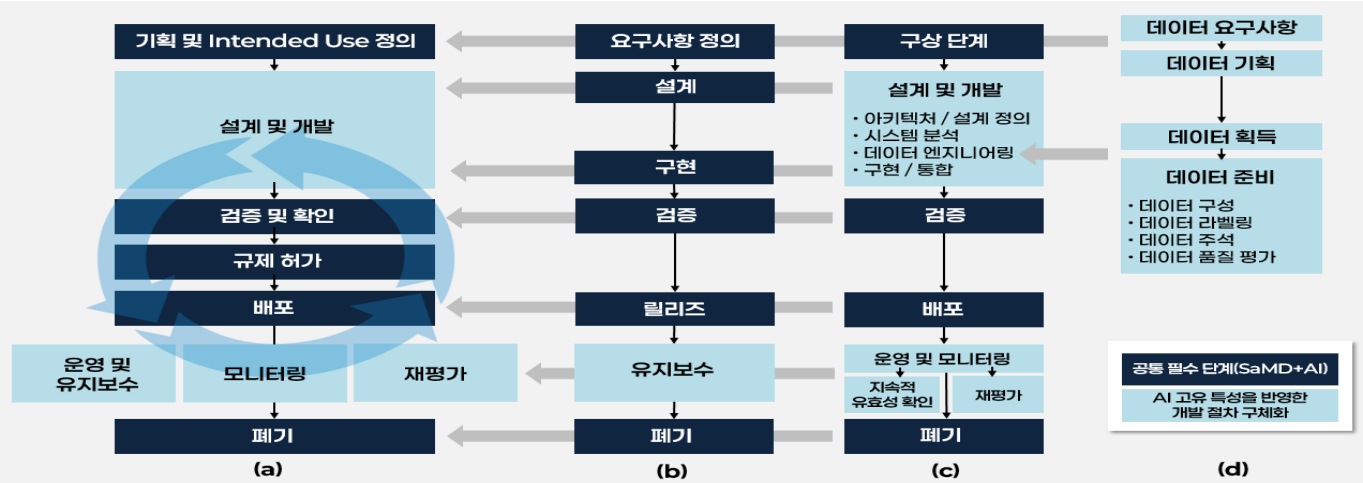


그림1. 국제표준 통합 기반 인공지능 의료기기 전주기 위험관리 프로세스 (a) 제시한 AI 의료기기 전주기 프로세스, (b) IEC 62304:2006, (c) ISO/IEC 5338:2023, (d) ISO/IEC 5259-4:2024

표 1. 의료기기 소프트웨어, AI 시스템 규격의 특성 및 한계 비교

구분	IEC 62304:2006	ISO/IEC 5338:2023
적용대상	의료기기 SaMD 개발	범용 AI 시스템
주요내용	의료기기 소프트웨어 생명주기 요구사항	AI 시스템 생명주기 전반의 품질 및 관리 프로세스 (기획 ~ 종료)
전 주기 프로세스	소프트웨어 개발 프로세스, 유지보수 프로세스, 위험관리 프로세스, 형상관리 프로세스, 문제 해결 프로세스로 구성	구상 단계 → 설계 및 개발(데이터엔지니어링 포함) → 검증→ 배포→ 운영 및 모니터링→ 재평가→ 지속적 유효성 확인→ 폐기
강점	SaMD에 특화된 전 주기 관리 체계 제공	성능 드리프트, 설명가능성 부족 등 AI 특성 반영
한계	AI의 학습·업데이트 등 특수성 반영 부족	의료기기 규제 환경에서 요구되는 상세 SW 전 주기 규정 부족
연구 반영 요소	기본 전 주기 프로세스 구조의 기반	AI 특화 위험요소(성능 드리프트, 설명가능성 등)

신뢰성을 충족할 수 있는 통합적 관리 방안을 제시한다.

① 기본 구조: IEC 62304:2006의 SaMD 개발 생명주기를 기반으로 하였다[2].

② AI 특화 요소 반영: ISO/IEC 5338:2023에서 제시하는 데이터 엔지니어링 단계, 운영 및 모니터링 단계의 지속적 유효성 확인과 재평가 절차를 통합하여, 적응형 학습 및 데이터 드리프트로 인한 성능 저하를 관리할 수 있도록 설계하였다[3].

③ 데이터 품질 관리 강화: ISO/IEC 5259-4:2024의 데이터 품질 관리 프로세스를 통합하여, 데이터 편향 및 대표성 부족 등 학습 데이터 고유의 문제를 전주기적으로 관리한다[5].

④ 순환적 관리 구조: 검증 및 규제 허가 단계에서 임상적 성능과 안전성을 평가하고, 배포 이후 운영 단계에서 모니터링과 재평가를 반복적으로 수행하는 순환적 구조를 제시한다. 이를 통해 단순 유지보수를 넘어 임상 환경에서 발생하는 문제까지 대응할 수 있도록 하였다.

3. 연구 결과

본 연구는 IEC 62304:2006의 구조를 기반으로, ISO/IEC 5338:2023의 인공지능 설계 과정의 데이터 엔지니어링 및 모니터링 절차와 ISO/IEC 5259-4:2024의 데이터 품질 관리 요소를 통합한 인공지능 의료기기의 전주기 프로세스를 제안한다[2,3,5]. 이를 통해 인공지능 의료기기의 주요 위험요인인 데이터 편향, 성능 드리프트, 적응형 학습, 설명가능성 부족 등을 전주기 단계에서 관리할 수 있다. 특히 시판 후 운영 단계에서의 지속적 모니터링과 재평가를 통해 성능 변동을 보완할 수 있는 순환적 관리 체계를 마련함으로써 기존 접근과 차별화된다. 본 연구의 결과는 인공지능 의료기기의 안전성과 신뢰성을 확보하기 위한 구체적이고 실질적인 프레임워크를 제공하며, 향후 규제 및 산업 적용 가능성을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

4. Acknowledgements

본 연구는 2025년도 식품의약품안전처 연구개발비(RS-2025-02213016)로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

5. 참고 문헌

[1] Grand View Research, 2024. AI in Healthcare Market Report, Report ID: GVR-3-68038-951-7

[2] IEC, IEC 62304:2006 – Medical device software – Software life cycle processes. Geneva: IEC; 2006

[3] ISO/IEC, ISO/IEC 5338:2023 – Information technology – Artificial intelligence — AI system life cycle processes. Geneva: ISO/IEC; 2023.

[4] ISO, ISO 14971:2019, Medical devices — Application of risk management to medical devices. Geneva: ISO; 2019.

[5] ISO/IEC, ISO/IEC 5259-4:2024 – Artificial intelligence — Data quality for analytics and machine learning (ML)— Part 4: Data quality process framework. Geneva: ISO/IEC; 2024.

[6] ISO, ISO/TR 24971:2020 – Medical devices — Guidance on the application of ISO 14971. Geneva: ISO; 2020.

[7] ISO, ISO/TS 24971(Draft) – Medical devices — Guidance on the application of ISO 14971 - Part 2: Machine learning in artificial intelligence.

X-ray 기술문서 오류 분석을 위한 LLM 기반 피드백 시스템 개발에 관한 연구

김윤호, 김승겸, 김영모+
건양대학교 의공학부 · 의료기기규제과학연구실

A Study on Development of an LLM-based Feedback System for Error Detection in X-ray Technical Documentation

Younho Kim, Seungkyem Kim, Yoeongmo Kim+
Department of Biomedical Engineering & Regulatory Science Laboratory, Konyang University, Korea
+ymkim@konyang.ac.kr

Abstract

Technical files for X-ray medical devices must substantiate safety and performance, yet real-world submissions often contain repetitive issues—missing items, inconsistent units/specifications, and mis-cited standards—that delay review and increase costs. We present a locally runnable, privacy-preserving pre-review system that detects sentence-leveldocumentation errors and produces regulation-aligned, structured feedback. The pipeline couples a fine-tuned Korean BERTclassifier (sentence-level error identification across 148 labels) with Llama 3 Instruct (GGUF)executed via llama.cppwithout any parameter fine-tuning, relying instead on schema-constrained promptingand deterministic decoding, followed by post-correctionto ensure machine-parsable outputs. Grounded in the 14-item MFDSstructure and international standards (IEC 60601 family, including 60601-2-54; IEC 62304; ISO 14971), we defined the label taxonomy and curated a corpus of ~14ksentences plus 1k+prompt–response exemplars for prompt design and internal evaluation. Given a technical file, the system segments sentences, classifies error types, and emits feedback conforming to a fixed JSON schema—ok, issues, type, where, explanation, fix, standard_refs—while an automatic correction routine enforces field completeness and JSON validity. Implemented on Windowswith a FastAPIendpoint and Excelexport, the solution supports offlineuse for pre-submission self-checks by authors and more consistent first-pass reviews by regulators. In an internal pilot (~1.4ksentences), JSON validity improved from ~80% pre-correction to ~99% post-correction, and the classifier achieved ~80% accuracywith macro-F1 in the 0.7 range. Future work will broaden external validation (blinded expert review), report full metrics, and extend label mappings to EU MDRand FDA eSTAR.

1. 연구 배경

의료기기 기술문서는 제품의 안전성과 성능을 규제 관점에서 추적 가능하게 입증해야 하며, 문서 내·문서 간 일관성과 표준 인용의 정확성이 심사 품질에 직접적으로 영향을 미친다. 그러나 실제 제출 문서에서는 항목 누락, 수치·단위 불일치, 시험 근거의 미흡한 연결, 표준(예: IEC 60601 계열, IEC 62304, ISO 14971) 인용의 부정확성 등 반복적 오류가 빈번하게 발견되어 심사 지연과 비용 증가로 이어진다. 특히 X-ray 장비와 같이 다학제적 요건(전기적 안전, 소프트웨어 생애주기, 위험관리)이 교차하는 품목은 문서 구조가 복잡하여 작성자의 숙련도 차이에 따른 품질 편차가 크다. 이러한 맥락에서, 규제 기준을 작성 단계에 반영하고, 제출 전 자가검토를 지원하도록 로컬 실행형 자동 사전검토 도구의 필요성이 증대되고 있으며, 개인정보·영업비밀 보호 차원에서 오프라인 운용 가능성도 중요한 요구 조건으로 부상하고 있다.

2. 연구 목적

본 연구의 목적은 기술문서의 제출 전 단계에서 문장 단위 오류를 자동 탐지하고, 규제 기준에 정합적인 수정 제안과 근거를 구조화된 JSON으로 산출하는 로컬 실행형 사전검토 도구를 구현하는 데 있다. 주 사용자는 의료기기 제조사의 문서 작성자·품질/규제 담당자와 규제기관의 1차 심사자이며, 본 도구를 통해 반복적 수정·보완 과정와 질의응답을 줄여 검토 사이클을 단축하고 표준 인용·문서 간 일관성을 높일 수 있다. 해당 시스템은 오프라인(Windows) 환경에서도 운용되도록 설계되어 개인정보·영업비밀 보호 요구를 충족하며, 적용 시점은 제출 전 사전검토와 1차 심사 지원 단계이다. 이를 수행하기 위해 기술문서를 학습한 LLM을 이용하여 기술문서의 사전검토를 실시한다. 본 연구는 우선적으로 X-ray 시스템에 대해 적용한다.

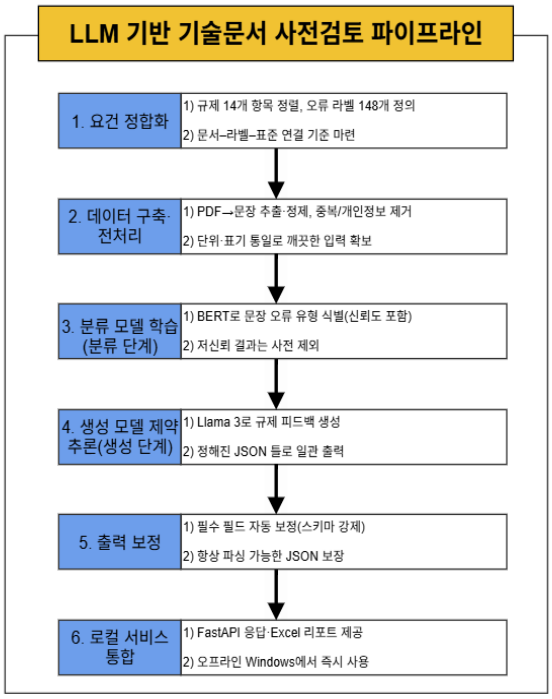
본 연구는 제출 전 단계에서 오류 유형·설명·수정 제안·근거 표준을 포함한 구조화 결과(JSON)를 일관되게 제공하여, 작성자가 신속히 자가 보완을 수행하고 심사자가 초기 검토를 효율화할 수 있도록 하는 것을 목표로 한다. 반복적 수정·보완을 줄여 시간 절약과 1차 검토의 일관성 향상에 기여하는 실용적 보조 도구로의 정착을 지향한다.

3. 연구 방법

본 연구는 LLM의 훈련을 다음의 순서로 진행하였다. 요건 정합화 → 데이터 구축·전처리 → 분류 모델 학습 → 생성 모델 제약 추론 → 출력 보정 → 로컬 서비스 통합 순으로 진행하였다. 먼저 식약처의 기술문서 양식에 있는 14장의 항목을 기준으로 본 논문에서 재정리하고 본논문에서 발생할수있는 오류 라벨을 148개를 정의하여 문서 구조–라벨–근거 표준 간 일관 매핑·추적성을 확보하였다. 데이터 구축·전

처리에서는 실제 문장 14,000건 이상을 모아 문장을 깔끔하게 나누고, 중복과 개인정보를 지우며, 표기·단위를 통일해 일관된 입력을 만들었다. 분류 단계에서는 한국어 BERT를 본 연구에서 정의한 148개 오류 유형에 맞게 다시 학습해 문장마다 오류 라벨과 신뢰도를 예측하고, 낮은 신뢰도 결과는 제외했다. 규제 피드백 생성 단계에서는 Llama 3를 로컬에서 실행해 미리 정한 JSON 틀에 맞춰 오류 설명·수정안·근거를 한 번에 만들고, 빠진 항목은 자동으로 보정해 항상 읽히는(JSON) 결과만 내게 했다.

마지막으로 결과는 엑셀로 저장되고 간단한 웹 API로 제공되어, 오프라인 Windows 환경에서도 바로 사용할 수 있게 했다.



4. 연구 결과 및 고찰

초기 구현의 유효성은 사례 분석으로 확인하였다.

첫째, "각 소프트웨어 릴리즈에서 위험통제 검토를 수행했다"는 진술에 대해 분류기는 '문서화 누락'으로 판정했고, 생성기는 릴리즈별 검토 기록의 부록 첨부와 본문 내 추적 ID 표기를 제안했다. 초기 출력에서 위치 정보 하위 필드 누락으로 JSON 파싱이 실패했으나, 스키마 보정 로직이 이를 자동 보완하여 최종 스키마 검증을 통과했는데, 이는 규제 근거를 포함한 구조화 피드백이 보정을 통해 실무에 바로 활용 가능한 형식으로 안정화됨을 시사한다.

둘째, 본문 "10 mm"와 표 "10㎜"가 혼재한 문장에 대해 분류기는 '단위 표기 불일치'를 식별했고, 생성기는 문서 전반의 SI 표기 통일과 표·본문 동시 갱신을 권고했다. 초기 생성물에서 근거 서술이 짧아 스키마 최소 요건을 충족하지 못했으나, 보정 로직이 표준 근거 템플릿을 주입해 일관된 JSON 구조를 확보했고 이후 엑셀·API 파이프라인에서도 정상 처리되었다.

종합하면, 본 시스템은 대표적 오류를 문장 단위에서 적절히 탐지하고 규제 근거가 수반된 구조화 피드백을 제공하며, 보정 로직으로 출력의 누락·형식 오류를 자동 보정해 후속 프로세스 활용성을 높임을 입증한다. 다만, 더 넓은 문서 유형과 희소 라벨에 대한 정량 평가및 전문가 블라인드 검토를 추가 수행해 일반화 가능성과 실무적 타당성을 보강할 필요가 있다.

5. 결론 및 향후계획

본 연구는 X-ray 기술문서를 대상으로 문장 단위 오류를 자동 탐지하고 규제 근거를 포함한 구조화 피드백(JSON)을 제공하는 로컬 실행형 사전검토 시스템을 제안·구현하였다. 식약처 기술문서 양식에 있는 14개 항목에 대해 본 논문에서 정의한 148개 오류 라벨, 한국어 BERT 분류기, Llama 3 Instruct기반 스키마 제약 생성과 post-correction, 그리고 FastAPI·Excel 연동으로 모든 단계가 오프라인에서 연속적으로 수행되는 하나의 흐름이 되도록 구성했다.

내부 파일럿(약 1.4k 문장)에서 보정 전구조화 유효성은 80% 대였고 보정 후 99%대로 안정화되었으며, 분류기는 정확도 80%대를 보였다. 또한 표준 인용 판본·연도 누락, 단위 표기 불일치, 위험통제 기록 미첨부 등 반복 오류에 대해 유형·식별 → 수정·제안 → 근거·표준·명시 → 형식·보정 절차가 일관되게 작동함을 확인하였다.

향후에는 데이터 확장으로 희소 라벨을 보강하고, RAG로 규격 조항 근거의 자동 첨부와 출처 명시를 강화하며, MDR GSPR·FDA eSTAR로의 구조 매핑을 확대할 예정이다. 아울러 JSON 유효성률·처리시간·저신뢰 필터 비율을 모니터링하는 운영 대시보드를 구축해 배포 이후 성능을 상시 관리함으로써, 본 시스템을 신속·일관·추적 가능한 사전검토 도구로 정착시키고자 한다.

6. 참고 문헌

- IEC 62304:2006, ISO 14971:2019, IEC 60601-2-54:2009.
- MFDS. 의료기기 기술문서 작성 가이드라인, 2022.
- MFDS. 디지털 맞춤형 민원 서비스/AI 사전검토 구축 전략, 2024.
- Meta AI. Llama 3 Model Card/Technical Report, 2024.
- Devlin, J. et al. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers, 2018.

인공무릎관절의 경골부가 받는 최대 응력(stress) 시뮬레이션의 신뢰성 평가

이태희[1], 김소희[1], 허희선[1], 김현정[1], 박해대[1], 정태곤[2], 박광민[2], 강관수[2], 정유진[2], 고동현[1*]

식품의약품안전평가원 의료기기연구과[1], (재)오송첨단의료산업진흥재단 첨단의료기기개발지원센터[2]

Credibility Assessment of a Computational Simulation for Evaluating Maximum Stress in the Tibial Component of a Total Knee Replacement

Tae-Hee Lee [1], So Hee Kim [1], Hee Seon Heo [1], Hyeon Jeong Kim [1], Hae Dae Park [1], Tae-Gon Jung [2], Kwang-Min Park [2], Kwan-Su Kang[2], Yu-Jin JEONG[2], Dong Hyun Go[1*]

Medical Device Research Division, National Institute of Food and Drug Safety Evaluation, Korea[1],

Medical Device Development Center, Osong Medical Innovation Foundation, Korea[2]

*godh@korea.kr

Abstract

This study established the credibility of a computational modeling and simulation (CM&S) model developed to evaluate the maximum stress in the tibial component of a total knee replacement (TKR). The simulation and comparative tests were conducted based on ASTM F3334, and the model's credibility was demonstrated through verification and validation. The findings provide a practical example for ensuring the reliability of CM&S in medical device performance evaluation and support its application within the Korean regulatory framework.

1. 연구 배경

컴퓨터 모델링 및 시뮬레이션(Computational Modeling and Simulation, 이하 CM&S) 기술은 현실 세계의 물리적 시스템을 수학적 모델로 정의하고, 이를 컴퓨터 환경에서 구현하여 분석하는 기술로 다양한 의료기기의 설계와 성능평가에 활용되고 있다 [1].

특히, 인공무릎관절 분야에서 CM&S는 실제 시험에서 구현하기 어려운 다양한 하중 조건, 재료 물성 변화 및 사용 환경의 변화를 수치적으로 재현하고 분석할 수 있다는 점에서 큰 장점을 가지기 때문에, ISO 21536 표준에서도 평가 전 가혹조건 시료 선정의 방법 중 하나로 컴퓨터 모델링 시뮬레이션을 언급하고 있다[2].

그러나 규제 의사결정 영역에서는 시뮬레이션 결과를 활용하기 위해서는 모델이 물리적 시스템을 얼마나 정확히 표현하는지를 입증하는 검증(Verification) 및 유효성 확인(Validation) 과정을 통해 신뢰성 확보가 필수적이다.

따라서, 본 연구에서는 인공무릎관절 경골부 최대응력 평가 시뮬레이션 모델을 개발하고 신뢰성을 입증하였다.

2.연구 방법

2.1 시뮬레이션 모델 개발

유한요소모델은 ABAQUS 2024(Dassault Systemes Simalia Corp., Johnston, RI, USA)를 사용하여 개발하였다. 시뮬레이션을 위한 3차원 모델은 Depuy-Synthes사의 ATTUNE 제품의 모델 #3, #7의 경골부를 3D scan(MetraSCAN BLACK Elite, Creaform, CA, USA)을 통해 획득한 3차원 영상을 요소화(mesh) 하였으며, 논문 및 제조사에서 제공되는 물성값을 활용하여 모델을 구성하였다(표1). 해석은 비선형 정적(Implicit) 조건에서 대변형효과를 포함하였으며, 인공무릎관절 경골부의 유한요소분석에 관한 ASTM F3334 표준에 따라 하중조건, 경계조건을 설정하였다(그림 1).

표 1 시스템 특성(재료물성)

구성	Material	Young's Modulus	Poisson's Ratio
지그(Metal) [3]	Stainless	193,000 MPa	0.28
지그(Bone Cement) [4]	PMMA	3,500 MPa	0.3
Tibial Component[5]	Co-Cr	238,839 MPa	0.3

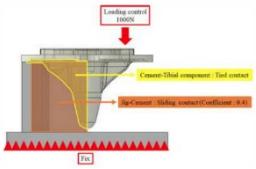


그림 1 시뮬레이션 구성

2.2 신뢰성 평가

2.2.1 사용맥락(Context of Use, COU) 설계

개발한 모델의 신뢰성 평가 시 모델의 역할과 범위를 규정해야 하기 때문에 모델링하는 의료기기의 정보, 모델링을 통해 확인하고자 하는 성능평가 항목에 관한 정보, CM&S 결과의 활용 및 역할에 관한 내용을 포함하여 사용맥락을 설계하였다.

2.2.2 모델위험도(model risk) 평가

ASME V&V 40 표준에서 제시하는 모델영향과 결정결과에 따른 모델위험도 평가방법을 '모델역할', '위해의 심각도', '위해의 발생확률'로 세분화하였다. 모델역할은 규제의사결정과정에서 CM&S 결과가 얼마나 중요한 판단 근거로 사용되는지를 나타내는 정도에 따라 낮음-중간-높음 3단계로 설정하고, 결정결과는 잘못된 결정으로 인한 부정적인 결과의 중요성으로 위해의 심각도(낮음-중간-높음)와 발생확률(낮음-중간-높음)의 곱으로 표현하였으며, 이를 통해 모델위험도를 종합적으로 평가하였다.

2.2.3 신뢰성 입증활동

2.2.3.1 코드검증

사용한 소프트웨어의 품질관리 절차를 검토하여 정확하고 일관된 결과를 생성하는지를 평가하고, 수치 알고리즘의 올바른 구현과 기능을 입증하기 위해 외팔보(cantilever beam) 시뮬레이션 결과값과 수학적으로 계산한 값의 동등성을 평가하였다.

2.2.3.2 계산검증

ASTM F3334 표준에 따라 최소한 세 가지 수준의 메쉬 세분화를 수행하여 메쉬 세분화에 따른 시뮬레이션 결과값의 변화율이 5% 이하로 수렴하는 지점을 확인하였다.

2.2.3.3 계산모델의 민감도 및 불확실성

시뮬레이션 모델에서 가장 중요한 입력 변수가 무엇인지 식별하기 위해 하중이 가해지는 지점, 시편 고정 범위(센터 정렬), 재료의 물성을 변화시켜 모델의 민감도를 평가하였으며, 민감도가 높은 변수에 대해 입력변수의 불확실성이 출력에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다.

2.2.3.4 실제 시험과 비교

시뮬레이션 모델과 실제 시험의 일치도를 보기 위해 실제 물리적 시험환경에서 변형률(stratin)을 측정하였다. 실제 시험환경에서는 응력측정이 어렵기 때문에 변형률 결과를 활용하여 비교하였다. 시뮬레이션의 모델과 동일한 시편(Depuy-Synthes사의 ATTUNE

제품의 모델 #3, #7의 경골부)을 사용하였으며, ASTM F3334 표준에 따라 구성 시험환경을 구성하고 인장시험기(Bionix 858, MTS Systems Corp., Eden Prairie, MN, USA)를 사용하여 수직하중을 인가하였다.

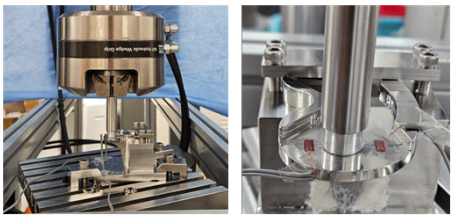


그림 2 실제 시험 구성

3. 연구 결과

3.1 시뮬레이션 결과

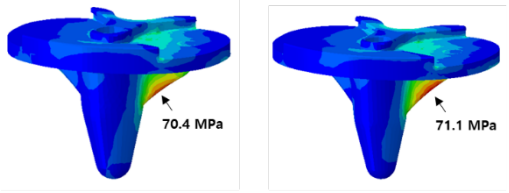


그림 3 시뮬레이션 결과

해석 결과 동일한 하중 조건에서 모델크기가 클수록 최대응력은 증가하였으며, 최대응력의 위치는 제품 크기와 상관없이 용골(Keel) 부근에 집중되었다(그림 3).

3.2 신뢰성 평가

3.2.1 사용맥락(COU)

COU는 다음과 같이 설계하였다.

컴퓨터 모델은 3등급 인공무릎관절인 CoCrMo Alloy 재질의 경골 구성품의 최대 주응력을 계산하는 데 사용된다. 이 시험은 ISO 21536:2023 표준 7.2.1.4을 기반으로 ASTM F3334-19 표준에 따라 유한요소해석(FEA)을 수행하여 계산하고 FEA 변형률과 스트레인 게이지로 측정한 변형률을 직접 비교하여 모델의 유효성을 확인한다. 이 모델은 다양한 크기 중에서 가혹 시료를 선택하는 데 사용되며, 규제 결정(승인)을 위해 실제 성능시험 결과와 함께 제출된다.

3.2.2 모델위험도(model risk) 평가

본 시뮬레이션 모델은 인허가용 성능시험 전, 가혹시료 선정을 위한 참고자료로 활용되므로, 모델의 역할은 "중간 위험수준"으로 평가하였다. 만약 CM&S를 통해 도출한 인공무릎관절 경골부 구성요소의 최대 접촉 응력 수치에 오류가 발생할 경우, 제품 파손 혹은 정렬 실패로 인한 통증 등이 발생할 수 있으며 이는 사망까지는 이르는 부작용은 아니지만 외과적 처치가 필요할 수 있으므로 오류 발생시 위해의 심각도는 "중간 위험수준", 발생확률은 "중간 위험수준"으로 결정결과는 "중간 위험수준"이 된다. 따라서, 모델위험도는 "중간 모델역할-중간 결정결과"로 다섯단계의 모델 위험도 등급 중 중간등급인 Level3로 판단하였다.

3.2.3 신뢰성 입증

3.2.3.1 코드검증

품질경영시스템 인증(ISO 9001)을 받은 소프트웨어 개발사의 시뮬레이션 프로그램을 사용하여 유한요소분석을 수행하였으며, 제조사의 지속적인 품질보증 프로세스가 운용되고 있음을 유지보수 문서를 통해 확인하였다.

외팔보 시뮬레이션 결과값과 수학적으로 계산한 값의 오차율은 0.62%~1.73%로 수치코드가 오류없이 작동함을 확인하였다.

3.2.3.2 계산검증

메쉬크기를 2.0mm부터 0.75mm까지 0.25mm 간격으로 세분화하여 결과값의 변화를 확인하였고, 결과값의 변화율이 5% 이하로 수렴하는 1.5mm를 최적의 메쉬크기로 결정하여 시뮬레이션에 적용하였다.

3.2.3.3 계산모델의 민감도 및 불확실성

민감도 분석 결과 재료의 물성의 변화가 출력에 미치는 영향이 가장 적게 나타났다. 따라서, 불확실성 정량화 분석에는 하중지점과 시편고정범위(센터 정렬)의 불확실성이 시뮬레이션 결과에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다.

표 2 민감도 분석 결과

매개변수		최소		명목 값	최대	
		Stress (MPa)	오차율 (%)	Stress (MPa)	Stress (MPa)	오차율 (%)
하중 지점	x	224.7	-7.57	243.10	255.3	5.02
	y	230.7	-5.10		214.0	-11.97
Center 정렬		216.9	-10.78		220.6	-9.26
시편 물성		242.6	-0.21		243.6	0.21

3.2.3.4 실제 시험과 비교

시편의 동일한 위치에서 측정한 변형률 값을 정량적으로 비교한 결과 최대 2.87%의 차이를 보였다.

표 3 시뮬레이션과 실제시험 변형률 비교

제품	시뮬레이션 결과	실제시험 결과	오차율
#3	14.8μ	15.02μ	1.8%
#7	17.9μ	17.41μ	2.87%

4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 인공무릎관절의 경골부에 발생하는 최대응력 평가 시뮬레이션을 개발하고, 검증(verification), 유효성 확인(validation)을 수행하여 신뢰성을 확보하였다. 개발된 시뮬레이션 모델의 출력값과 실제 시험의 측정값의 차이가 5% 미만으로 높은 일치도를 보였다. 사용맥락(COU) 설계 및 모델위험도 평가항목을 세분화하여 제시하였으며, 국내 의료기기 제조사 및 시뮬레이션 연구자들이 실제 연구개발 과정에서 참고할 수 있도록 신뢰성이 입증된 CM&S 모델 개발 사례를 제공하였다. 본 연구의 결과는 연구자와 규제당국자 모두가 활용할 수 있을 것으로 기대되며, 인공무릎관절의 다른 평가항목뿐만 아니라 다양한 의료기기 평가에도 확장 적용되어 CM&S 기반의 과학적 규제체계 구축에 기여할 것으로 기대된다.

5. Acknowledgements

본 연구는 2024년 식품의약품안전처의 연구개발비(24204MFDS198)로 수행되었으며 이에 감사드립니다

6.참고 문헌

[1] 컴퓨터 모델링을 이용한 의료기기 시뮬레이션 평가 보고서 작성방법 정보자료집, 식품의약품안전평가원, 2021

[2] ISO 21536 Non-active surgical implants-Joint replacement implants-Specific requirements for knee-joint replacement implants, ISO, 2023.

[3] Tumer, Devrim, et al. "Investigation of effective coating of the Tie6Ale4V alloy and 316L stainless steel with graphene or carbon nanotubes with finite element methods." J. Mater. Res. Technol 9 (2020): 15880-15893. (sus)

[4] Chen, Ji, et al. "Space between bone cement and bony endplate can trigger highe r incidence of augmented vertebral collapse: An in-silico study." Journal of Clinic al Neuroscience 125 (2024): 152-158. (bone cement)

[5] De Ruiter L, Russo L, Vet NJ, Janssen DW, Verkerke GJ. A preclini cal numerical assessment of a polyetheretherketone femoral component in total k nee arthroplasty during gait. J Exp Orthop. 2017;4:1-8. (CoCr)

[6] ASME V&V 40 Assessing Credibility of Computational Modeling through Verification and Validation Application to Medical Devices, ASME, 2018.

여성의공학자

좌장: 전수민(동아대학교), **박은영**(KAIST)

11월 8일 (토) **일강원 104 (10:00-11:30)**

신미경(성균관대학교)
Invited 신경 및 근육 재생을 위한 의료용 전도성 접착제

박현지(아주대학교)
Invited 오가노이드 모델과 생물정보학 분석 기술을 통한 혈관 발달 과정에서의 대식세포 역할 규명

김지원(Brown University)
Invited 3차원 세포군집의 집단침윤에서 나타나는 규칙성



신미경/Shin, Mikyung
부교수/Associate Professor
성균관대학교 글로벌바이오메디컬공학과/
Sungkyunkwan University Department of Biomedical Engineering

신경 및 근육재생을 위한 의료용 전도성 접착제
Adhesive and conductive biomaterials for enhanced nerve and muscle repair

Abstract
Tissue-adhesive biomaterials have emerged as a promising solution for enhancing tissue repair and local drug delivery due to their biocompatibility, tunable mechanical properties, and resistance to delamination on wet tissues. For effective regeneration of peripheral nerve and muscle tissues, which require high elasticity, controlling interfaces with tissue-mimetic hydrogels is crucial for restoring motor function and sensory perception after traumatic injury. This study introduces various hydrogel interfaces with strong adhesiveness to nerve and muscle tissues and electrical conductivity, which effectively promote axon and myofiber growth. The adhesive properties allow for stable attachment without the need for sutures or invasive fixation, reducing complications. Furthermore, combining these conductive, adhesive hydrogels with self-healable, stretchable electronics enables the development of an injectable tissue prosthesis, facilitating closed-loop robot-assisted rehabilitation. Challenges such as long-term stability, mechanical strength, and immune response are discussed, along with future directions for optimizing hydrogel-based therapies in clinical applications.

Brief Biosketch
(2019~2023) 성균관대학교 글로벌바이오메디컬공학과 조교수
(2018~2019) 펜실베니아대학교 생명공학과 박사후연구원
(2011~2016) 한국과학기술원 나노과학기술대학원 박사졸업
/(2019~2023) Sungkyunkwan University, Department of Biomedical Engineering, Assistant Professor
(2018~2019) University of Pennylvania, Post-doc researcher
(2011~2016) KAIST, PhD.



박현지/Hyun-Ji Park
조교수/Assistant Professor
아주대학교/Ajou University

오가노이드 기반 분석을 통한 혈관 발달 및 재생에서의 대식세포 기능 규명

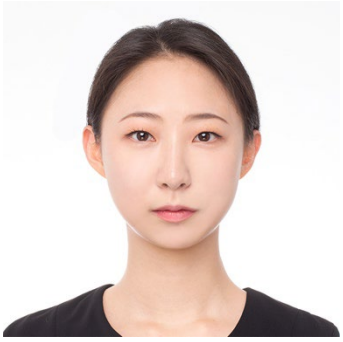
Elucidating the role of macrophages in vascular development and regeneration through organoid-based analyses

Abstract

Proper vascular development and regeneration are essential for tissue homeostasis, and their dysregulation can lead to severe outcomes such as ischemic necrosis or tumor progression. To elucidate the cellular programs governing vascular maturation, we established a cross-scale analytical framework integrating time-series single-cell transcriptomics and tissue morpho-mechanics in mouse pulmonary arteries. This approach uncovered macrophages as key regulators coordinating lumen expansion and wall remodeling during postnatal vascular growth. Using a human iPSC-derived blood vessel organoid (BVO) model, we confirmed that anti-inflammatory MGL^{high} macrophages recapitulated physiological lumen enlargement while maintaining structural integrity through balanced fibroblast and smooth muscle cell differentiation. Building upon these insights, we generated iPSC-derived macrophages spanning a functional spectrum from inflammatory to anti-inflammatory states and applied them to a human atherosclerotic BVO model. Regenerative macrophages within this system facilitated foam cell clearance, suppressed inflammation, and enhanced collagen-based vascular repair. Together, these studies establish a mechanistic and translational link between macrophage-mediated vascular development and regeneration, providing a foundation for macrophage-based immunoregenerative therapies targeting vascular diseases.

Brief Biosketch

박현지 교수는 아주대학교 첨단바이오융합대학 조교수로, 줄기세포 및 세포 외 소포체 기반 생체모사 유전자 전달을 통한 노화 및 심혈관질환의 면역재생치료제 개발 연구를 수행하고 있다. 아주대학교 학사, 연세대학교에서 석사 및 박사학위를 취득하고, 미국 Georgia Tech 및 Emory University 에서 박사후 연구를 수행하였다. Hyun-Ji Park focuses on developing immunoregenerative therapeutics for aging and cardiovascular diseases through stem cell and extracellular veslcle-mimetic gene delivery platforms. She received her B.S. degree from Ajou University, M.S. and Ph.D. degrees from Yonsei University, and completed her postdoctoral research at Georgia Tech and Emory University.



김지원/Jiwon Kim
박사후연구원/Hibbitt Postdoctoral Fellow in Engineering
소속: 브라운대학교 공과대학/School of Engineering, Brown University
Legorreta Cancer Center, Brown University

3 차원 세포군집의 집단침윤에서 나타나는 규칙성

Collective Transitions from Orbiting to Matrix Invasion in 3D Multicellular Spheroids

Abstract

Three-dimensional epithelial cell collectives often exhibit coordinated orbiting along curved cell-matrix interfaces before transitioning into collective matrix invasion. These symmetry-breaking transitions underlie morphogenesis and cancer invasion, yet the spatial cues that dictate where invasive branches arise remain elusive. Here, we show that the transition from orbiting to invasion is governed by bidirectional coupling between cell traction and local matrix curvature. We used slightly elongated multicellular spheroids that initially possessed both sharper and flatter regions. During the early orbiting phase, they round up while exerting stronger contractile forces preferentially near the initial sharper curvatures. This process locally aligns collagen fibers radially, priming the matrix for subsequent invading branches that emerge roughly along the initial major axis of the spheroid. Notably, applying osmotic pressure arrested or even reversed these invading branches. "Mosaic" spheroids containing small fractions of "leader" cells disrupted coherent orbiting yet retained invasiveness. Finally, we establish a minimal self-propelled particle model to elucidate how the crosstalk of cell-cell and cell-matrix adhesion mediates collective orbiting. Altogether, this work elucidates how local curvature guides symmetry-breaking collective, with relevance for embryonic development and tumor progression.

Brief Biosketch

2023 년 박사학위 취득(지도: KAIST 신현정 교수님) 후 박사후연구원으로 재직중(지도: 브라운 대학교 Ian Y. Wong 교수님) 입니다. 3 차원 세포모델을 대상으로 이미징 기반 형태분석과 기계적 자극제어를 통해 세포의 기계적 기억력과 침윤 거동을 규명하였습니다. 기계적 미세환경 조절을 통한 질병의 정량적 이해와 치료기작 개발에 기여하고자 합니다. Hibbitt Postdoctoral Fellow 로 선정되어 BME Design and Innovation II 과목을 공동지도 하였습니다. Rising Stars in Mechanical Engineering (female)로 선정되었습니다. Jiwon Kim received her Ph.D. from KAIST and is currently a Postdoc at Brown University. Her research focuses on 3D cell mechanics/mechanobiology. She was selected as a Hibbitt Postdoctoral Fellow (2023-2025) and as a Rising Star in Mechanical Engineering (2025).

Poster Presentation
뇌공학

Poster-001

DLPFC 자극을 위해 40mm 깊이에 0.4mT 이상의 자기장 펄스를 생성하는 비침습적 자기자극 웨어러블 기기

송지윤[1*], 김서진[1], 심정은[2], 백지은[2], 이승우[3], 원혁[3], 정목근[2]

[1]대진대학교 IT기계공학과, [2]대진대학교 전자공학과, [3](주)리솔

Non-Invasive Wearable Magnetic Stimulator Device for DLPFC Using 0.4mT Pulses at 40mm Depth

Jiyun Song[1*], Seojin Kim[1], Jeongeun Sim[2], Jieun Baek[2], Seungwoo Lee[3], Hyuk Won[3], Mokkun Jeong[2]

[1]Department of IT Mechanical Engineering, Daejin University, Korea

[2]Department of Electronic Engineering, Daejin University, Korea

[3]Leesol Co., Ltd., Korea

[*]mangosteen464@gmail.com

Abstract

Neurons synchronize their activity to periodic external stimuli, allowing modulation of brain function through electrical or magnetic stimulation. In this study, a wearable pulsed electromagnetic field (PEMF) device targeting the dorsolateral prefrontal cortex (DLPFC) was developed to deliver low-frequency (1Hz) and high-frequency (40Hz) magnetic stimulation. The coil design and pulse parameters were optimized to achieve an effective magnetic field of 0.4mT at a depth of approximately 40mm. Physiological effects were assessed using heart rate variability (HRV) as an index of autonomic nervous system activity. Low-frequency stimulation enhanced parasympathetic dominance, promoting relaxation and calm states, while high-frequency stimulation increased sympathetic activity, facilitating arousal and attention. These findings demonstrate that wearable PEMF can selectively modulate brain states, suggesting potential for non-invasive regulation of autonomic and cognitive functions.

1. 연구 배경

신경계의 뉴런은 외부 자극에 반응하여 활동 패턴이 자극 주기에 동기화하는 경향을 보인다. 이러한 특성을 이용해 전기·자기적 자극을 가하면 신경 활동을 조절할 수 있다. 이러한 효과는 자극의 방식과 위치에 따라 다르게 나타나며, 특히 뇌 기능 조절을 목적으로 다양한 연구가 진행되고 있다. 뇌를 자극하는 방식 중 PEMF(Pulsed Electromagnetic Field)는 자기장의 세기를 변화시켜 목표 지점에 유도전류를 발생시킨다. 이는 직접적인 접촉이 필요하지 않아 기기 착용으로 인한 통증과 부작용이 다른 방식보다 적다는 장점이 있다. 또한, 우울증 환자를 대상으로 한 임상 시험에서는 20분 치료만으로도 유의한 효과가 관찰되는 등 정신건강 분야에서도 활용 가능성이 제시되고 있다[1].

한편, 정신질환에 대한 부정적 인식, 부작용, 비용 부담, 시간적 여유 부족 등의 이유로 병원에서 뇌 자극 치료를 받기는 어렵다. 더불어, 기존의 장치는 크고 고정식이기 때문에 전문적인 의료 환경에서만 사용할 수 있는 한계가 있다. 따라서 본 연구의 목표는 웨어러블 형태의 자기자극 기기를 개발하고, 이를 통해 뇌 상태 변화를 유도할 수 있는지 평가하는 것이다.

2.연구 방법

본 연구에서는 전두엽의 배외측 전전두피질(Dorsolateral Prefrontal Cortex, DLPFC)을 자극 영역으로 설정하였다. DLPFC는 기억, 사고, 의사결정 등 고차원적 인지 기능과 감정 조절의 핵심인 영역이며, 정신건강 연구에서 자주 표적 부위로 설정된다. 본 연구에서는 코일에 펄스 전류를 인가하여 시변자기장을 발생시키고, DLPFC 영역의 뉴런에 유도 전류를 생성하였다. 자극을 효과적으로 전달하기 위해서는 머리의 표면에서 약 40mm 깊이까지 전자기장이 도달해야 한다. PEMF의 종류 중 하나인 LFMS(Low-Frequency Magnetic Stimulation)의 낮은 전자기장 강도를 참고하여 자극 영역에서 자기장 세기는 0.4mT가 필요함을 확인하였다.

먼저, 웨어러블 제작에 적합하도록 보빈의 크기를 결정하였다. 이후 코일 굵기, 감은 횟수, 공급 전압을 변수로 설정하고, Elmer의 유한요소해석을 통해 자기장 분포를 시뮬레이션 했다. 결과를 기반으로 초기 코일 사양을 도출한 뒤, 목표 자기장 세기에 도달할 때까지 변수들을 조절하여 실제 코일을 제작하였다. 이후 웨어러블 기기 구현에 적합한 전류·전압 범위에서, 제작한 코일이 목표 자기장 세기인 0.4mT에 도달함을 확인하였다.

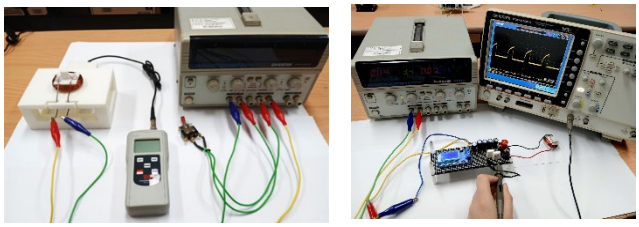


그림 1. 전류의 크기에 따른 자기장의 측정과 펄스 구동 실험

뇌파는 주파수 대역에 따라 서로 다른 인지 및 정서 상태와 관련되어 있다. 본 연구에서는 1Hz를 안정 및 긴장 완화 주파수, 40Hz를 집중력 향상 및 각성 주파수로 설정하였다. 펄스 발생기(ZK-PP2)를 이용해, 펄스의 주파수를 조정하여 각각 1Hz와 40Hz에서 코일에 0.4mT의 자기장을 생성하도록 전자회로를 구성하였다.

설정된 조건을 기반으로, 펄스 자기장 자극이 생체 신경 반응에 미치는 영향을 평가하기 위해 심박변이도(HRV)를 활용하여 자율신경계를 분석하였다. 저주파(1Hz) 자극은 부교감신경계의 우세를 유도하고, 이로 인해 심박수와

호흡수 감소, 혈압 저하 등 안정 및 이완 상태가 나타난다. 반대로, 고주파(40Hz) 자극은 교감 신경계의 우세를 유도하며, 그 결과 심박수 증가, 호흡 촉진, 혈압 상승 등 각성 및 집중 상태가 강화된다.

피험자는 편안히 앉아 긴장을 완화한 상태에서, 양측 눈 위쪽 이마 부근에 두 개의 코일을 헤어밴드로 고정하였다. 해당 코일은 펄스 제어 회로에 연결되어, 파워 서플라이를 통해 전력을 공급받는다. 실험 중 HRV 측정을 위해 PPG 센서를 손가락에 부착하고, OpenBCI 보드를 이용하여 맥파 신호를 수집하였다(그림 2). 수집된 데이터를 OpenBCI 분석 툴을 통해 시간영역 및 주파수영역 지표와 자율신경계 활성도를 산출하여 주파수 조건에 따른 변화를 비교하고 분석하였다. 실험은 표1의 절차대로 진행하였으며 동일한 날에 두 세션으로 나뉜다. 각 세션 전후에는 15분의 안정화 시간을 두어 생리적 기저 상태를 확보하였다.

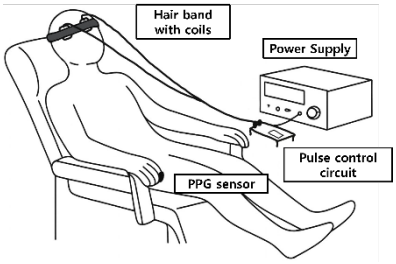


그림 2. HRV 실험 환경

세션	단계	자극 조건	활동/상태	시간
세션1	1단계	X	시청각 자료 청취	16분
세션1	2단계	1Hz 자극	시청각 자료 청취	16분
세션2	1단계	X	안정 상태 유지	16분
세션2	2단계	40Hz 자극	안정 상태 유지	16분

표 1. HRV 실험 절차

3. 연구 결과

시간영역 HRV 지표를 분석한 결과, 1Hz 자극에 따라 부교감신경계 활성 지표인 RMSSD, pNN50, pNN20이 증가하고, 평균 심박수 및 최대·최소 심박수가 감소하였다. 40Hz 자극 전후로는 부교감신경계 활성 지표인 RMSSD와 pNN50이 감소하였고, 평균 심박수 및 최대·최소 심박수가 증가하였다(표 2).

지표	1Hz 자극 전	1Hz 자극 후	증감률
Mean HR (bpm)	70.61	67.44	-4.49%
SDNN (ms)	41.80	41.53	-0.66%
RMSSD (ms)	38.42	45.79	+19.17%
Min HR (bpm)	60.48	58.37	-3.50%
Max HR (bpm)	87.72	86.21	-1.72%
pNN50 (%)	18.39	28.72	+56.14%
pNN20 (%)	56.80	66.13	+16.42%

지표	40Hz 자극 전	40Hz 자극 후	증감률
Mean HR (bpm)	72.56	72.78	+0.29%
SDNN (ms)	59.49	38.05	-36.05%
RMSSD (ms)	34.03	32.70	-3.92%
Min HR (bpm)	57.25	63.56	+11.02%
Max HR (bpm)	86.71	89.29	+2.98%
pNN50 (%)	12.33	12.17	-1.30%
pNN20 (%)	52.55	55.76	+6.11%

표 2. 시간영역 HRV 지표

심박수 분포를 HR 구간별 점유율로 나타내어 자극 효과를 비교한 결과, 무 자극 대비 1Hz 자극 조건에서 낮은 심박수 구간(50-60bpm) 점유율이 증가하고 높은 심박수 구간 점유율이 감소하여 안정 및 이완 상태가 유도되었음을 확인하였다. 40Hz 자극 조건에서는 높은 심박수 구간(70-80bpm) 점유율이 증가하여 각성 상태가 강화됨을 나타냈다(그림 3).

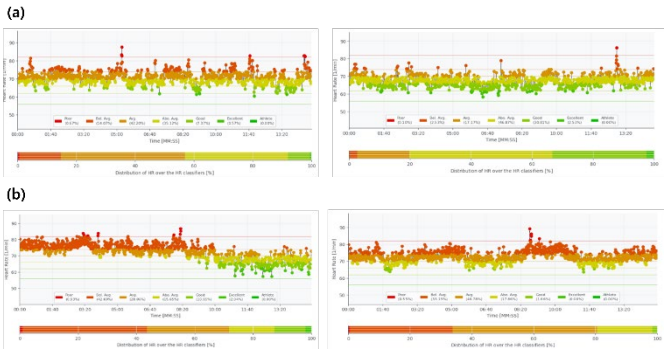


그림 3. 1Hz 자극 전·후(a), 40Hz 자극 전·후(b), 심박수 분포

주파수영역 HRV 지표를 분석한 결과, 1Hz 자극에서는 VLF, LF가 감소하고 HF와 부교감신경계 관련 지표가 증가하는 경향이 관찰되었다. 이는 부교감신경계 우세와 심박 안정화, 신체 이완 상태가 유도됨을 시사한다. 반면, 40Hz 자극에서는 LF가 감소하는 가운데 HF와 부교감신경계 관련 지표가 증가하는 양상이 나타나, 일정 수준의 심박 안정화와 함께 교감신경계 활성도 유지되는 각성 및 집중 상태가 나타났다(그림 4).

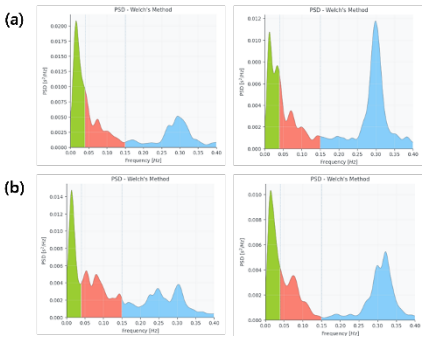


그림 4. 1Hz 자극 전·후(a), 40Hz 자극 전·후(b), 주파수 분석

두 자극 모두 자율신경계 균형에 영향을 미쳤으나, 1Hz 자극은 안정·이완 효과가 보다 뚜렷하고, 40Hz 자극은 각성·집중과 안정 상태를 동시에 유도하였다.

따라서 본 연구는 웨어러블 자기자극 기기를 통해 특정 주파수의 자기장이 뇌 상태를 선택적으로 조절할 수 있음을 확인하였다. 저주파(1Hz) 자극은 부교감신경계 활성화와 안정·이완 상태를 유도하였고, 고주파(40Hz) 자극은 교감신경계 활성과 각성·집중 상태를 강화하는 효과를 나타내었다. 이러한 결과는 웨어러블 자기 자극 기기를 이용한 뇌 상태 조절 가능성을 제시한다.

4. Acknowledgements

이 연구는 대진대학교 생명윤리위원회의 승인을 받아 수행하였음. (2025-01)

5.참고 문헌

[1] Rohan M. L., et al. “Rapid Mood-Elevating Effects of Low Field Magnetic Stimulation in Depression.” *Biological Psychiatry,* Vol 76, no. 3, p.186-193, 2014

Poster-002

뇌 조직 내 물질의 방향성 전달을 위한 이온영동법

민창희[1,+], 지한비[1,+], 한재훈[1,+], 박준원[2,+], 이경구[3,+], 최지성[1], 임창환[3,4,*], 장원석[2,**], 최영빈[1,5,6,***]

서울대학교 공과대학 협동과정 바이오엔지니어링 전공[1], 연세대학교 의과대학 신경외과학교실[2], 한양대학교 공과대학 융합전자공학과[3], 한양대학교 공과대학 전기생체공학부 바이오메디컬공학전공[4], 서울대학교 의과대학 의공학교실[5], 서울대학교 의학연구원 의용생체공학연구소[6]

Iontophoretic strategy for Directional Delivery of Compounds within Brain

Chang Hee Min[1,+], Han Bi Ji[1,+], Jae Hoon Han[1,+], Junwon Park[2,+], Kyeonggu Lee[3,+], Ji Seong Choi[1], Chang-Hwan Im[3,4,*], Won Seok Chang[2,**], and Young Bin Choy[1,5,6,***]

Interdisciplinary Program in Bioengineering, College of Engineering, Seoul National University[1], Department of Neurosurgery and Brain Research Institute, Yonsei University College of Medicine[2], Department of Electronic Engineering, Hanyang University[3], Department of Biomedical Engineering, Hanyang University[4], Department of Biomedical Engineering, Seoul National University College of Medicine[5], Institute of Medical and Biological Engineering, Medical Research Center, Seoul National University[6]

*ich@hanyang.ac.kr, **changws0716@yuhs.ac, ***ybchoy@snu.ac.kr

[+]These authors contributed equally to this work

Abstract

Convection-enhanced delivery (CED) enables localized administration of therapeutics into brain tissue but lacks directional control. To address this limitation, we suggested infusion and iontophoresis for directional delivery (IIDD), integrating a drug-infusing cannula with two plate electrodes implanted at predetermined brain sites. The applied current generates an electric field that guides compound migration. Using gadobutrol, a negatively charged MRI contrast agent, we demonstrated that prolonged current application markedly enhanced anode-directed transport compared to passive CED. Three-dimensional finite element simulations supported the experimental findings, validating IIDD as a promising strategy for targeted brain compound delivery.

1. 연구 배경

임상에서 항암제 화학요법은 뇌종양을 제거하고 수술 후 재발을 방지하기 위해 흔히 사용된다. 그러나 혈액-뇌 장벽(BBB) 때문에, 항암제가 종양을 효과적으로 표적하기 어려우며, 이로 인해 치료 효과는 제한적이고 환자의 예후도 불량하다 [1.2]. 이를 극복하기 위해 convection-enhanced delivery (CED)가 제안되어 항암제를 뇌에 직접 전달하는 방법으로 활용되고 있다. CED는 cannula를 뇌에 삽입한 뒤 양압을 가해 약물을 주입하는 방식으로 BBB를 우회하여, 직접 약물을 종양 조직에 전달할 수 있다. 그러나 주입된 약물은 방향성 없이 단순 확산에 의해서 분포되기 때문에 정상조직에도 다량 노출되는 한계가 있다. 종양 부위에 접근하기 어려운 경우, cannula를 종양에서 떨어진 위치에 삽입 후 약물을 전달해야 하며 이 과정에서 약물의 정상 조직 노출이 더욱 증가한다 [3].

본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 infusion and iontophoresis for directional delivery (IIDD)를 제안하였다. 이는 CED와 유사하게 cannula를 삽입하여 약물을 주입하고 동시에 두 개의 판 모양 전극(음극과 양극)을 미리 정해진 위치에 삽입한 뒤, 전류를 인가해 약물을 목표 방향으로 이동시키는 방식이다. 약물 이동의 방향성과 이동성은 전극의 위치 및 전류 인가 시간에 의해 조절되며, 이를 통해 약물이 방향성을 갖고 표적 부위로 전달된다. 이 방법은 약물의 정상 조직 노출을 줄이면서 목표 부위로의 정밀한 전달을 가능하게 한다 (그림 1).

본 연구에서는 IIDD의 효용성을 확인하기 위해 임상 승인 가돌리늄 기반 조영제 가도부트롤을 모델 약물로 사용하였다. IIDD를 *ex vivo* 및 *in vivo* 환경에서 적용하여 전류 인가 시간(0~30분)에 따른 뇌 조직 내 가도부트롤의 분포를 분석하였으며, 이를 3차원 유한 요소 기반 전산 모델 결과와 비교하였다. 아울러 조직화학적 분석을 통해 IIDD 후 뇌 조직의 안전성을 검증하였다.

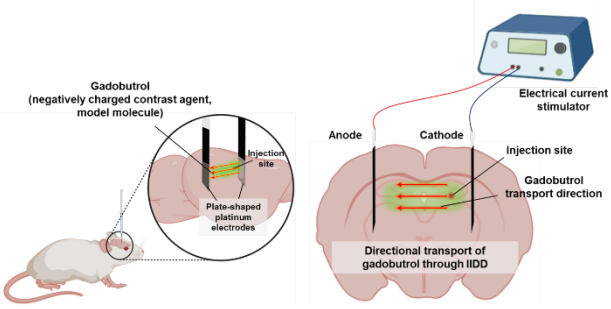


그림 1. IIDD의 적용 모식도

2.연구 방법

전극은 생체적합하면서 전도도가 높은 금속인 백금을 사용하여 사다리꼴 형태로 (두께 0.3 mm, 높이 3 mm, 밑변 23 mm, 윗변 21 mm) 제작하였고. 전류 인가 부위를 제외한 표면은 polytetrafluoroethylene을 이용하여 절연하였다.

IIDD의 효용성은 rat brain을 대상으로 한 *ex vivo* 및 *in vivo* 실험을 통해 확인하였다. 모든 실험은 연세대학교 의료원의 IACUC 승인을 받아 수행되었다. (IACUC No. 2023-0154). 실험에서는 정위계, 26G hamilton syringe, syringe pump를 이용하여 지정된 뇌 위치에 가도부트롤을 주입한 뒤 전극을 삽입하였다. 이후 정전류원을 이용하여 0, 15, 30분 간 전류를 인가하였으며, 각 조건을 IIDD_0, IIDD_15, IIDD_30으로 명명하였다. 가도부트롤 주입 1시간후 T1- 및 T2-weighted MR 영상을 획득하여, 가도부트롤의 분포를 정성적, 정량적으로 분석하였다. IIDD 후 행동학적 이상 여부는 rota-rod test로 확인하였고, 시술 1주 후 뇌를 적출하여, hematoxylin&eosin (H&E) 및 Fluoro-Jade C (FJC) 염색을 통해 안전성을 평가하였다. 또한 3차원 유한요소 모델을 구축하여 전류장 내 가도부트롤 분포를 시뮬레이션하고 실제 결과와 비교하였다.

3. 연구 결과

Ex vivo 실험 결과, IIDD_0 그룹의 경우 대부분의 가도부트롤은 주입한 위치 주변에서 단순 확산에 의해 분포됨을 확인하였다. 그러나 전류를 인가한 IIDD_15, IIDD_30 그룹의 경우 가도부트롤이 방향성을 갖고 반대편 전극 방향으로 이동함을 확인하였으며, 전류 인가 시간이 길수록 이동한 가도부트롤의 비율이 증가하였다 (그림 2).

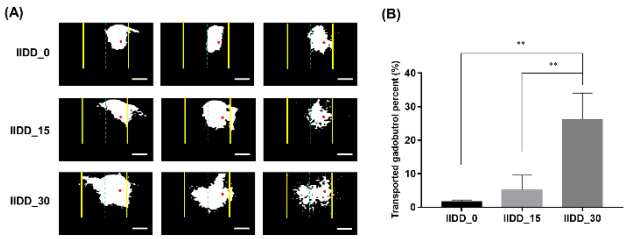


그림 2. IIDD treatment 후 *ex vivo* rat brain에서의 가도부트롤의 분포. (A) Binary image, (B) Quantitative 분석 결과

In vivo 실험 결과 역시 *ex vivo* 실험 결과와 유사한 양상을 보였다. 전류를 인가하지 않은 IIDD_0 그룹의 경우 주입한 위치 주변으로 방향성없이 단순 확산에 의해 가도부트롤이 분포하였지만, 전류를 인가한 IIDD_15, IIDD_30 그룹의 경우 양 전극의 중앙선을 넘어 왼쪽을 향해 방향성을 갖고 이동한 것으로 나타났으며, 전류 인가시간이 길수록 방향성을 갖고 이동한 가도부트롤의 비율이 증가하였다. (그림 3).

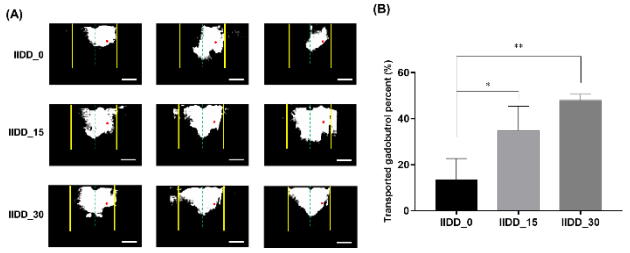


그림 3. IIDD treatment 후 *in vivo* rat brain에서의 가도부트롤의 분포. (A) Binary image, (B) Quantitative 분석 결과

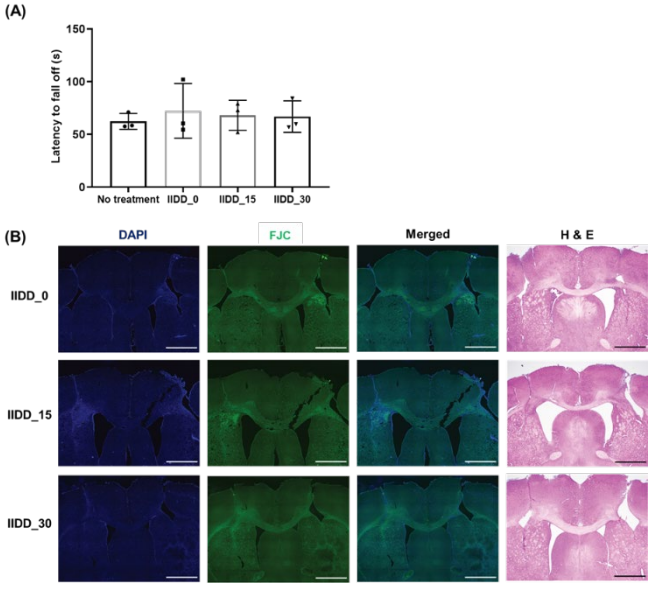


그림 4. IIDD treatment 1주 후 평가한 *in vivo* safety 분석 결과 (A) Rota-rod 시험, (B) FJC and H&E 염색 결과

Rota-rod test를 이용한 행동학적 평가 결과 (그림 4A) IIDD treatment 동물 모두 운동장애가 발생하지 않았으며, no treatment 그룹과 동일하게 정상 운동능력을 갖고 있음을 확인하였다. 이후 수행한 H&E, FJC 염색을 통한 조직학적 분석 (그림 4B) 결과 역시 전극 삽입 부위를 제외하고는 어떠한 이상도 관찰되지 않았다.

3차원 유한요소 시뮬레이션 결과, 가도부트롤의 분포 양상은 *in vivo* 실험에서의 관찰 결과와 유사하게 나타났으며, 특히 IIDD_30의 경우 두 결과가 매우 유사하게 일치하였다. 시뮬레이션을 통해 얻은 가도부트롤의 이동 비율은 IIDD_0, IIDD_15, IIDD_30 그룹에서 각각 13.1%, 21.8%, 41.3%였으며, 이는 *in vivo*, *ex vivo* 실험에서 관찰된 값의 중간 범위에 위치하였다 (그림 5)

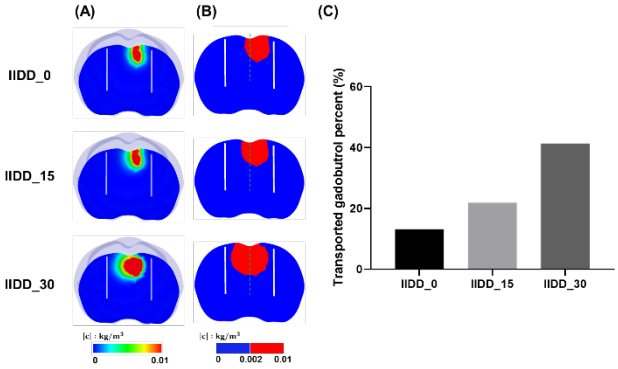


그림 5. 3차원 유한요소를 이용한 시뮬레이션 결과. (A) 연속적인 가도부트롤 분포, (B) Binary 변환 후 이미지, (C) Binary 이미지 기반 quantitative 분석 결과

4. Acknowledgements

이 연구는 National Research Foundation of Korea (NRF) 과제의 지원을 받아 수행하였음. (RS-2024-00410364)

5.참고 문헌

[1] L. Stewart. “Chemotherapy in adult high-grade glioma: a systematic review and meta-analysis of individual patient data from 12 randomised trials.” *The Lancet*, Vol 359, Issue 9311, p.1011-1018, 2002

[2] N. U. Barua, S. S. Gill, and S. Love. "Convection-Enhanced Drug Delivery to the Brain: Therapeutic Potential and Neuropathological Considerations." *Brain Pathology,* Vol 24, p.117-127, 2014

[3] W. Zhan, F. R. Baena, and D. Dini. "Effect of tissue permeability and drug diffusion anisotropy on convection-enhanced delivery." *Drug Delivery,* Vol 26, Issue 1, p.773-781, 2019

Poster-003

MRI 기반 회백질의 자유수분율과 비만의 연관성에 대한 연구

권도형[1], 김원진[1], 한승환[1], 김도현[1], 김철운[1], 이완형[2], 최준열[1*]

[1]연세대학교 의공학과

[2]중앙대학교 의과대학 예방의학교실

The association between obesity and MRI-based free water fraction of the brain

Dohyeong Kwon[1], Wonjin Kim[1], Seunghwan Han[1], Dohyeon Kim[1], Cheol-Woon Kim[1], Wanhyung Lee[2], Joon Yul Choi[1*]

[1]Department of Biomedical Engineering, Yonsei University, Wonju, Republic of Korea

[2]Department of Preventive Medicine, College of Medicine, Chung-Ang University, Seoul, Republic of Korea

[*]jychoi717@yonsei.ac.kr

Abstract

Obesity has been associated with neuroinflammation and microstructural brain alterations. Free water fraction (FWF), derived from diffusion tensor imaging (DTI), reflects the proportion of extracellular free water and serves as a sensitive indicator of microstructural changes. In this study, diffusion tensor imaging and T1-weighted images were obtained from 110 participants to investigate the associations between body mass index (BMI) and FWF of the brain. FWF maps were computed using the Freewater EstimatoR using iNtErpolated iniTialization (FERNET) algorithm after denoising and bias field correction. Mean FWF values were extracted from gray matter (GM), white matter (WM), and 62 GM regions. Spearman correlation analyses and generalized linear model (GLM) controlling for age and sex were performed to assess the associations between BMI and FWF. GM showed a significant positive correlation with BMI, whereas no association was observed in WM. Atlas-based analysis identified 16 GM regions with significant associations, and GLMs confirmed four regions—the left and right middle temporal gyrus, the left paracentral lobule, and the right superior temporal gyrus. These findings suggest that obesity is linked to increased extracellular free water in specific GM regions, reflecting tissue-specific microstructural alterations related to metabolic or inflammatory factors.

Keywords: Body mass index, Free water fraction, Diffusion tensor imaging, Inflammation, Obesity

1. 연구 배경

비만(obesity)은 과도한 체지방 축적으로 인한 만성 대사 질환으로, 전신 염증과 인슐린 저항성을 유발해 신경퇴행성 질환의 위험 요인으로 알려져 있다. 최근 연구에서는 비만이 해마 위축과 뇌 미세구조 변화 등 뇌 구조적 손상과 관련된 것으로 보고되며[1], 이러한 변화는 염증 반응과 세포외 환경의 변화를 통해 수분 확산 특성에도 영향을 미칠 수 있다. 확산 텐서 영상(diffusion tensor imaging, DTI)으로부터 산출되는 자유수분율(free water fraction, FWF)은 세포외 공간의 자유 확산성 수분 비율을 나타내며, 신경 염증이나 조직 부종을 민감하게 반영하는 지표이다[2]. 그러나 비만과 관련된 뇌 미세구조 변화를 FWF 관점에서 분석한 연구는 현재까지 수행된 바 없다. 본 연구에서는 체질량지수(body mass index, BMI)와 뇌의 FWF 간의 연관성을 평가하였다.

2. 연구 방법

2.1 데이터 수집

본 연구에서는 총 110명의 참가자를 대상으로 DTI와 T1 강조 영상(T1-weighted image, T1w)을 획득하였다. DTI의 획득 파라미터는 repetition time (TR) = 8800 ms, echo time (TE) = 78 ms, flip angle (FA) = 90°, b-value = 1000 s/mm², directions = 64였다. T1 강조 영상의 획득 파라미터는 TR = 1970 ms, TE = 2.84 ms, inversion time (TI) = 991 ms, FA = 9°였다.

2.2 전처리

DTI 자료에서 FWF를 추정하기 위해 먼저 local-principal component analysis(LPCA)를 적용하여 잡음을 제거하고, bias field correction을 통해 영상 내 강도 불균일성을 보정하였다. 이후 Freewater EstimatoR using iNtErpolated iniTialization(FERNET)[3] 알고리즘을 이용해 FWF map을 산출하였다 (그림 1). T1 강조 영상을 활용하여 회백질(gray matter, GM)과 백질(white matter, WM) 마스크를 분할한 후, 산출된 FWF map을 T1 공간에 선형 정합(linear registration)하였다. 이어서 뇌의 세부 영역 분석을 위해 FreeSurfer의 recon-all 파이프라인을 수행하였다. 그 결과 생성된 아틀라스의 라벨 파일을 이용하여, T1w 공간으로 정합된 FWF map에서 뇌의 62개 영역별 평균 FWF 값을 산출하였다.

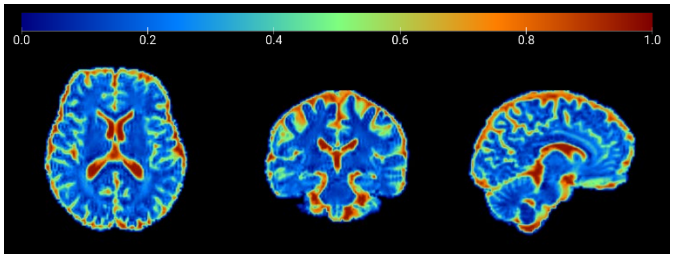


그림 1. 뇌에서의 FWF 영상 예

2.3 통계 분석

첫째, GM 및 WM 마스크 내 평균 FWF 값을 산출하고, 이를 BMI와 spearman 상관분석으로 평가하였다. 둘째, 62개 영역별 평균 FWF 값과 BMI 간 spearman 상관분석을 실시하였다. 셋째, 유의한 상관성이 확인된 영역에 대해서는 연령과 성별을 공변량으로 포함한 일반화 선형모형(generalized linear model, GLM) 분석을 수행하여 FWF과 BMI 간의 독립적인 연관성을 검증하였다.

3. 연구 결과

상관분석 결과, WM에서는 rho = 0.032, p = 0.733으로 유의하지 않았으나, GM에서는 rho = 0.203, p = 0.033으로 유의한 양의 상관관계가 확인되었다 (그림 2). WM에서는 유의하지 않아, GM 내에서만 추가 분석을 수행하였다. 62개 GM 영역 중 16개 영역에서 BMI와 FWF 간의 유의한 양의 상관관계가 관찰되었다 (표 1). 유의한 영역들을 대상으로

한 GLM 추가 분석 결과, Left Middle Temporal Gyrus (L-MTG; β = 0.0019, p = 0.0099), Left Paracentral Lobule (L-PL; β = 0.0025, p = 0.0419), Right Middle Temporal Gyrus (R-MTG; β = 0.0019, p = 0.0126), Right Superior Temporal Gyrus (R-STG; β = 0.0015, p = 0.0301) 영역은 연령과 성별을 공변량으로 보정한 이후에도 BMI와 FWF간의 유의한 양의 연관성이 유지되었다. 특히 MTG 영역은 좌·우 반구 모두에서 일관된 연관성을 보이는 영역이다.

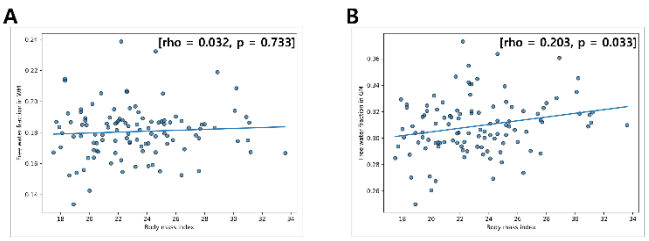


그림 2. BMI와 FWF 간 상관관계 산점도: (A) 백질(white matter, WM), (B) 회백질(gray matter, GM)

표 1. GM 영역별 Spearman 상관분석 결과 및 GLM 결과

Brain regions	spearman		GLM	
	rho	p-value	β	p-value
Left Inferior Parietal Lobule	0.1904	0.0463	0.0007	0.4191
Left Isthmus Cingulate Gyrus	0.2183	0.022	0.0012	0.1496
Left Lateral Orbitofrontal Gyrus	0.3094	0.001	0.0012	0.1269
Left Medial Orbitofrontal Gyrus	0.208	0.0292	0.0010	0.1872
Left Middle Temporal Gyrus	**0.3416**	**0.0003**	**0.0019**	**0.0099**
Left Paracentral Lobule	**0.2633**	**0.0055**	**0.0025**	**0.0419**
Left Rostral Anterior Cingulate Gyrus	0.213	0.0255	0.0012	0.1115
Left Rostral Middle Frontal Gyrus	0.2012	0.0351	0.0004	0.6360
Left Supramarginal Gyrus	0.2033	0.0332	0.0007	0.3728
Right Inferior Temporal Gyrus	0.2686	0.0045	0.0012	0.1328
Right Lateral Orbitofrontal Gyrus	0.2085	0.0288	0.0003	0.7371
Right Middle Temporal Gyrus	**0.2832**	**0.0027**	**0.0019**	**0.0126**
Right Paracentral Lobule	0.2062	0.0307	0.0008	0.3811
Right Rostral Anterior Cingulate Gyrus	0.2144	0.0245	0.0013	0.1422
Right Superior Temporal Gyrus	**0.2019**	**0.0344**	**0.0015**	**0.0301**
Right Supramarginal Gyrus	0.2107	0.0272	0.0011	0.2107

Rho = spearman 상관계수, spearman p-value = spearman 상관계수에 대한 유의확률, β = coefficient, GLM p-value = coefficient에 대한 유의확률

4. 결론

본 연구의 결과를 통해 비만이 대사적 스트레스나 신경염증 등으로 인해 GM의 미세구조적 변화를 유발할 가능성이 있음을 확인하였다. 특히 MTG는 대사적으로 민감한 영역으로, 비만과 관련된 염증 반응에 취약하여 FWF 증가와 같은 변화를 보일 수 있다. 본 연구는 BMI와 FWF간의 연관성을 규명한 최초의 연구로, 그 기전을 명확히 이해하기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다.

5. 참고 문헌

[1] Sui, S. X., & Pasco, J. A. (2020). Obesity and brain function: The brain–body crosstalk. *Medicina, 56*(10), 499. https://doi.org/10.3390/medicina56100499

[2] Bergamino, M., Kuplicki, R., Victor, T. A., Cha, Y. H., Paulus, M. P., & Tulsa 1000 Investigators. (2021). Free-water diffusion tensor imaging improves the accuracy and sensitivity of white matter analysis in Alzheimer's disease. Scientific Reports, 11(1), 6990. https://doi.org/10.1038/s41598-021-86505-7

[3] Parker, D., Ould Ismail, A. A., Wolf, R., Brem, S., Alexander, S., Hodges, W., Pasternak, O., Caruyer, E., & Verma, R. (2020). Freewater estimatoR using iNtErpolated iniTialization (FERNET): Characterizing peritumoral edema using clinically feasible diffusion MRI data. PLOS ONE, 15(5), e0233645. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0233645

Poster-004

뇌졸중에서 혈류 점성도와 뇌 회백질 부피의 연관성

김철운[1], 김원진[1], 한승환[1], 김도현[1], 김도연[2], 최준열[1*]

연세대학교 의공학과[1]

분당 서울대학교병원 신경과 및 뇌혈관센터[2]

Association Between Blood Viscosity and Gray Matter Volume in Stroke

Cheol-Woon Kim[1], Wonjin Kim[1], Seung hwan Han[1], Dohyeon Kim[1], Do Yeon Kim[2], Joon Yul Choi[1*]

1. Department of Biomedical Engineering, Yonsei University, Wonju

2. Department of Neurology and Cerebrovascular Center, Seoul National University Bundang Hospital, Seoul National University College of Medicine, Seongnam

jychoi717@yonsei.ac.kr

Abstract

Increased blood viscosity may impair cerebral microcirculation and promote structural brain vulnerability. This study investigated the association between blood viscosity and gray matter volume in ischemic stroke patients. T1-weighted MRI images were processed using FreeSurfer standard recon-all pipeline to quantify Total Gray Matter Volume (TGMV). Blood viscosity was measured under the 5Hz shear rate condition. Spearman correlation analyses was performed to investigate t an association between TGMV and blood viscosity. The result demonstrated a significant negative association between viscosity and TGMV (rho = −0.4335, p = 0.0104). These findings suggest that elevated blood viscosity is possibly linked to cortical atrophy, indicating that viscosity-related microcirculatory impairment may contribute to neuronal loss in ischemic stroke.

Keywords: Blood viscosity, Gray matter volume, Stroke, Neuronal loss, Brain atrophy

1. 연구 배경

뇌혈류는 뇌세포의 에너지 대사와 생존을 유지하는 필수적 요소이며, 이는 혈관 내역학적 인자(hemodynamic factors)들에 의해 미세하게 조절된다. 이 중 혈액 점성도(blood viscosity)는 혈류 저항(flow resistance)을 결정하는 핵심 변수로, 적혈구의 농도(hematocrit), 세포 변형성(deformability), 혈장 단백질 농도등에 의해 결정된다. 혈액 점성도가 높아지면 동일한 압력 조건에서도 혈류량이 감소하며, 결과적으로 뇌 관류압과 산소 공급이 저하되어 뇌세포 수준에서 허혈(ischemia) 및 대사 불균형이 발생한다 [1]. 이러한 혈류역학적 변화는 대혈관뿐 아니라 소혈관 수준의 미세순환에 특히 큰 영향을 미친다. 혈류 점도가 상승하면 혈류가 느려지고 전단응력(shear stress)이 감소하며, 이는 내피세포(endothelium)의 산화질소(Nitric Oxide) 생성 저하와 미세혈관 폐색을 유발한다 [2]. 그 결과, 만성적인 저관류 상태가 발생하여 피질하 구조(subcortical structure)와 백질(white matter)뿐 아니라 피질 회백질(gray matter)에서도 점진적인 구조 손상이 초래될 수 있다. 실제로, 높은 점성도는 뇌소혈관질환의 위험 인자로 보고되었으며, 심지어 혈류역학적 불안정성을 동반한 급성 허혈성 뇌졸중 환자에서 조기 신경학적 악화(early neurological deterioration)도 연관된다는 연구들이 제시되어 있다 [3].

혈액 점성도와 뇌 구조의 연관성을 탐색한 기존 연구들은 대부분 뇌혈류 측정이나 백질 병변에 초점을 맞추었고, 뇌 전체의 회백질 구조적 변화를 직접적으로 평가한 연구는 미비했다. 그러나 점성도 상승에 의해 미세혈관 관류가 감소하면 산소 대사가 활발한 피질 신경세포가 대사 스트레스를 받게 되며, 이는 뉴런 손실과 시냅스 밀도 감소로 이어져 피질 부피 감소를 유발할 가능성이 있다. 따라서 혈액 점성도는 뇌의 기능적 변화 이전에 나타나는 구조적 취약성의 조기 지표가 될 수 있다. 이에 본 연구에서는 MRI를 이용해 측정한 전체 회백질 부피(Total Gray Matter Volume)와 혈액 점성도 간의 상관관계를 분석하여, 혈류 점성도 변화가 뇌의 구조적 무결성에 미치는 영향을 규명하고자 하였다. 특히 허혈성 뇌졸중 환자 집단에서 얻은 점성도–구조 상관 분석을 통해, 혈류 점도가 뇌 위축(cortical atrophy)의 잠재적 위험요인으로 작용할 수 있음을 탐색하는 데 목적이 있다.

2.연구 방법

총 34명의 허혈성 뇌졸중 환자를 대상으로 하였으며, 모든 대상자에게 T1 강조 영상 (T1-weighted)을 획득하였다 (repetition time (TR) = 7.9 ms, echo time (TE) = 3.5 ms). 획득된 영상은 대뇌 구조의 정량적 분석과 부피 산출을 위해 FreeSurfer의 표준 'recon-all' 파이프라인을 이용하여 전처리하였다 [4]. 주요 단계는 다음과 같이 요약된다. 영상의 밝기 불균일성을 교정(intensity normalization)하고 두개골을 제거하였다. 또한 affine transform을 통해 표준 좌표계로 정렬하였다. 그 뒤 백질(white matter)과 회백질(gray matter)을 분할(segmentation)하고, 피질 표면(white surface, pial surface)을 재구성하였다. 표면을 팽창(inflation) 및 구면화(spherical mapping)하여 회백질의 부피를 계산하였다. 모든 대상자에서 5Hz 전단 속도(shear rate) 조건에서 혈액의 흐름 저항을 평가하기 위해 혈액 점성도를 측정하였다. 측정된 회백질의 부피와 혈액 점성도 간의 상관관계를 위해 Spearman's correlation 분석을 이용하였다.

3. 연구 결과

뇌졸중 환자 34명의 평균 점성도와 회백질 부피는 33.2 ± 21.1 cP, 499860 ± 66128 mm^3 이다. 상관분석 결과, 혈액 점성도와 회백질 부피 간의 음의 유의한 상관관계를 보였다 (rho = −0.434, p = 0.010). 즉, 혈액 점성도가 높을수록 대뇌

회백질 부피가 유의하게 감소하였다 (그림 1).

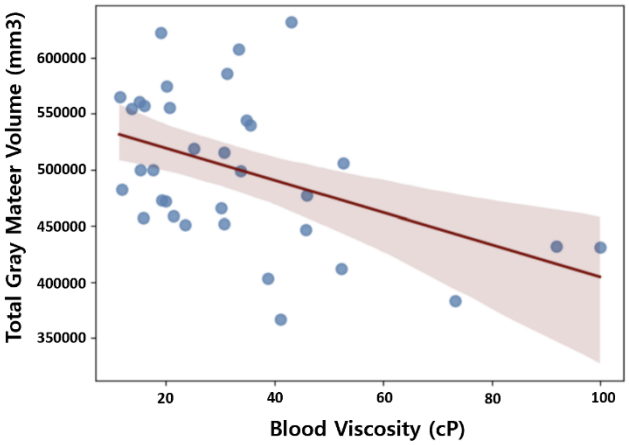


그림 1. 혈액 점도와 회백질 부피 간의 산점도

4. 연구 고찰 및 결론

혈액 점도 상승은 회백질 부피 감소와 유의한 음의 상관관계를 보여, 미세혈관 순환 저하로 인한 피질 위축 및 신경세포 손실 가능성을 보인다. 점도 증가는 전단응력 감소와 내피세포 기능 저하를 유발해 만성 저관류 상태를 초래하며, 이는 구조적 무결성을 손상시켜 뇌 위축을 가속화할 수 있다. 따라서 혈액 점도는 허혈성 뇌졸중 환자에서 뇌의 조기 구조적 취약성을 반영하는 생체지표로 활용될 가능성이 있다.

5. Acknowledgements

이 연구는 한국연구재단(National Research Foundation of Korea, NRF)의 지원을 받았습니다 (과제번호: RS-2023-0024908).

6.참고 문헌

[1] Gyawali, Prajwal, et al. "Whole blood viscosity is associated with baseline cerebral perfusion in acute ischemic stroke." Neurological Sciences 43.4 (2022): 2375-2381.
[2] Nader, Elie, et al. "Blood rheology: key parameters, impact on blood flow, role in sickle cell disease and effects of exercise." *Frontiers in physiology* 10 (2019): 1329.
[3] Woo, Ho Geol, et al. "Blood viscosity associated with stroke mechanism and early neurological deterioration in middle cerebral artery atherosclerosis." *Scientific Reports* 13.1 (2023): 9384.
[4] Fischl, Bruce. "FreeSurfer." *Neuroimage* 62.2 (2012): 774-781.

Poster-005

MRI 기반 장시간 근로에 따른 뇌 구조적 연결성의 변화 관찰

김예찬[1], 한승환[1], 김원진[1], 김도현[1], 이종훈[1], 이완형[2], 최준열[1*]

연세대학교 의공학과[1]

중앙대학교 의과대학 예방의학교실[2]

MRI-Based Observation of Structural Brain Connectivity Alterations Associated with Overworking

Yechan Kim[1], Seunghwan Han[1], Wonjin Kim[1], Dohyeon Kim[1], Jonghun Lee[1], Wanhyung Lee[2], Joon Yul Choi[1*]

[1]Department of Biomedical Engineering, Yonsei University, Wonju, Republic of Korea

[2]Department of Preventive Medicine, College of Medicine, Chung-Ang University, Seoul, Republic of Korea

[*]jychoi717@yonsei.ac.kr

Abstract

Overwork has become a critical issue affecting both individual health and societal productivity and is closely associated with cardiovascular diseases, mental health problems, and particularly sleep disturbances. Although previous studies on sleep have reported structural alterations in multiple brain regions, the effect of overwork on their connectivity remains unclear. The present study performed Diffusion tensor imaging (DTI)-based deterministic tractography in nine sleep-related regions of interest (ROIs). Fractional volume of tracks compared to masked total volume (fNV) was compared between the control and overwork groups to assess connectivity changes. Group differences were performed using the Mann–Whitney U test, and a general linear model (GLM) was constructed with fNV as the independent variable and age, sex, and group as dependent variables. The overwork group had significantly lower fNV in the right superior frontal gyrus (SFG) and brainstem than controls (right SFG, $p = 0.0004$; brainstem, $p = 0.0077$). In the GLM, the right SFG still exhibited a significant group effect (coefficient = -0.0037, $p = 0.0065$). These findings suggest that overwork may decrease sleep quality and alter structural connectivity, particularly in the right SFG.

Keywords: Overwork, Sleep disturbance, White matter, DTI-based Tractography, Superior frontal gyrus

1. 연구 배경

장시간 근로는 현대사회에서 개인의 건강과 사회적 생산성에 있어 중요한 문제 중 하나이며, 심혈관계 질환, 대사 질환, 정신 건강에 밀접하게 연관되어 왔다 [1]. 그럼에도 불구하고 과로에 따른 뇌의 신경 생리학적인 메커니즘에 대한 이해가 여전히 부족하다.

특히, 장시간 근로는 수면 장애(sleep disturbance)의 주요 원인 중 하나로 알려져 있다. 최근 연구에서는 정상군과 비교하여 만성 초기 불면증 환자에서 여러 뇌 영역에서 회백질 손실이 있는 것으로 보고되었고, 정상군을 대상으로 한 연구에서 여러 뇌 영역의 백질 부피와 수면의 질 사이에 유의한 음의 상관관계를 확인된 바 있다 [2-3]. 그러나 장시간 근로자의 수면 관련 뇌 영역에 대한 구조적 연결성을 확인한 연구는 아직 보고되지 않았다.

이에 본 연구에서는 주당 52 시간 이상의 장시간 근로집단을 대상으로, 수면과 관련된 아홉 개의 영역에 대해 DTI 기반의 트랙토그래피(tractography)를 수행하고, 전체 부피 대비 트랙의 부피 비율 지표 (fractional volume of tracks, fNV)를 활용하여 장시간 근로집단과 대조집단의 차이를 비교함으로써 장시간 근로로 인한 뇌의 구조적 연결성의 변화를 확인하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 데이터

본 연구는 69명의 대조집단과 37명의 장시간 근로집단을 대상으로 수행되었다. 모든 참가자에 대해 3T MR scanner (Siemens, Erlangen, Germany)를 이용하여 3D T1-weighted MPRAGE (T1w) 영상과 확산텐서영상(DTI)을 획득하였다. T1w 영상의 파라미터는 다음과 같다: TR/TE=1970ms/2.84ms, inversion time=991ms, FOV=256×256, flip angle=9°, in-plane resolution=0.5×0.5×1mm³, 192 slices.

DTI 영상은 spin-echo echo-planar imaging (EPI) 2D 시퀀스를 사용하였고, 반대 phase encoding 방향 (AP/PA)으로 영상을 획득하였으며, 파라미터는 다음과 같다: TR/TE=8800ms/78ms, FOV=256×256, flip angle=90°, in-plane resolution=2×2×2mm³, 80 slices, b=1000s/mm², 30 diffusion directions.

분석에 포함된 참여자의 기본 특성으로 성별, 연령, 근로시간을 포함하였다. 식사 시간을 제외한 주당 근로 시간에 따라 참여자는 주당 52시간 이상 근무한 장시간 근로집단과 52시간 미만 근무한 대조집단으로 구분하였다.

2.2 데이터 처리 및 통계적 분석

각 피험자의 뇌 영역 라벨은 T1w 영상에 대해 FreeSurfer의 'recon-all' 파이프라인을 사용하여 획득하였다 [4]. 'recon-all' 과정에서는 움직임 보정, intensity 정규화, 두개골 제거, 표준 템플릿으로의 registration 및 라벨링을 수행하였다. 라벨링 결과를 기반으로 좌우 superior frontal gyrus (SFG), 좌우 소뇌 피질, 좌우 소뇌 백질, 뇌간, 좌우 시상을 포함하는 아홉 개의 영역을 수면과 관련된 영역으로 정의한 후, DTI 영상에 registration하여 활용하였다.

DTI 영상 전처리 과정은 FSL의 TOPUP을 이용하여 susceptibility distortion을 보정한 후, EDDY를 통해 eddy current correction, motion correction, outlier replacement를 진행하였다 [5-6]. 이후 BET을 활용하여 뇌 영역을 추출하였다 [7].

AFNI를 이용하여 확산텐서를 추정하고, AFNI의 FATCAT 소프트웨어를 통해 deterministic 방식의 트랙토그래피를 구현하였다. 이때 트랙토그래피 주요 파라미터는 다음과

같다: FA threshold=0.2, Angle threshold=60, Length threshold=20, Nseed_X/Y/Z=2/2/2. AFNI 내에서 fNT는 관심영역의 트랙 부피를 마스크된 전체 부피로 나누어 계산되었다 [9].

장시간 근로집단과 대조집단의 관심영역 간의 구조적 연결성 차이를 확인하기 위해 트랙 기반 지표를 활용하여 Mann-Whitney U test를 진행하였다. 이후, GLM (general linear model)을 활용하여 트랙기반 지표 fNV를 종속 변수로, 성별, 나이, 근무 시간에 따른 집단 분류를 독립 변수로 두고 성별과 나이의 영향력을 고려하였다.

3. 연구 결과

그림1은 우측 SFG 영역의 장시간 근로집단과 대조집단 간 평균 fNV 차이를 보여준다. 두 집단의 그룹 간 Mann-Whitney U test 분석한 결과, 우측 SFG ($p = 0.0004$)와 뇌간 ($p = 0.0077$)에서 유의한 차이가 나타났다. 나머지 영역에서는 유의한 차이가 없었다 (좌측 SFG, $p = 0.61$; 우측 소뇌 피질, $p = 0.85$; 좌측 소뇌 피질, $p = 0.49$; 우측 소뇌 백질, $p = 0.82$; 좌측 소뇌 백질, $p = 0.15$; 우측 시상, $p = 0.35$; 좌측 시상, $p = 0.42$).

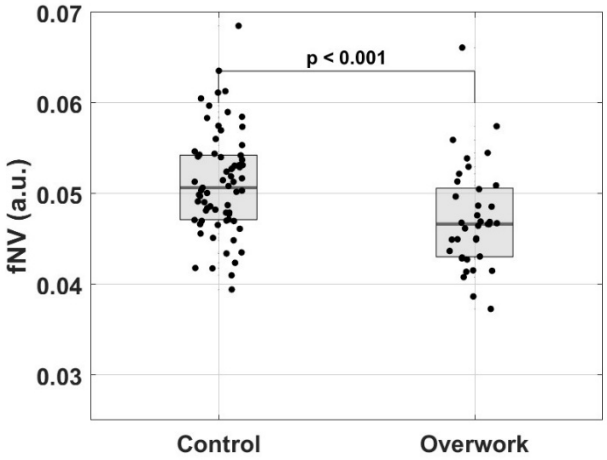


그림 1. 장시간 근로집단과 대조집단 간 우측 SFG 영역의 평균 트랙 부피 지표 (fNV) 비교.

GLM 분석에서 성별과 나이를 통제한 후에도 우측 SFG 영역이 근무 시간에 따른 집단 구분과 유의한 음의 상관관계를 보였다 (coefficient = -0.0037, $p = 0.0065$).

4. 결론 및 토의

본 연구에서는 장시간 근로에 따라 오른쪽 SFG 영역의 트랙 지표 fNV가 감소함을 확인하였다. SFG는 수면, 각성 조절과 고차 인지 기능에 관여하며, 본 연구에서 관찰된 fNV 감소는 장시간 근로로 인한 수면 부족이나 생체리듬 교란과 연관된 수면 조절 네트워크의 구조적 연결성 저하를 반영할 가능성이 있다.

5. Acknowledgements

본 연구는 Ministry of Education of the Republic of Korea와 National Research Foundation of Korea (NRF) 과제의 지원을 받아 수행되었다 (NRF-2021R1C1C1008871).

6. 참고 문헌

[1] J. Ervasti, J. Pentti, S. T. Nyberg, M. J. Shipley, C. Leineweber, J. K. Sørensen, L. Alfredsson, J. B. Bjorner, M. Borritz, H. Burr, A. Knutsson, I. E. H. Madsen, L. L. Magnusson Hanson, T. Oksanen, J. H. Pejtersen, R. Rugulies, S. Suominen, T. Theorell, H. Westerlund, J. Vahtera, M. Virtanen, G. D. Batty, and M. Kivimäki, "Long working hours and risk of 50 health conditions and mortality outcomes: a multicohort study in four European countries," *Lancet Regional Health – Europe*, vol. 11, p. 100212, Sep. 2021.

[2] E. Y. Joo, H. J. Noh, J. S. Kim, D. L. Koo, D. Kim, K. J. Hwang, J. Y. Kim, S. T. Kim, M. R. Kim, and S. B. Hong, "Brain gray matter deficits in patients with chronic primary insomnia," *Sleep*, vol. 36, no. 7, pp. 999–1007, Jul. 2013.

[3] Y. Bai, L. Zhang, C. Liu, X. Cui, D. Li, and H. Yin, "Association of white matter volume with sleep quality: a voxel-based morphometry study," *Brain Imaging and Behavior*, vol. 16, no. 3, pp. 1163–1175, Jun. 2022.

[4] B. Fischl, D. H. Salat, E. Busa, M. Albert, M. Dieterich, C. Haselgrove, A. van der Kouwe, R. Killiany, D. Kennedy, S. Klaveness, A. Montillo, N. Makris, B. Rosen, and A. M. Dale, "Whole brain segmentation: automated labeling of neuroanatomical structures in the human brain," *Neuron*, vol. 33, no. 3, pp. 341–355, Jan. 2002.

[5] J. L. Andersson, S. Skare, and J. Ashburner, "How to correct susceptibility distortions in spin-echo echo-planar images: application to diffusion tensor imaging," *NeuroImage*, vol. 20, no. 2, pp. 870–888, Oct. 2003.

[6] J. L. R. Andersson and S. N. Sotiropoulos, "An integrated approach to correction for off-resonance effects and subject movement in diffusion MR imaging," *NeuroImage*, vol. 125, pp. 1063–1078, Jan. 2016.

[8] S. M. Smith, "Fast robust automated brain extraction," *Human Brain Mapping*, vol. 17, no. 3, pp. 143–155, Nov. 2002.

[9] P. A. Taylor and Z. S. Saad, "FATCAT: (an efficient) functional and tractographic connectivity analysis toolbox," *Brain Connectivity*, vol. 3, no. 5, pp. 523–535, 2013.

Poster-006

외상성 뇌손상 환자에서 딥러닝 기반 뇌 나이 예측: 파일럿 스터디

장원필[1], 권도형[1], 김원진[1], 한승환[1], 이종훈[1], 최준열[1*]

연세대학교 의공학과[1]

Deep Learning-Based Brain Age Prediction in Traumatic Brain Injury: A Pilot Study

Wonpil Jang[1] , Dohyeong Kwon[1], Wonjin Kim[1], Seunghwan Han[1], Jonghun Lee[1], Joon Yul Choi[1*]

[1]Department of Biomedical Engineering, Yonsei University, Wonju, South Korea

[*]jychoi717@yonsei.ac.kr

Abstract

Traumatic brain injury (TBI) is a leading cause of disability, often accompanied by cognitive and structural brain decline. The brain-predicted age difference (brain-PAD), derived from MRI, serves as a biomarker reflecting deviations from normal brain aging. In this study, we acquired T1 weighted images of 31 TBI patients (age = 70.64 ± 5.64) and 65 healthy controls (HC; 71.31 ± 5.72) from ADNI-DOD datasets and calculated brain-PAD using the pretrained DenseNet121-based BrainAge model. A Student's t-test was performed to assess the group difference in brain-PAD. The TBI group showed significantly higher brain-PAD (−15.78 ± 5.96) than the HC group (−19.09 ± 7.78; p = 0.039), indicating greater brain aging despite comparable chronological age. These results demonstrated that TBI is associated with accelerated brain aging.

Keywords: Traumatic brain injury, Neurodegeneration, Brain age, Artificial intelligence, Brain-PAD

1. 연구 배경

외상성 뇌손상(traumatic brain injury; TBI) 은 주요 사망 원인 중 하나로, 인지 및 기능 저하를 초래할 수 있다 [1]. 선행 연구에 따르면, 만성 TBI 환자의 뇌 나이를 T1 강조 영상을 이용하여 머신 러닝 기법으로 예측해 보았을 때, 정상인 대비 더 높은 뇌 나이를 보였음을 확인했으며, 회백질과 백질 위축과 밀접하게 연관되어 있다는 결과를 보고하였다 [2]. 그러나 본 연구는 전처리, 차원축소, 회귀 모델 등의 많은 과정을 거치는 머신러닝 기법을 활용하였기 때문에, 딥러닝 기법에 비해 비선형 패턴 포착이 어렵고, 구조적 정보의 손실 가능성이 있다. 또한 여러 단계를 거치기 때문에 데이터의 품질과 파이프라인에 따라 결과에 크게 영향을 미칠 수 있다.

반면 최근에 전처리를 최소화한 합성곱 신경망 (Convolutional Neural Network; CNN) 기반 딥러닝 모델로 산출된 뇌 예측 연령 차이(실제나이 -딥러닝 기반 예상 나이; brain-predicted age difference; brain-PAD)는 정상적인 뇌 노화와 질병으로 인한 가속화된 뇌 노화의 편차를 반영하는 지표로 주목받고 있다 [3]. 본 연구는 MRI 영상을 입력으로 하는 사전 학습(pre-trained) 딥러닝 모델을 활용하여 정상군(Healthy Control; HC)과 TBI 환자군 간의 brain-PAD 차이를 딥러닝 기법으로 검증하는 것을 목표로 한다.

2.연구 방법

2.1 ADNI-DOD 데이터셋

본 연구에는 전쟁에 참전한 군인을 대상으로 한 ADNI-DOD (Alzheimer's Disease Neuroimaging Initiative; ADNI) 데이터셋을 활용하였다 [4]. 해당 데이터셋은 표준화된 프로토콜에 따라 획득된 고해상도 구조적 T1 강조 영상과 임상·인지 평가 정보를 제공한다.

본 연구에서는 TBI 환자 31명(평균 나이 = 71.31 ± 5.56세)과 HC 65명(평균 나이 = 71.31 ± 5.72세)의 T1 강조 영상을 활용하였다.

2.2 뇌 나이 예측 모델

뇌 나이는 그림 1과 같이 DenseNet121 기반의 사전 학습 모델을 기반으로 계산하였다. [5]. 이 모델은 T1 강조 영상과 실제 나이를 입력으로 받아 리샘플링, 리사이즈, 정규화를 자동으로 수행하여 표준화된 형태로 변환한다. 표준화된 영상은 3D DenseNet121 네트워크를 통해 특징 추출 과정을 거치며, 마지막으로 완전연결 회귀층(Fully Connected Layer)에서 뇌 나이 예측값을 출력한다.

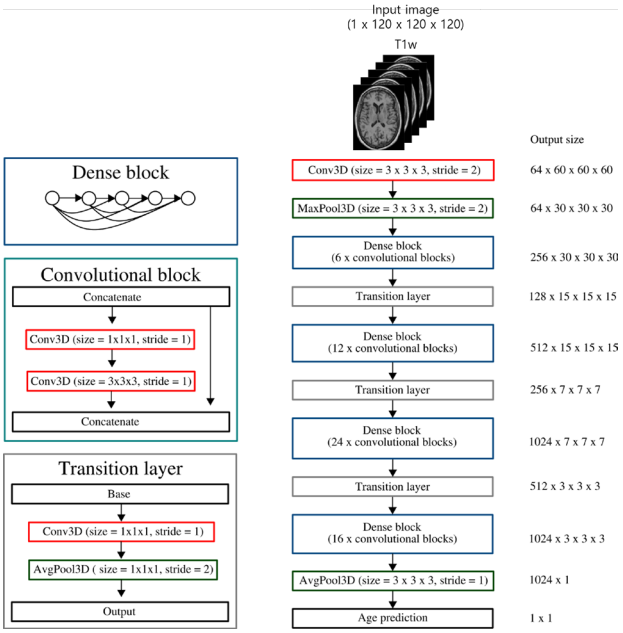


그림 1. 뇌 나이 예측을 위한 DenseNet121 구조

2.3 통계적 분석

실제 나이와 예측된 뇌 나이의 차를 통해 brain-PAD를 계산하였다. HC와 TBI간 실제나이와 brain-PAD 의 유의한 차이를 검증하기 위해 Student's t-test를 수행하였다.

3. 연구 결과

그림 2A와 같이, HC와 TBI환자군 간의 실제 나이는 유의한 차이가 없는 데에 반해 (p = 0.590), TBI 그룹의 brain-PAD 값 (-15.78 ± 5.96)은 HC 그룹 (-19.09 ± 7.78)에 비해 유의하게 높았다 (p = 0.039, 그림 2B). 이는 TBI 환자에서 뇌 노화가 가속화되었음을 시사한다.

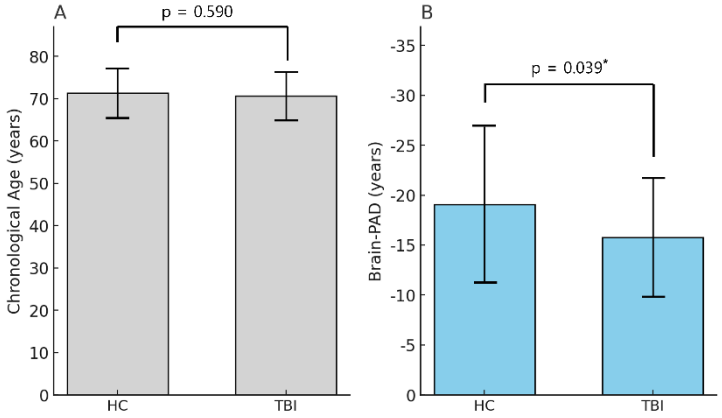


그림 2. HC와 TBI 그룹간 실제 연령(A)과 brain-PAD(B)의 비교

4. 결론 및 토의

본 연구에서 TBI 환자와 HC의 Brain-PAD는 유의한 차이를 보여주었으며, 이는 정상군에 비해 TBI 환자가 뇌 노화가 가속되었다는 것을 의미한다. 이러한 결과는 회백질과 백질에서 관찰되는 TBI 후 위축을 포함한 구조적·신경생물학적 변화가 만성적인 스트레스 반응과 신경염증의 누적 효과를 반영할 수 있음을 시사하며, 이는 연령 관련 신경퇴행성 변화와 유사한 양상을 보인다 [6]. 본 연구에서 HC와 TBI 모두 Brain-PAD에서 음의 편향이 나타났다. 연구에서 활용한 사전 학습 모델은 평균 연령 40세 전후의 데이터를 기반으로 학습되었기 때문에, 70세 이상 고령층 데이터를 적용하여 예측된 뇌 나이가 실제 연령보다 낮게 산출되는 경향이 나타났다. 추가적인 검증을 위해 향후 다양한 딥러닝 기반 뇌 나이 예측 모델을 활용하여 TBI에서 brain-PAD를 비교하는 것이 필요하다.

5.참고 문헌

[1] Sandsmark DK, Bashir A, Wellington CL, Diaz-Arrastia R. Cerebral Microvascular Injury: A Potentially Treatable Endophenotype of Traumatic Brain Injury-Induced Neurodegeneration. *Neuron*. 2019;103(3):367-379.

[2] Spitz G, Hicks AJ, Roberts C, Rowe CC, Ponsford J. Brain age in chronic traumatic brain injury. Neuroimage Clin. 2022;35:103039. doi: 10.1016/j.nicl.2022.103039. Epub 2022 May 10. PMID: 35580421; PMCID: PMC9117693.

[3] Dartora C, Marseglia A, Mårtensson G, Rukh G, Dang J, Muehlboeck JS, Wahlund LO, Moreno R, A deep learning model for brain age prediction using minimally preprocessed T1w images as input. Front Aging Neurosci. 2024 Jan 8;15:1303036. doi: 10.3389/fnagi.2023.1303036. PMID: 38259636; PMCID: PMC10800627.

[4] Alzheimer's Disease Neuroimaging Initiative (ADNI). (2012). Data collection and sharing for this project was funded by the Department of Defense ADNI (DOD ADNI, award number W81XWH-12-2-0012).
Retrieved from https://adni.loni.usc.edu

[5] Wood DA, Wyss M, Schlegel F, Rummel C, Wiest R, Reyes M. Accurate brain-age models for routine clinical MRI examinations. NeuroImage. 2022;251:118988.

[6] Harris TC, de Rooij R, Kuhl E. The Shrinking Brain: Cerebral Atrophy Following Traumatic Brain Injury. Ann Biomed Eng. 2019 Sep;47(9):1941-1959. doi: 10.1007/s10439-018-02148-2. Epub 2018 Oct 17. PMID: 30341741; PMCID: PMC6757025.

Poster-007

인지 재활 적용을 위한 SSVEP 기반 EEG 신호의 학습 방해 상태 딥러닝 분류 연구

성민지[1], 임현미[1], 구정훈[1*]

계명대학교 의용공학과[1]

Deep learning based classification of SSVEP based EEG signals under learning distraction situation for applications to cognitive rehabilitation

Minji Sung[1], Hyunmi Lim[1], Jeonghun Ku[1*]

Department of Biomedical Engineering, Keimyung University, Korea

*kujh@kmu.ac.kr

Abstract

This study aims to evaluate the effectiveness of deep learning-based classification of EEG signals recorded during an n-back task using SSVEP stimuli, by comparing classification accuracy between conditions with and without SSVEP. EEG signals based on SSVEP were recorded using an n-back task. Under the condition where SSVEP was present, the sentences presented in the n-back test were designed to flicker at a frequency of 15 Hz, while under the condition where SSVEP was absent, the sentences remained static. The recorded EEG signals were classified using deep learning, and the results showed that in tests where SSVEP was present, validation accuracy, ROC curve, and AUC curve values were all higher compared to those without SSVEP. Therefore, when performing deep learning-based classification of EEG signals using SSVEP, more accurate results, can be expected compared to cases without SSVEP.

1. 연구 배경

최근 평균 수명 증가로 고령 인구가 증가하며, 치매와 알츠하이머병 같은 신경인지 장애 발병이 증가하고 있다[1]. 인지 재활 치료 효과는 환자의 참여 동기와 집중력에 영향을 받는다[2][3]. 따라서 인지 재활 치료는 조기 진단과 실시간 상태 평가, 난이도 및 피드백 조절이 중요하다.

이러한 집중 상태를 해결하기 위해서는 방해 자극이 존재하는 지에 대한 판단 혹은 집중의 유무에 대해 확인해야한다. 실시간으로 집중 상태를 판단하는 것을 시도한 예시로는 카메라를 통한 눈 개폐와 정수리 인식 측정을 통한 집중도 측정한 연구[4], 기능적 근적외선 분광법과 시선 추적 기술을 함께 측정하여 집중의 유무를 판단하고자 한 연구[5] 등이 있다. 기존 연구들은 중요한 성과를 보였으나 여러가지의 한계점이 존재하였고 뇌파를 활용한 집중도 평가 연구[6]와 인공지능 기반 뇌파 신호 분석 기술이 활발히 발전하고 있다[7].

정상상태 시각유발전위(Steady State Visual evoked Potential, SSVEP)는 특정 주파수로 반짝이는 광 자극에 의해 유발된 뇌의 반응을 나타내는 전기신호이다[8]. 이 신호는 간단히 시각 자극에 집중하기만 하면 뇌전도를 통해 쉽게 측정할 수 있기에 뇌전도 신호 중에서도 집중 상태를 평가하는데 유용하다는 연구 결과가 있다[9][10].

본 연구의 목적은 SSVEP 기반 EEG 신호를 효과적으로 분류하고 그 정확도를 향상시키고자 하는 것이다. 이를 위해 EEG 신호의 시공간적 특징을 학습할 수 있도록 딥러닝 기반 모델을 설계하였으며, EEGNet 구조에 셀프 어텐션 모듈과 장단기 메모리(LSTM) 모델을 결합하여 시공간적 특징을 효과적으로 학습하도록 설계하였다.

2. 연구 대상

본 연구에서는 건강한 성인 남녀 7명(남 2명, 여 5명)을 대상으로 뇌전도 측정을 실시하였다. 7명의 피험자는 신경학적 이상이 없는 평균 22.8세로 구성되었다.

3. 실험 절차 및 구성

실시한 n-back 검사에서 제시된 문장은 카페, 공사장, 스마트폰 등과 같은 13개의 카테고리로 분류되었으며, 각 12문장, 총 156 문장으로 구성하였다.

정상상태 시각유발전위는 15Hz로 설정하고 이 자극이 존재하는 조건을 On조건, 존재하지 않는 조건을 Off 조건이라 정의하였다. 또한, 제시 순서 효과를 통제하기 위해 On-Off-On-Off(A유형)와 Off-On-Off-On (B유형)으로 카운터 밸런싱을 적용하였다.

실험은 휴식 상태인 뇌파를 1분간 측정한 후 정상상태 시각유발전위의 조건 순서에 따라 n-back 검사를 네 차례 수행하였다. 각 검사에 100개의 문장을 제시했고 이 문장 중 50개가 방해 자극이 존재하도록 하였다. 방해 자극은 청각, 시각, 청각+시각의 3종류로 이루어져있다. 그림 1의 (b)는 방해 자극이 없는 기본 문장이다. 만약 시각 자극이 제시될 경우 그림1의 (c)와 같이 나타나며 빙글빙글 도는 효과를 통해 시각의 분산을 유도하였다. 청각 방해 자극만 존재할 경우는 그림1의 (d)와 같이 "집중 좀 해봐", "이게 그렇게 어려워?" 등의 대화나 단순 소음(박수, 피아노, 고성 등)을 제시하였다. 청각 방해와 시각 방해가 모두 일어나는 경우는 그림1의 (e)의 상황으로 제시되었다. 제시되는 문장들은 3초에 한번씩 바뀌도록 하여 한 번의 검사에 5분, 총 실험은 20분 동안 진행되었다.

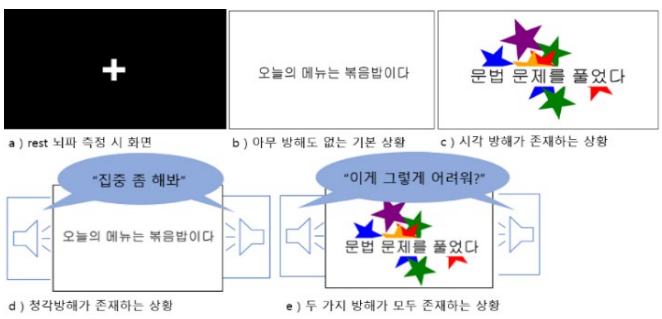


그림 1. 실험 구성

4. 데이터 전처리

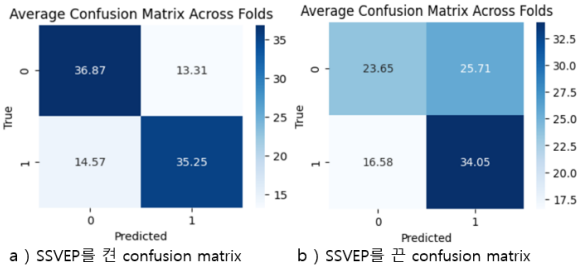
n-back 검사로 기록된 뇌전도 신호는 500Hz로 표본화되었으며, 60Hz의 노치필터, 2-30Hz로의 대역통과필터, 공통평균참조(CAR), 150Hz로의 다운 샘플링, ICA절차를 거쳐 전처리되었다. 문장이 제시되는 0.0초부터 다음 문장 제시 전까지의 3.0초 구간으로 에포크를 분할하였고, 평균 신호 진폭의 4배를 초과하는 에포크는 제거하였다. 이후, 방해 자극이 있는 에포크는 0, 포함되지 않은 에포크는 1로 라벨링을 하였으며, 라벨링 된 에포크들은 텐서 형태로 병합된 뒤 각 에포크 별 Z-점수 정규화를 수행하여 동일한 스케일에서 비교 및 분류가 가능하도록 하였다.

5. 딥러닝 모델 구조

본 연구의 딥러닝 모델은 EEGNet을 기반으로 하되, 시간 축 합성곱 (Temporal Convolution)과 공간 합성곱 (Spatial Convolution) 이후와 분리 가능한 합성곱 (Separable Convolution) 이전 단계 위치에 셀프 어텐션 모듈을 추가하여 시간 축에 대한 가중 학습을 강화하였다. EEGNet 완료 후, RNN 기반 모델인 장단기 메모리(LSTM)를 연결하여 시계열 의존성을 학습하도록 설계하였다. 하이퍼 파라미터는 드롭아웃 0.7, 학습률 0.0005, 가중치 감쇠 1e-3, 배치 크기 64, 장단기 메모리의 은닉 상태 크기 32, 장단기 메모리의 층 개수 2개로 설정하였다. 또한 학습 정확도의 손실 값이 100번의 학습 동안 0.0001 이상 개선되지 않으면 조기 종료(early stopping)되도록 하였으며, k를 10으로 설정한 k-겹 교차 검증(K-fold cross validation)방식을 이용하여 성능을 평가하였다.

6. 연구 결과

위 실험을 통해 혼동 행렬(Confusion matrix)에서 그림 2의 (a)와 (b)에 제시되었다. 정상상태 시각유발전위가 존재하는 딥러닝 분류 결과는 정상상태 시각유발전위가 존재하지 않는 분류 결과보다 진양성이 13.22%, 진음성이 1.2%가 높게 나타났다. 혼동 행렬을 토대로 산출된 정밀도, 재현율, F1 지표(F1-score)는 그림2의 (c)에 제시된 바와 같다.



a) SSVEP를 켠 confusion matrix　　b) SSVEP를 끈 confusion matrix

	Accuracy	Specificity	F1-Score	Sensitivity
SSVEP On	72.12%	73.48%	72%	71%
SSVEP Off	57.7%	47.91%	62%	67%

c) 주요 지표 산출값

그림 2. Confusion matrix와 주요지표

또한, 수신자 조작 특성 곡선(ROC curve)에서도 정상상태 시각유발전위가 존재하는 데이터의 분류 성능이 0.2055 더 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

이는 정상상태 시각유발전위 기반 시각 자극이 시각 피질에서 신경 반응을 유발하여, 주의 분산 및 방해상황에서 패턴의 강도와 특이성이 변하기 때문으로 볼 수 있다[10]. 또한, 셀프 어텐션과 장단기 메모리 모델이 정상상태 시각유발전위에 의한 이런 미세한 신호의 공간과 주파수의 특징을 효과적으로 구별할 수 있었다고 해석가능하다[11].

따라서 본 연구 결과는 정상상태 시각유발전위가 적용된 패러다임이 방해 유무 분류에서 더 높은 분류의 정확도를 보였다. 이는 실시간 집중도 평가와 인지 재활 훈련에 적용함으로써 뇌-컴퓨터 인터페이스(BCI) 분야에서 활용 가능할 것이다.

4. Acknowledgements

이 연구는 National Research Foundation of Korea(NRF) 과제의 지원을 받아 수행하였음. (RS-2025-00561764, NRF-2022R1A2B5B01001443, RS-2024-00397674)

5.참고 문헌

[1] L. Xue, F. Xiaojin, S. Xiaodong, H. Ningning, H. Fang, and L. Yongping, "Global, regional, and national burden of Alzheimer's disease and other dementias, 1990–2019," *Frontiers in Aging Neuroscience*, vol. 14, pp. 937486, 2022, doi: 10.3389/fnagi.2022.937486

[2] S. Y. Ha and Y. H. Sung, "Attentional concentration during physiotherapeutic intervention improves gait and trunk control in patients with stroke," *Neuroscience Letters*, vol. 736, pp. 135291, 2020, doi: 10.1016/j.neulet.2020.135291

[3] "Impact of participation on rehabilitation results: a multivariate study," *European journal of physical and rehabilitation medicine*, vol. 48, no. 3, 2012.

[4] 임대근, 고규한, and 조재춘, "온라인 교육을 위한 OpenCV 기반 집중도 측정 시스템 개발," *융합정보논문지*, vol. 10, no. 11, pp. 195-201, 2020.

[5] E. Dayane, J. Ricardo, R. da, C. Barreto, and A. Yumi, "Eye-tracker and fNIRS: Using neuroscientific tools to assess the learning experience during children's educational robotics activities," *Trends in Neuroscience and Education*, vol. 36, pp. 100234, 2024, doi: 10.1016/j.tine.2024.100234

[6] E. Magosso, G. Ricci, and M. Ursino, "Modulation of brain alpha rhythm and heart rate variability by attention-related mechanisms," *AIMS Neuroscience*, vol. 6, no. 1, pp. 1, 2019, doi: 10.3934/Neuroscience.2019.1.1

[7] Q. Ai, Y. Liu, Q. Liu, L. Ma, and K. Chen, "Holographic convolutional attention neural network for motor imagery decoding based on EEG temporal–spatial frequency features," *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 104, pp. 107526, 2025, doi: 10.1016/j.bspc.2025.107526

[8] 김봉현, "CNN-LSTM 기반의 SSVEP 분류 모델 개발," *아시아태평양융합연구교류논문지*, vol. 9, no. 10, pp. 85-94, 2023, doi: http://dx.doi.org/10.47116/apjcri.2023.10.08

[9] S. Walter, C. Quigley, S. K., and M. M., "Effects of overt and covert attention on the steady-state visual evoked potential," *Neuroscience Letters*, vol. 519, no. 1, pp. 37-41, 2012, doi: 10.1016/j.neulet.2012.05.011

[10] S. T, J. C, and S. A, "Selective attention to stimulus location modulates the steady-state visual evoked potential," *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 93, no. 10, pp. 4770, 1996, doi: 10.1073/pnas.93.10.4770

[11] C. Guijun, Z. Xueying, Z. Jing, L. Fenglian, and D. Shufei, "A novel brain-computer interface based on audio-assisted visual evoked EEG and spatial-temporal attention CNN," *Frontiers in Neurorobotics*, vol. 16, pp. 995552, 2022, doi: 10.3389/fnbot.2022.995552

Poster-008

외상후 스트레스 장애 환자에서 증상 심각도와 회백질-백색질 신호 강도 대비 간의 연관성

이종훈[1], 한승환[1], 김원진[1], 김도현[1], 최준열[1,*]
연세대학교 의공학과[1]

Association Between Symptom Severity and Gray-to-White Matter Intensity Contrast in Patients with Post-traumatic Stress Disorder

Jonghun Lee[1], Seunghwan Han[1], Wonjin Kim[1], Dohyeon Kim[1], Joon Yul Choi[1,*]
Department of Biomedical Engineering, Yonsei University, Korea
[*]jychoi717@yonsei.ac.kr

Abstract

Cortical gray to white matter signal intensity contrast (GWC) on T1-weighted MRI is a sensitive marker of intracortical myelin. This study investigated whether GWC captures symptom-specific alterations in post-traumatic stress disorder (PTSD) within the ADNI-DOD cohort. T1-weighted images from 92 male subjects (PTSD: n=52; controls: n=40) was processed using FreeSurfer v7.4.1 to compute GWC. Prior to examining associations with symptom severity, group comparisons were performed using a vertex-wise general linear model (GLM) controlling for age. Based on a 4-factor symptom framework, partial correlation analyses were then conducted between the mean GWC from significant clusters and symptom dimensions within the PTSD group. Vertex-wise GLM analyses revealed that PTSD group exhibited higher GWC than controls across frontoparietal regions. Moreover, the mean GWC from significant cluster showed differential associations with distinct symptom factors. These findings support GWC as a surface-based biomarker aligned with PTSD symptom structure.

Keywords: PTSD, Gray-to-white matter signal intensity contrast, Brain, MRI, Intracortical myelin

1. 연구 배경

외상후 스트레스 장애(Post Traumatic Stress Disorder, PTSD)는 외상성 사건의 노출 이후 나타나는 정신질환으로, 재경험, 회피, 과각성, 불쾌감 등 다양한 증상군으로 나타나며, 임상에서는 이질성이 커서 PTSD 환자임을 구분할 수 있는 객관적인 바이오마커의 필요성이 크다 [1].

MRI 기반 회백질-백색질 신호 강도 대비(gray-to-white matter signal intensity contrast, GWC)는 피질 회백질-백색질 경계부의 신호 대비를 정량화한 지표로, 피질내 수초(intracortical myelin, ICM) 함량 변화에 민감한 간접 표지자로 볼 수 있다. 이러한 ICM은 개인의 인지, 행동 및 감정과 밀접한 관련이 있으며, GWC 상승은 상대적인 ICM의 저하와 연관성이 있다 [2].

본 연구는 베트남전 참전 용사를 주된 모집단으로 하는 Department of Defense Alzheimer's Disease Neuroimaging Initiative (ADNI-DOD) 데이터셋을 활용하여, PTSD 그룹과 HC (Healthy Control) 그룹 간의 전뇌 수준에서 GWC 차이를 분석해내고, GWC 차이를 보인 영역을 클러스터 단위로 추출하여 해당 클러스터와 개별 증상 심각도 간의 연관성을 정밀 검증하였다.

2. 연구 방법

실험에 사용된 ADNI-DOD 데이터셋은 기존 ADNI (Alzheimer's Disease Neuroimaging Initiative)를 기반으로 미국 국방부 과제를 통해 외상성 사건 노출 및 베트남 전쟁 참전 이력이 반영되도록 확장된 하위 코호트(cohort)이다. 최종 분석에는 남성 PTSD 52명, 남성 대조군(Healthy Control, HC) 40명의 총 92개 구조적 3D T1 가중 SPGR (Spoiled Gradient Echo) 영상이 포함되었으며, 강도 기반 지표인 GWC의 일관성을 확보하기 위해 다른 파라메터를 갖은 T1 강조 영상은 제외하였다. 모든 영상은 FreeSurfer v7.4.1의 recon-all 파이프라인으로 처리하여 피질 표면 재구성 및 분할을 수행하였다 [3]. 각 정점에서의 회백질 신호 강도는 백질 표면에서 피질 리본 두께의 30% 지점에 해당하는 표면을 생성한 뒤, 그 지점을 연질막(pial) 표면 방향으로 투영하여 산출하였다. 각 정점에서의 백질 신호 강도는 백질 표면으로부터 1.0 mm 아래에 위치한 표면에서 얻었다 [4]. 그리하여 각 정점의 GWC 값은 다음과 같은 식으로 계산되었다:

$$GWC = \frac{Intensity_{WM} - Intensity_{GM}}{(Intensity_{WM} + Intensity_{GM})/2} \times 100(\%)$$

위와 같이 계산된 개인별 정점 단위의 GWC 맵은 분석을 위해 표준 피질 표면 공간인 fsaverage 공간으로 정합하였다. PTSD와 HC 간의 그룹 차이 분석은 정점 단위의 일반선형모형(GLM)으로 평가하였으며, 연령을 공변량으로 회귀 보정하였다. PTSD 그룹을 1, 대조군을 0으로 더미 코딩(dummy coding)하고 그룹과 나이 간의 상호 작용을 허용한 GLM 수식은 다음과 같다:

$$GWC = \beta_0 + \beta_1 \cdot Group + \beta_2 \cdot Age + \beta_3 \cdot (Group \times Age)$$

정점 형성 임계에서 추출된 클러스터에 대해 10,000회 반복의 클러스터 단위 몬테카를로 시뮬레이션으로 다중비교를 보정하였다.

개별 증상 심각도는 DSM-IV-TR에 기반한 Clinician-Administered PTSD Scale(CAPS) 점수로 산출하였으며,

현재(current) 및 평생(lifetime) 증상 심각도 모두에 대해 동일 문항을 4증상 구조(재경험·회피·과각성·디스포리아)에 맞게 재배치하여 하위척도 점수를 도출하였다. 이러한 하위척도 구성은 전쟁 배치 참전군인 표본에서 디스포리아 요인을 분리한 4증상 구조의 타당성을 보고한 Simms 등(2002)의 모델에 근거한다 [5].

그룹 분석 이후에 PTSD 집단 내부에서 유의한 클러스터의 평균 GWC와 4증상 모델의 증상 점수 간의 연령을 통제한 부분상관분석을 실시하였다.

3. 연구 결과

본 연구의 정점 기반 그룹 차이 비교에서는 총 5개의 유의 클러스터가 도출되었다. 좌반구에서는 supramarginal과 pars triangularis, 우반구에서는 caudal middle frontal, supramarginal, superior parietal 영역에서 클러스터가 도출되었으며, 모든 클러스터에서 GWC는 PTSD 그룹이 HC 그룹보다 유의하게 컸다. 그림 1은 해당 5개의 클러스터를 측면도(lateral view)와 내측면도(medial view)에서 시각화한 결과이다.

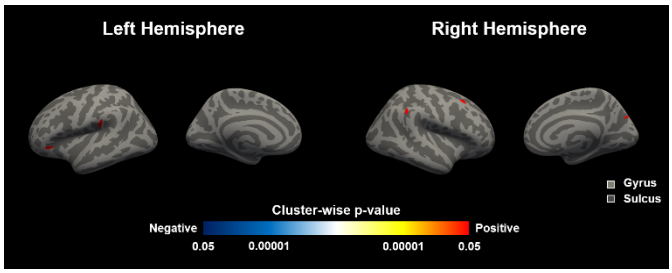


그림 1. PTSD와 HC 간의 그룹 차이 분석에서 도출된 유의한 클러스터들

PTSD 집단 내에서, 그룹간 비교 분석으로 도출된 5개의 클러스터 평균 GWC을 이용한 부분상관분석을 수행한 결과, 좌측 pars triangularis 클러스터의 평균 GWC는 현재(current) 재경험 점수와 유의한 음의 부분상관을 보여, 동일 연령에서 재경험 증상이 심할수록 GWC가 낮은 경향을 보였다(r=-0.335, p=0.016). 반면, 우측 supramarginal 클러스터의 평균 GWC는 평생(lifetime) 과각성 점수와 유의한 양의 부분상관을 보여, 과각성 증상이 심할수록 GWC가 높은 경향을 보였다(r=0.312, p=0.026). 그림 2는 연령으로 잔차화된 클러스터 평균 GWC와 해당 증상 점수의 산점도를 제시하여, 상관의 방향과 분포 특성을 직관적으로 보여준다.

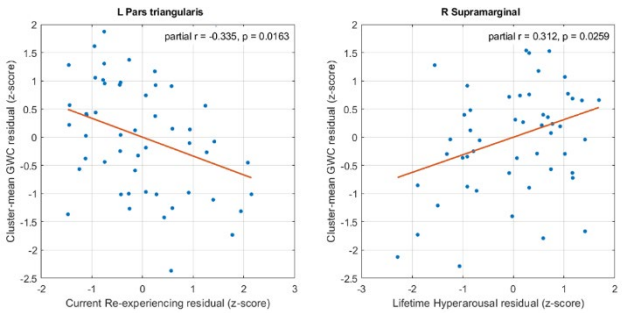


그림 2. PTSD 그룹 내 연령을 통제한 부분상관 산점도

4. 연구 고찰

본 연구에서 PTSD 그룹에서 GWC가 대조군에 비해 유의하게 증가하여 ICM의 저하 가능성을 보여준다.

좌측 pars triangularis는 기억 검색 및 억제 기능에 관여하는 영역으로, PTSD로 인한 ICM 변화가 재경험 증상과의 연관성으로 나타난 것으로 해석된다 [6, 7].

Supramarginal gyrus는 예기치 못한 자극에 대한 주의 전환과 포착에 관여하며, 이는 ventral attention network(VAN)의 주요 구성 영역 중 하나이다 [8]. 본 연구에서는 PTSD로 인해 발생된 과각성 증상이 supramarginal 영역에서 ICM 변화 가능성을 보여준다.

GWC는 ICM의 간접적 지표이므로 본 연구에서 관찰된 변화에 대해서는 다중 모달 영상 기법을 활용한 추가적인 검증이 필요하다.

5. 참고 문헌

[1] Yehuda, R., Hoge, C. W., McFarlane, A. C., Vermetten, E., Lanius, R. A., Nievergelt, C. M., ... & Hyman, S. E. (2015). Post-traumatic stress disorder. Nature reviews Disease primers, 1(1), 1-22.

[2] Chwa, W. J., Tishler, T. A., Raymond, C., Tran, C., Anwar, F., Villablanca, J. P., ... & Ellingson, B. M. (2020). Association between cortical volume and gray-white matter contrast with second generation antipsychotic medication exposure in first episode male schizophrenia patients. Schizophrenia research, 222, 397-410.

[3] Dale, A. M., Fischl, B., & Sereno, M. I. (1999). Cortical surface-based analysis: I. Segmentation and surface reconstruction. Neuroimage, 9(2), 179-194.

[4] Salat, D. H., Lee, S. Y., Van der Kouwe, A. J., Greve, D. N., Fischl, B., & Rosas, H. D. (2009). Age-associated alterations in cortical gray and white matter signal intensity and gray to white matter contrast. Neuroimage, 48(1), 21-28.

[5] Simms, L. J., Watson, D., & Doebbelling, B. N. (2002). Confirmatory factor analyses of posttraumatic stress symptoms in deployed and nondeployed veterans of the Gulf War. Journal of abnormal psychology, 111(4), 637.

[6] Badre, D., & Wagner, A. D. (2007). Left ventrolateral prefrontal cortex and the cognitive control of memory. Neuropsychologia, 45(13), 2883-2901.

[7] Anderson, M. C., & Levy, B. J. (2009). Suppressing unwanted memories. Current Directions in Psychological Science, 18(4), 189-194.

[8] Vossel, S., Geng, J. J., & Fink, G. R. (2014). Dorsal and ventral attention systems: distinct neural circuits but collaborative roles. The Neuroscientist, 20(2), 150-159.

Poster-009

법의학적 맥락에서 EEG 기반 기만 탐지의 설명가능성을 향상시키기 위한 설명 가능한 인공지능(XAI)

김태희[1], 김수혜[1], 천재훈[1], 김석찬[2], 임창환[1,3,*]

한양대학교 융합전자공학과[1]

대검찰청 과학수사부 법과학분석과[2]

한양대학교 바이오매디컬공학과[3]

Explainable AI Approach to EEG-based Deception Detection to Enhance Explainability in the Forensic Context

Taehee Kim[1], Suhye Kim[1], Jaehoon Cheon[1], Seok Chan Kim[2], and Chang-Hwan Im[1,3,*]

Department of Electronic Engineering, Hanyang University, Korea[1]

Department of Forensic Science Investigation, Supreme Prosecutors' Office, Korea[2]

Department of Biomedical Engineering, Hanyang University, Korea[3]

[*]ich@hanyang.ac.kr

Abstract

In this study, we applied an explainable AI (XAI) technique, which called gradient-weighted class activation mapping (grad-CAM) to a pre-trained deep learning model for EEG-based deception detection to identify the temporal and spatial EEG features that influenced the model's predictions. In spatial analysis, the results showed that the centro-parietal region was important in classifying the innocent group, whereas the prefrontal region was salient in classifying the guilty group. Spatial similarity analysis revealed that time-domain features such as the area under the curve (AUC) within the P300 window and the mean amplitude across the full window, calculated using a combination of three different stimulus types showed the greatest spatial similarity with the outcome of spatial analysis. Moreover, averaging multiple features showed higher similarity with model results than using single features, implying that the model considered multiple features from the input signals during classification. Temporal analysis revealed that the time intervals the model considered important overlapped with periods when salient ERP features such as P300 occur. These findings highlight the potential of explainability techniques to enhance both the transparency and forensic applicability of deep learning-based deception detection.

1. 연구 배경

법의학 분야에서 거짓말 탐지 기술은 폴리그래프 방식과 숨김정보검사 방식으로 구성된다. 기존의 폴리그래프 방식은 심박수, 피부전도도 등 자율신경계 반응에 기반하기 때문에 스트레스나 긴장과 같은 외부 요인에 의해 신뢰도가 쉽게 왜곡된다는 한계가 있다. 이를 보완하고자 최근에는 뇌파(EEG)를 활용한 신경생리학적 접근 방식이 주목받고 있으며, 그 중 사건관련전위(event-related potential, ERP)를 기반으로 한 숨김정보검사(concealed information test, CIT)가 대표적이다. 이 방법은 범죄 관련 자극(Probe stimulus, PR), 범죄 무관련 자극(Irrelevant stimulus, IR), 표적 자극(Target stimulus, TR)을 제시하고 그에 대한 반응을 비교하여 참가자가 범죄 정보를 인지하는지를 평가한다.

범죄 정보 인지 여부를 분석하는 방법으로는 범죄 관련 자극(PR)과 무관련 자극(IR) 간 P300 진폭의 차이를 통계적으로 비교하는 부트스트랩 진폭 차이 분석(bootstrapped amplitude difference, BAD) 방식이 주로 사용되어 왔다. 그러나 BAD 방법은 자극 간 의미적 차이가 낮은 상황에서는 분류 성능이 저하되고 EEG의 복잡한 시공간적 특성을 충분히 반영하지 못하는 한계가 있다. 이를 보완하기 위해 최근에는 기계 학습 및 딥러닝 기법이 도입되고 있다. BAD와 기계 학습 및 딥러닝 기법 간 성능을 비교한 선행 연구에서는 딥러닝 모델이 가장 높은 분류 성능을 나타낸 바 있다 [1]. 그러나 딥러닝 모델은 판단 근거를 설명하기 어려운 블랙 박스(black-box) 특성으로 인해 법의학적 신뢰 확보에 제약이 따른다.

본 연구는 기존의 딥러닝 기반 거짓말 탐지 모델에 설명 가능한 인공지능(Explainable AI, XAI) 기법인 경사 가중치 클래스 활성화 지도(gradient-weighted class activation mapping, grad-CAM) 기법을 적용하여 모델의 예측에 기여한 시간적(temporal), 공간적(spatial) EEG 특징을 시각화하고 분석하였다. 이를 통해 높은 예측 성능을 보이는 딥러닝 모델에 해석을 제시하여 법의학적 활용 가능성을 높이고자 하였다.

2.연구 방법

본 연구는 기존에 사전 학습된(pre-trained) 기만 탐지 모델을 분석에 활용하였다. 해당 모델은 유죄 집단 30명, 무죄 집단 30명의 참가자를 대상으로 모의 범죄 미션에 참여한 뒤 수행한 CIT 검사에서 측정된 뇌파 데이터를 이용하여 학습되었다. 각 참가자의 모든 전극 및 자극 조건에 대한 ERP 신호를 증강(augmentation)한 후 학습에 사용하였으며, 모델 구조는 EEGNet을 기반으로 일부 수정되었다.

모델이 분류 시 중요하게 활용한 시간적(temporal) 및 공간적(spatial) 정보를 확인하고자 grad-CAM 기법을 적용하였다. Grad-CAM은 합성곱 신경망(convolutional neural network, CNN) 기반 모델의 특정 층(layer)의 특징 맵(feature map)을 특징 맵의 그래디언트(gradient)를 기반으로 계산한 중요도 가중치를 이용해 가중합(weighted

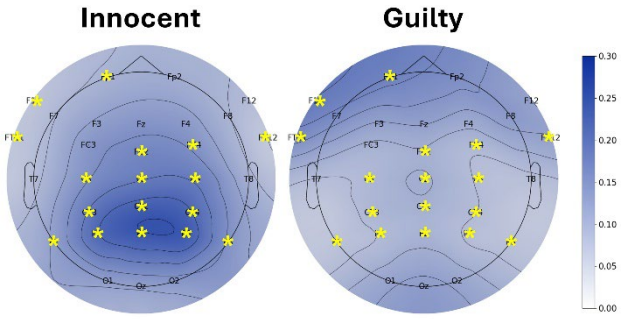


그림 1. 첫번째 층에 grad-CAM을 적용하여 집단 별로 평균한 결과. 파란색이 진할수록 해당 영역의 중요도가 높음을 의미한다. 집단 간 차이가 통계적으로 유의미했던 전극(p<0.05)은 노란색 별표(*)로 표시되었다.

sum)한 후 양의 값만 남기는 방식으로 계산된다 [2]. 이때 도출된 grad-CAM의 결과값이 클수록 모델의 결정에 더 큰 영향을 미쳤음을 의미한다. 본 연구에서는 특징 맵이 공간적 정보를 반영하는 첫번째 층과 시간적 정보를 강조하는 마지막 층에 grad-CAM을 적용하였으며, 사전학습 모델에서 분류 결과가 옳았던 참가자의 데이터만을 분석에 활용하였다.

모델의 공간적 분석을 위하여 첫 번째 층에서 계산된 grad-CAM 결과(시간 * 전극 차원)를 전체 시간에 대해 평균하여 전극별 중요도를 산출하였다. 또한 집단 간 유의미한 차이를 보이는 전극을 확인하기 위해 전극별 중요도 값을 이용하여 통계 분석을 수행하였다.

공간적 분석 결과가 모델이 데이터의 어떤 특징(feature)을 고려해서 나온 결과인지를 확인하기 위해 공간적 유사도 분석(spatial similarity analysis)를 진행하였다. 입력 신호로부터 여러 후보 특징을 계산하고 스피어만 순위 상관계수(Spearman's rank correlation)을 이용하여 각 특징의 공간적 패턴이 모델의 공간적 분석 결과와 얼마나 유사한지를 분석하였다.

시간적 분석에서는 마지막 층의 grad-CAM 결과(시간 * 1 차원)를 약 100 ms 윈도우(window)마다 이동하여 평균 값을 계산하였다. 두 집단 전체의 평균 및 표준편차를 이용하여 각 집단 결과를 z-점수로 변환하였고, 최종적으로 90% 신뢰구간(z>1.29)을 초과하는 시간 구간이 도출되었다.

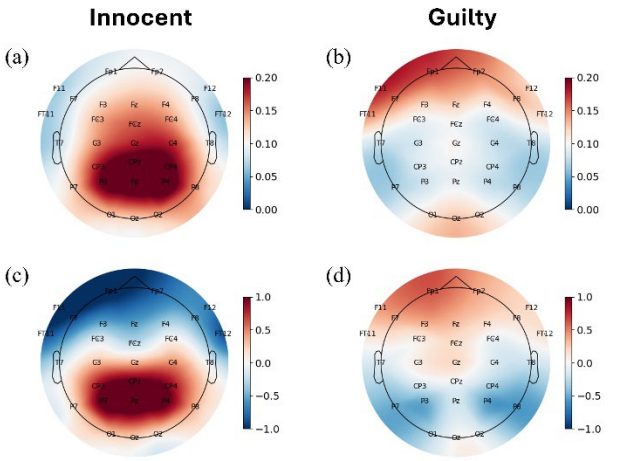


그림 2. (a), (b) 공간적 분석을 통해 산출한 무죄 및 유죄 집단 분류에서 중요하게 사용된 전극 영역의 공간 분포도. (c), (d) 공간적 유사도 분석에서 유사도가 높은 상위 20개 특징의 공간적 패턴을 평균한 결과.

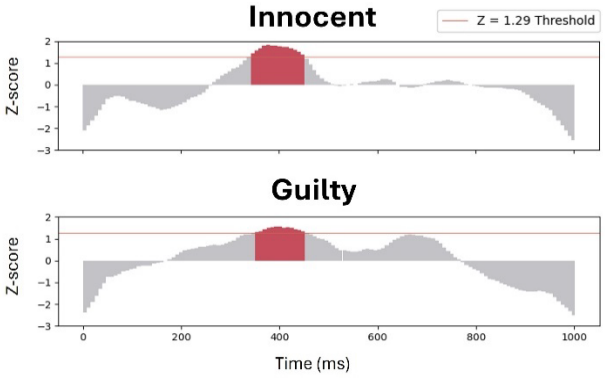


그림 3. 마지막 층에 grad-CAM을 적용하여 집단 별 평균을 z-점수로 변환한 결과. 붉은색 구간: 90% 신뢰구간.

3. 연구 결과

공간적 분석을 통해 모델이 중요하게 고려한 전극 영역을 확인한 결과는 그림 1에 제시되어 있다. 무죄 집단은 중심-두정(centro-parietal) 영역이 중요하게 나타났으며, 유죄 집단은 전전두엽(prefrontal) 영역이 중요하게 나타났다. 공간적 유사도 분석 결과 단일 특징 중에서는 무죄 집단의 경우 IR-PR+TR의 자극 조합으로 계산한 P300 윈도우의 곡선 아래 면적(Area under the curve, AUC)과의 공간적 유사도가 가장 높았으며(rho=0.648), 유죄 집단의 경우 -IR+PR-TR의 자극 조합으로 계산한 전체 윈도우의 진폭(amplitude) 평균값과의 공간적 유사도가 가장 높았다(rho=0.450). 추가로 다중 특징을 사용한 경우의 공간적 유사도를 확인해보기 위해, 유사도가 높았던 상위 20개의 특징의 공간적 패턴을 각각 정규화 한 뒤 평균을 낸 결과를 계산하였다(그림 2). 두 집단 모두 20개 특징을 평균한 패턴이 모델의 공간적 분석 결과와 높은 유사도(무죄집단 rho=0.878, 유죄집단 rho=0.845)를 나타내었으며, 이는 모델이 입력 신호가 보이는 다양한 특성을 학습하여 높은 분류 정확도를 이뤄 냈음을 시사한다.

마지막 층에서 시간 영역의 중요도를 분석한 결과는 그림 3에 제시되어 있다. 무죄 집단은 342-449 ms 구간, 유죄 집단은 350-449 ms 구간에서 높은 중요도를 보였다. 해당 시간 구간은 ERP의 주된 특징인 P300이 발생하는 시점으로, 모델이 중요한 ERP 특징을 학습에 반영하였음을 시사한다. 본 연구는 딥러닝의 분류 근거의 공간적 및 시간적 해석을 함께 제시함으로써 단순 분류 결과만으로는 확보하기 어려운 설명 가능성을 제공하였다. 이는 EEG 기반 기만 탐지에서 딥러닝 분류 결과의 실질적 활용 가능성을 높이는 데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 참고 문헌

[1] S. Kim, J. Cheon, T. Kim, S. C. Kim, and C.-H. Im, "Improving Electroencephalogram-Based Deception Detection in Concealed Information Test under Low Stimulus Heterogeneity," p. arXiv:2509.02234. [Online]. Available: https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2025arXiv250902234K

[2] R. R. Selvaraju, M. Cogswell, A. Das, R. Vedantam, D. Parikh, and D. Batra, "Grad-CAM: Visual explanations from deep networks via gradient-based localization," in Proc. IEEE Int. Conf. Comput. Vis. (ICCV), Venice, Italy, 2017, pp. 618–626, doi: 10.1109/ICCV.2017.74.

Poster-010

뇌파 기반 뇌-컴퓨터 인터페이스를 위한 측정-재측정 안정성 성능을 고려한 최적 정신 심상 작업 조합 탐색

박윤진, 한창희*
고려대학교 컴퓨터정보학과

Optimal Combination of Mental Imagery Tasks for EEG-Based Brain–Computer Interfaces Considering Test–Retest Reliability

Yoon-jin Park and Chang-Hee Han*
Dept. of Computer and Information Science, Korea University, Korea
*changheehan@korea.ac.kr

Abstract

Electroencephalography (EEG)-based brain–computer interfaces (BCIs) have attracted considerable attention due to their high temporal resolution and noninvasive nature. However, the low test–retest reliability of EEG signals remains a major obstacle to their practical implementation. In this study, we examined the session-to-session test–retest reliability of EEG signals using data from 60 participants who performed five tasks—eyes closed (EC), eyes open (EO), mental subtraction (Ma), memory retrieval (Me), and mental singing (Mu)—across three sessions. Power spectral density features were extracted from preprocessed EEG data and evaluated using intraclass correlation coefficients (ICCs) and deep learning–based classification with ShallowFBCSPNet. Non-cognitive tasks (EC, EO) showed higher ICC values and more stable decoding performance than cognitive tasks. Fine-tuning with a small portion of target-session data (5%) improved classification accuracy by approximately 20%, highlighting the potential of adaptive learning to mitigate inter-session variability.

1. 연구 배경

뇌-컴퓨터 인터페이스(Brain-computer interface, BCI)란 인간의 뇌와 컴퓨터를 연결하여 새로운 의사소통 채널을 제공하거나 외부 장치들을 생각만으로 제어할 수 있도록 하는 기술이다. 이러한 BCI 기술은 가상현실 제어, 무인 시스템 조작, 인간-기계 상호 작용 등 다양한 분야에서 활용될 수 있어 최근 많은 주목을 받고 있다.

BCI 기술 중에서도 뇌파(Electroencephalography, EEG) 기반 BCI는 높은 시간 해상도, 비침습적 방법, 비교적 저렴한 비용 등 여러 가지 장점 덕분에 활발히 연구되고 있다. 그러나 EEG 기반 BCI는 낮은 공간 해상도, 주변 환경의 노이즈 영향, 피험자의 상태 변화에 따른 신호 불안정성 등 여러 한계가 있으며 현재까지 상용화 단계에 이른 EEG 기반 BCI 기술은 매우 제한적이다. 특히 EEG 기반 BCI의 실용화를 가로막는 핵심 문제는 EEG 신호의 측정-재측정 안정성 문제이다. 측정-재측정 안정성 문제란 동일한 피험자가 동일한 태스크를 서로 다른 날에 수행했을 때 얻어지는 EEG 신호가 일관되지 않은 것을 의미한다. 이런 EEG 신호의 측정-재측정 안정성 문제는 BCI 시스템의 안정성과 신뢰도를 저하시키는 핵심적인 원인이며, 기존 연구들에서는 이러한 EEG 신호의 측정-재측정 안정성 문제를 해결하고자 다양한 연구들을 수행해왔다 [1][2]. 하지만, 이러한 노력에도 불구하고 아직까지 뇌파 신호의 측정-재측정 안정성 문제는 효과적으로 해결되지 못하고 있다.

2.연구 방법

본 연구에서는 총 60명의 정상인 피험자가 5가지의 작업(눈 감기(EC), 눈 뜨기(EO), 뺄셈(Ma), 기억 회상(Me), 암송(Mu))을 각각 5분씩 수행하는 동안 뇌파 데이터를 측정한 공개 EEG 데이터셋을 사용했다 [3]. 데이터는 10-20 국제 전극 배치 시스템을 기반으로 뇌 전체 영역에 61개의 전극을 사용해서 수집되었으며, 샘플링 속도 (sampling rate)는 500Hz로 측정되었다.

각 피험자는 5개의 서로 다른 작업을 3회에 반복해서 수행했다. 첫 번째 측정(1세션)이 진행된 후, 두 번째 측정(2세션)은 첫 측정으로부터 90분 후에 진행되었다. 세 번째 측정(3세션)은 첫 측정으로부터 한 달 후에 진행되었다. 각 피험자는 총 5가지 작업을 각각 10초씩 30회 반복 수행했다.

데이터의 잡음을 줄이고 신호를 정규화하기 위해 전처리 과정이 적용되었다. 우선, EEG 신호에 공통 평균 참조(Common Average Referencing)를 적용하여 신호를 정규화하였고, 베이스라인 보정(Baseline Correction)을 통해 신호의 평균값을 제거하였다. 이어서 1-45Hz 밴드패스 필터링을 통해 관심 주파수 대역을 추출한 후, Artifact Subspace Reconstruction (ASR)을 활용하여 이상 신호를 제거하였다. 이후 독립 성분 분석(Independent Component Analysis, ICA)을 통해 신호에서 뇌파와 무관한 잡음 성분을 추가로 제거하였다. 최종적으로 신호는 10초 길이의 Epoch 단위로 분할되었으며, Epoch 내에서 ±100μV를 초과하는 신호의 비율이 10% 이상인 Epoch을 제거했다. 전처리 후 작업당 최대 30개의 Epoch이 생성되었으며, 불량 Epoch 제거 후 잔여 Epoch이 20개 이하인 피험자 12명을 분석에서 제외하여, 최종적으로 총 48명의 데이터를 분석에 사용했다.

전처리가 완료된 Epoch에 대해 Fast Fourier Transform (FFT)을 적용하여 주파수 밴드 파워를 추출했다. 추출된 주파수 밴드 파워는 Delta (1-4Hz), Theta (4-8Hz), Alpha (8-13Hz), Beta (13-30Hz), Gamma (30-45Hz)의 5개 주파수 밴드별로 Power Spectrum Density (PSD)로 계산되었다.

각 주파수 밴드별로 세션 간 신호의 측정-재측정 안정성을 정량적으로 평가하기 위해 Intraclass Correlation Coefficient (ICC)를 계산하였다. 각 피험자 및 작업별로 Delta, Theta, Alpha, Beta, Gamma 밴드의 파워 값을 세션 1, 2, 3 간에

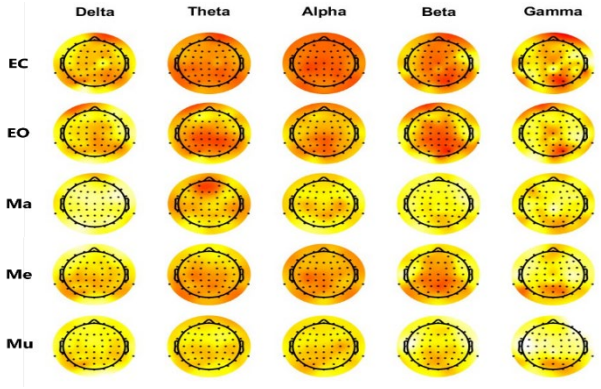


그림 1. 정신 심상 작업 별 급내상관분석 결과(ICC)

비교하여 ICC 값을 산출하였으며, 이를 통해 주파수 밴드별 안정성 수준을 평가하였다.

작업 별로 측정-재측정 안정성 측면에서의 분류 성능 평가를 위해 딥러닝 분석을 수행했다. 기존 뇌파 분야에서 우수한 성능이 입증된 ShallowFBCSPNet을 사용하여 각 피험자별, 작업별 EEG 신호의 분류 정확도를 계산했다. 첫 번째 분석에서는 세션 1의 데이터를 이용하여 10-fold 교차 검증으로 모델을 학습하고, 세션 2 및 세션 3의 데이터를 이용하여 측정-재측정 정확도를 계산했다. 두 번째 분석에서는 정확도를 향상하기 위해 세션 1에서 학습된 모델을 기반으로 세션 2와 세션 3의 데이터 중 특정 비율의 데이터를 학습에 사용하여 균형화 된 파인튜닝을 수행하고, 나머지 데이터를 이용하여 파인튜닝된 모델의 정확도를 평가했다.

3. 연구 결과

그림 1은 작업별로 추출된 주파수 밴드 특성에 대한 세션 간 측정-재측정 안정성 변화를 나타낸 결과이다. 색이 진할수록 Intraclass Correlation Coefficient(ICC) 값이 높음을 의미하며, 즉 세션 간 EEG 신호의 일관성이 높음을 나타낸다.

비인지 작업(EC, EO)의 경우 대부분의 주파수 밴드에서 비교적 높은 ICC 값을 보여 안정적인 신호 특성을 보였으나, 인지 작업(Ma, Me, Mu)의 경우 상대적으로 낮은 ICC 값을 나타내 세션 간 변동성이 크게 관찰되었다. 이를 통해 EC와

표1. 파인튜닝 5% 적용 후 세션 간 작업별 분류 정확도

Task1	Task2	1	2	3	(1-2)	(1-3)	Avg
EO	Ma	99.37	96.24	94.32	3.13	5.05	4.09
EO	Mu	98.92	94.74	94.87	4.18	4.05	4.11
EC	EO	98.85	93.80	94.76	5.05	4.09	4.57
EO	Me	99.65	94.47	94.63	5.18	5.02	5.10
EC	Ma	92.08	80.78	73.76	11.30	18.32	14.81
Ma	Me	91.98	78.65	70.05	13.33	21.93	17.63
EC	Mu	87.64	71.56	68.24	16.08	19.40	17.74
Ma	Mu	92.12	74.82	72.06	17.30	20.06	18.68
EC	Me	89.72	67.05	71.45	22.67	18.27	20.47
Me	Mu	91.74	68.48	68.08	23.26	23.66	23.46
Avg		94.21	82.06	80.22	12.15	13.98	13.07

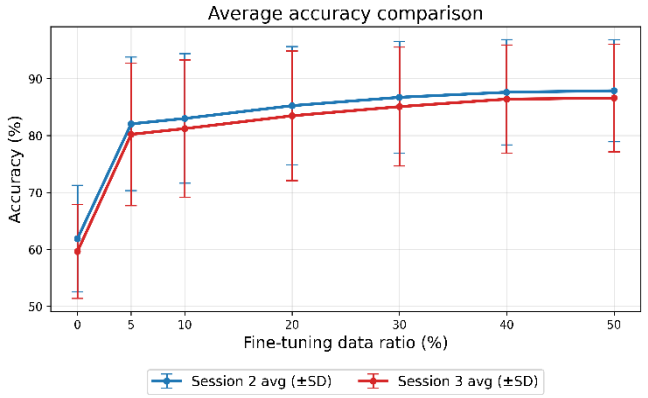


그림 2. 파인튜닝 비율 증가에 따른 세션 간 분류 정확도 비교

EO 조건에서 EEG 신호의 재현성이 인지 과제보다 확연히 높음을 확인할 수 있다.

그림 2는 세션 2와 세션 3 데이터를 대상으로 파인튜닝(fine-tuning) 데이터 비율에 따른 평균 분류 정확도의 변화를 나타낸 결과이다. 파인튜닝 비율을 5%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%로 증가시키며 성능 변화를 비교하였다.

파인튜닝 데이터 비율이 증가할수록 분류 정확도가 점진적으로 향상되는 경향을 보였으며, 특히 단 5%의 데이터만을 사용한 파인튜닝에서도 약 20%의 정확도 향상이 나타났다. 이는 소량의 추가 학습만으로도 세션 간 신호 차이를 효과적으로 보정할 수 있음을 시사한다.

표 1은 5% 비율의 파인튜닝을 적용한 후 세션 간 작업별 분류 정확도를 비교한 결과이다. 각 작업 조합별로 세션 간 정확도 차이를 평균하여 순위화한 결과, EC(눈 감기) 또는 EO(눈 뜨기) 와 같은 비인지(non-cognitive) 작업이 포함된 조합이 대부분 상위에 위치함을 확인할 수 있었다. 이는 비인지 작업이 인지 작업(Ma, Me, Mu)에 비해 세션 간 EEG 신호의 변동성이 낮고, 상대적으로 높은 측정-재측정 안정성을 보유하고 있음을 의미한다.

종합적으로, 이러한 결과는 뇌파 기반 BCI 시스템의 안정성 확보를 위해서는 인지 과제보다 비인지 과제를 활용하는 것이 유리함을 시사한다.

4. Acknowledgements

이 연구는 2025년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. RS-2024-00455484)과 2025년 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 SW중심대학사업의 지원을 받아 수행되었음(2024-0-00036)

5.참고 문헌

[1] Lihong Ding ; Wei Duan ; Yulin Wang ; Xu Lei ; “Test-retest reproducibility comparison in resting and the mental task states: A sensor and source-level EEG spectral analysis” International Journal of Psychophysiology, 2022

[2] Na Li ; Jingqi Yang ; Changquan Long ; Xu Lei ; “Test–Retest Reliability of EEG Aperiodic Components in Resting and Mental Task States” Brain Topography, 2024

[3] Yulin Wang ; Wei Duan ; Debo Dong ; Lihong Ding ; Xu Lei ; “A test-retest resting, and cognitive state EEG dataset during multiple subject-driven states” Sci Data, 2022

Poster-011

기계학습 기반 뇌파 분석을 이용한 이러닝 환경에서의 지속적 주의력 상태 분류

천재훈[1] , 김수혜[1] , 임창환[1,2*]

한양대학교 융합전자공학과[1]

한양대학교 바이오메디컬공학과[1]

Classification of Sustained Attention States in e-Learning Using Machine Learning-based EEG Analysis

Jaehoon Cheon[1], Suhye Kim[1] and Chang–Hwan Im[1,2*]

[1]Department of Electrical Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Republic of Korea

[2]Department of Biomedical Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Republic of Korea

[*]ich@hanyang.ac.kr

Abstract

Classifying learners' sustained attention states based on Electroencephalography (EEG) has the potential to support customized learning strategies. The goal of this study was to find a specific pattern in EEG that reflects a student's state of attention during online learning. For this study, EEG signals from 30 middle school participants were recorded as they completed two tasks: the d2 Test of Attention and an online lecture. A machine learning method was then used to distinguish between two distinct attention states based on this EEG pattern. The accuracy of this classification was then validated by examining the students' academic performance during the online lecture. The results indicate that this method is effective and could be a useful tool for creating online learning systems that adapt to a student's attention state.

1. 연구 배경

최근, 온라인 학습이 보편화됨에 따라, 직접적인 감독 없이 학생의 집중도를 파악하는 것은 교육 환경에서 중요한 과제가 되었다. 온라인 학습은 대면 교육을 보완하는 목적으로 활용될 수 있지만, 일부 연구에서는 온라인 강의를 수강한 학생들의 학업 성취도가 오히려 감소했다는 결과가 보고되었다[1]. 이는 온라인 학습이 대면 교육보다 효과가 떨어질 수 있음을 시사한다. 온라인 학습 중 집중도를 객관적으로 측정하는 기술을 개발하면 강의 후 맞춤형 피드백을 제공하는 등 학습 효과를 높이는 전략의 핵심 기반으로 활용할 수 있다. 따라서 학습자 집중도를 모니터링하는 기술을 높은 신뢰도로 개발할 필요가 있다.

이러한 필요성에 따라, 본 연구에서는 학습자의 집중도를 객관적으로 평가하기 위한 도구로 뇌파(EEG)를 활용하였다. 뇌파는 특정 과제를 수행하는 동안 발생하는 두뇌의 전기적 활동을 실시간으로 기록하므로, 학습자의 인지적 변화를 측정할 수 있다. 또한 비침습적으로 측정이 가능하여 사용자에게 불필요한 시술 없이 신호를 측정할 수 있어 실제 학습 환경에 적용이 용이하다는 장점이 있다.

이러한 장점에도 불구하고 뇌파 신호는 복잡하고 방대한 특징을 포함하고 있다. 본 연구에서는 뇌파 신호에 내재된 복잡한 패턴을 분석하여 집중 상태를 분류하기 위해, 클러스터링 기법과 머신러닝 기법을 적용하였다. 구체적으로, d2 주의력 검사를 수행하는 동안 측정된 행동 데이터를 클러스터링하여 뇌파 데이터의 라벨로 사용하고 다층 퍼셉트론(MLP) 모델에 학습시켜 분류기를 생성하였다. 이후, 이 분류기를 온라인 강의 데이터에 적용하여 학습자의 집중 상태를 판별하였으며, 상태 분류 결과를 학업 성취도와 비교하여 모델이 분류한 결과와 학업 성취도 간의 관계를 확인하였다.

2.연구 방법

분석에 사용된 데이터는 2학년 중학생 30명을 대상으로 측정되었다. 실험 과정은 d2 주의력 검사를 진행한 후 온라인 강의를 수행하는 순서로 진행되었다. 실험이 진행되는 동안 10-20 system에 입각하여 19개의 채널에서 뇌파가 기록되었다. d2 주의력 검사는 참가자의 지속적인 주의력을 측정할 수 있는 검사 도구로, 자극 중 점 두 개가 있는 'd'를 그렇지 않은 자극 사이에서 신속하게 분류하는 검사이다[2]. 주의력 검사에서 자극은 총 1320회 제시되었으며, 참가자의 행동 데이터가 기록되었다. 온라인 강의는 K-POP에서의 문화 도용에 관한 약 18분의 동영상 강의가 사용되었으며 참가자들은 강의 수강 후 강의와 관련된 간단한 시험을 진행함으로써 학업 성취도를 평가하였다.

2.1 집중력 지표 개발

집중력 지표를 추출하기 위해 총 22명의 d2 주의력 검사 데이터가 사용되었다. 각 참가자들의 주의력 검사에서 측정된 행동 데이터는 120개의 자극마다 행동적 집중 지표인 CONC(Concentraion performance)를 계산하였다[2]. 계산은 50%마다 겹쳐서 계산되어 총 22개의 CONC가 계산되었다. CONC가 계산된 구간에 맞추어 참가자들의 뇌파데이터로부터 뇌파 지표를 추출하였다. 추출된 뇌파 지표는 9가지 종류의 주파수 구역(Whole band, Theta, Alpha, High Alpha, Low Alpha, Beta, SMR, High beta and Low beta band)에서 3가지 종류의 지표(Absolute power spectral density, Relative power spectral density, Differential Entropy)가 계산되어 총 1350개가(15*90) 추출되었다. 추출된 뇌파 지표는 CONC 값과 상관 계수를 계산하였으며, 상관 계수가 높은 상위 10개만을 집중력 지표의 후보군으로 선정하였다. 이후 상위 10개의 후보군 지표의 가중치(weight)를 조정하여 더하는 방식으로 조합된 후보군들을 생성하였고 다시 한번 CONC 값과 상관 계수를 계산하여 최종 집중력 지표를 추출하였다. 이렇게 선정된 집중도 지표를 EEG index of learners' sustained attention (EISA)로 명명하였다

2.2 집중력 분류기 생성

집중력 분류기의 학습을 위해서 d2 주의력 검사를

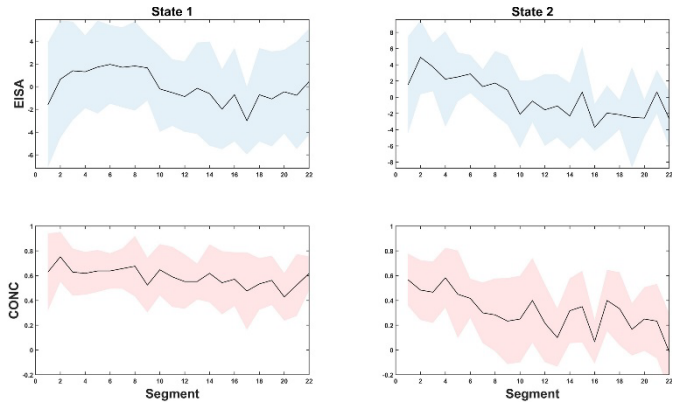


그림 1. 두 가지 종류로 분류된 집중력 패턴. 검정색 선은 참가자 전체 평균 값을 의미하고, 푸른색 음영 및 붉은색 음영은 각각 EISA와 CONC의 참가자로부터 계산된 표준 편차를 의미한다.

진행하는 동안 측정된 뇌파에서 EISA를 계산하였다. CONC는 계측정 군집 분석(hierarchical clustering) 기법이 적용되어 두 가지 집중 상태(State 1과 State 2)로 분리되었으며 이는 집중력 지표들의 정답 라벨(Label)로 사용되었다. 즉, 집중력 분류기의 학습의 입력 데이터로는 EISA가 사용되었고 참가자별 집중 상태 label로는 State 1 또는 State 2가 사용되었다. 사용된 모델은 MLP 모델로 복잡한 비선형 관계를 모델링하는 데 강점이 있어 선정하였다. 학습된 모델은 Leave-one-subject-out cross-validation (LOSO-CV)을 통해 검증되었다.

2.3 집중력 분류기 검증

학습된 모델을 실제 학습 환경에서 검증하기 위하여 온라인 강의에서 측정된 뇌파 데이터가 사용되었다. 기술적인 문제로 22명의 참가자 데이터가 사용되었다. 뇌파 데이터는 d2 주의력 검사 데이터와 동일하게 22개 구간으로 나뉘어 EISA를 추출하였다. 각 참가자의 EISA는 앞서 학습시킨 집중력 분류기를 통해 State 1 (집중력 유지군) 또는 State 2 (집중력 하락군)으로 분류되었다. 각 state로 분류된 집단의 학업 성취도를 이용하여 집단 간 평균 차이 통계 검정을 진행함으로써 모델이 분류한 결과가 실제로 학업 성취도에 영향을 미치는지 확인하였다. 평균 차이 검정은 ranksum test를 이용하였다.

3. 연구 결과

본 연구를 통해 개발된 최종 집중도 지표 EISA와 CONC의 상관관계는 r=0.201이었으며, 그 지표는 다음과 같다: APSD of Theta in the Pz channel*2.15 + RPSD of High beta/Theta of the T6 channel*2.25 + RPSD of Low alpha/Whole of the C4 channel*2.65

그림 1. 은 집중력 분류기의 학습을 위해 계층적 군집 분석으로 두 가지 상태로 분류된 참가자들의 CONC와 EISA의 평균 그래프를 나타낸다. 두 가지 집중력을 분류하는 집중력 분류기의 LOSO-CV 정확도는 **86.36%**였다.

분류기를 통해 22명의 참가자의 온라인 학습 중 추출된 EISA는 집중력 유지군(State 1)과 집중력 하락군(State 2)으로 분류되었다. 분류기가 실제로 학업과 관련있는지 확인하기 위하여 두 집단의 학업 성취도 평가 점수의 평균 차이 분석을 진행하였다. 분석 결과 집중력 유지군(18.08 ± 6.63)이 집중력 하락군(14.64 ± 5.71) 보다 더 높은 학업 성취도를 나타냈다 (marginally significant, p=0.08). 그림 2. 는 각 집단의 학업 성취도 평가 점수의 평균과 표준편차를 나타낸다.

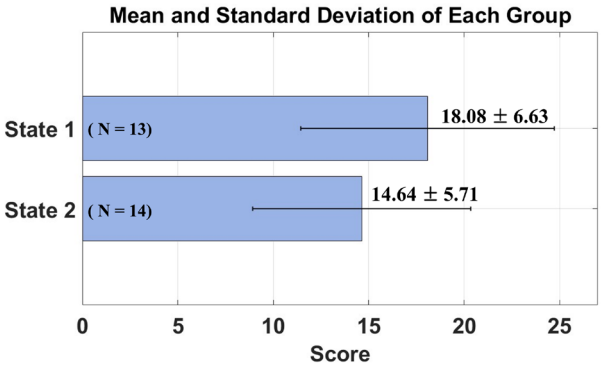


그림 2. 집중력 분류기를 통해 분류된 각 집단의 학업 성취도 평가 점수의 평균 점수와 표준편차 그래프 State 1은 집중력 유지군을, State 2는 집중력 하락군을 나타낸다.

본 연구에서는 온라인 학습을 하는 학습자들의 지속적인 집중력을 분류할 수 있는 분류기를 생성하였다. 집중력 분류기는 온라인 강의를 수강하는 동안 측정된 뇌파 신호를 이용하여 계산된 EISA를 입력 값으로 넣어 분류된 분류기의 결과와 학업 성취도를 비교함으로써 본 연구는 실제로 학업 성취도를 예측할 수 있는 분류기를 개발하였다. 본 연구에서 개발한 분류기를 활용한다면 직접적인 감독자가 없는 온라인 환경에서 학습자에게 집중 유무를 알려주는 맞춤형 피드백에 활용되어 학습자의 교육 효율성을 높여줄 수 있을 것이다.

4. Acknowledgements

이 연구는 2024년도 정부(과기정통부)의 재원으로 한국연구재단 바이오·의료기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2024-00397673)

5.참고 문헌

[1] B. A. Betthäuser, A. M. Bach-Mortensen, and P. Engzell. "A systematic review and meta-analysis of the evidence on learning during the COVID-19 pandemic." *Nature Human Behaviour*, Vol 7, No.6, p.851-863, 2023.

[2] M. E. BATES and E. P. LEMAY, “The d2 Test of Attention: Construct validity and extensions in scoring techniques,” *Journal of the International Neuropsychological Society*, vol. 10, no. 3, pp. 392–400, 2004.

Poster-012

척수손상 장애인의 하지 운동 상상 기반 뇌-컴퓨터 인터페이스를 위한 계층적 사용자와 세션 간의 전이 학습 전략

정지혁[1,2], 김근태[3], 성동진[1], 김래현[1], 이송주[1], 김동주[2], 김형민[1]

한국과학기술연구원 바이오닉스연구센터[1]

뇌공학과, 고려대학교[2]

정보과학대학, 한림대학교[3]

A Hierarchical Subject-Session Transfer Learning Strategy for Lower-Limb Motor Imagery Brain-Computer Interface in Individuals with Spinal Cord Injury

Ji-Hyeok Jeong[1], Keun-Tae Kim[3], Dong Jin Sung[1], Laehyun Kim[1], Song Joo Lee[1], Dong-Joo Kim[2], Hyungmin Kim[1]

[1]Bionics Research Center, Biomedical Research Division, Korea Institute of Science and Technology

[2]Department of Brain and Cognitive Engineering, Korea University

[3]College of Information Science, Hallym University

E-mail: t20193@kist.ac.kr, hk@kist.re.kr

Abstract

Motor imagery (MI) brain computer interface (BCI) offer a non-invasive avenue for people with spinal cord injury (SCI) to volitionally control assistive technologies. However, MI-BCI performance in SCI is constrained by pronounced inter-subject variability, stemming from differences in injury level, chronicity, and the degree of cortical reorganization induced by sensory deafferentation rather than direct cortical damage. We propose a hierarchical subject-session transfer (HSST) method that first pre-trains on other subjects, then adapts with frozen features on target subject's support sessions, and finally personalizes on the target session using an CNN model backbone. In five SCI subjects (four sessions each), HSST achieved the highest accuracy (89.8±4.6%), surpassing ST (86.8±5.7%), CST (87.0±7.2%), and SST (87.8±7.5%).

1. 연구 배경

최근 뇌-컴퓨터 인터페이스(BCI) 기술의 발전으로, 사용자가 뇌파(electroencephalogram, EEG)를 통해 휠체어나 로봇 팔, 하지 외골격 로봇 등의 외부 장치를 제어하는 기술이 활발히 연구되고 있다. 그 중 비침습적 방식인 EEG는 외과적 처치 없이 사용할 수 있다는 장점 덕분에 다양한 BCI 연구에 활용되고 있으며, 특히 외부 자극이 필요 없는 직관적인 패러다임인 운동 상상(motor imagery, MI)가 주목받고 있다. MI는 실제 움직임 없이 뇌 속에서 특정 움직임을 상상하는 과제로, 특정 운동 동작을 상상할 경우 관련된 운동 피질이 활성화되며, 이 신경 활성 패턴을 기반으로 BCI가 사용자의 의도를 판별하는 방법으로 많이 활용된다.

기존 MI-BCI 연구에서는 공통 공간 패턴(Common Spatial Pattern, CSP) 필터링 기반의 전통적인 기계학습 기법이 널리 활용되어 왔으나, 최근 GPU 등 컴퓨팅 자원의 발전과 함께 CNN 기반 딥러닝 접근이 도입되면서 보다 높은 분류 정확도가 보고되고 있다. 하지만 딥러닝 모델은 일반적으로 피험자별로 많은 교정(calibration) 데이터가 필요하고 신호 특성의 개인차가 커 실사용에 어려움이 있다. 이를 해결하기 위해 최근에는 다른 사용자의 데이터를 활용하는 사용자 전이 (subject-transfer) 기반 전략들이 제안되었고, 이러한 전략들은 다른 사람의 데이터로 사전학습한 모델을 목표 피험자 데이터로 미세조정(fine-tuning)하는 접근을 통하여 MI BCI 성능 향상이 가능함을 보여주고 있다.

그러나 이러한 연구[1,2]은 대부분 건강한 피험자를 대상으로 수행되었으며, MI 기반 BCI의 임상적 적용 가능성이 높은 척수손상 (spinal cord injury, SCI) 장애인에 대한 연구는 아직 미흡한 부분이 많다. SCI 장애인은 손상 이후 운동 피질의 재조직화로 인해 개인 간 뇌파 패턴의 차이가 커지므로, 전통적인 방식이나 기존 사용자 전이 방법의 적용에는 한계가 존재한다. 이에 본 연구에서는 SCI 장애인의 여러 세션에 걸친 데이터와 다른 SCI 장애인들의 데이터들을 활용한 계층적 사용자 학습 전략을 제안하고, 이를 통한 SCI 장애인의 직관적인 보행 관련 MI 분류 정확도 향상의 가능성을 탐색하였다.

2.연구 방법

본 연구에는 5명의 SCI 장애인(남성 4명, 평균 51.4±6.5세)가 4회의 세션에 걸쳐 참여하였다. SCI 장애인은 미국척수손상학회 (ASIA) 기준 A등급 3명, B등급 2명으로 구성되었으며, 모든 참여자는 연구 참여 전 KIST 생명윤리위원회(KIST IRB 2021-046)의 승인을 받은 동의서에 서명하였다.

EEG 측정을 위해, Brain Products의 ActiCHamp 장비(Brain Products GmbH, Gilching, Germany)와 국제 10-20 시스템을 기반으로 배치된 32개의 EEG 전극을 사용하였으며, 500 Hz 샘플링으로 데이터를 수집하였다. 전극의 기준점은 FCz, 접지점은 AFz에 위치하였다. MI 데이터 수집을 위해, 시각적인 자극을 기반으로 하는 MI 수행 프로토콜이 수행되었다. 참가자는 참가자는 화면에 제시되는 화살표(걷기), 사각형(휴식) 중 하나를 따라 5초간 MI 과제를 수행하였다. 이 MI 과제는 총 60회로 구성되었으며 무작위 순서로 제시되었다.

측정된 EEG는 전처리 과정을 위해, 0.1–40 Hz의 대역통과 FIR 필터를 적용하였다. 이후 각 트라이얼의 채널×시간 축 전체에 대해 min–max 정규화를 수행하였으며, 학습 데이터의 다양성을 높이기 위해 시간-윈도우 증강(time-window augmentation)[3]을 수행하였다. 시간-윈도우 증강은 MI 유효 구간에서 4초 크기의 윈도우를 0.5s 간격으로 이동시켜, 동일 길이의 윈도우를 3개씩 추출하여 학습 샘플 수를 3배로 확장하였다.

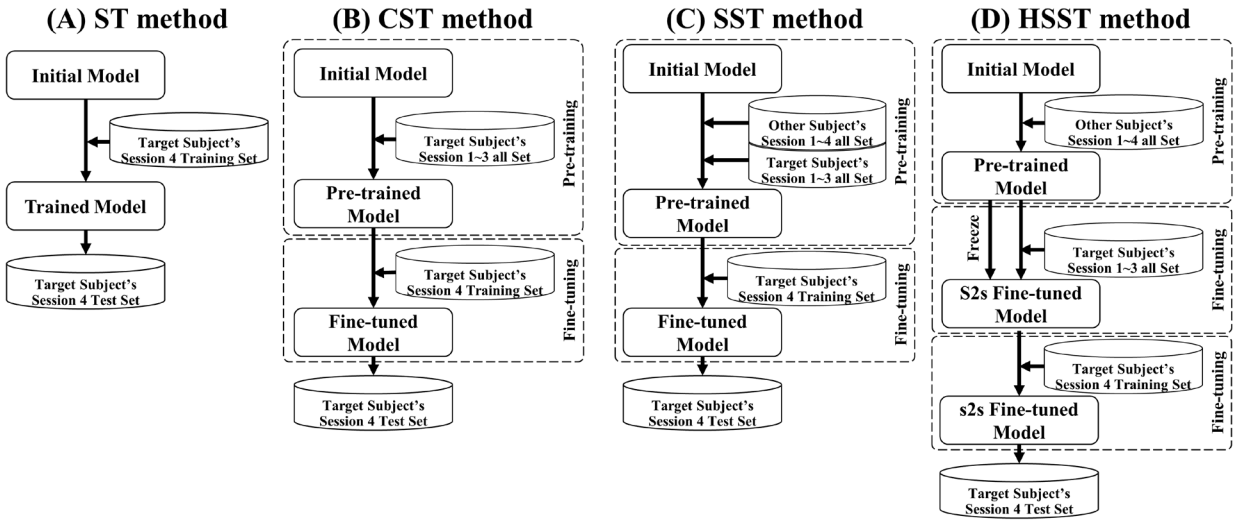


그림 1. 여러 세션을 가진 SCI 장애인 데이터셋을 위한 학습 방법: (A) Self-Training(ST), (B) Cross-Session Transfer(CST), (C) Subject and Session Transfer(SST), (D) Hierarchical Subject-Session Transfer(HSST)

MI BCI를 위한 딥러닝 분류기로 이전 연구에서 제안된 Multi-Model CNN(MM-CNN)을 활용하였다. MM-CNN 모델은 모든 피험자가 동일한 하이퍼파라미터(learning rate=0.001, epochs=100, batch size=32, dropout=0.5 등)로 학습되었다.

제안된 사용자-세션 전이 학습 접근법인 Hierarchical Subject-Session Transfer(HSST)는 먼저 다른 SCI 장애인(Subject) 그룹의 데이터들을 활용하여 사전 학습(pre-training)을 수행한 후, 모델의 특징 추출 계층은 고정(freeze)하고 상위 계층에 대해서만 대상자의 나머지 다른 세션(session)의 데이터를 통해 미세 조정(fine-tuning) 학습을 진행하였다. 그런 다음, 대상 SCI 장애인의 평가 세션의 Training Set을 이용해 개인화된 미세 조정(personalized fine-tuning) 학습을 수행하는 계층적인 적응 방식으로 구성되었다. 비교를 위한 기존 사용자 전이 학습 접근법 중 하나인 Cross-Session Transfer(CST)는 대상 SCI 장애인의 다른 세션 데이터를 기반으로 사전 학습을 수행한 뒤, 대상 SCI 장애인의 평가 세션의 Training Set를 활용하여 미세 조정 학습을 수행하였다. Subject and Session Transfer(SST)는 사전 학습을 수행할 때, 다른 SCI 장애인 그룹의 데이터와 대상 SCI 장애인의 다른 세션의 데이터 전체를 사용해서 학습을 수행하고, 대상 SCI 장애인의 평가 세션의 Training Set를 활용하여 미세 조정 학습을 수행하였다. 마지막으로, 기존의 개인별 학습 방식인 Self-Training(ST)은 대상 피험자의 평가 세션의 Training Set만으로 분류기를 학습하였다(그림 1).

성능 평가는 10-fold 교차검증을 기반으로 수행되었으며, SCI 장애인 그룹의 학습 방법 간 분류 정확도는 Friedman 검정(비모수 일원 반복측정)과 Wilcoxon 부호-순위 검정 사후분석을 통해 비교하였다. 유의수준은 0.05으로, 다중 비교 보정을 위해 Holm–Bonferroni 방법을 적용하였다.

3. 연구 결과

5명의 SCI 장애인들의 MI 분류 정확도 비교 결과, HSST 방법(89.8±4.6%)는 다른 방법들(ST: 86.8±5.7%, CST: 87.0±7.2%, SST: 87.8±7.5%)에 비하여 통계적으로 유의하게 높은 분류 정확도를 나타내지는 못하였으나, 평균 정확도에서 다른 모든 방법보다 평균적으로 가장 높은 분류 결과를 보였다(그림 2). 특히 HSST 방법은 S3를 제외한 나머지 모든 SCI 장애인에 대해 가장 높은 정확도를 보였다.

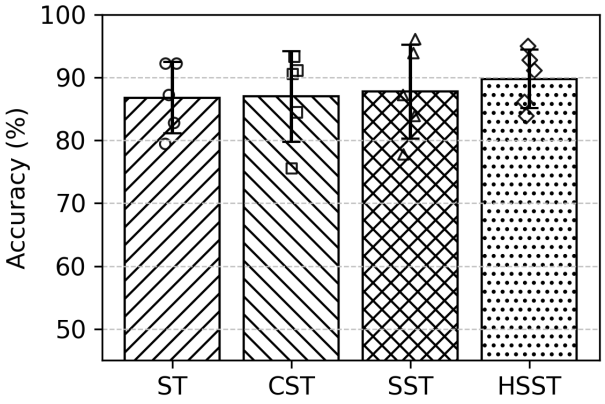


그림 2. 각 학습 방법에 따른 분류 결과 그래프.

본 연구는 SCI 장애인들의 여러 세션 데이터를 활용한 사용자와 세션 간의 계층적 전이(HSST) 전략이 SCI 대상자들의 하지 기반 MI-BCI의 분류 성능을 향상시킬 수 있는 가능성을 확인하였다. 이러한 결과는 비장애인 그룹에서 사용되는 서로 다른 피험자 간의 데이터를 활용한 전이 전략이 SCI 대상자에도 적용되어 보다 효과적인 BCI 데이터 사용 가능성을 높일 수 있는 기반이 될 수 있음을 시사한다.

4. Acknowledgements

이 연구는 Korea Institute of Science and Technology (KIST) Institutional Program 과제의 지원(No. 2E33771)과 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원(RS-2024-00417959)을 받아 수행되었습니다.

5.참고 문헌

[1] W. Li et al. "The human–machine interface design based on sEMG and motor imagery EEG for lower limb exoskeleton assistance system." *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 73, pp. 1–14, 2024.

[2] M. Ortiz et al. "An EEG database for the cognitive assessment of motor imagery during walking with a lower-limb exoskeleton." *Scientific Data*, vol. 10, no. 1, p. 343, 2023.

[3] Lashgari, E., Liang, D., & Maoz, U. “Data augmentation for deep-learning-based electroencephalography.” *Journal of Neuroscience Methods*, vol 346, p. 108885, 2020.

Poster-013

감마대역동기화자극을 통한 니코틴중독개체의 보상회로 신경생리학적 균형회복

박성아[1], 추민혜[1], 허채원[2], 정수연[1], 박성민[1,2*]

포항공과대학교 IT융합공학과[1]

포항공과대학교 의과학전공[2]

Gamma-Band Synchronization Stimulus Restores Neurophysiological Balance in the Reward Circuit of Nicotine-dependent Model.

Sungah Pak[1], Minhye Choo[1], Chaewon Heo[2], Sooyeon Jung[1], Sung-Min Park[1,2*]

Department of Convergence IT Engineering, Pohang university of Science and Technology[1]

Medical Science and Engineering, Graduate School of Convergence Science and Technology[2]

*sungminpark@postech.ac.kr

Abstract

The brain's reward circuit is a neural network in which dopaminergic signals originating from the ventral tegmental area (VTA) project to the nucleus accumbens (NAc) and the prelimbic cortex (PrL) of the prefrontal cortex, playing a crucial role in motivation and behavioral regulation. However, repeated exposure to addictive substances disrupts inhibitory control, resulting in a collapse of the electrophysiological balance across the reward network. To restore this dysfunctional reward circuit, the present study applied a synchronization stimulus using gamma-band (30–100 Hz) light and acoustic stimulation. A chronic nicotine addiction model was established to investigate the neurophysiological recovery induced by gamma-band stimulation through electrophysiological and histological analyses. The results demonstrated that, unlike nicotine-treated subjects without stimulation, receiving gamma-band light and sound stimulation exhibited electrophysiological and histological responses like those of the normal control group, showing restoration of normal reward-related activity. These findings suggest that gamma-band light and acoustic stimulation can restore the resonant rhythm of the reward circuit and serve as a potential noninvasive neuromodulation approach to recover the neurophysiological balance disrupted by addictive substance use.

1. 연구 배경

뇌의 보상회로는 중뇌 VTA(Ventral Tegmental Area)를 시작으로 도파민신호가 발생하여 NAc(Nucleus Accumbens), PrI(Prelimbic Cortex)로 projection되는 신경들의 네트워크로 동기부여, 등의 조절에 핵심적 역할을 한다. VTA 도파민뉴런의 활성화는 NAc의 GABA성 D1-MSN을 활성화하고 GABA성 D2-MSN이 억제하여 보상관련 행동강화 및 억제를 중계하는 역할을 한다. PrI에서는 VTA 도파민뉴런 활성화로 인해 글루타메이트성 피라미달뉴런 흥분이 강화되고 GABA성 인터뉴런 활성도 강화된다. 이 강화는 다시 피라미달뉴런을 억제하므로써 흥분과 억제의 균형을 이루는 E-I 피드백 루프를 형성하고 감마대역의 리듬을 형성한다. GABA성 인터뉴런은 다시 도파민활성을 억제하는 VTA의 GABA성 뉴런을 흥분시켜 VTA의 도파민 과활성화를 억제하며 전체 보상회로의 안정성을 유지한다. 즉, PrI은 상위조절(top-down regulator)역할을 하며 VTA의 활동을 억제 및 조절하여 과도한 보상반응을 제어하고 균형을 유지하는 역할을 한다. 그러나 중독성약물에 노출되게 되면 VTA의 GABA성 억제회로가 붕괴되어 과도한 도파민 방출이 지속되며 PrI로의 과흥분신호가 누적되고 상위억제조절 기능이 손상되어 전체 보상회로의 전기생리학적 기능붕괴로 이어진다.

본 연구에서는 이러한 보상회로의 기능적 붕괴를 교정하기 위해 감마 밴드(30–100Hz) 대역의 광음자극을 활용한 동기화 자극(synchronization stimulus)을 적용하였다. PrI에서의 감마리듬은 억제성 인터뉴런이 과활성화된 뉴런을 안정화시킬 때 형성되며, ss본 연구에서 사용하는 감마대역의 광음자극이 이런 반응을 촉진시킬 것으로 예상된다.

따라서 이런 감마밴드 대역의 광음자극은 중독물질의 반복적 노출로 인한 보상회로의 붕괴로 형성되지 않는 감마리듬을 외부적 자극을 통해 복원함으로써 보상회로의 공진을 회복시켜 흥분-억제 균형을 재정립하고 도파민 신호의 정상적 조절 및 회로 수준의 신경생리학적 회복을 유도할 수 있을 것이라 기대된다.

이를 규명하기 위해 본 연구에서는 니코틴만성중독 개체에 대하여 해당 감마대역의 광음자극의 보상회로의 신경학적 복원가능성을 GABA성 인터뉴런의 감마리듬과 PrL과 VTA 두 영역에서의 전기생리 신호와 조직학적 분석을 통해 규명하고자 한다.

2.연구 방법

생후 8주령의 수컷 Sprague-Dawley 랫드를 대상으로 실험을 수행하였다.

광음자극의 뇌의 보상회로의 복원가능성을 확인하기 위해 만성 니코틴모델을 구축한 뒤 광음자극을 가해준 그룹과 광음자극을 가해주지 않은 그룹으로 나누어 정상개체와의 비교분석을 진행하였다. 만성 니코틴 모델링을 위한 니코틴 주입은 ALZET micro-osmotic pump model 1002를 피하에 삽입하여 일정시간동안 일정량이 주입되도록 하였으며 하루당 1mg/1kg씩 2주동안 주입되도록 하였다.

감마대역의 광음자극은 광음차단 부스 내부의 LED조명기기와 스피커를 통해 전달되었다. 하루에 오전과 오후, 두번 1시간동안 총 2주동안 진행되었다.

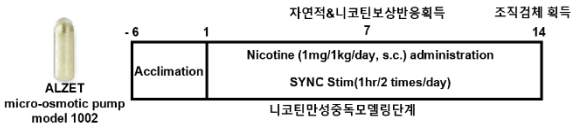


Figure1 (좌) 니코틴모델링에 사용된 니코틴 펌프(ALZET micro-osmotic pump model 1002) (우) 실험 프로토콜

전기생리학적 검증을 위해서 직경 200㎛의 직접 제작한 은전극(polyimide절연)을 이용하여 신호를 획득하였다. 24414Hz의 Sampling rate으로 LFP신호를 기록하였으며, 주파수 대역별 ERSP(event-related spectral perturbation)를 기반으로 분석하였다. 조직학적 방식을 통해 검증하기 위해 조직 절편은 10% Neutral Buffered Formalin로 고정한 후 3% agarose에 임베딩하여 30μm 두께로 제작하였다. 절편은 0.3% Triton X-100 처리 후 5% normal donkey serum으로 비특이적 결합을 차단하였다. 1차 항체 [anti-

tyrosin Hydroxylase Antibody, 1:500, CHEMICON®] 와 [anti-GAD67 Antibody, 1:200, CHEMICON®]를 4°C에서 overnight 반응시켰다. 다음날 각각 Alexa Fluor 488-conjugated 2차 항체(1:300), Alexa Fluor 594-conjugated 2차 항체(1:300를 암조건에서 1시간 동안 반응시킨 뒤, DAPI로 핵을 염색하였다. 형광 이미지는 confocal microscope ,Zeiss)를 사용하여 획득하였다.

3. 연구 결과

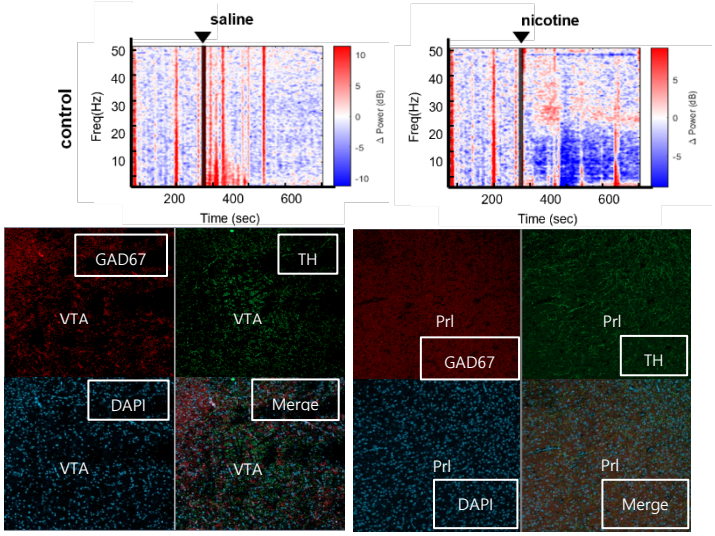


Figure2 정상개체의 보상반응과 VTA,Prl 면역조직형광결과

정상개체의 경우 면역조직 형광결과 도파민과 전반적 GABA톤이 균형적으로 발현된 것을 확인할 수 있다. 보상반응에 대해서는 급성으로 니코틴이 주입되었을 때 LFP상에서 감마대역 활성과 델타대역의 억제를 확인할 수 있었다. 이는 니코틴이 주입되면서 피라미달 뉴런의 발화에 의해 GABA성 인터뉴런의 활성되고 다시 피라미달뉴런을 억제하면서 감마대역의 활성화를 유도한 정상보상회로에서 볼 수 있는 결과이다.

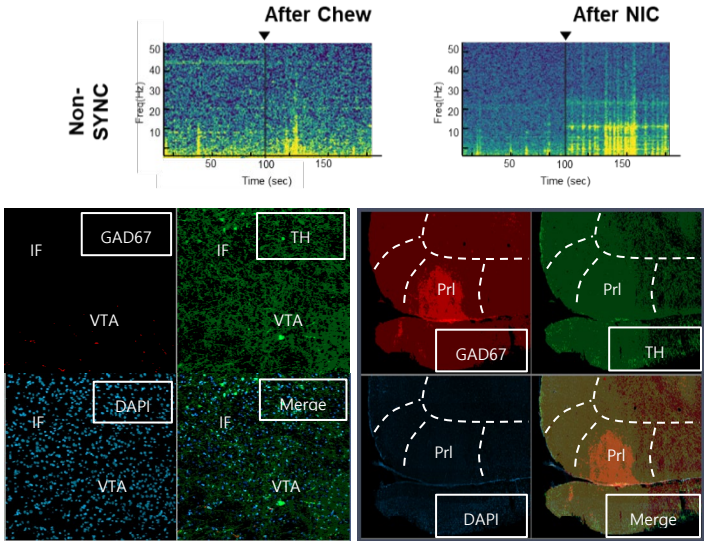


Figure3 광음자극을 주지 않은 개체의 보상반응과 VTA,Prl 면역조직형광결과

광음자극을 가하지 않은 니코틴 만성 모델 개체에서는 VTA에서, figure2) 정상개체에 비해 figure3) 광음자극을 주지 않은 개체의 경우 GABA톤이 현저히 감소하여 도파민 활성의 억제기능의 저하상태를 나타냈다. 이로 인해 도파민신호가 과활성화되었고, Prl에서는 반대로 억제기능의 과활성이 유도된 GABA톤의 상승을 나타냈다. 이런 도파민성 억제작용이 보상회로의 붕괴에 따라 VTA로 feedback되지 못하면서 VTA에서 여전히 억제성뉴런이 활성화되지 않는 것을 나타내고 있다. 이런 Prl에서 보상회로의 붕괴는 Prl에서 측정한 LFP상에서도 확인할 수 있는데, 피라미달 뉴런의 발화에 의해 GABA성 인터뉴런의 활성되고 다시 피라미달뉴런을 억제하면서 생성되는 감마대역의 활성화가 나타나지 않으며 델타대역의 강화가 발생한 것을 확인할 수 있었다.

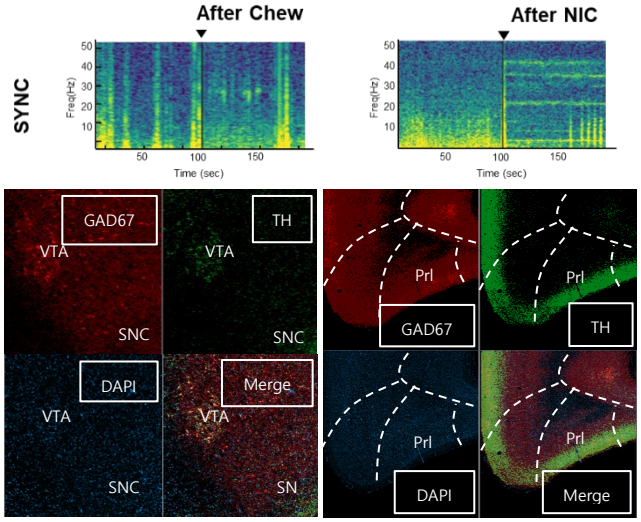


Figure4 광음자극을 준 개체의 보상반응과 VTA,Prl 면역조직형광결과

광음자극을 가한 개체는 기존 니코틴 만성 모델 개체 VTA에서 확인할 수 있었던 도파민 활성 억제 저하 및 도파민 과활성없이 정상개체와 유사하게 균형적으로 유지되고 있는 것을 확인했다. Prl에서도 과도한 도파민활성 억제작용이 유도되지 않고 정상개체와 유사한 발현정도를 나타내는 것을 확인할 수 있었다. LFP상에서도 정상개체와 유사하게 감마대역의 활성화와 델타대역의 억제가 나타났으며 이는 보상회로 내 억제성 흥분성 신호의 균형이 회복되고 정상적인 신경동기화 반응이 재형성되었음을 나타낸다. 결론적으로 감마대역의 광음자극이 신경생리학적 회로 균형을 회복시키고 보상회로의 정상적기능복원을 확인할 수 있었다.

4.결론

본 연구에서는 감마 밴드의 동기화 자극이 중독에 의해 붕괴된 보상회로의 리듬을 회복시킬 수 있음을 전기생리학적 및 조직학적으로 입증하였다. 이는 중독성 질환의 치료적 접근으로 확장될 수 있는 가능성을 제시한다. 향후에는 행동 분석 및 장기 모니터링을 병행함으로써, 보상회로 회복의 기능적 측면을 정량적으로 검증할 계획이다.

5. Animal

모든 수술 및 실험 프로토콜은 포항공과대학교 동물실험윤리위원회 (POSTECH-IACUC; 승인 번호: POSTECH-2025-0034의 승인을 받았으며, 또한 미국 보건부(NIH)의 실험동물 사용 지침을 준수하였다. 우리는 성인 수컷 SD-Rat(나이: 8-10주; 체중: 270-320 g; Orient Bio, 대한민국)를 사용하였다. 실험이 종료되면 CO2 가스를 사용하여 안락사하였다

6. Acknowledgement

본 연구는 한국연구재단을 통해 미래창조과학부의 미래유망융합기술 파이오니어사업 (2022M3C1A3081294)과, 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단을 통한 우수연구-중견연구 사업(RS-2025-00517742)으로부터 지원받아 수행되었습니다

Poster-014

커넥톰 기반 인공신경망 모델을 통한 초파리 후각 회로 구조의 기능적 이점 규명

구경모[1], 인현서[1], 김성용[2], 김안모[1,2*]

한양대 바이오메디컬공학과[1]

한양대 융합전자공학과[2]

A connectome-based artificial neural network model elucidates the functional advantages of *Drosophila* olfactory circuit architecture

Kyungmo Koo[1], Hyunseo In[1], Sungyong Kim[2], Anmo J Kim[1,2*]

Department of Biomedical Engineering, Hanyang University, Korea

Department of Electronic Engineering

*anmokim@hanyang.ac.kr

Abstract

The *Drosophila* connectome provides a blueprint for understanding the computational principles of its olfactory system. We built a connectome-based neural network and trained it on odor classification using biological (DoOR) and synthetic data to assess the functional advantages of its innate architecture. Compared to a randomly initialized model, the connectome-based network exhibited superior accuracy, faster learning of naturalistic stimuli, and greater data efficiency, acting as an "innate knowledge" framework. The model also replicated key biological principles, demonstrating the critical role of specific "labeled-line" connections (ORN-PN) versus the robustness of "distributed" connections (PN-KC). Our work validates that the evolved connectome provides quantifiable computational advantages and that such data-driven models can successfully simulate complex, stage-specific neural coding strategies

1. 연구 배경

초파리(*Drosophila melanogaster*)의 후각 시스템은 먹이 탐색과 포식자 회피 같은 생존 행동을 유도할 뿐 아니라, 번식·사회적 상호 작용 등 복잡한 행동을 매개하는 핵심 역할을 담당한다[1]. 냄새분자를 탐지·인식하고 경험에 따라 기억을 형성해 특정 행동 반응 이어지는 후각 정보 처리 과정과 그 기저 신경회로의 구조·기능적 특성은 신경생리학적 분석과 이론적 모델링 등 다양한 방법으로 규명되어 왔다[2-5].

초파리의 후각 정보 처리 과정은 주로 Olfactory Receptor Neuron(ORN), Antennal Lobe Projection Neuron(ALPN), Kenyon Cell(KC), Mushroom Body Output Neuron(MBON)의 네 가지 주요 신경 타입으로 구성된다(그림1, [3]). 첫 번째 계층인 ORN은 특정 후각 수용체를 발현하여 냄새 분자를 탐지하고, 이 정보는 사구체(glomeruli) 구조 내에서 ALPN으로 전달된다[2,3]. 두 번째 계층인 ALPN은 더듬이엽(antennal lobe)의 냄새 정보를 통합하여 상위 뇌 영역인 버섯체(mushroom body)로 전달하는 역할을 한다[4]. 세 번째 계층인 KC는 버섯체의 핵심 뉴런으로서, ALPN으로부터의 입력을 희소 부호화(sparse coding)로 확장하고 변환하여 냄새 식별을 위한 기반을 제공한다[4, 5]. 마지막으로, MBON은 KC의 희소한 표상을 읽고, 학습을 통해 KC-MBON 시냅스 가소성(synaptic plasticity)을 조절하여 냄새에 대한 행동반응을 분류하고 조절하는 최종적인 출력 뉴런으로 기능한다[4].

기존의 연구들은 ORN-ALPN-KC-MBON으로 이어지는 주요 후각 정보 처리 경로의 구조와 핵심 기능을 성공적으로 규명하여 초파리 후각 시스템 이해의 기반을 확립하였다. 하지만 최근 전자현미경 기술을 기반으로 하여, 시냅스 수준의 정밀한 해상도로 뇌를 구성하는 모든 뉴런 간의 화학적 연결정보를 포함한 초파리의 전뇌 커넥톰(whole-brain connectome)은[6], 후각 시스템을 구성하는 새로운 뉴런들과 신경망 내의 복잡한 상호 연결성이 새롭게 드러내어, 초파리 후각 시스템 전체의 통합적 작동 원리를 이해하기 위해서는 커넥톰을 활용한 연구가 필수적임을 시사한다.

이러한 배경에서, 본 연구는 초파리 전뇌 커넥톰 정보를 활용하여 후각 신경회로의 구조를 모방한 인공신경망 모델을 구축하고, 초파리 후각 시스템의 내재적 특성과 정보처리 기능을 심층적으로 분석하였다. 구체적으로, 인공신경망 모델을 통해 후각 시스템을 구성하는 뉴런 간의 정량적인 연결 강도(synaptic weight)와 연결 구조(connectivity)가 갖는 기능적 의미를 규명하는 데 중점을 두었다. 특히 커넥톰 기반으로 구성된 인공신경망이 실제 생물학적 냄새 반응 데이터에 대해 특정 편향성을 갖는지 연구하였다.

2.연구 방법

본 연구에 사용된 인공신경망 모델은 초파리 후각 시스템의 주요 경로를 모방하여 ORN(n=2,278), ALPN(n=615), KC(n=4,907), MBON(n=250)의 네 가지 계층으로 구성된다. 이 중 MBON을 제외한 뉴런의 수와 각 계층 간 연결 구조는 초파리 전뇌 커넥톰 데이터를 기반으로 실제 뉴런 간의 시냅스 연결을 재현했으며, 연결 강도는 각 연결의 시냅스 수에 비례하도록 설정하였다(그림 1).

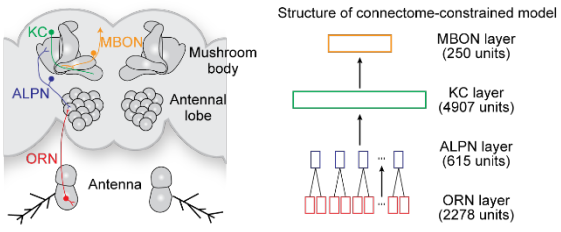


그림 1. 초파리 후각 시스템 및 인공신경망 모델 구조

모델이 수행할 과제는 250종의 서로 다른 냄새를 식별하는 냄새 분류(odor classification) 작업으로 설정하였다. 이 과제를 위해 두 종류의 입력 데이터셋을 사용하였다. 첫째는 실제 초파리의 후각 수용체가 다양한 냄새 분자(odorant)에 보이는 반응 강도를 종합한 'Database of Odorant Responses (DoOR)' 데이터셋으로, 실제 환경의 생물학적 자극을 구현하였다[6]. 둘째는 입력 자극에 내재된 통계적 편향을 제거하기 위한 인공 냄새 자극(artificial odor stimuli)이다. 각 인공 냄새는 다차원 벡터 공간에서 각 차원의 값이 독립적인 균일 분포(uniform distribution)로부터 무작위로 추출되어, 생물학적 편향이 배제된 자극 집합을 구성하였다.

본 연구는 상기 두 가지 유형의 입력 데이터를 모델에 적용하고, 나아가 커넥톰에 기반한 연결 강도와 연결 패턴을 체계적으로 조작하는 시뮬레이션을 수행함으로써 1) 초파리 후각 신경회로의 고유한 연결 구조에 내재된 기능적 의미와, 2) 생물학적 냄새 반응 데이터에 내재된 통계적 편향이 정보 처리 과정에 미치는 영향을 비교 분석하여 궁극적으로 초파리 후각 시스템의 통합적인 정보 처리 원리와 기능적 특성을 규명하고자 한다.

3. 연구 결과

초파리의 실제 냄새 반응을 모사한 DoOR 데이터셋을 입력으로 사용하였을 때, 커넥톰 기반 초기값 모델이 무작위 초기값 모델보다 더 높은 정확도를 보였다. 이러한 결과는 초파리 신경망(connectome)의 고유한 연결 강도가 실제 냄새 자극을 해석하는 데 보다 효과적으로 작용함을 시사한다(그림2).

또한, 커넥톰 기반 모델을 사용하여 DoOR 데이터셋과 무작위 데이터셋에 대한 학습 효율을 비교 분석하였다. DoOR 데이터셋을 입력했을 때의 학습 속도가 무작위 데이터셋에 비해 유의미하게 높았으나, 최종적으로 도달한 정확도는 무작위 데이터셋의 경우가 더 높았다. 학습 속도의 이러한 차이는 생물학적 관점에서 중요한 의미를 가진다. 생존을 위해 초파리는 주변 환경의 다양한 냄새 정보를 실시간으로, 그리고 신속하게 처리하여 먹이를 찾거나 위험을 회피해야 한다. 따라서, 이러한 학습 속도의 차이는 커넥톰의 구조가 외부의 특정 자극(실제 냄새)을 빠르고 효율적으로 학습하도록 진화적으로 설계되었다는 근거를 제공한다(그림2).

이어서, DoOR 데이터셋을 기반으로 하여, 학습에 사용되는 데이터 수를 의도적으로 제한한 few-shot 학습 환경을 조성하여 모델의 데이터 효율성을 평가하였다(그림2). 그 결과, 모든 조건에서 커넥톰 기반 모델이 무작위 연결강도 모델의 성능을 일관되게 상회하는 것을 확인하였다(그림2). 이러한 결과는 초파리의 커넥톰이 최소한의 데이터만으로도 새로운 냄새 자극의 핵심 특징을 빠르게 포착하고 효과적으로 일반화(generalization)하는 '선험적 지식(innate knowledge)'을 갖춘 구조임을 시사한다.

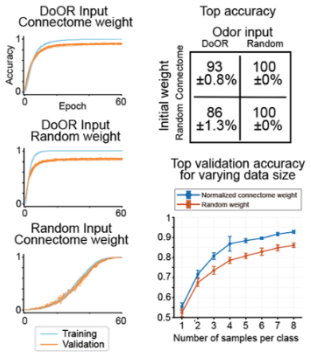


그림 2. 모델 가중치 초기값 및 입력 데이터에 따른 학습 비교

마지막으로, 각 신경망 계층의 연결 특이성(connection specificity)이 가지는 기능적 중요성을 확인하고자, 입출력 차수(degree)는 보존한 채로 특정 레이어의 연결 구조만 무작위화하는 실험을 수행하였다(그림3). 그 결과, ORN-PN 연결을 무작위화 했을 때 모델의 정확도가 급격하게 저하된 반면에 PN-KC 연결을 무작위화 했을 때는 정확도가 소폭 감소하는 데 그쳤다. 이는, 본 연구에서 사용된 모델이 초파리 후각 시스템이 초기 단계에서는 고도로 구조화된 '레이블 라인(labeled-line)' 방식을 사용하고, 이후 단계에서는 '분산 부호(distributed coding)' 방식을 조합하여 활용하는 정교한 정보 처리 전략을 모사함을 보여준다.

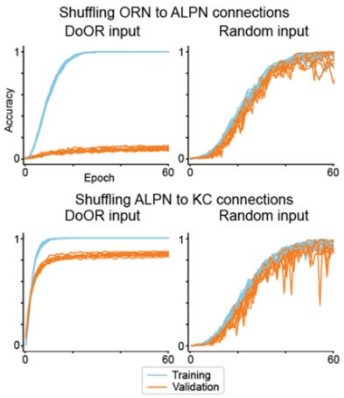


그림 3. 차수 유지 연결 무작위화 모델 학습 성능 비교

4. Acknowledgements

이 연구는 National Research Foundation of Korea (NRF) 과제와 Samsung Science and Technology Foundation의 지원을 받아 수행하였음. (NRF-2011-0031866 and SSTF-BA2401-06)

5.참고 문헌

[1] Benton, R. (2022). Drosophila olfaction: past, present and future. *Proceedings of the Royal Society B*, *289*(1989), 20222054.

[2] Vosshall, L. B., Amrein, H., Morozov, P. S., Rzhetsky, A., & Axel, R. (1999). A spatial map of olfactory receptor expression in the Drosophila antenna. *Cell*, *96*(5), 725-736.

[3] Wilson, R. I. (2013). Early olfactory processing in Drosophila: mechanisms and principles. *Annual review of neuroscience*, *36*(1), 217-241.

[4] Turner, G. C., Bazhenov, M., & Laurent, G. (2008). Olfactory representations by Drosophila mushroom body neurons. *Journal of neurophysiology*, *99*(2), 734-746.

[5] Litwin-Kumar, A., Harris, K. D., Axel, R., Sompolinsky, H., & Abbott, L. F. (2017). Optimal degrees of synaptic connectivity. *Neuron*, *93*(5), 1153-1164.

[6] Dorkenwald, S., Matsliah, A., Sterling, A. R., Schlegel, P., Yu, S. C., McKellar, C. E., ... & Murthy, M. (2024). Neuronal wiring diagram of an adult brain. *Nature*, *634*(8032), 124-138.

[7] Münch, D., & Galizia, C. G. (2016). DoOR 2.0-comprehensive mapping of Drosophila melanogaster odorant responses. *Scientific reports*, *6*(1), 21841.

Poster-015

뇌자도 기반 고주파 진동촉각 및 청각 자극에 대한 감각 특이적 반응 연구

최수인[1], 김민영[1*]

한국표준과학연구원 의료융합측정그룹 [1]

Modality-specific cortical dynamics induced by high-frequency vibrotactile and auditory stimulation based on magnetoencephalography recordings

Soo-In Choi[1], Min-Young Kim[1*]

Medical Metrology Group, Division of Biomedical Metrology, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon, Korea

[*]mykim@kriss.re.kr

Abstract

In this study, we investigated cortical responses to vibrotactile and auditory stimuli using magnetoencephalography (MEG) to compare modality-specific processing of high-frequency inputs. MEG signals were recorded during random presentations of 150 Hz vibrotactile and auditory stimuli, which are known to elicit sensory components such as M50 and M100. Event-related field (ERF) analysis revealed distinct M50 and M100 responses in both modalities with different cortical distributions. Time-frequency analysis further showed low-frequency event-related desynchronization for vibrotactile stimulation and event-related synchronization for auditory stimulation. These results demonstrate modality-dependent neural encoding of high frequency oscillating inputs in both auditory and tactile senses during early sensory processing stages.

1. 연구 배경

청각과 진동촉각 자극은 모두 주기적 물리 진동을 처리하는 감각 체계로, 서로 다른 감각 수용기와 신경 경로를 통해 대뇌피질에 도달한다. 동일한 주파수의 자극이라도 감각 경로에 따라 뇌에서 처리되는 방식과 활성화되는 피질 영역이 다르며, 이를 비교 분석하는 것은 감각 특이적(sensory-specific) 및 감각 통합(sensory integration) 기전을 규명하는데 중요 단서를 제공할 수 있다. 실제 여러 선행 연구에서 진동촉각 자극이 체성감각피질 뿐 아니라 청각 피질에서도 활성화를 유발하거나, 반대로 청각 자극이 체성감각영역에서 교차활성화(cross-modal activation)를 유도한다는 결과가 보고되었다[1-2]. 이러한 연구들은 감각 각 공통 신경회로의 존재 가능성을 시사하였으나, 대부분 단일 모달리티에서의 반응 특성 기술 혹은 현상 관찰에 머물러있다. 특히 동일한 주파수 특성을 갖는 고주파 진동 조건에서 두 감각 모달리티의 피질 반응을 정량적으로 비교한 연구는 매우 제한적인 실정이다.

청각과 진동촉각 자극에 대한 뇌반응을 직접 비교함으로써 감각 간 처리 특성의 차이를 규명하고, 감각통합의 생리학적 근거를 마련할 수 있다. 이에 본 연구에서는 동일한 진동수(150 Hz)의 청각 및 진동촉각 자극을 제시하고, 자극에 대한 반응을 초전도양자간섭소자(superconducting quantum interference device: SQUID) 기반 뇌자도(magnetoencephalography: MEG) 시스템을 사용하여 측정하였다. 측정된 MEG 신호를 통해 두 모달리티 간 사건관련자기장(event-related field: ERF)과 시간-주파수 반응을 비교하였으며, 자극 이후 발생하는 M50 및 M100 반응을 포함한 시간적 특성을 분석하였다. 이를 통해 동일한 주파수의 진동 자극에 대한 청각 및 진동촉각 경로의 공통 및 차별적 신경처리 메커니즘을 파악하고자 하였다.

2. 연구 방법

본 연구에는 만 20-29세 사이의 오른손잡이 및 정상시력 보유자이며 과거 신경계 및 정신질환이 없는 피험자 30명을 모집하였다. 실험의 모든 절차는 한국표준과학연구원 기관생명윤리위원회(IRB) 승인을 받아 수행되었으며 관련 생명윤리 지침을 준수하였다 (KRISS-IRB-2016-07). 피험자들을 대상으로 진동촉각 및 청각 자극을 제시하였으며, 1차 권선형 미분계 기반 152채널 헬멧형 SQUID-MEG 장비를 사용하여 뇌자도 측정을 진행하였다[3]. 피험자는 측정 전, MEG 좌표계에서 피험자 머리 위치 추적을 위해 제작된 4개의 코일을 두피에 고정시킨 후, 디지타이저를 사용하여 머리좌표계의 기준점으로 사용되는 비근점(nasion)과 좌, 우, 이개전방점(preauricular points), 4개의 코일 및 두피 표면점들의 좌표를 측정하였다. 피험자는 자기차폐실에 입실하여 MEG 헬멧과 머리가 최대한 가까이 위치할 수 있도록 앉은 후, 청각 및 진동촉각 자극 실험을 수행하였다.

실험은 약 10분간 진행되었으며, 150 Hz의 순음 청각자극과 진동촉각자극이 각각 150 번 씩 200 ms 동안 제시되었다. 두 자극은 무작위 순서로 2초의 자극간간격(inter-stimulus interval: ISI)으로 제시되었다. 청각 자극은 비자성 튜브를

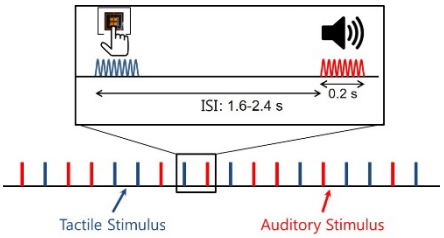


그림 1. 진동촉각-청각 자극 실험 패러다임

통해 피험자의 오른쪽 귀에 제공되었으며, 진동촉각 자극은 폴리머 기반 액추에이터를 사용한 촉각패드를 통해 오른손 검지에 제시되었다[4].

MEG는 1024 Hz의 샘플링율로 측정되었으며, 측정 신호는 잡음 제거를 위해 독립성분분석(independent component analysis: ICA)와 1-50 Hz 대역 통과 필터링을 수행하였다. 전처리된 데이터는 그룹 분석을 위해 평균센서공간상으로

재정렬(realign)하였다. 자극 시점 기준 -0.2–0 s 구간의 신호를 사용하여 기준선 보정(baseline correction) 수행 후, ERF 변화를 관찰하였다. 또한 각 모달리티 별 M50, M100 반응을 확인하고자 각 반응 구간(피크 기준 ± 10 ms)의 평균 topomap을 계산하였다. 주파수 분석은 planar transform을 적용한 후, 7–50 Hz 범위에서 Morlet wavelet 기반의 시간-주파수 반응을 계산하였다. 기준구간 대비 자극 후 차이를 관찰하고자 클러스터 기반 비모수 통계로 검정하였다(α = 0.05).

3. 연구 결과

그림 2는 진동촉각과 청각 자극에 대한 ERF 결과이다. 두 모달리티 모두에서 명확한 초기 감각 반응인 M50 성분이 확인된다. 진동촉각 자극에서는 약 57 ms에서 M50 성분이, 102 ms 에서 M100 반응이 관찰되었으며, 청각 자극에서도 각각 약 63 ms, 107 ms 시점에서 뚜렷한 반응이 나타났다. 토포맵 결과에서 두 모달리티 모두 M50 시점에서 자극의 대측 중심부의 활성 분포가, M100 시점에서 측두-두정엽 영역에서의 공간적 패턴이 확인된다.

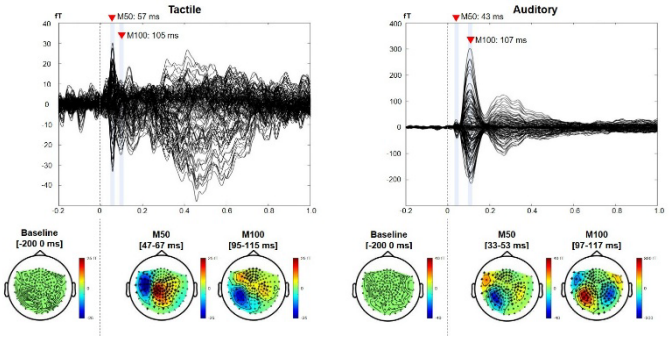


그림 2. 진동촉각 및 청각 자극별 ERF 및 토포맵

M100 반응의 신호원 분석 결과(그림 3 참고), 진동촉각 및 청각 자극 모두 자극의 대측 반구를 중심으로 피질 활성화가 관찰되며 신호원의 중심과 분포 양상에는 차이가 있음을 보여준다. 먼저, 진동촉각 자극의 경우 체성감각피질 영역과 인접한 부위에서 국소적인 활성화가 주로 나타났으며 청각 자극의 경우 상측두회(superior temporal gyrus, STG)와 Heschl's gyrus를 포함하는 청각피질 영역 전반에 걸친 강한 활성화가 확인되었다. 이는 두 모달리티 모두 100 ms 전후의 조기 감각 처리 단계에서 공통적으로 피질 반응을 유발하지만, 자극 특성에 따라 활성 중심이 서로 다른 감각 피질 네트워크로 분리되어 있음을 보여준다.

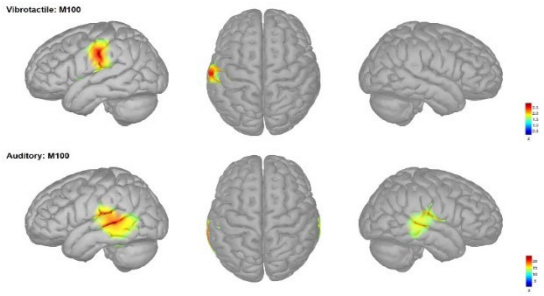


그림 3. 진동촉각 및 청각 자극에 대한 M100 신호원

그림 4는 자극 모달리티별 시간-주파수 분석 결과를 나타낸다. 두 자극 모두 자극 후 200 ms 이내 7–20 Hz의 저주파 대역에서 뚜렷한 변화가 관찰되었다. 진동촉각 자극에서는 약 10–20 Hz 범위에서 event-related desynchronization (ERD) 패턴이, 청각 자극의 경우 7–15 Hz 대역에서 상대적으로 강한 event-related synchronization (ERS) 패턴이 확인된다. 진동촉각 자극의 중심-두정 영역의 ERD 패턴은 체성감각 정보처리 활성화를 반영하며[5], 청각자극의 ERS는 α- low-β 대역이 청각예측 처리에 관여한다는 선행 결과와 일치한다[6]. 이러한 결과는 자극 모달리티가 달라지더라도 유사한 시간 구간에서 변화를 보이지만, 감각 자극의 특성에 따라 공간적 분포가 상이함을 보여준다.

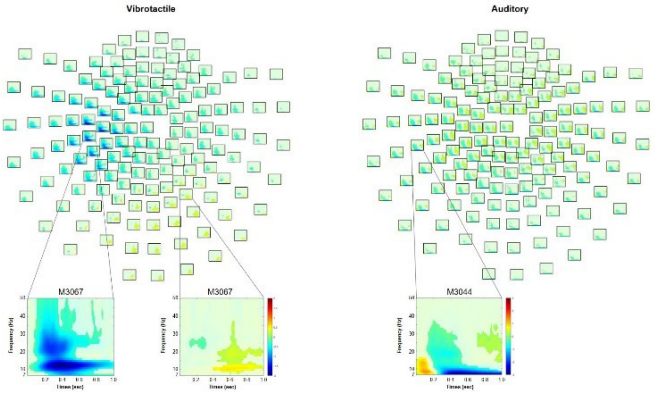


그림 4. 진동촉각 및 청각 자극에 대한 시간-주파수 반응

본 연구는 150 Hz의 진동촉각 및 청각 자극을 제시하여 두 감각 모달리티의 피질 반응 특성을 비교하였다. 그 결과, 동일한 주파수 특성을 갖는 진동 자극이라도 감각 유형에 따라 피질 수준에서 상이한 반응이 나타남을 보였으며, 이는 각 감각 경로의 특이적 신경 처리 기전을 반영한다. 또한, 진동촉각 자극에서의 저주파 ERD 패턴과 청각 자극에서의 ERS 패턴은 두 감각이 감각 처리 및 통합 과정에서 신경 조절 양상이 상이할 수 있음을 보여준다. 이러한 결과는 감각통합의 신경생리학적 메커니즘 이해에 기초적 근거를 제공한다.

4. Acknowledgements

이 연구는 2025년 한국표준과학연구원의 첨단 바이오·의료 측정기술개발사업 (No. KRISS-2025-GP2025-0007) 지원을 받아 수행되었습니다.

5.참고 문헌

[1] M. Schürmann et al. "Touch activates human auditory cortex." *NeuroImage*, Vol. 30, No.4, p.1325-1331, 2006

[2] Caetano, G. et al. "Evidence of vibrotactile input to human auditory cortex." *NeuroImage*, Vol. 29, No.1, p.15-28, 2006

[3] Y. H. Lee, et al. "A whole-head magnetoencephalography system with compact axial gradiometer structure. "*Supercon-ductor Science and Technology*, Vol 22, No.4, p.045023, 2009

[4] M.-Y. Kim, et al. "Development of a polymer-based MEG-compatible vibrotactile stimulator for studying neuromagnetic somatosensory responses." *IEEE Acess*, Vol 8, p.9235-9245, 2020

[5] A. Stancak. "Cortical oscillatory changes occurring during somatosensory and thermal stimulation." *Progress in Brain Research*, Vol 159, p.237-252, 2006

[6] S. Su, et al. "Contra-lateral desynchronized alpha oscillations linearly correlate with discrimination performance of tactile acuity." *Journal of Neural Engineering*, Vol 14, p.046041, 2020

Poster-016

만성 노출 및 자가투여 중독 모델에서 30 Hz 비침습적 광음 자극이 전사체와 재발 행동에 미치는 영향

허채원[1], 정수연[2], 추민혜[2], 박성아[2], 박성민[1,2]

포항공과대학교 의과학전공 [1]

포항공과대학교 융합대학원 IT융합공학과[2]

Effects of Noninvasive 30 Hz Light-Sound Stimulation on Transcriptomes and Relapse Behavior in Chronic-Exposure and Self-administration Models of Addiction

Chaewon Heo[1], Sooyeon Jung[2], Minhye Choo[2], Sungah Pak[2], Sung-Min Park[1,2*]

Medical Science and Engineering, Pohang University of Science and Technology (POSTECH), Pohang, Republic of Korea[1]

Convergence IT Engineering, Pohang University of Science and Technology (POSTECH), Republic of Korea [2]

[*] Correspondence: sungminpark@postech.ac.kr

Abstract

Addiction reshapes the mesocorticolimbic axis by coupling circuit plasticity to region-resolved transcriptional programs. Motivated by the reports that invasive 30 Hz deep brain stimulation (DBS) along the mesolimbic dopamine pathway preferentially engages dopaminergic output, we tested whether noninvasive, synchronized 30 Hz light–sound entrainment can bias VTA–NAc–PFC dynamics toward extinction-supportive states in addiction models. We asked whether 30 Hz stimulation is associated with pathway-level transcriptomic differences during chronic nicotine exposure, and whether delivering the same rhythm during extinction in a nicotine self-administration model coincides with favorable relapse-related trends. Bulk RNA-seq from ventral tegmental area (VTA), nucleus accumbens (NAc), and prefrontal cortex (PFC) highlighted *Fam111a* as a top positive signal across regions, implicating a replication-stress/repair–linked serine protease as a shared node. Pathway-oriented inspection indicated coordinated shifts in cilium/axonemal programs (prominent in PFC/NAc), interneuron/excitability features in VTA, and axon-guidance/cytoskeletal cues. Markers of immune presentation were more evident in PFC/NAc than VTA. Behaviorally, applying 30 Hz stimulation during extinction was associated with directional reductions in relapse-related measures: fewer active-lever responses/infusions and longer latency to first infusion. Together, these preliminary data prioritize a Fam111a-linked cilium–immune (PFC/NAc)–interneuron/excitability (VTA) axis as a testable substrate connecting rhythmic sensory entrainment to transcriptional homeostasis and reduced relapse propensity, motivating cell-type–resolved profiling, targeted pathway perturbations, and circuit physiology.

1. Background

Nicotine addiction remodels the mesocorticolimbic network—centered on the ventral tegmental area (VTA) with major projections to the nucleus accumbens (NAc) and prefrontal cortex (PFC)—by coupling experience-dependent synaptic plasticity to cell-type–specific transcriptional programs and glia-mediated neuroimmune signaling. Gamma-band activity (~30–100 Hz) has been implicated in long-range coordination of information flow and value-based action selection across these nodes. Externally delivered, synchronized 30 Hz light–sound stimulation provides a noninvasive approach to bias gamma-range dynamics and potentially recalibrate network set-points perturbed by chronic nicotine exposure.

Although invasive 30 Hz stimulation along the mesolimbic dopamine pathway has been shown to bias dopaminergic output, the downstream transcriptomic consequences and the transferability of this frequency to noninvasive sensory entrainment remain unknown. Despite growing interest in rhythm-based interventions, key mechanistic links between 30 Hz sensory entrainment and molecular/circuit outcomes remain underdefined. In particular, it is unclear whether brief, repeated 30 Hz stimulation can (i) reweight pathway-level transcriptomic states across VTA–NAc–PFC, where dopaminergic, synaptic, ciliary, and neuroimmune programs intersect, and (ii) measurably bias behavior during learning and memory phases that govern drug seeking (e.g., extinction and relapse tests). Prior work has not systematically evaluated whether delivering the same 30 Hz rhythm during extinction stabilizes adaptive network states and translates into reduced relapse-related responding.

Guided by these gaps, we advance two linked hypotheses. First, 30 Hz multisensory entrainment during chronic nicotine exposure will shift pathway-level transcriptional balance within VTA, NAc, and PFC toward synaptic/homeostatic and anti-inflammatory programs. Second, delivering 30 Hz entrainment during extinction will bias action selection away from nicotine seeking and lowering relapse propensity, reflected in reduced active-lever pressing, increased latency to first infusion, etc. This circuit-to-genome framework motivates cell-type–resolved profiling and causal pathway perturbations to test how rhythmic sensory entrainment interfaces with transcriptional homeostasis and addiction-relevant behavior.

2. Methods

2.1 Experimental design and stimulation protocol

Sprague–Dawley rats (total n = 6; 8-10 weeks, 270–320 g) were assigned to two complementary preparations.

Chronic nicotine model (n = 4): On day 0, rats were implanted subcutaneously with Alzet® 1002 osmotic pumps filled with nicotine solution and maintained for 14 days of continuous delivery. During the infusion period, animals received either 30 Hz synchronized light–sound stimulation (Stim, n = 2) or no stimulation (Non-stim, n = 2).

Stimulation was delivered twice daily, 1 h per session, on all 14 days. On day 14, animals were sacrificed for bulk RNA-seq (Section 2.2).

Behavioral model (self-administration → extinction → relapse; n = 2): After acquisition of nicotine self-administration, animals underwent extinction with 30 Hz stimulation on (Stim, n = 1) or off (Non-stim, n = 1), followed by self-administered relapse testing (Section 2.3). Similar to chronic nicotine model, 30 Hz visual-auditory trains were delivered concurrently for 1 hour/session, 2 sessions/day.

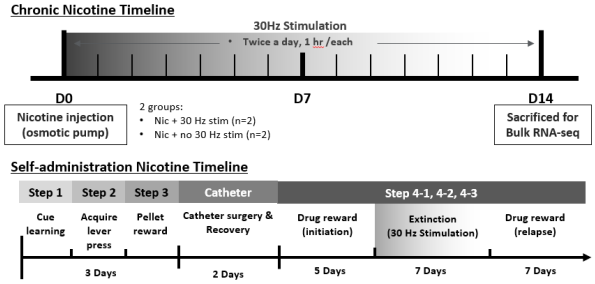


Figure 1. Timeline for chronic nicotine model (n=4) and self-administration nicotine model (n=2).

2.2 Tissue collection and transcriptomics

At the terminal session (day 14 of continuous pump infusion), VTA, NAc, and PFC were rapidly dissected. Total RNA (RIN ≥ 7) was processed into rRNA-depleted libraries and sequenced (PE150; ~30–50 M reads/sample). Reads were aligned with STAR and summarized with featureCounts; low-expression genes were filtered after standard QC. Differential expression was performed with DESeq2, reporting FDR < 0.05 with shrunken $\log_2$ fold changes. Region-specific contrasts (VTA, NAc, PFC) were reported. Pathway inferences used preranked GSEA (MSigDB GO) on signed, shrunken $\log_2$FC.

2.3 Behavioral endpoints and statistics

Self-administration (SA) was conducted in BioMed (China) chambers. Animals completed FR1 food-pellet training (2×20 min/day), underwent jugular-vein catheterization, recovered, and then initiated nicotine SA under FR1 (2×30 min/day; Figure 1). Extinction and relapse each spanned 7 consecutive days; during extinction, one rat received synchronized 30 Hz light–sound stimulation (2×1 h/day) and one received no stimulation. The unit dose was 30 μg/kg/infusion with a fixed 0.12 mL infusion volume; working concentration was adjusted to daily body weight to maintain the unit dose. Active- and inactive-lever presses, number of infusions, and latency to first infusion were recorded, and session-level cumulative records were computed.

3. Results

3.1 Cross-region common signature: the Fam111a axis

To identify convergent molecular features across mesolimbic nodes, we compared differential-expression profiles from VTA, NAc, and PFC using the preranked score (Methods). Fam111a ranked first in all three regions (VTA 41.7; PFC 35.5; NAc 24.4), implicating a shared replication-stress/repair axis under nicotine exposure with or without rhythmic stimulation. In the VTA, Tcf7l2 (28.6) and Lef1 (15.3) were also among the top signals, indicating a VTA-biased coupling between replication/repair programs and Wnt/β-catenin–linked transcriptional control.

3.2 Region-biased modules and pathway concordance

Ciliogenesis/axonemal components were prominent in PFC/NAc (e.g., Dnah1/10/11/12, Cfap43/44/65, Ak7, Crocc2, Rp1, Tmem212, Lrrc74b, Rsph4a, Wdr49), and MHC-I antigen-presentation signals were observed in PFC (RT1-M1-2 ~8.8) and NAc (~8.4), but not among top VTA genes. By contrast, VTA showed enrichment for interneuron/excitability markers (Pvalb, Kcnc3, Cplx1, Shank1) together with Epha8 up and Sema3a down, consistent with altered Eph–Sema guidance; Tubb4a and Myrf further suggest oligodendrocyte/myelin involvement. In PFC, Cdhr4/Rp1 increased while Igfbp6 decreased, indicating cortical-specific tuning. Preranked GSEA was concordant with these gene-level patterns, highlighting cilium assembly/axonemal dynein and antigen processing & presentation (MHC-I) in PFC/NAc, and synapse organization/fast-spiking together with Wnt-linked transcription in VTA. Collectively, the data support a Fam111a-centered configuration comprising PFC/NAc ciliary + MHC-I modules and VTA interneuron/excitability + guidance/myelin modules, aligning with the 30 Hz–associated behavioral trends reported above.

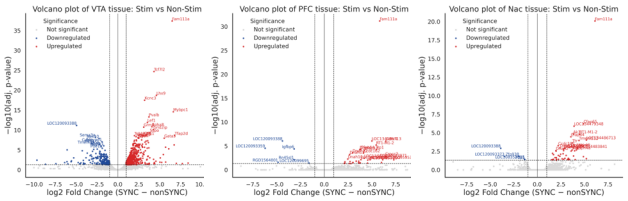


Figure 2. Differential gene expression in mesolimbic regions (VTA-PFC-NAc) following 30 Hz synchronized multisensory stimulation during chronic nicotine exposure (Stim: n=2, non-Stim: n=2). Significantly upregulated gene (red) and downregulated genes (blue) are indicated relative to non-significant transcripts (gray). Notably, *Fam111a* emerged among the top upregulated genes across all three regions.

3.3 Behavior:

In the single-subject extinction contrast, applying 30 Hz stimulation was associated with fewer active-lever responses and infusions during relapse, together with longer latency to first infusion. While exploratory and underpowered, the directionality of these readouts is consistent with the hypothesis that rhythmic sensory entrainment can bias action selection away from drug seeking.

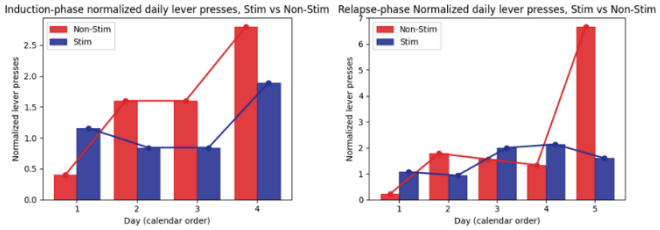


Figure 3. Normalized daily active-lever pressing during (left) drug-induction and (right) relapse. Rats received 30 Hz synchronized light–sound stimulation during extinction (blue) or no stimulation (red).

4. Animal

All procedures complied with NIH guidelines and POSTECH IACUC approval (POSTECH-2025-0034). Adult male Sprague–Dawley rats (8–10 weeks, 270–320 g; Orient Bio) underwent aseptic survival surgery with recovery; chronic nicotine exposure and self-administration were performed in freely moving animals, followed by humane euthanasia at the terminal time point for tissue collection.

5. Acknowledgements

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korean government (Ministry of Education), RS-2025-00517742.

Poster-017

뇌졸중 환자와 건강인에서 운동상상 기반 뇌-컴퓨터 인터페이스 성능과 관련된 과제 수행 전 알파 활동의 신경생리학적 차이

이승원[1,2], 김상록[1,2], 이준석[1,2], 황한정[1,2,3*]

고려대학교 전자·정보공학과[1]

고려대학교 인공지능 스마트융합기술 융합전공[2]

고려대학교 미래전략산업연구원 디지털헬스케어센터[3]

Neurophysiological Differences in Pre-Motor Alpha Activity Associated with Motor-Imagery-Based Brain-Computer Interface Performance in Stroke and Healthy Individuals

S. –W. Lee[1,2], S. –R. Kim[1,2], J. –S. Lee[1,2], H. –J. Hwang[1,2*]

[1]Department of Electronics and Information Engineering, Korea University, Sejong, Korea

[2]Interdisciplinary Graduate Program for Artificial Intelligence Smart Convergence Technology, Korea University, Sejong 30019, Republic of Korea

[3]Digital Healthcare Center, Sejong Institute of Business and Technology (SIBT), Korea University, Sejong 30019, Republic of Korea

*hwanghj@korea.ac.kr

Abstract

In this study, we developed pre-task electroencephalography (EEG)-based neurophysiological indices to predict motor imagery (MI) brain-computer interface (BCI) performance in stroke patients. We utilized three open MI-EEG datasets comprising both healthy participants and stroke patients. EEG indices derived from spectral power across different frequency bands were computed, and Pearson's correlation analysis was performed to examine their relationship with classification accuracy. Central alpha-band power showed a significant positive correlation with MI-BCI accuracy in healthy participants, but a significant negative correlation in stroke patients. These findings indicate pre-task central alpha power serves as a biomarker related to MI-BCI performance in opposite directions for healthy participants and stroke patients. The proposed indices could enable prescreening and adaptive feedback strategies for personalized neurorehabilitation.

1. 연구 배경

뇌-컴퓨터 인터페이스(brain-computer interface: BCI)는 뇌의 활동을 측정하고 이를 해석하여 BCI 어플리케이션에 정보를 전달하는 상호작용 시스템이다. BCI는 다양한 응용 분야에 활용되고 있으며, 그중 운동상상 (motor imagery: MI) 기반 BCI는 뇌졸중 환자의 신경재활을 위한 보조 치료법으로 제안되어 왔다[1]. MI에 따른 운동 의도를 실시간으로 디코딩하고, 이에 연동된 로봇 보조나 기능적 전기자극을 제공하면 신경가소성을 촉진할 수 있다[1]. 이러한 치료적 효과를 위해서는 MI 의도 디코딩 정확도가 충분히 높아야 하지만, 70% 이상의 성능을 안정적으로 상회하지 못하는 사례가 적지 않으며, 이로 인해 재활 효과가 저하될 수 있다[1]. MI-BCI의 성능은 심리적 요인과 신경생리적 요인에 따라 크게 변동하기 때문에[1], 과제 수행 전에 성능을 예측하고 이에 기반한 적응적 피드백(adaptive feedback)을 제공하는 접근이 요구된다.

MI-BCI의 성능을 예측하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있으며, 그중 뇌파(electroencephalography: EEG)와 같은 신경생리적 지표는 객관적 특성으로 인해 폭넓게 활용되고 있다[1, 2]. 특히, MI 과제 전 휴식 상태에서 측정된 세타(theta), 알파(alpha), 베타(beta) 대역 기반 특징이 MI 디코딩 성능과 유의한 상관관계를 보였다는 보고가 있어, MI-BCI 시스템의 실시간 성능 예측 가능성을 시사한다[2].

하지만, 이러한 근거는 대부분 건강한 성인을 대상으로 한 연구에 기반하고 있어, 뇌졸중 환자에게 직접 일반화하기에는 한계가 존재한다. 따라서 본 연구에서는 건강인과 뇌졸중 환자의 공개 데이터셋을 활용하여, MI-BCI 과제 수행 전 EEG 기반 MI-BCI 시스템의 성능 예측 지표를 체계적으로 검증하고자 한다.

2.연구 방법

본 연구에서는 공개 BCI 데이터셋을 활용하였다. 데이터셋 1과 2는 건강한 피험자가 좌, 우 손 움직임을 상상하는 동안 측정된 EEG 데이터를 포함한다. 데이터셋 1은 52명(남성: 33명, 여성: 19명 나이: 24.80±3.86세)의 EEG 데이터로 구성되어 있으며, 모든 피험자가 40회 시도(trial)로 구성된 5개 세션을 수행하였다. 각 시도는 2초 휴식, 3초 MI 과제, 2초 휴식으로 구성되었다. 데이터셋 2는 54명(남성: 29명, 여성: 25명 나이: 24.20±3.05세)의 EEG 데이터를 포함하며, 100회 시도로 구성된 2개 세션을 모든 피험자가 이틀에 걸쳐 수행하였다. 각 시도는 3초 휴식, 4초 MI 과제, 4.5 – 7.5초 휴식으로 구성되었다. 데이터셋 3은 50명(남성: 39명, 여성: 11명, 나이: 56.70±5.78세)의 뇌졸중 환자가 좌, 우 손 움직임을 상상하는 동안의 EEG 데이터가 포함되어 있다. 모든 피험자는 40회 시도로 구성된 단일 세션을 수행하였고, 각 시도는 2초 휴식, 4초 MI 과제, 2초 휴식으로 구성되었다. 모든 데이터셋에서 좌, 우 손 MI 과제의 비율이 동일하게 유지되었으며, 무작위(randomized) 순서로 진행되었다.

데이터셋 1, 2, 3은 국제 표준 시스템에 의해 각각 64, 62, 29개의 전극으로부터 512, 1000, 500 Hz의 샘플링 주파수로 각각 측정되었다. 데이터셋 3의 4명의 뇌졸중 환자 데이터는 심한 잡음 유입으로 인해 분석에서 제외하였다. 전처리로는 각 전력 잡음에 맞는 50 혹은 60 Hz의

대역저지필터, 1 – 50 Hz의 대역통과필터, 연산량 감소를 위한 200 Hz 다운샘플링, 전체 채널에 공통적으로 유입된 잡음 성분 제거를 위한 공통 평균 참조를 적용하였다. 이후, ShallowNet 기반 모델을 통해 좌, 우 손 움직임 상상을 이진 분류하였다. MI 과제 구간 데이터만을 사용해 10겹 교차 검증으로 각 데이터셋에 대한 분류 성능을 도출하였다.

분류 성능 예측을 위한 EEG 지표는 과제 수행 전 -2~0초 구간에서 계산하였다. 이를 위해, 독립성분분석을 사용하여 안구전도 및 근전도 성분을 제거한 후, 5개 주파수 대역(델타: 1 – 3 Hz, 세타: 4 – 7 Hz, 알파: 8 – 13 Hz, 베타: 13 – 30 Hz, 감마: 30 – 50 Hz)에 대한 주파수 파워 값을 계산하였다. 도출된 대역별 주파수 파워 값은 전두엽(F3, F4), 중앙 영역(C3, C4), 두정엽(P3, P4)에 대해 평균하였다. 이후 피험자 각각에 대해 모든 시도의 영역별 주파수 대역 파워값을 평균하여 분류 성능 간의 피어슨 상관관계 분석을 진행했다.

3. 연구 결과

데이터셋 1은 74.02±14.81 %, 데이터셋 2는 78.21±13.11 %, 데이터셋 3은 56.30±13.14 %의 피험자 평균 분류 성능을 도출했다. 그림 1은 영역, 주파수 대역별 파워 값과 분류 성능과의 상관계수를 나타낸다. 이때, 통계적으로 유의미한 상관계수만 표시하였다(p < 0.05). 세 데이터셋 모두 중앙 영역의 알파 대역에서 공통적으로 유의미한 상관관계가 나타났다. 그러나 건강인 데이터셋 (1, 2)의 경우 유의한 양의 상관관계가 나타난 반면, 뇌졸중 환자 데이터셋(3)에서는 유의한 음의 상관관계가 관찰되었다.

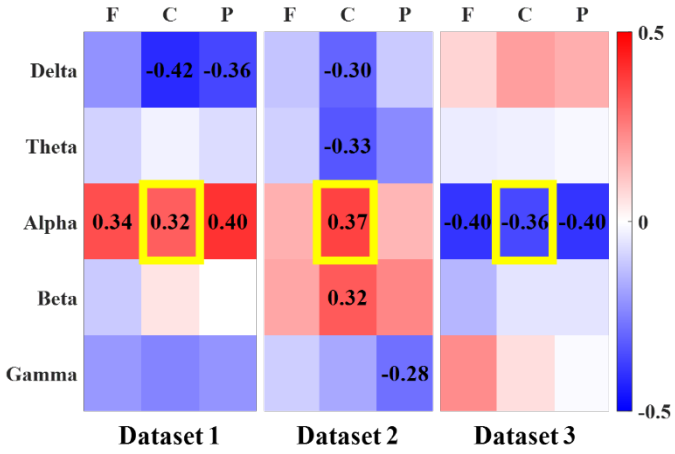


그림 1. 영역, 주파수 대역별 파워와 분류 성능 간의 상관계수(F: 전두엽, C: 중앙 영역, P: 두정엽)

그림 2는 각 데이터셋별 분류 성능 중앙값을 기준으로 저성능과 고성능 그룹으로 나누어, 알파 파워 값의 토포그래픽 맵으로 나타낸 것이다. 데이터셋 3의 뇌졸중 환자의 경우, 좌측 병변 환자는 전극 배치를 반전시켜 병변 부위가 모두 우측에 나타나도록 정렬하였다. 세 데이터셋 모두 중앙 영역 부근에서 유의한 알파 파워 차이가 관찰되었으며, 이러한 차이는 통계적으로 유의하였다(p < 0.05). 데이터셋 1, 2는 고성능 그룹이 알파 파워가 유의하게 큰 것으로 나타났다. 데이터셋 3은 고성능 그룹이 알파 파워가 유의하게 낮았고, 병변측 알파 파워가 큰 활동을 보이는 경향이 나타났다.

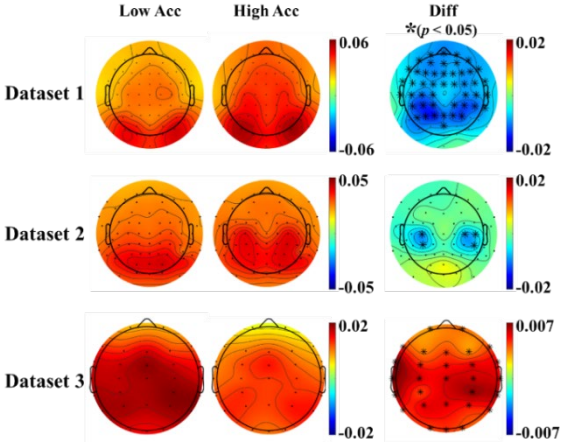


그림 2. 저성능, 고성능 그룹간 알파 파워 토포그래픽 맵

본 연구에서는 두 개의 건강인 데이터셋과 한 개의 뇌졸중 환자 데이터셋을 활용하여, 뇌졸중 환자 대상 MI-BCI 과제 수행 전 EEG 기반 성능 예측 지표를 탐색하였다. 그 결과, 과제 전 중앙 영역 알파 파워의 증가는 건강인에서는 높은 성능과 관련이 있었으나, 뇌졸중 환자에서는 오히려 낮은 성능과 관련이 있었다. 과제 수행 전 알파 파워의 증가는 뇌의 이완 상태와 관련이 있으며, 이러한 안정된 준비 상태는 과제 수행 시 더 강한 MI 관련 활동으로 이어질 수 있다[2]. 따라서 건강인의 경우 높은 알파 활동이 MI 과제 수행 중의 활성 증가로 이어져 성능 향상에 기여한 것으로 추정된다. 반면, 뇌졸중 환자는 병변에 의해 손상된 반구의 활성화 양상이 건강인과 상이할 수 있으며, 이로 인해 알파 활동 및 MI 관련 활성 패턴이 달라질 가능성이 있다 [1]. 따라서 과제 수행 전 알파 활동과 MI-BCI 성능 간의 상반된 관계는 이러한 신경생리학적 차이에 기인한 것으로 해석된다. 향후 연구에서는 뇌졸중 환자에서 과제 전 알파 파워 증가가 성능 저하로 이어지는 기전과, 병변측의 알파 파워가 높게 나타나는 현상이 성능과 어떤 관계를 가지는지에 대해 추가적인 분석이 필요하다.

4. Acknowledgements

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 정보통신기획평가원-대학ICT연구센터(ITRC)의 지원(IITP-2025-RS-2023-00258971, 50%)과 한국연구재단(NRF)의 지원을 받아 수행되었음 (No. RS-2024-00397674, 50%)

5.참고 문헌

[1] Shu, Xiaokang, et al. "Fast recognition of BCI-inefficient users using physiological features from EEG signals: a screening study of stroke patients." *Frontiers in neuroscience* 12, 93, 2018

[2] Mohamed, Mohamed AA, et al. "Associations between pre-cue parietal alpha oscillations and event related desynchronization in motor imagery-based brain-computer interface." *Frontiers in Human Neuroscience* 19, 1625127, 2025

[3] Cho, Hohyun, et al. "EEG datasets for motor imagery brain–computer interface." *GigaScience* 6, 7, 2017

[4] Lee, Min-Ho, et al. "EEG dataset and OpenBMI toolbox for three BCI paradigms: An investigation into BCI illiteracy." *GigaScience* 8, 5, 2019

[5] Liu, Haijie, et al. "An EEG motor imagery dataset for brain computer interface in acute stroke patients." *Scientific Data* 11.1, 131, 2024

Poster-018

실시간 뇌-기계 인터페이스를 이용한 뇌 영역별 동적 신경 활성 조절

김나현[1†], 진태균[2†], 백승준[2], 김도형[1,2,3*]

[1]포항공과대학교 융합대학원 의과학전공

[2]포항공과대학교 IT융합공학과

[3]포항공과대학교 생명과학과

Dynamic Control of Neural Activity via Real-Time Brain-Machine Interface Across Brain Regions

Nahyun Kim[1†], Taegyun Jin[2†], Seungjun Baek[2], Dohoung Kim[1,2,3*]

[1]Medical Science and Engineering, Graduate School of Convergence Science and Technology, POSTECH, Korea

[2]Department of Convergence IT Engineering, POSTECH, Korea

[3]Department of Life Sciences, POSTECH, Korea

[†]These authors contributed equally to this work

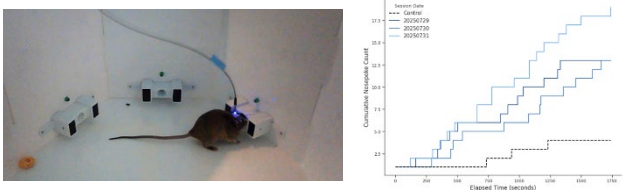
[*]kimd42@postech.ac.kr

Abstract

Conventional Brain-Machine Interfaces (BMIs) limit long-term stability due to 'neural representation drift'. We developed a bi-directional, closed-loop BMI to address this, using a dynamic decoder for real-time, multi-neuron tracking. This system delivers low-latency (< 1.5ms) optogenetic dopamine stimulation to the Ventral Tegmental Area (VTA). While recording from the Prelimbic area (PrL), Primary Motor Cortex (M1), and Striatum in mice, our system successfully modulated target neurons activity with dopamine feedback. Crucially, neural responses to this reinforcement were highly heterogeneous across these regions. The proportion of 'responder' neurons - those with significantly increased firing rates - varied distinctively among the areas, demonstrating that dopamine induces region-specific plasticity. This highlights that selecting these 'responder' neurons is critical for creating stable and effective BMIs, offering a new principle for customized BMI design.

1. 연구 배경

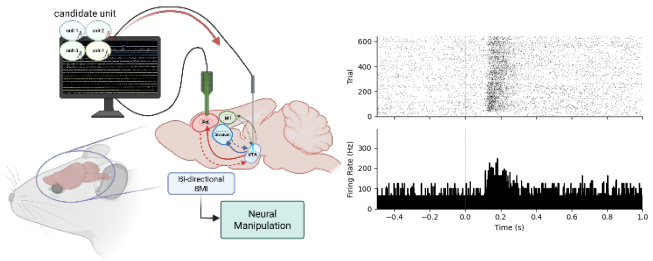
보상과 연관된 신경 활동이 반복될 가능성이 높다는 강화 학습 원리는 뇌-기계 인터페이스 (Brain-Machine Interface, BMI) 분야의 핵심적인 이론적 기반을 제공한다. 특히, 중뇌 복측 피개 영역 (Ventral Tegmental Area, VTA) 에서 기원하는 도파민 신호는 신경 활동, 학습, 그리고 신경 가소성 (Neuroplasticity) 을 조절하는데 결정적인 역할을 한다 [1, 2].



<그림 1. 두개 내 자가 자극(ICSS)을 이용한 도파민의 행동 강화 효과 검증>

하지만 기존 BMI 시스템은 주로 정적 디코더 (Static Decoder) 를 사용하여 시간의 흐름에 따라 신경 표현이 변화하는 '표상 변동 (Neural Representation Drift)' 현상을 효과적으로 처리하지 못하는 한계가 존재한다 [2]. 이는 장기적인 BMI 시스템의 안정성을 저해하는 주된 요인으로 작용한다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 본 연구에서는 뉴런의 활동을 실시간으로 추적하는 동적 디코더 (Dynamic Decoder) 를 기반으로 한 양방향 폐쇄 루프 BMI 시스템을 개발했다. 이 시스템은 특정 뉴런 집단의 발화에 반응하여 1.5 ms 이내의 빠른 속도로 VTA에 직접적인 도파민 자극을 전달한다.

이를 통해, 우리는 실시간 도파민 강화가 1) 특정 뉴런의 활동을 정밀하게 조절할 수 있는지, 그리고 2) 이러한 신경 가소성 유도 과정이 전전두엽 피질의 하부 영역인 변연전영역 (Prelimbic Area, PrL), 운동 피질 (Primary Motor Cortex, M1), 선조체 (Striatum, STR) 등 상이한 뇌 영역에 따라 어떻게 다르게 나타나는지 규명하고자 한다.



<그림 2. BMI 시스템 개요 및 광자극 반응 뉴런(Opto-tagged neuron) 활동>

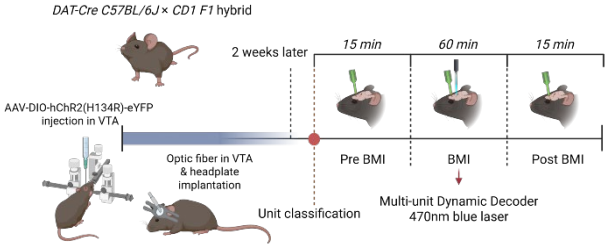
2.연구 방법

본 연구는 특정 뉴런 집단의 발화 시점에 맞추어 1.5ms 이내의 짧은 지연 시간으로 도파민 자극을 실시간 제공하는 양방향 폐쇄 루프 BMI 시스템을 구축해 진행했다.

12주령 DAT-Cre C57BL/6J × CD1 F1 hybrid 마우스의 VTA 영역에 AAV 바이러스 (AAV-DIO-hChR2(H134R)-eYFP)을 주입하여 channelrhodopsin-2를 발현시켰다. 이후 변연전영역, 일차 운동 피질, 선조체 등 다양한 뇌 영역에 다채널 신경전극 (160 channels, 25 kHz) 을, VTA에는 광섬유를 삽입하였다. 실험은 특정 뉴런 집단 (Target Group)의 발화를 동적 디코더가 감지하면 470 nm 파장의 레이저로 VTA를 자극하는 방식으로 진행하였다.

휴지 상태 측정을 위한 Pre-BMI, 자극을 가하는 BMI, 그리고 자극 후 변화를 관찰하는 Post-BMI 단계로 구성되었다. 수집된 신경 데이터는 온라인/오프라인 스파이크 정렬 (Spike Sorting) 을 통해 개별 뉴런 단위로 분석되었다[4]. 도파민 자극에 대한 발화율 변화를 기준으로

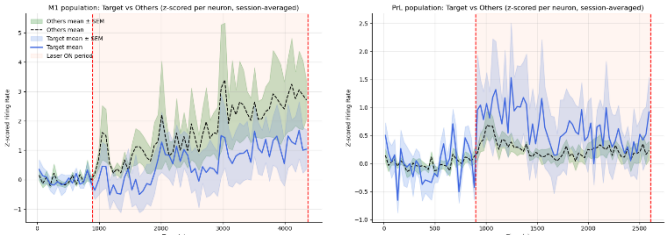
뉴런들을 '반응군 (responder)' 과 '비반응군 (non-responder)' 으로 분류하여 뇌 영역별 차이를 분석하였다.



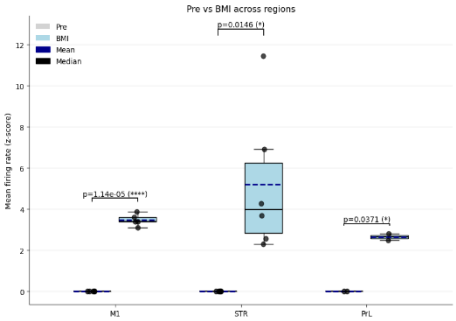
<그림 3. 실험 설계 및 진행 과정 모식도>

본 연구에서 포함된 동물실험계획서는 포항공과대학교 동물실험윤리위원회 (POSTECH-IACUC)에 의해 동물실험의 윤리성과 과학성에 대한 검토를 받아 적합한 것으로 승인(POSTECH-2024-0098)을 획득하여 수행되었다.

3. 연구 결과

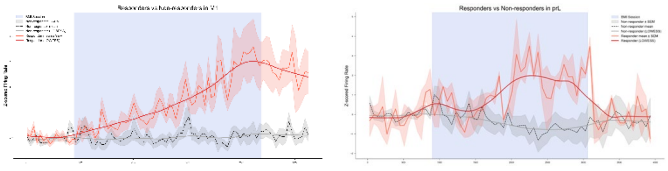


<그림 4. Pre-BMI와 BMI에서 뇌 영역의 집단 신경 활성>



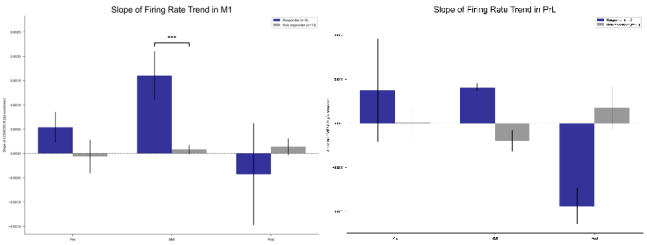
<그림 5. Pre-BMI 와 BMI의 발화율 비교>

본 연구에서 개발된 동적 BMI 디코더는 목표 뉴런 집단의 발화 활동을 성공적으로 추적하여 실시간 도파민 자극을 유도했다. 이 피드백 자극이 목표 뉴런 집단의 발화율을 선택적이고 지속적으로 증가시키는 것을 Z-score 분석을 통해 확인하였다 (그림 4, 5). 가장 핵심적인 발견은 도파민 강화 신호에 대한 신경 반응이 뇌 영역에 따라 뚜렷한 이질성 (heterogeneity)을 보인다는 점이다.



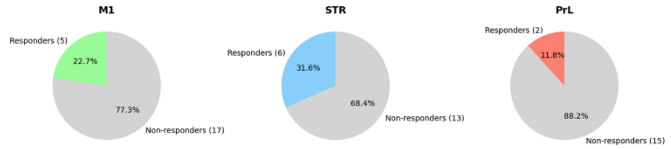
<그림 6. 뇌 영역별 반응군 및 비반응군 뉴런 활동 비교>

목표 뉴런 집단 중, 도파민 자극에 반응한 '반응군' 과 '비반응군' 사이의 뉴런 발화율은 그림 6와 같이 BMI 단계에서 두드러지게 나타난다. 이는 목표로 지정한 뉴런들이 모두 도파민 자극에 의해 강화되지 않는다는 것을 의미한다. 하지만, 목표 뉴런 집단의 전체적인 발화율은 도파민 자극에 따라 상승하는 것을 확인할 수 있다. 자극 후 발화율이 상승했던 뉴런의 활동이 어떻게 변화하는지 확인하기 위해 진행한 post-BMI 단계에서의 변화를 보면 상승하던 발화율이 다시 하강하는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 발화율의 증가가 VTA의 도파민 자극에 기인한 것임을 알 수 있다 (그림 7).



<그림 7. 각 세션별 발화율 변화 기울기>

또한, 자극에 반응한 '반응군' 뉴런의 비율은 변연전영역, 일차 운동 피질, 선조체에서 각각 다르게 나타났으며, 특히 선조체에서 가장 높은 반응 비율을 보였다 (그림 8).



<그림 8. 뇌 영역별 반응군 및 비반응군 목표 뉴런의 분포>

이러한 결과는 도파민이 매개하는 신경 발화 활동이 뇌 전반에 걸쳐 균일하게 작용하는 것이 아니라, 각 뇌 영역의 고유한 회로적 특성과 기능에 따라 특이적으로 발현됨을 강력히 시사한다.

4. Acknowledgements

본 연구는 보건복지부의 재원으로 한국보건산업진흥원의 보건의료기술연구개발사업 지원에 의하여 이루어진 것임 (RS-2024-00440705).

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 학·석사연계ICT핵심인재양성사업의 연구결과로 수행되었음 (IITP-2025-RS-2024-00437359).

5.참고 문헌

[1] Morales, M., Margolis, E. Ventral tegmental area: cellulargeneity, connectivity and behaviour. (2017). Nat Rev Neurosci 18, 73–85

[2] Tsai, H.-C., Zhang, F., Adamantidis, A., Stuber, G. D., Bonci, A., De Lecea, L., & Deisseroth, K. (2009). Phasic firing in dopaminergic neurons is sufficient for behavioral conditioning. Science, 324(5930), 1080–1084.

[3] Driscoll, L. N., Duncker, L., & Harvey, C. D. (2022). Representational drift: Emerging theories for continual learning and experimental future directions. Current Opinion in Neurobiology, 76, 102609.

[4] Pachitariu, M., Sridhar, S., Pennington, J., & Stringer, C. (2024). Spike sorting with Kilosort4. Nature Methods, 21(4), 914–921.

Poster-019

시공간적으로 조합된 전기 자극 기반 생물학적 신경망의 시공간적 통합 특성 정량화를 위한 분석 플랫폼 개발

송요셉[1], 남윤기[1*]

한국과학기술원 바이오및뇌공학과[1]

Development of an Analysis Platform for Quantifying Spatiotemporal Integration Properties of Biological Neuronal Networks under Spatiotemporally Combined Electrical Stimulation

Yosep Song[1*], Yoonkey Nam[1*]

[1]Department of Bio and Brain Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Daejeon, Korea

[*]E-mail: ynam@kaist.ac.kr

Abstract

Biological computing platforms utilizing biological neuronal networks (BNNs) have emerged as promising systems for information processing. Although the mechanisms by which cultured neuronal networks transform spatiotemporal inputs into distinct computational outputs remain elusive, we established an analysis platform to quantitatively characterize their spatiotemporal information-processing properties. Hippocampal neurons from E18 rats were cultured on microelectrode arrays and electrically stimulated across all channels. Spatial separation and state retention properties were quantified using Fisher's discriminant ratio and effective time constant of responses, respectively. Spatial and temporal input integration were further analyzed by comparing network responses single and combined stimulations. The results revealed distinct spatial activation patterns, diverse response retention dynamics, and nonlinear integration of combined stimuli. These findings demonstrate that the developed platform enables quantitative assessment of the information-processing capabilities of cultured neuronal networks and provides a foundation for future BNN-based computing studies.

1. 연구 배경

최근 생물학적 지능을 활용한 연산 플랫폼에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이 플랫폼은 2차원 배양 신경망이나 인간 유래 세포를 사용한 뇌 오가노이드(brain organoid) 등 생물학적 신경망 (biological neuronal network)을 기반으로 하며, 미세전극칩(microelectrode array, MEA) 등의 신경 인터페이스를 통해 정보를 전달하고 처리된 정보를 읽어낸다. 입력 방식으로는 전기적, 광학적 자극을 시공간적으로 조합한 자극 패턴이 사용되며, 시간 및 공간적 발화율(spatiotemporal firing rate)을 사용한 디코더를 통해 해석된다. 이러한 생물학적 연산 플랫폼을 통해 음성 데이터 분류, 비선형 시계열 예측 등 다양한 정보 처리 과제가 수행된 바 있다 [1][2].

이 플랫폼의 핵심 구성 요소인 배양 신경망은 두 가지 고유한 특성을 통해 입력 정보를 처리한다. 첫째, 공간적 입력 분리(spatial separation) 특성은 동일한 공간 입력에 대해 일관된 반응을 내고, 서로 다른 공간 입력에 대해서는 구별되는 반응을 나타내는 특성이다. 둘째, 상태 유지(state retention) 특성은 입력에 의해 유도된 반응 상태를 일정 시간 동안 유지하는 특성이다. 배양 신경망은 이러한 기본적 특성들을 바탕으로 공간적, 시간적 통합(spatial and temporal integration)을 수행함으로써, 시공간적으로 분리되어 들어온 입력 정보를 하나의 통합된 반응으로 처리한다. 이때 정보의 통합 방식에 따라 선형적 혹은 비선형적 정보 처리가 가능하다.

배양 신경망을 재현 가능한 정보 처리 소자로 활용하기 위해서는 입력으로 전달된 정보가 신경망의 고유한 특성에 의해 어떻게 변형되고 상호작용하며 처리되는지를 명확히 이해할 필요가 있다. 선행 연구들은 배양 신경망이 복잡한 정보 처리 문제를 수행할 수 있다는 가능성에 초점을 두었으나, 배양 신경망의 고유한 특성과 정보 처리 성능을 연결하는 원리적 이해는 상대적으로 부족했다.

이를 위해 미세전극칩 위에 형성된 배양 신경망에 두 개의 자극 채널을 통한 공간적 전기 자극을 입력하여, 신경망의 공간적 반응 분리 특성과 시간에 따른 반응 통합 정도를 자동으로 정량화할 수 있는 분석 체계를 구축하였다. 또한, 두 자극을 순차적으로 입력하여, 신경망의 상태 유지 특성과 입력 간 시간적 상호작용을 평가하는 분석 모듈을 구현하였다. 이를 통해 신경망이 시공간적으로 분리된 입력을 통합하여 처리하는 과정을 정량적으로 평가할 수 있는 통합 플랫폼을 제시하였다. 본 플랫폼은 배양 신경망의 정보 처리 특성을 표준화된 지표로 비교·분석할 수 있도록 설계되어 있으며, 향후 재현 가능한 생물학적 연산 소자 개발을 위한 기반 기술로 활용될 수 있다.

2.연구 방법

배양 신경망의 공간적 입력 분리 특성과 반응 유지 특성을 정량하기 위해 모든 채널에 전기 자극을 가한 뒤 얻은 반응 데이터를 활용하였다. 공간적 입력 분리 특성은 두 채널을 각각 자극한 뒤 얻은 반응에서 자극 후 15-200 밀리초 구간에서 자극 채널을 제외한 각 채널의 발화율 패턴이 다른 정도를 Fisher Discriminant Ratio (FDR)로 정량하였다. 상태 유지 특성은 각 채널을 자극한 뒤 나머지 채널의 발화율이 최대값의 37% 수준으로 감소하는 데까지 걸리는 시간으로 정량하였다. 이를 통해 유의미한 반응을 유도한 자극 채널에 대해 공간적 입력 분리 특성과 반응 유지 특성을 정량적으로 평가하였다.

배양 신경망의 공간적 입력 통합 특성을 분석하기 위해, 앞서 정량한 공간적 입력 분리 특성과 반응 유지 특성을 바탕으로 두 개의 자극 채널을 선정하였다. 각 채널을 개별적으로 자극하여 얻은 반응의 합과 두 채널을 동시에 자극하여 얻은 반응을 비교함으로써, 두 공간 입력이 네트워크 내에서 선형적으로 단순 합산되는지 혹은 비선형적으로 통합되는지를 평가하였다. 또한, 배양 신경망의 시간적 입력 통합 특성을 분석하기 위해 동일한 자극 채널에 시간 간격을 두고 두 번의 자극을 가하였다. 이를 통해 하나의 자극으로 얻은 반응과, 그 반응을 일정 시간만큼 이동시켜 더한 가상적 합성 반응을 비교하였다. 두 자극 사이의 간격은 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000 밀리초로 설정하였다. 공간적 및 시간적 통합 특성의 정량 비교에는 각 반응 패턴 사이의 코사인 유사도(cosine similarity)를 사용하여 각 입력의 개별 반응의 합과 두 입력을 통합한 반응 사이의 유사도를 평가하였다.

플랫폼 검증에는 E18 쥐의 해마에서 박리한 신경세포를 미세전극칩 위에 배양한 신경망을 사용하였다. 전기 자극 및 반응 기록은 37°C, 5% CO_2 환경의 인큐베이터 내에서 Intan 자극 및 기록 시스템과 마이크로컨트롤러(Arduino)를 결합한 시스템을 통해 이루어졌다. 배양 신경망의 공간적 분리 및 반응 유지 특성을 정량하기 위해 모든 채널을 20번씩 자극하여 각 채널의 반응을 수집하였고, 시공간적 통합 특성을 정량하기 위해 단일 자극 및 조합 자극을 각각 50번씩 자극하여 반응을 수집하였다. 각 채널을 자극한 뒤 얻은 반응의 자극 후 15-200 밀리초 구간의 스파이크 개수를 사용하여 각 채널을 통한 입력에 대한 신경망의 공간적 입력 분리 특성과 상태 유지 특성을 정량하였다.

3. 연구 결과

개발한 분석 플랫폼을 이용하여, 배양 신경망의 모든 채널을 순차적으로 자극하고 이에 대한 반응을 기록하였다. 이를 통해 각 채널을 자극했을 때 나머지 채널에서 관찰된 반응으로부터 공간적 분리 특성과 반응 유지 특성을 정량화하였다. 공간적 분리 특성은 두 자극 채널에 의해 유도된 반응의 공간적 패턴을 시간에 따른 FDR로 계산하여 평가하였다 (그림 1A). 그 결과, 서로 인접한 채널보다 멀리 떨어진 채널 간의 FDR 값이 높게 나타나, 배양 신경망이 공간적으로 구별되는 입력에 대해 분리된 반응을 생성함을 확인하였다.

반응 유지 특성은 각 채널 자극 후 나머지 채널의 발화율을 Post-Stimulus Time Histogram (PSTH)으로 나타내고, 반응의 최대값이 37% 수준으로 감소하는 데까지 걸리는 시간으로 정량하였다 (그림 1B). 채널마다 자극 직후 반응이 단조 감소하거나 일정 지연 시간 이후 발화율이 증가했다가 감소하는 반응이 관찰되었다.

또한, 시공간적으로 조합된 전기 자극을 사용하여, 개별 자극에 대한 반응과 조합 자극에 대한 반응의 유사도를 비교하였다 (그림 1C, D). 조합 자극 후 반응은 개별 자극 반응의 단순 합과 유의미하게 달랐으며, 일부 조합 자극 후 반응에서는 비선형적 통합 혹은 새로운 차원의 반응 패턴이 나타났다.

이러한 결과는 개발된 분석 플랫폼을 통해 배양 신경망의 정보 처리 특성을 정량적으로 평가할 수 있음을 보여준다. 본 플랫폼은 추후 배양 신경망 기반 연산 수행의 동작 원리를 규명하고, 정보 처리 성능을 향상시키기 위한 전략을 수립하는 데 기여할 것으로 기대된다.

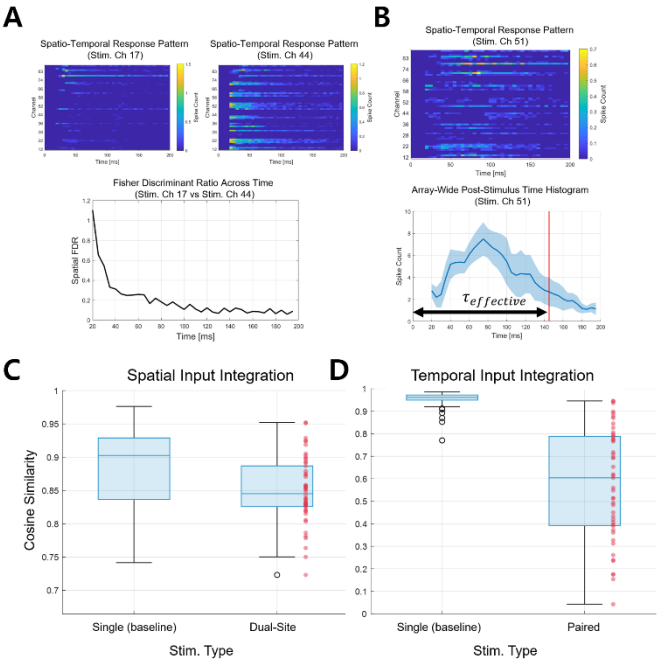


그림 1. 배양된 뉴런 네트워크의 공간 분리, 상태 유지, 시공간적 통합 속성에 대한 정량적 분석 결과

4. Acknowledgements

이 연구는 National Research Foundation of Korea (NRF) 과제의 지원을 받아 수행하였음. (NRF-2011-0031866, NRF-2018M3A9D7079485)

5.참고 문헌

[1] H. Cai *et al.*, "Brain organoid reservoir computing for artificial intelligence," *Nature Electronics*, vol. 6, no. 12, pp. 1032-1039, 2023.

[2] T. Sumi *et al.*, "Biological neurons act as generalization filters in reservoir computing," *Proc Natl Acad Sci U S A*, vol. 120, no. 25, p. e2217008120, Jun 20 2023, doi: 10.1073/pnas.2217008120.

Poster-020

개인 최적 주파수 경두개교류자극에 의한 안정상태시각유발전위 반응 향상

김정희[1], 온누리[1], 김상수[1], 김도원[1,2,3*]

전남대학교 바이오메디컬공학협동과정[1]

전남대학교 의공학부[2]

전남대학교 헬스케어의공학연구소[3]

Enhancement of Steady-State Visual Evoked Potentials by individually optimized tACS

Jeonghui Kim[1], Nuri On[1], Sang Su Kim[1], Do-Won Kim[1,2,3*]

[1]Department of Biomedical Engineering, Chonnam National University,

[2]School of Biomedical Engineering, Chonnam National University,

[3]Research Center for Healthcare-Biomedical Engineering, Chonnam National University

[*]dowon.kim@jnu.ac.kr

Abstract

Transcranial electrical stimulation (tES) has been widely studied as a non-invasive technique for modulating brain activity. While transcranial direct current stimulation (tDCS) has been shown to affect the excitability of the visual cortex, the effects of transcranial alternating current stimulation (tACS) remain less clear. In this study, we investigated the effects of tACS at a specific frequency by observing changes in steady-state visual evoked potential (SSVEP). Personalized frequency-based tACS significantly increased SSVEP amplitude and signal-to-noise ratio (SNR) at the stimulated frequency, whereas no significant changes were observed at non-stimulated frequencies. These findings demonstrate that tACS can selectively modulate frequency-specific neural activity and highlight the importance of personalized frequency selection in enhancing stimulation efficacy. Future studies should explore various combinations of frequencies and stimulation sites to better understand how tACS induces large-scale neural network interactions and affects higher cognitive and sensory processes.

1. 연구 배경

경두개전기자극(transcranial electrical stimulation, tES)은 비침습적인 방법으로 두피에 2 mA 이하의 미세 전류를 인가하여 뇌신경활동을 조절하는 기술이다. tES는 자극 형태에 따라 특정 주파수의 교류전류를 이용하는 경두개교류자극(transcranial alternating current stimulation, tACS)과 직류전류를 이용하는 경두개 직류자극(transcranial direct current stimulation, tDCS)으로 구분된다.

tACS는 tDCS에 비해 특정 주파수를 가진 교류신호로 신경활동을 조절할 수 있다는 장점을 지닌다. 특히, 10 Hz 대역의 자극은 인지기능 향상[1], 만성 통증 완화[2], 신경성 난청 치료[3] 등 다양한 긍정적 효과가 보고된 바 있다.

그러나 tACS는 비교적 최근에 제안된 자극 방법으로, 신경조절의 임상적 근거나 신경생리학적 변화에 대한 근거는 아직 충분하지 않다. 이전 연구에서는 후두엽에 tDCS를 적용했을 때 신호대잡음비(signal-to-noise, SNR)가 증가한 것으로 보고되었으며[4], 이는 시각 피질의 전기 자극이 신경 반응을 변조할 수 있음을 시사한다. 따라서 교류전류를 이용하는 tACS에서도 자극 주파수에 따른 뇌신경신호의 변화를 검증하는 것이 필요하다.

안정상태시각유발전위(steady-state visual evoked potential, SSVEP)는 특정 주파수로 점멸하는 시각 자극을 응시할 때, 시각 피질에서 동일한 주파수의 뇌파가 유도되는 반응이다. 이러한 SSVEP는 tACS의 주파수 특이적 신경 조절 효과를 평가하기 위한 유용한 지표가 된다.

따라서 본 연구에서는 특정 주파수의 tACS가 동일한 주파수의 SSVEP 반응에 미치는 변화를 확인하여, tACS의 주파수 특이적 신경조절 효과를 검증하고자 한다.

2.연구 방법

2.1 연구대상자

본 연구는 총 18명(남 14, 여 4)의 신체 건강한 일반인을 대상으로 수행되었으며, 참가자의 평균 연령 22.39 ± 1.89 세였다. 모든 연구대상자는 실험이나 뇌파에 영향을 미칠 수 있는 신경학적 질환이 없었으며, 정상 시력 또는 교정된 정상 시력을 가진 건강한 개인으로 모집되었다.

본 연구는 전남대학교 생명윤리심의위원회(Institutional Review Board: IRB, No.1040198-210708-HR-103-01)의 승인을 받았다.

2.2 실험 방법

본 연구에서는 연구대상자에게 모니터(주사율: 240 Hz)를 통해 시각 자극을 제시하였으며, 모든 연구대상자는 모니터에서 60 cm 떨어진 의자에 앉아 실험에 참여하였다. 먼저, 연구대상자는 10분 동안 안정상태 뇌파를 먼저 측정하였다.

이후, 연구대상자별 단일 주파수 SSVEP 반응을 측정하기 위해 총 12개의 서로 다른 주파수(5.45, 6, 6.7, 7.27, 7.5, 8, 8.89, 9.6, 10, 10.91, 12.63, 14.12 Hz)를 가진 체커보드 자극을 제시하였다. 각 자극은 5초간 10회 무작위로 제시되었으며, 자극 간 간격(inter-stimulus interval, ISI)는 2초로 설정하였다.

각 연구대상자별로 SSVEP 반응의 SNR이 가장 낮은 주파수를 tACS 자극 주파수로 선정하였다. 시각 피질이 위치한 후두엽을 효과적으로 자극하기 위해 전극은 O1, Oz, O2, Pz, Cz 위치에 부착하였다.

tACS는 20분간 인가되었으며, 자극 중에는 fixation cross를 응시하도록 지시하였다. 자극 종료 후에는 자극 전과 동일한 방법으로 SSVEP 반응을 다시 측정하였다 [그림 1].

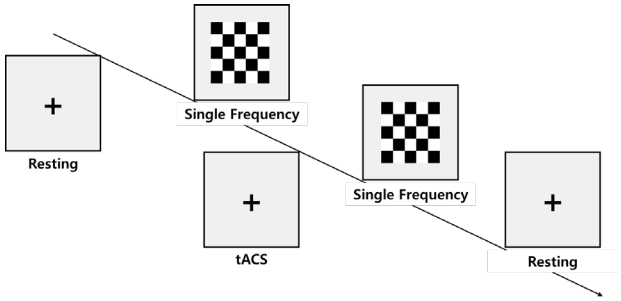


그림 1. 실험절차에 대한 모식도

2.3 뇌파 측정 및 분석

뇌파 측정과 tACS 자극은 Starstim R-32(Neuroelectrics, Barcelona, Spain)를 사용하여 수행하였으며, extended International 10-20 system에 따라 총 32개의 전극을 부착하였다. EEG 신호는 500 Hz의 샘플링 주파수로 기록되었으며, MATLAB R2020b(Mathworks, MA, USA)를 이용해 분석하였다.

수집된 데이터는 common average reference와 baseline correction을 적용한 후 1-50 Hz 대역통과 필터를 거쳤다. SSVEP 분석에는 후두엽에 위치한 2개의 전극(O1, O2)의 데이터를 사용하였으며, 각 자극 주파수별 absolute power와 SNR을 산출하였다. 이후, tACS 전후의 변화를 통계적으로 비교하여 분석하였다.

3. 연구 결과

[그림 2]는 tACS 전후의 SSVEP 반응 변화를 나타낸다. 10 Hz의 tACS를 인가한 실험 참가자의 경우, 자극 이후 10 Hz 대역에서 SSVEP 진폭이 뚜렷하게 증가하는 양상이 관찰되었다.

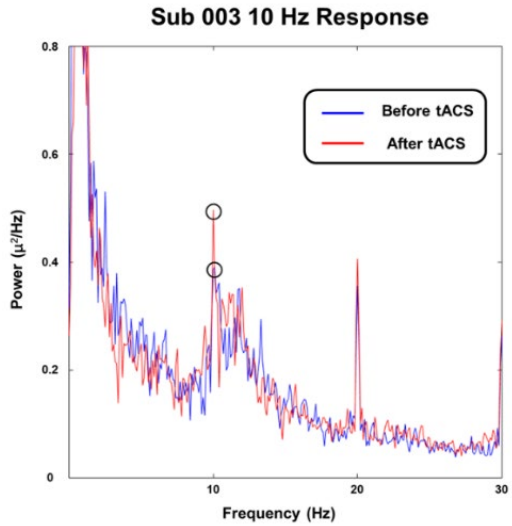


그림 2. 10 Hz tACS를 인가받은 실험 참가자의 자극 전후의 SSVEP 주파수 스펙트럼 변화

[그림 3]은 모든 피험자에 대한 tACS 인가 전후의 자극 주파수 및 비자극 주파수에서 absolute power와 SNR 변화를 나타낸다. 반복측정 ANOVA 결과, 자극조건(stimulation vs non-stimulation)과 자극 시점 간에 모든 지표에서 유의한 교호작용이 관찰되었다 ($p<0.001$).

자극 주파수 조건(stimulation)에서는 absolute power (pre = 0.441 ± 0.270, post: 0.541 ± 0.274 p = 0.0016)와 SNR (pre = 1.189 ± 0.351, post = 1.398 ± 0.386, p = 0.0038) 모두 유의하게 증가하였다.

반면, 비자극 주파수 조건(non-stimulation)에서는 absolute power (pre: 0.593 ± 0.258, post: 0.608 ± 0.287, p = 0.4724)와 SNR (pre: 1.620 ± 0.407, post: 1.576 ± 0.410, p = 0.1841) 모두 유의한 변화가 나타나지 않았다.

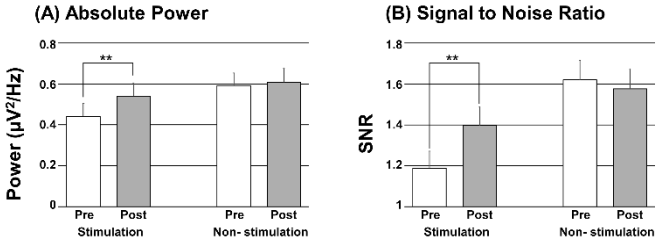


그림 2. 모든 실험 참가자의 tACS 자극 주파수(Stimulation)과 비자극 주파수(non-stimulation) SSVEP 반응의 absolute power와 SNR 수치

4. 연구 고찰

본 연구에서는 각 연구대상자의 SSVEP 반응 중 SNR이 가장 낮았던 주파수를 선정하여, 해당 주파수로 개인 맞춤형 tACS를 인가하였다. 그 결과, 자극 주파수 대역에서 SSVEP 진폭과 SNR이 유의하게 증가하였다. 반면, 비자극 주파수에서는 유의한 변화가 관찰되지 않았다. 이는 tACS가 특정 주파수와 관련된 신경 활동을 선택적으로 변조할 수 있음을 시사하며, 자극주파수 선정의 중요성을 보여준다.

다만, 본 연구는 후두엽 단일 부위 자극에 한정되어 있어, tACS가 뇌 영역간 상호작용이나 네트워크 수준의 변화를 어떻게 유도하는지 명확히 규명하지 못하였다. 향후 연구에서는 다양한 주파수 및 자극 부위 조합을 적용하여, tACS가 뇌 네트워크 수준에서 어떠한 상호작용을 유발하고 인지 기능이나 감각 처리 과정에서 어떠한 영향을 미치는지 종합적으로 탐색할 필요가 있다.

5. Acknowledgements

본 연구는 2025년도 식품의약품안전처 연구개발비(RS-2023-00215716)와 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00456412).

6.참고 문헌

[1] Zaehle, Tino, et al. "Transcranial direct current stimulation of the prefrontal cortex modulates working memory performance: combined behavioural and electrophysiological evidence." BMC neuroscience 12 (2011): 1-11.

[2] O'Connell, Neil E., et al. "Non-invasive brain stimulation techniques for chronic pain. A report of a Cochrane systematic review and meta-analysis." European journal of physical and rehabilitation medicine 47.2 (2011): 309-326.

[3] Vanneste, Sven, Felipe Fregni, and Dirk De Ridder. "Head-to-head comparison of transcranial random noise stimulation, transcranial AC stimulation, and transcranial DC stimulation for tinnitus." Frontiers in psychiatry 4 (2013): 158.

[4] Kim, Do-Won, et al. "Can anodal transcranial direct current stimulation increase steady-state visual evoked potential responses?." Journal of Korean Medical Science 34.43 (2019).

Poster-021

폐루프 피드백을 통한 배양된 신경네트워크의 학습 유도 플랫폼 개발

서은비[1*], 남윤기[1]

한국과학기술원 바이오및뇌공학과

Closed-loop Feedback Platform for Inducing Learning in Cultured Neuronal Networks

Eunbee Seo[1*], Yoonkey Nam[1]

[1]Department of Bio and Brain Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Daejeon, Korea

[*]E-mail: ynam@kaist.ac.kr

Abstract

To investigate how to direct learning in a desired manner, we explored a specific learning task and the corresponding feedback strategy. The goal of learning was defined as reaching the same success count D with fewer inputs, satisfying three criteria: (1) reduced input to reach D during feedback training, (2) retention without feedback, and (3) increased success rate after training. Feedback stimulation was configured to guide the network toward the target state so that it could learn the desired response through feedback. We demonstrated that this closed-loop feedback paradigm successfully induced learning in cultured neuronal networks, accompanied by increased output sensitivity and strengthened connectivity between channels, whereas open-loop stimulation failed to induce learning.

1. 연구 배경

배양된 신경 네트워크는 실제 뇌보다 단순한 구조를 가지지만, 다수의 뉴런이 상호 연결되어 복잡한 네트워크를 형성하며, 외부 자극에 대한 반응을 처리·조절하는 정보처리 능력과 외부 입력에 따라 연결 강도가 변화하는 가소성을 지니고 있어, 네트워크 수준의 학습 원리를 탐구하기 위한 모델로 적합하다. 이러한 신경 네트워크의 연결도를 원하는 방향으로 제어할 수 있는 기술은, 배양된 신경 네트워크의 활용 범위를 바이오 컴퓨팅의 연산 단위로 확장할 수 있는 가능성을 제시한다.

학습은 자극에 대한 반응 결과로 신경 네트워크의 연결도가 선택적으로 변화하고, 그 변화가 지속되어 기억으로 전환되는 과정으로 이해된다. 생체 내 강화학습은 시냅스 가소성에 더해, 도파민성 강화 신호가 결합하여 작용함으로써 원하는 연결을 선택적으로 강화하는 것으로 설명된다.[1] 배양된 신경 네트워크에서는 이러한 도파민성 보상 체계가 존재하지 않기 때문에, 네트워크의 반응에 따라 피드백 자극을 제공하는 폐루프 구조를 구성하여 학습을 유도하는 전략이 시도되어 왔다.[2, 3] 그러나 기존 연구에서 정의된 학습 과제에 따른 피드백 전략은 연구마다 달라, 특정 과제에서 유효했던 전략이 다른 학습 과제에는 적용되지 않거나 학습이 안정적으로 재현되지 않는 사례가 있었다. 또한 복잡한 네트워크 내에서 피드백 자극이 학습에 미치는 영향을 명확히 해석하기 어려웠다.

따라서 본 연구에서는 신경 네트워크의 두 채널을 입출력 채널로 설정하고, 입출력 간의 연결 강화를 학습 과제로 정의하였다. 이를 효율적으로 달성하기 위한 피드백 전략을 탐색하고, 그 전략에 따라 연결 강화가 유도되어 학습이 이루어짐을 확인하였다. 또한 사후 분석과 open-loop control 실험을 통해, 해당 피드백 방법이 학습 성공 여부에 미치는 효과를 분석하였다.

2.연구 방법

실험은 배양된 해마 뉴런 네트워크 (15-27DIV)를 사용하였다. 광학문자인식(OCR) 기술을 이용하여 신경 네트워크 신호 분석 소프트웨어의 화면에 표시된 반응 값을 읽고, 그에 따라 마우스 매크로로 자극 소프트웨어를 제어하는 프로그램을 제작하였다. 이를 통해 별도의 하드웨어 장비 없이 폐루프 시스템을 구성하였으며, 전체 피드백 지연 시간은 평균 940.66ms, 입력 자극 후 피드백 자극까지의 시간은 출력 반응의 ROI를 포함하여 약 875.4 ms로 측정되었다.

학습 전, 네트워크의 연결도를 평가하여 입력과 출력 채널을 설정하였다. 입력 자극에 대해 출력 반응이 미리 설정된 기준값을 초과할 경우 이를 성공으로 정의하고, 100회의 입력 자극에 대한 성공 횟수 D를 계산하였다.

피드백 학습의 목표는 더 적은 입력으로 동일한 성공 횟수 D 에 도달하는 것으로, 이는 두 채널 간 기능적 연결도의 강화를 의미한다. 피드백 자극은 목표 상태를 유도하도록 설정하여, 네트워크가 피드백을 통해 목표 성공 상태를 학습할 수 있도록 학습 전 파라미터 프로빙을 통해 적절한 채널과 전압과 주파수를 설정하였다.

네트워크가 목표 상태를 학습했다고 판단하기 위한 기준은 다음 세 가지이다.
(1) 피드백 학습 중 더 적은 입력으로 D에 도달할 것,
(2) 학습 직후 피드백 없이도 (1) 조건이 유지될 것,
(3) 학습 직후 100회의 입력 자극에서 학습 전보다 성공 횟수가 증가할 것.
조건 (2)와 (3)은 피드백 자극의 효과가 단기적 반응 조정이 아닌 신경 가소성의 변화로 이어졌는지를 평가하기 위함이다.

마지막으로, 동일한 자극 조건에서 출력 반응과 무관하게 무조건적으로 같은 피드백 자극을 open-loop 조건을 수행하여, 피드백의 연동 여부가 학습 성립에 미치는 영향을 비교하였다.

3. 연구 결과

그림 1(a)에서와 같이, 피드백 자극을 통한 목표 성공 상태의 유도를 통해 입출력 채널 간 연결도가 원하는 방향으로 변화함을 확인하였다. 그림 1(b)는 학습 전후의 PSTH를 비교한 결과로, 학습 후 PSTH의 피크값이 증가하고 피크 시점이 입력 자극 시점에 더 근접하여, 출력 반응의 민감도가 증가했음을 보여준다. 또한, 학습 후 1시간 간격으로 측정한 결과 강화된 연결도는 약 10시간까지 유지된 뒤 점차 감소하는 경향을 보였다. 그림 1(c)는 설정한 피드백 자극이 실제로 목표 반응을 유도하는지를 검증한 결과로, 다섯 번의 피드백 트레이닝 동안 피드백 자극 직후 입력 자극 후 출력 반응이 성공 상태에 도달할 확률은 평균 0.6325로 나타났으며, 이는 피드백 자극이 설정한 방향대로 네트워크를 목표 반응으로 이끄는 신호로 작용했음을 시사한다. 반면, 그림 1(d)는 동일한 칩에서 3일 후 동일한 채널 설정으로 피드백 없이 자극만 제공한 open-loop 조건의 결과로, 학습 효과가 유도되지 않았음을 보여준다. 이로부터 피드백의 존재가 학습 성공의 요인이었음을 확인하였다.

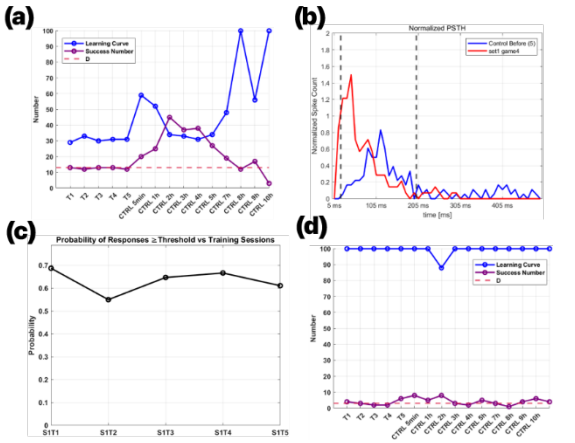


그림 1. 피드백 학습 실험 결과. (a-c) 학습 성공한 폐회로 조건의 (a) Learning Curve (b) 학습 전후의 PSTH 비교(b/r: 전/후), (c) 피드백 효과. (d) 동일한 자극 조건에서 open-loop 대조 실험의 Learning Curve

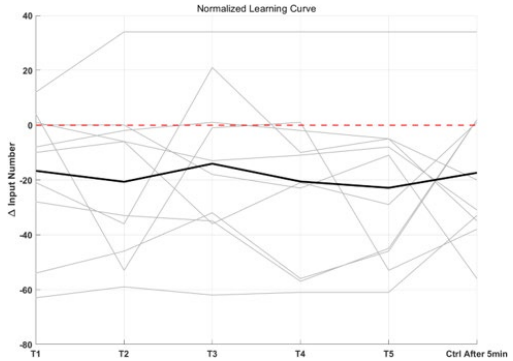


그림 2. 평균 정규화 학습 곡선 (n=10 trials, chip = 8)

총 10회의 실험 중 6개에서 세 가지 학습 기준(1–3)을 모두 만족하였으며, 나머지 4개 중 3개에서도 피드백이 주어진 조건에서는 학습 전보다 더 적은 입력으로 성공 횟수 D에 도달하였다. 이는 피드백 자극이 단기적으로 목표 반응을 유도하는 데에는 효과적이었으나, 그 변화가 신경 가소성의 지속적인 변화로는 이어지지 않았음을 의미한다. 그러나 사용한 연결도 기반의 피드백 설정 전략이 여러 칩에서도 일관되게 작용하여, 신경 네트워크 학습을 유도할 수 있는 재현 가능한 접근임을 확인하였다.

4. Acknowledgements

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00349495, RS-2024-00414004)

5.참고 문헌

[1] N. Frémaux and W. Gerstner, "Neuromodulated spike-timing-dependent plasticity, and theory of three-factor learning rules," Frontiers in neural circuits, vol. 9, p. 85, 2016.

[2] D. J. Bakkum, Z. C. Chao, and S. M. Potter, "Spatio-temporal electrical stimuli shape behavior of an embodied cortical network in a goal-directed learning task," J Neural Eng, vol. 5, no. 3, pp. 310-23, Sep 2008, doi: 10.1088/1741-2560/5/3/004.

[3] G. Shahaf and S. Marom, "Learning in networks of cortical neurons," J Neurosci, vol. 21, no. 22, pp. 8782-8, Nov 15 2001, doi: 10.1523/JNEUROSCI.21-22-08782.2001.

Poster-022

피부전도 및 기능적근적외선분광 기반 위험 직무 종사자 스트레스 예측을 위한 생리적 바이오마커 개발

김지승, 박은서, 한창희*

고려대학교 컴퓨터정보학과

Development of GSR and NIRS-Based Physiological Biomarkers for Predicting Occupational Stress in High-Risk Workers

Ji-seung Kim, Eun-seo Park, and Chang-hee Han*

Dept. of Computer and Information Science, Korea University

*changheehan@korea.ac.kr

Abstract

This study investigated psychophysiological biomarkers of stress vulnerability using galvanic skin response (GSR) and functional near-infrared spectroscopy (fNIRS). Forty-one high-risk workers participated in alternating rest and 2-back task sessions. GSR signals were decomposed into tonic and phasic components with the SparsEDA algorithm to extract indices such as SCL_mean, NS_SCR_rate, and EDASymp. fNIRS data were processed using the modified Beer–Lambert law to obtain hemodynamic features (mean, slope, AUC, and peak). Higher stress levels were associated with lower tonic arousal (ΔSCL_mean, $r = -0.34$, $p = 0.031$), greater phasic reactivity (ΔEDASymp, $r = 0.38$, $p = 0.04$), and stronger deoxygenation responses (AUC_deoxy, $r = 0.40$, $p = 0.013$). These results indicate that combined GSR–fNIRS markers can reflect autonomic and neurovascular alterations linked to occupational stress, offering potential for objective risk assessment in high-stress workers.

1. 연구 배경

현대 산업 환경에서 위험 직무군에 종사하는 근로자들은 장시간 노동, 교대 근무, 물리적 위험 노출, 사회적 관계 갈등 등 다양한 스트레스 요인에 지속적으로 노출되어 있다. 이러한 직무 스트레스는 자율신경계의 불균형과 스트레스 호르몬 분비 이상을 유발하며, 장기적으로는 우울, 불안, 인지 기능 저하, 직무 소진 등 정신건강 문제로 이어지는 것으로 보고되고 있다. 그러나 현재의 직무 스트레스 평가 방법은 대부분 자기보고식 설문에 의존하고 있어, 주관적 편향과 상황적 변동성을 충분히 반영하지 못한다는 한계가 있다. 이에 따라 생리신호 기반의 객관적이고 정량적인 스트레스 평가 지표, 즉 바이오마커(biomarker) 개발의 필요성이 커지고 있다.

이 가운데 피부전도(Galvanic Skin Response, GSR)는 교감신경계 활성에 의해 발생하는 피부의 전기전도 변화로, 정서적 자극이나 인지적 부하에 대한 반응을 민감하게 반영한다. 특히 GSR의 tonic 성분(SCL)과 phasic 성분(SCR)은 각각 장기적인 각성 수준과 순간적인 반응성을 나타내어, 교감신경계의 안정성과 반응성을 함께 평가할 수 있다. GSR 지표는 실시간 측정이 용이하고 피험자 부담이 적어, 스트레스 수준을 모니터링하는 대표적인 생리적 지표로 활용되고 있다.

또한, 기능적 근적외선 분광법(functional Near-Infrared Spectroscopy, fNIRS)은 뇌혈류의 산소화·탈산소화 변화를 비침습적으로 측정함으로써, 스트레스 상황에서의 전전두엽(prefrontal cortex) 활성 변화를 관찰할 수 있는 기술이다. 전전두엽은 감정 조절, 의사결정, 작업기억 등 고차원적 인지 기능을 담당하며, 스트레스 반응의 중추적 역할을 하는 영역으로 알려져 있다. 따라서 NIRS를 활용한 혈역학적 반응 분석은 인지적 부하 및 정서적 스트레스에 대한 뇌 반응 특성을 이해하는 데 중요한 단서를 제공한다.

이에 본 연구는 위험 직무군 종사자들을 대상으로 GSR 및 NIRS 신호를 통합적으로 분석하여, 자율신경계 및 뇌혈류 반응의 상호작용을 기반으로 한 스트레스 관련 바이오마커를 탐색하고자 하였다. 특히, 인지 부하 과제 수행 전후의 생리적 변화를 분석함으로써, 직무 스트레스 수준과 연관된 교감신경 반응성의 불균형 및 전전두엽 탈산소화 경향을 규명하고, 이를 통해 정신건강 위험 예측을 위한 객관적 지표 개발의 가능성을 검토하였다.

2. 연구 방법

본 연구에서는 위험 직무군 종사자의 스트레스 반응을 객관적으로 평가하기 위해 다중 생리신호 기반 실험을 설계하였다. 총 50명 중 데이터 품질을 충족한 41명의 데이터를 분석에 사용하였으며, 실험은 개안–폐안–휴식–2-back 과제–휴식 순으로 구성하고, 2-back–Rest 블록을 4회 반복하여 안정 상태와 인지 부하 상태의 교차 변화를 측정하였다.

GSR 신호는 베이스라인 보정, 밴드패스 필터링(0.05–1 Hz), 다운샘플링(8Hz)을 거쳐 전처리하였다 [1,2]. SparsEDA 알고리즘으로 tonic 성분(SCL)과 phasic 성분(SCR)을 분리하고, 시간·주파수 영역 지표를 산출하였다 [1,2]. 시간영역에서는 SCL_mean, SCL_std, NS_SCR_rate_permin, NS_SCR_max, SCR_amp_mean을, 주파수영역에서는 EDASymp, TVSymp, TVSymp_std, Phasic_energy를 추출하였다. 각 과제 전후 구간(Rest–Task–Rest)을 한 쌍으로 묶어 변화량(Δ)과 변화율(%Δ)을 계산하여 교감신경 반응성을 평가하였다.

fNIRS 신호는 Modified Beer–Lambert Law(MBLL)을 적용하여 산소화(HbO) 및 탈산소화(HbR) 헤모글로빈 변화를 산출하였다. 0.01–0.1 Hz 대역통과 필터를 적용하고, 자극 전 10초–자극 후 230초 구간을 기준으로 베이스라인을 보정하였다 [3]. 각 채널에서 Mean, Slope, AUC, Peak, Time-to-Peak, Variance, HbT, ODI, coupling

표 1. GSR 데이터와 직무스트레스 간 상관분석 결과 (Post–Pre)

GSR (Post-Pre)	d_SCL_mean 피어슨		pct_SCL_mean 피어슨		d_SCL_std 피어슨		pct_EDASymp 스피어만	
	p	r	*p*	r	*p*	r	*p*	r
직무스트레스	0.1736	-0.2195	0.2111	-0.2136	0.0159*	0.3886	0.7696	0.0558
직무스트레스(역할갈등)	0.0312*	-0.3412	0.0238*	-0.3762	0.1759	0.2243	0.0707	0.3347
직무스트레스(대인관계)	0.0355*	-0.3335	0.0014*	-0.5130	0.8953	0.0221	0.0398*	0.3774

표 2. NIRS 데이터와 직무스트레스 간 상관분석 결과 (Post–Pre)

NIRS (2-back)	auc_deo 스피어만		mean_deo 스피어만		peak_deo 피어슨		slope_deo 스피어만	
	p	r	*p*	r	*p*	r	*p*	r
직무스트레스	0.0128*	0.3953	0.0128*	0.3953	0.0243*	0.3603	0.0424*	0.3309
직무스트레스(역할갈등)	0.7499	0.0527	0.7499	0.0527	0.7706	0.0482	0.5073	0.1079
직무스트레스(대인관계)	0.2304	-0.1965	0.2304	-0.1965	0.1280	-0.2480	0.8646	0.0286

지표를 계산하고 채널 평균을 산출하였다 [3].

각 생리지표는 직무스트레스, 역할갈등, 대인관계 스트레스 설문 점수와 매칭하여 상관분석을 수행하였다. 이상치는 MAD(z ≤ 3) 또는 IQR(1.5×IQR) 기준으로 제거하였으며, 정규성 검정(Lilliefors)에 따라 Pearson 또는 Spearman 상관을 사용하였다. 이를 통해 생리적 반응과 심리적 스트레스 간의 관계를 정량적으로 분석하였다.

3. 연구 결과

표 1에서, GSR 데이터는 ΔSCL_std와 유의한 양의 상관을 보였다(r≈0.39, p=0.016). 역할갈등 점수는 ΔSCL_mean과 pct_SCL_mean 모두와 음의 상관을 보여(각각 r≈−0.34, p=0.031; r≈−0.38, p=0.024) 과제 전후 tonic 수준의 증가가 둔화되는 경향을 나타냈다. 대인관계 스트레스는 ΔSCL_mean(r≈−0.33, p=0.036)과 pct_SCL_mean(r≈−0.51, p=0.001)에서 일관된 음의 상관을 보였으며, 주파수 지표인 pct_EDASymp와는 양의 상관을 보였다(r≈0.38, p=0.040). 요약하면, 스트레스가 높을수록(특히 역할갈등·대인관계 영역) tonic 반응의 증분이 감소하고(둔화), 변동성은 증가하며(ΔSCL_std↑), 일부 주파수 기반 sympathetic 활성은 상대적으로 증가하는 불균형 양상이 관찰되었다.

표 2(NIRS, 2-back)에서는 직무스트레스와 HbR 기반 지표들 간 일관된 양의 상관이 확인되었다: auc_deo(r≈0.40, p=0.013), mean_deo(r≈0.40, p=0.013), peak_deo(r≈0.36, p=0.024), slope_deo(r≈0.33, p=0.042). 즉 스트레스가 높을수록 2-back 동안의 탈산소화 반응의 면적·평균수준·최대치·초기기울기가 모두 증가했다.

그림 1은 각 모달리티에서의 대표적 상관을 예시로 제시한다. NIRS에서는 auc_deo와 스트레스 점수의 양의 상관(r≈0.40, p≈0.013), GSR에서는 pct_SCL_mean과 대인관계 스트레스의 음의 상관(r≈−0.51, p<0.01)이 가장 두드러진 결과로 시각화되었다. 전체적으로, 인지부하 과제 전후의 GSR 변화 지표와 과제 중 NIRS HbR 지표가 설문 기반 스트레스 수준과 의미 있게 연결되며, 위험 직무군의 위험도 예측을 위한 바이오마커로의 가능성을 시사한다.

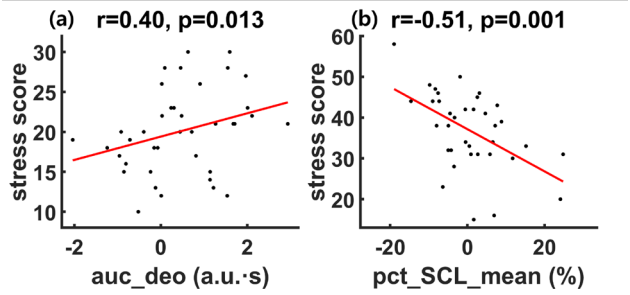


그림 1. (a) 대인관계 스트레스와 pct_SCL_mean(GSR, Post–Pre %) 간의 상관관계 (b) 직무스트레스과 AUC_deoxy(NIRS, 2-back) 간의 상관관계

4. Acknowledgements

이 연구는 2025년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. RS-2024-00455484)과 2025년 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 SW중심대학사업의 지원을 받아 수행되었음(2024-0-00036)

5. 참고 문헌

[1] Posada-Quintero, H. F., Florian, J. P., Orjuela-Cañón, Á. D., Aljama-Corrales, T., Charleston-Villalobos, S., & Chon, K. H. "Power Spectral Density Analysis of Electrodermal Activity for Sympathetic Function Assessment." Annals of Biomedical Engineering 44(10) (2016): 3124–3135.

[2] Posada-Quintero, H. F., & Chon, K. H. "Highly Sensitive Index of Sympathetic Activity Based on Time-Frequency Spectral Analysis of Electrodermal Activity." American Journal of Physiology – Regulatory, Integrative and Comparative Physiology 311(3) (2016): R582–R591.

[3] Pinti, P., Scholkmann, F., Hamilton, A., Burgess, P., & Tachtsidis, I. "Current Status and Issues Regarding Pre-processing of fNIRS Neuroimaging and Potential Solutions." Frontiers in Human Neuroscience 12 (2018): 505.

Poster-023

뇌자도 기반 집중 상태 정량화를 위한 새로운 집중 지표 개발 연구

한효정[1], 김예성[2], 김민영[3], 최수인[3], 임창환[1,2*]

한양대학교 융합전자공학과[1]

한양대학교 인공지능학과[2]

한국표준과학연구원 의료융합측정그룹[3]

Development of a Novel Attention Index for Quantification of Attentional States Using Magnetoencephalography

Hyojeong Han[1], Ye-Sung Kim[2], Min-Young Kim[3], Soo-In Choi[3], Chang-Hwan Im[1,2*]

[1]Department of Electronic Engineering, Hanyang University, Korea

[2]Department of Artificial Intelligence, Hanyang University, Korea

[3]Medical metrology group, Division of biomedical metrology, Korea Research Institute of Standards and Science, Korea

*ich@hanyang.ac.kr

Abstract

Magnetoencephalography (MEG), which offers high temporal resolution and minimal preparation, has become increasingly accessible and applicable with recent technological advances. However, whereas the electroencephalography (EEG) studies have extensively investigated attention markers such as the theta/beta ratio, research on standardized MEG indices that quantitatively capture attentional state has yet to be established. This study proposes a new MEG-based attention index. We collected attention-related behavioral data using the d2 test and derived the index by comparing and analyzing the behavioral measures with concurrently recorded MEG signals. The proposed index was validated by comparing resting state with two attention-inducing tasks, and the results indicate that it reliably reflects attentional state.

1. 연구 배경

집중은 인간의 행동과 인지 과정을 이해하는 데 핵심적인 역할을 한다. 집중 수많은 자극 중에서 무엇에 집중하고 무엇을 무시할지를 결정하는 인지적 필터로 작용하며, 이를 통해 운전, 학습, 업무 등 다양한 일상 활동들을 효율적이고 안정적으로 할 수 있게 한다. 더 나아가 집중 메커니즘에 대한 이해는 주의력결핍과잉행동장애(ADHD)를 비롯한 여러 인지 장애의 진단과 해석에도 기여한다. 집중에 대한 신경생리학적 메커니즘을 규명하기 위해 그 동안 뇌파(electroencephalography, EEG)를 활용한 세타/베타 비율(theta/beta ratio)와 같은 다양한 집중 지표들이 다양하게 연구되어 왔다.

한편 뇌자도 (magnetoencephalography, MEG)는 신경 전류가 생성하는 미세 자기장을 높은 시간 해상도로 할 수 있으며, 전극 부착이 필요하지 않아 측정 시 준비 시간이 짧으며 보다 편리한 측정 환경을 제공한다. 특히 기존의 초전도양자간섭장치 (SQUID) 기반 MEG는 크기와 비용, 유지보수의 문제로 인해 활용이 제한적이었으나, 최근 광펌프자력계(optically pumped magnetometer, OPM) 기술의 발전으로 MEG 시스템의 소형화와 휴대성이 향상되면서, MEG의 대중화 가능성이 커지고 있다.

그럼에도 불구하고, MEG 환경에서 집중 상태를 정량적으로 반영하는 표준화된 생체 지표는 아직 확립되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 MEG 기반의 새로운 집중 지표를 제안한다. 대표적인 집중 행동 지표 검사인 d2 test로 집중 관련 행동 데이터를 수집하고 이를 MEG 신호를 비교, 분석하여 집중 지표를 도출하였다. 제안한 지표의 유효성을 검증하기 위해 안정 상태(resting state)와 두 가지 집중 유발 과제 사이의 지표 유의성을 검증하였다. 그 결과 도출한 집중 지표가 집중 상태를 효과적으로 반영함을 입증하였다.

2. 연구 방법

본 연구에서는 attention index extraction experiment와 validation experiment의 두 가지 실험으로 구성되었다. 첫 번째 실험은 그림 1과 같이 d2 test 패러다임으로 집중상태를 유발하고 과제 수행 중 발생하는 뇌자도를 측정하는 절차로 진행되었다. 총 22명의 건강한 성인이 참여했으며, d2 test 정확도가 70% 미만인 1명은 성실하게 참여하지 않은 것으로 판단하여 추후 분석에서 제외하였다.

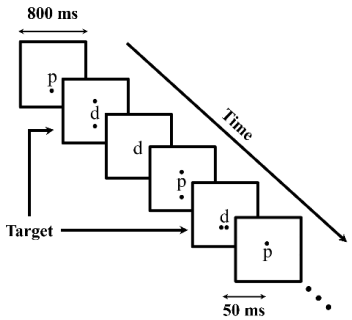


그림 1. D2 test 패러다임

참가자에게는 문자 'd'와 점 두 개가 있는 경우를 목표 자극으로 인식하고, 그 외는 비목표 자극으로 구분하도록 지시했다. 목표 자극이 제시되면 response pad의 초록색 버튼, 비목표 자극일 때는 빨간색 버튼을 누르도록 안내했다.

세 가지 유형의 목표 자극과 아홉 가지 유형의 비목표 자극이 1:3 비율로 총 1,316 trials로 구성되었다. 각 자극은 최대 800ms 동안 제시되었고, 자극 종료 또는 정답 응답한 시점으로부터 50 ms 이후 다음 자극이 제시되도록 설정하였다. 전체 과제 수행 시간은 약 15분 이내였다.

주의 지표 산출을 위해 먼저 각 참가자의 d2 test 결과 데이터로부터 concentration performance (CONC)를

계산하였다.

$$CONC = \frac{TP - (FP + FN)}{NTT}$$

여기서 TP(true positives)는 목표 자극을 정확히 목표로 판별한 횟수, FP(false positives)는 비목표 자극을 잘못하여 목표로 판별한 횟수, FN(false negatives)은 목표 자극을 비목표로 잘못 판별한 횟수, NTT는 전체 목표 자극 수를 의미한다.

각 참가자에 대해 CONC는 94 trials를 overlapping 비율 50%로 설정하여 계산하였으며, 그 결과 총 27개의 CONC 값이 계산되었다. MEG 신호도 동일한 방식으로 94개 trial에 해당하는 길이만큼 분할한 뒤, 각 segments를 50% sliding window를 적용하여 2 s 길이의 epoch으로 추가 분할하였다. 채널은 frontal, central, parietal, temporal, occipital의 다섯 영역으로 묶고, 각 영역을 좌우로 분리하여 분석했다. 영역 간 채널 수 균형을 맞추기 위해 temporal은 두 개의 하위 영역으로 추가 세분하여, 총 16개 영역을 정의하였다. 주파수 대역은 theta, alpha, low-alpha, high-alpha, SMR, beta, low-beta, high-beta의 8개 밴드로 구분하고, 각 epoch마다 영역별 평균 밴드 파워를 산출하여 총 128개의 feature를 얻었다. 이후 참가자별로 각 feature와 CONC 간 상관계수(correlation coefficients, CC)를 계산하고, 모든 참가자의 CC값을 평균하였다. 평균 CC의 절댓값이 최대인 feature를 MEG 기반 집중 지표로 선정하였다.

제안한 MEG 기반 집중 지표가 집중 상태를 신뢰성 있게 반영하는지 확인하기 위해 validation experiment를 진행하였다. 집중 상태 유발 과제로 틀린그림찾기(Spot the difference)와 월리를찾아라(Where's Wally)를, 비교를 위한 비집중 상태는 resting state를 사용하였다.

Validation experiment에는 건강한 성인 21명이 참여하였다. 이 중 월리를 찾아라 과제에서 측정 신호에 과도한 노이즈가 포함된 2명은 추후 해당 과제 분석에서 제외했다.

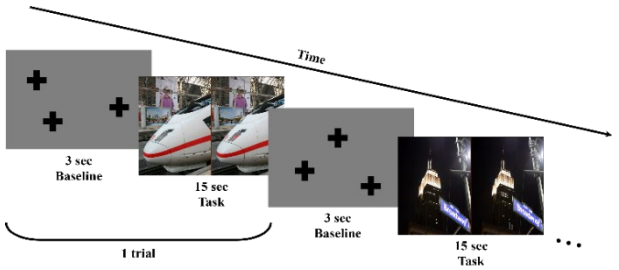


그림 2. 틀린그림찾기 패러다임

틀린그림찾기는 그림 2와 같이 두 장의 유사한 그림 사이에서 차이점을 찾는 과제이다. 각 trial은 15 s 동안 제시되었고 총 10개의 그림을 사용하였다. 각 trial 시작 전 참가자들에게 틀린 개수를 안내했으며, 다 찾더라도 집중 상태를 계속 유지할 수 있도록 실제 개수보다 하나 더 많은 수로 제시하였다.

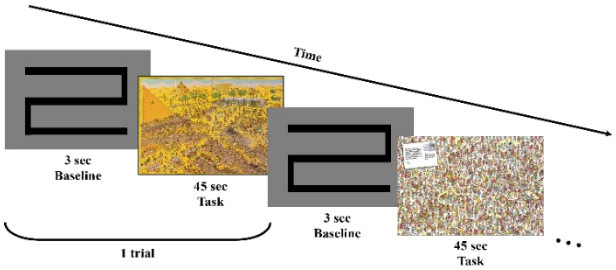


그림 3. 월리를찾아라 패러다임

월리를 찾아라는 그림 3.과 같이 다수의 인물이 등장하는 장면에서 목표 인물인 Wally를 찾는 실험이다. 각 trial은 45 s 동안 제시되었고 총 6개의 그림을 사용했다. 앞선 과제와 동일하게 그림 제시 전 Wally의 수를 실제 개수보다 하나 더 많게 안내하여 집중을 유도하였다.

집중 상태 유발 과제에 앞서 비집중 상태 신호를 측정하기 위해 3 min의 resting state를 기록하였다. 또한 두 과제 모두 안구 움직임이 많이 발생할 수 있으므로, 각 trial 시작 전 과제별로 예상되는 눈 움직임을 수행하는 3 s의 baseline 구간을 두었다. 본 연구는 한국표준과학연구원 기관생명윤리위원회(IRB)의 승인을 받았으며(KRISS-IRB-2024-09), 모든 참가자로부터 실험 절차 설명 후 서면 동의를 받았다.

3. 연구 결과

표 1.은 CONC와 MEG 신호 사이에서 가장 높은 CC 값을 보인 상위 5개 후보이다. CONC와 MEG 신호 사이의 가장 강한 상관성은 좌측 Central 영역의 SMR 대역에서 관찰되었다. 또한 전반적으로 Central 영역과 Frontal 영역에서 CONC와 높은 상관관계를 보였다.

Rank	Region	Frequency Band	Correlation coefficient
1	Central Left	SMR	-0.1928
2	Frontal Left	Low Beta	-0.1650
3	Frontal Left	Beta	-0.1591
4	Central Left	Alpha	-0.1552
5	Central Left	High Alpha	-0.1445

표 1. Attention Index 순위

그림 4.는 집중 과제와 비집중 상태를 비교한 validation experiment 실험 결과를 보여준다. 두 집중 과제 모두 MEG 기반 집중 지표는 안정 상태보다 유의미하게 낮았다.

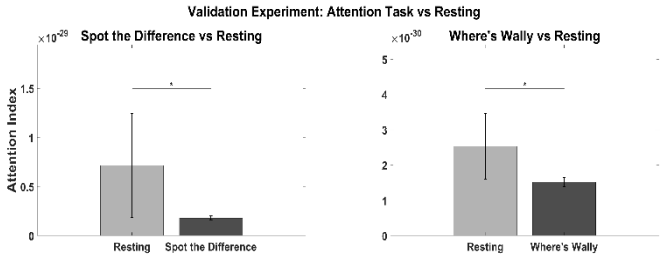


그림 4. 집중 및 비집중 task에서의 validation 결과

4. Acknowledgements

이 연구는 2023년 방위사업청 (DAPA)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 미래도전국방기술 연구개발사업임. (No.915061201)

5. 참고 문헌

[1] Angelidis, A., van der Does, W., Schakel, L., and Putman, P., "Frontal EEG theta/beta ratio as an electrophysiological marker for attentional control and its test-retest reliability." *Biological psychology* 121 (2016): 49-52.

[2] Kim, J. H., Kim D. W., and Im, C. H., "Brain areas responsible for vigilance: an EEG source imaging study." *Brain topography* 30.3 (2017): 343-351.

Poster-024

단일 탭 코일을 이용한 소형 듀얼채널 무선 통증제어 시스템

문정주[1*], 성경모[1], 김현규[1], 문원기[2], 민승현[2], 박영훈[1], 송동환[1], 장재은[1], 최영환[1], 박성윤[1], 정준수[3], 고진수[2], 정현호[2], 엄경식[1]

부산대학교 전자공학과[1]

연세대학교 신경외과[2]

부산대학교 의생명융합공학부[3]

Miniaturized Dual-Channel Wireless Pain Modulation System Using a Single Tapped Coil

Jeongju Moon[1*], Kyungmo Seong[1], Hyeon Gyu Kim[1], Wonki Mun[2], Seung Hyun Min[2], Younghoon Park[1], Donghwan Song[1], Jaeuen Jang[1], Younghwan Choi[1], ,Sung-Yun Park[1], Joonsoo Jeong[3], Chin Su Koh[2], Hyun Ho Jung[2], Kyungsik Eom[1]

Department of Electronics Engineering College of Engineering, Pusan National University, Korea[1]

Department of Neurosurgery Brain Research Institute, Yonsei University College of Medicine, Korea[2]

School of Biomedical Convergence Engineering, Pusan National University, Korea[3]

[*]jeongjudal96@pusan.ac.kr

Abstract

Neuropathic pain often persists despite pharmacotherapy. Motor-cortex stimulation (MCS) is promising but current implants are bulky due to batteries/active electronics, and single-channel designs limit targeting and are misalignment-prone. We present a battery-free dual-channel MCS implant that uses a single tapped receiver coil with channel-specific parallel capacitors to create two independent LC resonances, enabling frequency-selective addressing over an inductive link. PSPICE analyses verified dual resonances, strong channel isolation. A multilayer planar design yielded a compact package (9 × 13 × 3.4 mm³, 0.451 g). Measurements showed well-separated resonances (16.3 and 1.87 MHz) in S11 and low cross-channel coupling in S21. Power-transfer efficiency (PTE) at 1 mm spacing reached ~5.1% (CH1) and ~4.1% (CH2) and decreased with distance; rectified outputs remained stable under load during frequency-selective operation. In a spared nerve-injury (SNI) rat model, M1 stimulation via either channel significantly increased mechanical withdrawal thresholds with no inter-channel difference. These results demonstrate a passively powered, miniaturized, frequency-selective dual-channel architecture that preserves form factor, improves alignment tolerance, and achieves effective analgesia. The tapped-coil concept offers a scalable path to multichannel implants without increasing receiver count.

1. Introduction

Neuropathic pain persists after peripheral or central nervous system injury, and conventional pharmacotherapy often suffers from limited durability and adverse effects. Neuromodulation—such as spinal cord stimulation (SCS), deep brain stimulation (DBS), and motor-cortex stimulation (MCS)—has emerged as a viable alternative; among these, MCS was introduced as a treatment technique for patients with drug-resistant pain [1]. Nonetheless, current implantable MCS systems incorporate batteries and active electronics, leading to increased device bulk and weight, surgical complexity for pocket creation and lead fixation, revision burden for battery replacement, and risks of infection and migration [2, 3].

To fundamentally relax these constraints, the implant should be simplified while receiving energy safely and efficiently from outside the body. A wireless passive stimulator eliminates the battery/controller, enabling miniaturization and packaging freedom with improved biocompatibility. With an inductive link, single-coil passive stimulators can efficiently deliver power across millimeter distances, but they typically support only a single stimulation site, limiting post-implant targeting and multi-site selectivity. Common workarounds enlarge the electrode to recruit a wider tissue volume—sacrificing spatial specificity and risking unintended activation—or "add channels" by introducing multiple receiver coils, which increases device size and complexity [4, 5].

We therefore propose a single tapped receiver coil to form multiple independent LC resonances without extra coils. The external transmitter selects channels by carrier frequency (frequency-based channel selection), preserving the implant's footprint while enabling scalable multichannel operation and improving tolerance to misalignment. Building on this design, we quantitatively verify multi-resonance behavior and experimentally demonstrate increased pain thresholds with M1 stimulation in an SNI rat model.

2. Methods

(1) Multichannel verification

We used PSpice (OrCAD, USA) to validate that a single tapped inductor can realize frequency-addressable multichannel stimulation. A single tap yielded two channels and two taps yielded three, with each channel implemented as an LC tank. AC sweeps around the design band quantified per-channel |Vout| at the load and channel isolation. Tap ratio and coupling were varied to assess resonance spacing and robustness, informing the component values of the fabricated dual-channel implant.

(2) Device design and fabrication

A multilayer (e.g., three-layer) planar receiver coil was fabricated; parallel capacitors at the tap points established two independent LC resonances (1.87 MHz and 16.3 MHz). The implant rectifies and smooths the received power and delivers stimulation to electrodes, while the external transmitter selects the channel by carrier frequency. The packaged implant measures 9 × 13 × 3.4 mm³ and 0.451 g.

(3) Electrical characterization

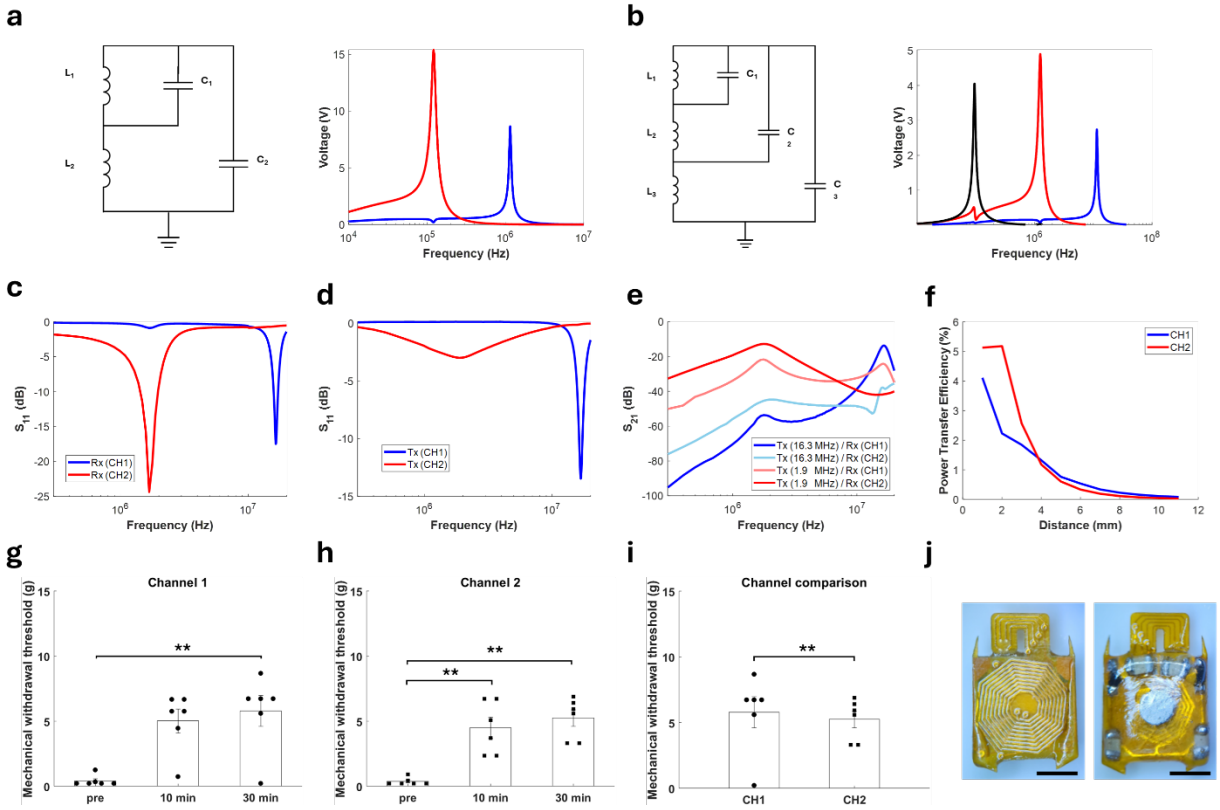


Fig. 1 (a) Single tapped LC tanks and two-channel |Vout|. (b) Two tapped LC tanks and three-channel |Vout|. (c) RX S11: resonances at 16.3 MHz (CH1) and 1.87 MHz (CH2). (d) TX S11 tuned for each channel. (e) S21 showing low cross-channel coupling. (f) PTE vs. distance; ~4.1% (CH1) and ~5.1% (CH2). (g) CH1 M1 stimulation increases withdrawal threshold (mean ± SEM; Mann–Whitney U test). (h) CH2 M1 stimulation increases withdrawal threshold. (i) CH1 vs CH2 analgesia; no significant difference. (j) Device photos (top/bottom); scale bar, 1mm.

Using a vector network analyzer, we measured S-parameters (S11/S21) to confirm resonance separation and cross-channel suppression. We quantified PTE versus coil separation and verified rectified output stability under load during frequency-selective operation and continuous sweeps.

(4) In-vivo experiments

In an SNI rat model, the implant was placed over M1 and channels were driven separately. Mechanical withdrawal thresholds were measured by the Von Frey up-down method. After testing normality, non-parametric statistics (Kruskal–Wallis–Dunn, Mann–Whitney) evaluated time effects and inter-channel differences.

3. Results

(1) Multichannel simulation (Fig. 1a-b)

PSpice analyses and bench measurements confirmed that a single tapped inductor yields distinct multi-resonance responses: one tap produced two |Vout| peaks (dual channel), and two taps produced three peaks (three channels). Channel-addressed operation showed strong isolation of non-addressed paths, validating frequency-based multichannel stimulation with a single coil.

(2) Miniaturization and build (Fig. 1j)

The implant was realized in a compact package (9 × 13 × 3.4 mm³, 0.451 g), with simplified lead routing and robust encapsulation suitable for cranial fixation in small animals. Top/bottom photographs illustrate the final layout and scale (1 mm scale bars).

(3) Electrical performance (Fig. 1c-f)

Receiver-side S11 exhibited two well-separated resonances at 16.3 MHz (CH1) and 1.87 MHz (CH2), while the transmitter S11 was tuned to efficiently drive each channel. S21 of the TX–RX pair demonstrated low cross-channel coupling and frequency-selective transfer. PTE at 1 mm spacing reached ~4.1% (CH1) and ~5.1% (CH2) and decreased monotonically with distance; under load, rectified outputs remained stable during channel-selective operation.

(4) In-vivo analgesic efficacy (Fig. 1g-i)

In the SNI rat model, M1 stimulation via either channel significantly increased mechanical withdrawal thresholds (Mann–Whitney U, mean ± SEM): CH1 showed a significant increase at 30 min; CH2 showed significant increases at 10 min and 30 min. No significant difference was detected between channels, indicating that the battery-free, frequency-selective dual-channel architecture achieves effective analgesia without sacrificing form factor.

4. Acknowledgements

This work was supported by Alchemist Project Program (RS-2024-00422269, Interactive humanoid platform with transcendental sensory augmentation) funded By the Ministry of Trade, Industry & Energy(MOTIE, Korea), and by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (RS-2023-00217893).

5. References

[1] T. Tsubokawa et. al. "Chronic Motor Cortex Stimulation for the Treatment of Central Pain." *SPRINGER*, Vol 9, p.137, 1991

[2] S. F. Lempka et. al. "Patient-Specific Analysis of Neural Activation During Spinal Cord Stimulation for Pain." *Neuromodul.: Technol. Neural Interface,* 2020, 23: 572-581.

[3] J.-P. Van Buyten et. al., "High-Frequency Spinal Cord Stimulation for the Treatment of Chronic Back Pain Patients:

Results of a Prospective Multicenter European Clincal Study.” *Neuromodul.: Technol. Neural Interface,* 2013, 16: 59-66
[4] J. Koo et. al. "Wireless bioresorbable electronic system enables sustained nonpharmacological neuroregenerative therapy." *Nat. Med.,* 2018, 24, 1830.
[5] J. Koo et. al. "Wirelessly controlled, bioresorbable drug delivery device with active valves that exploit electrochemically triggered crevice corrosion." *Sci. Adv.,* 2025, 6, abb1093.

Poster-025

뇌 영감 기반 이중-경로 정렬 및 융합을 통한 EEG-이미지 검색 향상

이창민[1*], 김준모[2*], 최우혁[2], 최예빈[2], 감태의[2**]

[1]상명대학교 휴먼지능정보공학전공

[2]고려대학교 인공지능학과[1]

Brain-Inspired Dual-Stream Fusion for EEG-to-Image Retrieval

Changmin Lee[1*], Jun-Mo Kim[2*], Woohyeok Choi[2], Yebin Choi[2], Tae-Eui Kam[2**]

[1]Dept. Human-Centered AI, Sangmyung University, Korea

[2]Dept. Artificial Intelligence, Korea University, Korea

[*]Equal contribution

[**]Corresponding author: kamte@korea.ac.kr

Abstract

EEG-based image retrieval aims to identify viewed images given brain signals. However, conventional methods that feed all EEG channels into a single encoder have achieved limited accuracy (~22% Top-1). To address this, we propose a dual-stream model inspired by the brain's two visual pathways. In our approach, EEG channels are split into ventral ("what") and dorsal ("where") streams, each processed by a dedicated encoder aligned to a different representation level of a CLIP visual model. The ventral-stream EEG features are aligned to higher-layer (semantic) CLIP embeddings, while the dorsal-stream features align with mid-layer (spatial) embeddings. A simple fusion mechanism then combines the two pathway outputs into a unified image-retrieval embedding. We evaluated our method on the large-scale THINGS-EEG2 dataset. The proposed dual-stream pipeline achieved about 25% Top-1 retrieval accuracy, outperforming the monolithic baseline (~22%) by ~3 percentage points. Top-5 accuracy also rose from ~54% to ~58% (+4 points). These gains were consistent across participants, with most subjects showing statistically significant improvements. Our results demonstrate that explicitly modeling ventral/dorsal pathways and aligning each to appropriate deep features yields a robust performance boost. Moreover, the pathway-specific design provides better interpretability: the dorsal pathway primarily contributes coarse spatial filtering, whereas the ventral pathway adds finer semantic detail, confirming their complementary roles. In summary, incorporating neuroscientific priors (dual pathways and hierarchical alignment) into EEG decoding can substantially enhance image retrieval performance and insight into the model's decision basis.

1. Background

EEG-based image retrieval has garnered interest as a means to decode a person's visual experience from brain signals. The recent release of the THINGS-EEG2 dataset, comprising EEG responses to a large set of object images, enables data-driven modeling of EEG–image correspondences [1,2]. However, existing approaches typically use a single-stream encoder that aggregates all EEG channels, which may not fully exploit the functional organization of the brain's visual system [3,4]. For instance, a baseline model mapping 64-channel EEG to CLIP image embeddings (using InfoNCE contrastive training) reaches only ~22% Top-1 accuracy on THINGS-EEG2. To move beyond this limitation, we draw inspiration from the well-established dual visual pathways of the brain. According to this theory, the ventral pathway processes "what" (object identity) information, while the dorsal pathway processes "where" (spatial and action-related) information. We hypothesized that modeling these pathways separately would improve retrieval performance. A similar notion of aligning deep neural network layers with the brain's processing hierarchy has been explored in computational neuroscience [5-8]. Our proposed method explicitly incorporates dual pathways into the EEG-to-image retrieval pipeline to leverage this neuroscientific prior.

2. Methods

Dataset and Baseline: We utilized the THINGS-EEG2 dataset, which provides EEG recordings for 1,854 object images viewed by human subjects. Following the dataset's protocol, we extracted EEG segments from 0.2 s before stimulus onset to 1.0 s post-onset, resampled to 250 Hz, and applied trial averaging and multivariate noise normalization (MVNN). As a baseline, we trained an ATM (All-channels to final-layer) encoder that maps the 64-channel EEG to a 1024-D vector, aligned with CLIP's final image embedding via InfoNCE loss (supplemented by an MSE term). After 50 epochs of training, this single-stream baseline achieved ~0.22 Top-1 accuracy and ~0.54 Top-5 accuracy on the test set.

Define–Align (Dual Streams): Our brain-inspired dual-stream model defines two distinct EEG channel groups corresponding to the ventral and dorsal visual pathways. The ventral-pathway group consists of electrodes roughly over occipito-temporal and inferior parietal regions (e.g., O1/O2, T7/T8, P7/P8), which are associated with object recognition processing. The dorsal-pathway group includes electrodes over occipito-parietal and centro-parietal regions (e.g., PO3/PO4, P1–P4, CP1–CP6), linked to spatial and action-related processing. We ensured no overlapping electrodes between the two groups to maximize pathway specificity and interpretability[9]. (We experimented with an alternative that shared midline electrodes Oz and CPz across both streams, but found it degraded pathway specificity with negligible performance benefit, so the non-overlapping split was chosen.) Each EEG pathway is encoded by a

separate transformer-based encoder, producing a 1024-D latent vector. We then aligned each pathway's encoder output to a different layer of a pretrained CLIP ViT-H/14 model. Specifically, the dorsal-pathway EEG embedding is mapped to the CLIP mid-layer (16th) representation to capture spatial/form information, whereas the ventral-pathway EEG embedding is mapped to a higher-layer (26th) CLIP representation to capture semantic category information. For reference, the baseline used the CLIP final-layer embedding. Through this "Define–Align" design, we obtain two complementary EEG feature streams corresponding to different levels of visual feature abstraction.

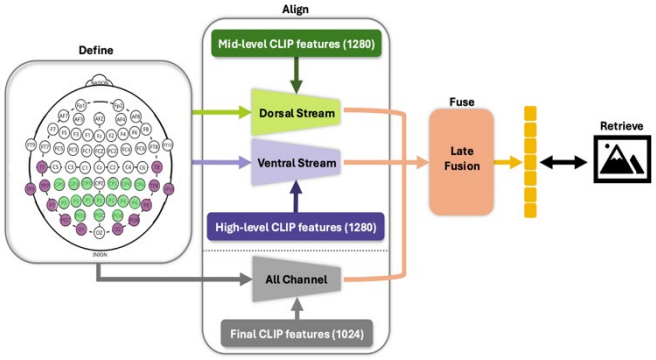


Figure 1. Overview of the Define–Align–Fuse dual-stream model. Dorsal (green) aligns to mid-level CLIP; ventral (purple) aligns to high-level CLIP; a lightweight head (orange) fuses embeddings for retrieval.

Fusion: In the "Fuse" stage, we integrate the two pathway embeddings into a single 1024-D retrieval embedding. We explored multiple late-fusion strategies: (1) simple feature averaging, (2) learnable weighted sum, and (3) a two-layer multilayer perceptron (MLP) that concatenates and projects the two vectors. These fusion methods are lightweight, adding minimal parameters. Additionally, we also tried a cross-attention module and max-pooling fusion in preliminary tests.

3. Results

On THINGS-EEG2, the dual-stream approach improves over the all-channel baseline: Top-1 0.22→0.25 (+3.4 pp) and Top-5 0.54→0.58 (+3.9 pp), consistent across subjects (SEM). Mean/Weighted/MLP deliver the largest, most stable gains; Cross-attention is positive but smaller.

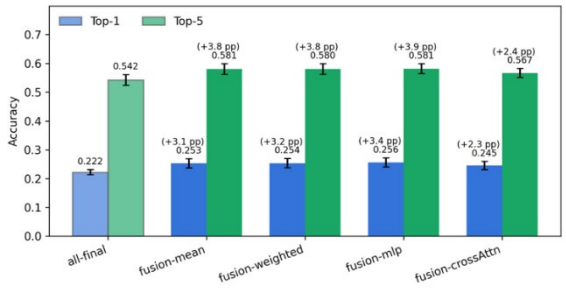


Figure 2. Top-1 (blue) and Top-5 (green) accuracies for dual-stream fusions (mean, weighted, MLP, cross-attention) vs all-final baseline. Bar labels show the exact value; the second line in parentheses shows Δpp vs baseline. Error bars: SEM across subjects.

These results suggest that the two pathways carry largely complementary information that can be effectively combined with straightforward fusion. Importantly, the dual-stream model also offers enhanced interpretability. This aligns with the known functional roles of the dorsal and ventral pathways and provides a neuroscientifically meaningful explanation for the performance improvements.

In summary, our results demonstrate that a Define–Align–Fuse paradigm – separating EEG signals by cognitive pathways, aligning with appropriate deep features, and fusing – yields reproducible gains in EEG-based image retrieval accuracy and provides clearer insight into the neural information utilized.

4. Acknowledgements

This work was supported by the Institute of Information & Communications Technology Planning & Evaluation (IITP) grant funded by the Korean government (MSIT) under the Artificial Intelligence Innovation Hub program at Korea University (No. RS-2019-II190079). This work was also supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korean government (MSIT) (No. RS-2023-00212498), and the Institute of Information & Communications Technology Planning & Evaluation (IITP) grant funded by the Korea government (MSIT) under the Development of AI Autonomy and Knowledge Enhancement for AI Agent Collaboration (No. 2022-0-00871).

5. References

[1] Gifford, A. T., Dwivedi, K., Roig, G., & Cichy, R. M. (2022). *A large and rich EEG dataset for modeling human visual object recognition*. NeuroImage, 264, 119754.

[2] Hebart, M. N., Contier, O., Teichmann, L., et al. (2023). *THINGS-data, a multimodal collection of large-scale datasets for investigating object representations in human brain and behavior*. eLife, **12**, e82580.

[3] Li, D., Wei, C., Li, S., et al. (2024). *Visual decoding and reconstruction via EEG embeddings with guided diffusion*. arXiv preprint arXiv:2403.07721.

[4] Radford, A., Kim, J. W., Hallacy, C., et al. (2021). Learning transferable visual models from natural language supervision. In Proceedings of the 38th International Conference on Machine Learning (ICML), pp. 8748-8763.

[5] Ungerleider, L. G., & Mishkin, M. (1982). *Two cortical visual systems*. In D. J. Ingle, M. A. Goodale, & R. J. W. Mansfield (Eds.), **Analysis of visual behavior** (pp. 549–586). MIT Press.

[6] Cichy, R. M., Khosla, A., Pantazis, D., Torralba, A., & Oliva, A. (2016). *Comparison of deep neural networks to spatio-temporal cortical dynamics of human visual object recognition reveals hierarchical correspondence*. Scientific Reports, **6**, 27755.

[7] Goodale, M. A., & Milner, A. D. (1992). *Separate visual pathways for perception and action*. Trends in Neurosciences, **15**(1), 20–25.

[8] Kravitz, D. J., Saleem, K. S., Baker, C. I., Ungerleider, L. G., & Mishkin, M. (2013). The ventral visual pathway: an expanded neural framework for the processing of object quality. Trends in Cognitive Sciences, 17(1), 26-49.

[9] O'Connell, R. G., Dockree, P. M., & Kelly, S. P. (2012). A supramodal accumulation-to-bound signal that determines perceptual decisions in humans. Nature Neuroscience, 15(12), 1729-1735.

Poster-026

면역-교세포 상호작용 연구를 위한 조절형 생체외 성상세포 스페로이드 플랫폼

제갈 욱[1], 박은영[1], 고은민[1], 연제민[2], 임성갑[2], 신현정[1*]

한국과학기술원 기계공학과[1]

한국과학기술원 생명화학공학과[2]

A Tunable In Vitro Spheroidal Astrocyte Platform for Immune-Glial Interface Studies

Uk Jegal[1], Eunyoung Park[1], Eunmin Ko[1], Jemin Yeon[2], Sung Gap Im[2] and Jennifer H. Shin[1*]

[1] Dept. of Mechanical Engineering, KAIST, Republic of Korea

[2] Dept. of Chemical & Biomolecular Engineering, KAIST, Republic of Korea

[*] j_shin@kaist.ac.kr

Abstract

Understanding astrocyte–microglia interactions is essential for modeling neuroinflammatory conditions such as stroke. However, isolating astrocytes without unintended activation remains a major challenge, limiting the reproducibility of in vitro glial models. In this study, we present an engineered in vitro platform that enables the isolation and co-culture of minimally stimulated, spheroidal astrocytes using a pCHMA-coated substrate. This chemically defined surface prevents cell-substrate adhesion while preserving cell-cell contacts, supporting 3D spheroid formation with minimal mechanical stress. When co-cultured astrocytes and microglia are treated with lipopolysaccharide (LPS) stimulation to examine how immune crosstalk drives astrocyte activation, activated microglia are shown to induce a shift toward the A1 astrocyte phenotype, highlighting the importance of microglial paracrine signaling. This modular and reproducible system provides a new tool for neuroinflammation modeling, and can be readily integrated into organ-on-chip, biomaterial-based drug screening, or bioelectronic interface platforms where glial contributions must be quantified.

1. 연구배경

신경아교세포 중 성상세포(astrocyte)는 신경 염증, 조직 재형성, 및 손상 반응 등 다양한 뇌질환에서 핵심적인 역할을 수행한다. 특히 뇌졸중 등 염증성 질환의 기전을 규명하기 위해서는 비활성 상태의 성상세포를 안정적으로 확보하고, 미세아교세포(microglia)와의 상호작용을 정량적으로 분석할 수 있는 플랫폼이 필요하다. 그러나 기존의 대표적 성상세포 분리법인 회전 진탕법(orbital shaking)은 다른 glial cell을 제거하는 물리 자극을 활용하기 때문에 [1], 성상세포가 의도치 않게 활성화되는 부작용이 있다. 이로 인해 염증 유도 실험의 대조군 확보가 어렵고, downstream 분석 결과의 신뢰성이 저하될 수 있다. 이를 해결하기 위해, 본 연구는 세포 부착 기전의 차이를 이용한 접착 제어 플랫폼을 도입한다. 대부분의 신경아교세포는 세포-기질 부착(cell-substrate adhesion)에 의존하지만, 성상세포는 세포-기질 부착과 세포-세포 부착(cell-cell adhesion)이 모두 가능하다는 점에 착안하였다. 본 연구에서는 iCVD(Initiated Chemical Vapor Deposition) 공정을 활용하여 접촉각 약 80°를 갖는 pCHMA(poly(cyclohexyl methacrylate)) 표면을 재현하였다. 이 표면은 세포 간 부착을 유지하면서도 세포-기질 부착을 억제하여, 물리 자극 없이도 성상세포만 spheroid 형태로 선택적으로 분리 가능하다. 이와 같은 표면공학 기반 glial sorting 전략은 기존 방식보다 생리적 안정성이 높고, 다양한 neuroinflammatory 모델에 쉽게 통합될 수 있는 장점이 있다.

이 연구는, pCHMA를 증착시킨 배양접시 표면에 세포간 부착이 존재하는 성상세포를 3차원으로 스페로이드화하여 신경아교세포들을 분리시키는 선행연구 방법을 바탕으로 [2], 회전 진탕에 의해 유체전단 자극을 받으며 분리된 성상세포와의 활성화 양상을 비교함으로써, pCHMA가 증착된 접시에서 분리시킨 spheroidal astrocytes가 비활성 대조세포군으로써 활용될 수 있음을 보여준다. 이러한 분리 방법은 다른 세포들을 제거하는 진탕에 의한 성상세포 분리와는 달리, 바닥에 부착된 미세아교세포가 함께 배양된 상태에서 spheroidal astrocytes를 분리시킬 수 있다는 장점이 있다. 이와 관련하여 본 연구에서는, pCHMA가 증착된 배양접시로부터 분리된 spheroidal astrocytes와 미세아교세포를 함께 배양할 수 있다는 장점을 활용하여, LPS 자극으로 인해 나타나는 미세아교세포에 의한 성상세포 활성화 양상이 어떻게 나타나는지 보여준다.

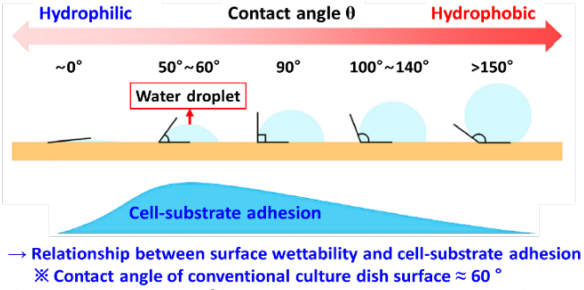
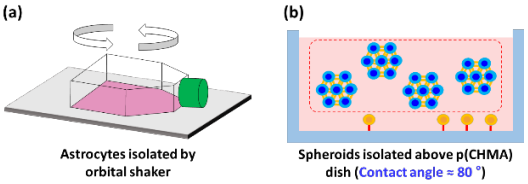


그림 1. 세포-기질 부착(cell-substrate adhesion)과 표면젖음성(wettability)과의 상관관계

2. 연구방법

회전 진탕기를 활용한 성상세포 분리의 경우, 생후 1~2일이 지난 쥐의 대뇌피질로부터 신경아교세포를 채취하고, DMEM

배양액에 10% FBS와 1% PS을 추가하여 37℃, 5% CO_2 조건에서 10~14일 간 Poly-D-lysine(PDL) coated T-75 flask에 배양한다. 회전 진탕기를 통해, 250 rpm으로 18시간동안 진탕하여, 다른 신경 아교세포들을 제거하고 성상세포를 분리한다 (그림 2(a)). pCHMA가 증착된 배양접시를 활용한 성상세포 분리의 경우, 동일한 방식으로 신경아교세포를 채취하고, 같은 배양조건에서, pCHMA가 증착된 배양접시 내에 배양한다. 3~4일차에서, 표면으로부터 세포 간 부착을 지닌 성상세포가 3차원 스페로이드화 되어 분리 되는데, 4일차에서 분리 되었던 스페로이드가 다시 표면에 부착할 수 있기 때문에, 이를 방지하기 위해 모든 세포를 새로운 배양접시에 같은 방식으로 배양함으로써 표면에 부착되었던 스페로이드를 다시 분리한다. pCHMA가 증착된 배양접시로부터 분리된 spheroidal astrocytes(그림 2(b))와 진탕을 통해 분리된 성상세포에 대하여, Glial fibrillary acidic protein(GFAP)에 대한 면역형광염색 결과를 비교하고, qRT-PCR을 통해 성상세포 활성화와 관계된 유전자 발현 양상을 확인한다. 또한, 이렇게 분리된 spheroidal astrocyte를 활용하여, 4일차에서 새로운 배양접시에 재배양할 때, 배양액 내 1ng/mL 농도의 LPS를 첨가한다. 특히 LPS를 자극할 때, spheroidal astrocyte를 microglia와 함께 자극하거나 그렇지 않은 경우로 나누어서 배양한다. 5일차가 되었을 때 LPS를 자극(24hr)한 경우와 자극하지 않은 경우들에 대한



spheroidal astrocyte에 대하여 GFAP과 Complement3(C3)에 대한 면역형광염색 결과를 비교하고, qRT-PCR을 통해 성상세포 활성화와 관계된 유전자 발현 양상을 확인한다.

그림 2. (a) 회전진탕기를 활용(250rpm, 18hr)한 성상세포 분리, (b) pCHMA가 증착된 배양접시 표면을 활용한 성상세포 분리

3. 연구결과

회전진탕기에 의해 분리된 성상세포에서의 GFAP에 대한 면역형광염색 영역(그림 3(a))과 비교했을 때, pCHMA 배양접시로부터 분리된 성상세포에서의 GFAP에 대한 면역형광염색 영역(그림 3(b))이 정량적 분석을 통하여 상대적으로 작게 나타나는 것이 확인되었다 (그림 3(c)).

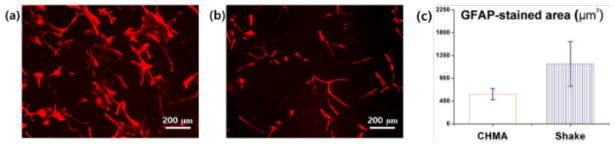


그림 3. (a) 회전진탕기에 의해 분리된 성상세포와 (b) pCHMA 배양접시로부터 분리된 성상세포에서의 GFAP에 대한 면역형광 이미지 (Scale bar: 200 μm), (c) GFAP에 대한 면역형광염색 영역의 정량적 비교

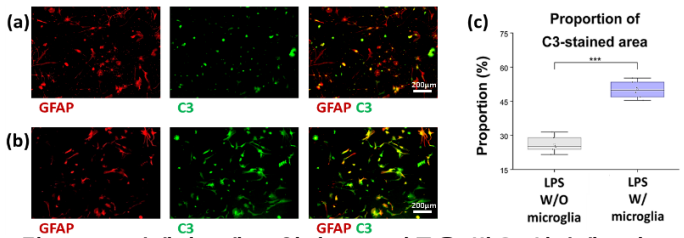


그림 4. (a) 미세아교세포 없이 LPS 자극을 받은 성상세포와 (b) 미세아교세포와 함께 LPS 자극을 받은 성상세포에서의 GFAP과 C3에 대한 면역형광이미지 (Scale bar: 200 μm), (c) C3에 대한 면역형광염색 영역 분포의 정량적 비교

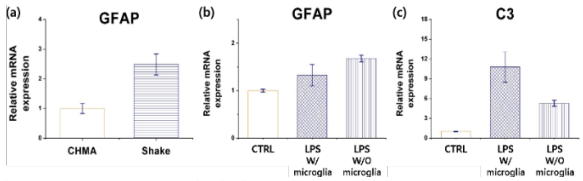


그림 5. pCHMA 배양접시 표면 위의 spheroidal astrocytes와 진탕을 통해 분리된 성상세포에서의 (a) GFAP 에 대한 유전자 발현, 및 LPS 자극을 받지 않은 spheroidal astrocytes와 LPS 자극(24hr)을 microglia와 함께 받거나 그렇지 않은 spheroidal astrocytes에서의 (b) GFAP과 (c) C3에 대한 유전자 발현 결과

또한, GFAP은 활성화된 성상세포에 대한 마커로써 널리 활용되는데, 진탕을 통해 분리시킨 성상세포와 비교했을 때, pCHMA 배양접시로부터 분리된 성상세포에서의 GFAP 유전자 발현이 상대적으로 2배 이상 낮게 나타났음을 확인하였다 (그림 5(a)). 이러한 결과들은 물리적 자극을 최소화하여, 성상세포를 분리하고자 했던 실험 목적에 맞는 긍정적인 결과로 볼 수 있다. 한편, 선행연구들에 따르면, stroke과 같은 뇌질환 발병 시, 독소인 LPS가 증가하고, 이로 인해 신경아교세포와 성상세포가 활성화되는 것으로 알려져 있다. 이때 활성화된 미세아교세포로부터 분비되는 다양한 생화학적 물질은 성상세포를 A1 성상세포로 유도하는 것으로 알려져 있다. 이러한 선행연구들을 바탕으로, LPS로 오직 성상세포를 자극한 경우에 비해 성상세포와 미세아교세포를 함께 자극했을 때 상대적으로 A1 성상세포로의 활성화가 많이 나타날 것임을 예상할 수 있는데, 미세아교세포와 함께 LPS 자극을 받은 성상세포와 미세아교세포 없이 LPS 자극을 받은 성상세포에서의 GFAP과 C3에 대한 면역형광염색 이미지들을 비교했을 때, 미세아교세포와 함께 LPS 자극을 받은 성상세포가 그렇지 않은 경우에 비해, C3에 대한 면역형광염색 영역 분포가 더 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다 (그림 4). 게다가, A1 성상세포에 대한 마커인 C3의 유전자 발현이 미세아교세포와 함께 자극했을 때 현저히 높게 발현되는 것을 실제로 확인할 수 있다 (그림 5(c)). 또한, LPS의 자극을 받지 않은 spheroidal astrocyte에 비해 LPS 자극을 받은 경우에서 GFAP과 C3 발현 모두 높게 발현되는 것을 확인할 수 있었다 (그림 5(b), 5(c)).

이러한 연구 결과들은, pCHMA가 증착된 배양접시를 활용함으로써, 물리적 자극에 의한 성상세포의 활성화 가능성을 최소화하여 성상 세포를 분리할 수 있음을 보여주고, 비활성 상태의 대조 세포군으로써 실제 실험에 활용할 수 있음을 보여준다. 따라서, 해당 연구 내용은 성상세포에 대한 비활성 상태의 대조 세포군을 확보하여 실제 실험에 적용하는데 용이하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

4. Acknowledgements

This research was supported by the Basic Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the MSIT(NRF-2021R1A4A1031198).

5. 참고문헌

1. Hu, Y., et al. (2021). NPG Asia Materials **13**(1).
2. Park, E., et al. (2022). Advanced Materials Interfaces **9**(22).

Poster-027

렘수면행동장애 환자와 정상인의 수면 중 다중 생체신호 간 시간지연안정성 분석

남혜린[1*], 정기영[3], 임창환[1,2]

한양대학교 인공지능학과[1]

한양대학교 바이오메디컬공학과[2]

서울대학교병원 신경과[3]

Time Delay Stability Analysis of Polysomnography in Patients with REM-Sleep Behavior Disorder and Healthy Controls During Sleep

Hyerin Nam[1*], Ki-Young Jung[3], Chang-Hwan Im[1,2]

School of Artificial Intelligence, Hanyang University, Korea[1]

School of Biomedical Engineering, Hanyang University, Korea[2]

School of Neurology, Seoul National University Hospital[3]

[*]hyerinn@hanyang.ac.kr

Abstract

Idiopathic REM sleep Behavior Disorder (iRBD) is a critical prodromal state for α-synucleinopathies (PD, DLB, MSA), marked by dream enactment behavior (DEB) and REM sleep without atonia (RSWA). Given the high conversion, current research focuses on identifying heterogeneous iRBD subtypes and biomarkers via multimodal data integration to improve predicting prognosis. This study uses Polysomnography (PSG) data and Time Delay Stability (TDS) analysis to quantify inter-system physiological interactions. The goal is to characterize the iRBD network topology, aiming for novel biomarkers for early disease progression.

1. 연구 배경

특발성/단독 렘수면행동장애(idiopathic/isolated REM sleep behavior disorder, iRBD)는 수면 단계 중 각성 단계와 비렘수면 단계의 중간 단계인 렘수면(Rapid eye movement, REM) 단계 중 발생하는 꿈의 행동화와 무긴장으로 인한 과도한 근전도 활동을 특징으로 하는 수면장애의 한 종류로, 파킨슨병(PD), 루이소체 치매(DLB) 및 다계통 위축증(MSA)과 같은 알파-시누클레인병증의 전구 단계 역할을 하는 것으로 알려져 있다. iRBD 환자의 90% 이상이 15년 이내에 알파-시누클레인병증으로 전환되며, 따라서 이와 관련된 신경퇴행성 바이오마커를 규명하는 것은 전구 단계를 식별하고 질병 진행을 예측하는 데 매우 중요하다. iRBD의 자율신경 기능 장애, 후각 상실, 신경 인지 장애, 도파민 기능 장애, 과도한 주간 졸음, 우울증 및 운동 기능 이상을 포함한 여러 바이오마커가 질병 진행 속도를 잠재적으로 예측할 수 있는 것으로 연구된 바 있다[1].

최근에는 iRBD에서 PD, DLP 및 MSA의 임상적 특징과 메커니즘의 이질성을 갖는 아형이 발견될 수 있다는 것이 알려지면서, 행동 및 임상적 특징뿐 아니라 신경 영상, 뇌파 등 다양한 데이터를 통합하고, 이를 바탕으로 전구단계에서 나타나는 아형의 특성을 더 명확히 이해하기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이러한 다중 데이터 통합 연구는 신경퇴행성 질환의 분류 및 전환 시기 예측의 정밀도를 향상시키는 데 기여할 것으로 기대된다.

한편, 수면다원검사(Polysomnography, PSG)는 수면 중 뇌파, 안구운동, 근육 움직임, 호흡, 심전도 등 다양한 시계열 생체신호를 획득할 수 있으며 정확한 수면 질환의 진단을 가능케 하는 강력한 도구로, iRBD 증상의 관찰 및 진단 또한 이 검사를 통해 이루어진다.

본 연구는 iRBD 진단에 활용되는 PSG를 통해 획득된 장시간, 동시 측정 생체신호를 사용하여, 서로 다른 생리 시스템 간의 상호작용을 추적하고 정량화하기 위해 시간 지연 안정성 (Time Delay Stability, TDS) 분석을 시도하였다. 최종적으로 이를 통해 iRBD 환자군과 정상 대조군 간의 네트워크 토폴로지 차이를 규명하고, 질병의 병태생리학적 기전에 대한 통찰을 얻어 조기 진단 및 예측 바이오마커 개발의 기반을 마련하고자 한다.

2.연구 방법

이전 연구[2]에서 획득한 데이터 중 iRBD 환자 13명과 정상인 10명의 데이터를 사용하였으며, 모든 데이터는 2014년 10월부터 2016년 4월 사이에 수집되었다. 모든 환자는 약물 치료를 받지 않았고 수면 중 복잡한 운동 행동을 호소했으며, PD, DLB 와 같은 신경퇴행성 질환의 뚜렷한 증상은 관찰되지 않았다. 야간 비디오 수면다원검사(vPSG)를 시행하였으며, 국제 수면장애 분류(ICSD-3) 제3판 기준에 따라 iRBD로 진단되었다. 모든 정상인 참가자는 수면 장애, 신경학적 질환, 향정신성 약물 사용 또는 질병 병력이 없었으며, 두 그룹 모두 REM 수면 중 폐쇄성 수면 무호흡증의 영향을 배제하기 위해 수면무호흡-저호흡 지수(Apnea-Hypopnea Index, AHI)가 15점 미만인 피험자의 데이터가 분석에 사용되었다.

수면 단계는 미국 수면의학회 메뉴얼(AASM)에 따라 30초 단위로 에포킹하여 Awake, REM, N (NREM) 1단계부터 4단계까지 총 6단계로 기록하였다. PSG를 통해 얻은 다양한 생체신호 중 수면 뇌파 분석에 가장 많이 사용되는 6개의 뇌파 채널(F3, F4, C3, C4, O1, O2), 7개의 근전도 채널(양쪽 전경골근, 상완요골근 및 턱밑근), 1개의 심전도 채널, 1개의 코 압력 센서(Nasal pressure)에서 데이터를 추출하였다. 뇌파 데이터의 경우 200Hz 다운샘플링, 평균 유양돌기 신호 기준 재참조(linked-mastoid re-rereferencing), 60Hz 대역저지필터을 적용하고, 수면 단계에 맞춰 30초 단위로 에포킹하였다. 이후 오염된 에포크를 제거 또는 선형보간하고, 독립성분분석을 통해 눈움직임을 포함한

아티팩트를 제거하고 대역통과필터를 적용하였다 (0.5-35 Hz). 근전도, 심전도 데이터는 200Hz 다운샘플링 후 대역통과필터를 적용하였으며 (근전도: 10-95 Hz, 심전도: 0.5-40 Hz), 코 압력 센서에서 얻은 호흡 데이터는 50 Hz 다운샘플링 후 0.1-1 Hz 대역통과필터를 적용하였다.

TDS는 서로 다른 생리 시스템간의 상호작용을 정량화하기 위해 제안된 방법으로, 동일한 시점의 신호 세그먼트들 간의 교차상관함수의 최댓값으로 시간 지연 계수 τ를 결정하고, 이 계수의 변동성을 통해 두 신호간 결합의 안정성을 분석할 수 있다[3]. τ값이 적어도 5개의 연속 세그먼트 중 4개에서 $[\tau-1, \tau+1]$ 범위의 값을 유지하면 이 세그먼트는 신호간 결합이 안정적인 것으로 판단한다. 최종적으로 두 신호간 안정성을 정량화하는 지표인 %TDS는 시계열 τ에서 안정적인 구간의 비율로 계산된다. 교차상관함수 계산을 위해 뇌파에서 주파수 밴드파워, 근전도에서 분산, 심전도에서 심박수를 추출하고 1Hz 다운 샘플링을 통해 시간 해상도를 동일하게 맞추었다.

수면 단계 기록을 이용하여 각 수면 단계마다 연속된 구간이 일정 시간 (2.5분)을 넘는 세그먼트를 추출하여 TDS 분석을 수행하였으며, 뇌파 데이터 내에서는 주파수 대역 간 TDS 분석 또한 수행하였다.

3. 연구 결과

표 1.은 각 그룹간 임상 인구학적 특징을 나타낸다. iRBD 환자 13명 중 남성은 11명이었으며, 평균 연령은 66.3±6.5세였다. iRBD 군과 정상인 군 간에 연령, 성별, 체질량 지수(BMI)는 차이가 없었으며, iRBD 군의 평균 MoCA 점수는 정상인 군의 평균 점수보다 낮았다(p = 0.015). 두 그룹 간의 KVSS(p = 0.042) 및 SCOPA-AUT(p = 0.049) 점수의 유의미한 차이는 iRBD에서 후각 및 자율신경 기능 장애를 시사할 수 있지만, ESS, PSQI, GDS-K와 같은 수면의 질, 우울증 척도 평가에서는 유의미한 차이가 관찰되지 않았다.

표 1. 임상적 특성의 그룹 간 비교

Variables	iRBD (n = 13)	HC (n = 10)	P-values
Age, year	66.3 ± 6.5	62.3 ± 7.5	0.186
Sex, male	11 (84.6)	7 (70.0)	0.618
BMI, kg/ m^2	23.5 ± 3.1	24.6 ± 2.0	0.343
Education, year	12.2 ± 3.5	12.0 ± 3.4	0.927
RBD duration, year	4.0 ± 2.1		
RBDQ-KR, total	52.3 ± 19.5	6.1 ± 4.8	<0.001
Factor 1	15.2 ± 7.4	3.5 ± 2.8	<0.001
Factor 2	37.1 ± 14.6	2.6 ± 3.0	<0.001
MoCA	24.8 ± 3.1	27.9 ± 1.8	0.015
ESS	5.5 ± 3.1	4.0 ± 1.4	0.131
PSQI	4.4 ± 1.7	3.9 ± 1.9	0.693
KVSS	4.8 ± 1.2	5.9 ± 0.9	0.042
SCOPA-AUT	11.5 ± 4.9	7.7 ± 4.2	0.049
GDS-K	12.3 ± 5.1	8.1 ± 8.8	0.148

그림 1.은 REM 수면 단계에서 다양한 신호쌍에 대한 안정성의 차이를 그룹간 비교한 결과를 나타낸다. iRBD 군이 정상인 군보다 뇌파 데이터 내에서 주파수 대역간 연결이 활발하고 특히 고주파대역에서 더 뚜렷한 연결성을 보이며, 뇌파와 근전도 간 연결성 또한 두드러지게 나타나는데, 이는 REM 수면동안 근육의 마비가 정상적으로 유지되지 못하는 iRBD의 대표적인 특성을 반영하는 것으로 볼 수 있으며 뇌 내 비정상적으로 과 활성화된 네트워크는 흥분성(Excitatory) 신호와 억제성(Inhibitory) 신호 간의 균형이 깨진 상태임을 표상한다.

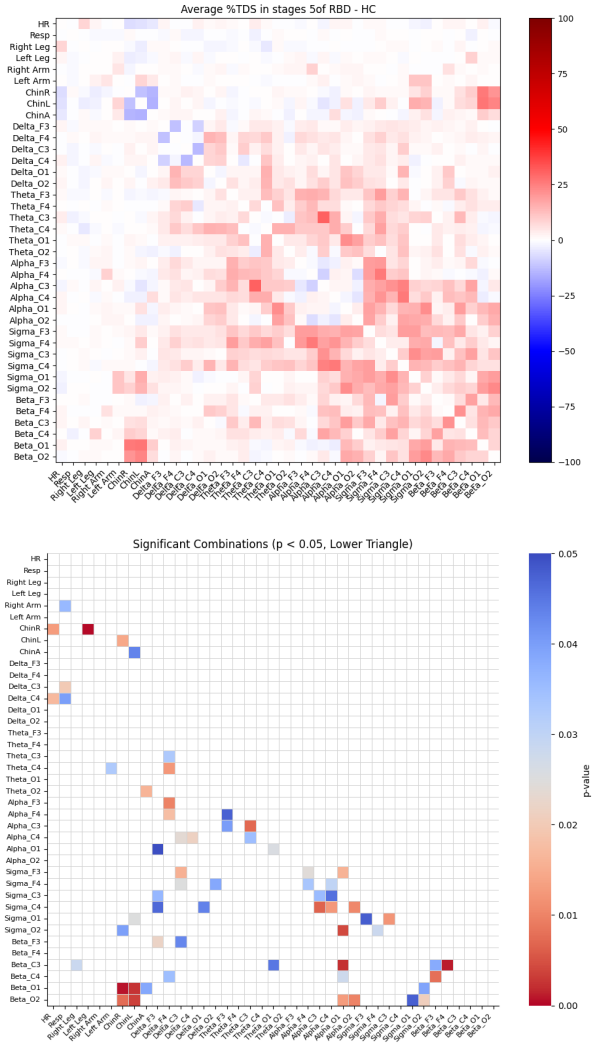


그림 1. iRBD 군과 정상인 군의 신호간 안정성 비교. 두 그룹간 안정성 차이가 발생한 신호 쌍을 나타낸 히트맵 (위)과 통계적으로 유의미한 차이가 나는 신호 쌍 (아래)

4. Acknowledgements

이 논문은 2024년도 정부(과기정통부)의 재원으로 한국연구재단 바이오·의료기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2024-00397673)

5.참고 문헌

[1] Tang, Shi, et al. "Brain-clinical biotyping in patients with idiopathic REM sleep behavior disorder." npj Parkinson's Disease 11.1 (2025): 156.

[2] Sunwoo, Jun-Sang, et al. "Abnormal activation of motor cortical network during phasic REM sleep in idiopathic REM sleep disorder." *Sleep* 42.2 (2019): zsy227.

[3] Bartsch, Ronny P., et al. "Network physiology: how organ systems dynamically interact." PloS one 10.11 (2015): e0142143.

Spectral Graph Theoretical Characterization of Cortical Neuronal Networks using HD-MEA

Hyo-jeong Lee[1] , Akm Ashiquzzaman[1] , Hyuk Sang Kwon[1, 2] , Young Ro Kim[3, 4] , Sang Seong Kim[1*] , Euiheon Chung[1, 2*]
[1] Department of Biomedical Science and Engineering, Gwangju Institute of Science and Technology (GIST), Gwangju, South Korea
[2] AI Graduate School, GIST, Gwangju, South Korea
[3] Athinoula A. Martinos Center for Biomedical Imaging, Massachusetts General Hospital, Charlestown, MA, USA
[4] Department of Radiology, Harvard Medical School, Boston, MA, USA

[*] chiralcenter21@gmail.com, ogong50@gist.ac.kr

Abstract

Spectral graph theory provides a mathematical framework for network-level analysis that extends beyond traditional microscale metrics. Eigenvectors and eigenvalues derived from Laplacian matrix decomposition serve as basis functions describing the network's dynamic properties. However, most applications of spectral graph theory have focused on macroscale brain networks, leaving mesoscale investigations relatively unexplored. In this study, we cultured primary mouse cortical neurons on high-density microelectrode arrays (HD-MEAs) and applied spectral graph theory-based metrics to assess network differentiation and evaluate the impact of amyloid-beta (Aβ42) oligomers on network properties.

1. Introduction

Most studies on neural networks have largely relied on graph-based analyses such as mean firing rates or node degrees. However, such approaches usually depend on grand averaging of microscale metrics, which reference only node-level information, limiting their ability to capture collective and emergent properties of the network [1, 3].

To address this problem, several recent studies have adopted spectral graph theory, a framework that enables understanding of the structural and dynamical characteristics at the network-level through eigen decomposition of a Laplacian matrix. Eigenvectors serve as the basis that describes network dynamics, while the corresponding eigenvalues represent the frequency or the rate of change in that basis [2]. Various metrics using eigenvectors and eigenvalues can quantitatively evaluate a network's synchronization, modularization, and the functional constraint given by its structure. In the physical and chemical sciences, it is well established that the solutions of diffusion or flow models are closely related to the Laplacian spectrum, and that spectral similarities can be utilized for network classification [1].

In neuroscience, these approaches have been predominantly applied to macroscopic neural data such as magnetic resonance imaging (MRI) or electroencephalography (EEG). However, with the advent of high-resolution recording systems such as HD-MEAs and Neuropixels, there is an increasing demand for analytical frameworks that account for network-scale organization in mesoscale as well. In this study, we adopted a spectral graph theoretical approach to characterize mesoscale neuronal networks and to investigate their potential to identify pathological effects of amyloid-beta oligomers.

2. Methods

Recorded signals from [4] were used for this analysis. Brain tissue was harvested from neonatal mice immediately after birth, and the cerebral cortex was dissected in 4°C Neurobasal medium (NBM) with papain solution. The isolated tissue was washed and subsequently incubated in a 37°C water bath for 30 minutes. To further dissociate the tissue to a cellular level, it was triturated 20-30 times with a fire-polished Pasteur pipette. A 64x64 HD-MEA Biochip (3Brain, Pfäffikon, Switzerland) was prepared for cell seeding through prior ethanol cleaning and poly-D-lysine (PDLO) coating.

Two HD-MEA recordings with successful cell growth were used for further analyses. Each well was seeded with 30-90μL of cells at a density of 1,000-1,500cells/μL. All wells were incubated in the same condition at 37°C with 5% CO_2 until day *in vitro* (DIV) 9, where Aβ42 oligomers were applied to one of the wells on DIV 10. 1mg Aβ42 oligomers were dissolved in dimethyl sulfoxide (DMSO) at room temperature, then diluted with phosphate-buffered saline (PBS) at a 1:9 ratio and used after incubation. The experiment was approved by Hanyang University IACUC (protocol code 2019-0192A).

For matrix computation, each electrode of an HD-MEA was assumed as one graph node. The recorded signals were preprocessed with a 4th order Butterworth filter to extract the local field potential within 6-120Hz. Then the magnitude-squared coherence averaged over frequency were calculated between every two channels, to compose a symmetric adjacency matrix. This procedure was repeated for each DIV. Laplacian matrices, considering only the top 5% connection strengths for each channel on each DIV, went through eigen decomposition to obtain the eigenvalue distribution or spectral plot (Eq. 1), spectral distance (Eq. 2), and the inverse participation ratio of eigenvectors (Eq. 3). The equations follow the definitions by De Lange et al. [1] and McGraw and Menzinger [3]. σ denotes the width of the Gaussian kernel, λ represents the eigenvalues, n the number of eigenvalues, V the eigenvectors, and m the number of intervals.

$$\Gamma(x) = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{|x-\lambda_i|^2}{2\sigma^2}\right) \quad \text{(Eq. 1)}$$

$$D(\Gamma_1, \Gamma_2) = \frac{1}{m+1}\sum_{i=0}^{m} \min_j \left(\sqrt{\left(\Gamma_1(i) - \Gamma_2(j)\right)^2 + (i-j)^2}\right) + \frac{1}{m+1}\sum_{j=0}^{m} \min_i \left(\sqrt{\left(\Gamma_1(i) - \Gamma_2(j)\right)^2 + (i-j)^2}\right) \quad \text{(Eq. 2)}$$

$$P(V) = \sum_i V_i^4 / (\sum_i V_i^2)^2 \quad \text{(Eq. 3)}$$

3. Results

3.1. Adjacency Matrices

Fig. 1 shows the adjacency matrices along DIV for the Aβ42 well

and the control well. Both conditions exhibited low coherence in general, but several electrode pairs showed values reaching 1.0. In the control well, electrodes that were physically close tended to display higher coherence, and this spatial pattern became more pronounced over time until DIV 7 before saturation. Although differences between the Aβ42 and control well were already visually observable prior to the oligomer treatment, we considered them as intrinsic variations between networks.

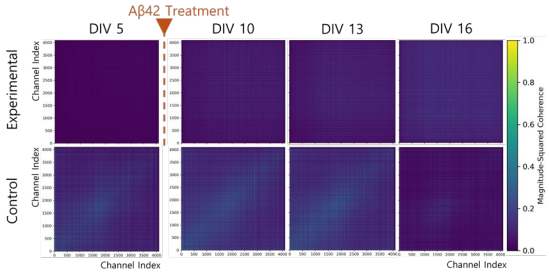


Figure 1. Connectivity matrices at different DIVs

3.2. Eigenvalue Spectra

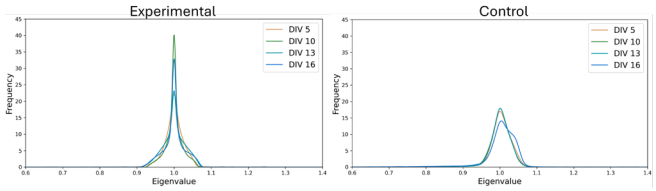


Figure 2. Eigenvalue spectra at different DIVs

Overall, the range of eigenvalues is smaller than that found in macroscale studies, which is likely due to the limited size of the regions at the mesoscale, preventing them from having as many diverse modes as at the macroscale.

In an eigenvalue spectrum, the peak sharpness is associated with the clustering coefficient, and the frequency of eigenvalue 1.0 is related to node duplication, indicating nodes with similar connection patterns. The eigenvalue distribution of the Aβ42 well exhibited a prominent and rising peak, while the control well showed a more gradual and consistent bell-shaped distribution (Fig. 2). This implies that the experimental well had stronger global connectivity compared to the control. Furthermore, the experimental group showed a decrease in the first few nonzero eigenvalues after the treatment, suggesting an increase in low-frequency modes and a reduction in variation across the nodes.

3.3. Spectral Distance

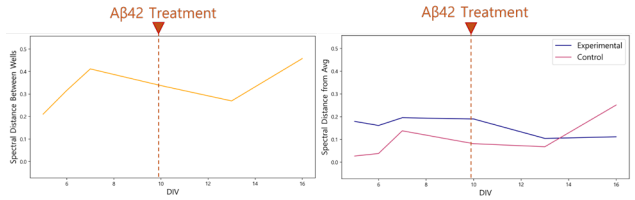


Figure 3. Spectral distance between conditions for each DIV (left), and spectral distance compared to each well's mean spectrum (right)

The spectral distance, defined as the mean Euclidean distance between two eigenvalue spectra, represents their morphological similarity. Overall, the spectral distance between conditions fluctuated within the range of [0.2, 0.5], with no prominent change before and after the treatment (mean spectral distance before treatment: 0.318±0.090, after treatment: 0.355±0.078).

The spectral distance from the average distribution within each condition showed a slight downward trend in the experiment well and an upward trend in the control. These drifts may be attributable to several potential factors. One tentative explanation, although speculative, is that the control group exhibited diverging spectra changes as the network develops, whereas the experiment group showed initial fluctuations and eventually converged to the mean.

3.4. Inverse Participation Ratio

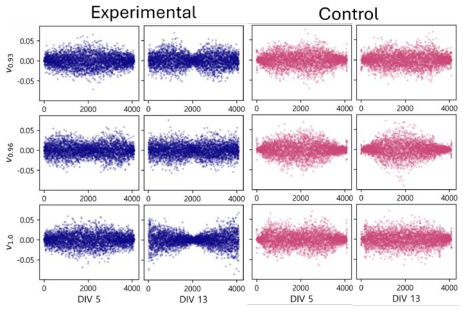


Figure 4. Components of eigenvectors with eigenvalue 0.93, 0.96, and 1.0, on DIV 5 and 13

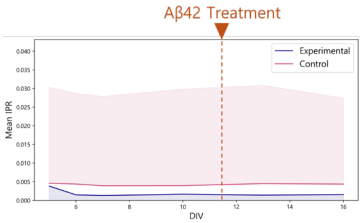


Figure 5. Averaged IPR values over eigenvectors

The inverse participation ratio (IPR) quantifies the uniformity of components in each eigenvector, which also corresponds to its node dependency. Higher IPR means that the mode has an impact only on specific nodes. The IPR was generally higher in the control group, in overall magnitude (Fig. 5) as well as in the maximum value. In both conditions, only a few vectors showed high and extreme IPR, while most had near-zero values. This suggests the existence of distinct modules in the network.

Although there wasn't a noticeable change after the treatment, by visually examining the component distribution changes across different vectors (Fig. 4), we confirmed the possibility in mesoscale networks to further investigate and identify specific modes and nodes that have the greatest influence at the network level.

4. Acknowledgements

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (NRF-2011-0031866, NRF-2018M3A9D7079485; RS-2023-00264409, RS-2023-00302281, RS-2025-00522868, RS-2025-00573499).

5. References

[1] S. C. De Lange, M. A. De Reus, and M. P. Van Den Heuvel, "The Laplacian spectrum of neural networks," *Frontiers in Computational Neuroscience*, vol. 7, 2014.

[2] P. N. McGraw and M. Menzinger, "Laplacian spectra as a diagnostic tool for network structure and dynamics," *Physical Review E*, vol. 77, no. 3, 2008.

[3] A. Raj et al., "Spectral graph theory of brain oscillations," *Human Brain Mapping*, vol. 41, no. 11, pp. 2980–2998, 2020.

[4] D. Ganbat, J. K. Jeon, Y. Lee, and S. S. Kim, "Exploring the pathological effect of Aβ42 oligomers on neural networks in primary cortical neuron culture," *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 24, no. 7, p. 6641, 2023.

Poster-029

증강현실 기반 거울시각피드백과 말초전기자극이 뇌 활성화에 미치는 영향

임현미, 구정훈*
계명대학교 의용공학과

Effects of Augmented Reality-Based Mirror Visual Feedback Combined with Peripheral Electrical Stimulation on Brain Activation

Hyunmi Lim, Jeonghun Ku*
Department of Biomedical Engineering, Keimyung University, Korea
*kujh@kmu.ac.kr

Abstract

Mirror visual feedback (MVF) engages the mirror neuron system and facilitates motor recovery. This study investigated cortical activation during augmented reality (AR)-based MVF in healthy adults. Twenty-one right-handed participants performed 100 left-hand pinch movements under two conditions: (1) MVF, showing a mirrored virtual right hand moving in real time, and (2) Non-MVF, where the right hand remained static. Visual pinch cues appeared every 3–5 seconds. Peripheral electrical stimulation (PES) was applied to the right forearm for 1 second after each pinch. Event-related spectral perturbation (ERSP) was analyzed for mu-band (8–13 Hz) activity at C3. The MVF condition exhibited greater mu-band desynchronization over C3 compared to the Non-MVF condition, indicating enhanced activation of the mirror neuron system. AR-based MVF implemented effectively increased sensorimotor cortical activity, suggesting its potential as a neurorehabilitation tool for stroke patients with upper-limb paresis.

1. 연구 배경

뇌졸중 후 상지 편마비 환자들은 마비측 손의 자발적인 움직임이 어렵고, 운동 피질의 흥분성이 저하되고 운동 학습 및 재조직화(neuroplasticity) 과정이 지연된다. 이러한 이유로 재활 치료의 초기 단계에서는 비마비측의 움직임을 활용하여 마비측 운동 피질을 간접적으로 자극하는 방법이 주목받고 있다.

거울 치료(Mirror Therapy)는 이러한 접근 중 대표적인 기법으로, 비마비측 팔의 움직임을 거울을 통해 마비측이 움직이는 것처럼 시각적으로 인식하게 하여 운동 피질을 활성화시키는 원리를 이용한다[1]. 기존 연구들에 따르면, 거울시각피드백(Mirror Visual Feedback, MVF)은 거울신경시스템(Mirror Neuron System, MNS)을 활성화시켜 마비측 운동 영역의 피질 활동을 촉진시키는 것으로 알려져 있다.

하지만 물리적 거울을 이용한 전통적 MVF는 시야의 제한, 움직임 정합도(spatial congruency)의 부족, 그리고 현실감이 낮은 등 여러 한계를 가진다. 이러한 한계를 보완하기 위해 최근 증강현실(Augmented Reality, AR) 기술을 활용한 새로운 형태의 거울 치료가 등장하고 있다.

증강현실 기반 MVF는 실제 움직임을 실시간으로 추적하여 반대측에 가상의 손을 중첩시켜 보여줌으로써, 보다 정확하고 자연스러운 시각 피드백을 제공한다. 이러한 특성은 임상 환경에서의 사용 편의성과 몰입감을 크게 향상시킨다.

또한, 말초 신경 전기자극(Peripheral Electrical Stimulation; PES)은 감각 입력을 통해 운동 피질의 흥분성과 가소성을 조절하는 중재이다. PES는 말초 감각신경을 자극하여 감각 피드백을 유도함으로써, 운동 피질의 활성화와 운동 학습을 촉진한다. 이러한 PES를 시각적 피드백 기반의 MVF와 결합하면 감각–운동 통합(sensory–motor integration)을 강화하고, 단일 자극보다 더 큰 뇌 활성 효과를 기대할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 증강현실 기반의 PES 결합 거울 재활 시스템을 개발하고, 운동 피질 활성에 미치는 영향을 확인하고자 하였다.

2. 연구 방법

2.1. 피험자

건강한 성인 21명(남 10명, 여 11명, 평균연령 23.95 ± 4.38세)이 참여하였다. 모든 피험자는 오른손잡이였으며, 신경학적 질환 또는 상지 근골격계 질환의 병력이 없었다.

2.2. 증강현실 기반 PES 거울 재활 시스템

- 증강현실 환경

증강현실 환경을 구성하기 위하여 Meta Quest 3 (Meta Platforms Inc.)를 이용하였다. Quest3의 내장형 손 추적 기능(hand tracking)을 통해 별도의 센서 없이 사용자의 손 움직임을 3차원 공간에서 인식하였으며, 이를 이용하여 현실 공간 영상 위에 가상의 손 모델이 실시간으로 중첩되어 표시되도록 하였다.

- 운동과제 및 거울 시각 피드백

피험자는 양손을 테이블 위에 올린 상태에서 오른손은 정지시키고 왼손만 움직이도록 지시 받았다[그림1]. 운동 과제는 왼손의 pinch 동작(엄지-검지 집기)으로 구성되었으며, pinch 동작 수행을 유도하기 위한 시각적 cue로써 가상의 오른손 엄지 위에 작은 구체(pinch target)가 3-5초 간격으로 무작위로 생성되었다[그림1-a]. Pinch target이 나타날 때마다 피험자는 왼손으로 pinch 동작을 수행하였고, 이때 해당 움직임이 거울 반사 형태로 가상의 오른손 모델에 실시간으로 반영되어, 마치 오른손이 동작을 수행하는 것처럼 제시되었다. 왼손의 pinch 동작이 정확히 인식되면 pinch target 구체가 사라짐과 동시에 오른쪽 전완부에 PES 자극이 제공되었다 [그림1-b].

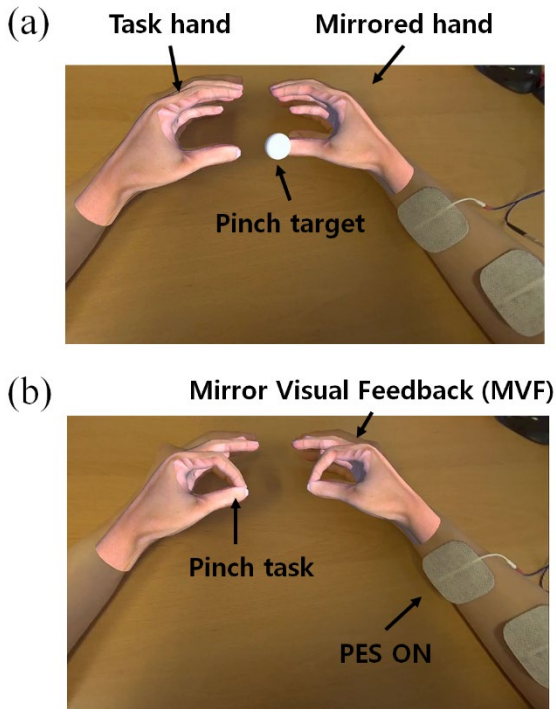


그림 1 증강현실 기반 PES 거울 재활 시스템 (a) 오른손 엄지에 pinch target이 생성된 모습 (b) 왼손으로 pinch동작을 수행한 후 오른손에 MVF 및 PES 제공

- PES 자극

왼손의 pinch 동작이 인식되면 MVF를 제공함과 동시에 오른팔 전완부에 PES를 1초간 제시하였다. 자극 강도는 개인의 감각 역치(sensory threshold) 수준으로 설정하여 불편감 없이 인지될 정도로 조절하였다.

2.3. 실험 조건

실험은 두 가지 조건으로 구성되었다

1) MVF+PES 조건: 왼손의 움직임이 가상의 오른손에 실시간으로 반영되어, 피험자가 오른손이 실제로 움직이는 것처럼 인식함. 왼손의 pinch 동작 시 MVF가 제공됨과 동시에 오른팔에 PES가 1초간 제공됨.

2) Non-MVF+PES 조건: 오른손은 정지된 상태로 표시되어 MVF가 제공되지 않으며, 왼손의 pinch 동작 시 오른팔에 PES만 제시됨

각 조건에서 피험자는 100회의 pinch 동작을 수행하였다. 조건의 순서는 무작위로 배정하였으며, 조건 간 5분의 휴식시간을 두었다.

2.4. EEG 측정 및 데이터 처리

EEG는 17채널 전극 시스템(국제 10–20 배치법에 따른 F3, F4, C3, C4, Cz, P3, P4 등)을 사용하여 측정하였다. 샘플링 주파수는 500 Hz로 설정하였다.

데이터는 1–50 Hz band-pass 필터를 적용한 후, Artifact Subspace Reconstruction(ASR)및 Independent Component Analysis(ICA)을 통해 눈 깜빡임, 근전도 등 아티팩트를 제거하였다.

각 pinch 이벤트를 기준으로 -0.5초에서 +1.0초 구간의 신호를 추출하였으며, Event-Related Spectral Perturbation (ERSP) 분석을 통해 C3 채널의 mu-band (8-13 Hz) 전력 변화를 확인하였다.

3. 연구 결과

두 조건 모두에서 왼손의 pinch 동작 이후 오른손 운동피질(C3 영역)의 mu rhythm 감소(mu suppression) 가 관찰되었다[그림 2]. 특히 MVF+PES 조건에서 mu band 감소가 더욱 뚜렷하게 나타났으며, 이러한 변화는 더 오랜 시간 동안 지속되었다[그림 2-a].

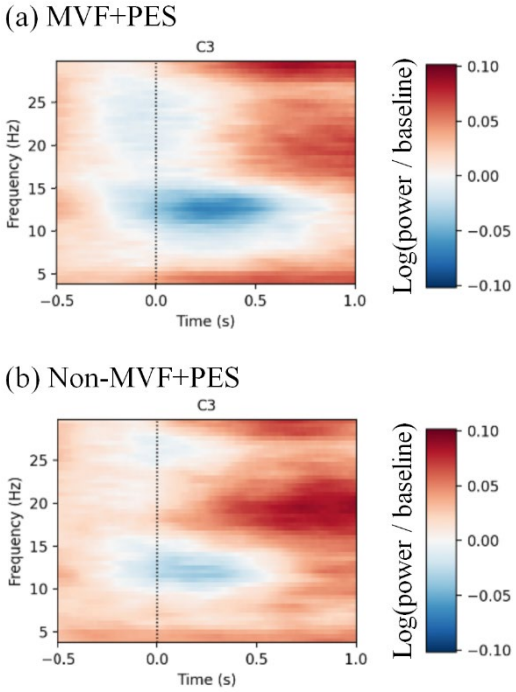


그림 2 증강현실 기반 PES 거울 재활 중 왼손 pinch 동작 수행 시 C3 채널에서의 ESRP 결과 (a) 거울 시각 피드백이 있는 조건(MVF+PES), (b) 거울 시각 피드백이 없는 조건 (Non-MVF+PES). 파란색은 baseline 대비 감소(ERD)를 의미함

이러한 결과는 증강현실 기반 MVF가 감각 자극(PES)에 의해 유도된 운동피질의 활성화를 더욱 촉진하였음을 시사한다. 즉, 왼손의 실제 운동 수행과 거울 반사를 통한 자기 움직임 관찰의 결합이 운동 관련 피질의 동시 활성을 강화한 것으로 해석된다.

따라서 본 연구 결과는 AR과 PES의 병행 자극을 통해 감각–운동 통합(sensory–motor integration)을 효율적으로 촉진할 수 있는 가능성을 보여주며, 뇌졸중 후 상지 기능 회복을 위한 유망한 신경자극 기반 재활 전략으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

4. Acknowledgements

이 연구는 National Research Foundation of Korea (NRF) 과제의 지원을 받아 수행하였음. (RS-2025-00561764, NRF-2022R1A2B5B01001443, RS-2024-00397674)

5. 참고 문헌

[1] Ramachandran, V. S., & Altschuler, E. L. (2009). The use of visual feedback, in particular mirror visual feedback, in restoring brain function. Brain : a journal of neurology, 132(Pt 7), 1693–1710. https://doi.org/10.1093/brain/awp135

Poster-030

공간 제약 MUSIC 기반 서브스페이스 분류법을 이용한 fNIRS-BCI 뇌 활동 분류 정확도 향상 연구

엄태인, 이승준, 김기환, 이옥균*

대구경북과학기술원 로봇및기계전자공학과

Improving Brain Activity Classification Accuracy using a Spatially Constrained MUSIC-based Subspace Method for fNIRS-BCI

Taiin Eom, Seungjun Lee, Kihwan Kim, Okkyun Lee*

Robotics and Mechatronics engineering, Daegu-Gyeongbuk Institute of Science and Technology

*oklee@dgist.ac.kr

Abstract

The practical application of functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) for brain-computer interfaces (BCIs) is limited by a low signal-to-noise ratio and physiological artifacts, which degrade classification accuracy. Conventional methods compound this issue by relying on statistical features that discard crucial spatial information. We address this by proposing a framework that integrates subject-specific anatomical constraints with a MUltiple SIgnal Classification (MUSIC) algorithm and a subspace classifier. Using personalized head models: generated by registering individual optode coordinates to a standard brain atlas (Colin27), derived from Monte Carlo simulations, MUSIC estimates high-resolution spatial patterns of brain activity that serve as high-dimensional features for classification. Our method significantly outperforms conventional approaches in accuracy and demonstrates greater robustness to hemodynamic delays. This study validates that leveraging anatomical priors with full spatial pattern analysis substantially enhances the performance and reliability of fNIRS-BCI systems.

1. 연구 배경

뇌-컴퓨터 인터페이스(Brain-Computer Interaction) 기술에서, 비침습적이며 간편한 기능적 근적외선 분광법(fNIRS)이 주목받고 있다. fNIRS는 물질에 의해 산란된 근적외선을 Modified beer-lambert 법칙을 통해 옥시-헤모글로빈과 디옥시-헤모글로빈의 농도 변화를 측정하는 기술이다. 그러나 근적외선이 물질을 통과하여 산란할 때 조직을 투과할 때 마다 신호가 약해지고, 심장박동과 같은 생리적 노이즈에 약하다는 단점이 있다. 이로 인해 뇌 활동 상태를 분류하는 정확도가 낮아져 BCI 기술의 한계점을 가지게 된다 [1]. 기존의 fNIRS-BCI 연구에서는 신호의 평균, 분산과 기울기 등 통계적인 특징을 추출하여 사용하기 때문에 공간적인 패턴 정보를 적용할 수 없는 단점이 있다. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위해, 뇌의 해부학적 구조와 깊이 정보를 활용해 공간적 정보를 신호에 적용하여 발전된 신호 처리 기법으로 분류 정확도를 획기적으로 개선하고자 한다.

2. 연구 방법

1. 데이터 수집 및 전처리:

본 연구에서는 5명의 피험자를 대상으로 Right Hand-squeezing Task를 수행하여 fNIRS 데이터를 수집했다. (IRB 승인번호: DGISTIRB-FAST-0018) 좌반구 motor cortex 부분에 8개의 source와 8개의 detector를 사용하여 24채널 구성을 하였다. 데이터는 각 사람 당 60초 휴식, 10초 task 후 30초 휴식을 10번 반복했으며 task가 끝난 후에 100초를 휴식하여 휴식기에 대한 데이터도 수집하였다. 실험 데이터는 37.037Hz로 샘플링되었으며, 수집된 24개 채널의 Optical Density는 0.2Hz, 0.0125Hz로 각각 low-pass, highpass 버터워스 필터링을 하여 전처리를 하였다.

2. Conventional method1: LDA

전처리된 24채널의 Optical Density는 수정된 비어-람베르트 법칙

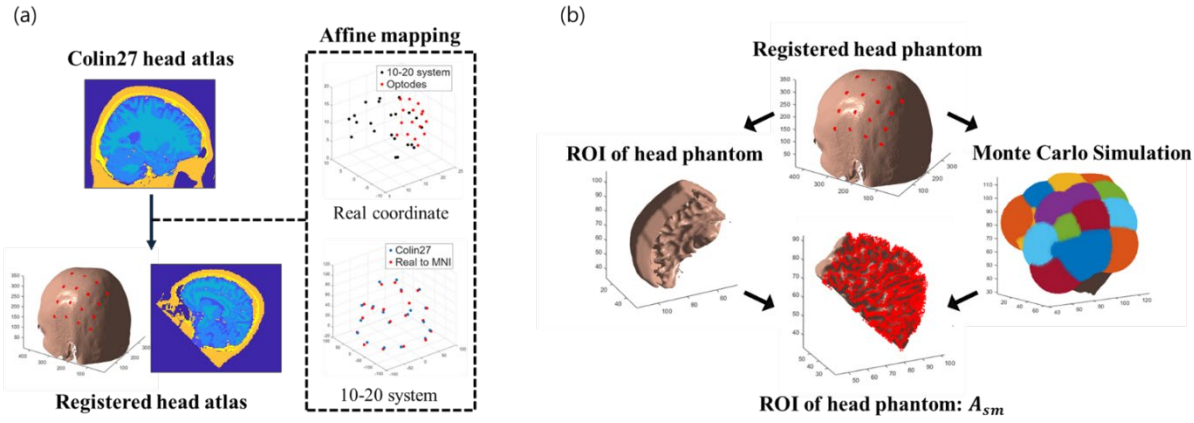


그림 1 피험자 맞춤형 뇌 모델(a) 및 민감도 행렬(b)

을 통해 옥시/디옥시 헤모글로빈(HbO/HbR) 변화량으로 변환되었다. 24채널 신호를 평균 낸 후, 10초의 과제 및 휴식 구간에서 평균, 분산, 최댓값, 기울기 4개의 통계적 특징을 추출했다. 분석은 HbO 신호 단독으로 4차원 특징 벡터를 구성한 경우와, HbO와 HbR 신호를 결합해 8차원 특징 벡터를 구성한 두 가지 조건으로 수행되었다. 생성된 특징 벡터들을 80%는 학습, 20%는 테스트 데이터로 사용하여 선형판별분석(LDA) 분류기의 정확도를 평가했으며, 이 과정을 30회 반복하여 평균 정확도를 계산했다.

3. Conventional method2: subspace method

24채널의 10초 구간 HbO/HbR 시계열 데이터 전체를 벡터화(vectorize)하여 고차원 특징으로 사용했다. HbO 단독 데이터와 HbO+HbR 결합 데이터 두 가지 조건에 대해, 각 상태(Active/Rest)의 학습 데이터 행렬을 특이값 분해(SVD)하여 클래스를 대표하는 Subspace(U_A, U_R)를 생성했다. 이후 테스트 데이터를 각 Subspace에 투영하여 투영 에너지 $\|U_A^T x_{test}\|_2^2$, $\|U_R^T x_{test}\|_2^2$의 크기를 비교하는 방식으로 분류를 수행하였다.

4. Proposed tomographic method: MUSIC with Subspace method

피험자 맞춤형 뇌 모델 생성: 공간 정보를 얻기 위해 먼저 digitizer(Fastrak)로 실험 전 피험자의 10-20 system과 각 source-detector의 좌표 정보를 측정하고, Affine mapping을 통해 Colin27 head atlas 모델을 각 피험자의 실제 머리에 맞게 Register하여 복셀화된 뇌 모델을 생성했다. (그림1.a)

민감도 행렬 생성: 생성된 뇌 모델과 맞춰진 source-detector의 좌표를 기반으로 Monte-Carlo 시뮬레이션을 이용해 빛의 산란 경로를 예측하여 뇌의 특정 위치(복셀)가 각 fNIRS 신호에 기여하는 정도를 정량화한 개인별 민감도 행렬 $A_{sm}(A_{sensing\ matrix})$를 생성했다. (그림1.b)

MUSIC(MUltiple SIgnal Classification Algorithm) 스펙트럼 계산: 뇌 활동의 공간적 패턴은 MUSIC 알고리즘을 이용하여 추정되었다 [2]. 각 실험의 Baseline 시간 구간과 특정 시간 구간을 이어붙여 만든 측정 데이터 y로부터 채널 간의 상호작용을 나타내는 공분산 행렬 $R \cong \frac{1}{N} yy^T$을 추정한 뒤, 특이값 분해(SVD)를 적용하여 ($R = U \cdot S \cdot V^T$) 데이터 공간을 Signal subspace(U_{signal})와 Noise subspace(U_{noise})로 분리하였다. MUISC 알고리즘은 각 두 subspace가 수학적으로 직교한다는 원리를 기반으로 한다. 따라서 j번째 뇌 복셀에서의 신호 벡터 A_j가 각 subspace와 이루는 직교성을 계산함으로써 해당 복셀의 활성도를 추정할 수 있다. 이는 $MUSIC_{noise\ spectrum}(j) = \left(A_j^T\ U_N\ U_N^T\ A_j\right)^{-1}$, $MUSIC_{signal\ spectrum}(j) = A_j^T\ U_s U_s^T A_j$ 로 표현되며, noise subspace에서는 분모가 0에 가까워질수록, signal subspace에서는 클수록 해당 복셀이 활성화되었을 가능성이 높다.

Subspace method: 기존 방식과 달리, 본 연구에서는 뇌 활동의 공간적 분포를 포함하는 MUSIC 스펙트럼 전체를 하나의 고차원 특징 벡터 x로 정의하였다. 활동/휴식 상태의 학습 데이터를 각각 SVD하여, 각 상태의 데이터가 주로 분포하는 고차원 공간을 정의하는 Active Subspace U_A 와 Rest subspace U_R을 생성하였다. 새로운 테스트 데이터 x_{test} 의 분류는 U_A, U_R 에 투영한 에너지 $\|U_A^T x_{test}\|_2^2$, $\|U_R^T x_{test}\|_2^2$ 를 비교하여, 투영 에너지가 더 큰 쪽의 subspace로 테스트 데이터를 분류한다. 이 방식은 데이터의 전체적인 공간 패턴을 직접 비교하므로, 통계적 특징 추출에 비해 더 많은 정보를 활용하여 분류할 수 있다. 제안한 방법과 비교를 위해 기존의 특징 추출으로부터 같은 subspace method를 진행했다.

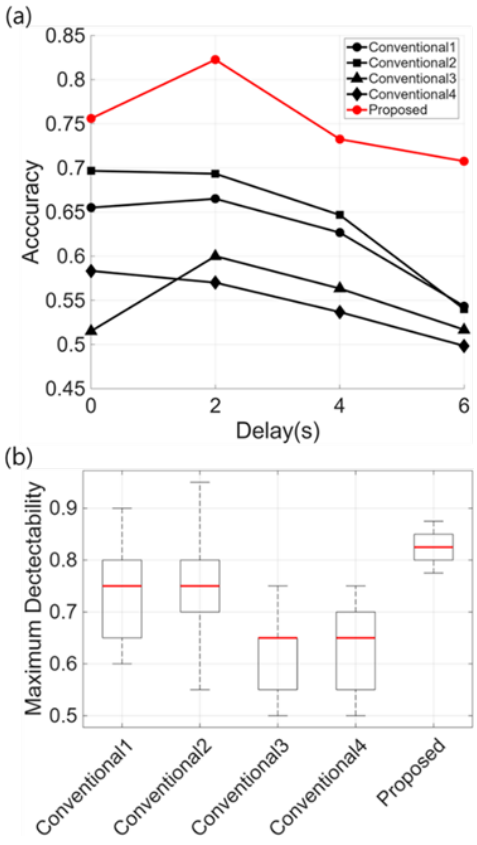


그림 2. 신호의 시간 지연에 따른 정확도 변화 (a), 최대 분류 정확도 (b) Conventional1: Subspace HbO, Conventional2: Subspace HbO + HbR, Conventional3: LDA (MPSV) HbO, Conventional4: LDA (MPSV) HbO + HbR, Proposed: MUSIC Signal Subspace HbO

3. 연구 결과

제안된 방법은 기존 방법에 비해 통계적으로 유의미한 성능 향상을 보임을 알 수 있다. 그림 2의 결과는 MUSIC 기반 subspace 방법이 기존의 LDA 및 subspace 방법에 비해 더 높고 안정적인 최대 분류 정확도를 보이며(a), 시간 지연 변화에도 더 강건함을 입증했다(b). 이러한 성능 향상은 뇌 활동의 전체 공간 패턴을 활용하고, MUSIC 알고리즘을 통해 노이즈에 대한 강건성을 확보했기 때문으로 분석된다. 본 연구에서는 fNIRS 분석 패러다임을 채널 기반의 통계적 특징 추출에서 벗어나, 개인별 뇌 구조를 고려한 3차원 소스 공간(source space)에서의 고해상도 패턴 인식으로 확장하는 것에서 중요한 방법론적 기여를 가진다고 볼 수 있다. 해부학적 정보, 시뮬레이션 기반의 피험자 맞춤형 모델링과 MUSIC 알고리즘, subspace method를 결합한 공간적 패턴 인식을 적용한 본 연구의 접근법은 기존 fNIRS-BCI 시스템의 한계를 극복하고 다양한 뇌공학 응용 분야로의 확장 가능성을 보여주는 기초가 될 수 있다.

Acknowledgment

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No.2020R1F1A1073229).

5.참고 문헌

[1] Y. Hoshi, Functional Near-Infrared Spectroscopy: Potential and Limitations in Neuroimaging Studies, in: Neuroimaging, Part A, Vol. 66 of International Review of Neurobiology, Academic Press, 2005, pp. 237–266.

[2] Jung, J. W., Lee, O. K., & Ye, J. C. (2012). Source localization approach for functional DOT using MUSIC and FDR control. *Optics Express*, *20*(6), 6267-6285.

Poster Presentation
바이오반도체

Poster-031

뉴로모픽 생체 의료 기기를 위한 하이브리드 전기-광학 2D FeFET

정현우[1,2], 이영택[1*], 강지훈[1,2*]

인하대학교 전기컴퓨터공학과[1]

Hybrid Electrical–Optical 2D FeFETs for Neuromorphic Biomedical Devices

Hyeonu Jeong[1,2] , Young Tack Lee[1*] , Ji-Hoon Kang[1,2*]

[1]Department of Electrical and Computer Engineering, Inha University, Incheon, South Korea

[2]Program in Semiconductor Convergence, Inha University, Incheon, South Korea

[*]ytlee@inha.ac.kr, [*]jhkang57@inha.ac.kr

Abstract

Recent advances in artificial intelligence have accelerated the demand for low-power and high-reliability hardware in biomedical devices. In this study, we fabricated a MoS_2/P(VDF-TrFE)/Graphene-based two-dimensional ferroelectric field-effect transistor (2D-FeFET) and validated its potential as a neuromorphic device responsive to both electrical and optical stimuli. The fabricated device exhibited pronounced hysteresis, endurance over 10^3 cycles, and stable data retention exceeding 10^3 seconds. Furthermore, long-term potentiation/depression (LTP/D) was successfully implemented, confirming controllable synaptic weight modulation under electrical excitation. In addition, the device demonstrated wavelength-dependent photo-response under various optical stimulus. These results confirm that the proposed 2D-FeFET can simultaneously achieve low-power operation and long-term data stability, while its fine conductance tunability under optical excitation enables precise weight update. Consequently, the device presents significant potential as a next-generation neuromorphic platform suitable for wearable and implantable biomedical applications requiring high accuracy and reliability.

1. 연구 배경

최근 인공지능의 발전은 방대한 데이터 생성과 처리 수요를 가속화시키며, 의공학 기기 분야에서 개인 맞춤형 진단, 생체 신호 모니터링, 의료 데이터 관리 등 다양한 응용 가능성을 열고 있다. 특히 심혈관 질환, 뇌졸중, 부정맥, 당뇨와 같은 만성질환은 응급 상황에서 골든타임이 존재하며, 발작이나 이상 징후를 놓치지 않고 실시간으로 탐지하는 것이 환자의 생존율과 치료 효과를 좌우한다. 따라서 단기적인 이벤트 감지뿐 아니라, 환자의 일상적인 상태 변화를 장기간 추적할 수 있는 데일리 모니터링(daily monitoring) 기술의 필요성이 강조되고 있다.

이러한 기기는 웨어러블 혹은 삽입형 형태로 구현되는 경우가 많으며, 배터리 용량이 제한된 환경에서도 장시간 안정적으로 동작해야 한다. 동시에, 측정되는 데이터가 환자의 건강 및 의료 정보와 직결되므로, 높은 수준의 데이터 보안성 역시 필수적이다. 그러나 기존 폰 노이만 구조 기반 컴퓨팅은 연산 장치와 메모리 간 데이터 이동에 따른 병목 현상으로 인해, 저전력 동작과 보안성을 동시에 충족하기 어렵다는 한계가 있다[1].

이러한 문제를 해결하기 위한 대안으로 뉴로모픽 컴퓨팅이 주목받고 있다. 뉴로모픽 소자는 생물학적 뉴런과 시냅스의 정보 처리 방식을 모방하여, 메모리와 연산을 동일한 위치에서 수행하는 인메모리(in-memory) 구조를 구현한다. 이를 통해 데이터 이동에 따른 에너지 소모를 획기적으로 줄일 수 있으며, 실시간 분석, 저전력 구동, 데이터 보안성 강화라는 세 가지 핵심 요구를 동시에 충족할 수 있다[2]. 이는 장시간 동작이 필요한 웨어러블 및 삽입형 의료기기에 특히 적합하다.

차세대 뉴로모픽 소자 후보 중 강유전체 전계효과 트랜지스터(Ferroelectric Field-Effect Transistor, FeFET)는 비휘발성, 낮은 누설 전류, 가역적 전도도 조절 등 메모리

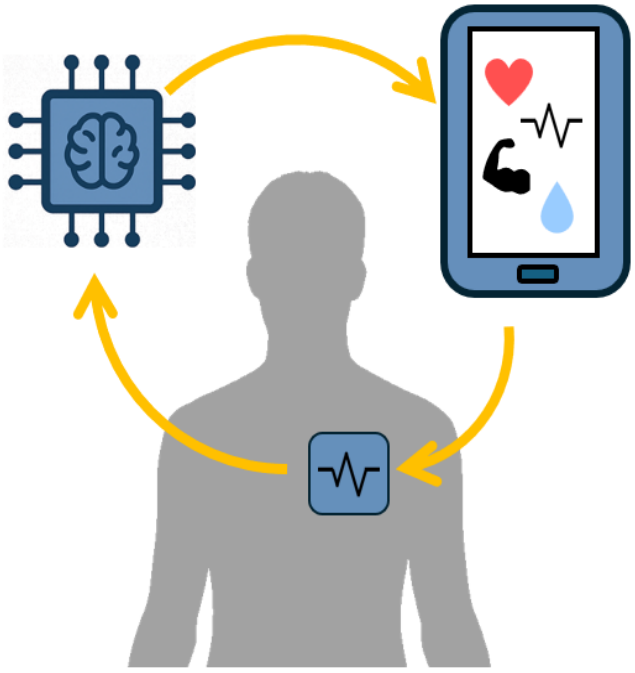


그림 1. 뉴로모픽 기반 실시간 헬스케어 모식도

소자로서의 장점을 바탕으로 주목받고 있으며[3], 더 나아가 인간 시각계에서 착안한 광전자 시냅스 소자 연구도 활발히 진행되고 있다. 특히 2차원 전이금속 칼코겐화합물(2D TMDCs)은 뛰어난 전기적 특성과 작은 밴드갭을 통해 광유도 전자 변조가 가능하여, 고감도·저전력 기반의 실시간 모니터링 기기 구현에 적합한 후보군으로 부상하고 있다[4].

따라서 FeFET와 2D TMDCs 기반 광전자 뉴로모픽 소자의 개발은 단순한 소자 성능 향상을 넘어, 환자의 생체 신호를 실시간·저전력으로 처리하고 안전하게 관리할 수 있는

차세대 의공학 플랫폼 구현으로 이어질 수 있다. 이는 의료기기의 패러다임을 변화시켜, 궁극적으로 환자 맞춤형 치료와 예방적 헬스케어 실현에 중요한 기여를 할 것으로 기대된다.

2.연구 방법

2차원 강유전체 전계효과 트랜지스터(2D-FeFET)는 기계적 박리(mechanical exfoliation) 방법으로 얻은 MoS_2 박막을 채널 물질로 사용하여 제작하였다. 채널 하부에는 전하 트랩을 줄이고 깨끗한 계면을 제공하기 위해 h-BN 층을 삽입하였다. 게이트 절연체로는 P(VDF-TrFE)를 사용하였으며, 6 wt% 용액을 이용하여 약 200 nm 두께의 박막을 형성하였다. 제작된 P(VDF-TrFE) 층의 두께 의존적 특성을 분석한 결과, 6 wt% 조건에서 안정적인 강유전 거동을 나타내어 본 소자의 절연체로 최적화되었음을 확인하였다.

전극은 높은 광투과성을 확보하기 위해 그래핀(Graphene, Gr)을 소스, 드레인, 게이트 전극으로 채택하였다. 최종적으로 제작된 소자는 MoS_2 채널 위에 P(VDF-TrFE) 절연층과 그래핀 전극이 적층된 구조를 가지며, 투명 전극 및 게이트 절연체를 통해 빛이 직접 채널과 상호작용할 수 있도록 설계되었다.

추가적으로, P(VDF-TrFE) 층의 강유전 특성을 검증하기 위해 인듐 주석 산화물(Indium Tin Oxide, ITO) 기판 위에 강유전체 커패시터 구조를 제작하였다. 6 wt% 용액을 이용해 P(VDF-TrFE) 박막을 형성한 후, 도트(dot) 패턴의 금(Au) 전극을 증착하여 금속–강유전체–금속(MFM) 커패시터를 제작하였다. 형성된 P(VDF-TrFE) 층의 두께는 광학 현미경과 두께 측정을 통해 약 200 nm로 확인되었다. 최종 소자 이미지는 그림 1. 에서 확인 가능하다. 강유전 거동은 Sawyer–Tower 회로를 이용하여 분극–전기장(P–E) 히스테리시스 곡선 및 전류–전기장 특성을 분석하였다.

마지막으로, 제작된 단일 FeFET 소자를 기반으로 어레이 수준으로 확장 가능한 구조를 모델링하여 뉴로모픽 응용 가능성을 검토하였다.

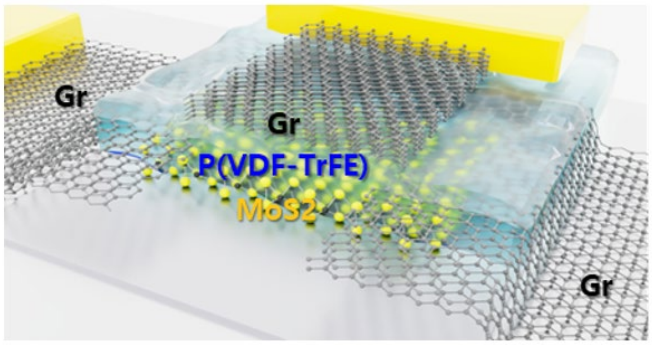


그림 2. 소자 Schematic Image

3. 연구 결과

제작된 2D-FeFET의 전기적 메모리 특성을 평가한 결과, VD = 0.1 V 조건에서 ±15 V 게이트 전압을 스위핑했을 때 뚜렷한 반시계 방향 히스테리시스와 약 50%의 메모리 윈도우가 관찰되었다. 이는 P(VDF-TrFE) 강유전체 절연층의 분극 반전이 안정적인 메모리 동작을 가능하게 함을 의미하며, ±15 V의 단일 펄스를 인가한 이후 좁은 범위(±0.1 V)에서 측정된 전달 특성은 소거 상태에서 약 10^{-12} A, 프로그램 상태에서 약 2×10^{-6} A의 전류가 재현되어 비휘발성 메모리 소자로서의 우수한 저장 특성을 보여주었다. 내구성 측정에서는 프로그램 및 소거 펄스를 반복 인가하였을 때 10^3회 이상의 사이클 동안 두 상태가 안정적으로 전환되었으며, 데이터 유지 특성 또한 소거와 프로그램 상태 모두에서 10^3초 이상 일정한 전류 레벨을 유지하였고, 두 상태 간 전류 비율은 10^6 이상을 나타내어 장기 메모리 동작에 필요한 높은 안정성을 입증하였다. 더 나아가 연속적인 게이트 펄스를 인가함으로써 장기 시냅스 가소성(Long-Term Potentiation/Depression)을 구현할 수 있었는데, +14 V의 양 펄스 인가 시 전류가 4×10^{-8} A에서 10^{-6} A까지 점진적으로 증가하였으며, –10 V의 음 펄스 인가 시 전류가 10^{-6} A에서 6×10^{-8} A까지 감소하는 등 가중치 조절이 점진적이고 가역적으로 나타났다. 이는 본 소자가 아날로그적 시냅스 가중치 업데이트에 적합하다는 것을 의미한다.

광학적 특성 평가에서는 MoS_2 채널의 밴드갭을 고려하여 청색(400 nm), 녹색(520 nm), 적색(650 nm), 적외선(780 nm) 파장의 광원을 조사한 결과 암상태 대비 모든 파장에서 전류가 증가하였으며, 15 mW/cm² 세기의 빛을 5초간 조사한 후에도 전류가 초기 상태보다 상승한 채 유지되었다. 특히 파장이 짧을수록 전류 증가가 크게 나타났고, 청색광에서 가장 두드러진 변화를 보였다. 이는 고에너지 광자가 MoS_2 채널과 P(VDF-TrFE) 강유전체 절연층에 동시에 작용하여 전도도 조절에 영향을 미친 것으로 해석된다.

종합적으로 2D-FeFET는 전기적 자극을 통한 빠른 상태 전환과 안정적인 메모리 동작뿐만 아니라, 광 자극을 통한 세밀한 전도도 조절 능력을 동시에 갖추고 있어 에너지 효율성과 정밀도가 동시에 요구되는 뉴로모픽 시스템에 적합하다. 특히 웨어러블 및 삽입형 의료기기와 같이 저전력·고신뢰성이 필수적인 응용 환경에서 실시간 신호 모니터링과 고정밀 연산을 가능하게 할 차세대 핵심 소자로서의 잠재력을 보여준다.

4. Acknowledgements

This work was supported by the Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT) under a grant funded by the Korea Government (MOTIE) (RS-2022-KI002581, HRD Program for Industrial Innovation).

5.참고 문헌

[1] A. Mehonic, et al. "Roadmap to neuromorphic computing with emerging technologies." *APL Materials*, Vol. 12, No. 10, p.109201, 2024.

[2] K. Wang, et al. "Neuromorphic Chips for Biomedical Engineering." *Mechanobiology in Medicine*, Vol. 1, p.100133, 2025.

[3] Q. Li, et al. "High-performance ferroelectric field-effect transistors with ultra-thin indium tin oxide channels for flexible and transparent electronics." *Nature Communications*, Vol. 15, No. 1, p.2686, 2024.

[4] A. Chaves, et al. "Bandgap engineering of two-dimensional semiconductor materials." *npj 2D Materials and Applications*, Vol. 4, No. 1, p.29, 2020.

Poster-032

광·전기 가소성을 갖는 DPP-DTT 나노와이어 시냅스 소자를 이용한 생체 신호 분류

최왕명[1*], 유호천[1]

한양대학교 융합전자공학과[1]

Biosignal Classification Using DPP-DTT Nanowire Synaptic Devices with Optical and Electrical Plasticity

Wangmyung Choi[1*], Hocheon Yoo[1]

Department of Electronic Engineering, Hanynag University, Korea[1]

*wmchoi@hanyang.ac.kr

Abstract

A neuromorphic phototransistor based on nanowire-patterned diketopyrrolo-pyrrole-dithienylthieno[3,2-b]thiophene (DPP-DTT) is demonstrated. The nanowires, aligned with a width of about 460 nm, a spacing of 8–11 μm, and a height of ≈80 nm, are fabricated through a soft-lithographic stamping process and exhibit synaptic responses under optical stimulation. Under blue light illumination (455 nm, 0.55 mW cm^{-2}), a photogating effect occurs at the DPP-DTT/SiO_2 interface, causing threshold-voltage shifts of up to 6.4 V due to electron trapping. Negative gate pulses (−7 V) accelerate electron recombination, leading to detrapping and lowering the threshold voltage. These complementary processes successfully reproduce synaptic potentiation and depression. The unique nanowire architecture promotes efficient trap–detrapping dynamics, enabling plasticity tuning. By varying the intensity (light: 0.26–1.42 mW cm^{-2}; gate: −6 to −9 V), duration (0.3–2.1 s), frequency (0.47–3.33 Hz), and repetition (1–40 cycles) of stimuli, the device transitions from short-term to long-term behavior. Performance evaluation in artificial-intelligence-based classification shows recognition accuracies of 97.4% for MNIST, 93.4% for electromyography (7 classes), 89.0% for electrocardiography (5 classes), and 83.8% for CIFAR-10.

1. 연구 배경

광 변조 시냅스 소자는 저전력, 높은 공간 정밀도, 병렬 자극 등 신경모사 시스템에 적합하며, 빛은 파장·강도·지속 시간에 따라 시냅스 가중치를 정밀하게 조절할 수 있는 비침습적 수단을 제공한다[1, 2]. 이러한 특성은 전기적 제어만으로는 달성하기 어려우며, 다중채널 신경모사 회로 확장에 유리하다.

유기 반도체 고분자는 밴드갭 조절성, 기계적 유연성, 용액 공정성을 통해 저비용 대면적 제조를 가능하게 하며, soft lithography 기반의 패터닝은 나노와이어 어레이 형성을 용이하게 해 시냅스 네트워크와 유사한 전도 경로를 구현한다. 나노와이어/유전체 계면의 trap site는 광여기된 carrier 포획을 유도해 photogating 효과를 제공하고, gate bias로 재결합을 제어함으로써 양방향 시냅스 가소성을 모사할 수 있다.

본 연구에서는 Stampping을 통해 패터닝된 diketopyrrolo-pyrrole-dithienylthieno[3,2-b]thiophene(DPP-DTT) 나노와이어를 기반으로 용액공정 광트랜지스터를 보고한다. 제안된 소자는 photogating effect에 의해 구동되는 시냅스 거동을 나타내며, 가소성은 빈도수, pulse 지속 시간, 자극 횟수 및 gate bias에 의해 조절된다. 본 연구는 단순한 구조를 기반으로 가시광선 광 영역하에서 광 여기된 carrier의 trapping을 안정적으로 구현한다. DPP-DTT 나노와이어 기반 광트랜지스터는 MNIST 필기 숫자 분류에서 97.4%의 정확도를 달성하고, 근전도(EMG)에서 93.4%, 심전도(ECG)에서 89.0%, 그리고 물체 인식(CIFAR-10)에서 83.8%의 정확도를 달성하는 신경모사 성능을 입증한다.

2.연구 방법

SiO2/Si 기판을 아세톤, 이소프로판올, 탈이온수를 사용하여 10분간 초음파 세척한다. 세척된 기판을 N_2 블로우 건을 사용하여 건조한다. SiO_2의 두께는 100 nm이고, 고농도로 도핑된 Si를 back-gate로 사용했다. Au/Ti(40 nm, 10 nm) 전극은 기판 위에 photolithography로 패터닝한 후 E-beam evaporator를 사용하여 증착하였다. 전극 사이의 길이는 10 μm이다. 1 μL의 DPP-DTT 용액을 기판 위에 떨어뜨린 후, 상온에서 PDMS stamp를 조심스럽게 적층하였다. 잔류 용매를 제거하기 위해 140°C에서 4시간 동안 열처리하였다.

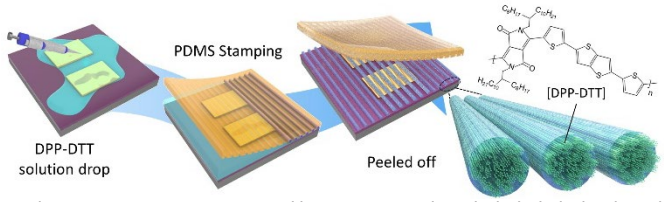


그림1. soft lithography를 통한 DPP-DTT 나노와이어기반의 광트랜지스터 제작 과정의 개략도.

3. 연구 결과

DPP-DTT 나노와이어 기반 광트랜지스터의 시냅스 특성의 원인을 규명하기 위해 전기적 특성을 체계적으로 분석하였다. 전기적 특성 분석 과정에서 드레인-소스 전압(V_{ds})은 −5 V로 고정하였다. 그림 2.a는 어둠 조건에서의 전달 특성을 나타내며, 약 ΔV_{th} = −5.95V의 음의 이동과 gate voltage 의존적 hysteresis를 나타낸다. 이러한 거동은 DPP-DTT 나노와이어/SiO_2 계면에서 OH^- 작용기에 의한 carrier trapping으로 인해 발생한다. 660 nm(적색), 530 nm(녹색), 455 nm(청색)의 빛을 고정된 세기(0.55 mW ·cm^{-2})로 조사했을 때, 전달 곡선은 양의 방향으로 이동했으며, 짧은 파장에서 더 큰 이동을 보였다(그림 2.b). 그림 2.c는 적색, 녹색, 청색 파장에 대해 일정한 강도의 파장 하에 시간에 따른 광응답을 보여줍니다. 모든 조건에서 광 여기된 전자는 trap되어 시냅스와 유사한 반응을 나타내며, 청색광 조건에서는 더 효율적인 carrier trap과 더 강화된 photogating 효과로 인해 향상된 거동을 보인다. 그림 2.d는 음의 gate pulse가 있을 때와 없

을 때의 시냅스 반응을 보여준다. 광 pulse가 인가된 후 gate pulse가 없을 때는 광전류가 약간의 감소 후 일정하게 유지된다. 반대로, 광 펄스가 인가된 후 음의 gate pulse를 인가하면 I_{ds}가 점진적으로 감소하여 시냅스 억제 기능이 구현된다. 이러한 결과는 DPP-DTT NW 기반 PT가 광과 게이트 펄스의 조율된 제어를 통해 증강과 억제를 모두 구현할 수 있음을 보여준다.

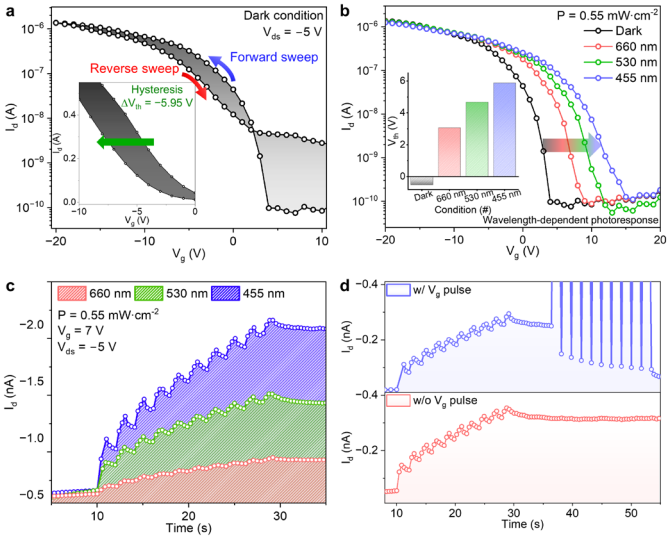


그림2. (a) gate bias sweep 방향에 따른 DPP-DTT 나노외어어기반 광트랜지스터의 히스테리시스 (inset: linear scale). (b) 파장 조건하에 측정한 전달 곡선 (inset: 파장에 따른 V_{th}). (c) 455, 530, 660 nm에 따른 시냅스 강화 특성 (광 pulse: 0.55 mW ·cm^{-2}, 1 s; V_{ds} = −5 V, V_g = 7 V). (d) 음의 gate pulse 유무에 따른 시냅스 억제 비교 (V_{ds} = −5 V, V_g = 7 V; 광 pulse: 0.55 mW·cm^{-2}, 1 s; gate pulse: −1 V, 0.3 s).

시냅스 가소성은 자극의 시간, 주기, 그리고 횟수를 조절함으로써 제어된다. 광 pulse 지속 시간이 짧을수록 흥분성 시냅스후 전위(EPSC)가 −0.13 nA에서 −4.7 nA로 증가하고 억제성 시냅스후 전위(IPSC)는 −1.3 nA에서 −1.03 nA로 감소하여, 자극의 시간이 짧을수록 시냅스 거동이 강화된다(그림 3.a). 그림 3.b는 10개의 반복적인 자극 조건 하에 시냅스 가소성 변화율을 보여준다. 자극의 주기가 짧아질수록 EPSC의 시냅스 가소성은 221%에서 306%로 증가하였다. IPSC의 경우, −5.7%에서 −11.5%로 증가하였다. 자극의 시간과 주기를 고정한 조건하에 자극의 횟수를 1개에서 40개로 늘리면 EPSC가 −0.25 nA에서 −2.94 nA로 증가하고 IPSC는 −1.26 nA에서 −0.84 nA로 감소한다(그림 3.c). 뉴로모픽 컴퓨팅에서, 강화와 억제 사이의 대칭성은 효율적인 SW 업데이트를

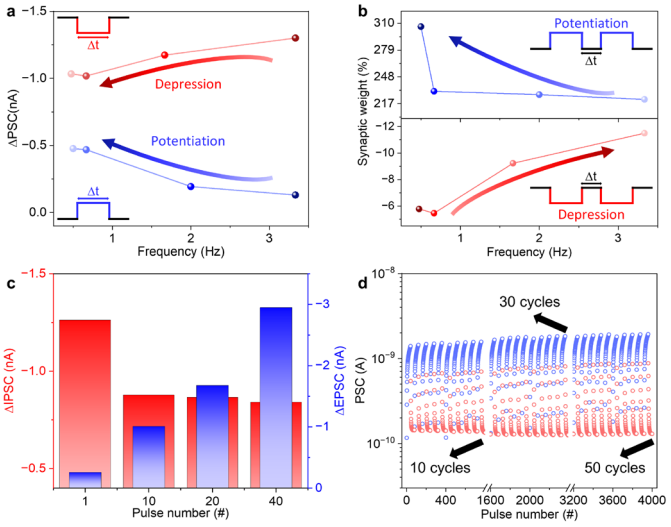


그림3. 자극 조건에 따른 DTT-DTT 나노와이어기반 광트랜지스터의 시냅스 가소성 특성; (a) 0.55 mW·cm^{-2}의 광 펄스와 −7 V의 gate pulse를 사용한 자극 지속 시간(0.3~2.1 s), (b) 0.55 mW·cm^{-2}의 광 pulse와 −7 V의 게이트 펄스를 사용한 자극 주파수(0.47~3.33 Hz), (c) 1 s의 광 pulse와 0.3 V의 gate pulse를 일정하게 인가되었을 때의 자극 수(1~40 cylces). (d) 50 cycle동안 반복적으로 측정한 증강 및 억제 특성.

위해 매우 중요하다. 시냅스 소자의 내구성을 평가하기 위해, 강화와 억제를 50번 반복하여 확인하였다(그림 3.d). 50번의 반복 자극 동안 총 4000개의 자극이 인가되었으며, PSC는 1.40 nA에서 1.93 nA로 약 37% 증가하였다. 이러한 특성은 생물학적 시스템에서 시냅스 연결이 점진적으로 강화되는 현상과 유사하다.

이러한 내구성 특성을 바탕으로, 본 소자는 실제 생리 신호 분류 응용에도 적용될 수 있음을 검증하였다 (그림 3.a). 심전도(ECG, 5 클래스)와 근전도(EMG, 7 제스처) 신호를 인공 신경망으로 학습한 결과, ECG 분류에서 최대 76.8%(평균 71.6%), EMG 분류에서 최대 93.4%(평균 88.3%)의 정확도를 달성하였다 (그림 4.b와 4.c). 이러한 결과는 DPP-DTT 나노와이어 기반 시냅스 소자가 다양한 생리 신호 인식 및 바이오헬스케어 응용에 유망함을 입증한다.

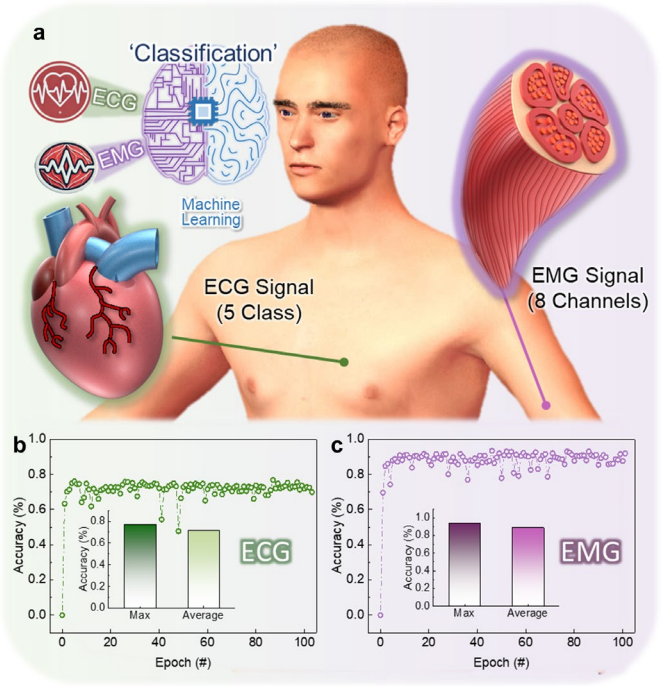


그림4. (a) 5개 클래스의 심전도(ECG) 및 8채널 근전도(EMG) 신호 분류. 인공 신경망 학습을 통한 (b) ECG 및 (c) EMG 분류 인식 정확도.

4. Acknowledgements

이 연구는 National Research Foundation of Korea (NRF) 과제의 지원을 받아 수행하였음. (RS-2024-00438999, RS-2023-00210194, RS-2024-00433166, and RS-2024-00442020)

5.참고 문헌

[1] Zhu, C. et al L. "Optical synaptic devices with ultra-low power consumption for neuromorphic computing." *Light: Science & Applications*, Vol 11, No.1, p.337, 2022

[2] Wang, Y. et al " Optoelectronic synaptic devices for neuromorphic computing." *Advanced Intelligent Systems*, Vol 3. No. 1, p.2000099, 2021

Electrospun P(VDF-TrFE) Nanofibrous Membrane Based High Performing Energy Harvesting Devices

Yongbin Han[1], Hong-Joon Yoon[1,*]

[1]Department of Semiconductor Engineering, Gachon University, Seongnam, Korea

gksdydqls125@gachon.ac.kr

Poly(vinylidenefluoride-co-trifluoroethylene)(P(VDF-TrFE)), as a ferroelectric polymer, offers great promise for energy harvesting for wearable and flexible applications. Generally, ferroelectric polymers exist five different phases (α, β, γ ,δ and ε), wherein the α-phase belongs to the non-polar phase that occurs naturally and the β-phase is the polar phase. The β-phase can enhance the performance of ferroelectric polymers by increasing their polar phase, which improves properties such as pyroelectric, triboelectric, and piezoelectric characteristics. Electrospinning can produce nanofibers of ferroelectric polymer with high β-phase content. The applied high electric field induces uniaxial stretching of the polymer chains and, along with the electrical poling effect during electrospinning, aligns the dipoles of polymer chains along the external electric field direction,thereby promoting the formation of the oriented crystalline β-phase.

In the process of fabricating nanofiber membranes through electrospinning, the characteristics of the membrane vary depending on the solvent used to dissolve the material. In this study, we investigate the influence of the solvent on the performance of P(VDF-TrFE)-based electrospun nanofiber membrane Triboelectric, Piezoelectric, Pyroelectric nanogenerator (TENG, PENG, PyNG) for energy harvesting.

To confirm the surface characteristics of nanofiber membranes according to each solvent, measurements were conducted using a scanning electron microscope (SEM), and the formation of β-Phase was investigated through XRD analysis to determine the degree of crystallinity. P(VDF-TrFE)-based TENG, PENG and PyNG were implemented to confirm the performance improvement according to the solvents used.

Optimization of Energy Harvesting Characteristics in a Metal Mesh-Based Ultrasound Triboelectric Nanogenerator

Ki-Yoon Park[1], Hong-Joon Yoon[1,2]

[1]*Department of Semiconductor Engineering, Gachon University, Seongnam, Korea*

[2]*Department of Electronic Engineering, Gachon University, Seongnam, Korea*

Implantable Medical Devices (IMDs) require reliable power sources, as traditional battery replacements involve high costs and repeated surgeries, increasing patient risk. Ultrasound-powered triboelectric nanogenerators (US-TENGs) present a sustainable solution due to ultrasound's FDA approval, biocompatibility, and non-invasive properties.[1] However, conventional US-TENGs with single-electrode designs have limited adaptability for diverse medical applications.

This presentation introduces the Metal Mesh-enhanced Ultrasound TENG (MMUS-TENG), addressing these limitations through a dual-electrode system and customizable metal mesh with adjustable pores per inch (PPI). This structure allows precise output control and optimizes acoustic impedance for efficient ultrasound energy capture. By tuning the metal mesh material and configuration, MMUS-TENG increases triboelectric efficiency, providing tailored output for specific IMD needs.[2]

In summary, MMUS-TENG is a promising advancement in IMD energy solutions, offering enhanced versatility, safety, and efficiency. Continued research aims to further optimize its performance, paving the way for impactful applications in healthcare.

References [1] Hinchet et al., Transcutaneous ultrasound energy harvesting using capacitive triboelectric technology, Science. 365, 491-494 (2019) [2] H. Li et al., Multi-scale metal mesh based triboelectric nanogenerator for mechanical energy harvesting and respiratory monitoring, Nano Energy 89 (2021) 106423

Poster-035

다공성 열 제어층을 이용한 고성능 웨어러블 땀 센서

이준석 [1], 이두현 [2], 윤효상 [3], 유기준 [2*], 상민규 [3*]

가천대학교 의공학과[1]

연세대학교 전기전자공학부[2]

가천대학교 전자공학과[3]

Wearable Sweat Sensor with a Porous Active Thermal Layer for Enhanced Signal Repolarization and Amplification

Junseok Lee[1], Doohyun J. Lee[2] , Hyosang Yoon[3], Ki Jun Yu[2*], and Mingyu Sang[3*]

[1)] *Department of Biomedical Engineering, Gachon University, 1342 Seongnamdaero, Sujeong-gu, Seongnam 13120, Republic of Korea*

[2)] *School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, 50 Yonsei-ro, Seodaemungu, Seoul 03722, Republic of Korea*

[3)] *Department of Electronic Engineering, Gachon University, 1342 Seongnamdaero, Sujeong-gu, Seongnam 13120, Republic of Korea*

Prof. Ki Jun Yu*: kijunyu@yonsei.ac.kr

Prof. Mingyu Sang*: sangmg315@gachon.ac.kr

Abstract

Wearable sweat sensors are emerging as a promising technology for non-invasive health monitoring, but their practical application is hindered by challenges such as sample contamination and signal instability. Specifically, hysteresis—caused by the mixing of old and new sweat samples—is a critical issue that slows response times and degrades the long-term reliability of the sensors. To overcome these limitations, this research introduces a novel component called the porous active thermal layer (PATL). The PATL performs two key functions through localized thermal activation. First, it effectively resolves the issue of hysteresis by safely removing used sweat samples via low-temperature evaporation. Second, this same thermal activation process amplifies the detection signal by accelerating the molecular kinetics of biomarkers. In conclusion, this novel design offers a powerful solution that simultaneously improves sensor reliability and sensitivity, with the added advantage of being easily integrable with existing wearable sensor architectures.

1. 연구 배경

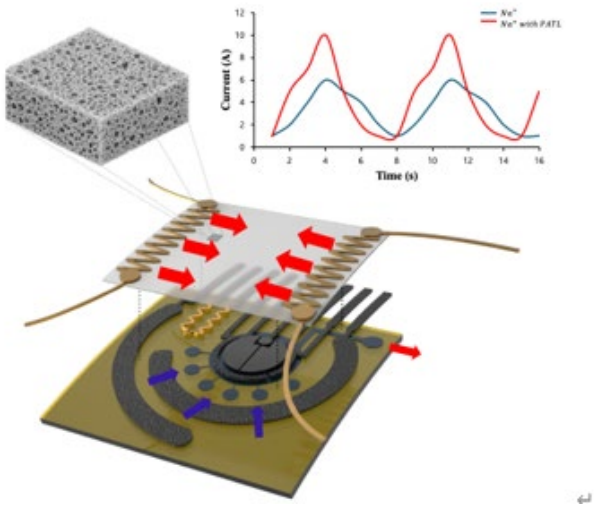


그림 1. 웨어러블 땀 센서 개요

웨어러블 땀 센서(Wearable sweat sensor)는 전해질(electrolytes), 대사산물(metabolites), 호르몬(hormones)과 같은 바이오마커(Biomarkers)의 실시간 분석을 통해 건강 상태를 비침습적이고(Non-invasive), 지속적(Continuos)으로 모니터링할 수 있다는 특징이 있다. 이런 특징으로 인해 개인 맞춤형 의료 분야의 다음 세대 플랫폼으로 떠오르고 있다. [1,2]

하지만, 현재의 땀 센서를 실용화하기 위해서는 몇 가지 해결해야 할 중요한 문제점들이 존재한다. 첫째, 피부 표면으로부터의 샘플 오염 및 무결성 문제는 측정 정확도를 떨어뜨린다. 현재 이 문제점을 미세유체 채널(Microfluidic channel)을 통해 해결하려고 하지만 완전히 해결되지 않았다. 둘째, 잔류 땀으로 인한 이전 샘플과 새로운 샘플의 혼합으로 인해 신호 불안정성 문제가 있다. 이런 혼합된 샘플은 이력 현상(Hysterisis)를 유발하여 응답 속도를 낮추고 신호 드리프트(Signal drift)를 야기함으로써 장기적인 모니터링에서 신뢰성을 감소시킨다. 셋째, 실험실에서 보정된 센서 성능이 피부 위에서의 온도 및 pH 변화에 따라 크게 저하될 수 있다. [3]

기존의 땀 센서의 구조에 다공성 열 제어층 (Porous Active Thermal Layer, PATL) 구조를 도입함으로 인해 PATL의 다공성 기판과 미세 유체 채널간 시너지 효과로 센서

내부로 샘플 전달(Inlet)과 반응이 끝난 분석물 센서 외부로 배출(Outlet)하는 두 가지 측면에서 효율성을 보인다. 또한, 이 시스템은 국소적인 열 활성층을 이용하게 되는데, 이 층은 앞서 언급한 잔류 땀과 오염물을 제거 및 바이오마커의 반응 속도와 실험실 외부 환경에서의 분석 성능 안정성을 보장하도록 설계되었다. [4]

PATL을 도입한 땀 센서를 다양한 환경에서 기존 센서와 비교한 경우 이력현상 및 신호 드리프트 감소를 통해 전반적인 센서 성능 향상을 보장한다는 것을 확인하였다.

2. 연구 방법

실험에 사용한 땀 센서는 전위차 측정(Potertiometry) 방식으로 땀에 포함된 이온의 농도를 전압의 변화로 측정하는 방식의 전기화학 센서이다. 전위차 측정을 이용하는 땀 센서는 이온을 선택하는 전극(Working Electrode)과 기준 전극(Reference Electrode) 두 단자로 구성되며, 다양한 바이오마커 중 나트륨 이온, 칼슘 이온 등의 이온 검출에 적합한 방식이다.

나트륨 이온은 땀에 포함된 물질들 중 가장 농도가 높고, 탈수, 이온 불균형 등을 알아낼 수 있는 중요한 척도가 된다. [5] 이러한 이유로 실험에서 사용한 센서는 나트륨 이온 검출 센서로 센서의 성능을 측정하기 위한 용액으로는 염화 나트륨(NaCl)을 사용하였다. 10℃, 25℃(상온), 36.5℃(인체의 평균체온), 40℃, 50℃ 환경에서 10^{-2}, 10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}, 10^{-6}, 10^{-7}, 10^{-8}M NaCl 용액에서의 센서의 신호를 얻어 온도별로 센서의 성능을 확인한다. 추가로 다공성 층을 배출부에 배치하여 센서의 출력 신호를 증폭회로를 거치도록 확인하여 온도, 다공성 층을 추가한 구조가 센서의 성능에 어느정도 영향을 미치는지 확인하도록 하였다. 또한 다양한 활성 전극(Working electrode) 전극을 만들고 실험을 통해 결과를 비교해보는 과정을 통해 다양한 땀 센서의 구조와 호환성 확인 및 적합한 전극을 찾을 수 있도록 진행하였다.

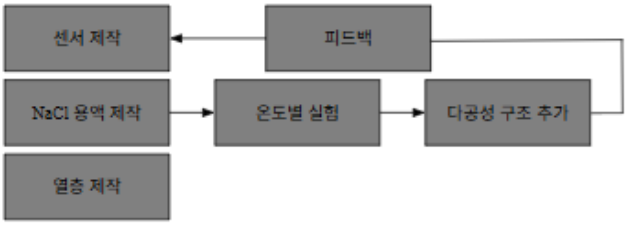


그림 2. 전체 실험 순서도

3. 연구 결과

해당 실험은 땀 센서는 잔류 땀으로 인한 이력 현상 및 신호 드리프트 현상의 발생, 실험실 외부 환경(10℃ 혹은 이하, 50℃ 혹은 이상)에서 센서의 신호의 불균일성을 해결하기 위한 방법으로 36.5℃, 40℃ 부근에서 유지시켜주었을 때 센서의 성능이 균일하게 유지되는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 10℃ 혹은 이하, 50℃ 혹은 이상의 환경에서는 이온선택성막(Ion Selective Membrane)의 수축 및 팽창, 추가로 전극의 성능 감소 등의 원인으로 인해 신호의 선택성 및 땀 센서의 미세 유체 채널의 문제점을 해결할 수 없었다.

기존의 땀 센서의 구조는 미세 유체 채널을 통해 땀을 흡수하고, 방출하는 구조를 띠고 있지만, 이 구조로 이력 현상을 해결하기에는 한계점이 있었다. 다공성 PDMS 층을 방출부에 추가하는 것을 통해 기존의 땀 센서의 땀 배출 효과를 향상시키는 결과를 얻을 수 있었다. 이런 열층과 다공성층을 복합적으로 추가한 PATL을 추가함으로써 기존의 센서에 비해 재분극 속도 향상을 통한 이력 현상 및 신호 드리프트 해결, 센서 성능의 안정성 보장을 확인할 수 있었다.

4. Acknowledgements

이 연구는 Korea Institute for Advancement of Technology(KIAT)의 지원을 받아 수행되었음. (Ministry of Education) (P0028100, Semiconductor Specialized University)

5.참고 문헌

[1] W. Gao *al.*, "Fully integrated wearable sensor arrays for multiplexed in situ perspiration analysis," *Nature,* Vol. 529, no. 7587, pp. 509–514, 2016.

[2] K. Kim *et al.*, "Highly Sensitive and Wearable Liquid Metal-Based Pressure Sensor for Health Monitoring Applications: Integration of a 3D-Printed Microbump Array with the Microchannel," *Advanced Healthcare Materials,* Vol. 8, no. 22, p. 1900978, 2019.

[3] J. Choi *et al.*, "Synergetic Effect of Porous Elastomer and Percolation of Carbon Nanotube Filler toward High Performance Capacitive Pressure Sensors," *ACS Applied Materials & Interfaces,* Vol. 12, no. 1, pp. 1698–1706, 2020.

[4] M. Sang *et al.*, "Ultrahigh Sensitive Au-Doped Silicon Nanomembrane Based Wearable Sensor Arrays for Continuous Skin Temperature Monitoring with High Precision," *Advanced Materials,* Vol. 34, no. 4, p. 2105865, 2022.

[5] Bariya, M., Nyein, H.Y.Y. & Javey, “A. Wearable sweat sensors.” *Nature Electronics* **1**, 160–171 (2018).

Poster-036

PVA/PVP 이용한 2주 분해성 디졸빙 마이크로니들의 개발 및 안구 약물 전달 응용

김종문[1,2], 김대유[1,2,3*]

인하대학교 전기컴퓨터공학과[1]·인하대학교 센서시스템 연구소[2]·인하대학교 우주항공의과학연구소[3]

Sustained Ocular Drug Delivery for Two Weeks Using a Biodegradable PVA/PVP-Based Dissolving Microneedle

Jong moon Kim[1,2], DaeYu Kim[1,2,3*]

Department of Electrical and Computer Engineering, Inha University, Korea[1]

Center for Sensor Systems, College of Engineering, Inha University, Korea[2]

Inha Research Institute for Aerospace Medicine, Inha University, Inha University, Korea[3]

*dyukim@inha.ac.kr

Abstract

Recent research on dissolving microneedles has trended towards rapid dissolution to mitigate concerns about in-vivo residues. Chronic ocular diseases affecting the anterior segment and posterior segment typically required long-term treatment. This study presented a counter-intuitive approach: designing a two-week drug delivery platform using polyvinyl alcohol (PVA) and polyvinylpyrrolidone (PVP), materials conventionally used for rapid release. The core strategy for controlling the matrix decomposition rate involved two key approaches: utilizing the inherently low solubility of high molecular weight, fully hydrolyzed PVA, and optimizing the ratio of PVA to PVP. The successfully fabricated microneedles were designed to exhibit a controlled dissolution profile over 14 days in a simulated physiological environment. In conclusion, this study demonstrated that re-engineering rapidly dissolving polymers into a slowly degradable matrix enabled sustained ocular drug delivery over 14 days while maintaining safety and complete biodegradability.

1. 연구 배경

정확한 위치에 유효 농도의 약물을 자극 없이 전달하는 것은 안과 질환 치료의 핵심 목표이다. 현재 표준 치료법은 비침습적 방식과 침습적 방식으로 구분된다. 비침습적 점안액은 눈물의 빠른 순환과 비루관 배출로 인해 약물의 95% 이상이 소실되어 생체이용률(Bioavailability)이 극히 낮다. 이로 인해 빈번한 투여가 필요하며, 환자 순응도 저하와 치료 실패로 이어질 수 있다. 반면, 안내 주사(intraocular injection)와 같은 침습적 방법은 높은 약물 전달 효율을 보이지만, 안내염(Endophthalmitis)이나 망막 박리 등 심각한 합병증과 환자의 불안 및 통증 유발이라는 한계를 가진다. 이러한 이유로, 최소 침습적 마이크로니들(microneedle) 기술이 각막이나 결막과 같은 국소 조직을 정밀하게 투과하여 약물을 직접 전달하는 혁신적 대안으로 주목받고 있다.[1].

생분해성 고분자로 제작된 용해성 마이크로니들은 치료 후 체내에 잔여물을 남기지 않기 위해 빠른 용해를 목표로 개발되어 왔다. 이러한 접근은 체내 축적 가능성에 대한 우려를 줄이고, 안전성을 확보하기 위한 것이다.[2] 실제로 대부분의 기존 연구들은 수 분에서 수 시간, 길게는 하루 이내 완전 용해를 달성하도록 설계되었다.[3]그러나 이러한 신속한 용해 특성은 녹내장(Glaucoma), 당뇨병성 황반부종(DME), 만성 포도막염과 같이 수 주에서 수개월에 걸쳐 지속적인 약물 공급이 필요한 만성 안과 질환에는 적합하지 않다. 따라서, 장기적이고 지속적인 약물 방출이 가능한 느리게 용해되는 마이크로니들 시스템의 개발이 필수적이다.

따라서 본 연구는 이러한 임상적 요구와 기술적 한계의 불일치를 해결하는 것을 목표로 한다. 대표적인 생체적합성 고분자인 폴리비닐알코올(PVA)과 폴리비닐피롤리돈(PVP)을 이용하되, 그 특성을 역으로 활용하는 새로운 접근법을 제안한다. 즉, 높은 분자량과 완전 가수분해된 PVA가 형성하는 반결정성(semi-crystalline) 구조에서 기인하는 느린 분해 특성을 활용하여[3] 플랫폼의 기본 골격을 형성하고, 여기에 빠른 수화(hydration) 및 용해 특성을 지닌 PVP의 비율을 정밀하게 조절하여 전체 매트릭스의 붕해 및 약물 방출 속도를 제어하고자 한다. 이를 통해 2주 동안 점진적이면서도 완전하게 용해되어 약물을 방출하는 마이크로니들 플랫폼을 구현하는 것을 목표로 한다. 본 연구에서 제안하는 플랫폼은 한 번의 적용으로 장기간 안정적인 치료 농도를 유지함으로써, 환자의 치료 부담을 획기적으로 줄이고 만성 안과 질환 치료의 패러다임을 전환할 수 있는 잠재력을 가진다.

2.연구 방법

PVA/PVP 고분자 블렌드 용액은 그림 1에 나타낸 바와 같이, PVA 수용액과 PVP 수용액을 최적의 부피 비율로 혼합한 뒤 볼텍싱을 통해 균일하게 제조하였다. 이후, 두 고분자 간의 혼화성을 향상시키고 PVA 사슬 간의 물리적 가교(physical cross-linking)를 유도하여 최종 매트릭스의 구조적 안정성을 확보하기 위해 95 ℃ 오븐에서 24시간 동안 어닐링(annealing)을 진행하였다.



그림 1. PVA/PVP 혼합 용액 제조

그림 2에 나타낸 바와 같이, 마이크로니들 성형을 위한 음각 몰드(negative mold)는 다음과 같이 제작하였다. 먼저, 3D 프린터로 정밀 제작된 마이크로니들 양각 마스터(positive master) 위에 PDMS(Polydimethylsiloxane) 베이스와 경화제를 10:1의 질량비로 혼합·탈기(degassing)한 용액을 부었다.이후, 60 °C에서 1시간 동안 열경화를 수행한 뒤, 경화된 PDMS를 마스터로부터 천천히 박리하여 마이크로니들 형상이 각인된 음각 몰드를 확보하였다.

.

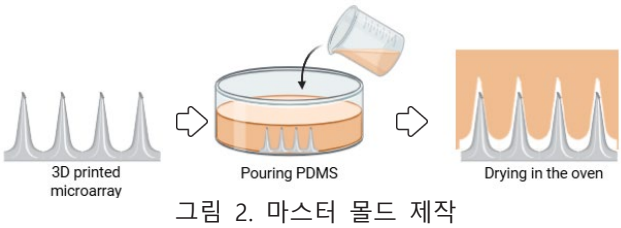


그림 2. 마스터 몰드 제작

그림 3에 나타낸 바와 같이, 최종 마이크로니들 어레이는 다음 절차로 제작하였다. PVA/PVP 블렌드 용액을 PDMS 음각 몰드에 주입한 뒤, 원심분리(centrifugation)를 통해 몰드의 미세 캐비티를 완전히 충전시켰다. 이후, 몰드를 오븐에서 24시간 동안 건조 및 어닐링(annealing)하여 고분자 매트릭스를 고형화(solidify)한 후, 완전히 경화된 마이크로니들 어레이를 몰드로부터 조심스럽게 박리(demolding)하여 최종 시편을 얻었다.

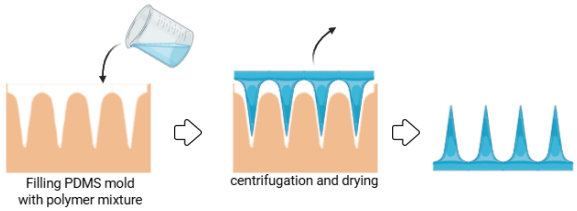


그림 3. 마이크로니들 어레이 복제 과정

제작된 마이크로니들 어레이의 시험관 내(*in vitro*) 용해 특성을 평가하기 위해, 인산완충식염수(Phosphate-Buffered Saline, PBS, pH 7.4)를 사용하였다. 그림 4번과 같이, 마이크로니들 어레이를 PBS가 담긴 바이알에 완전히 침지시킨 후, 실제 생체 환경과 유사한 36.5°C 조건의 인큐베이터(incubator)에 보관하였다. 실험 시작 후 14일까지 매 24시간 간격으로 시료를 꺼내어 건조시킨 뒤, 광학 현미경(Optical Microscope)을 이용하여 마이크로니들의 형태학적 변화와 분해 과정을 관찰하고 이미지로 기록하였다.

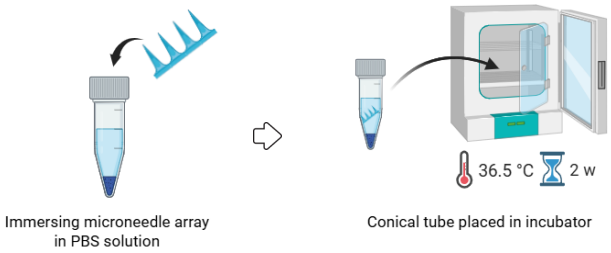


그림 4. 마이크로니들 어레이 용해 평가

3. 연구 결과

2주(14일) 지속 방출형 마이크로니들의 가능성을 검증하기 위해 제작된 PVA/PVP 마이크로니들에 대한 in vitro 용해 실험을 수행하였다. 비록 목표한 14일 내 완전 용해에는 도달하지 못했지만, 시간이 지남에 따라 마이크로니들의 기둥부위부터 점진적으로 팽윤·용해가 진행되며, 상부 구조가 서서히 둔화되는 양상이 관찰되었다(그림 5). 이러한 결과는 일반적인 PVA/PVP 혼합물이 수 시간 내 빠르게 용해되는 것과 비교할 때, 본 연구의 고분자 조성 제어가 용해 속도를 유의미하게 지연시켜 지속적 약물 방출이 가능함을 입증한다. 따라서, 조성비 및 분자량 최적화를 통해 2주 이상의 장기 방출형 마이크로니들 구현 가능성이 충분히 확인되었다.

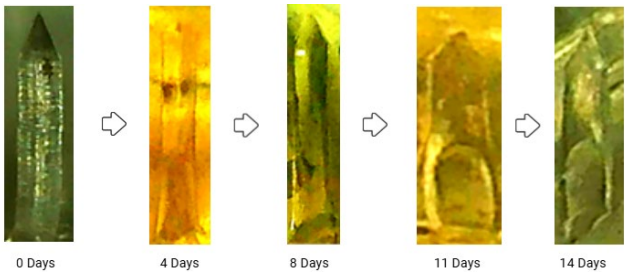


그림 5. 실제 용해성 테스트 결과

현재 제작된 마이크로니들은 설계 목표였던 14일을 초과하여 안정적으로 유지되는 특성을 보였다.이는 제형의 물리적 네트워크가 예상보다 견고하게 형성되었음을 의미하며, PVA와 PVP의 혼합 비율 및 분자량 등 조성 파라미터를 미세 조정함으로써 목표 용해 시간에 정밀하게 도달할 수 있을 것으로 판단된다.향후 이러한 최적화 연구를 통해 정확히 2주간 약물을 방출하는 마이크로니들이 구현된다면, 한 번의 적용만으로 장기 치료가 필요한 만성 안과 질환 환자의 치료 순응도와 임상 효율성을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

4. Acknowledgements

This research was supported by Korea Institute for Advancement of Technology(KIAT) grant funded by the Korea Government(MOTIE) (RS-2022-KI002581, HRD Program for Industrial Innovation)This research was supported by Korea Institute for Advancement of Technology(KIAT) grant funded by the Korea Government(MOTIE) (RS00411221, HRD Program for Industrial Innovation)This work was supported by the Korea/Medical Device Development Fund grant funded by the Korea government(the Ministry of Science and ICT, the Ministry of Trade, Industry and Energy , the Ministry of Health & Welfare. The Ministry of Food and Drug safety)(Project Number: RS-2023-00242778)This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT)(RS-2023-NR076534)

5.참고 문헌

[1] Glover, K.; Mishra, D.; Gade, S.; Vora, L. K.; Wu, Y.; Paredes, A. J.; Donnelly, R. F.; Singh, T. R. R. Microneedles for advanced ocular drug delivery. Advanced Drug Delivery Reviews 201 (2023) 115082.

[2] Kornicka, J.; Śniadek, P.; Marycz, K.; Walczak, R. Dissolving microneedles fabricated from 3D-printed master molds for application in veterinary medicine. Scientific Reports 15 (2025) 14102.

[3] Bazargani, Z.; Khorram, M.; Zomorodian, K.; Ghahartars, M.; Omidifar, N. Development and comparative analysis of clobetasol-loaded microneedle patches versus clobetasol propionate ointment in experimental induced-psoriasis model. International Journal of Pharmaceutics 674 (2025) 125423.

Poster-037

신경 조절을 위한 사각파 기반 시간 간섭 자극 시스템

김예민[1*], 이준혁[1], 길재준[1], 김동림[2], 이병훈[1,2]

한양대학교 융합전자공학과[1], 인공지능반도체공학과[2]

Towards a Square-wave-based Temporal Interference Stimulation System for Neuromodulation

Yemin Kim[1*], Junhyuck Lee[1], Jaejun Kil[1], Dongrim Kim[2], Byunghun Lee[1,2]

[1]Department of Electronic Engineering, Hanyang University, Korea

[2]Department of Artificial Intelligence Semiconductor Engineering, Hanyang University, Korea

[*]rtdfas11@hanyang.ac.kr

Abstract

Deep brain stimulation (DBS) effectively treats neurological disorders such as Parkinson's disease and obsessive-compulsive disorder but requires invasive surgery with significant risks. To overcome these limitations, this study proposes a square-wave-based minimally invasive wireless temporal interference stimulation (TIS) system that provides stronger and more controllable stimulation with low invasiveness. The device, implanted beneath the scalp and powered via inductive coupling, enables real-time control through on-off keying pulse width modulation (OOK-PWM) communication. Using square-wave-based TIS simplifies the circuitry and enhances depolarization efficiency by approximately 40% compared to conventional sine-wave-based TIS. This system demonstrates the feasibility of strong, long-term, and real-time controlled brain stimulation, offering a promising direction for future clinical applications in neurological therapy.

1. 연구 배경

파킨슨병, 강박장애, 알츠하이머와 같은 신경 질환들은 약물치료만으로는 근본적인 치료나 충분한 증상 완화에 한계가 존재한다. 이러한 한계를 극복하기 위한 대안으로 뇌심부자극술(deep brain stimulation, DBS)이 높은 치료 효과를 보여왔으나, 전극을 뇌 심부에 직접 삽입하는 침습적 수술로 인해 감염, 출혈, 기기 고장 등의 위험이 존재하며 자극 위치를 조정하기 어렵다는 단점이 있다. 이에 따라 두개골을 열지 않고 신경 회로를 조절할 수 있는 비침습적 뇌 자극 기술에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 대표적인 방법으로는 경두개 직류 자극술(transcranial direct current stimulation, tDCS), 경두개 교류 자극술(transcranial alternating current stimulation, tACS) 등이 있으나, 이러한 방식은 자극의 공간 정밀도가 낮아 주변 조직을 자극할 수 있는 위험이 있으며 깊은 영역까지 자극 전달이 어렵다는 한계가 있다.

최근 이러한 문제를 해결하기 위한 새로운 접근법으로 시간 간섭 자극(temporal interference stimulation, TIS)이 제안되었다 [1]. 그림 1과 같이 두 개의 고주파 전류(f_1, $f_2 = f_1 + \Delta f$)를 서로 다른 전극쌍을 통해 주입하여, 조직 내에서 형성되는 합성 전기장의 낮은 주파수 성분(Δf)을 이용해 신경 자극을 유도하는 기술이다. 이 방식은 고주파 캐리어가 신경막의 저역통과특성에 의해 필터링 되기 때문에 주변 조직 손상을 최소화된다. 따라서 TIS는 비침습적인 조건에서도 깊은 뇌 영역의 선택적 자극이 가능하며 채널 간 주입 전류 비율 조절을 통해 전극의 이동 없이 자극 위치를 이동시킬 수 있는 장점이 있다. 그러나 기존의 두피 전극 기반 TIS는 shunting effect로 인한 전류 감쇠와 안전 기준에 따른 주입 전류 밀도 제한 때문에 큰 전기장을 형성하기 어렵다 [2]. 따라서, 비침습성의 장점을 유지하면서도 충분한 자극 강도와 표적 정밀도를 동시에 달성할 수 있는 TIS 디바이스 설계가 요구된다.

본 연구에서는 사각파 기반 최소침습형 무선 TIS 자극기를 제안한다. 제안된 시스템은 두피 아래, 두개골 위에 전극과

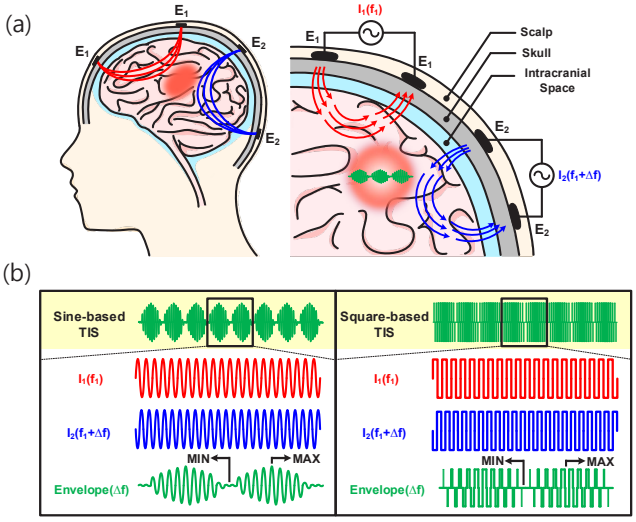


그림 1. 시간 간섭 자극 과정. (a) 자극 도식 및 단면도, (b) 사인파 기반 및 사각파 기반 자극 파형.

자극기를 배치하여 침습성을 최소화하면서도 기존 두피 전극 대비 더 강한 전기장을 뇌 심부에 전달한다. 또한 사각파 자극 방식을 적용하여 동일한 전류 밀도 조건에서 사인파 대비 높은 실효값을 확보하고, 단순한 on/off 제어로 자극 신호를 생성하여 회로 구조를 크게 단순화하였다. 더하여 무선 전력 및 통신 기능을 통해 실시간 자극 제어와 장기 운용이 가능하여, 향후 다양한 신경 질환 치료에의 임상적 적용 가능성을 높일 것으로 기대된다.

2. 연구 방법

자극 시스템은 그림 2(a)와 같이 외부 송신기(transmitter, Tx)와 배터리, 그리고 두피 아래, 두개골 위에 위치한 수신기(receiver, Rx) 및 전극으로 구성된다. 시스템은 유도결합(inductive link)을 통해 무선으로 전력과 데이터를 수신하며, 이를 통해 외부에서 자극 주파수, 진폭, 시간 등의 파라미터를 실시간으로 제어할 수 있다. 데이터 통신은 신호

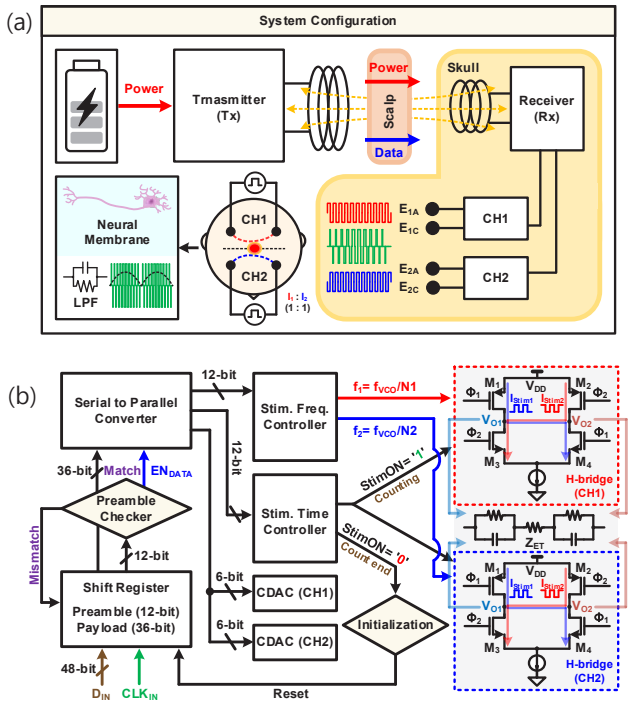


그림 2. (a) 제안된 자극 시스템 구성도, (b) 자극 프로토콜 및 단순화된 회로도.

변동에 강인한 on-off keying pulse width modulation(OOK-PWM) 방식을 적용하여 안정적으로 전송된다. 전송된 신호는 Rx 내부의 데이터 및 클럭 복원 회로에서 복원된 후, 48-bit 시프트 레지스터로 전달된다. 이후 프리앰플(preamble)이 검출되면 그림 2(b)에 제시된 자극 프로토콜에 따라 데이터가 각 컨트롤러로 분배된다. 설정된 자극 시간 동안 StimON 신호가 high('1') 상태로 유지되며, 각 채널의 H-bridge 게이트가 f_1, f_2 주파수로 스위칭 된다. 자극 시간이 종료되면 StimON 신호가 low('0')로 전환되고, 모든 레지스터와 컨트롤러가 초기화되어 다음 자극 제어 신호를 대기한다.

사각파 기반 TIS의 자극 효율은 Sim4Life의 Electro-Ohmic Quasi-static LF Solver를 이용하여 정량적으로 검증하였다 [3]. 뇌 조직은 전기전도도 0.59 S/m을 갖는 200 mm × 200 mm × 100 mm 영역으로 모델링하였으며, 지름 20 mm, 두께 2 mm의 원형 전극을 적용하였다. 동일한 표면 전류 밀도 조건에서 f_1= 1 kHz, f_2= 1.1 kHz로 설정하여 사인파 기반 TIS와 사각파 기반 TIS를 비교하였다. 실험 검증을 위해서는 지름 60 mm, 격자 간격 5 mm의 페트리 접시를 이용한 측정 환경을 구성하였다. 자극 주파수는 1 kHz와 1.1 kHz, 부하 임피던스는 1 kΩ으로 설정하였으며, 총 98개 지점에서 전기장을 측정하였다.

3. 연구 결과

그림 3은 시뮬레이션을 통해 도출된 사인파 기반 및 사각파 기반 TIS의 전기장 분포를 나타낸다. 동일한 피크 전류 밀도 조건에서 교류 신호의 실효 전류값(I_{RMS})은 사각파의 경우 $I_{RMS,sq}$= I_{PEAK}, 사인파의 경우 $I_{RMS,sin}$= I_{PEAK} / √2로 정의된다. 즉, 사각파는 약 41.4% 더 높은 자극을 제공한다. 시뮬레이션 결과, 초점 부위의 정규화 된 전기장 비는 약 1.4로 나타나, 사각파 기반 TIS가 동일한 전류 조건에서 더 강한 전기장을 형성함을 확인하였다. 이는 사각파의 높은 I_{RMS}가 실제 조직 내 자극 효율을 향상시킴을 보여준다. 그림 4는 제작된 자극기로, 2 mm × 2.5 mm

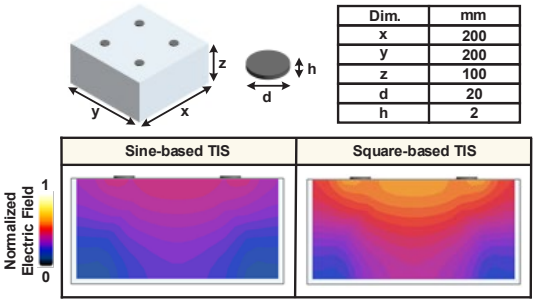


그림 3. 사인파 및 사각파 기반 자극 강도 비교.

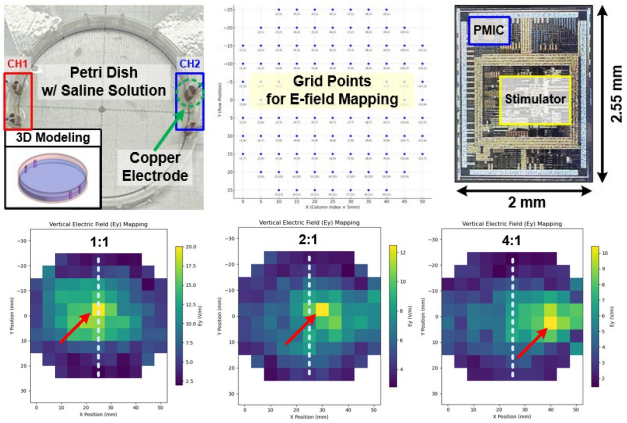


그림 4. 자극기 측정 환경 및 전기장 매핑.

크기를 갖는다. 자극 전류의 최대값은 1.4 mA로 설정하였고, 전류 비율에 따른 전기장 E_Y의 크기는 1:1 조건에서 20 V/m, 2:1에서 12 V/m, 4:1에서 10 V/m으로 측정되었다. 해당 결과는 전류 비율 제어에 따라 자극 초점이 안정적으로 이동함을 의미하며, 시뮬레이션에서 예측된 초점 이동 특성과 일치하는 경향을 보였다. 결과적으로 제안된 사각파 기반 최소침습형 무선 TIS 자극기는 사인파 대비 높은 전기장 효율과 초점 제어 성능을 동시에 확보하였으며, 단순한 회로 구조를 유지하면서도 정밀한 자극 제어를 구현하였다. 이러한 결과는 제안된 시스템이 기존 비침습 자극 방식의 한계를 극복하고, DBS 영역에서 정밀도, 효율성, 실용성을 모두 갖춘 기술로 발전할 수 있음을 시사한다.

4. Acknowledgements

This work was supported by the Bio & Medical Technology Development Program (RS-2024-00398460) funded by the National Research Foundation (NRF), Korea. This research was also supported by a grant of the Korea Health Technology R&D Project through the Korea Health Industry Development Institute (KHIDI), funded by the Ministry of Health Welfare, Republic of Korea (grant number : HR21C0885).

5. 참고 문헌

[1] E. M. Grossman, D. Bono, R. Dedic, S. Boyden, and E. S. Boyden. “Noninvasive deep brain stimulation via temporally interfering electric fields.” *Cell*, Vol. 169, No. 6, p.1029–1041, 2017.

[2] W. Kang, J. Lee, Y. R. Kim, W. R. Chung, D. L. Na, Y.-M. Shon, and S. M. Park. “Analyzing the advantages of subcutaneous over transcutaneous electrical stimulation for activating brainwaves.” *Scientific Reports*, Vol. 10, No. 1, p. 7360, 2020.

[3] ZMT. *Sim4Life*. [Online]. Available: https://www.zmt.swiss

Poster-038

노이즈 레벨 조절 가능한 포토다이오드를 이용한 PPG 암호화

유영우[1*], 한영민[3], 윤성순[1], 유호천[3], 김영준[1,2]

가천대학교 반도체공학과[1]

가천대학교 전자공학과[2]

한양대학교 융합전자공학과[3]

Encryption PPG Using Changeable Noise Level Photo Diode

Youngwoo Yoo[1*], Youngmin Han[3] , Seong-soon Yoon[1], Hocheon Yoo[3], Young-Joon Kim[1,2]

Department of Semiconductor Engineering, Gachon University, Korea[1]

Department of Electronic Engineering, Gachon University, Korea[2]

Department of Electronic Engineering, Hanyang University, Korea[3]

[*]mechanic0919@gachon.ac.kr

Abstract

Collecting biosignals and encrypting them on wearable devices are critical processes. However, the limitations of software-based random number generation, along with the power and latency overheads arising from signal processing and encryption, remain challenges to be addressed. To tackle these issues, we propose a system that leverages the bias-dependent current-noise characteristics of a heterojunction photodiode to perform both random-bit generation from current noise and photoplethysmography (PPG) within a single device, thereby enabling on-device signal acquisition and encryption. The proposed system aims to obtain both PPG and random bits from a heterojunction photodiode on a single edge platform, and demonstrates that biosignals can be encrypted using device-noise-based true randomness rather than software-based pseudo-random numbers.

1. 연구 배경

최근, 모바일 기기를 넘어 웨어러블 기기 곳곳에서 생체신호를 측정하기 위해 센서를 추가하며 신호를 수집하기 위한 노력을 들이고 있다. 특히 최근 공개된 애플社 AirPods Pro 3처럼 히어러블에 PPG 기능이 탑재된 사례는, 귀·이도(in-ear) 영역이 동잡음과 주변광 변동에 상대적으로 강하고 착용 순응도가 높아 임상·실사용 환경에서의 신호 품질지표(SQI) 관리와 결합될 때 ECG 대비 신뢰할 만한 심박 추정에 도달할 수 있음을 보여준다[1]. 다만 웨어러블의 본질적 제약(초소형 배터리, 제한된 연산, 메모리, RF 통신 의존성)을 고려하면, 기기 상에서 신호취득–전처리–특징추출–암호화–전송 전 과정을 수행하는 것은 전력, 지연, 열 예산 측면에서 부담이 크고, 설령 처리 자체는 가능하더라도 민감한 바이오신호가 무선 구간을 통과하는 순간 도청, 메타데이터 노출 등 프라이버시 위협에 직면한다. 최근 문헌에서도 엣지(기기) 단의 보호와 데이터 최소화, 세션 단위 동적 키 관리의 필요성이 강조되고[2], 물리 현상(소자 잡음·양자 사건 등)을 엔트로피 원천으로 활용해 소프트웨어 의사난수에 대한 의존도를 낮출 것을 권고한다. 이러한 점에 기반하여, 이종접합(heterojunction) 포토다이오드의 바이어스 의존 전류 잡음 특성을 이용해 하나의 소자로 진난수생성(TRNG)과 PPG 계측을 동시에 수행하는 보안-동시센싱(secure co-sensing) 아키텍처를 제안한다. 핵심 아이디어는 바이어스를 스윕해 잡음 레벨이 높은 구간을 엔트로피 소스로 삼아 난수 비트를 추출하고, 잡음이 낮은 구간에서는 PPG를 취득하도록 모드 전환하는 것이다. 이종접합 구조는 밴드정렬과 장벽 설계로 암전류(dark current), 1/f 잡음의 크기·주파수 의존성을 공정적으로 조정하기 용이하며, 그 잡음 스펙트럼(PSD)은 바이어스 전압과 전류 레벨에 강하게 의존함이 다양한 포토다이오드/광검출기 계열에서 보고되어 왔다. 위와 같은 점을 고려하여 heterojunction 포토다이오드의 노이즈 특성을 활용하여 인가된 전압구간에 따른 전류-노이즈 레벨을 구분하고 이를 통해 고노이즈 생성구간과 저노이즈 생성구간을 나누어 랜덤비트 생성과 PPG 측정을 동시에 진행할 수 있도록 한다. 소자로부터 랜덤비트를 얻음으로써 프로세서의 부담을 줄이며 동시에 PPG 측정을 수행하여 측정된 신호를 웨어러블 디바이스에서 암호화하여 사용자의 생체정보를 원천적으로 보호할 수 있도록 한다.

2.연구 방법

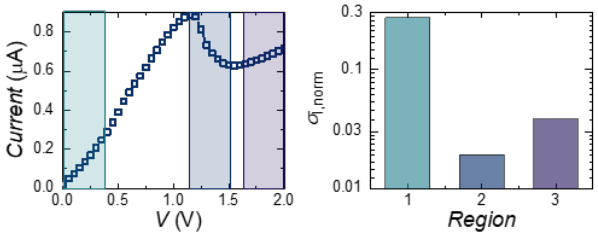


그림 1. 전압에 따른 노이즈 성분

소자의 양단에 가해진 전압에 따라 흐르는 전류에서 발생하는 노이즈의 크기가 달라지는 특성을 이용하기 위해 노이즈를 통해 암호화를 위한 랜덤비트를 추출해내는 전압 구간과 적은 노이즈로 안정적으로 PPG 신호를 추출해내는

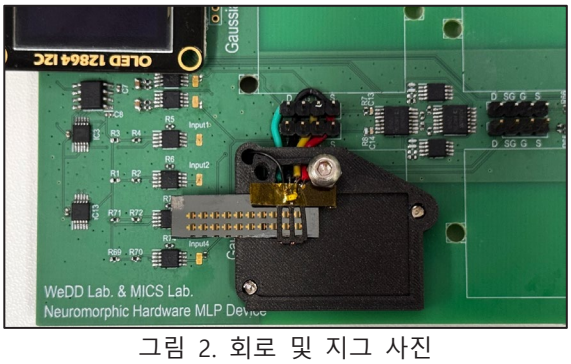


그림 2. 회로 및 지그 사진

전압 구간을 설정하였다. 사용한 photo diode의 전압 구간에 따른 노이즈 성분은 아래 그림 1과 같다. 0.3 V의 전압이 설정된 구간에선 빛이 가해질 때 발생하는 노이즈가 흐르는 전류에 비해 크기 때문에 이를 측정함으로써 암호화를 위한 노이즈 신호를 얻을 수 있으며 1.3 V 구간에서는 노이즈 성분이 적게 나타나므로 안정적으로 PPG 신호를 측정할 수 있으므로 해당 특성을 살려 PPG와 암호화 비트를 한 소자에서 얻을 수 있다. 이를 실제로 구현하기 위해 그림 2와 같이 회로를 구성하고 측정을 수행하였다. 측정을 위한 회로는 각 소자의 전압구간을 만족시키기 위해 아날로그 전압을 공급하기 위한 digital-to-analog converter(DAC)와 전류를 측정하기 위한

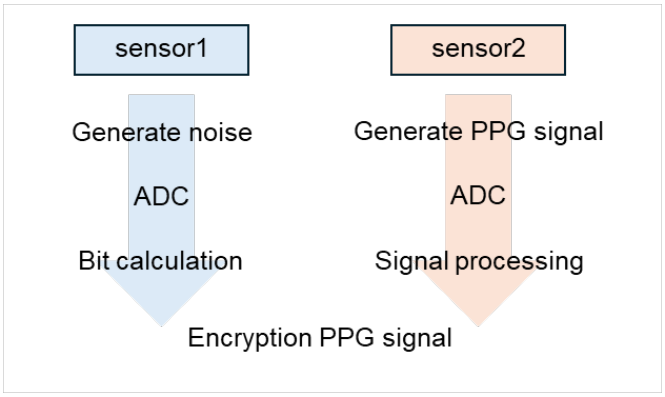


그림 3. 전체적인 flow diagram

transimpedance amlifier(TIA), 통신 및 제어를 위한 32비트 프로세서로 구성되어 있다.

PPG의 측정은 소자와 지그 위 엄지를 접촉하여 이로부터 반사되는 빛을 받아들이도록 하여 측정하였으며 sampling rate는 1 kSPS로 설정되었다. 노이즈로부터 암호화를 위한 비트를 추출하기 위해 측정된 신호를 LPF를 이용하여 평탄화시킨 후 평균값을 임계값으로 설정하였으며 이와 대조하여 비트를 결정하였으며 전체적인 과정을 그림4에 나타내었다.

3. 연구 결과

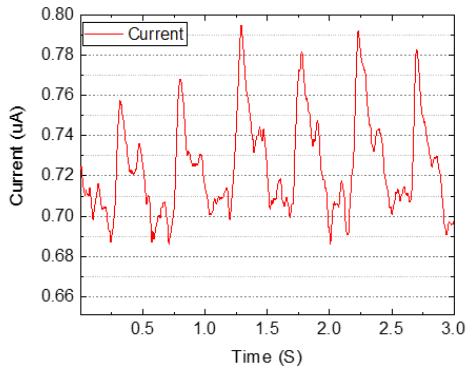


그림 4. 측정된 PPG 신호

해당 소자와 회로를 통해 얻은 PPG 신호와 랜덤 비트를 그림 4, 5에 나타내었다. 랜덤비트의 경우 간단한 NIST 테스트를 통해 랜덤성에 대한 검증을 수행하였으며 그 결과를 그림 5에 나타내었다.

한 종류의 소자에서 다른 전압 구간을 설정하여 PPG 신호와 랜덤비트를 얻음으로써 단순한 생체신호 측정이 아닌 측정-암호화까지 웨어러블 엣지 디바이스에서 수행할 수 있음을 나타낸다.

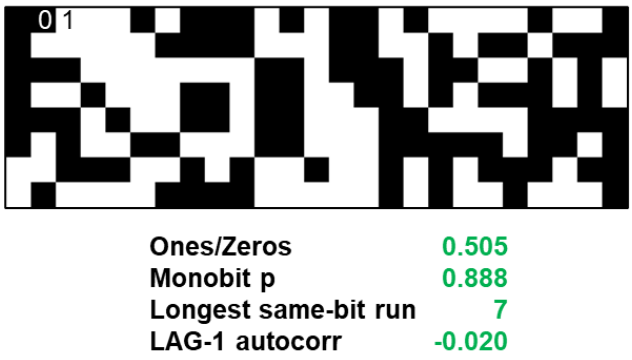


그림 5. 랜덤 비트 및 NIST 테스트 결과

4. Acknowledgements

이 연구는 National Research Foundation of Korea (NRF) 과제와 한국산업기술진흥협회 과제의 지원을 받아 수행하였음. (RS-2025-24683075 and KOITA20250002-89)

5.참고 문헌

[1] T. Adams, S. Wagner, M. Baldinger, I. Zellhuber, M. Weber, D. Nass, R. Surges. “Accurate detection of heart rate using in-ear photoplethysmography in a clinical setting.” *Front Digit Health*, Vol 17, No.4, p909519, 2022

[2] Doherty, C., Baldwin, M., Lambe, R. *et al.* “Privacy in consumer wearable technologies: a living systematic analysis of data policies across leading manufacturers.” *npj Digit. Med.* Vol 8, No.363, 2025

Poster-039

경골 신경 자극을 위한 대역 내 데이터 원격 측정 기능을 갖춘 무선 마이크로컨트롤러 기반 전류 제어 자극기

이준혁[1*], 김동림[2], 김유경[3], 김태우[3], 김태경[3], 손영민[4, 5], 이규성[6], 이병훈[1, 2]

한양대학교 융합전자공학과[1], 한양대학교 인공지능반도체공학과[2], 삼성서울병원 의공학연구센터[3], 삼성서울병원 스마트헬스케어연구소[4], 성균관대학교 의과대학 삼성서울병원 신경과[5], 성균관대학교 의과대학 삼성서울병원 비뇨의학과[6]

*wnsgur2906@hanyang.ac.kr

Abstract

Tibial nerve stimulation (TNS) for overactive bladder (OAB) is gaining attention as an alternative due to its low side effects and long-lasting efficacy. However, non-anesthetic animal studies to explore the mechanism of TNS require ultra-small, low-power wireless stimulators. This study developed a wireless microcontroller-based current-controlled stimulator (MCCS). The MCCS employs dual-band matching to simultaneously and reliably transmit power and data, with the microcontroller directly recovering data without external circuitry.Furthermore, by implementing biphasic current stimulation and charge balancing using the MCU's built-in functions, the number of components can be reduced, achieving miniaturization and low power consumption. This device demonstrates characteristics suitable for precise stimulation control and long-term implantation, and is expected to make a significant contribution to future TNS research.

1. 연구 배경

과민성 방광(OAB)는 요로 감염이나 명확한 병리적 원인 없이 갑작스러운 요의를 특징으로 하는 만성 질환으로, 빈뇨, 야간뇨를 동반하여 환자의 삶의 질을 현저히 저하한다. 현재 사용되는 약물치료는 효과가 제한적이며 구강 건조, 변비 등 부작용을 자주 유발하여 많은 환자에게 적합하지 않다. 이러한 문제를 해결하기 위한 대안으로 신경 조절 치료가 주목받고 있다. 신경 조절 치료의 하나인 천골 신경 자극(SNS)은 효과적인 것으로 입증되었으나, 침습적인 수술이 필요하고 합병증 위험이 있어 모든 환자에게 적용하기 어렵다. 이와 달리, 후경골 신경 자극(TNS)은 비침습적이고 부작용이 적으며, 특히 치료 후에도 지속적인 효과를 나타내는 장점이 있어 유망한 대안으로 제시되고 있다 [1]. 그러나 TNS의 지속적인 억제 효과에 대한 근본적인 메커니즘은 아직 완전히 규명되지 않아 추가적인 연구가 필요하다. 특히, 마취 상태가 아닌 동물 모델을 사용한 장기적인 연구는 매우 중요하지만, 배뇨 반사가 마취에 민감하여 신뢰할 수 있는 데이터를 얻기 어려운 한계가 있다. 따라서 마취되지 않은 소형 동물에게 TNS를 적용하여 그 효과를 정밀하게 연구하기 위해서는 초소형, 저전력, 다기능 무선 신경 자극기가 필수적이다. 기존의 무선 자극기는 크기가 작다면 정밀 제어 기능이 부족하거나, 기능이 많다면 사용되는 부품의 수가 많아져 부피가 커서 소형 동물에 이식하기 어려운 단점들을 가지고 있다.

본 연구는 이러한 기존 연구의 한계를 극복하기 위해, 최소한의 상용 부품과 마이크로컨트롤러 유닛(MCU)의 내장 기능을 활용하여 초소형 다기능 MCU 기반 전류 제어 자극기(MCCS)를 제안한다. 제안된 MCCS는 무선으로 자극 파라미터를 정밀하게 제어할 수 있으며, 소형 동물의 자유로운 움직임을 방해하지 않아 장기간 이식 실험에 적합하다. 또한, MCU 기반의 유연성을 통해 다양한 실험 프로토콜에 맞게 기능을 쉽게 수정할 수 있다. 그림 1에서 볼 수 있듯이, 제안된 무선 MCCS 장치를 사용하여 OAB 모델 유도가 되고 쥐의 방광 활동의 다양한 자극 파라미터에 대한 반응을 확인하고, TNS 자극 후에 지속적인 억제 효과의 지속 시간을 관찰하는 실험에 적합한 이식형 기기로서의 실현 가능성을 입증하였다.

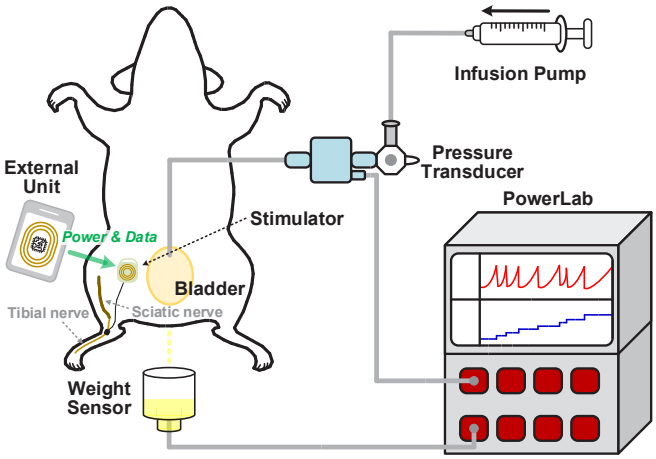


그림 1. 이식형 무선 자극 장치를 이용한 과민성 방광 모델 쥐를 대상으로 한 생체 내 경골 신경 자극 실험

2. 연구 방법

그림 2는 제안하는 MCCS를 활용한 무선 자극 시스템을 보여준다. 이 무선 자극 시스템은 안정적인 전력 전송과 데이터 통신을 위해 주파수 편이 변조(FSK) 방식을 채택하였다. 이 방식은 캐리어 신호의 진폭을 일정하게 유지하여 데이터 통신이 전력 전송 효율에 미치는 영향을 최소화한다. 송신기는 FSK 데이터 변조기를 통해 전력 증폭기의 캐리어 주파수를 데이터 비트에 따라 변조하여 무선으로 데이터를 전송한다.

시스템의 핵심인 유도 결합은 FSK 데이터 전송의 두 가지 주파수에 모두 공진되도록 이중 대역 매칭으로 설계되었다. 단일 대역 매칭의 경우, FSK 변조 시 주파수가 공진점에서 벗어나 전력 전송 효율이 급격히 저하되지만, 이중 대역 매칭은 두 주파수 모두에서 높은 전력 전송 효율을 유지한다. 또한, 이 설계는 주파수 편이폭을 충분히 확보하여 수신기에서 FSK 신호를 안정적으로 복조할 수 있도록 한다 [2]. 이중 대역 코일은 전력과 데이터를 동시에

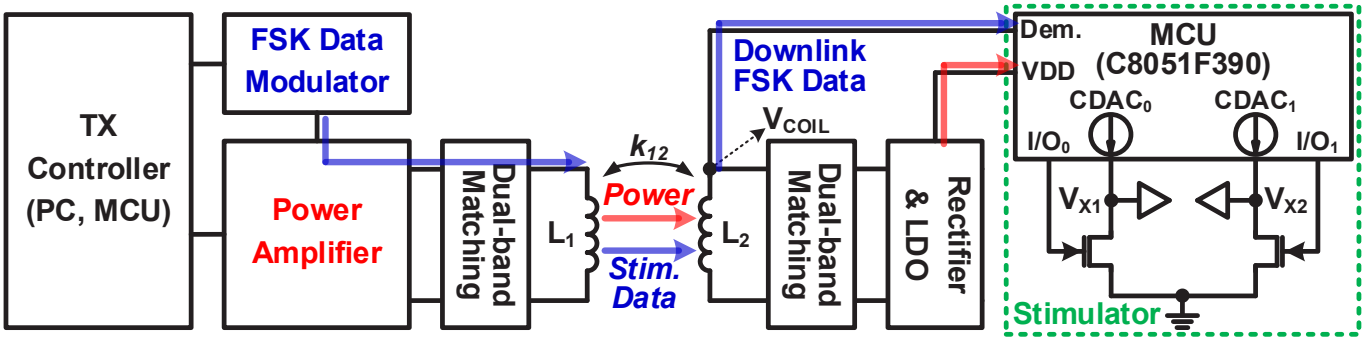


그림 2. 제안된 MCU 기반 전류 제어 자극기의 듀얼 밴드 매칭 코일을 이용한 회로 구현

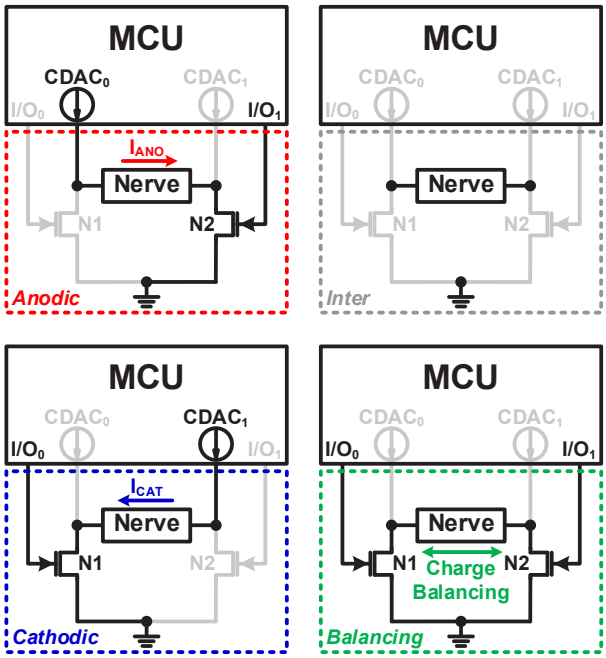


그림 3. 양극, 음극, 중간 단계 및 전하 균형 단계를 포함한 양극성 전류 발생의 순서

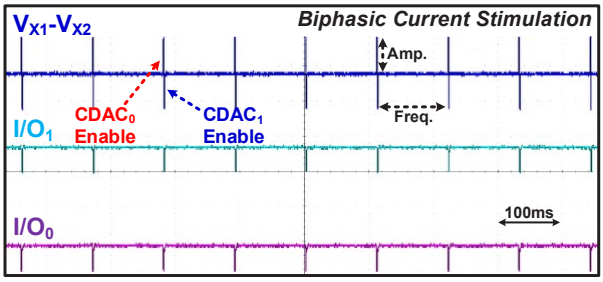


그림 4. 양극성 전류 자극의 측정된 파형

수신하므로, 별도의 RF 안테나 없이도 시스템의 복잡성과 크기를 줄이는 데 기여한다. 수신기는 이중 대역 유도 링크를 통해 전력과 데이터를 동시에 수신하며, 전력 관리 회로(PMU)와 MCU, 그리고 두 개의 외부 스위치로 구성된 자극기로 이루어져 있다. 특히, 제안하는 시스템의 FSK 데이터 복조 방식은 별도의 외부 복조 회로 없이, 수신기 코일 전압(V_{COIL})을 MCU에 직접 입력하여 주파수를 판별하고 FSK 데이터를 복구하는 방식을 사용한다.

본 시스템에 사용된 C8051F390 MCU는 10비트 해상도의 2채널 전류 디지털-아날로그 변환기(CDAC)를 내장하고 있어, 정밀한 전류 제어가 가능하다. 이를 통해 자극기는 MCU에 내장된 CDAC과 두 개의 스위치만으로 양극성(biphasic) 전류 자극을 구현할 수 있다. 기존의 디스크리트 기반 무선 자극기는 정밀한 전류 제어를 위해 다수의 연산 증폭기(op-amp)와 여러 수동 부품을 사용해 크기가 커지는 단점이 있었으나, 제안하는 MCCS는 최소한의 부품만으로도 동일한 기능을 수행하여 디바이스의 소형화에 크게 기여하였다. 그림 3은 제안된 MCCS의 biphasic 자극 동작을 수행하는 순서에 대해서 보여준다. MCCU는 자극 동작을 수행하기 위해서 MCU에 내장된 2개의 전류 CDAC와 2개의 스위치를 활용해 양극과 음극 전류를 순차적으로 인가하는 양상성 전류 자극을 생성하며, 자극 후에는 잔여 전하를 제거하는 전하 균형(charge balancing) 동작을 수행한다.

3. 연구 결과

그림 4는 MCCU를 활용한 biphasic 자극 파형을 보여준다. 먼저 양극 자극을 위해 I/O1 핀과 CDAC0가 활성화되어 전류를 인가한 자극 과정은 다음과 같다. 먼저 양극 자극을 위해 I/O1 핀과 CDAC0가 활성화되어 전류를 인가한다. 설정된 시간이 지난 후에는 모든 핀과 CDAC을 비활성화하여 휴지기를 유지한다. 이후 음극 자극을 위해 I/O0 핀과 CDAC1을 활성화하여 전류를 흘려보낸다. 음극 자극 시간이 끝나면 CDAC1을 비활성화하고, 조직에 남아있는 전하를 제거하기 위해 I/O0 및 I/O1 핀을 동시에 활성화하여 전극 노드를 접지 상태로 만들어 charge balancing을 수행한다. 이러한 제어 방식을 통해 MCCU는 다양한 파라미터의 자극 동작을 수행할 수 있다.

4. Acknowledgements

본 연구는 보건복지부의 재원으로 한국보건산업진흥원의 보건의료기술연구개발사업 지원에 의하여 이루어진 것임 (과제고유번호: HR21C0885)

5. 참고 문헌

[1] E. Park, J.-W. Lee, T. Kim, M. Kang, B. H. Cho, J. Lee, S.-M. Park, and K.-S. Lee, “The long-lasting post-stimulation inhibitory effects of bladder activity induced by posterior tibial nerve stimulation in unanesthetized rats,” *Sci. Rep.*, vol. 10, no. 1, pp. 1–10, Dec. 2020.

[2] H. Jung and B. Lee, “Wireless Power and Bidirectional Data Transfer System for IoT and Mobile Devices,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 69, no. 11, pp. 11832–11836, Nov. 2022.

Poster Presentation
바이오센서&바이오칩

Poster-040

임상 진단을 위한 2D TMDC 기반 JFET-커패시터 플랫폼을 이용한 고감도 알부민 바이오센싱

김경섭[1*], 이영택[1]

인하대학교 전기컴퓨터공학과[1]

High-Sensitivity Albumin Biosensing Using 2D TMDC-Based JFET-Capacitor Platform for Clinical Diagnostics

GyeongSeop Kim[1*], YoungTack Lee[1]

School of Electrical and Computer Engineering, Inha University, Korea

[*]kks0614kr@inha.edu

Abstract

Albumin is a key biomarker for kidney, liver, and cardiovascular diseases, yet conventional detection methods remain time-consuming and equipment-intensive. We propose a biosensing platform based on a junction field-effect transistor (JFET) integrated with a metal–insulator–metal (MIM) capacitor functionalized for albumin detection. Two-dimensional van der Waals materials (MoS_2, WSe_2, graphene, h-BN) were mechanically exfoliated and stacked to form the JFET channel, while Ti/Au electrodes with a CYTOP dielectric provided the capacitor sensing site. Antibody immobilization was achieved through 11-mercaptoundecanoic acid (11-MUA), EDC/NHS activation, and streptavidin–biotin coupling. Albumin binding induced capacitive coupling, effectively modulating the JFET channel and causing a consistent drain current (I_D) decrease across concentrations from 0.1 µg/mL to 10 mg/mL. Real-time monitoring further confirmed quantitative and sensitive detection. This platform enables label-free, reusable, and cost-effective biosensing, offering strong potential for early clinical diagnostics and point-of-care applications.

1. 연구 배경

여러 질환 정보를 제공하는 중요한 임상학적 지표인 체내 알부민의 검출 및 정량은 신장 질환, 간 기능 장애, 심혈관 질환을 포함한 다양한 건강 상태의 조기 진단 및 관리에 매우 중요합니다. 인체 혈액의 핵심 단백질인 알부민은 이러한 질환을 평가하는 데 중요한 바이오마커 역할을 합니다. 그러나 면역 분석법이나 크로마토그래피와 같은 기존의 알부민 검출 방법은 방대한 시료 준비와 정교한 기기 사용이 필요하며, 시간 소모적입니다. 따라서 임상 현장에서 현장 진단을 위해 구현 가능한 고감도, 고속, 신뢰성 있는 감지 기술의 개발이 필요합니다.

본 연구는 2차원 전이 금속 디칼코게나이드(TMDC) 나노소재로 구성된 Junction field effect transistor (JFET) 기반 고정밀 알부민 센서 구현에 중점을 두고 있습니다. TMDC 나노소재는 높은 표면 대 부피 비율, 우수한 전기적 특성, 유연성, 투명성 등 고유한 전기적 특성을 가지고 있어 높은 감도와 선택성을 갖춘 센서 응용 분야에 매우 적합합니다.

제안된 센서는 실리콘 웨이퍼에 증착된 Ti/Au를 커패시터로 사용했으며, 알부민 항체를 적용한 후 알부민 농도가 증가함에 따라 전류 레벨이 감소하는 것을 관찰했습니다. 이 접근법은 커패시터를 간단히 교체하여 새로운 측정을 수행할 수 있게 하며, 다양한 생체 분자 검출에 유연성을 제공합니다. 또한, 이 방법은 높은 재사용성과 센서 제작 비용 절감 등의 장점을 제공합니다. 이러한 발전은 의료 진단 능력을 크게 향상시켜 조기 개입과 환자 예후 개선을 가능하게 할 것으로 기대됩니다.

2.연구 방법

실험에 사용한 소자는 JFET (본체), 커패시터 (sensing site)로 구성되어 있다. JFET은 세척한 유리기판 위에 MoS_2, WSe_2, 그래핀, h-BN과 같은 2D van der Waals (vdW) 소재를 polydimethylsiloxane (PDMS)을 사용하여 기계적으로 박리했습니다. 박리된 플레이크는 광학 현미경을 이용한 건식 전사법을 사용하여 유리 기판에 직접 전사했습니다. 그림 1에서 볼 수 있듯이, 2D 나노플레이크를 순차적으로 적층하여 JFET 구조를 형성한 후, 소스 (S), 드레인 (D), 게이트 전극을 표준 포토리소그래피 및 리프트 오프 공정을 사용하여 패터닝했습니다.

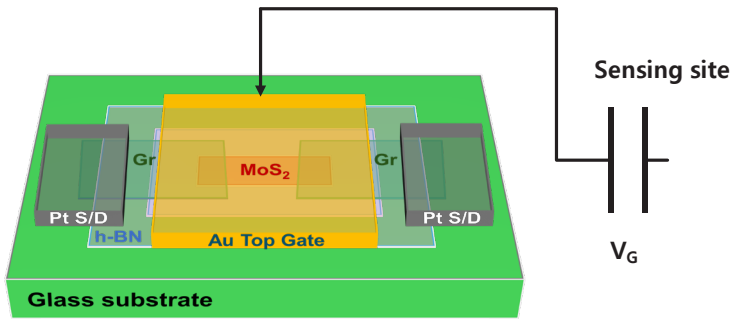


그림 1. 제작한 소자 개략도

커패시터는 하부 전극을 제작하기 위해, 먼저 세척된 유리 기판을 포토리소그래피를 통해 패터닝했습니다. 이어서, 전자빔 증착 시스템을 사용하여 티타늄/금 (Ti/Au, 10/40 nm)을 증착했습니다. 45 mg/ml의 Cyclic Transparent Optical Polymer (CYTOP) 용액을 2단계 공정을 통해 스핀 코팅했습니다. 처음에는 1000 rpm에서 10 초, 그 다음에는 4000 rpm에서 30초 동안 스핀 코팅했습니다. 코팅된 필름을 180 °C의 핫플레이트에서 2분간 열 경화하여 유전체층을 형성했습니다. 마지막으로, 하부 전극과 동일한 방법으로 상부 전극을 제작했습니다.

감지 부위의 커패시터의 항체 기능화는 표면의 Au를 황산과 Phosphate Buffered Saline (PBS)를 사용하여 세척하고, 에탄올에 용해된 11-Mercaptoundecanoic acid (11-MUA)을 실온에서 1시간 동안 반응시켜 표면 기능화를 수행했습니다. 이후, Au 표면을 에탄올로 세척해 잔여 11-MUA분자를 제거했습니다. 다음으로, 시트르산 완충액에 1-Ethyl-3-(3-dimethylaminopropyl) carbodiimide (EDC) N-hydroxysuccinimide (NHS)를 함유한 용액을 실온에서 15분간 적용하여 Au 표면에서 고정화된 11-MUA의 카르복실기를 활성화했습니다. 활성화 용액을 제거한 후, PBS에 Streptavidin (SPV)용액을 첨가하고 30분간 배양하여 NHS로 활성화된 에스테르와 아마이드 결합을 형성했습니다. 그런 다음 표면을 PBS용액으로 세척하고, 바이오틴화된 항체 용액을 SPV로 기능화된 표면에 첨가하고 30분간 배양하여 특이적 결합을 촉진했습니다.

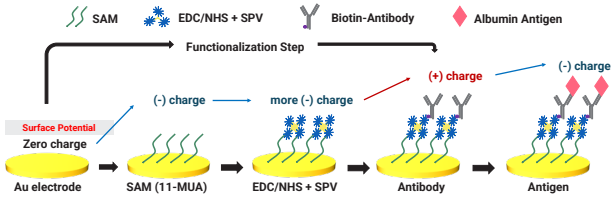


그림 2. 감지 부위의 캐패시터 항체 기능화

3. 연구 결과

JFET-커패시터 시스템을 바탕으로, 간 기능을 나타내는 임상적으로 유의미한 바이오마커인 알부민을 이용하여 바이오센싱 플랫폼의 적용 방법을 연구했습니다. 원격 센싱 부위 커패시터에서 발생하는 생체분자 결합이 용량성 결합 효과를 통해 JFET 전달 특성의 게이트 변조로 변환됩니다. 순차적인 표면 기능화 과정에서 카르복실기(-COOH-) 및 아민기(-NH_2)와 같은 음전하를 띤 말단기가 도입됩니다. 결합된 생체분자의 수가 증가함에 따라, 음의 결합 전하(-Q_{bound})는 연결된 게이트 전극에 상응하는 전위차(-V_{bound})를 발생시켜, Q=CV의 기본 정전용량 관계에 따라 유효 게이트 전하를 감소시킵니다. 여기서, -V_{bound}로 표시되는 유도 전위는 JFET 판독 장치에 대한 추가 게이트 전압으로 간주할 수 있습니다. 이 게이트 바이어스는 MoS_2 활성 채널의 공핍 영역을 증가시켜 그림 3에 나타난 바와 같이 드레인 전류(I_D)를 감소시킵니다.



그림 3. 바이오 물질 유무에 따른 소자 내부의 전하 이동

그림 4는 순차적인 표면 기능화 단계(SAM, EDC/NHS, SPV 및 항체) 후와 1 wt%의 알부민의 정적 검출 동안 측정된 JFET 판독 장치의 전달 특성을 보여줍니다. 이는 우수한 감도와 실시간 검출 능력을 보여줍니다.

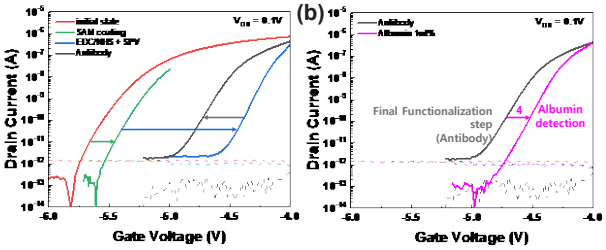


그림 4. 순차적인 표면 기능화 단계에 따른 I-V 특성 평가와

4. Acknowledgements

이 연구는 National Research Foundation of Korea (NRF) 제의 지원을 받아 수행하였음. (RS-2025-16071033)

5.참고 문헌

[1] Z. YS, A.J. S. SR, et al. "Multisensor-integrated organs-on-chips platform for automated and continual in situ monitoring of organoid behaviors." *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2017;114(12)

[2] S.E.Y, H.J.L, M.K, S.I, and Y.T.L. "J-MISFET Hybrid Dual-Gate Switching Devices for Multi-Functional Opto-Electonic Logic Gate Applications." *ACS Nano,* 18,17 (2024)

Poster-041

MnO_2@Au@Ag 나노프레임 기반의 현장형 황화수소 비색 분석법 개발

조상현[1], 손한규[2], 김현중[3], 이기자[1,2,3,*]

경희대학교 일반대학원 정밀의료학과[1], 경희대학교 일반대학원 생체의과학과[2], 경희대학교 의과대학 의공학교실[3]

On-Site Colorimetric Detection of H_2S Using MnO_2@Au@Ag Nanoframes

Sang Hyun Cho[1], Hangyu Son[2], Hyun Jung Kim[3], Gi-Ja Lee[1,2,3,*]

Department of Precision Medicine[1], Department of Medical Engineering[2], Department of Biomedical Engineering[3], College of Medicine, Kyung Hee University, Korea

*gjlee@khu.ac.kr

Abstract

Hydrogen sulfide is a volatile biomarker of fish spoilage and a broader indicator of food-safety risk. Real-time monitoring is essential, yet prevailing assays rely on unstable oxidants (e.g., H_2O_2), costly instrumentation, or laboratory-bound workflows that impede field deployment. Nanozymes-engineered nanomaterials that mimic discrete enzymatic functions-offer high, tunable catalytic activity, operational robustness, and scalable, low-cost synthesis, thereby overcoming key limitations of protein enzymes. Building on these advantages, we report a smartphone-assisted colorimetric assay in which MnO_2@Au@Ag nanoframes function as H_2O_2-independent oxidase mimics, enabling sensitive, selective, and rapid on-site screening of H_2S.

1. 연구 배경

최근 황화수소(H_2S)는 생체 내 신호전달 물질로서 혈관조절, 산화·환원 균형, 신경전달 등 다양한 생리·병리 과정에 관여함이 규명되었다. 비정상적인 H_2S 농도는 당뇨, 알츠하이머병, 파킨슨병, 암 등과 연관성이 보고되었고[1], 구강 환경에서는 혐기성, 단백질분해성 세균의 대사로 과량 생성되어 치주질환의 발병과 진행을 촉진하는 것으로 알려져 있다. 식품 분야에서도 H_2S는 유제품, 와인, 육류의 풍미 형성과 관련되며, 특히 황 함유 아미노산의 미생물 분해 과정에서 생성되므로 어류·육류 부패의 핵심 지표로 활용될 수 있다[2]. 세계보건기구에 의하면, 안전하지 못한 식품은 전 세계적으로 200종 이상의 질환을 유발하는 공중보건 문제이므로, 생물학적이나 식품 시료에서 H_2S를 민감하고 선택적이며 현장에서 신속하게 정량할 수 있는 분석 기술의 개발이 필요하다.

비색(colorimetric) 분석은 쉬운 조작, 휴대성, 빠른 응답, 저비용, 육안 판독 가능성 등의 장점으로 인해 H_2S 검출에 많이 활용되어 왔으나 낮은 감도라는 한계를 가지기 때문에 이를 개선하여 비색 신호를 증폭하기 위한 나노자임(nanozyme)이 도입되었다. 나노자임은 생리적 조건에서 미카엘리스–멘텐(Michaelis–Menten) 동역학을 따르면서 효소 유사 활성을 가지는 나노소재를 말하며, 단백질 효소 대비 높은 안정성, 간편하고 대량화 가능한 합성, 가변적 물성 등의 장점을 가진다[3]. 특히 다공성 중공(hollow) 구조 설계는 기질 접근성과 활성자리 밀도를 높이고, 이종 금속 등 다성분 조성은 촉매 시너지를 부여하여 반응성을 증대시킬 수 있다.

지금까지 금속-유기 골격체(metal organic framework, MOF) 기반 나노자임이나 금, 은 코어/쉘 나노자임 기반의 H_2S 센서가 보고되었다. 그러나 다수의 MOF 기반 시스템은 합성 시간이 길고 조건도 까다로우며, 무엇보다 많은 나노자임 기반 비색 분석이 과산화효소(peroxidase, POD) 유사 활성에 의존하기 때문에 과산화수소(H_2O_2)와 발색기질(TMB 또는 ABTS)의 동시 사용을 요구한다. H_2O_2는 불안정하고 대상 분석물의 변성 및 분해를 유발할 수 있어, 현장형 분석에서 실무적인 제약이 될 수 있다.

망간산화물(MnO_2)은 저비용과 생체적합성을 바탕으로 다양한 촉매 활성을 보이는데, 특히 산화효소(oxidase, OXD) 유사 활성으로 H_2O_2 없이도 기질을 직접 산화할 수 있다. 이는 시약 구성을 단순화하고 안전성을 높이며, 현장 적용성을 향상시킬 수 있다. 하지만 미량 수준의 H_2S 정량을 위해서는 MnO_2의 촉매 효율을 향상시킬 필요가 있다. 이를 위해 중공형 이종금속(예: Au@Ag) 나노프레임(nanoframes, NFs)과 복합화하는 전략이 필요하다. 중공 프레임은 높은 비표면적과 다수의 활성자리를 제공하여 OXD 유사 활성을 증강시킬 수 있다.

따라서 본 연구에서는 중공 Au@Ag NFs 위에 MnO_2를 도입한 MnO_2@Au@Ag 나노자임을 개발하고, H_2O_2가 불필요한 H_2S 비색 검출 플랫폼으로의 적용 가능성을 제시하였다. 합성된 나노자임은 TMB를 산화하는 OXD 유사 활성을 발휘하나, H_2S 존재 시 황화물과의 선택적 상호작용으로 촉매 활성이 억제되어 발색이 농도 의존적으로 감소하였다. 추가로, 헤드스페이스 단일방울 미세추출(headspace single-drop microextraction, HS-SDME)을 통해 시료 전처리를 간소화하고 기체상 H_2S 포집 효율을 높였으며, 스마트폰 기반 영상 분석과 결합하여 장비 비의존적 현장 판독을 가능하게 하였다.

2.연구 방법

중공 구조의 Au@Ag NFs은 삼각형 Ag 나노플레이트(nanoplates, NPls)를 주형으로 갈바닉 치환을 통해 합성하였다. 먼저 Ag NPls 용액(LSPR λ_{max} = 600 nm)에 $HAuCl_4$ 용액을 서서히 점적하여 740 nm로 이동하는 색 변화(남청→연청)를 확인했고, 원심분리 및 세척 후 구연산나트륨 용액에 재분산하여 광학밀도(OD) 1.0으로 맞추었다. 이어 $KMnO_4$(50 mM)를 가하여 25 °C에서 1 h incubation 후 60 °C에서 45 min 추가 반응하여 Au@Ag 표면에 MnO_2를 성장시켜 MnO_2@Au@Ag NFs를 제조하였으며, 세척 후 4 °C에서 보관하였다[그림 1].

형성된 나노자임의 OXD 유사 활성 평가는 pH 4.0의 인산-구연산 완충액에서 TMB(0.3 mM)를 기질로 사용해 2 min 반응 후 650 nm 흡광분석으로 확인하였다. 용존산소의 기여는 질소 퍼지로 제거한 대조군으로 검증했고, 반응 활성이 관여하는 활성산소종(ROS)은 PBQ, IPA, Trp 등의

소거제를 첨가한 라디컬 소거 실험으로 추정하였다.

H_2S 정량은 HS-SDME 기반 비색분석을 수행하였다. 마이크로튜브 뚜껑 안쪽에 MnO_2@Au@Ag 용액(10 μL)을 놓고, 튜브 내 PBS에 용해한 Na_2S로 H_2S를 발생시켜 10 min 동안 기상-고체계 반응을 유도하였다. 이후 TMB 용액을 가해 잔존 활성에 따른 발색을 2 min 후 측정하고, light box에서 촬영한 이미지를 ImageJ로 RGB 분해하여 R채널 변화(ΔR)를 분석에 사용하였다.

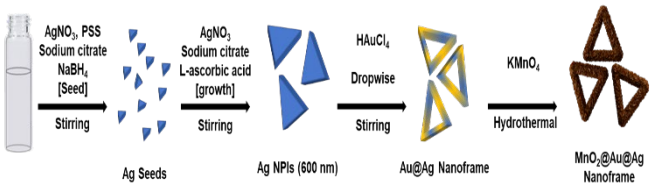


그림 1. MnO_2@Au@Ag 나노프레임 합성과정 개략도.

3. 연구 결과

UV-Vis 분광분석을 통해 구조 변화를 관찰한 결과, 초기 Ag NPls(LSPR λ_{max} = 600 nm)는 $HAuCl_4$가 점진적으로 첨가될수록 스펙트럼이 적색편이(red shift)되어 740 nm까지 이동하고 전체 흡광도는 감소했다(그림 2A & 2B). 낮은 $HAuCl_4$ 농도에서는 Au가 edge/tip의 고에너지 부위에 우선 증착되어 Au@Ag 코어/쉘 NPls가 형성되었고, 추가 Au 공급 시 림 부위 증착과 함께 Ag(111)의 산화적 용출이 가속되어 중앙에 빈 공간이 생기며 중공형 Au@Ag NFs로 전환되었다. 적색편이는 Au 축적과 공극화로 인한 유효 입자 크기 및 종횡비 증가에 기인하는 것으로 생각되며, 흡광도 감소는 합금화 및 Ag 코어의 thinning에 의한 것으로 보인다. 12 μM $HAuCl_4$에서 LSPR λ_{max} 740 nm의 Au@Ag NFs 형성이 완료되었으며 15 μM에서는 추가적인 변화가 없었다.

합성된 Au@Ag NFs을 주형으로, 시트르산 용매 존재하에 $KMnO_4$(최적 ≈ 50 mM)와 60 °C, 45 분 가열로 선택적 MnO_2 코팅을 구현하였고, 이에 따라 740 nm LSPR 피크가 소멸되고 350–380 nm 흡수대가 생성 및 증가하였다[그림 2C & 2D].

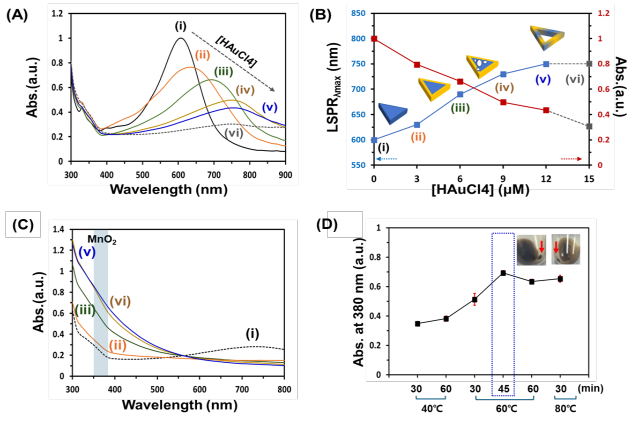


그림 1. (A) $HAuCl_4$ 농도 변화에 따른 Ag NPls 및 생성물의 UV–Vis 스펙트럼과 (B) LSPR 최대파장과 피크 흡광도 변화. (C) $KMnO_4$ 농도별 생성물의 UV-Vis 스펙트럼, (D) 반응온도 및 시간에 따른 380 nm 에서의 흡광도 변화.

MnO_2@Au@Ag 나노자임은 전도성 Au@Ag 프레임과 산소공이 풍부한 비정질 MnO_2 shell의 시너지로 H_2O_2 없이 TMB를 산화(370/650 nm 피크)시키며 Ag NPls, Au@Ag NFs 보다 우수한 활성을 보였다(그림 3A). 미카엘리스–멘텐 동역학(K_m=0.086 mM, V_{max}=62.1×10^{-8} M s^{-1}; HRP 대비 우위)을 따르며, 용존 O_2 제거 시 흡광이 ≈16% 감소하고 라디컬 소거 결과 $\cdot O_2^-$와 $^1O_2$(주요: $\cdot O_2^-$)가 관여함을 통해 용존 O_2를 $\cdot O_2^-$/$^1O_2$로 전환해 TMB를 청색의 산화형으로 만드는 OXD-유사 촉매 메커니즘을 입증하였다.

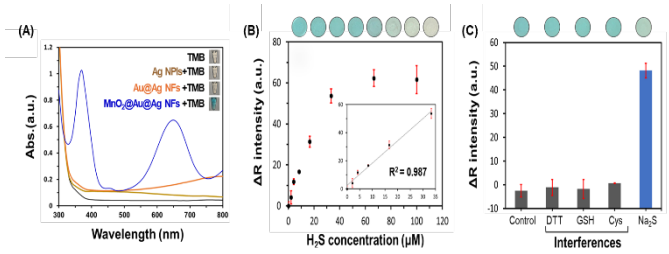


그림 3. (A) MnO_2@Au@Ag NFs의 OXD 유사 활성을 보여주는 UV-Vis 스펙트럼(H_2O_2 없이 TMB 산화), MnO_2@Au@Ag nanozyme 기반 H_2S 비색 분석 어세이의 (B) 검정곡선과 (C) 선택성 결과.

MnO_2@Au@Ag 나노자임 기반 비색 분석은 2.1–33 μM H_2S 농도 범위에서 선형상관(기울기 1.582 ΔR/μM, R^2 = 0.987)을 보이고 LOD가 3.85 μM($3s_{bl}$/S)이며, 1 mM DTT, GSH, L-Cys에 거의 영향받지 않는 높은 선택성, 독립 제조 8회 기준 RSD 3.94%의 재현성, 4 °C 28 일 보관 후 초기의 89.8 ± 3.0%를 유지하는 안정성을 입증했으며, 불안정한 H_2O_2를 쓰지 않는 스마트폰 판독형 OXD 유사 활성을 가지므로 현장 정량 모니터링에 적합하다. 따라서, 본 연구는 (i) H_2O_2가 불필요한 OXD 모사형 MnO_2@Au@Ag NFs의 합리적 설계, (ii) 휘발성 H_2S 농축을 위한 HS-SDME 통합, (iii) 스마트폰 기반 RGB 판독의 휴대형 분석을 결합한 세 가지 차별점을 통해 기존 나노자임 분석과 구분되는 저비용 현장 진단 플랫폼의 가능성을 보여주었다. 향후 다른 부패성 휘발물이나 질병과 연관된 가스신호전달물질 및 환경 독성물질의 다중 검출로 확장되어 식품안전 및 공중보건 모니터링 전반에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

4. Acknowledgements

이 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 과학기술사업화진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2025-02222568).

5.참고 문헌

[1] C. Szabo. “Roles of hydrogen sulfide in the pathogenesis of diabetes mellitus and its complications.” *Antioxidants & Redox Signaling*, Vol 17, No.1, p. 68–80, 2012

[2] V. Varlet, and X. Fernandez. “Review. Sulfur-containing Volatile Compounds in Seafood: Occurrence, Odorant Properties and Mechanisms of Formation.” *Food Science and Technology International,* Vol. 16, No.6, p.463–502, 2010

[3] M. Zandieh, and J. Liu. “Nanozymes: Definition, Activity, and Mechanisms.” *Advanced Materials*, Vol. 36, No.10, p.2211041, 2024

Poster-042

단일 마이크로니들을 활용한 다점 근전도 기반 정밀 모션 인식 인터페이스

황철진[1], 김주현[2], 한서진[1], 김대유[1*]

인하대학교 전기공학과[1] 인하대학교 기계공학과[2]

A single-microneedle interface enabling multi-site electromyography and fine-grained motion recognition

Chuljin Hwang[1], Ju Hyeon Kim[2], Seojin Han[1], and Dae Yu Kim[1*]

[1]Department of Electrical and Computer Engineering, [2]Department of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon 22212, Republic of Korea

dyukim@inha.ac.kr

Abstract

Human–machine interfaces (HMIs) require accurate translation of neuromuscular activity into interpretable control signals for seamless interaction between humans and electronic systems. To address this need, a single microneedle electrode (MNE) is developed as a minimally invasive and high-fidelity electromyography (EMG) interface, capable of penetrating the stratum corneum to establish a low-impedance and mechanically stable skin–electrode junction, enabling artifact-suppressed acquisition of localized muscle potentials. When spatially distributed across the forearm, arrays of single MNE capture distinct activation patterns corresponding to wrist and finger movements with high spatial resolution. The proposed platform establishes a robust foundation for precise, real-time neuromuscular decoding in next-generation wearable HMIs.

1. 연구 배경

인간의 근육 움직임을 정밀하게 감지하고 해석하는 기술은 재활 의공학, 로봇 제어, 증강·가상현실(AR/VR), 스포츠 분석 등 다양한 분야에서 핵심적인 역할을 하고 있다. 특히 손목이나 전완근의 세밀한 움직임은 사용자의 동작 명령을 기계적으로 반영할 수 있는 중요한 생체 정보로, 이러한 움직임을 실시간으로 추적하는 기술은 차세대 인간–기계 인터페이스(Human–Machine Interface, HMI) 개발의 기반이 된다[1]. 기존의 움직임 인식 기술은 주로 3차원 비전 센서, 관성 측정 장치(Inertial Measurement Unit, IMU), 또는 광학 센서를 활용해 신체의 외형적 변화를 분석하는 방식에 기반한다. 그러나 이러한 비접촉식 접근법은 센서의 특성상 외부 조명, 시야각, 기기 캘리브레이션 등 환경 요인에 민감하며, 복잡한 영상 처리와 높은 전력 소모로 인해 소형화와 착용형 시스템으로의 확장이 어렵다. 더 나아가, 이러한 방식은 신체의 외부 움직임만을 감지할 뿐 근육의 실제 생리학적 활성 변화를 반영하지 못하므로, 운동 의도 신호를 추정하거나 세밀한 근육 활성 패턴을 구분하는 데 본질적인 한계를 가진다. 이 문제를 해결하기 위한 방법으로 근전도(Electromyography, EMG) 신호를 이용한 생체신호 기반 움직임 인식이 주목받고 있다[2]. EMG는 근육의 수축·이완 시 발생하는 전기적 활성도를 직접적으로 반영하기 때문에, 외부 환경의 영향을 거의 받지 않으며, 실제 근육 활성 상태를 시공간적으로 측정할 수 있다. 하지만 기존의 젤 전극 기반 EMG 센서는 피부–전극 계면의 높은 임피던스와 움직임에 따른 접촉 불안정성으로 인해, 장시간 측정 시 신호 왜곡과 잡음이 쉽게 발생한다. 또한 전극의 면적이 크고 부착 방식이 제한적이어서, 근육 간의 세밀한 활성 차이를 공간적으로 분리해 측정하기 어렵다.

이러한 한계를 극복하기 위한 대안으로 마이크로니들 전극이 새로운 생체신호 인터페이스 기술로 주목받고 있다. 수백 마이크로미터 길이의 미세 바늘 형태로 설계된 마이크로니들은 피부의 절연성 각질층을 최소침습적으로 관통하여 표면근전위층과 직접 전기적으로 결합함으로써 낮은 접촉 임피던스와 높은 신호 대 잡음비를 구현한다. 또한 통증이나 출혈 없이 안정적이고 재현성 높은 전기적 인터페이스를 형성할 수 있어, 장시간 혹은 반복적인 EMG 측정에서도 신호 왜곡을 효과적으로 억제한다. 본 연구에서 제안하는 단일 마이크로니들 전극은 기존의 다면적 젤 전극과 달리 접촉 면적이 매우 작아, 피부 표면의 특정 근육 위치에 다수의 전극을 정밀하게 배치할 수 있다. 팔목이나 전완근의 주요 굴근 및 신근 부위에 복수의 단일 마이크로니들을 삽입하면, 각 근육군의 국소 EMG 신호를 독립적으로 수집할 수 있으며, 이를 통해 근육 활성의 공간적 분해능(spatial resolution)을 향상시킬 수 있다. 결과적으로, 이러한 다점 측정은 손목 굴곡·신전, 손가락의 개별 움직임, 손가락 간 협응 동작 등과 같은 복합적 운동을 정밀하게 분류할 수 있도록 한다.

본 연구의 목적은 단일 마이크로니들 전극을 이용한 다점 EMG 측정 플랫폼을 구축하여, 미세한 근육 움직임을 고해상도로 분석하고 인식하는 것이다. 제안된 시스템은 (1) 각질층을 투과해 저임피던스 접촉을 형성하는 단일 마이크로니들 전극, (2) 근육 부위별 다점 배열을 통한 공간적 EMG 측정, (3) 획득된 신호를 기반으로 한 모션 해석으로 구성된다. 이 플랫폼은 근육 활성의 시공간적 분포를 실시간으로 디지털화 하여 손목과 손가락의 세밀한 동작을 정확히 구분할 수 있다. 결과적으로, 단일 마이크로니들 전극의 구조적 단순성과 배열 확장성을 동시에 활용함으로써, 고해상도 EMG 기반 모션 디코딩이 가능한 차세대 웨어러블 인터페이스를 제시한다.

2.연구 방법

본 연구의 단일 마이크로니들 전극은 생체적합성 폴리머를 이용해 제작하였으며, 전도성 폴리머 PEDOT:Tos로 코팅하여 안정적인 전위 전달과 낮은 접촉 임피던스를 확보하는 전극 특성을 구현하였다. 전극의 길이는 450 μm, 설계하여 각질층을 최소침습적으로 관통하면서도 통증이나 출혈을 유발하지 않도록 길이를 최적화하였다. 제작된 마이크로니들은 유연한 PET 기판에 결합되어 일체형 구조로 구성되었으며, 손목 및 전완근의 주요 굴근과 신근부위에 다점 배열로 부착하였다. 전극 간 간격은 15 mm로 설정하여 공간적 해상도를 확보하면서 근전도 간섭을

최소화하였다. 부착 시에는 저자극성 의료용 테이프를 사용하여 움직임 중에도 안정적인 전기적 접촉이 유지되도록 하였다. 피험자는 손목 굴곡·신전 및 손가락 개별 움직임을 일정 속도로 수행하였으며, 각 전극에서 수집된 EMG 데이터를 통해 근육 활성의 시간적 변화와 공간적 분포를 분석하였다. 동작별 신호는 진폭 및 시간 영역 특징값을 기반으로 정량화하였으며, 단순 임계값 기반 구간화를 통해 손목과 손가락의 세밀한 움직임을 구분하였다.

3. 연구 결과

본 연구의 마이크로니들 전극은 최소 침습적이면서도 안정적인 피부–전극 인터페이스를 구현하기 위해, 미세구조를 정밀하게 제어할 수 있는 2광자중합 기반 3D 프린팅 공정을 통해 제작하였다(그림 1A). 제작된 마이크로니들 전극은 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 분석하였으며(그림 1B), 평균 높이 약 450 μm, 기저 직경 150 μm의 균일한 원추형 구조와 정교한 표면 미세 형상을 확인하였다. 단일 마이크로니들 전극 구조 특성상 접촉 면적이 제한되어 임피던스가 증가할 수 있으므로, 이를 보완하기 위해 마이크로니들의 축 방향으로 미세 홈(groove)을 도입하였다(그림 1C). 이러한 홈 구조는 PEDOT:Tos 코팅 과정에서 용액의 모세관 침투(capillary infiltration)를 유도하여 코팅 면적과 두께를 증가시키며, 결과적으로 전극–피부 계면의 유효 접촉면적을 확장시켜 접촉 임피던스를 효과적으로 감소시킨다.

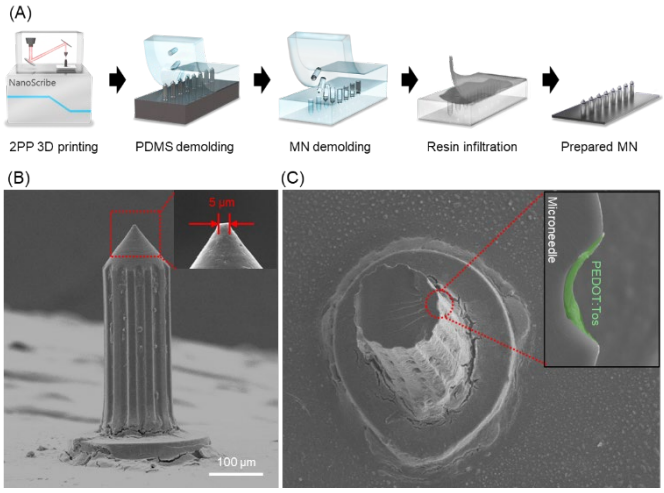


그림 1. (A) 2광자중합 기반 3D 프린팅을 이용한 단일 마이크로니들의 공정 모식도. (B) 제작된 마이크로니들의 SEM 이미지 (C) 단일 전극의 높은 임피던스를 보완하기 위해 축 방향으로 형성된 미세 홈(groove) 구조

마이크로니들 전극 표면에 형성된 홈(groove) 구조가 전기화학적 특성에 미치는 영향을 평가하기 위해 임피던스 스펙트럼(EIS)과 사이클릭 전류–전압(CV) 측정을 수행하였다(그림 2). EIS 결과(그림 2A)에서 groove 구조를 가진 전극은 conical 구조에 비해 전 주파수 영역 전반에서 현저히 낮은 임피던스를 보였다. 이는 홈 구조가 모세관 작용(capillary effect)에 의해 PEDOT:Tos 용액이 홈 내부로 스며들면서 코팅 두께와 도포 균일성이 향상되고, 전극 표면의 유효 전도 경로가 확장되어 전하 전달 저항이 감소한 결과로 해석된다. 또한 CV 측정(그림 2B)에서 groove 전극은 conical 전극 대비 훨씬 큰 전류 응답을 나타내었으며, 이는 전하 저장 용량(charge storage capacity)이 향상되었음을 의미한다. 이러한 결과는 마이크로니들 표면의 미세 홈 구조가 PEDOT:Tos의 전도성 네트워크 형성을 강화하여 전극–피부 계면의 전기화학 반응을 활성화하고, 단일 마이크로니들 전극의 신호 전달

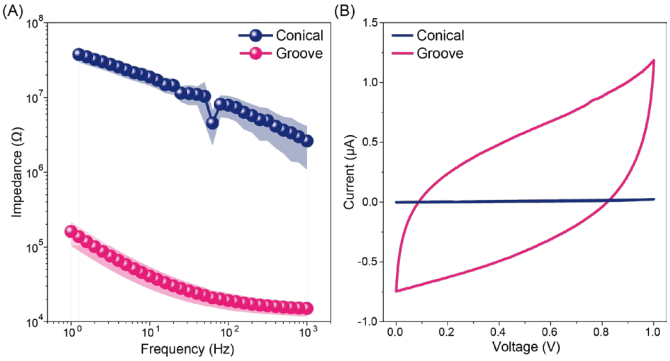


그림 2. Conical 구조와 groove 구조의 마이크로니들 전극 (A) EIS와 (B) CV 측정 결과

효율을 향상시킴을 보여준다. 따라서, 홈 구조를 가진 단일 마이크로니들 전극은 낮은 접촉 임피던스와 높은 전하 전달 성능을 동시에 확보하여, 생체 환경에서의 안정적 근전도(EMG) 측정에 적합한 인터페이스로 작용할 수 있음을 확인하였다.

그림 3. 특정 동작 수행 시, 손목 및 전완의 서로 다른 부위에 삽입된 단일 마이크로니들 전극을 통해 동시에 측정된 다채널 EMG 신호를 보여준다. 각 채널은 근육 부위별 전위를 나타내며, 특정 동작 구간에서 동시적 신호 변화가 관찰되어 근육 간 협응(contraction synergy)과 부위별 활성 패턴의 차이를 반영하고 있다. 이러한 결과는 단일 마이크로니들 전극 배열이 근육의 생리학적 활성 변화를 실시간으로 추적하고, 복합적인 손·손목 움직임을 구분할 수 있는 신뢰성 있는 EMG 인터페이스로 기능함을 보여준다.

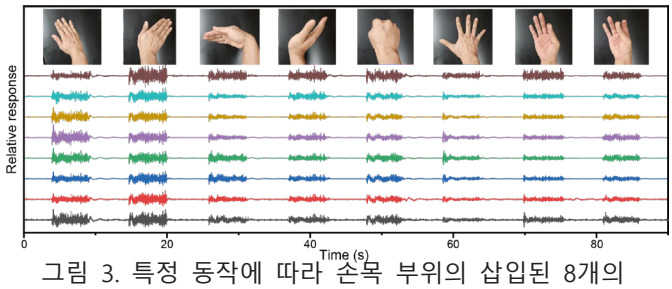


그림 3. 특정 동작에 따라 손목 부위의 삽입된 8개의 마이크로니들 전극에서 동시에 측정된 EMG 신호

4. Acknowledgements

이 연구는 National Research Foundation of Korea (NRF) 과제의 지원을 받아 수행하였음. (RS-2024-00460600 and RS-2025-00559359)

5.참고 문헌

[1] Ferreira, A., Celeste, W.C., Cheein, F.A. *et al.* Human-machine interfaces based on EMG and EEG applied to robotic systems. *J NeuroEngineering Rehabil*

[2] S. Zhang, H. Zhou, R. Tchantchane and G. Alici, "A Wearable Human–Machine-Interface (HMI) System Based on Colocated EMG-pFMG Sensing for Hand Gesture Recognition," in *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 30, no. 1, pp. 369-380, Feb. 2025

Poster-043

인듐 도핑 텔루륨 나노와이어 기반 화학저항식 이산화탄소 감지센서

김현준, 박인혁, 전인호, 황규민, 이원석*
국립한국교통대학교 전기공학과

Indium-doped tellurium nanowire based chemi-resistive CO_2 gas sensor

Hyunjun Kim, Inhyuk Park, Inho Jeon, Gyumin Hwang, Wonseok Lee*
Department of Electrical Engineering, Korea National University of Transportation, South Korea

*Corresponding authors: wslee@ut.ac.kr

Abstract

The growing adoption of electric vehicles poses significant battery fire risks, which can seriously threaten human safety. For this reason, early detection of battery fires is essential to mitigate such risks in modern society. For rapid and early detection of battery ignition, carbon dioxide (CO_2) is a strong candidate, as it is released in large quantities during battery fires. Consequently, rapid and sensitive CO_2 sensing could play a crucial role in preventing battery fire accidents. In this study, we propose a chemi-resistive CO_2 gas sensor based on indium-doped tellurium nanowires. The indium-doped tellurium nanowires-based gas sensor exhibited a clear gas response of 10.2% to 50 ppm CO_2, with stable repeatability attributed to its large surface area and rapid electron transfer properties enabled by high carrier mobility. In addition, the indium-doped tellurium nanowires-based sensor selectively detected CO_2 in the presence of various interfering analytes. We demonstrate a novel strategy for preventing hazardous battery fire accidents through effective CO_2 detection using an indium-doped tellurium nanowires-based chemi-resistive gas sensor.

1. 연구 배경

전기자동차 보급의 가속화와 함께 리튬이온 배터리의 열폭주로 인한 화재 위험이 대두되고 있으며, 열적 스트레스가 누적되는 초기 단계에서 전해액 및 전극 재료의 산화·분해에 의해 이산화탄소를 포함한 다양한 휘발성 가스가 방출된다. 이산화탄소는 밀폐·반밀폐 환경에서 인체 위해를 유발할 수 있을 뿐만 아니라, 배터리 내부에서 진행되는 부반응의 진척도를 반영하는 조기 지표로 기능할 수 있다. 따라서 배터리 팩 또는 모듈 레벨에서 CO_2의 미량 변화를 신속하고 정확하게 추적하는 센서 기술은 전기차 화재의 사전 감지와 사고 억제를 위해 필수적이다. 기존의 열·연기 기반 감지 방식은 배출 가스 형성 이전 단계에서는 민감도가 낮고, 진동과 온도 편차가 큰 차량 환경에서 실시간 적용에 제약이 있다. 이에 따라 민감하고 안정적인 가스 감지 시스템의 필요성이 강조되고 있다. 이를 위한 가스 감지 기술로 초음파식, 비분산 적외선식, 촉매 연소식 센서 등이 제시되어 왔으나, 각 방식은 고비용·고전력 소모, 짧은 수명, 소형화 및 배터리 팩 내부 설치의 어려움과 같은 한계를 지닌다. 이러한 한계를 보완하기 위한 대안으로 화학저항식(chemi-resistive)가스 센서가 주목받고 있다.

화학저항식 가스 센서는 소자 구조가 단순하고 제조가 용이해 저비용·소형화 구현에 유리하며, 저전력 구동과 실시간 연속 모니터링이 가능하다는 점에서 유망한 가스 감지 플랫폼으로 평가된다. 특히 높은 민감도 달성을 위해 소재·구조 설계가 활발히 진행되고 있으며, 가스 분자와의 효율적 상호작용을 확보하기 위해 나노재료의 도입이 보편화되고 있다. 최근에는 나노재료의 구조를 변형하거나 원소를 도핑하여 감지 성능을 극대화하는 접근이 다수 보고되고 있다. 예를 들어, 나노다공성 또는 1차원 와이어 구조로의 변형은 비표면적 증가와 확산 경로 개선을 통해 흡착 사이트를 확대하고 전하 이동을 촉진하여 민감도를 향상시킨다. 또한 원소 도핑은 반송자 농도, 페르미 준위, 계면 장벽, 표면 활성점 분포를 정밀 제어함으로써 선택성, 응답/회복 속도, 검출한계, 장기 안정성의 균형을 개선한다.

본 연구에서는 구조 제어와 도핑을 결합한 원소 도핑 나노와이어를 이용하여 가스센서를 개발하였다. 인듐을 텔루륨 나노와이어에 도핑할 경우, 얕은 도너 준위 도입을 통해 본래 p형 성향이 강한 텔루륨의 페르미 준위를 상향시켜 기본 저항을 센싱에 유리한 영역으로 조정할 수 있다. 이로써 소량의 흡착에도 공간전하층 변조가 증폭되어 상대 저항 변화가 커지고, 전하 이동도 개선과 접촉 저항 저감으로 신호대잡음비가 향상된다. 더불어 표면에서 형성되는 인듐계 활성점은 이산화탄소와 같은 화학적으로 덜 반응적인 분자의 흡착을 보조하여, 직선형·비극성·낮은 전자친화도를 가지는 이산화탄소에 대해서도 유효한 전하 이동을 유도할 수 있음을 시사한다. 이러한 재료·구조적 설계를 바탕으로 인듐 도핑 텔루륨 나노와이어를 화학저항식 가스 센서의 감지 채널로 적용하였으며, 가스 농도 변화에 따른 정량 응답 특성을 최적화하였다.

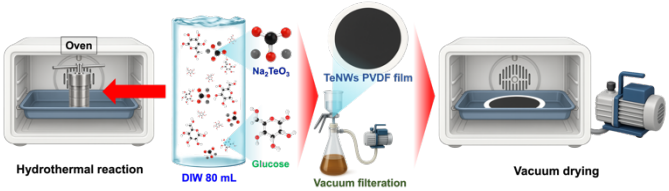


그림 1. TeNWs 제작 과정 모식도

2.연구 방법

인듐 도핑 텔루륨 나노와이어(In@Te) 제작을 위해 우선 텔루륨 나노와이어(TeNWs)를 합성하였다. 텔루륨 전구체로 sodium tellurite(Na_2TeO_3) 140 mg을 초순수 80 mL에 용해·교반하였고, 독성 환원제인 hydrazine monohydrate 대신 D-(+)-glucose 4 g을 첨가하여 용액이 완전히 투명해질 때까지 교반하였다. 이후 용액을 PTFE 라이너가 장착된 스테인리스 오토클레이브에 주입·밀봉한 뒤 100 ℃ 오븐에서 12 시간 반응시켰다. 반응 종료 후 오토클레이브를 서서히 실온까지 냉각하고, 생성물을 PVDF 필터(0.2 μm pore size)로 진공 여과하였다. 여과막을 초순수와 에탄올로 투명 여액이 얻어질 때까지 세척한 뒤 60 ℃ 진공 오븐에서 건조하여 TeNWs 필름을 얻었다. (그림 1)

TeNWs에 인듐을 도핑하기 위해 indium(III) chloride($InCl_3$) 39.8 mg을 ethylene glycol 5 mL에 분산하여 0.0036 M $InCl_3$ 용액을 제조하였다. 건조된 TeNWs 필름에 $InCl_3$ 용액 1 mL를 적하하여 전체를 충분히 적신 상태로 상온에서 1 시간 반응시킨 뒤, 잔여 용액을 에탄올로 세척하고 60 ℃ 진동 오븐에서 12 시간 건조하여 In@Te를 제조하였다. 제조된 In@Te 분말은 초순수 20 mL에 분산하여 약 1 시간 초음파 처리로 균일 현탁액을 얻었다.

센서 제작을 위해 실리콘 웨이퍼 기반의 interdigitated electrode(IDE) 표면에 In@Te 현탁액 약 8 μL를 drop-casting하고 120 ℃ 핫플레이트에서 건조하였다. 완성된 센서는 가스 센서 측정용 챔버에 장착하였다. 이후 가스 실린더와 연결된 mass flow controller(MFC)로 유량을 제어하여 챔버 내 가스 농도와 상대습도를 조절하면서, 소스미터(Keithley 2450)를 사용해 센서의 저항 변화를 측정하였다. (그림 2) 또한, 가스 노출에 의한 저항 변화는 식 (1)을 통해 응답률 (response) 로 계산되었다.

$$Response\ (\%) = \frac{|R_{air} - R_{gas}|}{R_{air}} \times 100 \qquad (1)$$

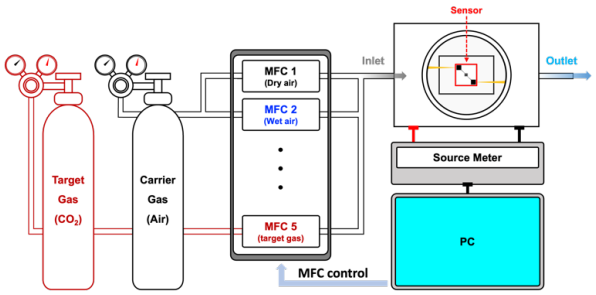


그림 2. 가스 센서 측정 시스템 모식도

3. 연구 결과

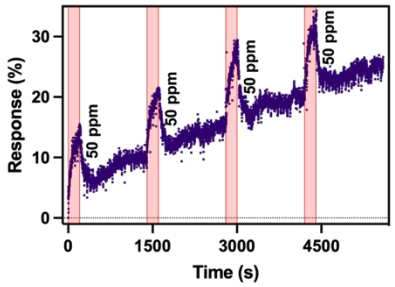


그림3. In@Te 가스센서의 CO_2 반복 노출에 대한 저항 변화

그림 3은 상온(27℃) 및 50% 상대습도 조건하에서의 In@Te 가스 센서의 CO_2 반복 노출에 대한 실시간 (real-time) 응답률을 나타낸 그래프이다. CO_2 가스 노출 전, 반응률 비교를 위하여, 공기 (O_2 21%, N_2 balanced)만을 센서에 노출하였다. 이후, CO_2 가스 노출 200초, 공기 노출 1200초의 간격으로 총 4번의 반복 사이클을 적용하여 CO_2 가스 노출에 따른 실시간 응답률을 조사하였다. 센서는 CO_2와의 상호작용으로 뚜렷한 저항 변화를 보였으며, 200초간의 노출동안 평균 10.2%의 높은 응답률을 나타냈다. CO_2 가스 노출에 따른 In@Te의 저항 변화의 원리는 N-type 반도체물질인 인듐과 P-type 반도체물질인 텔루륨의 결합으로 설명이 가능하다. 정공 지배적인 특성을 띄는 텔루륨에 인듐을 도핑함으로서 N-P 접합이 형성되었고, 이는 전자-정공쌍을 생성함과 동시에 In@Te이 전자 지배적인 물질이 되도록 유도한다. 따라서, In@Te의 주요 전하캐리어는 전자이며 전자수용체인 CO_2에 노출되었을 경우, 전자를 뺏기며 전기적 저항이 감소하게된다. 또한, 인듐 도핑을 통해 전하 이동도가 빨라지며, 가스 분자와의 상호작용에 대한 전기적 신호를 더욱 빠르고 민감하게 나타낼 수 있게 된다. 이러한 특성은 가스센서로서 탐지 성능을 향상시키며, 높은 신호 대 잡음비 (SNR) 를 나타낸다. 이는 반복되는 4번의 사이클동안 나타나는 뚜렷한 반응-회복 특성을 통해서도 확인 가능하며, 모든 사이클에 대한 낮은 표준편차 (0.2%) 로도 입증 가능하다. 이러한 결과는 In@Te 센서의 높은 안정성과 민감도를 시사하며, 효과적인 CO_2 검출이 가능함을 나타낸다.

추가적으로, 다양한 종류의 가스 노출에 대해 CO_2 만을 선택적으로 구별 가능한지 확인하기 위하여 서로 다른 종류의 간섭가스들 (NH_3, O_2, 및 Acetone) 노출에 따른 In@Te의 응답률을 조사하였고, 이를 CO_2 가스에 대한 응답률과 비교 분석하였다 (그림 4). 간섭가스들에 대한 노출 시간 및 농도는 CO_2 와 동일하게 각각 200초, 50 ppm으로 설정되었으며, 측정 조건 또한 상온(27℃) 및 50% 상대습도로 동일하게 설정되었다. 가스 응답률은 NH_3, O_2, Acetone 가스에 대하여 각각 3.16 ± 0.89%, 0.22 ± 0.08%, 및 2.39 ± 0.4% 로 측정되었으며, 이는 CO_2 노출에 대한 응답률 (10.2 ± 0.1%)에 비해 현저히 낮은 수치이다. 이러한 결과는 In@Te이 다양한 종류의 간섭 가스들에 대해서도 CO_2 를 선택적으로 구별 가능하다는 점을 시사하며, In@Te이 CO_2 센서로서 적합하다는 결과를 보여준다.

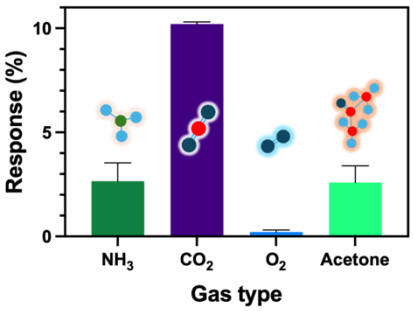


그림4. CO_2 가스와 간섭가스들 (NH_3, O_2, 및 Acetone) 간의 응답률 비교

4. Acknowledgements

본 연구성과는 2025년 국립한국교통대학교 지원을 받아 수행하였음. (This was supported by Korea National University of Transportation in 2025.)

5.참고 문헌

[1] Z. D. Yu, and G. Seelig. "Dynamic DNA nanotechnology using strand-displacement reactions." *Nature chemistry*,Vol 3, No.2, p.103-113, 2011

[2] Q. Lulu, and E. Winfree. "Scaling up digital circuit computation with DNA strand displacement cascades." *Science,* Vol 332. No. 6034, p.1196-1201, 2011

[3] J. Cheulhee, and A. D. Ellington. "Diagnostic applications of nucleic acid circuits." *Accounts of chemical research,* Vol 47, No.6, p1825-183, 2014

Ultrathin Gold-Doped Silicon Nanomembrane Sensor for Real-Time Brain Surface Temperature Mapping Using Electrical Impedance Tomography

Doohyun J. Lee[1)], Kyubeen Kim[2)], Ju Young Lee[1)], Mingyu Sang[3),†], and Ki Jun Yu[1),†]

[1)] *School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University*

[2)] *Department of Mechanical Engineering and Materials Science, McKelvey School of Engineering, Washington University in St. Louis*

[3)] *Department of Electronic Engineering, Gachon University*

Prof. Mingyu Sang[†]: sangmg315@gachon.ac.kr

Prof. Ki Jun Yu[†]: kijunyu@yonsei.ac.kr

Abstract

With the growing interest in brain research, the development of implantable devices for brain temperature monitoring has become increasingly important, complementing existing methods for tracking electrophysiological signals, intracranial pressure, and cerebral blood flow.[1-3] Despite this demand, current implantable temperature mapping devices face several challenges. First, material limitations due to the restricted choice of biocompatible materials impose constraints on device performance, thereby limiting sensitivity against subtle temperature changes. Second, form factor limitations, particularly the absence of an ultrathin geometry, impede conformal adherence between the brain-device interface, thus reducing the measurement accuracy. Third, structural constraints associated with array-based designs for signal acquisition and transmission, increase interconnect complexity and device thickness, making precise temperature monitoring more difficult.

Here, we present an ultrathin brain temperature mapping sensor based on a gold-doped crystalline silicon nanomembrane. We address the material limitations by optimizing the gold doping process, which yields a record-high temperature coefficient of resistance.[4] By employing silicon in an ultra-thin nanomembrane form, we effectively overcome the form factor constraints that hinder conformal contact in conventional devices. Moreover, the inherent reliability of crystalline silicon minimizes signal distortion and ensures uniform sensitivity across the sensing area.[5] The unique structure of the sensor is defined by metal electrodes arranged along the perimeter, surrounding a 5 mm x 5 mm homogeneous crystalline silicon sensing area in the center. This configuration allows for precise, high-spatial resolution temperature mapping across the brain surface using electrical impedance tomography (EIT), which captures temperature-induced changes in conductivity and reconstructs the temperature distribution across the entire sensing area, as shown in **Fig. 1**. By adopting EIT as the measurement approach, our sensor effectively avoids the structural limitations encountered in conventional crossbar array–based designs.[6] Together, we present a sensor characterized by its biocompatibility and high sensitivity, offering strong potential for real-time brain surface temperature mapping.

Keywords: Silicon Nanomembrane, Gold-doped Silicon, Electrical Impedance Tomography, Brain Temperature Mapping

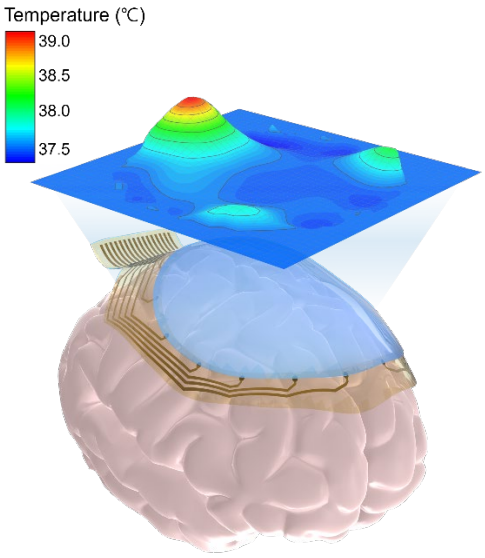


Fig. 1. Schematic of brain temperature mapping with EIT-based Au-SiNM Sensor

Acknowledgement

This research was supported by Korea Institute for Advancement of Technology(KIAT) grant funded by the Korea Government (Ministry of Education) (P0028100, Semiconductor Specialized University)

References

[1] Kang, S.-K. *et al.* Bioresorbable silicon electronic sensors for the brain. *Nature* **530**, 71-76 (2016).
[2] Shin, J. *et al.* Bioresorbable optical sensor systems for monitoring of intracranial pressure and temperature. *Science advances* **5**, eaaw1899 (2019).
[3] Shin, J. *et al.* Bioresorbable pressure sensors protected with thermally grown silicon dioxide for the monitoring of chronic diseases and healing processes. *Nature biomedical engineering* **3**, 37-46 (2019).
[4] Sang, M. *et al.* Ultrahigh sensitive Au-doped silicon nanomembrane based wearable sensor arrays for continuous skin temperature monitoring with high precision. *Advanced Materials* **34**, 2105865 (2022).
[5] Zhang, Z. *et al.* Recent Progress on Flexible Silicon Nanomembranes for Advanced Electronics and Optoelectronics. *Advanced Functional Materials*, 2502191 (2025).
[6] Kim, K. *et al.* Extremely durable electrical impedance tomography–based soft and ultrathin wearable e-skin for three-dimensional tactile interfaces. *Science Advances* **10**, eadr1099 (2024).

Poster-045

상용 PPG와 전도성 고분자 온도센서 기반 저비용 휴대용 생체신호 모니터링 시스템

민병언[1], 박성혁[1], 서민호[1*]

부산대학교 의생명융합공학과[1]

A Portable Low-Cost Biosignal Monitoring System Using PPG and PDMS-Based Temperature Sensor

ByeongEon Min[1], SeongHyeok Park[1], Min-Ho Seo[1*]

School of Biomedical Convergence Engineering, Pusan National University, Korea

*mhseo@pusan.ac.kr

Abstract

This study presents a low-cost, low-power portable biosignal monitoring system that combines a PPG-based optical sensor and a Carbon Black–PDMS temperature sensor. The proposed system simultaneously measures heart rate, oxygen saturation, and body temperature, transmitting the data in real time via BLE communication. Experimental results under resting and post-exercise conditions confirmed that all signals were stably detected within normal physiological ranges. The total prototype cost was approximately 27,880 KRW, demonstrating high cost efficiency and strong potential for practical healthcare applications compared to commercial devices.

1. 연구 배경

코로나19 팬데믹은 개인 건강 관리의 중요성을 부각시키며, 일상적인 생체 신호 모니터링에 대한 수요를 급격히 증가시켰다. 그중 체온, 맥박, 산소포화도는 인체의 생리적 상태를 종합적으로 반영하는 핵심 지표로, 세 변수를 동시에 측정하면 감염이나 순환계 이상을 조기에 감지할 수 있다[1]. 이에 따라 이러한 복합 생체신호를 간편하게 측정할 수 있는 휴대형 모니터링 기술의 필요성이 꾸준히 확대되고 있다.

현재 스마트워치나 피트니스 밴드같은 상용 웨어러블 기기가 있지만, 높은 가격, 짧은 배터리 수명, 운영체제 의존성 등으로 접근성과 지속적인 사용성에 한계가 있다[2]. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 체온, 맥박, 산소포화도를 동시에 측정할 수 있는 저비용·저전력 휴대형 생체신호 측정 시스템을 제안하였다. 제안된 시스템은 간단한 센싱 구조와 블루투스 기반 통신 방식을 통해 주요 생체지표를 실시간 전송하며, 유지관리 부담이 적어 누구나 손쉽게 건강 상태를 모니터링할 수 있는 실용적 대안을 제공한다.

2.연구 방법

2.1. 시스템 구성

본 연구에서 제안한 시스템은 맥박, 산소포화도, 체온을 동시에

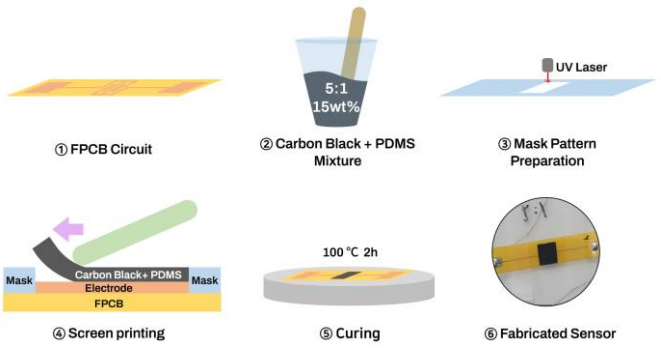


그림 2. 온도센서 제작과정

측정하는 저비용·저전력 일체형 장치로, 적색광과 적외선을 이용하는 PPG 센서(MAX30102), 저항형 온도센서, BLE 기능이 내장된 MCU(XIAO nRF52840)로 구성된다. 온도센서는 Carbon Black–PDMS 기반 소자로 휘스톤 브리지 회로를 통해 저항 변화를 전압 신호로 변환하였으며, I²C 통신선(SCL, SDA)에는 4.7 kΩ 풀업 저항을 삽입하여 데이터 신호의 안정성을 확보하였다. 수집된 신호는 ADC 변환 후 BLE를 통해 스마트폰으로 실시간 전송되며, 전원은 3 V 리튬 코인셀(CR2032)을 사용한다. 전체 시스템의 구성은 그림 1에 나타내었다.

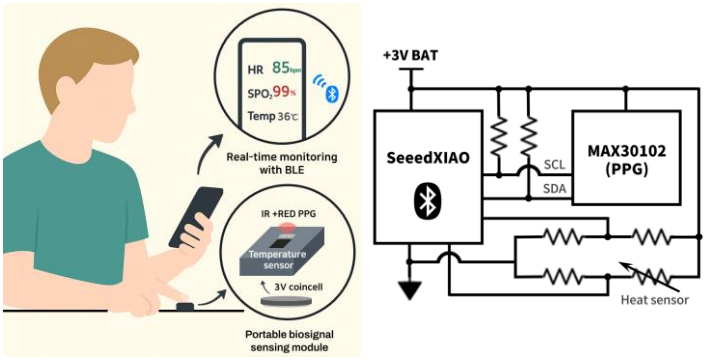


그림 1. 시스템 구성(좌), 회로 구조(우)

2.2. 온도센서 제작

저항형 온도센서는 FPCB 기판에 금속 전극 패턴을 형성한 후, 해당 영역 위에 마스크를 덮고 PDMS base와 curing agent를 5:1 비율로 혼합한 매트릭스에 Carbon Black 15 wt%를 첨가한 복합 혼합물을 스크린 프린팅 방식으로 도포하여 제작하였다(그림 2). 스크린프린팅을 위한 Mask는 UV레이저로 제작되었으며 두께는 약 100 μm로 제어하였다. 스크린프린팅 이후 100°C에서 2시간 동안 1차 경화(primary curing) 를 수행하며 고분자 매트릭스를 형성함. 센서의 성능은 4개의 샘플을 대상으로 핫플레이트로 온도를 변화시키며 저항값 변화를 측정하여 평가하였고, 이를 바탕으로 각 시료의 평균 저항변화율을 보정하여 온도–저항변화율 특성커브를 도출하였다(그림 3).

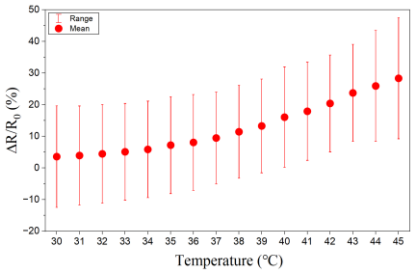


그림 3. 온도-저항변화율 특성커브

2.3. 데이터 취득 및 처리

MAX30102에서 측정한 PPG 신호를 100 Hz로 수집하여 1초 구간의 100샘플 슬라이딩 윈도우에 저장하고, 25샘플씩 갱신하며 실시간 처리를 수행하였다. 적색광과 적외선 신호의 DC 성분을 제거한 후 피크 검출을 통해 심박수를 계산하고, MAXIM 알고리즘을 이용해 두 파장의 AC/DC 비율로부터 SpO_2를 산출하였다. 계산된 신호는 4포인트 이동평균으로 평활화하여 노이즈를 최소화하였다. 온도는 차동 ADC로 측정된 전압차를 기반으로 보정식을 적용해 온도로 변환하였으며, HR, SpO_2, 온도 데이터를 4바이트 패킷으로 묶어 BLE를 통해 전송하였다(그림 4).

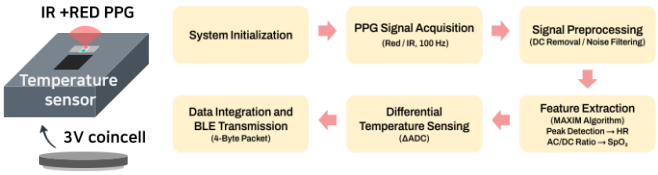


그림 4. 데이터 프로세싱 과정 모식도

3. 연구 결과

3.1. 일반 상태에서의 생체신호 측정

제작된 프로토타입을 통해 일상 안정 상태에서 생체신호를 약 120초간 측정한 결과, 제안된 시스템은 심박수, 산소포화도, 체온 신호를 안정적으로 검출하였다(그림 5). 심박수는 70–105 bpm 범위, 산소포화도는 평균 97–100%, 체온은 약 35 °C 수준으로 유지되어 세 지표 모두 정상 범위 내에서 안정적으로 측정됨을 확인하였다.

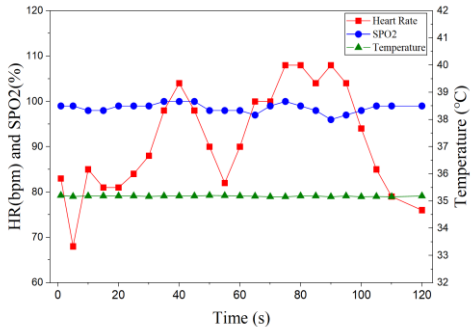


그림 5. 안정상태 생체신호 측정 결과

3.2. 활동 후 생체신호 변화

피험자가 가벼운 운동(푸쉬업 10회) 후 생체신호 변화를 측정한 결과, 심박수는 운동 직후 뚜렷하게 상승하였으며 회복 2분 후 다시 안정 상태로 감소하였다(그림 6). 산소포화도는 운동 전 약 97.5%에서 운동 직후 99%까지 증가하였다가, 회복 단계에서 다시 정상 수준으로 감소하였다. 체온은 전 구간에서 큰 변화 없이 약 36 °C 수준을 유지하였다. 이러한 결과는 제안된 시스템이 운동에 따른 생리적 반응과 회복 과정을 안정적으로 반영함을 보여준다.

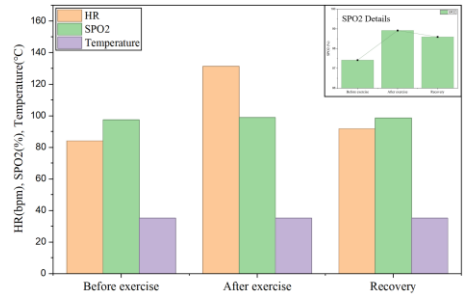


그림 6. 운동전후 생체신호 변화

3.3. 비용 및 효율 비교

본 연구에서 제작한 프로토타입은 약 27,880 KRW로, 상용 제품 대비 매우 낮은 수준이다(표 1). 이는 스마트워치나 피트니스 밴드에 비해 약 1/3 ~ 1/20 수준이며, 단일 기능을 수행하는 의료용 산소포화도 센서보다도 저렴하다. 그럼에도 불구하고 본 시스템은 심박수, 산소포화도, 체온을 동시에 측정하고 BLE 통신을 통해 실시간 데이터를 전송할 수 있어, 가격 대비 기능 효율성이 높다.

표 1. 여러 제품 타입의 비용 및 기능 비교

구분	본 연구	스마트워치	피트니스 밴드	의료용 센서	산업용 생체센서
예시	-	Apple Watch 9 / Galaxy Watch 6	Xiaomi Smart Band 8 / Fitbit Inspire 3	Nonin Pulse Oximeter / Yuwell YX302	Maxim MAXREFDES117 / SparkFun Qwiic PPG
기능	HR, SPO2, 체온	HR, SpO_2, 체온, ECG, GPS등	HR, SpO_2, 수면 트래킹 등	HR, SpO_2	HR, SpO_2
가격 KRW	약 28,000	약 500,000 ~ 600,000	약 70,000 ~130,000	약 100,000 ~ 200,000	약 40,000 ~ 60,000
비고	저비용, 저전력	고가, 멀티센서, 짧은 배터리	중간 가격, 제한된 정확도	단일 기능 정확도 높음	연구·개발용 모듈, 통합도 낮음

4. Acknowledgements

본 과제는 2025년도 교육부 및 부산광역시의 재원으로 부산라이즈혁신원의 지원을 받아 수행된 글로컬대학30 프로젝트의 결과입니다(2025-glocal-02-004-511-001).

본 연구는 보건복지부의 재원으로 한국보건산업진흥원의 보건의료기술연구개발사업 지원에 의하여 이루어진 것임 (과제고유번호: HR20C0026).

5.참고 문헌

[1] M. O. O'Keeffe, J. M. MacKinnon, A. W. Taylor, and M. C. O'Sullivan, "Monitoring symptoms of infectious diseases through continuous vital sign measurement," Frontiers in Digital Health, vol. 3, no. 695745, pp. 1–12, 2021.

[2] A. El Noshokaty, "Drivers and Challenges of Wearable Devices Use," Texas A&M University–San Antonio Faculty Publications, vol. 1, no. 9, pp. 1–15, 2022.

Poster-046

정확한 심폐소생술 수행을 위한 표피 근전도 기반 팔 자세 모니터링 기기 개발

김덕용[1], 김은미[2], 서민호[1*]

[1]부산대학교 의생명융합공학부, [2]부산대학교 간호대학

Development of an EMG-based Arm Posture Monitoring Device for Accurate CPR Performance

Deok Yong Kim[1], Eunmi Kim[2], Min-Ho Seo[1*]

[1]School of Biomedical Convergence Engineering, [2]College of Nursing, Pusan National University, Korea

[*]mhseo@pusan.ac.kr

Abstract

Cardiopulmonary resuscitation (CPR) plays a crucial role in improving survival outcomes after cardiac arrest, making accurate and consistent chest compressions essential. Various feedback devices have been developed to assist CPR training by providing quantitative indicators such as compression depth and rate. However, these devices primarily focus on numerical performance metrics and lack the ability to monitor the rescuer's posture, which is critical for maintaining compression quality and preventing fatigue. To address this limitation, this study introduces an EMG-based arm posture monitoring device designed to classify extension and flexion postures. The proposed device enables continuous assessment of the rescuer's arm posture, providing a foundation for improving CPR accuracy and training effectiveness.

1. 연구 배경

심정지 (Sudden Cardiac Arrest)는 심장이 갑작스럽게 멈춰 전신에 혈액 공급이 중단되는 치명적 응급상태로, 병원 밖 발생 시 생존율은 약 9%에 불과하다. 신속하고 정확한 심폐소생술 (CPR)은 생존율을 2~3배 향상시키는 핵심 요인이며, 특히 팔을 완전히 편 상태에서 어깨, 손이 흉부 위에 수직이 되도록 유지하는 자세가 고품질 압박에 필수적이다[1]. 그러나 실제 교육에서는 압박 깊이·속도 등 정량적 지표에 대한 피드백은 가능하나, 시술자의 신체 자세, 특히 팔 펴짐에 대한 정량적 평가와 교정은 어렵다. 이에 본 연구에서는 표피 근전도 (EMG)를 활용하여 팔의 신전과 굴곡 상태를 실시간으로 구분하는 팔 자세 모니터링 기기를 개발하였다. 단일 채널 EMG 신호를 이용해 반복 측정에서도 일관된 패턴을 확인하였으며, 이를 통해 시술자의 자세 인식 및 자가 교정이 가능한 경량형 CPR 훈련 보조기술의 가능성을 제시한다.

2.연구 방법

(1) 시스템 개요

제안된 시스템은 근전도 센서, 신호처리 하드웨어, 알고리즘 모듈로 구성된다 (그림 1a).

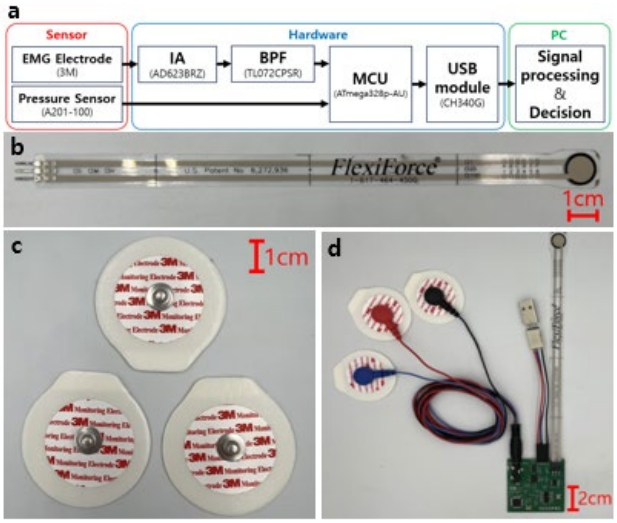


그림 1. 시스템 블록 다이어그램, 하드웨어, 소자

근전도 센서로부터 수집된 신호는 아날로그 증폭 및 필터링 단계를 거쳐 마이크로컨트롤러 (ATmega328P-AU)로 입력되며, 이후 디지털화되어 PC로 전송된다. PC에서는 실시간 전처리 및 팔 자세 판별 알고리즘이 적용된다.

(2) 하드웨어

압력 신호는 TEKSCAN A201-100 센서를 이용하여 가슴압박 강도를 측정하도록 구성하였다 (그림1b). EMG 측정용 전극은 1회용 상용제품 (3M 2223H)을 사용하였다 (그림1c). 측정회로는 차동증폭기 (AD623BRZ) 기반 회로로 구현하였으며, 5–480 Hz 대역통과필터 (TL072CPSR)를 적용하여 유효 주파수 성분만을 추출하였다. 전체 이득은 약 180배로 설정하였다[2] 측정된 신호는 MCU에서 1 kHz로 샘플링되어 CH340G USB-Serial 모듈을 통해 PC로 전송된다 (그림1d).

(3) 착용 및 데이터 측정

제작된 하드웨어는 팔의 삼두근 (triceps) 부위에 부착하여, 팔의 굽힘 (flexion) 및 폄 (extension) 동작 시 근전도 신호를 측정하였다. 피험자는 두 자세를 교대로 수행하였으며, 각 동작 구간에서의 원시 EMG 신호를

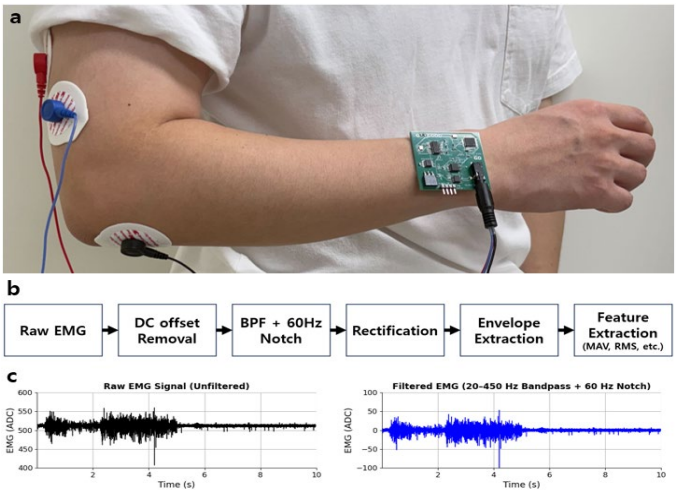


그림 2. 전극 부착 예시, 전처리 과정, 전처리 전후 비교

기록하였다 (그림2a).
획득된 신호는 디지털 notch 필터 (60 Hz)로 전원잡음을 제거한 후, 정류 및 평활화 과정을 거쳐 엔벨로프를 계산하였다[3] (그림2b). 이후 평균 절대값 (MAV), 제곱평균 제곱근 (RMS) 등 대표적 근전도 특징 지표를 산출하여 자세 간 차이를 분석하였다 (그림2c).

3. 연구 결과

본 연구에서는 자체 개발한 EMG 획득 하드웨어를 활용하여 삼두근의 굽힘 (Flexion)과 폄 (Extension) 동작 시 표면 근전도 (EMG) 신호의 차이를 분석하였다.

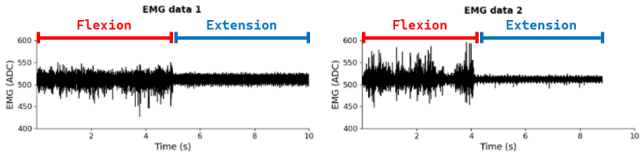


그림 3. 팔 자세 변화(신전→굽힘) 시 근전도(Raw data)

[그림 3]은 피험자의 삼두근 (triceps)에서 획득한 원시 EMG 신호 예시이다. 각 그래프는 동일 조건에서 반복 측정한 결과를 나타내며, 초기 구간은 팔을 편 (Extension) 상태, 이후 구간은 팔을 굽힌 (Flexion) 상태로 전환된 시점을 포함한다. [그림 3]의 데이터 포함, 모든 측정에서 자세 변화 시 EMG 진폭의 뚜렷한 증가가 관찰되었다.

4 차례 반복 측정을 통해 얻은 주요 지표 (MAV, RMS, WAMP, SSC, MNF)는 [표 1]과 같은 특징을 보였다.

Feature	Result 1	Result 2	Result 3	Result 4
MAV (Ext)	8.006	8.428	11.335	4.896
MAV (Flex)	2.797	5.425	5.617	1.755
RMS (Ext)	11.256	10.843	14.861	7.505
RMS (Flex)	3.476	6.591	6.532	2.159
WAMP (Ext)	1204	1495	1425	889
WAMP (Flex)	547	1493	922	140
SSC (Ext)	1229	1310	1322	1233
SSC (Flex)	1111	1371	1501	1483
MNF (Ext)	256.33Hz	248.59Hz	268.46Hz	249.50Hz
MNF (Flex)	173.50Hz	216.69Hz	348.76Hz	330.83Hz

표1. 전처리 결과 요약

분석 결과, 폄 (Extension) 동작에서는 네 번의 반복 측정 모두에서 MAV와 RMS 값이 굽힘 (Flexion)에 비해 일관되게 높은 경향을 보였다 (표 1). 예를 들어, Result 3에서 Extension의 MAV와 RMS는 각각 Flexion에 비해 두 배 이상 높았으며, Result 4에서도 동일한 경향이 유지되어 폄 동작 시 삼두근의 근육 활성도가 지속적으로 두드러짐을 확인할 수 있었다.

신호 변동성을 나타내는 WAMP (윌리슨 진폭)와 SSC (기울기 변화) 지표는 측정 간 다소의 변동을 보였다. 특히 두 번째 측정에서 Flexion의 WAMP (1493)와 SSC (1371)가 Extension과 유사한 수준까지 증가하여 굽힘 시 순간적인 신호 변화가 증가하는 양상이 관찰되었다. 반면 네 번째 측정에서는 Flexion의 WAMP (140)로 크게 감소하고 SSC (1483)는 높은 수준을 유지하여, 근육 수축 강도보다는 신호 형태의 급격한 변화가 강조되는 특징을 보였다.

주파수 특성을 나타내는 평균 주파수 (MNF)는 Extension 동작에서 네 번의 측정 모두 249~268 Hz 범위로 안정적으로 유지되었다. 반면 Flexion에서는 첫 측정 (173.50 Hz) 대비 반복 측정 시 주파수가 점차 증가하여 세 번째와 네 번째 측정에서는 각각 348.76 Hz와 330.83 Hz로 Extension보다 높은 값을 보였다. 이는 반복 훈련 시 굽힘 동작에서 더 빠르고 다양한 근육 섬유가 동원되었음을 시사한다.

이러한 특징 분석을 바탕으로, 실제 실시간 자세 구분이 가능한 알고리즘을 구현하였다. 본 알고리즘은 초기 5초 구간의 EMG 신호를 굽힘 (Flexion) 기준 상태로 설정하고, 해당 구간의 평균 절대값 (MAV)과 제곱평균 제곱근 (RMS)을 기준 특성으로 산출한다. 이후 신호를 1초 단위 윈도우로 분할하여 각 구간의 MAV와 RMS를 계산하고, 두 값이 기준치 대비 30% 이상 증가할 경우 폄 (Extension)으로, 그렇지 않으면 굽힘 (Flexion)으로 분류하였다.

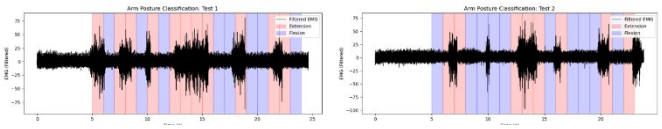


그림4. 데이터 분류 결과

제작된 알고리즘을 무작위로 선택한 네 가지 EMG 데이터에 적용한 결과, 그림4와 같이 모든 데이터에서 폄 구간이 빨간색, 굽힘 구간이 파란색으로 시각적으로 명확히 구분되었다. 필터링 된 EMG 파형 위에 각 구간별 색상 표시를 통해 시간 축 상의 자세 변화를 직관적으로 확인할 수 있었으며, Extension 구간에서 MAV와 RMS의 동시적 상승이 안정적으로 검출되었다. 특히 근육 활성도의 상대적 변화가 명확할수록 판별 정확도가 향상되는 경향을 보였다. 이러한 결과는 단순 임계값 기반의 규칙 (rule-based) 접근만으로도 폄과 굽힘 자세를 실시간으로 구분할 수 있음을 보여준다. 향후에는 압력 센서 신호와의 동시 분석 및 윈도우 중첩 (overlap), 히스테리시스 보정 등을 추가하여 잡음에 대한 구별 능력을 높이고, 개별 사용자에 맞춘 적응형 임계값 설정을 통해 CPR 교육 및 훈련용 자세 피드백 시스템으로의 확장 가능성을 확인할 예정이다. 이상의 결과를 종합하면, 본 시스템은 표면 EMG 신호의 다양한 특징을 통해 폄과 굽힘 동작을 명확히 구분할 수 있음을 보여준다. 이러한 결과는 향후 CPR 가이드 시스템의 자세 인식 및 피드백 기능 고도화에 실질적인 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

4. Acknowledgements

본 과제 (결과물)는 2025년도 교육부 및 부산광역시의 재원으로 부산라이즈혁신원의 지원을 받아 수행된 글로컬대학30 프로젝트의 결과입니다. (2025-glocal-02-004-511-001)

5.참고 문헌

[1] Abel Nicolau, Ingrid Bispo, Marc Lazarovici, Christoffer Ericsson, Pedro Sa-Couto, Inês Jorge, Pedro Vieira-Marques, and Carla Sa-Couto. Influence of rescuer position and arm angle on chest compression quality: An international multicentric randomized crossover simulation trial. Resuscitation, 2024, 100815. DOI: 10.1016/j.resplu.2024.100815.

[2] De Luca CJ. Filtering the surface EMG signal: Quality and optimal cutoff frequencies. Journal of Biomechanics. 2010;43(8):1571-1579. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2010.03.011.

[3] Sandra Marquez-Figueroa, Yuriy S. Shmaliy, and Oscar Ibarra-Manzano. Removing Artifacts from EMG Envelope for Improving Myoelectric Robot Arm Control. WSEAS Transactions on Signal Processing, 2020, 16:4. DOI: 10.37394/232014.2020.16.4.

Poster-047

멀티 웰 분자진단 장치를 위한 3D 프린터 기반의 시약 분주기

한지욱[1], 김종원[2], 유문호[3,4*]

전북대학교 대학원 헬스케어공학과[1], 바이오메듀스㈜ 기술연구소[2], 전북대학교 바이오메디컬공학부[3], 전북대학교 고령친화 복지기기연구소[4]

3D printer-based reagent dispenser for nucleic acid diagnostic device with multi-well

Chi-Uk Han[1], Jongwon Kim[2], Mun-Ho Ryu[3,4*]

Department of Healthcare Engineering, Jeonbuk National University, Jeonju, Republic of Korea[1]

Biomedux Co., Ltd., Gyeonggi, Republic of Korea[2]

Division of Biomedical Engineering, Jeonbuk National University, Jeonju, Republic of Korea[3]

Research Center of Healthcare & Welfare Instrument for the Aged, Jeonbuk National University, Jeonju, Republic of Korea[4]

*mhryu@jbnu.ac.kr

Abstract

This work presents a cost-effective automated system for the preparation and dispensing of reagents used in molecular diagnostics and various laboratory workflows. Manual reagent preparation is labor-intensive and error-prone, often causing inaccuracies in volume handling. To address this, a dispensing platform was developed using open-source 3D printer technology, integrating a motion stage and a syringe-based pump for precise liquid handling. The system achieved relative accuracy of 0.30% and a coefficient variation (CV) of 2.64% based on the weight test of 500 µL water, meeting ISO 8655 standards. In terms of throughput, the system dispensed a single sample tube in 13.57 seconds, significantly faster than manual pipetting. The modular design enables flexible applications not only to nucleic acid extraction workflows but also to various reagent preparation processes across molecular biology, chemistry, and bioanalysis.

1. 연구 배경

감염병의 정확하고 시의적절한 진단은 임상 및 공중 보건 대응에 필수적이다. 실시간 정량적 중합효소 연쇄 반응(qPCR)은 바이러스 배양이나 혈청 검사와 같은 방법 중 가장 정확하고 민감한 방법으로 인정받고 있다. qPCR은 증폭 중 DNA 또는 RNA의 실시간 정량을 가능하게 하며, COVID-19 검사를 포함한 분자 진단에서 표준 방법이 되었다. Kil 등은 마이크로 유체 카트리지를 사용하여 핵산 추출, qPCR 및 결과 해석을 자동화하는 저비용 휴대용 핵산 분석기를 개발했다 [1]. 이 연구에서 사용된 카트리지에는 중앙 주사기 펌프와 로터리 밸브로 연결된 13개의 시약 챔버가 포함되어 있지만, 시약을 챔버에 수동으로 사전 충전하는 작업은 일관성, 처리량 및 확장성을 제한하는 병목 현상으로 남아있다.

이 액체 처리 단계를 자동화하는 것은 시스템이 실용적인 대용량 애플리케이션으로 전환되는 데 필수적이다. 최근 로봇 공학 및 자동화 기술의 발전으로 실험실 워크플로의 정밀도, 재현성 및 처리량을 개선하기 위한 다양한 액체 처리 시스템이 개발되었다. 이러한 시스템에는 고급 상업용 로봇 플랫폼과 오픈 소스 구성 요소를 사용하거나 3D 프린터 하드웨어를 개조하여 구축된 비용 효율적인 장치가 포함된다. 이러한 플랫폼은 임상 진단, 생명 과학, 화학, 바이오 분석, 바이오 프린팅, 유전학 등 다양한 분야에 적용되었다. 예를 들어, Kopyl 등은 데스크톱 3D 프린터를 수정하여 피펫팅 시스템을 개발했으며, Opentrons와 같은 상업용 오픈 소스 플랫폼은 접근 가능한 실험실 자동화의 잠재력을 입증했다 [2]. 저비용 3D 프린터를 재활용하는 것이 맞춤형 분주 시스템의 실용적인 기반이 될 수 있음을 보여주는 연구들이 있다. 로봇 액체 처리 시스템은 수동 프로세스의 한계를 해결하고 재현성 및 확장성을 향상시킨다. 하지만, 대부분의 시스템은 다중 챔버 시약 전달을 조정해야 하는 로터리 밸브가 있는 마이크로 유체 카트리지의 특정 설계에 맞춤 화되어 있지 않다. 이러한 격차를 해소하기 위해 PCR 호환 마이크로 유체 카트리지를 위해 특별히 설계된 3D 프린터 기반 시약 분주 시스템이 개발되었다.

2.연구 방법

2.1. 기계 시스템 설계

본 연구에서 제안하는 시스템은 분자 진단 및 다양한 생명과학 실험에서 필요한 시약을 자동으로 준비하고 분주하는 것을 목표로 하며, 3축 모션 테이블과 시린지 펌프를 통합한다. 각 실험에서는 프로토콜에 따라 여러 종류의 시약(30 µL ~ 410 µL 범위의 부피)이 정확한 부피로 준비되어야 하며, 이를 자동화하여 반복성과 효율성을 향상시키는 것을 목표로 한다.

모션 테이블은 저가형 CNC 라우터 프레임 (CNC 3018, HAEYON, China)을 3축 모션 테이블로 재활용했다 (그림 1). 이동 속도 향상을 위해 기존의 나사 구동식 X 및 Y축은 타이밍 벨트 시스템으로 대체되었다. 제어장치는 오픈 소스 3D 프린터 제어 보드인 RAMPS 1.4와 Marlin 펌웨어(bugfix-2.1x)로 교체했다. Marlin 펌웨어는 표준 G-code 명령을 통해 모터 구동 단계를 작동시키는 데 활용되었다. X, Y축은 20.62 µm/step의 해상도를, Z축은 1.25 µm/step의 해상도를 달성했다. 노즐 및 트레이는 시린지 펌프 출구의 2 mm 튜브를 연결하기 위해 맞춤형 노즐이 설계되었다. 트레이 위에는 다수의 시약 튜브 또는 반응 용기를 고정할 수 있으며, 시스템은 각 용기에 정확한 부피의 시약을 자동으로 분주한다. 이를 통해 사용자는 핵산 추출, PCR, 효소 반응 등 다양한 후속 공정을 별도의 장비에서 수행할 수 있다. 또한 분주 처리량 향상을 위해 50개 또는 100개의 시약 용기를 동시에 고정할 수 있는 평평한 트레이(300 × 240 × 18 mm)를 제작했다.

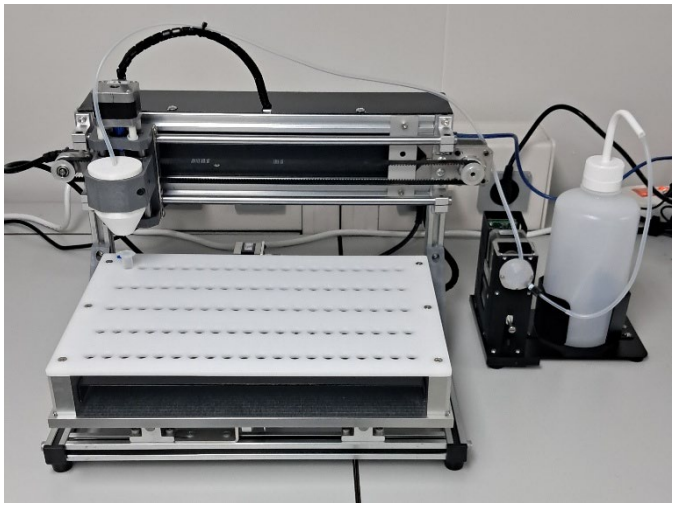


그림 1. 전체 시스템 사진

2.2. 시린지 펌프

액체 시약 취급을 위해 밸브가 있는 시린지 펌프(Cadent™ 3, IMI Norgren, United Kingdom)가 사용되었다. 밸브 선택은 흡입을 위해 저장소로 이동할 필요 없이 분주 및 흡입을 모두 허용하므로 장점이 있다. 시린지 자체는 1,000 µL 용량을 가지며, 시린지 펌프는 0.2%의 우수한 정확도와 0.05%의 정밀도(CV)를 제공한다. 시린지 펌프는 내장된 제어 장치를 통해 직렬 통신 기능을 활용했다.

2.3. 전체 시스템 구성 및 인터페이스

개발된 자동 시약 분주 시스템은 3축 모션 테이블, 시린지 펌프 및 PC UI 애플리케이션으로 구성된다 (그림 2). PC UI 애플리케이션은 Python 및 PyQt5를 사용하여 개발되었으며, 시리얼 통신을 통해 3축 모션 테이블(Marlin 펌웨어 기반, G-code 사용)과 시린지 펌프(DT 프로토콜 명령 사용)를 제어한다. PC UI의 프로그램 탭은 텍스트 파일에 작성된 프로토콜 시퀀스의 자동 실행을 지원하여 일관성과 효율성을 높인다.

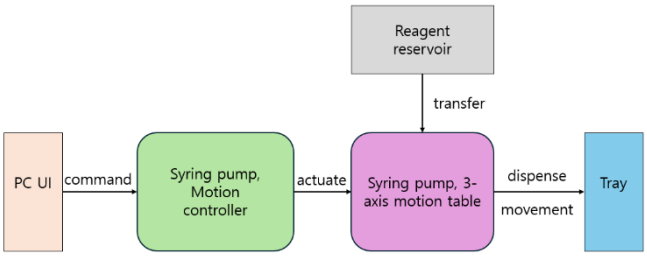


그림 2. 전체 시스템 개략도

3. 연구 결과

3.1. 위치 정확도

3축 모션 테이블의 위치 정확도는 다이얼 게이지(분해능 10 µm)를 사용하여 평가되었다. 1 mm 이동 명령 후 실제 이동 거리를 측정했다. 모든 축에서 최대 위치 오차가 31 µm 이내로 유지되었다. 이 정밀도 수준은 분주 노즐이 마이크로 유체 카트리지 챔버와 정확하게 정렬되도록 보장하기에 충분할 것으로 판단된다.

3.2. 분주 정확도

분주 된 시약의 부피 정확도 및 일관성은 진단 프로세스의 신뢰성에 직접적인 영향을 미친다. 500 µL의 증류수를 20개의 카트리지에 분주한 후 중량 측정법을 사용하여 평가했다. 500 µL 목표 부피에 대해 절대 정확도 1.52 µL, 상대 정확도 0.30%를 달성했다. 측정된 부피의 표준 편차는 13.25 µL였으며, 상대 정밀도(CV)는 2.64%이다. 이 값들은 ISO 8655의 정확도(≤1.6%) 및 정밀도(≤0.6%) 기준을 충족한다.

3.3. 분주 속도

처리량 향상을 위해 20개의 카트리지에 500 µL를 분주하는 데 걸리는 시간을 측정했다. 10회 반복 측정 결과, 한 주기를 완료하는 데 평균 271.3초가 소요되었으며, 이는 카트리지당 13.57초에 해당한다. 이 시간은 노즐 유닛 이동과 시린지 펌프의 실제 분주 시간을 모두 포함한 시간이다.

4. 결론

본 연구는 신속 핵산 진단 워크플로우에 맞춤 화된 자동화된 저비용 시약 준비 시스템을 개발 및 검증했다. 이 시스템은 3D 프린터 모션 테이블, G-code 호환 컨트롤러, 3방향 밸브가 있는 시린지 펌프 등 널리 사용 가능한 구성 요소를 통합한다.

주요 결론은 다음과 같다:

1. 정확도 및 정밀도: 500 µL 분주 시 0.30%의 부피 정확도와 2.65%의 정밀도(CV)를 달성하여 ISO 8655 표준을 충족했다.
2. 운영 효율성: 단일 카트리지를 13.57초 만에 채워 높은 처리량을 입증했다.
3. 새로운 분주 방법: 3방향 밸브와 결합된 시린지 펌프는 피펫 팁 없이 정밀한 액체 취급을 가능하게 하여 인적 오류를 줄이고 소모품 낭비를 최소화했다.
4. 시스템 유연성: CNC 라우터 프레임을 기반으로 한 기계 구조는 3D 프린터나 레일 기반 시스템과 같은 다른 플랫폼에 적용될 수 있으며, Marlin 펌웨어 외에도 G-code 호환 컨트롤러를 지원하여 적응성을 높인다.

특히, 본 시스템은 특정 카트리지 기반 진단 장비뿐만 아니라, 샘플 전처리, 효소 반응 준비, 세포 배양용 시약 분주 등 다양한 생명과학 및 화학 실험 공정에서도 활용될 수 있는 확장성을 지니고 있다. 다만, 현재 검증은 증류수를 사용하여 수행되었으므로, PCR 혼합물과 같은 점성 시약에 대한 추가 최적화가 필요하다. 향후 개선 사항은 버퍼별 취급 매개변수, 컴팩트한 펌프 통합 및 실시간 감지에 초점을 맞추어 견고성과 다용도성을 향상시켜야 한다.

5.참고 문헌

[1] Kil BH, Park JS, Park CY, Kim YS, Kim JD. “System Architecture for IIoT-Based POC Molecular Diagnostic Device.” *Engineering Proceedings*, vol. 6, no. 1, article no. 60, 2021.

[2] A. Kopyl, Y. Yew, J. W. Ong, T. Hiscox, C. Young, M. Muradoglu, et al., “Automated Liquid Handler from a 3D Printer,” *Journal of Chemical Education*, vol. 101, no. 2, pp. 640-646, 2024.

Poster-049

전기화학 기반 타액 내 알코올 검출 센서 시스템 개발

이태무[1,2] , 백현재[2], 김광복[1*]

한국생산기술연구원 산업전환기술부문[1]

순천향대학교 바이오메디컬공학과[2]

Development of an electrochemical-based sensor system for alcohol detection in saliva

Tae Mu Lee[1,2] , Hyun Jae Baek[2] , Kwang Bok Kim[1*]

[1]Industrial Transformation Technology Department, Korea Institute of Industrial Technology, Cheonan, Korea

[2]Department of Biomedical Engineering , Soonchunhyang Univ, Korea

[*]kb815kim@kitech.re.kr

Abstract

Korea's drink-driving problem motivates alternatives to breath-based IIDs, which suffer usability and cost issues. We propose a noninvasive saliva electrochemical sensor using an Fc-PAMAM mediator with AOx on Au-SPEs; in PBS and artificial saliva, +0.60 V (vs. Ag/AgCl) yields clear, linear chronoamperometric responses to 0–80 mM ethanol ($R^2 > 0.9$). The results indicate robust, concentration-dependent sensing suitable for integration as a primary or secondary IID module.

1. 연구 배경

우리나라의 음주운전은 지난 5년(2019~2023년) 동안 75,950건의 사고와 1,161명의 사망, 122,566명의 부상으로 이어진 심각한 사회·공중보건 문제이며, 음주 상태는 공간지각력과 반응속도 저하로 추돌사고 비율을 전체 교통사고의 20.4% 대비 46.5%로 크게 높이는 것으로 보고된다. 이에 경찰청은 숙취운전을 포함한 상시·집중 단속을 시행하고, 도로교통공단은 음주운전을 생명을 위협하는 중대한 범죄로 규정하며 예방을 강조하고 있다. 이러한 배경 속에서 운전자가 탑승 후 호흡으로 음주 여부를 측정해 알코올이 감지되면 시동을 차단하는 시동연동형 장치(IID)가 기술적 대안으로 주목받고 있으며, 미국에서는 해당 호흡 기반 시스템 도입이 재범률 감소에 효과를 보인 사례가 보고되었다[1–3]. 국내에서도 5년 이내 2회 이상 음주운전 경력이 있는 운전자의 차량에 장치 부착을 의무화하는 도로교통법 개정안이 시행 중이다. 다만 장치 오작동이나 유지비용, 호흡 측정 오류로 인한 불필요한 시동 차단 또는 음주 상태에서의 시동 허용 사례 등 안전·편의상의 문제가 지적되며[4], 여성이나 흡연자처럼 폐활량이 작은 경우 테스트·시동 성공률이 낮다는 한계도 보고되었다[5].

이를 보완하기 위해 타액 기반 전기화학 센서를 기존 장치의 대체 또는 2차 검증 수단으로 도입하는 접근이 유효하다. 타액 기반 알코올센서는 비침습적이며, 알코올산화효소(AOx)가 타액 내 에탄올을 산화하며 생성하는 과산화수소(H_2O_2)를 일정 전위에서 산화해 얻는 전류로 혈중 알코올 농도를 간접 추정한다. 이때 전자전달 매개체로 Fc-PAMAM(ferrocene-cored PAMAM dendrimer)을 활용하면, 페로센의 가역 레독스 특성에 기반한 낮은 과전위·빠른 전자전달을 확보할 수 있고, 다가성 구조를 통해 효과적으로 효소 고정화 및 안정성을 높일 수 있다. 또한 선택적 투과막과 병용하면 아스코르브산,요산 등 간섭 물질에 대한 산화 전류를 저감할 수 있어 실제 타액 환경에서의 선택성을 높이는 데 유리하다. 구성 요소가 소형·모듈화 가능해 유지보수 비용 절감, 교체식 카트리지화, 그리고 차량 시동 연동 시스템(IID) 과의 기능적 통합에도 적합하다는 장점이 있다. 선행 연구에서도 타액을 이용한 알코올 검출이 보고되어 있으며[6–7], 본 연구는 이러한 설계를 토대로 Fc-PAMAM을 적용한 타액 전기화학 센서를 개발하여 비침습적이고 정확한 음주 측정을 구현하고, 기존 차량 시동 제어 시스템의 대체 또는 2차 검증 수단으로 확장하는 것을 목표로 한다. 이를 위하여 에탄올을 농도별로 섞어 만든 샘플을 테스트한 결과, 각 농도별 샘플에 대한 출력 전류가 구분 가능한 수준으로 측정됨을 확인하였다.

2.연구 방법

Fc-PAMAM은 발산형(divergent) 합성을 통해 3세대까지 제조하여 사용하였다. 페로센 아민(Fc–NH_2)을 무수 메탄올 20 mL에 용해하고 methyl acrylate (MA, 20 당량)를 넣어 실온에서 24시간 동안 교반한다. 반응 혼합물을 로타리 농축기로 진공 상에서 50 °C에서 감압 건조로 잔류 MA를 제거하여 Fc-PAMAM(G0.5)을 제조하였다. 이어 생성한 Fc-PAMAM(G0.5)에 ethylenediamine (EDA, 30 당량)을 넣은 다음 실온에서 72시간 동안 반응시켰으며, 반응이 끝난 후, 로타리 농축기로 진공 상에서 70 °C에서 감압 건조로 잔류 EDA를 제거하여 Fc-PAMAM(G1)을 제조하였다. 동일한 사이클을 반복하여 Fc-PAMAM(G3)까지 세대를 향상시킨 후, 사용하였다.

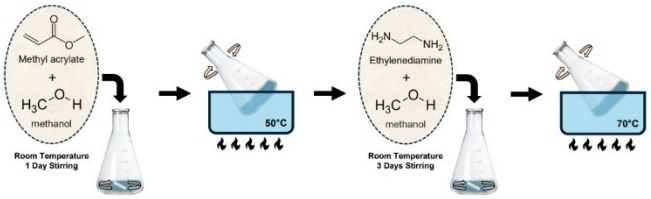


그림 1. Fc-PAMAM 제조 과정

본 연구의 센서는 Au를 작업·상대 전극, Ag/AgCl을 기준 전극으로 갖는 Screen-Printed Electrode(SPE)를 기반으로 하여 제작하였다. 먼저 Au 전극을 피라냐 용액(20% 암모니아/dH_2O/35% H_2O_2 혼합액)으로 80 °C에서 1분 동안 처리한 뒤 dH_2O로 충분히 세척 및 건조하였고, 이어 2 mM 3-mercaptopropionic acid(3-MPA) 용액 3 μL를 작업 전극에 드롭 캐스팅하여 self-assembled monolayer(SAM)를 형성하였다. 이후 EDC(0.2M)/NHS(0.05M) 혼합 용액에 45분 동안 침지하여 카르복실기를 N-hydroxysuccinimide(NHS)

에스터로 전환한 뒤, 10 mM Fc-PAMAM(G3) 용액 3 μL를 도포하여 상온에서 4시간 동안 반응시켜 아마이드 결합을 통해 전극 표면에 고정화하였다. 다음으로 2.5% glutaraldehyde 용액에 30분동안 침지해 Fc-PAMAM(G3) 말단과 효소의 교차결합이 가능한 표면을 형성하였고, PBS와 Alcohol Oxidase(AOx)를 5:1(v/v)로 혼합한 효소 용액 3 μL를 전극 표면에 드롭 캐스팅하였다. 마지막으로 5 °C에서 하룻밤(overnight) 건조하여 효소 고정화를 완료한 후 dH₂O로 세척 후, 건조하여 센서를 제작하였다. 제작된 전극은 사용 전까지 4–5 °C에서 건조 보관하였다.

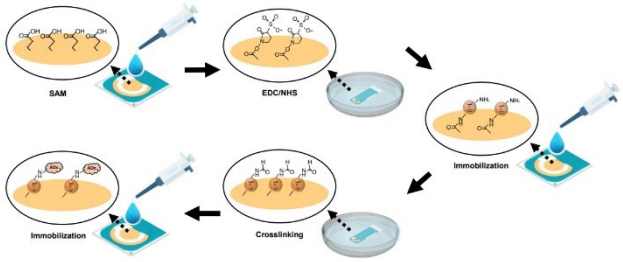


그림 2. 알코올 센서 제조 과정

3. 연구 결과

측정은 Phosphate buffered saline (PBS, pH 7.4) 및 인공 타액(artificial saliva) 두 매질에서 수행하였다. 각 측정 전 전극을 매질에 담가 안정화를 확보한 뒤 실험을 진행하였다. 우선 cyclic voltammetry(CV)로 적정 작동 전위를 도출하기 위해 –0.20 ~ +0.60 V (vs. Ag/AgCl)의 전위 구간을 주사하면서, 0–80 mM 범위의 에탄올을 10 mM 간격으로 단계적으로 첨가하여 산화 전류 변화를 확인하였다. 그 결과, 두 매질 모두에서 +0.40 ~ +0.60 V 구간에서 농도에 비례한 산화 전류 증가가 확인되었고, 특히 +0.60 V에서 농도 간 전류 차이가 가장 뚜렷하게 분리되어 이를 적정 작동 전위로 채택하였다.

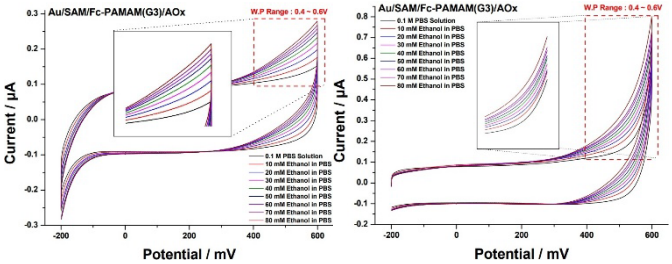


그림 3. PBS(pH 7.4) & Artificial Saliva CV 측정 결과 데이터

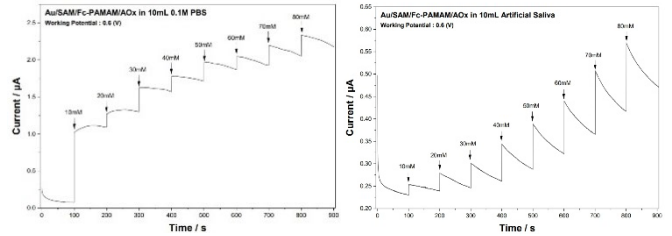


그림 4. PBS(pH 7.4) & Artificial Saliva CA 측정 결과 데이터

CV를 통해 도출한 작동 전위 +0.60 V(vs. Ag/AgCl)에서 수행한 chronoamperometry(CA) 결과, 0–80 mM(10 mM 간격) 에탄올 농도에 대해 PBS(pH 7.4) 및 인공 타액 모두에서 산화 전류가 농도에 비례하여 증가했으며, 단계 간 전류가 분해능 있게 구분되었다. 특히 농도–전류 간의 두 매질 모두 R-Square 0.9 이상 확보하여 센서의 선형성과 정량 분석이 가능함을 확인하였다.

이러한 결과는 본 전극이 생체 유사 환경에서도 안정적 전자전달과 농도의존적 응답을 제공함을 의미하며, 타액 기반 음주 모니터링에 적용 가능한 작동 전위와 측정 프로토콜을 제시한다. 향후 연구에서는 대조군 확장, 간섭 내성 및 장기 안정성 검증, 그리고 제조 공정 최적화를 통해 임상·현장 적용성을 한층 발전시킬 예정이다.

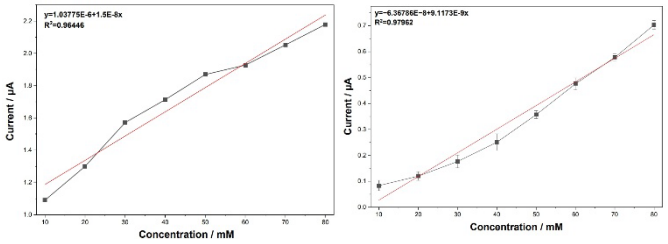


그림 5. 상관계수 그래프

4. Acknowledgements

This work was supported by a grant from the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Korean government (MSIT) (Grant No. RS-2022-NR069934). This work was also supported in part by the Soonchunhyang University Research Fund, BK21 Fostering Outstanding Universities for Research (FOUR), under Grant 5199990914048.

5.참고 문헌

[1] WILLIS, Charlene; LYBRAND, Sean; BELLAMY, Nicholas. Alcohol ignition interlock programmes for reducing drink driving recidivism. Cochrane Database of Systematic Reviews, 2004, 3.

[2] RAUB, Richard A.; LUCKE, Roy E.; WARK, Richard I. Breath alcohol ignition interlock devices: controlling the recidivist. Traffic injury prevention, 2003, 4.3: 199-205.

[3] NOCHAJSKI, Thomas H., et al. The impact of interlock installation on driving behavior and drinking behavior related to driving. Traffic injury prevention, 2020, 21.7: 419-424.

[4] KHOURY, Angelise; ROLLAND, Connor. Ignition Interlock Devices: Do they really help?. 2025.

[5] SAWYER, Ben D.; HANCOCK, P. A. An Evaluation of Drivers Using an Ignition Interlock Device: Breath Tests while Driving. In: Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting. Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications, 2014. p. 2098-2101.

[6] MOHAN, AM Vinu, et al. Continuous minimally-invasive alcohol monitoring using microneedle sensor arrays. Biosensors and Bioelectronics, 2017, 91: 574-579.

[7] MISHRA, Rupesh K., et al. Simultaneous detection of salivary Δ9-tetrahydrocannabinol and alcohol using a Wearable Electrochemical Ring Sensor. Talanta, 2020, 211: 120757.

Poster-050

파열·비파열 뇌동맥류 환자의 정량 뇌파 비교: 탐색적 분석

방승민[1*], 권다은[2], 유승준[3,4], 유현동[3], 안민규[1*]

[1] 한동대학교 전산전자공학과

[2] 한동대학교 BK21 AI사업단

[3] 을지대학교병원 신경외과

[4] 생명과학 연구클러스터

Quantitative EEG in Ruptured vs. Unruptured Intracranial Aneurysms: An Exploratory Analysis

Seungmin Bang[1], Daeun Gwon[2], Seungjun Ryu[3,4], Hyundong Yoo[3], Minkyu Ahn[1],

[1] School of Computer Science and Electrical Engineering, Handong Global University

[2] BK 21 Advanced AI Talent Education and Research Group for Industrial Innovation, Handong Global University

[3] Department of Neurosurgery, Daejeon Eulji University Hospital

[4] Life Science Cluster, Center for Cognition and Sociality, Institute for Basic Science (IBS)

[*]minkyuahn@handong.edu

Abstract

To identify physiological markers associated with intracranial aneurysm rupture, we quantitatively analyzed resting-state frontal two-channel EEG from aneurysm patients (n=30; 13 ruptured, 17 unruptured). We extracted band powers, spectral edge frequencies, Shannon entropy, and ratio indices, and compared groups using one-tailed tests. Group differences were observed primarily for features derived from bilateral channels: the unruptured group showed higher α power (non-lesioned hemisphere p=0.04; bilateral p=0.04) and higher high-β power (bilateral p=0.03). Ratio metrics were also greater in the unruptured group, with significant effects for DAR (p=0.01) and DTABR (p=0.04) on bilateral measures. Other bands (δ, θ, β, γ) tended to be larger in the unruptured group but did not reach significance (p≈0.06–0.11), and no differences emerged for 50% SEF/80% SEF or Shannon entropy. Overall, the pattern suggests rupture-status–dependent EEG signatures characterized by greater α/high-β absolute power and elevated DAR/DTABR in unruptured aneurysms. To establish reproducibility and diagnostic/prognostic validity, follow-up studies with larger samples, multi-channel and longer recordings, and rigorous analyses that account for covariates are needed.

1. 연구 배경

지주막하출혈(Subarachnoid hemorrhage, SAH)은 뇌를 싸고 있는 수막 중 지주막과 연막 사이의 지주막하 공간에 혈액이 유입되어 축적되는 상태로, 주로 뇌동맥류의 파열, 외상, 기타 뇌혈관 이상에 의해 유발된다. 의료적 처치 이전에 약 12%가 사망하고, 처치 이후에도 1개월 내 사망률이 약 40%에 달하며 생존자의 약 30%가 영구적 신경학적 결손을 남길 수 있는 치명적 질환이다[1]. 이러한 중증도와 예후의 이질성 때문에 조기 발견과 신속한 치료 의사결정이 필수적이다.

뇌전도(electroencephalography, EEG)는 신경생리 변화를 고시간해상도로 포착하는 도구로서, 임상 상태 및 뇌혈류 변화와의 연관성이 반복적으로 보고되어 왔다. 최근 연구들에서는 허혈성 및 출혈성 뇌졸중 환자에서 EEG 기반 지표가 임상적 중증도와 예후를 유의하게 반영한다는 결과가 보고되었다. 대뇌 반구 간 비대칭을 나타내는 Brain Symmetry Index(BSI)는 신경학적 손상 정도와 밀접한 상관성을 보였으며[2], 저주파/고주파 비율과 같은 EEG 스펙트럼 지표는 장기 예후를 예측하는 민감한 인자로 제시된 바 있다[4]. 이러한 근거는 혈류 역학 중심의 경두개 도플러(Transcranial Doppler, TCD)에 비해, EEG가 신경생리적 기능 저하를 직접적으로 반영할 수 있음을 시사한다[3,4].

한편, SAH의 가장 흔한 원인은 동맥류 파열로 전체의 약 85%를 차지하지만[5], 파열성 동맥류와 비파열성 동맥류 환자 간 EEG 특성을 체계적 비교는 부족하다. EEG는 동맥류 파열 여부에 따라 상이하게 전개될 수 있는 신경생리학적 차이를 반영할 가능성이 있다. 따라서 본 연구는 파열 및 비파열 동맥류 환자의 EEG를 정량 지표로 분석하여, 두 집단 간 신경생리학적 차이를 탐색적으로 규명하고자 하였다.

2.연구 방법

2.1 참여자 및 데이터 수집

본 연구에는 뇌동맥류로 진단된 피험자 31명이 참여하였다. 이 중 EEG 신호 품질 저하 및 측정 오류가 확인된 1명을 제외하고, 최종적으로 파열성 동맥류군 13명과 비파열성 동맥류군 17명을 포함한 30명의 데이터를 분석에 사용하였다. EEG 신호는 전두부에 부착된 2개 전극을 사용해 수집하였다. 본 연구는 을지대학교 생명윤리위원회(Institutional Review Board, IRB)의 승인을 받았다(IRB 승인번호: 2024-09-008).

2.2 EEG 기록 및 전처리

EEG는 마취 직후, 마취 심도 값이 40~65를 유지한 상태에서 눈을 감고 누운 자세로 기록하였다. 표본화 주파수는 250Hz로 설정하였고, 전극–피부 임피던스는 10 kΩ 이하로 유지하였다. 원시 신호에 0.5–50 Hz 대역통과 필터를 적용하여 저주파 기저선 변동과 고주파 잡음을 제거하였다. 이후 시각 검토를 통해 각 피험자별로 인공물이 없는 15초 길이의 연속 구간을 선별하였다. 전처리는 MATLAB R2025a와 EEGLAB 2025.0.0을 사용하여 수행하였다.

2.3 특징 추출

아래 표1 과 같은 EEG 파생 특징을 비손상 반구 및 양측 반구 채널에 대해 추출하였다. 비손상반구는 영상학적 진단 결과에 근거해 정의하였다. 특징 추출은 MATLAB R2025a로 구현하였다.

2.4 통계 분석

두 집단 간 특징값 차이는 독립표본 t-검정으로 비교하였다. 각 집단의 표본 수가 30명 이하이므로, 모수 검정 가정 충족 여부를 확인하기 위해 각 특징값에 대해 Shapiro–Wilk 정규성 검정과 Levene 등분산성 검정을 수행하였다. 정규성과 등분산성이 모두 충족된 경우에는 Student의 t-검정을, 등분산성이 위반된 경우에는 Welch의 t-검정을 적용하였다. 모든 검정은 단측 검정(one-tailed)으로 수행하였고, 유의수준은 $\alpha = 0.05$로 설정하였다. 통계 분석은 MATLAB R2025a(Statistics and Machine Learning Toolbox 포함)을 사용하였다.

표 1. EEG로부터 추출한 특징 목록

세부 구분
50%, 80% 스펙트럴 경계 주파수 (Spectral Edge Frequency, SEF)
섀넌 엔트로피 (Shannon Entropy)
δ (0.5–4 Hz), θ (4–8 Hz), α (8–13 Hz), β (13–30 Hz), low β (13–20 Hz), high β (20–30 Hz), γ (30–45 Hz) 전력
델타 - 알파 비율 (Delta/Alpha Ratio, DAR)
델타 세타 - 알파 베타 비 ((Delta+Theta)/(Alpha+Beta) Ratio (DTABR)

3. 연구 결과

전체 지표에 대한 통계분석 결과는 표 2에 제시하였다. 집단 간 유의한 차이는 주로 양측 반구에서 추출한 특징에서 관찰되었다. 비파열군은 파열군보다 α 전력이 높았고(비손상 반구 p=0.04; 양측 반구 p=0.04), high-β 전력 역시 양측에서 더 컸다(p=0.03). 비율 지표에서는 비파열군의 DAR와 DTABR가 파열군 대비 더 높았으며, 두 지표 모두 양측 반구에서 유의했다(DAR p=0.01; DTABR p=0.04). 그 외 지표는 통계적으로 유의하지 않았으나, δ·θ·β·γ 전력은 전반적으로 비파열군이 더 큰 경향을 보여 유의수준에 근접했다(p≈0.06–0.11). 반면 스펙트럴 경계주파수(SEF 50%, 80%)와 Shannon entropy는 반구에 관계없이 유의한 차이가 없었다.

이러한 결과는 α·high-β 전력과 DAR·DTABR이 파열 여부를 반영하는 유망한 후보 지표임을 시사한다. 향후에는 표본 확대·다채널 장기 기록·공변량 보정을 갖춘 다변량/교차검증 분석으로 재현성, 판별력, 예후 타당도를 정량 검증할 필요가 있다.

표 2. 전체 특징에 대한 통계 분석 결과.

지표/반구		평균±SD		t (df=28)	p
		파열군	비파열군		
50% SEF	비손상	5.50±2.73	4.70±1.79	0.97	0.16
	양측	9.41±2.06	8.70±2.61	0.78	0.22
80% SEF	비손상	11.00±3.63	10.62±3.40	0.29	0.38
	양측	20.07±4.15	19.52±3.90	0.37	0.35
Shannon Entropy	비손상	5.83±0.91	6.00±0.64	-0.59	0.27
	양측	5.63±0.94	5.93±0.63	-1.01	0.16
δ 전력	비손상	20.40±9.24	24.91±7.96	-1.45	0.07
	양측	21.11±8.64	25.61±7.69	-1.53	0.06
θ 전력	비손상	17.21±8.85	20.93±7.65	-1.25	0.11
	양측	18.11±8.38	21.83±7.35	-1.31	0.09
α 전력	**비손상**	**15.35±6.20**	**20.25±4.90**	**-2.26**	**0.04***
	양측	**16.35±6.41**	**20.15±5.67**	**-1.75**	**0.04***
β 전력	비손상	7.19±7.21	11.17±7.43	-1.50	0.07
	양측	8.89±6.22	12.09±6.94	-1.33	0.09
low β 전력	비손상	9.28±7.12	13.14±7.16	-1.49	0.07
	양측	10.71±6.48	13.85±6.82	-1.30	0.10
high β 전력	비손상	4.45±7.58	8.85±7.97	-1.56	0.06
	양측	**5.79±4.86**	**10.13±7.20**	**-1.86**	**0.03***
γ 전력	비손상	-2.39±8.44	2.84±9.87	-1.5	0.06
	양측	-0.40±7.30	4.17±9.29	-1.50	0.07
DAR	비손상	3.72±2.90	4.90±3.23	-1.02	0.15
	양측	**2.66±1.19**	**4.52±2.33**	**-2.44**	**0.01***
DTABR	비손상	4.67±3.26	5.62±3.34	-0.78	0.22
	양측	**3.84±1.16**	**5.29±2.48**	**-1.72**	**0.04***

4. Acknowledgements

본 연구는 정부(교육부 및 과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단(NRF)의 지원을 받아 수행되었으며, 기초연구사업(No. RS-2025-25412061) 및 세종과학프로그램(No. RS-2022-NR072349)의 일환으로 수행되었습니다. 또한, 본 연구는 2025년도 교육부·한국연구재단의 글로벌대학사업의 지원을 받았습니다.

5. 참고 문헌

[1] Cahill WJ, Calvert JH, Zhang JH. Mechanisms of Early Brain Injury after Subarachnoid Hemorrhage. *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism*. 2006;26(11):1341-1353. doi:10.1038/sj.jcbfm.9600283

[2] Van Putten, Michel JAM, and Dénes LJ Tavy. "Continuous quantitative EEG monitoring in hemispheric stroke patients using the brain symmetry index." Stroke 35.11 (2004): 2489-2492.

[3] Chen, Ying, et al. "Monitoring of patients with brainstem hemorrhage: a simultaneous study of quantitative electroencephalography and transcranial Doppler." Clinical Neurophysiology 132.4 (2021): 946-952.

[4] Friedman, Daniel, Jan Claassen, and Lawrence J. Hirsch. "Continuous electroencephalogram monitoring in the intensive care unit." *Anesthesia & Analgesia* 109.2 (2009): 506-523.

[5] J. van Gijn, G. J. E. Rinkel, Subarachnoid haemorrhage: diagnosis, causes and management, *Brain*, Volume 124, Issue 2, February 2001, Pages 249–278, https://doi.org/10.1093/brain/124.2.249

Poster-051

HFSS 시뮬레이션을 활용한 바이오임피던스 센싱의 주입 주파수 및 전극 정렬 허용 오차 최적화 연구

곽권률[1], 홍성철[1*]

홍익대학교 전자전기융합공학과[1]

Optimization of Injection Frequency and Electrode Alignment Tolerance in Bioimpedance Sensing Using HFSS Simulation

Gwon Ryul Gwak[1], Sungcheol Hong[1]

Department of Electronic & Electrical Convergence Engineering, Hongik University, Republic of Korea
*hyhaerong@hongik.ac.kr

Abstract

This study presents an electromagnetic simulation-based approach for optimizing the injection frequency and electrode alignment tolerance in bioimpedance sensing for peripheral artery condition. A three-dimensional tissue model including epidermis, dermis, and arterial layers was implemented in Ansys HFSS, and frequency-domain field simulations were conducted to quantify vascular selectivity across multiple excitation frequencies (1 kHz, 5 kHz, 10 kHz, 50 kHz). The electric field distribution revealed that low-frequency currents (1–5 kHz) exhibited broad and uniform penetration, while higher frequencies (≥ 50 kHz) resulted in excessive subsurface propagation and reduced sensitivity to vascular impedance changes. In contrast, the 10 kHz band provided an optimal balance between vascular field concentration and background suppression, suggesting it as the most effective operating point for peripheral artery condition-related tissue discrimination. Electrode alignment simulations further indicated that up to 20° deviation in current-injection electrodes and 40° deviation in voltage-sensing electrodes maintained more than 50 % of the nominal signal amplitude, defining a practical alignment tolerance for wearable systems. These findings establish a quantitative design guideline for frequency and geometry selection in wearable or implantable bioimpedance devices. The proposed HFSS-based optimization framework offers an efficient means to predict signal degradation caused by electrode misalignment and to enhance the robustness of frequency-domain bioimpedance measurements for vascular health monitoring.

1. 연구 배경

바이오임피던스 측정은 전류를 인가하고 전위 응답을 해석해 조직의 전기적 특성을 추정하는 방법이다. 주입 주파수의 결정은 디바이스의 성능을 판단하는 중요한 요소인데, 저주파에서는 전류가 상대적으로 표층 경로를 따르며 접촉 임피던스와 피부 각질층의 영향이 커진다. 반대로 높은 주파수에서는 전류가 용량성 경로를 통해 깊이 침투하지만 비혈관 조직 기여가 커져 혈관 선택성이 떨어질 수 있다. 기존 연구들은 주입 전류의 주파수가 높을수록 신호가 더 깊이 침투한다는 Cole–Cole 모델에 근거한 분석에 머물러 있으며, 혈관 상태에 대한 선택성의 중요성은 간과해 왔다. 뿐만 아니라 웨어러블이나 이식형 환경에서 전극 배열은 미세한 틀어짐과 위치 편차가 불가피하다. 이때 전류 경로가 변형되어 민감도 저하 SNR 하락 위상 왜곡이 발생한다. 따라서 주입 주파수와 전극 정렬 허용오차를 동시에 고려한 사전 설계가 필요하다.

본 연구는 Ansys HFSS를 이용해 다층 피부 모델에서 주파수별 전계 분포와 혈관 선택도를 정량화하고 최적 주파수 후보를 도출한다. 조직 모델은 표피 진피 피하층과 동맥 혈액으로 구성하며 실제 두께 범위를 반영한다. 전극은 fPCB 기판 위 4전극 방식으로 배치한다. 전류 전극 쌍이 정현파 전류를 주입하고 전압 전극 쌍이 전위를 측정하는 구성을 따른다. 각 주파수에서 얻은 전계 E와 전류 밀도 J를 사용해 혈관 Region of Interest (ROI)와 비혈관 배경의 평균 값을 계산하고 선택도 지표 Vascular Selectivity Index (VSI)를 정의한다. VSI는 혈관 ROI 평균 전계를 전체 경로 평균 전계로 정규화해 산출한다. 값이 클수록 혈관 기여가 크다. 추가로 주입 전극과 검출 전극의 상대 회전각을 독립 스윕해 정렬 민감도를 평가한다. 정렬 오차에 따른 정규화 진폭을 기준 상태 대비 백분율로 표현하고 50 퍼센트 지점 각도를 허용오차로 정의한다.

핵심 목표는 첫째 혈관 대비 배경 억제가 균형을 이루는 최적 주파수 대역 결정 둘째 착용 변동을 고려한 전극 정렬 허용오차 범위 제시다. 최적 주파수는 실제 시스템에서 고조파 기반 특징량 계산과 직결되며 신호 품질과 모델 적합도에 직접 영향을 준다. 정렬 허용오차는 사용자 착용 편차와 실험 중 동작에 따른 변위를 흡수할 수 있는 설계 기준을 제공한다. 해석 기반 접근은 물리 파라미터 변경의 효과를 반복적으로 탐색할 수 있어 실험적 시행착오를 줄이고 설계 수렴 속도를 높인다. 연구 결과는 PAD 조기 예측과 혈관 순응도 모니터링 같은 응용에 필요한 주파수 선택과 기하학 최적화를 동시에 지원한다.

2.연구 방법

모델 구성 직육면체 계산 영역에 표피 진피 피하층 동맥 혈액을 포함한다. 두께 예시는 표피 0.1–0.2 mm 진피 1.5–2.5 mm 피하층 2–4 mm 동맥 외경 2–3 mm 혈관벽 0.3–0.5 mm 혈액 내경 1.5–2.4 mm를 사용한다. 유전율과 도전도는 주파수 종속 값을 적용한다. 혈액은 도전도가 높고 유전율이 큰 매질로 설정한다. 전극은 PI 기판 상 구리 패턴으로 폭

2–4 mm 길이 8–12 mm 간격 6–12 mm 범위의 현실적 치수를 적용한다. 전극과 피부 사이 접촉층은 얇은 저도전성 층으로 근사해 접촉 임피던스의 1차 효과를 반영한다.

경계 조건 계산 영역 외곽은 복사경계로 설정한다. Z 방향으로는 충분한 패딩을 두고 X Y 방향은 전극 간격 대비 5배 이상 여유를 둔다. 여기 전원은 전류 포트로 모델링하고 단위 전력 1 W 혹은 단위 전류 1 A 조건에서 정규화한다. 메시는 전극 모서리 혈관 경계 얇은 층에 국소 적응 세분화를 적용한다. 수렴 기준은 S 매개변수 변화 0.02 이하 혹은 전계 에너지 변화 1 퍼센트 이하로 설정한다.

주파수 스윕 1 kHz 5 kHz 10 kHz 50 kHz에서 정준 해석을 수행한다. 각 주파수에서 전계 분포와 전류 밀도를 추출하고 혈관 ROI 평균 전계 Evasc와 전체 경로 평균 Epath를 구해 VSI는 Evasc 나누기 Epath로 정의한다. 신호 모델은 4전극 임피던스 Zmeas 등가 모델로 취급한다 (그림 1).

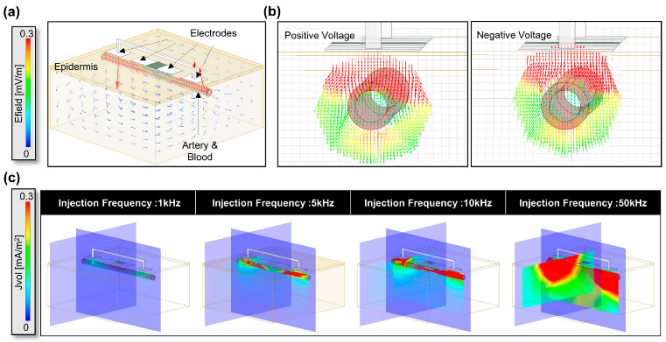


그림 1. 다중 타깃 바이오임피던스 디바이스의 HFSS 전기 시뮬레이션 결과. (a) 전류 주입 시 전계 분포가 표시된 전극 및 조직층(표피, 진피, 동맥, 혈액)을 포함한 HFSS 시뮬레이션 모델. (b) 전류 주입 시 동맥 내부로 전계가 전파되는 단면도. (c) 서로 다른 주입 주파수(1 kHz, 5 kHz, 10 kHz, 50 kHz)에서의 전류 흐름 비교.

정렬 오차는 주입 전극 회전각 α와 검출 전극 회전각 β의 조합으로 스윕한다. α 0–60도 β 0–90도 범위에서 Aαβ를 기준 상태 대비 백분율로 계산한다 (그림 2 [1]). 반감점 기반 허용오차는 Aαβ가 50 퍼센트 이상 유지되는 최대 조합을 집합으로 정의한다. 모든 데이터는 동일 정규화 조건에서 비교한다.

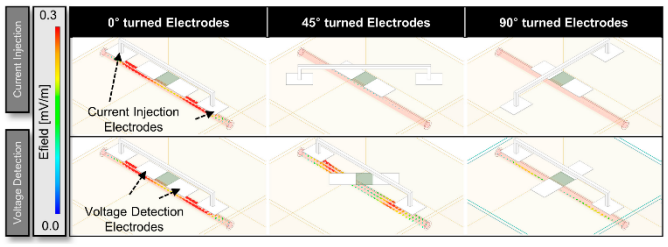


그림 2. 전극 배열 각도(0°, 45°, 90°)에 따른 HFSS 시뮬레이션으로, 구성에 따른 출력 변화를 평가함.

3. 연구 결과

주파수 효과 1 kHz에서는 전류가 표피와 진피를 따라 넓게 분포해 혈관 대비 콘트라스트가 낮았다. 5 kHz에서는 진피 하부까지 침투가 증가하지만 배경 기여가 여전히 크다. 50 kHz에서는 용량성 경로가 지배적이 되어 피하층으로 과도 침투하며 비혈관 신호 성분이 증가한다. 10 kHz에서는 혈관 주변에 전류가 상대적으로 집중되고 배경 분포가 억제되어 VSI가 최대를 기록했다. 이 대역은 전류 집중과 침투 억제의 균형이 확보되어 혈관 감도가 높다. 주파수별 VSI 막대그래프는 그림 2에 제시한다.

정렬 허용오차 기준 정렬에서의 진폭을 100 퍼센트로 정규화했을 때 주입 전극만 0–50도 회전 시 30도 부근까지는 완만한 감소를 보였고 50도를 넘으면 급격한 감쇠가 나타났다. 검출 전극만 0–90도 회전 시 40도까지는 50–70 퍼센트 범위를 유지했다. 두 전극을 함께 틀 경우 허용 영역은 좁아지지만 α 20도 β 40도 조합까지는 50 퍼센트 이상의 진폭이 유지되어 착용 편차에 대한 내성이 확인되었다. 정렬 민감도 곡선과 허용 영역은 그림 3 [1]에 나타낸다.

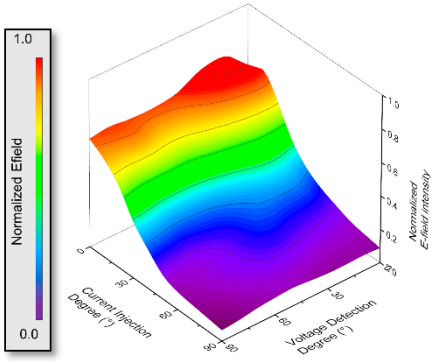


그림 3. 전극 정렬 오차에 따른 정규화된 전기장 세기 비교.

설계 지침 최적 주파수 후보는 10 kHz이며 저주파의 접촉 영향과 고주파의 비혈관 침투를 동시에 회피한다. 권장 정렬 공차는 주입 전극 ±20도 검출 전극 ±40도 수준이다. 전극 간격과 폭을 늘리면 민감도는 증가하나 국부화가 약해질 수 있으므로 간격 8–10 mm 폭 3–4 mm가 균형적이다. 접촉층 임피던스 변동이 큰 환경에서는 5–15 kHz 범위에서 보정 스윕을 권장한다. 본 결과는 주파수 선택과 기하학 설계를 정량적으로 연결하며 웨어러블 및 이식형 혈관 모니터링 장치의 초기 파라미터 설정에 바로 적용 가능하다.

4. Acknowledgements

본 연구는 홍익대학교 세종RISE사업단의 후원을 받아서 진행되었습니다.

5.참고 문헌

[1] H. Sungcheol, and C. Gerard. "Development of a Tetherless Bioimpedance Device That Uses Morphologic Changes to Predict Blood Flow Restrictions Mimicking Peripheral Artery Disease Progression" *Biosensors* 14, no. 6: 286,2024

Poster Presentation
생체계측

Poster-052

홀로그램 거울 치료 기반 뇌졸중 환자의 뇌파 재활 반응 분석

계슬아[1], 김수복[1], 장상훈[2], 이언석[13*]

순천향대학교 일반대학원 소프트웨어융합학과[1]

국립한국교통대학교 물리치료학과[2]

순천향대학교 의료IT공학과[3]

EEG-Based Rehabilitation Response Analysis in Stroke Patients Using Hologram Mirror Therapy

Seula Kye[1], Subok Kim[1], Sanghun Jang[2], Onseok Lee[13*]

[1]Department of Software Convergence, Graduate School, Soonchunhyang University, Korea

[2]Department of Physical Therapy, College of Health and Life Sciences, Korea National University of Transportation, Korea

[3]Department of Medical IT Engineering, Soonchunhyang University, Korea

[*]leeos@sch.ac.kr

Abstract

Most stroke patients experience hemiplegia, which negatively impacts their daily activities, yet complete functional recovery is rare. This study aimed to investigate whether a holographic mirror therapy system, developed based on previous research, is effective for upper limb rehabilitation in stroke patients. To conduct the study, 8 healthy adults and 4 stroke participants were recruited, and each participant performed an action observation task using a cup. During the 1-minute task, electroencephalography (EEG) data were recorded, and event-related desynchronization/synchronization (ERD/ERS) analyses and task repetition adaptation patterns were examined. The results of this study demonstrated that during task performance in stroke patients, ERD occurred in the beta band in the lesioned brain area, eliciting compensatory neural strategies, which led to neurological patterns distinct from those of healthy participants. These findings not only support the rehabilitation effect of the system but also suggest its potential role as an assessment measure for evaluating stroke severity.

1. 연구 배경

뇌졸중은 전 세계적으로 사망과 장애의 중요 원인으로, 대부분의 뇌졸중 환자는 신체 한쪽이 마비되는 편마비를 경험한다. 특히 상지 기능의 마비는 미세한 운동을 수행할 수 없게 되므로 일상생활을 활동하는 데 큰 어려움을 겪는다 [1]. 따라서 뇌졸중 환자의 일상생활로의 복귀를 위해 상지 기능을 회복하는 재활 치료 방법 개발이 필요하다.

Motor Imagery (MI)는 주어진 행동을 외적인 행동 없이 상상만으로 수행하는 정신적인 과정을 의미하며, Action Observation (AO)는 뇌졸중 등 신경계 환자의 재활 수행 시 동작을 관찰함으로써 미러 신경계를 자극하여 운동 기능을 회복시키는 방법을 의미한다 [2]. 거울치료 (Mirror therapy; MT)는 환자의 비마비측 움직임이 반사되어 나타나는 시각적인 착시를 활용하는 MI 및 AO의 한 형태이나, 대칭적인 움직임으로 인해 재활 동작이 제한된다는 한계가 존재한다 [3].

따라서 이러한 기존 MT의 한계를 극복하고 재활 효과를 향상시키기 위해 선행연구를 통해 새로운 재활 치료 시스템인 Floating Hologram Mirror Therapy (FHMT)를 개발하였으며, 본 연구에서는 뇌졸중 환자에 대한 FHMT의 효과를 조사하고자 하였다.

2. 연구 방법

2.1. Subjects

본 연구는 헬싱키 선언의 윤리적 원칙에 따라, 한국교통대학교 인간대상윤리위원회의 승인을 받아 수행되었다 (KNUT IRB 2023-26). FHMT를 통한 뇌졸중 환자의 재활 효과를 확인하기 위해 건강한 성인 8명 (Control group; CG)과 뇌졸중 환자 8명 (Stroke group; SG)을 모집하였다. 모집된 SG 중, 실험을 위해 마비된 손이 왼쪽인 뇌졸중 환자만을 선별하여 최종 4명의 SG 데이터만 분석에 포함되었다. 실험에 참여한 모든 대상자로부터 실험 전 서면으로 동의를 받은 후 실험을 진행하였다.

2.2. Protocol for FHMT

선행연구에서는 아크릴 반사판을 피라미드 형태로 만든 후, 이를 24인치 모니터 (24MK400H, LG Inc., Korea) 아래에 위치시켰다. 또한, 비마비측인 오른손이 수행하는 과제를 실시간으로 반전시켜 홀로그램으로 출력될 수 있도록 Unity 프로그램과 웹카메라 (HD 20, Joytron Inc., China)를 연동함으로써 FHMT를 구현하였다 [4].

모든 피험자는 일상 생활 활동 중, 컵을 이용한 AO FHMT를 수행하였다. 편안한 자세로 앉아 컵을 들고 앞으로 뻗었다가 돌아오는 과제를 2초마다 반복하였으며, 이때 홀로그램으로 나타나는 왼손을 응시하도록 요청하였다. 따라서, 피험자들은 반전되어 나타나는 홀로그램 상지 동작을 응시하며 재활을 수행하게 되므로, 기존의 MT와 동일한 원리로 재활을 수행할 수 있다.

2.3. EEG data acquisition and analysis

본 연구에서는 QCap-32W (LAXTHA Inc., Korea)을 사용하여 AO 과제를 수행하는 동안 감각운동피질의 즉각적인 활동을 측정하였다. International 10-20 system을 따르는 32개 전극 중, 왼쪽 귓불을 기준 전극으로 설정하고, 1분 동안 C3, Cz, C4 채널의 뇌파 데이터를 측정하였다 (그림 1).

획득한 뇌파 데이터의 전처리 및 분석은 Python 버전 3.10을 사용하여 수행하였다. Sampling rate는 500Hz, 전극 임피던스 신호는 5kΩ로 설정하였으며, 노이즈를 제거하기 위해 0초-10초, 50초-60초 구간을 제외하였다. 위 구간을

제외한 10초-50초의 구간에서, 10-20초 (10초) 동안 가만히 있는 상태를 baseline, 20-50초 (30초) 동안 2초마다 과제를 반복하는 상태를 task로 지정하여 (그림 2), ERD/ERS 분석을 수행하였다.

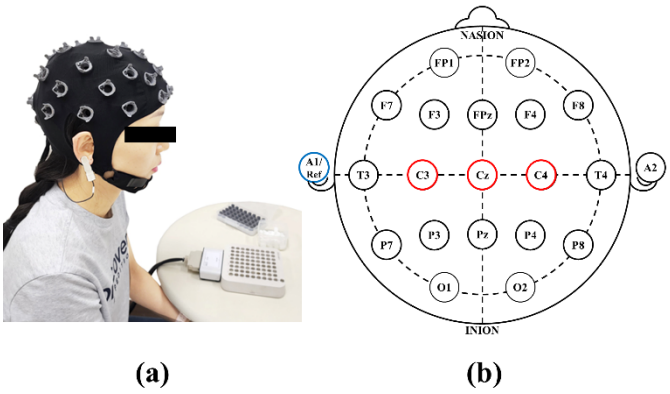


그림 1. 뇌파 측정기; (a) QCap-32W, (b) international 10-20 system에 따른 전극 배치

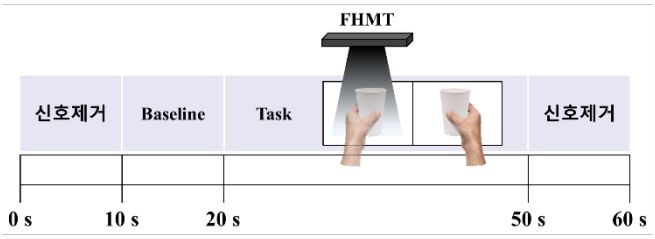


그림 2. 본 연구의 개략도

Task 구간에서 2초 동안 과제를 반복함은 즉, 과제를 15번 반복함을 의미한다. 따라서, 과제를 반복 수행함에 따른 CG 및 SG의 뇌파 활성 반응을 확인하기 위해 15개의 trial로 구분하였으며, trial별 ERD/ERS 분석 및 선형 회귀 기반 trial별 변화 추세 분석 (slope)을 수행하였다. 통계적 유의성은 $p<0.05$로 설정하였다.

3. 연구 결과

본 연구에서는 CG 및 좌측 편마비를 갖는 SG에서 FHMT의 재활 효과를 조사하기 위해 왼손을 담당하는 우측 뇌 반구의 신호를 측정하는 C4채널의 Mu band (8-12Hz), beta band (13-30Hz) 대해 ERD/ERS 분석 및 선형 회귀 기반 적응 패턴에 대한 통계 분석을 수행하였다.

3.1. ERD/ERS 분석 결과

Trial별 ERD/ERS 분석 결과, Mu band의 ERD/ERS 값은 SG 평균 10.2579, CG 평균 -56.1386이었으며, 그룹 간 유의한 차이가 나타났다. CG에서는 뚜렷한 Mu ERD가 관찰되었으나, 환자군에서는 Mu 억제가 거의 나타나지 않았다.

Beta band의 ERD/ERS 값은 SG 평균 -19.4933, CG 평균 -3.4534였으며, 그룹 간 유의한 차이가 나타났다. 특히, SG에서 상대적으로 강한 Beta ERD가 나타났다.

3.2. 적응 패턴 통계 분석 결과

Trial별 ERD/ERS 추세 변화를 선형회귀 기반 slope를 측정함으로써 분석하였다. Slope는 trial이 지남에 따라 ERD가 증가 또는 감소하는지를 의미하며, 음수는 시간이 지남에 따라 ERD가 깊어지는 즉, 뇌가 활성화됨을 의미한다. 본 연구에서 slope 분석 결과, SG는 Mu band에서 -2.5306, beta band에서 0.1683으로 나타났으며, CG는 Mu band에서 -10.6742, beta band에서 -0.4343으로 나타났다. 반복 trial에 따른 적응 효과는 환자군에서 제한적이었으며, 두 그룹 간 통계적 유의성은 없었다.

표 1. C4채널의 Mu, Beta band %ERD/ERS 분석 결과

		Mu band	Beta band
ERD/ERS	Stroke group	10.2579	-19.4933
	Control group	-56.1386	-3.4534
그룹 간 p-value		0.0105	0.0165

표 2. C4채널의 Mu, Beta band 적응 패턴 분석 결과

		Mu band	Beta band
Slope Average	Stroke group	-2.5306	0.1683
	Control group	-10.6742	-0.4343
그룹 간 p-value		0.2828	0.8081

본 연구에서는 C4 채널의 Mu 및 Beta band ERD/ERS 분석을 통해 SG와 CG를 구분할 수 있는 가능성을 확인하였다. SG에서는 정상적인 Mu 억제가 결손되나 beta band의 동원이 관찰되었으며, 이는 FHMT 수행 시 손상된 뇌 병변을 자극하는 과정에서 보상적 신경 전략을 활용하는 양상으로 해석된다. 또한, 이는 FHMT가 SG에서 CG와는 다른 양상의 신경학적 반응을 유발함으로써 재활 효과를 나타낼 수 있음을 보여준다. 그러나, slope 기반 적응 패턴 분석은 그룹 간 차이가 통계적으로 유의하지 않게 나타났는데, 이는 표본 수의 부족에 따른 한계일 가능성이 있다. 따라서, 향후 연구에서는 보다 많은 데이터 획득 및 임상 지표 연계한 분석을 통해 Mu 및 beta band가 환자군 분류 및 재활 단계 평가의 바이오마커로 발전할 수 있는 가능성을 추가적으로 검증할 필요가 있다.

4. 참고 문헌

[1] Kim, H., Kim, J., Jo, S., Lee, K., Kim, J., & Song, C. “Video augmented mirror therapy for upper extremity rehabilitation after stroke: a randomized controlled trial.” *Journal of Neurology*, Vol.270, No.2, p.831-842, 2023.

[2] Eaves, D. L., Hodges, N. J., Buckingham, G., Buccino, G., & Vogt, S. “Enhancing motor imagery practice using synchronous action observation.” *Psychological Research*, Vol.88, No.6, p.1891-1907, 2024.

[3] Rungsirisilp, N., & Wongsawat, Y. “Applying combined action observation and motor imagery to enhance classification performance in a brain–computer interface system for stroke patients.” *IEEE Access*, 10, 73145-73155, 2022.

[4] Kim, S. B., Kye, S. A., & Lee, O. S. “Development of digital mirror therapy for stroke-severe patients.” *In 2023 45th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC)*, p.1-4, IEEE, 2023.

Poster-053

비접촉 생체신호 측정이 가능한 구급대원용 바디캠 개발

박은빈[1] , 이종하[2*,]

주식회사 인셉션랩[1]

계명대학교 의용공학과[2]

Development of Deep Health LifeCam: An AI-Based Contactless Biometric Bodycam System for Emergency Medical Responders

Eunbin Park[1] , Jong-Ha Lee[2]

[1] InceptionLab. Inc., Korea

[2*]School of Biomedical Engineering, Keimyung University, Korea

[*]segeberg@gmail.com

Abstract

Effective on-site response is critical in emergency medical care, but current tools used by paramedics—bodycams, contact-based sensors, and manual data entry are fragmented, resulting in delayed decisions and poor triage accuracy. To overcome these limitations, we developed the Deep Health LifeCam, a wearable AI-integrated bodycam that enables contactless real-time measurement of vital signs including heart rate, respiratory rate, and oxygen saturation using facial video analysis.

The system utilizes remote photoplethysmography (rPPG), facial landmark tracking, and motion correction algorithms, implemented on an edge computing platform for real-time processing without network dependency. It demonstrated high accuracy (≥90%) in controlled and field conditions, including low light and high-motion environments.

Field trials confirmed reduced manual workload (by 60%), enhanced triage reliability, and seamless hospital data sharing. Users reported high satisfaction with usability and safety.

This technology elevates the bodycam into a decision-support platform for paramedics, with potential applications in disaster medicine, infectious disease response, and military operations. The system also holds promise for integration into broader smart healthcare and public safety infrastructures.

1. 연구 배경

응급의료 체계는 환자 생명을 지키기 위한 최전선으로, 출동부터 병원 이송에 이르는 모든 단계에서 신속하고 정확한 의사결정이 핵심이다. 특히, 응급 현장에서 이루어지는 초동 대응은 이후 치료의 방향과 환자의 생존율에 큰 영향을 미치며, 이 과정에서 구급대원의 역할은 절대적이다. 그러나 현재 구급대원이 사용하는 장비는 바디캠(영상 기록용), 생체신호 측정기(접촉식), 태블릿(수기 입력용) 등으로 각각 독립적으로 운영되며, 이로 인해 정보 통합 및 실시간 대응이 어려운 구조적 한계가 존재한다.

실제로 환자의 심박수, 혈압, 산소포화도 등 활력징후는 접촉식 장비로 측정하고, 측정된 정보를 구급대원이 직접 입력해야 하며, 이 과정에서 업무가 지연되거나 정보가 누락되는 사례도 발생한다. 이러한 한계는 중증도 분류 오류(PRE-KTAS 기준), 응급처치 지연, 병원과의 의사소통 단절 등으로 이어져 환자 안전에 위협이 될 수 있다.

이러한 상황에서 최근 주목받는 기술이 바로 영상 기반 비접촉 생체신호 측정 기술이다. 이 기술은 카메라로 촬영한 얼굴이나 피부에서 미세한 색 변화(맥파)를 분석해, 심박수·호흡수·산소포화도 등 생체 정보를 추출하는 방식으로, 센서 접촉이 어려운 상황에서도 안정적인 측정이 가능하다. 특히 remote PPG(rPPG), EVM(영상 증폭), 딥러닝 기반 얼굴 추적 및 모션 보정 알고리즘과 같은 최신 AI 영상처리 기술과 결합되면서, 응급현장에 실질적으로 적용할 수 있을 만큼 성능이 고도화되고 있다.

이에 본 연구는 이러한 기술을 활용해 기존 바디캠을 생체신호 측정 기능을 포함한 지능형 장비로 업그레이드한 '비접촉 생체신호 측정기술이 적용된 구급대원용 바디캠'을 개발하고자 하였다. 이 시스템은 구급대원이 착용한 카메라로 환자를 촬영하는 것만으로 자동으로 생체신호를 감지하고, AI 알고리즘이 이를 실시간 분석하여, 환자의 중증도 상태를 판단하거나 병원 의료진과 공유할 수 있도록 구성되었다.

본 연구의 비접촉 생체신호 측정기술이 적용된 구급대원용 바디캠 시스템은 단순 기록 장비가 아닌 의료 데이터 자동화·AI 분석·실시간 전송·Edge AI 처리 기능을 통합한 차세대 응급의료 대응 장비로, 센서 접촉이 어렵거나 위험한 환경(화재, 감염병, 정신질환자 대응 등)에서도 유용하며, 업무 효율 향상은 물론 구급대원의 안전 확보와 의료 판단의 객관성 향상에도 기여할 수 있다. 나아가 이 기술은 경찰·군·재난 대응 등 다양한 공공안전 분야로 확장 가능하며, 스마트 헬스케어 산업의 미래 인프라 로서도 높은 파급력을 갖는다.

2.연구 방법

본 연구는 구급대원의 응급 대응 역량을 향상시키기 위한 AI 기반 비접촉 생체신호 측정 바디캠 시스템인 '딥헬스라이프캠(Deep Health LifeCam)'을 개발하고, 이를 실제 현장에 적용 가능한 수준으로 구현하는 것을 목적으로 한다.

2.1 비접촉 생체신호 추출 알고리즘

본 시스템의 핵심은 영상 기반 생체신호 추출 알고리즘이다. 본 연구에서는 rPPG(remote Photoplethysmography) 기술을 기반으로, 일반 RGB 카메라 영상에서 환자의 피부색 변화를 감지하여 심박수(HR), 호흡수(RR), 산소포화도(SpO_2), 혈압(BP) 등의 생체신호를

비접촉 방식으로 정량화하는 알고리즘을 개발하였다. 영상 증폭(Eulerian Video Magnification), 주성분 분석(PCA), 독립 성분 분석(ICA) 기법을 융합하여 노이즈를 최소화하고, 의미 있는 생체신호 성분만을 안정적으로 추출하도록 설계하였다.

얼굴 인식에는 YOLOv5 및 MediaPipe 기반의 딥러닝 알고리즘을 활용하였으며, 얼굴의 468개 랜드마크를 실시간으로 검출 및 추적함으로써 측정 대상의 움직임, 자세 변화, 조명 조건 변화에도 안정적인 신호 획득이 가능하도록 구현되었다.

혈압 및 산소포화도는 Lambert-Beer 법칙, 맥파 전파 시간(PTT: Pulse Transit Time) 등을 바탕으로 한 추정 모델을 구성하였고, 기존 rPPG 알고리즘과 통합하여 확장된 생체신호 측정이 가능하도록 하였다.

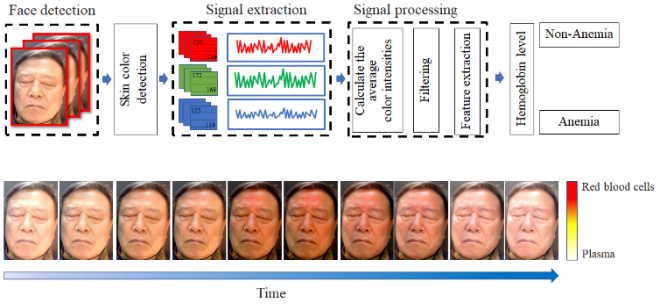


그림 1. 카메라 기반 생체신호 측정 시스템 모식도

2.2 하드웨어 설계 및 시스템 통합

알고리즘이 구현된 소프트웨어는 실시간 분석 성능 확보를 위해 Edge AI 환경에 탑재되었다. 이를 위해 NVIDIA Jetson Xavier NX와 같은 AI 연산이 가능한 임베디드 플랫폼을 채택하고, 알고리즘 경량화를 위해 TensorRT 최적화, ONNX 모델 포맷 변환, FP16 양자화(Quantization)를 수행하였다. 연산속도는 평균 15fps 이상을 유지하며, 실시간 응답성을 확보하였다.

하드웨어는 구급대원의 활동성과 응급 환경의 특성을 고려하여 어깨 장착형(shoulder-mount) 바디캠 형태로 설계되었다. 주요 구성은 고해상도 RGB 카메라(640×480 이상, 시야각 70도), 5G/LTE/Wi-Fi 통신 모듈, 8시간 이상 지속 가능한 리튬 배터리, 디스플레이 및 제어 인터페이스, 방수·방진 설계(IP65 수준) 등이다. 전체 시스템은 인체공학적 착용감을 고려한 하우징 설계와 구급복 일체형 착용 가능성을 염두에 두고 제작되었다.

2.3 데이터 연동 및 사용자 인터페이스

측정된 생체신호는 구급대원용 태블릿 또는 스마트기기로 실시간 시각화되며, 클라우드 서버로 자동 전송된다. 서버는 암호화된 데이터를 저장 및 분석하고, 병원 의료진은 이를 실시간으로 모니터링함으로써 환자 이송 전 응급대응 준비를 완료할 수 있다. 사용자 인터페이스(UI)는 조작성을 최소화하여, 현장에서 버튼 1~2회만으로 자동 측정 및 데이터 전송이 가능하도록 구성되었다. 데이터 전송에는 SSL/TLS 기반 보안 통신, AES-256 기반 저장 암호화가 적용되었고, 역할 기반 접근제어(RBAC) 체계를 통해 의료정보 보안 요건도 충족하였다.

3. 연구 결과

본 연구를 통해 개발된 비접촉 생체신호 측정기술이 적용된 구급대원용 바디캠 시스템은 비접촉 생체신호 측정 기술, Edge AI 기반 실시간 분석, 클라우드 연동 데이터 관리 등의 주요 기능을 통합하여 응급 현장에서의 실용성을 갖춘 지능형 바디캠 시제품으로 구현되었다. 이후 시제품을 기반으로 다양한 환경에서 실증 실험을 수행하였으며, 알고리즘 성능, 연산 속도, 데이터 전송 안정성, 사용 적합성 등을 정량적·정성적으로 평가하였다.

3.1 알고리즘 성능 평가

가장 핵심적인 성능 항목은 비접촉 방식으로 측정된 생체신호의 정확도와 안정성이었다. 고정 조명 환경(실내 500 lux)에서 심박수(HR) 추정 정확도는 ±3.2 bpm, 호흡수(RR)는 ±2.1 bpm 수준으로 측정되었으며, 산소포화도(SpO_2)는 기존 접촉식 맥박산소측정기 대비 91.8%의 상관성을 보였다. 저조도 환경(10 lux 이하)에서도 모션 보정 및 조명 보정 알고리즘의 적용을 통해 HR 오차 ±5.5 bpm, RR 오차 ±3.4 bpm 수준으로 측정이 가능하였으며, 맥파 추출 성공률은 평균 88.6%로 나타났다.

혈압(BP) 추정의 경우 Lambert-Beer 기반 광학 이론과 PTT(맥파 전파 시간)를 활용한 모델을 적용하여, 실험적으로 85.2% 수준의 정확도를 확보하였다. 특히 얼굴 움직임이 있는 환경에서도 Optical Flow 기반 보정 기술이 효과적으로 적용되어, 생체신호의 노이즈 영향을 현저히 감소시켰다.

3.2 시스템 응답성 및 Edge 연산 성능

AI 알고리즘은 NVIDIA Jetson Xavier NX 기반 Edge 컴퓨팅 환경에서 실시간으로 동작하였으며, 평균 처리 속도는 17.5fps로 측정되었다. 영상 분석을 통한 생체신호 추출까지의 지연 시간은 약 0.28초(±0.09초)로, 응급 상황에서 실시간 판단이 가능한 수준의 응답성을 확보하였다. 또한 알고리즘 경량화(QAT, FP16, TensorRT 최적화)를 통해 메모리 사용량을 약 35% 감소시켰으며, 연산 에너지 효율도 개선되어 장시간 배터리 사용에 유리한 조건을 제공하였다. 클라우드 서버와의 데이터 연동은 5G 및 LTE 환경에서 평균 4.6초 이내 전송 지연을 기록하였다.

3.3 기술적 의의 및 비교 분석

기존 바디캠은 영상 기록용 단말에 불과했으며, 생체신호는 별도 기기와 수작업 전송이 필수적이었다. 반면, 딥헬스라이프캠은 비접촉 생체신호 측정, 실시간 분석, 클라우드 전송까지 단일 기기에서 통합 운영이 가능하며, 이를 통해 응급처치 정확도 향상, 이송 우선순위 판단의 자동화등 다방면의 효과를 입증하였다.

4. Acknowledgements

This research was supported by the Regional Innovation System & Education (RISE) program through the Daegu RISE Center, funded by the Ministry of Education (MOE) and Daegu Metropolitan City, Republic of Korea (2025-RISE-03-002), and by the Technology Development Program funded by the Ministry of SMEs and Startups (MSS, Korea) [RS-2025-02311535].

5.참고 문헌

[1] Molinaro, Nunzia, et al. "Contactless vital signs monitoring from videos recorded with digital cameras: An overview." Frontiers in Physiology 13 (2022): 801709.

Poster-054

뇌파 기반의 동물용 마취 심도 모니터링 시스템을 이용한 Isoflurane 마취에서의 마취 심도 평가

문재희[1*], 홍승균[1], 박현[1], 이인배[1], 김광무[1]

(주)브레인유[1]

Evaluation of Anesthetic Depth Under Isoflurane Using an EEG-Based Anesthesia Depth Monitoring System for Animals

Jaehee Moon[1*], Seungkyun Hong[1], Hyun Park[1], Inbae Lee[1], Kwangmu Kim[1]

Brainu.CO.,LTD, Korea

*jaehee@brainu.co.kr

Abstract

With the increasing population of companion animals, the need for advanced and reliable veterinary technologies has grown, especially in the field of anesthesia management. Conventional approaches to assessing anesthetic depth primarily rely on physiological parameters such as heart rate and blood pressure, which may not accurately reflect anesthetic depth under conditions affected by comorbidities or intraoperative medications. To address these challenges, we developed a novel EEG-based anesthesia depth monitoring system adapted from human clinical use. This system employs a non-invasive, liquid-gel-based EEG sensor that enables continuous real-time monitoring without shaving. By providing objective EEG-derived indices, the proposed system enhances the accuracy and safety of anesthesia management in veterinary medicine.

1. 연구 배경

최근 코로나19 팬데믹의 영향과 1~2인 가구의 증가, 그리고 반려 동물을 가족으로 여기는 사회적 인식의 변화로 인해 전 세계적으로 반려 동물 양육 가구가 급격히 증가하고 있다. 한국의 경우 반려 동물 양육 가구의 수는 2024년 기준 전체 가구의 약 28.6%에 달하며 이는 지속적으로 증가하고 있는 추세이다. 이러한 반려 동물 양육 가구의 증가로 반려 동물 의료 기술이 발전하면서 정확하고 안전한 마취 관리의 중요성이 더욱 커지고 있다.

수의학 분야에서 마취 관리(Anesthesia Management)는 외과적 수술, 진단적 시술 등 처치 시 동물의 안전을 보장하고 생리적 스트레스를 최소화하기 위한 필수적인 요소이며 이러한 마취 관리가 제대로 되지 않을 경우 수술 중 사망사고로 이어질 수 있다. 따라서 안정적이고 정량적인 마취 심도 모니터링 시스템을 통해 개별 동물 환자의 생리적 상태를 정밀하게 살펴볼 필요가 있다.

현재 임상 수의학에서 사용하는 마취 심도 평가는 주로 심박수(Heart Rate), 혈압(Blood Pressure), 호흡수(Respiratory Rate) 등 생리적 지표와 안검 반사를 통한 신체 반사에 의존하고 있다. 하지만 이러한 지표는 동물의 기저 질환이나 수술 중 사용하는 약물 등에 의해 영향을 받을 수 있으므로 동일한 마취 프로토콜을 적용하더라도 의식 수준이나 진통 수준을 객관적으로 비교하기 어렵다는 문제가 있다.

인간 마취 분야에서는 뇌파(EEG)기반의 BIS(Bispectral Index)나 엔트로피 지표를 활용해 마취 심도를 정량적으로 평가하는 기술이 사용되고 있으며[1] 이를 임상에서 활용하여 마취 약물 투여를 정밀하게 제어할 수 있고 회복 시간을 단축하는 성과를 거두고 있다. 반면 동물 마취 분야에서는 뇌파를 이용한 마취 심도 평가 연구가 제한적으로 진행되어 왔으며 인간 대상의 마취 심도 측정기를 동물에 그대로 적용하여 바늘과 같은 침습적인 방법 또는 제모를 이용한 데이터 수집 방법[2]을 이용했다. 이러한 기존 연구는 동물의 해부학적, 생리학적 구조의 다양성을 고려하지 않아 기술적, 실용적 한계가 존재한다.

따라서 본 연구에서는 비침습, 비제모 방식의 뇌파 기반 동물용 마취 심도 모니터링 시스템을 설계하여 실제 임상 환경에서의 적용 가능성과 유효성을 검증하기 위해 6마리 비글견을 대상으로 흡입 마취제인 이소플루란(Isoflurane)을 이용하여 실험을 진행하였다. 이소플루란의 농도를 1.0%에서 3.0%까지 단계적으로 높여가며 마취 농도에 따른 뇌파 및 생체 신호의 변화를 관찰하는 실험을 진행한 결과, 마취 농도와 생체 신호가 본 연구에서 개발한 마취 심도 모니터링을 통한 마취 심도 지수와 선형 관계가 있는 것을 확인했다.

2. 연구 방법

본 연구는 HLB바이오스텝의 동물 실험 윤리 위원회(IACUC)의 정식 승인(승인 번호: S25-DM-0477, S25-DM-0498)을 받아 윤리 규정을 준수하여 수행했다. 실험에는 11~13개월령의 수컷 비글견 6마리를 사용했으며 모든 개체는 실험 전 신체 검사를 통해 임상적으로 건강함을 확인했고 연구 기간 동안 표준 사육 환경에서 관리했다.

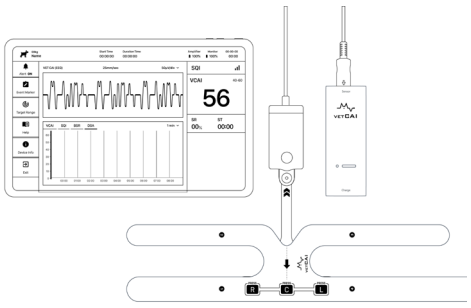


그림1. 동물용 마취 심도 모니터링 시스템 구성

뇌파 기반의 동물용 마취 심도 모니터링 시스템은 그림 1과 같이 구성되어있으며, 액상으로 된 겔을 이용한 1채널 뇌파 측정 센서를 이용하여 비침습적인 방법으로 동물의

정수리 부분에 부착 후 뇌파를 수집한다. 마취 심도 알고리즘을 연산하기위해 수집한 뇌파 신호를 디지털 신호로 증폭하여 변환하고 모니터 장치로 송신하여 뇌파의 특성을 고려하여 회귀 분석을 통해 선별된 여러 특징을 활용, 마취의 깊이에 따라 0~100사이의 값을 갖는 정량 수치로 변환한다. 정량 수치에서 99~80은 각성, 80~60은 진정 상태, 60~40은 전신 마취, 그리고 40이하는 과마취로 구분한다.

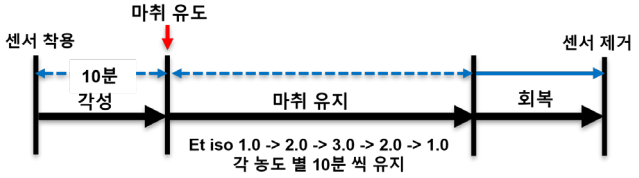


그림 2. 실험 프로토콜

그림 2는 본 실험의 프로토콜로, 마취 유도 전 각성 상태에서 동물용 마취 심도 측정 센서(VET CAI, (주)브레인유, 대한민국)를 장비의 가이드라인에 따라 그림 3와 같이 비글견의 정수리 부분(C3, C4)에 부착하고 각성 상태에서 10분간 유지 후 마취 유도를 위해 알팍살론(Alfaxalone, Algaxan Multidose, Cymedica社) 3mg을 정맥(IV)으로 투여했다. 마취 유도 후 비글견의 자세를 엎드린 자세로 변경하였다. 마취 유도 후 즉시 기간 내 삽관을 실시하고 호흡 마취 시스템에 연결하여 산소와 함께 이소플루란(Isoflurane, Terrell Isoflurane, Piramal社)을 공급하며 마취 상태를 유지하도록 했다.

마취 심도 변화를 관찰하기 위해 이소플루란의 호기말 농도(End-tidal Isoflurane Concentration, Et Iso)를 기준으로 얕은 마취에서 부터 깊은 마취인 1.0%, 2.0%. 3.0%으로 단계적으로 조절했다. 각 목표 농도에 도달한 후 생체 신호가 안정화되는 10분 동안 해당 농도를 유지하며 뇌파 데이터와 생체 신호를 측정했다. 마찬가지로 깊은 마취 단계인 3.0% 도달 후 다시 마취 농도를 낮추어 3.0%, 2.0%, 1.0% 순서로 얕은 마취에서의 데이터 또한 측정했다.



그림 3. 동물용 마취 심도 측정 센서 부착 모습

3. 연구 결과

그림 4는 본 연구에서 수집한 6개 case의 마취 농도와 그에 따른 마취 심도 판별 지수(VET CAI 지수) 변화를 나타낸 것으로, 얕은 마취 구간(Et Iso 1%)에서 깊은 마취 구간 (Et Iso 3%)까지 마취 농도가 높아질수록 마취 심도 판별 지수가 감소하는 경향을 보였다. 반대로 마취 농도가 3.0%에서 1.0%로 낮아질수록 지수가 증가하는 경향을 보였다.

그림 5는 본 연구에서 수집한 6개 case의 마취 농도와 그에 따른 평균 혈압의 변화를 나타낸 것으로, 얕은 마취 구간(Et Iso 1%)에서 깊은 마취 구간 (Et Iso 3%)까지 마취 농도가 높아질수록 평균 혈압이 감소하는 경향을 보였다. 반대로 마취 농도가 3.0%에서 1.0%로 낮아질수록 평균 혈압이 증가하는 경향을 보였다.

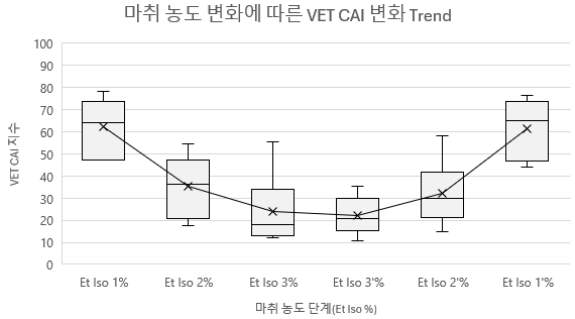


그림 4. 마취 농도 변화에 따른 마취 심도 판별 지수의 변화

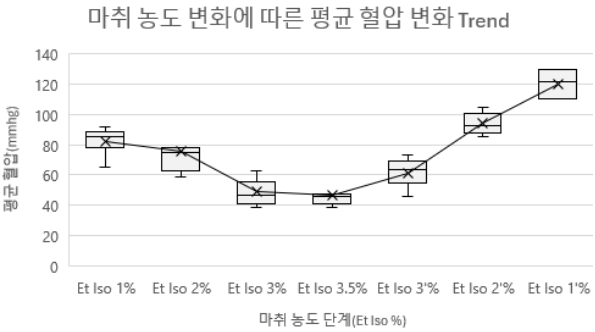


그림 5. 마취 농도 변화에 따른 평균 혈압의 변화

실험 결과, 이소플루란의 농도가 높아질수록(마취가 깊어질수록) 뇌파 기반 마취 심도 지수와 평균 혈압이 모두 일관되게 낮아지는 경향(상관계수 -0.8)을 보였다. 이는 뇌파를 이용한 마취 심도 평가가 혈압을 이용한 기존의 마취 심도 판단 방식만큼 신뢰할 수 있으며, 뇌파 기반의 마취 심도 모니터링 시스템으로 동물의 마취 상태를 판단할 수 있다는 것을 의미한다. 본 연구는 동물의 마취 관리 분야에서 뇌파 기반 모니터링 시스템의 유효성을 입증했으며 이 시스템을 통해 앞으로 반려 동물이 더 안전하고 정밀한 마취 관리를 받을 수 있는 기반이 마련되었다는 점에서 큰 의의를 가진다.

4. Acknowledgements

이 논문은 2025년도 과학기술정보통신부의 '미래선도연구장비핵심기술개발, 한계 극복 측정용 뇌파 분석 핵심기술 개발 (RS-2022-CP000140)'과 2025년도 농림축산식품부의 공공기술 사업화 촉진, 뇌파 기반 동물용 마취심도 의료기기 및 멘탈 헬스케어 개발 (RS-2024-00400855)의 지원을 받아 연구되었음.

5.참고 문헌

[1] H. Huh, S. H. Park, J. H. Yu et al., “Quantifying the depth of anesthesia based on brain activity signal modeling.” *Medicine(Baltimore)*, Vol 99, No. 5, 2020

[2] J. C. Ko, C. Murillo, A. B. Weil, M. Kreuzer, and G. E. Moore, “Electroencephalographic and Cardiovascular Assessment of Isoflurane-Anesthetized Dogs.” *Vetinary Sciences,* Vol 10, No. 10, 2024

Poster-055

미주신경자극술에 의한 동공 변화 검증을 위한 설치류용 동공 계측 알고리즘 개발

조민근[1], 홍성욱[1], 박성민[1,2*]

포항공과대학교 기계공학과[1]

포항공과대학교 IT융합공학과[2]

Development of a Pupillometry Algorithm for Rodents to Validate Pupillary Changes Induced by Vagus Nerve Stimulation

Mingeun Cho[1], Sunguk Hong[1], Sung-Min Park[1,2*]

Department of Mechanical Engineering, Pohang University of Science and Technology (POSTECH), Korea [1]

Department of Convergence IT Engineering, Pohang University of Science and Technology (POSTECH), Korea [2]

Abstract

Pupillometry has been studied as an important indicator of autonomic nervous system activity and arousal state. However, stable pupil measurement algorithms applicable to animal experiments, such as those using rodents, are currently lacking. We developed a real-time pupil tracking algorithm based on a rule-based pipeline that can be implemented in embedded environments and observed pupil responses to both cervical and transcutaneous vagus nerve stimulation. The developed algorithm successfully tracked pupil dilation induced by vagus nerve stimulation, highlighting the potential of pupillometry as a biomarker for optimizing stimulation efficacy.

1. 연구 배경

동공은 자율신경계 활동과 각성 상태를 대표하는 중요한 지표로 연구되어 왔으며, 특히 청반(Locus Coeruleus, LC)과 노르아드레날린성 뉴런들의 활성을 반영하는 지표로 활발히 활용되고 있다. 한편, 미주신경 자극술은 난치성 우울증 치료에 대해 FDA 승인을 받았고, 염증, 간질 등 다양한 질환에 대해서도 연구가 진행되고 있다. 그러나 치료 효과의 최적화 과정이 여전히 환자와 치료자의 주관적 경험에 의존하기 때문에 치료 효능을 객관적으로 평가하고 조절하는 데에는 한계가 존재한다. 따라서 신경 자극의 효과를 확인할 수 있는 생체표지자 (biomarker) 탐색은 신경 조절 시스템의 치료 효율을 높이기 위한 중요한 목표이다. 미주신경 자극술이 청반을 활성화시켜 강력한 동공 확장 반응을 유도한다는 점은 동공 측정법이 신경 조절 효과를 직접적으로 반영할 수 있는 생체표지자로서의 가능성을 제시한다.

동공 측정을 위한 기존의 알고리즘들은 대규모 인간 데이터셋을 기반으로 한 합성곱 신경망(CNN)을 활용하여 높은 정확도를 달성하였으나, 설치류 등 동물 실험에 적용하기에는 주석이 달린 데이터셋의 희소성과 계산 자원의 한계가 문제로 작용한다. 이에 본 연구에서는 임베디드 하드웨어, 소형 적외선 카메라 및 조명을 기반으로 한 저비용 실시간 설치류 동공 측정 알고리즘과 플랫폼을 새롭게 개발하였다. 제안된 알고리즘은 PuReST 기법에서 영감을 받아 적응형 타원 감지와 반사 처리를 통합한 규칙 기반 파이프라인을 적용함으로써, 데이터셋 의존도를 줄이고 설치류 실험에 적합한 환경을 구현하였다 [1].

개발된 알고리즘은 침습적 및 경피적 미주신경 자극술에 모두 적용되어 동공 반응 변화를 성공적으로 관찰할 수 있었다. 이를 통해 동공 측정법이 미주신경 자극 효과를 정량화할 수 있는 수단으로서의 가치를 입증하였으며, 본 연구에서 제안된 알고리즘은 동물 실험 환경에서도 높은 강건성을 보임을 확인하였다. 이러한 결과는 동공 기반 신경 조절 시스템 구축을 위한 토대를 마련하여 `정밀한 신경 조절 치료 최적화에 기여할 수 있는 가능성을 보여준다.

2.연구 방법

동공 추적 알고리즘은 전처리, RGB 기반 마스크 생성, 동공 후보 검출, 그리고 Greedy 기반 동공 추적의 네 가지 주요 과정을 거쳐 동공을 정확하게 검출한다(그림 1A). 먼저, IR 카메라로 촬영된 영상은 전처리 단계에서 Grayscale로 변환된다. 변환된 영상에는 선형 정규화와 Gaussian blur를 적용하여 영상에 포함된 고주파 센서 노이즈를 효과적으로 억제한다. 이후 RGB 기반 마스크를 생성함으로써 IR 조명의 반사광으로 인해 발생할 수 있는 검출 오류를 사전에 방지한다. 다음으로, 동공 후보 검출을 위해 Canny edge detector를 사용하여 경계를 추출한다. 추출된 경계는 Morphological opening 및 Douglas–Peucker 알고리즘으로 후처리 과정을 거친다. 마지막으로, 타원 피팅을 반복적으로 적용하여 신뢰도가 가장 높은 타원을 찾아 최종 동공 위치로 확정하는 Greedy 기반 동공 추적을 수행한다.

개발한 알고리즘의 성능은 인간 대상 알고리즘인 PuReST, EISe, ExCuSe와 비교하여 평가하였다. 각각 인간 동공 데이터와 설치류 동공 데이터를 대상으로 전체 기간 대비 인식 성공률을 산출하여 성능을 검증하였다.

마지막으로 개발한 알고리즘을 활용하여 미주신경 자극술에 대한 동공 반응을 분석하였다. 전극은 경부 미주신경(cervical vagus nerve)과 귀 미주신경(auricular vagus nerve)이 위치한 cymba conchae 부위에 배치하였다. 자극 효과를 확인하기 위해 대퇴부 동맥에 카테터를 삽관하여 혈압을 연속적으로 측정하였다. 자극은 각각 30초간 수행하였으며, 측정된 혈압 및 동공 데이터는 2차 Butterworth 저역통과 필터를 적용한 뒤 1 Hz로 다운샘플링하여 분석하였다.

3. 연구 결과

개발된 알고리즘은 기존 알고리즘들과 비교해 보았을 때 쥐 동공 데이터에서 매우 높은 인식률을 보였다. 특히 탐색 임계치 (detection threshold)를 높였을 때 인식률은

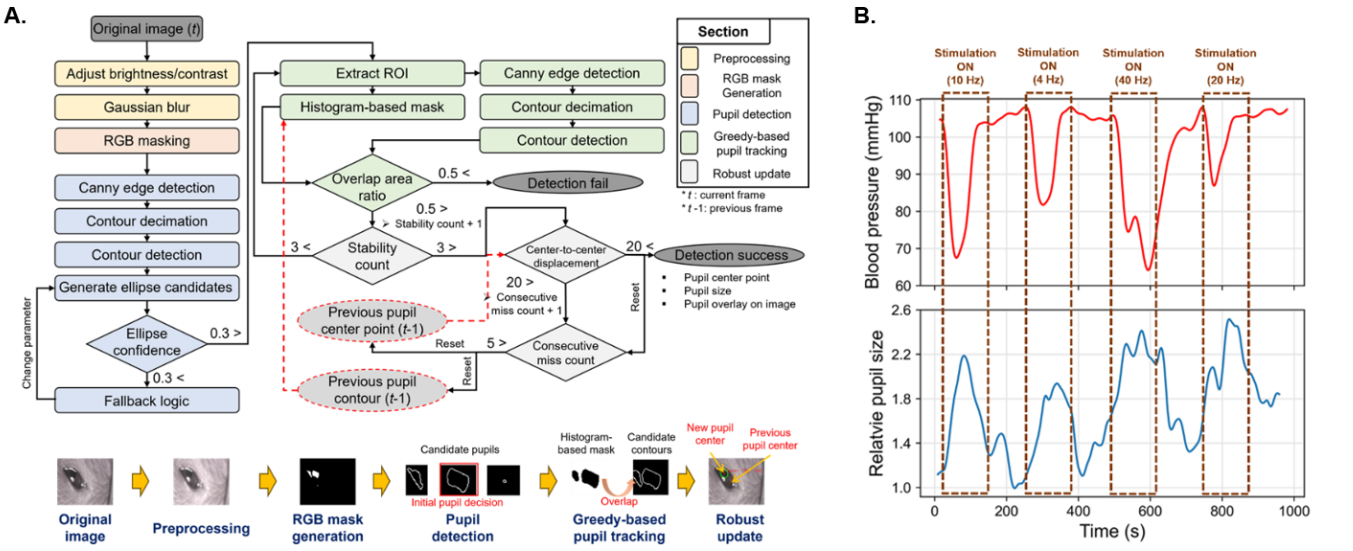


그림 1. A. 설치류용 동공 계측 알고리즘의 전체 개요. B. 경부 미주신경 자극에 의한 혈압 및 동공 변화

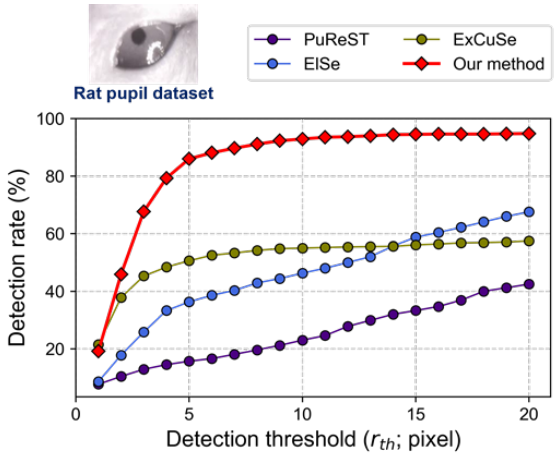


그림 2. 설치류에 대하여 알고리즘 별 동공 인식률.

급격하게 상승하여 타 알고리즘은 70% 미만의 탐지율을 보였으나 본 알고리즘은 최대 94.5%의 정확도를 보였다 (그림 2). 반면 사람 동공 데이터에서는 낮은 인식률을 보여 0%의 정확도를 보였다 (그림 3). 이러한 결과는 쥐와 사람 간의 차이로 인한 한계로 추정되므로 종에 맞는 이미지 처리 방법의 필요성을 강조한다. 한편 개발된 알고리즘은 실행 시 작동 시간이 77.25 ms이었다. 통상 동공 변화를 추적하기 위해서는 3 Hz 이상의 프레임을 요구하므로 요구사항을 충분히 만족함을 확인할 수 있었다.

또한 침습적 미주신경 자극에 대하여 유의미한 동공 변화를 확인하였다. 자극 기간 동안 동공은 기준선 대비 최대 2배 가량 증가한 이후, 시간이 지남에 따라 서서히 감소하였으며, 동공 확장과 유사한 경향성으로 혈압이 감소하는 것을 확인하였다 (그림 1B). 경피적 미주신경 자극 역시 동일하게 자극 기간 동안 점차 증가한 이후 시간이 지남에 따라 감소하였다 (그림 4). 미주신경 자극이 콜린성 경로를 통하여 LC를 활성화하고, 그 결과 동공이 커진다는 기존의 연구 결과들을 고려할 때, 동공 크기는 미주신경 자극의 효과를 정량화하기 위한 지표로 사용될 수 있을 것이다 [2].

정리하면 본 연구에서는 미주신경 자극의 효과로 인한 동공 확장을 확인하기 위하여 설치류를 위한 동공 계측

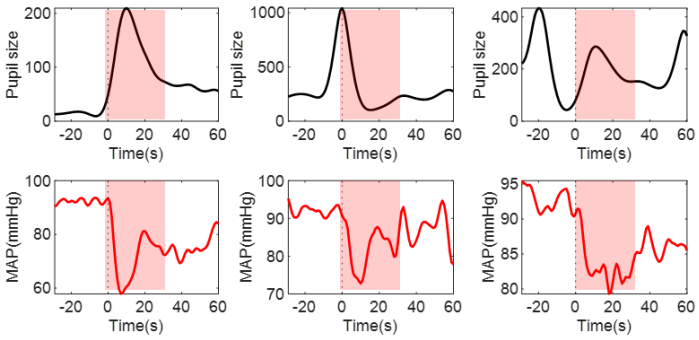


그림 3. 경피적 미주신경 자극에 의한 동공 및 혈압 변화

알고리즘을 개발하였다. 이는 타 알고리즘 대비 높은 탐지율을 보여주었으며, 동공 데이터 처리 과정에서의 종 특이성이 나타났다. 또한 미주신경 자극술은 침습 및 비침습적 자극 모두에서 동공 확장을 유도하였으므로 동공 측정법은 미주신경 자극술의 효과를 확인하기 위한 생체 표지자로 사용될 가능성이 있다.

4. Acknowledgements

- This research was supported by National R&D Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by Ministry of Science and ICT(2021M3H4A1A03049084)
- 본 연구는 2025 포스텍 차세대 융합연구 파이오니어 프로그램의 지원을 받아 수행되었습니다.

5.참고 문헌

[1] T. Santini, W. Fuhl, and E. Kasneci, “PuReST: Robust pupil tracking for real-time pervasive eye tracking,” in Eye Tracking Research and Applications Symposium (ETRA), Association for Computing Machinery, Jun. 2018.

[2] Mridha, Z., de Gee, J.W., Shi, Y. *et al.* Graded recruitment of pupil-linked neuromodulation by parametric stimulation of the vagus nerve. *Nat Commun* **12**, 1539 (2021).

Poster-056

3D scan data 활용한 곡률 분석 및 측정:인체공학적 의료기기 설계를 위한 예비연구

양은선[1], 정인철[1,2*]

한림대학교 뇌혈관질환선도연구센터[1]

한림대학교 정보과학대학 인공지능융합학과[2]

Curvature analysis and measurement using 3D scanning data: A preliminary study for ergonomic medical device design

Eun-Seon Yang[1], In cheol Jeong[1,2*]

Cardiovascular Disease Research Center, Hallym University, Korea[1]

Department of Artificial Intelligence Convergence, Hallym University, Korea[2]

*incheol.jeong@hallym.ac.kr

Abstract

Medical device-related pressure injuries (MDRPI) occur when pressure and friction are concentrated on specific areas due to the tightening of fixation components, which increases adhesion between medical devices and the skin. In particular, the face and neck regions experience significant friction and are the most frequently reported sites of MDRPI. Although several studies have emphasized the need to improve medical device design, no research has yet analyzed curvature as a factor. This study aims to develop a novel approach for accurately measuring curvature and to conduct foundational research to suggest optimized curvature values for preventing facial MDRPI. The proposed methodology utilizes the recently developed artificial intelligence equipped PTC Creo Parametric software to section the plane and measure its curvature, thereby proposing a novel measurement approach. Analysis of 3D scan data from fifty adult women showed that seven points identified as high-risk for MDRPI exhibited low variability, with average radius of curvature (ROC) ranging from 189 mm to 192 mm. These findings suggest that a mean curvature in the low 190 mm range may serve as an optimized reference value for preventing MDRPI.

1. 연구 배경

의료기기 관련 압력 손상 (Medical device-related pressure injuries, MDRPI)은 의료기기 사용 시 발생하는 피부 또는 하부 조직에 가해지는 국소적 손상을 의미하며, 특히 뼈 돌출부와 같은 부위에서 발생 위험이 높은 것으로 알려져 있다[1]. 실제로 산소 마스크 같이 생명 유지를 위한 의료기기 사용이 필수인 중환자실 환자의 경우 일반 환자에 비해 MDRPI 발생이 2.4배 더 높으며[2], 소아 환자를 대상으로 수행된 체계적 고찰 및 메타 분석 연구에 따르면, MDRPI를 가장 많이 유발하는 해부학적 부위는 얼굴이 29.1%로 가장 높음이 확인되었다[3]. 한편, 요양원 장기 입원 환자의 경우에는 뇌혈관 질환자에게서 압박 손상 위험이 가장 높은 것으로 나타났다[4]. 이는 아마도 대표적인 뇌 질환 중 하나인 치매 환자의 경우 통증을 표현이 어려운 점과 관련되어 있을 수 있으며, 실제로 신경퇴행성 뇌 질환과 피부 병변 사이의 상관관계가 높음이 보고된 바 있다[5]. 따라서 의료기기는 이러한 인체 특성을 고려하여 설계될 때 치료 효과를 극대화하고 안전성까지 확보될 수 있다. 대표적인 예로, 지속적 양압 호흡기, 전기 치료 패치 등은 장치가 얼마나 균일하게 밀착되는지가 치료 효과에 반영되고 있다[6]. 이러한 배경을 따라 얼굴과 목을 감싸거나 슬라이딩이 되는 의료기기를 포함한 장치 설계 시 상대적으로 낮은 굴곡 형태의 특성을 고려하는 것은 MDRPI 감소에 효과 적일 것으로 보인다. 일반적으로 안면 측정은 인체에 직접 접촉하는 방식으로 이루어지지만, 이러한 방법은 정밀한 측정에 한계가 있다. 이를 보완하기 위해 최근에는 3D 스캔 기술이 도입되어 복잡한 인체 표면의 부피 측정에 활용되고 있지만 기존의 3D 스캔 방식은 주로 얼굴 길이와 볼륨 측정에 사용되고 있으며, 얼굴의 굴곡을 정밀하게 측정할 수 있는 적절한 방법은 아직 제안되지 않은 실정이다. 이에 본 연구에서는 객체의 특정 구간을 단면으로 절단하여 곡률 반경 (radius of curvature, ROC)을 측정하는 방식을 적용함으로써 데이터 오차를 최소화할 수 있는 새로운 접근법을 제안하고, MDRPI 감소에 기여 가능한 기초 연구를 수행하고자 한다.

2.연구 방법

본 연구는 AI-Hub에서 제공한 3D 스캔 데이터가 사용되었다[7]. 이 데이터는 만 20세에서 59세 사이 연령대를 가진 여성 50명을 대상으로 수집되었으며, 모든 데이터는 익명화 처리되어 개별 참가자를 식별할 수 있는 나이나 특정 생체 정보는 포함되지 않았다. 안면의 구간 설정은 상안부 (upper face), 중안부 (mid face) 그리고 하안부 (lower face) 세 영역으로 나누어 그림 2 (a) 와 같이 주요 영역이 선정되었다. 이를 기준으로 MDRPI가 흔하게 유발되는 7개의 특정 지점으로부터 측정되는 국소 부위의 ROC 값이 일관성 있게 측정되도록 모든 곡률 길이는 현 길이가 25 mm가 고정되었다.

영역별 ROC 측정을 수행하기 위한 7개의 절단 평면을 생성은 다음 단계들로 수행되었다 (그림 1). 먼저, 상안부 A의 측정 영역을 정의하기 위해 눈썹 위 20 mm을 기준으로 평면을 생성하였다. 세 곳의 측정 구간이 지정된 중안부에서는 이전에 생성된 A 측정 평면으로부터 55 mm 떨어진 광대뼈 지점을 B로 정의하였다. 그리고 지점 b는 지점 B 로부터 수평으로 약 25 mm 아래 영역으로 정의하였고, C는 귓바퀴 앞과 목젖 중앙부를 교근과 사선으로 연결한 평면으로 정의되었다. 하안부에서는 두 곳의 측정 구간이 지정되었다. D는 턱 끝과 귓불을 잇는 사선 경로를 따라 구각하제근을 가로지르는 평면으로 정의하였고, 이 평면으로부터 평행하는 사선이자 귀 뒤를 지나 턱 밑을 통과하는 사선 상에 위치한 턱 밑 샘 부위를 E로 정의하였다. 마지막으로 목 부위에서는 목젖이 경추 C3와 C4사이로 추정되는 위치와 평행하게 기울인 다음, 후두를 중심으로 좌우가 30 mm 떨어진 영역을 F로 정의하였다.

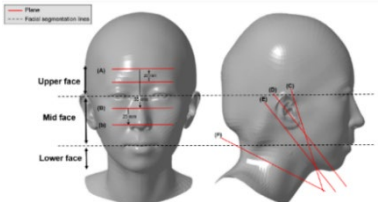


그림 1. ROC 측정 영역 및 평면 설정

ROC 값 수집에는 곡률 산출 기능을 제공하는 Creo Parametric 7.0.8.0 (PTC, Boston, MA)을 통해 생성된 각 호에 대한 ROC 값이 자동으로 산출되었다. 7개의 절단 평면을 생성하기 전, 그림 2와 같이 측정 구간과 별개로 눈썹 위치의 가상 기준선에서 세 개의 점을 사용해 참조 평면을 생성하였다. 베이스 평면이 생성된 후 차례대로 7개의 평면을 평행 이동을 시켜 동일한 절삭 각도를 적용하였다. 생성된 평면들 중 특정 평면을 선택한 다음, 형상을 절단하면 그림 2 (b)와 같이 특정 영역만 남는다. 이후 객체를 90° 회전시켜 나타나는 단면 윤곽에 측정 구간 위로 두 점을 지정하여 호를 생성하였다. 이 때 호의 현 길이는 이전에 설정한 기준에 따라 25 mm가 되도록 조정되었다.

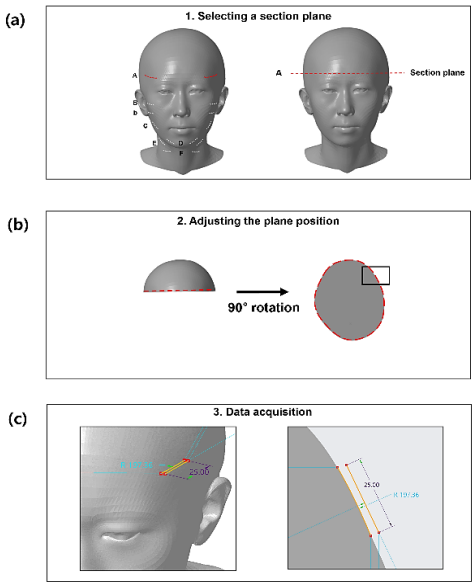


그림 2. (a)측정 영역 및 평면 선택 (b)평면 절단 (c)호 생성

3. 연구 결과

여성 (n=50) 데이터 표본으로부터 얼굴 및 목 부위의 특정 지점 7개 영역에서 ROC 평균 값을 도출한 결과는 다음과 같이 나타났다 (표 1). 상안부의 A 영역은 189.81 mm, 중안부의 B, b, C 영역은 각각 189.17 mm, 192.12 mm, 192.44 mm로 나타났다. 그리고 하안부의 D와 E 영역에서는 192.28 mm, 191.11 mm, 목 영역 F의 평균 ROC 값은 190.72 mm로 나타났다. 모든 영역 (A - F)에서 좌우 ROC 값의 차이는 유의하지 않았으며 ($p>0.05$), 이는 좌우 대칭적 경향을 가진다는 점을 의미한다. 또한 그림 3에서 나타나듯, 모든 영역의 평균 ROC 값은 190 mm을 중심으로 낮은 변동성이 확인되었다.

Facial area		Mean ± SD	Left curvature Mean ± SD	Right curvature Mean ± SD	p
Upper face	A	189.81± 12.15	188.93 ± 13.02	190.69 ± 11.27	0.273
Mid face	B	189.17 ±11.04	189.66 ±13.13	188.68 ± 8.57	0.469
	b	192.12 ± 13.59	190.93 ± 15.39	193.30 ± 11.56	0.282
	C	192.44 ± 10.87	192.44 ± 10.76	191.64 ± 11.07	0.595
Lower face	D	192.28 ± 10.56	192.28 ± 9.62	192.05 ± 11.52	0.871
	E	191.11 ± 10.00	191.11 ± 11.29	189.70 ± 8.57	0.402
Neck	F	190.72 ± 8.67	190.72 ± 9.48	190.71 ± 7.88	0.997

표 1. 얼굴 영역 별 ROC 평균 값 (mm)

연구 결과, 여성의 얼굴 및 목의 ROC 값은 평균 189 mm에서 192 mm 범위로 확인되었다. 그러나 성별과 연령대에 따른 얼굴 형태와 크기 차이가 존재할 수 있다는 점을 감안하여 본 연구에서 사용된 표본 집단에 제한되어 해석될 필요가 있다. 또한, 본 연구를 통해 여성의 얼굴 외곽과 목의 곡률은 이목구비 대비 평평한 수준임이 관찰되었으므로 의료기기 사용 시 마찰과 압력 집중의 위험이 더 크게 나타날 수 있음을 의미한다[8]. 따라서 추후 연구에서는 최적화된 굴곡이 반영된 디자인의 의료기기가 MDRPI 감소에 효과적임을 확인할 수 있는 시뮬레이션 또는 장치가 준비되어야 할 필요가 있다.

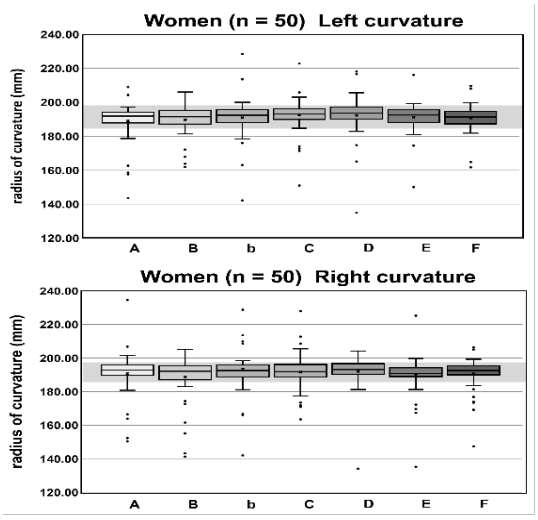


그림 3. 얼굴 좌우의 영역 별 ROC 평균 값 분포 (mm)

4. Acknowledgements

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NR070859). 또한 본 연구는 한국정보화진흥원(NIA)의 인공지능 플랫폼 AI-Hub에서 제공한 "한국인 얼굴 3D 스캐닝 데이터"를 활용하여 수행되었으며 본 데이터는 AI-Hub(aihub.or.kr)에서 다운로드 받을 수 있음을 명시함.

5.참고 문헌

[1] "Resources - National Pressure Ulcer Advisory Panel." Accessed: May 16, 2025. [Online]. Available: https://npiap.com/page/resources

[2] J. M. Black, J. E. Cuddigan, M. A. Walko, L. A. Didier, M. J. Lander, and M. R. Kelpe, "Medical device related pressure ulcers in hospitalized patients," *International Wound Journal*, vol. 7, no. 5, pp. 358–365, 2010, doi: 10.1111/j.1742-481X.2010.00699.x.

[3] E. Şimşek, A. S. Demir, R. Semerci, and A. Karadağ, "The incidence and prevalence of medical device-related pressure injuries in pediatric patients: Systematic review and meta-analysis," *J Pediatr Nurs*, vol. 72, pp. e130–e138, 2023, doi: 10.1016/j.pedn.2023.06.019.

[4] C. Elli, A. Novella, A. Nobili, A. Ianes, and L. Pasina, "Factors Associated with a High-Risk Profile for Developing Pressure Injuries in Long-Term Residents of Nursing Homes," *Med Princ Pract*, vol. 31, no. 5, pp. 433–438, 2022, doi: 10.1159/000527063.

[5] A. L. Clos, R. Kayed, and C. Lasagna Reeves, "Association of Skin with the Pathogenesis and Treatment of Neurodegenerative Amyloidosis," *Front. Neurol.*, vol. 3, Jan. 2012, doi: 10.3389/fneur.2012.00005.

[6] A. Kurz, G. F. Volk, D. Arnold, B. Schneider-Stickler, W. Mayr, and O. Guntinas-Lichius, "Selective Electrical Surface Stimulation to Support Functional Recovery in the Early Phase After Unilateral Acute Facial Nerve or Vocal Fold Paralysis," *Front. Neurol.*, vol. 13, Apr. 2022, doi: 10.3389/fneur.2022.869900.

[7] AI-Hub, "3D scanning data of Korean faces, open ai dataset project (ai-hub, s.korea)," December 2023. [Online; accessed December 2023]

[8] K. S. Jang, M. Bayome, J. H. Park, K.-H. Park, H.-B. Moon, and Y.-A. Kook, "A three-dimensional photogrammetric analysis of the facial esthetics of the Miss Korea pageant contestants," *Korean J Orthod*, vol. 47, no. 2, pp. 87–99, Mar. 2017, doi: 10.4041/kjod.2017.47.2.87.

Poster-057

시간간섭자극에서 전극 배치의 효과: 팬텀 모델 및 시뮬레이션 연구

타텟[1], 김현지[1], 김수혁[1], 전예진[1] 박은경[1*]

순천향대학교 의공학과[1]

Effects of electrode placement on temporal interference stimulation: phantom model and simulation study

Thar Htet Nyan[1], Hyunji Kim[1], Suhyeok Kim[1], Yejin Jeon[1], Eunkyoung Park[1*]

Department of Biomedical Engineering, Soonchunhyang University, Korea

*ek.park@sch.ac.kr

Abstract

Temporal Interference Stimulation (TIS) has recently emerged as a promising noninvasive neuromodulation technique that enables selective targeting of deep neural regions through the interference of high-frequency electric fields with small frequency offsets. Despite strong computational evidence of feasibility, experimental validation remains limited, particularly regarding the impact of electrode placement on spatial interference patterns. In this study, we present a systematic investigation of electrode configurations using both phantom experiments and finite-element simulations. A circular saline phantom was constructed and stimulated with two-pair (2000 Hz & 2010 Hz, 3.1 Vpp) and four-pair (1975–2025 Hz, 2975–3025 Hz) waveforms. Voltages were recorded across a dense probe grid and compared directly with COMSOL Multiphysics models under matched conditions. The results demonstrated strong qualitative agreement between phantom and simulation. Two-pair stimulation generated broad diagonal or cross-shaped envelopes depending on electrode orientation, while four-pair stimulation produced multi-lobed, rotationally symmetric interference fields. These findings confirm that electrode placement is the dominant determinant of TIS field distributions, exceeding frequency choice alone. This study establishes phantom–simulation validation as a robust framework for TIS analysis and underscores the importance of optimized electrode geometry for selective neuromodulation.

1. Background

Noninvasive neuromodulation has emerged as a transformative alternative to pharmacological and surgical interventions, offering therapeutic benefits with fewer systemic side effects and reduced risk of complications. Unlike invasive methods, which often require implanted electrodes or drug delivery devices, noninvasive approaches provide the opportunity for repeatable and adjustable treatments tailored to individual patients. Among these, Temporal Interference Stimulation (TIS) has gained significant attention due to its unique mechanism of generating a low-frequency modulation envelope at depth by overlapping two or more high-frequency carriers. This strategy allows targeting of deeper neural structures without directly stimulating superficial tissues at the carrier frequency, thereby improving selectivity [1, 2].

Despite promising computational work, the translation of TIS into experimental and clinical contexts remains limited. One of the critical challenges is the role of electrode placement, which governs the geometry, focality, and intensity of the interference fields. Small variations in placement can shift the region of maximum modulation or broaden the field distribution, potentially reducing the selectivity of stimulation. Most prior studies have relied heavily on finite-element simulations [3], but direct phantom validation of placement effects has been sparse. Establishing this correspondence between simulation and experiment is essential for moving TIS from theoretical feasibility toward robust preclinical and clinical applications [4].

2. Method

2.1 Experimental Setup

A circular phantom was constructed using a 95 mm PLA container filled with 0.9% NaCl solution (conductivity ≈ 1.7 S/m) to approximate tissue electrical properties. he phantom geometry was designed in Autodesk Inventor and 3D-printed in PLA. Rectangular stimulating electrodes (1 × 2 cm) were attached to the phantom surface. Stimulation was delivered in two modes: (i) two-pair configuration with 2000 Hz and 2010 Hz carriers (3.1 Vpp each), and (ii) four-pair configuration with carrier ranges of 1975–2025 Hz and 2975–3025 Hz. Voltages were recorded across 121 probe points arranged in an 11×11 grid (1.25 mm spacing) using a Keysight DSOX1204G oscilloscope. Recorded waveforms were processed to extract peak-to-peak amplitudes of the modulation envelope.

2.2 Simulation Setup

Equivalent electrode placements were modeled in COMSOL Multiphysics 6.3 using the same geometric and electrical parameters as the phantom. The stimulating electrodes (1 × 2 cm) were represented as boundary voltage sources on the phantom surface. The saline domain was assigned conductivity of 1.7 S/m, and sinusoidal voltage sources were applied at the electrodes. Envelope modulation amplitudes were calculated from the simulated electric potential fields and directly compared with phantom measurements for validation of spatial interference patterns.

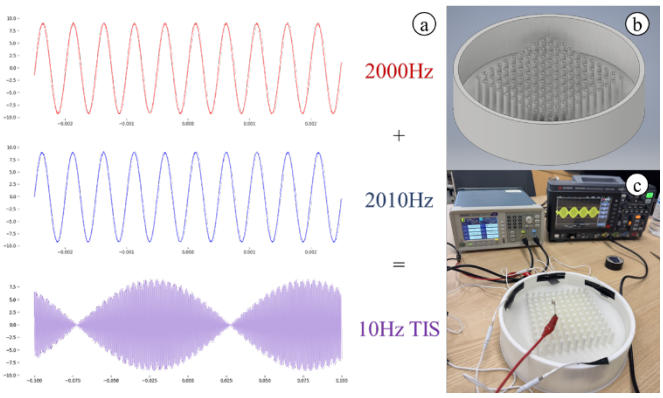


Fig. 1. (a) Principle of Temporal Interference Stimulation (TIS) using 2000 Hz and 2010 Hz carriers to generate a 10 Hz envelope. (b) 3D model of the circular phantom container (c) Experimental phantom setup

3. Result

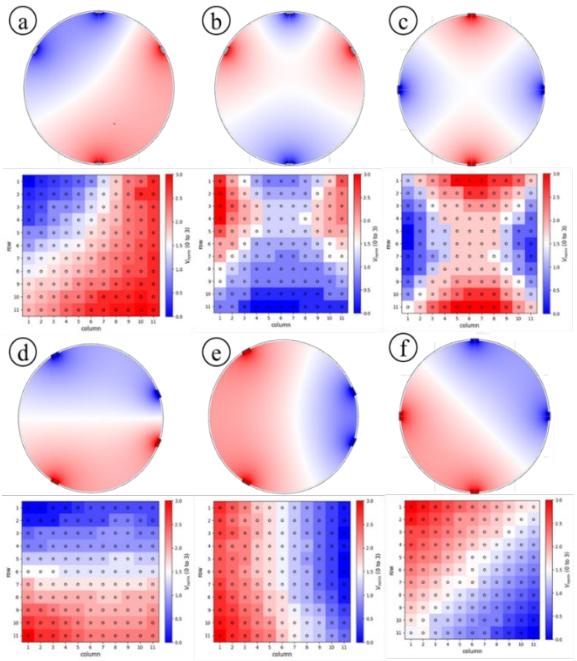


Fig. 2. Interference field distributions with two electrode pairs under different placements. For each case (a–f), COMSOL simulation (top) and experimental phantom measurement (bottom) are shown, demonstrating the influence of electrode orientation on the resulting envelope patterns.

Experimental phantom recordings exhibited strong qualitative agreement with simulation outputs, validating the reliability of finite-element modeling for predicting TIS field distributions. In the two-pair configuration, envelope patterns were highly sensitive to electrode orientation. When electrodes were aligned diagonally, broad gradient fields extended across the phantom, whereas orthogonal placement generated distinct cross-shaped patterns with a more centralized envelope region. These results demonstrate that small changes in electrode positioning can substantially alter the spatial profile of the interference field.

In contrast, the four-pair configuration produced more complex spatial patterns characterized by multiple lobes with partial rotational symmetry. This arrangement provided a wider distribution of interference maxima, suggesting potential for covering larger stimulation regions. However, the increased spatial complexity also reduced focal precision compared to the two-pair setup, indicating a trade-off between selectivity and coverage. Importantly, both phantom measurements and COMSOL simulations consistently reproduced these distinct features, highlighting the predictive power of computational models and confirming the experimental validity of electrode placement effects.

Across all tested placements, electrode geometry was identified as the primary determinant of interference envelope shape and intensity, outweighing the influence of carrier frequency selection. This reinforces the importance of optimized electrode configuration when designing TIS systems for neuromodulation.

4. Discussion

This study systematically evaluated electrode placement effects in Temporal Interference Stimulation by combining phantom experiments with finite-element simulations. Both approaches revealed that electrode geometry is the dominant determinant of interference field distributions, outweighing carrier frequency choice. Two-pair configurations produced more focal and predictable envelopes, whereas four-pair configurations generated broader multi-lobed fields, offering greater coverage but reduced spatial selectivity.

A key limitation of this work is the use of a homogeneous saline phantom, which does not capture the layered conductivity and anisotropy of biological tissues. In addition, only a limited range of electrode separations and orientations was tested. Future studies should expand to anatomically realistic head or pelvic models, incorporate anisotropic tissue conductivities, and explore adaptive electrode arrays for dynamic targeting. Integration with neuronal activation models will also be critical for translating envelope field patterns into predictions of neural response.

In conclusion, phantom–simulation correspondence establishes a robust framework for validating TIS field predictions. Optimized electrode geometry remains the central factor for selective neuromodulation, and multi-pair electrode strategies hold promise for enhancing adaptability in clinical applications.

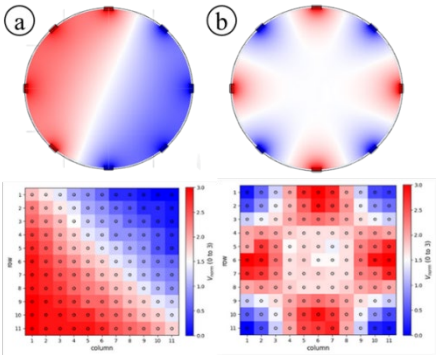


Fig. 3. Interference field patterns with four electrode pairs. (a) COMSOL simulation (top) and experimental phantom measurement (bottom) for diagonal orientation. (b) COMSOL simulation (top) and experimental phantom measurement (bottom) for cross-shaped orientation.

5. Acknowledgement

This work was supported by grants from the National Research Foundation of Korea (NRF), funded by the Korean government (Ministry of Science and ICT, MSIT) (RS-2022-NR070502 and RS-2023-00220534), and from the Korea Health Technology R&D Project through the Korea Health Industry Development Institute (KHIDI), funded by the Ministry of Health and Welfare, Republic of Korea (RS-2025-02273012).

6.Reference

[1] N. Grossman, D. Bono, N. Dedic, S. B. Kodandaramaiah, A. Rudenko, H. Suk, A. M. Cassará, E. Neufeld, L. Kuster, T. Tsai, et al., “Noninvasive deep brain stimulation via temporally interfering electric fields,” Cell, vol. 169, no. 6, pp. 1029–1041, 2017.

[2] E. Mirzakhalili, B. Barra, M. Capogrosso, and S. F. Lempka, “Biophysics of temporal interference stimulation,” Cell Systems, vol. 11, no. 6, pp. 557–572, 2020.

[3] I. R. Violante, K. Alania, A. M. Cassarà, E. Neufeld, J. Grossman, G. A. Mashour, et al., “Non-invasive temporal interference electrical stimulation of the human hippocampus,” Nature Neuroscience, vol. 26, pp. 1101–1112, 2023.

[4] J. Lee, E. Park, W. Kang, Y. Kim, and K. S. Lee, “An efficient noninvasive neuromodulation modality for overactive bladder using time interfering current method,” IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, vol. 28, no. 11, pp. 2410–2418, 2020.

Poster-058

실시간 맥파 감지 및 혈압측정이 가능한 MEMS 공정 기반 정전용량형 압력센서 시스템 개발

정연호[1*], 박재순[1]

한밭대학교 전자공학과[1]

Development of a MEMS-Fabricated Capacitive Pressure Sensor System for Real-Time Pulse Wave Detection and Blood Pressure Measurement.

Yeunho Joung[1*], Jaesoon Park[1]

Department of Electronic Engineering, Hanbat National University, Korea[1]

[*]yhjoung@hanbat.ac.kr

Abstract

In this study, we developed a membrane-deformation-based capacitive pressure sensor capable of detecting the mechanical deformation of the radial artery to measure pulse waves and blood pressure. For stable pulse acquisition at the radial artery, the sensor was integrated into a wristwatch-shaped wearable structure, enabling real-time and continuous blood pressure monitoring.

The pressure sensor was fabricated using a MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) process and operates as a variable capacitor, detecting the mechanical displacement of the skin induced by arterial pulsation as changes in the capacitor gap. To ensure flexibility conforming to skin curvature and biocompatible interaction, the sensor was fabricated on a 200 μm-thick polyimide film substrate. Considering the typical width of the human radial artery (3 mm), the top and bottom electrodes were designed with dimensions of 4 mm × 5 mm. The capacitive sensor was designed with an air gap below 10 μm and a nominal capacitance of approximately 4.34 pF. The polyimide film containing the sensor was fixed onto a 6-inch soda-lime glass substrate and processed through wafer-level MEMS fabrication, followed by CO_2 laser micromachining for singulation. The sensor circuit was configured as an R-C high-pass filter, where a 4 MHz excitation pulse was applied and the resulting DC voltage variation—after passing through a full-bridge rectifier—was measured to monitor real-time pulse waveforms. To enable real-time blood pressure estimation, the acquired pulse wave signals were synchronized with ECG signals measured by a custom-developed ECG module, employing a pulse transit time (PTT)-based method. The estimated blood pressure values were compared with those from a conventional blood pressure monitor to verify the accuracy and reliability of the proposed system.

1. 연구 배경

혈압은 심장의 수축과 이완에 따라 혈관 내를 흐르는 혈액이 혈관벽에 가하는 압력으로, 개인의 생활 패턴, 식습관, 스트레스 수준, 운동 상태 등에 따라 시시각각 변동한다. 따라서 단일 시점의 측정만으로는 정확한 건강 상태를 반영하기 어렵기 때문에 다양한 환경에서 반복적으로 측정하거나, 실시간에 가까운 연속 측정이 가능해야 임상적으로 유의미한 혈압을 파악할 수 있으며, 심혈관 질환의 예방 및 관리에 효과적인 생체신호로 활용될 수 있다.

기존의 혈압 측정 방식은 커프(cuff)를 이용하여 인위적으로 혈관에 압력을 가하고, 혈관의 개폐 시 발생하는 Korotkoff sound를 감지하여 혈압을 추정하는 방식이다. 그러나 이러한 방식은 신체 구조나 의복 착용 상태 등에 따라 다양한 오차가 발생할 수 있으며, 측정 과정에서 사용자에게 통증, 혈관 손상, 피부 발진 등의 부작용이 나타날 수 있다. 또한 커프를 이용한 방식은 연속적 혈압 모니터링이 불가능하다는 한계가 있어, 실시간 혈압 측정이 가능한 비침습적 센서 시스템의 개발 필요성이 대두되고 있다.

최근 여러 연구에서 실시간 혈압 측정을 위한 비침습적 방법이 제안되고 있으며, 그 중에서도 PTT 기반 혈압 측정 방식이 주목받고 있다. PTT 방식은 심장에서 말초 동맥까지의 두 지점 간 혈류 전달 시간을 측정하여 혈압을 추정하는 방법으로, 동맥의 탄성 및 혈관계의 물리적 특성을 수식으로 실시간 분석할 수 있다는 장점을 가진다. 그러나 기존 연구에서는 주로 광용적맥파(Photoplethysmogram, PPG) 센서를 이용해 맥파를 검출하므로, 외부 조명이나 움직임에 의한 광학적 잡음 및 동잡음(Motion artifact)이 발생하여 파형이 왜곡되고, 정확한 신호 검출이 어려운 한계가 있다 [1].

본 연구에서는 PTT 기반의 혈압 측정 방식을 적용하되, 기존의 PPG 센서를 대신하여 MEMS 공정을 통해 제작한 정전용량형(Capacitive) 압력센서를 사용하였다.

이 센서는 혈류가 혈관을 통과할 때 발생하는 피부의 미세한 기계적 변화를 감지하여 이를 전기적 신호로 변환하여 맥파를 검출하도록 설계되었다.

또한 ECG 신호 검출을 위해, '동잡음 저감을 위한 심전도 전극 특성에 대한 연구'에서 개발된 정전용량형(capacitive coupled) 전극 기반의 ECG 측정 장치를 사용하였으며, 두 신호를 동시 측정하여 맥파 분석을 통한 혈압 변환을 수행하였다. [2].

2. 연구 방법

압력센서는 인체 요골동맥의 굵기를 고려하여 Polyimide film(200 um 두께)을 기판위에 가로 4 mm, 세로 5 mm의 금속판이 10 um 이하의 air-gap을 갖는 capacitor 구조로 설계하였으며, 메인보드와 전기적 연결을 위해 제작한 Solder pad가 인체에 닿지 않게 두 커패시터를 직렬로 연결하였다.

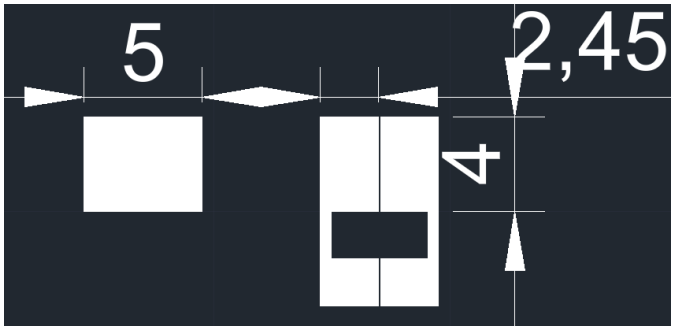


그림 1. 압력센서 제작을 위한 센서 구상 및 설계도

$$C = \varepsilon_0 * \frac{S}{d} = 8.85 * e^{-12} * \frac{2.45 * e^{-3} * 4 * e^{-3}}{10 * e^{-6}} = 8.68\,pF$$

$$C_{total} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = 4.34\,pF$$

제작된 센서는 사용자의 요골동맥 위에 부착되어 맥파의 흐름에 따라 발생하는 기판의 미세한 변형을 감지하며, 이에 따른 정전용량 변화가 발생한다.
이 센서는 회로에 연결되어 고역통과필터(High-pass filter)의 차단 주파수(cut-off frequency) 변화를 유도하고, 그에 따른 출력 전압 변화를 통해 맥파 신호를 검출할 수 있도록 설계되었다.
회로는 MCU(Cortex-M0)에서 발생하는 4 MHz 구형파를 센서단에 인가하고, 이후 신호를 정류 및 증폭하여 출력 전압을 생성하도록 구성되었으며, 최종적으로 ADC를 거쳐 디지털 신호로 변환하여 측정하였다.

Poster-069

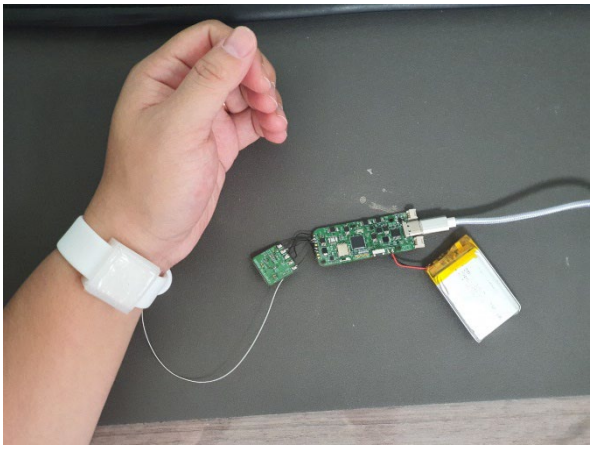


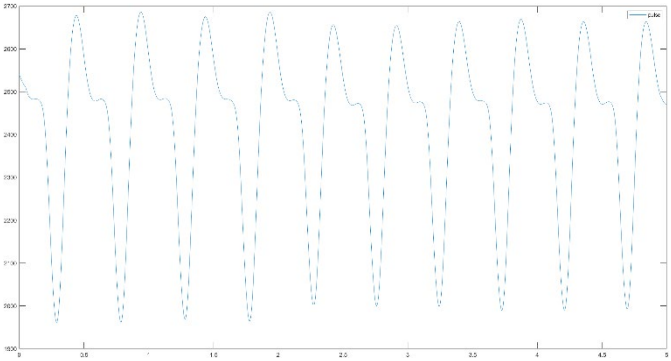
그림 2. 측정 시스템 모습

3. 연구 결과

혈압 측정을 위해 ECG 측정 전극과 압력센서를 각각 착용하여 심전도 신호와 요골동맥의 맥파를 동시에 측정하였다.
획득된 신호로부터 ECG의 R-peak와 맥파의 peak 및 foot 성분을 검출하여, 이를 혈압 추정식의 변수로 사용하였으며 해당 수식은 다음과 같다..

$$\mathrm{BP} = 0.6 \times \left(\frac{\rho}{1.4} \times \frac{h^2}{d^2 * PTT_{p\&f}{}^2} + B \right) \quad [3]$$

ρ : 혈액의 밀도, 1035 kg/m3
d : 심장으로부터 요골동맥까지의 거리
h : 사용자의 키
B : 보정상수



측정된 데이터는 혈압 추정 수식을 통해 계산되었으며, 그 결과 수축기 혈압은 약 113.3 mmHg, 이완기 혈압은 약 75.2 mmHg로 산출되었다.
이는 OMRON사의 상완 커프 혈압계로 측정한 기준 값과 비교했을 때 ±3 mmHg 이내의 오차 범위에 해당하였다.

4. Acknowledgements

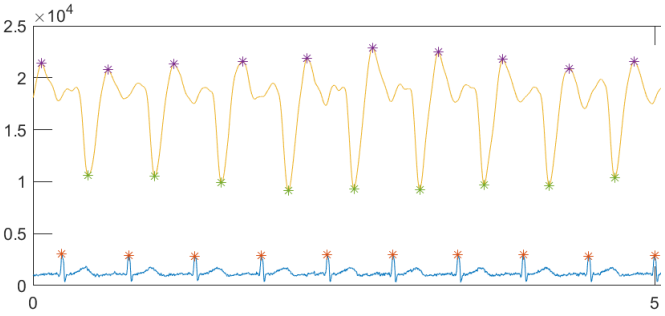


그림 4. 걷기 중 심전도 및 맥파 파형

본 연구는 정부 (산업통상자원부)의 지원을 받아 수행된 연구임. (연구개발과제번호 : RS-2023-00236657, "심혈관질환 진단 및 예측을 위한 체내 삽입형 인공지능 융복합 센서 모듈 기술 개발")

5. 참고 문헌

[1] B. Chavez. *New Developments in Medical Research: Advances in Arterial Stiffness Research*: New York: Nova Science Pub Inc, 2016.
[2] Kang YH, Park JS, Cho BK, Choi SD and Jung YH. "Study on Characteristics of ECG Electrodes for Motion Artifact Reduction. "*J Korean Inst Electr Clectron Mater Eng*, Vol 30, No.6, p366-71, 2017
[3] M. Sharma, K.Barbosa, V. Ho, D. Griggs, R. Ghirmai, S. Krishnan, T. Hsiai, J. Chiao and H. Cao. " Cuff-Less and Continuous Blood Pressure Monitoring: A Methodological Review." *MDPI Technologies,* Vol 5, p21, 2017

Poster-059

흉부 기반 cECG와 PPG 신호 동시 측정을 위한 통합형 웨어러블 센서 개발

정연호[1*], 강영환[1]

한밭대학교 전자공학과[1*]

Development of an Integrated Wearable Sensor for Simultaneous Chest-Based cECG and PPG Measurement

Yeunho Joung[1*], Younghwan Kang[1]

Department of Electronic Engineering, Hanbat National University, Korea[1]

[*]yhjoung@hanbat.ac.kr

Abstract

We present a chest-worn integrated wearable sensor that simultaneously acquires capacitive electrocardiogram (cECG) and photoplethysmogram (PPG) signals at a single location. The device integrates a SiO_2-coated cECG electrode and a centrally embedded PPG module whose optical path is perpendicular to the skin, enhancing signal stability and enabling hardware-level synchronization between ECG and PPG. Human studies were conducted in two stages: (i) derivation of a subject-specific proportional constant R to compensate optical differences between chest and fingertip measurements, and (ii) validation of chest-derived oxygen saturation (SpO_2) against a commercial fingertip oximeter under apnea and recovery. Across all participants, chest-derived SpO_2 responded 13–33 s earlier than the fingertip reference. After temporal alignment, agreement analysis showed RMSE < 2% and |Bias| < 1%. Although the 95% limits of agreement were slightly wider—primarily due to the 1% resolution of the reference oximeter—the results confirm that accurate and synchronized SpO_2 monitoring is feasible at the chest. The proposed platform is promising for continuous, non-invasive cardiovascular monitoring and personalized healthcare.

1. 연구 배경

심혈관 질환은 전 세계 주요 사망 원인으로, 비침습적이고 연속적인 생체신호 모니터링 기술의 필요성이 커지고 있다. ECG와 PPG는 각각 심장의 전기적 활동과 말초 혈류 변화를 반영하며, 두 신호를 결합하면 심박수, 부정맥, 맥파전달시간(PTT) 기반 혈압 추정, 무맥전기활동(PEA) 감지 등 확장된 분석이 가능하다[1]. 그러나 일반적인 측정 방식은 다음과 같은 한계를 가진다. (1) ECG와 PPG를 서로 다른 부위에서 측정하기 때문에, 착용 편의성이 낮고 두 신호 간 시간 정렬이 어렵다. (2) 습식 Ag/AgCl 전극의 낮은 접촉 안정성과 일회성 특성으로 인해, 장시간 반복 사용이 어렵다. (3) PPG가 말초 혈류에 의존하므로, 온도 변화나 혈관 수축, 순환 장애 등 생리적·환경적 요인에 의해 신호 반응이 지연되거나 왜곡될 수 있다. 본 연구에서는 SiO_2 코팅을 적용한 cECG 전극과 PPG 모듈을 일체화한 흉부 부착형 센서를 제안한다. 제안 센서는 한 위치에서 두 신호를 동시에 획득함으로써 외부 환경 및 생리적 요인에 따른 시간 지연을 최소화하고, 흉부 기반 PPG를 통해 말초 환경 요인의 영향을 완화한다. 이를 통해 일상 환경에서도 안정적이고 재현성 있는 심혈관 파라미터 추정이 가능함을 보인다.

2.연구 방법

2.1 센서 구조

본 연구에서 개발한 통합형 웨어러블 센서는 cECG 전극과 PPG 모듈을 단일 구조로 통합하여, 흉부 부착만으로 두 신호를 동시에 측정할 수 있도록 설계하였다. 전극 표면에는 Silicon dioxide(SiO_2) 코팅을 적용하여 반복 사용이 가능하며, 장시간 착용 시 발생할 수 있는 피부 자극을 최소화하였다[2]. Fig. 1에 나타낸 것처럼, 심전도 전극의 중앙에 PPG 센서(LED 광원 및 포토다이오드)를 배치하여 광 경로가 피부에 수직이 되도록 설계하였으며, 이를 통해 광학 신호의 감쇄와 왜곡을 줄이고 PPG 측정의 안정성을 향상시켰다. 더불어 ECG 전극과 PPG 센서를 동일 위치에 배치함으로써, 중앙부 혈류의 빠른 반응을 확보하고, 말초 혈류에서 발생하는 시간

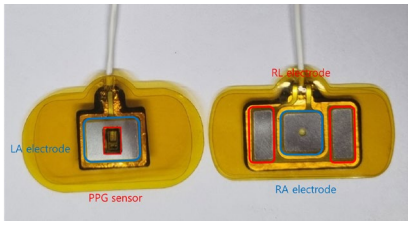


Figure 1. Capacitive ECG electrode integrated with PPG sensor

지연과 외부 요인의 영향을 줄였다. 결과적으로 제안된 구조는 착용 편의성과 신호 일관성을 동시에 확보할 수 있는 통합형 흉부 부착 플랫폼으로, 일상 환경에서도 안정적인 ECG 및 PPG 동시 측정을 가능하게 한다.

2.2 실험 환경

LA 전극과 PPG 센서를 통합한 모듈은 좌측 흉부 상단에 부착하였으며, RA 및 RL 전극은 우측 흉부상단에 부착하였다. 제안된 흉부 부착형 통합 웨어러블 센서의 보정 및 성능 평가를 위해 두 단계의 실험을 수행하였으며, 모든 실험은 성인 피험자를 대상으로 동일한 환경(온도 23–25 °C, 조도 300 lx 이하)에서 진행되었다. 획득된 신호는 실시간으로 수집·기록하였다.

(1) 비례상수 산출 실험:

흉부에서 측정된 PPG 신호와 손가락 기준 PPG 신호 간의 비례상수(proportional constant)를 산출하였다. 이를 위해 정상적인 호흡 상태에서 흉부 센서를 이용하여 ECG 및 PPG 신호를 동시에 측정하고, 손가락에도 동일한 PPG 센서를 부착하여 세 신호(ECG, 흉부 PPG, 손가락 PPG)를 동시에 기록하였다. 획득된 데이터로부터 두 부위 간의 진폭 및 파형 비율을 분석하여, 개인별 광학 특성 차이를 보정하는 비례상수 R을 결정하였다.

(2) 산소포화도 비교 실험:

상용 SpO_2 측정장치를 손가락에 부착하고, 흉부 센서에서 ECG 및 PPG를 동시에 측정하였다. 실험은 총 100초간 수행

되었으며, 0–20 s 구간은 안정 상태, 20–40 s는 의도적 호흡 정지(apnea), 40–100 s는 회복 구간으로 설정하였다. 이후 비례상수를 적용하여 흉부에서 추정된 SpO_2와 상용 기기 측정값을 비교함으로써 센서의 정확도와 실용성을 평가하였다.

2.3 신호 처리

비례상수 산출을 위해 손가락과 흉부에서 동시에 측정된 10 초 구간의 PPG 신호를 추출하였으며, 각 위치의 적색(red) 및 적외선(IR) 채널의 교류(AC) 성분과 직류(DC) 성분의 비를 계산하였으며, 이를 이용해 각 부위의 파장별 흡광 특성 차이를 반영하는 상수 K_{chest}, K_{finger}를 정의하였다.

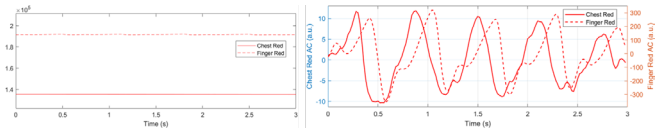
$$K_{chest} = \frac{(AC/DC)_{chest,ir}}{(AC/DC)_{chest,red}}, K_{finger} = \frac{(AC/DC)_{finger,ir}}{(AC/DC)_{finger,red}},$$

Fig.2에는 각 채널의 raw 및 AC coupled PPG신호가 나타나며, 이를 통해 두 부위 간의 DC수준 차이와 AC진폭 비가 확인된다. 이러한 비교를 통해 두 부위간 광학적 경로 및 산란 특성 차이를 보정하기 위한 비례상수 R을 다음과 같이 계산하였다.

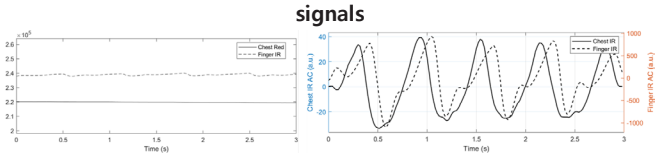
$$R = \frac{K_{finger}}{K_{chest}}$$

이 비례상수를 적용하여 흉부에서 추정된 산소포화도(SpO_2)는 다음의 모델로 계산하였으며, 여기서 a, b, c는 회귀 분석을 통해 구한 계수이다.

$$SpO_2 = (a + (RK_{chest}) + b)(RK_{chest}) + c$$



(a) Red PPG signals: (left) raw signals, and (right) AC-coupled signals



(b) IR PPG signals: (left) raw signals, and (right) AC-coupled signals

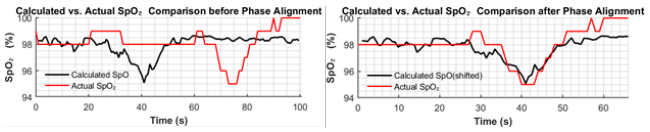
Figure 2. Red- and infrared-channel PPG signals measured at the chest and fingertip for calculating the proportional constant R.

3. 연구 결과

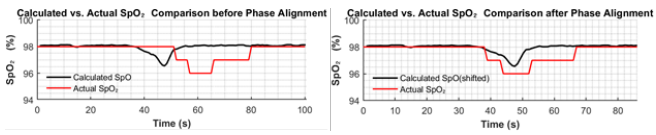
Fig. 3은 세 피험자에 대해 흉부 부착형 센서에서 추정된 SpO_2와 손가락 기준 장비 측정값을 비교한 결과를 보여준다. Fig. 3의 좌측 그래프는 정렬 전, 우측 그래프는 정렬 후 비교 결과이며, 좌측 그래프에서 볼 수 있듯이, 모든 피험자에서 흉부 신호의 SpO_2 하락 및 회복이 손가락 신호보다 선행되었다. 각 피험자별로 흉부 신호는 손가락 대비 33 s, 13 s, 23 s 빠르게 반응하였으며, 이는 심장에 더 가까운 부위에서 산소 포화도 변화가 먼저 반영되기 때문으로 해석된다. Fig. 3의 우측 그래프는 시간 정렬을 통해 두 신호 간 위상을 보정한 결과로, 정렬 후에는 두 파형이 거의 일치함을 확인할 수 있었다.

두 신호 간의 일치도를 정량적으로 평가하기 위해 정렬된 데이터를 이용하여 RMSE (Root Mean Square Error), Bias, SD(d), 95% Limits of Agreement (LoA) 를 계산하였다. RMSE는 전체 오차의 크기를, Bias는 평균 오차를, SD(d)는 차이의 분산을 나타내며, LoA는 $\text{Bias} \pm 1.96\text{SD(d)}$로 계산하였다.

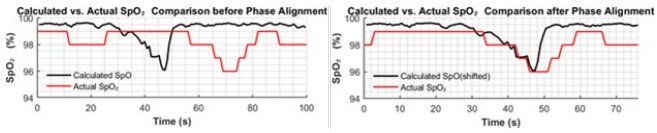
세 피험자의 RMSE는 각각 1.90%, 0.57%, 1.41%로 모두 2%



(a) Subject #1



(b) Subject #2



(c) Subject #3

Figure 3. Comparison of chest- and finger-derived SpO_2 signals for three subjects before and after phase alignment.

이하였고, Bias는 ±1% 이내로 확인되어 두 신호 간 높은 일치도를 보였으며, 이는 제안된 흉부 센서가 손가락 기반 상용 기기와 임상적으로 유의한 수준의 정확도를 가짐을 의미한다. 다만 LoA 값이 실제 생리학적 차이보다 다소 크게 산출된 것은, 본 연구에서 사용한 기준 SpO_2 장비가 1% 단위 해상도(resolution) 를 가지기 때문으로, 이로 인해 quantization error가 발생하여 오차 범위가 과대평가되었을 가능성이 있다.

4. 결론

SiO_2 가 코팅된 cECG 전극과 PPG 모듈을 일체화한 흉부 부착형 센서를 통해, 한 위치에서 ECG와 PPG를 동시 획득하여, 중심부 혈류 변화를 실시간으로 반영할 수 있었다. 무호흡/회복 프로토콜에서 흉부 SpO_2는 손가락 대비 13–33 s 빠른 변화를 보였고, 시간 정렬 후 RMSE < 2%, |Bias| < 1% 의 높은 정량적 일치도를 확인하였다[3]. 제안 플랫폼은 연속·비침습 심혈관 모니터링 및 개인 맞춤형 헬스케어에 유용하며, 향후 더 큰 표본과 다양한 활동/온도 조건에서의 검증, 개인 보정(R)의 자동화 및 무보정화, 혈압/호흡수 등 파라미터 확장 연구가 요구된다.

5. Acknowledgements

본 연구는 정부 (산업통상자원부)의 지원을 받아 수행된 연구임. (연구개발과제번호 : RS-2023-00236657, "심혈관질환 진단 및 예측을 위한 체내 삽입형 인공지능 융복합 센서 모듈 기술 개발")

6.참고 문헌

[1] J. Allen, "Photoplethysmography and its application in clinical physiological measurement," *Physiological Measurement*, Vol. 28, No. 3, pp. R1–R39, 2007.

[2] Y. M. Chi, T. P. Jung, and G. Cauwenberghs, "Dry-contact and noncontact biopotential electrodes: methodological review," *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, Vol. 3, pp. 106–119, 2010.

[3] A. M. Chan, S. M. Ferdosi, and A. Narasimhan, "Enabling continuous wearable reflectance pulse oximetry at the sternum," *Biosensors*, Vol. 11, No. 7, pp. 521–534, 2021.

Poster-060

수면무호흡증 모니터링을 위한 실시간 다중 생체신호 모니터링 장치

정연호[1*], 심형진[1], 김시완[1]

국립한밭대학교 전자공학과[1]

Real-Time Vital signs Monitoring Device for Obstructive Sleep Apnea

Yeunho Joung[1*], Hyoungjin Shim[1], siwan Kim[1]

Department of Electronics Engineering, Hanbat National University, Korea[1]

*yhjoung@hanbat.ac.kr

Abstract

Obstructive Sleep Apnea (OSA), caused by obstruction or collapse of the upper airway, is a prevalent disease affecting 9 to 38 % of adults. It is recognized as a risk factor for systemic hypertension, cardiovascular disease, and stroke, so early diagnosis and management are important. The current standard diagnostic method is night polysomnography, which comprehensively records and classifies electroencephalography, nasal airflow, and oxygen hemoglobin during sleep to diagnose sleep disorders. However, reflecting on the usual sleeping habits is difficult because testing in an environment unfamiliar to the patient causes the first-night effect (FNE). Therefore, in this paper, we propose a wearable measurement system that can check vital signals related to obstructive sleep apnea in a normal sleep environment.

1. 연구 배경

수면무호흡증은 수면호흡장애의 주된 원인으로 상기도의 폐쇄 또는 호흡 노력 감소로 인해 반복적인 호흡 중단이 발생하는 질병이다. 전 세계 성인 인구(18세 이상)에서 9 ~ 38 %의 유병률을 보이고 있으며, 고령 인구에서는 약 2배 이상의 유병률을 보인다[1]. 이는 야간 수면의 질을 저하시켜 집중력 저하 및 주간 만성피로, 인지 기능 장애를 유발한다. 또한 여러 임상 결과에서 전신성 고혈압, 심혈관 질환, 뇌졸중을 야기하는 위험 인자로 인식되고 있으며, 의료 이환율(morbidity)과 사망률(mortality)에 영향을 미치는 주요한 원인으로 인식되고 있어, 이를 조기에 진단하고 관리하는 것이 중요하다[2].

현재 수면 무호흡의 표준 진단 검사로는 야간 수면다원검사(overnight polysomnography)가 있으며, 이는 뇌전도, 안전도, 근전도, 심전도, 호흡 노력, 산소포화도 등을 종합적으로 기록 및 분석하여 수면 무호흡증과 기타 수면 장애를 진단한다. 하지만 이는 익숙하지 않은 검사실 환경에서 많은 측정 장치들을 착용하고 진행되어 환자에게 불편함을 유발하여, 검사를 한 환자 중 48.9 %가 첫날밤 효과(first night effect, FNE)를 일으키는 결과를 보였다[3]. 특히 폐쇄성 수면무호흡증, 과다 수면 장애, 단순 코골이 환자에게서 높은 비율로 FNE가 관찰되어 평소의 수면 습관을 반영하기 힘들다[4].

따라서 본 연구에서는 폐쇄성 수면무호흡증의 증상인 호흡중단과 이로 인한 체내 산소포화도 감소, 교감신경 항진에 의한 심박 불규칙성을 평소의 수면 상태에서 확인할 수 있는 웨어러블 장치을 개발하였으며, 장치는 MEMS 마이크 센서, 심전도 센서, PPG(photoplethysmography) 센서를 포함하여 수면 중 생체신호를 관찰하고 이를 통해 수면무호흡증 발생 시의 생체신호를 감지할 수 있는 알고리즘 개발에 활용하고자 한다.

2.연구 방법

수면무호흡증의 증상 중 반복적인 호흡 중단, 수면 중 각성 상태, 체내 산소포화도 감소를 확인할 수 있는 생체신호 모니터링 장치를 설계하였다. 비강 내부에는 MEMS 마이크로폰이 비강 외부에는 PPG 센서가 위치하는 코걸이 장치와 심전도 전극 및 메인보드가 있는 본체로 구성하였으며, 사용자의 착용 상 불편함을 줄이기 위해 코걸이 장치와 심전도 전극은 유연한 소재로 제작하였다. 각 신호처리 방식은 이동평균 및 구간 내 최대크기변화 등 경량 알고리즘을 활용하여 실시간으로 Vital sign을 출력하였다.

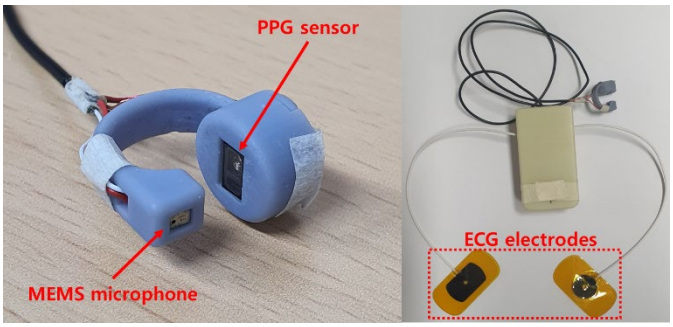


그림 1. 제작한 생체신호 모니터링 장치

호흡 중단을 확인하기 위해 비강 내 호흡 기류를 확인할 수 있는 MEMS 마이크로폰으로 호흡음을 측정하였다. 측정된 호흡음은 포락선과 유사한 형태로 신호처리하여 분당 호흡수를 모니터링하였다.

수면 중 각성 상태는 교감신경계의 활성화로 인해 심박변이도의 상승으로 나타난다. 따라서 이를 확인하기 위해 전극으로 심전도를 측정하여 심박수를 모니터링하였다. 측정을 위한 전극은 접착제를 사용하지 않으며 동잡음에 강인한 특성을 가지는 capacitive coupled electrodes(CCE)를 사용하였다. 심전도에서 가장 큰 크기 변화를 보이는 R-peak를 피크로 신호처리하여 심박수를 모니터링하였다.

체내 산소포화도를 확인하기 위해 반사식 PPG 센서를 사용하여 적색광 및 적외선 맥파를 측정하였다. 각 맥파의 DC 값과 AC 값의 비율을 가지고 산소포화도를 측정하였으며, 오차를 최소화 하기 위해 맥파의 주기를 보다 정확한 심박수와 비교하여 노이즈에 의한 오차 값을 무시하였다.

개발한 생체신호 모니터링 장치의 Vital sign 측정 성능 평가를 위해 Philips 사의 환자 감시장치(Intellivue MX100)와 동시에 착용하고 정확도를 평가하였다. 주저자가 두 장치를 동시에 착용하고 3분 동안 측정하였으며, 환자 감시장치의

출력 결과는 5초 간격으로 기록하여 개발한 장치의 측정결과와 비교하였다. 또한 각 장치로 측정한 Vital sign의 평균 절대오차와 Bland-Altman 그래프의 일치한계 값을 구하여 심박수와 체내 산소포화도, 호흡수를 측정하는 의료기기 가이드라인에서 명시하는 정확도와 비교하여 개발한 장치의 실용성을 확인하였다.

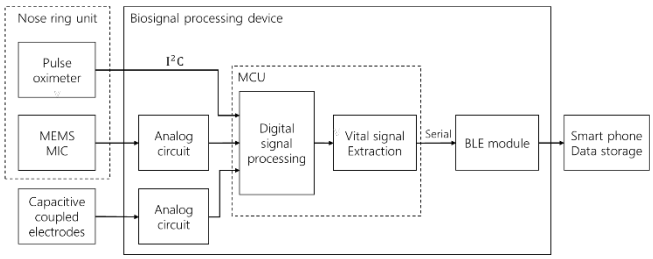


그림 2. 생체신호 모니터링 장치 블록 다이어그램

3. 연구 결과

그림 1의 제작한 다중 생체신호 모니터링 장치를 활용하여 그림 3과 같은 생체신호를 측정 하였다. 그림 3. (a)와 같이 측정된 심전도는 신호처리를 거쳐 QRS-complex 중 R-peak를 두드러진 피크로 표현하였다. 해당 피크 간 샘플 수를 활용하여 심박수와 심박변이도를 측정한다. 그림 3. (b)는 호흡음과 신호처리 결과로, 한 주기의 흡기와 호기를 펄스 파형으로 표현하였으며 이를 활용하여 분당 호흡수를 출력하였다. 그림 3. (c)는 비강 외벽에서 얻어진 IR, RED 맥파로 이를 활용하여 체내 산소포화도를 계산하고, 상대적으로 작게 출력되는 RED 맥파의 주기와 심박수를 비교하여 노이즈에 의한 오차를 최소화 하였다.

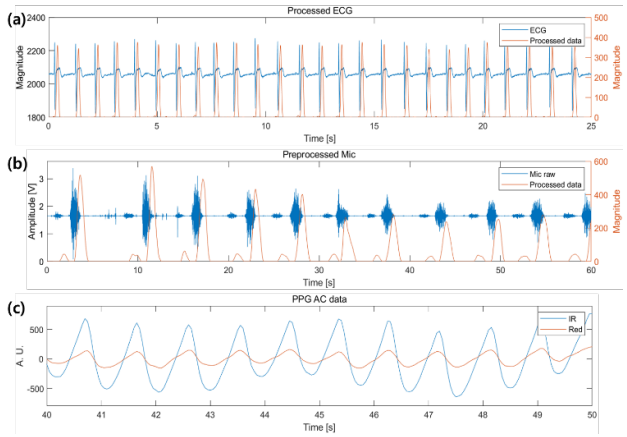


그림 3. 측정한 생체신호 및 신호처리 결과

그림 4.는 주저자의 비교 분석 데이터이고, 그림 5.는 그림 4. 데이터로 그린 Bland-Altman 그래프이다. 그림 4.(a)의 심박수 측정값은 두 장치에서 매우 유사한 추세를 보였으며 평균절대오차 0.9 bpm, 일치한계 상한값 +1.84 bpm 하한값 -2.51 bpm으로 가이드라인에서 명시하는 정확도인 ±3 bpm 이내에 부합하는 결과를 보였다. 체내 산소포화도의 평균절대오차는 0.92 %, 일치한계 상한값 -0.39 % 하한값 -1.45 %로 가이드라인의 정확도인 0.97 %에서 조금 벗어난 일치한계값을 보였으나, 평균절대오차는 정확도 범위에 부합하였다. 분당 호흡수의 평균절대오차는 0.04 bpm, 일치한계 상한값 +1.04 bpm 하한값 -0.99 bpm으로 가이드라인의 정확도인 ±1 bpm 보다 약간 큰 차이를 보였다. 이는 환자 감시장치와 개발한 장치의 측정 방법 차이에 의한 것으로 예상된다. 환자 감시장치는 매 호흡 간 주기를 이용해 분당 호흡수를 산출하는 반면, 개발한 장치에서는 신호처리 결과의 펄스 간격으로 계산한 후 환자 감시장치와의 정합을 위해 보간법을 적용하였다.

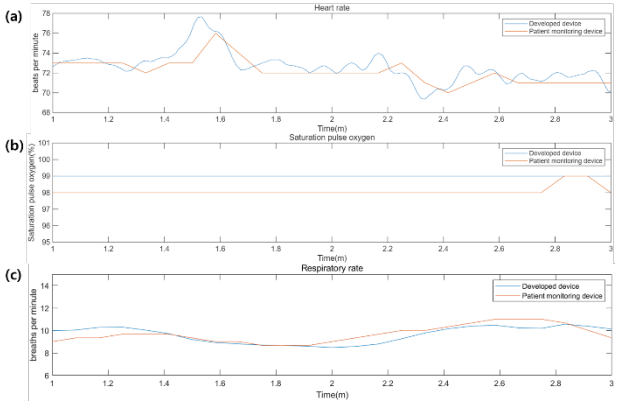


그림 4. 환자 감시장치와 개발한 장치의 Vital sign 비교 결과

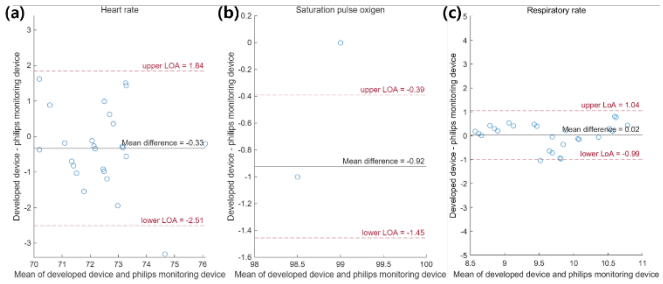


그림 5. 비교 결과의 Bland-Altman 그래프

4. 결론

본 연구에서 개발한 장치는 착용상의 불편함을 최소화 하면서도 선명한 생체신호를 실시간으로 측정하였으며, 의료기기 가이드라인에서 명시하는 정확도와 비교하였을 때 완벽하진 않지만 일부분 부합하는 결과를 보였다. 추후 지속적인 알고리즘 및 장치 개발을 통해 Vital sign의 측정 정확도를 높여, 수면무호흡증 진단을 위한 다중 생체신호 모니터링 장치로써 관련 분야 및 수면 관리 분야에 활용할 수 있을 것으로 예상된다.

5. Acknowledgements

본 연구는 정부 (산업통상자원부)의 지원을 받아 수행된 연구임. (연구개발과제번호 : RS-2023-00236657, "심혈관질환 진단 및 예측을 위한 체내 삽입형 인공지능 융복합 센서 모듈 기술 개발")

6.참고 문헌

[1] Bruyneel M, Ninane V, "Unattended home-based polysomnography for sleep disordered breathing: current concepts and perspectives", *Sleep Med Rev*, 18(4), 341-7, 2014

[2] Punjabi, Naresh M. "The epidemiology of adult obstructive sleep apnea." *Proceedings of the American Thoracic Society*, Vol 5, No.2, p.136-143, 2008

[3] Byun JH. "Patients' Estimates of Sleep Quality During Nocturnal, In-Laboratory Polysomnography: Assessment of the First Night Effect." PhD Thesis, 2018

[4] Jang KH, Kim SJ, Lee SY, & Lee JH. "Sleep Wake Patterns and Nocturnal Sleep Parameters in the Morning and Evening Types." *Journal of Korean Neuropsychiatric Association,* Vol 51, No.4, p.218-224, 2012

Poster-061

멀티모달 EMG–IMU 신호 기반 VR 무자각 생체인증

유다영[1,2], 이형탁[1,2], 김영삼[3], 노종혁[3], 김수형[3], 최두호[4], 황한정[1,2,4*]
고려대학교 전자·정보공학과[1]
고려대학교 인공지능 스마트융합기술 융합전공[2]
한국전자통신연구소 사이버보안연구본부 암호인증기반기술연구실[3]
고려대학교 미래전략산업연구원 디지털헬스케어센터[4]

Implicit Biometrics in Virtual Reality Using Multimodal EMG–IMU Signals

Da-Young Yu[1,2], Hyung-Tak Lee[1,2], Youngsam Kim[3], Jong-hyuk Roh[3], Soohyung Kim[3], Dooho Choi[4], Han-Jeong Hwang[1,2,4*]
[1]Department of Electronics and Information Engineering, Korea University, Korea
[2]Interdisciplinary Graduate Program for Artificial Intelligence Smart Convergence Technology, Korea University, Korea
[3]Cyber Security Research Division, Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI), Korea
[4]Digital Healthcare Center, Sejong Institute of Business and Technology (SIBT), Korea University, Sejong 30019, Republic of Korea
[*]hwanghj@korea.ac.kr

Abstract

This study investigates implicit biometrics in virtual reality (VR) using electromyogram (EMG) and inertial measurement unit (IMU) signals, with a particular focus on practical calibration requirements. Biosignals were collected from 32 participants during VR rhythm gameplay and analyzed using a Subspace Discriminant Classifier. In offline analysis with 5-second windows, the proposed system achieved accuracies of 97.77 ± 3.82 % for human identification and 93.72 ± 5.54 % for human authentication. Furthermore, pseudo-online analysis demonstrated that the combined EMG-IMU modality achieved comparable performance to offline analysis with only about half the calibration data required when using EMG alone. These results demonstrate the feasibility of using multimodal biosignals for seamless and efficient implicit biometrics in VR.

1. 연구 배경

최근 개인용 가상현실(Virtual Reality: VR) 기술의 발전과 헤드 마운티드 디스플레이(Head-Mounted Display) 기기의 대중화로 VR 콘텐츠 접근성이 크게 향상되었다[1, 2]. 그러나 VR 헤드셋은 이메일, 사진, 소셜미디어 계정 등 많은 개인정보를 저장함에도 불구하고, 대부분의 사용자가 1회 잠금 설정만 사용하거나 아예 잠금 설정하지 않는 실정이다[2]. 이는 시각 중심의 VR 환경 특성상 복잡한 인증 절차가 사용자 경험을 저해하기 때문이며, 결과적으로 VR 환경의 보안은 타 모바일 기기에 비해 취약한 상황이다.

현재 VR에서는 개인식별번호(PIN), 패턴 그리기 등 전통적인 명시적(explicit) 인증 방식이 주로 사용되고 있다. 그러나 이러한 방법은 숄더 서핑(shoulder surfing)과 같은 관찰 공격에 취약하다는 한계가 있다[1]. 이를 보완하기 위해 사용자가 인증 행위를 의식하지 않은 상태에서 생체신호로 자연스럽게 신원을 확인하는 무자각(implicit) 인증 방식이 주목받고 있다[3].

근전도(Electromyogram: EMG)와 관성측정장치(Inertial Measurement Unit: IMU)를 활용한 생체신호 기반 인증은 VR 게임 수행 중 자연스럽게 발생하는 손동작에서 개인 고유의 특징을 추출할 수 있어 무자각 인증에 적합하다. 그러나 실용화를 위해서는 초기 설정 단계에서 사용자별 생체신호 특성을 학습하는 보정(calibration) 과정이 필수적이다. 보정 데이터 수가 과도하면 사용자 편의성이 저하되고, 불충분하면 인증 정확도가 낮아진다. 따라서 인증 성능을 유지하면서도 사용자 부담을 줄일 수 있는 최소 보정 데이터 수를 결정하는 것이 중요하다.

이에 본 연구는 EMG와 IMU 신호를 동시에 활용하여 VR 콘텐츠 사용 중 자연스럽게 발생하는 손동작 기반 무자각 사용자 인증 시스템을 개발하고자 한다. 이를 위해 오프라인 분석을 통한 최적 인증 모델을 구축하고, 실제 사용 환경을 모사한 의사 온라인(pseudo-online) 분석을 통해 센서 모달리티별 최소 보정 데이터 수를 제시하고자 한다.

2.연구 방법

근골격계 질환이 없는 건강한 36명의 피험자(남성 21명, 여성 15명)를 대상으로 VR 게임 수행 중 생체신호 데이터를 수집하였다. 피험자들은 Meta Quest 2 VR 헤드셋을 착용하고, 오른팔 전완근에 OYMotion 사의 gForcePro+ EMG armband를 착용하였다. 이 밴드 형태의 무선 멀티모달 생체신호 측정 장비를 통해 8개 채널의 EMG 신호와 9축 IMU 신호를 동시에 수집하였다(그림 1).

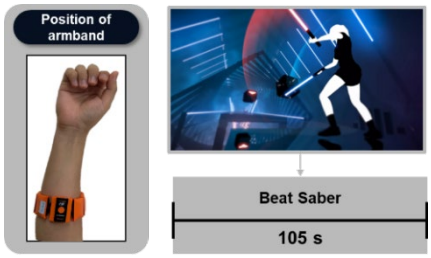


그림 1. (좌) 근전도 및 관성데이터 측정 장비, (우) VR 게임 패러다임

실험은 VR 리듬 게임 'Beat Saber'를 이용하여 진행되었다. 피험자들은 두 손에 컨트롤러를 잡고 'beat saber' 곡(약 105초)을 1회 플레이하였으며, 노래에 맞춰 날아오는 노트를 자르는 방식으로 게임을 수행하였다. 본 연구는 고려대학교 기관생명윤리위원회의 승인을 받아 진행되었다[KUIRB-2023-0238-01].

총 36명 중 게임 길이보다 신호가 짧게 기록된 4명을 제외한 32명의 피험자 데이터가 분석에 활용되었다. 외부 잡음 제거를 위해 8채널의 EMG 신호에는 1–240 Hz, 3축(X, Y, Z)으로 측정된 IMU의 가속도 및 각속도 신호에는 0.1–15

Hz 대역통과필터를 적용하였다. 최적 윈도우 크기를 결정하고자 2, 3, 4, 5초의 네 가지 윈도우 길이를 비교 분석하였으며, 각 윈도우에서 6가지 시계열 특징(root mean square, mean average deviation, variance, zero crossing, waveform length, mean absolute value)을 추출하였다.

EMG와 IMU 신호의 기여도를 분석하고자 추출한 특징을 EMG_IMU (근전도와 관성측정장치 합성), EMG (근전도 단독), IMU (관성측정장치 단독)의 3가지 유형으로 특징 벡터를 생성하였다. 사용자 인증은 부분 공간 판별 (Subspace Discriminant Classifier) 기반 개인 식별(human identification)과 개인 인증(human authentication)의 두 가지 방법으로 수행하였다. 개인 식별은 32명의 피험자를 각각 별도의 클래스로, 개인 인증은 특정 피험자를 하나의 클래스로, 나머지를 별도의 클래스로 할당하여 분류하였다.

모델 성능 평가를 위해 두 가지 분석을 수행하였다. 첫째, 오프라인 분석에서는 5겹 교차검증을 적용하였다. 예를 들어, 105초의 신호를 5초 윈도우로 분할할 경우 총 21개의 윈도우가 생성되며, 각 폴드에서 랜덤한 16–17개의 윈도우를 훈련 데이터로, 4–5개를 테스트 데이터로 사용하였다. 둘째, 실용성 검증을 위한 의사 온라인 분석을 수행하여 최소 보정 데이터 수를 도출하였다. 의사 온라인 분석에서는 실제 사용 환경을 모사하여 게임 초반부터 순차적으로 수집된 데이터를 훈련에 사용하고 이후 데이터로 테스트하는 방식을 적용하였다. 훈련 데이터 개수를 2개(5초 윈도우 기준 10초)부터 20개(100초)까지 증가시키며 인증 성능을 평가하였고, 오프라인 분석 결과와 통계적으로 유의한 차이가 없는 지점을 확인하여 최소 보정 데이터 개수를 분석하였다.

3. 연구 결과

그림 2는 윈도우 크기와 센서 모달리티에 따른 오프라인 사용자 인증 평균 분류 정확도를 나타낸다. 모든 센서 조합에서 윈도우 크기가 증가할수록 정확도가 향상되었으며, 5초 윈도우에서 최고 성능을 달성하였다. 5초 윈도우 기준으로 개인 식별은 EMG_IMU 97.77%, EMG 96.28%, IMU 63.69%의 정확도를 보였으며, 개인 인증은 EMG 93.72%, EMG_IMU 91.95%, IMU 68.49%의 정확도를 도출했다. EMG_IMU와 EMG는 통계적으로 유의한 차이가 없었으나(paired t-test, $p > 0.05$), IMU는 유의하게 낮은 성능을 보였다($p < 0.05$).

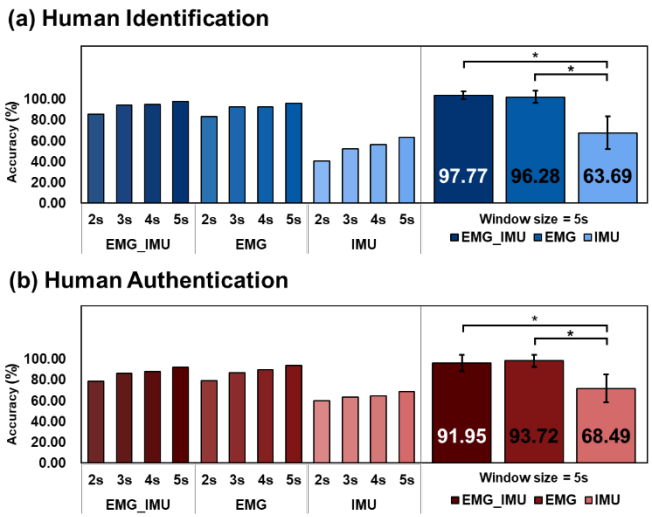


그림 2. 윈도우 크기에 따른 사용자 인증 정확도 변화
(a: 개인 식별, b: 개인 인증, *$p < 0.05$)

그림 3은 의사 온라인 분석을 통한 최소 보정 데이터 수 분석 결과이다. 개인 식별에서 EMG_IMU는 6개(30초), EMG는 11개(55초)부터 오프라인 성능과 통계적 차이가 없었으며(paired t-test, $p > 0.05$), 개인 인증에서는 EMG_IMU가 3개(15초), EMG가 5개(25초)에서 오프라인 성능에 도달하였다. IMU는 개인 식별에서 11개(55초), 개인 인증에서 2개(10초)에 오프라인 성능에 도달하였으며, 개인 식별의 경우 훈련 데이터가 증가할수록 지속적으로 성능이 향상되어 더 많은 보정 데이터가 필요함을 시사한다.

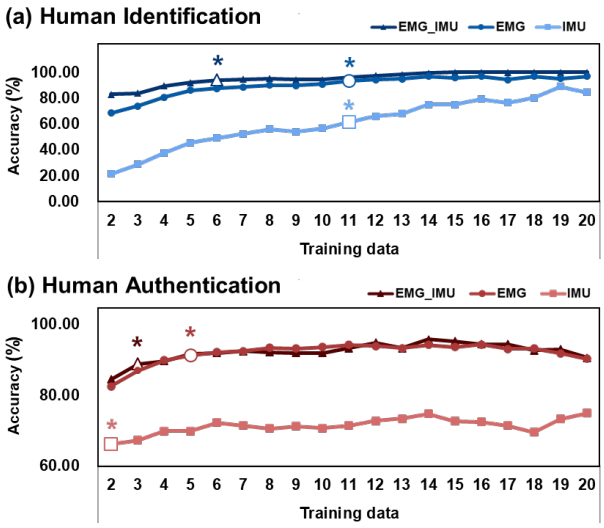


그림 3. 훈련 데이터 개수에 따른 사용자 인증 정확도 변화
(a: 개인 식별, b: 개인 인증, *$p < 0.05$)

오프라인 분석에서는 EMG 단독으로도 EMG_IMU와 유사한 성능을 보여 EMG만으로 충분한 인증이 가능함을 확인하였다. 그러나 의사 온라인 분석 결과, EMG_IMU가 EMG 단독보다 약 2배 적은 보정 데이터로 오프라인 성능에 도달하였다. 이는 IMU가 제공하는 손의 움직임 정보가 초기 보정 단계에서 EMG를 보완하여 학습을 가속화하기 때문으로 판단된다.

본 연구는 VR 리듬게임 수행 중 멀티모달 생체신호를 이용한 무자각 사용자 인증의 실용 가능성을 확인하였으며, 개인 식별 최대 97.77 ± 3.82 %, 개인 인증 최대 93.72 ± 5.54 %의 정확도를 달성하였다. 후속 연구에서는 다양한 딥러닝 모델을 적용하여 사용자 인증 정확도를 향상시킬 예정이다.

4. Acknowledgements

이 연구는 2025년도 산업통상자원비 및 한국산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(RS-2025-02317769)

5.참고 문헌

[1] Mathis, Florian, et al. "Fast and secure authentication in virtual reality using coordinated 3d manipulation and pointing." *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (ToCHI)* 28.1 (2021): 1-44.

[2] Zhang, Yongtuo, et al. "Continuous authentication using eye movement response of implicit visual stimuli." *proceedings of the acm on interactive, mobile, wearable and ubiquitous technologies* 1.4 (2018): 1-22.

[3] Rocha, Rodrigo, Davide Carneiro, and Paulo Novais. "Continuous authentication with a focus on explainability." *Neurocomputing* 423 (2021): 697-702.

A Methodological Protocol for Assessing the Reliability of a Pressure-Sensor-Based Training Program for Korean Medicine Pulse Diagnosis

Seojung Ha[1*]

Department of Acupuncture and Moxibustion Medicine, College of Korean Medicine, Sangji University, Republic of Korea

*sangjiacu2@gmail.com

Abstract

Background: Pulse diagnosis is a cornerstone of diagnostics in Korean Medicine (KM). However, the subjective nature of the pressure applied by practitioners presents a significant challenge to its standardization and reproducibility. This study protocol outlines a method to evaluate the effectiveness of a tactile training program, utilizing a micro-pressure measurement device, to standardize the palpation pressures among clinical KM doctors (KMDs).

Methods/Design: Three experienced KMDs will be recruited for this study. A training protocol using a micro-pressure sensor device will be implemented to train the participants to recognize and replicate three distinct target pressures: 30 gf, 60 gf, and 90 gf, corresponding to the superficial (浮), middle (中), and deep (沈) levels of pulse-taking. Following the training phase, each participant will perform 10 blinded trials to replicate each target pressure. The intra-rater reliability for each KMD will be assessed using the Intraclass Correlation Coefficient (ICC). The inter-rater reliability among the three KMDs will be evaluated using Cohen's Kappa statistic.

Discussion: We hypothesize that this standardized training will result in high levels of both intra- and inter-rater reliability (ICC > 0.8 and Kappa > 0.75). If successful, this protocol could provide a foundational methodology for standardizing the physical component of pulse diagnosis. This would be a critical first step toward developing objective, data-driven diagnostic systems in KM and enhancing the consistency of clinical training and research.

Keywords: Pulse Diagnosis, Reliability, Standardization, Korean Medicine, Pressure Sensor

Poster-063

음파 진동을 이용한 이명 완화 프로토콜 설계를 위한 선행 연구 : 이명 현상 개선을 위한 음파 진동 자극에 의한 주파수 스펙트럼 분석

홍예진[1] , 이용흠[1*]
연세대학교 의공학부[1]

A Pilot Study on the Design of Tinnitus Relief Protocol Using Sound Wave Vibration : Frequency Spectrum Analysis by Sound Wave Vibration Stimulation to Improve Tinnitus

Yejin Hong[1] , Yong-Heum Lee[1*]
Department of Biomedical Engineering, Yonsei University, Wonju, Korea[1]
* koaim@yonsei.ac.kr

Abstract

Tinnitus is a common symptom, some of which are severe enough to have difficulty in daily life, and most of them are accompanied by hearing loss. However, existing methods for improving this have obvious limitations compared to their severity. Therefore, we would like to approach tinnitus relief in a new way by utilizing sound wave vibration stimulation in the oral cavity. This study was based on a study that confirmed changes in muscle activity in the oral cavity through mechanical vibration applied from outside rather than direct stimulation in the oral cavity. Based on this study, motor is attached to the mandibular or submandibular to vibrate sound waves, and EMG was measured in the mastoid process according to each frequency. After measuring through ADInstruments' Bio amp, we analyzed the results of Fast Fourier Transform(FFT, Size = 128k, Overlap = 50%, Display mode = Power (nV^2)) through LabChart 8.0. Through this, it is expected that future studies will be able to achieve effective tinnitus improvement in consideration of the characteristics of the human body medium and harmonics.

Poster-069

1. 연구 배경

이명(tinnitus)은 외부로부터의 실제 청각 자극이 없어도 소리가 들린다고 느끼는 증상이다. 기존 연구에 따르면 전체 인구의 약 4분의 1이 최소 한 번 이상 이명을 경험한 것으로 나타날 정도로 흔하게 발생하며, 이 중 절반은 일상생활을 영위하는 것이 심각하게 저해될 정도로 큰 고통을 겪고 있다[1]. 또한 이명 환자의 90% 이상에서 청력 손실이 동반되므로 보청기(hearing aids) 등의 기기 사용이 권장된다. 하지만 보청기의 이명 개선 효과에 대한 연구는 중간에서 약한 수준의 근거를 보이며, 소음 발생기(noise generators)의 경우 넓은 주파수의 희미한 소음 발생시키는 장치는 이명 치료에 권장되지 않고 87개의 연구를 포함한 스코핑 리뷰에서 효과가 입증되지 않았다[2,3]. 이처럼 이명의 발생 빈도와 심각성에 비해 기존 방법의 한계가 명확하므로 이명 개선을 위한 새로운 방법이 필요하며 이를 위한 다양한 연구가 진행되고 있다.

하악골(mandibular) 및 턱밑(submandibular)에 가해진 기계적 진동에 의한 턱끝혀근(genioglossus)의 반응을 관찰한 연구에 따르면, 구강 내 자극을 통해 해당 부위를 직접 자극하지 않고 체외 다른 부위에서 진동 자극이 주어지더라도 자극이 목표부위까지 전달된다[4]. 해당 연구에서는 피험자의 근육량에 따라 목표 지점의 근활성도 변화가 유의미하게 달랐으며, 이를 바탕으로 본 연구 이전에 근육량에 따른 음파 진동의 특성을 확인하고자 상완이두근(biceps brachii) 장두, 정강이뼈(tibia), 비복근(gastrocnemius)에 음파 진동 자극을 가하고 해당 부위에서의 근전도 주파수 스펙트럼을 분석하는 연구를 진행하였다. 해당 실험 결과 65-500Hz의 주파수 대역에서는 해당 주파수를 포함하여 정수배에 해당하는 고조파(harmonic) 특성이 나타났으며, 500-1000Hz의 주파수 대역의 경우 음파 진동 자극을 주어도 큰 변화를 볼 수 없었다.

본 연구에서는 이전 연구에 이어 음파 진동 자극을 통한 이명 완화 프로토콜을 설계를 위한 추가적인 선행연구를 진행하였다. 해당 이명 개선 프로토콜의 최종 목표는 구강 내 자극을 통한 이명의 완화이다. 사전에 진행된 연구결과를 바탕으로 체외에서 주어지는 진동 자극이 구강내까지 전달될 것으로 가정하고, 하악골과 턱밑에 음파 진동을 주었을 때의 특성을 확인하고자 하였다. 각 지점에 진동자를 부착한 후 유양돌기(mastoid process)에서의 근전도를 측정하여 음파 진동 자극에 의한 주파수 스펙트럼 분석을 진행하였다.

2. 연구 방법

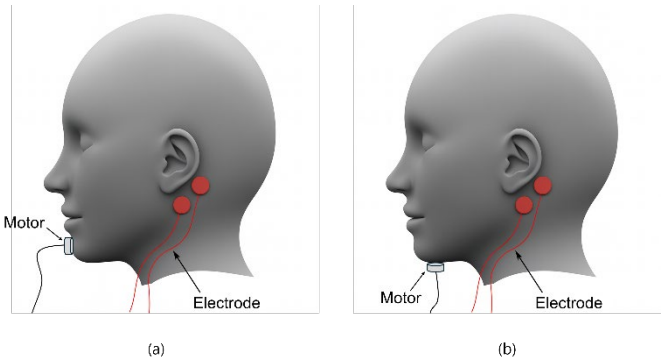


그림 1. 진동자 부착 부위.
(a) 하악골(mandibular), (b) 턱밑(submandibular)

실험에 사용된 음파 진동 주파수는 사전에 제작된 진동 자극 시스템을 통해 65~1kHz까지로 설정하였다(65Hz, 100Hz, 300Hz, 415Hz, 500Hz, 1000Hz). 설정된 주파수가

시스템에 연결된 진동자를 통해 출력된다.

근전도 측정은 ADInstruments 사의 Bio Amp 와 3M 사의 2223H Ag/AgCl 전극을 사용하였다. 측정된 데이터는 ADInstruments 사의 LabChart 8.0 을 통해 고속푸리에변환(Fast Fourier Transform, FFT)하였다(FFT size = 128k, Overlap = 50%, Display mode = Power(nV^2)).

하악골 혹은 턱밑에 진동자 부착 후 진동 자극 시스템의 전원 off 상태로 5초, 전원 on & 진동 없음 상태로 5초, 진동 있음 상태로 10초, 총 20초를 한 세트(set)로 하여 진동자 부착부위별(2군데), 주파수별(6종류) 10세트씩 반복하여 총 120번 측정을 진행했다(그림 1).

3. 연구 결과

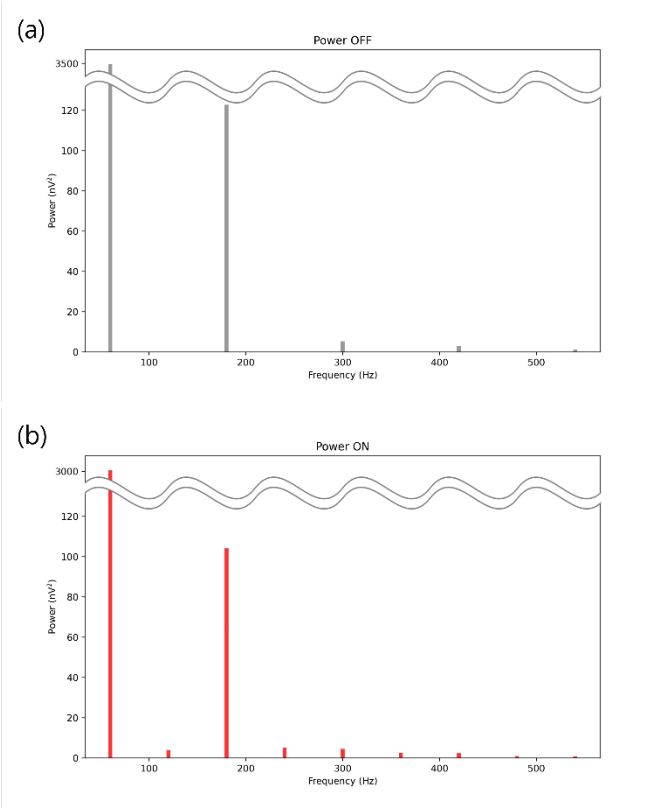


그림 2. 음파 진동 자극 시스템 Power ON/OFF 시의 노이즈. (a) Power OFF, (b) Power ON

음파 진동 자극 전 진동자와 전극 부착 후 시스템 전원 ON/OFF 시의 노이즈를 측정한 결과, 60Hz의 전원 노이즈가 가장 크게 나타났다. 더불어 60Hz의 홀수배에 해당하는 180Hz(3배), 300Hz(5배), 420Hz(7배)에서도 노이즈가 발생하는 것을 확인하였다(그림 2).

진동자 부착 부위별로 음파 진동 자극이 주어졌을 때 유양돌기에서의 근전도 주파수 스펙트럼 분석 결과 400Hz의 음파 진동에서 가장 큰 값이 나타났다. 또한, 각 주파수마다 해당 주파수 외 주파수도 측정되었으며, 진동 자극 주파수의 정수배에 해당하는 고조파(harmonic)특성이 나타났다. 또한, 1000Hz 이상의 대역에서는 근전도 및 주파수 스펙트럼의 변화가 미미하거나 유도되지 않음을 확인하였다(그림 3).

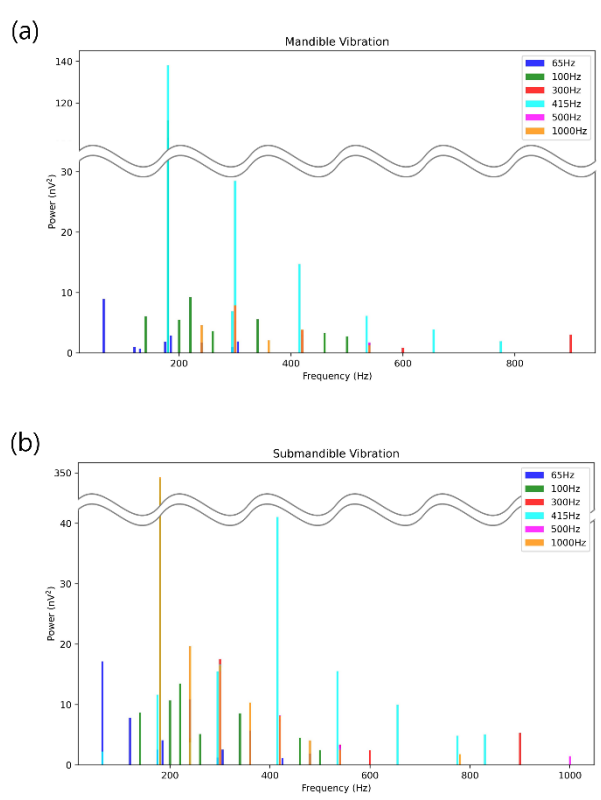


그림 3. 진동자 부착 부위별 음파 진동 자극에 대한 주파수 스펙트럼 분석 결과. (a) Mandible Vibration, (b) Submandible Vibration

4. 결론

하악골 및 턱밑에서 음파 진동 자극을 주었을 때 유양돌기에서도 근전도 변화를 확인할 수 있었다. 이를 통해 해당 부위에서 음파 진동 자극 시 이명 현상이 나타나는 부위인 귀까지 충분히 전달될 수 있음을 확인하였다.

일정한 음파 진동 주파수로 자극 시 해당 주파수뿐만 아니라 더 작은 주파수와 큰 주파수도 측정되는 것을 확인하였다. 인체는 단일 매질이 아닌 근육, 지방, 혈관 등 다양한 생체 조직으로 이루어져 있다. 또한, 매질이 균일하지 않고, 각 매질마다 고유진동수 등의 특성이 다르기 때문에 이러한 결과가 나온 것으로 사료된다.

해당 결과를 바탕으로 자극 부위의 매질 특성, 고조파 등의 요인을 고려하여 추후 음파 진동을 이용한 이명 완화 프로토콜 설계 시 효과적인 이명 개선 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

5. 참고 문헌

[1] A. McCormack, M. Edmondson-Jones, S. Somerset, and D. Hall. "A systematic review of the reporting of tinnitus prevalence and severity." *Hearing Research*, Vol. 337, p.70–79, 2016

[2] S. H. Kimball, C. E. Johnson, J. Baldwin, K. Barton, C. Mathews, and J. L. Danhauer. "Hearing aids as a treatment for tinnitus patients with slight to mild sensorineural hearing loss." *Semin Hear*, Vol. 39, No. 2, p.123–134, 2018

[3] L. Tutaj, D. J. Hoare, and M. Sereda. "Combined amplification and sound generation for tinnitus: a scoping review." *Ear Hear*, Vol. 39, No. 3, p.412–422, 2018

[4] F. Erdogan and M. Sahin. "Genioglossal response to mechanical vibrations of the mandible and the submandibular muscles." *Journal of Applied Physiology*, Vol. 127, No. 1, p.11–21, 2019

Poster-064

조직 온도에 따른 전기천공 소작의 임피던스 및 병변 특성 변화

안진수[1], 이지호[2], 박기현[2], 최호성[2], 김형식[2*]

건국대학교 글로컬캠퍼스 과학기술대학 ICT융합공학부 BK21플러스의공학실용기술연구소 바이오메디컬공학과[1]

건국대학교 글로컬캠퍼스 과학기술대학 ICT융합공학부 메카트로닉스공학과[2]

Effect of Tissue Temperature on Impedance and Lesion Characteristics in Electroporation

Jinsu An[1], Ji-Ho Lee[2], Ki-Hyeon Park[2], Ho-Sung Choi[2], Hyung-Sik Kim[2*]

[1] Department of Biomedical Engineering, BK21+ Research Institute of Biomedical Engineering, School of ICT Convergence Engineering, College of Science & Technology, Konkuk University, Chungju, South Korea

[2] Department of Mechatronics Engineering, School of ICT Convergence Engineering, College of Science & Technology, Konkuk University, Chungju, South Korea

*hskim98@kku.ac.kr

Abstract

This study investigated the influence of tissue temperature on lesion formation during electroporation-based ablation using potato tissue as an experimental model. A custom electroporation (EP) generator was developed, consisting of a flyback-based switched-mode power supply (SMPS), a control module, and an H-bridge circuit. The system allows precise adjustment of key parameters such as output voltage, pulse width, pulse phase, and pulse number. Electroporation was performed with electric field intensities of 1 kV/cm and 2 kV/cm, bipolar pulses of 10 µs width and 10 µs interval, and a total of 30 pulses applied at 100 kHz. Experiments were conducted under three initial temperature conditions: approximately 25 °C, 40 °C, and 60 °C. After the procedure, tissue slices were stained with trypan blue solution, and the lesion areas were quantitatively analyzed using ImageJ software. The results demonstrated that the lesion size increased with both temperature and electric field strength. At higher temperatures, the stained regions appeared darker and more extensive, indicating stronger electroporation effects. These findings confirm that initial tissue temperature is a key factor influencing the extent of electroporation-induced ablation. Temperature control may therefore serve as an important parameter for improving the reproducibility and efficiency of future IRE-based therapeutic systems.

1. 연구 배경

전기천공(Electroporation)은 세포막의 투과성을 일시적으로 또는 영구적으로 증가시켜 약물 전달, 유전자 주입, 그리고 조직 소작 등에 활용되는 기술로 잘 알려져 있다[1,2]. 특히 불가역 전기천공(Irreversible Electroporation, IRE)은 고주파 열 치료(RFA)나 레이저 소작과 달리 열적 손상을 최소화하면서도 효과적인 조직 제거가 가능하다는 점에서 종양 치료의 새로운 대안으로 주목받고 있다[3].

전기천공 소작의 효과는 인가 전압, 펄스 수, 전극 간격과 같은 물리적 자극 조건뿐만 아니라, 조직의 전기적·생물학적 특성에 따라 크게 달라진다. 이 중에서도 조직 온도는 전기적 임피던스와 전도도에 직접적인 영향을 미치며, 이는 전기장 분포와 소작 병변의 형성에 중요한 변수로 작용한다. 그러나 기존 연구들은 주로 전압, 전극 구조, 펄스 조건에 따른 병변 특성에 집중되어 있으며, 조직의 초기 온도가 전기천공 소작 과정과 결과에 미치는 영향은 상대적으로 충분히 규명되지 않았다.

이에 본 연구에서는 감자 조직(potato tissue)을 대상으로 electroporation 소작을 수행하면서 초기 조직 온도를 달리 설정하였다. 이를 통해 조직 온도 변화가 임피던스 반응 및 병변 크기에 미치는 영향을 분석하고, electroporation 기반 조직 소작 기법의 안전성과 효율성을 높이기 위한 기초 자료를 제시하고자 한다.

2. Methods

2.1 소작용 Electroporation generator 설계 및 개발

개발된 전기천공(Electroporation, EP) generator의 실제 모습을 Figure 1에 제시하였다. EP generator는 SMPS 전원 모듈, control 모듈, 그리고 H-bridge 회로로 구성되어 있다.

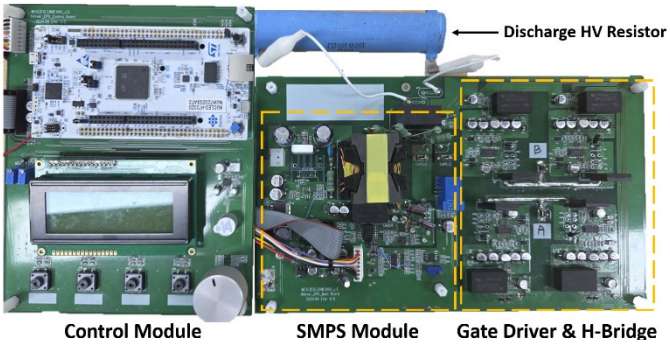
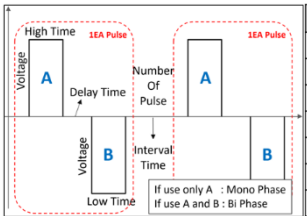


Figure 1. 소작용 Electroporation generator

SMPS 모듈은 플라이백 컨버터 구조를 기반으로 설계되었으며, 24 V의 입력 전압을 최대 1.5 kV까지 승압된다. 고전압 펄스를 안정적으로 공급할 수 있도록 설계되었다. Control 모듈은 출력 전압, 펄스 위상, 펄스 폭, 펄스 개수 등 주요 매개변수를 설정·제어한다(Figure 2).

사용자에 의해 설정된 파라미터(parameter)를 게이트 드라이버로 전달하여 H-bridge 회로의 MOSFET를 구동하여 원하는 파형을 발생시킨다. H-bridge 회로는 네 개의 MOSFET으로 구성되며, bi-polar 형태의 출력이 가능하다. 과전류 차단 회로를 이용하여 최대 20 A의 전류 출력이 가능하도록 설계하였다. 이 구조는 electroporation에 적합한 짧고 반복적인 고전압 펄스를 안정적으로 발생시킨다.



Parameter	Adjustable range
Pulse Phase	Mono Phase, Bi Phase
Voltage	500V, 800V, 1000V, 1300V, 1500V
High Time	1us – 10ms
Delay Time	1us – 10ms (use only Bi phase)
Low Time	1us – 10ms (use only Bi phase)
Interval Time	1us – 10ms
Number of Pulse	1EA – 990EA

Figure 2. Electroporation generator의 출력 파라미터

2.2 감자 조직을 이용한 electroporation 실험 방법

온도 변화에 따른 소작 면적의 차이를 확인하기 위해, 개발된 EP generator 를 이용하여 감자 조직(potato tissue)에서 Electroporation 실험을 수행하였다. 감자는 약 2 cm 두께로 절단하여 시편으로 사용하였으며, 두 개의 니들형 전극(needle electrode)은 5 mm 간격으로 배치하였다. 인가 전압은 1 kV/cm 및 2 kV/cm 두 조건으로 설정하였고, 펄스는 bipolar 형태로 구성하였다. 펄스 폭과 펄스 간격은 각각 10 μs 로 설정하였으며, 총 30 개의 펄스를 100 kHz 로 인가하였다. 실험은 세 가지 온도 조건(상온 약 25 °C, 40 °C, 60 °C)에서 진행하였고, 동일한 조건에서 각 실험을 2–3 회 반복 수행하였다.

소작 병변(lesion)의 면적을 확인하기 위해, 처리된 감자 시편의 중심부를 약 2 mm 두께로 절단한 후 트리판 블루(trypan blue) 용액으로 염색하였다. 염색된 시편은 ImageJ 프로그램을 이용하여 병변 면적을 정량적으로 분석하였다.

3. Results

3.1 소작용 Electroporation generator 동작 시험

SMPS 모듈 특성을 평가한 결과, 출력 전압이 1.5 kV에 도달하기까지 약 4초가 소요되었다(Figure 3-a). 제어 모듈을 통해 출력 전압, 펄스 위상, 펄스 폭 등을 다양하게 조절할 수 있음을 확인하였다(Figure 3-b). Figure 3-c 와 Figure 3-d는 감자 조직 실험에 적용된 펄스 파형을 나타낸다.

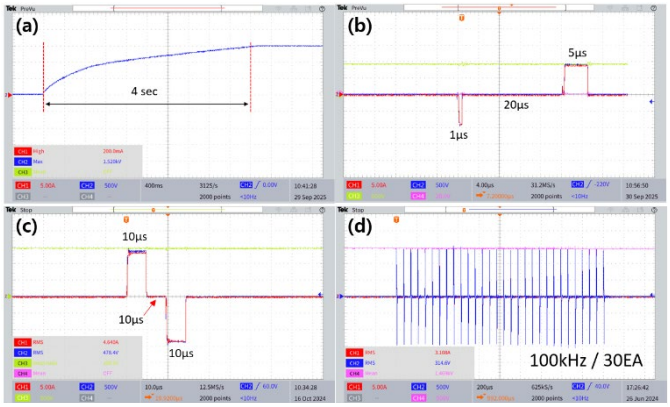


Figure 3. Electroporation generator 동작 시험 파형

3.2 감자 조직을 이용한 electroporation의 소작 면적 비교

Figure 4는 온도 및 전압 크기에 따른 감자 조직의 소작 병변(lesion)을 ImageJ 프로그램 이용하여 분석한 결과를 나타낸다. 왼쪽 상단의 파란색 사진은 트리판 블루 용액으로 염색한 후의 모습을 나타낸다.

1 kV/cm 조건에서 소작 병변의 면적은 온도가 상승함에 따라 점차 증가하는 경향을 보였다. 상온(약 24 °C) 조건에서 형성된 병변은 상대적으로 작고 색이 옅었으며, 명확한 경계가 뚜렷하지 않았다. 반면, 40 °C와 60 °C 조건에서는 염색된 영역이 넓어지고 색의 농도가 진해져, electroporation의 영향이 더 강하게 나타났다. 2 kV/cm 조건에서는 1 kV/cm 조건 대비 전반적으로 병변의 크기가 더 크게 형성되었으며, 전계 세기가 증가함에 따라 소작 영역의 확산이 명확하게 관찰되었다.

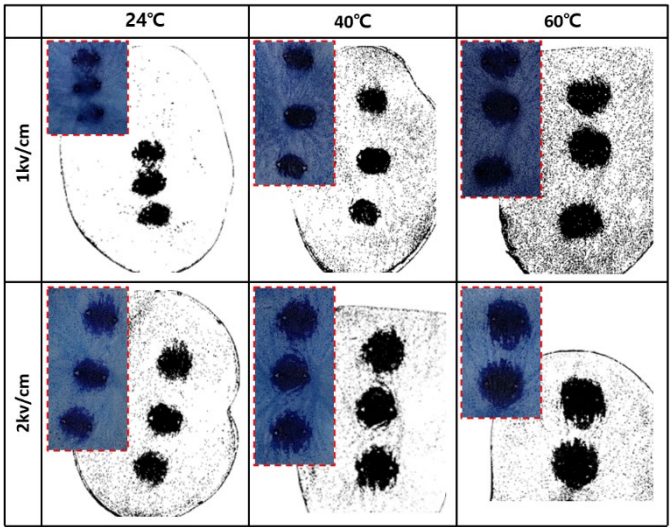


Figure 4. 감자 조직을 이용한 electroporation

4. Discussion

본 연구에서는 감자 조직을 이용하여 electroporation 소작 시 조직 온도 변화가 병변 형성에 미치는 영향을 분석하였다. 실험 결과, 온도와 인가 전계 세기가 증가할수록 소작 병변의 면적이 확대되는 경향이 뚜렷하게 나타났다. 이러한 경향은 조직의 전기적 임피던스(electrical impedance)가 온도 상승과 함께 감소하는 특성과 관련이 있다. 일반적으로 생체조직의 전도도(conductivity)는 온도가 높아질수록 증가하며, 그 결과 동일한 전계 세기에서 더 큰 전류가 흐르게 된다. 전류 밀도의 증가는 전기장 분포를 넓히고 세포막 투과성을 높여, electroporation의 효과를 가속화시키는 요인으로 작용한다. 따라서 본 실험에서 관찰된 병변 면적의 증가는 온도 상승으로 인한 전도도 향상 및 세포막 손상 증가에 기인한 것으로 판단된다.

또한, 높은 전계 세기(2 kV/cm) 조건에서 병변이 더 균질하고 넓게 형성된 것은 전기장이 조직 내부 깊숙이 침투했기 때문으로 해석된다. 이는 electroporation 기반 조직 소작에서 전계 세기와 온도의 복합적 조합이 병변의 깊이와 균질성에 중요한 영향을 미친다는 점을 보여준다.

5. Acknowledgements

본 연구는 정부(과학기술정보통신부, 산업통상자원부, 보건복지부, 식품의약품안전처)의 재원으로 범부처전주기의료기기연구개발사업단의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호: 1711196795, RS-2023-00238092)

6. 참고 문헌

[1] Davalos, Rafael V., L. M. Mir, and Boris Rubinsky. "Tissue ablation with irreversible electroporation." Annals of biomedical engineering 33.2 (2005): 223-231.

[2] Rubinsky, Boris. "Irreversible electroporation in medicine." Technology in cancer research & treatment 6.4 (2007): 255-259.

[3] Hogenes, Annemiek M., et al. "The Influence of Irreversible Electroporation Parameters on the Size of the Ablation Zone and Thermal Effects: A Systematic Review." Technology in Cancer Research & Treatment 22 (2023): 15330338221125003.

Poster-065

심박 간격 정규화가 수면 중 부교감 신경 활동에 미치는 영향

홍종현[1], 고정민[1], 김진영[1], 류현찬[1], 이다혜[1], 최지호[2], 백현재[3], 윤희남[1*]

[1]상명대학교 대학원 지능정보공학과

[2]순천향대학교 부천병원 이비인후과-두경부외과

[3]순천향대학교 의공학과

Effects of R-R interval Normalization on parasympathetic nerve activity during sleep

Jonghyun Hong[1], Jungmin Koh[1], Jinyoung Kim[1], Hyunchan Ryu[1], Dahye Lee[1], JiHo Choi[2], Hyun Jae Baek[3], Heenam Yoon[1*]

[1] Department of AI & Informatics, Graduate School, Sangmyung University, Seoul, 03016, Republic of Korea

[2]Department of Otorhinolaryngology-Head and Neck Surgery, Soonchunhyang University Bucheon Hospital, Soonchunhyang University College of Medicine, Bucheon, 14584, Republic of Korea

[3]Department of Biomedical Engineering, Soonchunhyang University, Asan, 31537, Republic of Korea

[*]h-yoon@smu.ac.kr

Abstract

Heart Rate Variability (HRV) is a key indicator for assessing autonomic nervous system (ANS) activity during sleep, but its interpretation can be skewed by individual differences in R-R intervals (RRI). This study aimed to analyze how applying Z-score normalization of varying strengths to RRI could more sensitively reflect the parasympathetic dominance characteristic of slow-wave sleep (SWS). Using polysomnography (PSG) data from 40 participants, HRV indices in the frequency domains were calculated from both raw and normalized RRI ($Z=(X-\bar{X})/\sigma^n$, where n=1 to 2). Subsequently, statistical differences in these indices across four sleep stages (SWS, light sleep, REM, and wakefulness) were analyzed. The results showed that while HRV indices from raw RRI did not clearly distinguish deep sleep from other stages, under all Z-score normalization conditions, the indices for SWS were significantly higher than those of all other stages ($p<0.05$), markedly improving stage discriminability. In conclusion, adjusting the strength of the standard deviation during RRI normalization can be an effective strategy for detecting parasympathetic activity by amplifying the physiological characteristics of SWS. These findings may contribute to the future development of precise, personalized sleep analysis technologies.

1. 연구 배경

수면 단계는 자율 신경계 활동과 밀접한 관련이 있다. 자율 신경계는 교감 신경과 부교감 신경으로 구성되며, 수면 단계에 따라 이들의 활동 수준이 달라진다. 일반적으로 교감신경 활동은 비렘수면 중 감소하고, 렘수면에서 증가하는 경향을 보이며, 반대로 부교감신경 활동은 수면 시작과 함께 증가하여 깊은 수면동안 높은 수준을 유지한다. 자율 신경계의 변화를 정량적으로 평가하는 방법 중 가장 대표적인 방법은 심박변이도 측정이다. 이는 심장 박동 간의 간격(RRI, R-R interval)에서 나타나는 변동성을 분석함으로써 자율 신경계의 활동을 반영한다 [1].

기존 연구에 따르면 심박변이도를 계산할 때 RRI나 심박을 사용할 수 있으나 두 지표는 역관계에 있어 동일한 결과를 보장하지 않는다. 특히 RRI는 개인의 기저 심박수에 영향을 받아, 이로 인해 산출된 심박변이도 값이 왜곡될 수 있다는 문제점이 제기되어 왔다 [2], [3].

따라서 본 연구에서는 RRI에 다양한 강도의 정규화를 적용하여, 이를 기반으로 계산된 심박변이도 지표가 깊은 수면의 부교감 신경 우세 상태를 얼마나 더 민감하게 반영하는지 분석하고자 한다.

2. 연구 방법

본 연구에서 사용한 심전도데이터는 순천향대학교병원 수면 의학센터에서 수면다원검사를 통해 수집되었다 participants (IRB No. SCHBC 2019-08-020 and No. 201911-BM-061-01). 본 연구에는 총 40명(남성 25명, 여성 15명)이 참여하였다. 연구에 참여한 피험자들의 정보는 표1에 제시되어있다. 수집한 심전도 신호에서 R-peak를 검출하기 위해 자동 R-peak 검출 알고리즘을 사용하였다. 이후 수기로 보정하여 RRI를 취득하였다. 본 연구에서는 RRI를 일관된 척도로 표준화하여 개인 간 차이를 최소화하기 위해 정규화를 진행하였다. 정규화 방법으로는 z-score 정규화를 사용했으며, 이는 개별 RRI 값(X)에서 평균($\bar{X}$)을 뺀 값을 표준편차(σ)로 나누어 계산한다. 이를 통해 RRI의 상대적 변동성을 강조하고 전체적인 추세를 제거하여 평균 중심으로 데이터를 정렬할 수 있다 (그림1). 이러한 차이를 정량적으로 분석하기 위해 본 연구에서는 z-score 정규화의 분모에 사용되는 표준편차의 지수(σ^n)를 변화시켜 정규화 강도를 조절하였다. 본 연구에서는 부교감신경의 활동을 반영하는 대표적인 주파수 영역 지표인 HF(High frequency)를 사용했다. HF는 FFT(Fast Fourier Transform)를 이용하여 0.15~0.4Hz 대역의 파워 스펙트럼 밀도를 계산하여 산출했다.

본 연구에서는 정규화 된 RRI를 통해 계산된 심박변이도가 원시 RRI를 통해 계산된 심박변이도 보다 부교감신경의 활동을 더 효과적으로 반영할 것이라는 가설을 세웠다. 이를 검증하기 위해 4가지 수면 단계(깊은 수면, 얕은 수면, 깸, 렘수면)에 걸쳐 다양한 정규화 지수(σ^n)를 적용한 원시 RRI와 정규화 된 RRI에서 도출된 심박변이도 값을 비교했다. 수면 단계별 심박변이도의 유의미한 차이를 확인하기 위해 일원분산분석을 수행했다. 이후 Tukey 사후검정을 실시하여 각 정규화 방법에 대한 단계별 차이를 분석했다.

Variable	Mean ± S.D
Sex (M/F)	25 / 15
Age (years)	35.03 ± 10.44
Total recording time (min)	470.45 ± 27.98
Total sleep time (min)	427.65 ± 38.54
Sleep efficiency (%)	88.76 ± 9.10
Rapid eye movement sleep (%)	17.45 ± 5.10
Wakefulness (%)	11.23 ± 9.11
Light sleep (%)	64.18 ± 7.20
Slow-wave sleep (%)	7.15 ± 5.05
Apnea-hypopnea index	8.75 ± 13.96

표 1. 피험자 정보

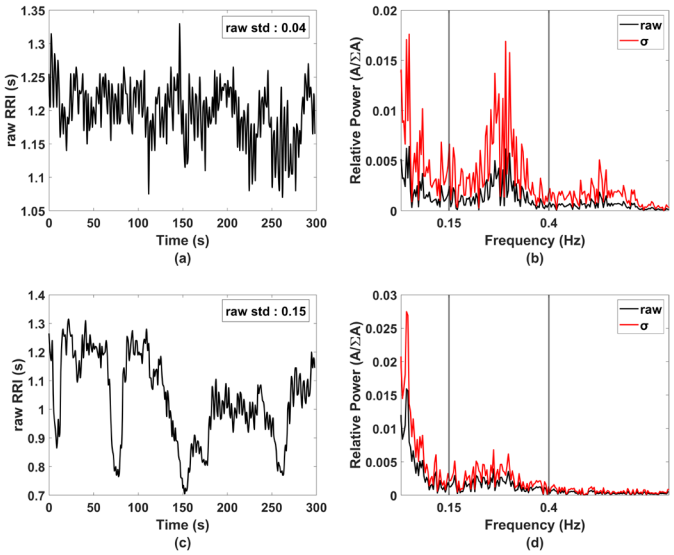


그림 1. 깊은 수면(SWS)과 비깊은 수면(NSWS) 동안의 RRI 및 주파수 분석

3. 연구 결과

그림 2에서 나타나듯, HF는 수면 단계에 따라 유의미한 차이를 보였다. 원시 RRI 기반 지표에서는 깊은 수면에서 가장 높은 값을 보였으나 얕은 수면과는 통계적으로 유의하지 않았다($p>0.05$). 반면 정규화를 적용했을 때, 모든 정규화 조건(σ^1~σ^2)에서 깊은 수면에서의 HF 값이 월등히 높았으며, 다른 모든 수면단계와 통계적으로 유의미한 차이를 보여 구분이 더욱 분명해졌다 ($p<0.05$). 이는 정규화가 수면 단계별 부교감 신경 특성의 차이를 보다 명확히 드러냄을 의미한다.

4. 토의

본 연구에서는 다양한 강도의 정규화 방법(σ^1~σ^2)을 RRI 계산에 적용하여 HF가 얼마나 부교감신경의 특성을 잘 반영하는지 확인했다. HF는 다른 수면단계보다 깊은 수면에서 높은 값을 보였으며, 정규화 이후 이러한 차이가 더욱 분명해졌다 ($p<0.05$). 이는 HF가 부교감 신경 활동을 반영한다는 이전의 연구 결과와 일치한다.

z-score 정규화는 원시 RRI에서 개인의 편차를 제거하여 RRI의 절대적인 크기에 영향을 받지 않고 상대적인 변동만을 강조하는 효과가 있다. 원시 RRI는 사람마다 분포가 다르기 때문에 일반화하기 어려운 반면, 정규화를 통해 모든 피험자의 RRI를 평균을 중심으로 정렬하면 개인차를 제거할 수 있다. 이 과정은 특히 심장 박동이 안정적인 깊은 수면과 높은 심박변이도를 가진 다른 수면단계의 차이를 강조하는데 유리하다.

정규화 과정에서 정규화 지수(n)가 커질수록 RRI 신호는 평균에 더 가깝게 분포하게 되며, 변동성이 큰 값들의 영향력은 상대적으로 감소한다. 그 결과, 심박이 안정적이라 표준편차(σ)가 작은 깊은 수면에서는 분모(σ^n)가 작게 유지되어 심박변이도 값이 증폭된다. 반면, 심박 변동이 커 표준편차가 큰 다른 수면 단계에서는 분모가 급격히 커져 심박변이도 값이 상대적으로 감소하게 된다 (그림 3).

결론적으로, 본 연구는 RRI 정규화 과정에서 표준편차의 강도를 조절하는 것이 수면 단계, 특히 깊은 수면의 부교감신경 우세를 반영하는데 효과적인 전략이 될 수 있음을 시사한다. 이는 향후 개인 맞춤형 수면 분석 알고리즘 개발에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

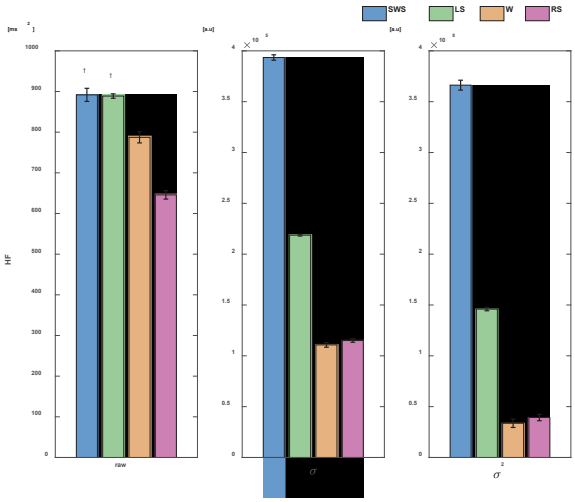


그림 2. 원시 RRI 및 z-score 정규화(σ^1~σ^2)를 사용한 수면 단계별 HF 비교

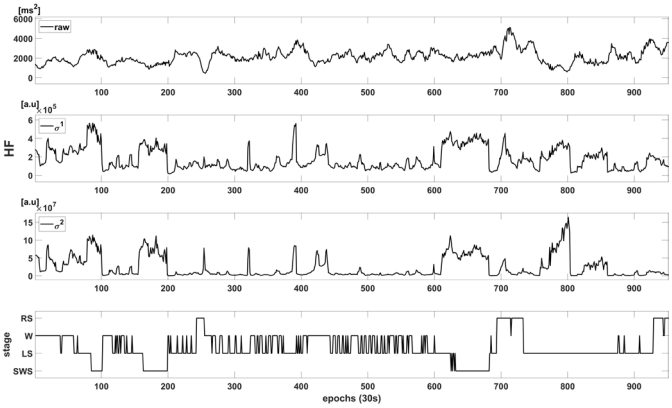


그림 3. 원시 RRI와 z-score 정규화(σ^1~σ^2)에 따른 HF와 수면 단계

5. Acknowledgements

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2025-24533026)

6. 참고 문헌

[1] P. Bušek, J. Vaňková, J. Opavský, J. Salinger, and S. Nevšímalová, “Spectral analysis of heart rate variability in sleep,” Physiol. Res., vol. 54, no. 4, pp. 369–376, 2005.

[2] J. Sacha and W. Pluta, “Alterations of an average heart rate change heart rate variability due to mathematical reasons,” Int. J. Cardiol., vol. 128, no. 3, pp. 444–447, 2008.

[3] J. Sacha, “Why should one normalize heart rate variability with respect to average heart rate,” Front. Physiol., vol. 4, Art. no. 306, 2013.

Poster-066

관성 센서 기반 보행자 식별에 관한 연구

조우형[1*], 이석형[1], 김규성[2], 이상민[1,3]

인하대학교 전기컴퓨터공학과[1]

인하대병원 이비인후과[2]

인하대학교 전기전자공학부[3]

A Study on Inertial Sensor-Based Pedestrian Identification

WooHyeong Cho[1*], SeokHyung Lee[1], KyuSung Kim[2], Sangmin Lee[1,3]

Department of Electrical and Computer Engineering, Inha University, Incheon, Republic of Korea[1]

Department of Otorhinolaryngology, Inha University Hospital, Incheon, Republic of Korea[2]

Department of Electrical and Electronic Engineering, Inha University, Incheon, Republic of Korea[3]

*wakeiy@inha.edu

Abstract

This paper proposes a pedestrian identification method using a multi-task learning approach on IMU-based acceleration data. Gait data were collected from six adult male subjects under both normal and muscle-fatigued conditions. The proposed method achieved high accuracies of 100% for the personal identification task and 96.65% for the gait-state classification task. Future work will be conducted with a larger sample size to validate the generalizability of these results.

1. 연구 배경

생체 인식(Biometrics)이란 개인의 고유한 신체적 또는 행동적 특성을 기반으로 생물학적 특성을 측정하는 것을 말하며, 오래전부터 자동화되지 않은 여러 생체 인식방식을 시작으로 다양하게 활용되어왔다[1-3]. 개인 식별을 위한 생체 정보의 활용은 지문, 홍채, 음성, 얼굴 형태 등 널리 쓰이는 기존 방식들을 넘어, 최근에는 개인마다 고유한 특성을 갖는 보행 데이터를 이용한 새로운 인증 및 식별 연구가 활발히 진행되고 있다[4]. 보행 인식 기술은 개인의 독특한 걸음걸이를 분석하여 신원을 확인하는 현대적인 생체인식기법으로 이 기술의 가장 큰 특징은 다른 생체 인식 방법들(예: 얼굴, 지문, 홍채인식)과 달리, 식별 대상과의 직접적인 접촉 없이 원거리에서 작동이 가능하다는 점이다. 다양한 기존 선행 연구를 통해 보행은 신원 확인의 고유한 마커로서, 낮은 품질의 영상에서도 개별 대상자를 인식할 수 있을 만큼 구별성이 높음이 입증되었다[5]. 이러한 보행인식은 비침습성, 장거리 캡처, 그리고 모방에 대한 높은 저항성을 포함하는 독특한 장점을 제공함으로써, 신뢰도 높은 보안 및 식별 수단으로 활용된다. 해당 기술은 범죄수사, 감시, 스마트 시티 모니터링, 접근 통제, 헬스케어 등 광범위한 영역에 적용되고 있다[6]. 기존의 보행 분석 연구는 초고속 카메라나 적외선 카메라 시스템을 주로 활용하였으나, 이러한 영상 기반 접근법은 높은 장비 도입 비용과 복잡한 초기 설정 과정으로 인해 한계가 명확하였다. 특히, 영상 기반 보행자 식별 연구에서는 의상이나 외부 액세서리의 변화에 따라 인식률이 떨어지는 문제가 꾸준히 보고되었으며 [7], 영상 촬영 과정에서 발생하는 초상권 침해 문제 역시 상용 서비스 적용을 제약하는 주요 원인이 되었다. 이러한 기존 방식의 단점들을 극복하고 연구의 편리성을 높이기 위해, 최근에는 성능이 크게 향상된 관성측정장치(Inertial Measurement Unit, IMU)를 활용하는 연구가 주된 흐름을 이루고 있다. 본 논문에서는 관성측정장치(IMU)로 획득한 정상 및 근피로 보행 데이터를 기반으로, 멀티태스크 학습(Multi-Task Learning, MTL)을 이용한 보행자 식별 방법을 제안한다.

2. 연구 방법

본 연구의 대상자는 보행에 영향을 미치는 신경학적 및 근골격계 질환 병력이 없는 성인 남성 6명으로 구성되었다. 모든 실험 과정은 인하대학교 기관 생명 윤리 위원회(IRB)의 승인(승인번호: 160822-1A) 하에 진행되었으며, 피험자들은 실험 전 충분한 설명을 듣고 서면 동의를 완료하였다. 데이터 획득을 위해 Noraxon사의 myo MOTION Research Pro 모션 캡처 시스템(Noraxon U.S.A, Inc., Scottsdale, AZ, USA)을 활용하였다. 센서는 허리 중앙부, 양쪽 허벅지, 그리고 발등에 부착되었으며, 측정 데이터는 100Hz로 샘플링 되어 전용 소프트웨어를 통해 실시간으로 수집되었다. 아래, 그림 1은 본 실험에 사용된 관성측정장치 시스템 및 피험자대상 센서 부착위치를 나타낸다.

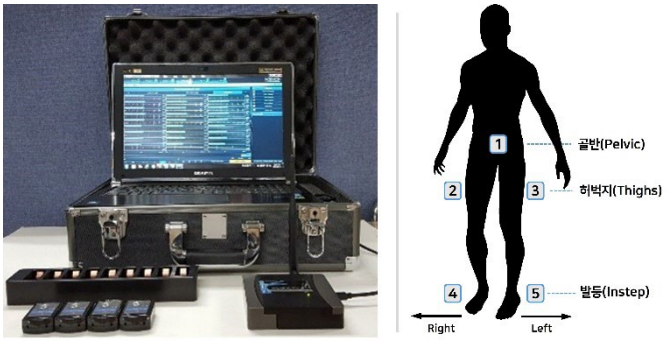


그림 1. 관성측정장치 시스템 및 피험자 센서 부착위치

피험자들은 트레드밀 위에서 두 가지 조건의 보행을 수행했다. 먼저 정상 보행 조건에서는 경사각 0도, 속도 3 km/h로 보행을 실시하였다[8]. 근피로 유발을 위해 경사각 14단계, 속도 5km/h 조건에서 30분간 보행을 수행한 후,

정상 보행 측정 조건과 동일하게 5분간 데이터를 추가로 수집하였다. 원시 데이터에 포함된 전기적 노이즈 및 고주파 성분은 수집 프로그램에서 제공하는 기본 저역통과 필터를 적용하여 제거하였다. 제안하는 멀티태스크 모델은 TensorFlow 프레임워크와 Keras API를 사용하여 구현하였다. 모델 학습 시 최적화 알고리즘으로 학습률 0.001의 Adam 옵티마이저(Adam optimizer)를 적용하였다. 손실 함수는 두 개의 출력 헤드에 대해 각각 정의하였으며, 개인 식별 헤드에는 다중 클래스 분류를 위한 범주형 교차 엔트로피(categorical crossentropy)를, 상태 분류 헤드에는 이진 분류를 위한 이진 교차 엔트로피(binary crossentropy)를 사용하였다. 총 손실(loss)은 두 손실 함수의 단순 합으로 구성하였으며, 손실 가중치(loss weights)는 개인 식별과 상태 분류 과제에 대해 각각 1.0으로 동일하게 설정하여 균형 잡힌 학습을 유도하였다.
훈련은 배치 크기(batch size) 64로 수행하였으며, 모델의 과적합 방지를 위해 조기 종료(EarlyStopping) 콜백을 활용하였다. 조기 종료 기준은 검증 손실(validation loss)이며, 10 에포크(epoch) 연속 성능 향상이 없을 경우 학습을 중단하고, 가장 성능이 우수했던 시점의 가중치를 복원하도록 설정하였다.

3. 연구 결과

개인 식별 과제에서는 6명의 피험자 모두를 정확하게 구분하여 100%의 정확도를 달성하였다. CNN-LSTM 기반의 공유 백본은 각 개인의 고유한 보행 특징을 효과적으로 추출하였으며, 소프트맥스(softmax) 출력층을 사용한 식별 헤드는 이를 기반으로 모든 피험자를 성공적으로 분류하였다. 모든 클래스에서 정밀도, 재현율, F1-점수가 모두 1.00을 기록하여, 오분류나 혼동이 없는 분류 성능을 보여주었다.

Task	Metric	Value(%)
개인식별	Accuracy	100
	Precision	100
	Recall	100
	F1-score	100

보행 상태 분류 과제에서는 정상 상태와 피로 상태 두 클래스에 대해 96.65%의 높은 정확도를 기록하였다. 이진 시그모이드(sigmoid) 출력층을 이용한 상태 분류 헤드는 정상과 피로 상태를 명확히 구분하며, 미세한 보행 패턴 차이까지도 효과적으로 포착하였다. 두 클래스 모두에서 96% 이상의 높은 정밀도와 재현율을 기록하여, 특정 클래스에 치우치지 않는 안정적인 분류 능력을 도출하였다.

Task	Metric	Value(%)
보행 상태분류	Accuracy	96.65
	Precision	96.60
	Recall	96.50
	F1-score	96.51

4. 결론 및 고찰

본 논문은 관성측정장치(IMU)로 획득한 정상 및 근피로 보행 데이터를 기반으로, 멀티태스크 학습(MTL)을 이용한 보행자 식별 방법을 제안하였다. 이를 통해 보행자 식별 및 보행 상태 분류의 동시 수행 가능성을 확인하였으며, 제안된 멀티태스크 학습 기반 모델은 두 가지 상이한 태스크를 상호 보완적으로 학습함으로써, 개인 식별 태스크에서 100%, 보행 상태 분류 태스크에서 96.65%의 높은 정확도를 달성하였다. 이러한 결과는 보행 데이터에 내재된 개인의 고유한 걸음걸이 특성이 근피로와 같은 보행 상태 변화에도 불구하고 일정부분 보존되고 있음을 의미한다. 후속 연구에서는 본 연구 결과의 일반화 성능을 확보하기 위해 피험자 수를 충분히 확대하여 관련 연구를 수행할 예정이다.

5. Acknowledgements

본 연구는 보건복지부의 재원으로 장애인·노인 자립생활을 위한 보조기기 실용화 연구개발사업(과제고유번호: RS-2024-00434322) 및 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. NRF-2018R1A6A1A03025523)을 받아 수행되었음.

6. 참고문헌

[1] R. D. Chaudhari, A. A. Pawar, and R. S. Deore, "The historical development of biometric authentication techniques: a recent overview," *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 2, no. 10, pp. 1–8, 2013.
[2] P. Connor and A. Ross, "Biometric recognition by gait: A survey of modalities and features," *Comput. Vis. Image Underst.*, vol. 167, pp. 1–27, 2018.
[3] J. E. Cutting and L. T. Kozlowski, "Recognizing friends by their walk: Gait perception without familiarity cues," *Bull. Psychon. Soc.*, vol. 9, no. 5, pp. 353–356, 1977.
[4] V. Munusamy and S. Senthilkumar, "Emerging trends in gait recognition based on deep learning: a survey," *PeerJ Comput. Sci.*, vol. 10, p. e2158, 2024.
[5] N. Cai, et al., "Hybrid silhouette-skeleton body representation for gait recognition," in 2021 13th Int. Conf. Intell. Human-Mach. Syst. Cybern. (IHMSC), 2021, pp. 201–204.
[6] B. Lin, et al., "Multi-scale temporal information extractor for gait recognition," in 2021 IEEE Int. Conf. Image Process. (ICIP), 2021, pp. 1018–1022.
[7] Y. Makihara, H. Mannami, T. Tsuji, M. A. Hossain, K. Sugiura, A. Mori, and Y. Yagi, "The OU-ISIR Gait Database Comprising the Treadmill Dataset," IPSJ Trans. Comput. Vis. Appl., vol. 4, pp. 53–62, 2012.
[8] R. M. Kiss, "Comparison between kinematic and ground reaction force techniques for determining gait events during treadmill walking at different walking speeds," Med. Eng. Phys., vol. 32, no. 6, pp. 662-667, 2010.

Poster-067

피크 기반 적응형 임계값을 이용한 심탄도 신호의 아티팩트 검출

고정민[1], 김진영[1], 류현찬[1], 이다혜[1], 홍종현[1], 이유진[2], 윤희남[1*]

[1]상명대학교 대학원 지능정보공학과

[2]서울대학교병원 수면의학센터

Ballistocardiogram artifact detection using peak-based adaptive thresholds

Jungmin Koh[1*], Jinyoung Kim[1], Hyunchan Ryu[1], Dahye Lee[1], Jonghyun Hong[1], Yu Jin Lee[2], Heenam Yoon[1**]

[1]Department of Artificial Intelligence and Informatics, Graduate School, Sangmyung University, Seoul, Korea

[2]Center for Sleep and Chronobiology, Seoul National University Hospital, Korea

[*]h-yoon@smu.ac.kr

Abstract

Ballistocardiogram (BCG) signal is a biological signal that can be measured without the need to attach a separate sensor by detecting vibration using a film-type sensor, but it is easily affected by various movements and environments that occur during sleep. In this study, to solve this problem, local peaks are calculated from the BCG signal acquired from the film-type piezoelectric sensor, and based on the information extracted from the peak, an algorithm using a adaptive threshold value is applied to determine whether an artifact has occurred. The maximum peak in the section was detected every 0.6 second after taking the absolute value every 30 seconds from the signal. The index reflecting the linearity of the detected peaks was set as the first component of the adaptive threshold, and the index reflecting the mean, median, and maximum values of the peaks were set as the second component, so that the threshold value was set differently depending on the epochs. The performance was evaluated by checking the signal directly on the artifact interval found through the proposed adaptive threshold-based algorithm and comparing it with the result of manually tagging the artifact interval. The result recorded an average sensitivity of 94.5%, specificity of 93.5%, and accuracy of 93.8%. These results suggest that the occurrence of artifacts can be detected using information that can be calculated by finding the local peak in the BCG signal.

1. 연구 배경

수면은 신체의 회복과 건강 유지를 위해 반드시 필요하다 [1]. 수면 중 신체의 회복을 위해 발생하는 다양한 생리적 변화를 측정할 수 있다면 건강 상태를 파악하는 데에 도움이 된다. 이러한 변화를 알기 위한 대표적인 방법으로는 수면다원검사(Polysomnography, PSG)가 있다 [2]. 하지만 수면다원검사는 비용이 많이 들고 검사를 받기까지 긴 대기시간으로 인한 부담이 발생한다. 또한 다양한 센서를 부착한 후 병원에서 수면을 취하게 되는데, 이는 가정 수면 환경과 차이가 존재하여 부정확한 결과가 유도될 수 있다.

심탄도(Ballistocardiogram, BCG) 신호는 필름형 센서 등을 사용하여 진동을 감지하는 방식으로 별도의 센서를 부착할 필요 없이 측정할 수 있는 생체신호이다. 가정에서도 큰 불편함 없이 무구속적으로 신호를 수집할 수 있다는 특징이 있다. 하지만 수면 중 발생하는 다양한 움직임이나 환경 등의 영향을 많이 받는다. 이렇게 발생한 artifact는 심탄도 신호를 분석하고 사용함에 있어 큰 어려움으로 작용한다. 따라서 해당 구간을 찾아 제거하는 과정이 필요하다.

심탄도 신호에서 발생하는 artifact는 다양한 방법으로 제거할 수 있다 [3]. 가정환경이나 소형 디바이스에서 artifact를 제거하기 위해서는 연산량이 적은 방식이 유리하다.

본 논문에서는 필름형 압전 센서에서 취득한 심탄도 신호에서 국소 peak들을 계산하고 peak에서 추출한 정보를 바탕으로 구간에 따라 변화하는 임계값을 사용한 알고리즘을 적용하여 artifact 발생 여부를 판단하고자 한다.

2.연구 방법

본 연구에서 활용한 데이터는 침대에 설치한 필름형 압전 센서로 수집하였으며, 서울대학교병원 수면의학센터에서 수행한 수면다원검사(PSG, Polysomnography) 중 수집하였다. 총 20명(남성 10명, 여성 10명)의 피험자 중 신호의 품질이 특정 기준을 만족하는 7명의 데이터를 사용하였다. 샘플링 주파수는 250Hz로 기록되었다. 수집한 데이터에 1 - 10Hz의 대역통과필터를 적용하여 심탄도 신호를 획득하였다.

처리된 신호에서 30초 단위로 절대값을 취한 후 구간 내 최대 peak를 검출하였다. peak를 검출하는 윈도우는 0.6초 크기로 설정하였고, 0.2초씩 오버랩해서 총 74개의 peak를 계산하였다. 검출한 peak를 오름차순으로 정렬하고, 최소-최대 정규화를 진행하였다. 잡음이 없는 30초 구간의 신호에서 peak를 오름차순으로 정렬할 경우 선형적으로 증가하는 경향이 있기 때문에, 기울기가 1인 직선과의 RMSE(Root Mean Squared Error) 값을 계산하여 peak 값의 증가 추이를 확인하였다. Artifact가 있는 구간과 없는 구간에서의 peak의 RMSE 변화는 그림 1과 같다. 적응형 임계값을 구성하는 첫 번째 요소 C_1을 계산하는 방식은 아래 수식과 같다. 여기서 y_i는 y = x 직선상의 점이고 p_i는 정규화 된 peak 값이다.

$$RMSE_{epoch} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \frac{(y_i - p_i)^2}{n}} \quad (1)$$

$$C_1 = 1 - \left(\frac{1}{0.577} \times RMSE_{epoch}\right) \quad (2)$$

적응형 임계값을 구성하는 두 번째 요소 C_2를 계산하는 방식은 아래 수식과 같다. 여기서 p_{mean}, p_{max}, p_{med}는 각각

peak 값들의 중앙값, 평균값, 최대값이다.

$$C_2 = 5 \times \left(\frac{p_{mean}}{p_{max}}\right) + p_{med} \qquad (3)$$

최종적으로 신호의 30초 구간에 적용될 적응형 임계값 AT는 수식(4)의 방식으로 계산되었다 여기서 p_{Q1}, p_{std} 는 각각 peak 값들의 제1사분위값, 표준편차이다.

$$AT = p_{Q1} \times (0.5 + C_1) \times \frac{1}{p_{std}} \times C_2 \qquad (4)$$

30초 구간의 신호에서 임계값 AT를 넘는 값이 존재할 경우 artifatct가 발생했다고 판단하였다.

제안한 적응형 임계값 기반 알고리즘을 통해 찾은 artifact 구간을 직접 신호를 확인하여 artifact 구간을 수동으로 표시(Tagging)한 결과와 비교하여 성능을 평가하였다. 두 방식의 결과의 일치도를 확인하기 위하여 민감도(Sensitivity), 특이도(Specificity), 정확도(Accuracy)를 활용하여 평가하였다. 5명의 피험자에 대해 REM(Rapid Eye Movement)을 포함하는 수면단계의 변화구간에 대해 성능을 평가하였고 2명의 피험자에 대해 전체 수면구간에서 성능을 평가하였다.

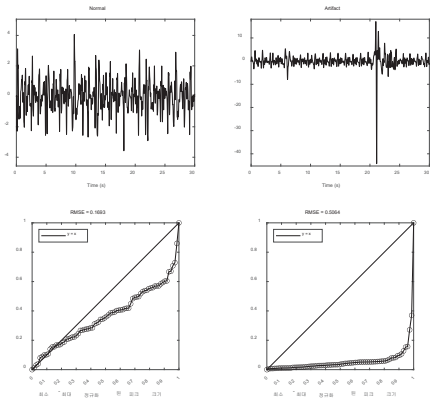


그림 1. 신호의 Artifact 유무에 따른 peak의 RMSE 변화

3. 연구 결과

분석에 사용된 구간의 수는 총 2620개였다. 모든 구간에 대한 성능 평가 결과는 표 1과 같다. 성능평가는 각각 REM 수면을 포함한 구간에 대해 평가한 5명, 전체 수면 구간에 대해 평가한 2명, 전체 7명에 대해 진행하였다.

평균	민감도(%)	특이도(%)	정확도(%)
REM 수면 포함 구간	94.4	95.2	95.1
전체 수면 구간	94.5	92.8	93.3
통합	94.5	93.5	93.8

표 1. 성능 평가 결과표

REM 수면을 포함하는 수면단계 변화 구간은 총 695개였다. 전체 수면을 전부 사용한 구간은 총 1815개였다. 성능 평가를 위해 사용한 혼동행렬은 표 2와 같다.

통합		Reference		
		Artifact	Clean	Sum
Prediction	Artifact	617	127	744
	Clean	36	1840	1876
	Sum	650	1967	

표 2. 전체 데이터의 artifact 구간 검출 혼동 행렬

4. 토의

분류 성능 평가 결과, 제안한 적응형 임계값 기반 알고리즘으로 찾은 심탄도 신호의 artifact 구간이 수기로 표기한 결과와 높은 일치도를 보였다. 이러한 결과는 심탄도 신호를 처리하는 과정에서 peak를 찾아 계산할 수 있는 정보들을 사용하여 artifact의 발생 여부를 확인할 수 있음을 시사한다. 혼동행렬을 보았을 때 clean 구간을 artifact 구간으로 찾는 경우는 적었지만, clean 구간을 artifact 구간으로 찾는 경우는 그에 비해 높게 나타났다. 이는 적응형 임계값이 충분히 높게 설정되지 못하는 조건이 있었을 것으로 추정한다.

본 연구에서 설정한 적응형 임계값은 30초 구간의 신호에서 국소 peak들을 찾은 뒤, 오름차순으로 정렬했을 때의 선형성을 RMSE로 반영한다. Peak들의 최대값과 표준편차는 커질수록 임계값이 작아지도록 설계하였다. 이는 경험적으로 심탄도 신호에서 artifact가 발생하면 peak들이 지수적으로 증가하거나, 특정 peak들의 값이 대부분의 다른 값들보다 월등히 큰 경우를 고려하였다.

향후 연구에서는 데이터의 수를 늘리는 경우에서도 일치도가 높게 나오는지 확인하고자 한다. 또한 30초 구간 내 artifact의 발생 횟수를 파악하는 방향으로 발전시키고자 한다.

5. Acknowledgements

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2025-24533026).

6.참고 문헌

[1] Besedovsky, Luciana, Tanja Lange, and Jan Born. "Sleep and immune function." *Pflügers Archiv-European Journal of Physiology* 463.1 (2012): 121-137.

[2] Rundo, Jessica Vensel, and Ralph Downey III. "Polysomnography." *Handbook of clinical neurology* 160 (2019): 381-392.

[3] Bonmassar, Giorgio, et al. "Motion and ballistocardiogram artifact removal for interleaved recording of EEG and EPs during MRI." *Neuroimage* 16.4 (2002): 1127-1141.

Poster-068

운동 상상 과제 중 정신적 피로 추정을 위한 뇌파 기반 지표 탐색

김상록[1], 이준석[1,2], 이승원[1,2], 이윤성[1,2], 황한정[1,2,3*]

고려대학교 전자·정보공학과[1]

고려대학교 인공지능 스마트융합기술 융합전공[2]

고려대학교 미래전략산업연구원 디지털헬스케어센터[3]

Exploration of EEG-Based Indices for Estimating Mental Fatigue during Motor Imagery Tasks

Sang-Rok Kim[1], Jun-Seok Lee[1,2], Seung-Won Lee[1,2], Yun-Sung Lee[1,2], Han-Jeong Hwang[1,2*]

[1]Department of Electronics and Information Engineering, Korea University, Sejong, Korea

[2]Interdisciplinary Graduate Program for Artificial Intelligence Smart Convergence Technology, Korea University, Sejong 30019, Republic of Korea

[3]Digital Healthcare Center, Sejong Institute of Business and Technology (SIBT), Korea University, Sejong 30019, Republic of Korea

[*]hwanghj@korea.ac.kr

Abstract

This study aimed to identify electroencephalography (EEG)-based neurophysiological indices for monitoring mental fatigue during motor imagery (MI) tasks. We analyzed three publicly available EEG datasets from healthy subjects (135 participants) and one dataset from stroke patients (46 participants). Using these data, we computed ten fatigue-related metrics based on EEG spectral power across multiple frequency bands. In the healthy group, frontal beta power consistently showed the strongest positive correlation with fatigue across datasets (Dataset 1: $r = 0.96$, Dataset 2: $r = 0.93$, Dataset 3: $r = 0.76$; $p < 0.05$). In contrast, the stroke group exhibited the highest correlation in central alpha power ($r = 0.80$, $p < 0.05$), while frontal beta also maintained a significant correlation ($r = 0.70$, $p < 0.05$). These findings suggest that although stroke patients may show altered spectral patterns compared to healthy individuals, frontal beta activity remains a robust index across both groups, supporting its potential for real-time monitoring.

1. 연구 배경

운동 상상(motor imagery, MI) 과제는 신체를 실제로 움직이지 않고 움직임을 상상하는 과제로, 운동 관련 신경회로의 재조직을 촉진하여 뇌졸중 및 사지마비 환자의 재활에 널리 활용된다[1]. 그러나 재활 과정에서 MI 과제를 반복적으로 수행하게 되면, 장기간의 단조로운 과제와 각성 유지에 필요한 인지적 노력으로 인해 정신적 피로가 누적될 수 있다. 이러한 정신적 피로는 주의력 저하와 각성 수준 감소로 이어져 재활 효과를 저해할 수 있다. 따라서 최적의 재활 성과를 얻기 위해서는 MI 과제 수행 중 실시간 피로 평가가 필요하며, 피로가 감지될 경우 적절한 휴식이나 피드백을 제공하여 집중도를 유지하는 것이 중요하다.

정신적 피로는 뇌 활동의 변화를 동반하며, 이는 뇌파(electroencephalogram, EEG)를 통해 관찰할 수 있다. 기존 연구들은 다양한 인지 및 운동 과제에서 피로에 따른 EEG 변화를 보고하였으며, 이를 기반으로 실시간 피로도 디코딩 가능성을 제시하고 있다. 특히, EEG의 주요 주파수 대역인 델타(δ), 세타(θ), 알파(α), 베타(β)는 피로 상태를 반영하는 주요 지표로 활용된다[1]. 그러나 MI 과제 기반 연구에서는 사용된 EEG 지표와 결과가 개별 연구별로 상이하며 최적의 지표를 특정하기 어렵고, 대부분 과제 전후 비교에 국한되어 있다. 또한 선행 연구는 주로 건강한 성인을 대상으로 수행되었기 때문에, 뇌졸중 환자 집단에서도 이러한 피로도 지표들이 적용 가능한지 확인할 필요가 있다.

이에 본 연구에서는 선행 연구에서 피로 지표로 활용된 EEG 주요 주파수 대역 지표들을 MI 과제에 적용하여, 실시간 피로도 디코딩을 위한 피로도 지표를 탐색하고자 한다. 특히 건강한 집단과 뇌졸중 환자 집단을 대상으로 공통적이면서도 차별적인 EEG 기반 바이오마커를 탐색하여, 피로를 추정할 수 있는 최적의 지표를 규명하고자 한다.

2. 연구 방법

본 연구에서는 네 개의 공개 뇌-컴퓨터 인터페이스(brain–computer interface, BCI) 데이터셋을 활용하였다[3–6]. 모든 데이터셋은 좌·우 손의 운동 이미지를 수행하는 과제로 구성되어 있다. 데이터셋 1은 29명의 건강한 성인(남 14명, 여 15명, 28.5 ± 3.7세)을 대상으로 MI와 암산 과제를 교차로 3세션씩 총 6세션 진행하였으며, 본 연구에서는 MI 데이터만 활용하였다. 각 MI 세션은 20회의 10초 MI 시도로 구성되었다. 데이터셋 2는 건강한 성인 52명(남 33명, 여 19명, 24.8 ± 3.9세)을 대상으로 5세션의 MI 과제를 수행하였다. 각 세션은 40회의 3초 MI 시도로 구성되었다. 데이터셋 3은 건강한 성인 54명(남 29명, 여 25명, 24.2 ± 3.0세)이 참여하였으며, 2일간 2세션을 진행하였다. 각 세션은 100회의 4초 MI 시도로 구성되었다. 데이터셋 4는 급성기 뇌졸중 환자 50명(남 39명, 여 11명, 56.70 ± 10.57세)을 대상으로 진행되었으며, 단일 세션은 40회의 4초 MI 시도로 구성되었다. 신호 품질 저하로 4명이 제외되어 최종적으로 46명의 데이터가 분석에 활용되었다.

EEG 데이터는 전처리를 위해 2초의 사전 작업 기간과 과제 수행 기간으로 분할하고, 1–50 Hz의 대역통과필터와 50 Hz의 대역저지필터(단, 데이터셋 2와 3은 60 Hz)를 적용하였다. 이후, 200 Hz로 다운샘플링하고, 공통 평균 참조를 통해 전체 채널에 공통적으로 유입된 잡음 성분을 제거하였다. 마지막으로, 독립 성분 분석을 통해 EEG에 포함된 안구전도 및 근전도 성분을 제거하였다.

전처리된 데이터는 MI 과제 구간만 추출하여, 각 시행마다 고속 푸리에 변환(fast Fourier transform, FFT)을

수행하고 δ (1–3 Hz), θ (4–7 Hz), α (8–13 Hz), β (13–30 Hz) 대역의 파워 스펙트럼 밀도(power spectral density, PSD)를 산출하였다. 산출된 PSD 값은 전두엽(F3, F4), 중추엽(C3, C4), 두정엽(P3, P4), 후두엽(O1, O2), 측두엽(T7, T8) 영역별로 평균하였으며, 선택된 10개 채널 전체의 평균도 함께 계산하였다(그림 1). 이후 피험자별로 시행 단위의 피로도 지표를 계산하고, 세션 간 휴식에 따른 변동성을 최소화하기 위해 세션 간 동일한 시행 순서를 평균하였다. 마지막으로, 데이터셋별로 시행 단위의 피험자 전체 평균을 도출하였다. 본 연구는 MI 세션이 진행될수록 피로도가 증가한다는 선행 연구에 근거하여[1], 시행 횟수와 피로도 지표 간의 피어슨 상관관계(Pearson's correlation)를 데이터셋별로 산출하여 세션 내 피로 지표의 변화 양상을 평가하였다.

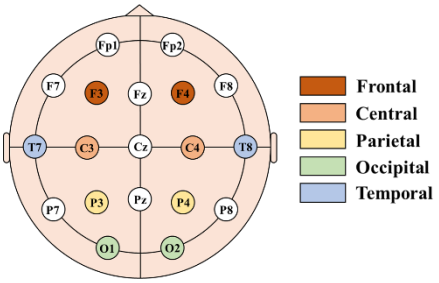


그림 1. 연구에 선택된 두피 영역별 채널

3. 연구 결과

그림 2는 MI 시행 횟수와 피로도 지표 간의 상관계수(r)를 네 개의 데이터셋별로 산출해 히트맵으로 시각화한 결과이다. 각 행은 피로도 지표를, 각 열은 두피 영역을 나타내며, 통계적으로 유의한 값($p < 0.05$)은 숫자로 표시했다. 상관계수는 -1일수록 파란색, 1일수록 빨간색으로 표현했으며, 각 데이터셋에서 가장 높은 상관계수를 보인 지표는 검정색 박스로 표시하였다.

모든 지표에서 일부 통계적으로 유의하지 않은 영역($p > 0.05$)을 제외하고, MI 시행 횟수와 일관된 양의 상관관계가 확인되었다. 특히, 건강한 피험자 데이터셋에서는 모두 전두엽의 β 파워가 가장 강한 양의 상관관계(데이터셋1: r = 0.96, 데이터셋2: r = 0.93, 데이터셋3: r = 0.76; $p < 0.05$)를 보였다. 반면, 뇌졸중 환자의 경우에는 중앙엽의 α 파워에서 가장 강한 상관관계($r = 0.80; p < 0.05$)가 관찰되었으며, 전두엽 β 파워 역시 높은 수준(r = 0.70; $p < 0.05$)의 상관관계를 유지하였다.

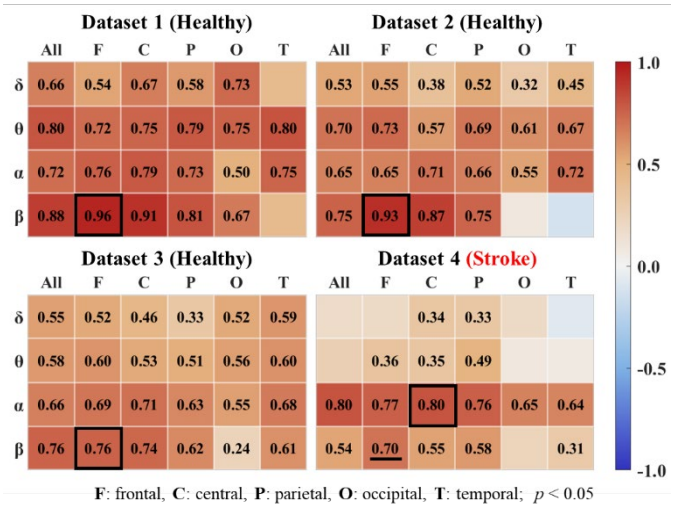


그림 2. 피로도 지표와 시행 횟수 간 상관계수 히트맵

본 연구는 네 개의 공개 BCI 데이터셋을 활용하여 피로도 지표별로 MI 시행에 따른 변화를 피어슨 상관계수를 통해 분석하였다. 그 결과, 건강한 집단과 뇌졸중 집단 모두에서 피로도 지표와 시행 횟수 간 양의 상관관계가 확인되어 MI 수행 중 누적되는 정신적 피로를 반영할 수 있음을 보였다. δ와 θ 지표의 증가는 졸림과 피로 누적과 관련이 있으며[1], α와 β 지표의 증가는 주의 집중과 밀접하게 연관되어 있어[1], 반복적인 과제 수행 중 지속적인 집중이 피로 누적을 유발했을 가능성을 보여준다.

특히 건강한 집단에서 전두엽 β 파워는 시행 횟수와 정신적 피로 간에 가장 강한 상관관계를 보였다. β 대역은 운동 실행뿐 아니라 주의 조절 및 인지적 노력과 밀접하게 관련되어 있으며[1], 전두엽은 운동 계획과 고차원 인지 기능을 담당하는 핵심 영역으로 알려져 있다. 이러한 신경생리학적 메커니즘을 고려하면, 전두엽 β 파워는 MI 수행 중 누적되는 정신적 피로를 반영하는 핵심 지표로 기능할 수 있음을 시사한다.

한편 뇌졸중 환자의 경우, 중앙엽 α 파워가 시행 횟수와 가장 두드러진 상관관계를 보였다. 선행 연구에 따르면 뇌졸중 환자는 뇌졸중 후 피로를 경험하는 것으로 알려져 있으며, 이러한 만성 피로를 겪는 환자군은 건강인보다 α 파워가 유의하게 증가하고 더 빠르게 피로를 경험한다고 보고된 바 있다[2]. 따라서 본 연구에서 확인된 중앙엽 α 파워와 시행 횟수 간의 높은 상관관계는 뇌졸중 후 피로와 같은 만성적 피로가 MI 수행 과정에서 누적되는 정신적 피로와 결합된 결과로 해석된다. 또한 전두엽 β는 뇌졸중 환자에서도 건강한 집단과 유사하게 높은 상관관계를 유지하여 두 집단에서 공통적으로 활용 가능한 핵심 피로도 지표로 확인되었다. 결론적으로, 뇌졸중 환자의 중앙엽 α는 환자 특성을 반영하는 피로도 지표로 기능할 수 있어, 전두엽 β와 함께 고려하는 접근이 환자 맞춤형 피로 모니터링에 보다 적절함을 시사한다.

4. Acknowledgements

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 정보통신기획평가원-대학ICT연구센터(ITRC)의 지원(IITP-2025-RS-2023-00258971, 50%)과 한국연구재단(NRF)의 지원을 받아 수행되었음 (No. RS-2024-00397674, 50%)

5.참고 문헌

[1] Talukdar, Upasana, Shyamanta M. Hazarika, and John Q. Gan. "Motor imagery and mental fatigue: Inter-relationship and EEG based estimation." *Journal of computational neuroscience* 46 (2019): 55-76.

[2] Wu, Tong, et al. "Electroencephalogram characteristics in patients with chronic fatigue syndrome." *Neuropsychiatric Disease and Treatment* (2016): 241-249.

[3] Shin, Jaeyoung, et al. "Open access dataset for EEG+ NIRS single-trial classification." *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* 25.10 (2016): 1735-1745.

[4] Cho, Hohyun, et al. EEG datasets for motor imagery brain–computer interface. *GigaScience*, 2017, 6.7: gix034.

[5] Lee, Min-Ho, et al. EEG dataset and OpenBMI toolbox for three BCI paradigms: An investigation into BCI illiteracy. *GigaScience*, 2019, 8.5: giz002.

[6] Liu, Haijie, et al. "An EEG motor imagery dataset for brain computer interface in acute stroke patients." *Scientific Data* 11.1 (2024): 131.

Poster-069

가속도계 기반 무음 발화 인터페이스를 위한 효과적인 센서 배치 탐색

최희진[1], 정성민[2], 손장재[3], 임창환[1,2,3,*]

한양대학교 바이오메디컬공학과[1], 인공지능학과[2], 융합전자공학과[3]

Investigation of Effective Sensor Configurations for an Accelerometer-based Silent Speech Interface

Heejin Choi[1], Sungmin Jung[2], Jang Jay Sohn[3], Chang-Hwan Im[1,2,3,*]

[1]Department of Biomedical Engineering, Hanyang University, Seoul, Republic of Korea

[2]Department of Artificial Intelligence, Hanyang University, Seoul, Republic of Korea

[3]Department of Electronic Engineering, Hanyang University, Republic of Korea

Abstract

Accelerometer-based Silent Speech Interface (SSI) is a promising communication method without vocalization due to small size, sensitivity to speech-related movement, and durability. This is the first study to investigate sensor configurations suitable for an accelerometer-based SSI to detect speech-related movement. 20 participants were instructed to silently speak 100 English words over 5 sessions and we collected signals from 10 accelerometers attached near the mouth and chin. Using data of 3 sessions, we trained the models for each subject and 10-fold cross validation was used to evaluate the classification accuracy. By evaluating the performance of all possible sensor configurations, we determined the optimal sensor configuration, which showed 92.56 ± 4.77 % classification accuracy. Furthermore, we proposed a practical configuration that achieved comparable performance, 89.42 ± 6.15 %, with only 2 accelerometers, which could be developed as a mask-compatible wearable device.

1. 연구 배경

오늘날 다양한 기술을 바탕으로 발성하기 어려운 환경에 있는 사람들을 위한 무음 발화 인터페이스 (Silent Speech Interface, SSI)가 연구되고 있다. 본 연구팀에서는, 3축 가속도계를 사용한 SSI를 최초로 제안하였으며 [1], 4개의 가속도계 센서로 40개 단어에 대해 95.58 ± 1.83%의 높은 정확도를 보인 바 있다. 그러나 해당 연구에서 사용한 센서 위치는 안면부 표면 근전도 기반 이전 연구 결과를 바탕으로 한 것으로, 근육의 전기 신호를 측정하는 근전도와는 다르게 입과 턱 등의 발음기관의 직접적인 움직임을 감지하는 가속도계의 특성과는 맞지 않는 한계가 있었다. 실제로 해당 연구에서는 발음기관과 거리가 먼 광대에 부착한 센서는 다른 센서에 비해 유의미하게 낮은 성능을 보여서 제외되었다. 이러한 이유로 추후 우수한 성능의 인터페이스를 위해서는 발화 시 물리적 움직임을 측정하는 가속도계의 특성을 반영하여 센서 위치를 최적화해야 할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 최초로 가속도계 기반 SSI에 효과적인 센서 배치를 탐색하고자 한다. 나아가, 적은 개수로 비슷한 성능을 보이는 실용적인 센서 배치와 함께 이를 활용한 웨어러블 디바이스 구현 가능성을 제시하는 것까지 목표로 한다.

2.연구 방법

본 연구에서는 관성 측정 장치(Inertial Measurement Unit, IMU)로 MPU 9250 (TDK InvenSense, SanJose, CA, USA)가 사용되었으며, IMU의 신호 중 3축 가속도계 신호만으로 본 연구를 진행하였다. IMU 센서 하나가 한 채널로, 각 디바이스에 5 채널의 IMU를 연결해서 10 채널의 IMU는 2개의 디바이스에 분산되어 데이터 수집이 진행되었다. 각 IMU는 ESP32 (Espressif Systems, Shanghai, China)와 I2C 통신으로 데이터 송신이 이루어졌으며, Wi-Fi 기반 통신 프로토콜을 통해 ESP32에서 PC로 송신되었다. 센서 위치는 선행 연구 [1, 2]의 결과와 카메라 모션 캡처를 사용한 발화 시 얼굴과 목 움직임 연구 [3]을 참고하여 그림 1과 같이 선정하였다. 두 대의 디바이스를 좌, 우 어깨에 하나씩

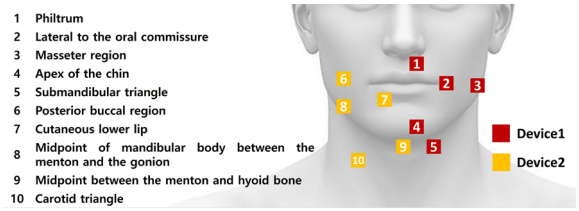


그림 1 가속도계 센서 위치

고정하여 센서 5개씩 좌 혹은 우측 얼굴에 부착하였다. 개인마다 발화 시 좌우 얼굴 움직임에 차이가 있을 것을 고려하여 피험자마다 두 디바이스의 부착 방향을 다르게 좌, 우 번갈아 가며 실험을 진행하였다.

20명의 피험자가 실험에 참여하였으며, 실험은 한양대학교 기관생명윤리위원회의 승인을 받고 진행되었다(IRB No.HYU-2024-217). 피험자는 100개의 영어 단어를 소리 내지 않고 발화하였으며 이를 총 5회 반복하였다. Unity (Unity Technologies, San Franscico, CA, USA) 프로그램을 통해 해당 단어를 제시되었으며, 피험자는 직접 스페이스 바를 누르면 나오는 소리 신호에 맞춰 4초 동안 해당 단어에 대해 무음 발화를 수행하였다. 10개의 가속도계에서 단어마다 4초의 데이터가 100Hz로 측정되었으며, 통신 장애 등으로 발생한 이상치의 경우 눈으로 판단하여 제거한 후, [1]과 같이 50Hz로 다운 샘플링하여 사용했다. 즉, 한 세션 마다 (200개의 시간 샘플, 10개의 센서X3개의 축, 100개의 단어)로 데이터를 전처리했다.

가속도계 데이터는 z-score 정규화를 거친 후 [1]을 참고하여 설계된 CNN-BiLSTM 구조의 모델에 입력되고, 100개의 단어를 분류하도록 학습된다. 피험자 마다 총 5세션의 데이터에서 3세션으로 모델을 학습시키고, 나머지 2 세션으로 테스트하여, 모든 경우의 수에 대해 10겹 교차 검증을 통해 모델의 성능을 도출하였다. 가능한 모든 센서 조합을 가지고 모델을 학습시켜 성능을 구했으며, 피험자 전체를 평균 내어 센서 배치 마다 정확도를 산출하였다. 모든 센서 배치를 정확도 순으로 내림차순 정렬을 한 뒤, 가장 높은 평균 정확도의 센서 배치와 나머지 센서 배치의

정확도 간에 유의미한 차이가 있는지 윌콕슨 부호 순위 검정을 수행하여 FDR 보정된 p-value 값을 도출하였다. p-value 값이 0.05 이상, 즉 통계적으로 유의미한 차이가 없는 센서 배치 중에서 개수가 가장 적고, 정확도가 높은 센서 배치를 최적화된 센서 배치로 선정하였다.

3. 연구 결과

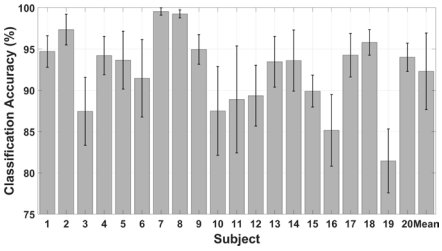


그림 2 센서 [1, 4, 5, 7, 8] 사용 시 피험자별 평균 정확도

센서 [1, 2, 4, 5, 7, 8, 9, 10] 조합의 평균 정확도는 92.56 ± 4.77 %로, 전체 피험자 기준 가장 높은 성능을 보였다. 이와 통계적으로 유의미한 차이가 없으면서도 센서 수가 가장 적고 정확도가 높은 조합은 센서 [1, 4, 5, 7, 8] (92.30 ± 4.64 %) 이었다. 따라서 본 연구에서는 센서 [1, 4, 5, 7, 8] 조합을 최적화된 센서 배치로 선정하였다. 그림 2는 해당 조합에 대한 피험자별 10겹 교차 검증 평균 정확도와 표준편차를 나타낸 것이다. 이후 그림 3과 4에서는 선정된 센서 조합 또는 그 조합에 포함된 센서들을 진한 색상으로 표시하였다.

그림 3(a)는 단일 센서만을 사용하여 무음 발화 분류를 수행했을 때의 피험자 전체 평균 정확도와 표준편차를 보여준다. 그 결과, 7번 센서가 85.69 ± 7.67 %로 가장 높은 정확도를 기록하였고, 4번, 8번, 5번, 1번 순으로 높은 성능을 보였다. 선정된 센서 배치 [1, 4, 5, 7, 8]은 모두 상위 5개 단일 센서 안에 포함되었다.

그림 3(b)는 섭동 기반 설명 가능성 분석을 통해 산출된 센서별 기여도를 나타낸 것이다. 이 기법은 입력 데이터의 특정 부분을 인위적으로 변형(섭동)시킨 뒤, 그 변화가 모델 출력에 미치는 영향을 반복적으로 평가하여 모델의 의사결정 근거를 해석하는 방법이다 [4]. 구체적으로, 10개 센서 데이터를 모두 이용해 모델을 학습시킨 뒤, 테스트 시에는 하나의 센서 데이터를 시간 축에 따라 무작위로 섞어 해당 센서 값을 무력화하였고, 이때의 정확도 감소량을 통해 센서별 중요도를 평가하였다. 그림 3(b)는 이러한 방식으로 각 센서를 무력화시켰을 때의 성능 차이를 보여준다. 1번 센서를 섭동 시켰을 때의 정확도가 12.25 ± 4.69 % 하락하며 가장 큰 감소폭을 보였다. 이는 1번 센서 단독으로는 발화 정보를 충분히 포함하지 않지만, 다른 센서에서는 얻을 수 없는 고유한 정보를 제공함을 의미한다. 다음으로 7번, 8번, 4번, 5번 센서의 순으로 성능 저하가 크게 나타났으며, 선정된 센서 배치의 모든 센서가 역시 상위 5개 기여도 센서에 포함되었다.

그림 4는 센서 개수마다 가장 높은 정확도를 보는 센서 조합의 정확도를 나타낸 것이다. 그래프에서 확인할 수 있듯이, 4개 이상의 센서를 사용할 경우 센서를

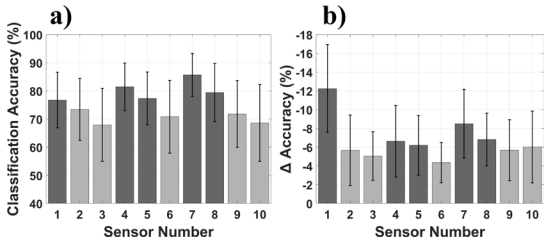


그림 3 (a) 센서별 성능 (b) 섭동에 의한 정확도 감소량

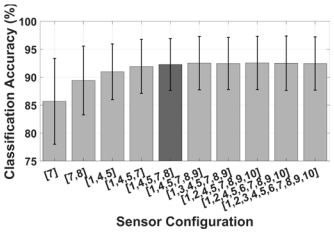


그림 4 센서 개수마다 가장 높은 성능의 센서 배치

추가하더라도 성능 향상은 거의 없었다. 이는 4-5개의 가속도계만으로도 무음 발화 인식이 충분히 가능함을 의미한다. 또한, 센서 개수가 늘어날수록 높은 정확도와 기여도를 보인 센서들이 조합에 포함되는 경향이 있었으나, 일부는 이러한 경향과 일치하지 않았다. 이는 센서 개별 성능뿐 아니라, 센서 간 상호보완적 특성 또한 전체 인식 성능에 중요한 영향을 미친다는 점을 시사한다.

4. 연구 고찰

센서 [1, 4, 5, 7, 8] 조합은 본 연구에서 제안한 최적화된 센서 배치이다. 최적화된 센서 배치와 더불어 웨어러블 기기 적용을 위한 최소 개수의 배치로 센서 [7, 8]번을 사용할 것을 제안한다. 2개의 센서 위치 선택에 대한 근거는 다음과 같다. 1번 센서는 인중에 위치하여 착용이 불편하고 장시간 착용이 어렵다. 5번은 목에 부착하는 센서로 일정한 위치에 부착하기 어렵고, 개인마다 부착하는 위치의 차이가 나서 성능의 편차가 크다. 또한, 목의 특성상 부착한 센서 위치 자체가 변하기가 쉬워서 신호의 변동성이 크다. 이후 센서 4번을 포함한 조합 [4, 7, 8]과 제외한 조합 [7, 8]의 성능이 각각 89.51 ± 6.40 %, 89.42 ± 6.15 %로 통계적으로 유의미한 차이가 나지 않음 ($p = 0.736$)을 확인하고 더 적은 개수의 센서 배치를 선택하였다. 센서 7번 (85.69 ± 7.67 %)과 8번 (79.44 ± 10.32%) 모두 단독으로만 사용했을 때도 성능이 높았으며, 이는 해당 센서가 상당히 많은 발화 움직임에 대한 정보를 포함하고 있음을 의미한다. 섭동에 의한 정확도 감소량 역시 7번 (8.50 ± 3.67 %)과 8번 (6.82 ± 2.81 %) 센서 모두 컸고, 이는 해당 센서만의 고유한 정보가 무음 발화 인식에 기여함을 보여준다. 따라서 본 연구에서는 7번과 8번 위치에 가속도계 센서를 배치하여 마스크 형태의 기기를 구현하는 것을 사용자의 편의성과 인식 성능을 동시에 만족시키는 실용적인 방안으로 제안한다.

5. Acknowledgements

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00348497).

6. 참고 문헌

[1] J. Kwon, H. Nam, Y. Chae, S. Lee, I. Y. Kim, and C. H. Im, "Novel three-axis accelerometer-based silent speech interface using deep neural network," (in English), *Eng Appl Artif Intel,* vol. 120, Apr 2023, doi: ARTN 105909 10.1016/j.engappai.2023.105909.

[2] J. Kwon, J. Hwang, J. E. Sung, and C. H. Im, "Speech synthesis from three-axis accelerometer signals using conformer-based deep neural network," *Comput Biol Med,* vol. 182, p. 109090, Nov 2024, doi: 10.1016/j.compbiomed.2024.109090.

[3] L. Xie, L. Wang, and S. Yang, "Visual speech animation," *Handbook of Human Motion,* pp. 1-30, 2016.

[4] M. Ivanovs, R. Kadikis, and K. Ozols, "Perturbation-based methods for explaining deep neural networks: A survey," (in English), *Pattern Recogn Lett,* vol. 150, pp. 228-234, Oct 2021, doi: 10.1016/j.patrec.2021.06.030.

Poster-070

웨어러블 기기 교정을 위한 저비용 심혈관계 다중 생체신호 시뮬레이션 시스템 개발

정지우[1,3*], 투멘후슬렌[1], 이상원[1,3], 김봉조[1], 나강오[1], 웨이춴[2,3]

계명대학교 일반대학원 의용공학과[1]

계명대학교 공과대학 의용공학과[2]

주식회사 클레어오디언스[3]

Development of a Low-Cost Cardiovascular Multi-Physiological Signal Simulation System for Wearable Device Calibration

JiWoo Jung[1,3*], Tumenkhuslen Delgerkhaan[1], SangWon Lee[1,3], BongJo Kim[1], GangOh Na[1], Qun Wei[2,3]

Dept. of Biomedical Engineering, Graduate School, Keimyung University, Korea[1]

Dept. of Biomedical Engineering, College of Engineering, Keimyung University, Korea[2]

Clairaudience Co., Ltd[3]

weiqun@kmu.ac.kr

Abstract

Using multimodal wearable devices to diagnose cardiovascular diseases early is essential for providing timely medical assistance, particularly in remote areas. This approach helps prevent risks and reduce mortality rates. However, prolonged use of medical devices can lead to measurement inaccuracies, necessitating calibration to maintain precision. Unfortunately, wearable devices often lack affordable calibrators that are suitable for personal use. This study introduces a low-cost simulation system for phonocardiography and photoplethysmography signals designed for a multimodal smart stethoscope calibration. The proposed system was developed using a multicore microprocessor, two digital-to-analog converters, an LED light, and a speaker. It synchronizes dual signals by assigning tasks based on a multitasking function. The simulation signals are generated from preprocessed PCG and PPG signals collected during in vivo experiments. A prototype device was manufactured to evaluate performance by measuring the generated signal using an oscilloscope and a multimodal smart stethoscope. The preprocessed signals, generated signals, and measured by the smart stethoscope were compared and evaluated through correlation analysis. The experimental results confirm that the proposed system accurately generates the features of the physiological signals and remains in phase with the original signals.

1. Introduction

Early detection of cardiovascular disease is crucial because timely management through counseling and medication can significantly improve patient outcomes and reduce mortality rates. However, in rural and remote areas, early diagnosis is often ineffective or unavailable, and treatment is frequently delayed due to limited medical infrastructure, lack of services, and economic constraints. These issues lead to adverse health consequences, highlighting the urgent need for remote health monitoring systems that allow individuals in these regions to communicate with healthcare professionals. Consequently, the use of IoT-based wearable health devices for self-diagnosis has gained popularity and shows significant potential for enhancing health monitoring.

This study aims to develop a low-cost physiological signal simulation system for calibrating wearable devices. To achieve this goal, a multimodal smart stethoscope (Synesper, Clairaudience, Korea) has been chosen as the target for calibration system development. The proposed calibration device is designed as a simulation system featuring an adjustable PCG and PPG signal generation system, allowing for the simultaneous calibration of the multimodal smart stethoscope's dual signal sensors within a single setup. This system comprises a high-performance microprocessor for signal generation, a speaker, and an LED light-emitting component for individually generating heart sounds and pulse signals. It can accurately produce dual signals using a programmable PCG and PPG generation algorithm along with advanced stored data. Additionally, it can simulate various cardiovascular diseases by adjusting the time difference between the two signals. This proposed system will enable residents of remote areas, who often lack access to regular professional maintenance and calibration due to geographic and financial constraints, to conduct self-calibration of their wearable health devices at home. This capability enhances the accuracy and reliability of remote cardiovascular condition monitoring and diagnostic outcomes.

2. Method

The proposed system is designed to include a microprocessor, peripheral digital-to-analog converters (DACs), an audio amplifier, and signal output units, which consist of an LED and a speaker. This setup allows for the simultaneous generation of heart sounds and blood pulse waves. The system operates as follows: the microcontroller (MCU) manages the system and processes the raw data of pre-stored heart sounds and blood pulse waves. The processed pulse wave data is transmitted to the DAC via the Inter-Integrated Circuit (I2C) interface, which converts the digital data into an analog signal. The LED then generates light for the PPG signal, visualizing the pulse waveform through a gradual change in light intensity. Simultaneously, the heart sound data is sent to the DAC through an Inter-Integrated Circuit Sound (I2S) interface, which also converts this data into an analog signal. Then, the converted heart sound is amplified by an audio amplifier and output through the speaker.

Figure 1 shows the 3D model of the proposed physiological signal simulation system device. The design consists of two main components: the top part, which features an LED light to emit pulse waves and houses the device's hardware, and the bottom part, which contains a speaker to produce heart sounds and serves as a platform for holding the measurement device. This configuration allows the multimodal smart stethoscope to be positioned between the two sections, ensuring precise alignment of the sensors for accurate measurements. The prototype is manufactured using a 3D printer with ABS material. For calibration purposes, the multimodal smart stethoscope was placed on the device. In this setup, the microphone of the smart stethoscope is positioned above the speaker of the prototype, while the PPG sensor is located below the LED light. This design enables the smart stethoscope to simultaneously measure the generated heart sounds and pulse waves.

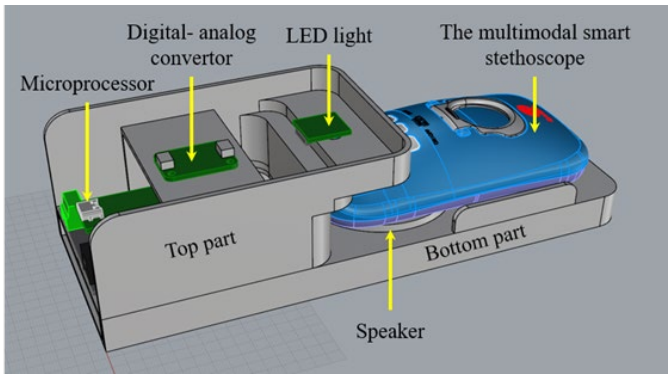


Figure 1. 3D model of the proposed device design

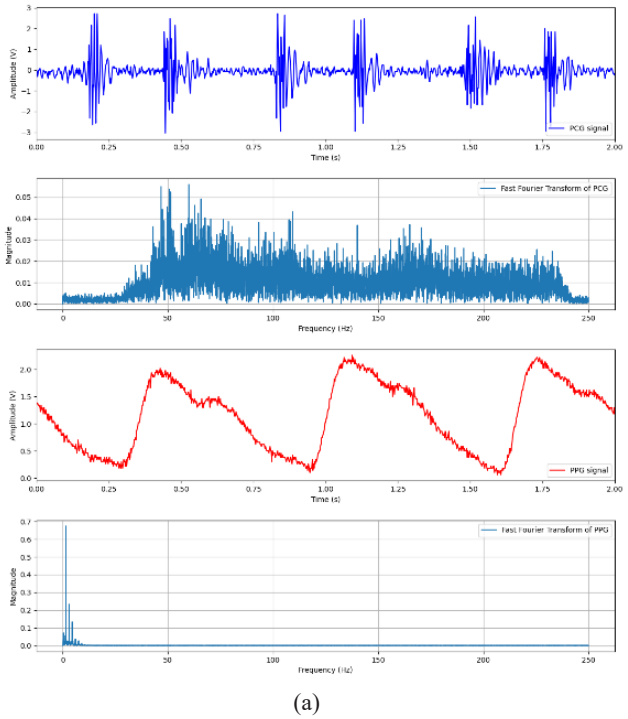
3. Results

To evaluate the performance of the proposed system, a digital oscilloscope (MDO4104C, Tektronix, USA) was connected to two DACs to measure the generated PCG and PPG signals. Additionally, a multimodal smart stethoscope was used in conjunction with the prototype to simultaneously measure the final output signal. The PCG and PPG signals were generated continuously, and a 20-second measurement period was recorded. After the measurement, the original raw data, as well as the data captured by the oscilloscope and the multimodal smart stethoscope, were collected and converted into PCG and PPG signals. This allowed for comparing the signal shape, frequency components, and phase variations, as shown in Figure 2.

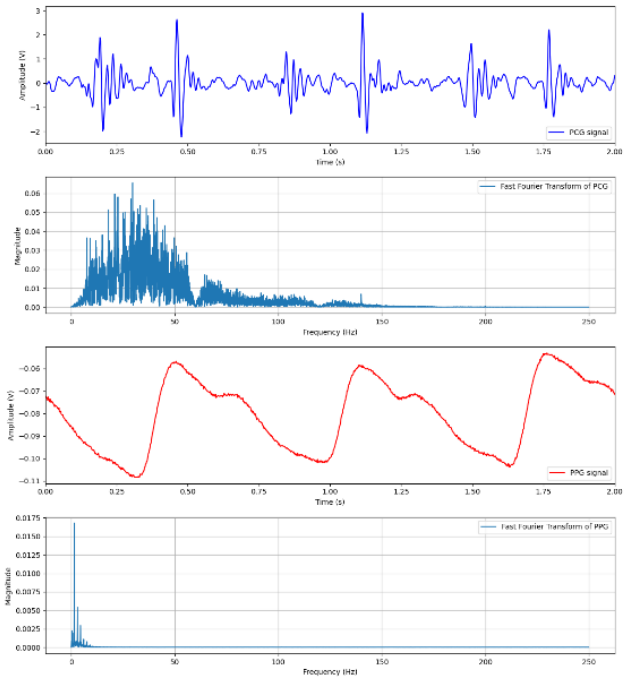
Based on the experimental results in Figure 3, the developed simulation system can accurately generate both the PCG and PPG in an analog signal simultaneously before they are output through the speaker and LED. However, the PCG and PPG signals measured by the multimodal stethoscope exhibited significant distortion in their shapes. The distortion in the PCG signal is likely due to a mismatch between the speaker and the amplifier, which prevents the signal from being fully reconstructed across all frequency bands for the heart sound. Additionally, the diaphragm of the multimodal stethoscope was placed directly on the speaker, rather than on a human chest, resulting in a sound amplitude that is several times larger than a normal signal value. For the PPG signal, the issue arises because the light emitted by the LED does not reflect off the skin; instead, it travels directly through the air to the PPG sensor. This leads to a signal that does not accurately correspond to a real human pulse.



Figure 2. Diagram of the process



(a)



(b)

Figure 3. An example of one subject's measurement data of PCG and PPG signals with FFT of the signals

4. Acknowledgements

본 연구는 2025년도 중소벤처기업부의 창업중심대학 지원사업에 의한 연구 결과이며, 주관기관인 대구대학교 창업지원단의 지원을 받아 수행되었음 [20326479]

Poster-071

내장형 인공지능 기반 생체신호 분석 모바일 시스템

이재혁[1*], 양혜정[2], 송강일[2†]

국립부경대학교 컴퓨터공학부[1]

국립부경대학교 스마트헬스케어학부[2]

On Device AI Based Bio-Signal Analysis system for Mobile

Jaehyeok Lee[1*], Hyejeong Yang[2], Kang-Il Song[2†]

Division of Computer Engineering and Artificial Intelligence, Pukyong National University, Korea[1]

Division of Smart Healthcare, Pukyong National University, Korea[2]

*qw803qw803@pukyong.ac.kr

Abstract

Wireless mobile biosignal monitoring systems have emerged as a next-generation measurement modality thanks to their user convenience, continuous data collection, and personalized healthcare capabilities. This study combines a BLE-based wireless platform with on-device AI to develop and evaluate a real-time cardiac disease prediction system that preserves user privacy by eliminating external data transfers. The system comprises an nRF52832 microcontroller and an Android mobile application that stream ECG, EDA, and skin temperature signals via BLE; ECG signals are pre-filtered on the embedded device and then undergo FFT analysis and feature extraction in the mobile app. An XGBoost model trained on the Kaggle "ECG Heartbeat Categorization Dataset" classifies each heartbeat as Normal, Abnormal, or Indeterminate entirely on device. The on-device inference achieved F1 scores of 0.87 for Normal, 0.85 for Abnormal, and 0.96 for Indeterminate classifications. The platform provides real-time biosignal analysis without any server communication. While the current on-device AI model focuses on ECG-based cardiac disease prediction, future work will expand the system to capture additional biosignals—including skin temperature, EDA, and EMG—to enable personalized prediction and analysis of diseases beyond cardiovascular conditions.

1. 연구 배경

최근, 무선 통신 기반 모바일 생체 신호 모니터링 시스템은 사용자 편의성, 낮은 공간 제약성, 연속적 수집, 개인 맞춤형 헬스케어와 같은 이점으로 인해 차세대 측정 방식으로 주목받고 있다. 특히, 실시간으로 시스템이 심전도(ECG, Electrocardiogram), 피부전도(EDA, Electrodermal Activity), 피부 온도를 동시에 측정하는 경우 운동 시의 심혈관계 부하, 자율 신경계 활성, 체온 조절 반응 간의 복합적 상호작용을 분석하여 정밀한 운동 강도 및 피로도를 분석할 수 있다[1].

또한 심전도를 인공지능을 기반으로 하여 정상/비정상 상태를 분류할 수 있다면 실시간으로 이상 징후를 감지할 수 있다. 기술 발전에 따른 모바일 하드웨어의 성능 향상에 따라 모바일 환경에서도 서포트 벡터 머신(Support Vector Machine) 모델을 바탕으로 심전도를 분석한 사례가 있으며[2], 해당 사례에 입각하여 모바일 애플리케이션에 심전도 분석을 위한 기계학습 모델을 적용하고자 하였다.

2. 생체신호 분석을 위한 무선 전자 시스템

2.1. 시스템 개요

우리가 구현한 BLE 기반 무선 전자 시스템은 크게 1) 생체신호를 전압으로 바꿔주는 생체신호 변환기(Bio-Transducer), 2) 변환된 생체신호를 디지털 신호로 전환하고 필요 시 소프트웨어 필터 처리 후 모바일로 전송하는 SoC(System on Chip), 3) 수신한 신호를 시각화하고 Csv 파일로 저장하며, 사전 학습 모델로 분석하는 모바일 장치로 구성된다.

구현된 시스템은 종단 간(end-to-end) 처리 구조로 설계되어, 데이터가 외부 서버로 전송되지 않은 채 기기 내에서 처리되므로 민감 정보 유출 가능성이 없어 의료데이터 처리에 적합하다.

2.2. 무선 전자 시스템

생체신호 계측에서는 실시간 전송 및 연속적 모니터링이 중요하며, 이를 위해서는 무선 전자 시스템의 실시간성이 필수적이다. 실시간 시스템을 구현하기 위해 BLE SoC(nRF52832)와 Zephyr RTOS(Real-Time Operating System)를 사용하였다.

그림 1과 같이 센서 데이터들을 측정하는 ADC를 SoC 내장 하드웨어 타이머로 구동시켜 연속적 모니터링의 정밀성을 확보하였으며 추가적으로 심전도 신호에 소프트웨어 필터 처리를 하여 심전도 신호의 저주파 노이즈, 전원 노이즈, 고주파 노이즈를 모두 제거하였다.

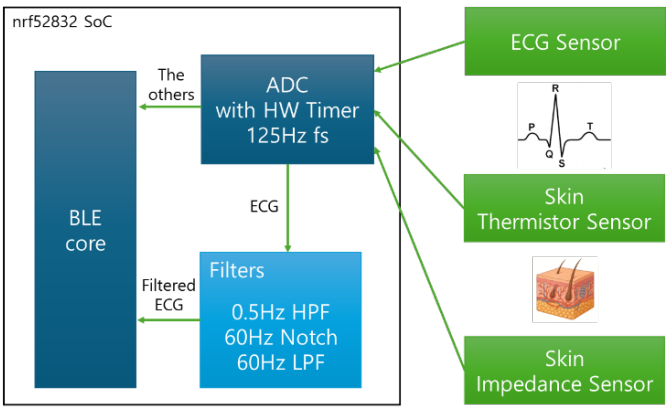


그림 1. BLE SoC 도식도

2.3. 생체신호 계측 하드웨어

심전도는 통합된 전치증폭기(PSL-IECG2)를 활용하여 측정하였다. 안정적인 심전도 측정을 위해 기존 연구를 통해 개발된 3차원 프린터로 제작된 유연전극 및 상용전극(3M)을 선택적으로 활용하였다. 피부 온도의 측정을 위해 MLCC기반의 소형화된 온도센서를 활용하였다. 피부 임피던스 측정 시 안정적인 신호발진을 위해 SoC 내장 오실레이터을 그대로 사용하지 않고 추가적인 오실레이터를 배치하였다.

2.4. 모바일 시스템

상대적으로 기능 제한이 많은 BLE SoC와 달리 모바일 시스템이 가진 컴퓨팅 자원을 활용하여 외부에서 사전 학습시킨 XGBoost(eXtreme Gradient Boosting) 모델을 ONNX(Open Neural Network Exchange) 형식으로 안드로이드 기반 모바일 애플리케이션에 삽입하였다.

이러한 모델을 효과적으로 사용하기 위해 고속 푸리에 변환 결과 수치와 통계적 수치들을 12bit 심전도 신호로부터 얻어내고 이를 모델에 삽입하여 심전도의 이상 유무를 판별하였다.

3. 실시간 온디바이스 인공지능 활용

3.1. 온디바이스 인공지능 모델 학습

학습을 위한 생체신호는 kaggle의 "ECG Heartbeat Categorization Dataset"을 활용하였다[3].

데이터 셋의 심전도 신호는 고정 길이 188의 제로-패딩(Zero-Padding)된 신호들의 집합이었으며, XGBoost의 성능 향상을 위해 심전도의 R 피크의 앞뒤 샘플들을 기준으로, 제곱평균제곱근, 최솟값, 최댓값, 평균, 표준편차의 5가지 통계 수치와 고속 푸리에 변환을 수행한 후 얻은 최대 진폭 주파수, 특정 대역의 에너지 합들(저역구간: 0.5Hz-10Hz, 중역구간: 10Hz-50Hz, 고역구간: 50Hz-100Hz)을 특징으로 추출하여 학습시켰다.

그림 2는 모델 학습 시의 혼동 행렬(Confusion Matrix)이며 Normal, Abnormal, Undefined 각각의 F1-score는 0.87, 0.85, 0.96이다.

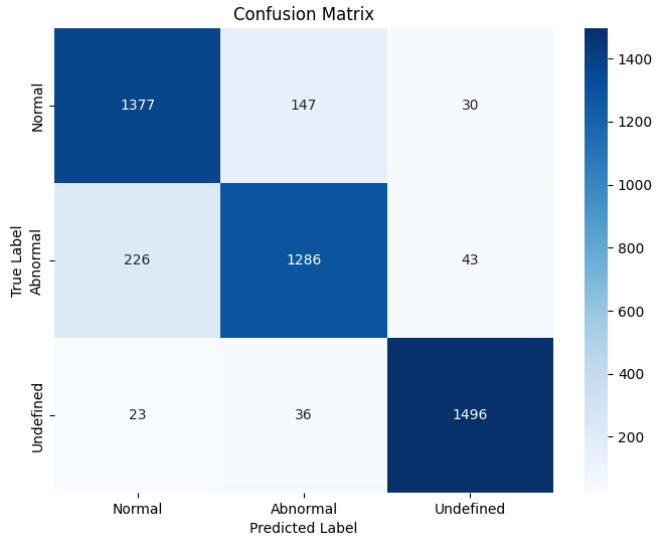


그림 2. 모델 학습 시의 혼동 행렬

3.2. 실시간 심전도 질환 예측

그림 3의 (a)는 실제 구동되는 모바일 애플리케이션의 모습이다. 그림 5의 (b), (c)는 좌측의 상황에서 실시간으로 수집/처리/저장된 데이터를 나타낸 것으로 (b)는 원신호, (c)는 원신호의 심전도 이상 여부를 표현한다. (c)에서 Undef., Abnorm., Norm., NA는 각각 "모델 추론 시 정의되지 않는 심전도", "비정상 심전도", "정상 심전도", "모델이 처리하지 않음"을 의미한다.

최종적으로 실시간으로 수집한 모든 정상 심전도 신호에 대해 기계학습 모델에서 정상 판정이 내려졌다.

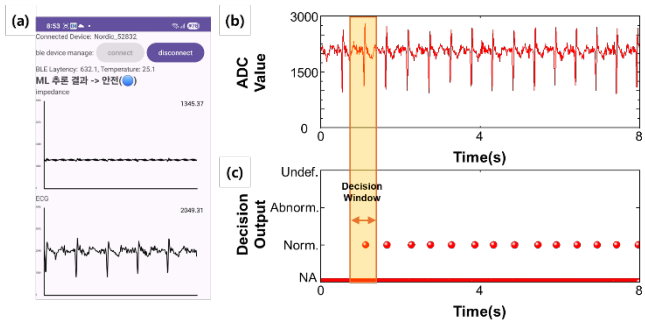


그림 3. 실시간 온 디바이스 인공지능 추론 (a) 구동된 모바일 애플리케이션 그림, (b) 원본 심전도 신호(ADC Value), (c) 심전도 모델 추론 결과(Decision output)

4. 논의

현재 구현한 시스템의 인공지능 모델은 심전도를 기반으로 하여 심장 질환 예측에 중점을 두고 있으나, 현 모바일 시스템에서 수집 가능한 다양한 생체 신호(피부 체온, 피부전도, 근전도)들을 활용하여 향후 우리의 시스템을 심장 질환 외 개인 맞춤의 질환 예측 및 분석을 위해 사용할 예정이다.

5. Acknowledgements

이 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2024-00337597)

6.참고 문헌

[1] J. A. Castro-García, A. J. Molina-Cantero, M. Merino-Monge, C. Lebrato-Vázquez and I. M. Gómez-Gónzalez, "The Effect of Demanding Mental Tasks on Electrodermal Activity and Heart Rate During Physical Activity: A Pilot Study," IEEE Access, Vol. 11. p. 46665-46677, 2023

[2] Aziz, S., Ahmed, S. & Alouini, MS. ECG-based machine-learning algorithms for heartbeat classification. Sci Rep 11, 18738 (2021). https://doi.org/10.1038/s41598-021-97118-5

[3] Mohammad Kachuee, Shayan Fazeli, and Majid Sarrafzadeh. "ECG Heartbeat Classification: A Deep Transferable Representation." arXiv preprint arXiv:1805.00794 (2018).

Poster-072

Smart Glasses 기반 Around-Ear EEG 측정 시스템의 개발 및 검증

손효원[1*], 백현재[1]

순천향대학교 바이오메디컬공학과[1]

Development of a Smart Glasses-Based Around-Ear EEG System and Validation

Hyo Won Son[1*], Hyun Jae Baek[1]

Department of Biomedical Engineering, SoonChunHyang University, Korea

*gydnjs0192@sch.ac.kr

Abstract

In this study, we developed an Around-Ear EEG measurement device applicable to smart glasses and investigated its feasibility for reliable EEG acquisition. The proposed system integrates a miniaturized EEG acquisition PCB and dry electrodes into the frame of smart glasses, enabling non-invasive EEG recording from the area around the ears. To evaluate the performance of the proposed device, three EEG experiments—Alpha Power Modulation, Auditory Steady-State Response (ASSR), and Steady-State Visual Evoked Potential (SSVEP)—were conducted. The results demonstrated meaningful neural responses comparable to those obtained from conventional scalp EEG, confirming the feasibility of stable EEG acquisition using the developed around-ear device. This study highlights the potential of the smart glass platform to evolve beyond a simple information display system into a biological signal-based cognitive state monitoring and Brain–Computer Interface (BCI) application.

1. Introduction

스마트 글래스(Smart Glasses)는 기존의 안경 형태에 센서, 카메라, 디스플레이 등 다양한 전자 부품을 통합한 웨어러블 디바이스이다. 이를 통해, 사용자가 손을 사용하지 않고도 실시간으로 디지털 정보를 인식하고 상호작용할 수 있으며, 현실 세계의 영상에 가상 정보를 중첩하여 표시함으로써 사용자가 현실과 디지털 환경을 동시에 인지할 수 있도록 지원하는 증강현실 기술의 대표적인 응용 사례이다.

본 연구에서는 이러한 스마트 글래스의 형태를 활용하여 안경 프레임에 적용가능한 Around-Ear EEG 측정 디바이스를 개발하였다. 제안된 시스템은 안경 다리 부분에 소형화된 EEG 측정 PCB와 건식 전극을 통합해 귀 주변에서 뇌파를 비침습적으로 측정할 수 있도록 설계하였다. 이는 기존의 헤드셋형 Around-Ear EEG 장비에 비해 편의성과 착용감이 우수하여 일상생활 중에도 안정적인 신호 측정이 가능하다. 이를 통해 스마트 글래스가 단순한 정보 표시 장치를 넘어 인지 상태 분석 및 뇌-컴퓨터 상호작용(Brain–Computer Interaction, BCI) 응용으로 확장될 수 있음을 확인하였다.

2. Development of a Smart Glasses-Based Around-Ear EEG System and Experimental Validation

2_1. Miniaturized EEG Acquisition PCB Design

본 연구에서 스마트 글래스에 뇌파 측정 시스템을 통합하기 위해 Figure 1과 같은 30mm X 30 mm 사이즈를 갖는 소형화된 뇌파 데이터 측정 PCB를 제작했다 [1].

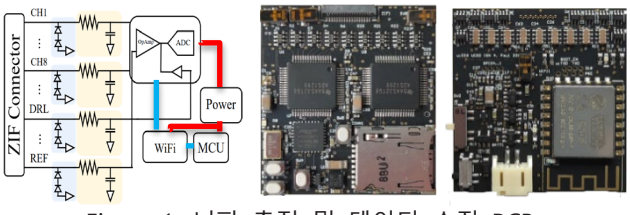


Figure 1. 뇌파 측정 및 데이터 수집 PCB

해당 디바이스는 측정되는 생체전위를 증폭 및 디지털화하기 위해 고입력 임피던스 및 저잡음 특성을 갖는 Analog-Front End(AFE) 칩인 ADS1299를 활용했으며, 신호 왜곡을 최소화하기 위해 차동 신호 증폭 방식을 적용한다. 또한, 고주파 노이즈를 제거하기 위한 아날로그 필터를 포함하며, 802.11n WiFi 프로토콜을 사용하여 데이터의 손실 없이 안정적으로 기록이 가능해 생체 신호를 지속적으로 모니터링하기에 적합하다.

2_2. Fabrication of Smart Glasses Frame with Integrated Dry Electrode

안경 착용 시 뇌파를 측정하기 위해 귀 주변에 위치하는 안경 다리 프레임에 전도성 천을 활용하여 전극을 제작했으며, 안정적인 전극-피부 접촉 인터페이스를 위해 추가적인 3D CAD를 더해 Figure 2와 같은 형태로 제작했다.



Figure 2. 안경 다리 프레임 전극

뇌파 측정을 위한 Reference 전극과 Recording 전극은 안경 다리 프레임에 위치하며, GND 전극은 안경 코받침에 위치하도록 배치했다. Figure 3는 본 연구에서 제시하는 스마트 글래스 형태를 활용한 Around-Ear EEG 측정 디바이스이다.



Figure 3. Around-Ear EEG 측정 디바이스

2_3. Experimental Protocols for Around-Ear EEG Validation

본 연구에서 제안하는 디바이스를 사용해 Around-Ear EEG를 측정하기 위해 Alpha Power Modulation, Auditory

Steady State Response(ASSR), Steady State Visual Evoked Potential(SSVEP)을 측정했다.

Alpha Power Modulation은 eyes open과 eyes closed 상태에 따른 EEG 변화이다. 이는 주의력 또는 이완 상태를 반영하는 8-13Hz의 alpha 대역이 eyes closed 상태에서 증가하는 특성이 존재한다. 본 연구에서는 총 35초 동안 데이터를 수집하며, 15초에 상태 전환을 알리는 cue를 제공했다.

ASSR은 지속적이거나 규칙적인 소리에 대한 뇌의 반응이며, 본 연구에서는 40Hz의 Modulation Frequency와 1kHz의 Carrier Frequency로 발생하는 Sinusoidal 소리를 제시했다. 실험의 duration은 20s이며, trial 10회를 측정하여 Grand Average PSD 분석을 수행했다.

SSVEP은 지속적이거나 규칙적인 시각 자극에 대한 뇌의 반응이며, 본 연구에서는 7.5Hz의 Stimulation Frequency로 깜빡이는 자극원을 제시했다. 실험의 duration은 10s이며 trial 10회를 반복 측정해 Grand Average PSD 분석을 수행했다.

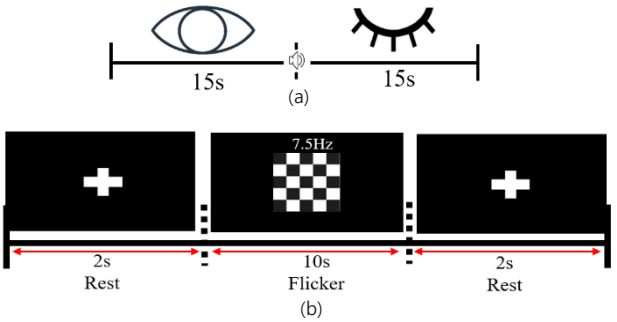


Figure 4. (a) Alpha Power Modulation과 (b) SSVEP 실험 설계

3. Experimental Results

3_1. Alpha Power Modulation

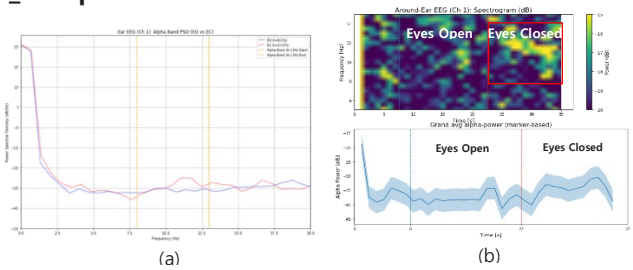


Figure 5. Alpha Power Modulation 실험 결과

Figure 5는 본 연구에서 제시하는 디바이스를 통해 측정된 Alpha Power Modulation 실험에 대한 PSD 분석과 Spectrogram이다. (a)의 그래프에서 빨간색은 눈을 감은 상태이고, alpha 대역에서의 power가 증가한 것을 확인할 수 있다. 또한, (b)의 spectrogram에서 eyes closed로 표시된 구간의 power가 증가함을 확인할 수 있다.

3_2. Auditory Steady State Response (ASSR)

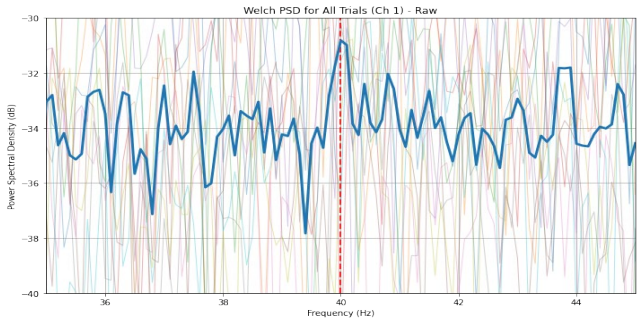


Figure 6. 40Hz ASSR 실험 결과

Figure 6는 본 연구에서 제시하는 디바이스를 통해 측정된 ASSR 실험에 대한 Grand Average PSD 결과이다. 그림에서 빨간색 점선은 실험에서 사용된 modulation frequency인 40Hz를 의미하며, 분석 결과 측정된 신호가 modulation frequency인 40Hz와 동기화된 반응을 보이는 것을 확인할 수 있다.

3_3. Steady State Visual Evoked Potential (SSVEP)

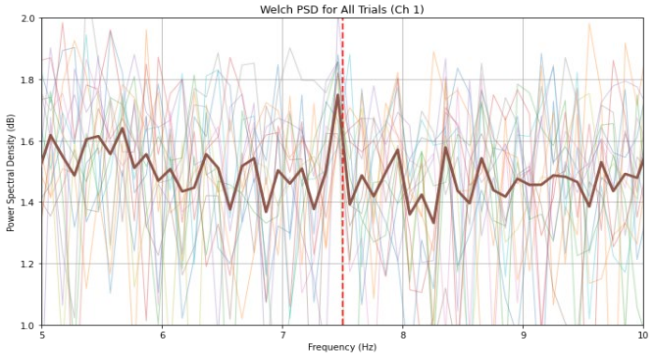


Figure 7. 7,5Hz SSVEP 실험 결과

Figure 7는 본 연구에서 제시하는 디바이스를 통해 측정된 SSVEP 실험에 대한 Grand Average PSD 결과이다. 그림에서 빨간색 점선은 실험에서 사용된 stimulation frequency인 7.5Hz를 의미하며, 분석 결과 측정된 신호가 stimulation frequency인 7.5Hz와 동기화된 반응을 보이는 것을 확인할 수 있다.

4. Conclusion

본 연구에서는 스마트 글래스 형태에 적용 가능한 Around-Ear EEG 측정 디바이스를 개발하고, EEG 측정 가능성을 검증하였다. 이를 위해, 안경 형태에 결합 가능한 소형화된 EEG 측정 PCB를 설계하고, 안정적인 전극-피부 접촉을 위해 3D CAD 기반 구조 설계를 통해 건식 전극 인터페이스를 구현하였다.

제안된 시스템의 성능을 평가하기 위해 Alpha Power Modulation, ASSR, SSVEP를 수행했으며, 각 실험에서 유의미한 반응이 관찰되었다. 이를 통해 본 연구에서 제안한 디바이스가 귀 주변 영역에서 뇌파 측정이 가능함을 확인하였고, 향후 스마트 글래스 기반의 인지 상태 분석 및 BCI 응용으로 확장될 수 있음을 확인하였다.

5. Acknowledgements

This work was supported by a grant from the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Korean government (MSIT) (Grant No. RS-2022-NR069934). This work was also supported in part by the Soonchunhyang University Research Fund, BK21 Fostering Outstanding Universities for Research (FOUR), under Grant 5199990914048.

6.참고 문헌

[1] PAUL, Akshay, et al. A versatile in-ear biosensing system and body-area network for unobtrusive continuous health monitoring. *IEEE transactions on biomedical circuits and systems*, 2023, 17.3: 483-494.

Poster-073

고령자 인지기능 변화 양상에 따른 감각 및 균형 기능의 종단적 분석

윤채린[1], 곽기영[2], 이신영[1], 윤정은[1], 김동욱[2,3,*], 서동권[2]

[1]전북대학교 대학원 헬스케어공학과

[2]전북대학교 공과대학 바이오메디컬공학부

[3]전북대학교 고령친화복지기기연구센터

Longitudinal Analysis of Sensory and Balance Changes According to Cognitive Change Patterns in Older Adults

Chaerin Yun[1], Kiyoung Kwak[2], Sinyoung Lee[1], Jeongeun Yoon[1], Dongwook Kim[2,3,*], Donggwon Seo[2]

[1]Department of Healthcare Engineering, The Graduate School, Jeonbuk National University, Rep. of Korea

[2]Division of Biomedical Engineering, College of Engineering, Jeonbuk National University, Rep. of Korea

[3]Research Center for Healthcare & Welfare Instrument for the Elderly, Jeonbuk National University, Rep. of Korea

[*]biomed@jbnu.ac.kr

Abstract

With global population aging, the prevalence of dementia continues to rise, posing a major public health concern. As no curative treatment exists, early detection and prevention are essential. Mild Cognitive Impairment (MCI), a transitional stage between normal aging and dementia, is a critical target for early interventions. Recent studies suggest that cognitive decline is associated with changes in multisensory functions, including hearing and balance. This longitudinal study investigated sensory and balance changes according to cognitive change patterns in older adults aged 65 years and older. Participants were categorized into maintained, declined, and improved cognition groups based on changes in K-MoCA and Memory Index Scores. Auditory function was evaluated using the Korean Speech Audiometry, and balance function was assessed using Biodex Balance System. Consequently, changes in auditory and balance functions were observed according to cognitive changes. These findings from the longitudinal study suggest that alterations in sensory function may serve as potential biomarkers for predicting cognitive changes.

1. 연구 배경

전 세계적으로 고령화가 진행됨에 따라 치매 유병률은 꾸준히 증가하고 있으며, 이는 개인의 삶의 질 저하뿐 아니라 사회적·경제적 부담을 심화시키는 중대한 공중보건 문제로 부상하고 있다. 치매는 기억력, 주의력, 실행기능 등 다양한 인지 영역에서 점진적인 손상을 보이는 신경퇴행성 질환으로, 현재까지 근본적인 치료법이 부재하다는 점에서 조기 예측과 예방적 개입의 중요성이 강조되고 있다. 이에 따라 치매로의 진행 위험이 높은 경도인지장애(Mild Cognitive Impairment, MCI)는 치매 전 단계에서의 핵심적인 중재 시점으로 주목받고 있다.

경도인지장애는 정상적인 노화 과정을 넘어선 인지기능 저하 상태를 의미한다. MCI는 기억 손상의 존재 여부에 따라 기억상실형(aMCI, amnestic MCI)과 비기억상실형(naMCI, non-amnestic MCI)으로 구분되며, 두 유형은 향후 치매의 진행 경로가 다를 수 있다[1].

최근 연구에서는 인지기능 변화가 단일 인지 영역에 국한되지 않고, 시각, 청각, 후각, 균형 등 다중감각 기능의 변화를 동반한다는 점이 보고되고 있다[2,3]. 감각은 인지와 계층적으로 분리된 과정이 아닌, 정보 처리의 연속적 관계에 있으며[4,5], 인지기능 저하가 감각 처리 효율을 저하시킬 수 있다[6,7]. 즉, 인지기능과 감각기능은 상호의존적 체계로 작동하며[8], 인지기능의 변동은 감각 변화로 반영될 수 있다.

대부분의 선행연구는 정상군과 MCI군 간의 단일 시점의 감각기능 차이를 비교하는 횡단적 연구에 집중되어 있어[9], 시간의 경과에 따른 인지기능 변화 방향(유지, 향상, 감소)에 따른 감각 기능의 변화를 충분히 설명하지 못했다.

이에 본 연구는 동일한 지역사회 고령자를 대상으로한 3개년의 종단 데이터를 기반으로 인지기능 변화 양상에 따라 그룹을 구분하고, 청각 및 균형 기능의 종단적 변화를 분석하였다. 이를 통해 시간에 따른 인지기능 변화를 반영함으로써, 치매의 조기 예측에 활용 가능한 잠재적 바이오마커를 탐색하고자 하였다.

2. 연구 방법

본 연구는 2022년부터 2025년까지 진행되었으며, 만 65세 이상의 지역사회 고령자가 실험에 참여하였다. 모든 연구자들은 본 연구 목적, 내용, 연구, 실험 환경, 실험 절차, 이익, 부작용, 개인정보 및 병력 수집 등에 대한 설명을 듣고 연구참여에 대한 자발적 서면 동의를 얻었다. (JBNU IRB No.2023-11-015-001)

인지기능검사는 한국판 몬트리올 인지기능 평가(K-MoCA)를 사용하였으며, K-MoCA점수에 따라 30~26점은 정상군, 25점 이하는 위험군으로 분류하였고, 위험군은 기억력 감소 정도에 따라 재분류 하기 위해 K-MoCA의 Memory Index score (MIS) 점수에 따라 7점 이하인 참여자를 기억상실형 위험군(aMCIs), 8점 이상인 참여자를 비기억상실형 위험군(naMCIs)으로 분류하였다.

청각 기능은 한국어음청각검사와 청력계를 이용하여 순음청력(Pure Tone Average, PTA)과 어음인지역치(Speech Recognition Threshold, SRT), 단어인지도(Word Recognition Threshold, WRS), 문장인지도(Sentence Recognition Score, SRS)를 검사하였으며, 양쪽 귀 모두를 측정하였다.

균형 기능은 균형 평가 시스템(Balance System SD, Biodex, USA)을 이용해 개안/폐안 조건에서의 정적 자세안정성, 낙상 위험도(Fall Risk, FR), 동적 자세 안정성 한계 등의 검사와 개안/폐안 조건에서의 일자 룸버그 검사를 진행하였다. 정적자세안정성의 경우 PSI(Postural Stability Index), APSI(AnteroPosterior Stability Index), MLSI(MedioLateral Stability Index)를 진행하였다.

분석 대상 변수는 청각기능의 단어 수를 기준으로 채점한 문장인지도와 문장수를 기준으로 채점한 문장인지도 중 좋은쪽 귀의 점수(SRS_W_Better, SRS_S_Better)와 균형기능의 개안시 PSI와 APSI를 사용하였다.

종단적 변화를 통한 그룹간 평균 차이의 유의성을 확인하기 위해 Kruskal-Wallis H test, 일원배치 분산분석(One-way ANOVA)을 사용하였다. 총 3차 종단 데이터 중 1차 및 2차 방문 데이터만 분석하였으며, 샘플 수가 너무 적은 그룹은 분석에서 제외되었다.

3. 연구 결과

3.1 세 그룹의 인구학적 정보

다음의 표1에 세 그룹의 1차 방문시와 2차 방문시의 인구학적

정보와 K-MoCA점수, MIS 점수를 나타냈다.

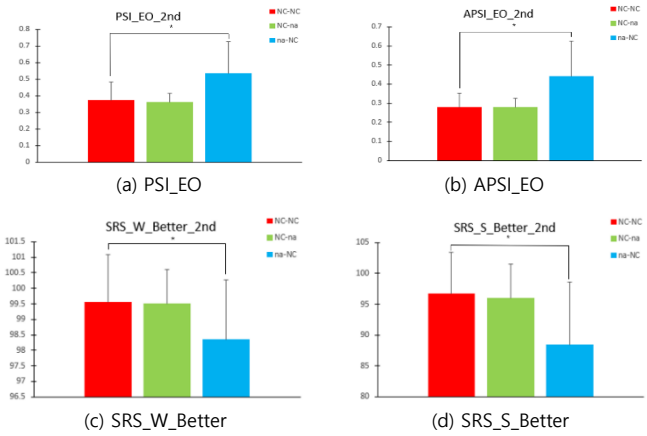
그룹	N (명)	나이 (세)	교육수준 (년)	K-MoCA (점)	MoCA-MIS (점)
NC-NC	27	73.4 ±3.6	14.8 ±2.8	27.0 ±1.4	12.8 ±2.2
				27.0 ±1.3	13.1 ±1.8
NC-naMCIs	5	76.2 ±5.0	15.2 ±2.2	27.0 ±1.2	12.8 ±2.5
				24.4 ±0.8	11.8 ±2.1
naMCIs-NC	12	75.2 ±3.7	12.9 ±4.2	23.7 ±0.8	11.0 ±2
				26.0 ±0.9	13.0 ±2.1

<표1. 세 그룹의 인구학적 정보와 인지기능 점수>

NC- NC는 27명, NC-naMCIs는 5명, naMCIS-NC는 12명으로 구성되었다. MIS 점수가 낮아질수록 나이는 증가하고 K-MoCA점수는 감소하는 경향을 보였다. 이는 지연 회상 기능이 전반적인 인지기능과 연관되어 있고, 연령이 증가함에 따라 기억력 저하가 진행될 수 있음을 나타낸다.

3.2 세 그룹의 평균 차이

다음의 그림 1은 2차 측정 시점에서 세 그룹 간 평균 차이가 유의하게 나타난 균형 및 청각 관련 변수들을 나타낸다.



(a) PSI_EO (b) APSI_EO

(c) SRS_W_Better (d) SRS_S_Better

<그림1. 세 그룹간 평균 차이가 유의한 균형 및 청각 변수>

1차 측정 시점에서는 세 그룹 간 평균에서 유의한 차이가 나타나지 않았으나, 2차 측정 시점에서는 균형 및 청각에서 그룹간 차이가 발생하였다. 2차 측정 시점에서 네 가지 유의 변수에 대한 분석 결과, 인지기능이 정상으로 유지된 그룹과 인지기능이 향상된 그룹 간의 통계에서 유의한 차이가 확인되었다. 반면, 인지기능이 감소한 그룹과는 통계적으로 유의한 차이가 관찰되지 않았다.

3.3 세 그룹의 종단적 변화 비교

다음의 표2에 각 그룹에 대한 감각 변수 중 그룹별 평균에서 유의한 차이를 나타낸 변수의 종단적 변화를 나타냈다.

그룹		PSI_EO (index)	APSI_EO (index)	SRS_W_Better (점)	SRS_S_Better (점)
NC-NC	1st	0.41 ± 0.19	0.32 ± 0.13	99.6 ± 0.9	98.1 ± 3.96
	2nd	0.37 ± 0.11	0.27 ± 0.08	99.5 ± 1.56	99.6 ± 6.79
NC-naMCIs	1st	0.38 ± 0.04	0.28 ± 0.04	99.5 ± 1.12	96.0 ± 5.48
	2nd	0.36 ± 0.05	0.28 ± 0.04	99.5 ± 1.11	96.0 ± 5.48
naMCIs-NC	1st	0.60 ± 0.30	0.40 ± 0.20	99.4 ± 0.99	96.9 ± 6.25
	2nd	0.53 ± 0.19	0.44 ± 0.18	98.3 ± 1.95	88.3 ± 10.23

<표2. 세 그룹의 유의미한 감각 변수의 종단적 변화>

인지기능이 정상으로 유지된 그룹은 개안 시 PSI와 APSI 등 균형 지표에서 기능 향상이 두드러졌으며, 정상군에서 naMCIs로 인지기능이 저하된 그룹은 해당 지표의 향상 폭이 상대적으로 작거나 유지되는 경향을 보였다. 인지기능이 향상된 그룹의 경우 개안 시 PSI는 개선되었으나 APSI는 오히려 감소하는 양상이 나타났다.

청각 관련 지표인 SRS_W_Better와 SRS_S_Better에서, 인지기능이 유지된 그룹은 단어 수를 기준으로 채점한 문장인지도 중 좋은쪽 귀의 점수가 다소 감소했으나 문장 수를 기준으로 채점한 문장인지도 중 좋은쪽 귀의 점수에서는 오히려 향상되는 양상을 보였다. 반면, 인지기능이 감소한 그룹은 두 지표 모두에서 점수 변동이 거의 없었으며, 인지기능이 향상된 그룹에서는 두 지표 모두에서 점수가 감소하는 경향을 나타냈다.

이는 인지기능이 안정적으로 유지될 경우, 청각 기능과 자세 조절 기능이 안정적으로 보존됨을 의미한다. 반면 인지기능에 변화가 발생한 경우에는 감각 기능의 유지보다는 변화가 발생함을 뜻한다.

이러한 결과는 횡단 연구들이 제시하지 못한 시간의 흐름에 따른 인지기능 변화와 감각 기능 간의 연관성을 제시하며, 인지기능 변화에 따라 청각 및 균형 기능과 같은 감각 기능의 차이가 발생함을 보여준다.

본 연구는 종단적 관찰을 통해 시간에 따른 인지기능의 변화가 청각 및 균형 기능에 영향을 미친다는 점을 확인하였다. 즉, 시간의 흐름에 따른 인지기능 변화 방향에 따라 감각 및 균형 기능의 변화를 종단적으로 탐색했다는 점에서 의의가 있으며, 청각 및 균형 기능이 이러한 인지기능 변화를 예측하는 잠재적 바이오마커로 활용될 수 있음을 확인하였다.

향후 더 많은 피험자를 대상으로 한 종단 연구를 통해 이러한 지표의 예측력을 보다 정밀하게 검증할 필요가 있으며, 이를 위한 추가적인 검증 연구가 수행될 필요가 있다.

4. Acknowledgements

이 연구는 정부(과학기술정보통신부 및 교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2022-NR070417, RS-2022-NR074923).

5. 참고 문헌

[1] Vos, Stephanie JB, et. al., "Prediction of Alzheimer disease in subjects with amnestic and nonamnestic MCI." Neurology. Vol. 80, 2013.

[2] Hong S, et. al., "Aging-associated sensory decline and Alzheimer's disease." Molecular Neurodegeneration. Vol. 19, 2024.

[3] Lucas JC, et. al., "Olfactory, auditory, and vestibular performance and cognitive impairment." Frontiers in Neurology. Vol. 13, 2022.

[4] Maneemai C, et. al., "Sensory integration: A novel approach for healthy ageing." Brain Sciences. Vol. 14, No. 3, 2024, p. 285.

[5] Kannan L, et. al., "Multidimensional relationships between sensory/perceptual systems and cognitive aging." Frontiers in Aging Neuroscience. Vol. 16, 2024.

[6] Möller S, et. al., "Sensory impairments and the risk of cognitive decline and dementia." Experimental Gerontology. Vol. 190, 2024.

[7] Zhang NK, et. al., "Sensory processing deficits and related cortical pathological changes in Alzheimer's disease." Frontiers in Aging Neuroscience. Vol. 15, 2023.

[8] Kannan L, et. al., "Multidimensional relationships between sensory perception and cognitive aging." Frontiers in Aging Neuroscience. Vol. 16, 2024.

[9] Pudumjee SB, et. al., "A comparison of cross-sectional and longitudinal methods for modeling cognitive trajectories in aging." Frontiers in Aging Neuroscience. Vol. 13, 2021, p. 748125.

Poster-074

커프리스 혈압 추정을 위한 인공 혈관 모델 기반 다중 LED PPG 신호 측정 및 비교

유상흔[1*], 유상규[1], 최정우[1], 박한욱[1], 백현재[1]

순천향대학교 의공학과[1]

Measurement and Comparison of Multi-Wavelength PPG Signals Using an Artificial Vascular Model for Cuffless Blood Pressure Estimation

SangHeun Yu[1*], SangGyu Yu[1], JeongWoo Choi[1], HanWook Park[1], HyunJae Baek[1]

Department of Biomedical Engineering, SoonChunHyang University, Korea

[*]ysh522@sch.ac.kr

Abstract

Cuffless blood pressure measurement has attracted increasing attention as a non-invasive and continuous assessment method. PPG is widely used for Cuffless blood pressure measurement because it allows optical sensing of blood volume changes. However, most previous studies were performed on the human arm, continuous measurement was difficult to perform. In this study, the artificial vascular model was used to overcome this limitation. The model consisted of a silicone tube, a fluid circulation system with a controllable pump, and LED of multiple wavelengths (Red, Green, Infrared). PPG signals were measured in sequence at different wavelengths, and their waveform responses were compared with each other. As a result, distinct differences in the signals were observed depending on the LED wavelength. These results enable continuous blood pressure measurement and provide a foundation for cuffless estimation studies.

1. 연구 배경

광용적맥파(photoplethysmography, PPG)는 LED 빛을 혈관에 비추고, 혈액량 변화에 따라 반사 또는 투과되는 빛의 세기 변화를 측정하는 방법으로, 심박수(Heart Rate), 산소포화도(SpO2), 혈류 변화, 혈압 추정 등 생체신호 분석에 전반적으로 활용되고 있다.

전통적인 혈압 측정 방식은 오실로메트릭 기법으로 팔에 커프를 감싸고 압력을 가해 맥동을 감지하여 SBP, DBP를 계산하는 방법으로, 커프를 감싸는 불편함과, 움직임이 제한된다는 한계점으로 인해, 일상생활에서 혈압(BP)을 측정하는 것에는 어려움이 존재한다. 이에 비해 커프리스 혈압 추정[1]은 기존 혈압 측정의 원리를 이용해서 PPG와 ECG(Electrocardiogram, 심전도)를 결합하여 분석하거나, 압력 데이터를 추가해 오실로메트릭 기법을 이용하여 혈압을 추정[2]하여 커프를 감싸지 않고도 혈압 측정이 가능하게 하는 것으로 최근 연구되고 있는 주제이다. 또한, 인체에서의 연속적인 혈압 측정은 어렵기 때문에, 이 연구에서는 인공 혈관 모델(모의 혈관 팬텀)을 이용한다. 이 모델은 내경, 벽 탄성, 유체 점도, 박동 파형 등을 정밀하게 제어할 수 있어 일정한 조건으로 연속적인 측정이 가능하여 향후 진행할 커프리스 혈압 추정 연구에 적합하다.

해당 연구에서는 이런 커프리스 혈압 추정 기법을 기반으로 연구를 진행하기 위해 인공 혈관 모델을 이용해 다중 LED의 PPG를 측정하고 비교해 향후 연구에 적용할 최적의 LED 파장을 찾아내는 것이 이번 연구의 목표이다.

2. 연구 방법

2_1. 실험 설계

PDMS로 제작한 혈관 팬텀에 맥동 펌프를 연결하고, 전·후단에는 차압계를, 팬텀 상부에 PPG 디바이스를 올리고 동일한 조건에서 각 신호를 개별 채널로 기록하였다. Fig. 1은 실험 setup을 보여준다. 팬텀 형상은 상완동맥 축소형(+지지대)로 준비하였다.

실험은 물 또는 물+색소에서 3개의 LED(RED, GREEN, INFRARED)를 측정하는 실험을 진행했다. 실험 후에는 혈관 모델의 차압 데이터와 PPG 디바이스의 PPG 데이터의 같은 시간 구간을 발췌해 시각적으로 대조하여 두 신호의 주기성·변화 양상을 비교하였다. 제작 공정은 인벤터로 몰드와 튜브 지지대를 설계·3D 프린팅 한 뒤, 몰드에 이형제를 도포하고 PDMS(베이스: 경화제 = 30:1)를 주입·탈포·경화하여 탈형하는 순서로 진행하였다. Fig. 2는 몰드 제작 과정을 나타낸다. 30:1 비율을 선택한 이유는 탄성계수(Young's modulus)를 약 0.23 MPa 수준으로 낮춰 피부층에 가까운 유연성을 확보하기 위함이며, 이를 통해 압박 시 내강 변형이 보다 생체에 근접한 거동을 보이도록 했다. 축소형 상완(+지지대)은 커프 압박 중 내강 붕괴를 억제하고 센서 접촉 안정성을 높이기 위해 지지 구조를 포함하도록 설계하였고, 동일 공정으로 세 형상을 제작해 형상· 순응도 차이에 따른 신호 변화를 비교 가능하게 했다.

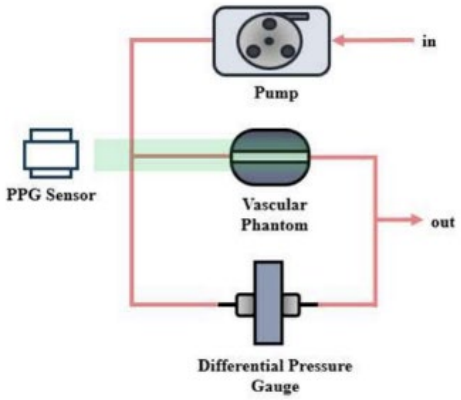


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup

2_2. 데이터 수집

본 연구에서 제작한 PPG 디바이스는 Fig. 2이며, Nucleo 보드, 압력 센서 그리고 PPG 센서로 구성되어 있다. Nucleo 보드는 Nucleo-L432KC, 압력 센서는 CS15-45N 그리고 PPG 센서는 MAXM86161 모듈을 사용하였다.

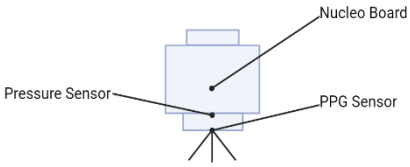


Fig. 2. The multi-wavelength PPG measurement device

해당 디바이스에서 PPG 측정은 MAXM86161 센서를 기반으로 설계되었으며, STM32 Nucleo 보드를 이용해 I²C 통신으로 제어하였다. 보드에 적용되는 펌웨어는 LED 전류, 샘플링 속도, ADC 설정, FIFO 인터럽트 등을 초기화하고, 측정된 PPG 신호의 아날로그 값을 읽는다. 데이터 수집 및 실시간 시각화는 Python (PyQt5, PyQtGraph, PySerial) 기반으로 진행되었다. 샘플링 주파수는 512Hz로 설정하였고 PPG 신호에는 3차 Butterworth 0.5Hz에서 4Hz 대역통과 필터를 이용하여 노이즈를 제거하였다. 필터링 된 신호는 128Hz로 다운샘플링하여 표시하였다.

3. 연구 결과

3_1. Multi-wavelength PPG measurement

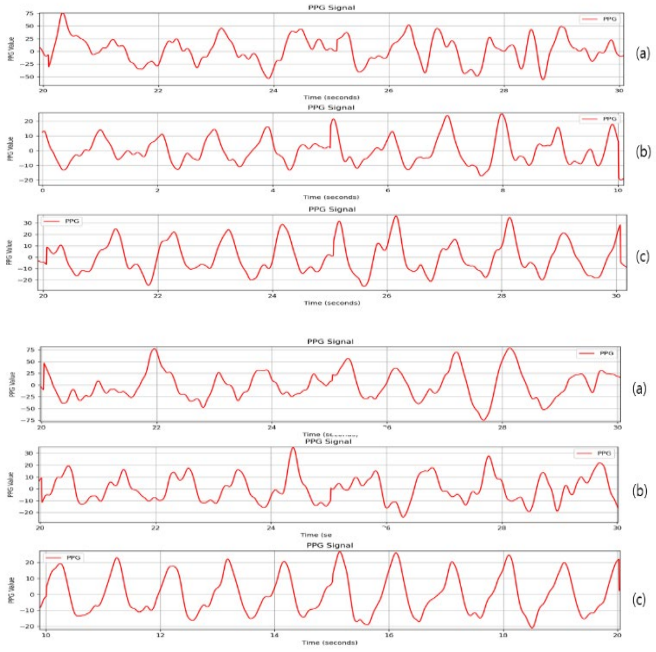


Fig. 3. LED 파장 별 PPG 신호 파형
(a): Green, (b): Red, (c): Infrared, (위) 색소 X, (아래) 색소 O

Fig. 3은 LED 파장에 따른 PPG 파형을 나타낸 것으로 시각적으로 확인한 결과, 신호의 진폭과 파형의 명확도는 (a) → (b) → (c) 순으로 향상되었으며, 특히 (c): IR 파장에서 가장 안정적이고 뚜렷한 파형이 나오는 것을 확인했다. 또한, 색소가 없는 조건(상단 그래프)과 색소가 있는 조건(하단 그래프)을 비교했을 때, 색소가 있는 경우의 신호에서 노이즈가 감소하고 파형이 보다 매끄럽게 나타났다.

3_2. Comparison between differential pressure and PPG signals

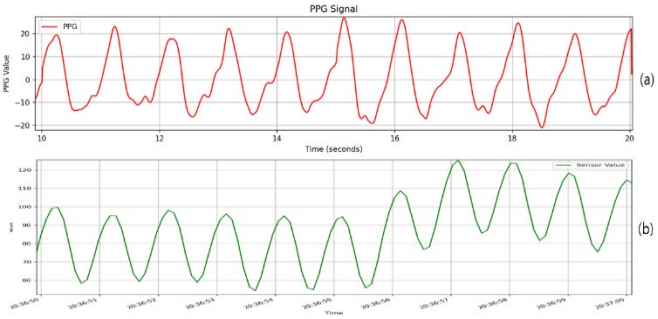


Fig. 4. 같은 시간 구간 차압과 PPG 파형 박동수 비교
(a) PPG 데이터, (b) 차압 데이터

인공 혈관 모델에서의 펌프 구동에 의해 발생한 압력 파형 주기성과 PPG 신호의 박동 주기를 비교하였다. Fig. 4의 그래프에서 차압계로 측정된 데이터와 PPG 파형을 동일 시간 축 상에서 정렬하여 비교한 결과, 두 신호의 주파수 및 패턴이 유사하게 나타났다.

4. Conclusion

본 연구에서는 PDMS 상완 팬텀을 기반으로 진행하는 PPG+Pressure을 동시에 측정하여 커프리스 오실로메트릭 혈압 추정 실험에 유용한 정보를 제공하는 것을 목표로 하였다. LED 파장에 따라 3가지의 LED로 PPG를 측정하고, 색소의 유무에 따른 파형을 비교해봤으며, 색소가 없는 Green LED에서 잡음이 가장 심했고, 색소가 있는 Infrared LED에서 가장 깔끔한 신호 파형을 얻을 수 있었다. 또한, PDMS로 제작한 인공 혈관 모델을 이용해서 인체에서 측정되는 PPG 파형과 비슷하게 구현이 가능함을 보여주며, 실제 PPG 파형 박동수와 혈관 모델의 차압 파형 박동수를 비교하여 확인했다. 이를 통해 향후 진행 예정인 인공 혈관 팬텀을 기반으로 PPG 데이터와 압력 데이터를 이용하여 수축기·이완기 혈압을 추정을 위한 실험적 출발점을 제공한다.

5. Acknowledgements

This work was supported by a grant from the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Korean government (MSIT) (Grant No. RS-2022-NR069934). This work was also supported in part by the Soonchunhyang University Research Fund, BK21 Fostering Outstanding Universities for Research (FOUR), under Grant 5199990914048.

6.참고 문헌

[1] MUKKAMALA, Ramakrishna; STERGIOU, George S.; AVOLIO, Alberto P. Cuffless blood pressure measurement. *Annual Review of Biomedical Engineering*, 2022, 24.1: 203-230.

[2] FREITHALER, Mark, et al. Smartphone-based blood pressure monitoring via the oscillometric finger pressing method: Analysis of oscillation width variations can improve diastolic pressure computation. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2023, 70.11: 3052-3063.

Poster-075

마이크로폰 기반 기관내 삽관 튜브의 폐색 상태 구분

이지호[1], 안진수[2], 박기현[1], 최호성[1], 김형식[1*]

건국대학교 글로컬캠퍼스 과학기술대학 ICT융합공학부 메카트로닉스공학과[1]

건국대학교 글로컬캠퍼스 과학기술대학 ICT융합공학부 BK21플러스의공학실용기술연구소 바이오메디컬공학과[2]

A Study on Airway Obstruction Degree Analysis in a Microphone-Based Endotracheal Tube

Ji-Ho Lee[1], Jinsu An[2], Ki-Hyeon Park[1], Ho-Sung Choi[1], Hyung-Sik Kim[1*]

[1]Department of Mechatronics Engineering, School of ICT Convergence Engineering, College of Science & Technology, Konkuk University, Chungju, South Korea

[2]Department of Biomedical Engineering, BK21+ Research Institute of Biomedical Engineering, School of ICT Convergence Engineering, College of Science & Technology, Konkuk University, Chungju, South Korea

*hskim98@kku.ac.kr

Abstract

This study analyzed the effect of endotracheal tube obstruction on the characteristics of microphone-based respiratory signals. An artificial airway obstruction caused by sputum was simulated using a ventilator, an endotracheal tube model (ET model), and a test lung. Experiments were conducted under two conditions: a non-obstructed state and a 60 mm obstructed state. Respiratory signals were recorded using a microphone for 15 seconds at a sampling rate of 100 Hz, repeated ten times for each condition. Various statistical analyses in the time and frequency domains revealed distinct differences in signal characteristics depending on the presence of obstruction. The RMS, Power Sum, and Power Integral values all increased under the obstructed conditions. Differences in standard deviation mean absolute difference, and Higuchi fractal dimension (HFD) indicated higher signal complexity and nonlinearity. These findings demonstrate that microphone-based, non-contact respiratory monitoring is highly sensitive to changes in airway obstruction and can effectively distinguish obstruction levels through spectral pattern analysis.

1. 연구 배경

생명을 위협하는 급성 호흡 부전 상황에서 환자의 기도 유지를 위해 시행되는 기관내 삽관술은 인공호흡기 치료의 기본이 되는 핵심적인 의료 처치이다[1]. 삽관된 튜브 내강에 기관지 분비물이나 외부 이물질이 축적되는 현상은 점진적인 기도 저항 증가 및 최종적인 폐쇄를 유발할 수 있으며, 이는 치명적인 저산소증 및 심정지로 이어질 수 있는 심각한 합병증으로 작용한다[2].

현재 임상에서 활용 중인 대다수 환기 감시 장비는 튜브 내부 폐쇄를 직접적으로 감지하는 데 본질적인 한계를 지니고 있어, 실제 폐쇄 발생 시에도 신속한 발견과 개입이 지연될 위험성을 내포한다[3]. 따라서 기관내 삽관 튜브의 폐쇄를 조기에 예측하고 감지할 수 있는 새로운 기술 개발이 필요하다.

따라서 마이크로폰 기반 신호 분석을 통해 기도 내 삽관 튜브의 폐색 정도를 정량적으로 평가할 수 있는 가능성을 탐색하고자 한다.

2. 연구 방법

중환자의 호흡 환경을 모사하기 위해 인공호흡기(Savina 300, Drägerwerk AG & Co. KGaA, Lübeck, Germany), Endotracheal tube model, (ET model), Test Lung을 이용하였다. ET model은 폐색 유무에 따라 각각 inner diameter (ID) 7.5로 제작하였으며, 폐쇄된 모델은 길이 60 mm의 내부 baffle 구조를 포함하여, 유동 저항이 증가된 폐색 상태를 모사하였다.

호흡 신호는 아날로그 마이크로폰(CMEJ-4618-32-L045, CUI Devices, Tualatin, OR, USA)을 이용하여 12-bit 해상도, 100 Hz 샘플링 조건으로 15초간 10회 반복 측정하였다. 실험 환경 및 ET model의 내부 구조는 그림 1. 에 나타내었다.

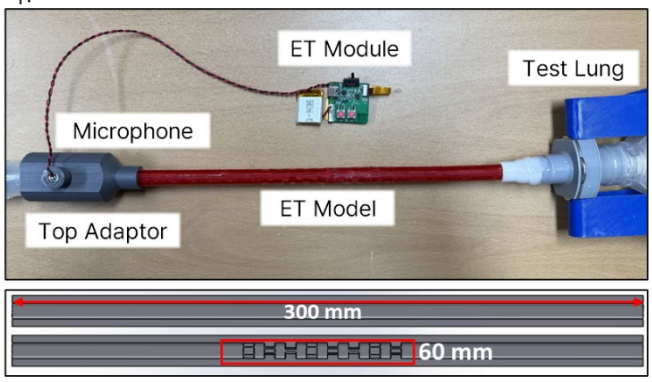


그림1. 실험 환경 및 ET model의 내부 구조

획득한 신호는 폐색 유무에 따른 호흡 신호 변화를 다각도로 분석하기 위해 시간 영역, 주파수 영역, 주파수 에너지 지표, 시간에 따른 주파수 영역, 통계적 및 복잡도 특징 분석을 수행하였다.

시간 영역 분석은 원신호의 진폭 변동과 파형 형태를 비교하여 폐색 상태에서의 비정상성 및 잡음 특성을 확인하였다.

주파수 영역 분석은 fast Fourier transform (FFT)을 적용하여 에너지 분포의 변화를 확인하였다. 주파수의 에너지 지표를 비교하기 위해 root mean square (RMS), power sum, power integral을 계산하였다.

시간에 따른 주파수 성분 분석은 에너지 변동 양상을 시각화하기 위해 단시간 푸리에 변환 (STFT)을 적용하여

Spectrogram을 산출하였다.

통계적 및 복잡도 특징 분석은 파형의 복잡도와 비선형성을 평가하기 위해 표준편차, 평균절대차, higuchi fractal dimension (HFD), signal energy를 계산하였다.

3. 연구 결과

3-1) 시간 영역분석

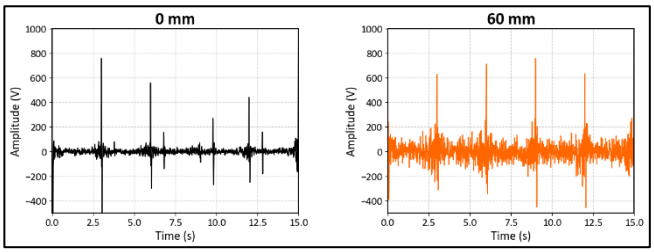


그림 2. 폐쇄 조건별 측정된 마이크로폰 신호

시간 영역 신호 분석 결과, 0 mm 조건에서는 진폭이 작고 안정적인 파형이 유지된 반면, 폐색이 존재하는 60 mm 조건에서는 진폭과 배경 잡음이 모두 증가하였다. 또한 스파이크성 노이즈가 나타나며 신호의 불규칙성이 확대되었다.

3-2) 시간-주파수 영역분석

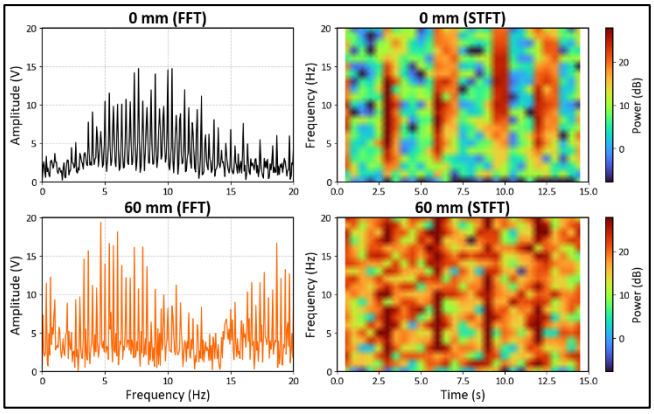


그림 3. 마이크로폰 신호의 FFT 및 STFT 결과

두 조건(0 mm, 60 mm)에서 측정된 마이크 신호를 FFT와 ET model의 폐색 유무에 따라 주파수 스펙트럼의 분포가 명확히 달라졌다. 0 mm 조건에서 신호의 FFT 결과는 5-15 Hz 영역에 에너지가 집중된 구조를 보였으며, 60 mm 에서는 스펙트럼이 전 대역으로 확산되고 주파수 성분의 세기가 증가하면서, 전체적으로 잡음이 증가하였다.

이러한 경향은 폐색이 진행될수록 호흡 시 공기 흐름의 저항이 증가하여 turbulence 및 압력 변동이 크게 발생하기 때문으로 해석된다(표1).

Condition (mm)	RMS(V)	Power Sum(V^2)	Power Integral(V^2Hz)
0	0.05180	4.028818	0.345452
60	0.07456	8.344268	1.476825

표 1. 폐색 유무에 따른 에너지 지표

60 mm 조건에서 RMS가 0 mm 대비 더 크게 나타나 평균 진폭 수준이 상승하였으며, 이는 시간 영역에서 관찰된 배경 진폭 확대 및 스파이크성 성분의 빈번한 출현과 일치한다. 또한 power Sum과 power integral 또한 폐색 조건에서 상대적으로 높은 값을 보여, 일정 기간 동안 누적되는 에너지와 주파수 전 대역에 분포하는 스펙트럼 에너지가 모두 증가했음을 확인하였다.

STFT 분석에서도 이러한 경향이 일관되게 확인되었다. 0 mm에서는 시간 축을 따라 일정한 주파수대의 고에너지 띠가 연속적으로 유지되어 신호가 비교적 정상적인 특성을 보였다. 60 mm에서는 고에너지 구간이 불규칙적으로 분포하고 시간에 따라 세기의 변동 폭이 커져 비정상성이 증가하였다.

3-3) 통계적 복잡도 특징 분석

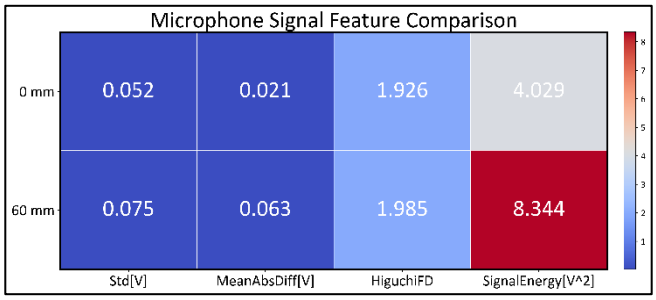


그림 4. 마이크로폰 신호 통계적 복잡도 결과

폐색 유무에 따른 마이크 신호의 통계적 및 복잡도 특성 분석 결과 폐색이 존재하는 조건에서 신호의 표준편차와 평균절대차가 모두 증가하는 경향을 보였다.

또한 HFD 역시 폐색 조건에서 다소 높게 나타나, 신호의 파형이 단순한 주기 구조에서 복잡하고 비 선형적인 형태로 변화했음을 의미한다. 신호의 에너지 또한 증가하였다. 즉, 기도 삽입관 내 폐색은 음향의 전달 경로를 변형시켜 신호 내 에너지 분포를 불 균질하게 하고, 결과적으로 파형의 복잡도와 불규칙성을 증가시키는 요인으로 작용한다.

따라서 시간, 주파수 영역뿐 아니라 통계적 복잡도 특성 면에서도 비정상성 증가, 진폭 변동 확대, 신호 복잡도 강화의 특징을 나타냄을 확인하였다. 이는 향후 폐쇄성 호흡 질환 감지나 실시간 호흡 패턴 모니터링 시스템 개발에 중요한 설계 근거를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

4. Acknowledgements

본 연구는 정부(과학기술정보통신부, 산업통상자원부, 보건복지부, 식품의약품안전처)의 재원으로 범부처전주기 의료기기연구개발사업단의 지원을 받아 수행된 연구임 (과제번호: 1711196795, RS-2023-00238092)

5. 참고 문헌

[1] Ghatehorde, Namratta K., and Hariharan Regunath. "Intubation endotracheal tube medications." (2017).

[2] *Bansal, Ranju B., Mridul M. Panditrao, and Minnu M. Panditrao. "Unusual cause of airway obstruction after nasal* intubation with a preformed endotracheal tube." Journal of Anaesthesiology Clinical Pharmacology 36.3 (2020): 429-430.

[3] Zaben, Sufyan O., Wan Mohd Nazmee Wan Zainon, and Ahmad H. Sabry. "Machine Learning-Based Methods for Detecting Respiratory Abnormalities Using Audio and Visual Analysis: A Review." Results in Engineering (2025): 104744.

발끝 움직임의 위상 분석을 통한 보행 안정성 비교

김령아[1], 박현준[2], 임해윤[2], 김민승[2], 정가은[2], 박기원[1*]

인천대학교 바이오-로봇시스템공학과[1] 인천과학예술영재학교[2]

Gait Stability Analysis Using Phase Analysis of Toe Movements

Ryeongah Kim[1], Hyeonjoon Park[2], Haeyun Lim[2], Minseung Kim[2], Gaeun Jung[2], Kiwon Park[1]

Dept. of Biomedical & Robotics Eng. Incheon National University, Incheon, Korea[1]

Incheon Academy of Science and Arts, Incheon, Korea[2]

*kiwon@inu.ac.kr

Abstract

This study aimed to quantitatively evaluate gait stability through phase-space analysis. Toe marker data were collected from 20 participants using the OptiTrack motion capture system, and the position–velocity phase space was constructed based on these data. Each gait cycle formed a characteristic loop in this phase space, and the loop area and its distribution were quantitatively calculated to assess differences in gait stability among individuals. In particular, by analyzing the toe trajectory, which clearly reveals the moments of ground-off and landing, the loop area and shape enable a more detailed assessment of gait stability for each step.

1. 연구 배경

최근 보행 연구는 단순한 이동 특성 이해를 넘어, 보행 안정성의 정량적 평가와 낙상 위험 예측으로 발전하고 있다[1]. 보행은 일상생활에서 가장 기본적인 움직임이자 삶의 질과 독립성을 결정짓는 핵심 요소이다. 특히 고령화 사회에서 보행 불안정은 낙상, 노인성 질환, 재활 과정과 직결된 문제로 대두되고 있으며, 이를 평가할 정밀한 과학적 방법의 필요성이 꾸준히 제기되고 있다.

기존 연구는 트레드밀 힘판이나 압력 중심(COP) 분석을 통해 Foot Contact(FC)와 Foot Off(FO) 시점을 검출하고, 이를 기반으로 주기성과 안정성을 측정하였다[2]. 이러한 방식은 실시간 이벤트 탐지에는 유용하지만, 시간·공간적 지표에 의존하기 때문에 보행의 복잡한 동역학적 특성과 내재된 불안정성을 충분히 반영하지 못하는 한계가 있다. 이에 따라 최근에는 데이터의 위상학적 특성을 활용한 분석 기법이 주목받고 있다. Topological Data Analysis(TDA)는 데이터 내 루프, 연결성, 구멍 등 불변적 구조를 추출할 수 있어 노이즈에 강하며 다양한 조건에서 일관된 분석[3]이 가능하다. 선행 연구에서는 보행 데이터를 위상공간에 투영하여 루프의 형태와 면적을 바탕으로 안정성을 평가하고 임상적 활용 가능성을 제시하였다. 이러한 접근은 보행을 단순한 시간·거리 문제로 보지 않고, 동역학적 시스템의 위상 구조로 해석할 수 있음을 보여준다.

본 연구는 이를 확장하여 발끝의 궤적을 위상공간에서 분석하였다. 발끝은 지면 이탈과 착지 시점이 뚜렷하게 드러나는 지점으로, 보행 주기를 규명하는 핵심적 이벤트 포인트이다. 발끝 궤적이 형성하는 루프는 보행 안정성과 직접적으로 연결되며, 그 면적이 클수록 보행 불안정성이 크다는 점은 낙상 위험 평가의 중요한 단서가 될 수 있다. 이를 정량화하기 위해 루프 면적과 발끝의 에너지 전달 주기를 고려한 무차원 수 S를 정의하였으며, 이를 통해 개인 간 보행 안정성을 비교하고 연령 및 신체 특성이 보행 패턴에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 연구 방법

2.1 참가자 및 데이터 수집

본 연구는 인천대학교 기관생명윤리위원회(Incheon National University Institutional Review Board) (승인번호: 7007971-202309-004A)의 승인을 받았으며, 연구에 포함되기 전에 모든 참여자로부터 서면 동의를 받아, 신경계, 근골격계, 청각에 이상이 없는 건강한 성인 남녀 20명(남 10명, 여 10명, 연령 19~34세)이 실험 참가자로 참여하였다. 최근 6개월 이내 보행이나 청각에 영향을 줄 수 있는 질환, 부상, 약물 복용 이력이 있는 경우는 제외하였다. 실험은 6 m 보행 트랙에서 수행되었다. 참가자들은 트랙을 따라 왕복 보행을 실시하였으며, 각자의 신체에는 총 39개의 반사 마커를 부착하였다. 마커 부착 위치는 skeleton 모델을 따랐으며, 머리 4개, 상체 19개, 하체 16개로 구성되었다.

운동학적 데이터는 OptiTrack 모션 캡처 시스템(샘플링 주파수 120 Hz)을 사용하여 전신에 부착된 마커의 3차원 궤적을 기록하였다. 또한, 지면 반력기(force plate)를 통해 하지 관절에 작용하는 지면 반력 데이터를 동시에 수집하였다. 이를 바탕으로 각 마커의 x,y,z 좌표 및 속도를 산출하였다. 수집된 원시 데이터(raw data) 중, 보행 중 지면과 가장 민감하게 상호작용하여 이탈 및 착지 시점에서 궤적 변화가 뚜렷하게 나타나는 발끝 마커만을 분석 대상으로 선정하였다.

2.2. 데이터 전처리

수집된 모션캡처 원시 데이터는 Python 3.8(Anaconda 배포) 기반의 커스텀 스크립트(pandas, numpy, scipy 사용)로 처리되었다. 이상치는 해당 시계열의 이동평균에서 3 표준편차를 벗어나는 값으로 정의하고 선형 보간(interpolation)하여 치환하였다.

보행 주기 분할을 위해, 오른쪽 발끝의 진행방향(x, z축) 속도와 수직위치(y축) 데이터를 활용해, toe-off 및 heel-strike 이벤트를 자동 검출하였다. 이를 통해 각 보행 주기를 'swing'과 'stance' 구간으로 분리하였다. 데이터의 과도기 효과를 최소화하기 위해 첫 걸음, 마지막 걸음(각각 1 stride씩)은 최종 분석에서 제외하였고, 모든 분석은 steady-state gait에 집중하였다.

2.3. 데이터 분석

각 보행 주기에 대해, 발끝의 수직 위치(y)-수직 속도($\dot{y}$) phase space 곡선을 도출하였다. 각 위상 공간 루프(1 stride)는 수치 적분을 활용하여 계산하였다.

또한, 정의한 무차원 안정성 지표(S)는 다음과 같다.

$$S_{toe} = \frac{\int_{T_{swing}} \dot{y}(t)^2 dt}{\frac{y_{max}^2}{T_{swing}}}$$

$\dot{y}(t)^2$: 해당 보행 주기 동안 발끝 수직 속도
T_{swing}: 보행 주기

분자는 연직방향 속도의 제곱을 적분한 값이며, 이 항은 질량을 제외한 단위 질량당 운동 에너지의 시간 적분으로 볼 수 있다. 또한, 분모는 시험체의 각 보행 스케일을 반영하여 정규화를 진행하도록 하였다. 각 주기에 대하여 S를 산출하고, 개인별 평균값 및 표준편차(standard deviation, SD)로 대표성을 부여하였다.

개인차 및 군집 내 변동성을 분석하기 위해 일원배치분산분석(ANOVA) 및 연령·신체지수 등과의 상관분석 (Pearson correlation coefficient)을 시행하였고, 통계적 유의성 검증은 Python(scikit-learn, scipy.stats, statsmodels) 환경에서 0.05 미만의 유의수준($p<0.05$)에서 이루어졌다.

3. 연구 결과

Table 1. Average value for stability factor

Subject1	Subject2	Subject3	Subject4	Subject5
4.39857	3.987004	4.069148	4.141448	5.371952
Subject6	Subject7	Subject8	Subject9	Subject10
4.220864	3.609265	3.714743	5.591083	3.853663

참가자별 평균 안정성 지수 값은 최소 3.609에서 최대 5.591까지 분포하였다. 10명의 참가자 중 7명은 3.6~4.5 범위에 위치하였으며, 나머지 참가자들은 5 이상 또는 3.7 이하의 값에 위치하였다.

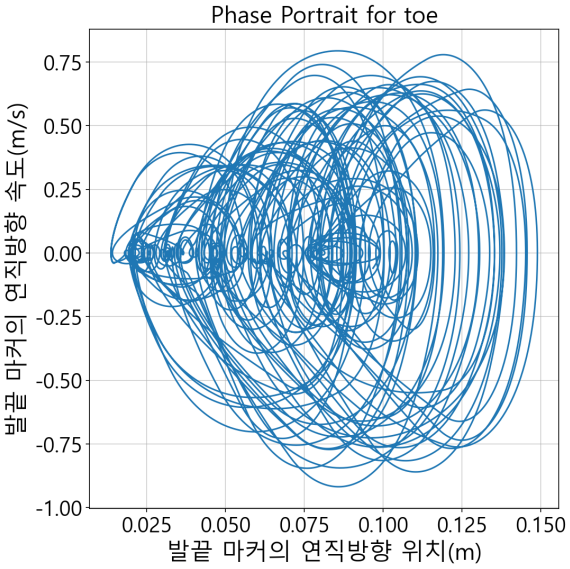


Figure 1. TOE marker's phase portrait

발끝의 수직 위치(Y)와 속도를 위상공간에 투영한 결과, 각 보행 주기에서 닫힌 루프 형태의 궤적이 도출되었다. 루프의 면적과 형상은 주기별로 다르게 나타났다. 예를 들어, 위 피험자의 경우, 총 93회의 보행 구간에 대해 산출된 안정성 지수 값은 평균 3.854로 나타났다.

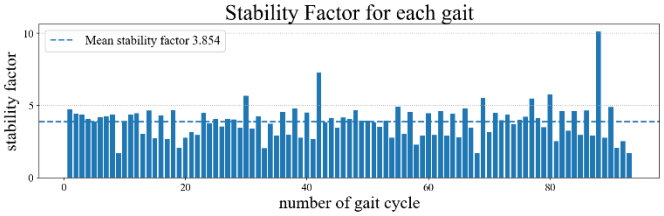


Figure 2. Stability factor by each gait

4. 결론 및 기대효과

보행 주기 동안 발끝의 수직 위치와 속도를 위상공간에 투영한 결과, 주기별로 일관된 루프 구조가 반복적으로 관찰되었다. 루프의 크기와 형태는 보행 속도와 보폭에 따라 일부 변동이 있었으나, 전체적으로 안정적인 패턴을 유지하였다. 이러한 결과는 본 연구의 분석 방식이 보행 주기를 정밀하게 구분하고, 주기적 궤적의 안정성을 시각적으로 확인할 수 있는 도구임을 보여준다.

무차원 보행 안정성 지표는 평균값을 넘어 개별 보행 주기 단위에서도 안정성 변화를 포착할 수 있음을 보여준다. 실제 분석 결과, 전반적으로 대칭적 분포를 보였으나 일부 스윙 국면에서 뚜렷한 편차가 나타났으며, 이는 개인별 특성이나 순간적 변동성이 반영된 결과로 보행이 항상 일정하지 않음을 시사한다.

본 연구의 접근법은 기존의 시공간적 지표나 평균 기반 분석과 달리, 위상공간에서 보행 패턴의 안정성을 직접적으로 가시화할 수 있다는 점에서 차별성이 있다. 기존 연구가 속도, 보폭, 변동계수 등을 통해 간접적으로 안정성을 평가한 것과 달리, 본 연구는 루프 형태 자체를 안정성 지표로 제시함으로써 미세한 불안정성까지 포착할 수 있음을 확인하였다. 더 나아가, 적은 시행만으로도 안정성 확인이 가능하여 착용형 기구와 연계한 실시간 모니터링 도구로 발전할 수 있을 것으로 기대된다.

향후에는 다양한 연령대와 보행 장애군을 포함한 확장 연구를 통해 지표의 임상적 타당성을 검증하고, 웨어러블 센서 기반 실시간 평가 시스템으로 발전시킬 수 있을 것이다. 이를 통해 본 연구의 방법론이 재활, 낙상 예방, 맞춤형 보행 분석 등 실제 현장에서 폭넓게 응용될 수 있을 것으로 전망된다.

5.참고 문헌

[1] Bonanno, Mirjam, et al. "Use of Wearable Sensors to Assess Fall Risk in Neurological Disorders: Systematic Review." *JMIR mHealth and uHealth* 13 (2025): e67265.

[2] Roerdink, Melvyn, Claudine JC Lamoth, and Peter J. Beek. "Online gait event detection using a large force platform embedded in a treadmill." *Journal of biomechanics* 41.12 (2008): 2628-2632.

[3] Bois, Alexandre, et al. "A topological data analysis-based method for gait signals with an application to the study of multiple sclerosis." *Plos one* 17.5 (2022): e0268475.

Poster-077

건강한 여성의 동맥 맥박 파형 모델링: *In Silico* 분석

이건준[1*], 한인철[2], 최수현[3], 이종실[3], 김인영[3,4], 이제연[3,4†]

한국공학대학교 컴퓨터공학부[1], 한양대학교 융합전자공학과[2], 한양대학교 생체의공학과[3], 한양대학교 의과대학 의공학교실[4]

Modeling Arterial Pulse Waves in Healthy Female: *In Silico* Analysis of Pulse Waves

Geonjun Lee[1*], Incheol Han[2], Soo Hyun Choi[3], Jongshill Lee[3], In Young Kim[3,4], Jeyeon Lee[3,4†]

Department of Computer Engineering, Tech University of Korea[1]

Department of Electronic Engineering, Hanyang University, Korea[2]

Department of Biomedical Engineering, Hanyang University, Korea[3]

Department of Biomedical Engineering, College of Medicine, Hanyang University, Korea[4]

*dlrjswns151@gmail.com

Abstract

Arterial pulse waves (PW) serve as valuable indicators for cardiovascular status. As the representative example of an *in silico* cardiovascular model-based simulation, the pulse wave database (PWDB) lacks sex diversity, including only data of males with a height of 175cm. To address this limitation, this study simulates female data, using the female-specific cardiovascular parameters adjusted by the *in vivo* ratio of male-to-female reported in the previous studies. Among the simulated female PWs, the photoplethysmography (PPG) from the digital artery and blood pressure (BP) from the radial artery were analyzed, and morphological differences were compared with those of the male PWs.

1. 연구 배경

Cardiovascular disease (CVD)는 전세계적으로 높은 발병률을 보이며 주요한 사망 원인 중 하나로 알려져 있다. Pulse wave (PW)는 심장의 박동으로 인해 발생한 압력과 용적의 변화가 arterial network를 따라 전파하며 나타난다. PW의 파형은 심혈관계 특성인 heart rate (HR), stroke volume (SV), 동맥 형태 등의 영향을 받아 달라진다. 이에 따라 PW 파형을 통해 심혈관계 상태를 추정할 수 있다.

Photoplethysmography (PPG) PW는 microvascular bed의 혈액량 변화를 비침습적으로 측정한 광학 신호로, 비교적 간단한 측정 방식으로 다양한 웨어러블 디바이스에 적용되어 측정된다. PPG는 심박수, 산소포화도 등의 다양한 신체 상태의 모니터링에 사용된다. 그러나 PPG는 센서와 피부 간의 접촉 압력과 위치, 움직임, 외란광 등으로 인한 noise의 영향을 받으며, 재현성 있는 반복 측정이 어렵다. Blood Pressure (BP) PW는 심장 박동에 따라 혈관 벽에 가해지는 압력으로, 주로 radial artery나 femoral artery에서 침습적으로 연속적인 동맥 내 압력을 측정한다. 침습적 혈압 측정은 피부의 절개 및 catheter 삽입 과정에 의료진이 필요하고 감염의 위험성이 존재한다는 한계를 가진다.

이러한 *in vivo* 환경에서의 PW 측정 및 데이터 구축의 한계를 보완하기 위해, *in silico* model-based simulation에 대한 연구가 진행되었다. *In silico* model-based simulation은 생리학적인 과정을 수학적인 방정식으로 계산함으로써 구현해내는 접근법으로, 대규모의 데이터베이스를 비교적 빠르게 구축해낼 수 있다는 장점이 있다. 또한 반복적으로 noise-less 신호를 생성해낼 수 있다. 대표적인 *in silico* 심혈관계 model-based simulation의 예시로, PWDB가 있다 [1]. PWDB는 6가지 연령대(25세~75세, 10세 단위)를 가지는 가상의 남성(신장 175cm) 피험자의 PW 신호로 이루어져 있다. 각 피험자로부터 13개 arterial segments에서의 4가지 PW (BP, PPG, blood flow velocity, luminal area)가 생성된다. 시뮬레이션은 aortic root에서의 혈류 신호 생성과 arterial network 구성의 단계로 이루어져 있다. 심장 기능과 관련된 파라미터를 통해 좌심실에서 박출되는 혈류 신호를 생성한다. 이후 116개의 arterial segment의 혈관 특성을 기반으로 구성된 arterial network에 혈류 신호를 전파시켜 PW를 생성한다. 시뮬레이션 시 입력 심혈관계 파라미터는 각각의 평균과 표준편차를 이용하여 변동을 주며 다양한 상황에서의 PW를 생성한다. 본 연구는 *in vivo*에서 조사된 남성과 여성 간의 심혈관계 파라미터 비율을 이용하여, 여성에 대한 *in silico* model-based simulation을 수행하고, 남성과 여성 간 PW의 파형 차이를 분석하였다.

2. 연구 방법

여성(신장 160cm)의 PW를 simulation하기 위해, *in vivo*에서 측정된 cardiac 파라미터와 vascular 파라미터 값을 활용하였다. Cardiac 파라미터는 HR, SV, left ventricular ejection time (LVET), mean blood pressure (MBP), diastolic blood pressure (DBP)가 포함되며, *in vivo* 환경에서 조사된 값을 사용하였다(표 1). 일반적으로 남성은 상대적으로 큰 좌심실 크기로 인해 SV가 더 크며, 여성은 작은 SV를 보상하기 위해 HR이 더 높은 경향을 보인다 [2]. 조사된 남성과 여성의 cardiac 파라미터 값을 통해, 심혈관계 파라미터 별 male-to-female 비를 계산하였다. 계산된 male-to-female 비를 통해 female-specific 심혈관계 파라미터를 조정하여 simulation에 적용하였다.

표 1. Cardiac 파라미터

Cardiac 파라미터	남성	여성	Male-to-female 비
HR	59.9	63.7	1.0634
SV	60.4	50.3	0.8329
MBP	98.0	91.7	0.9357
DBP	81.0	77.0	0.9506

Vascular 파라미터 조정을 위해, 116개의 arterial segments에 대해서 elastic artery와 muscular artery로 분류하였다. Elastic artery로 분류된 arterial segment는 문헌에 기반하여 *in vivo* 환경에서 측정된 여성의 arterial radius 값을 활용하였다. Muscular artery로 분류된 arterial segment에 대해서는, brachial artery radius의 male-to-female 비를 적용하였다. Arterial length는 arterial segment

중 해부학적으로 carotid artery의 아래에 위치한 segment들에 대하여 male-to-female의 신장 비(160/175)를 적용하여 감소시켰다. 표준편차를 활용한 파라미터의 변동 없이 baseline subjects (6개 연령대)의 PWs를 생성하였다.

표 2. Vascular 파라미터

분류	수	조정 방법
Elastic artery	21	문헌에 기반한 radius 적용
Muscular artery	67	Male-to-female 비 적용 (radius of brachial artery)

형태학적 분석을 위해 사용된 PW는 digital artery에서의 PPG와 radial artery에서의 BP이다. PW으로부터 형태학적 특징을 추출하였다(표 3). 추출된 형태학적 특징들에 대해서 연령 간, 성별 간 차이를 비교하였다. 연령을 연속형 공변량으로 두고, 성별과의 상호작용을 포함한 공분산분석(ANCOVA)을 실시하였다.

표 3. PW의 형태학적 특징

특징	정의
SI	Stiffness index $height/(T_{diastolic\ peak} - T_{systolic\ peak})$
RI	Reflection index $(A_{2nd\ peak}/A_{1st\ peak}) \times 100$
IPA	Inflection point area $A_{(after\ injection\ point)}/A_{(before\ injection\ point)}$
AI	Augmentation index $(AP/(SBP - DBP)) \times 100$
AP	Augmented pressure $P_{late\ systolic\ peak} - P_{systolic\ inflection\ point}$
t_{sys}	Systolic ejection duration $T_{dicrotic\ notch} - T_{foot}$

3. 연구 결과

Simulation 결과, simulation된 여성과 남성에서 모두 연령 증가에 따라 PPG와 BP PW의 reflection wave가 조기에 도달하여 percussion wave와의 중첩이 증가하는 양상이 관찰되었다(그림 1). 여성의 경우 남성보다 reflection wave가 더 빠르게 도달하기 때문에 PPG와 BP PW에서 late-systolic augmentation이 더 크게 나타났다. 이는 여성의 경우 더 짧은 artery length와 작은 radius으로 인하여 나타난 것으로 해석할 수 있다.

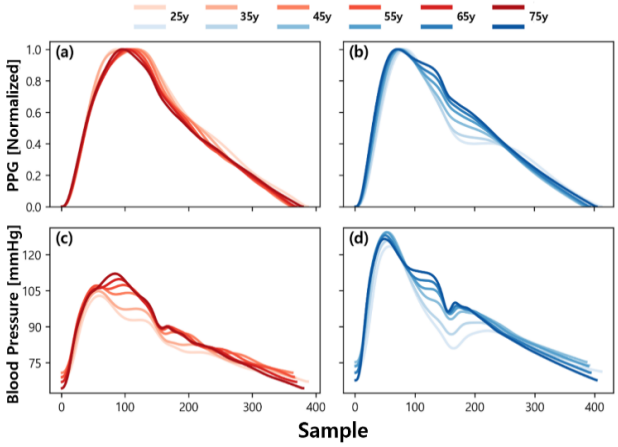


그림 1. 연령에 따른 Digital PPG 및 Radial BP 파형
(a) 여성의 digital PPG 파형 (b) 남성의 digital PPG 파형
(c) 여성의 radial BP PW 파형 (d) 남성의 radial BP PW 파형

Simulation된 여성과 남성의 PPG와 BP PW에서 추출된 특징을 성별에 따라 box plot으로 나타냈다(그림 2). 특징은 ANCOVA를 통해 성별 간의 차이를 비교하였다. PPG의 특징의 경우, SI, RI, IPA 모두 연령증가에 따라 상승하였고, 연령을 공변량으로 설정하여 보정한 성별 간의 비교에서는 통계적으로 유의하지 않았다(그림 2(a)~(c)). BP PW의 AI, AP, t_{sys}는 모두 연령 증가에 따라 상승했다. AI와 AP는 연령을 공변량으로 설정하여 보정한 성별 간의 비교에서는 여성에서 유의하게 높은 값을 보였고 t_{sys} 는 유의하지 않았다(그림 2(d)~(f)). 이는 같은 연령 조건에서 여성의 AI 와 AP 가 남성보다 유의하게 높다는 것을 의미하고 여성의 더 짧은 artery length와 작은 diameter으로 인해 reflection wave가 조기에 도달한다는 선행연구의 생리학적 해석과도 일치한다 [3].

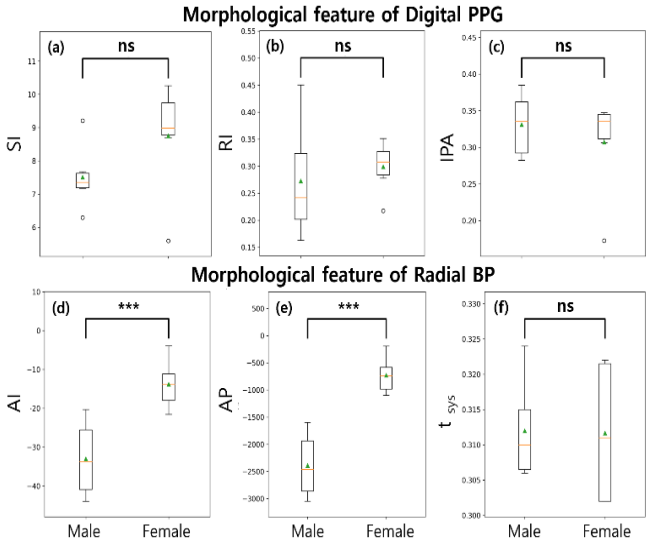


그림 2. Digital PPG와 Radial BP의 feature boxplot.
(ns: nonsignificant, ***: $p < 0.001$)
(a) PPG SI 성별 비교 (b) PPG RI 성별 비교
(c) PPG IPA 성별 비교 (d) BP AI 성별 비교
(e) BP AP 성별 비교 (f) BP t_{sys} 성별 비교

본 연구는 기존 PWDB의 한계점을 보완하기 위해, female-specific 심혈관계 파라미터를 조정하여 simulation에 적용했다. Simulated PW의 특징을 추출한 결과, BP PW의 AI와 AP에서 짧은 artery length와 작은 radius로 인해 성별 간의 차이가 유의미하였다. 다른 특징들은 여성과 남성의 추가적인 심혈관 파라미터의 조사를 통한 개선이 필요하며, 데이터 타당성의 추가적인 검증이 필요하다.

4. Acknowledgements

이 연구는 2024년도 산업통상자원부 및 산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임 ('RS-2024-00444631', 'RS-2024-00445152').

5. 참고 문헌

[1] Charlton *et al.*, *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.*, 317:H1062–H1085, 2019.
[2] Dehghanojamahalleh & Kaya, *IEEE J. Transl. Eng. Health Med.*, 7:1–7, 2019.
[3] Gatzka *et al.*, *J. Hypertens.*, 19:2197–2203, 2001.

Poster-078

아날로그 EOG 회로 설계 및 PSpice 시뮬레이션을 통한 눈 깜빡임 제어연구

유상규[1] , 유상흔[1] , 정희주[1] , 백현재[1]

순천향대학교 의공학과 지능형생체전자연구실[1]

Eye Blink Control Research through Analog EOG Circuit Design and PSpice Simulation

S.G.Yu[1] , S.H.Yu[1] , H.J.Jeong[1] , H.J.Baek[1]

Intelligent Meditronins Laboratory, Department of Biomedical Engineering, Soonchunhyang University, Korea

Abstract

Indium tin oxide (ITO)–based electrooculogram (EOG) sensing is proposed as an emerging approach for developing intuitive human–machine interfaces beyond conventional controller-based systems. EOG signals, generated by corneoretinal potential differences during eye movements, can be utilized as a direct control source for analog circuit operation. In this work, we designed an analog blink-controlled circuit composed solely of hardware components without any digital processors. The system consists of an EOG amplification and filtering stage, a peak detection circuit, a counter–timer module, and a motor control unit. Each module was verified through PSpice simulation to evaluate signal propagation and logical timing. Simulation results confirmed that amplified EOG signals within 0.5–15 Hz were successfully converted into discrete pulse outputs corresponding to eye blinks, which were then counted and translated into motor ON/OFF states. The overall response time of the system was within 100 ms, demonstrating real-time operation capability. This study suggests that a fully analog circuit using ITO transparent electrodes can implement a blink-based control mechanism, offering a new pathway toward lightweight, low-power, and integrable AR/VR human–machine interfaces.

1. 연구 배경

최근, 인간-기계 상호작용(Human-Machine Interaction, HMI)은 단순히 물리적인 조작 신호를 입력받는 수준을 넘어, 사용자의 생리적 반응와 의도를 감지하여 직관적으로 시스템이 여전히 컨트롤러나 버튼, 조이스틱과 같은 물리적 입력 장치에 의존하고 있다. 이러한 제어 방식은 사용자의 자유로운 상호작용을 제한하며, 장시간 착용 시 피로도와 몰입감 저하를 초래하는 문제점이 있다.

이러한 한계를 극복하기 위해 생체신호 기반 비접촉 제어 기술이 차세대 핵심 인터페이스로 주목받고 있다. 지금까지 EEG(뇌파), EMG(근전도), HR(심박수), GSR(피부 전기 반응) 등 다양한 생체신호가 활용되어 왔으나, 외부 잡음, 개인차, 전극 부착 불편 등으로 인해 실생활 적용에 제약이 존재한다. 이에 본 연구에서는 높은 신호 대 잡음비(SNR)와 빠른 반응속도를 지닌 EOG(Electrooculogram) 신호를 사용하여, 사용자의 눈 깜빡임을 제어 신호로 변환하는 시스템을 제안한다.

EOG(Electrooculogram, 안전도)는 인간의 눈에 존재하는 생체 전위를 직접 측정하는 방식으로, 눈이 움직일 때마다 발생하는 전위 차이를 피부 표면에 부착된 전극을 통해 손쉽게 기록할 수 있다. EOG는 단순한 전극 배치만으로도 안정적이고 일관된 신호를 얻을 수 있으며, EEG나 EMG에 비해 높은 신호 대 잡음비(SNR)를 제공하고 전기생리학적 특성상 반응 속도가 빠르다. 또한 눈 깜빡임, 시선 이동, 안구 운동 등은 인간이 무의식적이면서도 가장 직관적으로 수행하는 행동이기 때문에, EOG는 사용자의 의도를 기계 제어로 직접 연결할 수 있는 최적의 생체신호라 할 수 있다.

본 연구에서는 기존의 Ag/AgCl 전극 대신 ITO(Indium Tin Oxide) 기반 투명전극을 활용한 AR 글래스형 측정 방식을 제안한다. ITO는 높은 전기전도도와 광투과도를 지니며, 유연한 Glass 또는 PET 기판 위에 증착되어 눈 주위 접촉부를 시야를 가리지 않는 투명 센서로 구현 할 수 있다.[1] 이를 통해 착용감 저하 없이 생체신호를 측정할 수 있으며, 광학 디스플레이와의 통합도 용이하다. 또한 신호 안정성과 잡음 억제 측면에서도 우수하다. 금속 전극 대비 접촉 저항이 낮고, 전도층이 균일하여 장시간 착용 시에도 신호 드리프트가 적다. 이러한 특성 덕분에 본 연구에서 제시하는 EOG 기반 인터페이스는 기존 전극형 대비 사용자 편의성과 신뢰도를 크게 향상시킬 수 있다.

특히 본 연구에서는 디지털 프로세서나 마이크로컨트롤러를 사용하지 않고, 전적으로 아날로그 회로만을 이용하여 전체 시스템을 설계하였다. EOG 신호의 증폭, 필터링, 피크 검출, 카운터, 모터 제어까지의 모든 과정은 하드웨어 레벨에서 아날로그 신호처리를 기반으로 구성되며, 현재 Cadence OrCAD PSpice 시뮬레이션을 통해 각 회로 블록의 동작을 검증하였다.

본 연구의 목표는 회로 시뮬레이션 결과를 토대로 향후 실제 하드웨어를 구현하고, ITO 전극 기반 EOG 신호를 실측하여 아날로그 회로만으로 구동 가능한 눈 깜빡임 제어형 AR/VR 인터페이스 시스템으로 완성하는 것이다. 이를 통해 컨트롤러 중심의 기존 입력 패러다임을 넘어서는 차세대 생체신호 기반 인간-기계 상호작용 기술의 실용 가능성을 제시하고자 한다.

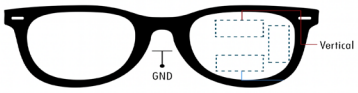


Fig 1. Configuration of ITO film-based EOG measurement in glasses-type interface.

2.연구 방법

본 시스템은 EOG 회로, Peak Detect 회로, Counter/Timer 회로, Motor Control 회로로 구성된다. 전체 신호 흐름은 사용자의 눈 깜빡임에 의해 발생한 EOG 생체전위가 계측되어, 피크 검출 과정을 거쳐 일정 시간 동안 카운트되고, 그 결과가 모터의 구동 신호로 변환되는 구조를 따른다.

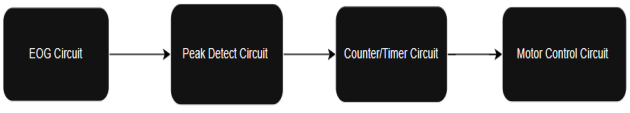


Fig 2. Overall system flow of the analog EOG-based blink control circuit.

EOG 회로는 전극을 통해 얻은 미세한 전위차 신호를 INA118 계측증폭기를 사용하여 증폭하고, OP497 기반의

고역통과(HPF), 저역통과(LPF) 필터 회로를 통해 0.5 Hz에서 15 Hz 범위의 유효 생체신호만을 통과시키도록 설계하였다. 이는 EOG 신호의 주파수 특성과 일치하며, 저주파 영역의 드리프트와 고주파 노이즈를 효과적으로 제거한다. 또한 MAX660 반전 전원 회로를 이용하여 전원을 안정적으로 공급하고, 드리븐 회로(Buffer + Gain)를 통해 공통 모드로 노이즈를 상쇄 하였다.

다음으로, Peak Detect 회로는 두개의 Schmitt Trigger Comparator 로 구성되어, 입력된 아날로그 EOG 신호 중 순간적인 최대 전위 변화를 검출한다. 회로는 설정된 기준전압 (Vref = 4V)을 초과할 때 High 신호를 출력하도록 설계되어 있으며, 두 비교기의 출력이 동시에 High 상태 일 때만 AND 게이트를 통해 피크 신호가 생성된다. 이를 통해 눈 깜빡임과 같은 짧은 전위 변화만을 선택적으로 감지할 수 있다.

피크 검출 이후의 신호는 Counter/Timer 회로로 전달되어 일정 시간 내의 깜빡임 횟수를 집계한다. 이 회로는 2-Bit Synchronous Counter(74161) 와 555 Timer를 결합하여 약 2.5 초 주기의 시간 창 내에서 펄스 개수를 측정하도록 구성되었다. 타이머의 출력이 상태 High 상태일 때 카운터가 활성화 되며, Low 상태가 되면 카운터가 자동으로 리셋되어 다음 측정 주기를 준비한다. 이 방식은 사용자의 눈 깜빡임 빈도를 안정적으로 계수할 수 있도록 설계되었다.

마지막으로, 카운터의 출력 비트는 Motor Control 회로로 입력되어 제어 신호로 변환된다. 출력이 '10'일 때 모터가 구동되고, '11'일 때 정지하도록 설정되었으며, 릴레이 드라이버(2N2222)와 역전압 보호 다이오드(1N4007)를 이용하여 구동 전류를 안정적으로 공급하고 회로 손상을 방지하였다. 이를 통해 눈 깜빡임의 횟수에 따라 모터의 ON/OFF 상태가 제어되는 동작을 구현 할 수 있다.

전체 회로는 PSpice 시뮬레이션 환경에서 설계 및 검증되었으며, 각 블록의 출력 파형과 타이밍 관계를 분석 하여 신호의 전송과 제어가 정상적으로 이루어짐을 확인하였다.

3. 연구 결과

본 연구에서는 EOG회로, Pick Detect 회로, Counter/Timer 회로, Motor Control 회로를 각각 PSpice 환경에서 개별적으로 시뮬레이션하고, 이후 전체 시스템을 하나의 블록으로 통합하여 신호 흐름을 검증하였다. 각 단계별 출력 파형과 논리적 응답 관계를 분석하였다.

EOG 회로에서는 입력 전극 간 ±0.3V의 미세 전위차가 계측 증폭기를 통해 약 10배 증폭되어 ±3V 범위의 안정된 출력을 보였다. 필터 회로(HPF 0.5Hz, LPF 15Hz)는 저주파 드리프트와 고주파 노이즈를 효과적으로 제거하여 눈 깜빡임에 해당하는 파형을 명확히 재현하였다.

Pick Detect 회로에서는 기준 전압 4V를 초과할 때만 발생하도록 설계하였으며, 두 비교기와 AND 게이트 조합을 통해 실제 깜빡임에 해당하는 단일 펄스(약 50ms)가 안정적으로 검출되었다.

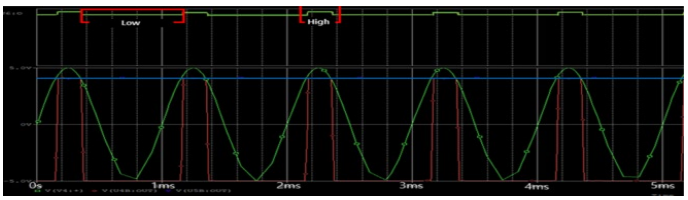


Fig 3. Output waveform of the peak detection circuit.

Conter/Timer 회로는 약 2.5ms 주기의 시간 창 내에서 피크 펄스를 집계하였다. 시뮬레이션 결과, 카운터의 출력이 00 - 01 - 10 - 11 로 순차적으로 변화하며 입력 이벤트를 정확히 누적하였고, Timer 리셋 후 새로운 주기가 정상적으로 초기화되었다.

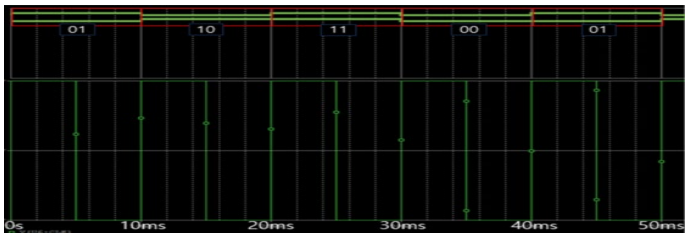


Fig 4. Output waveform of the counter circuit.

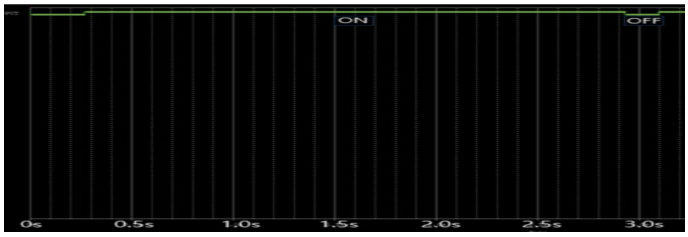


Fig 5. Output waveform of the Timer circuit.

Motor Control 회로에서는 출력비트가 '10'일 때 드라이버(2N2222)가 활성화 되어 12V 모터가 동작하고, '11'로 전환 시 자동으로 정지하였다. 역전압 보호 다이오드(1N4007)는 서지 전류를 차단하여 회로 안정성을 확보하였다.

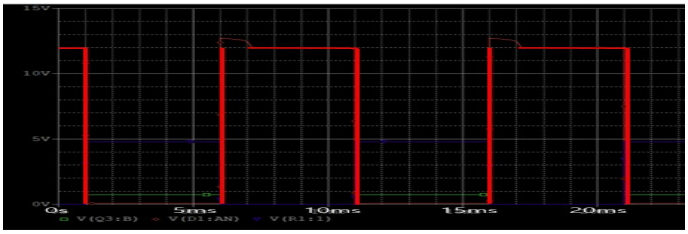


Fig 6. Output waveform of the motor control circuit.

통합 시뮬레이션 결과, 눈 깜빡임에 해당하는 입력 전위가 인가되면, 약 40ms 이내의 지연 시간으로 회로가 연속적으로 수행되었으며, 시스템 전체의 응답속도(Pesponse Time)는 100ms 이하로 측정되었다. 이는 실시간 생체신호 기반 제어 시스템으로 충분한 응답 성능을 보여준다.

현재까지의 연구 결과는 아날로그 회로만으로 생체신호의 감지, 처리, 제어를 완전 구현할 수 있음을 입증하는 단계를 보여준다. 향후 단계에서는 시뮬레이션에서 얻은 회로 파라미터를 기반으로 셀지 PCB를 제작하고, ITO 투명전극을 부착한 EOG 측정 실험을 통해 회로의 출력 특성을 실측할 예정이다. 이를 통해 아날로그 신호 경로의 선형성, 드리프트 안정성, 전극 접촉저항에 따른 오차 특성을 추가적으로 분석할 계획이다.

4. Acknowledgements

This work was supported by a grant from the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Korean government (MSIT) (Grant No. RS-2022-NR069934). This work was also supported in part by the Soonchunhyang University Research Fund, BK21 Fostering Outstanding Universities for Research (FOUR), under Grant 5199990914048.

5.참고 문헌

[1] Son, Hyo Won, et al. "1D Convolutional Neural Network-Based Hierarchical Classification of Eye Movements Using Noncontact Electrooculography." IEEE Access (2025).

Poster-079

가속도 신호의 파워 스펙트럼 밀도 분석을 활용한 라이프로깅 데이터의 모션 아티팩트 검출 알고리즘 개발

우정식[1*], 박소영[2*], 김정훈[3], 최수현[4], 이명규[4], 이종실[4], 이제연[4,5], 김인영[4,5†]

한양대학교 스포츠사이언스전공[1], 동서울대학교 컴퓨터소프트웨어학과[2], 한양대학교 융합전자공학과[3],

한양대학교 생체의공학과[4], 한양대학교 의과대학 의공학교실[5]

Development of a Motion Artifact Detection Algorithm for Lifelogging Data Using Power Spectrum Density Analysis of Accelerometer

Jungsik Woo[1], So Young Park[2], Jeonghoon Kim[3], Soo Hyun Choi[4], Myung-Kyu Yi[4], Jongshill Lee[4], Jeyeon Lee[4,5], In Young Kim[4,5†]

[1] Department of Sport Science, Hanyang University

[2] Department of Computer Science, Dong Seoul University

[3] Department of Electronic Engineering, Hanyang University

[4] Department of Biomedical Engineering, Hanyang University

[5] Department of Biomedical Engineering, College of Medicine, Hanyang University, Korea

*zzikmuckrer@gmail.com, †iykim@hanyang.ac.kr

Abstract

Lifelogging biosignals have become widely accessible for health monitoring. However, these signals are often degraded by motion artifacts, reducing their reliability. Therefore, an artifact-removal process is essential to ensure the utilization of high-quality data. This study proposes a motion artifact detection algorithm by leveraging power spectral density (PSD) analysis of ACC signals to identify low-motion segments through periodic respiratory patterns. The proposed algorithm was validated using the Signal Quality Index (SQI), demonstrating that the PSD analysis method achieved higher accuracy in identifying low-quality PPG segments and improved the proportion of high-quality data, thereby enhancing the reliability of the screened data.

1. 연구 배경

웨어러블 장비의 발전으로 일상생활 속 생체신호를 손쉽게 측정할 수 있게 되면서, 라이프로깅 데이터베이스의 구축과 활용이 활발히 이루어지고 있다. 이러한 라이프로깅 데이터는 기존의 제한된 실험실 환경에서 측정된 데이터에 비해 일상생활 중의 생리적인 반응을 모니터링할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 라이프로깅 데이터는 일상생활 중의 움직임으로 발생하는 모션 아티팩트(Motion artifact)로 인해 신호의 품질이 저하되어 알고리즘 학습의 정확도를 저해시킬 수 있으며, 데이터베이스의 신뢰성이 떨어진다는 한계가 있다. 따라서 양질의 라이프로깅 데이터를 확보하기 위해서 효과적인 artifact 제거의 과정이 필수적이다.

기존의 accelerometer (ACC) 기반의 motion artifact 제거 알고리즘은 ACC 신호의 magnitude를 활용한다. 움직임이 커질수록 ACC 의 magnitude가 증가하므로, 일정 임계값을 설정하여, ACC 의 magnitude가 임계값을 초과하는 구간을 motion artifact로 판단하여 제거하는 방식이다. 그러나 이러한 고정 임계값 방식은 개인의 체형이나 생활 패턴에 따른 움직임 특성을 반영하지 못하므로, motion artifact가 큰 데이터 구간를 충분히 제거하지 못하거나, 유효한 데이터 구간을 과도하게 손실시키는 한계를 지닌다. 이러한 한계를 극복하기 위해서는 개인별로 신체 움직임이 적고 호흡 패턴이 뚜렷하게 관찰되는 구간을 선별하는 과정이 필요하다 [1].

본 연구는 ACC 신호의 magnitude 고정 임계값을 통한 스크리닝 이후의 과정에서 power spectral density (PSD)를 활용한 correlation coefficient (CC) 개념을 도입하였다. PSD 분석을 통해 개인별로 일정한 호흡 패턴이 나타나며, motion artifact의 영향이 최소화된 구간을 선별해내는 알고리즘을 개발하였다.

2. 연구 방법

한양대학교에 재학 중인 학생 9명을 대상으로 4일 간의 라이프로깅 데이터베이스를 구축하였다. 스마트 워치(Galaxy Watch 6, Samsung)를 통해 자체 개발된 전용 측정 어플리케이션으로 photoplethysmography (PPG)와 ACC 가 측정되었다. 본 어플리케이션은 매시 정각과 30분에 각각 6분간 측정을 수행하도록 설계되었으며, 측정된 데이터는 블루투스 통신을 통해 모바일 기기로 실시간 전송된다 (그림 1). 장기간 안정적 데이터 수집을 위해 배터리 소모를 최소화하고 전송 효율 향상시키고자, 배치 전송 및 Google Protocol Buffers(protobuf) 기반의 이진 직렬화 방식을 적용하였다.

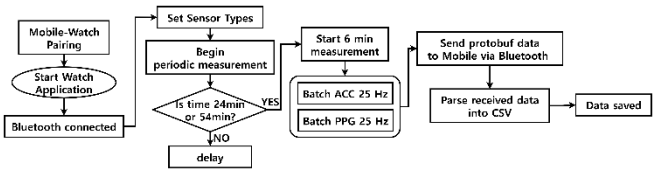


그림 1. 데이터 측정 및 전송 절차 흐름도

단일 일(day) 데이터가 가질 수 있는 편향(수면 부족, 스트레스, 생활 패턴의 변동 등)을 완화하고, 주·야간 변동(circadian rhythm)과 같은 생리적 리듬을 충분히 포착하여 개인별 안정적 생리 패턴을 확보하였다. 시간 지연 오차를 최소화하기 위해 측정된 PPG와 ACC 신호의 타임스탬프를 기준으로 정렬 및 동기화하였다.

PPG 신호는 empirical mode decomposition (EMD) 방법을 적용하여 baseline wandering을 제거하였으며, 이후 주간(daytime) 활동 신호에 대해서는 Chebyshev Ⅱ 대역통과 필터(0.5~10Hz, 4차, 40dB)를 적용하여 추가 전처리 과정을 진행하였다. ACC는 중력가속도 단위(g)로 스케일링한

후, 3축(x, y, z) 신호와 vector magnitude 값을 각각 추출하였다. 신호처리 시 20초의 window로 25% overlap을 적용하였으며, window 간 신호의 경계 효과를 완화하기 위해 Hamming window를 사용하였다. Window 내에 ACC 신호의 magnitude가 0.05 g 이상인 sample이 0.2초 (1%) 이상 연속적으로 나타나는 경우, 해당 window는 제거하였다 [2]. 1차로 선별된 window들에 대해 Welch 방법을 사용하여 ACC 3축 간의 PSD를 계산하였다. 각 축의 PSD 간 상관계수(Pearson's correlation coefficient)를 확인하였으며, 축 간 상관계수가 0.9 이상인 window를 선별하여 최종적으로 motion artifact 영향이 최소화된 데이터 구간을 선별하였다 [3]. 제안한 방법의 성능을 검증하기 위해, 제안한 PSD 기반 방식과 기존 고정 임계값 기반 방식 간에 dropout ratio와 signal quality index (SQI)를 비교하였다.

3. 연구 결과

측정된 데이터에서 주로 세 가지 유형의 motion artifact 상태가 관찰되었다. 주기적인 패턴을 보이는 gait (보행), 주기 없이 불규칙하고 복잡한 형태를 보이는 daily movement (일상 움직임), 그리고 motion artifact가 없는 static 상태이다 (그림 2). 상태별 PSD와 ACC 3축 간의 상관성을 분석한 결과, gait 및 static 상태에서는 PSD에서 규칙적인 패턴이 나타나며 상관계수가 1에 근접하였다. 반면, 비정형적인 motion artifact를 가지는 daily movement 상태에서는 PSD가 불규칙한 스펙트럼 분포를 보이고, 낮은 상관계수를 보였다.

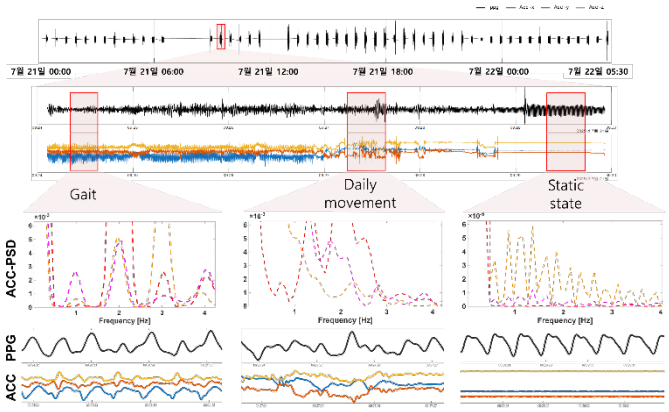
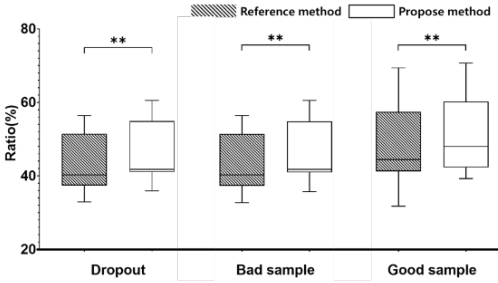


그림 3. 획득된 데이터의 segment 예시.
Motion artifact 유형별 ACC 3축 PSD와 raw signal

본 연구에서 제안된 artifact 제거 알고리즘 성능을 객관적으로 검증하기 위해, 각 window에 template matching 기반 SQI를 적용하여 PPG 신호의 품질을 평가하였다. SQI 점수가 0.75 이상인 경우를 '고품질(good)', 0.75 미만인 경우를 '저품질(bad)'로 분류하였다. 이를 기준으로 제안된 방법의 성능을 기존 방법과 비교하여, bad PPG 신호 제거 효과를 정량적으로 비교하였다 (그림 3). 제안된 방법은 기존 방법에 비해 더 많은 window를 제거하는 경향을 보였다. 미세한 motion artifact 감지의 정밀도를 평가하기 위해 bad sample ratio를 분석하였다. Bad sample ratio는 전체 window 수 대비 SQI가 'bad'로 판정된 window의 비율로 정의된다. Bad sample ratio는 기존 방법에 비해 통계적으로 유의하게 높았으며($p < 0.01$, Wilcoxon test), 이는 기존 방법보다 3.27%p 더 정확하게 bad sample을 식별하는 것으로 해석 가능하다. 제안된 방법의 good sample ratio는 기존 방법에 비해 통계적으로 유의하게 높았다($p < 0.01$, Wilcoxon test). 이러한 결과는 기존 알고리즘과 비교했을 때, good PPG와 bad PPG 구간을 보다 정확하게 분류하였으며, 모든 피험자의 데이터에서 미세한 motion artifact의 영향을 받는 구간을 더 정밀하게 제거했음을 나타낸다.



	Reference [2]	Propose method	p-value
Total Window (sample)	2173.67 ± 763.78		-
Dropout ratio (%)	43.258 ± 8.369	46.528 ± 8.551	$p < 0.01$
Bad sample ratio (%)	43.2 ± 8.388	46.467 ± 8.579	$p < 0.01$
Good sample ratio (%)	48.893 ± 11.453	51.409 ± 10.690	$p < 0.01$

그림 2. 알고리즘 성능 평가

4. 결론

본 연구는 웨어러블 장비를 통해 수집된 라이프로깅 생체신호의 주요 문제인 motion artifact를 효과적으로 제거하기 위한 새로운 접근법을 제안한다. 기존의 고정 임계값 기반 artifact 제거 방식이 개인의 움직임 특성을 반영하지 못해 데이터 손실이나 잔여 아티팩트 발생 등의 한계를 보였던 점을 개선하고자 하였다. 특히, 안정된 상태에서 관찰되는 호흡으로 인한 주기적 패턴을 활용하여, motion artifact가 최소화된 구간을 정밀하게 선별하는 방법을 도입하였다. 제안된 방법은 기존 ACC 기반 motion artifact 제거 방법과 비교하여 정량적으로 향상된 성능을 보였다. Dropout ratio 분석을 통해 제안된 방법은 기존 방법보다 더 많은 window를 제거하는 경향을 나타냈으며, Bad sample ratio가 통계적으로 유의하게 높아($p < 0.01$) 기존 방법보다 저품질 신호를 정확하게 식별함을 확인하였다. 또한, Good sample ratio를 통계적으로 유의하게 향상되어($p < 0.01$), 최종적으로 선별된 PPG 신호 품질이 일관되게 개선되었음을 입증하였다. 아울러, 제안된 방법은 개인별 움직임 특성이나 측정 환경에 관계없이 적용 가능하여, 웨어러블 기반 생체신호 분석의 정확성과 신뢰성 향상에 기여할 수 있음을 확인하였다.

5. Acknowledgements

이 논문은 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(No.RS-2024-00357879, 지능형 개인 맞춤 만성질환 관리를 위한 AI 기반 생체데이터 융합 및 생성 기술)

6. 참고 문헌

[1] H. Jung *et al.*, "Validating a consumer smartwatch for nocturnal respiratory rate measurements in sleep monitoring," *Sensors*, vol. 23, no. 18, p. 7976, 2023.

[2] M. Proença *et al.*, "Method-comparison study between a watch-like sensor and a cuff-based device for 24-h ambulatory blood pressure monitoring," *Sci. Rep.*, vol. 13, no. 1, p. 6149, 2023.

[3] S. C. Crepaldi *et al.*, "A stability- and aggregation-based method for heart rate estimation using photoplethysmographic signals during physical activity," *Sensors*, vol. 25, no. 14, p. 4315, 2025.

Poster-080

Wide-Band Gap 반도체 기반 Flyback 컨버터의 스위칭 주파수 별 전력 효율 비교

박기현[1], 안진수[2], 이지호[1], 최호성[1], 김형식[1*]
[1]건국대학교 글로컬캠퍼스 과학기술대학 ICT융합공학부 메카트로닉스공학과
[2]건국대학교 글로컬캠퍼스 과학기술대학 ICT융합공학부 BK21플러스의공학실용기술연구소 바이오메디컬공학과

A Comparative Evaluation of Wide-band Gap Flyback Converter Power Efficiency on Various Switching Frequency

Ki-Hyeon Park[1], Jinsu An[2], Ji-Ho Lee[1], Ho-Sung Choi[1], Hyung-Sik Kim[1*]
[1]Department of Mechatronics Engineering, School of ICT Convergence Engineering, College of Science & Technology, Konkuk University, Chungju, South Korea
[2]Department of Biomedical Engineering, BK21+ Research Institute of Biomedical Engineering, School of ICT Convergence Engineering, College of Science & Technology, Konkuk University, Chungju, South Korea
*hskim98@kku.ac.kr

Abstract

A flyback converter is widely used as the high voltage charging circuit in various power supplies and its efficiency and power density have been improved by WBG (Wide-band Gap) semiconductor devices such as SiC (Silicon Carbide) and GaN (Gallium Nitride) MOSFETs. In this study, a comparative evaluation on power efficiency of SiC MOSFET-based flyback converter and Si MOSFET-based converter has been made. Power efficiency was experimentally evaluated at switching frequencies of 50 kHz, 100 kHz, and 200 kHz under a 1 kΩ resistive load. The results showed that the SiC MOSFET converter achieved higher efficiency at all tested frequencies, primarily due to its lower output capacitance and reduced switching losses. Moreover, the efficiency degradation of SiC MOSFET was less significant as the switching frequency increased. These results indicate that WBG MOSFET-based flyback converters can enhance charging speed and minimize the circuit of medical devices.

1. 연구 배경

의료기기의 효율적인 전원 공급을 위해 고전압을 안정적으로 생성할 수 있는 절연형 DC-DC 컨버터가 사용된다. 그중 Flyback 컨버터는 구조가 단순하고 절연이 용이하여 배터리 충전기, 어댑터, 산업용 전원 등에 널리 사용된다. Flyback 컨버터는 스위치 turn-on 시간에 자화 인덕턴스에 에너지를 저장한 후 스위치 turn-off 시간에 2차측 충전 커패시터로 에너지를 넘기는 구조이다. 스위칭 주기마다 이러한 에너지 저장·방출 과정이 반복되며, 듀티비(Duty ratio)에 따라 출력 전압이 결정된다.

최근에는 전력 회로의 고효율화, 고밀도화를 위해 핵심 파워 트랜지스터로 GaN(Gallium Nitride), SiC(Silicon Carbide) 기반 WBG(Wide-Band Gap) MOSFET이 사용되고 있다[1]. WBG MOSFET은 전통적 파워 트랜지스터인 Si MOSFET과 달리 높은 임계 전계와 전자 이동도를 가지기 때문에, 더 높은 스위칭 속도와 낮은 손실을 구현할 수 있다[2]. 따라서 WBG MOSFET은 더 향상된 전력 밀도 설계, 고효율 전력 전달, 회로의 소형화가 가능하다[3].

의료기기 전원 공급장치로써 WBG MOSFET 기반 Flyback 컨버터를 이용하면 기존보다 더 효율적인 에너지 전달이 가능하다. 본 연구에서는 WBG MOSFET 기반 Flyback 컨버터의 스위칭 주파수 별 전력을 Si MOSFET 기반 Flyback 컨버터와 비교하여 전력 효율을 분석하고자 한다.

2. 연구 방법

Flyback Converter의 회로 구성을 그림 1과 같이 나타내었다. Flyback 컨버터의 고전압 승압을 담당하는 트랜스포머를 설계하였다. 입력전압(V_{in})은 17V, 입력 피크전류(I_{1_pk})는 5A로 설계하였다. 트랜스포머는 스위칭 주파수(f_{sw}) 50 kHz, 최대 듀티바(D_{max}) 0.48에서 동작할 수 있도록 설계하였다. 설계한 트랜스포머의 1차측 턴수는 9턴, 2차측 턴수는 130턴이었으며 이때 측정된 1차측 인덕턴스(L_1)은 33.4 μH, 2차측 인덕턴스(L_2)는 6.64 mH이다.

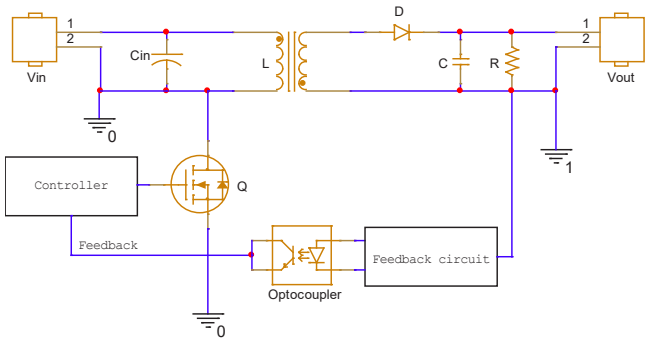


그림 1. Flyback 컨버터의 회로 구성

WBG 반도체 기반 Flyback 컨버터의 스위치 소자로 SiC MOSFET을 사용하였고 전력 효율을 Si MOSFET 기반 Flyback 컨버터와 비교하였다. 두가지 전력 소자에서 스위칭 주파수 50 kHz, 100 kHz, 200 kHz 동작을 하였을 때 1 kΩ 유부하 시험을 하여 전력 효율을 비교 분석하였다. 유부하 시험의 환경을 그림 2에 나타내었다.

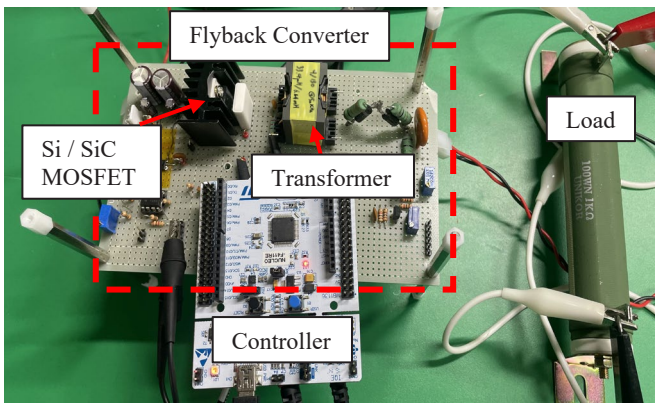


그림 2. Flyback 컨버터의 유부하 시험 환경

3. 연구 결과

1) 50 kHz 스위칭 주파수 전력 전달 효율

스위칭 주파수 50 kHz에서 Si MOSFET과 SiC MOSFET을 사용한 Flyback 컨버터의 1 kΩ 부하 출력 전압을 측정하여 그림 3에 나타내었다.

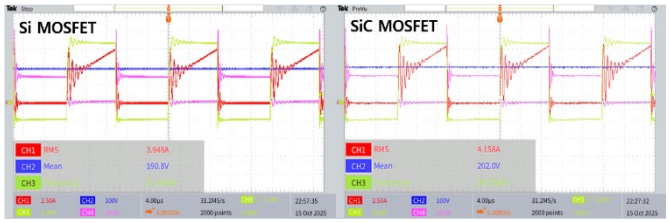


그림 3. Flyback 컨버터의 50 kHz 출력 전압 파형

스위칭 주파수 50 kHz에서 Si MOSFET 기반 Flyback 컨버터의 입력 실효전류(I_{rms})는 2.74 A이고 출력 평균 전압은 190.8 V이다. SiC MOSFET 기반 Flyback 컨버터의 입력 실효전류(I_{rms})는 2.817 A이고 출력 평균 전압은 202 V이다.

2) 100 kHz 스위칭 주파수 전력 전달 효율

스위칭 주파수 100 kHz에서 Si MOSFET과 SiC MOSFET을 사용한 Flyback 컨버터의 1 kΩ 부하 출력 전압을 측정하여 그림 4에 나타내었다.

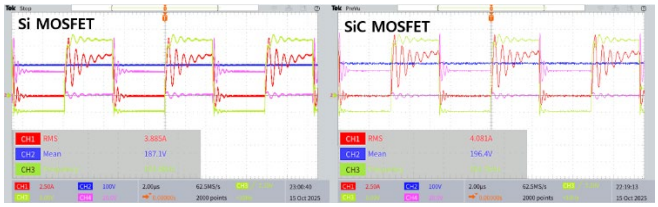


그림 4. Flyback 컨버터의 100 kHz 출력 전압 파형

스위칭 주파수 100 kHz에서 Si MOSFET 기반 Flyback 컨버터의 입력 실효전류(I_{rms})는 2.67 A이고 출력 평균 전압은 187.1 V이다. SiC MOSFET 기반 Flyback 컨버터의 입력 실효전류(I_{rms})는 2.77 A이고 출력 평균 전압은 196 V이다.

3) 200 kHz 스위칭 주파수 전력 전달 효율

스위칭 주파수 200 kHz에서 Si MOSFET과 SiC MOSFET을 사용한 Flyback 컨버터의 1 kΩ 부하 출력 전압을 측정하여 그림 5에 나타내었다.

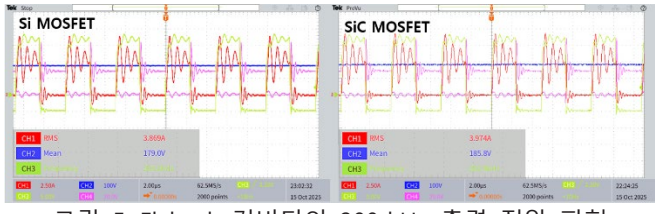


그림 5. Flyback 컨버터의 200 kHz 출력 전압 파형

스위칭 주파수 200 kHz에서 Si MOSFET 기반 Flyback 컨버터의 입력 실효전류(I_{rms})는 2.62 A이고 출력 평균 전압은 179 V이다. SiC MOSFET 기반 Flyback 컨버터의 입력 실효전류(I_{rms})는 2.48 A이고 출력 평균 전압은 185.8 V이다.

4) 전력 효율 비교

Si MOSFET과 SiC MOSFET 기반 Flyback 컨버터의 주파수별 전력 효율을 표 3에 나타내었다.

	50 kHz		100 kHz		200 kHz	
	P_{in}(W)	P_{out} (W)	P_{in} (W)	P_{out} (W)	P_{in} (W)	P_{out} (W)
Si MOSFET	46.58	36.1	45.44	34.98	44.54	32.04
	η = 0.77		η = 0.76		η = 0.72	
SiC MOSFET	47.89	40.80	47.09	38.57	42.16	34.52
	η = 0.85		η = 0.82		η = 0.82	

표 3. Flyback 컨버터의 주파수별 전력 효율

각 스위칭 주파수(50 kHz, 100 kHz, 200 kHz)에서 측정된 전력 전달 효율은 SiC MOSFET을 사용한 경우가 Si MOSFET을 사용한 경우보다 모두 높게 나타난다. 특히 주파수가 증가할수록 두 소자 간 효율 차이가 난다.

4. Conclusion

WBG MOSFET 기반 Flyback 컨버터의 스위칭 주파수 별 전력을 Si MOSFET 기반 Flyback 컨버터와 비교하여 전력 효율을 분석하였다.

각 스위칭 주파수에서 Si MOSFET 보다 SiC MOSFET이 전력 전달 효율이 더 높았다. 이는 Si MOSFET과 SiC MOSFET의 출력 커패시턴스(C_{oss}) 차이 때문이다. SiC MOSFET이 Si MOSFET보다 출력 커패시턴스가 작기 때문에 스위칭에 필요한 에너지가 적어 이때 발생하는 손실도 적다.

또한 스위칭 주파수가 증가함에 따라 Si MOSFET보다 SiC MOSFET의 효율 감소가 더 적었다. 이는 상대적으로 스위칭 손실이 적은 SiC MOSFET이 더 높은 주파수에서도 효율을 유지할 수 있기 때문이다.

본 연구는 WBG 반도체의 고밀도 전력 전달을 바탕으로 의료기기 전원 공급장치 연구에 활용될 수 있을 것이다.

5. Acknowledgment

이 논문은 한국연구재단의 중견연구자지원사업의 지원을 받아 수행된 것임(NRF-2021R1A2C2009136).

6. 참고문헌

[1] X. Guo, S. Wu, Y. Zhang, C. Dou and Y. Chi, "Optimal Design of High Frequency Transformer for High Power Density Flyback Converter," in *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 69, no. 11, pp. 4399-4403, Nov. 2022, doi: 10.1109/TCSII.2022.3184724.

[2] Y. Liu, Z. Song, H. Wang, G. Wang, J. Peng and S. Yin, "Comparative evaluation of WBG and Si power devices for the flyback converter," *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Beijing, China, 2017, pp. 964-969, doi: 10.1109/IECON.2017.8216166.

[3] B. Zhao, G. Wang and D. L. Wang, "Analysis of High Frequency Flyback Converters For High-voltage Low-power Applications," *2019 International Vacuum Electronics Conference (IVEC)*, Busan, Korea (South), 2019, pp. 1-3, doi: 10.1109/IVEC.2019.8744964.

Poster-081

심음 S1, S2 신호 추출에 대한 최적화된 PCG 청진 위치 선정에 관한 연구

이상원[1,3], 정지우[1,3], 김인철[2], 박희준[1], 웨이췬[1,3]

계명대학교 대학원 의용공학과[1]

계명대학교 의과대학 의학과[2]

주식회사 클레어오디언스[3]

A Study on the Selection of Optimized PCG Auscultation Position for Heart S1 and S2 Signal Extraction

S. W. Lee[1,3], J. W. Jung[1,3], I. C. Kim[2], H. J. Park[1], Q. Wei[1,3]

Department of Biomedical Engineering, Keimyung University, Korea[1]

Department of Medicine, College of Medicine, Keimyung University[2]

Clairaudience co., Ltd.[3]

weiqun@kmu.ac.kr

Abstract

Cardiovascular disease remains the second leading cause of death, and valvular disorders often progress without noticeable symptoms. This study aimed to identify the optimal auscultation site for reliable extraction of the first (S1) and second (S2) heart sounds using phonocardiogram (PCG) signals. Five standard chest sites (Aortic, Pulmonic, Erb's point, Tricuspid, and Mitral areas) were evaluated to determine location-dependent performance. PCG signals were preprocessed through Butterworth band-pass filtering, wavelet denoising, and envelope smoothing. S1 and S2 were extracted based on electrocardiogram (ECG) R/T peaks and photoplethysmography (PPG) systolic and diastolic anchors. Sensitivity, mean absolute error (MAE), and signal-to-noise ratio (SNR) were calculated for quantitative evaluation. Erb's Point showed the highest detection sensitivity (S1 = 0.53, S2 = 0.43) and lowest MAE (ECG = 9.43 bpm, PPG = 48.76 bpm) with stable SNR (0.35 dB). These findings suggest that Erb's Point provides the most reliable cardiac sound acquisition, supporting its use as the optimal site for PCG measurement and AI-based heart sound analysis.

1. 연구 배경

최근 10년간 심장 질환으로 인한 사망자 수는 지속적으로 증가하고 있는 추세이다. 2024년 국내 질환별 사망률 통계 결과에 따르면 심장 질환으로 인한 사망률은 65.7%로 2위를 기록했다 [1]. 특히 심장 질환 중 판막질환의 경우 중증에도 불구하고 뚜렷한 증상이 나타나지 않는 경우가 많아 환자 스스로 문제를 인지하기 어렵다. 따라서 증상에 의존하지 않고 질환을 진단할 수 있는 방법이 필요하며 의학적으로 청진기를 통해 측정된 심음도(Phonocardiogram, PCG)를 통하여 진단할 수 있다. 하지만 비전문가인 일반 사용자의 경우 정확한 심음 청진의 위치를 찾기 어렵다. 따라서 본 연구는 비전문가가 심음의 특성을 정확하게 측정할 수 있는 청진 위치를 탐색 및 제안하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 의학적으로 검증된 청진점을 바탕으로 심전도(Electrocardiogram, ECG)와 광전용적맥파 (Photoplethysmography, PPG)를 보조 지표로 사용하여 PCG의 제1심음(S1)과 제2심음(S2)을 추출한 뒤, 해당 신호의 신뢰도와 신호 품질을 정량적으로 평가하고 최적의 위치를 분석한다 [2]. 이는 심혈관 신호가 심장 박동의 한 주기 내에서 발생하는 전기적 활성 작용과 그에 따른 판막의 진동, 말초 혈관의 혈류 변화가 동일한 시간 축에서 연계된 생리적 연쇄 반응이라는 이론적 배경에 기반한다.

2. 연구 방법

2-1. PCG 전처리

PCG는 환경소음과 호흡음 등으로 인하여 발생하는 내외부적 소음의 영향을 받기 때문에 전처리를 통하여 잡음을 상쇄하는 필터링 작업을 진행하였으며 그림1은 PCG의 전처리 알고리즘에 따른 블록 다이어그램이다. 먼저 저주파에 존재하는 호흡음과 고주파에 존재하는 소음에 대한 잡음을 억제하기 위해 버터워스 대역 통과 필터(Butterworth Band-Pass Filter)를 사용하였다. 해당 필터는 통과 대역에서 안정적인 주파수 통과율을 지녀 심음 신호의 왜곡을 최소화할 수 있다. 평균적인 심신호의 주파수 분포를 고려하여 30Hz에서 600Hz를 제외한 구역을 차단 대역으로 설정하였다. 또한, 웨이블릿 필터(Wavelet Filter)를 통하여 구간내 여러 주파수에 낮은 에너지로 분포하는 잡음을 다중 해상도 분석으로 임계값과 해당 주파수의 에너지를 비교하여 낮은 진폭을 가진 잡음을 제거한다. 이후 PCG의 규칙성을 파악하기 위하여 인벨로프(envelope)와 사비츠키-골레이 필터(Savitzky-Golay filter)를 적용하여 신호 평활화(smoothing)를 수행하였다. 이후 S1과 S2 추출을 위해 진폭의 크기에 따라 증폭을 부여하는 비선형 이득 함수(Non-linear Gain Function)를 적용하여 심음의 특성을 강조하였다.

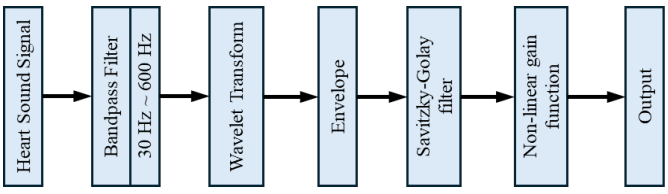


그림 1 PCG 전처리 블록 다이어그램

2.2 앵커 추출 및 PCG 특성 추출

전처리 된 PCG에서 S1과 S2를 도출하기 위하여 ECG와 PPG에서 특징 추출의 기준점으로 활용하기 위한 앵커를 도출하였다. ECG에서는 신호의 진폭이 80%에 위치한 임계값(Threshold)를 토대로 R 피크를 도출하였고 PCG의 S2 발생

을 유도하는 신호인 T 피크를 찾기 위하여 R 피크를 기준으로 120~500ms 구간에서 존재하여 신호가 급격하게 하락하는 국소최저점을 T 피크가 종료되는 시점으로 특정하였고 PPG의 수축기 피크는 그래프 내에서 두드러진 스파이크(spilke)로 관찰되기 때문에 PPG의 국소 최대값을 수축기 피크로 특정하였다. 이완기 노치의 경우 수축기 피크와는 반대로 심주기 내에서 가장 낮은 국소 최저점을 활용하여 앵커를 추출하였고 이를 바탕으로 S1과 S2를 추출하였다. S1의 경우 심음의 수축기에 발생하는 신음이기 때문에 ECG의 R 피크 직후에 발생하는 특징을 활용하여 직후 발생하는 신호를 S1으로 판정하였다. 하지만 ECG와 심음 발생의 시간적 간격(PTT)는 측정 위치별, 측정 대상별로 상이하기 때문에 이를 해결하기 위하여 S1의 발생 구간을 R피크 이전 수축기 피크를 앵커로 제한하는 S1 Section을 보조 평가 지표로써 활용한다. S2의 경우 ECG의 T 피크가 완전히 끝나는 종단시점에서 발생하기 때문에 T 피크의 종단 시점을 기준으로 수축기 피크와 노치를 앵커로 S2 Section으로 나누어 특성을 추출했다.

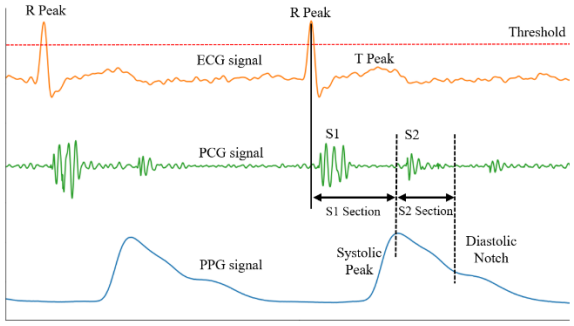


그림 2. 심혈관계 생체신호 관계 및 PCG 분석을 위한 특성 신호 구간 분할

3. 실험

본 연구는 탐색적 파일럿 연구로써 건강한 남성 3명 (평균 연령 25±2세)을 대상으로 실험을 진행하였다. 피험자는 안정된 자세에서 동시에 측정되었으며 PCG는 그림 3에서 명시된 부위에, ECG는 Lead3의 표준 배치에서 측정하였으며 PPG는 좌측 검지에서 측정을 진행하였다. 모든 생체 신호를 측정함에 있어 데이터 수집 시스템(MP160, BIOPAC Systems, Goleta, CA, USA)을 활용하여 4kHz 샘플링 속도를 기준으로 측정을 진행하였다.

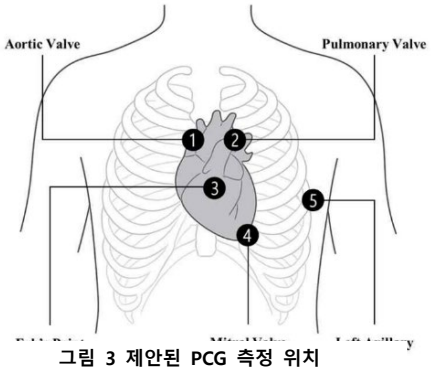
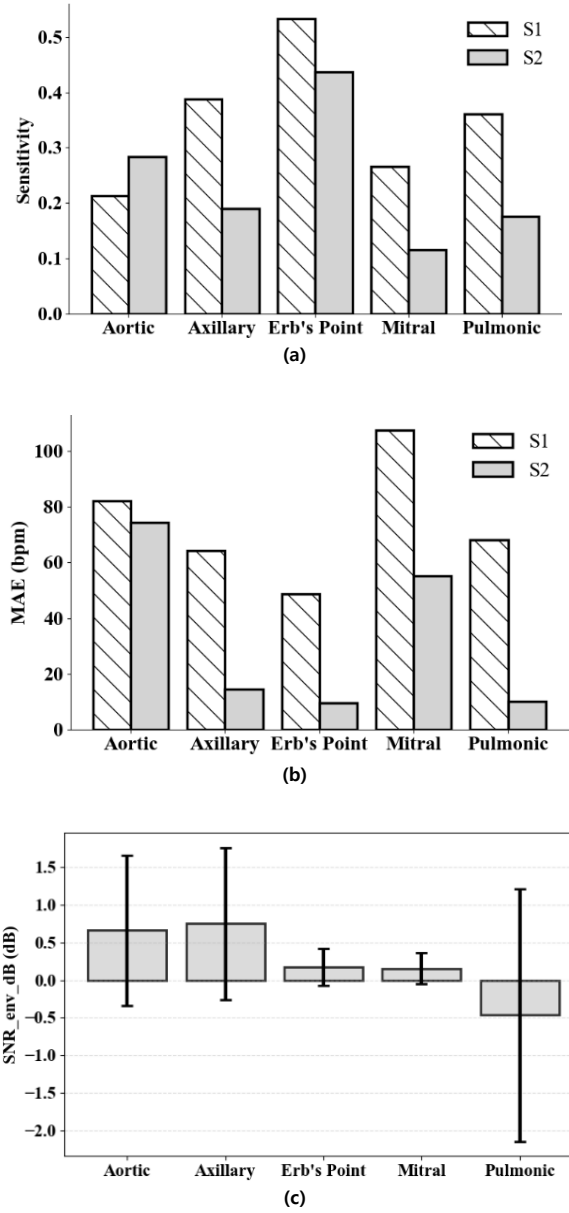


그림 3 제안된 PCG 측정 위치

4. 연구 결과

그래프 1은 각 부위에서 측정한 ECG, PPG, PCG신호를 바탕으로 검출 민감도, 표준 절대 오차, SNR을 정량적으로 평가한 결과이다. 먼저 그래프1(a)에 따르면 부위별 심음 검출 민감도가 Erb's Point에서 S1이 0.53, S2가 0.43으로 가장 높은 민감도를 보였지만 Aortic에서 S1은 0.22, S2가 0.28로 가장 낮은 검출 민감도를 나타내었다. 이는 심장의 중심부에 위치한 Erb's Point가 모든 판막의 계폐음을 상대적으로 뚜렷하게 관측할 수 있기 때문으로 해석된다. 그래프1(b)의 BPM 평균 절대 오차 또한, Erb's Point에서 ECG 기준 표준오차 9.43, PPG 기준 48.76으로 상대적으로 낮은 오차를 보였으며 Axillary 또한 안정적인 동기성을 보였다. 마지막으로 그래프 1(c)의 SNR은 Aortic과 Axillary에서 가장 높은 수치인 1.81을 보였으며 Erb's Point는 0.35로 안정적인 잡음비를 보였다. 결과적으로 검출 민감도와 평균 절대 오차 및 SNR 항목에서 안정적인 성능을 보이는 Erb's Point가 신호의 일치도 및 품질적 성능면에서 최적의 청진 위치로 확인되었다. 이는 임상적 심음 측정에서 표준 청진 부위로서의 유효성을 확립할 수 있으며, 향후 연구에서는 심음 기반 인공지능 모델 학습에서도 Erb's Point 중심의 데이터 구성이 가장 효율적일 것으로 판단된다.



그래프 1. 각 부위에서 측정된 PCG 특성 추출 결과: (a) S1, S2 검출 민감도 (b) 표준 절대 오차 (c) 부위별 SNR 수치

5. Acknowledgements
본 연구는 2025년도 중소벤처기업부의 창업중심대학 지원사업에 의한 연구 결과이며, 주관기관인 대구대학교 창업지원단의 지원을 받아 수행되었음 [20326479]

6.참고 문헌
[1] 통계청. (2025.09.25). 2024년 사망원인통계 결과 [보도자료], https://url.kr/v7bd8e
[2] Gersten, A. J., & Al-Moustadi, W. (2024). Cardiac exam. In StatPearls. StatPearls Publishing.
[3] Jaros, R., Koutny, J., Ladrova, M., & Martinek, R. (2023). Novel phonocardiography system for heartbeat detection from various locations. Scientific Reports, 13(1), 14392.

Poster-082

3D 프린팅을 이용한 생체신호 측정용 유연 배열 전극 시스템 개발

양혜정[1*], 유영현[1], 이재혁[2], 송강일[1‡]
국립부경대학교 스마트헬스케어학부[1]
국립부경대학교 컴퓨터·인공지능공학부[2]

Development of a 3D-printed Flexible Array Electrode System for Biosignal Monitoring

Hyejeong Yang[1*], Younghyun Ryu[1], Jaehyeok Lee[2] Kang-Il Song[1‡]
Division of Smart Healthcare, Pukyong National University, Korea
Division of Computer Engineering And Artificial Intelligence, Pukyong National University, Korea
*hyey1215@pukyong.ac.kr

Abstract

Biosignal measurement is essential for disease diagnosis, health monitoring, and the development of wearable medical devices. However, conventional electrodes are limited in flexibility and patient-specific manufacturability. Motivated by the need for skin-conformable flexible electrodes, this study aims to develop a three-dimensional (3D)-printed flexible array electrode system for biosignal acquisition. Flexible array electrodes were fabricated via 3D printing, and geometry-dependent electrical properties, electrochemical characteristics, and practical biosignal recording performance were comprehensively evaluated. The proposed 3D-printed flexible electrodes achieved both high electrical conductivity and low impedance. These findings demonstrate a rapid and efficient fabrication methodology for biosignal electrodes and are expected to support the development of customizable flexible array electrode systems.

1. 연구 배경

생체신호 측정은 질병 진단, 건강 모니터링, 그리고 다양한 웨어러블 의료기기 개발에 필수적인 기술로, 그 중요성이 더욱 부각되고 있다[1]. 특히, 다수의 측정 지점에서 정밀한 생체신호를 동시에 감지하고 분석할 수 있는 유연 배열 전극의 개발은 넓은 인체 부위의 신호를 종합적으로 파악하고 고해상도 정보를 획득하는 데 핵심적인 역할을 수행한다. 이에 따라 인체에 직접 부착되어 생체신호를 정확하고 효과적으로 감지 및 전달할 수 있는 고성능 전극에 대한 요구가 지속적으로 증가하고 있다.

기존 생체신호 측정 전극은 주로 복잡한 제조 공정과 높은 비용을 수반하는 평면 패터닝 기술로 제작되어 왔다[2]. 이러한 방식은 전극의 형태적 유연성을 제한하며, 특히 다채널 배열 전극(Multielectrode Array)이나 대면적 전극의 환자 맞춤형 제작에 어려움을 야기하여 착용감 및 신호 감지 효율성 측면에서 한계를 지닌다. 특히, 유연성과 인체 적합성을 동시에 만족하는 전극 기술은 여전히 중요한 연구 과제로 남아있다.

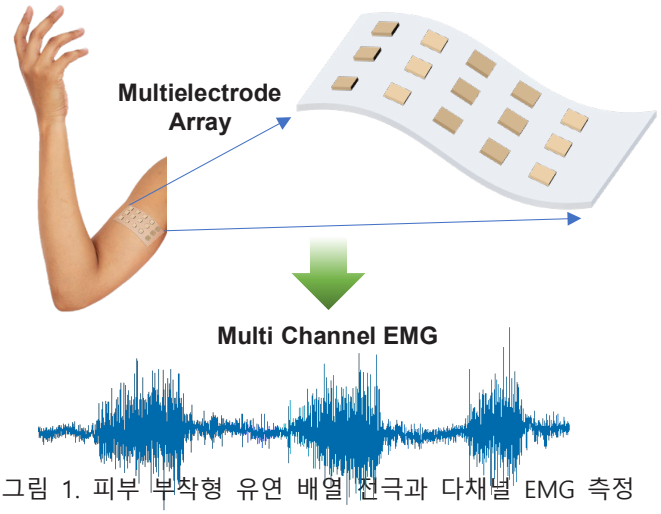


그림 1. 피부 부착형 유연 배열 전극과 다채널 EMG 측정 개념도

최근 3차원 프린팅 기술은 복잡한 구조를 단일 공정으로 구현할 수 있는 제조 대안으로 주목받고 있다. 이 기술은 뛰어난 설계 유연성을 바탕으로 다양한 형태의 다채널 배열 구조를 단일 공정으로 정밀하게 구현하고, 비용 효율성 등의 장점을 바탕으로 개인 맞춤형 유연 배열 전극 개발에 새로운 가능성을 제시하고 있다. [3]

본 연구에서는 3차원 프린팅 기술을 활용하여 생체신호 측정용 유연 배열 전극 시스템을 개발하였다. 개발된 전극은 전기적 및 전기화학적 특성 평가와 상업용 전극과의 비교를 통해 실제 생체신호를 측정하는 데 문제가 없음을 확인하였다. 이러한 결과는 3차원 프린팅 기술을 활용한 효율적인 생체신호 측정용 유연 배열 전극 시스템 제작의 실현 가능성을 나타낸다.

2. 연구 방법

전극의 기하학적 형상은 CAD 소프트웨어 (Fusion 360, Simplify)를 이용해 설계하였다. 설계된 모델은 적층 제조에 적합하도록 G-code로 변환되었다. 전극은 기판층, 전극층, 보호층으로 구성된 3층 구조를 지니며(그림 2), 유연 전극의 안정적 성능 확보를 위해 인쇄 속도, 유량, 출력 압력, 프린팅 패턴 등의 공정 조건은 체계적으로 최적화되었다. 또한, 기하학적 형상에 따른 효과를 비교하고자, 동일 공정 조건으

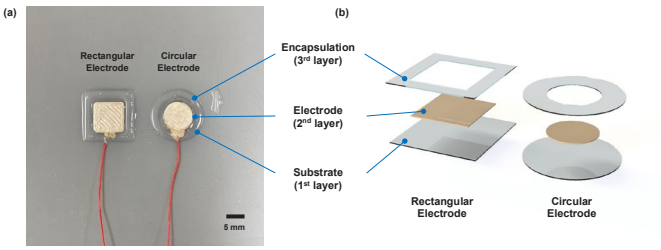


그림 2. 생체신호 계측을 위한 유연전자 전극. a) 제작된 전극 사진. b) 적층 구조.

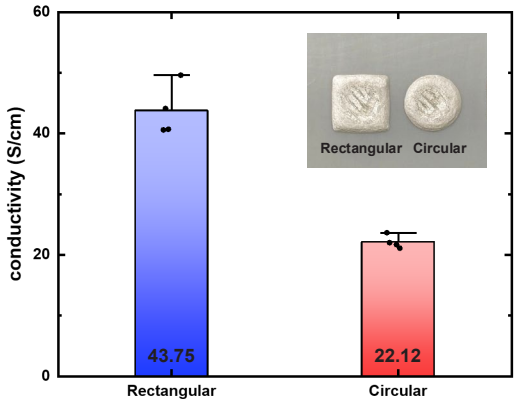


그림 3. 전극 모양에 따른 유연전자 전극의 전기전도도 비교

로 사각형 시편과 원형 시편을 각각 제작하였다.

전기적 특성 평가는 4-point probe 방식으로 수행하였다. 프로브 간격은 1.27mm로 설정되었으며, 100 nA의 정전류를 인가하여 각 시편에 대해 4회 반복 측정하였다. 측정된 면저항 값은 시편의 두께 반영하여 최종적인 전기전도도를 산출하는 데 활용되었다.

전기화학적 특성 평가는 전기화학적 임피던스 분광법(Electrochemical Impedance Spectroscopy)으로 수행하였다. 측정을 위해 3전극 시스템으로 구성하였으며, 작업 전극(WE)은 제작된 전극, 기준 전극(RE)은 Ag/AgCl, 보조 전극(CE)은 Pt 와이어를 활용하였다. 전해질로는 염화나트륨 수용액을 사용하였으며, AC 5 $mV_{RMS,}$ 100 kHz부터 0.2 Hz 범위까지 주파수 스윕을 수행하였다.

제작한 전극의 실제 생체신호 측정 능력을 확인하기 위해 생체 신호 데이터 증폭기 (AD Instrument PowerLab 15T)를 사용하여 근전도를 측정하였다. 신호 측정 시 60 Hz 전원 노이즈 제거를 위해 Notch Filter를 적용하였고, 증폭 비는 10:1로 설정하였다. 전극과 피부 사이에는 신호 측정의 안정성 확보를 위해 전도성 젤을 도포 후 측정하였다.

3. 연구 결과

동일한 공정 조건에서 제작된 사각형 시편은 평균 43.75 S/cm의 낮은 면저항을 보였고, 원형 시편은 평균 22.15 S/cm로 측정되었다(그림 3). 이러한 전극의 기하학적 형상이 전기적 특성에 유의미한 영향을 미침을 확인하였다.

전기화학 임피던스 분광법 분석에서는 제작된 전극이 생체신호 계측에 적합한 낮은 임피던스 특성을 보였으며(그림 4), 전극-전해질 계면의 안정적인 특성을 기반으로 생체 신호 계측에 적합함을 확인하였다.

근전도 측정 결과 근육의 활성 상태와 휴식 상태 구간에서 신호 차이가 명확히 구분되었으며(그림 5), 이를 통해 제작된 전극의 생체신호 계측 유효성을 확인하였다.

본 연구는 유연 배열 전극 시스템 구현을 위한 최적 전극 형상 연구를 수행하였으며, 생체신호 계측을 위한 3차원 프린팅 공정 변수를 도출하였다. 또한 실제 생체신호 측정 데이터의 안정적인 결과를 통해 개발된 전극의 유효성을 입증하였고 해당 결과는 유연 전극 배열 시스템 설계를 위한 기초 자료를 제공하며 향후 최적 전극 형상 도출 및 시스템 성능 향상에 기여할 것으로 기대된다.

4. Acknowledgements

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임. (No. RS-2024-00337597)

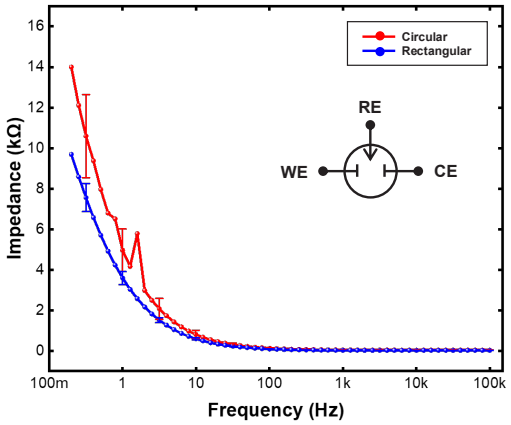


그림 4. 전극 모양에 따른 유연전자 전극의 임피던스 크기 비교

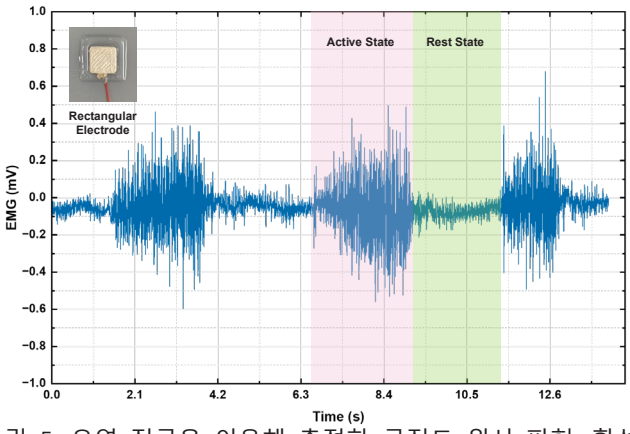


그림 5. 유연 전극을 이용해 측정한 근전도 원시 파형. 활성 구간(분홍)과 휴식 구간(녹색)을 색상으로 표시함.

5.참고 문헌

[1] H. Kim, B. Rigo, G. Wong, Y. J. Lee, and W. H. Yeo, "Advances in Wireless, Batteryless, Implantable Electronics for Real-Time, Continuous Physiological Monitoring," (in eng), *Nanomicro Lett,* vol. 16, no. 1, p. 52, 2023

[2] M. T. Hoang, A. H. Ngo, P. L. Nguyen, and M. D. Nguyen, "Flexible Conductive Dry Electrodes: A Customizable and Cost-Effective Approach for Biosignal Measurement," in *2024 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC)*, pp. 768–773, 2024

[3] K.-I. Song *et al.*, "Adaptive self-healing electronic epineurium for chronic bidirectional neural interfaces," *Nature Communications,* vol. 11, no. 1, p. 4195, 2020

Poster-083

In Silico 모델 기반의 심혈관계 파라미터 변화에 따른 맥파 특성 분석

최수현[1*], 한인철[2*], 이종실[1], 이제연[1,3], 김인영[1,3†]

한양대학교 생체의공학과[1], 한양대학교 융합전자공학과[2], 한양대학교 의과대학 의공학교실[3]

In Silico Model-Based Analysis of Pulse Wave Characteristics under Cardiovascular Parameter Variations

Soo Hyun Choi[1*], Incheol Han[2*], Jongshill Lee[1], Jeyeon Lee[1,3], In Young Kim[1,3†]

[1] Department of Biomedical Engineering, Hanyang University, Korea

[2] Department of Electronic Engineering, Hanyang University, Korea

[3] Department of Biomedical Engineering, College of Medicine, Hanyang University, Korea

[*]shc2912@hanyang.ac.kr, [†]iykim@hanyang.ac.kr

Abstract

In silico model provides a mathematical representation of physiological processes, enabling the simulation of complex human cardiovascular system. This approach allows for parametric analysis, in which individual parameters can be precisely controlled to evaluate their independent effects. In this study, cardiovascular parameters were systematically modulated to investigate their specific influences on blood pressure and photoplethysmogram pulse wave morphology.

1. 연구 배경

최근 심혈관계의 생리적 기전과 특성을 규명하기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 실제 측정된 생체 신호로 이루어진 *in vivo* database (DB)가 폭넓게 활용되고 있다. 그러나 *in vivo* 환경에서는 피험자 간/내 생리적 변동성, 측정 환경의 제약 및 데이터 확보에 필요한 시간과 비용의 부담으로 재현성 있는 대규모 DB 구축이 어렵다. 이러한 한계를 극복하기 위해 생리학적 시스템을 수학적으로 해석하는 *in silico* model이 주목받고 있다. *In silico* model은 수학적인 방정식을 통해 복잡한 생리학적 과정과 현상을 모사할 수 있는 접근법으로, 반복적인 시뮬레이션으로 비교적 짧은 시간 내에 재현성 있는 대규모 데이터를 생성할 수 있다. 또한 개별 생리학적 parameter를 정밀하게 통제하여, 다양한 조건에서 각 parameter가 미치는 영향을 독립적으로 분석할 수 있다. 대표적인 예로 pulse wave database (PWDB) model이 있다. PWDB model은 116 arterial segments의 혈관 특성을 통해, 가상 피험자의 arterial network를 구성하여, 동맥 위치별 arterial pulse wave (PW)를 생성한다. PWDB model을 통해 cardiac parameter (heart rate (HR), stroke volume (SV) 등)와 vascular parameter (arterial segment의 radius, elasticity 등) 조절을 통해 다양한 환경에서의 arterial pulse wave (PW) 파형 생성이 가능하다.

Blood pressure (BP)은 심혈관계 기능을 종합적으로 반영하는 PW로, 심장 박동에 의해 생성된 혈류가 말초혈관을 따라 이동함에 따라 혈관 벽에 가해지는 압력이다. Photoplethysmogram (PPG)는 피하 혈관층의 혈액 부피 변화를 비침습적으로 측정한 PW로, 광학적으로 간단하게 측정 가능하여 웨어러블 디바이스를 통해 생리적 신호(심박수, 산소포화도 등) 모니터링에 활용된다. PW morphology는 심장의 박동으로 인해 발생하는 percussion wave와 말초에서의 reflected wave의 합으로 이루어져 있으며, 심혈관계 특성(HR, SV, systemic vascular resistance (SVR), arterial stiffness 등)의 복합적인 영향을 받는 것으로 알려져 있다. Cardiac parameter (HR, SV)는 PW의 temporal과 amplitude 특성을 변화시킨다. Vascular parameter인 SVR은 혈관의 radius의 제곱(luminal area)에, arterial stiffness는 elasticity (compliance)에 반비례한다. SVR이 증가하면 혈액의 afterload가 커지며 혈류 저항이 증가하고 파형의 감쇠가 증가하는 것으로 알려져 있다. SVR의 증가와 arterial stiffness의 감소는 reflected wave의 발생 시기를 앞당기며, 진폭을 증가시킨다. 이로 인해 percussion wave와 reflected wave의 중첩이 증가하며, PW의 morphology가 변화한다. 심혈관계 특성의 복합적 변화의 대표적인 예로는 노화가 있으며, cardiac parameters의 감소와 vascular parameters의 증가가 PW의 morphology에 복합적으로 영향을 미친다.

본 연구는 *in silico* model을 활용하여 심혈관계 주요 parameter를 독립적으로 조절하며 PW를 시뮬레이션하고, 이들이 PW의 morphology에 미치는 영향을 분석하였다.

2.연구 방법

심혈관계 주요 parameter가 PW의 morphology에 미치는 영향을 확인하기 위해, 각 parameter를 독립적으로 조절하며 시뮬레이션을 수행하였다 (표 1).

표 1. 심혈관계 parameter 조절

Category	Adjusted parameters	Variations	*N*
Baseline	-	-	6
Cardiac	Heart rate	mean + k * SD (k = −2.5, −2.0, −1.5, ..., 1.5, 2.0, 2.5)	60
	Stroke volume	mean + k * SD (k = −2.5, −2.0, −1.5, ..., 1.5, 2.0, 2.5)	60
	Mean blood pressure	mean + k * SD (k = −2.5, −2.0, −1.5, ..., 1.5, 2.0, 2.5)	60
Vascular	Radii of elastic arteries	80%, 90%, 110%, 120%	24
	Radii of muscular arteries	110%, 120%	12
	Radii of both elastic & muscular arteries	Radii of elastic arteries: 110% Radii of muscular arteries: 110%, 120%	12
		Total	234

모든 시뮬레이션은 25세부터 75세까지 6개 연령군의 PW를 생성한다. 심혈관계 parameter는 *in vivo* 환경에서 보고된 연령대 별 parameter의 mean과 standard deviation (SD) 값을 활용하여 조절하였다. Baseline 시뮬레이션은 각 parameter의 mean 값을 기준으로 수행하였다. Cardiac parameter (HR, SV, MBP)는 SD-based incremental modulation 방식으로 10단계 조정하였다. Vascular parameter의 조절을 위해 전체 116개 arterial segment에 대해서 elastic artery (21개)와 muscular artery (67개)로 분류하였다 (표 2). 조절된 vascular parameter는 elastic artery radius, muscular artery radius이다. 또한 본태성 고혈압군과 정상혈압군 간 parameter 차이를 보고한 선행

연구 [2]를 참고하여, elastic artery radius를 110%로 증가한 상태에서 muscular artery radius를 증가시켰다.

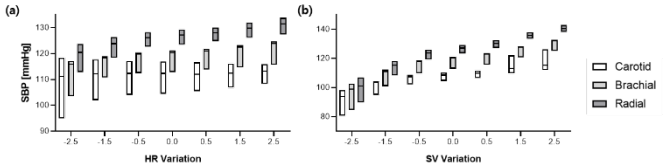
표 2. Elastic artery와 Muscular artery

Artery	Name
Elastic	Ascending Aorta, Aortic Arch I~II, Descending Thoracic Aorta I~II, Abdominal Aorta I~V Brachiocephalic Artery, Left/Right Subclavian Artery I Left/Right Common Carotid Artery, Left/Right Internal Carotid Artery Left/Right Internal Carotid Sinus, Left/Right Common Iliac Artery
Muscular	Basilar Artery I~II , Celiac Artery I~II, Hepatic Artery, Splenic Artery, Gastric Artery Left/Right Vertebral Artery, Left/Right External Carotid Artery I, Left/Right Interosseous Artery Left/Right Brachial Artery, Left/Right Radial Artery, Left/Right Ulnar Artery I~II, Left/Right Renal Artery, Left/Right External/Internal Iliac Artery, Left/Right Anterior/Posterior Tibial Artery, Left/Right Femoral Artery, Left/Right Deep Femoral Artery, Left/Right Anterior Cerebral Artery I, Left/Right Posterior Cerebral Artery I~II, Left/Right Distal Internal Carotid Artery I~II, Left/Right External Carotid Artery II, Left/Right Middle Cerebral Artery (M1), Left/Right Inferior/Superior Middle Cerebral Artery (M2), Left/Right Superior Temporal Artery, Left/Right Superior Temporal Frontal/Parietal Artery, Left/Right Maxillary, Opthalmic, Superior Thyroid, Ascending Pharyngeal, Lingual, Facial, Occipital Artery, Superior/Inferior Mensenteric Artery, Intercostal Arteries [x35]

심혈관계 parameter가 PW에 미치는 영향을 분석하기 위하여, systolic BP (SBP) 값을 비교하였다. PPG로부터 arterial stiffness에 따른 반사파 발생의 변화와 관련된 reflection index (RI), modified aging index (AGI_{mod})를 추출하였다. RI 는 PPG의 diastolic peak와 systolic peak의 amplitude 비율이며, AGI_{mod} 는 PPG의 2차 미분 신호로부터 추출된 fiducial point들의 amplitude 비율이다.

3. 연구 결과

중심에서 말초로 진행됨에 따라 혈관 저항의 증가로 반사파의 중첩이 커지며, SBP 값 또한 증가하는 경향을 보였다. Cardiac parameter와 vascular parameter의 변동에 따른 SBP 변화 양상을 분석하였다. HR이 증가함에 따라 말초(brachial artery, radial artery)의 SBP 값이 증가하였다. 심박수의 증가로 인하여, 반사파의 발생 속도가 빨라져, 말초에서의 중첩이 증가하기 때문이다. SV의 증가에 따라 carotid artery와 말초의 SBP 모두 증가하였다. Arterial network에 유입되는 혈액량이 증가하기 때문에 BP의 증가에 직접적으로 영향을 미치는 것으로 해석할 수 있다. Cardiac parameter의 변동은 carotid artery에 비해 말초의 SBP에 더 높은 상관성을 보였고, HR보다 SV가 혈압 변화에 더 큰 영향을 미쳤다 (그림 1). Elastic artery의 radius가 증가함에 따라 혈관 저항이 감소하여 SBP는 감소한다. Muscular artery radius에 비해 elastic artery radius 변동이 SBP에 더 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다 (그림 2). Elastic artery는 심장으로부터 혈류가 직접적으로 유입되고 전파되는 영역으로 압력파 생성의 초기 조건을 결정하기 때문이다.



Adjusted parameters	Correlation coefficient		
	Carotid SBP	Brachial SBP	Radial SBP
Heart rate	0.8022	0.6417	0.8511
Stroke volume	0.8072	0.8511	0.9130

그림 1. Cardiac parameter 변동에 따른 SBP의 변화.
(a) HR, (b) SV, (표) HR, SV와 SBP 간의 Pearson's CC

심혈관계 parameter가 변화함에 따라 digital artery에서의 PPG의 파형에 영향을 미친다 (그림 3). HR의 변화는 PPG의 심장주기에 영향을 미치고, HR의 감소는 말초 혈관에서의 blood filling을 증가시켜 diastolic peak의 amplitude를 증가시키는 것으로 해석할 수 있다. 반면 SV의 변화는 말초 혈관 저항으로 인해 digital artery 수준의 PPG 파형에는 뚜렷한 영향을 미치지 않는 것을 볼 수 있다. Digital artery는 말초의 소동맥으로, elastic artery radius에 비해 muscular artery radius 변동이 PPG의 파형 변화에 더 큰 영향을 미치는 것

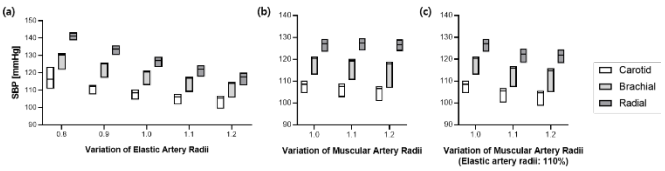


그림 2. Vascular parameter 변동에 따른 SBP의 변화
(a) Elastic arteries의 radii 변동
(b) Muscular arteries의 radii 변동
(c) Elastic arteries와 muscular arteries의 radii 변동

을 볼 수 있다. Muscular artery radius가 증가함에 따라 전신 혈관 저항은 감소하고, 반사파의 중첩이 감소함에 따라 dicrotic notch 부분이 선명해진다. 이러한 심혈관계의 변동에 따른 PPG의 morphology 변화는 feature의 분포 변화에도 나타난다 (그림 4).

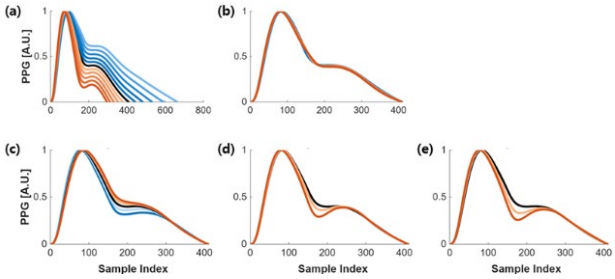


그림 3. 심혈관계 parameter 변동에 따른 digital artery에서의 PPG 파형(25세). (a) HR, (b) SV, (c) elastic artery radius, (d) muscular artery radius, (e) elastic artery와 muscular artery의 radius. (Blue: parameter 증가, Orange: parameter 감소)

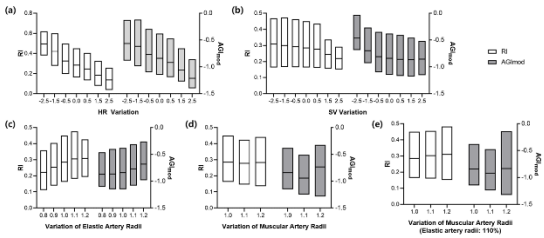


그림 4. 심혈관계 parameter 변동에 따른 PPG morphological feature (RI, AGI_{mod}) 분포. (a) HR, (b) SV, (c) elastic artery radius, (d) muscular artery radius, (e) elastic artery와 muscular artery의 radius

본 연구는 각 심혈관계 parameter의 독립적인 조절을 통한 시뮬레이션으로 BP와 PPG에 미치는 영향을 비교하였다. 또한 *in silico* model이 arterial network 내 PW의 전파와 관련된 생리학적 기전과 가설을 잘 반영하였음을 확인하였다.

4. Acknowledgements

이 연구는 2024년도 산업통상자원부 및 산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임 ('RS-2024-00444631', 'RS-2024-00445152').

5.참고 문헌

[1] Charlton PH, et al. Am J Physiol Heart Circ Physiol. 2019;317(5):H1062–H1085.

[2] Celant M, et al. Int J Numer Methods Biomed Eng. 2023;39(11):e3748.

자기 보고식 일주기 성향과 무구속 수면 데이터의 비교 분석: 일주기 리듬 평가 지표의 타당성 검증

이다혜[1*], 고정민[1], 김진영[1], 류현찬[1], 홍종현[1], 권현빈[2], 윤희남[1**]

[1]상명대학교 일반대학원 지능정보공학과

[2]주식회사 비알랩 연구소

Comparative Analysis of Self-Reported Chronotype and Non-Intrusive Sleep Data: Validation of a Circadian Rhythm Assessment Index

Dahye Lee[1*], Jungmin Koh[1], Jinyoung Kim[1], Hyunchan Ryu[1], Jonghyun Hong[1], Hyun Bin Kwon[2], Heenam Yoon[1**]

[1]Department of Artificial Intelligence and Informatics, Graduate School, Sangmyung University, Seoul, Korea

[2]Research Institute of BRLAB, Inc

[*]leenimok6@naver.com, [**]h-yoon@smu.ac.kr

Abstract

The circadian rhythm, a biological clock that regulates internal and external timing over an approximate 24-hour cycle, plays vital role in maintaining physiological function. A widely used method for assessing circadian rhythm is the Morningness-Eveningness Questionnaire (MEQ), which quantifies and allows for self-assessment of chronotype. However, the inherent limitations of the MEQ—its subjectivity and high dependence on respondent participation—necessitate a more objective, user-friendly method suitable for long-term monitoring. Bed sensors overcome the limitations of subjective assessment of the circadian rhythm; as a user-friendly, non-wearable device, they ensure high continuous usability and resolve issues like data gaps caused by device removal or charging. The acrophase determined by cosinor analysis of bed sensors data represents the peak time of the fitted rhythm curve, indicating the user's primary activity time, and thus serves as an objective, non-intrusive measure of chronotype. This study compares the acrophase derived from non-wearable bed sensor Sleep/Wake binary data with MEQ scores to demonstrate the suitability of utilizing non-intrusively acquired sleep data as a valid circadian rhythm analysis index. Analysis of longitudinally collected data from 35 subjects in a home environment revealed a significant and high correlation between the subjective MEQ scores and the objective sleep/wake data. In conclusion, non-intrusive bed sensors are validated as a feasible and practical alternative for long-term, objective circadian rhythm assessment in real-life settings, suggesting their potential utility in personalized health management.

1. 연구 배경

생체 시계는 약 24시간 주기로 내외부의 다양한 변동 변수들의 타이밍을 조절하며 인간의 생리 및 행동에 있어 매우 중요한 역할을 수행한다. 일주기 리듬은 수면 장애, 대사 질환, 정신 건강 등에 영향을 미치기에, 개인 맞춤형 치료 및 생활 패턴 관리를 위한 중요성이 강조된다 [1].

일주기 리듬을 평가하기 위한 황금표준으로는 멜라토닌과 심부 체온이 대표적이지만, 이러한 측정은 환경적 및 생리적 영향을 많이 받는 침습적인 방식이라는 근본적인 한계가 존재하기에 실생활 환경에서의 적용이 어렵다 [2].

이에 대한 대안으로, 설문 기반의 주관적 평가 도구들이 도입되었으며 그중 대표적인 것이 MEQ (Moringness-Eveningness Questionnaire)이다. MEQ는 생체 시계 타이밍 선호도를 바탕으로 일주기 성향을 수치화 하여 아침형-저녁형 성향을 스스로 평가할 수 있는 주관적 설문지이다. MEQ 점수의 범위는 16~86점이며, 점수가 높을수록 아침형을 나타낸다 [3]. 그러나 응답자의 적극적인 참여가 필수적이며 개인의 인지 능력 및 응답 신뢰도 등에 영향을 받을 수 있다는 한계가 있다.

주관적 평가의 한계를 극복하고 실생활에서의 객관적인 일주기 리듬 측정을 위해 웨어러블 기기의 사용이 확대되었다. 실제로 MEQ와 웨어러블 장치를 비교하는 연구가 진행되어 왔다 [4, 5]. 그러나 착용형이라는 특성 때문에 지속적인 착용에 따른 불편함이 발생하며, 장기적 모니터링에 있어서 낮은 지속 사용성이라는 한계를 야기한다.

그 대안으로, 비-착용형 센서인 침대 센서가 주목받고 있다. 침대 센서는 사용자가 수면을 취하는 침대 매트리스에 설치되며 신체의 미세한 움직임, 압력 변화, 심박 변화 등을 감지하여 수면 상태를 기록하는 무구속적 장치이다. 이 방식은 사용자의 불편을 최소화하며 수면 중 연속적인 데이터 취득이 가능한 장점이 있다. 비-착용형 기기를 통해 수집된 수면/각성 데이터는 일주기 리듬 분석법으로 자주 사용되는 코시노 분석(Cosinor analysis)을 통해 최고 활성 시점인 위상(Acrophase)을 객관적으로 도출할 수 있다.

본 논문에서는, 일주기 리듬의 주관적 평가 방법인 MEQ 점수와 비-착용형 침대 센서를 통해 수집된 수면/각성 이진화 데이터를 기반으로 도출된 위상 간의 상관관계를 분석하여, 무구속적 데이터 기반 리듬 추정의 타당성을 검증하고자 한다.

2. 연구 방법

본 연구는 총 35명의 성인 대상자(남성 24명, 여성 11명)로부터 수집된 데이터를 기반으로 수행되었다. 실험이

진행되는 동안 모든 대상자는 MEQ 설문을 1회 실시하여 주관적인 일주기 성향 점수를 획득하였다. 객관적인 일주기 리듬 측정을 위해, 대상자들은 가정 내 침대에 설치된 특수 제작 토퍼 위에서 모든 수면을 취하도록 요청받았다. 토퍼는 침대에 누웠음을 감지하는 압전 센서와 생체 신호를 감지하는 센서 등이 탑재된 비-착용형 침대 센서이다.

침대 센서의 FSR(Force Sensitive Resistor) 센서 데이터를 매 1분 간격의 평균값으로 처리하고 개별 임계값을 기준으로 대상자의 수면(0) 또는 각성(1) 상태를 판별하여 수면/각성 이진화 데이터를 생성하였다. 수집된 장기 데이터 중 안정적인 리듬 추정을 위한 가용 데이터는 자체 알고리즘을 통해 확보되었으며, 최종 데이터에 대한 코시노 분석 적용 예시는 그림 1. 과 같다.

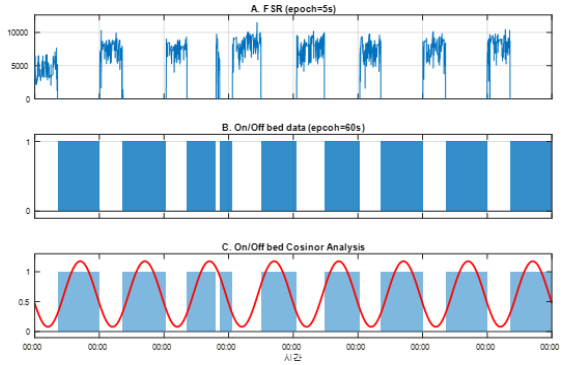


그림 1. FSR 데이터의 수면/각성 이진화 및 코사인 분석 적용 예시

대상자의 평균적인 일주기 성향을 반영하기 위하여 긴 데이터셋의 위상 값에 가중치를 부여하는 가중 평균을 적용하였다. MEQ 점수와 침대 센서 데이터의 위상 정보 간의 상관성을 확인하기 위하여 통계적 분석을 수행하였다.

3. 연구 결과

연구 대상자의 MEQ 점수 분포는 표 1. 에 제시되어 있다. 침대 센서 데이터의 코시노 분석을 통해 산출된 수면/각성 리듬의 위상과 MEQ 점수 간의 분포는 그림 2. 와 같다. 분석 결과, 두 변수 간에 통계적으로 유의미하고 높은 음의 상관관계(r=-0.70, p<0.001)가 확인되었다.

MEQ	Chronotype Classification	Male (n)	Female (n)	Total (n)
16-30	Definitely Evening	0	0	0
31-41	Moderately Evening	9	3	12
42-58	Neither	12	8	20
59-69	Moderately Morning	3	0	3
70-86	Definitely Morning	0	0	0

표 1. 대상자의 MEQ 분포

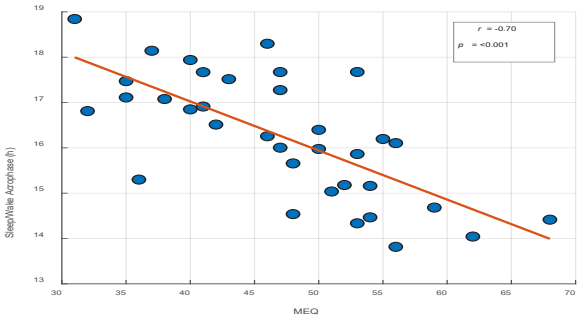


그림 2. MEQ 점수와 수면/각성 위상 간의 상관관

4. 토의

본 연구는 일주기 리듬 평가에서 사용되는 주관적 설문지인 MEQ와 객관적인 비-착용형 침대 센서 데이터 간의 관계를 코시노 분석을 통해 도출된 위상을 중심으로 검증하였다. 분석 결과, MEQ 점수와 침대 센서 기반의 위상 사이에 통계적으로 유의미하고 높은 음의 상관관계가 확인되었다. 이러한 결과는 MEQ 점수가 높은 아침형 일수록, 침대 센서 데이터의 위상 역시 이른 시간대에 위치하여, 객관적인 일주기 타이밍이 주관적 선호도를 잘 반영하고 있음을 보여준다. MEQ를 통해 개인이 스스로 인지하는 일주기 성향이 침대 센서로 포착한 실제 수면/각성 리듬 간의 높은 일치도를 바탕으로, 본 연구에서는, 무구속적인 침대 센서가 일주기 리듬의 핵심 지표인 위상을 객관적으로 측정하는 데 유효하다는 근거를 제시했다. 비-착용형 기기를 통해 취득한 데이터가 무구속적으로 개인의 일주기 성향을 반영하는 객관적 지표로 활용될 수 있음을 증명하며, 사용자의 주 활동 시간을 이용한 개인 맞춤형 헬스케어 시스템 등에 유용한 도구로 사용될 잠재력을 가진다.

향후 대상자의 MEQ 유형을 다양화하여 일주기 유형별 민감도를 검증하고, 수면/각성 데이터 외의 침대 센서 데이터를 활용하여 무구속 센서 기반 일주기 리듬 추정의 타당성를 다각도로 발전시키고자 한다.

5. Acknowledgements

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2025-24533026).

6. 참고 문헌

[1] Reid, Kathryn J. “Assessment of Circadian Rhythms.” Neurologic clinics vol. 37,3 (2019): 505-526. doi:10.1016/j.ncl.2019.05.001

[2] Martinez-Nicolas, Antonio et al. “Uncovering different masking factors on wrist skin temperature rhythm in free-living subjects.” PloS one vol. 8,4 (2013): e61142. doi:10.1371/journal.pone.0061142

[3] Horne, J A, and O Ostberg. “A self-assessment questionnaire to determine morningness-eveningness in human circadian rhythms.” International journal of chronobiology vol. 4,2 (1976): 97-110.

[4] Roveda, Eliana et al. “Predicting the actigraphy-based acrophase using the Morningness-Eveningness Questionnaire (MEQ) in college students of North Italy.” Chronobiology international vol. 34,5 (2017): 551-562. doi:10.1080/07420528.2016.1276928

[5] Wu, Fan et al. “Comparative Efficacy of Commercial Wearables for Circadian Rhythm Home Monitoring From Activity, Heart Rate, and Core Body Temperature.” IEEE journal of biomedical and health informatics vol. 29,2 (2025): 900-908. doi:10.1109/JBHI.2024.3471254

Poster-085

광열 효과를 이용한 비침습 혈류 측정 가능성 평가

조민성, 최우석, 김현주, 김한준

국립금오공과대학교 메디컬IT융합공학과

Evaluation of the feasibility of non-invasive blood flow measurement using the photothermal effect

Minseong Cho, Woo Seok Choi, Hyeonju Kim, and Han-Joon Kim

Kumoh National Institute of Technology, Department of Medical IT Convergence Engineering

ms0141@kumoh.ac.kr, cws98110@kumoh.ac.kr, hyeon356@kumoh.ac.kr, hanjoonk@kumoh.ac.kr

Abstract

This study presents a non-invasive wearable device for blood flow measurement based on the photothermal effect. The device employs a 520 nm light-emitting diode (LED) as both a light and heat source to deliver energy to subcutaneous blood vessels and detect temperature variations associated with changes in blood flow. Experiments conducted on the radial veins of healthy adult males compared normal blood flow with reduced flow induced by cuff compression, yielding average temperature changes of 0.333°C and 0.667°C, respectively. This sensitivity enables the detection of blood flow reductions of approximately 100 mL/min or greater, highlighting the high sensitivity and non-invasive advantages of the photothermal-based approach. The proposed technology holds promise for wearable healthcare systems, particularly for chronic disease management and real-time blood flow monitoring.

1. 연구 배경

혈류 측정은 건강 관리를 위한 핵심적인 지표로 사용되며, 심혈관 질환, 혈액 투석을 필요로 하는 말기 신부전 등 만성질환의 진단 및 관리를 위한 모니터링에 필수적이다[1]. 정확한 혈류 정보를 얻을 수 있는 방식 중 하나인 카테터 삽입 방식은 정확 정보를 제공하지만, 침습적인 방식으로 반복적인 모니터링에는 부적합하다[2]. 대표적인 비침습적인 도플러 기반의 초음파 측정 방법은 사용자의 숙련도, 측정 방법 등에 따라 결과가 달라지기 때문에 전문성이 요구된다[3]. 하지만, 만성질환의 경우 가정에서 지속적인 관리와 모니터링이 필요하기 때문에 쉽게 사용할 수 있는 웨어러블 기반의 혈류 측정 기술이 요구된다[4]. 혈류의 냉각효과로부터 혈류를 추정하는 열원 기반의 혈류 추정 방식은 비침습적이고 소형화에 유리하기 때문에 웨어러블 장비에 적합하다. 본 연구에서는 기존에 전도성 열원을 사용하는 방식과 달리 광열 기반의 열 전달을 통한 혈류 측정 방법을 소개한다. 본 연구팀에서는 전도성 열원을 광원으로 대체하는 경우에 혈류에 직접적인 열전달이 가능하여 더 민감하게 혈류를 감지할 수 있음을 시뮬레이션과 실험으로 검증하였다[5]. 본 논문에서는 그림 1(a) 와 같이 제작된 디바이스를 사용하여 혈류량 변화를 감지할 수 있음을 보였다.

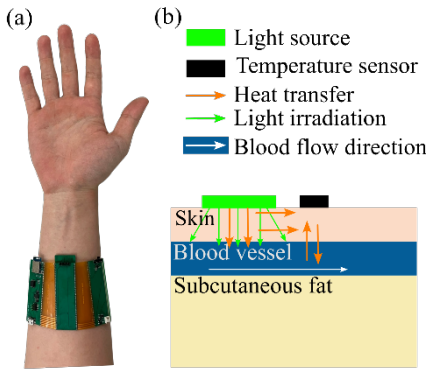


그림 1 (a) 제작된 광열 기반 혈류 모니터링 디바이스, (b) 광열 기반 열전달 시스템 구조

2. 연구 방법

본 연구에서는 Light-emitting diode (LED) 광원을 조사하여 피부와 혈류에 직접적으로 빛과 열을 전달한다(그림 1(b)). 본 연구에서 사용한 520 nm 광원은 피부보다 혈류에서 흡수가 잘 되기 때문에 피부에서 전도로 인한 열 전달만 존재하는 열원보다 혈류로 인한 온도 변화가 피부 표면에서 더 효과적으로 드러나게 된다. 열교환을 효과적으로 하기 위해서 열원은 혈관 위에 길게 배치하였다.

장비의 성능 검증은 건장한 20대 남성을 대상으로 그림 2(a)와 그림 2(b)의 요골정맥(Cephalic Vein)에서의 정상 혈류와 커프로 상완을 압박했을 때의 저혈류 상태를 개발 장비와 상용 장비로 측정하여 비교하는 것으로 진행하였다(그림 2(c)). 비교를 위한 혈류 정보를 얻기 위하여 사용한 장비는 Omegawave 사의 레이저 도플러 기반의 혈류량계 OMEGAFLO-Lab 2ch로 현재 유량을 실시간으로 확인할 수 있다. 상용 장비로 혈류를 측정한 결과, 그림 3(a)와 같이 정상상태에서의 평균 유량은 171.47 mL/min, 커프 압박으로 인한 저혈류 상태에서 평균 유량은 53.06 mL/min로 정상 상태의 혈류량과 압박으로 인한 저혈류 상태를 확인할 수 있었다. 개발 장비는 요골정맥 위치에 부착되었고, 2분간 녹색광을 조사했을 때 최고 온도 변화량을 3회 측정하고 평균값을 얻었다. 그림 3(b)의 그래프와 같이 두 조건에 대하여 정상 혈류에서 최대 온도

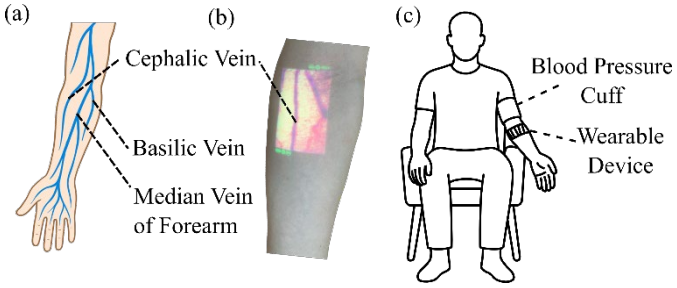


그림 2 (a) 팔의 주요 혈관 그림, (b) 디바이스 부착 위치 확인을 위한 레이저 스펙클 장비 사용 사진, (c) 실험 방법의 일러스트

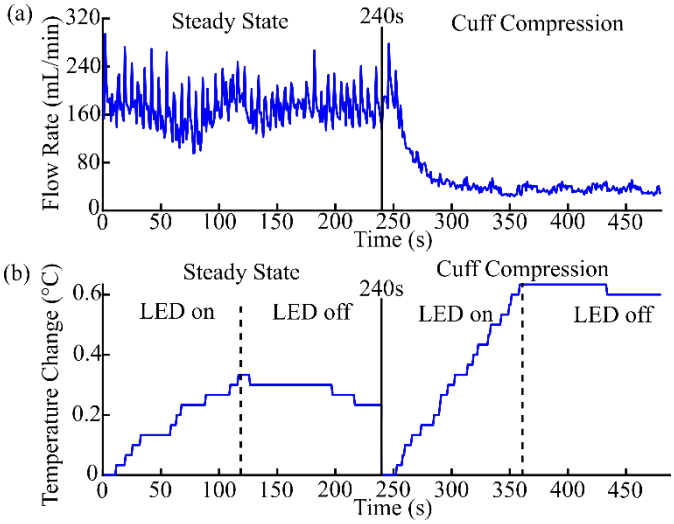


그림 3 (a) 정상 상태와 커프로 인한 저혈류 상태에서 혈류량계 결과, (b) 광열 기반 혈류 모니터링 장비를 이용한 측정 결과

변화량은 약 0.333℃, 저혈류에서 최대 온도 변화량은 약 0.667℃로 보다 높게 관찰되는 결과를 보였다. 피부에 밀착되는 열원의 경우 큰 커프 압박으로 인한 저혈류 상태와 정상 상태의 유량 차이에도 불구하고 온도변화가 적어 확인할 수 없지만, 광원을 사용하는 경우에 이러한 결과는 100 mL/min 이상의 혈류량 감소에 대하여 약 0.3℃ 이상의 온도 변화를 확인할 수 있었다.

3. 연구 결과

본 연구에서는 광열효과 기반의 혈류 측정 기술을 적용한 웨어러블 장비를 개발하고 성능 검증을 위하여 혈류 변화 측정을 수행하였다. 제안한 혈류 측정 장비는 피부 아래 혈관까지 직접 에너지를 전달할 수 있고, 혈류량 변화를 온도변화를 통해 효과적으로 검출할 수 있었다. 본 기술은 비침습적인 방법으로 혈류의 이상이나 감소 상태를 평가하는데 유용하게 적용될 수 있으며, 향후 장기적인 자가 건강관리, 만성질환 모니터링, 실시간 혈류 감지 등 다양한 분야에서의 응용 가능성이 존재한다. 하지만, 정확한 혈류량 추정을 위해서는 피부층의 두께, 혈관의 위치 및 형태, 모세혈관의 존재 등 다양한 요인을 고려한 개인별 맞춤 캘리브레이션과 정확한 센서 부착 위치의 선정 등을 위한 전략을 고민할 필요가 있다.

4. Acknowledgements

이 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단(RS-2023-00214390, RS-2024-00415347)의 지원을 받아 수행하였음.

5.참고 문헌

[1] H. S. Kim, B. -N. Yoo, E. W. Lee, “Evaluation of the national chronic diseases management policy: performance and future directions,” Public Health Aff., vol. 2, no. 1, pp. 105-120, Dec. 2018.

[2] S. Stephan, et al., "Catheter-based arterial input function determination for myocardial perfusion measurements," Zeitschrift für Medizinische Physik, vol. 31, no. 1, pp. 65 – 72, Feb. 2021.

[3] F. Wang, et al. "Flexible Doppler ultrasound device for the monitoring of blood flow velocity." Sci. Adv., vol. 7, no. 44, p. eabi9283, Oct. 2021.

[4] Y. Deng, et al. “A soft thermal sensor for the continuous assessment of flow in vascular access,” Nat. Commun., vol. 16, no. 38, Jan. 2025.

[5] 조민성, "광열효과 기반 고감도 혈류 센서를 활용한 무선 웨어러블 모니터링 장치 개발," 석사학위논문, 국립금오공과대학교, 메디컬IT융합공학과, Jun. 2025.

Poster-086

수면 단계 전이: 노화 및 OSA로 인한 자율신경계 기능 저하의 탐지 지표

신채윤[1*], 최성택[2*], 최영석[2], 이종실[1], 이제연[1, 3], 김인영[1, 3†]

한양대학교 생체의공학과[1], 한양대학교 융합전자공학과[2], 한양대학교 의과대학 의공학교실[3]

Sleep Stage Transitions as a Sensitive Window for Detecting Age- and OSA-Related Autonomic Impairment: Analysis of Heart Rate Variability

Chaeyoon Shin[1*], Seongtaek Choi [2*], Youngseok Choi[2], Jongshill Lee[1], Jeyeon Lee[1,3], Inyoung Kim[1,3†]

[1] Department of Biomedical Engineering, Hanyang University, Korea

[2] Department of Electronic Engineering, Hanyang University, Korea

[3] Department of Biomedical Engineering, College of Medicine, Hanyang University, Korea

*iykim@hanyang.ac.kr

Abstract

Heart rate variability (HRV) serves as a sensitive indicator of autonomic nervous system (ANS) function during sleep. This study investigated age-related alterations in ANS regulation across sleep stages and their transitions using electrocardiographic (ECG) signals from polysomnography (PSG) in healthy individuals and patients with obstructive sleep apnea (OSA). HRV analysis revealed progressive age-dependent impairments in autonomic modulation, which were more pronounced during transitions between sleep stages than within stable stages. Furthermore, OSA patients exhibited markedly greater autonomic deterioration during these transition periods compared to healthy controls, underscoring the pathological relevance of sleep-stage dynamics. These findings elucidate how aging and disease states interact to disrupt autonomic control during sleep, highlighting the pivotal role of sleep-stage transitions in maintaining cardiovascular homeostasis.

1. 연구 배경

심박변이도(HRV)는 연속된 두 심장 박동 사이의 시간 간격의 변화를 의미한다. 이는 자율신경계의 활동을 반영하며, 교감신경과 부교감신경의 상호작용을 통해 신체의 항상성 유지와 다양한 생리적 기능 조절에 핵심적인 역할을 한다[1].

수면 연구는 일반적으로 PSG를 기반으로 수면 단계를 분석하여 수행된다. 수면 단계의 분류는 미국수면의학회(American Academy of Sleep Medicine, AASM)에서 제시한 가이드라인에 따라 표준화된 절차로 이루어지며, 주로 뇌파(Electroencephalogram, EEG) 신호를 중심으로 구분된다[2]. 자율신경계(ANS)는 수면 단계의 변동에 따라 활성 수준이 달라지며, 이러한 생리적 변화는 HRV를 통해 정량적으로 평가할 수 있다. 여러 선행연구에 따르면, 각 수면 단계의 특이적인 HRV 양상은 교감 및 부교감 신경의 활성 균형 변화를 반영하는 것으로 보고되었다. 따라서 HRV는 수면 중 자율신경계 조절 기능을 이해하기 위한 중요한 생리학적 지표로서, 수면 단계별 생리적 특성과 병태생리적 변화를 규명하는 데 유용하게 활용되고 있다.

그러나 기존 연구들은 수면 단계 간 자율신경계 변화를 주로 각 단계 내의 평균적 특성에 국한하여 분석하였으며, 수면 단계 전이(transition) 구간에 대한 체계적인 검토가 부족하다는 한계가 있다[3]. 또한 대부분의 연구가 수면 단계를 단순한 범주적 구분으로 처리함으로써, 실제 생리적 변화를 충분히 세분화하지 못하였다.

최근 보고에 따르면, 수면 단계 전이 시점의 HRV는 전이의 유형(type)과 방향(direction)에 따라 상이한 양상을 보이며, 이는 자율신경계의 역동적 조절 과정과 밀접하게 관련되어 있음을 시사한다[4]. 이러한 점에서, 수면 단계 전이 구간은 단순한 과도기적 상태가 아닌, 자율신경계 기능 평가의 핵심 구간으로 주목받고 있다.

노화는 생리적 기능 전반의 저하와 함께 수면 구조의 민감한 변화를 유발하는 주요 요인으로 알려져 있다. 노화가 진행됨에 따라 수면의 연속성은 저하되고, 깊은 수면의 비율이 감소한다. 이러한 변화는 자율신경계의 불균형과 밀접하게 연관되어 HRV를 통해 정량적으로 관찰 가능하다.

이에 본 연구는 수면 단계를 세분화하여 각 단계 및 전이 구간에서의 HRV 특성을 정량적으로 규명하고, 연령 및 질환 여부(폐쇄성 수면무호흡, OSA)에 따른 자율신경계 조절 변화를 비교, 분석하고자 하였다. 이를 위해 선형회귀분석(linear regression)과 선형혼합모형(linear mixed-effects model)을 활용하여 수면 단계 내 평균에 의존한 기존 연구 한계를 보완하고 수면 단계 전이에 따른 자율신경계 변화를 보다 정밀하게 해석하고자 하였다.

2.연구 방법

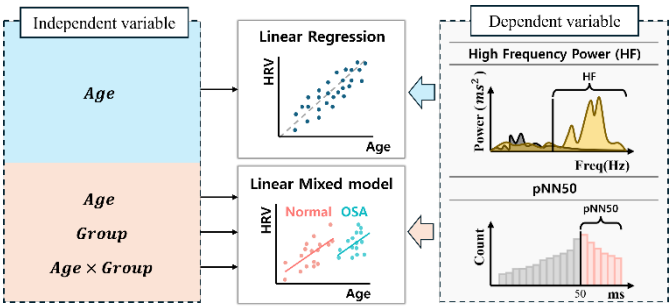


그림 1. 통계 분석 방법론 개요

본 연구에서는 public database인 Cleveland Family Study (CFS)를 활용하였다. CFS는 폐쇄성 수면무호흡증(OSA)의 가족력 및 유전적 요인을 규명하기 위해 설계된 대규모 역학 연구로, PSG를 통해 취득된 뇌파(EEG), 심전도(ECG) 등의 생체신호와 함께, 전문가가 판정한 수면 단계 정보 그리고 임상, 생활습관 지표를 체계적으로 포함한다. 전체 730명의 데이터 중, 정상 수면군(healthy sleeper, HS)

289명과 OSA 환자군 181명을 분석에 포함하였다. 심혈관 질환, 불면증, 제2형 당뇨병, 하지불안증후군 등 다른 주요 질환을 보유한 대상자는 분석에서 제외하였다.

HRV의 수면 단계 전이 구간은 전이 시점 이전 5분 구간으로 정의하였다. Time domain 지표로는 percentage of differences between adjacent normal RR intervals greater than 50ms(pNN50)을 산출하였으며, frequency domain 지표로는 high-frequency power(HF) 성분을 추출하였다[5].

수면 단계 및 전이 구간에서의 자율신경계 조절 변화를 정량적으로 비교하기 위하여 선형 회귀 기반 통계 분석을 수행하였다. 그림 1은 통계 분석의 전체 과정을 요약한다. 첫째, 연령 증가에 따라 수면의 질이 저하되는 생리적 특성을 반영하여, 연령을 독립변수로 설정하고 HRV 지표를 종속변수로 한 선형회귀분석(linear regression analysis)을 수행하였다. HRV 지표는 단일 수면 단계와 수면 전이 구간으로 구분하여 분석하였으며, 이를 통해 연령 증가에 따른 수면 자율신경계 조절 기능 저하가 두 구간에서 어떻게 상이하게 나타나는지를 비교하였다. 이러한 접근은 노화로 인한 수면의 민감한 악화가 안정된 수면 상태와 전이적 생리 상태에서 서로 다른 양상으로 반영되는지를 평가하기 위함이다. 둘째, 노화에 따른 변화뿐만 아니라 OSA의 유무가 자율신경계 기능에 미치는 영향을 검증하기 위하여 선형혼합모델(linear mixed-effects model, LMM)을 적용하였다. 이때 독립변수로는 연령, OSA 유무, 그리고 연령×OSA 상호작용항(interaction term)을 포함하였고, 종속변수로는 단일 수면 단계 및 수면 전이 구간에서 산출된 HRV 지표를 각각 사용하였다. 이를 통해 노화와 OSA의 독립적 및 상호적 효과가 수면 중 자율신경계 조절에 미치는 상대적 기여도를 평가하였다. 식 (1)은 선형혼합모델의 구성을 나타낸다.

$$HRV\ Feature = B_1 \times age + B_2 \times group + B_3 \times (age \times group) \quad (1)$$

3. 연구 결과

그림 2은 단일 수면 단계와 수면 단계 전이 구간에 대한 연령에 따른 HF와 pNN50의 변화에 대한 선형회귀분석 결과를 나타낸다. 선형회귀분석에서 연령이 증가함에 따라 HF와 pNN50 모두 유의하게 감소하였으며, 이는 healthy sleeper와 OSA 환자군 모두에서 일관되게 나타났다. 특히, N2에서 N3로의 수면 단계 전이 구간에서 HF 감소폭은 N3 단일 수면 단계에 비해서 현저히 컸다(HF of healthy sleeper in N3; $coef. = 55.26, p < 0.01$, HF of healthy sleeper during transition from N2 to N3; $coef. = -102.71, p < 0.01$). 이러한 양상은 모든 종류의 수면 단계 전이 구간에서 OSA 유무, HRV 지표에 상관없이 모두 일관되게 나타났다.(그림 3).

한편, 단일 회귀분석 결과를 통합적으로 해석하고, 연령과 OSA의 상호작용 효과를 검증하기 위하여 LMM을 추가로 적용하였다. 표 1은 LMM을 적용하여 연령, OSA 유무, 그리고 연령 × OSA 상호작용항(interaction term)이 HRV 지표에 미치는 상대적 기여도를 단일 수면 단계와 수면 전이 구간에서 각각 분석한 결과를 제시한다. OSA의 유무의 주효과(main effect)와 상호작용 효과는 단일 수면 단계에서 통계적으로 유의하지 않았으나, 전이 구간의 HF, RMSSD, pNN50에서 유의한 효과가 관찰되었다. 이러한 결과는 수면 단계 전이 구간이 단일 수면 단계보다 자율신경계 기능 저하에 더 민감하게 반응하는 생리적 구간임을 시사하며, 특히 OSA 환자군에서 그 영향이 더욱 두드러짐을 보여준다.

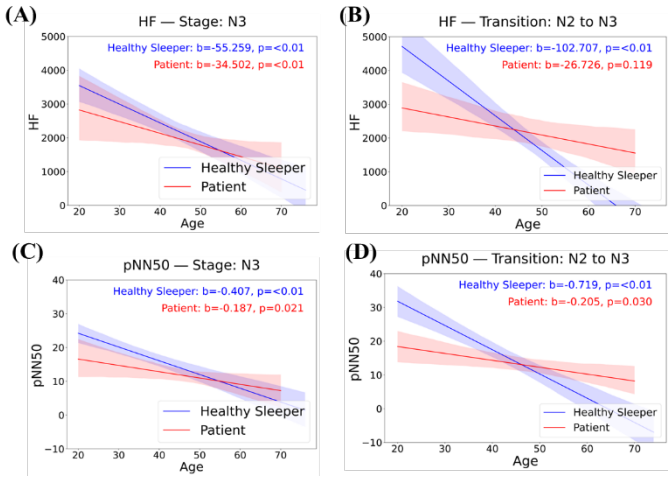


그림 2. 선형회귀분석 결과(연령에 따른 HRV 지표 변화).

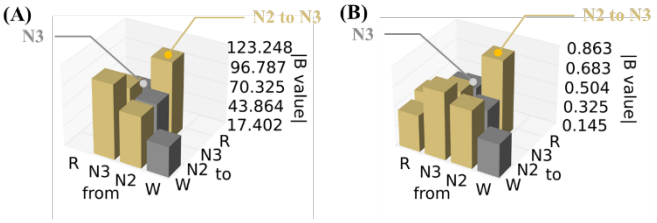


그림 3. 선형회귀분석 결과 3차원 시각화. 3D 공간에서 각 막대 그래프의 높이는 선형회귀분석 결과 도출된 coefficient의 절대값을 나타냄. (A) HF. (B) pNN50.

표 1. 단일 수면 단계 및 수면 단계 전이 구간에서의 HRV 지표에 대한 선형혼합모델 분석 결과.(*p<0.05;**, p<0.01;***, p<0.001)

	HRV Feature	Coef. Age	Coef. Group	Coef. Age × Group
N3	HF	**-65.784****	-306.085	4.348
	RMSSD	**-0.505*****	-6.637	0.104
	pNN50	**-0.434*****	-8.523	0.122
	SDNN	**-0.479*****	-9.656	0.245
N2 to N3	HF	**-104.979*****	**-3549.850***	**76.914***
	RMSSD	**-0.757*****	**-23.294****	**0.507****
	pNN50	**-0.732*****	**-24.870****	**0.522***
	SDNN	**-0.614*****	-10.465	0.332

4. Acknowledgements

5.참고 문헌

[1] Tiwari, Reena, et al. “Analysis of Heart Rate Variability and Implication of Different Factors on Heart Rate Variability.” Current Cardiology Reviews, vol. 17, no. 5, 22 Oct. 2021

[2] Herzig, David, et al. “Reproducibility of Heart Rate Variability Is Parameter and Sleep Stage Dependent.” Frontiers in Physiology, vol. 8, 10 Jan. 2018

[3] Radha, Mustafa, et al. “Sleep Stage Classification from Heart-Rate Variability Using Long Short-Term Memory Neural Networks.” Scientific Reports, vol. 9, no. 1, 2 Oct. 2019

[4] Fernandez Guerrero, Antonio, and Peter Achermann. “Brain Dynamics during the Sleep Onset Transition: An EEG Source Localization Study.” Neurobiology of Sleep and Circadian Rhythms, vol. 6, Jan. 2019

Poster-087

운동 부하 조건에서 PPG-노치 파형의 기하학적 지표를 이용한 연령별 혈관 반응 분석

김민성[1,3*], 김광용[1], 육순현[2], 황재윤[3*]

한국전자통신연구원[1], University of Southern California[2], 대구경북과학기술원[3]

Correlation Analysis between a Geometric PPG-Notch Feature and Chronological Age during Physical Exercise

Minseong Kim[1,3*] Kwang Yong Kim[1], Soonhyun Yook[2], Jae Youn Hwang[3*]

Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI)[1], University of Southern California[2],

Daegu Gyeongbuk Institute of Science and Technology (DGIST)[3]

*kms5905@etri.re.kr, *jyhwang@dgist.ac.kr

Abstract

This study proposes a novel method to assess dynamic vascular characteristics during exercise using PPG, which are often missed in resting-state analyses. From 19 healthy subjects during rest (sit) and exercise (run), we extracted a novel geometric feature, the Shortest Perpendicular Distance (SPD), from each pulse wave. Analysis against chronological age revealed that while the mean SPD during exercise correlated significantly with age (Spearman's $\rho = 0.67$, $p < 0.01$), its variability (standard deviation) showed a much stronger positive linear correlation (Pearson's $r = 0.76$, $p < 0.001$). This suggests that cardiovascular response instability during exercise increases with age, reflecting declining vascular compliance. The proposed SPD variability index is thus a promising biomarker for wearable health monitoring.

1. 연구 배경

심혈관 질환은 전 세계적으로 주요 사망 원인 중 하나이며, 이를 예방하기 위하여 조기에 혈관 건강을 평가하는 것이 매우 중요하다. 혈관나이는 혈관의 생물학적 노화 정도를 나타내는 지표로, 동맥 경직도(Arterial Stiffness)와 밀접한 관련이 있다.

광용적맥파(Photoplethysmography, PPG)는 손끝이나 손목 등에서 비침습적으로 맥파를 측정할 수 있어 웨어러블 기기에 널리 활용되고 있으며, 이를 통해 혈관 나이를 추정하려는 연구가 활발히 진행되고 있다[1]. 임상적 표준 장비를 이용해 혈관 나이를 직접 측정하는 것이 이상적이지만, 대규모 데이터 수집이나 일상적 모니터링에는 현실적인 제약이 따른다. 따라서 최근의 많은 선행 연구들은 건강한 인구 집단에서 혈관의 생물학적 노화가 실제 연령과 높은 상관관계를 갖는다는 사실에 기반하여, 연대기적 나이(Choronological Age)를 혈관 나이의 강력한 대리 지표로 활용하고 있다[2].

본 연구에서는 이러한 접근법을 채택하여, 운동 부하가 혈관에 가하는 스트레스가 연대기적 나이에 따른 혈관의 기계적 특성 차이를 더 명확하게 보여줄 것이라는 가설을 세웠으며, 이를 검증하기 위하여 안정상태와 운동 상태에서 PPG 파형의 새로운 기하학적 지표를 추출하고, 연령과 어떤 상관관계를 갖는지 분석하고자 하였다.

2. 연구 방법

본 연구에서는 PhysioNet에서 제공하는 공개 데이터셋인 Pulse Transit Time PPG Dataset을 사용하였다[3,4]. 데이터 정제 과정을 거쳐 건강한 성인 19명을 대상으로 안정(Sit), 운동(Run) 상태에서 측정된 데이터를 활용하였으며, Proximal 위치의 Infrared 채널 PPG신호를 사용하였다. PPG 신호는 밴드패스 필터링 등의 전처리 과정을 통하여 기저선 변동 및 고주파 노이즈를 제거하였고 각 심박에서 Peak, Foot(Valley), Dicrotic Notch를 검출하였다.

본 연구에서는 그림 1과 같이, PPG 파형의 Peak(A)와 Foot(B)을 잇는 직선과 노치(N) 지점 사이의 최단 수선 거리(Shortest Perpendicular Distance, SPD)를 새로운 기하학적 특징으로 정의하여 추출하였다.

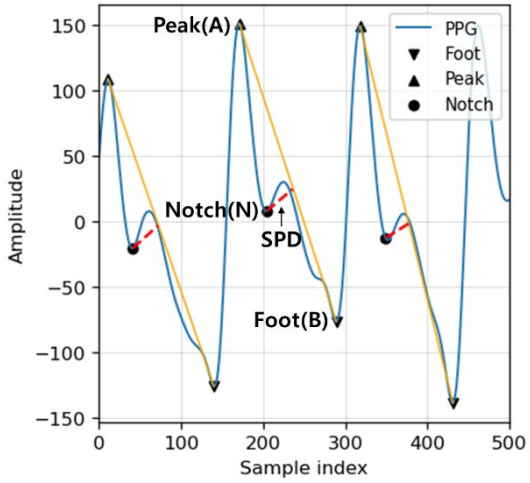


그림 1. 최단 수선 거리(SPD) 특징 추출 방법

PPG의 생리학적 기전에 따라 PPG는 심실수축에 의하여 발생한 직접파(Direct wave)와 확장된 혈관의 탄성에 의하여 발생한 반사파(Reflected wave)로 구성된다. 심실 수축에 따른 혈액량의 최대 값은 Peak 특징점으로 나타나며, 심장의 한 주기가 끝났을 때의 기저값은 Foot 특징점으로 나타난다. Dicrotic Notch는 혈관 탄성도와 직접적인 영향이 있는 형태학적 특징점으로서, Peak, Foot과 Notch의 정보를 함께 사용하여 추출된 SPD는 한 심박 주기 동안 혈관의 탄성 변화와 관련된 정보를 담고 있다. 특히 운동으로 인한 심박수 증가는 맥파전달속도(Pulse Wave Velocity, PWV)를 증가시켜 일시적으로 혈관 강직도를 높이는 것으로 알려져 있다[4]. 따라서 운동 부하 시 SPD 값의 변화를 관찰하는 것은 혈관의 동적 반응성을 평가하는 데 유용할 수 있다.

본 연구에서는 각 피험자의 안정, 운동 상태에서 추출된 SPD들의 평균값을 해당 상태의 대표값으로 사용하였으며

SPD와 피험자의 연령 간의 상관관계를 분석하기 위하여, 스피어만 순위 상관 분석을 수행하였다. 통계적 유의수준은 $p<0.05$로 설정하였다.

3. 연구 결과

그림 2는 동일 피험자의 안정(Sit) 상태와 운동(Run) 상태의 PPG 파형을 각각 비트 단위로 정규화하여 중첩한 결과이다. 안정 상태에 비해 운동 상태에서 반사파의 진폭이 낮아지며 파형의 형태가 변하는 것을 시각적으로 확인할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 형태학적 변화를 정량화하기 위해 SPD 지표를 분석하였다.

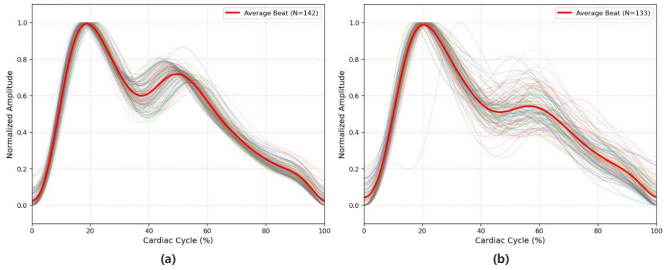


그림 2. 안정(a) 및 운동(b) 상태의 PPG 파형 중첩 비교

SPD의 크기와 변동성이 운동 부하시 연령과 유의미한 상관관계를 갖는 것을 확인하였다. 그림 3(a)에 나타난 바와 같이 운동 시 SPD의 평균 값은 연령과 강한 단조 증가 관계를 보였다. 또한, 그림 3(b)에 나타난 바와 같이 SPD의 표준편차 값은 연령과 강한 양의 선형 상관관계를 보였으며, 이는 Pearson 상관 분석에서 가장 뚜렷하게 나타났다 (Pearson's r = 0.76, p <0.001). 이는 연령이 증가할수록 운동 중 매 심박마다 SPD 값이 더 불규칙해지고 불안정해지는 경향이 있음을 의미한다.

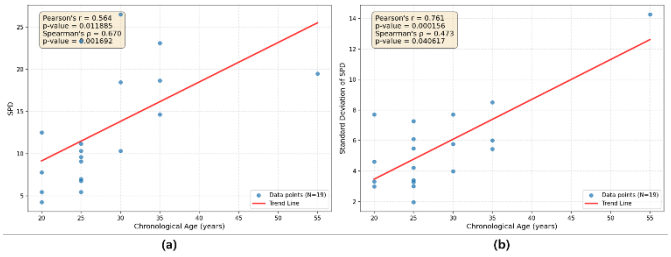


그림 3. 운동 상태에서 연령과 SPD의 평균(a), SPD의 변동성(b)의 상관관계

표 1은 안정 및 운동 상태의 각 지표와 연령 간의 상관관계를 종합적으로 나타낸다. 운동 상태의 지표들이 안정 상태에 비하여 높은 상관성을 나타냄을 확인할 수 있다.

표 1. 상관관계 분석 결과

-	Feature	Pearson's		Spearman's	
		r	p-value	ρ	p-value
Run	Mean of SPD	0.564	0.012*	**0.670**	**0.0017****
	Standard Deviation of SPD	**0.761**	**0.00016*****	0.473	0.041*
Sit	Mean of SPD	0.134	0.586	0.286	0.235
	Standard Deviation of SPD	0.351	0.141	0.477	0.039*

* p < 0.05, ** p < 0.01, *** p < 0.001

4. 결론

본 연구는 운동 부하 시 PPG 파형의 기하학적 특징이 연령과 관련된 혈관의 동적 반응성을 평가하는 데 유용할 수 있음을 보인다. 안정 상태에서는 뚜렷한 관계가 나타나지 않았던 SPD의 평균값이 운동상태에서 유의미한 상관관계를 보인 것은, 운동으로 인해 심박출량이 증가하고 혈압이 상승하는 상황에서 고연령층의 혈관이 젊은 층에 비해 경직되어 탄성 반응이 감소하기 때문으로 사료된다. 이는 심박수 증가가 혈관의 순응도(compliance)를 감소시키고 강직도를 높인다는 기존 연구들과 일치하는 맥락이다[5,6]. 즉, SPD 값의 증가는 혈관이 혈류량 변화에 유연하게 대처하지 못하는 정도를 반영하는 간접 지표일 수 있다. 더욱 주목할만한 점은 운동 상태에서의 SPD의 표준편차가 연령과 강한 선형 상관관계를 보였다는 점이다. 이는 물리적 스트레스 상황에서 고연령층의 심혈관계가 매 심박마다 일관된 반응을 유지하는 능력이 저하됨을 시사하며, SPD 값의 변동성 증가는 이러한 혈관 반응의 동적 불안정성을 반영하는 지표로 해석할 수 있다.

본 연구에서는 Pearson과 Spearman 상관 분석을 모두 사용하여, 각 지표와 연령 간의 관계가 선형적(Linear)인지 혹은 단조적(Monotonic)인지를 함께 평가하였다. 그 결과, 운동시 SPD 값은 강한 단조 관계를 보였으며, SPD의 변동성은 뚜렷한 선형 관계를 보였다. 이는 노화가 혈관반응에 미치는 영향이 다각적임을 시사한다.

본 연구는 19명의 소규모 피험자를 대상으로 한 파일럿 연구라는 한계가 있다. 하지만 안정 상태에서는 포착하기 어려운 혈관의 동적 특성을 운동 부하를 통해 비침습적으로 평가할 수 있는 새로운 가능성을 제시했다는 점에서 의의가 있다. 향후 더 많은 피험자를 대상으로 제안된 지표의 유효성을 검증하고, 성별이나 체질량(Body Mass Index, BMI) 등 다른 임상 변수들을 고려한 추가 연구로 확장할 예정이다.

5. Acknowledgements

본 연구 논문은 한국전자통신연구원 연구운영지원사업의 일환으로 수행되었음. [25ZD1140, 대경권 지역산업 기반 ICT 융합 기술 고도화 지원(의료)]

6. 참고 문헌

[1] Charlton, Peter H., et al. "Assessing hemodynamics from the photoplethysmogram to gain insights into vascular age: a review from VascAgeNet." *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology* 322.4 (2022): H493-H522.

[2] Aging Biomarker Consortium, et al. "A framework of biomarkers for vascular aging: a consensus statement by the Aging Biomarker Consortium." *Life Medicine* 2.4 (2023): lnad033.

[3] Goldberger, Ary L., et al. "PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: components of a new research resource for complex physiologic signals." *circulation* 101.23 (2000): e215-e220.

[4] Mehrgardt, Philip, et al. "Pulse transit time ppg dataset." *PhysioNet* 10 (2022): e215-e220.

[5] Cunha, Roberto Sa, et al. "Association between high heart rate and high arterial rigidity in normotensive and hypertensive subjects." *Journal of hypertension* 15.12 (1997): 1423-1430.

[6] Thorin, Eric, and Nathalie Thorin-Trescases. "Vascular endothelial ageing, heartbeat after heartbeat." *Cardiovascular research* 84.1 (2009): 24-32.

Poster-088

척수 손상 모델의 통증 검출을 위한 척수 신경 신호 기반 디지털 바이오마커

이성재[1,†], 박의호[2,†], 옥호광[3], 김준선[3,*], 박성민[1,*]

포항공과대학교 의과학전공[1]

고려대학교 의과대학[2]

고려대학교 보건과학대학[3]

Spinal Cord Neural Signals as Digital Biomarkers for Chronic Pain Detection in Contusive Spinal Cord Injury of Rats

Seongjae Lee[1,†], Eui Ho Park[2,†], Hogwang Ok[3], Junesun Kim[3,*], Sung-Min Park[1,*]

[1] Major in Medical Science and Engineering, POSTECH, Korea

[2] Department of Physiology, College of Medicine and Neuroscience Research Institute, Korea University, Korea

[3] College of Health Science, Graduate School, Korea University, Korea

[*]Corresponding author: junokim@korea.ac.kr, sungminpark@postech.ac.kr

[†]These authors contributed equally to this work.

Abstract

Traumatic spinal cord injury (SCI) disrupts neuronal homeostasis, leading to chronic pain and spasticity that severely compromises patient quality of life. While neuromodulation has emerged as a therapeutic approach, the mechanism underlying spinal neuronal hyperexcitability remains poorly understood, limiting spinal cord-based closed-loop systems. This study aimed to characterize spinal cord neural signals as digital biomarkers for chronic pain states, examining both evoked and spontaneous pain-related neuronal signals in SCI rat models. Adult male Sprague-Dawley rats underwent T11 spinal segment using Infinite Horizons (IH) impactor (150 kdyne). Motor function was assessed using the Basso, Beattie, and Bresnahan (BBB) locomotor scale and combined behavioral score (CBS). Spasticity was evaluated with Modified Ashworth Score (MAS), and mechanical sensitivity was measured via paw withdrawal threshold (PWT) testing. At 28 days post-SCI, after behavioral validation of chronic pain, we recorded spinal neural activity from L4–L6 using 16-channel probes in three groups: Normal (n = 5), Sham (n = 5), and SCI (n = 5). Evoked activity was recorded during mechanical hind-paw stimulation (0.4–300 g, 10 steps) using von Frey filaments, and spontaneous neural activity was continuously recorded. Neural data were processed with spike sorting algorithms and analyzed for multi-unit activity patterns. SCI rats showed significantly enhanced responses to ≥15 g vs. Normal and ≥26 g vs. Sham rats (group × stimulus interaction, $p < 0.05$). Hypersensitivity-validated datasets were used to train a deep learning model that accurately classified stimulation levels. Additionally, spontaneous activity was segmented into 6-second chunks, enabling a classifier that distinguished chronic pain rats with > 95% accuracy. These findings support spinal neural signals as reliable digital biomarkers for evoked hypersensitivity and spontaneous pain. Our work demonstrates that spinal cord-centered measurements provide a foundation for closed-loop neuromodulation systems, advancing adaptive pain management strategies.

1. Introduction

Chronic pain is a major global health issue affecting millions of people and is associated with significant socioeconomic burden [1]. Current clinical assessments rely on subjective tools such as the Visual Analog Scale (VAS) and Numerical Rating Scale (NRS) [2,3]. While widely used, these tools lack objectivity, are prone to misinterpretation, and limit the development of data-driven closed-loop therapeutic systems [4].

Previous biomarker research has largely focused on the central nervous system, particularly the brain, using neuroimaging techniques such as EEG, ECoG, and fMRI [5,6]. These approaches have revealed neural correlates of pain, yet brain activity related to pain is often difficult to distinguish from other sensory or emotional processes [7]. Moreover, neuroimaging techniques are limited by either low resolution in non-invasive approaches or invasiveness and risk in direct approaches.

The spinal dorsal horn is the first relay of nociceptive input before higher-order cognitive modulation [9]. Therefore, it provides a more direct view of pain processing and represents a promising target for identifying objective electrophysiological biomarkers. This study aimed to investigate whether spinal cord neural signals can serve as digital biomarkers for chronic pain, using both conventional neural analyses and deep learning methods. We hypothesized that spinal activity in SCI rats would exhibit altered receptive field properties, hypersensitivity to stimulation, and identifiable spontaneous patterns that can be classified with high accuracy using machine learning

approaches.

2. Methods

Animals and Model

Adult male Sprague–Dawley rats (n = 15, 280–330 g) were used. SCI was induced at the T11 level using the Infinite Horizons impactor (150 kdyne). Sham and Normal rats served as controls. All procedures were approved by the IACUC of POSTECH (Approval No. POSTECH-2025-0009).

Behavioral Assays

Motor impairment was evaluated using the BBB locomotor scale and Combined Behavioral Score (CBS). Mechanical sensitivity was tested with paw withdrawal threshold (PWT) using von Frey filaments, cold sensitivity with acetone application, and spasticity with the Modified Ashworth Score (MAS). Tests confirmed the presence of chronic pain phenotypes in SCI rats at 28 days post-injury.

Electrophysiology

Rats were anesthetized with urethane (1.2 g/kg, i.p.) and spinal segments L4–L6 were exposed by laminectomy. A 16-channel probe (NeuroNexus) was inserted into the dorsal horn to record LFPs and MUA. Evoked responses were recorded during hind-paw stimulation (von Frey filaments, 0.4–300 g, 10 graded steps, 6 s stimulation, 90 s rest). Spontaneous activity was recorded during inter-stimulus intervals for 10 min. Signals were digitized at 24 kHz with TDT hardware

Data Analysis

Conventional analysis included spike sorting (Klusta, Phy), firing rate (FR), inter-spike intervals (ISI), and LFP spectral power (δ–γ bands). Statistical tests included ANOVA and Kruskal–Wallis. For deep learning, signals were downsampled to 200 Hz, segmented into 6 s windows, and preprocessed with notch filtering and baseline correction. CNN and CNN–LSTM architectures were trained using leave-one-subject-out cross-validation. Model evaluation used accuracy, precision, recall, and AUC.

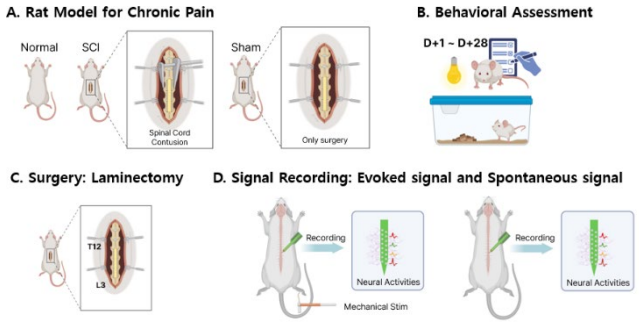


Figure 1: Spinal cord signal recordings

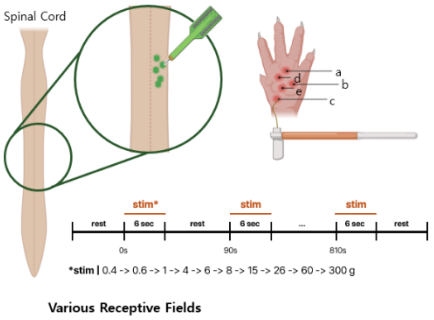


Figure 2: The experiment protocol

3. Results

Conventional Neural Analysis

Multi-channel recordings revealed 4–5 receptive fields in the dorsal horn corresponding to plantar stimulation. SCI rats exhibited broader receptive fields and heightened responsiveness, consistent with central sensitization. Spike sorting demonstrated increased firing rates beginning at 4 g of stimulation in SCI rats, while Sham and Normal groups required ≥21 g for comparable responses. Saturation effects were observed at higher forces (>60 g). LFP analyses showed increased β and γ band power in SCI rats during stimulation, supporting allodynia-related hypersensitivity.

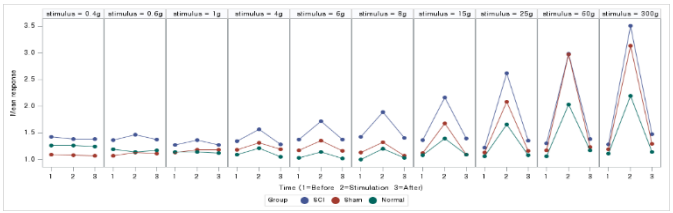


Figure 3: Firing rate analysis before and after the stimulation

Deep Learning Classification

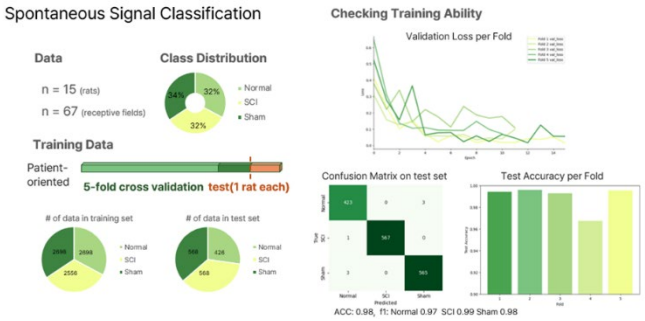


Figure 4: CNN-based chronic pain model classification DL model.

4. Acknowledgements

This research was supported by the Pioneer Research Center Program through the National Research Foundation of Korea funded by the Ministry of Science, ICT & Future Planning (2022M3C1A3081294). This research was supported by the MSIT(Ministry of Science and ICT), Korea, under the ICAN(ICT Challenge and Advanced Network of HRD) support program(IITP-2025-RS-2024-00437359) supervised by the IITP(Institute for Information & Communications Technology Planning & Evaluation)

5.참고 문헌

[1] S. E. Mills, K. P. Nicolson, and B. H. Smith. "Chronic pain: a review of its epidemiology and associated factors in population-based studies." *British journal of anaesthesia*, Vol 123, No. 2, p. e273-e283, 2019.

[2] G. A. Hawker, S. Mian, T. Kendzerska, and M. French. "Measures of adult pain: Visual analog scale for pain (vas pain), numeric rating scale for pain (nrs pain), mcgill pain questionnaire (mpq), short-form mcgill pain questionnaire (sf-mpq), chronic pain grade scale (cpgs), short form-36 bodily pain scale (sf-36 bps), and measure of intermittent and constant osteoarthritis pain (icoap)." *Arthritis care & research*, Vol 63, No. S11, p. S240-S252, 2011.

[3] M. J. Hjermstad, P. M. Fayers, D. F. Haugen, A. Caraceni, G. W. Hanks, J. H. Loge, R. Fainsinger, N. Aass, S. Kaasa, and EPCR Collaborative. "Studies comparing numerical rating scales, verbal rating scales, and visual analogue scales for assessment of pain intensity in adults: a systematic literature review." *Journal of pain and symptom management*, Vol 41, No. 6, p. 1073-1093, 2011.

[4] M. T. Bjelkarøy, J. Š. Benth, T. B. Simonsen, T. G. Siddiqui, S. Cheng, E. S. Kristoffersen, and C. Lundqvist. "Measuring pain intensity in older adults. Can the visual analogue scale and the numeric rating scale be used interchangeably?" *Progress in Neuro-Psychopharmacology and Biological Psychiatry*, Vol 130, p. 110925, 2024.

[5] K. D. Davis, H. Flor, H. T. Greely, G. D. Iannetti, S. Mackey, M. Ploner, A. Pustilnik, I. Tracey, R-D. Treede, and T. D. Wager. "Brain imaging tests for chronic pain: medical, legal and ethical issues and recommendations." *Nature Reviews Neurology*, Vol 13, No. 10, p. 624-638, 2017.

[6] B. Horing, and C. Büchel. "The human insula processes both modality-independent and pain-selective learning signals." *PLoS Biology*, Vol 20, No. 5, p. e3001540, 2022.

[7] C. Peirs, and R. P. Seal. "Neural circuits for pain: recent advances and current views." *Science*, Vol 354, No. 6312, p. 578-584, 2016.

Poster-089

피부색 보정을 위한 다파장-거리기반 반사형 광센서의 반사광 일관성 분석

윤희진[1], 최원준[1], 조재걸[2*]

순천향대학교 일반대학원 바이오메디컬공학과[1]

순천향대학교 의공학과[2]

Reflectance Consistency Analysis of a Multi-Wavelength Distance-Based Reflection-Type Optical Sensor for Skin Tone Correction

Heejin Yoon[1],Wonjun Choi[1], Jaegeol Cho[2*]

Graduate Student, Dept. of Biomedical Engineering, Soonchunhyang University, Korea[1]

Dept. of Biomedical Engineering, Soonchunhyang University, Korea[2]

[*]jaegeolcho@sch.ac.kr

Abstract

This study aims to minimize the influence of skin color on optical fat-thickness measurements by integrating a multi-wavelength color-correction module with a distance-based infrared (IR) array sensor. A melanin phantom was fabricated using coffee powder to simulate various skin tones (Level I–V), and a reflection-type sensor consisting of green (570 nm), red (630 nm), and infrared (880 nm, 960 nm) LEDs was developed. Two correction methods were applied: (a) melanin compensation using the red-to-IR intensity ratio based on the Beer–Lambert law, and (b) distance ratio normalization between multiple LED–PD spacings. For both methods, reflection intensity changes were normalized as a percentage relative to Level I, and the standard deviation (STD) across melanin levels was calculated to evaluate stability. Experimental results showed that both correction methods effectively reduced the effect of melanin on reflected intensity, maintaining consistent optical responses regardless of skin tone. These findings confirm the potential of the proposed reflection-type multi-wavelength optical sensor for quantitative, non-invasive subcutaneous fat measurement independent of skin pigmentation.

1. 연구 배경

전 세계적으로 비만 유병률이 급증하고 있으며, 이는 고혈압 및 심혈관 질환을 포함한 다양한 만성 질환의 주요 위험 인자로 작용한다. 특히 체질량지수 뿐만 아니라 피하지방 중에서도 복부 부위에 집중적으로 축적된 지방은 질병 발생 위험을 높이는 것으로 알려져 있다. 따라서 만성 질환의 위험을 평가하고 예방 전략을 수립하기 위해서는 피하지방를 정확하게 측정하고 평가하는 것이 중요하다.

현재 임상 환경에서 피하지방 분포를 측정하는 데는 MRI, CT, DEXA, 초음파와 같은 영상 기술이 활용된다. 그러나 이러한 방법은 비용이 높고 방사선 노출이 있어 반복적인 측정의 어려움이 존재한다. 따라서 광학 기반 비침습 측정 기술이 새로운 대안으로 주목받고 있다.

기존 연구[1]에서는 적외선 파장을 이용한 광센서를 통해 피하지방 두께를 추정하는 방법을 제시되었다. 그러나 피부는 멜라닌과 헤모글로빈 농도 차이로 인해 입사광의 흡수와 산란 특성이 달라지는 문제가 발생한다. 이러한 피부색 변화는 반사광 세기 변동을 유발하여 피하지방 두께 추정 정확도를 저하시킬 수 있다.

본 연구에서는 다파장 피부 보정용 광센서와 거리별 IR 광센서를 통합된 광센서를 제작하여 멜라닌 보정 및 거리 비율 기반의 피부색 보정 방법을 적용함으로써 피부색 변화에에 따른 광학 신호의 편차를 최소화하고자 하였다. 이를 통해 피부색이 서로 다른 조건에서도 동일한 피하지방 두께를 일관되게 측정할 수 있는 가능성을 실험적으로 확인하였다. 제안한 광센서가 피부색과 무관하게 피하지방 두께를 정량적으로 측정할 수 있는 비침습 측정 장치로 발전할 잠재력을 가지며, 향후 비만 평가 및 개인 맞춤형 헬스케어 시스템 등 다양한 분야에서 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2.연구 방법

2.1 피부 조직 내에서의 광학적 특성

피부의 광학적 반응은 멜라닌과 헤모글로빈 등 색소 성분의 농도에 따라 달라진다. 이 중 멜라닌은 주로 표피층에 분포하며, 가시광선부터 근적외선 영역(380-2500nm)에서 높은 흡수율을 보인다. 멜라닌 함량이 높을수록 센서로 도달하는 빛의 양이 줄어들어 측정값에 영향을 미치게 된다.

2.2 실험 구성 및 측정 방법

피부의 광학적 특성을 모사하기 위해 멜라닌 팬텀을 제작하였다. 멜라닌의 흡수 특성을 재현하기 위하여 생체 광 흡수 특성과 유사한 커피분말을 사용하였다[2]. Fitzpatrick 피부 유형 Ⅰ형~ Ⅵ형에 대응하도록 농도를 단계적으로 조절하여 총 5단계의 피부색 패턴을 제작하였다. 또한 일정한 산란 특성을 확보하기 위해 팬텀 하단에 테플론 블록(Teflon)을 배치하여 반사광의 재현성과 측정 안정성을 높였다.

피부색 보정용 다파장부와 피하지방 측정용 IR 거리 배열부를 통합한 반사형 광센서를 제작하였다. 피부색 보정용 다파장부는 green(570 nm), red(630 nm), IR(880 nm)의 세 파장으로 구성되며, 이 중 red와 IR(880nm)은 멜라닌 보정 지표로 사용하였다. 피하지방 측정부는 IR(960 nm) LED를 사용하였으며, 포토다이오드(PD)로부터 10, 15, 20, 25, 30 mm의 거리에 배열하여 거리별로 피하지방층에 도달하는 광의 침투 깊이 차이를 구현하였다. LED-PD 사이 거리 증가에 따라 IR 신호 세기가 급격히 감소하는 문제를 보완하기 위해 LED와 PD 사이의 거리가 20 mm 구간에는 2개, 25 mm는 3개, 30 mm는 4개의 LED를 배치하여 멀리 떨어진 구간에서도 안정적인 반사광 신호를 확보하도록 설계하였다. 그림 1는 실험에 사용된 피부색 보정용 다파장부와 피하지방 측정부를 통합한 제작 광센서와 5단계의 피부색 팬텀을 나타낸다.

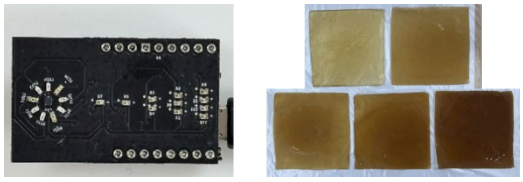


그림1. 측정 센서 및 피부색 팬텀
(a) 통합형 광센서 (b) 5단계의 피부색(멜라닌) 팬텀

2.3 멜라닌 보정 및 거리 비율

Beer-Lambert 법칙[3]은 빛이 흡수 물질을 통과할 때 발생하는 감쇠 현상을 정량적으로 설명하는 이론이다. 이 법칙은 빛의 세기 I는 초기 세기 I_0에 대해 흡수 계수(α), 물질의 농도(c) 및 광의 경로 길이(l)의 곱에 비례하여 지수적으로 감소한다는 원리에 기반한다.

$$I = I_0 exp(-\alpha cl) \quad (1)$$

이 원리는 피부 내 색소(멜라닌)의 농도를 추정하는데 활용된다. 피부에 입사된 빛은 멜라닌에 의해 흡수되며, 반사광의 세기를 측정함으로써 물질의 농도를 추정할 수 있다. 멜라닌은 red 영역에서 높은 흡수율을 보이고 IR 영역에서 낮은 흡수율을 보인다. 따라서 두 파장에서의 반사광 세기 비율 이용하여 멜라닌 농도를 추정할 수 있다. 두 파장에서의 반사광 세기를 각각 I_{660} 과 I_{880} 이라 할 때, 멜라닌 농도 c는 식(2)과 같이 표현할 수 있다.

$$c = \frac{1}{\alpha l} ln\left(\frac{I_{880}}{I_{660}}\right) + \frac{1}{\alpha l} ln\left(\frac{a}{b}\right) \quad (2)$$

또한 반사광 세기는 다음과 같이 나타낼 수 있으며, 이를 정리하면 식 (3)와 같다.

$$I_1 = I_{1,o}\, exp(-\alpha c_1 l) = I_{1,o}\left(\frac{I_{1,660}}{I_{1,880}}\right)\frac{b}{a} \quad (3)$$

따라서 멜라닌 농도가 높아질수록 I_{660}/I_{880} 비율이 커지며, 이를 이용해 IR 세기를 해당 비율로 나눠어 정규화하여 멜라닌 흡수에 의해 감소한 IR 세기를 보정하였다.

또한 거리 비율을 이용한 정규화 방법을 적용하였다. LED–PD 간의 거리가 증가할수록 반사광은 경로 길이 증가에 따라 감쇠하며, 멜라닌에 의한 흡수는 피부에서 균등하게 작용한다고 가정할 수 있다. 따라서 서로 다른 거리에서 측정된 IR 세기 간의 비율 관계를 이용하면 멜라닌 농도 변화에 따른 공통 감쇠 성분이 상쇄되어 피부색의 영향을 완화할 수 있다. 기준 거리 r_0(예: 10 mm)에서의 IR 세기를 I_{r_0}, 임의의 거리 r_i에서의 IR 세기를 I_{r_i}라 할 때, 거리 비율 R_i는 $R_i = I_{ri}/I_{r_{0i}}$으로 정의된다.

본 연구에서는 위 두 가지 보정 방법인 멜라닌 보정식과 거리 비율 정규화를 각각 적용한 후, 모든 데이터를 멜라닌 1단계를 기준으로 변화율(%)로 계산하였다. 각 거리 및 멜라닌 단계별 반사광 세기를 동일한 방식으로 정규화하여, 두 보정 방법 간의 결과를 직접 비교할 수 있도록 통일된 기준을 적용하였다. 이후 각 거리별 변화율의 표준편차(STD)를 산출하여, 두 보정 방법이 피부색 변화에 대해 얼마나 일정한 반사광 특성을 유지하는지를 비교 평가하였다.

3. 연구 결과

그림 2는 멜라닌 보정식과 거리 비율 보정을 적용하여 멜라닌 단계(Ⅰ~Ⅴ)에 따른 반사광 변화를 비교한 결과이다. 왼쪽 그래프는 멜라닌 보정 후의 반사광 세기, 오른쪽 그래프는 거리 비율을 적용한 정규화 반사광 세기를 나타낸다. 두 결과 모두 멜라닌 농도 증가에 따라 감소하는 반사광 세기를 일정 수준으로 보정하는 효과를 보였다.

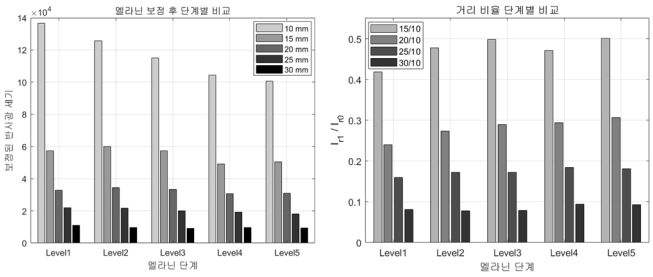


그림2. 멜라닌 단계(Ⅰ~Ⅴ)에 따른 반사광 변화
(a) 멜라닌 보정식 (b) 거리비율 보정

그림 3은 동일 거리에서 측정된 반사광이 멜라닌 단계 변화에 따라 얼마나 일정하게 유지되는지를 평가한 결과를 나타낸다. 두 그래프 모두 멜라닌 1단계를 기준으로 각 단계별 변화율(%)을 계산하였다.

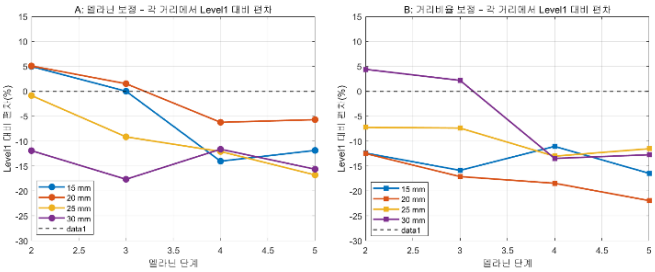


그림3. 동일 거리에서의 멜라닌 단계별 변화율
(a) 멜라닌 보정식 (b) 거리비율 보정

멜라닌 보정과 거리 비율 보정의 거리별 반사광 표준편차(STD)를 비교하면 멜라닌 보정식은 15–20 mm에서 STD가 8–9 %로 높았으나, 25–30 mm 구간에서는 5–7 %로 감소하여 피부색 영향이 부분적으로 완화되었다. 반면 거리 비율 보정은 전 구간에서 STD가 3 % 이하로 유지되는 것을 확인하였다. 따라서 두 보정 방법 모두 피부색 변화에도 동일한 피하지방 두께를 일관되게 측정할 수 있는 가능성을 확인하였다. 그러나 두 방법 간의 결과 차이는 조명 간섭 및 온도 등의 외부 환경적인 요인으로 작용했을 가능성이 있다. 향후 개선을 위해서는 멜라닌 보정식에서 보정항을 추가하거나 측정 환경 변동 요인을 제거하여 신호를의 균일성과 재현성을 향상시켜 진행하고자 한다.

4. Acknowledgements

본 논문은 과학기술정보통신부 재원으로 범부처전주기의료기기연구개발사업단의 지원(RS-2023-00255005) 및 한국연구재단의 지원(RS-2023-00279475)을 받아 수행된 연구임.

5.참고 문헌

[1] HWANG, In Duk; SHIN, Kunsoo. Fat thickness measurement using optical technique with miniaturized chip LEDs: A preliminary human study. In: *2007 29th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*. IEEE, 2007. p. 4548-4551

[2] AFSHARI, Ali, et al. Evaluation of the robustness of cerebral oximetry to variations in skin pigmentation using a tissue-simulating phantom. *Biomedical optics express*, 2022, 13.5: 2909-2928.

[3] NITZAN, Meir, et al. Measurement of oxygen saturation in venous blood by dynamic near IR spectroscopy. *Journal of Biomedical Optics*, 2000, 5.2: 155-162.

Poster-090

PPG 신호의 시간–주파수 및 형태학적 특징 결합을 통한 수면 무호흡 사건 예측 연구

이은주[1], 조재걸[2*]

순천향대학교 일반대학원 바이오메디컬공학과[1]

순천향대학교 의공학과[2]

Prediction of Sleep Apnea Events Using Combined Time–Frequency and Morphological Features of PPG Signals

Eunju Lee[1], Jaegeol Cho[2*]

Graduate Student, Dept. of Biomedical Engineering, Soonchunhyang University, Korea[1]

Dept. of Biomedical Engineering, Soonchunhyang University, Korea[2]

* jaegeolcho@sch.ac.kr

Abstract

Sleep Apnea Syndrome (SAS) and Obstructive Sleep Apnea (OSA) are characterized by repetitive upper airway obstruction leading to apnea and hypoxemia and are known risk factors for cardiovascular and metabolic diseases. This study aims to develop an algorithm that predicts OSA events in advance using photoplethysmography (PPG) signals. The PPG signals were recorded at 512 Hz, bandpass-filtered between 0.5–10 Hz to remove baseline drift and high-frequency noise, and then downsampled to 25 Hz for efficient processing. The data were segmented into 30-second epochs, where the preceding 120 seconds (4 epochs) were used as input to predict the occurrence of apnea events in the following 30 seconds. From the preprocessed PPG, two types of input features were generated: (1) 2D time–frequency images using Wigner–Ville Distribution (WVD), and (2) nine 1D morphological features. Two models—WVD-only CNN (Model 1) and WVD + PPG Feature CNN (Model 2)—were trained and evaluated under identical data split conditions (train:test = 8:2). Model 1 achieved an accuracy of 66.77%, while Model 2 reached 71.22%, showing a 4.5% improvement. Notably, OSA classification accuracy improved from 41.6% to 52.1% (+10.5%). These findings demonstrate that incorporating morphological PPG features enhances OSA early prediction performance and suggests potential applications in non-invasive, real-time sleep monitoring systems.

1. 연구 배경

수면 무호흡증(Sleep Apnea Syndrome, SAS) 및 폐쇄성 수면무호흡증(Obstructive Sleep Apnea, OSA)은 모든 호흡기 질환 중에서 가장 흔한 장애로, 전 세계적으로 중요한 공중보건 문제로 인식되고 있다 [1]. OSA는 수면 중 상기도의 반복적인 폐쇄로 인해 기류가 차단되고, 그 결과 간헐적 저산소증과 수면 분절이 발생하는 질환이다. 연구에 따르면 성인 인구에서 OSA의 유병률은 약 6%에서 17%로 보고되며, 특히 남성, 비만 인구, 고령층에서 더 높은 경향을 보인다 [2].

미국수면의학회(AASM) 및 국제수면장애분류(ICSD-3)에 따르면, OSA 사건은 정상 수준에 비해 기류가 90% 이상 감소하고 그 지속 시간이 10초 이상인 경우로 정의된다 [3].

또한 무호흡(apnea)과 저호흡(hypopnea) 사건의 빈도를 합산한 무호흡-저호흡 지수(Apnea–Hypopnea Index, AHI)는 질환의 중증도를 평가하는 핵심 지표로 활용된다.

OSA는 단순한 수면 장애를 넘어 전신적인 생리학적 변화를 유발하며, 다양한 합병증의 주요 원인으로 작용한다. 여러 연구에 따르면 OSA는 주간 졸음 및 피로뿐 아니라 심부전, 뇌졸중, 폐동맥 고혈압 밀접하게 연관되어 있다 [4].

이에 따라 OSA의 조기 진단 및 예측 기술 개발은 수면의학뿐 아니라 심혈관 및 대사질환 예방의 측면에서도 중요한 연구 주제로 부상하고 있다.

OSA를 진단하는 가장 신뢰할 수 있는 방법은 수면다원검사(Polysomnography, PSG)이며, 이는 숙련된 의료 전문가가 환자에게 여러 개의 센서를 부착하여 수면 중 다양한 생리 신호를 기록하고 분석하는 방식이다. 그러나 PSG는 고비용, 숙련 인력의 필요성, 그리고 수면 중 센서 부착으로 인한 불편함 등으로 인해 대규모 선별검사나 가정기반 모니터링에는 현실적인 제약이 존재한다 [5].

이러한 한계를 극복하기 위해 최근에는 PSG 데이터를 분석하거나 OSA 발생 위험을 사전에 추정하기 위한 머신러닝 및 인공지능(AI) 기반 접근이 활발히 연구되고 있다. 그동안 다양한 연구에서 무호흡(apnea) 및 저호흡(hypopnea) 사건을 자동으로 탐지하기 위한 기법이 제안되었으나, 실제로 사건 발생을 사전에 예측(predict)하는 연구는 매우 제한적이다 [6].

이에 본 연구에서는 PSG에서 획득한 PPG (Photoplethysmography) 신호를 이용하여, 시간–주파수 변환 기반의 2차원 스펙트럼과 PPG 파형의 형태학적 특징을 결합함으로써 수면 무호흡 사건의 조기 예측 기법을 제안하고자 하였다.

2. 연구 방법

본 연구에서는 PSG에서 측정된 PPG 신호를 입력으로 사용하는 예측 알고리즘을 개발하였다. PSG는 순천향대학교 부속 천안병원에서 임상시험 승인(IRB No. SCHCA 2022-03-026)을 받은 후 진행하였다.

PPG 신호는 512 Hz의 샘플링 주파수로 측정되었으며, 0.5–10 Hz 대역통과 필터를 적용하여 저주파 기저선 변동과 고주파 잡음을 제거하였다. 이후 25 Hz로 다운샘플링하여 처리 효율성을 확보하였다. 데이터를 30초(epoch) 단위로 구분한 후, 선행 120초 구간을 입력으로, 다음 30초 구간의 무호흡 발생 여부를 예측하도록 설계하였다. 즉, 입력

시점에서 모델은 직전 120초 동안의 생리 신호 변화를 분석하여 향후 30초 내 호흡사건 (무호흡 및 저호흡) 발생 여부 출력하도록 구성하였다.

모든 데이터를 피험자별로 세분화한 후, 모델의 일반화 성능을 확보하기 위해 전체 데이터를 무작위로 섞은 뒤 80%는 training set, 20%는 test set으로 사용하였다. 두 모델 모두 동일한 데이터 분할 조건에서 학습과 검증을 수행하여 성능을 공정하게 비교할 수 있도록 하였다.

전처리된 PPG 신호로부터 두 가지 입력 형태를 생성하였다. 첫째, 시간–주파수 분석을 위해 각 segment를 Wigner–Ville Distribution(WVD)으로 변환하였다. 0.5–5 Hz 대역을 강조하여 호흡 리듬 및 혈류 진폭의 변조를 시각화하였으며, 변환 결과를 224×224 크기의 grayscale 이미지로 저장하여 CNN 입력으로 사용하였다. 이를 통해 모델은 주파수 스펙트럼 상의 미세한 에너지 변화와 리듬 패턴을 학습할 수 있다.

둘째, PPG 파형의 형태학적 특징(1D)을 추출하였다. Peak–valley 검출을 기반으로 평균 진폭, 변동계수, 상승 시간, 하강 시간, 상승/하강 비, 진폭 변화율(%), Hilbert envelope의 기울기(%/s), pulse interval variability(PIV), pulse amplitude drop index(PADI) 등 총 9개의 특징을 계산하였다. 이러한 특징들은 혈류 진폭의 불안정성, 파형 비대칭성, 교감신경 활성 증가에 따른 진폭 저하 등을 정량적으로 반영하는 생리학적 지표이다.

모델 1은 "WVD-only CNN"으로, 시간–주파수 이미지로부터 패턴을 학습하는 단일 입력 CNN 구조이다. 5개의 convolution–batch normalization–ReLU–max pooling 계층을 연속적으로 구성하고, fully connected(64) 계층을 통해 최종 softmax 분류기에서 Normal/OSA를 이진 분류한다.

모델 2는 "WVD + 1D PPG Feature CNN"으로, 동일한 CNN branch에 추가로 1D feature 입력 branch를 병렬로 결합하였다. 1D feature는 fully connected(16)–ReLU 계층을 통과하여 CNN branch에서 추출된 이미지 feature와 concatenation layer에서 융합된다. 이후 fully connected(32)–ReLU–softmax 계층을 거쳐 최종적으로 Normal과 OSA를 이진 분류한다.

이러한 구조를 통해 모델 1은 시간–주파수 패턴 중심의 호흡 리듬 변화를 학습하고, 모델 2은 추가적인 생리적 특징을 결합함으로써 무호흡 전 교감신경 활성 변화를 정밀하게 반영하도록 설계되었다.

그림 1은 PPG 신호로부터 생성된 1차원 파형(1D PPG)과 이에 대응하는 2차원 시간–주파수 이미지의 예시를 보여준다.

상단의 ①과 ②는 Normal→ 호흡사건 전이 구간의 데이터를, 하단의 ③과 ④는 호흡사건→Normal 회복 구간의 데이터를 나타낸다. 검은색(①, ③) 및 흰색(②, ④) 점선은 상태 전이 시점을 의미한다.

3. 연구 결과

두 모델의 성능은 동일한 데이터 분할 기반으로 평가되었으며, 각 모델의 전체 정확도(accuracy)에 대해 비교 분석하였다.

모델 1(WVD-only CNN)은 시간–주파수 기반의 2차원 이미지(Wigner–Ville Distribution, WVD)만을 입력으로 사용하였고, 모델 2(WVD + 1D PPG Feature CNN)은 동일한 WVD 이미지에 PPG 특징을 입력으로 결합하였다.

그림 2에서 전체 정확도는 모델 1에서 66.77%, 모델 2에서 71.22%로 약 4.5%의 향상을 보였다. 특히 세부 구간별 분석에서, Normal 구간에 대한 분류 정확도는 두 모델 모두 85.4%로 동일하게 유지되었으나, 호흡사건 구간의 정확도는 모델 1의 41.6%에서 모델 2의 52.1%로 약 10.5% 개선되었다. 이는 추가된 PPG 형태학적 정보가 수면 무호흡 상태의 식별에 유의미하게 기여했음을 의미한다.

결과적으로, PPG 형태학적 feature를 포함한 다중입력 CNN 모델은 단일 WVD 기반 모델에 비해 수면 무호흡 구간의 판별 정확도를 향상시켰으며, 이는 향후 실시간 무호흡 예측 시스템에서 PPG 파형의 형태학적 정보가 중요한 생리학적 지표로 활용될 수 있음을 시사한다.

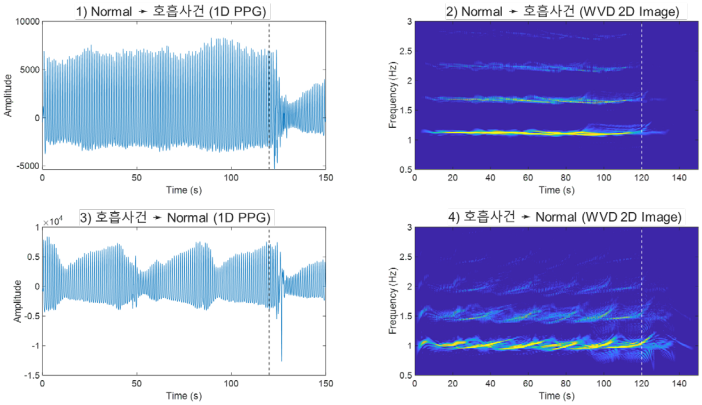


그림 1 수면 무호흡 예측 모델에 사용된 입력 데이터의 예시

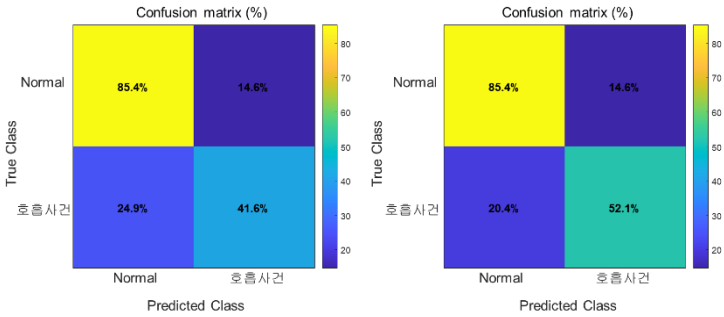


그림 2 모델 1,2 Confusion matrix

4. Acknowledgements

본 논문은 과학기술정보통신부 재원으로 범부처전주기의료기기연구개발사업단의 지원(RS-2023-00255005) 및 한국연구재단의 지원(RS-2023-00279475)을 받아 수행된 연구임.

5. 참고 문헌

[1] Garvey, J. F., Taylor, C. T., & McNicholas, W. T. (2015). Epidemiological aspects of obstructive sleep apnea. Journal of Thoracic Disease, 7(5), 920–929.

[2] Senaratna, C. V., Perret, J. L., Lodge, C. J., Lowe, A. J., Campbell, B. E., Matheson, M. C., Hamilton, G. S., & Dharmage, S. C. (2017). Prevalence of obstructive sleep apnea in the general population: A systematic review. Sleep Medicine Reviews, 34, 70–81.

[3] Sateia, M. J. (2014). International classification of sleep disorders. Chest, 146(5), 1387–1394.

[4] Cowie, M. R., Woehrle, H., Wegscheider, K., Angermann, C., d'Ortho, M. P., Erdmann, E., Levy, P., Simonds, A. K., Somers, V. K., Zannad, F., & Teschler, H. (2021). Sleep disordered breathing and cardiovascular disease. Journal of the American College of Cardiology, 78(14), 1377–1392.

[5] Stewart, S. A., et al. (2017). Investigating cost implications of incorporating level III at-home testing vs in-lab PSG. Journal of Clinical Sleep Medicine, 13(4), 467–474.[1]

[6] Bazoukis, G., Tse, G., Letsas, K. P., Korantzopoulos, P., Fragakis, N., Goudis, C. A., Saplaouras, A., Liu, T., & Baranchuk, A. (2023). Application of artificial intelligence in the diagnosis of sleep apnea. Diagnostics, 13(7), 1224.

Poster-091

피하지방 유전특성 변동에 강건한 전극 배치 최적화

최원준[1], 윤희진[1], 조재걸[2*]

순천향대학교 일반대학원 바이오메디컬공학과[1]

순천향대학교 의공학과[2]

Optimization of Electrode Placement Robust to Variations in Subcutaneous Fat Dielectric Properties

Wonjun Choi[1], Heejin Yoon[1], Jaegeol Cho[2]*

Graduate Student, Dept. of Biomedical Engineering, Soonchunhyang University, Korea[1]

Dept. of Biomedical Engineering, Soonchunhyang University, Korea[2]

*jaegeolcho@sch.ac.kr

Abstract

Local BIA for subcutaneous fat is affected by variability in fat permittivity and conductivity. Focusing on voltage electrodes only with current electrodes fixed, we evaluated three comparison metrics between voltage electrode layouts: ratio, absolute difference, and percentage change. A three dimensional multilayer finite element model of skin, fat, muscle, and cortical bone was built in COMSOL Multiphysics AC/DC Electric Currents. Simulations ran at 50kHz with stainless steel electrodes, and fat thickness varied from 10 to 50 mm. Tissue properties were taken from the literature. Voltage electrode spacing and position were varied relative to a baseline, apparent impedance was computed from the measured potential difference, and the three metrics were derived. Percentage change was defined as the relative decrease from baseline. Results showed that the ratio metric changed more for thin fat and diminished as fat became thicker, whereas the absolute difference metric stayed small and nearly constant across thickness. These findings suggest using the ratio metric to highlight contrasts when fat is thin around 10 to 15mm, and using the absolute difference metric, especially for spacing comparisons, when fat is 20mm or thicker to support robust and reproducible electrode layout selection.

1. 연구 배경

현대 사회에서 비만은 단순한 체중 증가를 넘어서 전 세계적으로 심각한 공중보건 문제로 자리잡고 있다. 비만은 체내에 지방이 과도하게 축적된 상태를 의미하며, 주로 체질량지수(Body Mass Index, BMI)를 통해 평가된다. 그러나 BMI는 지방량과 근육량을 구별하지 않으며, 체내 지방의 분포를 반영하지 못하여 비만을 정확하게 진단하는 데 한계가 있다.[1] 이를 보완하고자 생체전기저항분석(Bioelectrical Impedance Analysis, BIA)를 통해 전신의 체성분을 분석하는 방법이 널리 활용되어 왔다. 그러나 특정 부위의 비만 양상을 정밀하게 파악하기 위해서는 단일 부위에 초점을 맞춘 Local BIA 기술이 필요하다.

Local BIA는 4전극법 임피던스 측정 기술이 사용되는데 이때 전기 임피던스를 이용한 피하지방 정량화에서는 개인, 부위, 병태에 따라 지방의 전도도(σ)와 상대유전율(ε_r)이 달라지며, 이 물성 변동이 측정 임피던스의 절대값과 위상에 직접 반영되어 전극 배열 간 비교나 두께 추정의 재현성을 떨어뜨린다.

본 연구는 전극 전체가 아니라 전압 전극에 주목한다. 즉, 전류 전극은 고정한 상태에서 전압 전극의 간격과 위치만을 변화시켜 전류 경로에 대한 샘플링 방식과 민감도장 분포가 어떻게 달라지는지에 초점을 둔다. 전압 전극의 배치는 각 조직층(피부, 지방, 근육)의 기여도 가중치를 바꾸므로, 지방 물성 변화에 덜 흔들리면서도 전압 전극 배치 간 차이를 안정적으로 드러내는 비교 지표가 필요하다.

목표는 현장 적용에서 물성 불확실성이 존재하더라도 전극 설계의 최적 범위를 도출할 수 있는 안정적 지표 체계를 제안하는 데 있다. 이를 위해 3D 유한요소(FEM)로 피부, 피하지방, 근육, 뼈로 이루어진 다층 구조를 구현하였다. 표면 tetrapolar 임피던스 모델에서 전류 전극은 고정하고 전압 전극의 간격과 위치만 변화시켰다.

2. 연구 방법

2.1 유한 요소 모델 시뮬레이션

FEM 시뮬레이션은 Comsol Multiphysics(Comsol, Inc., Burlington, Massachusetts)의 AC/DC모듈, Electric Currents Physics를 사용하여 주파수 영역에서 수행되었다. 다층 구조는 경계 영향(edge effect)을 최소화하기 위해 충분한 길이와 너비를 가지고 제작하였으며, 길이 l = 200mm, 너비 w = 200mm, 높이 h 는 각각 피부 h_s = 1mm, 피하 지방 h_f = 10~50mm, 근육 h_m=30mm, 뼈 h_b =20mm로 구성하였다.

각 조직의 전도도(σ)와 상대유전율(ε_r)은 문헌 기반 내부 데이터베이스에서 인용하여 적용하였다.[2-4] 사용한 조직 모델은 "wet skin", "fat", "muscle", "cortical bone"이며, 근육은 이방성을 고려해 섬유 평행(∥)/수직(⊥) 방향의 전기적 특성을 구분(σ∥, σ⊥; ε_r∥, ε_r⊥)하여 모델링하였다.

FEM 해석은 50 kHz 단일 주파수에서 수행하였다. [그림 1]의 기준 전극 배열에서는 전류 전극과 전압 전극 사이의 기준 거리를 d = 12 mm로 설정하였다. 전극 간 간격 효과를 평가하기 위해 간격을 2d로 확대한 구성을 추가했으며, 전극 위치 효과는 기준 배열을 측정축과 평행한 방향으로 d만큼 이동한 구성으로 평가하였다.

모든 시뮬레이션에서 전극은 스테인리스로 모델링했으며, 전기적 물성은 σ = 1.7 M[S/m], ε_r = 1(무차원)으로 설정하였다. 전극 치수는 너비, w_e 5mm, 높이, h_e = 1mm 로 동일하게 두었고, 전류 전극 길이 L_e= 40mm, 전압 전극 길이 l_e = 10mm로 구성하였으며 전류 전극에는 1 A의 전류를 인가하였다.[5]

그림 1. (a) 전극 간격 구성 (b) 전극 위치 구성

2.2 데이터 분석

분석 절차는 다음과 같다. 먼저 각 전극 배치, 물성 조합마다 전압 전극 두 면의 면적 평균전위를 취해 전압차를 계산하고, 인가 전류(1 A)로 나누어 임피던스(크기, 위상, R/X 분해)를 산출하였다. 전극 배치는 기준 배열(d=12 mm)과 간격 확대한 배열(2d), 그리고 기준 배열을 측정축 방향으로 d만큼 평행 이동한 배열(위치)으로 구성하였다. 피하지방 두께는 10–50 mm 범위를 일정 간격(10 mm)으로 변화시켰고, 지방의 전도도, 상대유전율은 문헌 기반 기준값을 중심으로 스윕하여 조합을 구성하였다. 각 두께, 물성 조건에서 전압 전극 배치 간 임피던스를 서로 비교하여 (i) 비율(배치 A 대비 배치 B의 |Z| 비), (ii) 정량적 차이(|Z|의 절대 차) (iii) 증감률(해당 지표의 기준 물성 대비 변화율: (기준−변경 후)/기준 ×100%)을 계산하였다. 여기서 비율 및 정량적 차이는 동일 두께, 동일 물성에서 "배치 간" 상대성을 나타내며, 증감률은 동일 두께, 동일 배치에서 "기준 물성 대비" 지표의 민감도를 정량화한다. 이렇게 얻은 지표들을 두 축에서 해석하였다. 첫째, 전압 전극 간격, 위치 변화에 따른 효과를 보기 위해, 두께, 물성을 고정한 상태에서 배치 간 지표를 비교하여 배치 간 대비가 얼마나 변화 하는지를 평가하였다. 둘째, 피하지방 두께 변화에 대한 응답성을 보기 위해, 물성을 고정하고 두께를 증가시키며 지표가 변하는지 응답을 확인하였다. 마지막으로, 간격(d 대 2d)과 위치(0 대 d)의 조합별로 위 지표들의 변동성이 최소가 되는 안정 작동 영역을 탐색하여, 물성 변동이 존재하는 조건에서도 전압 전극 설계(간격, 위치)를 비교, 선별하는 데 활용 가능한 근거를 마련하였다.

3. 연구 결과

연구 결과는 다음과 같이 요약된다. 50 kHz에서 지방의 유전 특성(σ, ε_r)만을 변화시키며 전압 전극의 간격 변화와 위치 변화를 비교한 결과, [그림 2]와 같이 비율 기반 증감률은 피하지방 두께가 얇을수록 크게 나타났다. 두께 10 mm에서 간격 변화는 약 5%, 위치 변화는 약 3.3%로 가장 컸고, 20 mm에서 두 지표 모두 급감하여 1.7% 수준으로 떨어진 뒤 30–50 mm 구간에서는 1.0–1.2%로 거의 평탄하게 유지되었다. 즉, 비율 지표는 얇은 지방층에서 지방 물성 변화의 영향을 상대적으로 크게 받지만, 두께가 20 mm를 넘어서면 영향이 빠르게 완화되어 안정화된다.

반면 정량적 차이 기반 증감률은 전 범위에서 전반적으로 낮고 평탄했다. 간격 변화는 전 구간 0.5% 내외로 가장 안정적이었고, 위치 변화는 10→20 mm에서 0.4%→0.75%로 소폭 증가한 뒤 30–50 mm에서 0.85% 이하 수준을 유지했다. 두 경우 모두 1% 미만으로, 비율 지표 대비 물성 변화에 더 둔감했다.



그림 2. 전극 구성

최종적으로, 지방 물성의 불확실성이 존재하는 조건에서 정량적 차이 기반 지표 비율 기반 지표는 얇은 지방층(10 mm 이하)에서 배치 간 대비를 강조할 때 유용하지만 물성 변화의 영향이 더 크게 나타났다. 따라서 지방층이 얇은 경우(약 10~15 mm)에는 비율 지표로 배치 간 대비를 강조하는 편이 유리하고, 지방층이 20 mm 이상으로 두꺼운 경우에는 특히 전압 전극 간격 비교에서 정량적 차이 지표를 사용하는 것이 재현성과 강건성을 확보하는 데 적절하다. 이 결과는 지방 두께에 따라 지표 선택과 전압 전극 배치 전략을 달리해야 함을 시사한다.

향후 추가 연구에서는 동일 프로토콜로 다층 팬텀을 제작할 예정이며, 이를 이용하여 재현성과 실용 타당성을 검증할 예정이다.

4. Acknowledgements

본 논문은 과학기술정보통신부 재원으로 범부처전주기의료기기연구개발사업단의 지원(RS-2023-00255005) 및 한국연구재단의 지원(RS-2023-00279475)을 받아 수행된 연구임.

5.참고 문헌

[1] KOK, Petra; SEIDELL, Jacob C.; MEINDERS, AE15615272. The value and limitations of the body mass index (BMI) in the assessment of the health risks of overweight and obesity. *Nederlands tijdschrift voor geneeskunde*, 2004, 148.48: 2379-2382.

[2] GABRIEL, Sami; LAU, R. W.; GABRIEL, Camelia. The dielectric properties of biological tissues: III. Parametric models for the dielectric spectrum of tissues. Physics in medicine & biology, 1996, 41.11: 2271.

[3] GABRIEL, S. The dielectric properties of biological tissues. Phys. Med. Biol., 1996, 41: 2271-2293.

[4] GABRIEL, Sami; LAU, R. W.; GABRIEL, Camelia. The dielectric properties of biological tissues: III. Parametric models for the dielectric spectrum of tissues. Physics in medicine & biology, 1996, 41.11: 2271.

[5] RUTKOVE, Seward B.; PACHECK, Adam; SANCHEZ, Benjamin. Sensitivity distribution simulations of surface electrode configurations for electrical impedance myography. Muscle & nerve, 2017, 56.5: 887-895.

Poster Presentation
생체소재

Poster-092

만성 고막 천공 치료를 위한 기능성 하이드로겔 연구

홍진영[1,†], Gan-Erdene Narantsolmon[2,3,4,†], 황유정[2,†], 김민지[1,†], 최현서[1], 서명환[2,*], 최영빈[1,5,6,*]

서울대학교 공과대학 협동과정 바이오엔지니어링 전공[1]

서울대학교병원 이비인후과[2]

몽골 제1중앙병원 이비인후과[3]

몽골국립의과대학교 병리해부학 및 법의학과[4]

서울대학교 의학연구원 의용생체공학연구소[5]

서울대학교 의과대학 의공학과[6]

Study on Functional Hydrogel-Based Treatment for Chronic Tympanic Membrane Perforations

Jin Young Hong[1, †], Gan-Erdene Narantsolmon[2,3,4,†], Yu-Jung Hwang[2,†], Min Ji Kim[1,†], Hyun Seo Choi[1], Myung-Whan Suh[2,*], and Young Bin Choy[1,5,6,*]

Interdisciplinary Program in Bioengineering, College of Engineering, Seoul National University, Seoul, Republic of Korea[1]

Department of Otorhinolaryngology, Seoul National University Hospital, Seoul, Republic of Korea[2]

Department of Otorhinolaryngology, First Central Hospital of Mongolia, Ulaanbaatar, Mongolia[3]

Department of Pathology and Forensic Medicine, Mongolian National University of Medical Science, Ulaanbaatar, Mongolia[4]

Institute of Medical and Biological Engineering, Medical Research Center, Seoul National University, Seoul, Republic of Korea[5]

Department of Biomedical Engineering, Seoul National University College of Medicine, Seoul, Republic of Korea[6]

[*]ybchoy@snu.ac.kr, drmung@naver.com

[†]These authors contributed equally to this work

Abstract

Chronic tympanic membrane (TM) perforations are difficult to heal, largely due to persistent oxidative stress and hypoxia in the middle ear. To address this challenge, we developed a biocompatible hydrogel made of thiolated chitosan and manganese porphyrin-functionalized polyethylene glycol (PEG), designed to both scavenging reactive oxygen species and generate oxygen. The hydrogel was evaluated *in vitro* for mechanical strength, swelling capacity (~155%), porosity, and enzymatic antioxidant activity. Its *In vivo* efficacy was then assessed in a rodent model of chronic TM perforation following transtympanic administration. Functional and structural outcomes were assessed using otoscopy, auditory brainstem response (ABR), micro-CT, and histological analysis. Despite demonstrating promising *in vitro* antioxidant and oxygen-generating properties, the hydrogel failed to produce significant improvements in TM regeneration or auditory function *in vivo*. Imaging revealed substantial hydrogel volume loss within three weeks, likely caused by dehydration in the air-exposed middle ear, which impaired sustained therapeutic activity. These findings emphasize a critical consideration in hydrogel design for TM repair: maintaining hydration under air-exposed conditions is essential for prolonged efficacy and successful tissue regeneration.

1. 연구 배경

만성 고막 천공은 반멸균 상태의 중이 환경을 손상시켜 반복적인 감염과 청력 저하를 일으킨다. 수술적 치료는 성공률이 65% 이하로 제한적이고, 비수술적 방법 역시 중이의 산화 스트레스와 저산소 환경으로 인해 안정적인 재생을 이루지 못한다 [1, 2]. 이를 해결하기 위해, 우리는 반응성 산소종(ROS)을 제거하고 산소를 공급할 수 있는 티올화 키토산과 망간 포르피린-PEG 기반의 생체적합성 하이드로겔을 개발하였다. 이 하이드로겔은 기공 구조, 팽윤 특성, 효소적 항산화 활성을 포함한 *in vitro* 평가를 거쳤다. 또한 설치류 만성 고막 천공 모델에 적용하여 *in vivo* 효능을 평가하였고, 이 과정에서 내시경 영상과 마이크로 CT를 활용해 기능적 및 구조적 재생 효과를 확인하였다.

그러나 항산화 및 산소 발생 기능으로 치료 효과가 기대된 *in vitro* 결과와 달리, *in vivo*에서는 뚜렷한 재생 효과를 보이지 않았다. 영상 분석 결과, 투여 3주 이내에 하이드로겔의 부피가 크게 감소하였고, 이는 공기와 접촉하는 중이 환경에서의 건조로 인한 구조적 붕괴 때문으로 판단된다. 이로 인해 치료 효과가 지속되지 못했다. 따라서 고막 재생용 하이드로겔은 공기 노출 환경에서도 수분을 안정적으로 유지할 수 있도록 설계하는 것이 중요함을 본 연구는 보여준다.

2. 연구 방법

Ch_MnP 하이드로겔은 티올화 키토산(CS-SH) 용액과 말레이미드기로 기능화된 망간 포르피린(MnP-PEG-MAL) 용액을 혼합하여 제작하였다. MnP-PEG-MAL과 4-arm PEG-MAL의 몰비를 75:25 및 0:100으로 조절하여 MnP를 포함한 하이드로겔(Ch_MnP(+))과 MnP를 포함하지 않은 하이드로겔(Ch_MnP(-))을 각각 얻었다. 하이드로겔의 단면 구조는 전계방출 주사전자현미경(FE-SEM)으로 관찰하였고, ROS 제거 능력은 superoxide dismutase(SOD) assay kit를 이용해 평가하였다. 산소 발생 능력은 용존산소계(dissolved oxygen meter)로 측정하였다.

만성 고막 천공 모델 설치류는 세 가지 그룹으로 나누어 처리하였다: (1) 대조군, (2) Ch_MnP(-) 처리군, (3) Ch_MnP(+) 처리군. 고막 재생 여부는 내시경으로 확인하였으며, 하이드로겔의 잔존 여부는 micro-CT로 평가하였다.

In vivo 실험 방법은 서울대학교병원 전임상실험부의 IACUC 심의 후 허가된 방법으로 진행하였다 (IACUC No. 24-0050-S1SA1).

3. 연구 결과

Ch_MnP(+) 하이드로겔은 망간 포르피린(MnP)을 키토산 네트워크에 도입하여 ROS를 제거하고 산소를 발생시키도록 설계했으며, 동시에 고막 재생에 적합한 구조와 물리적 특성을 유지하도록 제작하였다. *in vitro* 실험에서는 항산화 효과와 산소 발생 능력을 확인했고, 조직에 적용하기에 충분한 기공 구조와 팽윤 특성도 확인하였다. (그림 1)

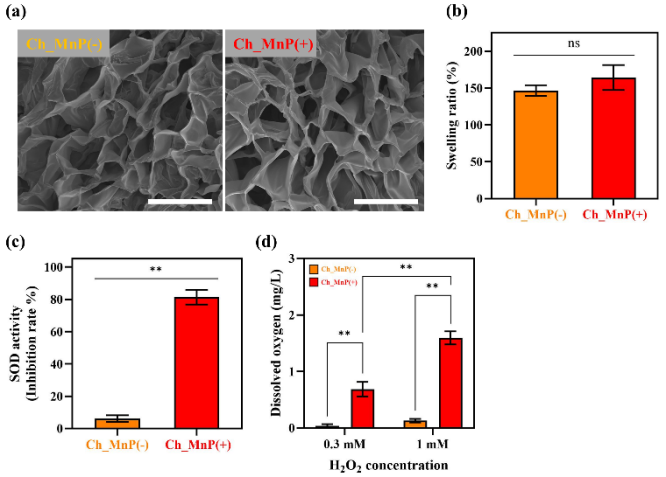


그림 1. Characterizations of Ch_MnP hydrogels

그러나 *in vivo*에서는 고막 재생 효과를 확인할 수 없었다. 내시경 관찰 결과, 모든 그룹에서 투여 전과 3주 후 고막 천공 크기에 차이가 없었으며, 그룹 간 유의한 차이도 나타나지 않았다. 또한 micro-CT 결과, 하이드로겔 부피가 약 80% 감소해 중이 내에서 상당한 수분 손실이 발생했음을 보여주었다. (그림 2, 3)

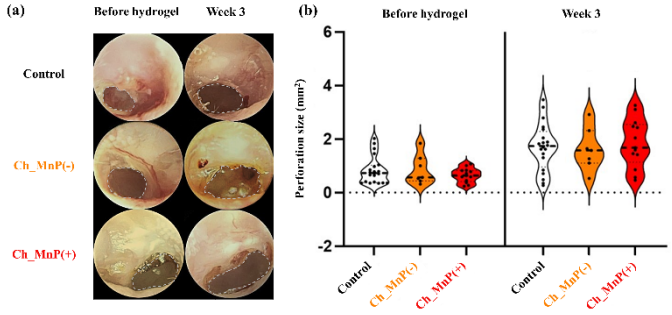


그림 2. TM perforation size profile by endoscopic image analysis

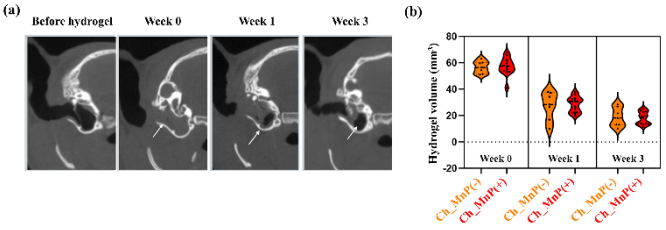


그림 3. Hydrogel retention profile in the bulla by volumetric CT analysis

이는 중이강(bulla) 특유의 환경 때문으로 보인다. 다른 상처 부위는 삼출액에 지속적으로 노출되지만, 중이는 공기로 채워져 있으며 이관(Eustachian tube)을 통해 환기가 지속적으로 이루어진다 [3,4]. 이로 인해 하이드로겔이 건조되면서 부피가 줄고 천공 부위에서 떨어져 나갔으며, 건조된 뒤에는 기공 구조가 무너져 다시 물을 흡수하지 못했다. 이 과정에서 지지체 역할을 잃었을 뿐 아니라, 수분 손실로 인해 항산화 효소 활성도 크게 감소하였다. (그림 4)

결과적으로 고막 재생 효과는 나타나지 않았다. 본 연구 결과는 공기 노출 환경에서 발생하는 건조가 하이드로겔의 구조적 안정성과 치료 효과를 크게 저해한다는 점을 보여준다. 따라서 고막 재생을 위한 하이드로겔 기반 치료법을 개발할 때는 수분을 안정적으로 유지할 수 있는 전략이 핵심적임을 시사한다.

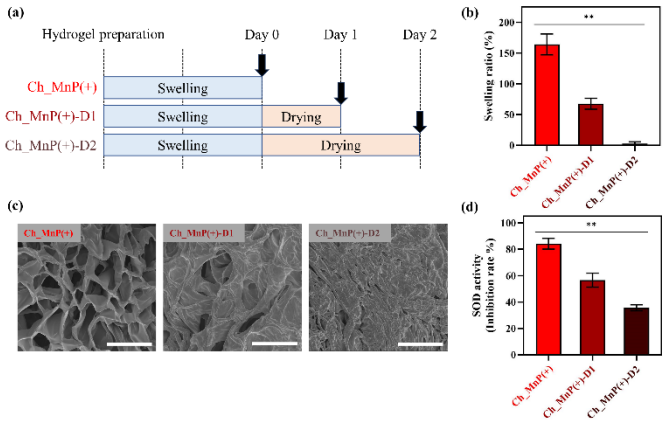


그림 4. Characterizations of dried functional hydrogels

4. Acknowledgements

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2024-00410364).

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2025-00555398).

5. 참고 문헌

[1] Lorenzo Monasta et al, “Burden of disease caused by otitis media: systematic review and global estimates”, *PLoS One*, 2012, 7, 4

[2] Jeongmin Lee et al, “Narrative Review of Free Radicals and Reactive Oxygen Species in Otitis Media”, *Antioxidants*, 2025, 14, 1, 3

[3] Keith Harding et al, “WUWHS Consensus Document: Wound Exudate, effective assessment and management”, 2019

[4] Rebeca Rivero et al, “Mechanical and physicochemical behavior of a 3D hydrogel scaffold during cell growth and proliferation”, *RSC Adv.*, 2020, 10, 10, 5827-37

Poster-093

헤르페스 바이러스 치료를 위한 아시클로버 함유 전분 기반 마이크로니들 패치

김경중[1], 윤순도[2], 최세운[1,3,*]

[1]금오공과대학교 바이오메디컬공학과

[2]전남대학교 화공생명공학과

[3]금오공과대학교 첨단의료기기연구소

Acyclovir-loaded starch-based microneedle patches for herpes simplex virus therapy

Kyeongjung Kim[1], Soon-Do Yoon[2], Se-woon Choe[1,3,*]

[1]Department of Biomedical Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Korea.

[2]Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Chonnam National University, Korea

[3]High-tech Medical Equipment Research Institute, Kumoh National Institute of Technology, Korea

[*]sweoon@kumoh.ac.kr

Abstract

Microneedles (MN) have emerged as promising drug delivery systems for the treatment of various diseases, including herpes simplex virus (HSV) infections. Here in, we fabricate acyclovir (ACV)-loaded MN patches for HSV therapy using starch, polyvinyl alcohol (PVA), and plasticizers, and investigated their characterization and ACV release behavior. Mechanical strength and SEM analysis confirmed that the fabricated ACV-loaded MN demonstrated compression forces of 1.50 – 4.80 N/needle, and exhibited a pyramidal square needle shape with a length range of 620 – 640 μm, which is sufficient for effective skin penetration. The ACV release (%) via an artificial skin test was found to be 2.50 – 4.32 times higher than that from ACV-loaded patches as the film-type formulation. Additionally, the ACV release mechanism was analyzed using various mathematical models. Visualization of drug delivery was conducted using ACV- and riboflavin (RFV)-loaded MN on skin simulants. The results of antiviral activity confirmed that the fabricated ACV-loaded MN patches are suitable for HSV therapy.

1. 연구 배경

ACV는 FDA 승인을 받은 HSV 감염 치료제로, 체내에서 인산화되어 HSV의 DNA 중합효소의 활성을 선택적으로 억제해 DNA 사슬의 성장을 방해함으로써 HSV의 증식을 효과적으로 저지한다. 하지만, 경구투여용 ACV는 장 투과성이 낮아 생체이용률이 최대 20%까지 감소된다는 문제가 있다. 이러한 문제는 ACV의 투약 빈도 수 및 내성 증가 문제를 유발하므로 약물의 효과를 유지하면서 생체이용률을 향상시키는 방안이 필요하다[1].

이러한 경구 투여의 한계를 극복하기 위한 대안으로 개발된 transdermal drug delivery system (TDDS)는 약물이 피부에 흡수되어 질병을 치료하기에 약물의 생체이용률을 향상시킬 수 있다. 이러한 특징을 고려하면 ACV의 투여 방법으로 TDDS를 적용하기에 적절하다고 판단된다. 그러나, TDDS는 피부 가장 바깥쪽에 존재하는 각질층의 보호작용으로 인해 약물이 체내에 침투하기 어렵고, 이로 인해 적용하는 약물의 제한적이다[2].

이러한 TDDS의 한계를 해결하고자 다양한 방법들이 연구되고 있으며, 이 중에서 microneedle (MN)은 마이크로 크기의 바늘이 지지대 위에 배열된 형태로, 피부에 적용 시 각질층을 쉽게 관통하여 약물의 제한없이 효과적인 약물 전달이 가능하다. 최소침습적이고 통증이 없이 자가투여가 가능하다는 특징이 있어 암, 당뇨병, 상처치유, 바이오센서 등의 분야에서 응용되고 있다[3].

전분은 식물에 주로 존재하는 천연 다당류로써 옥수수, 밀, 감자, 녹두 등에서 발견되고, 선형 구조인 아밀로오스와 분지형 구조인 아밀로펙틴으로 구성되어 있다. 식물에 풍부해 저렴한 비용으로 공급이 가능하며, 뛰어난 생분해성과 생체적합성을 지니고 있기에 의공학, 식품, 섬유, 바이오 플라스틱, 화장품, 종이 분야 등에 이용되고 있다. 특히, 의공학 분야에서는 약물 전달 플랫폼, 조직 공학 스케폴드, 상처 드레싱, 봉합사 등으로 연구되고 있다[4].

본 연구에서는 HSV 감염을 치료하기 위한 ACV가 함유된 전분 기반의 MN 패치를 제조하여 ACV의 피내 침투 및 치료 효과를 향상시키고자 하였다. 제조한 MN 패치의 특성을 분석하였고, ACV 방출 특성을 평가하였으며, 수학적 모델을 적용해 방출 동역학 및 확산 메커니즘을 확인하였다. 또한, MN의 약물 방출을 시각화하여 ACV의 피내 침투 효과를 평가하였고, 항바이러스 활성을 통하여 HSV 감염 치료에 대한 응용가능성을 확인하였다.

2.연구 방법

ACV가 함유된 전분 기반 MN 패치는 원심분리 및 casting method로 제조하였다. 전분 및 PVA 용액을 제조하고 mechanical stirrer를 이용해 두 용액을 혼합해 균일한 겔화 용액을 형성시킨 뒤, ACV 용액을 dropwise하였다. MN의 tip은 PDMS mold (너비 400 μm, 높이 600 μm의 피라미드 형태; MN tip array: 7 x 7)에 제조된 겔화 용액을 부어 원심분리를 통해 형성시켰다. 이 후, MN의 지지대를 형성하기 위하여 casting하고 12시간동안 건조한 뒤, PDMS mold와 MN 패치를 분리하였다. 그림 1.에서 전분 기반 MN 패치의 제조과정이 확인된다.

제조한 MN 패치의 가교는 UV lamp로 수행하였으며, UV 조사 시간에 따라 내수성을 평가해 최적의 UV 조사 시간을 설정하였다. 또한, MN의 압축강도는 tensile strength testing machine으로 확인하였고 MN의 형태는 FE-SEM으로 관찰되었으며, ACV의 안정성 및 MN의 작용기 분석은 FT-IR을 이용하였다. ACV 방출 특성은 인공피부 및 돼지피부 테스트로 확인하였으며, ACV 방출 데이터에 수학적 모델을 적용하여 방출 동역학과 확산 메커니즘을 평가하였다. ACV 피내 침투 시각화는 피부 모의체에 RFV가 함유된 MN 패치를 적용하여 평가하였다. MN 패치의 항바이러스 활성은

HSV-1의 TCID50을 조사하였다.

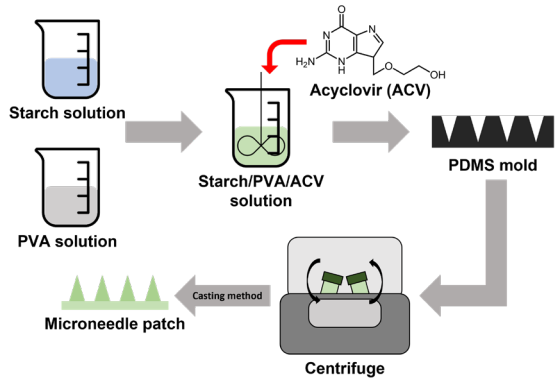


그림 1. ACV 함유 전분 기반 MN 패치의 제조 모식도

3. 연구 결과

제조한 MN 패치의 내수성 결과는 UV 조사시간이 증가되면서 가교가 진행되어 내수성이 향상된 것으로 평가되었다. 또한, 40분이 초과되면 패치에 산화가 일어나 변색이 관찰되었으므로, 최적의 UV 조사시간을 40분으로 설정하였다. MN 패치의 압축강도는 MN의 tip을 500 μm까지 압축하였을 때 니들 당 1.5 N 이상의 강도를 나타내었으며, ACV의 첨가 유, 무에 유의미한 차이는 없었다. 가소제를 첨가한 경우, 압축강도가 향상되었는데, 이는 가소제의 작용기가 분자간 상호작용을 향상시킨 것으로 판단된다.

제조한 MN의 표면과 단면에 대한 FE-SEM 이미지 결과에서는 MN tip은 피라미드 형태로 균일하게 형성된 것이 확인되었다. ACV 및 가소제가 첨가된 경우에도 균일한 형태를 나타내었다. 사람 피부의 각질층은 보통 10-20 μm의 두께이고, MN tip의 높이는 500-750 μm이면 진피층의 통증을 최소화하면서 약물의 피내 전달이 가능하다. 즉, 본 연구에서 제조한 MN tip의 높이는 600 μm 이상이므로 MN 적용 시 각질층을 파괴하고 효과적으로 ACV를 전달할 수 있다고 판단된다.

UV 조사 전과 후의 ACV에 대한 FT-IR 분석 결과는 UV 조사 후에도 ACV의 특징적인 피크에 변화가 없는 것으로 확인되었다. 이러한 결과로 UV 조사로 인해 ACV의 구조적 변형이 유발되지 않음을 확인하였다. 제조한 MN 패치의 FT-IR 분석 결과에서 MN 패치의 구성성분인 전분 및 가소제의 작용기와 관련된 피크가 확인되었다.

제조한 MN 패치의 ACV 방출 특성 및 수학적 모델을 나타낸 결과를 보면 MN 패치와 film 형태의 패치의 ACV 방출을 비교한 결과, film 형태에서 ACV는 90분 동안 약 64%의 ACV가 방출되었으나 MN 형태에서는 약 98%로 2.5-4.3배 증가된 방출율을 나타내었다. 이는 제조한 MN 패치가 더 효과적인 피내 침투가 가능하므로 ACV 방출 효과가 상승된 것을 나타낸다. ACV 방출 데이터에 수학적 모델을 적용하면 ACV 방출 동역학은 Korsmeyer-Peppas model에 적합하였고 Fickian 확산 메커니즘인 것으로 평가되었다.

돼지피부에서 ACV 및 RFV의 방출 거동 및 피내 침투 효과를 확인한 결과, MN 패치에서 ACV 및 RFV는 유사한 경향으로 방출되었으며, MN 패치는 각질층을 효과적으로 관통하여 film 형태보다 높은 방출효과를 나타내었다. 또한, 피부모의체인 돼지피부/agarose block에 대한 ACV의 피내 침투를 시각화한 이미지에서 MN 패치를 적용한 시간이 증가함에 따라 RFV가 방출되어 피부내로 침투되는 것이 확인되며, MN 패치는 피부의 각질층을 관통하여 film 형태보다 깊숙이 침투가 가능하기에 ACV의 방출 효과를 향상시킬 것을 평가되었다.

제조한 패치의 HSV-1에 대한 항바이러스 활성 결과에서는 ACV가 첨가되지 않은 대조군 MN 패치에 비하여 ACV가 함유된 MN 패치는 높은 $TCID_{50}$ 수치를 보여주었고, 가소제에 따라 유의미한 차이는 나타내지 않았다. 따라서, ACV가 함유된 전분 기반 MN 패치는 HSV 감염 치료에 유망할 것으로 평가되었다.

4. Acknowledgements

이 논문은 2023년과 2025년도 정부(교육부, 과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (RS-2023-00240521, RS-2025-16068429).

5. 참고 문헌

[1] Z. Saifi, M. Rizwanullah, S. R. Mir, and S. Amin. “Bilosomes nanocarriers for improved oral bioavailability of acyclovir: A complete characterization through in vitro, ex-vivo and in vivo assessment.” Journal of Drug delivery Science and Technology, Vol 57, p101634, 2020.

[2] W. Y. Jeong, M. Kwon, H. E. Choi, K. S. Kim. “Recent advances in transdermal drug delivery system: a review” Biomaterials Research, Vol 25, No 1, p24, 2021.

[3] Y. Xue, C. Chen, X. Mi, R. Tan, J. Wang, S. Wu, Y. Wang, R. Xiong, M. Chen, W. Q. Tan, and H. Lu. “Transdermal Drug Delivery System: Current Status and Clinical Application of Microneedles” ACS Materials Letters, Vol 6, No. 3, p801-821, 2024.

[4] P. V. F. Lemos, H. R. Marcelino, L. G. Cardoso, C. O. de Souza, and J. I. Druzian. “Starch chemical modifications applied to drug delivery systems: From fundamentals to FDA-approved raw materials.” International journal of Biological Macromolecules, Vol 184, p218-234, 2021.

Poster-094

마이크로패터닝 유도 세포막 융합 기반 확장형 생체모사 전자소자

김재흥[1,2], 이동택[3], 이정훈[4], 윤대성[1,2,*]

고려대학교 바이오의공학과[1]

고려대학교 정밀보건과학융합전공[2]

인천대학교 생명공학부 생명공학전공[3]

KU-KIST 융합대학원[4]

Micropattern guided fusion of cell membranes for scalable biomimetic electronics

Jaeheung Kim[1,2], Dongtak Lee[3], Jeong Hoon Lee[4], Dae Sung Yoon[1,2,*]

School of Biomedical Engineering, Korea University, Seoul, Republic of Korea[1]

Interdisciplinary Program in Precision Public Health, Korea University, Seoul, Republic of Korea[2]

Division of Bioengineering, Incheon National University, Incheon, Republic of Korea[3]

KU-KIST Graduate School of Converging Science and Technology, Korea University, Seoul, Republic of Korea[4]

[*]dsyoon@korea.ac.kr

Abstract

Reconstituting native cell membranes (CMs) on devices enables multifunctional biointerfaces, but stable, spatially confined coatings on noble metals are elusive. We present a wafer-scale, lithography-compatible method that embeds hydrophilic SiO_2 microdomains in a hydrophobic Au matrix to drive vesicle fusion selectively onto SiO_2/Au while excluding adjacent Au. Using erythrocyte- and human lung epithelial–derived membranes, we obtain uniform, area-defined CM layers that retain lateral fluidity and native protein composition. Integrated onto capacitive Au electrodes, ACE2-presenting coatings emulate early SARS-CoV-2 engagement, exhibiting intrinsic antifouling and selective spike S1 recognition. This solvent-free, process-robust strategy provides a scalable route to membrane-integrated biosensing and biomimetic electronics, and is readily extensible to multiplexed architectures on noble-metal substrates.

1. 연구 배경

세포막은 생명체의 핵심 구성 요소로서 세포 내부와 외부 환경 사이에 동적이고 선택적인 경계를 형성한다. 인지질 이중층 사이에 다양한 막단백질이 삽입된 구조로 이루어진 원형질막은 이온 수송, 신호 전달, 면역 인식과 같은 생명 현상에 관여한다. 화학적 조성뿐만 아니라, 나노-규모의 도메인 조직을 이루어 수용체 클러스터링, 지질뗏목(lipid-raft) 형성, 바이러스-숙주 상호작용등의 공간적 구획화가 가능하다는 특징도 가지고 있다.

세포막의 구조적 완전성과 다기능적 특성을 이용하여, 고체 기판 위에 생체모방형 인터페이스를 구축하기 위한 다양한 막코팅 전략이 개발되었다. Supported lipid bilayers (SLB)는 합성 지질 또는 세포 유래 소포로부터 조립될 수 있으며, 막관련 현상을 연구하고 전자소자와 생체모방 인터페이스를 결합하는데 유연한 플랫폼을 제공한다. 특히 세포 유래 SLB는 막관통 단백질, 당화 수용체, 지질 마이크로도메인 등 세포막의 구성과 방향을 보존함으로써, 본래의 세포막이 지니는 배향, 밀도, 다가성을 유지하여 수용체-리간드 인식과 같은 생물학적 현상을 충실히 재현할 수 있다. 경제적인 측면에서도 세포 유래 SLB는 제조합 단백질의 발현, 정제, 재구성 과정을 생략함으로써 비용을 절감하고, 간단한 표면의 기능화가 가능하다. 결과적으로, 세포막 코팅은 살아 있는 세포의 기능적 복잡성을 유지하면서도 장치와의 호환성을 확보할 수 있는 생체모방 인터페이스를 설계하기 위해 필수적이다.

최근 여러 연구에서 세포막의 고유한 특성을 활용한 센서가 보고되었다. 하지만 세포막의 이질적인 구조와 다양한 막단백질의 간섭으로 인해 증착이 균일하지 진행되지 않았고 이는 코팅이 이루어지지 않은 부분과 겹겹히 코팅이 이루어진 부분이 공존하는 문제를 일으킨다. 이전극 위 세포막의 두께를 일관적으로 신뢰성있게 제어하지 못하여 센서의 성능을 일정하게 유지하는 것에 어려움이 있었다. 특히, 높은 전도도와 화학적 안정성으로 바이오센싱에 널리 사용되는 금전극은 금 표면에서 소낭의 파열과 확산에 필요한 에너지 장벽이 커서 불완전하거나 불안정한 지질 이중층이 형성되는 것이 보고되었다. 그 결과, 세포막과 금속 기판 사이의 제한된 적합성은 세포막을 전자소자에 통합하여 생체모방 바이오전자 인터페이스를 구축하는데 있어 여전히 주요한 장애로 남아있다. 따라서, 고성능과 우수한 재현성을 확보하려면 견고한 단일층 막증착 기술이 요구된다.

소수성 금표면에 단일층 세포막을 안정적으로 증착하기 위해서 마이크로패터닝된 SiO_2층을 이용하였다. 공간선택적으로 진행된 막코팅의 형성을 확인하기 위해 적혈구세포막과 A549 세포막을 사용하여 형광현미경, 원자힘현미경, 켈빈프로브힘 현미경으로 검증하였다. 또한 마이크로패터닝된 세포막의 수용체 매개 SARS-CoV-2 virion 인식과 BSA 비특이적 흡착에 대한 항오염 성능을 보존함을 검증하였다. 이러한 특성을 바탕으로, 세포막 코팅을 전기화학센서에 통합해 SARS-CoV-2의 ACE2 매개 초기감염 단계를 모사하였다. 마이크로패터닝된 세포막 인터페이스는 S1 단백질을 특이적으로 인식하였으며, IgG, 포도당, BSA에 대해 항오염성을 보였다.

2.연구 방법

실험에 사용된 마이크로패턴은 표준 반도체 공정을 통해 제작하였다. Electron beam evaporation을 이용하여 4인치 실리콘 웨이퍼에 10 nm Ti/ 100 nm Au를 순차적으로 증착하였다. 양성포토레지스트를 3000 rpm에서 30 초동안 스핀코팅하였다. 크롬포토마스크를 통해 자외선을 노광하여

패턴을 형성한 후, 30 nm 두께의 SiO_2를 Electron beam evaporation를 통해 증착하였다. 남은 포토래지스트는 아세톤에서 30분간 반응 후 30초간 초음파 처리를 통해 제거하였다.

세포막을 추출하기 위해서, 세포를 원심분리 (800xg, 5분)하여 혈장과 버피코트를 제거한 뒤, 0.25x PBS에 담가 저장성 용혈을 유도하였다. 다시 20,000xg, 30분간 원심분리하고 PBS로 세척하여 세포막을 회수하였다.

막증착을 시각화하기 위해서 소포막을 적색 형광체인 18:1 1,2-dioleoyl-sn-glycero-3-phosphoethanolamine-N-(lissamine rhodamine B sulfonyl) (Rhod-PE)로 형광 표지하였다. 클로로포름에 용해된 1.5 μM Rhod-PE를 질소로 건조한 뒤 밤새 진공 데시케이터에서 건조하였다. 건조된 Rhod 필름은 Tris 완충액의 세포막 용액 0.1% (v/v)로 재수화하고, 30초간 볼텍싱한 뒤 3분간 초음파처리하여 세포막소포를 생성하였다.

마이크로패턴 코팅을 위해 준비된 소포 현탁액을 기판 표면에 drop casting하고 37 °C에서 10분간 반응시켰다. 이후 비결합 소포를 제거하기 위해 초순수로 세척하고, 바로 후석 분석에 사용하였다.

3. 연구 결과

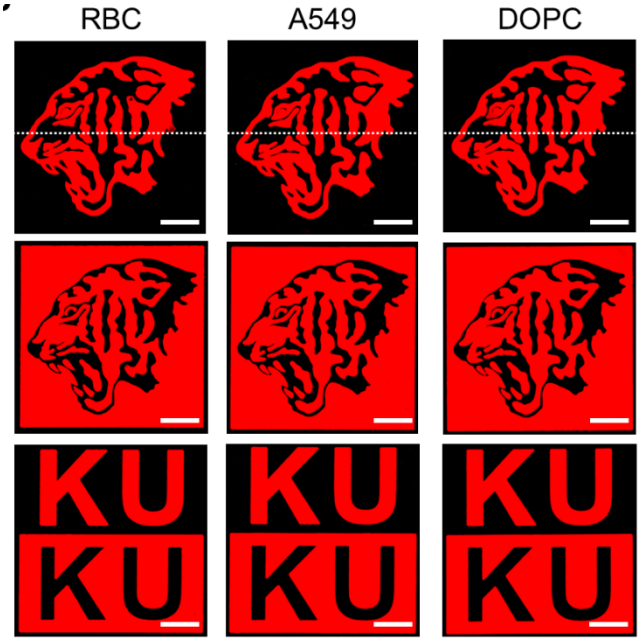


그림 3.1 다양한 인지질 이중층이 코팅된 마이크로패턴

공간적으로 제어된 생체모사막의 증착을 확인하기 위해서, 정제된 적혈구막으로부터 초음파 처리를 통해 소포를 제조하였다. 후에 빨간 형광으로 표지한 뒤, 마이크로패턴 기판위에 도포하였다. 그림 3.1에서와 같이 강하고 균일한 형광이 마이크로패턴 위에 국한되어 나타났으며, 지정된 영역에서 일관되고 연속적인 막 형성이 이루어졌음을 확인할 수 있다. 또한 적혈구(RBC), A549, DOPC 등의 다양한 세포, 합성인지질 유래 소포에서도 동일한 형상의 형광을 관찰하여 선택적 막코팅 전략의 범용성을 검증하였다.

마이크로패턴 세포막코팅이 본래의 생물학적 기능을 유지하는지 평가하기 위해서, 세포막의 두가지 핵심 특성, i) 수용체-항원 인식과 ii) 항오염 기능을 확인하였다. 폐상피세포인 A549의 세포막과 SARS-CoV-2의 결합을 이용하여, Rhod-PE로 표지한 A549 소포를 기판에 증착한 뒤, 불활성화된 SARS-CoV-2 비리온과 순차적으로 반응시키고, 이어서 바이러스와 반응하는 2차항체에 Alexa 488로 표지하여 그 형상을 관찰하였다.

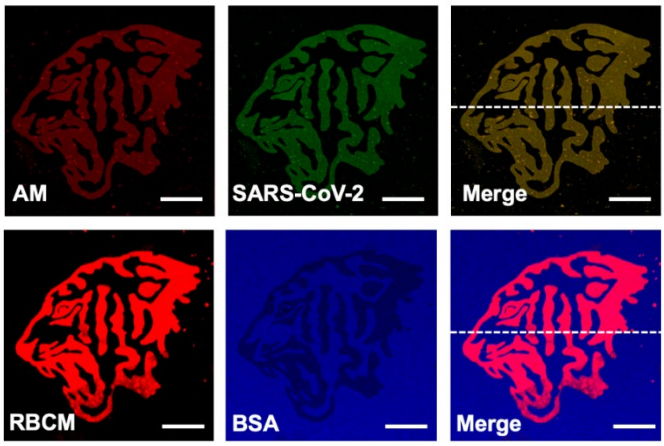


그림 3.2 코팅된 마이크로패턴의 생물학적 기능 검증

그림 3.2에서와 같이 ACE2 수용체가 발현해있는 세포막 영역에서만 녹색 형광이 관찰되었고, 주변 금영역에서는 신호가 거의 없었다. 둘 사이의 강력한 공간적 공재는 코팅된 세포막의 특이적 결합능력을 보여준다.

또한 코팅된 세포막의 항오염 성능을 평가하기 위해 RBC유래 소포와 소혈청알부민(BSA)을 사용하였다. 빨간색으로 표지한 RBC를 기판에 코팅한 뒤, BSA에 노출시키고, 이어서 Alexa 405결함 anti-BSA 항체로 반응시켰다. 적색의 세포막 신호는 마이크로패턴에 국한되어 나타난 반면, 흡착된 BSA에서 기인한 청색 형광은 주변의 금영역에서만 관찰되었다. 둘의 배타적인 공간 분포는 코팅 세포막의 항오염 능력을 보여준다.

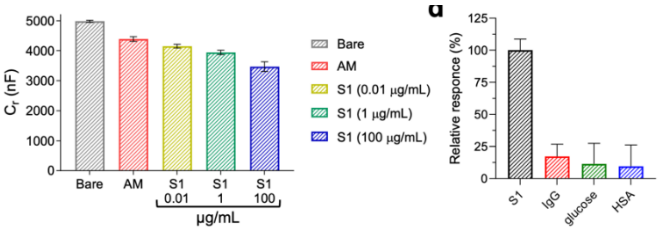


그림 3.3 전기화학 센서로의 적용

마이크로패턴 세포막을 확장하기 위해, A549세포막을 30nm SiO_2가 코팅된 작동전극에 통합하였다. 한번의 기능화 단계를 통해서 항오염 특성과 수용체 매개 분자인식 특성을 동시에 활용하여 항원검출을 가능하게 한다. 각각의 단계의 이중층 커패시턴스(C_{dl})는, SiO_2만 증착된 전극에서 4983.76 ± 31.60 μF였고, AM 코팅 후 4391.23 ± 76.90 μF로 감소하였다. 추가적인 S1 코팅시 100 μg/mL에서 4153.76 ± 61.61 μF, 1 μg/mL에서 3945.01 ± 67.96 μF, 0.01 μg/mL에서 3470.81 ± 163.03 μF로 농도 의존적으로 감소하였다. 센서의 선택성을 확인하기 위해 대표적인 혈청간섭물질인 γ-글로불린(IgG), 포도당, 사람 혈청알부민(HSA)—에 대해 각각 검증하였다. 모두 S1 단백질 대비 17.25 ± 9.46 %, 11.37 ± 16.11 %, 9.53 ± 16.57 %로 비특이적 간섭이 최소화되었음을 확인하였다.

4. Acknowledgements

이 연구는 BK21 FOUR Institute of Precision Public Health와 National Research Foundation of Korea (NRF) 과제의 지원을 받아 수행하였음. (RS-2025-16069542, RS-2025-02263504, RS-2024-00423580, RS-2024-00400563)

5.참고 문헌

Poster-095

AI 기반 re-screening을 통한 신규 MEK5 억제 후보물질의 효능 평가와 이를 활용한 지질 나노입자 개발

황윤호[1], 루마나 페르두시[1], 조혜연[1], 최선민[1] 기재홍[1*]

연세대학교 의공학과[1]

Efficacy evaluation of MEK5 inhibitor identified by AI re-screening and its application in lipid nanoparticle development

Yoonho Hwang[1], Rumana Ferdushi[1], Hyeyoun Cho[1], Seonmin Choi[1], Jaehong Key[1*]

[1]Department of Biomedical Engineering, Yonsei University, Korea

[*]jkey@yonsei.ac.kr

Abstract

The MEK5/ERK5 pathway has emerged as a promising therapeutic target in cancer, but the lack of selective inhibitors and limitations of conventional drug discovery highlight the need for AI-based approaches. In our previous work, the AI-derived candidate MEK5i-Iodo showed synergistic effects with curcumin but limited cytotoxicity, prompting a re-screening strategy. Here, nine new candidates (MEK5i_C1–C9) were evaluated in HCT-116 colorectal cancer cells, and four (C2, C4, C7, and C9) exhibited superior activity compared to MEK5i-Iodo. Among them, MEK5i_C9 showed the most potent effect, reducing cell viability below 40% at 20 μM ($p < 0.001$), and was selected as the final lead compound. To enhance its delivery, MEK5i_C9 was encapsulated into lipid nanoparticles (iMEK5_C9@LNP) using an emulsion-based self-assembly method, resulting in an average size of 290.2 ± 7.15 nm and an encapsulation efficiency of 30.08 ± 2.29%. These results demonstrate that MEK5i_C9 is a promising AI-derived inhibitor with significant in-vitro efficacy and potential for nanoparticle-mediated colorectal cancer therapy.

1. 연구 배경

MAPK(mitogen-activated protein kinase)는 세포의 증식, 분화 및 암 발병과 관련된 중요한 신호 전달 경로이며, 특히 MEK5는 최근 암 치료의 신규 표적으로 주목받고 있다.

그러나 MEK5 억제제 발굴을 기존의 신약개발 개발 과정만으로 진행하기에는 시간적·경제적 한계가 존재하며, 이를 극복할 수 있는 방안으로 AI 기반의 virtual screening이 효과적인 대안으로 제시되고 있다[1]. 하지만 AI-screening을 통해 도출된 초기 후보물질(hit)의 구조적 한계와 실험적 검증 부족으로 실제적인 적용 가능성은 여전히 제한적이다.

이전 연구에서 AI-screening을 통해 도출된 MEK5 억제제 초기 후보물질인 MEK5i-Iodo의 효능과, curcumin과의 병용처리에서 시너지 효과를 확인하였으나, 유의미한 세포독성을 확인하지 못하였다. 이를 극복하기 위해 본 연구에서는 이전 실험결과를 반영한 AI 기반 재선별(re-screening)을 통해 도출한 9종 후보물질의 세포독성 평가를 진행하였으며, 세포독성 분석을 통한 효능 검증을 거쳐 최종 약물 후보물질을 선정하였다. 이어 전달 효능 강화를 위해 지질 나노입자(LNP)에의 초기 적재 가능성을 확인하였다.

2.연구 방법

(1) 세포독성 효능평가

Re-screening을 통해 도출한 MEK5 억제 후보물질 9종(MEK5i_C1~C9)에 대한 효능을 평가하기 위해 세포독성 평가를 진행했다. HCT-116 세포를 96-well plate에 well당 100 μL의 배지를 이용하여 5×10^3 개의 세포를 분주하였다. 이후 각 후보물질을 0, 1, 10, 20 μM 처리한 뒤 24시간 뒤에 cell counting kit(CCK)를 통해 세포 생존율을 측정하였다.

(2) MEK5i_C9 적재 지질 나노입자 합성 및 특성 분석

MEK5i_C9 적재 지질 나노입자(iMEK5_C9@LNP)를 합성하기 위해 유화 작용 기반 자가조립 반응(emulsion based self-assembled reaction)을 사용하였다. PBS에 9:1(soybean lecithin : cholesterol) 비율의 지질 수용액 20mg를 dropwise 한 후, 5 mg/ml 농도의 MEK5i_C9-DMSO 혼합액을 dropwise하였다. 24시간 동안 교반 시켰다. 이후, 원심분리기를 통해 정제하여 pallet 형태로 농축 보관하였다. 입자의 크기는 Zetasizer(Nano-zs90)를 통해 측정하였다. 입자에 적재된 약물 양을 분석하기 위해, MEK5i_C9의 특정 파장인 310nm에서 흡광도 분석을 진행했고, 적재된 약물 농도를 역산하였다.

3. 연구 결과

본 연구에 사용된 re-screening을 통해 도출된 MEK5 억제 후보물질인 9종은 한국과학기술원(KIST)강릉분원 박근완 박사 및 김도현 박사과정 연구원의 ECBS-screening을 통해 도출 및 제공된 화합물이다[2].

Candidate ID	Activity Difference model score	Diff-Dock score
iMEK5_C1	0.73591	-0.69
iMEK5_C2	0.69579	-0.36
iMEK5_C3	0.72107	-0.74
iMEK5_C4	0.68396	-0.16
iMEK5_C5	0.70052	-0.19
iMEK5_C6	0.47243	0.78
iMEK5_C7	0.46486	0.76
iMEK5_C8	0.71947	-0.09
iMEK5_C9	0.68528	0.33

그림 1 Re-screening을 통해 도출한 후보물질 9종의 ECBS 점수

(1) re-screening 9종 화합물 세포독성 효능평가

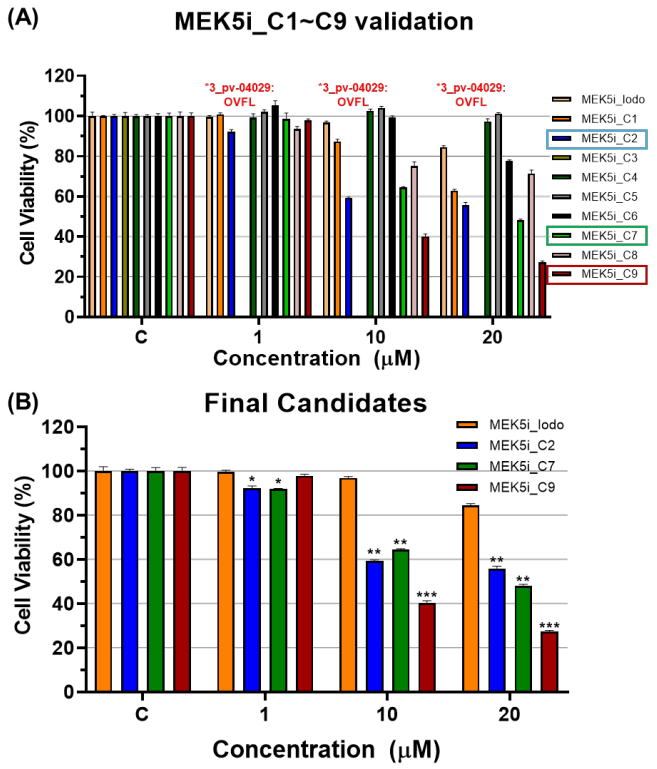


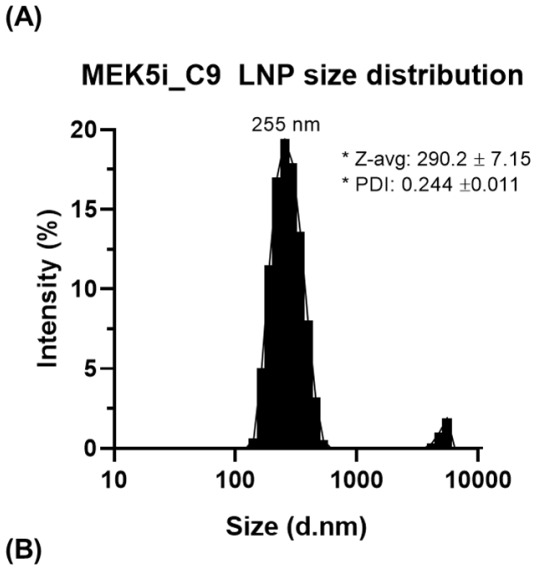
그림 2. Re-screening 추가 9종 세포독성 결과 (A) 추가 9종 화합물의 농도별 세포독성 효능 평가 (B) 선별 4종 화합물의 농도별 세포독성 재현성 평가

Re-screening을 통해 확보한 추가 9종 후보물질(MEK5i_C1~C9)에 대한 세포독성 평가 결과, 다수의 후보군에서는 HCT-116 세포에서 초기 MEK5억제 화합물인 MEK5i-Iodo에 대비 뚜렷한 효능이 확인되지 않았다. 그러나 C2, C4, C7, C9의 경우 MEK5i-Iodo 대비 농도 의존적으로 세포 생존율을 감소시켰으며, 이에 따라 1차적으로 4종의 후보물질을 선별하였다[그림 3. (A)].

선별 4종에 대한 재현성 검증을 통해, C2는 1 μM의 농도에서 MEK5i-Iodo 대비 $p<0.05$의 유효성을 보였으며, 10, 20 μM에서 $p<0.01$의 유의미한 효과를 보였다. C7의 경우 C2와 동일하게 1 μM에서 $p<0.05$, 10-20 μM에서 $p<0.01$의 MEK5i-Iodo대비 유의미한 효능 차이를 보였다. 마지막 C9의 경우 1 μM에서는 뚜렷한 활성을 보이지 못했으나, 10 20 μM에서 세포 생존율이 40% 이하로 억제되는 후보군중 가장 강력한 세포독성($p<0.001$)을 보였다[그림3. (B)]. 따라서 MEK5i_C9을 본 연구의 최종 약물 후보물질로 확정하였다.

(2) MEK5i_C9@LNP 개발 및 특성 분석

합성한 MEK5i_C9@LNP는 3회 반복측정에서 intensity peak 255 nm로 측정되었으며, 입자 평균크기는 290.2±7.15 nm로 확인되었다[그림3. (A)]. 흡광도를 이용한 약물 적재효율 분석을 통해서, 투여 대비 30.08±2.29 %의 MEK5i_C9이 입자에 적재된 것을 확인할 수 있었다[그림3. (B)]. 이러한 나노입자의 특성에 의해, EPR effect를 통한 약물의 대장암 부위로의 효과적인 전달 가능성을 보였다.



(B)

Loading drug (μg)	Encapsulation Efficiency (%)
150.86 ± 11.45	30.08 ± 2.29

그림 3. MEK5i_C9 적재 LNP 특성 분석. (A) 입자 크기 분포도, (B) 약물 적재 효율

본 연구를 통해 AI-screening으로부터 도출된 MEK5 억제 후보물질의 in-vitro상의 세포사멸 효과를 확인할 수 있었으며, 가장 효능이 좋은 최종 후보물질을 적재한 지질 나노입자를 개발하여 약물전달체에 적용할 수 있었다 . 추후 본 나노입자를 활용하여 AI 신약 예측 플랫폼과 약물전달체 플랫폼의 융합을 통한 효과적인 암 치료제 개발을 지속적으로 연구할 계획이다.

4. Acknowledgements

본 연구는 2024년도 정부(교육부) 재원의 한국연구재단(RS-2024-00460405) 지원과 한국과학기술원(KIST) 강릉분원 박근완 박사 연구팀의 2024년 정부(과학기술정보통신부) 재원의 한국연구재단(RS-2024-00440975) 지원을 받아 수행됨.

5.참고 문헌

[1] Yang Y, et al. Artificial intelligence in drug discovery: Recent advances and future perspectives. *Expert Opin Drug Discov*. 2020;15(8):897-906

[2] Durai, P., Lee, S.J., Lee, J.W. et al. Iterative machine learning-based chemical similarity search to identify novel chemical inhibitors. *J Cheminform*. 2023;15(86)

.

Poster-096

실크 단백질 복합체를 활용한 원반형 미세입자의 제작 및 폐 표적 항암 효과 평가

조혜연[1], 황윤호[1], Rumana Ferdushi[1], 최선민[1], 기재홍[1*]

연세대학교 의공학과[1]

Fabrication of Silk Protein Composite Discoidal Microparticles and Evaluation of Their Lung-Targeted Anticancer Efficacy

Hyeyoun Cho[1], Yoonho Hwang[1], Rumana Ferdushi[1], Seonmin Choi[1], Jaehong Key[1*]

[1]Department of Biomedical Engineering, Yonsei University, Korea

[*]jkey@yonsei.ac.kr

Abstract

In this study, 3 μm-sized discoidal drug delivery particles were fabricated using a silk sericin (SS) and silk fibroin (SF) composite protein (SSSF). The particles exhibited a uniform diameter of approximately 2.8 μm and a zeta potential of –31 mV, indicating good colloidal stability. They showed rapid degradation under acidic conditions (pH 5.4), confirming responsiveness to the tumor microenvironment. Drug release studies revealed cumulative release exceeding 90% within 72 hours, and drug loading efficiency reached up to 30%. Cytotoxicity assays using A549 lung cancer cells demonstrated significant reduction in cell viability, supporting the synergistic anticancer effects of SS and SF. In vivo biodistribution and therapeutic efficacy studies further confirmed preferential lung accumulation, suppression of metastatic lung nodules, improved survival rates, and negligible systemic toxicity. Collectively, these findings highlight the clinical potential of silk protein-based discoidal composite particles as a promising platform for lung-targeted chemotherapy.

1. 연구 배경

폐암은 전 세계적으로 암 관련 사망 원인의 최상위를 차지하며, 특히 비소세포폐암(non-small cell lung cancer, NSCLC)이 전체의 약 85%를 차지한다. 그러나 현재 항암화학요법을 포함한 기존 치료법만으로는 5년 생존율이 20% 이하에 머무르고 있으며, 치료 과정에서 발생하는 전신 독성으로 환자의 삶의 질이 심각하게 저하된다. 대표적인 항암제인 도세탁셀(docetaxel)은 세포분열 억제를 통해 강력한 항암 효과를 나타내지만, 조혈 억제, 간독성, 위장관 독성, 면역 억제 등 부작용으로 인해 임상 적용에 제약이 있다. 따라서 정상세포 손상을 최소화하면서 종양 조직에 선택적으로 약물을 전달할 수 있는 새로운 접근법이 요구된다.

최근 약물전달시스템(Drug Delivery System, DDS)은 이러한 한계를 극복하기 위해 개발되고 있으며, 특히 나노입자 기반 DDS는 약물의 혈중 반감기 연장, 조직 특이적 축적, 방출 제어 등에서 진보를 보였다. 그러나 대부분의 구형 입자는 간과 비장에서 빠르게 제거되어 폐에 선택적으로 전달되기 어렵다는 한계가 있다. 이에 반해, 직경 약 3 μm의 원반형 입자는 혈류에서 비교적 안정적으로 순환하면서 폐 모세혈관 직경과 유사해 폐 조직에 기계적으로 포획될 수 있는 장점이 보고되었다.

실크 단백질은 이미 봉합사, 인공혈관 등 의료 소재로 수십 년간 사용되어 안전성이 검증된 천연 고분자다. 실크 세리신(silk sericin, SS)은 친수성과 항산화·항암 활성, 세포사멸 유도 효과를 가지며, 실크 피브로인(silk fibroin, SF)은 β-sheet 구조를 통한 우수한 기계적 강도와 안정성을 제공한다. 두 단백질을 복합화하면 생리활성과 구조적 안정성을 동시에 확보할 수 있으며, 약물 적재 효율과 종양 미세환경에서의 방출 특성까지 향상시킬 수 있다. 이러한 점에서 SS/SF 복합체 원반형 입자는 폐 표적 항암 치료를 위한 최적의 플랫폼이 될 수 있다.

2.연구 방법

본 연구에서는 인간 폐선암 세포주(A549)와 마우스 편평상피암 세포주(SCC7)를 활용하여 폐 전이 마우스 모델을 구축하였다. 세포를 BALB/c nude mouse의 미정맥에 접종하여 7일간 전이를 유도한 후, saline, free docetaxel, DTX-SF-DSPs, DTX-SS/SF-DSPs 네 가지 군으로 나누어 치료를 진행하였다. 각 군은 3일 간격으로 반복 정맥 주사를 시행하였다(그림 1A).

치료 종료 후 폐 조직을 적출하여 육안으로 전이 결절을 관찰하고, 평균 결절 수를 정량 분석하였다(그림 1B, 1C). 생존율은 Kaplan–Meier 방법으로 분석하였으며(그림 1D), 체중 변화를 기록하여 전신 독성을 평가하였다(그림 1E).

추가적으로, in vitro 실험에서는 A549와 SCC7 세포를 대상으로 EZ-Cytox assay를 24, 48, 72시간 동안 수행하여 농도·시간 의존적 세포사멸 효과를 분석하였다. 또한 ROS 생성 분석 및 apoptosis 관련 단백질 발현(p53, Bax, Bcl-2, caspase-3)을 확인하여 SS의 고유한 항암 효과가 복합체 전달체의 효능에 기여함을 검증하였다.

약물 방출 시험은 pH 7.4 PBS와 pH 5.4 acetate buffer에서 37℃ 조건으로 72시간 동안 진행하였다. 초기 burst release 이후 점진적인 지속 방출이 확인되었으며, 종양 미세환경(pH 5.4)에서 방출 속도가 가속화되었다. 이를 통해 SSSF 입자가 pH 의존적으로 약물을 방출함을 확인하였다.

또한 in vivo biodistribution 평가에서는 형광 이미징을 통해 폐, 간, 신장, 비장에 대한 분포를 비교하였다. 그 결과, DTX-SS/SF-DSPs는 폐 조직에 선택적으로 축적되었으며 간·비장·신장 등 다른 장기에서는 상대적으로 낮은 신호가 관찰되었다.

3. 연구 결과

실크 단백질 복합체 기반 원반형 미세입자는 평균 직경 약 3 μm의 균일한 크기와 안정적인 제타 전위를 가지며, 산성 환경에서 빠른 분해와 약물 방출이 촉진되는 특성을 보였다. 이러한 특성을 바탕으로 in vivo 폐 전이 모델을 구축하여 항암 효능을 평가하였다(그림 1).

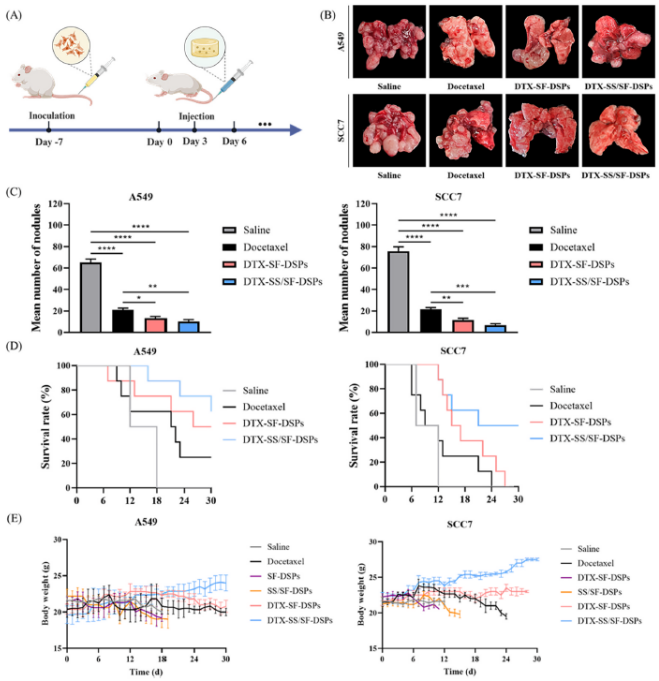


그림 1. In vivo 폐 전이 억제 및 항암 효과 평가. (A) 폐암 전이 마우스 모델에서의 세포 접종 및 치료 스케줄. (B) 치료 후 폐 조직의 육안적 관찰. Saline군에서는 다수의 전이 결절이 관찰되었으나, DTX-SS/SF-DSPs 투여군에서는 결절 수가 현저히 감소함. (C) 평균 종양 결절 수의 정량 분석. DTX-SS/SF-DSPs 투여군에서 가장 강력한 억제 효과가 확인됨. (D) Kaplan–Meier 생존율 곡선. DTX-SS/SF-DSPs 투여군은 30일까지 50% 이상의 생존율을 유지. (E) 체중 변화 추적. Free docetaxel군에서 체중 감소가 나타났으나, DTX-SS/SF-DSPs 투여군은 안정적 체중 유지 또는 증가 경향을 보임.

먼저, 치료 스케줄은 폐암 세포(A549, SCC7) 접종 후 7일째부터 3일 간격으로 정맥 투여를 실시하는 방식으로 설계되었다(그림 1A). 폐 조직의 육안 관찰 결과, saline 투여군에서는 광범위한 전이 결절이 확인되었으나, free docetaxel 및 DTX-SF-DSPs 투여군에서는 부분적인 억제 효과가 나타났다. 반면 DTX-SS/SF-DSPs 투여군에서는 결절 수가 현저히 줄어든 것이 확인되었다(그림 1B).

정량 분석 결과, saline군에서 가장 많은 결절이 관찰되었으며, free docetaxel군과 DTX-SF-DSPs군은 유의한 감소를 보였다. 특히 DTX-SS/SF-DSPs군은 두 군보다도 낮은 결절 수를 기록하여 가장 강력한 종양 억제 효과를 나타냈다(그림 1C).

생존율 분석에서도 뚜렷한 차이가 나타났다. saline군은 평균 12일 내외에서 대부분 사망하였고, free docetaxel군은 24일 전후에서 사망률이 급격히 증가하였다. 반면 DTX-SF-DSPs군은 생존 기간이 일부 연장되었으며, DTX-SS/SF-DSPs군은 30일까지도 약 50% 이상의 개체가 생존하여 가장 우수한 효과를 보였다(그림 1D).

또한 체중 변화를 추적한 결과, saline군은 전이 진행과 함께 체중 감소가 나타났고, free docetaxel군도 치료 기간 동안 점차 체중이 줄어드는 경향을 보였다. 그러나 DTX-SF-DSPs군은 체중이 안정적으로 유지되었으며, DTX-SS/SF-DSPs군은 오히려 체중이 증가하는 경향을 보여 전신 독성이 최소화되었음을 시사하였다(그림 1E).

종합적으로, DTX-SS/SF-DSPs는 기존 항암제 및 단일 단백질 기반 입자보다 폐 전이 억제, 생존율 향상, 전신 독성 최소화 측면에서 현저히 우수한 성과를 보였으며, 폐 표적 항암 치료제로서의 높은 가능성을 입증하였다.

4. Acknowledgements

본 연구성과물은 2024년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(RS-2024-00460405).

5.참고 문헌

[1] Giaquinto, A.N., et al., Breast Cancer Statistics, 2022. CA Cancer J Clin, 2022.

[2] Park, J.Y., et al., Biodegradable micro-sized discoidal polymeric particles for lung-targeted delivery system. Biomaterials, 2019. 218: p. 119331.

[3] Al Saqr, A., et al., Enhanced Cytotoxic Activity of Docetaxel-Loaded Silk Fibroin Nanoparticles against Breast Cancer Cells. Polymers (Basel), 2021. 13(9): p. 1416.

[4] Banagozar Mohammadi, A., et al., Identification and applications of neuroactive silk proteins: a narrative review. J Appl Biomed, 2019. 17(3): p. 147-156.

Poster-097

Transparent, metal-free PEDOT: PSS neural interfaces for simultaneous recording of low-noise electrophysiology and artifact-free two-photon imaging

Jeong Young Lim[1], Yeonjin Jang[1], Sinwoo Park[2], Eunsung Kim[3], Hayoung Jung[4], Young Uk Cho[1*]
Department of Biomedical & Robotics Engineering, Incheon National University, Yeonsu-gu, Incheon, 22012, Republic of Korea[1]
Department of Electrical Engineering, Incheon National University, Yeonsu-gu, Incheon, 22012, Republic of Korea[2]
Department of Materials Science and Engineering, Incheon National University, Yeonsu-gu, Incheon, 22012, Republic of Korea[3]
Department of Mechanical Engineering, Incheon National University, Yeonsu-gu, Incheon, 22012, Republic of Korea[4]
[*]yucho@inu.ac.kr

Abstract

This study introduces a fully transparent neural electrode array based on poly(3,4-ethylenedioxythiophene) polystyrene sulfonate (PEDOT:PSS), where both the electrodes and interconnect lines are transparent. Unlike traditional devices that either create imaging artifacts with metal or rely on opaque wiring, our design is completely clear, enabling seamless integration of electrophysiology and two-photon imaging. Through a specialized chemical treatment using formamide, phosphoric acid, and ethylene glycol, we dramatically improved the electrode's performance to achieve a low impedance of 45.8 kΩ (at 1 kHz). This allowed for the simultaneous, high-quality recording of neural signals and artifact-free deep-tissue imaging in vivo. Biocompatibility assessments also confirmed the material is safe for biological use, showing minimal immune response. This work presents a significant advancement in transparent neural interface technology, facilitating integrated optical and electrophysiological approaches in neuroscience.

1. 연구 배경

뇌의 복잡한 신경 회로를 이해하기 위해 특정 뉴런의 전기적 활동을 직접 측정하는 신경 임플란트 기술은 신경과학 연구의 핵심 도구이다. 이 기술은 뉴런의 신호의 기록 및 자극을 가능하게 하지만, 뇌 기능에 대한 온전한 이해를 위해서는 신경망의 구조와 활동을 시각적으로 보여주는 의료 영상 기술과의 융합이 필요하다. 특히, 살아있는 뇌 심부 조직을 고해상도로 관찰할 수 있는 이광자 현미경과 신경 임플란트를 결합하면, 특정 뉴런의 형태를 직접 보면서 그 뉴런의 전기 신호를 실시간으로 포착하는 분석이 가능하다.

하지만 이러한 결합은 기존 신경 임플란트의 재료적 한계로 실현에 어려움이 있다. 전통적인 신경 임플란트는 주로 백금이나 이리듐 같은 불투명한 금속 전극에 의존했다. 이 금속 전극들은 영상 기술과 함께 사용할 때 두 가지 치명적인 문제를 일으킨다. 첫째, 금속은 빛을 투과시키지 못해 현미경의 시야를 물리적으로 가려 관찰을 방해한다. 둘째, 더 심각한 문제로, 현미경의 레이저 빛이 금속에 닿으면 광전 효과 아티팩트(photoelectric artifact)라는 전기적 잡음을 생성한다. 이 노이즈는 측정하려는 미세한 신경 신호를 오염시켜 데이터의 신뢰도를 심각하게 훼손한다.

이러한 문제들을 해결하고 전기적 기록과 광학적 관찰을 동시에 완벽하게 수행하기 위해 광학적으로 투명한 신경 임플란트가 등장했다. 투명 소자는 영상 촬영 기능과 전기생리학적 기록 기능의 통합을 가능하게 했다. 이러한 소자는 동일한 뉴런 집단으로부터 광학적 신호와 전기적 신호를 높은 공간 및 시간 해상도로 동시에 얻을 수 있는 가능성을 제공한다. 이전의 여러 연구에서도 투명 전극을 사용하여 광학 영상과 전기생리학을 결합하는 잠재력을 입증했다. 그러나 그래핀, 탄소 나노튜브 등을 활용한 기존 연구들에서는, 기록 부위를 제외한 연결 배선이 일반적으로 불투명하고 전도성이 높은 물질로 제작되는 한계가 있었다. 이는 광학적 투명도와 전기화학적 임피던스 사이에 존재하는 본질적인 상충 관계 때문이다. 결과적으로, 이처럼 완전히 투명하지 않은 전극들은 뇌의 이광자 현미경 촬영 과정에서 주변 신경망의 시야를 가려 영상의 선명도를 저해하는 문제를 야기한다. 이러한 문제를 해결하기 위한 다른 시도로, 기존의 완전 투명 전극 연구들은 상대적으로 높은 임피던스를 낮추기 위해 200μm를 초과하는 큰 크기의 전극을 사용했다. 하지만 큰 전극은 여러 뉴런의 신호를 동시에 포착하게 되어 개별 뉴런의 활동 전위를 분리하기 어렵게 만들고, 이는 결국 시공간 해상도를 감소시키는 결과를 만들었다. 궁극적으로, 광학 기술과 전기생리학을 통합하는 투명 신경 임플란트는, 기록 부위와 모든 연결 배선이 완전히 투명하면서도 본질적으로 우수한 전기화학적 임피던스 특성을 통해 고품질의 신경 신호 기록을 보장해야 한다.

이에 본 연구에서는 이광자 영상 촬영과 고충실도(high-fidelity) 전기생리학 기록을 위한 완전 투명 초저 임피던스 신경 임플란트 전극 어레이를 소개한다. 본 연구에서 개발한 30채널 전극 어레이 소자는 연결 배선을 포함한 모든 구조가 광학적으로 투명하다. 이 특징으로 인해, 조밀하게 설계된 전도성 배선에 의해 시야가 가려지는 일 없이 형광 염색된 조직 전체를 온전히 관찰할 수 있다. 본 연구에서는 소자 전체를 구성하며 포토리소그래피 공법으로 패터닝된 PEDOT:PSS의 전기화학적 특성을 향상시키는 핵심적인 방법으로 포름아마이드, 인산, 에틸렌 글리콜을 이용한 3중 처리 방법을 개발했다.

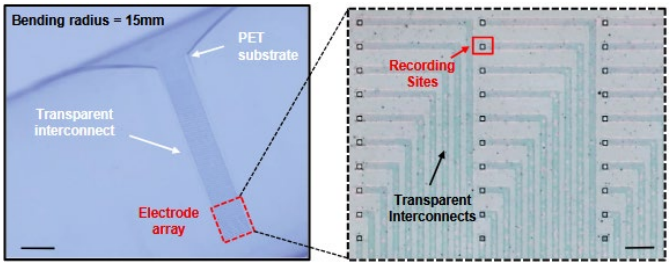


그림 1. 좌: 30개의 기록 채널 및 연결 배선 전체가 투명한 FPE-PEDOT 소자의 모습, 우: 전극 배열 부분의 확대 이미지

2.연구 방법

본 연구의 투명 신경 전극은 전도성 고분자인 PEDOT:PSS를 기반으로 제작했다. 순수 PEDOT:PSS는 전기 전도성이 비교적 낮아 미세한 신경 신호를 측정하기에는 한계가 있다. 이러한 문제를 해결하고 전극의 전기화학적 성능을 극대화하기 위해, 포름아마이드(Formamide), 인산(Phosphoric acid), 에틸렌 글리콜(Ethylene glycol)을 이용한 순차적 3중 처리, FPE 처리(FPE treatment) 공법을 적용했다

개발된 전극이 신경세포에 미치는 독성과 면역 반응을 확인하기 위해 생체 외(in vitro) 세포 생존율 테스트와 생체 내(in vivo) 염증 반응 분석을 수행했다.

제작된 전극을 살아있는 쥐의 대뇌 피질 표면에 이식하여, 국소장 전위(LFP) 와 개별 뉴런의 활동을 나타내는 단일 스파이크 활동(Single-spike activity)을 기록하였다. 또한 이광자 현미경(Two-photon imaging)을 이용한 뇌 심부 영상 촬영을 진행했다.

3. 연구 결과

FPE 처리된 PEDOT:PSS(FPE-PEDOT) 전극은 반경 15mm의 플라스틱 막대에 감쌀 수 있을 정도로 유연하며, PEDOT:PSS 단일 층으로만 구성되어 있다. 이 전극은 30개의 기록 채널과 연결 배선 전체에 걸쳐 높은 투명도를 보였다. 특히 개별 뉴런 수준의 미세한 활동 전위(EAP) 측정이 가능하도록 기록 채널을 20x20 μm²의 작은 크기로 설계했음에도 불구하고, 기존에 보고된 다른 투명 전극들과 비교했을 때 가장 낮은 전기화학적 임피던스(1kHz 기준) 값을 나타냈다.

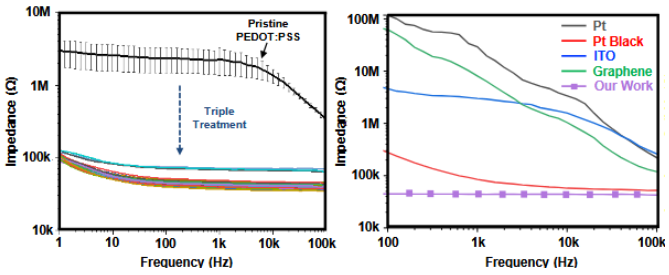


그림 2. 좌: 처리 전의 순수 PEDOT:PSS 전극과 FPE 처리를 거친 PEDOT:PSS 전극 각각 30개 채널의 주파수에 따른 전기화학적 임피던스, 우: 다양한 주파수 대역에서 FPE-PEDOT 전극의 평균 임피던스를 다른 대조군 전극들과 비교

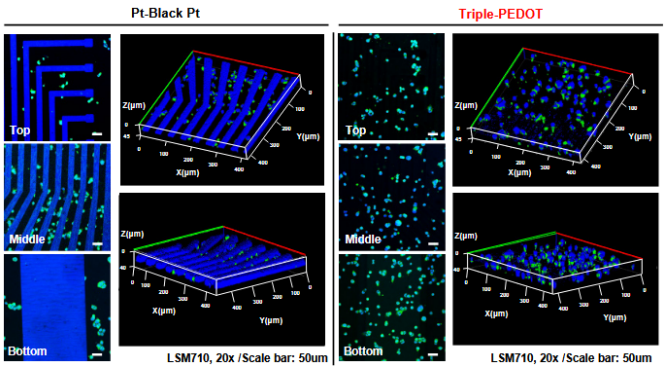


그림 3. 백금(Platinum)과 FPE-PEDOT의 영상 품질 비교

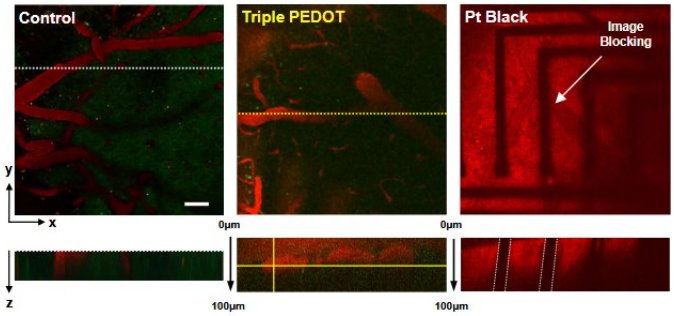


그림 4. FPE-PEDOT를 이식한 경우와 그렇지 않은 경우의 2광자 이미지

고해상도 X선 회절(HR-XRD) 분석 결과, FPE 처리를 거친 필름에서 가장 높은 강도가 관찰되었으며, 이는 화학적 처리를 통해 전도성을 띠는 PEDOT 입자(grain)의 수가 가장 많이 형성되었음을 시사한다.

세포 사멸이나 염증 반응을 유발하지 않는 생체 적합성을 확인한 후, 공초점 현미경을 이용한 생체 외(in vitro) 투명도 평가를 진행했다. FPE-PEDOT 전극은 물질 자체에서 빛이 나오는 자가형광(autofluorescence)을 최소화하여, 전극의 간섭 없이 세포의 크기와 특정 물질의 발현을 선명하게 관찰할 수 있었다. 이는 기존 전극 재료에서 발생하던 문제를 해결한 고품질 공초점 영상 촬영을 가능하게 했다.

FPE 처리를 통해 전도성이 향상된 전극의 실제 성능을 평가하기 위해 생체 내(in vivo) 전기생리학적 신호를 기록했다. 고역 통과 필터링된 신호를 비교한 결과, FPE-PEDOT 전극은 6.6-6.8 μV라는 매우 낮은 수준의 RMS 노이즈를 보였으며, 이를 통해 약물(pilocarpine) 주입으로 유도된 스파이크 활동을 명확하게 감지할 수 있었다. 반면, 대조군인 ITO 전극은 50–60 μV에 달하는 높은 RMS 노이즈로 인해 스파이크 활동이 가려져 관찰되지 않았다.

마지막으로, FPE-PEDOT 전극은 뇌 심부 이광자 현미경 촬영에서도 거의 시야를 방해하지 않았으며, 전극의 유무에 관계없이 뇌 내부의 혈관과 모세혈관이 모두 선명하게 관찰되었다.

4. Acknowledgements

This work acknowledges the support received from National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government. (MSIT) (RS-2024-00353768)

All experiments involving animals were performed following the ethical guidelines required by the Institutional Animal Care and Use Committee of Yonsei University Health System (IACUC No: 2022-0057) and the National Institutes of Health

5.참고 문헌

[1] Cho, Y. U. et al. MRI-Compatible, Transparent PEDOT:PSS Neural Implants for the Alleviation of Neuropathic Pain with Motor Cortex Stimulation. Adv Funct Materials 34, 2310908 (2024).

[2] Cho, Y. U. et al. Ultra-Low Cost, Facile Fabrication of Transparent Neural Electrode Array for Electrocorticography with Photoelectric Artifact-Free Optogenetics. Adv Funct Materials 32, 2105568 (2022).

Poster-098

삼중음성 유방암의 국소 화학요법을 위한 독소루비신 적재 실크 피브로인/알지네이트 복합 스펀지 개발

최선민, 조혜연, Rumana Ferdushi, 황윤호, 기재홍*

연세대학교 의공학과

Development of Doxorubicin-loaded Silk Fibroin/Alginate Composite Sponge for Localized Chemotherapy in Triple-negative Breast Cancer

Seonmin Choi, Hyeyoun Cho, Rumana Ferdushi, Yoonho Hwang and Jaehong Key*

Department of Biomedical Engineering, Yonsei University, Korea

*jkey@yonsei.ac.kr

Abstract

Triple-negative breast cancer (TNBC) represents a challenging malignancy characterized by the absence of estrogen receptor, progesterone receptor, and HER2 expression, accounting for 10-15% of all breast cancers with aggressive clinical behavior and poor prognosis. While doxorubicin serves as a first-line chemotherapeutic agent for TNBC treatment, its systemic administration is associated with severe cardiotoxicity and other adverse effects, along with limited tumor-specific drug accumulation. To address these limitations, localized drug delivery systems have emerged as promising therapeutic approaches. In this study, we developed a novel doxorubicin-loaded silk fibroin/alginate composite sponge for localized chemotherapy in TNBC treatment. Swelling analysis revealed that doxorubicin-loaded sponges demonstrated enhanced water absorption capacity compared to drug-free controls, with swelling ratios of 0.74 and 0.69 at 24 and 48 hours, respectively. Degradation studies in PBS (pH 7.4, 37°C) showed controlled biodegradation patterns, with doxorubicin-loaded sponges exhibiting slightly delayed initial degradation (25% vs 37% at 24 hours) but achieving approximately 42% degradation by day 7, indicating sustained drug release potential. The developed doxorubicin-loaded SF/alginate composite sponge demonstrated favorable physicochemical properties, biocompatibility, and controlled degradation characteristics suitable for localized chemotherapy applications. These findings suggest that the proposed drug delivery system holds significant promise as a therapeutic platform for TNBC treatment, potentially offering enhanced efficacy while minimizing systemic toxicity.

1. 연구 배경

삼중음성 유방암 (Triple-negative breast cancer, TNBC)은 에스트로겐 수용체, 프로게스테론 수용체, HER2가 모두 음성인 유방암 아형으로 전체 유방암의 10-15%를 차지하며, 공격적인 임상 경과와 불량한 예후를 보인다. TNBC는 표적치료제에 대한 반응성이 낮아 화학요법이 주된 치료 옵션이지만, 치료 선택의 폭이 제한적이어서 새로운 치료 전략이 절실히 요구되고 있다 [1].

TNBC 치료에는 독소루비신 (doxorubicin)이 1차 치료제로 널리 사용되고 있으나, 전신 투여 시 심독성을 비롯한 심각한 부작용과 약물 내성 발생이 주요한 치료 한계로 작용하고 있다. 또한 전신 순환을 통한 약물 분포로 인해 종양 부위의 약물 농도가 제한적이며, 정상 조직에 대한 독성으로 인해 치료 효율이 저하되는 문제가 있다. 이러한 한계점들을 극복하기 위해 국소 약물전달시스템을 이용한 새로운 치료 접근법이 주목받고 있다 [2].

실크 피브로인 (silk fibroin, SF)은 누에고치에서 추출되는 천연 단백질로서 우수한 생체적합성, 생분해성, 그리고 가공 조건에 따라 조절 가능한 약물 방출 특성을 보유하여 약물전달체로서 이상적인 소재로 인정받고 있다. 특히 SF의 β-sheet 구조 조절을 통해 즉시 방출부터 장기간 지속 방출까지 정밀한 약물 방출 제어가 가능하다는 장점이 있다.

본 연구는 실크 피브로인을 기반으로 한 독소루비신 적재 복합체 스펀지 (Doxorubicin-loaded silk fibroin/alginate composite sponge)을 개발하여 TNBC에 대한 효과적이고 안전한 국소 화학요법 플랫폼을 제안하고자 한다. 해당 약물전달시스템의 임상 적용 가능성을 확인하기 위해 스펀지의 물리화학적 특성, 팽윤 특성, 및 분해 특성을 평가하였다.

2. 연구 방법

(1) 실크 피브로인 용액 추출

누에고치 (cocoon)로부터 실크 피브로인을 추출하기 위해 탈검 (degumming) 과정을 수행하였다. 누에고치를 0.02 M Na_2CO_3 용액에서 30분간 2회 끓여 세리신을 제거한 후, 증류수로 충분히 세척하였다. 추출된 실크 피브로인을 9.3 M LiBr 용액에 60°C에서 4시간 동안 용해시킨 후, 증류수에 대해 72시간 동안 투석(dialysis)하여 실크 피브로인 용액을 얻었다.

(2) 실크 피브로인/알지네이트 혼합 용액 제조

소듐 알지네이트 (sodium alginate)를 증류수에 60°C에서 1시간 동안 교반하여 완전히 용해시켜 알지네이트 용액을 제조하였다. 실크 피브로인 용액과 알지네이트 용액을 1:1 질량비로 혼합하여 균질한 SF/SA 복합 용액을 제조하였다.

(3) 독소루비신 적재 SF/SA 스펀지 제조

독소루비신 염산염 (doxorubicin hydrochloride)을 증류수에 용해하여 2 mg/ml 농도의 독소루비신 용액을 제조하였다. SF/SA 혼합 용액에 독소루비신 용액 1 ml를 첨가하여 균질하게 혼합한 후, 실리콘 몰드에 주입하였다. 이를 -70°C 냉동고에서 4시간 동안 냉동시킨 후, 동결건조기를 이용하여 24시간 동안 건조하였다. 건조된 스펀지는 에탄올 어닐링 (annealing) 처리를 1시간 동안 수행한 후, 37°C에서 24시간 동안 완전히 건조시켜 최종 독소루비신 적재 SF/SA 스펀지를 제조하였다.

(4) 팽윤 및 분해 분석 (Swelling and Degradation Analysis)

팽윤도 측정은 제조된 SF/SA 스펀지의 팽윤 특성을 평가하기 위해 건조된 스펀지를 일정한 크기로 절단하고 초기 무게 (W_0)를 측정하였다. 스펀지를 37°C의 D.W에 24, 48시간 동안 침지시킨 후, 일정 시간 간격으로 스펀지를 꺼내어 표면의 물을 제거하고 팽윤된 무게 (W_t)를 측정하였다. 팽윤비는 다음 공식을 사용하여 계산하였다:

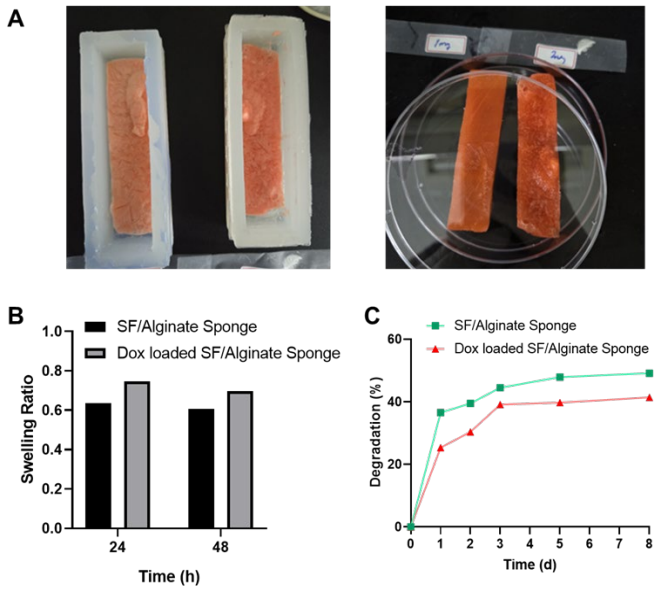
$$Swelling\ Ratio = \frac{(W_t - W_0)}{W_0}$$

분해도 측정은 SF/SA 스펀지의 분해율을 평가하기 위해 37°C의 인산완충용액(PBS, pH 7.4)에서 분해 실험을 수행하였다. PBS에 침지하기 전 스펀지의 건조 무게 (W_0)를 기록한 후, 24시간, 48시간, 72시간, 및 120시간 동안 PBS에서 배양하였다. 각 시간점에서 스펀지를 꺼내어 건조시킨 후 무게 (Wf)를 측정하였으며, 분해율은 다음 식에 따라 계산하였다:

$$Degradation\ = \frac{(W_0 - W_f)}{W_0} * 100$$

3. 연구 결과

제조된 독소루비신 적재 SF/Alginate 스펀지는 균일한 주황색을 띠며 일정한 형태의 스트립으로 제작되었다. 독소루비신이 매트릭스 전체에 균질하게 분포되어 있었으며, 동결건조를 통해 형성된 다공성 구조는 적절한 기계적 강도와 유연성을 제공하여 조직 밀착에 적합한 물리적 특성을 보였다.



[그림 1. 독소루비신 적재 SF/Alginate 스펀지의 특성 분석. (A) 제조된 독소루비신 적재 SF/Alginate 스펀지, (B) 팽윤도 분석, (C) 분해도 분석]

팽윤도 분석 결과, 독소루비신 적재 스펀지는 24시간 후 0.74, 48시간 후 0.69의 팽윤비를 보여 대조군 (0.62, 0.60)보다 높은 수분 흡수 능력을 나타내었다. 이는 독소루비신 적재가 스펀지의 친수성을 증가시켜 약물 방출에 유리한 환경을 조성함을 시사한다.

PBS 환경에서 8일간 관찰한 분해도 분석에서는 독소루비신 적재 스펀지가 1일 후 25%의 분해율을 보여 대조군 (37%)보다 낮았으나, 2일 후부터는 유사한 분해 패턴을 나타내어 7일 후 42%의 분해율에 도달하였다. 이는 독소루비신과 매트릭스 간 상호작용이 초기 분해를 지연시키면서도 지속적인 약물 방출과 적절한 생분해성을 제공함을 확인하였다.

개발된 독소루비신 적재 SF/Alginate 스펀지는 생리적 조건에서 안정적인 특성과 예측 가능한 분해 거동을 보여 TNBC의 국소 치료를 위한 약물전달시스템으로서 임상 적용 가능성을 시사한다.

4. Acknowledgements

이 연구는 2025년도 교육부 및 강원특별자치도의 재원으로 강원RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계 (RISE)의 지원을 받아 수행하였음. (2025-RISE-10-006)

5. 참고 문헌

[1] Wei, L., Kim, S. H., Armaly, A. M., Aubé, J., Xu, L., & Wu, X. (2024). HuR inhibition overcomes cFLIP-mediated doxorubicin resistance in triple-negative breast cancer. *NPJ Precision Oncology*, *8*(1), 286.

[2] Kciuk, M., Gielecińska, A., Mujwar, S., Kołat, D., Kałuzińska-Kołat, Ż., Celik, I., & Kontek, R. (2023). Doxorubicin—an agent with multiple mechanisms of anticancer activity. Cells, 12(4), 659.

Tantalum-Doped Surface Modification for Enhanced Osteogenesis Bioactivity and Controlled Corrosion Rate for Biodegradable Magnesium Mini-plates

Seo Yeon Lee[1], Patrick M. Bacirhonde[2], Joshua Lee[1], Chan Hee Park[1,3,4,5*]
[1] Division of Mechanical Design Engineering, Jeonbuk National University, Korea
[2] Regional Leading Research Center for Nanocarbon-Based Energy Materials and Application Technology, Jeonbuk National University, Korea
[3] Department of Bionanotechnology and Bioconvergence Engineering, Graduate School, Jeonbuk National University, Korea
[4] Interventional Mechano-Biotechnology Convergence Research Center, Jeonbuk National University, Republic of Korea
[5] Innovative Mechanobio Active Materials Based Medical Device Demonstration Center, Jeonbuk National University, Republic of Korea
*biochan@jbnu.ac.kr

Abstract

The clinical application of bioresorbable magnesium (Mg) implants is severely limited by their rapid, uncontrolled corrosion. Herein, we propose a dual-function surface engineering strategy to decouple anti-corrosion and bioactive properties. An inner tantalum oxide (Ta_2O_5) barrier layer was fabricated by chemical vapor deposition (CVD), followed by an outer bioactive hydroxyapatite (HA) layer deposited using electrodeposition (ED). The dense Ta_2O_5 layer serves as a robust barrier to control the initial corrosion rate, while the HA layer is designed to enhance osteoconductive bone regeneration. This synergistic Ta_2O_5/HA architecture presents a promising pathway for developing high-performance bioresorbable metallic implants.

1. 연구 배경

In the fields of orthopedics and dentistry, enhancing the performance of metallic implants for bone fixation and healing has become a key challenge. Titanium (Ti), the current clinical gold standard, exhibits excellent mechanical strength and biocompatibility. However, it presents several limitations, such as stress shielding arising from its significantly higher elastic modulus compared to natural bone, and the necessity for a secondary removal surgery as it remains permanently in the body after healing. To overcome these issues, magnesium (Mg) implants, which function as a mechanical support before gradually biodegrading, are emerging as a next-generation material [1].

Mg possesses bone-like mechanical properties and its degradation products are non-toxic ions. However, the most significant obstacle to its practical application is an excessively rapid corrosion rate in vivo. The reaction of Mg with chloride ions (Cl^-) in body fluids leads to rapid degradation, accompanied by substantial hydrogen gas evolution and a sharp increase in local pH. This can cause inflammation, cytotoxicity to surrounding tissues, and a critical loss of mechanical integrity before bone healing is complete. Therefore, controlling the degradation rate of Mg is a core technology for its clinical application [2].

While alloying has been actively studied for Mg corrosion control, the potential toxicity of certain alloying elements and alterations in intrinsic mechanical properties are noted drawbacks. As an alternative, surface modification, which alters only the surface properties while maintaining the bulk characteristics, is gaining significant attention. Specifically, multilayer coatings that provide both a barrier layer for corrosion resistance and a bioactive layer to promote bone cell attachment and proliferation are being actively researched. However, designing a system that clearly separates the roles of each layer and ensures interfacial stability to create a synergistic effect remains a significant challenge [3].

Therefore, in this study, we designed a unique dual-layer structure with clearly separated roles to control the rapid corrosion of Mg and promote bone regeneration. A corrosion-resistant Ta_2O_5 layer was formed as a primary barrier using chemical vapor deposition (CVD), and a bioactive hydroxyapatite (HA) layer, similar in composition to bone, was coated on top using electrodeposition (ED) to maximize interfacial stability. Our results confirm that the fabricated Ta/HA dual-layer coating effectively suppresses the corrosion rate of the Mg substrate while simultaneously promoting the initial attachment and proliferation of osteoblasts, demonstrating its potential as a high-performance bioresorbable implant.

2.연구 방법

2.1. Coatings preparation

Fig. 1 illustrates the overall architecture of the Ta@HA_Mg multilayer coating. In this system, chemical reactions at the interface between the Ta_2O_5 and HA layers, deposited on the Mg substrate, govern the corrosion resistance and interfacial stability. The tantalum oxide coating was fabricated on pure Mg (12.5 mm x 12.5 mm x 0.5 mm) substrates via CVD (GMC1200, ATOVAC) using Tantalum(V) butoxide (99.99%, Sigma-Aldrich Korea) as a precursor. The subsequent HA coating was applied using a three-electrode system with an electrolyte containing 2.5 mM $Ca(NO_3)_2$ and 1.5 mM $NH_4H_2PO_4$.

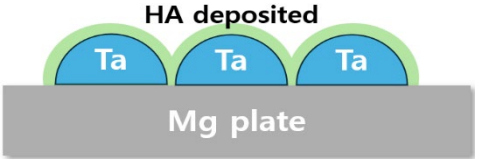


그림 1. Ta@HA 다층 표면개질된 Mg plate 구조

Prior to deposition, the Mg substrates were pretreated by progressive polishing with SiC sandpaper (800, 1000, 1500, and 2000 mesh) and smoothing with an alumina suspension, followed by ultrasonic cleaning in ethanol and plasma surface treatment using plasma surface treatment (PLASOL, Korea).

During the CVD process, a mixture of argon and hydrogen was used as the reactive gas, with the temperature ramped at 2.5 °C/min to a final deposition temperature of 200 °C for durations of 15 and 60 minutes.

After cooling, the Ta-coated layer was stabilized by drying in an 80 °C oven before the HA electrodeposition. The ED process was performed potentiodynamically for 10 and 30 minutes using Ag/AgCl as the reference electrode and a Pt wire as the counter electrode.

The surface-modified Ta@HA_Mg specimens were then characterized to investigate their microstructure and performance, and their corrosion resistance was evaluated via electrochemical tests. Furthermore, for biomedical applications, cytotoxicity was assessed using an extract method, and the promoting effect on bone regeneration was confirmed by culturing osteoblasts (MC3T3-E1) on the surfaces and performing a CCK assay on days 1, 3, and 5.

3. 연구 결과

Fig. 2 illustrates the cross-sectional microstructure and corresponding elemental distribution of the Ta/HA dual-layer coating on the Mg substrate. The EDS mapping results confirm the formation of an intermediate layer on the Mg substrate (red map), characterized by strong signals from Ta (green) and O (blue).

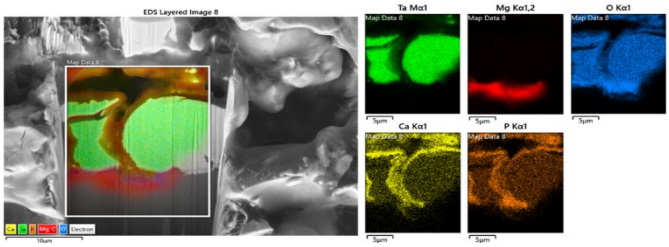


그림 2. Ta@HA_Mg 샘플의 cross-sectional image 및 EDS

Notably, this Ta_2O_5 layer exhibited a unique morphology, growing as a series of agglomerated clusters rather than as a uniform film. The successful fabrication of the intended dual-layer architecture was confirmed by localized signals of Ca and P on the outermost surface and by quantitative EDS analysis detecting all expected elements (Mg, Ta, O, Ca, and P). The unique cluster morphology of the Ta_2O_5 layer is expected to serve a dual role as both a physical barrier against corrosive media and a scaffold for the HA layer, creating a hierarchical topography anticipated to directly influence osteoblast attachment and proliferation, thereby enhancing the implant's bone regeneration capability.

To evaluate the influence of the coatings on the corrosion behavior of the Mg substrate, electrochemical impedance spectroscopy (EIS) and potentiodynamic polarization tests were conducted (Fig. 3).

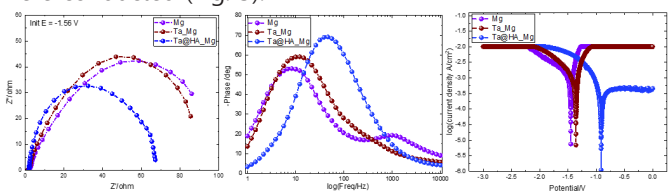


그림 3. 부식저항성 평가를 위한 Electrochemical test

In the Nyquist plot, the charge transfer resistance of the Ta@HA_Mg specimen was significantly larger than that of the uncoated pure Mg or the single-layer Ta specimens. This indicates that the Ta/HA dual-layer acts as a highly resistive barrier, effectively hindering charge transfer between the corrosive solution and the substrate. The Bode plot further elucidates these protective properties. At low frequencies, the Ta@HA_Mg specimen exhibited the highest impedance modulus (|Z|), demonstrating its superior corrosion resistance. Furthermore, in the mid-frequency range, the specimen displayed a broader and higher phase angle peak, suggesting a more pronounced capacitive behavior indicative of a more stable and less defective protective layer. Finally, potentiodynamic polarization analysis revealed that the Ta@HA_Mg specimen shifted the corrosion potential (E_corr) in the noble direction and markedly decreased the corrosion current density (I_corr) by two to three orders of magnitude, signifying that the dual-layer effectively suppresses both the thermodynamic and kinetic aspects of the corrosion reaction.

The cytotoxicity of the coated samples was evaluated using a CCK-8 assay and Crystal Violet staining with osteoblasts. The pure Mg sample exhibited significant cytotoxicity, as evidenced by a decrease in absorbance over time and a distinct zone of inhibition where cell death occurred. In contrast, the Ta@HA_Mg samples demonstrated a time-dependent increase in cell proliferation, with cell viability on Day 5 approaching or even surpassing that of the Control group. Visually confirmed by the uniform and dense layer of proliferated cells in the staining images, these findings confirm that the Ta/HA dual-layer effectively masks the cytotoxicity of the Mg substrate and provides a highly favorable surface for osteoblast attachment and proliferation.

4. Acknowledgements

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT)(IRIS RS-2023-00213244).

5.참고 문헌

[1] S. Amukarimi, M. Mozafari. "Biodegradable magnesium-based biomaterials: An overview of challenges and opportunities " *MedComm*, Vol 2, No.2, p.123-144, 2020

[2] R. Krishnan, A. Elesheikh. "Biodegradable magnesium metal matrix composites for biomedical implants: synthesis, mechanical performance, and corrosion behavior – a review " *Journal of Materials Research and Technology,* Vol 20, p.650-670, 2022

[3] M. C. Oliveira, R. A. Antunes. " Mechanisms and strategies for corrosion control of additively manufactured magnesium alloys" *Journal of Magnesium and Alloys,* 2025

Poster-100

Developing Fucoidan/SPIONs Nanoparticles for Enhanced Otoprotective Therapy

Rumana Ferdushi[1], Hyeyoun Cho[1], Seonmin Choi[1], Yoonho Hwang[1], Jaehong Key[1*]
Department of Biomedical Engineering, Yonsei University, Republic of Korea[1]
[*]jkey@yonsei.ac.kr

Abstract

Hearing loss from ototoxic injury remains a major clinical problem and motivates new inner-ear drug delivery strategies. We engineered fucoidan-coated superparamagnetic iron-oxide nanoparticles (fucoidan-SPIONs) as carriers for dexamethasone (Dex) to enhance cochlear protection. Fucoidan, a sulfated polysaccharide, improved colloidal stability and cellular interaction, while the magnetic core enables guidance and recovery. The nanocarriers provided sustained Dex release and attenuated oxidative stress in auditory cells. In Hei-OC1 cultures, fucoidan-SPION–Dex reduced reactive oxygen species (ROS) in a dose-dependent manner relative to free fucoidan or Dex alone, indicating a synergistic antioxidant effect of the coated, drug-loaded particles. Formulation was characterized by hydrodynamic size, ζ-potential, iron-normalized dosing, and fucoidan loading via a methylene-blue assay. These results support magnetically assisted, fucoidan-functionalized SPIONs as a promising platform for targeted otoprotection and justify further in vivo evaluation.

1. Introduction

Ototoxicity is injury to the inner ear from drugs or chemicals that compromises hearing and balance. Among patients receiving aminoglycosides, roughly one in ten shows ototoxic effects; reports suggest up to one-third of adults exhibit some degree of damage, and about 3% progress to permanent hearing loss [1]. Because mammalian hair cells regenerate poorly, management typically relies on stopping the offending agent once toxicity is suspected, and established damage is largely irreversible [2]. The pharmacologic goal is therefore to develop otoprotectants that shield the ear without diminishing the primary therapeutic activity of the causative drug. Dexamethasone (Dex), a synthetic glucocorticoid, has shown promise for otoprotection in conditions such as sudden idiopathic sensorineural hearing loss and Ménière's disease [3]. Although corticosteroids can curb inner-ear reactive oxygen species (ROS), their benefit is limited by suboptimal cochlear exposure [4]; systemic delivery is further constrained by the blood–labyrinth barrier (BLB) and dose-related adverse effects (e.g., nausea, hypertension) [5].

Emerging nanoparticle (NP) platforms offer a route to targeted, sustained inner-ear delivery. Biodegradable polymer–coated NPs can enhance biocompatibility, prolong release, and improve targeting while reducing total dose [6]. Fucoidan, a sulfated polysaccharide from brown algae, provides antioxidant, anti-inflammatory, and antimicrobial activities that are attractive for cochlear protection. Prior work (Park et al.) indicates that Dex-loaded superparamagnetic iron-oxide nanoparticles (SPIONs), combined with an external magnetic field, can mitigate ototoxic injury via anti-apoptotic mechanisms [7]. Fucoidan-coated, positively charged SPIONs reduce toxicity and improve targeted Dex delivery, highlighting their promise as magnetically responsive otoprotective nanocarriers.

2. Methodology

In a 50 mL tube, combine 24 mL water, 1 mL fucoidan (5 mg/mL), 1 mL PEI (5 mg/mL), and 1 mL positively charged SPIONs; cap and vortex 5 min, then bath-sonicate 3 min with the tube in the bath followed by 7 min with the tube submerged in a beaker of water (keep bath ≤ 30 °C). Stir the dispersion 6 h at room temperature to complete electrostatic coating. Clarify by centrifuging 5 min at low speed (~1,000 ×g; discard pellet, keep supernatant) to remove coarse aggregates. Collect product by transferring the supernatant to a clean tube and centrifuging 10 min at ~1,400 ×g (or use a magnet); discard supernatant and retain the soft pellet (fucoidan-coated SPIONs). Resuspend in water (10–20 mL) and, if desired, wash once more with a brief 30–60 s bath sonication followed by the same collection step. Finally, resuspend to the desired volume, store at 4 °C (use within 1–2 weeks), and characterize by DLS/ζ, Fe content, and MB assay for fucoidan loading.

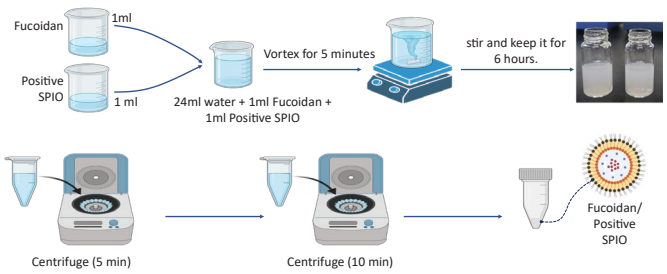


Figure 1. Schematic representation of preparation of Fucoidan/ Positive SPIO NPs.

3. Results and Discussion

The Fucoidan/Positive SPIO nanoparticles (FU/Positive SPIO) exhibited a mean particle size of 238.1 nm, PDI of 0.151, and a zeta potential of -7.2 mV, indicating a stable dispersion with minimal aggregation in biological environments.

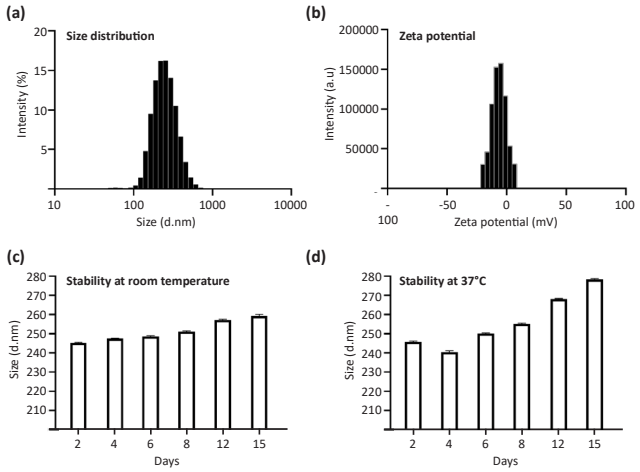


Figure 2. Morphology and size distribution: **(a)** Size of FU/Positive SPIO nano particle. **(b)** Zeta potential of

FU/Positive SPIO. **(c)** Stability at room temperature. **(d)** Stability at 37°C temperature.

The nanoparticles maintained stable hydrodynamic size under both neutral and acidic pH, confirming good colloidal stability in physiologically relevant conditions.

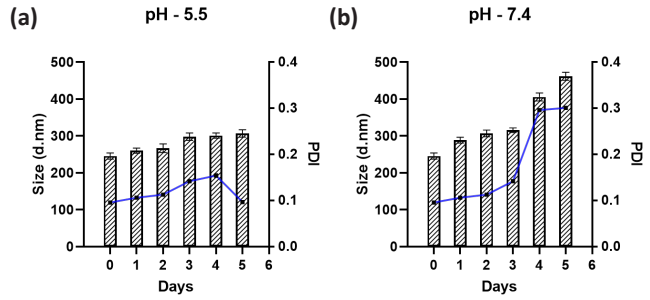


Figure 3. Size stability analysis at **(a)** pH 5.5 and **(b)** pH 7.4.

In HEI-OC1 mouse auditory cells, Fucoidan (FU) nanoparticles resulted in a moderate reduction in cell viability, with cells remaining relatively viable at all concentrations, suggesting low toxicity. In contrast, Positive SPIO nanoparticles induced a stronger cytotoxic effect, significantly reducing cell viability at each tested concentration, indicating higher toxicity compared to FU nanoparticles. The CCK-8 assay results confirmed that the nanoparticles' cytotoxicity varied based on formulation, with the FU/Positive SPIO NPs showing intermediate toxicity levels. And the ROS level is decreasing with dose increasing.

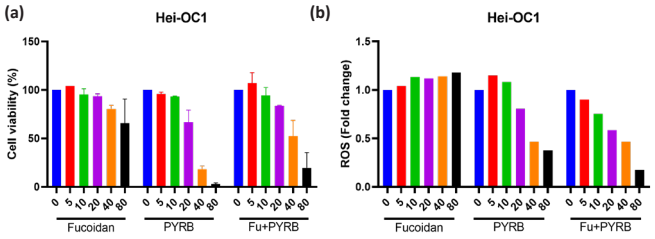


Figure 4. (a) Cell viability test, and **(b)** ROS level test of Hei-OC1 cells.

Fucoidan/Positive SPIO nanoparticles demonstrate strong potential for targeted inner-ear drug delivery by ensuring precise delivery to auditory cells while minimizing systemic side effects. Their fucoidan coating enhances biocompatibility with minimal cytotoxicity, supporting suitability for long-term use.

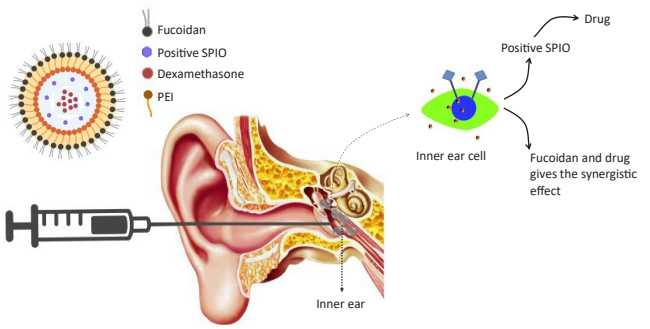


Figure 5. Fucoidan/Positive SPIO nanoparticles delivering controlled therapy to the inner ear for hearing loss treatment.

Additionally, the synergistic effect of Fucoidan and positive superparamagnetic iron oxide (SPIO) promote enhanced cellular uptake and controlled drug release, maximizing the therapeutic effect at the site of action. This targeted delivery system could offer a more effective and safer alternative to traditional treatments for hearing loss, reducing the need for systemic therapies and their associated risks. However, further optimization and in vivo studies are essential to confirm the long-term safety and efficacy of these nanoparticles for clinical applications.

4. Conclusion

In summary, fucoidan-functionalized SPIONs show strong potential as precision drug carriers for inner-ear therapy, combining good colloidal stability, low cytotoxicity, and reliable dispersion in biologically relevant media. The fucoidan shell appears to reduce toxicity without compromising activity, supporting their use for protecting auditory cells. Even so, further formulation tuning (e.g., coating density, payload loading, dosing) and comprehensive in-vivo evaluation—including safety, pharmacokinetics/biodistribution, hearing outcomes, and immunogenicity—are essential to establish efficacy and de-risk translation toward clinical management of hearing loss.

5. Acknowledgements

This research was supported by the Basic Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF), funded by the Ministry of Education (RS-2024-00460405).

6. References:

[1] Selimoglu, Erol. "Aminoglycoside-induced ototoxicity." *Current pharmaceutical design*, Vol 13, No.1, p.119-126, 2007.

[2] Sun, C., Wang, X., Chen, D., Lin, X., Yu, D. and Wu, H. "Dexamethasone loaded nanoparticles exert protective effects against Cisplatin-induced hearing loss by systemic administration." *Neuroscience letters*, Vol 619, No. 1, p.142-148, 2016.

[3] Chertok, B., Moffat, B.A., David, A.E., Yu, F., Bergemann, C., Ross, B.D. and Yang, V.C. "Iron oxide nanoparticles as a drug delivery vehicle for MRI monitored magnetic targeting of brain tumors." *Biomaterials*, Vol. 29, No. 4, p.487-496, 2008.

[4] Ferdushi R, Park S, Seo YJ, Key J. Fucoidan-based Nanomedicine for Hearing Loss: Emerging Roles as Carrier and Therapeutic Agent. Pharmaceutical Research. 2025 Aug 19:1-6.

[5] Leterme G, Guigou C, Oudot A, et al. "Superparamagnetic nanoparticle delivery to the cochlea through round window by external magnetic field: feasibility and toxicity." *Surg Innov*, Vol 26, No. 6, p.646-655, 2019.

[6] An X. and Zha D. "Development of nanoparticle drug-delivery systems for the inner ear." *Nanomedicine*, Vol. 15, No. 20, p.1981-93, 2020.

[7] Park, J.E., Kim, W.C., Kim, S.K., Ahn, Y., Ha, S.M., Kim, G., Choi, S., Yun, W.S., Kong, T.H., Lee, S.H. and Park, D.J. "Protection of Hearing Loss in Ototoxic Mouse Model Through SPIONs and Dexamethasone-Loaded PLGA Nanoparticle Delivery by Magnetic Attraction." *International journal of nanomedicine*, Vol. 17, p.6317, 2022.

Poster Presentation

생체역학 및 의료로봇

Poster-101

구급이송침상 공기기류조절 시스템 개발 및 감염제어 효과 평가

김상훈[1] , 주윤하[2] , 이신혜[3] , 노주연[3] , 이원석[3] , 이정찬[1] , 신상도[2] , 여명석[3]
[1] 서울대학교 의과대학 의공학교실, [2] 서울대학교병원 응급의학과, [3] 서울대학교 공과대학 건축학과

Development of an Airflow Regulation System for Ambulance Stretchers and Assessment of Its Efficacy in Infection Control

Sanghun Kim[1*], Yoon Ha Joo[2], Shinhye Lee[3], Jooyeon Roh[3], Wonseok Lee[3], Jung Chan Lee[1], Sangdo Shin[2], Myoungsouk Yeo[3]

[1]Department of Biomedical Engineering, College of Medicine, Seoul National University
[2]Department of Emergency Medicine, Seoul National University Hospital
[3]Department of Architecture and Architectural Engineering, College of Engineering, Seoul National University
[*]efu0211@snu.ac.kr

Abstract

Ambulance transport poses a high risk of infection transmission to healthcare workers and subsequent patients, especially during respiratory outbreaks. Negative-pressure isolation units have been used, but their clinical applicability is limited due to restrictions on patient monitoring and emergency interventions. In this study, we developed an Infection Control–Patient Protection Stretcher (IC-PPS) equipped with airflow management modules and evaluated its infection control efficacy through computational fluid dynamics (CFD) analysis and controlled chamber experiments. Prototype modules including head top, head bottom, side bar exhausts, and a fan filter unit were designed within allowable ranges. Simulation and physical chamber tests demonstrated that IC-PPS significantly reduced aerosol concentrations in both primary (patient) and secondary (healthcare worker) zones, achieving removal efficiencies up to 98%. Compared with standard stretchers and negative-pressure units, IC-PPS maintained infection control with minimal leakage while allowing direct access for emergency care. These findings highlight IC-PPS as a promising solution for safe patient transport during respiratory pandemics and high-risk emergencies.

1. 연구 배경

구급차는 응급환자를 신속히 의료기관으로 이송하는 중요한 역할을 수행하지만, 이송 과정에서 감염병 전파 위험이 매우 높다. 2022년 기준 국내 구급차 이송 환자는 약 200만 명, 일본은 660만 명, 미국은 2천만 명에 이르며, 이 중 상당수가 호흡기 감염병 환자이거나 의심 환자였다. 특히 응급실 내원 환자 중 약 13.6%가 폐렴 등 호흡기계 감염으로 최종 진단되었으며, 코로나19 팬데믹 동안 국내에서만 80만 명의 확진자 또는 의심 환자가 구급차로 이송되었다는 점은 이 위험성을 잘 보여준다[1]. 응급의료종사자는 이러한 상황에서 환자와 직접 접촉하며, 이후 이송되는 다른 환자와 의료진 또한 이차 감염의 위험에 노출된다[2].

현재 사용 중인 음압 이송 장치는 반원형 챔버 형태로 설계되어 외부로의 입자 유출을 억제할 수 있으나, 실제 현장에서는 구조적 제약이 드러난다. 심폐소생술, 기관삽관, 흡인과 같은 긴급 처치가 필요한 경우 장치 일부를 개방해야 하고, 이 과정에서 감염제어 성능이 급격히 떨어진다. 또한 장치 내부에서 환자의 모니터링 장비를 조작하거나 환자의 상태를 세밀하게 관찰하는 데 한계가 있어, 결국 음압 장치가 있음에도 불구하고 의료진이 감염 위험을 감수해야 하는 상황이 반복된다.

이에 대한 대안으로 최근 주목받는 것이 공기 흐름(airflow) 제어 기술이다. 수술실의 층류 환기(Laminar Airflow, LAF) 시스템은 수술부위 감염을 줄이는 데 효과적임이 보고되었고, 음압격리실에서도 문 개폐 순간 directional airflow가 감염 전파를 줄이는 효과가 관찰되었다 [3]. 이러한 선행연구는 개방된 공간이라도 적절히 설계된 기류 조절만으로 감염 제어가 가능함을 보여준다.

본 연구는 이러한 과학적 근거를 토대로, 구급이송침상에 특화된 기류 조절 시스템을 개발하고, 실제 이송 상황을 모사한 환경에서 그 효과를 검증하는 것을 목표로 한다.

2.연구 방법

2.1 장치 설계 및 제작

연구의 1단계는 Infection Control-Patient Protection Stretcher (IC-PPS)의 모듈 설계였다. 기존 상용 구급이송침상을 기반으로 head top, head bottom 및 사이드바 배기구, 급기구 포함한 4개 모듈을 설계하고, 이를 FFU(Fan filter unit)와 결합하였다. 각 모듈은 아크릴 재질로 투명성을 확보했으며, head top(높이 500 mm 이하), head bottom (길이 300mm이하), side bar(세 구역 분할, 높이 250mm 이하) 등 허용 범위 내에서 최적화되었다. FFU는 원심식 팬을 기반으로 하여 HEPA 필터(DOP 효율 ≥99.97% @ 0.3㎛)를 장착, 350CMH 이상의 유량을 유지하도록 제작되었다. 이로써 개방된 구급차 환경에서도 환자 주변을 국소적으로 정화된 기류로 둘러싸는 개방형 보호공간을 구현할 수 있도록 설계하였다.

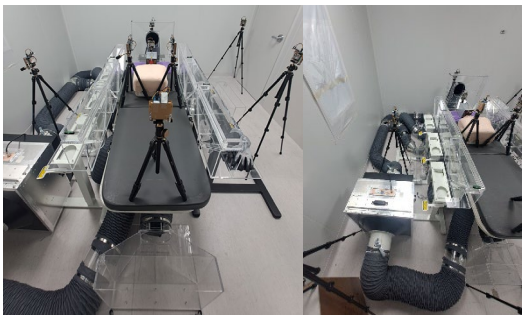


그림 1. 설계된 장치 사진

2.2 CFD 기반 시뮬레이션

장치 제작 전, 설계의 타당성을 검증하기 위해 CFD 해석을 실시하였다. Base case에서 primary zone의 에어로졸 농도는 122,291/㎥, secondary zone은 136,907/㎥로 매우 높게 나타났다. 그러나 head top(200 CMH), head bottom(150 CMH) extraction 및 350 CMH 급기구를 적용하자 primary zone은 3.9%, secondary zone은 6.9% 수준으로 감소하였다. 이어 supply 높이와 방향을 조절한 case, 사이드바 배기구를 추가한 case, 다방향 급기구 적용 case 등을 비교하여 zone별 에어로졸 제거 효율을 체계적으로 분석하였다.

Case		IC-PPS EA [CMH] Head Top	Head bottom	Side Bar	Total	IC-PPS SA [CMH] Foot	공조기 EA [CMH] Grille	공조기 SA [CMH] Diffuser	ACH 챔버
Base	-	X	X	X	X	X	X	X	0
Case1	Head + Foot (下)	200	150	X	350	350	X	X	13.8
Case2	Head + Foot (中)	200	150	X	350	350	X	X	13.8
Case3	Head + Foot (上)	200	150	X	350	350	X	X	13.8
Case4	Head + Side Bar(1/3) + Foot (下)	187	141	22	350	350	X	X	13.8
Case5	Head + Side Bar(All) + Foot (下)	167	125	58	350	350	X	X	13.8
Case6	Head + Foot (4 way)	200	150	X	350	350	X	X	13.8
Case7	Head + Side Bar(1/3) + Foot (4 way下)	187	141	22	350	350	X	X	13.8
Case8	Head + Side Bar(1/3) + Foot (4 way下)	347	262	41	650	650	X	X	25.7
Case9	음압격리병실 (차압 -2.5 Pa)	X	X	X	X	X	350	210	13.8

그림 1. Case별 model setting

2.3 챔버 기반 성능 검증

실험은 부피 25.3m³ 의 음압격리병실 챔버에서 수행되었는데, 이는 실제 구급차 내부 부피의 약 1.57배 크기로 외부 영향을 최소화할 수 있었다. 입자 발생기(TSI 3073)를 이용해 미세입자를 분사하고, research-grade 센서(AM520)와 보급형 센서(PM2008)를 동시에 설치하여 측정하였다. 보급형 센서는 연구용 장비와 collocation 및 calibration을 거쳐 정확도를 확보한 후 사용하였다. 측정 위치는 다음과 같다.

- Primary Zone: 환자 머리와 몸통 부근 4곳(S1-S4).
- Secondary Zone: 환자와 의료진 간격 부근(S5-S8).

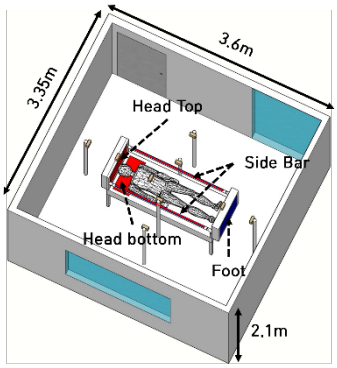


그림 3. 챔버 규격/장치 부위별 명칭 및 센서 위치

2.4 평가 변수(Outcomes)

본 연구의 주요 결과변수(primary outcome)는 IC-PPS 가동 시 환자(primary zone)와 의료진(secondary zone) 영역에서 측정된 에어로졸 평균 농도 및 제거율(%)이었다.

$$\text{Zone 제거율} : \eta_{zone} = \frac{C_{base,zone} - C_{case,zone}}{C_{base,zone}} \times 100\%$$

- $C_{base,zone}$: Base Case에서 해당 Zone 내 센서의 평균 농도
- $C_{case,zone}$: IC-PPS 가동 또는 챔버 공조 가동 (Case 9)시 Zone 내 센서의 평균 농도

이차 결과변수(secondary outcomes)로는 (1) 의료진 호흡선(HCW zone, S5-7) 농도 변화, (2) 기류 가시화 분석을 포함하였다.

3. 연구 결과

3.1 CFD 분석 결과

CFD 결과에서 IC-PPS는 base case 대비 최대 98%의 제거 효율을 보였다. 특히 side bar exhaust와 foot 4-way supply를 결합한 case가 벽 효과 억제를 통해 가장 높은 효율을 보였다.

3.2 챔버 실험 결과

실험 결과에서도 IC-PPS의 효과는 뚜렷했다. Base case에서 Primary 181, Secondary 134㎍/m³ 였던 평균 농도는, case 4-5(사이드바 적용)에서 각각 Primary 20-23㎍/m³ , Secondary 12-13㎍/m³ 수준으로 급감하였다. case 6-7에서는 Secondary 농도가 3-4㎍/m³ 로 거의 배경 수준까지 낮아졌으며, 모든 HCW zone에서도 90% 이상의 제거율을 기록하였다. case 8(최대 풍량)에서는 Primary 14㎍/m³ , Secondary 2㎍/m³ 까지 감소해 음압격리병실(case 9)의 Primary 108㎍/m³ , Secondary 91㎍/m³ 보다 우수한 결과를 보였다.

Zone별 평균 제거율 분석에서는 case 4-7 모두 Primary 87-89%, Secondary 90-98%, HCW zone 91-98%의 제거율을 보였다. 이는 IC-PPS가 개방형 환경에서도 음압 장치 이상의 감염제어 성능을 발휘할 수 있음을 보여준다.

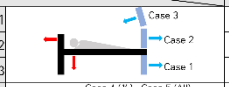
Case (Zone 별 평균 제거율 [%])		Primary	Secondary	HCW1 (S5)	HCW2 (S6)	HCW3 (S7)
Case 1		87	79	83	79	72
Case 2		62	65	62	62	54
Case 3		73	61	58	61	66
Case 4		89	91	89	91	93
Case 5		88	90	87	91	93
Case 6		87	98	98	97	98
Case 7		69	97	97	97	98

그림 4. Case별 제거효율 결과

3.3 기류 가시화

레이저 가시화 결과, base case는 환자 주변에서 발생한 입자가 난류를 따라 빠르게 확산되었으나, IC-PPS 적용 시 환자 영역에서 곧바로 흡입되어 secondary zone으로의 확산이 차단되는 모습이 관찰되었다.

4. Acknowledgements

이 연구는 서울대학교 의과대학 응급의학과와 공과대학 건축학과의 공동 학제간 연구(서울대학교 교내과제, 2024년 의대-공대 학제간 융합연구, 과제번호: 800-20240491) 및 보건복지부의 재원으로 한국보건산업진흥원의 융합형 의사과학자 양성 사업 지원에 의하여 이루어진 것임.

5.참고 문헌

[1] 국가응급진료정보망, National Emergency Department Information System, 2018-2022, 중앙응급의료센터

[2] Bitely, Colton, Brian Miller, and Jonathan Glauser. "EMS disease exposure, transmission, and prevention: a review article." Current emergency and hospital medicine reports 7 (2019): 135-140.

[3] Weiser MC, Moucha CS. Operating-room airflow technology and infection prevention. JBJS. 2018;100(9):795-804.

고강도 인터벌 트레이닝과 중강도 지속 트레이닝이 파킨슨 보행에 미치는 영향

김령아[1], 김률[2], 박기원[1*]

인천대학교 바이오-로봇시스템공학과[1] 서울대학교병원운영 서울특별시보라매병원 신경과[2]

Effects of High-Intensity Interval and Moderate-Intensity Continuous Training on Parkinsonian gait behaviors.

Ryeongah Kim[1], Ryul Kim[2], Kiwon Park[1*]

Dept. of Biomedical & Robotics Engineering, Incheon National University, Incheon, South Korea[1]

Department of Neurology, Seoul Metropolitan Government - Seoul National University Boramae Medical Center, Seoul National University College of Medicine, Seoul, Korea[2]

*kiwon@inu.ac.kr

Abstract

Gait Gait disturbance, characterized by reduced walking speed and increased variability, is one of the most disabling motor symptoms in Parkinson's disease (PD). Exercise-based interventions have been shown to improve gait performance; however, the influence of exercise intensity on gait stability remains unclear. This study aimed to compare the effects of high-intensity interval training (HIIT) and moderate-intensity continuous training (MICT) on gait speed and gait variability in individuals with PD. Thirty participants with mild PD (Hoehn & Yahr stage 1–2) were randomly assigned to three groups and completed a 4-week treadmill-based training program. Spatiotemporal gait parameters, including gait speed, stride time coefficient of variation (CV), and step length CV, were measured before and after training using a 3D motion capture system. A mixed ANOVA revealed a significant main effect of time for gait speed ($p < 0.05$), with the HIIT group showing the greatest improvement. However, stride time CV and step length CV showed no significant differences ($p > 0.3$). These findings suggest that high-intensity exercise enhances gait performance but does not influence rhythmic gait stability. The selective improvement in gait speed may be associated with increased motor control efficiency and neuroplastic adaptations induced by repetitive high-intensity loading. Overall, high-intensity treadmill training may serve as an effective intervention to enhance locomotor function and maintain mobility independence in individuals with PD.

1. Introduction

Parkinson's disease (PD) is a representative neurodegenerative disorder characterized by the progressive loss of dopaminergic neurons in the central nervous system, leading to impaired motor control. Individuals with PD experience various motor symptoms, including bradykinesia, rigidity, tremor, and postural instability, and these symptoms often result in reduced gait speed and increased gait variability [1]. Such gait impairments increase the risk of falls and markedly reduce quality of life, making the restoration of gait function through exercise intervention a primary goal of rehabilitation. Recent studies have reported that aerobic exercise can promote neuroplasticity and improve gait and balance performance, with treadmill-based gait training shown to be particularly effective in enhancing motor function in individuals with PD [2].

Exercise intensity plays a crucial role in gait rehabilitation, and its effects may differ depending on the training pattern. High-intensity interval training (HIIT) involves repeated short bouts of high-intensity effort, maximizing metabolic and neurophysiological stimulation, whereas moderate-intensity continuous training (MICT) is performed at a constant intensity and is known to improve cardiorespiratory endurance and muscular efficiency [3]. Emerging evidence suggests that higher-intensity exercise may induce greater cortical activation and dopamine release, potentially counteracting motor deficits in PD. Despite these promising findings, it remains uncertain whether such intensity-dependent adaptations translate into improved gait stability or rhythmic control. Therefore, this study aimed to compare the effects of HIIT and MICT on gait speed and temporal–spatial gait variability, providing evidence for effective exercise intensity strategies to enhance functional gait recovery in Parkinson's disease.

2. Methods

This study included early Parkinson's disease (PD) patients with less than five years of disease duration and Hoehn and Yahr stages 1 or 2. Written informed consent was obtained from all participants, and the study was approved by the Institutional Review Board of Inha University Hospital (Table 1). Participants were randomly assigned to one of three groups: a control group, a moderate-intensity continuous training (MICT) group, and a high-intensity interval training (HIIT) group. Exercise interventions followed previously established protocols and were implemented three times per week for 24 weeks (Table 2)

Table 1 Participant's general and clinical characteristics by exercise, control group

Group	MICT	Control	HIIT
Number of participants	10	11	9
Age, y	61.6 (7.20)	66.91 (8.14)	69.44 (6.97)
Male sex, %	30	60	50
Height, m	160.40 (11.14)	162.46 (8.89)	161.06 (7.91)
Weight, kg	63.51 (16.35)	63.97 (9.91)	57.23 (9.19)
MDS-UPDRS 1	9.23 (7.00)	6.00 (5.47)	6.67 (7.00)
MDS-UPDRS 2	2.60 (3.10)	5.91 (5.47)	6.00 (7.00)
MDS-UPDRS 3	19.90 (7.34)	18.73 (6.12)	22.94 (7.92)
HY score	1.75 (0.26)	1.82 (0.40)	1.89 (0.22)

Table 2 Exercise timetable of MICT and HIIT group

Phase	Duration	Activity
① Warm-up	5 min	Stretching
② Aerobic Exercise (1st session)	20-30 min	**MICT**: Moderate-intensity continuous training (50% VO_2peak) **HIIT**: Interval training (High intensity: 30-50 sec, Low intensity: 1 min)
③ Strength Training (Calisthenics)	5 min	Chair squat, chair split squat, seated dorsiflexion, standing calf raise
④ Rest	5 min	Light rest
⑤ Aerobic Exercise (2nd session)	20-30 min	**MICT**: Moderate-intensity continuous training (50% VO_2peak) **HIIT**: Interval training (High intensity: 30-50 sec, Low intensity: 1 min)
⑥ Cool-down	5 min	Stretching

Gait data were collected from 33 PD patients using an eight-camera Optitrack motion capture system (NaturalPoint, Corvallis, OR, USA) operating at 120 Hz. Participants were attached with 39 reflective markers according to a conventional marker set provided by Motive software. During the gait trials, participants walked back and forth twice along a six-meter path marked by red lines, covering a total distance of 24 meters, to collect spatiotemporal gait data.

Post-processing procedures were conducted to enhance data accuracy and reliability. This involved applying a low-pass Butterworth filter to reduce noise in the motion capture signals and using cubic or pattern-based gap-filling techniques to address missing marker data. Manual corrections were performed in Motive software to rectify incorrect marker labels, ensuring accurate trajectory reconstruction.

3. Results

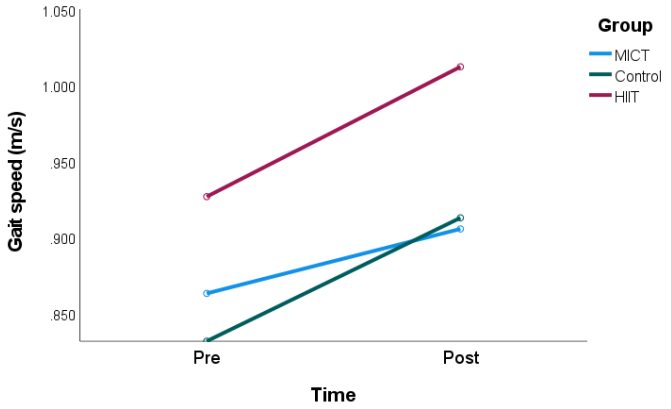


Figure 1 Estimated marginal means of gait speed before (Pre) and after (Post) training across groups (Control, MICT, HIIT)

A mixed ANOVA revealed a significant main effect of time for gait speed ($F(1, 27) = 6.74$, $p = 0.016$), indicating that gait speed increased after the 24-week intervention across all groups. Among them, the HIIT group exhibited the greatest improvement compared with the MICT and control groups (Figure 1). However, neither the main effect of group nor the time × group interaction reached statistical significance ($p > 0.05$).

For the stride time coefficient of variation (CV) and step length CV, the three-way mixed ANOVA (time × side × group) showed no significant main or interaction effects (all $p > 0.3$; Figure 2). Both temporal and spatial gait variability remained relatively stable before and after training, regardless of exercise intensity or limb side (affected vs. unaffected).

In summary, the 24-week treadmill-based intervention improved gait speed in individuals with PD, particularly under high-intensity conditions, while gait variability remained largely unchanged. These findings suggest that exercise intensity differentially influences gait performance and stability. The enhancement in gait speed may reflect improved motor control efficiency and neuroplastic adaptations induced by repetitive high-intensity loading. In contrast, gait variability, representing rhythmic stability rather than voluntary control, may require longer or task-specific interventions. Overall, high-intensity exercise selectively enhances gait performance and may contribute to maintaining walking ability and functional independence in individuals with PD.

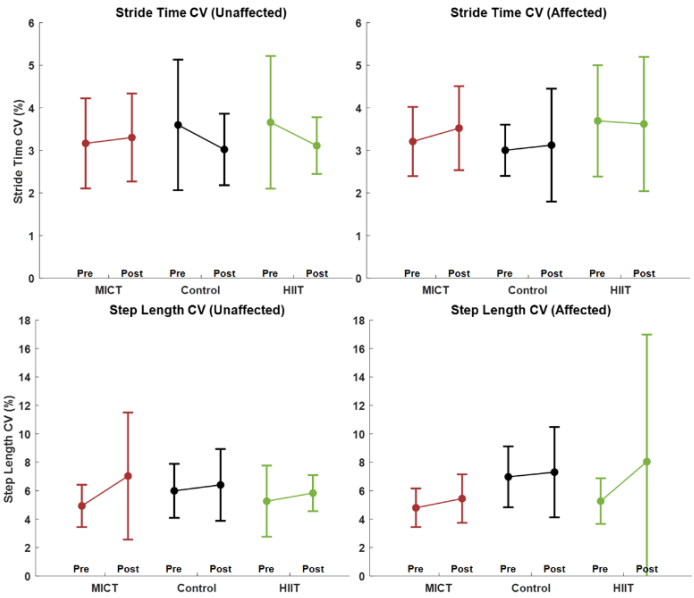


Figure 2 Changes in stride time coefficient of variation (CV; top) and step length CV (bottom) for the unaffected (left) and affected (right) limbs across time (Pre vs. Post) in each group (MICT, Control, HIIT). Each point represents the group mean ± SD. No significant main or interaction effects were observed.

4. Acknowledgements

This research was funded by the National Research Foundation (NRF) grant funded by the Korean Government (MSIT) (No. RS-2023-00222406)

5. Reference

[1] Nadeau, A., et al. (2017). "A 12-week cycling training regimen improves gait and executive functions concomitantly in people with Parkinson's disease." Frontiers in human neuroscience 10: 690.

[2] Carse, B., et al. (2013). "Affordable clinical gait analysis: An assessment of the marker tracking accuracy of a new low-cost optical 3D motion analysis system." Physiotherapy 99(4): 347-351.

[3] Toth, C., et al. (2004). "Anomalies of asymmetry of clinical signs in parkinsonism." Movement disorders: official journal of the Movement Disorder Society 19(2): 151-157.

Poster-103

인지기능 및 지연회상 기능 수준에 따른 고령자의 평지보행 동안 하지 관절 모멘트의 종단적 변화

곽기영[1], 이신영[2], 윤채린[2], 윤정은[2], 서동권[1], *김동욱[1,3]

[1]전북대학교 공과대학 바이오메디컬공학부

[2]전북대학교 대학원 헬스케어공학과

[3]전북대학교 고령친화복지기기연구센터

Longitudinal Changes in Joint Moments of Lower-limb during Level-Walking in the Older Adults, depending on Functions of Cognition and Delayed Recall

Kiyoung Kwak[1], Shinyoung Lee[2], Chaerin Yun[2], Jeongeun Yoon[2], Donggwon Seo[1], *Dongwook Kim[1,3]

[1]Division of Biomedical Engineering, College of Engineering, Jeonbuk National University, Korea

[2]Department of Healthcare Engineering, Graduate School, Jeonbuk National University, Korea

[3]Research Center for Healthcare & Welfare Instrument for the Elderly, Jeonbuk National University, Korea

*biomed@jbnu.ac.kr

Abstract

MCI, which is considered a prodromal stage of dementia, is divided into amnestic mild cognitive impairment (aMCI) and non-amnestic mild cognitive impairment (naMCI), and the developing type of dementia between the two subtypes is different. Therefore, investigating longitudinal changes in level-walking in the two subtypes may contribute to the development of early dementia screening techniques and the establishment of intervention strategy. In the present study, we investigated the longitudinal changes in joint moment of lower-limb of two subtype during level-walking.

1. 연구 배경

아직까지 완벽하게 치료가 되지 않는 신경퇴행성질병인 치매는 발병원인에 따라서 알츠하이머 치매, 루이소체 치매, 전두측두엽 치매 등등으로 나뉘며, 그에 따라서 치료 중재 전략이 수립된다[1]. 이와 관련하여, 경도인지장애(MCI, Mild Cognitive Impairment)는 치매의 전구단계로 장애유형에 따라서 크게 기억상실형 경도인지장애(aMCI, amnestic-MCI)와 비기억상실형 경도인지장애(naMCI, Non-amnestic-MCI)으로 구분되며, aMCI는 알츠하이머 치매, naMCI는 루이소체 치매, 전두측두엽 치매, 파킨슨병 치매 등으로 발전되는 것으로 보고되고 있다[2].

현재 한번 발병된 치매는 완치하기가 매우 어렵기 때문에 MCI와 같은 전구단계 혹은 그 보다 앞선 전임상 단계를 조기에 선별하여 약물/비약물적 중재개입을 하는 것이 치매 치료의 최선으로 여겨지고 있다. 즉, 치매의 전임상 혹은 전구단계에서 대상이 어떤 유형의 치매로 진행/발전될 것인지를 예측해낸다면 발병원인에 따른 치매 중재 전략 수립과 중재 효과에 긍정적인 기여할 수 있을 것이다.

조기 선별을 위해서 여러 측면에서 연구가 진행되고 있으며, 본 연구는 보행측면에서 접근하고자 하였다. 인지기능장애 및 치매 환자들은 그 신경병리에 따라서 손실적 중추신경계 변화가 점진적으로 진행되는 것은 잘 알려진 사실[2-6]이며, 또한 많은 연구에서 보행기능의 변화가 치매에 앞서 수반된다는 것도 밝혀져 왔다[7-8]. 이에 더해 MCI의 아형과 관련하여 대상자들의 평지보행을 횡단적으로 분석한 연구들이 진행되었으며, 그 결과 아형에 따라서 평지보행의 기능 감소 특징이 다르다는 것이 보고되었다[7-10].

하지만, 아직까지 전임상-전구단계 사이에 있는 대상자들에 대한 연구 또한 인지기능감소에 따른 종단적인 연구가 부족한 실정이다. 만약 이 부분의 차이를 메워줄 수 있는 연구가 진행이 된다면, 전구단계보다 더 앞선 조기선별 방법과 평지보행 측면에서 인지기능 감소와의 종단적 기저 기전을 제시할 수 있을 것이다.

따라서, 본 연구는 먼저 평지보행을 통한 조기선별 기법을 제시하기 위해 전임상-전구단계에 있는 지역사회 고령자를 대상으로 종단적 평지보행 분석을 통해 치매 고위험자를 선별할 수 있는 매개변수를 탐색하고자 하였다.

2.연구 방법

본 연구는 만 65세 이상 지역사회 고령자를 대상으로 2022년~2025년까지 1년 단위로 인지기능 및 평지보행 기능 측정을 시행한 종단연구(IRB File No. 2022-04-017-003)의 1차 및 2차 측정 데이터를 사용하였다[11].

연구참여자들의 인지기능은 한국판 몬트리올 인지기능 평가(K-MoCA)를 사용하여 평가하였다. 평가점수에 따라 30점~26점은 정상 인지기능(NC)그룹, 25점이하는 인지감소 위험(Risk)그룹으로 분류했다. Risk그룹을 다시 기억력 감소 정도에 따라 분류하기 위해, K-MoCA의 Memory Index Score (MIS)를 사용했다. MIS가 7점 이하인 참여자는 기억력 감소군(L-MIS)으로 8점 이상인 참여자는 비기억 감소군(N-MIS)로 분류하였다[11].

Motion module Guide (Motion Analysis Co., Ltd., USA)에 따라 양측 하지 및 골반에 총 17개의 능동 적외선 발광 마커를 부착하고 3대의 Position sensor (Optotrak Cetus, Northern Digital Inc., Canada)와 소프트웨어 (First principle, Northern Digital Inc., Canada), 그리고 지면반발력을 수집하기위해 2대의 Force plate (4060-08, Bertec Co., Ltd., USA)를 사용해 참여자들의 평지보행 동안의 걸음걸이를 수집하였다[11]. 참여자들은 평소 걷는 속도로 10m 이상의 보행로를 걸었으며 최소 10번의 평지보행을 수행하였고, 이 중 3개의 시도를 분석에 사용하였다.

보행분석을 위해 인체 신경근골격계 모델링 및 해석 소프트웨어(SIMM, Motion Analysis Co., Ltd., USA)를 사용하였다[11].

3. 연구 결과

3.1 세 그룹의 인구학적 정보

표1에 첫번째 방문시점에서 전체 참여자 및 세그룹의 인구학적 정보와 K-MoCA 및 MIS점수를 나타냈다[11].

<표 1. 전체 및 각 그룹의 인구학적 정보와 인지기능평가 점수>

그룹	N (명)	나이 (세)	키 (cm)	체중 (kg)	교육수준 (년)	K-MoCA (점)	MIS (점)
전체	77	75.2 ±3.8	166.6 ±6.0	66.8 ±7.4	13.8 ±3.7	24.9 ±2.5	10.7 ±3.2
NC	31	73.8 ±3.6	166.1 ±5.6	67.0 ±6.9	15.0 ±2.7	27.4 ±1.3	13.0 ±2.0
N-MIS	31	75.9 ±3.7	166.3 ±5.6	67.1 ±7.1	13.1 ±2.8	23.7 ±1.3	10.9 ±2.0
L-MIS	15	76.9 ±3.7	168.2 ±5.6	65.7 ±6.8	12.5 ±3.2	22.3 ±1.4	5.7 ±2.0

인지기능과 연관성이 높은것으로 잘 알려진 나이와 교육수준을 보면, L-MIS군이 다른 두그룹과 비교하여 가장 나이가 많고 교육수준은 가장 낮았다.

3.2 하지 관절의 모멘트의 종단적 변화

다음의 표2에 고관절 모멘트의 종단적 변화를 나타냈다.

<표 2. 세 그룹의 고관절 모멘트의 종단적 변화>

HEM	NC	N-MIS	L-MIS
1 wave	1.120±0.187	1.139±0.231	1.103±0.230
2 wave	1.121±0.154	1.136±0.196	1.136±0.208

Mean ± Standard deviation, HEM: Hip Extensor Moment at the loading response phase.

세그룹이 각기 다른 변화 양상을 나타내었다. NC그룹은 부하반응기에서의 고관절 신전근 모멘트가 유지되는 경향을, N-MIS그룹은 감소되는 경향을 나타내는 반면에 L-MIS그룹은 증가하는 경향을 나타냈다.

표3과 4에 슬관절 모멘트의 종단적 변화를 나타냈다.

<표 3. 세 그룹의 슬관절 굴곡근 모멘트의 종단적 변화>

KFM	NC	N-MIS	L-MIS
1 wave	0.403±0.127	0.395±0.133	0.375±0.130
2 wave	0.380±0.119	0.390±0.113	0.404±0.128

Mean ± Standard deviation, KFM: Knee Flexor Moment at the loading response phase.

NC그룹과 N-MIS그룹은 부하반응기 동안 굴곡근 모멘트가 감소하는 경향을 나타낸 반면, L-MIS그룹은 증가하는 경향을 나타내었다.

<표 4. 세 그룹의 슬관절 신전근 모멘트의 종단적 변화>

KEM	NC	N-MIS	L-MIS
1 wave	0.637±0.235	0.606±0.200	0.546±0.199
2 wave	0.616±0.228	0.615±0.258	0.589±0.153

Mean ± Standard deviation, KEM: Knee Extensor Moment at the loading response phase.

정상 인지기능그룹은 부하반응기동안 슬관절 신전근 모멘트가 증가하고 인지기능 감소 고위험군은 감소하는 서로 상반되는 변화 양상을 나타내었다. 이에 더해, 고위험군들은 서로 증가하는 양상을 나타내지만 L-MIS그룹의 증가량이 더 큰 것으로 나타났다.

<표 5. 세 그룹의 족관절 굴곡의 종단적 변화>

AFM	NC	N-MIS	L-MIS
1 wave	0.178±0.050	0.181±0.045	0.147±0.047
2 wave	0.196±0.045	0.197±0.058	0.179±0.050

Mean ± Standard deviation, AFM: Ankle Flexor Moment (i.e. Dorsiflexor moment) at the loading response phase.

세 그룹 모두 부하반응기에서 저측굴곡근 모멘트가 모두 증가하는 경향을 나타내었다. 여기에서도 L-MIS군이 가장 많은 증가를 나타냈었다.

본 연구에서 평지보행 동안 세 그룹의 하지 관절의 모멘트의 종단적 변화를 조사하였다. 그 결과 각 관절 부위에서의 증·감 변화의 양상과 종합적인 변화 양상이 다름을 확인할 수 있었다. 정상 인지기능을 유지한 그룹은 슬관절과 족관절에서 모멘트 변화가 나타났으며, 슬관절은 감소, 족관절은 증가하였ㄷ다. NC그룹과 비교해, N-MIS그룹은 고관절 신근 모멘트는 감소, 족관절 굴곡근 모멘트는 증가하였고 슬관절에서는 부하반응기 초기에서는 감소 그 이후는 증가하였다. 이에 반해 기억력 감소가 나타난 L-MIS는 모든 관절의 모멘트가 증가하였다. 이 결과는 기억력 감소에 따라서 평지보행의 생체역학적 측면이 서로 다르게 변화해 간다는 것을 의미하며, 평지보행을 수행하는 신경운동제어 역시 다르게 적응한다는 것을 암시한다. 또한 보행의 종단변화를 상세하게 분석하면 이를 향후 인지기능 감소 유형에 따른 조기선별 기법이 가능할 것임을 시사한다.

4. Acknowledgements

이 성과는 정부(과학기술정보통신부 및 교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2022-NR070417, RS-2022-NR074923).

5.참고 문헌

[1] 대한치매학회, 치매 임상적 접근, 제3판, 도서출판 대한의학, 2021.

[2] R. C. Petersen. "Mild cognitive impairment as a diagnostic entity." Journal of Internal Medicine, Vo l 256, No.3, p.183–194, 2004.

[3] V. Valkanova et al., What can gait tell us about dementia? Review of epidemiological and neuropsychological evidence, Gait & Posture, Vol. 53, pp. 215-223, 2017.

[4] M. Montero-Odasso et al., Gait and Cognition: A Complementary Approach to Understanding Brain Function and the Risk of Falling, J Am Geriatr Soc, Vol. 60, pp. 2127-2136, 2012.

[5] Z. Xiao et al., Sensory impairments and cognitive declinein older adults: A review from a population-based perspective, Aging and Health Research, Vol. 1, pp. 1-16, 2021.

[6] M. Lad et al., Sensory loss and risk of dementia, The Neuroscientist, Vol. 0, pp. 1-13, 2022.

[7] D. Banerjee et al., Neuroimaging in dementia: A brief review, Cureus, Vol. 12, pp. 1~8, 2020.

[8] W.D. Brenowitz et al., Multiple sensory impairment is associated with increased risk of dementia among black and white older adults, J Gerontol A Biol Sci Med Sci., Vol. 74, pp 890-896, 2019.

[9] G. Allali et al., Gait phenotype from mild cognitive impairment to moderate dementia: results from the GOOD initiative, Eur J Neurol, Vol. 23, pp.527-541, 2016.

[10] J. Verghese et al., Gait dysfunction in mild cognitive impairment syndromes, J Am Geriatr Soc, Vol. 56, pp.1244-1251, 2008.

[11] 곽기영 등, 지연회상 기능 감소 고령자의 평지보행 동안 하지 관절 각도의 종단적 변화, 2025년도 제65회 대한의용생체공학회 춘계학술대회 초록집, pp.557-558, 2025.

세포외기질 조성에 따른 HeLa 세포의 접촉 기반 상호작용 및 형태학적 반응

신의철[1], Jahangir Khan[1], 권보미[1*]
[1]세종대학교 기계공학과

Contact-based Interactions and Morphological Responses of HeLa Cells to Different Extracellular Matrix Compositions

Euichul Shin[1], Jahangir Khan[1], Bomi Gweon[1*]
[1]Department of Mechanical Engineering, Sejong University, South Korea
[*]bgweon@sejong.ac.kr

Abstract

Cell-cell interactions are essential for coordinating collective behaviors, and direct physical contact enables immediate exchange of signals between cells. In particular, in cancer metastasis, these collective behaviors are directly linked to collective invasion, where cancer cells maintain physical contact as cohorts. Despite its critical role, systematic quantification of contact behaviors across different microenvironments remains limited. In this study, we quantitatively compared the direct contact capabilities of HeLa cervical cancer cells in different extracellular matrix (ECM) environments. Cells were cultured on laminin (Ln), collagen I (Col1), and collagen III (Col3), and analyzed using machine learning-based segmentation. We defined cell-cell interactive segments (CCIS) and measured contact behaviors, interface morphology, and cellular shape changes. Cells on Ln maintained contact for 340 minutes, significantly longer than Col1 (190 min) and Col3 (241 min), with nearly doubled contact events (23.4 vs. 11.9 and 14.8 times). Ln exhibited the longest contact interface (19.6 μm) with high aspect ratio, while Col1 showed the highest curvature (0.17), suggesting distinct contact geometries. These findings reveal that ECM composition distinctly modulates contact-based interactions and provide insights into how the microenvironment regulates collective invasion capabilities of cancer cells.

1. 연구 배경

세포간 상호작용은 생물의 항상성 유지, 조직 발달, 그리고 질병 진행 과정에서 필수적인 역할을 수행한다. 세포간 상호작용에는 원거리 분비 신호와 세포 간 직접 접촉으로 구분되는데[1, 2], 이 중 직접 접촉은 두 세포가 만든 접촉면을 통해 신호, 힘, 형태 변화가 즉시 교환되어, 극성 재배치, 진행 방향, 속도 정렬 같은 집단 수준의 운동성을 빠르게 조정한다.

암에서는 이러한 접촉 기반 상호작용이 집단 세포 이동(collective cell migration)과 직결된다. 암 전이에서 암세포들은 물리적 접촉을 유지한 코호트(cohort)로 침윤하며, 이 중 앞서가는 선도 세포(leader)는 경로, 장력 분포를 주도하고 추종 세포(follower)가 이를 추종, 보강하는 역할 분화와 상호 피드백이 침윤 효율을 좌우한다[3]. 또한, 전이성이 높은 암세포는 세포간 접촉 이후 운동성이 변화되는 것이 보고되고 있다. 접촉 저해 운동(Contact Inhibition of Locomotion, CIL)은 두 세포가 접촉할 때 접촉면에서의 돌기 활동이 억제되고 반대편에서 새로운 돌기가 형성되어 방향을 전환하는 현상을 말한다. 정상 세포에서 CIL은 조직 경계 형성과 유지에 기여하지만, 암세포에서는 CIL의 저하가 빈번하고 이는 정상 조직 경계를 관통하는 주요 메커니즘으로 지목된다[4].

본 연구에서는 이러한 세포간 상호작용을 분석하기 위하여 세포가 주변세포와의 접촉을 형성하기 위하여 생성한 돌기구조(protrusive structure)를 분석하는 플랫폼을 개발하였다. 다음으로는 이 분석 플랫폼을 다양한 암 미세환경 중에서도 Extracellular Matrix (ECM) 종류에 따른 세포의 거동을 관찰하고자, 3종류의 ECM위에서 촬영한 자궁경부 암세포의 영상에 적용하였다. 최신의 기계학습 기반 세포영역 추출을 통해 세포 간의 접촉기반 상호작용과 접촉면의 형태적 특성 또한, 접촉이 발생할 때의 세포형태 변화 값을 정량화 하였다. 본 연구를 통해 ECM 조성에 따른 암세포간 직접 접촉 상호작용의 변화를 이해하고, ECM 환경이 암세포 집단 침윤에 미치는 영향을 규명하고자 하였다.

2. 연구 방법

ECM이 코팅된 confocal dish 제작을 위해, 먼저 Ln (Gibco; #23017015), Col1(Advanced Biomatrix; #5005-B), Col3 (Advanced Biomatrix; #5021)을 PBS로 50 μg/ml까지 희석하였다. Confocal dish (SPL; #101350)에 희석된 각 ECM 용액을 도포한 후 4℃에서 overnight 조건으로 코팅하였다. 자궁경부암 세포주 HeLa를 ECM 코팅된 디시에 2.0 × 10^4 cells/dish 밀도로 파종하였다. 파종 2 시간 후부터 위상차 현미경을 이용해 12 시간 동안 5 분 간격의 생세포 이미징을 수행하였다. 획득한 이미지에서 세포의 영역 추출은 Cellpose-SAM을 사용하여 수행하였다. Trackypy를 통해 동일 세포의 시계열 추적이 수행되었고, 세포 이진 마스크에서 둘레 좌표는 Savitzky–Golay 필터로 평활화하였다. 이렇게 얻어진 평활화된 세포 둘레 값을 기반으로 세포의 표면 곡률이 MATLAB을 통해 계산되었다.

세포 segmentation 결과에서 픽셀 인접성을 이용해 서로 다른 세포 마스크가 이웃하는 경계픽셀을 검출하였고, 이를 Cell–Cell Interactive Segments(CCIS)으로 규정하였다. ECM에 따른 암세포의 CCIS의 형태적 특징이 분석되었고, 추가로 세포의 영역에 CCIS가 포함될 경우 세포의 직접접촉 상태로 판단하였다.

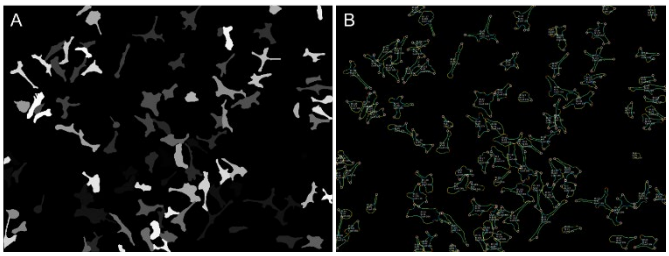


그림 1. Cellpose-SAM을 이용한 세포영역 추출(A)과 세포간 접촉행동 및 둘레 곡률을 적용한 형태 분석(B)

3. 연구 결과

세포접촉 상호작용 평가는 다음의 3가지 관점에서 평가되었다. 1. ECM에 따른 세포의 접촉행동 비교, 2. 접촉영역의 형태적 특성 비교, 3. 접촉중인 상태와 비접촉상태에서의 세포형태의 변화이다. 그림 2은 ECM에 따라 변화된 세포의 접촉행동을 나타낸다. 총 촬영 지속된 720분 중 세포간 접촉 중인 시간을 비교했을 때, Ln에서 세포는 평균 약 340 분 동안 하나 이상의 세포와 접촉중임을 보였다. 반면, 이 지표에서 Col1에서의 190 분과 Col3에서의 241 분을 보였는데(그림 2A), 이 결과는 Ln에서 세포간 상호작용이 가장 활발하게 일어나고 있다는 것을 의미했다. 세포의 접촉이 발생하고 5분 이내에 떨어진, 일시적인 접촉행위를 센 결과, Ln에서 거의 2배 가까이 증가하였다(그림 2B). 또한, 그림 3의 C에서 세포가 접촉중인 분할 영역의 최대 개수는 같은 세포 쌍의 접촉이라도 서로 다른 영역을 통해 접촉되어 있으면, 별도로 개수가 세어진 뒤, 세포 마다 한 번에 가장 많이 상호작용하는 개수를 보여주는 값에서 Ln은 약 2.8 개, Col 1에서 2.12 개, Col 3에서의 2.56개를 나타냈다. 그림 2의 D는 세포의 총 접촉행위 개수를 보여주는데, 흥미롭게도, Ln에서 23.4 번으로 Col1의 11.9 번, Col3의 14.8 번 보다 거의 2배 수준으로 증가하였다.



그림 2. ECM에 따른 HeLa 세포의 직접 접촉 상호작용 변화

다음으로, 세포간 접촉에 관여하는 영역인 CCIS의 형태적 특성이 분석되었다. CCIS의 길이는 Ln에서 평균 19.6 μm를 보이며, Col1의 17.2 μm, Col3의 18.2 μm 보다 더 긴 접촉면적을 나타냈다(그림 3A). CCIS의 종횡비는 Ln에서 가장 높았는데, 이는 Ln에서의 길고 직선적인 접촉면을 의미했다. 반면 CCIS 굴곡성은 Col1에서 가장 높았는데,

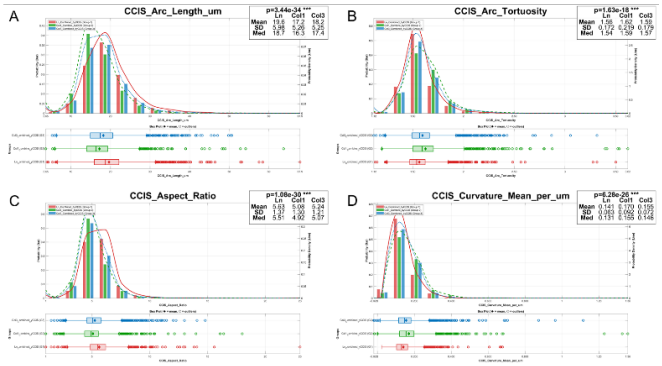


그림 3. ECM에 따른 HeLa 세포의 Cell-Cell interactive segments(CCIS) 특성 분포

곡률 값은 Col1에서 0.17, Ln에서 0.14, Col3에서 0.15을 나타냈다(그림 3 B, D). 이는 Col1에서 가장 날카로운 돌출구조 형태로 세포 간 접촉이 일어난 것이 반영된 것으로 해석된다. 반면, Ln에서의 크게 증가된 세포 상호작용과 변화된 길고 높은 종횡비의 접촉면은 암세포의 집단이동 및 침윤성 증가에 영향을 주는 기계적 특성인 것을 제시하였다.

4. Acknowledgements

이 연구는 한국연구재단(과제번호: RS-2022-NR070365) 및 과학기술정보통신부 및 보건복지부의 재원으로 보스턴 코리아 공동연구지원사업에 의하여 이루어진 것임(과제번호: RS-2024-00468873).

5. 참고 문헌

[1] B. A. Yang, T. M. Westerhof, K. Sabin, S. D. Merajver, and C. A. Aguilar, "Engineered Tools to Study Intercellular Communication," *Adv Sci (Weinh),* vol. 8, no. 3, p. 2002825, Feb 2021, doi: 10.1002/advs.202002825.

[2] J. Su *et al.*, "Cell-cell communication: new insights and clinical implications," *Signal Transduct Target Ther,* vol. 9, no. 1, p. 196, Aug 7 2024, doi: 10.1038/s41392-024-01888-z.

[3] X. C. Wang, Y. L. Tang, and X. H. Liang, "Tumour follower cells: A novel driver of leader cells in collective invasion (Review)," *Int J Oncol,* vol. 63, no. 4, Oct 2023, doi: 10.3892/ijo.2023.5563.

[4] J. Zimmermann, B. A. Camley, W. J. Rappel, and H. Levine, "Contact inhibition of locomotion determines cell-cell and cell-substrate forces in tissues," *Proc Natl Acad Sci U S A,* vol. 113, no. 10, pp. 2660-5, Mar 8 2016, doi: 10.1073/pnas.1522330113.

Poster-105

의약품 배달 로봇을 위한 웹 기반 인터랙티브 네비게이션 시스템

김성우[1], 김경이[2*]

인제대학교 AI융합로봇학[1], 인제대학교 AI소프트웨어[2*]

Web-based Interactive Navigation System for Medicine Delivery Robots

Seongwoo Kim[1], Kyoungyee Kim[2*]

School of AI Convergence Robotics[1], AI Software[2*] Inje University, Korea

*kimky@inje.ac.kr

Abstract

This research proposes a React-ROS2 web-based interactive navigation system for hospital medicine delivery robots. Traditional ROS2 interfaces require complex commands and specialized knowledge, creating barriers for medical staff such as nurses who are not robotics experts. Our system addresses this issue by providing an intuitive web interface with button-based destination selection (pharmacy, ward, nurse station, etc.) using React, enabling autonomous navigation through simple clicks instead of complex parameter settings.The system implements efficient communication between React frontend and ROS2 backend using Rosbridge websocket protocol, allowing real-time data exchange. We validated the system in a Gazebo virtual hospital environment, demonstrating successful integration of user-friendly interface with ROS2 navigation stack.This methodology enhances operational efficiency of hospital medicine delivery workflows and improves accessibility for medical staff without robotics expertise. By enabling nurses to focus on core medical tasks rather than robot operation complexities, this system contributes to improved healthcare service quality and addresses nursing workforce challenges.

1. 연구 배경

최근 병원 내 의약품 배달 및 환자 안내 서비스 로봇의 활용이 증가하고 있다[1]. 특히 COVID-19 이후 비대면 의료 서비스 수요가 급증하면서 병원 내 자율주행 로봇 도입이 가속화되고 있으며[2], 간호 인력 부족 문제 해결과 의료진의 업무 효율성 향상을 위한 대안으로 주목받고 있다. 병원 환경에서 의약품 배달 로봇 시스템 개발에는 ROS2 네비게이션 스택이 널리 사용되고 있으나, 이를 효과적으로 활용하기 위해서는 전문 지식이 요구된다. 특히 ROS2 네비게이션 스택은 RVIZ 도구, 복잡한 매개변수 설정, 명령줄 인터페이스 등의 전문 기술을 필요로 하여, 간호사나 의료진 등 로봇공학 비전문가에게 진입 장벽으로 작용하고 있다.

의약품 배달 로봇의 실용화를 위해서는 간호사와 의료진이 전문 지식 없이도 쉽게 활용할 수 있는 사용자 친화적 인터페이스가 필수적이다. React는 컴포넌트 기반 구조와 상태 관리 기능으로 직관적인 웹 인터페이스 구현에 적합하며, 별도의 앱 설치 없이 병원 내 다양한 기기에서 접근 가능하다는 장점이 있다.

본 연구는 병원 의약품 배달 로봇을 위한 React 기반 웹 인터페이스와 ROS2 네비게이션 시스템을 연동하는 새로운 접근 방법을 제안한다. 복잡한 명령어 대신 직관적인 버튼 클릭만으로 로봇의 목적지(약국, 병동, 간호사실 등)를 지정하고 자율 주행을 실행할 수 있도록 하여, 의료진이 로봇공학 지식 없이도 효율적으로 의약품 배달 로봇을 활용할 수 있도록 한다.

연구 목표는 의료 환경에 특화된 React 기반 사용자 친화적 인터페이스 설계, React-ROS2 간 효율적 통신 아키텍처 구현, Rosbridge 웹소켓 통신을 통한 실시간 데이터 교환 구현이다.

2.연구 배경 및 기본 개념

2.1 ROS2 네비게이션 시스템

ROS2는 로봇 응용 프로그램 개발을 위한 오픈소스 프레임워크[3]로, AMCL 위치 추정, SLAM 환경 인식, 전역/지역 경로 계획 알고리즘을 통해 자율 주행 기능을 제공한다[4]. 기존 ROS2 인터페이스는 명령줄이나 RViz 기반으로 복잡한 매개변수 설정과 전문 지식이 요구되어 비전문가의 접근성이 제한적이다.

2.2 웹 기술과 로봇 제어 시스템

React는 컴포넌트 기반 JavaScript 라이브러리로 반응형 인터페이스 구현에 적합하다. Rosbridge를 통해 ROS 메시지를 JSON으로 변환하여 웹소켓 통신이 가능하며[5], 웹 기반 인터페이스는 플랫폼 독립성과 사용자 친화적 UI/UX를 제공한다.

2.3 Gazebo 가상환경 시뮬레이션

Gazebo는 ROS2와 통합된 3D 로봇 시뮬레이션 플랫폼으로 물리 엔진과 센서 모델을 지원한다[6]. 실제 로봇 없이도 알고리즘 테스트가 가능하여 개발 비용 절약과 안전한 반복 테스트가 가능하다. 본 연구는 Gazebo 가상환경에서 실험을 진행한다.

3. React-ROS2 시스템 구현

3.1 Gazebo 가상환경 및 네비게이션

본 연구는 Gazebo 가상환경에서 시스템을 구현하고 검증하였다. AWSRoboMaker의 "aws-robomaker-hospital-world" 맵을 사용하여 실내 배달 로봇의 네비게이션 테스트에 적합한 병원 환경을 시뮬레이션하였다. 로봇은 LiDAR 기반 SLAM 알고리즘으로 환경을 인식하고 맵을 생성하며, 생성된 맵 데이터는 네비게이션 스택에서 장애물 회피와 경로 계획에 활용된다.

3.2 시스템 아키텍처 및 통신 구현

제안하는 시스템은 그림1과 같다. React 프론트엔드, Rosbridge 웹소켓 서버, ROS2 네비게이션 백엔드, Gazebo 가상환경으로 구성된다. React와 ROS2 간 통신은 Rosbridge 웹소켓 프로토콜로 구현되어, 사용자 명령이 JSON 형식으로 변환되어 ROS2 메시지로 전달되며, 로봇 상태 정보는

실시간으로 인터페이스에 표시된다.

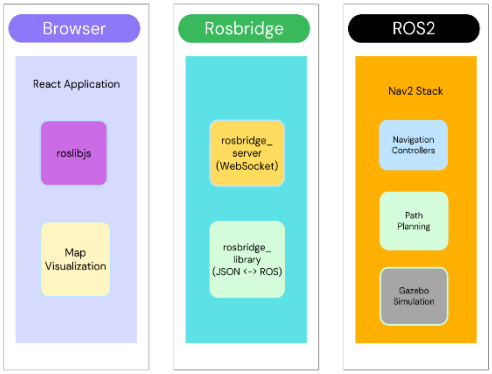


그림 1. 3 제안된 시스템 아키텍처

3.3 React 프론트엔드 구현

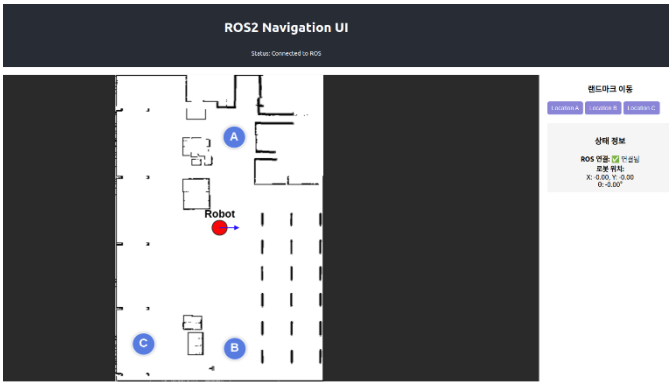


그림 2. React 유저 인터페이스

React 기반 인터페이스는 직관적 디자인 그림 2와 같다. 상단에 연결 상태, 중앙에 로봇 위치와 목적지를 시각화한 맵, 우측에 목적지 선택 버튼과 상태 정보를 배치했다. '/map'과 '/odometry' 토픽을 구독하여 맵 시각화와 실시간 위치 추적을 구현하였으며, roslibjs 라이브러리로 웹소켓 통신을 관리하였다.

3.4 시스템 검증 결과

개발된 시스템은 인터페이스-ROS2 통신, 실시간 상태 표시, 네비게이션 기능에서 모두 정상 작동을 확인하였다. 기존 RViz 대비 직관적인 버튼 클릭으로 로봇 제어가 가능해 비전문가도 쉽게 사용할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 병원 내 의약품 배달 로봇을 위한 React-ROS2 기반 웹 인터랙티브 네비게이션 시스템을 제안하였다. 기존 ROS2 인터페이스가 가진 의료진의 접근성 문제를 해결하기 위해 React 웹 프레임워크를 활용한 직관적인 인터페이스와 ROS2 네비게이션 시스템을 효과적으로 연동하였다.

제안된 시스템은 복잡한 명령어나 로봇공학 지식 없이 간단한 버튼 클릭만으로 약국, 병동, 간호사실 등 병원 내 목적지 지정과 자율 주행을 실행할 수 있도록 하였다. Rosbridge 웹소켓 통신으로 React-ROS2 간 효율적 데이터 교환을 구현하였으며, Gazebo 가상 병원 환경에서 시스템의 안정적 작동을 검증하였다.

본 연구의 주요 기여는 간호사와 의료진이 로봇 전문 지식 없이도 쉽게 활용할 수 있는 의약품 배달 로봇 제어 시스템을 설계한 점이다. 이는 병원 내 의약품 배달 업무의 효율성을 향상시키고, 간호 인력의 핵심 업무 집중을 가능하게 하여 의료 서비스 품질 개선에 기여할 것으로 기대된다.

5. Acknowledgements

본 과제(결과물)는 교육부와 경상남도의 재원으로 지원을 받아 수행된 경상남도 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 연구결과 입니다.(202502440001)

6.참고 문헌

[1] S. H. Kim, and Y. J. Cho. "의료서비스 로봇의 개발 동향 및 활용 사례: 물류, 안내, 약제처리 로봇을 중심으로." Journal of Digital Convergence, Vol 19, No.2, 2021

[2] E. Merdin-Uygur, and S. Ozturkcan. "Consumers and service robots: Power relationships amid COVID-19 pandemic." Journal of Retailing and Consumer Services, Vol 70, p.103174, 2023

[3] S. Macenski, T. Foote, B. Gerkey, C. Lalancette, and W. Woodall. "Robot operating system Design, architecture, and uses in the wild." Science robotics, Vol 7, No.66, p.eabm6074, 2022

[4] S. Macenski, F. Martin, R. White, and J. G. Clavero. "The marathon 2: A navigation system." in Proceeding of the 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Las Vegas, NV, p.1-8, 2020

[5] C. Crick, G. Jay, S. Osentoski, B. Pitzer, and O. C. Jenkins. "Rosbridge: ROS for Non-ROS Users." in *Robotics Research: The 15th International Symposium ISRR*, Cham: Springer International Publishing, p.493-504, 2016

[6] N. Koenig, and A. Howard. "Design and use paradigms for Gazebo, an open-source multi-robot simulator." in Proceedings of the 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Sendai, Japan, p.2149-2154, 2004

Poster-106

지연회상 기능 수준에 따른 고령자의 인지기능, 균형 및 보행기능의 종단적 변화

이신영[1], 곽기영[2], 윤정은[1], 윤채린[1], 서동권[2], 김동욱[2,3*]

[1]전북대학교 대학원 헬스케어공학과

[2]전북대학교 공과대학 바이오메디컬공학부

[3]전북대학교 고령친화복지기기연구센터

Longitudinal Changes in Cognitive, Balance, and Gait Functions in Older Adults according to the Level of Delayed Recall Function

Shinyoung Lee[1], Kiyoung Kwak[2], Jeongeun Yoon[1], Chaerin Yoon[1], Donggwon Seo[2], Dongwook Kim[2,3*]

[1]Department of Healthcare Engineering, The Graduate School, Jeonbuk National University, Korea

[2]Division of Biomedical Engineering, College of Engineering, Jeonbuk National University, Korea

[3]Research Center for Healthcare & Welfare Instrument for the Elderly, Jeonbuk National University, Korea

[*]biomed@jbnu.ac.kr

Abstract

Detection of cognitive deterioration in its early stage is important for dementia prevention. Mild cognitive impairment (MCI) is regarded as the prodromal stage, and it is divided into amnestic mild cognitive impairment (aMCI) and non-amnestic mild cognitive impairment (naMCI) based on the degeneration of cognitive domains. aMCI is known to progress to Alzheimer's dementia, while naMCI is reported to progress to Lewy body and vascular dementia. Additionally, previous studies have suggested that aspects of balance and gait decline differ across MCI subtypes. Considering these results, observing the longitudinal changes of the aforementioned functions may help detect cognitive decline subtypes and aid in establishing a strategy for customizing treatment. This study aimed to investigate longitudinal changes in cognitive function, balance, and gait in the elderly who were divided according to the level of delayed recall function.

1. 연구 배경

치매는 완치가 어려운 질환으로 발병 속도를 늦추거나 예방을 위해 인지장애 초기단계를 발견하는 것이 가장 중요하다. 치매의 전구단계로 여겨지는 경도인지장애(MCI, Mild Cognitive Impairment)는 인지기능의 세부영역 저하 특성에 따라 기억상실형 경도인지장애(aMCI, amnestic MCI)와 비기억상실형 경도인지장애(naMCI, non-amnestic MCI)로 나누어진다[1].

aMCI는 기억력 저하가 주된 특징인 MCI로 naMCI보다 알츠하이머 치매로 진행될 위험이 더 높다고 보고되었으며, naMCI는 사고력, 판단력, 시공간 기능 등 다른 영역의 인지기능 저하가 대표적인 MCI로 혈관성이나 루이소체 치매로 진행되는 경향이 나타난다[1].

기존의 다양한 연구에서 인지기능 장애나 치매환자들에게서 균형과 보행기능의 저하가 나타났으며[2,3], 또한 특수감각기능과 보행기능의 저하가 치매 발생보다 앞선다는 것이 보고되었다[4,5].

선행연구가 많은 것은 아니지만 aMCI와 naMCI의 균형과 보행기능의 저하가 다르다는 것이 밝혀졌다. aMCI에서는 보행 리듬과 관련하여 더 큰 변화가 나타나고 naMCI에서는 보행 속도와 같은 시공간기능 변수가 저하될 가능성이 높다고 보고되었다[6]. 또한 aMCI는 균형 평가에서 건강한 고령자 집단과의 차이는 있지만 naMCI보다는 anterior-posterior 흔들림이 적은 것으로 나타났고, naMCI는 anterior-posterior과 medio-lateral 흔들림이 가장 높은 것으로 보고되었다[7].

선행연구의 결과들을 통해, 인지기능장애 하위 유형에 따라 보행과 균형기능의 종단적 변화가 서로 다를 것이라고 유추할 수 있다. 따라서 향후에 인지기능 저하 하위 유형을 보행과 균형기능 변화를 활용하여 예후를 예측할 수 있는 가능성이 존재하며, 또한 개인 맞춤형 치료 방법/전략 수립에 근거가 될 것이다. 이에, 본 연구는 인지기능 저하 특성에 따라 나누어진 고령자의 인지기능과 보행 및 균형기능의 종단적 변화를 조사하고자 하였다.

2. 연구 방법

본 연구는 만 65세 이상 지역사회 거주 고령자를 대상으로 하여, 연구대상자들의 인지기능과 보행기능의 변화를 측정하였다. 모든 연구대상자들은 측정에 앞서 연구목적 및 내용, 부작용, 이익 수집정보 등을 구두 및 서면으로 설명 받았으며, 연구 참여에 대한 동의를 서면으로 직접하였다. 본 연구는 전북대학교 생명윤리심의위원회의 승인을 받았다(JBNU IRB File No.2023-11-015-001).

모든 연구대상자들의 인지기능 측정에는 한국판 몬트리올 인지검사(K-MoCA)가 사용되었으며, 연구대상자의 교육년수가 12년 이하인 경우 1점을 더했다[8]. K-MoCA 점수가 26점~30점은 인지기능 정상군(NC), 25점 이하인 연구대상자들 중에서 MoCA의 세부항목인 Memory Index Score(MIS)를 활용하여 8점 이상을 s-naMCI(suspected naMCI), 7점 이하인 경우 s-aMCI(suspected aMCI)로 분류하였다[9].

보행기능 측정을 위해 17개의 능동 적외선 발광 마커(Smart Maker, Northern Digital Inc., Canada)를 참여자에게 부착하였다. 3D 동작분석기(Optotrak Certus, NDI, Canada), 동작 캡쳐 소프트웨어(First Principle, Northern Digital Inc., Canada)와 4대의 힘판(Bertec Ltd., USA)이 사용되었으며 근골격계 모델링 소프트웨어(SIMM, Motion Analysis Corp., USA)를 이용해 보행 시공간변수(Stride, Cadence, Velocity)와 하지 관절 파워를 도출하였다.

균형기능 측정에는 Tandem Romberg 검사와 Balance System SD(Biodex Medical systems, Inc., USA)가 활용되었으며, 개안과 폐안 시 Romberg 검사 자세유지 시간(RT_EO, RT_EC)과 Limits of Stability(LoS) 검사 측정시간(LoS time)과 정상 목표치와의 차이(Overall_Diff)를 분석변수로 하였다.

3. 연구 결과

3.1 세 그룹의 인구학적 정보

각 그룹은 첫번째와 세번째 종단 측정시점에서의 인지기능 검사 결과로 NC to s-naMCI, s-naMCI to NC, s-aMCI to s-naMCI그룹으로 분류되었으며, 다음의 표1에 세 그룹의 인구학적 정보와 첫번째와 세번째 종단 K-MoCA와 MIS점수를 나타내었다.

표1. 세그룹의 인구학적 정보와 인지기능 점수

그룹	N (명)	나이 (세)	키 (cm)	체중 (kg)	교육수준 (년)	K-MoCA (점)	MIS (점)
NC to s-naMCI	6	76.0 ±3.6	166.2 ±5.9	67.8 ±7.2	16.2 ±2.4	26.7 ±0.8	10.8 ±2.2
						24.0 ±0.9	11.5 ±2.7
s-naMCI to NC	10	74.2 ±3.9	165.9 ±4.4	64.1 ±6.9	14.0 ±4.0	24.5 ±0.5	11.9 ±1.6
						26.9 ±1.3	14.2 ±0.8
s-aMCI to s-naMCI	7	75.9 ±4.0	169.7 ±7.7	67.8 ±6.6	12.0 ±4.6	21.7 ±1.8	6.0 ±1.5
						23.1 ±0.5	10.1 ±0.9

인지기능이 저하된 NC to s-naMCI 그룹은 인지기능이 향상된 두 그룹보다 연령과 교육수준이 높은 경향이 나타났다.

3.2 세 그룹의 균형기능 종단적 변화

다음의 그림 1에 각 그룹에 대한 균형기능의 종단적 변화를 나타내었다.

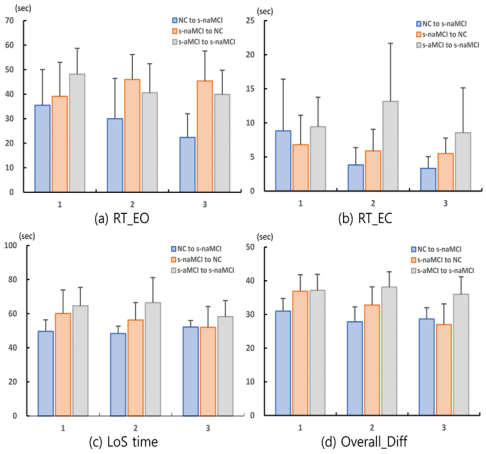


그림 1. 세그룹의 RT_EO, RT_EC, LoS time, Overall_Diff 종단적 변화

RT_EO는 s-naMCI to NC 그룹에서 증가하였고 나머지 두 그룹은 감소하는 경향이 나타났다. RT_EC는 NC to naMCI 그룹만 크게 감소하였다. LoS time은 NC to s-naMCI 그룹과 s-naMCI to NC그룹의 격차가 점차 줄어드는 경향이 나타났다. NC to s-naMCI 그룹은 1차측정에서 Los time이 가장 적었으나 조금씩 늘어났고 s-naMCI to NC 그룹은 LoS time이 조금씩 줄었다. s-aMCI to s-naMCI 그룹은 1차와 2차는 비슷하고 3차는 1,2차에 비해 약간 시간이 줄었다. Overall_Diff는 낮을수록 LoS 정확도가 높은 것이다. s-naMCI to NC 그룹은 정확도가 향상되는 경향이 나타나고 나머지 두 그룹은 Overall_Diff가 거의 유지되었다.

3.3 세 그룹의 보행기능 종단적 증감 변화

그림 2는 각 그룹의 Stride, Cadence, Velocity의 1차-2차측정과 1차-3차측정의 증감 변화를 나타내었다.

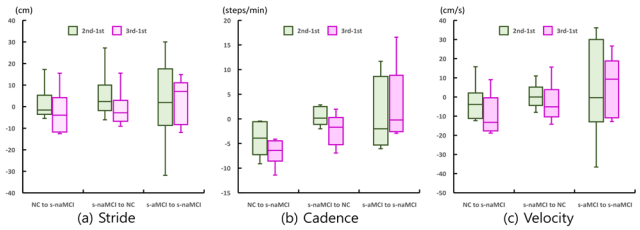


그림 2. 세그룹의 Stride, Cadence, Velocity 1-2차와 1-3차 증감 변화

s-aMCI to s-naMCI 그룹은 Stride, Velocity가 2차에서는 1차와 유사한 것으로 나타났지만 3차에서 1차보다 증가하였으며, Cadence는 2차에서 1차에 비해 약간 감소했으나 3차에서는 1차와 비슷해진 것을 볼 수 있다. s-naMCI to NC 그룹은 Stride, Cadence, Velocity가 2차에서는 1차와 비교했을 때 유지/증가하였는데 3차에서는 1차보다 약간 감소하였다. NC to naMCI 그룹은 Stride, Cadence, Velocity가 모두 2차, 3차에서 모두 1차보다 감소하였다. 또한 2차보다 3차에서 감소가 더 크게 나타났다.

다음의 그림 3에서는 각 그룹의 하지 관절 파워의 1차-2차측정과 1차-3차측정의 증감 변화를 나타내었다.

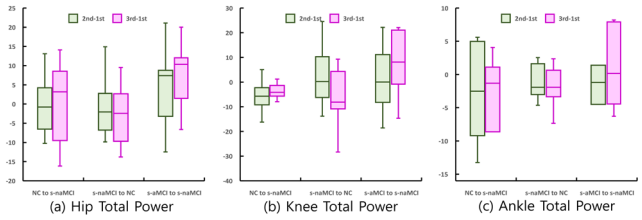


그림 3. 세그룹의 Hip, Knee, Ankle total power 1-2차와 1-3차 증감 변화

s-aMCI to s-naMCI 그룹은 Hip Power가 2차, 3차에서 1차보다 증가한 것으로 나타났고, Knee Power는 1차와 비교해볼때 2차에서는 유지하였고 3차에서는 증가하였으며, Ankle Power는 2차에서는 1차보다 약간 감소한 것으로 나타났지만 3차에서는 2차보다 증가해 1차와 비슷해졌음을 알 수 있다. s-naMCI to NC 그룹은 Hip, Ankle Power가 2차, 3차에서 1차보다 감소한 것을 알 수 있다. 그러나 1차-3차에서 1차-2차보다 감소의 크기가 증가하지 않은 것을 볼 수 있다. s-naMCI to NC그룹의 Knee Power는 2차에서는 1차와 비슷하지만 3차에서는 1차보다 감소하였다. NC to s-naMCI 그룹은 Hip Power가 2차에서는 1차보다 약간 감소한것으로 나타났으나 3차에서는 1차보다 증가하였고, Knee와 Ankle Power는 2차, 3차에서 1차보다 감소한 것을 볼 수 있다. 그러나 Knee, Ankle Power는 1차-2차보다 1차-3차에서 감소의 크기가 줄어들었다.

NC to s-naMCI 그룹은 세 그룹 중에서 균형과 보행기능의 시공간기능 변수 저하가 가장 두드러지게 나타났으며, s-naMCI to NC 그룹에서는 주로 균형기능의 향상이, s-aMCI to s-naMCI 그룹은 보행기능의 향상을 관찰할 수 있었다. 이 결과는 인지저하 하위유형의 보행, 감각기능의 변화 패턴이 다르다는 것을 의미하며, 이는 인지기능 감소를 조기에 감지하거나 하위유형별 맞춤 중재전략을 설계하는 근거로 활용될 수 있을 것이다. 따라서 향후 더 많은 연구대상자를 모집하여 데이터 수를 키우고 더 긴 종단적 변화를 추적하는 연구가 필요하다.

4. Acknowledgements

이 성과는 정부(과학기술정보통신부와 교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2022-NR070417 and RS-2022-NR074923).

5.참고 문헌

[1] R.C Petersen. “Mild cognitive impairment as a diagnostic entity.” Journal of Internal Medicine, Vol. 256, No.3, p.183-194, 2004

[2] M Montero-Odasso et al. “Gait and cognition: a complementary approach to understanding brain function and risk of falling.” Journal of the American Geriatrics Society, Vol. 60, p2127-2136, 2012

[3] Z. Xiao et al. “Sensory impairments and cognitive decline in older adults: A review from a population-based perspective.” Aging and Health Research, Vol. 1, 2021

[4] W. D. Brenowitz et al. “Multiple sensory impairment is associated with increased risk of dementia among black and white older adults.” The Journals of Gerontology: Series A, Vol. 74, p890-896, 2019

[5] Kikkert et al. “Walking ability to predict future cognitive decline in old adults: A scoping review.” Ageing research reviews, Vol. 27, 2016

[6] J. Verghese et al. “Gait Dysfunction in Mild Cognitive Impairment Syndromes.” Journal of the American Geriatrics Society, Vol. 56, p1244-1251, 2008

[7] L. Bahureksa et al. “The Impact of Mild Cognitive Impairment on Gait and Balance: a Systematic Review and Meta-Analysis of Studies using Instrumented Assessment.” Gerontology, Vol. 63, p67-83, 2016

[8] Dautzenberg et al. “The Montreal Cognitive Assessment (MoCA) with a double threshold: improving the MoCA for triaging patients in need of a neuropsychological assessment.” International Psychogeriatrics, Vol. 34, p571-583

[9] A. Kaur et al. “The MoCA-Memory Index Score: an efficient alternative to paragraph recall for the detection of amnestic mild cognitive impairment.” Alzheimer Disease & Associated Disorders, Vol. 32, p120-124

Poster-107

뇌전도 기반 자기 주도 트레드밀에서 보행 의도 파악

오지우[1*], 오건영[1]
경북대학교 기계공학과[1]

Detecting Walking Intentions on an EEG-Based Self-Directed Treadmill

Jiwoo Oh[1*], Keonyoung Oh[1]
School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University, Korea
[*]jiwooh@knu.ac.kr

Abstract

The increase in stroke patients due to population aging has highlighted the necessity of effective gait rehabilitation, as many suffer from gait disorders. Self-paced Speed Treadmill training, which encourages active participation, is a promising rehabilitative approach. However, its control system, which adjusts speed after observing movement, inherently causes a delay. To overcome this, the pre-identification of gait intention using brain waves, particularly EEG, is essential. A significant challenge lies in accurately classifying the short transient sections of Acceleration and Deceleration, which suffer from severe class imbalance relative to the longer Steady speed sections. This study proposed an LSTM-based model for gait intention classification using EEG and Depth camera data collected from healthy adults (Intact Subjects) and stroke patients (Patient Subjects). To address the imbalance among the Acceleration, Deceleration, and Steady classes, various methods were implemented and compared: Class Weight and the SMOTE (Synthetic Minority Over-sampling Technique) method. The results showed that the Baseline Model and Simple Model (without imbalance techniques) exhibited high Accuracy (0.82) but critically failed to classify the minority classes, recording zero for Precision, Recall, and F1-Score in both Acceleration and Deceleration, indicating they classified all data as Steady. In contrast, the Class Weight Model and SMOTE Model successfully classified the Acceleration and Deceleration sections to some extent. The SMOTE Model achieved better overall performance, recording a higher Macro F1-Score (0.32) than the Class Weight Model, demonstrating that the SMOTE technique effectively increases the robustness of the LSTM model in handling class imbalance in this context. This research presents a methodology that successfully tackles the class imbalance issue and accurately predicts dynamic gait state transitions, which is expected to minimize the delay in Self-paced Speed Treadmill systems, contributing to more effective gait rehabilitation for stroke patients.

1. 연구 배경

인구 고령화가 심화됨에 따라 뇌졸중 환자가 증가하고 있으며, 이들 중 약 50-60%가 보행 장애를 겪는다[1]. 보행 장애는 환자의 삶의 질을 저하시키므로 효과적인 보행 재활이 필수적이다. 기존 보행 재활 훈련 중 Fixed Speed Treadmill을 사용한 훈련은 지면 보행과 차이가 있고, 환자의 능동적 참여가 제한된다는 단점이 있다[2]. Fixed Speed Treadmill과 달리 Self-paced Speed Treadmill 훈련은 지면 보행과 더 유사하며, 환자의 능동적 참여를 유도할 수 있다. 하지만 Self-paced Speed Treadmill 훈련은 사용자의 움직임을 관측하여 그 움직임에 따라 트레드밀의 속도를 컨트롤하는 시스템이기 때문에 딜레이가 발생할 수밖에 없다. 딜레이 문제를 해결하기 위해 움직임 발생 전 의도 파악이 가능한 뇌파, 특히 EEG를 활용하는 방안이 주목받고 있다[3]. EEG를 사용하여 보행의 동적 상태 변경을 판별하기 위해서는 아주 짧은 구간인 속도 변환 구간을 인지해야 하는데, 이와 관련한 연구는 많이 진행되지 않았다.

2.연구 방법

피험자가 EEG 장비를 부착한 뒤 Self-paced speed treadmill에서 보행 훈련을 하는 장면을 Depth camera로 촬영하였다. 실험에 건강한 성인(Intact Subjects)이 4명, 환자(Patient Subjects; 급성 뇌졸중 환자 6명, 만성 뇌졸중 환자 2명) 6명으로, 총 12명이 참가하였다. 데이터는 가속(Acceleration), 감속(Deceleration), 저속(Low Speed), 고속(High Speed) 구간으로 나누었다. 가속과 감속 구간은 속도 전환(Transient) 구간, 저속과 고속 구간은 속도 유지(Steady) 구간으로 나누어 사용하였다. 가속, 감속 구간이 저속, 고속 구간보다 상대적으로 짧아 클래스 불균형 문제가 생겼으며 이를 해결하기 위해 여러 기법을 활용하였다. 기준이 되는 Baseline Model, 클래스마다 가중치를 다르게 적용하는 Class Weight Model, LSTM 레이어를 하나 줄인 Simple Model, 소수 클래스의 샘플 수를 증강하는 SMOTE(Synthetic Minority Over-sampling Technique) 기법을 사용한 SMOTE Model을 비교하였다.

3. 연구 결과

여러 LSTM 모델을 학습시켜 비교하였을 때, Baseline Model과 Simple Model이 Accuracy나 Macro F1-Score의 지표로는 좋은 성능을 보였다. 하지만 그림 1에서 볼 수 있듯이 가속과 감속 클래스에서 Precision, Recall, F1-Score 세 지표 모두 0을 기록하여 모든 데이터를 속도 유지 구간으로 분류한다는 것을 알 수 있었다.

Class Weight Model과 SMOTE Model은 그림 2에서 볼 수 있듯이 가속과 감속 구간에서 Precision, Recall, F1-Score 세 지표에서 0을 기록하지 않았다. 이를 미루어 두 모델은 일정 부분 가속과 감속으로 분류하는 것으로 볼 수 있다. 두 모델 중 Class Weight Model에 비해 SMOTE Model이 더 나은 Accuracy와 Macro F1-Score를 기록한 것으로 보아 SMOTE 기법이 LSTM 모델의 강건성을 증가시키는 것으로 볼 수 있다.

가속, 감속, 저속, 고속 4가지 클래스를 분류하거나, 속도 전환, 속도 유지 2가지 클래스를 분류하는 등의 다른 시나리오에서도 Baseline Model, Simple Model보다 Class

Weight Model, SMOTE Model이 더 나은 성능을 보이는 경향이 있었다.

Model	Accuracy	Macro F1-Score
Baseline	0.82	0.30
Class Weight	0.44	0.28
Simple	0.82	0.30
SMOTE	0.70	0.32

표 1. Acceleration vs. Deceleration vs. Steady(Low Speed, High Speed) for Intact subjects

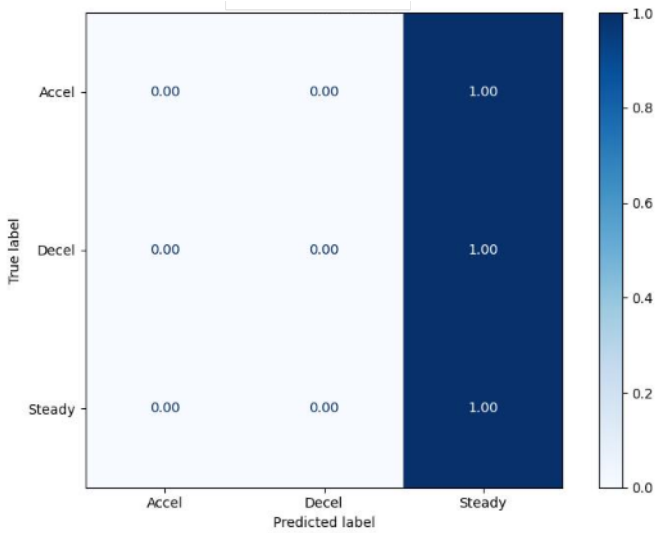


그림 1. Baseline Model의 Confusion Matrix

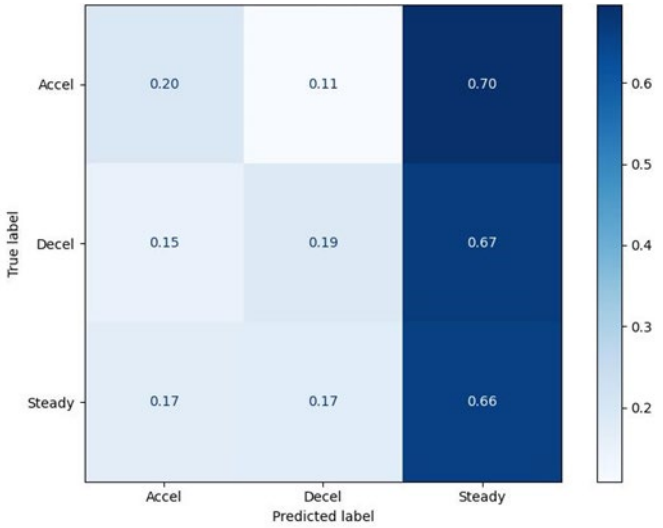


그림 2. SMOTE 기법이 적용된 모델의 Confusion Matrix

4. Acknowledgements

본 연구는 보건복지부 국립재활원 재활연구개발용역사업(R&D) 재활로봇중개연구사업 (NRCTR-EX25007), 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(RS-2024-00406223)으로 수행되었습니다.

5.참고 문헌

[1] S. Hesse, J. Mehrholz, and C. Werner, “Robot-Assisted Upper and Lower Limb Rehabilitation After Stroke,” *Deutsches Ärzteblatt international*, May 2008, doi: 10.3238/arztebl.2008.0330.

[2] T. Bulea, J. Kim, D. Damiano, C. Stanley, and H.-S. Park, “User-driven control increases cortical activity during treadmill walking: An EEG study,” *2014 36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, vol. null, pp. 2111–2114, 2014, doi: 10.1109/EMBC.2014.6944033.

[3] N. Richer, J. C. Bradford, and D. P. Ferris, “Mobile neuroimaging: What we have learned about the neural control of human walking, with an emphasis on EEG-based research,” *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, vol. 162, p. null, 2024, doi: 10.1016/j.neubiorev.2024.105718.

Poster-108

진동자극에 따른 운동감각 착각의 최적 인지관절각 규명

강승훈[1] · 우무진[1] · 오건영[2]

경북대학교 기계공학과[1], 교신저자[2]

Identification of the Optimal Perceived Joint Angle in Vibration-Induced Proprioceptive Illusion

Seunghoon Gang[1], Moojin Woo[1] and Keonyoung Oh[2]

Dept. of Mechanical Engineering, Kyungpook Nat'l Univ[1] Corresponding Author[2]

* kanrde@gmail.com

Abstract

Vibration stimulus that induces kinesthetic illusions is effective for motor function recovery in stroke rehabilitation; however, the optimal vibration conditions have not been clearly identified. This study, therefore, aims to investigate the most effective conditions for inducing kinesthetic illusions by analyzing the effects of tendon vibration frequency and duration on the perceived joint angle. To this end, four healthy, blindfolded adults were stimulated on the right wrist flexor muscles with varying vibration frequencies (60, 70, 75, and 80 Hz) and durations (5, 15, and 25 s). Participants symmetrically represented the kinesthetic illusion of the right wrist, induced by the vibration, with their left wrist, and the joint angle of the left wrist was measured. Through the quantitative analysis of perceived joint angles under different vibration stimulus conditions, this study is expected to provide fundamental data for the future design of proprioceptive rehabilitation programs for stroke patients and the development of precise motor control algorithms for rehabilitation robots.

1. 연구 배경

뇌졸중 환자 중 상당수는 신체 제어를 위한 힘의 크기, 신체의 위치나 움직임을 인지하는 능력인 고유 수용성 감각(Proprioception)의 저하 또는 손실을 경험한다. 이러한 감각의 손상은 환자의 운동 기능과 일상 생활에 큰 영향을 미친다. 이를 회복하기 위한 재활치료는 중요한 문제이다. 최근 재활 분야에서 힘줄에 특정 진동 조건(주파수, 진폭, 예압력, 진동 시간)의 진동 자극을 가하여 척수와 뇌가 관절 움직임과 무관하게 관절이 운동을 하는 듯한 느낌이 들게 하는 운동감각 착각(Kinesthetic Illusion) 현상을 활용한 재활 방법이 주목받고 있다.

운동감각 착각은 실제로 관절이 운동하지 않았음에도 불구하고, 진동 자극이 근육 내의 수용기관인 고유수용기인 근방추(muscle spindle)를 활성화시켜 움직임에 대한 감각적 착각을 유발하는 현상이다. 뇌가 이 착각을 통해 인지하는 관절의 움직인 정도를 인지관절각(Cognitive-joint angle)이라고 정의할 수 있다. 이처럼 진동 자극이 고유 수용성 감각 재활에 효과적이라는 사실은 검증한바 있으나, 가장 효과적인 운동감각 착각을 유발하기 위한 최적의 진동 자극 조건은 명확하게 규명되지 않았다

따라서 본 연구의 목표는 힘줄에 가해지는 진동 자극의 주파수와 지속 시간이 인지관절각에 미치는 관계를 정량적으로 분석하여, 운동감각 착각의 관계를 보다 명확히 이해하고, 향후 뇌졸중 환자를 위한 효과적인 재활 프로토콜을 제시하여 재활 로봇 분야에 응용될 수 있는 기초자료를 제공하고자 한다.

2.연구 방법

본 연구는 진동 주파수와 시간이 인지관절각에 미치는 영향을 분석하기 위해 자체적으로 실험장치를 구성하고 정해진 절차에 따라 진행하였다. 실험에는 오른손을 주로 사용하는 건강한 남성 피험자 4명이 참여했다. 실험 중 시각 정보가 결과에 미치는 영향을 배제하기 위해 모든 피험자는 안대를 착용했다. 진동 모터에서 발생하는 소음 또한 차단하기 위해 귀마개를 착용했다. 피험자의 오른팔은 진동자극부인 노쪽손목굽힘근의 힘줄이 장비 진동부에 정확히 닿도록 고정하였다. 착각으로 인지된 각도를 표현할 외팔 또한 오른팔과 대칭적으로 위치시켰다. 한 피험자마다 주파수(60, 70, 75, 80Hz)와 진동 시간(5, 15, 25s) 조합을 무작위 배열하여 진동자극을 가하여 인지관절각을 측정하였으며, 휴식시간을 부여 후 이를 총 3번 반복하였다.

정밀한 진동 자극을 인가하고 제어하기 위한 시스템은 사용자 인터페이스, 마이크로 컨트롤러, 모터 드라이버, 그리고 진동 모터로 구성하였다. 연구자가 PC에서 Python으로 제작된 GUI를 통해 원하는 진동 주파수와 진동 시간을 입력하면, 이 데이터는 시리얼 통신을 통해 마이크로 컨트롤러로 전송된다. 데이터를 수신한 마이크로 컨트롤러는 PWM제어 방식을 통해 모터를 입력 주파수로 구동한다. 제어 회로는 마이크로 컨트롤러 구동을 위한 5V 전원과 모터 드라이버 구동을 위한 24V 전원으로 분리하여 안정성을 확보하였다.

실험은 진동 주파수 (60, 70, 75, 80 Hz)와 진동 시간 (5, 15, 25초)의 조건을 조합하여 진행되었다. 각 조건은 무작위 순서로 피험자에게 3회씩 반복 제시되었고, 진동 자극이 오른팔에 가해지는 동안, 피험자는 실시간으로 느껴지는 착각의 정도를 왼손목을 움직여 동일하게 표현하도록

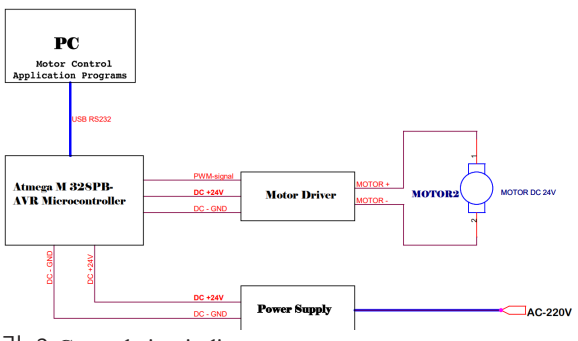


그림 2 Control circuit diagram

지시받았다. 연구자는 피험자가 표현한 왼손목의 최대 굽힘 각도를 각도계로 측정하여 기록하였고, 이 값을 해당 조건의 인지관절각으로 정의했다.

3. 연구 결과

실험 데이터 분석 결과, 시간이 증가함에 따라 인지관절각은 증가하는 그래프를 얻었지만, 피험자 별로 최대 인지관절각을 느끼는 각도가 상이했다. 75Hz,25초에서 최대 인지관절각을 느끼는 피험자가 3명이었으며, 그 중 한 참가자는 진동시간 커짐에 따라 인지관절각의 변화량이 증가하는 추세선을 가졌다. 적은 시간 안에서 높은 인지관절각의 변화를 만들어낼 수 있는 80Hz를 이용하여 진동 자극을 가하는 방식을 사용한다면, 적은 시간에 높은 인지관절각을 유도할 수 있다는 장점이 있어, 뇌졸중 환자들을 대상으로 재활 기기를 제작할 때에 있어 신체 움직임과 착각을 유발하는 시간 차이를 줄여, 높은 재활 효과를 기대할 수 있다.

본 연구는 진동 조건과 인지관절각 사이의 긍정적인 상관관계를 확인하는 성과를 거두었으나, 몇 가지의 한계를 가진다. 우선 피험자의 수가 적어 개인별로 진동 자극에 대한 민감도 차이로 인해 표준 편차가 크게 나타난다. 또, 실험 장비를 피험자의 신체 조건에 맞게 자체 제작을 하지 않은 것이 특정 주파수 및 시간에서 착각을 느끼지 못하는 요인이 됐다. 진동 착각이 느껴지는 정도를 다른 팔로 표현하는 것에 있어서도 표준편차가 존재하였을 것이며, 진동 자극이 전해지는 접촉부의 변형 혹은 파손에 의한 변경이 많은 실험 데이터를 가져오는 과정에서 표준편차를 만들었다.

결론적으로 본 연구를 통해 힘줄 진동 자극의 주파수와 시간이 운동감각 착각의 강도에 직접적인 영향을 미치는 것을 확인하였다. 이는 향후 뇌졸중 환자의 고유 수용성 감각 재활에 진동 자극을 활용할 때, 원활한 착각을 유도하기 위해 특정 주파수를 사용하거나 자극 시간을 조절하는 등의 구체적인 가이드라인을 제공할 수 있다. 본 실험의 결과는 재활 로봇의 모터 제어 알고리즘에 적용되어 환자 맞춤형 재활 치료의 효과를 높이는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 향후 연구에서는 더 많고 다양한 피험자를 모집하여 실험결과의 표준 편차를 줄이고, 실험 조건 설정을 할 때에 있어, 조금 더 피험자 친화적인 실험 조건 설계를 할 필요가 있다. 노쪽손목굽힘근 외 다른 근육 부위에 대한 진동 자극의 영향을 추가적으로 연구하여, 운동각각 착각 현상을 보다 포괄적으로 이해할 필요가 있어 보인다.

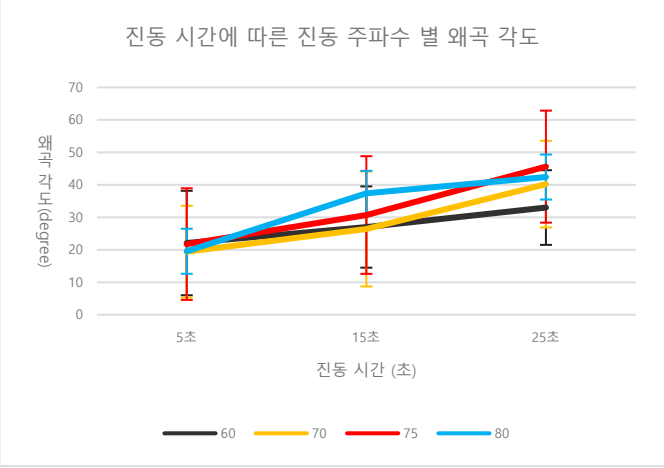


그림 3 실험 데이터

4. Acknowledgements

이 연구는 National Research Foundation of Korea (NRF) 과제의 지원을 받아 수행하였음. (NRF-2011-0031866 and NRF-2018M3A9D7079485) 본 연구는 보건복지부 국립재활원 재활연구개발용역사업(R&D) 재활로봇중개연구사업(NRCTR-EX25007)으로 수행되었습니다.

5.참고 문헌

[1] Fuentes, C. T., Gomi, H., & Haggard, P., 2012, "Temporal features of human tendon vibration illusions," European Journal of Neuroscience, Vol. 36, No. 12, pp. 3709-3717.

[2] Varas-Diaz, G., Cordo, P., Dusane, S., and Bhatt, T., 2021, "Effect of robotic-assisted ankle training on gait in stroke participants: A case series study," Physiotherapy Theory and Practice, Vol. 37, No. 8, pp. 1-10.

[3] Albert, F., Bergenheim, M., Ribot-Ciscar, E., and Roll, J. P., 2006, "The Ia afferent feedback of a given movement evokes the illusion of the same movement when returned to the subject via muscle tendon vibration," Experimental Brain Research, Vol. 172, No. 2, pp. 163-174.

[4] Roll, J. P., Albert, F., Thyrion, C., Ribot-Ciscar, E., Bergenheim, M., and Mattei, B., 2009, "Inducing Any Virtual Two-Dimensional Movement in Humans by Applying Muscle Tendon Vibration," Journal of Neurophysiology, Vol. 101, No. 2, pp. 816-823.

[5] Roll, J.P., Vedel, J.-P., and Roll, R., 1980, "Kinaesthetic Role of Muscle Afferents in Man, Studied by Tendon Vibration and Microneurography," Experimental Brain Research, Vol. 47, No. 1, pp. 177-190.

[6] Cordo, P., Wolf, S., Rymer, W. Z., Byl, N., Stanek, K., and Hayes, J. R., 2022, "Assisted Movement with Proprioceptive Stimulation Augments Recovery from Moderate-To-Severe Upper Limb Impairment During Subacute Stroke Period: A Randomized Clinical Trial," Neurorehabilitation and Neural Repair, Vol. 0, No. 0, pp. 1-12.

[7] Calvin-Figuière, S., Romaiguère, P., Gilhodes, J.-C., and Roll, J.-P., 1999, "Antagonist motor responses correlate with kinesthetic illusions induced by tendon vibration," Experimental Brain Research, Vol. 124, No. 3, pp. 342-350.

Poster-109

러닝화 굽힘 강성에의 적응기간에 따른 인체 동역학 및 러닝효율 변화

노병욱[1] , 오건영[1*]

경북대학교 기계공학과[1]

Changes in Human Biomechanics and Running Efficiency According to the Adaptation Period of Running Shoe Bending

ByungUk Rho[1] , Keonyoung Oh[1*]

School of Mechanic Engineering, Kyungpook University, Korea

*kyoh@knu.ac.kr

Abstract

Recent studies have attempted to improve running efficiency by inserting carbon plates into running shoes to increase bending stiffness. However, the adaptation time to the added stiffness varies across individuals, leading to inconsistent results. This study aimed to analyze how running efficiency changes according to the adaptation period and to determine the minimum adaptation time required for improved performance. Eleven healthy participants performed running sessions twice a week for five weeks, with each session consisting of 30 minutes of running. The results showed that approximately four weeks were required for the joint torques of the lower limbs to stabilize, and VO_2 measurements indicated significant improvements by the fifth week. These findings suggest that increased shoe stiffness affects running efficiency and that around four weeks of adaptation are necessary. Therefore, when evaluating running shoes or external stiffness devices, sufficient user adaptation time should be considered.

1. 연구 배경

최근 웨어러블 인체 보조 장치를 활용하여 보행 및 주행 시 운동능력을 향상시키려는 연구가 활발히 진행되고 있다.

특히, 하지 관절에 외부 강성 요소를 추가하여 이동 효율을 증가시키는 연구가 다수 있다. 한 예로, 러닝화에 외부 강성요소를 추가하여 인체 주행에 있어서 관절을 보조함으로써 인체의 이동효율을 증가시키려는 시도가 있어왔다[1].

운동화의 인솔부분에 카본 플레이트를 추가함으로써 러닝화 굽힘 시 탄성에너지를 저장하고, 이를 재활용하여 인체 보행 및 주행을 보조할 수 있는 토크를 생성할 수 있게 하였다. 추가된 카본 플레이트는 발가락 관절의 굽힘 운동에 반하여 토크를 생성하는데, 그 만큼 해당 관절에서 생성하는 토크를 감소시킬 수 있다. 이는, 최종적으로 카본 플레이트가 발생시키는 토크만큼 신체의 근육에너지 소모량이 감소하여, 인체의 주행 및 보행 효율이 증가할 수 있다는 것을 시사한다.

러닝화에 추가된 외부 강성요소에도 적응 기간에 따라 생체역학적 효과 및 이동 효율 변화 가능성이 제기되었으며, 이러한 상이한 결과들은, 서로 다른 적응기간에서 기인한 것으로 보인다. 한 연구에서는 운동화의 강성 변화에 따른 에너지 소비 감소 효과가 초기 착용 시점보다는 일정 시간 착용 후에 더 뚜렷하게 나타난다고 보고하였다[2]. 이러한 결과들은 외부 강성 요소가 초기에는 인체의 자연스러운 움직임을 방해할 수 있지만, 시간이 지남에 따라 신체가 장치에 적응하고 보조 토크의 활용이 최적화됨에 따라 이동 효율이 증가함을 시사한다. 이로써 외부 강성 보조 장치의 효과를 정량적으로 평가하기 위해서는 적응 기간을 실험 설계에서 명확히 정의하고 통제하는 것이 필수적이다.

그러므로, 러닝화 연구에서도 추가된 외부 강성요소에 대한 적응기간과 인체 이동 효율 간 관계를 규명할 필요가 있다. 외부 강성 요소의 효과를 해석할 때에는 단순한 착용 직후의 효율 지표가 아니라, 충분한 적응 시간이 반영된 후의 데이터를 기준으로 평가해야 한다. 이는 강성 변화에 대한 신체의 역학적 반응이 시간 축에 따라 동적으로 변화하며, 그 변화 양상을 계량적으로 분석하는 것이 장치 설계 및 적용 기준 설정에 필수적임을 시사한다. 하지만 현재까지 명확하게 보고된 바가 없으며, 다수의 연구에서는 인체가 외부 강성 요소에 적응하였는지 여부가 확실치 않다[3]. 또한 외부 강성 요소 추가 시 인체 하지 관절의 운동역학적 특성이 시간에 따라 어떻게 변화하는지에 대해서는 아직 명확히 밝혀지지 않았다. 따라서, 본 연구에서는 러닝화에 추가된 외부 강성 요소(카본 플레이트)에 적응하여 이동 효율이 향상하는데 필요한 적응 기간 (또는 거리)과 이 기간 동안 인체가 채택하는 적응 전략을 함께 규명하고자 한다.

2.연구 방법

본 연구에서는 하지 관절에 카본 플레이트를 결합하여 5단계의 강성을 구현한 러닝화를 사용하였으며, 11명의 건강한 피험자를 대상으로 5주간 총 5번의 보행 실험을 수행하였다. 실험의 제1회차부터 제5회차까지 모션 캡쳐, 지면반력 및 역운동학을 통한 관절 토크 계산을 수행하였고, VO_2는 대조군, 최적강성, 최적강성의 약 2배 등 3개 조건에 대해 동일한 적응 및 측정 프로토콜로 휴대용 대사분석기를

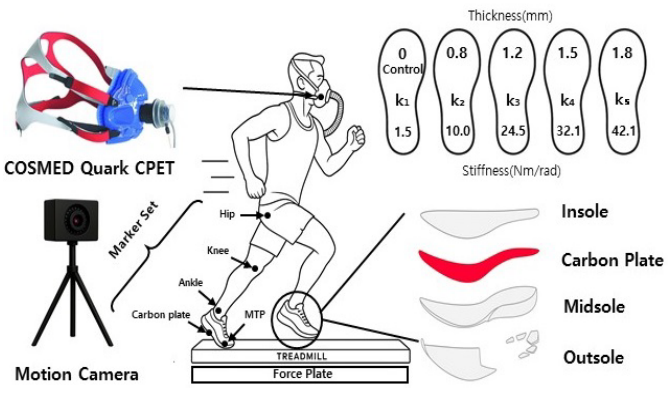


그림 1. 실험 구성

사용하여 측정하였다. 수집된 데이터는 주차 별 및 강성별로 관절 토크 적분, 역학적 일, 관절 가동범위 및 VO_2 변화를 비교 및 분석하여 러닝 중 하지의 동역학적 특성이 시간과 주행 시간 및 거리에 따라 어떻게 변화하는지를 정량적으로 분석하였다.

3. 연구 결과

측정된 하지 관절 토크 값은 시간의 경과와 러닝화의 굽힘 강성 조건에 따라 분석되었다. 분석 결과, Hip, Knee, Ankle, MTP 각 관절의 토크 값은 실험 초기에는 주차별로 뚜렷한 변화를 보였으나, 4주차 이후부터는 주차 간 평균 기준으로 큰 변동 없이 일정하게 유지되었다. 이는 신체가 외부의 굽힘 강성 변화에 점진적으로 적응하며, 일정 시점 이후 안정된 운동역학적 패턴을 형성한다는 점을 보여준다.

강성 조건별로 살펴보면, K=5 조건에서는 Knee를 제외한 모든 관절에서 가장 큰 절댓값의 토크가 측정되었다. 이는 과도한 강성이 하지 관절에 높은 하중을 유발함을 시사한다. 반면, K=2 및 K=3 조건에서는 Hip, Knee, Ankle, MTP 대부분의 관절에서 상대적으로 낮은 평균 토크 값이 나타났으며, 주차 간 변화 또한 제한적이거나 통계적으로 유의하지 않은 수준을 보였다. 이러한 결과는 중간 수준의 강성이 상대적으로 안정된 관절 운동을 유도함을 의미한다.

관절 별 세부 분석에서는 Ankle에서 모든 강성 조건(k=1~5)에서 1주차와 5주차 간 유의미한 차이($p<0.05$)가 나타났으며, Hip 관절에서는 k=3에서 3주차와 4주차 간($p=0.038$), 그리고 k=1, k=2, k=3 조건에서 1주차와 5주차 간 유의한 차이($p=0.010$, $p=0.035$, $p=0.042$)가 확인되었다. Knee 관절에서는 k=3 조건에서 2주차와 3주차($p=0.009$), 1주차와 3주차($p=0.036$) 간의 유의미한 차이가 관찰되었고, 1주차와 5주차 간에는 모든 강성 조건에서 통계적으로 유의한 변화($p<0.05$)가 나타났다. 특히 Knee에서는 1주차부터 3주차까지 평균 토크 값이 점진적으로 감소하였으며, 이는 시간이 지남에 따라 근육 및 관절 수준에서의 운동 패턴이 점차 안정화된다는 점을 보여준다.

이러한 mechanical work의 안정화 경향은 에너지 소모를 나타내는 VO_2 결과에서도 유사하게 관찰되었다. VO_2는 측정 방법에 민감한 파라미터로 절대적인 수치 비교에는 한계가 있으나, 실험 결과 1주차와 5주차 간 VO_2의 평균값 차이는 감소 방향으로 나타났으며, 표준편차 또한 시간이 지남에 따라 점차 감소하는 경향을 보였다. 이는 시간이 지날수록 피험자 간 반응의 일관성이 증가하고, 더 많은 피험자들이 러닝 효율 향상(VO_2 감소)의 추세를 보인다는 점을 의미한다. 따라서 VO_2 변화 또한 mechanical work 안정화와 같은 시점, 즉 약 4주 이후부터 안정된 상태로 수렴하는 것으로 해석할 수 있다.

결과적으로, 본 연구에서는 신체가 외부 강성 요소에 완전히 적응하기 위해 최소 약 4주의 착용 기간이 필요함을 확인하였다. 4주 이후에는 Hip, Knee, Ankle, MTP 관절의 토크뿐 아니라 mechanical work 및 VO_2 변화도 안정화되며, 신체가 외부 굽힘 강성에 충분히 적응하였음을 보여준다. 이는 단기간의 평가에서는 강성 요소의 효과가 과소평가될 수 있음을 의미하며, 러닝화 또는 외골격 장비 등 외부 강성을 포함한 시스템의 성능을 평가할 때는 충분한 적응 기간을 고려해야 한다는 점을 시사한다.

또한, 적응 기간 동안 카본 플레이트를 통한 탄성에너지의 저장 및 재활용량이 증가하였으며, 이에 따라 인체는 점차 MTP 및 Ankle 관절에서의 근골격계 사용 비중을 줄이고, 카본 플레이트를 활용한 탄성에너지 회수를 극대화하는 방향으로 에너지 효율을 높이는 적응 전략을 수행한 것으로 보인다. 이러한 적응 과정은 시간이 지남에 따라 mechanical work와 VO_2 모두에서 표준편차가 감소하고, 보다 일관된 효율 향상 패턴을 보이는 결과와 일치한다.

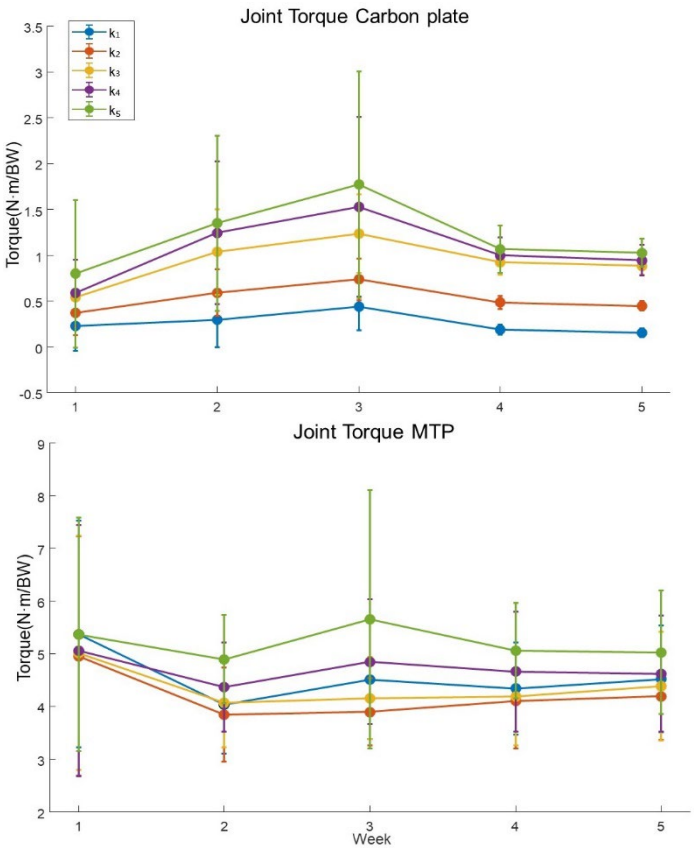


그림 2. CBN과 MTP 관절의 주차 별 토크 변화. 두 관절은 4주차 이후 안정화 양상이 가장 뚜렷하게 나타난 대표적인 예시이며, 다른 관절들(Ankle, Knee, Hip)에서도 유사한 경향이 관찰되었다.

결국 본 연구는, 외부 강성 요소가 포함된 러닝화의 성능 평가에 있어 단기 실험으로는 신체의 적응 과정을 충분히 반영하기 어렵고, mechanical work와 VO_2가 안정화되는 약 4주 이상의 적응 기간을 거쳐야 정확한 효율 평가가 가능함을 보여준다. 이는 향후 러닝화뿐 아니라 외골격 로봇 등 유사한 원리의 착용형 강성 보조 장치 연구에도 적용 가능한 중요한 근거를 제공한다.

4. Acknowledgements

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) (RS-2023-00252471)

5.참고 문헌

[1] Oh K. Dynamic Changes depending on Adaptation to Assistive Joint Stiffness in Metatarsophalangeal Joint during Human Running. J Biomed Eng Res. 2024;45(2):57–65. doi:10.9718/JBER.2024.45.2.57.

[2] Sawicki GS, Beck ON, Kang I, Young AJ. The exoskeleton expansion: improving walking and running economy. J Neuroeng Rehabil. 2020;17(1):25.

[3] Ortega JD, Farley CT. Effects of aging on mechanical efficiency and muscle activation during level and uphill walking. J Appl Physiol. 2021;130(4):1286–94.

Poster-110

착용형 센서를 활용한 딥러닝 기반 보행 동작 의도 파악 기법 및 성능 비교

박건우[1], 노병욱[1], 오건영[1*]
경북대학교 기계공학과[1]

Intent Recognition in Gait Transition Using Wearable Sensors with Deep Learning and Performance Comparison

Geonwoo Park[1], Byunguk Rho[1], Keonyoung Oh[*]
School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University, Korea
[*] kyoh@knu.ac.kr

Abstract

This study proposes a deep learning model-based gait transition intention recognition method using wearable sensors and compares the classification performance of different sensor types. An insole-type pressure sensor, an IMU sensor, and a cuff-type pressure sensor were used to record a series of motions, including sitting, standing, walking, and running. Deep learning techniques were then applied to movement classification. The overall accuracies of the predicted movement states based on data from the IMU, insole-type pressure, and cuff-type pressure sensors were 97.13%, 93.61%, and 82.19%, respectively.

1. 연구 배경

최근, 인간의 보행 효율을 향상시키거나 보행 재활을 도와주는 목적으로 착용형 보조로봇 및 보행을 보조해주는 기기들의 개발이 늘어나고 있다. 착용형 보조로봇이나 보행 보조장치가 착용자의 보행을 보조해주기 위해서는 구동부의 높은 힘이 요구된다. 이를 위해 구동부의 기어 비(감속비)를 높이게 될 경우 back-drivability 문제가 발생하거나 착용자의 의도에 반하는 움직임이 발생할 수 있어 착용자의 로봇에 대한 적응을 늦추거나 보행 효율을 감소시킬 수 있다. 따라서 착용형 보조 장치 및 웨어러블 로봇이 착용자에게 적절한 힘을 보조해주기 위해서는 로봇이 착용자의 움직이고자 하는 의도를 파악한 후 적절한 힘을 지원해주는 의도 파악 기술 개발이 필수적이다.

기존의 의도 파악 기술에는 착용자의 움직임 이전 발생하는 뇌파 신호를 감지해 착용자의 의도를 파악하는 EEG 및 근 수축 이전 근육에 발생하는 전기 신호를 감지해 착용자의 의도를 파악하는 EMG 방식을 활용해 왔다. 착용형 로봇에서 EEG 및 EMG를 활용할 경우 안정성과 편리성을 위해 일반적으로 비 침습 방식이 선호되는데 EEG의 경우 임피던스를 최소화하기 위해 착용자의 모발을 헤쳐가며 전극을 설치해야 하고 EMG의 경우 피부에 존재하는 각질을 제거 후 설치해야 하는 등, 착용까지의 시간이 비교적 오래 소요된다. 또한 EEG 및 EMG는 신호의 품질이 착용자의 땀이나 움직임 등 외부 노이즈에 민감하다는 단점이 존재한다[1].

EMG 및 EEG 기반 의도 파악 기술의 한계를 극복하기 위해 신호가 외부 노이즈에 강인하고 착용이 간편한 착용형 센서를 활용한 의도 파악 기술이 연구되고 있다. IMU 센서를 활용한 의도파악 기법의 경우, 착용자가 움직이게 되면 착용부의 가속도와 각속도를 측정해 착용자의 의도를 파악하는 원리이며 착용이 간편하며 외부 노이즈에 신호가 강인하다. 인솔형 센서를 활용한 의도파악 기법은 착용자가 움직임을 전환하거나 보행 시 발생하는 발바닥 압력을 측정해 의도를 파악하는 방식으로 센서의 신호측정이 빠르고 정확하다. 근 부피 센서를 활용한 의도 파악 기법의 경우, 착용자가 움직일 때 발생하는 근육 부피의 변화를 측정해 의도를 파악하는 방식으로 실제 동작에 선행해 근 부피가 변화하므로 착용자의 의도를 빠르게 감지해낼 수 있다[2].

본 연구에서는 착용이 간편하고 외부의 노이즈에 신호에 강인한 착용형 센서를 활용한 딥 러닝 모델 기반 보행 동작 의도 파악 기법을 제안하고 기법 간 성능을 비교, 분석하고자 한다.

2. 연구 방법

15명(25.53 ± 0.62세)의 건장한 성인을 대상으로 IMU 센서, 인솔 센서, 근 부피 센서를 착용 후, 서기(10초), 앉기(10초), 서기(10초), 걷기(10초), 서기(10초), 걷기(10초), 뛰기(10초), 서기(10초), 뛰기(10초), 서기(10초)로 이어지는 연속 동작 실험을 진행하였으며 피험자는 사전에 준비된 음성 안내 신호에 따라 연속 동작을 수행하였다. 피험자는 총 12회 연속 동작을 반복 수행하였으며 이때 모든 센서는 100Hz의 샘플링 주파수로 보행 동작 신호를 측정하였다[3]. 실험 전 경북대 연구윤리위원회의 사전 승인을 획득하였다. (IRB 번호: 2025-0247)

보행 신호로부터 보행 동작을 분류하기 위해 딥 러닝 모델을 활용하였으며, 과거 정보를 활용해 시계열 데이터 처리에 강점을 가지는 LSTM (Long Short-Term Memory) 모델을 선택하였다. LSTM 모델은 300 유닛을 가지는 2개의 LSTM 레이어와 1개의 배치 정규화 레이어, 완전연결 계층 레이어와 소프트맥스 레이어로 구성하였다. 딥러닝 모델 학습을 위해 보행 신호 데이터 라벨링을 진행하였으며 이렇게 획득한 총 12개의 데이터 중 9개를 모델 학습에,

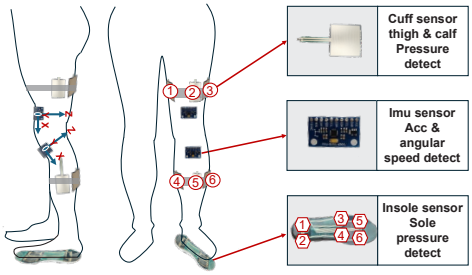


그림 1. 착용형 센서를 활용한 보행 동작 신호 분석 시스템

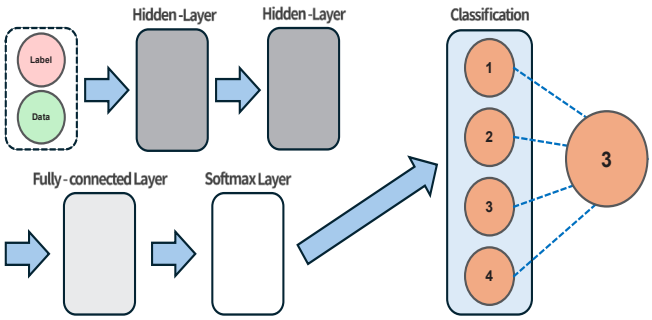


그림 2. LSTM 모델 구성도

3개를 모델 정확도 검증에 활용하였다.

3. 연구 결과

한 명의 피험자 데이터를 가지고 도출한 초기 연구 결과, 전체 동작 정확도 검증에서 인솔 센서, IMU 센서, 근 부피 센서 신호 기반 의도 파악 기법은 그림 3과 같이 각각 93.61%, 97.13%, 82.19%의 정확도를 기록하였다. 세 가지 기법 중, IMU 센서 신호 기반 의도 파악 기법이 가장 우수한 정확도를 나타내었으며 인솔 센서 신호 기반 의도 파악 기법 또한 IMU 신호 기반 기법과 유사한 정확도를 기록하였다. 근 부피 센서 신호 기반 의도 파악 기법은 앞선 두 기법 대비 다소 낮은 정확도를 기록하였다.

동작 별 정확도 검증 결과, 그림 4와 같이 앉기 동작에서 인솔 센서, IMU 센서, 근 부피 센서 신호 기반 의도 파악 기법은 각각 78.31%, 97.35%, 86.97%의 정확도를 기록하였으며 근 부피 센서 신호 기반 의도 파악 모델의 정확도가 가장 높게 나타났다. 서기 동작의 경우 인솔 센서, IMU 센서, 근 부피 센서 신호 기반 의도 파악 기법은 각각 96.36%, 96.99%, 93.34%의 정확도를 기록하였으며 IMU 센서 신호 기반 의도 파악 모델의 정확도가 가장 높게 나타났다. 걷기 동작의 경우 인솔 센서, IMU 센서, 근 부피 센서 신호 기반 의도 파악 기법은 각각 93.02%, 96.99%, 68.79%의 정확도를 기록하였으며 뛰기 동작의 경우 인솔 센서, IMU 센서, 근 부피 센서 신호 기반 의도 파악 기법은 각각 95.55%, 97.47%, 67.64%의 정확도를 기록하였다.

보행 동작 분류 예비 검증 결과, IMU 센서 신호 기반 의도 파악 기법이 가장 우수한 보행 동작 분류 성능을 보였으며, 모든 동작 분류에서 95% 이상의 보행 동작 분류 성능을 보였다. 인솔 센서 신호 기반 의도 파악 기법 역시 IMU 센서 기반 모델과 유사한 성능을 보였으며 특히 서기

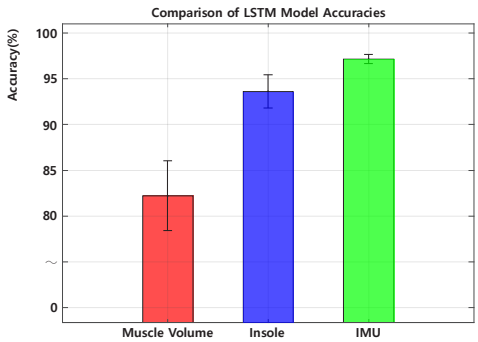


그림 3. 의도 파악 기법 간 정확도 비교

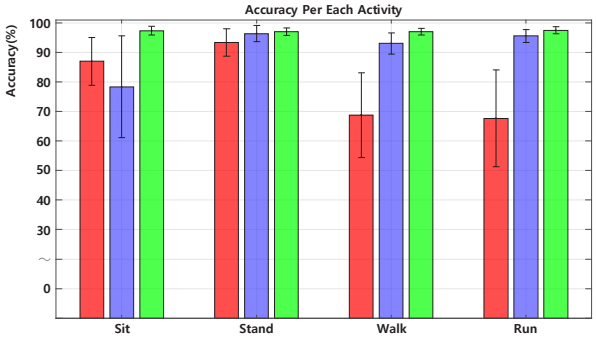


그림 4. 동작 별 의도 파악 기법 간 정확도 비교

및 뛰기 동작 분류에서 우수한 성능을 나타내었다. 근 부피 센서 신호 기반 의도 파악 기법은 앞선 두 모델 대비 다소 낮은 성능을 기록하였으나 앉기 및 서기 동작 분류에서 높은 성능을 나타내었다.

향후 15명의 피험자 데이터를 분석하여 성능 검증 결과의 신뢰도를 높일 계획이며, 추후 본 연구에서 제안한 기법이 보행보조장치 및 웨어러블 로봇에 적용될 경우 착용자가 움직이고자 하는 의도를 로봇이 정확히 인식하여 착용자에게 보조장치의 적절한 힘이 제공되어 착용자의 로봇에 대한 적응도 및 보행 효율을 향상시킬 것으로 기대된다.

4. Acknowledgements

이 논문은 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(No. P0020616, 2024년 산업혁신인재성장지원사업)

본 연구는 보건복지부 국립재활원 재활연구개발용역사업(R&D) 재활로봇중개연구사업(NRCTR-EX25007)으로 수행되었습니다.

5. 참고 문헌

[1] N. Hooda, R. Das, and N. Kumar. "Fusion of EEG and EMG signals for classification of unilateral foot movements." Biomedical Signal Processing and Control, Vol 60, 101990, 2020

[2] J. J. Lin, C. K. Hsu, W. L. Hsu, T. C. Tsao, F. C. Wang, and J. Y. Yen. "Machine learning for human motion intention detection." Sensors, Vol 23, No.16, 7203, 2023

[3] Y. Liu, X. Liu, Z. Wang, X. Yang, and X. Wang. "Improving performance of human action intent recognition: analysis of gait recognition machine learning algorithms and optimal combination with inertial measurement units." Computers in Biology and Medicine, Vol 163, 107192, 2023

Poster-111

고령자의 인지기능 변화에 따른 하지 관절의 종단적 변화

윤정은[1], 곽기영[2], 이신영[1], 윤채린[1], *김동욱[23], 서동권[2]

[1]전북대학교 대학원 헬스케어공학과

[2]전북대학교 공과대학 바이오메디컬공학부

[3]전북대학교 고령친화복지기기연구센터

Longitudinal Changes in Lower-Limb Joint Kinematic According to Cognitive Function Change in Older Adults

Jeongeun Yoon[1], Kiyoung Kwak[2], Shinyoung Lee[1], Chaerin Yun[1], *Dongwook Kim[2,3], Donggwon seo[2]

[1]Department of Healthcare Engineering, Graduate School, Jeonbuk National University, Korea

[2]Division of Biomedical Engineering, College of Engineering, Jeonbuk National University, Korea

[3]Research Center for Healthcare & Welfare Instrument for the Elderly, Jeonbuk National University, Korea

*biomed@jbnu.ac.kr

Abstract

Dementia is an irreversible neurodegenerative disease; therefore, early detection and preventive intervention are essential. This study aimed to explore the potential of gait kinematics as an indicator for early detection and intervention of cognitive decline. To this end, the longitudinal relationship between cognitive function and kinematic joint function was examined. Participants with cognitive decline exhibited gait patterns similar to those observed in aging, whereas those with improved cognitive function showed little or no change. Groups that maintained normal or at-risk cognitive levels exhibited only minor changes, while the at-risk group for cognitive decline showed a marked reduction in ankle flexibility. These findings suggest that cognitive function is closely associated with gait-related kinematic joint function and may provide a foundation for the identification of early predictive biomarkers and the development of intervention strategies for cognitive decline.

1. 연구 배경

치매는 고령화 사회에서 급속히 증가하는 대표적인 신경퇴행질환이다. 치매의 진행은 비가역적이기 때문에, 발병 이후의 치료보다 조기 발견과 예방적 중재가 핵심적인 대응 전략으로 강조되고 있다. 특히, 인지기능 저하 고위험군 단계를 정확히 판별하는 것은 향후 인지기능 악화를 예방하는 데 매우 중요하다[1,2]. 그러나 기존의 인지기능 평가는 주로 신경심리검사나 뇌 영상 분석에 의존하고 있어, 환경적 제약과 비용 부담 등 실용적 한계가 지적되고 있다[3]. 이러한 이유로, 인지기능 변화를 보다 일상적이고 비침습적인 지표를 통해 추적할 수 있는 새로운 접근법이 요구되고 있다.

최근 연구에서는 인지기능 저하가 단순 신경학적 변화에 그치지 않고, 신체의 움직임 조절 능력과 밀접한 관련이 있다는 사실이 보고되고 있다[4,5]. 특히 보행은 신체 기능 중에서도 중추신경계의 통합적 제어와 인지적 처리 과정을 모두 반영하는 복합적인 활동으로, 인지기능 변화의 초기 징후를 포착할 수 있는 잠재적 지표로 주목받고 있다[6,7]. 선행연구들에서는 보행 속도, 보폭, 활보장, 보빈도 등의 시공간 변수와 관절 운동 특성이 인지기능 저하와의 상관관계를 보여 조기 진단 지표로서의 가능성을 제시하였으나, 대부분 단면적 분석에 머물러 있어 시간에 따른 변화 양상은 충분히 검증되지 않았다[7-9].

이에 본 연구는 이러한 단면적 연구의 한계를 보완하고, 인지기능의 변화가 실제로 시간의 흐름에 따라 보행 관절 운동에 어떠한 영향을 미치는지를 확인하기 위해 수행되었다. 인지기능 변화에 따라 집단을 분류하고, 3년간의 종단 데이터를 기반으로 고관절·슬관절·족관절의 운동학적 변화를 비교·분석하였다. 이를 통해 인지기능 변화와 보행 특성 간의 연관성을 파악하고, 보행 관절의 운동학적 변수가 인지기능 저하의 조기 예측 및 중재 지표로 활용될 수 있는 기반을 마련하고자 하였다.

2.연구 방법

본 연구는 2022년부터 2025년까지 수행되었으며, 만 65세 이상의 지역사회 거주 고령자를 대상으로 하였다.

모든 참여자는 연구 목적과 절차, 수집되는 정보에 대한 설명을 충분히 들은 후 자발적으로 동의하였다. 연구는 전북대학교 생명윤리심의위원회의 승인을 받아 진행되었다. (JBNU IRB File No. 2023-11-015-001).

연구 참여자들은 1년마다 3차례에 걸쳐 실험실에 방문하여 인지기능과 보행기능을 평가받았다.

인지기능 평가는 K-MoCA(한국판 몬트리올 인지평가)를 이용하였으며, 점수에 따라 NC(정상군, 30~26점), Risk(인지기능 저하 고위험군, 25~21점), MCIs(인지기능 저하군, 20점 이하)으로 구분하였다[1].

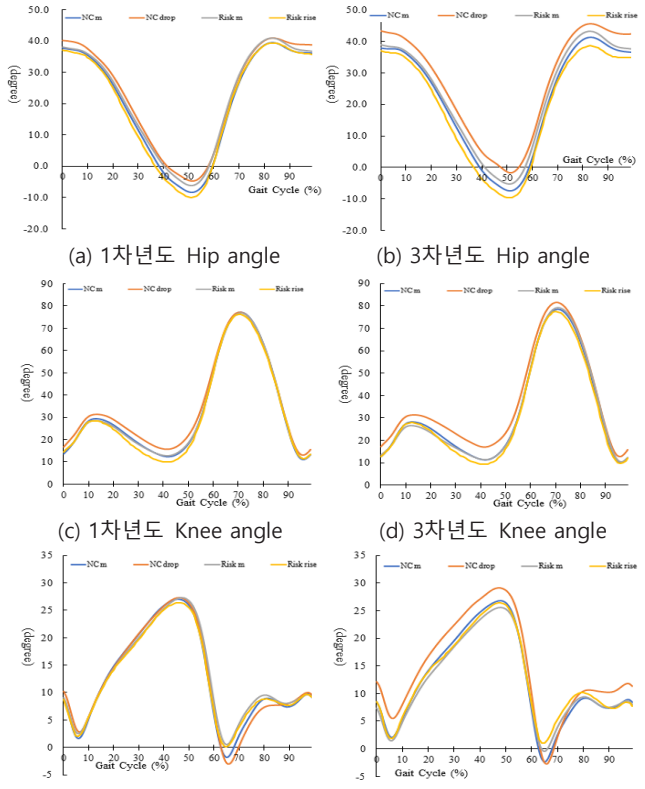
보행기능은 대상자에게 17개의 능동 적외선 발광 마커(Smart Marker, Northern Digital Inc., Canada)를 부착한 상태에서 평상시와 유사한 속도로 보행하는 모습을 측정하였다. 3차원 동작분석기, 동작 캡처 소프트웨어, 그리고 2대의 힘판을 이용하여 데이터를 수집하였으며, 근골격계 모델링 소프트웨어(SIMM, Motion Analysis Corp, USA)를 이용하여 시공간 변수 및 보행 관절의 운동학적 변수를 산출하였다.

인지기능의 1차 및 3차 방문 결과를 기준으로 NC m(NC→NC), NC drop(NC→Risk), Risk m(Risk→Risk), Risk rise(Risk→NC) 그룹으로 분류하였으며, 각 그룹의 특성을 비교·분석하였다. 그룹 간 종단적 변화를 확인하기 위해 혼합효과 반복측정 분산분석(Mixed Effect Repeated

Measures ANOVA)을 실시하여 유의성을 검정하였다. 분석 시 1차 방문 연령을 공변량으로 설정하였으며, 개체 간 요인은 앞서 분류한 그룹으로 지정하였다. 통계 분석은 SPSS 27.0 소프트웨어를 이용하였다.

샘플 수가 적은 MCIs 포함 그룹(4명)은 분석에서 제외하였다. 1차 방문 시점의 평균 연령은 NC m (72.5±2세), NC drop (76.6±3.4세), Risk m (76.7±3.9세), Risk rise (74.4±3.6세)으로 나타났으며, NC m-Risk m 및 NC m-NC drop 간의 차이가 통계적으로 유의하였다($p<0.05$).

3. 연구 결과



(a) 1차년도 Hip angle (b) 3차년도 Hip angle

(c) 1차년도 Knee angle (d) 3차년도 Knee angle

(e) 1차년도 Ankle angle (f) 3차년도 Ankle angle

<그림 1. 인지기능 그룹별 관절 각도의 종단적 변화>

다른 그룹들과 비교했을 때, 1차년도와 3차년도 모두 인지기능이 향상된 Risk rise 그룹에서는 고관절의 굴곡이 가장 작고 신전이 가장 크게 나타났다. 슬관절의 경우, 1차년도 Terminal Stance 구간에서 비교적 큰 신전이 두드러졌으며, 이러한 경향은 3차년도에서도 동일하게 유지되었다. 반면, 인지기능이 저하된 NC drop 그룹은 1차년도에서 보인 특성이 3차년도에 더욱 뚜렷해졌다. 고관절에선 굴곡이 크고 신전이 작았으며, 슬관절은 Loading Response 구간에서 가장 큰 굴곡을, Terminal Stance 구간에서 가장 작은 신전을 보였다. 또한, 족관절에서는 초기 Dorsi-flexion이 가장 큰 것으로 나타났다.

그룹별로 1차년도와 3차년도를 비교하면, Risk rise 그룹은 모든 관절에서 변화가 거의 없었으며, NC drop 그룹은 3년동안 가장 크게 변화했다. NC drop 그룹은 고관절과 슬관절의 굴곡이 증가하고 신전이 감소하였으며, 족관절의 Dorsi-flexion이 증가하였다. 반면, 인지기능을 유지한 NC m 및 Risk m 그룹은 변화의 폭이 상대적으로 작았다. 고관절에서는 굴곡이 약간 증가하고 신전이 감소하였으며, 슬관절은 굴곡이 감소하고 신전이 증가하는 경향을 보였다. 두 그룹은 전반적인 변화의 양상이 유사했으나, Risk m 그룹에서 특히 족관절의 Dorsi-flexion에서 크게 감소하는 차이를 보였다.

종합적으로, 인지기능이 감소한 그룹은 노화와 유사한 보행 형태를 보였으며, 인지기능이 향상된 그룹은 3년동안 거의 변화가 없었다. 인지기능을 유지한 그룹들은 인지기능이 저하된 그룹에 비해 변화가 적었으나, 인지기능이 저하된 상태를 유지하는 그룹의 발목 유연성이 더욱 감소하였다.

본 연구 결과는 인지기능 변화가 보행 운동학적 특성과 밀접하게 관련되어 있음을 보여주며, 보행 관절의 운동학적 변수가 인지기능 저하의 조기 지표로 활용될 가능성을 제시하였다. 향후에는 보행 변수의 변화를 보다 심층적으로 분석하여 인지기능 저하 조기 예측 및 중재에 적용할 수 있는 기반을 마련할 수 있을 것으로 기대된다.

4. Acknowledgements

이 성과는 정부(과학기술정보통신부 및 교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2022-NR070417, RS-2022-NR074923).

5.참고 문헌

[1] Geraud M. F. C. Dautzenberg et. al., “The Montreal Cognitive Assessment (MoCA) with a double threshold: improving the MoCA for triaging patients in need of a neuropsychological assessment”. Vol. 34, 2022

[2] Sylvie Belleville et. al., “Five-year effects of cognitive training in individuals with mild cognitive impairment.” Diagnosis, Assessment Disease Monitoring, Vol.10, 2024

[3] C.R.Jack Jr. et. al. "NIA-AA Research Framework: Toward a biological definition of Alzheimer’s disease." *Alzheimer’s&Dementia,* 535-562, 2018

[4] Montero-Odasso, M., Verghese, J., Beauchet, O., & Hausdorff, J. M., “Gait and cognition: A complementary approach to understanding brain fuction and the risk of falling.”, Journal of the American Geriatric Society, 60(11), 2027-2136, 2012

[5] Marianna Amboni, MD, Phd et al., "Cognitive Contributions to Gait and Falls: Evidence." *Health of national instututes,* 28(11), 1520-1533, 2013

[6] Galit Yogev-Seligmann, MscPT et. al., "The Role of Executive Function and Attention in Gait." *Movement Disorders,* Vol 23, No.3, 2008

[7] Rosie Morris et. al., "Gait and cognition: Mapping the global and discrete relationships in ageing and neurodegenerative disease." *Neuroscience & Biobehavioral Reciew,* Vol 64, p326-345, 2016

[8] Lindsay Bahureksa et. al., "The Impact of Mild Cognitive Impairment on Gait and Balance: A Systematic Review and Meta-Analysis of Studies Using Instrumented Assessment." *Gerontology,* Vol 63, p67-83, 2016

[9] Kiyoung Kwak et. al., “Differences in Gait Cycle and Biomechanical Lower-Limb Joint Function between Elderly People with and without Cognitive decline.” Applied sciences, 11(17), 2021

Poster-112

자율 보행 트레드밀 재활에서 뇌졸중 환자의 뇌전도 기반 뇌 연결성 활성도 비교

채현찬[1], 오지우[1], 홍성진[2], 박형순[2*], 오건영[1*]
경북대학교 기계공학과[1], 한국과학기술원[2]

Comparison of EEG-based Cortical Connectivity Activation in Stroke Patients during Self-paced Treadmill Gait Rehabilitation

Hyeon Chan Chei[1], Ji Woo Oh[1], Seong-Jin Hong[2], Hyung-Soon Park[2*], Keonyoung Oh[1*]
School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University[1], Korea
School of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST)[2], Korea
hyungspark@kaist.ac.kr[*], kyoh@knu.ac.kr[*]

Abstract

This study investigates the effects of self-paced gait rehabilitation on cortical functional connectivity and neuroplasticity in stroke patients using EEG-based analysis. EEG data were collected from eight stroke survivors during both self-paced and fixed-speed treadmill walking. After preprocessing using independent component analysis (ICA) and artifact subspace reconstruction (ASR), functional connectivity was assessed through coherence measures. Results indicated that self-paced walking induced stronger cortical synchronization and directional connectivity particularly between frontal and motor-related areas compared to fixed-speed walking. These findings suggest that self-paced gait training not only enhances cortical engagement but also facilitates neuroplasticity, supporting its utility as an effective intervention for post-stroke gait rehabilitation.

1. 연구 배경

뇌졸중 재활의 핵심은 손상된 뇌 기능을 회복하기 위한 신경 가소성(neuroplasticity)의 촉진에 있다. 신경 가소성은 반복적인 운동 학습이나 보행 훈련을 통해 촉진될 수 있으며, 운동 기능 회복을 위한 뇌의 재조직화 과정에서 핵심적인 역할을 수행한다.

자율 보행(self-paced) 트레드밀은 이러한 신경 가소성 유도를 위한 효과적인 재활 플랫폼으로 주목받고 있다. 이는 사용자의 보행 의도에 따라 속도가 실시간으로 조절되는 방식으로, 기존의 고정 속도(fixed-speed) 트레드밀과 달리 능동적 참여와 감각 피드백을 동반한 보행 환경을 제공한다. 실제 지면 보행과 유사한 운동 시나리오를 구현함으로써, 보다 자연스럽고 역동적인 뇌 활성화를 유도할 수 있다.

이러한 보행 중 뇌의 반응을 실시간으로 측정하고 분석하기 위해, 뇌전도(EEG, electroencephalography)를 사용하였다. EEG는 높은 시간 해상도를 기반으로 운동 계획, 실행, 피드백 과정에서의 피질 활동 변화를 민감하게 추적할 수 있기에 임상 및 재활 연구에 광범위하게 활용되고 있다.

특히 EEG 기반의 뇌 연결성 분석은 운동 중 발생하는 뇌 영역 간 네트워크의 동적 변화를 파악하는 데 유용하다. 그중 coherence는 특정 주파수 대역에서 두 뇌 신호 간의 동기화 수준을 수치화하는 지표로, 뇌 영역 간의 기능적 연동 정도를 평가할 수 있다. Coherence 값이 클수록 두 신호 간 연결성이 크다는 것을 시사한다.

이에 본 연구는 자율 보행 트레드밀과 고정 속도 트레드밀 조건에서 특정된 EEG 데이터를 바탕으로, coherence 기반의 연결성 분석을 수행하고, 어떤 조건이 더 높은 신경 가소성 촉진에 유리한지 비교하고자 한다. 또한 조건 별 coherence의 뇌 영역 간의 network plot을 통해, 보행 시 어떤 뇌 영역에서의 연결성이 활성화되는지 살펴보고, 보행에 관여하는 뇌 영역을 규명하고자 한다.

2. 연구 방법

실험은 총 8명의 뇌졸중 환자를 대상으로 사전에 실험 참여에 대한 동의를 받고 진행하였다. 환자들은 6명의 아급성 뇌졸중, 2명의 만성 뇌졸중 병력으로 구성되었다. 환자들의 평균 나이는 65.1세이며, 아급성 뇌졸중 환자 중 왼쪽에 병변이 있는 환자는 3명, 병변이 오른쪽에 있는 환자는 2명, 여러 영역에 병변이 발생한 환자는 1명이었다. 만성 뇌졸중 환자는 모두 오른쪽 영역에 병변이 발생하였다.

환자들은 일정한 속도 패턴을 제공하여 트레드밀이 자동으로 속도를 제어하는 'fixed-speed' 모드, 트레드밀에 탑재된 3D depth sensor(Kinect v2)를 통해 피험자의 전후 위치 변화를 감지하여 실시간으로 트레드밀 속도를 자동 조절할 수 있는 'self-paced' 모드로 보행 실험을 수행했다. 또한, 각 피험자에게 적절한 속도 수준을 제공하기 위해 사전 세션을 통해 지속적으로 걷기가 가능한 최대 속도를 먼저 측정하였으며, 이를 '빠른 목표 속도'로 정의하였다. 그리고 빠른 목표 속도의 40% 수준을 '느린 목표 속도'로 정의하였다[1].

보행 시, 뇌파 데이터 수집을 위해 antiCHamp 64ch system(BrainProduct, Germany)을 사용하였고, 500Hz로 신호를 기록하였다. 측정된 데이터는 전처리 과정을 거쳐 분석에 용이하도록 하였으며, steady-slow 조건에서의 coherence 연결성 분석이 수행되었다.

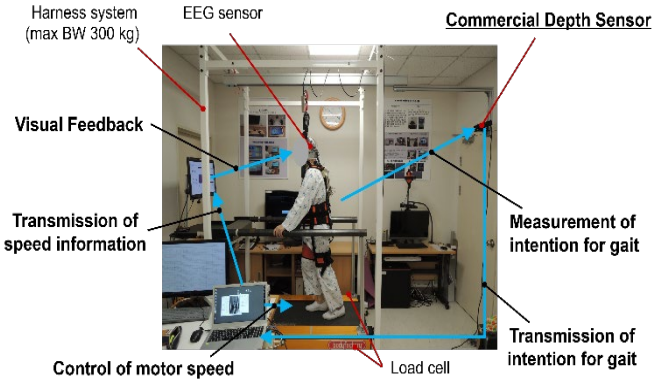


그림 1. Self-paced 트레드밀[2]

3. 연구 결과

본 연구에서는 뇌의 감각운동 조절과 밀접한 관련이 있는 저주파~중주파 대역인 5-12 Hz 범위를 분석 대상 주파수로 설정하였다. 이는 주로 세타(4-7 Hz) 및 알파(8-13 Hz) 대역에 해당하며, 기존 연구에 따르면 이 범위는 보행 중 주의 집중, 감각통합, 운동 준비 상태 등과 관련된 뇌 활동을 반영하는 것으로 알려져 있다[3]. 이번 실험에서는 8명의 피험자 중, 한 명의 피험자를 대표 예시로 하여 steady-slow 조건에서 fixed-speed 모드와 self-paced 모드를 각각 수행할 때의 coherence 분석 결과를 비교하였다. 모든 EEG 채널 쌍에 대해 coherence 값을 산출하였으며, 5-12Hz 주파수 대역의 coherence 평균값을 기반으로 threshold 0.6 이상을 활성도로 간주하여 시각화 하였다.

분석 결과, self-paced 모드에서 더 많은 채널 간 coherence가 관찰되었으며, 이를 빨간 네모 박스로 표시하였다. 이는 self-paced 보행이 fixed-speed 보행보다 더 많은 뇌 영역 간의 연결성을 활성화한다는 가능성을 시사한다. 이후, 해당 coherence 정보를 2차원 뇌 채널 맵 상에 시각화한 network plot을 작성하였다.

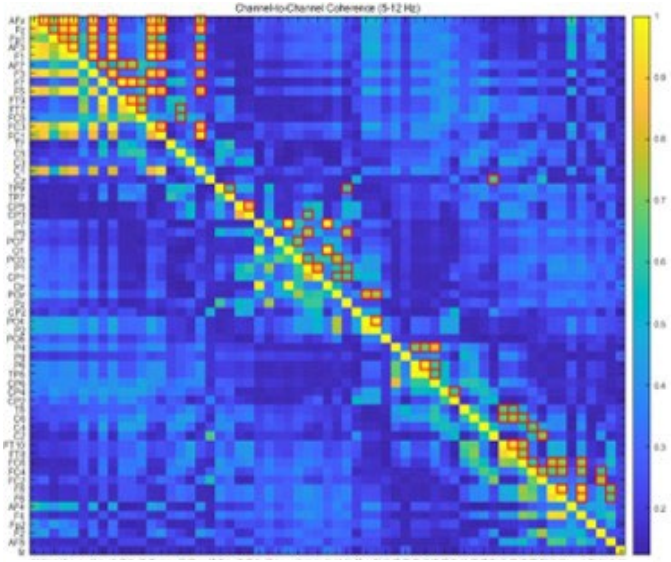


그림 2. Fixed-speed 모드에서의 coherence 결과

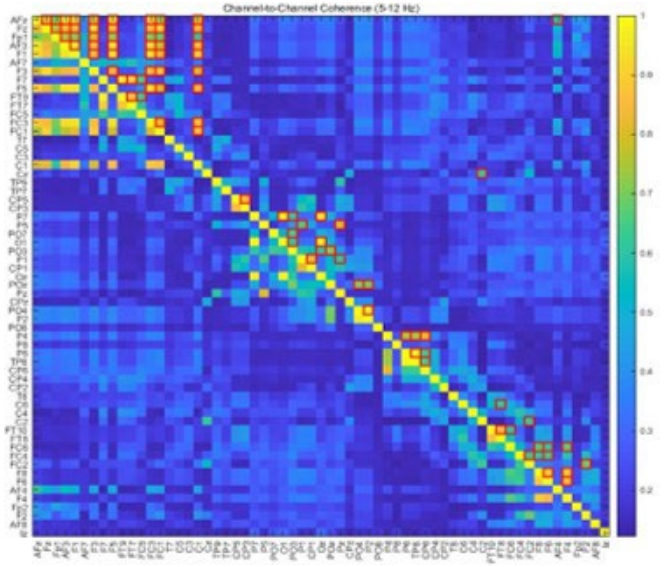


그림 3. Self-paced 모드에서의 coherence 결과

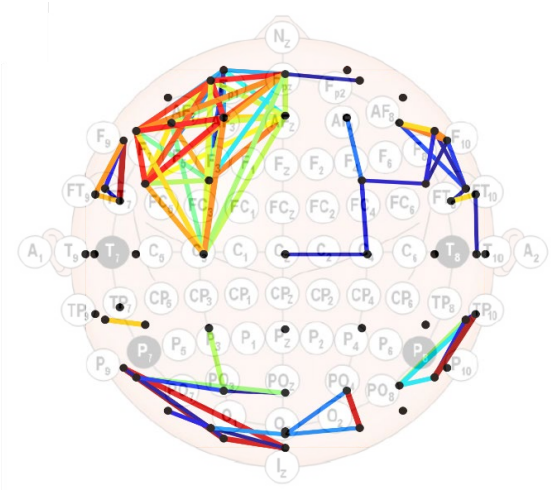


그림 4. Fixed-speed 모드에서의 coherence network

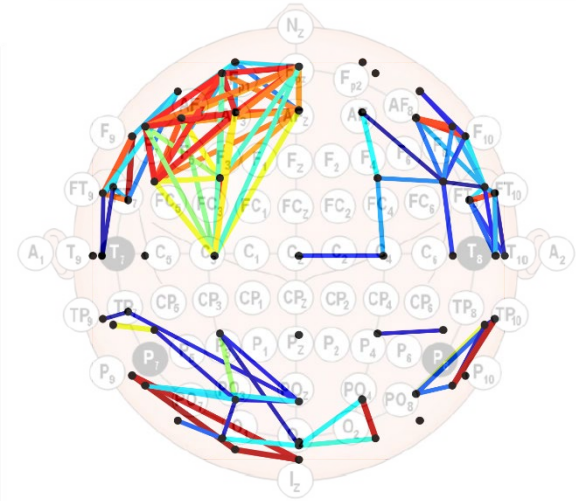


그림 5. Fixed-speed 모드에서의 coherence network

network plot 상에서 전두엽과 감각운동 영역을 중심으로 coherence 증가가 두드러졌다. Self-paced 모드에서의 활성도가 크다고 볼 수는 있지만, 일반화하기 위해서는 더 많은 수의 피험자를 대상으로 한 후속 연구와 통계적 분석이 필요하다.

4. Acknowledgements

이 연구는 분당서울대학교 병원 연구 윤리 위원회 (B-1608/358-004)의 승인을 받아 진행되었음. 또한 National Research Foundation of Korea(NRF) 과제의 지원과 (RS-2023-00252471), 보건복지부 국립재활원 재활연구개발용역사업 (R&D) 재활로봇중개연구사업 (NRCTR-EX25007)으로 진행됨.

5. 참고 문헌

[1] Seong-Jin Hong. Analysis of Brain Connectivity in Gait Cycle Using EEG During Walking on the Treadmill. Department of Mechanical Engineering. 2018. 49+iii pp. Advisor: Hyung-Soon Park. (Text in Korean)

[2] Oh, K, Park, J., Jo, S. H., Hong, S. J., Kim, W. S., Paik, N. J,. & Park, H. S. (2021). Improved cortical activity and reduced gait asymmetry during poststroke self-paced walking rehabilitation. Journal of neuroengineering and rehabilitation, 18, 1-12.

[3] Klimesch, Wolfgang. "EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: a review and analysis." *Brain research reviews* 29.2-3 (1999): 169-195.

Poster-113

착용형 Exosuit를 이용한 들어올리기 동작 중 요추부담 시점의 정량적 평가

이광희[1], 유상근[1], 김수빈[2], 유미[2*], 김영민[3], 정래훈[3], 홍철운[2], 권대규[2*]

전북대학교 대학원 헬스케어공학과[1]

전북대학교 공과대학 바이오메디컬공학부[2]

위드포스㈜[3]

Quantitative Evaluation of Lumbar Load Onset During Lifting with a Wearable Exosuit

Kwanghee Lee[1], Sangkeon You[1], Subeen Kim[2], Mi Yu[2*], Youngmin Kim[3], Laehoon Jeong[3] Chulun Hong, Taekyu Kwon[2*]

Department of Healthcare Engineering, Graduate school, Jeonbuk National University[1]

Division of Biomedical Engineering, College of Engineering, Jeonbuk National University[2]

WITHFORCE Inc.[3]

*kwon10@jbnu.ac.kr, yumi@jbnu.ac.kr

Abstract

This study aimed to quantitatively analyze the biomechanical characteristics of the lumbar spine (L5/S1) during lifting tasks using a wearable Exosuit, in order to establish a basis for optimizing assistive force timing. Thirty healthy male participants in their twenties performed lifting tasks with a 30 kg load under three postural conditions: Stoop, Semi-Squat, and Squat. Motion data were collected using an inertial-based motion capture system to measure L5/S1 flexion/extension angle, anterior flexion angular velocity, and right knee flexion/extension angle. The results showed that as posture became more upright, both the maximum flexion angle and angular velocity of the L5/S1 decreased, while the Time to Peak (TTP) was delayed. Specifically, the TTP of lumbar flexion occurred at approximately 20%, 23%, and 27% of the lifting cycle for Stoop, Semi-Squat, and Squat postures, respectively, indicating that lumbar loading is concentrated in the early phase of lifting in the Stoop posture, whereas load transfer to the lower limbs delays the lumbar peak in the Squat posture. These findings provide essential biomechanical evidence for designing timing control algorithms in Exosuit systems and can serve as a foundation for developing user-specific control strategies to improve postural stability and reduce lumbar strain during industrial lifting tasks.

1. 연구 배경

산업 및 물류 환경에서 수행되는 들어올리기 작업은 근골격계 질환(Musculoskeletal Disorders, MSDs)의 주요 원인이다. 특히 허리 부위의 과도한 굴곡과 반복적인 하중 노출은 요추에 구조적 스트레스를 가중시켜 L5/S1 분절을 중심으로 퇴행성 변화를 유발한다. 이는 만성 요통)과 같은 산업재해의 주요 원인 중 하나로, 국내외 산업 근로자의 약 60% 이상이 요통을 경험한 것으로 보고되고 있다. 이러한 배경에서, 작업자의 신체 부담을 경감하기 위한 착용형 보조기기의 필요성이 지속적으로 제기되고 있다.

최근에는 인체의 근육 작용을 보조하기 위한 Exosuit 형태의 경량 착용형 로봇이 개발되면서, 기존의 경질 외골격 대비 착용 편의성과 실용성이 향상되었다. Exosuit는 신체와 유연하게 결합되어 근육 및 관절의 움직임을 방해하지 않으면서, 하중이 집중되는 구간에서 보조력을 제공하는 특징을 가진다. 특히 Back Support Exosuit는 허리 및 엉덩이 부위의 근육 활성도를 감소시켜 근피로 누적을 완화하는 효과가 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 실제 산업 작업 상황에서는 자세, 중량, 동작 속도 등 다양한 요인이 복합적으로 작용하여 요추부 부담이 달라지기 때문에 보조력 인가 시점을 최적화하기 위한 정량적 근거가 필요하다.

기존 연구들은 Exosuit 착용 전·후의 근전도 신호 비교나 에너지 소비 감소율 평가에 초점을 맞추어 수행되었지만, L5/S1 관절의 굴곡각, 각속도, 그리고 하지 관절의 보상 움직임을 통합적으로 고려한 연구는 부족하다. 특히 들어올리기 동작의 세부 구간 중, 들어올리기 구간에서 요추부 하중이 가장 집중되는 시점(Time to Peak, TTP)을 규명하는 것은 매우 중요하다.

이 시점은 Exosuit의 보조력 인가 타이밍 제어와 직결되며, 부적절한 시점에서의 보조력은 오히려 사용자의 균형 유지나 자세 안정성을 저해할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 Exosuit 착용 시 중량물을 들어올리는 작업 자세(Stoop, Semi-Squat, Squat)에 따른 요추부(L5/S1)의 굴곡 및 각속도 변화를 정량적으로 분석하여, Lifting 구간에서 부담이 집중되는 시점을 평가하고자 한다. 이를 통해 Exosuit의 보조력 인가 타이밍 설계 및 제어 알고리즘 최적화에 필요한 생체역학적 근거를 제공하고자 한다.

2. 연구 방법

본 연구는 신체적 활동에 제약이 없는 건강한 20대 성인 남성 30명(23.3±1.68yr, 174.7±3.47cm, 71.2±6.59kg)을 대상으로 수행하였다. 대상자는 최근 6개월 이내 요통, 관절 통증, 하지 근골격계 질환의 경험이 없으며, 실험 장비 부착에 따른 피부 자극이나 알레르기 반응이 없는 자로 선정하였다. 또한, 정형외과적 또는 신경학적 진단을 받은 이력이 있거나, 심혈관계 질환 및 고혈압 등 만성 질환이 있는 경우는 제외하였다. 본 연구는 전북대학교 생명윤리위원회(Institutional Review Board, IRB)의 승인을 받아 수행되었다(IRB No: JBNU 2023-09-019-001).

동작 분석은 관성기반 모션 캡처 시스템인 Xsens Link System(Movella Technologies, Enschede, Netherlands)을 사용하였다. 총 17개의 IMU 센서가 머리, 흉골, 골반, 양측 어깨, 상완, 전완, 손, 대퇴, 하퇴, 발에 부착되었으며, 샘플링 주파수는 240 Hz로 설정하였다. 측정 항목은 요추의 L5/S1

Flexion/Extension 각도, L5 부위의 전방 굴곡 각속도(Angular Velocity), 그리고 우측 무릎(Right Knee) Flexion/Extension 관절각이었다.

각 Lifting 동작은 Bending이 시작되는 시점을 Cycle 0%, Lowering이 종료되는 시점을 Cycle 100%로 설정하여 시간 정규화를 수행하였다. 본 연구에서는 중량 조건을 30 kg으로 고정하였으며, 세 가지 자세(Stoop, Semi-Squat, Squat)에서의 Lifting 구간을 분석하였다. 이때 각 변수는 세 차례 반복 측정값의 평균으로 산출하였으며, 평균 피크 값(Average Peak), 최대 피크 값(Maximum Peak) 및 최대 피크 도달 시점(Time to Peak, TTP)을 추출하였다.

3. 연구 결과

표 1은 자세(Stoop, Semi-Squat, Squat)에 따른 L5/S1 Flexion/Extension, L5 전방 굴곡 각속도(Angular Velocity) 및 우측 무릎 Flexion/Extension의 평균값, 최대값, 그리고 최대 피크 도달 시점을 나타낸다. L5/S1 Flexion/Extension의 평균 굴곡각은 Stoop 자세에서 6.13±2.27°, Semi-Squat 자세에서 6.08±2.39°, Squat 자세에서 5.42±2.07°로 허리가 직립에 가까워질수록 감소하는 경향을 보였다. 최대 굴곡각은 각각 13.34±2.54°, 10.43±2.75°, 7.32±3.71°로, Stoop 자세에서 가장 큰 굴곡이 발생하였다. 또한 최대 굴곡각에 도달하는 시점은 Stoop 20%, Semi-Squat 23%, Squat 27%로 나타나, 자세가 직립에 가까워질수록 peak 시점이 지연되는 경향을 확인하였다.

L5 전방 굴곡 각속도(Angular Velocity)는 Stoop, Semi-Squat, Squat에서 각각 0.11±0.06 rad/s, 0.10±0.05 rad/s, 0.08±0.04 rad/s로 측정되어, Stoop 자세에서 가장 높은 각속도를 보였다. 각속도 피크 시점은 Stoop 29%, Semi-Squat 35%, Squat 37%로 나타나, Squat 자세일수록 동작 후반부에서 peak가 형성되는 특성을 보였다. 이러한 결과는 상체 굴곡 중심의 Stoop 자세에서는 요추부에 직접적인 부하가 집중되며, Semi-Squat과 Squat에서는 하지 관절의 참여로 하중이 분산됨을 의미한다.

우측 무릎 Flexion/Extension의 평균 굴곡각은 Stoop, Semi-Squat, Squat 순으로 각각 1.20±4.67°, 20.71±6.87°, 33.64±11.00°였으며, 최대 굴곡각은 7.79±7.64°, 41.64±7.64°, 60.11±14.59°로 나타났다. Squat 자세에서 무릎의 굴곡 범위가 가장 크게 증가함에 따라, 요추부의 상대적 부담이 감소하는 양상이 관찰되었다. TTP는 Stoop 22%, Semi-Squat 20%, Squat 21%로 큰 차이는 없었지만, Squat 자세에서 하지의 기여도가 뚜렷하게 높았다.

이러한 결과는 lifting 동작 시 자세에 따라 요추부(L5/S1)와 하지 관절의 운동 기여도가 다르게 나타남을 보여준다. 특히 Stoop 자세에서는 lifting 초반부(Cycle 약 20%)에 L5/S1 최대 굴곡이 발생하여 요추부 부담이 급격히 증가하였으며, 이는 보조력이 조기에 인가될 필요가 있음을 시사한다. 반면, Squat 자세에서는 lifting 중후반부(Cycle 약 27%)에서 peak가 형성되어, 보조력 인가를 다소 지연시키는 것이 효율적일 것으로 판단된다. 또한 L5 전방 굴곡 각속도 역시 Stoop 자세에서 가장 높은 값을 보여, 순간적 근수축이 집중되는 구간이 존재함을 알 수 있었다.

표 1. 리프팅 자세에 따른 요추부 및 하지 관절의 각도

Parameter	Lifting Posture	Stoop	Semi-Squat	Squat
L5/S1 Flexion/Extension	Mean (°)	6.13 ±2.27	6.08 ±2.39	5.42 ±2.07
	Time to Peak (%)	20	23	27
	Peak (°)	13.34 ±2.54	10.43 ±2.75	7.32 ±2.71
L5 Anterior Angular Velocity	Time to Peak (%)	29	35	37
	Peak (rad/s)	0.11 ±0.06	0.10 ±0.05	0.08 ±0.16
Right Knee Flexion/Extension	Mean (°)	1.20 ±4.76	20.71 ±6.87	33.64 ±11.00
	Time to Peak (%)	22	20	21
	Peak (°)	7.79 ±7.64	41.64 ±7.60	60.11 ±14.59

본 연구의 결과는 자세에 따른 요추부와 하지의 협응 패턴을 정량적으로 제시하였으며, 특히 L5/S1 부위의 최대 굴곡 및 각속도 시점이 Exosuit의 보조력 인가 타이밍 제어에 중요한 기준이 될 수 있음을 확인하였다. Stoop 자세에서는 lifting 초기(약 20% 구간)에서, Squat 자세에서는 lifting 후반부(약 27% 구간)에서 보조력이 요구되는 특성이 나타났다. 이러한 결과는 Exosuit 제어 알고리즘 설계 시 자세별 보조력 인가 타이밍 설정에 활용될 수 있으며, 작업자의 자세 안정성 및 요추부 부담 경감을 위한 사용자 맞춤형 제어 전략을 제공한다.

4. Acknowledgements

본 연구는 위드포스(주)의 재원으로 수행된 연구임.

5. 참고문헌

[1] Qu Y, Wang X, Tang X, Liu X, Hao Y, Zhang X, Liu H, Cheng X. A review of wearable back-support exoskeletons for preventing work-related musculoskeletal disorders. *Biomimetics. 2025, 10(5):337.*

[2] Madinei S, Nussbaum MA. Estimating lumbar spine loading when using back-support exoskeletons. *Appl Ergon*. 2023, 107:103901.

[3] Chung J, Quirk DA, Applegate M, Rouleau M, Degenhardt N, Galiana I, Dalton D, Awad LN, Walsh CJ. Lightweight active back exosuit reduces muscular effort during an hour-long order picking task. *npj Flex Electron*. 2024, 8(1):12.

[4] Ali A, Fontanari V, Schmoelz W, Agrawal SK. Systematic review of back-support exoskeletons and soft designs. A systematic review and meta-analysis *Front Bioeng Biotechnol*. 2021, 9:765257.

[5] Kang S, Mirka G. Effects of a passive back-support exosuit on erector spinae and abdominal muscle activity during short-duration, asymmetric trunk posture maintenance tasks. *Ergonomics*. 2023, 66(7):887–898.

[6] von Arx M, Liechti M, Connolly L, Bangerter C, Meier ML, Schmid S. From Stoop to Squat: A comprehensive analysis of lumbar loading among different lifting styles. *Front Bioeng Biotechnol*. 2021, 9:769117.

Poster-114

보행 재활을 위한 하지 운동 상상 훈련의 운동 피질 활성도 비교

손주영[1*], 서재민[1], 도예윤[1], 최정현[2], 서유성[2], 김 경[2]

대구한의대학교 재활의료공학과[1]

대구한의대학교 재활치료학부[2]

Comparison of Motor Cortical Activation in Lower-Limb Motor Imagery Training for Gait Rehabilitation

Juyoung Son[1*], Jaemin Seo[1], Yeyun Do[1], Jeonghyun Choi[2], Yousung Seo[2], Kyung Kim[2]

Department of Rehabilitation Medical Engineering, Daegu Hanny University[1]

Divison of Rehabilitation Therapy, Daegu Hanny University[2]

*jkjojo132@gmail.com

Abstract

This study aims to analyze and compare brain activation in the Pre-Motor Cortex (PMC), Supplementary Motor Area (SMA), and Primary Motor Cortex (M1) during the execution and imagination of lower limb movements, specifically Knee Extension, Knee Flexion, Dorsiflexion, and Plantar Flexion. To achieve this, we utilized the NIRSport2 system (NIRx, USA) with functional near-infrared spectroscopy (fNIRS). The participants were healthy adults in their 20s with no neurological or musculoskeletal abnormalities. They performed three types of tasks: a motor execution task (M), a motor imagery task using videos of lower limb movements (MI), and a combined task of motor imagery and motor execution using videos (ME). Brain activation during these tasks was measured and analyzed using fNIRS. The results indicated that motor imagery did not elicit greater brain activation compared to motor execution. However, motor imagery demonstrated a similar activation pattern in the same brain regions, with significant activation observed in Brodmann area 6. These findings suggest that motor imagery induces activation trends comparable to motor execution in the same regions, indicating its potential contribution to lower limb motor recovery. In conclusion, lower limb motor imagery training may serve as an effective intervention to enhance motor performance and support functional recovery. Future research will involve patient populations and expand the measurement regions, including the primary visual cortex, to provide a more comprehensive analysis of brain activation.

1. 연구 배경

고령화의 가속과 함께 외상성 뇌손상(TBI)과 비외상성 뇌손상(Non-TBI)의 유병이 증가하면서, 마비·근력 저하·운동조절 저하 등 운동기능 장애와 기억력·주의력 저하 등 인지기능 저하가 동반된 환자군의 체계적 재활 수요가 급증하고 있다[1–2]. 보고에 따르면 TBI 환자의 약 30–50%에서 상지 또는 하지의 기능 저하가 나타나며[1], 비외상성 손상 중 뇌졸중 환자의 약 60%는 편마비를 경험한다[3]. 특히 뇌졸중 환자의 80% 이상에서 보행능력 손상이 관찰되고, 이로 인해 건강인 대비 낙상 위험이 약 4배 증가하여[4] 환자들이 가장 우선적으로 희망하는 재활 목표가 보행 회복임이 지속적으로 확인되고 있다[4]. 이러한 임상 수요에 대응하기 위해 거울치료(Mirror Therapy), 기능적 전기자극치료(FES), 로봇 보조 재활, 운동 상상(Motor Imagery, MI) 등 다양한 중재가 활용되고 있으며, 이들 중 MI는 실제 움직임 없이 운동 관련 신경망(보완적 전전두영역, 보조운동영역, 전운동영역, 1차운동피질 등)을 활성화하여 신경가소성을 촉진하는 접근으로 여러 선행연구에서 타당성이 입증되었다[5–6]. 특히 MI는 실제 운동 수행과 동일하거나 매우 유사한 뇌 활성 패턴을 유발한다는 점에서 재학습·재조직화를 목표로 하는 현대 재활의 핵심 도구로 부상하고 있다[7]. 그럼에도 불구하고 기존 문헌의 초점은 손가락 조작, 손목·팔꿈 관절 운동 등 상지 과제에 편중되어 있으며[7,8], 무릎 신전·발목 배측/저측굴곡, 보행 관련 움직임과 같은 하지 과제의 신경생리학적 근거는 상대적으로 부족한 실정이다[9]. 실제로 Adham 등은 재활 분야에서 상지 움직임에 관한 신경생리 데이터는 충분히 축적된 반면 하지 움직임에 대한 체계적 데이터는 부족하다고 보고하였다[21]. 하지 기능은 체중지지·보행·자세제어 등 전신 기능과 직결되며, 피질·피질하 회로(전운동/보조운동영역, 1차운동피질, 기저핵–소뇌 네트워크)의 상호작용이 강하게 관여한다는 점에서 상지와 기전·가소성의 양상이 다를 수 있다. 따라서 본 연구는 하지 움직임을 대상으로 운동 상상과 실제 수행 간 뇌활성의 유사성·차이를 정량 비교함으로써, 하지 영역 재활 설계에 요구되는 근거를 보강하고 MI 기반 하지고유 중재의 임상적 적용 가능성을 평가하고자 한다.

2.연구 방법

본 연구는 근골격계 질환, 정신과적 병력, 신경계 질환이 없는 20대 성인 22명(남 12, 여 10)을 대상으로 수행되었으며, 평균 연령은 22.9±2.01세이다. 참여자는 연구 목적·절차·잠재적 위험과 보호조치를 충분히 안내받고 서면 동의서를 제출한 뒤 실험에 참여했으며, 과제 친숙화를 위해 실제 과제와 동일한 동작을 1–2분간 연습하였다. 실험은 (1) 실제 하지 움직임 수행(M, Motor), (2) 본인 하지 운동 영상을 보며 동작을 따라 수행(ME, Motor Execution), (3) 동일 영상을 보며 운동을 상상(MI, Motor Imagery)의 세 조건으로 구성하였고, 조건 순서는 학습·피로·순서효과를 최소화하기 위해 균형화(counterbalancing)하였다. 세 조건 모두에서 우세·비우세 하지의 뇌활성을 비교하기 위해 양측을 평가했으며, 과제는 무릎 신전–발등굽힘과 무릎 굴곡–발바닥굽힘을 1초 간격으로 교대 수행하는 패턴으로 표준화하였다(메트로놈 60 bpm 및 화면 시각 큐 제시). 각 블록은 20초 과제(1초 주기

로 10회 반복)와 20초 휴식으로 구성되었고, 동일 블록을 5회 반복하는 블록 디자인(rest–task 교대)을 적용하였다. 참여자는 등과 골반을 의자 등받이에 밀착해 앉고 양팔은 허벅지 위에 편하게 올리며, 머리·상체의 움직임을 최소화하도록 지시하였다. M·ME·MI 조건에서 사용할 시각 자극은 참여자 본인의 하지 동작을 동일 카메라·조명 조건에서 사전 촬영해 개인화 영상으로 제작하였다.



그림 1. 블록 디자인

뇌혈역학 측정은 휴대형 기능적 근적외선 분광법 장비 NIRSport2(NIRx, USA)를 사용하여 16채널로 수행하였으며, Source–Detector 간격은 표준 3 cm로 배치하여 전중앙소엽 및 운동 피질을 포괄하도록 구성하였다. 측정 전 20초 안정 상태를 기록한 뒤 본 과제를 시작했고, 측정 중 과도한 아티팩트가 감지될 경우 즉시 옵토드와 케이블을 재정비하였다. 모든 측정은 소음·빛 반사가 적은 조용한 독립 공간에서 일정한 온도·조명을 유지한 상태로 이루어졌고, 화면 밝기와 카메라 위치는 참여자마다 동일하게 표준화하였다. 분석 지표는 채널별 산소화헤모글로빈(ΔHbO)과 탈산소화헤모글로빈(ΔHbR)의 블록 평균 변화로 정의하였으며, 전처리는 표준 파이프라인에 따라 광강도→흡광도로 변환 후 밴드패스 필터링(저주파 드리프트 및 심폐성분 저감), 모션 보정(가속 구간 클리핑·웨이블릿 기반 보정), 베이스라인 정규화를 수행하였다. 1차 분석은 과제 대비 휴식에서의 ΔHbO 증가(및 ΔHbR 감소)를 채널 수준에서 평가하고, 영역별(ROI) 평균과 블록 레벨 설계행렬을 사용한 채널 단위 GLM을 적용해 조건(M, ME, MI) 간 차이를 검정하였다(다중비교는 FDR로 보정). 모든 과정은 동일한 실험자와 동일한 장비 세팅으로 수행되어 측정자 간 변이를 배제했으며, 전체 소요 시간은 개인 영상 촬영 약 5분, 장비 착용 및 신호 안정화 약 15분, 본 측정 약 15분으로 참여자당 약 40분이었다. 연구는 기관 생명윤리위원회(IRB) 승인을 받은 후 진행되었고, 자료는 익명화하여 보관·분석하였다.

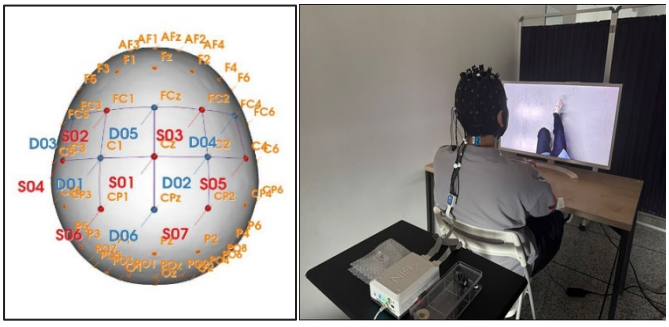


그림 2. 실험 사진 및 Optode 배치 포인트

3.연구 결과

M과 ME에서 전중앙소엽 3개 채널(11, 15, 16)과 일차운동피질 4개 채널(1, 2, 5, 12)에서 공통적으로 활성화가 관찰되었다. MI는 M·ME와 비교 시 전중앙소엽 2개 채널(11, 15)과 일차운동피질 5개 채널(1, 2, 4, 5, 12)에서 동일한 범주의 활성화를 보였다. 크기 비교에서 MI는 M 대비 일차운동피질 5개 채널(6, 7, 9, 10, 12)에서 상대적으로 더 큰 활성(ΔHbO 증가)을 나타냈고, ME 대비로는 전중앙소엽 1개 채널(13)과 일차운동피질 8개 채널(6, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14)에서 더 강한 활성화를 보였다. 이는 하지 운동 영상을 활용한 운동 상상(MI)은 실제 수행(M)과 영상 따라 수행(ME)과 유사한 공간적 패턴의 전두-운동 영역 활성화를 재현할 뿐 아니라, 일부 일차운동피질 채널에서는 더 큰 반응을 유발하였습니다. 따라서 하지 재활 맥락에서 영상 기반 운동 상상이 실제 수행을 보완·대체할 수 있는 잠재적 중재 훈련이라 판된된다.

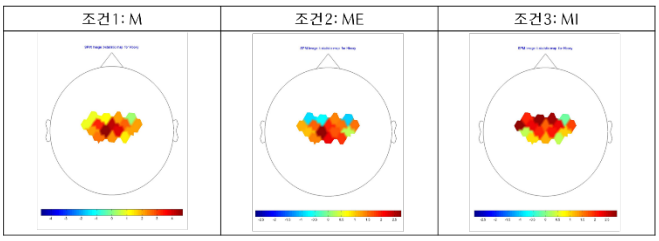


그림 3. M, ME, MI 조건 간 뇌활성도 비교

4. Acknowledgements

본 논문은 한국연구재단의 RISE(로컬 맞춤형 R&D) 지원사업의 지원으로 연구되었음 (연구과제번호 25-220-037)

5.참고 문헌

[1]. Maas, A. I. R., Menon, D. K., Adelson, P. D., Andelic, N., Bell, M. J., Belli, A., Bragge, P., Brazinova, A., Büki, A., Chesnut, R. M., Citerio, G., Coburn, M., Cooper, D. J., Crowder, A. T., Czeiter, E., Czosnyka, M., Diaz-Arrastia, R., Dreier, J. P., Duhaime, A. C., Ercole, A., … InTBIR Participants and Investigators (2017). Traumatic brain injury: integrated approaches to improve prevention, clinical care, and research. The Lancet. Neurology, 16(12), 987–1048.

[2]. Feigin, V. L., Lawes, C. M., Bennett, D. A., & Anderson, C. S. (2003). Stroke epidemiology: a review of population-based studies of incidence, prevalence, and case-fatality in the late 20th century. The Lancet. Neurology, 2(1), 43–53.

[3]. Kim Ju O, & Lee Byoun Hee. (2020). The Effects of Lower Extremity Strengthening Program on Balance, Gait and Upper Limb Function in Patients with Stroke. The Journal of the Korea Contents Association, 20(6) 114-123

[4]. Verma, R., Arya, K. N., Sharma, P., & Garg, R. K. (2012). Understanding gait control in post-stroke: implications for management. Journal of bodywork and movement therapies, 16(1), 14–21.

[5]. Gurbuz, N., Afsar, S. I., Ayas, S., & Cosar, S. N. (2016). Effect of mirror therapy on upper extremity motor function in stroke patients: a randomized controlled trial. Journal of physical therapy science, 28(9), 2501–2506.

[6]. Ren, C., Li, X., Gao, Q., Pan, M., Wang, J., Yang, F., Duan, Z., Guo, P., & Zhang, Y. (2024). The effect of brain-computer interface controlled functional electrical review and meta-analysis. Frontiers in human neuroscience, 18, 1438095.

[7]. Su, WC., Dashtestani, H., Miguel, H.O. et al. Simultaneous multimodal fNIRS-EEG recordings reveal new insights in neural activity during motor execution, observation, and imagery. Sci Rep 13, 5151 (2023).

[8]. Binks, J. A., Emerson, J. R., Scott, M. W., Wilson, C., van Schaik, P., & Eaves, D. L. (2023). Enhancing upper-limb neurorehabilitation in chronic stroke survivors using combined action observation and motor imagery therapy. Frontiers in neurology, 14, 1097422.

[9]. Luft, A. R., Smith, G. V., Forrester, L., Whitall, J., Macko, R. F., Hauser, T. K., Goldberg, A. P., & Hanley, D. F. (2002). Comparing brain activation associated with isolated upper and lower limb movement across corresponding joints. Human brain mapping, 17(2), 131–140.

Poster-115

카페인에 따른 운동조절 능력

서재민[1*], 도예윤[2*] , 손주영[1], 서유성[1,2], 김 경[1,2], 최정현[1,2]

대구한의대학교 재활의료공학과[1]

대구한의대학교 재활치료학부[2]

Caffeine-induced Modulation of Motor Control Ability

Jaemin Seo[1*], Yeyun Do[2*], Juyoung Son[1], Yuseong Seo[2], Gyeong Kim[2], Jeonghyeon Choi[2]

Department of Rehabilitation medical Engineering, Graduate School, Daegu Haany University, Korea

Divison of Rehabilitation Therapy, Daegu Hanny University[2]

[*]cho90722000@dhu.ac.kr

Abstract

Caffeine is a central nervous system stimulant known to enhance alertness, attention, and psychomotor performance. This study aimed to examine the effects of caffeine intake on motor control ability and to identify the underlying neurophysiological mechanisms using functional near-infrared spectroscopy (fNIRS). Sixteen healthy adults participated in three sessions: baseline, 3 hours, and 6 hours after ingestion of 200 mg caffeine. Participants performed a visuomotor tracking task while cortical activation in the dorsolateral prefrontal cortex (DLPFC) and premotor cortex (PMC) was recorded. Results showed significantly increased oxyhemoglobin levels and improved tracking accuracy 3 hours after caffeine intake, whereas both measures declined after 6 hours. These findings suggest that caffeine temporarily enhances motor control ability through increased prefrontal activation, with maximal effects observed approximately 3 hours post-ingestion.

1. 연구 배경

카페인은 대표적인 중추신경계 자극물질로서, 각성 수준을 높이고 피로를 완화하며 주의집중 및 반응속도를 향상시키는 물질로 잘 알려져 있다. 이러한 생리적·인지적 효과로 인해 카페인은 일상생활뿐만 아니라 운동 수행 향상을 위한 ergogenic aid (운동수행 보조제)로도 광범위하게 사용되고 있다. 일반적으로 카페인은 아데노신 수용체(A1, A2A)의 길항작용을 통해 신경세포의 흥분성을 높이고, 도파민 및 노르에피네프린 분비를 촉진하여 각성 상태를 유지시키는 것으로 알려져 있다. 이러한 신경전달물질의 변화는 단순한 각성 효과를 넘어, 운동 수행 과정에서의 인지적 조절 기능, 즉 반응속도, 주의집중, 운동계획 및 오류조절과 같은 고차원적 운동조절 능력에도 영향을 미칠 수 있다[1].

최근 운동과학 및 신경생리학 연구에서는 운동 수행의 성공 여부가 단순한 근력이나 지구력뿐 아니라, 전전두엽 (prefrontal cortex, PFC)을 중심으로 한 인지-운동 통합 기능 (cognitive-motor integration)에 의해 좌우된다는 점이 강조되고 있다. 특히 배외측 전전두엽 (dorsolateral prefrontal cortex, DLPFC)은 운동 수행 전 목표 설정과 의사결정, 운동 중 주의자원 분배 및 오류 인식, 그리고 피드백 기반의 조절 과정에 깊이 관여한다[2]. 따라서 카페인 섭취 후 나타나는 전전두엽의 산소화 변화 (oxy-Hb 증감)는 운동 수행 능력 향상과 직접적으로 연관될 가능성이 높다.

선행연구에 따르면, 카페인은 인지 과제 수행 중 뇌 혈류를 증가시켜 반응속도 및 작업기억 수행능력을 향상시키는 것으로 보고되었으며, 운동 중에도 유사한 신경활성 패턴이 나타날 수 있음이 제시되고 있다[3]. 그러나 대부분의 연구는 안정 상태 (resting condition)나 단순 인지 과제에 국한되어 있으며, 실제 운동 상황에서 카페인이 운동조절 능력에 미치는 신경생리학적 메커니즘을 종합적으로 분석한 연구는 매우 부족하다. 또한 카페인 섭취 후 시간이 경과함에 따라 뇌활성 패턴과 운동 수행의 상관성이 어떻게 변화하는지에 대한 연구 제한적이다.

이에 본 연구에서는 카페인 섭취 시점에 따른 운동조절 능력의 변화를 분석하고, 그 과정에서 나타나는 전전두엽의 활성 변화를 기능적 근적외선분광법 (functional near-infrared spectroscopy, fNIRS)을 통해 평가하고자 한다. 이를 통해 카페인에 의한 운동조절 효율성 향상의 신경생리학적 근거를 규명하고, 개인의 생리적 특성이나 섭취 시점에 따른 최적의 카페인 활용 전략을 제시하는데 기초자료를 제공하고자 한다.

2.연구 방법

본 연구는 건강한 성인 남녀 16명을 대상으로 무작위 교차설계 (randomized crossover design)로 수행하였다. 피험자는 카페인을 섭취하지 않은 조건 (Baseline), 섭취 3시간 후 (Caffeine–3h), 섭취 6시간 후 (Caffeine–6h)의 세 조건을 모두 수행하였으며, 각 조건 간에는 48시간 이상의 간격을 두어 순서 효과를 최소화하였다. 카페인 투여는 1회 200mg 캡슐 형태로 제공하였고, 섭취 전 24시간 동안 카페인 함유 식품의 섭취를 제한하였다.

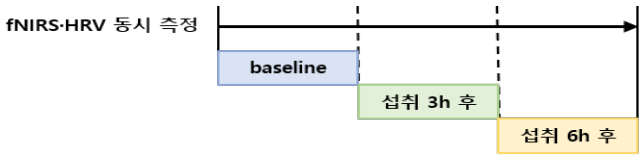


그림 1. 카페인 섭취에 따른 운동조절 능력 평가 절차

운동조절 능력은 시각-운동 통합 기반 추적 과제 (visuomotor tracking task)를 통해 평가하였다. 피험자는 모니터에 제시되는 목표 경로를 마우스로 추적하면서 운동의 정확도와 반응시간을 측정하였다. 과제 수행 중 전전두엽 (DLPFC, FPA, PMC)의 활성 변화를 기능적 근적외선분광법

(fNIRS, NIRSport2 system)을 이용해 측정하였다. 각 신호는 0.01–0.2 Hz의 대역통과 필터를 적용하여 전처리하였고, 일반선형모형(GLM)을 통해 HbO, HbR의 β값을 산출하였다.

또한 자율신경계 반응을 평가하기 위해 BACS advance (TAOS institute Inc. Japan)를 사용하여 심박변이도(HRV)를 측정하였다. HRV 지표는 평균심박수, RMSSD, LF/HF 비율로 산출하였으며, 운동 수행 전후의 교감·부교감 신경 활성 변화를 분석하였다. 모든 측정은 조명이 일정하고 외부 자극이 통제된 환경(재활의료기기학 실험실, 207호)에서 진행되었다.

3. 연구 결과

카페인 섭취 후 운동조절 과제를 수행한 결과, 섭취 3시간 후 조건 (Caffeine–3h)에서 전전두엽 (DLPFC) 및 전운동피질 (PMC)의 산소화 헤모글로빈 (HbO) 농도가 유의하게 증가하였으며 ($p < .05$), 운동 정확도와 반응속도 또한 향상되는 경향을 보였다. 반면 섭취 6시간 후 (Caffeine–6h)에는 이러한 활성 및 수행 향상이 감소하여, 카페인의 효과가 시간 경과에 따라 점차 소실되는 양상이 확인되었다.

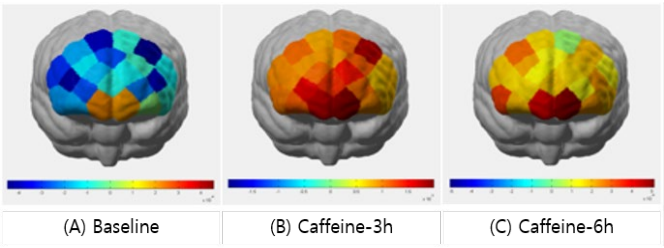


그림3.카페인 섭취 후 경과 시간에 따른 전전두엽 활성도 비교 결과
(A) 미섭취 (B) 섭취 3시간 후 (C) 섭취 6시간 후

심박변이도(HRV) 분석에서는 카페인 섭취 직후 교감신경 활성(LF/HF)이 증가하였으나, 6시간 경과 시점에서는 안정화되는 경향을 나타냈다. 이는 카페인 섭취가 일시적인 각성 효과를 유발하지만, 자율신경계가 일정 시간 이후 항상성(homeostasis)을 회복함을 시사한다.

이상의 결과를 종합하면, 카페인 섭취는 운동 수행 중 전전두엽 활성화를 통해 운동조절 능력을 일시적으로 향상시키며, 그 효과는 섭취 약 3시간 후에 가장 두드러진다. 본 연구는 카페인 섭취 시점에 따른 신경생리학적 반응 특성을 규명함으로써, 향후 운동 수행 향상 및 피로 조절 전략 수립에 기초자료를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

Condition	ROI	β (HbO)	β (HbR)	β (tHb)
Baseline	Left DLPFC	0.412 ± 0.08	-0.204 ± 0.04	0.198 ± 0.05
	Right DLPFC	0.385 ± 0.09	-0.213 ± 0.05	0.192 ± 0.06
	PMC	0.436 ± 0.07	-0.189 ± 0.03	0.217 ± 0.05
Caffeine–3h	Left DLPFC	0.527 ± 0.09	-0.174 ± 0.05	0.251 ± 0.07
	Right DLPFC	0.548 ± 0.10	-0.163 ± 0.04	0.239 ± 0.06
	PMC	0.562 ± 0.08	-0.158 ± 0.03	0.264 ± 0.05
Caffeine–6h	Left DLPFC	0.389 ± 0.09	-0.196 ± 0.05	0.176 ± 0.06
	Right DLPFC	0.403 ± 0.08	-0.201 ± 0.04	0.189 ± 0.05
	PMC	0.417 ± 0.09	-0.191 ± 0.05	0.201 ± 0.07

〈Table 1〉 카페인 섭취 시점에 따른 fNIRS 기반 혈류역학 반응의 β값 변화

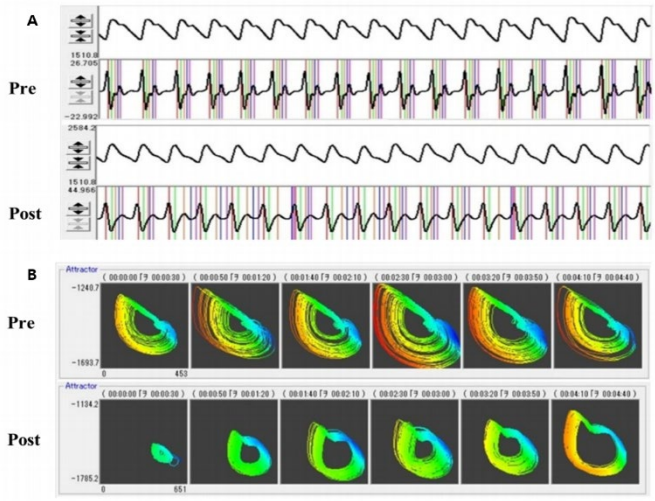


그림 4. 카페인 섭취 전·후 전전두엽 혈류 및 HRV 기반 자율신경계 반응 변화

4. Acknowledgements

본 논문은 한국연구재단의 (글로컬)산학공동기술개발과제 지원사업의 지원으로 연구되었음 (연구과제번호 25-220-032)

5.참고 문헌

[1] C. Sanchis, E. Blasco, F. G. Luna, and J. Lupiáñez. "Effects of caffeine intake and exercise intensity on executive and arousal vigilance." Scientific Reports, Vol. 10, No. 8393, pp. 1–13, 2020.

[2] A.-C. Ehlis, L. Zarantonello, F. B. Haeussinger, T. Rohe, D. Rosenbaum, A. J. Fallgatter, and M. J. Maier. "The DLPFC is centrally involved in resolving Stroop conflicts, suppressing distracting sensory input within the auditory and visual system." Frontiers in Psychology, Vol. 15, Article No. 1427455, 2024.

[3] A. Smit, and E. M. Rogers. "Effects of caffeine on cognitive, physical and occupational performance." Psychopharmacology, Vol. 182, No. 2, pp. 147–158, 2005.

Poster-116

공동수축 조절 및 관절 강성 보조를 위한 유연한 어깨 관절 보조 외골격 시스템

최준열[1], 최호선[1,2,*]

[1]세종대학교 AI로봇학과, [2]세종대학교 AI로봇연구소

A Flexible Shoulder Exoskeleton System for Co-contraction Control and Joint Stiffness Assistance

Junyeol Choi[1], Ho Seon Choi[1,2,*]

[1]Department of Artificial Intelligence and Robotics, Sejong University, Seoul, Korea

[2]Artificial Intelligence and Robotics Institute, Sejong University, Seoul, Korea

[*]choihoseon@sejong.ac.kr

Abstract

Minimally invasive surgery (MIS), a type of laparoscopic procedure, offers faster patient recovery but inevitably restricts surgeons' arm motion due to structural constraints, leading to muscle fatigue and reduced joint stiffness during prolonged operations. To address this, a shoulder exoskeleton system was proposed to assist and induce cocontraction for joint stability. The upper limb was modeled in 3D space with the glenohumeral (GH) joint as the origin, and spring-induced moments were analyzed using rotation matrices of abduction and flexion. Springs were arranged along the deltoid line of action, and future work includes actuator integration and EMG-based control validation.

1. 연구 배경

복강경 수술의 한 형태인 최소 침습 수술은 약 5~10mm 크기의 절개를 통해 수술 도구와 내시경 카메라를 삽입하고, 모니터 영상을 보며 진행되는 방식이다. 절개 부위가 작아 환자 회복은 빠르지만, 제한된 작업 공간과 낮은 도구 자유도로 인해 외과의의 상지 움직임이 제한되고 장시간 동일한 자세를 유지하므로 어깨 삼각근에 피로가 누적된다. 이러한 생리적 피로는 관절 안정성을 저하시켜 수술 조작 정밀도와 효율성을 떨어뜨리는 주요 원인이 된다[1].

근피로는 상지 근육의 협응 방식을 변화시켜 관절 강성을 유지하는 공동수축 수준을 감소시킨다. 공동수축은 주동근과 길항근의 동시 활성화로 관절 안정성을 확보하는 생체역학적 전략으로, 높은 정확도가 요구될수록 그 수준이 증가하여 움직임의 정밀도가 향상된다[2]. 그러나 피로 누적으로 공동수축이 저하되면 관절 제어 효율이 감소하고, 이는 수술 수행 중 어깨 안정성 저하로 이어지게 된다[3].

이러한 문제를 해결하기 위해 수술대 높이 조절, 도구 손잡이 회전축 개선 등 다양한 인체공학적 접근이 시도되었으나, 이는 작업 환경과 환자 조건에 따라 즉각적 적용이 어렵다는 한계가 존재한다[1].

이러한 요구를 충족할 수 있는 기술 중 하나가 작업 환경과 무관하게 스프링이나 구동기를 이용해 사용자의 관절 운동을 물리적으로 보조할 수 있는 힘을 제공하는 외골격 시스템이다[1].

따라서 본 연구에서는 외골격을 활용하여 어깨 관절 부하를 보조하고, 근전도 센서를 기반으로 산출된 공동수축 지수를 통해 근활성 변화를 실시간으로 평가하며, 그 결과에 따라 스프링 장력을 능동적으로 조절하는 어깨 보조 시스템을 제안한다. 이를 통해 수술자의 피로를 완화하고 장시간 작업 중에도 안정적으로 관절 강성을 유지하는 것을 목표로 한다.

2. 연구 방법

본 연구의 외골격 장치에 사용될 스프링 개수와 배치를 결정하기 위해, 스프링 1개가 끝점에서 발생시키는 모멘트를 계산하였다. 그림1. 과 같이 상지를 3차원 좌표계로 모델링하고, 어깨 관절 중심을 원점(0, 0, 0)으로 설정하였다. 좌표계는 +X축(오른쪽), +Y축(전방), +Z축(상방)으로 정의하였으며, 어깨 자세는 외전 각도(α)와 굴곡 각도(β)를 이용해 3차원 회전으로 표현하였다. 이러한 모델링을 통해 실제 상지 움직임에서 발생하는 관절 모멘트 변화를 수학적으로 단순화하고, 자세 변화에 따른 힘의 방향성과 모멘트 분포를 예측할 수 있도록 하였다.

스프링은 등 뒤에 직선 형태로, 어깨 사이에 곡선 형태로 배치하였고 끝점 부착 위치는 인체공학적 관점에서 삼각근 힘줄 부위를 기준으로 설정하였다. 이를 통해 스프링의 힘이 삼각근의 힘 전달 방향과 유사하게 작용하도록 설계하였다.

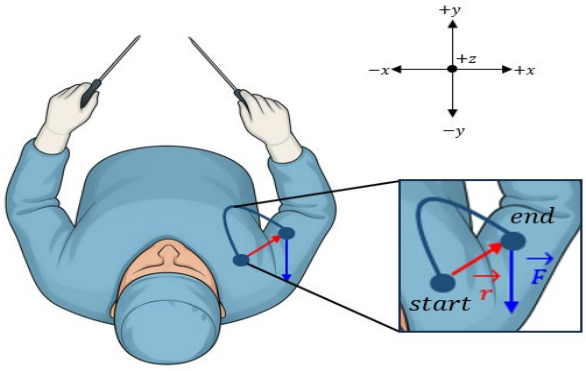


그림1. 인체 상지 3차원 좌표계 모델링

각 스프링의 끝점에서 발생하는 모멘트는 어깨 관절 중심을 기준으로 한 모멘트암 벡터 r과 힘(force) 벡터 F의 외적으로 정의되며, 외전(α)과 굴곡(β)에 따른 회전행렬을 적용하여 다음과 같이 계산하였다.

$$r = R_x(\beta)R_y(\alpha)r_0, \quad F = R_x(\beta)R_y(\alpha)F_0$$

식1. 어깨 외전(α) 및 굴곡(β) 변화에 따른 모멘트암과 힘 벡터의 회전 관계

$R_x(\beta)$와 $R_y(\alpha)$는 각각 x축, y축 기준 회전행렬을 의미하며, r_0와 F_0는 초기 자세에서의 모멘트암, 힘 벡터를 나타낸다. 초기 힘 방향은 각각 전면 스프링 (0, -1, 0), 후면 스프링 (0, 1, 0)으로 설정하였다. 외전(α) 및 굴곡(β) 동작을 수행하지 않은 상태를 기준으로 하며, 외전 및 굴곡 동작은 식1. 과 동일하게 회전행렬을 적용하였다. 힘의 크기는 훅의 법칙에 따라 $|F| = k\Delta x$로 계산하였다.

또한 설계된 구조의 실제 구동 가능성을 확인하기 위해 선형 액추에이터(LM2219F-6012)를 이용한 단순 구동 실험을 수행하였다. 실제 사용 조건을 단순화하여 모사하기 위해 스프링을 튜브 내부에 직선 형태로, 끝단에서는 곡선 형태로 배치하였다. 액추에이터의 로드가 돌출되면서 스프링을 밀어넣는 구간에서 구조적 간섭이나 마찰에 의한 저항이 발생하지 않는지를 확인하였으며, 이를 통해 제안된 모듈의 기본적인 기구적 설계 타당성을 검토하였다.

3. 연구 결과

복강경 수술 중 발생할 수 있는 가장 비이상적인 자세(외전 61°, 굴곡 85°)를 기준으로 모멘트를 분석하였다. 해당 자세에서 공동수축이 안정적으로 유도되면 일반적인 작업 자세에서도 충분한 공동수축 유도와 관절 강성 보조가 가능하다고 판단하였다[1].

표1. 은 20대 성인 남성의 평균 인체치수를 기준으로 계산한 결과를 나타낸다. 전면과 후면 스프링의 모멘트 크기는 모두 2.34 N·m로 동일하였으며, 방향만 서로 반대였다. 30대와 40대 남성의 인체치수를 적용했을 때에도 모멘트 크기의 차이는 0.03 N·m 이하로 나타나, 연령대별 체형 차이가 보조 토크에 미치는 영향은 미미하였다.

(20대 성인 남성 평균 인체치수 기준)

구분	모멘트 벡터(N·m)	모멘트 크기(N·m)
전면	[-1.14, 2.04, -0.18]	2.34
후면	[1.14, -2.04, 0.18]	2.34

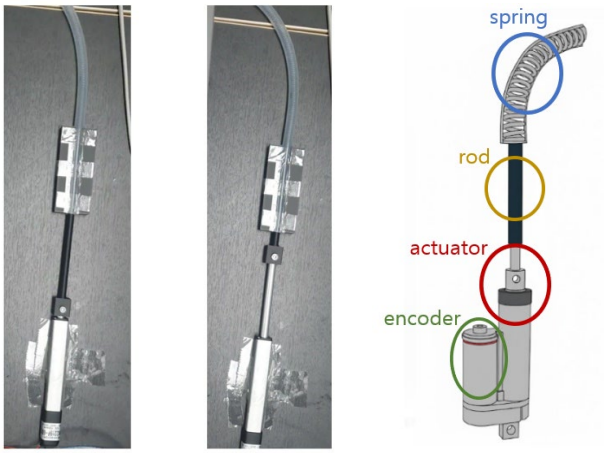
표1. 비이상적 자세에서의 전·후면 스프링 모멘트 비교

이 결과는 전·후면 삼각근에 배치된 스프링이 서로 반대 방향으로 동일한 크기의 모멘트를 발생시켜 관절의 기본 자세 안정성을 확보할 수 있음을 보여준다. 다만 본 계산은 스프링의 곡선 부위에서 발생하는 외피(튜브)와의 마찰, 곡률에 따른 탄성 손실 등 비선형 요소를 고려하지 않은 이상적 조건을 전제로 하였다.

그림2. 는 선형 액추에이터(LM2219F-6012)를 이용해 스프링을 밀어넣은 실험 결과이다. (A)는 스프링 압축 전, (B)는 약 100mm 압축 후의 상태이다. 로드 끝단이 튜브 홀보다 두꺼워 3D 프린팅으로 제작한 돌출부를 부착하여 밀어넣었으며, 스프링은 무리 없이 압축·복원되었다. 그러나 약 2분 이상 연속 작동 시 하우징에서 발열이 발생하였으며, 해당 모델에는 엔코더의 부재로 인해 스프링 장력을 능동적으로 제어할 수 없다는 한계가 존재하였다.

이에 따라 이후 연구에서는 장력 피드백과 스프링 변위 제어가 모두 가능하도록 (C)와 같이 엔코더 내장형 선형 액추에이터(LM4075OE-6008)를 적용해 모듈을 재설계하였다.

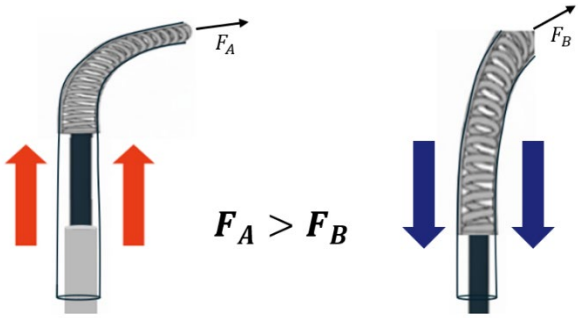
향후 앞서 언급한 비선형 손실 요인을 반영하고, 공동수축 지수를 산출하여 실험자의 상태에 따라 스프링 장력을 제어할 예정이다. 그림3. 과 같이 스프링을 밀어넣을 때 복원력이 증가하고 후진 시 감소하므로, 이러한 원리를 활용해 능동적인 장력 조절 알고리즘을 구현할 계획이다.



(A) (B) (C)

그림2. 스프링 구동 실험 및 재설계 모듈 도식화

((A): 압축 전, (B): 압축 후, (C): 엔코더 내장형 모듈 도식)



(A) (B)

그림3. 스프링 압축에 따른 복원력 비교

((A): 압축 전, (B): 압축 후)

이후 복강경 수술 환경과 유사한 조건에서 근피로 완화 및 조작 안정성 향상 효과를 실험적으로 검증할 예정이다.

4. Acknowledgements

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단과 정보통신기획평가원 - 학·석사연계ICT핵심인재양성의 지원을 받아 수행된 연구임. (RS-2024-00452977, IITP-2025-RS-2024-00436528)

5. 참고 문헌

[1] CHOI, Ho Seon; LEE, Seung Jun; IN, Hyunki. Development and clinical validation of passive shoulder exoskeleton with novel gravity compensation mechanism for stabilizing arm tremor of surgeons during minimally invasive surgery. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2024, 12: 1418148.

[2] GRIBBLE, Paul L., et al. Role of cocontraction in arm movement accuracy. *Journal of neurophysiology*, 2003, 89.5: 2396-2405.

[3] Gates, D. H., and Dingwell, J. B. (2011). The effects of muscle fatigue and movement height on movementstability and variability. Exp. brain Res. 209, 525–536. doi:10.1007/s00221-011-2580-8.

Poster-117

최적화 기반 무동력 하지 보조 외골격의 중력 보상 및 무릎 과보상 보정 메커니즘

정세희[1] , 최호선[1*]

세종대학교 AI로봇학과[1], 세종대학교 AI로봇연구소[2]

Optimization-Based Passive Lower-limb Exoskeleton for Gravity Compensation with Knee Overcompensation Correction Mechanism

Sehee Jung[1] , Hoseon Choi[1,2,*]

[1]Department of Artificial Intelligence and Robotics, Sejong University, Seoul, Korea

[2]Artificial Intelligence and Robotics Institute, Sejong University, Seoul, Korea

[*]choihoseon@sejong.ac.kr

Abstract

Walking assist robots are exoskeleton systems that support human movement and strength. However, their weight can burden the wearer, requiring gravity compensation. In this study, we propose a non-powered gravity compensation mechanism for the hip joint and address the knee over-compensation issue by adding a knee compensation mechanism. An optimization method was applied to enhance the compensation ratio and improve the augmentation factor(AF), achieving better torque balance. This study helps to develop a more precise walking assist system through further optimization and moment offsetting mechanisms.

1. 연구 배경

보행 보조 로봇은 구동 장치의 무게로 인해 착용자에게 부담이 된다[1]. 이를 해결하기 위해 이전 연구에서 무동력 보조 외골격 중력 보상 메커니즘을 제시하였다. 그러나 중력 보상 과정에서 무릎 관절에 과도한 모멘트가 발생하여 착용자의 움직임을 방해하는 문제가 나타났다.

본 연구는 이러한 문제를 개선하기 위해 최적화 기반의 중력 보상 및 무릎 과보상 보정 메커니즘을 설계하였다. 최적화 과정에서는 관절별 잔여 모멘트를 최소화함과 동시에, 외골격이 인체의 근육이 수행하는 양의 기계적 일을 얼마나 분담하는지를 나타내는 보조 효율 지표인 AF (augmentation factor)를 함께 최적화 변수로 포함하였다[2]. 이를 통해 외골격의 중력 보상 효율을 향상시키고, 이 결과를 바탕으로 무릎 관절의 과보상 문제를 최적화를 통해 효과적으로 보정하도록 하였다. 설계된 메커니즘의 유효성은 기구학적 해석을 통해 검증하였다.

2.연구 방법

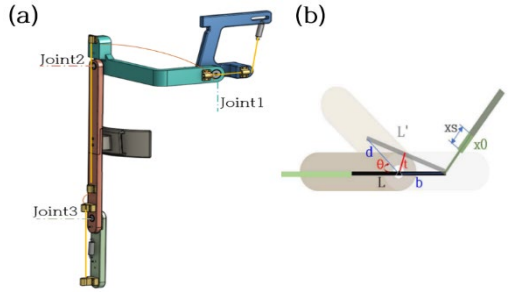


그림 1(a). 중력 보상 메커니즘 프로토타입 외골격

그림 1(b). 각도에 따라 변하는 조인트 토크 수식화

하지 외골격의 중력 보상 메커니즘은 고관절 부위에 설계하였다. 고관절은 다리의 앞뒤 움직임(Flexion/Extension), 좌우 움직임(Abd/Adduction), 그리고 회전 운동을 담당한다. 회전운동은 중력에 영향을 미치지 않으므로 무릎 각도에 따라 보조력을 추가하는 것으로 외골격의 세 조인트 자유도를 이와 같이 구성하였다. [그림1(a)]는 중력 보상 메커니즘을 적용한 프로토타입 외골격으로, 첫번째 조인트는 다리의 Abduction-Adduction, 두 번째 조인트는 다리의 Flexion-Extension 동작을 담당한다. 세 번째 조인트는 무릎 위치에 배치되어, 무릎 조인트 회전 시 다리의 질량 중심(center of mass, COM)이 몸 쪽으로 이동함에 따라 보조 모멘트가 감소하도록 설계하였다. 이러한 구조적 설계를 기반으로, 각 조인트의 회전과 스프링 인장 변화에 따른 토크를 계산하고 최적화 과정을 수행하였다.

$$t_i = {b_i \cdot d_i \cdot sin\theta_i}/{L_i'} \quad ,(i=1,2,3) \tag{1}$$

$$x_s = (L_1 + L_2 + L_3) - (L_1' + L_2' + L_3') \tag{2}$$

$$\tau_i = pi_{total} + k_{total} \cdot t_i \cdot x_s \tag{3}$$

목적함수1 = w1·total remain - w2·power plus total (4)

중력 보상 토크는 각 조인트의 회전 각도 변화에 따른 모멘트 암 및 스프링 인장 길이 변화를 통해 계산하였다. 세 조인트를 하나의 모델로 단순화한 토크를 식 (1)-(3)으로 표현하였으며, 스프링 인장 차이와 스프링 상수의 곱으로 인장력을 구하고, 모멘트 암과 곱하여 조인트별 토크를 계산하였다. 이때 중력 보상 성능을 향상시키기 위해 조인트 변수 (b_i, d_i)와 스프링 상수 (k)를 최적화 변수로 설정하고, interior-point 알고리즘 기반의 목적함수(식(4))를 구성하였다. 목적함수는 외골격 무게로 인한 모멘트와 스프링 보상 모멘트의 차이를 최소화하고 동시에 보행 보조 효율(augmentation factor, AF)을 최대화 하도록 설정하였다[2]. 그 결과, 최적화된 파라미터는 각 조인트의 모멘트를 최적값으로 감소시켜 약 40%의 중력 보상 효과를 확인하였다. 하지만 최적화된 구조에서는 무릎 관절에 의도하지 않은 과도한 토크가 발생하는 과보상 (over-compensation) 현상이 확인되었으며, 이를 보정하기 위한 추가 메커니즘을 설계하였다.

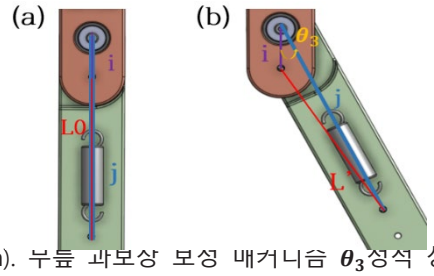


그림 2(a). 무릎 과보상 보정 매커니즘 $\boldsymbol{\theta_3}$정적 상태
그림 2(b). 무릎 과보상 보정 매커니즘 θ_3회전 상태

$$L' = \sqrt{i^2 + j^2 - 2 \cdot i \cdot j \cdot cos\theta_3} \quad (5)$$

$$t_{knee} = {i \cdot j \cdot sin\theta_3}/{L'} \quad (6)$$

$$\tau_{knee} = pi_{knee} + k_{knee} \cdot t_{knee} \cdot (L' - |j - i|) \quad (7)$$

목적함수2 = joint3 torque - knee mechanism (8)

이러한 과보상 문제를 해결하기 위해 [그림2]와 같은 보정 메커니즘을 추가하고, 최적화를 수행하였다. 이 메커니즘은 무릎 회전 각도 θ_3에 따라 스프링 인장 길이가 변화하며, 반대 방향의 보정 모멘트를 생성할 수 있도록 설계되었다. 스프링 길이 변화와 모멘트 암의 관계는 식(5)-(6)으로 표현되며, 이를 통해 무릎 보정 토크를 식 (7)로 계산하였다. 보정 효과를 정량화하기 위해 보정 변수 두 개(i, j)와 스프링 상수 총 세 개를 최적화 변수로 설정하고, 식 (8)을 기반으로 동일한 interior-point 최적화를 수행하였다. 최적 변수는 무릎 관절의 과보상 모멘트를 약 94% 감소시켰다.

3. 연구 결과

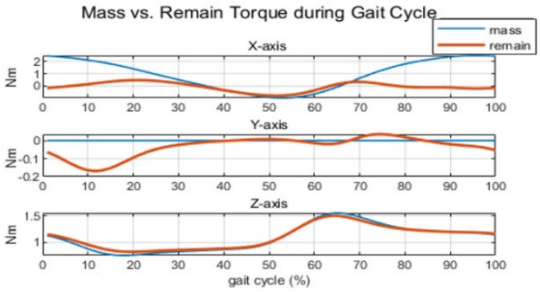
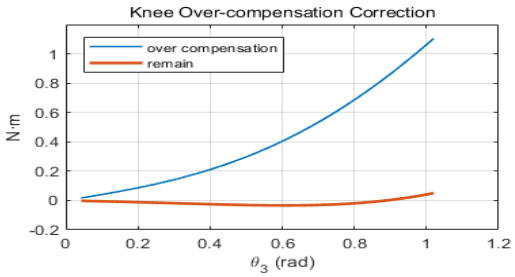


그림 3. 중력보상 메커니즘 적용 후 각 축별 모멘트 비교
(파란 선: 중량 모멘트, 빨간 선: 보상 후 잔여 모멘트)

본 연구에서는 최적화 기반 중력 보상 메커니즘을 구현하여 하지 외골격의 중력 보상 및 무릎 보정 메커니즘의 성능을 정량적으로 검증하였다. 최적화 결과, 세 조인트의 설계 변수 6개와 스프링 상수는 각각 (50, 3, 5, 80, 7, 40mm) 및 7.28(N/mm)로 도출되었다. 이를 적용한 하지 외골격 중력 보상률은 약 40%였으며, 이때의 보조 효율(augmentation factor, AF)은 52.4%로 계산되었다. 이는 [2]에서 제시된 AF-대사비용 상관관계 모델을 적용하여 환산한 결과, 약 8.2%의 대사비용 감소에 해당한다. 이러한 감소율은 무동력 고관절 외골격의 보행 시 평균 대사비용 감소율인 7.2%[3]보다 높은 값으로, 본 연구에서 제안한 중력 보상 메커니즘이 무동력 시스템으로서 충분한 보조 효과를 제공함을 의미한다. [그림3]에서 확인할 수 있듯이, 중력 보상 적용 후 전체 보행 주기에서의 모멘트 크기가 전반적으로 감소하였다. 이러한 결과는 제안된 최적화



기법이 무동력 외골격의 중력 보상 성능 향상에 효과가있음을 보여주며, 잔여 오차 요인 분석으로 이어진다.

그림 4. 무릎 조인트 과보상 보정 결과
(파란 선: 보정 전, 빨간 선: 보정 후)

중력 보상 메커니즘을 무릎 조인트(Joint3)까지 확장 적용하여 발생한 과보상(over-compensation) 문제를 최적화를 통해 보정한 결과, 전체 토크 안정성이 크게 향상되었다. [그림4]의 파란선에서 확인할 수 있듯이, 보상 전에는 모멘트 크기가 각도 변화에 따라 증가하였으나, 최적화된 무릎 과보상 보정 메커니즘을 적용한 후(빨간선)에는 모멘트 곡선이 안정적으로 0에 수렴하였다. 최적화 결과, 보정 변수 2개(i, j)와 스프링 상수는 각각 (16, 9mm), 5.4 N/mm으로 도출되었으며, 무릎 과보상 보정률은 94.2%로 향상되었다. 이러한 결과는 제안한 무릎 과보상 보정 메커니즘이 중력 보상 과정에서 발생하는 의도하지 않은 토크를 효과적으로 제어할 수 있음을 입증하였으며, 전체 시스템의 안정성 개선으로 이어진다. 이러한 결과를 통해 무릎 관절의 과보상 문제는 효과적으로 개선되었으나, 전체 시스템 수준에서는 여전히 잔여 오차가 확인되었다.

현재 시스템은 대부분의 축에서 충분한 보상이 이루어졌음을 확인하였으나, Z축 방향에는 여전히 잔여 오차가 남아 완전한 중력 보상은 하지 못하였다. 이론적으로 완전한 보상이 이루어지기 위해서는 외골격으로 인한 모멘트와 보상 모멘트의 차이는 X, Y, Z축 모두 0에 가까운 값이 나와야 한다. [그림3]에서 확인되듯이, X축에는 -0.77-0.47Nm, Y축에서는 -0.16-0.03Nm 만큼의 작은 오차가 남았으나, Z축에서는 여전히 0.8-1.5Nm 만큼의 잔여 오차가 발생하였다. 이러한 오차는 주로 Z축 방향 보상이 충분하지 않았기 때문으로 분석된다. 따라서 향후 Z축 잔여 오차를 보정하기 위한 CAM 기반 보상 메커니즘을 추가할 계획이다.

4. Acknowledgements

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단과 정보통신기획평가원 - 학·석사연계ICT핵심인재양성의 지원을 받아 수행된 연구임. (RS-2024-00452977, IITP-2025-RS-2024-00436528)

5.참고 문헌

[1] Rodríguez-Fernández, Antonio, Joan Lobo-Prat, and Josep M. Font-Llagunes. "Systematic review on wearable lower-limb exoskeletons for gait training in neuromuscular

impairments." Journal of neuroengineering and rehabilitation 18.1 (2021): 22.
[2] Mooney, Luke M., Elliott J. Rouse, and Hugh M. Herr. "Autonomous exoskeleton reduces metabolic cost of human walking during load carriage." Journal of neuroengineering and rehabilitation 11.1 (2014): 80.
[3] Zhou, Tiancheng, et al. "Reducing the metabolic energy of walking and running using an unpowered hip exoskeleton."Journal of neuroengineering and rehabilitation18.1 (2021): 95.

Poster-118

착용형 외골격 기반 능동적 질량 중심 이동을 통한 인간 균형 보조

이장원[1], 최호선[2,3*]

[1]세종대학교 지능기전공학부, [2]세종대학교 AI로봇학과, [3]세종대학교 AI로봇연구소

Human Balance Assistance based on Center of Mass Shifting using a Wearable Exoskeleton

Jangwon Lee[1] , Hoseon Choi[2,3,*]

[1]School of Intelligent Mechatronics Engineering, Sejong University, Seoul, Korea

[2]Department of Artificial Intelligence and Robotics, Sejong University, Seoul, Korea

[3]Artificial Intelligence and Robotics Institute, Sejong University, Seoul, Korea

[*]choihoseon@sejong.ac.kr

Abstract

Balance assistance technology for fall prevention is crucial in an aging society, and effective balance is closely related to controlling the body's Center of Mass (CoM). This study, therefore, proposes a balance assistance strategy that directly controls CoM by actively shifting an internal mass within a wearable exoskeleton. Its feasibility was validated through simulations based on a double inverted pendulum model and Model Predictive Control (MPC). Simulation results revealed that the proposed strategy mitigated the joint torque burden caused by the added mass. Furthermore, it enhanced postural stability, proving more effective at disturbance rejection than the baseline no-mass condition. This work validates the effectiveness of the active CoM shifting strategy and provides an engineering basis for the development of a balance assisting exoskeleton.

1. 연구 배경

고령화 사회에서 낙상 감소는 중요한 과제이다. 낙상으로 인한 사망률은 남녀 모두, 모든 인종 및 민족 집단에서 연령이 증가함에 따라 급격히 증가하며, 75세 이상 노인의 사고사 중 낙상이 70%를 차지한다[1]. 낙상을 예방하기 위해서는 인간의 균형 조절 메커니즘에 대한 이해가 필수적이다.

균형이 유지되기 위해서는 신체의 질량 중심(Center of Mass, CoM)이 신체와 주변 환경 사이의 접촉 영역인 지지면(Base of Support, BoS) 내부에 위치해야 한다[2]. 외란이나 급격한 자세 변화는 CoM을 BoS의 경계로 이동시켜 낙상을 초래한다. 따라서 외부 장치를 통해 CoM이 BoS 내부에 위치하도록 보조한다면 인간의 균형 유지에 직접적으로 기여할 수 있다.

본 연구에서는 이러한 개념을 기반으로 착용형 장치 내부의 추가 질량을 능동적으로 이동시켜 착용자의 질량 중심을 제어하는 균형 보조 전략을 제안한다. 제안한 전략의 타당성을 검증하기 위해 이중 도립진자 모델과 모델 예측 제어(Model Predictive Control, MPC)를 적용하였으며 시뮬레이션을 통해 성능을 평가하였다.

2. 연구 방법

2.1 모델링

본 연구에서는 추가 질량의 이동이 발목 및 고관절 각도 변화에 미치는 영향을 확인하기 위해 신체를 다리 및 상체(머리-팔-몸통)와 두 관절(발목과 고관절)로 구성된 이중 도립진자로 모델링하였다. 모델의 매개변수는 체중 84.14kg, 키 1.79m의 젊은 성인 남성의 평균 인체 치수를 기반으로 설정하였다[3]. 이 모델에 상체 링크를 따라 prismatic joint로 연결된 질량을 추가하여 능동적으로 CoM을 이동시키는 착용형 장치의 균형 보조 전략을 분석할 수 있다(그림 1). 본 모델의 일반화 좌표는 다음과 같다.

$$q = \left[\theta_1, \theta_2, r\right]^T \quad (1)$$

θ_1 은 발목 각도, θ_2 는 고관절 각도, r 은 상체를 따라 움직이는 추가 질량의 위치이다. 오일러-라그랑주 방정식을 적용하면 발목, 고관절, 이동 질량에 대한 운동방정식을 얻으며, 이는 다음과 같이 표현된다.

$$M(q)\,\ddot{q} + C(q,\dot{q})\,\dot{q} + G(q) = Q \quad (2)$$

- $M(q)$는 질량/관성 행렬
- $C(q,\dot{q})$는 코리올리 및 원심항
- $G(q)$는 중력항
- $Q = \left[\tau_a, \tau_h, F\right]^T$ 는 일반화 힘 벡터이다.

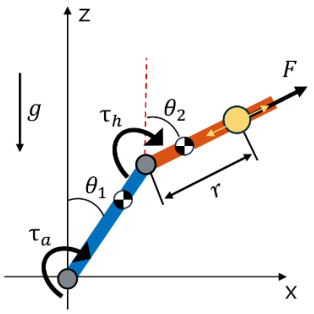


그림 1. prismatic joint로 연결된 추가 질량을 포함한 이중 도립진자 모델. 하부 및 상부 링크의 각도는 각각 $\boldsymbol{\theta_1}, \boldsymbol{\theta_2}$, 추가 질량 위치는 $\boldsymbol{r}$로 표현되며, 제어 입력은 발목 토크 $\boldsymbol{\tau_a}$, 고관절 토크 $\boldsymbol{\tau_h}$, 그리고 질량을 구동하는 힘 $\boldsymbol{F}$로 구성된다. 중력은 $\boldsymbol{g}$ 방향으로 작용한다.

2.2 모델 예측 제어(MPC)

본 연구에서는 상체에 연결된 추가 질량의 위치 제어를 위해 모델 예측 제어를 적용하였다. 모델 예측 제어는 시스템 동적 모델을 기반으로 일련의 최적화 문제를 반복적으로 해결하여 최적 제어 전략을 계산한다[4]. 본 연구에서는 2.1절에서 유도한 운동방정식을 시스템 모델로 사용하여 컨트롤러가 매 순간 발목 및 고관절의 각도를

0(직립 자세)으로 되돌리는 최적의 제어 입력(발목 토크, 고관절 토크, 추가 질량의 위치)을 산출한다. 이러한 최적 제어 전략은 목표 상태와의 오차 및 제어 입력의 크기를 정량화한 비용함수를 최소화하는 과정을 통해 결정된다.

비용함수는 예측 구간 동안의 상태 오차와 제어 입력의 크기를 종합적으로 평가하는 역할을 한다. 본 연구에서 제어 입력을 산출하기 위해 최소화하는 비용 함수는 다음과 같다.

$$J = \sum_{i=0}^{N-1} \left[(x_i - x_{ref,i})^T Q (x_i - x_{ref,i}) + u_i^T R u_i \right] \quad (3)$$

여기서 x_i는 시간 i에서의 시스템 상태, $x_{ref,i}$는 해당 시점의 기준 상태(직립 자세), u_i 는 제어 입력(발목 토크, 고관절 토크, 추가 질량 위치), Q와 R은 각각 상태 오차와 제어 입력에 대한 가중 행렬이다. 비용함수의 첫 번째 항은 발목 및 고관절 각도의 오차를 최소화하여 목표 자세로 빠르게 복원하도록 유도하며, 두 번째 항은 과도한 관절 토크나 불필요한 질량 이동을 억제하여 제어 입력의 효율성을 향상시킨다. 이를 통해 외란에 대해 안정적이고 효율적인 균형 제어가 가능하도록 설정하였다.

2.3 모델 시뮬레이션

본 시뮬레이션의 목적은 제안한 질량 이동 제어 전략이 착용자의 균형 유지에 미치는 영향을 정량적으로 평가하는 것이다. 시뮬레이션은 MATLAB(The MathWorks Inc., Natick, MA, USA)으로 수행하였다. 제어 성능을 검증하기 위해 초기 직립 자세에서 외란 토크를 인가한 후 시스템의 응답을 관찰하는 시나리오를 설계하였다.

추가 질량의 유무와 이동이 균형 제어에 미치는 영향을 분석하기 위해 시뮬레이션은 세 가지 조건으로 나누어 수행되었다. 세 가지 조건은 1) 추가 질량이 없는 경우, 2) 추가 질량이 상체 중심에 고정된 경우, 3) 제어에 의해 추가 질량이 능동적으로 이동하는 경우이다. 또한 제어 효과를 극대화하는 조건을 찾기 위해 추가 질량의 무게와 이동 속도를 변수로 설정하여 그 영향을 추가적으로 확인하였다.

3. 연구 결과

3.1 추가 질량 유무에 따른 관절 토크 비교

추가 질량을 사용하는 제어 전략은 질량이 없는 조건보다 더 큰 관절 토크를 요구하지만 질량을 이동시킴으로써 그 부담을 완화할 수 있었다. 추가 질량을 상체에 고정했을 때는 질량이 없는 조건보다 관절 토크가 약 7.73% 증가하였다. 하지만 질량을 이동시켰을 때 질량이 상체에 고정된 경우보다 관절 토크가 약 2.34% 감소하였다. 이는 본 제어 전략이 추가 질량으로 인한 부하를 상쇄하여 최소한의 토크 증가만으로 균형 보조 효과를 달성하게 함을 의미한다(그림 2).

또한 질량의 위치 제어는 외란에 대한 자세 안정성을 유의미하게 향상시켰다. 관절 각도의 누적 값은 질량이 없는 조건보다 약 8.13%, 최대 편차는 약 9.1% 감소하였다. 관절 각도의 누적 값과 최대 편차의 감소는 외란 후 진동이 빠르게 수렴하고 순간적인 자세 변동이 완화되었음을 의미한다. 즉, 제안한 전략이 자세 복원 과정에서 진동 억제와 자세 회복 속도를 동시에 개선함으로써 외란 대응 안정성을 향상시켰음을 보여준다(그림 2).

3.2 질량 무게에 따른 관절 토크 감소량 비교

추가 질량의 무게는 제어 효과에 직접적인 영향을 미치는 변수였으며, 질량이 클수록 토크 감소 효과가 증가하였다. 시뮬레이션 결과 3kg, 5kg, 7kg의 모든 질량 조건에서 질량이 고정된 경우보다 관절 토크 총합이 감소하였으며, 감소율은 각각 약 1.49%, 2.34%, 3.22%로 나타났다. 이는 질량이 클수록 관성모멘트가 증가하여 외란에 대한 안정성이 향상됨을 의미한다.

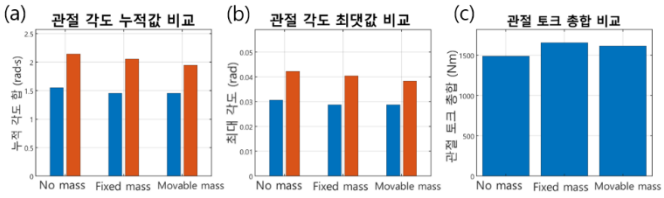


그림 2. 추가 질량 조건에 따른 시뮬레이션 결과
(a) 관절 각도 누적합, (b) 관절 각도 최댓값(파랑: 발목, 빨강: 고관절), (c) 관절 토크 총합. x축: ① 무질량, ② 고정 질량, ③ 이동 질량.

3.3 질량 속도에 따른 관절 토크 감소량 비교

질량의 이동 속도 또한 빠를수록 외란에 더 효과적으로 대응하여 토크 감소율이 증가하였다. 추가 질량의 무게를 고정한 상태에서 이동 속도 제한을 $0.05\boldsymbol{m/s}$, $0.1\boldsymbol{m/s}$, $0.5\boldsymbol{m/s}$로 설정하였으며, 동일한 질량을 고정한 조건과 비교한 결과 관절 토크가 각각 약 0.94%, 2.19%, 2.41% 감소하였다. 이러한 결과는 외란에 신속하게 반응하여 질량을 재배치하는 능력이 균형 보조 성능의 핵심적인 요소임을 보여준다.

3.4 하드웨어 설계

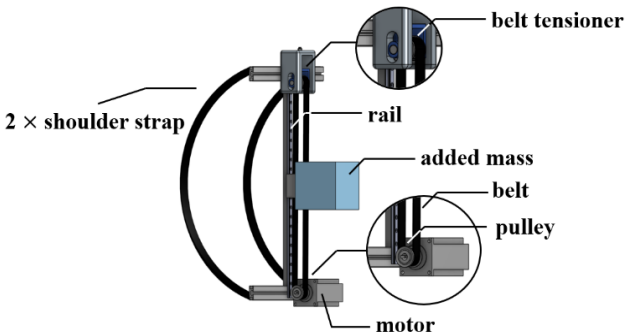


그림 3. 하드웨어 구성 개략도

시뮬레이션을 통해 제안한 전략이 균형 제어에 효과적임을 확인하였다. 후속 연구에서는 이를 하드웨어로 구현하여 실험적으로 검증할 예정이다.

4. Acknowledgements

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단과 정보통신기획평가원 - 학·석사연계ICT핵심인재양성의 지원을 받아 수행된 연구임. (RS-2024-00452977, IITP-2025-RS-2024-00436528)

5. 참고 문헌

[1] Fuller, George F. "Falls in the elderly." American family physician 61.7 (2000): 2159-2168.

[2] Hof, At L., M. G. J. Gazendam, and W. E. Sinke. "The condition for dynamic stability." Journal of biomechanics 38.1 (2005): 1-8.

[3] Morasso, Pietro. "Integrating ankle and hip strategies for the stabilization of upright standing: An intermittent control model." Frontiers in Computational Neuroscience 16 (2022): 956932.

[4] Aftab, Zohaib, Thomas Robert, and Pierre-Brice Wieber. "Balance recovery prediction with multiple strategies for standing humans." PloS one 11.3 (2016): e0151166.

Poster-119

전분화능 줄기세포 군집 가장자리의 구조적 특성에 따른 분화운명 이질성의 조절

전영우[1*], 박회원[2], 정현태[1], 성남지[1], 윤기준[2], 신현정[1],
한국과학기술원 기계공학과[1], 한국과학기술원 생명과학과[2]

Edge Mechanics Drive Heterogeneous Differentiation in Pluripotent Stem Cell Colonies

Young-woo Jeon[1*], Hoewon Park[2], Hyuntae Jeong[1], Namji Sung[2], Ki-Jun Yoon[2], Jennifer H. Shin[1]
[1]Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Korea
[2]Department of Biological Science, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Korea
[*]ywjeon@kaist.ac.kr

Abstract

Induced pluripotent stem cells (iPSCs) exhibit highly sensitive responses to the mechanical stiffness of their surrounding matrix, which modulates their adhesion, cytoskeletal organization, and lineage commitment. To investigate stiffness-dependent regulation of cell fate, iPSCs were cultured on substrates ranging from 150 Pa to 90 kPa and analyzed for morphology, cytoskeletal architecture, traction forces, and gene expression. Soft matrices promoted compact, uniformly organized colonies, whereas stiff substrates enhanced cell spreading and peripheral actin enrichment accompanied by localized traction forces. Transcript analysis revealed upregulation of multiple lineage-specific markers above 11 kPa, suggesting that stiffness-induced mechanical imbalance contributes to heterogeneous differentiation. These findings establish a mechanistic link between matrix mechanics and stem cell fate, offering strategies to minimize variability in regenerative applications.

1. 연구 배경

줄기세포의 운명 결정(fate determination)은 전통적으로 성장인자(growth factors)나 사이토카인(cytokines) 등 생화학적 신호(biochemical cues)에 의해 조절된다고 여겨져 왔다. 그러나 최근 연구들은 생체 조직의 물리적 특성(mechanical propertiess)이 세포 행동(cellular behavior)과 운명 결정의 핵심 조절 인자로 작용함을 보여주고 있다 [1]. 발달(development)과 재생 과정에서 세포는 주변 환경의 기질 강성(matrix stiffness), 세포 간 장력(intercellular tension), 형상 구속(geometric confinement) 등 다양한 기계적 단서(mechanical cues)를 지속적으로 감지하며, 이를 전사 프로그램(transcriptional program)으로 변환해 구조적 조직화와 분화 방향을 결정한다. 이러한 기계전달(mechanotransduction) 과정은 단일 세포 수준을 넘어 콜로니(colony)나 조직 단위의 집단적 패턴 형성(spatial patterning)을 유도하는 것으로 제시되고 있으나 [2-4], 그 정량적 인과 관계는 아직 명확히 규명되지 않았다.

인간 전분화능줄기세포(human pluripotent stem cell; hPSC)는 배아 발달 초기의 세포 상태를 본질적으로 지니며, 자기재생(self-renewal)과 전분화능(pluripotency)을 동시에 유지하는 독특한 생물학적 특성을 갖는다. 이러한 특성으로 인해 hPSC는 생화학적 신호뿐 아니라 물리적 요인이 세포 운명 결정에 미치는 영향을 규명하기 위한 이상적인 모델로 간주된다. 특히 hPSC 콜로니는 세포 간 결합(cell–cell junctions)과 기질 부착(focal adhesions)이 정교하게 조직된 상피(epithelial) 구조를 이루며, 가장자리(edge) 세포가 생성하는 견인력(traction force)이 내부로 전달되어 집단적 장력 네트워크(junctional tension network)를 형성한다. 이러한 기계적 연속성(mechanical continuity)은 세포골격(cytoskeleton)과 핵 간의 응력 전달(stress transmission)을 매개하며, YAP/TAZ뿐 아니라 RhoA–ROCK, PI3K/AKT 등 다양한 기계전달 경로(pathways)를 조절함으로써 공간적 운명 패턴(spatial fate pattern)의 형성과 유지에 중요한 역할을 하는 것으로 제시되고 있다 [5].

한편, 낮은 강성(low stiffness) 환경에서는 부착 단백질 활성과 세포 간 장력의 형성이 제한되어 세포 집단 내 기계적 연속성이 약화되고, 기계적 신호 흐름(mechanical signaling cascade)이 불균형 하게 조절된다. 이러한 변화는 세포가 물리적 자극을 해석하고 전사 프로그램으로 전환하는 방식에 근본적인 영향을 미칠 수 있다. 따라서 기질 강성의 변화가 세포 간 장력 전달, 핵 내 기계전달 그리고 운명 결정(fate specification) 간의 연계를 어떻게 재조직하는지를 규명하는 것은 발달(developmental) 기계생물학의 핵심 과제이다. 본 연구에서는 세포골격 구조 분석과 qPCR 기반의 분화 마커 발현 정량화를 통해, 물리적 미세환경이 세포 운명 결정에 미치는 기계적–전사적 연계를 탐색하고자 한다.

2.연구 방법

Polyacrylamide (PA) 젤 제작 및 표면 처리

다양한 강성의 PA 젤은 acrylamide와 bis-acrylamide 농도 비율을 조절하여 제작하였다. 젤 용액은 0.1% ammonium persulfate(APS)와 0.01% N,N,N′,N′-tetramethylethylenediamine(TEMED)을 첨가해 glass coverslip 위에서 중합(polymerization)시켰다. 중합된 젤 표면은 Sulfo-SANPAH(0.5 mg/mL in HEPES buffer)를 자외선(UV)으로 활성화한 뒤, Matrigel(1:100 dilution)을 37 °C에서 overnight 코팅하여 세포 부착이 가능하도록 처리하였다.

세포 배양 조건

hPSC는 Matrigel이 코팅된 PA 젤 위에 E8 배지(Stemcell Technologies)를 사용하여 37°C, 5% CO_2의 가습 배양기에서

유지하였다. 세포는 동일한 배양 밀도에서 seeding 후, 24–96시간 동안 시간 의존적 변화를 관찰하였다.

Actin 세포골격 염색 및 형태 분석

세포골격 구조는 Alexa Fluor 568-conjugated phalloidin을 이용해 염색하였으며, DAPI로 핵을 대조 염색하였다. Confocal microscopy로 이미징 후, 콜로니 형태, edge–center 간 actin 분포 등을 imageJ를 통해 정량 분석하였다.

유전자 발현 분석 (qPCR)

각 강성 조건에서 세포를 수집해 TRIzol로 RNA를 추출하고, reverse transcription 후 SYBR Green 기반 qPCR을 수행하였다. 분석 대상은 전분화능 유전자(pluripotency markers)와 3배엽 분화 마커(ectoderm, mesoderm, endoderm markers)였다.

3. 연구 결과

hPSC는 기질 강성(matrix stiffness)에 따라 뚜렷한 형태학적 차이를 보였다(그림. 1a). 150 Pa 및 3 kPa의 낮은강성 환경에서는 세포가 서로 강하게 응집되어(compacted) 돔형(dome-like) 콜로니를 형성하였으며, 세포 간 경계가 불분명한 구상 형태를 유지하였다. 반면, 38 kPa 이상에서는 세포가 기질 위로 확산되며, 콜로니 외곽(edge)에서 평탄화(flattening)와 확장이 뚜렷하게 나타났다. 이러한 형태 변화는 강성 증가에 따라 부착 안정성과 세포 확산이 동시에 강화됨을 시사한다.

Phalloidin 염색을 통해 관찰한 결과, actin 세포골격은 강성에 따라 뚜렷한 공간적 재편성을 보였다(그림. 1b). 저강성 조건에서는 actin 섬유가 콜로니 내부에서 균일하게 분포하며 응축된 네트워크를 형성하였으나, 고강성(stiff) 기질에서는 스트레스 섬유(stress fiber)가 발달하고, actin이 콜로니 가장자리(edge)에 집중되는 양상이 뚜렷하였다. 이러한 변화는 세포 부착력 증가와 함께 견인력(traction force)이 콜로니 가장자리에서 우세하게 축적됨을 시사한다.

qPCR 분석 결과(그림. 2), 낮은강성(150 Pa)에서는 전분화능 유전자(pluripotency genes; OCT4, NANOG)가 상대적으로 높게 유지되었다. 반면, 11 kPa 이상에서는 ectoderm, mesoderm, endoderm 관련 분화 마커(differentiation markers)의 발현이 전반적으로 증가하는 경향을 보였다. 특히 3 kPa 조건에서는 ectodermal markers (SOX1, PAX6)가 선택적으로 발현되어 신경계(neuroectoderm) 계통으로의 편향을 시사하였다.

이상의 결과는 기질 강성이 hPSC의 형태, 세포골격 조직, 그리고 운명 관련 유전자 발현을 동시적으로 조절함을 보여준다. 즉, 부드러운 기질에서는 세포 응집(compaction)과 전분화능 유지가, 단단한 기질에서는 세포 확산(spreading)과 다계통 분화 경향이 우세하게 나타났다. 이러한 강성 의존적 반응은 물리적 미세환경(mechanical microenvironment)이 세포 운명 결정(fate determination)을 매개하는 주요 조절 축으로 작용함을 시사한다.

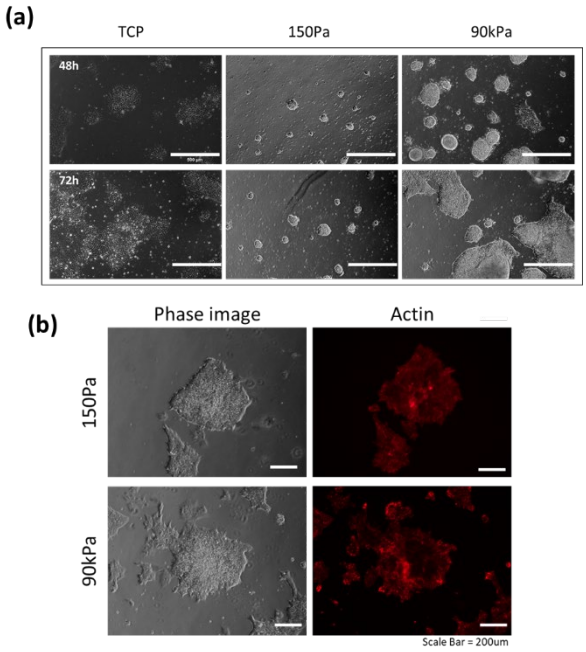


그림 1. 기질강성에 따른 인간 전분화능줄기세포(hPSC)의 형태 및 세포골격

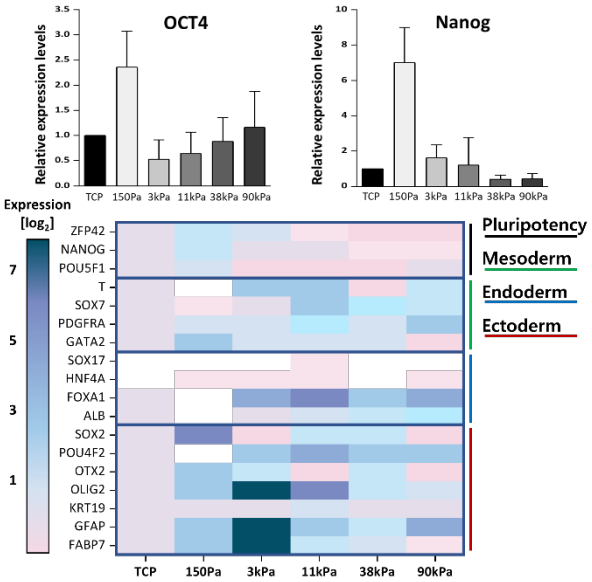


그림 2. 기질 강성에 따른 전분화능 및 계통 특이적 유전자 발현

4. Acknowledgements

이 연구는 National Research Foundation of Korea (NRF) 과제 "바이오의료기술개발사업"의 지원을 받아 수행하였음. (No. NRF-2020M3A9E4039658)

5.참고 문헌

[1] J. Vining and D. J. Mooney, "Mechanical forces direct stem cell behaviour," *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, Vol. 18, No. 12, pp. 728–742, 2017.

[2] M. Närvä, A. Stubb, J. Guzmán, *et al.*, "A strong contractile actin fence and large adhesions direct human pluripotent colony morphology and adhesion," *Nature Communications*, Vol. 8, No. 1, p. 1387, 2017.

[3] D. Warmflash, B. Sorre, F. Etoc, E. D. Siggia, and A. H.

Brivanlou, “A method to recapitulate early embryonic spatial patterning in human embryonic stem cells,” *Nature Methods*, Vol. 11, No. 8, pp. 847–854, 2014.
[4] S. M. Rosowski, T. Mertz, M. Höhne, *et al.*, “Edges of human embryonic stem cell colonies display distinct mechanical properties and differentiation potential,” *Scientific Reports*, Vol. 5, p. 14218, 2015.
[5] L. Cai, X. Xie, Y. Zhou, Y. Liu, and Y. Sun, “Regulation and mechanism of YAP/TAZ in the mechanical microenvironment of stem cells,” *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, Vol. 9, 2021.

Poster-120

나사 풀림 현상의 생체역학적 분석을 통한 노인 쇄골 골절 치료용 혼합치수형 잠금 압박 금속판(LCP) 제안

공희경[1*], 김재수[2], 태기식[1]

건양대학교 의공학과[1], 중앙대학교 광명병원 정형외과[2]

Proposal of a Hybrid-Sized Locking Compression Plate (LCP) for Fixation of Elderly Clavicle Fractures Based on Biomechanical Evaluation of Screw Loosening

Huigyeong Gong[1]*, Jaesoo Kim[2], Kisik Tae[1]

Dept of Biomedical Engineering, Konyang University, Korea[1]

Dept. of Orthopedic Surgery, Chung-Ang University Gwangmyeong Hospital, Korea[2]

*23606007@konyang.ac.kr

Abstract

Midshaft clavicle fractures are common, but optimal fixation remains challenging in elderly patients with anatomically shorter and osteoporotic clavicles. This study evaluated the biomechanical characteristics of four fixation models using finite element analysis under bending, compression, and torsion loading conditions. tress concentrations were observed near the central screw holes across all models. The G 3.5 mm model exhibited high plate stress but low screw stress, while the S 2.7 mm model showed localized stress peaks due to its curved geometry. The G 2.7 mm model demonstrated low plate stress but relatively higher screw stress. The hybrid model—combining central 3.5 mm and peripheral 2.7 mm screws—showed the lowest overall stress in both components. These results suggest that the hybrid design provides balanced load distribution and may be an effective fixation option for elderly patients.

1. 연구 배경

쇄골 간부 골절은 견갑대 외상 중 가장 흔하게 발생하는 유형이다. 전체 쇄골 골절의 약 81%를 차지하며, 비수술적 방법과 수술적 방법을 통해 치료한다. 연구에 따르면, 비수술적 방법을 시행했을 경우 부정유합 및 불유합과 같은 합병증 발생률이 수술적 치료에 비해 높은 경향이 있어, 수술적 치료가 권장된다. 수술적 치료는 금속판과 나사못을 활용한 고정술이 골수 내 고정술보다 선호되는데, 파손 시점을 테스트하는 하중 부하 테스트에서 더 안정적인 결과를 갖는다. 일반적으로 사용되는 금속판은 LCP(locking-screw)형태로, 쇄골 중간부 골절 모델에서 굽힘 및 비틀림 하중에 대한 뛰어난 저항력을 가지며, non-locking screw에 비해 더 빠른 골유합을 제공한다.

금속판 고정술에서 발생하는 대다수의 합병증은 임플란트와 관련된 것으로, 환자의 해부학적 특성을 고려한 적절한 플레이트의 사용이 무엇보다 중요하다. 하지만 쇄골은 길이, 상하 방향 굽힘, 내외측 굴곡 등 해부학적 변이가 커, 외과의가 표준화된 규격의 기성 금속판만으로 모든 환자를 적절히 수술하기는 어렵다. 특히, 150mm 이하의 쇄골에서 금속판의 종류에 따른 성능 편차가 심한 것으로 나타난다. 여성, 특히 노인의 경우 골다공증과 골격 변화가 더해져 고정에 불리한 조건을 가질 수 있다. 이에 다양한 규격의 금속판에 대한 연구 필요성이 더욱 강조된다.

기존의 연구들은 금속판 고정술의 생체역학적 안정성 평가를 실시할 때, 주로 금속판 자체의 응력 분포나 전반적인 강성에만 초점을 맞추어 왔다. 고정 실패의 주요 원인인 나사못에 대한 응력 분석은 거의 다루지 않았다. 임상적으로는 개별 나사와 뼈 사이의 접촉 부위에서 발생하는 응력 집중이 고정력 약화와 밀접한 연관이 있으므로, 나사 단위의 뽑힘 위험성 평가가 필요하다.

본 연구는 이러한 기존 연구의 한계점을 극복하고, 골격이 작은 노인 환자의 쇄골 골절에 최적화된 임플란트를 제안하고자 한다. 이를 위해 기존에 임상에서 사용되는 3.5mm, 2.7mm 규격의 금속판 외에도, 둘의 장점을 결합한 중앙부 3.5mm, 외곽부 2.7mm 규격의 혼합형 금속판을 새로이 설계하여 유한요소해석(FEA)을 진행하였다. 구체적인 목적은 세 가지 규격에 대한 금속판 및 나사못의 응력 분포를 분석하여 생체역학적 안정성 차이를 정량적으로 평가하고, 나사 풀림 위험을 포함한 임플란트 고정 실패 위험을 종합적으로 비교하는 것이다. 최종적으로, 골격이 작은 노인 환자에게 가장 적합한 생체역학적 안정성을 제공하는 새로운 혼합형 금속판의 임상적 유용성을 제시하고자 한다.

2.연구 방법

본 연구에 사용된 쇄골 모델은 72세 여성의 CT 영상을 기반으로 MIMICS 21.0 (Materialise Interactive Medical Image Control System, Belgium)을 통해 3차원 형상으로 재구성되었다. 해면골과 피질골은 구분되었으며, 골절을 의미하는 2.5mm의 균열은 쇄골 간부에 묘사되었다. 연구에 사용되는 네 가지 금속판의 형상이 판이하고, 최적의 삽입 위치가 상이함에 따라 골절 또한 네가지 유형으로 각 금속판의 정중앙부에 모델링되었다.

기성 제품인 (1) G사의 3.5mm 모델, (2) G사의 2.7mm 모델, (3) S사의 2.7mm 모델 그리고 (4) 새롭게 디자인된 G사의 혼합형 모델(중앙부 3.5mm-외곽부 2.7mm)은 모두 쇄골의 수평 방면, 골절면을 기준으로 대칭하게 삽입되었다. 모든 모델에는 금속판과 동일한 규격의 잠금 나사(Locking screw)가 사용되었다.

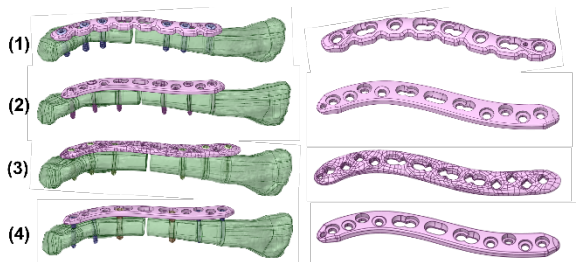


그림 1. 금속판 모델

해석은 유한요소분석 기반의 소프트웨어 ANSYS 2022 R2 (ANSYS, INC., Canonsburg, PA)에서 진행되었다. 전체 모델의 평균 요소 크기는 0.3mm로 유지하였다. 금속판과 나사의 재료는 티타늄 합금으로 가정하고, 모든 Geometry는 탄성계수와 포아송비 두 개의 매개변수를 사용해 특성을 반영하였다.

표 1. 재료물성값

Component	Young's modulus	Poisson's ratio
Cortical bone	17,000 MPa	0.3
Cancellous bone	1,000 MPa	0.3
Ti-6Al-4V	110,000 MPa	0.3

하중 조건은 견봉(acromion) 쪽 상지 움직임을 모사하는 세가지 형태(a:Cantilever bending, b:Axial compression, c:Axial torsion)로 설정되었으며, 흉골과 맞닿는 근위부는 Fixed Support 기능을 통해 완전 고정되었다. 금속판과 나사 모두 Von-mises stress를 측정하였으며, 나사의 경우 축 방향으로 작용하는 응력을 개별로 측정하기 위해 나사 각각에 로컬 좌표계가 부여되었다.

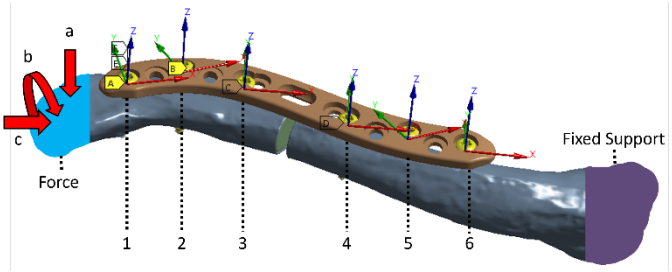


그림 2. 경계조건 : 하중 및 끝단 고정 조건, 나사 번호(1–6) 정의

3. 연구 결과

모든 모델에서 금속판의 응력 집중은 골절 부위 인접에 인접한 두 나사가 삽입되는 위치에서 공통적으로 관찰되었으며, 이는 하중 조건과 금속판의 형상에 관계없이 동일한 경향을 보였다. (그림 3).

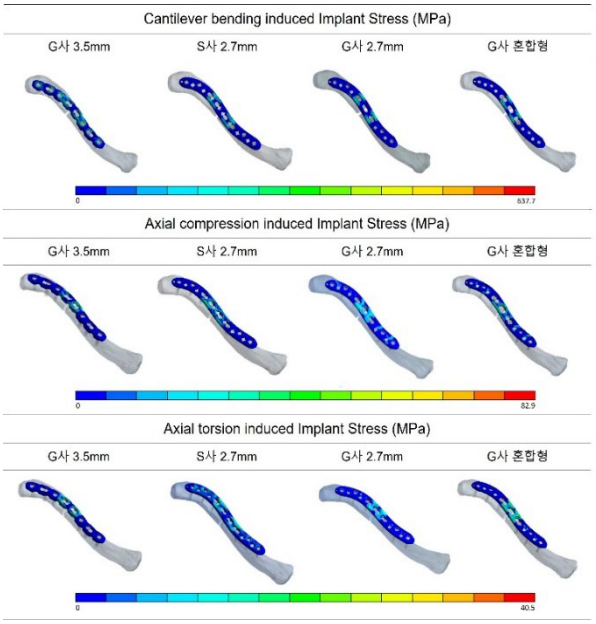


그림 3. 금속판에서의 응력 분포 양상

세 가지 하중 조건 대한 모델별 평균 및 최대 응력 값은 표 2와 같다. 혼합형 모델은 모든 하중 조건에서 금속판에 작용하는 평균 및 최대 응력이 가장 낮았으며, G사 3.5mm 모델은 강성이 큰 만큼 금속판에 높은 응력이 집중되는 양상을 보였다. S사 2.7mm 모델은 일부 조건에서 G사 3.5mm보다 더 높은 최대 응력을 보이기도 했는데, 이는 플레이트의 굴곡 구조에 따라 특정 부위에 응력 집중이 발생했기 때문으로 해석된다. 반면, G사 2.7mm 모델은 일자형 구조로 플레이트 응력은 비교적 낮았으나, 하중이 나사로 더 분산되어 나사 응력이 높게 나타나는 경향이 있다.

표 2. 금속판의 응력 값

Cantilever bending induced Implant Stress (Mpa)	Max.	Min.	Avg.
S사 2.7mm	637.7	141.7	175.85
G사 2.7mm	548.1	121.8	154.1
G사 혼합형	453.4	100.8	139.2
G사 3.5mm	629.5	140	195.9
Axial compression induced Implant Stress (Mpa)	**Max.**	**Min.**	**Avg.**
S사 2.7mm	82.97	13.85	23.09
G사 2.7mm	74.25	16.50	20.32
G사 혼합형	61.75	13.72	21.05
G사 3.5mm	77.56	17.24	26.18
Axial torsion induced Implant Stress (Mpa)	**Max.**	**Min.**	**Avg.**
S사 2.7mm	37.78	8.72	11.81
G사 2.7mm	28.52	6.33	7.34
G사 혼합형	22.97	5.10	7.36
G사 3.5mm	40.44	8.99	13.63

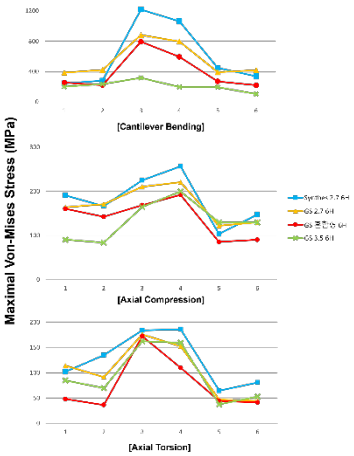


그림 4. 나사의 최대 응력값

나사에 작용한 최대 응력은 모든 조건에서 동일하게 S사 2.7mm, G사 2.7mm, G사 3.5mm, 혼합형 순으로 나타났다. (그림 2). 모델 별 편차는 금속판의 강성과 형상 차이에 따라 하중의 전달 방향이 달라졌음을 시사한다. 특히 G사 3.5mm 모델의 낮은 나사 응력은 금속판이 하중을 흡수하였다고 해석할 여지가 있다. S사 2.7mm는 구조적 유연성과 굴곡 형태로 인해 응력이 나사에 집중된 양상을 보였다.

혼합형 모델은 중앙부에 3.5mm 나사, 외곽부에 2.7mm 나사를 사용하여 하중이 고정력 확보가 필요한 부위에서는 강성을 유지하고, 외곽부에서는 유연하게 분산되도록 설계되었다. 그 결과, 플레이트와 나사 모두에서 평균 및 최대 응력이 가장 낮게 측정되었으며, 응력 집중과 고정력 간의 균형을 고려한 유효한 설계 대안으로 판단된다.

4. Acknowledgements

본 연구는 정보통신기획평가원의 SW중심대학사업 지원을 받아 수행된 결과입니다.

5.참고 문헌

[1] T. L. Huang et al., "Conceptual finite element study for comparison among superior, anterior, and spiral clavicle plate fixations for midshaft clavicle fracture," Med. Eng. Phys., vol. 38, no. 10, pp. 1070–1075, 2016.

[2] M. H. Hu et al., "Effect of Sextant Fixating Angle of Spiral Clavicle Plate on Biomechanical Stability—A Preliminary Finite Element Study," Bioengineering, vol. 11, no. 7, p. 713, 2024.

[3] A. M. Malhas, Y. G. Skarparis, S. Sripada, R. W. Soames, and A. C. Jariwala, "How well do contoured superiormidshaft clavicle plates fit the clavicle? A cadaveric study," Journal of Shoulder and Elbow Surgery, vol. 24, no. 12, pp. e399–e405, 2015.

Poster-121

불안정 근위 상완골 골절에서 최적의 비골 지주 이식편 고정 각도: 유한요소해석

공희경[1*] , 이현주[2] , 송현석[3] , 김형석[3] , 태기식[1]

건양대학교 의공학과[1], 건양대학교 물리치료학과[2], 가톨릭대학교 은평성모병원 정형외과[3]

The Optimal Fibular Strut Bone Graft Fixation Angle for Unstable Proximal Humerus Fractures: A Finite Element Analysis

Huigyeong Gong[1]*, Hyunju Lee[2], Hyeonseok Song[3], Hyeongsuk Kim[3], Kisik Tae[1]

Dept of Biomedical Engineering, Konyang University, Korea[1] , Dept of Physical Therapy, Konyang University, Korea[2]

Department of Orthopedic Surgery, Eunpyeong St. Mary's Hospital, College of Medicine, The Catholic University of Korea

*23606007@konyang.ac.kr

Abstract

This study aimed to evaluate the biomechanical effects of different insertion angles (0° and 30°) of fibular strut grafts in proximal humerus fractures using finite element analysis. Varus and valgus unstable models were created with wedge osteotomies, and a locking plate and fibular graft were applied. Axial and traction loads were simulated. Under axial loading, the 0° insertion showed lower stress, whereas under traction, the 30° insertion reduced stress in both the plate and graft.. These results suggest that oblique insertion of fibular strut grafts may improve mechanical stability in unstable proximal humerus fractures.

1. 연구 배경

변위된 근위 상완골 골절(displaced proximal humerus fractures)의 수술적 치료는, 골절이 내주(medial column)의 분쇄(comminution)를 포함할 경우 기술적으로 큰 어려움을 동반한다. 내측 지지대 재건의 실패는 고정 실패의 주요 위험 인자로 간주되며, 이는 내반 붕괴(varus collapse) 및 나사못 침범(screw penetration)으로 이어져 임플란트 실패를 초래할 수 있다.

근위 상완골 골절은 65세 이상 인구에서 원위 요골 및 고관절 골절에 이어 세 번째로 높은 발병률을 보이는 골절 유형이다. 대부분은 열악한 골질을 가진 골다공증성 또는 골감소증성 골에서의 저에너지 낙상으로 발생하며, 하내측 지지대의 손상을 초래해 복합적인 분쇄 패턴을 유발하고, 고정 후 정복 소실, 내반 붕괴 및 나사못 침범의 위험성을 증가시킨다.

이러한 한계를 극복하고자 내측 지지 나사(calcar screw)를 활용한 금속판(locking plate fixation) 고정술이 도입되었으며, 현재까지 긍정적인 임상적 평가를 받고 있다. 그러나 나사못 침범 및 내반 붕괴 등의 합병증은 여전히 자주 보고된다.

최근, 안정성을 향상시키고 내반 붕괴를 방지하기 위한 방법으로 금속판 고정술에 비골 지주 이식편(fibular strut bone graft)을 추가하는 기법이 제안되었다. 선행 연구들은 비골 지주 이식편이 골-임플란트 복합체의 실패 하중 및 강성을 증가시키고, 골절 조각의 이동을 감소시킨다는 점을 입증하였다. 아울러, 다수의 임상 연구에서도 지주 이식편을 사용한 잠금 플레이트 고정술이 성공적인 결과를 보고하였다.

비골 지주 이식편의 유용성에도 불구하고, 최적 삽입 각도에 대한 연구는 아직 부족한 실정이다. 기존 연구들은 대체로 이식편을 상완의 골수강(humeral canal)에 수직으로 삽입해 내측으로 위치시키는 방식을 제안해 왔으며, 일부는 불안정한 골절의 경우 삽입 위치를 달리해야 한다고 주장한다.

이에 따라, 사선으로 삽입된 지주 이식재가 내반 불안정 골절에서 더 큰 안정성을, 수직으로 삽입된 지주 이식재가 외반 불안정 골절에서 더 큰 안정성을 제공할 것이라는 가설을 설정하였다. 본 연구의 목적은 유한 요소 분석(Finite Element Analysis, FEA)을 통해 내반 불안정 및 외반 불안정 근위 상완골 골절 모델에서 비골 지주 이식편의 서로 다른 고정 각도(0° 및 30°)에 따른 생체 역학적 특성을 비교하는 데 있다.

2.연구 방법

본 연구에 사용된 모델은 73세 남성의 상완골 CT 영상(DICOM)을 기반으로 하였으며, MIMICS 21.0(Materialise NV, Belgium)을 통해 3차원 형상으로 재구성되었다. 내측 및 외측 쐐기 절제술(wedge osteotomy)을 통해 내반 및 외반 불안정 골절 모델이 각각 구현되었고, 골절 간의 독립성을 위해 0.2mm 간극이 추가되었다.

잠금 금속판(PHILOS® system, DePuy Synthes, Switzerland)은 길이 90mm(3공)로 적용되었으며, 두부에는 길이 50, 48, 45, 30mm의 나사, 간부에는 30mm 길이의 피질 나사 3개가 삽입되었다. 나사의 나사산은 모델의 단순화를 위해 생략되었다. 모든 구성 요소는 SolidWorks 2015(Dassault Systèmes, USA)를 통해 구현되었다. 물성치는 표 1과 같이 적용되었다. 금속판과 나사는 티타늄 합금 Ti-6Al-4V으로 가정되었다.

표 1. 재료물성값

Component	Young's modulus	Poisson's ratio
Proximal humerus	13,800 Mpa	0.30
Fibular graft	17,000 MPa	0.30
Ti-6Al-4V	110 GPa	0.34

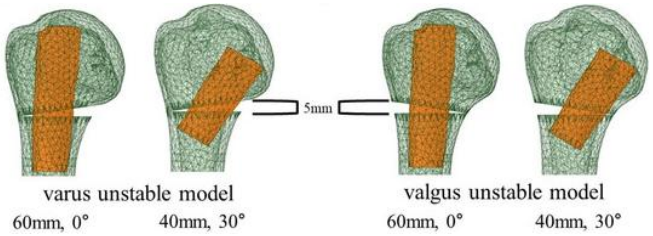


그림 1. 내반(A) 및 외반(B) 불안정 골절 모델에서의 비골 지주 이식편 삽입.

비골 지주 이식편(fibular strut graft)은 길이 60mm와 40mm로 설정되어 상완골 간부에 대해 0° 및 30°의 각도로 삽입되었다.

경계 조건은 원위부를 고정(Fixed Support)하고, 상완골 두부에 500N의 하중을 원격 점을 통해 전달하였다. 견관절의 생리적 운동 범위를 반영하여 70°, 90°, 110°의 견인 방향을 포함한 4가지 조건(골절 유형 × 삽입 각도)을 설정하였다.

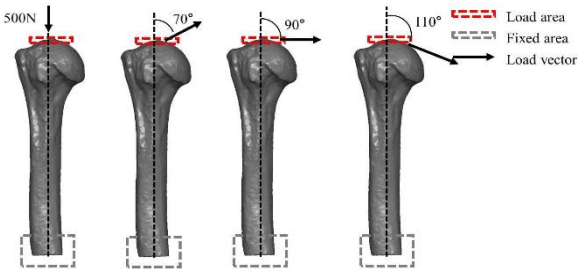


그림 2. 상완골에 적용된 하중 조건

판과 나사, 골 사이의 접촉은 완전 고정으로 정의되었고, 이식편과 골 간의 마찰계수는 0.2로 설정되었다.

금속판, 나사, 상완골에 대해서는 최대 응력(Von-mises)을, 취성 재료인 이식편에 대해서는 최대 주응력(Max principal stress)을 측정하였다.

3. 연구 결과

모든 모델에서 금속판의 응력 집중은 골절 부위에 인접한 나사 삽입부에서 공통적으로 관찰되었으며, 하중 조건 및 이식편의 삽입 각도에 관계없이 유사한 양상을 보였다.

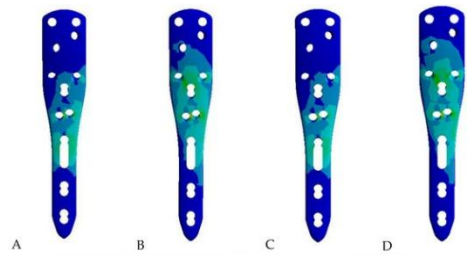


그림 3. 금속판의 응력 분포 양상. (A, B) 내반 불안정 모델 / (C, D) 외반 불안정 모델, (A, C) 수직 삽입 / (B, D) 사선 삽입.

표 2. 내반 불안정 모델에서의 응력 및 주응력 값(MPa)

	Axial Load				Traction at 70°			
	Plate	Screw	Humerus	Fibula	Plate	Screw	Humerus	Fibula
Vertical	48.1	148.9	40.6	28.5	268.6	516.5	159.4	121.0
Oblique	60.7	134.0	136.6	91.7	26.8	540.6	260.9	186.0

	Traction at 90°				Traction at 110°			
	Plate	Screw	Humerus	Fibula	Plate	Screw	Humerus	Fibula
Vertical	295.8	622.4	187.7	150.7	294.6	656.7	198.1	160.0
Oblique	59.4	611.0	322.0	67.5	287.1	618.9	346.6	68.5

표 3. 외반 불안정 모델에서의 응력 및 주응력 값(MPa)

	Axial load				Traction at 70°			
	Plate	Screw	Humerus	Fibula	Plate	Screw	Humerus	Fibula
Vertical	44.6	145.4	47.2	37.0	270.3	494.6	182.8	140.0
Oblique	66.9	165.5	174.5	30.5	259.0	589.4	284.1	68.8

	Traction at 90°				Traction at 110°			
	Plate	Screw	Humerus	Fibula	Plate	Screw	Humerus	Fibula
Vertical	296.9	591.5	216.3	175.6	290.8	623.8	221.51	185.1
Oblique	289.2	671.3	366.7	79.1	285.1	676.2	369.4	80.7

0° 수직 삽입에 비해 30° 사선 삽입 모델은 대부분의 견인 하중 조건에서 금속판에 작용하는 응력이 낮았고, 이식편에도 더 낮은 최대 주응력이 나타났다. 단, 축 방향 하중에서는 사선 삽입 시 오히려 더 높은 응력이 관찰되었다. 견인 하중 조건에서는 응력이 보다 넓게 분산되어 금속판과 나사에 대한 응력 집중이 감소하는 경향을 보였다.

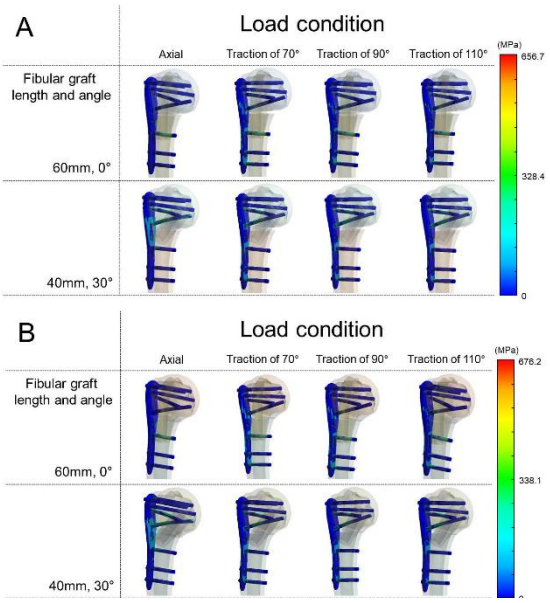


그림 4. 나사의 응력 분포 양상. (A) 내반 불안정, (B) 외반 불안정

나사에 작용한 최대 응력은 견인 하중에서 뚜렷하게 증가했으며, 대부분 이식편을 관통하는 나사에서 가장 높은 응력이 나타났다. 특히, 수직 삽입 모델에서는 원위부 나사에서, 사선 삽입 모델에서는 근위부 나사에서 최대 응력이 집중되었다. 이는 이식편과의 접촉 관계 및 삽입 각도에 따라 응력 전달 위치가 달라졌음을 시사한다.

30° 사선 삽입은 내측 버팀 구조를 보강함으로써 금속판에 작용하는 하중을 분산시키고, 고정체 전반의 응력 집중을 완화하는 데 기여하였다. 이식편 자체의 주응력도 대부분의 조건에서 낮게 나타나, 취성 재료의 파절 위험을 줄이는 것으로 평가된다.

결론적으로, 30° 사선 삽입은 내반 및 외반 불안정 근위 상완골 골절 모델 모두에서 다방향 견인 하중에 대해 더 유리한 기계적 안정성을 제공하였으며, 금속판과 이식편 모두에서 응력 분산 효과가 확인되었다. 이는 내측 지지 기능을 보강하는 효과적인 삽입 전략으로, 향후 임상적 적용 가능성이 높은 설계 대안이라 판단된다.

4. 참고 문헌

[1] M. J. Gardner, Y. Weil, J. U. Barker, B. T. Kelly, D. L. Helfet, and D. G. Lorich, "The importance of medial support in locked plating of proximal humerus fractures,"J. Orthop. Trauma, vol. 21, no. 3, pp. 185–191, 2007.

[2] R. M. Chow, G. F. LeBus, E. A. Lalone, J. A. Johnson, and G. S. Athwal, "Biomechanical analysis of different lengths and positions of fibular strut grafts in proximal humerus fractures," *J. Shoulder Elbow Surg.*, vol. 31, no. 1, pp. 126–133, 2022.

Poster Presentation
의광학

Poster-122

햅틱 촉감 계수 생성을 위한 피부 초분광 영상의 고속 푸리에 주파수 변환 기반 유효 밴드 비교 분석

김주현[1], 이언석[12*]

순천향대학교 일반대학원 소프트웨어융합학과[1]

순천향대학교 의료IT공학과[2]

Comparative Analysis of Effective Bands Based on Fast Fourier Transform of Skin Hyperspectral Images for Haptic Touch Coefficient Generation

Juhyun Kim[1], Onseok Lee[12*]

[1]Department of Software Convergence, Graduate School, Soonchunhyang University, Korea

[2]Department of Medical IT Engineering, Soonchunhyang University, Korea

[*]leeos@sch.ac.kr

Abstract

Quantitative and highly reproducible tactile feedback technology is required to provide skin sensations to haptic devices. This study, based on hyperspectral imaging technology, examined the necessity of generating detailed tactile coefficients that consider different subcutaneous properties depending on the body part. To this end, we quantitatively compared the correlations between spectral bands across body parts using Spearman correlation analysis. The results showed that while body parts showed similar average elasticity values, the spectral bands effective for actual elasticity formation differed. This suggests that tactile coefficients need to be generated differently depending on the influence of different skin layers and subcutaneous structures in forming elasticity across body parts.

1. 연구 배경

햅틱은 촉감 피드백을 기반으로 인간 피부가 현실 및 가상환경에서 물체 표면 간의 접촉을 통해 몰입감 높은 물리적 경험을 증진시키는 기술 중 하나이다. 최근 정밀한 피부 촉감을 제공하기 위한 촉감 정량화 연구가 활발히 수행되고 있다 [1]. 그러나 기존 촉감 피드백 기술 연구들은 주로 피부 표면의 질감이나 피부 촉감의 단편적 정보를 제공한다는 한계점이 있다.

피부는 복합적 다층상 구조로 인해 신체 부위별로 서로 다른 탄력 값을 형성한다. 기존의 피부 탄력 정량화를 위한 방법으로 접촉 및 압입식 탄력 기기가 사용되었으나, 해당 기기는 단순 압입식으로 인해 피부층별로 탄력에 영향을 미치는 상이한 정보가 부재하다 [2]. 이에 따라 햅틱 피드백 기술 개발에 있어 피부층별 복합적인 특성이 포함된 정밀한 촉감 정보를 제공하는 연구가 필요하다.

초분광 영상 기술 (Hyperspectral Imaging, HSI)은 비침습, 비접촉적으로 물질의 물리 화학적 특성을 정량화할 수 있는 광학 기술로 최근 다양한 산업 분야에서 활발히 적용되어 왔다. 특히 초분광 영상 기반의 피부 질환 및 생리학적 변수 추정 평가 연구를 통해 비침습적으로 신뢰성 높은 임상 진단 보조 도구의 가능성을 보였다 [3]. HSI 기술은 100개 이상의 연속적인 분광 밴드로 구성됨에 따라 차원 축소 및 유효 밴드 선택을 수행하여 물질의 물리 화학적 특성에 중요한 영향을 갖는 분광 밴드를 추출하기도 한다. 이를 통해 보다 효율적으로 미세하고 복잡한 물질 특성을 예측하고 정량화 할 수 있는 장점이 있다.

본 연구는 재현성 있는 햅틱 피드백 기술 개발을 위해 피부 탄력 촉감 계수 생성에 있어 초분광 피부 영상 내 탄력에 유효한 분광 밴드를 비교 분석하고자 한다. 이를 위해 유사한 탄력값을 갖더라도 부위에 따라 탄력 형성에 영향을 주는 분광 대역이 유의하게 다른지 확인하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1. 데이터 획득

본 연구에서는 건강한 피부를 가진 성인 17명을 대상으로 1명 당 서로 다른 신체 부위 10곳에 대해 두 종류의 데이터를 수집하였다. 분석에 사용된 데이터셋은 압입식 탄력값 평균이 유사한 4가지의 신체부위로 선택하였다 (Approval number : 1040875-202303-SB-019). 초분광 영상은 SNAPSCAN VNIR camera(Imec, Reuven, Belgium)로 470~900nm대역의 영상을 획득하였으며 Skin Elastimeter (Delfin, Kuopio, Finland)로 압입식 탄력 수치값 (N/m^2)을 획득하였다.

2.2. 데이터 전처리

초분광 피부 영상은 분광 및 공간 상의 복잡한 신호를 포함하고 있다. 따라서 고속 푸리에 변환 (Fast Fourier Transform, FFT)을 적용하여 영상의 주파수 성분 추출을 하였다. 이는 신체 부위별로 상이한 피부 탄력 촉감 계수 생성을 위해 유의미한 밴드 확인에 있어 복잡한 피부 특성을 직관적이고 정량적으로 비교할 수 있다는 장점이 있다.

2.2.1. FFT

FFT는 영상의 이산 푸리에 변환 (Deviation Fourier Transform, DFT)을 효율적으로 계산하는 알고리즘이다 [4]. 영상데이터에 대해 2차 DFT를 수행하며 주파수 진폭 (Magnitude)를 계산한다. 이후 본 연구에서는 식 (1)과 같이 각 초분광 피부 영상 샘플에 대해 밴드별로 고주파 성분 (High frequency, HF)과 저주파 성분 (Low frequency, LF)에 대한 비율 (magnitude ratio)을 산출하여 분석하였다.

$$magnitude\ ratio = \frac{HF}{LF} \quad (1)$$

2.3. 데이터 분석

서로 다른 신체부위 mouth (입가), neck (목), upper leg (다리 오금), under leg (종아리)들은 각각 17명의 실험자마다 신체 양측에 대해 피부 표본을 수집하여 부위별로 각각 34개의 피부 데이터로 구성되었다. 먼저 일원분산분석을 수행하여 부위별 피부 압입식 측정 탄력값의 평균의 차이가 유의한지 확인하였다. 이후 각 탄력값에 유의미한 상관성을 갖는 분광 밴드를 확인하기 위해 신체부위별로 식 1을 통해 산출된 magnitude ratio와 압입식 탄력값에 대해 스피어만 상관분석을 수행하였다. 본 연구의 데이터 분석은 모두 python 3.11.9 환경에서 수행하였다.

3. 연구 결과

3.1. 탄력값 평균 비교

그림 1에서 mouth와 upper leg, under leg 그리고 neck과 upper leg, under leg는 탄력값에 유의한 차이가 있었다 ($p<0.01$). 그러나 mouth와 neck 그리고 upper leg와 under leg 사이에서는 평균 차이가 유의하지 않았다. 이는 압입식 탄력 측정으로는 서로 다른 신체 부위에 대한 미세한 차이를 분석하는 데에 제한적임을 시사한다.

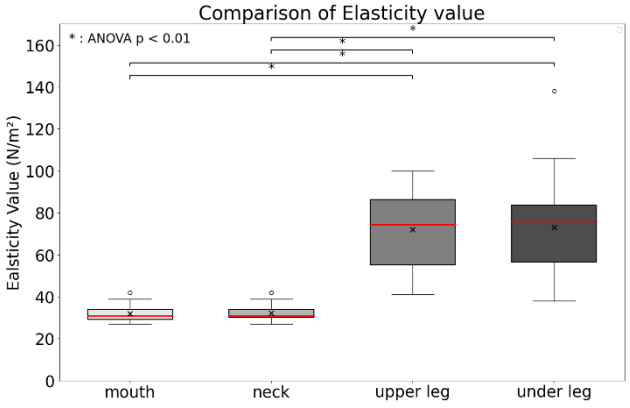


그림 1. 신체 부위 별 탄력값 평균 비교

3.2. 신체부위 별 탄력값 유효 밴드 비교

상관분석 결과는 그림 2와 같이 시각화 하였다. 그래프의 가로축은 초분광 영상 분광 밴드 대역을, 세로축은 초분광 영상의 magnitude ratio와 탄력값에 대한 스피어만 상관계수를 나타낸다. 해당 밴드의 상관계수가 유의미한 경우 빨간색 ($p<0.01$)으로 표시하였다.

3.1절에서 neck과 mouth는 평균 탄력값이 서로 유사했으나 실제로 탄력값에 유의미한 영향을 주는 분광 밴드는 다름을 그림 2의 (a)와 (b)에서 확인할 수 있다. 그림 2(a) mouth는 대부분 근적외선 대역에 해당하는 796.10nm이후에서 magnitude ratio와 탄력값이 -0.4에서 -0.5 사이의 유의한 음의 상관관계를 가졌다. Neck은 $p<0.01$ 유의수준에서는 상관성이 없었으나 $p<0.05$ 수준에서 472.88nm과 536.37nm대역이 0.35이상 유의한 양의 상관관계를 가졌다. 이를 통해 mouth의 탄력은 근적외선 대역에서 확인할 수 있는 진피층, 콜라겐과 같은 구조물이 탄력 형성에 영향을 미치는 것으로 해석할 수 있으며, neck은 가시광선 대역에서 발견할 수 있는 멜라닌, 헤모글로빈의 구성에 따라 탄력값 형성에 주요 요인이 될 수 있는 것으로 해석해볼 수 있다. 그림 2의 (c)와 (d)는 upper leg와 under leg의 탄력값과 상관있는 파장 대역은 서로 다름을 나타내고 있다. Upper leg는 가시광선 대역에 해당하는 475.77nm~718.18nm 범위에서 탄력과 -0.4 이상의 유의한 음의 상관관계를 가졌다. Under leg는 가시광선부터 근적외선 대역 전 범위의 대역에서 비교적 많은 대역들이 -0.4~-0.5 사이의 유의한 음의 상관관계를 가졌다. Upper leg는 가시광선 대역에서 관찰될 수 있는 혈관, 인대 등의 피하 구조물의 영향으로 초분광 피부 영상에서 고주파 성분으로 관찰되었을 가능성이 있으며, under leg는 비교적 탄력 촉감 생성에 있어 다층적인 피하 구조물의 영향을 고려해야 할 가능성이 있다.

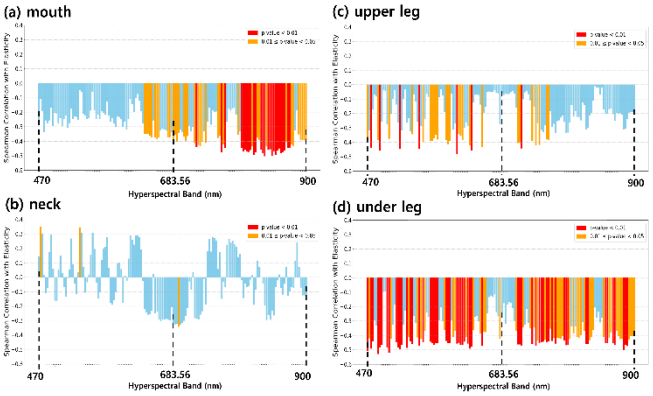


그림 2. 분광 밴드별 magnitude ratio와 탄력값의 상관 계수 (좌측 상단(a) mouth, 좌측 하단 (b) neck, 우측 상단 (c) upper leg, 우측 하단 (d) under leg)

본 연구 결과는 신체 부위 별 해부학적 특성을 고려하여 서로 다른 피부층 및 피하 구조물의 상이한 영향을 반영한 HSI기반의 촉감 계수 생성 필요성 및 가능성을 보여준다. 전반적으로 피부 내 고주파수 요소가 많을수록 낮은 압입식 측정 탄력을 형성하였으며 대부분 특정 분광 대역에서 0.4~0.5 절댓값 크기만큼 탄력과 유의한 상관성을 가졌다. 이는 촉감 계수 생성 시 '부위별 탄력에 유의한 분광 대역의 피부 정보에 대한 0.4~0.5 가중치 부여'와 같은 기술 응용을 기대할 수 있다. 추후 본 연구 결과와 같은 탄력값에 유효한 분광 대역의 상관계수를 포함하여, 피부층별 영률 (Young's modules), 푸아송비 (Poisson's ratio)와 같은 피부의 물리적 계수 참조를 통해 정밀한 피부 탄력 촉감 생성 연구에 확장 적용시키고자 한다.

4. 참고 문헌

[1] S. Patel, Z. Rao, M. Yang, and C. Yu. "Wearable haptic feedback interfaces for augmenting human touch." *Advanced Functional Materials*, 2417906, 2025.

[2] Z. Ivanova, T. Aleksiev, H. Dobrev, and N. Atanasov. "Use of a novel indentometer to evaluate skin stiffness in healthy and diseased human skin." *Skin Research and Technology*, Vol. 29, No. 7, e13384, 2023.

[3] T. Manojlović, T. Tomanič, I. Štajduhar, and M. Milanič. "Robust estimation of skin physiological parameters from hyperspectral images using Bayesian neural networks." *Journal of Biomedical Optics*, Vol. 30, No. 1, 016004, 2025.

[4] O. S. Osman, J. L. Selway, P. E. Harikumar, C. J. Stocker, E. T. Wargent, M. A. Cawthorne, S. Jassim, and K. Langlands. "A novel method to assess collagen architecture in skin." *BMC Bioinformatics*, Vol. 14, p. 260, 2013.

Poster-123

잔차 보정을 통한 초분광 영상 기반 조직 산소포화도 추정 안정화

장채령[1], 길태연[2], 권재헌[1], 이언석[12*]

순천향대학교 의료IT공학과[1]

순천향대학교 일반대학교 소프트웨어융합학과[2]

Residual-Corrected Tissue Oxygen Saturation Estimation in Hyperspectral Imaging

Chaeryeong Jang[1] , Taeyeon Gil[2] , Jaehun Kwon[1] , Onseok Lee[12*]

[1]Department of Medical IT Engineering, Soonchunhyang University, Korea

[2]Department of Software Convergence, Graduate School, Soonchunhyang University, Korea

[*]leeos@sch.ac.kr

Abstract

Tissue oxygen saturation (StO_2) is a critical indicator of peripheral vascular function. Conventional hyperspectral imaging (HSI) models that consider only hemoglobin leave systematic residuals, particularly in melanin- and water-dominant bands. To address this limitation, residual spectra after hemoglobin fitting were decomposed using non-negative matrix factorization (NMF), yielding basis patterns related to water and melanin. Incorporating these references into the model reduced the root mean square error (RMSE) by up to 40.5% compared with hemoglobin-only fitting. Furthermore, pixel-wise StO_2 maps demonstrated that the corrected model revealed clearer spatial differences between normal and occlusion conditions. This approach confirms that residual-based correction improves not only spectral fitting accuracy but also the spatial fidelity of StO_2 estimation, advancing non-invasive microcirculation assessment.

1. 연구 배경

조직 산소포화도(Tissue oxygen saturation, StO_2)는 말초 혈관 기능과 미세순환 상태를 반영하는 핵심 지표로, 이를 비침습적으로 측정하기 위한 다양한 광학적 접근법이 연구되어 왔다. 특히 초분광 영상(Hyperspectral Imaging, HSI)은 수백 개의 연속적인 파장대에서 분광 정보를 동시에 획득할 수 있는 영상으로, 산화 헤모글로빈(oxyhemoglobin, HbO_2)과 환원 헤모글로빈(deoxyhemoglobin, Hb)의 파장별 흡광 특성을 모델링하여 StO_2를 근사적으로 추정할 수 있다는 점에서 주목받고 있다 [1].

그러나 실제 생체 조직에는 HbO_2와 Hb 외에도 물(water), 멜라닌(melanin) 등 다양한 흡수체가 존재한다 [2]. 이 때문에 Hb·HbO_2 만을 고려한 모델은 StO_2의 전반적인 경향은 설명할 수 있으나, 특정 파장대(예: 575–605 nm 및 >700 nm)에서는 체계적인 잔차(residual)를 남기는 한계가 있다. 특히 근적외선(NIR) 장파장 영역에서는 물의 흡수 특성이 지배적으로 작용하여 모델의 적합도가 저하된다 [3].

본 연구에서는 이러한 한계를 보완하기 위해, Hb·HbO_2 모델 피팅 후 남는 잔차 스펙트럼을 행렬(residual matrix)로 구성하고, 비음수 행렬 분해(Non-negative Matrix Factorization, NMF)를 적용하여 잔차를 구성하는 주요 변동 성분을 기저(basis)로 도출하고자 한다. 또한 도출된 reference를 활용하여 단일 헤모글로빈 모델의 한계를 보완하고 StO_2 추정의 정확도를 향상시키고자 한다. 나아가, 제안된 다중 성분 모델을 이용해 픽셀 단위 StO_2 맵을 생성하고 안정-폐색 조건에서의 공간적 분포 차이를 시각화함으로써, 생리적 반응을 공간적으로 재현할 수 있는 가능성을 검토하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 데이터 획득

본 연구에서는 초분광 카메라(SNAPSCAN VNIR, imec, Netherlands)와 접사 렌즈(Tamron 60mm (F2.0), Tamron, Japan)를 사용하여 470-900 nm 범위의 총 150개 밴드에서 1,024×1,024 픽셀 영상을 획득하였다.

2.2 실험 환경

피험자와 카메라 간 거리는 약 800mm로 고정하였다. 조명은 650W의 할로겐 광원(FOMEX H1000, FOMEX, Korea)을 사용하였다. 화이트 레퍼런스는 반사율 99%의 white standard calibration surface (Edmund Optics, USA)를 이용하여 매 촬영마다 스펙트럼 보정을 수행하였다.

혈류 차단은 피험자의 상완에 수동 혈압계 커프를 착용하고, 개인별 수축기 혈압(SBP)+30 mmHg 수준으로 압박하여 폐색을 유도하였다. 안정 상태 영상을 촬영한 뒤, 3분간 폐색을 유지한 후 폐색 영상을 획득하였다. 총 10명의 피험자에서 촬영된 영상 중 16장을 분석에 사용하였다.

2.3 전처리 및 ROI 추출

획득 영상은 MATLAB R2022b (MathWorks, USA)로 처리하였다. Gaussian 필터링으로 노이즈를 억제한 후 이진화 및 형태학적 연산을 통해 ROI (Region of Intertest) 마스크를 생성하였으며, 동일 마스크를 전 파장대에 적용하였다.

2.4 산화·환원 헤모글로빈(Hb·HbO_2) 모델 피팅

반사율 스펙트럼 R(λ)은 로그 변환을 통해 광학밀도(Optical Density, OD)로 변환하였다. 각 픽셀의 OD 스펙트럼에 대해 Hb·HbO_2 흡광계수를 설계 행렬로 구성한 뒤, 비음수 최소제곱(Non-negative Least Squares, NNLS)으로 피팅하였다. 피팅된 계수로부터 StO_2를 산출하였다 (식 1)[4].

$$OD(\lambda) = -\log_{10}(R(\lambda)) \qquad (1)$$

2.5 잔차 행렬(Residual matrix) 및 NMF 분석

Hb·HbO_2 모델 피팅 후 남는 잔차 스펙트럼을 파장(λ) × 샘플(N) 형태의 행렬로 구성하였다. 잔차 행렬에 대해 비음수 행렬분해(NMF)를 적용하여 주요 변동 패턴을 기저스펙트럼으로 분리하였으며, Hb·HbO_2 성분과 직교화를 통해 중복 기여를 최소화하였다 [5].

2.6 다중 성분 기반 StO_2 보정

Hb·HbO_2 모델의 잔차는 주로 가시광선(VIS) 영역의 멜라닌 흡수와 NIR 장파장 영역의 물 흡수 특성과 관련된다.

물은 700 nm 이상 대역에서 흡수가 급격히 증가하며, 멜라닌은 VIS에서 NIR까지 전 영역에 걸쳐 점진적으로 감소하는 광범위한 흡수 스펙트럼을 가진다 [6].

이에 따라 본 연구에서는 기존 문헌의 물과 멜라닌의 광학 계수를 참고하여 모델의 reference 계수로 추가하였다 [6-8]. 멜라닌 스펙트럼은 Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial (PCHIP) 보간하여 연속 스펙트럼을 구성하고, 장파장 영역에서는 power-law tail 외삽을 적용하였다. 모든 reference 스펙트럼은 카메라의 분광 응답 특성을 반영하기 위해, 각 파장대에서의 스펙트럼을 카메라의 Full Width at Half Maximum (FWHM)에 맞추어 가우시안 컨볼루션하였다.

2.7 픽셀 단위 StO_2 맵

최종 설계 행렬은 Hb·HbO_2, 물, 멜라닌 (비음수 제약)과 baseline(상수항·선형항)으로 구성하였다. 가중 최소제곱(Weighted Least Squares, WLS)을 적용하여 픽셀 단위 NNLS 피팅을 수행하였고, 각 픽셀에서 StO_2 값을 계산하였다. 이를 통해 생성된 StO_2 맵을 정상과 폐색 상태 영상에 적용하여 두 조건 간 공간적 분포 차이를 시각화하였다.

3. 연구 결과

3.1 Hb·HbO_2 모델의 한계와 잔차 특성

Hb·HbO_2 모델은 ΔOD 스펙트럼의 주된 경향은 설명하였으나, 그림 1과 같이 특정 파장대에서 체계적인 잔차가 나타났다. VIS 영역(570–600 nm)에서는 잔차가 작았으나, NIR 장파장 영역(>700 nm)에서는 잔차가 선형적으로 증가하는 패턴이 관찰되었다. 이는 Hb·HbO_2 외 성분인 물, 멜라닌 및 파장 의존적 산란 등과 같은 추가적인 물리적 요인이 존재함을 시사한다. 그림 1은 실제 ΔOD 스펙트럼(blue), 단일 Hb·HbO_2 피팅 곡선(orange), 잔차(green)를 나타낸 것이다.

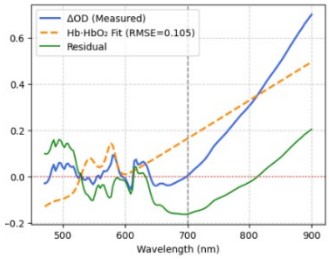


그림 1. ΔOD 스펙트럼과 Hb·HbO_2 피팅 및 잔차

3.2 다중 성분 기반 StO_2 보정 효과

Hb·HbO_2 모델의 한계를 보완하기 위해 멜라닌과 물 reference 스펙트럼을 순차적으로 추가하여 픽셀 단위 WLS 기반 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error, RMSE)를 분석했다. 그 결과, Hb·HbO_2 모델의 평균 RMSE는 0.0721 ± 0.0163이었으나, 멜라닌을 추가한 모델(Hb·HbO_2+ Melanin)에서는 0.0539 ± 0.0105로 오차가 25.1% 유의하게 감소하였다. 물 reference 스펙트럼까지 포함한 모델(Hb·HbO_2+ Melanin+Water)은 0.0428 ± 0.0082로, Hb·HbO_2 모델 대비 총 40.5%의 개선 효과를 보였다. RMSE 감소 기여도는 멜라닌 0.0158(≈59%), 물이 0.0111(≈41%)을 설명하며, 두 성분이 상호보완적으로 모델 설명력을 향상시킴을 시사한다.

이러한 피팅 모델의 물리적 타당성을 검증하기 위해 Hb·HbO_2 모델의 잔차에 대해 비지도학습 방식인 NMF 분석을 수행했다. 분석 결과, 잔차를 구성하는 가장 지배적인 기저 성분은 물의 참조 스펙트럼과 매우 높은 유사도(cosine similarity ≈ 0.98)를 보였으며, 물 외에도 멜라닌과 일부 유사한 패턴(cosine similarity ≈ 0.36)을 분리해냈으며, 이는 VIS 영역에 남아있던 비-헤모글로빈 잔차 성분을 반영한다. 따라서 물과 멜라닌을 reference spectrum에 포함하는 보정 접근은, 물이 NIR 영역의 지배적인 흡수 성분을 설명하고 멜라닌이 VIS 영역의 잔여 변동을 보완적으로 설명함으로써, RMSE를 유의하게 감소시킬 뿐 아니라 StO_2 추정 모델의 생리적 타당성과 안정성을 높이는 데 기여하였다.

3.3 픽셀 단위 StO_2 맵 결과

보정된 최종 모델(Hb·HbO_2+Melanin+Water+baseline)을 픽셀 단위에 적용하여 StO_2 맵을 생성하였다 (그림 2). 안정 상태(좌)에서는 손 전반에 걸쳐 높은 StO_2가 균일하게 분포하였으나, 폐색 상태(우)에서는 손끝과 말단부에서 StO_2가 비교적 낮은 양상이 나타났다. 이는 혈류 차단에 따른 산소 공급 제한이 공간적으로 반영된 결과이다. 이처럼 제안된 보정 모델은 정량적 RMSE 감소뿐만 아니라, 공간적 분포에서 안정–폐색 조건 차이를 더 명확히 하여 모델 개선 효과가 영상 수준에서도 검증됨을 보여준다.

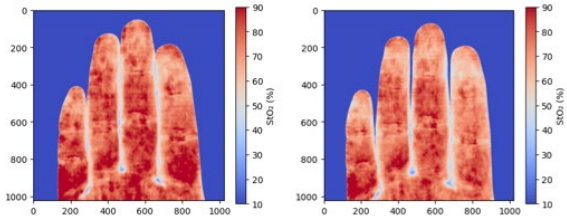


그림 2. 안정 상태(좌)와 폐색 상태(우)에서의 픽셀 단위 StO_2 맵

4. Acknowledgements

본 연구는 2025년 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 SW중심대학사업의 연구 결과로 수행되었음 (2021-0-01399).

5.참고 문헌

[1] Grambow, E. & Sandkühler, N. A. & Groß, J. & Thiem, D. G. E. & Dau, M. & Leuchter, M. & Weinrich, M., “Evaluation of Hyperspectral Imaging for Follow-Up Assessment after Revascularization in Peripheral Artery Disease,” Journal of Clinical Medicine, 11(3), 758 (2022).

[2] Jacques, S. L., “Optical properties of biological tissues: a review,” Physics in Medicine & Biology, 58(11), R37–R61 (2013).

[3] Fredriksson, Ingemar, Marcus Larsson, and Tomas Strömberg. "Machine learning for direct oxygen saturation and hemoglobin concentration assessment using diffuse reflectance spectroscopy." Journal of Biomedical Optics, 25(11), 112905 (2020).

[4] Wu, Jiangbo. "Hyperspectral imaging for non-invasive blood oxygen saturation assessment." Photodiagnosis and Photodynamic Therapy 45 (2024): 104003.

[5] Galeano, J., Garcia, A., Vitrià, J. & Malvehy, J., “Unmixing of human skin optical reflectance maps by nonnegative matrix factorization,” Biomedical Signal Processing and Control, 8(6), 642–650 (2013).

[6] Jacques, S. L., “Optical properties of biological tissues: a review,” Physics in Medicine & Biology, 58(11), R37–R61 (2013).

[7] Pope, R. M. & Fry, E. S., “Absorption spectrum (380–700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements,” Applied Optics, 36(33), 8710–8723 (1997).

[8] Kou, L., Labrie, D. & Chylek, P., “Refractive indices of water and ice in the 0.65–2.5 μm spectral range,” Applied Optics, 32(19), 3531–3540 (1993).

Poster-124

High-resolution longitudinal imaging of tumor vasculature using GPU-accelerated photoacoustic microscopy

Thanh Dat Le[1], Tu Van Nguyen[1], Changho Lee[1,2]*
[1]Department of Artificial Intelligence Convergence, Chonnam National University, Gwangju 61186,
[2]Department of Nuclear Medicine, Chonnam National University Medical School & Hwasun Hospital, Jeollanam-do 58128, South Korea
* ch31037@jnu.ac.kr

Abstract

Understanding vascular angiogenesis is crucial to understanding how tumors grow and survive by delivering nutrients and oxygen to malignant areas. Photoacoustic microscopy (PAM) images tumor vasculature label-free and in great resolution. Traditional PAM techniques have a narrow FOV and modest image depth, making vascular mapping across scales difficult. A GPU-accelerated 3D mosaic imaging architecture enhances our hybrid scanning optical-resolution photoacoustic microscopy (HS-OR-PAM) system. This method allows for comprehensive 3D mosaicking of tumors by extending FOV. Our method allows non-invasive, label-free, high-resolution imaging and quantitative analysis of tumor vasculature dynamics in a nude mouse model with 4T1 tumor implantation over 11 days. This methodology provides critical insights into tumor vascularization and may improve oncology diagnostic and treatment tactics by resolving FOV, depth, and computational scalability issues.
Keywords: photoacoustic microscopy, mosaic processing, conventional speeded up robust features.

1. Introduction

Tumor growth arises from abnormal cell proliferation sustained by irregular vascular properties. Although angiogenesis supplies oxygen and nutrients, the inefficient vasculature creates a hypoxic microenvironment that promotes further tumor progression and resistance to therapy. Optical resolution photoacoustic imaging (OR-PAM) is a powerful label-free non-invasive method for high-resolution vasculature imaging, but it struggles to achieve a wide FOV and imaging depth for tumor vasculature mapping. OR-PAM offers high spatial resolution (~10 μm) but is limited by slow scanning speed in linear stage systems. Advanced hardware acceleration is needed for 3D mosaic reconstruction and quantitative vasculature analysis. GPU-based parallel processing is essential for large datasets, and complex 3D matrix algorithms speed feature extraction, vessel segmentation, and quantitative analysis, which quantifies vessel diameter, density, and complexity without biomarkers. We present a hybrid scanning-based optical-resolution system (HS-OR-PAM) for tumor vasculature growth monitoring. We also propose a GPU-accelerated 3D mosaic imaging framework that generates volumetric data and quantifies vascular parameters using a modified mosaic-matching method to achieve a volumetric FOV of up to 10 × 10 × 2.5 mm² for early tumor growth while supporting full 3D mosaicking for later stages exceeding ~2.5 mm in depth. We quantified the tumor vasculature dynamics of 4T1 tumors implanted in nude mice after 11 days and found significant increases in vessel diameter, density, and complexity, indicating enhanced angiogenesis.

2.Method

The developed HS-OR-PAM is presented in Figure 1 [1] to generate 3D mosaic image data. First, a fast 3D scanning system with a 1-axis high-speed MEMS scanner on the X-axis and a linear motor stage on the Y-axis is used. The MEMS scanner scanned a single 3D dataset (800 × 200 × 1024 voxels) in ~32 seconds. Second, volumetric mosaic imaging uses X-, Y-, and Z-axis linear motor stages. Moving the linear motor stage on the X- and Y-axes to the next scanning point extends MEMS scanner range. Figure 1b shows a mosaic at various depths from three fast Z-axis scans. The XZ-axis mosaic process combines B-scan data from the same location (Figure 1b). For fast data processing, CUDA libraries were installed on an NVIDIA RTX-3090 GPU (24GB VRAM), were used to create a GPU-powered local service (Figure 1c-i). After extracting two-depth XY and XZ images, SURF descriptors found matching points in 3D volumetric data (Figure 1c-ii). Matching points in two XZ MAP images should form a parallel Z-axis line with minimal coordinate difference. The final volumetric preserves spatial integrity while separating blood vessel pixels from the background. To determine vessel characteristics and angiogenesis, quantitative tumor vasculature parameters were calculated in 3D vessel diameter, vascular complexity and vascular density units (Figure 1c-iv). Figure 1d compares CPU and GPU execution times for processing 1024 × 2000 × 800 px (16-bit, ~3.1 GB). Although GPU loading was slower (3.1 s vs. 1.3 s), it outperformed the CPU in all major tasks: Hessian and bandpass filtering (~21× and ~1.7× faster), 3D mosaics processing (~1.7× faster), and diameter, density, and complexity analyses (up to ~7× faster).

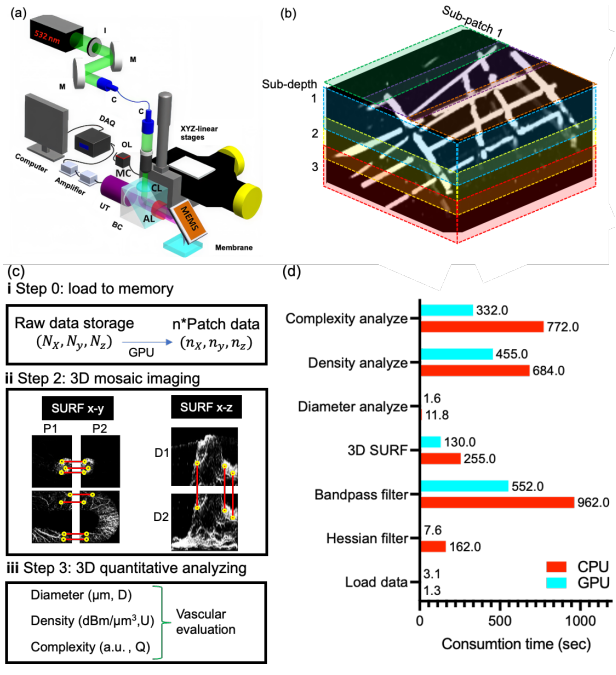


Figure 1. (a) Schematic of HS-OR-PAM, (b) mosaic volumetric, (c) GPU-accelerated 3D mosaic imaging and volumetric quantification process, (d) comparison of execution times CPU/GPU.

3. Results

3.1. 3D SURF Mosaic PAM

We validated the 3D mosaic imaging performance of HS-OR-PAM using a hair phantom (Figure 2). Figure 2a shows XY mosaic imaging at three depths with five patches (step size: 0.7 mm), while Figure 2b presents XZ mosaics combining depths of 100 µm and 500 µm. Affine transformations aligned patches using at least two matched lines. We presented MAP, depth-decoded, and 3D visualizations (Figure 2c,d,e). These results demonstrate accurate volumetric reconstruction and detailed visualization of hair structures across depths.

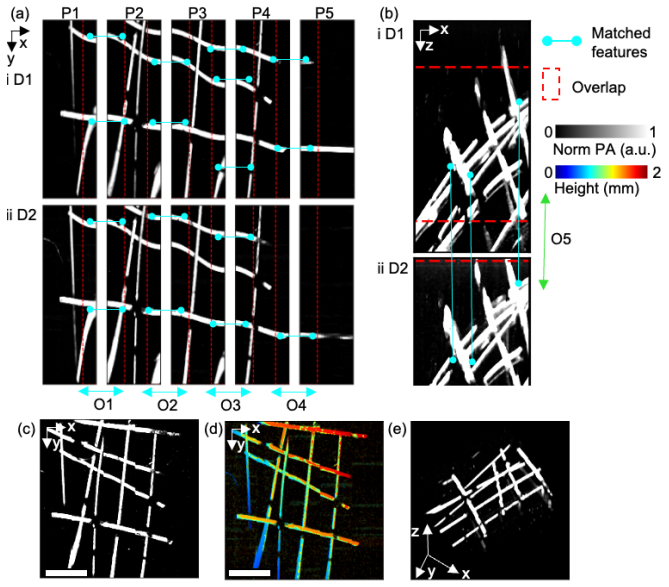


Figure 2. 3D SURF mosaic in phantom: (a) x-y MAP matching, (b) x-z b-scan matching, (c) MAP combined, (d) depth image, (e) 3D image.

3.2. Evaluation of in vivo tumor monitoring

We monitored 4T1 tumor growth in nude mice ears for 11 days, imaging every 2 days. Figure 3a shows tumor photographs used to validate mosaic PAM images. By day 3, slow tumor growth remained within the HR-OR-PAM detection range, allowing XY-axis mosaicking at a fixed position. From days 5–11, as tumor height exceeded the optical limit, combined XY- and XZ-axis mosaicking (Figure 3b,c) was applied, producing 3D reconstructions (e). Minor variations in XZ and depth images did not affect ear thickness measurements. Tumor height increased from ~1.2 mm (day 3) to 1.8 mm (days 5–7) and ~2.5 mm (days 9–11). Our process revealed physiological tumor changes compared to normal tissue. Tumor regions showed increasing color intensity over time, suggesting angiogenesis, with a temporary dip on day 5 possibly due to reduced blood flow. Normal regions remained stable, confirming true physiological variation. Caliper measurements indicated exponential tumor growth to ~34 mm³ on day 11 ($\mu \approx 0.4016$ day^{-1}). ROI-based PAM analysis visualized 3D vascular changes: vessel diameter (~20–30 µm before day 5, ~40 µm after), vascular density (~4.2→~5.4 dBm/µm³), and complexity (~0.4→~0.42 (a.u.)).

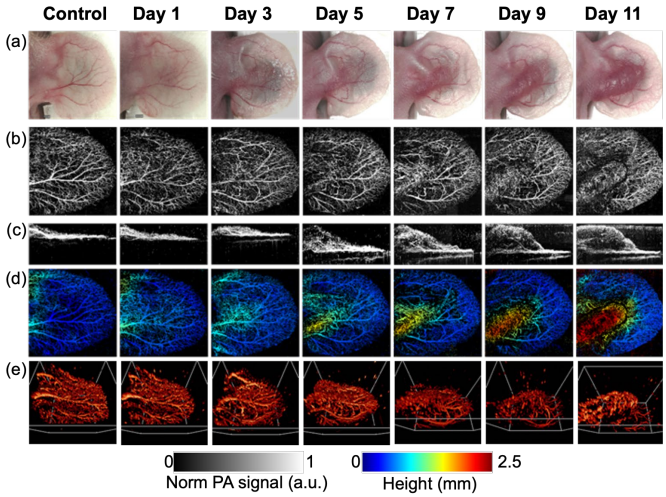


Figure 3. In vivo 11-day monitoring (i-vii). (a) Photography, (b) x-y MAP, (c) x-z MAP, (d) depth, (e) volume render. Scale bar: x-y: 2 mm, x-z: 1mm.

4. Conclusion

We developed an HS-OR-PAM system optimized for large-scale 3D mosaic imaging and quantitative monitoring of whole-tumor vascularity. Using SURF feature-based matching ensured accurate 3D reconstruction and quantitative analysis of vascular diameter, density, and complexity over 11 days. GPU acceleration with CuPy reduced computational load by over half and processing time by ~2× compared to CPU processing. HS-OR-PAM imaging revealed detailed tumor growth from <500 µm to 2.5 mm, capturing vascular fractures and structural changes through combined XY/XZ mosaics. Quantitative analysis showed faster increases in vascular diameter, density, and complexity in tumors. In future, we would integrate multi-wavelength lasers or AR-PAM with generative networks to extend depth.

5. Acknowledgements

This research was supported by the National Research Foundation (NRF) funded by the Korean government (MSIT) (RS-2022-NR067329, RS-2022-NR075732, RS-2023-00278972) and Institute of Information & communications Technology Planning & Evaluation (IITP) under the Artificial Intelligence Convergence Innovation Human Resources Development (IITP-2023-RS-2023-00256629) grant funded by the Korean government (MSIT).

6.References

[1] Le TD, Kwon SY, Lee C. Performance Comparison of Feature Generation Algorithms for Mosaic Photoacoustic Microscopy. Photonics. 2021; 8(9):352.

Poster-125

손상 및 취약 조직에 대한 공기 중 광음향 영상 진단을 위한 광기계 초음파 센서

남상우[1*], 김재현[1], 한상윤[1], 유재석[1]

DGIST 로봇및기계전자공학과[1]

Optomechanical ultrasound sensor for air-coupled photoacoustic imaging diagnosis of damaged & vulnerable tissue: in-vitro study

Sangwoo Nam[1*], Jaehyeon Kim[1], Sangyoon Han[1], Jaesok Yu[1]

Department of robotics and mechatronics engineering, DGIST, Korea

[*]leo21551@dgist.ac.kr

Abstract

Photoacoustic imaging (PAI) is a hybrid modality that combines optical contrast with ultrasonic penetration depth to provide structural and functional information of biological tissues. Conventional PAI systems, however, require coupling media such as gels or water, which limit their application in scenarios where direct contact is undesirable, such as burns, wounds, mucosa, or periocular regions. Non-contact PAI in air thus emerges as a crucial approach for safe and efficient imaging in vulnerable areas, including the monitoring of skin regeneration, wound infection, and nerve recovery. Detecting air-borne photoacoustic signals is challenging due to the significant acoustic impedance mismatch at the tissue-air interface, necessitating highly sensitive ultrasound sensors. Here, we present a novel optomechanical ultrasound sensor fabricated on a silicon photonics-MEMS platform that transduces weak acoustic perturbations into optical readout with high sensitivity. Experimental imaging results demonstrate a Full Width at Half Maximum (FWHM) in the Line Spread Function (LSF) of 125.5 μm (estimated lateral resolution), highlighting the potential of this compact, non-contact sensor for safe and practical clinical photoacoustic diagnostics in air.

1. 연구 배경

광음향 영상 (Photoacoustic imaging, PAI)은 광학적 대비와 초음파의 깊은 침투 특성을 결합하여 조직의 구조적, 기능적 정보를 동시에 제공하는 하이브리드 영상 기법이다. 특히 혈관 분포, 산소 포화도, 병리학적 변화를 비침습적으로 관찰할 수 있어 생체 진단과 임상 적용에서 큰 잠재력을 지니고 있다. 그러나 현재 대부분의 광음향 영상 시스템은 음향 임피던스 정합을 위해 젤이나 수조와 같은 매질을 필요로 한다. 이는 위생 관리와 환자 편의성 측면에서 한계를 가지며, 화상이나 창상 부위, 점막 및 안구 주변과 같이 직접 접촉이 어려운 부위에는 적용이 제한적이다.

따라서 공기중에서의 광음향 영상화 기술은 비침습적 진단을 위한 필수적 요구로 제기되고 있다. 예시로, 화상 환자의 피부 재생 과정 모니터링, 감염 환부의 조직 회복 과정 모니터링 등 접촉식 초음파 센서 사용이 곤란하거나 취약 부위에서 비접촉식 광음향 영상화 진단 기술은 안전성과 효율성을 동시에 제공할 수 있다 [1]. 이러한 임상적 필요성은 현장 진단(point-of-care)이나 반복적 추적 검사에서도 동일하게 요구된다.

그러나 공기 중 광음향 신호는 조직과 공기 간의 큰 음향 임피던스 불일치로 인해 감쇠가 심하므로, 이를 고해상도로 검출하기 위해서는 고민감도 센서가 필요하다. 이를 위해 다양한 접근법이 제안되어 왔으나, 실제 임상적 적용을 충족할 수준의 영상화 성능을 구현한 사례는 아직 제한적이다 [2].

본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 새로운 광기계(optomechanical) 초음파 센서를 개발하여 공기 중 광음향 영상화를 수행하였다. 제안된 센서는 광반도체 제조 기술인 실리콘 포토닉스-멤스 플랫폼(Silicon Photonics-MEMS Platform)을 기반으로 제작되었으며, 벤치탑 형태로 구현되는 bulky한 광학 시스템의 고민감도 특성을 수십 마이크로미터 규모의 초소형 기계적 구조로써 구현하였다 (그림 1). 제안된 센서는 기계적 구조인 캔틸레버를 기반으로 공기 중 전파되는 광음향 신호를 광역학적으로 감지할 수 있으며, 광음향 영상화 실험을 통해 125.5 μm의 lateral resolution 추정치를 확인하였다. 이는 공기 중에서도 미세 혈관 및 표재 조직의 구조적 변화를 관찰할 수 있는 수준의 해상도로, 향후 취약 부위에서의 높은 안전성 및 효율성을 갖춘 비접촉 광음향 진단 시스템의 임상 적용 가능성을 제시한다.

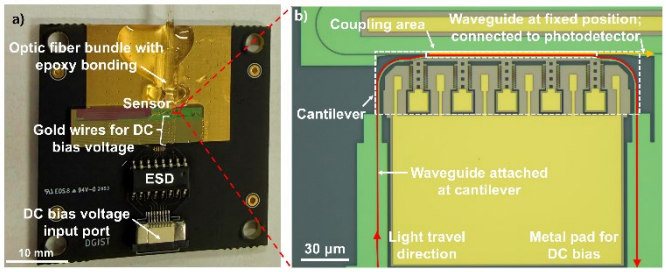


그림 1. (a) 광신호 인가용 optic fiber가 본딩된 센서 모듈, (b) 50배 배율 확대한 센서 현미경 사진

2.연구 방법

본 연구 센서는 그림 2. (a)와 같은 공정 과정을 거쳐 제작된다. 3단계의 리소그래피 및 실리콘 드라이 에칭 단계를 수행하고, 이후 HF 가스를 이용한 릴리즈 공정을 통해 기계적 구조 (캔틸레버)를 구현하게 된다. 해당 캔틸레버의 디자인 파라미터 (길이: 22μm, 폭: 195μm, 두께: 340nm)의 제어를 통해 공진 주파수 1MHz를 구현했다. 이후 금속 증착 과정을 통해 DC 전압 인가를 위한 금속 패드를 구현하게 된다. 이와 같이 제작된 센서는 그림 2. (b)의 작동 모식도와 같이 작동하게 된다. DC 전압 인가를 통해 캔틸레버의 진동 이전의 초기 위치를 낮은 위치로 설정하게 되면, 캔틸레버에 부착된 광 도파로 (왼쪽)와 광 검출기와 연결된 광 도파로 (오른쪽) 간의 거리가 가까워지게 된다. 이 때, 외부에서 입사된 초음파 신호에 의해 캔틸레버는 수직 방향으로 진동하게 되고, 부착된 광 도파로 역시 수직 진동하게 된다. 그래서 해당 수직 진동으로 인해 캔틸레버-부착 광 도파로에서 광검출기-연결 광 도파로를 향해 전파되는 광신호의 전파 정도가 변화하게 된다. 해당 광신호 전파 정도의 변화는 입사된 초음파 신호의 주파수를 따라 변화하게 되고, 결과적으로 광 검출기

상에서는 출력 광신호의 세기 변조로 입사 초음파 신호를 검출하게 된다.

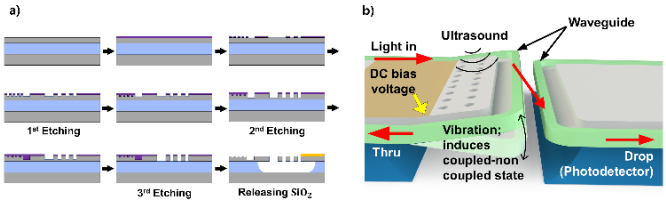


그림 2. (a) 센서 공정 플로우, (b) 센서 작동 모식도

본 연구 센서의 광음향 이미지 획득을 위해 그림 3과 같이 광학 렌즈 셋업을 구성하였다. Nd:YAG 파장 가변 레이저(Surelite OPO, Continuum)를 활용하여 700nm 파장의 광음향 신호 생성용 레이저를 해당 셋업에서의 가장 상단에 위치한 conical lens에 인가하였다. 이후 추가의 conical lens를 이와 마주보게 배치하여 레이저 beam을 collimation 시킨 후, 셋업 그림 상의 lens A, B, C, D (75mm diameter Plano-convex lens, Edmond Optics)를 순서대로 배치하여 sample 단에서의 레이저 집속을 수행하였다. 연구 센서는 가장 하단에 배치된 lens D에 부착되었고, 그림 3의 bottom view와 같이 광음향 신호 검출용 광신호 파이버와 DC 전압 인가용 electric wire가 연결된 상태로 배치되었다. 해당 셋업은 XY 모터 스테이지에 연결되어 1951 USAF resolution target에 대하여 step size 127μm의 raster scanning을 통해 C scan 광음향 영상화를 수행하였다.

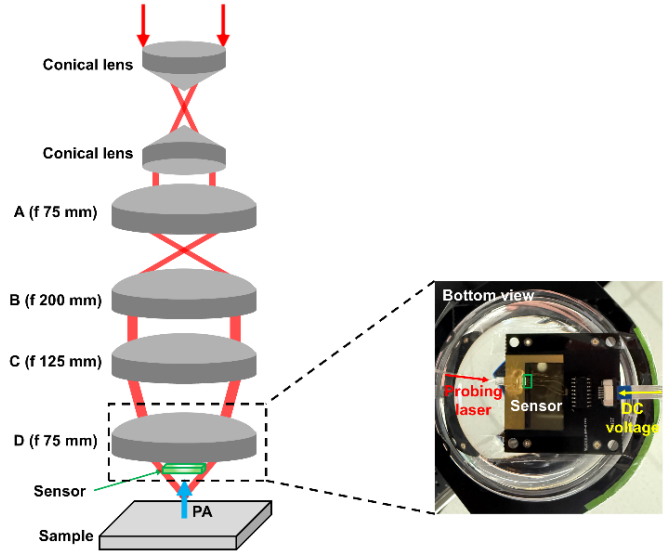


그림 3. 광음향 영상화를 위한 실험 셋업 모식도

3. 연구 결과

그림 4. (b)는 그림 4. (a)의 1951 USAF resolution target에 대해 본 연구 센서로 획득한 광음향 영상이다. 해당 영상은 타겟에 대해 raster scanning을 수행하여 얻은 영상으로, 수신된 신호의 전체 범위 중 타겟이 위치한 깊이 범위에서 수신된 값들에 대해 maximum amplitude projection을 수행하여 구현되었다. 이후, 2차원 interpolation 처리를 진행했고, 10 dB의 dynamic range로 display한 결과이다. 그림 4. (c)는 (b)의 초록색 실선 영역 (Group #0, Element #6)에 대해 line-pair width profile을 분석한 결과이다. 해당 영역의 line width는 280.62 μm으로, 해당 두께를 가지는 3개 line의 구분이 가능함을 확인할 수 있다. 더불어, (b)의 a-a′ dashed line으로 표시된 실험 데이터에 대해 Edge Spread Function (ESF)을 계산하고, 이후 ESF에 대한 1차 미분을 통해 Line Spread Function (LSF)을 그림 4. (d)와 같이 나타냈다. LSF의 Full Width at Half Maximum (FWHM) 계산 시 125.5μm의 lateral resolution 추정치를 확인할 수 있다.

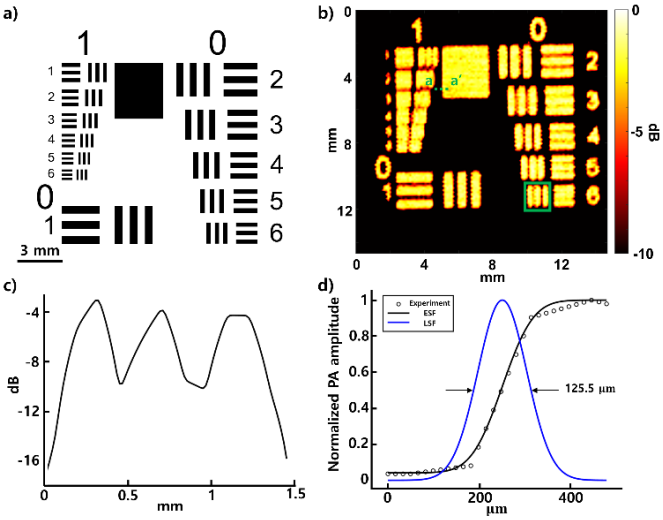


그림 4. (a) 1951 USAF 해상도 타겟, (b) 연구 센서를 통해 획득한 광음향 영상, (c) line-pair width profile ((b) 초록색 실선 영역), (d) edge spread function 및 line spread function 측정 결과 ((b) a-a′)

본 연구에서는 공기 중 광음향 영상 진단을 위한 초소형 고민감도 광기계 초음파 센서를 제안한다. 본 센서의 공기중 광음향 영상화 기능성을 검증하기 위해 1951 USAF resolution target에 대해 C scan 광음향 영상화 실험을 수행했고, 280 μm 두께의 line 구분 가능성 및 125.5 μm 의 lateral resolution 추정치를 확인했다. 이 때, 본 연구에서 ESF/LSF 기반으로 추정된 lateral resolution은 스캐닝 스텝 크기 (127 μm)와 거의 유사하다. 이를 line-pair width profile 결과와 함께 고려할 때, 해당 추정치는 센서의 실제 성능을 보수적으로 추정한 값으로 해석되어야 한다. 그래서 이후 추가 실험을 통해 더 작은 스캐닝 스텝 크기, 타겟 면에서의 광학 집속 spot 크기 최적화, point-like target 활용 등을 반영한 lateral resolution 및 line-pair width profile을 정밀하게 규명하고자 한다.

본 연구 센서는 해당 광음향 영상화 실험을 통해 손상 및 취약 조직 부위에 대한 공기 중 광음향 영상화 진단의 잠재성을 입증하였다. 향후 연구에서는 센서의 감도와 주파수 대역 및 센서 패키징 공정을 최적화하여 다양한 임상 상황에서의 실용성을 높이고자 한다. 또한, 손상되거나 취약한 조직 부위에 대한 in vivo 실험 및 검증을 통해 공기 중 비접촉 광음향 영상화의 임상 적용 가능성을 입증하고자 한다.

4. Acknowledgements

이 연구는 삼성미래기술육성사업 (SRFC-IT2102-02)과 중소기업벤처부(RS-2023-00222912) 과제, 2025 innovation base artificial intelligence data convergence project with the funding of the 2025 government (Ministry of Science and ICT) (S2201-25-1002)의 지원을 받아 수행하였음.

5.참고 문헌

[1] Hu H, Zeng R, Du L, Hu W, Lin C, Liao J, Ding C, Xie X, Mi B, Zhou W, et al. “The Potential of Photoacoustic Imaging in Detecting and Managing Complex Wounds.” Biomater. Res. 2025;29:Article 0206.

[2] Zohreh Hosseinaee, Martin Le, Kevan Bell, Parsin Haji Reza,"Towards non-contact photoacoustic imaging [review]", Photoacoustics, Volume 20,2020,100207, ISSN 2213-5979,

A Policy Study on Developing a Customized Medical Device Localization Model for Uganda Healthcare System

Auma Agnes Scovia [1], Sansarmaa Batbold[1], and Jaehong Key[1,*]
[1]Department of Biomedical Engineering, Yonsei University Mirae Campus, Republic of Korea
[*]jkey@yonsei.ac.kr

Abstract

Developing a Customized regulatory model for Medical Device Localization in Uganda is essential for establishing a supportive regulatory framework to drive innovations that address local healthcare needs, and ensure safety, quality and efficacy of medical devices from design, development to post market surveillance. Literature review on regulatory framework of medical devices. Data was obtained and filtered from Google scholars, competent regulatory agencies and World Health Organization (WHO). Key areas of search were narrowed to regulatory framework for medical devices from design to post market surveillance. The framework models were compared with Uganda's to identify critical gaps. Then utilize this data in the formulation of the new regulatory medical device model bespoke for Uganda healthcare system. The proposed Medical Device model includes the establishment of a clear regulatory and legislative framework, outlining key components, featuring a risk-based classification system aligned with Korean policies, international standards and WHO guidelines. Facilitating innovation while ensuring safety and efficacy emphasizes rigorous pre-market requirements, including design controls, clinical evaluation, quality management systems, and technical documentation. Market authorization processes as highlighting pathways. This paper proposes a robust framework for developing a potential medical device regulatory model for Uganda, outlining key components and processes necessary for effective regulation, advocates for international harmonization and collaboration, promoting regulatory convergence and the adoption of global standards.

1. Introduction

Medical Device plays a vital role in the prevention, diagnostic, treatment monitoring and rehabilitation of patients. They range from simple tongue depressors to complex radiotherapy systems and software. Medical devices are a key component of health technology, providing healthcare professions with the tools they need to perform their duties effectively and efficiently [1].

More than 10,000 types and approximately 2 million pieces of medical equipment are available [2], [3], [4], [5]. To guarantee quality, safety and effectiveness of medical devices, regulatory agencies strictly control and ensure safety, quality and efficacy of medical device throughout their entire lifecycle from design, development to post market surveillance. Example of medical device regulatory agencies are European Medicines agency (EMA) in Europe, FDA in USA and South Korea.

The aim of this research is to identify the medical devices, challenges Uganda faces to develop, regulate and adopt innovative medical technologies that are suitable for the Uganda healthcare system [6] and proposes a robust framework for the potential regulatory model, outlining key components and processes necessary for effective regulation, and harmonized collaboration among key stakeholders. It recognizes the need to strengthen the policy frameworks that facilitate innovation while ensuring safety and efficacy and having a self-sustaining medical industry in Uganda. In addition, it will accelerate regulatory clearance, support the development of alternative clinical trial protocols, and invest in vitro and test methods can help streamline the path from concept to commercialization.

2. Methodology

Literature review and collected data from official website of various regulatory agencies, including USA (FDA) WHO, Korean (FDA), EMA, Uganda medical equipment guidelines Uganda, and other international bodies. A comparative analysis was conducted to identify gaps between Uganda's regulatory framework and Korean standard policy (study of Korean medical device guideline, legal systems and regulatory authorities such as clinical trial approval process, medical device regulations (balanced management of medical device lifecycle), strategic operation based on expertise & Efficacy, predictable approval system with scientific approach, Medical device quality management audit procedures, Monitoring & tracking system, sustainable effort & commitment for International Cooperation. Interview were conducted with Two Ugandan experts involved in the formulation of the new regulatory model.

The data gathered were utilized to identify the key components and best practice in existing regulatory processes, as well gaps and challenges that needs to addressed [7]. Furthermore, an Analysis of regulatory requirement and approval pathways for different risk classifications (classes I, II, III and IV) was carried out to highlight variations in regulatory practices across different countries as shown in Table 1 and Table 2.

Table 1. Classification of medical devices.

Example of the device	Class	Risk Level
Bandages, tongue depressor	I	Law risk
Infusion pump, suction equipment	II	Moderate
Implants, defibrillators	III	High risk
Invasive, HIV test strips	IV	Very high risk

Table 2. Comparative analysis Shows. Gaps between Uganda's medical device regulatory framework Korean standard policy.

Medical device Ecosystem in Korea		Medical device Ecosystem in Uganda	
Subsidiary organization		Subsidiary organization	
National institute of medical device	-Legal entity established by Medical device act - Support and provide information regarding Clinical investigations, standards, safety etc., established in 2012	Partial, because Uganda relays mostly on importated medical devices, The medical device act are sub divide; -Ministry of Health- Drafts, Medical device policy and guidline following WHO and Iso standards. -National Advisory committee on medical Equipment(NACME) and Health Infarastructure department(HID), coordinates implimation stage - National drug Authority (NDA)established in act, 1993 safety and quality -Uganda National bureau of Standards act, 1989 for safety, efficacy and quality nedical equipment	
Collaborating third parties in Korean		Collaborating third parties in Uganda	
Medical device Testing Centre	Testing labs for medical devices (13)	Medical device Testing Centre	Testing labs for medical devices (1)
Medical device (QMS) Audit Institution	Quality Management system Audit issue certification with MFD (4 institution)	Medical device (QMS) Audit Institution	Quality Management system Audit issue and good manufacturer Practice (GMP)certificati on, done with UNBS and NDA (2 institution)
Medical device (Documentation review Agency	Review technical documentation on class 2 device(4 institution)	Medica device(Docume ntation review Agency	Review technical documentation on classes (1 institution)
Medical device Clinical Trial centres	Hospital credited by Medica device clinical Trial (198)	Medical device Clinical Trial centres	Hospital credited by Ministry of Health (MOH) for medical device trial (8 Research centre with coodinationation any hospital)
Korean Medical device industrial Asssociation	-Industrial Asssociation approved by MFDS -Advertisment review, performance prediction report, medical representative	Uganada Medical device industrial Asssociation	None, in Uganda it has only UNAMEH, Uganda Association for Medical and Hospital Engineers, Registered International Federation for Medical and Biological Engineering.

3. Results

The proposed Medical Device model for Uganda includes the establishment of a clear regulatory and legislative framework, aligned with international standards to ensure the safety, efficacy and quality of medical device. Central to risk-based classification system that defines regulatory pathway according to the device level. It emphasizes rigorous pre-market requirements, including design controls, clinical evaluation through a centralized Clinical Trial Centers and implementation of quality management systems, supported by medical device testing laboratories. The Framework incorporates ISO 13485 aligned Quality Management systems and QMS Audit procedures. A structure market authorization process with clear pathways for different risk classes was implemented, along with post market monitoring and tracking systems. The Model also fosters innovation while maintaining high safety standards and emphasizes commitment & sustained international Cooperation and harmonization with global regulatory practices.

4. Discussion and Conclusion

This study highlights the critical gaps within Uganda's Medical Device ecosystems and the pressing need for policies that support local manufacturing of medical devices. While some efforts-such as regulatory waivers, prioritized reviews and financial subsidies have been initiated, significant challenges persist. These include limited infrastructure for testing and clinical trials, insufficient regulatory support and limited collaboration among key stakeholders.

For Uganda to build a robust, self-sustaining medical industry, it is imperative to strengthen the policy framework that facilitates innovation while ensuring safety and efficacy and quality. Additionally, accelerating regulatory clearance, supporting the development of alternative clinical trial protocols, and investing in vitro and test methods can help streamline the path from concept to commercialization.

The future of Uganda's medical device sector depends heavily on a multipronged approach. Collaboration between academia, industry, government, and international partners must be prioritized. With sustained commitment and targeted reforms, Uganda can create an enabling environment for the development of safe, reliable, and locally manufactured medical devices.

5. Acknowledgements

This research was supported by the Basic Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF), funded by the Ministry of Education (RS-2024-00460405**).**

6. References

[1] Development of medical device policies WHO Medical device technical series.

[2] Development of a comprehensive regulatory model for the medical device October 14,2024 (Korean).

[3] National Medical Equipment Guidelines (2024), provide guidance on equipment acquisition, specifications, norms and standards set out in the Medical Equipment Policy (2009).

[4] Healthcare Experts' Advisory Unit and Support (HAUS) Program for Medical Device Development in Korea: Introduction of Clinical Unmet Needs-Based Intended Use.

[5] T R P, Kumar S, R K. A Comparative Analysis of the Regulatory Framework and Collaborative Environment for Pediatric Medical Device Development in Japan and the United States.

Poster-127

자외선 광음향 현미경을 이용한 오가노이드의 약물 반응 평가

계현준[1,2], 유원종[3], 김지수[2], 박종찬[1,3], 박별리[1,3,*]

성균관대학교, 양자물리생명대학, 생명물리학과[1]

부산대학교, 인지메카트로닉스공학과[2]

성균관대학교, 메타바이오헬스학과[3]

Label-Free Drug Response Evaluation in Organoids via Ultraviolet Photoacoustic Microscopy

Hyunjun Kye[1,2], Won Jong Yu[3], Jeesu Kim[2], Jong-Chan Park[1,3], Byullee Park[1,3,*]

[1]Department of Biophysics, Institute of Quantum Biophysics, Sungkyunkwan University, Korea.

[2]Department of Cogno-Mechatronics Engineering, Pusan National University, Korea

[3]Department of MetaBioHealth, Sungkyunkwan University, Korea

*byullee@skku.edu

Abstract

Photoacoustic microscopy (PAM) is a hybrid imaging technique that combines the high optical contrast of light absorption with the spatial resolution of acoustic detection, enabling label-free visualization of biological structures. In this study, we developed an ultraviolet photoacoustic microscopy (UV-PAM) system optimized for 266 nm excitation, a wavelength strongly absorbed by DNA and RNA, to selectively image cell nuclei in brain organoids. This system addresses the limitations of conventional fluorescence-based nuclear imaging, which requires staining and sectioning procedures that may alter the biological integrity of the sample. Achieving a lateral resolution of approximately 300 nm, the platform enables subcellular imaging of nuclei within intact three-dimensional organoids. To demonstrate its utility, we applied the system to assess drug-induced effects on nuclear morphology. Organoids exposed to a cytotoxic agent exhibited significant reductions in nuclear area and diameter compared to untreated controls, indicating structural damage associated with cell death. These results highlight the potential of label-free UV-PAM as a powerful tool for drug screening and toxicity evaluation in intact organoid models.

1. 연구 배경

질병 중 태아알코올스펙트럼장애 (Fetal Alcohol Spectrum Disorders, FASD)는 임신 중 산모의 알코올 섭취로 인해 태아의 뇌 발달이 손상되는 질환으로, 세계적으로 주요 발달장애 원인 중 하나로 꼽히고 있다. 최근, 인간의 기관을 모방하는 3차원 오가노이드의 연구는 정밀진단 및 생명과학 분야에서 활발하게 연구되고 있으며, FASD와 같은 질병을 모델링하기 위해 오가노이드를 적용하는 연구도 진행되고 있다. 오가노이드는 기존의 2차원 세포에 비해 인체 기관 및 그 환경을 정밀하게 모사하며, 동물 모델에 비해 낮은 제약을 가진다. 또한, 질병에 대한 모델링이 가능하기 때문에, 약물 스크리닝 및 정밀 진단 분야에서 2차원 세포 및 동물 모델을 대체하기 위해 질병 모델에 오가노이드를 적용하고 있다. 특히, 뇌 오가노이드는 접근하기 힘든 사람의 뇌 기관을 분석하는 매우 중요한 수단으로 대두됨에 따라, 질병 뇌 오가노이드 모델도 진행되고 있다. 기존의 형광 기반 이미징 기법은 생명과학 분야에서 흔히 사용되는 표준 기술이다. 그러나 이러한 형광 기반 기법은 고정, 절편화, 염색 등의 과정이 필수적이고, 이 과정은 자원 및 시간 소모를 야기한다. 또한 세포 및 조직 파괴로 인해 살아있는 상태에서 측정을 힘들 게 한다 [2].

이러한 한계를 해결하기 위해, 광음향 현미경 (Photoacoustic Microscopy, PAM)는 대안으로 사용될 수 있다. 광음향 효과는 시료에서 빛이 흡수되면 빛에너지가 열에너지로 전환되며 열탄성팽창을 야기하고, 팽창이 초음파 형태의 압력을 생성하는 것을 기반으로 한다. PAM은 빛의 조사와 초음파 검출이라는 광학과 음향의 하이브리드 기술로, 기존의 광학 기반 현미경에 비해 비표지로 사용될 있다. 또한 초음파의 낮은 산란 및 속도는 깊은 영역 영상화 및 2차원 스캔으로 3차원 체적 영상화가 가능하게 한다. 특히, 세포핵 내의 DNA/RNA는 자외선(UV) 파장에서 강한 흡수를 가지기 때문에, UV-PAM을 이용하여 비표지 세포핵 영상을 획득할 수 있다.

본 연구는 300 nm 이하의 고해상도 UV 빔을 이용하여 FASD를 모델링하는 뇌 오가노이드의 세포핵 영상을 비표지로 획득하는 것을 목표로 한다. 정상 세포와 FASD 모방 세포의 형태학적 차이 비교하여 분류를 진행한다.

2.연구 방법

FASD 오가노이드 모델을 만들기 위해, 2%의 ethanol을 넣은 배지로 뇌 오가노이드를 6시간 배양하였다. 뇌 오가노이드는 90일 이상의 성장하여 2 mm 지름을 가지는 성숙한 모델을 선택하였고, 정상 및 질병 모델 군에서 각각 3개씩 총 6개의 오가노이드가 평가에 이용되었다.

UV-PAM은 266 nm 파장의 레이저를 조사하여 세포핵의 신호를 생성하고, 50 MHz 중심주파수의 초음파 변환기로 생성된 신호를 검출한다. 살아있는 상태의 오가노이드를 영상화 하기 위해 주변 장비인 2축 모터 스테이지, 샘플 홀더, 초음파 변환기를 소독한 후 사용하였다.

시스템은 LabVIEW 기반의 연구실 개발 프로그램으로 동작되었다. 또한, 획득된 신호는 MATLAB을 이용하여 처리되었으며, 서포트 벡터 머신(Support Vector Machine, SVM) 기반의 머신러닝을 이용하여 정상 및 질병 모델을 분류하였다.

3. 연구 결과

그림 2에서, 고해상도 UV-PAM으로 탄소나노튜브를 영상화하였고, 이를 통해 300 nm 이하의 공간 해상도에서 구분 가능함을 보였다. 이 과정에서 z축 방향의 고정밀 피에조 스테이지를 이용하여 빔의 짧은 초점 심도 정밀하게 동작하여 해상도의 오차를 최소화하였다.

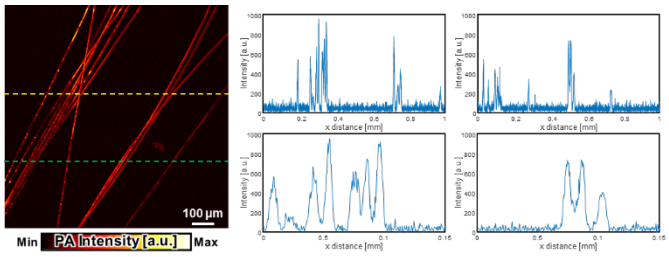


그림 2. 광음향 현미경 해상도 평가 결과

그림 3에서, 개발된 UV-PAM을 이용한 뇌오가노이드 비표지 영상과, 이를 DAPI로 염색하여 광학 현미경과 비교하였다. 동일한 섹션된 면에서, 광시야, 형광 및 광음향 영상이 유사함을 보였다. 광시야 현미경은 세포핵에 대한 대비가 없으며, DAPI 염색 및 UV-PAM은 대비가 있음을 나타냈다. 같은 영역에 영상에서 세포핵 가장자리 검출 알고리즘을 이용하여 각 세포를 분석하였고, 개수, 핵 넓이, 핵 지름에서 유사함을 보였다. 이는 UV-PAM의 세포핵 영상화가 가능함을 의미한다.

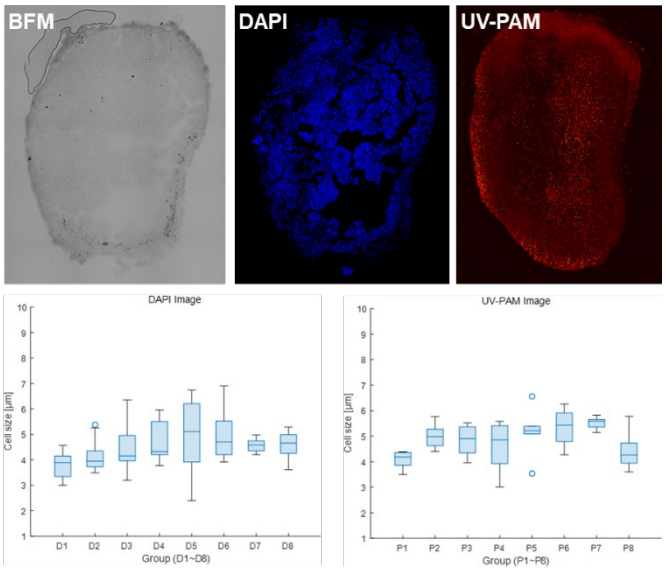


그림 3. 절편화 뇌 오가노이드 영상

이후 절편화하지 않은 살아있는 오가노이드에 대한 영상 가능성을 검증하였다. 피에조 스테이지를 움직여 3번의 다른 초점 평면에서 영상화를 진행하였고, B-mode 영상에서 구형의 오가노이드 바닥 부분 형태과 일치함을 보였다. 또한 깊이별로 영상을 나눠서 maximum amplitude projection (MAP)를 진행한 결과, 최대 100 μm 깊이에서 신호가 획득됨을 보였다. 이 실험을 통해 UV-PAM 현미경을 이용하여 절편화하지 않은 살아있는 오가노이드의 비표지 영상이 가능할 뿐 아니라, 최대 100 μm 깊이의 신호를 획득할 수 있음을 나타냈다.

마지막으로, 정상 및 FASD를 모사하는 오가노이드에 대한 비교를 진행하였다. 정상 및 질병 모델링을 위해 각각 3개씩 총 6개의 뇌 오가노이드가 사용되었고, 각 분류에 대하여 세포핵의 면적, 지름, 원형도를 평가했다. 면적과 지름에서는 통계학적으로 매우 다름을 보였고, 원형도에서도 다름을 보였다. 특히, 단일 세포로 확대한 결과, 원형을 유지하는 정상 세포핵에 비해 질병 모델의 세포핵은 파편화가 진행되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 ethanol이 세포핵에 직접적인 영향을 미치며, 신생 뇌를 모사하는 오가노이드를 통해 FASD의 영향을 확인할 수 있었다.

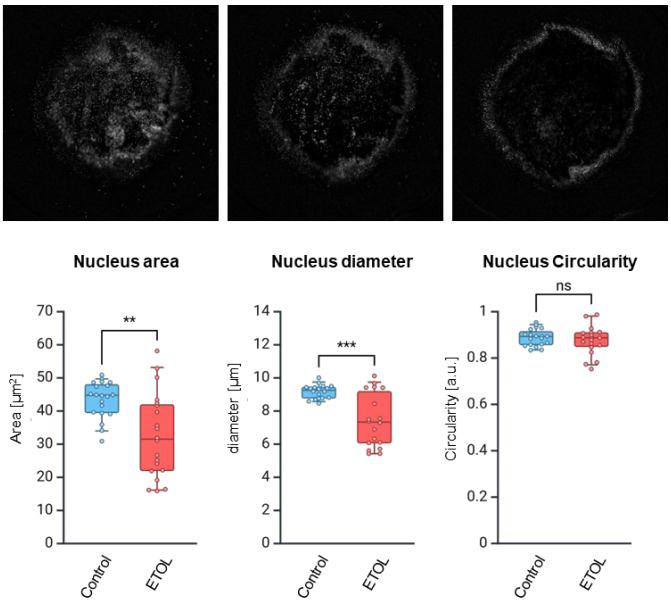


그림 4. UV-PAM을 이용한 이미징 깊이 평가 및 FASD 오가노이드 모델의 세포핵 분석

이 연구는 고해상도 UV-PAM을 이용하여 세포핵 파편화에 대한 비표지 영상을 획득할 수 있음을 보였으며, 이후 생명과학, 정밀 진단, 신약 개발과 같은 분야에서 활용될 수 있음을 나타냈다.

4. Acknowledgements

이 연구는 National Research Foundation (NRF) of Korea (RS-2021-NR060086, 2022R1C1C2012736, RS-2023-00266110, RS-2024-00462912, RS-2023-00210682)의 지원, Ministry of Science and ICT (MSIT) , Republic of Korea (RS-2024-00339665)의 지원, BK21 FOUR 과제의 지원을 받아 작성했음.

5.참고 문헌

[1] A. Barulin et al., Sci. Adv., 11(3), eadr0654 (2025).

[2] J. W. Baik, Laser Photonics Rev., 15(10), 2100124 (2021).

Poster-128

광음향 이미징을 이용한 비침습적 피부 과색소 분석

김민성 [1,†], 한주희 [2,†], 김에스더 [2], 이지현 [2,*], 김철홍 [1,*], 최원석 [3,*]

[1] 포항공과대학교 IT융합공학과, 전자전기공학과, 기계공학과, 의과학과, POSTECH-가톨릭대 의생명공학연구원, 의료기기혁신센터

[2] 가톨릭대학교 서울성모병원 피부과

[3] 가톨릭대학교 의과대학 의공학교실

Non-invasive analysis of skin hyperpigmentation using photoacoustic imaging

Minseong Kim, MS[1,†]; Ju Hee Han, MD, PhD[2,†]; Esther Kim, MD[2]; Ji Hyun Lee, MD, PhD[2,*]; Chulhong Kim, PhD[1,*]; and Wonseok Choi, PhD[3,*]

[1] Department of Convergence IT Engineering, Electrical Engineering, Mechanical Engineering, and Medical Science and Engineering, POSTECH-CATHOLIC Biomedical Engineering Institute, Medical Device Innovation Center, Pohang University of Science and Technology, Pohang, Korea

[2] Department of Dermatology, Seoul St. Mary's Hospital, College of Medicine, The Catholic University of Korea, Seoul, Korea

[3] Department of Biomedical Engineering and Medical Sciences, College of Medicine, The Catholic University of Korea, Seoul, Korea

[†] Equal contribution

*Corresponding author: Wonseok Choi, Chulhong Kim, and Ji Hyun Lee

Abstract

In skin hyperpigmentation, the depth of pigment varies ranging from the epidermis to the dermis. Determining the depth of the pigment is important both for deciding whether excision is needed and for selecting the appropriate type of laser for treatment. Currently, diagnosing hyperpigmentation relies on visual assessment of pigment distribution and depth using equipment like dermascopes or Wood's lamps. However, this method is subjective and can yield unclear results. Biopsies, performed as an adjunct, are invasive, may cause scarring, and can be varies to sampling point. Photoacoustic imaging is a non-invasive imaging method that uses ultrasound signals generated from light absorbers when laser is illuminated. This study utilized photoacoustic imaging to analyze pigment distribution and depth within hyperpigmented lesions. Additionally, we performed biopsies on the same lesions to compare the pigment distribution observed in our photoacoustic imaging analysis with those confirmed by actual biopsy. The results showed that our imaging analysis was consistent with what was actually observed in the biopsies. This demonstrates the potential of photoacoustic imaging to aid in the diagnosis and analysis of hyperpigmentation.

1. 연구 배경

피부 과색소 질환은 다양한 형태로 발생하며 질환에 따라 표피에서 진피까지 색소의 깊이에서 차이를 보인다. 질환의 종류와 색소 깊이를 포함한 병변 양상을 고려하여 절제 혹은 레이저 치료가 시행된다. 또한 치료에 사용되는 레이저의 경우, 그 종류에 따라 투과 깊이가 달라지기 때문에 효과적인 진단 및 치료를 위해서는 색소의 깊이를 파악하는 것이 중요하다.

일반적으로 색소의 상대적인 깊이에 따라 겉보기 색이 달라지므로 [1], 더마스코프 등의 시각적 보조 도구를 통해 색소 깊이를 추정하고 우드램프를 이용하여 색소의 분포를 시각적으로 파악할 수 있다. 그러나 이러한 방법들은 색소가 여러 깊이에 퍼져 있는 경우 정확히 알 수 없으며 정성적인 결과를 바탕으로 주관적으로 판단이 이루어진다. 조직 검사는 직접적으로 멜라닌 색소를 검출하여 깊이를 알 수 있으나, 결과를 얻는데 시간이 오래 걸리고 샘플링한 위치에 따른 편차가 있을 수 있다. 또한 환자의 고통을 유발하며 흉터가 발생할 수 있다.

광음향(photoacoustic) 이미징은 비침습적으로 생체 조직을 이미징하고 정량적으로 분석하기 위해 개발된 이미징 방법이다. 이는 조직에 펄스 레이저를 조사했을 때 조직 내 광흡수체가 열팽창을 통해 음파를 발생하는 광음향 효과에 기반을 두고 있다. 멜라닌 색소의 경우 높은 광흡수도를 가져 강한 신호를 발생시키므로 광음향을 통해 효과적으로 이미징 할 수 있다.

이 연구에서는 과색소 질환들을 광음향/초음파 장비를 통해 이미징하고, 이를 통해 멜라닌 색소 분포 패턴 및 깊이에 대해 분석했다. 또한, 이미징과 함께 조직검사를 시행하여 조직내의 실제 멜라닌 분포를 확인하고, 이를 광음향 결과와 비교함으로써 광음향 이미징의 유효성을 보이고자 하였다.

2.연구 방법

이 연구에서는 초음파 장비와 레이저 장비를 통합하여 개발된 광음향/초음파 이미징 시스템 및 연속적인 이미징을 위한 핸드헬드 스캐너가 사용되었다 [3]. 레이저의 경우, 주요 타겟인 멜라닌 및 헤모글로빈의 광흡수도를 고려하여 680nm, 730nm, 796nm, 820nm의 4개의 파장이 사용되었다.

모든 프로토콜은 서울성모병원 IRB의 승인 하에 진행되었다(KC17DESI0201).

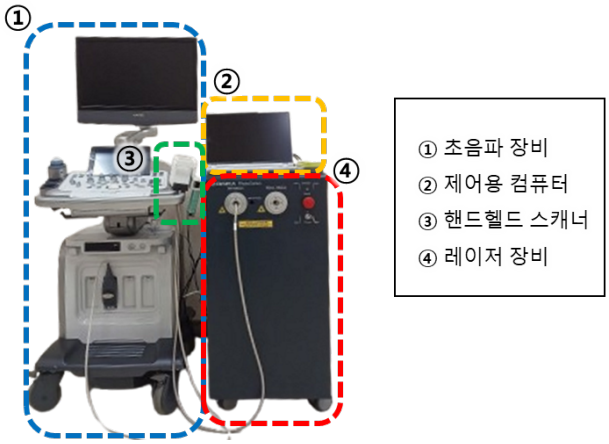


그림 1 광음향/초음파 이미징 시스템

병변 피부와 정상 피부가 모두 영역 내에 포함되도록 하여 촬영 부위를 마킹한 후, 해당 부위를 스캔하였다. 이후, 동일한 부위에서 조직검사를 시행하였다. 광음향/초음파 데이터에서 혈관 및 멜라닌 신호를 분리하고, 멜라닌 색소 분포를 나타낸 후, 실제 조직검사 시행 위치 부분에서 해당 분석 결과를 비교하였다.

3. 연구 결과

그림 2는 진피멜라닌세포증(dermal melanocytosis) 병변에 대한 광음향 이미징 및 조직검사 결과를 보여준다. 광음향 이미징 분석에서는 멜라닌 색소가 0.5 ~ 1.2mm 깊이에서 분포하는 것으로 나타났는데, 조직 검사에서도 이와 유사하게 멜라닌 색소가 0.47 ~ 1.28mm 깊이에 분포하는 것으로 나타났다. 또한 분포 패턴에 있어도 층계형태의 공통적인 모습을 보였다.

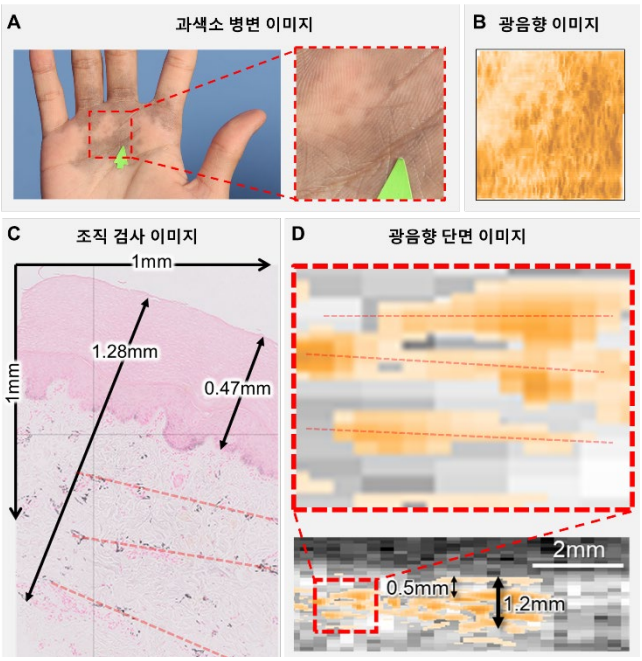


그림 2 진피멜라닌세포증 광음향 및 조직검사 결과

그림 3는 염증 후 과색소침착(Postinflammatory hyperpigmentation) 병변에 대한 광음향 이미징 및 조직검사 결과를 보여준다. 광음향 이미징 결과, 이 병변의 경우, 0.4mm 이내의 얕은 깊이에도 멜라닌이 다량 존재하고, 약 1mm 깊이까지 멜라닌이 밀집 분포하는 것으로 분석되었다. 실제 조직검사 결과, 0.2mm 이내의 기저층에 멜라닌 색소가 다량으로 밀집해 있으며, 약 1mm 깊이까지 멜라닌 색소가 다량 존재하는 것을 확인할 수 있었다. 특히 특정 위치에서 전 깊이에 걸쳐 연속적으로 멜라닌이 밀집되는 것이 광음향 분석과 조직검사 모두에서 발견되었다.

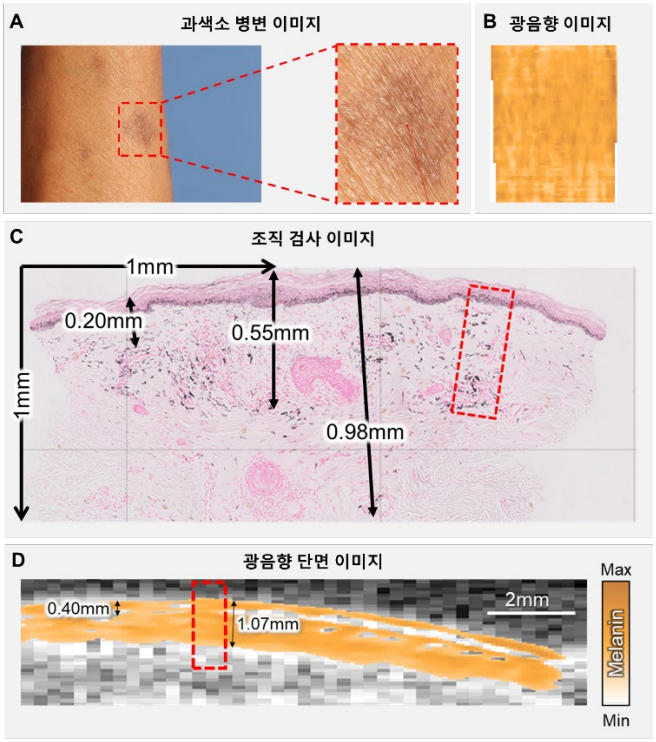


그림 3 염증 후 과색소 침착 광음향 및 조직검사 결과

이러한 결과는 광음향 영상 기술이 과색소 질환의 진단 및 분석에 기여할 수 있는 잠재력을 보여준다.

4. Acknowledgements

이 연구는 National Research Foundation of Korea(NRF) (2020R1A6A1A03047902, 2021R1I1A1A01045146, 2023R1A2C3004880, RS-2024-00340633), the Commercialization Promotion Agency for R&D Outcomes (COMPA) funded by the Ministry of Science and ICT (MSIT) (RS-2025–02304660), a grant of the Korea Health Technology R&D Project through the KoreaHealth Industry Development Institute (KHIDI), funded by the Ministry of Health & Welfare (RS-2024-00512879), the BK21 FOUR project의 지원을 받아 수행되었음.

5.참고 문헌

[1] Woltsche, N., Schmid-Zalaudek, K., Deinlein, T., Rammel, K., Hofmann-Wellenhof, R., & Zalaudek, I. (2017). Abundance of the benign melanocytic universe: Dermoscopic–histopathological correlation in nevi. The Journal of Dermatology, 44(5), 499-506.

[2] Lee, C., Choi, W., Kim, J., & Kim, C. (2020). Three-dimensional clinical handheld photoacoustic/ultrasound scanner. Photoacoustics, 18, 100173.

Poster-129

시험관 내 3D 상피 주름 조직의 라벨 없는 자외선 광음향 현미경

짜린빈[1,†], 윤장원[2,†], 연재성[2,†], 미스트라 산타누[1,†], 계현준[1], 김동성[2,3], 박별리[1,*]

Label-free ultraviolet photoacoustic microscopy of 3D epithelial wrinkle tissues in vitro

Linbin Zha[1,†], Jangwon Yoon[2,†] Jaesung Youn[2,†], Santanu Misra[1,†], Hyunjun Kye[1], Dong Sung Kim[2,3,*], Byullee Park[1,*].

[1]Department of Biophysics, Department of MetaBioHealth, Department of Biopharmaceutical Convergence, Institute of Quantum Biophysics, Sungkyunkwan University, Suwon, Republic of Korea.

[2]Department of Mechanical Engineering, Department of Chemical Engineering, School of Interdisciplinary Bioscience and Bioengineering, Pohang University of Science and Technology (POSTECH), Pohang, Republic of Korea.

[3]Institute for Convergence Research and Education in Advanced Technology, Yonsei University, Seoul, Republic of Korea.

Email Address: byullee@skku.edu, smkds@postech.ac.kr

Abstract

Epithelial wrinkles are crucial for regulating cell behavior, maintaining tissue mechanical stability, and shaping the microenvironment. High-resolution image acquisition of epithelial wrinkles contributes to quantitatively elucidating wrinkle structures and remodeling the dynamics in tissues and organoids. However, achieving label-free and high-resolution imaging of epithelial wrinkles in vitro remains challenges by using conventional microscopes. Here, we employ label-free ultraviolet photoacoustic microscopy (UV-PAM) for high-resolution imaging of three-dimensional (3D) epithelial bilayer wrinkle models that incorporate with epithelium and extracellular matrix (ECM), as well as wrinkle microarchitectures of intestinal organoids in vitro. Quantitative morphological and structural analyses of flat/compressed wrinkle models elucidate that nuclear morphology is intimately influenced by compressive strain. To further assess the capability of UV-PAM in disease modelling, untreated and drug-treated wrinkle models in intestinal organoids are cultured to mimic the morphology of normal intestine and the epithelial intestinal barrier dysfunction, respectively. Imaging results demonstrate that UV-PAM can distinctly reveal wrinkle microstructures and individual nucleus without staining and detects morphological and structural integrity disruptions in pathological models. This advanced imaging technology provides new opportunities to investigate epithelial biomechanics and pathological development within organoid and microengineered tissue models.

1. Introduction:

Wrinkle structures induced by compressive strain are the canonical morphogenetic programs commonly found in epithelial tissues in vivo[1,2]. These mechanically generated architectures serve essential biological functions across multiple scales. At the tissue level, folding provides compliance and structural organization. At the cellular and nuclear levels, compression-induced deformation regulates mechanotransduction and gene expression. Capturing these multi-scale deformations is crucial for advancing our understanding of epithelial physiology and its changes during development, aging, and disease. However, capturing such multiscale deformations with sufficient spatiotemporal resolution in vivo remains difficult owing to limited optical access, physiological motion, and the episodic nature of folding events. In contrast, in vitro epithelial wrinkle models[3], including organoids and micro-engineered tissue models with controlled compressive strain, enable rapid or real-time imaging of wrinkling dynamics. These epithelial wrinkle models in vitro provide tractable platforms that recapitulate key architectural and functional features for mechanistic studies and drug-response assessment.

In this context, wrinkling and nucleus deformation directly couple to mechanotransduction. high-resolution, minimally invasive imaging of epithelial wrinkle structures together with nuclear morphology is essential for interpreting morphogenesis and revealing the dynamics of these architectures regulating biological function across multiscale levels. Conventional fluorescence microscopy typically requires fluorescence labelling and physical sectioning for thick tissues, which induce photobleaching and phototoxicity, thereby compromise long-term observation.

To overcome this limitation, there is clear need for label-free, high-resolution modalities that can simultaneously resolve epithelial wrinkle architecture and nuclear morphology. Photoacoustic microscopy is an emerging label-free imaging technology based on photoacoustic effect[4]. Specifically, UV-PAM leverages the strong absorption of DNA/RNA at 266 nm to generate nuclear contrast without staining or sectioning[4]. To best of our knowledge, the application of UV-PAM to in-vitro 3D epithelial wrinkle models remain largely unexplored. In this study, we employ UV-PAM as a label-free and high-resolution imaging modality to visualize and quantify epithelial wrinkling tissues and intestinal organoids in vitro (Fig 1). We demonstrate the applicability of UV-PAM by analyzing wrinkle formation and drug responses in organoid-derived 3D epithelial tissues.

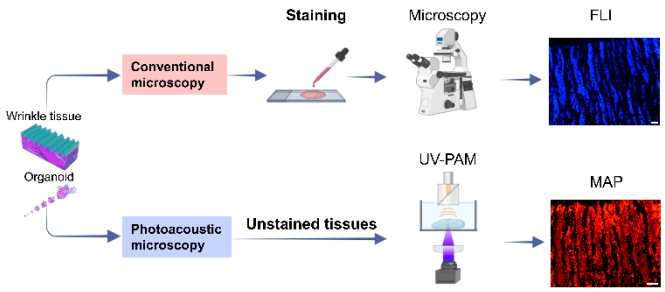


Fig 1: Comparison between conventional microscopy and label-free ultraviolet photoacoustic microscopy. FLI, fluorescence imaging. MAP, maximum amplitude projection.

2. Methods:

We built a label-free UV-PAM system, as shown in Fig.2. A fourth-harmonic (266 nm) pulsed laser source provides nanosecond excitation; residual green light from harmonic generation is rejected with a ultraviolet (UV) bandpass, and the pulse energy is set with neutral-density optics. The beam is spatially cleaned with a pinhole-based spatial filter and then collimated; an iris limits peripheral diffraction before two UV-enhanced mirrors steers the beam into a UV-compatible, high-NA objective lens. A motorized z-axis keeps the UV focus on the sample surface during raster scanning. The generated photoacoustic waves are detected by a single-element, high-frequency ultrasound transducer. The analog signal is preamplified, band-pass filtered, and digitized by a high-speed data acquisition system that is hardware-synchronized to the laser pulses and raster scan. The specimen is held flat on a UV-transmissive quartz window in a rigid metal frame; two motorized linear stages translate the sample in x–y directions while a photodiode monitors the pulse train and furnishes triggers for synchronized acquisition in the control software (LabVIEW). Overall, these elements yield subcellular nuclear contrast and millimeter-scale fields of view suitable for wrinkle tissue assessment.

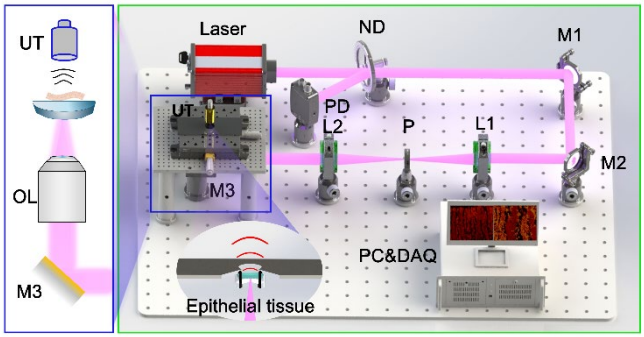


Fig 2: Ultraviolet photoacoustic microscopy system schematic diagram. ND, neural density filter. M1-M3, mirror. L1-L2, lens. P, pinhole. PD, photodiode. UT, ultrasound transducer. OL, objective lens.

3. Results:

To elucidate the capability of UV-PAM for imaging wrinkle tissues, we performed imaging of different epithelial wrinkled tissues using UV-PAM. Fig. 3A shows obtained images of wrinkle tissues through UV-PAM with a relatively large step size along x and y. Image results indicate obvious wrinkle patterns. Fig. 3B presents magnified view of representative regions marked with boxes in Fig.3A with a decreasing step size, respectively. High-resolution images acquired by UV-PAM manifest distinct cell nuclei of wrinkle tissues, demonstrating the performance of UV-PAM in clear depicting of wrinkle pattern and cell morphology. Importantly, Taking the enlarged images coming from Fig. 3B (center) as target regions for measurements, quantitative analyses of nuclei area, diameter, and perimeter validate the capacity of UV-PAM for label-free nuclear morphological characterization (Fig. 3C). These results confirm the viability of UV-PAM as a powerful imaging tool to replace conventional fluorescence microscopy for high-resolution and label-free imaging of wrinkle tissues.

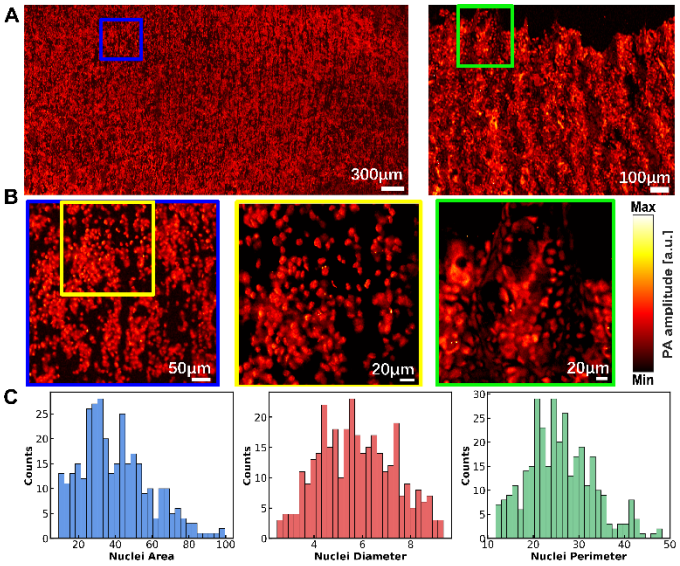


Fig 3: UV-PAM of wrinkle tissues in vitro. A. Large-FOV MAPs of wrinkle tissues acquired by UV-PAM with a step size of 5μm. B. High-resolution MAPs show individual nuclei, acquired with a reduced step size of 1.25μm and 0.625μm. C. Quantitative analysis of Nuclei area (left), diameter (center), perimeter (right) from the nuclei image in B.

4. Acknowledgements

This work was supported by the National Research Foundation (NRF) grant (RS-2023-00266110, RS-2024-00462912, RS-2023-00210682) funded by the Ministry of Science and ICT (MSIT) of the Korean government and by the BK21 FOUR Project.

5. References

1. Karzburn E, Kshirsagar A, Cohen S, Hanna J, Reiner O. Human brain organoids on a chip reveal the physics of folding. Nat. Phys. 2018;14:515-522.
2. Gonzalez C, Ceada G, Greco F, Matejcic M, Gonzalez M, Castro N, et al. Mechanical compartmentalization of the intestinal organoid enable crypt folding and collective cell migration. Nat. Cell Biol.2021;23:745-757.
3. Youn JS, Kim DH, Kwak HS, Lee AN, Kim DS. Tissue-scale in vitro epithelial wrinkling and wrinkle-to-fold transition. Nat. Commun. 2024;15:7118.
4. Choi WS, Park BL, Choi SW, Oh DH, Kim JB, Kim CH. Recent advances in contrast-enhanced photoacoustic imaging: overcoming the physical and practical challenges. Chem. Rev. 2023;123:7379-7419.

Poster-130

유연 유기 발광 광검출 소자 기반 대사 활성화 및 혈당 저감형 웨어러블 디바이스

김동준[1], 김인호[1], 김영우[2], 정재영[4], 권상직[3], 조의식[3*], 전용민[5*]

[1]가천대학교 의공학과

[2]가천대학교 반도체공학과

[3]가천대학교 전자공학과

[4]가천대학교 바이오의공학과

[5]경희대학교 정보디스플레이학과

A Wearable Device for Metabolic Activation and Blood Glucose Utilization Using Flexible Organic Optoelectronic Components

Dong Jun Kim[1], In Ho Kim[1], Young Woo Kim[2], Jae-Young Jeong[4], Sang Jik Kwon[3], Eou-Sik Cho[3*], and Yongmin Jeon[5*]

[1]Department of Biomedical Engineering, Gachon University, Seongnam 13120, Korea

[2]Department of Semiconductor Engineering, Gachon University, Seongnam 13120, Korea

[3]Department of Electronic Engineering, Gachon University, Seongnam 13120, Korea

[4]Department of Biohealth & Medical Engineering, Gachon University, Seongnam 13120, Korea

[5]Department of Information Display, Kyung Hee University, Seoul 02453, Korea

e-mail : es.cho@gachon.ac.kr, yongmin@khu.ac.kr

Abstract

In this study, a non-invasive photobiomodulation(PBM) system using a 630nm flexible organic light-emitting diode (OLED) was proposed to enhance cellular metabolism and reduce blood glucose levels. The OLED irradiated group showed a significant glucose reduction compared to the control group, showing a 15.5% decrease after 6h and a 37.9% decrease after 24h, whereas the control group showed only a 27.8% reduction. Furthermore, an organic photodiode(OPD) fabricated via thermal deposition was integrated to detect reflected red light and sensing SpO_2 signals. These findings demonstrate that the integrated OLED-OPD wearable platform can simultaneously achieve PBM based glucose regulation and physiological monitoring, offering potential for therapeutic management of delayed-healing lesions such as diabetic ulcers.

1. 연구 배경

최근, 수십 년간 광학 기술의 발전과 함께 LASER, LED, OLED와 같은 여러 광원이 등장함에 따라 생체의학적 응용에 활용되기 시작하면서, Phototherapy에 대한 관심도가 급격히 올라가고 있다. 광치료의 여러 가지 기법 중에서도 Photobiomodulation(PBM)은 낮은 세기의 적색부터 근적외선(600-1100nm) 파장을 이용하여 세포 내 신호전달, 미토콘드리아 기능 및 대사 활동을 조절하는 비침습적 치료법(non-invasive therapy)으로 주목받고 있다[2][3].

PBM의 주된 작용 기전으로는 미토콘드리아의 내막에 존재하는 내인성 광수용체인 Cytochrome c oxidase(CCO, 복합체IV)가 광자를 흡수함으로써 전자전달계를 활성화시키고, 아데노신삼인산(Adenosine triphosphate, ATP)의 합성을 증가시키는 데 있다[6][7]. 이 과정에서 활성산소종(ROS), 일산화질소(NO), 칼슘 이온(Ca^{2+})과 같은 신호 분자의 조절이 유도되며, 이는 세포 내 항산화 반응 및 에너지 대사 조절을 유도한다[2][3]. 결과적으로 PBM은 세포의 생존율 향상, 조직 회복, 염증 억제 등 다양한 생리적 효과를 유발할 수 있다[1].

ATP 합성에는 포도당(Glucose)과 산소(O_2)가 필수적으로 사용되기 때문에, 미토콘드리아 활성화는 곧 혈당 사용 증가와 세포 에너지 대사 효율 향상으로 이어진다. 여러 연구에서 PBM이 glucose regulation 및 대사 항상성에 영향을 미친다는 결과가 보고되었다[3][5]. 600nm대 적색 파장의 빛을 인체에 조사하여 PBM 효과를 이용한 당 감소 실험에서는 경구 당부하검사(OGTT) 동안 혈당의 상승 면적(AUC)이 위약 집단 대비 27.7% 감소하였고, 최고 혈당치도 PBM 집단에서 위약 집단 대비 12.1% 감소하였다고 보고되었다[5]. 이러한 결과는 PBM이 인체에서 실제로 혈당 변동을 억제하고 대사 항상성을 조절할 수 있음을 보여준다. 기존 연구들에서 사용한 광원인 LASER, LED, 램프 등은 구조적으로 단단하며, 구현 가능한 파장이 제한적이고, 사용 중 발생하는 국부 발열로 인해 피부 밀착형 디바이스에 적합하지 않다는 단점이 존재한다[6].

이러한 무기물 기반의 광원에서 오는 한계를 극복하기 위해, 유기 발광 다이오드(OLED)가 차세대 광원으로 부상하였다[7]. OLED는 높은 유연성과 면광원 특성을 갖추고 있어, 피부와의 밀착성을 유지하면서도 넓은 면적에 균일한 빛을 제공할 수 있다. 또한 저온에서의 구동이 가능하여, 발열로 인한 화상의 위험성이 감소하여 타 광원에 비해 생체적합성이 우수하다. 추가적으로 장기적인 사용에도 안정적인 구동을 통한 치료 및 모니터링 환경을 제공할 수 있다.

광자극을 통해 세포 에너지 대사를 조절하고 혈당을 안정화시키는 효과를 기반으로, 본 연구에서는 웨어러블 형태의 혈당 감소 플랫폼을 제안하였다. 또한 Red 파장의 빛을 유기 광 검출기(OPD)로 수광 하여 SpO_2를 측정함으로써, 피부에서의 당뇨성 궤양 등 재생 지연성 병변에 대한 모니터링과 PBM 효과를 이용한 치료를 동시에 수행할 수 있는 통합형 시스템을 구현하였다.

2.연구 방법

HaCaT cell을 2x10⁴ cells/well로 96 well plate에 시딩한다. 세포를 시딩한 후 인큐베이터(37℃, 5% CO_2)에서 12시간 안정화 시킨 뒤, well에 들어있는 배지를 제거하고, DMEM과 DW를 희석하여 당이 약 300mg/dL 검출되도록 제작한 배지를 well당 200μL 분주해준다. 이후 9J/cm²의 에너지를 조사하기 위해 3V 30분간 광을 조사한다. 광을 조사한 직후, 1h, 3h, 6h, 12h, 24h 마다 Accu-check 혈당측정기를 이용하여 혈당 변화를 측정한다.

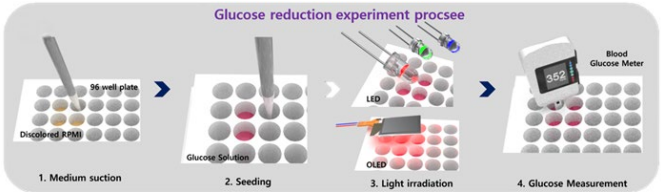


그림1. 세포 광조사 실험 절차

3. 연구 결과

3.1 광자극에 의한 세포 활성화 및 혈당 변화

630nm 파장의 빛에 의한 당 감소 효과는 그림 2.와 같이 나타났다. OLED를 조사한 실험군에서는 광 조사 후 6시간이 경과된 시점부터 대조군과 뚜렷한 차이를 보이며, 유의미한 당 감소 효과가 확인되었다. 0시간 대비 각 시점의 혈당 농도 변화를 분석한 결과, 6시간이 경과 시 OLED 조사군은 약 15.53%의 당 감소를 나타낸 반면, 대조군에서는 8.99%의 감소만이 확인되었다. 이후 두 군 간의 차이는 시간이 지날수록 점차 확대되어, 24시간 경과 후 OLED 조사군에서는 초기 대비 약 37.9%의 당 감소가 나타났다. 이는 대조군의 27.8% 감소에 비해 10% 더 높은 수준으로. 광자극의 대사 활성화 효과가 지속적으로 작용했음을 시사한다. 이러한 결과를 통해 630nm 파장(5mW/cm², 30min) 광조사가 세포 내 대사 과정을 활성화 시켜 에너지 소비를 촉진하고, 그 결과로 혈당 농도가 감소했음을 확인할 수 있었다. 본 결과는 PBM 기전에 기반한 세포 대사 조절이 실제 혈당 안정화에 기여할 수 있음을 시사한다.

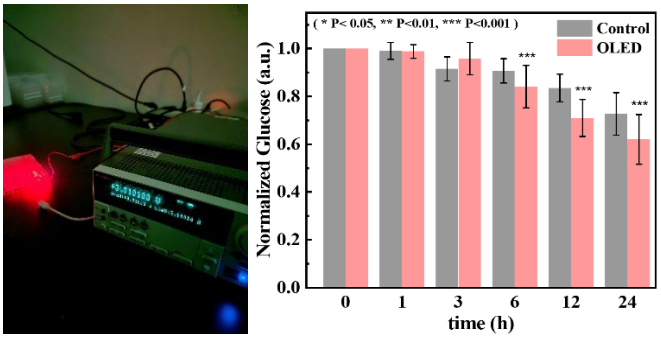


그림2. 세포 광조사 실험 사진과 당 감소 결과 그래프 (n=26)

3.2 광자극에 의한 세포 활성화 및 혈당 변화

그림 3은 개발한 630nm 파장을 이용한 광학 웨어러블 디바이스를 이용하여 혈중 산소포화도(SpO_2)를 측정한 결과를 나타낸 것이다. 사용자가 손목에 웨어러블 디바이스를 착용한 후 피부 밀착형 구조를 통해 안정적으로 빛을 조사하고 반사 신호를 감지하여 산소포화도를 측정할 수 있도록 설계하였다. 그림 4의 우측 그래프에서는 산소포화도 측정 시 얻어진 시간에 따른 전압 신호의 파형으로 맥박에 따른 주기적인 파형 변화를 확인할 수 있다. 통과하는 방식의 측정이 아니라 반사되는 광량을 통해 측정하는 방법이므로 당뇨성 궤양이 발생할 수 있는 부위에서 웨어러블 디바이스를 사용할 시 산소 포화도가 감소하는 모습을 확인할 수 있다. 이를 통해 당뇨성 궤양의 발생 유무를 모니터링 할 수 있을 것으로 확인된다. 본 연구를 통해서 630nm 파장의 빛이 글루코스를 효과적으로 감소시킬 수 있음을 실험적으로 입증하였다. 이러한 결과를 기반으로 기존 무기 광원의 경직성과 디바이스의 사이즈가 크다는 한계를 극복하기 위해 유기발광 다이오드와 유기 광 다이오드를 결합한 유연 광전자 소자를 섬유와 결합하여

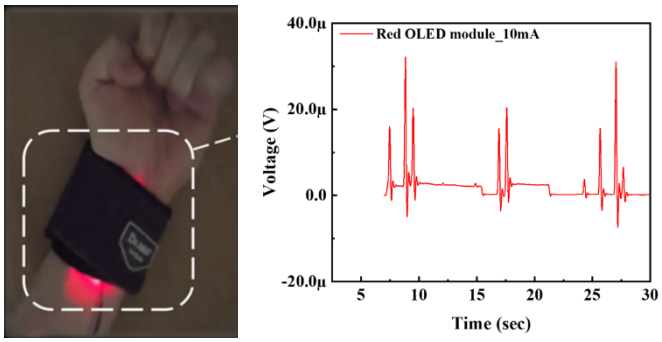


그림3. 유기 광검출기를 이용한 SpO_2 신호 측정

웨어러블 형태로 구현하였다.

4.참고 문헌

[1] Hamblin M. R., Mechanisms of photobiomodulation (PBM) or low-level light therapy (LLLT), *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **22**(3), 7000417, 2016.

[2] Hamblin M. R., Photobiomodulation: Underlying Mechanism and Clinical Applications, *J. Clin. Med.*, **9**(6), 1724, 2020.

[3] Chung H., Dai T., Sharma S. K., Huang Y. Y., Carroll J. D., Hamblin M. R., Proposed mechanisms of photobiomodulation (PBM) or low-level light therapy (LLLT), *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **22**(3), 7000417, 2016.

[4] Jeon Y. M., Kim K. N., Lee J. H., Kim H. S., Kim J., Yoon E. J., Parallel-Type Organic Light-Emitting Diodes Operating at 630 nm for Biomedical Applications, *ACS Nano*, **15**(1), 109–118, 2021.

[5] Carvalho P. D. O., et al., Regulation of blood glucose levels by photobiomodulation therapy, *PLoS One*, **17**(10), e0276937, 2022.

[6] Russell B., Kellett N., Reilly L., A study to determine the efficacy of combination LED light therapy (633 nm and 830 nm) in facial skin rejuvenation, *J. Cosmetic Laser Ther.*, 7(3–4), 196–200, 2005.

[7] Lee J., Choi S., Lee T. W., Hwang Y. H., Park Y., Jeong S. Y., Choi K. C., RGB-Color Textile-Based Flexible and Transparent OLEDs Considering Aesthetics, *Adv. Mater. Interfaces*, **10**(2), 2202114, 2023.

Poster-131

풀필드 광간섭현미경의 파장 분할 기반 위상 측정 범위 확장 기술

정민주[1], 김재흥[1], 김창석[1,2], 이휘돈[1,2*]

[1]부산대학교 인지메카트로닉스공학과

[2]컬러변조 초감각 인지기술 선도연구센터

Wavelength Segmentation-Based Phase Range Extension for Full-Field Optical Coherence Microscopy

Minju Jeong[1], Jaeheung Kim[1], Chang-Seok Kim[1,2], Hwidon Lee[1,2*]

[1]Department of Cogno-Mechatronics Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Korea

[2]Engineering Research Center for Color-Modulated Extra-Sensory Perception Technology, Pusan National University, Busan, 46241, Korea

*hwidonlee@pusan.ac.kr

Abstract

Phase imaging using swept-source optical coherence microscopy (SS-OCM) offers submicron-resolution for cellular imaging, but its axial measurable range is fundamentally constrained by 2π ambiguity. In this study, we present a wavelength-segmented phase imaging approach implemented in full-field SS-OCM to overcome this limitation without any hardware modification. The proposed method effectively extends the axial measurable range while maintaining high resolution, enabling quantitative phase imaging of cellular structures over an extended depth.

1. 연구 배경

광간섭단층촬영(optical coherence tomography, OCT)은 간섭계를 이용해 고해상도의 단면 이미지를 제공하는 비침습적 3차원 이미징 기술로, 바이오 영상 및 조직 진단 분야에서 널리 활용되고 있다[1]. 광간섭현미경(optical coherence microscopy, OCM)은 OCT를 기반으로 한 고해상도 영상 기법으로, 높은 개구수(numerical aperture, NA)의 광학계를 사용하여 횡방향 및 축방향 해상도를 향상시켜 세포 수준 구조의 영상화에 적합하다[2].

이 중 파장 가변 레이저(swept-source, SS-) OCM은 파장 가변 레이저를 이용해 깊이 정보를 획득하며, 간섭 신호의 위상 정보를 분석함으로써 서브마이크론 수준의 고해상도 이미징이 가능하다. 그러나 위상 측정 기술은 2π 모호성으로 인해 위상 래핑 없이 측정할 수 있는 축방향 범위가 광원의 중심 파장의 절반 수준으로 제한된다. 이러한 한계를 극복하고 측정 범위를 늘리기 위해 다중 광원 기반의 측정 방식이나 복잡한 계산 알고리즘을 활용한 보정 기법이 제안되어 왔다[3,4]. 그러나 이러한 접근법은 시스템의 복잡성과 안정성 측면에서 제약이 있다.

본 연구에서는 단일 파장 가변 레이저 기반의 파장 분할 위상 이미징 기술을 제안하여, 광학계 구성 변경 없이 측정 가능한 깊이 범위를 확장하였다. 제안된 방법은 광원 스펙트럼을 여러 구간으로 분할하여 각 구간의 위상 정보를 독립적으로 추출한 후, 광학 경로차(optical path difference, OPD)를 계산함으로써 축방향 측정 범위를 효과적으로 확장한다. 또한 풀필드(full-field, FF-) OCM 시스템을 적용하여, 기계적 스캔 없이 단일 촬영으로 2차원 간섭 신호를 획득한다.

따라서 FF-SS-OCM에 파장 분할 위상 이미징을 적용함으로써, 시스템의 단순성과 안정성을 확보하면서 확장된 위상 측정 범위를 구현하였으며, 이는 생물학적 조직 및 세포 영상화에 응용될 수 있다.

2. 연구 방법

그림 1.은 FF-SS-OCM 시스템과 파장 분할 위상 측정 과정의 모식도이다. 신호 처리 단계에서 단일 광원의 파장 대역을 최적으로 분할하고, 각 대역의 간섭신호에 가우시안 윈도우를 적용하여 위상 안정성을 향상하며 축 방향 측정 범위를 확장하였다.

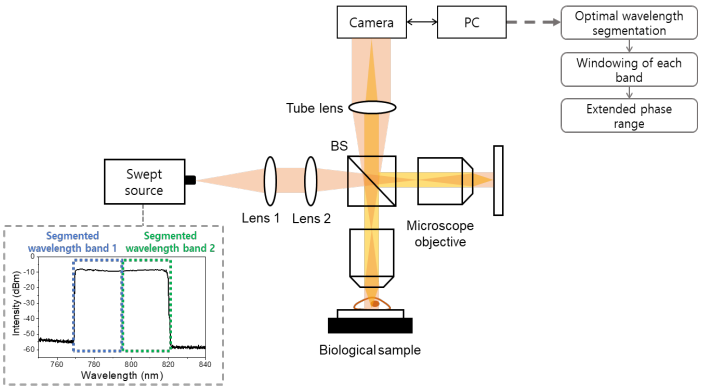


그림 1. FF-SS-OCM 시스템 모식도 및 파장 분할 위상 측정 과정

기존 위상 이미징 기법의 2π 모호성 한계는 위상 변화가 2π 범위를 초과할 경우 위상 래핑이 발생하여 실제 위상 정보를 연속적으로 측정하기 어렵게 되는 현상이다. 위상 이미징에서 OPD(δz)는 측정된 위상값 ($\Delta\varphi$) 로부터 다음과 같이 계산된다.

$$\delta z = \frac{\lambda_0}{4n\pi}\Delta\varphi \qquad (1)$$

이때 λ_0는 광원의 중심 파장, n 은 시료의 굴절률이다[5]. 측정 가능한 위상이 2π 범위로 제한되기 때문에, 위상 래핑이 발생하지 않는 상태에서 측정 가능한 최대 OPD는 다음과 같이 주어진다.

$$\delta z_{max} = \frac{\lambda_0}{2n} \qquad (2)$$

측정 범위 한계를 극복하기 위해 본 연구에서는 단일 광원을 이용한 파장 분할 위상 이미징 기법을 제안한다. 이 방법은 광원 스펙트럼을 여러 파장 대역으로 분할하고, 각 대역에서 위상 정보를 독립적으로 추출함으로써 측정 가능한 범위를 확장한다. 단일 파장 가변 레이저의 스펙트럼을 중심 파장이 λ_{c1}, λ_{c2}인 두 개의 파장 대역으로 분할하는 경우, 각각의 위상 값은 $\Delta\phi_1 = 4n\pi\delta z/\lambda_{c1}$, $\Delta\phi_2 = 4n\pi\delta z/\lambda_{c2}$ 이다. 두 위상 값의 차를 계산하면 다음과 같다.

$$\Delta\phi_{1-2} = 4n\pi\delta z\left(\frac{1}{\lambda_{c1}} - \frac{1}{\lambda_{c2}}\right) = 4n\pi\delta z/\Lambda \quad (3)$$

이때 Λ는 비트 파장이며, $\Lambda = \lambda_{c1}\lambda_{c2}/|\lambda_{c1} - \lambda_{c2}|$ 이다. 비트 파장 Λ은 개별 중심 파장인 λ_{c1}, λ_{c2}보다 항상 크고, 측정 가능한 OPD는 다음과 같이 계산된다.

$$\delta z_{1-2} = \left(\frac{\Lambda}{4n\pi}\right)\Delta\varphi_{1-2} \quad (4)$$

따라서, 최대 측정 가능한 OPD는 비트 파장에 비례하여 확장되며 다음과 같다.

$$\delta z_{max} = \frac{\Lambda}{2n} \quad (5)$$

이와 같이, 본 연구에서 제안한 방법은 단일 광원의 스펙트럼을 두 개의 파장 대역으로 분할하여 각 대역의 위상 정보를 독립적으로 계산하고 위상 차를 구함으로써 측정 가능한 범위를 확장한다. 이를 FF-SS-OCM 시스템에 적용함으로써, 광학계 구성 변경 없이 위상 측정 범위를 효과적으로 확장할 수 있다. 또한 파장 분할 대역 범위 및 중심 파장은 측정 대상 시료의 특성과 요구되는 축방향 측정 범위 및 축방향 해상도에 따라 선택적으로 조정하여 적용할 수 있다.

3. 연구 결과

본 연구에서는 FF-SS-OCM 시스템에 파장 분할 위상 이미징 기술을 적용하여, 위상 측정에서 발생하는 2π 모호성으로 인한 축방향 측정 범위의 제한을 극복하였다.

그림 2.는 세포 시료에 대한 FF-SS-OCM 측정 결과를 나타낸다. 실험에 사용된 시료는 평균 직경 약 10 μm의 L-929 생쥐 섬유아세포이다. 그림 2.(b)는 FF-SS-OCM을 통해 획득한 진폭(intensity) 기반 3차원 이미지로, 세포의 분포는 확인 가능하나, 해상도가 수 μm 수준으로 제한되어 세포의 세부 구조를 명확히 구분하기 어렵다. 그림 2.(c)는 단일 파장 대역에서 측정한 기존 위상 이미지로, 2π 모호성으로 인해 위상 래핑이 다수의 영역에서 발생함을 확인할 수 있다. 실험에서 사용된 파장 가변 레이저의 중심 파장은 795 nm 이며, 이에 따라 식 (2)로부터 단일 파장 대역에서 얻을 수 있는 최대 측정 범위는 약 400 nm 수준으로 제한된다. 그림 2.(d)는 본 연구에서 제안한 파장 분할 위상 이미징 기술을 적용하여 두 파장 대역 간 위상 차를 계산한 결과이다. 제안된 기술을 통해 위상 래핑으로 인한 왜곡 없이 깊이 방향 정보가 정확히 측정된 것을 확인할 수 있다. 본 실험에서는 중심 파장이 각각 λ_{c1}=785 nm, λ_{c2}=805 nm인 두 개의 파장 대역으로 분할하여 사용하였으며, 각 대역의 파장 대역폭을 30 nm로 설정하였다. 비트 파장은 Λ=31.5 μm이며, 식 (5)에 따라 최대 측정 가능한 OPD는 15.75 μm로 크게 확장되었다. 또한 시스템의 위상 안정도에 따른 축방향 해상도는 51 nm로 측정되어, 세포의 깊이 구조가 왜곡 없이 정밀하게 측정됨을 확인하였다.

결과적으로, 제안된 기법을 통해 15 μm 이상의 축방향 측정 범위를 달성하였으며, 동시에 수십 nm 단위의 축방향 해상도를 입증하였다. 이를 통해 제안된 기술이 FF-SS-OCM의 깊이 측정 성능을 향상시키며, 세포 이미징에 성공적으로 적용됨을 확인하였다. 이러한 결과는 본 기술이 정밀하고 확장된 깊이 측정이 요구되는 생물학적 응용 및 기타 영상 분야에 활용될 수 있는 가능성을 보여준다.

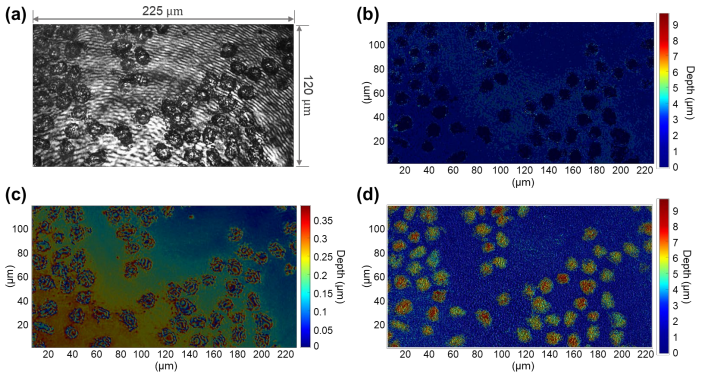


그림 2. FF-SS-OCM으로 측정한 L-929 세포 이미지. (a) 명시야 이미지. (b) 진폭 측정 기반 3차원 이미지. (c) 단일 파장 대역으로 얻은 위상 이미지. (d) 파장 분할 위상 이미지.

4. Acknowledgements

이 연구는 National Research Foundation of Korea (NRF) 과제의 지원을 받아 수행하였음. (NRF-RS-2021-NR060086)

5. 참고 문헌

[1] S. Aumann, S. Donner, J. Fischer, and F. Müller, “Optical Coherence Tomography (OCT): Principle and Technical Realization,” in High Resolution Imaging in Microscopy and Ophthalmology, J. Bille, ed. (Springer, Cham, 2019).

[2] A. D. Aguirre and J. G. Fujimoto, “Optical Coherence Microscopy,” in Optical Coherence Tomography, W. Drexler and J. G. Fujimoto, eds., Biological and Medical Physics, Biomedical Engineering (Springer, Berlin, Heidelberg, 2008).

[3] J. Gass, A. Dakoff, and M. K. Kim, “Phase imaging without 2π ambiguity by multiwavelength digital holography,” Opt. Lett. 28, 1141-1143 (2003).

[4] J. J. Chyou, S. J. Chen, and Y. K. Chen, “Two-dimensional phase unwrapping with a multichannel least-mean-square algorithm,” Appl. Opt. 43, 5655-5661 (2004).

[5] H. C. Hendargo, M. Zhao, N. Shepherd, and J. A. Izatt, “Synthetic wavelength based phase unwrapping in spectral domain optical coherence tomography,” Opt. Express 17, 5039-5051 (2009).

Poster-132

건선 및 지루성 피부염 분류를 위한 멀티모달 영상 분석 Transformer-KAN 기반 융합 네트워크

김성현[1*], 김세웅[2], T. C. Cavalcanti[2], 이종헌[3], 이동훈[4], 황재윤[1,2]

대구경북과학기술원 인공지능전공[1*], 대구경북과학기술원 전기전자컴퓨터공학과[2], 대구경북과학기술원 의생명공학전공[3], 서울대학교 의과대학 피부과학교실[4]

Transformer-KAN-Based Fusion Framework for the Classification of Psoriasis and Seborrheic Dermatitis with Multimodal Imaging

Seong Hyun Kim[1*], Sewoong Kim[2], T. C. Cavalcanti[2], Jonghun Lee[3], Dong Hun Lee[4], Jae Youn Hwang[1,2]

Dept. of Artificial Intelligence, Daegu Gyeongbuk Institute of Science and Technology, Korea[1*]

Dept. of Electrical Engineering and Computer Science, Daegu Gyeongbuk Institute of Science and Technology, Korea[2]

Dept. of Biomedical Science & Engineering, Daegu Gyeongbuk Institute of Science and Technology, Korea[3]

Dept. of Dermatology, Seoul National University College of Medicine, Korea[4]

[*]rlatjdgus224@dgist.ac.kr

Abstract

Psoriasis and seborrheic dermatitis share highly similar clinical appearances, making vision-based automatic classification particularly challenging. Although several image-based approaches have been proposed, they remain vulnerable to surface reflections and scattering and often rely solely on single-spectral information. In this study, we developed a multimodal imaging system that integrates cross-polarization, which suppresses specular reflections and enables the acquisition of complementary polarimetric–spectral cues, with ultraviolet (UV) fluorescence imaging for enhanced diagnostic contrast. To achieve precise classification between psoriasis and seborrheic dermatitis using this system, we designed a Transformer-KAN–based fusion framework. The proposed model extracts Transformer-based features from each multimodal image channel, integrates them through concatenation-based fusion, and employs a Kolmogorov–Arnold Network (KAN) classifier head. Experimental results demonstrate that the proposed framework outperforms conventional deep learning baselines and enables more fine-grained discrimination between the two skin conditions.

1. 연구 배경

건선(Psoriasis)과 지루성 피부염(Seborrheic Dermatitis)은 홍반, 인설, 가려움 등 유사한 임상 양상을 보여 감별이 쉽지 않다. 특히 실제 진료 현장에서는 두 질환의 특징이 혼재된 sebopsoriasis가 관찰되어, 진단의 경계를 더욱 모호하게 만든다 [1,2]. 이러한 이유로 단순한 시진 소견이나 병변의 분포만으로는 두 질환을 안정적으로 구분하기 어렵고, 반복 관찰 및 보조적 진단 정보의 활용이 필요하다 [2].

일반적으로 상기 질환의 진단에는 피부확대경(dermoscopy, 트리코스코피)이 활용되어 왔으며, 건선에서는 red dots/globules, twisted loops, glomerular vessels 등이, 지루성 피부염에서는 arborizing 또는 atypical red vessels 등의 차별적 혈관 패턴이 일관되게 보고되어 왔다 [1]. 그러나 이러한 차이를 영상으로 지속적이고 정량적으로 포착하여 자동 분류로 연결하는 일은 조명, 촬영 각도, 표면 반사 등 영상 획득 환경의 변동성으로 인해 여전히 도전적인 과제로 남아 있다 [3]. 더 나아가, 병변이 두피에 국한된 경우에는 조직학적 감별 또한 쉽지 않다는 보고가 있어, 단일 모달 영상만으로는 진단에 한계가 있음을 시사한다 [2]. 최근에는 피부확대경(dermoscopy) 영상을 활용한 딥러닝 기반 분류기가 다수의 피부과 전문의를 능가하는 정확도를 보였다는 결과도 제시되었으나, 데이터의 표준화 및 모델의 일반화 가능성에 대해서는 여전히 추가적인 검증이 필요하다 [5]. 이러한 한계를 극복하기 위해 다양한 영상 기술들이 적용되고 있으며, 특히 멀티모달 영상 기반 분석은 기존 방법에 비해 우수한 성능을 보이는 것으로 보고되고 있다 [3,4].

이에 본 연구에서는 형광-편광-분광 영상 기반 멀티모달 분석을 기반으로 건선과 지루성 피부염을 정확하게 분류하기 위해, 채널별 특징을 Transformer 기반 특징 추출기를 통해 추출·통합하고, KAN(Kolmogorov–Arnold Networks) [6] 분류기를 이용하여 분류를 수행하는 Transformer-KAN-Based Fusion Framework 를 개발하였다.



그림 1. 정상 피부(a), 건선 피부(b), 지루성 피부염(c) 비교

2.연구 방법

본 연구는 자체적으로 구축한 분광평광 영상 시스템을 이용해 2020년부터 2023년까지 서울대학교병원에서 수집된 127건의 검사 세션을 대상으로 수행하였다. 이중 78건은 Psoriasis (건선), 49건은 Seborrheic Dermatitis (지루성 피부염)으로 구성되어 있다. 각 세션은 8개 파장에 대해 공편광 (co-polarized)과 교차 편광 (cross-polarized)로 촬영하여 세션당 16프레임의 Multi Spectral Image (MSI)를 획득하였다. 이 가운데 공편광 4채널과 교차 편광 4채널을 선별하고, 자기형광(uv, Autofluorescence) 1채널을 추가하여 총 9채널 입력으로 모델을 학습·평가하였다.

그림 2를 보면 알 수 있듯이, 두 개의 MSI 흐름에는 먼저 spectrum stack을 PCA(Principal Component Analysis)로 압축해 신호를 응집시키고 잡음을 완화한다. 이후 각 흐름에서 영상은 4x4 patch embedding을 거쳐 64차원 token sequence로 변환되며, 흐름 내부의 장·단거리 상관을 학습하기 위해 그림 3. (a)와 같은 Transformer block 4개를 적용한다. 세 개의 스트림은 여기서 서로 정보를 교환한다. 그 다음 각 스트림의 출력을 평균(Average)하여

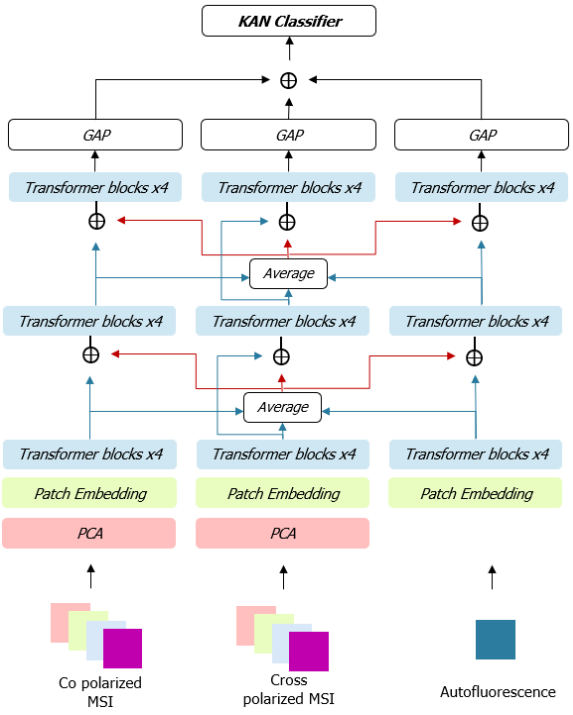


그림 2. Transformer-KAN 기반 융합 네트워크 구조

공통 context를 만들고, 이를 각 흐름 특징에 잔차 합(⊕) 형태로 주입한 뒤 다시 Transformer block 4개를 통과시킨다. 동일한 절차를 한 번 더 반복하여 상보 신호를 강화한다.

최종적으로 각 흐름의 sequence는 GAP(Global Component Analysis)으로 벡터화되고, 이 벡터들을 합하여 하나의 통합 표현을 만든다. 분류기는 이 통합 벡터를 입력으로 하는 KAN Classifier 헤드로 구성되며, 그림 3. (b)와 같이 DenseKAN(128) → LayerNorm→Dropout(0,1) → DenseKAN(64) → Dense(2, sigmoid) 순으로 두 질환을 판별한다. 학습은 binary focal loss (label smoothing 0.2)와 함께 Adam optimizer, 초기 학습률 1e-4, 지수 감쇠를 사용하였고, Tensorflow 2.13, Python 3.9 환경에서 RTX A5000 GPU를 활용하여 최대 150 epoch, 배치 크기 16으로 학습을 진행하였다. 성능 평가는 5-fold 교차검증을 통해 정확도, F1 score, ROC_AUC score 등을 기준으로 평가하였다.

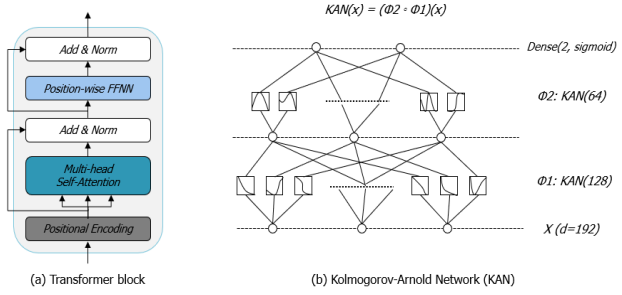


그림 3. Tansformer block 구조(a)와 KAN 구조(b)

3. 연구 결과

실험 결과, 제안된 모델은 표 1.과 같이 정확도 0.9024, F1 score 0.9004, ROC_AUC score 0.9398로 가장 뛰어난 성능을 기록하였다. 비교 대상으로 사용된 기존 모델(Vision-Transformer, Swin-Transformer, ResNet-50)은 모두 제안된 모델보다 낮은 성능을 보였다. 비교 대상 모델 대다수가 F1 score는 0.70대에 머물고, ROC_AUC도 0.32 ~ 0.59 범위로 제한적이었다. 특히 ROC_AUC에서의 큰 격차는 제안된 모델이 기존 범용 backbone들 대비 정확도와 강건성 (ROC_AUC)를 동시에 개선하였음을 보여주고 있다.

이러한 향상은 멀티모달 영상 입력으로 표면 반사를 억제하면서 상보 정보를 확보하고, 단계적 교차—모달 상호작용(average→residual add)으로 모달 정렬을 강화하였으며, KAN 분류기로 연속적·구간적 패턴을 부드럽게 근사한 설계에 기인한 것으로 파악할 수 있다.

Model	Accuracy	F1 score	ROC_AUC
ViT	0.7183	0.7081	0.5608
SwinT	0.6888	0.6888	0.3248
ResNet50	0.7105	0.6609	0.5853
Ours	***0.9024***	***0.9004***	***0.9398***

표 1. Our method vs 다른 딥러닝 알고리즘 성능 비교

4. 향후 계획

본 연구는 건선과 지루성 피부염의 분류를 위한 멀티모달영상기반 다채널 입력과 KAN 분류기의 결합이 임상적 분류 성능을 유의미하게 향상시킴을 확인하였다. 제안된 Transformer기반 교차-모달 상호작용 + KAN 헤드 구조는 향후 다양한 피부영상 및 광학 영상 분석 문제에서 범용적인 경량 딥러닝 프레임워크로 확장될 수 있으며, 스플라인 기저를 활용한 설명 가능성[6]과 높은 판별 성능을 동시에 갖춘 의료 AI 도구 개발의 기반이 될 것으로 기대된다.

향후 연구에서는 동일한 특징 추출 부분에서 MLP 헤드와 KAN 헤드를 직접 비교하는 소거 실험을 진행해, 데이터가 제한된 상황에서도 KAN이 보이는 데이터 효율성과 설명 가능성(스플라인 응답 시각화)을 정량적으로 확인할 예정이다. 또한 간단한 임계값 튜닝과 캘리브레이션을 적용해 실시간 감별이 가능한 시스템을 구축할 계획이다.

5. Acknowledgements

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Science, ICT & Future Planning (RS-2025-023055555) and this work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (No.RS-2024-00354020)

6. 참고 문헌

[1] G.W. Kim, *et al.*, "Dermoscopy can be useful in differentiating scalp psoriasis and seborrhoeic dermatitis," Acta Dermato-Venereologica, 91(4):431–435, 2011.

[2] J.H. Park, *et al.*, "Histopathological Differential Diagnosis of Psoriasis and Seborrheic Dermatitis of the Scalp," Annals of Dermatology, 28(4):427–432, 2016.

[3] M.A. Ilișanu, *et al.*, "Multispectral Imaging for Skin Diseases Assessment—State of the Art and Perspectives," Sensors, 23(9), 2023.

[4] C. Benvenuto-Andrade et al. "Differences Between Polarized Light Dermoscopy and Immersion Contact Dermoscopy for the Evaluation of Skin Lesions." *Arch Dermatol* (JAMA Dermatology), 2007

[5] A. Esteva, *et al.*, "Dermatologist-level classification of skin cancer with deep neural networks," Nature, 542:115–118, 2017.

[6] Z. Liu, *et al.*, "KAN: Kolmogorov-Arnold Networks," arXiv:2404.19756, 2024.

Poster-133

소형·저가형 Real-time PCR 시스템의 형광 신호 안정화를 위한 기준선 및 음영 보정

구슬빛나[1], 윤성훈[2,3],김종원[1*]

㈜ 바이오메듀스[1]

한림대학교 융합소프트웨어학과[2]

한림대학교 BIT융합연구소[3]

Fluorescence Signal Stabilization in a Compact and Low-cost Real-time PCR System via Baseline and Shading Corrections

Seulbitna Koo[1], Yunsung Hun[2,3], Jongwon Kim[1*]

Biomedux, Co., Ltd.

Department of Convergence Software, Hallym, Chunchon, Korea

Bio-IT Research Center, Hallym, Chunchon, Korea

*jwkim@biomedux.com

Abstract

Accurate fluorescence quantification is essential in real-time PCR. However, miniaturized low-cost PCR platforms often exhibit signal fluctuation and baseline drift due to optical misalignment and thermal non-uniformity. To mitigate these limitations, fluorescence data from a CMOS-based 25-well system were analyzed to evaluate baseline and shading correction strategies. Four baseline models (Fixed mean, Fixed linear, SPE mean, SPE linear) yielded nearly identical Ct standard deviations (difference ≤ 0.01), whereas Curve equalization reduced the Ct deviation by about 19% compared with Linear gain. The optimized correction strategy enhanced computational efficiency and Ct stability, providing an effective solution for portable real-time PCR applications

1. 연구 배경

실시간 중합효소연쇄반응(real-time PCR, RT-PCR)은 형광 신호를 실시간으로 모니터링하여 핵산 증폭 과정을 정량화하는 대표적인 분자진단 기술이다. 정확한 Ct 계산을 위해 상용 RT-PCR 장비는 baseline 및 shading 보정을 수행하며, 정밀 광학계와 자동 교정 기능, 주기적 캘리브레이션 키트를 통해 형광 신호의 안정성을 유지한다. 최근 현장진단(point-of-care, POC) 환경과 이동형 진단 시스템의 확산에 따라, 이러한 기능을 소형화·간소화한 저비용 RT-PCR 플랫폼이 활발히 개발되고 있다[1,2].

소형 RT-PCR 시스템은 POC 환경에서의 신속성과 경제성을 위해 설계되었으나, 열적·광학적 오차의 영향을 더 크게 받으며 정밀 교정 장치의 적용이 제한적이다. 이에 따라 하드웨어 보정보다는 소프트웨어 기반 형광 신호 안정화 알고리즘의 정밀도와 효율성이 진단 성능을 좌우한다.

형광 안정화를 위한 다양한 알고리즘이 제안되어 왔으며, 특히 증폭 효율을 고려한 baseline 보정 모델이 Ct 정확도 향상에 유효함이 보고되었다[3]. 또한 영상 기반 형광 측정에서는 조명 불균일성에 따른 형광 세기 왜곡을 최소화하기 위해 shading correction의 중요성이 강조되고 있다[4]. 한편 기존 연구들은 대부분 고정된 조명과 안정된 열 환경을 전제로 수행되어, POC용 소형 RT-PCR과 같이 광학적 변동이 큰 조건에서는 보정 효과가 다르게 나타날 수 있다.

본 연구에 사용된 CMOS 기반 RT-PCR 시스템은 필터휠 회전에 따른 미세한 광축 변화로 신호 불균형이 발생하므로, 이를 보정하기 위한 정교한 소프트웨어 접근이 요구된다[2]. 이에 CMOS 기반 25웰 RT-PCR 플랫폼에서 획득한 형광 데이터를 이용하여 기준선 보정(Baseline correction)과 음영 보정(Shading correction) 알고리즘을 비교·분석하고, 소형 RT-PCR 장비에서 형광 신호 안정화와 연산 효율을 동시에 확보할 수 있는 최적의 보정 조합을 제시하고자 하였다.

2.연구 방법

광 정량에서의 기준선 및 음영 보정 성능을 평가하기 위해 25웰(5×5 배열) 구조의 소형 실시간 PCR 시스템을 사용하였다. 광원은 white LED와 프레넬 렌즈로 구성되었고, 형광 신호는 Sony IMX298 CMOS 센서를 통해 취득하였다. 시스템에는 FAM, HEX, ROX, CY5 네 가지 채널을 갖춘 리니어 이동형 4채널 필터휠(EM/EX 일체형)이 장착되어 있으며, PCR 사이클 진행 동안 순차적으로 각 채널의 영상을 획득하였다. 본 실험에서는 Chlamydia trachomatis 검출에 대응하는 FAM 채널 영상을 분석에 사용하였다.

증폭 실험에는 C. trachomatis DNA(10^3–10^5 copies/μL)를 이용하였으며, 각 농도별로 5회 반복 수행하였다. 한 실험 내 25개의 웰에는 동일 농도의 시료를 주입하였고, PCR 프로토콜은 97 °C에서 10 s, 60 °C에서 20 s의 60 cycle로 구성하였다. 영상은 각 사이클의 annealing 단계에서 촬영하였으며, 노출 시간과 게인 조건은 일정하게 유지하였다. 각 웰의 ROI는 고정 좌표로 설정하여 평균 형광 세기(RFU, Relative Fluorescence Unit)를 계산하였다.

추가로 두 가지 기준 영상을 확보하였다. 첫째, PCR 완료 후의 plateau 영상은 웰 간 밝기 정규화를 위한 선형 이득(linear gain) 보정에 사용하였고, 둘째, 750 fmol FAM 형광판 영상은 조명 균일도 평가 및 장비 교정에 활용하였다.

획득된 형광 데이터는 다섯 단계의 정량 분석 절차를 통해 처리하였다.

(1)필터휠 이동과 함께 FAM 영상을 획득하고 ROI 평균 형광값을 산출하였다.

(2)기준선 보정 단계에서는 초기 3–14 cycle 구간의 형광

변동을 보정하기 위해 Fixed mean, Fixed linear, SPE mean, SPE linear 네 가지 모델을 비교하였다. SPE(Start Point of Exponential) 기법은 표준화 잔차 분석을 통해 지수 증폭 구간의 시작점을 탐지하고, 해당 구간 이전을 기준선으로 설정하였다.

(3) 음영 보정 단계에서는 웰 간 조명 불균일을 보정하기 위해 Linear gain과 Curve equalization 두 가지 방법을 적용하였다. Linear gain은 plateau 평균 밝기와 참조 형광 영상을 이용해 상대 세기를 정규화 하였으며, Curve equalization은 참조 웰(12번)과 타 웰 간 RFU 관계를 3차 다항식($y = ax^3 + bx^2 + cx$)으로 근사하여 비선형 응답을 보정하였다. 보정 함수는 10^5 copies 샘플의 5회 평균 곡선을 기준으로 계산하였다.

(4) 이후 보정된 형광 곡선으로부터 임계값(Threshold)을 1.0–2.5 범위(0.1 간격)에서 변화시키며 Ct 값을 계산하였다.

(5) 마지막으로 각 보정 조합별 Ct 표준편차(Ct SD)를 산출하여 신호 안정성 및 재현성을 평가하였다.

3. 연구 결과

그림 1은 네 가지 기준선 보정 모델(Fixed mean, Fixed linear, SPE mean, SPE linear)에 세 가지 음영 보정 이득(FAM, Plateau, Plateau-initial)을 적용했을 때의 평균 Ct 표준편차(Ct SD)를 비교한 결과이다.

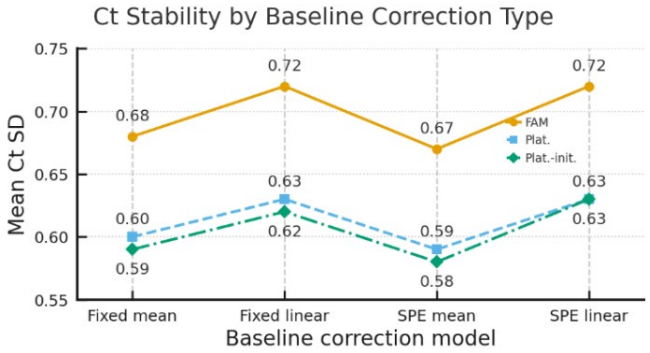


그림 1. 네 가지 기준선 보정 모델에 따른 Ct 표준편차 비교 결과

모든 조합에서 Ct SD 차이는 0.01 이하로 미미하였으며, Fixed mean과 SPE mean 모델이 가장 낮은 Ct SD(약 0.6 수준)를 보였다. 이는 baseline 보정 방식의 세부 차이보다 시스템의 광학적·열적 요인이 Ct 변동성에 더 큰 영향을 미친다는 것을 시사한다. 특히 3–14 cycle 평균을 사용하는 Fixed mean 방법은 SPE 기반 방식과 유사한 성능을 유지하면서 계산 효율이 높아, 소형 시스템에 적합한 baseline 보정 모델로 확인되었다.

또한, 세 가지 shading gain 비교 결과에서 FAM 형광판으로 계산한 gain보다 실제 증폭 영상의 plateau(58–60 cycle) 구간에서 계산한 gain이 더 낮은 Ct SD를 보였다.. 이러한 결과는 고정된 외부 reference보다 내부 증폭 결과를 이용한 보정이 소형 시스템에서 더 안정적인 교정 방법임을 시사한다.

그림 2는 임계값(Threshold)을 1.0–2.5 범위에서 변화시키며 Linear gain과 Curve equalization 보정의 Ct SD 변화를 비교한 그래프이다. 두 방식 모두 threshold 증가에 따라 Ct SD가 감소했으나, Curve equalization은 전 구간에서 더 낮은 값을 유지하며 Linear gain 대비 약 20% 낮은 Ct 변동성을 보였다. 특히 고농도(10^5 copies) 시료에서 Ct SD가 0.44에서 0.31로 감소하였다(표 1).

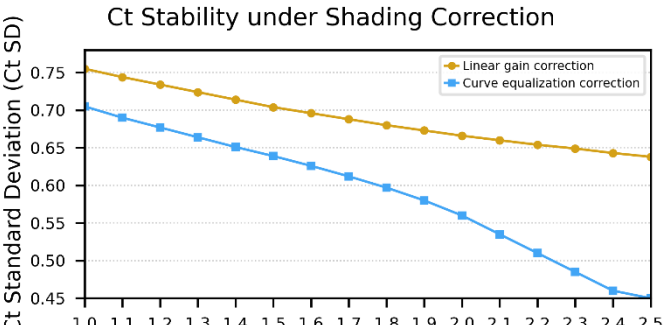


그림 2. 임계값(Threshold)에 따른 음영(Shading) 보정 방식별 Ct 표준편차(Ct SD) 변화.

표 1inear gain과 Curve equalization 보정 방식의 임계값(Threshold) 및 농도별 Ct 표준편차(Ct SD) 비교

Method	Threshold	Mean Ct SD	10^5 copies	10^4 copies	10^3 copies
Linear	1.6	0.57	0.44	0.56	0.71
Curve	2.3	0.46	0.31	0.43	0.65

Curve equalization은 각 웰의 형광 응답을 참조 웰과의 관계로 다항식으로 근사하여, 선형 보정으로 해결되지 않는 비선형 감도 차이를 보상한다. 적용 결과, 각 웰의 증폭 곡선이 거의 중첩되어 exponential phase 구간의 신호 분산이 감소하였으며, baseline drift와 shading error가 동시에 개선되었다. 이로 인해 Ct 산출의 표준편차가 감소하고, cycle threshold의 분포 폭이 좁아졌다.

결과적으로 Fixed mean baseline 보정과 Curve equalization 음영 보정의 조합이 Ct 변동성을 최소화하면서 계산 효율성을 유지하는 최적의 조합으로 확인되었다. 이는 CMOS 기반 소형 RT-PCR 시스템에서 내부 데이터만으로 형광 신호를 안정화할 수 있음을 보여준다.

5.참고 문헌

[1] M. Kim, S.-H. Yun, S.-H. Kim, and J.-D. Kim. "A compact real-time PCR system for point-of-care detection using a PCB-based disposable chip and open-platform CMOS camera." Sensors, Vol 25, No.10, p.3159, 2025

[2] S. B. Koo, Y. S. Kim, C. Y. Park, and D. J. Lee. "Compact camera fluorescence detector for parallel-light lens-based real-time PCR system." Sensors (Basel), Vol 22, No.21, p.8575, 2022

[3] L. Gong, S. Yao, Y. He, and C. Liu. "Robust and precise quantitative real-time polymerase chain reaction with an amplification efficiency-aware reaction kinetics model." Analytical Chemistry, Vol 95, No.4, p.1223–1234, 2023

[4] M. H. F. Wilkinson. "Shading correction and calibration in bacterial fluorescence measurement by image processing system." Computer Methods and Programs in Biomedicine, Vol 43, No.3–4, p.175–182, 1994

Poster-134

혈소판 제제의 정량적 스월링 분석을 위한 저비용 인공지능 기반 프레임워크 개발

황혜지[1], 홍승재[1], 남혜성[1], 고태식[1,2*]

[1]전북대학교 바이오메디컬공학부

[2]전북대학교 전자•정보공학부

Development of a Low-cost AI Framework for Quantitative Swirl Analysis in Platelet Concentrates

Hyeji Hwang[1], Seungjae Hong[1], Hyeseong Nam[1], Taesik Go[1,2*]

[1]Division of Biomedical Engineering, Jeonbuk National University, Korea

[2]Division of Electronics and Information Engineering, Jeonbuk National University, Korea

[*]tsgo@jbnu.ac.kr

Abstract

Platelet concentrates are critical for transfusion therapy, yet their storage quality is still evaluated subjectively through visual inspection of the swirling phenomenon. To establish an objective and low-cost alternative, we developed a smartphone-based imaging system integrated with an Arduino-controlled rotation device and analyzed captured videos using the deep learning optical-flow model Recurrent All-Pairs Field Transforms (RAFT). Dense motion fields were converted into swirl-strength (λ_ci) maps to quantify local rotational flow inside the platelet bag. The 95th-percentile λ_ci value of each frame (p95) represented swirl intensity, smoothed temporally with an exponential moving average. Across experiments, λ_ci distributions were consistent (mean ≈ 0.8, max = 7.48), demonstrating stable detection of micro-vortical motion under varying thresholds. These results suggest that combining RAFT-based optical flow analysis with inexpensive imaging hardware enables a quantitative and reproducible evaluation of platelet swirling, providing a promising foundation for automated platelet quality assessment.

1. 연구 배경

혈소판 제제는 출혈 환자 치료나 수술 후 회복 과정에서 필수적으로 사용되는 혈액 성분으로, 저장 중 품질 유지가 임상적 효율성과 안전성에 직결된다[1]. 혈소판의 저장 품질은 일반적으로 스월링(swirl)현상으로 평가되며, 이는 혈소판 부유액을 흔들었을 때 발생하는 유동성 변화를 통해 신선도를 간접적으로 판단하는 지표이다[1,2]. 스월링 강도가 높게 잘 유지된 혈소판 제제는 형태학적으로 원판형(discoid) 세포 구조를 유지하며, 수혈 후 혈소판 증가율(platelet recovery)이 높게 나타는 것으로 알려져 있다[1-3].

그러나 현재 임상 현장에서 이루어지는 스월링 평가는 전문 인력의 육안 관찰에 의존하고 있으며, 관찰자의 숙련도나 조명 조건 등에 따라 평가 결과가 달라지는 주관성 및 재현성 한계가 있다[4]. 이를 대체하기 위해 고속카메라 기반의 정량 분석 장치나 동적 광산란(Dynamic Light Scattering, DLS) 시스템이 연구되었으나, 이들 장비는 고가이며 설치가 복잡하여 일반 혈액원이나 병원에서 활용하기 어렵다[5].

이에 본 연구에서는 스마트폰 카메라와 라즈베리 파이 기반 하드웨어를 이용한 저비용 스월링 관찰 광학 장치를 개발하고, 이를 통해 획득한 영상을 AI 기반 알고리즘으로 분석하여 혈소판 제제의 신선도를 자동 평가하는 시스템을 제안한다. 이를 통해 임상 현장에서의 평가 표준화와 수혈 안전성 향상에 기여하고 향후 혈액 제제 품질 관리 자동화 시스템의 기초 기술로 발전시키는 것을 목표로 한다.

2. 연구 방법

2.1 하드웨어 구성

스월링 유도를 위해 SER0060 서보모터 기반 회전판(5-20rpm)을 설계하였으며, Raspberry Pi Pico H와 MTS-102 토글 스위치로 제어 회로를 구성하였다. 구조물은 PLA 소재로 3D 프린팅하여 스마트폰 거치대를 통합하여 촬영 일체형 구조로 설계하였다.

촬영 환경은 1080x1920 해상도, 프레임 속도 30 pfs로 설정하였고, 혈소판 백과 스마트폰 사이이 거리 15-20cm로 표준화하였다. 광원은 LED COB-1007을 사용하였으며, 15도 각도로 기울여 산란광을 형성하였다. 영상은 암실 조건에서 Galaxy S21 Ultra 후면 카메라의 프로 모드(W 렌즈)로 촬영하였다.

스월링 유도를 극대화하기 위해, 혈소판백의 y 축 중앙 양쪽을 자석으로 고정하는 벽 구조를 추가하였다. 벽의 하단 약 2 cm 구간은 개방하여 내용물이 통과할 수 있는 병목 형태를 형성하였으며. 이 구조적 개선으로 회전 시 와류가 한 쪽으로 집중되어, 스월링 현상이 영상에서 보다 뚜렷하게 관찰되도록 하였다.

2.2 영상 처리

촬영된 혈소판백 회전 영상 내에서 발생하는 미세한 유체 흐름을 정량적으로 측정하기 위해, 딥러닝 기반 Optical Flow 모델인 Recurrent All-Pairs Field Transforms (RAFT)를 사용하였다. RAFT는 모든 픽셀 쌍 간의 상호 상관(all-pairs correlation)을 반복적으로 계산하여, 기존 전통적 방식(Farneback, Lucas–Kanade 등)보다 훨씬 정밀하고 안정적인 흐름 벡터를 산출할 수 있다는 장점이 있다. 특히 혈소판백 내부와 같이 반사광, 미세 입자, 불균질한 조명 조건이 존재하는 환경에서도 픽셀 단위의 이동 벡터 (u,v)(u,v)(u,v)를 연속적이고 공간적으로 일관된 형태로 추정할 수 있어, 의료 영상 환경에 적합하다. 각 비디오의 연속된 프레임 쌍은 TorchVision의 사전학습된 RAFT-large 모델에 입력되어 Optical Flow 맵을 계산하였으며, 이를 통해 시간 축에 따른 혈소판 입자의 미세 운동을 벡터 필드 형태로 표현하였다.

이후, 각 픽셀의 흐름장으로부터 지역적 회전 성분을 추출하기 위해 속도 구배 텐서

J=[∂u/∂x,∂u/∂y;∂v/∂x,∂v/∂y]를 계산하였으며, 해당 행렬의 복소 고유값의 허수부 절댓값으로 정의되는 소용돌이 강도(swirl strength, λ_ci) 를 도출하였다. λ_ci는 전단(shear)이나 병진(translation) 성분을 제거하고 순수한 회전성만을 반영하기 때문에, 혈소판백 내부의 소용돌이 영역을 물리적으로 가장 잘 표현하는 지표로 사용되었다. 이렇게 계산된 λ_ci 맵은 각 프레임마다 정규화되어 원본 영상 위에 컬러 히트맵(JET colormap)으로 시각화되었으며, λ_ci의 크기가 큰 영역은 붉은색으로 표시되어 회전이 강하게 발생하는 구간을 직관적으로 확인할 수 있다.

정량적 분석을 위해 각 프레임에서 λ_ci 분포의 상위 5% (95th percentile) 값을 프레임 점수(p95) 로 정의하였다. 이 지표는 극값에 민감하지 않으면서도 실제 소용돌이가 존재하는 영역의 회전 강도를 반영하는 데 효과적이었다. 시간적 변동성을 줄이기 위해 지수이동평균(Exponential Moving Average, EMA)를 적용하여 프레임 간 점수를 평활화하였고, EMA 값이 사전에 설정한 임계값(Threshold, TH)을 초과하는 구간을 '소용돌이 감지(Swirl Detected)' 로 판정하였다. 이를 통해 시스템은 단일 프레임의 일시적 노이즈나 조명 변화에 영향을 받지 않고, 시간 축에서의 지속적 회전 패턴을 실시간으로 안정적으로 추적할 수 있었다. 최종적으로 사용자는 각 프레임의 λ_ci 히트맵을 통해 소용돌이의 위치와 강도를 직관적으로 확인함과 동시에, 자동 계산된 감지 결과(YES/NO)를 영상 상단의 상태표시 영역에서 즉시 확인할 수 있도록 구성하였다.

3. 연구 결과

3.1 하드웨어 작동 검증

제작된 회전 메커니즘은 5-20 rpm 범위에서 안정적으로 혈소판백을 회전시켰으며, 제어 회로 및 광원 시스템 모두 정상적으로 작동함을 확인하였다. 스마트폰 카메라(1080*1920, 30 fps)로 촬영한 영상에서는 혈소판백 내부의 입자들이 원형 흐름을 형성하며 스월링 현상이 육안으로 명확히 관찰되었다. 확보된 영상은 명암 대비와 입자 움직임이 뚜렷해, 향후 AI 영상 분석 모델 학습에 적합한 품질을 확보하였다.

3.2 RAFT 기반 Optical Flow 분석

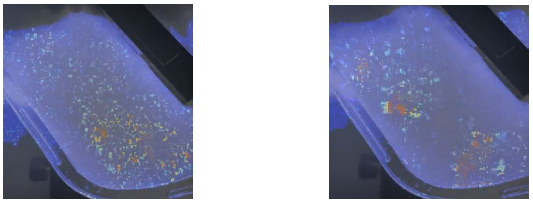


Figure 1. Swirl strength detection result as JET colormap for Exp 1 (left) and Exp 2 (right)

RAFT 기반 Optical Flow 분석을 통해 산출된 λ_ci(소용돌이 강도) 분포를 비교한 결과, 두 실험(Exp1, Exp2) 모두에서 혈소판백 내부의 회전 유동이 뚜렷하게 관찰되었다(Figure 1).

Exp #	F_Score	EMA	TH	Mean	Max
1	p95	0.2	0.35	***0.81***	7.48
2	p95	0.2	0.50	***0.78***	7.48

F_Score: Frame Score
EMA: Exponential Moving Average
TH: Threshold

Table 1. Quantitative comparison of swirl intensity metrics (λ_ci) under different threshold settings

실험 1에서는 λ_ci의 프레임별 상위 5% 평균(p95 mean)이 0.8124, 최대값(max λ_ci)이 7.4839로 나타났으며,
실험 2에서도 p95 mean 0.7830, 최대값 7.4839로 유사한 수준의 회전 강도가 확인되었다(Table 1).

이는 RAFT 모델이 영상 조건과 임계값 설정(TH)에 관계없이 혈소판 농축액 내 국소적인 미세 유동을 안정적으로 포착했음을 보여준다.

특히 λ_ci의 최대값이 두 실험에서 동일하게 나타난 것은, 혈소판액 중심부에서 지속적으로 발생하는 고강도 회전 영역이 일관되게 검출되었음을 의미한다.

한편, EMA 기반의 누적 곡선은 실험 1에서 상대적으로 빠른 상승을 보였으며, 이는 평균 회전 강도가 시간 축에서 지속적으로 유지되었음을 시사한다.

전반적으로 RAFT 기반 소용돌이 강도 계산은 조명, 회전 속도, ROI 설정의 변화에도 안정적으로 작동하며, 혈소판 농축액 내부의 유체 흐름을 정량적으로 평가하는 데 충분한 민감도와 일관성을 보였다.

4. Discussion

본 연구에서는 RAFT 기반 Optical Flow 분석을 통해 혈소판 제제 내 소용돌이 흐름을 정량적으로 계산하고, λ_ci(소용돌이 강도) 지표로 시각화하였다. 이를 통해 기존 육안 관찰에 의존하던 스월링 평가를 객관적이고 재현 가능한 형태로 정량화할 수 있음을 확인하였다.

RAFT 모델은 조명 반사나 입자 밀도 변화 등 비균질 환경에서도 안정적인 Optical Flow 추정을 보여주었으며, 두 실험에서 λ_ci의 평균 및 최대값이 유사하게 유지되어 하드웨어 조건이나 임계값 변화에 관계없이 일관된 회전 강도 분석이 가능함을 입증하였다. 또한 λ_ci 히트맵은 소용돌이의 위치와 크기를 직관적으로 표현하여, 혈소판 제제 내 유동 패턴을 시각적으로 확인할 수 있었다.

다만, 스마트폰 영상의 프레임 속도 제한과 색상 기반 ROI 설정으로 인해 세밀한 유동 분석에는 한계가 있으며, 후속 연구에서는 세그멘테이션 모델을 통한 자동 ROI 검출과 다양한 저장 조건의 혈소판 제제 적용을 통해 분석의 신뢰성을 높일 예정이다.

5. Acknowledgements

이 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 바이오•의료기술개발사업(RS-2023-00236157), 정보통신기획평가원-지역지능화혁신인재양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임(IITP-2025-RS-2024-00439292).

6. 참고 문헌

[1] Holme S. In vitro assays used in the evaluation of the quality of stored platelets: correlation with in vivo assays. *Transfusion and Apheresis Science*. 2008;39(2):161-165.

[2] Murphy S, Gardner FH. Platelet storage at 22°C: metabolic, morphologic, and functional studies. *J Clin Invest*. 1971;50(2):370–377.

[3] Aubron C, et al. Platelet storage duration and its clinical and transfusion outcomes: a systematic review. *Critical Care*. 2018;22(1):185.

[4] Tynngård N. Preparation, storage and quality control of platelet concentrates: a review. *Transfusion and Apheresis Science*. 2009;41(2):97–104.

[5] Chen F, et al. Quality assessment of the preparation and storage of leukocyte-depleted platelet concentrates. *Blood Transfusion and Hemotherapy*. 2024;47(12):123–134.

Poster-135

광음향현미경을 이용한 3차원 바이오프린팅 종양–혈관 모델의 혈관신생 반응 분석

조용재[1, #], 한석규[3, 4, #], 계현준[1], 유진희[1], 김준형[2], 김인기[1], 박성수[1, 2, 3, *], 박별리[1, 2, *]

성균관대학교 양자생명물리과학원[1]

성균관대학교 메타바이오헬스학과[2]

성균관대학교 기계공학과[3]

하버드 메디컬 의공학부[3]

Photoacoustic microscopy reveals deep angiogenic responses in 3D bioprinted tumor–vessel models

Yongjae Jo[1, #], Seokgyu Han[3, 4, #], Hyunjun Kye[1], Jinhee Yoo[1], Junhyung Kim[2], Inki Kim[1], Sungsu Park[1, 2, 3, *], and Byullee Park[1, 2, *]

Department of Biophysics, Institute of Quantum Biophysics, Sungkyunkwan University, Korea[1]

Departments of MetaBioHealth, Biopharmaceutical Convergence, Sungkyunkwan University, Korea[2]

School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Korea[3]

Division of Engineering in Medicine, Department of Medicine, Brigham and Women's Hospital, Harvard Medical School, USA[4]

[*] byullee@skku.edu

Abstract

Three-dimensional (3D) tumor–vessel constructs serve as physiologically relevant in vitro models for investigating tumor-driven angiogenesis and assessing therapeutic efficacy. Yet, conventional optical imaging techniques often suffer from shallow penetration and insufficient volumetric resolution, limiting quantitative analysis of these complex systems. To address these limitations, we implemented high-resolution photoacoustic microscopy (HR-PAM) for longitudinal monitoring and quantification of angiogenic progression within bioprinted tumor–vessel constructs subjected to drug exposure. In comparison with confocal microscopy, HR-PAM exhibited a 1.6-fold enhancement in the $1/e^2$ penetration depth, enabling visualization of vascular networks extending to approximately 1 mm. Utilizing this platform, we successfully captured and quantified tumor-induced angiogenesis and observed pronounced suppression following antibiotic treatment. This HR-PAM–based deep-tissue imaging framework provides comprehensive 3D insights into drug-mediated vascular responses, establishing a powerful tool for precise in vitro evaluation of therapeutic strategies and drug screening applications.

1. 연구 배경

종양의 성장과 전이를 유지하는 데 있어 혈관신생은 필수적인 생리학적 과정으로, 종양 조직에 산소와 영양분을 공급한다. 이에 따라 혈관신생을 억제하는 항혈관신생 요법은 암의 성장 억제를 위한 유망한 치료 전략으로 제시되고 있다. 기존의 in vivo 동물 모델은 생리학적으로 유사하다는 장점이 있으나, 처리량이 낮고 비용과 윤리적 제약이 크다. 반면 2차원(2D) 세포 배양 시스템은 단순하지만, 실제 종양 미세환경의 3차원적 상호작용을 충분히 재현하지 못한다. 이러한 한계를 극복하기 위해, 최근 3차원(3D) 바이오프린팅 종양–혈관 모델이 주목받고 있다. 그러나 기존의 형광 또는 공초점 현미경 기반 분석은 광 산란과 투과 깊이의 한계로 인해 심부 혈관 구조의 관찰이 어렵다. 따라서 본 연구에서는 고해상도 광음향현미경 (High-resolution photoacoustic microscopy, HR-PAM)을 이용하여 고심도 3D 영상 기반의 종양 유도 혈관신생을 관찰하고 약물 반응을 정량적으로 평가하고자 하였다.

2.연구 방법

바이오프린팅된 혈관 모델은 젤라틴–알지네이트–피브리노겐 기반 하이드로젤을 이용하여 제작하였으며, 혈관내피세(HUVECs)와 섬유아세포 (LFs)를 혼합한 바이오잉크를 사용하였다. 프린팅 후 37°C, 5% CO_2 조건에서 배양하여 모세혈관 형성을 유도하였고, 이후 U87 교모세포종 (tumor spheroid)을 바이오프린트 구조물에 결합하여 종양 유도 혈관신생 환경을 구축하였다. 광음향 영상은 자체 제작한 투과형 HR-PAM 시스템을 사용하였다. 532 nm 파장의 펄스 레이저 (20 kHz)와 중심주파수 19 MHz의 초음파 트랜스두서 이용해 3D 영상 데이터를 획득하였다.

대사활성을 기반으로 검푸를 포르마잔 결정을 형성하는 MTT를 이용해 살아있는 혈관과 암세포를 선택적으로 표지하였다. 포르마잔 결정은 532 nm에서 강한 흡수가 있어 강한 광음향 신호를 생성한다. PAM의 $1/e^2$ 침투 깊이는 공초점 현미경 대비 약 1.6배 향상 (431 μm vs. 262 μm) 되었으며, 최대 1 mm 깊이까지의 미세 혈관 구조를 고해상도로 관찰할 수 있었다. 항암제 반응 평가를 위해 Temozolomide (TMZ)와 Sunitinib (SU) 단독 및 병용 처리를 수행하였다. 각 조건별로 3일간 약물 반응을 유도한 뒤, MTT 염색 후 PAM 이미징을 수행하였다. PAM 데이터는 MATLAB 기반 3D 세그멘테이션을 통해 혈관 구조를 정량화 하였으며, 깊이별 혈관 밀도 및 길이 분포를 분석하였다.

3. 연구 결과

혈관 배양 시간에 따른 PAM 이미징 결과, 배양 4일차에는 희소하고 단절된 혈관 구조가 관찰되었으나, 6일 및 8일차에서는 모세혈관의 연결성과 길이가 점진적으로 증가하였다. 정량적 분석 결과, 평균 혈관 길이는 67.1 μm에서 158.5 μm

로 증가하였으며, 최대 길이 또한 1 mm 이상으로 확장되어 시간 의존적인 혈관 성숙을 확인하였다.

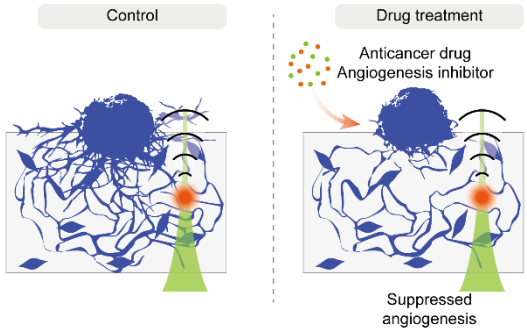


그림 1. 튜머-바이오프린팅 구조체 복합물에서의 광음향 이미징을 통한 혈관생성 정량 실험 모식도

약물 반응 실험에서는 대조군의 경우 종양 주위로 방사형 확장형 혈관망이 형성되었으나, SU 및 TMZ 단독군에서는 혈관 밀도와 분지 복잡도가 부분적으로 감소하였다. 특히 SU+TMZ 병용군에서 가장 강한 혈관신생 억제 효과가 나타났으며, PAM의 깊이별 분석에서 표층(0–200 μm)뿐 아니라 심부 (400–600 μm)에서도 유의한 혈관 밀도 감소가 관찰되었다. 이 결과는 PAM의 심부 영상 능력이 기존 광학 영상법으로는 불가능한 3차원 혈관 신호의 정량 평가를 가능하게 함을 입증한다. 또한 PAM 영상은 광시야 현미경 영상과 비교했을 때, 불투명한 하이드로젤 내에서도 뚜렷한 혈관 구조를 보여주었으며, 영상 병합 시 PAM이 혈관 경계를 명확히 구분함을 확인하였다.

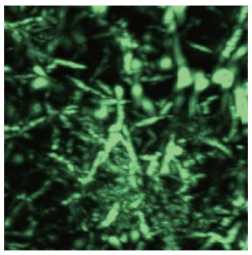


그림 2. MTT 염색된 바이오프린팅 혈관 구조체의 3차원 광음향 영상

본 연구에서 제시한 HR-PAM 기반 3D 종양–혈관 모델 분석 플랫폼은 비침습적, 고해상도, 심부 영상이 가능한 차세대 혈관신생 평가 기술로서, 기존의 광학 이미징이 갖는 한계를 효과적으로 극복하였다. 본 플랫폼은 항암제의 혈관 억제 효과를 깊이별로 정량화할 수 있으며, 향후 MTT 외의 생체적합 광흡수 염색제 도입 및 혈류 모사 시스템과 결합하여 기능적 이미징으로 확장 가능하다. 또한, 환자 유래 세포를 적용하면 개인 맞춤형 약물 반응 예측 및 대규모 신약 스크리닝 플랫폼으로 발전할 수 있다. 본 연구는 광음향 기반의 정밀 3D 약물 반응 평가의 새로운 가능성을 제시한다.

4. Acknowledgements

This work was supported by National Research Foundation (NRF) grants (RS−2023−00266110, RS−2024−00462912, RS−2023−00210682, RS-2023-00218543), funded by the Ministry of Science and ICT (MSIT) of the Korean government, and by the BK21 FOUR Project.

5.참고 문헌

[1] Jiang, X. et al. The role of microenvironment in tumor angiogenesis. Journal of Experimental & Clinical Cancer Research 39, 204 (2020).
[2] Lugano, R., Ramachandran, M. & Dimberg, A. Tumor angiogenesis: causes, consequences, challenges and opportunities. Cellular and Molecular Life Sciences: CMLS 77, 1745–1770 (2019).
[3] Deryugina, E. I. & Quigley, J. P. Tumor angiogenesis: MMP-mediated induction of intravasation- and metastasis-sustaining neovasculature. Matrix Biology 44–46, 94–112 (2015).
[4] Weis, S. M. & Cheresh, D. A. Tumor angiogenesis: molecular pathways and therapeutic targets. Nature Medicine 17, 1359–1370 (2011).
[5] El-Kenawi, A. E. & El-Remessy, A. B. Angiogenesis inhibitors in cancer therapy: mechanistic perspective on classification and treatment rationales. British Journal of Pharmacology 170, 712–729 (2013).
[6] Cook, K. M. & Figg, W. D. Angiogenesis Inhibitors: Current Strategies and Future Prospects. CA: A Cancer Journal for Clinicians 60, 222–243 (2010).
[7] Liu, Z.-L., Chen, H.-H., Zheng, L.-L., Sun, L.-P. & Shi, L. Angiogenic signaling pathways and anti-angiogenic therapy for cancer. Signal Transduction and Targeted Therapy 8, 1–39 (2023).
[8] Saaristo, A., Karpanen, T. & Alitalo, K. Mechanisms of angiogenesis and their use in the inhibition of tumor growth and metastasis. Oncogene 19, 6122–6129 (2000).
[9] Li, T., Kang, G., Wang, T. & Huang, H. Tumor angiogenesis and anti-angiogenic gene therapy for cancer (Review). Oncology Letters 16, 687–702 (2018).
[10] Kapałczyńska, M. et al. 2D and 3D cell cultures – a comparison of different types of cancer cell cultures. Archives of Medical Science : AMS 14, 910–919 (2018).

Poster-136

인지기능이 정상인 고령자의 수면무호흡증에 대한 fNIRS 및 PSG 동시 측정 연구

박창현[1], 심환욱[2], 이영민[2], 김창석[1,3], 이휘돈[1,3*]

부산대학교 인지메카트로닉스 공학과[1]

부산대학교병원 정신건강의학과[2]

부산대학교 컬러변조 초감각 인지기술 선도연구센터[3]

Simultaneous fNIRS and PSG Assessment of Sleep Apnea in Cognitively Normal Older Adults

Chang Hyun Park[1], Hwan Wook Shim[2], Young-Min Lee[2], Chang-Seok Kim[1,3], Hwidon Lee[1,3*]

1 Department of Cogno-Mechatronics Engineering, Pusan National University,Korea

2 Department of Psychiatry, Medical Research Institute, Pusan National University Hospital, Korea

3 Engineering Research Center for Color-Modulated Extra-Sensory Perception Technology, Pusan National University, Korea

(hwidonlee@pusan.ac.kr)

Abstract

Obstructive sleep apnea (OSA) is commonly observed in older adults and is associated with systemic hypoxemia and cognitive decline. However, conventional measures such as the apnea-hypopnea index (AHI) and peripheral oxygen saturation (SpO_2) may not accurately reflect cerebral oxygenation. Functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) offers a non-invasive method for real-time monitoring of regional cerebral oxygen saturation (rSO_2). In this study, cognitively normal older adults underwent simultaneous monitoring using fNIRS and polysomnography (PSG) to assess changes in cerebral and peripheral oxygenation during OSA events. The findings revealed physiological differences between cerebral and systemic oxygen responses, underscoring the clinical importance of direct cerebral oxygenation monitoring in evaluating hypoxia in older adults.

1. 연구 배경

수면은 신체적·정신적 회복을 위한 핵심 생리 작용으로, 인간의 건강과 삶의 질 유지에 필수적인 역할을 한다. 특히 노년층에서는 수면의 질이 건강 상태 전반과 밀접하게 연관되어 있으며, 수면장애는 고혈압, 당뇨병, 심혈관 질환과 같은 만성질환을 악화시킬 뿐 아니라, 인지 기능 저하, 우울증, 치매 등 신경정신과적 문제로 이어질 수 있다. 폐쇄성 수면무호흡증(Obstructive Sleep Apnea, OSA)은 노인에서 유병률이 높은 대표적인 수면장애로, 반복적인 상기도 폐쇄로 인한 호흡 정지가 수면의 질을 저하시킬 뿐 아니라 다양한 건강 문제를 유발한다. [1]

OSA는 수면 중 반복적인 저산소증과 재산소화를 동반하며, 이 과정에서 산화 스트레스, 염증 반응, 신경세포 손상, 세포 사멸 등의 병태생리학적 변화가 발생할 수 있다. 이러한 변화는 궁극적으로 인지 기능 저하와 같은 장기적 신경학적 합병증으로 이어질 수 있으므로, 수면 중 뇌의 산소포화도 변화를 정밀하게 관찰하는 것이 중요하다.[2]

기존에 OSA 진단에는 수면다원검사(PSG)가 사용되어 왔다. PSG는 다양한 생리신호를 측정함으로써 수면 구조 및 이상 사건을 정밀하게 분석할 수 있지만, 고비용·전문 인력 의존·비자연적 검사 환경 등의 제약이 존재한다. 특히 산소포화도는 대부분 말초 혈관에서 측정되며(SpO_2), 뇌 산소 상태(rSO_2)를 직접적으로 반영하지 못해 한계가 있다. 이에 따라 최근에는 뇌의 혈류역학적 변화를 비침습적으로 측정할 수 있는 근적외선 기능성 뇌영상(fNIRS)의 활용 가능성이 주목받고 있다.[3]

본 연구에서는 fNIRS와 PSG를 병행하여 수면무호흡증이 없는 노인과 수면무호흡증이 있는 노인 간의 수면 구조 및 뇌 산소화 변화 양상을 비교하였다. 이를 통해 노인 OSA의 병태생리학적 메커니즘, 특히 대뇌 저산소증, 자율조절 기능, 수면 관련 신경 활동 변화에 대한 이해를 심화시키고자 하였다.

2.연구 방법

본 연구에서는 피험자에게 PSG 장비와 fNIRS 장비를 동시에 부착한 상태로 수면 중 데이터를 수집하였다. 두 장비는 개별적으로 작동하며, PSG는 30초 평균데이터를 제공하고, fNIRS는 1Hz의 샘플링 속도로 데이터를 연속 기록하였다. 동일한 측정 시간 동안 fNIRS의 rSO_2 데이터가 PSG에 비해 더 많은 데이터 수를 갖게 되므로, 두 장비의 데이터 비교를 위해 샘플링 보정이 필요하였다. 이에 따라, fNIRS의 rSO_2 데이터를 30초 단위로 평균 처리하여, 30초 간격으로 기록되는 PSG 데이터와의 비교 분석이 가능하도록 정규화하였다.

데이터 분석의 신뢰성을 높이기 위해 세 가지 유형의 제외 기준을 적용하였다.

수면무호흡이 대뇌 혈류역학에 미치는 영향을 평가하기 위해, PSG에서 측정된 수면 단계, 무호흡저호흡지수(AHI), 말초 산소포화도(SpO_2)와 fNIRS 기반 rSO_2 데이터를 사용하였다. rSO_2는 좌우 대뇌를 구분하지 않고 각 피험자별 평균값을 산출하여 분석에 활용하였다.

통계 분석에는 그룹 간 평균 비교를 위한 독립표본 t-검정(t-test), 수면지표와 혈류역학 지표 간 선형 관계를 확인하기 위한 단순 선형회귀분석 실시하였다. 모든 통계 처리는 SPSS Statistics 27 (IBM Corporation, USA)을 사용하여 수행하였다. 윤리적 승인은 부산대학교병원 기관생명윤리위원회(IRB No. 2209-016-119)로부터 받았으며, 모든 참여자 또는 그들의 법적 보호자로부터 서면 동의서를 받았습니다.

3. 연구 결과

fNIRS 로 측정한 rSO2와 수면다원검사로 측정한 SpO2의 주요값들과 수면무호흡을 나타내는 다양한 지표들의 상관관계를 분석하기 위해 회귀분석을 진행하였고 해당

결과는 표2에 정리 되어있다. 표2는 수면무호흡과 저호흡의 반복도를 표현하는 index 값, 전체 수면시간에서 무호흡, 저호흡이 차지하는 비율을 표현하는 rate 값과 Mean rSO_2, Min SpO_2 그리고 Mean SpO_2 사이의 상관관계를 보여준다. 말단 산소포화도 수치의 최소값인 Min SpO2는 모든 무호흡, 저호흡 지표와 유의미한 상관관계를 보이는 것을 확인할 수 있었으며, 평균값인 Mean SpO_2는 무호흡과는 유의미한 상관관계가 없었지만 저호흡과 상관관계가 있음을 확인하였다. 그러나 fNI를 이마에 부착하여 직접적으로 뇌 혈류 산소포화도를 측정한 값의 평균인 Mean rSO_2는 무호흡과 관련된 지표와는 유의미한 상관관계를 확인할 수 있었으나 저호흡과 관련된 지표들과는 상관관계를 보이지 않았다. 이는 SpO_2가 전신적인 산소포화도 변화를 반영하지만, 뇌의 산소포화도 변화와는 일치하지 않을 수 있음을 나타낸다. 따라서 fNIRS를 통해 뇌의 산소포화도를 직접적으로 측정함으로써, 수면 호흡 장애가 뇌에 미치는 영향을 보다 직접적으로 측정할 수 있다는 장점을 가진다. 이는 뇌의 건강 상태를 모니터링하고, 수면 호흡 장애 뿐만 아니라 수면 중 다양한 요소에 의한 혈역학적 변화를 연구하는데 중요한 정보를 제공할 수 있음을 보여준다.

표 1 연구 참가자의 인구통계학적 특성

Demographic	Control (n=9)	OSA (n=13)	p-value
Age (year)	72.56 ± 6.37	72.46 ± 4.14	0.970
Female, n (%)	7 (77.78)	8 (61.54)	0.421
BMI, (kg/m^2)	23.05 ± 2.53	22.29 ± 2.51	0.480
Hypertension, n (%)	4 (44.44)	6 (46.15)	0.937
Diabetes, n (%)	1 (11.11)	4 (30.77)	0.279
Heart disease, n (%)	2 (22.22)	2 (15.39)	0.683
Hyperlipidemia, n (%)	2 (22.22)	4 (30.77)	0.658
STOP-Bang	1.33 ± 0.71	1.92 ± 0.76	0.081
PSQI	8.67 ± 4.03	9.08 ± 3.88	0.813
AI (/hr)	15.81 ± 6.31	25.04 ± 10.87	0.033*
PLMS (/hr)	3.82 ± 11.47	1.83 ± 5.92	0.598
Snoring (%)	11.58 ± 18.34	11.27 ± 13.47	0.964
AHI (/hr)	6.76 ± 4.14	31.77 ± 14.58	0.000**
N1 (%)	20.68 ± 8.01	27.12 ± 11.03	0.150
N2 (%)	44.64 ± 10.58	44.85 ± 8.68	0.961
N3 (%)	19.28 ± 9.54	14.40 ± 9.04	0.238
REM (%)	15.39 ± 8.81	13.64 ± 6.77	0.603
WASO (%)	24.48 ± 21.33	18.35 ± 14.21	0.465
Sleep efficiency (%)	70.89 ± 21.28	78.53 ± 13.89	0.362
Sleep latency (Min)	31.76 ± 42.46	17.57 ± 14.18	0.273
Rem latency (min)	150.25 ± 69.57	132.81 ± 72.22	0.593
TST (min)	299.06 ± 94.45	317.67 ± 46.70	0.596
TIB (min)	420.44 ± 29.04	404.97 ± 43.55	0.364
BPM	60.54 ± 7.01	64.25 ± 9.66	0.337

BMI, body mass index; PSQI, Pittsburgh sleep quality index; AI, arousal index; PLMS, periodic limb movement of sleep; AHI, apnea-hypopnea index; WASO, wake after sleep onset; TST, total sleep time; TIB, time in bed; BPM, beats per minute

표2 OSA 지표와 rSO_2·SpO_2 간의 단순선형회귀분석 결과

	Mean rSO2	Min SpO2	Mean SpO2
AHI	-0.52* (0.012)	-0.74** (0.000)	-0.35 (0.106)
Apnea index	-0.47* (0.026)	-0.60** (0.003)	-0.05 (0.818)
Hypopnea index	-0.27 (0.227)	-0.47* (0.024)	-0.46* (0.026)
OSA rate	-0.48* (0.0246)	-0.75** (0.000)	-0.21 (0.357)
Apnea rate	-0.43* (0.047)	-0.59** (0.004)	0.01 (0.972)
Hypopnea rate	-0.25 (0.268)	-0.54** (0.010)	-0.43* (0.041)
CT 90	-0.40 (0.063)	-0.78** (0.000)	-0.65** (0.001)
Apnea-Hypopnea index (Under 90)	-0.47* (0.029)	-0.74** (0.000)	-0.51* (0.016)
Apnea index (Under 90)	-0.49* (0.021)	-0.68** (0.001)	-0.16 (0.476)
Hypopnea index under (Under 90)	-0.25 (0.254)	-0.48* (0.023)	-0.58** (0.005)

* = p-value < 0.05, ** = p-value < 0.01
OSA rate, the ratio of the duration of apnea-hypopnea to the total sleep time; Apnea rate, the ratio of the duration of apnea to the total sleep time; Hypopnea rate, the ratio of the duration of apnea to the total sleep time; Mean, overall average of measurements taken during sleep; Min, minimum value of measurements taken during sleep

4. Acknowledgements

본 연구는 Korea Health Technology R&D Project through the Korea Health Industry Development Institute (KHIDI) 과제와 National Research Foundation of Korea (NRF) 과제의 지원을 받아 수행하였음. (HR20C0026, NRF-RS-2021-NR060086)

5.참고 문헌

[1] Peppard, P. E., et al. Increased Prevalence of Sleep-Disordered Breathing in Adults. Am J Epidemiol 177(9), 1006–1014 (2013).
[2] Osorio, R. S., Martínez-García, M. Á. & Rapoport, D. M. Sleep apnoea in older people: a great challenge for the future. European Respiratory Journal 59(4), 2101649 (2022).
[3] Olopade, Christopher O., et al. "Noninvasive determination of brain tissue oxygenation during sleep in obstructive sleep apnea: a near-infrared spectroscopic approach." Sleep 30(12), 1747-1755 (2007)

Poster-137

치아 구조 결함의 조기 진단을 위한 실시간 구강 광학 영상 시스템

김하영[1*], 전만식[1], 김지현[1]

경북대학교 전자전기공학부[1]

Real-time intra-oral optical imaging system for diagnosis of early dental structural defects

Hayoung Kim[1*], Mansik Jeon[1], Jeehyun Kim[1]

School of Electronic and Electrical Engineering, College of IT Engineering, Kyungpook National University, Korea

[*]hayoung1101@knu.ac.kr

Abstract

Dental hard tissue often develops micro-cracks or mild cervical abrasion that remain undetectable by conventional methods. To overcome this limitation, we developed a handheld optical coherence tomography (OCT) system optimized for intra-oral imaging. The system integrates a MEMS-based compact scanner with a Z-shaped optical path, achieving axial and lateral resolutions of 6 μm and 35 μm. Subsurface imaging revealed internal cracks beneath restorations and quantitatively visualized deep and mild cervical abrasion invisible to visual or radiographic inspection. These results demonstrate that the proposed system enables non-invasive, real-time detection of early dental lesions, providing a practical platform for chairside diagnostics and digital dentistry.

1. 연구 배경

최근 치과 진단 기술은 시진과 방사선 영상에 의존하던 기존 방식에서 벗어나, 조직 내부를 비침습적으로 관찰할 수 있는 고해상도 광학 영상 기술로 발전하고 있다 [1,2]. 그러나 치아 경조직은 복잡한 굴절 특성과 높은 반사율로 인해 내부 결함을 탐지하기 어렵고, 이는 수복물 내부의 미세 균열이나 치경부마모증과 같은 초기 병변의 조기 진단을 제한한다 [3]. 이러한 미세 결함은 외관상 변화가 거의 없더라도 내부 구조의 연속성을 손상시켜 치아 파절이나 수복물 탈락으로 이어질 수 있으며, 진단 시기를 놓칠 경우 치료 예후에도 부정적인 영향을 미친다 [4]. 그러나 기존의 시진이나 방사선 영상은 표면 관찰에 국한되어 병변의 깊이와 형태를 정량적으로 평가하기 어렵다.

이러한 한계를 극복하기 위한 대안으로 광간섭단층촬영(Optical Coherence Tomography, OCT) 기술이 주목받고 있다 [5,6]. OCT는 근적외선 간섭 신호를 이용해 조직 내부의 반사 특성을 깊이 방향으로 재구성하는 비침습적 고해상도 영상 기법으로, 방사선 노출 없이 미세 구조를 실시간으로 영상화할 수 있다[7]. 특히 치과 분야에서는 법랑질–상아질 경계 (DEJ), 수복물 하부 결함, 표면 마모 및 미세균열 등 다양한 병변을 정량적으로 분석할 수 있어 기존 진단 기법의 한계를 보완할 수 있다[8-10].

본 연구에서는 이러한 OCT 기술을 실제 임상 환경에서도 손쉽게 적용할 수 있도록, 핸드헬드 형태의 치과용 OCT 시스템을 개발하였다. 제안된 장치는 MEMS 기반 스캐닝 모듈과 Z형 광학 설계를 통해 소형화 및 광축 안정성을 확보하였으며, 6 μm의 축방 해상도와 35 μm의 측방 해상도를 구현하여 구강 내에서도 DEJ와 미세 결함을 명확히 구분할 수 있다. 프로브는 상용 구강 스캐너 형태를 모사하여 임상 친화적으로 설계되었고, GPU 기반 실시간 영상처리를 통해 임상 환경에서도 즉각적인 단층 영상 및 정량 분석이 가능하다.

이를 통해 제안된 시스템은 비침습적이고 신뢰성 높은 치과 진단 도구로서, 임상 현장에서의 조기 병변 평가 및 치료 계획 수립에 활용될 수 있음을 기대한다.

2. 연구 방법

본 연구에서 개발한 핸드헬드 치과 OCT 시스템은 중심파장 840 nm, 대역폭 50 nm의 SLED(Exalos, Switzerland)를 광원으로 사용하였다. 광원에서 나온 빛은 2×2 파이버 커플러를 통해 기준단과 시료단으로 분리되며, 시료단에는 MEMS 스캐너(A8L2.2-5000, Mirrorcle Tech, USA)와 초점거리 150 mm 렌즈로 구성된 소형 광학 모듈이 장착되었다. 광학 경로는 Z자형으로 설계되어 구강 내 접근성을 높였으며, 시스템의 축방 해상도는 약 6 μm, 측방 해상도는 약 35 μm로 측정되었다.

프로브는 상용 구강 스캐너(i-Tero 5D)의 형태를 참고해 설계되었으며, 전체 크기는 317.9 mm × 41.0 mm × 68.6 mm로 실제 임상 환경에서 사용하기에 적합한 형태로 제작되었다.

임상 실험은 서로 다른 성인 피험자를 대상으로 진행되었다. 한 피험자에서는 상악 구치부의 금속-세라믹 수복물 내부 균열이 의심되는 부위를 촬영하였으며, 다른 피험자에서는 깊은 V자형 및 완만한 치경부마모 부위를 각각 영상화하였다. 모든 영상은 비접촉 방식으로 획득되었고, GPU 기반 병렬처리를 통해 실시간으로 단층(B-scan) 및 en-face 영상으로 재구성하였다.

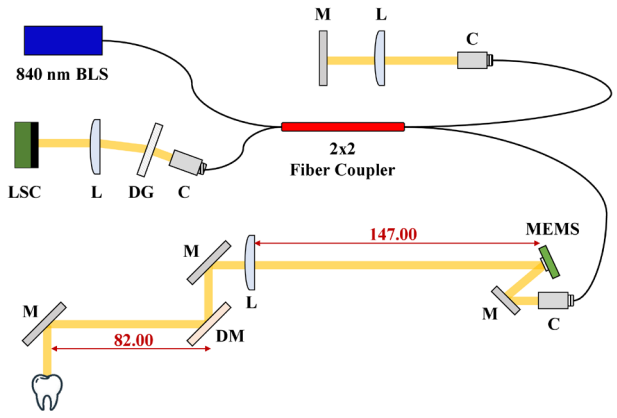


그림 1. MEMS 스캐너와 Z형 광경로를 통합한 소형 고해상도 치과용 핸드헬드 OCT 시스템의 광학 구성도

3. 연구 결과

본 연구에서 개발한 핸드헬드 OCT 시스템은 MEMS 기반 스캐닝 모듈과 GPU 병렬 영상처리 구조를 결합하여, 실제 구강 내 환경에서도 안정적인 고해상도 단층 영상을 실시간으로 획득할 수 있었다.

보철물 내부 균열의 영상 결과는 그림 2에 나타내었다. en-face 영상에서는 표면 일부에서 미세한 불연속 영역이 관찰되어 균열의 존재가 간접적으로 확인되었으며, 단층영상에서는 그 하부에 위치한 구조적 손상이 명확히 드러났다. (b) 영상에서는 표면이 일부 함몰된 형태로 관찰되었으나, (c)와 (d)에서는 외관상 결함이 거의 보이지 않음에도 내부에서 DEJ 경계를 따라 확장된 미세 균열이 뚜렷하게 확인되었다. 이러한 결과는 겉으로는 정상처럼 보이지만 내부에 균열이 존재하는 보철물의 잠재적 손상을 OCT로 시각화한 것으로, 기존 방사선 영상이나 시진으로는 검출이 어려운 비표면성 구조 결함(subsurface crack) 을 비침습적으로 진단할 수 있음을 보여준다.

치경부마모증의 형태별 영상 결과는 그림 3에 제시하였다. 깊은 V자형 병변의 경우, 단층 영상에서 법랑질 손상이 상아질층까지 침투한 형태가 뚜렷하게 관찰되었다. 완만한 형태의 경미 마모증은 육안이나 탐침 검사 등 기존 방법으로는 식별이 불가능했음에도, OCT 영상에서는 표면 반사율의 국소적 저하와 경계면의 미세 굴곡이 명확히 나타났다. 이러한 결과는 본 시스템이 임상적으로 '보이지 않는' 조기 병변을 비침습적으로 탐지할 수 있음을 입증한 사례로, OCT의 조기 진단 잠재력을 뚜렷하게 보여준다.

A-scan 기반 정량 분석 결과, 깊은 마모 부위(D_1)는 2289.1 um, 완만한 마모 부위(D_2)는 1379.5 um로 측정되었다. 이는 병변의 깊이와 반사 특성 간의 상관성을 정량적으로 규명한 것으로, OCT 신호 분석이 병변의 진행 단계를 평가하는 객관적 진단 지표로 활용될 수 있음을 시사한다.

결론적으로, 제안된 핸드헬드 치과 OCT 시스템은 보철물 내부 균열과 치경부마모증을 모두 정밀하게 영상화할 수 있으며, 특히 기존 방식으로는 진단이 어려운 경미한 치경부마모증의 조기 탐지를 가능하게 한 임상 적용 사례로 의의가 있다. 본 시스템은 광학 정렬 안정성, 영상 처리 효율, 임상 접근성을 동시에 확보한 점에서 기존 실험실 기반 OCT 장비와 뚜렷이 구별된다. 또한 치과용 구강 스캐너 형태의 프로브를 통해 임상 workflow에 자연스럽게 통합될 수 있어, 향후 실시간 진단 및 치료 의사결정 지원 도구로 발전할 가능성이 크다.

향후 다양한 치과 질환의 구조적 변화 분석 및 장기 추적 관찰에도 적용 가능성이 높으며, 본 시스템은 향후 비침습적 치과 진단 및 수복물 상태 모니터링을 위한 실용적 광학 영상 플랫폼으로 확장될 수 있을 것으로 기대된다.

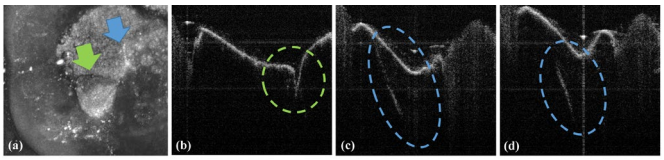


그림 2. 치아 보철 내부 크랙의 OCT 영상 결과. (a) en-face 영상, (b–d) 단면(B-scan) 영상으로, 보철 내부의 균열 부위(화살표 및 점선 표시)가 깊이 방향으로 확장되는 양상을 확인할 수 있다.

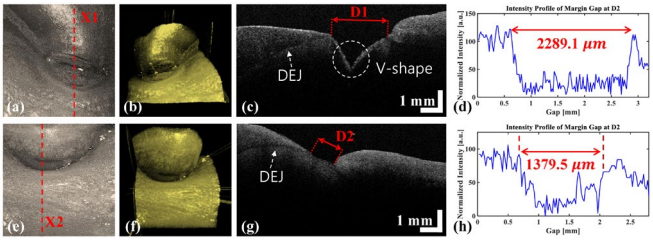


그림 3. 치경부마모 형태별 OCT 영상 결과. (a–d) 깊은 V자형 치경부마모의 OCT 결과: (a) en-face 영상, (b) 3차원 영상, (c) B-scan 영상, (d) A-scan 프로파일; (e–h) 완만한 치경부마모의 OCT 결과: (e) en-face 영상, (f) 3차원 영상, (g) 단면(B-scan) 영상, (h) A-scan 프로파일

4. Acknowledgements

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-지역지능화혁신인재양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임(IITP-2025-RS-2022-00156389)

5. 참고 문헌

[1] Schneider, Hartmut, et al. "Dental applications of optical coherence tomography (OCT) in cariology." Applied Sciences 7.5 (2017): 472.

[2] Shimada, Yasushi, et al. "Application of optical coherence tomography (OCT) for diagnosis of caries, cracks, and defects of restorations." Current oral health reports 2.2 (2015): 73-80.

[3] Zidane, Bassam. "Recent advances in the diagnosis of enamel cracks: a narrative review." Diagnostics 12.8 (2022): 2027.

[4] Kothari, Vishaka, et al. "Systematic Review on Toothbrushing and Cervical Abrasion: A Comprehensive Analysis of the Evidence." Journal of Pioneering Medical Sciences 14 (2025): 52-59.

[5] Hsieh, Yao-Sheng, et al. "Dental optical coherence tomography." Sensors 13.7 (2013): 8928-8949.

[6] Machoy, Monika, et al. "The use of optical coherence tomography in dental diagnostics: a state-of-the-art review." Journal of healthcare engineering 2017.1 (2017): 7560645.

[7] Fercher, Adolf F., et al. "Optical coherence tomography-principles and applications." Reports on progress in physics 66.2 (2003): 239.

[8 Stănuşi, Andreea, et al. "Morphological and optical coherence tomography aspects of non-carious cervical lesions." Journal of Personalized Medicine 13.5 (2023): 772.

[9] Hovander, Daniel, et al. "Optical coherence tomography evaluation of deep dentin crack removal techniques." JADA Foundational Science 1 (2022): 100012.

[10] Kim, Yoonseok, et al. "Non-invasive optical coherence tomography data-based quantitative algorithm for the assessment of residual adhesive on bracket-removed dental surface." Sensors 21.14 (2021): 4670.

Poster-138

파장가변레이저 광간섭단층 이미지 기반 치아 상태에 따른 치아 우식 진단

김보성[1], 전만식[1*]

경북대학교 전자전기공학부[1]

Dental caries diagnosis based on swept source optical coherence tomography

Bosung Kim[1], Mansik Jeon[1*]

School of Electronic and Electrical Engineering, Kyungpook National University

*msjeon@knu.ac.kr

Abstract

Dental caries is a common oral disease worldwide, starting with early enamel demineralization and progressing, making early detection key. However, traditional methods like X-rays and fluorescence have limits such as radiation risks, low resolution, and subjective checks, so optical coherence tomography (OCT) has emerged as a non-invasive alternative. This study evaluated the accuracy of swept source-OCT(SS-OCT) for detecting caries lesions under wet/dry tooth conditions. We used 21 extracted human teeth, imaged them first in wet state, then re-imaged the same spots after air-drying at room temperature (at 1-4 hour intervals and after 24 hours). We classified lesions based on remaining ratio (distance from lesion end to DEJ / distance from surface to DEJ * 100) using ICDAS codes, and validated with histological checks. As a result, in wet conditions, 13/21 accurate (8 misclassified); in dry conditions, 14/21 accurate (7 misclassified, 2 common). Drying turned 6 misclassifications accurate but caused 5 new ones, showing a trend of overestimating lesion depth.

1. 연구 배경

치아 우식은 전 세계 인구에게 광법위하게 영향을 미치는 대표적 구강 질환으로, 세계보건기구(WHO)에 따르면 성인의 90% 이상이 평생 동안 적어도 한 번 이상 경험한다. 우식 초기에는 법랑질의 탈석회화(decalcification)로 시작되어, 진행될수록 상아질과 치수까지 침투한다. 이러한 진행이 방치되면 통증과 기능 저하를 넘어 치아 상실로 이어질 수 있고, 심한 경우에는 전신 감염의 위험까지 높아진다. 따라서 조기 진단이 치료의 핵심으로, 초기 단계에서 발견하면 최소 침습 치료로 회복 가능성이 높아지지만, 반대로 지연되면 복잡한 근관 치료나 발치와 같은 침습적인 처치가 불가피하다[1].

그럼에도 불구하고, 현재 임상에서 널리 사용되는 진단 방법에는 여러 한계점이 존재한다. 방사선을 이용한 X-선 촬영은 표준화된 절차와 높은 접근성 덕분에 널리 활용되지만, 반복 노출에 따른 방사선 위험이 상존한다는 점에서 어린이와 임산부에게는 제약이 따른다. 또한, 초기 우식 병변은 X-선으로 진단하기에는 해상도가 낮아 식별이 어렵고 인접 구조의 중첩으로 인해 정확도가 떨어질 수 있다. 형광 기반 진단이나 시각적 검사는 검사자 경험에 따라 좌우되기 쉬우며, 병변의 깊이나 진행 정도를 정량적으로 파악하기 어렵다는 점에서 한계가 드러난다[2]. 이러한 이유로, 방사선 노출 없이 반복 측정이 가능하고 초기 미세 변화를 높은 해상도로 포착할 수 있으며 병변의 진행도를 정량화 할 수 있는 비 침습적이고 고 정밀 이미징 기술의 필요성이 꾸준히 제기되어 왔다.

Optical coherence tomography(OCT)는 이러한 대안으로 주목받고 있다. OCT는 근적외선 광원을 이용한 광학 간섭계 원리를 기반으로, 생체 조직의 단층 이미지를 실시간으로 생성한다[3]. 해상도는 1~15 μm으로 X-선보다 우수하며 방사선 없이 안전하다[4]. OCT는 안과에서 가장 널리 사용되는 기술로, 망막 질환 진단에 필수적이며, 피부과, 심장학 등 의료 분야와 반도체, 디스플레이, 용접 등 산업 분야에서도 활용되어 다양한 분야에서 기술적 신뢰성을 입증한다. 치과 분야에서 OCT는 치아 법랑질, 상아질의 미세 변화를 시각 화하며, 우식 병변의 깊이와 범위를 정량적으로 평가할 수 있다.

그러나 치아의 습윤 및 건조 상태가 OCT 영상에서 치아의 광학적 특성에 영향을 미쳐 검출 정확성을 저하시킬 수 있다. 본 연구는 OCT를 활용해 치아 습윤/건조 상태에 따른 우식 병변 변화를 촬영하고, 이를 조직학적 검사로 검증하여 치아 수분 상태 별 영상 정확성을 평가하는 것이다.

2.연구 방법

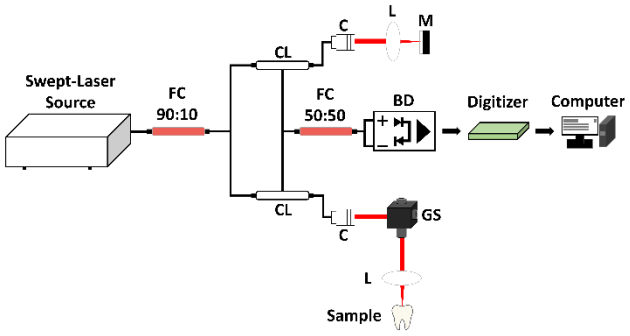


그림 1. SS-OCT 계략도. BD, balanced detector; C, collimator; CL, circulator; FC, fiber coupler; L, lens; M, mirror

본 연구에서는 총 21개의 발치 된 인간 치아를 수집하였다. 모든 치아는 초기 습윤 상태를 유지하기 위해 생리식염수(0.9% NaCl 용액)에 담가 보관하였다. 수집된 치아 중 신선한 치아(발치 후 1주일 이내)는 5개, 오래된 치아(발치 후 1주 이상 경과)는 16개였다. 깨지거나 레진 충전물이 있는 치아는 연구에서 제외하였다.

치아의 우식 병변 검출을 위해 본 연구에서는 중심 파장 1300 nm, 스위프 속도 400 kHz, 이미징 깊이 범위 3 mm인 스웹 레이저 이미징 소스(SL134051, Thorlabs, USA)를 광원으로 한 swept source-OCT(SS-OCT)를 사용하였다. SS-OCT의 구성은 그림 1. 과 같다. 촬영 전 치아 표면의

물기를 제거하였으며, 이는 표면 물기로 인한 반사 신호를 최소화하여 OCT 이미지의 품질을 일정하게 유지하기 위함이다. 촬영 부위 선정은 치아의 전체 영역을 스캔한 후, ICDAS(International Caries Detection and Assessment System) 기준으로 가장 높은 코드의 우식 병변 부위를 기준으로 하였다. 선택된 부위는 그림 2. 에서와 같이 Dino-Lite 디지털 현미경으로 촬영한 치아 표면 사진에 OCT 스캔 라인을 표시하였다.

초기 습윤 상태에서 병변 위치에서의 단면 이미지를 획득한 후, 치아를 25 °C 실온에서 공기 건조하였다. 건조는 시간 경과에 따라 1시간 간격으로 4시간까지 진행하였으며, 추가로 24시간 후 최종 촬영을 실시하였다. 각 시간대별로 동일 부위를 재 촬영하여 우식 영역의 깊이 변화를 관찰하였다.

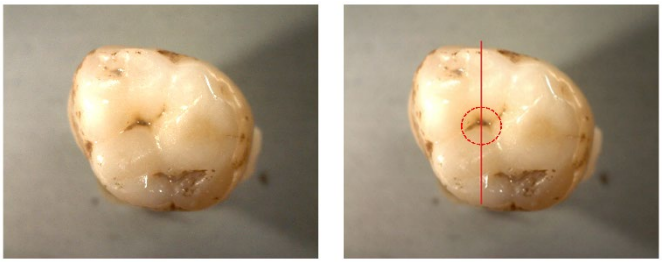


그림 3. 치아 표면과 OCT 스캔 영역 표시 이미지

3. 연구 결과

본 연구는 총 21개의 발치 된 치아를 대상으로 습윤 과 건조 조건에서 SS-OCT를 사용하여 우식 병변의 진행도를 평가하고, 그 결과를 조직학적 검사와 대조하였다. OCT 이미지 분석 시, 우식 병변의 잔량 비율을 평가하기 위해 그림 3. 과 같이 표면을 노란 선, 병변의 끝을 빨간 선, DEJ(법랑질-상아질 경계)를 초록선으로 표시 후 표면에서 DEJ까지의 거리를 측정하고, 병변 끝부분에서 DEJ까지의 거리를 측정하였다. 이를 바탕으로 병변 끝에서 DEJ까지의 거리를 잔량 비율로 계산하였다. 이 비율이 50 % 이상(50 포함)이면 코드 1로 분류하였으며, 50 % 미만이면 코드 2로 분류하였다. 비율이 0%이거나 음수 값이면 코드 3 이상으로 분류하였다.

분석 결과, 습윤 조건에서는 21개 중 13개 치아에서 우식 병변의 진행도를 정확히 판별하였고 8개 치아에서 오 분류가 관찰되었다. 건조 조건에서는 14개 치아에서 정확한 진단을 이루었으나 7개 치아에서 오 분류가 확인되었으며, 두 조건 모두에서 오 분류된 치아는 2개였다. 즉, 습윤 조건에서 오 분류였던 8개 중 6개는 건조 조건에서 정확 판별로 전환되었고, 반대로 습윤에서 정확했던 5개가 건조 조건에서 새롭게 오 분류에 포함되었다.

이러한 변화는 그림 3. 에서 볼 수 있다. 그림 3. 의 (a)는 습윤 상태에서 획득한 이미지보다 건조 상태의 이미지에서 우식 영역이 더 깊게 들어가며 이는 조직학적 검사 결과와 유사하다. 반대로 그림 3. 의 (b)는 앞서 말한 것과 같이 건조 상태일 때 우식 영역이 더 깊게 들어가지만 조직학적 검사 결과 습윤 상태일때와 검사 결과가 유사한 것을 확인할 수 있다.

4. 논의

본 연구 결과는 치아 내부의 수분 상태가 OCT기반 우식 진단에 유의한 영향을 미칠 수 있음을 시사한다. 건조 상태일때 법랑질에서 반사와 산란이 증가하는 현상은, 내부

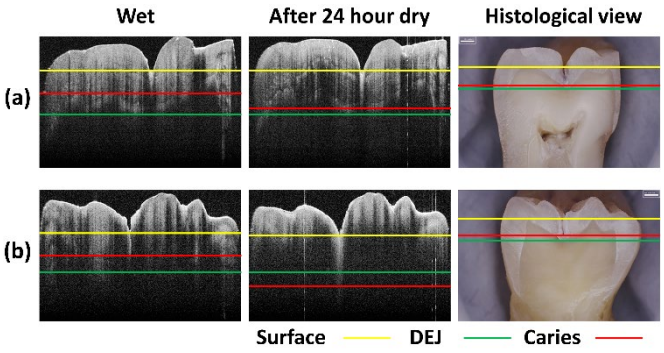


그림 2. 습윤, 건조, 조직학적 검사의 대표 이미지

수분이 제거되면서 치아 내부의 미세 공극이 공기로 가득 차게 되어 법랑질의 굴절률이 공기와의 차이로 인해 일어나고 이로 인해 병변 경계가 더 선명하게 보인다[5]. 그러나 본 연구에서 사용한 공기 건조 방법은 임상에서 그대로 구현하기 어렵고, 과도한 건조는 실제보다 병변이 깊게 보이는 과대평가를 초래할 위험이 있다. 따라서 향후 연구에서는 치아의 수분 상태를 조절할 수 있는 방안과 가장 정확도가 높은 치아의 수분상태를 알아낸 후 이를 임상적으로 적용할 방안을 구상할 필요가 있다.

5. Acknowledgements

본 연구는 과학기술정보통신부(MSIT)의 재원으로 정보통신기획평가원(IITP)의 지역지능화 혁신인재양성 프로그램(IITP-2025-RS-2022-00156389)의 지원을 받아 수행되었습니다.

6.참고 문헌

[1] Tsai, M. T., Wang, Y. L., Yeh, T. W., Lee, H. C., Chen, W. J., Ke, J. L., & Lee, Y. J. (2019). Early detection of enamel demineralization by optical coherence tomography. Scientific reports, 9(1), 17154.

[2] Wang, T. A., Trung, N. H., Lee, H. C., Lee, C. K., Tsai, M. T., & Wang, Y. L. (2023). Quantitative Evaluation of Caries and Calculus with Ultrahigh-Resolution Optical Coherence Tomography. Bioengineering, 10(11), 1317.

[3] Huang, D., Swanson, E. A., Lin, C. P., Schuman, J. S., Stinson, W. G., Chang, W., ... & Fujimoto, J. G. (1991). Optical coherence tomography. science, 254(5035), 1178-1181.

[4] Al-Azri, K., Melita, L. N., Strange, A. P., Festy, F., Al-Jawad, M., Cook, R., ... & Bozec, L. (2016). Optical coherence tomography use in the diagnosis of enamel defects. Journal of biomedical optics, 21(3), 036004-036004.

[5] Shimamura, Y., Murayama, R., Kurokawa, H., Miyazaki, M., Mihata, Y., & Kmaguchi, S. (2011). Influence of tooth-surface hydration conditions on optical coherence-tomography imaging. Journal of dentistry, 39(8), 572-577.

Poster-139

스마트폰 현미경 왜곡 보정을 위한 모델 비교

범정윤[1], 정예환[1], 고태식[1,2]
[1]전북대학교 바이오메디컬공학부
[2]전북대학교 전자·정보공학부

Comparison of Optical Distortion Correction Models in Smartphone-based Microscope

Jeongyun Beom[1], Yehwan Jung[1], Taesik Go[1,2]
[1]Division of Biomedical Engineering, Jeonbuk National University, Korea
[2]Division of Electronics and Information Engineering, Jeonbuk National University, Korea
*tsgo@jbnu.ac.kr

Abstract

Smartphone microscopy is appealing for point-of-care use but suffers from nonlinear lens distortions that hinder accurate registration and analysis. We compare three correction approaches—(1) physics-based Brown–Conrady (OpenCV), (2) Zernike polynomial–based, and (3) GAN-based learning—using paired benchtop-reference and smartphone images acquired at identical fields of view. From 3,000 images, we split data into train/validation/test = 8/1/1 at the FOV level and applied training-only oversampling to address data scarcity. Evaluation focused on qualitative criteria (grid straightness, structural preservation).

Brown–Conrady consistently yielded the most stable corrections, with occasional residual tangential distortion under imperfect optical centering. Zernike showed limited effectiveness due to circular-aperture assumptions and geometric constraints; the GAN approach served as a comparative baseline but degraded on low-contrast grids. Overall, a standard calibration-based physics model provides a reproducible baseline for smartphone microscope distortion correction and supports more reliable downstream AI analysis in resource-constrained settings.

1. 연구 배경

스마트폰 현미경은 30X 광학배율 렌즈를 스마트폰에 클립 형태로 장착한다. 이는 광학 현미경보다 휴대성과 경제성이 뛰어나다는 장점이 있다. 최근 스마트폰의 발전에 따라 이를 임상에 적용하려는 연구가 활발히 이루어지고 있다 [1]. 특히 의료 인프라가 제한적인 개발도상국 및 농촌 지역에서 스마트폰 현미경은 현장 진단에 높은 적용 가능성을 지닌다.

하지만 스마트폰 현미경으로 촬영한 이미지는 비선형적인 렌즈 왜곡, 품질 저하로 인해 여러 기술 적용에 어려움을 겪고 있다 [2]. 이러한 왜곡은 정확한 진단과 후처리에 제약을 초래한다.

본 연구에서는 스마트폰 현미경의 품질을 극대화하기 위해 3가지 왜곡 보정 소프트웨어 모델을 활용했다. 각 모델을 사용한 보정 이미지를 생성한 뒤, 벤치탑 참조 이미지와 비교하여 모델의 왜곡 보정 성능을 비교해보고자 한다. 이를 통하여 스마트폰 현미경을 활용한 AI 적용 및 임상에서의 편리한 활용에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

2.연구 방법

가. 데이터셋 수집을 위한 스마트폰 기반 현미경 구성

안정적으로 데이터셋을 수집하기 위해 광학 현미경의 구조를 참고하여 스마트폰 기반 현미경을 구성했다. 사용한 스마트폰 기종은 삼성 갤럭시 S21 Ultra이다.

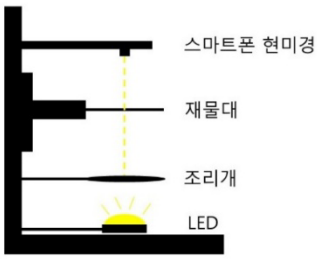


그림 1. 스마트폰 기반 현미경 구조도

나. 데이터셋

왜곡 보정의 정확한 판단을 위해 시료를 동일 시야에서 광학 현미경으로 촬영한 후, 같은 좌표를 스마트폰 현미경으로 촬영했다. 여러 위치에서 총 3,000장의 이미지를 촬영했으며, 각 시야에 대해 광학 현미경 이미지와 스마트폰 기반 현미경 보정 이미지로 이루어진 쌍을 구성했다. 전체 데이터는 훈련/검증/테스트=8/1/1로 무작위 분할하였다. 본 데이터는 표본 수가 적어 딥러닝 학습에 불리하므로 훈련 세트에 업샘플링을 적용한 후 모델의 성능을 비교했다.

다. 이미지 왜곡 보정을 위한 모델

본 연구에서는 OpenCV에서 제공하는 Brown-Conrady 모델, Zernike Polynomial을 사용한 모델, GAN을 사용한 모델로 총 3가지를 비교했다.

OpenCV(Open Source Computer Vision Library)는 카메라 왜곡 보정을 할 때 기본적으로 Brown-Conrady 모델을 사용한다. 이는 렌즈의 기하학적 왜곡을 모델링한 대표적인 수학 모델로, Radical distortion + Tangential distortion을 함께 고려할 수 있다는 장점이 있다 [3]. OpenCV를 사용한 모델은 렌즈의 왜곡을 파라미터로 모델링하고, Checkerboard Calibration으로 계수를 추정해 기하 왜곡을 보정한다.

Zernike polynomial은 단위 원판에서 정의되는 직교 기저로, 축대칭 광학계의 파면이나 수차를 간결하게 표현하는데 이용된다. 원판 좌표 (ρ,θ)에서 방사(radial)와 각(angular) 성분으로 분리되어 저차 수차를 안정적으로 기술할 수 있고, 원형 개구에 맞춰 직교성과 해석 용이성을 갖는다 [4].

GAN(Generative Adversarial Network)은 생성자와 판별자가 경쟁적으로 학습해 데이터 분포를 모사하는 모델로, 입력 이미지를 목표 도메인으로 학습 기반 변환하는 모델이다. GAN은 왜곡 이미지를 보정 도메인으로 매핑하여 시각 품질과 구조적 일관성을 동시에 향상시킨다. 데이터셋이 pair라면 조건부 GAN(pix2pix)으로 픽셀

손실(L1)과 적대 손실을 결합해 정합을 보장하고, pair가 아니라면 CycleGAN을 사용해 사이클 일관성 손실로 내용 보존을 강제한다 [5].

3. 연구 결과

그림 2는 왜곡 이미지와 왜곡 보정 모델을 사용한 이미지를 보여준다. 그림 2a는 스마트폰 기반 현미경을 사용해서 line grid target을 촬영한 이미지이고, 그림 2b는 Brown-Conrady 모델을 사용한 보정 이미지이다. 그림 2c는 Zernike polynomial을 사용한 모델의 보정 이미지, 그림 2d는 GAN을 사용한 모델의 보정 이미지이다.

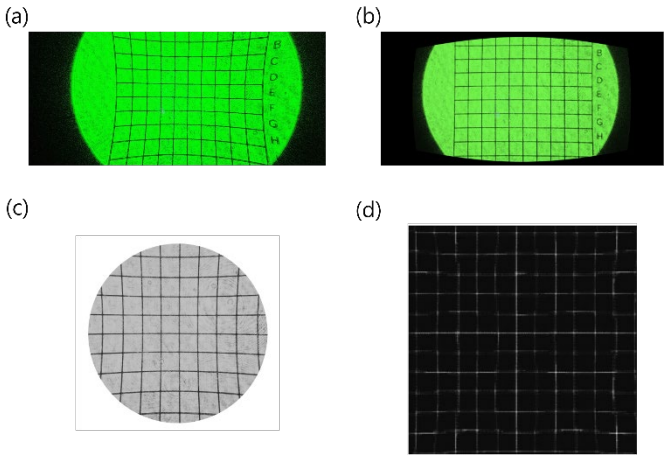


그림 2. (a)스마트폰 기반 현미경으로 촬영한 이미지,
(b)OpenCV 모델 적용 이미지,
(c)Zernike polynomial 모델 적용 이미지,
(d)GAN 모델 적용 이미지

OpenCV를 사용한 모델의 보정 이미지를 보면, Line Grid Target이 비교적 굴곡 없이 잘 펴진 모습을 볼 수 있다. OpenCV모델은 이미지의 중앙을 기준으로 보정을 수행하는데, 그림 2a처럼 좌우대칭이 맞지 않으면 제대로 된 보정을 수행할 수 없기 때문에 OpenCV 모델을 사용하기 위해서는 이미지의 전처리 과정이 필수적임을 알 수 있다. Zernike polynomial을 사용한 모델은 왜곡 보정이 거의 이루어지지 않았다.

Zernike polynomial은 원형 개구 안에서의 기저 함수로, 보정하고자 하는 대상이 원 안에 위치해 있어야 정상적으로 모델이 작동한다. 하지만 사용된 이미지는 물리적인 이유로 원의 일부가 삭제되었고, 그로 인해 모델이 보정 대상을 인식하지 못한 것으로 추정된다.

GAN 모델은 원본 이미지의 대조도가 낮아 line grid target의 선이 제대로 인식되지 않았고, 이로 인해 품질 저하 문제가 생겼다.

본 연구에서는 스마트폰 기반 현미경 영상의 왜곡 보정을 위해 OpenCV, Zernike polynomial, GAN 총 세 모델을 활용하여 이미지의 distortion 보정을 수행했다. 소프트웨어를 사용한 왜곡 보정을 통해 고품질의 스마트폰 기반 현미경 영상을 얻을 수 있을 것이라 기대된다.

4. Acknowledgments

이 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 바이오•의료기술개발사업(RS-2023-00236157), 정보통신기획평가원-지역지능화혁신인재양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임(IITP-2025-RS-2024-00439292).

5.참고 문헌

[1] D'Ambrosio, Michael V., et al. "Point-of-care quantification of blood-borne filarial parasites with a mobile phone microscope." *Science translational medicine* 7.286 286re4-286re4, 2015.

[2] Rivenson, Yair, et al. "Deep learning enhanced mobile-phone microscopy." *Acs Photonics* 5.6 p2354-2364, 2018.

[3] Zhang, Zhengyou. "A flexible new technique for camera calibration." *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence* 22.11 p1330-1334, 2002.

[4] Noll, Robert J. "Zernike polynomials and atmospheric turbulence." *Journal of the Optical Society of America* 66.3 p207-211, 1976.

[5] Lee, Jeong Hyeon, et al. "GAN-Based Image Restoration for Enhancing Object Detection in Projector-Camera Systems." *IEEE Access*, 2025.

Poster-140

Quantitative Assessment of Stress-induced Changes in Human Cardiac Organoid using Dynamic OCT

Nchumpeni Chonpemo Shitiri[1], Thanh Dat Le[1], Soo-Ji Yoo[2], Meeyoung Cho[2], Yongsook Kim[2,3], Youngkeun Ahn[2,3], Changho Lee[1,4*]

[1]*Department of Artificial Intelligence Convergence, Chonnam National University, Gwangju* [2]*Cell Regeneration Research Center, Chonnam National University Hospital,* [3]*Department of Cardiology, Chonnam National University Medical School & Hospital*
[4]*Department of Nuclear Medicine, Chonnam National University Medical School & Hwasun Hospital, Hwasun 58128, Jeollanam-do, Republic of Korea*
*ch31037@jnu.ac.kr

Abstract

In this work, we present a dynamic optical coherence tomography D-OCT framework for quantitative, noninvasive characterization of cardiac organoid function. The developed approach simultaneously extracts temporal metrics, including beating frequency, contraction–ejection interval (CEI), and maximum velocity, and spatial features such as effective beating area (EBA), and maximum velocity distribution (MVD), derived from pixel-wise power spectral analysis. Two experimental models were implemented to assess organoid response: (1) Room temperature exposure (0–180 minutes, 30 min intervals), (2) drug treatment under temperature exposure (0–30 minutes, 5-minute intervals).

1. Research Background

Cardiac organoids have emerged as advanced three-dimensional models that mimic important features of the development and function of the human heart. They provide dynamic in vitro systems for researching heart development, pathology, and drug responses [1,2]. In addition, these organoids display spontaneous rhythmic activity, organized ventricle-like structure, and early electrophysiology [3], providing a relevant human-based platform for exploring cardiac dynamics and the effects of pharmaceuticals.

Investigating structure and function in cardiac organoids requires imaging modalities capable of capturing rapid, three-dimensional beating behavior. While conventional techniques such as fluorescence and brightfield microscopy offer useful visualization, they are constrained by limited depth information and dependence on fluorescent labeling, restricting prolonged observation [4]. These limitations highlight the necessity for a label-free, depth-resolved method appropriate for continuous monitoring. Optical coherence tomography (OCT) addresses this challenge by providing high-resolution, label-free cross-sectional imaging of organoid structure and motion. Previous OCT studies have shown chamber formation and contractile function [5], however, an in-depth quantitative characterization of organoid beating dynamics is yet to be achieved.

This study introduced a dynamic OCT (D-OCT) method for quantitative evaluation of both temporal and spatial patterns of cardiac organoid contractions. Time-resolved parameters, including beating frequency, contraction–ejection interval (CEI), and maximum velocity, were analyzed, as well as spatial parameters such as effective beating area (EBA) and maximum velocity distribution (MVD). To evaluate functional adaptability, we examine two experimental models: (1) prolonged room-temperature exposure and (2) drug-induced response.

2.Methods

Cardiac organoids were imaged with a swept-source OCT system (OCS1310V1, Thorlabs) with a 1310 nm MEMS-VCSEL as the light source. The system operates at an A-scan rate of 100,000 lines per second. The axial resolution was measured at 10.6 µm, while the lateral resolution was 25 µm.

For spatial and temporal analysis, a motion vector was obtained using block matching between OCT frames. From the motion vector (displacement coordinates, d_x and d_y), the beating velocity (v) was calculated. Based on the velocity profile, we quantified temporal metrices such as beating rate, CEI, and maximum velocity, as well as spatial analysis including EBA and MVM.

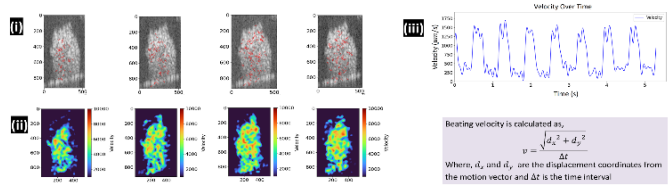


Fig. 1. Spatial & temporal D-OCT analysis approach

3. Result

Fig. 3 illustrates the assessment of beating dynamics in cardiac organoids subjected to prolonged room-temperature exposure. The figure comprises multiple sections corresponding to sequential time points (0–180 minutes). For each time point, section (i) presents the OCT B-scan image, (ii) displays the corresponding velocity map, (iii) depicts the EBA alongside the MVM, and (iv) shows the velocity-time profile.

Fig. 2 presents quantitative changes in cardiac organoid beating during prolonged room-temperature exposure (0–180 minutes). The beating rate increased from 0.30 ± 0.03 Hz (control) to 0.38 ± 0.10 Hz at 180 minutes. CEI showed progressive divergence between cycles, extending to 1.96 ± 0.09 s at 180 minutes. The maximum velocity declined from 1481.7 ± 256.2 μm/s to 1128.6 ± 228.6 μm/s beating cycle 1) and to 647.8 ± 63.6 μm/s (beating cycle 2).

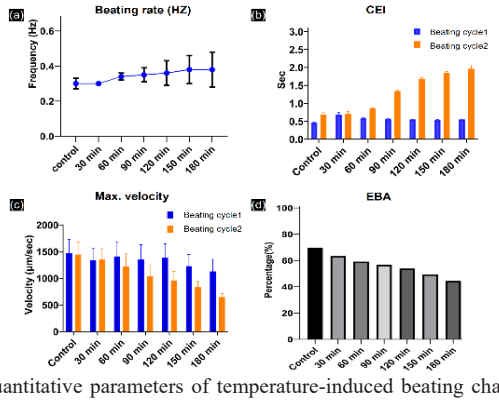


Fig. 2. Quantitative parameters of temperature-induced beating changes: (a)

Beat rate, (b) CEI (c) Maximum velocity, (d) EBA.

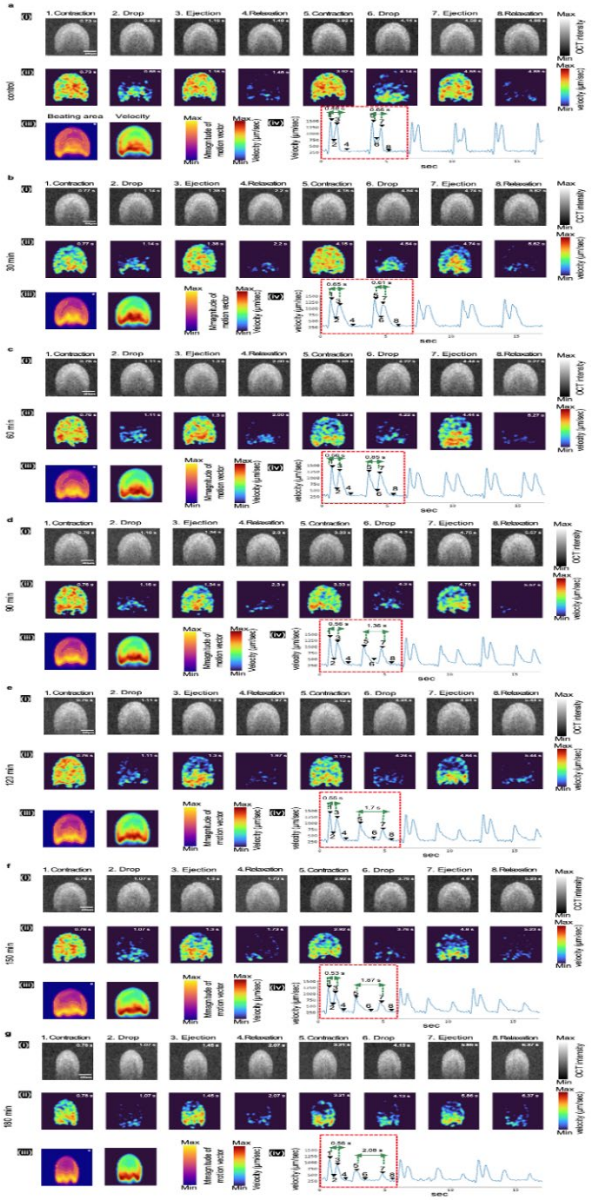


Fig. 3. Temperature-induced changes in beating area and pattern from normal to 30–180 min post-exposure at room temperature. (a) Control: (i) OCT beating cycle, (ii) Velocity map, (iii) Beating area and max velocity, (iv) Velocity–time plot. (b–g) Organoids at 30–180 min post-exposure.

Fig. 4 shows the analysis of beating behavior in cardiac organoids under drug treatment. In each section, (i) shows OCT B-scan, (ii) shows the corresponding velocity map, (iii) shows the EBA and MVM, and (iv) shows the velocity-time plot. D-OCT measurements were performed under baseline conditions, thereafter at 5-minute intervals for 30 minutes in order to evaluate drug-induced functional changes.as shown in Fig. 5. At control, the organoid exhibited a regular contraction and relaxation pattern with a beating frequency of 0.15 ± 0.01 Hz, EBA 55.44%, and maximum velocity 1461.6 ± 9.35 μm/s. Within 5 min post-treatment, the frequency increased to 0.35 ± 0.05 Hz, while EBA decreased to 46.48% and velocity to 1244.3 ± 121.5 μm/s. The frequency remained high through 30 min (0.36–0.39 Hz), whereas EBA declined to 36.7%. Average maximum velocity stabilized near 1.22–1.27 mm/s, suggesting that contractile activity was gradually decreased after an initial stimulation phase.

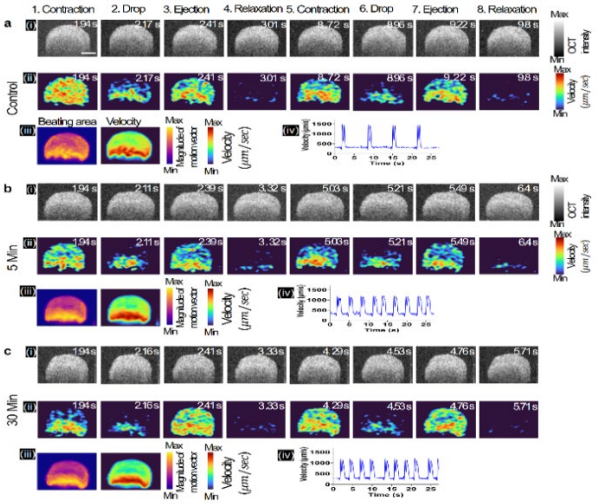


Fig. 4. Dynamic OCT assessment of cardiac organoid beating after drug treatment. (a) Control organoid and (b–c) 5-30-minutes post-drug exposure. (i) OCT B-scan, (ii) Velocity map, (iii) EBA and MBM (iv). Velocity-time plots.: 200 μm

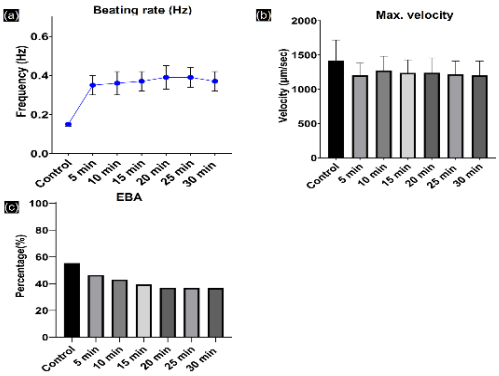


Fig. 5. Quantitative parameters of cardiac organoid (0–30 min). (a) Beating rate, (b) Maximum velocity, (c) EBA.

4. Acknowledgements

This research was supported by the National Research Foundation (NRF) funded by the Korean government (MSIT) (RS-2022-NR067329, RS-2022-NR075732, RS-2023-00278972) and Institute of Information & communications Technology Planning & Evaluation (IITP) under the Artificial Intelligence Convergence Innovation Human Resources Development (IITP-2023-RS-2023-00256629) grant funded by the Korean government (MSIT).

5. References

[1] Y. R. Lewis-Israeli, A. H. Wasserman, M. A. Gabalski, B. D. Volmert, Y. Ming, K. A. Ball, W. Yang, J. Zou, G. Ni, N. Pajares, X. Chatzistavrou, W. Li, C. Zhou, and A. Aguirre, "Self-assembling human heart organoids for the modeling of cardiac development and congenital heart disease,"*Nature Commun*, Vol. 12, No 1, p.5142, 2021.

[2] Z. Huang, K. Jia, Y. Tan, Y. Yu, W. Xiao, X. Zhou, J. Yi, and C. Zhang, "Advances in cardiac organoid research: implications for cardiovascular disease treatment," *Cardiovasc Diabetology,* Vol 24, No. 1, p.25 2025.

[3] X. Xia, M. Hu, W. Zhou, Y. Jin, and X. Yao, "Engineering cardiology with miniature hearts," *Materials Today Bio,* Vol. 31, p.101505, 2025.

[4] D. Zhao, W. Lei, and S. Hu, "Cardiac organoid — a promising perspective of preclinical model," *Stem Cell Research & Therapy,* Vol. 12, No. 1, p.272, 2021

[5] R.-P. Xiao, "β-Adrenergic Signaling in the Heart: Dual Coupling of the β_2 -Adrenergic Receptor to G_s and G_i Proteins," *Science's. STKE* Vol. 2001, No. 104, 2001.

Poster-141

갑상선 결절의 세침흡인검사 필요성 진단을 위한 다중 매개변수 광음향 초음파 영상

안준호[1], 이재경[2], 김광순[3], 배자성[3], 정찬권[4], 김민성[1], 최원석[5], 박별리[6*], 임동준[2*], 김철홍[1*]

포항공과대학교 전자전기공학과, IT융합공학과, 기계공학과[1], 서울성모병원 내분비내과[2], 서울성모병원 외과[3], 서울성모병원 병원병리과[4], 가톨릭대학교 의공학과[5], 성균관대학교 생명물리학과[6]

In Vivo Multiparametric Photoacoustic and Ultrasound Imaging for Stratifying Fine-Needle Aspiration Biopsy Necessity in Thyroid Nodules

Junho Ahn[1], Jaekyung Lee[2], Kwangsoon Kim[3], Ja Seong Bae[3], Chan Kwon Jung[4], Minseong Kim[1], Wonseok Choi[5], Byullee Park[6*], Dong-Jun Lim[2*], Chulhong Kim[1*]

Department of Convergence IT Engineering, Electrical Engineering, and Medical Science and Engineering, Pohang University of Science and Technology, Korea[1]

Division of Endocrinology and Metabolism, Seoul St. Mary's Hospital, Korea[2]

Department of Surgery, Seoul St. Mary's Hospital, Korea[3]

Department of Hospital Pathology, Seoul St. Mary's Hospital, Korea[4]

Department of Biomedical Engineering and Medical Sciences, The Catholic University of Korea, Korea[5]

Department of Biophysics, Sungkyunkwan University, Korea[6]

[*]byullee@skku.edu, ldj6026@catholic.ac.kr, chulhong@postech.ac.kr

Abstract

For thyroid cancer diagnosis, ultrasound imaging (USI) has low specificity, causing unnecessary fine-needle aspiration biopsies (FNAB). We combined multiparametric photoacoustic (PA) imaging with USI to assess FNAB requirements in 106 patients with 29 benign nodules, 45 papillary thyroid cancers, and 32 follicular neoplasms. Three PA parameters—spectral gradient, oxygen saturation, and skewness of the oxygen saturation distribution—were combined using support vector machine to develop the ATA-Photoacoustic (ATAP) scoring system. ATAP achieved 97% sensitivity and 38% specificity, reducing unnecessary biopsies in 11 of 29 benign cases. This approach effectively reduces unnecessary biopsies while maintaining diagnostic accuracy.

1. 연구 배경

갑상선암은 전 세계적으로 가장 빈번하게 진단되는 암 중 하나로, 2022년 미국에서만 거의 44,000건의 새로운 사례가 발생했다[1]. 현재 갑상선암 진단 과정은 초음파(US) 스크리닝 후 의심스러운 결절에 대해 세침흡인검사(FNAB)을 시행하여 악성도를 판단한다. 그러나 초음파 스크리닝을 통한 갑상선암 진단은 낮은 특이도(specificity)를 보인다. 초음파 기반 갑상선암 진단 방법 중 미국 갑상선 학회(ATA) 가이드라인의 민감도(sensitivity)는 98%이지만 특이도는 17.3%에 불과하여, 불필요한 세침흡인검사와 환자 부담을 초래한다[2]. 갑상선 여포성 종양의 진단은 특히 어려운데, 이들이 약 30%의 암 위험도를 가지고 있음에도 불구하고 양성 결절과 유사한 초음파 소견을 보이는 경우가 많기 때문이다[3]. 이로 인해 다수의 양성결절 환자가 초음파 스크리닝 후 세침흡인검사를 받게 된다. 초음파 영상과 결합된 광음향(PA) 영상은 갑상선 결절 평가를 위한 유망한 접근법으로 부상했다. 광음향 영상은 악성 종양의 특징인 조직 저산소증을 식별할 수 있는 혈중 산소포화도(sO_2) 정보를 제공한다. 이전 연구들은 여러 갑상선암 종류 중 갑상선 유두암(PTC)과 양성 결절에만 초점을 맞춰 임상 적용성이 제한적이었다. 본 연구는 양성 결절, 갑상선 유두암, 갑상선 여포성 종양을 포함하는 갑상선 결절 진단 방법을 개발하여 이러한 한계를 해결했다. ATA 가이드라인과 통합된 다중 매개변수 광음향 지표를 사용하여 106개의 결절을 분석해 새로운 ATA-광음향(ATAP) 점수 시스템을 만들었으며, 97%의 민감도와 38%의 특이도를 달성하면서 불필요한 세침흡인검사를 줄일 수 있음을 보였다.

2.연구 방법

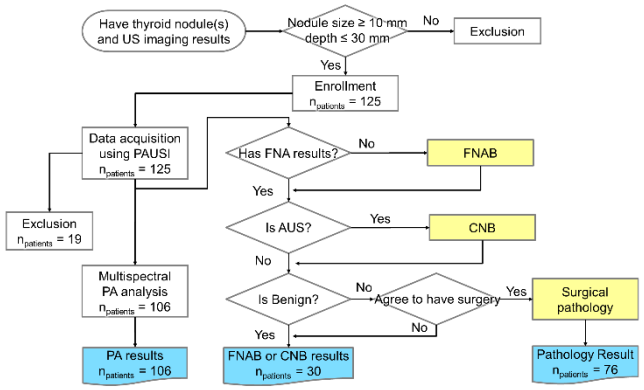


그림1. 환자 모집 및 임상 워크플로우

이번 인간대상 임상 연구는 기관윤리위원회의 승인을 받았다(서울성모병원: KC15DISI0276). 우리는 프로그래밍 가능한 초음파 기기(EC-12R, Alpinion Medical Systems)와 레이저(PhotoSonus M-20)로 구성된 실시간 이중 모드 광음향 및 초음파 영상(PAUSI) 시스템을 사용했다. 이 시스템은 레이저 전달을 위한 광섬유 번들과 리니어 초음파 프로브(L3-12, 중심 주파수 8.5 MHz)를 결합하여 사용했다.

환자에게서 광음향/초음파 데이터를 얻기위해 갑상선 결절이 영상 영역에 들어오도록 광음향 프로브를 위치시킨 후, 레이저로 7개 파장(700, 730, 756, 796, 820, 866,

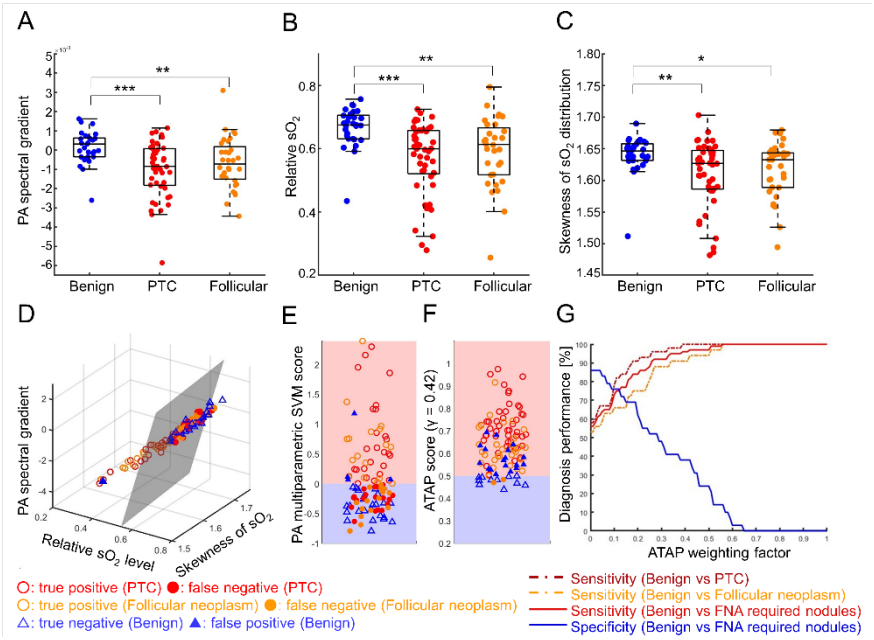


그림 2. 다중 매개변수 광음향 초음파 분석 및 통계 결과

900 nm)을 20 Hz 속도로 7-8초 동안 순차적으로 발사하여 광음향/초음파 신호를 획득했다. 한번 촬영에 9개의 데이터셋을 획득하였고, 재현성을 확인하기 위해 결절당 5회 반복 촬영했다. 갑상선 경계는 기존 임상 초음파 영상을 참조하여 3명의 독립적인 검토자가 수동으로 분할했다. 비정상적으로 강한 신호와 같은 피부의 반사 아티팩트가 포함된 영역은 수동으로 식별하고 분석에서 제외했다. 갑상선 결절의 광음향 신호는 정상 조직에서의 광음향 신호로 나누는 방식으로 레이저 세기에 따른 신호 크기를 보정하였고, 이 광음향 신호로부터 3개의 광음향 매개변수를 계산했다: 광음향 스펙트럼 기울기(PA spectral gradient), 상대적 산소포화도 수준(Relative sO_2), 산소포화도 분포의 왜도(Skewness of sO_2). 이러한 매개변수들은 서포트 벡터 머신 분류로 결합하여 양성 결절과 세침흡인검사가 필요한 결절을 구별했다. 추가로, 광음향 지표를 기존 초음파 기반 ATA 가이드라인과 선형 결합하여 갑상선 결절을 분류하는 ATAP 점수 시스템을 결절 진단에 적용했다. 각 결절에 대해 ATAP 점수가 0.5 이상인 경우, 악성일 가능성이 높아 세침흡인검사 필요한 결절로 분류하였다.

3. 연구 결과

우리는 125명의 환자를 모집했고 장비 문제로 인한 오류, 아티팩트 또는 조직검사 결과가 없는 19례를 제외한 후 106개의 갑상선 결절을 분석했다(그림 1). 최종 코호트는 29개의 양성 결절, 45개의 갑상선 유두암, 32개의 갑상선 여포성 종양(26개 양성, 6개 악성)으로 구성되었다. 분석결과 3개의 광음향 매개변수는 양성과 세침흡인검사가 필요한 결절 사이에 유의한 통계적 차이를 보였다(그림 2). 광음향 스펙트럼 기울기는 양성 대 갑상선 유두암($p<0.001$)과 양성 대 갑상선 여포성 종양($p<0.01$) 그룹 간에 유의한 차이를 보였다(그림 2A). 상대적 산소포화도 수준은 양성 결절(66.7%)이 갑상선 유두암(56.9%)과 갑상선 여포성 종양(59.0%)에 비해 유의하게 높았다(각각 $p<0.001$과 $p<0.01$)(그림 2B). 산소포화도 분포의 왜도도 그룹 간에 유의한 차이($p<0.05$)를 보였다(그림 2C). 서포트 벡터 머신 분류를 사용하여 3개 매개변수를 모두 결합했을 때(그림 2D), 양성 결절과 세침흡인검사가 필요한 결절을 구별하는 데 55%의 민감도와 86%의 특이도를 달성했다(그림 2E). 최적 임상 설정(γ=0.42)에서 ATAP는 세침흡인검사 필요성 분류에 대해 97%의 민감도와 38%의 특이도를 달성했다(그림 2F). 기존 ATA 가이드라인이 모든 환자의 결절을 세침흡인검사 후보로 분류한 반면, ATAP 시스템은 29개 양성 결절 중 11개(38%)를 비세침흡인검사 후보로 성공적으로 식별하여 높은 진단 민감도를 유지하면서 불필요한 생검을 줄일 수 있는 상당한 잠재력을 보여주었다.

4. Acknowledgements

This work was supported by the Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF), funded by the Ministry of Education (2020R1A6A1A03047902 received by C.K.); a NRF grant funded by the Korea government (MSIT) (2023R1A2C3004880 received by C.K.); a grant of the Korea Health Technology R&D Project through the Korea Health Industry Development Institute (KHIDI), funded by the Ministry of Health & Welfare (RS-2024-00512879 received by C.K.); a grant of the Korea Medical Device Development Fund, funded by the MSIT, the Ministry of Trade, Industry and Energy, the Ministry of Health & Welfare, the Ministry of Food and Drug Safety of the Korea government (Grant Nos. 1711137875 and RS-2020-KD000008); and by the BK21 FOUR project.

5.참고 문헌

[1] Kitahara CM, Schneider AB. “Epidemiology of Thyroid Cancer.” *Cancer Epidemiology, Biomarkers & Prevention*. 2022;31(7):1284-97.

[2] Chng CL, Tan HC, Too CW, Lim WY, Chiam PPS, Zhu L, Nadkarni NV, Lim AYY. “Diagnostic performance of ATA, BTA and TIRADS sonographic patterns in the prediction of malignancy in histologically proven thyroid nodules.” *Singapore Med J*. 2018;59(11):578-83.

[3] Carling T, Udelsman R. “Follicular Neoplasms of the Thyroid: What to Recommend.” *Thyroid®*. 2005;15(6):583-7

Poster-142

파킨슨병 인간 중뇌 오가노이드 평가를 위한 광음향 생체 영상 챔버 시스템 개발

김준형[1, #], 조용재[2], 박수민[2], 박종찬[1, 2, 4, *], 김인기[1, 2, 3, *], 박별리[1, 2, 4, *]

성균관대학교 메타바이오헬스학과[1], 생명물리학과[2], 지능형 정밀의료 융합학과[3], 바이오의학융합전공[4]

Development of a Photoacoustic Live Imaging Chamber System for Evaluating Human Midbrain Organoids in Parkinson's Disease

Junhyung Kim[1, #], Yongjae Jo[2], Soomin Park[2], Jong-Chan Park[1, 2, 4, *], Inki Kim[1, 2, 3, *],and Byullee Park[1, 2, 4,*]

Departments of [1]MetaBioHealth, [2]Biophysics, Institute of Quantum Biophysics, [3]Intelligent Precision Healthcare Convergence, [4]Department of Biopharmaceutical Convergence,

Sungkyunkwan University, 16419, Republic of Korea.

*Corresponding author

[#]presenter: bio3574@skku.edu

Abstract

Parkinson's disease (PD) causes progressive degeneration of dopaminergic neurons and loss of neuromelanin (NM) in the substantia nigra. We developed a photoacoustic microscopy (PAM) system integrated with a live imaging chamber (LIC) to achieve label-free, deep-tissue, and age-dependent imaging of human midbrain organoids (hMOs). The LIC system maintained physiological conditions during imaging, as verified by heat transfer simulations, pH monitoring, and viability tests. Using 532 nm excitation, we quantitatively visualized the 3D distribution of NM in live hMOs and validated results through IHC and Fontana–Masson staining. This study provides the first quantitative evidence of NM degradation in PD organoids, offering a promising platform for future PD research and therapy development.

1. Introduction

Parkinson's disease (PD) is a neurodegenerative disorder marked by the selective vulnerability of dopaminergic neurons in the substantia nigra. Recent studies have reported the expression of melanin in human midbrain organoids (hMOs). The hMOs derived from induced pluripotent stem cells, recapitulate key features of midbrain development and offer a physiologically relevant in vitro model for PD research.

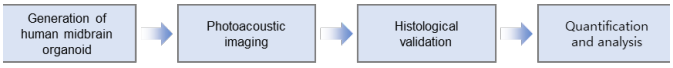
Despite their potential, intact, live hMOs present challenges for imaging neuromelanin due to their irregular surface topography and optical opacity. Conventional microscopy techniques are limited in penetration depth and often require staining, which can alter cellular physiology.

To address these challenges, advanced imaging approaches capable of deep-tissue, label-free, and longitudinal analysis are needed. Therefore, we introduce a high-speed photoacoustic microscopy (PAM) approach combined with a customized live imaging chamber (LIC) designed to preserve organoid viability. This platform enables comprehensive spatiotemporal analysis of neuromelanin accumulation and provides a foundation for investigating PD-associated neuronal degeneration in a controlled in vitro environment.

2. Methods

Figure 1 delineates the overall methodology used to assess changes in neuromelanin content within hMOs. Initially, human induced pluripotent stem cells (hiPSCs) derived from healthy control lines and patient-derived PD lines were cultured under feeder-free conditions using mTeSR1 medium (STEMCELL Technologies, Inc.). Cells at passages below 20 were utilized for organoid generation. The generated organoids were maintained for up to 220 days and classified into three developmental stages: 90–130, 130–170, and 170–220 days. The categorized hMOs were subjected to photoacoustic imaging using the designed LIC system to analyze stage-dependent variations in neuromelanin content. For LIC-PAM, a 532 nm nanosecond laser was employed as the excitation source, operating at a pulse repetition frequency of 20 kHz and a pulse width of 8 ns. Following photoacoustic imaging, histological validation was conducted using Fontana–Masson staining, passive tissue clearing, and immunostaining to quantitatively evaluate neuromelanin within the hMOs.

Figure 1. Overall pipeline of the experimental workflow



3. Results

Figure 2. Volumetric PA imaging of neuromelanin in hMOs. (a) 3D rendered PA image of normal midbrain organoid (b) Neuromelanin content in brain organoids of normal and PD groups at different growth stages. Each data point represents the median of total neuromelanin volume (μm²) quantified from PA MAP images, and the error bars indicate the median absolute deviation (MAD). Growth stages were divided into three intervals: 90–130, 130–170, and 170–220 days. For each interval, neuromelanin volume was quantified from six biologically independent organoid samples

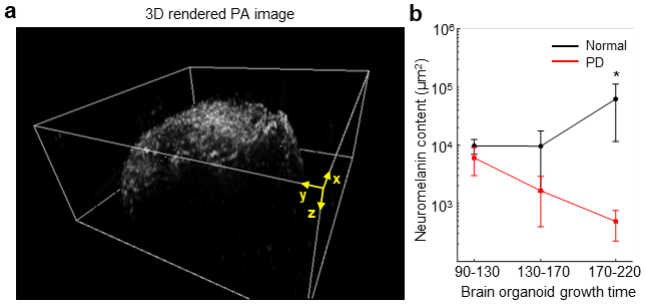


Figure 2 presents the 3D PA imaging of neuromelanin distribution within brain organoids. The imaging is achieved using a visible excitation source in the PAM setup enhanced by live imaging chamber. The 3D rendered PA image provided demonstrates the ability of this system to capture comprehensive volumetric information. In panel (a), a top field of view is shown, revealing the widespread distribution of neuromelanin across the organoid. In panel (b), In normal midbrain organoids, the neuromelanin content exhibited minimal variation from day 90 to day 170. However, as the maturation period extended from day 170 to day 220, a gradual accumulation of neuromelanin granules was observed. In contrast, the PD midbrain organoids showed a linear decrease in neuromelanin content starting from day 130. Therefore, the LIC-PAM provides an effective imaging system for quantitative screening of melanin production in entire live brain organoids.

4. Conclusion

We developed a photoacoustic live imaging chamber (PA-LIC) system that maintains physiological conditions for live human midbrain organoids (hMOs) during photoacoustic imaging (PAI). This LIC system enables long-term maintenance of viable hMOs in vitro, enabling investigation of the correlation between Parkinson's disease (PD) pathology and neuromelanin distribution within the organoids. This advanced methodology facilitates three-dimensional, label-free, live imaging of biological tissues and materials.

5. Acknowledgements

This research was supported by the SungKyunKwan University and the BK21 FOUR(Graduate School Innovation) funded by the Ministry of Education(MOE, Korea) and the National Research Foundation of Korea (NRF) grant (RS-2024-00462912), funded by the Ministry of Science and ICT (MSIT) of the Korean government. B.P. acknowledges support from the NRF grant (RS-2023-00266110), funded by the MSIT, and the NRF Basic Science Research Program (RS-2023-00210682), also funded by the MSIT of the Korean government.

6. References

[1] Shintate, Ryo, et al. "High-speed optical resolution photoacoustic microscopy with MEMS scanner using a novel and simple distortion correction method." *Scientific Reports* 12.1 (2022): 9221.

[2] Barulin, Aleksandr, et al. "Axially multifocal metalens for 3D volumetric photoacoustic imaging of neuromelanin in live brain organoid." *Science Advances* 11.3 (2025): eadr0654.

Enhancement of Tumor Classification Algorithms for Orthotopic Pancreatic Cancer via Endoscopic Hyperspectral Imaging

Thi Kim Chi Tran[1,2,3], Na Eun Mun [1,2,3], and Su Woong Yoo[1,2,3*]

[1]Department of Nuclear Medicine, Chonnam National University Medical School and Hwasun Hospital, South Korea
[2]Biomedical Science Graduate Program, Chonnam National University, South Korea
[3]Institute for Molecular Imaging and Theranostics, Chonnam National University Medical School, South Korea
*yoosw.md@jnu.ac.kr

Abstract

Pancreatic cancer is a malignancy characterized by a high worldwide mortality rate. Presently, the combination of surgery and chemotherapy constitutes a primary therapeutic criterion. Nevertheless, surgeons must face the challenge of identifying the tumor margin to enhance effective treatment while avoiding damage to adjacent healthy tissues. Hyperspectral systems are garnering interest due to their capacity to reflect the biological characteristics of materials via light interaction. This study aims to utilize hyperspectral imaging combined with machine learning to detect pancreatic tumors in in vivo models. Moreover, we enhanced the effectiveness of tumor classification when integrated with the Spectrum Angle Mapper (SAM).

1. Background

Pancreatic cancer is the fourth leading cause of cancer-related mortality in the United States, with a relatively low 5-year survival rate of only 12% [1]. It is usually tough to simply identify pancreatic cancer at an early stage, not only due to its vague and non-specific symptoms, but also because the pancreas is located deep within the abdominal cavity, making small tumors challenging to identify through routine clinical examination or conventional ultrasound. Recently, there has been a notable trend in the application of optical methods to improve the accuracy of clinical diagnosis and surgery. Compared to old technologies, these new methods are more cost-effective, safer, and easier to use.

Hyperspectral imaging (HSI) is a technique using both conventional imaging and spectroscopy methods to provide not only spatial but also spectral information. In contrast, traditional imaging methods only record the three separated Gaussian spectral bands at visible wavelengths. HSI can access spectral information in excess of 30 channels and provide data on light-matter interactions associated with either reflected or absorbed luminance produced at fixed wavelengths, utilizing a setup with hyperspectral sensors. Currently it has been applied in the biomedical field, particularly for cancer detection [2].

HSI data are usually highly nonlinear and exhibit a high-dimensional character, which is why traditional classifiers struggle to apply to HSI data. These approaches typically relied on “hand-crafted features” derived by experts, which are time-consuming and unsuitable for HSI’s native complexity. This limitation has led to the adoption of machine learning approaches as a more effective and automatic solution. Therefore, this study aims to develop a comprehensive system that can detect pancreatic tumors more safely and efficiently, thereby helping to increase patient survival rates.

2. Method

Orthotopic pancreatic tumors were established in C57BL/6 mice by directly injecting two types of pancreatic cancer cells as KPC (1×10^5/20 µL) and Pan02 (3×10^5/20 µL), into the pancreatic tissue (Figure 1). Two weeks after implantation, HSI were acquired using a custom-designed endoscopic system equipped with a liquid crystal tunable filter (LCTF). Spectral data underwent processing and analysis through five classification algorithms: support vector machine (SVM), neural network (NN), light gradient boosting machine (LGBM), random forest (RF), and logistic regression (LR).

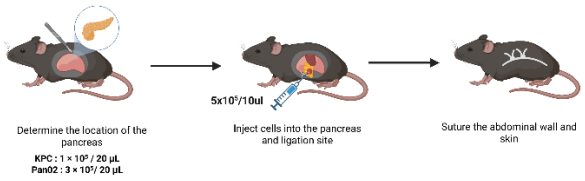


Figure 1. Generation of an orthotopic pancreatic mouse tumor model

To enhance classification performance, tumor-specific spectral signatures (endmembers) were extracted for algorithm optimization (Figure 2). SAM analysis was subsequently employed to exclude training data pixels that demonstrated inadequate spectral similarity to the identified endmembers. This preprocessing step minimized class overlap and noise, thus improving algorithm performance. Furthermore, label precision was enhanced to minimize misclassification with adjacent organs.

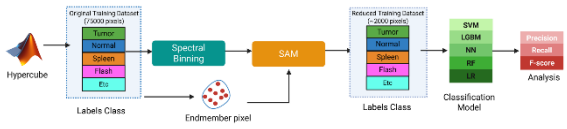


Figure 2. Proposed framework to enhance tumor classification algorithm performance

3. Result

Histopathological evaluation verified effective tumorigenesis in all subjects. The representative mean reflectance spectra of normal pancreatic tissue and pancreatic tumor tissue showed marked differences on day 5 (Figure 3). The reflectance spectrum of tumor tissue was consistently lower than that of normal tissue across most wavelengths from 450 to 700 nm, with the most pronounced divergence observed in the 600–650 nm range. One of the factors that stimulates tumor progression and promotes angiogenesis is tumor hypoxia [3]. Optically, hypoxia substantially reduces the tissue oxygen saturation (StO_2). Additionally, tumors often exhibit a higher cellular density and a larger nuclear-to-cytoplasmic ratio compared to normal tissue. These structural alterations increase light scattering, resulting in a smoother spectral profile compared to that of normal tissue, which exhibits more distinct secondary peaks.

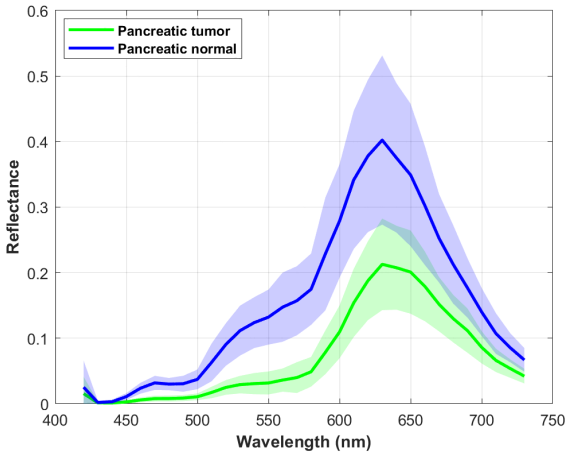


Figure 3. Spectral characteristics of pancreatic tumors and normal pancreas. Mean (solid line) and standard deviation (std) (shaded line) of the entire data set (n= 15 in each group).

The tumor classification results showed that, before refinement, the KPC model's classification performance had reasonable F-scores: LGBM (68.2%), NN (64.9%), SVM (66.0%), RF (51.5%), and LR (48.4%). After refinement, there were considerable increases, with LGBM getting an F-score of 90.7%, followed by NN (77.5%), SVM (75.5%), RF (83.6%), and LR (70.9%). The Pan02 model showed similar results to KPC. Before refinement, the F-scores varied from 49.0% to 52.5%. After refinement, the scores increased significantly, with LGBM (86.1%), NN (82.8%), SVM (83.4%), RF (81.2%), and LR (81.2%) achieving notable improvements. In general, algorithmic optimization improved the F-score by an average of 19.84% ± 8.99 (mean ± SD) in the KPC model and 32.02% ± 1.42 in the Pan02 model.

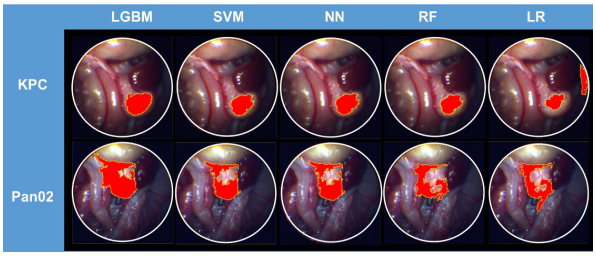


Figure 4. After refinement, an automated tumor classification system uses five different algorithms on pancreatic tumor images

4. Acknowledgments

This research was supported by the grant of the Korea Health Technology R&D Project through the Korea Health Industry Development Institute (KHIDI), funded by the Ministry of Health & Welfare, Republic of Korea (grant number: RS-2022-KH128380, RS-2025-24536036, RS-2025-19252970) and supported by a grant (HCRI25010) of Chonnam National University Hwasun Hospital Institute for Biomedical Science.

5. Reference

[1] Yu W, Zhou D, Meng F, Wang J, Wang B, Qiang J, et al. The global, regional burden of pancreatic cancer and its attributable risk factors from 1990 to 2021. *BMC Cancer*. Vol 25, No.1,p.186, 2025

[2] Mun NE, Tran TKC, Park DH, Im JH, Park JI, Le TD, et al. Endoscopic Hyperspectral Imaging System to Discriminate Tissue Characteristics in Tissue Phantom and Orthotopic Mouse Pancreatic Tumor Model. *Bioengineering*. Vol 11, No.3, p208, 2024

[3] Rankin EB, Giaccia AJ. Hypoxic control of metastasis. *Science* Vol 352, No.6282, p175-180, 2016

Poster Presentation
의료기기규제과학

Poster-144

AI 의료기기의 위험관리: 혁신 촉진과 안전 확보를 위한 국제 규제 비교

민찬홍[1], 성진영[1], 김성민[1,2], 권지연[1,2*]

동국대학교 바이오헬스의료기기규제과학과[1], 동국대학교 의료기기산업학과[2]

Risk Management of AI-Based Devices: An International Regulatory Comparison for Promoting Innovation and Ensuring Safety

Chanhong Min[1], Jinyoung Sung[1], Sungmin Kim[1,2], Jiyean Kwon[1,2*]

Department of Regulatory Science for Medical Device, Dongguk University, Korea[1]

Department of Medical Device and Healthcare, Dongguk University, Korea[2]

2025120247@dgu.ac.kr, 2024120384@dongguk.edu, sungmin2009@gmail.com, jykwon@dongguk.edu*

Abstract

Artificial intelligence (AI) medical devices evolve through continuous data and algorithm updates, raising novel safety and reliability risks. The U.S. FDA promotes innovation with the *PCCP(Predetermined Change Control Plan*), and Korea leads with the *Digital Medical Products Act* (2023/2025), emphasizing stringent safety requirements. While all adopt risk-based and life-cycle approaches, they differ in flexibility versus conservatism, highlighting the need to balance innovation with patient safety and pursue global regulatory harmonization.

1. 연구 배경

인공지능(AI) 기술은 진단, 치료, 예후 예측 등 의료 분야 전반에서 빠르게 확산하고 있으며[1], AI 기반 의료기기는 학습 데이터와 알고리즘의 지속적 업데이트에 따라 성능이 변동되는 특성이 있다[2]. 이러한 특성은 환자 안전성과 신뢰성 확보에 새로운 위험 요인을 야기하며, 기존 규제체계만으로는 충분히 대응하기 어렵다. 이에 미국 FDA는 2019년 AI/ML 소프트웨어 변경 관리 프레임워크를 제안하고, 2025년 PCCP(Predetermined Change Control Plan) 최종 지침을 확정하여 사전 합의된 범위 내에서 유연한 업데이트를 허용하였다[2-3]. PCCP는 제조자가 제출한 사전변경계획 범위 내에서는 재허가 없이 소프트웨어 업데이트를 가능하게 하는 제도로, 지속적 진화를 제도적으로 수용한다는 점에서 의미가 있다[3]. 반면 한국은 2025년 디지털의료제품법을 시행해 세계 최초로 AI 의료기기와 디지털 헬스 제품을 포괄하는 독립 법체계를 마련하고, 알고리즘 원리·데이터·성능 검증 자료 제출을 의무화하는 등 안전성 확보에 중점을 두었다[4-6].

미국과 한국 모두 위험 기반 접근을 적용하지만, FDA는 SaMD 대부분을 Class II로 분류하여 신속 승인을 강조하는 반면[7], 한국은 1-4등급 세분화와 보수적 검증을 통해 안전을 우선시한다. 그러나 이러한 분류만으로는 편향, 불확실성, 생성형 모델 변동성과 같은 AI 특유의 위험을 충분히 반영하기 어렵다. 본 연구는 미국과 한국의 규제체계를 비교·분석하여 향후 한국의 규제 방향성과 국제 조화 방안을 모색하는 데 목적을 둔다[1-7].

2. 연구 방법

1) 연구 대상 및 비교 범위

본 연구는 AI 의료기기의 특성을 반영한 규제체계를 비교하기 위하여 미국 식품의약국(FDA)과 한국 식품의약품안전처(MFDS)의 최신 법령과 가이드라인을 분석 대상으로 했다. 미국은 PCCP 제도를 확립하며 AI 의료기기 규제체계에서 유연성을 강조하고 있고[3], 한국은 세계 최초로 디지털의료제품법(2025)을 제정하여 AI 의료기기를 포괄하는 독립 법체계를 마련한 국가라는 점에서 비교 대상으로 선정하였다[4-6].

2) 자료 수집

미국과 한국의 AI 의료기기 규제체계를 비교하기 위하여, 각국 규제당국에서 발간한 공식 문헌 가운데 AI 의료기기 규제와 직접적으로 연관된 가이드라인과 법령을 선정하였다.

3) 가이드라인 분석 및 비교

미국과 한국은 모두 위험 기반 접근과 전주기(TPLC, Total Product Life Cycle) 관리 원칙을 적용하고 있으나, 구체적 실행 방식에서는 차이를 보인다. 두 국가의 위험등급 분류와 규제체계 차이는 표 1에 요약되어 있다.

먼저, 위험등급 분류에 있어 미국은 사용 목적과 환자 위해 가능성에 따라 Class I–III의 3단계 체계를 운영하며, SaMD의 경우 대부분 중등도(Class II)로 분류되어 510(k) 경로를 통해 신속히 승인되고, 고위험 기기는 Class III로 지정된다[7]. 반면 한국은 사용 목적과 환자의 상태, 의료적 영향도, 오작동 시 피해 수준까지 고려하여 1~4등급으로 세분화 체계를 적용하여 보다 정교한 분류 기준을 운영한다.

그러나 이러한 분류 체계만으로는 AI 의료기기의 고유한 위험(데이터 편향, 알고리즘 불확실성, 지속적 업데이트 등)을 충분히 반영하기 어렵다[1]. 미국은 이를 보완하기 위해 PCCP와 GMLP(Good Machine Learning Practice)를 도입하여, 알고리즘 업데이트와 학습 데이터 관리 절차를 전주기에 내재화하였다.

반면 한국은 인허가 단계부터 알고리즘 원리, 학습 데이터, 성능 검증 자료 제출을 의무화함으로써 분류 체계의 한계를 보완하는 선제적·보수적 접근을 택하고 있다.

변경 관리 제도에서도 상이한 양상을 보인다. 미국의 PCCP는 제조자가 사전에 제출한 계획 범위 내에서는 재허가 없이 업데

표 1. 미국-한국 규제체계의 분석 사항

구분	미국	한국
위험 등급 분류	• 사용 목적과 환자 위해 가능성에 따라 Class I–III으로 분류	• 사용 목적, 환자 상태·의료적 영향, 오작동 시 피해 수준을 기준으로 1~4등급으로 분류
분류 체계의 한계 보완	• 위험 등급 분류만으로 AI 특유 위험(편향·불확실성 등) 반영 부족 → PCCP·GMLP로 보완(업데이트/품질·학습관리)	• 분류 한계 보완을 위해 알고리즘 원리·학습데이터·성능검증 제출을 TPLC에 내재화(허가 단계부터 요구)
변경 관리	• PCCP: SaMD 전반에 적용, 사전계획 범위 내 업데이트는 재허가 불요 → 유연성/속도	• 사전변경계획 도입(주로 AI 소프트웨어 대상)이나, 핵심 알고리즘·성능 관련 변경은 변경허가 필수 → 보수적 안전 우선
전주기(TPLC) 관리	• PCCP 및 품질관리 체계 중심으로 TPLC 운영	• 임상근거·사이버보안·사용적합성 강화, 알고리즘/데이터/성능검증을 TPLC에 의무화
사후관리 · 운영	• 510(k) 중심 승인 → 임상검증 부족, 사후감시 중요	• 인허가 단계부터 엄격 심사, 폭넓은 임상근거 요구

이트를 허용하여 혁신적 발전을 촉진한다[3]. 이에 비해 한국의 사전 변경계획 제도는 일부 변경은 신속히 허용하되, 핵심 알고리즘이나 성능과 직결되는 변경은 반드시 재허가를 요구한다[4-5]. 즉, 미국은 유연성을, 한국은 안전성을 상대적으로 우선시하는 체계라 할 수 있다.

전주기 관리 측면에서도 차별화된다. 미국은 PCCP와 품질관리 체계를 중심으로[3], 허가 이후 단계에서 소프트웨어 업데이트 및 품질을 추적 관리하는 구조를 마련하였다. 반면 한국은 법제화를 통해 임상근거 제출, 사이버보안, 사용적합성, 알고리즘 검증을 인허가 단계에서부터 요구함으로써 전주기 관리 장치를 제도적으로 확보하였다[4-6].

사후관리 운영에서도 뚜렷한 차이가 존재한다. 미국은 다수의 SaMD가 510(k) 경로를 통해 신속 승인됨에 따라, 임상검증 부족이 지적되고 있으며 이에 따라 사후감시가 안전성 확보에서 핵심적 역할을 담당한다[1,7]. 반면 한국은 시장 진입 전 단계에서부터 엄격한 심사와 폭넓은 임상근거 제출을 요구하여, 사후관리보다는 사전 규제에 무게를 두는 특징을 보인다[4-6].

종합하면, 표 2에 명시된 바와 같이 미국은 기존 분류 체계의 한계를 사후적·유연한 관리 장치를 통해 보완하는 접근을 취하는 반면, 한국은 사전적·보수적 절차를 강화하여 안전성을 확보하는 방향으로 규제체계를 운영하고 있다.

3. 결론 및 시사점

본 연구는 미국과 한국의 AI 의료기기 규제체계를 위험등급 분류, 변경관리, 전주기(TPLC) 관리, 사후관리 측면에서 비교하였다. 두 국가는 모두 위험 기반 접근과 전주기 관리라는 공통 원칙을 따르지만, 미국은 혁신 촉진형, 한국은 안전 중심형으로 특징지을 수 있다.

첫째, 혁신과 안전의 균형이 과제다. 미국은 신속 승인으로 시장 진입을 촉진하지만 사후감시 부담이 크며, 한국은 안전성 강화로 혁신 속도가 제한될 수 있다.

둘째, AI 특화 규제와 국제 정합성 확보가 중요한 과제로 부상하고 있다. AI 의료기기는 데이터 편향, 알고리즘 불확실성, 생성형 모델의 예측 변동성과 같은 특수 위험을 지니므로 기존 위험등급 분류만으로는 안전성을 충분히 보장하기 어렵다[1]. 미국은 기존 의료기기 체계 내에서 이러한 문제를 관리하려 하지만 한계가 있으며, 한국은 이를 보완하기 위해 알고리즘·데이터·성능 검증 제출 의무화와 생성형 AI 가이드라인을 통해 선제

표 2. 미국-한국 규제체계 핵심 비교

구분	미국	한국
위험등급 분류	단순·유연	세분화·AI 특화
변경관리	유연성 강조	보수적 운영
전주기(TPLC) 관리	PCCP 및 품질관리 체계 중심	법제화 및 자료 제출 의무화
사후관리	사후관리 의존	사전검증 강화

적으로 대응하고 있다[5-6].

이와 동시에 국제적으로는 ISO/IEC가 AI 품질관리·신뢰성 평가 기준을 마련하고, IMDRF가 AI 의료기기의 전주기 관리(TPLC) 및 변경관리 지침을 연구하는 등 글로벌 차원의 정합성 확보가 추진되고 있다. 따라서 한국은 자국 규제체계를 이러한 국제 표준과 조화시키는 한편, 규제 제안국으로서 적극 참여하여 글로벌 시장 진출과 상호인정 체계를 선도적으로 이끌어갈 필요가 있다.

4. Acknowledgements

본 연구는 2025년도 식품의약품안전처 연구개발비(RS-2025-02213016)로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

본 연구는 식품의약품안전처의 규제과학인재양성 사업(R&D)으로부터 지원받아 수행되었습니다. (22183규제학367)

5. 참고 문헌

[1] National Academy of Medicine. *Artificial Intelligence in Health Care: The Hope, the Hype, the Promise, the Peril*. Washington, DC: National Academies Press; 2022.

[2] FDA. *Artificial Intelligence/Machine Learning (AI/ML)-Based Software as a Medical Device (SaMD) Action Plan*. 2021.

[3] FDA. *Marketing Submission Recommendations for a Predetermined Change Control Plan for AI/ML-Enabled Device Software Functions*. Aug 2025.

[4] 식품의약품안전처. *디지털의료제품 법령 시행에 따른 업무 안내서* (공고 제2025-038호). 2025.

[5] 식품의약품안전처. *인공지능기술이 적용된 디지털의료기기의 허가·심사 가이드라인 (민원인 안내서).* 2025.

[6] 식품의약품안전처. *생성형 인공지능 의료기기 허가·심사 가이드라인 (민원인 안내서).* 2025.

[7] FDA. *Medical Device Classification Regulations (21 CFR Part 860).* U.S. Code of Federal Regulations.

Poster-145

고위험 의료기기 치료재료 제조업체의 글로벌 시장 진출 전략 연구

주요국: 미국, 유럽, 일본, 중국 시장의 허가 이후 유통 및 마케팅 구조 분석

김윤주[1*], 류규하[1]

성균관대학교 의료기기산업학과[1]

Global Market Entry Strategies for High-Risk Surgical and Implantable Medical Device Manufacturers

Yoonju Kim[1*], Gyuha Ryu [1]

Department of Medical Device Industry at SAIHST, Sungkyun Kwan University, Korea

[*]didvkfld0806@naver.com

Abstract

This study examines global market entry strategies for high-risk surgical and implantable medical device manufacturers, focusing on post-approval distribution and marketing structures in the United States, Europe, Japan, and China. In the U.S., GPO and IDN networks dominate hospital purchasing, requiring both FDA approval and reimbursement access. Europe operates under a unified CE marking but with decentralized tenders and high price pressure. China's NMPA approval is followed by province-level VBP bidding, where bid success determines market access. Japan requires both PMDA approval and NHI listing, with entrenched multi-layered distributors. The findings highlight that tailored strategies reflecting each region's regulatory, procurement, and reimbursement systems are essential for sustainable global growth.

1. 연구 배경

고위험 외과용 치료재료 및 이식형 의료기기는 인체에 삽입되어 생체조직의 지혈, 봉합, 접착 또는 복원을 돕는 고위험 의료기기(Class III/IV)에 해당한다. 이러한 제품군은 생체적합성과 안전성 확보가 필수적이므로, 개발에서 인허가에 이르기까지 엄격한 규제 절차를 거친다. 그러나 실제 시장 진입은 인허가 승인 이후에도 각국의 조달 제도, 보험 체계, 유통 구조, 병원 구매 정책 등 복잡한 상업적 장벽에 의해 크게 좌우된다.

기존 연구는 주로 기술개발 및 인허가 취득 절차에 초점을 맞추었고, 승인 이후 시장 접근(post-approval phase)에 대한 국가 간 비교 연구는 부족하였다. 이에 본 연구는 미국, 유럽, 일본, 중국의 대표 4개국을 중심으로 고위험 의료기기 제조사의 허가 이후 유통 및 마케팅 구조를 체계적으로 비교·분석함으로써, 국내 제조업체의 글로벌 시장 진출 전략 수립에 실질적인 시사점을 제시하고자 한다.

2.연구 방법

연구 대상은 외과용 고위험(Class III/IV) 의료기기로, 봉합사, 지혈제, 실란트, 유착방지제, 스텐트 등 환자 체내에 직접 적용되는 제품군으로 한정하였다.

연구 방법은 질적 문헌 분석(qualitative document analysis)으로 설계하였으며, 각국의 규제기관(FDA, PMDA, NMPA, European Commission) 공식 문서, WHO 및 OECD 보건산업 자료, IQVIA 글로벌 의료기기 시장 리포트, 각국의 병원조달제도 관련 보고서를 종합 검토하였다.

분석 항목은 ① 인허가 승인 이후의 유통 구조, ② 병원 조달 및 입찰 제도, ③ 보험 및 수가 체계, ④ 마케팅·영업 전략으로 구분하였다. 또한 각 항목별로 시장 접근성에 미치는 요인을 정리하고, 제도적 차이에 따른 전략적 대응 방향을 도출하였다.

3. 연구 결과

(1) 미국 (United States)

- 시장: 미국은 민간 중심의 의료체계로, 병원 구매는 GPO(Group Purchasing Organization)와 IDN(Integrated Delivery Network)을 통해 이루어진다. FDA 승인 이후에도 HCPCS 보험코드 확보와 GPO 계약 진입이 필수적이며, 이를 충족하지 못하면 실질적인 판매가 어렵다. 유통 구조가 복잡하고 초기 진입 비용이 높지만, 일단 진입 시 장기적 및 안정적인 매출이 가능하다.
- 진출 전략: 현지 유통 파트너 또는 GPO 계약 경험이 있는 업체와의 협력이 필요하며, 제품의 임상적 가치뿐 아니라 비용 효율성을 함께 입증해야 한다. 또한 각 병원 그룹의 조달 프로세스에 맞춘 영업 접근과, 보험코드 발급을 위한 사전 데이터 확보가 중요하다.

(2) 유럽 (Europe)

① 영국 (United Kingdom)

- 시장: NHS(National Health Service)가 시장을 전적으로 통제하며, NHS Supply Chain을 통한 중앙 집중형 조달체계가 운영된다. 의료기기 구매는 공공 입찰을 통해 이루어지고, NICE 평가 결과가 제품 채택에 큰 영향을 미친다.
- 진출 전략: 영국 진입을 위해서는 NHS의 승인된 공급업체(Framework Agreement)로 등록하는 것이 필수적이다. 현지 딜러 또는 NHS 조달 경험이 있는 유통사를 통한 간접 진입이 효과적이며, NICE 임상근거 요건에 맞춘 임상데이터 확보가 중요하다.

② 독일 (Germany)

- 시장: 독일은 연방제 의료시스템으로, 병원 단위의 개별 계약이 일반적이며 공보험과 사보험이 병행된다.

보험수가 체계는 G-BA(Federal Joint Committee)가 관리, 병원은 품질과 비용을 기준으로 공급업체를 선택한다.

- 진출 전략: 병원 직접판매(Direct Sales) 또는 지역 유통망과의 제휴가 필요하며, 제품의 임상적 효율성뿐 아니라

경제적 효과를 강조해야 한다. 공보험 급여등재를 위해서는 G-BA 심의자료 준비가 필수적이다.

③ 프랑스 (France)

- 시장: 프랑스는 사회보장제도 기반의 공보험 체계로 운영되며, LPPR 수가 등재가 판매 전 필수 절차이다.

병원은 정부 예산 내에서 제품을 구매하며, 등재되지 않은 제품은 보상받기 어렵다.

- 진출 전략: LPPR 등재 신청 전 현지 대리인을 통한 법적 대표자 지정이 필요하다. 국가 건강보험청(HAS)의 평가 기준에 부합하는 임상자료와 가격근거를 확보해야 하며, 공공입찰 참여를 위한 프랑스 내 법인 설립 또는 현지 파트너 계약이 효과적이다.

④ 이탈리아 (Italy)

- 시장: 이탈리아는 지역 보건청(ASL, Azienda Sanitaria Locale)이 의료기기 조달을 담당하며, 주(州) 단위의 분산형 입찰이 운영된다. 조달 절차가 지역별로 상이하고 행정 절차가 복잡하여 시장 진입 속도가 느리다.

- 진출 전략: 각 지역 ASL 입찰에 대응할 수 있는 현지 대리점 확보가 필수이며, 가격 경쟁력과 더불어 장기 납품 신뢰성을 확보해야 한다. 또한 CE 인증 이후에도 지역당 등록절차가 별도로 필요하므로, 현지 법률자문 및 행정 대응 역량을 갖춘 파트너와의 협력이 중요하다.

⑤ 스페인 (Spain)

- 시장: 스페인은 17개 자치주가 각각 보건조달권을 보유하고 있으며, 지역 단위의 공공 입찰 구조가 복잡하다. 입찰가가 강하게 통제되어 가격 경쟁이 매우 심한 시장이다.

- 진출 전략: 자치주별 입찰일정 및 규정을 사전에 파악해야 하며, 현지 유통사(distributor)를 통한 간접 진출이 현실적이다. 가격 경쟁만으로는 지속 가능하지 않으므로, 제품 차별화와 학회 중심의 인지도 제고 활동이 병행되어야 한다.

즉, 유럽 시장은 규제(CE-MDR)는 통일되어 있으나, 조달·보험·입찰은 국가별로 분산되어 있으므로, 국가별 제도·입찰구조·파트너십 전략을 병행해야 시장 접근이 가능하다.

(3) 중국 (China)

- 시장: 중국은 공공 3급 병원이 시장의 주 수요처이며, 의료기기 유통은 지방정부의 집중입찰(VBP, Volume-Based Procurement)을 통해 이루어진다. 낙찰 가격이 곧 시장의 상한가로 작용하고, 낙찰 실패 시 판매가 불가능하다. 정부 주도의 가격 통제와 현지화(Localization) 정책으로 인해 외국계 제조사의 진입 장벽이 높다.

- 진출 전략: 현지 대리점 및 유통망을 활용한 단계적 진입이 효과적이며, 가격 경쟁력을 확보하기 위한 생산 현지화 전략이 요구된다. 지방정부의 조달 정책에 대한 지속적 모니터링과, 현지 병원 및 학회 네트워크를 통한 제품 인지도 제고가 필요하다.

(4) 일본 (Japan)

- 시장: 일본은 PMDA 승인 후 NHI(국가건강보험) 수가 등재가 필수이며, 이 과정이 시장 진입의 핵심 관문이다. 의료기기 유통은 총판(General Agent)과 지역 MS(Medical Supplier)가 담당하는 다단계 구조로 고착화되어 있다. 병원 내 제품 교체율이 낮고, 신규 제조사의 시장 진입이 어려운 보수적인 구조를 가진다.

- 진출 전략: 일본 내 신뢰성 높은 총판과의 파트너십 구축이 필요하며, 제품의 임상적 안전성과 품질 우수성을 명확히 입증해야 한다. KOL(Key Opinion Leader) 기반의 학술 마케팅과 장기적인 신뢰 관계 형성이 중요하다. 또한 NHI 수가 등재 절차와 평가 기준을 사전에 충분히 검토하여 전략적으로 대응해야 한다.

(5) 비교 및 시사점

4개국 모두 인허가 이후에도 조달·보험·유통의 구조적 요인이 시장 성패를 결정짓는다. 미국은 보험과 네트워크 진입, 유럽은 입찰 경쟁, 중국은 가격규제, 일본은 유통 고착화가 주요 제약으로 작용한다. 따라서 국내 제조업체는 국가별 제도적 특성에 맞춘 차별화된 시장 진입 전략(예: 현지 파트너십, 데이터 기반 가치 제시, 다국적 규제 대응 역량 확보)이 필요하다.

4. Acknowledgements

본 연구는 성균관대학교 의료기기산업학 석사과정 학위 논문의 일환으로 수행되었으며, 지도교수 류규하 교수님의 지도를 통해 진행되었다. 연구 수행 과정에서 의료기기 산업 관계자들의 실무적 자문과 조언에 깊이 감사드린다.

5.참고 문헌

[1] U.S. Food and Drug Administration (FDA). Medical Device Regulations and Guidance Documents. 2024.

[2] European Commission. Medical Device Regulation (EU) 2017/745 and 2017/746. Brussels, 2024.

[3] PMDA (Pharmaceuticals and Medical Devices Agency). Medical Device Review and Approval Process in Japan. 2023.

[4] NMPA (National Medical Products Administration). Guidelines for Volume-Based Procurement Implementation. Beijing, 2023.

[5] OECD. Health at a Glance 2023: OECD Indicators. Paris: OECD Publishing, 2023.

[6] WHO. Global Medical Device Market Structure and Procurement Systems. Geneva: WHO Press, 2022.

[7] IQVIA. Global Surgical Device Market Outlook. 2023.

[8] 한국보건산업진흥원. 「주요국 의료기기 시장동향 및 규제제도 비교분석 보고서」, 2023.

[9] 식품의약품안전처.「의료기기 산업 실태조사」, 2022.

Poster-146

선형 가중합 모델 기반 환자 맞춤형 의료 교육 영상 시청 앱 개발에 관한 기초 연구

한지승[1*], 윤세영[2], 정지우[1,4], 김근형[3], 김인철[2], 웨이췬[1,4]

계명대학교 공과대학 의용공학과[1]

계명대학교 의과대학 의학과[2]

계명대학교 공과대학 컴퓨터공학과[3]

주식회사 클레어오디언스[4]

A Pilot Study on the Development of a Personalized Medical Education Video Viewing Application Based on a Linear Weighted Model

Jiseung Han[1*], Seyoung Yun[2], Jiwoo Jung[1,4], Geunhyung Kim[3], Incheol Kim[2], Qun Wei[1,4]

Department of Biomedical Engineering, College of Engineering, Keimyung University[1]

Department of Medicine, College of Medicine, Keimyung University[2]

Department of Computer Engineering, College of Engineering, Keimyung University[3]

Clairaudience Co., Ltd.[4]

weiqun@kmu.ac.kr

Abstract

In this study, we developed a smartphone application designed to provide personalized educational videos from physicians during outpatient waiting periods. This initiative aims to address the low patient satisfaction often associated with long waiting times and short consultation durations in hospitals. The videos focus on six cardiovascular topics: heart failure, hypertension, arrhythmia, cardiovascular medications, heart transplantation, and valvular disease. To enhance the user experience, we implemented a personalized video recommendation algorithm that utilizes a weighted sum model based on patients' disease and medication information. For the APP effectiveness evaluation, outpatients were randomly assigned to one of three groups: the APP group, a printed educational material (PEM) group, or a Usual Care group. Patients in the APP group reported significantly higher satisfaction scores regarding waiting-time utilization compared to those in the PEM or Usual Care groups. The mean usability score for the APP was 4.16 ± 0.64, and physician satisfaction was highest in the APP group. These findings suggest that pre-consultation education through a personalized video application enhances patients' understanding and improves communication efficiency for both patients and physicians.

1. 연구 배경

우리나라 대학병원의 외래 진료는 환자가 긴 대기시간을 감수해야 하는 반면, 실제 진료 시간은 매우 짧게 배정되는 구조적 특성을 지닌다. 이는 환자들이 고난도의 진단과 치료를 위해 대학병원에 집중되는 경향과, 이에 비해 부족한 전문 의료 인력의 공급에서 비롯된다. 이로 인해 환자는 수십 분에서 수 시간을 기다린 뒤에도 진료실에서는 몇 분 안에 진찰과 처방을 받는 경우가 많고, 질환과 치료 과정에 대해 충분히 이해하지 못한 채 주치의의 판단에 의존하게 된다. 이러한 구조 속에서 충분한 설명이 어렵고, 결과적으로 환자는 수동적 태도에 머물며 주치의 역시 소통 부족으로 인한 낮은 만족도를 경험한다. 이를 해결하기 위해선 환자 및 주치의 간의 소통 효율을 극대화하는 것이 최적의 방법이나, 대다수의 환자는 의료 지식이 부족하여 주치의와 원활히 소통하기엔 한계가 있다 [1]. 따라서 본 연구에서는 긴 외래 대기시간을 효율적으로 활용하고 환자 의료 지식을 향상하기 위하여 대기시간 중 스마트폰 앱을 통한 환자 교육용 의료 영상 시청 방안을 제시한다.

최근 환자 교육용 영상을 통한 환자 만족도를 향상하고자 하는 연구는 활발히 진행되었다. 주치의와 환자 사이에서 발생하는 지식적 격차의 해결 방법으로써 환자들에게 효과적으로 의학적인 정보를 전달할 수 있는 매개체인 멀티미디어 기술이 주목받고 있고, 특히 영상 기반 교육은 시청각적 요소가 결합하여 단시간 내에 핵심 정보를 전달할 수 있어 환자 본인의 질병 이해도를 높일 수 있다는 장점이 존재한다 [2]. 이러한 결과는 영상 교육이 단순한 정보 전달을 넘어 환자에게 치료에 대한 적극적 참여를 유도할 수 있음을 나타낸다.

또한 최근 스마트폰 앱(APP)을 활용한 환자 교육이 의료 교육 분야에서 활발히 연구되고 있다. 하지만, 연구 결과에 따라 이러한 디지털 교육 도구가 대체로 효과적이나 실제 임상에서 환자가 사용하기에 앱 디자인이 충분히 환자 친화적이지 않고, 영상 속 인물이 환자의 주치의가 아니어서 몰입감과 신뢰가 떨어지는 점을 한계로 지적하였다. 이러한 한계점으로 인해, 환자가 가정에서 자발적으로 영상을 꾸준히 시청하는 경우도 드물었다 [3].

이에 본 연구에서는 주치의가 직접 등장하는 맞춤형 교육 영상을 탑재하고 환자 친화적인 UI/UX 설계를 반영하였으며, 환자의 진단명, 처방 약제, 주치의 설정정보를 기반으로 한 알고리즘을 적용하여 개인화된 영상 추천과 퀴즈 기능을 제공함으로써 환자가 능동적으로 학습할 수 있도록 설계하였다. 주치의가 환자에게 따로 영상을 배정해놓으면 가중치가 가장 높게 책정되어 영상 목록의 최상단에 위치하게 된다. 이어서 환자의 진단명에 해당하는 카테고리의 영상, 처방약제 순서로 배정되었다. 이러한 가중치 배정 방안을 바탕으로 영상 알고리즘 가중치를 부여하여 환자별 맞춤형 교육 경로를 제공하였다. 이를 통해 사용성이 낮은 앱 디자인과 몰입감, 신뢰가 떨어지는 기존

멀티미디어 방식의 한계를 보완하고, 환자 만족도를 최대화하는 외래 대기 시간을 활용한 맞춤형 환자 교육 앱을 개발하고자 한다.

2.연구 방법

본 연구에서는 환자가 본인 질환에 대한 의학 지식을 쉽게 이해할 수 있도록 심혈관 질환의 여섯 가지 주요 분야(심부전, 고혈압, 부정맥, 심혈관 약제, 심장이식, 판막질환)를 기준으로 제작되었다. 또한, 영상에 대한 환자의 몰입도 및 친근감을 높이기 위해 환자가 실제로 진료를 받는 주치의가 설명하는 모습을 직접 촬영하거나 딥페이크 기반 기술을 활용하여 주치의가 영상에 등장하도록 하였다.

연구에서는 심혈관 환자의 특성을 고려한 UI/UX 설계를 적용하였다. 심혈관 환자는 상대적으로 스마트폰 사용에 익숙하지 않은 고령자인 경우가 많다. 이러한 특수한 사용환경에 따라 편의성을 최우선으로 고려하기 위하여 사용자 시력에 따른 텍스트 크기, 사용하기 쉬운 버튼 배치, 사용 시나리오 3요소를 고려하여 시스템이 설계되었다.

또한 본 연구에서는 맞춤형 교육 영상을 제공하기 위해 환자 데이터 기반 선형 가중합 모델 활용 알고리즘을 설계하였다. 본 알고리즘은 크게 질병 및 약제 등록, 영상 등록, 사용자 영상 리스트 요청의 세 단계로 구성된다. 여기서 환자의 질환 및 약제에 따라 환자 개인 별로 기본 가중치가 부여된 상태이며 개별 영상의 질병 및 약제 가중치와 연계되어 개인 맞춤 영상이 앱 영상 리스트 상단에 우선적으로 게시된다. 또한 주치의가 특정 영상을 지정할 경우 기존 가중치에 추가 가중치가 더해져 우선순위가 결정된다.

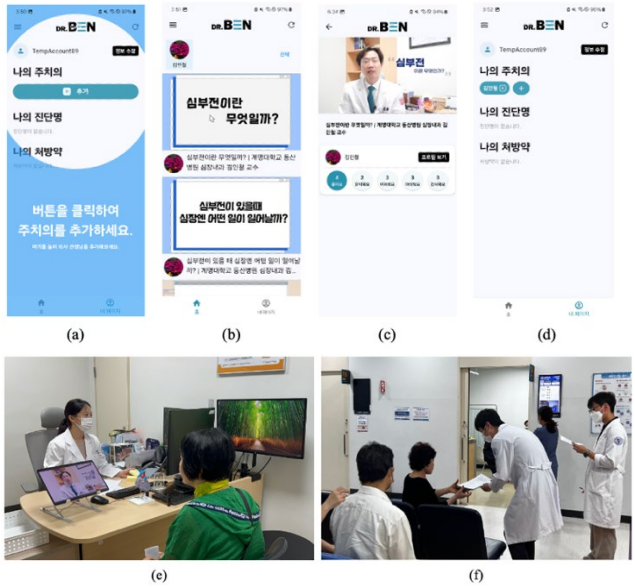


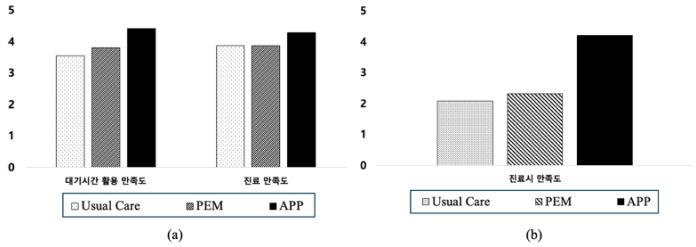
그림 1 개발한 스마트폰 앱 일부 화면 및 외래 진료 중 본 연구 사진: (a) 시작 가이드 (b) 영상 추천, (c) 영상 재생, (d) 주치의 선택화면, (e) APP군 영상 시청 모습, (f) 진료 후 만족도 설문 진행 모습.

개발한 스마트폰 앱의 심혈관 외래 진료 만족도에 미치는 영향을 연구하기 위하여 병원에서 내원하는 환자를 대상으로 임상시험을 진행하였다(IRB 승인번호: 2023-07-045-089). 교육에 따른 진료 만족도를 분석하기 위하여 진료 전 교육 개입 여부에 따라 연구참여자를 영상 기반 앱을 제공받은 APP군, 브로슈어 형태의 인쇄 자료를 제공받은 PEM(Printed Educational Material)군, 그리고 별도의 사전 교육을 받지 않은 Usual Care군으로 무작위 배정표 생성을 통해 균등하게 배정하였다. 모든 진료 절차는 영상 및 문서 자료 제공 여부를 제외하고 동일하게 유지되었다. 진료 후, 연구 참여 환자는 환자 만족도 및 앱 사용성 평가에 대한 설문을 시행하며, 동시에 주치의를 대상으로 해당 환자 진료에 대한 주치의의 만족도 설문을 시행한다. 모든 분석은 양측 검정(two-sided test)을 원칙으로 하였으며, 통계적 유의수준은 $p<0.05$로 설정하였다.

3. 연구 결과

그래프 1은 환자와 의료진 만족도 조사 결과이다. 그래프 1(a)의 환자 조사에서 APP군은 진료 전 대기 시간 활용도와 진료 후 만족도 모두에서 가장 높은 점수를 보였다. 대기 시간 활용에 대한 만족도 설문의 두 가지 문항 모두에서 APP군의 점수가 가장 높았다. 전체 평균은 Usual Care군에서 3.55±0.87점, PEM군에서 3.80±0.83점이었으며, APP군에서 4.40±0.55로 가장 높았다. 이를 통해 진료 전 대기 시간 동안 앱을 통한 사전 교육이 참여자에게 사전 교육의 중요성과 필요성을 인식시키고, 진료 내용에 대한 이해도를 향상시키는 데 가장 효과적인 방법으로 확인되었다.

그래프 1(b) 의료진 대상 조사에서도 APP군 환자를 진료한 경우의 만족도가 Usual Care군과 PEM군에 비해 현저히 높게 나타났다. 주치의 진료 만족도 설문 결과이다. 주치의가 시행한 각 환자에 대한 만족도 설문의 두 가지 문항 모두에서 APP군에서의 점수가 가장 높았다. 전체 평균은 Usual Care군에서 2.08±0.47점, PEM군에서 2.32±0.72점이었으며, APP군에서 4.20±0.43로 가장 높았다. 이를 통해 환자와 마찬가지로, 주치의 또한 APP군 환자의 이해도가 증가한 것을 진료 중에 느꼈다는 것으로 분석할 수 있다. 또한 질환에 대한 충분한 이해도를 가진 환자를 진료할 때 주치의의 진료 만족도가 높다는 것을 파악할 수 있다. 앱 사용성 평가 설문 결과에 따라 본 연구에서 개발하고 활용한 앱이 교육적 효과와 환자 친화적 사용성 경험을 동시에 달성할 수 있는 수단임을 입증하였다.



그래프 1 환자와 의료진 만족도 조사 결과: (a) 환자 대상 대기 시간 및 진료 만족도 결과, (b) 의료진 대상 진료 만족도 결과

본 연구는 단일 기관에서 주치의 한 명을 대상으로 진행되었고, 환자의 표본수가 62명이므로 일반화하기에는 한계가 있다. 또한 더 많은 표본을 확보하여 각 분류군 간 평균 연령대의 차이도 최소화 할 필요가 있다. 따라서 150명 이상의 표본 수를 확보하고 여러 명의 주치의를 대상으로 다기관에서 연구를 이어서 진행할 방법을 모색할 것이다.

4. Acknowledgements

본 연구는 2025년도 중소벤처기업부의 창업중심대학 지원사업에 의한 연구 결과이며, 주관기관인 대구대학교 창업지원단의 지원을 받아 수행되었음 [20326479]

5.참고 문헌

[1] 고유경. 일 종합병원 외래환자의 진료대기시간 및 환자만족도, 재이용 의도와의 관계.간호행정학회지. 2010;16(3):219–28. doi. artiId=ART001481684

[2] Bassett SF, Prapavessis H. A test of an adherence-enhancing adjunct to physiotherapy steeped in the protection motivation theory. Physiotherapy theory and practice. 2011;27(5):360–72.

[3] Choi E-Y, Park J-S, Min D, Ahn S, Ahn J-A. Heart Failure-Smart Life: a randomized controlled trial of a mobile app for self-management in patients with heart failure. BMC cardiovascular disorders. 2023;23(1):7.

Poster-147

Development of a Real-Time Multi-Biosignal Measurement and Visualization System Using Raspberry Pi and OpenBCI.

Jung Rae Hyun[1], Ari Kurniawan Saputra[2], Ki Moo Lim[12*]
Department of Biomedical Engineering[1], Kumoh National Institute of Technology, Korea
Department of IT Convergence Engineering[2], Kumoh National Institute of Technology, Korea
[*]kmlim@kumoh.ac.kr

Abstract

This study presents a real-time multi-biosignal recording and visualization system integrating the OpenBCI 16-channel module with a Raspberry Pi 5 controller. The device is designed for educational and research applications requiring synchronized acquisition of physiological signals such as ECG, PPG, PCG, EEG, EMG, hand force, body temperature, lung volume, blood pressure, and oxygen concentration. A hybrid graphical user interface (GUI) was developed using a JavaScript-based front end and a Python-based back end, both installed on the Raspberry Pi for improved responsiveness and real-time performance. The system employs a 14-inch touchscreen monitor directly connected to the Pi, allowing intuitive operation without external devices. Users can select active channels, visualize biosignals in real time, apply a 60 Hz notch filter, perform FFT-based spectral analysis, and continuously log data at 125 Hz. This compact architecture enables synchronized acquisition across multiple sensor modalities, generating high-resolution datasets suitable for advanced data analysis and AI-based feature extraction. The proposed system provides a cost-effective, extensible platform for studies in cardiopulmonary physiology, neuromuscular coordination, and personalized healthcare research.

1. Introduction

Multi-modal biosignal acquisition is essential in biomedical research, particularly in analyzing cardiopulmonary, neuromuscular, and physiological interactions. Previous studies have demonstrated that synchronized monitoring of ECG, PPG, and PCG can provide valuable indicators such as pulse arrival time (PAT) and pulse transit time (PTT), which are correlated with blood pressure and cardiac electromechanical delay [1][2]. However, existing laboratory-grade systems are expensive and often unsuitable for portable or real-time analysis.

To address these limitations, this work introduces a compact and low-cost platform capable of acquiring synchronized signals from multiple biosensors, including ECG, PPG, PCG, EEG, EMG, hand force, body temperature, lung volume, and oxygen concentration. The system operates in three measurement modes: (1) multi-biosignal mode for integrative physiological studies, (2) 16-channel EEG mode for neurophysiological assessment, and (3) 12-lead ECG mode for cardiac analysis.

The proposed system integrates the OpenBCI Cyton–Daisy board for high-resolution biosignal acquisition and a Raspberry Pi 5 single-board computer for embedded signal processing and data management. This configuration allows full autonomy without external PCs while maintaining low latency and flexible control through a hybrid graphical interface built with JavaScript and Python. The design aims to bridge the gap between open-source research tools and professional biomedical data acquisition systems.

2. Materials and Methods

The hardware configuration consists of a 16-channel OpenBCI Cyton–Daisy module connected via USB to a Raspberry Pi 5 running a custom Linux-based interface. Power is supplied by a regulated Li-ion battery to ensure safety during human-subject testing. Hardware switches are used to toggle between three operational modes depending on the study protocol.

The system uses a 14-inch capacitive touchscreen directly connected to the Raspberry Pi's HDMI and USB ports. This direct integration significantly improves responsiveness and reduces latency during real-time visualization. The device system schematic and prototype are shown in Figure 1 and Figure 2.

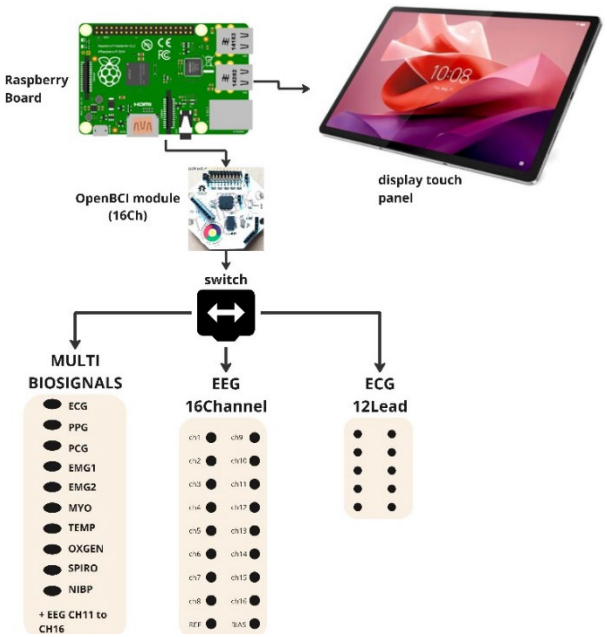


Figure 1. Multi-biosignal measurement device system

The GUI software was implemented as a hybrid application, combining a JavaScript-based front end for interactive visualization and a Python-based back end for data acquisition and processing. The backend incorporates PyQtGraph and SciPy libraries for real-time plotting, filtering, and spectral analysis. The GUI provides features such as:

- Channel selection and live signal display,
- Configurable 60 Hz notch filtering for line-noise suppression,
- FFT-based amplitude spectrum analysis for EEG and EMG, and
- Continuous data logging at 125 Hz in CSV format.

All recorded data are time-synchronized, enabling multi-modal signal fusion for advanced processing and potential integration with machine-learning-based physiological analysis frameworks.



Figure 2. Prototype of Multi-Biosignal Measurement Device

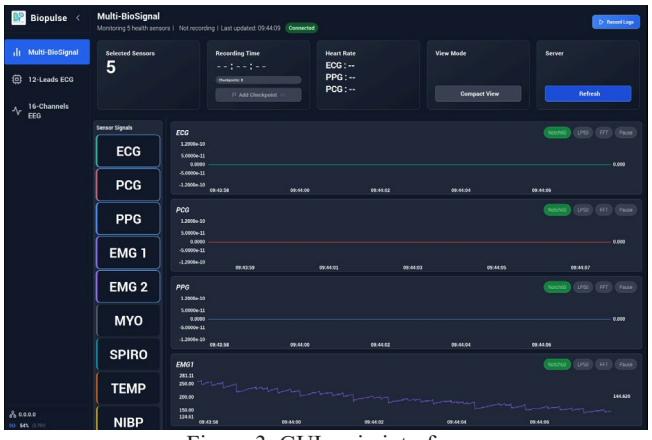


Figure 3. GUI main interface

3. Result and Discussion

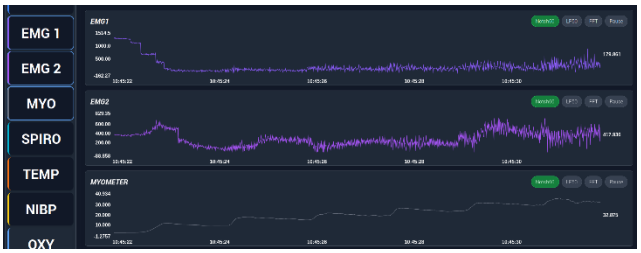
The ECG, PCG, and PPG traces in Figure 4(a) exhibit distinct temporal alignment, confirming synchronized sampling among cardiovascular sensors. Such a configuration enables quantitative analysis of timing metrics—such as pulse arrival time (PAT) and pulse transit time (PTT)—which are essential for cuffless blood pressure estimation and electromechanical delay assessment [1]–[3]. The PPG waveform showed consistent pulse morphology, while the PCG trace revealed clear S1–S2 heart sounds corresponding to ECG R-peaks.

In Figure 4(b), EMG1 and EMG2 signals captured muscle activation from wrist extensor and flexor groups, respectively, with the Myometer channel displaying the corresponding mechanical force output. The simultaneous recording of electrical and mechanical responses supports detailed evaluation of neuromuscular coordination and timing relationships. The signals maintained a stable baseline and low noise floor, indicating effective 60 Hz notch filtering and robust grounding.

The system demonstrated high signal fidelity and low visualization latency (< 25 ms). Compared with commercial research platforms such as the Biopac MP-160, the proposed design achieved comparable waveform quality while reducing hardware cost by more than 80%. The open-source architecture allows flexible modification of channel mapping, filtering parameters, and analytical routines, making it suitable for educational use and advanced biomedical research in digital health and physiological modeling.



(a)



(b)

Figure 4. The capture of the GUI showed (a) ECG, PCG, and PPG; (b) EMG1 (wrist extensor), EMG2(wrist flexor), and Myometer.

4. Acknowledgments

This research was partially supported by the Ministry of Food and Drug Safety (24212MFDS266, 20%), National Research Foundation of Korea (NRF, 40%) under the Basic Science Research Program (2022R1A2C2006326), and Ministry of Science and the Institute of Information & Communications Technology Planning & Evaluation(IITP)-Innovative Human Resource Development for Local Intellectualization program grant funded by the Korea government(MSIT)(IITP-2025-RS-2020-II201612, 40%)

5. References

[1] M. H. Askarian, A. Nouri, and K. Nazari, “Cuff-less blood pressure prediction from ECG and PPG signals using a hybrid deep learning model,” Front. Physiol., vol. 13, 2022.

[2] S. Chowdhury, S. Karmakar, and S. Mitra, “Pulse transit time-based continuous cuffless blood pressure measurement,” Sci. Rep., vol. 7, 2017.

[3] H. Kim, D. Chung, and J. Lee, “Development of a real-time cuffless blood pressure measurement system using a microphone instead of PPG,” Sensors, vol. 23, no. 3, p. 1684, 2023.

4] L. Sörnmo and P. Laguna, Bioelectrical Signal Processing in Cardiac and Neurological Applications, Elsevier, 2005.

Poster-148

AI 기반 의료기기 규제의 주요국 비교와 국내 표준 제고 및 대응 전략

손지수, 이주연, 김영모*

건양대학교 의공학과 의료기기규제과학연구실

Comparative Analysis of AI-Based Medical Device Regulations in the European Union, United States, and South Korea: Strategies for Advancing Domestic Standards and Regulatory Responses

Jisoo son, Juyeon Lee, YoungmoKim*

Medical Device Regulatory Science Laboratory, Department of Biomedical Engineering, Konyang University, Korea

*ymkim@konyang.ac.kr

Abstract

The rapid advancement of AI technologies and the increasing risks associated with AI-based medical devices necessitate urgent regulatory refinement. This study aims to enhance the international alignment of Korea's Digital Medical Products Act by incorporating the U.S. PCCP model to improve flexibility in AI updates and by referencing the EU AI Act to strengthen security review criteria against adversarial attacks, a characteristic risk of AI systems. Furthermore, it proposes extending GMP quality management to include the maintenance of AI model performance and security management, thereby contributing to the establishment of evaluation standards that ensure lifecycle-wide reliability of AI-based medical devices.

1. 연구 배경

인공지능(AI) 기술이 LLM(대규모 언어 모델)을 활용한 진단지원, 임상 의사결정, 데이터 해석 등 다양한 형태로 확산되면서 각국은 이를 규제하기 위한 가이드라인을 마련하고 있다. 이러한 변화는 의료기기 분야의 혁신을 촉진하는 동시에 예측 불가능한 결과를 초래할 수 있는 잠재적 위험도 내포하고 있다. 특히 대규모 입출력이 가능한 LLM을 비롯하여 콘텐츠 생성형 제너러티브 AI와 자율적으로 작동하는 피지컬 AI 등의 기술은 Hallucination, Violence 등 새로운 신뢰성 문제를 야기하여 기존 규제 체계만으로는 안전성과 유효성을 담보하기 어렵다. 이에 기술 발전 속도에 부합하는 새로운 규제와 표준의 마련이 요구된다.

미국과 유럽연합(EU)는 각각의 AI 규제 프레임워크를 수립하여 기술 혁신과 환자 보호의 균형을 모색하고 있으며, 국제표준화기구(ISO)와 국제전기기술위원회(IEC)는 IEC 62304, IEC 63450, IEC 63521 등 AI 의료기기 관련 국제 표준을 논의 중이다. 대한민국 또한 「디지털의료제품법」 제정을 추진하며 국제적 흐름에 발맞추고 있으나, 규제의 효율성과 산업 적용성 측면에서 보완이 필요하다.

본 논문은 주요국의 AI 규제 및 표준 동향을 비교·분석하고, 국내 법제의 구조적 한계를 진단하여 국제적 정합성과 기술 발전에 부합하는 규제 체계 방향을 제시하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 주요국(EU, 미국) 규제 체계 및 동향 분석

첫째, EU의 AI Act 분석은 AI 시스템이 초래할 위험 수준에 따라 규제 의무를 차등 적용하는 위험 기반 접근 방식을 중점적으로 다룬다. AI 시스템을 △허용 불가, △고위험, △제한적 위험, △최소 위험의 네 가지 범주로 명확히 분류하고 이에 따라 의무 사항을 차등 적용한다.

의료 AI는 일반적으로 '고위험' 시스템으로 분류되어 AI법의 투명성, 위험 관리, 데이터 거버넌스 등 광범위한 의무를 기존 의료기기 규정(MDR)과 동시에 적용받게 된다. 고위험 AI는 시장 출시 전 적합성 평가를 의무적으로 받아야 하며, 높은 수준의 기술 문서화, 투명성, 인간 감독 및 사이버 보안 요건을 충족해야 한다. 이는 AI의 신뢰성을 확보하고 시민의 기본권과 안전을 강력하게 보호하는 것을 목표로 한다.

둘째, 미국 AI 규제는 시장 경쟁력 촉진에 중점을 둔 연방정부의 정책 기조부터 시작한다. 트럼프 행정부의 'AI Action Plan' 등을 통해 AI 분야의 규제 부담을 최소화하고 AI 소프트웨어 및 하드웨어의 해외 수출을 촉진함으로써 민간의 자율적인 발전을 적극적으로 유도하며, 신속한 기술 개발 속도를 지원하는 효과를 가져온다.

연방 차원의 포괄적인 AI 규제 법안이 없는 상황에서도 개별 주 정부가 자체적인 AI 법안을 경쟁적으로 도입하여 규제의 공백을 메우고 있다. 이러한 주 정부의 입법 활동은 콜로라도의 'AI 소비자보호법(SB 24-205)'과 캘리포니아의 'AI 투명성법(SB 942)'에서 나타나듯이 AI 활용의 투명성 확보와 소비자 보호를 목표로 시민의 권익을 능동적으로 보호하는 데 주력하고 있다.

2.2 대한민국 규제 체계 및 동향 분석

대한민국은 AI 및 디지털 의료기기의 급속한 발전에 대응하기 위해 「디지털의료제품법」과 「AI 기본법」을 제정하여 제도적 기반을 구축하고 있으며, 식품의약품안전처 인공지능 의료기기 혁신지원센터(AIRIS)를 중심으로 세부 가이드라인과 인허가 체계를 구체화하고 있다. 특히 식품의약품안전처는 국제 의료기기 규제당국자 포럼(IMDRF) 등에서 AI 의료기기 평가 기준 마련을 주도하고, 미국·EU 등 주요 규제기관과 협력을 통해 글로벌 규제 논의를 선도하고 있다.

2025년 시행된 디지털의료제품법은 기존 의료기기법의 한계를 보완해 디지털 치료제·AI 의료기기 등을 포괄하고, 위험도 기반 평가 체계와 사후관리 규정을 강화하였다. 한편 2026년 시행을 앞둔 「AI 기본법」은 모든 산업 분야를 포괄하여 고위험 AI 관리, 신뢰성 확보, 이용자 보호 등을 규율하는 기본적 법체계를 제시한다.

이에 따라 향후에는 세부 시행령과 가이드라인의 정비를 통해 개인정보보호법 등 기존 법률과의 정합성을 확보하고 기술 변화에 대응할 수 있는 유연한 규제 체계를 구축하는 것이 주요 목표로 제시되고 있다.

3. 대한민국 AI 의료기기 규제의 개선 방향

3.1 AI 의료기기 변경 관리 제도의 유연성 확보 방안

미국 FDA의 PCCP(Predetermined Change Control Plan) 모델과 대한민국「디지털의료제품법」의 '변경 관리 계획'을 비교·분석하였다. 현행 국내 제도는 AI/ML 기반 의료기기의 반복적인 성능 개선을 반영하고자 '변경 관리 계획'을 도입하였으나, '중요한 사항'에 해당하는 변경을 엄격히 해석할 경우 AI 모델의 재학습이 빈번히 변경 허가 대상으로 분류되어 심사 지연과 혁신 저해를 초래할 수 있다는 한계를 지닌다. 반면 미국 FDA의 PCCP는 최초 허가 시 향후 변경 범위와 검증 프로토콜을 사전 승인함으로써 승인된 범위 내에서는 추가 심사 없이 업데이트를 허용하여 인허가 절차의 유연성과 신속성을 확보한다. 이러한 차이에 주목하여 본 연구는 국내 제도 개선 방향으로 '중요한 사항'에 해당하더라도 (1) 최초 허가 시 제출된 검증 프로토콜에 따라 안전성과 유효성이 확보되고, (2) 기기의 의도된 사용 목적을 벗어나지 않는 경우에는 보고 절차만으로 이행할 수 있는 예외 조항을 마련할 필요가 있다.

3.2 AI 의료기기 보안 체계 강화 방안

AI 기반 디지털의료기기는 소프트웨어 의존성과 네트워크 연결성을 특징으로 하며, 학습 데이터에 기반하여 진단 결과를 도출한다. 이러한 특성은 기존 의료기기와 달리 전통적 사이버보안 위협뿐만 아니라 AI 모델의 신뢰성을 근본적으로 저해하는 새로운 위험을 수반한다. 현행「디지털의료제품법」은 전자적 침해행위 예방 및 대응체계를 규정하고 있으나 인허가 심사 단계에서 AI 특유의 위험을 충분히 반영하지 못하는 한계가 존재한다. 이에 따라 산업계의 기술 성숙도를 고려한 단계적 가이드라인 마련과 지원 체계를 병행함으로써 규제의 실효성을 높이면서도 기업이 제도적 요구사항을 원활히 충족할 수 있는 기반을 마련해야 한다. 또한 EU AI Act를 참조하여 시스템 취약점 방어 측면에서는 보안 아키텍처 문서화, 위험 모델링 보고서, S-BOM 제출 등을 단계적으로 의무화하고, AI 특유의 위험 방어 측면에서는 적대적 공격과 데이터 오염 방지 대책 등 AI 모델의 안정성 검증 자료 제출을 강화할 필요가 있다.

3.3 AI/ML 기반 GMP 심사 기준의 한계와 보안

AI/ML 기반 디지털의료기기는 지속적인 학습과 업데이트를 통해 성능을 개선하나, 동시에 성능 저하와 보안 위협이라는 고유한 위험을 내포한다. 현행「디지털의료기기 제조 및 품질관리 기준(GMP)」은 소프트웨어 특화 품질관리 체계(별표 2·3·4)를 적용하도록 규정하고 있으나 실제 심사에서는 이를 뒷받침할 구체적 문서화가 미비하여 점진적으로 발생하는 자료에 의존하는 한계가 존재한다.

이에 본 연구는 '디지털의료기기 AI 제어조치 심사기준'의 8개 항목을 보완하기 위해 (1) AI/ML 기능 모델 성능 유지율 관리 항목과 (2) AI/ML 기능 모델 보안 관리 항목을 추가할 것을 제언한다.

4. 연구결과 및 고찰

대한민국 AI 의료기기 규제 체계의 개선 방향을 도출하고, 주요국의 정책 사례와 비교를 통해 국내 제도의 구조적 한계를 규명하고, 단계적 규제 접근의 필요성을 도출하였다.

첫째, 변경 관리 제도의 유연화 방안은 AI 모델 업데이트 주기를 단축하고 불필요한 재심사를 최소화함으로써 산업 혁신과 인허가 효율성 제고에 기여할 것으로 기대된다. 식약처는 이를 통해 심사 자원을 효율적으로 활용할 수 있으며, 기업은 예측 가능한 개발 로드맵을 구축할 수 있다.

둘째, 보안 체계 강화 방안은 AI 의료기기의 기술적 안정성 및 국제 규제 정합성 확보에 효과적이다. 특히 단계적 보안 의무화, 데이터 검증 체계 명문화, S-BOM 관리 등은 EU AI Act와의 호환성을 높여 해외 진출 경쟁력을 향상시킬 것이다.

셋째, GMP 심사 기준의 구체화는 기존 품질관리체계가 제공하지 못했던 AI 특화 리스크 대응을 가능하게 하며, 성능 유지율 관리 및 보안 검증 항목 도입은 장기적 모델 신뢰성 보장에 기여할 것이다.

이러한 개선은 단순한 규제 강화가 아닌 안전성과 혁신성의 균형을 추구하는 방향으로 이루어져야 한다. 결과적으로 본 연구에서 제시한 제도 개선 방향은 국내 기업의 자율적 혁신을 촉진하고, 동시에 환자 안전성과 신뢰성을 강화하는 규제 생태계 조성에 기여할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구는 AI 기반 의료기기의 동적 특성을 반영한 합리적 규제 체계 구축을 목표로 미국·EU 등 주요국과의 비교 분석을 통해 대한민국 제도의 개선 방향을 제시하였다.

결론적으로 (1) 변경 관리의 사전 승인 체계 도입, (2) AI 보안 및 데이터 검증 절차의 단계적 의무화, (3) AI/ML 특화 GMP 항목의 신설이 핵심 개선 과제로 도출되었다.

이러한 개선은 단기적으로는 인허가 절차의 효율성을 높이고, 장기적으로는 글로벌 규제 정합성 확보 및 산업 경쟁력 강화로 이어질 것이다. 향후 연구에서는 AI 의료기기 성능 검증 자동화, 데이터 생명주기 관리, 지속적 모니터링 체계 구축 등 구체적 평가 기준을 정립하여 대한민국이 국제 AI 의료기기 규제 표준 선도국으로 자리매김할 수 있도록 기여해야 한다.

6. 참고 문헌

[1]「디지털의료기기 제조 및 품질관리 기준」, 식품의약품안전처 고시 제2025-28호, 2025.
[2]「디지털의료제품법 시행규칙」, 총리령 제2025호, 2025.
[3]「인공지능 발전과 신뢰 기반 조성 등에 관한 기본법」, 대한민국 국회 제정, 과학기술정보통신부 소관, 2024.
[4] 유럽연합(EU),「인공지능법(Regulation (EU) 2024/1689, Artificial Intelligence Act)」, 2024. (유럽의회 및 이사회 공동제정)
[5] 미국 식품의약국(FDA),「인공지능·기계학습 기반 의료기기 소프트웨어 변경에 대한 규제 프레임워크 제안(PCCP 모델)」, 2019.

Poster-149

IEC 62304 1.1판과 2판의 비교 분석을 통한 기업 대응 전략

정민혁, 김영모
건양대학교 의공학과

Corporate response strategies through comparative analysis of IEC 62304 editions 1.1 and 2.

wjdalsgur57@naver.com, ymkim@konyang.ac.kr

Abstract

This study compares IEC 62304 Editions 1.1 and 2 (draft), analyzing key differences and suggesting appropriate corporate response strategies. The existing Edition 1.1 scoped medical device software to a Class A/B/C safety classification system. In contrast, Edition 2 expanded the scope to include healthcare software, implemented a risk-based classification system based on Rigor Levels I/II, incorporated security into the entire lifecycle and incorporated AI and Agile into Annex E/F. These changes require companies to not simply supplement documentation but to comprehensively redesign their operating systems. Companies should prepare for these changes, including establishing evaluation and reevaluation systems for Rigor Levels, implementing static code analysis and risk/defect linkage management, implementing AI and security management, and operating an Agile-based evidence system. This study systematically organizes the structural differences between Editions 1.1 and 2 and presents practical strategies for companies to address each change, thereby providing basic data for future standards compliance and regulatory response.

1. 서론

의료기기 소프트웨어는 환자 안전과 직결된다. 이에 따라 소프트웨어 개발 및 유지보수 전 과정을 규율하는 국제표준인 IEC 62304는 2015년도에 나온 IEC 62304 1.1판에서는 Class A/B/C 기반 안전 등급 체계와 전통적 수명주기를 중심으로 구성되었으나, 적용 범위가 의료기기에 한정되고 보안 요구가 제한적이며 등급 체계가 모호하다는 한계를 보였다. 그에 반해 헬스케어 산업은 웰니스 장비 등 건강 소프트웨어의 확산과 함께 AI 기반 소프트웨어의 등장으로 데이터 품질, , 편향 등 새로운 위험 요인을 맞이하였다. 이를 반영해 제정 중인 IEC 62304 2판은 구조적 변화를 도입하기 위해 개발 중에 있다. 엄격 등급(Rigor Levels) I/II 기반의 위험 평가 방식을 적용, 적용 범위를 건강 소프트웨어까지 확대 부속서 E 신설 등의 구조적 변화를 도입하고 있어, 본 연구에서 IEC 62304 1.1판과 2판의 차이를 통해서 기업이 준비해야 할 대응 방안을 제시한다.

2. 연구 방법

본 연구는 IEC 62304의 1.1판과 2판 초안을 중심으로 비교 분석을 수행하였으며 1.0판도 보조적으로 참조하였다. 연구 방법은 다음과 같이 진행되었다.

첫째, 각 항목에 대해서 IEC 62304 원문을 직접 비교하였다. 1.1판과 2판의 절 구조와 문구를 대조하고, 변화된 부분을 정리하였다.

둘째, 원문 비교 결과를 토대로 10가지 핵심 변화 항목을 도출하였다.

셋째, 도출된 변화 항목을 소프트웨어 수명주기 단계에 따라 분류하고, 각 단계별로 기업이 준비해야 할 요구사항과 대응 요소를 정리하였다.

3. 연구 결과

첫째, 적용 범위는 의료기기 소프트웨어에 한정되던 1.1판과 달리 2판에서는 건강 소프트웨어까지 확대되었다. 2판에서는 소프트웨어의 종류나 용도에 따라 구분하던 기존 체계에서 벗어나, 위험 수준에 따라 동일한 관리 원칙을 적용하는 위험 기반 틀을 도입하였다. 이는 의료기기와 건강 소프트웨어를 하나의 기준에서 평가하기 위함으로, 안전에 미치는 영향이 적은 소프트웨어에는 절차를 단순화하고, 위해상황에 직접 관여하는 고위험 소프트웨어에는 강화된 관리 활동을 요구하기 위한 것이다. 따라서 의료기기 소프트웨어라 하더라도 위험분석 결과 위해상황에 기여하지 않거나 외부 통제 수단으로 안전이 확보되는 경우에는 엄격 등급 I/II로 분류되어 간소화된 절차를 적용할 수 있다. 이에 따라 기업은 제품의 성격을 명확히 분류하고, 웰니스 소프트웨어라 하더라도 최소한의 수명주기 관리 절차와 증빙 체계를 마련해야 한다.

둘째, 기존의 안전등급 체계에서 엄격 등급 I/II 기반의 위험 중심 관리 방식으로 전환되었다. 또한 2판에서는 소프트웨어의 위험 수준에 따라 활

동을 두 단계로 구분하였다. 모든 소프트웨어가 공통으로 수행해야 하는 기본 절차를 [엄격 등급 I/II]로 정의하고, 여기에 위험 관리와 안전성 확보를 위해 추가적으로 요구되는 활동을 [엄격 등급 II]로 구분하였다. 기업은 개발계획 단계에서 엄격 등급 평가·재평가 절차를 마련하고, 요구사항 관리부터 변경 관리에 이르기까지 엄격등급 지정과 증거 문서를 유지해야 한다.

셋째, 보안은 일부 기능 요구 수준에서 사이버보안으로 확대되어 기밀성·무결성·가용성을 전 수명주기에서 관리하도록 변화하였다. 이에 따라 기업은 보안 요구를 별도로 정의하고 운영 과정 전반에 반영해야 한다.

넷째, AI는 2판에서 Annex E로 추가되었다. 데이터 품질 등의 관리가 요구되며, 기업은 이를 ISO 13485 기반 품질시스템과 연계하여 데이터·모델 관리 체계와 AI 검증 프로세스를 강화해야 한다.

다섯째, 개발 방식은 기존의 전통적 수명주기 중심에서 Annex F에 의해 민첩한(Agile)이 공식적으로 도입되었다. 이에 따라 기업은 Definition of Done(DoD)에 규제 증거를 포함하고, QA/RA 참여 체계를 갖추어야 한다.

여섯째, 유지보수는 결함 대응 위주였던 1.1판과 달리 2판에서는 ISO/IEC 14764 유지보수 유형을 반영하고 서비스 종료 절차까지 포함하였다. 기업은 유지보수 계획에 보안 취약점 대응과 엄격 등급 재평가를 포함하고, 종료 시 데이터 보존·폐기 절차를 명확히 해야 한다.

일곱째, 지원 항목은 1.1판에서 별도로 규정되지 않았으나 2판에서는 개발 도구, 실행 환경, 데이터, 시뮬레이터까지 포함되었다. 따라서 기업은 지원 항목 목록을 작성하고 툴 밸리데이션 및 데이터 무결성 검증 절차를 마련해야 한다.

여덟째, 코드 품질 관리에서는 시험 의존적이었던 1.1판과 달리 2판에서 엄격 등급 II 소프트웨어에 정적 코드 분석이 의무화되었다. 정적 코드 분석은 시험이 아닌 검증 활동으로, 코드 실행 전 잠재 결함·취약점을 탐지하고 결함관리 및 위험관리 절차와 연계하여 품질·안전 확보를 위한 필수 활동으로 추가되었다. 기업은 정적 분석 툴을 도입·밸리데이션하고 결과를 결함 제거 및 위험관리와 연계해야 한다.

아홉째, 위험관리는 1.1판에서 Class B/C 중심이었으나 2판에서는 엄격 등급 II 전체에 적용되고, 분석 범위도 보안 취약점, 개발 환경 제약, 언어적 한계 등으로 확장되었다. 기업은 위험관리 계획을 재정비하고, 추적성 매트릭스를 통해 위험·통제·검증 간 연결성을 확보해야 한다.

열째, 소프트웨어 설계에서는 상세설계 용어가 삭제되고, 엄격 등급에 따라 설계 수준이 달리 적용된다. 엄격 등급 I은 기본 아키텍처만 문서화하면 되지만, 엄격 등급 II는 상세 설계와 요구사항,설계,시험 간 추적성이 필수적이다. 따라서 기업은 등급별로 설계 관리 절차를 차등화해 운영해야 한다.

4. 결론

본 연구는 IEC 62304 1.1판과 2판(초안)을 비교하여 주요 차이와 기업의 대응 전략을 제시하였다. 2판은 적용 범위를 건강 소프트웨어까지 확대하고, 엄격 등급 기반 위험 관리, 사이버보안 내재화, 정적 코드 분석 및 유지보수·폐기 절차 강화, Annex E/F를 통한 인공지능·Agile 반영 등 근본적인 변화를 포함한다. 이는 단순한 문서 보완을 넘어 기업 운영 체계의 재설계를 요구한다. 기업은 엄격 등급 평가 체계, 정적 코드 분석과 위험·결함 연계 관리, AI·보안 관리 및 Agile 기반 증거화 체계를 마련해야 한다. 본 연구는 이러한 구조적 차이를 정리하고 대응 방안을 제시함으로써, 향후 표준 준수와 규제 대응을 위한 기초 자료를 제공한다. 향후 연구에서는 IEC 62304 2판 최종 확정본과 더불어, 인공지능 및 사이버보안 관련 국제 가이드라인과의 정합성을 검토하고 실제 기업 사례를 통해 대응 전략의 실효성을 평가할 필요가 있다.

참고 문헌

1.IEC SC 62A/1662/CC – Compilation of comments on document 62A/1639/CD: IEC 62304 Ed.2, Health software and medical device software – Software life cycle processes. Geneva: IEC; 2024.

2.IEC 62304:2006 – Medical device software – Software life cycle processes. Geneva; 2006.

3.IEC 62304:2015 – Medical device software – Software life cycle processes (Amendment 1). Geneva; 2015.

4.IEC 62304 Ed.2 (Draft) – Health software and medical device software – Software life cycle processes. Geneva; 2024.

5.TTA. 2024.06.24. TTA 보안회의 제2-1차 회의 자료. Seoul; 2024.

6.IEC SC 62A WG 2. IEC 62304 Ed. 2.0 Design Specification – Health software and medical device software – Software life cycle processes. Geneva: IEC; 2019.

7.식품의약품안전처. 디지털의료제품 전자적 침해행위 보안 지침(안). 청주; 2023.

Poster-150

Study of a TADF Blue OLED Device for Non-Invasive Dermatological Light Therapy

Batdelger Ankhnybayar[1], Soon-Gyu Lee[2], Sang-Hyeon Hwang[2], Jeong-Hyeon Wi[2], Mi-Rin Hong[3], Sang-Geon Park[4*]

[1] Dept. of Culture and Technology Convergence, Changwon National University, South Korea.
[2] Dept. of Smart Manufacturing Engineering, Changwon National University, South Korea.
[3] Dong-A University Hospital, South Korea
[4] Dept. of Mechatronics Convergence, Changwon National University, South Korea.
[*] sgpark@changwon.ac.kr

Abstract

Blue light therapy is a non-invasive skin treatment with multiple advantages, including selective targeting of acne-causing bacteria, reduction of inflammation, and promotion of faster skin healing, without damaging surrounding tissue. Due to these benefits, blue light therapy has gained considerable attention from researchers and clinicians worldwide, and numerous studies have confirmed its therapeutic potential. In this study, we report the fabrication and characterization of a thermally activated delayed fluorescence (TADF) blue light-emitting diode (LED) device for skin care applications. The device exhibits stable and uniform emission, high irradiance, and improved energy efficiency, making it suitable for therapeutic use. Our results indicate that the easily fabricated TADF blue LED device can serve as a safe and effective tool for dermatological therapy, with potential applications in both clinical and at-home settings.

1. Introduction

LED (light-emitting diode) therapy is becoming increasingly popular as a non-invasive and safe treatment for a variety of skin disorders, including acne, eczema, psoriasis, rosacea, and fine wrinkles. Blue light (400-470 nm) is particularly useful for treating superficial skin issues because it selectively targets acne-causing bacteria (Propionibacterium acnes), decreases inflammation, and stimulates skin repair. According to clinical studies, regular blue light exposure can improve skin clarity while also reducing the intensity and frequency of breakouts.

Due to these therapeutic benefits, blue light therapy has attracted significant research attention, and numerous studies have confirmed its potential for safe and effective skin treatment. Traditional blue light devices, such as LED masks or lamps, are effective but often limited by low energy efficiency and uneven emission.

Thermally activated delayed fluorescence (TADF) materials have emerged as an exciting alternative for blue light devices. TADF emitters harvest both singlet and triplet excitons, boosting device efficiency and allowing for consistent emission at the targeted therapeutic wavelength. In this study, we designed and built a TADF-based blue LED device that combines blue light's therapeutic effects with enhanced energy economy and homogeneity, with the goal of creating a device that can be used in both clinical and at-home skincare applications.

2. Experimental

The TADF-based blue OLED was manufactured on ITO-coated glass substrates, with a sheet resistance of around 15 Ω/sq. The substrates were ultrasonically cleaned in acetone, isopropanol, and deionized water before being dried with nitrogen gas and treated with UV-ozone for 15 minutes to increase surface wettability.

A thin layer of PEDOT:PSS (40 nm) was spin-coated onto the ITO as a hole injection layer and annealed for 15 minutes at 120 °C. The blue TADF emitting layer was deposited using thermal evaporation at a base pressure of 5×10^{-6} Torr. Following that, an electron transport layer (ETL) and an Al cathode were placed in sequence.

The total device structure was:

ITO/PEDOT:PSS (40 nm)/NPB(50nm)/TADF emitter (~30 nm)/ETL (~40 nm)/LiF/Al (100 nm).

The emission spectrum and brightness were measured with a spectroradiometer. The current density-voltage-luminance (J-V-L) properties were measured with an Mscience-3000. Surface shape and roughness were analyzed using atomic force microscopy (AFM, Park Systems XE-7), and elemental composition and chemical bonding of the emitting layer were confirmed using X-ray photoelectron spectroscopy (XPS, Thermo Scientific K-Alpha) (Changwon National University).

3. Results and discussion

The fabricated TADF-based blue OLED demonstrated stable electroluminescence, with a peak emission at 428 nm, resulting in a vivid and uniform blue color. The current density-voltage (J-V) characteristics showed effective carrier injection and balanced charge transport, as well as a low turn-on voltage and higher luminance efficiency. The maximum luminance was at 4000 cd/m² at 8 V, and the spectral shape remained consistent across driving circumstances.

AFM pictures revealed a smooth film morphology with a root mean square (RMS) roughness of around 1.2 nm, indicating that the organic layers were deposited uniformly. XPS examination revealed chemically stable interfaces, with unambiguous evidence of predicted bonding states in the organic and electrode layers, confirming the OLED's steady performance.

Blue light treatment can be used to treat a range of skin conditions. It can help to enhance skin texture and reduce sebaceous hyperplasia, or enlarged oil glands. It can help erase sun spots, acne, and even acne-related scars (Fig 1).

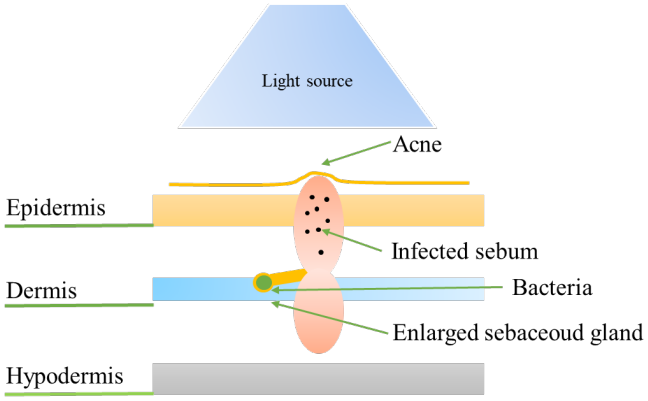


Figure 1. Blue light therapy

Although biological tests were not performed in this study, the blue light emission (about 470 nm) corresponds to a wavelength range commonly used in skin therapy and antibacterial applications. Previous research has shown that blue light ranging from 405 to 480 nm can effectively inactivate Propionibacterium acnes, reduce inflammation, and promote skin healing without causing tissue damage [1-3]. Furthermore, recent studies on OLED-based therapeutic light sources demonstrate that flexible, low-heat-emission OLEDs can be safely integrated into phototherapy systems [4-6].
As a result, our device's optical and electrical results suggest that it could be used as a light-emitting source in dermatological treatment systems, due to its compactness, stability, and therapeutic wavelength emission.

4. Conclusion

In conclusion, a thermally activated delayed fluorescence (TADF) blue OLED was built and tested for optical and electrical features. The device produced intense blue light, a steady brightness, and efficient current flow. AFM and XPS studies validated the surface's high quality morphology and chemical homogeneity. Although therapeutic performance was not explicitly examined, the emission wavelength and irradiance match the parameters for photobiomodulation and acne treatment as reported in prior research. These findings indicate that the developed TADF blue OLED has a high potential as a next-generation light source for non-invasive dermatological and cosmetic therapeutic procedures.

5. Acknowledgements

본 연구는 2025년도중소벤처기업부의 기술개발사업 지원에 의한 연구임.(RS-2025-02312566)

6. Reference

[1] T. Dai, A. Gupta, C. K. Murray, M. S. Vrahas, G. P. Tegos, M. R. Hamblin, Drug Resistance Updates 2012, 15, 223.
[2] M. L. Hernández-Bule, J. Naharro-Rodríguez, S. Bacci, M. Fernández-Guarino, International Journal of Molecular Sciences 2024, 25, 4483.
[3] M. H. Gold, W. Sensing, J. A. Biron, Journal of Cosmetic and Laser Therapy 2011, 13, 308.
[4] Y. Jeon, H. Choi, K. Park, K. C. Choi, Journal of the Society for Information Display 2020, 28, 324.
[5] D. Yin, S.-X. Jia, H.-Y. Zhang, S.-H. Li, Y.-F. Liu, J. Feng, Wearable Electronics. 2025.
[6] M. Bonnans, L. Fouque, M. Pelletier, R. Chabert, S. Pinacolo, L. Restellini, K. Cucumel, Journal of Photochemistry and Photobiology B Biology 2020, 212, 112026.
[7] M. Sadowska, J. Narbutt, A. Lesiak, Life 2021, 11, 670.
[8] C. Pieper, E. B. Lee, R. Swali, K. Harp, A. Wysong, Dermatologic Surgery 2022, 48, 802.

Poster-151

ASME V&V 40에 따른 의료기기 컴퓨터 모델링 및 시뮬레이션(CM&S)의 신뢰성 평가 연구 : MR 환경에서 담관용스텐트 주변의 RF 유도 발열 예측

이주선[1], 이주연[1], 이지원[1], 이수경[1], 김현정[1], 서동기[2], 김은영[2], 정동하[2], 송서연[2], 박해대[1*]

식품의약품안전처 식품의약품안전평가원 의료제품연구부 의료기기연구과[1]

오송첨단의료산업진흥재단 첨단의료기기개발지원센터 생체적합성평가팀[2]

A Study on the Credibility Assessment of Computer Modelling and Simulation (CM&S) for Medical Devices According to ASME V&V 40 : Predicting RF Induced Heating Around Biliary Stent in a MR Environment

Ju-Seon Lee[1], Ju-Yeon Lee[1], Ji-won Lee[1], Su-Kyoung Lee[1], Hyeon-Jeong Kim[1], Dong-ki Seo[2], Eunyoung Kim[2], Dongha Jeong[2], Seo Yeon Song[2], Hae-Dae Park[1*]

Medical Device Research Division, Pharmaceutical and Medical Device Research Department, National Institute of Food and Drug Safety Evaluation, Ministry of Food and Drug Safety, Korea[1]

Biocompatibility Evaluation Team, Medical Device Development Center, OSONG Medical Innovation Foundation, Korea [2]

*hdspace@korea.kr

Abstract

As the scope of CM&S application in the medical device field has gradually expanded, demonstrating credibility has emerged as a critical issue. Accordingly, this study evaluated the credibility of a computational model for assessing the RF induced heating of biliary stents, in accordance with ASME V&V 40. The computational model was confirmed to exhibit quantitatively similar trends to actual test results, albeit under limited conditions. Furthermore, additional simulations were performed by applying both the biliary stent model used for validation and additional models to the validated model. As a results, similar heat generation trend was confirmed across all samples. In future studies, enhancing the model's predictive capability through comparative validation involving diverse samples and conditions, coupled with uncertainty quantification processes, would significantly strengthen its potential utility as a tool supporting product design, clinical, and regulatory decision-making.

1. 연구 배경

최근 다양한 분야에서 컴퓨터 모델링 및 시뮬레이션(Computational Modeling and Simulation, CM&S)의 활용이 급격히 증가하고 있으며, 특히 의료기기 개발에서도 CM&S의 적용이 확대되고 있다[1]. 자기공명(Magnetic Resonance, MR) 환경 발열 안전성 평가 분야에서도 시뮬레이션을 통해 물리적 시험을 보완하고 제품 설계 시 개선이 필요한 부분을 예측할 수 있는 장점이 있어 널리 사용되고 있다. 이러한 CM&S와 관련하여 ASME에서는 분야별로 검증, 유효성 확인 및 불확실성 정량화(Verification, Validation and Uncertainty Quantification, VVUQ)에 대한 신뢰성 평가 표준을 제시하고 있으며[2], 규제기관인 FDA에서도 가이던스가 발간되고 있다. 하지만 국내 의료기기 분야에서는 이에 대한 연구가 상대적으로 부족하며, 표준화된 신뢰성 평가 체계 또한 충분히 정립되지 않은 실정이다. 이에 본 연구에서는 MR 환경에서 고주파(Radio Frequency, RF)에 의해 유도된 수동 이식형 의료기기(Passive Implant) 주변의 발열 안전성 평가에 널리 사용되고 있는 표준[3]을 기반으로 담관용스텐트 주변의 RF 유도 발열 예측을 위한 컴퓨터 모델을 개발하였으며, 의료기기 CM&S의 신뢰성 평가 표준인 ASME V&V 40를 기반으로 개발한 모델을 검증하였다. 이를 통해 향후 의료기기 분야에서 CM&S가 널리 활용될 수 있는 기반을 마련하고, 더 나아가 신뢰성 평가 체계 구축에도 기여하고자 한다.

2.연구 방법

본 연구에서는 담관용스텐트의 MR 환경 발열 안전성 평가를 위한 컴퓨터 모델을 구축하고, 해당 모델에 대해 ASME V&V 40를 기반으로 신뢰성을 평가하였다.

해당 표준에서 제시하고 있는 신뢰성 평가 프레임워크에 따라 해결하고자 하는 문제(Question of Interest, QOI) 및 CM&S를 사용하게 될 상황(Context of Use, COU)을 정의하고, 이를 바탕으로 컴퓨터 모델이 의사 결정에 영향을 미치는 정도(Model Influence)와 잘못된 결정으로 인해 환자에게 발생할 수 있는 위해 정도(Decision Consequence)를 조합하여 모델 위험도(Model Risk)를 산정하였다. 그 다음 산출된 모델 위험도에 따라 신뢰성 요소별 최소 수행 기준을 결정하여 이를 충족하는 검증(Verification), 유효성 확인(Validation), 적용가능성(Applicability)에 대한 활동을 수행하고 그 결과를 평가하였다. 더 나아가 검증된 모델을 다양한 직경 및 길이 별 담관용스텐트에 적용하여 그 활용성을 추가적으로 확인하였다.

3. 연구 결과

3.1 QOI 및 COU 정의

ASME V&V 40에서 제시하고 있는 위험도 기반 신뢰성 평가 프레임워크에 따라 먼저, 아래 표1과 같이 QOI 및 COU를 정의하였다.

표 1 QOI 및 COU

QOI	MRI 촬영 시 발생하는 고주파(RF)에 의해 유도된 담관용스텐트 주변의 최대 온도 상승(△T)은 얼마인가?
COU	담관용스텐트의 MR 환경 내 고주파에 의한 발열 안전성 평가를 위해 ASTM F2182에 따른 시험을 컴퓨터 모델로 구현하여 1.5T MR 환경에서 담관용스텐트 주변의 최고 온도 상승(△T)을 확인한다. CM&S 결과는 제품 설계 시 구조적 특성에 의한 발열 경향을 분석하고, 이에 기반하여 설계 개선이 요구되는 부위를 예측하는 데 활용된다.

3.2 모델 위험도 산정

앞서 정의한 QOI 및 COU를 바탕으로 모델 영향 및 결정 결과를 조합하여 모델 위험도를 산정하였다. CM&S 결과는 제품 설계 시 발열에 의해 설계 개선이 필요한 부위를 예측하기 위한 것으로 모델 영향은 낮음, 인체 이식형 의료기기 주변의 발열로 인해 인체 조직의 손상 등을 초래할 수 있기 때문에 결정 결과는 중간이다. 이는 해당 모델이 규제 의사 결정 과정에서 활용되지 않으며, 잘못된 판단으로 인해 시스템 또는 환자에 미치는 영향이 작다는 것을 의미한다. 최종 모델 위험도 산정은 3×3 매트릭스를 활용하였으며, 이에 따라 본 모델의 위험도는 낮음-중간(Level 2)으로 결정되었다.

3.3 신뢰성 평가

신뢰성 확보를 위해 산정된 모델 위험도에 따라 ASME V&V 40에서 제시하는 23개 신뢰성 요인에 대한 평가를 수행하였다. 전반적인 신뢰성 평가 결과, 대부분의 신뢰성 요소에 대해 설정된 최소 기준을 충족하였으며, 본 연구에서 개발한 컴퓨터 모델은 해당 용도 내에서 활용 가능성이 충분한 것으로 확인되었다. 검증 단계에서는 제3의 기관으로부터 획득한 ISO/IEC 17025 인증을 통해 소프트웨어 품질 보증(Software Quality Assurance, SQA) 기준을 만족하였으며, 주요 솔버 파라미터(Solver Parameter) 변화에도 출력 안전성이 유지되어 전체 검증 기준을 충족함을 확인하였다. 또한, 실제 시험과 비교·검증한 유효성 확인 단계에서는 두 시험 간의 차이가 제한적인 수준에 머물렀으며, 경향 또한 유사하게 나타나 모델의 예측력이 양호함을 확인할 수 있었다. 아래 표 2와 같이 실제 시험과의 정량적 비교에서 오차범위는 약 11 %로 나타났으며, 이는 ISO 10974 Annex I[4]에서 제시하는 허용 범위인 -7 %에서 19 % 내에 포함되어 모델의 타당성을 뒷받침하였다.

표 2 시뮬레이션 및 실제 시험에서의 최대 온도 상승

시험	자기장 (MHz)	최대 (℃)	최소 (℃)	차이 (℃)
시뮬레이션	64	26.92	21.20	5.72
실제 시험		26.78	21.66	5.12
차이 (℃)		0.14	0.46	0.6
오차 (%)		0.52	2.12	11.72

3.4 다양한 담관용스텐트 적용

앞서 검증한 컴퓨터 모델을 활용하여 두 가지 모델의 담관용스텐트에 대해 직경 및 길이 별 발열 양상을 확인하였다. 검증 시 사용된 담관용스텐트와 동일한 모델은 스텐트 와이어, 불투과성 표식자 등 모든 구성요소를 구현하여 시뮬레이션 하였으며, 타 모델의 경우 단순 스텐트 형상만을 고려하기 위해 스텐트 와이어만 구현하여 시뮬레이션 하였다. 그 결과 두 모델에서 모두 직경이 가장 작고 길이가 가장 긴 모델의 발열이 가장 높았으며, 널리 알려진 안테나 효과[5]에 따른 발열 양상과 유사한 결과가 나타남을 확인하였다. 또한, 두 모델에서 동일한 직경 및 길이를 가진 시료에 대한 시뮬레이션 결과를 비교하였을 때 두 모델 모두 스텐트 끝 부분에서의 발열이 가장 높았으며, 발열량은 약 0.1 ℃, 약 0.44 %의 차이를 보였다. 결과적으로 해당 컴퓨터 모델은 제품 설계 시 발열 경향 예측을 위한 목적으로는 충분한 신뢰성을 확보하였음을 확인하였다.

본 연구에서는 MR 환경에서 담관용스텐트의 RF 유도 발열 예측을 위한 컴퓨터 모델을 개발하였다. 이에 대한 신뢰성 평가를 수행하였으며, 다양한 모델의 담관용스텐트에 적용한 결과, 제품 개발 단계에서 발열 예측 모델로서 적합함을 확인하였다. 그러나, 실제 시험과의 비교 검증 과정에서 단일 시료 사용, 제한된 검증 환경으로 인해 통계적 유의성 및 일반화 가능성이 낮다는 한계가 존재한다. 향후 연구에서 다양한 시료 및 조건 하의 반복 검증, 불확실성 정량화 등을 포함한 체계적 검증 절차가 수행되어야 할 것이다. 이를 보완한다면 제품 설계 과정뿐만 아니라 임상 및 규제 의사 결정 과정까지 실제 시험을 대체할 수 있는 도구로서 점차 그 활용 범위가 늘어날 것으로 기대된다.

4. 감사의 글

본 연구는 2025년도 식품의약품안전처의 연구개발비(24204미래기197)로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

5.참고 문헌

[1] Medical Device Innovation Consortium, Landscape Report & Industry Survey on the Use of Computational Modeling & Simulation in Medical Device Development, Arlington, VA, USA: Medical Device Innovation Consortium, Feb. 16, 2024

[2] ASME, “Assessing Credibility of Computational Modeling through Verification and Validation: Application to Medical Devices,” ASME V&V 40-2018, 2018.

[3] ASTM International, "Standard Test Method for Measurement of Radio Frequency Induced Heating Near Passive Implants During Magnetic Resonance Imaging," ASTM F2182-19, 2019.

[4] ISO, “Assessment of the safety of magnetic resonance imaging for patients with an active implantable medical device,” ISO/TS 10974:2018, 2018.

[5] Y. Cho and H. Yoo, “RF Heating of Implants in MRI: Electromagnetic Analysis and Solutions, Investigative Magnetic Resonance Imaging, vol. 24, no. 2, pp. 67-75, Jun. 2020.

Poster-152

초음파 기반의 혈역학 모니터링 기기의 사용자인터페이스 설계 최적화를 위한 위해요인 분석

Hyungmin Kim[1*], Wonseuk Jang[1]
Department of Medical Device Engineering and Management, Yonsei University College of Medicine, Seoul, Korea
*mahoyo-_0412@naver.com

Abstract

Interest in measuring cardiac output using carotid Doppler ultrasound has been increasing; however, its potential use errors have not yet been thoroughly investigated. In this study, 964 MAUDE reports (product code: DXG, DQK, and IYN) from 2020 to 2023 were reviewed to analyze known hazards and hazardous situations associated with carotid doppler ultrasound-based hemodynamic monitoring system to reduce potential use errors. The main issues identified were unawareness of manual precautions, insufficient UI design, device management problems and inadequate user knowledge and training. Based on the analysis of these hazards and hazardous situations, potential use errors were systematically reviewed to strengthen the safety and effectiveness of such systems.

1. 연구 배경

혈역학 모니터링은 혈역학적으로 불안정한 환자를 대상으로 혈역학 지표를 지속적으로 확인하기 위한 목적으로 사용한다[1]. 전통적으로 폐동맥 카테터(Pulmonary Artery Catheter, PAC)를 이용한 심박출량(Cardiac Output, CO) 측정이나 중심정맥압(Central Venous Pressure) 측정과 같은 침습적 방법은 보다 정확한 값을 측정할 수 있다는 장점을 가지고 있으나, 혈관 천공, 출혈, 감염 등 합병증의 위험이 있고 시술자 높은 숙련도를 요구한다는 한계가 있다.[2] 이에 따라 최근 비침습적으로 심박출량(CO) 또는 1회 박출량(Stroke Volume, SV)을 측정할 수 있는 다양한 기술들이 연구되고 있다. 이중 경동맥 도플러 초음파(Carotid Doppler Ultrasound, CDU)는 사용자의 접근성과 모니터링의 실시간성 및 반복 측정의 용이성 등의 장점으로 인하여 새로운 비침습적 혈역학 모니터링 수단으로 주목받고 있다.[3] 경동맥 도플러 초음파를 이용한 혈역학 모니터링 기기의 사용자 인터페이스(user interface) 사용오류로 인해 발생할 수 있는 위해상황(Hazardous Situation)에 대한 체계적 분석이 필요하다.

의료기기 사용적합성(Usability)에 관한 국제 규격 IEC 62366-1은 새로운 의료기기를 개발 시 사용자가 해당 기기를 안전(Safe)하고 유효(Effective)하게 사용할 수 있도록 사용자 인터페이스(User Interface)를 설계·개선하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 위해상황으로 이어질 수 있는 위해요인(Hazard)을 식별하고, 이를 바탕으로 구성한 위해요인 관련 사용 시나리오(Hazard-Related Use Scenario)를 통해 사용자 인터페이스를 평가하여 잠재적 사용 오류를 식별하고 조치한다.[4][5]

본 연구에서는 개발 중인 경동맥 도플러 초음파 혈역학 모니터링 기기를 대상으로, 위해상황을 유발할 수 있는 사용 오류를 사전에 식별하기 위해 미국 식품의약국(Food and Drug Administration, FDA)의 MAUDE(Manufacturer and User Facility Device Experience, MAUDE) 데이터베이스를 활용하였다. 이를 통해 보고된 부작용 사례를 기반으로 알려지거나 예측 가능한 위해요인 및 위해상황(Forseeable Known Hazards and Hazardous situations)을 분석하고, 발생가능한 사용 오류를 최소화하고자 한다.

2.연구 방법

본 연구에서 경동맥 도플러 초음파 혈역학 모니터링 기기와 유사한 기존 제품의 부작용 사례(adverse event)를 조사하여 사용 오류로 인한 위해상황과 위해요인을 식별하였다. 이를 위해 먼저 임상환경에서 실제 사용되고 있는 혈역학 모니터링 기기를 조사하고 대표적인 사용자군인 마취통증의학과 전문의 17명을 대상으로 설문조사를 수행하였다. 설문 결과, 가장 많이 사용되는 기기 제조사는 Edwards Lifesciences(14명), Masimo(5명)으로 나타났다. FDA의 Device Product Classification Database를 활용하여 해당 제품들의 Product Code 중 연구 목적에 부합하는 항목을 선별하였다. 의도한 사용목적(Intended Use) 및 기능적 유사성을 고려하여, 혈역학 모니터링 기기 관련 DXG(Single-function, preprogrammed diagnostic computer, 116건), DQK(Programmable diagnostic computer, 158건), 그리고 도플러 초음파 기기 관련 IYN(Ultrasonic pulsed doppler imaging system, 690)건을 포함하여 총 964건의 사례를 분석 대상으로 포함하였다.

각 사례의 "Event Description"에서 서술된 사용 오류와 관련된 위해상황을 식별하였다. 식별된 위해상황에 대해서는 이를 유발한 위해요인을 추가로 분석하였으며, 이후 ISO 14971에서 제시하는 심각도 수준을 참고하여 1에서 5까지의 등급으로 평가하였다.

Table 1. 5-Scale Severity Rank

Severity	Description
1	Inconvenience or temporary discomfort, but no injury
2	Temporary injury or impairment not requiring professional medical intervention
3	Injury or impairment requiring professional medical intervention
4	Permanent impairment or life-threatening injury
5	Death

3. 연구 결과

본 연구에서 MAUDE 데이터베이스 분석을 통해 혈역학 모니터링 기기(DXG, DQK)와 도플러 초음파 기기(IYN)에 보고된 부작용 사례를 분석하고 이를 바탕으로 경동맥 도플러 초음파 혈역학 모니터링 기기에서도 발생할 수 있는 주요 위해상황을 도출하였다. 또한 각 위해상황에 대한 심각도를 평가하여 종합적으로 위해요인을 식별하였다.

표 1은 DXG, DQK, IYN의 사용 오류와 관련된 위해상황으로, 화재가 발생한 DXG의 (1)을 제외하고 발생한 중대한 사용 오류는 없었다. DQK (7)의 경우 파라미터가 0으로 표시되어 의학적 개입을 준비하고 있었기에 심각도 3을 부여하였다.

Table 2. List of Hazardous Situations

Product Code	No.	Hazardous Situation	Severity
DXG	1	The power supply was exposed to saline.	4
	2	Use of the device by insufficiently trained personnel.	2
DQK	3	Device not rebooted weekly as instructed in the user manual.	2
	4	Incorrect parameter range set due to decimal point input error.	2
	5	Inability to connect the device to another system.	2
	6	Device Cleaned while powered on causing shock.	2
	7	Parameter displayed as "0" during "Pause mode", potentially leading to inappropriate clinical treatment.	3
	8	Delay in necessary blood transfusion due to inaccurate parameter measurement based on incorrectly entered patient data.	2
IYN	9	Portable ultrasound system became non-operational due to a damaged keyboard cable.	2
	10	System shutdown due to lack of storage.	3

표 3는 표 2의 위해상황에 대한 근본 원인(root cause)를 바탕으로 4개의 위해요인을 설정하여 분류하였다. 주의사항에 대한 미숙지, 불충분한 기기 사용 교육, 미흡한 UI 디자인과 적절치 못한 기기 관리가 사용 오류를 발생시키는 것을 확인할 수 있다.

Table 3. Hazards analysis

Hazard	No.	Root Cause of Hazardous Situation
Unawareness of Manual Precautions	1	Liquid exposure due to user negligence.
	3	Failure to follow power-cycling procedure.
	6	Failure to follow power-off procedure before cleaning.
Insufficient User Knowledge and Training	2	Insufficient train.
	5	Insufficient user knowledge or training on device interconnection.
	8	Misinterpretation of device data overwrite function and improper patient data input.
Insufficient UI Design	4	User input error.
	7	Misleading parameters display due to inadequate user interface design.
Device Management Issue	9	Improper cable position.
	10	Improper data management.

표 4은 표 2의 위해상황과 표 3의 위해요인을 활용하여 경동맥 도플러 초음파 혈역학 모니터링 사용 중 발생할 수 있는 잠재적 사용 오류를 작성하였다. 표 2의 (3)과 (5)의 경우 개발중인 경동맥 도플러 초음파 혈역학 모니터링 기기에 적용되지 않아 잠재적 사용오류로부터 제외하였다. 표 2의 (4)과 (9)를 반영하여 작성한 표 4의 (3)과 (7)의 경우 사용 오류로 인해 모니터링 과정에 지연이 발생하거나 의사의 개입이 필요할 수 있다는 부작용 사례의 서술은 도플러 초음파 혈역학 모니터링 기기의 임상 환경을 고려하는 경우 심각도가 보다 높다고 판단하였다. 표 4.에 제시한 잠재적 사용오류에 따른 위해상황을 고려한 사용적합성 평가와 사용자 인터페이스 설계를 통해 위해요인을 완화할 수 있을 것으로 예상한다.

Table 4. List of Potential Use Errors

No.	Potential Use Error	Severity
1	The user leaves a power supply exposed to saline, causing fire.	4
2	The user is not trained enough to attach the probe and continue monitoring the patient.	2
3	The alarm would not trigger due to user's incorrect range configuration.	3
4	The user cleans the device while the power is on.	2
5	As the user turned on the standby mode, the parameter displayed as "0"	3
6	The user enters wrong patient data.	2
7	The probe cable became damaged because of improper position	3
8	The system crashes due to lack of storage	3

개발하는 기기의 특성을 고려하여 유사한 시판 중인 제품의 위해상황 및 위해요인 분석을 통해 의료기기 사용 중 발생할 수 있는 잠재적인 사용 오류를 분석하였다. 향후 연구에서는 분석한 위해요인과 잠재적 사용오류를 반영한 형성 평가 및 총괄평가를 진행하여 기기의 사용자 인터페이스를 개선하는 연구를 추가적으로 진행하고자 한다.

4. Acknowledgements

이 연구는 범부처전주기의료기기사업단의 실시간 비침습 패치형 초음파 혈역학 모니터링 기기 과제의 지원을 받아 수행하였다. (RS-2023-00243901)

5.참고 문헌

[1] 권혜연, et al. "혈역학 감시의 일반적 원칙." Journal of Acute Care Surgery 7.1 (2017): 2-8.

[2] Scheeren, Thomas WL, and Michael AE Ramsay. "New developments in hemodynamic monitoring." Journal of cardiothoracic and vascular anesthesia 33 (2019): S67-S72.

[3] van Houte, Joris, et al. "Correlation of carotid Doppler blood flow with invasive cardiac output measurements in cardiac surgery patients." Journal of Cardiothoracic and Vascular Anesthesia 36.4 (2022): 1081-1091.

[4] IEC 62366-1:2015+AMD1:2020 Medical devices − Part 1: Application of usability engineering to medical devices

[5] IEC 62366-2:2016 Medical devices – Part 2: Guidance on the application of usability engineering to medical devices

한의사의 진단용 의료기기 사용에 관한 법적 쟁점과 정책적 개선방안 일본·중국·미국 사례 비교를 중심으로

(Legal Issues and Policy Alternatives on the Use of Diagnostic Medical Devices by Korean Medicine Doctors: A Comparative Study of Japan, China, and the United States)

강준철[1] , 최민주[1]

제주대학교 일반대학원 의공학협동과정 박사과정[1]

Junchul Kang[1], Minjoo Choi[1]

Jeju National University, Interdisciplinary Program in Biomedical Engineering, Republic of Korea

Corresponding author: <mjchoi@jejunu.ac.kr>

Abstract

This study examines the legal and policy issues surrounding Korean medicine doctors' (KMDs) use of diagnostic devices within Korea's dual-licensure system. The 2016Do21314 Supreme Court ruling (Dec 22, 2022) conditionally allowed ultrasound use, but the Medical Service Act still lacks clear device-specific standards.

A comparative and doctrinal analysis suggests a risk-based framework: low-risk devices permitted with training, mid-risk (e.g., X-ray) limited to acquisition, and high-risk (CT/MRI) restricted to collaborative care. Japan prevents overlap through unified licensing, China authorizes use under statute, and U.S. states regulate variably. The study calls for statutory clarification, certification systems, and structured cooperation to improve patient safety and legal certainty.

1. 연구 배경 (Introduction)

한국의 의료체계는 의사와 한의사의 각 면허가 병존하는 이원적 구조로, 의료법상 허용되는 의료행위의 범위는 해당 학문체계 (현대의학/한의학), 위해성, 전문성 등을 종합 고려해 해석되어 왔다. 초음파·X선·CT·MRI 등 현대 의료기기의 확산은 진단의 정확성을 높였으나, 이에 관한 규범적 기준은 여전히 불명확하다. 예를 들어, 최근 대법원 전원합의체판결은 '한의사의 초음파진단기기의 보조적 사용'을 무죄로 판단했지만, 기기별(초음파/CT/MRI), 행위별(촬영/ 판독) 기준은 체계적으로 정립되어 있지 않다. 따라서 본 연구는 (1) '면허 외 의료행위'의 해석기준을 체계화하고, (2) 일본, 중국,미국의 사례를 비교연구하며, (3) 법령,교육,양한방 협진을 포함한 구체적 정책대안을 제시한다

2. 연구 방법 (Methods).

2.1 법학적 분석

의료법·한의약육성법 조문 대비, 대법원·하급심 판결 및 복지부 유권해석 검토로 기기별 판단요소(학문적 연계성, 위해성, 전문성)를 도출한다.

2.2 정책분석

환자안전, 법적 안정성, 재정 효율, 서비스 질을 기준으로 규제대안을 평가한다.

2.3 비교법 분석

일본(단일면허·통합운영), 중국(명문허용·교육·시험), 미국(주별 CAM 분권규제)의 면허·교육·법령·보험 틀을 비교해 이식 가능 요소를 도출한다.

2.4 종합 설계

(i) 국내 판례·유권해석의 기기별 정리, (ii) 3개국 비교틀, (iii) 위험도 기반 단계허용+협진시스템+수가체재정비의 3축기반의 새로운 정책모형을 구성한다.

3. 연구 결과 (Results)

3.1 국내 법제·판례 분석

판단기준: ① 한의학적 기초원리 부합성(보조수단 여부), ② 장비 위해성(직접 위해·피폭·오진 위험), ③ 전문성(해부·생리·영상 해석능력).

1) 저위험: 체열진단기, 기본 초음파 — 보조수단 범위 내 제한적 허용 가능.

2) 중위험: X선 — 촬영(획득)은 조건부 허용 여지, 판독(해석)은 의사 전문영역.

3) 고위험: CT·MRI — 고도의 전문성·환자위험으로 원칙적 금지, 협진통해서 보조적 활용.

<표 1> 의료기기별 판례등 요약정리

기기	판례 요지	법적 태도
CT	1심: 허용 가능(망진 보조), 2심: 금지(의과 영역)	금지 경향
X선 성장판 검사기	한의학 원리와 무관, 입법 필요	금지
X선 골밀도 측정기	전문성 부족, 한의학 원리와 무관	금지
초음파 골밀도 측정기	과학기술 기반, 한의학 원리와 무관	금지
초음파 진단기기	대법원 전원합의체 무죄 판결	조건부 허용
뇌파계	초기 금지 -항소심 허용	제한적 허용
체열진단기	한방 원리와 밀접하여, 허용	허용

3.2 비교법 결과 요약

1) 일본: 단일 의사면허로 장비 전면 활용 가능, 한방은 임상의 선택지로 통합. 직역갈등 구조적으로 낮음.

2) 중국: 「중의약법」에 전통의학 종사자의 현대기기 사용을 명문화; 교육과정·국가시험에 실습 포함. 서의/중의 협업 전제.

3) 미국: 주별 CAM 면허체계로 허용범위가 각 상이함; 일부주는 금지, 일부주는 교육 조건부 허용. 연방 차원의 통일기준은 미비.

3.3 정책모형 제시

1) 위험도 기반 단계허용: 저위험(교육·인증 후 제한적 허용) → 중위험(획득/판독 분리) → 고위험(협진 전제).

2) 교육실습 및 자격제도: 한의과대학에 해부·생리·영상의학·장비실습 편성, 면허 후 **추가 인증** 및 **정기 재교육**.

3) 양한방협진시스템 제도화: 촬영–판독 분리의 법제화, 원격판독 인프라, 보험 수가 연계로 인센티브 정렬.

4)법령 명확화: 의료법 제27조 위임조항 신설**,** 복지부령 고시로 기기별 리스트 및 요건 공시.

<표 2> 한의사 진단용의료기기 사용제도개선방안

구분	주요 내용	세부 방안
법령제도 개선	법령 차원의 명확화	- 「의료법」 제27조 개정 - 의료기기 정의 및 분류 고시제도입 - 「한의약육성법」 제2조 보완
교육·자격 인증제도입	전문성 및 안전성 확보	- 한의과대학 기초의학 교육 강화(해부학, 생리학, 영상의학 등) - 보수교육 및 별도 자격 인증제를 통해 통제 - 주기적 재교육을 통한 전문성 유지 및 환자의 신체안전성 확보
협진 체계 제도화	직역 간 협력시스템	- 촬영과 판독의 분리 원칙 제도화 - 원격 협진 시스템 구축 및 활성화 - 건강보험 수가 반영을 통한 협진 보상체계 마련

<표 3> 기기 위험도에 따른 단계적 접근 방안

구분	기기 예시	제안 방안
저위험기기	체열진단기, 초음파기기	일정 교육 이수 후 제한적 허용
중위험기기	X선 촬영기, 혈액검사기	촬영·검사만 허용, 판독은 협진 체계에서만 가능
고위험기기	CT, MRI	원칙적 불허, 의사 협진·의뢰 중심으로 운영

4. 결론 (Conclusion)

본 연구는 (i) 학문연계성–위해성–전문성의 3요소 판단틀, (ii) 위험도 기반 단계허용 + 획득/판독 분리, (iii) 협진 인프라와 수가 인센티브라는 정책 패키지를 제시했다.

5. 참고 문헌 (References)

[1] Kim JS. A study on the scope of medical licenses under the Korean Medical Service Act. *Constitutional Studies*. 2023;25(2):1–30.

[2] Shin EJ. Case-law review of Korean medicine doctors' use of ultrasound devices and unlicensed medical practice. *Korean Journal of Medical Law*. 2023;31(1):7–34.

[3] Supreme Court of Korea. 2016Do21314, Dec 22, 2022.

Poster Presentation
의료영상 처리 및 시스템

Poster-154

광학현미경 기반 암세포 진단 보조를 위한 GAN 생성 영상의 유효성 평가

박소윤[1] , 임혜진[2] , 최세운[2,3*]

금오공과대학교 메디컬IT융합공학과[1],금오공과대학교 바이오메디컬공학과[2], 금오공과대학교 첨단의료기기연구소[3]

Evaluation of the Efficacy of GAN-Generated Images for Assisting Optical Microscopy-Based Cancer Cell Diagnosis

So-yun Park[1] , HyeJin Lim[2] , Se-woon Choe[2,3*]

[1]Department of Medical IT Convergence Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Korea

[2]Department of Biomedical Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Korea

[3]High-tech Medical Equipment Research Institute, Kumoh National Institute of Technology, Korea

[*]sewoon@kumoh.ac.kr

Abstract

This study explores the use of Generative Adversarial Networks (GAN) to generate optical microscopy images of cancer cells and evaluates their applicability for classification tasks. DCGAN, LSGAN, and WGAN were trained on HeLa, Huh7, and MCF-7 cell lines, and the optimal model for each class was identified. The generated images were evaluated using FID, LPIPS, Precision, and Recall, showing that the best-performing GAN varied by cell type. Data augmentation with the selected models was applied to a ResNet50 classifier, where a composition of 75% real and 25% synthetic images achieved the highest accuracy. These results indicate that GAN-generated images can effectively supplement real data to improve classification performance.

1. 연구 배경

인공지능(AI) 기술이 발전하면서, 고품질의 대규모 데이터셋 확보는 가장 핵심적인 문제로 부상하고 있다[1]. 특히, 노동력 및 시간적 제약으로 인해 데이터셋 확보에 근본적인 한계가 존재하는 의료 영상 분석 분야에서는 이러한 어려움이 더욱 두드러진다. 결과적으로, 의료 분야의 자동화를 위한 인공지능 연구는 데이터를 직접 획득하거나 한정된 공공 데이터셋에 의존하는 경우 현실적인 제약에 직면하게 된다. 또한, 전통적인 증강 방법은 단순히 회전이나 이동을 사용하며 원본 이미지와 크게 다르지 않아 데이터셋의 다양성을 확보하지 못해 데이터 부족 문제를 근복적으로 해결하기엔 한계가 존재한다[2-3].

이러한 데이터 부족 문제에 대한 효과적인 해결책으로 최근 생성적 적대 신경망(Generative Adversarial Networks, GAN)이 주목받고 있다[4]. GAN은 생성자(Generator)와 판별자(Discriminator)가 경쟁하며 학습하는 구조를 통해, 실제와 매우 유사한 데이터를 합성할 수 있으며, 이는 효과적인 이미지 증강 방법으로 널리 활용되고 있다. 이러한 기본 구조를 바탕으로 다양한 아키텍처와 손실 함수를 적용한 GAN 모델들이 지속적으로 발표되고 있지만, 연구자가 다루는 데이터셋의 특성과 도메인에 따라 최적의 성능을 보이는 GAN 모델이 다르게 나타난다[5-6].

본 연구는 여러 GAN 모델을 활용하여 세포 단위의 미세 구조나 세부 특징을 나타내는 현미경 이미지를 생성하고 그 성능을 평가하는 데 중점을 두었다. 세포 수준의 현미경 이미지 분석은 세포의 특징을 확인하고 구별하는 가장 기초적인 단계임에도 불구하고, 희귀한 세포 유형이나 특정 조건에 따라 생존율 및 비용적 제약으로 인해 충분한 데이터를 확보하기 어렵다는 고질적인 한계가 존재한다. 이에 따라, 본 연구는 GAN을 통해 실제와 유사한 이미지를 확보함으로써 데이터 다양성과 분석 효율성을 향상시키는 것을 목표로 한다.

2.연구 방법

본 실험에 사용된 데이터셋은, 자궁경부암 세포주인 HeLa, 간암 세포주인 Huh7, 그리고 유방암 세포주인 MCF-7으로 구성되었으며, 모든 이미지들은 실험실에서 역상 광학 현미경을 사용하여 직접 획득하였다. 데이터셋 구축 과정에서, 일정 픽셀 크기 이하의 미성숙 세포나 부유물 등 세포가 아닌 객체들은 정확한 특징 추출 및 모델 학습의 효율성을 높이기 위해 제외되었다. 전처리 단계에서는 Python을 기반으로 OpenCV와 scikit-image 라이브러리를 활용했으며, CLAHE 및 감마 보정 기법을 적용하여 세포의 특징이 명확하게 보이도록 처리하였다. 최종적으로 100x100 픽셀의 그림1과 같은 이미지를 획득하여 GAN 모델에 적용하였다.

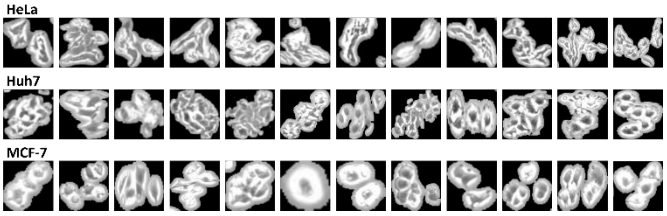


그림 1. 전처리 과정을 적용한 세포 클래스별 이미지

이러한 이미지를 기반으로 손실 함수의 변화가 GAN 성능에 미치는 영향을 비교 분석하였다. 이를 위해 각기 다른 손실 함수를 사용하는 세 가지 주요 GAN 모델, 즉 Binary Cross-Entropy (BCE) 기반의 DCGAN, Least Squares Loss 기반의 LSGAN, 그리고 Wasserstein-1 distance 기반의 WGAN을 사용하였다.

생성된 이미지의 품질 평가는 GAN 생성 이미지의 보편적인 지표인 FID (Fréchet Inception Distance), LPIPS (Learned Perceptual Image Patch Similarity), Precision, 및 Recall을 사용하여 수행되었다. 이때, FID와 LPIPS는 값이 낮을수록 생성된 이미지의 분포가 실제 이미지의 분포와 더 유사함을 의미한다. Precision과 Recall은 높을수록 모델이 실제 데이터 분포에 근접하면서 동시에 다양성을 포괄적으로 반영한다. 모든 훈련 및 평가 과정에서 각 클래스의 데이터셋 구성과 모델의 하이퍼 파라미터 조건은

일관된 비교를 위해 동일하게 설정되었다.

또한, 생성된 이미지를 수치로만 판단하지 않고, 실제 분석 과정에서 활용될 수 있는지를 확인하기 위해 CNN 모델 중 하나인 ResNet50을 사용하였다. 특히, 실제 이미지와 생성 이미지의 혼합 비율을 25% 단위로 구성한 후, 분류 성능 변화를 측정하여 데이터 증강 효과가 가장 최적화되는 지점을 확인하고자 하였다.

3. 연구 결과

세 가지 GAN 모델을 각 세포주에 적용한 결과, 클래스별 정량적 결과가 다르게 도출되었다. 따라서, 본 연구에서는 Radar chart를 사용하여 각 클래스에 대한 면적값을 계산하여 최적의 모델을 선정하였다. 이때 실제 이미지들끼리 계산한 FID, LPIPS, Precision, Recall 값을 기준으로 사용하여 각 클래스별 모델 성능을 정규화하였다.

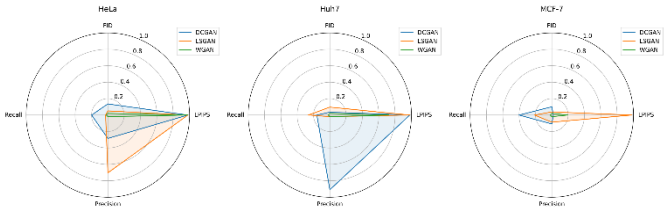


그림 2. 각 클래스에 대한 Radar chart 결과

Radar chart를 통해 산출된 비교 결과는 그림2에 제시하였다. 각 세포주별로 다른 양상을 보였는데, HeLa에서는 LSGAN이 0.44로 가장 높은 면적을 나타내어 다른 모델 대비 우수한 성능을 보였다. Huh7 세포주에서는 DCGAN이 0.52로, MCF-7 세포주에서는 LSGAN이 최적의 결과를 기록하였다. 전반적으로 LPIPS 축에서는 대부분의 모델이 0.9~1.0에 근접해 차이가 크지 않았던 반면, FID 축에서는 실제 이미지 기준과의 격차가 크게 드러나 모델 간 성능 차이가 뚜렷하게 나타났다. Precision과 Recall 축은 세포주에 따라 서로 다른 분포를 보였으며, 이러한 결과는 단일 지표보다는 종합적인 평가를 통해 모델을 선정하는 것이 적절함을 의미한다.

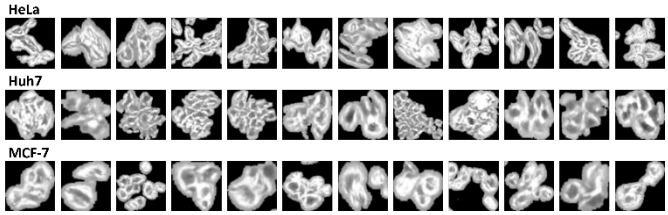


그림 3. 각 클래스에 대한 GAN 모델 학습 결과

각 클래스에 대해 가장 우수한 성능을 보인 GAN 모델을 통해 해당 모델이 생성한 이미지를 CNN 분류 학습에 활용하였으며, 그 예시는 그림3에 제시되어 있다. 그림4에 제시된 ResNet50 기반 비율별 성능 분석 결과, 생성 이미지의 활용 가능성이 확인 되었다. 특히, 실제 이미지 75%와 생성 이미지 25%를 혼합한 조건에서 0.94의 정확도로 가장 높은 성능을 기록하였으며, 이는 생성된 이미지가 분류 성능 향상에 기여할 수 있음을 보여준다. 하지만, 생성 이미지 100%만을 사용했을 때의 정확도가 0.76이 나온다는 점은 생성 이미지가 실제 데이터를 완전히 대체하는 것은 불가능하며, 일정 비율 이상의 실제 이미지가 필수적으로 요구됨을 의미한다.

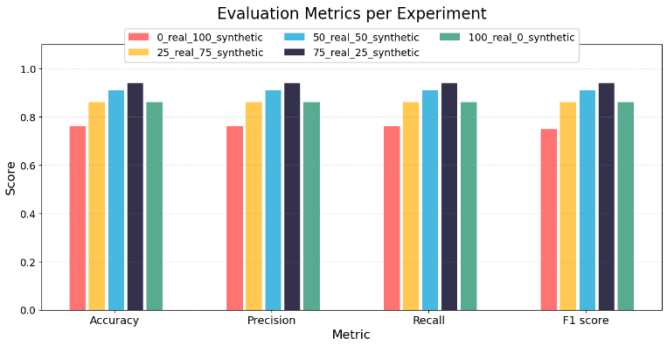


그림 4. 실제·생성 이미지 비율에 따른 분류 성능

4. Acknowledgements

이 논문은 2023년과 2025년도 정부(교육부, 과학기술정보통신부) 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (RS-2023-00240521, RS-2025-16068429).

5.참고 문헌

[1] A. Arora, J. E. Alderman, J. Palmer, S. Ganapathi, E. Laws, M. D. McCradden, L. Oakden-Rayner, S. R. Pfohl, M. Ghassemi, F. McKay, D. Treanor, N. Rostamzadeh, B. Mateen, J. Gath, A. O. Adebajo, S. Kuku, R. Matin, K. Heller, E. Sapey, N. J. Sebire, H. Cole-Lewis, M. Calvert, A. Denniston, and X. Liu. "The value of standards for health datasets in artificial intelligence-based applications." *Nature Medicine*, Vol. 29, No. 11, pp. 2929–2938, 2023

[2] K. Guo, J. Chen, T. Qiu, S. Guo, T. Luo, T. Chen, and S. Ren. "MedGAN: An adaptive GAN approach for medical image generation." *Computers in Biology and Medicine*, Vol. 163, p.107119, 2023

[3] H. Ding, N. Huang, Y. Wu, and X. Cui. "Improving imbalanced medical image classification through GAN-based data augmentation methods." *Pattern Recognition*, Vol. 166, p.111680, 2025

[4] I. J. Goodfellow, J. Pouget-Abadie, M. Mirza, B. Xu, D. Warde-Farley, S. Ozair, A. Courville, and Y. Bengio. "Generative adversarial nets." *arXiv preprint arXiv:1406.2661*, 2014.

[5] H. Ding, N. Huang, Y. Wu, and X. Cui. "LEGAN: Addressing intraclass imbalance in GAN-based medical image augmentation for improved imbalanced data classification." *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 73, p.2517914, 2024

[6] M. Frid-Adar, I. Diamant, E. Klang, M. Amitai, J. Goldberger, and H. Greenspan. "GAN-based synthetic medical image augmentation for increased CNN performance in liver lesion classification." *Neurocomputing*, Vol. 321, pp.321–331, 2018

Poster-155

딥러닝 기반 계층적 손톱주름 모세혈관 분석 파이프라인

박영욱[1], 이다운[2], 이언석[12*]

순천향대학교 일반대학원 소프트웨어융합학과[1]

순천향대학교 의료IT공학과[2]

A Deep Learning-Based Hierarchical Pipeline Nailfold Capiilary Analysis

Younguk Park[1], Dawoon Lee[2], Onseok Lee[12*]

[1]Department of Software Convergence, Graduate School, Soonchunhyang University, Korea

[2]Department of Medical IT Engineering, Soonchunhyang University, Korea

[*]leeos@sch.ac.kr

Abstract

Although nailfold capillaroscopy is a standard and efficient examination for the differential diagnosis of Raynaud's phenomenon, its consistency and reliability are limited as it relies on the clinician's experience and subjective interpretation. This study proposes a hierarchical pipeline that uses deep learning to precisely detect the morphological boundaries of capillaries and the location of loop apices. In the first stage, an object detection model localizes candidate regions, and in the secondary stage, a multi-task Learning model simultaneously yields both morphological and structural location information. The proposed method provides a reliable foundation for objectifying capillary analysis and is expected to contribute to the automation of standardized density counts and enhance the consistency of clinical interpretations.

1. 연구 배경

손톱주름 모세혈관경 (Nailfold Capillaorscopy)은 레이노 현상과 같은 미세혈관 질환을 진단하고 추적 관찰하는 데 필수적인 비침습적 검사 방법이다 [1]. 특히, 모세혈관의 형태와 밀도를 정량적으로 평가하는 것은 예후가 양호한 1차성 레이노 현상과 혈관의 구조적 이상 및 자가면역학적 병태가 동반되는 2차성 레이노 현상을 감별하는 데 결정적인 역할을 한다.

기존의 손톱주름 모세혈관경 진단방법은 의료진의 육안 판독에 의한 질병의 유무를 판단하였다. 하지만, 이는 의료진의 숙련도와 주관적인 해석에 의해 진단 결과의 일관성과 객관성이 떨어질 수 있다. 그 결과 의료진 간 판독 편차가 커지고 신뢰성 및 재현성이 낮아져 환자의 예후 평가와 치료 방향 설정에 불확실성을 초래할 수 있다. 더욱이, 수동적 판독 과정은 상당한 시간이 소요될 뿐만 아니라, 높은 비용을 수반하는 문제를 지닌다.

이러한 한계를 극복하고 일관된 진단을 제공하기 위해서는, 판독 과정을 자동화하여 모세혈관의 형태 및 구조적 특징을 정밀하게 분석할 필요가 있다. 모세혈관의 형태와 밀도계수 진단 방법은 원위열에서 U자형 모세혈관 루프를 보이며 루프의 구조적 정점 (Apex)들이 형성하는 선을 따라 정의된다 [2]. 하지만 모세혈관의 루프 모양과 Apex는 이미지의 노이즈나 불분명한 혈관 경계, 비전형적인 혈관의 형태 등으로 인해 단순 검출만으로는 정확하게 구하기 어려운 한계점이 있다.

본 연구는 이러한 문제를 해결하기 위해 딥러닝 기반의 계층적 분석 파이프라인을 제안하고자 한다. 제안한 계층적 접근은 1차 단계에서 개인별 모세혈관의 후보 영역을 제시한 뒤, 2차 단계에서 분할 (Segmentation)과 Apex Keypoint 추정을 통해 모세혈관의 형태학적 구조와 원위열 판정 기준점을 정밀하게 산출하고자 한다. 이를 통해, 개인별 혈관의 구조적 특징과 표준화된 밀도 산정의 토대를 마련하고자 한다. 나아가 1차성 및 2차성 레이노 현상의 감별 진단에 있어 보다 정밀하고 신속한 판단을 가능하게 하는 보조적 진단 도구로서의 가능성을 제시하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1. 데이터 세트

실험에 참가한 피험자는 건강에 이상이 없는 18명 (연령 24.56 ± 2.53)을 대상으로 데이터를 확보하였다. 손톱 주름은 500배율의 확대가 가능하고 8개의 LED 조명이 내장된 USB디지털 현미경 (AM4113-N5UT Dino-Lite Premier, Anmo Electronics Corporation, Taiwan)을 사용하였다. 양 손의 각질층의 투명도를 높이기 위해 엄지를 제외한 8개 손가락 손톱 하부에 Immersion Oil Type A (Cargille laboratories, USA)한 방울을 도포하였다. 획득한 영상은 1,280 × 1,024 해상도의 총 1,264장의 데이터를 확보하였고, 데이터 품질이 낮거나 혈관의 검출이 되지 않은 영상은 사용하지 않았다.

2.2. 실험 환경

1단계 후보 영역 검출을 위한 You Only Look Once (YOLO) v5, v8, 11모델과 2단계 정밀 분석을 위한 U-Net 기반 Multi-Task Learning (MTL) 모델은 Python 버전 3.10.0 기반의 PyTorch 환경에서 구현하였다. 모든 모델의 학습 및 추론은 NVIDIA GeForce RTX 4090 24GB GPU 2대에서 병렬 수행하였다.

2.3. 1차적 검출

1차적 검출 단계에서는 모세혈관을 포함하는 후보 영역을 신속하고 정확하게 찾는 것을 목표로 하였다. 이를 위해, 실시간 처리 속도와 높은 검출 성능으로 널리 알려진 객체 탐지 모델인 YOLO모델을 사용하였다. COCO 데이터셋으로 사전 학습된 모델을 기반으로 전이 학습을 수행하여, 다양한 버전과 크기의 모델 성능을 비교하였다. 획득한 이미지는 Train (864장), Validation (198장), Test (198장) 세트로 약 7.5:1.5:1.5의 비율로 구성하였다. 본 단계에서 예측한 bounding box 결과는 후속 정밀 분석 단계의 입력으로 사용되어, 분석 범위를 국소화하고 불필요한 영역을 배재하며 최종적으로 전체 파이프라인의 연산 효율성을 높이는 중요한 역할을 수행하였다.

2.4. 2차적 검출

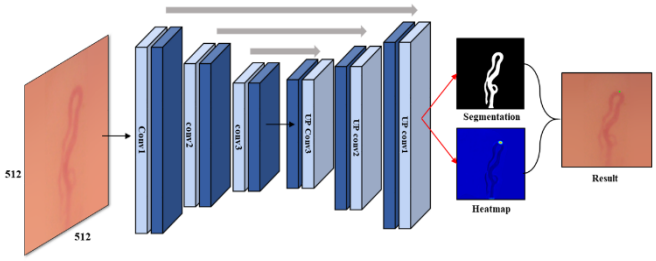


그림 1. MTL Architecture

2차적 검출 단계에서는 Segmentation과 Apex Keypoint를 공동학습하여 루프 경계와 Apex 좌표를 동시에 산출하는 U-Net기반 MTL모델을 설계하였다 (그림1). 또한 U-Net의 특징 추출 성능을 극대화하기 위해 Encoder (Backbone) 부분에 ImageNet 사전 학습 가중치를 가진 ResNet50과 EfficientNet-b2을 적용하여 비교 분석하였다. 학습 데이터는 YOLO로 검출된 후보 영역에서 신뢰도 높은 Ground Truth (GT) 마스크를 구축하기 위해 비교적 명확하게 혈관의 경계와 Apex Keypoint로 구분이 가능한 407장의 데이터를 선정하였다. 또한, 피험자 내 동일 부위에서 추출된 이미지가 훈련·검증 세트에 섞이는 데이터 누수를 방지하고 일반화 성능을 강건하게 평가하기 위해 GroupKFold 교차검증을 수행하였다.

Segmentation GT를 생성하기 위해 Photoshop 2025 (Adobe Inc., San Jose, CA, USA) 환경에서 모세혈관을 수동 Annotation 하였다. Apex Keypoint GT는 모세혈관 루프의 정점 위치를 단일 픽셀 좌표 (x, y)로 수동 Annotation을 진행하였다. MTL 모델이 Apex의 좌표 정보를 효과적으로 학습할 수 있도록, 라벨 좌표 중심으로 2D 가우시안 히트맵 (Gaussian Heatmap)을 생성하여 GT로 사용하였다 [3]. 이는 단일 좌표 회귀 방식보다 공간적 맥락과 구조를 보존하며, 모델이 안정적으로 최적 점에 수렴하도록 한다. 이를 토대로 Segmentation과 Apex Keypoint 공동 학습을 통해 형태학적 경계 정보와 위치 정보를 상호보완적으로 활용함으로써 유효 루프 판정을 더 일관성 있게 하였다.

3. 연구 결과

본 연구는 계층적 파이프라인의 각 단계에 대한 성능을 정량적으로 평가하고 최종적으로 MTL의 효과를 검증하였다. 표 1은 1단계 후보 영역 검출을 위한 YOLO 모델들의 성능 지표이다. 1차 검출 단계의 목표는 후속 정밀 분석에 활용할 신뢰도 높은 후보 영역들을 모두 확보하는 것이다. 따라서, 검출 누락을 나타내는 재현율(Recall)과 더불어, 위치 정확도(Intersection over Union)까지 종합적으로 평가하는 mAP50-95 지표를 가장 중요하게 고려하였다. 그 결과, mAP50-95에서 0.444의 값을 보인 YOLO11s를 1차 모델로 선정하였다. 표2 (a)와 (b)는 MTL모델의 성능을 검증하기 위해, 단일 작업만을 수행하는 두 모델 (Segmentation, Heatmap)의 성능 비교 결과를 보여준다. MTL 모델의 Segmentation성능은 단일 모델에 비하여 미세한 상승 혹은 대등한 수준을 유지하였다. 그에 반해 Apex Keypoint 탐지 성능은 단일 Heatmap의 Apex 검출 보다 대체적으로 매우 향상된 결과를 보였다. 이는 혈관의 전체적인 형태학 정보를 학습하는 과정이 모델이 이미지의 구조적 맥락을 더 깊이 이해하도록 돕는 정규화 효과를 가져와, 결과적으로 구조적 위치 정보를 더 정확하게 특정하는 데 결정적인 기여를 했음을 시사한다.

표 1. YOLO 성능 비교 결과

Model	Precision	Recall	mAP50	mAP50-95
YOLOv5n	0.848	0.859	0.911	0.431
YOLOv5s	0.831	0.846	0.895	0.419
YOLOv8n	0.845	0.794	0.886	0.413
YOLOv8s	0.844	0.828	0.899	0.417
YOLO11n	0.841	0.824	0.897	0.421
YOLO11s	**0.849**	**0.838**	**0.914**	**0.444**

표 2. MTL과 단일 작업 모델간의 성능 비교 결과

(a)

Backbone		Dice	IoU	Precision	Recall
U-Net	MTL	0.885 ± 0.004	0.798 ± 0.007	0.891 ± 0.007	0.887 ± 0.01
	Segmentation	0.884 ± 0.003	0.797 ± 0.006	0.889 ± 0.016	0.889 ± 0.016
ResNet50	**MTL**	**0.885 ± 0.003**	**0.798 ± 0.005**	**0.897 ± 0.01**	**0.881 ± 0.01**
	Segmentation	0.885 ± 0.005	0.797 ± 0.009	0.892 ± 0.012	0.885 ± 0.018
EfficientNet-b2	MTL	0.885 ± 0.004	0.798 ± 0.005	0.892 ± 0.018	0.8858 ± 0.019
	Segmentation	0.811 ± 0.147	0.713 ± 0.167	0.872 ± 0.036	0.798 ± 0.179

(b)

Backbone		L2-distance (px)	PCK@10 (%)
U-Net	MTL	16.58 ± 5.97	0.47 ± 0.08
	Heatmap	20.77 ± 11.77	0.47 ± 0.08
ResNet50	**MTL**	**12.94 ± 2.62**	**0.66 ± 0.07**
	Heatmap	58.58 ± 55.07	0.50 ± 0.10
EfficientNet-b2	MTL	12.86 ± 3.66	0.64 ± 0.03
	Heatmap	58.87 ± 56.88	0.5 ± 0.12

4. 참고 문헌

[1] V. Smith et al., "Nailfold capillaroscopy," *Best Pract Res Clin Rheumatol*, Vol. 37, No. 1, p. 101849, 2023

[2] M. Etehad Tavakol, A. Fatemi, A. Karbalaie, Z. Emrani, and B. E. Erlandsson, "Nailfold Capillaroscopy in Rheumatic Diseases: Which Parameters Should Be Evaluated?," *Biomed Res Int*, Vol. 2015, p. 974530, 2015

[3] C. Payer, D. Stern, H. Bischof, and M. Urschler, "Integrating spatial configuration into heatmap regression based CNNs for landmark localization," *Med Image Anal*, Vol. 54, pp. 207–219, 2019

Poster-156

GAN을 이용한 유방암 조직병리학 이미지 증강 및 분류 기술

레디엣 알레무[1] , 나즈라위트 테쇼메[1], 최세운[1,2,*]

국립금오공과대학교 바이오메디컬공학과[1], 국립금오공과대학교 첨단의료기기연구소[2]

Augmenting Breast Cancer Histopathology Image using GAN for Classification

Rediet Alemu[1], Nazrawit Teshome[1], Se-woon Choe[1,2,*]

Department of Biomedical Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Korea[1]

High-tech Medical Equipment Research Institute, Kumoh National Institute of Technology, Korea[2]

[*]sewoon@kumoh.ac.kr

Abstract

Generative Adversarial Networks (GANs) have emerged as a powerful approach in generating synthetic medical images to augment training data. This study introduces a GAN-based augmentation approach for generating synthetic breast cancer histopathological images, increasing the dataset diversity and boosting classification performance. Three GAN models, namely DRAGAN (Deep Regret Analytic GAN), SNGAN (Spectral Normalization GAN) and SAGAN (Self-Attention GAN), were implemented and systematically evaluated on the BreakHis dataset. The generated images were evaluated qualitatively and quantitatively through Fréchet Inception Distance (FID), Kernel Inception Distance (KID), and Inception Score (IS). The SAGAN-generated images, the highest-quality images, were combined with the real images and used to train CNN model, Xception. Our results demonstrate that SAGAN produces high quality images, mitigating dataset scarcity and the Xception model demonstrated the robustness of breast cancer classification result.

1. Introduction

Breast cancer affects millions of individuals and their families annually, making it one of the leading types of cancer worldwide. Accurate and early detection plays a vital role in improving patient survival rates and therapeutic outcomes.

Biopsy is considered a gold standard among various screening methods, as it involves microscopic images analysis of tissue images by medical experts. However, characterizing and identifying cellular morphology is subjective, time-consuming and heavily dependent on pathologist's experience.

Recent advances in deep learning, particularly the use of Convolutional Neural Networks (CNNs), have demonstrated outstanding achievement in detecting complex features of histopathological images. While these models can aid pathologists by delivering rapid and consistent interpretations, training such models demands substantial quantities of well-annotated medical dataset. However, obtaining such datasets are often challenging due to privacy restrictions, scarcity of diverse samples, and labeling costs.

To address these, this study proposes GAN-based augmentation diagnostic method that utilizes Generative Adversarial Network (GAN) to generate synthetic histopathological images of breast cancer and employs CNN model for accurate and automated classification.

2. Materials and Methods

2.1 Dataset

For this study, the Breast Cancer Histopathology image classification (BreakHis) dataset was used. It consists of 7,909 samples that are organized into two main classes: benign and malignant. The dataset was acquired at four magnifications 40×, 100×, 200× and 400× [1].

The dataset was divided into 70% train, 20% validation and 10% test sets using stratified sampling by considering the labels. All samples were resized to 128×128 pixels, and both the GAN-based augmentation and classification experiments conducted separately for each of the magnifications.

2.2 GAN Architecture

DRAGAN: This architecture applies a gradient penalty around the real data points on the discriminator to stabilizes training [2].

SNGAN: This model applies spectral normalization for same reason as the DRAGAN to the discriminator to avoid the discriminator from overpowering the generator [3].

SAGAN: In both the generator and the discriminator this architecture employs self-attention, allowing the model to capture long-range dependencies within the image [4].

2.3 Classification Experiment

A CNN model, namely Xception is used for classification of the generated histopathology images to assess the effectiveness of the synthetic images in the classification.

To ensure consistency across experiments, all experiments were carried out using an NVIDIA GeForce RTX 3090 graphics processing unit (GPU) in with PyTorch, python 3.11.0, and CUDA 12.1.

3. Results and Conclusions

3.1 Performance of GAN

The generated samples were evaluated using visual inspection, Fréchet Inception Distance (FID), Inception Score (IS), and Kernel Inception Distance (KID).

As presented in table 1, SAGAN achieved the lowest FID and KID values and highest IS, indicating high realism and diversity compared to those generated by SNGAN and DRAGAN. SNGAN generally resulted lower FID at 100× and 200× magnification levels, and high KID at 40× while DRAGAN resulted in high FID and KID values, and lower IS

compared to the other GAN models across all magnifications.

Notebly, for SNGAN and SAGAN models the results of 100× and 200× magnification levels yielded silightly better quantitative results relative to 400× and 40×, indicating the favourable magnification levels for high-quality image generation are the intermediate magnification levels.

Table. 1 Quantitative result on DRAGAN, SNGAN and SAGAN at 40×, 100×, 200×, and 400× magnification levels

Magnification	Model	FID	KID	IS
40×	DRAGAN	85.778	0.050	2.613 ± 0.106
	SNGAN	77.138	0.042	**2.976 ± 0.120**
	SAGAN	**73.567**	**0.033**	2.964 ± 0.163
100×	DRAGAN	93.364	0.058	2.512 ± 0.097
	SNGAN	**63.522**	0.030	2.910 ± 0.069
	SAGAN	67.940	**0.028**	**3.034 ± 0.116**
200×	DRAGAN	98.582	0.059	2.586 ± 0.098
	SNGAN	**67.248**	0.033	2.904 ± 0.124
	SAGAN	71.659	**0.032**	**3.138 ± 0.157**
400×	DRAGAN	101.121	0.064	2.750 ± 0.150
	SNGAN	79.218	0.048	3.130 ± 0.152
	SAGAN	**69.140**	**0.032**	**3.296 ± 0.226**

3.2 Performance of Classification using Generated images

The GAN-generated images were combined with the original BreakHis dataset and used to train CNN model for the classification experiment. Since the SAGAN achieved the lowest FID at 40× and because obtaining low FID result at this magnification is difficult due to the presence of various tissue structures, patterns, and background elements, SAGAN-generated images were selected for classification training among the two GANs.

The Xception model achieved consistently high performance across all magnification levels. At the lowest magnification level, 40×, the model obtained an accuracy of 0.987 ± 0.007, precison of 0.978 ± 0.013, recall of 0.996 ± 0.001 and f1 score of 0.987± 0.006. At 100×, it maintained a strong perfomance with an accuracy of 0.985 ± 0.003, precison of 0.976 ± 0.005, recall of 0.995 ± 0.006, and f1 score of 0.985 ± 0.003. At 200×, the results were 0.987 ± 0.004 accuracy, 0.979 ± 0.008 precision, recall of 0.995 ± 0.003 and 0.987 ± 0.004 f1 score. At the highest magnification level, 400×, it achieved accuracy of 0.987 ± 0.003, precison of 0.981± 0.005, recall of 0.992 ± 0.005 and, f1 score of 0.987 ± 0.003.

The classification result of the Xception model shows that the highest accuracy, recall, and F1 score is at 40× magnification, outperforming the other three magnification levels and the highest precision is achieved at 400× magnification scale. These results demonstrate that GAN based augmentation, particularly with SAGAN, effectively enriches the dataset diversity and enhances the classification robustness.

4. Acknowledgements

이 논문은 2023년과 2025년도 정부(교육부, 과학기술정보통신부) 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (RS-2023-00240521, RS-2025-16068429)

5. References

[1] F. A. Spanhol, L. S. Oliveira, C. Petitjean, and L. Heutte, "A Dataset for Breast Cancer Histopathological Image Classification," IEEE Transactionson Biomedical Engineering, vol. 63, no. 7, pp. 1455-1462, Jul. 2016. DOI: 10.1109/TBME.2015.2496264.

[2] N. Kodali, J. Abernethy, J. Hays, and Z. Kira, "On Convergence and Stability of GANs," arXiv preprint arXiv:1705.07215, Dec. 2017. DOI: 10.48550/arXiv.1705.07215.

[3] T. Miyato, T. Kataoka, M. Koyama, and Y. Yoshida, "Spectral Normalization for Generative Adversarial Networks," arXiv preprint arXiv:1802.05957, Feb. 2018. DOI: 10.48550/arXiv.1802.05957.

[4] H. Zhang, I. Goodfellow, D. Metaxas, and A. Odena, "Self-Attention Generative Adversarial Networks," arXiv preprint arXiv:1805.08318, Jun. 2019. DOI: 10.48550/arXiv.1805.08318.

Poster-157

피부 병변 합성 이미지 생성을 위한 GAN 모델의 비교 평가

나즈라위트 테쇼메[1] , 레디엣 알레무[1] , 최세운[1,2,*]

금오공과대학교 메디컬IT융합공학과

Comparative Evaluation of GAN Models for Synthetic Skin Lesion Image Generation

Nazrawit Teshome[1] · Rediet Alemu[1] · Se-woon Choe[1,2,*]

Department of Medical IT Convergence Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Korea[1]

High-tech Medical Equipment Research Institute, Kumoh National Institute of Technology, Korea[2]

[*]sewoon@kumoh.ac.kr

Abstract

Generative Adversarial Networks (GANs) have become valuable tools for medical image generation, offering effective ways to address the challenges of limited and imbalanced annotated datasets. In the field of dermatology, where labeled skin cancer images are often scarce, GANs can produce realistic and varied synthetic samples. This study conducts a comparative evaluation of six conditional GAN architectures, all trained under uniform settings on the HAM10000 skin lesion dataset. Model performance was measured with four widely recognized metrics: Fréchet Inception Distance (FID), Inception Score (IS), Kernel Inception Distance (KID), and Structural Similarity Index Measure (SSIM). The results show that each architecture demonstrates unique advantages. Notably, Conditional FastGAN achieved the best FID, while the Auxiliary Classifier GAN obtained the highest SSIM. These outcomes highlight the relative strengths of different GAN designs and provide guidance for selecting suitable models in skin lesion data augmentation and clinical applications.

1. Introduction

Skin cancer ranks among the most prevalent and serious forms of cancer globally, with melanoma posing especially high mortality risk if not identified in its early stages [1]. Dermoscopic imaging has become an essential non-invasive diagnostic tool; however, the development of reliable deep learning models remains challenging due to limited annotated data and significant class imbalance in datasets such as HAM10000 [2]. Generative Adversarial Networks (GANs) have emerged as promising methods to address these limitations by generating synthetic samples for underrepresented classes [3]. Several architectures have been proposed, including Self-Transfer GAN (STGAN) and Auxiliary Classifier GAN (AC-GAN), each contributing improvements in generation stability, image realism, and classification accuracy [1,4]. Xiang et al. showed that incorporating AC-GAN–generated images into the training set improved CNN classification performance, with the most significant gains observed in ensemble models. They further confirmed the quality and diversity of the synthetic images using latent space interpolation and nearest-neighbor analysis [4]. Despite these advances, comparative evaluations of GAN models trained under standardized conditions for dermatological imaging remain scarce. In particular, studies focusing on the HAM10000 dataset—a widely used benchmark—are limited, especially when considering computationally efficient models suitable for clinical applications. Building on prior works, this study conducts a systematic comparison of six conditional GANs using consistent preprocessing procedures, hyperparameters, and evaluation metrics. Four widely adopted metrics are employed to evaluate generative performance. The objective is to identify an effective low-complexity GAN capable of producing diverse and realistic skin lesion images for data augmentation, thereby providing practical guidance for both research and real-world deployment of deep learning–based skin cancer classification systems.

2. Methodology

The HAM10000 dataset [2] is composed of 10,015 dermoscopic images spanning seven diagnostic categories: Melanoma (MEL), Melanocytic Nevus (NV), Basal Cell Carcinoma (BCC), Actinic Keratosis (AKIEC), Benign Keratosis (BKL), Dermatofibroma (DF), and Vascular lesions (VASC).

Due to the pronounced class imbalance, with most images belonging to the NV class, our study focuses on the six minority categories.

In this research, six GAN variants were explored for skin lesion image generation: Vanilla GAN, Feature Matching GAN (FM-GAN), Auxiliary Classifier GAN (AC-GAN), FastGAN, Lightweight GAN (LightGAN), and Conditional Deep Convolutional GAN (CDC-GAN). These models were chosen to represent diverse architectural designs while maintaining low computational demands, allowing fair benchmarking and potential real-world applicability under a unified training protocol.

All experiments were carried out on a workstation with a single NVIDIA GeForce RTX 3090 GPU (24 GB VRAM) using CUDA 11.8 and PyTorch 2.1.0. Loss functions were applied according to each GAN's structure: Vanilla GAN and AC-GAN utilized binary cross-entropy (with AC-GAN also applying categorical cross-entropy for classification), whereas FM-GAN, CDC-GAN, and LightGAN adopted Wasserstein loss with gradient penalty. Additionally, FM-GAN introduced a frequency-domain loss to enhance learning.

3. Results

The different GAN architectures were quantitatively evaluated using the four metrics. Across the evaluated GAN

architectures, FastGAN demonstrated the best overall performance, achieving the lowest FID (95.35) and KID (0.04), which reflects strong fidelity and diversity in the generated images. LightGAN also performed competitively, producing the highest Inception Score (3.23 ± 0.09) while matching FastGAN in KID, indicating a robust balance between realism and variability. AC-GAN excelled in terms of structural similarity, with the highest SSIM (0.54), showing its strength in preserving perceptual features of skin lesion images. In contrast, Vanilla GAN consistently underperformed, with the highest FID (143.27) and the lowest IS (2.28 ± 0.15) and SSIM (0.26), underscoring its limitations in capturing the underlying distribution of dermatological images. Taken together, these findings highlight the superiority of recent variants—particularly FastGAN and LightGAN—in producing dermatological images that are both realistic and diverse. Consequently, subsequent analyses focused on these two models through class-wise evaluation.

When comparing class-wise performance, LightGAN obtained lower FID values for several categories, particularly melanoma (MEL) and benign keratosis (BKL), highlighting its advantage in image fidelity. By contrast, FastGAN consistently produced higher SSIM scores across most classes, suggesting stronger preservation of structural and perceptual similarity. For the more challenging classes, such as dermatofibroma (DF) and vascular lesions (VASC), FastGAN outperformed LightGAN not only in SSIM but also in Inception Score, indicating superior capability in generating images that are both realistic and average, FastGAN achieved better perceptual quality, while LightGAN maintained competitive fidelity for certain lesion types.

The observations reinforce the quantitative findings, highlighting that Lightweight GAN and FastGAN consistently produce samples with higher perceptual realism and intra-class diversity. The improvements in lesion boundary sharpness and texture representation suggest their stronger capacity to capture clinically relevant features compared to the other models. While AC-GAN and CDC-GAN provide moderate enhancements over Vanilla GAN, they remain limited in reproducing subtle structures, which may affect their utility in augmenting datasets for fine-grained classification tasks. FM-GAN, despite showing potential in select categories, exhibits instability in maintaining color balance across samples. Taken together, the qualitative evaluation demonstrates that model choice has a direct impact on the visual fidelity of synthetic skin lesion data, further supporting the suitability of Lightweight GAN and FastGAN for real-world augmentation scenarios.

4. Acknowledgements

이 논문은 2023년과 2025년도 정부(교육부, 과학기술정보통신부) 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (RS-2023-00240521, RS-2025-16068429)

5. REFERENCES

[1] Q. Su, H. N. A. Hamed, M. A. Isa, X. Hao, and X. Dai, "A GAN-Based Data Augmentation Method for Imbalanced Multi-Class Skin Lesion Classification," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 16498–16509, Jan. 2024. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3360215.

[2] P. Tschandl, C. Rosendahl, and H. Kittler, "The HAM10000 dataset: A large collection of multi-source dermatoscopic images of common pigmented skin lesions," *Scientific Data,* vol. 5, no. 180161, pp. 1–9, Aug. 2018. DOI: 10.1038/sdata.2018.161.

[3] S. Q. Gilani and O. Marques, "Skin lesion analysis using generative adversarial networks: a review," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 82, no. 19, pp. 30065-30106, Jan. 2023. DOI: 10.1007/s11042-022-14267-z.

[4] A. Xiang and F. Wang, "Towards interpretable skin lesion classification with deep learning models," in *Proceedings of the AMIA Annual Symposium*, Washington, USA, pp. 1246-1255, 2019.

Poster-158

조현병 특이적 fMRI 초저주파 전파 패턴 연구

최영선[1*], 김성필[1]

울산과학기술원 바이오메디컬공학[1]

Investigation of infra-slow phase propagation in schizophrenia using fMRI

Yeongseon Choi[1*], Sung-Phil Kim[1]

Biomedical Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST), Korea

[*]yseon22@unist.ac.kr

Abstract

Spontaneous infra-slow fluctuations in the BOLD signal reflect intrinsic functional organization of the brain, which can propagate across the cortex as traveling waves. These infra-slow phase propagations coordinate with arousal variations and follow the cortical functional gradient. Schizophrenia has been associated with disrupted functional integration and abnormal spatiotemporal dynamics, altered traveling wave patterns. In this study, we used task-related fMRI data to examine differences in infra-slow phase propagation between schizophrenia and healthy control groups. LPG characteristics of somatomotor and superior temporal areas were significantly different between schizophrenia and healthy control. These findings suggest that schizophrenia disrupts the infra-slow BOLD phase propagation, which is indicative of macroscale functional integration.

1. 연구 배경

뇌의 자발적 활동은 단순한 잡음이 아니라, 기능적 네트워크 간의 복잡한 시간적 상호작용을 반영하는 것으로 알려져 있다 [1]. 특히 fMRI에서 관찰되는 초저주파(0.01–0.1 Hz) 대역의 BOLD 신호 변동은 뇌 전반의 기능적 연결성(functional connectivity, FC)을 형성하는 핵심적 기반으로 이해되고 있다. 이러한 자발적 infra-slow BOLD 변동이 단순한 정지 상태 신호가 아니라, 피질 전반을 따라 전파되며 arousal 변동과 동기화되는 진행파(traveling wave)로 설명될 수 있음을 보여주었다. 이러한 파동은 unimodal 영역에서 transmodal 영역으로 진행하며, 기능적 구배(functional gradient)의 공간적 구조와 밀접하게 일치한다고 보고하였다[2], [3].

한편, 조현병 환자의 경우 disconnection syndrome 이론이 오랜 기간 병리적 기전을 설명하는 주요 틀로 연구되어 왔으며 [4] resting state에서 정적인 FC의 감소나 재배열이 지속적으로 보고되어 왔다 [5]. 최근 연구에서는 이러한 정적 연결성의 변화뿐 아니라, 네트워크 수준에서 spatiotemporal propagation 패턴 자체가 변형된다는 결과도 제시되었다 [6].

EEG 기반 연구에서는 조현병 환자에서 traveling wave의 전파 방향성이 비정상적으로 나타나며 [7], [8], 특히 local phase gradient (LPG) 분석을 통해 인접 영역 간 위상차의 방향성과 일관성이 손상되어 있음을 보고하였다 [9]. 이러한 변화는 피질 간 정보 흐름의 방향성이 교란되어 있음을 시사한다.

본 연구에서는 fMRI 데이터에서 BOLD 신호의 초저주파 대역을 추출하여 voxel 간 phase shift를 계산하고, 이를 바탕으로 local phase gradient를 산출함으로써, 조현병 환자와 건강 대조군 간의 국소 위상 전파 특성이 어떻게 달라지는지를 규명하고자 한다. 이를 통해 조현병에서의 기능적 위상 지연 왜곡과 정보 전달 불균형의 신경생리학적 기전을 보다 심층적으로 탐색하고자 한다.

2.연구 방법

본 연구에서는 listening task를 수행하는 동안의 healthy control (HC, n = 23)과 schizophrenia환자 (SZ, n = 43) 의 3T BOLD fMRI 오픈데이터를 사용하였다 [10]. Listening task는 spoken words, spoken sentences, reversed speech, low-level white-noise로 구성되었고 모든 조건을 합쳐서 총 5가지 조건에 대해 분석을 진행하였다.

전처리는 초기 5개 이미지를 제거한 후, head motion correction, slice timing correction, registered to MNI152 20mm template을 하였다. 전처리를 한 후에 0.01-0.1Hz에 대해 대역통과필터를 적용하여 초저주파 대역 신호를 추출하였다. Schaefer 400 parcels [11]를 이용하여 ISA신호의 voxels 평균 신호를 구하여 parcels단위로 이후 분석을 진행하였다.

Phase shift map은 global signal 대비 각 parcels별 phase차이를 구한 후 시간 평균을 하여 구하였다 [3].

LPG [9]는 phase shift map의 phase 와 유클리디안 거리로 구한 인접한 8개의 parcel간에 상관관계를 통해 구하였고, PG 벡터의 방향은 전파되는 공간적 방향을, LPG의 크기는 위상 전파의 일관성 혹은 강도를 의미한다. 그룹 간 LPG 비교를 위해 mean LPG에 대해 각 참가자의 LPG를 투영(projection)한 후, 두 집단 간 투영값 차이를 양측(two-tailed) Wilcoxon rank-sum test로 검정하였다. 동일 절차를 SZ의 mean LPG에 대해서도 수행하여, 두 검정에서 나온 p-value 중 더 작은 값을 채널별로 선택하고, 다시 FDR 보정($p<0.05$) 적용하여 그룹 간 LPG가 유의미한 차이를 보인 parcel을 확인하였다. Atlas는 AAL3 atlas를 사용하였다 [12].

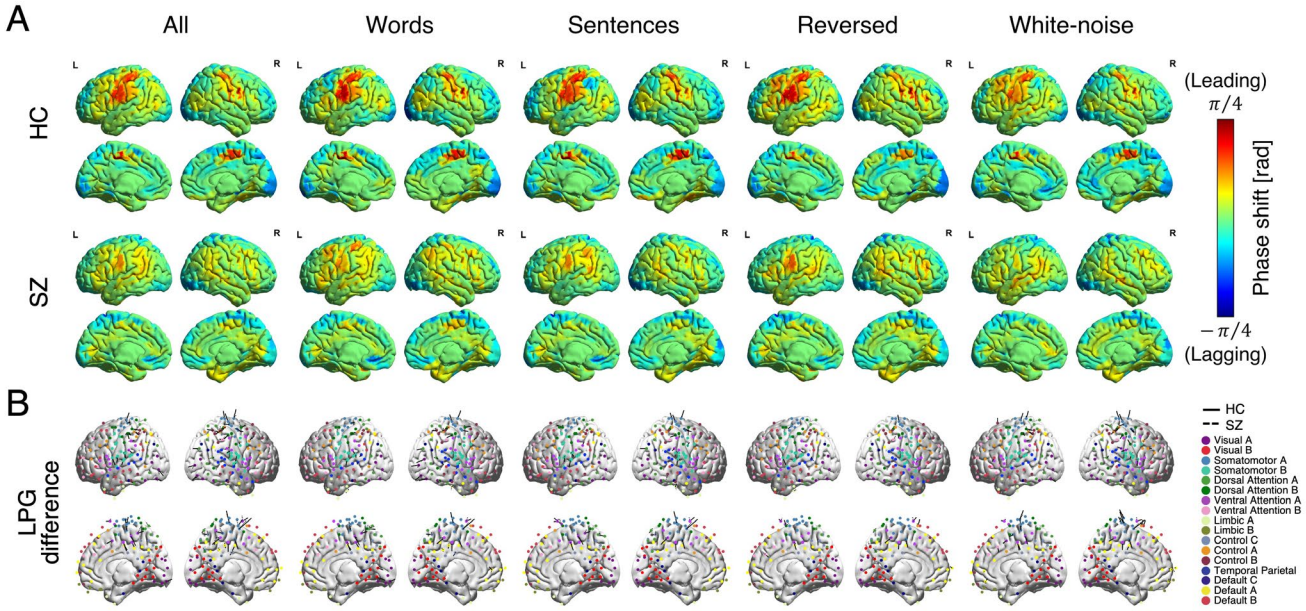


그림 1. A. Phase shift map의 그룹 별 평균 (위) HC 그룹 평균, (아래) SZ 그룹 평균. B. 그룹간 LPG차이가 유의미한 영역. 원의 색깔은 Yeo 17-network와 동일하고, 실선은 HC를, 점선은 SZ를 나타냄.

3. 연구 결과

Phase shift map을 구한 결과, 증폭 반응은 그림 1.A에서 보이는 것과 같이 HC 그룹은 SZ에 비해 somatomotor 영역에서 global signal보다 선행하였다. 반대로 visual 영역은 SZ에 비해 지연되어다. 이러한 특징은 대부분의 조건에서 유사하게 관찰되었다. Phase shift map을 통해 LPG를 구한 후 그룹간 차이를 확인하였다 (그림 1.B). 그 결과 주로 Postcentral LR, Precentral LR, Supplementary motor area LR, Paracentral lobule LR, Temporal superior LR, Temporal middle R, Rolandic operculum L 등을 포함한 여러 영역에서 그룹 간 LPG 차이가 관찰되었다. 이러한 영역들은 주로 감각운동 및 청각 피질과 연관되어 있으며, HC 그룹에서 보다 뚜렷한 전방→후방(anterior-to-posterior) 방향의 위상 전파를 보인 반면, SZ 그룹에서는 전파 방향이 불규칙하거나 일관성이 감소하였다.

특히 somatomotor 및 superior temporal 영역에서의 위상 선행(leading phase)이 조현병 환자에서 감소하였으며, 이는 해당 네트워크의 위상 동기화 및 전파 일관성 저하를 시사한다. 따라서 본 연구는 task를 수행하는 동안에 시공간적 전파 패턴에 차이가 보이는 것을 통해 조현병에서 제안된 disconnection syndrome 가설과 일치하는 결과를 확인하였다.

4. Acknowledgements

이 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-대학ICT연구센터(ITRC)의 지원을 받아 수행된 연구임(IITP-2025-RS-2024-00437866)

5.참고 문헌

[1] M. D. Fox and M. E. Raichle, “Spontaneous fluctuations in brain activity observed with functional magnetic resonance imaging,” *Nat Rev Neurosci*, vol. 8, no. 9, pp. 700–711, 2007, doi: 10.1038/nrn2201.

[2] D. S. Margulies *et al.*, “Situating the default-mode network along a principal gradient of macroscale cortical organization,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 113, no. 44, pp. 12574–12579, Nov. 2016, doi: 10.1073/pnas.1608282113.

[3] R. V Raut *et al.*, “Global waves synchronize the brain’s functional systems with fluctuating arousal,” *Sci Adv*, vol. 7, no. 30, p. eabf2709, 2021, doi: 10.1126/sciadv.abf2709.

[4] K. J. Friston and C. D. Frith, “Schizophrenia: a disconnection syndrome?,” *Clin Neurosci*, vol. 3, no. 2, pp. 89–97, Jan. 1995, Accessed: Mar. 10, 2025. [Online]. Available: https://europepmc.org/article/med/7583624

[5] S. Whitfield-Gabrieli *et al.*, “Hyperactivity and hyperconnectivity of the default network in schizophrenia and in first-degree relatives of persons with schizophrenia,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 106, no. 4, pp. 1279–1284, Jan. 2009, doi: 10.1073/pnas.0809141106.

[6] B. Bostami *et al.*, “Time-Varying Spatial Propagation of Brain Networks in fMRI Data,” *Hum Brain Mapp*, vol. 46, no. 2, p. e70131, Feb. 2025, doi: 10.1002/HBM.70131.

[7] H. Pei *et al.*, “Fronto-occipital dyscommunication associates with brain hierarchy in schizophrenia,” *Communications Biology 2025 8:1*, vol. 8, no. 1, pp. 1–10, May 2025, doi: 10.1038/s42003-025-08053-4.

[8] A. Alamia, D. Gordillo, E. Chkonia, M. Roinishvili, C. Cappe, and M. H. Herzog, “Oscillatory Traveling Waves Provide Evidence for Predictive Coding Abnormalities in Schizophrenia,” *Biol Psychiatry*, vol. 98, no. 2, pp. 167–174, Jul. 2025, doi: 10.1016/J.BIOPSYCH.2024.11.014.

[9] D. Sihn and S.-P. Kim, “Disruption of alpha oscillation propagation in patients with schizophrenia,” *Clinical Neurophysiology*, vol. 162, pp. 262–270, 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.clinph.2024.02.028.

[10] J. Soler-Vidal *et al.*, “Brain correlates of speech perception in schizophrenia patients with and without auditory hallucinations,” *PLoS One*, vol. 17, no. 12, pp. e0276975-, Dec. 2022, [Online]. Available: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0276975

[11] A. Schaefer *et al.*, “Local-Global Parcellation of the Human Cerebral Cortex from Intrinsic Functional Connectivity MRI,” *Cerebral Cortex*, vol. 28, no. 9, pp. 3095–3114, Sep. 2018, doi: 10.1093/cercor/bhx179.

[12] E. T. Rolls, C. C. Huang, C. P. Lin, J. Feng, and M. Joliot, “Automated anatomical labelling atlas 3,” *Neuroimage*, vol. 206, p. 116189, Feb. 2020, doi: 10.1016/J.NEUROIMAGE.2019.116189.

Poster-159

주관적 비폐색 정도의 정량화를 위한 열 영상 기반 비강 기류 특징 분석

민지희[1], 김주현[2], 박윤희[1], 이언석[12*]

순천향대학교 의료IT공학과[1]

순천향대학교 일반대학교 소프트웨어융합학과[2]

Thermal Imaging-Based Analysis of Nasal Airflow Features for Quantifying Subjective Nasal Obstruction

Jihee Min[1] , Juhyun Kim[2] , Yoonhui Park[1] , Onseok Lee[12*]

[1]Department of Medical IT Engineering, Soonchunhyang University, Korea

[2]Department of Software Convergence, Graduate School, Soonchunhyang University, Korea

[*]leeos@sch.ac.kr

Abstract

Nasal obstruction occurs due to various causes, and surgical intervention is often required when structural abnormalities are present or nonsurgical treatments are ineffective. However, because patients perceive the severity of nasal obstruction differently, it is difficult to objectively evaluate improvement before and after treatment. Therefore, this study aimed to quantify nasal patency by analyzing the correlation between thermal imaging–based nasal breathing features and subjective nasal obstruction scores. Infrared thermal videos of 14 healthy subjects were acquired, and nasal exhalation features such as temperature difference (ΔT) and exhalation angle were extracted. Pearson correlation analysis showed a negative correlation between nasal obstruction score and ΔT ($r = -0.44$) and a positive correlation with exhalation angle ($r = 0.39$), indicating that as nasal obstruction became more severe, the temperature variation decreased while the exhalation angle increased. These findings suggest the potential of thermal imaging as an objective and quantitative indicator for assessing nasal obstruction and airflow characteristics.

1. 연구 배경

1.1 비폐색

비폐색 (코막힘)은 비강을 통해 공기 흐름이 충분하지 않다는 주관적인 인식과 객관적인 상태를 의미하며, 생리적 요인, 구조적 문제 등 다양한 원인에 의해 흔히 발생한다 [1]. 일시적인 비폐색은 자연스럽게 해소되기도 하지만, 증상이 심각하거나 오래 지속되면 임상적 평가와 적절한 치료가 요구된다. 특히 비강 내부의 구조적인 문제가 있거나, 비수술적 치료로 해결되지 않는 경우 수술적 치료가 필요하다. 하지만 환자마다 비폐색 정도에 대한 인식이 상이하고 주관적이기 때문에, 치료 전후에 따른 비폐색의 차이를 객관적으로 진단하기 어렵다 [2]. 따라서 비강 개통도에 따른 비폐색 정도를 평가하기 위한 주관적인 비강 기류 인식의 객관적 분석 방법이 필요하다.

1.2 기존 검사 방법

음향비강통기도검사, 최대비흡기유속과 같은 여러 객관적인 기법들이 존재하지만, 이러한 기법들은 주관적인 비강 개통도와의 낮은 상관관계 때문에 수술 계획 단계에서 널리 사용되지 못하고 있다 [3]. 최근 연구에서는 공기가 비강 점막을 통과하면서 나타나는 점막의 온도 변화가 주관적인 비폐색 정도와 높은 상관관계를 가지는 것이 밝혀졌다 [4]. 그러나 점막 온도 측정을 위해 열 영상 카메라 기반 평가법이 제안되었지만, 비공 (콧구멍)을 관찰하는 해당 방법은 직접적인 비강 기류 관찰을 통한 정밀한 분석에 제한적이다.

1.3 제안한 방법

호흡은 외부의 공기를 빨아들이는 흡기와 외부로 공기를 밀어내는 호기로 구분되며, 호기 시 체열로 가열된 공기를 배출한다. 열 영상 카메라는 사람의 눈에 보이지 않는 열에너지를 영상으로 획득할 수 있어 비강 개통도에 따른 비강 기류의 정량적인 분석이 가능하게 한다. 따라서 본 연구에서는 열 영상 기반 비강 기류 분석을 통해 비강 기류를 추적하여 비강 기류 특징을 추출한 후, 주관적 비폐색과 유의한 상관관계를 가지는 비강 기류 특징을 도출 및 분석하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 실험 환경

열 영상 카메라를 기반한 진단 촬영을 위해 항온·항습이 조절된 실내환경 (21 ± 2℃; 30 – 75%)에서 촬영을 수행하였고, 열 스펙트럼 설정은 진단 가치가 있는 온도 범위 (22 – 40℃)로 고정되었다.

2.2 데이터 획득

적외선 열 영상 카메라 FLIR C2 (FLIR Systems, Inc., Wilsonville, USA)를 사용하여 초당 30 프레임으로 비강 기류 동영상을 획득하였다. 호흡기 질환 외에 이상이 없는 건강한 성인 14명을 대상으로 진행하였으며, 이후 데이터 처리 과정을 통해 좌측과 우측으로 분리하여 총 28개의 데이터로 활용하였다. 실험 대상자들은 실험 전 비폐색 자가 문진표를 작성하였고, 촬영은 편안한 호흡 상태에서 진행되었다.

2.3 전처리

획득한 비강 기류의 동영상을 프레임당 이미지로 변환한 후, grayscale 이미지로 변환하였다. 피험자의 비강 기류 길이 및 강도는 개인차가 존재하므로 비강 기류를 호기 및 흡기의 시작과 끝으로 구분하였고, 호기의 최종 프레임에서 상위 35%에 해당하는 픽셀 값으로 모든 프레임에 문턱처리를 수행하여 비강 기류 영역을 분할하였다. 비공을 기준으로 비강 기류의 좌측과 우측을 나눈 후, 좌측 영상을 반전시켜 좌표계 기준점을 일치시켰다. 그 후, 프레임별로 열이 확산된 가장 끝 지점을 좌표로 표현하였다 (그림 1).

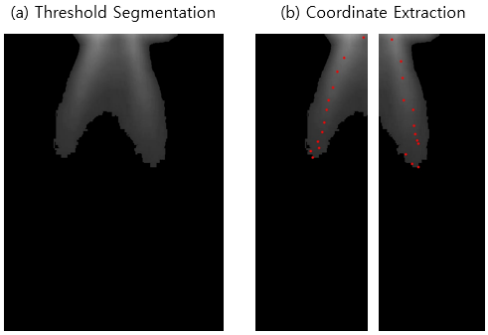


그림 1. 전처리 결과 (좌측 (a) Threshold Segmentaion, 우측 (b) Coordinate Extraction)

2.4 ROI(Region Of Interest) 추가

주관적인 비폐색 정도와 높은 상관관계를 가지는 비강 점막의 온도 변화가 비공 주위의 비강 기류에서도 관찰되는지 확인하기 위해, 비공 주위를 추가적인 ROI로 설정하였다. 이후 호기 시 최대 온도 값과 흡기 시 최소 온도 값의 차이(ΔT)를 통해 비강 점막의 온도 변화를 미루어 관찰하고자 하였다.

2.5 비강 기류 특징 추출

본 연구에서는 영상의 픽셀 강도 (pixel intensity)와 전처리 과정에서 추출한 좌표를 통해 비강 기류 특징을 추출하였다. 비강 기류 특징으로는 ΔT, 호흡량 (Volume), 호기 길이 (Length), 호기 각도 (Angle)를 사용하였다.

3. 연구 결과

3.1 주관적 비폐색 점수

본 연구는 자가 문진표를 통해 피험자의 비강 좌측과 우측에 대한 주관적 비폐색 정도를 0부터 4까지의 정수로 획득하였다.

3.2 상관분석

주관적 비폐색 정도와 추출한 비강 기류 특징들이 어떤 연관성을 가지는지 파악하기 위해 Pearson 상관분석을 진행하였다. 상관분석 결과 비강 기류 특징 중 ΔT와 호기 각도가 유의하였다 ($p<0.05$). 또한 비폐색 정도와 ΔT는 음의 상관관계 ($r=-0.45$), 비폐색 정도와 호기 각도는 양의 상관관계 ($r=0.39$)를 보이는 것을 확인했다 (표 1).

표 1. 주관적 비폐색 정도와 비강 기류 특징 상관분석 결과

Airflow Features	Correlation (r)	P-value ($p<0.05$)
ΔT	-0.4453	0.0176
Volume	-0.0836	0.6723
Length	0.0879	0.6630
Angle	0.3859	0.0468

3.2 주관적 비폐색 점수 그룹 간 비강 기류 특징 값 비교

주관적 비폐색 정도에 따른 비강 기류 특징 값을 비교하기 위해, 주관적 비폐색 점수를 그룹화하여 각 그룹간 비강 기류 특징 값을 비교하였다.

그 결과 ΔT의 경우, 주관적 비폐색 점수가 0~1인 그룹의 평균은 약 2.6℃이었고, 2인 그룹은 약 1.3℃, 3인 그룹은 약 1.0℃, 4인 그룹은 약 1.8℃였다. 호기 각도의 경우, 0~1인 그룹의 평균은 약 31.4도, 2인 그룹은 약 35.4도, 3인 그룹은 약 37.4도, 4인 그룹은 약 62.2도였다. 이를 통해 주관적 비폐색 정도가 2~4인 중증군의 경우 ΔT가 약 1.8℃ 이하이며, 호기 각도의 경우 약 35.4도 이상인 것을 확인할 수 있었다 (표 2).

본 연구 결과는 열 영상 기반 비강 기류 분석을 통해 비강 기류를 추적하여 추출한 비강 기류 특징과 주관적 비폐색 정도 간의 상관관계를 보여준다. 전반적으로 주관적 비폐색 정도가 심해질수록 ΔT는 감소하고, 호기 각도는 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 객관적인 비강 기류 데이터는 주관적 증상, 영상 검사 등과 함께 이용되며 수술 대상 환자 선별 등 진단에 도움을 줄 수 있다. 향후 보다 많은 데이터 확보와 임상 진단군을 포함한 검증을 통해, 진단에서의 신뢰성 있는 비강 폐색의 수술적 치료 진단 지표로서 연구를 확장하고자 한다.

표 2. 주관적 비폐색 점수 그룹 간 비강 기류 특징 값 비교

Discomfort	Angle Mean	ΔT Mean	Count
0	32.7816	2.5246	13
1	30.1156	2.6111	9
2	35.3841	1.3450	2
3	37.3557	0.9867	3
4	62.1759	1.8300	1

4. Acknowledgements

본 연구는 2025년 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 SW중심대학사업의 연구 결과로 수행되었음 (2021-0-01399).

5.참고 문헌

[1] Harvey RJ, Roland LT, Schlosser RJ, Pfaar O. Chief Complaint: Nasal Congestion. J Allergy Clin Immunol Pract. 2024 Jun;12(6):1462-1471. doi: 10.1016/j.jaip.2024.04.028. Epub 2024 Apr 26. PMID: 38677589.

[2] Bailey RS, Casey KP, Pawar SS, Garcia GJ. Correlation of Nasal Mucosal Temperature With Subjective Nasal Patency in Healthy Individuals. JAMA Facial Plast Surg. 2017 Jan 1;19(1):46-52. doi: 10.1001/jamafacial.2016.1445. PMID: 27918749; PMCID: PMC5247324.

[3] André RF, Vuyk HD, Ahmed A, Graamans K, Nolst Trenité GJ. Correlation between subjective and objective evaluation of the nasal airway. A systematic review of the highest level of evidence. Clin Otolaryngol. 2009 Dec;34(6):518-25. doi: 10.1111/j.1749-4486.2009.02042.x. PMID: 20070760.

[4] Jiang S, Chan J, Stupak HD. The Use of Infrared Thermal Imaging to Determine Functional Nasal Adequacy: A Pilot Study. OTO Open. 2021 Sep 30;5(3):2473974X211045958. doi: 10.1177/2473974X211045958. PMID: 34616996; PMCID: PMC8489757.

Poster-160

외상성 뇌손상 환자에서 병변 기반 뇌혈관 반응성과 임상 결과 간의 연관성

김도현 [1], 권도형 [1], 김원진 [1], 한승환 [1], Junghoon J Kim[2], Ramon R. Diaz-Arrastia[3], 최준열 [1*]

[1] 연세대학교 의공학과

[2]Department of Molecular, Cellular, and Biomedical Sciences, CUNY School of Medicine, The City University of New York

[3]Department of Neurology, University of Pennsylvania Perelman School of Medicine

Associations Between Lesion-Based Cerebrovascular Reactivity and Clinical Outcomes After Traumatic Brain Injury

Dohyeon Kim[1], Dohyeong Kwon[1], Wonjin Kim[1], Seunghwan Han[1], Junghoon J Kim[2], Ramon R. Diaz-Arrastia[3], Joon Yul Choi [1*]

[1]Department of Biomedical Engineering, Yonsei University

[2]Department of Molecular, Cellular, and Biomedical Sciences, CUNY School of Medicine, The City University of New York

[3]Department of Neurology, University of Pennsylvania Perelman School of Medicine

jychoi717@yonsei.ac.kr

Abstract

Traumatic brain injury (TBI) often results in long-term neurological deficits, and impaired cerebrovascular reactivity (CVR) may contribute to these persistent outcomes. While CO_2-inhalation CVR (CO_2-CVR) has been the traditional method to assess vascular function, resting-state CVR (RS-CVR) provides a non-invasive alternative with clinical potential. This study aimed to investigate whether lesion-based CVR (CO_2-CVR and RS-CVR) is associated with clinical outcomes in chronic TBI patients. 23 chronic TBI patients underwent 3T MRI, including T1, T2-FLAIR, and Blood-oxygen-level-dependent (BOLD) fMRI during CO_2 challenge and resting-state. Voxel-wise General linear models (GLM) were applied to estimate CO_2-CVR using end-tidal CO_2 as a regressor, and RS-CVR using band-pass filtered [0–116.4 mHz] resting-state BOLD signals. GLMs were constructed to evaluate the associations between lesion-based CVR values and clinical outcomes. Higher CO_2- and RS-CVR was associated with longer intensive care unit stays, while lower CVR correlated with more severe post-concussion symptoms. Our results highlight lesion-based RS-CVR as a clinically relevant marker that may differentiate recovery potential from ongoing impairment in chronic TBI patients.

1. 연구 배경

외상성 뇌손상 (Traumatic brain injury, TBI)은 장기적인 신경장애의 주요 원인 중 하나이며, 축삭과 혈관에 광범위한 손상을 초래한다 [1]. 뇌혈관 반응성(Cerebrovascular reactivity, CVR)의 손상은 TBI 이후 관찰되며, 지속적인 신경학적 결손의 원인이 될 수 있다 [2,3]. CO_2 흡입 기반 CVR (CO_2-CVR) 측정은 혈관 기능을 평가하는 전통적인 방식으로 활용되어 왔으나, 최근에는 휴지 상태 기반 CVR (RS-CVR)이 비침습적이며 임상 적용 가능성이 높은 대안으로 주목받고 있다 [4]. 그러나 TBI 환자의 병변 영역에서 측정된 CVR 과 임상 결과 간의 연관성은 충분히 규명되지 않았다. 이에 본 연구는 TBI 환자를 대상으로 병변 기반 CVR (CO_2-CVR 및 RS-CVR)과 다양한 임상 지표와의 연관성을 분석함으로써 CVR 의 잠재적 임상적 활용 가능성을 탐색하고자 하였다.

2.연구 방법

이 연구는 연구 윤리 심의 위원회(IRB) (ClinicalTrials.gov NCT01762475)의 승인을 받고 진행하였다.

23 명의 만성 TBI 환자는 3T MRI 장비(Biograph mMR, Siemens)를 이용하여 구조적 및 기능적 뇌 영상을 촬영하였으며, 촬영에는 휴지 상태와 CO_2 자극 혈중 산소 농도 의존 (Blood-oxygen-level-dependent, BOLD) fMRI 가 포함되었다. CO_2-CVR 의 경우, 참가자들은 7 분 동안 매분마다 실내 공기와 5% CO_2 가스 혼합물을 번갈아 흡입하였으며, 해당 기간 동안 BOLD 이미지가 획득되었다. RS-CVR 의 경우, 별도의 과제 수행 없이 휴식 상태에서 BOLD 이미지가 획득되었다.

각 시퀀스의 이미징 매개변수는 다음과 같았다. T1 MPRAGE 이미지는 반복 시간(TR) = 2,530 ms, 에코 시간(TE) = 30 ms, 역전 시간(TI) = 1,200 ms, 플립각(FA) = 7°, 시야 범위(FOV) = 256 × 256 mm², 매트릭스 크기 = 256 × 256, 슬라이스 수 = 176, 슬라이스 두께 = 1.0 mm 로 획득하였다.

T2 FLAIR 이미지는 TR = 9,090 ms, TE = 112 ms, TI = 2,450 ms, FA = 120°, 매트릭스 크기 = 256 × 256, 슬라이스 수 = 45, 슬라이스 두께 = 3.0 mm 로 획득하였다. 병변 마스크는 T2 FLAIR 영상을 통해 획득되었으며, T2 고신호 병변과 연화성 병변을 포함하였다.

CO_2-CVR 의 경우, 참가자들은 7 분 동안 매 분마다 실내 공기와 5% CO_2 혼합 가스를 번갈아 흡입하였으며, 해당 기간

동안 BOLD 이미지가 획득되었다. 이미징 매개변수는 TR = 2,000 ms, TE = 25 ms, FA = 80°, FOV = 220 × 220 mm², 매트릭스 크기 = 64 × 64, 슬라이스 수 = 36, 슬라이스 두께 = 3.6 mm, 슬라이스 간 간격 없음, 총 210 볼륨, 스캔 시간 = 7 분이었다.

RS-CVR 의 경우, 별도의 과제 수행 없이 휴식 상태에서 BOLD 이미지를 획득하였다 (TR = 2,000 ms, TE = 27 ms, FA = 90°, FOV = 220 × 220 mm², 매트릭스 크기 = 64 × 64, 슬라이스 수 = 36, 슬라이스 두께 = 3.6 mm, 총 206 볼륨, 스캔 시간 = 7 분).

이전 문헌에 따라, CO_2-CVR 은 종단 CO_2 를 회귀자로 사용하는 복셀 단위 일반 선형 모델 (General linear model, GLM)을 통해 추정되었다 [5]. RS-CVR 은 GLM 을 적용하여 [0-116.4 mHz] 범위로 밴드패스 필터링된 휴지 상태 BOLD 신호로부터 계산되었다. 이후 RS-CVR, CO_2-CVR 및 병변 마스크는 모두 T1 구조영상에 정합하여 동일한 공간에서 분석을 진행하였다.

병변 기반 CVR 과 TBI 환자의 임상 결과 간의 관계를 평가하기 위해 각 임상 지표 (TBI 이후 경과 시간, 의식 소실, 중환자실 (intensive care unit, ICU) 입원 일수, 재활 여부, Glasgow Outcome Scale-Extended (GOSE), Rivermead Post-Concussion Symptoms Questionnaire (RPQ), Brief Symptom Inventory (BSI))를 종속 변수로, 병변 기반 CVR 값과 연령, 성별을 독립 변수로 하는 GLM 을 구성하였다. 결측 값이 있는 사례를 제외한 최종 표본 크기는 TBI 이후 경과 시간, LOC, ICU 입원 일수의 경우 n=8 이였으며, 재활 여부, GOSE, RPQ, BSI 의 경우 n=9 였다. 모든 통계분석은 MATLAB 2021a Statistics toolbox (Mathworks. Natick)를 사용하여 수행되었다.

3. 연구 결과

병변 기반 CO_2-CVR 과 RS-CVR 모두 ICU 입원 일수와 양의 상관성을 보였다(CO_2-CVR: $\beta = 109.03$, $p = 0.026$; RS-CVR: $\beta = 43.57 \pm 7.86$, $p = 0.005$). 반면 RPQ 에서는 두 지표 모두 음의 방향성을 보였으나, CO_2-CVR 은 유의하였고($\beta = -279.42$, $p = 0.031$), RS-CVR 은 통계적으로 유의하지 않은 경향에 그쳤다($\beta = -61.07$, $p = 0.089$). 그러나 이러한 경향은 소규모 표본(n = 9)으로 인한 통계적 검정력의 한계를 반영할 수 있다. 다른 임상 지표에서는 유의한 연관성이 확인되지 않았다 (표 1).

표 1. 병변 기반 CVR 과 임상 결과 간의 연관성

	임상 지표	추정 회귀계수 (β)	표준 오차	p-value
CO_2-CVR	TBI 이후 경과 시간	82.86	128.04	0.552
	의식 소실	-164.95	124.33	0.255
	ICU 입원 일수	109.03	31.75	0.026
	재활 여부	6.69	3.04	0.079
	GOSE	-0.45	10.53	0.967
	RPQ	-279.42	93.51	0.031
	BSI	-57.10	60.83	0.391
RS-CVR	TBI 이후 경과 시간	33.72	29.45	0.316
	의식 소실	-42.09	50.57	0.452
	ICU 입원 일수	43.57	7.86	0.005
	재활 여부	1.12	0.97	0.299
	GOSE	-2.52	2.44	0.349
	RPQ	-61.07	29.01	0.089
	BSI	-12.93	15.82	0.451

4. 연구 고찰 및 결론

본 연구에서는 병변 기반 CVR 값이 TBI 환자의 임상적 중증도 지표와 연관되어 있음을 보여주었다. 높은 CVR 은 더 긴 ICU 입원 기간과 관련되었으며, 이는 보상적 혈관 재형성 또는 반응성 충혈을 반영할 수 있다. 이는 TBI 가 내인성 회복 기전의 일환으로 지연된 혈관신생과 혈관 가소성을 유발할 수 있다는 기존의 근거와 일치한다 [6]. 반면 낮은 CVR 은 높은 RPQ 점수와 상관관계를 보였다. 이는 병변 부위에서의 혈관 반응성 저하가 지속적인 외상 후 증상과 관련됨을 시사하며, 이는 CVR 손상이 만성적인 미세혈관 기능장애와 인지 저하와 연결된다는 기존 연구와 부합한다 [7].

이러한 연구 결과는 병변 기반 CVR 이 적응성 혈관 반응과 지속적인 기능 장애를 모두 반영하여 TBI 의 임상 중증도를 나타내는 잠재적인 바이오마커로 작용할 수 있음을 시사한다.

5. 사사

This study was supported by the National Research Foundation of Korea (no. RS-2023-00251484) and NIH U01 NS114140, R01 NS125408, and DoD HT94252311039, W81XWH-19-1-0861 (to R.D-A.)

6. 참고 문헌

[1] Kenney K, Amyot F, Haber M, et al. Cerebral vascular injury in traumatic brain injury. Experimental neurology 2016;275(353-366

[2] Amyot F, Kenney K, Moore C, et al. Imaging of cerebrovascular function in chronic traumatic brain injury. Journal of neurotrauma 2018;35(10):1116-1123

[3] Haber M, Amyot F, Kenney K, et al. Vascular abnormalities within normal appearing tissue in chronic traumatic brain injury. Journal of neurotrauma 2018;35(19):2250-2258

[4] Liu P, Li Y, Pinho M, et al. Cerebrovascular reactivity mapping without gas challenges. Neuroimage 2017;146(320-326

[5] Lu H, Liu P, Yezhuvath U, et al. MRI mapping of cerebrovascular reactivity via gas inhalation challenges. Journal of visualized experiments: JoVE 2014;94):52306

[6] Xiong Y, Mahmood A, Chopp M. Angiogenesis, neurogenesis and brain recovery of function following injury. Current opinion in investigational drugs (London, England: 2000) 2010;11(3):298

[7] Amyot F, Lynch CE, Ollinger J, et al. Cerebrovascular reactivity measures are associated with post-traumatic headache severity in chronic TBI; a retrospective analysis. Frontiers in physiology 2021;12(649901

Poster-161

생성적 적대신경망을 활용한 데이터 증강 기반 말라리아 생애주기 진단 분류 연구

박민제[1], 장우진[1], 김재강[1], 임혜진[1], 주연오[1] , 최세운[1,2,*]

국립금오공과대학교 바이오메디컬공학과[1], 국립금오공과대학교 첨단의료기기연구소[2]

Data Augmentation with Generative Adversarial Networks for Malaria Life-cycle Classification

Minjae Park[1], Woojin Jang[1], Jaegang Kim[1], Hyejin Lim[1] ,Yeon-O Joo[1] , Se-woon Choe[1,2,*]

Department of Biomedical Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Korea[1]

High-tech Medical Equipment Research Institute, Kumoh National Institute of Technology, Korea[2]

[*]sewoon@kumoh.ac.kr

Abstract

This study aimed to enhance the accuracy and efficiency of malaria diagnosis by developing an automated cell classification model using a publicly available malaria blood smear image dataset. Color images were converted to grayscale to reduce the computational burden of preprocessing, and synthetic data generated through a generative adversarial network was employed to improve the diversity and reliability of the training dataset. The AI-based blood cell classifier effectively distinguished infected red blood cells, and the classification performance was validated through cross-validation. These findings suggest that the proposed approach can enable rapid and accurate malaria diagnosis even in resource-limited settings without access to advanced diagnostic equipment.

1. 연구 배경

모기에 의해 전파되는 열대 감염병인 말라리아는 2023년 한 해에만 전 세계에서 약 2억 6천만 건의 감염과 60만 명의 사망자를 발생시켰다 [1]. 대부분의 발병 및 사망 사례는 사하라 사막 이남의 아프리카에서 보고되고 있으며 [2], 신속한 진단은 감염자의 생명을 구하고 추가적인 전파를 막는 데 필수적이다. 하지만 현미경을 이용한 기존의 진단 방식은 숙련된 전문가가 필요하고 시간이 오래 소요된다는 단점을 지니고 있다.

이러한 문제점을 극복할 대안으로 딥러닝 영상 분석 기술이 부상하고 있다. 일례로 Vijayalakshmi A 연구팀은 전이 학습 기법을 적용하여 얇은 혈액 염색 영상에서 말라리아 원충을 성공적으로 검출하고 구분해낸 바 있다 [3]. 이에 본 논문에서는 공개된 혈액 도말 영상 자료를 이용해 혈중 말라리아 원충의 성장 단계를 판별하는 데이터셋을 만들었다. 더 나아가, 다양한 GAN(Generative Adversarial Networks) 모델로 합성 데이터를 만들어 데이터의 다양성을 확보하고 클래스 간의 불균형을 해소하고자 했다 [4].

이렇게 구축된 데이터셋으로 여러 분류 모델들을 훈련시켰고, 생성된 이미지의 질은 FID(Frechet Inception Distance)로 측정하였다. 또한, 분류 모델의 성능은 정확도, 정밀도를 평가지표로 검증했다 [5,6]. 본 연구 결과는 현미경을 이용한 전통적 진단법의 단점을 극복하고, 말라리아 진단 자동화의 새로운 길을 열어줄 것으로 기대된다.

2. 연구 방법

본 연구의 분석 대상은 M5-Malaria [7], Malaria 2019 [8], IML-Malaria [9] 등 공개된 혈액 염색 이미지 데이터셋이다. 말라리아 원충은 적혈구 내에서 ring, schizont, trophozoite 세 단계를 거쳐 발달하며 [10], 각 단계는 현미경 영상에서 명확한 형태학적 특징을 가진다.

데이터셋 간 촬영 조건과 염색 방식이 상이하고 클래스 불균형 문제가 존재하므로, 클래스별로 1,400장의 이미지를 추출하였다. 이후 그레이스케일 변환, 색상 반전, RGB 가중치 보정을 통해 색상 차이를 최소화하였으며, 이를 통해 원본 컬러 데이터셋과 전처리된 변환 데이터셋 두 가지를 확보하였다.

데이터 부족과 학습 효율 문제를 해결하기 위해, 합성 이미지 생성을 통한 데이터 증강을 수행하였다. 구체적으로, 장기적 의존성을 학습하고 안정적인 고해상도 이미지를 생성할 수 있는 Self-Attention과 Spectral Normalization이 적용된 SAGAN(Self-Attention GAN) [11]과 소량의 데이터에서도 효율적으로 학습 가능한 FastGAN [12]을 사용하였다.

분류 모델로는 NAS (Neural Architecture Search) 기반으로 설계된 경량 블록 구조를 통해 높은 연산 효율과 정확도를 동시에 달성할 수 있는 MobileNetV3 [13]와 Transformer 구조를 기반으로 이미지를 패치 단위로 입력 받아 어텐션 메커니즘으로 전역 특징을 학습하는 ViT-B (Vision Transformer Base) [14]를 사용하였다.

3. 연구 결과

SAGAN과 FastGAN을 활용하여 말라리아 혈액 이미지 생성 실험을 수행하였으며, 학습은 100 에포크부터 500 에포크까지 진행되었다. 각 구간에서 FID를 측정하여 이미지 품질 변화를 분석하였으며, 연구는 원본 컬러 데이터셋과 그레이스케일 데이터셋으로 나누어 실시하였다.

컬러 데이터셋에서는 FastGAN이 학습이 진행됨에 따라 FID가 안정적으로 감소하며 가장 우수한 성능을 보였으며, 500 에포크에서는 원본 이미지와 거의 유사한 합성 결과를 나타냈다. 반면, SAGAN은 100 에포크에서 최저 FID를 기록한 이후 성능이 점차 저하되었으며, 전반적으로 FastGAN보다 높은 FID 값을 기록하였다. 이는 동일 조건에서 FastGAN이 말라리아 혈액 이미지 학습과 생성에 보다 효율적임을 보여준다.

그레이스케일 데이터셋에서도 FastGAN은 에포크가 증가할수록 안정적으로 FID가 감소하였고, 500 에포크에서 원본 이미지와 유사한 합성 이미지를 생성하였다. SAGAN은 300 에포크에서 Schizont와 Trophozoite 단계에서, Ring

단계에서는 400 에포크에서 최저 FID를 기록하였다. 이후에도 성능이 개선되었지만 FastGAN에 비해 상대적으로 높은 FID를 유지하였다.

분류 실험에서는 원본, 원본+GAN, 그레이스케일, 그레이스케일+GAN 데이터셋을 대상으로 수행하였다. MobileNetV3는 원본 데이터셋에서 모든 성능 지표가 60% 이상, 원본+GAN 데이터셋에서는 50% 이상의 성능을 보였으며, 그레이스케일 및 그레이스케일+GAN 데이터셋에서는 모든 성능 지표가 80% 이상을 기록하였다. ViT-B는 네 가지 데이터셋 전반에서 모든 성능 지표가 90% 이상으로 측정되어 전반적으로 우수한 성능을 나타냈다.

4. 결론

본 연구는 공개 혈액 염색 이미지를 기반으로 말라리아 기생충의 생애 주기를 자동으로 분류할 수 있는 딥러닝 기반 프레임워크를 제안하였다. 데이터셋 간 색상 차이를 최소화하고 학습 안정성을 확보하기 위해 그레이스케일 변환과 색상 반전을 적용했으며, 데이터 부족 문제는 다양한 GAN 기반 합성 이미지를 활용하여 보완하였다. 실험 결과, FastGAN은 원본과 가장 유사한 합성 이미지를 생성하였고, 분류 성능에서는 ViT-B가 가장 우수한 결과를 나타냈다. 이는 제안한 접근 방식이 제한된 환경에서도 신속하고 정확한 말라리아 진단을 지원할 수 있음을 시사한다.

향후 연구에서는 기존에 세 단계로 구분한 말라리아 생애 주기를 네 단계(ring, schizont, trophozoite, gametocyte)로 확대하고, 다양한 GAN 모델과 평가 지표를 적용하여 보다 정밀한 성능 분석을 수행할 계획이다. 또한 최신 분류 모델과의 비교를 통해 제안 기법의 일반화 성능을 강화하고, 실제 임상 적용 가능성을 높이는 방향으로 연구를 발전시킬 예정이다.

5. Acknowledgements

본 결과물은 2025년도 경상북도지역혁신중심대학지원체계(RISE)-(로컬이슈해결(RIS))의 지원을 받아 수행된 결과임.

6. 참고 문헌

[1] World Health Organization, “Malaria fact sheet,” [Internet]. Available: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/malaria.

[2] World Health Organization, “World malaria report 2023,” Geneva: World Health Organization, 2023. [Online]. Available: https://www.who.int/teams/global-malaria-programme/reports/world-malaria-report-2023.

[3] Vijayalakshmi, A. (2020). Deep learning approach to detect malaria from microscopic images. Multimedia Tools and Applications, 79(21), 15297-15317.[4] I. J. Goodfellow, J. Pouget-Abadie, M. Mirza, B. Xu, D. Warde-Farley, S. Ozair, A. Courville, and Y. Bengio, “Generative adversarial nets,” in Proceeding of the Advances in Neural Information Processing Systems 27, Montreal, Canada, pp. 2672–2680, 2014.

[5] M. Heusel, H. Ramsauer, T. Unterthiner, B. Nessler, and S. Hochreiter, “GANs trained by a two time-scale update rule converge to a local Nash equilibrium,” arXiv preprint arXiv:1706.08500, Jun. 2017. DOI: 10.48550/arXiv.1706.08500.

[6] J. S. Bekker, P. J. B. Brown, and C. G. H. A. C. M. de Korte, “A closer look at classification evaluation metrics and a critical reflection of common evaluation practice,” arXiv preprint arXiv:2404.16958, Apr. 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2404.16958.

[7] Centers for Disease Control and Prevention, “Malaria,” U.S. Department of Health & Human Services. [Online]. Available: https://www.cdc.gov/dpdx/malaria/index.html. [Accessed: Sep. 01, 2025].

[8] S. S. Abbas and T. M. Dijkstra, “Detection and stage classification of Plasmodium falciparum from images of Giemsa stained thin blood films using random forest classifiers,” Diagnostic Pathology, vol. 15, no. 1, Art. no. 130, Oct. 2020. DOI: 10.1186/s13000-020-01047-9.

[9] W. Sultani, A. Hancharou, R. Jennane, and S. Oueld-Chaib, “Towards low-cost and efficient malaria detection,” in Proceeding of the 2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), New Orleans, LA, pp. 20655–20664, Jun. 2022. DOI: 10.1109/CVPR52688.2022.01999.

[10] Q. A. Arshad and A. Al-Ajlan, “A dataset and benchmark for malaria life-cycle classification in thin blood smear images,” Neural Computing and Applications, vol. 34, no. 6, pp. 4473–4485, Mar. 2022. DOI: 10.1007/s00521-021-06555-2.

[11] H. Zhang, I. Goodfellow, D. Metaxas, and A. Odena, “Self-attention generative adversarial networks,” in Proceeding of the 36th International Conference on Machine Learning (ICML), Long Beach, CA, pp. 7354–7363, 2019.

[12] B. Liu, Y. Zhu, K. Song, and A. Elgammal, “Towards faster and stabilized GAN training for high-fidelity few-shot image synthesis,” in Proceeding of the International Conference on Learning Representations (ICLR), Vienna, Austria, 2021.

[13] Howard, A., Sandler, M., Chu, G., Chen, L. C., Chen, B., Tan, M., ... & Adam, H. (2019). Searching for mobilenetv3. In Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision (pp. 1314-1324).

[14] A. Dosovitskiy, L. Beyer, A. Kolesnikov, D. Weissenborn, X. Zhai, T. Unterthiner, M. Dehghani, M. Minderer, G. Heigold, S. Gelly, J. Uszkoreit, and N. Houlsby, “An Image is Worth 16×16 Words: Transformers for Image Recognition at Scale,” in Proceeding of the International Conference on Learning Representations (ICLR), Virtual, May 2021.

Poster-162

비병변 수초 관련 지표를 활용한 딥러닝 기반 뇌졸중 예후 예측 모델

김철운[1], 김도현[1], 권도형[1], 김원진[1], 김도연[2], 최준열[1*]

연세대학교 의공학과[1]

분당 서울대학교병원 신경과 및 뇌혈관센터[2]

Deep Learning-Based Prediction Model for Stroke Prognosis Using Non-Lesional Myelin Related Metrics

Cheol-Woon Kim[1], Dohyeon Kim[1], Dohyeong Kwon[1], Wonjin Kim[1], Do Yeon Kim[2], Joon Yul Choi[1*]

1. Department of Biomedical Engineering, Yonsei University, Wonju

2. Department of Neurology and Cerebrovascular Center, Seoul National University Bundang Hospital, Seoul National University College of Medicine, Seongnam

jychoi717@yonsei.ac.kr

Abstract

Non-lesional myelin integrity may influence post-stroke recovery but is rarely incorporated into prognostic models. This study aimed to improve the prediction of 3-month functional outcomes after ischemic stroke by comparing deep neural network (DNN) models using only clinical variables with those integrating non-lesional myelin related metrics from T1w-weighted /T2w-weighted images. Data from 499 patients were used to develop DNNs with 3, 5, and 7 layers. The 5-layer model demonstrated the best performance, increasing area under the receiver operating characteristic curve (AUC) from 0.811 (clinical variables only) to 0.911 with myelin integration. These findings highlight the complementary value of non-lesional myelin integrity in enhancing individualized prediction of post-stroke functional outcomes.

1. 연구 배경

뇌졸중은 전 세계적으로 주요한 사망 및 장애 원인 중 하나이며, 환자의 기능적 예후를 예측하는 것은 치료 전략 수립, 재활 계획에 실질적인 도움을 줄 수 있다.

지금까지 급성기 뇌졸중 예후 척도들은 주로 연령, 초기 미국 국립 보건원 뇌졸중 척도(National Institutes of Health Stroke Scale), 발병 전 기능 수준, 기저 질환(고혈압, 당뇨, 심방세동 등), 뇌졸중 유형등을 주요 입력 변수로 활용해 왔다 [1]. 이러한 임상 지표 중심의 접근은 임상 현장에서 활용도가 높지만, 임상 지표만으로는 환자 개개인의 회복 다양성의 복잡성을 설명하기 어렵다는 근본적 한계가 있다.

허혈성 뇌졸중은 혈류 차단으로 인해 산소 공급이 급격히 감소하며, 특히 산소에 민감한 희소돌기아교세포(oligodendrocyte)가 손상되면서 이들이 유지하던 수초(myelin)가 광범위하게 소실된다 [2]. 이러한 수초 손실은 신호 전달 속도 저하뿐 아니라 축삭 보호 기능의 상실을 초래하여 축삭 퇴행과 신경망 불안정을 가속화한다. 최근 동물실험과 임상 연구들에서도 수초 결손이 장기적 신경 손실과 기능 저하로 이어지는 결과가 보고되었다 [3].

본 연구에서는 임상 중심 예측 접근의 한계를 보완하기 위해, 임상 변수에 더하여 비병변 영역에서 추출한 수초 정량 지표를 통합한 딥러닝 모델을 개발하였다.

2.연구 방법

총 499명의 허혈성 뇌졸중 환자를 대상으로 하였으며, 모든 대상자에게 T1 강조영상(T1-weighted, T1w)과 T2 강조영상(T2-weighted, T2w) 영상을 획득하였다. 획득된 MRI 시퀀스 파라미터는 다음과 같다 (T1w: repetition time [TR] = 8.3 ms, echo time [TE] = 4.6 ms, T2w: TR = 9000 ms, TE = 135 ms, inversion time [TI] = 2500 ms), and diffusion-weighted imaging (DWI; TR = 3000 ms, TE = 70.5 ms). T1w 영상을 T2w 영상으로 나누어 수초 강화 이미지를 생성하였으며, DWI 영상에서 병변을 수동으로 분할하여 비병변 영역의 수초 정량 지표를 추출하였다. 3개월 시점의 기능적 예후는 modified Rankin Scale (mRS) 점수를 이용해 평가하였고, 0–2점을 favorable outcome, 3–6점을 unfavorable outcome으로 정의하였다.

임상 정보는 나이, 성별, 고혈압, 당뇨병, 고지혈증, 심방세동, 흡연 여부, 정맥내 혈전용해술, 동맥내 혈전제거술, 그리고 초기 미국 국립 보건원 뇌졸중 척도 점수를 포함하였다.

이후 deep neural network (DNN)을 이용하여 두 가지 이진 분류 모델을 구축하였다. (1) 임상 지표만을 입력으로 한 모델, (2) 임상 지표와 비병변 수초 정량 지표를 함께 입력으로 한 모델이다. 각 모델은 3층, 5층, 7층의 서로 다른 구조로 구성하여 예측 성능을 비교하였으며, 전체 데이터의 80%를 훈련 세트로, 20%를 테스트 세트로 사용하였다. 각 모델의 성능은 area under the receiver operating characteristic curve (AUC), 정확도(Accuracy), 민감도(Sensitivity), 특이도(Specificity)를 기준으로 평가하였다. 또한 각 모델별로 Youden index를 기반으로 최적 임계값(threshold)을 적용하여 최종 결과를 도출하였다.

3. 연구 결과

각 층별 모델의 성능 비교 결과는 표 1에 요약하였다. DNN 모델의 은닉층 개수를 3, 5, 7층으로 달리하여 분석한 결과, 3, 5층 구조에서 비병변 수초 정량 지표를 포함한 모델이 일관되게 우수한 성능을 보였으며, 특히 5층 구조에서 최적의 0.91의 AUC와 83%의 정확도를 보여주었다.

임상지표만을 사용하였을 때는 7층 구조에서 최적의 성능을 보여주었으며 (AUC = 0.85, 정확도 = 75%), 이는

수초 지표를 포함한 최적의 모델 (5층 구조)의 비해 0.06의 낮은 AUC와 8%의 낮은 정확도를 보여준다.

표 1. 임상변수 단독 모델과 비병변 수초 정량 지표를 포함한 딥러닝 모델의 예후 예측 성능 비교

Layers	Input	AUC	정확도	민감도	특이도	임계값
3	임상지표I	0.81	0.59	0.49	1.00	0.91
	임상지표 + 수초	0.88	0.78	0.75	0.90	0.80
5	임상지표	0.81	0.85	0.89	0.70	0.63
	임상지표 + 수초	**0.91**	**0.83**	**0.80**	**0.95**	**0.83**
7	임상지표	0.85	0.74	0.69	0.95	0.82
	임상지표 + 수초	0.85	0.75	0.71	0.90	0.86

AUC, 정확도, 민감도, 특이도는 Youden index를 이용해 도출된 최적 임계값에서 산출되었다. AUC: the area under the receiver operating characteristic curve

4. 연구 고찰 및 결론

본 연구에서는 비병변 부위의 수초 지표가 뇌졸중 환자의 예후 예측에 미치는 영향을 평가하기 위해 딥러닝 모델을 구축하여 비교하였다. 그 결과, 임상지표에 수초 지표를 통합한 모델이 임상지표만을 사용한 모델보다 우수한 예측 정확도를 보였다. 이러한 결과는 비병변 수초 정량 지표가 임상 정보를 보완하며, 뇌졸중 후 기능적 예후를 보다 정확하게 예측하는 데 중요한 역할을 할 수 있을 것임을 보여준다.

5. Acknowledgements

이 연구는 분당서울대학교병원 연구비(과제번호 00-2025)의 지원을 받아 수행되었습니다.

6.참고 문헌

[1] Drozdowska BA, Singh S, Quinn TJ. Thinking about the future: a review of prognostic scales used in acute stroke. Front Neurol. 2019;10:274.

[2] Chen D, Li J, Wang X, et al. Demyelinating processes in aging and stroke in the central nervous system and the prospect of treatment strategy. CNS Neurosci Ther. 2020;26(12):1219-1229.

[3] Cheng YJ, Li W, Zhang Q, et al. Prolonged myelin deficits contribute to neuron loss and functional impairments after ischaemic stroke. Brain. 2024;147(4):1294-1311.

[4] GLASSER, Matthew F.; VAN ESSEN, David C. Mapping human cortical areas in vivo based on myelin content as revealed by T1-and T2-weighted MRI. Journal of neuroscience, 2011, 31.32: 11597-11616.

Poster-163

스마트 미러 기반 비침습적 생체 신호 모니터링 알고리즘 개발

강인구[1], 박지훈[2], 박성민[3], 전희재[1, 4*]

[1]강원대학교 기계의용공학과,

[2](주)지오맥스소프트 기술혁신연구소,

[3]강원대학교병원 흉부외과,

[4]강원대학교 스마트헬스 과학기술 융합학과

Noninvasive vital signal monitoring algorithm for smart mirrors

In-goo Kang[1], Ji-hoon Park[2], Sung-Min Park[3], Hee-Jae Jeon[1,4*]

[1]Department of Mechanical and Biomedical Engineering, Kangwon National University

[2]Geomexsoft Co., Ltd., Research Center, Korea.

[3]Department of Thoracic and Cardiovascular Surgery, Kangwon National University

[4]Department of Smart Health Science and Technology, Kangwon National University

[*]jeon22@kangwon.ac.kr

Abstract

Conventional contact-based vital signal monitoring systems in hospital settings often cause patient discomfort and carry a risk of infection. While various non-contact technologies have been developed to overcome these issues, they have been limited by user-friendliness and challenges in continuous monitoring. This study proposes a non-invasive vital sign monitoring algorithm that utilizes a standard webcam and remote photoplethysmography technology to address these problems. The proposed algorithm extracts key vital signals, including heart rate, respiration rate, oxygen saturation, and a stress index based on heart rate variability, by detecting subtle color changes on the user's facial skin caused by cardiac pulses. Notably, it is designed to operate efficiently on low-cost hardware without the need for extensive deep-learning datasets. To validate its accuracy, the algorithm was compared against an ECG-based heart rate monitor and a medical-grade pulse oximeter, demonstrating a level of precision suitable for daily use. This research shows significant potential as a low-cost, user-friendly solution for continuous health management.

1. 연구 배경

기존 병원 중심의 접촉식 생체 신호 측정은 비용, 통증, 감염 위험을 포함한 여러 한계점을 가지고 있다. 이로 인해 비접촉 디지털 헬스케어 기술에 대한 수요는 지속적으로 증가해왔다. 그중 원격 광혈류측정(rPPG)은 카메라로 미세한 피부색 변화를 감지하여 다양한 생체 신호를 측정하는 핵심 기술이다 [1]. 그러나 기존 rPPG 기술은 조명 변화나 사용자의 미세한 움직임과 같은 요인들로 인한 노이즈에 취약하며, 정확도를 향상시키기 위해 대규모 데이터셋에 의존하는 경우가 많다. 광범위한 딥러닝 데이터셋 없이 저비용하드웨어에서 효율적으로 작동하도록 하기 위해 본 연구는 외부 광원의 영향을 최소화하고 순수한 맥파 신호에 집중함으로써 측정 안정성과 정확도를 향상시키는 POS (Plane Orthogonal to Skin tone) 알고리즘을 생체 신호 측정에 접목하였다 [2].

2. 연구 방법

본 연구에서는 스마트 미러에 내장된 저사양 웹캠(720p, 30fps)을 사용하여 rPPG 신호를 추출했다 (그림 1). 제안된 알고리즘의 정확도를 검증하기 위해, 심박수(HR)에 대해서는 Garmin ECG 기반 심박수 모니터(HRM-pro)를, 산소포화도(SpO2)에 대해서는 의료 등급의 산소포화도 측정기를 기준 장비로 사용했다. 생체 신호 추출 과정은 다음과 같다 (그림 2). 먼저, 웹캠 영상으로부터 실시간으로 얼굴을 추적한다. rPPG 신호 추출은 이마, 양 볼에서 가장

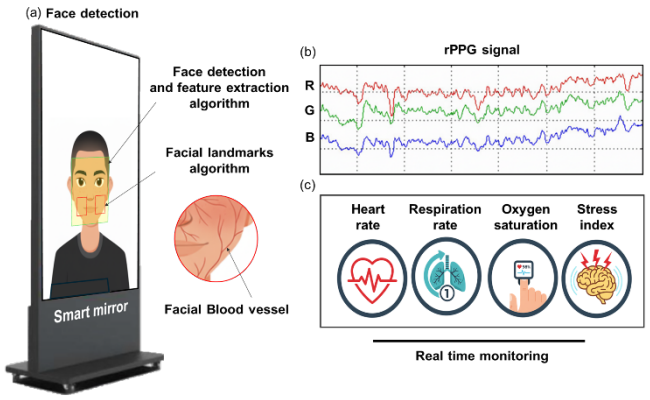


그림 1. 비접촉 생체신호 모니터링 시스템 흐름도. 스마트 미러를 이용해 얼굴을 감지하고 심장 박동에 따른 얼굴 미세혈관의 변화를 통해 rPPG 신호를 추출해냄. 이후 rPPG 신호는 각각의 계산 알고리즘을 통해 생체신호로 변환됨.

안정적이지만, 한국인 특성상 앞머리가 있는 경우가 많아 양 볼을 관심 영역(ROI)으로 설정한다. 이 ROI에서 추출된 원본 RGB 신호는 디트렌딩 및 대역 통과 필터링을 통해 전처리된다. 그 후 핵심 기술인 POS 알고리즘을 통과하여 노이즈가 제거된 단일 rPPG 신호로 변환된다. 마지막으로, 이 신호에 FFT를 통해 심박수를 계산하는 알고리즘,

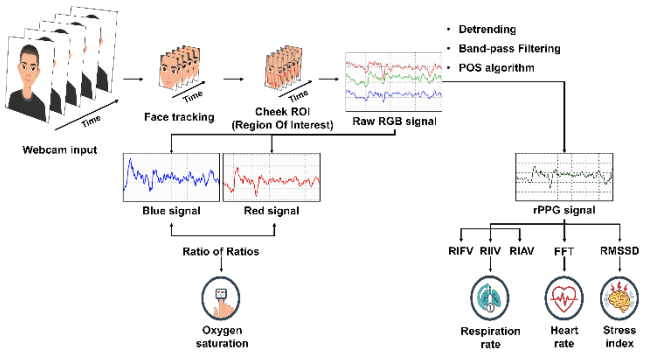


그림 2. 생체신호 측정 알고리즘의 블록 다이어그램 (산소포화도, 호흡률, 심박수, 스트레스 지수)

비율의 비율(Ratio of Ratios)을 이용해 산소포화도를 계산하는 알고리즘, RMSSD를 통해 스트레스 지수를 계산하는 알고리즘, 호흡률을 측정하는 알고리즘 (RIFV, RIIV, RIAV)와 같은 기법들을 적용하여 각각 심박수, 산소포화도, 호흡수, 스트레스 지수를 계산한다. 이 최종 계산 결과는 시스템의 그래픽 사용자 인터페이스(GUI)를 통해 실시간으로 표시된다 (그림 3).

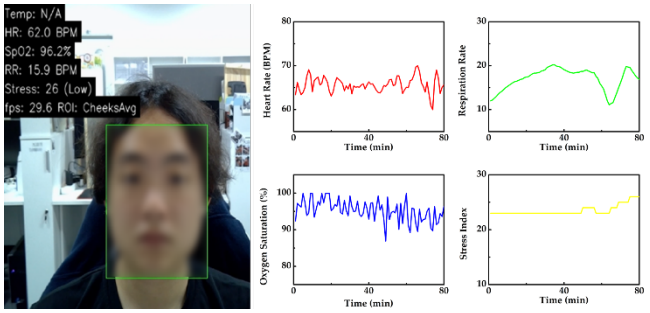


그림 3. 실시간으로 생체신호를 측정하는 모습

3. 연구 결과

제안된 알고리즘의 성능을 평가하기 위해, 안정적인 조명 환경(900lx, 6500K)에서 80분 동안 생체 신호를 동시에 측정하여 기준 장비와 비교했다 (그림 4). 심박수 측정 결과, 평균 rPPG 값은 65.7 BPM으로, Garmin ECG (69.4 BPM) 대비 5.33%의 오차율을 보였다. 주목할 만한 점은 데이터 분포이다. rPPG 측정값의 최대-최소 범위는 10 BPM으로 기준 장비(12 BPM)와 매우 유사한 안정성을 보인 반면, 접촉식 PPG 센서(산소포화도 측정기)는 23 BPM으로 상대적으로 더 큰 편차를 보였다. 산소포화도의 경우, 평균 rPPG 값은 95.3%로, 기준 장비인 산소포화도 측정기(98.9%)와 3.64%의 차이를 보였다. 이러한 결과는 제안된 알고리즘이 별도의 학습 데이터나 고사양 장비 없이도 일상생활에서 신뢰할 수 있는 모니터링을 제공할 수 있음을 보여준다 [3].

4. 결론

본 연구는 저사양 웹캠과 POS 기반 알고리즘을 결합하여 여러 생체 신호를 비침습적으로 모니터링하는 지능형 시스템을 성공적으로 구현했다. ECG 센서와의 비교 검증을 통해 학습 데이터 없이도 높은 정확도를 확인했으며, 이는

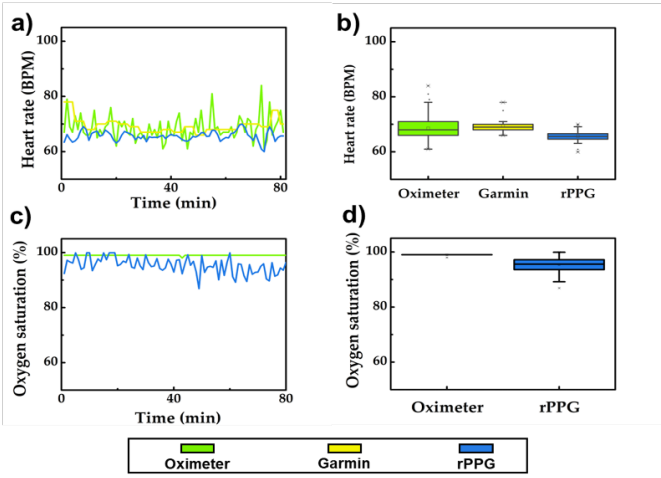


그림 4. 80분간 rPPG 데이터를 측정해 Garmin(심박수 기준 장비)과 산소포화도 측정기(산소포화도 기준 장비) 데이터와 비교 분석한 그래프

저비용의 사용자 친화적인 건강 모니터링 솔루션을 제공할 수 있음을 의미한다. 이 기술은 현재 원격 의료 및 운전자 모니터링 시스템을 포함한 다양한 산업 분야에 적용하기 위해 관련 기업 및 병원과 공동 연구를 진행 중이다.

5. Acknowledgements

This study was supported by the Innovative Human Resource Development for Local Intellectualization support program (IITP-2025-RS-2023-00260267) supervised by the IITP and funded by the Ministry of Science and ICT, Korea; the National Research Foundation of Korea grant under the auspices of the Korea government (RS-2023 00213379); the Korea Health Technology R&D Project through the Korea Health Industry Development Institute, funded by the Ministry of Health & Welfare, Republic of Korea (RS-2025-24535069); the Ministry of Trade, Industry and Energy and the Korea Evaluation Institute of Industrial Technology (RS 2025-14353015) ; the Ministry of SMEs and Startups(MSS) through the Development for Global Innovation Special Zone.

6. 참고문헌

[1] D. J. McDuff, J. R. Estepp, A. M. Piasecki, and E. B. Blackford, "A Survey of Remote Optical Photoplethysmographic Imaging Methods," 2015 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), pp. 6398-6404, 2015.

[2] W. Wang, A. C. den Brinker, S. Stuijk, and G. de Haan, "Algorithmic principles of remote PPG," IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol. 64, no. 7, pp. 1479-1491, July 2017.

[3] P. Pirzada, A. Wilde, G. H. Doherty, and D. Harris-Birtill, "Remote Photoplethysmography (rPPG): A State-of-the-Art Review," medRxiv preprint, 2023. doi:10.1101/2023.10.12.23296882.

Poster-164

데이터 희소성 문제 해결을 위한 생성형 AI 기반 의료영상 증강 기법 및 분할 성능 최적화

강유비[1] , 한종혁[2] , 황호식[3], 전희재[2,4*]

[1]강원대학교 컴퓨터공학과, [2]강원대학교 스마트헬스 과학기술 융합학과,

[3]가톨릭대학교 여의도성모병원 안과, [4]강원대학교 기계의용공학과

Generative AI-based medical image augmentation for data scarcity and segmentation performance optimization

Youbi Kang[1], Jonghyeok Han[2], Hosik Hwang[4], Hee-Jae Jeon[2,3*]

[1]Department of Compuer Science and Engineering, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea

[2]Department of Smart Health Science and Technology, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea

[3]Department of Ophthalmology, Yeouido St. Mary's Hospital, The Catholic University of Korea, Seoul 07345, Korea

[4]Department of Mechanical and Biomedical Engineering, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea

*jeon22@kangwon.ac.kr.

Abstract

Data scarcity remains a critical bottleneck in medical artificial intelligence. This study examines generative AI based data augmentation for training a U-Net[1] model for meibomian gland segmentation in meibography, using synthetic data produced by Latent Diffusion Models (LDM)[2] and Pix2Pix[3] across multiple original to synthetic ratios. Performance was evaluated with Dice and Intersection over Union (IoU), showing that a moderate mix of original and synthetic data outperformed original only training, while excessive augmentation degraded accuracy. Training exclusively on synthetic data approached the baseline without using real images, indicating practical value when privacy or access constraints limit originals. These findings outline a concrete augmentation strategy under data scarcity and position synthetic only training as a viable option in constrained clinical scenarios.

1. 연구 배경

의료 인공지능 분야에서 데이터 희소성은 지속적인 난제로, 이는 엄격한 개인정보 보호 규제와 의료 영상에 대한 전문의의 라벨링 비용 부담에서 기인한다. 이러한 제약은 특히 의료 영상 분할 기술의 발전을 저해하고, 딥러닝 모델의 일반화를 제한하는 주요 원인이다. 생성형 AI는 현실성 있는 합성 영상을 생성하여 이러한 제약을 완화할 수 있지만, 합성 데이터의 효과적인 활용 비율에 대한 실증적 근거가 부족하다. 또한, 원본 데이터에 대한 접근이 극히 제한적인 상황에서 합성 데이터만으로 모델을 학습시키는 접근 방식의 실현 가능성 및 실용성에 대해서도 명확한 검증이 필요하다.

본 연구는 마이봄샘(meibomian gland) 분할을 위한 마이보그래피(meibography) 영상을 대상으로 생성형 AI 모델인 LDM[2]과 Pix2Pix[3]를 적용하여 데이터 증강의 효과를 실증적으로 평가한다. 연구의 핵심 목표는 두 가지로, 데이터 희소성 환경에서 원본 데이터와 합성 데이터의 효과적인 활용 비율을 규명하는 것과, 원본 데이터 접근이 제한될 때 합성 데이터만으로 표준 분할 모델인 U-Net[1]을 학습시키는 접근 방식의 실용성을 검증한다. 이러한 연구 결과는 의료 AI 분야에서 생성형 모델을 활용한 효율적인 데이터 증강 전략을 제시하고, 개인정보 보호 및 비용문제로 인한 데이터 제약을 극복하는 데 중요한 기반을 마련할 것이다.

2.연구 방법

본 연구는 총 79쌍의 meibography 이미지와 대응 분할 마스크로 구성된 데이터셋을 사용하였다. 데이터셋은 분할 모델 개발과 평가를 위해 train 50쌍, validation 14쌍, test 15쌍으로 분할하였다.

생성형 AI를 이용한 증강 절차는 그림 1과 같다. 먼저 LDM을 원본 분할 마스크에 학습하여 합성 마스크를 생성한다. 생성된 마스크는 품질 검증을 거쳐 유효 샘플을 선별한다. 이어서 Pix2Pix는 원본 이미지와 마스크 50쌍으로 학습되며, LDM에서 선별된 합성 마스크를 입력으로 받아 대응하는 meibography 이미지를 합성한다. 이렇게 얻은 합성 이미지와 합성 마스크의 쌍을 U-Net 학습 데이터로

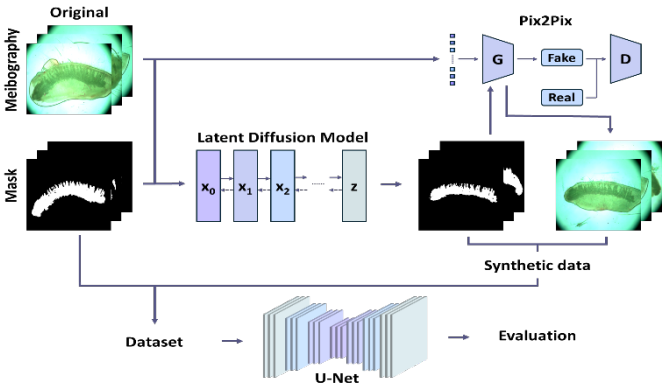


그림 1. LDM과 Pix2Pix 기반 데이터 증강을 활용한 U-Net 학습 절차

사용한다.

LDM은 1,500 에포크로 학습하였으며, 이 모델이 생성한 합성 마스크의 예시는 그림 2의 (a)와 같다. 총 1,000개의 합성 마스크 가운데 품질 기준을 충족한 샘플은 601개였고, 이 중 500개만을 최종 학습에 사용하여 선별 품질을 유지하면서도 데이터 규모의 효율성을 확보하였다. Pix2Pix도 1,500 에포크로 학습하였고, 그림 2의 (b)와 같이 원본 이미지와 유사한 meibography를 생성한다. 선별된 합성

마스크는 Pix2Pix의 입력 조건으로 사용되어 대응 meibography 이미지가 생성되며, 이로써 합성 이미지와 합성 마스크가 쌍으로 구축된다. 동일 절차를 반복 적용함으로써 합성 데이터의 규모를 단계적으로 조절할 수 있다

분할 모델은 표준 구조인 U-Net으로 사용하였다. 학습 데이터 구성은 두 그룹으로 구분하였다. 첫째, 원본과 합성 데이터를 혼합한 그룹으로, 원본 대 합성의 비율을 달리하여 여러 조합을 구성하였다. 예시 원본 데이터:합성 데이터 비율은 2:1, 1:1, 1:2, 1:5, 1:10으로 설정하였다. 둘째, 합성 데이터만 사용한 그룹으로, 합성 샘플의 수를 달리하여 여러 규모의 데이터셋을 구성하였다. 예시 규모는 합성 50장 수준에서 수백 장 규모까지 확장하였다. 모든 학습은 동일한 전처리와 증강 규칙을 적용하여 공정성을 확보하였다.

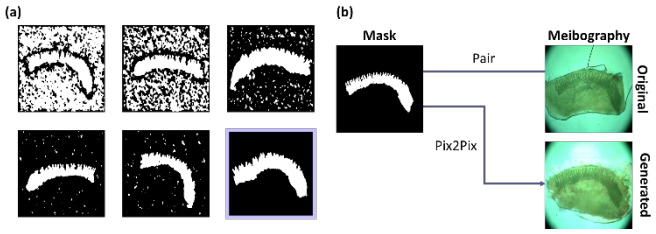


그림 2. 1,500 에포크 학습 이후 생성형 AI 모델이 생성한 합성 데이터. (a) LDM이 생성한 합성 마스크. (b) Pix2Pix가 생성한 합성 meibography 이미지와 원본 이미지의 비교

평가는 Dice 계수와 IoU로 수행하였다. test 데이터셋으로 최종 성능을 산출하였으며, 혼합 그룹과 합성 전용 그룹 간 성능 차이를 비교하여 합성 데이터의 활용 전략을 분석하였다.

3. 연구 결과

원본 50장으로 학습한 U-Net을 기준으로, 기준 모델 성능은 Dice 0.9623과 IoU 0.9276으로 확인되었다.

그림 3의 (a)는 혼합 데이터셋의 성능 결과이다. 원본과 합성 데이터를 함께 사용할 때 성능이 전반적으로 향상되었으며, 원본 50장과 합성 100장의 조합에서 최고 성능이 관찰되었다. 이 조합은 Dice 0.9656과 IoU 0.9336을 기록해 기준 대비 뚜렷한 개선을 보였다. 반면 합성 데이터 비중을 더 높이면 성능이 감소하는 경향이 나타났는데, 원본 50장과 합성 250장은 Dice 0.9618과 IoU 0.9266, 원본 50장과 합성 500장은 Dice 0.9603과 IoU 0.9239로 하락하였다. 따라서 혼합 학습에서는 original:synthetic 비율이 1:2일 때가 최적에 가깝고, 과도한 증강은 정확도를 저하시킬 수 있음을 확인하였다.

그림 3의 (b)는 합성 데이터 단독 학습의 결과이다. 데이터 규모가 증가함에 따라 성능이 점진적으로 개선되는 것을 관찰하였으며, 합성 550장에서 Dice 0.9562와 IoU 0.9164로 기준에 근접한 성능에 도달하였다. 중간 규모에서는 합성 75장이 Dice 0.9531과 IoU 0.9111로 비교적 안정적인 성능을 보였고, 합성 100장과 150장은 각각 Dice 0.9491과 IoU 0.9037, Dice 0.9494과 IoU 0.9042로 나타났다. 한편 특정 구간에서는 성능 저하가 두드러졌는데, 합성 50장과 300장은 모두 Dice 0.9430과 IoU 0.8929로 가장 낮은 값을 기록하였다. 이는 합성 데이터만으로도 충분한 규모가 확보되면 기준에 근접한 분할 품질을 달성할 수 있으나, 데이터 양과 품질의 균형이 성능에 직접적으로 영향을 미친다는 점을 시사한다.

본 연구를 통해 LDM과 Pix2Pix를 이용한 생성형 증강은 적정 비율에서 분할 성능을 유의하게 향상시키며, 특히 혼합 학습에서 original:synthetic은 1:2가 가장 효과적임을 알 수 있었다. 또한, 합성 데이터 단독 학습은 데이터 접근과 프라이버시 제약이 큰 상황에서 실용적 대안이 될 수 있으며, 충분한 규모의 합성 데이터가 확보되면 기준 성능에 근접한 수준까지 도달할 수 있음을 시사한다.

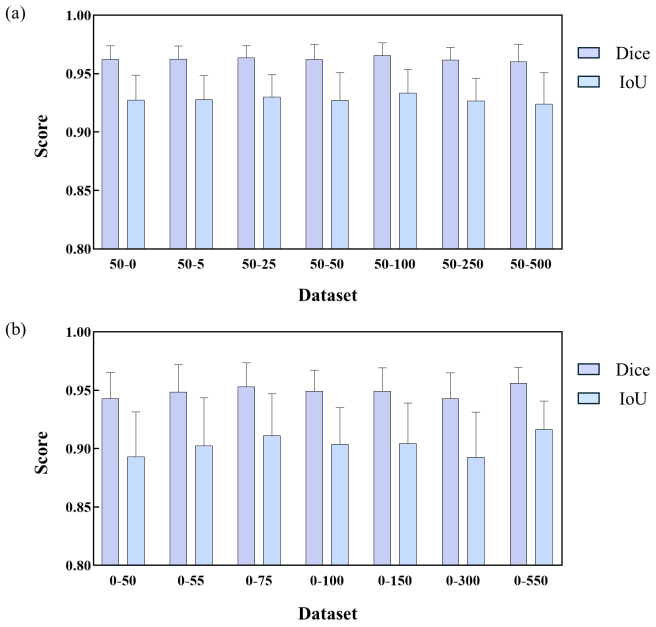


그림 3. U-Net 모델의 성능을 Dice와 IoU로 비교 평가한 결과. (가) 원본과 합성 데이터를 혼합해 학습한 그룹의 성능 비교. (나) 합성 데이터만으로 학습한 그룹의 성능 비교.

4. Acknowledgements

This study was supported by the Innovative Human Resource Development for Local Intellectualization support program (IITP-2025-RS-2023-00260267) supervised by the IITP and funded by the Ministry of Science and ICT, Korea; the National Research Foundation of Korea grant under the auspices of the Korea government (RS-2023 00213379); the Korea Health Technology R&D Project through the Korea Health Industry Development Institute, funded by the Ministry of Health & Welfare, Republic of Korea (RS-2025-24535069); the Ministry of Trade, Industry and Energy and the Korea Evaluation Institute of Industrial Technology (RS 2025-14353015).

5.참고 문헌

[1] Ronneberger, Olaf, Philipp Fischer, and Thomas Brox. "U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation." International Conference on Medical image computing and computer-assisted intervention. Cham: Springer international publishing, 2015.

[2] Rombach, Robin, et al. "High-resolution image synthesis with latent diffusion models." Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. 2022.

[3] Isola, Phillip, et al. "Image-to-image translation with conditional adversarial networks." Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2017.

Poster-165

과로군에서의 회백질-백색질 신호 강도 대비 분석

이종훈[1], 김원진[1], 한승환[1], 김도현[1], 이완형[2], 최준열[1,*]

연세대학교 의공학과[1]

중앙대학교 의과대학 예방의학교실[2]

Analysis of Cortical Gray-to-White Matter Signal Intensity Ratio in Individuals with Overwork

Jonghun Lee[1], Wonjin Kim[1], Seunghwan Han[1], Dohyeon Kim[1], Wanhyung Lee[2], Joon Yul Choi[1,*]

Department of Biomedical Engineering, Yonsei University, Korea

Department of Preventive Medicine, College of Medicine, Chung-Ang University, Korea

[*]jychoi717@yonsei.ac.kr

Abstract

Overwork is a risk factor for cognitive dysfunction and neurodegeneration. This study investigated whether overwork is associated with cortical microstructural alterations, as measured by the gray-to-white matter signal intensity ratio (GWR). T1-weighted MRI from 110 adults (overwork n= 32; controls n=78) was processed with FreeSurfer v7.4.1 to reconstruct cortical surfaces. Group differences were tested using a vertex-wise general linear model (GLM) controlling for age and sex with multiple-comparison correction via Monte Carlo simulation. Overworked individuals showed significantly higher GWR across widespread cortical regions. These findings indicate that overwork is linked to subtle yet distributed cortical changes consistent with microstructural disruption.

Keywords: Overwork, Gray-to-white matter signal intensity ratio, Brain, MRI, Cortical myelination

1. 연구 배경

과로(overwork)와 장시간 노동은 개인의 건강뿐 아니라 사회 전체의 생산성과 직결되는 중대한 공중보건 문제로 대두되고 있다. 과도한 업무량과 불규칙한 근무 환경은 심혈관계 질환 위험 증가, 수면의 만성적 파편화, 기분장애 및 스트레스 관련 증상 악화와 같은 전신적 문제를 유발할 뿐만 아니라, 주의·기억·집행기능 등 핵심 인지기능의 저하와 삶의 질 감소로 이어질 수 있음이 지속적으로 보고되고 있다. 특히 업무 관련 만성 스트레스와 장시간 노동은 중·장년층에서의 인지저하 가속화 및 알츠하이머병 위험 증가와 연관될 가능성이 제기되고 있다 [1].

신경 연구에서는 과로·스트레스 노출자가 구조적 뇌 변화의 초기 신호를 보일 수 있다는 근거가 축적되고 있다 [2, 3]. 만성 스트레스는 시냅스 가소성 저하, 시냅스 소실, 수초(myelin) 손상 및 신경염증과 같은 미세구조 수준의 변화를 매개할 수 있으며, 이는 T1 강조 영상의 조직 대비나 국소 피질 특성에 반영될 수 있다. 이 가운데 피질 회백질 대비 백색질 신호강도 비율(cortical gray-to-white matter signal intensity ratio, GWR)은 T1 강조영상에서 피질 회백질 대비 백색질의 상대적 신호강도를 정량화한 지표로, 수초 손상, 축삭(axon) 밀도 감소, 철 침착(iron deposition) 변화, 수분 함량 증가와 연관성이 있다고 보고되었다 [4]. 일부 선행연구에서는 알츠하이머병의 초기 단계에서 GWR 상승이 관찰되어 조기 신경퇴행 변화를 포착할 잠재적 바이오마커로 제시되었다 [4].

그럼에도 불구하고, 과로 및 직업적 스트레스 맥락에서 표면 기반 형태(surface-based morphometry) 분석을 이용한 GWR 변화를 체계적으로 평가한 연구는 없다. 기존 연구 다수는 임상진단 집단에 초점을 두거나, 전뇌 수준에서의 미세구조 지표를 정량적으로 충분히 다루지 못한 한계가 있다. 또한 동일한 영상 획득·전처리 파이프라인에서 도출한 영역 특이적 GWR 차이를 비교 집단과의 대조를 통해 검증한 증거도 제한적이다.

본 연구는 직업적 과로 노출 집단에서 GWR의 변화를 평가하여, 과로와 피질 미세구조 무결성 저하 사이의 연관성을 규명하고자 한다. 동일한 T1 강조영상 기반의 표준화된 파이프라인을 적용하여 전피질 영역의 GWR을 산출하고, 과로군과 대조군 간 정점 기반(vertex-wise) 차이를 비교·검증할 것이다.

2. 연구 방법

본 연구는 선행 연구에서 활용된 110명(과로군 32명과 대조군 78명)의 T1 강조 영상을 분석하여 진행하였다 (repetition time=1970 ms, echo time=2.84 ms, inversion time=991 ms, flip angle=9˚, resolution=0.5×0.5×1.0 mm^3, field of view=256×256, number of slices=192, scan time=4:34) [2].

모든 T1 강조 영상은 FreeSurfer v7.4.1의 recon-all 파이프라인으로 전처리하여 피질 표면을 재구성하고 분할하였다 [5]. 회백질 신호(gray matter signal intensity, GMI)는 백질 표면(white surface)에서 피질 리본 두께의 30% 깊이에 해당하는 표면을 생성한 뒤, 해당 지점을 연질막(pial) 방향으로 투영하여 각 정점에서의 값을 산출하였다. 백질 신호(white matter signal intensity, WMI)는 백질 표면으로부터 1.0 mm 아래에 위치한 내부 표면에서 산출하였다. 최종적으로 정점 수준의 GWR 값은 각 정점에서 산출된 GMI를 WMI로 나눈 비율로 계산하였다 [6]. 이렇게 정점별로 산출한 GWR 맵은 정점 기반 분석을 위해 표준 공간인 fsaverage 템플릿으로 정합하였다.

과로군과 대조군 간의 그룹 차이 분석은 정점 단위의 일반선형모형(general linear model, GLM)으로 평가하였으며, 연령과 성별을 공변량으로 회귀 보정하였다. 과로군을 1, 대조군을 0으로 더미 코딩(dummy coding)한 GLM 수식은 다음과 같다:

$$GWR = \beta_0 + \beta_1 \cdot Group + \beta_2 \cdot Age + \beta_3 \cdot Sex$$

정점 형성 임계에서 추출된 클러스터에 대해 10,000회 반복의 클러스터 단위 몬테카를로 시뮬레이션으로 다중비교를 보정하였다.

3. 연구 결과

본 연구의 정점 기반 그룹 차이 비교에서는 총 15개의 유의 클러스터가 도출되었다. 좌반구에서는 supramarginal과 precentral 영역에서 1개씩, 우반구에서는 precentral 영역에서 2개, supramarginal 영역에서 2개, middle temporal 영역에서 3개, postcemtral 영역에서 4개, paracentral 영역에서 1개, lateral occipital 영역에서 1개의 클러스터가 도출되었으며, 모든 클러스터에서 GWR은 과로군이 대조군보다 유의하게 컸다 (그림 1).

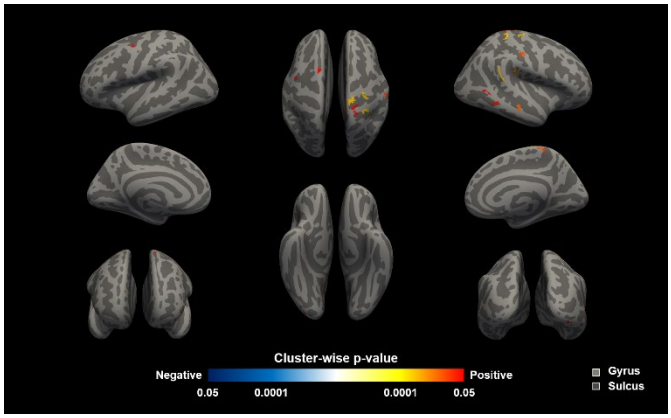


그림 1. 과로군과 대조군 간의 그룹 차이 분석에서 도출된 유의한 클러스터들

4. 연구 고찰

본 연구에서 과로군은 대조군과 대비해 광범위한 피질 영역에서 GWR 상승을 보였다. precentral·postcentral (운동 및 감각 통합), supramarginal (언어 및 사회인지), middle temporal (기억 및 언어 처리), paracentral (감각운동), lateral occipital (시지각) 등 이러한 다수 영역의 관여는 과로가 광범위한 신경기능 체계와 연관될 수 있음을 뒷받침한다 [7,8]. 이러한 변화는 수초 무결성 저하, 축삭 밀도 감소, 저등급 신경염증 등 미세구조 교란을 반영할 수 있으며, 장시간 노동이 인지 취약성과 초기 신경퇴행 위험을 높일 수 있음을 보여준다.

5. Acknowledgements

본 연구는 Ministry of Education of the Republic of Korea와 National Research Foundation of Korea (NRF) 과제의 지원을 받아 수행되었다 (NRF-2021R1C1C1008871).

6. 참고 문헌

[1] Nabe-Nielsen, K., Garde, A. H., Ishtiak-Ahmed, K., Gyntelberg, F., Mortensen, E. L., Phung, T. K. T., ... & Hansen, Å. M. (2017). Shift work, long working hours, and later risk of dementia: a long-term follow-up of the Copenhagen Male Study. Scandinavian Journal of Work, Environment & Health, 569-577.

[2] Jang, W., Kim, S., Kim, Y., Lee, S., Choi, J. Y., & Lee, W. (2025). Overwork and changes in brain structure: a pilot study. Occupational and environmental medicine, 82(3), 105-111.

[3] Savic, I. (2015). Structural changes of the brain in relation to occupational stress. Cerebral Cortex, 25(6), 1554-1564.

[4] Xu, X., Jang, I., Zhang, J., Zhang, M., Wang, L., Ye, G., ... & Alzheimer's Disease Neuroimaging Initiative. (2024). Cortical gray to white matter signal intensity ratio as a sign of neurodegeneration and cognition independent of β-amyloid in dementia. Human Brain Mapping, 45(1), e26532.

[5] Dale, A. M., Fischl, B., & Sereno, M. I. (1999). Cortical surface-based analysis: I. Segmentation and surface reconstruction. Neuroimage, 9(2), 179-194.

[6] Salat, D. H., Lee, S. Y., Van der Kouwe, A. J., Greve, D. N., Fischl, B., & Rosas, H. D. (2009). Age-associated alterations in cortical gray and white matter signal intensity and gray to white matter contrast. Neuroimage, 48(1), 21-28.

[7] Guo, Y., Wu, H., Dong, D., Zhou, F., Li, Z., Zhao, L., & Long, Z. (2023). Stress and the brain: emotional support mediates the association between myelination in the right supramarginal gyrus and perceived chronic stress. Neurobiology of stress, 22, 100511.

[8] Shields, G. S., McCullough, A. M., Ritchey, M., Ranganath, C., & Yonelinas, A. P. (2019). Stress and the medial temporal lobe at rest: Functional connectivity is associated with both memory and cortisol. Psychoneuroendocrinology, 106, 138-146.

Poster-166

웹캠 기반 심박수 측정

박재성[1*], 손호선[2], 최안렬[1], 김경아[1]

충북대학교 의과대학 의공학교실[1], 충북대학교 의학연구소[2]

Webcam-based Heart Rate Measurement

Jae Sung Park[1*], Ho Sun Shon[2], Ahnryul Choi[1], Kyung Ah Kim[1]

Department of Biomedical Engineering, College of Medicine, Chungbuk National University, Korea[1]

Medical Research Institute, Chungbuk National University, Korea[2]

[*]neates@chungbuk.ac.kr

Abstract

Heart rate is a basic physiological signal and an important indicator of health. Traditional measurement methods rely on contact sensors such as electrocardiogram or photoplethysmography, which can be uncomfortable over long periods. In this study, we present a pilot-level verification of a non-contact heart rate measurement method using a webcam, and we compare characteristics by body region. We recorded video of a single subject with a webcam, extracted time-series data from color channels, and applied a band-pass filter and fast Fourier transform to the green channel to estimate heart rate. In the forehead region, a distinct frequency component was detected, providing a stable signal close to the heartbeat timing. In contrast, the cheek and palm regions showed more noise and lacked a clear peak, although the palm region showed potential for extension to pulse transit time analysis. Although this work is a pilot with a single experimental subject, it confirms the viability of webcam-based heart rate measurement and highlights regional differences and future application possibilities.

1. 연구 배경

심박수는 인체의 기본적인 생체 신호로, 건강 상태와 심혈관계 이상을 평가하는 핵심 지표이다. 기존 측정 방식은 심전도(electrocardiogram, ECG)나 광용적맥파(photoplethysmography, PPG) 센서를 활용하는 접촉식 방법이 일반적이지만, 장시간 착용 시 불편감과 위생 및 감염 관리의 한계가 지적되어 왔다. 이러한 한계를 극복하기 위해 최근에는 웹캠 기반의 원격 광용적맥파(remote photoplethysmography, rPPG)가 활발히 연구되고 있으며, 딥러닝 기법과 결합하여 다양한 환경에서도 심박 추정의 정확성을 높이는 시도가 이루어지고 있다[1].

초기 연구들은 주로 얼굴 영역(이마, 뺨 등)을 관심 영역(region of interest, ROI)으로 설정하여 신호를 추출하였으며, 색채 기반 알고리즘이나 독립 성분 분석과 같은 기법을 통해 잡음을 억제하는 데 초점을 두었다[2]. 그러나 최근에는 얼굴을 넘어 전신으로 확장한 연구가 등장하면서, 손과 같은 말초 부위에서의 신호 활용 가능성이 보고되고 있다[3]. 이러한 말초 부위는 심장에서 더 멀리 떨어져 있어 ECG 신호와 결합할 경우 맥파 전달 시간(pulse transit time, PTT)을 산출할 수 있는 장점을 제공하며, 혈압 추정 등 심혈관계 평가로의 응용 가능성이 제시되고 있다[4,5].

웹캠을 이용한 rPPG 기반 PTT 추정은 여전히 조명 변화, 움직임, 피부 톤 등 외부 요인에 취약하며, 데이터셋 편향과 표준화된 검증 지표 부재가 주요 과제로 지적된다 [6]. 이러한 한계를 보완하기 위해 ROI 별 신호 특성을 비교하고, 단순한 심박수 추정에 그치지 않고 ECG와의 동시 측정을 통한 PTT 확장 가능성을 탐색하는 연구가 요구되고 있다. 따라서 본 연구에서는 이마, 광대, 손바닥 신호 특성을 예비적으로 관찰하고, 이를 바탕으로 향후 PTT 분석으로 확장할 수 있는 기초적 가능성을 제시하고자 하였다.

2. 연구 방법

2-1. 연구 대상

본 연구는 연구자 본인을 대상으로 수행한 단일 사례 파일럿 연구이다. 피험자는 30대 남성으로 웹캠 기반 비접촉식 심박수 측정의 가능성을 검증하기 위한 기초 실험으로 진행되었다. 본 연구는 탐색적 성격을 가지며 향후 다수 피험자를 대상으로 한 확장 연구를 위한 기초 단계로 수행되었다.

2-2. 실험 환경

실험은 조명이 일정하게 유지된 실내 환경에서 진행되었다. 피험자는 의자에 앉아 자동 혈압계(omron JPN600)의 커프를 왼쪽 상완에 착용하였고 정면에 설치된 웹캠 (logitech C310, HD webcam)을 바라보고 이마, 광대, 오른쪽 손바닥의 세 부위가 웹캠에 잘 보이도록 노출하면서 일정한 시간 동안 영상 촬영과 심박수를 측정하였다.

2-3 데이터 수집 및 신호 처리

수집된 영상으로부터 색상 채널 시계열 데이터를 추출하고, 이 중 심박수 신호에 민감한 녹색(green, G) 채널을 중심으로 분석하였다. 신호 처리는 python 환경에서 수행하였다. 고속 푸리에 변환(fast fourier transform, FFT)을 수행하기 위해 numpy의 fft 함수를 사용하고, fftfreq를 통해 주파수 벡터를 생성하였다. 이후 심박수 범위에 해당하는 주파수를 반영하고 저주파 및 고주파 잡음을 제거하기 위해 0.4–5[Hz] 범위의 대역통과 필터를 적용하였다. 필터링된 신호는 역푸리에 변환을 통해 시간 영역으로 복원하였다. 심박수는 주파수 스펙트럼에서 최대 진폭(Peak Amplitude)을 가지는 성분을 탐지하여 분당 박동수[bpm]로 환산하였다. 모든 과정은 numpy 및 scipy 라이브러리를 기반으로

수행하였다. 각 ROI에서 FFT로 추정한 심박수를 혈압계 기준값과 비교하였다.

3. 연구 결과

이마, 광대, 손바닥 부위에서 G 채널을 추출한 시간 영역 신호와 해당 신호의 주파수 스펙트럼을 그림 1과 그림 2에 제시하였다. 그림 1의 y축은 G 채널 강도의 진폭을 나타낸다. 그래프에서 검정색 선은 이마, 빨간색 선은 광대, 파란색 선은 손바닥을 나타낸다. 시간 영역 신호 분석 결과에서 이마(검정색)는 전체 측정 구간인 0~30[sec] 동안 최대값과 최소값의 차이가 5.81[a.u.]로 가장 크게 나타났다. 표준편차 또한 1.49[a.u.]로 다른 부위에 비해 약 두 배 정도 높았다. 반면 광대(빨간색)와 손바닥(파란색)은 각각 2.92[a.u.], 2.38 [a.u.]의 최대값과 최소값의 차이를 보였다.

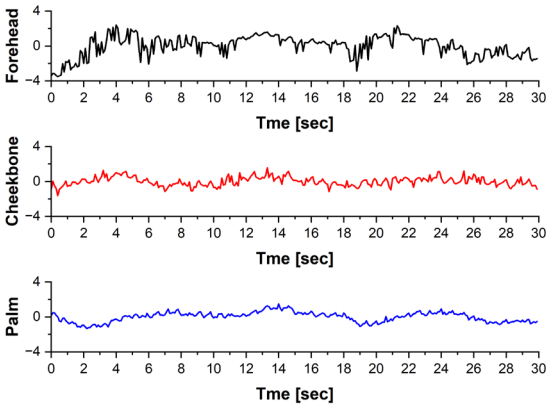


그림 1. 각 부위의 시간 영역 신호

그림 2의 주파수 분석 결과에서 주파수 성분 중 진폭이 가장 큰 성분이 심박수에 해당한다[7]. 이마 부위에서 진폭이 최대인 지점은 76[bpm], 광대와 손바닥 부위는 90[bpm]이었다. 특히 이마는 피부 혈류 변화가 뚜렷하고 움직임에 따른 잡음이 적어 진폭이 높게 나타났으며, 주파수 기반 심박수 추정에 가장 적합한 영역으로 판단된다[7].

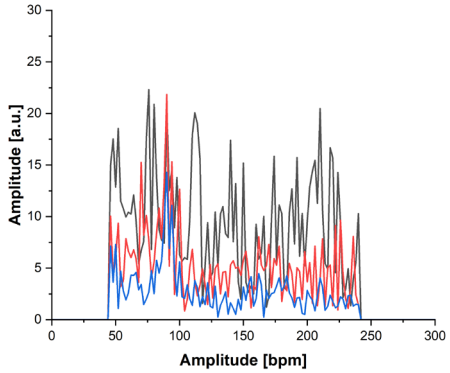


그림 2. 각 부위의 주파수 스펙트럼

혈압계로 측정한 기준 심박수는 73[bpm]이었으며, FFT 스펙트럼으로부터 얻은 최대 진폭, 최대 주파수(peak frequency), 주파수 기반 심박수 추정값을 표 1에 제시하였다. 분석 결과, 이마는 76[bpm]으로 기준값과의 차이가 3[bpm]으로 가장 근접하였다. 반면 광대와 손바닥 모두 90[bpm]으로 나타나 기준값 대비 각각 15[bpm] 높게 추정되었다. SNR은 이마, 광대, 손바닥 순으로 각각 10.9[dB], 14.9[dB], 17.7[dB]로 나타났으며, 손바닥의 SNR이 가장 높았다. 따라서 이마 부위는 기준 심박수의 오차가 가장 작아 실제 심박수 추정에 가장 적합한 영역으로 해석된다.

표 1. 부위별 심박수 추정 결과

Region	Peak Amplitude [a.u.]	Peak Frequency [Hz]	Heart Rate (Est) [bpm]	SNR [dB]
Forehead	22.31	1.27	76	10.9
Cheekbone	21.83	1.50	90	14.9
Palm	14.29	1.50	90	17.7

본 연구는 단일 피험자를 대상으로 한 파일럿 실험으로, 통계적 일반화에는 한계가 있으나 신체 부위에 따라 웹캠 기반 심박수 측정 성능이 달라질 수 있음을 확인하였다. 특히 이마 부위는 스펙트럼 진폭이 상대적으로 커 신호 강도가 높게 나타났으며, 향후 ECG와의 동시 측정을 통한 PTT 분석에서 기준 신호로 활용될 가능성을 보여주었다. 반면, 광대와 손바닥 부위에서 관찰된 주파수 피크는 광 반사율과 주변광 변화에 따른 왜곡 가능성이 있어, 실제 심박 성분 외의 광학적 잡음이 포함되었을 가능성이 있다. 이러한 결과는 부위별 광학 특성과 조명 조건이 웹캠 기반 생체신호 측정의 정확도에 중요한 영향을 미친다는 점을 시사하며, 추후 말초 부위(손가락, 손목 등)에 PPG 센서를 병행한 비교 실험을 통해 신호 신뢰성과 보정 알고리즘의 타당성을 검증할 필요가 있다.

4. Acknowledgements

이 연구는 정부(교육부, 과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2020R1I1A1A01065199, No. RS-2023-00245300).

5.참고 문헌

[1] U. Debnath, S. Kim, A comprehensive review of heart rate measurement using remote photoplethysmography and deep learning, Biomed Eng Online, 24:12, 2025.

[2] M.Z. Poh, D.J. McDuff, R.W. Picard, Non-contact, automated cardiac pulse measurements using video imaging and blind source separation, Opt Express, 18(10):10762-10774, 2010.

[3] L. Niu, et al., Full-Body Cardiovascular Sensing with Remote Photoplethysmography, arXiv:2303.09638, 2023.

[4] S. Mehta, et al., Examining the challenges of blood pressure estimation via PTT, Sci Rep, 14:22345, 2024.

[5] G. Slapničar, et al., Generalized channel separation algorithms for accurate cardiovascular assessment, IEEE Trans Biomed Eng, 71(2):455-468, 2024.

[6] X. Li, et al., The MSPM dataset for multi-ROI rPPG and PTT analysis, arXiv:2402.02224, 2024.

[7] Y. Sun and N. Thakor, "Photoplethysmography revisited: from contact to noncontact, from point to imaging," IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol. 63, No. 3, pp. 463-477, 2016.

Poster-167

갑상선 종양 섬유성 피막 검사를 위한 자가형광 수명 영상 기법 활용

권순용[1], 이우진[1], 한정무[1], 남형수[1], 석재연[2], 유홍기[1*]

한국과학기술원 기계공학과[1]

연세대학교 의과대학 용인 세브란스병원 병리과[2]

Autofluorescence lifetime imaging for label-free capsule assessment in thyroid cancer

Soonyong Kwon[1], Woojin Lee[1], Jeongmoo Han[1], Hyeong Soo Nam[1], Jae Yeon Seok[2] and Hongki Yoo[1*]

[1]Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Korea

[2]Department of Pathology, Yongin Severance Hospital,Yonsei University College of Medicine, Yongin, Republic of Korea

[*]h.yoo@kaist.ac.kr

Abstract

Traditional histological workflows, while highly informative, remain constrained by their reliance on staining, labor-intensive sample preparation. We explored the potential of autofluorescence lifetime imaging as a label-free method to address this limitation, focusing on its capacity to visualize fibrous capsule and detect capsular invasion in thyroid cancer. Leveraging a high-speed laser scanning fluorescence lifetime imaging microscopy, we acquired lifetime images spanning entire tissue sections, enabling continuous assessment of the tumor-capsule interface and the identification of focal capsular invasion. The fibrous capsule displayed distinct enhanced fluorescence lifetime and intensity, while focal regions associated with capsular invasion exhibited measurable reductions.

1. 연구 배경

갑상선 종양을 둘러싸는 섬유성 피막은 갑상선 종양 진단에 있어 주요한 구조물 중 하나로, 피막의 침윤 여부는 갑상선 종양의 악성 및 침습성을 평가하는 핵심 지표로 활용된다 [1]. 그러나 피막 침윤을 평가하기 위해, 일련의 연속 절편을 반복적으로 관찰해야 하며 염색을 포함한 긴 시간의 조직 시편 준비 과정이 필요하다. 이에 따라, 진단의 신속성 및 정확성을 향상시키는 새로운 영상 기법에 대한 수요가 점차 증가하고 있다.

자가형광 수명(autofluorescence lifetime, AFL) 영상은 조직 내 자가 형광을 이용하는 비표지 영상 기법으로 조직에 내재된 형광 분자의 신호 및 신호 감쇠율을 통해 구조적, 생화학적 정보를 제공한다. 특히, 암 미세환경 내 조직 구성 변화 및 세포의 대사 변화에 따라 형광 수명이 변화하는 양상을 나타내는데 [2], 이러한 특성을 바탕으로 다양한 암종을 대상으로 한 연구들에서 AFL 영상 기법의 유의미한 가능성이 제시되었다 [3]. 그럼에도 불구하고, 갑상선 종양에 대한 AFL 영상 기법 적용은 현재까지 제한적이다. 특히 갑상선 종양의 섬유성 피막의 정확한 평가를 위해선 종양 피막 전반에 대한 높은 해상도의 구조적 정보를 전달할 수 있는 영상 기법이 요구되는데 현재까지 AFL 영상 기법에서 갑상선 조직 전범위의 형광 수명에 대한 고해상도의 영상을 구현한 사례는 전무하다.

본 연구에서는 고속 광 스캐닝 형광 수명 영상 현미경을 활용하여. AFL 영상이 갑상선 암에서 섬유성 피막을 구분하고 피막 침윤 여부를 판별하는 데 기여할 수 있는지를 확인하였다. 염색되지 않은 갑상선 결절 조직 절편에 대한 대면적 자가형광 수명 영상을 획득하였으며, 섬유성 피막과 침윤 여부에 대한 형광 수명 기반 대비를 평가하였다.

2.연구 방법

실험에 사용된 자가형광 수명 영상 현미경의 구성은 그림 1과 같다. 여기광에 대한 광원으로 355nm 파장, 1MHz 반복률의 펄스 레이저를 활용하였으며, 영상 획득은 전 조직 촬영을 위한 4배율 대물렌즈 (NA 0.16)과 고해상도 촬영을 위한 20배율 대물렌즈 (NA 0.8)를 이용하여 순차적으로

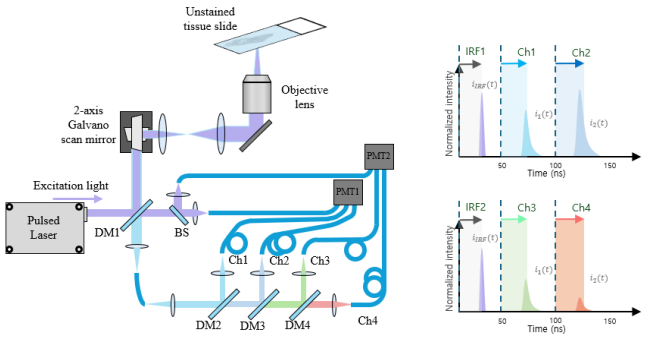


그림 1 자가형광 수명 영상 현미경 구성도

진행되었다. 조직 전반의 대면적 영상은 광스캐닝과 모터 구동 스테이지 이동을 결합한 스트립 모자이크 이미징 방식으로 획득하였다. 형광 방출 신호는 다이크로익 거울과 광학 밴드 필터를 이용하여 세 개의 분광 채널(Ch1: 390nm, Ch2: 452nm, Ch3: 540nm)로 분리하여 획득하였으며 3개의 분광 채널은 광섬유를 통한 시간 지연을 통해 두 개의 광검출기로 분리하여 획득하였다.

갑산선 조직에서 섬유성 피막을 평가하기 위해, 갑상선 여포암(follicular thyroid carcinoma, FTC)으로 진단된 환자로부터 얻은 무염색 조직 절편을 영상화하였다. 먼저 저배율 (4배율 대물렌즈)에서 전 절편 영상을 촬영한 후, 저배율 영상에서 확인된 관심영역을 대상으로 고배율 영상 (20배율 대물렌즈)를 추가로 획득하였다.

3. 연구 결과

그림 2는 갑상선 여포암 조직의 염색되지 않은 조직

절편에 대한 AFL 영상을 보여준다. 종양을 둘러싼 섬유성 피막에서 Ch1 (390nm)의 자가형광 세기가 주변 조직 대비 강하게 나타나고 긴 형광 수명을 띄어 인접한 종양 부위 및 정상 실질 조직 (non-neoplastic thyroid parenchyma, NT)과 뚜렷한 차이를 보였다. 이러한 대비를 통해 갑상선 여포암

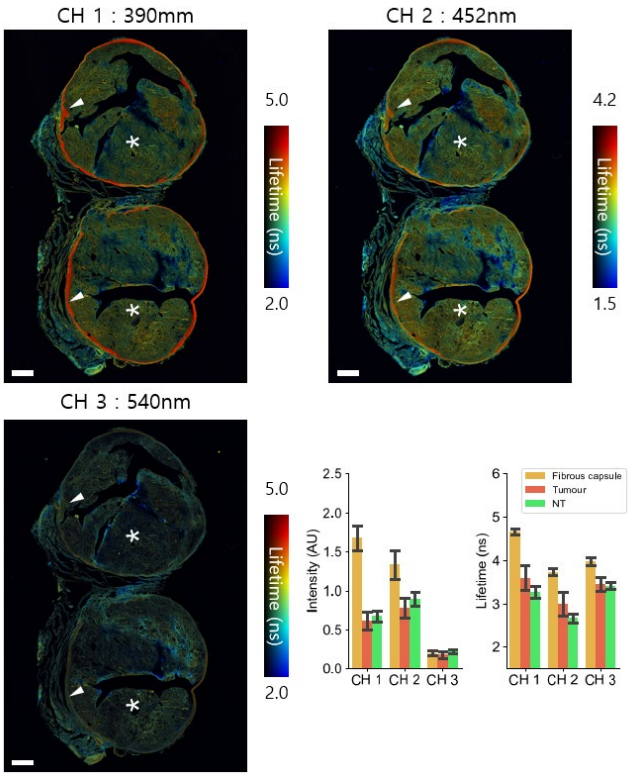


그림 2. 갑상선 여포암 무염색 조직 절편에 대한 자가형광 영상 및 해당 조직의 섬유성 피막, 암조직 및 정상 갑상선 실질 조직의 형광 세기 및 형광 수명에 대한 비교. Arrowhead와 asterisk는 각각 섬유성 피막과 암조직을 나타낸다. Scale bar: 2mm

내 섬유성 피막을 명확하게 구분 가능하였다.

본 연구에서는 또한 AFL 영상으로부터 확인된 섬유성 피막으로부터 피막 침윤(capsulr invasion, CI)을 확인하였다 (그림 3). 섬유성 피막을 따라 수행한 선형 프로파일에서, 피막 침윤이 확인된 부위에서 Ch1 과 Ch2 모두에서 형광세기 및 형광 수명이 감소하는 양상을 확인하였으며, 또한 고배율 영상에서 이러한 피막 침윤 영역에서 섬유성 피막이 얇아지고, 끊어지거나, 콜라겐 네트워크가 무질서하게 배열되는 구조적 손상이 관찰되었다. 반면, 파란 화살표머리로 표시된 온전한 피막 부위의 경우 두껍고 정련된 콜라겐 구조와 함께 강한 형광 세기 및 긴 형광 수명을 확인되었다. 반응이 일어난 것을 알 수 있다.

4. 결론

갑상선 종양의 섬유성 피막 및 피막 침윤은 진단적 중요성에도 불구하고 광범위한 조직 처리 과정 없이 이를 시각화 및 평가하는 것이 불가능하며 이로 인해 긴 시간 및 노동력을 요한다. 본 연구에서는 AFL 영상이 염색 과정 없이 갑상선 여포암에서 섬유성 피막 및 피막 침윤에 대해 고대비로 시각화할 수 있음을 제시하였다. 피막은 주변 종양 및 정상 조직 영역에 비해 Ch1에서 높은 형광 세기 및 연장된 형광수명을 보였으며, 특히, 피막 침윤

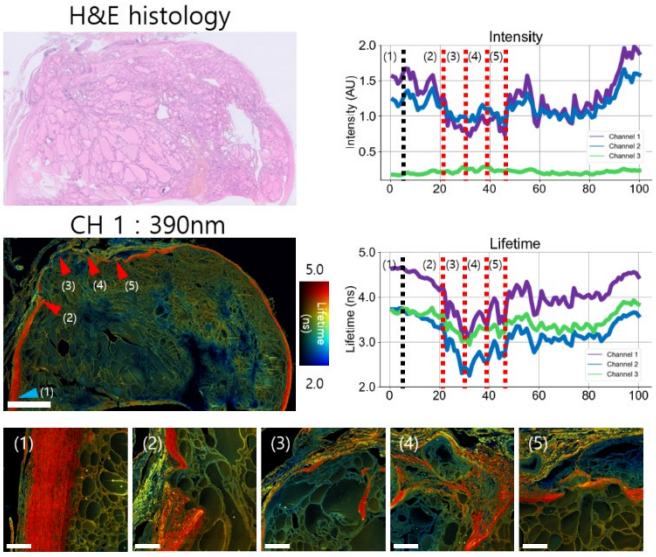


그림 3. 갑상선 여포암의 H&E 조직 영상과 이에 대응하는 무염색 절편의 AFL 영상. Scale bar: 2mm. Blue arrowhead (1)와 red arrowhead(2-5)는 각각 온전한 피막과 피막 침윤 부위를 나타낸다. 고배율 영상은 각 온전한 피막(1)과 피막 침윤 (2) 관심영역을 보여준다. Scale bar: 100 μm. 섬유성 피막을 가로질러 측정된 AFL 파라미터의 선형 프로파일.

부위에서는 형광수명과 형광세기가 국소적으로 감소하였으며, 고배율 영상에서 피막의 구조적 손상과 일치하는 양상이 관찰되었다. 이러한 결과는 AFL 영상이 염색 없이도 진단적으로 중요한 구조를 시각화할 수 있는 가능성을 보여준다. 병리학적 평가가 점차 신속하고 개관적인 진단 체계로 발전함에 따라, AFL 영상은 갑상선 종양 평가에서 진단의 정밀성을 향상시키고 의사결정 과정을 과속화할 수 있는 유망한 촬영 기법으로 제시될 수 있다.

4. Acknowledgements

이 연구는 2024년도 산업통상자원부 및 한국산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임 (RS-2024-00507755).

5.참고 문헌

[1] Haugen, B. R. et al. 2015 American Thyroid Association management guidelines for adult patients with thyroid nodules and differentiated thyroid cancer: the American Thyroid Association Guidelines Task Force on Thyroid Nodules and Differentiated Thyroid Cancer. *Thyroid 26*, 1–133 (2016).

[2] Lakowicz, J. R. Principles of Fluorescence Spectroscopy Springer US, Boston, MA, (2006).

[3] Alfonso-Garcia, Alba, et al. "Mesoscopic fluorescence lifetime imaging: Fundamental principles, clinical applications and future directions." *Journal of biophotonics* 14.6 (2021)

Poster-168

학대 경험과 관련된 기본 모드 네트워크에서의 글루타치온 수준에 대한 자기공명분광법 연구

우상욱[1], 김승호[2], 이상원[3,4], 이승재[4,5], 장용민[1,6,7]

경북대학교 의용생체공학과[1]

경북대학교 의생명공학연구소[2]

칠곡 경북대학교병원 정신건강의학과[3]

경북대학교 의과대학 정신건강의학과[4]

경북대학교병원 정신건강의학과[5]

경북대학교 의과대학 분자의학교실[6]

경북대학교병원 영상의학과[7]

The magnetic resonance spectroscopy study of glutathione levels in the default mode network related to maltreatment experiences

Sanguk Woo[1], Seungho Kim[2], Sang Won Lee[3,4], Seung Jae Lee[4,5], and Yongmin Chang[1,6,7]

Department of Medical & Biological Engineering, Kyungpook National University, Daegu, Korea[1]

Institute of Biomedical Engineering Research, Kyungpook National University, Daegu, Korea[2]

Department of Psychiatry, Kyungpook National University Chilgok Hospital, Daegu, Republic of Korea[3]

Department of Psychiatry, School of Medicine, Kyungpook National University[4]

Department of Psychiatry, Kyungpook National University Hospital, Daegu, Republic of Korea[5]

Department of Molecular Medicine, School of Medicine, Kyungpook National University, Daegu, Republic of Korea[6]

Department of Radiology, Kyungpook National University Hospital, Daegu, Republic of Korea[7]

sean0906@knu.ac.kr

Abstract

Maltreatment experiences induce chronic toxic stress that impairs brain development and leads to oxidative stress and antioxidant imbalance due to increased reactive oxygen species (ROS). Glutathione, a major antioxidant in the brain, removes these reactive oxygen species and maintains redox homeostasis to prevent cellular damage. In this study, we combined magnetic resonance spectroscopy (MRS) and functional magnetic resonance imaging (fMRI) to investigate the potential of glutathione as a biomarker and therapeutic target for mental disorders.

1. 연구 배경

아동기 학대와 같은 부정적 초기 생애 경험은 단순한 심리적 사건을 넘어 강력한 생물학적 스트레스로 작용하며 [1], 만성적 스트레스 반응을 유발하여 내측 전전두피질과 해마 등 감정 조절 및 실행 기능과 관련된 뇌 구조의 발달을 저해한다. 이러한 만성적 스트레스는 활성산소의 과도한 생성과 항산화 불균형을 초래하며[2,3], 실제로 학대경험이 있는 청소년에서 산화 스트레스 지표의 증가와 항산화 효소 감소가 보고된 바 있다.

글루타치온(GSH)은 뇌 내 주요 항산화 물질로, 활성산소를 제거하고 산화-환원 항상성을 유지함으로써 세포 손상을 방지한다 [4]. GSH 불균형은 글루탐산 및 GABA 신경 전달체계의 기능에도 영향을 미치며, 주요 우울 장애와 조현병 환자에서 내측 전전두피질이나 쐐기앞소엽의 글루타치온 감소가 보고되어 산화 스트레스의 병태생리학적 역할을 시사한다. [5]

자기공명분광법(MRS)는 비침습적으로 뇌 대사체를 정량화할 수 있는 기법으로 [6], 글루타치온과 같은 낮은 농도의 대사물은 신호 중첩 문제로 인해 정밀한 정량이 어렵다 [7]. 이를 해결하기 위해 개발된 MEGA-PRESS 시퀀스를 이용하여 글루타치온 신호를 선택적으로 분리, 정량화 할 수 있다 [8].

본 연구는 MEGA-PRESS 자기공명분광법과 휴식 상태의 기능적 자기공명영상을 결합하여 학대 경험이 뇌의 산화적 항상성 및 네트워크 기능에 미치는 생물학적 기전을 이해하고, 글루타치온이 정신질환의 잠재적 바이오마커이자 치료 표적으로서의 가능성을 규명하고자 한다.

2.연구 방법

본 연구는 18세에서 40세 사이의 총 47명의 건강한 성인을 대상으로 MEGA-PRESS 시퀀스를 이용한 자기공명분광법과 휴식 상태 기능적 자기공명영상을 결합하여 기본 모드 네트워크의 주요 영역인 내측 전전두피질과 쐐기앞소엽에서의 글루타치온 수치를 정량화하고, 정상 대조군에서의 글루타치온 수준, 기능적 연결성, 임상 증상 간의 관계를 탐구했다.

획득된 자기공명분광 데이터는 LCModel을 이용해 분석했으며, 물 신호로 정규화하여 대사물 농도를 산출하였다 (그림 1).

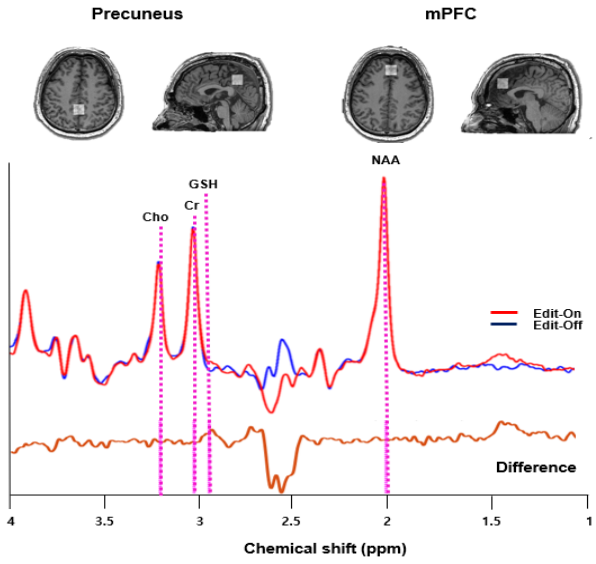


그림 1. MEGA-PRESS를 이용한 GSH 편집과 계산과정 다이어그램.

3. 연구 결과

분석 결과, 내측 전전두피질과 쐐기앞소엽에서의 글루타치온 수치는 학대 경험과 음의 상관관계를 보였으며, 이는 학대 경험이 뇌의 주요 항산화 시스템인 글루타치온 수치를 저하시킬 수 있음을 시사한다 (그림 2).

또한, 내측 전전두피질의 글루타치온 수준은 양측 중간전두이랑 및 좌측 상이마이랑과의 기능적 연결성과 유의미한 양의 상관관계를 나타내어, 글루타치온이 신경세포의 항상성 유지와 효율적인 신경 네트워크 통신에 필수적인 역할을 함을 보여주었다. (그림 3).

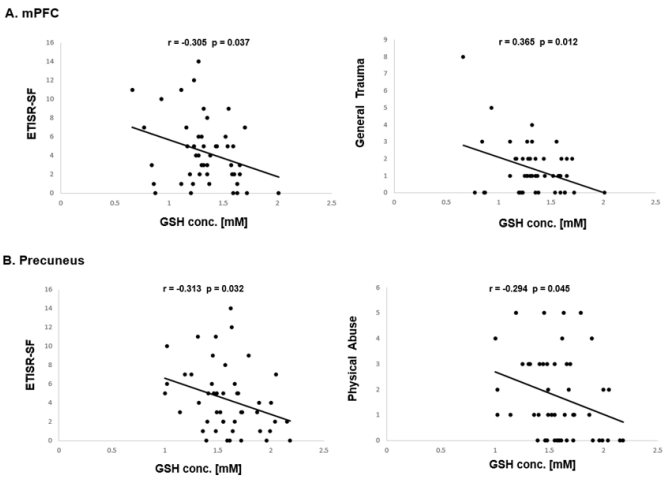


그림 2. 글루타치온 수준과 학대 경험 간의 상관관계

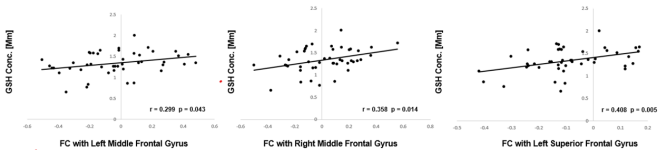


그림 3. 내측 전전두피질의 글루타치온 수준과 기능적 연결성 간의 상관관계

4. Acknowledgements

이 연구는 National Foundation of Korea (NRF) 과제의 지원을 받아 수행하였음. (Grant No. 2021R1A2C2004720 [to SJL])

5.참고 문헌

[1] Watling, S. E., Rhind, S. G., Warsh, J., Green, D., McCluskey, T., Tong, J., Truong, P., Chavez, S., Richardson, J. D., Kish, S. J., & Boileau, I. (2023). Exploring brain glutathione and peripheral blood markers in posttraumatic stress disorder: a combined [1H] MRS and peripheral blood study. *Frontiers in Psychiatry*, *14*, Article 1195012

[2] Lapidus, K. A. B., Gabbay, V., Mao, X., Johnson, A., Murrough, J. W., Mathew, S. J., & Shungu, D. C. (2014). “In vivo 1H MRS study of potential associations between glutathione, oxidative stress and anhedonia in major depressive disorder.” *Neuroscience Letters*, *569*, 74–79.

[3] Koush, Yury, et al. "Human brain functional MRS reveals interplay of metabolites implicated in neurotransmission and neuroenergetics." *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism* 42.6 (2022): 911-934.

[4] Aoyama, K., Nakaki, T. "Glutathione in Cellular Redox Homeostasis: Association with the Excitatory Amino Acid Carrier 1 (EAAC1)." *Molecules* 20 (2015): 8742-8758.

[5] Lapidus, K. A. B., Gabbay, V., Mao, X., Johnson, A., Murrough, J. W., Mathew, S. J., & Shungu, D. C. (2014). “In vivo 1H MRS study of potential associations between glutathione, oxidative stress and anhedonia in major depressive disorder.” *Neuroscience Letters*, *569*, 74–79.

[6] Tognarelli, J.M., Dawood, M., Shariff, M.I.F., Grover, V.P.B., Crossey, M.M.E., Cox, I.J., Taylor-Robinson, S.D., McPhail, M.J.W. "Magnetic Resonance Spectroscopy: Principles and Techniques: Lessons for Clinicians." *Journal of Clinical and Experimental Hepatology* 5 (2015): 320–328.

[7] Maulucci, G. "Rethinking Metabolic Imaging: From Static Snapshots to Metabolic Intelligence." *Biophysica* 5 (2025): 42.

[8] Tapper, S., Hui, S.C.N., Saleh, M.G., Zöllner, H.J., Oeltzschner, G., Near, J., Soher, B.J., Edden, R.A.E. "Influence of Editing Pulse Flip Angle on J-difference MRS." *Magnetic Resonance in Medicine* 87 (2022): 589-596.

Poster-169

알츠하이머병과 특발성 정상압 수두증의 피질 두께 패턴 구별을 위한 주성분 분석

신수빈[1], 강경훈[2], 권기헌[1], 윤의철[1]

[1]대구가톨릭대학교 의료공학과

[2]경북대학교 의과대학 신경과학교실

Principal Component Analysis for Differentiating Cortical Thickness Profiles of Alzheimer's Disease and Idiopathic Normal Pressure Hydrocephalus

Subin Shin[1]*, Kyunghun Kang[2], Kiheon Kwon[1], Uicheul Yoon[1]**

[1]Department of Biomedical Engineering, Daegu Catholic University, South Korea

[2]Department of Neurology, Kyungpook National University, South Korea

*ssb2231@cu.ac.kr, **yoonuc@cu.ac.kr

Abstract

In this study, cortical thickness was measured using high-resolution MRI in 494 patients with idiopathic normal pressure hydrocephalus (INPH) and 526 patients with Alzheimer's Disease (AD). Principal Component Analysis (PCA) was performed to extract both shared and distinct cortical thickness patterns associated with each disease since it effectively reduces the dimensionality of high-dimensional cortical data, allowing for clearer visualization of structural variation and group-specific cortical patterns. It revealed that INPH patients exhibited greater overall cortical thickness than AD patients, particularly in the parietal and temporal lobes. These findings indicate that PCA-based cortical thickness analysis may serve as a clinically valuable biomarker for distinguishing INPH from AD.

1. 연구 배경

특발성 정상압 수두증(Idiopathic Normal Pressure Hydrocephalus, INPH)은 명확한 원인 없이 발생하는 성인 발병형 신경 퇴행성 질환으로, 뇌척수액의 흡수 장애나 순환 이상에 의해 뇌실이 확장되면서 발생한다[1]. INPH의 진단 기준은 영상학적으로 Evans' index가 0.3을 초과하는 뇌실 확장 소견이며, 대표 증상은 보행장애, 인지기능 저하, 배뇨장애가 나타난다[1]. 이러한 INPH의 임상적 증상은 파킨슨병, 헌팅턴병, 알츠하이머병(Alzheimer's disease, AD)과 같은 신경 퇴행성 질환과 증상이 매우 유사하여 감별 진단이 어렵다. 특히 대부분의 INPH 환자가 알츠하이머 병리학적 변화를 동반하는 경우가 많아 오진 가능성이 높지만, 뇌실복강션트(Ventriculoperitoneal shunt) 수술을 시행하면 신경학적 증상이 호전될 수 있기 때문에 정확한 감별 진단이 임상적으로 매우 중요하다[2]. 그러나, 요추천자(Lumbar puncture) 등 침습적 진단법은 감염이나 두통 등의 부작용 위험이 있기 때문에, 보다 비침습적이고 정량적인 감별 진단 도구가 필요하다.

뇌 자기공명영상(Magnetic Resonance Imaging, MRI)의 정량적인 분석은 비침습적인 방법으로, 서서히 진행되는 퇴행성 뇌 질환에서 뇌 구조 변화를 연구하는 데 널리 활용되고 있다[3]. 특히, 임상 증상이 유사해 감별이 어려운 뇌 질환의 경우, 대뇌 피질의 두께, 표면적, 부피 등 구조적 변화를 분석하는 연구가 활발히 이루어지고 있다[3]. 피질 두께 분석은 뇌 피질의 미세한 위축 정도를 정량적으로 평가할 수 있는 방법으로, AD에서는 해마(Hippocampus)를 포함한 피질이 전반적으로 얇아지는 경향을 보이며, INPH도 유사한 경향을 나타낸다[4]. 그러나, INPH는 뇌실이 확장되고 특히 두정엽(Parietal lobe) 영역의 피질 두께가 더 두꺼운 특징을 보여, AD와의 감별 진단에서 중요한 임상적 지표로 활용될 수 있다[4].

MRI 기반 대뇌 피질 표면모델은 4만개 이상의 정점으로 표현되는 매우 고차원적인 특성을 지니고 있어 직접적인 해석이 어렵고 영역 간 상관성과 환자 개별 변이가 커서 단순 통계만으로는 질환 특이적 구조 변별력이 떨어진다. 이러한 한계를 보완하기 위해, 주성분 분석(Principal Component Analysis, PCA)은 고차원 피질 두께 데이터에서 주요 변동 축을 추출하여 데이터 차원을 효과적으로 축소하고, 군집 간 구조적 차이를 더 명확하게 시각화 할 수 있다. 본 연구에서는 INPH와 AD를 대상으로 MRI 기반의 피질 두께 데이터를 PCA로 분석하여, 두 질환 간 구별되는 공동 변동 패턴을 밝히고, 이를 통해 감별 진단을 지원하는 임상적 지표를 제시하고자 한다.

2. 연구 방법

본 연구는 칠곡경북대학교병원 뇌신경센터에 내원한 환자 중 Relkin 등의 진단 기준에 따라 INPH로 진단받은 494명과 AD로 진단받은 526명의 환자를 대상으로 하였다[1]. 또한, 본 연구는 칠곡경북대학교병원 임상연구윤리심의 위원회(Institutional Review Broad, IRB)의 승인을 받아 수행되었다.

뇌 자기공명영상은 3.0T 자기공명영상기기(GE discovery MR750, GE Healthcare)를 사용하여 획득하였으며, 뇌 조직을 효과적으로 구분할 수 있는 IR-FSPGR(Inversion Recovery Fast Spoiled Gradient Echo) 프로토콜을 적용하여 T1 강조 영상을 획득하였다. 영상 획득 변수는 TR=8.2 ms, TE = 3.2 ms, flip angle = 12°, acquisition matrix =256 × 256, field of view = 240 mm, slice thickness = 1 mm 이다.

모든 영상은 CIVET Pipeline을 사용하여 전처리되었으며, CLASP 대뇌피질 표면모델을 생성하고 피질 두께를 계산하였다(https://www.bic.mni.mcgill.ca/ServicesSoftware/CIVET) [4]. 통계 분석은 MATLAB 기반 SurfStat toolbox (http://www.math.mcgill.ca/keith/surfstat)에 내장된 주성분

분석을 이용하여 산출된 loading 값과 주성분 점수(PC score)를 통해 두 질환 간 구조적 차이를 시각적으로 확인하였다.

3. 연구 결과

PCA를 통해 피질두께의 공동 변동 패턴을 분석하였다. PCA에서 도출된 loading map은 각 피질 영역이 변동 패턴에 기여하는 방향과 정도를 색상으로 시각화하여 피질 두께 변화 양상을 직관적으로 표현한다. 의미 있는 변동 양상만을 강조하기 위해, 통계적으로 유의한 loading 값만을 시각화 범위에 포함시켜 분석의 정확도를 높였다. 또한 PC score는 각 개별 피험자가 해당 주성분에 기여하는 정도를 수치화한 지표로, 이를 바탕으로 그룹 간 구조적 차이를 통계적으로 비교하였다.

제1 주성분(PC1)은 전체 분산의 27.3%를 설명하며, 피질 전반에 걸쳐 광범위한 양의 loading 값을 나타내었다(그림 1). 이는 전반적인 피질 두께 패턴을 반영하는 주성분으로, INPH 군의 PC1 score가 AD 군에 비해 통계적으로 유의하게 높았다($p<0.001$). 이 결과는 INPH 환자군이 AD 환자군보다 전반적으로 피질 두께가 두껍다는 것을 시사한다.

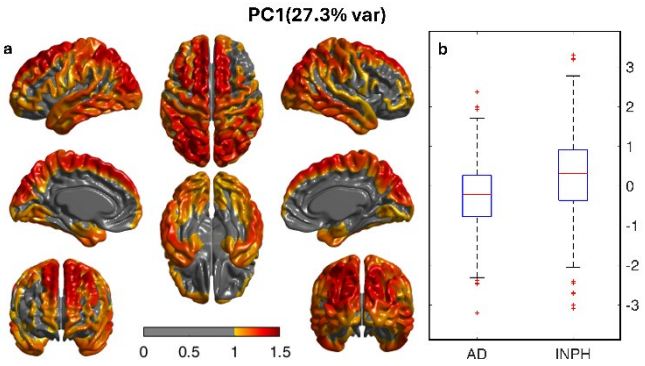


그림 1. 제1 주성분(PC1)의 loading map (a)과 PC score (b).

제2 주성분(PC2)은 두정엽(parietal lobe)에서 음의 loading 값을, 측두엽(temporal lobe)에서 양의 loading 값을 보여 상반된 피질 두께 패턴을 형성하였다(그림 2). 이는 특정 영역의 두께가 증가할 때 다른 영역의 두께가 감소하는 상대적 변동 양상을 반영한다. PC score는 INPH 군에서 유의하게 낮았으며($p<0.001$), 이는 INPH 환자가 AD환자에 비해 측두엽 피질이 얇고 두정엽 피질이 더 두꺼운 경향을 보임을 시사한다. 이러한 패턴은 뇌실 확장 및 지주막하 공간 압박에 따른 두정엽 피질의 상대적 비후라는 INPH의 전형적 영상학적 특징과 부합한다.

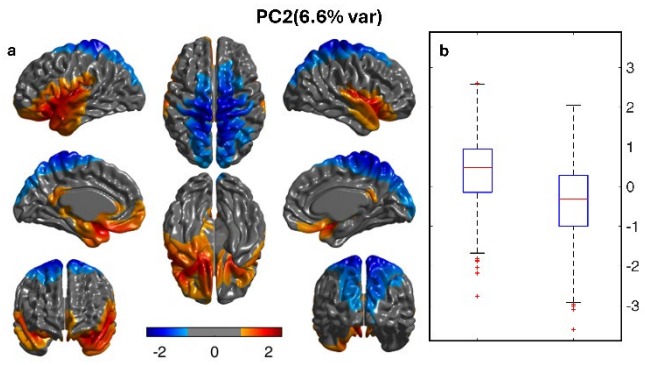


그림 2. 제2 주성분(PC2)의 loading map (a)과 PC score (b).

제4 주성분(PC4)은 전체 분산의 4.3%를 설명하며, 비율은 작지만 보다 미세한 국소적 피질 두께 변동을 포착한다(그림 3). PC4의 loading map은 베르니케 영역(Wernicke's area)에서 음의 방향, 변연계(limbic system)에서 양의 방향을 보여 상반된 국소 패턴을 나타냈다. PC score는 INPH 군에서 유의하게 높았으며 ($p<0.001$), 이는 전역적 변화(PC1)나 대조적 영역 변화(PC2)로 포착되지 않는 정교한 국소적 구조 차이를 특이적으로 반영함을 시사한다.

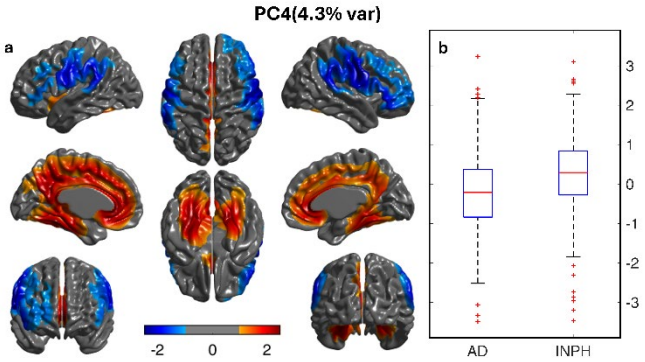


그림 3. 제4 주성분(PC4)의 loading map (a)과 PC score (b).

본 연구에서 피질 두께 기반 PCA를 적용하여 INPH와 AD 간 구조적 공동 변동 패턴을 정량적으로 규명하였다. PC1은 전역적 두께 변동, PC2는 두정엽과 측두엽 사이의 상반된 변화 양상을, PC4는 미세한 국소적 두께 변동을 각각 포착하였다. 특히, PC2에서 관찰된 두정엽 피질의 상대적 비후는 INPH의 전형적 구조 특징과 일치하여, 결과의 내적 일관성과 신뢰성을 뒷받침한다. 이러한 결과는 INPH와 AD를 구분하는 핵심 구조 차이를 정량적으로 제시하며, 두 질환의 감별 진단에 활용 가능한 영상 기반 임상 지표의 가능성을 시사한다.

4. Acknowledgement

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2023-00248120).

5. 참고 문헌

[1] Relkin K. et al. "Diagnosing idiopathic normal-pressure hydrocephalus." *Neurosurgery* Vol. 57, No. 3, p.2-4, 2005

[2] Kang K. et al. "Hippocampal and Ventricular Volumes of Idiopathic Normal-pressure Hydrocephalus and the Cerebrospinal Fluid Tap Test." *Journal of Biomedical Engineering Research* Vol. 40, No. 5, p.189-196, 2019

[3] Yun E. et al. "Correlation analysis between gait pattern and structural features of cerebral cortex in patients with idiopathic normal pressure hydrocephalus." *Journal of Biomedical Engineering Research* Vol. 42, No. 6, p.295-303, 2021

[4] Kang K. et al. "Abnormal cortical thickening and thinning in idiopathic normal-pressure hydrocephalus." *Scientific Reports* Vol. 10, No. 1, p.21213, 2020

Poster-170

다중파라미터 광음향 단층 촬영 시스템 기반 질병 모델 전임상 연구

김지웅[1], 전현서[1], 김철홍[1*]

포항공과대학교 전자전기공학과, IT융합공학과, 기계공학과[1]

Mutiparametric photoacoustic computed tomography system for preclinical disease models

Jiwoong Kim[1], Hyunseo Jeon[1], Chulhong Kim[1*]

[1]Department of Electrical Engineering, Convergence IT Engineering, Mechanical Engineering, and Medical Device Innovation Center, Pohang University of Science and Technology (POSTECH), Korea

[*] chulhong@postech.edu

Abstract

Photoacoustic computed tomography (PACT), which synergizes optical and acoustic contrast, enables non-invasive visualization of deep biological tissues with high spatial and temporal resolutions. Leveraging its ability to provide morphological, functional, and molecular information, we established a multiparametric PACT platform optimized for diverse disease models. In tumor-bearing mice, three-dimensional PACT successfully visualized primary and metastatic tumors, revealing vascular remodeling and hypoxic heterogeneity through oxygen-saturation (SO_2) mapping. In photothrombotic ischemic stroke models, transcranial whole-brain PACT non-invasively captured neovascularization and collateral circulation at early stages, along with the temporal evolution of SO_2 in ischemic and peri-infarct vessels. Furthermore, PACT enabled in-vivo monitoring of cerebrospinal-fluid (CSF) drainage and glymphatic function following indocyanine-green injection, dynamically assessing CSF flow under different anesthetic conditions and distinguishing impaired clearance in Alzheimer's-disease mice.

1. 연구 배경

생체 내부의 복잡한 병태생리 과정을 규명하기 위해서는 구조적 정보와 함께 기능적·분자적 정보를 동시에 제공하는 영상 기술이 필요하다. 기존의 X-ray CT, MRI, PET 등은 각각의 장점을 가지지만 이온화 방사선 노출, 낮은 시간 해상도, 높은 비용 등의 한계가 존재한다. 이에 반해 광음향 단층촬영(Photoacoustic computed tomography, PACT)은 펄스 레이저 조사 시 흡수된 광에너지로 인한 열팽창에 의해 발생한 초음파를 감지하여 영상을 재구성하는 방식으로, 비이온화·비침습적·고해상도 생체 영상을 실시간으로 제공한다 [1, 2].

PACT는 혈액 내 헤모글로빈의 파장별 광흡수 특성을 이용하여 산소포화도(SO_2)를 계산할 수 있으며, 조영제를 병용하면 약물 동태나 림프·CSF 순환 등 분자적 현상까지 추적할 수 있다 [3-5]. 본 연구에서는 반구형 초음파 변환기 배열(hemispherical ultrasound array)을 기반으로 한 전신 및 두뇌용 PACT 시스템을 구축하고, 세 가지 주요 질병 모델(① 원발성 및 전이성 종양, ② 허혈성 뇌졸중, ③ 알츠하이머에 적용함으로써 구조적, 기능적, 분자적 다중 파라미터 분석 능력을 입증하였다.

2. 연구 방법

광음향 단층촬영 시스템은 20Hz 펄스 반복률의 680-950 nm 범위 파장가변 OPO (optical parametric oscillator) 레이저 (PhotoSonus M-20, Ekspla, Inc, Lithuania), 반구형 초음파 트랜스듀서 배열 (Japan Probe, Inc. Japan), 데이터 수집 (data acquisition, DAQ) 시스템 (Vantage 256, Verasonics, Inc., USA)으로 구성되었다. 펄스 레이저 조사를 통해 발생한 광음향 신호를 반구형 초음파 트랜스듀서 배열이 신호를 획득하고, DAQ 시스템을 통해서 RF 신호를 3차원 광음향 영상을 재구성한다. 이 과정에서는 CUDA 기반 이미지 재구성 알고리즘이 MATLAB으로 구현되어 사용되었다. 모든 동물 실험은 포항공과대학교 IACUC의 승인 및 가이드라인에 따라 수행되었다 (POSTECH-2024-0025-C4).

원발성 종양의 경우, BALB/c 마우스 피하에 4T1 유방암 세포를 주입하여 직경 5–7 mm 종양을 형성시켰다. PACT 는 730, 756, 796, 866 nm 4개 파장으로 영상화하고, 선형분광 피팅으로 HbO/HbR 언믹싱을 수행하였다. 전이성 종양 모델의 경우, C57BL/6 마우스의 비장에 MC38 colon adenocarcinoma cells를 주입해 21일간 간 전이를 유도하였다. 허혈성 뇌졸중의 경우, 광혈전 유도(rose bengal 15 mg/kg + cold light 20 min) 후 반구형 부분회전(±30°) 스캔으로 전뇌 영상을 획득하였다. 6 파장(756–900 nm) 데이터에서 HbO/HbR 농도와 SO_2 맵을 산출하고, 혈관 밀도와 산소포화도 변화를 시간대별로 비교하였다. CSF/AD 모델의 경우, ICR 및 5xFAD 마우스에 1 mM ICG 8 μL를 ① 척수강 (L4–L6) 또는 ② 선조체에 주입하였다. 실시간 5 Hz PACT (800 nm)로 CSF 유입 동태를 관찰하였으며, 4 파장 다중 영상으로 ICG 장기 배출을 정량 분석하였다.

3. 연구 결과

원발성 종양 모델에서, 피하에 형성된 종양의 3차원 광음향 영상에서 혈관망이 종양 주변을 둘러싼 형태가 관찰되었다. 다중파장 영상으로부터 재구성된 산소포화도 맵은 종양 중심부 (core)에서 주변에 비해 약 40% 감소된 SO_2를 관찰하여, 종양 내 저산소증(hypoxia)을 시각화하였다 (그림 1a). 이를 통해기존의 단일 모달리티로는 확인하기 어려운 종양의 혈관 신생과 대사적 이질성을 직관적으로 관찰할 수 있음을 확인하였다. 전이성 종양 모델에서는 비장에 주입된 종양세포가 간으로 전이되며 형성된 병변을 전신 PACT로 추적하였다. 결과적으로 전이성 종양이 발생한 것으로 추정되는 간 영역에서 비정상적인 원형 형태의 구조가 관찰되었고, 다중파장 기반의 기능 영상에서는 병변 중심부에서 저산소증이 관찰되었다 (그림 1b). 이후 떼어낸 간 조직의 조직 검사를 통해서 전이성 종양이 있음을 검증하였다. 이러한 결과는 위치를 정확히 알기 어려운 전이성 종양에서도 광음향 시스템의 다중파라미터 정보를

이용해 조기 진단이 가능함을 시사한다.

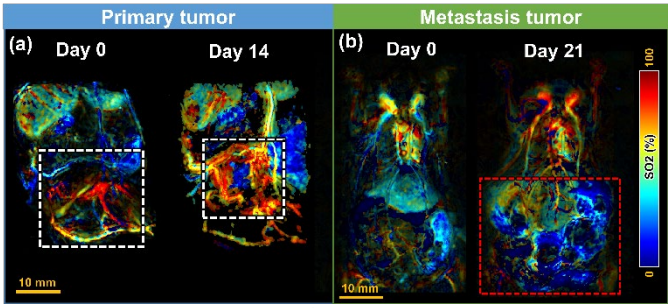


그림 1. 종양 광음향 단층촬영 영상. (a) 원발성 종양 (b) 전이성 종양

허혈성 뇌졸중 모델에서는 두개골을 절개하지 않은 상태에서 전뇌 (whole-brain)의 3차원 구조와 허혈 부위의 혈관 변화를 비침습적으로 관찰하였다. 광혈전 (photothrombosis) 유도 직후 얻어진 영상에서는 허혈 부위의 혈관이 급격히 소실되며 주변 영역의 혈류 신호가 감소하는 양상이 나타났고, 시간 경과에 따라 주변부에서 새로운 모세혈관이 형성되는 것이 관찰되었다 (그림2, 빨간색 화살표). SO_2 분포 영상에서는 허혈 발생 직후 25% 감소된 저산소 영역 관찰(그림 2, 빨간색 사각형)과 1일에 걸쳐 저산소화가 다시 회복되면서 새로 생긴 혈관에서 높은 SO2가 관찰되었다. 이러한 결과는 광음향 단층 촬영을 통해 허혈 부위에서 발생하는 측부 순환 (collateral circulation)과 혈관 신생 (neovascularization)을 관찰할 수 있었다.

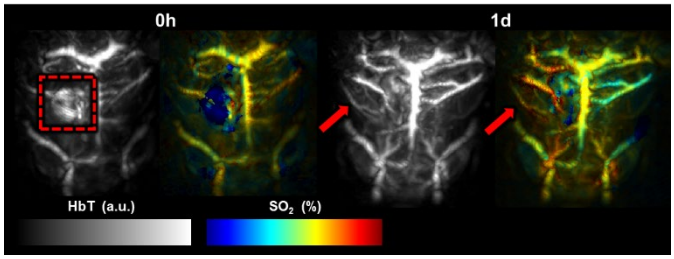


그림 2. 허혈성 뇌졸중 광음향 단층촬영 영상. 허혈성 뇌졸중 유도 후 0시간 및 1일 이후 전뇌 영상.

마지막으로 알츠하이머병 및 뇌척수액(CSF) 순환 연구에서는 조영제인 ICG를 광음향 tracer로 이용해 CSF의 흐름과 배출 경로를 전신 범위에서 영상화하였다. ICG를 척수강 내에 주입한 30분 이후, 척추 주변을 따라 상승하는 신호가 실시간으로 관찰되었고 (그림 3a), 이어서 후두부의 cisterna magna에 ICG 축척으로 인한 광음향 신호 증가가 관찰되었다. 동일한 실험에서 마취 조건에 따라 CSF 유입 dynamics가 다른 것을 관찰하기 위해서 케타민/자일리진과 아이소플루레인 마취한 그룹에서 척수강 주입 이후 30분간 cisterna magna의 신호 변화를 관찰했다. 결과적으로 케타민/자일라진 마취에서는 cisterna magna의 광음향 신호 증가가 더 빠르게 나타났고, 더 높은 신호가 관찰되어 이를 검증하였다 (그림 3b). 마지막으로, 알츠하이머병 모델에서 뇌 내 노폐물 clearance가 지연되는 것을 관찰하기 위해 ICG를 intraprenchymal injection 후, 뇌 내 신호가 사라지는 것을 추적하였다. 결과적으로 정상 마우스에서는 뇌 striatum 내 ICG 신호가 점차 소실되는 반면, 알츠하이머 모델에서는 잔류 광음향 신호가 오랫동안 지속되어 배출 기능 저하를 검증하였다. 이러한 전신 영상은 CSF의 주요 배출 경로인 cisterna magna와 경부 림프절까지 연속적으로 연결되는 흐름을 한눈에 시각화하여, 기존 형광영상이나 MRI로는 구현하기 어려운 전신적 체액 순환 지도를 제시하였다.

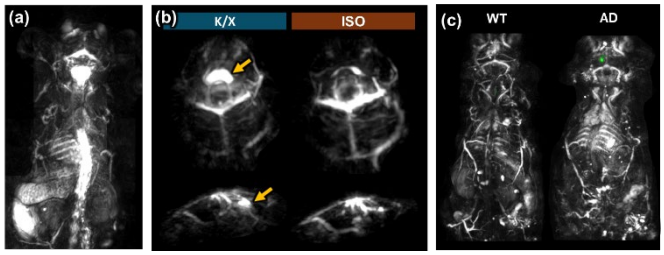


그림 3. 뇌척수액 순환 모니터링 및 알츠하이머 모델 광음향 단층촬영 영상. (a) ICG 척수강 주입 30분 이후 마우스 전신 광음향 영상 (b) 케타민 자일리진(K/X), 아이소플루레인(ISO) 마취 그룹에서 ICG 척수강 주입 30분 이후 뇌 영상. (c) 정상군 (WT)과 알츠하이머 (AD) 그룹에서 intraparenchymal injection 이후 96 시간 이후 전신 영상.

종합적으로, 본 연구의 영상 결과들은 광음향 단층촬영이 하나의 플랫폼에서 구조적·기능적·분자적 정보를 동시에 제공하며, 질병의 병태생리 과정을 직관적이고 실시간적으로 파악할 수 있음을 보여준다. 원발성 종양의 성장, 전이성 종양의 혈관 재형성, 허혈성 손상의 회복, 그리고 신경퇴행성 질환에서의 CSF 순환 이상까지 각 질환의 영상들은 모두 광음향 단층 영상 시스템이 제공하는 넓은 시야, 높은 해상도, 풍부한 스펙트럼 대비를 통해 얻어진 결과로서, 향후 다양한 전임상 질환 모델 연구에 강력한 도구가 될 수 있음을 시각적으로 입증하였다.

4. Acknowledgements

이 연구는 National Research Foundation (NRF) of Korea 과제 ((2020R1A6A1A03047902, 2023R1A2C3004880), BK21 Four program, Commercialization Promotion Agency for R&D Outcomes (COMPA) funded (No. 2710006567), Korea Health Technology R&D Project through the KoreaHealth Industry Development Institute (KHIDI, RS-2024-00512879)의 지원을 받아 수행되었음.

5.참고 문헌

[1] J. Yao, L.V. Wang, Photoacoustic microscopy, *Laser & photonics reviews* **7** 758-778 (2013).

[2] L.V. Wang, L. Gao, Photoacoustic microscopy and computed tomography: from bench to bedside, *Annual review of biomedical engineering* ***16*** 155-185 (2014).

[3] J. Kim, J. Lee, S. Choi, H. Lee, J. Yang, H. Jeon, M. Sung, W.J. Kim, C. Kim, 3D Multiparametric Photoacoustic Computed Tomography of Primary and Metastatic Tumors in Living Mice, *ACS Nano* (2024).

[4] S. Choi, J. Yang, S.Y. Lee, J. Kim, J. Lee, W.J. Kim, S. Lee, C. Kim, Deep Learning Enhances Multiparametric Dynamic Volumetric Photoacoustic Computed Tomography In Vivo (DL-PACT), *Advanced Science* 2202089 (2022).

[5] J. Kim, J.Y. Kweon, S. Choi, H. Jeon, M. Sung, R. Gao, C. Liu, C. Kim, Y.J. Ahn, Non-Invasive Photoacoustic Cerebrovascular Monitoring of Early-Stage Ischemic Strokes In Vivo, *Advanced Science* ***12*** 2409361 (2025).

Poster-171

강박 장애에서 계층적 클러스터링을 적용한 미세 공동 활성화 패턴 분석

김현수[1]. 이상원[2,3], 이승재[3,4], 장용민[1,5,6]

경북대학교 의용생체공학과[1]

칠곡경북대학교병원 정신건강의학과[2]

경북대학교 의과대학 정신건강의학과[3]

경북대학교병원 정신건강의학과[4]

경북대학교 의과대학 분자의학교실[5]

경북대학교병원 영상의학과[6]

Micro co-activation patterns analysis using hierarchical clustering in Obsessive-Compulsive Disorder

Hyunsoo Kim[1] Sang Won Lee[2,3], Seung Jae Lee[3,4], Yongmin Chang[1,5,6]

Department of Medical & Biological Engineering, Kyungpook National University, Daegu, Korea[1]

Department of Psychiatry, Kyungpook National University Chilgok Hospital, Daegu, Republic of Korea[2]

Department of Psychiatry, School of Medicine, Kyungpook National University[3]

Department of Psychiatry, Kyungpook National University Hospital, Daegu, Republic of Korea[4]

Department of Molecular Medicine, School of Medicine, Kyungpook National University, Daegu, Republic of Korea[5]

Department of Radiology, Kyungpook National University Hospital, Daegu, Republic of Korea[6]

qksrkdnj33@knu.ac.kr

Abstract

K-means clustering is random initialization yields non-deterministic solutions that limit reproducibility. Conventional μCAPs pipelines typically rely on K-means and an iterative selection clustering procedure across participants. To address this limitation, we integrated a deterministic hierarchical clustering scheme into the μCAPs pipeline applied Micro Co-Activation Patterns (μCAPs) provide a data-driven framework for characterizing seed-triggered co-activation states in Resting-State fMRI (RS-fMRI).

1. 연구 배경

최근 뇌 활동의 시간적 변동성과 영역 간 동적 재조직에 대한 관심이 높아지고 있다. 이러한 현상은 다양한 정량적 프레임워크와 계산 모델을 통해 연구되어 왔으며[1], 이를 통칭하여 동적 기능적 연결성 (dynamic Functional Connectivity, dFC)이라 한다[2-3]. 그러나 기능적 연결성 (Functional Connectivity, FC) 분석은 전체 스캔 기간의 신호를 평균화하여 상호작용을 평가하므로, 신경 활동에 내재한 순간적 변동성을 포착하는 데 한계가 있다. 이를 보완하기 위해 공동 활성화 패턴 (CAPs)과 미세 공동 활성화 패턴 (μCAPs)이 개발되었고, 단일 fMRI 볼륨의 순간적 활성 변화를 기반으로 군집화하여 패턴을 도출한다[4–5].

위와 같은 공동 활성화 패턴 분석에서는 k-평균 클러스터링으로 fMRI 볼륨을 군집화해 왔으나, k-평균은 클러스터 중심의 무작위 초기화에 민감하여 반복 실행 시 결과 변동이 발생하고, 이는 재현성을 저해할 수 있다[6]. 본 연구는 휴지기 상태 기능적 자기공명영상에서의 미세 공동 활성화 패턴 분석에 적용되는 k-평균 클러스터링의 한계를 극복하는 대안인 결정론적 계층적 군집화 (Hierarchical Clustering)를 적용하는 것을 목표로 한다.

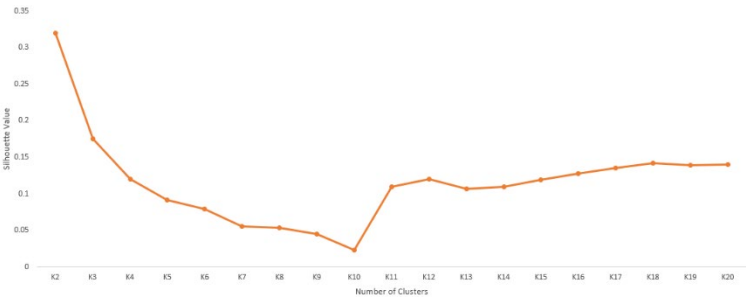


그림 1. 실루엣 값에 따른 계층적 클러스터링 미세 공동 활성화 패턴의 평가 곡선

2. 연구 방법

본 연구에서는 참가자는 총 94명 (정상군 47명, 강박 장애 환자 47명)을 대상으로 강박 장애의 병태생리와 밀접한 관련이 있는 대뇌피질-선조체-시상-피질 회로의 핵심 구성 요소인 양측 꼬리핵을 시드로 선정하여 미세 공동 활성화 패턴 분석을 진행하였다[7].

비결정론적 K-평균 클러스터의 한계를 보완하기 위해 결정론적 계층적 클러스터링을 z-점수 행렬(22,560×1,407)로

구성하여 적용하였다. 계층적 병합 군집 트리의 분석은 Ward's 와 square Euclidean 계산법을 채택하여 병합 단계마다 클러스터 내 제곱합 증가를 최소화하였고, 최적의 클러스터를 선정하기 위해 실루엣 값을 사용하였다. K ≈ 11 부근에서 시작하여 K=20까지 비교적 안정적으로 유지되는 구간으로, 해당 범위 전반에 걸쳐 비교적 안정적인 클러스터링 체계를 나타내므로 최적의 군집 수를 11개로 채택하였다 (그림 1).

3. 연구 결과

K-평균 클러스터링을 적용한 기존의 미세 공동 활성화 패턴 파이프라인을 사용하여, 전두엽 두정엽 네트워크 및 기본 모드 네트워크 두 개의 네트워크를 식별하였다 (그림 2). 이 연구의 목적에 따라 미세 공동 활성화 패턴 분석 파이프라인에서 동일한 데이터 세트에 대해 계층적 클러스터링을 적용했을 때 전두엽 두정엽 네트워크 및 기본 모드 네트워크가 동일하게 재현되었다는 것이다 (그림 3).

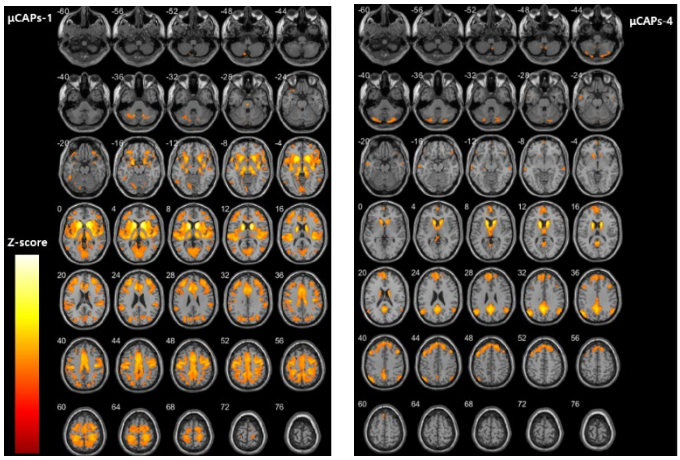


그림 2. K-평균 클러스터링이 적용된 미세 공동 활성화 패턴 (전두엽 두정엽 네트워크 및 기본 모드 네트워크)

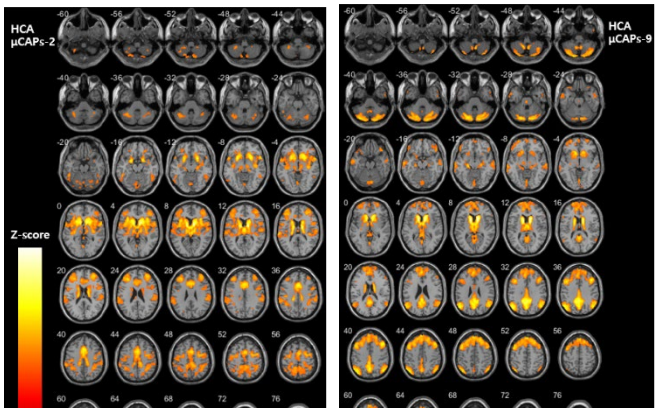


그림 3. 계층적 클러스터링이 적용된 미세 공동 활성화 패턴 (전두엽 두정엽 네트워크 및 기본 모드 네트워크)

4. Acknowledgements

본 연구는 경북대학교병원 기관생명윤리위원회(IRB NO: KNUH 2024-09-022)의 승인을 받았습니다.

5.참고 문헌

[1] Ma, Zhen-Zhen, et al. "Tracking whole-brain connectivity dynamics in the resting-state fMRI with post-facial paralysis synkinesis." Brain Research Bulletin 173 (2021): 108-115.

[2] Lurie, Daniel J., et al. "Questions and controversies in the study of time-varying functional connectivity in resting fMRI." Network neuroscience 4.1 (2020): 30-69.

[3] Preti, Maria Giulia, Thomas AW Bolton, and Dimitri Van De Ville. "The dynamic functional connectome: State-of-the-art and perspectives." Neuroimage 160 (2017): 41-54.

[4] Bolton, Thomas AW, et al. "TbCAPs: A toolbox for co-activation pattern analysis." Neuroimage 211 (2020): 116621.

[5] Delavari, Farnaz, et al. "Thalamic contributions to psychosis susceptibility: Evidence from co-activation patterns accounting for intra-seed spatial variability (μCAPs)." Human brain mapping 45.5 (2024): e26649.

[6] Yang, Jie, et al. "Adaptive initialization method for K-means algorithm." Frontiers in Artificial Intelligence 4 (2021): 740817.

[7] Yun, Je-Yeon, et al. "Brain structural covariance networks in obsessive-compulsive disorder: a graph analysis from the ENIGMA Consortium." Brain 143.2 (2020): 684-700.

Poster-172

3차원 광음향-초음파 자동 유방 스캐너와 임상연구

박신영[1,*], 성민식[2], 김현희[3], 김철홍[1,2,3]

포항공과대학교 전자전기공학과[1], 기계공학과[2], IT융합공학과[3]

Three dimensional photoacoustic-ultrasound automated breast scanner and clinical study

Sinyoung Park[1,*], Minsik Sung[2], Hyunhee Kim[3], and Chulhong Kim[1,2,3]

Department of Electrical Engineering[1], Mechanical Engineering[2], and IT Convergence Engineering[3], POSTECH, Pohang, Republic of Korea

*sinyoungpark@postech.ac.kr

Abstract

Mammography is the gold standard for breast screening, but its sensitivity is low in dense breasts, leading to the use of ultrasound (US). While 2D US imaging detects cancer well, it is operator dependent, leading to the introduction of 3D US automated breast volume scanners (ABVS). However, both 2D and 3D US imaging have high sensitivity but low specificity, resulting in many unnecessary biopsies. Here, we demonstrate a 3D photoacoustic and US ABVS (PAUS-ABVS) using a commercial large field-of-view transducer (768 elements linear array). In a clinical study involving 61 patients with 36 benign and 30 malignant lesions, we analyzed multispectral PA data to calculate the blood volume and oxygen saturation levels within the lesions, classifying them as benign or malignant. Combining these 3D PA multispectral parameters with US BI-RADS achieved a sensitivity of 96.7 % and a specificity of 66.7 %. The whole breast scanner combining 3D US and multiwavelength PA imaging system enhances the low specificity of conventional US while maintaining the high sensitivity, and demonstrating effective benign and malignant classification in the clinical study. The results suggest that the PAUS-ABVS system will potentially help radiologists make accurate diagnosis and reduce unnecessary biopsies in breast cancer patients.

1. 연구 배경

유방암은 전 세계 여성의 주요 사망 원인 중 하나로, 조기 진단과 정확한 병변 감별이 매우 중요하다[1]. 현재 표준 검사 방법인 유방촬영술(mammography)은 치밀 유방에서는 병변 민감도가 낮아, 추가적인 영상 검사가 필요한 경우가 많다. 자기공명영상(MRI)은 연부조직 대비가 우수하지만, 비용이 높고, 접근성이 제한적이며, 조영제 사용에 따른 안전성 우려가 있다. 초음파(ultrasound, US) 검사는 방사선 노출이 없고, 실시간으로 관찰할 수 있어 치밀유방에서도 높은 민감도를 보인다[2]. 그러나 검사자의 숙련도에 따라 결과의 일관성이 달라지고, 낮은 특이도로 인하여 불필요한 생검이 발생할 수 있다는 한계가 있다[3].

이러한 문제를 극복하기 위해, 자동화된 3차원 유방초음파(Automated Breast Ultrasound)가 개발되어 검사자 의존성을 줄이려는 노력이 이루어졌다. 하지만, 형태학적 영상만으로는 병변의 대사적 특성이나 혈관 구조와 같은 기능적 정보를 충분히 반영하기 어렵다.

PA 영상은 조직의 광 흡수 특성을 이용하여 레이저 에너지를 초음파 신호로 변환함으로써, 구조적 영상과 함께 혈관 구조 및 산소포화도(SO_2)와 같은 대사 정보를 동시에 제공할 수 있다[4,5]. 이를 기존 초음파 영상과 융합하면, 유방 전체의 구조적·기능적 특징을 고해상도로 관찰할 수 있어, 병변 특성 평가의 정확성을 높일 수 있다. 최근 광음향(photoacoustic, PA) 영상 기술은 이러한 한계를 보완할 수 있는 접근법으로 주목받고 있다.

본 연구에서는 상용 대형 선형 어레이 트랜스듀서를 활용한 3차원 PA-US 융합 자동 스캐너 시스템을 개발하였다. 이 시스템은 FPGA 기반 멀티플렉싱 기술과 다파장 제어 기능을 통합하여, 한 번의 스캔으로 유방 전체의 구조적 영상과 기능적 정보를 동시에 획득할 수 있다. 임상 결과, 제안된 시스템은 기존 2D/3D US 영상보다 불필요한 생검을 줄이고 병변 감별 능력을 향상시킬 수 있는 가능성을 보여주었다.

2. 연구 방법

본 연구에서는 3차원 광음향-초음파(PA-US) 자동 유방 스캐너(그림1)를 활용하여 유방암 환자의 데이터를 획득하고 분석하였다. 상용 대형 선형 어레이 트랜스듀서를 사용하여, 기존 초음파 검사와 동일한 자세(누운 상태)에서 한번의 스캔으로 유방 전체의 구조적 영상 및 기능적 정보를 획득하였다. 구조적 초음파 영상과 다파장 PA 영상 (730, 756, 796, 820, 866 nm)은 동시에 수집되었으며, 이를 통해 병변 위치 확인과 혈관 구조, 그리고 산소포화도(SO_2)와 관련된 대사 정보를 평가할 수 있었다.

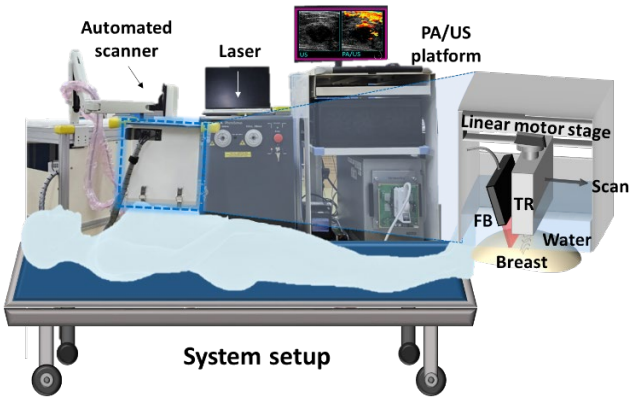


그림 1. 임상용 광음향 초음파 유방 스캐너 시스템 구성

먼저 초음파 영상을 활용하여 병변을 확인한 후, 3차원 볼륨에서 해당 위치의 축상(axial) 이미지를 기존 임상 표준 US 영상과 비교하여 병변을 검증하였다(그림2). 이어 다파장 PA 영상을 분석하여 병변 주변 혈관 구조와 병변으로 공급되는 혈관(feeding vessel)을 관찰하고, 병변 내 헤모글로빈 농도 및 산소포화도 정보를 산출하였다.

본 임상 연구에서는 61명의 환자로부터 36개의 양성 병변과 30개의 악성 병변을 포함한 3D PA-US 데이터를 획득하였다. 획득한 US 영상으로 BI-RADS 정보를, 다파장 PA 영상으로 혈관 신생과 저산소증(hypoxia)과 관련된 다변량 지표를 계산하고, Mann-Whitney U 검정과 서포트 벡터 머신(SVM)을 활용하여 병변을 양성과 악성으로 분류하였다. 또한, PA 결과와 US BI-RADS 점수를 결합하여 분석하였다.

기존 US BI-RADS만 사용한 경우 민감도(sensitivity)는 높았으나 (100%) 특이도(specificity)는 33.3%에 불과하였다. 3D PA-US 다변량 분석을 BI-RADS와 결합하여, 높은 민감도는 유지하면서 특이도를 높이는 것을 목표로 하였다.

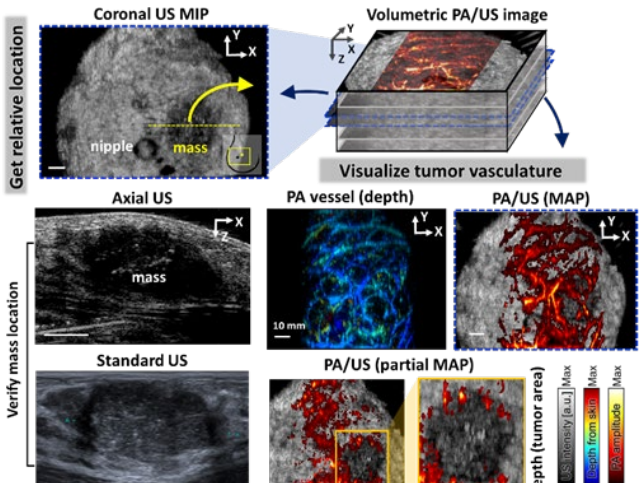


그림 2. 3D US 데이터를 이용한 병변 위치 확인 및 PA 영상을 통한 유방내 혈관 구조 시각화

3. 연구 결과

본 연구에서는 3차원 PA-US 시스템을 이용하여 유방암 환자의 실제 임상 데이터를 획득하고 분석하였다. 단면 B-mode 초음파 영상과 다파장 PA 영상을 실시간으로 동시 획득하였으며, 프로브를 자동 스캐닝하여 유방 전체의 3차원 영상 데이터를 재구성하였다.

US영상에서는 병변의 모양, 에코, 모양, 방향 등의 구조적 정보를 확인 할 수 있었고, PA 영상에서는 병변 내외의 혈관 구조 및 분포 양상을 시각화할 수 있었다. 이러한 3차원 영상 데이터는 병변의 위치 및 형태뿐만 아니라, 병변주변의 혈관 분포, 연결성까지 함께 파악할 수 있는 장점을 지닌다.

또한, 본 연구에서는 단일 파장의 구조적 영상 외에도, 다파장 PA 영상을 이용하여, 병변내 산소포화도를 분석하였다. 이를 통해 병변 내 저산소(hypoxic) 영역이나, 신생혈관생성(angiogenesis) 분포를 정량화함으로써, 양성 및 악성 병변 간의 대사적 차이를 평가하였다.

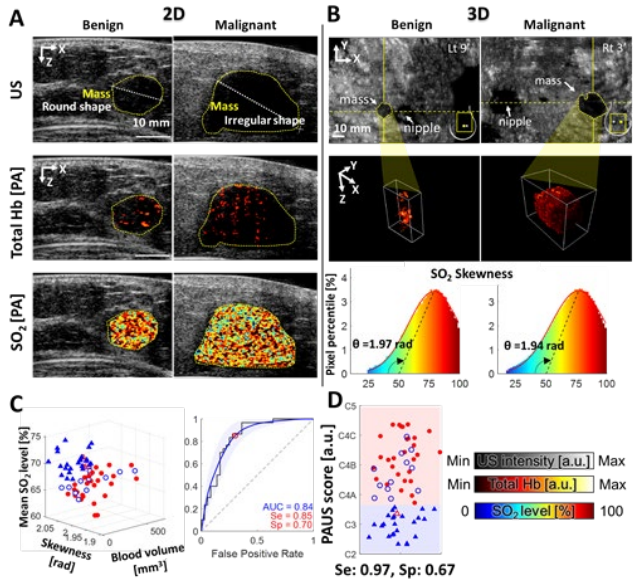


그림3. 양성과 악성 사례의 비교. (A) 2D 영상 (B) 3D 영상. (C) 다변량 PA 지표 및 ROC 곡선 (D) PA-US 분석.

그림 3A에서는 양성과 악성 사례의 단면(2D) US 및 PA 영상을, 그림 3B에서는 3차원 볼륨 영상과 해당 위치의 PA 지표를 제시하였다. 그림 3C에서는 전체 환자 데이터를 기반으로 한 다변량 PA 지표 분석 결과(평균 산소포화도, 산소포화도의 왜도(Skewness) 및 혈액용량)와 ROC 곡선을 제시하였으며, 그림 3D에서는 US BI-RADS 점수와 다변량 PA 분석 지표를 통합한 PA-US 융합 진단 성능을 나타내었다.

3D PA-US 분석은 초음파의 높은 민감도를 유지하면서도, 2D US와 비교하여 특이도를 유의하게 향상 시켰다(표1). 또한, 숙련되지 않은 검사자를 모사한 2D 경계부 (border frame) 분석 결과와 비교했을 때, 3D 분석은 숙련된 검사자를 모사한 2D 중심부 (center frame) 분석과 유사한 수준의 진단 정확도를 나타냈다. 이러한 결과는 3D 자동화 스캐닝이 검사자 숙련도 영향을 줄여 보다 일관된 진단 성능을 확보할 수 있음을 의미한다.

본 연구는 포항공과대학교 생명윤리위원회(IRB)의 승인과(PIRB-2023-009, PIRB-2024-005), 포항세명기독병원 IRB의 승인을 받아(3-37100211-AB-N-01-202301(05)-HR-004-02, 3-37100211-AB-N-01-202301(05)-HR-004-04) 진행하였다.

	Sensitivity	Specificity
2D US BI-RADS	100%	33.3%
2D PAUS (border)	100%	36.1%
2D PAUS (center)	96.7%	66.7%
3D PAUS	96.7%	66.7%

표 1. 2D 및 3D PA-US 분석과 2D US BI-RADS의 진단 성능 비교

4. Acknowledgements

This work was supported by the Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF), funded by the Ministry of Education (2020R1A6A1A03047902); a National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (2023R1A2C3004880);the Commercialization Promotion Agency for R&D Outcomes (COMPA) funded by the Ministry ofScience and ICT (MSIT) (No. 2710006567); a grant of the Korea Health Technology R&D Project through the KoreaHealth Industry Development Institute (KHIDI), funded by the Ministry of Health & Welfare (RS-2024-00512879 received by C.K.); and by the BK21 FOUR project.

5. 참고 문헌

[1] Sung, H. *et al.* Global cancer statistics 2020: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *CA: a cancer journal for clinicians* **71**, 209-249 (2021).

[2] Burkett, B. J. & Hanemann, C. W. A review of supplemental screening ultrasound for breast cancer: certain populations of women with dense breast tissue may benefit. *Academic radiology* **23**, 1604-1609 (2016).

[3] Neuschler, E. I. et al. A pivotal study of optoacoustic imaging to diagnose benign and malignant breast masses: a new evaluation tool for radiologists. *Radiology* 287, 398-412 (2018).

[4] Zhou, Y., Yao, J. et al. Tutorial on photoacoustic tomography. *Journal of biomedical optics* 21, 061007-061007 (2016).

[5] W. Choi, E.-Y. Park, S. Jeon, and C. Kim, "Clinical photoacoustic imaging platforms," Biomedical engineering letters, vol. 8, pp. 139-155, (2018).

Poster-173

ResNet18–CBAM 기반 혈액세포 암 검출의 실시간성 평가

조성우[1] , 김경이[2*]

인제대학교 Ai소프트웨어학부[1]

Real-time Performance Evaluation of Blood Cell Cancer Detection Using ResNet18–CBAM

Seong-Woo Cho[1] , Kyoung-yee Kim[2*]

School of AI Software, Inje University, Korea

jsw16977@naver.com / *kimky@inje.ac.kr

Abstract

This study evaluated the performance and real-time applicability of a model combining ResNet-18 and CBAM (Convolutional Block Attention Module) for cancer detection using blood cell images. The model was trained using Kaggle's Blood Cell Images for Cancer Detection dataset (5,000 images), and experiments were conducted on an NVIDIA RTX 3060 GPU environment. The ResNet-18+CBAM model demonstrated classification performance nearly identical to the standalone ResNet-18 model, achieving an F1-Score of 0.999, precision of 0.999, recall of 0.999, and F1-Score (0.999), nearly identical to the standalone ResNet-18 model. However, the average inference time increased by 79.87% to 5.82±5.58ms compared to ResNet-18 (3.23±4.35ms), and the FPS decreased by 44.4% to 171.9±20.25. We observed a trend where increasing the batch size reduced processing time per image and increased throughput, suggesting the importance of batch processing strategies in real-time environments. On the dataset used in this study, the CBAM module did not significantly improve accuracy. Furthermore, the increased computational load demonstrated potential constraints for real-time applications, highlighting the need for developing lightweight attention mechanisms and optimizing parallel processing in future work.

1. 연구 배경

현대 의료 산업은 정밀 진단과 맞춤형 치료로의 전환을 가속화하고 있으며, 이러한 변화의 중심에는 인공지능(AI) 기반 영상 분석 기술이 있다. 특히 혈액세포 이미지는 다양한 질병, 특히 백혈병이나 림프종 등 혈액암 진단에 있어 핵심적인 생체지표로 활용될 수 있다.[3] 그러나 실제 의료 현장에서 영상 판독은 숙련된 전문 인력에 의존하며, 분석 시간이 길고 주관적 오류가 발생할 가능성이 존재한다. 또한 혈액세포 영상은 촬영 장비, 염색 방식, 환자 특성에 따라 다양하게 변형되므로, 모델의 일반화 능력이 중요한 과제로 부각된다.

이를 해결하기 위해 CNN(Convolutional Neural Network) 기반 자동화 영상 분석 기법이 도입되며 진단 효율성이 향상되었으나, 대부분의 연구는 정확도 향상에만 집중되어 있어 실시간 진단 가능성 측면에 대한 체계적 검증이 요구된다. 실제 임상 환경에서는 대량의 고해상도 혈액세포 영상을 연속적으로 처리해야 하므로 배치 단위 처리 성능과 실시간 처리 속도가 중요한 요소로 작용한다. 최근 CBAM과 같은 주의(attention) 모듈을 적용한 연구들이 증가하고 있으나, 이들 역시 단일 이미지 기준 정확도 개선에 주로 초점을 맞추고 있어, 추론 시간(Inference Time), FPS(Frame Per Second), 배치 처리 효율성 등 실시간 임상 적용에 필수적인 성능 지표를 종합적으로 분석할 필요가 있다.

이에 본 연구에서는 ResNet-18과 CBAM(Convolutional Block Attention Module)을 결합한 모델을 구성하였다.[1] 혈액세포 이미지 기반의 암 검출 정확도와 인퍼런스 타임을 정량적으로 분석하여 실제 의료 현장에서의 실시간 적용 가능성을 평가하고자 한다. 나아가 배치사이즈에 따른 추론 시간과 FPS측정까지 포함하여, 정확도와 실시간성 측면을 종합적으로 검증함으로써 AI 기반 영상 분석 시스템의 임상적 활용 가능성을 탐색하고, 향후 자동화 진단 시스템 개발의 기초 자료로 활용하는 것을 목표로 한다.

2. 연구 방법

본 연구에서는 암세포를 분류하기 위해 혈액세포 이미지를 기반으로 ResNet18과 CBAM을 결합한 하이브리드 모델을 사용하였다.[1] 모델의 입력 크기는 224×224로 통일하였으며, 데이터 정규화 및 증강을 통해 학습의 일반화 성능을 높였다. 증강 기법으로는 수평 반전, 회전(±10°), 밝기 및 대비 변화(ColorJitter)를 적용하였다.

데이터셋은 Kaggle의 Blood Cell images for Cancer detection을 활용하였으며, 총 5,000장의 이미지를 사용하였다. 데이터는 학습(Train)과 검증(Validation)세트로 8:2 비율로 분할하여 사용하였다.

학습 환경은 Windows 11 운영체제와 NVIDIA RTX 3060 (12GB) GPU를 기반으로 하였으며, Intel Core i7 (64bit) CPU를 사용하였다. 개발 환경은 Python 3.11.9, PyTorch, CUDA 12.1로 구성하였다.

학습 파라미터는 Epoch 25, Batch Size 32, Learning Rate 0.0001로 설정하였으며, 옵티마이저는 Adam을 사용하고 학습률 조정에는 StepLR(step_size=7, γ=0.1) 스케줄러를 적용하였다. 손실 함수는 클래스 불균형 문제를 고려하여 가중치가 적용된 CrossEntropyLoss를 사용하였다.

모델 학습은 검증 정확도(Validation Accuracy)를 기준으로 조기 종료를 적용하였으며, 최종 모델은 검증 세트에서의 정확도(Accuracy), 정밀도(Precision), 재현율(Recall), F1-score를 종합적으로 평가하였다. 또한, 추론 시간과 FPS를 측정하여 실시간 응용 가능성을 검증하였다. 단, 추론 시간 측정에 사용된 데이터는 검증 세트로, 학습에 사용되지 않은 별도의 데이터이며, 전체 데이터 수의 한계로 인해 이러한 방식으로 실험을 진행하였다.

3. 연구 결과

본 연구에서는 ResNet-18 기반 모델과 CBAM 모듈을 통합

한 ResNet-18+CBAM 모델의 성능을 정확도와 실시간 처리 성능 측면에서 비교 분석하였다.

3.1 정확도 비교

표 1은 두 모델의 정확도, 정밀도, 재현율, F1-Score의 학습 결과를 정리한 것이다.

Model	Accuracy	Precision	Recall	F1-Score
ResNet-18	0.998	0.998	0.998	0.998
ResNet-18 +CBAM	0.999	0.999	0.999	0.999

표 1. 모델별 성능 비교

3.2 실시간성 검증

실시간성 검증은 평균 추론 시간과 FPS를 기준으로 수행하였다. 표 2는 두 모델의 평균 실시간성 검증을 정리한 결과이다.

Metric	ResNet-18	ResNet-18 + CBAM	Difference(%)
Inference_ Time(ms)	3.23±4.35	5.82±5.58	+79.87
FPS	309.3±17.88	171.9±20.25	-44.40

표 2. 모델별 평균 추론 시간 및 FPS 비교(Mean ± Std)

3.3 배치사이즈에 따른 추론 시간

모델의 추론 시간은 배치사이즈에 따라 달라짐을 확인하였다. 그림 1은 Batch Size 변화에 따른 처리량(Throughput)과 이미지당 추론 시간을 보여준다.

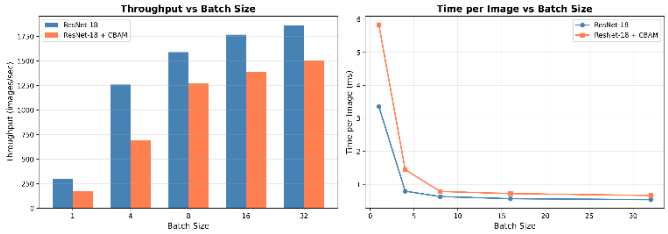


그림 1. Batch Size 변화에 따른 처리량과 이미지당 처리 시간

4. 결론

본 연구에서는 Blood Cell Images for Cancer Detection 데이터셋을 활용하여 ResNet-18 기반 모델과 CBAM 모듈을 결합한 ResNet-18+CBAM 모델의 성능을 비교하고 실시간 응용 가능성을 검증하였다.

모델 성능 측면에서는 Accuracy, Precision, Recall, F1-Score 모두에서 ResNet-18 대비 유의미한 향상없이 거의 동일한 수준을 보였으나, 실시간성 측면에서는 추론 시간 차이가 뚜렷하게 나타났다. ResNet-18+CBAM 모델의 평균 추론 시간은 5.82 ± 5.58 ms로 ResNet-18(3.23 ± 4.35 ms) 대비 79.87% 증가하였고, FPS는 171.9 ± 20.25로 ResNet-18(309.3 ± 17.88) 대비 44.4% 감소하였다. 이는 CBAM 모듈 적용이 연산량 증가로 인해 실시간 응용에서 제약 요인이 될 수 있음을 보여준다.

배치사이즈에 따른 실험 결과, 배치사이즈가 증가할수록 이미지당 추론 시간은 감소하고 처리량은 증가하였다. ResNet-18의 경우 배치사이즈 1에서 이미지당 3.36ms, 처리량 297.9 images/sec였으나, 배치사이즈 32에서는 이미지당 0.54ms, 처리량 1863.4 images/sec로 약 6.3배 향상되었다. ResNet-18+CBAM 역시 배치사이즈 1에서 이미지당 5.83ms, 처리량 171.5 images/sec에서 배치사이즈 32에서는 이미지당 0.66ms, 처리량 1507.0 images/sec로 약 8.8배 개선되었다. 이는 CBAM 모듈이 단일 이미지 처리 시 추론 시간을 증가시키지만, 배치 처리를 활용하면 전체 처리 효율을 높일 수 있음을 보여주며, 실시간 임상 환경에서는 적절한 배치 전략 설정이 중요함을 시사한다.

본 연구의 한계로는 실제 임상 환경의 다양한 영상 해상도와 노이즈 조건을 반영하지 못했다는 점이 있다. 그리고 5,000장의 제한적인 데이터셋을 사용하여 다양한 의료기관의 촬영 장비나 염색 방법을 포함하지 못했다. 또한 실제 병원 환경에서의 파일럿 테스트나 임상 전문가와의 비교 평가가 이루어지지 않아 실제 진단 보조 도구로서의 유용성은 추가 검증이 필요하다.

향후 연구에서는 경량화된 주의 모듈 설계, 다양한 촬영 조건에 대한 성능 검증, 데이터 증강 및 정규화 기법을 활용한 모델 일반화 향상 방안을 모색할 계획이다. 더불어 모델 경량화 및 엣지 디바이스 최적화를 통해 자원이 제한된 의료 환경에서도 활용 가능한 실시간 진단 시스템 구축할 예정이다.

5. Acknowledgements

본 과제(결과물)는 교육부와 경상남도의 재원으로 지원을 받아 수행된 경상남도 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 연구결과 입니다.(202502440001)

6.참고 문헌

[1] Y. Zhang, W. Feng, Z. Wu, W. Li, L. Tao, X. Liu, F. Zhang, Y. Gao, J. Huang, and X. Guo. "Deep-Learning Model of ResNet Combined with CBAM for Malignant–Benign Pulmonary Nodules Classification on Computed Tomography Images." *Medicina*, Vol. 59, No. 6, p.1088, 2023.

[2] Y. Kim, H. Kim, and H. Yu. "동기식 분산 딥러닝 환경에서 배치 사이즈 변화에 따른 모델 학습 성능 분석." *한국정보처리학회 학술대회논문집*, Vol. 30, No. 2, pp. 79–80, 2023.

[3] H. Sriraman, S. Badarudeen, S. Vats, and P. Balasubramanian. "A Systematic Review of Real-Time Deep Learning Methods for Image-Based Cancer Diagnostics." *Journal of Multidisciplinary Healthcare*, Vol. 17, pp. 4411–4425, 2024.

Poster-174

Fairness Supervisor: 사전 정의된 방향 벡터를 이용한 분류 모델의 성별 편향 억제

이희재[1], 추유성[1], 양세정[1,2*]

연세대학교 원주의과대학 정밀의학과[1]

연세대학교 원주의과대학 의료정보통계학과[2]

Fairness Supervisor: Suppressing Gender Bias in Classifiers using Pre-defined Direction Vector

Heejae Lee[1], Yuseong Chu[1], Sejung Yang[1,2*]

[1]Department of Precision Medicine, Yonsei University Wonju College of Medicine, Korea

[2]Department of Medical Informatics and Biostatistics, Yonsei University Wonju College of Medicine, Korea

suiginto765@gmail.com, dbtjd9968@yonsei.ac.kr, *syang@yonsei.ac.kr

Abstract

While AI-based diagnostic systems for skin lesions show high accuracy, they risk learning biases from data, such as gender, which is a critical fairness issue in medical AI. The black-box nature of these models makes it difficult to identify and mitigate the visual source of such biases. To address this, we propose the 'Fairness Supervisor,' a novel framework that directly intervenes in the model's latent space. First, we extract a universal gender direction vector from the latent space of a StyleGAN2-based model. This vector is then used as a supervisor to penalize a new classifier during training whenever its feature representation aligns with gender direction during training process. Our experiments show that this method reduces the Average Equal Opportunity Difference (EOD) by 38.6% and Average Odds Difference (AOD) by 26.5%, with a negligible 0.88% drop in accuracy. This demonstrates that our framework effectively mitigates gender bias while preserving high diagnostic performance.

1. 연구 배경

딥러닝을 기반으로 한 컴퓨터 비전의 연구는 의료 분야에 활발하게 적용되고 있으며, 특히 피부과 영역에서 AI 진단 시스템은 전문가 수준에 근접하는 높은 정확도를 보이고 있다. AI 기반 컴퓨터 비전 모델은 주로 영상, 이미지 등에서 중요한 특징을 추출하고 임상적으로 유의미한 패턴을 학습하여 진단 정확도를 높인다. 그러나 이 과정에서 모델이 의도치 않게 특정 속성에 의존하여 편향된 특징을 학습할 경우, 공정성이라는 중대한 윤리적 문제가 발생한다. 의료 데이터는 성별, 인종 등 민감한 속성에 따라 데이터의 불균형이나 질병의 발현 양상이 다르게 나타날 수 있다 [1]. 모델이 이러한 편향을 진단의 주요 단서로 오용하게 되면, 특정한 집단에서 더 높은 오진율을 보이거나 진단이 불안정해지는 결과가 발생한다. 이는 모델의 신뢰도를 저해하고 의료 불평등을 심화하는 심각한 문제로 이어진다.

본 연구는 문제의 원인이 되는 특징을 특정하기 어려운 딥러닝 모델의 블랙박스 내에서 발생하는 피부병변의 성별 편향을 해결하는 것을 목표로 하며 모델이 이미지를 이해하고 정보를 압축하는 추상적인 잠재 공간에 개입하는 접근법인 Fairness Supervisor 프레임워크를 제안한다.

먼저 StyleGAN2 기반 생성 모델을 활용하여 피부 병변 이미지의 풍부한 특징을 담은 잠재 공간을 학습하고, 이 공간 내에서 성별 속성이 변화하는 보편적인 방향 벡터(direction vector)를 추출한다 [2]. 그리고 이 사전 추출된 성별 방향 벡터를 일종의 지도로 활용하는 프레임워크를 구성한다. 이 프레임워크는 새로운 분류기 모델을 훈련시키는 과정에서, 모델의 학습 방향이 사전에 정의된 성별 편향 방향과 유사해질 때마다 페널티를 부여한다. 이를 통해 분류기는 전체적인 진단 성능을 유지하면서도, 성별과 관련된 잠재적 특징에 대한 의존도를 낮추고 오직 순수한 병변의 특징만으로 분류하는 방법을 학습하도록 유도된다. 본 연구는 이를 통하여 모델의 핵심 진단 성능을 최대한 유지하면서, 성별 편향을 효과적으로 억제하여 모델의 공정성을 향상시키는 것을 목표로 한다.

2.연구 방법

본 연구에서 제안하는 Fairness Supervisor 프레임워크는 편향 방향 벡터 추출과 공정한 분류기 훈련의 두 가지 주요 단계로 구성된다. 첫번째 단계에서는 약 8만 8천 장의 복합 모달리티(임상, 피부경) 데이터셋으로 StyleGAN2 기반 모델을 훈련하여 데이터의 잠재 공간을 학습하고, 이 공간 내에서 성별 편향을 나타내는 방향 벡터를 추출한다 [3]. 두번째 단계에서는, 첫 단계에서 추출된 벡터를 감독관으로 활용하여, 새로운 데이터셋으로 분류기를 훈련시키는 과정에 개입한다. 이 프레임워크를 통해 분류기가 성별 편향에 의존하지 않고 강인한 예측을 하도록 학습 방향을 제어한다.

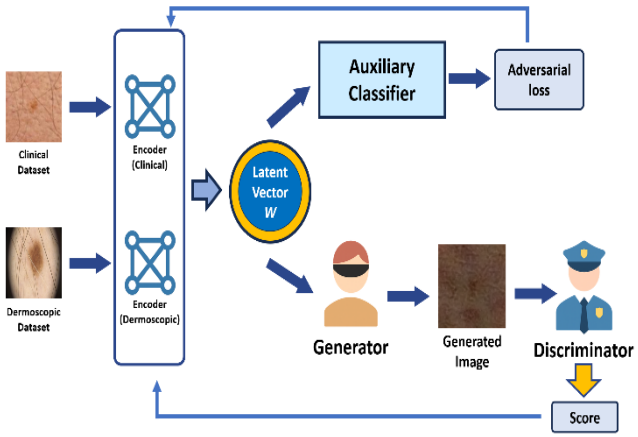


그림 1. 성별 편향 방향 벡터 추출을 위한 모델의 전체 구조도

첫번째 단계인 성별 방향 벡터 추출 단계는 StyleGAN2 아키텍처를 기반으로 한 Autoencoder 형태로 그림 1과 같이 구성된다. 임상 및 피부경 이미지는 각각의 독립적인 CNN 기반 인코더에 입력되어 512차원의 잠재 벡터 w로 변환된다. 생성자(Generator)는 이 잠재 벡터를 입력 받아 이미지로 복원하고, 판별자(Discriminator)는 생성된 이미지의 사실성을 평가하여 점수(Score)를 출력한다. 동시에, 잠재 벡터 w를 입력 받는 두 개의 MLP 보조 분류기(Auxiliary Classifiers)는 원본 이미지의 성별과 모달리티를 예측하도록 훈련된다. 이 구성 요소들은 적대적 학습을 통해 유기적으로 훈련되며 판별자가 출력한 점수와 보조 분류기가 예측한 결과는 각각 손실(Loss)로 변환되어 인코더로 다시 전달된다. 이 피드백 루프의 반복 학습을 통해 인코더는 이미지를 복원하는 동시에, 잠재 벡터에서 성별과 모달리티 정보를 제거하도록 학습 방향을 교정한다.

훈련 종료 후, 전체 데이터셋을 훈련된 인코더에 통과시켜 모든 이미지에 대한 잠재 벡터를 추출한다. 이 벡터들을 성별 레이블에 따라 남성 그룹과 여성 그룹으로 나누고, 각 그룹의 평균 벡터를 계산한다. 최종 성별 방향 벡터는 수식 1과 같이 두 평균 벡터의 차이를 정규화 하여 얻는다.

$$v_{gender} = \frac{w_{male_mean} - w_{female_mean}}{\left\| w_{male_mean} - w_{female_mean} \right\|} \quad (1)$$

두번째 단계에서는 ImageNet으로 사전 훈련된 ResNet50 모델을 사용하며, 공정성 모듈은 모델의 훈련 과정에 병렬로 연결된다. 훈련 및 검증을 위해서는 표준 벤치마크 데이터셋인 ISIC 2019를 사용한다 [4]. 불확정요소를 배재한 명확한 성능 비교와 클래스 불균형 문제를 완화하기 위해, 데이터셋에서 가장 대표적인 3개의 병변 클래스인 흑색종(Melanoma, MEL), 모반(Nevus, NV), 기저세포암(Basal Cell Carcinoma, BCC)만을 선별하여 학습에 사용하였다.

공정성 모듈은 1단계에서 훈련된 고정된 피부경 인코더와 성별 방향 벡터 v_{gender}, ResNet50의 특징 공간(2048차원)과 StyleGAN2의 잠재 공간(512차원)을 연결하는 매핑 네트워크로 구성된다. 분류기와 매핑 네트워크는 수식 2와 같이 분류 성능을 높이는 분류 손실 $\mathcal{L}_{class}$ 와 공정성 손실 $\mathcal{L}_{fair}$ 를 결합한 최종 손실 $\mathcal{L}_{final}$ 을 최소화하도록 학습된다. 여기서 λ_{fair} 는 두 손실 간의 중요도를 조절하는 가중치이다. $\mathcal{L}_{fair}$는 ResNet50이 출력한 중간의 특징 벡터를 매핑 네트워크에 통과시켜 잠재 공간 벡터w_{mapped}를 얻고, w_{mapped}와 성별 방향 벡터 v_{gender}간의 내적(dot product)의 제곱을 계산하여 구하며 모델이 성별 편향에 의존하지 않도록 제어하는 역할을 한다. 이 손실은 ResNet50의 특징 표현이 성별 방향과 유사할수록 증가하며, 모델은 이 페널티를 피하기 위해 성별과 무관한 특징을 학습하게 된다.

$$\mathcal{L}_{final} = \mathcal{L}_{class} + \lambda_{fair}\mathcal{L}_{fair} \quad (2)$$

$$\mathcal{L}_{fair} = \mathbb{E}\left[\left(w_{mapped} \cdot v_{gender} \right)^2 \right] \quad (3)$$

3. 연구 결과

Fairness Supervisor 프레임워크의 효과를 검증하기 위해, 표준 ResNet50 모델(Baseline)과 제안하는 프레임워크를 적용한 ResNet50 모델(Fair)을 학습하여 비교 분석을 진행하였다. 결과의 통계적 신뢰도를 확보하기 위해 각 모델에 대해 10회의 독립적인 실험을 수행하였고 성능 지표로는 평균 정확도(Accuracy)를, 공정성 지표로는 EOD(Equal Opportunity Difference)와 AOD(Average Odds Difference)를 사용하였다. 반복 실험의 EOD, AOD, 모델 정확도의 평균과 표준편차를 요약한 결과는 표 1과 같다.

평균±표준편차	ResNet50 (Baseline)	Fairness Supervisor	상대적 개선율
Average EOD	0.0376±0.009	0.0231±0.006	38.60%
Average AOD	0.0283±0.006	0.0207±0.004	26.50%
Average Accuracy	0.807±0.008	0.799±0.006	-0.88%

표 1. 성능 및 공정성 지표 비교

실험 결과, Fairness Supervisor 프레임워크를 적용한 모델은 평균 EOD는 38.60%, 평균 AOD는 26.50% 만큼 큰 폭으로 개선되어, 모델이 성별에 따라 보이는 편향이 유의미하게 감소했음을 확인하였다. 이러한 공정성 향상은 모델의 핵심 진단 성능을 거의 희생하지 않으면서 이루어졌다. 평균 정확도는 0.807에서 0.799로 0.88%만 감소하였으며, 이는 본 연구의 프레임워크가 성능과 공정성 사이의 이상적인 트레이드오프(trade-off)를 달성했음을 의미한다. 또한, Fairness Supervisor 모델의 공정성 지표 표준편차(EOD: ±0.006, AOD: ±0.004)가 감소를 통해서 우연에 의존하지 않고 안정적으로 편향을 억제하고 있음을 볼 수 있다.

특히, 임상적으로 가장 중요한 악성 흑색종(MEL) 진단에서 기존 모델은 성별에 따라 평균 6.25%p의 차이(EOD: 0.0625)를 보였으나, 프레임워크를 적용한 모델은 이 격차를 4.51%p로 줄여서 흑색종에 대한 편향을 약 27.8% 완화하였다. 이는 제안하는 방법론이 실제 의료 환경에서의 신뢰도를 높이는 데 기여할 수 있음을 시사한다.

4. Acknowledgements

본 연구는 과학기술정보통신부의 지원을 받은 한국여성과학기술인육성재단(WISET)을 통해서 수행된 성별 영향분석 연구개발사업(GISTeR, Korea Center for Gendered Innovations for Science and Technology research)의 지원(과제번호: WISET202503GI01)을 받았으며 2025년도 교육부 및 강원특별자치도의 재원으로 강원RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 지원(2025-RISE-10-006)을 받아 진행하였으며, 이와 함께 과학기술정보통신부 정보통신진흥기금을 지원받아 진행한 것으로, 과학기술정보통신부의 공식의견과 다를 수 있습니다.

5.참고 문헌

[1] Banerjee, Imon, et al. "Reading race: AI recognises patient's racial identity in medical images." arXiv preprint arXiv:2107.10356 (2021).

[2] Shen, Yujun, et al. "Interpreting the latent space of gans for semantic face editing." Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. 2020.

[3] Bolukbasi, Tolga, et al. "Man is to computer programmer as woman is to homemaker? debiasing word embeddings." Advances in neural information processing systems 29 (2016).

[4] Tschandl, Philipp, Cliff Rosendahl, and Harald Kittler. "The HAM10000 dataset, a large collection of multi-source dermatoscopic images of common pigmented skin lesions." Scientific data 5.1 (2018): 1-9.

Poster-175

경동맥의 플라크 내출혈에 대한 다중변수 광음향 분석

성민식[1], 남성훈[1], 김선오[2], 박종일[2], 정동영[1], 한문규[1], 박별리[3,*], 김웅[2,*], 김철홍[1,*]
[1]포항공과대학교 [2]영남대학교병원 [3]성균관대학교

Multiparametric photoacoustic analysis of intraplaque hemorrhage in carotids

Minsik Sung[1], Sunghun Nam[1], Sun Oh Kim[2], Jong-il Park[2], Dong Young Jeong[1], Moongyu Han[1], Byullee Park[3,*], Ung Kim[2,*], Chulhong Kim[1,*]
[1]Pohang University of Science and Technology [2]Yeungnam University Medical Center [3]Sungkyunkwan University
*Corresponding authors: byullee@skku.edu, woongwa@yu.ac.kr, chulhong@postech.edu

Abstract

Early identification of vulnerable carotid plaques—which are strongly linked to stroke risk—remains a significant clinical challenge. Although magnetic resonance imaging (MRI) can noninvasively reveal plaque morphology and key indicators such as intraplaque hemorrhage (IPH), its high cost and lengthy scan times limit widespread early use. To overcome these limitations, we introduce a multiparametric photoacoustic and ultrasound (PA/US) approach, where PA imaging detects IPH and US imaging assesses plaque morphology. Among 171 carotid arteries from 120 patients, PA identified IPH in 51 cases. Carotids with IPH showed significantly greater ultrasound-measured stenosis severity ($P < 0.001$) compared to those without IPH, and PA-determined IPH stage correlated positively with stenosis severity ($P = 0.003$). Of the total carotids, 36 also underwent MRI for validation. Using MRI as the reference, the combined PA/US method achieved a sensitivity of 89% and specificity of 95% for identifying vulnerable plaques. PA analysis yielded results comparable to MRI in detecting IPH, and US analysis matched MRI performance in evaluating carotid morphology, demonstrating the potential of PA/US imaging as a practical and efficient tool for assessing plaque vulnerability.

1. 연구 배경

경동맥의 플라크 내출혈(Intraplaque Hemorrhage, IPH)과 협착 정도, 플라크 두께 등의 형태학적 특징은 파열되기 쉬운 불안정한 플라크를 나타내는 중요한 지표로 알려져 있으며, 이러한 플라크는 허혈성 뇌졸중과 같은 심혈관 질환을 유발할 수 있다.

병리학적 연구 결과에 따르면, IPH의 메트헤모글로빈은 신생혈관형성을 유도하고, 섬유성 캡의 파열을 유발할 수 있으므로 메트헤모글로빈의 농도를 측정하는 것은 질병 진단에 중요하다.

최근 연구에서, 불안정한 경동맥 플라크를 비침습적으로 진단하는 표준은 자기공명영상(MRI)으로 간주되어 왔다. MRI는 IPH와 경동맥의 형태학적 구조를 모두 파악할 수 있기 때문이다. 그러나 MRI는 긴 검사 시간, 조영제 사용, 높은 비용, 대형 장비 인프라, 그리고 심박조율기나 제세동기를 장착한 환자에게 제한된 적용 등 여러 한계가 있다. 이러한 제약으로 인해 일부 환자들은 불안정한 플라크를 조기에 진단받지 못하고 있다. 따라서 IPH의 조기 진단 및 단계 평가와 경동맥 형태학적 구조 시각화를 동시에 수행할 수 있는 새로운 선별용 진단 도구의 개발이 필요하다.

MRI의 대안으로서, 최근 연구자들은 실시간(real-time)이며 비용 효율적인 다중 매개변수 광음향(photoacoustic, PA) 및 초음파(ultrasound, US) 영상을 활용하고 있다.

PA 영상은 IPH 내 메트헤모글로빈과 디옥시헤모글로빈에서 유래한 레이저 유도 음향파(laser-induced acoustic waves)를 구분함으로써 IPH를 탐지하고 그 단계를 평가할 수 있다. 한편, US 영상은 협착 정도, 석회화, 플라크 두께, 길이, 개수, 내중막 두께(intima-media thickness) 등 불안정한 플라크의 형태학적 특성을 포착한다.

결과적으로, 다중 매개변수 PA/US 분석은 MRI와 유사하게 불안정한 경동맥 플라크 진단에 필요한 포괄적인 정보를 짧은 검사시간과 낮은 비용, 심박조율기나 제세동기의 장착여부와 무관하게 실시간으로 제공할 수 있다.

2.연구 방법

우리는 PA 영상을 이용하여 플라크 내에서 IPH를 탐지하기 위해 PA_{mean}과 PA_{IPH_area}를 측정하고, IPH의 단계를 평가하기 위해 PA_{PCmet}을 측정하는 다중 매개변수 PA 분석을 수행하였다.

PA_{mean} 계산을 위해, 메트헤모글로빈(methemoglobin)과 디옥시헤모글로빈(deoxyhemoglobin)의 등흡수(isosbestic) 파장인 756 nm와 796 nm에서 획득한 PA 신호를 평균내어, IPH 내 총 헤모글로빈 농도를 반영하였다.

초음파(US) 영상을 기반으로 플라크를 수동 분할(segmentation)한 뒤, 분할된 영역 내에서 PA_{mean}과 PA_{IPH_area}를 계산하였다. IPH의 PA_{PCmet}을 정량화하기 위해, IPH의 주요 구성 성분인 메트헤모글로빈과 디옥시헤모글로빈의 고유한 흡수 스펙트럼을 이용하여 스펙트럼 언믹싱(spectral unmixing)을 수행하였다.

Otsu의 임계값 분할법(Otsu's thresholding method)을 이용하여 PA_{mean} 임계값을 기준으로 IPH 영역을 구분하고, 해당 영역의 PA_{IPH_area}를 측정하였으며, 그 영역 내의 PA_{PCmet}을 정량화하였다. 이후, PA_{mean}과 PA_{IPH_area} 간의 관계를 시각적으로 표현하였다.

수집된 데이터를 PA_{mean}과 PA_{IPH_area} 값에 기반하여 IPH 존재 여부(존재/부재)에 따라 계층적 군집화(hierarchical clustering) 하였다.

이 군집화 결과를 바탕으로, 서포트 벡터 머신(Suppoert Vector Machine, SVM)을 이용하여 각 PA 매개변수에 대한 최적의 IPH 탐지 기준을 도출하였다.

해당 기준에 따라 PA_{mean}과 PA_{IPH_area}의 구체적인 절단값(cutoff value)을 설정하여 IPH 존재 여부를 효과적으로 구분할 수 있도록 하였다.

메트헤모글로빈과 디옥시헤모글로빈은 756 nm 및 796 nm 파장에서 지방(lipid), 콜라겐(collagen), 물(water) 등 다른

플라크 구성 성분보다 훨씬 높은 광흡수를 나타내므로, 이들이 스펙트럼 언믹싱의 주요 성분임을 확인하였고, 이를 통해 생체 내(in vivo) PA_{PCmet} 측정이 가능함을 입증하였다.

3. 연구 결과

PA/US 영상의 진단 성능을 검증하기 위해, 동일 부위의 36 개 경동맥에서 PA/US 영상과 MRI 결과를 비교하였다 (그림 1). PA/US 영상에서, 환자 #114 는 4.8 mm 두께의 플라크 크기와 IPH 가 존재하지 않는 결과를 보여주고, MRI 영상에서 5.3 mm 두께의 플라크 크기와 IPH 가 존재하지 않는 결과를 보여준다. 환자 #40 의 경우, PA/US 영상에서 4.6 mm 두께의 플라크 크기를 보여주고, 22.2 mm^2 넓이의 IPH 가 존재하는 결과를 보여준다. MRI 영상에서 5 mm 두께의 플라크 크기를 보여주고, 20.4 mm^2 넓이의 IPH 가 존재하는 결과를 보여준다.

이런 결과를 통해 PA/US 영상을 통해 분석한 플라크의 형태학적 특성과 IPH 의 존재 여부 및 IPH 의 넓이가 MRI 영상을 통해 분석한 결과와 유사한 것을 확인할 수 있었다.

4. Acknowledgements

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science and ICT (MSIT) (2023R1A2C3004880, RS-2023-00266110), the Basic Science Research Program through the Ministry of Education (2020R1A6A1A03047902), BK21 FOUR program, the Glocal 30 University Project, and the Korea Medical Device Development Fund grant funded by the Korea Government (the Ministry of Science and ICT, the Ministry of Trade, Industry and Energy, the Ministry of Health & Welfare, the Ministry of Food and Drug Safety) (1711137875, RS-2020-KD000008). This research was supported by a grant of the Korea Health Technology R&D Project through the Korea Health Industry Development Institute (KHIDI), funded by the Ministry of Health & Welfare, Republic of Korea (RS-2024-00512879).

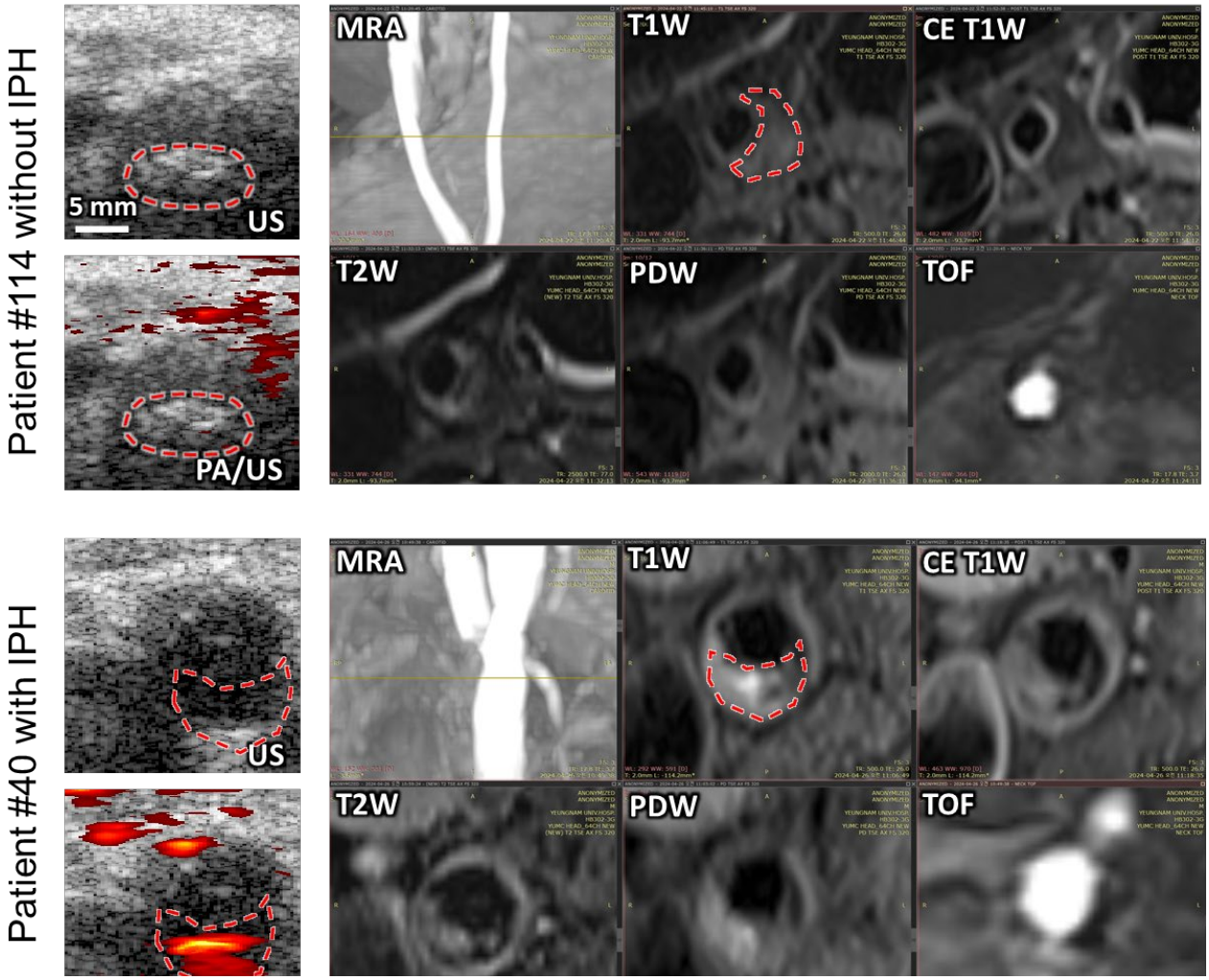


그림 1 검증을 위한 경동맥의 PA/US 융합 영상과 다중 대비 MRI 영상 대표 사례.

초음파(US) 영상은 형태학적 특성을 보여주며, PA/US 영상은 IPH 탐지 결과를 나타냄. 다중 대비 MRI 영상은 형태학적 특성과 IPH 탐지 결과를 모두 보여줌. 점선의 빨간색 선은 분할된 플라크(plaque)의 위치를 나타냄.

Poster-176

혼합치열기 두부 방사선 영상 랜드마크의 정밀 검출

문현[1], 이세나[3], 주희돈[2], 정주령[2*], 양세정[1,3*]
연세대학교 원주의과대학 의료정보통계학과[1], 연세대학교 치과대학 강남세브란스병원 교정과[2],
연세대학교 원주의과대학 정밀의학과[3]

Precise detection of landmarks in cephalometric images of mixed dentition

Hyun Mun[1], Sena Lee[3], Huidon Ju[2], Juryeong Jeong[2*], Sejung Yang[1,3*]
Department of Medical Informatics and Biostatistics, Yonsei University Wonju College of Medicine, Wonju, Korea[1],
Department of Orthodontics, Gangnam Severance Hospital,
Yonsei University College of Dentistry, 211 Eonju-ro, Gangnam-gu, Seoul-si, Republic of Korea[2],
Department of Precision Medicine, Yonsei University Wonju College of Medicine, Wonju, Korea[3],
bluesky9707@naver.com, syang@yonsei.ac.kr

Abstract

Skeletal and dental landmarks in cephalometric radiographs are key indicators for orthodontic and growth-related analyses, and their accurate identification is essential for reliably evaluating growth stages and planning effective treatment. Most existing datasets are based on adult subjects, limiting their applicability to patients in mixed dentition stages. In this study, we used a deep learning–based model to automatically analyze cephalometric images from growing patients, achieving over 95% accuracy for most landmarks, clearly demonstrating its potential for practical clinical application.

1. 연구 배경

두부방사선영상(cephalogram)에서의 골격 및 치과적 주요 해부학적 점(landmark)은 다양한 교정학적 및 성장 분석의 핵심 지표로 활용된다. 특히 성장 예측 연구에서는 랜드마크 위치의 정확성이 환자의 성장 단계 평가와 치료 계획 수립의 신뢰성을 높이는 데 필수적이다. 예를 들어, 성장기 악교정 환자의 경우, 두개골 구조의 정밀한 분석이 향후 치료 전략 결정과 예후 예측에 중요한 역할을 한다[1].

기존에는 숙련된 전문가가 랜드마크를 수동으로 지정해 왔다. 그러나 이 과정은 많은 시간이 소요될 뿐 아니라, 판독자 간 편차로 인한 일관성 저하 문제가 존재한다. 또한 데이터 수집 시, 장기간 데이터 확보가 어려워 일반적으로 성인 데이터를 기반으로 연구가 진행되는 경우가 많아, 혼합치열기인 성장기 환자에게는 적절히 적용되기 어렵다는 한계가 있다. 다만 최근에는 혼합치열기 환자 데이터를 활용하는 연구도 점차 증가하고 있으며, 본 연구에서도 혼합치열기 환자 데이터를 포함하여 분석을 진행하였다.

따라서 본 연구에서는 딥러닝 기반의 랜드마크 검출 모델을 활용하여, 혼합치열기와 영구치열기를 모두 포함하는 성장기 환자의 두부방사선영상을 자동으로 분석하였다. 예측된 랜드마크 좌표와 실제 좌표를 비교하여 검출 정확도를 평가하였으며, 이러한 자동화된 분석을 통해 랜드마크 검출의 효율성과 재현성을 향상시키고, 임상 현장에서의 활용 가능성을 검증하고자 한다.

2. 연구 방법

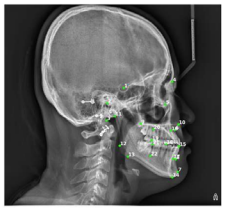
2-1) 데이터셋

모든 데이터는 강남세브란스병원 교정과에서 촬영된 두부방사선영상을 획득하여 후향적 연구로 진행되었고, 후향적 심의(IRB No. 2023-1249-003)를 받았다. 실험에는 총 1,714장의 영상이 사용되었고, 이는 130명의 환자로 구성되어 있다. 표 1에서 보듯이, 환자마다 병원 방문 시점이 상이하여 성장 단계별로 촬영된 다시점(longitudinal) 데이터를 포함하고, 이는 혼합치열기와 영구치열기를 모두 포함한다. 전체 데이터는 환자별로 8:1:1 비율에 맞게 데이터를 나누어 학습, 검증, 테스트에 각각 사용하였다.

정답(ground truth)으로 사용한 랜드마크는 V-Ceph 8.0의 Auto Tracing 기능을 이용해 자동 추출하였다. V-Ceph 8.0은 악교정 수술 및 치과 교정 치료의 결과 예측을 지원하는 소프트웨어로, 연조직과 경조직을 포함하여 기본 110개의 랜드마크를 추출할 수 있다[2]. 본 연구에서는 이 중 경조직 관련 22개 랜드마크만을 선택하여 실험에 사용하였다. 그림 1은 주요 경조직 랜드마크의 위치와 이름을 나타낸다.

나이	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
환자1						●	●	●	●		●		
환자2		●	●	●	●	●	●	●		●		●	●
환자3			●	●	●	●	●		●		●		
환자4	●		●	●	●	●	●	●					

표 1. 데이터셋 내 환자의 촬영 시점 예시



L1	Sella	L12	Ramus down
L2	Porion	L13	Corpus left
L3	Basion	L14	Menton
L4	Nasion	L15	Maxilla 1 crown
L5	Orbitale	L16	Maxilla 1 root
L6	A-Point	L17	Mandible 1 root
L7	Pogonion	L18	Occlusal plane point
L8	B-point	L19	Maxilla 6 distal
L9	Posterior Nasal Spine	L20	Maxilla 6 root
L10	Anterior Nasal Spine	L21	Mandible 6 distal
L11	Articulare	L22	Mandible 6 root

그림 1. 두부방사선영상에서의 경조직 랜드마크 위치

2-2) 모델 구조

본 연구에 사용된 모델은 그림 2에서 제시되어 있다. 최신 랜드마크 검출 모델의 백본-헤드 구조를 기반으로, 두부방사선영상에서 해부학적 랜드마크 위치를 정밀하게 예측하는 파이프라인을 구현하였다[3]. 입력 영상은 HRNet, ResNet 또는 Vision Transformer와 같은 네트워크를 통해 특징을 추출한 뒤, 여러 스케일의 특징 맵으로 인코딩한다. 인코딩된 저해상도 특징 맵을 사용하여 고해상도의 예측 히트맵을 생성하였으며, 훈련 파라미터가 없는 인코더 모듈을 통해 랜드마크 어노테이션을 가우시안 분포 형태의 정답 히트맵으로 변환한다. 예측된 히트맵과의 MSE 손실을

계산해 모델을 학습하고, 예측 히트맵에서 가장 높은 값을 가지는 픽셀의 위치를 최종 랜드마크 좌표로 산출하였다.

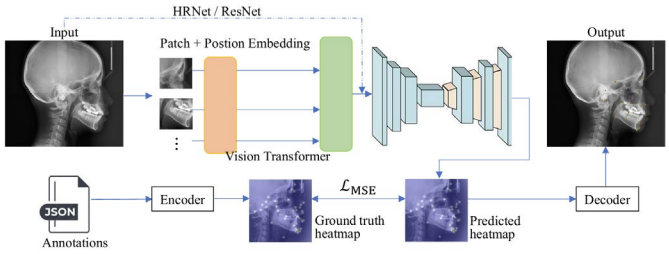


그림 2. 랜드마크 검출 모델 구조

3. 연구 결과 및 고찰

3-1) 랜드마크 검출 결과

표 2는 테스트셋에 대한 예측 랜드마크의 평균 정확도를 각 랜드마크의 평균 거리 오차와 SDR(Success Detection Rate) 지표로 나타낸 것이다. SDR은 예측된 랜드마크가 실제 좌표로부터 특정 임계값 거리(mm) 이내에 위치할 확률을 나타낸다. SDR 지표 뒤의 숫자는 해당 임계값 거리를 의미한다. 일반적으로 2mm 이내 정확도는 임상적으로 중요한 기준으로 인정되고[4], 일부 연구에서는 4mm 이내 오차도 허용 가능한 범위로 언급하기도 한다.

실험 결과, 22개의 경조직 랜드마크에 대한 평균 거리 오차는 약 0.56 정도로 매우 낮게 측정되었으며 SDR@2 확률도 98% 이상으로 높은 검출 정확도를 보였다.

또한 표 1에서 보듯 환자마다 촬영 시점이 상이하므로, 환자별 편차를 고려했을 때 가장 낮은 환자의 경우에서도 SDR@2가 94% 이상의 정확도를 보여 대부분의 환자에서 안정적인 랜드마크 검출 성능을 확인할 수 있었다.

Mean	SDR@2	SDR@2.5	SDR@3	SDR@4
0.558(1.334)	0.980	0.983	0.985	0.990

표 2. 테스트셋에서의 예측 랜드마크 평균 정확도

그림 3는 테스트셋에서 예측된 랜드마크의 정성적 결과를 보여준다. 초록색 점은 정답(Ground Truth), 빨간색 점은 모델이 예측한 위치(Prediction)를 의미한다. 대부분의 랜드마크에서 두 점이 거의 일치함을 확인할 수 있다.

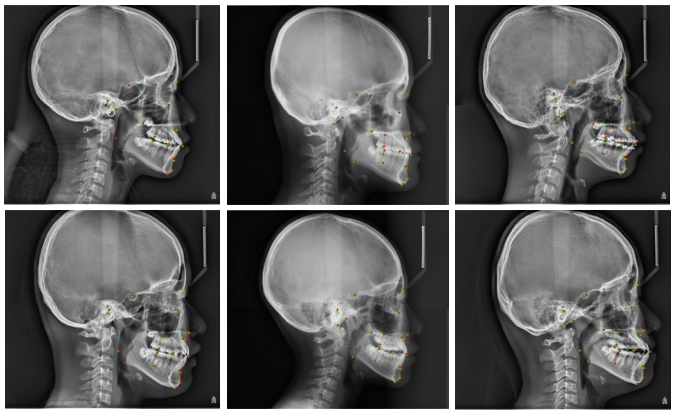


그림 3. 테스트셋에서의 정성적 결과
(초록색 점: Ground Truth, 빨간색 점: Prediction)

3-2) 추가 실험

앞선 실험은 개별 랜드마크의 위치 정확도에 초점을 맞췄지만, 실제 임상에서는 랜드마크의 상대적 관계가 중요하다. 따라서 복합 지표인 ANB 각도를 이용해 모델의 예측 결과를 추가 검증하였다. ANB는 SNA와 SNB의 각도 차이(ANB = ∠SNA − ∠SNB)로 정의되며, 악교정 치료 계획 수립 시 해당 각도값에 따라 골격형 클래스 1,2,3를 결정하는 주요 지표로 활용된다[5]. 여기서 S, N, A, B는 각각 랜드마크 이름인 Sella, Nasion, A-point, B-point이다.

예측 랜드마크를 이용해 계산된 클래스와 정답 클래스를 비교하여 분류 일치도를 평가하였다. 그 결과, 테스트셋 178장 중 25장을 제외한 모든 영상에서 클래스가 일치하였다. ANB 각도는 랜드마크 위치의 미세한 변화에도 큰 차이를 보일 수 있는 민감한 지표임을 고려할 때, 이는 모델의 예측 정확도가 매우 높다는 것을 의미한다.

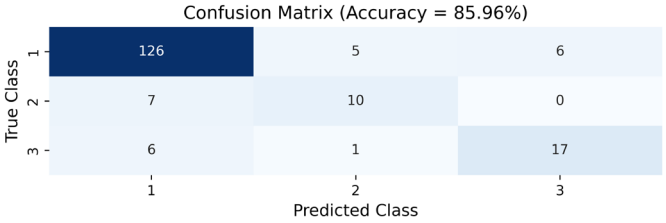


그림 4. 테스트셋에서의 예측 랜드마크 평균 정확도

3-3) 고찰

본 연구에서의 딥러닝 기반 랜드마크 검출 모델은 혼합치열기 데이터를 포함하여 다양한 성장 단계의 영상을 학습에 활용함으로써, 분석 시간을 단축하고, 임상적으로 유의한 형태 분석에서도 안정적인 재현성을 확인하였다. 향후 다기관 데이터셋으로 확장한다면, 모델의 일반화 성능과 임상 적용 가능성이 더욱 향상될 것으로 기대된다.

4. Acknowledgements

This work was supported by Align Technology, Inc and grant RS-2024-00350077 from the National Research Foundation of Korea grant funded by the Korean government's Ministry of Science and Information and Communication Technology.

본 과제(결과물)는 2025년도 교육부 및 강원특별자치도의 재원으로 강원RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과입니다.(2025-RISE-10-006)

This research received funding from the Bio & Medical Technology Development Program of the National Research Foundation (NRF), supported by the Korean government (MSIT) (Grant No. RS-2024-00440802).

5.참고 문헌

[1] H. Wu, et al., "Cephalometric Landmark Detection across Ages with Prototypical Network," arXiv:2406.12577, 2024.

[2] S. Han, et al., "Accuracy of posteroanterior cephalogram landmarks and measurements identification using a cascaded convolutional neural network algorithm: A multicenter study," Korean Journal of Orthodontics, vol. 54, no. 1, pp. 48–58, 2024.

[3] D. Guo, et al., "Towards better cephalometric landmark detection with diffusion data generation," *IEEE Transactions on Medical Imaging*, vol. 44, no. 7, Apr. 2025.

[4] Y. Shimamura, et al., "Accuracy of cephalometric landmark and cephalometric analysis from lateral facial photograph by using CNN-based algorithm," *Scientific Reports*, vol. 14, Art. no. 31089, 2024.

[5] A. Marya, et al., "Development and validation of predictive models for skeletal malocclusion classification using airway and cephalometric landmarks," BMC Oral Health, vol. 24, Art. no. 1064, 2024.

Poster-177

음향 현미경에서의 합성개구–코히어런스 융합 빔포밍 기법 성능 평가

송덕미[1] , 최호진[2] , 이승엽[3], 황재윤[3], 김지훈[1,2*]

[1]강남대학교 시스템및반도체융합공학과, [2]강남대학교 전자반도체공학부 전자공학전공

[3]대구경북과학기술원 전기전자컴퓨터공학과

Evaluation of Hybrid Synthetic Aperture and Coherence-Enhanced Beamforming Methods In Scanning Acoustic Microscopy

Deokmi Song[1], Hojin Choi[2], Seungyeop Lee[3], Jae Youn Hwang[3], Jihun Kim[1,2*]

[1]Department of Systems and Semiconductor Convergence Engineering, Kangnam University, S. Korea,

[2]Division of Electronic and Semiconductor Engineering, Major in Electronic Engineering, Kangnam University, S.Korea

[3]Department of Electrical and Electronic Computer Engineering, DGIST, S. Korea

* jihunk@kangnam.ac.kr

Abstract

Scanning Acoustic Microscopy (SAM) is a valuable tool for tissue characterization and pathological analysis but suffers from rapid resolution degradation outside the focal region. This study compares three beamforming algorithms—Virtual Source Synthetic Aperture (VSSA), p-th root Delay-and-Sum (p-DAS), and Delay-Multiply-and-Sum (DMAS)—using identical 2D SAM data. Coherence-based weighting (CF and VCF) was incorporated to suppress incoherent noise and enhance contrast. Simulations (40 MHz) and experiments (45 MHz single-element transducer) were performed under identical conditions. All methods improved lateral resolution and contrast over conventional B-mode imaging. At a depth of 3 mm, FWHM decreased from 464 μm to 99.6 μm (VSSA-CF-VCF), 65.2 μm (p-DAS-CF-VCF), and 118.4 μm (DMAS-VCF). VSSA-CF-VCF showed the fastest processing (0.286 s), p-DAS-CF-VCF achieved the highest resolution, and DMAS-VCF offered a balanced trade-off between quality and speed, suggesting algorithm suitability depending on real-time or high-resolution applications.

1. 연구 배경

초음파 영상 기술은 생체 조직의 구조적 특성과 병변을 비침습적으로 관찰할 수 있는 대표적인 의료 영상 기법으로 널리 활용되고 있다. 특히 3차원 주사 음향 현미경(Scanning Acoustic Microscopy, SAM)은 수십 MHz 이상의 고주파 초음파를 이용하여 조직 특성평가 및 병리학적분석에 유용하다[1].

본 연구에서 사용한 단일 고주파 집속형 트랜스듀서는 초점 영역에서 매우 높은 측방향 해상도를 제공하지만, 초점 영역을 벗어나면 공간 해상도가 급격히 저하되는 한계를 가진다. 이러한 문제를 해결하기 위해 다양한 빔포밍(beamforming) 기법이 제안되어 왔으며, 영상 분해능 및 신호 대 잡음비(SNR) 향상을 목표로 발전해왔다. 그러나 기존 연구들은 서로 다른 데이터셋, 하드웨어, 평가 지표를 사용하여 수행되었기 때문에 알고리즘 간의 성능을 직접적으로 비교하기 어렵다[2].

이에 본 연구에서는 동일한 2차원 SAM 데이터셋을 대상으로 세가지 대표적인 빔포밍 알고리즘—Virtual Source Synthetic Aperture (VSSA), p-th root Delay-and-Sum (p-DAS), 그리고 Delay-Multiply-and-Sum(DMAS)—을 적용하여 영상 품질 및 계산 효율성을 비교하였다.

(1) Virtual Source Synthetic Aperture (VSSA)

VSSA는 트랜스듀서 초점 부근에 가상의 점광원을 설정하여 합성 개구 효과를 모사하는 방식으로, 초점 이탈 영역에서의 화질 개선과 심도 확장에 효과적이다[3]. 본 연구에서는 기존 VSSA 구조에 CF(Coherence Factor)와 VCF(Vector Coherence Factor)를 추가로 결합하여 incoherent 위상 성분 억제를 강화하였다.

(2) p-th root DAS (p-DAS)

p-DAS는 입력 신호에 p-th root 변환을 적용한 뒤 합산하고, 다시 p-th power를 수행하는 비선형 구조로서 side-lobe 억제와 대비 개선을 목표로 한다[4]. 본 연구에서는 p=2를 적용하였으며, CF와 VCF를 동시에 적용하였다..

(3) Delay-Multiply-and-Sum (DMAS)

DMAS는 수신 신호 간의 곱 연산을 통해 채널 간 상관성을 비선형적으로 강화하는 방식으로, 위상이 일치하는 성분은 강조되고 불일치하는 성분은 억제되는 특징을 가진다. 이를 통해 신호 집중도와 콘트라스트가 향상되어 기존 DAS보다 우수한 영상 품질을 제공한다. [5]. 곱셈 과정에서 생성되는 저주파 성분을 억제하기 위해 대역통과 필터를 결합하였다.

DMAS는 구조적으로 coherence 강화 효과가 있어 CF 적용 시 유용 신호까지 과도 억제될 수 있다는 기존 연구[6]를 고려하여, 본 연구에서는 VCF만 결합하였다.

추가적으로 수신 채널 간 진폭 기반의 일치도를 반영하여 incoherent 잡음을 억제하는 가중치로 작용하는 CF (Coherence Factor)와 위상 기반 일치도를 이용하여 위상 불일치로 인한 잔여 성분을 효과적으로 억제하는 VCF(Vector Coherence Factor)을 사용하여[7]. 복합 가중 방식을 통해, 단일 트랜스듀서 기반 초음파 영상에서의 심도 확장 및 콘트라스트 향상을 동시에 달성하고자 하였다.

그림 1. System Architecture of scanning acoustic microscopy

2.연구 방법

본 연구에서는 실험과 시뮬레이션 환경에서 검증을 진행하였는데 시뮬레이션은 k-Wave를 이용해 중심 주파수 40 MHz, 격자 크기 38.5 μm, 음속 1540 m/s의 조건에서 수행하였다. 모사 대상은 각각 직경 0.5, 1.0, 0.7 mm의 Cyst 구조로 설정하여 세가지 빔포밍 알고리즘(VSSA, p-DAS, DMAS)을 동일한 조건에서 적용하였다.

실험은 그림1과 같이 중심 주파수 45 MHz의 고주파 집속형 단일 소자 트랜스듀서를 이용하여 3차원 스캐닝 음향 현미경(SAM) 시스템을 구성하였다. 트랜스듀서는 3축 모터 스테이지에 장착되었으며, Pulser/Receiver와 DAQ를 통해 PC로 신호를 수집하였다. 획득된 신호는 MATLAB 환경에서 지연 보상, Hilbert 변환, 로그 압축(60 dB)을 거쳐 영상화하였다.

또한, 실험에서는 직경 50 μm의 금속 와이어를 대각선 방향으로 4개 배치하여 초점 영역과 초점 이탈 영역을 동시에 평가할 수 있도록 설계하였다. 스캔 스텝 크기는 20 μm로 설정하였으며, 각 알고리즘의 영상화 성능을 비교하였다.

3. 연구 결과

그림 2(a)–(d)는 각 빔포밍 알고리즘(VSSA-CF-VCF, p-DAS-CF-VCF, DMAS-VCF)으로 재구성한 이미지를 나타낸다. 세 기법 모두 원시 B-mode 영상에 비해 주엽 폭(FWHM)이 뚜렷하게 감소였다. 그림3은 z축 깊이 3 mm에서 측정한 빔프로파일이다. 깊이 3mm 부근 FWHM은 원시 영상의 464 μm에서 VSSA-CF- VCF 99.6 μm(78.5 % 개선), p-DAS-CF-VCF 65.2 μm(85.9 % 개선), DMAS-VCF 118.4 μm(74.5 % 개선)로 감소하였다. 이러한 결과는 세 방법 모두 횡방향 해상도 및 부엽 억제 성능이 향상되었음을 보여준다.

연산 시간 비교 결과, VSSA-CF-VCF 가 0.286 s로 가장 빠르게 처리되었고, DMAS- VCF는 0.409 s, p-DAS-CF-VCF 는 0.662 s 순으로 나타났다. DMAS- VCF 는 수신 신호 간의 곱

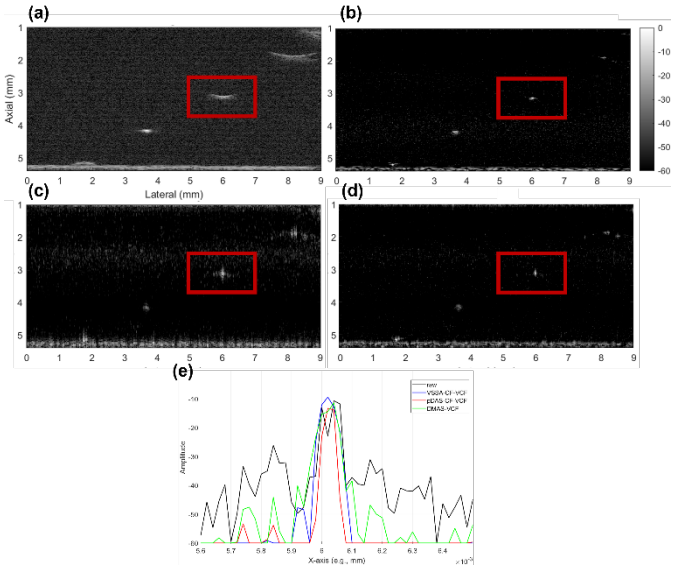
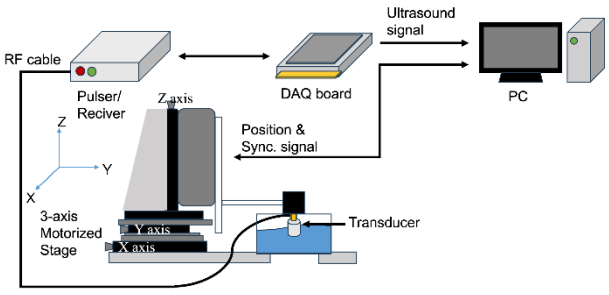


그림 2. Wire Phantom에 대한 UBM 이미징 결과.

(a) RF 신호 기반 B-mode 이미지, (b) VSSA-CF-PLV, (c) DMAS-PLV, (d) pDAS-CF-PLV 기법 적용 후 B-mode 이미지, (e) 3 mm 깊이 wire target 부근(붉은 사각형 내)에서 방향신호강도 프로파일

연산을 통해 상관성을 강화하면서도 중심 주파수 근방의



유효 성분만을 활용하여 계산량을 줄였기 때문에, 해상도와 속도 간의 균형을 제공하는 것으로 확인되었다.

또한, Cyst 시뮬레이션 결과에서는 모든 빔포밍 기법에서 배경 대비 병변 영역의 신호 대 잡음비(SNR)가 향상되었다.

요약하면, p-DAS-CF-VCF는 가장 높은 횡방향 해상도(65.2 μm), VSSA-CF-VCF는 가장 빠른 처리 속도(0.286 s)를 나타냈다. DMAS-VCF는 해상도(118.4 μm)와 속도를 함께 확보하면서 연산 효율 측면에서 균형 잡힌 결과를 보였다.

따라서 실시간성이 중요한 NDT 응용에서는 VSSA-CF-VCF, 고해상도 조직 분석이나 결함 검출에서는 p-DAS-CF-VCF, 연산 비용과 화질의 균형이 필요한 경우에는 DMAS-VCF 가 각각 적합할 것으로 판단된다.

4. Acknowledgements

이 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. RS-2025-00556581)과 신업통상자원부의 재원으로 한국산업기술평가원의 지원 (No. RS-2024-00419246) 을 받아 수행하였음.

5.참고 문헌

[1] P. Anastasiadis, P. V. Zinin, “High-Frequency Time-Resolved Scanning Acoustic Microscopy for Biomedical Applications,” The Open Neuroimaging Journal, 12, p.69–85, 2018

[2] R. Prakash, R. Manwar, K. Avanaki, “Evaluation of 10 Current Image Reconstruction Algorithms for Linear-Array Photoacoustic Imaging”, Journal of Biophotonics, 17(3), e202300117, 2024.

[3] G. Matrone, A. S. Savoia, G. Caliano, G. Magenes, “The Delay Multiply and Sum Beamforming Algorithm in Ultrasound B-Mode Medical Imaging,” IEEE Transactions on Medical Imaging, 34(4), 940–949, 2015.

[4] M. Yu, Y. Li, T. Ma, K. K. Shung, Q. Zhou, “Intravascular Ultrasound Imaging With Virtual Source Synthetic Aperture Focusing and Coherence Factor Weighting,” IEEE Transactions on Medical Imaging, 36(10), 2171–2178, 2017

[5] M. Polichetti, F. Varray, J.-C. Béra, C. Cachard, B. Nicolas, “A Nonlinear Beamformer Based on p-th Root Compression—Application to Plane Wave Ultrasound Imaging,” Applied Sciences, 8(4), 599, 2018.

[6] G. Matrone, A. S. Savoia, G. Caliano, G. Magenes, “Depth-of-Field Enhancement in Filtered-Delay Multiply And Sum Beamformed Images Using Synthetic Aperture Focusing,” Ultrasonics, 75, 216–225, 2017.

[7] Cruza, J. F., Camacho, J., and Fritsch, C., “Plane-Wave Phase-Coherence Imaging for NDE,” Ultrasonics, 116, 31-37, 106501, 2021.

On-Device Automated Patient Tracking Camera Module 개발

손상원[1,+], 임민혁[1,*], 주윤하[2,*]

[1]울산과학기술원 의과학대학원, [2]서울대학교병원

+제1저자 (tin09korea@unist.ac.kr), *교신저자 (limmh@unist.ac.kr, spauter@snu.ac.kr)

Development of Automated Patient Detection Model

Sangwon Son[1+], Minhyuk Lim[1,*], YoonHa Joo[2,*]

1Graduate School of Health Science and Technology, Ulsan National Institute of Science and Technology
[2] Biomedical Research Institute, Seoul National University Hospital, Jongno, Seoul 03080, South Korea,
Laboratory of Emergency Medical Services, Seoul National University Hospital Biomedical Research Institute,
Jongno-gu, Seoul 03080, South Korea
+ first Author (tin09korea@unist.ac.kr), Corresponding authors (limmh@unist.ac.kr, spauter@snu.ac.kr)

Abstract

의료현장에 요구되는 의료 기록 의무와 달리, 많은 의료 기관은 인력 부족과 과도한 업무 부담으로 인한 문제를 호소하고 있다. 본 연구를 이러한 한계를 해결할 수 있도록, 별도의 조작 없이 환자를 추적하며 자동으로 촬영을 수행할 수 있는 On-Device Automated Patient Tracking Camera Module을 개발하고자 한다. 본 연구는 초기 연구 단계로, 영상 내 피촬영자 촬영 여부 자동 분석을 목표로 한다. 본 연구의 목적은 새로운 기기를 통해 의료진의 업무 부담 경감 및 의무 기록 자동 생성 수행의 기술적 기반을 마련하고자 함에 있다.

1. Introduction

대한민국 의료법 제 22조에 따르면, 의료진은 반드시 의료행위에 관한 사항과 의견을 상세히 기록하여야 한다 [1]. 그러나 많은 국가의 의료 현장은 인력난 및 과도한 업무량으로 인해 의료진의 적극적인 의무기록 작성에 한계가 있다. 이러한 의료진에 요구되는 의무와 현장 사이 괴리는 기록 품질 저하로 이어져 양질의 정보 저장 프로세스 형성 부제로 이어진다[4, 5]..

이와 같은 문제를 해결하기 위해 제시된 방법 중 하나는 카메라와 마이크를 활용해 의료 행위를 실시간으로 녹화하고 이를 기록에 참고하는 것이다. 소형 연산 장치와 이미지 처리 AI를 결합하여 다양한 의료 현장에서 환자를 촬영하기 위한 시도가 있어왔다. 환자의 병실에 소형 연산장치와 카메라를 설치하여 환자의 낙상 사고를 예측하고자 한 시도는 높은 수준의 환자 낙상 여부 판별 능력과 영상 내 환자/의료진 구분 성능을 보여주었다 [7].

그러나 기존 방식은 분석을 위해 별도의 학습 과정이 필요하였으며, 피촬영자의 이동을 추적하지 못하는 등, 보편적 의료 환경에서 활용하기에 한계를 보였다[7, 8].

본 연구의 궁극적인 목표는 소형 연산 장치를 활용하여 환자를 객체 탐지(object detection)하고, 해당 정보를 바탕으로 모터를 제어하여 카메라가 환자를 자동으로 추적·촬영할 수 있는 장비를 개발하는 것이다. 이에 본 연구에서는 초기 단계로서 일반인 촬영 영상에서 피촬영자 촬영 여부 자동 판단 알고리즘을 개발하였고, 그 성능을 평가하고자 한다.

2. Methodology

본 연구는 환자의 위치를 분석하는 Patient Tracking Model 개발 단계이다. Patient Tracking Model은 YOLOv11-pose 모델을 기반하여 설계되었다. YOLOv11-pose 모델을 통해 피촬영대상의 중요 부위 촬영 여부와, 화면 중앙으로부터 중요 부위 중심의 거리를 측정한다(fig 1).

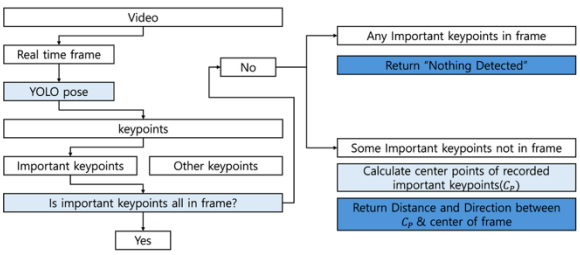


Figure 1 Patient Detection Model

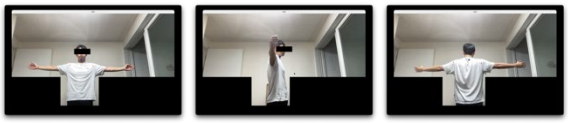


Figure 2 Patient Detection Model Results

Patient Detection Model의 분석 능력을 확인하기 위해 2개의 영상으로 실험을 진행하였다. 두 영상 모두 고정된 iPhone 13 pro로 촬영되었으며, 피촬영자가 다양한 방향으로 움직이며 촬영되었다. Test 1은 피촬영자의 측면이, Test 2는 피촬영자의 정면이 주로 보이도록 촬영되었다.

동일한 영상에 대하여 프레임 단위로 촬영 상태를 분석하였으며, 촬영 상태는 아래와 같은 4개로 구분하였다.

-1: 프레임 내 피촬영자 없음,
0: 프레임 내 피촬영자 신체 일부 관찰,
1: 프레임 내 피촬영자 얼굴 관찰,
2: 프레임 내 피촬영자 얼굴 및 온전한 상체 관찰

영상 전체에 대한 프레임 단위 분석을 Patient Detection Model(Model), Gemini 2.5, 저자(Human)이 각각 수행하였고, 그 결과는 fig 3~4에 나타나있다.

3. Results

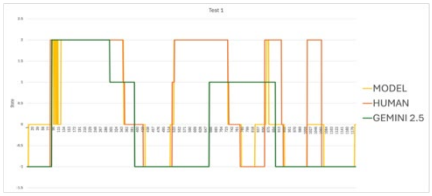


Figure 3. Test 1 Results

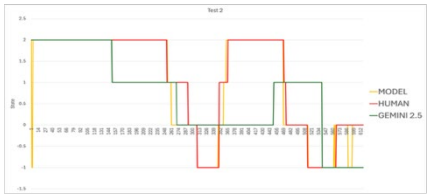


Figure 4. Test 2 Results

Human의 분석 결과와 비교하였을 때 Patient Detection Model은 Task 1에서 84.38%, Task 2에서 84.11%의 일치도를 보였다.

4. Discussion

본 연구는 영상 내 피촬영자 촬영 여부를 자동으로 판별하는 Patient Detection Model을 개발하는 것이 목표이다. 해당 모델은 task1, 2에 대하여 각각 84.38%, 84.11%의 일치도로 높은 피촬영자 촬영 여부 분별 능력을 보였다.

본 연구 결과는 [8~10] 등의 선행 연구와 달리, 기기의 제한 없이 객체 감지가 가능하다. 또한 별도의 fine-tuning 없이 사람을 대상으로 촬영 여부 분석이 가능하며 동일 과제를 수행한 GEMINI 2.5 모델과 유사한 성능(GEMINI 2.5: 84.85%)을 보인 바 있다. 이는 기기 사용이 제한된 의료 현장에서 높은 활용성으로 이어지리라 기대한다. 본 연구진은 향후 환자의 위치에 따라 카메라가 회전하는 On-Device Patient Tracking module 개발 단계를 거쳐 자동 환자 추적 기기 개발을 진행할 예정이다.

5. Conclusion

본 연구진은 피촬영자 촬영 여부를 자동으로 분석하는 Patient Detection Model을 개발하였다. 본 연구진은 Patient Tracking Model의 촬영 여부 및 상대적 위치 자동 분석 능력에 기반하여, 환자의 이동에 따라 자동으로 카메라가 회전하는 On-Device Automated Patient Tracking Camera Module을 개발하고자 한다.

6. Acknowledgments

본 연구는 과학기술정보통신부 한국연구재단 기본연구 (RS-2023-00251482) 및 과학기술정보통신부 정보통신기획평가원 SW 컴퓨팅산업원천기술개발사업 (RS-2024-00444014), 서울대학교병원 융합의학기술원 혁신의료기술 시제품 제작 지원사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

7. Reference

[1] https://www.law.go.kr/법령/의료법/제22조
[2] Rotenstein, L. S., Holmgren, A. J., Horn, D. M., Lipsitz, S., Phillips, R., Gitomer, R., & Bates, D. W. (2023). System-level factors and time spent on electronic health records by primary care physicians. JAMA Network Open, 6(11), e2344713-e2344713.
[3] Berk, S. I. (2020). Time to care: primary care visit duration and value-based healthcare. *The American Journal of Medicine*, *133*(6), 655-656.
[4] Khanam, R., & Hussain, M. (2024). Yolov11: An overview of the key architectural enhancements. *arXiv preprint arXiv:2410.17725*.
[5] Murad, M. H., Vaa Stelling, B. E., West, C. P., Hasan, B., Simha, S., Saadi, S., ... & Wang, Z. (2024). Measuring documentation burden in healthcare. *Journal of general internal medicine*, *39*(14), 2837-2848.
[6] Bjerge, K., Mann, H. M., & Høye, T. T. (2022). Real-time insect tracking and monitoring with computer vision and deep learning. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, *8*(3), 315-327.
[7] Gabriel, P., Rehani, P., Troy, T., Wyatt, T., Choma, M., & Singh, N. (2025). Continuous patient monitoring with AI: real-time analysis of video in hospital care settings. *Frontiers in Imaging*, *4*, 1547166.
[8] Li, J., Liu, K., & Wu, J. (2023). Ego-body pose estimation via ego-head pose estimation. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 17142-17151).

Poster-179

파킨슨병에서 도파민 신경퇴행과 피질 저관류의 시공간적 진행 양상 분석

최영석[1*], 순예은[2*], 박찬욱[2*], 김인영[3], 이필휴[2], 정석종[2†], 이제연[3†]

한양대학교 융합전자공학과[1]

연세대학교 의과대학 신경과학교실[2]

한양대학교 의과대학 의공학교실[3]

Spatiotemporal trajectories of dopaminergic loss and cortical hypoperfusion in Parkinson's disease

Youngseok Choi[1*], Ye Eun Sun[2*], Chan Wook Park[2*], In Young Kim[3], Phil Hyu Lee[2], Seok Jong Chung[2†], Jeyeon Lee[3†]

Department of Electronic Engineering, Hanyang University, Korea[1]

Department of Neurology, College of Medicine, Yonsei University, Korea[2]

Department of Biomedical Engineering, College of Medicine, Hanyang University, Korea[3]

[*]chyoungseok@hanyang.ac.kr, [†]SJCHUNG@yuhs.ac, [†]jeyeonlee@hanyang.ac.kr

Abstract

Parkinson's disease (PD) exhibits marked heterogeneity in its clinical and pathological progression. To disentangle the spatiotemporal relationship between dopaminergic degeneration and cerebral perfusion, we applied the Subtype and Stage Inference (SuStaIn) model to dual-phase ^{18}F-FP-CIT PET imaging. Using data from 708 newly diagnosed patients with PD and 50 healthy controls, we quantified dopamine transporter availability and cortical perfusion across 20 regions of interest. SuStaIn identified three distinct subtypes with unique progression trajectories. Subtype 1 showed initial asymmetric dopamine loss beginning in the posterior putamen followed by cortical hypoperfusion spreading from occipital to frontal regions. Subtype 2 exhibited diffuse, symmetric dopaminergic loss, with subsequent development of widespread cortical hypoperfusion and the highest dementia risk. Subtype 3 demonstrated early parieto-occipital hypoperfusion preceding dopaminergic deficits, with younger onset and relatively preserved cognition. These findings reveal biologically and prognostically distinct PD subtypes, suggesting that spatiotemporal trajectories inferred from dual-phase ^{18}F-FP-CIT PET via SuStaIn modeling may serve as potential progression markers for individualized disease staging and prediction of cognitive outcomes in PD.

1. 연구 배경

파킨슨병(PD)은 운동, 인지, 정서, 자율신경 등 다양한 영역에서 상이한 임상 양상과 진행 속도를 보이는 이질적 신경퇴행성 질환이다[1]. 이는 파킨슨병 예후 예측과 맞춤형 치료 전략 수립을 복잡하게 만드는 핵심 요인으로 작용하여 아형(subtype) 규명의 필요성을 강조한다. 대부분의 파킨슨병 아형 탐색 연구는 질병의 시공간적(spatiotemporal) 진행 양상을 충분히 반영하지 못했다.

이러한 한계를 극복하기 위해 개발된 확률 기반 머신러닝 기법인 SuStaIn은 cross-sectional 데이터로부터 질병의 시공간적 진행 궤적(spatiotemporal trajectory)을 추론할 수 있는 data-driven 모델로, 질병의 아형을 구분함과 동시에 각 아형 내 진행 병기(stage)를 동시에 추정할 수 있다[2].

파킨슨병 환자 대상 기존 SuStaIn 연구들은 대부분 구조적 MRI 기반의 뇌 위축(atrophy) 정보를 활용하였다. Atrophy는 α-synuclein 병리 이후 후기 단계에서 나타나는 변화로, 파킨슨병의 초기 병리적 진행을 포착하기 어렵다[3]. 한편, 대뇌 저관류(cerebral hypoperfusion)와 흑질-선조체 도파민 신경퇴행(nigrostriatal dopaminergic neurodegeneration)은 파킨슨병의 초기 병태생리를 민감하게 반영하는 영상 바이오마커로 보고되고 있다.

이러한 점에서 dual-phase ^{18}F-FP-CIT PET은 도파민 수송체(dopamine transporter, DAT) 결합을 평가하는 late-phase 촬영 과정에서, early-phase 영상 또한 촬영함으로써 대뇌 관류(cerebral perfusion) 정보를 동시에 획득할 수 있어, 흑질-선조체 도파민 신경퇴행과 대뇌 저관류 간의 시공간적 상호작용을 정량적으로 분석할 수 있다.

본 연구에서는 dual-phase ^{18}F-FP-CIT PET 영상을 SuStaIn 모델에 적용하여, 선조체 도파민 신경퇴행과 대뇌 저관류의 시공간적 진행 양상을 기반으로 파킨슨병의 아형 및 병기를 규명하고자 하였다. 또한 각 아형 간의 임상적 특징, 그리고 치매 전환 위험도를 비교하여, 본 모델이 영상 기반 질병 진행 마커로서 임상적 유용성을 평가하였다.

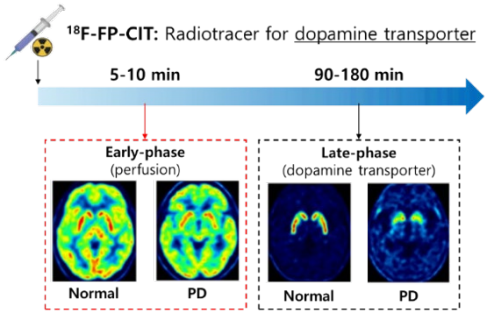


그림 1. Dual-phase ^{18}F-FP-CIT PET 촬영 과정

2.연구 방법

본 연구는 파킨슨병 환자 708명과 건강한 대조군 50명을 대상으로 획득한 dual-phase ^{18}F-FP-CIT PET을 활용하여 도파민 신경퇴행과 대뇌 저관류를 통합적으로 평가하였다. Late-phase 영상에서 도파민 수송체 결합능(SNBR)을, early-phase 영상에서 대뇌 관류(SUVR)를 산출하였으며, 각각 12개의 striatum 영역과 8개의 cortex 영역으로 정량화

하였다. 연령과 성별을 보정한 z-score를 입력값으로 SuStaIn 모델을 적용하여 파킨슨병의 시공간적 진행 궤적 및 아형을 규명하였고, 최적 아형 수는 교차검증 정보 기준(CVIC) 과 MCMC 수렴도를 통해 결정하였다. 아형 간 임상적 차이는 ANOVA 및 χ^2 검정으로 비교하였으며, SuStaIn stage와 임상지표 간의 관계는 상관관계 분석, 치매 전환 위험도는 Kaplan–Meier 생존 분석으로 평가하였다.

3. 연구 결과

세 아형은 도파민 신경퇴행과 대뇌 저관류의 진행 순서와 공간적 분포에서 뚜렷한 차이를 보였다. Subtype 1은 초기 비대칭적 도파민 손실이 posterior putamen에서 두드러지며, 말기에는 후두엽에서 전두엽으로 확산되는 대뇌 저관류가 나타났다. Subtype 2는 전반적이고 대칭적인 도파민 신경퇴행으로 시작하여, 중기 단계에서 후두엽을 기점으로 전두·두정엽으로 확산되는 광범위한 저관류가 관찰되었다. 반면 Subtype 3은 두정-후두 피질(parieto-occipital cortex)의 조기 저관류가 선행되고, 이후 다른 피질 영역과 선조체로 병리적 변화가 확산되는 특징을 보였다.

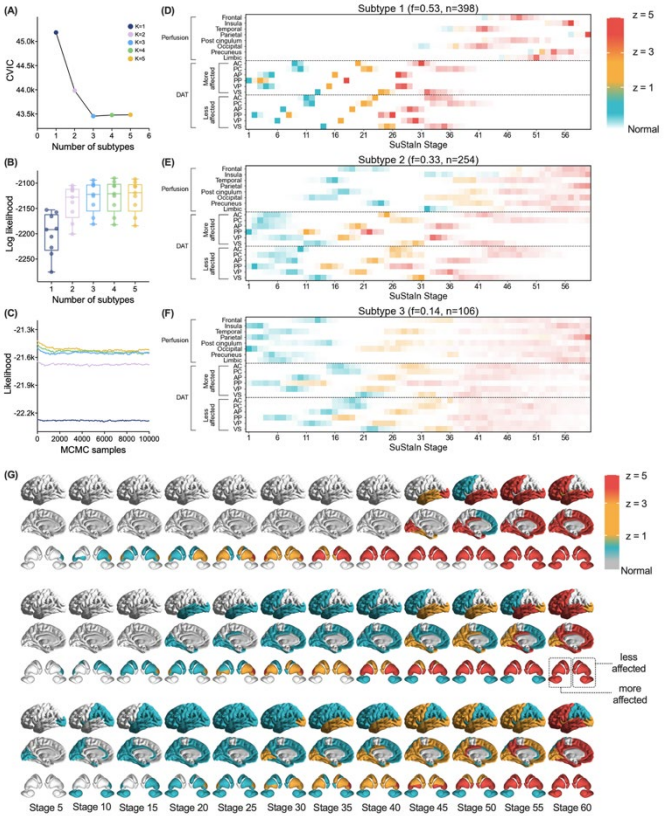


그림 3. SuStaIn 모델을 통해 추론된 cerebral hypoperfusion 및 striatal dopamine depletion의 시공간적 진행 패턴

인구학적 및 임상적 특성에서도 유의한 차이를 보였다. Subtype 1은 여성 비율이 높았다. Subtype 2는 발병 연령이 높고 인지 저하가 두드러졌다. 반면 Subtype 3은 발병 연령이 낮으며 RBD 유병률이 낮았다. 이러한 결과는 파킨슨병이 생리학적 측면 뿐만 아니라 임상적 수준에서도 뚜렷한 이질성을 보이며, SuStaIn 모델을 통해 그 차이를 정량적으로 규명할 수 있음을 시사한다.

각 아형 내에서 SuStaIn stage는 주요 임상지표들과 유의한 상관관계를 보였다. 모든 아형에서 stage가 높을수록 운동 증상(UPDRS-III)이 악화되고, DAT availability가 감소하며, 파킨슨병 관련 대뇌 관류 패턴(PDRP expression)이 증가하고, K-MMSE 점수는 저하되는 경향을 보였다. 특히 Subtype 2에서 이러한 상관성이 가장 강하게 나타났으며, DAT availability와 PDRP expression은 Subtype 1 및 3에 비해 유의하게 높았다($p < 0.001$, Fisher's r − to − z transformation).

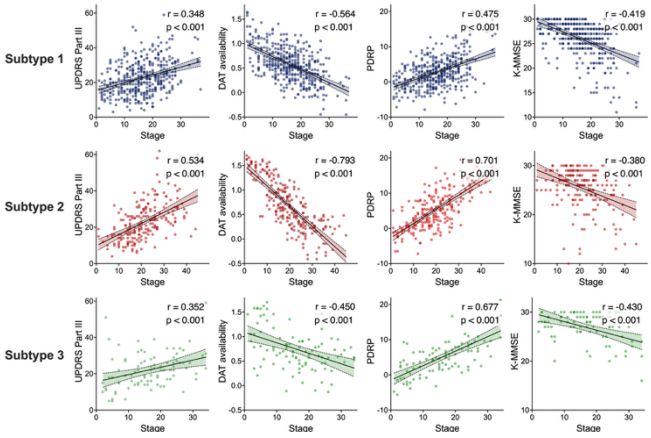


그림 2. 각 아형에서 SuStaIn stage와 임상 지표 간 상관관계 분석

Kaplan–Meier 생존 분석에서 치매 전환 확률에 유의한 차이가 관찰되었다. Subtype 2는 진단 후 약 4년 이내에 치매로 전환될 위험이 가장 높았으며, Subtype 1($P_{Log-rank} = 0.023$) 및 Subtype 3 ($P_{Log-rank} = 0.037$)과 비교해 생존 곡선이 급격히 감소하는 양상을 보였다. 반면 Subtype 1과 3은 4년 시점 이후 교차되어, 두 집단 간 장기 예후 차이는 통계적으로 유의하지 않았다.

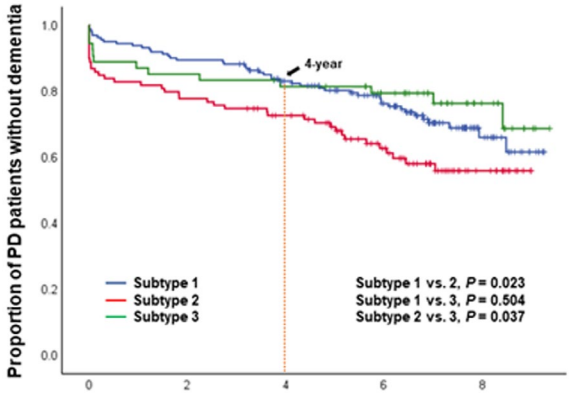


그림 4. Kaplan–Meier 생존 곡선

결론

본 연구를 통해 dual-phase ^{18}F-FP-CIT PET과 SuStaIn 모델이 파킨슨병의 시공간적 병리 진행 양상을 정량적으로 규명할 수 있음을 확인하였다. 이러한 접근은 개인 맞춤형 예후 예측을 위한 잠재적 영상 마커로 활용될 수 있다.

4. Acknowledgements

5.참고 문헌

[1] Thenganatt MA, Jankovic J. Parkinson disease subtypes. JAMA neurology 2014;71:499–504.

[2] Young AL, Marinescu RV, Oxtoby NP, et al. Uncovering the heterogeneity and temporal complexity of neurodegenerative diseases with Subtype and Stage Inference. Nat Commun 2018;9:4273.

[3] Zhou C, Wang L, Cheng W, et al. Two distinct trajectories of clinical and neurodegeneration events in Parkinson's disease. NPJ Parkinsons Dis 2023;9:111.

LoRA 및 강화학습 기반 Lingshu-7B 모델을 활용한 흉부 X-ray 판독문 자동 생성 성능 비교 연구

정수현[1], 홍파[2], 정세훈[3*], 김희철[1,4†]

인제대학교 AI융합로봇학과[1]

성균관대학교 의과대학 삼성창원병원 영상의학과[2]

세종대학교 인공지능데이터사이언스학과[3]

인제대학교 AI소프트웨어학부[4†]

Comparative Study on Chest X-ray Report Generation Performance Using the Lingshu-7B Model with LoRA and Reinforcement Learning

Soohyun Jung[1], Pa Hong[2], Sehoon Jeong[3*], Heechul Kim[1,4†]

Department of AI Convergence Robotics, Inje University, Gimhae, Korea[1]

Department of Radiology, Samsung Changwon Hospital, Sungkyunkwan University School of Medicine (SKKU-SOM), Changwon, Korea[2]

Department of Artificial Intelligence and Data Science, Sejong University, Seoul, Korea[3]

Department of AI & Software, Inje University, Gimhae, Korea[4†]

[*] jeongsh@sejong.ac.kr

[†] hee-ki@inje.ac.kr

Abstract

Recently, artificial intelligence(AI) technology has been actively adopted to automate medical image interpretation. In particular, Vision-Language Models(VLMs) are expanding the potential of chest X-ray image analysis and natural language interpretation generation. However, most prior studies have focused on simple lesion classification or static datasets, with limited exploration of which learning strategies yield the best performance when applying medical large language models(LLMs). This study systematically compares four approaches using the Lingshu-7B model: (1) prompt structure optimization, (2) metadata inclusion (gender, age, and view position), (3) LoRA-based fine-tuning, and (4) transformer reinforcement learning (TRL). Using 1,000 image-report pairs from the MIMIC-CXR dataset, model outputs were evaluated using ROUGE-L, BLEU-4, and BERTScore-F1 to measure linguistic and structural similarity with the ground-truth reports. Experimental results showed that including metadata improves linguistic coherence and consistency of clinical presentation. LoRA fine-tuning enhanced sentence structure and terminology alignment, increasing BERTScore-F1 from 0.063 to 0.078(+0.015) compared to the baseline zero-shot model. Furthermore, TRL yielded additional improvements, raising ROUGE-L from 0.181 to 0.188(+0.0007) and BLEU-4 from 0.029 to 0.031(+0.002), demonstrating the effectiveness of feedback-driven adaptation. In conclusion, this study provides a comparative analysis of prompting, metadata interpretation, fine-tuning, and transformer reinforcement learning for medical LLMs, offering insight into the optimal strategy for developing reliable and adaptive report generation systems in medical image processing.

1. 연구 배경

4차 산업혁명 시대에 인공지능(AI), 머신 러닝, 딥 러닝 기술이 의료 영상 분야에서 혁신적인 변화를 주도하고 있다[1]. 특히 흉부 X-ray 영상은 의료 현장에서 가장 보편적으로 사용되는 진단 영상으로, 질병 탐지와 판독 자동화 연구의 핵심 데이터로 자리 잡고 있다. 최근 대규모 언어모델(LLM)과 비전-언어 모델(Vision-Language Model, VLM)의 발전으로, 영상 또는 이미지의 정보를 해석하고 이를 자연어로 작성할 수 있는 기술이 등장하면서, 의료 영상을 보고 이를 자연어로 판독문을 자동으로 생성이 가능해졌다[2]. 그러나 기존 연구들은 단순한 병변 탐지 및 분류나 고정된 데이터셋 기반 정적 학습에 머물러, 실제 임상 판독문의 구조적 특성 및 새로운 이미지에 대한 정보를 충분히 반영하지 못하는 한계를 가진다. 이에 따라 단순한 모델의 예측 정확도보다, 의료진의 판독문 작성 패턴과 임상적 표현을 반영한 문장 생성 능력이 새로운 핵심 지표로 부각되고 있다. 또한, 최근 의료영상 판독문 생성 연구에서 단순한 프롬프트 엔지니어링만으로는 의학적 문맥의 정합성을 확보하기 어렵고, 모델이 메타데이터(성별, 나이, 촬영 방식 등)나 임상 컨텍스트를 함께 학습할 때 보다 정확하고 임상적인 판독문을 생성할 수 있음이 연구되었다.

본 연구는 의료 특화 비전-언어 모델인 Lingshu-7B 모델을 활용하여 흉부 X-ray 영상으로부터 판독문의 핵심 섹션인 Findings(소견)와 Impression(결론) 섹션을 자동 생성하고, 판독문의 품질을 향상시키기 위한 다양한 학습 전략을 비교·분석하였다. 구체적으로 프롬프트 구조 설계, 메타데이터 포함 여부, LoRA 기반 파인튜닝, TRL 강화학습 적용의 효과를 정량적으로 검증하였다. TRL 과정에서는 의료진이 수정한 판독문을 보상 신호로 활용하여 모델이 이를 실시간으로 재학습하는 도제식(Human-in-the-loop) 강화학습 구조로 설계하였다. 이를 통해 모델이 의료진의 판단 기준과 임상적 표현 패턴을 내재화하여, 지속적으로 언어적 일관성과 임상적 신뢰도를 개선하도록 하였다[3][4].

결과적으로 본 연구는 의료영상 판독문 자동 생성 모델의 성능을 단순한 프롬프트 기반 접근부터 강화학습 기반

학습까지 단계적으로 비교함으로써, 의료 LLM의 최적 학습 전략을 제시하고, 향후 임상적으로 신뢰할 수 있는 보고서 생성 시스템 구축의 방향성을 제안한다.

2.연구 방법

2.1 데이터셋 구성 및 전처리

본 연구에서는 흉부 X-ray 영상 기반 판독문 자동 생성을 위해 MIMIC-CXR 공개 데이터셋을 사용하였다. 이 중 AP 및 PA 촬영 영상 1,000쌍의 이미지-판독문 데이터를 구축하였다. 전처리 과정에서는 메타데이터 CSV에서 촬영 방식(view position)을 추출하고, 성별과 나이는 EfficientNet 기반 CNN 모델로 예측하였다. 모든 이미지는 512x512 해상도로 리사이즈하였고, 판독문은 Findings와 Impression 섹션으로 구분하였으며, 데이터는 학습(80%), 검증(10%), 테스트10%)로 분할하였다.

2.2 모델 구조 및 학습 설정

본 연구에서는 의료 특화 비전-언어 모델인 Lingshu-7B 모델을 기반으로 판독문 자동 생성을 수행하였다. Lingshu-7B는 Vision Encoder와 Text Decoder로 구성된 멀티모달 구조이며, 이미지의 시각적 특징을 Transformer 기반 언어모델과 결합해 자연어를 생성한다.

연구는 네 가지 학습 접근 방식으로 구분하여 수행하였다. (1) Zero-shot Prompting : 사전 학습된 Lingshu-7B 모델에 추가 학습 없이 그대로 사용하여, Existing 및 Strong 구조의 프롬프트를 입력하여, 1,000개의 X-ray 이미지 케이스에 대해 판독문을 자동으로 생성하고, 원본 판독문과의 텍스트 유사도를 비교하였다. (2) Metadata conditioning : 이미지 입력과 함께 성별, 나이, 촬영 방식의 메타데이터를 텍스트 형태로 추가하여, 임상적 맥락 정보를 반영 유무에 따른 성능을 비교하였다. (3) LoRA 기반 파인튜닝 : 모델의 언어 디코더 부분에 Low-Rank Adapter를 삽입하여 의료 용어 표현과 문장 일관성을 강화하였다. 1,000쌍의 학습 데이터를 사용하여 학습을 수행하였다. (4) TRL 강화학습 : 의료진 수정한 판독문을 PPO(Proximal Policy Optimization) 알고리즘의 보상 신호로 활용하여 모델의 점진적 재학습을 유도했다. 모든 실험에서 이미지 인코더의 출력은 텍스트 토큰 임베딩과 연결되어 LLM 디코더로 전달되며, 생성된 판독문은 정답 판독문과의 텍스트 유사도 기반 손실 함수로 최적화되었다.

2.3 성능 평가 지표 및 실험 환경

모델이 생성한 판독문 결과는 원본 판독문, 의료진 수정 판독문과의 언어적 유사도를 정량적으로 평가하기 위해 ROUGE-L, BLEU-4, BERTScore-F1 세 가지 지표를 사용하였다. ROUGE-L 지표는 생성 문장과 실제 판독문 간의 서열 기반 유사도를 평가하여 문장 구조의 정합성을 반영한다. BLEU-4는 4-gram 단위의 일치도를 계산하여 어휘 수준의 표현 정확도를 측정한다. BERTScore-F1은 사전 학습된 언어 모델의 문맥 임베딩을 활용하여 의미적 유사도를 정량화한다. 실험은 Ubuntu 22.04 LTS, Python 3.10, PyTorch 2.1, Transformers 4.41 환경에서 수행하였으며, GPU는 NVIDIA RTX 4090 (24GB) x 2를 사용하였다. LoRA 학습 시 배치 크기는 2, 학습률(Learning rate)은 2e-5로 설정하였고, 5 epoch 동안 학습하였다.

3. 연구 결과

본 연구에서는 흉부 X-ray 영상으로부터 판독문을 자동으로 생성하기 위해 Lingshu-7B 모델을 사용하였으며, 프롬프트 구조, 메타데이터 포함 여부, LoRA 기반 파인튜닝, TRL 강화학습 적용 여부에 따른 성능을 비교·분석하였다. Lingshu-7B 모델이 생성한 판독문과 실제 판독문 간의 언어적 유사도는 ROUGE-L, BLEU-4, BERTScore-F1 세 가지 지표를 사용하여 평가하였다.

실험 조건	ROUGE-L	BLEU-4	BERTScore-F1
7B_Existing_Meta	0.1787	0.0267	0.0645
7B_Existing_NoMeta	0.1791	0.0283	0.0679
7B_Strong_Meta	0.1786	0.0266	0.0643
7B_Strong_NoMeta	0.1791	0.0284	0.0680
7B_Existing_LoRA	0.1859	0.0318	0.0780
7B_Existing_TRL	0.1935	0.0331	0.0825

표 1. Lingshu-7B 기반 학습 전략별 판독문 생성 성능 비교

실험 결과, Existing 프롬프트의 경우 메타데이터를 포함한 조건과 미포함 조건에서 전체적인 성능 차이는 크기 않았으나, 메타데이터를 포함한 경우 문장 내에서 성별, 나이, 촬영 방식 등의 임상 정보가 판독문 성능에 반영되는 경향을 보였다. 또한, Strong 프롬프트의 경우도 메타데이터 포함 여부에 따른 수치 차이는 미미했으며, 전체적으로는 프롬프트 구조의 변화보다 표현 일관성이나 정보 반영 측면에서 미세한 차이가 관찰되었다. LoRA 기반 파인튜닝을 적용하였을 때, 기존 모델 대비 BERTScoe-F1이 약 0.02 상승(0.0679->0.078)하며, 의학 용어 선택 정확도와 문장 구조 정합성이 개선되었다. 마지막으로 TRL 강화학습을 적용한 모델은 ROUGE-L, BLEU-7, BERTScore-F1 모두에서 가장 높은 수치를 기록하였으며, 이는 의료진이 수정한 판독문을 보상 신호로 활용한 강화학습이 모델의 임상적 표현 일관성과 자연스러운 판독문 생성 능력을 향상시켰음을 의미한다.

4. 참고 문헌

[1] Chen, Z., Varma, M., Xu, J., et al. “A Vision-Language Foundation Model to Enhance Efficiency of Chest X-ray Interpretation.” *arXiv preprint arXiv:2401.12208.*

[2] Lee, S., Youn, J., Kim, M., Yoon, S.H. “CXR-LLAVA: A Multimodal Large Language Model for Interpreting Chest X-ray Images.” *Imaging Informatics and Artificial Intelligence*, 35, 4374-4386.

[3] Kapadnis, M.N., Patnaik, S., Nandy, A., Ray, S., Goyal, P., Sheet, D. “SERPENT-VLM: Self-Refining Radiology Report Generation Using Vision-Language Models.” *arXiv preprint arXiv:2404.17912*

[4] Shentu, J., AI Moubayed, N. “CXR-IRGen: An Integrated Vision and Language Model for the Generation of Clinically Accurate Chest X-Ray Image-Report Pairs.” *IEEE/CVF WACV 2024*, pp 5212-5221

에이전트 기반 다중모달 임상 질의응답: 영상과 텍스트로부터 도출한 근거 기반 답변

지아 생후이[1*], 김희철[1]
인제대학교 디지털항노화헬스케어학과[1]

Agentic Multimodal AI for Clinical Question Answering: From Images and Text to Reasoned Answer

Chea Senghuy[*], Kim Hee Cheol[1]
School of Digital Anti-Aging Healthcare, Inje University, Korea
[*]2024b199@oasis.inje.ac.kr

Abstract

Artificial intelligence is increasingly applied in clinical data interpretation, yet most systems focus on either text or image information alone. This paper proposes an Agentic Multimodal AI for Clinical Question Answering framework that can combine medical images and textual data to produce reasoned clinical responses. The proposed design introduces three interacting agents: an image agent for visual feature extraction, a text agent for language understanding, and a reasoning agent for generating step-by-step answers. The aim is to build an explainable, interactive system that mimics clinical reasoning rather than direct prediction. This paper presents the conceptual design and workflow of the proposed system, and future work will include implementation, dataset integration, and performance evaluation on benchmark datasets such as PathVQA and VQA-RAD.

1. Introduction

In clinical environments, accurate decision-making often depends on both medical images and textual data such as patient records and reports. However, many artificial intelligence systems are designed to handle only one type of data, which limits their ability to answer complex clinical questions. Recent advances in multimodal AI have shown the potential to integrate visual and textual information, yet most models still provide direct answers without clear reasoning or reference support.

To overcome these limitations, this study proposes an Agentic Multimodal AI for Clinical Question Answering framework. Unlike conventional systems, the proposed approach allows the AI to act as a group of cooperating agents, an image agent, a text agent, and a reasoning agent that communicate with each other. The reasoning agent can also search external databases or the internet for similar medical cases or related literature to enhance the reliability of its answers.

The goal of this study is to design a human-like, explainable AI that can interpret medical data, perform reasoning, gather external evidence, and generate transparent clinical answers. This framework aims to build trust between clinicians and AI by combining reasoning and evidence retrieval within a single interactive system.

2. Methodology

The proposed system follows an **agentic multimodal architecture** that integrates image analysis, textual understanding, and reasoning within a single collaborative workflow. Each agent performs a specialized function and communicates through structured prompts and shared memory to maintain logical consistency and information traceability throughout the process.

Core Idea:

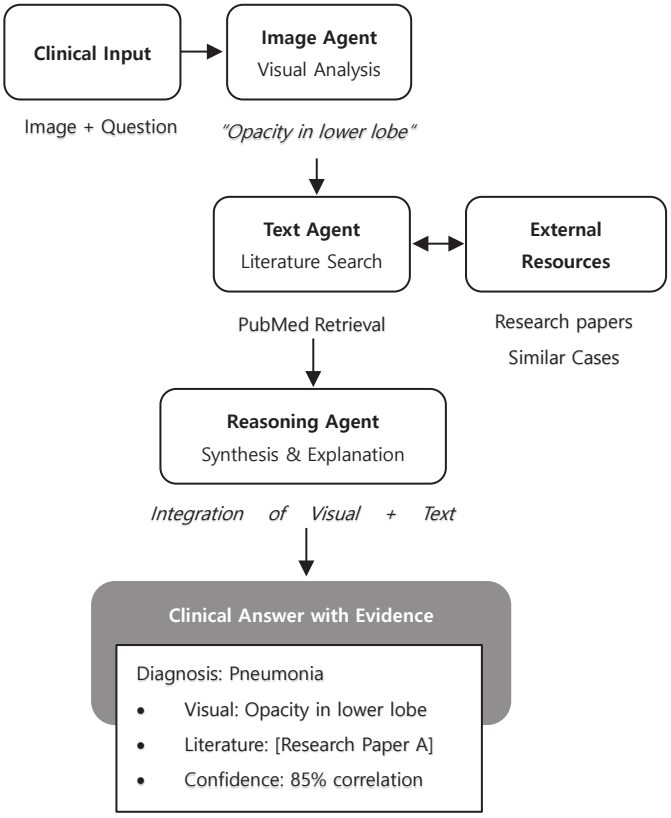
When a doctor uploads a new medical image, the system automatically analyzes the visual content and searches for similar medical cases and relevant research papers. The goal is not only to generate an answer but also to provide clear reasoning supported by existing medical evidence and literature references.

Step-by-Step Process:

1. **Doctor Uploads**: The clinician inputs a new chest X-ray and a question such as "What do you see?"
2. **Image Agent**: The image analysis module processes the uploaded image and detects key diagnostic features, for example, "opacity in the lower lobe." Visual embeddings are structured into descriptive keywords for downstream use.
3. **Text Agent**: Based on the extracted keywords, the text agent retrieves relevant information from medical databases (e.g., PubMed, BioASQ) or online repositories. It summarizes research papers or similar case studies to build contextual knowledge related to the detected pattern.
4. **Reasoning Agent**: The reasoning module integrates both visual and textual findings, constructing a step-by-step reasoning chain that leads to a final, explainable answer—e.g., "This pattern suggests pneumonia. Similar cases in [Research Paper A] showed 85% correlation."

This multi-agent approach enables clinicians to obtain faster, evidence-backed answers while maintaining interpretability and transparency. Each response is linked to verifiable medical knowledge sources, ensuring both reliability and

clinical trustworthiness. The modular structure also allows future integration with larger medical databases and real-time hospital systems.



(Figure 1. Conceptual workflow of the Agentic Multimodal AI system.)

3. Results

The conceptual evaluation of the proposed framework indicates several potential advantages over existing multimodal AI systems. In traditional models such as BLIP-2 or GIT-Large, image and text data are fused once and the final answer is directly generated. In contrast, the Agentic Multimodal AI framework enables interactive reasoning and evidence retrieval at each step, improving explainability and user trust.

Example Scenario:

When a doctor uploads a new chest X-ray showing partial opacity in the lower lobe and asks, "What does this indicate?", the Image Agent detects the opacity and summarizes it as a visual feature. The Text Agent then retrieves relevant case reports or research articles mentioning "lower lobe opacity" and finds prior findings correlated with pneumonia. Finally, the Reasoning Agent synthesizes both sources, generating an interpretable output such as:

> "This pattern is consistent with pneumonia. Similar findings reported in [Research Paper A] showed 85% correlation."

This process demonstrates how the system could support medical professionals by producing step-by-step reasoning rather than black-box predictions. Table 1 summarizes the expected qualitative improvements compared to standard multimodal models.

Evaluation Aspect	Conventional Model	Proposed Agentic Model (Expected)
Explainability	Limited or none	Stepwise reasoning + evidence retrieval
Reliability	Depends on training data	Supported by literature + case search
Clinical Trust	Low	Higher due to transparent answers
Response Time	Fast but opaque	Slightly slower but more interpretable

(Table 1. Expected performance and interpretability improvements.)

When applied to open datasets such as PathVQA and VQA-RAD, the framework is expected to yield coherent and evidence-linked responses that align with clinical reasoning patterns. Future experiments will validate these outcomes through quantitative metrics (BLEU, ROUGE) and qualitative expert evaluations.

4. Acknowledgements

This work was supported by the Institute of Information & Communications Technology Planning & Evaluation(IITP)-Innovative Human Resource Development for Local Intellectualization program grant funded by the Korea government(MSIT)(IITP-2024-RS-2024-00436773)

5. References

[1] Lau, J. J., Gayen, S., Ben Abacha, A., & Demner-Fushman, D. (2018). A dataset of clinically generated visual questions and answers about radiology images. Scientific Data (Nature), 5(1), 1-10. https://doi.org/10.1038/sdata.2018.267

[2] He, X., Yang, X., Zhang, S., Zhao, J., Zhang, Y., Xia, Y., & Yuille, A. L. (2020). PathVQA: 30,000+ Questions for Medical Visual Question Answering. Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), 2020. https://arxiv.org/abs/2003.10286

[3] Li, J., Li, D., Savarese, S., & Hoi, S. C. H. (2023). BLIP-2: Bootstrapping Language-Image Pre-training with Frozen Image Encoders and Large Language Models. arXiv preprint arXiv:2301.12597. https://arxiv.org/abs/2301.12597

[4] Hugging Face Datasets. (2024). PathVQA & VQA-RAD Dataset. https://huggingface.co/datasets/flaviagiammarino/path-vqa & vqa-rad

Poster-182

다기관 병리학을 위한 CNN 및 파운데이션 모델 표현 비교 연구

Maryam Naqvi[1*] , Hee-Cheol Kim *

디지털 안티에이징 헬스케어 인제대학교[1]

Comparative Study of CNN and Foundation-Model Representations for Multi-Organ Pathology

Maryam Naqvi[1*], Hee-Cheol Kim *

Digital Anti-Aging Healthcare, Inje University, Korea

*maryam@oasis.inje.ac.kr

Abstract

This paper presents convolutional neural networks against pathology foundation models (ConCH, UNI) for multi-organ whole-slide image classification across diverse countries, scanners, and clinical settings. Slides are tiled and stain-normalised; pretrained encoders extract patch features aggregated with attention-based multiple-instance learning for slide-level prediction. Using accuracy, sensitivity, specificity, and F1, foundation models consistently outperform the CNN and generalise more reliably across organs and institutions. Findings indicate that foundation-model pipelines provide robust and interpretable WSI classification suitable for prospective clinical evaluation.

1. Introduction

Recent advances in artificial intelligence (AI) have transformed computational pathology by enabling automated analysis of whole-slide images (WSIs) for cancer detection, classification, and prognosis [1, 2, 3]. Deep learning, particularly convolutional neural networks (CNNs) and vision transformers (ViTs), has significantly improved the ability to capture complex spatial and morphological patterns in histopathological images.

Despite these advancements, maintaining consistent performance across heterogeneous imaging conditions—arising from differences in scanners, staining protocols, and institutional workflows—remains a critical challenge [4, 5] CNNs have traditionally been effective at extracting local visual features, such as cellular textures, nuclei, and tissue boundaries [6]. In contrast, transformer-based architecture utilizes self-attention mechanisms to model both local and global dependencies, allowing a more comprehensive understanding of tissue context [7, 8]. While ViTs have shown strong performance on natural image tasks, their application to computational pathology remains limited.

Foundation models, pretrained on large-scale and diverse datasets, have recently emerged as a promising approach for overcoming these limitations. By learning generalizable representations, they can be adapted to multiple downstream tasks with minimal fine-tuning. This potential for stable performance across heterogeneous WSIs is a reason for optimism about the future of AI in pathology.

In this study, we systematically evaluate CNN-based and foundation model encoders for multi-organ WSI classification. Specifically, we compare ResNet-50 with two foundation models, ConCH and UNI, assessing classification accuracy, precision, recall, and F1-score. Our results demonstrate that foundation models, with their improved generalization and stability across diverse imaging conditions, are reliable and robust frameworks for AI-assisted pathology, providing reassurance to the field.

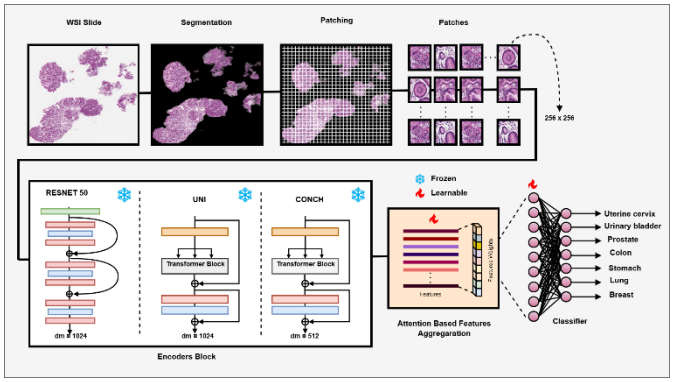


Fig 1: Overview of Methodology

2. Research Methodology

Key to our methodology is the patch extraction and preprocessing step. We tiled WSIs into 256 × 256 patches using a CLAM-based weakly supervised pipeline. These patches underwent stain normalization and intensity scaling, and any background/low-quality tiles were removed prior to feature extraction {9}. The feature encoders, ResNet-50, UNI, and CONCH, were chosen for their efficiency in computing patch embeddings. These pretrained backbones, representing CNN and foundation models, extracted a penultimate-layer vector for each patch, which was then ℓ2-normalized for numerical stability and cross-model comparability { unimodel, conchmodel}. Equally significant in our methodology is the MIL aggregation step.

This process produces slide-level representations via attention-based multiple-instance learning. It learns patch weights and aggregates features by a weighted sum to retain discriminative regions and a broader context. The training used slide-level labels only (weak supervision). The classifier and training process were designed with adaptability in mind. A fully connected head consumed the MIL descriptor and was

optimized for multi-class prediction with cross-entropy loss, AdamW, cosine learning-rate scheduling, and early stopping on a held-out validation set. Unless noted, encoders operated in feature-extraction mode while attention and classifier were trained end-to-end {UNI modal, ConCH model. Baseline definition: This pipeline constitutes the study baseline for comparing classification performance between CNN and foundation model encoders, given the lack of directly comparable prior benchmarks (unimodal, conch model).

3. Dataset:

The REG2025 corpus contains 10,494 whole-slide images spanning seven organs breast, bladder, cervix, colon, lung, prostate, and stomach sourced from five institutions in Korea, Turkey, India, Japan, and Germany. Each slide is paired with a pathology report standardized to CAP conventions, detailing organ, procedure, histologic type, and grade, with subtypes annotated per the WHO 5th edition.

4. Results
5.

Relative to the CNN baseline (ResNet: accuracy 0.850, recall 0.850, precision 0.860, F1-score 0.850), both foundation models performed better: ConCH reached 0.975 accuracy, 0.975 recall, 0.976 precision, and 0.975 F1-score, and UNI achieved 0.970 accuracy, 0.978 recall, 0.979 precision, and 0.978 F1-score. These results show that foundation encoders provide higher and more balanced baseline performance than the CNN across slide-level metrics.

Model	Accuracy	Recall	Precision	F1-Score
ResNet	0.850	0.850	0.860	0.850
ConCH	0.975	0.975	0.976	0.975
UNI	0.970	0.978	0.979	0.978

Table 1: Baseline Model Accuracies and Metrics

Class	ResNet Sens.	ResNet Spec.	ConCH Sens.	ConcH Spec.	UNI Sens.	UNI Spec.
Breast	1.000	0.964	1.000	1.000	1.000	0.994
Colon	0.786	0.940	1.000	0.986	1.000	0.987
Lung	0.786	0.964	1.000	1.000	1.000	0.994
Prostate	0.786	1.000	0.957	1.000	0.962	1.000
Stomach	0.714	0.988	0.913	0.993	0.923	1.000
Urinary bladder	0.929	1.000	0.957	1.000	0.962	1.000
Uterine cervix	1.000	0.976	1.000	0.993	1.000	1.000

Table 2: Baseline Model Results Details (Class-wise Sensitivity and Specificity).

6. Conclusion
7.

This paper compares convolutional neural networks and foundation models for multi-organ pathology classification across diverse settings. Foundation models consistently outperformed CNNs in accuracy and robustness, demonstrating superior generalizability. These results highlight foundation models as promising tools for AI-assisted pathology. Future work should focus on clinical validation and broader applications to enhance diagnostic support.

8. Acknowledgements

This work was supported by the Institute of Information & Communications Technology Planning & Evaluation (IITP)-Innovative Human Resource Development for Local Intellectualization program grant funded by the Korea government(MSIT)(IITP-2024-RS-2024-00436773)

6. References

[1] Nicolas Coudray, Paolo Santiago Ocampo, Theodore Sakellaropoulos, Navneet Narula, Matija Snuderl, David Feny¨o, Andre L Moreira, Narges Razavian, and Aristotelis Tsirigos, “Classification and mutation prediction from non–small cell lung cancer histopathology images using deep learning,” Nature medicine, vol. 24, no. 10, pp. 1559–1567, 2018.

[2] Jakob Nikolas Kather, Alexander T Pearson, Niels Halama, Dirk J¨ager, Jeremias Krause, Sven H Loosen, Alexander Marx, Peter Boor, Frank Tacke, Ulf Peter Neumann, et al., “Deep learning can predict microsatellite instability directly from histology in gastrointestinal cancer,” Nature medicine, vol. 25, no. 7, pp. 1054–1056, 2019.

[3] Didem Cifci, Sebastian Foersch, and Jakob Nikolas Kather, “Artificial intelligence to identify genetic alterations in conventional histopathology,” The Journal of pathology, vol. 257, no. 4, pp. 430–444, 2022.

[4] JD Pallua, A Brunner, B Zelger, M Schirmer, and J Haybaeck, “The future of pathology is digital,” Pathology-research and practice, vol. 216, no. 9, pp. 153040, 2020.

[5] Muhammad Khalid Khan Niazi, Anil V Parwani, and Metin N Gurcan, “Digital pathology and artificial intelligence,” The lancet oncology, vol. 20, no. 5, pp. e253–e261, 2019.

[6] Shikhar Tuli, Ishita Dasgupta, Erin Grant, and Thomas L Griffiths, “Are convolutional neural networks or transformers more like human vision?,” arXiv preprint arXiv:2105.07197, 2021.

[7] Ming Y Lu, Drew FK Williamson, Tiffany Y Chen, Richard J Chen, Matteo Barbieri, and Faisal Mahmood, “Data-efficient and weakly supervised computational pathology on whole-slide images,” Nature Biomedical Engineering, vol. 5, no. 6, pp. 555–570, 2021.

[8] Richard J Chen, Tong Ding, Ming Y Lu, Drew FK Williamson, Guillaume Jaume, Bowen Chen, Andrew Zhang, Daniel Shao, Andrew H Song, Muhammad Shaban, et al., “Towards a general-purpose foundation model for computational pathology,” Nature Medicine, 2024.

[9] Chen RJ, Ding T, Lu MY, Williamson DFK, Jaume G, Chen B, et al. Towards a general-purpose foundation model for computational pathology. Nat Med. 2024.

[10] Lu MY, Chen B, Williamson DFK, et al. A visual-language foundation model for computational pathology. Nat Med. 2024;30:863–874.

Poster-183

안면 이미지를 활용한 딥러닝 기반 생체신호 측정 시스템에 대한 연구

최재형[1], 김경이[2*]

인제대학교 AI융합로봇학과[1], 인제대학교 AI소프트웨어학과[2*]

Deep Learning-Based Vital Sign Measurement System Using Facial Images

Jaehyung Choi[1], Kyoungyee Kim[2*]

School of AI Convergence Robotics[1], AI Software[2*], Inje University, Korea

[*]kimky@inje.ac.kr

Abstract

This study presents a non-invasive biosignal measurement system based on Remote Photoplethysmography (rPPG) technology. rPPG enables non-invasive acquisition of vital biosignals including electrocardiogram (ECG), photoplethysmogram (PPG), heart rate, and blood pressure by capturing subtle color variations in facial skin via camera imaging. The technology holds promise for diverse medical and healthcare applications such as telemedicine, home-based health monitoring, and emergency situation surveillance. Recent advances have validated the feasibility of ECG and PPG prediction from facial videos alone. We constructed a multimodal architecture integrating Vision Transformer and LSTM, achieving high prediction accuracy with R^2 scores of 0.998 for ECG and 0.992 for PPG prediction. Our findings demonstrate that rPPG technology can deliver medical-grade biosignal measurements without contact-based sensors, indicating significant potential for deployment across various healthcare settings.

1. 서론

심혈관 질환은 전 세계 사망 원인 1위이며, 조기 발견과 지속적인 모니터링이 생존율 향상의 핵심이다. [1] 그러나 기존 생체신호 측정 방식은 전극이나 센서를 신체에 부착해야 하므로 장시간 착용 시 불편함, 피부 자극, 감염 위험 등의 문제가 있다. [2] 특히 화상 환자, 영유아, 피부 민감성 환자에게는 접촉식 센서 사용이 제한적이다.

Remote Photoplethysmography (rPPG) 기술은 카메라만으로 얼굴 피부의 미세한 색상 변화를 감지하여 심장 박동 정보를 획득하며, 심박수, 심박변이도, ECG, PPG, 혈압 등 다양한 생체신호를 추정할 수 있다. [3] 최근 연구를 통해 얼굴 영상만으로 ECG 및 PPG 예측이 가능함이 입증되었으며, 이는 원격 의료, 병원 환경, 스마트홈 등 다양한 분야로 확장 가능하다.[4][5]

본 연구는 rPPG 기술을 기반으로 실용적인 비접촉 생체신호 측정 시스템을 개발하고, 멀티모달 딥러닝 아키텍처와 특징 공학 기법을 적용하여 높은 예측 정확도를 달성하였으며, 다양한 건강관리 환경으로의 적용 가능성을 제시한다.

2. 관련 연구

얼굴 영상 기반 생체신호 측정 기술은 최근 딥러닝의 발전으로 급속도로 발전하였다. Li 등은 명시적 및 암묵적 감독 구조와 Generative Adversarial Networks를 결합하여 6초 분량의 얼굴 영상으로부터 ECG 신호를 재구성하는 네트워크를 제안하였다.[4] Lin 등은 비디오 확대 기술과 딥러닝을 결합하여 심박수와 혈압을 동시에 추정하였으며, 의료기기 표준인 AAMI 기준을 충족하는 정확도를 달성하였다.[5] 이러한 연구들은 rPPG 기술이 단순한 심박수 측정을 넘어 ECG, PPG, 혈압 등 임상적으로 의미 있는 생체신호를 비침습적으로 측정할 수 있음을 입증하였다.

rPPG 기술의 임상적 유효성은 여러 연구를 통해 검증되고 있다. 심박수 측정은 의료기기와 유사한 수준의 정확도를 보이며, 심박변이도 분석을 통한 자율신경계 평가도 가능하다.[6] 비침습성, 장시간 모니터링 가능성, 감염 위험 제로 등의 장점으로 원격 의료, 병원 중환자실, 신생아실, 정신건강 평가, 스포츠 의학 등 다양한 분야에서 활용 가능성이 연구되고 있다. [7] 다만 피부색, 조명 조건, 움직임 등 환경적 요인에 대한 강건성 확보가 과제로 남아있다.

3. 연구 방법

본 연구에서 제안하는 모델은 Vision Transformer(ViT)와 LSTM을 결합한 멀티모달 아키텍처로, 이미지 데이터와 시계열 특성을 통합적으로 분석한다.

생체신호 예측 정확도 향상을 위해 세 가지 핵심 특징 공학 기법을 적용하였다. 첫째, 얼굴을 이마, 중앙, 하단으로 분할하여 각 영역별 RGB 및 HSV 색상 특징을 추출하였다. 둘째, 운전자의 자세 및 움직임 정보를 포함한 신체 특징을 정량화하였다. 셋째, 이동 평균(SMA, WMA, EMA), 표준편차, 주파수 영역 특징 등의 시계열 분석 기법을 활용하였다. 이러한 다차원 특징들을 통합하여 ECG 및 PPG 신호 예측의 정확도를 유의미하게 향상시켰다.

본 연구에서는 AI Hub의 '운전자 및 탑승자 상태 및 이상행동 모니터링' 데이터셋을 사용하였다. 이 데이터셋은 실제 운전 환경에서 수집된 운전자 얼굴 영상과 동시 측정된 ECG, PPG 생체신호를 포함하고 있다. 데이터셋은 훈련(80%), 검증(10%), 테스트(10%) 세트로 분할하였으며, 배치 크기 64, 학습률 0.0001로 100 에폭 동안 학습을 진행하였다.

4. 연구 결과

학습 곡선 분석 결과 약 25 에폭 이후부터 안정적으로 수렴하며, 훈련 세트와 검증 세트 간의 성능 차이가 크지 않아 과적합 문제가 효과적으로 관리되었음을 알 수 있다.

제안된 모델의 성능은 MSE(Mean Squared Error), MAE(Mean Absolute Error), R^2(결정계수)를 통해 정량적으로 평가하였다. 테스트 결과, 모델은 ECG 예측에서 R^2 0.998, MAE 0.014, PPG 예측에서 R^2 0.992, MAE 0.018의 우수한 성능을 달성하였다. 이는 본 연구에서 제안한 ViT 기반 모델의 효과적인 특징 추출 능력을 보여준다.

5. 논의

본 연구에서 개발한 비접촉 생체신호 측정 시스템은 다양한 의료 및 건강관리 분야에 적용 가능하다. 원격 의료 및 재택 건강관리에서는 만성질환자나 고령 환자의 일상적인 건강 모니터링에 활용될 수 있으며, 병원 환경에서는 중환자실이나 신생아실에서 비접촉 모니터링 수단으로 활용 가능하다. 특히 화상 환자, 피부 질환자, 영유아 등 접촉식 센서 사용이 어려운 환자에게 유용하다.

rPPG 기술은 비침습성으로 인해 피부 자극, 감염 위험, 알레르기 반응 등의 부작용이 없으며, 센서 부착 및 제거 시간이 불필요하여 의료진의 업무 부담을 줄일 수 있다. 또한 환자의 자연스러운 상태에서 측정이 가능하여 측정 환경 효과를 최소화할 수 있다.

그러나 본 시스템은 매우 어두운 환경이나 급격한 조명 변화 시 신호 품질이 저하되며, 과도한 움직임 시 정확도가 감소하는 한계가 있다. 현재 적외선 조명 활용, 저조도 최적화 알고리즘, 고급 움직임 보정 알고리즘 등을 통해 시스템 고도화를 진행하고 있다.

6. 결론

본 연구는 rPPG 기술을 활용한 실용적인 비접촉 생체신호 측정 시스템을 개발하고, 그 적용 가능성을 검증하였다. 최근 연구들을 통해 입증된 얼굴 영상 기반 ECG 및 PPG 예측 기술을 기반으로, 멀티모달 딥러닝 아키텍처와 효과적인 특징 추출 기법을 적용하여 높은 예측 정확도를 달성하였다.

다양한 환경에서의 실험 결과, 도전적인 조건에서도 안정적인 성능을 보여 실용성을 확인하였다. 이는 본 시스템이 원격 의료, 병원 환경, 정신건강 분야, 스포츠 의학, 일상 건강관리 등 다양한 분야로 확장 가능함을 시사한다.

rPPG 기술은 접촉식 센서 없이도 의료 표준에 부합하는 생체신호 측정이 가능하며, 비침습성과 편의성이라는 고유의 장점으로 인해 기존 의료기기가 적용되기 어려웠던 영역에서 새로운 가능성을 열고 있다. 향후 대규모 임상 검증과 지속적인 기술 고도화를 통해 실제 의료 현장과 일상생활에서 널리 활용될 수 있는 건강관리 솔루션으로 발전할 것으로 기대된다.

7. Acknowledgements

본 과제(결과물)는 교육부와 경상남도의 재원으로 지원을 받아 수행된 경상남도 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 연구결과 입니다.(202502440001)

8. 참고 문헌

[1] World Health Organization, "Cardiovascular diseases (CVDs)," WHO Fact Sheet, 2025.

[2] C.M. Vidhya, Y. Maithani, and J.P. Singh, "Recent advances and challenges in textile electrodes for wearable biopotential signal monitoring: a review," Biosensors, vol. 13, no. 7, pp. 511, 2023.

[3] X. Liu, Y. Zhang, Z. Yu, H. Lu, H. Yue, and J. Yang, "rPPG-MAE: Self-supervised Pre-training with Masked Autoencoders for Remote Physiological Measurement," arXiv:2306.02301 [cs.CV], Jun. 2023.

[4] B. Li, W. Zhang, X. Li, H. Fu, and F. Xu, "ECG signal reconstruction based on facial videos via combined explicit and implicit supervision," Knowledge-Based Systems, vol. 272, pp. 110608, 2023.

[5] B. Lin, J. Tao, J. Xu, L. He, N. Liu, and X. Zhang, "Estimation of vital signs from facial videos via video magnification and deep learning," iScience, vol. 26, no. 10, pp. 107845, 2023.

[6] Vastmindz, "Evaluation of a Camera-Based Monitoring Solution Against Regulated Medical Devices to Measure Heart Rate, Respiratory Rate, Oxygen Saturation, and Blood Pressure," JMIR Publications, 2022.

[7] P. Pirzada, et al., "Remote Photoplethysmography (rPPG): A State-of-the-Art Review," medRxiv, 2023.

Poster Presentation
의료인공지능

Poster-184

LLM 기반 단백질 구조분석 및 신약개발 자동화 플랫폼

오성일[1*]

[1]아이디비에스 한국지사

*교신저자: os81paul@gmail.com

LLM-based Platform for Automated Protein Structure Analysis and Drug Development

Sungil Oh[1*]

[1]IDBS Korea

*Corresponding author: os81paul@gmail.com

Abstract

Protein structure analysis is a critical step determining molecular docking and simulation accuracy in drug discovery. However, existing workflows require sequential use of multiple software tools and specialized expertise, limiting accessibility. Here I developed DockMaster-SONGDO™, a Large Language Model (LLM)-based integrated platform for comprehensive protein structure analysis. The system automates essential preprocessing steps including water removal, hydrogen addition, charge assignment, and ligand/metal ion management. Additionally, it leverages LLM capabilities to perform quality assessment and generate expert-level analysis reports. The platform supports PDB and CIF file formats, efficiently handling various scales through single-file and batch processing modes. Integration with Mol* viewer provides real-time 3D visualization, intuitively presenting LLM-generated structural analysis results and improvement recommendations. Web-based implementation enables immediate use without software installation, delivering consistent processing results and AI-driven insights. This automated approach significantly reduces technical barriers in protein structure preparation while maintaining high analytical standards essential for accurate molecular modeling in pharmaceutical research.

1. 연구 배경

신약개발 과정에서 단백질 구조 전처리는 분자 도킹과 분자동역학 시뮬레이션의 정확성을 좌우하는 핵심 단계이다. 실험적으로 결정된 단백질 구조는 워터 분자, 불완전한 수소 원자 정보, 결정화 과정의 다양한 리간드와 금속 이온으로 인해 전산 연구에 직접 사용하기 어렵다. 특히 X-ray 결정학이나 NMR 분광법으로 얻어진 구조들은 실험 조건 특성상 생리학적 환경과 차이를 보이며, 이러한 불완전성은 후속 계산화학 연구의 신뢰성에 직접 영향을 미친다.

기존 전처리 과정은 PyMOL, ChimeraX, Schrödinger Suite, UCSF Chimera 등 여러 전문 소프트웨어를 순차적으로 사용해야 하며, 각 단계마다 구조생물학과 계산화학 전문 지식이 요구된다. 이러한 소프트웨어들은 대부분 고가의 상업적 라이선스가 필요하며, Schrödinger Suite 의 경우 연간 수만 달러의 비용이 발생한다. 복잡한 설치 과정과 운영체제별 호환성 문제, 그리고 각 도구 간 파일 형식 변환 과정의 데이터 손실은 많은 연구자들에게 진입 장벽으로 작용한다. 이러한 개별적 접근법은 연구자마다 다른 처리 방식을 사용하게 하여 결과의 재현성과 표준화에 문제를 야기한다.

최근 웹 기반 분자 시각화 도구 발전으로 브라우저에서 직접 분자 구조를 다룰 수 있게 되었다. 특히 Mol* 뷰어 같은 고성능 웹 기반 시각화 도구의 등장으로 복잡한 단백질 구조도 웹브라우저에서 실시간 렌더링이 가능하며, WebGL 과 WebAssembly 기술 발전은 데스크톱 소프트웨어 수준의 성능을 웹에서 구현할 수 있게 하였다. 동시에 대규모 언어모델(LLM)의 발전은 구조 분석과 품질 평가에서 전문가 수준의 해석과 권고사항을 자동으로 생성할 수 있는 가능성을 제시한다.

본 연구에서는 이러한 웹 기술의 발전과 AI 기술 혁신을 기반으로 단백질 구조 전처리 전 과정을 자동화하고 웹브라우저에서 직접 수행할 수 있는 통합 플랫폼을 개발하였다. 이 플랫폼은 별도의 소프트웨어 설치나 라이선스 없이 즉시 접근 가능하며, LLM 기반 지능형 분석을 통해 일관되고 신뢰할 수 있는 전처리 결과를 제공한다. 소량의 표적 구조 파일에서 자동 전처리가 일어나는 것을 관찰해 효율적인 워크플로우를 제공하는 도구임을 확인하였다.

2.연구 방법

시스템에 사용된 알고리즘은 웹 표준 기술을 통해 자동적으로 실행된다. 브라우저 기반의 처리 기법을 이용하였으며, Mol* viewer와 JavaScript를 활용하여 적합한 시각화와 처리 기능을 제공하는 플랫폼을 구현하였다.

시스템은 6개의 핵심 전처리 단계로 구성되어 있으며, 각 단계는 사용자 선택에 따라 독립적으로 수행될 수 있다. 밴드를 확인했다. 획득한 이미지를 ImageJ로 밴드를 정량화하여 비교분석 할 수 있다.

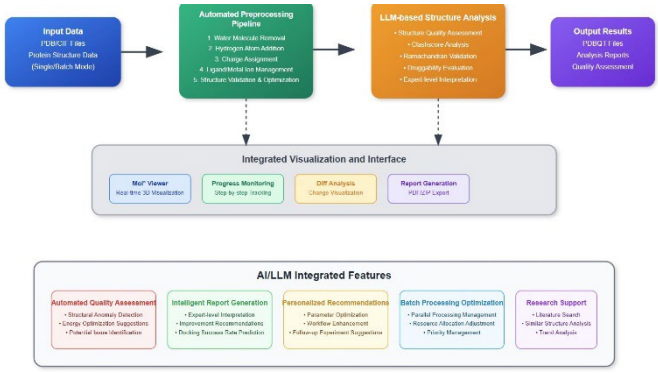


그림1. LLM 기반 단백질 구조분석 자동화 워크플로우

실험 직전 PDB 파일을 웹 인터페이스에 업로드하고 브라우저의 JavaScript 엔진을 이용해 파일 내용을 파싱한 뒤 각 전처리 단계를 순차적으로 실행하도록 설계하였다. 워터 제거, 수소 추가, 전하 할당, 리간드 제거, 금속 이온 관리의 6가지 단계를 거쳐 최종적으로 PDBQT 형식으로 결과를 출력한다

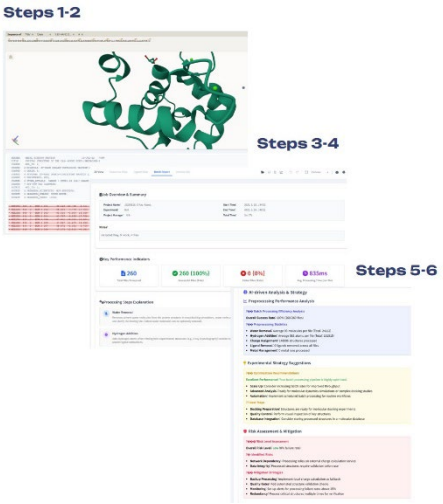


그림2. 6단계 전처리 파이프라인 과정

LLM 통합 시스템은 OpenAI GPT-4 모델을 기반으로 구축하였으며, 구조분석 결과를 종합하여 전문가 수준의 분석 보고서를 자동 생성한다. 각 전처리 단계별 결과와 구조 품질 지표를 LLM에 입력하여 구조의 전반적 품질 평가, 잠재적 문제점 식별, 그리고 개선 방안을 포함한 상세한 분석 보고서를 생성한다.

LLM은 clashscore, Ramachandran plot 분석 결과, B-factor 분포 등의 정량적 지표와 함께 구조의 druggability 평가 및 분자 도킹 성공률 예측까지 포함하는 종합적인 보고서를 제공한다.

IndexedDB를 활용한 브라우저 로컬 스토리지와 Web Workers API를 통한 병렬 처리를 구현하였고, Progressive Web App 기술을 적용하여 오프라인에서도 핵심 기능을 사용할 수 있도록 하였다. Mol* 뷰어를 통해 실시간 구조 시각화를 제공하며, 각 처리 단계의 변화를 diff 뷰어로 확인할 수 있다. 획득한 결과를 ZIP 형태로 다운로드하거나 개별 파일로 저장하여 후속 분석에 활용할 수 있으며, LLM 생성 보고서는 PDF 형태로 별도 저장이 가능하다.

3. 연구 결과

전처리 시스템은 6가지 단계로 구성된다. 1) 입력된 PDB 파일에서 HOH, WAT 등 워터 분자를 식별·제거하되, 사용자 지정 특정 워터는 보존한다. 2) 질소와 산소 원자 주변에 기본 수소 원자를 추가하여 분자 구조를 완성한다. 3) 아미노산 잔기별로 기본 전하를 할당하며, 백엔드 서비스 연결 시 정밀한 계산을 수행한다. 4) 사용자가 선택한 리간드를 제거하여 apo 형태 구조를 생성한다. 5) 구조적·촉매적으로 중요하지 않은 금속 이온을 제거한다. 6) 마지막으로 파일 형식 정리 및 최종 품질 검증을 통해 전체 처리 완료 시 안정화된 PDBQT 구조가 생성된다.

처리된 구조는 다른 전처리 작업에도 재사용 가능하여, 배치 처리에서 효율적인 워크플로우를 제공한다.

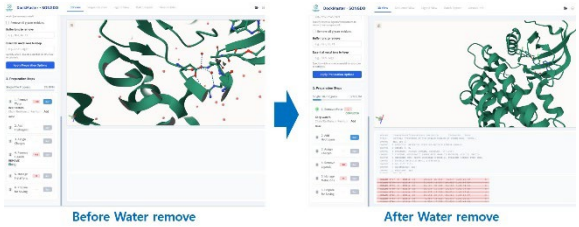


그림. 3. 전처리 전후 단백질 구조 시각적 비교

시스템 성능 테스트 결과, 소형 단백질에서는 빠른 처리 속도를, 대형 단백질에서도 합리적인 시간 내 전처리가 완료됨을 확인하였다. 같은 조건에서 다양한 크기 단백질에 대해 일관된 결과를 보였으며, 사용자 인터페이스의 직관성과 처리 결과의 신뢰성이 검증되었다.

4. Acknowledgements

본 연구는 개인 연구개발 프로젝트로 수행되었음.

5.참고 문헌

[1] Berman, H.M., et al. "The protein data bank." Nucleic Acids Research, Vol. 28, No. 1, p. 235-242, 2000.

[2] Jumper, J., et al. "Highly accurate protein structure prediction with AlphaFold." Nature, Vol. 596, No. 7873, p. 583-589, 2021.

[3] Davis, I.W., et al. "MolProbity: all-atom contacts and structure validation for proteins and nucleic acids." Nucleic Acids Research, Vol. 35, No. suppl_2, p. W375-W383, 2007.

[4] Trott, O., and Olson, A.J. "AutoDock Vina: improving the speed and accuracy of docking with a new scoring function, efficient optimization, and multithreading." Journal of Computational Chemistry, Vol. 31, No. 2, p. 455-461, 2010.

[5] Vaswani, A., et al. "Attention is all you need." Advances in Neural Information Processing Systems, Vol. 30, p. 5998-6008, 2017.

Poster-185

생성형 AI 기반 무표시자 광음향 영상의 H&E 및 Pap 가상 염색

박준영[1], 김영재[2], 박은우[3], 김진영[3], 정찬권[4], 김광기[5*]

가천대학교 중개-임상 의학과[1]

가천대길병원 가천의생명융합연구원[2]

융합IT공학과 포항공과대학교[3]

가톨릭대학교 의과대학 서울성모병원 병리과[4]

가천대길병원 의료기기 R&D센터[5]

Generation AI for Virtual Staining of Label-Free Photoacoustic Images into H&E and Pap

Jun Young Park[1], Young Jae Kim[2], Eunwoo Park[3], Jin Young Kim[3], Chan Kwon Jung[4], Kwang Gi Kim[5*]

Department of Translational-Clinical Medicine, Gachon University[1]

Gachon Biomedical & Convergence Institute, Gachon University Gil Medical Center[2]

Departments of Electrical Engineering, Convergence IT Engineering, Pohang University of Science and Technology (POSTECH)[3]

Department of Hospital Pathology, Seoul St. Mary's Hospital, College of Medicine, The Catholic University of Korea[4]

Medical Devices R&D Center, Gachon University Gil Medical Center[4]

[*]kimkg@gachon.ac.kr

Abstract

Pathological diagnosis is a crucial task for pathologists and cytologists. Traditionally, glass slides were observed under a microscope, which was time-consuming. Recently, WSI has been introduced using digital pathology scanners to improve efficiency. However, conventional staining requires skilled labor, long processing time, tissue consumption, and toxic chemicals. In this study, we developed a CycleGAN-based virtual staining model using label-free, H&E, and Pap data. Patches of 512×512 at 10× magnification were used for training. The model incorporated perceptual loss and different learning rates for generator and discriminator. The H&E model achieved SSIM 0.93 and FID 7, while the Pap model achieved SSIM 0.94 and FID 11, showing high similarity to real stained images.

1. 연구 배경

최근 디지털 병리학(Digital pathology)의 도입이 확산되면서 조직 및 세포 영상을 디지털화하여 보다 신속하고 정밀한 진단을 가능하게 하는 기술 개발이 활발히 이루어지고 있다. 이러한 변화 속에서, 빛의 흡수를 초음파 신호로 변환하여 생체 분자 정보를 무표시적(label-free)으로 획득할 수 있는 광음향 영상(Photoacoustic imaging, PAI) 기술은 차세대 병리 영상 기법으로 주목받고 있다.

한편, 전통적인 염색 방식은 많은 시간과 숙련된 인력이 필요함 등 여러가지 한계를 지닌다. 이에 따라 가상 염색(Virtual staining) 기술이 새로운 대안으로 부각되고 있다. 가상 염색은 실제 조직 절편에 물리적 염색을 시행하지 않고, 디지털 영상 기반으로 H&E 및 특수염색을 구현할 수 있어 진단 속도 향상, 검체 보존, 유해 화학물질 사용 절감 등의 장점을 제공한다(표 1). 특히 무표시자(Label-free) 기반의 인공지능 가상 염색 기법은 조직과 세포 검체의 보존성을 높이면서도 병리 진단에 필수적인 다양한 염색 효과를 재현할 수 있다.

표 1. 전통적인 병리 조직 검체 염색법과 가상 염색의 비교

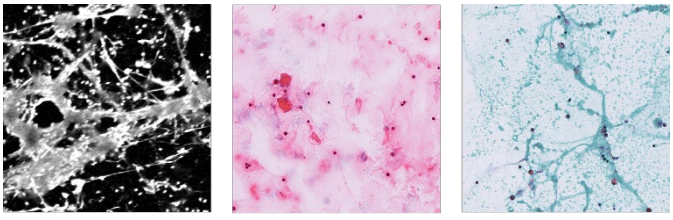
	전통적인 방식	가상 염색
시간	수시간~수일	수분
작업 난이도	숙련자 필요	절편 제작만 필요
염색 다양성	차이 있음	거의 없음
유해 물질	사용	거의 없음
조직 소모	많음	적음
다중 염색	불가	가능
염색 전환	불가	가능
실패 가능성	높음	낮음

2. 연구 방법

본 연구에서 사용된 데이터는 Hematoxylin & Eosin(H&E)와 Papanicolaou(Pap)은 서울성모병원에 내원한 환자들을 대상으로 디지털 병리 스캐너를 이용하여 유리 슬라이드를 스캔하여 Whole slide image(WSI)로 제작하였다. 무표시자는 서울성모병원에서 획득한 슬라이드를 기반으로 광음향 영상 장치로부터 획득하였다. 본 연구의 실험은 서울성모병원 기관생명윤리위원회의 승인을 받아 진행하였다(No. KC22SNDI0230).

본 연구의 흐름도는 WSI에서 패치를 추출하고 추출된 패치를 Cycle generative adversarial networks(CycleGAN) 모델로 가상염색 후 WSI를 복원하는 단계까지 포함하고 있다.

본 연구에서는 가상염색 생성형 모델을 학습하기 위해 Label-free, H&E, Pap 모든 영상에서 10 배율로 512x512로 패치를 추출하였다. 그림 1은 Label-free, H&E, Pap 패치 이미지의 예시다. Label-free는 염색되지 않은 상태로 전체적으로 검정색과 흰색을 띄고 있으며 H&E와 Pap은 각각의 염색 방법으로 염색된 상태로 분홍색과 청록색을 띄고 있는 것을 확인할 수 있다.



Label-free H&E Pap

그림 1. Label-free, H&E, Pap 패치 이미지

추출된 패치를 기반으로 CycleGAN 모델을 활용해서 H&E 및 Pap 가상염색 모델을 구축하였다[1]. 모델의 아키텍처는 그대로 활용하되 기존의 CycleGAN과 다르게 생성자(0.0003)와 판별자(0.0001)의 학습률을 다르게 적용하였다. 또한, 손실함수에서 visual geometry group(VGG) 기반 perceptual 함수를 추가하여 가상염색에 최적화된 모델을 구축하도록 설계하였다. 그림 2는 본 연구에서 사용한 CycleGAN 기반의 가상염색 모델 아키텍처이다. 또한, 임상 활용성을 위해 WSI를 복원하였으며, 가우시안 가중 마스크로 패치를 이어 붙이고 히스토그램 매칭으로 실제 H&E 및 Pap 염색과 유사하게 구현하였다.

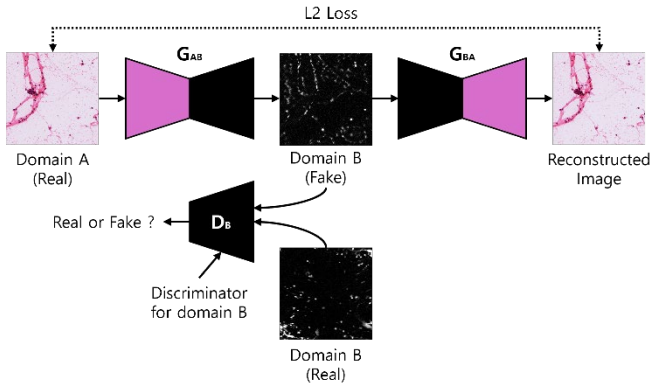


그림 2. CycleGAN 기반의 H&E 및 Pap 가상염색 모델

3. 연구 결과

본 연구의 CycleGAN 기반 가상염색 모델은 실제 H&E 및 Pap 영상과의 비교를 통해 평가하였다. 성능지표는 Structural similarity index measure(SSIM), Frechet inception distance(FID)를 사용하였다. SSIM은 1에 가까울수록 밝기, 명암대비, 구조가 동일함을 의미한다. FID는 0에 가까울수록 두 영상의 feature vector가 동일함을 의미한다. 표 2는 H&E 및 Pap 가상염색 모델 성능이다.

표 2. H&E 및 Pap 가상염색 모델 성능

	H&E	Pap
SSIM	0.93	0.94
FID	7	11

그림 3은 실제 H&E 및 Label-free 패치 데이터를 기반으로 가상염색 모델이 생성한 결과이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 상당히 높은 유사함을 보이며 육안으로 확인하였을 때 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

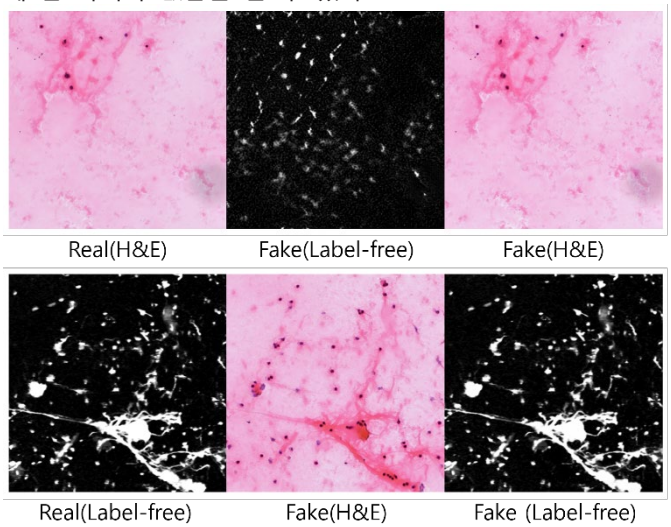


그림 3. H&E 가상염색 모델의 생성 영상 결과

그림 4는 실제 Pap 및 Label-free 패치 데이터를 기반으로 가상염색 모델이 생성한 결과이다.

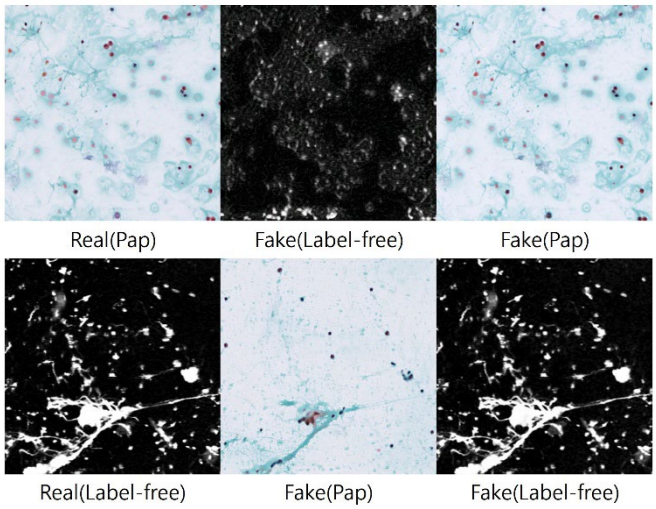


그림 4. Pap 가상염색 모델의 생성 영상 결과

그림 5는 가상 염색된 패치 데이터를 기반으로 후처리 과정을 통해 WSI를 복원한 결과이다.

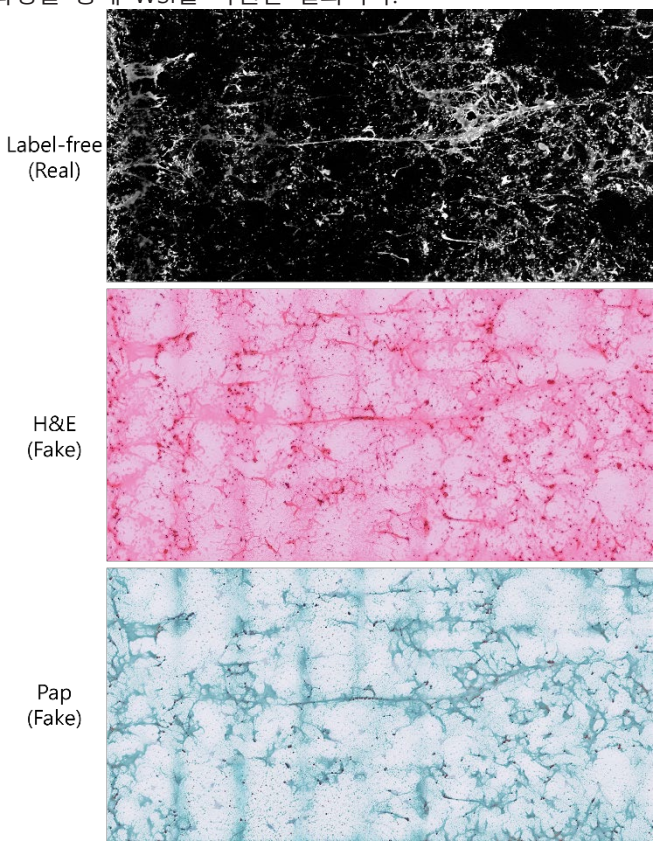


그림 5. 가상 염색된 패치 기반 WSI 복원 결과

4. 사사

본 연구는 한국 정부(과학기술정보통신부, 산업통상자원부, 보건복지부, 식품의약품안전처)가 공동으로 지원하는 한국의료기기 종합지원사업의 지원을 받아 수행되었음. (과제번호: 1711196789, RS-2023-00252804)

5. 참고 문헌

[1] Zhu, Jun-Yan, et al. "Unpaired image-to-image translation using cycle-consistent adversarial networks." Proceedings of the IEEE international conference on computer vision. 2017.

Poster-186

디퓨전 기반의 파노라마 영상에서 낭종양 위치 분할

김수정[1], 이원진[1,2*]

[1]서울대학교 공과대학 협동과정 바이오엔지니어링 전공

[2]서울대학교 치과대학 구강악안면방사선학 교실

Diffusion Probabilistic Models for Tumors and Cysts Segmentation in Dental Panoramic Radiographs

Sujeong Kim[1], Won-Jin Yi[1,2*]

[1]Interdisciplinary Program in Bioengineering, Seoul National University, Seoul, Korea

[2]Department of Oral and Maxillofacial Radiology and Dental Research Institute, School of Dentistry, Seoul National University, Seoul, Korea

Abstract

Accurate segmentation of tumors and cysts in dental panoramic radiographs is crucial for effective diagnosis and treatment. However, conventional CNN-based approaches face challenges due to indistinct boundaries, structural complexity, and noise from varying imaging conditions. To address these limitations, we propose Dentaldiff, a novel diffusion-based segmentation model. Our method introduces a dynamic feature fusion strategy and an iterative denoising mechanism to enhance global feature extraction and noise robustness. Additionally, modified DenseUNet was designed to improve segmentation performance. The model achieves state-of-the-art performance, with mean IoU of 0.61 ± 0.07 and Dice score of 0.75 ± 0.05, outperforming existing methods. Dentaldiff effectively handles complex anatomical structures and is the first known application of diffusion models to dental panoramic segmentation. Experimental results show that Dentaldiff achieves higher segmentation performance compared to CNN-based methods, particularly in challenging cases with indistinct boundaries and noise, suggesting its potential for broader clinical application.

1. 연구 배경

Dental panoramic radiographs are widely used in dentistry for diagnosing oral health conditions, including tumors and cysts [1]. Among these, dentigerous cysts (DCs), periapical cysts (PCs), odontogenic keratocysts (OKCs), and ameloblastomas (ABs) are notable for their potential to cause severe complications such as bone destruction, infection, and, in some cases, malignant transformation [2] Early detection of these anomalies is critical for preventing such outcomes and ensuring effective treatment [3]. Accurate localization of tumors and cysts is essential for effective treatment and removal in dental practice [4,5] However, direct segmentation is labor-intensive and requires expert knowledge. So far, the segmentation of cysts and tumors remains challenging due to three major issues: (1) irregular and indistinct boundaries [6], (2) high variability in anatomical structures across patients [7], and (3) scarcity of annotated data, limiting the development of supervised approaches.

Recently, diffusion models have been gaining success in medical imaging by overcoming CNN limitations such as insufficient global information capture and sensitivity to noise. They have been particularly applied to brain MRI analysis, achieving promising results in tumor and lesion detection [8, 9, 10, 11] However, there has been limited research on the application of diffusion models to dental panoramic images. Diffusion models [12], through iterative denoising and refinement, enable better global feature learning and robustness to noise, effectively handling high variability and structural complexity.

In this paper, we propose a diffusion model (**Dentaldiff**) for tumor and cyst segmentation in dental panoramic radiographs. The main contributions are: (1) to our knowledge, the first application of diffusion models for segmentation in dental panoramic images, (2) a diffusion-based framework with iterative denoising to capture global contextual features, (3) a modified Dense U-Net to enhance feature propagation and manage noise/artifacts, and (4) state-of-the-art performance with an average IoU of 0.61 ± 0.07 and Dice score of 0.75 ± 0.05, demonstrating significant improvements over CNN-based methods.

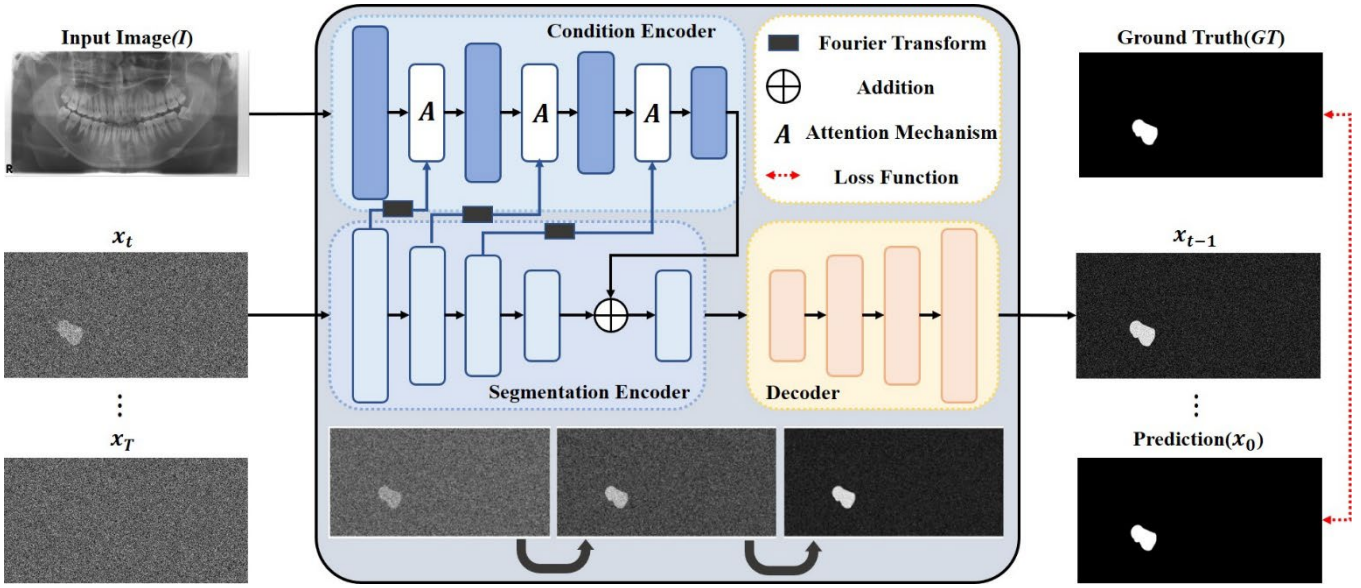


Figure 1. Overview of the proposed Dentaldiff architecture.

2.1 데이터셋

We prepared panoramic radiographs of patients who visited Seoul National University Dental Hospital from 1999 to 2017. Our dataset preparation is summarized in Table 1, highlighting a comparison with previous studies on segmentation tasks for tumors and cysts. Unlike other works that utilized smaller datasets and fewer tumor or cyst types (for example, Lee et al. with 282 images and 3 types, and Poedjiastoeti et al. with 400 images and 2 types), DentalDiff leverages a more comprehensive dataset consisting of 991 panoramic radiographs and includes a broader range of tumor and cyst types, namely dentigerous cysts (DCs), periapical cysts (PCs), odontogenic keratocysts (OKCs), and ameloblastomas (ABs). This extensive and diverse dataset enhances the robustness and generalization capability of our model for tumor and cyst segmentation in dental panoramic images.

The dataset consisted of a total of 991 images, which were split into training and testing sets at a 9:1 ratio, resulting in 892 and 99 images, respectively. To accommodate memory constraints due to the diffusion model's size, all images were resized to 64 × 128 resolution. For fair comparison with other models, no data augmentation was applied. Furthermore, to ensure unbiased evaluation, the same preprocessing and input format were maintained across all comparative models.

2.2 연구 방법

The DentalDiff model employs a modified DenseUNet (H-DenseUNet) architecture, which integrates a DenseNet with a UNet, as shown in Figure 1. Both the raw image (I) and the current-step segmentation map (xt) are processed through separate DenseNet encoders. Each encoder is organized into three stages, where hierarchical features are extracted using multiple dense blocks. Within each block, feature maps from all preceding layers are concatenated to facilitate both local and global feature propagation. Each dense layer consists of batch normalization, ReLU activation, and a combination of 1×1 and 3×3 convolutional layers.

To incorporate temporal information, a time embedding is generated by a multi-layer perceptron (MLP) with SiLU activation. This embedding influences the dense block output through scale and shift operations. The encoded features are fused by element-wise addition and passed to the final encoding stage. A UNet-style decoder, equipped with transposed convolutions and skip connections, reconstructs the segmentation map. By leveraging dense feature propagation, this architecture enhances robustness to noise and captures complex structural variations in panoramic radiographs.

3. 연구 결과

Table 1. Ablation study results of UNet architecture in Dentaldiff.

Methods	Dice Score	IOU
UNet	0.67 ± 0.11	0.51 ± 0.14

ResUNet	0.72 ± 0.09	0.58 ± 0.11
DenseUNet	**0.75 ± 0.05**	**0.61 ± 0.07**

Table 1 shows the performance of the proposed DentalDiff on the test dataset in comparison with other methods. Our method achieved a mean IoU of 0.61 ± 0.07 and a Dice score of 0.75 ± 0.05, outperforming the baseline methods. Specifically, the proposed DentalDiff showed an improvement of 4.2% in Dice score and 3.4% in IoU compared to MedSegDiff, demonstrating the effectiveness of our approach in accurately segmenting tumors and cysts from dental panoramic radiographs.

UNet and H-DenseUNet exhibited relatively lower performance due to their limited ability to capture complex anomalies in dental images. Meanwhile, MedSegDiff, which uses diffusion models for medical image segmentation, showed better performance than traditional CNN-based architectures but was still outperformed by our method. The combination of attention-guided diffusion processes and multi-scale feature learning in DentalDiff contributed to more robust segmentation, particularly in challenging regions with low contrast or irregular boundaries.

4. Acknowledgements

This work was supported by National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (RS-2023-NR077088). This work was supported by Technology Innovation Program (RS-2025-14322975) funded by the Ministry of Trade Industry & Energy.

5.참고 문헌

[1] Wang, Ching-Wei, et al. "A benchmark for comparison of dental radiography analysis algorithms." Medical image analysis 31 (2016): 63-76.
[2] Kwon, Odeuk, et al. "Automatic diagnosis for cysts and tumors of both jaws on panoramic radiographs using a deep convolution neural network." Dentomaxillofacial Radiology 49.8 (2020): 20200185.
[3] Sciubba, James J. "Oral cancer: the importance of early diagnosis and treatment." American journal of clinical dermatology 2 (2001): 239-251.
[4] Lee, Ari, et al. "Deep learning neural networks to differentiate Stafne's bone cavity from pathological radiolucent lesions of the mandible in heterogeneous panoramic radiography." PLoS One 16.7 (2021): e0254997.
[5] Liu, Zijia, et al. "Differential diagnosis of ameloblastoma and odontogenic keratocyst by machine learning of panoramic radiographs." International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery 16 (2021): 415-422.
[6] Hou, Senbao, et al. "Teeth U-Net: A segmentation model of dental panoramic X-ray images for context semantics and contrast enhancement." Computers in Biology and Medicine 152 (2023): 106296.
[7] Budagam, Devichand, et al. "Instance Segmentation and Teeth Classification in Panoramic X-rays." arXiv preprint arXiv:2406.03747 (2024).
[8] Wyatt, Julian, et al. "Anoddpm: Anomaly detection with denoising diffusion probabilistic models using simplex noise." Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2022.
[9] Wu, Junde, et al. "Medsegdiff: Medical image segmentation with diffusion probabilistic model." Medical Imaging with Deep Learning. PMLR, 2024.
[10] Iqbal, Hasan, et al. "Unsupervised anomaly detection in medical images using masked diffusion model." International Workshop on Machine Learning in Medical Imaging. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023.
[11] Wu, Junde, et al. "Medsegdiff-v2: Diffusion-based medical image segmentation with transformer." Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. Vol. 38. No. 6. 2024.
[12] Sohl-Dickstein, Jascha, et al. "Deep unsupervised learning using nonequilibrium thermodynamics." International conference on machine learning. PMLR, 2015.

Poster-187

비침습적 피부 진단을 위한 근적외선 초분광 영상의 계층적 도메인 적응

김은빈[1], 백유상[2], 이언석[13*]

순천향대학교 일반대학원 소프트웨어융합학과[1]

고려대학교 구로병원 피부과[2]

순천향대학교 의료IT공학과[3]

Layer-Wise Domain Adaptation for Noninvasive Skin Diagnosis Using Hyperspectral Imaging

Eunbin Kim[1], Yoosang Baek[2], Onseok Lee[13*]

[1]Department of Software Convergence, Soonchunhyang University, Korea

[2]Department of Dermatology, Guro Hospital, Korea University, Korea

[3]Department of Medical IT Engineering, Soonchunhyang University, Korea

[*]leeos@sch.ac.kr

Abstract

Clinical imaging data used for diagnosis are often affected by domain shifts arising from acquisition environment, equipment, and subject-to-sensor distance. To address these discrepancies, we propose a layer-wise feature alignment method specifically designed for hyperspectral imaging in the near-infrared (NIR) range, which is widely applied in noninvasive diagnosis. Our experiments demonstrate that domain adaptation at intermediate layers, where structural features are dominant, achieves the best performance: 82.80% for AD-to-NIR and 97.53% for NIR-to-AD. These results highlight the importance of selecting appropriate adaptation layers and suggest that balancing feature representation with domain alignment is essential for improving NIR-based noninvasive diagnostic imaging.

1. 연구 배경

최근, 변화하는 질병 양상이나 새로운 데이터에 적응할 수 있는 연구들이 등장하고 있다. 특히, 딥러닝의 발전으로 일부 분류기는 숙련된 피부과 의사와 필적한다. 그러나 복잡한 패턴과 다각적인 접근을 요구하는 아토피피부염 (AD) 평가의 어려움이 존재한다. 첫 번째는 소양증으로 인해 표피 및 진피의 장벽이 파열된다는 것이다. 이는 질환의 재발이나 2차 감염의 합병증으로 이어질 수 있다. 따라서 피부층에서 나타나는 특징을 식별하기 위한 비접촉적이고 비침습적인 효과적인 분석 연구가 필요하다 [1]. 두 번째는 치료 전후 및 과정을 기록하기 위해 남겨 놓은 영상 데이터의 문제이다. 질환을 촬영할 때의 환경과 신체 굴곡에 대한 음영, 움직임은 분석에 영향을 미친다. 또한 클래스의 불균형, 고품질 의료 데이터의 부족은 모델의 과적합 문제와 일반화의 어려움을 발생시킨다. 따라서 이를 해결할 방법에 대한 연구가 필요하다.

인간의 눈은 가시광선이라 부르는 특정 스펙트럼 만으로 물체를 구별한다. 그러나, 초분광 기술은 관찰 대상에 대하여 매우 세밀하게 나누어진 스펙트럼 및 공간 정보를 동시에 수집할 수 있다. 이는 피부의 미세한 변화나 병변을 감지할 수 있어 조직적 특성에 대한 정보 생성이 가능하다. 따라서 비접촉적이고 비침습적인 방식을 통해 피부를 분석할 수 있어 다양한 질환에 대한 진단 가능성을 높여준다. 그러나 일반적인 피부 영상과 초분광 영상은 환경, 인구, 기기, 그리고 질환 특성에 따라 도메인 차이가 크게 발생한다 [2]. 왜냐하면, 대부분의 머신러닝 알고리즘이 Independent and Identically Distributed (IID)를 가진 상황을 가정하기 때문이다. 그러나 IID 상황은 현실에서 접하기 어렵다. 이로인해, 도메인 차이가 발생하고, 심할수록 분석의 정확도가 낮아져 성능 저하, 불충분한 양질의 벤치마크 문제, 그리고 응용이 제한되기까지 한다. 따라서 이를 해결하기 위해 Domain Adaptation (DA)이 등장하였다.

DA는 서로 다른 도메인에 새로운 정보에 기존 분포의 정보를 적응시키는 것이다. 본 연구에서는 초분광 영상 기반 아토피피부염의 질환 평가와 분석에서 나타나는 도메인 차이를 이해하고 해결하고자 한다. 나아가 초분광 영상의 활용과 피부 질환 영상의 조화에 대해 논의하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1. 데이터 세트

실험에 사용된 AD와 초분광 카메라 기반 아토피피부염 영상은 고려대학교 구로병원 피부과에서 획득되었다 (2022GR0227, 2022DRB021). 모든 촬영은 오른쪽 팔에 나타나는 질환 영상이 수집되었으며 피부과 임상의가 clear부터 severe까지 5단계로 구성되어있는 Investigators' Global Assessment (IGA) 점수를 부여하였다. AD 데이터를 구축하기 위해 총 23명의 환자가 모집되었으며 촬영은 일반 DSLR 카메라를 이용하였고, 획득된 영상은 256 × 256 pixels로 나누어 총 720장의 데이터가 사용되었다. 초분광 카메라 기반 AD 영상은 초분광 카메라 (SNAPSCAN VNIR, imec, Netherlands)에 접사 렌즈 (Tamron 60mm(F2.0), Tamron, Japan)를 통해 영상의 초점을 수동으로 조절하여 13명의 병변 영상을 획득하였다. 이때, 650W의 할로겐 조명 1개 (FOMEX H100, Seoul, Republic of Korea)를 병변부위에 조사하여 약 20초에 걸쳐 영상이 촬영되었다. 이후 95%의 반사율을 가진 white reference (SG315-U, imec, Leuven, Belgium)를 사용하여 이미지를 정규화 시켰다. 실험에 사용한 데이터는 Near-Infrared (NIR)에 포함되는 750-900㎚로 총 2,548장으로 데이터를 구축하였다.

2.2. 실험 환경

본 연구는 Correlation alignment (CORAL)의 통계적 정렬 개념을 딥러닝 모델에 적용함으로써 더 복잡하고 비선형적인 분포 차이를 줄이는 Deep CORAL을 사용하였다. 우리는 ResNet18을 기반하고 모든 훈련과 테스트는 pytorch와 GeForece RTX A6000 48GB 2개를 이용하여 수행하였다. 데이터는 overall accuracy (OA), average accuracy (AA), 그리고 Cohen's Kappa Coefficient (Kappa)를 사용하여 모델의 성능을 객관적으로 평가하고자 하였다. 또한, t-distributed Stochastic Neighbor Embedding (t-SNE)을 사용하여 모델의 분류 성능을 시각적으로 표현하였다.

3. 연구 결과

3.1. Layer 별 도메인 적응 결과

표1은 Deep CORAL이 적용된 layer 별 성능 지표이다. 결과는 5회 반복 실험 평균을 기준으로 성능을 비교하였다.

AD data to NIR data의 source only의 결과, OA, AA, 그리고 Kappa 모두 낮은 정확도를 보였다. 이는 source와 target의 도메인 차이가 많이 난다는 것이다. 계층별 결과에서는 Layer 3의 성능이 target only와 가장 가깝고 높은 정확도를 보였다. 반면, 저수준의 특징인 Layer 1과 2를 사용한 결과는 모든 layer에 Deep CORAL을 적용한 결과보다 낮은 성능을 보였다. 즉, AD to NIR에서는 고수준의 특징을 추출하여 도메인의 차이를 줄이는 것이 효과적이라는 것을 확인할 수 있었다. NIR data to AD data의 source only의 결과 역시, OA, AA, 그리고 Kappa 모두 낮은 정확도를 보여 도메인의 차이가 많이 났다는 것을 확인하였다. 계층별 결과는, Layer 3의 성능이 target only와 가장 가깝고 높은 정확도를 보였다. Layer 1을 사용한 경우는 가장 낮은 성능을 보였다. 이를 통해, NIR to AD에서는 중간 수준의 shape와 구조적인 정보가 더 중요한 것을 알 수 있었다.

표 1. Layer 별 도메인 적응의 결과

(a)

R → N		OA (%)	AA (%)	Kappa (%)
Source only		21.76±6.86	16.13±4.15	-6.94±6.53
adaptation	Layer 1	71.83±9.80	68.70±13.68	61.33±14.08
	Layer 2	74.27±6.81	72.74±8.19	64.71±9.76
	Layer 3	**82.80±10.00**	**83.28±11.02**	**76.68±14.01**
	Layer 4	81.16±10.47	82.00±10.66	74.45±14.58
	All layer	75.82±11.97	73.76±13.92	67.07±16.43
Target only		100.00±0.00	100.00±0.00	100.00±0.00

(b)

N → R		OA (%)	AA (%)	Kappa (%)
Source only		27.67±0.30	21.69±0.73	2.70±0.94
adaptation	Layer 1	83.94±9.11	86.60±6.65	80.01±10.95
	Layer 2	95.78±2.26	96.70±2.27	94.59±3.51
	Layer 3	**97.53±1.15**	**98.16±0.83**	**96.81±1.48**
	Layer 4	90.89±10.68	90.07±14.10	88.32±13.67
	All layer	91.44±4.92	93.26±4.03	89.12±6.15
Target only		99.81±0.21	99.85±0.15	99.75±0.27

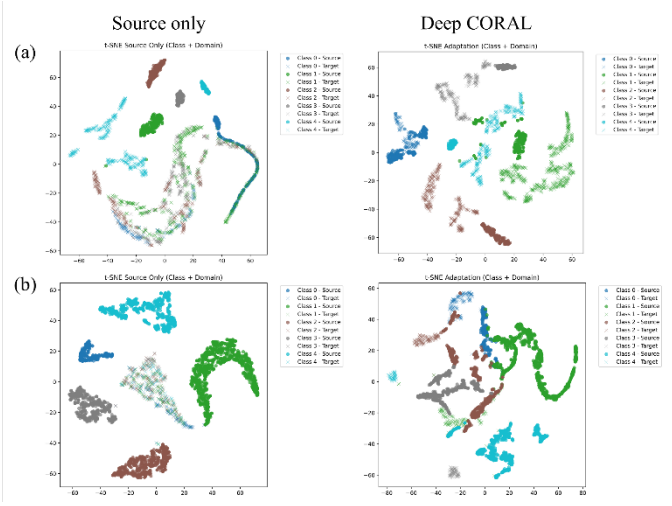


그림 1. Layer 3 기반 도메인 적응의 t-SNE 결과

3.2. 도메인 적응 결과의 시각화

그림 1은 가장 좋은 성능을 보였던 Layer 3의 결과를 t-SNE로 나타낸 것이다. 이때, 왼쪽은 source only 결과이고, 오른쪽은 Deep CORAL을 적용한 결과이다. 그림 1에서 동그라미는 source, x로 표시된 것은 target domain을 의미한다. 이때, 파란색은 class 0으로 clear, 초록색은 class 1로 almost clear, 갈색은 class 2로 mild, 회색은 class 3으로 moderate, 그리고 하늘색은 class 4로 severe를 나타낸다. 그림 1(a)는 AD to NIR, 그림 1(b)는 NIR to AD의 t-SNE 결과이다. Source와 target domain에서 이상적인 분포 정렬은 source와 target domain이 섞여 하나의 군집을 형성하면서 class 간 분리도 잘 되어있는 것이다. 먼저, 그림 1(a)에서 source only는 source와 target domain의 일부가 겹쳐있는 것을 볼 수 있다. Deep CORAL의 결과, source와 target domain의 일부가 겹쳐있으며 class 간 구분도 잘 유지되고 있는 것을 볼 수 있다. 그림 1(b)에서 source only에서는 source와 target이 완전이 분리되어있는 것을 볼 수 있다. Deep CORAL의 결과 source와 target domain이 서로 뒤섞여 위치해 있는 것을 볼 수 있다. 또한 각 class가 구분된 군집을 형성하고 있다는 것을 알 수 있다. 이는 도메인 정렬과 분류를 동시에 만족하는 효과적인 도메인 적응을 달성했음을 보여준다.

4. 참고 문헌

[1] E. B. Kim, Y. S. Baek, and O. Lee, "A Study on the Classification of Atopic Dermatitis by Spectral Features of Hyperspectral Imaging." *IEEE Access*, Vol 13, p.9209-9222, 2024

[2] Gu, Yanyang, et al. "Progressive transfer learning and adversarial domain adaptation for cross-domain skin disease classification." *IEEE journal of biomedical and health informatics* Vol 24, No.5, p.1379-1393, 2019

Poster-188

PRISM: 단일 모달리티 입력으로부터 결측 모달리티 표현의 복원

길태연[1], 이언석[12*]

순천향대학교 일반대학원 소프트웨어융합학과[1],

순천향대학교 의료IT공학과[2]

PRISM: Paired Representation Imputation from a Single Modality

Taeyeon Gil[1], Onseok Lee[12*]

[1]Department of Software Convergence, Graduate School, Soonchunhyang University, Korea

[2]Department of Medical IT Engineering, Soonchunhyang University, Korea

[*]leeos@sch.ac.kr

Abstract

Atopic dermatitis (AD) involves alterations across all layers of the skin, stemming from various etiologies. While a complex analysis from the surface to the deeper layers of the skin is necessary, most studies have focused on the skin surface using single modalities such as RGB. Hyperspectral imaging (HSI) and synchrotron radiation (SR) imaging, which enable deeper skin analysis, suffer from limited data accessibility and practicality due to specialized equipment. Therefore, this study proposes the Paired Representation Imputation from a Single Modality (PRISM) model, which reconstructs features of HSI and SR images from only an RGB image input and classifies AD. PRISM achieved high accuracy and stability (98.69% ± 1.85%) in the AD classification task. This can be interpreted as a strong regularization effect from the knowledge distillation process, confirming the model's effectiveness and practicality in a limited data environment.

1. 연구 배경

아토피피부염 (Atopic Dermatitis)은 유전적·면역학적·환경적 요인 등으로 인해 표피 장벽의 기능 장애 및 면역 체계의 조절 장애가 발생하는 다인성 질환이다. 이러한 병인들로 인해 표피 뿐만 아니라 진피 등 피부 내부 구조의 변형이 발생하며, 변형 정도가 다양하다. 질환 진단을 위해 아토피피부염으로 나타나는 임상적 증상의 중증 정도를 점수화하여 평가하는 SCORing Atopic Dermatitis (SCORAD), Eczema Area and Severity Index (EASI)와 같은 도구를 사용한다. 주로 시진 및 촉진을 통해 평가가 이루어지므로 객관적인 질환 상태 분석이 어렵다. 이에 따라 객관적 분석을 위한 연구들이 수행되고 있으나, 대부분의 연구에서는 단일 모달리티 (주로 RGB 이미지)를 사용한다. RGB 이미지는 접근성과 활용성이 높은 반면 피부의 표면만을 관찰할 수 있다는 한계가 있다 [1].

피부 전 층에 걸쳐 변형이 나타나는 아토피피부염 특성 상 피부 내부까지의 심층적 분석이 필요하다. 피부의 표피부터 내부까지의 광학적 특성을 포함한 초분광 영상 (hyperspectral imaging, HSI) [2], 피부의 미세 구조를 3차원으로 확인할 수 있는 방사광 (synchrotron radiation, SR) 이미지를 활용한다면 피부의 심층적 분석이 가능하다[3]. 그러나 고비용의 특수 장비가 필요하므로 임상에서의 HSI, SR 데이터 획득은 사실상 불가능하다.

따라서, 본 연구에서는 저비용 단일 모달리티인 RGB만으로 다른 고비용 모달리티인 HSI, SR의 특징을 복원하고자 한다. 이를 통해 멀티 모달리티의 복합적 분석과, 단일 모달리티의 실용성을 모두 충족할 수 있는 새로운 프레임워크를 제안하고자 한다. 이를 위해서 1) 멀티모달 대조 학습 (Multi-modal Contrastive Learning)을 통해 각 모달리티 간 복잡한 관계를 학습한 공유 특징 공간 (shared feature space)을 구축하고, 2) 특징 수준의 지식 증류 (Feature-level Knowledge Distillation)를 통해 HSI와 SR의 정보를 RGB 특징으로부터 복원하는 모델을 구축한다.

2.연구 방법

2.1. 데이터 획득 및 전처리

아토피피부염은 사람 뿐만 아니라 동물에서도 발현되며, 핵심 기전은 유사하다. 본 연구에서는 유연할 실험 설계가 가능한 동물 모델을 사용하였다. BALB/c-nu Mouse에 약품 도포를 통해 아토피피부염을 유발하였고, 실험군 6마리, 정상군 3마리의 등쪽 피부 전 층을 사용하였다 (Approval number : SCH24-0004). RGB, HSI, SR 이미지는 각각 DSLR 카메라 (Canon, Tokyo, Japan), SNAPSCAN camera(IMEC, Leuven, Belgium), 방사광가속기연구소의 6C-Biomedical imaging (BMI)(PLS-II, Pohang, Korea)을 통해 촬영되었다. 획득한 원본 데이터는 배경 제거, 관심 영역 추출 등의 전처리 과정을 거쳤으며, 최종적으로 개체, 부위 (목, 등, 엉덩이), 상태 (정상, 아토피)의 정보를 포함하는 메타 데이터로 정제하여 총 52개의 RGB-HSI-SR 데이터 쌍을 구축하였다. RGB, HSI, SR 데이터는 각각 3×224×224 (C×H×W), 150×224×224 (C×H×W), 1×128×128×128 (C×D×H×W) 크기로 resize 및 crop 하였다.

2.2. 제안 모델

제안 모델인 Paired Representation Imputation from a Single Modality (PRISM)은 교사 인코더, 학생 복원기, 최종 분류기의 계층적 구조로 구성된다 (그림 1).

교사 인코더는 각 모달리티에 특화된 2D 또는 3D CNN 인코더와 손실 계산을 위한 프로젝션 헤드로 구성되며, 대조 학습을 통해 도메인 불변 (domain invariant) 특징을 추출하도록 사전 학습된다. RGB와 HSI 이미지에는 ImageNet으로 사전 학습된 ResNet 50을, SR 이미지에는 사전 학습된 3D CNN을 사용하였다. 프로젝션 헤드는 2-layer Multi Layer Perceptron (MLP)로 구성되며 각 인코더에서 추출된 특징 벡터를 대조 학습에 적합한 저차원 벡터로 변환해주는 역할을 한다. Information Noise-Contrastive Estimation (InfoNCE) 손실 함수를 통해 변환된 저차원 벡터가 학습에 활용된다. 이때 인코더는 특징 공간, 프로젝션 헤드는 투영 공간이므로 차원 축소로 인한 정보

손실은 투영 공간에서만 이루어진다. 또한, Downstream task에서는 인코더를 통해 추출된 특징만이 사용된다.

학생 복원기는 사전 학습된 교사 RGB 인코더의 특징을 입력받아서 교사 HSI, SR 인코더의 특징을 모사하도록 학습된 2-layer MLP이다. HSI와 SR는 개별 복원기를 가지며, 손실을 계산하고 학습하는 과정에서 교사 인코더로부터 학생 복원기로의 지식 전이가 발생한다.

최종 분류기는 실제 RGB 특징과 학생 복원기가 생성한 가상의 HSI, SR 특징을 융합하여 최종적으로 피부의 상태(정상, 아토피)를 분류하는 선형 분류기이다.

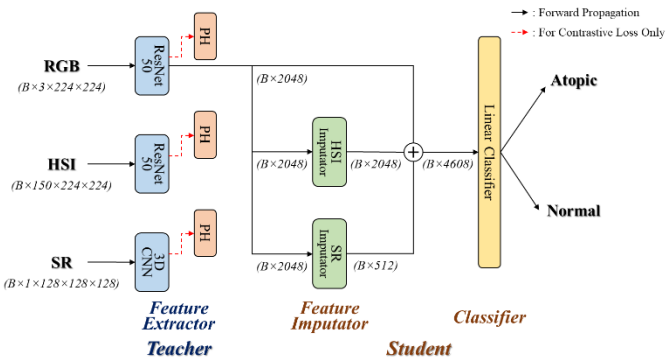


그림 1. 제안 모델의 Framework

2.3. 비교 연구

제안 모델의 성능을 검증하기 위해 3가지 모델의 성능을 비교하고자 한다. 첫번째는 단일 모달 분류기로 RGB, HSI, SR 각각의 특징만 단독으로 사용된다. 두번째는 멀티모달 융합 분류기로 실제 RGB, HSI, SR 특징을 융합하여 사용된다. 세번째는 제안모델로, RGB를 이용해 HS, SR 특징을 복원 및 융합하여 사용된다. 이때, 특징 추출에는 모두 사전 학습된 교사 인코더를 사용한다. 정확도 (%)와 F1-score로 분류 성능을 평가하며, 3겹 교차 검증을 서로 다른 random seed (42, 123, 2024)로 총 3번 수행한 후의 평균값을 비교한다. 모든 실험은 Intel(R) Core(TM) i7-13700F, 64GB RAM, NVDIA GeForce RTX 4090 (24GB) GPU 2개가 장착된 워크스테이션에서 수행되었다. 소프트웨어는 Window 11 Pro, Python 3.10.15, PyTorch 2.7.1, CUDA 11.8환경에서 모델을 구현하고 학습시켰다.

3. 연구 결과

대조 학습의 결과 확인을 위해 RGB, HSI, SR의 교사 인코더에서 추출된 특징을 Uniform Manifold Approximation and Projection (UMAP) 알고리즘으로 시각화하였다 (그림2). RGB와 HSI 공간에서 정상과 아토피 클래스가 명확하게 군집화되는 것을 확인하였다. SR의 경우 두 클래스의 일부가 섞여있는 것을 확인할 수 있으며, 작은 데이터 셋의 영향 또는 차원 축소로 인한 현상으로 해석된다. UMAP 기반의 정성적 평가를 통해 대조 학습이 특징 추출 및 분리에 효과적이라는 것을 확인하였다.

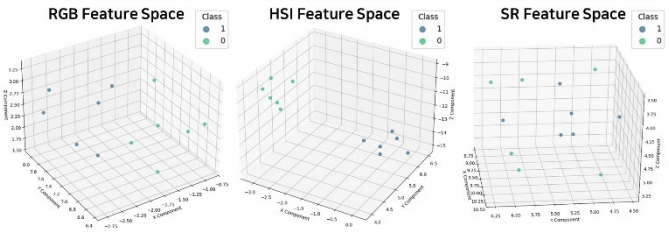


그림 2. RGB, HSI, SR 특징의 UMAP 시각화 결과

분류문제에서 추출된 특징이 각 모달리티의 주요 특성을 포함하고 있는지 정량적으로 평가하기 위해 3가지 모델의 분류 성능을 비교하였다 (표1).

표 1. 3가지 모델의 분류 성능 평가 결과

Classifier		Accuracy (%)	F1-score
Single-modal	RGB	100.00% ± 0.00%	1.00% ± 0.00
	HSI	87.36% ± 7.73%	0.86% ± 0.08
	SR	76.25% ± 6.64%	0.73% ± 0.83
Multi-modal	R+H+S	94.99% ± 5.29%	0.95% ± 0.06
PRISM	**R+H+S**	**98.69%± 1.85%**	**0.99 ± 0.02**

첫번째인 단일 모달 분류기 결과 RGB에서 100%±0.00%의 정확도를 보였으나, 이는 작은 데이터 셋 크기로 인한 과적합으로 해석할 수 있다. HSI, SR의 경우 각각 87.36% ± 7.73%, 76.25% ± 6.64%의 낮은 정확도를 보였다. 두번째인 멀티모달 융합 분류기는 실제 RGB, HSI, SR 데이터를 사용한 결과이며 94.99%±5.29% 정확도를 보였다. 세번째인 제안 모델은 실제 RGB를 통해 HSI, SR 특징을 복원하고 분류한 결과로 98.69% ± 1.85%의 높고 안정적인 정확도를 보였다.

이를 통해 단일 모달리티보다 멀티 모달리티 데이터를 활용하는 것이 분류 성능 향상에 도움이 된다는 것을 확인하였다. 또한, 성능 비교 결과 제안 모델은 가장 실용적인 단일 모달리티 (RGB)의 입력만으로도 높은 분류 정확도와 안정성을 보였으며, 실제 멀티모달 데이터를 사용한 멀티모달 융합 분류기보다도 뛰어난 일반화 성능을 보였다. 이러한 결과는 지식 증류 유무에 따른 강력한 규제 (Regularization) 효과로 해석 가능하다 [4]. 제안 모델은 지식 증류를 통해 특징을 복원하고 융합하는 과정에서 원본 데이터의 핵심 경향성은 유지되고, 노이즈는 완화되는 효과가 발생하였다. 이는 모델의 과적합을 방지하는 규제 효과로 작용하였고, 결과적으로 모델의 일반화 성능과 안정성 극대화에 긍정적으로 기여하였다. 반면, 멀티모달 융합 분류기는 원본의 노이즈까지 학습하여 과적합이 발생하고 모델의 일반화 성능이 다소 낮아진 것으로 분석된다.

본 연구의 결과를 통해, 제안 모델이 제한된 데이터 환경에서 높은 정확도와 실용성을 모두 달성할 수 있음을 확인하였다.

4.참고 문헌

[1] Park, Y. I., et al. "A new approach to quantify and grade radiation dermatitis using deep-learning segmentation in skin photographs." *Clinical Oncology*, Vol 35. No. 1, 2023

[2] E. B. Kim, Y. S. Baek, and O. S. Lee. "A study on the classification of atopic dermatitis by spectral features of hyperspectral imaging." *IEEE Access*, 2024

[3] Saccomano, G., et al. "The potential of x-ray virtual histology in the diagnosis of skin tumors." *Skin Research and Technology*, Vol 30. No. 10, e13801, 2024

[4] Müller, Rafael, Simon Kornblith, and Geoffrey E. Hinton. "When does label smoothing help?." *Advances in neural information processing systems*, Vol 32, 2019

Poster-189

HSSW: BPPV 진단을 위한 다중 스케일 윈도우를 이용한 하이브리드 신호 분석

박찬민[1,+], 손상원[1], 조성양[2], 이은재[2,*], 임민혁[1,*]

[1]울산과학기술원 의과학대학원 [2]울산대학교 의과대학, 서울아산병원 신경과

+제1저자 (vow0723@unist.ac.kr) *교신저자 (eunjae.lee@amc.seoul.kr, limmh@unist.ac.kr)

HSSW: Hybrid Signal analysis with multi-Scale Sliding Window for BPPV Diagnosis

Chan Min Park[1,+], Sangwon Son[1], Sungyang Jo [2], Eun-Jae Lee [2,*], Min Hyuk Lim [1,*]

[1]Graduate School of Health Science and Technology, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST), Korea

[2]Asan Medical Center, Korea

+ first author (vow0723@unist.ac.kr) * Corresponding author (eunjae.lee@amc.seoul.kr, limmh@unist.ac.kr)

Abstract

Nystagmus is often used to diagnose benign paroxysmal positional vertigo (BPPV). In this study, we proposed HSSW, a model that combined CNN and a Transformer to detect nystagmus from video nystagmography(VNG). Because nystagmus duration varied, we used multi scale sliding windows(0.5s, 1s, 2s) to extract patterns at different timescales. For each window scale, 1D CNN extracted local features and Transformer model formed temporal structure, and the probabilities from each scale were combined by soft voting. On 193 VNG videos, our model outperformed CNN + LSTM and 1D CNN in BPPV prediction. These results suggested that considering multiple temporal patterns was useful for BPPV diagnosis.

1. 연구 배경

안진(Nystagmus)은 본인의 의지와 무관하게 나타나는 규칙적인 안구의 왕복 진동을 의미하며, 전정계 및 신경계 이상을 반영하는 임상 지표로 사용된다. 특히, jerk Nystagmus는 느린 구간(slow phase) 뒤, 이어지는 반대 방향의 빠른 재설정 운동(fast phase)의 반복적인 순환으로 구성되고, 이러한 jerk 안진은 안정된 시선 고정(steady visual fixation)을 방해한다[1], [2]. 양성 발작성 체위성 현기증(BPPV)는 체위 변화에 의해 유발되는 전정질환으로, Dix–Hallpike 및 supine roll 검사에서 jerk 안진이 관찰된다.[3]

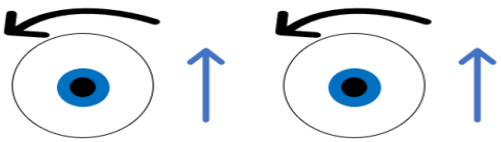


그림 1. Jerk Nystagmus 움직임

비디오 안진 검사(VNG)는 비침습적으로 안진을 관찰 및 정량화 할 수 있어 BPPV 진단에 널리 사용되고 있다. 최근에는 인공 지능을 활용해 영상에서 신호(동공의 움직임)를 정밀 추출하거나, 영상으로부터 안진 존재 및 유형을 직접 탐지하도록 하는 시도가 활발하게 진행되고 있다. ANyEye[4]는 CNN[5]을 이용하여 영상에서 동공 영역 추출 및 기기의 미끄러짐 보정을 한 후, U-net[6]을 통하여 BPPV를 진단한다. 관련 연구로는 영상에서 안진의 존재 여부를 직접 분류하는 시스템(aEYE)[7], VNG 시계열을 활용한 수평 안진 자동 검출 연구[8], optical flow 기반 검출 프레임워크[9]가 있다.

그러나, 기존 인공지능을 활용한 자동 탐지 기법들 대부분 고정길이의 슬라이딩 윈도우를 사용하기 때문에 환자마다 다르게 주어지는 자극으로 인하여 일정하지 않은 Nystagmus의 주기를 온전하게 탐지하지 못하는 단점이 있다. 또한 선행 연구의 대다수는 시계열 분석에서 윈도우 수준 표현을 분석하는 CNN만 연구하거나, 전 구간을 대상으로 분석하는 Transformer만 탐구하는 경향이 있다. 이는 두 과정에서 요구하는 모델의 역할이 다르기 때문에 비효율적일 수 있다. 이에 우리는 윈도우 임베딩(local pattern extraction) 과 전구간 맥락 통합(long dependency modeling) 두 과정을 하이브리드하게 진행할 수 있는 CNN과 Transformer를 결합한 모델을 제안하고자 한다. 더 나아가 스케일별(0.5s, 1s, 2s)로 영상을 끝까지 슬라이딩하여 스케일별 영상의 BPPV일 확률을 얻고, 이를 소프트 보팅(soft voting)으로 통합함으로써 전체 영상에 대한 BPPV 확률을 예측한다.

2.연구 방법

본 연구는 서울아산병원으로부터 제공받은 BPPV 환자 50명과 정상인 143명의 데이터를 활용하여 실험을 진행하였다. 사용된 비디오는 약 30초 길이의 VNG 기반 mp4 파일로, 피험자의 좌, 우 눈동자를 동시에 촬영하여 안구 운동을 기록하였다. 영상은 BPPV 진단 과정에서 흔히 사용되는 Dix–Hallpike와 supine roll과 같은 검사를 포함하고 있으며, 다양한 자세 변화에 따른 안진 영상이 포함되어 있다. 본 연구에 사용된 VNG 영상 자료는 두 눈만 촬영된 비식별화된 데이터로 개인 식별이 불가능하였다. 본 연구는 후향적(retrospective) 설계로 별도의 연구 참여 동의서는 받지 않았으며, 서울아산병원 기관생명윤리위원회(Institutional Review Board, IRB) 승인(과제 번호: 2024-1438)을 받았다.

안진 영상의 데이터 전처리 과정에서는 급격한 위치 변화를 잡음으로 간주하여 해당 프레임을 제거하고, 잔여 프레임을 기반으로 연속된 시계열을 재구성하였다. 이후 좌, 우 눈동자의 동공 중심 좌표$(x,\ y)$로부터 시간에 따른 변화율을 계산하여 속도 성분$(v_x,\ v_y)$을 추출하였다. 이들을 이용하여 좌, 우 눈동자의 x, y 좌표로부터 8차원 시퀀스(좌/우 x, y, v_x , v_y)를 구성하고, Nystagmus의 엔트로피, 비대칭성, 상관관계 등 8차원 특징을 추가하여 모델의 입력을 구성하였다.

시계열 분석에는 multi-scale 윈도우를 적용하였다. 전체 비디오를 각기 다른 스케일인 0.5초, 1초, 2초로 슬라이딩하여 윈도우를 구성하였고, 각 스케일별로 윈도우는 일정한 stride(스케일의 3분의 1)로 겹치게 분할하였다.

생성된 각 윈도우는 1D-CNN 기반 인코더를 거쳐 지역적 패턴을 추출한 뒤, AvgPool로 윈도우 길이에 무관한 임베딩으로 변환하였다. 나아가 스케일 임베딩을 더해 스케일 정보를 명시적으로 추가하였다. 이를 통해 모델은 같은 형태의 Nystagmus라 하더라도 길이가 짧은 패턴과 긴 패턴을 구분하여 해석할 수 있도록 설계하였다.

이어서 생성된 윈도우 임베딩들은 positional 인코딩 후, Transformer 인코더의 입력으로 사용되었다. Transformer는 어텐션 메커니즘을 이용하여 윈도우 간 상호작용을 학습하며, 시간 축 전반의 장기, 단기 의존성을 동시에 학습한다. 하나의 윈도우에서 드러나는 패턴뿐 아니라, 영상 전체에 걸쳐 반복되거나 변형되는 Nystagmus 패턴(한 번의 떨림 신호가 아닌 신호의 주기와 같은 신호 사이의 관계)까지 함께 포착할 수 있다. 이후, 어텐션 풀링(attention pooling)으로 상대적으로 중요한 윈도우에 더 큰 가중치를 부여하고, 하나의 영상에 대한 확률을 출력했다. 이후 스케일 내에서는 윈도우 확률의 단순 평균으로 스케일별 영상 확률 $P_{\text{video}}^{(0.5s)}, P_{\text{video}}^{(1s)}, P_{\text{video}}^{(2s)}$ 을 얻고, 스케일 간에도 평균으로 최종 영상 확률(BPPV vs normal)을 결정하였다. 학습은 BCEwithlogits 과 AdamW 로 진행하였다. Train, valid, test는 5:3:2의 비율로 나누어 진행하였다.

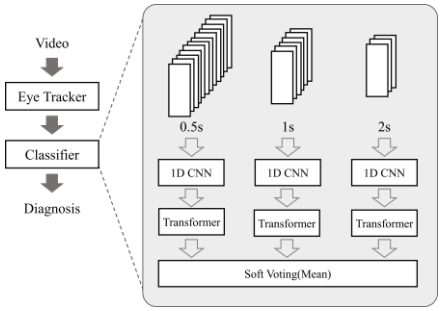


그림 2. 모델 Overview

3. 연구 결과

실험은 두 단계로 나누어 진행하였다. 첫 번째 실험은 윈도우 길이를 1초로 고정하고, 제안한 HSSW 모델(CNN+Transformer)과 기존 모델들의 성능을 비교하였다. 비교 대상은 aEYE(CNN + LSTM)과 1D CNN 단일 모델이었으며, 표 1에서 보여주듯이 하이브리드 모델의 성능이 가장 좋게 나온 것을 확인할 수 있다. 1D CNN 단일 모델은 학습 데이터(train set)에서의 성능은 높게 나왔으나, 노이즈까지 학습하여 검증 데이터(test set)에서 성능이 떨어진 것으로 확인이 된다.

	accuracy	f1	auroc
CNN + LSTM	0.68(0.63)	0.58(0.55)	0.72(0.68)
1D CNN only	0.71(0.67)	0.66(0.61)	0.76(0.73)
CNN + Transformer	0.75(0.72)	0.67(0.63)	0.80(0.78)

표 1. CNN + Transformer train(test)성능 비교

두 번째 실험은 하이브리드(CNN + Transformer) 모델에서 윈도우의 길이를 1s로만 사용했을 때와 multi-scale 윈도우로 학습을 진행한 결과를 비교하였다. 표 2와 같이 multi-scale에서 보다 안정적인 성능을 확인할 수 있다. 이는 BPPV를 진단하는데 고정된 길이의 패턴이 아닌 다양한 길이에서 살펴봐야 함을 보여준다.

	accuracy	f1	auroc
1s window	0.75(0.72)	0.67(0.63)	0.80(0.78)
Multi-scale window	0.78(0.73)	0.69(0.66)	0.82(0.80)

표 2. Multi-scale window train(test)성능 비교

기존 모델들[4],[7],[8]이 문헌에서 보고된 높은 성능(accuracy 0.9 이상)이 본 연구에서는 그대로 재현되지 않은 이유에 대해 몇 가지를 추측하고 있다. 첫째, BPPV 환자가 양성임에도 불구하고 안진(Nystagmus)이 매우 약하거나 간헐적으로만 보이는 사례가 포함됐을 가능성이 크다. 이와 같을 경우 환자의 눈동자 움직임이 진폭이 작고 박동 간 규칙성이 BPPV와 다르게 나타나 학습을 방해하고, f1과 재현율이 떨어질 수 있다. 실제로 sawtooth형 패턴의 안진(Nystagmus)이 명확히 관찰되는 환자들(50명 중 21명)로만 학습, 평가 셋을 구성하였을 때, 그림 3과 같이 모델의 예측 성능이 높게 나타나는 것을 확인하였다. 두 번째, 노이즈의 전처리 및 모델의 하이퍼 파라미터 설정 차이도 영향을 미쳤을 것으로 생각한다.

향후 연구에서는 안진(Nystagmus)이 명확하게 나타나지 않는 사례에 대한 민감도를 높이기 위해, BPPV임이 명확한 샘플에서 노이즈가 많은 샘플로 점진적으로 학습 범위를 넓히는 커리큘럼 학습(curriculum learning)과 강건 손실(focal loss)을 도입하고자 한다.

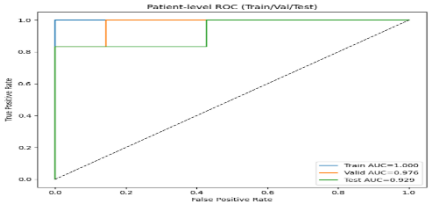


그림 3. 데이터 필터링 후, HSSW ROC curve

4. Acknowledgements

본 연구는 과학기술정보통신부 한국연구재단 기본연구(RS-2023-00251482) 및 과학기술정보통신부의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2024-00444014). 또한 정부(교육부)의 재원으로 울산대학교 글로컬대학 COMPaaS 공동연구과제의 지원을 받아 수행된 연구임 (2025-0629).

5.참고 문헌

[1] S. D. Z. Eggers, A. Bisdorff, M. von Brevern, D. S. Zee, J.-S. Kim, N. Perez-Fernandez, M. S. Welgampola, C. C. Della Santina, and D. E. Newman-Toker, "Classification of vestibular signs and examination techniques: Nystagmus and nystagmus-like movements," J. Vestib. Res., vol. 29, no. 2–3, pp. 57–87, 2019.

[2] S. H. Jeong and J.-S. Kim,"Update on nystagmus and other ocular oscillations," J. Clin. Neurol., vol. 17, no. 3, pp. 337–343, 2021.

[3] M. von Brevern, P. Bertholon, T. Brandt, T. D. Fife, T. Imai, D. Nuti, and D. E. Newman-Toker,"Benign paroxysmal positional vertigo: Diagnostic criteria," J. Vestib. Res., vol. 25, no. 3–4, pp. 105–117, 2015.

[4] Y. Lee, S. Lee, J. Han, et al.,"A nystagmus extraction system using artificial intelligence for video-nystagmography (ANy-Eye)," Sci. Rep., vol. 13, 2023.

[5] A. Krizhevsky, I. Sutskever, and G. E. Hinton,"ImageNet classification with deep convolutional neural networks," Commun. ACM, vol. 60, no. 6, pp. 84–90, 2017.

[6] O. Ronneberger, P. Fischer, and T. Brox,"U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation," International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI), 2015.

[7] A. S. Goldschagg, M. Rambold, C. Etz, and F. Bremmer,
"aEYE: A deep learning system for video nystagmus detection," Front. Neurol., vol. 13, 2022.

[8] J. L. Newman, J. S. Phillips, and S. J. Cox, "1D Convolutional Neural Networks for detecting nystagmus," *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, vol. 24, no. 11, pp. 3121–3128, Nov. 2020.

[9] W. Zhang, Q. Li, and H. Chen,"Deep learning–based torsional nystagmus detection for dizziness and vertigo diagnosis," Biomed. Signal Process. Control, vol. 68, Art. no. 102616, 2021.

Poster-190

적응형 MRI 기반 디지털 트윈을 활용한 유방 종양 진행 및 치료 반응의 개인 맞춤형 지능형 시뮬레이션

Fauzan Syarif Nursyafi[1], 임기무[2,3*]
메디컬IT융합공학과, 국립금오공과대학교, 대한민국 구미시 39177[1]
바이오메디컬공학과, 국립금오공과대학교, 대한민국 구미시 39177[2]
메타하트 주식회사, 대한민국 구미시 39253[3]

Adaptive MRI-Guided Digital Twin for Personalized and Intelligent Simulation of Breast Tumor Progression and Therapy Response

Fauzan Syarif Nursyafi[1], Ki Moo Lim[2,3*]
[1]Departement of Medical IT Convergence Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi, 39177, Republic of Korea.
[2]Department of Biomedical Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi, 39177, Republic of Korea.
[3]Meta Heart Co., Ltd, Gumi, 39253, Republic of Korea.
[*]kmlim@kumoh.ac.kr

Abstract

Breast cancer is the most prevalent malignancy among women, with highly variable outcomes due to tumor heterogeneity and patient-specific therapy responses. Predicting tumor progression and treatment efficacy remains challenging in precision oncology. Here, we present an adaptive, MRI-guided digital twin that integrates voxel-wise 3D tumor masks and spatial drug maps from DCE-MRI with a reaction-diffusion model of tumor growth, calibrated to patient-specific proliferation, diffusion, and drug efficacy parameters. Applied to two patients (BC05: pCR; BC01: non-pCR) over 140 days, the digital twin accurately predicted total tumor volume and cellularity, capturing 61.3% and 29.5% tumor reductions and distinguishing responders from non-responders with 100% accuracy and an AUC of 1.0, demonstrating its potential for personalized in silico therapy simulation.

1. Introduction

Breast cancer is the most prevalent malignancy among women worldwide, with 2.3 million new cases and 685,000 deaths reported in 2020, highlighting its substantial public health burden [1]. Despite advances in early detection and systemic therapies, clinical outcomes remain highly heterogeneous due to tumor variability and patient-specific treatment responses. Conventional imaging and histopathology, while essential for diagnosis, provide limited insight into tumor dynamics, restricting the ability to predict individual disease progression or optimize therapy.

To address this gap, this study develops an adaptive, MRI-guided digital twin for breast cancer that leverages patient-specific dynamic contrast-enhanced MRI (DCE-MRI) to generate 3D tumor masks and voxel-wise drug distribution maps. By integrating these data with reaction-diffusion models of tumor growth and chemotherapy response, the digital twin enables personalized simulations of tumor evolution under different treatment regimens, offering a predictive and in silico platform to optimize individualized therapy and explore alternative strategies in precision oncology.

2. Materials and Methods

The first step involved preprocessing MRI data to extract the 3D tumor mask and voxel-wise drug spatial map, which were used as inputs for digital twin modeling of breast cancer. In this study, MRI data were preprocessed to extract 3D tumor masks and voxel-wise drug maps for digital twin modeling. Dynamic contrast-enhanced MRI (DCE-MRI) from the QIN Collections [2], including pre-therapy (V1) and post-one-cycle (V2) scans with pCR/non-pCR labels, were combined into 4D volumes, baseline-corrected, and tumor voxels masked for analysis.

For each voxel, the area under the curve (AUC) of the DCE-MRI signal was normalized to generate the spatial drug map $C(x, y, z)$. which together with the tumor ROI served as inputs for simulations **(Figure 1).**

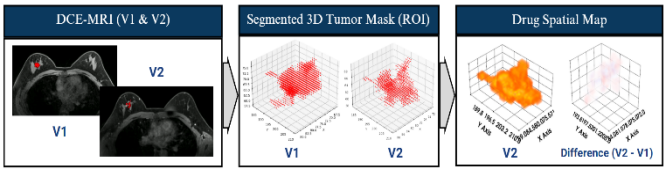


Figure 1. Workflow for processing MRI scans into inputs for the digital twin model.

Tumor growth and chemotherapeutic response were modeled using a voxel-wise reaction-diffusion partial differential equation (PDE) as follows [3]:

$$\frac{\partial N(\mathbf{x},t)}{\partial t} = \underbrace{\nabla \cdot \left(D(\mathbf{x},t)\nabla N(\mathbf{x},t)\right)}_{\text{tumor cell diffusion}} + \underbrace{k(\mathbf{x})\left(1-\frac{N(\mathbf{x},t)}{\theta}\right)N(\mathbf{x},t)}_{\text{logistic proliferation}} - \underbrace{N(\mathbf{x},t)\sum_i \lambda_i(\mathbf{x},t)}_{\text{treatment-induced death}},$$

where $N(\boldsymbol{x}, t)$ is the tumor cell density at voxel x and time t, $D(\boldsymbol{x}, t)$ is the diffusion coefficient modulated by local tumor density gradients, k is the proliferation rate, and θ is the global carrying capacity. The diffusion term describes tumor cell motility and spreading, with local mechanical resistance modeled as:

$$D(\boldsymbol{x},t) = D_0 \exp\left(-\gamma\sigma(\boldsymbol{x},t)\right)$$

where D_0 is the baseline diffusion coefficient, $\sigma(\boldsymbol{x},t)$ is the voxel-wise gradient magnitude of tumor density, and γ is an empirical coupling constant.

The treatment-induced cell death rate for drug i is represented as:

$$\lambda_i(\boldsymbol{x},t) = \alpha_i C_i(\boldsymbol{x}) e^{-\beta_i(t-t_i)}$$

where α_i is the drug efficacy, β_i is the decay rate of drug effect, t_i is the time of drug administration, and $C_i(\boldsymbol{x})$ is the voxel-wise spatial distribution of the drug, derived from MRI-informed maps. For multiple administrations, the effects are accumulated over all doses. The initial tumor cell density $N(\boldsymbol{x},0)$ was reconstructed from segmented 3D MRI tumor masks, and the total tumor volume (TTV) was computed as:

$$TTV(t) = \sum_{\boldsymbol{x}} N(\boldsymbol{x},t)\ \Delta x\,\Delta y\,\Delta z$$

To personalize the model according to the specific characteristics of each breast cancer patient, Patient-specific parameters $(k,\ D_0,\ \alpha_i,\ \beta_i)$ were calibrated using V1 and V2 MRI scans, with Doxorubicin and Cyclophosphamide administered on days 14 and 21. Tumor evolution was simulated over 30 days with an explicit finite difference scheme (Δt = 0.02 day), and predicted TTV and total tumor cellularity (TTC) were iteratively matched to observations **(Figure 2)** to generate the final patient-specific digital twin.

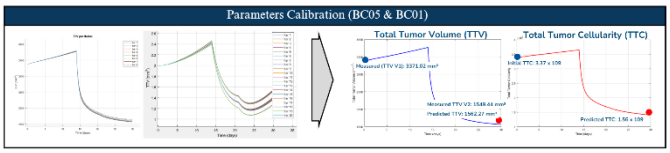


Figure 2. MRI-Based Tumor Digital Twin with Adaptive Parameter Calibration.

3. Results

The digital twin model was applied to two patients from the QIN dataset: BC05 (pCR) and BC01 (non-pCR), simulating tumor progression over 140 days, including V1 (baseline), V2 (after one drug cycle), V3 (after two cycles), and subsequent weekly administrations (**Figure 3**). Predicted total tumor volume (TTV) and total tumor cellularity (TTC) at V2 were compared with MRI measurements to evaluate treatment response.

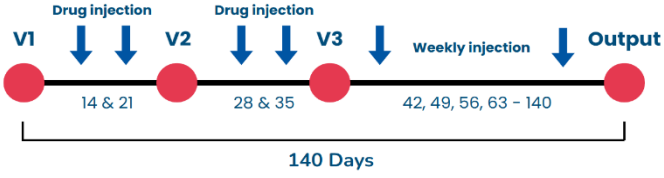


Figure 3. Breast cancer digital twin simulation scenario with calibrated parameters.

For BC05, the predicted TTV at V2 was 1562.27 mm³, compared with the measured 1549.44 mm³ (error 0.83%), reflecting a 61.3% tumor reduction consistent with complete response. In contrast, BC01 exhibited a predicted TTV of 14,059.17 mm³ versus a measured 14,059.83 mm³ (error 0.0047%), corresponding to a 29.5% reduction without achieving remission (**Figure 4**).

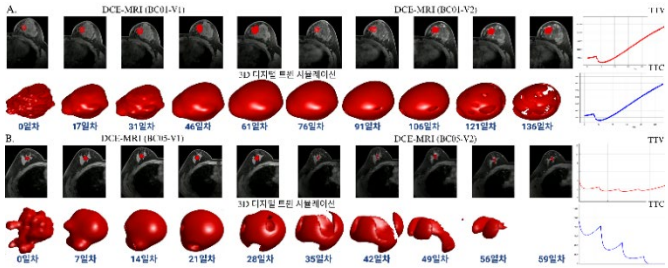


Figure 4. Simulation-based 3D TTV predictions with daily TTV and TTC profiles. (A) BC01 (non-pCR); (B) BC05 (pCR).

These results indicate that the digital twin accurately reproduced patient-specific tumor dynamics, distinguishing complete from non-complete responders with 100% accuracy and an AUC of 1.0. Predicted TTV and TTC closely matched measurements, capturing both tumor regression and cellular responses, while differences between patients highlight its potential for personalized treatment planning and in silico therapy optimization.

4. Acknowledgements

This research was partially supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) under the Basic Science Research Program (2022R1A2C2006326); the Ministry of Science and ICT (MSIT) and the Institute of Information & Communications Technology Planning & Evaluation (IITP) through the Innovative Human Resource Development for Local Intellectualization Program (IITP-2025-RS-2020-II201612); and the Gyeongsangbuk-do RISE (Regional Innovation System & Education) Project – Regional Growth Innovation LAB.

5. References

[1] Arnold M, Morgan E, Rumgay H, et al. Current and future burden of breast cancer: Global statistics for 2020 and 2040. The Breast 2022;66:15–23. https://doi.org/10.1016/j.breast.2022.08.010.

[2] Huang W, Tudorica A, Chui S, et al. Variations of dynamic contrast-enhanced magnetic resonance imaging in evaluation of breast cancer therapy response: a multicenter data analysis challenge (QIN Breast DCE-MRI) 2014. https://doi.org/10.7937/K9/TCIA.2014.A2N1IXOX.

[3] Wu C, Jarrett AM, Zhou Z, et al. MRI-based digital models forecast patient-specific treatment responses to neoadjuvant chemotherapy in triple-negative breast cancer. Cancer Res 2022:CAN-22-1329. https://doi.org/10.1158/0008-5472.CAN-22-1329.

nnU-Net 기반 교차검증 앙상블을 이용한 뇌졸중 병변 분할

이준범 [1], 권도형 [1], 김원진 [1], 한승환 [1], 김도현 [1], 김도연 [2], 최준열 [1*]

연세대학교 의공학부 [1]

분당서울대병원 신경과 [2]

Stroke Lesion Segmentation Using nnU-Net with Cross-Validation Ensemble

Junbeom Lee[1], Dohyeong Kwon[1], Wonjin Kim[1], Seunghwan Han[1], Dohyeon Kim[1], Do Yeon Kim[2], Joon Yul Choi[1*]

[1]Department of Biomedical Engineering, Yonsei University, Wonju, Republic Korea

[2]Department of Neurology and Cerebrovascular Center, Seoul National University Bundang Hospital, Seoul National University College of Medicine, Seongnam, Republic of Korea

jychoi717@yonsei.ac.kr

Abstract

Ischemic stroke is a leading cause of mortality and long-term disability, highlighting the need for accurate lesion segmentation in diagnosis and treatment. Manual segmentation is time-consuming and inconsistent, prompting the use of deep learning methods. This study applied nnU-Net for automatic stroke lesion segmentation using DWI images from 380 patients. The model was trained with a 3D full-resolution U-Net, Dice and cross-entropy loss, and five-fold cross-validation with soft voting for ensemble predictions. On the test set, the model achieved an average Dice score of 0.77 and lesion-wise F1 score of 0.76. This study demonstrated that the proposed deep learning model can achieve high accuracy in stroke lesion segmentation using only DWI.

Keywords: Stroke, Lesion segmentation, Deep learning, nnU-Net, MRI

1. 연구 배경

뇌졸중(stroke)은 전 세계적으로 높은 사망률과 장기 장애를 초래하는 주요 질환 중 하나이다[1]. 뇌졸중 병변 영역의 정확한 분할은 환자의 진단 및 예후 예측, 그리고 치료 계획 수립에 중요한 역할을 한다. 그러나 임상의가 병변을 수동으로 분할하는 과정은 개인 간 편차가 크고, 많은 시간과 노력을 요구한다는 한계가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 머신러닝[2]과 딥러닝[3] 기반의 자동화 기법들이 활발히 연구되어 왔으며, 특히 딥러닝 기반 접근법은 최근 몇 년간 현저한 성능 향상을 보여주고 있다. 본 연구에서는 이러한 딥러닝 기법 중 하나인 nnU-Net[4]과 앙상블 기법을 접목하여 뇌졸중 병변의 자동 분할을 수행하였다.

2. 연구 방법

2.1 DWI 데이터 획득

본 연구는 380 명의 뇌졸중 환자로부터 획득한 Diffusion Weighted Imaging (DWI) 영상을 활용하였다 (그림 1). 영상의 파라메터는 다음과 같다: Philips 3T MRI, b-value = 1000 s/mm², voxel size = 0.89 × 0.89 × 6.0 mm³, TR = 3000 ms, TE = 70–73 ms, FA = 90°. 데이터셋은 모델의 성능 평가를 위해 304 명(80%)의 데이터를 학습용으로, 나머지 76 명(20%)의 데이터를 테스트용으로 사용하였다. 병변 라벨 데이터는 수동으로 분할한 이진 마스크를 활용하였다.

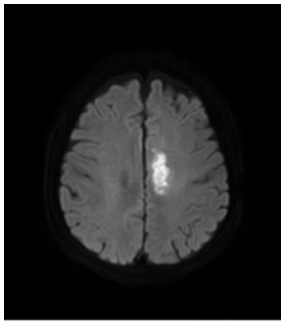


그림 1. 뇌졸중 환자의 DWI 영상

2.2 병변 분할을 위한 nnU-net 학습 구조

본 연구에서는 뇌졸중 병변의 자동 분할을 위해 nnU-Net 프레임워크를 사용하였다. DWI 영상을 입력으로 활용하였으며, 영상 전처리 과정에서는 스캔을 일정한 voxel 해상도로 재구성하고 z-score 기반의 강도 정규화를 수행하였다. 학습과정에서 모델은 3D full-resolution U-Net 구조를 기반으로 하며, 병변이 포함된 영역의 학습 비중을 높이기 위해 foreground oversampling 전략을 사용하였다. 손실 함수는 Dice loss 와 cross-entropy loss 의 조합으로 구성되었고, optimizer 로는 stochastic gradient descent (SGD)를 사용하였다. 모델 학습은 5-fold cross-validation 을 통해 수행되었으며, 검증 세트에서의 Dice Similarity Coefficient (DSC)를 기준으로 성능을 평가하였다. 각 fold 에 대해 검증 데이터의 Dice score 가 최대가 되는 시점의 모델을 해당 fold 의 best model 로 정의하였다. 최종 병변 마스크는 모든 fold 의 best model 결과를 soft-voting ensemble 방식으로 통합하여 생성하였다(그림 2).

2.3 모델 성능 평가 지표

모델의 성능 평가는 Dice score 와 lesion-wise F1 score 를 지표로 사용하였다. Dice scores 는 예측된 병변과 실제 병변 간의 중첩 정도를 측정하여 전체적인 분할 정확도를 평가하고, lesion-wise F1 score 는 개별 병변 단위에서의 검출 성능을 정량화하여 모델이 각 병변을 정확히 탐지하고 식별하는 능력을 반영한다. 각 환자별로 계산된 지표를 평균하여 전체 모델의 정량적 성능을 산출하였다.

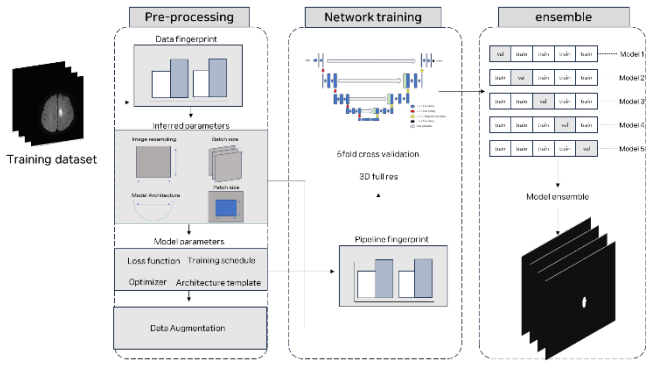


그림 2. 본 연구에서 제안한 nnU-Net 파이프라인

3. 연구 결과

5 개의 fold 모델을 soft voting 으로 앙상블한 결과 총 76 명의 데이터에 대해 평균 dice score 은 0.7663 ± 0.1933, 평균 lesion wise f1-score 는 0.7606 ± 0.2781 를 달성하였다. 모델은 뇌교(pons) 부위에 존재하는 실제 허혈성 병변을 정확히 검출하는 동시에, T2 shine-through 효과로 인해 병변으로 오인될 수 있는 영역을 효과적으로 구분하였다(그림 3 상단 행). 또한, 비교적 작은 병변 또한 정확히 검출하였으며(그림 3 중간 행), 상대적으로 큰 병변에 대해서도 정밀한 분할 성능을 보였다 (그림 3 하단 행).

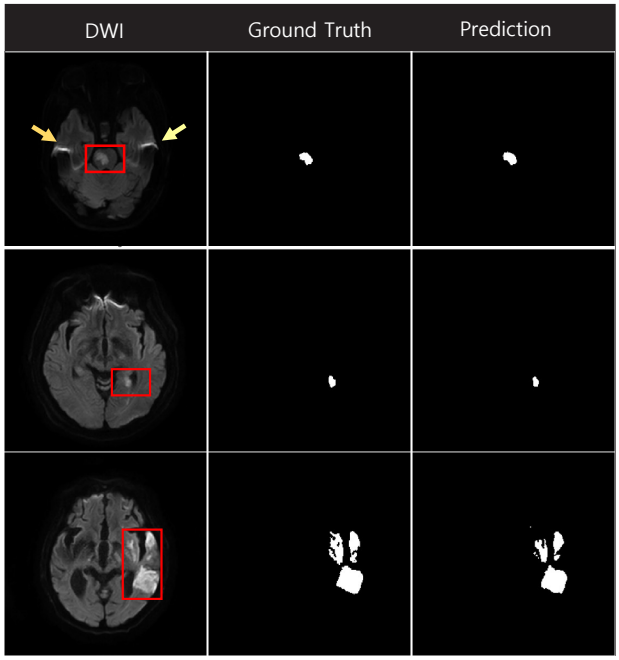


그림 3. nnU-Net 모델의 예측 결과 예시

4. 연구 고찰 및 결론

본 연구에서는 nnU-Net 기반의 딥러닝 프레임워크를 활용하여 뇌졸중 환자의 병변을 자동으로 분할하였다. 제안된 모델은 5-fold cross-validation 을 적용한 앙상블 방식을 통해 다양한 형태와 위치의 병변에 대해 안정적이고 정밀한 분할 성능을 보였다. 소규모 병변부터 광범위한 대형 병변에 이르기까지 다양한 크기의 병변을 일관되게 검출할 수 있었으며, T2 shine-through 효과로 인한 오분류 가능성을 효과적으로 줄일 수 있었다 MICCAI 뇌졸중 분할 챌린지에서 상위권을 달성한 모델의 경우 멀티 모달 입력을 통해 성능을 극대화하였다[5]. 이와 대조적으로, 본 연구는 DWI 단일 입력만으로 높은 정확도를 달성하였다. 본 연구의 접근법은 실제 임상 환경에서 발생할 수 있는 결측 데이터 문제에 대한 강건성을 확보했다는 점에서 의의가 있다.

5.참고 문헌

[1] 김준엽, 배희준, & 박종무. (2019). 뇌졸중 역학보고서, 2018. 주간 건강과 질병, 12(43), 1845-1860.

[2] Roohi, M., Mazloum, J., Pourmina, M.-A., & Ghalamkari, B. (2021). Machine learning approaches for automated stroke detection, segmentation, and classification in microwave brain imaging systems. *Progress In Electromagnetics Research C*, *116*, 193-205.

[3] Abbasi, H., Orouskhani, M., Asgari, S., & Zadeh, S. S. (2023). Automatic brain ischemic stroke segmentation with deep learning: A review. *Neuroscience Informatics*, *3*(4), 100145

[4] Isensee, F., Jaeger, P. F., Kohl, S. A., Petersen, J., & Maier-Hein, K. H. (2021). nnU-Net: a self-configuring method for deep learning-based biomedical image segmentation. Nature methods, 18(2), 203-211.

[5] de la Rosa, E., Reyes, M., Liew, S. L., Hutton, A., Wiest, R., Kaesmacher, J., ... & Wiestler, B. (2025). DeepISLES: a clinically validated ischemic stroke segmentation model from the ISLES'22 challenge. *Nature Communications*, *16*(1)

Poster-192

보행 영상 및 스마트폰 터치 데이터 기반의 파킨슨병 중증도 및 증상 예측

황성현[1], 박기원[1*], 성채린[1], 김률[2]

인천대학교 바이오-로봇시스템공학과[1], 서울대학교병원운영 서울특별시보라매병원 신경과[2]

Prediction of Parkinson's Disease Severity and Symptoms Based on Gait Video and Smartphone Touch Data

Seonghyeon Hwang[1], Kiwon Park[1*], Chaerin Seong[1], Ryul Kim[2]

1. Dept. of Biomedical & Robotics Engineering, Incheon National University, Incheon, South Korea,

2. Department of Neurology, Seoul Metropolitan Government - Seoul National University Boramae Medical Center, Seoul National University College of Medicine, Seoul, South Korea

[*]kiwon@inu.ac.kr

Abstract

Parkinson's disease (PD) is a progressive neurodegenerative disorder caused by degeneration of dopamine-producing neurons in the substantia nigra pars compacta, leading to bradykinesia, tremor, rigidity, and postural instability. The MDS-UPDRS is the standard assessment method, but because it is a subjective test, values may vary depending on the clinician. We evaluated a smartphone-based multimodal approach that integrates gait video features (n = 30) and touch/drawing metrics (n = 72) to predict PD severity and item-level symptoms. Models included LSTM, DNN, hybrid, SVM, and RF. LSTM best predicted total scores (MSE 13.32; MAPE 9.97%; R^2 0.8737). Item-wise accuracy averaged 58.23% (median 58.26%); lower-extremity rigidity, freezing of gait, and rest tremor exceeded 80%. Findings support remote, objective monitoring; future work will incorporate voice/video capabilities and explore the use of Transformers.

1. Introduction

Parkinson's disease (PD) is a progressive neurodegenerative disorder caused by degeneration of dopamine-producing neurons in the substantia nigra pars compacta, leading to impaired motor control and disabling symptoms [1]. Manifestations include bradykinesia, tremor, rigidity, postural instability, and freezing of gait. The Movement Disorder Society–Unified Parkinson's Disease Rating Scale (MDS-UPDRS) remains the gold standard for assessing PD severity. However, despite reliability, the scale has limitations. Assessments are infrequent, rely on the examiner's expertise, and may be subject to bias. In-person evaluations also create barriers for patients with mobility challenges or those far from centers, making it hard to capture daily fluctuations.

To address these gaps, research has explored smartphone-based telemedicine as an accessible approach for PD monitoring [2]. Smartphones contain accelerometers, gyroscopes, and touchscreens, which capture gross and fine motor behavior. Gait features from video indicate impairments such as reduced stride length, step variability, or freezing. Similarly, touchscreen data from tapping or gesture tasks reflect fine motor deficits and bradykinesia.

This study proposes an integrated multimodal analysis of gait video and smartphone touch data to classify PD and predict both overall severity and specific symptom levels. First, we use multimodal smartphone data—gait video and touch interactions—to predict MDS-UPDRS Part III motor scores through regression modeling. Second, we conduct multi-class classification for individual Part III items, capturing impairment levels of distinct symptoms such as finger tapping, hand movements, or lower-limb performance. Multimodal integration of gait and touch data enhances performance by reflecting gross and fine motor dysfunctions, providing a representation of PD motor symptoms. Ultimately, this work advances remote, objective, and symptom-level monitoring of Parkinson's disease, supporting precision medicine and improving accessibility in telemedicine contexts.

2. Methods

2.1 Participants & Data collection

A total of 203 individuals participated in the study, including 82 patients with Parkinson's disease and 121 healthy controls. Eligibility criteria required participants to be at least 30 years of age, with Parkinson's disease formally diagnosed or classified as being in the prodromal phase, for inclusion in the PD group. The study protocol received approval from the Institutional Review Board of Inha University Hospital (IRB No. 2022-09-037), and written informed consent was obtained from all participants before enrollment.

Gait video data and smartphone application touch data were collected for this study using a commercially available Galaxy S22 smartphone device (Samsung Electronics Co., Ltd., Suwon-si, Gyeonggi, Korea). Gait video recordings were obtained in the sagittal plane within a controlled indoor hospital facility, where participants were instructed to walk back and forth at a comfortable pace along a clearly marked 6-meter straight walkway under standardized and monitored conditions to ensure consistency. For the smartphone-based assessment, touch interaction data were acquired through applications.

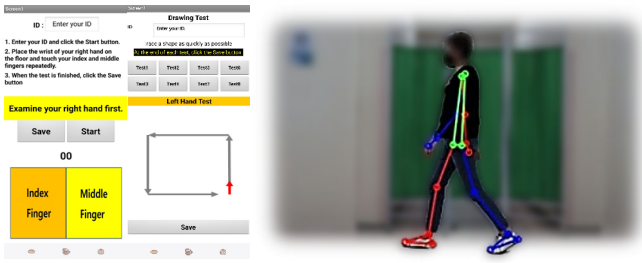


Figure 1. Overview of data acquisition for multimodal analysis using smartphone-based touch interaction tests and gait video recordings.

2.2 Data Processing & Classification Algorithm

The gait video recordings were processed into joint coordinate data using the OpenCV library and the MediaPipe framework. These coordinate data were subsequently transformed into a comprehensive set of 30 gait-related feature datasets through MATLAB-based

computational analysis. For the smartphone touch data, MATLAB was employed to systematically extract and organize features from both the Touch and Draw applications. Specifically, the Touch application was converted into 40 distinct feature datasets, while the Draw application yielded a total of 32 structured feature datasets.

Total Part III scores, as well as individual item-level scores, were predicted using features systematically extracted from gait video data. To achieve this objective, we implemented and compared classification models based on Long Short-Term Memory (LSTM), Deep Neural Networks (DNN), a hybrid LSTM–DNN architecture, Support Vector Machines (SVM), and Random Forests (RF). Model training was conducted with 80% of the dataset, while the remaining 20% was reserved for independent validation.

For the DNN, LSTM, and hybrid models, several strategies were employed to mitigate overfitting, including the use of multiple layers, dropout, batch normalization, early stopping, and related regularization techniques. Additionally, data augmentation methods based on Gaussian noise injection and sample shuffling were employed to enhance the models' generalization capability. These techniques were carefully tuned to achieve optimal learning performance in accordance with the dataset's characteristics.

3. Results

The results of applying machine-learning and deep-learning models trained with a multimodal framework that integrates diverse gait and touch features to predict Parkinson's disease severity and motor symptom levels are as follows. For severity prediction, the LSTM model achieved the best performance, with a mean squared error (MSE) of 13.32, a mean absolute percentage error (MAPE) of 9.97%, and a coefficient of determination (R^2) of 0.8737 (Figure 2). In descending order of performance after the LSTM, the DNN, Hybrid model, SVM, and RF also demonstrated robust predictive capability.

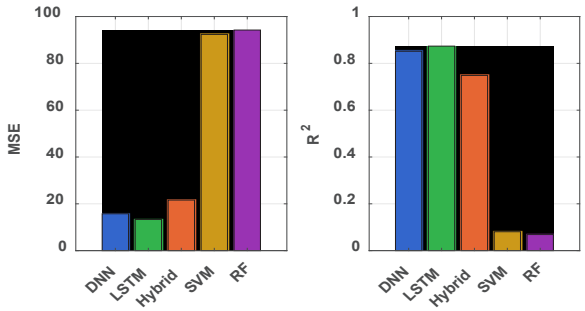


Figure 2. Performance comparison of five models evaluated by MSE and R^2.

Prediction of motor symptoms using individual MDS-UPDRS Part III item scores was formulated as a multi-class classification task, yielding accuracy-based outcomes. The average prediction accuracy across items was 58.23%, with a median of 58.26% (Figure 3). Notably, the Rigidity item in the Lower Extremity category, as well as the Freezing of Gait and Rest Tremor categories, achieved classification accuracies exceeding 80%. For per-item score prediction, the DNN, LSTM, and Hybrid models showed the strongest performance, in that order.

This study yielded several key findings regarding the prediction of Parkinson's disease severity and individual symptoms based on the MDS-UPDRS Part III using smartphone data. The high accuracy demonstrates that smartphones can be effectively utilized to assist with the complex and difficult-to-access MDS-UPDRS assessment. The fact that it relies on low-cost, simple smartphone-based data,

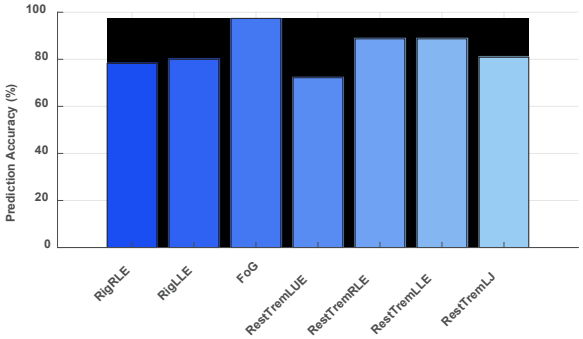


Figure 3. Predicted Accuracy for each MDS-UPDRS Part III motor symptom item based on the multimodal learning model
(RigRLE : Rigidity Right Lower Extremity, RigLLE : Rigidity Left Lower Extremity, FoG : Freezing of Gait, RestTremLUE : Rest Tremor Left Upper Extremity, RestTremRLE : Rest Tremor Right Lower Extremity, RestTremLLE : Rest Tremor Left Lower Extremity, RestTremLJ : Rest Tremor Lip and Jaw)

rather than costly, complex data obtained using external sensors, further solidifies its role as a telemedicine support tool. Total score prediction was confirmed to be feasible with high accuracy. While the overall accuracy of the model requires enhancement, the successful prediction of hallmark Parkinson's disease symptoms, including tremor and bradykinesia, as well as freezing of gait, a disabling feature, signifies its considerable potential.

The strong predictive performance for the MDS-UPDRS Part III total score supports not only the confirmation of Parkinson's disease presence but also the assessment of symptom severity at the individual patient level. This, in turn, enhances the scope of telemedicine for both individual patients and patient groups, facilitating the delivery of specialized care in underserved settings. In addition, the successful prediction of individual item scores suggests that the system can provide more granular clinical support for specific Parkinson's disease symptoms.

While the present results demonstrate adequate accuracy and promise, further refinement is warranted. Potential enhancements include incorporating voice data and MDS-UPDRS Part III examination video data to improve Total Score prediction. Alternatively, efforts could be directed toward elevating the accuracy of lower-performing items to clinically meaningful thresholds. Moreover, augmenting the model repertoire through the exploration of Transformer-based architectures has the potential to yield further enhancements in predictive accuracy. Collectively, these improvements would strengthen the remote diagnosis and monitoring of Parkinson's disease, further establishing the system's utility as a clinical support tool.

4. Acknowledgements

This research was funded by the National Research Foundation (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. RS-2023-00222406).

5. Reference

[1] Sveinbjornsdottir, Sigurlaug. "The clinical symptoms of Parkinson's disease." *Journal of neurochemistry* 139 (2016): 318-324.

[2] Abou, Libak, et al. "Gait and balance assessments using smartphone applications in Parkinson's disease: a systematic review." *Journal of medical systems* 45.9 (2021): 87.

Poster-193

해석 가능한 흉부 X선 시각적 질의응답을 위한 그룹 상대 정책 최적화 기반 접근법

나신영[1], 조민지[1], 유내정[1], 박현진[1,2*]

성균관대학교 인공지능학과[1]

성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과[2]

Towards Interpretable Chest X-ray Visual Question Answering: A Group Relative Policy Optimization Approach

Sinyoung Ra[1], Minji Cho[1], Nejung Rue[1], Hyunjin Park[1,2*]

Department of Artificial Intelligence, Sungkyunkwan University, Republic of Korea[1]

Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University, Republic of Korea[2]

[*]hyunjinp@skku.edu

Abstract

Chest X-ray (CXR) is a primary imaging modality for diagnosing thoracic diseases, yet automated interpretation often lacks transparency required in clinical practice. Recent vision–language models (VLMs) have shown strong performance on visual question answering (VQA) tasks, but typically operate as black boxes without providing interpretable reasoning. In this study, we propose a CXR-focused VQA framework that leverages Group Relative Policy Optimization (GRPO) to incentivize explicit reasoning. We construct a binary (Yes/No) VQA task from a CXR pneumonia dataset and train a Qwen2.5-VL–3B model to produce structured outputs containing both a reasoning trace and the final answer. The reward function combines a format reward to enforce structured reasoning and an accuracy reward to guide correct predictions. Experimental results show that the GRPO-trained model achieved higher accuracy, F1-score, and sensitivity than the base model, demonstrating its effectiveness in enhancing reasoning-driven classification performance. However, the lack of systematic evaluation of the reasoning quality remains a limitation, suggesting that future work should include dedicated metrics and larger-scale datasets to further enhance the reliability and clinical applicability of reasoning-aware medical VLMs.

1. Introduction

Early and accurate identification of pneumonia is crucial for timely treatment and preventing complications, especially in vulnerable populations such as children, the elderly, and immunocompromised patients [1]. However, manual interpretation of Chest X-ray (CXR) images can be subjective and time-consuming, often requiring expert radiological assessment. As the number of radiographic examinations continues to increase, there is a growing demand for automated and reliable pneumonia detection systems to support clinicians in diagnosis and decision-making [2].

Recent advances in large Vision-Language Models (VLMs) have demonstrated strong capabilities in multi-modal understanding and visual question answering (VQA) [3]. In medical imaging, such models have shown impressive performance on radiology VQA benchmarks, enabling direct answers to clinical questions without handcrafted features or separate classifiers.

Despite recent advances, most VLMs remain black-box predictors with limited interpretability, offering little insight into their decision-making process [4]. In healthcare, this lack of transparency undermines clinician trust and patient safety. For chest X-ray interpretation, models must provide not only answers but also human-interpretable reasoning—such as key findings or diagnostic logic—to ensure reliability and accountability. Hence, there is a growing need for VLMs that explicitly promote reasoning and improve explainability for clinical use.

To address these challenges, we leverage Group Relative Policy Optimization (GRPO), a reinforcement learning technique recently shown to effectively promote reasoning in DeepSeek-R1 [4, 5]. While GRPO has been previously explored in several medical VQA studies, its potential for chest X-ray–focused tasks remains largely untapped [6, 7]. In this work, we construct a dedicated CXR-VQA dataset and apply GRPO to enhance the model's reasoning ability, establishing a foundation for more explainable and trustworthy medical AI.

2. Methods

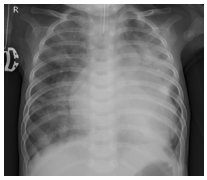
We curated a CXR pneumonia dataset of 5,856 anterior–posterior chest X-rays labeled for the presence or absence of pneumonia (1,583 normal, 4,273 pneumonia) [8]. To enable reinforcement learning in a VQA setting, the labels were converted into binary questions asking whether each image shows radiographic evidence of pneumonia, with answers limited to "Yes" or "No."

We adopted a VLM based on the Qwen2.5-VL-3B backbone as our policy network [9]. To promote explicit reasoning during decision making, we employed GRPO, a reinforcement learning method recently proven effective for reasoning-intensive tasks. During training, the model was prompted to generate a structured response containing a reasoning trace enclosed in <think>...</think> tags, followed by the final answer enclosed in <answer>...</answer> tags. The reward function consisted of two components:

1. **Format Reward** – encouraging the correct use of reasoning and answer tags.
2. **Accuracy Reward** – assigning a positive reward if the selected answer matched the ground truth label ("Yes" or "No").

We initialized the policy network with pre-trained Qwen2.5-VL

Question Template
Is pneumonia present in the chest X-ray?



Model Input Prompt
{Question} Your task:
1. Think through the question step by step, and enclose your reasoning process inside <think>...</think> tags.
2. Then provide ONLY the final answer — either "yes" or "no" — inside <answer>...</answer> tags.
3. Do not include anything else outside of these tags.

Model Output Examples
<think>Pneumonia is typically characterized by areas of consolidation (whitened regions) within the lung fields on a chest X-ray. In this image, there are distinct areas of increased opacity in the right lower lung field, consistent with consolidation caused by pneumonia. The distribution and density of these opacities suggest an active infectious process.</think>
<answer>Yes, but detailed description of the X-ray findings would be needed for a proper diagnosis.</answer>

Format Reward = 1 due to the present of all tags and no content outside the tags
Accuracy Reward = 0.5 due to extra explanation appended after the answer

Fig 1. Illustration of the prompt template, model output example, and applied reward rules.

weights and trained it on the binary CXR-VQA dataset using GRPO. During training, the model generated multiple responses per step, with rewards normalized to compute group-relative advantages. The policy was updated to maximize these advantages while constraining divergence from the reference model for stable learning.

3. Results

To evaluate the effectiveness of reinforcement learning with GRPO, we compared the GRPO-trained model with the base Qwen2.5-VL-3B on the constructed CXR pneumonia VQA dataset. Both models were tested on the same validation split using standard classification metrics (accuracy, F1-score, sensitivity). As shown in Table 1, the GRPO-trained model consistently outperformed the base model, indicating that GRPO improves both classification accuracy and reasoning stability.

As illustrated in Fig. 2, the GRPO-trained model generated more coherent and clinically grounded reasoning, whereas the base model often overinterpreted subtle visual cues as signs of pneumonia. Although the base model maintained the correct reasoning format, its diagnostic accuracy and factual consistency were lower. These results suggest that reinforcement learning with GRPO enhances reasoning consistency and shows potential for improving interpretability in medical VLMs.



Problem
Does this chest X-ray show pneumonia?
Ground Truth: No

BASE
Think:
To determine if this chest X-ray shows pneumonia, I'll consider the following points:
1. The X-ray is a posteroanterior (PA) view, which is commonly used for chest imaging.
2. Pneumonia typically presents as areas of consolidation (darkened areas) in the lung fields.
3. In this image, there are multiple darkened areas in both lungs, which could indicate pneumonia.
Given these considerations, while the X-ray does show some darkened areas that could be indicative of pneumonia, it's not definitive enough to make a diagnosis without further medical evaluation.
Answer: Yes

GRPO
Think:
To determine if the chest X-ray shows pneumonia, we need to look for specific signs such as consolidation (areas of lung tissue that appear darker than normal), infiltrates (areas of lung tissue that appear lighter than normal), or other abnormalities like pleural effusion or masses.
The image provided is a chest X-ray, but it does not clearly show any of these signs. The lung fields appear relatively clear without visible areas of consolidation or infiltrates. Additionally, there are no obvious signs of pleural effusion or masses.
Therefore, based on the visual inspection of the X-ray, it does not appear to show pneumonia.
Answer: No

Fig 2. Comparison of reasoning and answer outputs from the base and GRPO-trained models on the CXR pneumonia dataset.

Qwen2.5-VL-3B	Accuracy	F1-Score	Sensitivity
Base Model	0.3990	0.2171	0.1333
GRPO	0.5721	0.6454	0.6231

Table 1. Performance comparison on the CXR pneumonia VQA dataset.

4. Conclusion

In this study, we developed a CXR-focused VQA model using GRPO to promote explicit reasoning, showing that reinforcement learning can enhance both accuracy and interpretability in medical VLMs. A current limitation is the lack of systematic evaluation of the reasoning process, hindering deeper insight into its contribution to predictions. Future work will include qualitative analyses of reasoning quality.

5. Acknowledgements

This study was supported in part by the National Research Foundation of Korea (RS-2024-00408040), the AI Graduate School Support Program (Sungkyunkwan University) (RS-2019-II190421), the ICT Creative Consilience program (IITP-2025-RS-2020-II201821), and the Artificial Intelligence Innovation Hub program (RS-2021-II212068).

6. References

[1] O. Ruuskanen, E. Lahti, L. C. Jennings, and D. R. Murdoch, "Viral pneumonia," *The Lancet,* vol. 377, no. 9773, pp. 1264-1275, 2011.

[2] P. Rajpurkar *et al.*, "Deep learning for chest radiograph diagnosis: A retrospective comparison of the CheXNeXt algorithm to practicing radiologists," *PLoS medicine,* vol. 15, no. 11, p. e1002686, 2018.

[3] J. Zhang, J. Huang, S. Jin, and S. Lu, "Vision-language models for vision tasks: A survey," *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence,* vol. 46, no. 8, pp. 5625-5644, 2024.

[4] A. Adadi and M. Berrada, "Peeking inside the black-box: a survey on explainable artificial intelligence (XAI)," *IEEE access,* vol. 6, pp. 52138-52160, 2018.

[5] D. Guo *et al.*, "DeepSeek-R1 incentivizes reasoning in LLMs through reinforcement learning," *Nature,* vol. 645, no. 8081, pp. 633-638, 2025.

[6] J. Pan *et al.*, "Medvlm-r1: Incentivizing medical reasoning capability of vision-language models (vlms) via reinforcement learning," in *International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*, 2025: Springer, pp. 337-347.

[7] Y. Lai, J. Zhong, M. Li, S. Zhao, and X. Yang, "Med-r1: Reinforcement learning for generalizable medical reasoning in vision-language models," *arXiv preprint arXiv:2503.13939,* 2025.

[8] D. S. Kermany *et al.*, "Identifying medical diagnoses and treatable diseases by image-based deep learning," *cell,* vol. 172, no. 5, pp. 1122-1131. e9, 2018.

[9] S. Bai *et al.*, "Qwen2. 5-vl technical report," *arXiv preprint arXiv:2502.13923,* 2025.

Poster-194

설명가능 인공지능을 통한 심전도 신호의 우울증 특성분석 및 진단 알고리즘 개발

고재훈[1], 오소민[1], Doljinsuren Enkhbayar[1], 오르트나산 에르덴바야르[2*], 기재홍[1*]
연세대학교 의공학과[1], 연세대학교 AI 반도체 학부[2]

Development of Explainable AI-Based ECG Signal Analysis for Depression Features and Detection

Jaehoon Ko[1], Somin Oh[1], Doljinsuren Enkhbayar[1], Erdenebayar Urtnasan[2], Jaehong Key[1]
[1]Department of Biomedical Engineering, Yonsei University, Korea
[2]Department of AI Semiconductor, Yonsei University, Korea
[*]jkey@yonsei.ac.kr

Abstract

Depression is a highly prevalent disorder often diagnosed through subjective interviews and questionnaires, which limit objectivity and reproducibility. This study explored electrocardiogram signals from polysomnography to identify explainable digital biomarkers for depression. A total of 140 participants were selected using propensity score matching, with labels based on clinical diagnosis and antidepressant use within three days. ECG signals were analyzed through heart rate variability features and raw waveform segments, modeled with machine learning and a ResNet-based deep learning approach. SHAP analysis highlighted QRS skewness and kurtosis as critical predictors, while Grad-CAM revealed activation concentrated in ST–T segments among depressed patients. These findings suggest that ECG-derived features combined with explainable AI can provide objective and interpretable biomarkers, supporting early and reliable depression diagnosis.

1. 연구 배경

우울증은 높은 유병률과 재발률, 자살 위험, 기능 손상 등으로 인해 개인의 삶과 사회 전반에 막대한 부담을 주는 대표적 정신질환이다. 현재 임상 진단은 의사의 면담과 자가보고식 설문에 의존하고 있으나, 이는 환자의 주관적 경험에 기반하기 때문에 객관성과 재현성에 한계가 있다. 특히 증상이 심화된 이후 진단되는 경우가 많아 조기 개입의 기회를 놓치는 문제가 발생한다. 이에 따라 환자의 생활 맥락을 반영할 수 있는 객관적 지표의 발굴이 필요하다.

본 연구는 수면다원검사로부터 수집된 심전도(ECG) 신호를 활용하여 우울증 관련 디지털 바이오마커를 탐색하고자 한다. ECG는 심장의 전기적 활동을 반영하는 기본 생체신호로, 심박변이도(HRV)와 같은 고전적 지표부터 원시 신호(raw waveform) 기반 시계열 분석까지 다층적 접근이 가능하다. 선행 연구에 따르면 우울증 환자에서는 HRV 지표가 유의하게 저하되어 있으며, 이는 자율신경계 기능의 불균형을 반영하는 것으로 보고되었다[1]. 또한 최근 연구에서는 수면 중 단기간의 ECG 신호를 활용하여 우울증 환자를 효과적으로 식별할 수 있음을 확인하였으며, 이는 원시 신호 기반 접근의 가능성을 보여준다[2]. 이에 본 연구는 HRV와 원시 파형 분석을 병행하고, 설명가능 인공지능(XAI)을 적용하여 잠재적 바이오마커를 발굴함으로써 임상적으로 신뢰할 수 있는 조기 진단 체계를 제안하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 Dataset and Participants

본 연구는 수면다원검사(PSG)로부터 수집된 심전도(ECG) 데이터를 활용하여 우울증 관련 디지털 바이오마커를 탐색하였다. 연구대상자는 초기 모집 집단에서 인구통계학적 변수인 연령, 성별, BMI와 임상 정보를 기준으로 성향 점수 매칭(Propensity Score Matching, PSM)을 수행하여 집단 간 동질성을 확보하였다. 또한 데이터 라벨링은 검사 시점으로부터 3일 이내 항우울제 투약 여부와 전문의의 임상 진단 결과를 근거로 진행하였다. 이러한 과정을 통해 최종적으로 정상군 70명과 우울군 70명을 선정하였으며, 연구대상자의 세부 인구 통계학적 특성은 표1에 제시하였다.

표 1. 연구 대상자의 인구 통계학적 특성

Measure	Control	MDD	P-value
Total (n, %)	70	70	-
Sex (m/f)	22/48	20/50	-
Smoking(y/n)	20/50	24/46	-
Age (y)	48.44±17.02	46.23±13.23	-0.393
BMI (kg/m²)	38.14±9.93	37.03±9.66	0.505
BPS (mmHg)	127.54±16.37	124.25±13.80	0.201
BPD (mmHg)	74.64±9.02	73.08±8.33	0.288
TSD(h)	359.56±66.29	368.79±6364	0.402

2.2 Preprocessing and Models

ECG 신호는 두 가지 분석 경로로 전처리되었다. 첫째, HRV 기반 분석을 위해 R-peak 검출 후 NN 간격을 산출하고, 시간 영역, 주파수 영역, 비선형 지표를 포함하는 다차원 HRV 특성을 계산하였다. 둘째, 원시 신호(raw waveform) 기반 분석에서는 band-pass 및 notch 필터를 적용하여 잡음을 제거한 뒤, 30초 단위 세그먼트를 생성하였다. 이 세그먼트는 QRS 복합체, ST–T 구간 등 파형 구조적 특징을 보존한 형태로 표준화하여 모델 입력으로 사용하였다.

모델 학습은 HRV 지표에 대해서는 랜덤 포레스트, XGBoost, LightGBM과 같은 트리 기반 머신러닝 기법을 적용하였으며, 원시 신호에 대해서는 ResNet 기반 딥러닝 모델을 적용하였다.

마지막으로, 설명가능 인공지능 기법을 적용하여 모델의 해석력을 높였다. 대표 모듈로 적용되는 SHAP과 LIME을 통해 HRV 지표 중 우울증 진단에 핵심적으로 기여하는 변수를 확인하였고, Grad-CAM을 활용하여 ECG 파형 내에서 모델 예측에 주요하게 작용한 구간을 시각화하였다. 이를 통해 객관적이고 임상적으로 해석 가능한 바이오마커를 제시하고자 하였다.

3. 연구 결과

3.1 XAI

먼저 XAI 중 SHAP를 적용하여 모델별 주요 특징 변수의 기여도를 평가하였다. 그림1은 각각 (A) Random Forest, (B) XGBoost 모델의 SHAP 분석 결과를 제시한 것으로, 두 모델 모두 공통적으로 QRS 파형의 왜도와 첨도가 우울증 분류에 핵심적인 변수로 작용함을 확인할 수 있었다. 특히 QRS 구간의 왜도가 높게 나타난 경우 RS파형의 비대칭성이 증가하며 이는 자율신경 불균형 및 심장 전기생리학적 조절의 이상이 반영될 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

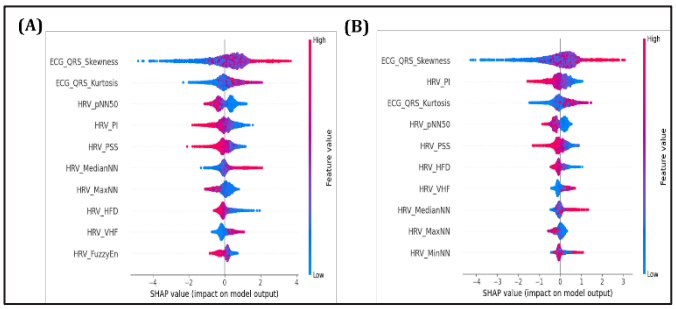


그림 1. SHAP 분석을 통한 HRV 특성 분석

다음은 ResNet 기반 딥러닝 모델에 Grad-Cam을 적용하여, 정상군과 우울군의 파형을 비교 분석하였다. 그림2는 대표적인 정상군과 우울군 대상자의 ECG 세그먼트 중 가장 특징적인 양상을 보인 예시를 비교한 것이다. 정상군에서는 모델의 활성화 영역이 QRS 복합체 전반에 고르게 분포하며, ST-T 구간에 대한 주목도가 상대적으로 낮게 나타났다. 반면 우울군에서는 Grad-cam의 활성화가 QRS 직후 및 ST-T구간에 집중되는 양상을 보였으며, 이는 심실 재분극 과정의 변동성이 모델의 분류에 중요한 단서로 작용했음을 시사했다. 결과적으로, ResNet 기반의 모델의 ECG 파형 해석의 차이를 직관적으로 제시하였다.

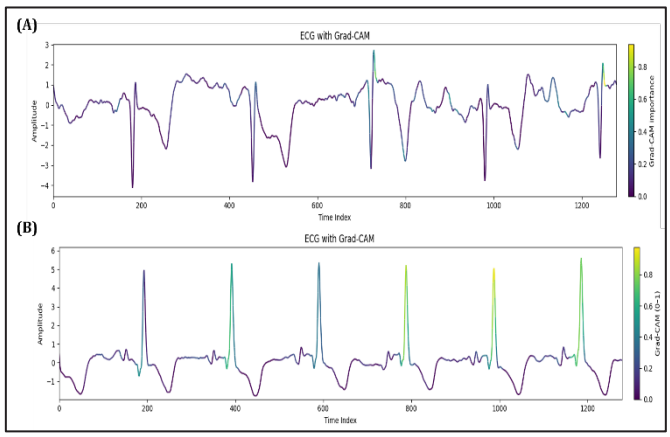


그림 2. Grad-Cam 분석을 통한 ECG 원시 신호 특성 분석

3.2 Evaluation

ECG 원시 파형을 입력으로 한 ResNet 기반 모델의 성능을 5-Fold 교차검증을 통해 평가하였다. 각 fold에서 20 epoch 학습을 수행한 결과, 평균 손실은 0.5890이었으며, 정확도는 0.7574, F1-score는 0.7677, AUROC은 0.8634를 기록하였으며 평균적으로 안정적인 성능을 보였다.

이러한 결과는 ECG 원시 파형만을 활용한 모델이 우울군과 정상군을 유의미하게 분류할 수 있음을 시사한다. 특히 평균 AUROC이 0.86 이상으로 나타난 것은 모델이 분류 임계값과 관계없이 높은 판별 능력을 가짐을 의미한다. 또한 F1-score가 0.76 이상으로 유지된 점은 불균형 데이터 상황에서도 비교적 안정적으로 양성과 음성을 구분할 수 있었음을 보여준다.

표 2. 5-fold cross validation한 ECG waveform 딥러닝 성능

20 epochs	Loss	Acc	F1	AUROC
1-fold	0.5588	0.7522	0.7988	0.8821
2-fold	0.6647	0.7682	0.8051	0.8543
3-fold	0.6321	0.7448	0.7213	0.8123
4-fold	0.6582	0.7985	0.7315	0.8732
5-fold	0.4312	0.7235	0.7818	0.8952
Average	0.5890	0.7574	0.7677	0.8634

3.3 Conclusion

본 연구는 수면다원검사로부터 수집된 ECG 신호를 활용하여 우울증 진단을 위한 디지털 바이오마커를 탐색하고, 설명가능 인공지능 기법을 적용해 모델의 해석 가능성을 제고하였다. HRV 지표와 원시 파형 기반 분석을 병행한 결과, ResNet 모델은 평균 AUROC 0.8634, F1-score 0.7677을 기록하며 안정적인 분류 성능을 보였다. SHAP 분석에서는 QRS 파형의 왜도와 첨도가 우울증 분류에 핵심적으로 기여하는 변수임을 확인하였고, Grad-CAM 분석에서는 우울군에서 ST–T 구간과 QRS 직후 영역에 활성화가 집중되는 특징을 확인하였다.

이러한 결과는 ECG 신호가 단순한 보조적 지표를 넘어, 우울증의 조기 선별과 진단을 위한 객관적이고 해석 가능한 디지털 바이오마커로 활용될 수 있음을 시사한다. 더 나아가, 본 연구는 설명가능 인공지능을 통해 모델의 블랙박스 한계를 보완하고 임상적 수용성을 높였다는 점에서 의의가 있다. 향후 더 큰 규모의 데이터와 다양한 임상 집단을 대상으로 한 추가 검증을 통해, 우울증 조기진단을 위한 임상 적용 가능성이 확대될 것으로 기대된다.

4. Acknowledgements

본 과제(결과물)는 2025년도 교육부 및 강원특별자치도의 재원으로 강원RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과입니다. (2025-RISE-10-006)

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 2024년도 의료 AI 반도체 교육·연구 플랫폼 구축사업의 결과로 수행되었음 (2024-0-00097).

5. 참고 문헌

[1] R. Hartmann, M. Schmidt, M. Sander, et al. "Heart Rate Variability as Indicator of Clinical State in Depression." *Frontiers in Psychiatry*, Vol. 9, Article 735, 2018.

[2] H. Geng, et al. "Identification of major depression patients using machine learning and ECG signals during a 5-min sleep period." *Computers in Biology and Medicine*, Vol. 164, Article 107264, 2023.

Poster-195

Multimodal Artificial Intelligence–Enabled Screening for Parkinson's Disease from Nocturnal Physiological Signals

Doljinsuren Enkhbayar[1], Jaehoon Ko[1], Somin Oh[1], and Jaehong Key[1*], and Erdenebayar Urtnasan[2*]

[1]Department of Biomedical Engineering, Yonsei University, Wonju-si, 26493, Republic of Korea;
[2]Department of AI Semiconductor, Yonsei University, Wonju-si 26493, Republic of Korea
[*]edenbyra@yonsei.ac.kr

Abstract

Parkinson's disease (PD) is often under-recognized until motor symptoms are prominent. Nocturnal physiology captured during routine polysomnography (PSG) cardiovagal activity (ECG), submental muscle tone (EMG), and airflow dynamics—may encode early PD-related alterations suitable for screening. We developed a multimodal AI algorithm, that processes single-lead ECG, EMG, and airflow via a representation-learning front end and three-branch architecture. The model was trained/validated on public data from the Sleep Heart Health Study (SHHS). The proposed model achieved good performance, achieving a mean accuracy of 97.23% on the test set. The results indicate the potential for the automatic screening of PDs based on nocturnal physiological signals. Furthermore, proposed model can serve as a valuable tool for monitoring cardiac activity during sleep in inpatient, outpatient, and home healthcare settings.

1. Introduction

Parkinson's disease (PD) is the second most common neurodegenerative disorder, affecting predominantly adults over 60 years, with >10 million cases worldwide and a prevalence that has roughly doubled over the past 25 years Routine diagnosis relies on clinical evaluation of motor features and rating instruments such as the UPDRS and Hoehn–Yahr staging. These clinician-dependent assessments are vulnerable to inter-rater variability and are relatively insensitive in the prodromal phase, when symptoms are subtle or nonspecific. Early, objective screening tools are therefore needed to shorten time to diagnostic evaluation and intervention [1].

Nocturnal polysomnography (PSG) is the gold standard for evaluating sleep disorders—including hypersomnolence, parasomnias, insomnia, circadian rhythm disorders, sleep-related movement disorders, and sleep-related breathing disorders—and records multichannel physiology (EEG, EOG, ECG, submental EMG, nasal airflow, oximetry, respiratory effort, and movement). Importantly for PD, sleep physiology probes systems known to be perturbed early: ECG-derived RR intervals and heart-rate variability index autonomic dysregulation; submental EMG reflects stage-dependent muscle tone and arousals; nasal airflow encodes respiratory microstructure and obstruction patterns. Despite this richness, daytime, clinic-based assessments still dominate PD research, and single-channel PSG approaches (e.g., airflow-only) leave complementary information unused.

Prior studies frequently train and test on a single dataset, emphasize internal evaluation, or risk data leakage through window-level splits, limiting claims about transportability and clinical reliability. Model interpretability—critical for adoption—also remains underexplored [2].

We propose a multimodal algorithm that jointly analyzes single-lead ECG, submental EMG, and nasal airflow from nocturnal PSG for automated PD screening. It employs three modality-specific CNN encoders with late fusion and is developed using subject-level partitions on the Sleep Heart Health Study (SHHS).

2. Material and Methods

We propose a multimodal algorithm for automated PD screening from multichannel PSG (Figure 1). From each PSG, three channels—single-lead ECG, submental EMG, and nasal/oral airflow—were segmented into fixed-length windows and used as inputs. Three parallel 1D-CNN encoders (one per channel) produce modality embeddings that are concatenated (late fusion) into a window-level vector. For subject-level inference, all valid window embeddings are averaged to form a single nocturnal summary. A LightGBM classifier, tuned on the validation set, outputs PD/control; the operating threshold is fixed by Youden's J on validation and applied unchanged to test. CNNs are optimized with Adam; all splits are at the subject level and performance is reported on held-out subjects.

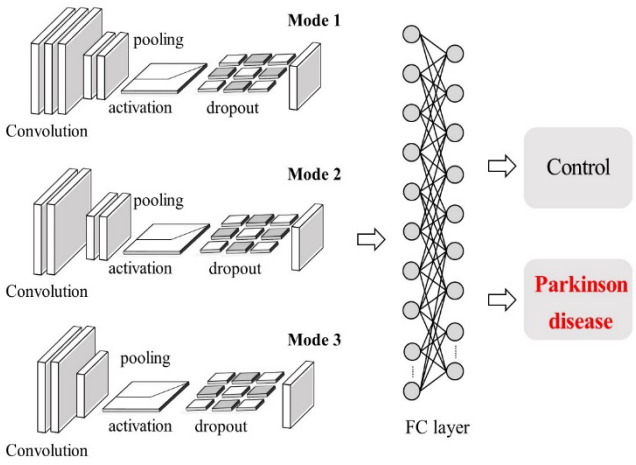


Figure 1. Ther model architecture.

2.1 PSG cohorts

Participant-level PSG came from two multicenter NSRR datasets: SHHS Visit 2 (development/internal validation). It

used standardized NIH-coordinated overnight PSG. Written informed consent was obtained in the parent studies; this secondary analysis of anonymized data was exempt (SHHS NCT00005275). In SHHS, we matched 13 PD to 13 controls (1:1) and excluded records with missing channels, substantial artifacts, or incomplete study information (final n = 26).

2.2 Nocturnal physiological dataset and preprocessing

ECG (Ag/AgCl, 250 Hz), EMG (gold-cup, 125 Hz), and airflow (Compumedics thermistor, 10 Hz) were extracted from lights-off to lights-on, discarding the first and last 15 min to minimize wake/noise contamination. Hardware high-pass filters were 0.15 Hz for ECG/EMG and 0.05 Hz for airflow. Signals were segmented into 8-s windows and time-aligned across modalities. Each channel was z-score normalized per subject, and low-quality windows were removed based on simple artifact rules (e.g., flat-lines or saturations). Windows inherit the subject label (PD/control).

2.3 Training and evaluation.

The proposed model consists of three modality-specific 1D CNN encoders (one per channel) that learn latent embeddings from ECG, EMG, and airflow. Encoder outputs are concatenated (late fusion) to form multimodal window-level embeddings. For subject-level inference, embeddings are averaged across all valid windows from that subject to yield a single fixed-length feature vector.

A gradient-boosted decision tree (LightGBM) serves as the final classifier operating on the subject-level fused vector. The operating threshold is fixed from the validation set using Youden's J to balance sensitivity and specificity.

Table 1. Distribution of the nocturnal physiological dataset

Data sets	Control	PD	Total
Training set	11,364	11,349	22,713
Validation set	5,683	5,674	11,357
Test set	39,774	39,720	79,494
Total	56,821	56,743	113,564

3. Results

The development/internal-validation cohort included 26 SHHS participants (13 PD, 13 controls), our model achieved 97.23% accuracy on the held-out SHHS test (per-class F1: control 97.24%, PD 97.22%; ROC-AUC 0.975, Fig. 2).

These results indicate robust discrimination between PD and control using nocturnal ECG, EMG, and airflow without reliance on daytime clinical features. The decision threshold chosen via Youden's J on the validation set transferred well to the test set, yielding balanced class performance (per-class F1 ≈ 0.97 each). Subject-level aggregation across tens of thousands of windows per split likely contributed to stability by averaging out transient artifacts.

4. Discussion and Conclusion

Multimodal nocturnal physiology augments PD screening by combining complementary autonomic (ECG), motor/submental (EMG), and respiratory (airflow) information. Unlike approaches relying on overt motor impairment—typically a late-stage hallmark—our pipeline leverages signals that may shift earlier in the disease course, potentially enabling timelier referral for confirmatory testing and management.

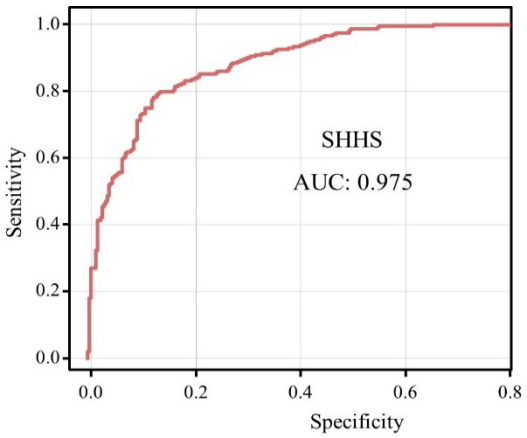


Figure 2. ROC curves and corresponding area under the curve (AUC) for PD's detection

Additionally, labels were derived from SHHS2 (Parkinson's medication use within two weeks of the visit). While pragmatic for large cohorts, medication-based labeling may misclassify rare off-label use and is agnostic to clinical staging; medications themselves can influence nocturnal physiology. Our retrospective design and intentional class balancing may also limit external generalizability. Future work will validate against clinician-confirmed PD variables when available, perform medication-stratified analyses, and test generalization across sites and vendors; prospective studies with home sensors are warranted.

Fusing ECG, EMG, and airflow during sleep improves PD screening performance versus single-channel models and aligns with the multisystem nature of PD. This lightweight, interpretable pipeline may help identify at-risk individuals earlier, when intervention options are broader.

5. Acknowledgements

This research was supported by the Regional Innovation System & Education (RISE) program through the Gangwon RISE Center, funded by the Ministry of Education (MOE) and the Gangwon State (G.S.), Republic of Korea. (2025-RISE-10-006)

This research was supported by the 2024 project for the establishment of a medical AI semiconductor education and research platform, funded by the Ministry of Science and ICT and the Institute of Information & Communications Technology Planning & Evaluation (IITP), Republic of Korea (Project No. 2024-0-00097).

6. Reference

[1] J. Cheulhee, and A. D. Ellington. "Diagnostic applications of nucleic acid circuits." *Accounts of chemical research,* Vol 47, No.6, p1825-183, 2014

[2] Y. Kim, H. Jo, and E. Urtnasan. "SleepMI: An AI-based screening algorithm for myocardial infarction using nocturnal electrocardiography." *Heliyon*, Vol 10, No. 4, e26548, 2024.

CycleGAN 을 이용한 일반 안구 사진의 슬릿램프 이미지 변환 가능성 탐색

김도현 [1], 한승환 [1], 김원진 [1], 김철운 [1], 이종훈 [1], 유태근 [2], 최준열 [1*]

[1] 연세대학교 의공학부

[2] 한길안과병원

Exploring the Feasibility of Transforming Standard Eye Photographs into Silt-Lamp Image using CycleGAN

Dohyeon Kim[1], Seunghwan Han[1], Wonjin Kim[1], Cheol-Woon Kim[1], Jonghun Lee[1], Tae Keun Yoo[2], Joon Yul Choi[1*]

[1]Department of Biomedical Engineering, Yonsei University

[2]Hangil Eye Hospital

jychoi717@yonsei.ac.kr

Abstract

Slit-lamp examination is widely used for diagnosing ophthalmic diseases such as meibomian gland dysfunction (MGD). However, its clinical application is limited by the requirement for specialized equipment and controlled environments. In contrast, standard eye photographs captured with ordinary cameras such as smart phones are more accessible and practical, but their visual characteristics differ significantly from slit-lamp images, restricting direct use in AI-based diagnostic models. This study aimed to explore the feasibility of transforming standard eye photographs into slit-lamp style images using CycleGAN with unpaired datasets. A total of 649 standard eye photographs and 2,999 slit-lamp images were used for training and evaluation. Qualitative analysis showed that the generated images successfully retained anatomical structures while incorporating slit-lamp-specific features such as corneal contours and blue illumination. Nonetheless, some artifacts and reddish tones were observed due to dataset bias. These findings highlight the potential of generative models to bridge domain gaps and broaden the clinical applicability of AI in ophthalmology.

1. 연구 배경

마이봄샘 기능장애(Meibomian Gland Dysfunction, MGD)와 같은 안과 질환의 진단에는 슬릿램프 검사가 중요한 역할을 한다 [1]. 그러나 슬릿램프는 고가의 장비와 전문적인 촬영 환경이 필요하여, 실제 임상 현장에서 대규모 데이터 확보나 환자 접근성 확대에 제약이 따른다. 반면, 스마트폰 카메라와 같은 일반 카메라를 이용한 안구 촬영은 비교적 간단하고 보급성이 높아, 이를 기반으로 한 인공지능 모델이 개발된다면 임상 적용 범위를 크게 넓힐 수 있다. 하지만 일반 안구 사진은 슬릿램프 영상과 촬영 조건과 시각적 특징이 현저히 달라, 단순히 기존의 AI 모델에 적용하기에는 한계가 존재한다.

이에 본 연구에서는 이러한 간극을 해소하기 위한 첫 단계로, 일반 카메라로 촬영한 안구 사진을 슬릿램프 영상 스타일로 변환하는 가능성을 탐색하고자 하였다. 특히, 쌍(pair) 데이터가 부족한 상황에서 도메인 간 변환을 가능하게 하는 Cycle-Consistent Adversarial Network(CycleGAN)를 활용하여, 두 영상 도메인 간의 스타일 전환이 가능한지를 검증하였다.

2. 연구 방법

2.1 안구 이미지 데이터 획득

본 연구에서는 서로 다른 두 공개 데이터셋을 사용하여 짝이 없는 이미지 도메인을 구성하였다. 일반 안구 사진은 Mendeley Data 에서 공개된 안구 이미지를 활용하였다 [2]. 슬릿램프 이미지는 SLID-E 데이터셋으로, 청색광 필터를 사용해 획득한 epiphora 환자의 슬릿램프 이미지는 활용하였다 [3]. 최종적으로 일반 안구 649 장, 슬릿램프 2999 장의 이미지를 각각 7:3 비율로 나누어 학습 및 테스트 데이터로 사용하였다.

2.2 이미지 변환을 위한 CycleGAN 학습 구조

일반 안구 사진과 슬릿램프 이미지 간 도메인 변환을 위해 CycleGAN 프레임워크를 사용하였다. CycleGAN 은 두 개의 생성기와 두 개의 판별기로 구성된다. 생성기는 ResNet 기반 인코더-디코더 구조로 두 단계의 다운샘플링, 9 개의 residual block, 두 단계의 업샘플링 계층을 포함하였다. 판별기는 70×70 PatchGAN 구조를 적용하여 입력 이미지를 겹치는 국소 패치 단위로 분류(real/fake)함으로써 세부 영역의 진위를 판별하였다. 학습 과정에서는 instance normalization 을

적용하여 이미지의 고유한 스타일을 유지하였다. 손실 함수는 adversarial loss 와 cycle-consistency loss 를 사용하였다 (그림 1). 본 연구에서는 CycleGAN 의 추가적인 요소인 identity loss 는 적용하지 않았다. 따라서 색상 보존보다는 구조적 일관성 유지에 초점을 두었다.

모델의 일반화 성능을 높이기 위해 무작위 회전과 밝기·대비·채도 등의 데이터 증강을 적용하였다.

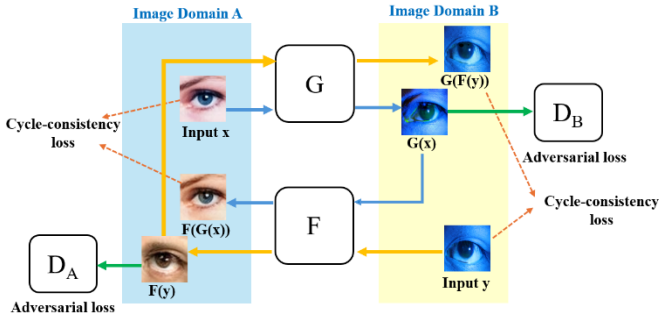


그림 1. CycleGAN 모델 다이어그램. Image Domain A 는 일반 안구 사진 도메인을 나타내며, Image Domian B 는 슬릿램프 이미지 도메인을 나타낸다.

2.3 모델 성능 평가

모델의 학습 결과는 입력 이미지 x, 변환된 출력 G(x), 그리고 복원된 이미지 F(G(x))를 비교함으로써 확인하였다. 생성된 이미지의 품질은 원본 이미지의 구조적 보존성, 목표 스타일의 자연스러운 전이, 인공적인 결함의 존재 여부에 초점을 두어 정성적으로 평가를 진행하였다.

3. 연구 결과

그림 2 는 일반 안구 사진과 슬릿램프 이미지 간 변환 결과를 보여준다. A-C 는 일반 안구 사진을 슬릿램프 이미지로 변환한 결과이며, D 는 grayscale 이 들어간 사진의 결과, E 는 슬릿램프 이미지를 일반 안구 사진으로 변환한 결과를 나타낸다.

A-C 에서는 원본 이미지의 해부학적 구조가 잘 보존되었으며, 청색광과 각막 윤곽선 등 슬릿램프 특유의 시각적 특징이 자연스럽게 반영되었다. 이러한 결과는 흑백 이미지(D)를 입력으로 한 경우에도 관찰되어 입력 색공간과 무관함을 알 수 있다.

복원된 이미지(F(G(x)))는 색상 및 명암에서 미세한 시각적 차이가 존재하나, 전반적으로 원본 이미지와의 구조적 유사성을 유지하고 있음을 보여주었다.

4. 연구 고찰 및 결론

본 연구에서는 CycleGAN 을 활용하여 일반 안구 사진과 슬릿램프 이미지 간의 도메인 변환 가능성을 탐색하였다. 전반적으로 원본의 구조적 형태를 유지하면서 슬릿램프 특유의 시각적 특징을 반영하는 데 성공하였다. 본 연구에서 사용한 슬릿램프 데이터셋은 epiphora 환자의 이미지로 구성되어 있어, 환자 특성상 눈 주변의 충혈 패턴이 학습 과정에서 반영되었을 가능성이 있다. 그 결과 일부 변환 이미지에서 붉은 톤이 강조되었으며, 이는 데이터셋 편향의 영향으로 해석된다.

그럼에도 불구하고 이러한 결과는 서로 짝지어진 데이터가 부족한 의료 영상 영역에서도 딥러닝 기반 생성 모델이 적용될 수 있음을 확인해 주었으며, 특히 스마트폰 과 같은 일반 카메라 이미지를 슬릿램프와 유사한 표현으로 변환할 수 있는 가능성을 제시한다.

향후 연구에서는 정상 안구 슬릿램프 데이터를 포함한 다양한 도메인으로 확장하여 임상적 사용 가능성에 대해서 연구하는 것을 계획하고 있다.

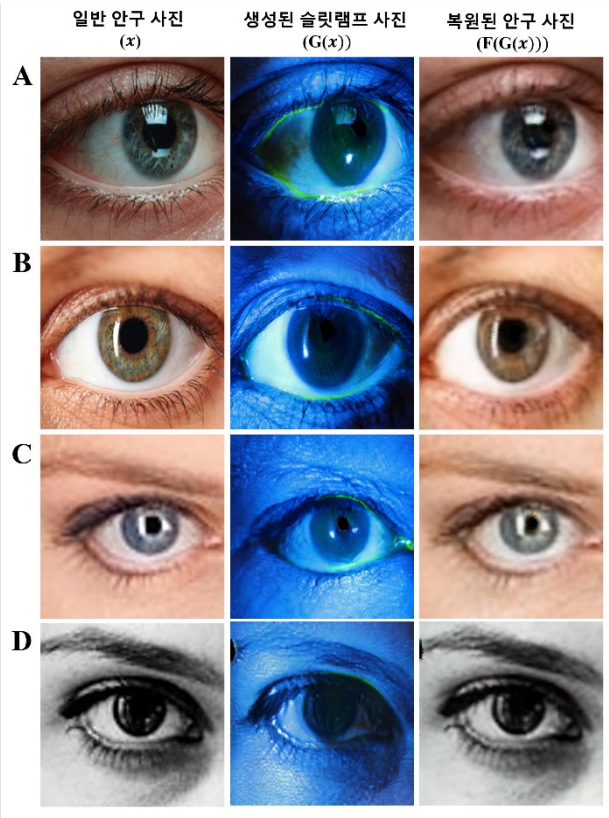


그림 2. CycleGAN 을 이용한 결과 예시. 첫 번째 열은 일반 안구 사진, 두 번째 열은 생성된 슬릿램프 이미지, 세 번째 열은 복원된 안구 사진을 나타낸다. (A–D) 일반 안구 사진을 슬릿램프 스타일 이미지로 변환한 결과. (E) 슬릿램프 이미지를 일반 안구 사진으로 역변환한 결과.

5. Acknowledgement

본 과제(결과물)는 2025 년도 교육부 및 강원특별자치도의 재원으로 강원 RISE 센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과입니다 (2025-RISE-10-006).

6. 참고 문헌

[1] Robin L, Chhadva P, McClellan AL, Seitzman GD, Lin MC, McNamara NA. *The Role of Meibography in the Diagnosis of Meibomian Gland Dysfunction in Ocular Surface Diseases.* Translational Vision Science & Technology. 2017;6(3):17.

[2] Ahmed M. Image Dataset on Eye Diseases Classification (Uveitis, Conjunctivitis, Cataract, Eyelid) with Symptoms and SMOTE Validation [Dataset]. Mendeley Data; 2024. Available from: https://data.mendeley.com/datasets/n9zp473wfw/1

[3] SLID-E: Slit Lamp Image Dataset for Epiphora – A Benchmark Resource for Automated Tear Overflow Analysis [Dataset]. Figshare; 2024. Available from: https://figshare.com/articles/dataset/_i_SLID-E_Slit_Lamp_Image_Dataset_for_Epiphora_-_A_Benchmark_Resource_for_Automated_Tear_Overflow_Analysis_i_/26172919

AI 기반 의료 장비 예비 부품 재고 관리 모델 제안

Indika Y.D. Hettiarachchige[1], 한승환[1], 김원진[1], 김도현[1], 권도형[1], 김예찬[1], 최준열[1*]
연세대학교 의공학과[1]

Proposal of AI Based Medical Equipment Spare parts Inventory Management

Indika Y.D Hettiarachchige[1], Seunghwan Han[1], Wonjin Kim[1], Dohyeon Kim[1], Dohyeong Kwon[1], Yechan Kim[1], Joon Yul Choi[1*]
[1]Department of Biomedical Engineering, Yonsei University, Wonju, Republic of Korea
*jychoi717@yonsei.ac.kr

Abstract

Efficient management of spare parts for medical equipment is essential for reducing downtime and ensuring continuity in patient care. This study proposes a no-code AI-based solution to build predictive models for spare parts forecasting. Historical maintenance and usage data from biomedical equipment could be used to collect and analyse using Orange's visual workflows for data pre-processing, feature selection, model training, and evaluation. The no-code approach significantly reduces the technical barrier to implementing AI in hospital settings, empowering biomedical teams to make data-driven decisions. The resulting system is expected to reduce equipment downtime, minimize inventory waste, and improve procurement planning. This research proposes the practical potential of no-code AI platforms in critical healthcare operations and lays the groundwork for scalable, explainable, and user-friendly predictive maintenance solutions.

Keywords: Medical Equipment Spare parts, no Coding AI, Repair Prediction, Orange software, Inventory Management

1. Introduction

The Biomedical Engineering Unit in hospitals plays a critical role in the repair and maintenance of medical equipment and a function that heavily depends on the timely availability of spare parts and accessories [1]. Effective inventory management of spare parts is often delayed by frequent equipment turnover and the limited technical expertise among store personnel [1-2]. Additionally delays in supplying these components can result in prolonged equipment downtime, which directly impacts patient care quality [2-3].

With a shortage of biomedical technical staff in many healthcare facilities, there is an increasing need for intelligent tools that can support and automate forecasting processes [1]. Recent studies have applied machine learning techniques to predictive maintenance and spare parts planning but nor for healthcare sector [4-6]. However, most of these rely on traditional, code-intensive solutions, limiting their accessibility to non-technical users [6]. While low-code and AutoML platforms have begun to bridge this gap, fully no-code solutions remain underexplored in hospital settings. In this study, we propose a no-code AI-based solution to build predictive models for spare parts forecasting.

2. Methods

2.1. Data Sources:

Spare parts usage history, installed medical equipment data and medical equipment failure records are the required data source for develop the system. A medical equipment inventory dataset available in Kaggle can be used as one data source for model training and evaluation.

2.2. no-code AI based model

As shown Figure 1, the followings are step by step process to build no-code AI based solution using orange software [7]. 1) Pre-processing: data cleaning will be performed to remove duplicates and handle missing values. This will be followed by data transformation to normalize the dataset. Finally, feature selection will be conducted to identify the most relevant variables for predicting spare parts. 2) Model Building: orange's widgets such as ARIMA, VAR, Decision Trees, Random Forests, and Naive Bayes are expected to use for prepare prediction

model. 3) Model Evaluation: built-in validation tools will be used to assess model accuracy and reliability.

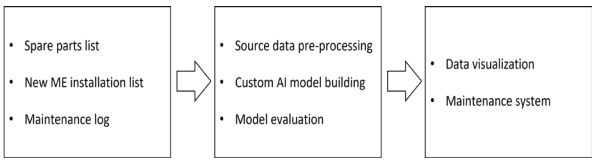


Figure 1. A preliminary conceptual framework

3. Expected Results

The expected outcomes of the research include the development of a functional, no-code-based predictive model for forecasting the demand for medical equipment spare parts. This model will reduce the equipment downtime, inventory obsolescence, and wastage. As a result, it will enhance decision-making capabilities among biomedical and logistics staff. Furthermore, the research can potentially be extended to predict individual equipment breakdowns using machine-specific maintenance data.

4. Discussion

This study aims to propose the feasibility and practical advantages of implementing a no-code AI solution in hospital biomedical engineering units. By leveraging Orange's accessible platform, hospitals can reduce dependence on technical expertise while still benefiting from advanced predictive analytics. The approach aligns with the growing need for explainable, user-friendly AI systems in healthcare.

5. References

[1] Edirisingha, A.S., Nazeer, F.S. and De Alwis, A.M.L., Maintenance inventory management in the healthcare facilities in Sri Lanka: A study on current issues and possible improvements, Proceedings of the 11th World Construction Symposium, 21-22July 2023 Sri Lanka, p.727-739, 2023

[2] Chaminda, J. L. P., Assessment of current practice of Medical Equipment at Tangalle Base Hospital in Hambantota District Sri Lanka, International Journal of Scientific and Research Publications, Vol11.Issue2, p.598-601, 2021

[3] Chaminda, J.L.P., Dharmagunawardene,D., Alexia, R., Kularatna, S, Reece, H, Implementation of a Multicomponent Program to Improve Effective Use and Maintenance of Medical Equipment in Sri Lankan Hospitals. WHO South-East Asia Journal of Public Health, Vol12.Issue2, p.85-92, 2024

[4] Fan, L., Liu, X., Mao, W., Yang, K., Song, Z., Spare Parts Demand Forecasting Method Based on Intermittent Feature Adaptation, Entropy, Vol25.Issue5, p. 764, 2023

[5] Metin, I., Adnan, A., Süleyman, E., Tahsin Ç., Demand forecasting of spare parts with regression and machine learning methods: Application in a bus fleet. Journal of Engineering Research, Vol11.Issue2, p.100057, 2023

[6] Kim, J.D., Kim, T.H., Han, S.W., Demand Forecasting of Spare Parts Using Artificial Intelligence: A Case Study of K-X Tanks. Mathematics, Vol11.Issue3, p.501, 2023

[7] Nurtriana, A, Rachmawati, D.D, Artiyasa, M, Sidiq, D.S.Z, Churn prediction analysis of telecom customers using svm, random forest and logistic regression models using orange data mining tools, E3S Web of Conferences, Vol501, p.02012, 2024

Poster-198

스마트미러 기반 2차원 rPPG 분석을 통한 비접촉 혈압 추정 시스템 및 알고리즘

김찬일[1,3], 강다연[1], 전종석[2], 김준호[2], 이종하[3*,]

주식회사 인셉션랩[1]

계명대학교 전기공학과[2]

계명대학교 의용공학과[3]

Non-Contact Blood Pressure Estimation via 2D rPPG Analysis for Smart Mirror Systems

Chanil Kim[1], Da-Yeon Kang[1], Jongseok Jeon[2], Jun-Ho Kim[2], Jong-Ha Lee[3*]

[1]InceptionLAB Inc., Korea

[2]Department of Electrical Engineering, Keimyung University, Korea

[3*]School of Biomedical Engineering, Keimyung University, Korea

[*]segeberg@gmail.com

Abstract

Conventional cuff-based BP monitoring is inconvenient, and existing non-contact rPPG methods are often vulnerable to noise and require individual calibration. To address this, we propose a Smart Mirror system that estimates BP using a novel 2D spatial analysis of pulse wave propagation delays derived from multiple facial Regions of Interest (ROIs). Our algorithm enhances reliability by combining cross-correlation and phase-based delay estimation with a signal quality assessment (SNR, prominence) filter to select stable ROIs. Critically, we optimize the system for real-time operation on low-power Mini PCs by using lightweight ROI coordinate-based delay features, avoiding full-frame video processing. Tested on 99 subjects (including a 30% hypertensive group), the system achieved a Mean Arterial Pressure (MAP) accuracy of 89.3%. SBP accuracy exceeded 90% in non-hypertensive groups, demonstrating the viability of this calibration-free, non-invasive technique for daily monitoring. Our method validates the potential of leveraging the spatial dynamics of the rPPG signal to provide a robust and practical solution for pervasive health screening.

1. 연구 배경

혈압은 심혈관계 건강을 평가하는 핵심 지표이며, 고혈압은 주요 만성질환 중 하나로 전 세계적으로 큰 부담을 주고 있다. 세계보건기구(WHO)에 따르면 성인 인구의 약 30%가 고혈압을 앓고 있으며, 치료 및 관리 비용은 꾸준히 증가하고 있다. 혈압은 체위, 활동, 스트레스, 수면 등 다양한 요인에 따라 지속적으로 변동하므로, 진료실 측정값만으로는 개인의 실제 상태를 충분히 반영하지 못한다.

현재 널리 사용되는 커프 기반 혈압계는 비침습적이지만, 팔을 압박해야 하는 불편함과 환경적 요인에 대한 민감성으로 연속적 모니터링에는 적합하지 않다. 이를 극복하기 위해 맥파전달시간(Pulse Transit Time, PTT)을 이용하는 커프리스(cuffless) 혈압계가 연구되고 있으나, ECG·PPG 센서 부착이 여전히 필요하다.

이에 대한 대안으로, 카메라 기반 원격광용적맥파(rPPG) 연구가 활발히 진행되고 있다. rPPG는 피부 색 변화로부터 심박, 호흡 등을 추정할 수 있어 비접촉 모니터링이 가능하다. 하지만 기존 rPPG 혈압 추정 연구들은 잡음에 취약하고 [2], 개인별 초기 캘리브레이션이 필요한 경우가 많아 실제 활용에는 한계가 있다. 최근에는 얼굴 영상을 이용한 딥러닝 기반 혈압 추정 기법 [1]이 연구되는 등 기술적 대안이 모색되고 있다.

본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 얼굴 영상 기반의 스마트미러 시스템을 제안한다. 본 연구의 핵심 기여는 다음과 같다. 제안된 시스템은 얼굴의 여러 ROI(Region of Interest)에서 동시 추출한 rPPG 신호의 전파 지연을 2차원적으로 분석하여 새로운 특징 벡터를 추출한다. 특히 상호상관과 위상 기반의 지연 추정을 병행하고, 품질 지표를 활용한 신뢰 ROI 선별 과정 [2]을 추가하여 안정성을 확보하였다. 또한 영상 전체를 입력하는 무거운 AI 대신 ROI 좌표 기반 지연 벡터만을 모델에 사용하여, 저전력 미니 PC 환경에서도 실시간 동작이 가능하도록 최적화하였다.

2.연구 방법

스마트미러에는 고해상도 RGB 카메라가 탑재되어 있으며, 실험에서는 60 fps로 영상을 획득하였다. 획득한 얼굴 영상은 Mediapipe FaceMesh 기반 랜드마크 검출 알고리즘을 활용하여 표준 좌표계에 정렬되었다. 정렬 후 얼굴 영역을 약 200–400개의 ROI(Region of Interest)로 분할하여, 각 ROI의 평균 RGB 강도를 추출하였다. 이 시계열은 원격광용적맥파(rPPG) 신호로 변환되며, 0.5–4 Hz 대역통과 필터를 적용하여 심박 관련 성분만을 남겼다.

ROI 간 혈류 전파 지연은 시간 영역과 주파수 영역 두 가지 방법을 병행하여 추정하였다. 첫 번째 방식은 상호상관(cross-correlation) 기반으로, 두 ROI 신호 $x(t), y(t)$의 상호상관 함수 $\boldsymbol{R_{xy}(\tau) = \sum_t x(t) y(t+\tau)}$ 를 계산하고, 최대값을 갖는 τ^*를 지연값으로 추정하였다. 두 번째 방식은 위상 기반 방법으로, 각 신호의 푸리에 변환에서 위상차 $\Delta\varphi(f)$ 를 계산한 후 $\Delta\tau = -\Delta\varphi(f)/2\pi f$ 를 통해 지연을 산출하였다. 두 방법에서 얻어진 결과가 일치할 경우에만 해당 ROI의 지연값을 채택하여 추정 안정성을 확보하였다.

추출된 ROI 신호는 품질 검증 과정을 거쳤다. 주파수

영역에서의 SNR, 피크 prominence, 평균 광도 안정성이 기준으로 활용되었으며, 품질 지표가 낮은 ROI는 자동 배제하거나 가중치를 낮추는 방식으로 처리하였다. 이러한 과정은 모션 아티팩트와 조명 변화를 최소화하고 안정적인 전파 지연 맵을 얻기 위한 목적을 가진다.

제안된 알고리즘은 저전력 미니 PC 환경에서도 실시간 처리가 가능하도록 최적화되었다. 얼굴 검출 이후 ROI cropping만을 수행하여 전체 프레임 처리 부담을 줄였으며, 상호상관 계산은 FFT 기반으로 구현하여 연산 효율성을 높였다. 위상 기반 지연 추정은 0.5–4 Hz의 협대역 주파수 대역에서만 수행하여 추가적인 연산량을 줄였다. 또한 8초 길이의 슬라이딩 윈도우 버퍼를 사용하여 신호를 관리함으로써, 움직임이 발생할 경우 전체 버퍼를 초기화하지 않고 안정적인 구간만 선택적으로 교체할 수 있도록 설계하였다.

최종적으로 각 ROI에서 계산된 유효 지연값들은 얼굴 좌표계에 매핑되어 이차원 전파 지연 맵을 형성하였다. 이 맵으로부터 평균 지연($\Delta\tau_{mean}$), 지연 분산(σ_τ^2), 전파 방향성(θ), 이방성 지수(Anisotropy Index, AI)의 특징을 추출하여 이들 특징을 입력으로 하는 회귀 모델을 통해 혈압을 추정하였다.

3. 연구 결과

본 연구에서는 100명의 피험자를 대상으로 데이터를 수집하였다. 피험자의 연령 분포는 22세에서 87세까지로 폭넓게 구성되었으며, 혈압군 분포는 저혈압군 5%, 정상혈압군 45%, 전고혈압군 35%, 고혈압군 15%로 이루어졌다. 고혈압군은 수축기 혈압(SBP) ≥ 160 mmHg 기준으로 분류하였다. 전처리 과정에서 일부 데이터가 제외되어 최종적으로 99명의 데이터가 분석되었다. 비교 기준은 동일 조건에서 측정된 전자혈압계 값이다.

평균 동맥압(MAP): 전체 대상군에서 약 89.3%의 정확도를 보였다. 수축기 혈압(SBP): 정상 및 전고혈압군에서 90% 이상의 정확도를 확보하였다. 다만 고혈압군에서는 약 79% 수준으로 정확도가 저하되었다. 이완기 혈압(DBP): 저혈압군을 제외한 전 구간에서 정확도를 유지하였다.

또한 낮은 프레임레이트(15 fps) 환경에서는 저심박 신호가 손실되면서 추정 성능이 저하되었으며, 얼굴 미검출 또는 움직임이 발생한 경우 전체 버퍼 초기화로 인한 결과 불안정성이 관찰되었다.

제안된 시스템은 개인별 캘리브레이션이 불필요하며 미니 PC에서도 실시간 동작이 가능하다는 실용적 강점을 가진다. 정상 및 전고혈압군에서 높은 정확도를 보여 일상적인 혈압 모니터링에 충분히 활용 가능함을 입증하였다. 이는 rPPG 신호의 2차원적 공간 정보를 특징 벡터에 통합하여, 단순 PTT 측정의 한계를 넘어섰기 때문이다.

한편, 고혈압군에서 정확도가 낮아진 것은 PTT-BP 간의 비선형적 관계가 고혈압 환자에게서 더 두드러지거나, 동맥 경직도 증가로 인한 맥파 형태 변화 때문이다. 또한 낮은 프레임레이트(15 fps) 환경에서 저심박 신호 손실이 발생하여 성능이 저하되었는데, 이는 PTT 추정의 시간 분해능 한계에 기인한다. 이를 개선하기 위해서는 고속 촬영 환경, 더 정교한 노이즈 억제 및 혈관 경직도 관련 특징을 통합하는 고도화된 신호 처리 기법이 필요하다.

스마트 미러 기반 얼굴 영상 분석을 통해 평균 89% 수준의 혈압 추정 정확도를 확보하였다. 2차원 전파 지연 분석과 실시간 최적화를 통해 비접촉 · 비침습적 혈압 모니터링의 가능성을 제시하며, 저전력 환경에서도 실시간 처리가 가능하다는 실용적 의의를 가진다. 향후 고혈압

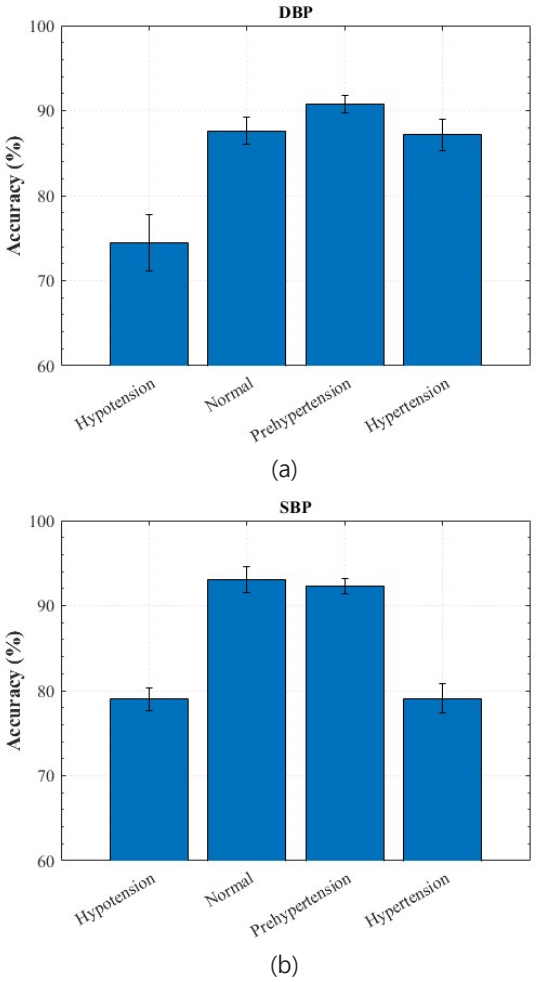


Fig. 1. Accuracy comparison
(a) Diastolic Blood Pressure (b) Systolic Blood Pressure

환자군 대상의 대규모 임상시험과 고도화된 신호 처리 연구를 통해 임상적 신뢰성을 강화할 수 있을 것으로 기대된다.

4. Acknowledgements

This research was supported by the Korea Innovation Foundation through the Ministry of Science and ICT (RS-2025-02220858) and by the Regional Innovation System & Education (RISE) program through the Daegu RISE Center, funded by the Ministry of Education (MOE) and the Daegu Metropolitan Government, Republic of Korea (2025-RISE-03-002)

5.참고 문헌

[1] C. H. Cheng et al., "Remote Blood Pressure Estimation from Facial Videos Using Transfer Learning: Leveraging PPG to rPPG Conversion," 2025 IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV), Tucson, AZ, USA, 2025, pp. 4225-4236, doi: 10.1109/WACV61041.2025.00415

[2] H. Gao, X. Wu, C. Shi, Q. Gao and J. Geng, "A LSTM-Based Realtime Signal Quality Assessment for Photoplethysmogram and Remote Photoplethysmogram," 2021 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), Nashville, TN, USA, 2021, pp. 3826-3835, doi: 10.1109/CVPRW53098.2021.00424

Poster-199

당뇨병 예측에서 노코드 기반과 코드 기반 인공지능의 비교

헨리 데이비드 무파티[1], 한승환[1], 김원진[1], 김도현[1], 최준열[1]*

[1]연세대학교 의공학과

Comparison Between No-code and Code based AI in Diabetes Prediction

Henry David Mupati[1], Seunghwan Han[1], Wonjin Kim[1], Dohyeon Kim[1], Joon Yul Choi[1]*

[1]Department of Biomedical Engineering, Yonsei University, Republic of Korea

jychoi717@yonsei.ac.kr

Abstract

Diabetes mellitus is a chronic metabolic disorder with increasing global prevalence and severe health complications. Early prediction and timely intervention are critical in reducing morbidity and mortality rates. Machine Learning (ML) has enhanced predictive healthcare, yet accessibility gaps persist. This study compares no-code ML with python ML approaches to ensure inclusivity for clinicians. Using the Pima Indian Diabetes dataset, three models—Logistic Regression (LR), Support Vector Machine (SVM), and Random Forest (RF)—were trained, optimized via Research, and evaluated using metrics such as accuracy, precision, recall, F1-score, area under the receiver operating curve (AUC). Results demonstrated comparable performance between no-code ML and python-based ML in diabetes prediction.

Keywords: Diabetes, No-code AI, Code AI, Prediction Model, Random Forest

1. Introduction

Diabetes mellitus is a chronic condition characterized by elevated blood glucose levels, resulting from either insufficient insulin production (Type 1 diabetes) or ineffective insulin utilization (Type 2 diabetes) [1],[2]. Diabetes-related complications include cardiovascular disease, kidney failure, stroke, and neuropathy. Although no permanent cure exists, early detection and lifestyle modification can significantly delay or prevent disease progression [3].

The healthcare industry generates vast amounts of patient data, ranging from medical records to laboratory results, which can be leveraged for predictive analytics. Traditional diagnostic methods, while effective, are often costly and time intensive. Artificial Intelligence (AI) has emerged as powerful tools for predictive diagnostics offering efficiency and scalability [4]. However, their adoption is limited by accessibility: most AI approaches require programming expertise. To address this, no-code AI platforms like Orange have gained popularity. Orange provides a graphical, user-friendly interface that allows non-programmers, such as healthcare practitioners, to implement machine learning (ML) models easily [5][6]. However, such platforms often lack the flexibility of Python-based ML, which supports advanced customization, hyperparameter tuning, and integration with broader applications. This study bridges the gap by comparing Orange and Python ML approaches in diabetes prediction.

2. Methods

We used the Pima Indians Diabetes dataset containing 768 records and 8 features. Invalid zero entries in Glucose, Blood Pressure, Skin Thickness, Insulin, and BMI were removed, leaving 392 valid records. The dataset was split into 70% training and 30% testing. Three models were trained to classify healthy controls and patients with diabetes: Logistic regression (LR), Support Vector Machine (SVM), and Random Forest (RF). As shown in Figure 1, Orange workflows provided a no-code pipeline for training after applying manual grid search.

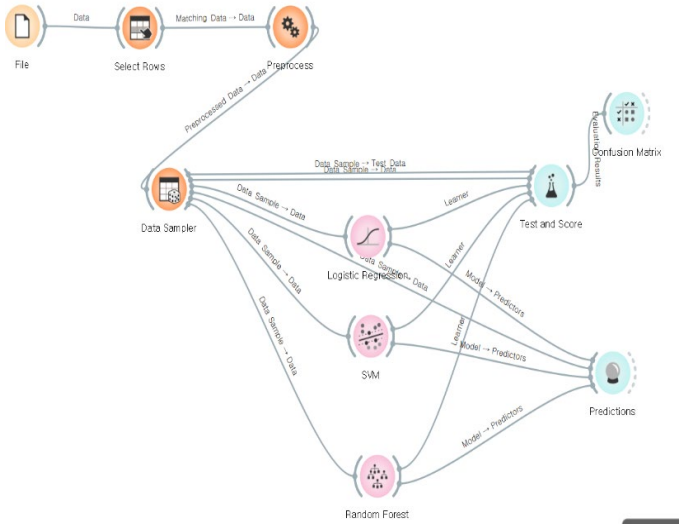


Figure 1. No- Coding AI Based diabetes prediction pipeline on a diabetes dataset using orange data mining

Evaluation metrics included area under the receiver operating characteristic curve (AUC), Accuracy, F1, Precision, Recall. Orange workflows were compared with python pipelines to evaluate predictive consistency and flexibility.

2.1 Model Optimization

GridSearchCV was applied in the code Based AI to optimize hyperparameters such as Regularization C, Kernel type and number of estimators.

3. Results

RF achieved the highest performance across nearly all metrics for both No-code and Code-Based environments with AUC of 0.861 for No-Code and 0.83 for code-based models. When

comparing code and no-code models, orange workflows showed slightly higher accuracy than code-based models due to inbuilt automatic parameter optimization.

Table 2. The summary of performance measures of all Models for No-Code and Code Based AI

Model	AUC	ACC	F1	Precision	Recall
NO-code LR	0.834	0.758	0.752	0.751	0.758
Code LR	0.820	0.760	0.770	0.780	0.760
No-code SVM	0.834	0.758	0.752	0.751	0.758
Code SVM	0.82	0.75	0.76	0.77	0.75
No-code RF	**0.861**	**0.831**	**0.827**	**0.828**	**0.831**
Code RF	**0.830**	**0.810**	**0.800**	**0.800**	**0.810**

AUC: area under the receiver operating characteristic curve, ACC: accuracy

4. Discussion

This study compared the performance of no-code Orange and Python ML frameworks for diabetes prediction. While Orange ensures accessibility for healthcare practitioners, Python provides robustness through advanced model tuning and deployment capabilities. The hybrid platform enhances predictive performance and bridges the gap between clinical usability and technical flexibility. Future work includes extending this approach to other chronic diseases and deploying a fully functional hybrid application for real-world deployments.

5. References.

1. *standards of medicalcare in Diabetes.* American Diabetes Association, 2022.
2. WHO, *Diabetes key facts.* 2023.
3. *National Diabetes preventation programms 2022.* Center for diseases control (CDC), 2022.
4. 1, K., *Machine Learning and Data Mining Toolbox in Python Methodes in Diabetes research.* Computer structure Biotechnol J, 2017. **2017: 15: 104-116**.
5. Demsar, J., *Orange: Data mining toolbox in python.* J Mach learn Res, 2013. **2349 - 2353**.
6. Demsar, J., *Data mining tool box in python.* journal of machine learning research, 2013. **14**.

Poster-200

CBCT 영상에서 골 이식량 예측을 위한 딥러닝 기반 치조골 결손 복원 네트워크

최호윤[1], 이원진[1,2,3*]

서울대학교 융합과학기술대학원 응용바이오공학과[1]

서울대학교 공과대학 협동과정 바이오엔지니어링전공[2]

서울대학교 치과대학 영상치의학교실[3]

Deep Learning–based Alveolar Bone Defect Restoration Network for Bone Graft Volume Prediction in CBCT

Hoyoon Choi[1], Won-Jin Yi[1,2,3*]

Department of Applied Bioengineering, Graduate School of Convergence Science and Technology, properate Seoul National University, Seoul, South Korea[1]

Interdisciplinary Program of Bioengineering, Seoul National University, Seoul, South Korea[2]

Department of Oral and Maxillofacial Radiology, School of Dentistry and Dental Research Institute, Seoul National University, Seoul, South Korea[3]

*wjyi@snu.ac.kr

Abstract

Stable implant placement requires sufficient residual alveolar bone, yet post-extraction resorption often necessitates bone grafting. However, graft-volume determination remains dependent on clinical experience, limiting systematic surgical planning. This study proposes a framework that reconstructs alveolar defects on CBCT using a WGAN-based 3D restoration to quantitatively estimate the required graft volume. In simulated evaluations, the method achieved a DSC of 0.833, confirming the feasibility of defect restoration and its potential for clinical application.

1. Introduction

임플란트의 안정적 식립에는 충분한 잔존 치조골이 필수적이지만, 발치 이후 시간 경과에 따른 골 흡수로 인해 보강적 골이식술이 자주 요구된다. 그러나 현재 임상 현장에서는 이식량 결정을 주로 임상의 경험적 판단에 의존하고 있어, 정량적 근거 기반의 계획 수립과 재현성이 부족하다는 한계가 있다. 이에 따라 객관적이고 표준화된 골 이식량 평가 방법의 필요성이 제기된다.

본 연구는 CBCT (Cone-Beam Computed Tomography) 상의 결손 부위를 WGAN-GP (Wasserstein Generative Adversarial Network with Gradient Penalty) 기반 3D 복원으로 재구성하고, 복원 전후 차이를 정량화 하여 환자 맞춤형 골 이식량을 자동 추정하는 프레임워크를 제안한다. 임상 데이터의 제한성을 보완하기 위해, 확률적 결손 시뮬레이션을 활용하여 여러 형태의 CBCT 쌍을 생성하고, 이를 통한 지도 사전학습으로 네트워크의 기본 성능을 확보하였다. 이후 실제 임상 데이터에서 적대적 정밀 학습을 적용해 불규칙한 결손 복원 성능을 강화하였다.

2. Method

2-1. Materials

본 연구에서는 서울대학교 치과병원에서 확보한 42명의 환자 CBCT 영상을 사용하였으며, 서울대학교 치과병원 IRB (Institutional Review Board 의 승인을 받아 진행하였다(ERI18001). 임상 데이터의 한계를 보완하고 다양한 결손 형태를 반영하기 위해, 결손부위의 반대측 정상 영역을 인위적 결손을 주입한 시뮬레이션 750건을 추가 생성하였다. 각 증례마다 (1) 원본 CBCT, (2) 결손 주입 CBCT, (3) 시뮬레이션 결손 마스크로 학습 데이터를 구성하였다. 시뮬레이션 데이터, 임상데이터 각각 7:2:1의 비율로 학습·검증·시험 세트로 분할하였다.

2-2. Stochastic Anomaly Simulation

임상 CBCT 에서 관찰되는 결손 부위는 형태와 분포가 매우 다양해 직접 모사하면 모델 구현 복잡도가 크게 증가할 수 있다. 이러한 한계를 고려하여, 단순한 구조로 다양한 결손 패턴을 표현할 수 있는 하이퍼볼릭 패러볼로이드 (Hyperbolic Paraboloid, HP) 기반 매개변형 마스크를 사용하였다. HP 수식 기반의 결손 마스크는 파라미터 조절을 통해 깊이, 폭, 방향성을 유연하게 설정할 수 있어 임상에서 관찰되는 다양한 패턴을 단순한 수학적 형태로 표현할 수 있다 (수식 1). 또한, Cologne Classification of Alveolar Ridge Defects (CCARD)[2] 분류기준을 반영하여 수평, 수직, 혼합 형태의 결손 패턴을 재현할 수 있도록 파라미터 범위를 설정하였다.

$$z(x,y,z) = -d \cdot \left(\frac{x^2}{a^2} - \frac{z_{\mathrm{rot}}^2}{b^2} + \frac{y_{\mathrm{rot}}^2}{c^2} \right)$$

수식 1. Hyperbolic Paraboloid 기반 결손 마스크 생성 수식

2-3. Network

본 연구에서 제안하는 네트워크 (그림 1) 는 두 단계 학습 전략으로 구성된다.

첫 번째 단계는 지도 사전학습 (Supervised pre-training) 으로, 결손 주입 CBCT (V_s) 와 정상 볼륨 (V_n) 으로 구성된 시뮬레이션 쌍을 이용해 복원 모듈을 초기화한다. 이

과정에서는 결손 영역의 재구성 일관성을 확보하기 위해 L1 재구성 손실을 적용하였다.

두 번째 단계는 적대적 정밀학습 (Adversarial refinement)으로, 임상 결손 CBCT (V_c) 를 대상으로 학습을 진행한다. 학습은 WGAN-GP 손실을 기본으로 경계 기반 손실 (Edge loss) 와 다이스 계수 손실 (Dice loss) 을 함께 최적화한다. 경계 기반 손실은 결손 부위 경계에서의 구조적 불연속성을 완화하여 재건된 뼈 윤곽의 선명도와 형태적 일관성을 강화하며, 다이스 계수 손실은 추가된 골영역의 정합도를 높여 골 이식량 추정의 정확성을 개선한다.

최종적으로, 두 단계 학습을 거친 후 임상 결손 CBCT 와 복원된 CBCT 를 동일한 임계 값을 기준으로 이진화 하여 두 볼륨 간 차이 부피를 계산해 이식량을 정량적으로 예측한다.

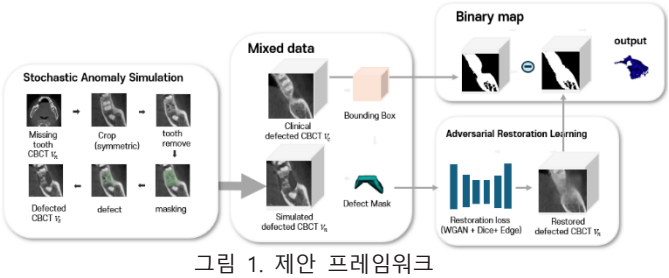


그림 1. 제안 프레임워크

2-4. Training Setup

CBCT는 결손 부위를 중심으로 $128 \times 128 \times 128$ 크기로 크롭하여 학습에 사용하였다. 최적화는 아담 (Adam) 을 적용하였으며, 손실 함수는 L1 손실 (L1 loss) 와 와서슈타인 거리 손실 (Wasserstein distance loss) 을 함께 적용하였다. WGAN-GP 설정에서 gradient penalty 계수는 $\lambda_GP = 10$으로 두었고, 네트워크 간 공정한 비교를 위해 출력 레이어의 활성화 함수는 모두 시그모이드 (sigmoid) 로 통일하였다. 또한 경계손실과 다이스 손실을 추가로 결합하여 학습을 진행하였다.

3. Results & Discussion

표 1은 시뮬레이션 데이터에서 생성된 결손 마스크를 정답 레이블로 활용하여 제안 모델의 성능을 정량적으로 평가한 결과를 제시한다. 성능 평가는 다이스 유사도 계수 (Dice Similarity Coefficient, DSC), 정밀도 (Precision), 재현율 (Recall) 지표를 기준으로 수행하였다.

구성 요소 분석 실험 (Ablation study) 결과, 다이스 계수손실을 제외하면 DSC 0.783, Recall 0.6545로 성능이 저하되어 결손 부위의 경계 불일치와 누락이 발생함을 확인하였다. 경계 기반 손실을 제외한 경우에는 DSC 0.826, Recall 0.6981로 여전히 경계 복원에서 한계가 확인되었다.

반면, 두 손실을 모두 포함한 모델은 DSC 0.833, Precision 0.9918, Recall 0.7243을 달성하여 가장 우수한 성능을 보였으며, 이는 두 손실의 조합이 구조적 일치와 경계 재현을 동시에 강화함을 보여준다.

그림 2는 제안 모델의 예측 결과와 실제 정답 마스크를 3D 형태로 비교한 예시로, HD95 (Hausdorff Distance 95%)를 기준으로 두 형태 간 거리 차이를 시각화 하여 복원 결과의 공간적 정확도를 보여준다.

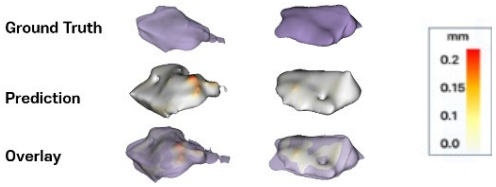


그림 2. 시뮬레이션 마스크와 복원 마스크 비교

Method	DSC	Precision	Recall
Ours w/o dice loss	0.783	0.984	0.655
Ours w/o edge loss	0.826	0.988	0.698
Ours	**0.833**	**0.992**	**0.724**

표 1. 손실 함수 구성 요소별 Ablation study 성능 비교

추가적으로, 실제 임상 데이터를 대상으로 제안 네트워크를 평가한 결과를 그림 3에 제시하였다. 그림의 좌측은 임상에서 관찰된 결손 CBCT며, 중앙은 제안 모델을 통해 복원된 결과를 나타낸다. 우측의 3D 시각화에서는 빨간색으로 표시된 부분이 복원된 결손 영역으로, 제안 방법이 실제 임상 결손에 대해서도 구조적 일관성을 유지하며 재건이 가능함을 확인할 수 있다. 특히 재건된 영역은 결손 주변의 해부학적 형태와 연속성을 보존하면서 결손 부위를 매끄럽게 채워주었으며, 이는 시뮬레이션 데이터뿐 아니라 임상환경에서 실질적인 적용 가능성을 뒷받침한다.

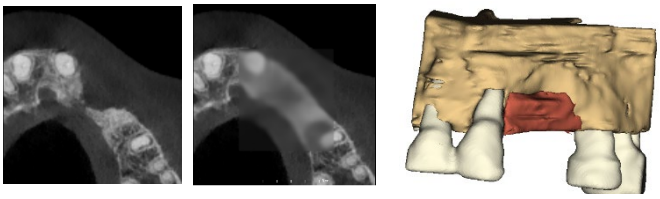


그림 3. 임상 결손 CBCT(좌)와 복원된 CBCT(중앙), 3D 재건 구조(우)

4. Conclusion

본 연구는 임플란트 수술 시 필요한 골이식량 예측을 위해 CBCT 상의 치조골 결손을 WGAN-GP 기반 복원으로 재구성하는 네트워크를 제안하였다. 제안된 방법은 결손 복원과 이식량의 정량 추정을 동시에 가능하게 하여, 임상 현장에서 수술 재료 선택과 수술 가이드 제작 등 수술 계획의 표준화에 기여할 수 있는 가능성을 보였다. 향후 연구에서는 다양한 임상 데이터에 대한 정량적 평가를 통해 일반화 성능을 확립하고, 실제 수술 워크플로우에 통합하여 임상 적용성을 높이는 것을 목표로 한다.

5. Acknowledgements

This work was supported by National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (RS-2023-NR077088). This work was supported by Technology Innovation Program (RS-2025-14322975) funded by the Ministry of Trade Industry & Energy.

6.References

[1] Guo, Y., Pei, Y., Chen, S., Zhou, Z. B., Xu, T., & Zha, H. (2024, October). Stochastic Anomaly Simulation for Maxilla Completion from Cone-Beam Computed Tomography. In *International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention* (pp. 667-677).

[2] Cologne Classification of Alveolar Ridge Defects (CCARD). Consensus Paper Approved at the 8th European Consensus Conference (EuCC) in Cologne; February, 2013.

Structure-Invariant Unpaired Image-to-Image Translation for Domain Adaptation in Panoramic Radiography

Sungho Oh[1,*],Ji Yong Han[1],Hyun Bin Yun[1],Taeyeon Lee[2],Hoyoon Choi[2],Sujeong Kim[1],Heejin Yun[1],Won-Jin Yi[1,2,3]

[1]Interdisciplinary Program in Bioengineering, Graduate School of Engineering, Seoul National University, Republic of Korea
[2]Applied Bioengineering, Graduate School of Convergence Science and Technology, Seoul National University, Republic of Korea
[3]Oral and Maxillofacial Radiology and Dental Research Institute, School of Dentistry, Seoul National University, Republic of Korea
wjyi@snu.ac.kr

Abstract

Panoramic X-ray imaging is widely used in dental and medical diagnostics, but significant variations across medical devices lead to inconsistent quality and hinder the generalization of deep learning models. Existing domain adaptation methods help reduce style differences, but they often fail to keep important anatomical structures intact. In this study, we propose a novel unpaired domain adaptation framework built upon the unpaired image translation model, enhanced with structure- and edge-preserving constraints. Our approach enables robust adaptation across diverse device domains while maintaining the fidelity of teeth and bone structures. Experiments on multi-device panoramic X-ray datasets demonstrate that the proposed method effectively reduces domain gaps and provides a practical solution for deploying deep learning models in diverse clinical environments.

1. Introduction

Panoramic radiography is a commonly employed diagnostic imaging technique that provides a comprehensive view of the entire oral and maxillofacial region in a single exposure. It is routinely acquired during initial dental examinations to facilitate the screening of diverse oral pathologies and to guide further imaging procedures.

Recent advances in deep learning have enabled automated diagnosis and quantitative analysis in dental radiography using artificial intelligence. However, the lack of standardization across imaging devices often causes variations in image quality and visual characteristics, thereby degrading the generalization performance of pretrained models when applied to data obtained from scanners different from those used for training.

To mitigate the performance degradation resulting from domain shift, domain adaptation methods that align the distributions of source and target images can be applied. However, as illustrated in Fig. 1, conventional unpaired image-to-image translation approaches, such as CUT [1], often introduce structural inconsistencies that cause the loss of important anatomical features (e.g., teeth and bone boundaries).

In this paper, we propose a novel unpaired domain adaptation framework based on a Contrastive Unpaired Translation (CUT) architecture to bridge the domain gap between panoramic radiographs acquired from multiple devices. The proposed method adopts across different devices domains while preserving anatomical consistency, enabling style alignment that provides robust and practical deployment of deep learning models in clinical use.

2. Methods and Material

2.1 Datasets

The panoramic radiographs were retrospectively collected from multiple imaging devices with different acquisition presets. The dataset consisted of two unpaired domains. A source domain containing 1,243 images obtained from multiple devices, and a target domain containing 624 images acquired form a single panoramic scanner. All images were fully de-identified prior to analysis, and no patient overlap existed between the domains. To ensure consistency, all radiographs were resampled to a unified in-plane resolution and intensity-normalized to a fixed dynamic range.

For comparison, we included a contrast-only baseline using contrast-limited adaptive histogram equalization (CLAHE [3]) to the source images. Additionally, an independent test set comprising 500 images acquired from a device distinct from the target domain was used for auxiliary evaluation task to examine cross-device generalization instead of in-domain adaptation.

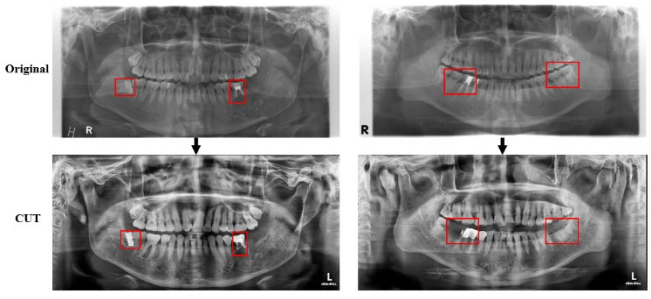


Fig. 1. Image translation results of CUT. While the model successfully achieves style transfer, it often introduces structural inconsistencies and degradation of essential anatomical features, including teeth and bones.

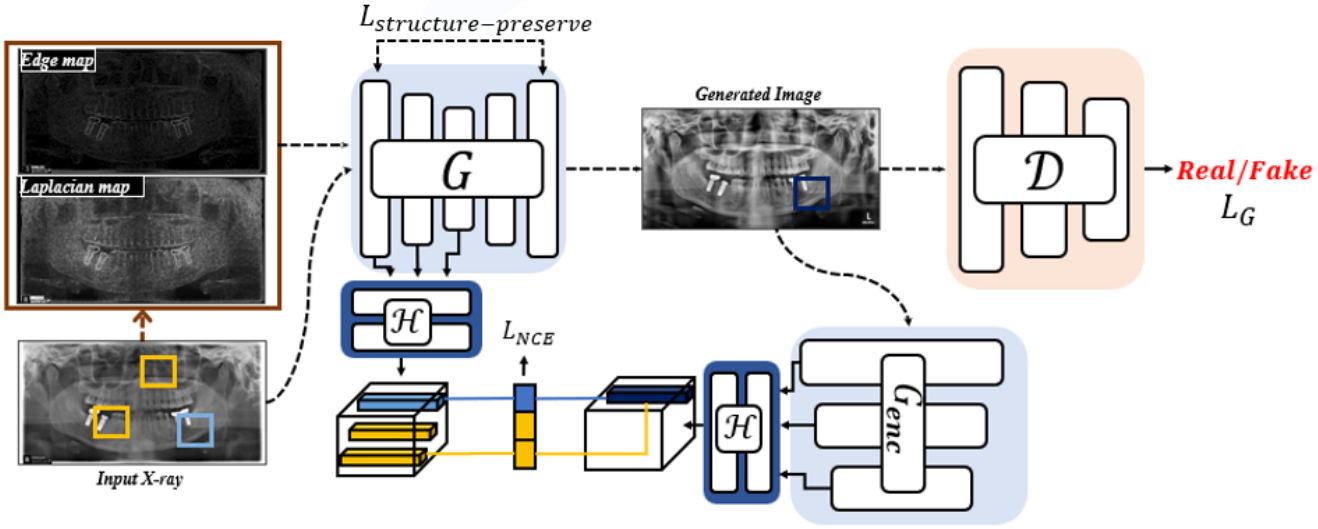


Fig. 2. Overall architecture of the proposed domain adaptation framework. The model is built upon CUT, Additional structure-preserving losses are introduced using Sobel edge maps and Laplacian responses to retain teeth and bone boundaries while transferring style across domains.

2.2 Model Architectures

We proposed image-to-image translation framework based on CUT model. The CUT architecture consists of a Generator G, a Discriminator $\mathcal{D}$, and a patch-sampling module F. The generator learns to translate images from the source domain x_s into the style of the target domain $\hat{y}$, while the discriminator enforces realism in the translated outputs. The patch-sampling module supports patch-wise contrastive learning by aligning features across domains at multiple encoder layers, Specifically, $G_{\text{enc},l}$ denotes the feature representation extracted from the l-th encoder layer of the generator, where z_l and $\hat{z}_l$ represent the patch embeddings obtained from the source and translated images, respectively.

$$\hat{y} = G(x_s)$$

$$z_l = F\left(G_{\text{enc},l}(x_s)\right), \quad \hat{z}_l = F\left(G_{\text{enc},l}(\hat{y})\right)$$

We adopted the standard adversarial loss $\mathcal{L}_{GAN}$ [5] to ensure the translated images resemble the target domain. The generator G maps a source image $x_s \sim X$ to the target domain, while the discriminator D distinguishes between real target images $y_t \sim Y$ and generated images $G(x_s)$.

$$\mathcal{L}_{GAN}(G, D, X, Y) = E_{y\sim Y}[\log D\,(y)] + E_{x_s\sim X}\left[\log\left(1 - D\left(G(x_s)\right)\right)\right]$$

To enforce semantic consistency across domains, we employ a patch-wise contrastive loss L_{NCE}. For each selected encoder layer l, we randomly sample K patches from the source image $x_s \sim X$ and translated image $G(x_s)$ The sampled features are projected into an embedding space using the projection head F. Let $z_{l,i}$ denote the embedding of the i-th source patch and $\hat{z}_{l,i}$ the corresponding embedding from the translated image. Here, K is the number of sampled spatial locations (patches) per layer, per image. This objective encourages the embeddings of corresponding patches ($z_{l,i}$,$\hat{z}_{l,i}$) to be pulled closer while pushing apart mismatched pairs, thereby enforcing semantic consistency across domains.

$$L_{NCE}(G, F, X) = E_{x_s\sim X}\left[\frac{1}{|L|}\sum_{l\in L}\frac{1}{K}\sum_{i=1}^{K} - log\,\frac{exp\left(\left(\hat{z}^{(l,i)}\right)^T z^{(l,i)}/\tau\right)}{\sum_{j=1}^{K} exp\left(\left(\hat{z}^{(l,i)}\right)^T z^{(l,j)}/\tau\right)}\right]$$

In addition to the standard adversarial loss $\mathcal{L}_{GAN}$ and patch-wise contrastive loss $\mathcal{L}_{NCE}$ [6] ,we introduce two structure-preserving regularization loss, Structure consistency $\mathcal{L}_{structure}$ and Edge sharpness consistency $\mathcal{L}_{\text{edge}}$ [7]

The Structure consistency loss encourages the model to preserve geometric information by minimizing the squared difference between Sobel edge maps $S(\cdot)$ of the input and translated images, thereby maintaining critical structures such as tooth boundaries and trabecular bone patterns.

$$\mathcal{L}_{structure} = \frac{1}{\mathrm{N}}|S(\mathrm{x_s}) - S(\mathrm{G(x_s)})|_2^2$$

The edge loss enforces boundary sharpness by comparing Laplacian responses $L(\cdot)$ of the input and translated images, reducing spurious artifacts while retaining fine anatomical details.

$$\mathcal{L}_{\text{edge}} = 1/N\left|\left(|L(x_s)| - \left|L\left(G(x_s)\right)\right|\right)\right|_1$$

The total loss was defined as the weighted summation of the adversarial loss, the patch-wise contrastive loss, and the two structure-preserving losses.

In particular, we used multiple weighting parameters (λ) to balance different loss terms. Specifically, λ_{GAN}=1.0 was used to stabilize the adversarial training and ensure realistic

appearance. λ_{NCE}=1.0 was employed to preserve semantic content through patch-wise contrastive learning. A Sobel-based structure preservation loss weighted by $\lambda_{structure}$=10.0, and a Laplacian-based edge preservation loss weighted by λ_{edge}=5.0. These terms encourage both global anatomical consistency and local sharpness of fine boundaries.

$$\mathcal{L} = \lambda_{GAN}\mathcal{L}_{GAN} + \lambda_{NCE}\mathcal{L}_{NCE} + \lambda_{structure}\mathcal{L}_{structure} + \lambda_{edge}\mathcal{L}_{edge}$$

Thus, the total loss is the aggregation of these individual losses, where each term contributes to aligning the generated images with the target domain while preserving critical anatomical structures.

3. Results

The performance of the proposed domain adaptation method was evaluated using a pretrained Attention U-Net model [2], which was originally trained on the target domain images for multi-class segmentation tasks. The model was applied to three different sets of test panoramic radiographs: the original test images from the source domain, the CLAHE-processed test images to improve contrast, and the domain-adapted test images, which were transformed from the source domain to the target domain using the proposed our domain adaptation model. Segmentation performance was calculated using standard metrics, including mean Intersection-over-Union (IoU), Dice score, Precision, and Recall, with these metrics computed for each image and averaged across the three sets of test images. The results demonstrate the effectiveness of domain adaptation in improving segmentation performance across panoramic radiographs from different devices.

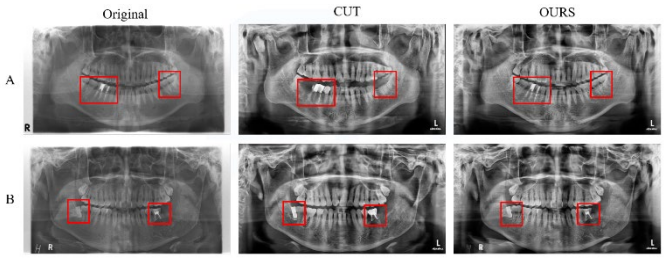


Fig.3. Visual results of domain adaptation for panoramic radiographs captured from different medical devices A and B, using the proposed model and CUT model. The proposed model effectively harmonizes domain-specific appearance variations while preserving detailed anatomical structures such as tooth boundaries, and bone shapes.

The results demonstrate a clear improvement in segmentation performance after applying the CUT-based domain adaptation. Compared to the original panoramic radiographs, the domain-adapted images show a ~~significant~~ increase in IoU (from 0.5786 to 0.7288), Dice (from 0.6965 to 0.8260) and Recall (from 0.6516 to 0.8438), confirming the effectiveness of the domain adaptation approach. Additionally, CLAHE processing improved the segmentation performance compared to the original images, but the domain adaptation method outperforms it across all metrics.

Table 1. Quantitative multi-class segmentation performance of Attention U-Net on panoramic X-ray test sets. Metrics (IoU, Dice, Precision, Recall) were computed per image and averaged across Original, CLAHE, and Ours (domain-adapted) test images.

Methods	IoU	Dice	Precision	Recall
Original	0.5786	0.6965	0.8056	0.6516
CLAHE	0.6817	0.7931	0.8025	0.7977
OURS	0.7288	0.826	0.8246	0.8438

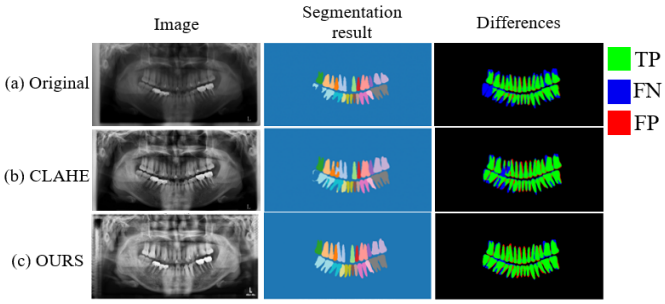


Fig.4. Qualitative comparison of multi-class segmentation results on panoramic X-ray images. From top to bottom: (a) Original, (b) CLAHE, and (c) Ours. Column 2 shows multi-class Attention U-Net predictions, and Column 3 shows prediction–ground truth overlap (green: TP, red: FN, blue: FP).With domain adaptation, our method yields superior cross-domain prediction performance and closer agreement with the ground truth.

4. Acknowledgements

This work was supported by National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (RS-2023-NR077088).This work was supported by Technology Innovation Program (RS-2025-14322975) funded by the Ministry of Trade Industry & Energy.

5.References

[1] Taesung Park, Alexei A Efros, Richard Zhang, and Jun-Yan Zhu. 2020. Contrastive learning for unpaired image-to-image translation. In European Conference on Computer Vision (ECCV).

[2] Ozan Oktay, Jo Schlemper, Loic Le Folgoc, Matthew Lee, Mattias Heinrich, Kazunari Misawa, Kensaku Mori, Steven McDonagh, Nils Y. Hammerla, Bernhard Kainz, Ben Glocker, and Daniel Ruecker. 2018. Attention u-net: Learning where to look for the pancreas. arXiv:1804.03999

[3] A. M. Reza, "Realization of the contrast limited adaptive histogram equalization (CLAHE) for real-time image enhancement," *J. VLSI Signal Process.-Syst. Signal, Image, Video Technol.*, vol. 38, no. 1, pp. 35–44, Aug. 2004.

[4] Rafael C. Gonzalez and Richard E. Woods. 2018. *Digital Image Processing* (4th ed.). Pearson Education.

[5] Ian J. Goodfellow, Jean Pouget-Abadie, Mehdi Mirza, Bing Xu, David Warde-Farley, Sherjil Ozair, Aaron Courville, and Yoshua Bengio. 2014. Generative Adversarial Nets. *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*.

[6] Aaron van den Oord, Yazhe Li, and Oriol Vinyals. 2018. Representation Learning with Contrastive Predictive Coding. *arXiv preprint* arXiv:1807.03748.
[7] Zhou Wang, Alan C. Bovik, Hamid R. Sheikh, and Eero P. Simoncelli. 2004. Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*, 13(4):600–612.

Poster-202

DentalRegformer 기반 디지털 치과 수술을 위한 CBCT와 3차원 구강스캔 자동 정합

윤희진[1], 이원진[1,2]

서울대학교 공과대학 협동과정 바이오엔지니어링전공[1]

서울대학교 치의학대학원 영상치의학교실[2]

Fully Automated Registration Between CBCT and 3D Intraoral Scan for Personalized Digital Dental Surgery Using DentalRegformer

Heejin Yun[0,1], Won-Jin Yi[1,2*]

Interdisciplinary Program of Bioengineering, Seoul National University, Seoul, South Korea[1]

Department of Oral and Maxillofacial Radiology and Dental Research Institute, School of Dentistry, Seoul National University, Seoul, South Korea[2]

*wjyi@snu.ac.kr

Abstract

This study presents DentalRegformer, a fully automated deep learning framework for accurate intraoral scans (IOS) – cone-beam computed tomography (CBCT) registration. The model integrates CBCT tooth segmentation (3D nnU-Net [1]), maxilla–mandible classification (DGCNN [2]), and a two-stage coarse-to-fine registration strategy combining DCP [4] and GeoTransformer [3] refinement. It achieved sub-millimeter accuracy (chamfer distance 0.584, root mean squared error (RMSE) 0.556, mean absolute error, MAE_x 0.231, MAE_y 0.329, MAE_z 0.283, time 19.623 seconds) with high segmentation and classification performance, demonstrating the potential for broad clinical applicability in digital dentistry.

1. Introduction

Digital dentistry has been transformed by advanced imaging and CAD/CAM technologies, with intraoral scans (IOS) providing precise surface details and cone-beam computed tomography (CBCT) offering volumetric skeletal context. Accurate fusion of these modalities enables enhanced diagnosis and treatment planning across orthognathic surgery, implantology, and orthodontics. However, reliable IOS–CBCT registration remains challenging due to operator dependency in manual methods, sensitivity of ICP-based approaches, and artifacts from restorations or appliances. Recent advances in deep learning, particularly transformer-based architectures, highlight the potential for robust, fully automated end-to-end registration frameworks.

2. Methods

This study employed 44 paired IOS and CBCT datasets from Seoul National University Dental Hospital, yielding 88 jaw-specific samples (train/val/test = 60/10/18). IOS were acquired using an i700 wireless scanner (Medit, Korea) and CBCT with a CS 9300 unit (Carestream Health, USA).

For tooth segmentation, a 3D nnU-Net [1] was trained on CBCT volumes with focal loss, AdamW optimization, and data augmentation, achieving the best performance among compared models in terms of Dice, precision, and recall. This segmentation step was essential for isolating individual teeth from CBCT scans, providing accurate tooth regions that were subsequently used for IOS–CBCT registration.

A hybrid classifier combining geometric descriptors and DGCNN [2] point cloud embeddings achieved the best performance among compared models, perfectly distinguishing between the maxilla and mandible. This classification step was necessary to ensure that each IOS was correctly aligned with its corresponding segmented CBCT jaw region, enabling anatomically accurate IOS–CBCT registration.

A coarse-to-fine registration was designed to align IOS and CBCT point clouds. Both meshes were uniformly sampled using farthest point sampling (FPS) and normalized to zero mean and unit sphere scaling, with corresponding centroids and scaling factors preserved for later restoration. Ground-truth transformation matrices were extracted from ITK-formatted files and normalized into a unified coordinate system. In the coarse registration stage, we adopted a Deep Closest Point (DCP) [4], where feature encoding was performed using a GeoTransformer [3] -based extractor. GeoTransformer [3] provided both positional encodings and local geometric descriptors, which were aggregated through self-attention and cross-attention to establish probabilistic correspondences between IOS and CBCT points. The Kabsch algorithm with singular value decomposition (SVD) was then applied to compute an initial rigid transformation. The fine stage refined these correspondences using GeoTransformer [3] 's local-to-global iterative refinement, alternating between local neighborhood aggregation and global contextual integration.

Training employed the Adam optimizer (learning rate = 0.0001, batch size = 4, epochs = 100) implemented in PyTorch (Python 3) on an NVIDIA RTX 4090 GPU (24 GB RAM). Multiple complementary losses—including Chamfer distance (CD), L1 translation loss, rotation consistency loss, and index-matching loss—were jointly optimized, with an additional cross-entropy pointer loss for correspondence supervision. A cycle-consistency constraint (A→B→A and B→A→B) was incorporated to enforce bidirectional alignment stability. Performance was evaluated using CD, RMSE, MAE (X, Y, Z), and runtime per case for computational efficiency.

3. Results & Conclusion

In this study, we developed DentalRegformer, a fully automated deep learning framework for IOS–CBCT registration that integrates segmentation, classification, and a coarse-to-fine transformer-based alignment strategy. The results of tooth segmentation and maxilla–mandible classification are presented in Table 1 and Table 2,

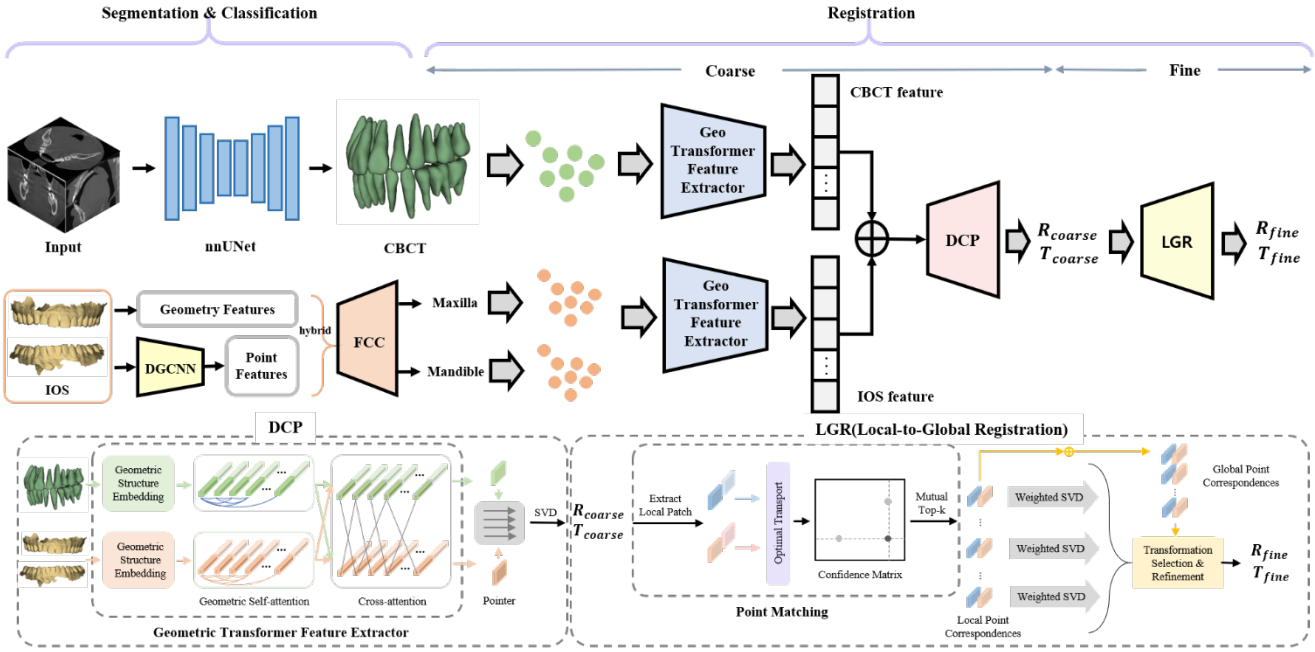


Figure 1. The entire process of proposed method

respectively. The registration results are summarized in Table 3. The model achieved low standard deviation and sub-millimeter errors. By eliminating operator dependency and enhancing reproducibility, DentalRegformer demonstrated strong clinical applicability and efficiency. Although current results were based on a limited dataset and rigid registration, the framework shows great potential for real-time, automated, and scalable digital dentistry applications through future expansion to non-rigid and multi-center data.

Table1. Performance of Tooth Segmentation

Network	DSC(↑)	Precision(↑)	Recall(↑)
UNet	0.88±0.00	0.87±0.01	0.89±0.02
DynUNet	0.91±0.00	0.89±0.01	0.03±0.01
nnUNet	**0.92±0.00**	**0.91±0.01**	**0.93±0.01**

Table2. Performance of Maxilla, Mandible Classification

Network	Structure	Precision (↑)	Recall (↑)	F1 Score (↑)	Accuracy (↑)
PointNet	Maxilla	0.87±0.03	1.00±0.00	0.93±0.02	0.91±0.02
	Mandible	1.00±0.00	0.80±0.04	0.88±0.03	0.91±0.02
DGCNN	**Maxilla**	**1.00±0.00**	**1.00±0.00**	**1.00±0.00**	**1.00±0.00**
	Mandible	**1.00±0.00**	**1.00±0.00**	**1.00±0.00**	**1.00±0.00**

Table3. Performance of Registration

CD(*1000) ↓	$RMSE$ ↓	MAE_x ↓	MAE_y ↓	MAE_z ↓
0.58±0.05	0.55±0.05	0.23±0.04	0.32±0.04	0.28±0.04

4. Acknowledgements

This work was supported by a grant from the Korea Medical Device Development Fund funded by the Korean government (Ministry of Science and ICT, Ministry of Trade, Industry and Energy, Ministry of Health & Welfare, Ministry of Food and Drug Safety) (Project Number: 1711194231, KMDF_PR_20200901_0011). This work was also supported by a grant from the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Korean government (MSIT) (No.2023R1A2C200532611).

5. References

[1] Isensee F. nnU-Net: a self-configuring method for deep learning-based biomedical image segmentation. Nat Methods. 2021;18:203–11.

[2] Phan AV. DGCNN: A convolutional neural network over large-scale labeled graphs. Neural Netw. 2018;108:533–43.

[3] Qin Z. GeoTransformer: Fast and Robust Point Cloud Registration With Geometric Transformer. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell. 2023;45(8):9806–21.

[4] Yue Wang JMS. Deep Closest Point: Learning Representations for Point Cloud Registration. International Conference on Computer Vision. 2019:422–31.

Poster-203

커리큘럼 학습 기반 파노라마 영상에서 하악과두의 골관절염 자동 분류

김다희[1], 이원진[1,2*]

서울대학교 융합과학기술대학원 응용바이오공학 전공[1]

서울대학교 치의학대학원 영상치의학교실[2]

Deep Curriculum Learning for TMJ Osteoarthritis Classification on Dental Panoramic Radiographs

Dahee Kim[1], Won-Jin Yi[1,2*]

Department of Applied Bioengineering, Graduate School of Convergence Science and Technology, Seoul National University, Seoul, Korea[1]

Department of Oral and Maxillofacial Radiology and Dental Research Institute, School of Dentistry, Seoul National University, Seoul, Korea[2]

*wjyi@snu.ac.kr

Abstract

Temporomandibular Joint Osteoarthritis (TMJOA) is a prevalent degenerative disorder characterized by pain, functional impairment, and malocclusion, profoundly impacting patients' quality of life. Early and precise diagnosis is critical to mitigate disease progression; however, detecting subtle morphological changes in the initial stages presents significant diagnostic challenges. Although cone-beam computed tomography (CBCT) provides high diagnostic precision, its limited accessibility and higher costs restrict its routine clinical use. In contrast, panoramic radiography is widely available and cost-effective, making it a practical modality for large-scale screening. However, the subtle and continuous transition from normal to incipient stages poses substantial difficulties for conventional deep learning models in identifying early degenerative changes. To address this limitation, we propose a curriculum-guided learning approach that progressively learns from clear to ambiguous cases to achieve more reliable classification of TMJOA on panoramic radiographs. A dataset of panoramic radiographs was utilized, consisting of 1,620 cropped images based on the mandibular condyle region of interest (ROI), including 540 normal, 540 incipient, and 540 TMJOA cases. Experimental evaluations show that the proposed model achieved a macro-averaged area under the curve (AUC) of 0.93 ± 0.01, an accuracy of 0.89 ± 0.03, a sensitivity of 0.83 ± 0.04, and a specificity of 0.91 ± 0.05, confirming its effectiveness in TMJOA classification. These results demonstrate that the curriculum-guided learning approach enables accurate and consistent TMJOA stage classification on panoramic radiographs, improving diagnostic reliability and efficiency.

1. Introduction

Temporomandibular Joint Osteoarthritis (TMJOA) is a prevalent joint disorder that can result in joint pain, functional impairment, malocclusion, and reduced health-related quality of life [1]. Early and accurate diagnosis of TMJOA is critical to prevent disease progression; however, detecting subtle morphological changes in the early stages remains a major clinical challenge [2]. Cone-beam computed tomography (CBCT) is considered the diagnostic gold standard for TMJOA due to its high resolution and detailed bone visualization, but its clinical use is limited by radiation exposure and cost. In contrast, panoramic radiography offers several advantages for detecting TMJOA. While panoramic radiographs have lower resolution than CBCT, they are more accessible due to their lower radiation dose, cost-effectiveness, ease of acquisition, and rapid imaging process [3]. Recent studies have applied deep learning techniques to automate the detection and classification of TMJOA on panoramic radiographs, showing promising results [4]. However, most conventional models treat all cases equally during training, which limits their ability to capture the subtle morphological continuum between normal, incipient, and advanced stages. To overcome this challenge, this study aims to enhance the automatic classification accuracy and diagnostic efficiency of TMJOA on panoramic radiographs through a curriculum-guided learning approach.

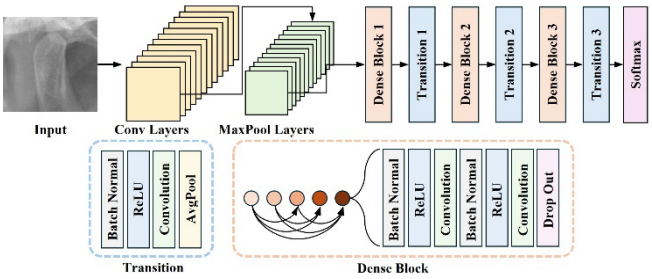


Fig 1. Model architecture for TMJOA classification

2. Materials and Methods

We constructed the image dataset using panoramic radiographs collected from patients at Seoul National University Dental Hospital between 2013 and 2024. The diagnosis was confirmed based on CBCT readings recorded in the Electronic Medical Record (EMR). A total of 1,620 mandibular condyle region of interest (ROI) images were collected, including 540 normal, 540 incipient, and 540 TMJOA cases. The entire dataset was randomly divided into training, validation, and test sets in a 6:2:2 ratio.

To obtain the condylar ROI dataset, a U-Net architecture with an EfficientNet-b3 encoder was used to generate condyle masks, which were then applied to crop 120 × 120 pixel regions centered on the condyles from resized 512 × 1024

Stage 1 (epochs 0-4)	Stage 2 (epochs 5-9)	Stage 3 (epochs ≥ 10)
Normal TMJOA	Normal TMJOA Incipient (partially added)	Normal TMJOA Incipient (fully indiaded)

Fig 2. Curriculum-guided training strategy for progressive learning of TMJOA classification

panoramic radiographs. The crop size was determined based on an analysis of condylar mask sizes from 223 panoramic radiographs, ensuring that all condyles fit within this region without truncation. The mandibular condyle labels for segmentation were verified by a specialist to ensure accuracy. The extracted ROI images were resized to 512 × 512 resolution, and various augmentations—including CLAHE, brightness and contrast adjustment, shifting, rotation, scaling, and flipping—were applied to enhance data diversity and model generalization.

The TMJOA classification model was developed using the ImageNet-pretrained DenseNet-201 as the base network, which takes single-channel ROI inputs and produces softmax-based probabilities for TMJOA stage classification. To enhance the learning process, a curriculum-guided strategy was incorporated, enabling the model to progressively learn from clear to ambiguous cases. The training process was divided into three stages based on data difficulty (Fig 2): During Stage 1 (epochs 0–4), the model was trained using Normal and TMJOA cases to establish fundamental discriminative features; in Stage 2 (epochs 5–9), Incipient cases were partially included to expose the model to early degenerative changes; and in Stage 3 (epochs ≥ 10), all classes, including fully added Incipient cases, were used to enable stable and generalized learning across the entire dataset. The model was trained using the AdamW optimizer with an initial learning rate of 1×10^{-4}, adjusted by a learning rate scheduler with a minimum value of 1×10^{-8}, for 200 epochs with a batch size of 16. Cross-Entropy loss was used, and the Early Stopping technique was applied to prevent overfitting and ensure optimal model performance.

3. Result

Table 1. Classification performance for TMJOA

	AUC	Accuracy	Sensitivity	Specificity
Normal	0.96±0.01	0.90±0.02	0.81±0.04	0.95±0.02
TMJOA	0.95±0.01	0.91±0.02	0.85±0.03	0.94±0.02
Incipient	0.88±0.02	0.85±0.02	0.83±0.04	0.85±0.02
Mean	**0.93±0.01**	**0.89±0.03**	**0.83±0.04**	**0.91±0.05**

The proposed model demonstrated excellent performance in TMJOA classification. As shown in Table 1, it achieved a macro-averaged area under the curve (AUC) of 0.93 ± 0.01, an accuracy of 0.89 ± 0.03, a sensitivity of 0.83 ± 0.04, and a specificity of 0.91 ± 0.05. These results indicate that the model can reliably predict both the presence and stage of TMJOA from panoramic radiographs, achieving a performance level comparable to that of CBCT-based diagnosis. Furthermore, the balanced sensitivity and specificity demonstrate that the model effectively identifies positive cases while minimizing false-positive predictions, ensuring stable and clinically meaningful diagnostic performance. Fig 3 shows representative examples of correctly classified ROI images for each TMJOA stage. From left to right, the columns correspond to Normal, Incipient, and TMJOA cases, each correctly predicted by the proposed model (Ground truth = Prediction). These results demonstrate that the model effectively captures the morphological differences across disease stages, particularly distinguishing subtle changes in the incipient stage.

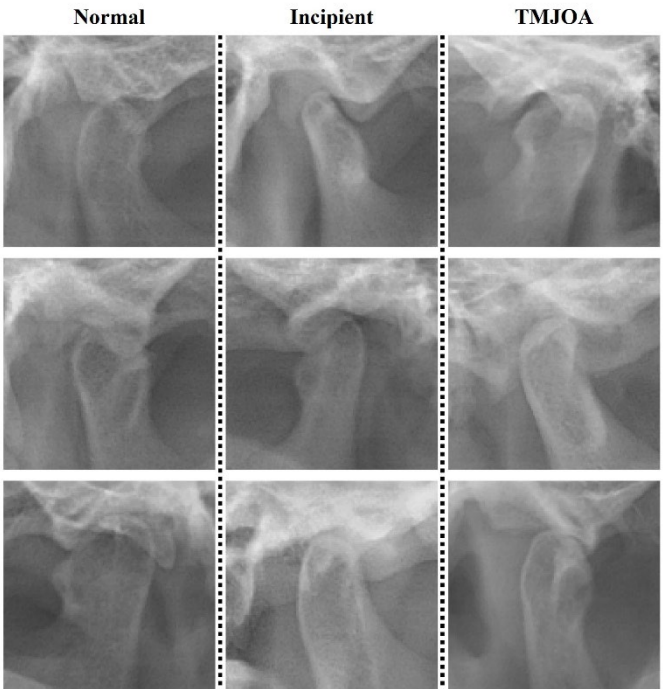


Fig 3. Correctly classified ROI images for each TMJOA stage

4. Acknowledgements

This work was supported by National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (RS-2023-NR077088). This work was supported by Technology Innovation Program (RS-2025-14322975) funded by the Ministry of Trade Industry & Energy.

5. References

[1] Bjørnland, T., A. A. Gjaerum, and A. Møystad. "Osteoarthritis of the temporomandibular joint: an evaluation of the effects and complications of corticosteroid injection compared with injection with sodium hyaluronate." Journal of oral rehabilitation 34.8 (2007): 583-589.

[2] Kalladka, Mythili, et al. "Temporomandibular joint osteoarthritis: diagnosis and long-term conservative management: a topic review." The Journal of Indian Prosthodontic Society 14 (2014): 6-15.

[3] Farman AG, Horner K. There are good reasons for selecting panoramic radiography to replace the intraoral full-mouth series. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod. 2002; 94(6):653–654.

[4] Farook, Taseef Hasan, and James Dudley. "Automation and deep (machine) learning in temporomandibular joint disorder radiomics: A systematic review." Journal of Oral Rehabilitation 50.6 (2023): 501-521.

Poster-204

발작 전 뇌파를 활용한 Preictal Period의 최적화에 관한 연구

김태현 , 이세호 *

울산대학교 전기전자컴퓨터공학과

Optimizing the Preictal Period Using Electroencephalography before Seizure Onset

Taehyun Kim , Seho Lee *

Department of Electrical, Electronic and Computer Engineering, University of Ulsan, South Korea

*leeseho@ulsan.ac.kr

Abstract

Epilepsy, a neurological disorder characterized by recurrent, unprovoked seizures, affects approximately 50 million people worldwide and significantly impairs quality of life. Electroencephalography (EEG) is a primary methodology for analyzing and estimating seizure onset, as distinct signal patterns manifest in the preictal period. Therefore, capturing these prodromal patterns is crucial for seizure prediction. However, accurately estimating the preictal period from EEG signals remains a persistent challenge. This study was conducted to estimate the preictal period using a dataset from the Children's Hospital Boston. The EEG data was segmented into 2-second epochs relative to the ictal onset. A hybrid sequential model, combining EEGNet and a Long Short-Term Memory network, was utilized to classify ictal, preictal, and normal brain states. Subsequently, a Gaussian Mixture Model was applied to the classifier's output probabilities to cluster epochs from each period with similar likelihoods. The results demonstrated a sustained high probability of seizure onset within a temporal window of 8 to 18 minutes prior to the ictal event. These findings suggest that the duration of this high-probability state may be indicative of the preictal period. Consequently, this methodology shows promise as a feasible approach for optimizing patient-specific preictal period detection, potentially leading to more accurate seizure onset estimation.

1. 연구 배경

뇌전증은 신경학적 뇌질환 중 네 번째로 흔하며, 전세계적으로 5천만명 이상의 사람들이 이로 인한 영향을 받고 있는데다, 이들 중 약 75%가 유전적 요인으로 어릴 때부터 발병한다 [1,3]. 뇌전증 발작은 뇌 내 신경세포의 비정상적인 전기적 임펄스 발생에 의해 반복적이고 자발적으로 발생한다. 그에 따라서 뇌전증 환자의 상태는 다음의 네 가지 패턴으로 규정된다: 발작 중인 상태(ictal period), 발작 전(preictal period), 발작 후(postictal period) 그리고 두 발작 사이의 안정적인 상태(interictal period) [2]. 안정적인 상태에서 뇌전증 환자는 정상인과 행동학적으로 큰 차이가 없다. 그러나 뇌전증 발작이 발생하면 행동 및 인지 장애가 일어나고, 이에 따라 외상성 사고 위험에 노출되어 최악의 경우 사망에 이를 수도 있기 때문에 발작 전 시기적절한 조치가 필요하다. 이러한 뇌전증 환자의 발작은 항뇌전증제로 조절할 수 있지만 근치적 방법이 아닌데다 약 30%의 환자는 약물 내성을 보이고, 심지어 부작용도 존재한다 [3]. 그러므로 대부분의 뇌전증 환자들에 대해 필요한 순간 사전에 조치를 취하여 운전 중 사고, 수영 중 익수, 트라우마 등 일상 생활 속에서 발생할 만한 위험 상황을 최소화하고, 삶의 질을 개선할 수 있도록 하기 위해선 신뢰성 있는 뇌전증 발작 예측 방법이 필요하다.

발작 시점 예측을 위해선 두개내 뇌신경세포들의 전기적인 활동을 지속적으로 모니터링해야 한다. 여기에 뇌파(Electroencephalography, EEG)가 가장 널리 사용되는데, 이는 높은 시간 분해능으로 뇌전증 발작의 빠른 전기적 변화를 검출할 수 있기 때문이다 [3]. 그러나 EEG 신호의 복잡성이 굉장히 높기 때문에 정확한 EEG 신호의 분석과 높은 수준의 발작 예측률의 달성에 머신러닝이 활용되고 있다. 이를 기반으로 예측 성능을 유지하면서 EEG 채널 수를 줄이거나, 분석구간을 조절하는 등 다양한 연구가 수행되고 있다. EEG를 활용한 뇌전증 발작의 조기 감지에 있어, 효과적인 예측을 실현하기 위해선 Preictal period을 정확하게 추정하는 것이 중요하다 [2,3].

본 연구는 발작 시점을 기준으로 뇌전증 환자들의 EEG에서 발작 전 Preictal period의 뇌파 패턴이 특정 시간동안 유지된다는 것을 딥러닝 모델을 이용하여 추정할 수 있다는 것을 가정하였다. 테스트는 뇌전증 환자 데이터셋을 이용해 수행하였고, 상기 접근방식의 Interictal와 Preictal의 분류에 대한 적용 가능성을 평가하였다.

2. 연구 방법

본 실험엔 Children's Hospital Boston의 소아 뇌전증 환자들 24명 각각의 발작 발생시간에 대한 정보와 EEG 신호 데이터로 이뤄진 오픈데이터셋을 사용하였다 [4]. 실제 분석엔 15분 이상의 Preictal period 설정이 가능한 발작 이벤트가 4회 이상이며, 측정 도중 EEG 전극의 위치가 바뀌지 않은 총 10명의 환자 레코드를 선택하였다.

각 환자들에 대해 발작 시점의 정보만 있는 상태에서 해당 이벤트 기준 과거 방향으로 2초씩 분석영역을 넓혀가며 EEGNet과 LSTM 결합 모델을 적용해 Ictal, Preictal, Normal 상태를 분류한 후, 발작 발생확률을 추정하였다. 그리고 이 시간-확률 변화곡선에 Gaussian Mixture model(GMM)을 적용하여 서로 다른 패턴들을 구별하였다. 그림 1. 은 위 과정을 수행하기 위한 실험설정의 예를 보여준다.

3. 연구 결과

실험 결과, 발작 발생 시간에 대해 특정 Preictal 구간에서 유사한 패턴이 존재함을 확인하였다. 그림 2. 는 추정 발작 발생률에 GMM을 적용한 그룹화의 결과를 각 환자별로 보여준다. 모든 환자들이 특정 Preictal 영역들에 확률 값들이 몰리는 형태였으며, 이러한 경향성은 짧게는 8분, 길게는 18분 동안 지속되었다.

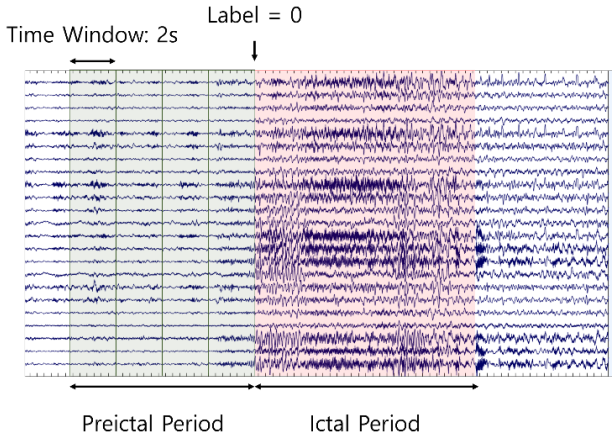


그림 1. 한 환자의 EEG 데이터에 대한 실험 설정 예

4. 연구 결론

본 연구는 발작 전 뇌파 패턴이 특정 시간동안 유지된다는 것을 딥러닝 모델을 이용하여 추정할 수 있음을 가정하였고, 실험을 통해 각 환자의 Preictal period별 발작 확률 궤적에 대한 경향성을 관찰한 결과 모든 환자들이 특정 Preictal 영역에서 특징적인 형태를 가지는 것을 확인하였다.

뇌전증 환자들의 삶의 질을 향상시키기 위해선 신뢰성 있는 발작 조기 경보의 구현이 필요하며, 이에 대부분 머신러닝을 활용하고 있고, 효과적인 예측에 Preictal period의 정확한 추정이 필요하지만 이는 아직까지 숙제로 남아있다. 하지만, 실험 결과를 통해 이 연구의 접근방식이 발작 발생확률이 높은 곳과 그에 대응하는 시간을 정확하게 유추할 수 있는 중요한 증거를 제시하며, 환자 별로 최적의 ictal onset을 예측하기 위한 분석 및 모니터링 시점을 제공할 수 있을 것으로 보여, 상기 문제의 해결에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

다만 실험에서 사용한 환자 표본수가 많지 않아, 향후 추가적인 데이터를 확보하여 검증에 활용할 필요가 있다. 또한, 딥러닝 모델로 산출한 확률들의 패턴이 ictal onset 이전구간에서 일정 기간 유지되는 경향이라는 점을 EEG 신호에서 나타나는 preictal의 특징에 결부시키고, 이를 바탕으로 그래프와 Power Spectral Density를 복합적으로 사용하여 심도 있는 분석을 수행할 예정이다.

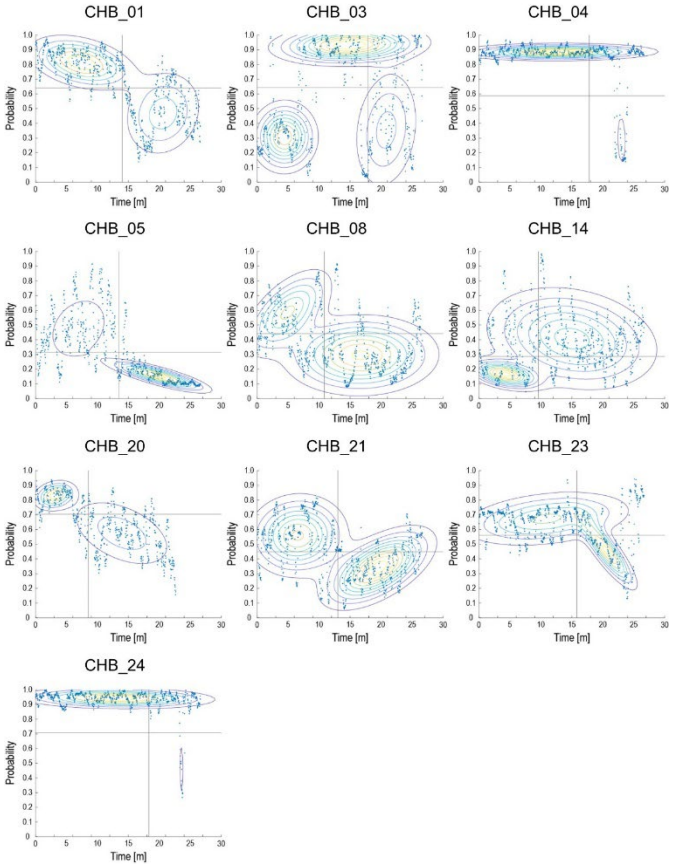


그림 2. 환자 별 시간-확률 Scatter-Plot 및 GMM기반 그룹화 결과: x축은 발작 발생 지점으로부터 떨어진 시간, y축은 추정 발작 발생확률에 대응. 등고선 및 구분선을 통해 특징적 그룹 구분.

5. Acknowledgements

본 과제(결과물)는 2025년도 교육부 및 울산광역시의 재원으로 울산RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE) 사업의 결과입니다. (2025-RISE-07-001)

6. 참고 문헌

[1] Ryu, Sanguk, and Inwhee Joe. "A Hybrid DenseNet-LSTM model for epileptic seizure prediction." *Applied Sciences* 11.16 (2021): 7661.

[2] Jana, Ranjan, and Imon Mukherjee. "Deep learning based efficient epileptic seizure prediction with EEG channel optimization." *Biomedical Signal Processing and Control* 68 (2021): 102767.

[3] Hussein, Ramy, et al. "Semi-dilated convolutional neural networks for epileptic seizure prediction." *Neural Networks* 139 (2021): 212-222.

[4] Guttag, John. "CHB-MIT Scalp EEG Database" (version 1.0.0). *PhysioNet* (2010). RRID:SCR_007345. https://doi.org/10.13026/C2K01R

Poster-205

수면 뇌파를 활용한 알츠하이머 진단을 위한 딥러닝 모델

오소민[1], 도지카[1], 고재훈[1], 기재홍[1], 에르덴바야르[2*]

연세대학교 의공학과[1]

연세대학교 AI반도체학부[2]

Deep Learning Model for Detecting Alzheimer's Disease based on Nocturnal Electroencephalography

Somin Oh[1], Doljinsuren Enkhbayar[1], Jaehoon Ko[1], Jaehong Key [1] and Erdenebayar Urtnasan [2*]

[1]Department of Biomedical Engineering, Yonsei University Mirae Campus, Korea

[2]Department of AI Semiconductor, Yonsei University Mirae Campus, Korea

*edenbyra@yonsei.ac.kr

Abstract

Alzheimer's disease (AD) is the most prevalent cause of dementia and exhibits a bidirectional relationship with sleep–wake regulation. Disease-modifying therapies remain limited; thus, early detection is of critical importance. Emerging evidence suggests that micro-architectural sleep electroencephalography (EEG) markers may serve as non-invasive indicators of early AD. In this study, we proposed a one-dimensional convolutional-Transformer model for the detection of AD, utilizing two-channel nocturnal EEG. The model is designed to identify individuals with AD who report the use of AD medication. The model exhibits an average accuracy of 66.09% and AUROC of 63.71% across a 5-fold cross-validation. The model demonstrated the feasibility of AD screening from minimal-channel sleep EEG and its potential translation to wearable settings. Nevertheless, the reliance on medicated AD status and the absence of prospective follow-up warrant further validation in drug-naïve cohorts and longitudinal studies.

1. 연구 배경

알츠하이머병(Alzheimer's disease, AD)은 가장 흔한 치매의 원인으로, 수면과 밀접한 상호작용을 보인다. 수면–각성 주기와 Aβ/타우 병리는 양방향으로 얽혀 있어 전임상 단계부터 수면 효율 저하와 서파활동(slow-wave activity) 감소 등이 나타나며, 이러한 변화는 인지 저하 및 병리 진행과 함께 악화될 수 있다[1].

최근 연구들은 수면 마이크로 지표(Sleep spindles, Sleep Slow Wave, Sleep Oscillation)가 AD 환자의 인지 기능과 신경퇴행성 바이오마커를 예측하는 유망한 표지로 제시되고 있으며, 비침습적 수면신호(Polysomnography, PSG)기반 평가의 임상적 가치를 뒷받침한다[2]. 아울러 딥러닝의 발전으로 수면 단계별 뇌파의 시·공간적 특징을 활용해 AD 관련 미세 신호 변화를 포착하고 조기 진행 양상을 판별하려는 시도가 확대되고 있다.

본 연구에서는 Transformer 기반의 수면 뇌전도 신호를 이용한 알츠하이머 진단 모델을 제안한다. 알츠하이머 약물 사용 여부에 대해 응답한 개인들의 데이터를 활용하여 해당 모델의 실효성을 검증하였다. 이를 통해 2-채널 수면 뇌전도만으로도 임상 및 실생활 환경에서 활용 가능한지 AD 선별 가능성을 탐색한다.

2.연구 방법

2-1 연구대상자

본 연구에서는 MrOS (Multicenter men Osteoporotic fractures) 1차 방문(2000년~2002년) 기간 동안 등록된 참가자 중 총 150명을 선정하여 이들의 임상 데이터를 분석하였다. 전체 참가자는 건강한 대조군 100명과 알츠하이머 환자군 50명으로 구성하였다 (표1). AD 환자군의 선정 기준은 약물을 지속적으로 복용하고 있다고 답한 참가들이다.

또한, 실험군과 대조군 간의 편향을 최소화하기 위해 나이, 체질량지수(BMI), 교육수준을 기준으로 성향 점수 매칭을 수행하여 AD 기반으로 참가자 그룹을 매칭하였다.

표 1. 연구 대상자의 인구 통계학적 특성

Measure	Total	Control	AD
Male (n, %)	150	100	50
Age (y)	78.1 ± 5.7	77.7 ± 5.8	78.8 ± 5.5
BMI (kg/m²)	26.5 ± 3.3	26.4 ± 3.1	26.7 ± 3.6
SBP (mmHg)	127.3 ± 17.7	126.9 ± 16.6	128.0 ± 20.0
DBP (mmHg)	66.9 ± 9.3	67.4 ± 9.1	66.0 ± 9.8
Total sleep time (h)	5.87 ± 1.31	5.88 ± 1.25	5.85 ± 1.45
Sleep efficiency (%)	73.87±12.88	74.50±12.78	72.60±13.12
Sleep Latency (min)	81.63 ± 53.1	81.3 ± 49.0	82.2 ± 61.1
REM Sleep Latency (min)	122.2 ± 80.7	118.1 ± 77.1	130.8 ± 88.2

Note: BMI, body mass index; SBS, Systolic blood pressure; DBP, Diastolic blood pressure;

2-2 수면 뇌파 데이터

모든 참가자에서 2채널 수면 뇌전도를 250 Hz로 수집하였다. 각 기록은 수면 시작(sleep onset) 10분 전부터 수면 종료(sleep offset)까지를 추출하여 30초 에포크로 분절하고, 표준 규약에 따라 수면 단계 라벨을 부여하였다. 제안한 모델의 견고성 평가는 참가자 단위(subject-wise) 5-겹 교차검증으로 수행하였다.

최종적으로 구축된 전체 수면 뇌전도 데이터셋은 정상인 98,010 에피소드, 알츠하이머 환자 49,488 에피소드로 총 147,498 에피소드이다(그림1).



그림 1. 데이터셋 수면단계별 분포비율

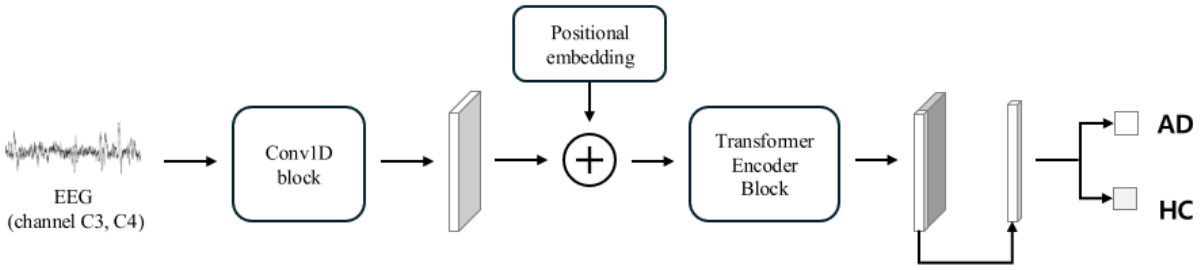


그림 2. 본 연구에서 제안하는 알츠하이머 진단 모델 구조

2-3 모델 구조

본 연구에서는 1차원 합성곱 신경망(1D-CNN)과 Transformer 인코더[3]를 결합한 뇌전도 분석 모델을 설계하였다(그림 2). 제안 모델은 뇌전도의 형태학적 특징을 추출하는 CNN 모듈과, 신호의 국소 및 전역 패턴을 효과적으로 포착하는 Transformer 인코더 모듈로(그림 3) 구성된다.

CNN에는 커널 크기 3과 패딩을 적용하였고, 각 합성곱층 뒤에 배치 정규화(batch normalization)와 LeakyReLU 활성화 함수를 배치하여 학습 안정성과 수렴 속도를 높였다. Transformer 인코더는 시간 순서로 정렬된 특징 맵을 입력으로 사용하며, 위치 임베딩(positional embedding)을 통해 시간 축 정보를 인코딩한다.

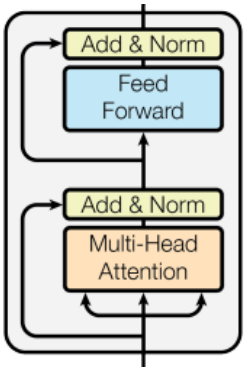


그림 3. Transformer Encoder Block구조

2-4 실험 세팅

손실 함수로는 이진 교차 엔트로피(Binary Cross Entropy)를 사용하였으며, 옵티마이저는 학습률 0.0001로 설정된 AdamW을 적용하였다. 제안된 모델은 Python 3.11과 PyTorch 프레임워크를 활용하여 구현되었으며, Intel i9-990X CPU (@ 3.5GHz) 및 NVIDIA GeForce RTX 3070 GPU 환경에서 학습을 수행하였다.

3. 연구 결과

본 연구는 참가자를 기준으로 5-겹 교차검증을 수행하여 제안 모델을 평가하였다. 그 결과, 평균 정확도 66.09%, 민감도 57.63%, 특이도 69.80%, AUROC 63.71%를 달성하였다. 아울러 특정 폴드에서는 정확도 75.29%, 특이도 84.31%, AUROC 70.27%로 상대적으로 우수한 성능을 확인하였다(표 2, 그림 4).

표 2. 제안하는 AD진단 딥러닝 모델 성능

Data Dividing	Accuracy	Sensitivity	Specificity	AUROC
5-fold (1)	0.7027	0.5345	0.7677	0.6511
5-fold (2)	0.5580	0.5286	0.5722	0.5504
5-fold (3)	0.6670	0.7240	0.6425	0.6832
5-fold (4)	0.7529	0.5623	0.8431	0.7027
5-fold (5)	0.6236	0.5320	0.6645	0.5983
Average	0.6609	0.5763	0.6980	0.6371

PSG 연구에서 사용하는 2채널 수면 뇌전도 신호를 이용하여, 웨어러블 디바이스에서 부착하여 실생활에 활용 가능하는 점에서 이점을 갖는다. 하지만, 본 연구는 알츠하이머 환자는 약물 복용중인 환자라 온전히 신뢰하기 어렵다. 약물을 복용하지 않고 진단 시점별로 분류한 환자를 대상으로 추가 검증이 필요하다.

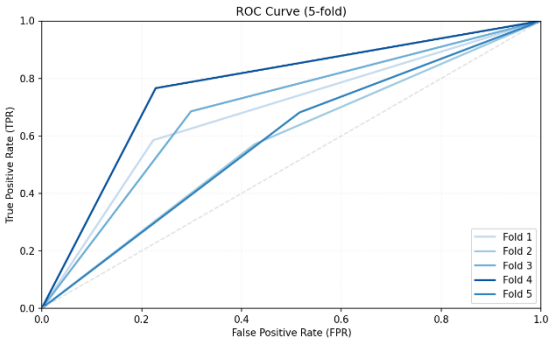


그림 4. ROC curve across 5-fold

4. Acknowledgements

이 논문은 2023년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 창의도전 연구기반지원사업임 (No. RS-2023-00249148)

5.참고 문헌

[1] Wang, Chanung, and David M. Holtzman. "Bidirectional relationship between sleep and Alzheimer's disease: role of amyloid, tau, and other factors." *Neuropsychopharmacology* 45.1 (2020): 104-120.

[2] Páez, Arsenio, et al. "Sleep spindles and slow oscillations predict cognition and biomarkers of neurodegeneration in mild to moderate Alzheimer's disease." *Alzheimer's & Dementia* 21.2 (2025): e14424.

[3] Vaswani, Ashish, et al. "Attention is all you need." *Advances in neural information processing systems* 30 (2017).

치과용 CBCT 영상을 이용한 치아 내부구조 자동 세그멘테이션 연구

이태연[1], 한지용[1,2], 임상헌[1,2], 김수정[1,2], 윤현빈[1,2], 윤희진[1,2], 오성호[1], 최호윤[1], 이원진[1,2,3]

서울대학교 치과대학 영상치의학교실[1]

서울대학교 공과대학 협동과정 바이오엔지니어링전공[2]

서울대학교 융합과학기술대학원 응용바이오공학과[3]

Abstract

Cone-Beam Computed Tomography (CBCT) is widely used in dental diagnosis, yet the internal structures of teeth such as enamel, dentine, and pulp are difficult to segment due to unclear boundaries and noise. In this study, we developed a deep learning-based segmentation pipeline for automatic segmentation of internal tooth structures. Individual cropped teeth with margin and resizing to 256×256 pixels were performed for dataset construction. The model achieved reliable segmentation results across enamel, dentine, and pulp, demonstrating potential for clinical application and integration with Statistical Shape Modeling (SSM) for precision dentistry

1. 연구 배경

치과용 CBCT(Cone-Beam Computed Tomography)는 교정, 보철, 임플란트 시술 등 다양한 임상적 상황에서 활용되는 영상 기법으로, 기존의 CT 에 비해 낮은 피폭량과 높은 공간 해상도를 제공한다. 그러나 CBCT 영상은 산란 및 금속 아티팩트로 인한 노이즈가 존재하며, 이로 인해 치아 내부구조인 법랑질(enamel), 상아질(dentin), 치수강(pulp Chamber)의 경계가 불명확하게 나타난다. 따라서 정확한 분석을 위해서는 치아 내부구조를 구분하는 세그멘테이션 과정이 필수적이다.

기존 연구에서는 치아 외형 분할에 초점이 맞추어져 있었으며, 내부구조를 정밀하게 분할한 연구는 많지 않다[1] .특히 내부구조는 얇고 복잡한 경계 특성으로 인해 자동 분할이 어려워 기존에는 수작업에 의존해야 하며, 이 과정은 많은 시간과 전문가의 개입이 필요하다.

최근 딥러닝 기반 의료영상 세그멘테이션 기법은 여러 장기와 조직 분할 과제에서 뛰어난 성능을 보여주고 있으며, U-Net 계열 모델은 소규모 데이터 환경에서도 안정적인 성능을 발휘하는 있는 구조로 널리 활용되고 있다[2].

본 연구에서는 CBCT 영상에서 치아 내부구조를 자동으로 분할하기 위해 여러 딥러닝 기반 세그멘테이션 모델을 적용·비교하고, 이를 통해 파이프라인을 구축하였다. 이 파이프라인은 치아 내부구조 분석에 활용될 수 있으며, 향후 3 차원 통계적 형태모델(Statistical Shape Model) 생성으로 확장될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 연구 방법

본 연구에서는 치아 내부구조 세그멘테이션을 위해 데이터 준비, 모델 학습 및 비교, 추론과 후처리의 세 단계를 거쳤다.

데이터 준비 단계에서는 환자별 CBCT DICOM 볼륨과 치아별 NIfTI 마스크를 확보하고, 치아는 FDI numbering(11 번 ~ 48 번) system 에 따라 구분하였다.

치아별 영상은 각 마스크의 bounding box 를 이용하여 치아 단위로 잘라냈으며, 치아 주변의 국소 구조만 보존하기 위해 마스크의 외곽에는 10 픽셀의 여유를 두어 불필요한 주변 구조를 제거하였다. 이후 잘라낸 영상은 256×256 크기로 맞추어 슬라이스 단위 영상으로 변환하였고, 영상 경로, 치아 번호, 단면 위치 등의 정보를 포함한 메타데이터를 구축하였다.

모델 구성에서는 U-Net 과 SegResNet 을 포함한 여러 딥러닝 기반 세그멘테이션 네트워크를 동일한 조건에서 적용하여 성능을 비교하였다. 입력은 단일 채널의 CBCT 영상이며, 출력은 법랑질, 상아질, 치수강의 세 가지 클래스로 설정하였다. 손실 함수는 Cross-Entropy 와 Dice 를 기본으로 하고 Boundary 와 Edge Loss 를 조합하여 내부구조 분할 성능에 미치는 영향을 확인하였다.

추론 및 후처리 단계에서는 새로운 CBCT 영상에 동일한 전처리 과정을 적용하여 학습된 모델로 예측을 수행하였다. 이후 예측된 마스크는 원본 해상도로 복원하여 NIfTI 형식으로 저장하고, 시각화를 위해 슬라이스 단위 결과와 3 차원 재구성 영상을 생성하였다.

모델의 성능 평가는 Dice 계수, 교차 합집합(IoU), Precision, Recall 지표를 통해 평가하였다. A=예측 영역, B=Ground Truth 라고 정의한다면, 각 지표는 다음과 같다[3].

$$\text{Dice} = \frac{2 \| A \cap B \|}{\| A \| + \| B \|} = \frac{2TP}{2TP + FP + FN} \quad (1)$$

$$\text{IoU} = \frac{\| A \cap B \|}{\| A \cup B \|} = \frac{TP}{TP + FP + FN} \quad (2)$$

$$\text{Precsion} = \frac{\| A \cap B \|}{\| A \|} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (3)$$

$$\text{Recall} = \frac{\| A \cap B \|}{\| B \|} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (4)$$

Dice 계수는 두 영역이 얼마나 잘 겹치는지를 평가하며, IoU 는 경계 부근의 정확도를 반영한다. Precision 은 모델이 불필요한 예측을 얼마나 줄였는지를 평가하며, 마지막으로 Recall 은 실제 구조 중 모델이 정확히 검출한 비율로, 민감도를 의미한다. 이러한 지표를 종합적으로 사용하여 모델별 및 클래스별로 산출하여 세그멘테이션 성능을 정량적으로 비교·분석하였다.

3. 연구 결과

구축한 파이프라인은 CBCT 영상에 적용되어 치아 내부구조를 자동으로 분할하는 데 사용되었으며, 클래스별 및 네트워크별 성능을 비교 하였다.

표 1. 슬라이스에서의 네트워크별 세그멘테이션 성능 비교

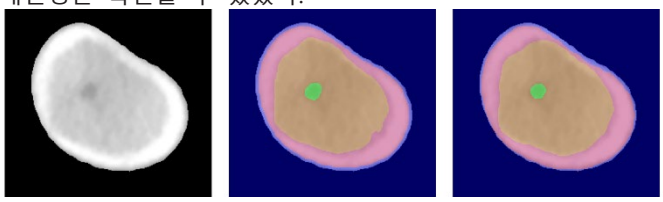
	Dice	IoU	Precision	Recall
nnUNet	0.671	0.510	0.611	0.752
Mask R-CNN	0.725	0.579	0.717	0.767
DynUNet	0.710	0.562	0.691	0.746
AttentionUNet	0.751	0.608	0.732	0.776
SegResNet	0.799	0.669	0.777	0.822

표 1 의 네트워크 비교 결과, SegResNet 이 평균이 0.767 으로 가장 높았으며, 모든 지표에서도 가장 우수한 성능을 기록하였다. 또한 IoU 가 0.669 로 안정적인 분할 결과를 보여, 치수강과 같은 세부 구조의 인식에서도 높은 정확도를 확인할 수 있었다.

표 2. SegResNet 을 적용하여 산출한 클래스별 세그멘테이션 성능 지표

	Dice	IoU	Precision	Recall
Enamel	0.756	0.608	0.717	0.800
Dentin	0.882	0.789	0.859	0.907
Pulp	0.757	0.610	0.754	0.761
Mean	0.799	0.669	0.777	0.822

표 2 에서 보듯이, 상아질(Dentin)은 모든 지표에서 세 구조 중 가장 안정적인 성능을 보였다. 법랑질(Enamel)과 치수강(Pulp)의 Dice 계수와 IoU 계수는 상대적으로 낮은 값을 보였다. 이는 경계가 얇고 노이즈에 민감한 해부학적 특성 때문에 경계 부근에서 불일치가 발생했음을 반영한다. 그럼에도 Precision 과 Recall 이 확보되어 일정 수준의 재현성은 확인할 수 있었다.



(a) (b) (c)

그림 1. 치아 단면 영상에서의 세그멘테이션 결과 – 우수 사례 (a: 원본 CBCT, b: Ground Truth, c: Prediction)

그림 1 은 실제 환자의 슬라이스와 예측한 마스크를 보여준다. 예측된 마스크는 Ground Truth 와 전반적으로 일치하는 형태를 보였으며, 특히 치수강의 위치와 크기를 잘 재현하였다. 또한 법랑질과 상아질의 경계가 불명확한 경우에도 비교적 안정적인 분할 성능을 나타냈다.



(a) (b) (c)

그림 2. 치아 단면 영상에서의 세그멘테이션 결과 – 저성능 사례 (a: 원본 CBCT, b: Ground Truth, c: Prediction)

그림 2 는 모델이 성능 저하를 보인 사례를 나타낸다. 치수강이 작은 슬라이스에서는 예측이 누락되는 경우가 있었고, 법랑질과 상아질이 중첩된 구간에서는 경계가 불명확하게 분할되었다. 이러한 결과는 내부구조의 얇은 두께와 CBCT 영상의 특성으로 인한 노이즈가 모델 학습에 영향을 미쳤음을 보여준다.

정량적 지표(표 2, 표 3)와 정성적 시각화(그림 1, 그림 2)를 종합하면, 제안한 방법은 CBCT 영상에서 치아 내부구조를 자동으로 분할하는 데 안정적인 성능을 보였다. 특히 Recall 이 높게 나타나 내부구조 검출의 신뢰성이 확인되었으며, 이는 향후 정밀 치의학적 분석 및 통계적 형태모델(SSM) 구축으로의 확장 할 수 있는 가능성을 보인다.

4. Conclusion

본 연구에서는 치과용 CBCT 영상을 대상으로 치아 내부구조를 자동으로 세그멘테이션 하기 위한 파이프라인을 구축하였고, 여러 딥러닝 기반 모델을 비교 및 평가하였다. 구축된 모델은 모든 지표에서 높은 수치로 내부구조를 안정적으로 분할할 수 있음을 보였다.

비록 제한된 데이터셋과 2D 네트워크 기반으로 수행되어 얇은 경계에서 Dice 가 낮게 나타나는 한계가 있었으나, 높은 Recall 이 확보되어 구조 누락 없이 내부구조를 정확하게 검출할 수 있었으며, 내부구조의 분포 또한 안정적으로 반영하는 결과를 확인할 수 있었다.

이러한 여러 딥러닝 모델들을 적용 및 비교한 결과를 통해 치과 영역에서 내부구조 세그멘테이션의 자동화 가능성을 확인하였다. 또한, 내부구조의 형태학적 정보는 교정, 보철, 임플란트 등 다양한 임상적 활용이 가능하며, 향후 통계적 형태모델(SSM) 구축의 기반으로 확장된다면 환자 맞춤형 진단 및 치료계획 수립에 기여할 수 있을 것이다.

5. Acknowledgements

본 연구는 서울대학교치과병원 IRB(Institutional Review Board)의 승인을 받아 진행하였다(ERI18001).

This work was supported by National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (RS-2023-NR077088). This work was supported by Technology Innovation Program (RS-2025-14322975) funded by the Ministry of Trade Industry & Energy.

6.References

[1] Kim SH, Lee J, Park E, Han J, Oh S, Lee WJ. Automatic segmentation of internal tooth structure from CBCT. In: Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2023. Cham: Springer; 2023. p. 780-790.

[2] Zhang Y, Chen L, Wu J, Li P, Xu T, Wang Y, et al. Evolution of deep learning tooth segmentation from CT/CBCT. Frontiers in Physiology. 2024;15:1366228.

[3] Müller D, Soto-Rey I, Kramer F. Towards a guideline for evaluation metrics in medical image segmentation. Medical Image Analysis. 2022;83:102658.

Poster-207

FESTA-Net: 다양한 과제와 채널 구성에도 강건한 뇌 상태 해독을 위한 fNIRS-EEG 동기화 시간 정렬 네트워크

김민수[1†], 이경구[1†], 천민영[1], 남혜린[2], 임창환[1,2,3*]

한양대학교 융합전자공학과[1]

한양대학교 인공지능학과[2]

한양대학교 바이오메디컬공학과[3]

FESTA-Net: An fNIRS–EEG Synchronized Temporal-Alignment Network for Brain-State Decoding with Robustness Across Tasks and Channel Configurations

Minsu Kim[1†], Kyeonggu Lee[1†], Minyoung Chun[1], Hyerin Nam[2], and Chang-Hwan Im[1,2,3*]

[1]Department of Electronic Engineering, Hanyang University, Korea

[2]Department of Artificial Intelligence, Hanyang University, Korea

[3]Department of Biomedical Engineering, Hanyang University, Korea

[†]These two authors contributed equally to this study as the first authors.

[*]ich@hanyang.ac.kr

Abstract

Hybrid systems of functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) and electroencephalography (EEG) in passive brain-computer interfaces (pBCIs) have demonstrated considerable efficacy in the decoding of cognitive and affective states. However, the development of deep learning models that are robust across diverse tasks and channel configurations remains a significant challenge. In this study, we propose the fNIRS–EEG Synchronized Temporal-Alignment Network (FESTA-Net), which enhances decoding performance using the synchronized temporal-alignment fusion strategy of fNIRS and EEG signals. To validate the FESTA-Net across diverse tasks and channel configurations, five distinct datasets are utilized: emotion, stress, word generation (WG), discrimination–selection response (DSR), and N-back. Across all datasets, the FESTA-Net achieved the highest classification accuracies, significantly outperforming state-of-the-art unimodal and hybrid deep learning models.

1. 연구 배경

수동적 뇌-컴퓨터 인터페이스(passive brain-computer interface; pBCI)는 사용자가 시스템을 제어하려는 의도 없이 감정, 인지 상태, 피로도와 같이 자연스럽게 발생하는 뇌 활동을 통해 사용자의 의도를 파악하고 반영하는 방법이다. pBCI는 여러 방법을 통해 개발되고 있는데, 그 중 뇌파(electroencephalogram)와 기능적 근적외선 분광법(functional near-infrared spectroscopy; fNIRS)은 안전성, 비침습성, 휴대성 등의 장점을 가져 실제 생활의 활용이 용이한 방법으로 주목받고 있다. 특히 뇌파와 fNIRS 두 모달리티(modality)를 동시에 활용하는 하이브리드 시스템에서 더 높은 성능을 기대할 수 있어 하나의 웨어러블(wearable) 장비로 개발되는 등의 시도가 이루어지고 있다 [1].

이러한 장점에도 불구하고 두 신호를 활용해 pBCI에서 인지 및 정서 상태를 강건하게 디코딩할 수 있는 방법의 개발은 여전히 해결해야 할 과제이다. 현재까지 전극 채널 구성과 무관하게 두 신호의 시계열 특성을 활용하여 상호 보완적인 혈역학적 및 전기생리학적 특징을 포착하는 방법은 존재하지 않는다. 더 나아가서, 최근 딥러닝(deep learning) 기법들이 디코딩 정확도를 향상시키고 있음에도 불구하고 다양한 작업과 채널 구성 전반에 걸쳐 일관적으로 견고한 성능을 보이는 모델 개발은 특히 어려운 과제로 여겨지고 있다.

본 연구에서는 뇌파와 fNIRS를 이용한 시스템에서 인지 및 정서 상태를 강건하게 디코딩할 수 있는 새로운 딥러닝 구조 FESTA-Net를 제안한다. FESTA-Net의 구조는 뇌파와 fNIRS 각 신호가 시간적 정렬을 이루며 같은 크기의 여러 분절(segment)로 분할되는 것으로 시작된다. 이후 각 신호 특성에 맞게 설계된 인코더를 통해 각 분절 마다의 특징을 추출하고, 추출된 각 신호의 특징은 분절마다 선형 투영(linear projection)을 통해 합쳐진다. 마지막으로 트랜스포머(Transformer)를 통해 분절 간의 관계를 학습한다. 제안된 모델은 총 5개의 데이터셋을 사용하여 5개의 이진 분류와 1개의 3-클래스 분류를 통해 평가되었다.

2.연구 방법

FESTA-Net의 전체적인 구조는 그림 1에 그려져 있다. 해당 모델은 네 가지 주요 구성 요소로 이루어져 있다: A. 시간 분할 모듈, B. 모달리티별 인코더, C. 다중 모달리티 특징 융합, D. 트랜스포머 분류기. FESTA-Net은 뇌파와 fNIRS 두 신호를 입력으로 받으면 먼저 시간 분할 모듈을 통해 각 신호를 시간적으로 정렬을 이루는 같은 크기의 여러 분절로 나눈다. 이를 통해 모델이 각 분절 내부의 국소적인 특징을 추출하면서 분절 간의 관계를 학습할 수 있도록 한다. 이후 모델은 각 모달리티별 특징에 맞게 제작된 인코더를 통해 분절 마다의 특징을 추출한다. 인코더의 구조는 그림 2에 그려져 있다. 각 인코더는 시간축 컨볼루션(convolution)과 공간축 컨볼루션 레이어로 이루어져 있으며, 마지막 선형 투영을 통해 분절 마다의 특징지도가 추출된다. 인코더를 통과한 각 신호의 특징 지도는 하나로 합쳐진다. 다중 모달리티 특징 융합은 뇌파와 fNIRS처럼 서로 다른 특성을 가진 모달리티를 통합하는 데 필수적이다. 본 연구에서는 특징 융합을 위해 단순히 특징을 결합하는 대신 시간적으로

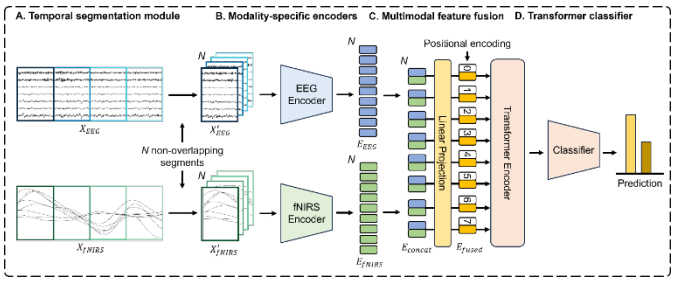


그림 1. FESTA-Net의 구조.

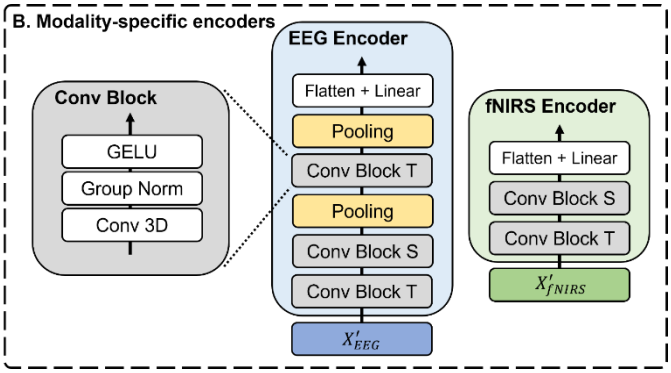


그림 2. 모달리티별 인코더의 구조. Conv Block T와 Conv Block S는 각각 시간축, 공간축 컨볼루션 레이어를 의미한다.

정렬된 뇌파와 fNIRS 분절 간의 관계를 학습하게 하기 위해서 분절 별로 선형 투영을 통해 특징을 융합한다. 또한 사인파 위치 인코딩을 추가하여 후속 트랜스포머가 셀프 어텐션(self-attention) 연산 과정에서 분절의 순서와 상대적인 위치를 고려하여 학습할 수 있도록 하였다. 마지막 트랜스포머 인코더를 통해 분절 간 관계를 학습하고 최종 분류까지 이루어지도록 하였다.

FESTA-Net을 평가하기위해서 2개의 연구실 내 데이터셋 (감정, 스트레스)와 3개의 공개 데이터셋 (단어 상상, 집중, 인지 부하)을 사용하였다 [2]. 감정 데이터셋은 유발된 감정을 2차원 감정 원형 모델을 기반으로 긍정적/부정적 감정과 높은/낮은 각성 상태로 나누어 2번의 이진 분류를 진행하였다. 스트레스는 높은/낮은 스트레스 이진 분류, 단어 상상은 단어 상상/휴지기 상태 이진 분류, 집중은 집중/휴지기 상태 이진 분류를 진행하였다. 마지막으로 인지 부하는 N-back 과제의 단계마다 인지 부하 정도가 달라지는 것을 이용하여 0-, 2-, 3-back 3가지에 대해서 3-클래스 분류를 진행하였다. 연구실 내 데이터셋은 전두엽의 뇌파 7채널, fNIRS 13채널에서 35명에 대해 측정되었으며 공개 데이터셋은 뇌 전체 영역에서 뇌파 28채널, fNIRS 36채널에서 26명에 대해 측정되었다. 이 연구는 한양대학교의 기관생명윤리위원회 (Institutional Review Board)를 통해 승인되었다 (HYUIRB-202407-029-1).

전처리 과정으로 연구실 내 데이터셋의 뇌파 데이터는 신호의 샘플링 레이트가 2048 Hz에서 128 Hz으로 다운 샘플링 되었으며, 공개 데이터셋의 뇌파 데이터는 200 Hz로 다운샘플링 되었다. 그리고 공개 데이터셋의 뇌파 신호는 공통 평균 기준 도출법(common average reference)을 통해 공통 잡음 성분(common noise)을 제거하였으며 연구실 내 데이터셋은 적은 채널 수로 인해 (n=7) 적용하지 않았다. 이후 뇌파 신호는 6차 영위상 버터워스 필터(4th order zero-phase Butterworth filter)를 통해 1 Hz 에서 50 Hz 사이로 필터링 되었다.

fNIRS 신호의 경우 연구실 내 데이터셋은 6.1 Hz, 공개 데이터셋은 10 Hz로 샘플링 되었다. 전처리 과정으로 잡음 제거를 위해 3차 영위상 버터워스 저역 통과 필터를 통해 0.5 Hz 미만으로 필터링 되었으며 modified Beer–Lambert 법칙을 이용하여 DHbO와 DHbR가 추출되었다. 마지막으로 6차 영위상 버터워스 필터를 통해 0.01 Hz 에서 0.2 Hz 사이로 필터링 되었다.

3. 연구 결과

제안된 방법은 뇌파, fNIRS 각 신호를 사용하는 방법들과 두 신호를 동시에 활용하는 다른 방법들과 비교를 통해 평가되었다. 모든 데이터셋에 대한 분류 결과는 표 1에 정리되어 있다. 표에서 감정1은 감정의 높은/낮은 각성 상태, 감정2는 감정의 긍정/부정 상태 분류를 의미한다. 결과를 보면 모든 경우에서 제안한 FESTA-Net이 가장 높은 성능을 보여주었다. 뇌파와 fNIRS를 같이 사용하는 다른 방법은 특정 분류 과제에서 낮은 성능을 보여주며 모든 과제에서 강건하게 결과를 도출해내지 못했지만, FESTA-Net은 모든 분류 과제에 대해서 일관적으로 높은 성능을 보여주며 제안한 방법이 여러 과제에서도 견고하게 작동할 수 있음을 보여주었다.

표 1. FESTA-Net과 다른 방법들의 성능 비교

방법	모달리티	정확도 (%)					
		감정1	감정2	스트레스	단어 상상	집중	인지 부하
EEGNet	뇌파	79.51	77.43	58.57	65.83	75.53	47.58
HiRENet	뇌파	80.90	78.12	65.71	75.71	85.64	50.43
fNIRSNet	fNIRS	64.93	52.78	67.14	65.83	68.80	45.87
fNIRS-T	fNIRS	65.28	54.86	77.14	61.73	64.96	45.44
BimodalNet	뇌파+fNIRS	69.10	70.14	68.57	68.14	76.92	46.01
EF-Net	뇌파+fNIRS	79.51	73.96	65.00	64.65	88.78	45.01
STA-Net	뇌파+fNIRS	60.76	60.42	65.58	79.55	75.32	47.44
FESTA-Net	뇌파+fNIRS	**86.81**	**84.72**	**87.14**	**81.86**	**94.66**	**62.68**

4. Acknowledgements

이 연구는 한국 정부 (과기정통부)의 재원으로 한국연구재단 바이오 의료기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2024-00397673).

5.참고 문헌

[1] Uchitel, J., E.E. Vidal-Rosas, R.J. Cooper, and H. Zhao, Wearable, Integrated EEG-fNIRS Technologies: A Review. Sensors (Basel), 2021.

[2] Shin, J., A. von Luhmann, D.W. Kim, J. Mehnert, H.J. Hwang, and K.R. Muller, *Simultaneous acquisition of EEG and NIRS during cognitive tasks for an open access dataset.* Sci. Data, 2018.

[3] Russell, James A. "A circumplex model of affect." Journal of personality and social psychology 39.6: 1161, 1980.

Poster-208

자기지도학습을 이용한 파노라마 방사선 사진에서의 치아 표현형 비지도 학습

손호선[1], Kong Vungsovanreach[2], 박재성[3], 이은영[4], 김경아[3]

충북대학교 의학연구소[1], 충북대학교 빅데이터협동과정[2], 충북대학교 의과대학 의공학교실[3],

충북대학교 의과대학 구강악안면외과학교실[4]

Unsupervised Learning of Dental Phenotypes from Panoramic Radiographs using Self-Supervised Learning

Ho Sun Shon[1*], Vungsovanreach Kong[2], Jae Sung Park[3], Eun Young Lee[4], Kyung Ah Kim[3]

Medical Research Institute, School of Medicine, Chungbuk National University, Cheongju, Korea[1]

Department of Big Data, Chungbuk National University, Korea[2]

Department of Biomedical Engineering, College of Medicine, Chungbuk National University, Korea[3]

Department of Oral and Maxillofacial Surgery, College of Medicine, Chungbuk National University, Korea[4]

*shon0621@gmail.com

Abstract

Panoramic dental radiographs provide comprehensive views of dentition and surrounding structures, yet annotated datasets remain scarce due to the need for expert labeling. This study demonstrates that self-supervised learning (SSL) can discover meaningful patient stratifications from unlabeled panoramic radiographs without expert annotation. We trained a SimCLR-based contrastive learning model on 500 unlabeled panoramic X-rays, extracted 512-dimensional feature embeddings, and applied unsupervised clustering to identify natural patient groupings. Our pipeline automatically identified three distinct clusters (n=109, 178, and 213 patients) corresponding to clinically interpretable dental phenotypes including complete dentition, dental restorations, and missing teeth patterns. UMAP and t-SNE visualizations demonstrated clear spatial separation with minimal overlap. While quantitative metrics showed modest values (silhouette score: 0.10, Davies-Bouldin index: 2.70), qualitative analysis of cluster representatives revealed coherent clinical patterns. This work establishes proof-of-concept that SSL-based unsupervised methods can extract interpretable dental phenotypes from small unlabeled datasets.

1. 연구 배경

Panoramic radiographs are crucial diagnostic tools that can visualize teeth, jaws, and surrounding structures to identify dental conditions and treatment outcomes [1]. However, analysing these images at scale is very challenging because annotated these datasets require expensive expert labelling. To address this bottleneck, this research paper proposes using self-supervised learning (SSL) techniques, specifically SimCLR, which can learn meaningful representations of an image without annotations [2]. SimCLR works by training a model to recognize that different augmented versions of the same image should have similar representations while different images should have distinct representations. The study hypothesizes that applying the SimCLR technique to dental radiographs data will automatically capture important dental features (implants, missing teeth, and bone density) without supervision, and that clustering these learned representations will reveal meaningful patient groups. This approach could enable large-scale dental image analysis without the prohibitive costs of expert annotation.

2.연구 방법

Experimental Dataset

The study was conducted using 500 unique panoramic dental radiographs in JPEG format, with images averaging 360KB each. These images were collected to represent diverse dental conditions including complete dentition, partial edentulism, dental restorations, and implants, with no ground truth labels available or used during training or clustering.

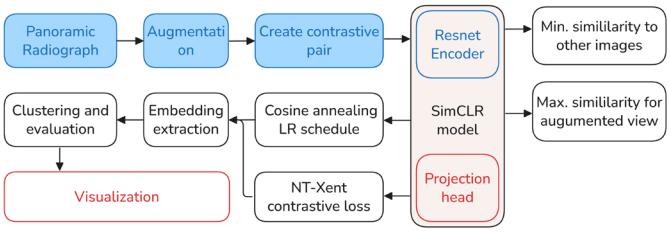


Figure 1. Proposed unsupervised discovery systems.

Self-Supervised Learning

SimCLR was applied with ResNet-18 as the backbone encoder, pretrained on ImageNet, followed by a 2-layer MLP head that was used during SSL training. The augmentation was conservative to preserve diagnostic features, including random resized crops, limited rotation ±10°, horizontal flips, and mild colour adjustments. Model was trained for 100 epochs with a batch size of 32, using Adam optimizer with cosine annealing and the NT-Xent contrastive loss with a temperature of 0.5, processing images at 224×224 pixels.

Embedding Extraction and Clustering

Then, 512-dimensional embeddings were extracted for all images using the trained encoder. The number of clusters (k=3) was determined using the elbow method combined with silhouette score optimization, testing values from 3 to 10. K-means clustering was applied to these embeddings, and five representative samples per cluster were identified based on their proximity to cluster centroids.

Evaluation and Visualization

Clustering quality was assessed using three intrinsic metrics: Silhouette Score for measuring cohesion versus separation, Davies-Bouldin Index for cluster similarity, and Calinski-Harabasz Index for between-cluster versus within-cluster dispersion. The embeddings were visualized in 2D using both UMAP and t-SNE techniques to enable interpretation of the learned representations and cluster distributions [3, 4].

3. 연구 결과

Training and Optimization

The SimCLR model was trained for 100 epochs, with training loss decreasing to 2.8. The cosine annealing schedule reduced the learning rate from 3×10^{-4} to 7×10^{-8}, facilitating stable convergence without signs of overfitting.

Cluster Analysis

Silhouette analysis identified k=3 as the optimal number of clusters, resulting in a relatively balanced distribution across the 500-patient dataset: Cluster 0 contained 109 patients (21.8%), Cluster 1 included 178 patients (35.6%), and Cluster 2 included 213 patients (42.6%). Quantitative clustering metrics yielded a silhouette score of 0.10, Davies-Bouldin index of 2.70, and Calinski-Harabasz score of 49.63, indicating weak but positive cluster separation consistency.

Embedding Visualization

Both UMAP and t-SNE projections demonstrated clear spatial separation of the three clusters in Figure 2. In the UMAP visualization, Cluster 2 occupied the upper-left region, Cluster 1 dominated the right region, and Cluster 0 concentrated in the lower portion, with convex hulls showing minimal overlap. The t-SNE projection confirmed this structure with even more pronounced local separation, particularly for Cluster 0, validating the robustness of the discovered patterns.

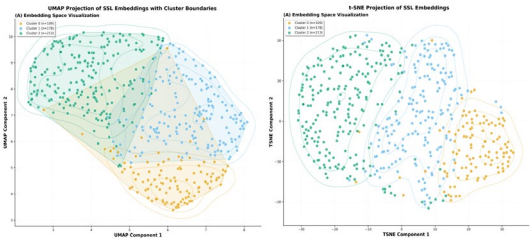


Figure 2. Visualizations of UMAP and t-SME

Clinical Phenotype Characterization

Visual inspection of representative radiographs revealed distinct clinical patterns for each cluster. Cluster 0 (n=109) predominantly showed complete dentition with all teeth present and normal jawbone, likely representing healthy or minimally treated patients. Cluster 1 (n=178) exhibited dental restorations and implants, characterized by bright metallic artifacts and mixed dental conditions including crowned teeth and fixed prosthetics. Cluster 2 (n=213) displayed missing teeth with edentulous regions, gaps in the dental arch, and areas of reduced bone density. The visualizations in Figure 3 and 4 aligned with clinical expectations, with the largest cluster representing patients with tooth loss (42.6%), followed by those with restorations (35.6%), and the smallest cluster containing patients with complete dentition (21.8%). This insight suggests genuine population stratification rather than artificial clustering, showing that self-supervised learning can discover meaningful dental phenotypes from unlabelled data.

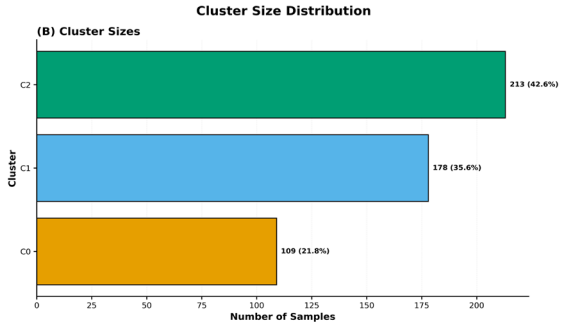


Figure 3. Diagram illustrating the experiment flows.

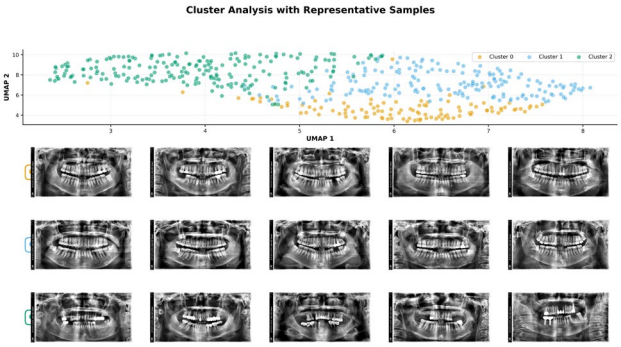


Figure 4. Visual of the representative X-rays per cluster.

This study demonstrates that self-supervised learning via SimCLR can discover clinically meaningful dental phenotypes from just 500 unlabelled panoramic radiographs. Our pipeline automatically identified three interpretable patient clusters without any expert annotation. Despite modest clustering metrics (silhouette score: 0.10), the visual coherence of cluster representatives confirms that SSL captures clinically relevant features. These findings show that SSL offers a solution for medical imaging domains where labelled data is scarce.

4. Acknowledgements

This research was supported by the Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (No. RS-2023-00245300, and No. 2020R1I1A1A01065199).

5.참고 문헌

[1] S. White, and M. Pharoah. "Oral Radiology: Principles and Interpretation." Elsevier, 7th ed., 2014.

[2] Y. LeCun, and I. Misra. "Self-supervised learning: The dark matter of intelligence." Meta AI Blog, 2021.

[3] L. McInnes, J. Healy, and J. Melville. "UMAP: Uniform manifold approximation and projection for dimension reduction." arXiv:1802.03426, 2018.

[4] L. van der Maaten, and G. Hinton. "Visualizing data using t-SNE." Journal of Machine Learning Research, Vol 9, p.2579-2605, 2008.

Poster-209

근감소증에 따른 자세 불안정성 정량 평가를 위한 감각-운동 반응 추정 딥러닝 전략

채승헌[1], 박재성[2], 김동겸[3], 방소현[3], 이상식[3], 박정미[4], 김경아[2], 최안렬[2*]

성균관대학교 생명공학대학 바이오메카트로닉스학과[1]

충북대학교 의과대학 의공학교실[2]

가톨릭관동대학교 의료융합대학 의료공학과[3]

울산대학교 의과대학 강릉아산병원 이비인후과[4]

Deep learning strategy for estimating sensorimotor responses in the quantitative evaluation of postural instability due to sarcopenia

Seugnheon Chae[1], Jae Sung Park[2], Dong Gyeom Kim[3], So Hyoen Bang[3], Sangsik Lee[3], Jung Mee Park[4], Kyung-Ah Kim[2], Ahnryul Choi[2*]

Department of Bio-Mechatronic Engineering, Sungkyunkwan University, Korea[1]

Department of Biomedical Engineering, College of Medicine, Chungbuk National University, Korea[2]

Department of Biomedical Engineering, Catholic Kwandong University, Korea[3]

Department of Otorhinolaryngology-Head and Neck Surgery, Gangneung Asan Hospital, University of Ulsan College of Medicine, Korea[4]

*achoi@chungbuk.ac.kr

Abstract

In this study, we propose a novel deep learning model for postural stability assessment that estimates sensory input capacity (equilibrium score) and the corresponding motor response (movement strategy) from center of pressure signals. The models utilize Short-Time Fourier Transform (STFT) and Wavelet Transform (WT) of center of pressure signals as input features. A Recurrent Attention Network was employed as the learning model. The feature distribution smoothing (FDS) method was applied to address performance degradation caused by target imbalance. The STFT+RAN+FDS model achieved a mean error of 0.89 for the equilibrium score and 0.72 for the movement strategy score. This approach may serve as a cost-effective solution to postural instability problems arising from the increasing number of elderly patients experiencing dizziness.

1. 연구 배경

근감소증은 나이, 질병, 활동 감소 등의 다양한 요인으로 인해 골격근량과 근력이 점진적으로 감소하는 상태를 의미하며, 신체의 균형 유지 능력 및 외부 자극에 대한 회복 능력이 저하된다. 안정된 자세 제어는 시각, 전정, 체성 감각계에서 들어오는 감각 입력 신호가 다양한 뇌 영역에서의 통합되어 유지된다 [1]. 신뢰할 수 있는 감각계 입력 뿐만 아니라, 지지면 내 무게중심의 투영점을 적절히 제어하는 운동 반응 역시 자세 안정성 유지를 위해 필수적이다 [2]. 이러한 운동 반응은 고관절과 발목관절의 조정을 통해 나타나며, 이는 전-후 방향의 자세 안정성을 보장한다 [3]. 특히, 발달성 협응장애 아동의 경우 정상적인 감각계 입력 시스템에도 불구하고, 무게중심 재정렬을 위한 운동 반응 기전에서 차이를 보이는 것으로 나타났다 [2]. 이는 자세 안정성을 평가할 때 감각계 입력의 통합 능력 뿐만 아니라 적절한 운동 반응 전략 수립이 중요함을 뒷받침한다.

전산화된 동적자세측정기의 감각구성검사는 임상에서 자세 안정성을 평가하기 위해 주로 사용된다 [4]. 본 검사는 특정 감각 입력과 그에 따른 운동 반응의 기여도를 평가하기 위하여 다른 감각계를 차단하거나 교란하여 수행되며, 균형점수 (Equilibrium score)와 움직임전략 (Movement strategy)의 정량적인 파라미터가 활용된다 [16]. 하지만, 감각구성검사는 감각계의 인위적 조작을 통하여 시각, 전정 및 체성의 개별 감각계만을 평가하는 프로토콜로서 통합된 감각 입력 및 그에 대한 운동 반응 평가가 어려운 한계가 있다. 따라서, 개별 감각계의 인위적 조작을 위하여 움직이는 가상 환경 시각 서라운드나 균형플레이트가 설치된 회전베이스 같은 고가의 추가 장치가 필요하며, 그로 인한 공간 제약 및 복잡한 검사 프로토콜의 한계점이 따른다 [5].

가만히 서 있기 자세에서는 모든 감각계가 균형 유지를 위해 함께 작동한다. 그러나 이 자세는 부정정 시스템으로서, 시각, 전정 및 체성 감각계 각각의 기여도를 직접적으로 도출할 수 없다. 딥러닝 기법의 적용은 이러한 문제를 해결할 수 있는 가능성을 제시한다. 최근 우리 연구팀은 서있기 자세에서 압력중심을 활용해 균형점수와 감각계지수를 추정하는 새로운 딥러닝 구조를 제안하였다 [4, 5]. 새로운 딥러닝 구조는 타겟을 부호화/복호화하여 모델 성능을 최적화하였고, 최대 약 2.5 점 수준의 오차를 달성함으로써 서있기 자세에서의 통합된 감각 입력 평가 가능성을 최초로 입증하였다.

자세 안정성은 감각 입력의 통합 뿐만 아니라 이에 상응하는 운동 반응도 포함하므로, 균형 장애의 정확하고 신뢰성 있는 진단 및 치료 계획을 위해서는 두 가지 측면 모두 평가될 필요가 있다. 그러므로, 본 연구의 목적은 서있기 자세에서 감각 입력의 기여도와 그에 따른 운동 반응을 동시에 추정할 수 있는 회귀 기반 딥러닝 프로세스를 제안하는 데 있다.

2.연구 방법

본 연구는 강릉 아산 병원에서 감각구성검사를 받은 정상 대조군 (201명)과 말초성 어지럼 질환이 있는 환자 (228명)를 대상으로 진행되었다. 어지럼 질환으로는 이석증 (99명), 메니에르병 (22명) 및 전정신경염 (107명) 환자들이 포함되어 있다. 본 연구 프로토콜은 강릉 아산 병원 임상연구심의위원회의 승인을 받았으며, 헬싱키 선언에 따라 수행되었다 (GNAH 2024-07-011).

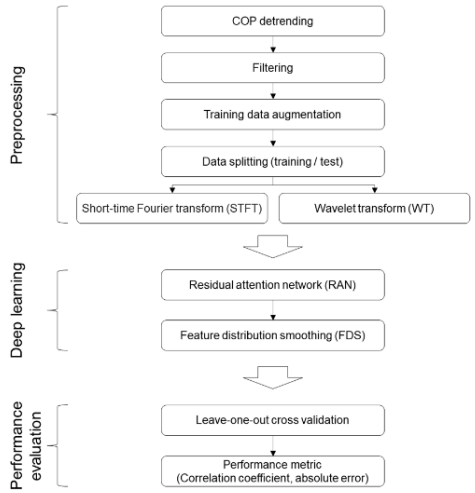


그림 1. 자세안정성 평가를 위한 딥러닝 전략 프로세스

전산화된 동적자세측정기는 이비인후과 어지럼증 진단에 활용되고 있는 Bertec (Bertec Corporation, Columbus, OH, USA)을 사용하였다. 본 검사 장비는 시각을 교란하기 위한 가상 환경 시각 서라운드, 체성 감각계를 교란하기 위한 회전 베이스, 인체의 전/후 방향 압력중심궤적을 추출하기 위한 이중 균형플레이트 및 검사 중 넘어질 때 부상을 방지하기 위한 일체형 안전 하네스 구조로 구성되어 있다.

자세 안정성을 평가하기 위해 감각구성검사 6가지 조건 1-6 에서의 검사 결과 (균형점수 및 움직임전략)를 추정하는 프로토콜은 그림 1에 제시되어 있다. 정적 자세에서 획득된 압력중심 신호는 전처리 과정을 거쳤으며, 균형점수 및 움직임전략을 추정하기 위하여 딥러닝 모델 구조 설계 및 학습을 수행하였다. 딥러닝 모델은 Residual attention network (RAN) 구조를 적용하였으며 (그림 2), Softmax 대신 회귀 레이어로 구성하였다. 또한, 타겟이 연속 변수일 때 데이터셋의 불균형을 해소할 수 있도록 Feature distribution smoothing (FDS)을 적용하였다.

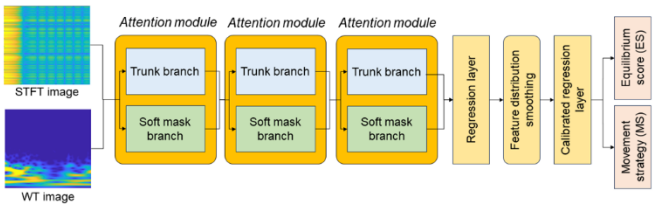


그림 2. Residual attention network 구조

모델은 입력 특징점 추출 방법 (웨이블릿변환; WT vs. Short-time Fourier transform; STFT), FDS 유무 총 4가지 경우에 대하여 학습하였으며, 교차 검증 기반으로 성능 평가를 수행하였다. 데이터셋의 학습 및 테스트 비율은 8:2로 설정하였으며, 모든 학습은 56 GB RAM의 RTX3090 GPU 기반 Python (version 3.10) 프로그램으로 수행되었다.

3. 연구 결과

딥러닝 모델 (STFT + RAN 모델 vs. WT + RAN 모델 vs. STFT + FSD + RAN 모델 vs. WT + FDS + RAN 모델)의 절대 오차는 그림 3에 제시하였다. 균형점수의 FDS를 하지 않은 RAN 모델의 경우 약 1.5에서 2.7의 절대 오차를 확인하였다. 그러나 FDS를 적용한 모델의 경우 0.29에서 1.86으로 약 32 - 80 %의 오차가 줄어드는 것으로 확인되었다. 움직임전략도 균형점수와 유사하게 FDS 처리 후 모든 조건에서 성능이 향상되며, 약 0.16에서 1.80의 차이를 나타내는 것을 확인하였다.

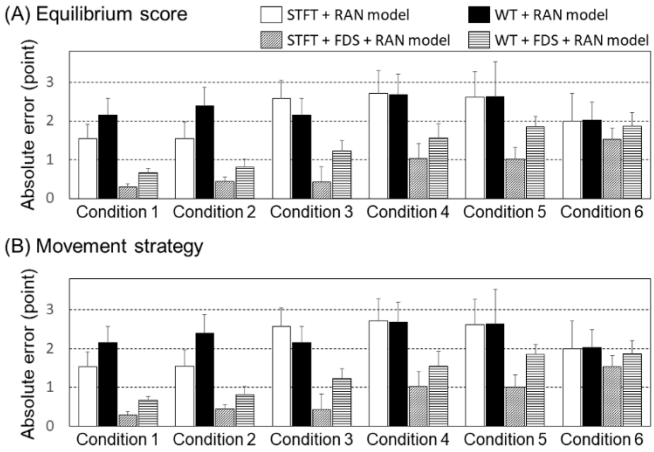


그림 3. FDS 유무에 따른 절대오차의 정량 비교

4. 결론

본 연구에서는 정적 압력중심 신호로부터 감각계 입력의 능력치 (균형점수)와 그에 따른 Motor response (움직임전략)를 추정할 수 있는 자세 안정성 평가 딥러닝 모델을 제안하였다. 모델의 입력으로는 서있기 자세에서의 압력중심을 활용하였으며, STFT와 WT를 특징점으로 활용하였다. 학습 모델은 RAN 구조를 활용하였으며, 타겟 데이터 불균형으로 인한 성능 저하를 막기 위하여 FDS 기법을 적용하였다. 대표 결과로서, STFT+RAN+FDS 모델은 ES에서는 평균 0.89점, SS에서는 평균 0.72점의 오차를 보였다. 이 방법은 고령 인구 증가로 인한 어지럼증 환자의 증가와 그로 인해 파생되는 자세 안정성 문제를 해결하는 데 비용 효율적인 대안이 될 수 있을 것으로 생각된다.

5. Acknowledgements

이 연구는 2025년도 산업통상자원부 및 한국산업기술기획평가원 (KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임 (RS-2025-02306536).

6.참고 문헌

[1] Y. Ivanenko and V.S. Gurfinkel. “Human postural control.” *Frontiers in Neuroscience*, Vol 12, p. 171, 2018.

[2] R.J. Cherng, F.C. Su, J.J. Chen and T.S. Kuan. “Performance of static standing balance in children with spastic diplegic cerebral palsy under altered sensory environments. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*. Vol 78, No. 4, p. 336-343, 1999.

[3] A. Shumway-Cook and F.B. Horak. “Assessing the influence of sensory interaction on balance: suggestion from the field.” *Physical Therapy*, Vol 66. No. 10, p. 1548-1221, 1986.

[4] A. Choi, E. Park, T.H. Kim, G.J. Im and J.H. Mun. “A novel optimization-based convolution neural network to estimate the contribution of sensory inputs to postural stability during quiet standing” *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, Vol 26, No. 9, p. 4414-4425, 2022

[5] A. Choi, E. Park, T.H. Kim, S. Chae, G.J. Im and J.H. Mun. “Deep learning model to evaluate sensorimotor system ability in patients with dizziness for postural control.” *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, Vol 32, p. 1292-1301, 2024

Poster-210

X-NIRSNet: 교차 잔차 블록을 적용한 기능적 근적외선 분광법 기반 뇌 상태 분류 딥러닝 모델

천민영[1] , 남혜린[2] , 김채윤[3] , 형우석[2] , 임창환[1,2,3,4*]

한양대학교 전자공학과[1]

한양대학교 인공지능학과[2]

한양대학교 HY-KIST 바이오융합학과[3]

한양대학교 생체공학과[4]

X-NIRSNet: A Novel Deep Learning Architecture Using Cross Residual Blocks for Decoding Brain States with Functional Near-Infrared Spectroscopy

Minyoung Chun[1], Hyerin Nam[2], Chaeyoon Kim[2], Wooseok Hyung[2], Chang-Hwan Im[1,2,3,4*]

[1]Department of Electronic Engineering, Hanyang University, Korea

[2]Department of Artificial Intelligence, Hanyang University, Korea

[3]Department of HY-KIST Bio-convergence, Hanyang University, Korea

[4]Department of Biomedical Engineering, Hanyang University, Korea

[*]ich@hanyang.ac.kr

Abstract

To implement passive brain-computer interface (pBCI) technologies in real-world scenarios, functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) has been widely employed to decode brain states. Deep learning (DL) studies using fNIRS have been attempted to maximize decoding accuracy with generalizability and reproducibility. However, some DL-based pBCI studies using fNIRS remain limited, either by relying on conventional hand-crafted feature extraction or by employing architectures that do not fully capture the complex information within fNIRS signals. In this study, we propose a novel DL structure, X-NIRSNet, which uses cross-residual blocks (cross-ResBlock) to extract interrelated and complementary features between the changes of oxy-hemoglobin concentration (ΔHbO) and deoxy-hemoglobin concentration (ΔHbR). The performance of the model was validated on two custom datasets (stress and mental fatigue) using a subject-independent classification strategy to ensure generalizability. Furthermore, Gradient-weighted Class Activation Mapping (Grad-CAM) was employed to interpret the decision-making process of X-NIRSNet.

1. 연구 배경

수동형 뇌-컴퓨터 인터페이스(passive brain-computer interface, pBCI)는 뇌 활동을 연속적으로 모니터링해 사용자의 정신 상태를 추정하고, 그 결과를 시스템에 반영하여 사용자 행동이나 주변 환경을 조절하도록 하는 기술이다. 이 기술은 교육, 업무, 의료 등 다양한 맥락에서 주의, 피로, 스트레스의 실시간 추적을 목표로 연구되고 있다. pBCI 구현에는 EEG, MEG, fMRI, 기능적 근적외선 분광법(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS) 등이 활용되며, fNIRS는 휴대가 가능하고 비용이 상대적으로 낮으며 움직임 유발 잡음에 비교적 강건하다는 점에서 일상 환경 적용에 적합한 수단으로 주목받는다.

fNIRS를 활용한 pBCI 시스템은 혈역학적 반응에서 특징을 추출해 기계학습 알고리즘을 훈련하는 전통적 방식을 주로 사용 해 왔다. 이러한 방식은 뇌 상태의 특정 양상을 포착할 수 있으나, 특징 추출에 선행적인 전문 지식이 요구되고 표준화된 프로토콜이 부재하여 연구마다 최적 특징이 상이하게 제안되는 한계를 가진다. 최근에는 fNIRS 원시 데이터로부터 복잡한 특징을 직접 학습하고, 전통적인 기계학습 방법보다 우수한 성능을 보이는 딥러닝이 유력한 대안으로 부상하고 있다.

그럼에도 fNIRS 기반의 딥러닝 pBCI 연구는 아직 초기 단계에 머물러 있다. 일부 선행 연구는 딥러닝의 핵심 강점인 자동 특징 추출을 활용하기보다 수동 추출 특징을 입력으로 사용하거나, 일반화 성능 확보에 필수적인 피험자 독립 검증을 수행하지 않아 그 성능이 과대평가되었을 가능성이 있다 [1]. 또한, 기존 fNIRS 분류 모델들은 두 주요 신호인 옥시헤모글로빈 농도 변화 (ΔHbO)와 디옥시헤모글로빈 농도 변화 (ΔHbR)의 생리학적 상호작용을 충분히 고려하지 못하는 구조적 한계를 보였다. 다수의 모델이 두 신호를 단순 결합하거나 각각 독립적인 경로로 처리한 뒤 최종 단계에서 통합함으로써, fNIRS가 가진 복잡한 정보를 온전히 활용하지 못했다 [2]. 이러한 한계를 해소하기 위해, ΔHbO와 ΔHbR의 연관성과 상호 보완적 관계를 엔드-투-엔드 방식으로 학습하는 교차 잔차 블록 (cross-residual block, cross-ResBlock)을 도입한 X-NIRSNet을 제안한다.

2.연구 방법

X-NIRSNet의 전체적인 구조는 그림 1에서 확인할 수 있다. X-NIRSNet은 2차원 합성곱 신경망을 기반으로 구성되어 있다. 두 입력 ΔHbO와 ΔHbR는 독립적인 초기 합성곱 블록을 통과하며 각 신호 고유의 특징이 추출된다. 이후 각 스트림의 특징은 자체 잔차 블록 (self-ResBlock)과 cross-ResBlock을 동시에 통과한다. Self-ResBlock은 각 신호의 고유한 정보를 심화시키고, cross-ResBlock은 다른 스트림으로 정보를 교차 전달하여 상호 보완적인 특징을 학습한다. 이 과정을 통해 생성된 네 종류의 특징 맵은 각각

독립적인 합성곱 블록과 완전 연결 층을 통과하여 개별적인 특징 벡터로 변환된다. 이후, 이 네 개의 특징 벡터를 결합하고, 추가적인 완전 연결층을 거쳐 최종적으로 뇌 상태를 분류한다. 이때 잔차 블록과 최종 합성곱 블록은 시간적 레이어와 공간적 레이어를 분리하지 않은 시공간적 레이어를 적용하여, 느린 혈역학적 반응에서도 각 채널의 특징을 효과적으로 추출하도록 설계하였다.

X-NIRSNet의 성능을 평가하기 위해 Montreal Imaging Stress Task (MIST) 기반 스트레스 데이터셋과 d2 테스트 기반 정신 피로 데이터셋을 구축하였다 (IRB No. HYUIRB-202407-029-1). 각 데이터셋에서 수집된 fNIRS 신호를 이용, 피험자별 교차 검증을 통해 X-NIRSNet의 분류 정확도를 측정하였다. 또한 제안 모델의 성능을 검증하기 위해 기존 대표 모델인 Shallow ConvNet [3], EEGNet [4], fNIRSNet [2]을 비교군으로 설정하였다. 이 세 가지 비교 모델의 경우, 두 종류의 입력 구성을 각각 적용하여 정확도를 측정한 후 이를 X-NIRSNet의 성능과 비교하였다. 이후 X-NIRSNet의 분류 판단 근거를 확인하기 위해 그래디언트 가중 클래스 활성화 맵(Gradient-weighted Class Activation Mapping, Grad-CAM)을 사용하였다. Grad-CAM 결과값이 가장 큰 상위 세 채널을 통해 모델이 각 상태를 분류할 때 중요하게 활용한 핵심 뇌 영역을 분석하였다.

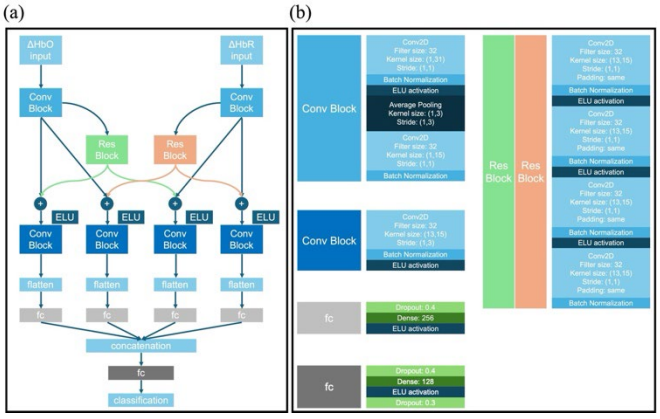


그림 1. X-NIRSNet의 (a) 모델 구조와 (b) 파라미터

3. 연구 결과

X-NIRSNet은 두 가지 분류 과제 모두에서 기존 모델들보다 뛰어난 성능을 보였다. 스트레스 분류 과제에서 X-NIRSNet은 88.57%의 정확도를 달성하여, 비교 모델 중 가장 높은 성능을 보인 Shallow ConvNet(78.57%)보다 10%p 높은 수치를 기록했다. 정신 피로 분류 과제에서도 X-NIRSNet은 76.39%의 정확도를 보여 Shallow ConvNet(70.83%) 대비 5.56%p 높은 성능을 확인하였다.

X-NIRSNet의 핵심 구성 요소들의 기여도를 확인하기 위해 애블레이션 스터디를 수행하였다. 먼저, self-ResBlock을 제거했을 때 스트레스 및 정신 피로 분류 정확도는 각각 14.28%p, 15.28%p 감소하였다. Cross-ResBlock을 제거했을 때는 정확도가 각각 10.00%p, 6.95%p 하락했다. 마지막으로, 시공간적 레이어를 분리된 시간 및 공간 레이어로 대체했을 때 정확도는 각각 12.86%p, 12.50%p 감소하였다. 이러한 결과는 제안된 세 가지 구성 요소 모두가 X-NIRSNet의 높은 성능에 필수적인 역할을 하고 있음을 시사한다.

Grad-CAM 분석을 통해 모델이 각 상태를 분류할 때 활용하는 주요 뇌 영역의 중요도를 확인하였다 (그림 2). 스트레스 분류 과제에서 ΔHbO 신호는 상태와 무관하게 배외측 전전두피질에 집중적인 중요도를 보였다. ΔHbR 신호 역시 배외측 전전두피질이 핵심적이었으나, 휴식 상태 분류에서는 좌측 안와전두피질 또한 중요한 역할을 수행했다. 정신 피로 분류 과제에서는 ΔHbO 신호의 경우 두 상태 모두 안와전두피질이, ΔHbR 신호는 배외측 전전두피질이 공통적으로 중요하게 활용되었다. 다만 ΔHbR은 높은 피로 상태를 분류할 때 우측 내측 전전두피질을 추가적으로 활용하는 패턴을 보였다. 종합적으로, X-NIRSNet은 과제 및 신호 종류에 따라 특정 뇌 영역을 선택적으로 활용하였으며, 이는 제안 모델이 뇌 상태에 따라 구분되는 신경생리학적 특징을 효과적으로 포착하고 있음을 시사한다.

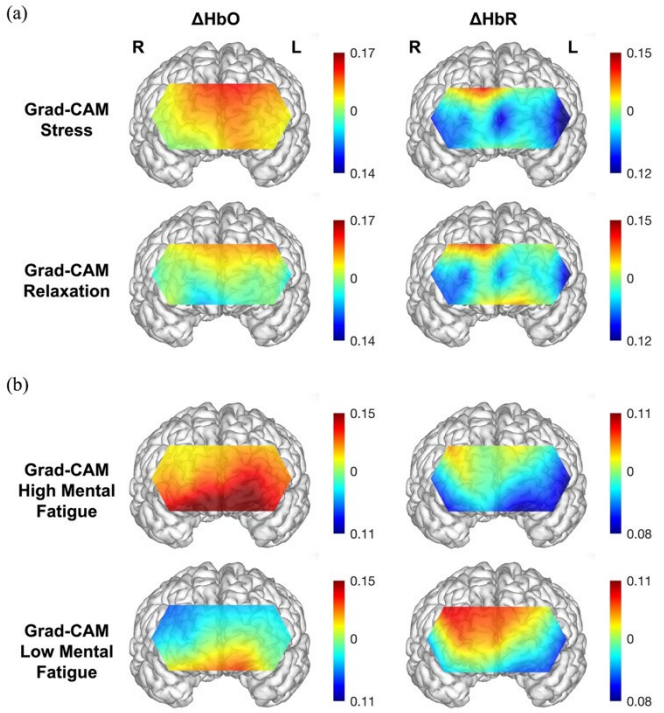


그림 2. (a) 스트레스, (b) 정신 피로 분류 과제의 Grad-CAM 결과값

4. Acknowledgements

이 연구는 정부(과기정통부)의 재원으로 한국연구재단 바이오·의료기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2024-00397673).

5.참고 문헌

[1] Hakimi, N., et al. "Proposing a convolutional neural network for stress assessment by means of derived heart rate from functional near infrared spectroscopy." *Computers in Biology and Medicine*, Vol 121, 2020

[2] Pandey, P., et al. "fNIRSNet: A multi-view spatio-temporal convolutional neural network fusion for functional near-infrared spectroscopy-based auditory event classification." *Engineering Applications of Artificial Intelligence,* Vol 137, 2024

[2] Schirrmeister, R.T., et al. "Deep Learing with convolutional neural networks for EEG decoding and visualization." *Human Brain Mapping,* Vol 38, No.11, 2017

[4] Lawhern, V.J., et al. "EEGNet: a compact convolutional neural network for EEG-based brain-computer interfaces." *Journal of Neural Engineering,* Vol 15, No.5, 2018

Poster-211

딥러닝 기반 향상된 광음향 영상을 이용한 자동 비표지 세포 병리 평가

윤치호[1], 김동규[1], 김동현[1], 박은우[1], 전소라[2], 김진영[1], 정찬권[2], 김철홍[1,*]

[1]포항공과대학교 [2]서울성모병원

Automated Label-Free Cytopathology Assessment Using Deep Learning-Enhanced Photoacoustic Imaging

Chiho Yoon[1], Donggyu Kim[1], Donghyun Kim[1], Eunwoo Park[1], Sora Jeon[2], Jin Young Kim[1], Chan Kwon Jung[2], Chulhong Kim[1,*]

[1]Pohang University of Science and Technology (POSTECH) [2]Seoul St. Mary's Hospital

[*]chulhong@postech.edu

Abstract

Cytopathology provides a minimally invasive approach to disease diagnosis through techniques such as fine needle aspiration. However, traditional cytological workflows rely heavily on staining procedures and expert interpretation, which can impede scalability—particularly in urgent or resource-constrained settings. Although rapid on-site evaluation (ROSE) can improve specimen adequacy, its dependence on skilled personnel and specialized infrastructure limits its accessibility. To overcome these challenges, we present a deep learning–driven photoacoustic cytopathology pipeline that enables label-free and automated specimen adequacy assessment. The proposed workflow begins with the acquisition of high-resolution, stain-free photoacoustic images from cytological samples. These images are subsequently processed using virtual staining and super-resolution algorithms to generate diagnostically interpretable representations analogous to conventional Pap-stained images. The enhanced images are then analyzed to detect malignant cell clusters and to distinguish inflammatory from neoplastic cells, facilitating objective and automated cytological diagnosis.

1. 연구 배경

병리학적 평가는 암과 같은 질환의 진단 및 관리에 필수적이다. FFPE(Formalin-fixed paraffin-embedded)나 동결절편(frozen section)과 같은 전통적인 조직병리학적 기법은 널리 사용되고 있지만, 시간이 많이 소요되며 세포액상검사나 최소침습적 시료 평가에는 적합하지 않다. 세포병리학(cytopathology)은 최소침습적으로 얻은 시료를 세포 수준에서 분석하는 분야로, 시료 적정도(specimen adequacy) 평가와 신속한 판독을 위해 숙련된 병리학자의 실시간 참여가 요구된다. 이러한 요인들은 수술 중 또는 현장 세포병리 진단의 효율성과 접근성을 제한한다.

이러한 한계를 극복하기 위해, 본 연구에서는 비표지 자외선 광음향 현미경(label-free ultraviolet photoacoustic microscopy, UV-PAM) [1]과 딥러닝을 결합한 새로운 비표지 세포병리학적 진단 접근법을 제안한다. 제안된 기술은 개별 세포 수준의 세포 병리 이미징을 가능하게 하며, 주요 세포병리 분석 과정을 자동화한다. 제안된 딥러닝 파이프라인은 Pap (Papanicolaou) [2] 스타일의 가상 염색(virtual staining), 초해상도(super-resolution) 향상, 암세포 클러스터(cancer cell cluster) 검출 및 염증세포(Inflammatory)와 종양세포 (Tumor) 분류를 수행함으로써, 염색 과정이나 병리학자의 현장 참여 없이 평가를 진행할 수 있다.

2.연구 방법

본 연구에서 제안하는 비표지 딥러닝 기반 광음향

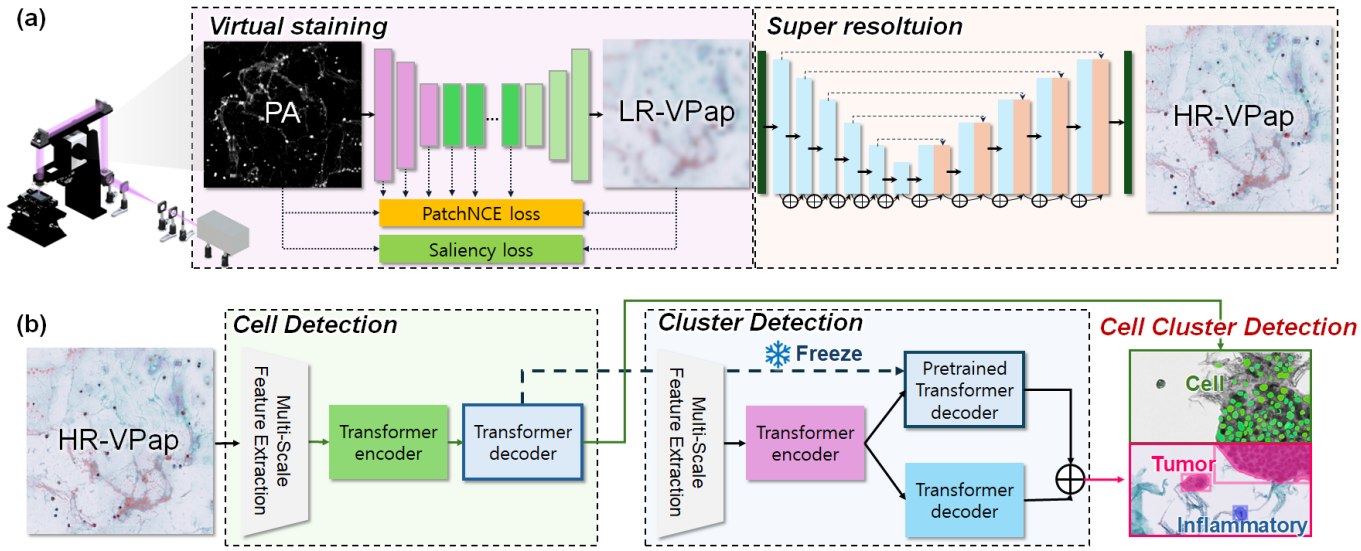


그림 1. 딥러닝 기반 광음향 세포병리 시스템. (a) 설명가능한 가상 염색 및 해상도 향상을 위한 초해상도 모델. (b) 세포 클러스터 검출 모델.

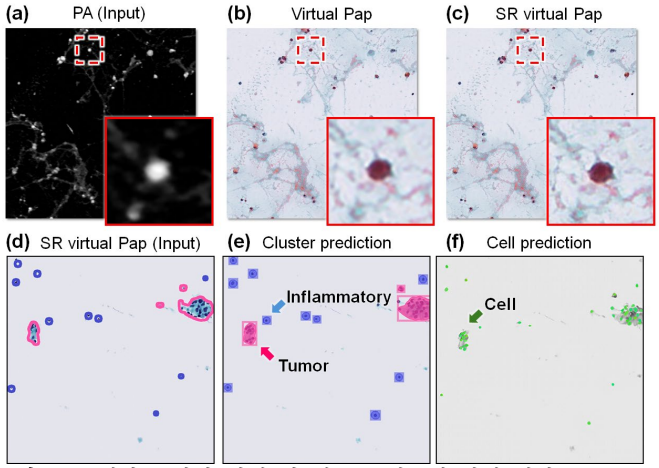


그림 2. 고해상도 가상 염색 및 세포 클러스터 탐지 결과.

세포병리 시스템은 세포 시료의 신속하고 자동화된 평가를 위해 세 가지 주요 구성 요소로 이루어진다: 가상 염색, 초해상도, 암세포 클러스터 검출 [그림 1].

가상 염색 단계에서는 대조 기반 비쌍방향 변환(contrastive unpaired translation, CUT) 모델 [3]을 기반으로 개발한 E-CUT(Explainable CUT) [5] 을 이용하여 UV-PAM 시스템으로 획득한 회색조 PA 세포 이미지를 Pap 염색 스타일로 변환한다. E-CUT 프레임워크는 주목도 손실(saliency loss) 을 포함하여 가상 염색 중 세포 구조의 보존을 보장함으로써 모델의 신뢰성과 설명가능성을 높였다. 이러한 접근법은 세포 구조를 유지하면서 가상 색상을 부여하여, 인공적 혹은 오해를 유발할 수 있는 구조의 생성을 방지한다.

다음으로 초해상도 단계에서는 U-형 다중 스케일 완전합성곱 신경망(U-shaped multi-scale fully convolutional network) 기반의 초해상도 모델 [4]을 적용하여 영상의 해상도를 향상시킨다 [그림 1(a)]. 모델은 짝지어진 저해상도 Pap 염색 영상과 고해상도 Pap 염색 영상 데이터셋을 이용한 지도 학습 방식으로 훈련되어, 세포핵 등의 세밀한 형태학적 정보를 보존하면서 해상도를 향상시킬 수 있도록 설계되었다.

마지막으로 암세포 클러스터 검출 단계에서는 세포 수준의 특징을 활용하여 클러스터 단위의 분석 결과를 도출한다 [그림 1(b)]. 분석 모델은 세포 검출(cell detection) 과 클러스터 검출(cluster detection)의 두 단계로 구성된다. 클러스터 검출은 핵 형태에 크게 의존하므로, 먼저 세포 검출 모델을 학습한 후 해당 디코더(decoder)를 클러스터 검출 모델로 전이하여 성능을 향상시켰다. 이를 바탕으로 세포 핵 탐지 단계에서는 클러스터 내 세부적인 세포 핵 정보들을 정확하게 추출하고, 이후 클러스터 탐지 단계에서는 앞서 얻은 세포 핵 정보를 바탕으로 더욱 정교한 세포 클러스터 탐지와 암 여부 분류를 진행할 수 있도록 한다. 본 연구는 가톨릭대학교 서울성모병원 기관생명윤리위원회(IRB)의 승인(KC22SNDI0230)을 받아 수행되었습니다.

3. 연구 결과

비표지 PA 영상의 형태와 해상도를 기존 세포병리 영상과 유사하게 맞추기 위해, 본 연구에서는 가상 염색과 초해상도 모델을 결합한 딥러닝 기반 파이프라인을 구현 및 결과를 확인하였다 [그림 2].

PA 영상은 세포학적 정보를 포함하고 있으나, 회색조의 이미지 특성으로 인해 병리학적 판독이 어렵다 [그림 2(a)]. 이를 해결하기 위해, E-CUT 기반 가상 염색 기법을 적용하여 PA 영상을 Pap 염색에 가까운 색상으로 변환함으로써 진단 활용도를 향상시켰다. [그림 2(b)]. 기존 흑백의 컬러를 Pap 스타일로 성공적으로 염색함과 동시에, 세포 핵 구조를 잘 유지함을 확인할 수 있었다.

이후 초해상도 모델은 세포의 세부정보를 향상시키고 전반적인 이미지의 해상도를 향상시킴을 확인할 수 있었다 [그림 2(c)].

세포 클러스터 검출은 초해상도 가상 염색된 세포병리 영상에서 수행되며, 자동화된 세포 수준 해석을 가능하게 한다 [그림 2(d-f)]. [그림 2(e)]에서 보이듯, 제안된 모델은 종양 세포군과 염증세포를 효과적으로 검출·분류할 수 있다. 또한 해당 세포군 내부의 세포 핵 정보들도 추가로 얻을 수 있다 [그림 2(f)].

본 연구에서는 세포 시료의 신속하고 자동화된 평가를 위한 비표지 딥러닝 기반 광음향 세포병리 시스템을 제안하였다. 제안된 시스템은 가상 염색, 초해상도 향상, 암세포 클러스터 검출의 순차적 파이프라인을 통해 고품질의 가상 염색 영상과 주요 진단 지표를 동시에 제공한다. 이 접근법은 저비용·고효율의 세포병리 분석을 지원하며, 병리학자의 임상 의사결정 과정에서 자동화된 시료 적정도 평가를 보조할 수 있다.

4. Acknowledgements

이 연구는 Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (2020R1A6A1A03047902), NRF grant funded by the Ministry of Science and ICT (MSIT) (2023R1A2C3004880), Korea Health Technology R&D Project through the Korea Health Industry Development Institute (KHIDI) funded by the Ministry of Health & Welfare (RS-2024–00512879), Korea Medical Device Development Fund grant funded by the Korea government (MSIT, the Ministry of Trade, Industry and Energy, the Ministry of Health & Welfare, the Ministry of Food and Drug Safety) (1711196475, RS-2023–00243633), BK21 FOUR program 과제의 지원을 받아 수행하였음.

5.참고 문헌

[1] W. Choi et al., Recent advances in contrast-enhanced photoacoustic imaging: overcoming the physical and practical challenges. Chemical Reviews 123, 7379-7419, 2023.

[2] V. Rojas-Zumaran et al., Decline of cytology-based cervical cancer screening for COVID-19: a single-center Peruvian experience. Medwave 22, e2589-e2589, 2022.

[3] T. Park et al., Contrastive learning for unpaired image-to-image translation. European conference on computer vision. Cham: Springer International Publishing, 2020.

[4] B. Li et al., Single image super-resolution for whole slide image using convolutional neural networks and self-supervised color normalization. Medical Image Analysis 68, 101938, 2021.

[5] C. Yoon et al., Deep learning-based virtual staining, segmentation, and classification in label-free photoacoustic histology of human specimens. Light: Science & Applications 13, 226, 2024.

Poster-212

세부 질문 기반 근거 정제를 통한 의료 영상 질문응답의 신뢰적 추론 학습

정유빈[1], 허근수[1], 남현영[1], 손영한[1], 감태의[1*]

고려대학교 인공지능학과[1]

Sub-question Driven Rationale Refinement for Reliable Reasoning in Medical Visual Question Answering

Yubin Jeong[1], Keun-Soo Heo[1], Hyeonyeong Nam[1], Young-Han Son[1], Tae-Eui Kam[1*]

Department of Artificial Intelligence, Korea University, Korea

[*]kamte@korea.ac.kr

Abstract

Medical Visual Question Answering(Med-VQA) aims to infer clinically relevant answers from medical images, serving as a core component of diagnostic interpretation and clinical decision support. Although recent Vision-Language Models(VLMs) have significantly improved image–language alignment, their reasoning reliability remains limited due to unverified or inconsistent rationales. To address this issue, we propose a novel sub-question-based rationale refinement framework to enhance the trustworthiness of Med-VQA reasoning. The proposed method first generates an initial rationale using a pre-trained VLM and detects hallucination-prone segments through uncertainty estimation. These segments are then decomposed into fine-grained sub-questions, which are independently verified by a Large Language Model(LLM). The verified information is subsequently integrated to reconstruct a refined rationale that serves as supervision during fine-tuning. Our framework, built upon LLaVA-Med for reasoning and Gemini 1.5 Pro for rationale verification, effectively mitigates hallucinations and improves reasoning consistency. Experiments on the SLAKE dataset demonstrate that our approach produces more factual and reliable reasoning, ultimately enhancing answer accuracy and interpretability in medical question answering tasks.

1. 연구 배경

Medical Visual Question Answering(Med-VQA)은 의료 영상을 기반으로 임상적 질문에 대한 답변을 추론하는 기술로, 의료 영상 판독과 임상 의사결정 지원의 핵심 요소로 주목받고 있다[1]. Med-VQA는 주어진 질문에 대해 의료 영상에서 나타나는 주요 임상적 특징을 정확히 해석하고, 그 근거에 기반한 논리적으로 일관된 답변을 생성하는 것이 중요하다.

최근 Vision-Language Model(VLM)의 급속한 발전과 함께, Med-VQA 모델들은 VLM을 활용하여 영상과 언어 간의 의미적 연관성을 학습하고 이를 임상 질의응답에 응용하는 방향으로 발전해왔다[2]. 그러나 이러한 접근은 VLM이 생성한 답변의 근거를 명시적으로 설명하지 못하기 때문에, 결과의 신뢰성과 일관성을 보장하기 어렵다는 한계를 지닌다[3]. 특히 복잡한 임상적 판단이나 고차원적 추론이 요구되는 상황에서, 모델이 제시한 답변이 실제 영상 근거와 얼마나 부합하는지를 평가하거나 그 추론 과정을 해석하기는 쉽지 않다.

이러한 한계를 보완하기 위해, 스스로 중간 추론 단계를 생성하고 이를 활용하는 Chain-of-Thought(CoT) 방법이 주목받고 있으며, 복잡한 의료적 판단 과정을 모사하는 새로운 접근으로 자리 잡고 있다[4]. CoT는 답변의 논리적 근거인 rationale을 생성하고 이를 활용함으로써, 답변의 정확도와 해석 가능성을 동시에 향상시킬 수 있음을 보여주었다.

그러나 생성된 rationale에는 사실과 무관하거나 의학적으로 부정확한 내용이 포함되는 환각(hallucination) 문제가 발생할 수 있으며, 이러한 오류가 학습 과정에 반영될 경우 오히려 잘못된 추론 패턴을 강화할 위험이 있다[5]. 이를 해결하기 위해, 생성된 rationale을 검증하고 정제하는 과정의 필요성이 대두되고 있다[6].

이에 본 연구에서는 Med-VQA 모델의 답변 신뢰성을 향상시키기 위해, rationale을 정제하는 새로운 학습 방법을 제안한다. 제안된 방법은 기존의 CoT 기반 Med-VQA 모델이 생성한 rationale로부터 여러 하위 질문(sub-question)을 유도하고, 이에 대한 응답을 통해 사실성과 일관성을 검증·정제함으로써, 모델이 보다 신뢰할 수 있는 답변을 생성하도록 학습한다.

2. 연구 방법

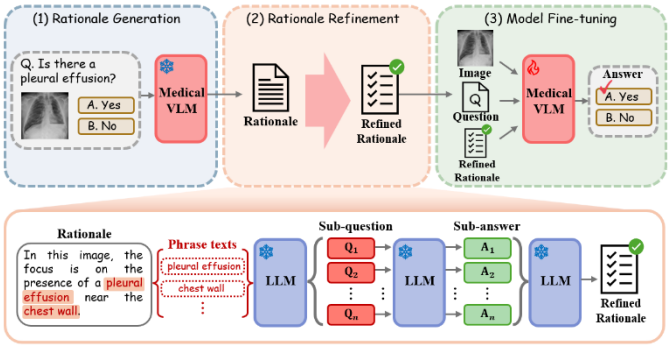


그림 1. 본 연구의 개요도

본 연구는 Med-VQA 모델의 답변 신뢰성을 향상시키기 위해, 우선 답변에 대한 rationale을 생성한 후 이를 검증하고 정제하는 새로운 학습 구조를 제안한다. 전체적인 프레임워크는 그림 1과 같이 세 단계로 구성된다: 1) 의료 영상과 질문을 입력으로 받아 초기 rationale을 생성, 2) rationale 내 환각 문제가 발생했을 가능성이 높은 구간을 탐지한 후, 해당 구간을 여러 하위 질문으로 분해하여 스스로 검증, 3) 검증 결과를 바탕으로 rationale을 정제하고

Sub-question Generation Prompt

Generate sub-questions based on the highlighted phrases in the rationale.
- Question: {question}, Original Rationale: {original rationale}
- Highlighted Phrases: {phrase texts}

Sub-question Verification Prompt

Answer each sub-question using the medical image with *"Yes"*, *"No"*, or *"Not Sure"*, and provide a short explanation.
- Sub-question: {sub question}, Image: [image]

Final Rationale Reconstruction Prompt

Using the sub-question verdicts, generate an improved and concise rationale that corrects factual inconsistencies.
- Question: {question}, Original Rationale: {original rationale}
- Sub-question Verdicts: {sub answers}

그림 2. 하위 질문 기반 rationale 정제를 위한 LLM prompt

이를 VLM의 미세조정(fine-tuning) 과정에서 학습 데이터로 활용.

먼저, 사전 학습된 VLM에 의료 영상과 질문을 입력하여 생성된 초기 rationale은 모델의 내재적 추론 경로를 반영하며, CoT 기반 학습의 기초로 활용된다. 이후, DRAGIN[7] 연구에서 제안된 불확실성 추정 방법을 적용하여 rationale 내 각 토큰의 의미적 중요도와 신뢰도를 도출한 뒤, 이를 기반으로 환각 발생 가능성이 높은 구간을 후보 영역으로 식별한다.

탐지된 구간은 sub-question generation prompt를 통해 Large Language Model(LLM)에 입력되어 세부적인 하위 질문으로 변환된다. 이렇게 생성된 하위 질문들은 sub-question verification prompt를 통해 각각 독립적으로 검증되며, 그 결과를 기반으로 rationale의 사실성을 평가한다. 마지막으로, LLM은 검증된 문장들을 통합하여 final rationale reconstruction prompt를 통해 최종적으로 정제된 rationale을 생성한다. Prompt에 대한 세부 구성은 그림 2에 제시되어 있다.

정제된 rationale은 의료 영상과 질문과 함께 VLM의 fine-tuning 단계에서 추가적인 학습데이터로 사용된다. 이때 rationale은 단순한 보조 텍스트가 아니라, 모델이 답변을 생성하는 과정에서 참조해야 할 논리적 추론의 근거로 작용한다. 이를 통해 VLM은 답변 예측 과정에서 비사실적 서술을 억제하고, 의료 영상 내 실제 근거와 일치하는 일관된 추론을 학습하게 된다.

3. 연구 결과

답변 생성 모델	정확도(%)
LLaVA-Med	69.64
LLaVA-Med + Ours (*w/o* Rationale Refinement)	76.63
LLaVA-Med + Ours	**78.80**

표 1. Rationale의 사용 및 정제 유무에 따른 정확도 비교

표 1은 LLaVA-Med[8] 모델을 기반으로 영상과 질문에 대한 답변을 생성할 때 제안한 방법(+Ours)을 적용하여, rationale의 사용 여부와 정제 단계 적용 유무에 따른 정확도를 비교한 결과를 보여준다.

실험에는 널리 사용되는 Med-VQA 데이터셋인 SLAKE[9]를 활용하였다. SLAKE는 방사선 및 CT 등 다양한 의료 영상과 이에 대응하는 임상적 질문–답변 쌍으로 구성되어 있으며, 본 연구에서는 closed-ended 질문을 사용하여 모델의 객관적 응답 정확도를 평가하였다. 하위 질문 기반의 rationale 정제 과정에는 Google Gemini 1.5 Pro[10] 모델을 활용하였다.

기본 LLaVA-Med 모델은 rationale 없이 영상과 질문만을 입력으로 받아 답변을 생성하며, 69.64%의 정확도를 보였다. 초기 rationale을 추가 입력으로 포함했을 때 정확도는 76.63%로 향상되었는데, 이는 단순히 답변을 예측하는 것보다 중간 추론 과정을 활용함으로써 모델의 논리적 일관성과 정확성이 개선된 결과로 해석된다. 그러나 초기 rationale에는 여전히 환각 문제가 포함되어 있어, 추론의 신뢰성 측면에서는 한계가 존재한다.

반면, 정제된 rationale을 입력으로 활용한 경우에는 78.80%의 정확도를 기록하며 성능 향상과 함께 가장 높은 성능을 달성하였다. 이는 모델이 생성한 rationale을 그대로 사용하기 보다는 우리가 제안한 하위 질문 기반 정제 과정을 통해 얻은 rationale을 학습에 활용함으로써 답변의 신뢰성과 안정성을 효과적으로 향상시킨다는 것을 입증한다.

4. Acknowledgements

본 연구는 정보통신기획평가원(IITP)의 지원을 받아 수행된 연구로, 고려대학교 인공지능대학원 인공지능 혁신융합대학 지원사업(No. RS-2019-II190079)의 일환으로 수행되었습니다. 또한, 이 연구는 과학기술정보통신부(MSIT)의 지원을 받아 한국연구재단(NRF)에서 수행한 연구(No. RS-2023-00212498)의 지원을 받았습니다.

5. 참고 문헌

[1] Lau, Jason J., et al. "A dataset of clinically generated visual questions and answers about radiology images." *Scientific data*, vol. 5, 2018.

[2] Zhang et al., "Biomedclip: a multimodal biomedical foundation model pretrained from fifteen million scientific image-text pairs." *arXiv preprint arXiv:2303.00915*, 2023.

[3] Hartsock et al., "Vision-language models for medical report generation and visual question answering: A review." *Frontiers in Artificial Intelligence*, vol. 7, 2024.

[4] Wei et al., "Chain-of-Thought prompting elicits reasoning in large language models." in *Advances in neural information processing systems*, 2022.

[5] Singhal et al., "Toward expert-level medical question answering with large language models." *Nature Medicine*, vol. 31, no. 2, pp. 943-950, 2025.

[6] Gao et al. "Rarr: Researching and revising what language models say, using language models." *arXiv preprint arXiv:2210.08726*, 2022.

[7] Su et al., "DRAGIN: dynamic retrieval augmented generation based on the information needs of large language models." *arXiv preprint arXiv:2403.10081,* 2024.

[8] Li et al., "LLaVA-Med: Training a large language-and-vision assistant for biomedicine in one day." in *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2023.

[9] Liu, Bo, et al. "Slake: A semantically-labeled knowledge-enhanced dataset for medical visual question answering." *IEEE international symposium on biomedical imaging (ISBI),* 2021.

[10] Google DeepMind, "Gemini 1.5: Unlocking multimodal understanding across millions of tokens of context.

Poster-213

인공지능을 이용한 만성정맥부전 관련 하지 피부 병변 임상사진 분류

이예린[1], 김고은[2], 강현영[1], 김범석[3,4*], 양세정[1,5*]

연세대학교 원주의과대학 정밀의학과[1]

고려대학교 구로병원 피부과학교실[2]

중앙대학교 의과대학 재활의학교실[3]

중앙대학교 광명병원 재활의학과[4]

연세대학교 원주의과대학 의료정보통계학과[5]

Artificial Intelligence-Assisted Classification of Lower Extremity Clinical Images for Chronic Venous Insufficiency-Related Skin Lesions

Yerin Lee[1], Ko Eun Kim[2], Hyunyoung Kang[1], Beom Suk Kim[3,4*], Sejung Yang[1,5*]

Department of Precision Medicine, Yonsei University Wonju College of Medicine, Wonju, Republic of Korea[1]

Department of Dermatology, Korea University Guro Hospital, Seoul, Republic of Korea[2]

Department of Physical and Rehabilitation Medicine, Chung-Ang University College of Medicine, Seoul, Republic of Korea[3]

Department of Physical and Rehabilitation Medicine, Chung-Ang University Gwangmyeong Hospital, Gwangmyeong-si, Republic of Korea[4]

Department of Medical Informatics and Biostatistics, Yonsei University Wonju College of Medicine, Wonju, Republic of Korea[5]

*co-corresponding authors (B.K.: grit@cau.ac.kr, S.Y.: syang@yonsei.ac.kr)

Abstract

Chronic Venous Insufficiency (CVI)-related skin lesions, such as stasis dermatitis and lipodermatosclerosis, are often clinically challenging to differentiate from various non-CVI inflammatory dermatoses like eczema and psoriasis. This study aimed to develop and validate an Artificial Intelligence (AI) model for the binary classification of CVI-related versus non-CVI-related lower extremity skin conditions using clinical images. Our proposed method utilized a U-Net model, pre-trained on an external public dataset, for precise skin region segmentation, followed by masking to remove background noise, before inputting the resulting images into an EfficientNet classifier. The model was trained on 70% of the patient-level data, with a minimal validation loss used for model selection. Compared to models using original images or bounding box cropping, the proposed segmentation-based method achieved superior performance in key metrics, demonstrating Recall of 0.75, an F1-score of 0.64, and Accuracy of 0.89 on the test set. This confirms that area-specific preprocessing significantly enhances AI classification accuracy for complex skin pathologies. While limited to a single dataset, these findings suggest the strong potential of our AI approach as an objective diagnostic aid for CVI complications. Future work will focus on external validation with multi-institutional data and extending the model to multi-modal classification incorporating clinical data for severity assessment.

1. 연구 배경

만성정맥부전(Chronic Venous Insufficiency, CVI)은 하지 정맥의 기능 장애로 인해 혈액이 심장으로 원활하게 돌아가지 못하고 정체되면서 발생하는 흔한 질환이다. CVI가 진행됨에 따라 정맥성 고혈압(Venous Hypertension)이 유발되며, 이는 부종, 통증 등 다양한 증상과 함께 피부 및 피하 조직의 변화를 초래한다. CVI와 관련된 대표적인 피부 변화로는 정체피부염(stasis dermatitis), 지방피부경화증(lipodermatosclerosis), 색소성 자반증 피부염(pigmented purpuric dermatosis) 등이 있으며, 이러한 피부 병변의 정확한 진단은 질병의 중증도를 평가하고 적절한 치료 방침을 결정하는 데 매우 중요하다.

CVI 관련 피부 병변은 임상적으로 아토피 피부염(atopic dermatitis), 접촉 피부염(contact dermatitis), 습진(eczema), 화폐상 습진(nummular eczema), 건선(psoriasis), 혈관염(vasculitis) 등 CVI와 관련 없는 다양한 염증성 피부 질환과 유사한 양상을 보이거나 중첩되는 경우가 많아, 숙련된 임상의에게도 감별 진단이 어려울 수 있다. 이러한 진단적 불확실성은 환자의 치료 지연 및 불필요한 침습적 검사로 이어질 수 있다.

최근 인공지능 분야에서 딥러닝 기술의 발전으로 인해 의료

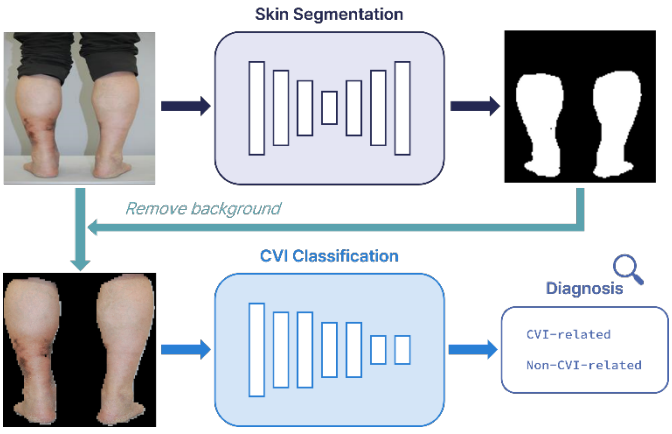


그림 1. 피부 병변 임상사진 분류 모델의 개요도

영상을 활용한 질환 분류 및 진단 보조 시스템 개발에도 인공지능이 도입되고 있다. 인공지능을 활용하여 CVI 관련 질환을 분류하는 기존 연구들은 대부분 적외선 열화상 영상이나 자기공명정맥조영술 같은 특수 영상을 사용하여 실제 임상 현장에 적용하기 어렵다[1, 2]. 본 연구에서 제안하는

방법은 하지 피부 병변 사진과 같은 임상 사진을 활용하여 CVI 관련 질환과 비관련 질환을 분류하는 딥러닝 모델으로, CVI의 조기 발견 및 효율적인 관리에 기여할 수 있는 잠재력이 높다.

본 연구는 하지 임상 사진을 기반으로 CVI 관련 피부 병변과 비관련 피부 질환을 이진 분류하는 딥러닝 모델을 개발하고 그 성능을 평가하는 것을 목표로 한다. 이를 통해 CVI 관련 피부 질환에 대한 비침습적이고 자동화된 진단 보조 시스템의 가능성을 제시하고자 한다.

2.연구 방법

본 연구는 고려대학교 구로병원에서 후향적으로 수집된 피부질환 임상 사진을 기반으로 진행되었다. 데이터셋은 CVI 관련 피부질환을 보유한 107명으로부터 획득한 임상 사진 1023장과 CVI 비관련 피부질환을 보유한 843명으로부터 획득한 임상 사진 7418장으로 구성되어 있다. 본 연구는 고려대학교 구로병원 기관생명윤리위원회의 승인(No. 2025GR0073)을 받고 모든 실험 대상자로부터 서면동의를 받은 후 진행하였다.

본 연구를 위해 수집된 임상 사진 데이터는 환자 단위로 분할되어 데이터 편향을 최소화했다. 전체 데이터셋은 학습, 검증, 테스트셋으로 각각 7:1:2의 비율로 나누었다. 모든 모델 학습 및 평가는 이 분할된 데이터셋을 기반으로 진행되었다. 모델의 입력 영상에 대한 핵심적인 전처리 과정으로 피부 영역 분할을 적용했다. 외부의 공개 피부 분할 데이터셋 Abdominal Skin Dataset[3]을 활용하여 U-Net 기반의 분할 모델을 사전 학습시켰다. 이후, 본 연구의 하지 임상 사진에 이 분할 모델을 적용하여 피부 영역을 식별했으며, 최종적으로 식별된 피부 영역만을 남기고 배경을 모두 0으로 처리하여 EfficientNet 모델의 입력으로 사용했다.

하지 피부 병변의 이진 분류를 위해 EfficientNet 기반 모델로 채택했다. 모델은 CVI-관련 질환군과 비관련 질환군을 구분하도록 학습되었다. 손실 함수로는 이진 분류 문제에 적합한 Binary Cross Entropy를 사용했으며, 최적화 알고리즘으로는 Adam을 적용했다. 모든 모델은 총 10 에폭 동안 학습을 진행했다. 학습 과정 중 과적합을 방지하고 일반화 성능이 가장 우수한 모델을 확보하기 위해, 검증 데이터셋에서의 손실 함수 값이 최소가 되는 시점의 모델 가중치를 저장하여 최종 성능 평가에 사용했다.

제안된 피부 분할 및 마스킹 방법의 유효성을 검증하기 위해 두 가지 추가적인 비교 실험을 진행했다. 첫 번째 비교군에서는 어떠한 피부 분할 및 전처리도 거치지 않은 원본 영상을 EfficientNet의 입력으로 사용하여 분류를 수행했다. 두 번째 비교군에서는 피부 분할 마스크를 활용하되, 배경 제거 대신 분할된 피부 영역을 포함하는 최소한의 바운딩 박스로 영상을 잘라내는 방식만을 적용했다. 모든 실험은 동일한 모델 구조와 학습 설정 하에 진행되었다. 최종 성능 평가는 테스트 데이터셋을 기반으로 정밀도(Precision), 재현율(Recall), F1-score, 그리고 정확도(Accuracy) 지표를 사용하여 수행되었다.

3. 연구 결과

CVI 관련 하지 피부 병변의 이진 분류를 위한 본 연구의 제안 방법은 비교 실험군 대비 전반적으로 우수한 성능을 보이며 그 유효성을 입증했다. 성능 평가 지표 분석 결과, 제안된 방법은 재현율(Recall), F1-score, 그리고 정확도(Accuracy) 세 가지 핵심 지표에서 가장 높은 수치를 달성했다. 본 연구에서 제안한 방법은 Recall 및 F1-score에서 원본 영상 입력 모델과 바운딩 박스 기반 Crop 모델보다 현저히 높은 성능을 기록했다. 이는

	Original data	Bounding box crop	Proposed method
Precision	0.48	**0.56**	0.55
Recall	0.73	0.66	**0.75**
F1-score	0.58	0.61	**0.64**
Accuracy	0.87	**0.89**	**0.89**

표 1. 제안된 방법의 테스트셋 성능 평가

U-Net을 통한 정확한 피부 영역 분할과 이를 기반으로 한 배경 제거가 모델이 피부 병변 자체의 특징에 집중하도록 유도하여, 배경 잡음과 같은 불필요한 영역의 영향을 최소화했음을 시사한다.

본 연구의 결과는 하지 임상 사진을 활용한 피부 질환 분류에서 피부 영역 분할 및 마스킹 기법이 분류 정확도를 높이는 데 매우 효과적인 전처리 과정임을 명확히 보여준다. 따라서 본 연구에서 제시한 피부 분할 기반의 인공지능 기반 이진 분류 모델이 CVI-관련 피부 병변과 비관련 피부 질환을 임상적으로 감별하는 데 유효한 인공지능 보조 도구가 될 수 있음을 검증했다.

본 연구는 인공지능을 활용하여 하지 임상 사진에서 CVI 관련 피부 병변과 비관련 염증성 피부 질환을 효과적으로 감별 분류하는 모델을 제안했다. U-Net 기반의 피부 분할 및 마스킹을 통한 배경 제거 전처리가 분류 모델의 성능을 비교군보다 향상시킴으로써, 복잡한 피부 질환 분류에서 영역 특화 전처리의 유효성을 입증했다. 이 결과는 CVI 관련 피부 합병증의 객관적이고 신속한 진단 보조 도구로서 인공지능의 임상 적용 가능성을 시사한다.

그러나 본 연구는 특정 데이터셋에 국한된 한계를 가지며, 모델의 일반화 성능 확보를 위해 다기관 대규모 데이터셋을 통한 외부 검증이 필수적이다. 향후 연구는 CVI의 중증도 분류로 확장하고, 피부 영상 외에 환자의 임상 정보를 융합하는 멀티모달 인공지능 모델을 개발하여 실제 임상 현장에서의 진단 효율성을 극대화하는 것을 목표로 한다.

4. Acknowledgements

본 연구는 National Research Foundation of Korea (NRF) 과제와 2024년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2022R1A2C2091160, RS-2024-00352120). 본 연구는 과학기술정보통신부 정보통신진흥기금을 지원받아 작성한 것으로, 과학기술정보통신부의 공식의견과 다를 수 있습니다.

5.참고 문헌

[1] Krishnan, Nithyakalyani, and P. Muthu. "CVINet: A deep learning based model for the diagnosis of chronic venous insufficiency in lower extremity using infrared thermal images." *International Journal of Imaging Systems and Technology* 34.2 (2024): e23004.

[2] Atreyapurapu, Viswanath, et al. "Assessment of anatomical changes in advanced chronic venous insufficiency using Artificial Intelligence) and machine learning techniques." *Journal of Vascular Surgery: Venous and Lymphatic Disorders* 10.2 (2022): 571-572.

[3] Topiwala, Anirudh, et al. "Adaptation and evaluation of deep learning techniques for skin segmentation on novel abdominal dataset." *2019 IEEE 19th international conference on bioinformatics and bioengineering (BIBE)*. IEEE, 2019.

Poster-214

고처리량 디지털 슬라이드 스캐너를 사용한 딥러닝 기반 고속 가상 염색 및 자동화된 암 분류

산타누 미스라[1], 세이나[2], 박경숙[2], 윤치호[3], 삼파 미스라[3], 김철홍[3], 송상용[1], 김형경[2*], 박별리[1*]

Deep Learning-Enabled Rapid Virtual Staining and Automated Cancer Classification using High-Throughput Digital Slide Scanner

Santanu Misra[1], Sei Na[2], Kyoungsook Park[2], Chiho Yoon[3], Sampa Misra[3], Chulhong Kim[3], Sang Yong Song[1], Hyung Kyung Kim[2*], and Byullee Park[1*]

[1]Department of Biophysics, Department of Pathology, Department of MetaBioHealth, Department of Biopharmaceutical Convergence, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

[2]Department of Pathology and Translational Genomics, Samsung Medical Center, Seoul, Korea

[3]Departments of Electrical Engineering, Pohang University of Science and Technology (POSTECH), Pohang, Korea

***Corresponding author**: Hyung Kyung Kim (hyungkyungjkim@gmail.com); Byullee Park (byullee@skku.edu)

Abstract

Traditional hematoxylin and eosin (H&E) staining remains central to histopathological diagnosis of formalin-fixed, paraffin-embedded (FFPE) tissues but H&E staining is irreversible, time-intensive, and dependent on costly reagents and manual expertise. Emerging label-free imaging combined with deep learning offers an appealing alternative, yet current methods often suffer from slow acquisition rates and limited scalability. Here, we introduce a high-throughput digital histology framework that unites virtual staining and cancer classification within a multi-slide scanning system. Unstained bright-field (UBF) images from FFPE sections of brain, lymph node, and liver tissues are automatically transformed into virtual H&E (VHE) counterparts using an enhanced unpaired image translation network (NEGCUT) that employs instance-specific hard negative generation to reinforce morphological consistency and color realism. A ResNet18-based dual-branch classifier utilizing both UBF and VHE inputs achieved high diagnostic accuracy for cancer detection. Independent pathologist evaluations confirmed that VHE images preserve essential structural features and diagnostic interpretability comparable to standard H&E slides. This framework enables rapid, cost-effective, and chemical-free histopathology, offering a scalable solution for digital diagnostic workflows in modern pathology laboratories.

1. Introduction

In the year 2022, nearly 20 million new cancer cases were diagnosed and 9.7 million deaths due to cancer were recorded worldwide; the figure is expected to be 35 million cases every year by 2050. Histopathology remains the fundamental approach for diagnosing cancer and many other diseases, relying on the microscopic evaluation of stained tissue sections to reveal cellular morphology. Conventional hematoxylin and eosin staining (H&E), while widely adopted, demands multiple chemical steps, experienced technicians, and considerable time. The process is irreversible, rendering the stained specimens unusable for further molecular or immunohistochemical analyses. This dependency on chemical reagents and manual intervention imposes high operational costs and restricts large-scale diagnostic throughput, particularly in an era of rapidly increasing clinical sample volumes. Therefore, developing alternative strategies that preserve tissue integrity while enabling rapid visualization of histological features has become a critical pursuit in modern pathology.

Recent advances in label-free optical imaging, combined with deep learning, have opened new possibilities for generating virtually stained images that emulate traditional histology.[1] Techniques such as optical coherence tomography, autofluorescence imaging, photoacoustic microscopy[2], and Raman scattering have enhanced label-free visualization, yet they often require complex instrumentation and lengthy acquisition times. Deep learning–based virtual staining bridges this gap by transforming unstained images into realistic histological equivalents. However, supervised models require precisely paired datasets of stained and unstained sections, which are difficult to obtain, while unsupervised approaches like Cycle-consistent Generative Adversarial Networks (CycleGAN), or Contrastive Unpaired Translation (CUT) may fail to retain fine structural details or demand extensive computational resources.

To address these challenges, this work presents a deep learning–driven framework that integrates virtual staining and cancer classification within a digital slide-scanning platform. The method employs Instance-wise Hard Negative Example Generation for Contrastive Learning in Unpaired Image-to-Image Translation (NEGCUT)[3] to generate virtual hematoxylin–eosin (VHE) directly from unstained bright-field (UBF) images. When combined with a residual network-based classifier, this system enables automated detection of pathological regions with strong morphological fidelity. By eliminating chemical processing and leveraging high-throughput digital acquisition, the proposed framework offers a scalable, cost-efficient, and sustainable alternative to conventional histopathology, advancing the transition toward fully digital diagnostic workflows.

2. Methods

Tissue specimens were obtained with institutional approval by the Institutional Review Board of the Samsung Medical Center (2024-11-032) and processed using routine fixation and embedding protocols. Thin sections were prepared on glass slides, some retained unstained for virtual staining, while others underwent conventional hematoxylin and eosin staining

for comparison. All slides were digitized using high-resolution whole-slide scanners from different manufacturers to ensure compatibility and robustness across imaging systems. The digital images were standardized through format conversion and contrast adjustment to produce consistent inputs for deep learning. Each slide was divided into smaller image tiles to maintain spatial continuity and enable efficient training.

Virtual staining was conducted using a deep learning framework based on contrastive learning principles. The model employed a generator–discriminator structure (Figure 1) augmented by a representation network that encouraged detailed feature alignment between input and output domains. Adversarial optimization allowed the network to learn meaningful mappings between unstained and histologically stained appearances without requiring paired datasets. Subsequently, a residual network–based classifier analyzed both the label-free and virtually stained images through separate feature-extraction branches whose outputs were fused for improved prediction. The system was trained using adaptive optimization with data augmentation and early stopping strategies to enhance generalization. Independent pathologist reviews further verified the morphological accuracy and interpretability of the virtually stained & classification outcomes.

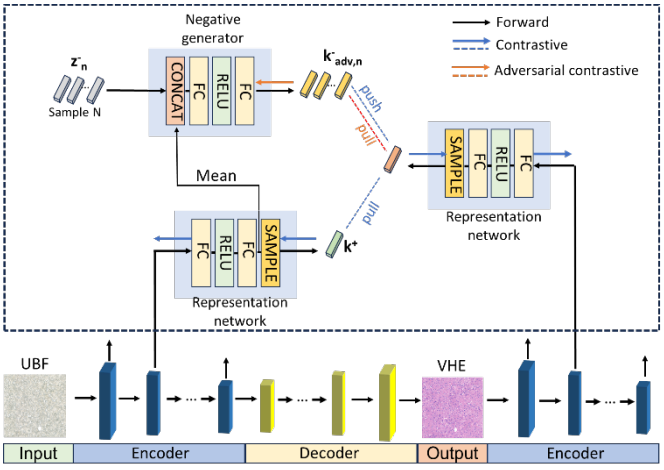


Fig 1: Model architecture of the NEGCUT used for converting UBF images to VHE images.

3. Results

The proposed deep learning framework effectively produced virtual hematoxylin–eosin images from unstained bright-field inputs of multiple human tissues. The NEGCUT-based virtual staining preserved cellular integrity and reproduced morphological features such as nuclear clarity, chromatin texture, and cytoplasmic contrast, closely matching conventional histological slides (Figure 2). The resulting virtual images demonstrated consistent coloration and fine structural detail, confirming accurate translation between label-free and stained domains. Pathologists independently verified that the virtually stained liver sections were diagnostically comparable to their chemically stained counterparts, exhibiting realistic color tone and minimal artifacts. These findings validate the reliability of the NEGCUT framework in maintaining histological fidelity across organ types while providing a scalable and non-destructive alternative to traditional staining.

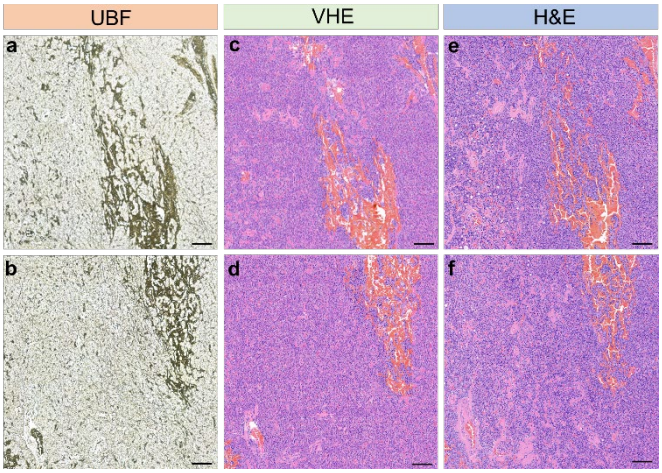


Fig 2: Virtual staining results for thyroid and bone tissue sections. **a–b** Contrast enhanced unstained bright field (UBF) images; **c-d** Corresponding virtually H&E-stained (VHE) images generated by NEGCUT; **and e-f** corresponding ground truth histochemical H&E-stained images of the same tissue (Adjacent slide section). Scale bars: 200 µm.

For cancer classification, lymph node samples were used to train and test the dual-branch classification network that combined label-free and virtually stained modalities. The fused representation enhanced the detection of malignant regions, producing cancer-probability maps that corresponded closely with expert annotations. The visual outcomes, shown in Figure 3, confirmed that the integrated model achieved robust classification performance while retaining interpretability through biologically meaningful feature activation.

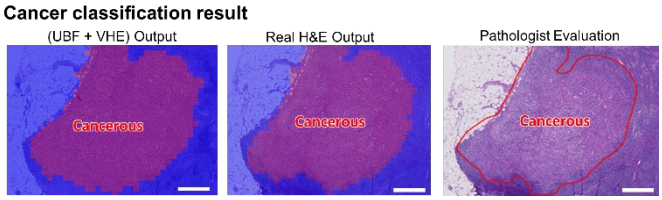


Fig 3: Classification results of human lymph node tissue. Scale bars: 500 µm.

4. Acknowledgements

This work was supported by the National Research Foundation (NRF) grant (RS-2023-00266110, RS-2024-00462912, RS-2023-00210682) and funded by the Ministry of Science and ICT (MSIT) of the Korean government and by the BK21 FOUR Project.

5. References

1. Latonen, L., Koivukoski, S., Khan, U. & Ruusuvuori, P. Virtual staining for histology by deep learning. *Trends in Biotechnology* vol. 42 1177–1191. (2024)
2. Yoon, C. *et al.* Deep learning-based virtual staining, segmentation, and classification in label-free photoacoustic histology of human specimens. *Light Sci Appl* **13**, (2024).
3. Wang, W., Zhou, W., Bao, J., Chen, D. & Li, H. Instance-wise Hard Negative Example Generation for Contrastive Learning in Unpaired Image-to-Image Translation. (2021).

FPP-CVI Net:
파운데이션 모델 활용 자세 추정 기반 전처리 기반 하지정맥류 분류 알고리즘

강현영[1], 김고은[2], 이예린[3], 김범석[4,5*], 양세정[1,3*]

연세대학교 원주의과대학 의료정보통계학과[1], 고려대구로병원 피부과[2], 연세대학교 원주의과대학 정밀의학과[3],
중앙대학교 의과대학 재활의학교실[4], 중앙대광명병원 재활의학과[5]

FPP-CVI Net: Foundation-based Pose Preprocessing for Chronic Venous Insufficiency Detection Algorithm

Hyunyoung Kang[1], Ko Eun Kim[2], Yerin Lee[3], Beom Suk Kim[4,5], Sejung Yang[1,3*]

Department of Medical Informatics and Biostatistics,
Yonsei University Wonju College of Medicine, Wonju, Republic of Korea
Department of Dermatology, Korea University Guro Hospital, Seoul, South Korea
Department of Precision Medicine, Yonsei University Wonju College of Medicine, Wonju, Republic of Korea
Department of Physical and Rehabilitation Medicine, Chung-Ang University College of Medicine, Seoul, Republic of Korea
Department of Physical and Rehabilitation Medicine, Chung-Ang University Gwangmyeong Hospital, Gwangmyeong-si, Republic of Korea

sonya23@yonsei.ac.kr, *mattkim9966@gmail.com, *syang@yonsei.ac.kr

Abstract

Varicose veins can progress beyond cosmetic concerns to cause significant skin complications, making accurate differential diagnosis from other dermatological conditions essential. We propose FPP-CVI Net, a framework combining transformer-based pose estimation with EfficientNet-B5 to automatically isolate leg regions and classify varicose veins using only clinical images. From 8,000 leg images collected, 4,495 were curated after preprocessing and split by patient into training, validation, and test sets. Despite severe class imbalance, FPP-CVI Net outperformed the baseline, improving Dice Score (0.67→0.69), Precision (0.77→0.78), and Recall (0.63→0.72). These results demonstrate that pose-aware preprocessing enhances sensitivity and enables practical, device-free automated diagnosis of chronic venous insufficiency.

1. 개요

만성정맥질환은 하지의 정맥에 혈액이 정체되고 이로 인한 정맥고혈압에 의해 경련, 부종, 통증, 소양감 등 다양한 하지 불편감을 유발하는 질환으로, 임상적으로는 6단계로 구분한다. 임상 분류 체계인 CEAP class에 따르면 C2는 육안적으로 정맥이 돌출된 하지정맥류, C3는 부종이 동반된 경우를 뜻하며 C4-6는 피부 병변이 동반된 상태를 의미한다. C3 이하의 경우 보존적 치료를 우선적으로 고려하나, C4 이상의 경우 진행된 단계로 간주되기에 시술 혹은 수술적 치료를 적극적으로 고려하게 된다. 즉, 임상 병기 판단에 따라 치료 방침이 달라지기에, 정맥 부전에 의한 피부 병변을 판별하는 과정은 진단과 치료에 있어 매우 중요하다고 할 수 있다 [1,2].

정맥 부전에 의한 피부 병변은 때때로 아토피성 피부염이나 접촉성 피부염, 습진 등 타 피부과적 질환과 유사한 임상상을 보인다. 이런 경우 피부과 전문의가 아닌 임상가 입장에서는 정확한 피부 병변 판별이 제한되는 경우가 많다. 피부 병변 판별 과정에 임상가의 방대한 경험을 토대로 한 직관적 판단이 개입하는 특성을 감안할 때, 인공지능의 활용도에 대해 고민해 볼 여지가 있다 [1,3].

현재 만성 하지 에 관련된 딥러닝 기반 연구는 광학 이미지를 기반으로 하지 정맥류의 중증도 분류에 대한 접근법, 이는 주로 중증도 분류에 국한되었다. 적외선 열화상 이미지를 활용하여 하지 정맥류 진단을 수행하는 딥러닝 모델로, 일반적인 임상 이미지가 아닌 특수한 열화상 장비가 필요하다는 한계가 있다 [4,5].

본 연구에서는 임상 이미지만을 활용해 하지 정맥류를 다른 피부 질환과 구별하는 자동화 감별 시스템을 구현하고자 하였다. 임상 이미지는 다양한 배경과 자세의 사람이 존재하기 때문에, 하지 정맥류의 관심 영역인 다리 부분을 이미지 트렌스포머 기반의 파운데이션 모델을 활용한 자세 추정 알고리즘을 통해 관심 영역 전처리를 적용한 하지정맥류 분류 알고리즘을 Foundation-based Pose Preprocessing (FPP) for Chronic Venous Insufficiency Network (FPP-CVI Net) 개발하였으며, Dicescore, Precision, Recall에서의 성능 향상을 확인했다.

2. 연구방법

2-1) 데이터셋

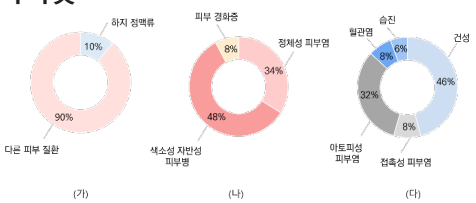


그림 1. 데이터셋 분포
(가).이진 데이터 (나).하지 정맥류 (다).다른 피부질환



그림 2. 피부 질환별 예시 데이터셋

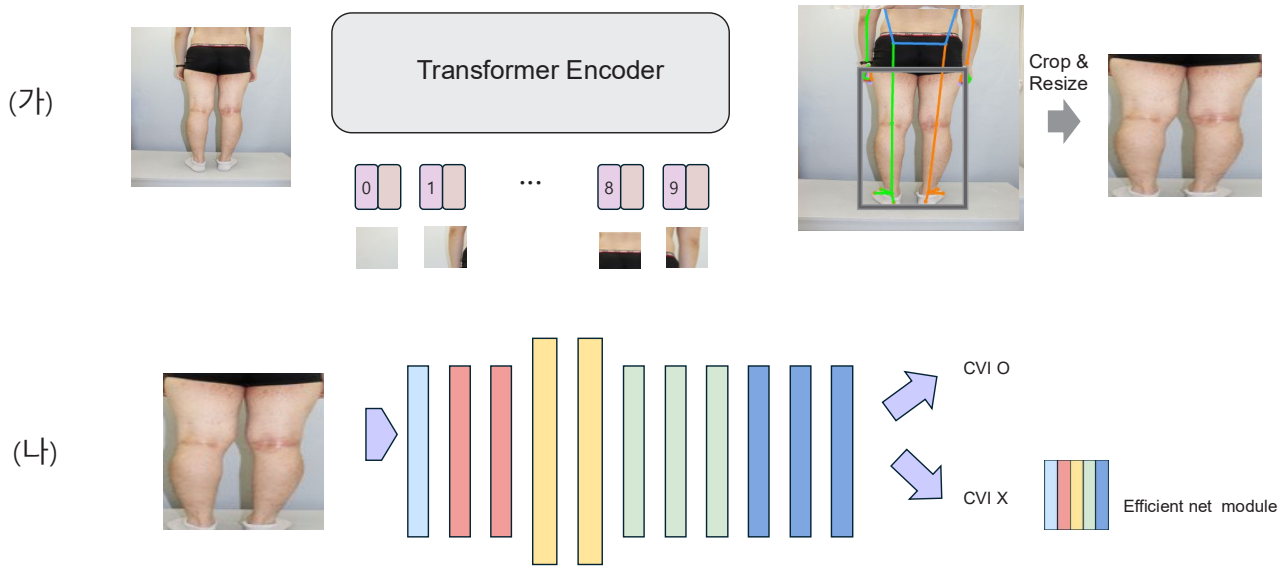


그림 3. Foundation-based Pose Preprocessing for Chronic Venous Insufficiency Network (FPP-CVI Net) 알고리즘
(가). 이미지 트렌스포머 파운데이션 모델 기반의 자세 추정 알고리즘을 이용한 관심 영역 추출 전처리 알고리즘
(나). 하지정맥류 이진 분류 알고리즘

임상이미지 기반 데이터셋 구축을 위해 중앙대학교 피부과 및 재활의학과와 협력하여 총 8,000장의 하지 영상 데이터(IRB-2025GR0073) 확보하였으며,제안한 FPP 알고리즘을 적용해 다리 부위가 포함된 4,495장의 영상을 최종 선별하였다. 선별된 데이터는 환자 단위로 학습·검증·시험 용도로 환자 기준으로 7:2:1 비율로 분할하였으며, 각 분할 집단은 동일 환자가 중복되지 않도록 구성하였다. 그림 1에 제시된 데이터 분포에 따르면, 하지정맥류 영상은 전체의 약 10%에 불과하여 다른 피부 질환 대비 현저한 클래스 불균형이 관찰되었으며, 각 질환에 따른 예시 이미지는 그림 2에서 확인할 수 있다.

2-2. 파운데이션 모델 활용 자세 추정 기반 전처리 기반 하지정맥류 분류 알고리즘

본 연구에서는 다리 부위에 한정된 고해상도 영상을 확보하기 위해, 사전 학습된 이미지 트랜스포머 기반 파운데이션 모델을 이용한 자세 추정 알고리즘을 적용하였다. 이를 통해 무릎, 골반, 발목에 해당하는 관절 좌표를 자동으로 추출한 뒤, 해당 좌표를 기준으로 관심 영역을 분할해내고, 일괄적인 입력 크기로 변경하여 전처리를 수행하였다[.

이후 하지정맥류 판별을 위한 이진 분류 모델로는 실험에서 최상의 성능을 보인 EfficientNet-B5를 채택하였으며, Adam 최적화 기법을 사용하고 학습률을 1×10^{-4}로 설정하여 총 50에폭 동안 학습을 진행하였다. 이와 같은 파이프라인은 자세 추정 기반 전처리와 고성능 분류 모델을 결합함으로써, 관심 부위 강조와 안정적인 수렴을 동시에 달성하도록 설계되었다.

3. 연구 결과 및 고찰

표 1은 FPP 알고리즘을 사용하지 않은 Base line과 전처리를 적용한 FPP에 대한 비교이다. 하지정맥류는 불균형 데이터셋이므로 매크로 평균에 따른 Dice Score, Precision, Recall을 사용하여 평가하였다.

제안한 파운데이션 모델 활용 자세 추정 기반 전처리 하지정맥류 분류 알고리즘(FPP)은 기존 베이스라인 모델과 비교했을 때 전반적인 분류 성능이 향상되었다. 구체적으로, FPP의 Dice Score는 베이스라인의 0.67에서 0.69로 개선되었으며, Precision 또한 0.77에서 0.78로 소폭 상승하였다. 특히 Recall은 베이스라인 모델의 0.63에서 FPP가 0.72로 크게 증가하여 질환 환자 검출 민감도가 현저히 높아졌다. 이러한 성능 향상은 자세 추정 기반 전처리가 이미지 내에서 다리 부위를 정확히 강조함으로써 분류 모델이 관심 영역에 집중하도록 돕고, 결과적으로 더 높은 민감도와 전체적인 예측 정확도를 달성했음을 시사한다.

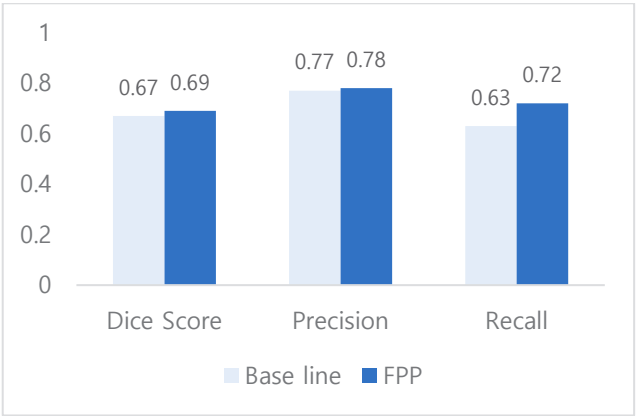


표 1. 정량적 결과 비교.

4. Acknowledgements

이 연구는 National Research Foundation of Korea (NRF) 과제의 지원을 받아 수행하였음(MSIT).(RS-2024-00352120). 본 연구는 과학기술정보통신부 정보통신진흥기금을 지원받아 작성한 것으로, 과학기술정보통신부의 공식의견과 다를 수 있음.

5.참고 문헌

[1] Kılınç, Fadime, et al. "Cutaneous findings in patients with chronic venous insufficiency." *Journal of Cosmetic Dermatology* 21.5 (2022): 2106-2112.

[2] Robert Norman, M. D. "Stasis Dermatitis: A Review of

Differential Diagnosis, Pathogenesis, and Current Treatment Options."
[3] Eberhardt, Robert T., and Joseph D. Raffetto. "Chronic venous insufficiency." *Circulation* 130.4 (2014): 333-346.
[4] Couairon, Paul, et al. "DiffCut: Catalyzing Zero-Shot Semantic Segmentation with Diffusion Features and Recursive Normalized Cut." *arXiv preprint arXiv:2406.02842* (2024).
[5] Kirillov, Alexander, et al. "Segment anything." *Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision*. 2023.

Poster-216

비침습적 HVPG 예측을 위한 멀티 모달 교차 어텐션 네트워크

정진교[1†], 류장훈[1†], 한슬기[2], 안지현[3], 김문영[2], 양세정[1,4*]

연세대학교 원주의과대학 정밀의학과[1]

연세대학교 원주의과대학 소화기내과[2]

연세대학교 원주의과대학 영상의학과[3]

연세대학교 원주의과대학 의료정보통계학과[4]

Multi-Modal Cross-Attention Network for Non-invasive HVPG Prediction

Jin Gyo Jeong[1†], JangHoon Ru[1†], Seul Ki Han[2], Jhii-Hyun Ahn[3], Moon Young Kim[2], Sejung Yang[1,4*]

Department of Precision Medicine, Yonsei University Wonju College of Medicine, Wonju, Korea[1]

Department of Gastroenterology, Wonju Severance Christian Hospital, Wonju, Republic of Korea[2]

Department of Radiology, Yonsei University Wonju College of Medicine, Wonju Severance Christian Hospital, Wonju, Republic of Korea[3]

Department of Medical Informatics and Biostatistics, Yonsei University Wonju College of Medicine, Wonju, Korea[4]

[†] These authors contributed equally to this work

[*]syang@yonsei.ac.kr

Abstract

The hepatic venous pressure gradient remains the gold standard for diagnosing and assessing portal hypertension, yet its measurement is invasive and is associated with procedural risks. Recent advances in artificial intelligence have facilitated the development of non-invasive predictive models using multimodal data, such as abdominal CT images and clinical information. Multimodal approaches integrate structural and functional data, providing a more comprehensive assessment of liver disease and portal hypertension. In this study, we propose a novel multi-modal cross-attention network that fuses abdominal CT imaging with clinical data to non-invasively estimate HVPG. This approach aims to mitigate the risks and patient burden associated with invasive HVPG measurement, offering a safer and more accessible alternative for diagnosis and prognosis. Our method holds the potential to enhance clinical decision-making and expand access to timely and accurate evaluation for patients with chronic liver disease.

1. 연구 배경

간정맥압력구배(Hepatic Venous Pressure Gradient, HVPG)는 문맥고혈압의 진단 및 예후 평가를 위한 gold standard로 알려져있다[1]. HVPG는 간정맥의 폐색 간정맥압(Wedged Hepatic Venous Pressure, WHVP)과 자유 간정맥압(Free Hepatic Venous Pressure, FHVP)의 차이로 산출되며, 간문맥과 하대정맥 사이의 압력 구배를 정확히 반영한다[2]. HVPG 수치가 5 mmHg를 초과하면 문맥고혈압으로 진단하며, 10 mmHg 이상은 임상적으로 유의한 문맥고혈압(clinically significant portal hypertension, CSPH)으로 분류한다[3]. 특히 12 mmHg를 초과하면 식도정맥류 출혈과 같은 합병증의 발생 위험이 현저히 증가하고, 16 mmHg 이상에서는 사망률 또한 급증한다[2].

HVPG 측정은 주로 경정맥 접근을 통해 간정맥에 카테터를 삽입하는 방식으로 수행된다. 이 시술은 풍선이 장착된 카테터를 간정맥에 위치시킨 후, 풍선을 팽창시켜 혈류를 일시적으로 차단한 상태에서 WHVP를, 풍선을 다시 수축시켜 FHVP를 측정하는 과정으로 이루어진다. 전체 측정 과정은 통상적으로 10분 이내에 완료되며, 방사선 투시 장비와 압력 기록 장치가 활용된다[1].

HVPG 측정은 비교적 안전한 시술로 간주되나, 침습적 절차의 특성상 드물게 합병증이 보고된다. 주로 일시적인 심장 부정맥, 국소 통증, 혈종 등이 발생할 수 있으며, 심각한 합병증의 발생률은 1% 미만으로 매우 낮다[3]. 그러나 시술 과정에서 환자가 느끼는 불편감, 불안, 통증이 수반될 수 있고, 시술의 안전성과 정확성을 위해 숙련된 의료진과 전문 시설이 필수적이다. 이러한 본질적인 한계점으로 인해, 최근 이를 대체할 비침습적 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

최근 의료 인공지능 기술이 급격히 발전하면서, HVPG 측정의 침습성과 위험성을 극복할 대안으로 비침습적 예측 모델이 활발히 제안되고 있다. 특히 복부 CT 영상, 혈액 검사 수치 등 서로 다른 형태의 데이터를 함께 분석하는 멀티모달(multi-modal) 접근법이 각광받고 있다. 이 접근법은 각 데이터가 가진 고유의 정보를 상호 보완하여 예측 모델의 정확도와 신뢰성을 높이는 장점을 가진다.

복부 CT 영상은 간의 해부학적 변화와 혈류 역학적 특성을 평가하는 핵심 정보를 제공하며, 임상 데이터는 간 기능과 환자의 전신 상태를 객관적으로 나타낸다. 기존에는 이러한 이종(heterogeneous) 데이터를 단순히 결합하는 방식이 주로 사용되었으나, 본 연구에서는 교차 어텐션(Cross-Attention) 메커니즘을 도입하여 데이터 간의 상호작용을 모델링하고자 한다. 이 메커니즘은 CT 영상의 특정 특징이 어떤 임상 수치와 깊은 연관이 있는지, 혹은 특정 임상 수치가 영상의 어느 부분에서 중요한 단서가 되는지를 학습하여, HVPG와 관련된 복합적인 패턴을 효과적으로 포착할 수 있다.

이에 본 연구에서는 복부 CT 영상과 임상 데이터를 활용하여 HVPG를 정확하게 예측하는 멀티 모달 교차 어텐션 네트워크를 제안한다. 제안하는 네트워크는 두 데이터가 서로의 정보에 '주목(attend)'하게 함으로써, HVPG를 예측하는 데 가장 중요한 특징들의 조합을 동적으로 찾아낸다. 이를 통해 기존 HVPG 측정의 위험성과 환자 부담을 경감시키고, 더 많은 만성 간질환 환자에게 안전하고 신속한 진단 및 예후 예측의 기회를 제공할 수 있을 것으로 기대한다.

2.연구 방법

2.1 데이터셋

본 연구에서는 원주 세브란스 기독병원을 방문한 603명의 혈액검사 결과와 복부 CT 영상(IRB-CR324071)을 활용하였다. 데이터셋 구성은 정상인 305명과 HVPG 환자 298명으로 구성되었다. 모든 CT 영상은 리샘플링 기법을 적용하여 복셀 간격을 [1.0, 1.0, 1.0]으로 조정하고, [256x256x96] 크기로 표준화하였다.

또한 본 연구에서는 텍스트 프롬프트 입력을 위해 룰 베이스(rule-base) 정해진 템플릿에 맞춰 사용되었으며, 텍스트 프롬프트 생성을 위해 사용된 혈액 검사 결과는 성별, 나이, Albumin, Total bilirubin, AST, ALT, WBC, PMN, Hg, PLT, Na, Cr, 간과 비장 간의 볼륨 비, 간 볼륨, 비장 볼륨으로 15개의 정보를 활용하였다. 데이터는 CT 볼륨 데이터와 텍스트 프롬프트를 한쌍으로 하여 구성되어 있으며, 전체 데이터를 각각 학습, 검증, 테스트로 6:2:2로 나누어 사용하였다.

2.2 멀티모달 네트워크

본 논문에서 제안하는 비침습적 HVPG 예측을 위한 멀티모달 네트워크는 복부 CT 영상과 텍스트 형태의 임상 정보를 입력으로 사용하는 멀티모달 아키텍처를 기반으로 한다. 먼저, 3D CT 영상은 Swin Transformer 백본을 통해 패치(patch) 단위로 분할되고, 반복적인 Swin-Block과 Patch Merging 과정을 거치며 영상의 계층적 특징 벡터로 인코딩된다[4]. 동시에, 나이, 성별, 혈액 검사 결과 등이 포함된 임상 정보 텍스트는 BLIP의 텍스트 인코더를 통과하여 고차원의 텍스트 임베딩 벡터로 변환된다. 모델의 핵심인 교차 어텐션 모듈에서는 텍스트 임베딩 특징 벡터가 쿼리(Query)로, 영상 벡터가 키(Key)와 값(Value)으로 작용하여 두 데이터 양식 간의 상호 관계를 학습한다. 최종적으로, 어텐션 메커니즘을 통해 융합된 특징 벡터는 완전 연결 신경망(FCN)을 거쳐 분류기와 회귀기로 전달되며, 각각 임상적으로 유의미한 CSPH 여부 판별과 HVPG 수치 예측을 각각 수행한다. 그림 1은 제안하는 모델의 개요도이다.

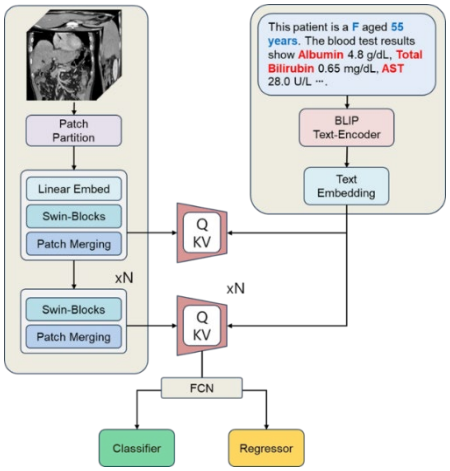


그림1. 제안하는 멀티 모달 교차 어텐션 네트워크 개요도

3. 연구 결과

본 논문에서는 복부 CT 영상과 혈액검사 결과를 사용하여 제안한 멀티모달 네트워크를 HVPG 예측하기 위해 학습하였으며, 모델의 일반화 성능을 확인하기 위해 5겹 교차 검증을 하였다. 그림 2는 전체 데이터에 대한 ROC (Receiver Operating Characteristic Curve) 결과를 나타내며, 표 1은 제안한 모델의 5겹 교차 검증 결과를 나타낸 결과표이다. 그림 3은 HVPG 값 예측에 대한 결과를 나타낸 그림이다.

Accuracy	PPV	Recall	Specificity	F1	AUC
0.703	0.723	0.925	0.211	0.703	0.702

표1. 제안하는 네트워크의 CSPH 분류 성능

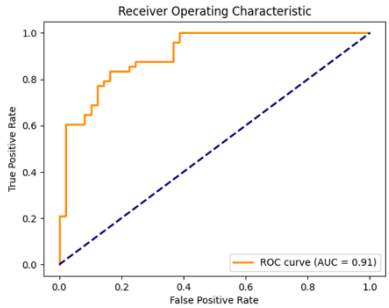
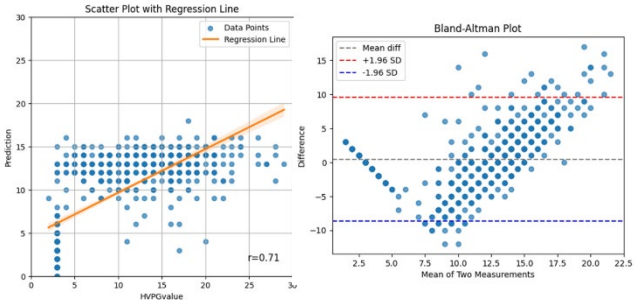


그림2. CSPH 분류 성능 ROC 곡선



(a) (b)

그림3. HVPG 값 예측 (a) Scatter plot, (b)Bland-Altman 분석

4.결론

본 논문에서는 복부 CT 영상에서 HVPG값의 따른 분류를 하기위해 혈액검사 결과 데이터와 복부 CT 영상 데이터를 활용한 멀티모달 네트워크를 제안하였다. 전문의가 수동으로 라벨링한 데이터와 제안하는 방법의 예측 결과를 비교 분석한 결과, 0.79의 정확도, 0.87의 AUC로 우수한 성능을 보였다. 제안한 네트워크를 통해 비침습적으로 HVPG 예측이 가능하도록 하여 침습적인 측정으로 인한 합병증에 대한 위험도가 낮아질 것으로 기대된다.

5. Acknowledgements

본 발표는 과학기술정보통신부 정보통신진흥기금을 지원받아 작성한 것으로, 과학기술정보통신부의 공식의견과 다를 수 있습니다.

6.참고 문헌

[1] Q. Lu, S. Leong, K. A. Lee, A. Patel, J. M. E. Chua, N. Venkatanarasimha, R. H. G. Lo, F. G. Irani, K. D. Zhuang, A. Gogna, P. E. J. Chang, H. K. Tan, and C. W. Too. "Hepatic venous-portal gradient (HVPG) measurement: pearls and pitfalls." Clin Liver Dis (Hoboken), Vol 17, No.3, p.144–148, 2021.

[2] T. Bochnakova. "Hepatic Venous Pressure Gradient." Clin Liver Dis (Hoboken), Vol 7, No.20, 2019.

[3] Z. Liu, Y. Lin, Y. Cao, H. Hu, Y. Wei, Z. Zhang, S. Lin, and B. Guo. "Swin Transformer: Hierarchical Vision Transformer using Shifted Windows." Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV), p.10012-10022, 2021.

[4] J. Li, D. Li, C. Xiong, and S. Hoi. "BLIP: Bootstrapping Language-Image Pre-training for Unified Vision-Language Understanding and Generation." arXiv preprint arXiv:2201.12086, 2022.

Poster-217

당뇨병 자가 관리를 위한 영양 맞춤형 혈당 인식 기반 대형언어모델(GLINT)

이성재[1], 황원준[2], 김관우[3], 정가원[4], 박성민[1,2*]

포항공과대학교 의과학전공[1]

포항공과대학교 IT융합공학과[2]

서울과학기술대학교 전기정보공학과[3]

삼성전자 MX사업부[4]

Glucose-aware Large Language Model for Intelligent Nutrition Tailoring (GLINT) in Diabetes Self-care

Seongjae Lee[1], Wonjun Hwang[2], Gwanwoo Kim[3], Kawon Jeong[4], Sung-Min Park[1,2*]

[1] Major in Medical Science and Engineering, POSTECH, Korea

[2] Dept. of Convergence IT Engineering, POSTECH, Korea

[3] Electrical and Information Engineering, SeoulTech., Korea

[4] Mobile Experience Division, Samsung Electronics

*corresponding author: sungminpark@postech.ac.kr

Abstract

Effective diabetes management requires personalized nutritional guidance. Yet, current decision-support systems often lack interpretability and individual tailoring, limiting their practical use. Here, we present GLINT (Glucose-aware Large Language Model for Intelligent Nutrition Tailoring), an LLM-powered framework designed to generate personalized and actionable dietary recommendations for individuals with diabetes. GLINT integrates a Postprandial Glycemic Response (PPGR) prediction module with a natural language generation module. By incorporating meal composition data, continuous glucose monitoring (CGM) histories, and personal health records, the framework predicts individualized glycemic responses and translates these outputs into accessible dietary advice. Evaluation results indicate that personalization significantly enhances the predictive accuracy of the PPGR model. In addition, the instruction-tuned LLM module consistently outperforms baseline models and existing clinical domain–specific LLMs in tasks including meal scoring, dietary recommendation, and interpretation of glycemic predictions. Collectively, these findings highlight the potential of GLINT to bridge the gap between complex AI-driven glycemic predictions and user-centered, personalized diabetes self-management strategies.

1. Introduction

Personalized nutrition is essential for effective diabetes management, yet current systems remain limited by scalability, fragmented care, and the difficulty patients face in interpreting complex advice. In particular, managing postprandial glycemic response (PPGR) is critical for individuals with type 2 diabetes mellitus (T2DM) [1,2]. While machine learning models for PPGR prediction have shown promise, their clinical use is restricted by poor interpretability and a reliance on population-based standards that overlook individual variability [3].

Recent progress in mobile health data and wearable biosensors offers opportunities to capture rich, individualized health signals in real time. Yet, fragmented datasets and insufficiently interpretable solutions have hindered their impact on patient outcomes. In parallel, large language models (LLMs) have demonstrated remarkable ability to produce user-friendly, contextually relevant explanations across diverse domains [4]. Their potential to translate complex model outputs into accessible advice makes them particularly well-suited for personalized nutrition. However, general-purpose or domain-wide medical LLMs may lack the specificity required to handle individualized dietary queries, limiting their effectiveness.

To address these challenges, we introduce GLINT (Glucose-aware Large Language Model for Intelligent Nutrition Tailoring), an integrated system that combines personalized PPGR prediction with natural language generation. GLINT analyzes multimodal inputs—including meal data, CGM histories, and individual health records—collected through common mobile and wearable devices. The system then employs an instruction-tuned LLM to transform predictive outputs into clinically meaningful, interpretable dietary

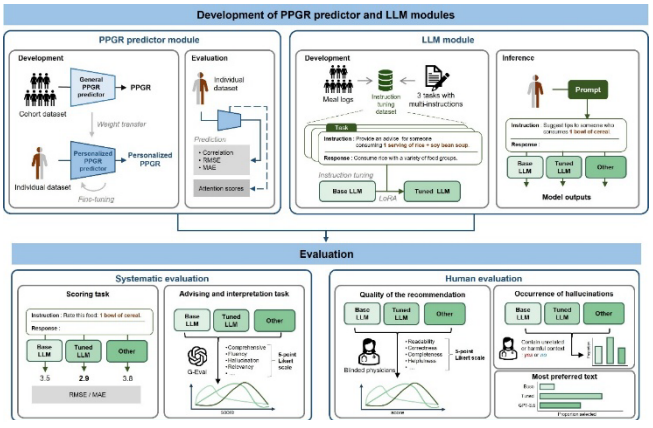


Figure 1 Schematic overview of LLM-powered glucose management study design

guidance (Figure 1).

2. Methods

PPGR Predictor Module

First, we developed a PPGR predictor, which is a deep learning-based prediction engine that uses multimodal inputs, meal information (e.g., nutritional features and meal timing), CGM data, and clinical data (e.g., lab results and medication doses) to predict individual PPGR. We calculated the ground truth PPGR, which is an incremental area under the glucose curve in the 2-h following a meal, as follows:

$$PPGR = \frac{1}{60}\sum_{i=1}^{24}\frac{(G_i - G_0) + (G_{i-1} - G_0)}{2} \times \Delta t \qquad (1)$$

where G_0 represents the blood glucose level at the start of the meal, G_i indicates the blood glucose level at 5 i minutes after the start of the meal, and Δt is the time interval. We adopted a two-step training strategy to model individual glycemic responses. First, a general PPGR predictor was trained on 3,580 meal records from 130 participants. Next, to enable personalization, the model was fine-tuned using six days of data from ten unseen individuals, and evaluated on the subsequent four days of each participant's data. Performance was assessed using root mean squared error (RMSE) and mean absolute error (MAE).

LLM Module

The LLM module generates glucose management responses from meal logs and PPGR predictions. We adopted LLaMA3.1-8B-Instruct as the backbone and further fine-tuned it with supervised instruction–response pairs to improve zero-shot performance. Fine-tuning was implemented with LoRA [5] for parameter efficiency, trained for three epochs using AdamW on two RTX 3090 GPUs.

Evaluation

To assess effectiveness and clinical utility, we designed a two-step evaluation. A dataset of 108 real-world eating scenarios from T2DM individuals (unseen during training) was used. For meal scoring, we applied RMSE and MAE; for dietary advising and PPGR interpretation, we employed the G-Eval framework with GPT-4o-mini as evaluator, rating responses on a 1–10 scale.

This study was approved by the ethics committee at Kangbuk Samsung Hospital (IRB KBSMC 2022-12-002-004).

3. Results

Impact of Personalization on PPGR Predictive Accuracy

Personalization significantly improved PPGR prediction. As shown in Figure 2a, fine-tuning with five or more days of individual data yielded a statistically significant reduction in MAE ($p < 0.05$), with six days used for subsequent analyses. Eight of ten test participants showed accuracy gains, and five achieved >10% MAE reduction (Figure 2b). Attention analysis (Figure 2c) revealed that CGM history had the highest global weight among input modalities, followed by meal carbohydrate content and time since previous meal, while basal insulin dose was most influential within health context features.

Meal scoring

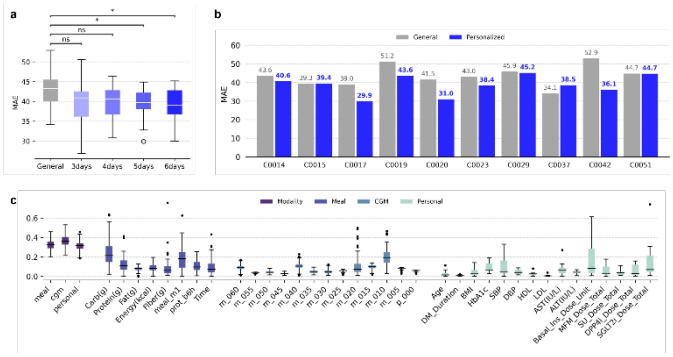


Figure 2 Personalization improves PPGR prediction accuracy and reveals key predictive features.

Model	RMSE	MAE
LlaMA-3.1-8B-Instruct	3.05	2.64
Ours	**2.29**	**1.80**

Table 1 Performance comparison on meal scoring.

Dietary advising

Model	Comprehensiveness	Fluency	Practical appropriateness	Relevancy
LlaMA-3.1-8B-Instruct	**4.59**	4.95	4.5	4.63
Med-Alpaca (7B)	2.65	4.14	3.42	2.82
PMC-LLaMA (13B)	2.94	3.92	3.16	2.64
BioMistral (7B)	3.03	4.05	3.43	3.02
Ours	4.51	**4.97**	**4.71**	**4.81**

Table 2 Performance comparison on dietary advising.

PPGR interpretation

Model	Degree of importance	Selectivity	Causality	Relevancy
LlaMA-3.1-8B-Instruct	2.82	3.17	3.14	3.72
Ours	**3.68**	**3.36**	**3.34**	**3.8**

Table 3 Performance comparison on PPGR interpretation.

In summary, our systematic assessment shows that the proposed model outperforms base LLM and other medical domain-adapted LLMs of similar or larger size, demonstrating its high adaptability in assessing the meal, providing dietary recommendations, and offering interpretation of expected glycemic response after the meal.

4. Acknowledgements

This research was supported by the University Technology Commercialization Promotion Program through the Commercializations Promotion Agency for R&D Outcomes (COMPA) funded by the National Research Foundation of Korea (NRF) (RS-2024-00426901) and by the Pioneer Research Center Program through the National Research Foundation of Korea funded by the Ministry of Science, ICT & Future Planning (2022M3C1A3081294). This research was supported by the MSIT(Ministry of Science and ICT), Korea, under the ICAN(ICT Challenge and Advanced Network of HRD) support program(IITP-2025-RS-2024-00437359) supervised by the IITP(Institute for Information & Communications Technology Planning & Evaluation)

5. References

[1] C. Ruijgrok et al., "Reducing postprandial glucose in dietary intervention studies and the magnitude of the effect on diabetes-related risk factors: a systematic review and meta-analysis," (in eng), European journal of nutrition, vol. 60, no. 1, pp. 259-273, Feb 2021, doi: 10.1007/s00394-020-02240-1.
[2] A. B. Evert et al., "Nutrition Therapy for Adults With Diabetes or Prediabetes: A Consensus Report," Diabetes Care, vol. 42, no. 5, pp. 731-754, 2019, doi: 10.2337/dci19-0014.
[3] D. Kirk, C. Catal, and B. Tekinerdogan, "Precision nutrition: A systematic literature review," Computers in Biology and Medicine, vol. 133, p. 104365, 2021/06/01/ 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2021.104365.
[4] S. B. Patel and K. Lam, "ChatGPT: the future of discharge summaries?," The Lancet Digital Health, vol. 5, no. 3, pp. e107-e108, 2023, doi: 10.1016/S2589-7500(23)00021-3.
[5] E. J. Hu et al., "Lora: Low-rank adaptation of large language models," ICLR, vol. 1, no. 2, p. 3, 2022.

Poster-218

AI 기반 안저 영상 식별 소프트웨어의 구현 및 성능 평가

김종원[1], 이득주[2,3*]

레티마크㈜[1]

한림대학교 소프트웨어학부[2]

한림대학교 바이오아이티연구소[3]

Implementation and Performance Evaluation of an AI-based Fundus Image Identification Software

Jongwon Kim[1], Deukju Lee[2,3*]

RetiMark Co., Korea

Division of Software, Hallym University, Korea

Bio-IT Research Center, Hallym University, Korea

*dlemrwn@hallym.ac.kr

Abstract

This study presents the design and implementation of artificial intelligence (AI)-based diagnostic software for automatic classification of retinal diseases using fundus images. The target classes were Diabetic Retinopathy (DR), Age-related Macular Degeneration (AMD), and Normal. A lightweight convolutional neural network (CNN) based on MobileNetV2 was trained and validated with the publicly available Retinal Image Analysis for Diabetic Retinopathy (RIADD) dataset. The software was developed in Python and built with a graphical user interface (GUI) using Tkinter, allowing model training, prediction, and result visualization in a single environment. Class weights were used during training to handle the data imbalance, which helped improve sensitivity for minority disease classes. The system runs with a multi-threaded structure, keeping the GUI responsive, and trained models are automatically saved after each training session. During prediction, the program shows class probabilities so that users can easily understand how confident the diagnostic results are. In the evaluation, the system achieved an accuracy of 90.3%, sensitivity of 72.4%, and specificity of 94.8%. Although the number of AMD samples was limited, the model showed stable convergence without overfitting. These results show that the proposed lightweight AI-based fundus analysis software can be useful for reliable diagnostic assistance in ophthalmology.

1. 연구 배경

당뇨병성망막병증(DR)과 연령관련황반변성(AMD)은 대표적인 실명 유발 질환으로 조기 진단과 치료 시기 결정이 임상적으로 매우 중요하다. 기존에는 안저 카메라로 촬영한 영상을 전문의가 직접 판독하였으나 판독자의 숙련도나 피로도에 따라 진단 정확도에 차이가 발생할 수 있다. 이에 따라 인공지능(AI)을 활용한 자동 영상 분석 기술이 임상 진단 보조 수단으로 빠르게 확산되고 있다.

최근 합성곱신경망(CNN)을 이용한 안저 영상 분석 기술은 높은 정확도와 일관성을 보여주며 임상적 적용 가능성을 확대하고 있다. 효율적인 CNN 구조를 통해 안질환 분류 성능을 개선하였고 다양한 CNN 모델의 구조적 차이에 따른 성능을 비교하였다[1, 2]. CNN을 이용해 당뇨병성망막병증의 특징을 자동 추출하고 중증도를 분류함으로써 AI 진단의 임상적 활용 가능성을 입증하였다[3].

그러나 기존 연구의 대부분은 모델의 정확도 향상에 초점을 맞추고 있으며 실제 사용자가 활용할 수 있는 형태의 AI 진단 소프트웨어 구현 연구는 부족한 실정이다. 특히 의료 현장에서 요구되는 것은 높은 정확도의 모델과 비전문가도 직관적으로 사용할 수 있는 실용적 형태의 시스템이다. 이에 본 연구에서는 학습, 예측, 결과 확인을 하나의 환경에서 수행할 수 있는 AI 기반 안저 영상 진단 소프트웨어를 설계하고 구현하였다. 또한 데이터 불균형 보정 및 결과 신뢰도 표시 기능을 통해 실용성과 신뢰성을 동시에 확보하였다.

2.연구 방법

본 연구에서 개발한 소프트웨어는 파이썬 기반으로 구현되었으며 Tkinter를 이용해 그래픽 사용자 인터페이스(GUI)를 구성하였다.



그림 1. AI 기반 안저 영상 진단 소프트웨어 메인 실행 화면

그림 1은 소프트웨어의 메인 실행 화면으로 학습과 예측을 통합적으로 제어할 수 있는 구성을 보여준다. 사용자는 학습 횟수와 불확실성 임계값을 직접 설정할 수 있고 모델 학습, 저장, 불러오기, 예측, 결과 요약 확인까지 모든 과정을 단일 창에서 수행할 수 있다. 사용된 데이터는 RIADD 공개 안저 영상 데이터셋으로 정상(Normal) 401장, 당뇨병성망막병증(DR) 240장, 연령관련황반변성(AMD) 34장으로 구성하였다.

이미지는 224×224 픽셀 크기로 리사이즈 후 정규화 과정을 거쳐 모델의 입력으로 활용하였다. 전체 데이터의 80%는 학습용 20%는 검증용으로 분할하였으며 모델의 성능은 검증 세트 기준으로 평가하였다. 별도의 테스트 세트는 본 연구의 범위에 포함하지 않았다.

모델은 MobileNetV2 구조를 기반으로 설계하였다. 기본 네트워크 상단에는 평균풀링 계층, 완전연결 계층, 드롭아웃 계층(비율 0.5), 소프트맥스 출력층을 순차적으로 추가하였다. 이를 통해 세 가지 클래스(DR, AMD, Normal)에 대한 확률을 계산하도록 모델을 구성하였다. 손실 함수는 범주형 교차 엔트로피를 사용하였으며 최적화 알고리즘은 Adam 방식을 적용하였다. 학습 횟수와 배치 크기는 각각 15회와 8로 설정하였다.

데이터의 클래스 불균형을 보정하기 위해 각 클래스의 이미지 수를 기준으로 가중치를 계산하여 학습 과정에 반영하였다. 이를 통해 데이터가 적은 질환 클래스(DR, AMD)의 학습 비중을 상대적으로 높여 모델의 민감도를 개선하였다. 모든 학습 과정은 다중 스레드 구조로 구현되어 GUI 응답성을 유지하였으며 학습 완료 후 모델은 자동으로 저장된다. 예측 단계에서는 입력 영상에 대해 각 클래스의 확률이 계산되며 가장 높은 확률을 가진 클래스를 결과로 표시한다. 예측 확률이 설정된 임계값(기본값 0.6) 미만일 경우 불확실한 결과로 분류되어 경고 메시지가 출력된다. 모든 예측 결과는 자동으로 요약 파일에 저장되어 후속 분석에 활용된다.

3. 실험 결과

소프트웨어는 Windows 10 환경에서 구동되었으며 외장 GPU 없이도 안정적으로 학습과 예측이 가능하였다. 검증 세트를 이용한 평가 결과는 전체 정확도 90.3%, 민감도 72.4%, 특이도 94.8%로 나타났다. 그림 2는 프로그램의 예측 결과 창을 보여준다.

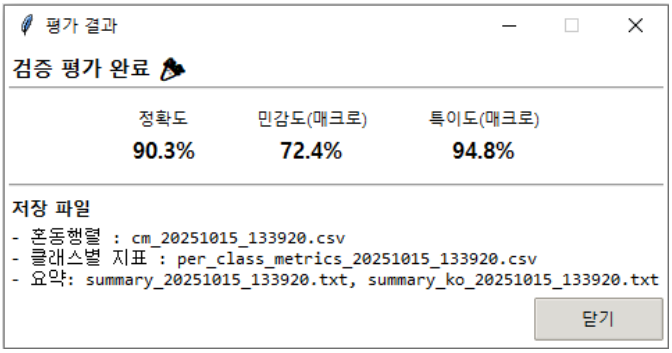


그림 2. 검증 결과를 표시하는 예측 결과 화면

학습된 모델을 이용해 검증 이미지를 분석한 결과 정확도 90.3%, 민감도 72.4%, 특이도 94.8%가 확인되었다. 결과 창에는 혼동행렬, 클래스별 지표, 요약 파일 경로 등이 함께 표시되어 사용자가 정량적 지표를 직관적으로 확인할 수 있다. 이러한 구성은 사용자가 결과의 정량적 지표를 직관적으로 확인할 수 있도록 돕는다.

혼동행렬을 분석한 결과 DR과 AMD 이미지에서 병변 영역이 작거나 중심부 명암 대비가 낮은 영상의 DR과 Normal 간의 분류 오류가 일부 발생하였지만 전체적인 분류 안정성과 데이터 불균형 보정 효과가 확인되었다. 본 시스템은 질환 검출 성능과 처리 효율성 면에서 안정적인 결과를 나타냈다.

4. 분석

MobileNetV2 기반의 경량 CNN 구조를 적용함으로써 고성능 GPU가 없는 환경에서도 실시간 학습 및 예측이 가능하였다. 클래스 가중치를 적용함으로써 데이터 불균형으로 인한 학습 편향을 효과적으로 완화하였다. 따라서 질환 검출 민감도가 향상되면서도 정확도는 90% 이상으로 유지되었다.

불확실성 임계값은 딥러닝 분류 모델에서 일반적으로 사용되는 확률 기준(0.5~0.7)을 참고하여 모델이 결과를 과도하게 확신하거나 경고하지 않도록 균형을 유지하도록 하였다. 이 기능은 사용자가 결과의 신뢰도를 정량적으로 파악할 수 있게 하여 예측 결과 해석의 투명성을 높였다.

5. 결론

본 연구에서는 안저 영상을 이용하여 망막 질환을 자동으로 분류하는 AI 기반 진단 소프트웨어를 설계하고 구현하였다. Tkinter 기반의 GUI 환경에서 학습, 예측, 결과 확인 과정을 통합하였고 MobileNetV2 기반 CNN 모델과 클래스 가중치 적용을 통해 데이터 불균형을 보정하였다.

이미지 검증 결과 정확도는 90.3%, 민감도 72.4%, 특이도 94.8%의 성능을 달성하였다. 본 소프트웨어는 경량 환경에서도 안정적으로 구동되며 비전문가도 쉽게 사용할 수 있는 구조를 갖추고 있다. 향후에는 데이터셋 확장과 모바일 환경에서의 실시간 분석 기능을 추가하여 임상 진단 보조 소프트웨어로 발전시킬 수 있을 것으로 기대된다.

6. 참고 문헌

[1] 강홍구, 양희규, 김문성, and 추현승, "데이터 효율적 이미지 분류를 통한 안질환 진단," *Journal of Internet Computing & Services,* vol. 25, no. 3, 2024.

[2] 김혜원, 장설봉, 김용수, and 정일홍, "망막질환진단을 위한 CNN 모델들의 성능비교," *한국지능시스템학회 논문지,* vol. 32, no. 1, pp. 51-60, 2022.

[3] 정영훈, 조경진, and 김대원, "CNN 기반 당뇨병성 망막병증 특징 추출 및 심각도 등급 분류," *전자공학회논문지,* vol. 56, no. 11, pp. 61-73, 2019.

Poster-219

경량 딥러닝 모델을 이용한 의료용 기기용 반도체 기판 결함 탐지 연구

홍석호[1] , 김경이[2*] , 김성권[3]

인제대학교 AI소프트웨어학부[1], 인제대학교 AI소프트웨어학부[2*], 인제대학교 산학협력단[3]

Research on Defect Detection in Semiconductor Substrates for Medical Devices Using Lightweight Deep Learning Models

Seok-ho Hong[1] , Kyoung-yee Kim[2*], Sung-Kwon Kim[3]

School of AI Software[1], AI Software[2*], Inje Industry Academic Cooperation Foundation[3], Inje University, Korea

[1]hsh00423@naver.com, [2*]kimky@inje.ac.kr, [3]openedge@inje.ac.kr

Abstract

The increasing demand for medical devices has heightened the importance of ensuring the quality and reliability of semiconductor substrates, which are core components of implantable equipment. This study aims to effectively detect substrate defects occurring during semiconductor manufacturing processes, thereby contributing to reducing defect rates in medical devices. To achieve this, AI-based deep learning technology was employed. Specifically, considering field application efficiency, the performance of basic CNN models and lightweight models such as MobileNetV2 and EfficientNet-B0 was compared and validated using the Carinthia dataset. Data imbalance was set as a key challenge, with F1-score used as the primary performance metric. Experimental results showed that EfficientNet-B0 achieved a validation accuracy of 99.35% and demonstrated the highest performance among the three models with an F1-score of 0.9569. Confusion matrix analysis revealed that EfficientNet-B0 minimized the false negative rate (False Negative, FN), demonstrating the level of reliability required for medical device applications. This shows that lightweight models can be sufficiently utilized for quality control of medical substrates even in imbalanced dataset environments.

1. 연구 배경

최근 의료 서비스의 발전과 함께 고령화 사회로의 전환은 의료용 기기의 수요를 급격히 증가시키는 주요 요인이다. 인체에 직접 적용되거나 높은 정밀도를 요구하는 의료 기기의 핵심 기능을 담당하는 반도체 기판은 그 신뢰성과 성능이 환자의 안전 및 기기 오작동 방지와 직결된다. 따라서 의료용 기기에 적용되는 반도체의 중요도가 증가함에 따라, 제조 공정에서의 품질 관리는 최우선 과제가 되고 있다.

반도체 제조 공정 중 발생하는 기판 결함은 최종 제품의 결함률을 높이는 주요 원인이다[1]. 기존의 육안 검사나 전통적인 이미지 처리 방식은 대량 생산 환경에서 정밀하고 신속한 결함 탐지에 근본적인 한계를 가진다. 인공지능(AI) 기반 딥러닝 이미지 인식 기술은 이러한 한계를 극복하고 빠르고 정밀한 결함 탐지를 가능하게 하는 핵심 해결책으로 부상하고 있다[2]. 본 연구는 이러한 AI 기술을 활용하여 의료용 기기 기판의 결함률 감소에 기여하는 기초 연구를 수행하고자 한다.

2. 연구 방법

본 연구는 실제 반도체 제조 환경과 유사한 Carinthia 데이터셋을 활용하였다[3]. 이 데이터셋은 웨이퍼에서 발생할 수 있는 불량과 정상 상태의 사진을 모으고 분류되어 있다. 그러나 실제 공정의 특성상 결함 샘플보다 정상 샘플이 압도적으로 많은 데이터 불균형 문제가 존재하며[4], 이는 모델 학습 시 소수 클래스인 결함 유형에 대한 탐지 성능 저하를 야기하는 주요 도전 과제이다.

현장 적용 시의 효율성과 신속한 추론 속도를 고려하여 경량 딥러닝 모델을 선정하였다. 비교 모델로는 CNN 기본형(Baseline), MobileNetV2[5], 그리고 EfficientNet-B0 세 가지를 사용하였다. 데이터는 이미지 크기 정규화 및 명암비 조정 등의 전처리 과정을 거쳤으며, 모델의 일반화 성능 향상 및 데이터양의 증가를 위해 회전, 이동, 반전 등의 데이터 증강 기법을 적용하였다.

모델 학습은 동일한 학습 파라미터(Learning Rate, Epochs 등) 환경에서 진행되었다. 학습 결과는 Epoch별 Loss와 성능 지표로 기록되었으며, 최종 성능은 이 파일을 통해 종합적으로 비교 분석되었다. 성능 평가를 위해 Accuracy와 함께 데이터 불균형 환경에서 모델의 실제 결함 탐지 능력을 정밀하게 측정하는 F1-score를 주요 지표로 사용하였다[6]. 또한, 데이터 불균형 대응 전략 적용 유무에 따른 성능 차이도 함께 분석하였다.

3. 연구 결과

세 가지 모델에 대한 학습 과정의 안정성은 손실(Loss) 그래프를 통해 분석되었다. 그림 1, 그림 2, 그림 3는 각각 CNN 기본형, MobileNetV2, EfficientNet-B0 모델의 학습 및 검증 손실(Loss) 추이를 보여준다. 모든 모델은 전반적으로 안정적인 손실 수렴 양상을 보였으나, 경량 모델인 MobileNetV2와 EfficientNet-B0는 CNN 기본형 대비 초기 학습 단계에서 손실이 빠르게 감소하며 학습 효율성측면에서 우위를 보였다. 특히 EfficientNet-B0는 학습 및 검증 손실이 가장 낮은 값으로 수렴하여 가장 우수한 학습 안정성을 확인하였다.

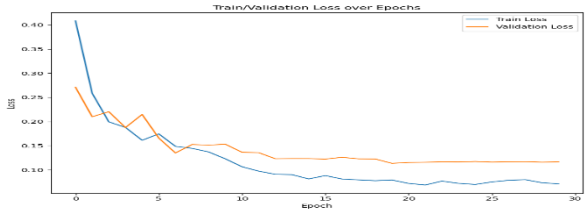


그림 1. CNN 기본형의 손실 그래프

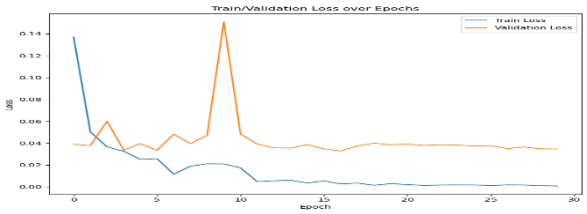


그림 2. MobileNetV2의 손실 그래프

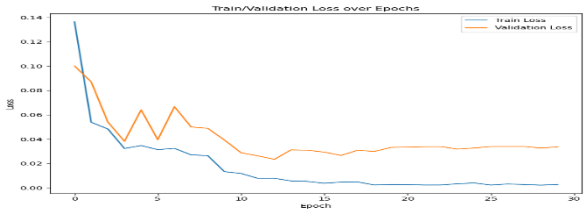


그림 3 . EfficientNet-B0의 손실 그래프

모델	Accuracy (%)	F1-score
CNN 기본형	97.06	0.5202
MobileNetV2	99.35	0.7996
EfficientNet-B0	99.35	0.9569

표 1 . 모델별 비교

표 1을 분석 결과, CNN 기본형은 97.06%의 높은 Accuracy를 보였음에도 불구하고 F1-score가 0.5202로 현저히 낮게 나타났다. 반면, MobileNetV2는 Accuracy 99.35%에 F1-score 0.7996을 기록하여 성능이 크게 향상되었으며, EfficientNet-B0는 동일한 Accuracy 99.35%에서 F1-score 0.9569를 달성하며 가장 우수한 성능을 보였다. F1-score를 주요 지표로 했을 때 경량 모델들이 우위를 보임에 따라, 고성능 컴퓨팅 자원이 제한된 제조 현장에서의 활용 가능성에 보여주었다.

각 모델의 상세한 탐지 능력은 혼동 행렬(Confusion Matrix) 분석을 통해 확인되었다. 의료용 기기의 신뢰성 확보에 가장 치명적인 오류는 결함 미탐지(False Negative, FN), 즉 결함이 있는 기판을 정상으로 판단하는 것이다.

그림 4, 그림 5, 그림 6는 각각 CNN 기본형, MobileNetV2, EfficientNet-B0 모델의 혼동 행렬을 보여준다.

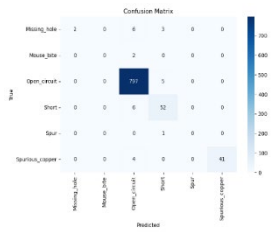


그림 4. CNN 기본형의 혼동 행렬

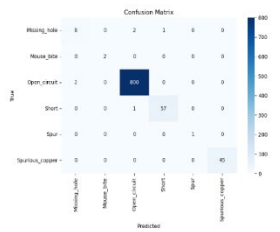


그림 5. MobileNetV2의 혼동 행렬



그림 6. EfficientNet-B0의 혼동 행렬

혼동 행렬 분석 결과, EfficientNet-B0는 세 모델 중 가장 낮은 FN 값을 기록하였다. 이는 EfficientNet-B0가 결함이 있는 기판을 놓치지 않고 탐지하는 재현율(Recall) 측면에서 가장 신뢰할 만한 성능을 제공했음을 의미한다. 이 결과는 의료용 기판의 품질 관리가 단지 정확도(Accuracy)뿐만 아니라, 미탐지 위험 최소화라는 관점에서 접근해야 함을 시사한다. 따라서 EfficientNet-B0 모델이 의료용 기기에 적용되는 반도체 기판의 AI 검사 솔루션으로서 적합한 모델임을 최종적으로 입증하였다.

4. 결론

본 연구는 의료용 기판 결함 탐지를 위해 경량 딥러닝 모델의 적용을 검증하고, 데이터 불균형 환경에서의 모델 신뢰성 확보에 집중하였다. 특히 의료 기기 품질 관리에 치명적인 미탐지 오류(False Negative, FN) 최소화를 핵심 목표로 설정하였다.

실험 결과, EfficientNet-B0 모델이 F1-score 0.9569를 달성하며 CNN 기본형 및 MobileNetV2 대비 가장 우수한 성능을 보였다. EfficientNet-B0는 혼동 행렬 분석에서 가장 낮은 FN 값을 기록함으로써, 고성능 컴퓨팅 자원이 제한된 제조 현장 환경에서 의료용 기기 품질 기준에 부합하는 신뢰성과 실효성을 갖출 가능성을 보여주었다.

5. Acknowledgements

본 과제(결과물)는 정부(교육부)의 재원으로 한국 산업 기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (P0028090, 첨단산업특성화대학 재정지원사업)

6. 참고 문헌

[1] U. Batool, S. P. Bates, et al., “A Systematic Review of Deep Learning for Silicon Wafer Defect Recognition,” IEEE Access, vol. 9, pp. 114320–114343, 2021.

[2] J. Ma, L. Zhang, and Y. Zhou, “Review of Wafer Surface Defect Detection Methods,” Electronics, vol. 12, no. 4, p. 857, 2023.

[3] Kofler, C., Strauß, S., Zernig, A., Lazaro Garcia, E., Boxleitner, M., Mayr, B., Dicillia-Kovatsch, I., & Dohr, C. A. (2024). Carinthia dataset [Data set]. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.10715190

[4] J. M. Johnson and T. M. Khoshgoftaar, “Survey on Deep Learning with Class Imbalance,” Journal of Big Data, vol. 6, no. 1, pp. 1–54, 2019.

[5] M. Sandler, A. Howard, M. Zhu, A. Zhmoginov, and L. Chen, “MobileNetV2: Inverted Residuals and Linear Bottlenecks,” in *Proc. IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit.* (CVPR), pp. 4510–4520, 2018.

[6] A. Tharwat, “Classification Assessment Methods,” *Applied Computing and Informatics*, vol. 17, no. 1, pp. 168–192, 2020.

Poster-220

대규모 공개 수면다원검사(PSG) 데이터셋을 활용한 파운데이션 모델 개발

김영돈, 신항식*
울산대학교 의과대학 서울아산병원 정보통계의학교실

Development of a Foundation Model for Polysomnography Using Large-Scale Public Datasets

Yeongdon Kim, Hangsik Shin*
Department of Medical Informatics and Statistics, Asan Medical Center, Brain Korea 21 Project, University of Ulsan College of Medicine, Seoul, Korea
*hangsik.shin@amc.seoul.kr

Abstract

We present PSG-FM, a self-supervised foundation model that learns unified representations from 19,234 polysomnography (PSG) recordings across eight public cohorts. The model addresses limitations of conventional supervised approaches that require extensive labeling and dataset-specific retraining. Built on a 12-layer Transformer encoder (151M parameters) and trained with combined Contrastive and Causal losses, PSG-FM captures physiologically meaningful relationships among multimodal biosignals without sleep stage labels. In pilot training with 5,000 segments, PSG-FM achieved a Silhouette Score of 0.436, revealing nine latent clusters that represent stable cross-signal patterns. These findings suggest that PSG-FM can serve as a reusable and generalizable foundation for downstream PSG-based analyses such as sleep staging and event detection.

1. 연구 배경

최근 인공지능 기반 수면 연구는 수면 단계 분류, 미세각성(arousal), 무호흡(apnea) 등 다양한 생리적 사건 검출로 확장되고 있다. 그러나 대부분의 모델은 지도학습(Supervised Learning, SL)에 기반해 대규모 라벨링이 필요하고, 데이터셋마다 측정 환경과 신호 구성이 달라 재학습과 전처리가 반복된다 [4]. 수면다원검사(Polysomnography, PSG)는 뇌파(EEG), 안구운동(EOG), 근전도(EMG), 심전도(ECG) 등 다채널 생리신호를 포함해 기관별 구성 차이에 따른 신호 정렬·채널 매핑·정규화 과정이 복잡하다 [1,5]. 본 연구는 이러한 한계를 극복하기 위해 자기지도학습(Self-Supervised Learning, SSL)을 적용해 라벨 없이 멀티모달 생체신호의 공통 표현을 학습하는 PSG 파운데이션 모델(PSG-FM)을 제안한다 [5,6].

2. 연구 방법

2.1. 데이터 구성 및 전처리

본 연구에서는 파운데이션 모델의 일반화 성능을 확보하기 위해 총 8개 공개 수면 코호트(ABC, Apple, CFS, MESA, MrOS, SHHS, SOF, WSC)를 통합하였다 [2]. 각 데이터셋은 다양한 수면 질환 및 연령대를 포함하고 있으며, 총 19,234개의 수면다원검사 데이터를 포함한다. 모든 신호는 128 Hz로 리샘플링하였고, 입력 세그먼트는 5초(640 samples) 단위로 분할하였다. 입력 신호는 총 23채널로 구성되며, 뇌파 및 안전도 등 뇌활동 신호(BAS, Brain Activity Signals) 10채널, 심전도 2채널, 근전도 4채널, 그리고 호흡 관련 신호 7채널로 이루어져 있다. 각 데이터셋 간 EEG, ECG, EMG의 측정 방식(단극 또는 양극, 센서 구성 등)은 상이하였으며, 이를 공통 스키마에 맞추어 채널명을 매핑하고 신호를 정렬하여 통합하였다. 모든 입력 세그먼트는 채널별 정규화를 거쳐 23×640 형태의 입력 텐서로 변환하였다.

2.2. 모델 구조

PSG-FM은 Transformer Encoder 기반 구조로 설계되었다 [5]. 입력 신호 x(23×640)는 Linear Projection을 통해 1024차원으로 변환되고, 시간축 위치 정보를 반영하기 위해 Positional Encoding이 추가된다. Transformer Encoder는 12개의 블록으로 구성되며, 각 블록은 16개의 어텐션 헤드를 사용하는 Multi-Head Self-Attention과 피드포워드 네트워크(dim_feedforward = 4096)로 이루어져 있다. 전체 모델의 파라미터 수는 약 1억 5천만 개이다. Encoder 출력은 Global Average Pooling을 통해 시간 차원을 축소한 후 3층 Multi-Layer Perceptron (MLP, 1024→1024→512)을 통과하여 최종적으로 512차원의 L2-normalized 임베딩 벡터를 생성한다.

2.3. 학습 전략(Self-Supervised Learning)

PSG-FM은 Contrastive Loss (NT-Xent)와 Causal Loss (Neural Granger Causality, NGC)를 결합한 자기지도학습 방식을 사용하였다 [4,6]. Contrastive Loss는 증강된 입력 간 유사도를 학습하고, Causal Loss는 생체신호 간 시간적·인과적 종속성을 학습한다 [3]. 최종 손실 함수는 L_total = αL_contrastive + βL_causal (α = β = 0.5)로 정의하였다. 모델은 4-GPU Distributed Data Parallel (DDP) 환경에서 bfloat16 Mixed Precision (MP) 방식으로 학습되었으며, 학습된 표현은 512차원 임베딩으로 저장된다.

2.4. 성능 평가 기준

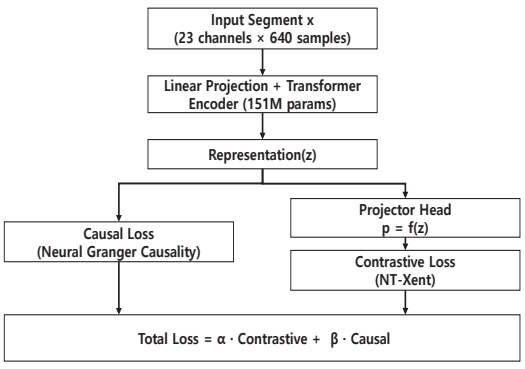
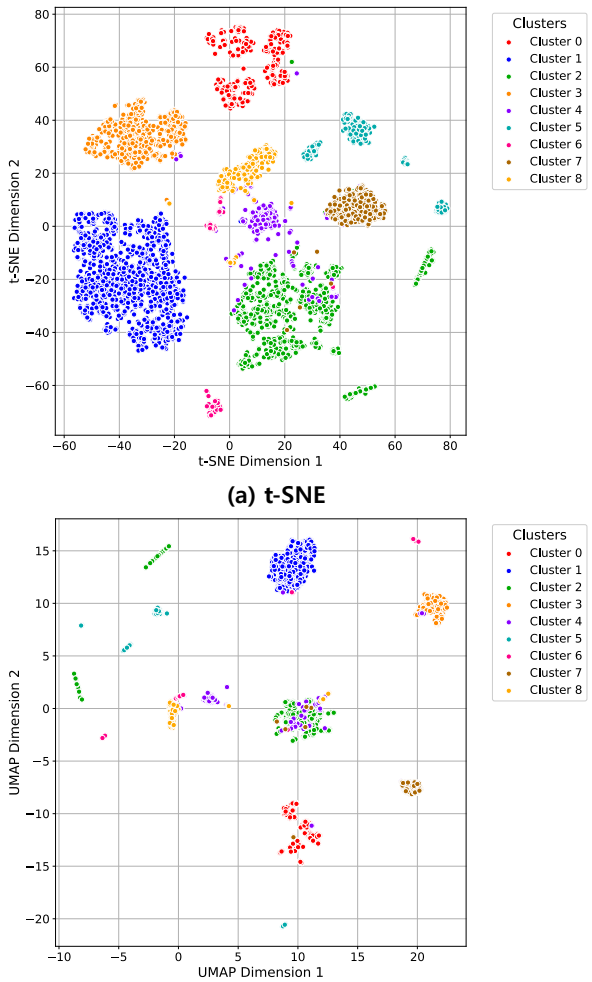


그림 1. PSG-FM 모델 구조

모델의 표현 학습 성능은 Silhouette Score (SS)와 차원 축소 기법을 활용한 시각적 군집 구조 평가를 통해 분석하였다. SS는 각 샘플이 속한 군집 내 응집도(cohesion)와 군집 간 분리도(separation)를 반영하며, 값이 1에 가까울수록 군집이 잘 분리됨을 의미한다 [7]. 고차원 임베딩 공간(512차원)의 구조를 직관적으로 파악하기 위해 t-distributed Stochastic Neighbor Embedding (t-SNE)과 Uniform Manifold Approximation and Projection (UMAP)을 사용하여 2차원 공간으로 투영하였다. t-SNE은 국소적 이웃 관계를, UMAP은 전역적 구조를 상대적으로 잘 보존하므로, 두 기법을 함께 활용해 모델이 학습한 표현 공간의 응집도와 분리도를 정성적·정량적으로 검증하였다.

3. 연구 결과

총 5,000개 세그먼트를 활용한 파일럿 학습 결과, PSG-FM이 생성한 512차원 임베딩의 군집 품질은 SS 0.436으로 평가되었다. 일반적으로 SS는 0.25~0.5를 중간 수준의 군집 구조로, 0.5 이상을 뚜렷한 군집 구조로 해석한다 [7,8]. 다기관 생체신호처럼 변동성이 큰 고차원 데이터의 특성을 고려할 때, 본 연구의 0.436은 비교적 일관된 군집 형성을 보여주는 값으로 해석된다. 이는 PSG-FM이 데이터 간 신호 변동과 잡음을 일정 부분 완화하며 안정적인 표현 공간을 학습했음을 시사한다. 그림 2는 학습된 512차원 임베딩을 t-SNE과 UMAP으로 2차원 공간에 투영한 결과이다. 각 점은 5초 길이의 입력 세그먼트를 나타내며, 색상은 K-means (k=9)으로 구분된 군집을 의미한다. 여기서 k 값은 SS 분석에서의 국소 최대값을 기준으로 선정하였다. 두 시각화 모두에서 유사한 군집 구조가 확인되었으며, 각 군집은 명확히 분리되기보다는 인접 군집과의 경계가 완만한 형태를 보였다. 이는 PSG-FM이 Dataset (cohort) 간 또는 채널 구성의 차이에 민감하게 반응하기보다, 다양한 생체신호 전반의 공통적 패턴을 포착하는 방향으로 표현을 학습했음을 시사한다. 본 파일럿 단계에서는 수면 단계 라벨을 이용한 직접적 검증을 수행하지 않았기 때문에, 군집 간 차이가 실제 생리적 상태(예: 수면 단계, 각성, 호흡 변화 등)에 대응하는지는 추가 분석이 필요하다. 향후 라벨 기반 검증을 통해 학습된 잠재 표현의 생리학적 의미를 평가할 예정이다.



(a) t-SNE

(b) UMAP

그림 2. 임베딩 시각화. (a) t-SNE, (b) UMAP

4. 결론

본 연구에서는 대규모 멀티모달 PSG 데이터를 활용하여 SSL 기반의 파운데이션 모델 PSG-FM을 개발하였다. PSG-FM은 라벨링 없이 생체신호의 공통 표현을 학습하도록 설계되었으며, 파일럿 학습 결과를 통해 다기관 데이터의 이질성을 완화하고 의미 있는 잠재 표현을 확보하였다. 이러한 접근은 기존 지도학습 기반 수면 분석의 한계였던 라벨링 부담과 복잡한 전처리 문제를 완화할 수 있는 가능성을 제시한다. 향후 전체 19,234건의 PSG 데이터를 대상으로 학습을 확장하고, 수면 단계 분류 및 생리적 사건 검출 등 다양한 다운스트림 과제에서 전이 학습 성능을 검증할 예정이다. 또한 실제 임상 환경에서의 적용 가능성을 평가하여 수면 연구와 진단 자동화를 위한 기반 기술로 발전시킬 계획이다.

5. Acknowledgements

본 연구는 2023년 식품의약품안전처 지원을 받아 수행하였음 (No. RS-2023-00215716).

6.참고 문헌

[1] R. B. Berry, et al., “AASM scoring manual updates for 2017 (version 2.4).” *Journal of Clinical Sleep Medicine,* Vol. 13, No. 5, p. 665-666, 2017.

[2] G. Q. Zhang, et al., "The National Sleep Research Resource: towards a sleep data commons." *Journal of the American Medical Informatics Association,* Vol. 25, No. 10, p.1351-1358, 2018.

[3] A. H. Tank, et al., “Neural Granger causality,” *Advances in Neural Information Processing Systems*, vol. 34, 2021.

[4] H. Zhang, et al., “Self-supervised contrastive learning for medical time series: a systematic review,” *Frontiers in Artificial Intelligence*, 2023. *(PMC indexed)*

[5] Y. Zhang, et al., “A foundational transformer leveraging full-night, multichannel sleep study data accurately classifies sleep stages,” *Sleep*, vol. 48, no. 8, zsaf061, 2025.

[6] R. Thapa, et al., “SleepFM: multi-modal representation learning for sleep across brain activity, ECG, and respiratory signals,” *arXiv preprint* arXiv:2405.17766, 2024.

[7] P. J. Rousseeuw, “Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis,” *Journal of Computational and Applied Mathematics*, vol. 20, pp. 53–65, 1987.

[8] L. Kaufman and P. J. Rousseeuw, *Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis*, Wiley-Interscience, 2009.

Poster-221

Cox를 넘어: 비선형 임상 변수 해석에서 드러난 인공지능 기반 생존분석의 가능성

한유진[1,2], 신항식[1,2*]
[1]울산대학교 의과학과
[2]울산대학교 의과대학 서울아산병원 정보통계의학교실

Beyond the Cox Model: Potential of Artificial Intelligence-Based Survival Analysis for Nonlinear Clinical Variable Interpretation

Yujin Han[1,2], Hangsik Shin[1,2*]
[1]Department of Medical Science, Graduate School, University of Ulsan, Seoul, Korea
[2]Department of Medical Informatics and Statistics, Asan Medical Center, Brain Korea 21 Project, University of Ulsan College of Medicine, Seoul, Korea
[*]hangsik.shin@amc.seoul.kr

Abstract

Survival prediction requires methods that capture complex clinical characteristics. Using liver transplantation data, we compared 5-year survival prediction by Cox, Random Survival Forest, and DeepSurv. Concordance indices were 0.35, 0.63, and 0.66, respectively, showing superior performance of artificial intelligence models. Model for End-Stage Liver Disease score and age showed nonlinear risk increases, less captured by Cox. Random Survival Forest and DeepSurv reflected these patterns more effectively and, with explainable artificial intelligence, offered complementary support for clinical decision-making.

1. 연구 배경

생존 예측은 환자 관리와 치료 전략 수립에서 중요한 과제이며, 다양한 임상 변수의 복합 특성을 반영할 수 있는 방법이 요구된다 [1]. 전통적으로 Cox proportional hazards model [2]은 임상 연구에서 가장 널리 사용되어 왔으며, 위험비(Hazard Ratio, HR)를 통해 변수 효과를 정량적으로 해석할 수 있다는 점에서 표준 접근으로 자리잡아 왔다. 최근 생존분석 분야에서는 머신러닝과 딥러닝 방법이 활발히 도입되고 있다. 특히 신경망을 활용한 생존모형은 Cox 모형의 선형 가정을 넘어, 비선형 임상 변수의 효과까지 포착할 수 있는 잠재력을 지닌 것으로 보고되고 있다 [1,3]. 이러한 흐름은 전통적 Cox 모형과 인공지능 기반 모델을 비교하는 연구의 필요성을 뒷받침한다.

본 연구에서는 Cox, Random Survival Forest (RSF) [4], DeepSurv [5] 세 가지 모델의 5년 생존율 예측 성능과 해석을 비교하고, 비선형 임상 변수 특성에 따른 모델 선택의 필요성을 검토하였다.

2. 연구 방법

2.1. 생존분석 모델

Cox는 공변량과 위험도 간의 관계를 선형 결합으로 추정하며, 각 변수의 회귀계수(β)는 HR(=exp(β))로 표현된다 [2]. RSF는 Random Forest를 생존분석에 확장한 모델로, 분할 기준으로는 그룹 간 생존곡선의 차이를 평가하는 log-rank 통계량을 사용한다 [4]. DeepSurv는 Cox 모형을 신경망 구조로 일반화하여 손실함수로 최적화한다 [5].

2.2. 분석 방법

생존 기간은 이식일부터 사망 또는 관찰 종료일(2024.10.30)까지로 정의하고, Kaplan–Meier 곡선으로 5년 생존율을 추정하였다. 5년 생존 예측을 위한 모델링에는 인구학적 특성, 기저질환, 생활습관 및 임상 변수를 사용하였다. 범주형 변수는 one-hot encoding, 연속형 변수는 z-score 표준화를 적용하였다. 데이터는 7:3으로 분할하여 훈련과 테스트에 사용하였고 각 모델은 Python 라이브러리(lifelines, scikit-survival, pycox)로 구현하였다. DeepSurv는 early stopping(patience=20)을 적용하였으며, 모델 성능은 test 세트의 concordance index (C-index)로 평가하였다. Cox는 회귀계수로, RSF와 DeepSurv는 SHAP (SHapley Additive exPlanations) 기반 변수 중요도로 해석하였다. 모델 간 차이를 보인 변수에 대해서는 PDP (Partial Dependence Plot)와 ALE (Accumulated Local Effects)를 수행하였다. PDP는 개별 변수가 예측 결과에 미치는 평균적 효과를, ALE는 변수 변화에 따른 국소적 효과를 추정한다.

2.3. 분석 데이터셋

본 연구에서는 Cox, RSF, DeepSurv 모델 비교를 위해 서울아산병원(서울, 대한민국)에서 1992–2019년 간이식을 받은 18세 이상 대한민국 국적 수혜자의 후향적 임상 데이터를 활용하였다 (IRB No. 2024-1206). 불명확한 응답 및 결측값을 제외한 최종 분석 대상은 4,607명이었다. 대상자의 평균 연령은 52.8세였으며, 남성이 73.5%로 다수를 차지하였다. MELD (Model for End-Stage Liver Disease) 점수는 혈청 크레아티닌, 빌리루빈, 프로트롬빈시간을 기반으로 산출되는 지표로 간 기능 저하와 단기 사망 위험을 반영하며, 본 연구 대상의 평균은 19.9±7.4로 주로 중등도 수준에 해당하였다 [6]. 간이식 유형은 생체간이식(living donor liver transplantation, LDLT)이 85.9%를 차지하였다.

연속형 임상 변수인 MELD 점수와 연령에 대해 스플라인 항을 포함한 Generalized Additive Model (GAM)을 적용한 결과, 두 변수 모두 곡선 형태를 보였으며, estimated degrees of freedom (EDF)가 각각 11.3과 11.4로 1을 초과하여 5년 사건 발생과 비선형 관계임을

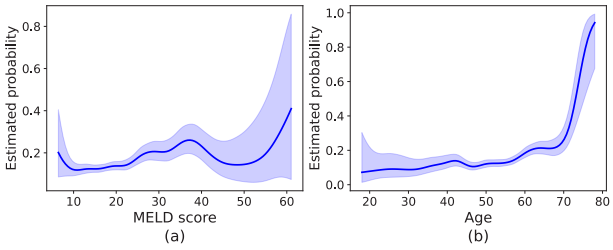


그림 1. 연속형 임상 변수의 비선형 특징. (a) MELD 점수, (b) 연령

확인하였다(그림 1).

3. 연구 결과

간이식 환자의 전체 5년 생존율은 85.4% (95% CI 84.4–86.4)였다. Cox 모형의 C-index는 0.35로 낮았으나, RSF(0.63)와 DeepSurv(0.66)는 상대적으로 높았다(표 2).

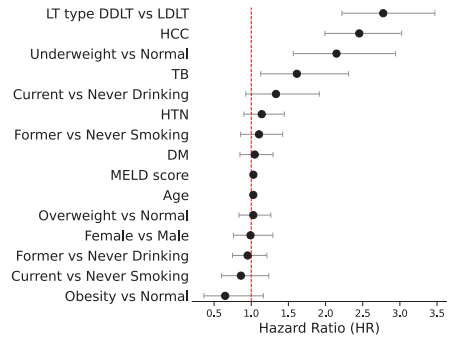


그림 2. Cox 모형의 변수별 Hazard Ratio forest plot

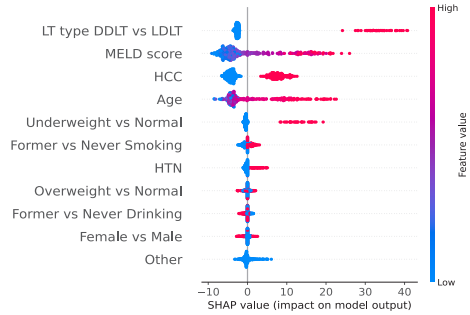


그림 3. Random Survival Forest의 SHAP 기반 변수 중요도 상위 10개

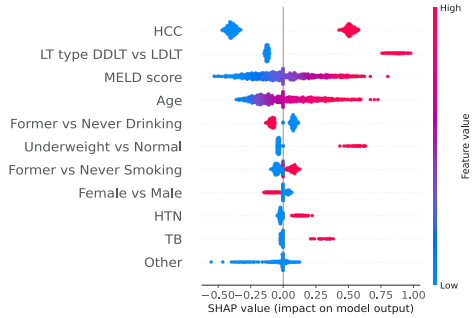


그림 4. DeepSurv의 SHAP 기반 변수 중요도 상위 10개

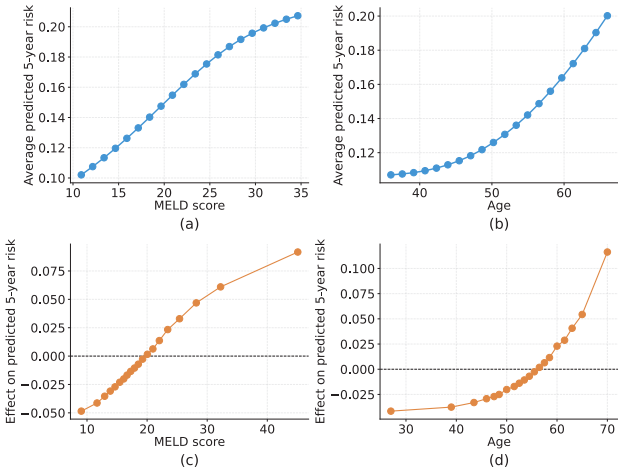


그림 5. DeepSurv의 PDP 및 ALE 분석. (a) MELD 점수의 PDP, (b) 연령의 PDP, (c) MELD 점수의 ALE, (d) 연령의 ALE

표 2. Cox, Random Survival Forest, DeepSurv 모델의 5년 생존율 예측 성능

Model	Test C-index
Cox proportional hazards model	0.35
Random Survival Forest	0.63
DeepSurv	0.66

그림 2는 Cox 모형의 HR을 forest plot으로 제시한 것이다. 뇌사자간이식(Deceased Donor LT, DDLT), 간세포암(HCC), 저체중, 결핵(tuberculosis, TB)에 대해 HR이 1.5 이상으로 생존에 큰 영향을 미치는 변수로 해석되었다.

그림 3과 4는 각각 RSF와 DeepSurv의 SHAP 분석 결과로, 두 모델 모두 HCC, MELD 점수, 이식 유형, 연령이 주요 변수였다. 세 모델 공통적으로 DDLT, 높은 MELD 점수, HCC, 고령, 저체중은 사망 위험을 증가시키는 요인으로 나타났다. RSF와 DeepSurv의 상위 변수는 유사했으나, Cox와는 일부 차이가 있었고, 특히 연령·MELD 점수는 RSF와 DeepSurv에서 중요도가 컸지만 Cox에서는 HR이 1에 가까워 사망 위험 증가와의 관련성이 미미하였다. PDP와 ALE 분석에서 MELD 점수는 20 전후에서 위험이 증가했고, 연령은 50대 중후반부터 비선형적으로 위험이 급격히 상승하는 패턴이 확인되었다(그림 5).

4. 결론

본 연구에서는 Cox, RSF, DeepSurv 세 모델을 비교하여 간이식 환자의 5년 생존율을 예측하였다. Cox 모형은 낮은 C-index를 보였고, MELD 점수와 연령 중요도가 두 모델과 달랐다. 이는 특정 구간에서 위험이 급격히 증가하는 비선형 특성에 기인한 것으로 해석된다. RSF와 DeepSurv는 SHAP, ALE와 같은 설명 가능한 인공지능 기법으로 비선형 임상 변수의 효과와 변화 패턴을 시각화해 임상적 의사결정에 보완적 근거를 제공할 수 있다. 따라서 예후 예측에서 Cox와 함께 인공지능 모델을 고려해야 한다.

5. Acknowledgements

본 연구는 2023년 식품의약품안전처 지원을 받아 수행하였음 (No. RS-2023-00215716).

6. 참고 문헌

[1] G. Kantidakis, A. D. Hazewinkel, and M. Fiocco, “Neural networks for survival prediction in medicine using prognostic factors: A review and critical appraisal”, *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, Vol. 2022, No. 1, p. 1176060, 2022.

[2] D. R. Cox, “Regression models and life-tables”, *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, Vol. 34, No. 2, pp. 187–202, 1972.

[3] S. Wiegrebe, P. Kopper, R. Sonabend, B. Bischl, and A. Bender, “Deep learning for survival analysis: a review”, *Artificial Intelligence Review*, Vol. 57, No. 3, p. 65, 2024.

[4] H. Ishwaran, U. B. Kogalur, E. H. Blackstone, and M. S. Lauer, “Random survival forests”, *Annals of Applied Statistics*, Vol. 2, No. 3, pp. 841–860, 2008.

[5] J. L. Katzman, U. Shaham, A. Cloninger, J. Bates, T. Jiang, and Y. Kluger, “DeepSurv: personalized treatment recommender system using a Cox proportional hazards deep neural network”, *BMC Medical Research Methodology*, Vol. 18, No. 1, p. 24, 2018.

[6] D. J. Joo, “Current Status of Deceased Donor Liver Transplantation for Alcoholic Liver Disease in Korea in MELD Era”, *The Korean Journal of Gastroenterology*, Vol. 77, No. 1, pp. 4–11, 2021.

Poster-222

ResNet 기반의 심음 및 맥파 신호 동시 분석을 통한 심장판막질환 예측 모델 개발

김지현[1], 김민정[2], 이상원[1,4], 정지우[1,4], 김인철[2], 조재형[3], 웨이춴[1,4]

계명대학교 공과대학 의용공학과[1]

계명대학교 의과대학 의학과[2]

계명대학교 동산의료원 연구처[3]

주식회사 클레어오디언스[4]

Development of a ResNet-based Prediction Model for Valvular Heart Disease using Simultaneous Analysis of PCG and PPG Signals

J. H. Kim[1], M. J. Kim[2], S. W. Lee[1,4], J. W. Jung[1,4], I. C. Kim[2], J. H. Cho[3], Q. Wei[1]

Department of Biomedical Engineering, College of Engineering, Keimyung University[1]

Department of Medicine, College of Medicine, Keimyung University[2]

Department of Research, Keimyung University Dongsan Medical Center, Daegu, South Korea[3]

Clairaudience co., Ltd.[4]

weiqun@kmu.ac.kr

Abstract

In this paper, we present a dual-branch model based on ResNet for diagnosing Valvular Heart Disease (VHD). This model identifies heart sound features by examining the correlation between Phonocardiogram (PCG) signals, represented as Mel-Spectrograms, and Photoplethysmogram (PPG) signals, represented as time-series graphs. This approach addresses the challenges associated with accessibility and subjectivity in auscultation for VHD diagnosis. The model was trained using data from 102 patients and achieved a strong F1-score of 0.7826, along with an area under the receiver operating characteristic curve (AUROC) of 0.8712 on the test set. A significant finding was the correlation between the algorithm's performance and the patients' Left Ventricular Ejection Fraction (LVEF). Notably, higher accuracy was observed in patients with Heart Failure with Reduced Ejection Fraction (HFrEF). These results suggest that the proposed algorithm is a clinically relevant tool for detecting severe hemodynamic changes, indicating its potential as a foundation for precise early diagnosis and patient risk stratification systems for VHD.

1. 연구 배경

심혈관 질환(Cardiovascular Disease, CVD)은 전 세계적으로 주요 사망 원인 중 가장 높은 비중을 차지하며, 그중 심장 판막 질환(Valvular Heart Disease, VHD)은 판막의 구조적 이상이 곧바로 심장의 혈역학적 기능 저하로 이어진다는 점에서 임상적 중요성이 크다. VHD는 초기에는 뚜렷한 증상이 없어 진단이 지연되는 경우가 많으며, 적절한 시기에 치료받지 못하면 심부전, 뇌졸중 등 치명적인 합병증으로 이어질 수 있다.

전통적인 진단 방식인 청진은 의사의 숙련도와 주관적 판단에 따라 진단 정확도가 크게 달라지는 문제를 가진다. 이는 VHD의 조기 발견을 저해하고 의료 자원의 비효율적 배분을 초래하므로, 단발성 검사로는 포착하기 어려운 병리학적 변화를 추적하고 질환 악화 이전 조기 개입할 수 있는, 접근성이 높고 지속적인 모니터링 시스템이 요구된다.

이에 본 연구에서는 멀티모달 스마트 청진 장치를 통해 수집된 심장의 기계적 운동과 판막 활동을 반영하는 심음도(Phonocardiogram, PCG)와 심박출에 따른 말초 혈관 변화를 나타내는 맥파(Photoplethysmography, PPG) 신호를 활용한 심장 판막 이상징후 판별 알고리즘을 제안한다.

PCG 신호는 판막의 개폐 및 혈액의 와류로 인해 발생하는 소리를 통해 판막의 협착, 폐쇄 부전과 같은 구조적 병변 상태를 제공하며, PPG 신호는 심장 박동에 따른 말초 혈관의 용적 변화를 측정하므로, 심장의 펌프 기능과 리듬 상태를 나타내는 혈역학적 정보를 담고 있다. 두 생체신호를 결합함으로써, 판막 질환, 부정맥과 같은 비정상 패턴 진단의 신뢰도를 향상시킬 수 있다.

이에 본 논문에서 ResNet 아키텍처에 기반한 합성곱 신경망(CNN) 모델을 이용하여 PCG 및 PPG 신호 그래프의 특징을 이미지 형태로 학습하고, 이를 통해 CVD의 정상군과 질환군을 자동으로 분류하는 알고리즘을 개발하여, 의학적으로 비정상으로 판단하는 근거가 VHD의 병태생리학적 특징과 연결되는 방안을 고찰하고자 한다.

2.연구 방법

2.1 연구 대상 및 데이터 수집

본 연구는 계명대학교 동산병원 기관생명윤리위원회의 승인(IRB 승인번호: 2025-07-068) 하에 진행되었으며, 연구 목적에 대한 충분한 설명을 제공받고 자발적으로 참여에 동의한 심혈관 외래 환자 102명을 대상으로 하였다.

데이터 수집에는 PCG와 PPG 신호의 동시 측정이 가능한 멀티모달 스마트 청진 장치(MUST, Clairaudience Co., Ltd. Korea)를 이용하였다. 데이터의 일관성과 재현성을 확보하기 위해, 선행 연구를 통해 판막 질환과 관련된 다양한 음향학적 특징이 가장 종합적으로 나타나는 단일 최적 청진 위치를 선정하였으며, 모든 피험자로부터 동일한 위치에서 신호를 측정하였다.

2.2 모델 학습

본 연구의 모델은 PCG 신호의 시간-주파수 특성을

시각화한 Mel-Spectrogram 이미지와 PCG와 PPG 신호의 시간적 관계를 나타내는 Time-Series Graph 이미지, 두 가지 형태의 데이터를 입력으로 사용한다.

심장 판막 이상징후 판별 알고리즘은 Mel-spectrogram의 시간-주파수적 특징과 Time-Series Graph의 시간적 특징을 동시에 학습하기 위해 설계된 이중 분기(dual-branch) 딥러닝 모델에 기반한다. 각 분기는 잔차 연결(Residual Connection)을 통해 심층 CNN에서 발생하는 기울기 소실 문제를 완화하여 깊이 증가에 따른 학습 안정적인 학습을 가능하게 하는 ResNet 아키텍처를 기반으로 하였다. 특히, 복합적인 구조를 가진 Mel-spectrogram의 시간-주파수적 특징 포착을 위해 비교적 깊은 ResNet-34으로 사용하였고, 상대적으로 표현 복잡도가 낮은 1차원적 시간 정보를 담은 Time-Series Graph에 대해서는 과적합을 방지하고 학습 효율을 높이기 위해 더 얕은 ResNet-18을 적용하였다. 두 분기는 표준 ResNet의 Stem 구조에 따라 7x7 합성곱 레이어와 MaxPooling을 통해 초기 특징 맵을 생성한다. 이후, ResNet-34는 스테이지별로 [3, 4, 6, 3]개의, ResNet-18은 [2, 2, 2, 2]개의 Basic Block으로 구성된 스테이지를 거치며 계층적인 특징을 추출한다.

본 연구에서 수집된 전체 데이터는 학습용(Training Set, 70%), 검증용(Validation Set, 15%), 테스트용(Test Set, 15%)으로 분할하였다. TrainingSet에는 정상군 22명과 환자군 25명을 포함하였고, Validation Set에는 정상군 9명과 환자군 11명으로 구성하였으며, 데이터 피딩은 10회 반복하여 수행하였다.

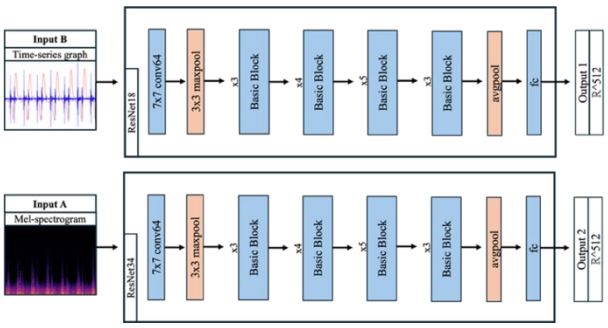


그림 2. ResNet 기반 PCG 및 PPG 신호 학습모델 구조

3. 모델 학습 결과

표 1는 제안된 모델의 학습 결과표이며, 전체 데이터에 대한 정확도(Accuracy), 정밀도(Precision)와 재현율(Recall)의 조화 평균으로 모델의 종합적인 성능을 나타내는 F1-Score는 각각 0.7826으로 측정되었고, 모델의 판별 능력(AUROC)은 0.8712, 항목 분리력(AUPRC)은 0.8835로 안정적인 수치를 보였다. 또한, 그림 2는 제안된 모델의 혼동행렬(Confusion Matrix)이며, 이 경우 전체 가중치(Macro Avg)는 0.7841로, 이는 소규모 데이터 환경이 갖는 높은 변동성에서도 균형 잡힌 분류가 가능한 것이 확인된다.

테스트 세트로 활용된 환자군 데이터들의 정규화 값을 내림차순으로 정리하여 심장 기능의 핵심 지표인 좌심실 박출률(LVEF) 간의 연관성을 분석하였다. 정규화 값을 기준으로 테스트 세트 데이터를 상위그룹과 하위 그룹으로 이분화하여 각 그룹의 LVEF 평균을 비교하여, 모델의 판별 성능이 LVEF 사이에 유의미한 연관성을 확인하였다. 상위 데이터와 하위 데이터의 LVEF 평균은 각각 40.3%, 58.8%로 상위 데이터의 평균치가 더 낮은 결과를 보였다. 이는 전체 환자군의 평균인 LVEF 평균치(50.2%)와 비교하여도 낮은 수치이며, 환자의 LVEF가 낮을수록 모델의 양성 예측도가 높아질 수 있음을 의미한다. 이러한 특성은 심부전 환자군 내 비교 분석을 통해서도 일관되게 확인되었으며, 특히 박출률 감소 심부전(HFrEF, LVEF ≤ 40%) 환자군에서 모델의 양성 예측도가 더 높게 나타났다.

표 1. 모델 학습 결과표

Class	정밀도(Precision)	재현율(Recall)	F1-score	Score	항목 수(Support)
Normal	0.7500	0.8182	0.7826	-	11
Abnormal	0.8182	0.7500	0.7826	-	12
macro avg	0.7856	0.7841	0.7826	-	23
AUROC	-	-	-	0.8712	-
AUPRC	-	-	-	0.8835	-
Accuracy	-	-	-	0.7826	23

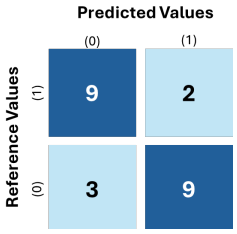


그림 1. Confusion Matrix

4. 토론(Discussion)

본 연구는 ResNet을 기반으로 PCG 및 PPG 신호를 분석하여 VHD를 선별하는 모델을 개발하고, 그 성능을 실제 임상 데이터의 맥락에서 심도 있게 분석하였다는 점에서 의의가 있다. VHD 신호는 정상 신호와 음향학적 유사성이 높아 분류 난이도가 높음에도 불구하고, 제안된 모델은 객관적인 조기 진단 도구로서의 가능성을 입증하였다.

연구의 핵심적인 발견은 알고리즘의 판별 능력이 환자의 근본적인 심장 기능 상태, 즉 좌심실 박출률(LVEF)과 밀접한 관련이 있다는 점이다. HFrEF 환자군(LVEF < 40%)에서 더 높은 정확도를 보인 것은, 이들에서 나타나는 명백한 심박출량 감소와 심장 리모델링(remodeling)이 PCG와 PPG 신호에 더 크고 명확한 비정상 패턴을 생성하기 때문으로 해석할 수 있다. 반면, 박출률 보존 심부전(HFpEF, LVEF ≥ 50%) 환자군에서 상대적으로 낮은 성능을 보인 것은 이 질환의 미묘한 혈역학적 변화가 신호에 덜 명확한 패턴으로 나타나기 때문이며, 이는 실제 임상에서의 진단적 어려움을 반영하는 결과이다. 이처럼 모델의 성능이 임상적 난이도와 유사한 경향을 보인다는 것은, 본 모델이 단순한 패턴 인식을 넘어 환자의 복합적인 생리학적 상태를 감지하고 있음을 보여준다.

그러나 연구 과정에서 일부 한계점을 가진다. 심실 빈맥(Ventricular Tachycardia)과 같이 발작적으로 발생하는 질환의 탐지 문제와 VHD 환자의 대다수가 삼첨 판막 폐쇄부전(TR)을 동반하여 발생한 데이터 불균형은 특정 판막 질환의 독립적 특성 분석에 제약이 따랐으며, 또한 측정 시 잡음으로 인한 데이터 손실 문제도 존재하였다. 향후 연구에서는 대규모 다기관 데이터 확보를 통해 데이터 불균형 문제의 해소하고, 다양한 임상 사례를 학습시켜 모델의 강건성을 높이는 과정이 필수적이다.

5. Acknowledgements

본 연구는 2025년도 중소벤처기업부의 창업중심대학 지원사업에 의한 연구 결과이며, 주관기관인 대구대학교 창업지원단의 지원을 받아 수행되었음 [20326479]

5.참고 문헌

[1] Clephas, P. R. D., R. A. de Boer, and J. J. Brugts. "Benefits of remote hemodynamic monitoring in heart failure." *Trends in Cardiovascular Medicine* 34.7 (2024): 468-476.

Poster-223

AI 의료 상담 웹 서비스의 기술 분석 및 발전 가능성 분석

강민서[1] , 김경이[2*]
인제대학교 AI소프트웨어

Technology Analysis and Development Potential Analysis of AI Medical Consultation Web Services

Minseo Kang[1] , Kyongyee Kim[2*]
AI Software Inje University, Korea
*kimky@inje.ac.kr

Abstract

Recently, as the demand for non-face-to-face treatment and counseling has increased in the medical field, various medical counseling web services have been developed. In particular, with the development of artificial intelligence (AI) technology, various functions such as a questionnaire-based diagnosis system, an AI chatbot, and a location-based hospital/pharmacy information service are being commercialized. This study analyzes the main technologies applied to these medical counseling web services and suggests future development directions focusing on the latest Generative AI trend. As a result of the analysis, the existing service secured the accuracy of counseling, but had limitations in terms of inducing the counselor's psychological stability and participation. Therefore, this study proposes that a highly reliable user-centered AI medical counseling service can be implemented by combining technologies such as emotion recognition AI, Vision-Language Model (VLM), and explainable AI (XAI). This study provides a technical framework that can guide future implementations of user-centered AI counseling systems in the medical field.

1. 서론

최근, 인공지능 기술이 사회 전반에 빠르게 확산되면서, 사람들의 생활 편의를 높이는 다양한 서비스가 등장하고 있다. 의료 분야에서도 이러한 흐름에 맞추어 디지털화가 가속화되고 있으며, 특히 비대면 진료와 의료 상담 서비스의 수요가 증가하고 있다. 이를 통해 사용자는 집에서도 간편하게 건강 상태를 점검하고, 온라인을 통해 상담을 받을 수 있게 되었다.

현재 의료 상담 웹 서비스에는 문진표 기반 진단 시스템, AI 챗봇, 룰베이스(rule-based) 챗봇 등 다양한 기술이 적용되고 있다. 이러한 서비스들은 의료 접근성을 높였지만, 여전히 상담의 정확성과 사용자 맞춤형 피드백 측면에서 개선의 여지가 남아있다.

따라서 본 연구는 의료 상담 웹 서비스에 적용된 기술들을 분석하고, 최근 급속히 발전하고 있는 생성형 AI 트렌드를 중심으로 향후 적용 가능성과 발전 방향성을 제시하고자 한다. 이를 통해 AI 의료 상담 시스템이 단순한 정보 제공을 넘어, 사용자의 심리적 안정감과 상담 참여 향상에 기여할 수 있는 방안을 탐색한다.

2. 연구 결과

2.1 의료 상담 웹 서비스의 주요 기술 분석

현재 상용화된 의료 상담 웹 서비스는 대규모 언어모델을 중심으로 한 인공지능 기술을 기반으로 하고 있다. 이러한 기술은 텍스트 생성, 번역, 질의응답, 요약 등 다양한 자연어 처리 기능을 수행하여 사용자가 쉽게 이해할 수 있는 정보를 제공한다. 특히 대화형 AI 챗봇 형태로 구현되어 맞춤형 상담이 가능하며, 사용자와의 상호작용을 통해 의료 서비스 접근성을 높이고 있다.

대표적인 예로, "닥터나우"는 사용자가 실시간으로 의료 상담을 요청하거나 약 처방을 받을 수 있는 기능을 포함하고 있다. 이와 유사하게 "굿닥" 또한 비대면 진료 기능을 지원하며, AI 챗봇을 통해 사용자가 입력한 키워드를 분석하여 맞춤형 의료 정보를 제공한다. 이러한 서비스들은 사용자의 증상, 나이, 성별 등의 기본 정보를 기반으로 질환 가능성을 예측하거나 적절한 의료 조치를 안내하는 기능을 수행한다.

한편, 일부 의료 상담 웹 서비스에서는 룰베이스 챗봇 기술이 사용되고 있다. 이는 사전 등록된 키워드 기반 패턴 매칭을 활용하여 사전에 설정된 규칙에 따라 예측 가능한 응답 포맷을 유지할 수 있다는 장점이 있다[1]. 이러한 방식은 사용자가 명확한 질문을 제시하기 어려운 경우에도 손쉽게 필요한 정보를 얻을 수 있도록 돕는다.

그러나 맥락 파악이 불가능하고, 정의된 시나리오 이외의 상황에서 유연한 대처를 하지 못하는 단점을 지니고 있다.

이에 따라 룰베이스 기반 의료 상담 챗봇은 사용자의 감정 상태나 공감적 반응을 충분히 반영하지는 못하는 경우가 있다. 상담이 단순 정보 전달 중심일 경우 사용자가 정서적 지원을 기대할 때 만족감이 낮게 인식되는 경우도 있다. 따라서 향후 의료 상담 웹 서비스는 단순 응답형 구조를 넘어, 사용자의 감정 상태를 분석하고 공감적 피드백을 제공할 수 있는 방향으로 발전할 필요가 있다.

2.2 생성형 AI 트렌드와 의료 상담 적용 가능성

최근 생성형 AI는 자연어뿐만 아니라 이미지와 음성 등 다양한 데이터를 함께 처리하면서 인간 수준의 의사소통이 가능해지고 있다. 특히 GPT 계열의 대규모 언어모델(LLM)과 시각-언어 정보를 결합한 비전-언어 모델(VLM)의 발전은 의료 분야에도 새로운 가능성을 제시한다.[2] 예를 들어, 다중 모드 의료 진단 시스템 의료 이미지와 환자 얼굴 데이터를 통합 분석하고 Knowledge-based Departmental Consultation을 활용하여 적절한 진료 과를 예측함으로써 진단 정확도를 향상 가능성을보여준다[3]. 이러한 접근은 단순 텍스트 기반 챗봇을 넘어 시각 정보와 언어 정보를 결합하여 보다 정교한 맞춤형 상담을 제공할 수 있음을 보여준다. 또한 최근의 생성형 AI는 사용자의 언어 표현에서 감정

상태를 추론하여 상담 톤을 조정하거나, 불안감이나 피로감과 같은 심리적 요인을 감지해 공감적인 피드백을 제공하는 방향으로 연구가 확장될 가능성이 있다. 설명 가능한 인공지능(XAI)는 의료 AI 시스템의 판단 근거를 시각화함으로써 의료진과 사용자의 신뢰성을 높이는 데 도움을 준다. 더불어 연합학습 기술을 적용하면 개인 의료 데이터가 중앙 서버로 직접 전송되지 않고, 로컬 환경에서 학습되어 개인정보 보호를 강화할 수 있다. 결국 생성형 AI의 발전은 의료 상담 웹 서비스의 자동화와 인간 중심성을 동시에 강화할 수 있는 핵심 요인으로 작용하고 있다.

2.3 기술 적용의 기대효과

일부 보도에서는 AI 챗봇을 통한 심리 상담이 사용자의 외로움이나 사회불안 완화에 긍정적 영향을 미쳤다고 보고된 바 있다. 특히 일반 사용자 그룹을 대상으로 4주간 챗봇과 지속적인 대화를 나눈 결과, 외로움과 사회불안 지표가 유의미하게 감소한 것으로 보고된 바 있다[4].

감정 인식 AI는 사용자의 언어·표정·어조를 분석해 공감적 피드백을 제공하고, 생성형 AI는 개인의 감정 변화를 실시간 반영하여 맞춤형 상담을 가능하게 한다. 이를 통해 사용자의 심리 상태가 위기 수준에 이르면 병원 방문을 제안하는 조기 대응 체계도 구축할 수 있다. 이러한 기술 통합은 의료 접근성을 높이고 상담의 인간 친화적 특성을 강화함으로써, 향후 AI 의료 상담 서비스가 정서적 케어와 예방적 의료를 동시에 수행하는 기반이 될 것으로 기대된다.

3. 고찰

본 연구는 상용화된 의료 상담 웹 서비스의 기술 구조를 분석하고, 생성형 AI 기반 의료 상담 웹서비스의 발전 가능성을 고찰하였다. 기존 서비스는 문진표, 룰 기반 챗봇, 위치 안내 등으로 구성되어 접근성은 높지만, 사용자의 감정과 심리적 안정을 충분히 반영하지 못하는 한계를 지닐 수 있다.

이에 따라 향후 의료 상담 웹 서비스는 단순 정보 제공을 넘어 감정 인식 AI, 비전-언어모델(VLM), 설명 가능한 인공지능(XAI)을 융합한 형태로 발전할 필요가 있다. 감정 인식 AI는 사용자의 음성, 언어, 표정 등에서 정서를 탐지해 정서적 공감형 피드백을 제공하고, VLM은 시각 정보를 활용해 환자의 상태를 종합적으로 분석할 수 있다. 또한 XAI는 판단 근거를 시각적으로 제시하여 의료진의 진단 판정의 신뢰성을 높이고, 이에 따른 사용자의 신뢰를 높인다.

특히 AI 기반 심리 상담 챗봇은 정신 질환이나 정서적 불안을 겪는 사용자와 일상적인 대화를 지속하며 친근하게 다가갈 수 있는 형태를 지녔다. 이러한 시스템은 사용자의 감정 변화를 실시간으로 감지하고, 우울·불안 수준이 임계치에 도달할 경우 병원 방문을 제안하거나 전문 의료기관과 연계하는 조기 대응 체계를 마련할 수 있다. 이는 단순한 대화 정확도 향상을 넘어, AI 의료 상담이 인간 중심의 심리적 돌봄과 예방적 의료의 역할까지 수행할 수 있음을 시사한다.

결론적으로, 본 연구는 향후 의료 AI 시스템 개발에서 사용자 감정 데이터의 윤리적 처리, 모델의 설명 가능성, 그리고 신뢰성 확보 방안이 반드시 병행되어야 함을 강조한다. 본 연구의 분석 결과는 이러한 통합형 AI 의료 상담 시스템을 설계하기 위한 기초 자료 및 방향성 제시 자료로서 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

4. Acknowledgements

본 과제(결과물)는 교육부와 경상남도의 재원으로 지원을 받아 수행된 경상남도 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 연구결과 입니다.(202503050001)

5.참고 문헌

[1] Dalpha. “Comprehensive Guide to AI Chatbots: Types, Recommendations, Implementation Strategies, and Industry Applications.” *Dalpha Blog*, November 21, 2024. Retrieved October 15, 2025, https://app.dalpha.so/blog/ai-chatbot

[2] Smith, A., Lee, B., & Kim, C. (2025). AI-Driven Healthcare Consultation Services and Their Technological Frameworks.Journal of Medical Systems, 49(2), 123–135.

[3] Yi Ren, et al. (2024). MMDS: A Multimodal Medical Diagnosis System Integrating Image Analysis and Knowledge-based Departmental Consultation.arXiv preprint. https://arxiv.org/abs/2410.15403

[4] Choi, Y. (2025, May 23). “ChatGPT, I Feel Depressed … Does AI Psychological Counseling Work?” *DongA Ilbo*. Retrieved October 15, 2025.

Poster-224

인간 피드백 기반 슈뢰딩거 브릿지 확산모델을 이용한 CBCT영상에서 MDCT 변환 음영 인공물 억제

강성호[1*], 최용은[1], 박현철[2]

[1] 국가수리과학연구소 산업수학연구본부, 대전, 대한민국

[2] 국립한국교통대학교 컴퓨터공학과, 충주, 대한민국

Human-Guided Shade Artifact Suppression in CBCT-to-MDCT Translation via Schrödinger Bridge with Conditional Diffusion

Sung Ho Kang[1*], Yong Eun Choi[1], Hyun-Cheol Park[2]

[1] National Institute for Mathematical Sciences (NIMS), Daejeon, Republic of Korea

[2] Department of Computer Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju, Republic of Korea

[*]runits@nims.re.kr

Abstract

We present a novel human-guided image translation framework for CBCT-to-MDCT enhancement based on the Schrödinger Bridge (SB) formulation integrated with conditional diffusion. The method leverages GAN-generated pseudo-targets as boundary priors and introduces binary human feedback through classifier-free guidance (CFG). This enables perceptual control and clinically aligned artifact suppression without training an explicit reward model. Quantitative experiments show superior RMSE, SSIM, LPIPS, and Dice performance over prior GAN and fine-tuning feedback methods, while maintaining real-time efficiency with only 10 sampling steps.

1. 연구 배경

CBCT(Cone-Beam Computed Tomography)는 치과, 두경부, 정형외과 분야에서 널리 활용되는 저선량 3차원 영상기법으로, 고해상도의 구조적 정보를 비교적 낮은 방사선량으로 획득할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 산란선(Scatter)과 빔 하드닝(Beam Hardening) 현상에 의해 발생하는 shade artifact(음영 인공물) 은 영상 전역의 HU 값 변동을 유발하며, 조직 간 명암 대비를 왜곡시켜 임상적 판독과 정량적 분석(예: 뼈 밀도 측정, 임플란트 위치 평가 등)을 어렵게 만든다. 특히 CBCT는 단일 원추형 빔으로 전체 부피를 촬영하므로 산란 영향이 크고, 이로 인해 재구성 영상에서 저주파 대역의 불균일한 그라데이션(불균일 음영)이 흔히 나타난다. 이에 비해 MDCT(Multi-Detector CT)는 고선량과 정밀한 보정 알고리즘을 통해 균질한 HU 분포를 유지하며 신뢰도 높은 조직 대조도를 제공한다. 따라서 CBCT를 MDCT 수준의 품질로 변환하는 것은 임상 현장에서 매우 중요한 문제로, 방사선량을 줄이면서도 진단적 품질을 확보하는 핵심적 과제이다.

최근에는 CycleGAN, Pix2Pix 등 GAN 기반의 이미지-투-이미지 변환 기법이 CBCT→MDCT 변환에 적용되어 일정 수준의 화질 개선 및 인공물 감소를 달성하였다. 그러나 이러한 접근법은 모드 붕괴(mode collapse) 와 학습 불안정성, 그리고 데이터셋 특화(overfitting) 문제로 인해 실제 임상 환경에서의 다양성(domain variability)을 충분히 반영하지 못한다. 또한, GAN은 생성-판별자 경쟁 구조상 확률 분포의 전역적 일관성(global consistency) 을 보장하기 어렵고, 그 결과 잔여 음영 인공물(residual artifacts) 이 잔존하거나, 반대로 과도한 평활화(over-smoothing) 로 인해 세밀한 해부학적 구조가 손상되기도 한다.

이를 해결하기 위해 본 연구에서는 Schrödinger Bridge(SB) 확산모델의 양방향 확률 경로 개념을 도입하여, CBCT와 MDCT의 데이터 분포 간에 해석 가능한 연결 경로를 학습한다. 또한, 인간 피드백 기반 조건부 확산(Conditional Diffusion with Human Feedback) 을 결합하여 기존 자동화된 손실 함수 기반 학습에서 포착하기 어려운 임상적 선호도(Clinical Preference) 를 모델 학습에 직접 반영하였다.

2. 연구 방법

2.1. SB 기반 확산모델

SB는 두 확률분포(소스 $p_0(z_0)$와 타깃 $p_1(z_1)$)를 연결하는 최적 확률경로를 학습한다. 기존 DDPM이 가우시안 노이즈를 시작점으로 하는 일방향 확산이라면, SB는 양방향 브릿지로 구성되어 경계 일관성(boundary consistency)을 보장한다. CBCT 입력 z_0와 GAN 기반 pseudo-target $z_1 = G_s(z_0)$을 경계로 설정하여 확률적 경로 z_t를 학습하며, 이를 통해 구조적 왜곡 없이 인공물만 점진적으로 제거하는 경로를 모델링한다.

2.2. 인간 피드백 기반 조건부 확산

CycleGAN으로 생성된 pseudo-target을 방사선 전문의가 평가하여 "좋음(good)"과 "나쁨(bad)"으로 이진 라벨링하였다. 이 라벨을 CFG(classifier-free guidance)로 모델에 주입하여 r∈{0,1}의 조건부 확산을 수행하였다.
보상모델을 따로 학습하지 않고, 단순한 피드백 신호로도 선호도 정렬을 실현하는 직접 선호 최적화(Direct Preference Optimization, DPO) 개념을 확산 도메인으로 확장하였다.

2.3. CFG 및 토너먼트 학습 루프

샘플링 단계에서 조건부와 비조건부 score를 선형 결합하여 다양한 guidance scale w 를 탐색하였다. 각 w에 대해 생성된 후보 세트를 토너먼트 기반 인간 평가자가

비교·선정하여 최종 "good" 샘플 집합 Z_{pref} 을 구축, 점진적 학습 및 미세조정(incremental learning and fine-tuning)에 활용하였다. 이 루프를 통해 모델은 반복적으로 인간의 시각적 기준을 내재화 하게 된다.

3. 데이터셋 및 실험설계

CBCT 20건, MDCT 28건을 사용하였으며 CycleGAN으로 생성된 pseudo-target에 대해 전문의가 4,075개 "좋음(good)"과 712개 "나쁨(bad)" 슬라이스를 라벨링하였다. 평가 지표로 RMSE, SSIM, LPIPS, Dice, ARR, ARSR를 사용하였고, 데이터는 치과용 CBCT 20건(0.4mm 해상도) 과 MDCT 28건(0.4mm × 0.4mm voxel) 으로 구성되었다. CBCT와 MDCT는 전처리 단계에서 랜드마크 기반 정렬(Sella 기준) 및 크롭을 통해 동일한 시야를 확보하였다. CycleGAN을 사용하여 unpaired 방식으로 pseudo-MDCT를 생성하였고, 이를 SB 학습의 경계 상태로 사용하였다.

총 4,787개의 슬라이스 중 15%는 검증 용으로 분리되었으며, 평가 지표로 RMSE, SSIM, LPIPS, Dice, ARR, ARSR을 사용하였다. Park et al. 기존 방법과 비교 하였다[1-2].

4. 실험 결과

SB 기반 모델은 ARR 96.98%, ARSR 96.23%로 기존 대비 가장 높은 인공물 억제 성능을 보였으며, SSIM 0.9975, LPIPS 0.0011, Dice 81.61%로 구조적 충실도 또한 우수하였다. 10-step 샘플링만으로 고품질 생성이 가능하여 실시간 임상 응용 가능성을 확인하였다. 시각적으로는 후두부와 연조직 영역의 음영이 감소하며, 해부학적 경계가 명확하게 복원되었다(그림 2 참조). 또한, SB 기반 양방향 확산은 10 sampling step만으로 안정적 수렴을 보였으며, 이는 기존 DDPM 대비 약 20배 빠른 생성 속도를 의미한다. 이는 실시간 임상 응용(약 0.8초/슬라이스) 도 가능한 수준이다. 추가적으로, negative feedback 조건에서는 의도적으로 shade artifact를 생성할 수 있었다. 이는 모델이 해석 가능한 잠재공간(semantic controllability)을 학습했음을 의미한다.(그림 3 참조)

표 1. Fidelity and Structural Similarity Results

Method	RMSE ↓	SSIM ↑	LPIPS ↓	DC (%) ↑
G_{SB} (Ours)	0.0025 ± 0.0007	0.9975 ± 0.0010	0.0011 ± 0.0006	81.61 ± 6.29
Park2025 [2]	0.0085 ± 0.0025	0.9895 ± 0.0031	0.0113 ± 0.0033	80.60 ± 6.73
Park2022 [1]	0.0259 ± 0.0062	0.9081 ± 0.0160	0.0375 ± 0.0105	81.35 ± 6.93

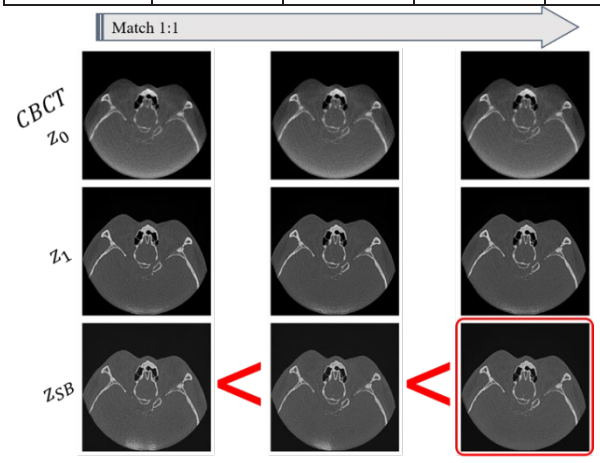


그림 1. 인간 피드백 기반 토너먼트식 선호도 선택 과정의 시각화. 각 열은 서로 다른 가이던스 스케일 w_j 및 체크포인트 θ_k에서 생성된 CBCT→MDCT 변환 후보 영상을 나타낸다. 1:1 비교(match) 단계에서 전문가가 두 영상을 비교하여 더 선호되는 결과(붉은 박스로 표시)를 선택하며, 이 과정을 반복해 최종 선정된 영상은 선호 데이터셋 Z_{pref} 에 포함되어 확산 모델의 점진적 미세조정(fine-tuning)에 사용된다.

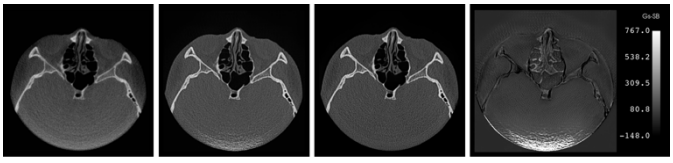


그림 2. 슈뢰딩거 브릿지(SB) 확산모델을 이용한 인간 피드백 기반 음영 인공물 억제 결과. 왼쪽부터 (1) 입력 CBCT 영상, (2) 사전학습된 GAN 생성기 G_s의 출력, (3) 제안된 인간 피드백 기반 SB 생성기 G_{SB}의 출력, (4) 두 결과의 차영상을 나타낸다. 차영상에서 특히 연조직 및 후두부 영역에서 인공물이 선택적으로 감소하면서 해부학적 구조가 유지되는 것을 확인할 수 있다.

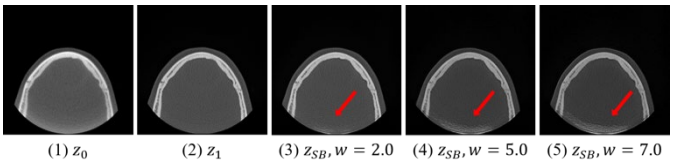


그림 3. 제안된 모델이 단순히 인공물을 제거하는 것뿐만 아니라, 확산 모델의 내재된 다양성(diversity) 을 활용하여 의도적으로 인공물을 재현하거나 조절 할 수 있음을 보임. 즉, 인간 피드백을 반전시킨 negative preference request 조건(r=1)을 주었을 때, 기존 데이터셋에 존재하지 않던 새로운 슬라이스에서도 음영 인공물 패턴을 생성할 수 있다는 것을 입증.

5. 결론

본 연구는 Schrödinger Bridge 기반 확산 모델에 인간 피드백을 직접 통합하여 CBCT→MDCT 변환에서 음영 인공물을 효과적으로 억제하였다. 보상 모델이 필요 없고 10단계 이하의 빠른 샘플링이 가능하며, 임상적으로 해석 가능한 결과를 제공한다. 향후 다중 속성 피드백 확장 및 개인 맞춤형 CT 향상에도 응용 가능성을 지닌다.

6. Acknowledgements

본 연구는 한국연구재단(NRF, RS-2024-00338504) 및 국가수리과학연구소(NIMS-B25910000)의 지원을 받아 수행되었다.

7. 참고 문헌

[1] H. S. Park, K. Jeon, S.-H. Lee, and J. K. Seo, "Unpaired-paired learning for shading correction in cone-beam computed tomography," IEEE Access, vol. 10, pp. 26 140–26 148, 2022.

[2] H.-C. Park, K. Jeon, H. S. Park, and S. H. Kang, "Shade artifact reduction in cbct-to-mdct: Fine-tuning based on style transfer and human feedback," IEEE Access, 2025.

[3] S. H. Kang, H.-C. Park. "Human-Guided Shade Artifact Suppression in CBCT-to-MDCT Translation via Schr\" odinger Bridge with Conditional Diffusion." *arXiv preprint arXiv:2507.11025* (2025).

Poster-225

LLM 기반 임상화학검사 결과보고서 자동 생성

정성연, 유지원, 신항식*

울산대학교 의과대학 서울아산병원 정보통계의학교실

Clinical Chemistry Report Generation with a Large Language Model

Sungyeon Chung, Jiwon You, Hangsik Shin*

Department of Medical Informatics and Statistics, Asan Medical Center, Brain Korea 21 Project, University of Ulsan College of Medicine

*hangsik.shin@amc.seoul.kr

Abstract

To automate the inefficient manual workflow of clinical chemistry reporting, we developed a methodology using a Large Language Model to generate test reports. Our approach involves instruction-tuning a TxGemma-9B-Chat model with QLoRA on a synthetic, rule-based dataset in a closed-book setting. The model's performance was evaluated on two key tasks. While the model demonstrated high proficiency in generating templated clinical explanations (BLEU 0.932, ROUGE_L 0.975), it struggled with accurately recalling textbook-based evidence, achieving a low overall Exact Match of 0.284. We conclude that constrained instruction-tuning achieves structural consistency at the cost of accurate knowledge retrieval, indicating that future work must focus on enhancing knowledge retrieval capabilities through methods such as data augmentation, parameter optimization, and Retrieval-Augmented Generation architecture.

1. 연구 배경

임상화학검사 (Clinical Chemistry Testing)는 혈액, 소변, 체액 등의 검체에 포함된 다양한 화학 물질을 정량적으로 분석하는 검사법으로 현대 의료의 임상적 의사결정에 중요한 역할을 한다 [1]. 임상화학검사 결과의 부정확한 해석은 환자에게 치명적일 수 있어, 검사 결과의 정확한 해석을 위해 검사 전과정을 이해하고 질병 및 증상 관련 전문 지식을 가진 임상 전문가의 참여가 필수적이다. 하지만 임상화학검사는 국내 상급종합병원 기준 하루 수만 건이 행하여지므로, 소수의 전문가가 모든 검사 결과에 대한 해석 요구에 대응하기는 현실적으로 불가능하다.

의료 분야에서 대규모언어모델 (Large Language Model, LLM)의 잠재력은 여러 연구를 통해 확인되고 있다 [2, 3]. LLM은 다양한 의학적 질의응답에서 이미 전문가 수준의 성능을 보였으며 [4], 비정형 데이터 및 의료 영상을 해석하여 보고서를 자동 생성하는 데 활용될 수 있다는 연구 또한 보고되었다 [5, 6]. 이러한 연구들은 LLM이 의학 지식에 대한 이해를 바탕으로 정형화된 의료 보고서를 생성하고 임상 워크플로우를 최적화하는 데 충분한 잠재력을 가지고 있음을 시사하여 더욱 다양한 의료문제 해결로 확장될 가능성을 보여준다.

따라서 이 연구에서는 임상화학검사의 결과 해석 과정을 자동화하고 임상 현장에서의 업무 효율성을 높이기 위해 LLM 기반의 검사 결과 보고서 자동 생성 방법론을 제안한다. 특히, 이 연구는 임상화학 지식 기반 미세조정 (fine-tuning)으로 해석 성능의 향상 가능성을 모색한다.

2. 연구 방법

이 연구에서는 임상화학 교과서 및 가이드라인을 근거로 임상화학검사 항목별 참조 구간을 설정하였다 [7-10]. 여기서, 참조 구간은 검사 결과를 해석할 때 비교 기준이 되는 건강한 사람 집단에서 측정된 결과의 분포 범위를 의미한다. 참조 구간을 기준으로 검체별 검사항목 39개 카테고리, Low, Normal, High의 3가지 범주, 범주별 15개 샘플을 고려해 총 1,755 샘플을 정규 분포에 따라 생성하고, 1:2로 분할하여 각각 학습과 검증에 사용하였다. 또한 보고서의 핵심 요소인 화학적 간섭 요인 (Chemical Interferences)과 진단 정보 (Diagnostic Information) 학습을 위해 교과서 기반 지식코퍼스 (knowledge corpus)를 구축하였다 [11, 12]. 최종적으로, 표준화된 보고 형식을 명시한 프롬프트를 활용하여 모델을 지시 튜닝 하였다.

보고서 생성 능력을 평가하기 위해, 정형화된 임상적 설명 생성 (태스크 1)과 교과서 기반 근거 생성 (태스크 2)이라는 두 가지 주요 태스크를 선정하였다.

- 태스크 1: 검사 항목, 수치, 단위, 참조 구간 등의 정보를 바탕으로 정해진 템플릿에 따라 결과를 서술
- 태스크 2: 결과가 비정상 (Low 또는 High)일 때 화학적 간섭 요인과 진단 정보를 교과서 기반 의학 지식에 근거하여 설명

모델 설계는 TxGemma-9B-Chat을 기반으로 QLoRA (Quantized Low-Rank Adaptation) 기법을 적용했다. 이는 모델 가중치를 4비트로 양자화하고 소수의 어댑터만 학습시키는 파라미터 효율적 파인튜닝 (Parameter-Efficient

표 1. 추론에 사용한 프롬프트 형식

Prompt of Task 1 (Clinical Explanation)

```
sent1 = 'The analyte "{analyte_str}" has a measured value of {value_str} {unit_str}.'.strip()
sent2 = 'The provided reference interval is {ref_str}.'.strip()
sent3 = 'Based on a direct comparison of the numeric value with the reference interval boundaries, this result is classified as {label}.'.strip()
- CLINICAL_EXPLANATION: write EXACTLY the following three sentences, verbatim, with no paraphrasing or extra spaces:
  1) {sent1}
  2) {sent2}
  3) {sent3}
  Join them with single spaces between sentences (i.e., a normal three-sentence paragraph).
```

Prompt of Task 2 (Textbook Guidance)

```
- TEXTBOOK_GUIDANCE (SELECTED ONLY):
  * Include EXACTLY ONE key, matching INTERPRETATION in UPPERCASE: one of LOW | NORMAL | HIGH.
  * If INTERPRETATION == "Low": TEXTBOOK_GUIDANCE must be { "LOW": { "CHEMICAL_INTERFERENCES": <str>, "DIAGNOSTIC_INFORMATION": <str> } }.
  * If INTERPRETATION == "High": TEXTBOOK_GUIDANCE must be { "HIGH": { "CHEMICAL_INTERFERENCES": <str>, "DIAGNOSTIC_INFORMATION": <str> } }.
  * If INTERPRETATION == "Normal": TEXTBOOK_GUIDANCE must be {{ "NORMAL": {{ "CLINICAL_MEANING": "{NORMAL_FIXED}" }} }}.
```

Fine-Tuning) 방식이다. 프롬프트는 자유로운 생성보다는 보고서 양식을 강제하여 출력의 일관성을 확보하는 데 초점을 맞췄으며, 추론 시에는 프롬프트 내에 주어진 정보와 모델이 학습한 지식만을 활용해 응답하도록 설계했다. 표 1에 제시된 프롬프트는 태스크 1의 문장 구조와 태스크 2의 JSON 스키마를 명시적으로 지시하여, 모델이 주어진 정보와 지정된 출력 형식을 따르도록 강제했다.

성능 평가는 모델이 주어진 입력값을 정해진 템플릿에 맞춰 정확한 문장으로 구성하는 능력과 학습된 지식을 재현하는 정보 인출 능력을 평가하기 위해 BLEU (Bilingual Evaluation Understudy)와 ROUGE_L (Recall-Oriented Understudy for Gisting Evaluation) 점수를 사용하였다. BLEU는 생성된 문장이 정답 문장과 비교하여 단어·구 (n-gram) 수준에서 얼마나 일치하는지를 측정하고, ROUGE_L은 두 문장 간의 가장 긴 공통 시퀀스 (Longest Common Subsequence)의 길이를 기반으로 핵심 정보의 누락 여부를 평가한다. 이 밖에 모델이 생성한 화학적 간섭 요인과 진단 정보 관련 표현이 학습용 지식코퍼스와 일치하는지를 측정하기 위해 정확 일치율 (Exact Match)를 사용하였다.

3. 연구 결과

그림 1은 태스크별 성능을 보여준다. 태스크 1은 BLEU 0.932 ± 0.018, ROUGE_L 0.975 ± 0.007로 매우 높은 정합성을 보였다. 반면 태스크 2의 성능은 BLEU 0.404 ± 0.489, ROUGE_L 0.483 ± 0.425로 편차가 크고 상대적으로 낮은 평균 점수를 보였다.

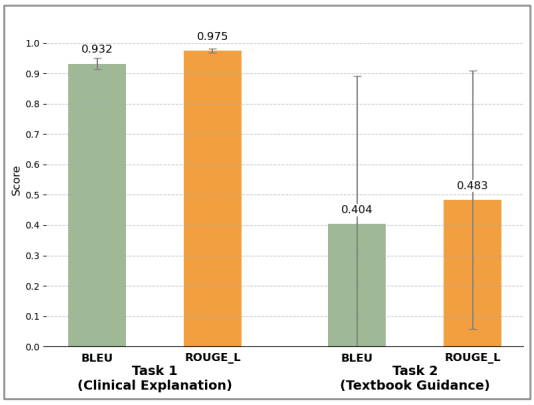


그림 1. 각 태스크별 BLEU, ROUGE-L 성능 (평균 및 표준편차)

표 2는 교과서 기반 근거 생성의 정확 일치율을 나타낸다. 전반적으로는 0.284, Low인 케이스에서는 0.150, High인 케이스에서는 0.060, Normal인 케이스에서는 1.000으로 나타났다. Normal 케이스는 고정된 문장 구조로 인해 완전 일치되는 것을 보였으나, Low/High 케이스에서는 다양한 임상적 근거 표현 방식 때문에 불일치가 발생하였다.

표 2. 교과서 기반 근거 생성의 정확 일치율

Task 2 (Textbook Guidance)	Overall	Low	High	Normal
Exact Match	0.284	0.150	0.060	1.000

4. 토의 및 결론

본 연구는 LLM을 활용한 임상화학검사 보고서 생성 방법론을 설계하고, 두 가지 핵심 태스크로 성능을 평가하였다. 먼저 정형화된 임상적 설명 생성 태스크에서는 모델이 명시적 프롬프트에 따라 정해진 템플릿을 일관되게 출력하는 데 우수함 (ROUGE_L 0.975)을 확인하였다. 반면, 교과서 기반 근거 생성 태스크 (ROUGE_L 0.483)에서는 정보 인출 능력의 불안정성 (ROUGE_L 0.483)을 드러냈다. 이러한 한계는 교과서 원문과의 정확 일치율로 더 명확히 파악할 수 있다. Normal 케이스의 결과 (Exact Match 1.000)는 모델이 고정된 문장을 암기하고 재현하는 데 완벽한 성능을 보임을 시사하나, Low (0.150) 및 High (0.060) 케이스의 현저히 낮은 일치율은 모델이 임상적 근거를 교과서 기준으로 인용하는데 어려움을 겪고 있음을 의미한다. 이러한 결과는 고도로 제약된 프롬프트의 영향으로 모델이 사전 학습된 지식을 인출하는 능력보다 보고서 구조의 모방에 과적합된 것이 원인으로 추정된다.

결론적으로, 본 연구는 LLM이 제약적 지시 튜닝을 통해 임상화학검사 결과보고서 생성에서 높은 구조적 일관성을 달성할 수 있음을 정량적으로 입증했으나, 복잡한 의학 지식을 정확하게 인용하는 정보 인출 능력에는 한계가 있음을 보였다. 이러한 한계를 개선할 방법으로는 데이터 증강, LoRA 파라미터 최적화, RAG (Retrieval-Augmented Generation) 아키텍처 도입 등을 고려해 볼 수 있다.

궁극적으로 본 연구는 임상화학분야에서 LLM 기반의 검사 결과 보고서 자동 생성 기술의 가능성을 확인하였다. 향후 고도화를 통한 정보인출 능력 개선, 의료전문가에 의한 정성 평가, 외부검증이 수행된다면, LLM기반 임상화학검사 보고서 자동 생성 기술은 결과 해석 및 보고서 생성 과정의 비효율을 해결하고 임상적 의사결정 질 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

5. Acknowledgements

이 연구는 서울아산병원 아산생명과학연구원 지원 (2025IP0016, 2024IP0025) 과 한국연구재단 (과학기술정보통신부) 지원 (RS-2024-00335644)을 받아 수행된 연구임.

6. 참고 문헌

[1] Eaton, Kevin P et al. “Evidence-Based Guidelines to Eliminate Repetitive Laboratory Testing.” JAMA Internal Medicine vol. 177,12 (2017): 1833-1839.

[2] Thirunavukarasu, Arun James et al. “Large language models in medicine.” Nature Medicine vol. 29,8 (2023): 1930-1940.

[3] Shah, Nigam H et al. “Creation and Adoption of Large Language Models in Medicine.” JAMA vol. 330,9 (2023): 866-869.

[4] Singhal, Karan et al. “Toward expert-level medical question answering with large language models.” Nature Medicine vol. 31,3 (2025): 943-950.

[5] Yang, Xi, et al. "A large language model for electronic health records." npj Digital Medicine 5.1 (2022): 194.

[6] Wu, Chaoyi, et al. "Towards generalist foundation model for radiology by leveraging web-scale 2d&3d medical data." Nature Communications 16.1 (2025): 7866.

[7] Korea Laboratory Accreditation Scheme. ISO 15189: 2012 해설서. KOLAS-G-17: 2014, Korean Agency for Technology and Standards, MOTIE, Korea, 2014.

[8] Horowitz, G., et al. "Clinical and laboratory standards Institute: defining, establishing, and verifying reference intervals in the clinical laboratory; approved guideline." Wayne, PA: CLSI (2008).

[9] American Board of Internal Medicine. ABIM Laboratory Test Reference Ranges - January 2025. ABIM (2025).

[10] Wu, Alan H. B., ed. Tietz Clinical Guide to Laboratory Tests. 4th ed., Saunders, 2006.

[11] Kanagasabapathy, A. S., and Sudarshan Kumari. "Guidelines on standard operating procedures for clinical chemistry." World Health Organization, Regional Office for South-East Asia, New Delhi (2000): 25-28.

[12] McPherson, Richard A., ed. Henry's Clinical Diagnosis and Management by Laboratory Methods, 24/e. Elsevier India, 2022.

Poster-226

LLM 기반 임상화학검사 재검사 판정 시스템

유지원[1], 김솔잎[2], 신항식[1*]

[1]울산대학교 의과대학 서울아산병원 정보통계의학교실, [2]울산대학교 의과대학 서울아산병원 진단검사의학과

LLM-based Re-test Decision System for Clinical Chemistry Test

Jiwon You[1], Sollip Kim[2], Hangsik Shin[1*]

[1]Department of Medical Informatics and Statistics, Asan Medical Center, Brain Korea 21 Project, University of Ulsan College of Medicine

[2]Department of Laboratory Medicine, Asan Medical Center, University of Ulsan College of Medicine

[*]hangsik.shin@amc.seoul.kr

Abstract

We developed an instruction-tuned Large Language Model to automatically determine re-test necessity and generate reasoning based on laboratory and clinical information. A total of 16,547 test records covering 31 analytes were used, with 13,242 samples for instruction-tuning and 3,305 for evaluation. The model, based on LLaMA 3.1–8B-Instruct, was fine-tuned using instruction data including manual retest labels and justifications. The model achieved an accuracy of 0.987, specificity 0.992, and NPV 0.995 on the test set. Generated justifications showed high language similarity (BLEU 0.778, ROUGE-L 0.776, BERTScore-F1 0.819). The proposed model effectively reflected clinical context and could reduce manual verification workload by approximately 70–80% in large-scale laboratory settings. This study demonstrates the feasibility of applying instruction-tuned LLMs for automated and explainable verification in clinical chemistry.

1. 연구 배경

상급 병원 진단검사실에서는 매일 수천에서 수만 건의 검사가 수행되며, 이 중 일부는 전처리 오류나 임상적 이상으로 인한 재검사가 요구된다. 현재 재검사 여부 판정은 검사결과의 신뢰성을 확보하기 위한 핵심 단계로서 숙련된 임상병리사나 진단검사의학전문의에 의해 수행된다. 그러나 이러한 수기 검증에는 매우 큰 인적·시간적 비용이 소모되며 수행 과정에서 검사자 간 편차가 발생할 수 있다.

최근 인공지능이 검사 자동화 영역에 도입되면서 인공지능 기반 검사 결과 해석에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히, 대규모 언어 모델 (Large Language Model, LLM)은 대규모 텍스트 데이터를 학습하여 맥락 이해, 추론, 설명 생성 능력을 가지고 있어 다양한 의료 태스크에 적용되고 있다 [1-7]. 하지만 지금까지 임상검사 데이터 해석이나 재검사 여부 판정에서의 LLM의 활용은 보고된 바가 없다. 따라서 본 연구에서는 LLM을 임상화학검사 검증 시스템에 접목시켜 기존 수기검증의 한계를 보완하고 업무 부담을 경감할 수 있는 LLM 기반 검증 시스템을 제안한다. 이를 위해 검사결과 및 임상정보를 입력 받아 재검사 필요 여부를 판정하고 판정 사유를 출력하는 instruction-tuned LLM 모델을 개발하였다.

2. 연구 방법

본 연구에서는 2024년 9월 1일부터 12월 31일 사이 서울아산병원에서 수행한 일반화학검사 결과 및 수기검증 결과 기록을 임의 추출하여 사용 하였다. 데이터 수집 연구 절차는 서울아산병원 연구심의위원회 (Institutional Review Board, IRB)의 승인을 받아 수행되었으며 (IRB 승인번호 S2025-0051-0001), 모든 데이터는 가명화 및 비식별화 처리를 완료한 후 분석에 활용하였다.

데이터에는 Glucose, Creatinine, BUN, Total cholesterol, HDL-cholesterol, LDL-cholesterol, Triglyceride, Sodium, Potassium, Chloride 등이 총 31종의 일반화학검사 항목이 포함되었다. 또한, 검사정보는 각 항목의 현재 검사결과값, 직전 검사결과값, 정상참고치 범위, 변동허용범위, DPCAR 정보가, 임상정보에는 성별, 나이, 진료유형 (외래, 입원, 응급, 검진), 진료과, 최근 24시간 이내 수술·수혈 여부, HIL Index, 직전 n 번째 검사결과 및 일시와 수진구분 등의 항목 검사결과 해석에 영향을 줄 수 있는 임상 변수가 포함되었다. 이 밖에 실제 수기검증을 수행하는 임상 전문가에 의해 수기검증 과정에서 재검사 여부 판정 결과와 판정 근거를 기록하였다.

사용된 전체 데이터는 16,547건으로, 이 중 13,242건을 Instruction-tuning을 위한 Instruction 데이터로 가공하여 사용하였으며, 3,305건을 성능 평가에 사용하였다. 입력 데이터는 검사정보와 임상정보로 구성되었으며, Instruction-tuning 시에는 수기검증 과정에서 기록된 재검사 판별 여부와 근거를 정답으로 포함하였다 (표 1).

모델은 LLaMA 3.1-8B-Instruct를 기반으로 Instruction-tuning을 통해 미세 조정 (fine-tuning)되었다. Instruction은 JSON 형식으로 구성되었으며, 시스템 지시문 예시는 표 1과 같다. 모델은 두 가지 주요 태스크를 목표로 학습하였다. 첫째는 각 검사에 대해 이진 분류 형태로 재검사 필요 여부 ('재검사 필요' 또는 '재검사 불필요')를 예측하는 태스크이고,

표 1. Instruction-tuning에 사용한 입력 데이터 예시

Example of Input data used for Instruction-tuning

```
{"instruction": "주어진 검사값과 임상데이터를 바탕으로 재검사 필요
  여부를 판정하고 판정 사유를 작성해주세요.",
  "input": {
    "검사항목": "Potassium",
    "직전값": 2.5,
    "현재결과값": 2.9,
    "정상참고치": ['3.5', '5.1'],
    "DPCAR check": TRUE,
    "HIL Index": False
    "검사나이": 50
    "성별": "F"
    "외래/병동/건진/응급실 여부": "외래"
    "진료과": "신장내과"
    "24시간 이내 수술여부": X
    "24시간 이내 수혈여부": X
    "직전 2번째 검사결과": '4.0'          # 최대 5번째 검사까지 존재
    "직전 2번째 검사처방 수진구분": "외래"
    "희석방법": X
    "희석배율": X},
  "output": {
    "재검사 필요 여부": "재검사 불필요",
    "판정 사유": -기록된 재검 판정 사유 사용-
                (예시: 이전 결과값과 큰 차이 없어 전송함)
  }
}
```

둘째는 해당 판단의 근거를 자연어 문장으로 생성하는 태스크이다.

성능 평가는 위 두 가지 태스크 목표에 따라 각각 수행하였다. 재검사 판별 여부의 경우, '재검사 필요 여부: 재검사 불필요'로 출력되며 정확도 (Accuracy), 민감도 (Sensitivity), 특이도 (Specificity), F1 score, NPV (Negative Predictive Value) 등의 지표로 평가하였다. 해당 지표들은 모델이 재검사 필요성을 정확히 판별하는 능력과, 불필요한 재검사를 효과적으로 줄일 수 있는지를 평가한다. 판정 사유의 경우, 표 1에서 볼 수 있듯이 '판정 사유: 이전 결과값과 큰 차이 없어 전송함' 과 같이 생성된다. 생성된 문장의 품질과 의미적 유사도를 평가하기 위해 BLEU, ROUGE-L, BERTScore-F1, 세 가지 언어 평가 지표를 활용하였다. 모델의 출력 결과는 실제 수기검증 기록에서 작성된 재검사 판정 결과와 근거 문장을 정답으로 하여 검증하였다.

3. 연구 결과

재검사 판별 여부의 경우, Instruction-tuning에 사용한 학습 데이터셋에서의 모델 성능은 Accuracy 0.994 Sensitivity 0.976, Specificity 0.995, F1 score 0.880, NPV 0.999로 나타났다. 테스트 데이터셋에서는 Accuracy 0.987, Sensitivity 0.794, Specificity 0.992, F1 score 0.741, NPV 0.995을 기록하였다 (표 2). 자연어 형태의 판정 사유에 대한 성능은 학습 데이터셋에서 BLEU 0.799, ROUGE-L 0.794, BERTScore-F1 0.823를 보였으며, 테스트 데이터셋에서는 BLEU 0.778, ROUGE-L 0.776, BERTScore-F1 0.819로 평가되었다 (그림 1).

표 2. Instruction-tuned 모델 재검사 판별 성능

Evaluation Metric	Accuracy	Sensitivity	Specificity	F1	NPV
Train (13,242)	0.994	0.976	0.995	0.880	0.999
Test (3,305)	0.987	0.794	0.992	0.741	0.995

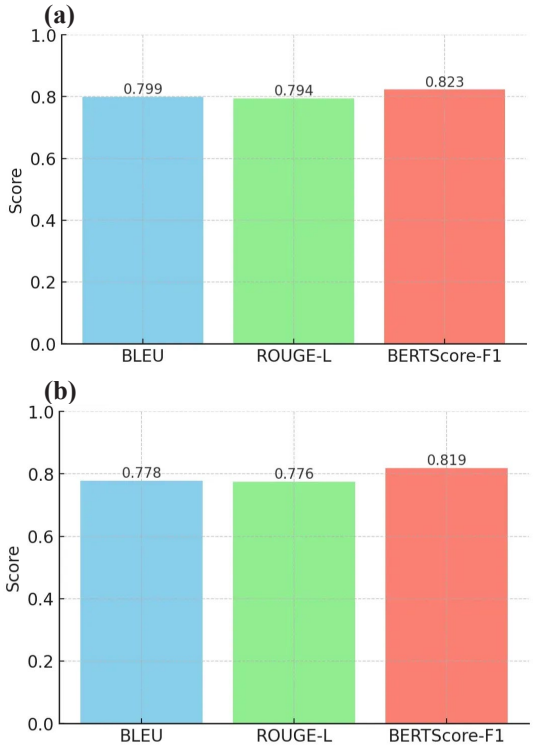


그림 1. Instruction-tuned 모델의 판정 사유 생성 성능. (a) Train set, (b) Test set.

4. 토의 및 결론

본 연구는 LLaMA 3.1-8B-Instruct을 Instruction-tuning하여 일반화학검사 결과의 재검사 여부를 자동 판정하고, 근거를 생성하는 모델을 개발하였다. 테스트 데이터셋에서의 평가 결과는 LLM이 임상적 맥락을 효과적으로 반영하여, 실제 검사실에서의 수기검증 업무를 보조할 수 있는 가능성을 제시한다. 다만 Sensitivity (0.794)와 F1 score (0.741)가 다소 낮게 나타났는데, 이는 전체 데이터 중 실제 재검사 필요 사례가 약 3% 수준으로 매우 적어 모델이 다수 클래스 (정상·재검사 불필요)에 상대적으로 편향될 가능성이 있었기 때문으로 판단된다. 이러한 경향은 모델이 보수적인 판단 방향, 즉 재검사가 불필요한 사례를 우선적으로 분류하려는 성향을 보였음을 시사한다. 향후에는 클래스 불균형을 완화하기 위한 데이터 증강 등의 전략을 통해 성능을 보완할 필요가 있다. 판정 사유 생성 태스크에서는 기록-출력 간 높은 유사도 (0.8 내외)를 보였다. 이는 LLM이 단순한 수치 비교를 넘어, 임상적 상황과 검사 이력을 근거로 한 설명 가능한 판단을 수행할 수 있음을 의미한다.

본 모델이 재검 불필요 건을 선별하여 근거를 제공한다면 약 70~80%의 수기검증 부담을 경감할 수 있을 것으로 예상된다. 다만 본 모델이 보여준 성능은 기술적 1차 검증 단계의 결과로서, 임상 현장에서의 실제 적용을 위해서는 오류 유형별 데이터 확대, 지속적인 모델 보정, 안전성 검증 절차가 필요하다. 그럼에도 불구하고 본 연구는 LLM을 활용해 일반화학검사 결과의 해석과 근거 제시를 동시에 수행할 수 있음을 입증하였으며, 검사자의 판단을 보조하는 1차 필터링 및 의사결정 지원 도구로 활용될 수 있는 가능성을 제시한다.

결론적으로, 본 연구는 LLM을 일반화학검사의 재검사 판정 과정에 적용하여 검증 자동화의 실현 가능성을 보여주었다. 향후 지속적인 데이터 확장과 모델 고도화를 통해 임상 현장에서 신뢰할 수 있는 LLM 기반 일반화학검사 결과 검증 시스템으로 발전할 수 있을 것으로 기대된다.

5. Acknowledgements

이 연구는 서울아산병원 아산생명과학연구원 지원 (2025IP0002, 2024IP0025) 과 한국연구재단 (과학기술정보통신부) 지원 (RS-2024-00335644)을 받아 수행된 연구임.

6. 참고 문헌

[1] Liss, David T., et al. "General health checks in adult primary care: a review." Jama 325.22 (2021): 2294-2306.

[2] Nazi, Zabir Al, and Wei Peng. "Large language models in healthcare and medical domain: A review." Informatics. Vol. 11. No. 3. MDPI, (2024).

[3] Omiye, Jesutofunmi A., et al. "Large language models in medicine: the potentials and pitfalls: a narrative review." Annals of internal medicine 177.2 (2024): 210-220.

[4] Shah, Nigam H., David Entwistle, and Michael A. Pfeffer. "Creation and adoption of large language models in medicine." Jama 330.9 (2023): 866 869.

[5] Thirunavukarasu, Arun James, et al. "Large language models in medicine." Nature medicine 29.8 (2023): 1930-1940.

[6] Yang, Xi, et al. "A large language model for electronic health records." NPJ digital medicine 5.1 (2022): 194.

[7] Luo, Renqian, et al. "BioGPT: generative pre-trained transformer for biomedical text generation and mining." Briefings in bioinformatics 23.6 (2022): bbac409.

Poster-227

Hybrid Vision-Language Framework for Tooth-Level Dental Report Generation from Panoramic X-Rays

Mobin Ahmadi[1*], Sang-Heon Lim[1], Ji Yong Han[1], Sujeong Kim[1], Heejin Yun[1], Dahee Kim[2], Hyunbin Yun[1], Won-Jin Yi[1,2,3]

Interdisciplinary Program of Bioengineering, Seoul National University, Seoul, South Korea[1]
Department of Applied Bioengineering, Graduate School of Convergence Science and Technology, Seoul National University, Seoul, South Korea[2]
Department of Oral and Maxillofacial Radiology, School of Dentistry and Dental Research Institute, Seoul National University, Seoul, South Korea[3]
[*]Mobeen@snu.ac.kr

ABSTRACT

Vision-language models (VLMs) often fail to detect multiple subtle abnormalities or precisely localize findings in dental panoramic X-rays, limiting accurate tooth numbering and diagnosis. We propose a hybrid framework combining expert vision models with a fine-tuned large language model for automatic dental report generation. YOLOv9e detects abnormalities, while Attention U-Net segments and numbers teeth by matching dilated tooth masks with detection boxes. The results prompt a LoRA-fine-tuned Qwen3-14B to generate detailed radiology reports. Using a private dataset of 1,811 panoramic X-rays, our system achieves high detection, segmentation, and reporting (BLEU) scores. This integration overcomes VLM limitations, improving precision and reliability for clinical dental radiology applications.

I. INTRODUCTION

Dental panoramic X-rays are essential for oral diagnosis but challenging to interpret due to overlapping structures, subtle abnormalities, low signal-to-noise ratio, and the need for precise tooth-level localization. VLMs can generate reports but often miss fine-grained findings. Detection and segmentation models, such as YOLO and Attention U-Net, accurately locate abnormalities but cannot produce coherent reports.

We propose a hybrid framework combining YOLOv9e [1] for detection, Attention U-Net [2] for tooth segmentation and numbering, and a LoRA-fine-tuned Qwen3-14B for report generation. Findings are assigned to teeth via mask–box overlap, guiding the language model to generate detailed, clinically coherent reports. Evaluated on 1,811 panoramic X-rays, the system improves accuracy and efficiency, supporting AI-assisted dental diagnostics.

II. METHODS

Data and Models Processing. We created a dataset of 1,811 dental panoramic X-rays with seven abnormality classes (including caries, periapical lesion, non-metallic fillings, metallic fillings, single crowns, dental bridges, and root canal fillings) tooth segmentation masks, and synthetic radiologist-approved reports. The dataset was split into 1,630 images for training and 181 images for testing. This data was used to train YOLOv9e for detection, Attention U-Net for segmentation, and fine-tuning Qwen3-14B for report generation.

Pipeline. Figure 1 presents our proposed pipeline. The input panoramic X-ray (I_{input}) is simultaneously processed by YOLOv9e for abnormality detection (I_d) and Attention U-Net for tooth instance segmentation and numbering (I_s). The segmentation masks are dilated using a 20×20 kernel and fused with the detection boxes to evaluate overlap (I_{fused}); if the coverage ($Coverage = \frac{|Mask \cap Box|}{|Box|}$) exceeds 0.5, the corresponding FDI tooth number T_n and tooth name are assigned to that abnormality L_i. The resulting paired data, containing each detected class and its associated tooth (T_n, L_i), are stored in a structured JSON format. This JSON output is then converted into ChatML-format zero-shot prompts, where the JSON acts as the user input and the synthetic expert dental report (EDR) serves as the assistant response. Using this paired dataset, Qwen3-14B is fine-tuned with LoRA [3] to generate clinically coherent, tooth-specific structured dental radiology reports.

III. RESULTS & DISCUSSION

Results show that high detection (Table 1) and segmentation scores (Table 2) enable accurate localization and tooth-level assignment of abnormalities, while the BLEU score (Table 3) demonstrates the LLM's ability to generate precise reports.

The framework overcomes VLM limitations in subtle multi-tooth detection and tooth-level localization, improving diagnostic accuracy and report coherence.

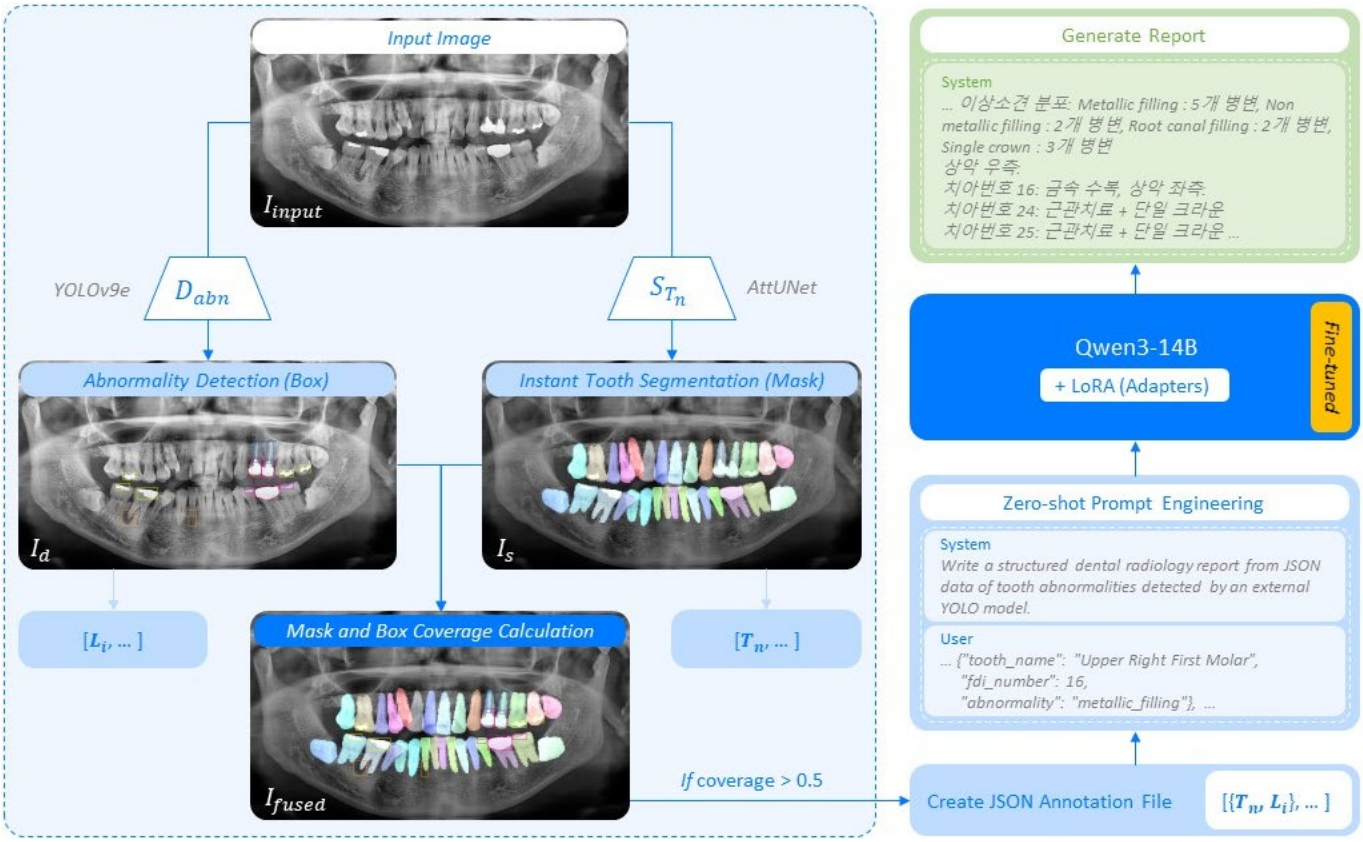


Figure 1. Overview of the proposed pipeline for tooth-level abnormality detection and report generation, including abnormality detection, tooth instance segmentation and numbering, mask–box fusion for tooth–abnormality pairing, JSON-based structured data creation, and report generation using the fine-tuned Qwen3 model.

Class	Precision	Recall	mAP50
All	**0.789**	**0.787**	**0.800**
Caries	0.483	0.400	0.382
Dental bridge	0.922	0.946	0.970
Implant	0.993	0.983	0.994
Metallic filling	0.883	0.950	0.958
Non-metallic filling	0.675	0.534	0.623
Periapical lesion	0.507	0.540	0.525
Root canal filling	0.944	0.975	0.984
Single crown	0.902	0.970	0.963

Table 1. Detection performance of YOLOv9e for each abnormality class.

Metric	Score
F1	0.901
IoU	0.854
Precision	0.907
Recall	0.927

Table 2. Overall tooth instance segmentation performance of Attention U-Net.

Metric	Score
BLEU Score	0.589

Table 3. Report generation performance of the fine-tuned Qwen3-14B model.

IV. ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (RS-2023-NR077088). This work was also supported by Technology Innovation Program (RS-2025-14322975) funded by the Ministry of Trade Industry & Energy.

V. References

[1] C.-Y. Wang, I.-H. Yeh, and H.-Y. M. Liao, “YOLOv9: Learning What You Want to Learn Using Programmable Gradient Information,” arXiv preprint arXiv:2402.13616, 2024.

[2] O. Oktay, J. Schlemper, L. Le Folgoc, M. Lee, M. Heinrich, K. Misawa, K. Mori, S. McDonagh, N. Y. Hammerla, B. Kainz, B. Glocker, and D. Rueckert, “Attention U-Net: Learning Where to Look for the Pancreas,” arXiv preprint arXiv:1804.03999, 2018.

[3] E. J. Hu, Y. Shen, P. Wallis, Z. Allen-Zhu, Y. Li, S. Wang, L. Wang, and W. Chen, “LoRA: Low-Rank Adaptation of Large Language Models,” arXiv preprint arXiv:2106.09685, 2021.

SHAP을 활용한 음성 감정 인식의 설명 가능한 특징 선택

몬돌 [1], 양윤지 [1], 노은주 [2], 맹세리 [3], 이상민 [*,1]
[1] 인하대학교 전기컴퓨터공학과
[2] 인하대병원 의생명연구원 중개연구센터
[3] 인하대병원 정신의학과
[*]e-mail: sanglee@inha.ac.kr

Explainable Feature Selection for Speech Emotion Recognition using SHAP

S I M M Raton Mondol [1], Yoon-ji Yang [1], Roh Eun Ju [2], Seri Maeng [3], Sangmin Lee [1]
[1] Department of Electrical and Computer Engineering, Inha University
[2] Translation Research Center, Institute for Biomedical Science, Inha University Hospital
[3] Department of Psychiatry, Inha University Hospital

Abstract

Speech Emotion Recognition systems often face the curse of dimensionality when dealing with high-dimensional acoustic feature spaces. This paper presents an iterative feature selection approach using SHapley Additive exPlanations to identify the most discriminative features for emotion classification. We evaluate three tree-based classifiers - Decision Tree, Random Forest, and XGBoost on the CREMA-D dataset focusing on three primary emotions: anger, happiness, and sadness. Results demonstrate that integrating explainable AI techniques into iterative model training improves discrimination accuracy while providing interpretable insights into acoustic emotion indicators.

1. Introduction

Speech Emotion Recognition (SER) has emerged as a critical technology in affective computing, enabling machines to interpret human emotional states through acoustic analysis. Applications span healthcare monitoring, human-computer interaction, customer service analytics, and mental health assessment. However, traditional SER systems extract comprehensive acoustic feature sets including prosodic, spectral, voice quality, and temporal characteristics resulting in high-dimensional spaces that challenge both model interpretability and computational efficiency.

This work investigates Explainable AI (XAI) techniques, particularly SHAP (SHapley Additive exPlanations) [1], a game-theoretic approach to model interpretability, for iterative feature selection in SER. We validate our approach on the CREMA-D dataset [2], a diverse emotional speech corpus across seven emotional categories spoken by 91 actresses. Our contributions include: (1) validation of SHAP-guided iterative training as an effective model refinement strategy, (2) comparative analysis of three tree-based classifiers revealing XGBoost's superiority, and (3) class-specific acoustic discrimination analysis. Results demonstrate that integrating explainability into the training loop enhances model learning beyond traditional hyperparameter optimization.

2. Methodology

2.1 Dataset

We utilize the CREMA-D (Crowd-sourced Emotional Multimodal Actors Dataset) corpus [2], focusing on three primary emotions: anger, happiness, and sadness. The dataset contains 17,316 utterances from 91 actors (48 male, 43 female) with diverse ethnic backgrounds, recorded at 16 kHz sampling rate. We extracted a balanced subset of 5,193 samples ensuring equal class distribution (1,731 samples per emotion) to prevent classification bias.

2.2 Feature Extraction

We extracted 162 handcrafted acoustic features per utterance spanning four categories: (1) Prosodic features, (2) Spectral features, (3) Voice quality metrics, and (4) Temporal dynamics.

2.3 Algorithm

Our SHAP-based iterative feature selection algorithm employs the following procedure:

Input: Dataset D, features F
Output: Optimized feature subset F* and model M*

1. Preprocessing: Split D (70-30), standardize features
2. Initialize: F_current ← F

3. while |F_current| > k:
4. Train {Decision Tree, Random Forest, XGBoost} on F_current
5. Select best model M via 5-fold cross-validation
6. Tune M using grid search (learning rate, depth, estimators)
7. Compute SHAP: S ← TreeExplainer(M).shap_values(X_train)
8. Rank: importance_i ← mean(|S_i|) for each feature i
9. F_current ← top-k features by importance
10. end while
11. Return: F_current, M

The algorithm iteratively refines the feature space through SHAP-guided pruning. At each iteration, three tree-based classifiers are trained and evaluated using stratified 5-fold cross-validation to ensure robust model selection. XGBoost consistently outperforms Decision Tree and Random Forest due to its gradient boosting framework.

3. Results and Analysis

We compared baseline classification against SHAP-guided training.

Table 1: Classification Report

	Accuracy	Precision	Recall	F1
Baseline	0.8617	0.86	0.86	0.86
SHAP-based	0.8698	0.87	0.87	0.87
Improvement	+0.81%	+1%	+1%	+1%

Table 2: Class-wise Performance (SHAP-based)

Emotion	Precision	Recall	F1-Score
Angry	0.88	0.86	0.87
Happy	0.82	0.81	0.82
Sad	0.90	0.94	0.92

SHAP-guided training improved accuracy by 0.81 percentage points (86.17% → 86.98%) despite using the same 162 features. This gain stems from SHAP's ability to identify and emphasize truly discriminative features during the iterative refinement process, effectively re-weighting feature importance.

Sadness achieved the highest F1-score (0.92), indicating strong acoustic distinctiveness. Happiness proved most challenging (F1=0.82), likely due to acoustic similarity with neutral speech and individual expression variations. Anger demonstrated balanced performance (F1=0.87) with high precision (0.88).
The SHAP-based approach showed consistent improvement over the baseline despite maintaining the same feature count. This suggests that the iterative training process with SHAP feedback helps the model learn more effective feature representations and decision boundaries. The algorithm completed convergence within 2 iterations, demonstrating computational efficiency.

4. Discussion and Conclusion

This work demonstrates that SHAP-based iterative training enhances speech emotion recognition through explainability-driven model refinement. Our approach achieved 86.98% accuracy on the CREMA-D dataset for three-class emotion classification (angry, happy, sad), representing a 0.81% improvement over baseline methods using XGBoost classifiers.

The results validate that SHAP's feature importance feedback improves model learning even in early training iterations. Key findings include: **(1)** SHAP-guided training enhances performance without requiring feature reduction, **(2)** Sadness exhibits the strongest acoustic discriminability (F1=0.92, 0.94 recall), while happiness remains challenging (F1=0.82).

The current experiment captured early-stage results (Iteration 2). Future work should: (a) Extend to 6-7 emotion classes for comprehensive evaluation, (b) Validate across multiple datasets (RAVDESS, TESS), and (c) Integrate with deep learning architectures using DeepSHAP for end-to-end learned representations. These extensions will establish whether aggressive feature pruning maintains the observed performance gains while achieving the targeted computational efficiency improvements.

Acknowledgements

This research was supported by the Assistive Technology Commercialize R&D Project for Independent Living for People with Disability and Older People by the Ministry of Health & Welfare, Republic of Korea (grant number: RS-2024-00434322) and National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (RS-2024-00348937).

References

[1] Scott M. Lundberg and Su-In Lee. 2017. A unified approach to interpreting model predictions. In Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS'17). Curran Associates Inc., Red Hook, NY, USA, 4768–4777.

[2] Cao H, Cooper DG, Keutmann MK, Gur RC, Nenkova A, Verma R. CREMA-D: Crowd-sourced Emotional Multimodal Actors Dataset. IEEE Trans Affect Comput. 2014 Oct-Dec;5(4):377-390.

Poster-229

필적 분석 기반 알츠하이머병 진단 과제 난이도별 머신러닝 모델 성능 비교

정재원[1], 김경이[2*]

인제대학교 AI소프트웨어학부[1], 인제대학교 AI소프트웨어[2*]

Comparison of Machine Learning Model Performance by Difficulty Level in Handwriting Analysis-Based Alzheimer's Disease Diagnosis Tasks

Jae-Won Jung[1], Kyoung-Yee Kim[2*]

AI Software[1] Inje University, Korea, AI Software[2*] Inje University, Korea

[1]ai20214598@gmail.com, [*2]kimky@inje.ac.kr

Abstract

This study proposed a method for diagnosing Alzheimer's disease based on handwriting analysis. It compared the performance of five machine learning models—XGBoost, LightGBM, SVM, Random Forest, and Neural Network—using the DARWIN dataset from the UCI Machine Learning Repository. Experimental results showed XGBoost and LightGBM performed best with 80.0% accuracy, with LightGBM achieving an excellent AUC of 0.908. Analysis of task difficulty revealed that the accuracy for Hard tasks was 14.3 percentage points higher than for Easy tasks, confirming that handwriting changes due to Alzheimer's become more pronounced in more complex cognitive tasks. Furthermore, writing time was identified as the most important diagnostic indicator. The top-performing XGBoost model recorded a sensitivity of 88.9%, suggesting its potential as a low-cost Alzheimer's diagnostic tool.

1. 연구 배경

알츠하이머병은 전 세계적으로 약 5,500만 명이 앓고 있는 대표적인 치매 질환이다[1]. 고령화 사회로 진입하면서 환자 수는 계속 증가하고 있다. 알츠하이머는 현재까지 완치법이 없기 때문에 조기에 발견하여 관리하는 것이 중요하다. 하지만 기존의 진단 방법인 MRI, PET 검사는 비용이 높고 시간이 오래 걸려 대규모 선별 검사에는 적합하지 않다는 한계가 있다[2].

본 연구에서는 필적 분석을 통한 인지 장애 진단 프로토콜을 기반으로, UCI Machine Learning Repository의 DARWIN 데이터셋[3]을 활용하여 머신러닝 기반 알고리즘을 비교하고, 각 모델의 성능을 진단 과제를 난이도별로 분류해 각 난이도에 최적화된 모델을 정량적으로 분석한다. 이를 통해 알츠하이머 검출을 위한 인공지능 적용 가능성을 분석하고자 한다.

2.연구 방법

본 연구는 UCI Machine Learning Repository의 DARWIN 데이터셋을 활용하였으며 해당 데이터셋은 174명의 참가자로부터 25가지 필기 과제를 통해 수집된 451개의 필적 특징을 포함한다. 참가자는 알츠하이머 환자 89명과 건강한 대조군 85명으로 구성되었다. 각 과제는 난이도에 따라 Easy, Medium, Hard로 분류되었다. 필적 특징은 필기에 소요된 시간, 공중에서 펜을 움직인 시간, 종이 위에서 필기한 시간 등의 시간 관련 지표와 필기 속도, 필압, 손떨림 정도, 운동 복잡도 등 다양한 인지 및 운동 기능을 반영하는 지표들로 구성되어 있다. 알츠하이머 진단의 정확도를 평가하기 위해 5가지 머신러닝 알고리즘으로 XGBoost, LightGBM, SVM, Random Forest, Neural Network를 선정하였다. 데이터 전처리는 결측치 평균 대체, StandardScaler 정규화, SMOTE를 통한 클래스 불균형 해결 후 80:20으로 분할하였다. K-fold cross-validation을 수행하였으며, 정확도, 재현율, 정밀도, F1-Score, AUC로 평가하고 과제 난이도별 성능도 분석하였다.

3. 연구 결과

5가지 머신러닝 모델의 성능을 비교한 결과는 그림 1과 같다. XGBoost와 LightGBM이 80.0%의 정확도로 가장 높은 성능을 보였다. XGBoost는 재현율 88.9%로 알츠하이머 환자를 발견하는 능력이 좋았으며, LightGBM은 정밀도 78.9%로 건강한 사람을 환자로 오진하는 비율이 낮았다. SVM은 77.1%, Random Forest는 74.3%, Neural Network는 68.6%의 정확도를 기록하였다. ROC 곡선 분석 결과, LightGBM이 AUC 90.8%로 가장 높은 판별 능력을 보였으며, 이는 우수한 수준으로 평가된다. XGBoost는 88.6%, Neural Network는 83.3%, Random Forest는 84.3%, SVM은 83%의 AUC를 기록하였다.

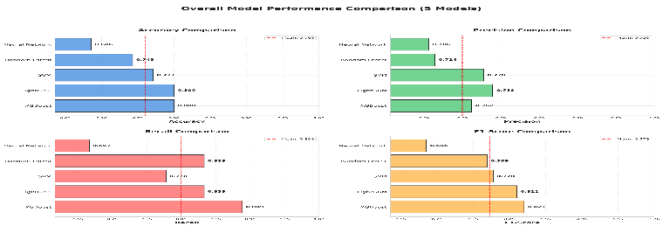


그림 1. 5가지 머신러닝 모델의 전체 성능 비교

과제 난이도에 따른 각 모델의 성능 변화를 분석한 결과는 그림 2와 같다. Easy 과제에서는 Random Forest가 71.4%로 가장 높은 정확도를 보였으며, XGBoost는 68.6%, LightGBM은 65.7%, SVM은 74.3%를 기록하였다. Neural Network는 62.9%로 가장 낮은 성능을 보였다. Easy 과제는 단순한 필기 작업으로, 알츠하이머로 인한 필적 변화가 적게 나타났다. Medium 과제에서는 Random Forest와 LightGBM이 80.0%로 가장 높은 성능을 보였으며, XGBoost는 77.1%, SVM은 77.1%를 기록하였다. Neural Network는 71.4%로 Easy 과제보다 향상된 성능을 보였다. 중간 난이도 과제에서 모델 간 성능 차이가 명확히 나타나기 시작하였다. Hard 과제에서는 XGBoost가 82.9%의

정확도를 달성하여 Easy 과제보다 14.3%p 높은 성능을 보였고, LightGBM도 80%로 높은 정확도를 기록하였다. Random Forest는 77.1%, SVM은 77.1%로 일관된 성능을 유지하였으며, Neural Network는 57.1%로 난이도가 증가할수록 성능이 저하되었다. 이러한 결과는 복잡한 인지 과제일수록 알츠하이머로 인한 필적 변화가 더 명확하게 나타나며, 난이도에 따라 최적 모델이 달라짐을 말한다. Easy와 Medium에서는 Random Forest가, Hard에서는 XGBoost가 가장 우수한 성능을 보였다.

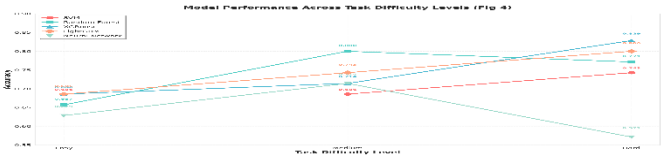


그림 2. 과제 난이도별 모델 정확도 변화

각 모델에서 알츠하이머 진단에 중요한 필적 특징을 분석한 결과는 그림 3과 같다. 난이도별 특징 중요도 분석 결과, Easy 과제에서는 Random Forest, XGBoost, LightGBM 세 모델이 과제 1-4의 총 소요 시간과 필기 속도를 중요한 특징으로 선정하였다. Medium 과제에서는 과제 5-12의 공중 펜 이동 시간과 필압 변화가 높은 중요도를 보였다. Hard 과제에서는 세 모델 모두 23번 과제의 총 소요 시간을 가장 중요한 특징으로 선정하였으며, 복잡한 필기 동작과 관련된 운동 복잡도 및 손떨림 정도가 높은 순위를 차지하였다. 이러한 Easy, Medium, Hard 전 난이도에 걸친 분석을 통해 복잡한 필기 과제의 수행 시간이 알츠하이머 진단에 핵심적인 지표임을 의미한다. 시간 관련 특징들이 모든 난이도에서 일관되게 높은 순위를 차지하였으며, 이는 알츠하이머 환자가 필기 과정에서 더 많은 시간을 소요한다는 것을 보여준다. 특히 Hard 과제의 특징들이 평균적으로 43.9%로 가장 높은 중요도를 보였으며 Medium 과제는 35.2%, Easy 과제는 21.0%를 기록하여 과제 난이도가 증가할수록 진단 특징의 중요도가 높아지는 것을 확인하였다. 이는 Hard 과제에서 모델 성능이 높았던 결과와 일치한다.

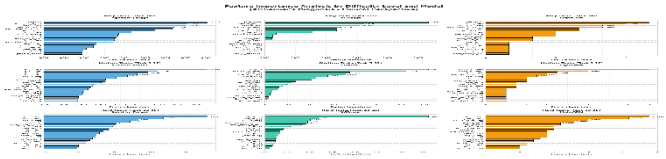


그림 3. 모델별 상위 20개 주요 필적 특징 중요도

난이도별 최적 모델의 진단 성능을 혼동 행렬을 통해 분석한 결과는 그림 4와 같다. Easy 과제에서 XGBoost 모델은 민감도 55.6%, 특이도 82.4%를 기록하였다. 양성 예측도(PPV)는 76.9%, 음성 예측도(NPV)는 63.6%로 나타났다. False Negative Rate이 44.4%로 비교적 높게 나타나 실제 알츠하이머 환자를 건강한 사람으로 오진하는 경우가 많았으며, False Positive Rate은 17.6%로 나타났다. Medium 과제에서 Random Forest 모델은 민감도 72.2%, 특이도 88.2%를 보여 Easy 과제보다 향상된 성능을 나타냈다. 양성 예측도(PPV)는 86.7%, 음성 예측도(NPV)는 75%로 나타났다. False Negative Rate이 27.8%로 감소하였으며, False Positive Rate은 11.8%로 낮게 나타나 건강한 사람을 환자로 오진하는 비율이 줄어들었다. Hard 과제에서 XGBoost 모델은 민감도 88.9%로 실제 알츠하이머 환자의 대부분을 정확히 식별하였으며, 특이도는 76.5%, 양성 예측도(PPV) 80.0%, 음성 예측도(NPV) 86.7%로 나타났다. False Negative Rate이 11.1%로 매우 낮아 환자를 놓치는 비율이 적었으나, False Positive Rate이 23.5%로 나타나 건강한 사람을 환자로 오진하는 경우가 일부 있었다. 난이도가 증가할수록 민감도가 향상되는 경향을 보였으며, 이는 복잡한 인지 과제일수록 알츠하이머로 인한 필적 변화가 정확히 드러나 환자 판별 능력이 향상됨을 의미한다.

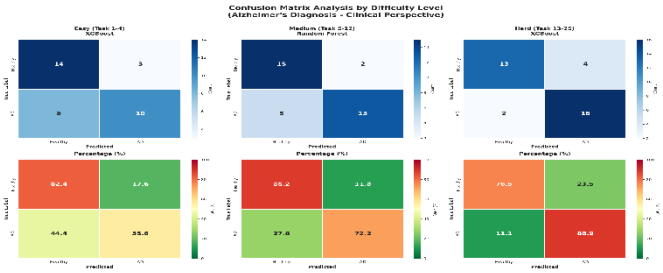


그림 4. XGBoost 모델의 혼동 행렬 및 성능 지표

4. 결론

XGBoost와 LightGBM이 80%의 정확도와 88% 이상의 AUC로 가장 높은 성능을 보였으며, 특히 LightGBM은 90.8%의 AUC 성능을 달성하였다. 난이도별 분석 결과, Easy 과제에서는 Random Forest가 71.4%, Medium 과제에서는 Random Forest와 LightGBM이 80%, Hard 과제에서는 XGBoost가 82.9%로 가장 높은 정확도를 보여 복잡한 인지 과제가 알츠하이머로 인한 필적 변화를 정확히 드러냄을 확인하였다. Easy, Medium, Hard 난이도에 걸쳐 필기 소요 시간이 공통적으로 가장 중요한 진단 지표로 확인되었으며, Hard 과제에서 XGBoost 모델은 민감도 88.9%로 우수한 환자 판별 능력을 보였다.

하지만, 현재 데이터셋은 알츠하이머 환자와 건강한 사람의 이진 분류만 가능하여 질병의 진행 단계를 구분하지 못하는 한계가 있다. 실제 임상에서는 정상, 경도 인지 장애, 초기, 중기, 말기 알츠하이머 등 다양한 발병 단계가 존재한다. 따라서 향후 연구에서는 세부 발병 단계를 정답값으로 구분하는 분류 데이터셋을 구축하여 질병 진행 정도를 예측할 수 있는 모델 개발이 필요하다.

4. Acknowledgements

본 과제(결과물)는 교육부와 경상남도의 재원으로 지원을 받아 수행된 경상남도 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 연구결과 입니다.(202502440001)

5.참고 문헌

[1] Laver, K., Connolly, C., Priest, L., & Rahja, M. (2025). Brain health and dementia prevention: getting the message across. Aging & Mental Health, 29(7), 1163–1165. https://doi.org/10.1080/13607863.2025.2478157

[2] Dubois, B., et al. (2014). "Advancing research diagnostic criteria for Alzheimer's disease: the IWG-2 criteria." The Lancet Neurology, 13(6), 614-629.

[3] N. D. Cilia, C. De Stefano, F. Fontanella, A. S. Di Freca, An experimental protocol to support cognitive impairment diagnosis by using handwriting analysis, Procedia Computer Science 141 (2018)

Poster-230

위암 병리 이미지 분류를 위한 경량 딥러닝 모델의 효율성 비교

우현진[1], 김경이[2*]

인제대학교 AI소프트웨어

Efficiency Comparison of Lightweight Deep Learning Model for Gastric Cancer Pathology Image Classification

Hyeonjin Woo[1] , Kyoungyee Kim[2*]

School of AI software, Inje University, Korea

*kimky@inje.ac.kr

Abstract

Gastric cancer is a common cancer worldwide and ranks among the leading causes of cancer-related deaths. While prognosis significantly improves with early detection, the number of pathologists is insufficient relative to the increasing incidence of cancer. This study aims to evaluate the efficiency of lightweight deep learning models in image classification for developing an AI diagnostic system deployable in clinical settings. We performed 4-class classification using 9,000 gastric cancer pathology images, divided into a training set (7,000 images), validation set (1,000 images), and test set (1,000 images). We compared three models under identical conditions: the lightweight models EfficientNet-B0 and MobileNetV3-Large, and the traditional model ResNet50. The results show MobileNetV3-Large achieved the highest accuracy of 98.8%, surpassing ResNet50 by 0.7% accuracy, with 2.4 times faster inference speed and a model size 5.6 times smaller. This study demonstrates that lightweight models can outperform traditional large-scale models and highlights the need to prioritize model efficiency for clinical deployment.

1. 연구 배경

위암(Gastric Cancer)은 전 세계적으로 흔한 암이며, 암 사망원인 중 상위권을 차지하는 질환이다. 위암의 예후는 조기 발견 여부에 크게 좌우되는데, 조기 위암의 5년 생존율은 90% 이상인 반면, 진행성 위암은 30% 이하로 급격히 감소한다[1]. 따라서 정확하고 신속한 조기 진단이 환자의 생존율 향상에 필수적이다. 하지만 암 발생률이 증가하고 있는 반면, 병리 전문의의 수는 이에 비례하여 증가하지 못하는 문제가 있다. 이를 위한 해결책으로 인공지능 기반 진단 보조 시스템이 주목받고 있다.

인공지능 기술의 발전으로 의료 영상 분석 전반에도 영향을 미치며 빠르게 확산되고 있다[2]. 특히 딥러닝(Deep Learning) 기술은 의료 영상 분야에 적용하는 연구가 급증하고 있으며[3], 병리학 분야에서는 조직 슬라이드를 디지털화 한 병리 이미지(Pathology Image)를 통해 인공지능 모델이 질병의 유무나 종류를 판별하는 기술이 연구되고 있다[4]. 이러한 인공지능 기술이 적용된 디지털 병리(Digital Pathology) 기술은 병리 전문의의 업무 부담을 줄이고, 진단의 일관성과 정확도를 향상시킬 수 있다는 점에서 가치가 크다.

그러나 보통 딥러닝 기술이 적용되는 고성능 모델들은 일반적으로 수천만에서 수억 개의 파라미터를 포함하며, 학습에 상당한 시간과 연산 자원을 요구한다. 하지만 고성능 모델의 학습 및 배포를 위해서는 고성능 GPU, 대용량 저장장치 등 고가의 하드웨어 투자가 필요하며, 시스템 구축 및 유지보수를 위한 전문 인력 확보 또한 필수적이다. 이러한 문제들은 실제 인공지능 도입에 큰 장벽이 된다.

본 연구는 AI-Hub의 위암 병리 이미지를 이용하여 위염, 장형선암, 미만형선암, 혼합형선암의 4-class 분류를 수행한다. 분류 모델은 경량 모델인 EfficientNet-B0, MobileNetV3-Large와 비교적 큰 모델인 ResNet50을 동일한 데이터셋과 실험조건에서 학습시켜 비교를 수행한다. 수행 결과는 Accuracy, Precision, Recall, F1-Score와 같은 성능 지표와 함께 학습 시간, 추론 시간, 모델 크기 등 효율성 지표를 종합적으로 측정하고 분석하고자 한다. 이를 통해 위암 병리 이미지 분류에서 효율적인 모델 선택 기준을 제시하고자 한다.

2.연구 방법

본 연구는 위암 병리 이미지의 4-class 분류 작업에서 경량 딥러닝 모델의 효율성을 분석하기 위해 설계되었다. 데이터셋은 1024×1024크기의 PNG 형식의 이미지 9,000장과 각 이미지에 JSON 형식의 어노테이션 파일이 쌍으로 제공되었으며, 각 클래스는 2,250장씩 균등하게 분포되어 있다. 학습과 검증 세트는 훈련용 이미지 8,000장을 7:1 비율로 random_split하여 생성하였으며, 테스트 세트는 별도로 제공된 1,000장을 사용하였다.

모델 비교 대상은 EfficientNet-B0, ResNet50, MobileNetV3-Large로 3가지를 선정하였다. 모든 모델은 사전학습된 가중치를 활용하였으며, 최종 분류층을 4-class 출력으로 재구성하였다. 학습 과정에서는 모든 레이어를 fine-tuning하는 방식을 채택하였다. EfficientNet-B0의 경우 Dropout(p=0.2)을 추가하여 과적합을 방지하였다.

모델 성능은 Accuracy, Precision, Recall, F1-Score와 같은 지표로 평가하였으며 효율성 측정은 파라미터 수와 FP16+FP32로 최적화된 모델크기, 단일 이미지 추론 지연시간(latency), 처리량(throughput, image/second)를 별도로 측정하였다.

실험 환경과 하이퍼파라미터는 표 1과 같다.

구분	항목	설정값
시스템 환경	운영체제	Ubuntu 22.04 LTS
	Python	3.12.7
	PyTorch	2.6.0
	CUDA	12.4

하드웨어	GPU	NVIDIA RTX 3090 24GB × 3
학습설정	Batch Size	32
	Learning Rate	0.001
	Optimizer	Adam
	Epochs	30

표 1. 실험 환경 및 하이퍼파라미터

3. 연구 결과

3가지 딥러닝 모델을 동일한 조건에서 학습시키고, 독립적인 테스트 세트로 평가한 결과는 표 2과 같다.

모델	Accuracy	Precision	Recall	F1-Score
EfficienNet-B0	97.80%	97.87%	97.80%	97.80%
ResNet50	97.70%	97.82%	97.70%	97.69%
MobileNetV3-Large	98.40%	98.49%	98.40%	98.40%

표 2. 모델 성능 비교

테스트 결과 모든 모델이 97% 이상의 높은 정확도를 달성하였다. MobileNetV3-Large가 98.40%로 가장 높은 정확도를 기록하였으며, EfficientNet-B0이 97.80%, 마지막으로 ResNet50이 97.70%로 가장 낮은 정확도를 보였다.

각 모델의 효율성을 평가하기 위해 계산 복잡도와 자원 사용량을 측정한 결과는 표 3와 같다.

모델	파라미터 (M)	크기 (MB)	학습시간 (분)	추론시간 (ms)	처리량 (img/s)
EfficienNet-B0	4.01	15.31	35.11	14.03	71.3
ResNet50	23.52	89.71	35.04	21.87	45.7
MobileNetV3-Large	4.21	16.05	35.02	9.30	107.5

표 3. 모델 효율성 비교

ResNet50은 23.52M의 파라미터로 다른 두 모델 대비 약 6배 많은 파라미터를 사용했다. EfficientNet-B0과 MobileNetV3-Large는 각각 4.01M, 4.21M의 파라미터로 유사한 수준을 보였다. 모델 크기 측면에서는 MobileNetV3-Large가 16.05MB, EfficientNet-B0이 15.31MB, 마지막 ResNet50이 89.71MB로 세 모델 중 가장 큰 모델 크기를 보였으며, 가장 많은 파라미터와 큰 모델 크기를 가진 ResNet50은 추론 시간에서 MobileNetV3-Large에 비해 2.4배 느린 성능을 보였다.

4. 결론

본 연구 결과, 위암 병리 이미지 분류에서 MobileNetV3-Large가 ResNet50 대비 0.7% 높은 정확도, 2.4배 빠른 추론 속도, 5.6배 작은 모델 크기를 달성하며, 경량 모델도 우수한 성능을 보일 수 있음을 입증했다. 특히 ResNet50이 가장 많은 파라미터와 가장 큰 모델 크기를 가졌음에도 불구하고 가장 낮은 정확도를 기록했다는 것이다. 이는 단순히 모델의 용량을 늘리는 것이 아니라, 효율적인 아키텍처 설계가 성능 향상의 핵심임을 알려준다. 이러한 결과는 의료 AI 시스템 개발 시 모델 효율성을 우선 고려해야 함을 보여주며, 제한된 컴퓨팅 자원을 가진 병원 환경이나 신속한 진단 결과가 요구되는 진료 현장에서는 경량 모델의 도입 가능성을 확인할 수 있을 것이다.

5. Acknowledgements

본 과제는 교육부와 경상남도의 재원으로 지원을 받아 수행된 경상남도 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 연구결과 입니다.(202502440001)

6.참고 문헌

[1] “No title,” *Yeungnam University Journal of Medicine*, vol. 13, no. 2. Yeungnam University College of Medicine, p. 173, 1996.

[2] Y. Bian, J. Li, C. Ye, X. Jia, and Q. Yang, "Artificial intelligence in medical imaging: From task-specific models to large-scale foundation models," *Chinese Medical Journal*, vol. 138, no. 6, pp. 651-663, Mar. 2025, doi: 10.1097/CM9.0000000000003489.

[3] Y. J. Kim and K. G. Kim, "Development of an optimized deep learning model for medical imaging," *Journal of the Korean Society of Radiology*, vol. 81, no. 6, pp. 1274-1289, Nov. 2020, doi: 10.3348/jksr.2020.0171.

[4] C. McGenity, E. L. Clarke, C. Jennings, G. Matthews, C. Cartlidge, H. Freduah-Agyemang, D. D. Stocken, and D. Treanor, "Artificial intelligence in digital pathology: a systematic review and meta-analysis of diagnostic test accuracy," *npj Digital Medicine*, vol. 7, no. 114, pp. 1-19, May 2024, doi: 10.1038/s41746-024-01106-8.

Poster-231

머신러닝을 활용한 전방십자인대 파열과 관련된 경골 형상의 3차원 CT 기반 통계적 형상 분석

이소흔[3*] 김성환[1*2*3*]

연세대학교 의과대학 관절경 및 관절 연구소[1,]

연세대학교 의과대학 세브란스병원 정형외과학교실[2,] 연세대학교 의료기기산업학과[3]

3-Dimensional CT-Based Statistical Shape Analysis of Tibial Morphology Associated with Anterior Cruciate Ligament Rupture Using Machine Learning

So-Heun Lee[3*] Sung-Hwan Kim, M.D., Ph.D.[1*2*3*]

Arthroscopy and Joint Research Institute, Yonsei University College of Medicine, Seoul, Republic of Korea.[1*]

Department of Orthopedic Surgery, Severance Hospital, Yonsei University College of Medicine, Seoul, Republic of Korea[2]

Department of Medical Device Engineering and Management,Yonsei University, Seoul, Republic of Korea[3*]

[*]orthohwan@gmail.com

Abstract

Anterior cruciate ligament (ACL) injury is a common knee pathology that has been linked to morphological risk factors. While prior 2D imaging studies have yielded inconsistent results, recent 3D analysis approaches have gained attention. Here, we present a CT-based statistical shape modeling (SSM) framework combined with machine learning to automatically detect anatomical landmarks and classify ACL injuries. Shape variations were extracted via principal component analysis, and key PCs were used to train classifiers. Among models tested, random forest and LDA achieved the highest predictive performance. This automated machine learning pipeline enables morphological interpretation and accurate ACL injury prediction without manual annotation.

1. 연구 배경

전체 무릎 부상의 약 50%를 차지하는 전방십자인대파열은 어리고 활동적인 사람에게 많이 일어나며 골관절염의 위험을 증가시킨다. 메커니즘 연구 이후로 뼈형상학적 위험요인이 많이 연구하고 있다. 하지만, 과거 2D 방사선 연구에서는 해부학적 구조를 적절하게 시각화하지 못하는 한계로 상반되는 결과가 많다. 그래서 3D 연구로 합의점을 도출하려고 한다. 과거 3D 연구에서는 랜드마크를 수동으로 지정하여 시간이 오래 걸리고 관찰자 편향이 발생할 수 있다.

최근, 머신러닝 기반으로 3D 랜드마크 자동 탐지를 기반으로 Altas를 찾는 Stastical shape model (SSM)이 주목받고있다. 또한, 이를 기반으로 Stastical Shape analysis (SSA)를 통해 주요한 Principal component (PC) 축을 기반으로 전방십자인대파열 환자군과 정상군의 특징적인 shape variation 범위를 확인할 수 있다. Altas를 찾는 것에서 나아가 머신러닝 기반으로 환자를 분류하는 예측모델을 학습하는데 응용되고 있다.[1]

Stastical shape model (SSM)은 그룹에 따라 평균모델을 생성할 수 있기 때문에 원하는 군 내부의 모델을 디자인해서 외부 모델끼리 비교하는 것이 가능하다. SSM을 프로그래밍 하는 보편적인 방법은 비지도학습을 통해 랜드마크를 기반으로 개별모델을 이용하여 평균모델을 생성할 수 있다.

Principal component (PCA)는 SSM 모델을 기반으로 Shape analysis는 PCA를 기반으로 Principal component 축을 기반으로 모양의 패턴을 포착하는 것이다. 이를 통해 정상군과 환자군의 숨겨진 모양 변화 범위를 시각화 할 수 있다. [2]

비지도학습 기반인 PC score는 지도학습인 레이블링과 결합하여 환자를 분류하는 머신러닝 예측 모델을 학습시키는데 활용이 되고 있다. 따라서 본 논문에서는 SSM으로 정상군과 환자군을 비교하여 형상학적 차이를 확인하고 추가로 성별차이도 확인하도록 디자인했다.
또한, PCA로 정상군과 전방십자인대파열 환자군의 shape variation으로 변화 범위를 확인하고 이를 기반으로 전방십자인대파열을 예측하는 머신러닝 분류모델을 학습시켜서 비교하였다.

2.연구 방법

3D simulation에 사용된 CT는 후향적으로 코호트 군은 총 120명이고 ACL 60명과 정상군 60명을 사용하였다.
ACL군과 정상군을 비교하고 성별 차이를 확인하기 위해 propensity matching 을 수행하였다. 남녀 비율을 50:50으로 비율을 맞추고 위험요인인 키, 몸무게, 나이, 오른쪽/왼쪽을 통제하였다.

모든 CT 스캔들은 Somatom Sensation 64 스캐너(Simens)를 사용하여 시행되었습니다. 슬라이스 두께 axial 1mm를 사용하였다. Mimics(Version 17; Materialise)에 가져와서 뼈의 윤곽선을 따라서 threshold를 설정하고 smoothing을 하여 3D surface model을 STL 파일로 생성한다. 좌측 대퇴골 STL을 3-Matics(Materialise, Belgium)을 Mirror 기능을 사용하여 우측 모델로 변경하였습니다.

STL은 이후 다른 3D Slicer (5.0.3)에 옮겨서 Stastical shape analysis를 위하여 pseudo landmark를 이용하여 자동으로 reference landmark를 생성하고 ALPACA를 이용하여 자동으로 참조모델에서 개별모델로 5473개의 동일한 해부학적 랜드마크를 등록하고 GPA 및 PCA 기반으로 SSM

model 만들고 Principal component analysis를 통해 주요한 PC 축을 기반으로 변형된 +3SD, -3SD 모델을 생성하였다.[4]

3-Matics(Materialise, Belgium)의 컬러맵을 이용하여 정상군을 기준으로 전방십자인대 파열 환자군의 평균모델들 간의 형상학적 차이를 평가하였다.

이후 생성된 형상 구성 요소들의 다변량 분석을 수행하였다. 먼저 총 120명의 정상군과 환자군의 누적분산그래프로 PC1~10까지 88%의 형상을 설명하는 것을 확인하여 로지스틱 회귀분석에 사용하였다. P-value <0.05 이하를 통계적으로 유의하다. MANOVA를 이용하여 PC1~10의 ACL 유무와 성별 차이를 확인하였다. PC 분포도를 3D로 시각화하여 해석하고 ACL 예측 가능성을 sigmoid 함수를 그려서 어떤 PC의 +3SD, -3SD 형상에 해당하는지 확인하였다. 이를 PC 변형 모델을 생성하여 임상적인 평가를 수행하였다.

ACL을 구별하는데 주요한 특징 변형 모델들인 PC1,2,3,4으로 LDA, SVM(with linear), SVM(with rbf), K-NN, Random Forest의 분류모델을 이용하여 ACL 예측을 시도하였다. 5-fold로 AUC 커브를 그렸다. 혼동행렬을 시도하여 위양성, 위음성이 최소화 되는지 확인하였다.

3. 연구 결과

Medial-lateral, Anterior-posterior, Proximal-distal 축을 기준으로 비교하였다. 1) 성별에 무관하게, intercondylar foot print가 내측으로 상승하면서 posterior tibial slope이 증가하고 lateral plateau의 직경이 감소하면서 보완적으로 lateral plateau가 상승하여 anterior tibial slope이 증가하여 전방 전위와 회전 불안성을 유발한다.
2) 남성에서, 두드러지게 intercondylar foot print가 안쪽으로 상승하고 posterior tibial slope 증가를 확인할 수 있습니다. lateral tibial slope, medial tibial slope이 증가한다. 3) 여성에서, lateral plateau표면이 전체적으로 상승하고 후방의 부피가 감소하면서 lateral tibial slope이 증가한다.

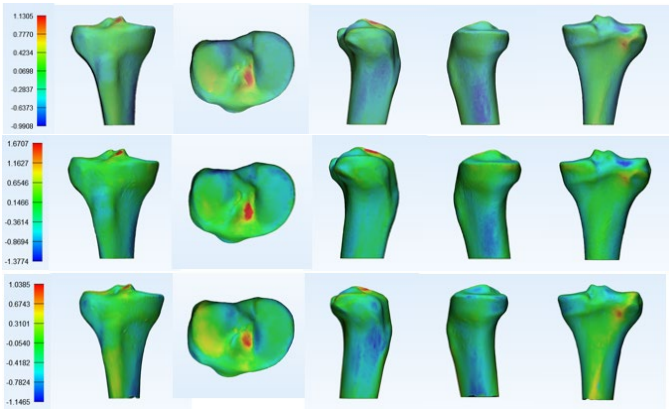


그림 1. 정상군-환자군의 평균모델을 비교(통합 ,남성, 여성)

로지스틱 회귀분석 결과, PC1,2,3,4가 통계적으로 유의하다. Sigmoid curve로 ACL과 관련있는 +3SD는 PC2,3, -3SD는 PC1,4를 확인하였다. PC1은 남성에서 lateral plateau가 상승하면서 lateral slope이 증가하고, intercondylar footprint가 상승하여 tibial slope이 증가한다. PC4은 PC1의 보조요인으로 medial slope이 증가하면서 전방전위를 유발한다. PC2는 성별차이를 반영하고 tibia tuberosity가 전방화된다. PC3은 posterior condyle 직경이 증가하였다.

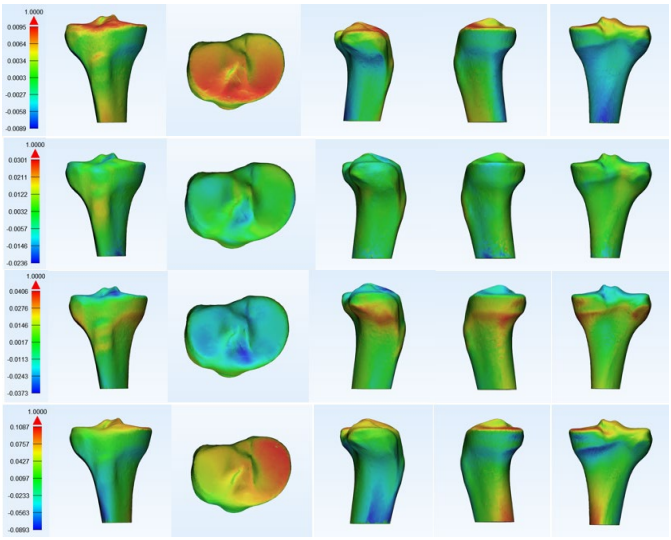


그림 2. PCA 기반으로 주요한 형상 변화 모델들

Feature selection으로 전체적으로 AUC가 0.92 이상으로 높은 예측력을 보인다. K-NN은 AUC 0.934로 가장 높지만 정밀도가 낮아서 보조모델로 사용된다. 반면, LDA, SVM-linear는 민감도와 특이도 간의 균형이 잘 맞는 모델로, 임상적용 가능성이 높은 예측력을 보였다.

Model	Accuracy	Precision	Recall	Specificity	F1-score	Mean AUC
Logistic Regression	0.89 ± 0.07	0.90 ± 0.10	0.90 ± 0.06	0.88 ± 0.13	0.90 ± 0.07	0.92
LDA	0.89 ± 0.07	0.90 ± 0.10	0.90 ± 0.06	0.88 ± 0.13	0.90 ± 0.07	0.92
SVM (Linear)	0.89 ± 0.09	0.91 ± 0.11	0.88 ± 0.10	0.90 ± 0.12	0.89 ± 0.09	0.93
SVM (RBF)	0.87 ± 0.10	0.87 ± 0.13	0.88 ± 0.07	0.85 ± 0.16	0.87 ± 0.09	0.54
k-NN	0.88 ± 0.10	0.87 ± 0.11	0.92 ± 0.08	0.85 ± 0.12	0.89 ± 0.09	0.92
Random Forest	0.85 ± 0.11	0.87 ± 0.14	0.85 ± 0.10	0.85 ± 0.15	0.85 ± 0.10	0.92
XGBoost	0.81 ± 0.11	0.84 ± 0.14	0.78 ± 0.11	0.83 ± 0.15	0.81 ± 0.11	0.91

그림 2. 정상군-환자군의 평균모델을 비교(통합 ,남성, 여성)

1) 3D 형상분석을 통하여, 성별에 상관없이, posterior slope, lateral slope 증가와 경골 관절면의 비대칭은 전방 전위와 회전 불안정을 유발하여 인대에 과부하를 줄 수 있습니다. 남성에서, medial slope이 증가한다. 여성은, lateral slope이 증가한다.

2) 전체 모델 중 Linear SVM이 가장 균형 잡힌 최고 성능을 보였으며, 평균 AUC는 0.93으로 가장 높았습니다

5.참고 문헌

[1] Porto, A. (2021). ALPACA: A fast and accurate computer vision approach for automated landmarking of three-dimensional biological structures. Methods in Ecology and Evolution, 12, 2129 - 2144.
[2] Pedoia, V.(2015). Three-dimensional MRI-based statistical shape model and application to a cohort of knees with acute ACL injury.. Osteoarthritis and cartilage, 23 10, 1695-703 .
[3] J. Ambellan, F.(2019). Statistical Shape Models: Understanding and Mastering Variation in Anatomy.. Advances in experimental medicine and biology, 1156, 67-84 .

Poster-232

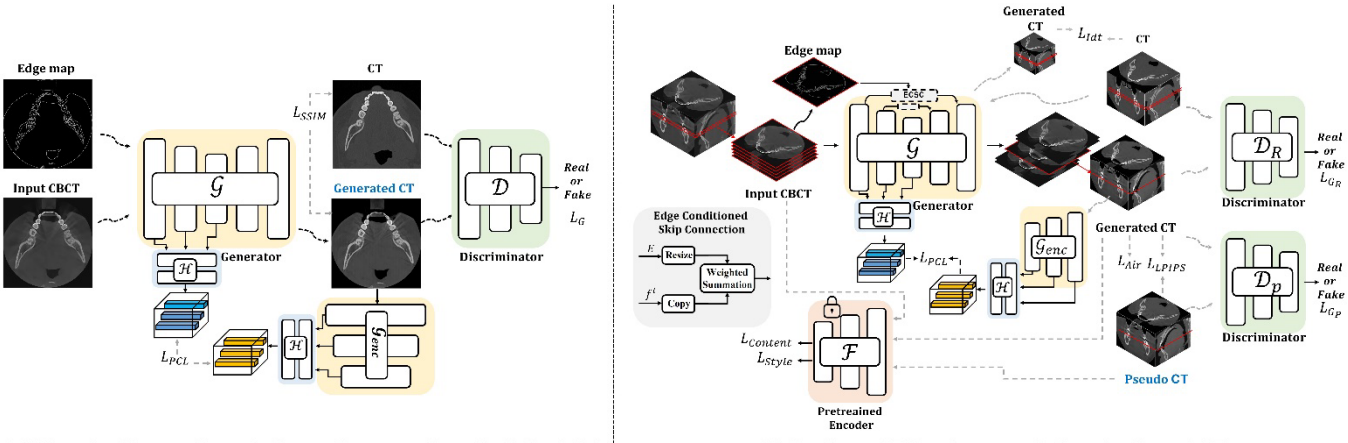
Structure-Invariant Image-to-Image Translation for Realistic CT Synthesis from CBCT

Ji Yong Han[1], Sang-Heon Lim[1], Sujeong Kim[1], Hynbin Yun[1], Heejin Yun[1], Mobin Ahmadi[1], Dahee Kim[2], Sungho Oh[1], Tae yeon Lee[2], Hoyoon Choi[2], Won-Jin Yi[1,2,3]

Interdisciplinary Program of Bioengineering, Graduate School of Engineering, Seoul National University, South Korea[1]
Applied Bioengineering, Graduate School of Convergence Science and Technology, Seoul National University, Republic of Korea[2]
Department of Oral and Maxillofacial Radiology School of Dentistry, Seoul National University[3]

Abstract

Cone-Beam CT (CBCT) offers high spatial resolution with low radiation but suffers from low contrast and inaccurate HU values. In contrast, multi-detector CT (MDCT) offers accurate HU measurements and enhanced contrast but exposes patients to higher radiation. Unpaired image-to-image translation methods such as CycleGAN, UNIT, and CUT have been applied to CBCT-to-CT translation, but they often introduce shape distortion and resolution degradation, which are critical issues in medical imaging. We propose a two-stage image-to-image translation framework for realistic CT synthesis from CBCT. An edge-conditioned generator first generates pseudo CT, and a UNet++-based generator with ECSC and ICUP modules refines them for structure and HU accuracy. Using dual discriminators, the method achieves superior performance over CycleGAN, UNIT, and CUT, providing anatomically consistent and realistic CT images for clinical applications.



(a) Unpaired Image Translation to Generate Pseudo-Paired CT

(b) Realistic CT Synthesis with Pseudo-Paired CT

Figure 1. Overview of the proposed two-stage framework. (a) Unpaired image-to-image translation with edge condition generates pseudo-CT images from CBCT data. (b) A paired translation stage generates realistic CT images, ensuring consistent HU value and preserving resolution.

1. Introduction

Cone-Beam Computed Tomography (CBCT) is widely used in dental and maxillofacial imaging because of its low radiation dose and high spatial resolution. However, its low contrast and inconsistent Hounsfield Unit (HU) values restrict quantitative analysis. In contrast, multi-detector CT (MDCT) offers accurate HU measurements and enhanced contrast but exposes patients to higher radiation.

Recent AI-based image-to-image translation (I2I) approaches have aimed to enhance CBCT to CT-like quality, combining the strengths of both modalities. Yet, acquiring paired CBCT-CT datasets is difficult due to patient motion and alignment issues. Unpaired I2I frameworks such as CycleGAN [1], UNIT [2], and CUT [3] have been proposed, but they often introduce geometric distortion and resolution loss, which are critical drawbacks in medical imaging.

To overcome these limitations, we propose a two-stage I2I framework for realistic CT synthesis from CBCT. The first stage uses an edge-conditioned unpaired model to generate pseudo-paired CT images. The second stage employs a paired translation network trained with these pseudo pairs to generate anatomically consistent and HU-accurate CT images. Our approach achieves higher image fidelity and structural preservation than previous unpaired translation methods.

2. Method

Unpaired Image Translation to Generate Pseudo-Paired CT. The first stage generates pseudo CTs using a modified contrastive unpaired translation (CUT) architecture. To retain structural details, we introduce an edge-conditioned generator that concatenates a gradient-based edge map with the CBCT input. A multi-scale discriminator jointly evaluates global and local features, improving image realism and translation stability. This stage provides pseudo-paired datasets that serve as structural references for the next step.

Realistic CT Synthesis with Pseudo-Paired CT. The second stage performs paired translation using the pseudo CT and real CT datasets. A UNet++-based generator is enhanced with Edge-Conditioned Skip Connections (ECSC) and Interpolation-Convolution Upsampling (ICUP) modules. ECSC fuses edge information into skip connections to prevent geometric deformation, and ICUP replaces transposed convolution, eliminating checkerboard artifacts and improving 3D smoothness. To refine HU values, we introduce dual discriminators: D_R distinguishes real from synthesized CT, while D_P compares

outputs with pseudo-paired CTs.

Multi-task Loss. Our overall loss function is a weighted sum of components that enforce perceptual quality, structural consistency, and HU value alignment. We include LPIPS loss (L_{LPIPS}) [4], style loss (L_{Style}) [5] to guide HU values, patch-wise contrastive loss (L_{PCL}) [3], content loss (L_{Content}) [5], identity loss (L_{Idt}) [1], and airway segmentation loss (L_{Air}) for structural consistency. It minimizes the mean squared error between the predicted air regions of the source CBCT and the generated CT:

$$L_{Air} = E_{X\sim p(x)}\left[\left\|S(G(X)) - S(X)\right\|_2^2\right]$$

with $S(\cdot)$ denoting the pretrained air segmentation network. Additionally, a dual adversarial loss (L_{DualAdv}) is introduced to enforce consistency in pseudo-paired data and to reduce HU differences with CT images. We employed a dual adversarial loss using two discriminators, D_P and D_R. The dual adversarial loss is defined as:

$$L_{\text{DualAdv}} = E_{y\sim P_{real}(Y)}[\log D_R(y)] + E_{x\sim P(X)}\left[\log\left(1 - D_R(G(x))\right)\right] + E_{y\sim P_{pseudo}(Y)}[\log D_R(y)] + E_{x\sim P(X)}\left[\log\left(1 - D_P(G(x))\right)\right]$$

3. Experiment

3.1 Dataset and Implementation details

Dataset. We collected CBCT and CT images from 40 subjects (20 males and 20 females; age range 21-80 years), CT scans were acquired using a Somatom Definition Edge CT scanner (Siemens AG, Erlangen, Germany) at 120 kVp and 120 mA, with voxel sizes of 0.49×0.49×0.5mm3, and dimensions of 512 × 512 pixels. CBCT scans were acquired using a Green X 12 CBCT scanner (Vatech, Hwaseong-si, South Korea) at 94 kVp and 11.7 mA, with voxel sizes of 0.2 × 0.2 × 0.2mm3, and dimensions of 600 × 600 pixels. For training, 10,625 axial slices from 25 subjects were used, and 6,375 axial slices from 15 subjects were reserved for evaluation. All images were resized to 576 × 576 pixels, and data augmentation including horizontal flipping, shifts of 0.1%, rotations of 20, and scaling variations of 0.1% was applied to enhance generalization.

Training setup. All models were trained by Adam optimizer for 50 epochs with an initial learning rate of 2×10−4. A batch size of 1 was used, and training was performed on an NVIDIA GeForce RTX 4090 GPU (24 GB RAM). All models were implemented in Python3 using the PyTorch framework and executed in identical computing environments to ensure a fair comparison.

Evaluation Metrics. To assess the performance of the generated images, we computed the structure score from the structural similarity index measure (SSIM) [6] to evaluate structural and resolution similarity between the generated output and the source CBCT. Additionally, we used luminance and contrast scores derived from SSI to evaluate the similarity of the HU distribution between the generated output and the CT images.

Table 1. Performance comparison of our method with other unpaired image-to-image translation networks. "Structure" denotes the structure score, "Luminance" represents the luminance score, and "Contrast" indicates the contrast score.

	Content & Resolution	Hounsfield Unit	
Methods	**Structure (↑)**	**Luminance (↑)**	**Contrast (↑)**
Cycle GAN	0.9395±0.0140	0.7921±0.1085	0.9394±0.0170
UNIT	0.9187±0.0221	0.7363±0.1333	0.9190±0.0220
CUT	0.9647±0.0113	0.7811±0.1108	0.9432±0.0163
OURS	**0.9882±0.0057**	**0.8090±0.0912**	**0.9483±0.0163**

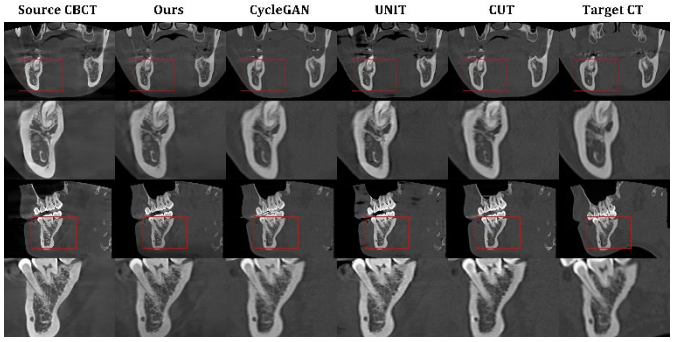


Figure 2. Qualitative comparison with different methods for unpaired image-to-image translation. The first and third views represent the coronal and sagittal view, respectively. The second and fourth rows correspond to cropped images of red-boxed regions.

3.2 Experimental Results

Quantitative Comparison with other methods. We evaluated the performance of our proposed method against several unpaired image-to-image translation methods, including CycleGAN, UNIT, and CUT. Our method achieves the best performance across all evaluation metrics. In particular, our method outperforms CUT with the second highest performance by obtaining 0.988±0.006, 0.809±0.091, and 0.948±0.018 for Structure, Luminance, and Contrast as summarized in Table 1.

Qualitative Comparison with other methods. Figure 2 shows that our method produces images that closely resemble the CT, preserving structural details without deformation while maintaining a resolution comparable to the source CBCT.

Qualitative Comparison with other methods. Figure 2 shows that our method produces images that closely resemble the CT, preserving structural details without deformation while maintaining a resolution comparable to the source CBCT.

Effectiveness of proposed components. We conducted ablation experiments to assess the effectiveness of our proposed ICUP and ECSC modules. Table 2 shows the quantitative performance variations with and without these components. The results indicate that ICUP effectively suppresses checkerboard artifacts, eliminating vertical line artifacts in the reconstructed volumes. Additionally, ECSC robustly prevents shape deformation and reduces resolution loss by explicitly integrating edge conditions into the skip connections (see Fig. 3).

Table 2. Quantitative performance comparison of the proposed ICUP and ECSC modules.

	Content & Resolution	Hounsfield Unit	
Methods	**Structure (↑)**	**Luminance (↑)**	**Contrast (↑)**
Baseline	0.9683±0.0026	0.7722±0.1203	0.9453±0.0155
+ICUP	0.9703±0.0040	0.7819±0.1121	0.9454±0.0154
+ECSC	0.9795±0.0027	0.7876±0.1064	0.9462±0.0156
+ICUP,ECSC	**0.9882±0.0057**	**0.8090±0.0912**	**0.9483±0.0163**

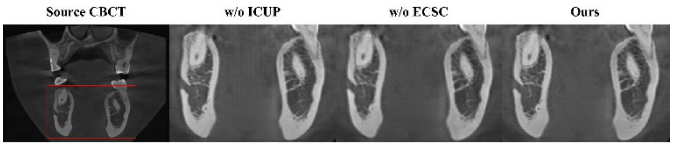


Figure 3. Qualitative comparison of the impact of ICUP and ECSC. The red box indicates the region of interest. Without ICUP, checkerboard artifacts cause vertical line distortions, and without ECSC, resolution is degraded.

4. Conclusion

In this paper, we proposed a semi-supervised framework for CBCT-to-CT synthesis that ensures the exact preservation of anatomical shape, high resolution, and accurate HU value. Our two-stage approach employs an edge-conditioned unpaired translation model to generate pseudo-paired CT images, followed by a paired translation stage using a UNet++ generator enhanced by ICUP, ECSC, and dual discriminators. Extensive evaluations demonstrate that our method outperforms existing techniques, achieving HU values closest to the CT. In future work, we plan to further explore artifact-free CT synthesis to enhance clinical applicability

5. Acknowledgements

This work was supported by National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (RS-2023-NR077088). This work was supported by Technology Innovation Program (RS-2025-14322975) funded by the Ministry of Trade Industry & Energy.

6. References

[1] Zhu, J.Y., Park, T., Isola, P., Efros, A.A.: Unpaired image-to-image translation using cycle-consistent adversarial networks. In: Proceedingsof the IEEE international conference on computer vision. pp. 2223–2232 (2017)

[2] Liu, M.Y., Breuel, T., Kautz, J.: Unsupervised image-to-image translation networks. Advances in neural information processing systems 30 (2017)

[3] Park, T., Efros, A.A., Zhang, R., Zhu, J.Y.: Contrastive learning for unpaired image-to-image translation. In: Computer Vision–ECCV 2020: 16th European Conference, Glasgow, UK, August 23–28, 2020, Proceedings, Part IX 16. pp. 319–345. Springer (2020)

[4] Zhang, R., Isola, P., Efros, A.A., Shechtman, E., Wang, O.: The unreasonable effectiveness of deep features as a perceptual metric. In: Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. pp.586–595 (2018)

[5] Gatys, L.A., Ecker, A.S., Bethge, M.: Image style transfer using convolutional neural networks. In: Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. pp. 2414–2423 (2016)

[6] Wang, Z., Bovik, A.C., Sheikh, H.R., Simoncelli, E.P.: Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. IEEE transactions on image processing 13(4), 600–612 (2004)

Poster-233

심부전 데이터를 활용한 예측 모델 비교 및 하이퍼파라미터 조합 분석

이서준[1], 김경이[2*]

인제대학교 AI소프트웨어학부

Comparison of Predictive Models Using Heart Failure Data and Analysis of Hyperparameter Combinations

Seojun Lee[1], Kyoungyee Kim[2*]

School of AI Software[1] Inje University, Korea

[*2]kimky@inje.ac.kr

Abstract

Heart failure (HF) constitutes a significant global health crisis, characterized by a concerning five-year mortality rate of approximately 50%. A prevailing challenge in clinical practice is the inadequacy of traditional statistical models, which often fail to accurately predict mortality risk due to their inability to accommodate the complex, non-linear interactions present in diverse patient data, such as age, blood pressure, and CPK levels. This study addresses this limitation by employing advanced Machine Learning (ML) techniques, systematically comparing eight classification algorithms, including Logistic Regression, Random Forest, XGBoost, LightGBM, and CATBoost. The methodology focuses on optimizing model performance through the F1-Score, a measure selected to ensure a critical balance between the identification of true risk (Recall) and the maintenance of diagnostic accuracy (Precision). The data underwent rigorous preprocessing and were divided using the Stratify option to ensure unbiased training outcomes. The primary objective of this research is to establish a predictive system that is both highly reliable and accurate, surpassing basic empirical judgment. This endeavor aims to provide clinicians with a personalized early warning tool. The anticipated success of the optimal model, proactive interventions, optimizing healthcare resource allocation, and advancing clinical decision-making in cardiology. Ultimately, this research lays a robust foundation for precision medicine in the prognosis of heart failure.

1. 연구 배경

심부전은 전 세계적으로 높은 유병률과 사망률을 보이는 치명적인 만성 질환이다. 이는 심장이 신체의 요구를 충족시킬 만큼 충분한 혈액을 펌프하지 못할 때 발생하며, 환자의 삶의 질을 현저히 저하시킨다. 심부전 환자의 경우, 진단 후 5년 이내의 사망률이 약 50%에 달하는 것으로 보고되고 있으며, 이는 여러 유형의 암 생존율과 유사하거나 더 높은 수치에 해당한다. 따라서 심부전 환자의 예후에 발생할 수 있는 사망 위험에 대한 정확하고 조기 예측은 환자의 생존율을 향상시키고 의료 비용을 절감하는 데 있어 가장 중요한 임상적 과제로 간주된다[1].

기존의 심부전 위험 예측은 주로 의사의 경험을 통해 주관적인 판단에 의존하고 있다. 이러한 주관적인 판단은 환자의 정보의 복잡성을 충분히 반영하지 못할 가능성이 있으며, 환자 상황에 따른 위험도를 정확하게 판단하는데 한계를 지닐 수 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 본 연구는 머신러닝 기술을 심부전 환자의 나이, 혈압, 크레아티닌 수치, CPK 효소 수치 등 12가지 이상의 다양한 특징으로 구성되어 있는 심부전 예측 데이터에 적용힌다[2]. 또한 각 모델에 Grid Search를 통한 하이퍼 파라미터 튜닝을 통해 모델의 성능을 도출하고 최적의 파라미터와 모델의 성능을 정확도(Accuracy)와 F1-Score를 주요 평가지표로 설정하여 정량적으로 분석하는 기초 연구를 하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 성능 평가 지표

심부전 환자의 사망 예측은 클래스 불균형 문제를 내포하고 있어, 단순 정확도만으로는 모델 성능을 적절히 평가가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 F1-Score를 주요 평가 지표로 채택하였다. F1-Score는 정밀도와 재현율의 조화 평균으로계산된다. 특히 의료 분야에서는 고위험 환자를 놓치지 않으면서도 오진을 최소화해야 하므로, 이 두 측면을 균형있게 평가하는 F1-Score가 적합하다[3].

$$F1 - Socre = 2 \times \frac{Percision \times Recall}{Percision + Recall}$$

2.2 분류 알고리즘

본 연구에서는 서로 다른 학습 원리를 가진 8개 알고리즘을 선정하여 성능을 비교하였다. Logistic Regression으로 선형 분류와 Random Forest, XGBoost, LightGBM, CATBoost와 같은 트리 기반 앙상블 모델들을 통해 비선형 패턴을 포착하고자 하였다. Random Forest는 배깅을 통한 분산 감소에 강점이 있으며, Gradient Boosting 계열인 XGBoost, LightGBM, CATBoost는 순차적 학습으로 편향을 줄인다. 특히 CATBoost는 범주형 변수를 자동으로 처리하는 장점이 있다. 또한 SVM으로 고차원 공간에서의 분류를, K-Nearest Neighbors로 지역적 패턴을, GaussianNB로 확률적 접근을 시도하였다.

2.3 모델 최적화 전략

하이퍼파라미터 튜닝은 GridSearchCV를 활용하여 수행하였다. 전체 파라미터 공간을 탐욕적으로 탐색하는 이 방법은 최적값을 보장하지만, 연산 비용이 크다는 단점이 있다. 이를 해결하기 위해 2단계 접근법을 적용하였다. 먼저 기본 파라미터로 8개 모델을 학습시켜 상위 3개를 선별한

후, 선별된 모델에 대해서만 집중적인 하이퍼파라미터 튜닝을 수행하였다. 교차 검증은 k-fold(k=5)를 적용하여 데이터의 부족을 보완하고 안정적인 성능 추정치를 얻고자 하였다.

3. 연구 결과

3.1 데이터 전처리 및 분할

특징 변수들의 스케일 차이를 해결하기 위해 StandardScaler를 적용하여 데이터를 표준화하였다. 데이터는 훈련 세트 70%, 테스트 세트 30%로 분할하였으며, stratified sampling을 통해 원본 데이터의 사망/생존 비율을 훈련 및 테스트 세트에서 동일하게 유지하였다.

3.2 기본 모델 학습 및 평가

8개 분류 알고리즘을 동일한 조건에서 학습시킨 후 성능을 평가하였다. 클래스 불균형을 고려하여 F1-Score를 주요 평가 지표로 사용하였다.

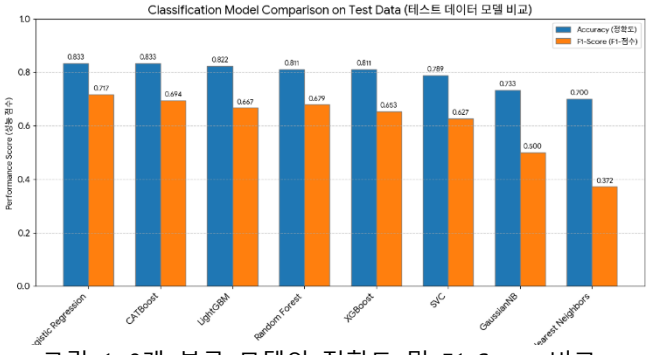


그림 1. 8개 분류 모델의 정확도 및 F1-Score 비교

Model	F1-Score	Model	F1-Score
Logistic Regression	0.7170	XGBoost	0.6531
CATBoost	0.6939	SVC	0.6275
Random Forest	0.6792	GaussianNB	0.5000
LightGBM	0.6667	K-Nearest Neighbors	0.3721

표 1 분류 모델의 F1-Score 수치

3.3 하이퍼파라미터 최적화

초기 평가에서 우수한 상위 3개 모델인 Logistic Regression, CATBoost, Random Forest을 대상으로 최적화를 수행하였다. 이 과정에는 GridSearchCV 기법이 적용되었다.

3.4 최종 모델 검증

Grid Search 튜닝을 통해 선정된 최적의 파라미터를 적용한 최종 모델을 학습에 사용되지 않은 테스트 세트에 적용한다. 이를 통해 최종 F1-Score를 산출한다.

Model	F1-score	Hyperparameter	
Logistic Regression	0.8147	C	0.1
		Penalty	L1
CATBoost	0.8526	Depth	3
		Learning_rate	0.15
		N_estimators	100
Random Forest	0.8327	Max_depth	4
		Max_features	sqrt
		Min_samples_leaf	7
		Min_samples_split	3
		N_estimators	100

표2.선정한 3개의 모델들의 최적화 파라미터값과 그에 따른 f1_Score

4. 결론

본 연구는 심부전 환자의 사망 위험을 예측하기 위해 다양한 머신러닝 분류 알고리즘을 비교하고, F1-Score를 기준으로 그 성능을 평가하였다. 실험 결과, Logistic Regression, CATBoost, Random Forest가 높은 F1-Score를 기록하며 유의미한 예측 성능을 나타냈으며, 특히 CATBoost는 하이퍼파라미터 튜닝 이후 F1-Score가 0.6939에서 0.8526으로 크게 향상되었다. 반면, GaussianNB와 K-Nearest Neighbors는 상대적으로 낮은 성능을 보여 이 과제에 적합하지 않은 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 머신러닝 모델이 심부전과 같은 복잡하지만 정형화된 의료 데이터를 분석하고 예측하는 데 효과적임을 보여 주며, 향후 임상 의사결정 보조 시스템 개발에 기초 자료로 활용될 수 있다. 본 연구를 계기로 지도학습 기반 모델의 구조와 원리에 대한 이해를 더욱 심화하고자 하며, 향후에는 비지도학습 기법과 딥러닝 기반 모델에 적용하여 환자군을 클러스터링하거나 이상 환자 탐지, 정확도 향상을 수행하는 등 보다 폭넓은 데이터 분석 방법을 학습하고 적용할 계획이다. 이를 통해 의료 분야에서의 데이터 과학 활용 가능성을 더욱 확장하고자 한다.

5. Acknowledgements

본 과제(결과물)는 교육부와 경상남도의 재원으로 지원을 받아 수행된 경상남도 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 연구결과 입니다.(202502440001)

6.참고 문헌

[1] A. Mosterd, and A. W. Hoes. “Clinical epidemiology of heart failure.” Heart, Vol. 93, No.9, p.1137-1146, 2007.

[2] M. Alaa, and M. van der Schaar. “Forecasting individualized disease trajectories using interpretable deep learning.” Nature Communications, Vol. 10, No.1, p.1-10, 2019.

[3] J. Saito, and E. Rehmsmeier. “The precision-recall plot is more informative than the ROC plot when evaluating binary classifiers on imbalanced datasets.” PLOS ONE, Vol. 10, No.3, p.e0118432, 2015.

UWB 레이더 신호 기반의 SNN-CNN 하이브리드 모델을 이용한 비접촉 인체 위치 및 호흡 모니터링

전기헌[1], 최상호[1*]
광운대학교 컴퓨터공학과[1]

Non-contact human localization and respiration monitoring using a SNN-CNN hybrid model based on UWB signals.

Ki Hun Jun[1], Sang Ho Choi[1*]
School of Computer and Information Engineering, Kwangwoon University, Korea
*shchoi@kw.ac.kr

Abstract

As demand for personalized healthcare grows, various wearable devices have been adopted, yet the act of wearing them imposes a burden on users. This study proposes an indoor respiration-rate monitoring system using a non-contact Ultra-Wideband (UWB) radar. For power-efficient processing, UWB range-time data are first analyzed by a Spiking Neural Network (SNN) to track indoor location, and the SNN's ROI (bin-time region) then guides a Convolutional Neural Network to extract the respiratory signal from the original UWB data and estimate respiration per minute in a two-stage hybrid architecture. Performance is evaluated against simultaneously recorded Biopac system's signals using three metrics-Peak, Rate, and Zero-Crossing errors-and shows a median error of about 0.3 across metrics, confirming efficient localization and robust respiration extraction.

1. 연구 배경

최근 고령화 사회의 가속화와, 개인의 생체신호를 비대면으로 모니터링하고 관리할 수 있는 개인 맞춤형 헬스케어 시스템에 대한 수요가 급격히 증가하고 있다. 이러한 흐름에 따라 다양한 웨어러블 디바이스를 활용한 생체신호 측정 기술과, 카메라 기반 영상 모니터링 방법이 활발히 연구되고 있다. 그러나 이러한 접근 방식은 사용자의 사생활 침해 우려, 착용에 따른 불편함과 위생 문제로 인한 일상 환경에서의 장기적인 활용에는 한계가 존재한다.

이러한 문제를 해결하기 위해, 본 연구에서는 무구속 레이더 센서(Ultra-Wideband, UWB)를 활용하여 사용자의 실내 위치를 추적함과 동시에 호흡 신호를 추출하는 새로운 방식의 생체 모니터링 방법을 제안한다. 본 연구의 핵심 목표는 구속적 센서를 통해 얻은 기준 호흡 신호와(Biopac) 비교함으로써, 무구속 방식인 UWB 센서가 실제 호흡 측정에 활용될 수 있는 가능성을 검증하는 데 있다.

UWB 센서는 전파의 미세한 반사 변화를 통해 사람의 움직임이나 미세한 흉곽 진동을 감지할 수 있어, 사용자가 별도의 장치를 착용하지 않고도 생활환경에서의 생체신호 모니터링이 가능하다. 이를 통해 기존 웨어러블이나 영상 기반 시스템이 가진 한계를 극복하고, 프라이버시 친화적이며 지속 가능한 헬스케어 환경을 구현할 수 있다.

2. 연구 방법

2.1 Experiment – dataset

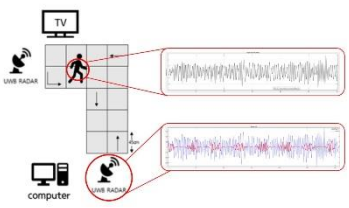


그림 1. UWB 레이더 측정 실험 환경

본 연구에서 UWB 레이더 센서 두 대를 사용하여 피험자의 실내 위치와 호흡 신호를 동시 측정하였다. 그림 1은 가정 환경을 모방한 실험 환경을 나타낸 것으로, 한 대의 레이더는 TV 방향, 다른 한 대는 Computer 방향에 설치하여 서로 다른 각도에서 신호를 수집하도록 설계하였다. 피험자는 45cm 간격으로 구분된 14개의 위치 중 한 지점에 위치하였으며, 각 구간에서 3초 단위로 정지 및 이동 동작을 반복하였으며, 총 5분동안 17fps로 측정했다. 동시에 피험자는 Biopac 센서를 흉부에 부착하여 실제 호흡 신호를 측정하였으며, 이 신호를 Ground Truth(기준 데이터)로 활용하였다.

2.2 UWB Data Extraction

UWB 레이더는 높은 공간 해상도를 가지는 센서이지만, 그만큼 잡음(Noise) 데이터가 많아 신호 처리가 어렵다는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 레이더 신호로부터 호흡 관련 생체신호를 효과적으로 추출하기 위해 다음과 같은 단계적 방법을 적용하였다.

1. **Column Normalization (Clutter Removal)**
   배경·고정물체에 의한 클러터를 줄이기 위해 열(column) 정규화를 적용했다. 신호 분포로 임계값을 정해 정적 성분을 제거하고, 이동평균 필터로 시간 변화(움직임)를 강조해 실내 위치 탐지·추적에 활용했다.
2. **Row Noremalization (Respiration Extraction)**
   호흡 대역(0.1-0.5Hz) 밴드패스 필터 후, 거리 bin별 행(row) 정규화로 상대 진폭을 보정해 호흡 성분을 강조했다. 이렇게 얻은 (Bin x Time) 2D 신호에서 윈도우 기반으로 호흡 구간을 추출했다

피험자의 위치에 따라 두 레이더에서 수신되는 신호의 세기와 품질이 달라지는 점을 고려하여, 거리 센서(bin) 인덱스 285 이하 구간의 데이터만을 분석 대상으로 선정하였다. 두 레이더 모두 동일한 구간(1~245bin)의 데이터를 활용하였으며, 각 레이더에서 측정된 신호를 비교 및 보정하여 피험자의 호흡 성분이 가장 안정적으로

관측되는 영역의 신호를 추출하였다. 이를 통해 보다 다양한 위치에서 호흡 신호 모니터링이 가능하다.

또한 Row 정규화 데이터는 여전히 노이즈의 영향을 받기 때문에, Column 정규화 결과를 보정 지표로 활용하여 호흡 신호가 가장 뚜렷하게 나타나는 구간을 선택하였다. 이후 Window Size 최적화 모델을 적용하여, 위치와 시간 변화에 대해 가장 안정적인 호흡 파형을 복원할 수 있는 크기로 최적화를 하였다. 그림 2는 정규화를 한 결과이다.

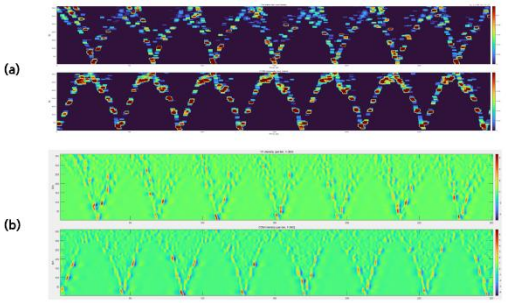


그림 2. UWB Normalization

a. Column Normalization , b. Row Normalization 예시

2.3 Models

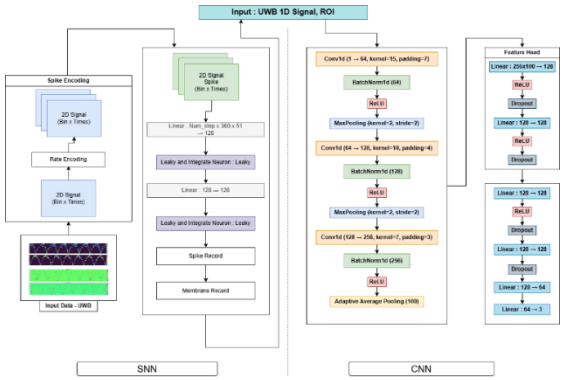


그림 3. SNN-CNN hybrid model

UWB 2D 시계열 데이터에 대해 SNN-CNN 단계형 하이브리드 모델을 제안한다. 그림 3은 전체 구조도로, UWB 레이더 신호를 Column/Row 정규화로 전처리한 뒤 스파이크 인코딩하여 SNN에 입력한다. SNN은 인코딩된 스파이크로부터 실내 위치를 분류하고, 동시에 호흡 신호 추출에 사용할 ROI 영역을 산출한다. 이후 UWB 데이터와 SNN이 제공한 ROI를 함께 CNN에 입력해 품질 좋은 호흡 신호를 추출하고 BPM(호흡수)를 산출한다. 학습은 Biopac을 Ground Truth로 삼아 아래 3가지 오류 지표를 최소화하도록 윈도우 크기(Bin x Time) 최적화 방식으로 진행된다. 이 구조는 2D 데이터 전영역을 다루는 위치/공간 탐색을 SNN으로 효율적으로 처리하도록 설계하고, 정밀한 신호 추출 및 신호 복원은 CNN이 처리하도록 설계함으로써 실내 환경에서 정확도와 계산 효율을 동시에 확보한다.

1. Peak Error : 호흡 주기(연속 피크 간격) 추정 오차
2. Rate Error : 호흡수(BPM) 절대/상대 오차
3. ZC Error : 영점 교차(Zero-Crossing) 간격의 변동성 기반 안정성 오차

3. 연구 결과

3.1 Moving Detection

그림 4는 SNN 모델을 이용한 피험자의 실내 위치 추적의 결과 성능을 나타낸다. 5-fold Cross validation으로 평균 정확도는 93.34%±0.88을 달성했으며, 폴드 간 변동성이 작아 안정적인 일반화 성능을 보였다.

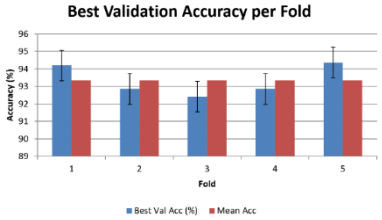


그림 4. UWB Moving Detection – 결과

3.2 Respiration Extraction

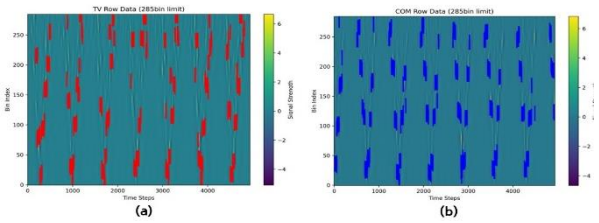


그림5. UWB 레이더 추출 결과

a. TV Radar , b. Com Radar

그림 5는 SNN이 제시한 ROI를 활용해 CNN이 원본 UWB데이터에서 필요한 구간을 선별해 추출하고, 그 결과를 히트맵으로 가시화한 예시다. 진하게 표시된 구역은 호흡 성분이 강한 지점으로, 피험자의 위치와 일관되게 나타난다. 이처럼 추출된 신호는 목표 신호(Biopac 기준)와의 유사도가 높게 나타나 제안한 방법의 타당성을 뒷받침한다.

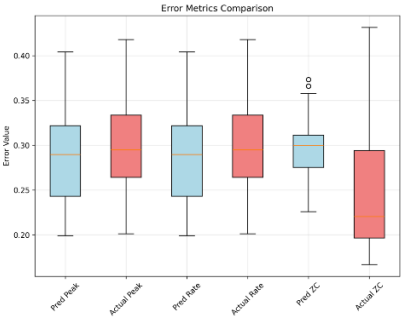


그림 6. 윈도우 별 Error 값 결과

그림 6은 그림 5에서와 같이 윈도우 단위로 신호를 추출한 후, 각 세그먼트마다 3가지 Error 지표를 산출하여 집계 통계로 나타낸 것이다. 전 지표의 중앙값은 약 0.3 수준에 형성되어 있으며, 특히 Peak, Rate 지표에서의 분포가 비교적 좁게 유지되어 추정에 있어서 일관성을 보여준다. 이를 통해 제안한 윈도우 기반 추출 방식이 Biopac 기준 신호와의 유사한 호흡 수 및 전반적 파형 특성을 보존함을 확인할 수 있다.

4. Acknowledgements

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-대학ICT연구센터(ITRC)의 지원을 받아 수행된 연구임(IITP-2025-RS-2022-00156225)

본 연구는 광운대학교 기관윤리위원회의 승인을 받아 실시하였다 (IRB no. 7001546-202300831-HR(SB)-008-03).

5.참고 문헌

[1] Lafontaine, Virgile, et al. "Denoising UWB radar data for human activity recognition using convolutional autoencoders." Ieee Access 11 (2023): 81298-81309.

[2] Yamazaki, Kashu, et al. "Spiking neural networks and their applications: A review." *Brain sciences* 12.7 (2022): 863.

Poster-235

단일 UWB 레이더를 이용한 하이브리드 CNN-Transformer 기반 수면 자세 분류

양서은 [1], 최상호 [1*]

광운대학교 컴퓨터정보공학부 [1]

Hybrid CNN-Transformer based Sleep Posture Classification using Single UWB Radar

Seo Eun Yang[1], Sang Ho Choi[1*]

School of Computer and Information Engineering, KwangWoon University, Korea

[*]shchoi@kw.ac.kr

Abstract

Monitoring sleep posture is crucial for the care of patients with physical impairments or those undergoing rehabilitation, as prolonged static positions can lead to complications such as falls, muscle stiffness, and impaired blood circulation. Traditional vision-based posture recognition methods face limitations including privacy concerns, dependency on lighting conditions, and installation constraints. In this study, we propose a non-contact sleep posture detection system using a single ultra-wideband (UWB) radar. The system collects radar signals and extracts time-frequency features through continuous wavelet transform (CWT). A hybrid 2D Convolutional Neural Network (CNN)-Transformer model is employed, where 2D CNN captures spatial patterns in the distance-time domain, and the Transformer learns global interdependencies across frequency components. Using data from 39 participants across four postures (21,363 UWB segments), 5-fold cross-validation and independent testing were performed. The proposed model achieved an average accuracy of 84%, surpassing the baseline 2D CNN (65%), with best validation accuracy near 90%. These results demonstrate that incorporating time-frequency information and using a hybrid CNN-Transformer architecture significantly improve sleep posture classification performance. The findings suggest that the proposed approach can provide an effective, privacy-preserving solution for continuous patient monitoring and rehabilitation support.

1. 연구 배경

재활 환자나 신체적 제약이 있는 환자는 장시간 동일한 자세로 누워 있을 경우 근육 경직이나 혈액 순환 문제 등이 발생할 수 있어 주기적인 체위 변경과 모니터링이 필요하다. 특히 스스로 움직이기 어려운 환자의 경우, 수면 중 자세를 자동으로 모니터링해 적절한 체위 변경 시점을 파악하는 것이 중요하다. 기존의 영상 기반 방법은 사생활 침해나 조명 의존성 등의 한계가 있어, 최근에는 비접촉식·무구속 센서가 주목받고 있다.

그중 UWB(초광대역, Ultra-Wideband) 레이더는 넓은 주파수 대역을 사용하는 비접촉식 센서로, 높은 거리 해상도와 미세 움직임 감지가 가능하다. 인체의 작은 움직임까지 탐지할 수 있어 생체 신호 측정과 자세 인식 등 다양한 헬스케어 분야에 활용되며, 최근 연구에서는 듀얼 UWB 레이더를 이용하여 수면 자세를 측정한 결과, 딥러닝 기반 방식에서 최대 71%의 분류 정확도를 달성하였다 [1].

본 연구에서는 단일 UWB 센서를 활용한 수면 자세 분류 모델을 개발하고, 이를 기반으로 환자의 상태를 비접촉 방식으로 모니터링함으로써, 재활 환자 및 신체 제약 환자 케어에 실질적으로 기여할 수 있는 무구속 수면 감지 시스템의 구축 가능성을 검증하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 Data Collection

본 연구에서는 레이더 기반 센서를 이용하여 다양한 체위에서의 생체 신호 데이터를 수집하였다. 피험자는 온도와 조명이 일정하게 유지된 환경에서 침대에 누운 상태로 총 60 분간 실험에 참여하였으며, 자세는 15 분 간격으로 변경되었다. 자세는 총 네 가지로 구성되었으며, 순서대로 정자세(supine), 왼쪽 측면(left lateral), 오른쪽 측면(right lateral), 그리고 엎드린 자세(prone)이다.

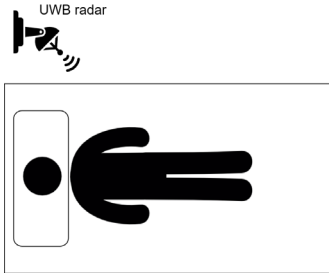


그림 1. 실험 환경

본 연구에서는 수면 자세 측정을 위해 XeThru X4M300 모델의 IR-UWB (Impulse Radio-UWB) 레이더 센서를 사용하였다. UWB 센서는 그림 1 과 같이 침대에 누운 피험자의 기준 왼쪽 베개 옆에 설치되어, 총 거리빈 (range bin) 576, 250Hz 의 샘플링 주파수로 수집되었다.

본 연구는 광운대학교 기관윤리위원회의 승인을 받아 실시하였다 (IRB no. 7001546-202300831-HR(SB)-008-03).

2.2 Data Preprocessing

UWB 신호는 10Hz 로 다운샘플링 후 DC 성분 제거, 특이값 분해(Singular Value Decomposition, SVD) 기반의 클러터 억제(clutter suppression)를 수행하였다. 이후 0.5-5Hz 대역 통과 필터를 적용하여 인체 움직임과 관련된 주파수 성분만을 남기고, z-score 정규화를 통해 신호 스케일을 통일하였다. 마지막으로 전체 거리빈 중 사람이 위치할 것으로 추정되는 100-149 구간에 대하여 연속 웨이블릿 변환(Continuous Wavelet Transform, CWT)[2]을 적용하여 시간-주파수 영역의 특징을 추출하였다. 이 과정에서 0.5-5Hz 범위의 34 개 주파수 성분이 도출되었다.

침대 아래에 설치된 압전 센서를 통해 실험 중 발생하는 노이즈를 기록하였으며, 이를 바탕으로 안정 구간(stationary segment)을 정의하였다. 이후 안정 구간을 기준으로 UWB 신호를 슬라이딩 윈도우(윈도우 크기 300, 스텝 50) 방식으로 세그먼트화하였다.

최종적으로 50(range bin)×300(time)×34(frequency) 형태의 UWB 시계열 세그먼트를 생성하였다. 피험자 총 39 명(남자 25 명, 여자 14 명)으로 21,363 개의 세그먼트를 가진 데이터셋이 완성되었다.

2.3 Modeling

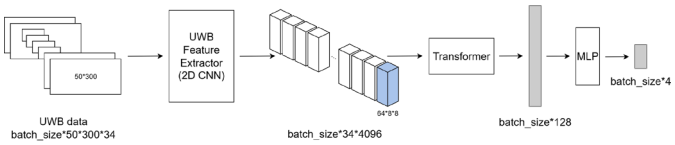


그림 2. 수면 자세 분류를 위한 CNN-Transformer 모델 구조

본 모델은 2D CNN 기반의 공간적 특징 추출부와 Transformer 기반의 주파수 간 관계 학습부로 구성된다.

2.3.1 2D CNN

각 주파수 성분별로 2D CNN 을 적용하여 거리-시간 영역에서 공간적 특징을 추출한다. CNN 은 연속적인 합성곱 계층과 활성화 함수를 통해 입력 신호의 지역적 패턴을 포착하며, 최종적으로 64×8×8 크기의 특징 맵으로 요약된다. 이 특징 맵은 평탄화(flatten)되어 Transformer 의 입력으로 변환된다.

2.3.2 Transformer

Transformer 는 주파수 차원을 따라 쌓인 특징 벡터들을 입력으로 받아, 다중 헤드 자기주의(Multi-head Self-Attention) 메커니즘을 통해 주파수 간 전역적 상호작용을 학습한다. Transformer 출력을 주파수 차원에서 평균(mean) 풀링 후, MLP 를 통해 최종적으로 수면 자세를 분류한다.

그림 2 은 제안한 모델의 전체 구조이다. 이와 같은 구조를 통해 CNN 은 거리-시간 영역의 국소적 패턴을, Transformer 는 주파수 전반의 전역적 상호작용을 학습하여 UWB 신호 내 복합적인 시간-주파수-공간 정보를 통합적으로 표현하도록 설계되었다.

3. 연구 결과

성능 검증을 위해 전체 데이터셋 중 20%는 test dataset 로 분리하고, 나머지 80%의 데이터에 대해서는 5-fold cross-validation 을 수행하였다.

본 연구에서 제안한 모델의 성능을 비교·분석하기 위해, [1]에서 제안된 모델과 실험을 병행하였다. [1]에서 수행된 정규화 및 대역통과 필터링 중심의 전처리 절차를 동일하게 적용하고, 2D CNN 기반 모델 구조를 구현하여 실험을 진행하였다.

본 연구와의 차이점으로는, 전처리 단계에서 UWB 신호에 연속 웨이블릿 변환(CWT)을 추가 적용하여 시간-주파수 영역 정보를 반영한 점과, 모델 구조에서 CNN-Transformer 결합형 hybrid 구조를 사용한 점이다.

이를 통해, CWT 기반 특징 추출 여부 및 모델 구조의 차이가 수면 자세 분류 성능에 미치는 영향을 비교·분석하였다.

그림 3 은 2D CNN 모델과 CNN-Transformer 결합 모델의 5-fold 교차검증 결과를 비교한 것이다. 각 모델의 평균 정확도와 표준편차를 나타낸 결과, 2D CNN 은 약 65%의 정확도를 보인 반면, 제안한 CNN-Transformer 모델은 약 84%의 정확도를 달성하였다. 특히 fold 중 가장 높은 정확도 기준으로 91%까지 도달하였으며, 각 fold 의 최고 검증 정확도(best validation accuracy) 또한 평균적으로 90%에 근접하였다. 이는 학습 안정성을 위한 early stopping 이나 하이퍼파라미터 최적화 등을 추가적으로 적용할 경우, 모델 성능이 더욱 향상될 가능성을 시사한다.

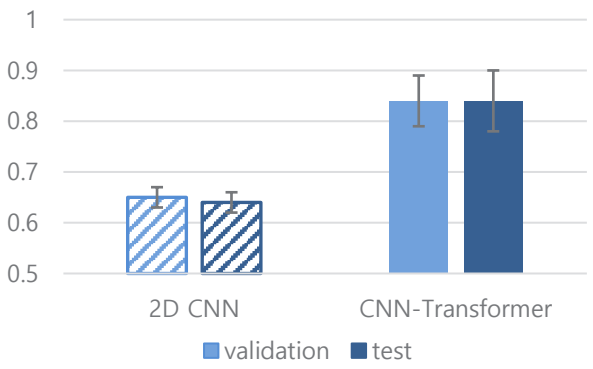


그림 3. 2D CNN 모델 및 CNN-Transformer 모델의 5-fold CV 정확도 결과

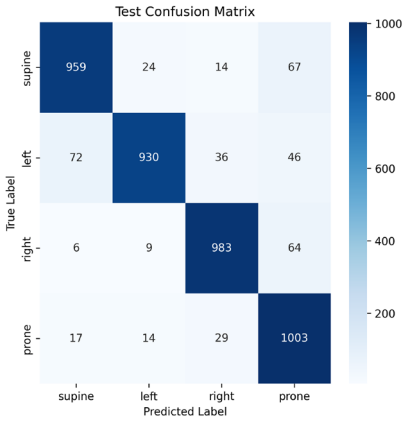


그림 4. CNN-Transformer 모델에 대한 test dataset 의 confusion matrix

그림 4 는 CNN-Transformer 모델에 대한 test dataset 의 confusion matrix 이다. 이를 통해 본 모델이 모든 수면 자세에 대하여 안정적으로 분류할 수 있음을 확인할 수 있다.

본 연구 결과, 레이더 신호를 활용한 수면 자세 분류에서는 시간-주파수-공간 정보를 효과적으로 표현할 수 있는 전처리 기법과 모델 구조의 선택이 성능 향상에 핵심적임을 확인하였다. 특히, CWT 기반 특징 추출과 CNN-Transformer hybrid 모델을 적용함으로써, 단일 UWB 레이더 신호만으로도 높은 정확도로 수면 자세를 분류할 수 있었다. 본 연구는 이를 통해 비접촉식 레이더를 활용한 실시간 환자 모니터링 및 재활·케어 시스템 구축에 유용한 기반을 제공한다.

4. Acknowledgements

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2025-24533026)

5.참고 문헌

[1] Lai, D.K.H., Lee, W.H., & Lee, C.H, “Dual ultra-wideband (UWB) radar-based sleep posture classification using deep learning,” *Journal of Healthcare Engineering*, 2023

[2] K. N. Dang, T. T. V. Tran, P. H. Y. Pham, B. T. T. Bui, V. S. L. Luong, and M. H. Le, “2D Wavelet Transform on Extraction of Heartbeat Signal with Ultra-Wideband Impulse Radar,” *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, 2024

Poster-236

수술 후 재원 기간 예측을 위한 BioclinicalBERT-DNN 융합 모델 개발

진재욱[1, 2], 류가연[1, 2], 심지훈[3], 신항식[1, 2*]
울산대학교 의과학과[1]
울산대학교 의과대학 서울아산병원 정보통계의학교실[2]
울산대학교 의과대학 서울아산병원 마취통증의학과[3]

Development of a BioclinicalBERT-Deep Neural Network Fusion Model for Predicting Postoperative Length of Stay

Jaewook Jin[1,2], Gayeon Ryu[1,2], Ji-Hoon Sim[3], Hangsik Shin[1,2*]
Department of Medical Science, Graduate School, University of Ulsan, Seoul, Republic of Korea[1]
Dept. of Medical Informatics and Statistics, Asan Medical Center, Brain Korea 21 Project, University of Ulsan College of Medicine, Seoul, Republic of Korea[2]
Dept. of Anesthesiology and Pain Medicine, Asan Medical Center, University of Ulsan College of Medicine, Seoul, Republic of Korea[3]
jinjae0814@ulsan.ac.kr, hangsik.shin@amc.seoul.kr*

Abstract

Predicting length of stay after surgery is a critical task for early recognition of patient recovery status and hospital bed resource management. In this study, we developed a deep learning fusion model that integrates unstructured text and clinical variables from electronic medical records, including the name of the operation, operating department, surgical site, affected side, and day of the week. Surgery-related text was embedded using BioclinicalBERT, and 47 clinical and blood test variables were encoded using a multilayer perceptron. Combining the two embeddings, we classified patients' length of stay into three categories: short (0–6 days), medium (7–13 days), and long (14 days or more). On an independent test dataset, the model achieved an area under the curve of 0.901, an accuracy of 0.759, and an F1 score of 0.687. The proposed fusion model demonstrates the potential for predicting length of stay in surgical patients step-by-step by combining unstructured medical text and clinical data.

1. 연구 배경

수술 후 재원 기간은 환자의 회복 속도, 합병증 발생, 병원 자원 관리 등과 직접적으로 연결되는 핵심 지표이다. 재원 기간이 길어질수록 의료 자원의 비효율적 사용, 병상 부족, 환자와 보호자의 부담이 증가하며, 합병증 및 재입원 위험도 높아진다. 따라서 재원 기간을 사전에 예측하는 것은 임상적 관리와 병원 운영 효율화 모두에 중요한 과제이다.

기존 연구들은 주로 나이, 기저질환, 혈액검사수치 등 구조화된 데이터를 이용하여 재원 기간을 예측해왔으나, 실제 임상에서는 환자 회복 양상이 다양해 장·단기 단순 분류로는 한계가 있다. 본 연구는 수술 후 재원 기간을 단기 (0-6일), 중기 (7-13일), 장기 (14일 이상)로 예측함으로써 재원 기간을 보다 정밀하게 반영하고자 하였다 [1].

이를 위해 전자의무기록에 포함된 수술명, 수술 부위, 환측 등 비정형 문자열 정보를 전처리해 자연어 처리 기반 임베딩으로 변환하고, 혈액검사 및 임상 변수를 통합한 딥러닝 융합 모델을 개발하였다. 본 연구의 목적은 이러한 융합 모델을 통해 수술 환자의 재원 기간을 단계적으로 예측하고, 환자 맞춤 관리와 병상 자원 운영 효율화에 활용 가능한 근거를 제시하는 것이다.

2.연구 방법

2.1 데이터 수집

본 연구는 81,084 명의 수술 환자 전자의무기록을 기반으로 수행되었다 (IRB: 2022-0755). 분석에 포함된 변수는 총 52개로, 문자형, 이진형, 서열형, 연속형의 네 가지 유형으로 분류된다 (표 1). 환자의 재원 기간을 기준으로 0–6일은 단기 (클래스 0), 7–13일은 중기 (클래스 1), 14일 이상은 장기 (클래스 2) 재원군으로 분류하였다. 이러한 분류는 재원 기간의 임상적 의미를 세분화하고 다중 분류 모델의 성능을 평가하기 위함이다. 전체 환자는 무작위로 6:2:2의 비율로 학습용, 검증용, 시험용 데이터 셋으로 분할하였다.

2.2 데이터 전처리

수술명은 전자의무기록에 기록된 비표준 수술명을 정규화하여 사용하였다. 먼저, "Lap app"을 "Laparoscopic appendectomy", "Rt. Hemi"를 "Right Hemicolectomy"로 변환하는 등 약어를 통일하여 표기 변이를 최소화 한 후 수술명, 집도과, 수술 부위, 환측, 수술 요일을 병합해 단일 텍스트 시퀀스를 구성하였다. 텍스트는 BERT 토크나이저로 토큰화하고, 입력 길이를 128로 제한하여 패딩 또는 절삭을 적용하였다. 연속형 변수는 StandardScaler로 평균 0, 표준편차 1로 표준화하였으며, 이진 변수는 0과 1로, 서열형 변수는 최대값 기준 0–1로 정규화하였다. 결측값이 포함된 환자는 분석에서 제외하고, 최종적으로 80,557명의 데이터를 사용하였다.

2.3 모델 구조

본 연구에서는 문자형과 수치형 변수를 통합적으로 활용하기 위해 BERT-Deep Neural Network 기반 융합 모델을 설계하였다 (그림 1). 텍스트 인코더는 사전학습된 BioClinicalBERT를 사용하여 최종 은닉 상태의 Classification

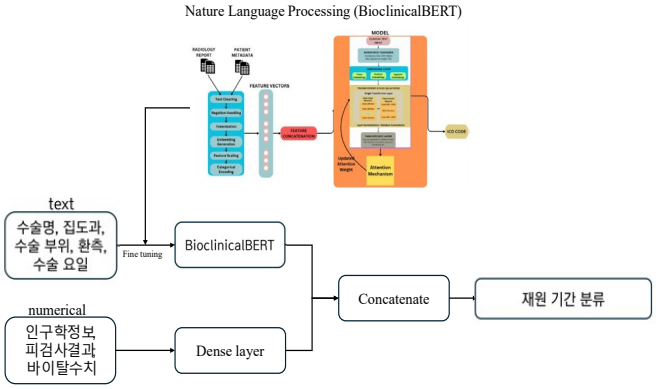


그림 1. BioclinicalBERT-Deep Neural Network 융합 모델 구조

표 1. 학습에 사용된 변수 목록

Type	Features
Text (5)	Surgical procedure name, Operating department, Lesion site, Affected side, Operating day
Binary (21)	History of cancer surgery, Emergency surgery, Intraoperative red blood cell transfusion, Estimated glomerular filtration rate (below 60 mL/min/1.73 m²), Antiplatelet medication, Beta blocker, Angiotensin-converting enzyme inhibitor, Angiotensin II receptor blocker, Calcium channel blocker, Diuretic, Statin, Anticancer medication, History of transplantation, Cerebrovascular disease, Cardiovascular disease, Diabetes mellitus, Hypertension, Renal disease, Respiratory disease, Hepatitis, Dyslipidemia
Ordinal (2)	European Society of Cardiology (ESC) surgical risk, American Society of Anesthesiologists (ASA) physical status classification
Continuous (24)	Sex, Age, Preoperative mean blood pressure, Intraoperative mean blood pressure, Operation time, Surgical type, Height, Weight, Body mass index, White blood cell count, Hemoglobin level, Platelet count, Aspartate aminotransferase, Alanine aminotransferase, Uric acid level, Total bilirubin level, International normalized ratio, Albumin level, Sodium level, Potassium level, Chloride level, Serum creatinine, Total calcium level, Blood glucose level

(CLS) 토큰 임베딩을 텍스트 표현 벡터로 활용하였다 [2]. 수치형 인코더는 128차원의 은닉층 2개로 구성된 완전연결 신경망으로, 각 층에 ReLU 활성화, Dropout, Layer Normalization을 적용하였다. 두 인코더의 임베딩을 Concatenation 한 후 128차원의 은닉층을 거쳐 Softmax 출력층에서 재원 기간을 3개 클래스로 분류하였다. 학습 시 BERT의 하위 레이어는 고정하고 상위 2개 레이어만 미세 조정하여 효율적 학습과 안정적 수렴을 유도하였다.

2.4 모델 학습 및 평가

모델 학습은 AdamW 최적화 알고리즘을 사용하였으며, BERRT와 Dense Layer 모두 Learning rate 0.00001, Weight Decay 0.001을 적용하였다 [3]. 최대 500 에폭을 상한으로 두고 검증 성능에 기반한 Early Stopping을 수행하였으며, 코사인 스케줄러로 학습 안정성을 확보하였다. 클래스 불균형은 학습 데이터 분포에 따라 계산된 가중치 교차 엔트로피 손실을 적용하여 보정하였다. 최종 평가는 독립적인 시험용 데이터 셋에서 Accuracy, F1 score, AUROC를 산출하여 수행하였다. F1 score, Precision, Recall은 Macro average 방식으로 산출하였으며, 각 클래스의 표본 수 차이를 고려하여 성능을 균형있게 평가하였다 (수식 1). 모든 과정은 PyTorch 기반 GPU 환경에서 구현하였다.

$$F1\ score = \frac{1}{K}\sum_{i=1}^{K} F1_i\,, Precision = \frac{1}{K}\sum_{i=1}^{K} Precision_i$$

$$Recall = \frac{1}{K}\sum_{i=1}^{K} Recall_i$$

수식 1. F1 score, Precision, Recall 계산 수식

3. 연구 결과

손실함수를 통해 모델의 정상적인 학습을 확인하였으며 검증 손실이 최소가 되는 16에폭에서의 모델을 최적 모델로 선정하였다 (그림 2). 독립적인 시험용 데이터 셋 (n=16,103)에서, BioclinicalBERT-DNN 모델은 Accuracy 0.759, F1 score 0.686, AUROC 0.901을 보였다 (그림 3). 이는 모델이 수술명 등 비정형 문자열 데이터와 임상 변수를 통합적으로 활용하여 환자의 재원 기간을 구분할 수 있음을 시사한다. 혼동행렬 분석 결과 단기(0–6일) 재원군 82.1%, 중기(7–13일) 재원군 63.4%, 장기(14일 이상) 재원군 72.7%가 정확히 분류되어, 다중 분류에서도 클래스 간 예측 편향이 크지 않았다.



그림 2. 학습 에폭에 따른 학습 및 검증 손실 곡선

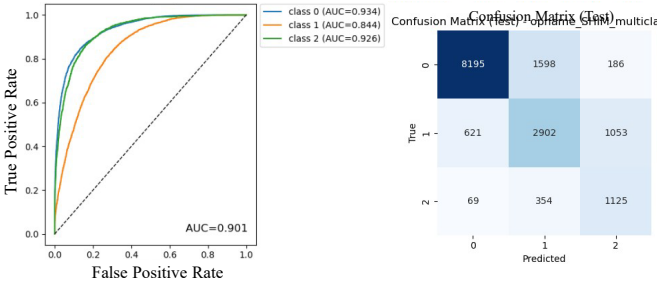


그림 3. BioclinicalBERT-Deep Neural Network 융합 모델 ROC 곡선 (좌), 혼동 행렬 (우)

4. 고찰

본 연구는 약 8만 명의 수술 환자 데이터를 기반으로, 수술명 텍스트와 임상 변수를 융합한 딥러닝 모델을 통해 수술 후 재원 기간을 단기, 중기, 장기 세 구간으로 분류하였다. 제안한 모델은 독립된 테스트 셋에서 Accuracy 0.759, F1 score 0.687, AUROC 0.901의 성능을 보여, 비정형 문자열 데이터와 임상 데이터를 통합적으로 활용하여 재원 기간을 단계별로 예측할 수 있음을 확인하였다. 기존 연구가 주로 구조화된 변수만을 사용한 반면, 본 연구는 의료 텍스트를 자연어 처리 기반으로 정규화하여 수술 특성을 효과적으로 반영하였다 [1].

그러나, 세 클래스 간 표본 불균형으로 중, 장기 재원군의 성능이 낮게 나타났으며, 단일 기관 데이터로 수행되어 외부 검증이 필요하다. 향후 연구에서는 데이터 균형화 및 다양한 임상 및 환경 요인을 포함한 확장형 모델을 개발할 예정이다. 결론적으로, 본 연구는 비정형 의료 텍스트 데이터와 임상 데이터를 결합한 융합 모델이 환자 재원 기간의 단계적 예측에 활용될 수 있는 가능성을 제시한다.

5. Acknowledgements

이 연구는 산업통상자원부 및 산업기술기획평가원 (KEIT) 과제의 지원을 받아 수행하였음 (RS-2024-00423853).

6.참고 문헌

[1] H. N. Cho, et al., "Explainable predictions of a machine learning model to forecast the postoperative length of stay for severe patients: machine learning model development and evaluation," BMC Medical Informatics and Decision Making, Vol. 24, No. 1, p. 350, 2024.
[2] Y. Gu, et al., "Domain-specific language model pretraining for biomedical natural language processing," ACM Transactions on Computing for Healthcare (HEALTH), Vol. 3, No. 1, pp. 1–23, 2021.
[3] I. Loshchilov, and F. Hutter, "Decoupled weight decay regularization," arXiv preprint arXiv:1711.05101, 2017.

Poster-237

갑상선 세포병리 영상 특징 추출을 위한 반지도 학습 프레임워크

박영현[1], 추유성[1], 박재현[2*], 양세정[1,3*]

연세대학교 원주의과대학 정밀의학과[1], 연세대학교 원주의과대학 갑상선내분비외과[2],

연세대학교 원주의과대학 의료정보통계학과[3]

Semi-Supervised Learning Framework for Feature Extraction in Thyroid Cytopathology

Younghyun Park[1] , Yuseung Chu[1], Jae Hyun Park[2], Sejung Yang[1,3]

Department of Precision Medicine, Yonsei University Wonju College of Medicine, Wonju, Korea[1]

Department of Surgery, Yonsei University Wonju College of Medicine, Wonju Severance Christian Hospital, Wonju, Korea[2]

Department of Medical Informatics and Biostatistics, Yonsei University Wonju College of Medicine, Wonju, Korea[3]

[*]syang@yonsei.ac.kr, jhoney@yonsei.ac.kr

Abstract

Differentiating the small fraction of malignant thyroid tumors from the vast majority of benign ones is a critical clinical challenge to prevent unnecessary surgeries. However, developing deep learning aids for this task is hampered by two fundamental issues: high annotation costs and the inherent data impurity of malignant Whole Slide Images (WSIs).While weakly-supervised methods like Attention-based Multiple Instance Learning (MIL) address these issues, they primarily target slide-level classification, providing only the relative importance of patches rather than quantifying their individual risk. To address this gap, a Variational Positive-Unlabeled (VPU) learning approach was employed to train a Vision Transformer specifically as a patch-level feature extractor using only WSI-level labels. On a dataset of 111 thyroid FNA WSIs, the model achieved a patch-level AUC of 92.40% and an F1-Score of 80.55%. The high precision (89.59%) demonstrates the model's reliability in identifying benign cases, minimizing the critical error of misclassifying malignant features. Qualitative analysis further confirmed the model learned key cytopathological features, such as honeycomb arrangements and nuclear enlargement. This study demonstrates the feasibility of developing a robust patch-level diagnostic aid from weakly labeled medical images, effectively bypassing the need for expensive annotations.

1. 연구 배경

갑상선암은 가장 흔한 내분비계 악성 종양 중 하나이지만, 발견되는 대부분의 갑상선 결절은 양성이다. 따라서 양성과 악성 결절을 정확하게 감별하는 것은 불필요한 수술을 피하고 적절한 치료 계획을 수립하는 데 중요하다. 이를 위한 표준 진단 절차는 세침흡인검사(Fine-Needle Aspiration)이며, 검사 결과는 베데스다 시스템(Bethesda System)에 따라 6개의 범주로 분류된다. 이 시스템은 각 범주에 따른 악성 위험도를 제시하여 임상적 결정을 돕지만, 범주 III, IV, V와 같은 '비정형(indeterminate)' 범주는 진단적 모호성이 커 임상 현장에서 큰 어려움으로 남아있다[1].

비정형 범주의 진단이 어려운 근본적인 이유는 하나의 검체 안에 양성과 악성의 세포 형태학적 특징이 혼재하기 때문이다. 이처럼 복합적인 특징을 객관적으로 해석하기에 앞서, 양성과 악성을 구분하는 가장 본질적인 특징이 무엇인지 명확하게 정의하는 딥러닝 기반의 선행 연구가 활발하게 연구되고 있다. 선행연구들의 가장 일반적인 접근법은 완전 지도 학습(fully-supervised learning)으로, 개별 이미지 패치에 '양성(Benign)' 또는 '악성(Malignant)' 레이블을 모두 부여하여 모델을 학습에 사용한다. 그러나 이 방식은 병리학자가 슬라이드 내 수만 개의 패치에 라벨링을 하는 많은 시간과 비용을 요구한다. 이러한 한계를 극복하고자 WSI 전체의 최종 진단명을 사용하는 약지도 학습(weakly-supervised learning)이 대안으로 고려된다. 하지만 이 접근법은 '악성'으로 진단된 WSI가 실제로는 악성 세포와 양성 세포가 혼재된 데이터 불순수성 문제에 직면하며, 이를 다루기 위해 Attention-based 다중 인스턴스 학습과 같은 접근법이 제안되었다[2]. 이 방식은 어텐션 메커니즘을 통해 진단에 결정적인 패치를 시각화하여 설명력을 제공하지만, 주된 목표는 WSI 단위의 최종 분류이며, 어텐션 스코어는 각 패치의 상대적 중요도를 나타낼 뿐, 개별 패치 자체의 악성 위험도를 직접적으로 나타내지는 않는다.

따라서 본 연구는 WSI 레벨의 레이블만으로 개별 패치의 위험도를 직접 추정하는 것을 목표로 한다. 이 목표를 달성하기 위해, 앞서 언급한 데이터 불순수성 문제를 해결하는 데 특화된 Variational Positive-Unlabeled (VPU) 학습 프레임워크를 도입한다[3]. 양성 WSI에서 추출한 패치들을 'Positive Set'으로, 악성과 양성이 섞여있는 악성 WSI의 패치들을 'Unlabeled Set'으로 정의한다. 이를 통해 본 연구는 각 패치에서 양성과 악성을 구분하는 세포 형태학적 특징을 추출하는 모델을 개발하였다.

2.연구 방법

2.1 모델 개요

본 연구는 WSI(Whole Slide Image) 수준의 레이블만을 사용하여, 개별 패치 단위에서 양성 세포의 형태학적 특징을 선별하고 추출하는 딥러닝 모델을 제안한다. 이를 위해 VPU 학습 프레임워크를 도입하였다.

2.2 모델 구성

모델은 그림 1의 형태로 구성되어 있으며, 모델의 backbone은 대규모 병리 데이터로 사전학습된 UNI Vision Transformer (ViT)를 사용한다[4]. 사전학습된 모델의 가중치는 대부분 동결하고 소수의 파라미터만 효율적으로 미세조정하기 위해 LoRA기법을 적용하였다[5]. ViT의 최종 CLS 토큰 출력에 MLP(Multi-Layer Perceptron) 헤드를 추가하여, 각 패치에 대한 양성 확률을 예측하도록 설계하였다.

2.3 손실 함수

모델 학습을 위해 Variational Positive-Unlabeled (VPU) Loss를 사용한다[3]. $\mathcal{L}_{VPU}$는 다음과 같이 구성된다.

$$\mathcal{L}_{VPU} = \log(-\mathbb{E}_{x\sim U}[\emptyset(x)]) - \mathbb{E}_{x\sim P}[log\emptyset(x)] \quad (1)$$

$$* U : Unlabeled\ Set, \quad P : Positive\ Set$$

$\mathbb{E}_{x\sim P}[log\emptyset(x)]$ 는 Positive Set의 모든 패치에 대한 양성 예측 확률 $\emptyset(x)$ 을 1에 가깝게 만드는 역할을 한다.

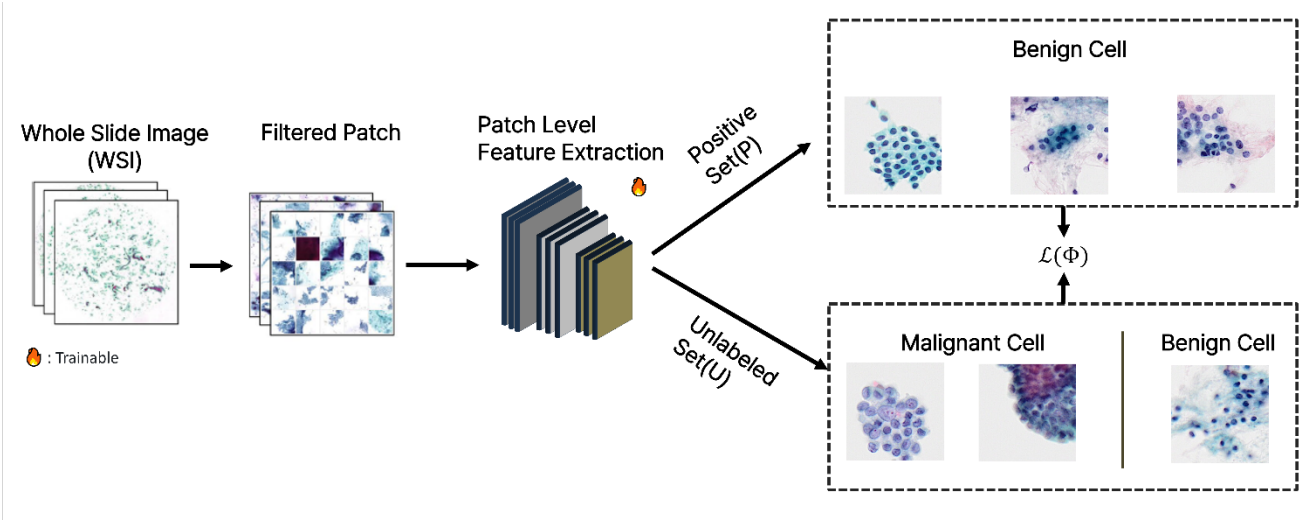


그림 1 제안하는 특징 추출 프레임워크의 파이프라인

$\log(-\mathbb{E}_{x\sim U}[\emptyset(x)])$는 Unlabeled Set의 평균적인 예측확률을 0에 가깝게 낮춘다. 따라서 모델은 Loss를 minimization하는 과정에서 Unlabeled Set 중 다수를 차지하는 악성 패치에 대해서 확률을 낮추는 방향으로 학습이 진행된다. 추가적으로 모델의 일반화 성능을 높이기 위하여 Mixup Regularization을 추가로 사용하였다. Mixup은 훈련 배치 내에서 임의로 선택된 두 데이터 샘플 x_i^P와 x_i^U를 다음과 같이 선형적으로 결합하여 새로운 가상의 학습 데이터 $\tilde{x}$와 확률 $\tilde{\phi}$를 생성한다.

$$\tilde{x} = \lambda x_i^P - (1-\lambda)x_i^U, \qquad \tilde{\phi} = \lambda \cdot 1 + (1-\lambda)\phi(x_i^U) \quad (2)$$

$$\mathcal{L}_{reg} = \mathbb{E}_{\tilde{\emptyset},\tilde{x}}\left[\left(log\tilde{\phi} - \log \emptyset(\tilde{x})\right)^2\right] \quad (3)$$

최종적으로 모델이 최소화하는 전체 손실은 다음과 같이 정의된다.

$$\mathcal{L}_{total} = \mathcal{L}_{VPU} + \lambda_{reg}\mathcal{L}_{reg} \quad (4)$$

3. 연구 결과

3.1 데이터 구성 및 전처리

본 연구의 모델 학습에는 연세대학교 원주세브란스기독병원에서 확보한 갑상선 세침 흡인검사의 WSI 데이터 셋을 사용하였다. 데이터 셋은 양성 WSI 57개와 악성 WSI 54개로 구성되었으며, 훈련과 검증을 위해 8:2 비율로 분할하였다. 전처리 단계에서는 WSI를 256x256 픽셀 크기로 50% overlapping하여 패치를 추출하였다. 이후 세포 영역이 패치 중앙에 위치하도록 각 패치의 중앙에서 128x128 픽셀 크기의 영역을 다시 추출하였다. 최종적으로, 이 패치들을 대상으로 평균 밝기, 표준편차 및 허프 변환을 적용하여 배경을 제외한 유의미한 세포를 포함하는 패치를 WSI당 100개씩 선별하였다. 만약 패치 수가 100개에 미치지 못하는 WSI의 경우, 간단한 데이터 증강을 통해 수를 동일하게 조정하였다. 본 연구는 연세대학교 원주세브란스기독병원 임상연구심의위원회(IRB)의 승인을 받아 수행되었다(IRB no. CR320109).

3.2 정량 평가 및 정성 평가

제안된 학습 모델의 성능을 검증 데이터셋에 대해 패치 단위로 정량적으로 평가하였으며, 그 결과는 표 1과 같다. 모델은 전체적인 분류 성능을 나타내는 AUC는 92.40%를 달성했으며, 세부적으로는 Accuracy 80.73%, F1-Score 80.55%를 기록하였다. 양성 클래스에 대한 Precision은 89.59%로 높은 반면 Recall은 73.17%로 측정되었다. 이러한 지표의 조합은 VPU 손실 함수의 설계에 따라 의도된 결과로 해석된다. 모델은 악성의 특징이 의심되는 패치는 양성으로 판단하지 않도록 학습되기 때문이다. 이러한 결과는 그림 2의 정성적 비교에서도 확인할 수 있다. 모델이 양성으로 올바르게 예측한 패치에서는 양성 여포 세포의 특징인 벌집 모양의 평면적인 세포 배열과 균일하고 둥근 핵이 뚜렷하게 관찰되었다. 반면, 악성으로 정확하게 예측한 패치(True Negative)에서는 갑상선 유두암의 주요 특징인 핵 비대, 불규칙한 핵 경계, 그리고 핵 내 염색질의 청명화와 같은 특징들이 나타났다[1]. 악성 WSI의 패치에서 양성으로 예측된 경우 혼재되어 있던 양성의 특성을 가지고 있는 패치 가 분리되어 나온 것으로 생각되며, 모델이 양성 WSI의 패치를 악성으로 잘못 예측한 경우를 분석한 결과, 주로 세포들이 심하게 겹쳐 있는 두꺼운 군집이나 초점이 맞지 않아 핵의 세부 특징을 파악하기 어려운 패치들이 포함되었다.

	ACC	Recall	Precision	F1	AUC
Proposed	80.73	73.17	89.59	80.55	92.40

표 1 제안된 모델의 정량적 지표

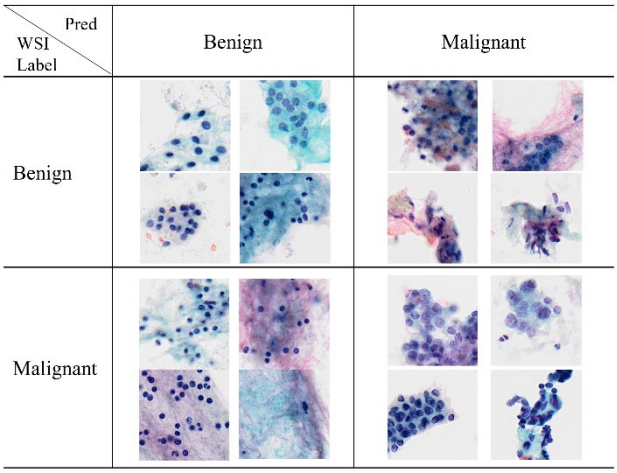


그림 2 모델의 예측에 따른 정성적 비교

4. Acknowledgements

본 연구는 과학기술정보통신부 정보통신진흥기금을 지원받아 작성한 것으로, 과학기술정보통신부의 공식의견과

다를 수 있습니다. 본 연구는 과학기술정보통신부(MSIT)의 재원으로 한국연구재단(NRF) 바이오·의료기술개발사업의 지원을 받아 수행되었습니다 (과제번호: RS-2024-00440802)

5.참고 문헌

[1] Cibas, E. S., & Ali, S. Z. (2017). The 2017 Bethesda system for reporting thyroid cytopathology. *Thyroid*, *27*(11), 1341-1346.

[2] Ilse, M., Tomczak, J., & Welling, M. (2018, July). Attention-based deep multiple instance learning. In *International conference on machine learning* (pp. 2127-2136). PMLR.

[3] Chen, H., Liu, F., Wang, Y., Zhao, L., & Wu, H. (2020). A variational approach for learning from positive and unlabeled data. *Advances in Neural Information Processing Systems*, *33*, 14844-14854.

[4] Chen, R. J., Ding, T., Lu, M. Y., Williamson, D. F., Jaume, G., Song, A. H., ... & Mahmood, F. (2024). Towards a general-purpose foundation model for computational pathology. *Nature medicine*, *30*(3), 850-862.

[5] Hu, E. J., Shen, Y., Wallis, P., Allen-Zhu, Z., Li, Y., Wang, S., ... & Chen, W. (2022). Lora: Low-rank adaptation of large language models. *ICLR*, *1*(2), 3.

Poster-238

고주파 유도와 프롬프트 자동화를 결합한 Box-Aware SAM 기반 유방 초음파 분할

이찬근[1] , 이해윤[1*]
한국기술교육대학교 컴퓨터공학부

Box-Aware SAM: Robust YOLO-prompted Ultrasound Segmentation with HF Guidance

Changeun Lee[1*] , Haeyun Lee[1]
School of Computer Science and Engineering, Korea University of Technology and Education, Cheonan, Republic of Korea
*haeyun@koreatech.ac.kr

Abstract

Lesion segmentation in ultrasound is clinically important for quantification and decision support, yet remains difficult due to low contrast, speckle noise, ambiguous boundaries, and domain shift across scanners. While promptable models such as SAM can produce accurate masks, manual prompting is impractical in batch processing and introduces human variability. We present Box-Aware SAM, an efficient framework that (i) injects a high-frequency guidance into the SAM image encoder via adapters, (ii) automates prompt generation with YOLO11 for true end-to-end training and inference, (iii) sharpens boundaries using a Dice plus edge loss, and (iv) mitigates over-reliance on noisy boxes by a lightweight box-aware prior fused as attention bias and a weighted union rule over K box proposals. We evaluate on BUSI and UDIAT data using automatic prompts only. Despite removing human interaction, our method achieves competitive performance to re-trained/hand-prompted baselines and consistently improves boundary fidelity and robustness.

1. 연구 배경

자연 영상에서의 SAM 계열 모델은 점/박스 Prompt만으로도 높은 분할 성능을 보이며, 대규모 사전학습 덕분에 일반화 성능도 우수하다. 그러나 유방 초음파 이미지에서는 domain shift, low contrast와 speckle noise, ambiguous boundaries 때문에 동일한 해부 구조가 다르게 보인다. [3] 이때 대형 파라미터 모델을 소규모 의료 데이터에 그대로 retraining하면 overfitting이 쉽게 발생하고, manual prompting은 대량 처리에 부적합하며 편차를 유발한다. 또한 자동화를 위해 Detector의 Prompt에 의존하면, 탐지 오류가 분할로 전파되는 연쇄 오차가 나타난다. [1]

이 한계를 줄이기 위해 우리는 다음의 설계를 채택했다. 첫째, Adapter를 삽입해 SAM Backbone의 표현력을 유지하면서 학습 파라미터 수를 최소화한다. [2] 둘째, 초음파의 Low contrast·noise 문제를 완화하기 위해 High-Frequency(HF) feature을 추출해 Image Encoder에 guidance로 주입, 경계 주변 신호를 강조한다. 셋째, Cross-Branch Attention(CBA)을 통해 Transformer 기반 표현과 HF Fusion Feature가 상호 보완적으로 상호작용하도록 한다. 넷째, YOLO11로 Prompt(box)를 자동 생성하되, 단순 예측 confidence에만 의존하지 않고 경계·형태·명암 단서 5가지로 box quality를 추정하여 box-aware prior를 Attention bias로 넣고, 다중 제안은 Weighted Complement Product로 결합해 불확실한 박스의 영향을 억제한다. 그 결과, 자동 프롬프트 설정임에도 기존 방법과 필적하는 성능과 더 나은 경계 충실도를 보인다.

2.연구 방법

그림 1 의 전체 파이프라인은 (i) Image Encoder branch, (ii) HF Fusion branch, (iii) Prompt Generation branch 로 구성된다.

Image Encoder. SAM 의 비전 트랜스포머 백본을 사용하며, 대부분의 블록은 동결하고 각 스테이지에 Adapter 를 삽입하여 소수의 파라미터만 미세조정한다. 이로써 의료 데이터처럼 규모가 작은 환경에서도 안정적인 학습이 가능하다.

HF Guidance/Fusion. 입력 초음파 이미지에서 경계·세부 구조를 강조하기 위해 High Frequency 지도를 만든다. 구체적으로 Sobel 기반 경계 반응과 더울어 wavelet 변환(예: Haar/Daubechies)의 고주파 subband(예: LH, HL, HH)를 추출한 뒤, 대역별 정규화 후 합성하여 HF magnitude $H \in [0,1]$ 를 얻는다. 이렇게 얻은 H는 (1) Fusion branch에서 Multi-scale CNN과 결합되어 fusion feature를 만들고, (2) Image Encoder의 Attention에 bias로 주입되어 경계 인접 토큰에 더 많은 가중치를 부여한다.

Cross-Branch Attention(CBA). Transformer의 global context과 HF fusion feature의 local 경계 단서가 한 연산에서 상호보완적으로 작용하도록, 토큰 간 attention에 box-aware bias B를 더해 계산한다:

$$Attn(Q,K,V;B) = softmax(\frac{QK^T}{\sqrt{d}} + B)V \quad (1)$$

이로써 전역 문맥($QK^T/\sqrt{d}$)과 국소 경계·형태 단서(B)가 한 연산에서 결합되어, 얕은 경계·저대비 구조에서도 안정적인 대응이 가능하다. **Bias $\boldsymbol{B}$**는 YOLO confidence, 내/외부 HF 비율, 이미지 테두리와의 거리, compactness, 내/외부 명암차의 5가지 box-quality cues를 기반으로 결정된다.

다중 박스 결합(Weighted Complement Product, WCP). YOLO가 예측한 K개의 box에 대한 마스크 확률 $p_k(x)$ 는 합성되면서 불확실한 제안의 영향은 작게 만든다:

$$p_{final}(x) = 1 - \exp\left(\sum_k w_k \, log\left(1 - p_k(x)\right)\right) \quad (2)$$

이로써 겹치는 영역은 강화하고, 신뢰도가 낮은 제안은 자연스럽게 감쇠시켜 최종 확률을 안정화한다.

학습 목표. 경계 품질을 직접 규제하기 위해

$$L = \alpha L_{dice} + \beta L_{edge} \quad (3)$$

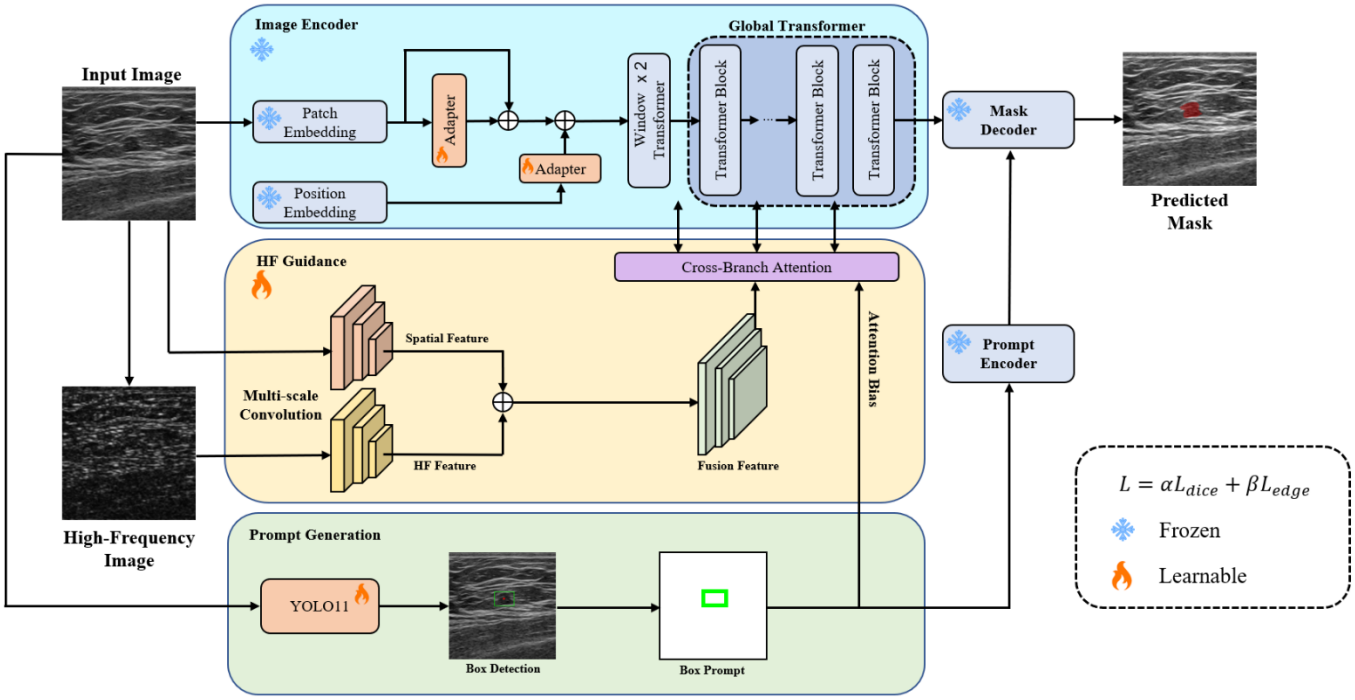


그림 1. 제안한 Box-Aware SAM의 전체 파이프라인 개요: HF guidance fusion–ViT 통합(CBA), YOLO11 기반 box-aware bias B주입, WCP에 의한 다중 박스 결합으로 최종 마스크 예측.

를 사용한다. 기본 설정은 $\alpha = 1.0$, $\beta = 1.2$로, Dice대비 Edge loss의 비중을 약간 높였다. L_{edge} 는 예측 확률 지도에 Sobel 필터를 적용해 얻은 경계 강도와 GT 경계 강도 사이의 L_1 손실로, Hausdorff 성향의 경계 오차를 낮추는 효과가 있다. 모든 실험은 BUSI [5]/UDIAT, Auto Box Prompt를 사용하며, 추론 시에도 YOLO box → box-aware bias → CBA → mask decoder → WCP의 동일 경로를 따른다.

3. 연구 결과

표 1에서 Dice/Accuracy를 제시하며, 비교 대상은 U-Net, Attention U-Net, MedSAM [4], SAMUS [2]로 구성하였다. 자동 프롬프트라는 제약에도 불구하고, 제안한 HF guidance + CBA + WCP+ Dice+Edge 조합은 재학습/수동 프롬프트 기반 모델들과 대등하거나 우수한 성능을 보였다. 특히 작은 병변과 저대비 경계에서 민감도(경계 닫힘)가 일관되게 개선되었고, 박스가 부분적으로 빗나간 사례에서도 box-aware prior가 신뢰도 낮은 제안의 영향력을 억제해 최종 마스크의 안정성을 확보하였다. UDIAT 실험에서도 BUSI와 유사한 경향이 관찰되어, 데이터 차이에 대한 강건성을 확인하였다.

표 1. BUSI/UDIAT 데이터에서의 도메인 특화 모델과 SAM 계열 모델과의 비교

Models	BUSI		UDIAT	
	Dice ↓	Accuracy ↑	Dice ↑	Accuracy ↓
Unet	78.12	95.44	77.84	96.72
AttentionUnet	79.36	94.20	80.28	96.06
MedSAM[4]	78.20	95.50	79.65	96.62
SAMUS[2]	**84.32**	96.77	87.62	**98.26**
Ours	82.82	**97.01**	**87.88**	98.12

4. 결론

본 연구는 HF 유도, YOLO 기반 자동 프롬프트, Box-Aware CBA/WCP를 통합한 초음파 분할 프레임워크를 제안하였다. 소수 파라미터 적응과 경계 중심 손실로 데이터가 적은 환경에서도 안정적으로 학습되었고, BUSI·UDIAT에서 경계 충실도와 민감도 향상, 전반적 정확도 개선을 확인하였다. 사람 개입 없이도 임상 적용 가능한 일관성과 강건성을 입증한다.

5. Acknowledgements

이 논문은 한국기술교육대학교 고용직업능력개발센터 2025년 연구과제(직무 맞춤형 로봇 제어 학습 기술 선행 개발)의 수행 결과 및 2025년도 교육부 및 충남시/도의 재원으로 충남RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과입니다. (2025-RISE-12-022)

6.참고 문헌

[1] A. Kirillov, E. Mintun, N. Ravi, H. Mao, C. Rolland, L. Gustafson, T. Xiao, S. Whitehead, A. C. Berg, W.-Y. Lo, P. Dollár, and R. Girshick. "Segment Anything." arXiv preprint arXiv:2304.02643, 2023.

[2] X. Lin, Y. Xiang, L. Yu, and Z. Yan. "SAMUS: Adapting Segment Anything Model for Clinically-Friendly and Generalizable Ultrasound Image Segmentation." arXiv preprint arXiv:2309.06824, 2023.

[3] Q. Huang, Y. Luo, and Q. Zhang. "Breast ultrasound image segmentation: a survey." International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, Vol. 12, p.493–507, 2017.

[4] J. Ma, Y. He, F. Li, L. Han, C. You, and B. Wang. "Segment anything in medical images." Nature Communications, Vol. 15, No. 1, p.654, 2024.

[5] W. Al-Dhabyani, M. Gomaa, H. Khaled, and A. Fahmy. "Dataset of breast ultrasound images." Data in Brief, Vol. 28, p.104863, 2020.

Poster-239

Top-k MIL 기반 경량 모델의 Diffusion 위내시경 위·변조 탐지 성능 분석

최시우[1], 한승희[1] , 김규리[1], 이진아[2], 허용도[1*]
건양대학교 의료IT공학과[1]
건양대학교 대학원 의료공학과[2]

Performance Analysis of a Lightweight Model with Top-k MIL for Diffusion Endoscopy Image Manipulation Detection

Siwoo Choi[1] , Seunghee Han[1] , Gyuri Kim[1] , Jina Lee[2] , Yongdo Her[1]*
School of Medical Engineering, Graduate School, Konyang University, Korea[1]
School of Medical Information Technology Engineering, Konyang University, Korea[2]
*ydher@konyang.ac.kr

Abstract

The recent advancement of diffusion models has enabled the generation of highly realistic medical images, but this also poses serious ethical and diagnostic risks due to potential image manipulation. This study proposes a lightweight deep learning model to accurately detect manipulations in diffusion-based endoscopic images. The proposed model combines a MobileNetV1 backbone with a Top-k Multiple Instance Learning (MIL) structure to effectively capture local artifacts, while Focal Loss and Class-Balanced Online Hard Example Mining (OHEM) are applied to address data imbalance issues. Experimental results demonstrate that the proposed model improved accuracy from 49.2% to 98.8% and precision from 49.2% to 98.4% after fine-tuning, while the specificity (TNR) for real images increased from 1.34% to 98.47%. These results indicate that the model effectively learns fine high-frequency artifacts inherent in diffusion-generated images and contributes to reliable authenticity verification in medical imaging.

1. 연구 배경

의료 인공지능은 내시경 영상 진단의 정확도를 높이며 임상 효율성을 향상시켜 왔다[1]. 그러나 최근 확산모델(Diffusion Model)의 등장으로 실제와 거의 구분되지 않는 합성 위내시경 영상이 생성되면서, 의료 영상의 진위 판별과 신뢰성 확보가 중요한 과제가 되었다. 이러한 위·변조 영상은 진단 오류를 유발할 수 있어 의료 포렌식 기반 탐지 기술의 필요성이 급증하고 있다.

본 연구는 이러한 문제를 해결하기 위해 경량 MobileNetV1 백본과 Top-k Multiple Instance Learning(MIL) 구조를 결합한 위·변조 영상 탐지 모델을 제안한다. 제안 모델은 Diffusion 합성 영상에 내재된 미세한 고주파 아티팩트를 효과적으로 학습하도록 설계되었으며, Focal Loss와 Class-Balanced OHEM을 결합하여 불균형 데이터를 안정적으로 학습한다[2].

연구의 주요 기여는 다음과 같다. (1) Diffusion 기반 위·변조 위내시경 이미지에 특화된 이진 분류 데이터셋을 구축한다. (2) Top-k MIL을 적용한 경량 구조에서 파인 튜닝 전후 성능(Accuracy 49.2%→98.8%)의 향상을 정량적으로 입증한다. 본 연구는 의료 영상 위·변조 탐지를 위한 경량 고성능 모델의 가능성을 제시하며, 향후 임상 환경에서의 실시간 적용 기반을 마련한다.

2. 관련 연구

확산모델(Diffusion Model)은 기존 GAN보다 높은 품질과 다양성을 갖는 합성 영상을 생성하지만, 결과물에는 미세한 주파수 기반 아티팩트(Artifact)가 남는다. 이는 육안으로 구별하기 어렵지만, 딥러닝 모델은 이러한 통계적 잔여 신호를 탐지 단서로 활용할 수 있다.

본 연구는 이러한 Diffusion 고유 패턴을 국소 단위로 포착하기 위해 Top-k Multiple Instance Learning(MIL) 구조를 도입하고, 이를 MobileNetV1과 결합하여 위·변조 영상 탐지에 최적화하였다[3].

3. 연구 방법

본 연구는 Diffusion 기반 위·변조 위내시경 영상을 탐지하기 위해 경량 MobileNetV1과 Top-k Multiple Instance Learning(MIL) 구조를 결합한 이진 분류 모델을 제안한다. 입력된 내시경 영상은 모델을 통해 실제(Real) 또는 위·변조(Fake)로 분류되며, 최종 결정은 두 클래스 확률 중 높은 값을 선택하는 Argmax 연산으로 수행된다.

데이터셋은 합성 영상의 경우 AIHUB와 AIHUB-ulcer의 Diffusion 데이터, 실제 영상은 GastroHun, GastroEndoNet_GRED, Gastric Polyp Dataset (PLOS ONE, 2019)을 활용하였다. 학습용으로 Fake 7,500장과 Real 7,636장을, 테스트용으로 Fake 500장과 Real 520장을 사용하였으며, 모든 이미지는 512×512로 정규화하였다. 각 영상은 Class 0(Real)

과 Class 1(Fake)로 이진 라벨링되었다.

모델은 MobileNetV1을 특징 추출기로 사용하고, 최종 분류단에 Top-k MIL pooling을 적용하여 Diffusion 합성 영상에 내재된 미세한 고주파 아티팩트를 국소적으로 포착하도록 설계하였다. 학습 초기에 전역적 특징(k=1.0)을 활용하고, 후반부에는 k=0.06까지 점진적으로 감소시키는 스케줄을 적용하여 모델이 점차 구별력 높은 영역에 집중하도록 하였다.

데이터 불균형 문제 해결을 위해 Focal Loss(γ=1.5, α=(0.6,0.4))와 Class-Balanced Online Hard Example Mining(OHEM, Keep Ratio=0.5)을 결합하였다. 이를 통해 모델이 학습 난이도가 높은 샘플에 더 큰 비중을 두고 학습할 수 있도록 유도하였다. 또한 Dropout(p=0.2)과 조기 종료(Early Stopping) 기법을 적용해 과적합을 방지하였다. 이러한 최적화 과정을 통해 제안 모델은 Diffusion 위·변조 영상의 미세한 시각적 차이를 효과적으로 학습하며, 경량 구조에서도 높은 탐지 성능을 확보할 수 있도록 설계되었다.

4. 실험 및 결과

모델 학습에는 Adam Optimizer(LR=1e-3, Weight Decay=1e-4)를 사용하였으며, 검증 손실이 개선되지 않을 경우 학습률을 자동 조정하는 ReduceLROnPlateau 스케줄러를 적용하였다. 손실 함수는 Focal Loss 기반의 Class-Balanced OHEM으로 설정하여 불균형 데이터에서도 안정적인 학습을 유도하였다.

모델 성능 평가는 테스트 데이터셋에 대한 정확도(Accuracy)를 기준으로 수행하였으며, 분류 결과는 클래스 확률값의 Argmax 연산을 통해 결정하였다. 비교 대상은 파인 튜닝 이전의 사전 학습 MobileNetV1 모델과, 제안된 Top-k MIL 기반 파인 튜닝 모델 간의 성능 차이다.

표 1. MobileNetV1과 제안 모델의 성능 비교

Model	Accuracy	Recall (TPR)	Real Recall	Precision (Fake)	FPR
MobileNetV1	49.2%	100.0%	1.34%	49.2%	98.7%
MobileNetV1 + MIL-pooling	98.8%	100.0%	98.47%	98.42%	1.53%

표 1. 은 MobileNetV1과 제안 모델의 성능 비교 실험 결과이다. 파인 튜닝 후 정확도는 49.2%에서 98.8%로 49.6%p 향상되었으며, Real 클래스의 특이도(TNR)는 1.34% → 98.47%, 정밀도(Precision)는 49.2% → 98.4%로 크게 개선되었다. 이는 제안된 모델이 Diffusion 기반 합성 영상의 미세한 고주파 아티팩트를 안정적으로 학습하며, 실제 영상의 질감적 특성을 효과적으로 구분했음을 의미한다.

특히 Top-k MIL의 점진적 k-ratio 감소 전략은 학습 후반부에서 중요한 국소 패치의 표현력을 극대화하여, 단순 평균 기반 MIL보다 더 명확한 결정 경계를 형성하는 데 기여하였다. 이러한 결과는 경량 MobileNetV1 구조에서도 고성능 위·변조 탐지가 가능함을 입증하며, Diffusion 기반 합성 영상에 대한 의료 영상 포렌식의 실질적 적용 가능성을 제시한다.

5. 결론

테스트 결과의 Argmax 정확도 수치를 바탕으로, MobileNetV1 + Top-k MIL 모델을 위·변조 검출 태스크에 특화하여 파인 튜닝하고 Focal Loss 및 OHEM을 적용하는 것이 Diffusion 모델 기반 위·변조 이미지를 탐지하는 데 결정적인 성능 향상을 가져왔음을 확인했다. Top-k MIL 아키텍처는 위·변조 이미지의 전역적인 특성뿐만 아니라 이미지 내의 작은 조작 영역(아티팩트)까지도 통합적으로 고려하여 분류 판단을 내리는 데 강점을 보였으며, 이는 경량 백본과 결합되어 효율성과 정확도를 모두 잡았다는 의의를 가진다. 궁극적으로 의료 진단의 신뢰성 확보까지 기여하기를 기대한다. 향후 연구에서는 다양한 생성 모델(예: GAN, VAE 등)로 확장하고, 검출 속도를 최적화하여 실제 임상 환경에 적용 가능한 경량화된 모델을 개발하는 방향으로 나아갈 것이다.

6. Acknowledgements

본 연구는 2025년도 교육부 및 대전광역시의 재원으로 대전RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과입니다.(2025-RISE-06-001)

7. 참고문헌

[1] Hyperspectral image classification using an encoder-decoder model with depthwise separable convolution, squeeze and excitation blocks. (2024).
[2] Tackling class imbalance in computer vision: a contemporary review. (2023).
[3] Cattle identification based on multiple feature decision layer fusion. (2024).

Poster-240

자궁경부 P3 병변 진단 보조를 위한 생성형 AI 기반 영상 생성 연구

백영서[1], 김영재[2], 김광기[3*]

가천대학교 의공학과[1]

가천대길병원 가천의생명융합연구원[2]

가천대학교 IT 융합대학 의용생체공학과[3]

Generative AI-based Cervical Image Generation for Diagnostic Support of P3 Cervical Lesions

Young Seo Baik[1], Young Jae Kim[2], Kwang Gi Kim[3*]

[1]Department of Biomedical Engineering, Gachon University, Republic of Korea

[2]Gachon Biomedical & Convergence Institute, Gachon University Gil Medical Center, Republic of Korea

[3]Department of Biomedical Engineering, College of IT Convergence, Gachon University, Republic of Korea

[*]kimkg@gachon.ac.kr

Abstract

This study proposes a mask-conditional diffusion model to generate synthetic cervical images of high-grade (P3) lesions using colposcopy data. A total of 905 cervical P3 lesion images were used to train the conditional diffusion model, incorporating a latent diffusion structure to enhance resolution and texture fidelity. The generated images achieved high visual similarity to real clinical data, with FID of 26.34 and SSIM of 0.65. The proposed approach effectively addresses the limitations of manual labeling and privacy constraints in large-scale cervical imaging datasets. In the future, this framework will be expanded into a multimodal predictive model integrating clinical information and report data to support clinical diagnosis and treatment planning.

1. 연구 배경

자궁경부암은 전 세계 여성암 중 발생률 4 위, 사망률 5 위에 해당하며, 조기 발견을 통한 치료가 예후에 결정적인 영향을 미친다[1]. 자궁경부의 병리적 변화는 정상 상태에서 저등급 병변, 그리고 고등급 병변으로 진행되며, 이 중 고등급 병변은 전암 단계로서 치료 개입이 필수적이다[2]. 그러나 임상 현장에서는 고등급 병변 중 P3 병변 영상 데이터의 수가 제한적이고, 정상 및 저등급 데이터에 비해 불균형이 심각하여 딥러닝 기반 진단 모델의 학습 효율이 저하된다[3].

자궁경부 확대검사(Colposcopy)는 촬영 환경에 따라 시각적 변동이 크고 병변 경계가 불명확해 추가적인 데이터 확보 및 다양화가 요구된다[4]. 최근 생성형 인공지능(Generative AI) 과 확산 모델(Diffusion model) 이 안정적이고 사실적인 의료 영상 합성에 효과적임이 보고되었으며[5], 병변 영상이 부족한 영역에서 데이터 다양성을 높이는 방법으로 주목받고 있다[6]. 특히 이러한 생성형 AI는 자궁경부 병변 P3 병변의 가상 영상을 생성하여 환자 정보를 보호하면서 학습 데이터 다양화를 가능하게 한다. 이에 본 연구는 생성형 AI를 활용하여 자궁경부 P3 병변 영상을 합성하고, 이를 진단 보조 목적의 데이터로 활용하고자 한다. 이 연구는 데이터 불균형 해소와 동시에 의료 영상의 안전한 활용 및 진단 자동화의 기반을 제공할 것으로 기대된다.

2. 연구 방법

본 연구에서는 자궁경부를 약 50 배 확대 촬영할 수 있는 자궁경부 확대검사(Colposcopy) 장비를 활용하여 데이터를 수집하였다. 자궁경부 확대검사 영상은 임상에서 일반적으로 음성(정상)과 양성(비정상)으로 구분되며, 그 중 육안으로 암 조직이 관찰되거나 암으로 발전될 가능성이 높다고 의심되는 병변, 즉 양성 P3 병변을 대상으로 하였다. 최종적으로 905 장의 P3 병변 이미지를 선정하였으며, 모든 이미지는 전문의의 판독을 통해 병변 부위가 표시된 상태로 확보하였다. 자궁경부 확대검사 영상은 일반적으로 높이에 비해 폭이 넓고, 자궁경부는 영상의 중앙에 위치하며, 질벽이 좌우 끝부분에 포함되는 경우가 많다. 이에 모델 학습의 효율성과 입력 형식의 일관성을 유지하기 위해 모든 이미지를 512x512 픽셀로 리사이즈하고 좌우 영역을 제거하였다. 본 연구에서는 자궁경부 P3 병변 이미지를 기반으로, 다양한 촬영 조건과 해부학적 구조를 반영한 합성 자궁경부 영상을 생성하기 위해 mask conditional diffusion model을 제안하였다(그림 1). 첫 번째 단계에서는, 입력 마스크를 조건으로 사용하여 고품질 합성 이미지를 생성하는 mask conditional diffusion model을 적용하였다. 이 단계에서 모델은 초기 노이즈 상태에서 시작해 점진적으로 노이즈를 제거함으로써, 실제 레이블링 데이터와 유사하면서도 구조적 다양성을 반영한 자궁경부 P3 병변 이미지를 복원하였다. 두 번째 단계에서는 latent diffusion model을 이용하여 마스크 기반 입력 데이터를 저차원의

latent space로 압축한 뒤, 학습 및 생성 과정을 수행하였다. 이를 통해 고해상도 합성 이미지를 생성하였으며, 기존 이미지와 시각적 일관성을 유지하면서도 해상도와 질감 품질을 향상시켰다. 세 번째 단계에서는 생성된 이미지를 복원 및 디코딩하여 최종 합성 이미지를 얻었다. 학습 환경은 학습률(base learning rate)을 1e-6, 총 1,000 타임스텝(timesteps)으로 설정하였다. 손실 함수는 L1 loss를 사용하였으며, latent space 학습을 위한 인코더-디코더 구조로는 VQ-VAE(Vector Quantized Variational Autoencoder)를 적용하였다.

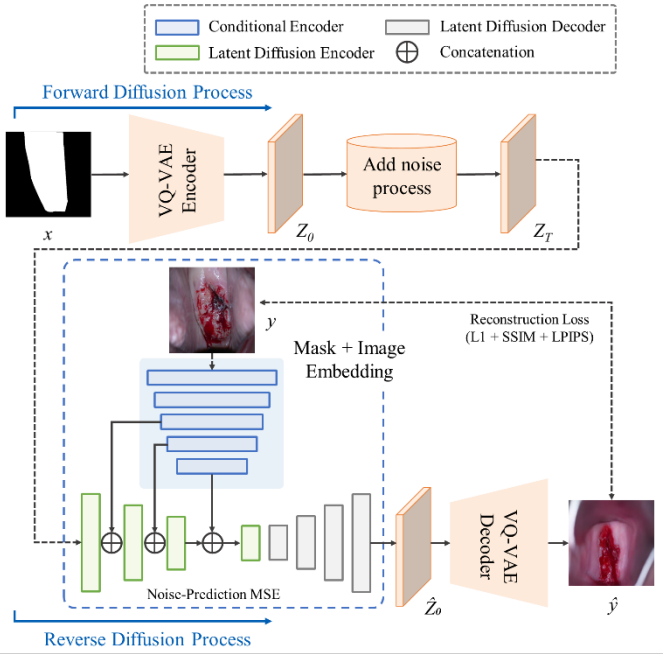


그림 1. 제안한 자궁경부 P3 병변 mask conditional diffusion model 아키텍처

3. 연구 결과

본 연구에서는 제안된 mask conditional diffusion model의 성능을 평가하기 위해, 합성 데이터와 실제 이미지간의 분포 유사도를 나타내는 Frechet Inception Distance(FID)와 휘도·대비·구조 정보를 기반으로 시각적 유사성을 정량화하는 Structural Similarity Index Measure(SSIM)을 활용하였다. 그림 2 은 제안된 모델을 통해 생성한 자궁경부 P3 병변 마스크 및 합성 이미지의 예시를 보여준다. 상단의 예시는 실제(real) 마스크와 생성된 마스크를 비교한 것으로, 실제 데이터의 자궁경부 형태적 특징과 공간적 관계를 정밀하게 재현하고 있음을 확인할 수 있다. 하단은 마스크를 조건으로 생성된 합성 이미지로, 고등급 병변 중 P3 병변의 조직 질감과 경계 형태를 선명하게 표현되어 있음을 보여준다. 이와 같은 방식으로 총 10,000 장의 마스크 및 합성 이미지를 생성하였으며, 생성된 이미지의 품질 평가는 FID 26.34, SSIM 0.65 로 측정되어 실제 이미지와 높은 분포 유사도 및 중상 수준의 구조 일관성을 보였다.

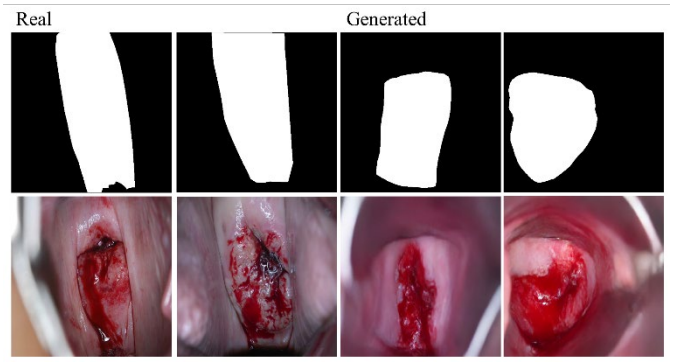


그림 2. 자궁경부 P3 병변 마스크 및 합성 이미지 예시

본 연구는 영상 획득 시 품질 편차가 크고 구조적으로 복잡한 자궁경부 P3 병변에 대해 고품질 합성 데이터를 생성할 수 있는 mask conditional diffusion model을 제안하였다. 기존의 수작업 라벨링 기반 데이터 구축 방식은 시간·인력 소모가 크고, 개인정보 보호 제약으로 인해 대규모 영상 확보가 어려운 한계를 지닌다. 본 연구의 합성 이미지 기반 접근은 이러한 문제를 해결할 수 있는 효율적 대안으로, 개인정보를 포함하지 않아 다기관·다수 환자 연구에서도 법적·윤리적 제약 없이 확장이 가능하다. 향후에는 자궁경부 영상 판독문 및 임상정보(BMI, 진단 기록 등)를 통합한 멀티모달 학습 기반 예측 모델로 발전시켜, 실제 임상 진단 및 치료 결정 지원에 기여할 예정이다.

4. Acknowledgements

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)의 자금 지원을 받은 의료데이터 합성 및 AI 기술 기반 디지털 의료 제품 개발 프로그램(RS-2025-02305698, 비정형 의료 데이터를 위한 합성 기술 및 합성 데이터를 활용한 온디바이스 AI 디지털 의료 제품 개발)의 지원을 받았음.

5. 참고 문헌

[1] World Health Organization (2023) Global Strategy to Accelerate the Elimination of Cervical Cancer as a Public Health Problem. Geneva: WHO.

[2] Lycke, K.D., Kjaer, J., Petersen, L.K., et al. (2023) Untreated cervical intraepithelial neoplasia grade 2 and 3 and risk of cervical cancer: population based cohort study. BMJ, 383:e075925.

[3] Pal, A., Xue, Z., Befano, B., et al. (2021) Deep metric learning for cervical image classification. IEEE Access, 9: 53266-53275.

[4] Aquilina, A., Papagiannakis, E. (2024) Deep learning diagnostic classification of cervical images to augment colposcopic impression. Journal of Lower Genital Tract Disease, 28(3): 224–230.

[5] Ho, J., Jain, A., Abbeel, P. (2020) Denoising diffusion probabilistic models. Advances in Neural Information Processing Systems, 33: 6840–6851.

[6] Sagers, L.W., Diao, J.A., Melas-Kyriazi, L., et al. (2023) Augmenting medical image classifiers with synthetic data from latent diffusion models. arXiv, 2308.12453.

Poster-241

보청기에서 DNN 기반 음성 향상을 위한 품질 및 복잡성 균형 연구

고형일[1], 강하림[1], 고유림[2], 우승탁[3], 나승대[4], 김명남[5]

경북대학교 대학원 의용생체공학과[1], 경북대학교병원 생명의학연구원[2], 동서울대학교 전자공학과[3],

경북대학교병원 의공학과[4], 경북대학교 의과대학 의공학교실[5]

Research on the Quality and Complexity Balance for DNN-Based Speech Enhancement in Hearing Aids

H.I. Koh[1], H.L. Kang[1], Y.L. Koh[2], S.T. Woo[3], S.D. Na[4], and M.N. Kim[5]

1 Department of Medical & Biological Engineering, Graduate School, Kyungpook National University

2 Department of Biomedical Research Institute, Kyungpook National University Hospital

3 Department of Electronic Engineering, Dong Seoul University.

4 Department of Biomedical Engineering, Kyungpook National University Hospital

5 Department of Biomedical Engineering, School of Medicine, Kyungpook National University

*kimmn@knu.ac.kr

Abstract

Recent advances in speech enhancement technology have been driven by the nonlinear modeling capabilities of deep neural networks, but these approaches often require large-scale computational power proportional to their performance, making them impractical for wearable devices such as hearing aids. In this paper, we propose a lightweight neural network based on Depthwise Dilated Dense Blocks (DDDB) to perform decent speech enhancement with limited computational resources. The network consists of an encoder-decoder structure that combines DDDB with Dual-Path Recurrent Neural Networks (DPRNN) that effectively model long sequence information. This design significantly reduces resource usage while fully utilizing time-frequency domain information. Experimental results show that the proposed model achieves competitive performance compared to recent baseline models that require much higher computational resources.

1. 연구 배경

배경 소음으로 인한 음성 명료도 저하는 스마트 스피커, 보청기와 같은 통신 기술에서 피할 수 없는 문제이다. 특히 청취 환경에 민감한 난청인이 시끄러운 환경에서 보청기를 사용할 경우 불필요한 소음을 증폭시켜 사용자 경험에 심각한 악영향을 미친다. 음성 향상은 까다로운 음향 환경에서 손상된 음성 신호의 어음 명료도와 지각 품질을 원래대로 복원시키는 기술로, 보청기 사용자의 소음 증폭 문제를 포함한 다양한 오디오 작업 문제들을 효과적으로 해결할 수 있어 수십 년 동안 널리 연구되었다. 최근 음성 향상 분야의 발전은 심층 신경망(DNN) 기반 접근 방식에 초점을 맞추고 있다. 특히 트랜스포머 기반의 음성 향상 모델은 CNN(convolutional neural network)에서 포착하기 어려운 저수준 특징에 대한 광범위한 종속성을 모델링함으로써, 유망한 음성 향상 성능을 보였다. 그러나 이러한 인상적인 성능 향상의 이면에는 신경망 기반의 음성 향상 알고리즘들이 위너 필터와 같이 고전적인 알고리즘에 비해 상당히 큰 컴퓨팅 자원을 필요로 한다는 단점이 있다. 사용 가능한 계산 리소스 제약 내에서 성능과 전력 소비의 균형을 맞춰야 하는 보청기 및 인공와우 시스템을 고려할 때, 음성 향상 모델의 계산 요구 사항을 줄이면서도 최신 모델들과 경쟁할 수 있는 경량 알고리즘에 대한 연구가 필요하다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 비교적 적은 연산으로 다양한 범위의 상관관계를 구축하기 위해 고전적인 밀집 연결 메커니즘과 그룹화된 팽창 합성곱을 결합한 DDDB (depthwise dilated dense blocks)를 제안한다. 제안한 모델은 DDDB를 기반으로 음성 스펙트럼 영역의 거친 특징부터 세밀한 특징까지 효과적으로 인코딩할 수 있으므로, 제한된 네트워크 수용량(Capacity)에서도 정교한 음성 복원이 가능하다.

2. 연구 방법

최신 음성 향상 모델에서 널리 활용되는 DDB(dilated dense block)[1]은 음성 향상 작업에서 뛰어난 성능을 발휘하지만, 모델의 채널 크기가 증가하면 매개변수의 수와 계산 복잡성이 상당히 증가하고, 특히 모듈의 팽창 합성곱 계층 수가 증가함에 따라 더 심화된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 깊이별 분리 합성곱 (depthwise separable convolution) 전략과 유사하게, 각 팽창 합성곱을 깊이별 팽창 합성곱과 점별(pointwise) 합성곱의 조합으로 분해하는 DDDB를 제안하였다. 그림1은 DDDB의 깊이별 분리 가능한 팽창 합성곱 과정을 나타내며, 기존 DDB과 DDDB에 대해

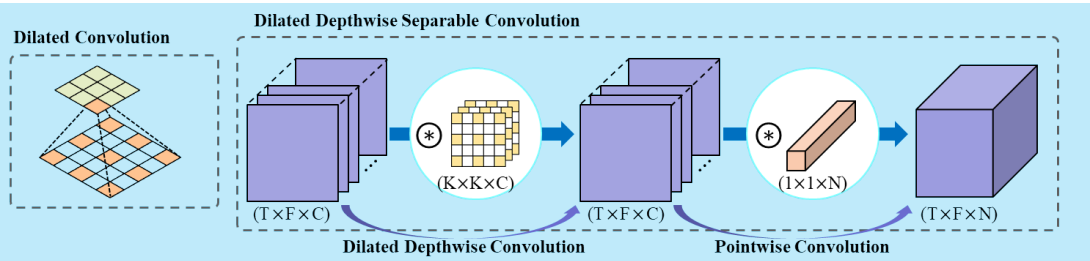


그림 1. 깊이별 분리 가능한 팽창 합성곱 연산의 개략도

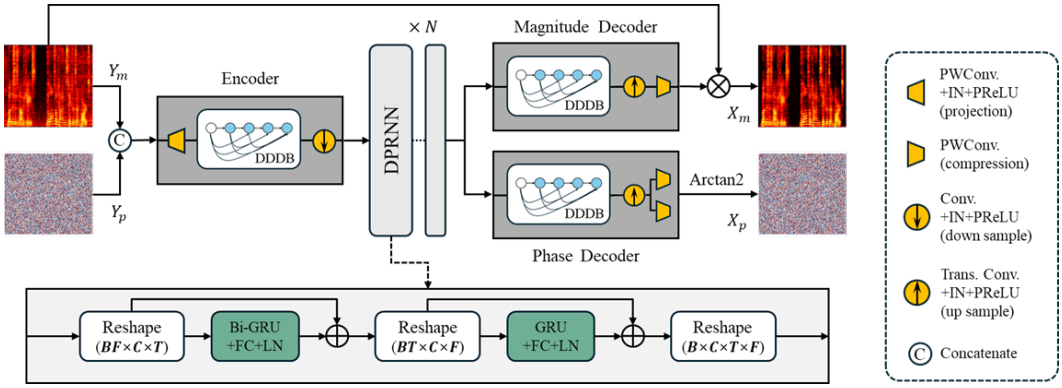


그림 2. 제안한 음성 향상 모델의 전체 구조

입력 스펙트럼 차원이 $t \times f$ 인 n 번째 레이어의 계산 복잡성은 수식 (1)과 (2)와 같이 표현된다.

$$DDB = \sum_{i=1}^{n} iC^2K^2tf \quad (1)$$

$$DDDB = \sum_{i=1}^{n} iCK^2tf + \sum_{i=1}^{n} iC^2tf \quad (2)$$

여기서 C는 사전 설정된 모델 채널의 수를 나타내고, K는 합성곱 커널의 크기를 의미한다. $n=4$, $C=64$, $K=3$ 인 경우, C^2 가 K^2 보다 훨씬 크기 때문에 DDDB의 복잡성과 매개변수 수는 DDB의 12.7%로 감소하며 특징 표현 능력은 그대로 유지하게 된다.

그림 2은 본 논문에서 제안한 음성 향상 모델의 전체 구조를 나타낸다. 구체적으로 네트워크는 먼저 25ms의 윈도우 길이와 6.25ms의 홉 길이를 갖는 STFT(short-time fourier transform)를 통해 시끄러운 음성 신호에서 크기 및 래핑된(wrapped) 위상 스펙트럼인 Y_m, Y_p 을 추출한다. 인코더는 스펙트럼을 보다 압축된 시간-주파수 영역 특징 표현으로 변환하고, 이를 2개의 DPRNN(dual-path recurrent neural network)[2]로 처리하여 단계별로 시간 및 주파수 종속성을 캡처한다. 마지막으로 병렬 크기 디코더와 위상 디코더는 인코딩된 특징 표현에서 각각 깨끗한 크기 및 위상 스펙트럼 X_m, X_p 을 예측하고 ISTFT(inverse STFT)를 통해 최종 강화된 음성 신호로 재구성한다. 인코더와 디코더는 점별 합성곱, DDDB, 2차원 합성곱, IN(instance normalization), PReLU(parametric ReLU) 층으로 구성되어 있으며, 2차원 합성곱의 커널 크기와 보폭은 (1, 3)와 (1,2)로 설정되었다. DDDB는 1, 2, 4, 8의 확장계수를 갖는 4개의 합성곱 층으로 구성되며 (3, 3)의 커널 크기를 갖는다.

제안한 음성 향상 모델의 평가를 위해 음성 처리 작업에 널리 사용되는 오픈 소스 데이터인 VoiceBank+Demand 세트를 학습에 사용하였다. 데이터는 {0dB, 5dB, 10dB, 15dB} SNR(signal-to-noise ratio)로 혼합된 11572개의 훈련용 잡음-음성 쌍과 824개의 테스트 쌍으로 구성된다. 원활한 학습을 위해 모든 데이터는 16kHz의 샘플링 주파수로 재조정되었으며, 2초 길이의 세그먼트로 분할되어 사용된다. 제안한 모델은 스펙트럼의 평균 제곱 오차(mean square error) 손실함수와 Adam 옵티마이저를 사용하여 최대 100 epoch 동안 학습되었으며, 초기 학습률 및 배치 크기는 0.001, 4를 사용했다.

3. 실험 결과 및 결론

향상된 신호의 정량적 성능 평가를 위해 품질과 명료도를 나타내는 PESQ(perceptual evaluation of speech quality)와 표

1. 테스트 데이터에 대한 모델 별 성능 평가 결과

Model	Size (M)	PESQ	STOI
Noisy	-	1.97	0.92
RNNoise	0.06	2.29	0.92
MP-SENet	2.05	3.50	0.96
Proposed	0.72	3.45	0.95
DDDB→DDB	1.68	3.46	0.95

STOI(short-time objective intelligibility)를 평가지표로 선택했으며, 표 1은 최신 모델들에 대한 비교 결과를 나타낸다. 표 1과 같이 제안한 음성 향상 모델은 기존 경량 음성 향상 모델인 RNNoise 대비 약 51%의 PESQ 개선을 보였다. 비록 제안한 모델이 RNNoise 보다 파라미터 크기가 다소 크지만, SOTA 모델인 MP-SENet에 준하는 음성 향상 성능을 보인다는 점을 고려할 때, 이러한 결과는 제안한 방식이 품질과 연산 복잡도 사이에서 매우 효과적인 균형을 달성한다는 것을 나타낸다. 이러한 결과는 성능 저하 없이 매개변수 비용을 크게 감소시키는 DDDB의 구조적 효율성에 기반한다.

본 논문에서는 실시간 음성 향상을 위한 DDDB 기반의 경량 네트워크를 제안하였다. 제안된 모델은 밀집 연결 메커니즘을 통해 다단계 특징 통합을 촉진하며, 그룹화된 팽창 합성곱을 결합하여 저수준부터 고수준까지 다양한 음향 특징을 효과적으로 인코딩한다. 실험 결과, 제안한 음성 향상 모델이 작은 연산 리소스 만으로도 지각 품질 및 명료도 측면에서 기존 모델들을 상회하는 성능을 보였으며, 현재 실시간 음성 향상을 위해 중요시되는 디지털 보청기 및 웨어러블 디바이스의 리소스 제한 문제를 극복할 수 있는 유망한 해결책이 될 수 있을 것으로 보인다.

4. Acknowledgements

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. NRF-2022R1A2C2009716, RS-2023-00279169, and RS-2023-00273459).

5. 참고 문헌

[1] Y.-X. Lu, Y. Ai, and Z.-H. Ling, “MP-SENet: A Speech Enhancement Model with Parallel Denoising of Magnitude and Phase Spectra,” in Proc. *INTERSPEECH*, pp. 3834–3838, 2023.

[2] Y. Luo, Z. Chen and T. Yoshioka, "Dual-path RNN: efficient long sequence modeling for time-domain single-channel speech separation", in Proc. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, pp. 46-50, 2020.

Poster-242

생리학적 및 환경적 잡음 증강을 통한 강건한 심폐음 잡음 제거 방법

이건, 신항식*

울산대학교 의과대학 서울아산병원 정보통계의학교실

Robust Cardiopulmonary Sound Denoising through Physiological and Environmental Noise Augmentation

Geon Lee, Hangsik Shin*

Department of Medical Informatics and Statistics, Asan Medical Center, Brain Korea 21 Project, University of Ulsan College of Medicine

*hangsik.shin@amc.seoul.kr

Abstract

Phonocardiogram (PCG) is a recording of various heart sounds, including heart murmurs, and plays a critical role in diagnosing cardiovascular abnormalities. However, PCGs are inherently susceptible to noise, which can distort the signal and lead to inaccurate diagnoses. Previous studies have addressed this issue, but most of them rely on synthetic noise sources like white or pink noise or risk removing important heart murmurs. In our previous work, we proposed a U-Net based multi-task learning model designed to preserve heart murmurs during denoising. In this study, we extend our previous model by incorporating two additional noise sources to investigate changes in denoising performance compared to the original model. Experimental results demonstrate that the model trained with the additional noise sources shows overall improvement in denoising performance, even under previously used noise conditions, and achieves notable performance gains in new noise environments. These findings suggest that incorporating a wider range of realistic noise conditions during training enables more reliable PCG signal acquisition and has strong potential to enhance the performance of automated auscultation systems in clinical applications.

1. 연구 배경

심음도(Phonocardiogram, PCG)는 심장 소리를 기록한 데이터로, 비침습적이며 비용이 저렴하다는 장점으로 인해 심혈관 질환의 진단에 널리 활용되고 있다. 그러나 심음도는 잡음에 매우 취약하여 신호 품질을 유지하기 어렵고, 특히 오염된 심음도에서 심혈관 질환 진단에 중요한 심잡음(heart murmur) 또한 잡음으로 오인될 수 있어 정확한 진단에 어려움을 겪을 수 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해 심잡음을 유지한 채로 외부 요인에 의한 잡음만을 제거하기 위한 다양한 연구가 진행되어 왔다. 그러나 기존 연구들은 인공적으로 합성된 잡음만을 고려하거나[1], 실제 환경 소음을 사용하더라도[2] 성능 향상 폭이 제한적이었다. 또한 심잡음의 특성을 고려하지 않아, 잡음 제거 과정에서 심잡음 신호가 함께 제거될 수 있다는 한계가 존재하였다.

이러한 한계를 극복하기 위해 선행 연구에서 U-Net 기반 다중 작업 학습(Multi-task Learning) 모델을 제안하였으며 이를 통해 잡음 제거와 심잡음 유형 분류를 동시에 수행함으로써, 기존 연구 대비 최대 SI-SDR 4.97 dB의 잡음 제거 성능 향상을 확인하였다.

본 연구에서는 선행 연구의 모델을 기반으로 두 가지 새로운 잡음원을 추가하여 학습을 수행하고, 이를 통해 성능 변화를 비교하였다. 특히 실제 심음도 녹음 환경에서 발생하는 폐음과 병원 환경에서 녹음 된 소리 등 실제 임상 환경을 반영할 수 있는 잡음원을 추가하여 학습함으로써, 다양한 잡음 조건에서도 효과적으로 잡음을 제거할 수 있는 모델을 개발하고자 하였다.

2. 연구 방법

2.1. 데이터 세트

이번 연구에서 사용한 심음도 데이터는 최대 3초 길이의 신호로 구성되어 있으며, 정상 심음(Normal), 대동맥 협착증(Aortic Stenosis, AS), 승모판 역류(Mitral Regurgitation, MR), 승모판 협착증(Mitral Stenosis, MS), 승모판 탈출증(Mitral Valve Prolapse, MVP)의 다섯 가지 유형을 포함한다. 각 유형별로 200개씩, 총 1,000개의 데이터를 사용하였다[3]. 이 데이터는 모델 학습 시 외부 요인에 의한 잡음 제거와 동시에 심잡음 유형을 예측할 수 있도록 정답 데이터로 활용하였다.

선행 연구에서는 외부 요인에 의한 잡음 데이터로 두 가지 인공 잡음인 가산 백색 가우스 잡음(Additive White Gaussian Noise, AWGN)과 가산 핑크 가우스 잡음(Additive Pink Gaussian Noise, APGN), 그리고 두 가지 실제 환경 잡음원을 사용하였다. 첫 번째로, PhysioNet/CinC Challenge 2016의 심음도 데이터[4]에서 심잡음이 없는 정상 심음도 2,293개를 이용하였으며, S1 및 S2 심음이 발생하지 않는 구간을 잡음으로 사용하였다. 두 번째로, LibriSpeech Database[5]의 28,539개 영어 낭독 음성을 활용하여 실제 녹음 환경에서 발생할 수 있는 대화 소음을 반영하는 목적으로 활용하였다.

이에 더해 이번 연구에서는 두 가지 실제 잡음원을 추가하였다. 첫 번째는 ICBHI 2017 Lung Sounds Database[6]로, 127명의 피험자에게서 녹음된 920개의 폐음(Lung Sound, LS) 데이터를 사용하였다. 이는 심음도 녹음 시 흔히 함께 녹음되는 폐음의 영향을 반영하기 위함이다. 두 번째는 병원 주변 소음 데이터(Hospital Ambient Noise Dataset, HAN)[7]로, 44.1 kHz로 샘플링된 5초 길이의 병원 내 소음으로 구성되어 있으며, 실제 병원 환경에서 발생하는 다양한 복합 소음을 반영하기 위해 사용하였다.

2.2. 데이터 전처리

심음도와 잡음은 서로 다른 샘플링 주파수로 획득되었으므로, 리샘플링을 통해 샘플링 주파수를 4,000 Hz로 통일하였다. 이후 정상 심음도 데이터와 잡음 데이터를 각각 8:2 비율로 나누어 학습 데이터와 시험데이터로 구분하였고, 학습에 사용된 데이터가 시험 단계에서 재사용되지 않도록 하였다.

잡음은 신호 대 잡음비(Signal-to-Noise Ration, SNR)에 따라 원신호에 첨가하였다. SNR은 신호와 잡음의 상대적 강도를 나타내며, 값이 높을수록 신호가 깨끗함을 의미한다. 본 연구에서는 -5 dB부터 10 dB까지 5 dB 간격으로 SNR을 설정해 심음도와 잡음을 합성하였다. 원신호의 개수에 비해

잡음 데이터 개수가 많으므로 중복되지 않도록 잡음을 무작위로 선택했으며, 길이가 더 긴 잡음은 원신호 길이에 맞춰 잘라 사용하였다. 결과적으로, 각 원신호에 대해 다섯 가지 잡음 종류와 네 단계의 SNR을 조합해 파생 데이터를 생성했고, 이를 단시간 퓨리에 변환을 적용하여 모델 학습에 활용하였다. 이때, 계산 부담과 모델 입력 크기를 고려하여 스펙트로그램의 크기를 조정하였으며, 구체적으로 256 샘플의 퓨리에 변환 크기(n_fft), 32 샘플의 홉 길이(hop_length), 128 샘플의 창 크기(win_length)를 사용해 128×370 크기의 스펙트로그램을 생성하였다. 이후 약 1초 분량에 해당하는 128x128 크기의 영역을 잘라 모델의 입력으로 활용하였다.

2.3. 모델 구조

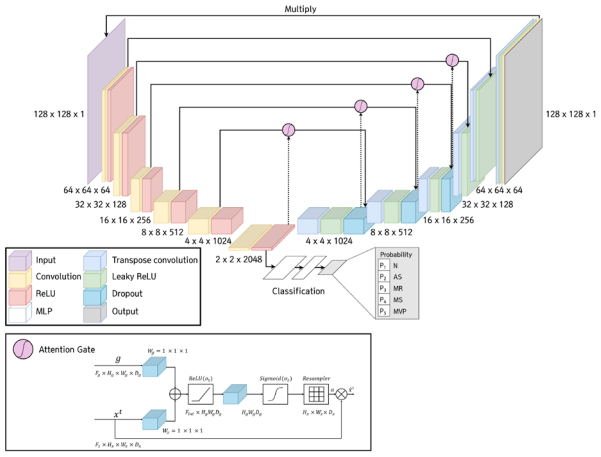


그림 1. U-Net 기반 다중 작업 학습 모델 구조

이번 연구에서는 인코더로 정보를 압축하고 디코더로 복원하면서 의미적 정보를 유지하는 U-Net을 기반으로 구성하였다. 추가적으로 U-Net의 인코더 정보를 전달하는 역할에 기존의 스킵 커넥션(Skip Connection) 대신 어텐션 게이트(Attention Gate)를 사용하여 디코더에 반영할 수 있게 구성하였다. 이러한 U-Net 구조에 다중 작업 학습을 적용하였으며 동일한 모델의 인코더에서 잡음 제거와 심잡음 유형 분류를 다중 작업으로 설정하였다. 이를 통해 심잡음 유형별로 다른 심음도의 특성을 인코더가 학습하여, 실제 잡음 제거 시 심잡음 특성을 반영할 수 있도록 하였다. 그림 1은 최종 모델의 전체 구조를 나타낸다.

모델 학습에서는 분류와 잡음 제거에 각각 범주형 교차 엔트로피와 평균 제곱 오차를 손실 함수로 사용하였고, 두 손실 함수의 가중치는 1:3으로 설정하였다. 최적화 알고리즘은 Adam을 적용하고, 학습률은 0.0001, 에포크는 200으로 설정하였다. 학습은 10-폴드 교차 검증으로 진행하였으며, 각 폴드에서 학습된 모델을 모두 저장한 뒤 앙상블 방식으로 최종 성능을 평가하였다.

3. 연구 결과

표 1. 잡음 제거 모델 성능 비교

SNR	-5		0		5		10	
Noise Type	2A +2E	2A +4E	2A +2E	2A +4E	2A +2E	2A +4E	2A +2E	2A +4E
AWGN	13.5	15.9	17.6	19.3	20.6	22.3	23.3	25.0
APGN	11.6	13.6	16.0	17.5	19.0	20.6	21.3	23.1
PhysioNet	11.8	11.9	16.8	17.0	20.0	20.2	22.5	23.0
Speech	13.6	17.1	18.1	20.3	21.0	23.0	23.2	24.8
LS		15.9		19.8		22.7		25.0
HAN		11.6		16.3		19.7		22.5

A : 인공(artificial) 잡음, E : 실제 환경(envieronmental) 잡음

성능 평가는 SI-SDR(Scale-Invariant Signal-to-Distortion Ratio)이라는 지표를 사용하였으며 잡음 합성에 사용한 SDR에 스케일을 조정함으로써 신호 크기의 영향 없이 신호 복원 정도를 평가할 수 있다.

표 1은 제안한 잡음 제거 모델의 성능을 비교한 결과를 나타낸다. 선행 연구에서는 기존 연구들보다 우수한 성능을 보였기 때문에, 본 연구에서는 선행 연구와의 직접적인 비교를 수행하였다. 선행 연구에서 사용된 모델은 AWGN, APGN, PhysioNet, LibriSpeech 데이터를 잡음원으로 사용하여 (2A+2E) 심음도를 오염시킨 후 모델 학습을 진행하였으며, 이번 연구에서 제안한 모델은 기존 잡음원에 더해 폐음과, 병원 주변 소음 데이터를 잡음원으로 추가하여 (2A+4E) 모델을 학습하였다. 여기서 A는 인공잡음(artificial noise)를, E는 환경잡음(environmental noise)를 의미한다. 그 결과, 잡음원을 추가함에 따라서 잡음 제거 성능이 전반적으로 개선되었음을 확인할 수 있었으며 특히 LibriSpeech 데이터를 잡음으로 사용한 경우 SNr -5 dB 구간에서 3.52 dB의 높은 성능 향상을 확인할 수 있었다.

4. 결론

이번 연구에서는 전반적으로 우수한 잡음 제거 성능을 보이는 모델을 제안한 선행 연구에 현실적인 잡음원을 추가하여 잡음 제거 성능을 비교하였으며, 이를 통해 최대 SI-SDR 3.52 dB의 성능 개선을 확인할 수 있었다. 이를 통해 임상 및 비임상 환경에서 녹음이 가능한 심음도에 대해 더욱 많은 잡음원을 추가하여 모델 학습을 진행한다면 기존 잡음에 대한 제거 성능도 향상 시킬 수 있으면서 다양한 잡음에 대해 강건한 모델을 개발할 수 있을 것으로 기대된다. 하지만 PhysioNet에서 추출한 잡음을 사용한 경우에는 다른 잡음원에 비해 성능 개선이 미미하였으므로 이를 개선할 수 있는 방법을 찾아 보완하는 과정이 필요하다는 점이 한계로 남아있으며, 이러한 개선 과정을 충분히 거친다면 실제 의료 현장을 비롯한 다양한 환경에서 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

5. Acknowledgements

본 연구는 산업통상자원부 및 산업기술기획평가원(KEIT)의 지원 (RS-2024-00423853)과 정부(과학기술정보통신부, 산업통상자원부, 보건복지부, 식품의약품안전처)의 재원으로 범부처전주기의료기기연구개발사업단의 지원 (RS-2022-00141473)을 받아 수행된 연구임.

6.참고 문헌

[1] S. K. Ghosh, R. K. Tripathy and R. N. Ponnalagu, "Evaluation of performance metrics and denoising of PCG signal using wavelet based decomposition", Proc. IEEE 17th India Council Int. Conf. (INDICON), pp. 1-6, Dec. 2020.

[2] Mukherjee, Ayan, Rohan Banerjee, and Avik Ghose. "A novel U-Net architecture for denoising of real-world noise corrupted phonocardiogram signal." arXiv preprint arXiv:2310.00216 (2023).

[3] Yaseen, Gui-Young Son, and Soonil Kwon. "Classification of heart sound signal using multiple features." Applied Sciences 8.12 (2018): 2344.

[4] C. Liu et al., "An open access database for the evaluation of heart sound algorithms", Physiol. Meas., vol. 37, no. 12, pp. 2181-2213, Dec. 2016.

[5] V. Panayotov, G. Chen, D. Povey and S. Khudanpur, "LibriSpeech: An ASR corpus based on public domain audio books", Proc. IEEE Int. Conf. Acoust. Speech Signal Process. (ICASSP), pp. 5206-5210, Apr. 2015.

[6] Rocha, Bruno M., et al. "An open access database for the evaluation of respiratory sound classification algorithms." Physiological measurement 40.3 (2019): 035001.

[7] Ali, Shams Nafisa, Samiul Based Shuvo, and Taufiq Hasan. "A robust deep learning framework for real-time denoising of heart sound." TechRxiv (2022).

Poster-243

혈압 데이터 기반 Windkessel–Baroreflex 모델 최적화를 통한 심혈관 디지털 트윈

Rahmafatin Nurul Izza[1], Ki Moo Lim[2*]

국립금오공과대학교 IT융복합공학과[1], 바이오메디컬공학과[2]

Cardiovascular Digital Twin via Optimization of a Windkessel–Baroreflex Model Using Blood Pressure Data

Rahmafatin Nurul Izza[1], Ki Moo Lim[2*]

[1]IT Convergence Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Korea

[2]Biomedical Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Korea

[*]kmlim@kumoh.ac.kr

Abstract

This study proposes a Cardiovascular Digital Twin based on a Windkessel–baroreflex framework that is personalized using blood-pressure signals alone. Personalization comprises (i) baseline hemodynamics—ventricular elastance and vascular resistance–capacitance—estimated via CMA-ES to match SBP/DBP, and (ii) reflex gains tuned to reproduce HR and MAP responses. The circulation is modeled as a 12-compartment system with time-varying elastance and adaptive numerical integration. Validation under slow and rapid tilt protocols demonstrates that the calibrated parameters reconstruct ABP morphology (including SBP/DBP levels) and capture beat-by-beat HR and MAP dynamics consistently across subjects. These results support the feasibility of data-efficient, BP-only calibration for building a physiologically relevant cardiovascular digital twin poised for clinical translation.

1. Introduction

A cardiovascular digital twin personalizes a patient's condition by mapping a computational model calibrated to individual data—a key step toward precision cardiology, yet one that still requires calibration procedures that are simple, reproducible, and data-efficient. The Windkessel framework summarizes hemodynamic behavior through arterial resistance–compliance, while the baroreflex accounts for rapid control of heart rate (HR) and peripheral resistance on a beat-to-beat scale [1], [2].

We propose a Cardiovascular Digital Twin calibrated solely from blood-pressure signals: baseline parameters (vascular R–C and ventricular elastance) are optimized against SBP/DBP, and reflex gains are then tuned to capture HR and MAP responses under slow- and rapid-tilt protocols. This data-efficient approach shows that the combined Windkessel–baroreflex model can reconstruct ABP waveform morphology and physiologically relevant cardiovascular dynamics at the subject level.

2. Methods

We personalized two components of the cardiovascular digital twin: (1) the baseline physiological state and (2) the baroreflex control system. For the baseline, the estimated parameters included ventricular elastance as well as vascular resistance and capacitance. Hemodynamics were modeled using the Heldt 12-compartment circulation (two ventricles, two pulmonary circuits, aorta, upper body, renal, splanchnic, legs, inferior vena cava, and abdominal cava), represented as a lumped Resistance–Capacitance (R–C) network [3].

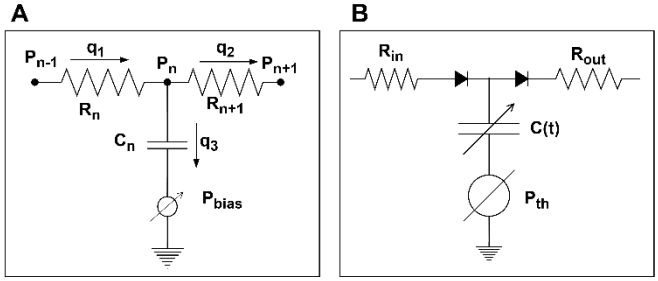


Figure 1 Windkessel Circulation Model. (A) shows the model for single compartment. Each compartment will be interact each other. (B) shows the model for heart compartment.

The heart was modeled as a resistive element with time-varying elastance, where compliance satisfies $C(t) = 1/E(t)$, with C(t) the time-varying compliance and E(t) the time-varying elastance. Each cardiac valve was modeled as an ideal diode (see Figure 1.B). Inertial elements were neglected; all resistors and most capacitors were assumed linear. By Kirchhoff's laws for the network in Figure 1.A, the branch flows satisfy $q_1 = q_2 + q_3$. The pressure in compartment n calculated according to:

$$\frac{dP_n}{dt} = \frac{P_{n+1} - P_n}{C_n R_{n+1}} + \frac{P_{n-1} - P_n}{C_n R_n} + \frac{P_{bias} - P_n}{C_n}\left(\frac{dC_n}{dt}\right) + \frac{dP_{bias}}{dt}$$

Where P denotes pressure, R resistance, C compliance, n menunjukkan index compartment, dan P_{bias} the external pressure.

External pressure (P_{bias}) was defined per compartment. For intrathoracic compartments (e.g., superior/inferior vena cava and the pulmonary circulation), P_{bias} was set equal to thoracic pressure (P_{th}). For systemic compartments P_{bias} was used to simulate posture-induced changes in venous transmural pressure due to blood-volume redistribution. To model the rapid blood-volume redistribution during tilt, P_{bias} in the legs denoted as P_{bias1} , splanchnic P_{bias2} , and abdominal venous beds P_{bias3} was prescribed as a time-varying ramp from 0 to a peak value as the tilt angle approached its maximum. Empirically, a peak of ≈40mmHg in the legs produces 500 mL pooling in the upright position, whereas peaks of ≈7 mmHg (splanchnic) and ≈5mmHg (abdominal) together yield an additional ≈300 mL pooling within the abdomen and pelvis.

$$P(t)_{bias-i} = \begin{cases} P_{max-i} \cdot \sin(\alpha(t)) & t_{on} \le t \le t_{tilt} \\ P_{max-i} \cdot \sin(\alpha_{max}) & t_{tilt} \le t \le t_{end} \end{cases}$$

Where α_{max} denote the maximum tilt angle, t the current simulation

time, t_{on} the onset of tilting, t_{tilt} time where the stay plateau at α_{max} and t_{end} time at which posture returns to supine.

Baseline parameters were identified from a single pre-tilt cardiac cycle of arterial blood pressure (ABP) data from PhysioNet [3], [4]. The system of differential equations was integrated using an adaptive step-size fourth-order Runge–Kutta scheme (step range 6.1×10^{-4}–10^{-2} s; mean 5.6×10^{-3} s). Parameter estimation employed the Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy (CMA-ES), minimizing the mismatch between modelled and measured systolic and diastolic pressures (SBP/DBP).

The reflex system was modeled using subject-specific pressure set-points derived from mean arterial pressure (MAP). The control inputs were the time-averaged arterial pressure $\overline{P_A}$ and central venous pressure $\overline{P_{CV}}$ used as surrogates for carotid-sinus and right-atrial pressures, respectively. Errors relative to the set-points $(PA_{\text{ref}}, PCV_{\text{ref}})$ were mapped through an arctangent nonlinearity to obtain effective pressures:

$$P_A^{\text{eff}} = 18 \cdot \arctan\left(\frac{\overline{P_A} - \overline{P_A^{\text{ref}}}}{18}\right)$$

$$P_{CV}^{\text{eff}} = 5 \cdot \arctan\left(\frac{\overline{P_{CV}} - \overline{P_{CV}^{\text{ref}}}}{5}\right)$$

The 30-s history of these effective pressures was convolved with effector-specific impulse responses to produce the instantaneous effector signals. We applied a 0.5-s delay to the parasympathetic pathway and a 2.0-s delay to all sympathetic pathways.

$$I(t) = \int_0^{30} \overline{P_A^{\text{eff}}}(t-k)\ [\beta\, p(k) + \gamma\, s(k)]\, dk$$

Let $p(k)$ and $s(k)$ denote the parasympathetic and sympathetic impulse responses, respectively, and let β and γ be the corresponding pathway gains for a given reflex arc. The instantaneous effector signal $I(t)$ is obtained by convolving the 30-s history of effective pressures with these kernels (see previous subsection), scaled by β and γ. The static gain for the R–R interval followed de Boer et al. (≈ 9 ms/mmHg for both sympathetic and parasympathetic pathways) [5]. Contractility feedback followed Davis, in which the left/right ventricular end-systolic elastance can vary by up to ~2× under maximal autonomic stimulation [6].

Reflex personalization was performed by tuning the static gains for total peripheral resistance (TPR) and venous unstressed volume on a per-subject basis. The TPR gain G_R was defined from the change in TPR with respect to changes in mean arterial pressure (MAP) between the baseline and tilt phases:

$$G_R = \left|\frac{\Delta TPR}{\Delta MAP}\right|, TPR = \frac{MAP}{CO}$$

Cardiac output (CO) was estimated from subject characteristics (e.g., body size, age) and heart rate/ejection-time metrics using standard formulae, and then used to compute TPR and its modulation across conditions [7].

$$BSA = \sqrt{Height \times Weight\ /3600}$$

$$\text{SV} = -6.6 + 0.25\,(ET - 35) - 0.62\,HR + 40.4\,BSA - 0.51\,Age$$

$$CO = HR \times SV$$

Height was measured in centimeters (cm), weight in kilograms (kg), body surface area (BSA) in square meters (m²), ventricular ejection time (ET) in milliseconds (ms), heart rate (HR) in beats per minute (bpm), and age in years.

Figure 2. Heart rate variation during slow tilt for 10 subjects. Tilt is start at 50s until 75 degrees. (A-J) shown the sample number from 1-10 respectively. Blue line shows the subject's measured heart rate and shadow shows its standard deviation. Green line shows the simulation result using the optimized physiological parameter and individual's reflex gain.

For venous compartments, we assumed a physiological upper bound of ~12 mL·kg⁻¹ for the change in systemic reservoir volume under maximal carotid sinus stimulation [6]. This quantity was scaled by body weight for each subject and normalized by MAP to obtain an individual venous unstressed-volume gain G_v. In other words, the subject-specific sensitivity of venous unstressed volume to pressure was defined as:

$$G_v = \frac{\Delta V}{\Delta MAP}$$

with ΔV denotes the maximal volume change capped at ~12 mL·kg⁻¹ and reflected to subject's actual weight.

The optimized baseline parameters and the derived static gains were then used to simulate posture-induced responses in MAP and HR. For each subject, we simulated both rapid and slow tilt using the same calibrated baseline and reflex gains (i.e., no re-fitting across protocols), thereby isolating protocol effects from parameter re-estimation.

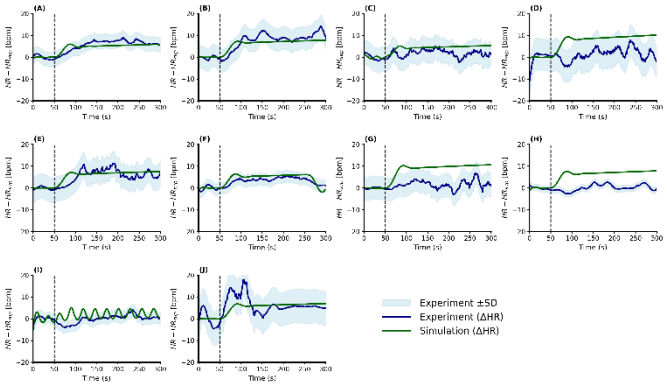
3. Result

Table 1. Physiological parameter optimization result.

sample	csa	emax	rsa
1	0.63786	4.735845	0.647058
2	0.543696	2.16287	0.997763
3	0.502668	2.467853	0.715626
4	0.436832	1.744831	0.794492
5	0.44462	2.733041	0.602766
6	0.882033	3.708279	0.37642
7	0.995372	3.04049	0.6822
8	1.012691	2.482214	0.489617
9	0.88539	3.041038	0.721295
10	0.654916	2.626037	0.767541

Physiological parameters were estimated for each subject by minimizing the discrepancy between modeled and experimental systolic (SBP) and diastolic (DBP) pressures (see **Table 1**). Overall, the optimized parameters yielded SBP/DBP values that closely matched the experimental measurements. Figure n shows that the synthesized ABP waveform morphology—encompassing the systolic upstroke, peak systolic pressure, and diastolic decay—was well reproduced. Minor deviations around the dicrotic notch persist, likely reflecting a simplification of the circulation model that neglects inertial effects of flow.

Figure 2 (slow tilt) and Figure 3 (rapid tilt) shows the dynamics of heart-rate change (ΔHR) across ten subjects. Following the posture



transition at t = 50s, the experimental data exhibit a gradual increase in heart rate, consistent with baroreflex activation triggered by blood-

volume redistribution. With subject-specific tuning of reflex gains, the model reproduces both the magnitude and direction of ΔHR observed experimentally under both protocols, while preserving realistic inter-subject variability.

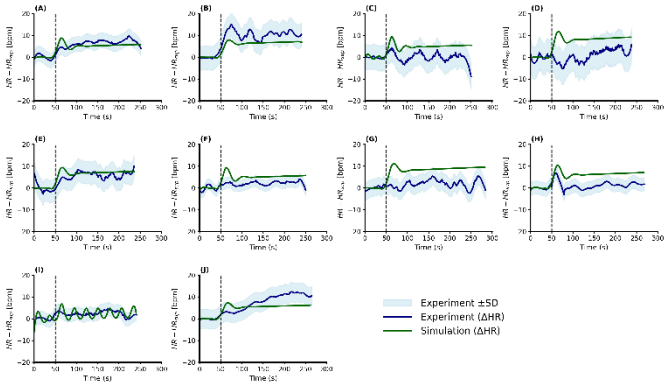


Figure 3. Heart rate variation during rapid tilt for 10 subjects. Tilt is start at 50s until 75 degrees. (A-J) shown the sample number from 1-10 respectively. Blue line shows the subject's measured heart rate and shadow shows its standard deviation. Green line shows the simulation result using the optimized physiological parameter and individual's reflex gain.

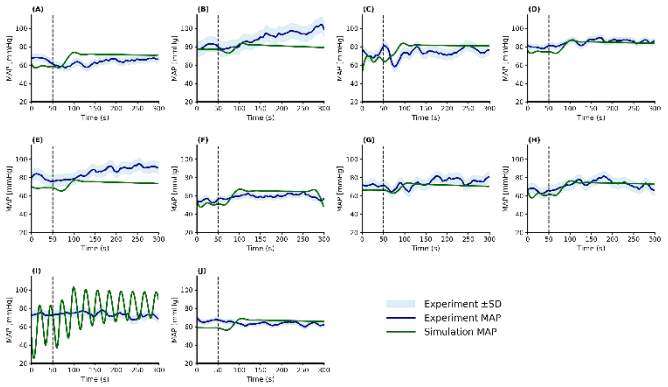


Figure 4. Mean Arterial Pressure variation during slow tilt for 10 subjects.

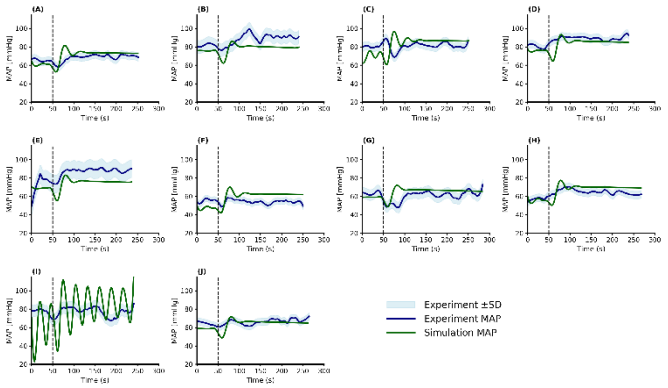


Figure 5. Mean Arterial Pressure variation during rapid tilt for 10 subjects.

Figure 4 and Figure 5 present the beat-by-beat MAP profiles during tilt. The combination of cardiovascular parameter optimization and static baroreflex gain tuning enables the model to capture not only the dynamic pattern (early transient and subsequent stabilization) but also to reproduce absolute MAP levels that closely match the experimental data. These findings indicate that the proposed optimization framework faithfully reconstructs physiologically consistent hemodynamic responses to postural change.

The results demonstrate that a Cardiovascular Digital Twin, calibrated via Windkessel–baroreflex optimization from ABP alone, can identify subject-specific physiological parameters that faithfully reconstruct ABP waveform morphology while capturing the dynamics of heart rate and beat-by-beat MAP across different tilt protocols.

4. Acknowledgements

This research was partially supported by National Research Foundation of Korea under the Basic Science Research Program (2022R1A2C2006326), Ministry of Science and the Institute of Information & Communications Technology Planning & Evaluation(IITP)-Innovative Human Resource Development for Local Intellectualization program grant funded by the Korea government(MSIT)(IITP-2025-RS-2020-II201612), and the Gyeongsangbuk-do RISE (Regional Innovation System & Education) project (Regional Growth Innovation LAB).

5.References

[1] K. Sel *et al.*, 'Building Digital Twins for Cardiovascular Health: From Principles to Clinical Impact', *J. Am. Heart Assoc.*, vol. 13, no. 19, p. e031981, Oct. 2024, doi: 10.1161/JAHA.123.031981.

[2] N. Westerhof and B. E. Westerhof, 'Waves and Windkessels reviewed', *Artery Res.*, vol. 18, pp. 102–111, June 2017, doi: 10.1016/j.artres.2017.03.001.

[3] T. Heldt, M. B. Oefinger, M. Hoshiyama, and R. G. Mark, 'Circulatory response to passive and active changes in posture', in *Computers in Cardiology, 2003*, Thessaloniki Chalkidiki, Greece: IEEE, 2003, pp. 263–266. doi: 10.1109/CIC.2003.1291141.

[4] A. L. Goldberger *et al.*, 'PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: components of a new research resource for complex physiologic signals', *Circulation*, vol. 101, no. 23, pp. E215-220, June 2000, doi: 10.1161/01.cir.101.23.e215.

[5] R. W. deBoer, J. M. Karemaker, and J. Strackee, 'Hemodynamic fluctuations and baroreflex sensitivity in humans: a beat-to-beat model', *Am. J. Physiol.*, vol. 253, no. 3 Pt 2, pp. H680-689, Sept. 1987, doi: 10.1152/ajpheart.1987.253.3.H680.

[6] T. L. (Timothy L. Davis, 'Teaching physiology through interactive simulation of hemodynamics', Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1991. Accessed: Oct. 17, 2025. [Online]. Available: https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/13823

[7] K. P. Sahoo, A. Patra, N. Ghosh, A. Pal, A. Sinha, and S. Khandelwal, 'A Lumped Parameter Model for Cardiac Output Estimation Using Arterial Blood Pressure Waveform', in *2021 43rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC)*, Nov. 2021, pp. 5523–5526. doi: 10.1109/EMBC46164.2021.9629803.

Poster-244

크로스 모달리티 의료 세그멘테이션에 대한 SAM2 기반 베이지안 프롬프트 적응

홍사강[1], 김준영[2], 이경수[1*]

전북대학교 전자정보공학부(컴퓨터공학)[1], 대구가톨릭대학교병원 정형외과[2]

SAM2-based Bayesian Prompt Adaptation for Cross-Modality Medical Segmentation

Sakang Hong[1], Jun-Yung Kim[2], Kyunsu Lee[1*]

Division of Electronics and Information Engineering (Computer Science), Jeonbuk National University, Korea[1]

Department of Orthopedic Surgery, School of Medicine, Catholic University of Daegu, Korea[2]

*ksl@jbnu.ac.kr

Abstract

Segmentation foundation models such as SAM2 generalize well in natural images, but adapting them to medical imaging is difficult due to cross-modality gaps and scarce annotations. We propose BayesPrompt, a SAM2-based Bayesian Prompt Adaptation framework for few-shot medical segmentation. It combines Bayesian meta-prior adaptation, which regularizes lightweight head updates through source–target posterior alignment, with a probabilistic prompt module that encodes feature statistics and uncertainty from few-shot supports into decoder prompts. This enables prompt-only fast adaptation or efficient Bayesian fine-tuning. Experiments on ultrasound and MRI show that BayesPrompt improves few-shot generalization, calibration, and efficiency over existing adaptation baselines.

1. 연구 배경

SAM2와 같은 분할 파운데이션 모델은 자연 영상 영역에서 강력한 일반화 능력을 보여주며, 대규모 사전학습을 통한 새로운 패러다임을 제시하였다. 그러나 이러한 모델을 의료 영상에 적응시키는 것은 질감, 명암 대비, 해부학적 구조 차이 등의 모달리티 간 격차와 제한된 주석 데이터로 인해 여전히 어렵다. 특히, 초음파와 MRI는 영상 형성의 물리적 원리 및 잡음 특성이 매우 다르기 때문에 직접적인 전이가 쉽지 않다. 전체 미세 조정, 배치 정규화 기반 테스트 시간 적응, 그리고 프롬프트 튜닝을 포함한 기존의 적응 방식들은 종종 많은 지도 신호를 요구하며, 극심한 도메인 전환으로 인한 불확실성을 다루지 못한다. 결과적으로, 모달리티 간 소수 샘플 적응은 여전히 불안정한 수렴과 낮은 수준의 보정 문제를 겪으며 분할 기반 파운데이션 모델의 임상 적용을 어렵게 하고 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해, 본 연구에서는 소수 샘플 교차 모달 의료 영상 분할을 위한 SAM2 기반 베이지안 프롬프트 적응 프레임워크인 BayesPrompt를 제안한다. BayesPrompt는 소스-타깃 사후 정렬을 통해 경량 헤드 업데이트를 정규화하는 베이즈 메타-사전 적응과, 지원 집합의 통계와 불확실성을 SAM2 디코더 어텐션 프롬프트로 인코딩하는 확률적 프롬프트 모듈을 결합한다. 제안하는 구조는 프롬프트 기반 빠른 적응과 제한된 감독 하의 효율적인 베이즈 미세 조정을 모두 가능하게 한다.

본 연구에서는 대구가톨릭대학교병원에서 수집한 회전근 파열(rotate cuff tear, RCT) 데이터셋(초음파 50명, MRI 50명)을 이용해 BayesPrompt를 평가하였다. BayesPrompt는 정확도와 보정 측면에서 프롬프트 튜닝 및 테스트 시간 적응 기법보다 지속적으로 우수한 성능을 보였다. 이러한 결과는 분할 기반 파운데이션 모델의 새로운 의료 영상 모달리티로의 빠르고 신뢰할 수 있는 적응을 위한 실질적인 접근법을 제시한다.

2.연구 방법

BayesPrompt는 베이즈 정규화와 확률적 프롬프트를 결합하여 SAM2를 새로운 의료 모달리티에 소수 샘플로 효율적으로 적응시킨다. 프레임워크는 세 단계로 구성된다:

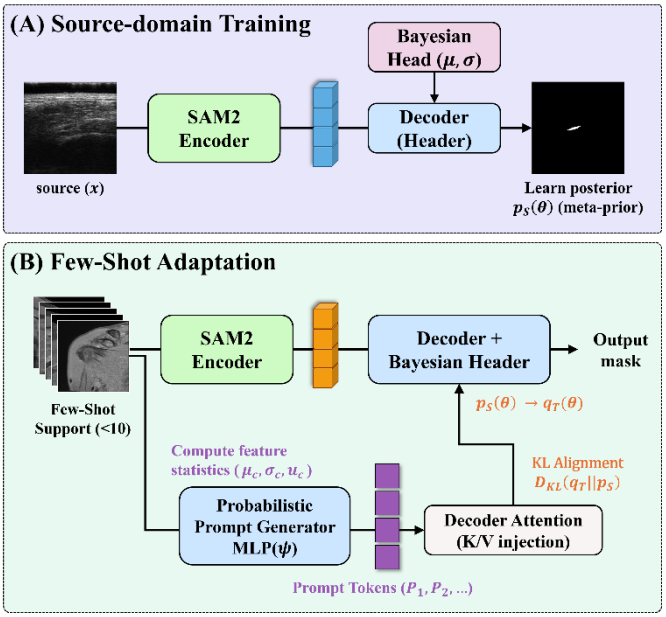


그림 1. BayesPrompt의 개요

그림1의 (A) 소스 도메인 학습, (B) 소수 샘플 적응, 마지막으로 추론. 모델은 동결된 SAM2 인코더, 경량 베이즈 헤드, 그리고 디코더 어텐션과 연결된 확률적 프롬프트 모듈로 구성된다.

(A) 베이즈 메타-사전 적응 (Bayesian Meta-Prior Adaptation, BMPA)은 소스에서 학습된 메타-사전을 이용해 타깃 도메인의 사후 분포를 제약함으로써 소수 샘플 학습을 안정화한다. 헤드 파라미터를 θ라 하고, $p_s(\theta)$와 $q_t(\theta)$를 각각 소스와 타깃의 사후 분포라 할 때, 목적함수는 다음과 같다:

$$L_{BMPA} = L_{seg}(x, y; \theta) + \lambda_{KL} D_{KL}(q_T(\theta) \,||\, p_S(\theta))$$

여기서 L_seg는 분할 손실 함수이며, KL 발산 항은 타깃 사후를 소스 메타-사전에 정렬시켜 과적합을 완화하고 불확실성 보정을 유지도록 하는 정규화 항이다. 실제 구현에서는 디코더의 최종 한두 개 층만 업데이트하여 파라미터 효율성을 확보한다.

(B) 확률적 프롬프트 모듈 (Probabilistic Prompt Module,

BPM)은 디코더 어텐션을 조절하는 불확실성 인식 프롬프트를 생성한다. 지원 샘플 쌍 (x_i, y_i)로부터 인코더 특징을 통해 클래스별 통계—평균 μ_c, 분산 σ²_c, 불확실성 u_c—를 계산한다. 이 값들을 소형 다층 퍼셉트론(MLP)에 통과시켜 프롬프트 벡터 p_c = ϕ([μ_c, σ²_c, u_c])를 생성한다. 이로부터 얻은 프롬프트 집합 P = {p_c}는 그림 1(B)와 같이 SAM2 디코더 어텐션의 key-value 쌍으로 삽입된다. 이러한 조건화는 모델이 클래스별 불확실성 가중 특징에 집중해 타깃 도메인의 맥락을 포착하도록 하며, BMPA와 결합될 때 안정적이고 유연한 소수 샘플 전이를 달성한다.

여기서, BayesPrompt는 추론 단계에서 두 가지 모드로 동작한다. Fast Prompt는 그래디언트 업데이트 없이 프롬프트만 이용해 메모리 효율적이고 빠른 전이를 수행한다. Bayesian Fine-tuning은 KL 정렬 하에 베이즈 헤드를 추가로 업데이트하여 더 높은 분할 정확도를 달성한다. 두 모드는 동일한 확률적 프롬프트를 공유하며, 초음파와 MRI와 같은 다양한 모달리티 사이에서 속도, 성능 간의 균형을 조정할 수 있다.

3. 연구 결과

본 연구는 대구가톨릭대학교병원에서 수집된 회전근 파열 데이터셋(초음파 50명, MRI 50명)에서 평가되었다. 각 피험자는 극상근건(supraspinatus tendon)과 주변 구조의 수동 주석을 포함한 익명화된 2D 슬라이스 영상을 포함한다. 모든 영상은 모달리티별 강도 정규화 후 512×512로 리사이즈되었다. 네 가지 적응 환경이 고려되었다: 단일 모달리티(US→US, MRI→MRI), 교차 모달리티(US→MRI, MRI→US).각 모달리티는 표 I과 같이 학습, 검증, 테스트 집합으로 분할하였다.

표 1. 단일 모달리티 및 교차 모달리티 실험의 데이터 분할

Setting	Train	Validation	Test
US→US	361 US	91 US	113 US
MRI→MRI	568 MRI	143 MRI	178 MRI
US→MRI	565 US	143 MRI	178 MRI
MRI→US	889 MRI	91 US	113 US

소수 샘플 적응은 타깃 도메인에서 k∈{1,3,5,10}개의 라벨링 샘플을 사용하고, 타깃 도메인의 나머지 이미지는 프롬프트 생성을 위한 비라벨 데이터로 활용한다.

BayesPrompt를 대표적인 분할 모델인 U-Net**[1]**, SegFormer**[2]**, CDUN(cross-domain U-Net)**[3]**과 네 개의 적응 시나리오에서 평가하였다. 실험 1–2는 단일 모달리티 분할(US→US, MRI→MRI)에 해당하며, 실험 3–4는 교차 모달리티 전이(US→MRI, MRI→US)를 평가한다. 모든 모델은 동일한 전처리와 최적화 설정에서 학습되어 공정하게 비교되었다.

Experiment	U-Net	SegFormer	CDUN	BayesPrompt (ours)
1 (US→US)	0.7853	0.6447	-	0.8421
2 (MRI→MRI)	0.6689	0.6316	-	0.7674
3 (US→MRI)	0.0733	0.0028	0.0211	0.5312
4 (MRI→US)	0.0330	0.0154	0.7099	0.8053

표 II는 네 가지 실험에서의 Dice와 IoU 성능을 요약한다. U-Net과 SegFormer는 단일 모달리티에서는 양호한 성능을 보였으나, 교차 모달리티 전이(실험 3–4)에서는 성능이 심각하게 저하되었다. CDUN은 특징 통계의 부분적 정렬을 통해 성능 저하를 완화하지만, US→MRI 방향에서 불안정하였다. 반면 BayesPrompt는 불확실성 인식 프롬프트와 베이즈 정규화 덕분에 모든 모달리티에서 더 높은 Dice와 IoU를 달성하였다.

표 2. 단일 및 교차 모달리티 분할 실험에서의 Dice 점수

BayesPrompt는 모든 실험에서 가장 높은 성능을 보였으며, 특히 교차 모달리티 전이에서 큰 향상을 보였다.

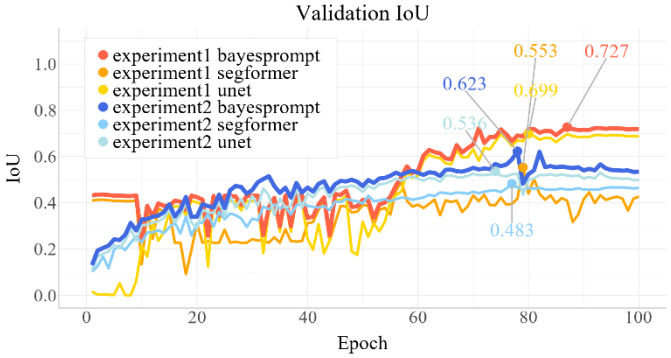


그림 2. 검증 Dice 손실 및 IoU 변화

그림 2는 U-Net과 SegFormer의 단일 모달리티 실험(1–2)에 대한 검증 Dice 손실과 IoU 곡선을 보여준다. SegFormer는 더 빠르게 수렴하지만 검증 손실의 진동이 크며, 이는 도메인 변화에 대한 안정성이 낮음을 의미한다. U-Net은 더 완만한 수렴을 보이지만 Dice 성능이 낮아 구조적 변이에 대한 과소적합을 나타낸다. 두 모델 모두 교차 모달리티 전이에서는 일반화에 어려움을 겪으며, 이는 안정적인 소수 샘플 적응을 위해 베이즈 사전과 확률적 프롬프트가 필요함을 보여준다.

본 연구에서는 소수 샘플 교차 모달리티 의료 영상 분할을 위한 SAM2 기반 베이즈 프롬프트 적응 프레임워크 BayesPrompt를 제안하였다. 베이즈 메타-사전 정규화와 불확실성 인식 프롬프트를 결합함으로써, BayesPrompt는 초음파와 MRI와 같은 모달리티 간에서 안정적이고 데이터 효율적인 적응을 가능하게 한다. 회전근 파열 데이터셋을 이용한 실험 결과, BayesPrompt는 기존의 프롬프트 튜닝 및 테스트 시 적응 기법보다 분할 정확도와 보정 측면에서 개선된 성능을 보였다. Fast Prompt와 Bayesian Fine-tuning의 이중 모드는 속도와 성능 간의 유연한 균형을 제공하여 임상 적용을 위한 실용적 가능성을 높인다. 향후 연구에서는 이 프레임워크를 다장기 및 다중 모달 3D 분할로 확장하고, 더 큰 규모의 파운데이션 백본을 활용하는 방향으로 발전시키고자 한다.

4. Acknowledgements

본 연구는 보건복지부의 재원으로 한국보건산업진흥원의 보건의료기술연구개발사업 지원에 의하여 이루어진 것임. (과제고유번호 : HR22C1832)

5.참고 문헌

[1] O. Ronneberger, P. Fischer, and T. Brox, "U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation," *arXiv*: arXiv:1505.04597. doi: 10.48550/arXiv.1505.04597, 2015

[2] E. Xie, W. Wang, Z. Yu, A. Anandkumar, J. M. Alvarez, and P. Luo, "SegFormer: Simple and Efficient Design for Semantic Segmentation with Transformers," *arXiv*: arXiv:2105.15203. doi: 10.48550/arXiv.2105.15203, 2021

[3] W. Jiao *et al.*, "Cross-modality segmentation of ultrasound image with generative adversarial network and dual normalization network," *Pattern Recognit.*, vol. 157, p. 110953, doi: 10.1016/j.patcog.2024.110953, 2025

Poster-245

사전학습 기반 개인화 CNN–BiLSTM–Attention 모델을 활용한 PPG 기반 혈압 추정

김가현[1], 서윤석[2], 신현식[2], 안민규[1*]

한동대학교 전산전자공학과[1]

㈜디트리플[2]

Personalized PPG-Based Blood Pressure Estimation Using a Pretraining-Based CNN–BiLSTM–Attention Model

Gahyeon Kim[1], Yunseok Seo[2], Hyeon Sik Shin[2], Minkyu Ahn[1*]

Department of Computer Science and Electrical Engineering, Handong Global University, Korea[1]

D-triple Inc.[2]

*minkyuahn@handong.edu

Abstract

Hypertension is a major chronic disease and a leading cause of cardiovascular mortality, which necessitates continuous and non-invasive blood pressure (BP) monitoring. Traditional cuff-based measurements are unsuitable for long-term monitoring due to discomfort and limited usability. To overcome these limitations, this study proposes a CNN–BiLSTM–Attention model for blood pressure estimation using photoplethysmogram signals, which also employs a pretraining strategy to mitigate subject-level data imbalance —a common issue in clinical datasets. Experimental results demonstrated that the proposed approach achieves stable and generalized BP prediction even for subjects with limited data, suggesting strong potential for practical wearable healthcare applications.

1. 연구 배경

고혈압은 대표적인 만성질환으로, 전 세계적으로 높은 유병률을 보이며 심혈관 질환의 주요 사망 원인 중 하나로 알려져 있다[1]. 고혈압은 초기에는 뚜렷한 증상이 없어 조기 진단이 어렵지만, 장기간 관리되지 않을 경우 뇌출혈, 심부전, 뇌출혈과 같은 치명적인 합병증으로 이어질 수 있다[2]. 따라서 조기 발견과 더불어, 환자의 혈압을 장기간에 걸쳐 지속적이고 연속적으로 모니터링하는 것이 예방과 관리에 있어 핵심적인 과제로 대두되고 있다.

그러나 기존 커프(cuff) 기반 혈압 측정 방식은 반복 측정 과정에서 피험자에게 불편을 초래할 뿐만 아니라[3], 가정이나 일상생활 환경에서 장기간 사용하기에는 현실적인 제약이 존재한다.

기존 방식의 한계를 대체할 새로운 접근으로, 최근에는 광용적맥파(Photoplethysmogram, PPG)와 같은 생체신호를 활용한 비침습적 혈압 추정 기술이 각광받고 있다. 기존 연구들은 주로 심전도(Electrocardiogram, ECG)와 PPG를 결합하여 맥파전달시간(Pulse Transit Time, PTT)을 기반으로 혈압을 추정하는 접근을 사용해왔으나, 최근에는 단일 PPG 신호만을 이용한 혈압 예측 연구가 활발히 진행되고 있다[4].

본 연구는 이러한 최신 연구 동향을 반영하여, 개인화된 단일 PPG 신호 기반 혈압 예측 모델을 제안한다. 제안된 모델은 Convolutional Neural Network(CNN)[5], Long Short-Term Memory(LSTM)[6], Attention[7] 메커니즘을 결합하여 개인의 생리적 특성에 최적화된 혈압 추정을 수행하도록 설계되었다.

아울러, 피험자 간 데이터 길이의 불균형으로 인한 모델 성능의 변동에 집중하였다. 이를 해결하기 위해 사전학습(pre-training)과 미세조정(fine-tuning) 기법을 도입하였으며, 그 결과 데이터 양이 상대적으로 적은 피험자에서도 안정적이고 일관된 혈압 예측 성능을 확보하였다.

2.연구 방법

본 연구에서는 PhysioNet에서 공개하는 MIMIC Database 1.0.0을 활용하였다[8]. MIMIC Database는 실제 중환자실(ICU) 환경에서 수집된 광용적맥파(PPG), 동맥혈압(Arterial Blood Pressure, ABP) 등 대규모 생체신호 및 임상 데이터를 포함하고 있으며, 다양한 환자군을 아우르는 특성을 지녀 혈압 예측 모델의 학습 및 검증에 적합하다.

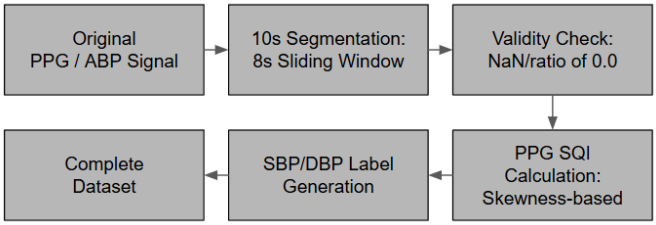


그림 1. PPG/ABP 신호 전처리 절차

전처리 과정은 그림 1.과 같다. PPG 및 ABP 신호는 10초 단위 세그먼트로 분할하고, 8초 슬라이딩 윈도우를 적용하여 중첩을 허용하였다. NaN 값 또는 0.0 구간이 10% 이상인 PPG 세그먼트는 제거하였으며, 잔여 세그먼트에 대해서는 skewness 기반 신호 품질 지수(Signal Quality Index, SQI)를 계산하여[9], SQI 2.0 이상인 경우만 분석에 포함하였다. ABP 세그먼트에서는 수축기 혈압(Systolic Blood Pressure, SBP)과 이완기 혈압(Diastolic Blood Pressure, DBP)을 탐지하고, 각각의 평균값을 해당 세그먼트의 레이블로 사용하였다.

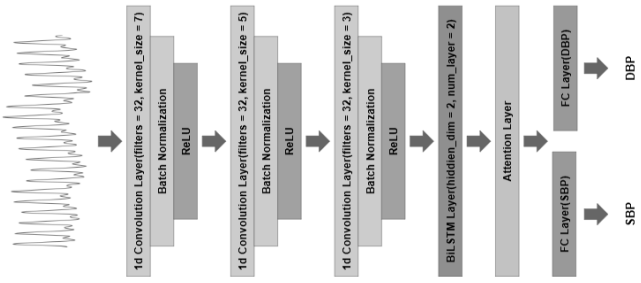


그림 2. 제안된 CNN-BiLSTM-attention 기반 모델 구조

본 연구에서는 PPG 신호로부터 SBP 및 DBP를 동시 추정하기 위한 CNN-BiLSTM-attention 기반 멀티헤드 모델을 제안한다(그림 2.). 합성곱 신경망을 통해 PPG 세그먼트의 국소적 파형 특징을 추출한 후, 양방향 LSTM을 거쳐 시계열의 전후방 의존성을 학습한다. 이어서 글로벌 어텐션 모듈을 적용하여 혈압 추정에 유효한 구간에 가중치를 부여하고, 이를 단일 컨텍스트 벡터로 요약한다. 최종적으로 컨텍스트 벡터는 두 개의 출력층으로 분기되어 수축기 및 이완기 혈압을 각각 예측한다.

모델 학습은 두 가지 패러다임으로 진행하였다. 하나는 각 피험자의 데이터를 독립적으로 학습하는 개인별 모델이며, 다른 하나는 전체 59명의 피험자 데이터에서 개인별 10%를 추출하여 구성한 데이터셋으로 사전학습을 수행한 후, 나머지 90%를 활용해 모델을 미세조정하는 방식이다. 미세조정 과정에서는 사전 학습된 모델의 LSTM, Attention, FC 계층의 가중치를 업데이트하여 피험자별 PPG 신호의 시계열적 특성과 전역적 패턴을 반영하도록 하였다. 모든 학습 과정은 결과의 신뢰성을 확보하기 위해 피험자별 5-fold 교차검증으로 평가하였다.

3. 연구 결과

표 1. 사전학습 및 미세조정 여부에 따른 예측 성능

	SBP MAE (Mean ± SD, mmHg)	DBP MAE (Mean ± SD, mmHg)
w/o Fine-tuning	7.57 ± 3.27	4.33 ± 1.55
w/ Fine-tuning	4.59 ± 1.53	3.13 ± 1.26
ΔMAE	**-2.98**	**-1.20**

표 1.은 사전학습 및 미세조정 여부에 따른 혈압 예측 성능을 비교한 결과이다. 각 피험자별로 5-fold 교차검증을 수행하여 fold별 평균절대오차(Mean Absolute Error, MAE)를 계산한 후, 이를 평균하여 피험자 단위의 성능 지표를 산출하였다. 이후 전체 피험자에 대해 평균 및 표준편차를 구하여 최종 결과를 도출하였다. 사전학습 및 미세조정을 적용한 모델은 적용하지 않은 경우에 비해 수축기 및 이완기 혈압에서 MAE가 각각 2.98 mmHg, 1.2 mmHg 감소하였음이 확인되었다.

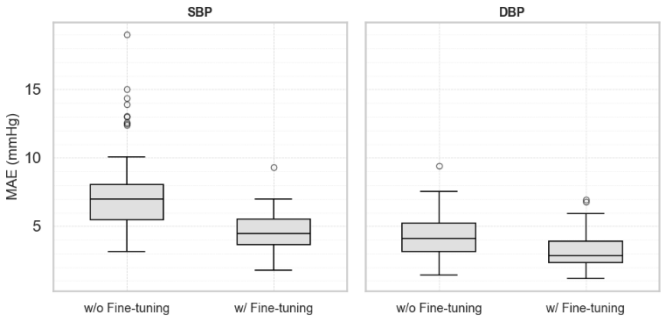


그림 3. 사전학습 및 미세조정 여부에 따른 예측 오차 분포

그림 3.은 사전학습 및 미세조정 여부에 따른 혈압 예측 오차 분포를 나타낸 것이다. 사전학습 및 미세조정을 적용하지 않은 경우, 수축기 및 이완기 혈압 모두에서 오차의 중앙값이 상대적으로 높고 분포 범위가 넓게 나타났다. 특히 수축기 혈압의 경우 일부 피험자에서 15 mmHg 이상의 높은 오차가 관찰되었다. 반면 사전학습 및 미세조정을 적용한 모델 오차의 중앙값이 낮고, 분포의 상·하위 경계가 좁아져 전반적으로 안정된 예측 성능을 보였다.

이는 사전학습을 통해 전체 피험자 데이터를 기반으로 공통적 패턴을 학습한 뒤, 각 피험자 데이터로 미세조정을 수행함으로써 개인 간 신호 차이를 보정하고 예측 정확도를 향상시킨 결과로 해석된다. 이로써 사전학습 기반 개인화 학습이 비침습적 혈압 추정의 정확도 향상에 효과적임을 이야기한다.

4. Acknowledgements

본 연구는 2025년 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 SW중심대학사업 지원을 받아 수행되었음(2023-0-00055).

5.참고 문헌

[1] X. Wu, J. Sha, Q. Yin, Y. Gu, and X. He, “Global burden of hypertensive heart disease and attributable risk factors, 1990–2021: insights from the global burden of disease study 2021”, *Scientific Reports*, Vol 15, No.1, p.1459, 2025

[2] A. E. M. Elsayed, N. Y. F. Almani, O. M. Assad, L. H. S. Mohamed, N. A. Moussa, Z. N. Al-Majmaie, R. M. A. Murayyi, R. M. A. Murayyi, B. A. Alsaluli, Z. A. Alnuwaiqi, H. M. H. Qutqut, A. S. Almehmadi, and A. H. M. Alhibshi, “Cardiovascular Complications in Patients With Hypertension: A Retrospective Study”, *American Journal of Psychiatric Rehabilitation*, Vol 28, No.5, p.523–528, 2025

[3] J.-R. Hu et al., ‘Validating cuffless continuous blood pressure monitoring devices’, *Cardiovascular Digital Health Journal*, Vol 4, No.1, p.9–20, 2023

[4] Y. Cho, G. Kim, Y. Kim, S. Ju, and M. Ahn, “A Brief Review of Non-Invasive Blood Pressure Estimation Techniques Using Photoplethysmographic Signals”, *Journal of biomedical Engineering Research*, Vol 45, No.6, p.364–378, 2024

[5] Y. Lecun, L. Bottou, Y. Bengio, and P. Haffner, “Gradient-based learning applied to document recognition”, *Proceedings of the IEEE*, Vol 86, No. 11, p.2278–2324, 1998

[6] S. Hochreiter and J. Schmidhuber, “Long Short-Term Memory”, *Neural Computation*, Vol 9, No. 8, p.1735–1780, 1997

[7] T. Luong, H. Pham, and C. D. Manning, “Effective Approaches to Attention-based Neural Machine Translation”, *Proceedings of the 2015 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing*, p.1412-1421, 2015

[8] G. B. Moody and R. G. Mark, “A database to support development and evaluation of intelligent intensive care monitoring”, *Computers in Cardiology 1996*, p.657–660, 1996

[9] Y. Liang, Z. Chen, G. Liu, and M. Elgendi, “A new, short-recorded photoplethysmogram dataset for blood pressure monitoring in China”, *Scientific Data*, Vol. 5, No.1, 180020, 2018

Poster-246

거대언어모델의 논리적 추론 보상과 세미-오프라인 학습을 통한 다목적 분자최적화 프레임워크

남현영[1*], 허근수[1], 손영한[1], 정유빈[1], 감태의[1]
고려대학교 인공지능학과[1]

Reasoning-based Reward Framework with Semi-offline Learning for Multi-objective Molecular Optimization

Hyeonyeong Nam[1*], Keun-Soo Heo[1], Young-Han Son[1], Yubin Jeong[1], Tae-Eui Kam
Department of Artificial Intelligence, Korea University, Korea
*hy_nam@korea.ac.kr

Abstract

Multi-objective molecular optimization (MOMO) is essential for drug discovery, where multiple pharmacological properties must be optimized simultaneously. However, obtaining experimental feedback in real time is costly and time-consuming, while offline-trained models show limited generalization to unseen molecules. This study introduces a reasoning-based reward framework that integrates a Large Language Model (LLM) with a reinforcement learning (RL) framework. The LLM extracts reasoning criteria from an offline dataset, evaluates newly generated molecules, and produces Direct Preference Optimization (DPO) pairs as rewards based on the criteria. These rewards guide the generative model to optimize molecule candidates toward multiple objectives Furthermore, a semi-offline learning strategy allows the model to incorporate newly sampled molecules in periodic updates without continuous oracle queries, effectively reducing the reliance on costly wet-lab validation. This hybrid setting enhances both adaptability and learning stability, providing a scalable and interpretable framework for AI-driven molecular design in medical research.

1. 연구 배경

신약개발 및 분자 설계 분야에서 여러 물성을 동시에 고려하는 다목적 분자 최적화(Multi-objective Molecular Optimization, MOMO) 는 의료인공지능 연구의 핵심 영역 중 하나로 주목받고 있다. 그러나 실제 실험 환경에서는 실험적 피드백을 지속적으로 수집하는 과정이 막대한 비용과 시간이 요구되며, 정적인 오프라인 데이터만으로 학습된 모델은 새로운 화합물에 대한 일반화 성능이 제한되는 문제가 존재한다[1]. 특히 기존의 강화학습 기반 분자 생성 모델들은 수치적 오라클 점수에만 의존하여, 화학적 상호작용의 맥락이나 복합적인 속성 간 관계를 충분히 반영하지 못한다는 한계가 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구는 대규모 언어모델(Large Language Model, LLM)의 논리적 추론(reasoning) 능력을 분자 최적화 과정에 도입하였다. LLM은 분자 구조와 속성 간의 인과적 관계를 분석하여 단순 점수기반 평가를 넘어선 논리적 보상 신호(reasoning-based reward) 를 생성할 수 있다. 본 연구에서는 LLM이 분자 쌍을 비교 및 분석하여 Direct Preference Optimization(DPO)[3] 학습용 데이터 쌍을 생성하고, 생성모델이 이를 이용해 학습하도록 구성하였다. 이때 LLM은 보상 생성자(reward generator) 로서 추론 기반의 피드백을 제공하고, 생성모델(generative model) 은 이를 반영하여 분자 구조의 최적화 방향을 조정한다.

또한, 완전-오프라인 학습(full-offline learning) 의 정적 한계를 보완하기 위해 세미-오프라인 학습(semi-offline learning) 전략을 사용하였다. 완전 오프라인 학습은 고정된 데이터셋만을 사용하기 때문에 새로운 화합물이나 정보에 대한 적응력이 떨어지며, 반대로 완전-온라인 학습(full-online learning) 은 실시간 오라클 호출이 지속적으로 요구되어 높은 비용과 실험 불안정성을 초래한다. 본연구의

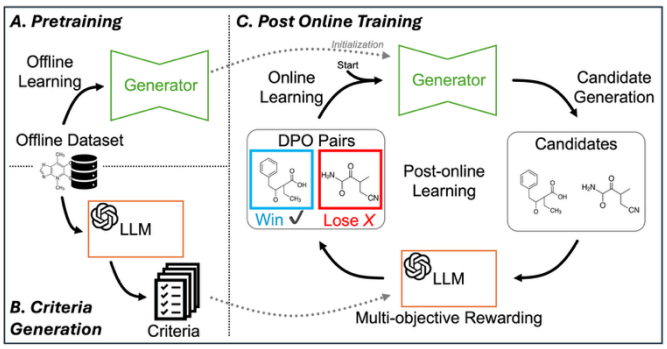


그림 1. 본 연구의 프레임워크

세미-오프라인 학습방식은 기존의 정적 오프라인 데이터셋에서 학습을 시작하여, 주기적으로 최적화된 신규 분자 데이터를 통합하여 모델을 갱신함으로써, 온라인 학습의 적응성과 오프라인 학습의 효율성을 동시에 확보한다[2]. 이는 실시간 상호작용 없이도 일정 주기마다 축적된 정보를 반영하여 모델을 점진적으로 개선할 수 있으며, 실제 환경에서 오라클 호출에 해당하는 wet-lab 실험(합성 및 활성 평가 등)의 빈도를 줄여 고비용의 실험 의존도와 시간 소모를 효과적으로 절감할 수 있을 것으로 보여진다.

2.연구 방법

본 연구의 베이스라인 모델은 강화학습(Reinforcement Learning, RL) 기반 분자 생성 프레임워크인 REINVENT[3]를 사용하였다. 분자 생성모델인 에이전트(Agent)는 RNN

학습 전략	학습 방법		GSK3β+JNK3		GSK3β+JNK3+QED		GSK3β+JNK3+QED+SA	
			HV(↑)	R2(↓)	HV(↑)	R2(↓)	HV(↑)	R2(↓)
오프라인	MSE		0.465±0.070	0.919±0.125	0.383±0.101	1.700±0.402	0.358±0.075	2.668±0.325
세미-오프라인	MSE		0.465±0.108	0.902±0.185	0.387±0.094	1.743±0.363	0.340±0.085	2.937±0.515
	DPO	오라클 기반	0.286±0.101	1.295±0.235	0.238±0.073	2.316±0.328	0.176±0.060	4.201±0.579
		LLM 기반	**0.494±0.071**	**0.854±0.124**	**0.426±0.060**	**1.583±0.257**	**0.397±0.071**	**2.596±0.489**

표 1. 학습 전략 및 보상 기법별 다목적 분자 최적화 성능 비교

구조로 설계되어 있으며, ZINC 데이터셋[4]을 이용한 사전학습(pre-training)을 통해 초기 분자 생성 능력을 확보하였다. 이후 5,000개의 분자를 샘플링 하여 오프라인 데이터셋을 구성하고, 이를 기반으로 세미-오프라인 학습 환경을 구축하였다.

이는 완전-온라인 학습과 달리 실시간 오라클 호출을 수행하지 않지만, 일정 주기마다 새롭게 수집된 분자 데이터를 통합하여 모델을 갱신한다. 이를 통해 오프라인 학습의 효율성과 온라인 학습의 적응성을 동시에 확보할 수 있다. LLM은 에이전트가 생성한 분자 쌍을 입력 받아 두

분자 간의 상대적 우수성을 화학적 근거와 함께 추론하고, 이를 Direct Preference Optimization(DPO) 학습용 쌍 데이터로 변환한다. 이렇게 생성된 DPO 데이터는 reasoning-based reward 로 작용하며, 에이전트는 이를 보상 신호로 사용하여 최적화한다. 즉, LLM은 분자적 논리 추론을 통한 보상 생성자(reward generator) 역할을 수행하고, 에이전트는 이를 이용해 다목적 속성 향상 방향으로 학습된다. 최적화 대상은 GSK3β[5]와 JNK3[6]의 활성을 기본으로 하며, 실험 설정에 따라 약물 유사도(Quantitative Estimate of Drug-likeness, QED) 와 합성 용이도(Synthetic accessibility score, SA)를 추가하여 각각 2·3·4목적 조합으로 구성하였다.

3. 연구 결과

표 1은 오프라인, 세미-오프라인 학습 전략과 각 보상 학습 기법에 따른 다목적 분자 최적화 성능 비교 결과를 보여준다. 전반적으로 세미-오프라인 전략이 단순 오프라인 대비 더 높은 Hypervolume(HV) 및 안정적인 R^2 값을 나타냈다. 이는 세미-오프라인 구조가 고정된 데이터셋의 한계를 완화하고, 주기적인 데이터 통합을 통해 모델의 탐색 공간을 확장시킨 결과로 해석된다.

또한 세미-오프라인 환경 내에서도 기존 MSE 기반 손실보다 DPO 기반 보상 학습이 전반적으로 일관된 향상 경향을 보였고, 특히 본 연구에서 제안한 LLM reasoning 기반 DPO 보상은 단순 오라클 점수 기반보다 HV와 R^2 모두에서 우수한 결과를 나타냈다. 이는 LLM이 생성한 추론적 보상이 복합적 분자 속성 간의 상관성을 반영함으로써, 다목적 최적화 성능을 개선했음을 시사한다.

그림 2는 LLM이 생성한 세 가지 reasoning criteria 중 일부를 제거하여 수행한 Ablation Study 결과를 보여준다. 각 criteria는 서로 다른 화학적 관점을 반영하며, 이를 조합해 최종 선호 관계를 평가하도록 설계되었다. 3목적 및 4목적 최적화 모두에서 criteria를 일부 제거할 경우 HV가 감소하고 R^2이 증가하는 경향을 보였다. 예를 들어, 3목적 최적화에서 전체 criteria를 사용했을 때 HV=0.426, R^2=1.583으로 가장 우수한 성능을 기록했으며, 일부 criteria를 제외할수록 HV가 감소하는 경향을 보였다. 이 결과는 LLM이 생성한 reasoning criteria가 개별적으로는 부분적인 기여를 하지만, 상호 보완적으로 작동할 때 다목적 최적화의 균형성과 수렴 안정성을 높인다는 점을 뒷받침한다.

따라서 LLM 기반 reasoning reward 방식은 분자의 구조적·화학적 맥락을 추론하여 상대적 우수성을 평가하기

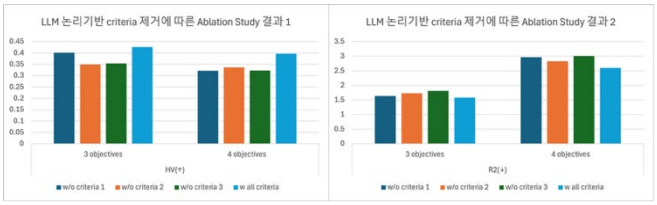


그림 2. LLM 기반 criteria 제거에 따른 Ablation Study 결과

때문에, 단순 수치 점수를 넘어 다목적 특성의 균형적 최적화에 기여했음을 시사한다.

결과적으로, 본 연구의 LLM-DPO 기반 세미-오프라인 학습 프레임워크는 기존 REINVENT 구조의 데이터 효율성과 일반화 성능을 향상시키며, 실험적 비용이 큰 실제 환경에서도 활용 가능한 효율적 대안임을 확인하였다.

4. Acknowledgements

본 연구는 정보통신기획평가원(IITP)의 지원을 받아 수행된 연구로, 고려대학교 인공지능대학원 인공지능 혁신융합대학 지원사업(No. RS-2019-II190079)의 일환으로 수행되었습니다. 또한, 이 연구는 과학기술정보통신부(MSIT)의 지원을 받아 한국연구재단(NRF)에서 수행한 연구(No. RS-2023-00212498)와 한국보건산업진흥원 (Korea Health Industry Development Institute)에서 수행한 연구(No. RS-2025-16066488)의 지원을 받아 수행되었습니다.

5.참고 문헌

[1] Yusuf, M. (2023). *Insights into the in-silico research: Current scenario, advantages, limits, and future perspectives. Life in Silico, 1 (1), 13-25*.

[2] Shin, D. H., Son, Y. H., Lee, H. J., Lee, D. J., & Kam, T. E. Offline Model-based Optimization for Real-World Molecular Discovery. In *Forty-second International Conference on Machine Learning*.

[3] Olivecrona, M., Blaschke, T., Engkvist, O., & Chen, H. (2017). Molecular de-novo design through deep reinforcement learning. *Journal of cheminformatics*, *9*(1), 48.

[4] Sterling, T., & Irwin, J. J. (2015). ZINC 15–ligand discovery for everyone. *Journal of chemical information and modeling*, *55*(11), 2324-2337.

[5] Beurel, E., Grieco, S. F., & Jope, R. S. (2015). Glycogen synthase kinase-3 (GSK3): regulation, actions, and diseases. *Pharmacology & therapeutics*, *148*, 114-131.

[6] Bogoyevitch, M. A., & Kobe, B. (2006). Uses for JNK: the many and varied substrates of the c-Jun N-terminal kinases. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, *70*(4), 1061-1095.

Poster-247

기억 증강 SAM2를 이용한 해부학적 지식 증류 기반 골절 검출

강동준[1] , 이경수[2*]

전북대학교 한약자원학과[1] 컴퓨터인공지능학부[2]

Anatomy-Aware Distillation with Memory-Augmented SAM2 for Fracture Detection

Dong Jun[1], Kyungsu Lee[2*]

Department of Oriental Medicine Resource[1] and Department of Computer Science and AI[2], Jeonbuk National University, Korea

*ksl@jbnu.ac.kr

Abstract

Fracture detection in radiographic images remains challenging due to subtle crack patterns, anatomical complexity, and limited annotations. To address these issues, we propose a SAM2-based teacher–student framework with a memory-augmented knowledge distillation strategy. The proposed memory bank stores anatomical crack embeddings extracted from the SAM2 teacher and guides the student to align its features with stored prototypes, ensuring consistent anatomical reasoning. Unlike conventional distillation, our approach enables continual knowledge transfer through memory retrieval and uncertainty-aware weighting. Experiments on public fracture datasets show improved detection accuracy and robustness, demonstrating the effectiveness of memory-based anatomical knowledge distillation for medical image understanding.

1. 연구 배경

최근 대규모 데이터로 사전 학습된 기초 모델(Foundation Model), 특히 Segment Anything Model 2 (SAM2)는 다양한 시각 인식 과제에서 우수한 범용성과 세분화 성능을 입증하였다. 그러나 이러한 대형 모델을 의료 영상과 같은 특수 도메인에 직접 적용하는 것은 계산 비용이 매우 크고, 골절 부위의 세밀한 해부학적 특징을 명시적으로 반영하지 못해 최적의 검출 성능을 확보하기 어렵다는 한계를 지니고 있다 **[1]**.

이에 본 연구에서는 SAM2를 교사(teacher)로, 경량화된 검출 네트워크를 학생(student)으로 설정한 메모리 증강 지식 증류(memory-augmented knowledge distillation) 프레임워크를 제안한다. 제안하는 방법은 해부학적 정보를 인지하는 메모리 뱅크(memory bank)를 도입하여, SAM2 교사 모델로부터 추출된 골절 관련 임베딩과 문맥적 특징을 저장하고, 학생 모델이 학습 과정에서 이러한 해부학적 프로토타입(prototype)과 표현 공간을 정렬하도록 유도한다. 이를 통해 교사가 제거된 이후에도 구조적 지식을 보존하며, 고수준의 해부학적 이해를 효율적으로 소형 모델로 전이할 수 있다. 또한 기존의 지식 증류 방식과 달리, 본 연구에서는 불확실도 기반 가중치(uncertainty-aware weighting)를 도입하여 신뢰도가 높은 영역의 지식을 선택적으로 전달함으로써, 골 경계가 모호하거나 노이즈가 포함된 영역에서의 오탐을 줄인다. 더 나아가, 메모리 뱅크는 새로운 골절 사례가 관찰될 때마다 관련 프로토타입을 갱신함으로써 지속적인 적응(continual adaptation)과 장기적인 지식 보존이 가능하다.

공개된 골절 영상 데이터셋(KHATL)에서의 실험 결과, 제안하는 방법은 데이터가 제한된 상황에서도 높은 검출 정확도와 안정성을 보였으며, 메모리 기반의 골절 패턴 검색을 통해 모델의 해석 가능성 또한 향상됨을 확인하였다. 본 연구는 대규모 세분화 모델(SAM2 등)을 의료 영상 검출 분야에 효율적이고 해부학적으로 일관된 형태로 적용할 수 있는 새로운 가능성을 제시하고자 한다.

2. 연구 방법

(**프레임워크의 개요**) 본 연구에서 제안하는 프레임워크는 SAM2 **[2]** 및 teacher-student 방법론 **[3]**을 기반으로 하여, 교사(teacher) 모델, 경량화된 학생(student) 검출기, 그리고 해부학적 골절 임베딩을 저장하는 메모리 뱅크(memory bank)로 구성된다. 입력 X-ray 영상 x가 주어지면, SAM2 교사 모델은 전역적인 골 구조와 국소적인 균열(crack) 정보를 모두 반영하는 분할 마스크(segmentation mask)와 특징 임베딩(feature embedding) f_t 를 생성한다. 학생 네트워크는 Swin-T 또는 YOLOv8-nano와 같은 경량 백본(backbone)을 사용하여 자체적인 특징 표현 f_s 를 추출한다. 기존의 단순한 출력 기반 증류(distillation) 방식과 달리, 본 연구에서는 교사 모델이 학습한 핵심 골절 프로토타입(prototype)을 저장하는 메모리 증강 중간 표현(memory-augmented intermediate representation)을 도입하였다. 이때, 메모리 뱅크는 $M = \{ f_t^1, f_t^2, \ldots, f_t^N \}$으로 정의되며, 골절 영역의 대표적인 임베딩을 동적으로 업데이트하여 장기적인 해부학적 지식 저장을 가능하게 한다. 훈련 과정에서 학생 모델은 코사인 유사도(cosine similarity)를 기반으로 메모리 내에서 가장 관련성 높은 프로토타입을 검색하고, 자신의 특징 표현을 해당 임베딩에 정렬(alignment)하도록 학습된다.

(**메모리 증강 지식 증류**) 구조적인 지식 전이를 효율적으로 수행하기 위해, 본 연구에서는 2단계 지식 증류(two-stage distillation) 과정을 사용한다. (1) 교사 모델의 메모리와의 특징 정렬(feature alignment) 단계, (2) 교사의 신뢰도(confidence)에 기반한 불확실도 가중(uncertainty-

그림 1. 제안하는 모델의 전체 구조

aware weighting) 단계로 구성된다. 각 영상에 대해 SAM2 교사는 탐지된 영역별 신뢰도 맵(confidence map) u_t를 생성한다. 학생 모델은 이 신뢰도를 활용하여 메모리 프로토타입과의 정렬 정도를 가중치로 반영하며, 다음과 같은 지식 증류 손실 함수를 통해 학습된다.

$$L_{KD} = \sum_t (1 - u_t) \left| f_s - f_t^{i*} \right|_2$$

여기서 f_t^{i*}는 메모리 뱅크에서 가장 유사한 프로토타입을 의미한다. 이러한 선택적 증류 과정은 불확실하거나 애매한 골절 부위에서 발생할 수 있는 노이즈를 감소시키고, 신뢰도가 높은 해부학적 영역의 정보를 더 강하게 학습하도록 돕는다. 최종 학습 목적 함수는 검출 손실, 증류 손실, 그리고 메모리 정규화 항을 결합하여 다음과 같이 정의된다.

$$L_{total} = L_{det} + \lambda_1 L_{KD} + \lambda_2 L_{mem}$$

여기서 L_mem은 메모리 임베딩의 다양성과 안정성을 유지하기 위한 모멘텀 업데이트(momentum update) 형태로 정의된다.

$$M_{t+1} = mM_t + (1 - m) f_t$$

이와 같은 메모리 기반 갱신 방식은 지속적 학습(continual learning)을 가능하게 하고, 드물게 등장하는 골절 유형이 학습 과정에서 잊히는(catastrophic forgetting) 현상을 방지한다.

3. 연구 결과

본 연구에서는 공개 데이터셋인 Roboflow Bone Fracture Detection (KHATL) **[4]**을 사용하여 제안한 방법의 성능을 평가하였다. 해당 데이터셋은 요골(radius), 상완골(humerus), 대퇴골(femur) 등 여러 부위의 X-ray 영상으로 구성되어 있으며, 각 영상에는 골절 부위에 대한 픽셀 단위의 분할 마스크와 바운딩 박스 주석이 포함되어 있다. 모든 이미지는 640×640 크기로 리사이즈하고 정규화(normalization)를 수행하였다. 비교 기준으로 사용한 YOLOv3 검출기는 배치 크기 4, 학습률 1×10^{-4}, 학습 횟수 300 epoch으로 학습을 진행하였다. 제안하는 모델은 SAM2를 교사(teacher)로 활용하며, SAM2는 SA-1B 데이터셋으로 사전 학습된 ViT-H 백본을 사용한다. 학생(student) 네트워크는 Swin-T 백본에 경량 검출 헤드를 결합한 구조를 사용하였다.

표 1은 다양한 방법의 골절 검출 성능을 비교한 결과를 요약한 것이다. YOLOv3는 빠른 추론 속도를 제공하지만, IoU 0.46으로 작은 균열이나 미세한 골절을 탐지하는 데 어려움을 보였다. SAM2를 직접 미세 조정(fine-tuning)한

표 1. 비교 모델과의 성능 비교 및 절제 연구

Method	Backbone	mAP (%)	IoU	F1-score	Params (M)	Inference (ms)
YOLOv3 (ours baseline)	DarkNet-53	-	0.46	-	61.9	20.5
YOLOv8-Small	CSPDarkNet	82.4	0.52	0.84	11.2	22.1
SAM2 Fine-tuning	ViT-H	85.3	0.57	0.87	632.1	96.7
Feature Distillation (KD)	Swin-T	86.2	0.58	0.88	27.4	24.3
w/o Memory Bank	Swin-T	87.0	0.59	0.89	27.4	24.9
w/o Uncertainty Weighting	Swin-T	88.1	0.60	0.90	27.4	25.0
Ours (Full Model)	**Swin-T**	**89.7**	**0.61**	**0.91**	**27.4**	**25.3**

모델은 분할 품질이 개선되었으나, 연산량이 매우 크고 학습 효율이 낮았다. SAM2로부터의 단순한 특징 증류(feature distillation)는 일정 수준의 향상을 보였지만, 제안하는 메모리 증강 프레임워크(memory-augmented framework)가 가장 우수한 성능을 보였다. 제안 모델은 mAP 89.7%, IoU 0.61을 달성하여, 기존 방법 대비 뚜렷한 성능 향상을 보였다. 이는 메모리 뱅크에 저장된 해부학적 프로토타입(anatomical prototype)을 통한 지식 전이가 검출 정확도와 일반화 성능 모두에 효과적임을 시사한다.

또한, 표 1에서 확인할 수 있듯, 각 구성 요소의 기여도를 검증하기 위해, 메모리 뱅크와 불확실도 기반 가중치 모듈을 각각 제거한 ablation 실험을 수행하였다. 메모리 뱅크를 제거했을 때 mAP가 약 2.7% 감소하였으며, 불확실도 가중치를 제거했을 때는 골이 겹쳐진 영역에서 오탐(false positive)이 증가하였다. 기본 모델인 YOLOv3와 비교했을 때, 제안 모델은 IoU가 +0.15, F1-score가 +0.12 향상되어, 제안한 증류 프레임워크가 골절선의 해부학적 일관성을

그림 2. 모델 별 성능의 정성적 비교

보존하는 데 기여함을 확인하였다.

그림 2는 YOLOv3, SAM2 미세조정 모델, 그리고 제안 방법 간의 시각적 결과를 비교한 예시를 보여준다. YOLOv3는 미세한 피질(cortical) 불연속성을 포착하지 못하고, SAM2 단독 모델은 세밀한 골절 부위에서 과검출(over-detection)되는 경향을 보였다. 반면, 제안한 모델은 전문가의 주석과 일치하는 미세 균열 구조를 명확하게 검출하였으며, 이를 통해 메모리 증강 SAM2 프레임워크가 해석 가능성과 정확도를 동시에 향상시킴을 확인할 수 있었다.

요약하면, 본 연구에서는 골절 검출을 위해 SAM2 기반의 해부학적 지식 증류(anatomy-aware knowledge distillation) 프레임워크를 제안하였다. 공개 데이터셋인 KHATL 에서의 실험 결과, 제안한 방법은 기존의 검출기(예: YOLOv3, YOLOv8) 대비 일관된 성능 향상을 보였으며, 더 높은 IoU와 우수한 해석 가능성(interpretability)을 확보하였다. 본 연구는 SAM2와 같은 대규모 기초 모델(foundation model)을 의료 영상 분석 분야에 효율적이고 메모리 기반의 지식 증류를 통해 적용할 수 있는 실질적인 방향을 제시한다. 이는 기억 증강 기법이 의료 영상에 적용될 수 있는 가능성을 보여줄 수 있다.

4. Acknowledgements

본 연구는 보건복지부의 재원으로 한국보건산업진흥원의 보건의료기술연구개발사업 지원에 의하여 이루어진 것임 (과제고유번호 : HR22C1832).

5. 참고 문헌

[1] Sengupta, Sourya, Satrajit Chakrabarty, and Ravi Soni. "Is SAM 2 better than SAM in medical image segmentation?." Medical Imaging 2025: Image Processing. Vol. 13406. SPIE, 2025.

[2] Ravi, Nikhila, et al. "Sam 2: Segment anything in images and videos." arXiv preprint arXiv:2408.00714 (2024).

[3] Abbasi, Sajjad, et al. "Modeling teacher-student techniques in deep neural networks for knowledge distillation." arXiv preprint arXiv:1912.13179 (2019).

[4] Fracture Detection. “Bone Fracture Detection Dataset.” Roboflow Universe, Roboflow, Feb. 2024, https://universe.roboflow.com/fracture-detection-29kih/bone-fracture-detection-khatl. Accessed 17 Oct. 2025.

Poster-248

움직임에 강인한 EIT 기반 실시간 1회박출량 추정 기법

최준혁[1] , 홍성현[2], 안민규[1*]

한동대학교 전산전자공학과[1]

㈜BiLab[2]

A Motion-Robust Real-Time Stroke Volume Estimation Method Using Electrical Impedance Tomography

Junhyeok Choi[1] , Sung Hyun Hong[2] , Minkyu Ahn[1*]

School of Computer Science and Engineering, Handong Global University, Korea[1]

BiLab Co., Ltd., Korea[2]

*minkyuahn@handong.edu

Abstract

Electrical Impedance Tomography (EIT) is a technique that can monitor lung ventilation and heart activity in real time by non-invasive measurement of changes in electrical impedance inside the human body. However, EIT is highly sensitive to motion, and cardiac-related impedance variations are only about one-tenth the amplitude of those associated with respiration, which poses a critical limitation for hemodynamic monitoring. In this study, we proposed a spatial filter-based SV estimation method that minimizes the loss of heart components by combining normalization of EIT signals, Principal Component Analysis (PCA) and Independent Component Analysis(ICA). Furthermore, a motion-free clean segment was detected using the contact impedance of EIT signals and a spatial filter learned in that section was applied in real time.

1. 연구 배경

전기 임피던스 단층촬영(Electrical Impedance Tomography, EIT)은 신체 내부에서 전기적 임피던스 변화를 전극을 통해 비침습적으로 측정하여 생리학적 변화를 실시간으로 모니터링할 수 있는 기술이다. EIT는 주로 폐의 공기 이동 시각화를 통한 호흡 활동 모니터링 혹은 심박출량(Cardiac Output, CO)과 1회박출량(Stroke Volume, SV)과 같은 혈역학적 지표를 측정하는데 사용된다. 또한 측정이 간편하고 휴대성이 좋다는 장점이 있으며, 시간해상도가 매우 높아 응급실, 중환자실 등의 다양한 임상 환경에서 유용하게 활용될 수 있다. 하지만 EIT는 전극과 피부 사이의 접촉 임피던스의 변화에 민감하게 반응하기 때문에, 환자의 자세 변화나 전극이 부착된 흉부의 미세한 움직임에도 영향을 받는다는 단점이 있다. 이러한 움직임 노이즈는 넓은 주파수 영역에 동시에 나타나서 단순 주파수 필터링으로는 효과적으로 제거하기 어려우며, 특히 심장 활동 신호는 호흡 신호에 비해 신호의 크기가 10배 작기 때문에 움직임 노이즈에 더욱 취약한 모습을 보인다.

최근 움직임 노이즈에 강건한 EIT 기반 SV 추정 기법 혹은 SV 상의 움직임 노이즈를 억제하는 방법론에 대한 연구가 이루어져 왔다[1—3]. 이러한 연구들은 신호처리 기반 접근을 통해 EIT의 임상 적용성을 향상시켰으나, 여전히 심장 성분이 호흡에 비해 매우 미약하고 두 주파수 대역이 일부 중첩되는 문제로 인해 SV 신호의 정밀 추출에는 한계가 있다.

본 연구에서는 EIT 신호에서 움직임 노이즈를 억제하면서 SV 신호 안정적으로 검출하기 위한 방법을 제안하고자 한다.

2.연구 방법

본 연구에서는 HemoVista^{TM} (BiLab) 시스템으로 수집된 임상 IRB 승인 데이터셋으로 성인 남녀 총 6명을 대상으로 측정되었다. 데이터셋은 참조 장치에 따라 구분되며, 참조장치로는 HemoShpere (Edwards Lifesciences)와 Vigileo (Edwards Lifesciences) & PulsioFlex (Pulsion Medical Systems) 장치가 각각 피험자 3명을 대상으로 사용되었다.

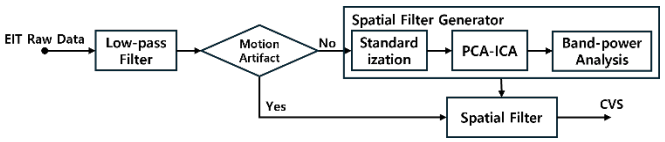
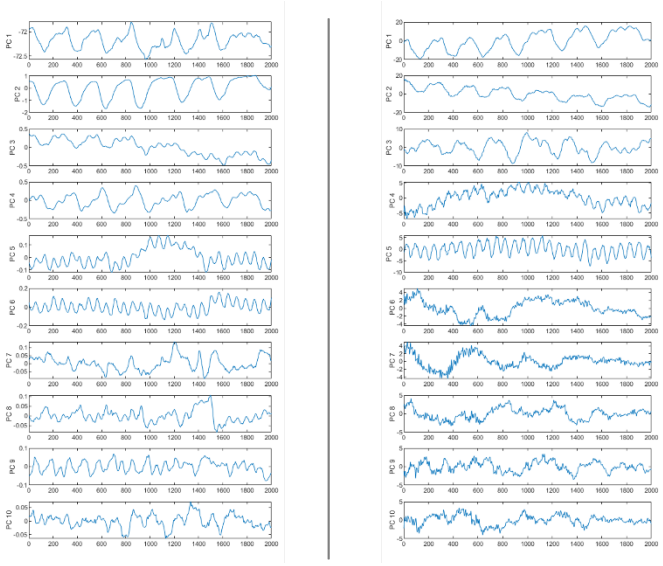


그림 1. 시스템 흐름도

본 연구에서 제안하는 시스템의 전체 구조는 그림 1과 같다. EIT 신호를 정규화하고, 주성분분석(Principal Component Analysis, PCA)과 독립성분분석(Independent Component Analysis, ICA)를 통해 Cardiac Volume Signal(CVS)를 분리하여 실시간으로 SV를 추정하도록 설계하였다. 원시 EIT 신호는 전극 접촉 불안정 및 전원 노이즈의 영향을 최소화하기 위해 10 Hz 이하 대역의 저역통과 필터(low pass filter)를 사용하였다. 이후, 각 채널을 평균 0, 표준편차 1로 정규화하여, 호흡 신호에 비해 상대적으로 작은 심장 성분이 PCA 분석시 왜곡되지 않도록 하였다. 정규화된 EIT 신호에 대해 특이값 분해(Singular Value Decomposition, SVD)를 이용하여 PCA를 수행하였으며, 전체 204개 채널 중 상위 15개의 주성분(Principal Component, PC)을 선택하였다. 이는 전체 데이터 분산의 약 99% 이상을 설명하는 구간으로, 이후 ICA를 통해 심장 성분을 분리하는데 사용했다. 선행 연구에서는 호흡 성분을 제거하기 위해 PC1을 제외하였으나, 본 연구에서는 심장 신호 손실을 최소화하기 위해 PC1을 포함시켜 ICA를 수행하였다. 분리된 독립성분 각각에 대해 주파수 분석을 수행하여, 심장 주파수 대역 (0.5-4 Hz)에서 파워가 가장 크게 나타나는 성분을 CVS으로 선택하였다. 선택된 CVS의 공간 투영벡터를 이용하여 CVS 분리를 위한 공간필터를 생성하였다. 생성된 공간 필터는 움직임 노이즈 유무에 따라 주기적으로 업데이트되며, 접촉 임피던스(Contact



(a) (b)

그림 2. 정규화 수행 여부에 따른 EIT 데이터의 PCA 결과 비교 예시 (a) 정규화를 수행하지 않은 PCA 결과 (b) 정규화 수행 이후 PCA 결과

Impedance)의 변화량이 임계값을 초과할 때 움직임이 발생한 것으로 간주하였다. 이를 통해 실시간으로 안정적인 CVS을 추출할 수 있었으며, CVS 파형의 valley-to-peak 값을 통해 relative Stroke Volume(rSV)을 산출하고, 이를 참조 장치 기반 스케일 팩터로 보정하여 절대 SV를 추정하였다.

3. 결과

정규화 여부에 따른 EIT 데이터의 PCA 결과는 그림 2와 같다. 정규화를 수행하지 않은 경우(그림 2(a)), 전체 분산의 대부분이 호흡에 의한 저주파 성분으로 이루어져 있으며, 첫번째 주성분(PC1)에서 나타난다. 심장 성분은 호흡성분과 기타 잡음과 혼합되어 여러 주성분에 분산되어 나타난다. 반면, 각 채널을 정규화한 경우(그림 2(b)), 심장 성분이 상위 5개의 주성분에 집중되어 나타나는 것을 볼 수 있다. 이를 통해 정규화 과정이 호흡과 심장 성분 간의 진폭 비율을 보정하여, 심장 성분이 잘 나타나도록 분포가 보정되었음을 알 수 있다.

정규화된 데이터에 대해 상위 15개의 주성분을 ICA에 입력하여 심장 및 호흡 성분을 분리하였다. 선행 연구에서는 호흡 성분 제거를 위해 PC1을 제거하였으나, 본 연구에서는 심장 성분 손실을 최소화하기 위해 PC1을 포함하여 ICA를 수행하였다. 그림 2를 통해 정규화 여부와 상관없이 PC1에 호흡 성분과 심장 성분이 혼합되어 나타나는 것을 볼 수 있음.

비교를 위해 Calibration 단계에서 PCA와 ICA를 통해 CVS 추출 공간 필터를 1회 생성하여 CVS를 추출한 알고리즘을 Baseline으로 삼았다. Baseline에서는 PC1을 제거한 후, PC2-15로 ICA를 수행하여 CVS를 추출한다. 그림 3은 Baseline 알고리즘과 본 연구에서 제안한 알고리즘을 통해 추출한 CVS를 나타낸다. Baseline기반 SV에는 호흡 성분이 혼합되어 있는 것을 볼 수 있으며, Baseline 상에서 남아있는 움직임 노이즈가 본 연구에서 제안한 알고리즘으로는 억제되어 나타나지 않은 모습을 보인다. 이를 통해 본 연구에서 제안한 알고리즘이 호흡성분과 움직임 노이즈에 강건한 공간 필터를 생성함을 알 수 있다.

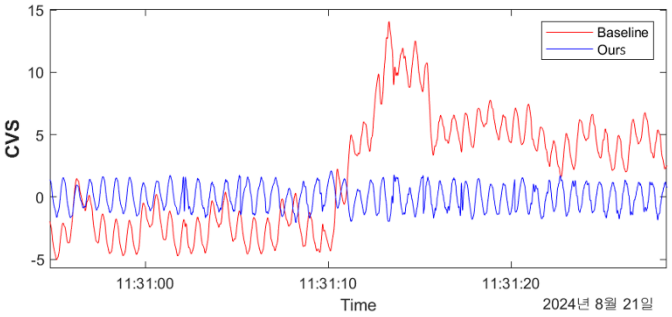


그림 3. 정규화와 PC1 제거 여부에 따른 CVS 변화

표 1은 각 피험자(s1-s6)에 대해 Baseline의 SV 추정 결과와 본 연구에서 제안한 SV 추정 결과를 Percentage Error(PE)로 비교한 것이다. PE는 EIT 기반 SV 추정 결과와 참조 장치의 SV 추정 결과를 통해 계산되었다. 대상 s1-s4에서는 제안 방법이 baseline 대비 PE가 감소하였다.

표 1. 데이터별 EIT기반 SV와 참조 장치기반 SV 간의 Percentage Error(%) 비교

Subject	s1	s2	s3	s4	s5	s6
Baseline	20.4	32.3	25.84	189.7	148.6	99.0
Ours	**14.0**	**12.3**	**7.38**	**29.3**	323.4	158.4

4. 결론

본 연구에서는 정규화 및 PC1 포함 ICA를 통해 심장 성분을 분리하여, 공간 필터를 안정적으로 적용하였다. 피험자 s5, s6의 데이터에서는 측정 초기구간부터 변동성이 크고 지속시간이 긴 움직임 아티팩트가 자주 발생하여 공간 필터 생성에 제약이 있었던 것으로 분석된다. 또한 움직임 발생 전후의 신호 위상과 분포 차이로 인해, 동일한 공간 필터를 양 구간에서 공유하여 적용할 경우 SV 추정의 정확도가 저하되었다. 이로 인해 Baseline과 제안한 알고리즘에서 PE가 높게 나타났다. 향후 연구에서는 CVS와 심전도(ECG) 간의 source consistency를 이용한 신호 융합 기법을 도입하여, 움직임에도 강건하고 신뢰성 있는 SV 추정 시스템으로 확장하고자 한다. 이를 통해 실시간 임상 환경에서도 적용 가능한 비침습적 혈역학 모니터링 시스템 구현을 목표로 한다.

5. Acknowledgements

본 연구는 2025년 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 SW중심대학사업 지원을 받아 수행되었음(2023-0-00055)

6.참고 문헌

[1] Jang, Geuk Young, et al. "Real-Time Measurements of Relative Tidal Volume and Stroke Volume Using Electrical Impedance Tomography with Spatial Filters: A Feasibility Study in a Swine Model Under Normal and Reduced Ventilation." *Annals of Biomedical Engineering* 51.2 (2023): 394-409.

[2] Dang, Thi Hang, et al. "Motion artifacts reduction for noninvasive hemodynamic monitoring of conscious patients using electrical impedance tomography: A preliminary study." *Sensors* 23.11 (2023): 5308.

[3] Yang, Lin, et al. "Removing clinical motion artifacts during ventilation monitoring with electrical impedance tomography: introduction of methodology and validation with simulation and patient data." *Frontiers in medicine* 9 (2022): 817590.

Poster-249

팔 근전도 신호 기반 펜 동작 회귀 예측 가능성 탐색

원지환[1], 김현중[1], 박철수[*]
광운대학교 컴퓨터공학과[1*]

Exploring the Feasibility of Pen Motion Regression Prediction Based on Arm Electromyography (EMG) Signals

Jihwan Won[1], Hyeonjung Kim[1] , Cheolsoo Park[*]
Computer Engineering, Kwangwoon University, Korea
[*]CheolsooPark@kw.ac.kr

Abstract

Current hand-tracking methods mainly rely on RGB or depth cameras, which are sensitive to occlusion, lighting changes, and cluttered backgrounds. These limitations reduce tracking accuracy or cause target loss, restricting practical applications in robotics, augmented reality (AR), and digital handwriting input. Recently, electromyography (EMG)-based hand tracking has emerged as a promising alternative, as EMG measures muscle electrical activity and is less affected by environmental factors. Previous studies have used EMG for hand action classification or regression of joint angles, but practical constraints such as sensor placement and usability remain, and fine finger or pen movement tracking has been limited. In this study, we aim to predict pen X and Y velocities using 8-channel forearm EMG signals collected with the Myo armband. We evaluate the feasibility of deep learning models—including DNN, CNN, LSTM, and Transformer—to predict pen motion solely from EMG signals. This work explores the potential for controlling pen input without cameras, contributing to practical applications in digital handwriting and human-computer interaction (HCI).

1. 연구 배경

현재 손 추적 기술은 주로 RGB 또는 심도(depth) 카메라에 의존하며, 이러한 방식은 가림(occlusion), 조명 변화, 배경 혼잡 등 환경 요인에 취약하다. 그 결과, 복잡한 환경에서는 손 위치나 손가락 움직임의 추적 정확도가 급격히 낮아지거나, 타겟 손실이 발생하는 문제가 발생한다 [1][2][3]. 이러한 한계는 로봇 제어, 증강현실(AR), 디지털 필기 입력 등 다양한 응용 분야에서 카메라 기반 손 추적 기술의 실용성을 제한한다.

최근 몇 년간, 근전도(EMG, Electromyography) 기반 손 추적 기술이 새로운 대안으로 주목받고 있다 [4][5]. EMG는 근육에서 발생하는 전기 신호를 측정하여 손이나 팔의 움직임을 간접적으로 추정할 수 있으며, 외부 환경 요인에 영향을 덜 받는다는 장점을 가지고 있다. 기존 연구에서는 EMG를 활용하여 손의 행동을 분류(classification)하거나 [6][7], 손목 각도와 같은 관절 움직임을 회귀(regression) 방식으로 예측하는 시도가 이루어졌다 [8]. 그러나 센서 부착 위치, 채널 수, 착용 편의성 등의 실용성 측면에서 여전히 제한이 존재하며, 특히 세밀한 손가락이나 펜 움직임까지 정확히 추적하는 연구는 많지 않다.

본 연구에서는 8채널 Myo 장비를 이용하여 팔 근육에서 ㅓ—측정한 EMG 신호를 기반으로 펜의 X, Y 속도를 예측하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 DNN, CNN, LSTM, Transformer와 같은 다양한 딥러닝 모델 구조를 적용하여, 근전도 신호만으로도 정밀한 펜 움직임 예측이 가능한지를 평가하고자 한다. 나아가 본 연구는 카메라 기반 센서 없이도 복잡한 입력을 제어할 수 있는 가능성을 탐색함으로써, 인간-컴퓨터 상호작용(HCI) 분야에서의 실용적 응용 가능성을 확장하는데 기여하고자 한다.

2.연구 방법

실험에서는 정확한 펜의 좌표를 추적하기 위해 펜 태블릿(Wacom CTL-1400WL)을 사용하였으며, 133 Hz로 펜 끝의 X, Y 좌표를 기록하였다. X축과 Y축 속도는 다음과 같이 계산하였다.

$$V_x = \frac{x(t_0) - x(t_{-1})}{\Delta t}, \quad V_y = \frac{y(t_0) - y(t_{-1})}{\Delta t}$$

EMG 신호는 Myo 장비를 사용하여 300 Hz로 수집하였고, 0.1초 길이(30 샘플)의 윈도우를 입력으로 하여 동일한 시간의 순간 변화율인 Vx, Vy를 예측하도록 하였다.

1명의 실험자로부터 데이터를 취득하였으며 약 5분 분량의 학습 데이터와 1분 분량의 테스트 데이터로 구성하였으며, EMG를 입력으로 DNN, CNN, LSTM, Transformer 기본 구조 모델을 학습시켜 각 모델의 예측 성능을 비교하였다.

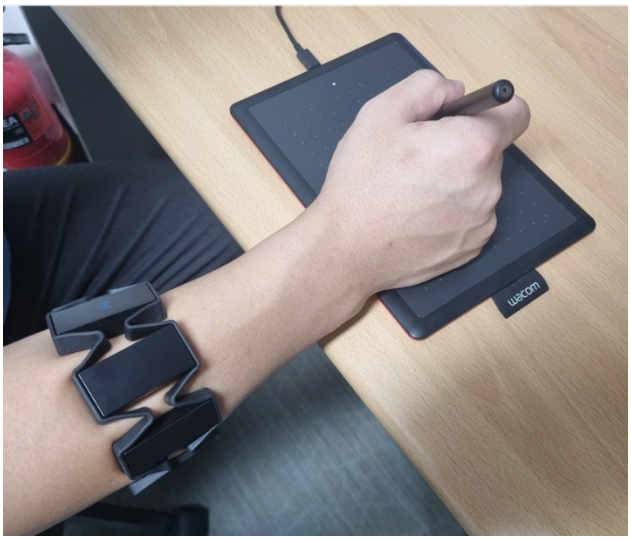


그림 1. 펜 태블릿 수집 장치와 Myo 장비 착용 모습

3. 연구 결과

본 연구에서는 DNN, CNN, LSTM, Transformer 총 4가지 모델을 대상으로 펜 X, Y 속도 예측 성능을 비교하였다. 테스트 데이터에 대한 평균 제곱 오차(MSE) 손실값은 표 1에 정리되어 있으며, 그 결과 CNN 모델이 가장 낮은 MSE를 기록하여, 본 연구에서 다루는 상대적으로 단순한 형태의 시계열 예측에 가장 적합함을 확인할 수 있었다.

Model	MSE Loss
DNN	2.0025
CNN(1D)	**1.1633**
LSTM	1.2171
Transformer	1.3144

표 1. 테스트 데이터 셋에 대한 MSE Loss 평균

그림 2는 LSTM 모델의 테스트 데이터 중 비교적 단순한 두 가지 형태의 펜 움직임 예측 결과를 시각화한 것이다.

가장 위쪽 그림은 실제 경로(파란색)와 모델이 예측한 경로(빨간색)를 비교한 것으로, 예측 경로가 실제 경로를 전반적으로 잘 따라가는 것을 확인할 수 있다.

그림 2의 아래쪽 두 그림은 X축과 Y축 속도(Vx, Vy)에 대한 실제 값(파란색)과 예측 값(빨간색)을 시간 축에 따라 나타낸 것이다. 이 그래프에서도 모델이 시간에 따른 속도 변화의 추세를 비교적 정확하게 재현함을 확인할 수 있다.

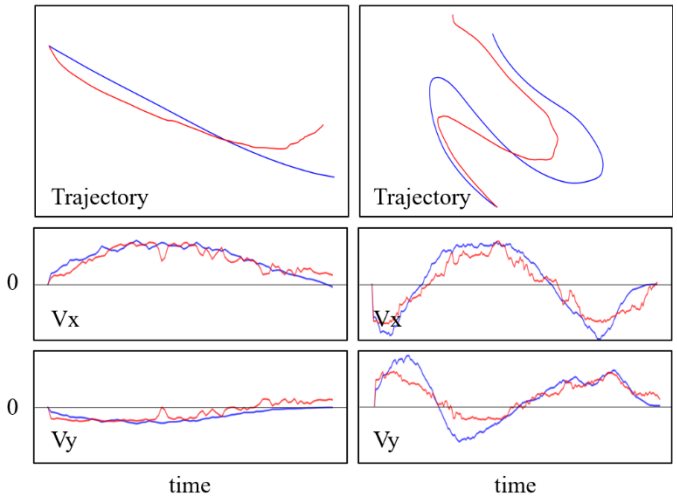


그림 2. 펜의 실제 경로(파란색)와 예측 경로(빨간색) 비교, 하단 그래프는 X축 및 Y축 속도(Vx, Vy)의 실제 값(파란색)과 예측 값(빨간색) 시각화

한편, 그림 3은 상대적으로 복잡한 형태의 펜 움직임 예측 결과를 보여준다. 시각적으로 일부 오차가 존재하지만, 전체 경로의 추세와 방향성은 실제 움직임과 유사하게 재현되었다. Vx와 Vy 그래프에서도 이러한 전반적인 경향이 확인되며, 모델이 단순한 형태뿐 만 아니라 일정 수준의 복잡한 움직임도 학습하여 예측할 수 있음을 보여준다.

이러한 결과를 통해, EMG 기반 신호만으로도 단순한 필기 움직임뿐 만 아니라, 복잡한 펜 동작까지도 예측할 수 있음을 확인할 수 있다.

4. Acknowledgements

이 연구는 2022년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(RS-2022-00154678)

이 연구는 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원을 받아 수행된 연구임 (No.RS-2023-00229800, 비대면 환경 사용자의 정량적 감정-감성 평가모델 개발 및 양방향 디지털 콘텐츠 적용 상용화)

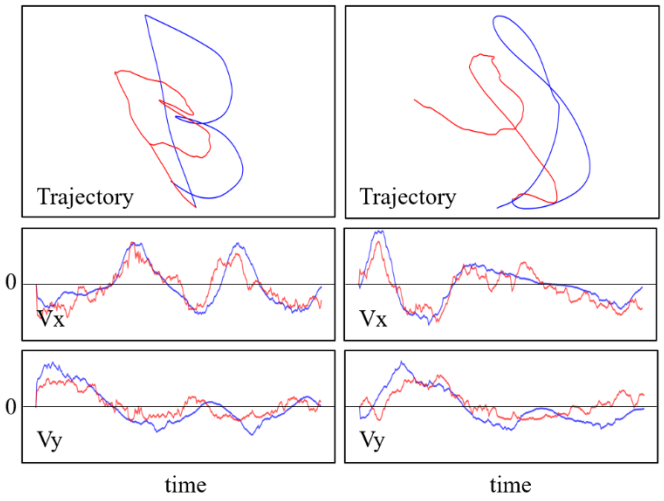


그림 3. 상대적으로 복잡한 경로 데이터에 대한 시각화

5.참고 문헌

[1] T. Morimoto, T. Kobayashi, H. Hirata, K. Otani, M. Sugimoto, M. Tsukamoto, T. Yoshihara, M. Ueno, and M. Mawatari, “Xr (extended reality: virtual reality, augmented reality, mixed reality) technology in spine medicine: status quo and quo vadis,” Journal of Clinical Medicine, vol. 11, no. 2, p. 470, 2022.

[2] D. Allcoat, T. Hatchard, F. Azmat, K. Stansfield, D. Watson, and A. von M¨uhlenen, “Education in the digital age: Learning experience in virtual and mixed realities,” Journal of Educational Computing Research,
vol. 59, no. 5, pp. 795–816, 2021.

[3] S. Riches, L. Azevedo, L. Bird, S. Pisani, and L. Valmaggia, “Virtual reality relaxation for the general population: a systematic review,” Social psychiatry and psychiatric epidemiology, vol. 56, pp. 1707–1727, 2021.

[4] S. Geetha, G. Aditya, C. Reddy, and G. Nischith, “Human interaction in virtual and mixed reality through hand tracking,” in 2024 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT). IEEE, 2024, pp. 1–6.

[5] C. Battisti, S. Messelodi, and F. Poiesi, “Seamless bare-hand interaction in mixed reality,” in 2018 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct). IEEE, 2018, pp. 198–203.

[6] Ovadia, D., Segal, A., & Rabin, N. (2024). Classification of hand and wrist movements via surface electromyogram using the random convolutional kernels transform. *Scientific Reports*, *14*(1), 4134.

[7] Prakash, K. S., & Kunju, N. (2025). An optimized electrode configuration for wrist wearable EMG-based hand gesture recognition using machine learning. Expert Systems with Applications, 274, 127040.

[8] Xiang, Y., Zhang, X., Zhang, W., Dou, Z., & Wang, T. (2025). Wrist Motion Regression Using EMG Attention Feature Fusion Algorithm. *IEEE Sensors Journal*.

Poster-250

ECG와 PPG 기반 인간행동인식의 멀티모달 융합 전략 비교 연구

고정환[1,2], 장선빈[1,2], 이성한[2], 정인철[1,2*]

한림대학교 정보과학대학 인공지능융합학과[1],

한림대학교 뇌혈관질환 선도연구센터[2]

A Comparative Study of Multimodal Fusion Strategies for Human Activity Recognition Using ECG and PPG Signals

Jeonghwan Koh[1,2], Sunbin Jang[1,2], Sunghan Lee[2], In cheol Jeong[1,2*]

Department of Artificial Intelligence Convergence, Hallym University, Korea[1]
Cardiovascular Disease Research Center, Hallym University, Korea[2]
*incheol.jeong@hallym.ac.kr

Abstract

This study compares two multimodal fusion strategies for human activity recognition (HAR) using electrocardiogram (ECG) and photoplethysmogram (PPG) signals collected simultaneously from 40 healthy adults. Two one-dimensional convolutional neural network (1-D CNN) models based on AlexNet were implemented: a feature-level fusion (*F-model*) that encodes ECG and PPG separately and a data-level fusion (*D-model*) that jointly learns both signals through early fusion. Under subject-independent five-fold cross-validation, the *D-model* achieved the highest performance with an accuracy of 0.925, an F1-score of 0.926, and an area under the receiver operating characteristic curve (AUROC) of 0.989. These findings demonstrate that early fusion effectively captures temporal and physiological dependencies between ECG and PPG, improving the generalization capability of wearable HAR systems.

1. 연구 배경

인간행동인식(human activity recognition, HAR)은 센서를 이용해 사람의 활동을 자동으로 판별하는 기술로, 의료 모니터링과 스마트 헬스케어 등 다양한 분야에 응용되고 있다. 최근에는 프라이버시 문제와 환경 의존성이 큰 영상 기반 접근 대신, 웨어러블 기기에 내장된 생체 신호 센서를 이용한 방법이 각광받고 있다 [1].

심전도(electrocardiogram, ECG)와 광용적맥파(photoplethysmogram, PPG)는 각각 심장의 전기적 활동과 말초 혈류 변화를 반영하는 대표적 생체 신호로, 자율신경계 변화나 운동 강도 등과 밀접한 관련을 가진다. 이러한 두 신호는 상보적인 생리학적 정보를 제공하기 때문에, 함께 활용할 경우 단일 신호 기반 HAR보다 높은 인식 정확도를 달성할 가능성이 있다.

선행 연구들에 따르면, 동일한 40명 코호트를 대상으로 한 단일모달 기반 연구에서도 ECG만을 사용한 경우 93.2 ± 2.86 %의 정확도 [3], PPG만을 사용한 경우 95.14 %의 정확도 [2]가 보고되었다. 이는 각 신호의 개별적 유효성을 보여주지만, 피험자별 생리적 차이로 인해 새로운 사용자에 대한 일반화 성능은 충분히 확보되지 못한다. 특히 기존 연구의 다수는 피험자 종속(subject-dependent) 조건에서 평가가 이루어져, 실제 환경에서 요구되는 피험자 독립(subject-independent) 성능을 객관적 검증이 어렵다는 한계가 있다 [4].

또한, ECG와 PPG를 함께 사용하는 멀티모달 융합 연구는 점차 증가하고 있으나, 특징 융합 시점(데이터 레벨 또는 특징 레벨)에 따른 성능 차이를 체계적으로 비교한 사례는 드물다. 데이터 레벨 융합은 두 신호를 동시에 입력받아 저수준의 시간적 상호작용을 학습하는 방식이며, 특징 레벨 융합은 각 신호에서 독립적으로 추출한 특징을 결합하는 방식이다. 그러나 어떤 접근이 실제 HAR 성능 향상에 더 효과적인지에 대한 근거는 아직 명확하지 않다.

이에 본 연구에서는 40명의 건강한 성인을 대상으로 ECG와 PPG 신호를 동시에 수집하고, 두 가지 대표적 융합 전략인 다중 브랜치(특징 레벨 융합) 모델과 다채널(데이터 레벨 융합) 모델을 피험자 독립, 5-fold 교차검증 조건에서 비교하였다. 본 연구의 목표는 두 신호의 결합 방식이 HAR의 정확도와 일반화 성능에 미치는 영향을 규명하고, 웨어러블 생체신호 기반 HAR 모델 설계에서 최적의 융합 구조를 제시하는 것이다.

2.연구 방법

2.1. 데이터셋

본 연구에서는 건강한 성인 40명(평균 연령 23.9세, 남성 20명)을 대상으로 ECG와 PPG 신호를 동시에 수집하였다. 모든 실험 절차는 한림대학교 생명윤리위원회의 심의 및 승인을 받았으며(승인번호: HIRB-2022-025), 참가자로부터 연구 목적과 절차에 대한 충분한 설명 후 서면 동의를 얻었다.

신호는 MP150 시스템(BIOPAC Systems, USA)을 사용하여 동기화하였으며, 무선 ECG 모듈(BN-RSPEC-T, 1.25 kHz)과 무선 PPG 모듈(BN-PPGED, 312.5 Hz)을 이용해 기록하였다. ECG 전극은 Lead I 구성(우측 쇄골하 양극, 좌측 쇄골하 음극, 좌측 늑골하 접지)으로 부착하고, PPG 센서는 검지에 장착하였다. 데이터 수집 과정과 신호 동기화 절차는 그림 1에 요약되어 있다.

참가자는 다음 다섯 가지 활동을 각각 한 세션씩 수행하였다. (1) Sleep – 누운 자세에서 최소한의 움직임으로 10 분

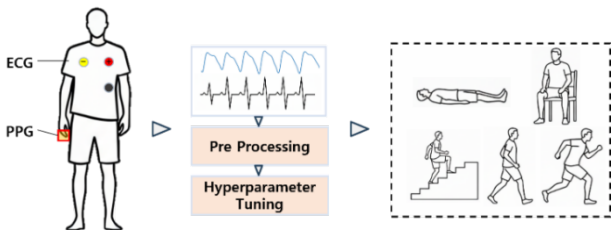


그림 1 데이터 셋 수집 프로세스

간 안정 유지, (2) Sit – 의자에 앉아 정적 과제를 5 분간 수행, (3) Stairs – 계단을 오르내리며 5 분간 이동, (4) Walk – 트레드밀에서 약 5–6 km/h 속도로 5 분간 보행, (5) Run – 트레드밀에서 약 8 km/h 속도로 5 분간 달리기.

모든 실험은 일정한 환경 조건(온도 22–24 °C, 일정한 조명)에서 진행되었으며, 피험자 간 변이를 최소화하기 위해 활동 수행 순서를 무작위로 배정하였다.

2.2. 모델

분류 모델은 AlexNet [5]구조를 1차원 신호에 맞게 변형한 합성곱 신경망(convolutional neural network, CNN)을 기본으로 하였다. 최적의 멀티모달 융합 전략을 비교하기 위해 두 가지 모델을 설계하였다.

1) 다중 브랜치 모델(Feature-level fusion, *F-model*): ECG와 PPG를 각각 독립된 CNN 브랜치로 인코딩한 뒤, 추출된 특징 벡터를 결합하여 분류층으로 전달한다.
2) 다채널 모델(Data-level fusion, *D-model*): ECG와 PPG를 (N, 2) 형태의 2채널 입력으로 단일 1-D CNN에 투입하여 종단간(end-to-end)으로 학습한다.

2.3. 전처리

모델 학습에 앞서 각 융합 전략의 특성에 따라 상이한 전처리 절차를 적용하였다. 모든 원시 ECG 및 PPG 신호는 0.5–40 Hz 대역통과 필터를 거쳐 고주파 노이즈와 기준선 변동을 제거하였다. 이후 각 모델에 대해 다음과 같이 전처리를 수행하였다.

1) *F-model*: ECG와 PPG를 각각 독립적으로 처리하였다. ECG 신호는 500 Hz로 리샘플링하고 60 초 길이의 세그먼트로 분할하였으며, PPG 신호는 64 Hz로 리샘플링하고 10 초 세그먼트로 분할하였다. ECG에는 평균과 표준편차를 이용한 Z-score 정규화를 적용하였다.
2) *D-Model*: 두 신호의 시간 정렬을 맞추기 위해 ECG를 PPG의 샘플링 속도(312.5 Hz)에 동일하게 리샘플링하였다. 신호 정규화는 분포 특성을 고려하여 ECG에는 Z-score 정규화, PPG에는 중앙값과 사분위 범위(inter-quartile range, IQR)을 이용한 robust normalization을 적용하였다. 이는 이상치에 덜 민감한 정규화 방법으로 데이터 x를 수식 (1)과 같이 변환한다.

$$x' = \frac{x - median(x)}{IQR(x)} \quad (1)$$

여기서 $median(x)$는 데이터집합 x의 중앙값, $IQR(x)$는 사분위 범위를 의미한다. 전처리된 모든 세그먼트는 이후 동일한 입력 형식으로 모델에 제공되었다.

2.4 데이터 분할 및 평가

모델의 일반화 성능은 피험자 독립조건을 유지하며 5-분할 교차검증으로 평가하였다. 각 fold는 8명씩의 피험자를 포함하며, 한 fold를 검증 세트로, 나머지 4 fold를 학습 세트로 사용하였다. 평가 지표로는 정확도(accuracy), F1-score, 그리고 ROC 곡선 하적분(area under the receiver operating characteristic curve, AUROC)을 산출하여 모델의 균형성과 분류 성능을 다각도로 검증하였다.

3. 연구 결과

두 가지 멀티모달 융합 전략(*F-model, D-model*)에 따른 HAR 분류 성능을 표 1에 정리하였다. 실험 결과, 두 신호를 데이터 수준에서 통합 입력하는 다채널(*D-model*) 방식이 전반적으로 우수한 성능을 보였다. 특히 AlexNet 기반 제안 모델은 Accuracy 0.925, F1-score 0.926, AUROC 0.989로 모든 지표에서 최고 성능을 기록하였다.

그림 2는 제안모델의 Fold 2 혼동행렬 예시로, 대부분 활동이 높은 정확도로 분류되었으나 stairs와 walk 활동 간에는 일부 혼동이 관찰되었는데, 이러한 경향은 다른 fold에서도 일관되게 확인되었다.

Model	Accuracy		F1-score		AUROC	
	F	D	F	D	F	D
GRU	0.824	0.874	0.821	0.874	0.966	0.972
CNN_BiGRU	0.753	0.913	0.745	0.913	0.950	0.990
CNN_LSTM	0.750	0.919	0.747	0.918	0.935	0.986
CNN_GRU	0.754	0.920	0.746	0.920	0.941	0.991
CNN_BiLSTM	0.779	0.908	0.775	0.908	0.942	0.987

F: 다중 브랜치 모델(Feature-level fusion), D: 다채널 모델(Data-level fusion)

표 1 모델 별 HAR 행동분류 성능

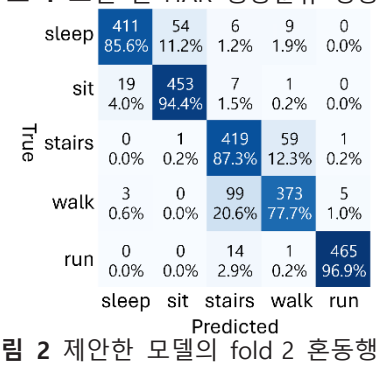


그림 2 제안한 모델의 fold 2 혼동행렬

4. 결론 및 향후 과제

본 연구에서는 ECG와 PPG 생체 신호를 활용한 HAR의 성능 향상을 위해, 두 가지 멀티모달 융합 전략(다중 브랜치, 다채널)을 피험자 독립조건에서 비교하였다. 실험 결과, 두 신호를 데이터 수준에서 통합 입력하는 다채널 모델이 특징 수준 융합 방식보다 우수한 성능을 보였으며, 특히 AlexNet 기반 제안 모델이 가장 높은 정확도를 달성하였다. 이는 신호 간 시간적 상호작용을 저수준 단계에서 통합적으로 학습하는 접근이 효과적임을 시사한다.

다만 최적 모델에서도 stairs와 walk 활동 간 일부 혼동이 관찰되어, 생리 신호만으로는 유사 활동의 완전한 구분에 한계가 있었다. 향후 연구에서는 가속도계 등 운동학적 센서를 추가한 이종 센서 융합과, 채널 중요도를 동적으로 조절하는 어텐션 메커니즘을 도입하여 모델의 해석력과 일반화 성능을 향상시킬 필요가 있다.

5. Acknowledgements

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NR070859)

6. 참고 문헌

[1] Dang, L. M., Min, K., Wang, H., Piran, M. J., Lee, C. H., & Moon, H. “Sensor-based and vision-based human activity recognition: A comprehensive survey.” *Pattern Recognition*, 108, 107561, 2020

[2] Ryu, S., Yun, S., Lee, S., & Jeong, I. C. “Exploring the possibility of photoplethysmography-based human activity recognition using convolutional neural networks.” *Sensors*, Vol.24, No.5, 1610, 2024.

[3] Lee, S., Lee, S., Yun, S., Ryu, S., & cheol Jeong, I. “ Real-World ECG-Based Human Activity Recognition: Optimal Window Size and Subject-Independent 1-D CNN Approach.” *IEEE Sensors Journal*, Vol.25, No.16, p.31754-31768, 2025

[4] Das, A., Sil, P., Singh, P. K., Bhateja, V., & Sarkar, R. “Mmhar-ensemnet: a multi-modal human activity recognition model.” *IEEE Sensors Journal*, Vol.21, No.10, p.11569-11576, 2020

[5] Krizhevsky, Alex and Sutskever, Ilya and Hinton, Geoffrey E, “ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks” *Advances in neural information processing systems*, VOL25, p.1097-1105, 2012

관성 측정 장치를 이용한 만성콩팥병 분류의 최적화: 입력 세그먼트 길이와 환자 단위 소프트 보팅의 딥러닝 분석

조윤재[1,3*], 김연준[2,3], 박웅[1,3], 이성한[3], 정인철[1,3†]

한림대학교 정보과학대학 인공지능융합학과[1]

한림대학교 정보과학대학 소프트웨어학과[2]

한림대학교 뇌혈관질환 선도연구센터[3]

Optimizing CKD Classification from IMU Signals: Segment Length and Patient-Level Soft Voting in a CNN Framework

Yunjae Cho[1,3*], Yeonjun Kim[2,3], Ung Park[1,3], Sunghan Lee[3], In cheol Jeong[1,3†]

[1]Department of Artificial Intelligence Convergence, Hallym University, Korea

[2]Department of Software Engineering, Hallym University, Korea

[3]Cardiovascular Disease Research Center, Hallym University, Korea

[†]incheol.jeong@hallym.ac.kr

Abstract

Our study investigates how input window length and patient-level probability-based soft voting affect classification of chronic kidney disease (CKD) from wrist and waist inertial measurement unit (IMU) motion signals. We analyzed data from 493 individuals (276 patients, 217 controls). Signals were segmented into 1–20 s windows with 50% overlap and used to train a one-dimensional convolutional neural network (CNN). Patient-level predicted probabilities were averaged for soft voting. The wrist model performed best at 1 s (AUROC = 0.709), and the waist model at 14 s (AUROC = 0.722). Soft voting improved performance across most window lengths. Jointly optimizing sensor placement, window length, and voting strategy enhances IMU-based CKD classification.

1. 연구 배경

만성콩팥병(chronic kidney disease, CKD)은 3개월 이상 지속되는 신장 구조/기능의 이상으로 규정되며, 추정 사구체여과율이 60 mL/min/1.73 m² 미만의 지속 또는 알부민뇨 등 손상 표지의 반복 확인에 의해 진단된다 [1]. 미국 질병통제예방센터 보고에 따르면 CKD는 성인의 약 14%(약 3,550만 명)에서 관찰되고, 고령층에서 유병률이 더 높다 [2]. 초기 CKD는 무증상 또는 피로, 무기력 등 비특이적 증상으로 인해 진단이 지연되기 쉬우며, 이러한 임상적 특성 때문에 정기적인 혈액·소변 검사에 의존하는 기존의 진단 체계만으로 일상 환경에서 조기 선별이 어렵다 [1].

최근에는 착용형 관성 측정 장치(inertial measurement unit, IMU)를 활용한 비침습적 생체 신호 분석이 대안으로 주목받고 있는데, 이는 보행, 동작 특성의 변화를 민감하게 반영한다 알려져 있다. 기존 연구에서 CKD 환자는 대조군에 비해 보행속도 저하, 보폭 감소, 회전 불안정 등 동작 패턴의 차이를 보인다는 결과가 보고되었으나 [3], 대부분은 영상 또는 임상 평가 중심이었고, IMU 신호만을 활용한 딥러닝 기반 분류 연구는 제한적이었다 [4].

한편, IMU 기반 시계열 분석에서는 입력 세그먼트의 길이와 분할 방식이 분류 성능에 영향을 미칠 수 있다. 세그먼트가 짧을수록 반응 속도는 향상되지만, 맥락 정보가 부족해 성능이 저하될 수 있으며, 반대로 지나치게 긴 세그먼트는 특징 중복과 계산비용을 증가시킨다. 또한, 개별 세그먼트 수준의 예측을 환자 단위로 통합하는 확률 기반 soft voting 기법은 신호 변동성과 과적합을 줄이는 데 유용할 수 있다.

본 연구는 이러한 관점을 바탕으로, IMU 기반 CKD 분류에서 입력 세그먼트 길이와 환자 단위 확률 기반 보팅의 영향을 정량적으로 비교하고, 센서 부착 위치에 따른 성능 차이를 평가하였다. 이를 통해 세그먼트 길이와 보팅 전략의 최적 조합을 제시하고, 착용형 센서 신호만으로 CKD를 조기에 분류할 수 있는 가능성을 실증적으로 검증하고자 한다.

2. 연구 방법

본 연구는 한림대학교 춘천성심병원 기관생명윤리위원회의 승인을 받았으며(승인번호 2022-06-009), 헬싱키 선언의 윤리 기준을 준수하였다. 모든 참여자는 연구 목적과 절차에 대해 충분한 설명을 듣고 서면 동의하였다. 총 493명(만성콩팥병 환자 276명, 대조군 217명)의 IMU 기반 동작 및 보행 데이터를 수집하였다. 분석 대상의 평균 연령은 52.90 ± 19.06세였으며, 남성 49.5%, 여성 50.5%로 구성되었다.

동작 과제는 Tinetti balance 과제 [6]를 기반으로 수행되었다. 피험자는 의자에 앉은 상태에서 기립한 후, 검사자가 흉골 부위를 세 차례 가볍게 밀어 균형 반응을 확인하고, 눈을 감은 채 정적 자세를 유지한 다음 제자리에서 360° 회전을 수행한 뒤 다시 착석하였다.

센서는 MPU-9250(TDK InvenSense, USA)을 사용하였으며, 왼쪽 손목과 허리에 각각 1대를 부착, 50 Hz의 샘플링 주파수로 연속 측정하였다. 가속도계의 측정 범위는 ±16 g, 회전의는 ±2000 °/s, 자력계는 ±4800 μT로 설정하였다. 자력계 신호는 보행 분석에 미치는 영향이 제한적이므로 분석에서 제외, 가속도계와 회전의의 6축 신호(X, Y, Z)를 사용하였다.

데이터 품질 검증 과정에서 통신 오류나 손상된 파일은 제외하였다. 신호는 0.5 Hz 하이패스 필터를 적용하고, 이후 z-score 정규화를 수행하였다. 최종적으로 손목 IMU 데이터는 325명, 허리 IMU 데이터는 251명이 분석에 포함되었다. 신호 세그먼트는 50 Hz 신호에서 1초부터 해당 과제의 허용 최대 길이까지 1초 간격으로 분할하였으며, 겹침(오버랩)은 50%로 고정하였다. Tinetti balance 과제의 최대 입력길이는 손목 20초, 허리 19초로 설정하였다.

데이터 누수를 방지하기 위해 참가자 단위 5-fold 교차검증을 수행하였으며, 각 fold 간의 학습 세트와 검증 세트는

상호 배타적으로 구성하였다. 분류 성능은 정확도(accuracy), 수신자조작특성 곡선하 면적(area under the receiver operating characteristic curve, AUROC), 특이도(specificity), 민감도(sensitivity)로 평가하였으며, 평가 단계에서 환자 단위 확률 기반 보팅(soft voting)을 적용하였다. 동일 조건 내에서 각 세그먼트의 양성 확률을 평균하여 환자 점수를 산출하고, 임계값 0.5를 기준으로 최종 판정을 수행하였다.

분류 모델은 4개의 은닉층으로 구성된 1차원 합성곱 신경망(convolutional neural network, CNN) 구조를 사용하였다.

3. 연구 결과

표 1과 그림 1은 Tinetti balance 과제의 손목 IMU에서 입력 세그먼트 길이와 확률 기반 보팅 (soft voting) 적용 여부에 따른 성능 변화의 5-fold 평균 결과이다. 보팅을 적용하지 않은 경우 AUROC은 1–16초 범위에서 0.61-0.63 수준으로 완만히 증가하였다. 보팅 적용시 15초 구간을 제외한 전 구간에서 성능이 향상되었으며, 1초 입력에서 AUROC 0.709로 가장 높은 성능을 기록하였다.

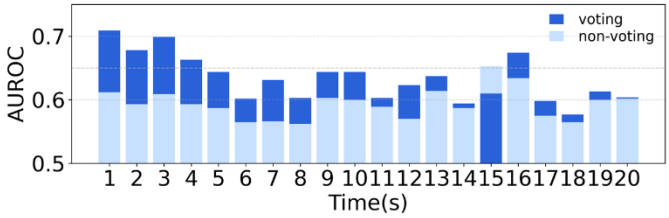


그림 1 입력 길이와 투표 유무에 따른 성능비교

V	Metric	1 s	3 s	5 s	7 s	9 s	11 s	13 s	15s
T	Acc	**0.671**	0.658	0.649	0.646	0.625	0.609	0.594	0.618
	AUROC	**0.709**	0.699	0.644	0.631	0.644	0.603	0.637	0.610
	Spec	0.900	0.881	0.764	0.919	0.826	0.954	0.829	**0.964**
	Sens	0.312	0.314	**0.450**	0.208	0.318	0.062	0.235	0.070
F	Acc	**0.605**	0.594	0.573	0.517	0.576	0.566	0.564	0.568
	AUROC	0.612	0.609	0.587	0.566	0.603	0.589	0.614	**0.653**
	Spec	0.730	0.732	0.696	0.824	0.751	**0.915**	0.819	0.888
	Sens	**0.442**	0.419	0.417	0.256	0.365	0.147	0.257	0.193

V: 투표 적용여부 T: voting 적용, F: 투표 적용 안 함, ACC: accuracy, AUROC: area under the receiver operating characteristic curve, Spec: specificity, Sens: Sensitivity

표 1 입력 길이와 투표 유무에 따른 성능비교

표 2와 그림 2는 동일 과제의 허리 IMU 결과를 제시한다. 보팅 미적용 시 AUROC은 14초에서 0.666으로 가장 높았고, 보팅 적용 후에는 14초에서 0.722로 추가 향상이 관찰되었다. 전반적으로 긴 세그먼트에서 성능이 우세하였으며, 이는 허리 신호가 신체 중심부의 패턴을 반영하여 CKD 관련 동작 변화를 보다 안정적으로 포착했기 때문으로 해석된다.

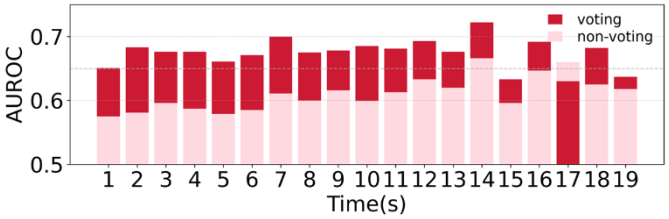


그림 2 입력 길이와 투표 유무에 따른 성능비교

두 센서 모두 1개의 구간을 제외하고 확률 기반 보팅 적용 시 AUROC이 상승하였으나, 허리 센서가 전반적으로 손목보다 높은 성능을 보였다. 결과적으로 허리 센서와 적절한 세그먼트 길이 (약 14초) 조합이 CKD 분류에 가장 효율적인 설정으로 확인되었으며, 세그먼트 길이 최적화 및 보팅 전략 동시 적용이 IMU 기반 딥러닝 분류 성능을 향상시키는 효과적 요인일 수 있다.

V	Metric	2 s	4 s	6 s	8 s	10 s	12 s	14 s	16 s
T	Acc	0.608	0.624	0.632	0.612	0.580	0.604	0.640	**0.644**
	AUROC	0.683	0.676	0.671	0.675	0.685	0.693	**0.722**	0.692
	Spec	0.588	0.792	0.893	0.727	0.768	**0.919**	0.584	0.690
	Sens	0.615	0.390	0.238	0.422	0.262	0.124	**0.735**	0.543
F	Acc	0.551	0.579	0.585	0.573	0.555	0.561	**0.606**	0.600
	AUROC	0.581	0.587	0.585	0.600	0.599	0.633	**0.666**	0.647
	Spec	0.517	0.742	0.811	0.696	0.767	**0.913**	0.532	0.648
	Sens	0.573	0.388	0.309	0.418	0.284	0.154	**0.696**	0.540

표 2 입력 길이와 투표 유무에 따른 성능비교

4. 논의

IMU 신호에서 입력 세그먼트 길이와 확률 기반 소프트 보팅이 CKD 분류 성능에 미치는 영향을 분석한 결과, 손목 센서는 1초, 허리 센서는 14초 입력에서 최고 AUROC을 보여 신체 부위별로 최적 세그먼트 길이가 상이함을 확인했다. 이는 손목이 짧은 구간의 균형 및 반응 특징을, 허리가 장기적 주기 패턴을 주로 반영하기 때문으로 추측된다. 확률 기반 보팅은 대부분의 입력 길이에서 성능을 향상시켜 세그먼트 단위 예측의 변동성을 환자 단위로 보정하는 효과를 보였다. 전반적으로 허리 센서가 손목보다 우수한 성능을 보였으며, 이는 CKD 환자의 균형 변화가 신체 중심부 움직임에 더 뚜렷이 반영된 결과로 볼 수 있다. 이러한 결과는 착용형 센서 기반 CKD 조기 탐지를 위한 센서 위치 및 데이터 분할 전략의 실용적 근거를 제시한다. 다만 단일 동작 과제(Tinetti balance)와 제한된 모델 구조에 기초한 결과이므로, 추후 다양한 과제, 센서 환경에서의 검증과 설명가능한 인공지능을 활용한 모델 해석이 추가로 필요하다. 향후에는 다중 센서 융합과 장기간 생활 신호 분석을 통해 CKD 환자의 조기 검출 및 지속적 모니터링으로 연구를 확장할 수 있다.

5. 결론

본 연구는 착용형 IMU 신호를 이용하여 CKD환자를 검출하는 딥러닝 기반 접근을 제시하였다. 입력 세그먼트 길이, 센서 부착 위치, 확률 기반 보팅이 성능에 유의한 영향을 미쳤으며, 특히 허리 센서와 보팅 적용 시 가장 높은 분류 정확도를 보였다. 이러한 결과는 IMU 기반 신체 동작 신호가 CKD의 생리적 변화를 반영할 수 있음을 시사하며, 비침습적 만성질환 조기 탐지의 가능성을 확인한 데에 의의가 있다.

6. Acknowledgements

이 성과는 정부 (과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NR070859)

7. 참고 문헌

[1] A. Levin, et al. "Executive summary of the KDIGO 2024 Clinical Practice Guideline for the Evaluation and Management of Chronic Kidney Disease: known knowns and known unknowns." *Kidney International*, Vol 105, No. 4, p.684-701, 2024

[2] Centers for Disease Control and Prevention. "Chronic Kidney Disease in the United States, 2023." Atlanta, GA, USA: U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, 2023

[3] D. D. Zemp, et al. "Gait characteristics of CKD patients: a systematic review." *BMC Nephrology*, Vol 20, No. 1, p.83, 2019

[4] D. D. Zemp, et al. "Gait disorders in CKD patients: muscle wasting or cognitive impairment? A cross-sectional pilot study to investigate gait signatures in Stage 1–5 CKD patients." *BMC Nephrology*, Vol 23, No. 1, p.72, 2022

[5] S. D. Yücel, et al. "Reliability and validity of the Performance-Oriented Mobility Assessment." *European Review of Aging and Physical Activity*, Vol 9, p.149-159, 2012

Poster-252

프롬프트 분리 기반 멀티모달 내시경 영상의 치료적 절제 가능성 분류

배현민[1], 한중훈[1], 김수영[3], 양세정[1,2*]

연세대학교 원주의과대학 정밀의학과[1], 연세대학교 원주의과대학 의료정보통계학과[2], 연세대학교 원주의과대학 소화기내과[3]

Multimodal Classification of Therapeutic Resectability in Endoscopic Images Using Prompt Separation

Hyunmin Pae[1], Junghun Han[1], Suyoung Kim[3], Sejung Yang[1,2*]

Department of Precision Medicine, Yonsei University Wonju College of Medicine, Wonju, Republic of Korea[1]

Department of Medical Informatics and Biostatistics, Yonsei University Wonju College of Medicine, Korea[2]

Divison of Gastroenterology, Department of Internal Medicine, Yonsei University Wonju College of Medicine, Wonju, Republic of Korea[3]

hmbae0405@gmail.com, syang@yonsei.ac.kr*

Abstract

Endoscopic imaging enables direct visualization of gastrointestinal lesions and plays a key role in determining therapeutic resectability. However, variations in observation angle, illumination, and mucosal texture make consistent classification challenging. In this study, we developed a Vision Transformer–based deep learning model to classify therapeutic resectability from endoscopic images by incorporating lesion-specific attributes. A total of 413 patients from four medical institutions were included, and images were divided into training, validation, and test sets with a 7:1.5:1.5 ratio. Separate Vision Transformer classifiers were trained for lesion morphology (8 classes), anatomical location (7 classes), and invasion depth (2 classes), using a combination of cross-entropy and Kullback–Leibler divergence losses to handle ambiguous class boundaries. The probability outputs of the three models were averaged to form an ensemble prediction. The proposed model achieved superior performance (Accuracy: 85.86%, Precision: 96.00%, Recall: 80.00%, F1-score: 87.27%, AUC-ROC: 87.52) compared to the baseline Vision Transformer. These results indicate that KL-regularized multi-attribute learning improves model stability and interpretability, providing a more reliable framework for computer-aided assessment of therapeutic resectability in endoscopic imaging.

1. 연구 배경

내시경 검사는 위장관 병변을 직접 관찰할 수 있는 비침습적 영상기술로, 조기 병변의 발견과 치료 전략 수립에 핵심적인 역할을 한다. 특히 고해상도 내시경 영상은 병변의 위치·형태·침윤 깊이와 같은 미세 단서를 담고 있어, 영상 자체에 풍부한 진단 정보를 내포한다[1]. 그럼에도 실제 판독은 관찰 각도, 조명 편차, 점막 배경의 이질성, 경계의 모호함 등으로 인해 높은 전문성에 의존하며 자동 분류의 일관성 확보가 쉽지 않다[2,3].

본 연구는 이러한 한계를 보완하기 위해 사전 학습된 Vision Transformer를 활용하여 내시경 영상으로부터 치료적 절제 가능 여부를 분류하는 방법을 제안한다. 종양의 형태, 위치, 침윤 깊이와 같은 임상적 단서를 각각 독립적인 Vision Transformer 분류기로 학습시키고, 클래스 간 경계가 모호한 특성을 반영하기 위해 교차 엔트로피 손실과 함께 KL 다이버전스 손실을 병행하였다. 이를 통해 유사한 형태나 인접 부위 간의 확률 분포를 부드럽게 학습하도록 유도함으로써, 임상적으로 연속적인 병변 특성을 반영할 수 있도록 하였다[4].

각 속성별 모델은 종양의 형태(8개 클래스), 위치(7개 클래스), 침윤 깊이(2개 클래스)에 대해 개별적으로 학습되었으며, 세 모델의 출력을 확률 단위로 평균하여 최종 치료적 절제 가능성을 예측하였다. 이러한 앙상블 접근은 단일 모델보다 안정적인 예측을 가능하게 하며, 다양한 병변 특성으로부터 얻은 정보를 통합하여 내시경 영상 기반 치료 결정의 신뢰도를 높이는 데 기여한다.

2.연구 방법

2-1) 데이터셋

본 연구에서는 실제 임상 환경에서 수집된 내시경 영상 데이터를 기반으로, 종양의 존재 여부를 분류하는 딥러닝 모델을 학습하였다. 데이터는 국내 4개 의료기관으로부터 제공된 총 413명의 환자 정보를 바탕으로 구성되었으며, 각 기관의 환자 수는 다음과 같다: 원주 세브란스 병원 60명, 한림대학교 병원 229명, 조선대학교 병원 94명, 삼성서울병원 30명

수집된 환자 데이터를 기반으로 전체 영상을 7:1.5:1.5의 비율로 나누어 훈련, 검증, 테스트 세트를 구성하였으며, 각 세트는 서로 다른 환자들의 영상으로 구성하였다. 또한, 네 개의 병원에서 수집된 데이터가 각각의 세트에 고르게 분포되도록 하여 특정 기관의 데이터에 편향되지 않도록 설계하였다.

각 영상은 전문가의 판독을 기반으로 클래스 라벨을 부여하였으며, 본 연구에서는 이 데이터를 기반으로 종양의 유무를 분류하는 이진 분류 모델을 학습하였다.

2-2) 치료적 절제 여부 분류 모델

본 연구는 내시경 영상에서 치료적 절제 가능 여부를 분류하기 위해 사전학습된 Vision Transformer 구조를 기반으로 선형 분류기를 결합한 모델을 구성하였다[5]. Vision Transformer는 영상 내 시각적 특징을 효과적으로 추출할 수 있는 신경망으로, 본 연구에서는 이를 동결된 이미지 인코더로 사용하였다.

데이터셋은 엑셀 파일의 환자번호, 프롬프트 문장, 치료적 절제 여부 항목을 기준으로 구성하였다. 환자번호는 이미지 파일명과 일치시켜 라벨을 부여하였으며, 치료적 절제(1)과 비치료(2)는 각각 0과 1로 변환하였다. 프롬프트에는 종양의 위치, 모양, 침윤 깊이에 대한 정보가 포함되어 있다. 종양의 위치는 해부학적 구역을 기준으로 cecum, ascending colon, hepatic flexure, transverse colon, descending colon, sigmoid colon, rectum, anus의 여덟 부위로 구분하였다. 종양의 모양은 내시경 관찰 시 형태적 특성을 기준으로 Ip, Isp, Is, IIa, IIb, IIc, LST-G, LST-NG의 여덟 가지 유형으로 분류하였다. 침윤 깊이는 병리학적 침윤 정도에 따라 lamina propria, submucosa, muscularis propria, pericolorectal tissue의 네 단계로 정의하였다. 전체 데이터는 학습, 검증, 테스트 세 집합으로 분할하였으며, 이미지 전처리 과정에서는 Vision Transformer에서 제공하는 기본 변환만을 적용하였다.

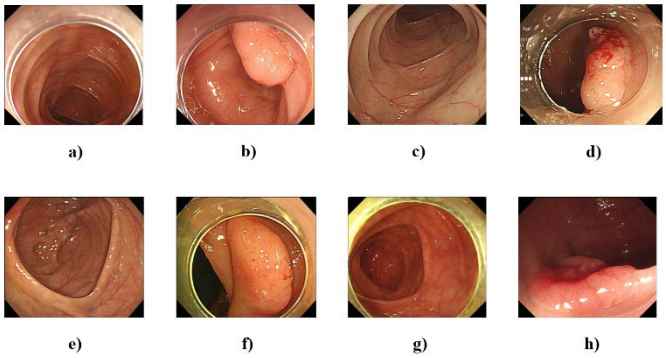


그림 1. 각 병원별 데이터

그림 1은 본 연구에서 사용된 데이터셋의 대표적인 내시경 영상을 보여준다. (a, c, e, g)는 정상 대장 점막을, (b, d, f, h)는 병리학적으로 확인된 비정상 병변 영상을 나타낸다. 정상 영상은 점막의 연속성과 혈관 구조가 명확히 유지된 반면, 비정상 영상은 점막 표면의 불규칙성, 미세 혈관 확장, 또는 출혈성 변화를 보인다. 특히 (b)는 점막층 내에 국한된 점막내선암을, (d, f, h)는 분화도가 좋은 선암을 나타낸다. 영상 (a, b)는 연세대학교 원주세브란스기독병원, (c, d)는 조선대학교병원, (e, f)는 한림대학교 성심병원, (g, h)는 삼성서울병원에서 각각 촬영된 영상이다.

학습 과정에서는 Vision Transformer의 모든 파라미터를 동결하고 선형 분류기만 AdamW 옵티마이저로 업데이트하였다[6]. 학습률은 0.0001, 배치 크기는 32로 설정하였다. 손실 함수는 교차 엔트로피 손실과 KL 다이버전스 손실을 함께 사용하였다. 교차 엔트로피는 실제 라벨에 대한 분류 정확도를 높이기 위해 사용되었고, KL 다이버전스는 종양의 위치와 모양처럼 클래스 간 경계가 모호한 다중 클래스 정보의 확률 분포를 부드럽게 학습하도록 유도하기 위해 적용하였다. KL 손실의 가중치는 5로 설정하여 모델이 유사한 형태나 인접 부위를 가진 클래스 간 관계를 완화된 형태로 학습하도록 하였다. 이는 단일 교차 엔트로피 손실만 사용할 때 발생할 수 있는 과도한 결정 경계를 줄이고, 임상적으로 유사한 클래스 간의 분류 안정성을 높이기 위한 목적이다.

또한, 본 연구에서는 치료적 절제 여부 분류의 성능을 향상시키기 위해 종양의 모양, 위치, 침윤 깊이 세 가지 보조 속성을 활용하였다. 각 속성별로 Vision Transformer 기반 분류기를 독립적으로 학습하였으며, 이때 클래스 간 경계가 모호한 특성을 반영하기 위해 교차 엔트로피 손실과 함께 KL 다이버전스 손실을 병행하여 사용하였다. 종양 모양(8개 클래스), 종양 위치(7개 클래스), 침윤 깊이(2개 클래스)에 대해 각각 학습된 세 모델의 출력을 확률 단위로 평균하여 최종 앙상블 결과를 산출하였다. 이러한 앙상블 방식은 서로 다른 임상적 속성에서 학습된 표현을 통합함으로써 치료적 절제 가능성에 대한 예측의 안정성과 신뢰도를 높이는 데 기여하였다.

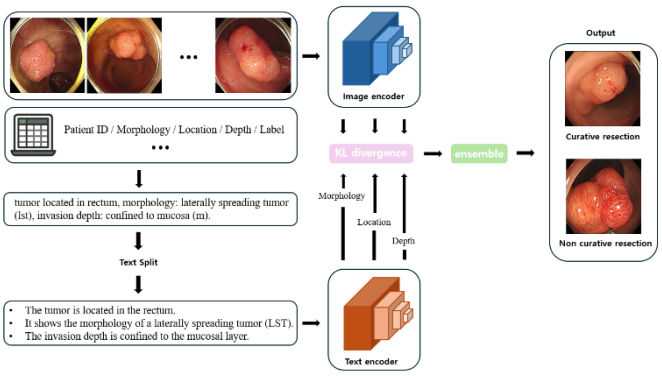


그림 2. 모델의 구조도

그림 2는 본 연구의 전체 파이프라인을 보여준다. 데이터 로딩과 프롬프트 전처리, 동결된 Vision Transformer 인코더를 통한 특징 추출, 속성별 분류기 학습과 KL 다이버전스 기반 정규화, 세 모델의 확률 평균을 통한 앙상블, 검증 기반 모델 선택 및 테스트 평가, 시각화 결과 저장의 순서로 구성되어 있다.

3. 연구 결과 및 고찰

본 연구에서는 단일 Vision Transformer 모델과 제안한 다중 속성 학습 기반 모델의 성능을 비교하여, 종양의 형태·위치·침윤 깊이 정보를 활용한 학습이 내시경 영상 분류 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 표 1은 동일한 테스트 데이터셋에서 두 모델의 정확도, 정밀도, 재현율, 그리고 F1-점수를 비교한 결과를 제시한다.

테스트 결과, 기본 Vision Transformer 모델의 정확도는 60.61%, 정밀도는 60.61%, 재현율은 100.00%, F1-점수는 75.47%, AUC-ROC는 46.92%로 나타났다. 반면, 제안한 모델은 정확도 85.86%, 정밀도 96.00%, 재현율 80.00%, F1-점수 87.27%, AUC-ROC는 87.52%를 기록하였다. 전체적으로 제안한 모델이 모든 지표에서 기본 모델보다 우수한 성능을 보였으며, 특히 재현율과 F1-점수에서의 향상폭이 뚜렷했다. 이는 제안한 방법이 단일 영상 학습에 비해 종양의 형태, 위치, 침윤 깊이와 같은 세부 임상 단서를 동시에 반영하여, 영상 내 병변 관련 특징을 보다 정교하게 학습했음을 의미한다.

	Accuracy	precision	Recall	F1-score	AUC-ROC
Vision Transformer	60.61	60.61	100.00	75.47	46.92
Our model	85.86	96.00	80.00	87.27	87.52

표 1. 모델의 치료적 절제 여부 탐지 성능 비교

내시경 영상의 경우 병변이 미세하거나 배경 조직과 시각적으로 유사해 탐지가 어려운 경우가 많은데, 본 연구에서 적용한 KL 다이버전스 기반 학습은 클래스 간 확률 분포를 부드럽게 조정하여 모델이 경계가 모호한

병변을 보다 안정적으로 인식할 수 있도록 돕는다.

이러한 개선은 단순한 수치 향상에 그치지 않고, 실제 임상적 의사결정에서의 활용 가능성 측면에서도 의미가 있다. 특히 재현율의 향상은 진단 과정에서 병변을 놓칠 위험을 낮추는 방향으로 작용할 수 있으며, 이는 내시경 기반 질환 탐지 모델의 임상적 신뢰도 향상에 기여할 수 있다. 따라서 본 연구의 결과는 종양의 형태, 위치, 침윤 깊이를 독립적으로 학습한 후 앙상블을 통해 통합하는 접근이 단일 모델보다 내시경 영상의 병변 정보를 보다 효과적으로 반영할 수 있음을 보여주며, 향후 의료 영상 분야에서 임상 정보를 고려한 멀티모달 학습 설계의 가능성을 제시한다.

4. Acknowledgements

본 연구는 과학기술정보통신부 정보통신진흥기금을 지원받아 작성한 것으로, 과학기술정보통신부의 공식의견과 다를 수 있습니다.

이 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00343323).

This research received funding from the Bio & Medical Technology Development Program of the National Research Foundation (NRF), supported by the Korean government (MSIT) (Grant No. RS-2024-00440802).

5.참고 문헌

[1] Nagy, M. R. (2023). Thoracic endoscopic surgery: advantages and limitations. *Egyptian Journal of Neurosurgery*, *38*(1), 24.

[2]Byrne, M. F., Chapados, N., Soudan, F., Oertel, C., Pérez, M. L., Kelly, R., ... & Rex, D. K. (2019). Real-time differentiation of adenomatous and hyperplastic diminutive colorectal polyps during analysis of unaltered videos of standard colonoscopy using a deep learning model. *Gut*, *68*(1), 94-100.

[3] Tajbakhsh, N., Gurudu, S. R., & Liang, J. (2015). Automated polyp detection in colonoscopy videos using shape and context information. *IEEE transactions on medical imaging*, *35*(2), 630-644.

[4] Kullback, S., & Leibler, R. A. (1951). On information and sufficiency. *The annals of mathematical statistics*, *22*(1), 79-86.

[5] Dosovitskiy, A. (2020). An image is worth 16x16 words: Transformers for image recognition at scale. *arXiv preprint arXiv:2010.11929*.

[6] Kingma, D. P. (2014). Adam: A method for stochastic optimization. *arXiv preprint arXiv:1412.6980*.

Poster-253

1차원 합성곱신경망과 DeepLiftShap를 이용한 음성 기반 뇌졸중 분류 및 해석 가능성 평가

이서영[1,2], 이성한[2], 정인철[1,2*]

한림대학교 정보과학대학 인공지능융합학과[1],

한림대학교 뇌혈관질환 선도연구센터[2]

Speech-Based Stroke Classification and Interpretability Assessment Using 1-D Convolutional Neural Networks and DeepLiftShap

Seoyeong Lee[1,2], Sunghan Lee[2], In cheol Jeong[1,2*]

Department of Artificial Intelligence Convergence, Hallym University, Korea[1]

Cardiovascular Disease Research Center, Hallym University, Korea[2]

*incheol.jeong@hallym.ac.kr

Abstract

This study presents a 1-D convolutional neural network (CNN) model for classifying stroke patients using speech signals and interpreting its decision process through explainable artificial intelligence (XAI). The model was trained on dysarthric speech data from AI-Hub and normal speech collected independently, after preprocessing with silence removal, length normalization, and noise reduction. 5-fold cross-validation showed strong performance, with an average F1-score of 98.1%, AUC of 98.3%, and sensitivity of 97.6%. XAI visualization using DeepLiftShap revealed that the model focused on acoustic transitions such as consonant bursts and vowel shifts, reflecting articulatory instability in stroke speech. These results demonstrate the potential of an interpretable, non-invasive speech-based approach for supporting early stroke screening.

1. 연구 배경

뇌졸중은 갑작스러운 혈류 차단으로 인해 신경 기능이 손상되는 주요 뇌혈관으로, 생존자의 상당수가 언어·운동 기능의 후유증을 겪는다. 특히 구음 장애는 뇌졸중을 처음 경험하는 환자의 25-42 %에서 발생하는 대표적인 후유즉으로 보고된다 [1].

뇌졸중의 확진에는 자기공명영상이나 컴퓨터단층촬영 등 고가의 영상 장비가 주로 사용되지만, 이들 검사는 비용과 접근성의 한계로 질환 조기 선별에 제약이 있다. 이에 따라 비침습적이며 저비용으로 획득 가능한 생체신호를 활용한 상태 판별 기술의 필요성이 대두되고 있다.

최근 음성 신호는 신경계 손상의 병리적 변화를 반영할 수 있는 지표로 주목받고 있다 [2, 3]. 선행연구에서는 신경퇴행성 질환과 관련된 말장애에서는 조음 명료도 저하, 비음화 증가 등의 발화 특성이 보고되었으나 [4], 이러한 특징이 뇌졸중 환자의 음성 파형에서 어떻게 나타나며 뇌졸중 환자의 병태 구분에 활용될 수 있는지에 대한 체계적 분석은 부족한 실정이다.

최근 인공지능 기술의 발전으로 음성의 복잡한 비선형 특성을 자동 학습하려는 시도가 활발히 이루어지고 있으며, 대표적으로 합성곱신경망(convolutional neural network, CNN), Transformer 기반 구조가 파킨슨병, 청각장애 등 다양한 신경, 언어 질환을 분류에 적용되어왔다. 예를 들어 멜 주파수 켑스트럼 계수를 입력으로 정상과 병리 음성을 구분하거나 [2], 설명 가능한 인공지능(explainable artificial intelligence, XAI)을 적용해 모델의 의사결정 근거를 시각화하는 시도가 있었다 [3]. 그러나 뇌졸중 환자의 음성을 대상으로 XAI를 적용하여 모델의 의사결정 근거를 파형 수준에서 해석한 연구는 거의 보고되지 않았다.

이에 본 연구에서는 음성 신호를 이용한 기반 뇌졸중 분류를 위해 1차원 CNN 모델을 설계하고, XAI 기법을 적용하여 모델의 의사결정 구간을 시각적으로 분석함으로써 뇌졸중 환자 발화의 음향적 특성을 확인하고, 모델의 판별 근거를 해석하고자 하였다.

2. 연구 방법

본 연구의 전체 절차는 그림 1에 제시되었다. 데이터는 AI-Hub에서 제공하는 '구음장애인 명령어 음성 데이터셋'과 자체 수집한 정상군 음성을 사용하였다. 환자군은 뇌졸중 후 구음 장애 환자 250명(여성 135명)을 대상으로 수집된 명령어 음성 데이터로, 연령 분포는 10–20세 34.8%, 30–40세 33.5%, 50–60세 21.4%, 70세 이상 10.3%였다. 각 참가자는 752개의 명령어 문장을 1-8회 반복 발화하였다. 모든 녹음은 문장 단위로 분할되어 통제된 환경에서 수집되었다. 정상군은 평균 연령 22.0세의 건강한 성인 50명(여성 25명)으로 구성되었으며, 환자군과 동일한 명령어 문장을 발화하였다. 정상군 데이터의 수집 절차와 세부 지침은 선행 연구 [5]에 상세히 기술되었다. 본 연구는 한림대학교 생명윤리위원회 승인(HIRB2024-003)을 받아 수행되었으며, 모든 참여자는 연구 참여에 충분한 설명을 듣고 서면 동의하였다.

모든 음성은 16kHz로 리샘플링되었고, –60dB 이하의 무음 구간은 제거되었다. 잡음 제거를 위해 0.5초 미만의 구간을 배경 잡음 샘플로 추출하여 spectral gating 방식으로 노이즈 제거를 수행하였다. 또한 입력 길이의 일관성을 위해 2초 미만 또는 4초 초과 음성은 제외하였다. 모든 신호는 참가자 단위로 정규화(–1~1 범위)하였으며, 환자군 데이터가 정

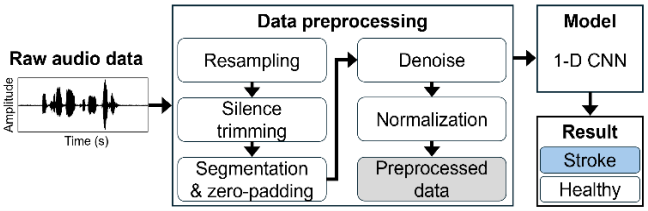


그림 1. 음성 기반 뇌졸중 선별의 전체 파이프라인

	Fold 1	Fold 2	Fold 3	Fold 4	Fold 5	평균
F1-score	0.9777	0.9826	0.9676	0.9862	**0.9957**	0.9819
Recall	0.9621	0.9848	0.9591	**0.9918**	0.9839	0.9763
AUC	0.9838	0.9919	0.9833	**0.9962**	0.9596	0.9830
특이도	**0.9771**	0.9068	0.9052	0.9263	0.9303	0.9291

표 1. 5-fold 교차검증별 모델 평가 결과

상군보다 많아 발생하는 불균형을 완화하기 위해, 정상군과 동일하게 각 환자당 한 개의 발화만을 사용하였다. 전처리 후 최종 206,324개 샘플(뇌졸중 168,398개, 정상 37,926개)을 확보하였다.

분류에는 1차원 CNN 기반 모델을 구현하였다. depthwise separable convolution 기반으로 설계되어, 시간축의 지역적 패턴을 효율적으로 학습하면서도 연산 복잡도를 최소화하였다. 모델은 5-fold 교차검증으로 학습되었으며, 참가자 단위로 데이터가 중복되지 않도록 분할하였다. 또한, 데이터 불균형을 보정하기 위해 클래스 가중치 기반 손실 보정을 적용하였다.

모델의 분류 성능은 F1-score, Recall, AUC, 특이도를 이용해 평가하였다. 또한 모델의 의사결정 근거의 분석은 DeepLiftShap 기반 분석을 통해 파형 구간별 중요도를 시각화 하였다.

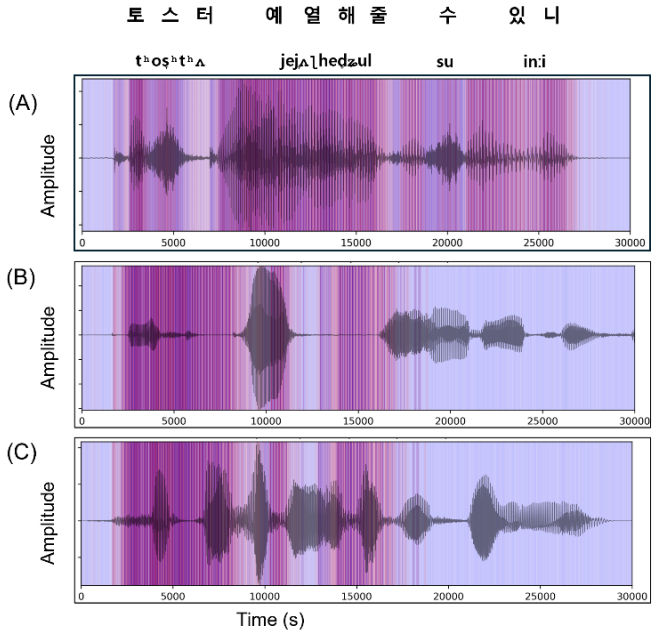


그림 2. XAI 기법을 사용한 정상과 뇌졸중 환자의 음성 파형, (A): 정상군 (B): 뇌졸중 환자군 1, (C): 뇌졸중 환자군 2

3. 연구 결과

표 1은 5-fold 교차검증을 통해 얻은 모델의 성능 지표를 나타낸다. 제안한 모델은 평균 F1-score 98.1%, AUC 98.3%, Recall 97.6%의 우수한 분류 성능을 보였다. 모든 fold에서 F1-score와 AUC가 0.95 이상으로 유지되었으며, fold 5에서 가장 높은 F1-score를 기록하였다.

그림 2는 DeepLiftShap 기법을 이용해 정상군과 뇌졸중 환자군의 음성 파형을 시각화한 결과이다. 모델은 자음 파열음과 모음 전이 구간의 에너지 변화를 주요 판별 단서로 활용한 것으로 나타났다. 정상 화자의 음성(그림 2A)은 파열음(tʰ, dʑ) 이후 모음으로의 전이가 매끄럽고, 기여도 색상이 발화 구조에 따라 규칙적으로 분포하였다. 반면, 뇌졸중 환자 음성(그림 2B, 2C)에서는 동일한 구간에서 불규칙한 진폭 변동과 비대칭적인 기여도 집중이 관찰되었다. 특히 '토(tʰo)'나 '터(tʰʌ)' 구간처럼 파열음 직후의 waveform에서 급격한 진폭 변동과 넓은 고기여도 영역이 나타났다. 또한 '예(j e)' '열(jʌɭ)' 구간과 같은 모음 전이 부분에서도 모델의 주목이 확산되는 경향을 보였다.

4. 결론 및 향후 과제

본 연구에서는 음성 기반 뇌졸중 분류를 위해 1-D CNN 모델을 구축하고, XAI 기법을 적용하여 모델의 의사결정 근거를 시각적으로 분석하였다. 5-fold 교차검증 결과, 제안한 모델은 F1-score와 AUC에서 각각 98.3%와 98.3%의 성능으로 정상군과 뇌졸중 환자군을 안정적으로 분류하였다.

DeepLiftShap 기반 시각화 결과, 모델은 음향적 특징과 판별 근거 간의 연관성을 명확히 보여주었다. 그림 2에서 보인 바와 같이 뇌졸중 환자에서는 조음 근육 제어 저하와 발화 리듬 불안정성이 음향적으로 파열음 지속 시간의 불규칙성과 모음 전이의 비선형적 에너지 변동으로 표현되었으며, 모델이 이러한 특징을 민감하게 포착함을 확인하였다. 따라서 DeepLiftShap 분석은 모델의 판별 근거가 단순한 에너지 크기보다는 조음 안정성과 호흡-조음 협응의 변동성에 관련된 동적 특징을 기반으로 이루어진 것으로 해석된다.

그러나 본 연구는 두 클래스 간 샘플 수의 불균형과 한국어 음성에 한정된 데이터 구성으로 인해, 모델의 일반화에 제약이 있을 수 있다. 향후 연구에서는 다국어 음성 데이터와 다양한 발화 조건을 포함한 확장 실험을 수행하고, 모델 해석 결과를 임상 지표와 연계하여 뇌졸중 환자의 조기 판별 및 임상적 판단을 지원하는 설명 가능한 프레임워크로 발전시킬 예정이다.

5. Acknowledgements

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NR070859). 또한, 과학기술정보통신부의 재원으로 한국지능정보사회 진흥원의 지원을 받아 구축된 "구음장애인 명령어 데이터"를 활용하여 수행된 연구임.

6. 데이터 가용성

본 연구에 활용된 데이터는 AI 허브(aihub.or.kr)에서 다운로드 받을 수 있음.

7. 참고 문헌

[1] Z. Mou, et al., "The application analysis of neural network techniques on lexical tone rehabilitation of mandarin-speaking patients with post-stroke dysarthria", *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 90709–90717, 2020

[2] W. Ye, et al., "An auxiliary diagnostic systematic for dysarthria in stroke patients based on spectrogram acoustic characteristics", *Applied Acoustics*, Vol. 231, p. 110479, 2025

[3] B. Gutiérrez-Serafín, et al., "Toward assessment of human voice biomarkers of brain lesions through explainable deep learning", *Biomedical Signal Processing and Control*, Vol. 87, p. 105457, 2024

[4] S. A. Sheikh, M. Sahidullah, and I. Kodrasi, "Overview of automatic speech analysis and technologies for neurodegenerative disorders: diagnosis and assistive applications", *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, pp. 1–20, 2025

[5] S. Lee, et al., "AI-enabled speech monitoring for dysarthria detection in consumer electronics", in: *Proceedings of the 2025 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, pp. 1–4, 2025

Poster-254

화농성 척추디스크 감염의 일체형 18F-FDG PET/MR 영상 데이터를 기반으로 생성형 인공지능(combination of GANs and cDDPMs)을 이용하여 단독 MR 영상으로부터 합성 PET/MR 융합 영상 생성

전익찬

영남대학교병원 신경외과

Generation of synthetic PET/MR fusion images from MR images using a combination of GANs and cDDPMs based on simultaneous 18F-FDG PET/MR image data of pyogenic spondylodiscitis

Ikchan Jeon

Department of Neurosurgery, Yeungnam University Hospital

jicns@hanmail.net

Abstract

This study proposed a novel cross-modality image generation approach that synthesizes PET/MR fusion images from MR images using a combination of generative adversarial networks (GANs) and conditional denoising diffusion probabilistic models (cDDPMs). Based on simultaneous 18F-FDG PET/MR imaging data of patients with pyogenic spondylodiscitis, the method achieved high quantitative and qualitative similarity to real PET/MR images. We believe that this study demonstrated the potential for cross-modal image generation from MR to PET images.

1. 연구 배경

자기공명영상(MRI)과 양전자방출단층촬영(PET)은 각각 구조적 및 대사적 정보를 제공하는 대표적 영상 기법으로, 두 영상의 융합은 질환의 병태생리와 치료 반응 평가에 유용하다. 그러나 PET 검사는 고비용과 방사선 노출 등의 한계로 인해 모든 환자에게 적용하기 어렵다. 특히 화농성 척추염(pyogenic spondylodiscitis, PSD)에서는 장기간 항생제 치료 중 임상 증상과 염증 수치가 일치하지 않거나 MR 영상에서 잔류 감염과 육아조직을 구분하기 어려운 경우가 많다. 이에 본 연구는 방사선 노출 없이 MR 영상만으로 PET의 기능적 정보를 재현할 수 있는 인공지능 기반 교차 모달리티(cross-modality) 영상 합성 모델을 개발하고, 그 성능을 정량적·정성적으로 검증하고자 하였다.

2.연구 방법

본 연구는 2017년부터 2020년까지 시행된 94명의 흉·요추부 화농성 척추염 환자에 대한 동시 18F-FDG PET/MR 영상을 이용한 후향적 연구이다. 각 환자에서 획득된 시상면 T2 강조 지방억제(T2-weighted fat-saturated, T2FS) MR 영상과 실제 PET/T2FS 융합영상을 짝지어 총 2,082쌍의 데이터를 구축하였다. 이를 훈련·검증·시험 세트(8:1:1)로 나누어 Pix2Pix(U-Net generator + Least Squares GAN discriminator)를 기반으로 한 1단계 합성 모델과, 조건부 확산 모델(conditional denoising diffusion probabilistic models, cDDPMs)을 이용한 2단계 정제 모델을 순차적으로 학습시켰다. 생성된 합성 PET/T2FS 영상과 실제 영상 간의 유사도는 PSNR, SSIM, MAE, MSE 등의 정량적 지표를 통해 평가하였으며, 세 명의 5년 이상 경력의 척추외과 전문의가 참여한 맹검 판독으로 정성적 구분 정확도를 분석하였다.

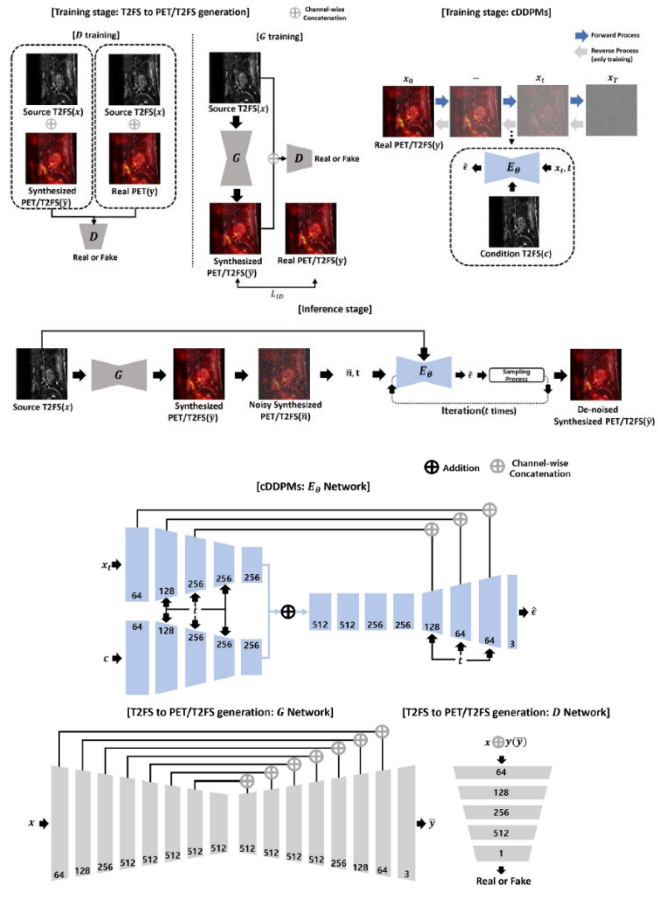


그림 1. 전체적인 모델 형태

3. 연구 결과

총 2,082쌍의 영상 중 1,664쌍이 훈련, 209쌍이 검증, 209쌍이 시험에 사용되었다. 단일 Pix2Pix 모델에 비해 Pix2Pix와 cDDPM을 결합한 모델은 모든 지표에서 향상된 결과를 보였으며, 시험 세트에서 PSNR은 약 30.6, SSIM은 0.91로 높은 영상 재현도를 나타냈다. 반면 PSNR, MAE, MSE 값은 실제 PET 영상의 FDG 섭취가 증가할수록 통계적으로 유의한 감소를 보였으나, SSIM은 FDG 섭취 정도와 유의한 상관을 보이지 않았다. 정성적 평가에서 세 명의 척추외과 전문의가 실제와 합성 영상을 구분한 평균 정확도는 47.4%로, 합성 영상이 실제 영상과 육안상 거의 구별되지 않을 정도의 품질을 보였다. 또한 합성 영상 내 정상 척추 부위에서는 생리적 FDG 섭취 패턴이 유지되어, 모델의 학습 과정에서 해부학적 일관성이 확보됨을 확인하였다.

Pix2Pix와 cDDPM을 결합한 2단계 생성 모델은 MR 영상으로부터 PET/MR 융합영상을 성공적으로 합성하였으며, 실제 영상과 유사한 정량적 및 정성적 결과를 통해 교차 모달리티 영상 생성의 임상적 가능성을 입증하였다. 본 연구는 척추 감염의 치료 반응 평가에 PET/MR의 대체적 접근을 제시할 뿐 아니라, 향후 척추 종양이나 대사성 골질환 등 PET 정보를 필요로 하는 다양한 질환에서 비침습적 영상 진단의 새로운 방향을 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

4. Acknowledgements

이 연구는 National Research Foundation of Korea (NRF-2022R1F1A1073230) 과제의 지원과 Institutional Review Board (Yeungnam University Hospital, 2016-12-019-013)의 승인하에 수행되었음.

5.참고 문헌

[1] Goodfellow I, Pouget-Abadie J, Mirza M, Xu B, Warde-Farley D, Ozair S. Generative adversarial nets. In: Ghahramani Z, Welling M, Cortes C, Lawrence ND, Weinberger KQ, editors. Adv neural inf pro-cess syst 27. Curran Associates, Inc; 2014. p. 2672–80. http://papers. nips.cc/paper/5423-generative-adversarial-nets.pdf.

[2] Isola P, Zhu J, Zhou T, Efros A. Image-to-image translation with con-ditional adversarial networks. In: Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition; 2017. p. 1125–34.

[3] Ho J, Jain A, Abbeel P. Denoising diffusion probabilistic models. Adv Neural Inform Proc Syst 2020;33:6840–51.

[4] Jeon I, Kong E, Kim SW, Cho IH, Hong CP. Assessment of therapeu-tic response in pyogenic vertebral osteomyelitis using (18)F-FDG-PET/MRI. Diagnostics (Basel) 2020;10(11):916.

	PSNR-validation	SSIM-validation	MAE-validation	MSE-validation
Model P	27.318±2.365	0.808±0.077	0.029±0.011	0.002±0.001
Model PD	30.636±3.328	0.912±0.062	0.017±0.007	0.001±0.001
	PSNR-test	SSIM-test	MAE-test	MSE-test
Model P	27.232±2.409	0.807±0.081	0.028±0.012	0.002±0.002
Model PD	30.634±3.437	0.910±0.067	0.017±0.008	0.001±0.001

그림 2. 정량적 이미지 일치도 분석

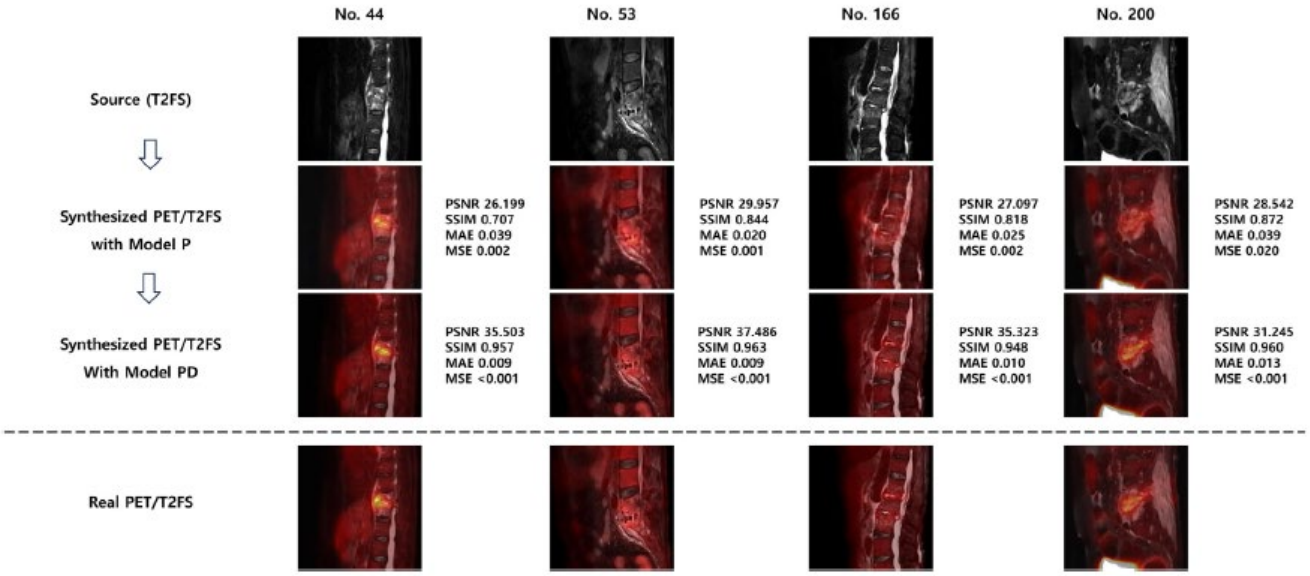


그림 3. 이미지 생성 예시

Poster-255

악성 뇌종양의 일체형 ^{18}F-FDOPA PET/MR 영상 데이터를 기반으로 생성적적대신경망을(conditional GANs, Pix2Pix)을 이용하여 단독 MR 영상으로부터 합성 PET/MR 융합 영상 생성

전익찬

영남대학교병원 신경외과

Cross-modality image-to-image translation from MR to synthetic ^{18}F-FDOPA PET/MR fusion images using conditional GAN in brain cancer

Ikchan Jeon

Department of Neurosurgery, Yeungnam University Hospital

jicns@hanmail.net

Abstract

This study proposed a novel cross-modality image generation approach that synthesizes PET/MR fusion images from MR images using a combination of generative adversarial networks (GANs) and conditional denoising diffusion probabilistic models (cDDPMs). Based on simultaneous 18F-FDG PET/MR imaging data of patients with pyogenic spondylodiscitis, the method achieved high quantitative and qualitative similarity to real PET/MR images. We believe that this study demonstrated the potential for cross-modal image generation from MR to PET images.

1. 연구 배경

자기공명영상(MR)과 양전자방출단층촬영(PET)은 각각 해부학적 및 대사적 정보를 제공하여 상호 보완적 역할을 하지만, PET은 방사선 노출과 비용 문제로 임상 적용에 제약이 있다. 특히 뇌종양의 경우, 방사선괴사와 종양 재발을 영상만으로 구분하기 어렵다는 점이 진단상의 중요한 한계로 작용한다. 이러한 한계를 극복하기 위해 본 연구는 조건부 생성적 적대 신경망(conditional generative adversarial network, CGAN)의 일종인 Pix2Pix 알고리즘을 활용하여 MR 영상으로부터 합성 18F-FDOPA PET/MR 융합영상을 생성하고, 실제 영상과의 정량적·정성적 유사도를 분석함으로써 교차 모달리티 영상 변환의 가능성을 평가하였다.

2.연구 방법

본 연구는 2017년부터 2022년까지 진행된 27명의 진행성 또는 재발성 뇌종양 환자를 대상으로 한 32건의 동시 18F-FDOPA PET/MR 검사 영상 데이터를 후향적으로 분석하였다. 각 검사에서 얻은 축상면 조영증강 T1 강조 영상(T1C)과 PET/T1C 융합영상을 1:1 쌍으로 구성하였으며, 총 2,167쌍의 이미지를 구축하여 학습:검증:시험 데이터셋을 7:2:1 비율로 분할하였다. Pix2Pix 프레임워크의 U-Net 기반 생성기(generator)와 PatchGAN 판별기(discriminator)를 이용하여 MR에서 PET/MR 융합영상으로의 변환을 학습하였고, 이미지 해상도 향상을 위해 다중 스케일 판별기(multi-scale discriminator)를 도입하였다. 모델의 성능 평가는 PSNR, MSE, SSIM, FSIM 지표를 이용하였으며, 실제 PET/T1C 영상과 합성 영상 간의 종양 대 배경비(TBRmax, TBRmean) 상관관계를 분석하여 FDOPA 섭취 재현성을 검증하였다.

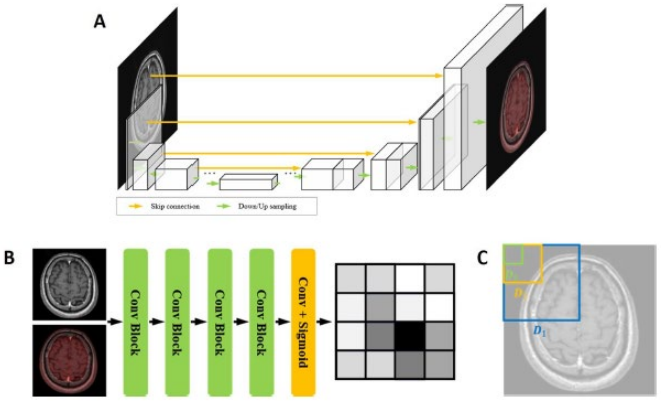


그림 1. 전체적인 모델 형태

3. 연구 결과

모델 학습 결과, 검증 데이터셋에서 PSNR 30.7±4.1, SSIM 0.857±0.091, FSIM 0.919±0.049의 유사도를 보였고, 시험 데이터셋에서는 PSNR 31.1±4.0, SSIM 0.868±0.079, FSIM 0.922±0.044로 높은 구조적 유사성을 나타냈다. 실제와 합성 영상 간의 TBRmax와 TBRmean의 상관계수는 각각 0.706, 0.901 ($p<0.001$)로 통계적으로 유의한 양의 상관을 보였으며, 이는 모델이 FDOPA 섭취의 대사적 패턴을 일정 수준 재현함을 의미한다. 또한 정상 뇌 조직의 선조체나 비강 점막 등에서 나타나는 생리적 FDOPA 섭취도 유사하게 표현되었다. 다만, FDOPA 섭취가 높은 병변에서는 PSNR과 SSIM 지표가 다소 감소하여 영상 복잡성 증가 시 정밀도가 다소 저하되는 경향을 보였다.

Pix2Pix 기반 CGAN 모델은 조영증강 T1C MR 영상으로부터 18F-FDOPA PET/T1C 융합영상을 성공적으로 합성하였으며, 실제 영상과의 높은 유사도를 통해 MR에서

PET로의 교차 모달리티 영상 생성 가능성을 입증하였다. 본 접근법은 방사선 노출과 비용 부담을 줄이면서도 대사적 정보를 반영할 수 있어, 향후 뇌종양의 재발·괴사 감별 및 치료 반응 평가에 보조적 진단 도구로 활용될 잠재력이 있다. 향후 대규모 다기관 데이터와 외부 검증을 통한 성능 보완이 필요하다.

4. Acknowledgements

이 연구는 National Research Foundation of Korea (NRF-2022R1F1A1073230) 과제의 지원과 Institutional Review Board (Yeungnam University Hospital, 2022-11-019)의 승인하에 수행되었음.

5.참고 문헌

[1] Goodfellow I, Pouget-Abadie J, Mirza M, Xu B, Warde-Farley D, Ozair S. Generative adversarial nets. In: Ghahramani Z, Welling M, Cortes C, Lawrence ND, Weinberger KQ, editors. Adv neural inf pro-cess syst 27. Curran Associates, Inc; 2014. p. 2672–80. http://papers. nips.cc/paper/5423-generative-adversarial-nets.pdf.

[2] Isola P, Zhu J, Zhou T, Efros A. Image-to-image translation with con-ditional adversarial networks. In: Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition; 2017. p. 1125–34.

[3] Jung E, Kong E, Yu D, Yang H, Chicontwe P, Park SH, Jeon I. Generation of synthetic PET/MR fusion images from MR images using a combination of generative adversarial networks and conditional denoising diffusion probabilistic models based on simultaneous 18F-FDG PET/MR image data of pyogenic spondylodiscitis. Spine J 24(8):1467–1477

	PSNR	MSE	SSIM	FSIM
Validation dataset (n=390)	30.695±4.119	0.001±0.001	0.857±0.091	0.919±0.049
Test dataset (n=217)				
Experiment 1	30.976±4.113	0.001±0.001	0.864±0.085	0.921±0.046
Experiment 2	31.054±3.966	0.001±0.001	0.868±0.078	0.922±0.045
Experiment 3	31.075±4.160	0.001±0.001	0.865±0.084	0.921±0.046
Experiment 4	30.819±3.938	0.001±0.001	0.863±0.080	0.919±0.045
Experiment 5	31.449±4.047	0.001±0.001	0.879±0.076	0.926±0.044
Average	31.075±3.976	0.001±0.001	0.868±0.079	0.922±0.044

그림 2. 정량적 이미지 일치도 분석

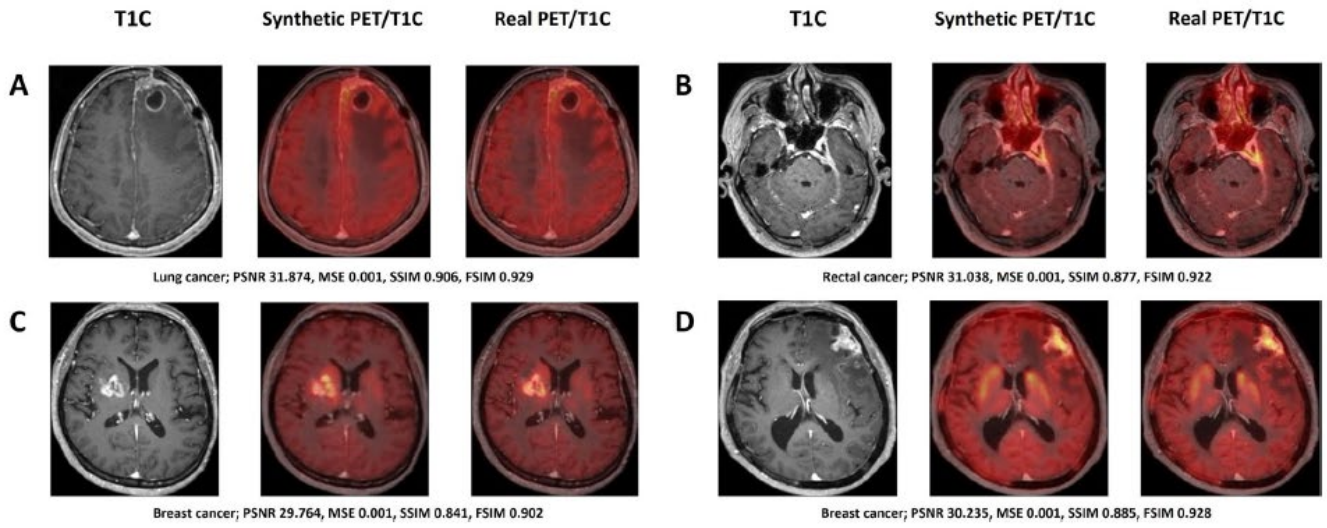


그림 3. 이미지 생성 예시

Poster-256

HTP 검사의 신뢰도 향상을 위한 다중 AI 모델 앙상블 시스템 구축

김경이[1*] , 박세훈[1]

인제대학교 AI소프트웨어[1*]인제대학교 AI융합로봇[1]

Multi-AI Model Ensemble for Improved Reliability in Automated House-Tree-Person Test Analysis

KyoungYee Kim[1*] , Sehoon Park[1]

School of AI Software[1*] AI Convergence Robotics[1], Inje University, Korea

[*]kimky@inje.ac.kr

Abstract

House-Tree-Person (HTP) testing suffers from inter-rater variability and limited reliability due to subjective interpretation. We developed an ensemble system integrating four multimodal large language models (GPT-4, Gemini-2.5 Pro, Claude-4.5 Sonnet, Grok-4) to automate HTP analysis with standardized prompts and consensus-based risk assessment. Analyzing 400 drawings from 100 ten-year-old children, the system achieved perfect inter-model agreement (100%), high internal consistency (95.9%), and 7.14-fold speedup over traditional assessment (2.10 vs. 15 minutes per child). Risk stratification based on psychological keyword ratios classified all participants as low-risk, reflecting normal developmental patterns. Results demonstrate practical feasibility as a primary clinical screening tool, though validation against expert evaluations remains necessary.

1. 연구 배경

House–Tree–Person(HTP) 검사는 아동이 그린 집·나무·사람 도상을 통해 정서 상태, 자기상, 가족·사회적 지각의 단서를 간접적으로 파악하는 투사적 검사로, 임상과 교육 현장에서 초기 선별과 면담 가설 수립에 오랫동안 활용되어 왔다[1]. 그럼에도 불구하고 해석 준거의 다양성과 관찰자의 경험 및 이론적 배경 차이로 인해 평가자 간 변산성(inter-rater variability)과 시간 경과에 따른 재검사 신뢰도(test–retest reliability)가 충분히 확보되지 않는다는 지적이 반복되어 왔다[2]. 동일한 도상적 특징이 맥락에 따라 상이한 의미로 해석될 수 있다는 점, 그리고 전역적 구성과 국소적 세부가 상호작용하는 다층적 패턴을 판독해야 한다는 점은 규칙 기반 표준화만으로는 설명력과 재현성을 동시에 달성하기 어렵게 만든다. 이로 인해 실제 임상에서는 판정 근거의 투명성, 판정 일관성, 보수적 안전 여유의 확보가 핵심 과제로 부각되어 왔다.

최근 멀티모달 대규모 언어모델(Multimodal Large Language Model, MLLM)의 급속한 발전은 그림과 같은 비정형 시각 자료에서 물체·형상·질감·공간 배치 등 저수준 특징의 감지와, 그 특징을 근거로 한 언어적 설명을 동시에 수행할 수 있는 기술적 조건을 마련하였다. 그러나 단일 모델은 입력 변형과 프롬프트 차이에 민감하며, 특정 시각 패턴이나 서술 습관에 편향될 위험이 존재한다. 특히 임상 맥락에서는 고위험군의 과소탐지(false negative)와 저위험군의 과잉 경보(false positive) 사이의 균형이 안전성과 직결되므로, 단일 모델의 불안정성은 즉각적인 적용의 장애 요인이 된다. 이에 따라 서로 다른 모델의 보완적 오류를 결합하여 분산을 낮추는 앙상블 접근이 재현성과 강건성을 높이는 현실적 대안으로 주목받고 있다. 다만 앙상블의 효과를 임상적으로 유의한 개선으로 연결하려면, 공통 프롬프트와 출력 스키마, 합의·가중 규칙, 신뢰도 산출 및 불확실성 표기 절차가 사전에 표준화되어야 하며, 판정과 권고의 보수성 원칙이 명시적으로 내재화되어야 한다.

본 연구는 이러한 배경에서 GPT-4, Gemini, Claude, Grok 네 개의 멀티모달 LLM을 동일한 프롬프트와 JSON 스키마 하에 독립 구동하고, 영역 가중 평균과 다수결 규칙을 병용하는 앙상블로 통합하여 HTP 자동 해석의 신뢰도와 일관성을 향상시키는 것을 1차 목적으로 한다. 더 나아가 단일 최고 성능 모델 대비 앙상블의 분류 안정성과 해석 포괄성(coverage)이 실제로 개선되는지를 정량적으로 검증하고, 모델 간 합의 강도에 기반한 위험도 등급화 및 권고문 자동 생성을 통해 임상 1차 스크리닝 보조 도구로서의 실무적 타당성을 탐색한다. 이를 위해 동일 연령대(만 10세)에서 표준화된 절차로 수집된 네 종류의 그림을 분석 단위로 삼고, 세션 기반 구조화 저장을 통해 재현성과 추적 가능성을 동시에 확보한다.

2.연구 방법

AI 허브 'AI 기반 아동 미술심리 진단을 위한 그림 데이터 구축' 데이터셋[4]에서 만 10세 아동 100명(남아 50명, 여아 50명)의 집, 나무, 남자, 여자 그림 총 400장을 확보하였다. 그림 1은 본 연구의 전체 분석 파이프라인을 나타내며, 입력 단계에서 아동 그림 데이터를 원본 보존 원칙 하에 전처리한 후, 4개 MLLM(GPT-4, Gemini-2.5 Pro, Claude-4.5 Sonnet, Grok-4)이 병렬적으로 독립 분석을 수행한다. 각 모델은 HTP 규칙 기반 개별 해석을 통해 도상적 특징의 심리·임상적 시사점을 구조화된 형식으로 산출하며, 모델별 통합 단계에서 4장 그림의 전체 심리상태, 그림 간 일관성, 1차 우려 사항을 요약한다. 품질 관리 단계에서는 거부 패턴("I'm unable to conduct detailed psychological analyses" 등)과 실제 분석 요소 포함 여부를 자동 검증하여 유효하지 않은 응답을 제외하며, 앙상블 합의 단계에서는 다수결 기반 합의 점수를 산출하고 심리적 키워드(정서, 행동, 성격, 자존감, 발달, 적응)의 긍정/부정 비율을 분석한다. 위험도 판정은 부정 키워드 비율 60% 이상을 고위험, 40-60%를 중위험, 40% 미만을 저위험으로 분류하며, 최종적으로 구조화된 권고문과 신뢰도 등급이 자동 생성되어 세션별 디렉터리에 저장된다.

표 1은 시스템의 핵심 구성 요소를 제시한다. 분석 모델은 GPT-4, Gemini-2.5 Pro, Claude-4.5 Sonnet, Grok-4로 구성되며, 공통 프롬프트 템플릿과 출력 스키마(risk_level,

psychological_state, key_observations, developmental_level, clinical_notes)를 적용하여 비교 가능성을 확보하였다. 위험도 판정 기준은 부정 키워드 비율 기반으로 명확히 정의되었고, 응답 유효성 검증은 _filter_valid_responses() 함수를 통해 자동화되었다. 합의 산출 방식은 다수결 기반으로, 합의 점수 0.75 초과 시 높은 합의, 0.5-0.75는 중간 합의, 0.5 미만은 낮은 합의로 분류한다. 평가 지표는 신뢰성(API 간 일치도, 내적 일관성)과 효율성(처리 시간, 속도 향상 배수)을 중심으로 구성하였으며, 모든 분석 과정은 세션 중심 파이프라인으로 조직되어 분석 성공률, 예외 발생 빈도 등의 품질 지표가 자동 기록된다. 윤리적 고려사항으로 보호자 사전 동의와 데이터 익명화를 준수하였으며, 자동화된 평정은 임상가의 전문적 판단을 보조하는 1차 스크리닝 도구로 설계되었다.

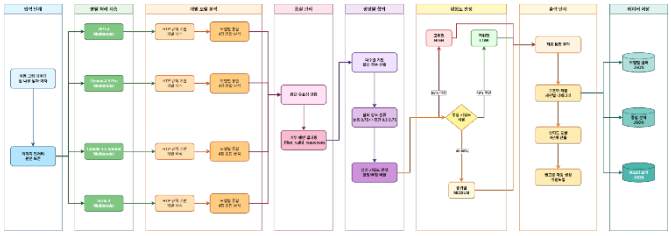


그림 1. 멀티모달 LLM 앙상블 기반 HTP 자동 분석 파이프라인

요소	구현
분석 모델	gpt-4, gemini-2.5pro, claude-4.5sonnet, grok-4
위험도 판정 기준	부정 키워드 비율60% 이상 고위험, 40% 이상 중위험 (_determine_final_risk() 함수)
응답 유효성 검증	거부 패턴 자동 탐지 및 제외 (_filter_valid_responses() 함수)
합의 산출 방식	다수결 기반 합의 점수(0.75 초과: 높은 합의, 0.5-0.75: 중간 합의)

표 1. 분석 시스템 핵심 구성요소

3. 연구 결과

그림 2는 시스템의 신뢰도, 합의도, 효율성을 포괄적으로 그림 2는 시스템의 종합 성능을 6개 하위 차트로 제시한다. 상단 좌측의 신뢰도 지표는 API 간 일치도(100%)와 내적 일관성(94.9%)이 모두 임상 기준선(0.7)을 크게 상회함을 보여주며, 상단 중앙의 API 합의도는 평균 합의 점수와 높은 합의 비율이 모두 100%로 완벽한 모델 간 합의를 나타낸다[3]. 중앙의 원형 차트는 전체 100명이 저위험(Low Risk)으로 판정되어 일반 아동 표본의 정상 발달 범주를 반영하였으며, 중위험 및 고위험 사례는 발견되지 않았다. 우측 효율성 차트는 29개 샘플 측정 기준 아동 1인당 평균 처리 시간 2.10분(126초)과 전통적 전문가 평가(추정 15분) 대비 7.14배의 속도 향상을 시각화하며, 시간당 처리량 28.6명으로 대규모 스크리닝 적용 가능성을 입증하였다. 인건비 기준 86.0%의 비용 절감 효과가 추정되었으며, 분석 성공률 100%, 예외 발생률 0%로 시스템의 높은 안정성이 확인되었다. 하단의 종합 평가 차트는 5개 핵심 지표가 모두 기준선(0.7)을 초과함을 통합적으로 제시한다.

본 연구는 세 가지 주요 제한점을 가진다. 첫째, 전문가 평가와의 직접 비교(concurrent validity)가 수행되지 않아 시스템 판정의 임상적 정확성을 외부 기준으로 검증하지 못하였다. 둘째, 재검사 신뢰도(test-retest reliability) 측정이 이루어지지 않아 시간 경과에 따른 판정의 안정성을 평가할 수 없었다. 셋째, 전체 100명이 저위험으로 판정되어 중위험 및 고위험 사례가 없었으므로, 시스템의 민감도와 특이도 등 실제 분류 정확도를 측정할 수 없었다. 향후 연구에서는 임상 전문가의 독립 평가와 시스템 판정 간 일치도 검증, 시간 경과에 따른 안정성 측정, 임상의뢰 사례를 포함한 다양한 위험도 수준의 표본 확보를 통해 시스템의 실제 임상 적용 타당성을 종합적으로 평가할 필요가 있다.

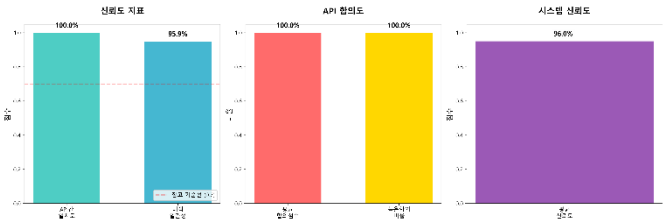


그림 2. 멀티모달 LLM 앙상블 시스템 성능 지표

평가 영역	측정 지표	측정값(%)	샘플 수(N)
신뢰도	API 간 일치도	100	100
	내적 일관성	95.9	100
API합의도	평균 합의 점수	100	100
시스템 신뢰도	평균 신뢰도	96	100
위험도 분포	저위험 비율	100	100
	중.고위험 비율	0	100
효율성	평균 처리시간	2.1분	100
	속도 향상 배수	7.14	100

표 2. 앙상블 HTP 분석 시스템의 종합 성능 지표

4. Acknowledgements

본 과제(결과물)는 교육부와 경상남도의 재원으로 지원을 받아 수행된 경상남도 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 연구결과 입니다.(202502440001)

5.참고 문헌

[1] Buck, J. N. (1948). The H-T-P technique: A qualitative and quantitative scoring manual. Journal of Clinical Psychology, 4(4), 317-396.

[2] Rosso, A. M., Martini, P. S., Giorgi, E., Meleddu, M., Fernandez, I., & De Coro, A. (2021). Inter-rater reliability and construct validity of the Lerner Defense Scale for assessing defense mechanisms in Rorschach protocols. Frontiers in Psychology, 12, 708886.

[3] Miller, R. L., Paolino, A. M., Jones, T. A., Raphael, A. J., & Golden, C. (2018). Inter-rater reliability of the Raphael Projective System (RPS) of scoring projective drawings. Archives of Assessment Psychology, 8(1), 89-107.

[4] AI Hub (2022). AI 기반 아동 미술심리 진단을 위한 그림 데이터 구축. https://www.aihub.or.kr/

Poster Presentation
의료초음파

Poster-257

주파수 영역 압축 센싱을 통한 초음파 지역화 현미경 성능 향상

문성빈, 김지훈*

강남대학교 전자반도체공학부 전자공학전공

Ultrasound Localization Microscopy Enhancement through Compressed sensing in Frequency Domain

Sungbin Moon and Jihun Kim*

Division of Electronic and Semiconductor Engineering, Major in Electronic Engineering, Kangnam University, Yongin, S. Korea

*jihunk@kangnam.ac.kr

Abstract

Ultrasound Localization Microscopy (ULM) enables super-resolution vascular imaging but typically requires long acquisitions, and its localization accuracy degrades in high-density microbubble conditions. We propose a fast, high-accuracy reconstruction method within a compressed sensing framework based on two-step iterative shrinkage/thresholding (TwIST) that combines (1) algorithm refinements, (2) frequency-domain convolution with block-circulant with circulant-blocks (BCCB) structure, and (3) GPU parallelization. Across simulations and real data, the method yields higher accuracy and recovery rates than 2D cross-correlation, while reducing both the per-frame computation time and the number of frames required. Consequently, it attains equivalent vessel depiction with shorter acquisition times, substantially improving the real-time feasibility and practical utility of ULM.

1. 연구 배경

Ultrasound Localization Microscopy(ULM)은 회절 한계를 넘어 미세 혈관을 고해상도로 복원하지만, 한 프레임 획득에 수분 이상이 걸려 실사용성이 떨어진다. 전통적 2D cross-correlation(2DCC)는 Microbubbles(MBs) 밀도가 낮을 때는 정확하나 높아지면 성능이 급격히 감소한다. 이를 보완하는 Compressed Sensing(CS) 기반 복원은 모든 밀도에서 기존 방식보다 우수하여 동일 혈관 품질을 적은 프레임으로 달성해 획득 시간 단축 가능성을 보여준다. 다만, CS기반 알고리즘 중 하나인 L1-homotopy (L1H)나 일반 목적 Convex Solver(CVX)를 이용한 L1 최소화는 정확도는 높지만 계산량이 많아 처리 속도가 느리다 [1-3].

Two-step Iterative Shrinkage/Thresholding (TwIST)는 L1H/CVX 대비 프레임당 처리 속도와 계산 효율이 뛰어나 실시간성에 유리하나, Localization 정확도는 다소 낮다 [4]. 본 연구는 TwIST의 이점을 유지한 채 성능을 끌어올리기 위해 핵심 알고리즘 개선, Block Circulant with Circulant Blocks(BCCB) 구조를 활용한 주파수 영역 컨볼루션, GPU 최적화 등을 적용하여, 고밀도 MBs 환경에서도 정확도를 높이고 필요한 프레임 수를 줄여 획득 시간을 단축하는 것을 목표로 한다 [5].

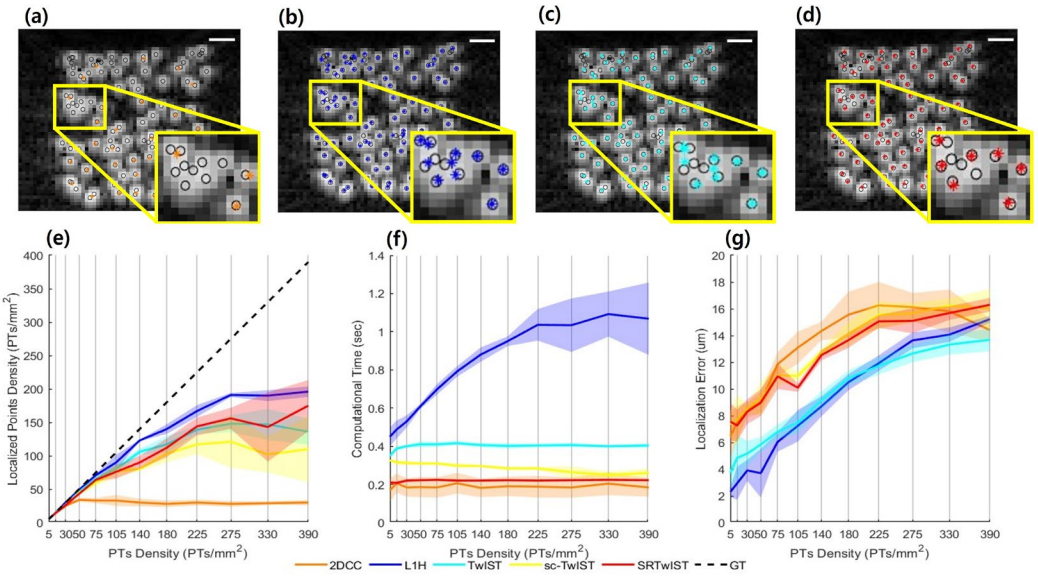


Fig. 1. Evaluation of Localization Performance in Simulation: Localization results at a density of 105 PTs/mm² using (a) 2DCC, (b) L1H, (c) TwIST, and (d) SRTwIST algorithms. Performance metrics including (e) Localization efficiency, (f) Localization error, and (g) Computational time. Note, the image size is 62 × 62 pixels and scale bars indicate 250 μm.

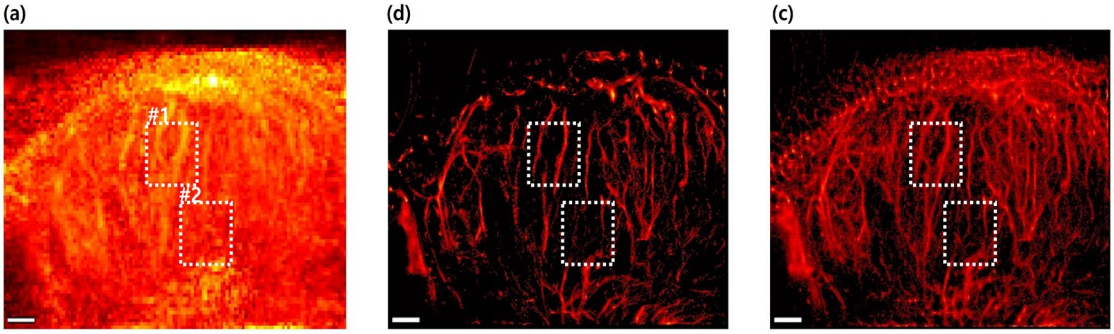


Fig. 2. In-vivo Mouse Brain 5k Frames Localization Images without Tracking: Images are reconstructed by accumulation localized points with Tracking. The white boxes indicate region of interest (ROI). These image including (a) Powe Doppler, (b) 2DCC and SRTwIST. Scale bars indicate 1mm.

2. 연구 방법

기존 TwIST는 Back-Tracking으로 임의의 Step을 조정하는 방식을 이용한다. 반면 본 연구는 A=DH에 대해 Power-Iteration으로 $\lambda_{max}(A^TA)$를 추정해 Lipschitz 상수 L을 얻고 스텝 1/L을 고정한다 [6]. 이는 시스템별 최적의 고정 Step을 이용해 빠른 수렴 속도 및 안정성을 얻을 수 있다는 보고에 근거한다 [7]. 또한 목적함수가 직전보다 증가할 때, TwIST처럼 Iterative Soft-Thresholding을 통해 탐색 및 계산을 다시 하지 않고, 가속 직전의 IST 값으로 단발성 회귀하여(Single Reversion) 재시작 없이 이어가도록 해 계산량을 줄였다. 구현 측면에서는 PSF를 BCCB 구조를 이용하여 주파수 영역 컨볼루션으로 A, A^T 를 구성해 연산량을 줄였다. 또 강한 비음수 제약으로 수렴의 안정성 높이고, 주요 연산을 GPU에서 수행해 전체 계산을 실질적으로 가속했다. 이 요소들을 통합한 알고리즘을 Single-Reversion TwIST(SRTwIST)로 제안한다.

3. 연구 결과 및 결론

Fig. 1 은 MB 밀도 변화에 따른 기법별 Localization 성능을 정량적으로 평가한 결과이다. 전반적으로 CS 기반 기법들이 2DCC보다 우수한 성능을 보였다. 그 중 TwIST은 밀도가 높아질수록 성능 곡선이 하락하지만, 제안한 SRTwIST는 고밀도 영역에서도 성능이 지속적으로 상향하는 양상을 나타냈다. 이는 밀도가 높아져도 SRTwIST가 MB를 더 안정적으로 분리 복원함을 의미한다. 또한 동일 조건에서의 연산 시간 비교에서도 SRTwIST는 다른 CS 기법대비 뚜렷한 이점을 보여, 정확도와 효율성 측면에서 모두 경쟁력이 있음을 확인하였다. Fig. 2는 PALA에서 제공한 Mouse Tumor 데이터 시뮬레이션 결과이다 [8, 9]. Tracking은 "simpletracker"을 통해 진행했다 [10]. 각 ROI에서 Power Doppler 및 2DCC의 경우 일부 미세 혈관이 낮은 대비로 나타나거나 분절되어 해석이 어렵다. 이에 비해 SRTwIST는 혈관의 연결을 보존하면서 희소했던 혈관 신호도 함께 복원되어, 혈관 복원 성능이 더 뛰어남을 확인하였다.

Acknowledgement

이 성과는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. RS-2025-00556581) 과 신업통상자원부의 재원으로 한국산업기술평가원의 지원 (No. RS-2024-00419246) 을 받아 수행된 연구임.

References

[1] Kim J, Wang Q, Zhang S, Yoon S. Compressed Sensing-Based Super-Resolution Ultrasound Imaging for Faster Acquisition and High Quality Images. IEEE Trans Biomed Eng. 2021 Nov;68(11):3317-3326.

[2] M. S. Asif and J. Romberg, "Fast and Accurate Algorithms for Re Weighted ℓ1-Norm Minimization," in IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 61, no. 23, pp. 5905-5916, Dec.1, 201

[3] M. Grant, S. Boyd, and Y. Ye, "CVX: Matlab software for disciplined convex programming, version 2.0 beta," ed, 2013.

[4] J. Bioucas-Dias and M. Figueiredo, "A new TwIST: two-step iterative shrinkage/thresholding algorithms for image restoration," IEEE Transactions on Image Processing, vol. 16, no. 12, pp. 29923004, Dec. 2007.

[5] Zhao, S., Hartanto, J., Joseph, R. *et al.* Hybrid photoacoustic and fast super-resolution ultrasound imaging. *Nat Commun* **14**, 2191 (2023).

[6] von Mises, R., et al. Praktische Verfahren der Gleichungsauflösung. ZAMM – Zeitschrift Für Angewandte Mathematik Und Mechanik 9:152–164 (1929).

[7] Neal Parikh and Stephen Boyd (2014), "Proximal Algorithms", Foundations and Trends® in Optimization: Vol. 1: No. 3, pp 127-239.

[8] Heiles, B., Chavignon, A., Hingot, V. et al. Performance benchmarking of microbubble-localization algorithms for ultrasound localization microscopy. Nat. Biomed. Eng 6, 605–616 (2022).

[9] Chavignon, A., et al. OPULM PALA (1.1) [Data Set]. Zenodo. (2020). https://doi.org/10.5281/zenodo.4343435

[10] H. W. Kuhn, "The Hungarian method for the assignment problem," Naval research logistics quarterly, vol. 2, no. 1-2, pp. 83-97, 1955.

Poster-258

이차원 위상 배열 소자 구동 최적화

최동현[1*], Godfrey Stephin Munyagwa[1], 서종범[1]
연세대학교 의공학부[1]

Optimization of driving condition for phased array system

Donghyun Choi[1*], Godfrey Stephin Munyagwa[1], Jongbum Seo[1]
Biomedical Engineering, Yonsei University, Korea
*fadette1@yonsei.ac.kr

Abstract

2D phased array system is widely used in therapeutic ultrasound including high intensity focused ultrasound (HIFU), ultrasound aided drug delivery, and histotripsy. Driving condition for each element usually obtained based on pseudo inverse matrix calculation. However, the result is not optimal since the amplitude of each element varies considerably since pseudo inverse leads to least square error at all cost. Weighted pseudo inverse could be applied but the nature of amplitude weighting leads to fluctuation and usually does not converge to optimal solution. In this presentation, the nature of this inverse problem was reevaluated and the alternative iterative method was proposed. This approach was validated with comparative simulation.

1. 연구 배경

이차원 위상 배열 음파변환기를 기반으로 하는 치료초음파 시스템의 발전은 2,000년대에 들어서며 기술 포화상태로 인식되고 있다. 음파변환기 재료 분야와 전용 전자 부품의 발전으로 인하여 성능이 개선되었으며, 아래 수식처럼 음파 전달 부분을 상대적으로 손쉽게 풀이할 수 있는 선형 모델을 통하여 단일 초점이 아닌 초점군 및 반초점 군등을 구현하는 것이 가능해지기 때문이다. [1,2]

$$Au = p$$

A: 선형모델을 통한 complex forward propagation matrix
u: 각 소자의 complex velocity
p: 목표 위치에서의 normalized pressure

따라서, 각 소자의 구동조건은 일반적으로 least square error를 기준으로 한 pseudo inverse를 통하여 구할 수 있으며, 그 결과는 다음 수식과 같다.

$$u = A^{+}p$$

A^{+}: A의 pseudo inverse matrix $(A^{*}(AA^{*})^{-1})$

이때 특정 소자의 과도한 사용을 배제하기 위하여, 위상 배열 소자의 효율을 고려할 수 있는데 이는 위 inverse problem에 constraint로 작용한다. 이상적 constraint를 수식으로 정리하면 다음과 같다.

$$|u(1)| = |u(2)| = \cdots = |u(n)|$$

전통적으로 이러한 문제를 해결하는 방식으로는 아래의 수식과 같이 weighted pseudo inverse를 반복적으로 실행하는 방식을 제시하기도 하였다. [1] 이 때 weighting matrix는 정방행렬로 각 소자의 amplitude의 역수를 사용하는 것이 일반적이다.

$$u = WA^{*}(AWA^{*})^{-1}p$$

W: 각 소자의 주대각 성분은 직전에 결정된 소자 amplitude의 역수인 대각행렬

단, 이 경우 u의 값은 실행할 때 마다 fluctuation 하며 일반적으로 최적의 값으로 수렴하지 않는 문제가 발생한다. 이러한 문제를 일반적인 constraint하의 inverse 문제로 전환하면 다음과 같은 cost function을 설정한 후 이를 최소화하는 방식으로 이해할 수도 있다.

$$min\ arg(u)\left\{< Au - p, Au - p > +\lambda\left(1 - \frac{< u, u >}{n|u_{max}|}\right)\right\}$$

<,>: complex vector에 대한 내적

이때 위 수식의 오른쪽 항이 원점이외의 공간에서 analytic 하지 않은 함수로 일반적인 iterative 한 방식으로는 최적화에 적합하지 않다. 하여 본 발표에서는 projection method기반 iterative 방식으로 위 inverse 문제의 해결책을 제시하고자 한다.

2.연구 방법

최초의 constraint를 고려한 inverse problem을 다시 분해하여 보면 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$Au = p$$
$$\min \arg(u)\left\{1 - \frac{< u, u >}{n|u_{max}|}\right\}$$

일반적 projection과 결합한 iterative 접근 방식은 특정한 시작점에서 f에 대한 gradient를 구한 후, 그 값을 행렬 A의 column space에 projection 시킴으로써, 최적화 된 값을 구하는 방식이 있다. [3] 문제는 여기서 $f(u)$가 analytic하지 않아, gradient를 계산할 수 없다는 사실에 있다. 이 문제를 조금 변형하여 그 순서를 바꾸면 다음 수식으로 표현될 수 있다.

$$\rho \le \sqrt{\overline{u_k}u_k}/\sqrt{\overline{u_{max}}u_{max}} \le 1 \quad for\ all\ k$$
$$min\ arg(u) < Au - p, Au - p >$$

위 수식은 $Au = p$ 근사치를 갖는 u를 일반적인 조건에서 시작하여 gradient method 방식으로 구한

뒤, $\rho \leq \sqrt{\overline{u_k}u_k}/\sqrt{\overline{u_{max}}u_{max}} \leq 1$ space에 projection을 통하여 u 값을 최적화하는 방식이다. 단, 이때 u 공간이 concave 한 영역임으로 수렴이 보장되지 않는다. 따라서, ρ 설정을 적절히 하여야 수렴이 가능해진다. 이를 위한 ρ 는 연구배경에서 소개된 weighted pseudo inverse를 한 차례 적용한 뒤 취득한 u에 대하여 다음의 수식으로 구할 수 있다.

$$\rho = mean\left(\frac{|u(k)|}{|u(k)_{max}|}\right)$$

위 알고리즘을 초점 거리 100 mm, 1MHz, 구형, 165 소자로 구성된 2차원 배열 음파변환기를 이용하여 4개의 초점군 {(0, -8, 10), (-8, 0, 100), (0, 8, 100), (8, 0, 100)}과 하나의 반초점 (0, 0, 100)으로 구성된 target에 실행한 결과를 비교 분석하였다. 다음에 정의된 배열 소자 efficiency (η)를 통한 정량적 비교와 알고리즘으로 생성된 field를 통하여 시각적이며 정성적으로 비교하였다.

$$\eta = \frac{< u, u >}{N u_{max}}$$

N: 소자의 총 개수

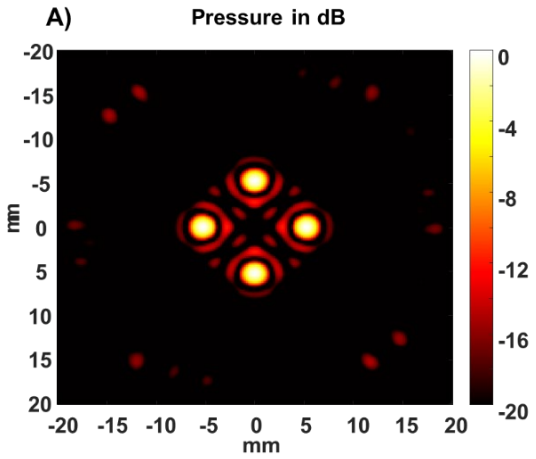
3. 연구 결과

각 알고리즘의 특성을 target 점에서의 normalized 된 pressure error 총합과 소자 efficiency를 아래 표 1에 정리하였다.

표1. 각 알고리즘에 대한 정량적 평가표

알고리즘	total normalized error	η
Pseudo inverse	9.49^{-16}	0.42
Weighted Pseudo Inverse	5.29^{-15}	0.64
New Algorithm (ρ =0.6, 17회 반복)	2.37^{-15}	0.85

표 1에서 보이는 것처럼, 적절한 $\boldsymbol{\rho}$ 를 weighted pseudo inverse를 통하여 제시한 경우 error의 감소와 함께 소자 효율도 기존 방식보다 약 30%가량 개선할 수 있음을 확인할 수 있다. 물론, 이러한 개선이 늘 보장되는 것은 아니지만, 기존 알고리즘 결과보다 성과가 개선될 가능성은 매우 높다는 것이다.



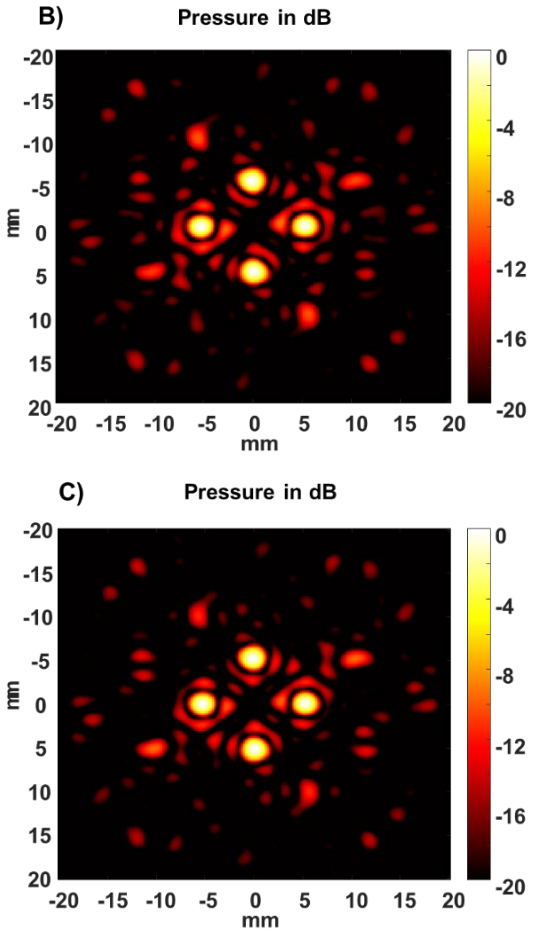


그림 1. 단순 pseudo inverse를 기반으로 계산된 pressure field (A), Weighted pseudo inverse 알고리즘을 기반으로 계산된 pressure field (B), 제안된 알고리즘을 기반으로 계산된 field (C)

그림1에서 제시된 것과 같이 가장 이상적인 결과는 pseudo inverse를 기반으로 계산된 pressure field이다. 다만, 소자 efficiency를 고려하면, 제안된 알고리즘을 기반이 가장 효율적인 방식으로 나타난다. 또한 제안된 알고리즘의 경우 pressure field error의 부분의 손실없이 weighted pseudo inverse보다 효과적이라는 점에서 가장 긍정적이라 할 수 있다.

4. Acknowledgements

본 연구는 한국국제보건의료재단(KOFIH)의 2024년도 이종욱펠로우십 프로그램 학위과정(의공)의 지원으로 수행되었습니다.

5.참고 문헌

[1] E. S. Ebbini, and C.A. Cain. "*Mtuliple-Focus Ultrasound Phased-Array Pattern Synthesis: Optimal Driving-Signal Distributions for Hyperthermia*." IEEE, trans., UFFC, Vol 36. No. 5, p.540-548, 1989

[2] J. Seo, and J. Lee. "*Anti-foci for focused ultrasound.*" Int. J. Hyperthermia, Vol 25. No. 7, 2009

[3] D. G. Luenberger, "*Optimization by Vector Space Methods*.", Jonh Wiley & Sons, Inc., 1969

Poster-259

딥러닝 기반 임의 평면 3D 초음파 재구성

Nguyen Ngoc Cuc Phuong[1], 박수현[1*]
이화여자대학교 전자전기공학과[1]

Plane-Agnostic 3D Ultrasound Volume Reconstruction using Deep Learning

Nguyen Ngoc Cuc Phuong[1], Suhyun Park[1*]
Department of Electronic and Electrical Engineering, Ewha Womans University, South Korea
[*]suhyun.park@ewha.ac.kr

Abstract

Three-dimensional (3D) ultrasound volume reconstruction from a sequence of 2D images has been widely studied and applied in various clinical scenarios. Many research works utilize deep learning networks to enhance volume quality and alleviate blurring and artifacts introduced by traditional volume interpolation methods. For volume reconstruction, sequences of 2D ultrasound images can be acquired from arbitrary imaging planes, capturing complementary views of the anatomical structures. In this study, we explicitly evaluate the performance of a 3D deep learning model in reconstructing ultrasound volume using data from different image planes. Experimental results show that the proposed network effectively generalizes across different input planes, enhancing reconstruction quality regardless of diverse image views.

1. Introduction

3D ultrasound reconstruction has significant contributions for diagnostic applications and precise analysis [1]. These potentials motivated many studies to improve 3D volume quality for real-world applications [2]. There are two main approaches for 3D ultrasound volume reconstruction: 1) mapping a sequence of 2D images into a 3D volume using their positional and orientational information, and 2) obtaining 3D volume data directly from 2D array transducers [3]. However, the 2D array systems have some drawbacks, such as hardware complexity, low flexibility, and large costs. In contrast, volume reconstruction using 2D image sequences collected from conventional 1D array transducers introduces many advantages, such as simple hardware and low costs. In addition, this method allows high flexibility as the sonographers can adjust scanning to cover a wide area of the target anatomy. When mapping from 2D images to 3D volumes, the gaps between these 2D slices need to be filled properly to maintain high-quality reconstruction. Traditional methods use interpolation techniques such as spline or nearest-neighbor interpolation to estimate missing voxel values. However, these approaches often produce blurred reconstructions and introduce interpolation-related artifacts. Recently, several methods employed 3D convolutional neural networks (CNNs) [1, 4, 5] to enhance volume reconstruction quality through data-driven learning, achieving promising performance. In real-world applications, 2D ultrasound images are often acquired from arbitrarily oriented planes, leading to significant variability in the input data. This study investigates the performance of a 3D CNN model designed for plane-agnostic volume reconstruction. Experimental results demonstrate that the proposed model effectively enhances reconstruction quality, regardless of the imaging plane used during acquisition.

2. Proposed method

We collected the training and testing data using an ultrasound imaging system with a linear array transducer. The scanning process was controlled by a six-axis robotic arm, which provided the positional and orientational information for each image slice. The data was collected from a vascular phantom in two different directions to capture 2D image sequences with a) cross-sectional view and b) longitudinal view, as shown in Figure 2.1. The training data only included image sequences with the cross-sectional view. Meanwhile, the testing data contained image sequences from cross-sectional or longitudinal views. The 2D image sequences with their corresponding positions and orientations were used to obtain volume samples.

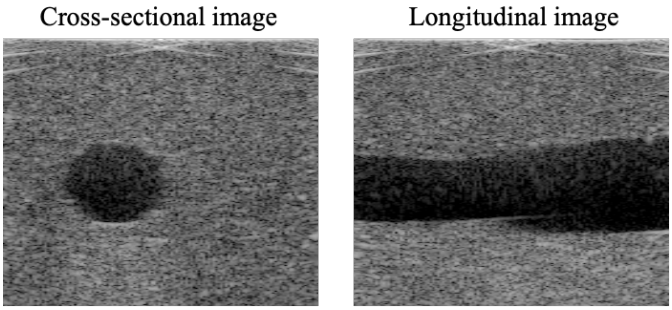


Figure 2.1 Examples of cross-sectional and longitudinal images

The overall pipeline of the proposed method is illustrated in Figure 2.2. The inputs are sparse volumes with missing slices in the middle, and the outputs are the complete volumes. We trained a 3D CNN model to effectively learn high-quality 3D volume reconstruction from sparse data. The network was trained with cross-sectional data and tested on both cross-sectional and longitudinal data. This is to evaluate the generalizability of the proposed method across different input planes.

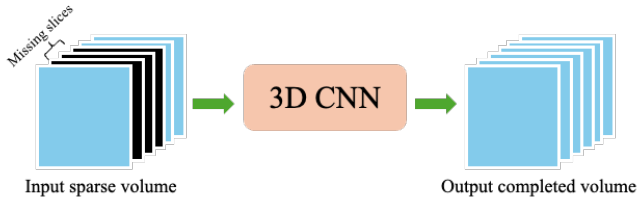


Figure 2.2 Overall pipeline of the proposed method

3. Results

The quantitative results are displayed in Tables 3.1 and 3.2 for cross-sectional and longitudinal testing data, respectively. We compare the performance of the proposed network with traditional interpolation methods, which are nearest and spline interpolation. The evaluation metrics include SSIM, MS-SSIM, and PSNR. As shown in Tables 3.1 and 3.2, the proposed method outperforms other interpolation techniques on both cross-sectional and longitudinal data across all metrics. These results validate the robustness of deep learning models for plane-agnostic 3D ultrasound volume reconstruction. The proposed network effectively transfers knowledge learned from cross-sectional training data to reconstruct volumes from longitudinal testing data, maintaining high-quality reconstruction regardless of imaging plane variations.

Table 3.1 Comparison of the proposed method with other approaches on cross-sectional data

Method	SSIM	MS-SSIM	PSNR
Nearest interpolation	80.15	89.03	26.81
Spline interpolation	83.21	91.65	27.27
Proposed method	**88**	**93.99**	**28.79**

Table 3.2 Comparison of the proposed method with other approaches on longitudinal data

Method	SSIM	MS-SSIM	PSNR
Nearest interpolation	78.81	88.99	26.56
Spline interpolation	81.65	91.38	27.20
Proposed method	**86.20**	**93.55**	**28.58**

We also visualize reconstructed results for visual comparison. In Figure 3.1, we display the longitudinal view of a volume reconstructed from cross-sectional data. Figure 3.2 depicts the cross-sectional view of several volumes reconstructed from longitudinal data. Based on these figures, we see that traditional interpolation techniques encounter severe blurring and artifacts, degrading volume quality. In contrast, the proposed method effectively alleviates blurry and artifact-related issues, significantly improving reconstruction quality.

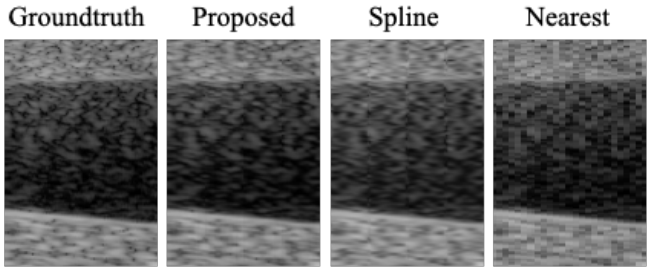


Figure 3.1 Visualizing the longitudinal view of the volume reconstructed from cross-sectional data

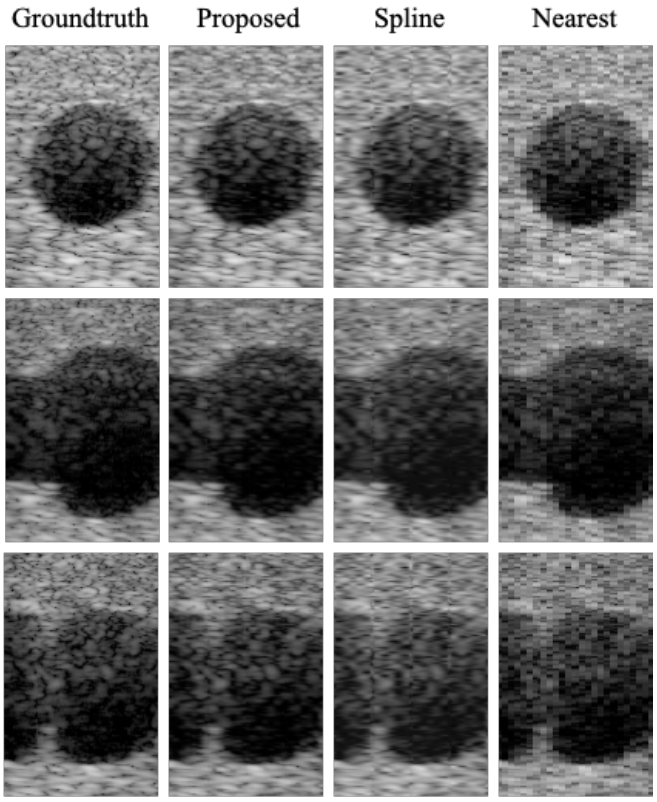


Figure 3.2 Visualizing the cross-sectional view of volumes reconstructed from longitudinal data

4. Acknowledgements

This study was supported by the Basics Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF), funded by the Ministry of Science and Technology and ICT under Grant NRF-2023R1A2C2003737.

5. References

[1] Q. Zou, Y. Huang, J. Gao, B. Zhang, D. Wang, and M. Wan, "Three-dimensional ultrasound image reconstruction based on 3D-ResNet in the musculoskeletal system using a 1D probe: ex vivo and in vivo feasibility studies," Physics in Medicine & Biology 68, no. 16, p. 165003, 2023.

[2] R. Prevost, M. Salehi, S. Jagoda, N. Kumar, J. Sprung, A. Ladikos, R. Bauer, O. Zettinig, and W. Wein, "3D freehand ultrasound without external tracking using deep learning," Medical Image Analysis, vol. 48, pp. 187–202, 2018.

[3] Q. Huang and Z. Zeng, "A Review on Real-Time 3D Ultrasound Imaging Technology," BioMed Research International, no. 1, p. 6027029, 2017.

[4] J. Dong, T. Fu, Y. Lin, Q. Deng, J. Fan, H. Song, Z. Cheng, P. Liang, Y. Wang, and J. Yang, "Hole-filling based on content loss indexed 3D partial convolution network for freehand ultrasound reconstruction," Computer Methods and Programs in Biomedicine 211, p. 106421, 2021.

[5] Ö. Çiçek, A. Abdulkadir, SS. Lienkamp, T. Brox, and O. Ronneberger, "3D U-Net: Learning Dense Volumetric Segmentation from Sparse Annotation," International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention, pp. 424-432, 2016.

복소 초음파 데이터를 위한 시암 네트워크의 확장 분석

Anika Tabassum Sejuty[1*], 박수현[1]
이화여자대학교 전자전기공학과[1]

Extended Analysis of Siamese Networks for Complex Ultrasound Data

Anika Tabassum Sejuty[1] and Suhyun Park[1*]
Department of Electronic & Electrical Engineering, Ewha Womans University, Seoul, Korea
*suhyun.park@ewha.ac.kr

Abstract

Accurate vascular wall motion analysis holds significant potential for cardiovascular disease detection. After finding out the effective performance of Siamese Neural Network for vascular wall motion tracking [2], various ultrasound data types were compared for Siamese network-based tracking [4], revealing that complex-valued and RF representations provide reliable and comparable performance. Building on these findings, the effect of network design on motion estimation for complex data was investigated. A Siamese network with a single shared CNN for both inputs (Unified-Siam) was compared to another Siamese network using separate CNNs to process the real and imaginary components of the complex data (Split-Siam). Both architectures were trained using simulated carotid motion data and evaluated on both simulated and in-vivo sequences encompassing axial, lateral, and combined random motion scenarios. While the Split-Siam network exhibited slight improvements in selected conditions, the Unified-Siamese model demonstrated more consistent and stable performance across all datasets and motion directions, reaffirming its reliability for vascular wall motion estimation. The results confirm that Unified-Siam effectively leverages complex data for accurate 2D motion estimation, highlighting its suitability without requiring additional model complexity.

1. Background

The accurate analysis of vascular wall motion plays a vital role in the early detection of cardiovascular diseases. Ultrasound imaging is widely used for vascular assessment due to its safety, affordability, and real-time imaging capabilities. With the rise of data-driven approaches, deep learning has emerged as a powerful tool for motion estimation. Prior studies have investigated architectures such as LSTM and Siamese networks for vascular motion tracking [1–2]. Also, the effect of ultrasound data type on Siamese network performance was examined, demonstrating that complex-valued and RF data provide reliable and comparable motion tracking results.

Building on this foundation, the motivation came in to analyze the model specifically for complex data. Two Siamese network architectures were considered: Unified-Siam, a conventional design where a single shared CNN processes the complex data through two input channels, and Split-Siam, which employs separate CNN branches to independently process the real and imaginary components of the complex data. Both models were trained on simulated carotid motion and evaluated on simulated and in-vivo sequences, enabling a controlled comparison of network design on 2D vascular wall motion tracking performance.

2. Methodology

Both models mentioned above share a common design principle of learning motion correspondence between a fixed template and a corresponding search window [3]. In the first model (Unified-Siam), which adheres to the traditional Siamese structure, features are extracted from both input windows, the template, and the search, using a shared convolutional neural network (CNN). A correlation operation is then performed to produce a displacement score map. The second model, referred to as Split-Siam, introduces multiple CNN branches to separately process the real and imaginary components of the template and search before feature correlation.

To simulate tissue scattering and vascular wall motion under realistic ultrasonic imaging conditions, training data were generated using the Field II simulation framework. Axial, lateral, and random 2D displacement motion were among the three motion categories that were covered by variations in wall thickness and motion amplitude.

To facilitate supervised learning, ground truth displacements were allocated to every training pair. All input data were represented in complex forms. To provide a controlled comparison of architectural performance, the two network types were trained with the same datasets and hyperparameters.

During testing, for in-vivo data, manually annotated in-vivo carotid artery sequences were used to evaluate resilience and generalization across motion types. Root Mean Squared Error (RMSE) was used to measure performance in both axial and lateral directions.

3. Results

The performance of the Unified-Siam and Split-Siam networks was evaluated on simulated and in-vivo carotid sequences. RMSE was calculated across all the directions.

Table 1: Mean & STD of RMSEs for simulation data

Model	Lateral	Axial	Random (Lateral)	Random (Axial)
Unified-Siam	0.01739 ± 0.00153	**0.00881 ± 0.00245**	**0.03963 ± 0.00004**	**0.01266 ± 0.00013**
Split-Siam	**0.01211 ± 0.00005**	0.04520 ± 0.00130	0.05380 ± 0.00107	0.03630 ± 0.00058

As shown in Table 1, in simulation data, the Split-Siam network demonstrated slightly lower RMSE for lateral-only motion, indicating a slight improvement in lateral motion estimation, which can be considered as comparable with Unified-Siam. For axial-only and random displacements, the Unified-Siam network consistently outperformed the Split-Siam architecture. Figure 1 illustrates the distribution of RMSE values for the simulation dataset, where both models exhibit similar variability, confirming the consistency of their performance.

Table 2 presents the analysis for in in-vivo sequences where similar

trends were observed. The Split-Siam network yielded slightly lower RMSE for lateral motion, whereas the conventional Siamese network maintained lower RMSE for axial motion. These results indicate that processing real and imaginary components separately provides improvement, primarily for lateral motion, while the Unified-Siam is showing more reliable tracking across axial and combined motion scenarios. Figure 2 presents the corresponding boxplot for the in-vivo dataset, further confirming that using separate CNNs for complex data does not provide meaningful performance improvement.

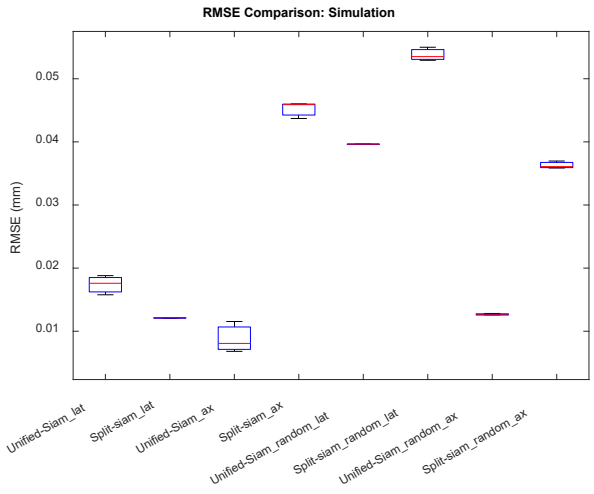


Figure 1: Performance comparison of simulation complex data

Table 2: Mean & STD of RMSEs for in-vivo data

Data type	Lateral	Axial
Unified-Siam	0.27172 ± 0.02753	**0.02686 ± 0.00291**
Split-Siam	**0.22473 ± 0.01381**	0.04334 ± 0.00335

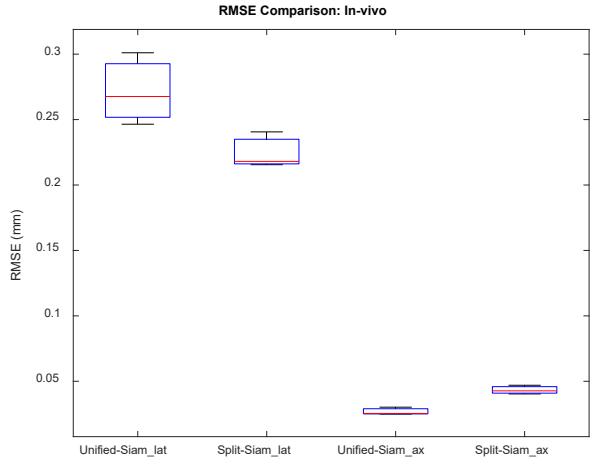


Figure 2: Performance comparison of in-vivo complex data

Overall, the results demonstrate that Unified-Siam consistently achieves superior accuracy in 2D vascular wall motion estimation, particularly in the axial direction, outperforming Split-Siam despite its simpler architecture. This highlights the effectiveness and efficiency of the unified approach for handling complex ultrasound data.

It is worth noting that for truly efficient processing of complex-valued ultrasound data, a fully complex-valued Siamese network, in which all operations are handled natively in the complex domain, is required. Our recent work [5] introduces such a framework, demonstrating the potential of this approach to fully exploit the representational power of complex-valued data for vascular wall motion tracking. This design marks a promising and technically meaningful direction in complex-valued deep learning. Future work will focus on further improving the network structure to enhance both accuracy and computational efficiency.

4. Acknowledgements

This work was supported by the Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science and ICT under Grant NRF2023R1A2C2003737.

5. References

[1] J. Seo, L. S. Nguon and S. Park, "Vascular wall motion detection models based on long short-term memory in plane-wave-based ultrasound imaging", Phys Med BioI, vol. 68, no. 7, Mar 2023.

[2] A. T. Sejuty, J. Seo and S. Park, "2D Motion Tracking for Vascular Wall in Ultrasound Imaging," 2024 International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC), Taipei, Taiwan, 2024, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICEIC61013.2024.10457266.

[3] C. Xiao, Z. Li, J. Lu et al., "A new deep learning method for displacement tracking from ultrasound RF signals of vascular walls," (in eng), Comput Med Imaging Graph, vol. 87, p. 101819, Jan 2021, doi: 10.1016/j.compmedimag.2020.101819.

[4] A. T. Sejuty and S. Park, “Comparative Analysis of Ultrasound Data Representations Vascular Motion Tracking,” presented at 제65회 대한의용생체공학회 춘계학술대회, Jeju, South Korea, 2025.

[5] A. T. Sejuty and S. Park, “Deep Complex Network for Vascular Wall Motion Tracking in Ultrasound Imaging”, presented at the IEEE International Ultrasonic Symposium, Utrecht, Netherlands, 2025.

Poster-261

영상 정보를 활용한 로봇 초음파 다축 혈관 추적 기법

Sothea Phann[1], 박수현 [1]
이화여자대학교 전자전기공학과 [1]

Image-Based Multi-Axis Vascular Tracking in Robotic Ultrasound

Sothea Phann[1], Suhyun Park[1*]
Department of Electronic and Electrical Engineering, Ewha Womans University, Korea
*suhyun.park@ewha.ac.kr

Abstract

We propose an image-based method for tracking vascular structure in robotic vascular ultrasound imaging using a deep learning approach with an adaptive template update strategy. This approach allows the tracker to maintain high accuracy despite local deformations and appearance changes in B-mode ultrasound sequences. We evaluated the method on robotic phantom scans with simultaneous axial and lateral probe motions. The proposed method achieved stable and precise tracking across both directions, outperforming traditional block matching and fixed-template approaches. These results demonstrate that adaptive template updating enables fully image-based, sensor-free vascular structure tracking, providing robust feedback suitable for integration into real-time robotic ultrasound systems.

1. 연구 배경

Accurate and stable motion estimation is essential for maintaining consistent vascular visualization in robotic ultrasound imaging. Robust and precise tracking ensures reliable visualization and supports quantitative assessment of vascular structures, improving measurement and diagnostic accuracy. In practical scenarios, ultrasound probe movement and physiological factors such as respiration or pulsation can induce complex, simultaneous motions along both axial and lateral directions. These coupled motions cause non-rigid tissue deformations and rapid changes in speckle patterns, making it challenging for trackers to maintain accurate correspondence between frames. These challenges are particularly critical in robotic ultrasound systems, where precise probe positioning and consistent target visualization are essential for automated or quantitative imaging [1][2]. Conventional tracking methods, including block matching or fixed-template deep learning approaches, often degrade under such conditions due to template drift and speckle decorrelation. Additionally, many existing studies rely on external motion sensors to estimate displacement, which can increase system complexity and cost [3][4].

This study aims to develop a fully image-based, sensor-free displacement estimation framework capable of robustly tracking vascular motion under simultaneous multi-axis movements. To achieve this, an adaptive template update strategy is integrated into a deep learning network framework for ultrasound image tracking. By dynamically adapting to local image deformation while preserving template reliability, the proposed approach achieves accurate displacement estimation directly from B-mode ultrasound sequences, enhancing the robustness and stability of vascular tracking in robotic ultrasound applications.

2. 연구 방법

B-mode ultrasound images from vascular phantoms and in-vivo scans were augmented with controlled synthetic motions to generate the training dataset for the deep learning framework. For tracking experiments, a robotic arm equipped with a linear ultrasound probe scanned a vascular phantom along predefined paths with simultaneous axial and lateral motions. Each sequence contained 200 frames. During simultaneous axial and lateral motions, contact forces between the probe and phantom cause deviations from the programmed robot trajectory, making the robot-recorded displacements unreliable. To address this, a polynomial fitting procedure was applied to generate a smoothed ground-truth reference for quantitative evaluation.

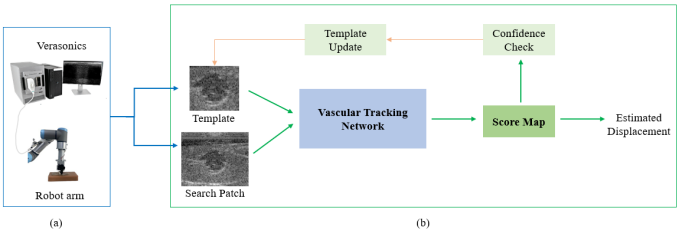


Fig. 1. Block diagram of the proposed displacement estimation approach (a) robotic ultrasound scanning setup (b) proposed adaptive template update deep learning network.

An adaptive template update strategy was integrated into a deep learning network to estimate displacements directly from B-mode ultrasound sequences [5]. The adaptive strategy uses a confidence threshold to determine when the reference template should be updated, ensuring that updates occur only when the tracker is confident, thereby suppressing drift from unreliable frames. A blending factor gradually merges new information into the template, avoiding abrupt changes that could destabilize tracking. The network was trained on the synthetic dataset and evaluated on robotic phantom scans, with performance measured using mean absolute error (MAE) between predicted and ground-truth displacements.

3. 연구 결과

The proposed method was evaluated on vascular phantom sequences with simultaneous axial and lateral motions, each generated using a different reference point to ensure variability in motion patterns. The line plots in Figure 2 show displacement estimates for both lateral and axial directions, comparing results with and without adaptive template update against the ground truth displacement, illustrating smoother and more accurate tracking when using the update strategy.

Quantitative comparison with and without fixed-template deep learning model and traditional block matching is summarized in Table 1. Across all evaluated sequences, the proposed method consistently achieved lower mean absolute errors than other approaches in both lateral and axial directions.

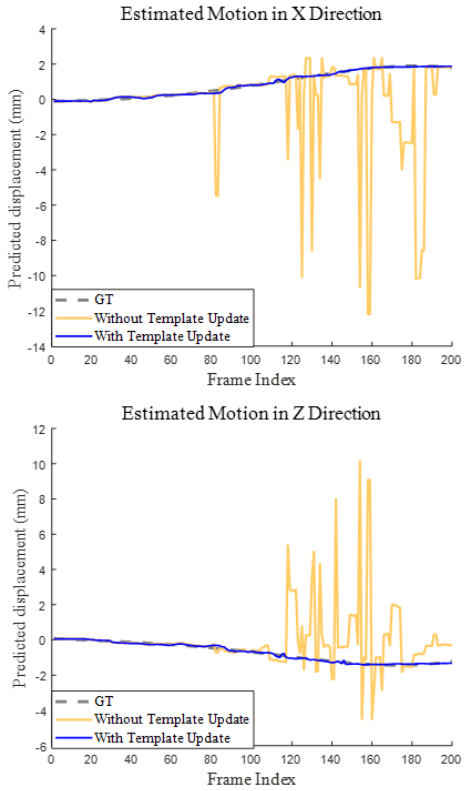


Figure 2. Predicted displacements in lateral (X) and axial (Z) directions comparing fixed-template and adaptive update methods with ground truth.

Table 1. Displacement estimation errors
(mean ± standard deviation in mm)

Axis	Proposed Model	Fixed-Template Model	Block Matching
Lateral	0.057 ± 0.010	1.234 ± 0.772	1.345 ± 1.641
Axial	0.051 ± 0.005	0.910 ± 0.535	1.133 ± 0.871

These results indicate that the proposed method significantly improves robustness and accuracy during simultaneous multi-axis motions, enabling precise and fully image-based vessel tracking suitable for integration into real-time robotic ultrasound systems. Incorporating template updates into block matching will be addressed in future work to enable further improvement.

4. Acknowledgements

This study was supported by the Basics Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science and Technology and ICT under Grant NRF-2023R1A2C2003737

5.참고 문헌

[1] X. Ma, M. Zeng, J. C. Hill, B. Hoffmann, Z. Zhang, and H. K. Zhang, “Guiding the Last Centimeter: Novel Anatomy-Aware Probe Servoing for Standardized Imaging Plane Navigation in Robotic Lung Ultrasound,” IEEE Trans. Autom. Sci. Eng., vol. 22, pp. 6569–6580, 2025, doi: 10.1109/TASE.2024.3448241.

[2] R. Nakadate, J. Solis, A. Takanishi, E. Minagawa, M. Sugawara, and K. Niki, “Out-of-plane visual servoing method for tracking the carotid artery with a robot-assisted ultrasound diagnostic system,” in 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 2011, pp. 5267–5272. doi: 10.1109/ICRA.2011.5979594.

[3] Q. Cai, C. Peng, J. C. Prieto, A. J. Rosenbaum, J. S. A. Stringer, and X. Jiang, “A Low-Cost Camera-Based Ultrasound Probe Tracking System: Design and Prototype,” in 2019 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), Oct. 2019, pp. 997–999. doi: 10.1109/ULTSYM.2019.8925631.

[4] E. Choi, L. Qian, and S. Park, “Sensor-free contact force guidance for ultrasound imaging,” in Medical Imaging 2025: Ultrasonic Imaging and Tomography, SPIE, Apr. 2025, pp. 33–37. doi: 10.1117/12.3047049.

[5] L. Bertinetto, J. Valmadre, J. F. Henriques, A. Vedaldi, and P. H. S. Torr, “Fully-Convolutional Siamese Networks for Object Tracking,” Dec. 01, 2021, arXiv: arXiv:1606.09549. doi: 10.48550/arXiv.1606.09549.

Poster-262

유방 특성 모사 데이터 기반 딥러닝 정량 초음파 추정 기술

이민규[1], 박기훈[1], 김계현[2], 윤희철[1*]

단국대학교 인공지능융합학과[1]

삼성리서치 비주얼테크놀로지팀[2]

Deep Learning–Based Quantitative Ultrasound Estimation Using Breast-Mimicking Data

Minkyu Lee[1*], Gihun Park[1], Gyehyun Kim[2], Heechul Yoon[1]

Department of AI-Based Convergence, Dankook University, Yongin-si, Gyeonggi-do 16890, Republic of Korea[1]

Visual Technology Team, Samsung Research, Samsung Electronics Co., Seoul 06765, South Korea[2]

[*]heechul.yoon@dankook.ac.kr

Abstract

Ultrasound imaging offers real-time visualization using harmless sound waves, avoiding ionizing radiation and allowing for safe, repeated examinations. However, conventional B-mode ultrasound has a limited field of view, low spatial resolution, and poor contrast between lesions and surrounding tissues, making the detection of visually indistinct lesions highly operator-dependent. To overcome these limitations, we propose a deep learning–based quantitative ultrasound (QUS) framework. Using simulation-based training data that reflect breast anatomy, the trained network effectively estimates quantitative ultrasound parameters, enabling accurate detection of lesions with similar echogenicity to surrounding tissues. This demonstrates the potential of QUS as a diagnostic aid to conventional B-mode imaging.

1. 연구 배경

초음파 검사는 방사선을 사용하지 않아 안전성이 높고 반복 검사가 가능하다는 장점이 있다. 또한 실시간 영상 제공이 가능하여 장기 및 조직의 동적 변화를 평가하는 데 유용하며, 이러한 특성은 임상적 접근성과 진단 효율성을 향상시키는 중요한 요인으로 작용한다. 그러나 낮은 공간 해상도로 인해 미세 구조 평가에는 한계가 따르고, 특히 병변 조직이 주변 조직과 유사한 반사 강도를 가질 경우, 영상에서 병변의 경계가 명확하게 나타나지 않아 병변의 진단이 검사자의 숙련도에 크게 의존하게 된다. 이로 인해 영상 품질과 해석의 일관성을 확보하는 데 제약이 존재한다.

이러한 한계를 극복하기 위해, 매질 내부의 음향학적 파라미터 분포 추정으로 병변 조직을 검출하는 딥러닝 기반 정량 초음파(Quantitative Ultrasound, QUS) 기술이 연구되고 있다[1, 2, 3]. 이때 주로 추정되는 QUS 파라미터로는 초음파의 전파 속도인 음속(Speed-of-Sound, SoS), 음파가 매질 내부에서 전파됨에 따라 크기가 작아지는 정도를 나타내는 감쇠 계수(Attenuation Coeficient, AC), 마지막으로 매질 내부 산란체(Scatter)의 특성 연구 등이 있다.

[1]은 정확한 음속 추정을 위해 매질의 밀도와 음속을 동시에 추정하는 것이 시뮬레이션 기반으로 학습된 딥러닝 네트워크의 일반화 성능 향상을 가져올 수 있음을 보였으며, [2]는 일반적인 길이의 1D 합성곱 커널 대신 64-tab의 딥러닝 커널을 적용하여 주파수 스펙트럼에서 감쇠 계수를 효과적으로 학습할 수 있음을 보였다. [3]의 경우 매질의 산란체 밀도, 산란체의 반사 강도 등을 지역적으로 다르게 설정한 학습 데이터를 직접 제작하였으며, 이를 통해 매질의 산란체 특성을 추정이 생체 데이터에서 병변의 구분에 이용될 수 있음을 보였다.

이러한 선행 연구들에 기반하여, 본 연구에서는 유방의 해부학적 특징을 모사한 딥러닝 학습 데이터를 제작하여 음속과 감쇠 계수를 동시에 추정하는 멀티-태스크(multitask) 기반 정량 초음파 기술을 제안한다. 이때, 추정 성능을 향상시키기 위해 멀티-태스크 최적화 기술[4]과 복소수 기반 학습 방법[5]을 도입했다. 이러한 방법을 통해 기존 초음파 영상에서는 시각적으로 구분하기 어려웠던 조직들을 QUS 파라미터 추정으로 분류할 수 있게 되었으며, 특히 멀티-태스크 방식으로 두 개의 음향학 파라미터를 동시에 추정했을 때, 하나의 파라미터로 구분이 안 되는 조직도 다른 파라미터를 통해 보완적으로 구분할 수 있다는 점을 확인했다.

2.연구 방법

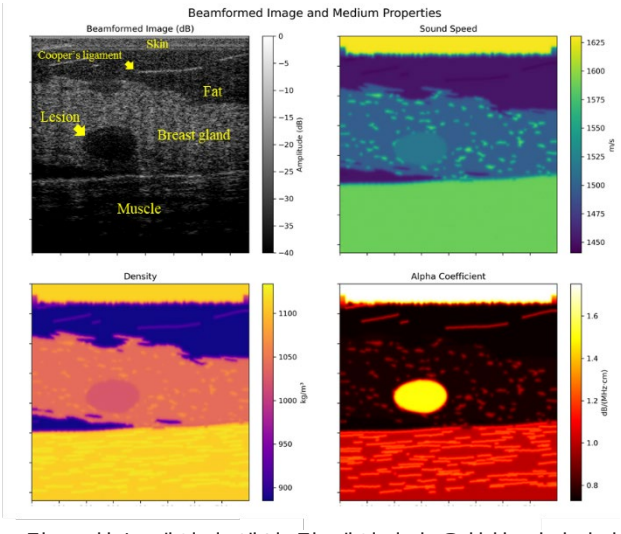


그림 1. 학습 데이터 예시 및 데이터의 음향학 파라미터

유방암을 타깃으로 한 학습 데이터를 제작하기 위해, 본 연구에서는 유방 조직의 해부학적 특징을 모사한 학습 데이터를 제작하였다. 이를 위해 k-Wave [6] 시뮬레이션을 활용하여 피부, 지방, 쿠퍼 인대(Cooper's ligament), 유선(fibroglandular), 그리고 근육 층에 해당하는 영역 등을 구현하였다. 이때 제작된 학습 데이터의 예시는 그림 1. 에 나타내었다. 이때 유선, 쿠퍼 인대, 근막, 유관(breast duct)에 해당하는 영역을 제작하기 위한 이진 마스크는 [1]과 [2]에서 제안된 가우시안 랜덤 필드(Gaussian Random Field,

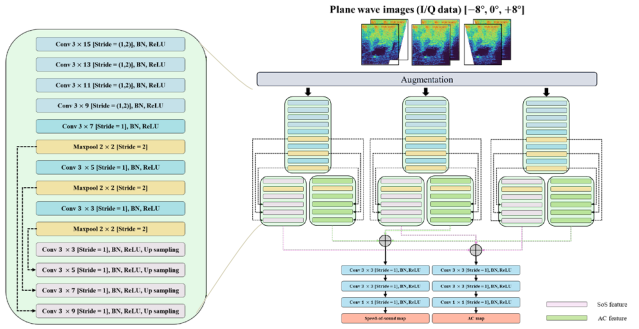


그림 2. 제안하는 딥러닝 네트워크의 구조

GRF)를 사용하였으며, 이에 사용된 가우시안 커널의 크기 [x_f y_f] 및 마스크의 임계값 τ는 표 1. 에 나타내었다.

또한, 정량 초음파(Quantitative Ultrasound, QUS)를 수행하는 딥러닝 네트워크의 구조는 그림 2. 와 같이 구성하였다. 이때 [1]에서 사용된 멀티-헤드(multi-head) 방법을 활용하여 세 개의 서로 다른 각도로 송신된 평면파 데이터를 입력으로 사용하였으며, 입력 데이터는 빔포밍(beamforming)된 IQ 데이터를 활용하였다. 이때 음속(Speed-of-Sound, SoS)과 감쇠 계수(Attenuation Coefficient, AC) 추정을 위한 멀티-태스크(multitask) 구조를 함께 도입하였다. 멀티-태스크에서 발생하는 태스크 간 그래디언트(gradient) 충돌을 해결하기 위해 두 태스크의 파레토-최적(Pareto optimal)을 계산하는 방법 [4]을 도입하였으며, 음파가 가지는 위상과 크기 정보를 동시에 학습하기 위하여 복소수 콘볼루션을 수행하는 복소 계산 기반 학습 방법을 도입하였다 [5].

손실 함수는 평균제곱오차(Mean Square Error, MSE) 함수를 사용하였으며, 태스크 간 그래디언트의 기울기 비율 조정을 위해 총 손실 함수 $MSE_{total} = MSE_{SoS} + 5000MSE_{AC}$ 로 활용하였다. 이때 학습을 위한 배치 크기(batch size)는 4, 학습률(learning rate)은 0.001을 사용하였고 옵티마이저(optimizer)로는 Adam 옵티마이저를 사용하였다.

	[x_f y_f]	τ
유선 (fibroglandular)	[800 ~ 1600, 200 ~ 400]	-0.4 ~ -0.3
유관 (breast duct)	[400 ~ 1200, -150 ~ 50]	0.2 ~ 0.25
쿠퍼 인대 (Cooper's ligament)	[700 -670]	0.25 ~ 0.35
근막	[3400, 300]	0.3 ~ 0.35

표 1. 데이터 제작에 사용된 GRF 커널 크기와 임계값

3. 연구 결과 및 결론

학습 데이터와 동일한 종류의 테스트 데이터에 대한 딥러닝 네트워크의 음속(Speed-of-sound, SoS) 및 감쇠 계수(Attenuation Coefficient, AC) 추정 오차는, 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE)에 대하여 각각 14.8 [m/s] 및 0.170 [dB/MHz/cm]로 나타났다. 이는 음속과 감쇠 계수가 가지는 값을 통하여 양성 및 악성 병변을 구분하여 진단할 수 있는 오차 범위 이내의 정확도를 보임을 알 수 있다 [7, 8].

또한, 제안하는 딥러닝 네트워크는 B-모드(Brightness mode) 영상에서 주변 조직과 잘 구분이 되지 않는 병변 조직을

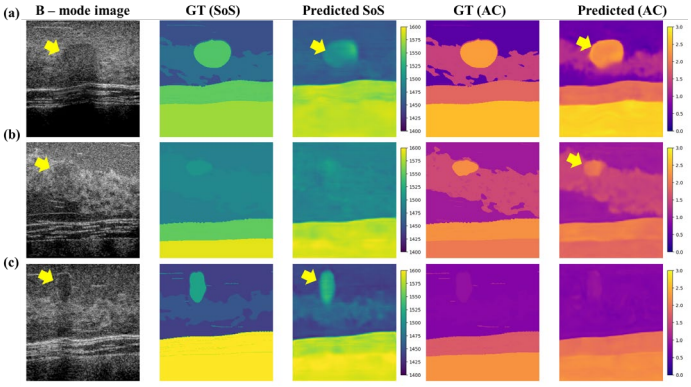


그림 3. 초음파 데이터와 추정된 정량 초음파 파라미터

정량 초음파(Quantitative Ultrasound, QUS) 추정에서 구분할 수 있었으며, 이는 그림 3. 의 (a)에 나타내었다. 또한, 그림 3. 의 (b)처럼 음속의 정답값이 주변 조직과 잘 구분이 되지 않더라도 감쇠 계수를 통해 병변을 진단하거나, 반대로 감쇠 계수를 활용한 진단이 어려운 경우 음속을 활용한 진단이 가능하여, 제안하는 딥러닝 기반의 정량 초음파 진단이 임상적으로 유의미할 수 있음을 시사하였다 (그림 3. (c)).

4. Acknowledgements

이 연구는 2025년도 산업통상자원부 및 한국산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구(20022442, 20024893), 2025년도 (주)아이블포토닉스 연구비 지원에 의한 연구임 (과제명: 고속, 고정밀 반도체 검사를 위한 음향 현미경 개발), 그리고 과학기술정보통신부의 재원으로 정보통신기획평가원
학·석사연계ICT핵심인재양성 지원을 받아 수행된 연구임(IITP-2024-00437027)

5.참고 문헌

[1] Lee, Minkyu, et al. "Deep learning-driven speed-of-sound mapping and real-time correction for enhanced ultrasound imaging." *Measurement* (2025): 118894.

[2] Jarosik, Piotr, et al. "Estimating the ultrasound attenuation coefficient using convolutional neural networks--a feasibility study." *arXiv preprint arXiv:2205.09533* (2022).

[3] Tehrani, Ali KZ, et al. "A deep learning approach for patchless estimation of ultrasound quantitative parametric image with uncertainty measurement." *Medical Imaging 2023: Ultrasonic Imaging and Tomography*. Vol. 12470. SPIE, 2023.

[4] Navon, Aviv, et al. "Multi-task learning as a bargaining game." *arXiv preprint arXiv:2202.01017* (2022).

[5] Trabelsi, Chiheb, et al. "Deep complex networks." *arXiv preprint arXiv:1705.09792* (2017).

[6] Treeby, Bradley E., and Benjamin T. Cox. "k-Wave: MATLAB toolbox for the simulation and reconstruction of photoacoustic wave fields." *Journal of biomedical optics* 15.2 (2010): 021314-021314.

[7] Li, Cuiping, et al. "In vivo breast sound-speed imaging with ultrasound tomography." *Ultrasound in medicine & biology* 35.10 (2009): 1615-1628.

[8] Landini, Luigi, and R. Sarnelli. "Evaluation of the attenuation coefficients in normal and pathological breast tissue." *Medical and Biological Engineering and Computing* 24.3 (1986): 243-247.

Poster-263

체내 삽입형 단일 초음파 변환자를 이용한 3차원 나선형 합성구경 영상 기법

원소현[1*], 이민규[1], 이원규[1], 윤희철[1]

단국대학교 전자전기공학과[1]

3D Helical Synthetic Aperture Focusing Method Using an Intracorporeal Single-Element Ultrasound Transducer

Sohyun Won[1*], Minkyu Lee[1], Wongyu Lee[1], Heechul Yoon[1]

Department of Electrical and Electronic Engineering, Dankook University, Korea

*sohyun.won@dankook.ac.kr

Abstract

본 연구는 체내 삽입형 초음파 시스템에 적용 가능한 단일초음파 변환자 기반 3차원 영상 기법(3-D Helical Synthetic Aperture Focusing)을 제안한다. 단일 변환자(single transducer)는 배열 변환자(array transducer)에 비해 하드웨어 경량화 등에 유리하지만, 구경(aperture)이 좁아 해상도가 낮고 영상 품질이 저하되는 한계가 있다. 이를 극복하기 위해 합성 구경 기법(Synthetic Aperture Focusing)을 적용해 산란체로부터 반사된 신호를 강조하고 잡음은 억제하는 효과를 낸다. 그러나 합성 창(synthetic window)의 크기가 일정 수준을 초과하면 관심 영역 외부의 반사 신호가 포함되어 영상 품질이 열화되는 현상이 발생한다. 이에 본 연구는 영상점에 따라 유효 신호가 포함되는 최적의 합성 구경 크기(N_{syn})을 결정하기 위해 수학적 모델을 제시한다. MATLAB 기반 Field II 시뮬레이션을 통해 1차원 합성 창 영상과 2차원 합성 창 영상을 비교 분석했다. 그 결과, 두 방법 모두 N_{syn} = 21에서 가장 우수한 해상도와 대비도를 보였다. 본 연구 결과는 단일 변환자 기반의 경량 초음파 영상 시스템에서 나선형 합성구경 영상 기법의 최적 설계를 위한 가이드 라인으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

1. 연구 배경

배열 변환자(array transducer)는 다채널 구조로 인해 부피가 크고 복잡도가 높아 삽입형 시스템에 적용하기 제한적이다. 이에 따라 하드웨어 경량화 및 소형화, 비용 효율성을 높이기 위해 단일 변환자(single transducer) 기반 초음파 영상 시스템에 대한 연구가 지속적으로 이뤄지고 있다.

그러나 단일 변환자는 배열 변환자에 비해 구경이 작아 해상도가 떨어지고 초점 외의 영역에서는 영상 품질이 열화된다.

이러한 단일 변환자의 한계를 보완하는 3차원 영상 기법으로 나선형 합성 구경 영상 기법(3-D Helical Synthetic Aperture Focusing)을 제안한다.

합성 구경 기법(Synthetic Aperture Focusing)은 초음파 변환자를 이동하면서 여러 차례 방출한 신호를 통해 수신신호를 초점화한다. 이를 통해 초점 외 영역의 해상도와 신호 대 잡음비(SNR)를 향상하는 기법이다. [1]

본 연구에서는 이 원리를 나선형 궤적에 적용해 1차원 합성 창 (1-D synthetic window)을 이용한 기법과 측방향까지 확장한 2차원 합성 창(2-D synthetic window)을 이용한 기법을 제안한다.

나선형 궤적에 따라 형성된 빔필드 특성을 고려하여, 주요 설계 설정값을 수학적 모델을 통해 제시한다. 또한, Field II 시뮬레이션을 통해 1차원 및 2차원 유효 합성 창 변화에 따른 해상도 차이를 정량적으로 분석하고 제안 기법의 타당성을 검증하고자 한다.

2.연구 방법

2.1 합성창 최적화를 위한 빔필드 분석

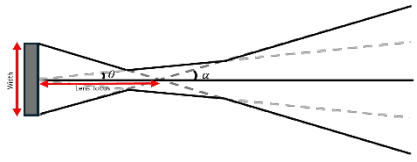


그림 1 초음파 빔 점근선의 간이 작도

일반적인 합성구경 기법은 초점이 없는 구면파(defocused spherical wave)를 사용한다. 하지만 단일 변환자는 렌즈에 의한 고정 초점을 갖게 되어 초점이 없는 구면파가 아닌 일정한 수용각(acceptance angle)을 갖는 파형을 송신한다. 영상 재구성 시 수용각 내에 포함되는 영상점만 이용해야한다. 그렇지 않을 경우 신호가 포함되지 않은 잡음이 추가되어 영상 품질이 열화되는 현상이 발생한다.

그림 1은 초음파 빔 점근선의 간이 작도를 나타낸다. θ는 변환자의 지향각, α는 초점의 교점에 따른 각을 의미한다. 초음파 빔을 작도하는 법은 다음과 같다. 단일 변환자 표면 중심에서 시작하고 기울기가 θ 인 직선과 변환자의 양 끝에서 시작하고 기울기가 α이며 초점에서 교차하는 직선을 그리고 더 바깥에 있는 직선으로 근사한다.

원거리 음장에서는 α 에 의한 빔이 지배적이므로 렌즈 초점을 하나의 음원으로 간주할 수 있다. 본 연구에서는 관심 영역이 원거리 음장에 해당하므로 렌즈 초점을 가상 송신원으로 정의한다. 이에 따라 2.2의 합성 창 계산 시 α에 의한 빔을 고려하여 분석한다.

2.2 나선형 합성 구경 기법을 위한 수학적 모델

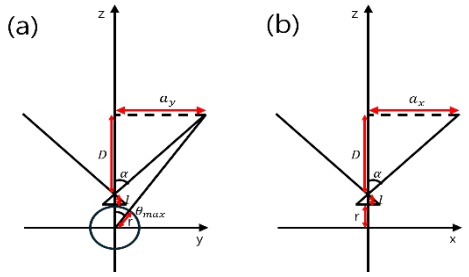


그림 2 나선형 합성 구경 기법 수학적 모델

(a) 회전 방향 모델, (b) 전진방향 모델

y-z 평면 위의 영상점으로부터 합성 구경 영상을 생성할 때 회전 방향에 있는 신호를 합성하는 1차원 합성 창 방법과 인접한 나선 위의 신호까지 포함하는 2차원 합성 창 방법 두 가지를 제안한다.

그림 2의 (a)는 회전방향으로 얻은 신호가 영향을 미치는 영역을 나타냈으며, (b)는 전진 방향으로 얻은 신호가 영향을 미치는 영역이다.

a_x, a_y는 초점에 의해 발생한 각에 따른 유효 영역의 길이로 식 (1)로 정의된다. I은 렌즈 초점, D는 렌즈 초점에서 관심 영역까지의 깊이, r은 회전 반경이다. θ_{max}는 신호가 영향의 미치는 최대 회전 각으로 식 (2)로 정의된다.

$$a_{x,y} = D \cdot \tan(\alpha) \quad (1)$$

$$\theta_{max} = tan^{-1}(\frac{\alpha}{D+l+r}) \quad (2)$$

단일 변환자를 회전하는 단위 각도를 $\Delta\theta$라 하면, 하나의 영상점에 사용 가능 최대 신호는 $N_{syn} = \Delta\theta/\theta_{max}$을 따른다.

2.3 나선형 합성 구경 기법을 위한 시뮬레이션

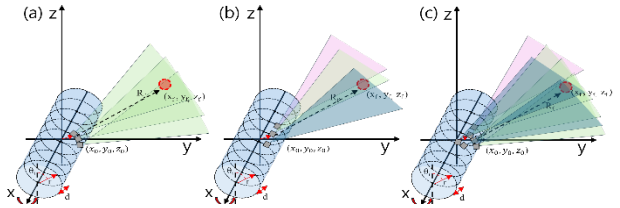


그림 3 나선형 합성 구경 기법 기하학적 모델

(a) 회전방향 1차원 합성 창, (b) 전진 방향 1차원 합성 창, (c) 2차원 합성 창

2.2의 수학적 모델을 바탕으로 시뮬레이션을 수행했다. MATLAB 기반 Field II 프로그램을 사용했다. 시뮬레이션 1은 그림 3의 (a) 방법으로 회전반경에 있는 신호 데이터를 이용해 영상을 재구성하는 방법이다. 시뮬레이션 2는 (c) 방법으로 (a)와 (b)를 합친 방법이다.

크기 [mm]	중심주파수 [MHz]	초점 [mm]	d [mm]	$\Delta\theta$ [deg]	r [mm]	총 나선 수
2.3 × 2.3	10	2	1	1	1	3

표 1 시뮬레이션 설정

시뮬레이션은 와이어 팬텀(Wire Phantom)을 사용했다. 각 와이어의 위치는 z축 위에 20mm부터 50mm까지 10mm 간격으로 배치했다.

나선 한 개의 회전 반경은 [-44° 44°]로 설정했다. 각 신호는 초기 위치를 기준으로 반지름 r을 따라 $\Delta\theta$ 만큼 초음파 변환자를 회전하여 획득했다. 이때 한 바퀴를 회전할 때마다 x축 방향으로 d 만큼 전진해 나선형 궤적을 따라 신호를 얻었다. 각 나선에서 얻은 신호수는 89개이다.

시뮬레이션 1은 합성 창의 크기 (N_{syn})를 1부터 89까지 변화하면서 영상을 재구성했다. 이는 표 1의 시뮬레이션 조건하에서 합성 창의 크기에 따른 영상 품질의 변화를 평가하기 위함이다.

시뮬레이션 2는 시뮬레이션 1 결과 가장 우수한 해상도를 보인 N_{syn}=21을 영상 점과 같은 평면에 놓인 나선의 유효 합성 창으로 고정한 뒤 인접한 나선의 합성 창 크기를 1부터 89까지 변화하며 영상을 재구성했다. 이를 통해 합성 창을 1차원으로 사용할 때와 2차원으로 사용할 때의 영상 품질의 차이를 비교하고, 최적화된 나선형 합성 구경 영상 생성 과정을 정립하고자 했다.

3. 연구 결과

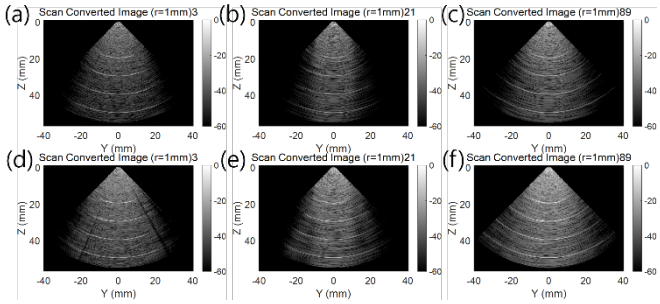


그림 4 합성창 크기 별 이미지

1차원 합성 창: (a) N_{syn} = 3, (b) N_{syn}=21, (c) N_{syn}=89

2차원 합성 창: (d) N_{syn} = 3, (e) N_{syn}=21, (f) N_{syn}=89

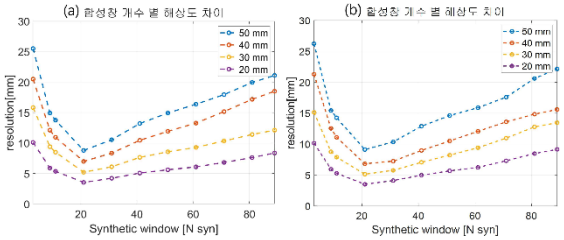


그림 5 합성 창 개수 별 해상도 차이

(a) 1차원 합성 창, (b) 2차원 합성 창

그림 4의 (a) - (c)는 시뮬레이션 1에 대한 결과이며 (d) - (f)는 시뮬레이션 2의 결과를 나타낸다. 1차원 합성 창에서는 N_{syn} = 21인 지점에서 가장 우수한 해상도를 얻을 수 있었다. N_{syn}= 3인 경우 합성 개구가 좁아, 각 송신 신호의 누적 효과가 충분히 발생하지 않는다. 따라서 영상 전반에 무작위 산란체의 영향이 크게 나타난다. 또한, 타겟 신호가 상대적으로 작게 들어온다. N_{syn} = 89인 경우, 근거리 영역에서 중복된 신호가 과도하게 합성되어 부엽(side lobe)이 증가하고 잡음 신호가 크게 들어온다.

2차원으로 확장한 경우에는 y축 상 구경의 크기는 동일하므로 해상도의 큰 차이는 발생하지 않았다. 그러나 더 많은 누적 효과를 얻을 수 있어 대비도 측면에서는 개선된 모습을 그림 4를 통해 확인할 수 있다.

4. Acknowledgements

이 연구는 2025년도 산업통상자원부 및 한국산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(20022442, 20024893)

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원–학·석사연계ICT핵심인재양성 지원을 받아 수행된 연구임(IITP-2024-00437027)

이 연구는 2025년도 (주)아이블포토닉스 연구비 지원에 의한 연구임 (과제명: 고속, 고정밀 반도체 검사를 위한 음향 현미경 개발)

5.참고 문헌

[1] 송태경, "초음파 선형주사 영상을 위한 합성구경 기법의 해석", 의공학회지, vol.20, no.4, p.503-513, 1999

Poster-264

실시간 혈류 모니터링을 위한 고주파 초음파 도플러 시스템 개발

손원태[1], 임찬영[2], 이창양[1], 박진형[2,3*]

성균관대학교 지능형정밀헬스케어연구소[1]

성균관대학교 글로벌바이오메디컬공학과[2]

성균관대학교 지능형정밀헬스케어융합전공[3]

A High-Frequency Ultrasound Doppler System for Real-Time Blood Flow Monitoring

Wontae Son[1], Chanyeong Yim[2], Changyang Lee[1], Jinhyoung Park[2,3*]

Intelligent Precision Healthcare Research Center, Sungkyunkwan University, Republic of Korea[1]

Department of Biomedical Engineering, Sungkyunkwan University, Republic of Korea[2]

Department of Intelligent Precision Healthcare Convergence, Sungkyunkwan University, Republic of Korea[3]

*jin.park@g.skku.edu

Abstract

A high-frequency real-time ultrasound Doppler system was developed for the continuous monitoring of vascular conditions. The system was implemented by integrating the signal processing unit, transmitter and receiver into a single printed circuit board (PCB). A high-speed sampling rate (250 MHz) was employed to digitize high frequency (24 MHz) echo signals. Furthermore, the Doppler processing algorithm was programmed into a Field-Programmable Gated Array (FPGA) for real-time Doppler display. Bidirectional high-speed communication with a PC was established via USB 3.0, enabling the real-time visualization of the Doppler spectrum. The Doppler spectrum visualized through a C# based graphical user interface (GUI) and allowing users to control system parameters directly. A string phantom experiment simulating pulsating blood flow was conducted to validate the system. After the phantom test, *in vivo* experiment was conducted using a rat's femoral vein. In the phantom experiment, system successfully measured velocities in the range of 0.5 to 33 cm/s and real-time changes in the direction of motion. In the *in vivo* experiment, the system successfully captured the venous blood flow pulsation. This study established the feasibility of a high-frequency ultrasound Doppler system for real-time blood flow velocity measurement which is expected to contribute to the advancement of wearable diagnostic devices and real-time monitoring systems in clinical environments.

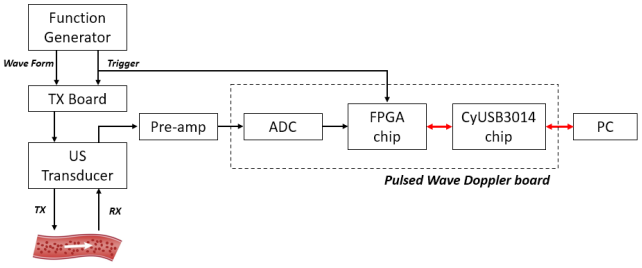
1. 연구 배경

초음파 도플러 시스템은 혈류 속도 측정을 통해 혈관 질환의 정량적 평가에 중요한 역할을 수행한다[1], [2]. 이러한 도플러 시스템을 이용한 혈관 건강 상태의 지속적 모니터링은 환자의 건강 상태 평가 및 혈관 이상의 조기 진단에 매우 유용하다[3],[4]. 그러나, 환자가 혈관 상태를 확인하기 위해서는 병원을 방문해야 하는 불편함이 있고, 일반인이 기기를 운용하기에는 기술적 한계가 있기에 이를 해결하기 위해 최근 휴대용 초음파 도플러 시스템과 패치형 또는 체내 이식 가능한 초음파 트랜스듀서에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다[5]-[7].

본 연구에서는 고주파 초음파를 활용하여 실시간 혈류 속도 측정이 가능한 FPGA 기반 고주파 초음파 도플러 시스템을 개발하였고 신호 처리 모듈과 송수신 회로를 단일 PCB에 통합하여 소형화 하였다. 또한, *in vivo* 실험을 통해 개발된 시스템의 생체 신호처리의 유효성을 확인하였고, FPGA 기반 고주파 초음파 도플러 시스템과 PC 양방향 통신 기능으로 사용자 친화성을 높였다. 이를 통해, 향후 고주파 도플러 시스템의 소형화를 구현하여 웨어러블 기기 또는 임상 환경에서의 실시간 모니터링 환경 개선에 기여하고자 한다.

2. 연구 방법

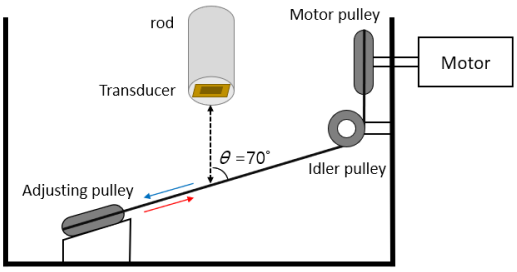
본 연구에서는 실시간 고주파 초음파 펄스파 도플러(PWD) 시스템을 구현하기 위해 혈관으로 인한 신호 감쇠가 덜 발생하도록 24 MHz 고주파 초음파 트랜스듀서를 사용하였다. 고주파 초음파 아날로그 에코 신호를 처리를 위한 고속 ADC(250MHz)를 사용하였다. 또한, 필터링, I/Q 복조, FFT 등의 연산을 실시간으로 감당하기 위해 125 MHz의 FPGA chip을 사용하였고, FPGA와 PC 간의 빠른 통신을 위해 USB 3.0 기반 양방향 통신 인터페이스 모듈을 구축하였다. 도플러 스펙트럼의 실시간 스트리밍을 위해 평균 5 Mbps의 USB 데이터 전송 대역폭을 확보하였다. PC로 전송된 도플러 스펙트럼 데이터는 C# 기반의 사용자 인터페이스(GUI)를 통해 실시간으로 시각화 되고, GUI 상에서 사용자가 조정한 도플러 신호처리용 파라미터 데이터는 FPGA chip으로 전송된다. 이를 기반으로 그림(1)과 같은 실시간 고주파 펄스파 도플러 시스템을 설계하였다.



그림(1). 실시간 PWD 전체 시스템 블록 다이어그램

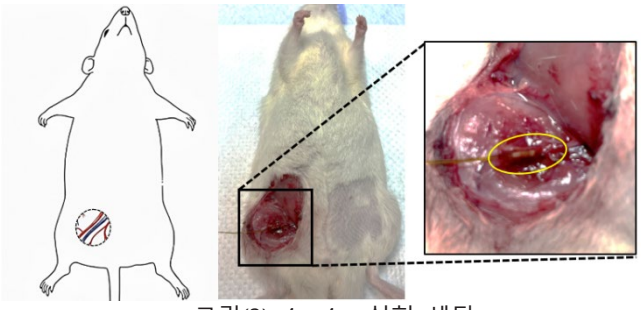
개발된 시스템 검증을 위해 맥동성 혈류를 모사한 팬텀 실험을 진행하였다. 그림(2)과 같이 아크릴 수조에 모터와 도르래를 고정하고 스트링으로 연결하였으며, 아두이노 보드와 모터 드라이버를 활용하여 모터의 회전 속도를 제어하였다. 기존의 모터 회전 주기 파라미터에 사인함수와 offset을 가하여 100 ~ 1600 μs의 주기적 회전 주기 변화를 구현함으로 맥동성 혈류를 모사하였다. 24 MHz 단일 소자

트랜스듀서를 스트링 위에 약 70도의 도플러 각도를 가지도록 위치시킨 후 운동하는 스트링으로부터 도플러 신호를 확인하였다.



그림(2). 스트링 팬텀 시스템 장치 모식도

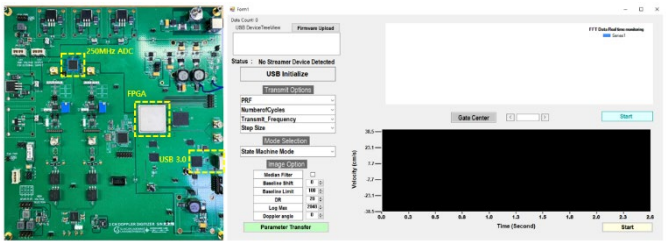
In vivo 실험을 위해 주사 마취된 rat의 대퇴부를 절개 개방하여 대퇴정맥을 노출시켰다. 이후, 그림과 같이 rat의 대퇴정맥에 24 MHz 단일 소자 트랜스듀서를 부착하여 실시간으로 도플러 신호를 확인하였다.



그림(3). *in vivo* 실험 세팅

3. 연구 결과

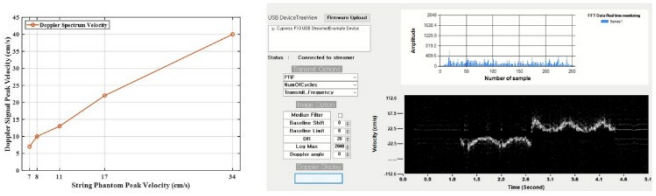
본 연구에서 제작된 고주파 도플러 시스템의 FPGA에서 PC로의 USB 데이터 전송 성능 측정 결과 평균 전송률 5 MBPs 이상을 안정적으로 유지하여, 고속 데이터 취득 환경에서 끊김 없는 실시간 전송을 가능함을 확인하였다. 그림(4)과 같이 송수신부, 도플러 신호처리 FPGA chip, USB 고속 통신용 chip을 $22.5\,cm \times 22.5\,cm$ 크기의 단일 PCB에 통합함으로써 소형화 하였다. USB 양방향 통신을 구현하여 GUI 상에서 사용자가 직접 원하는 설정을 시스템에 적용할 수 있었다.



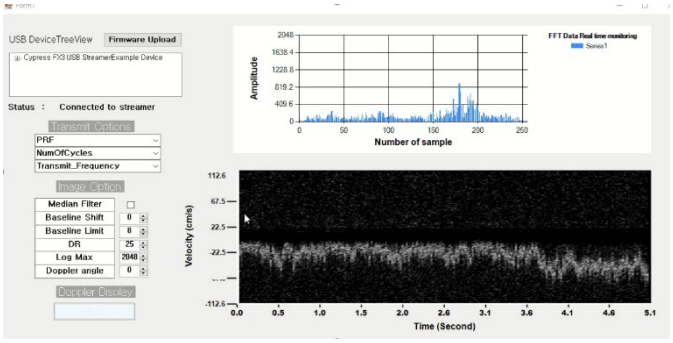
그림(4). 하드웨어 보드 및 GUI 이미지

구현한 스트링 팬텀으로부터 0.5 ~ 33 cm/s 범위의 속도를 측정하였다. 스트링 팬텀에서 회전 주기에 따른 스트링의 선속도를 고려했을 때, 도플러 신호를 성공적으로 검출하였음을 확인하였다. 또한, 도플러 신호를 측정하는 중 모터의 회전 방향을 반대로 전환했을 때 그림(5)과 같이 도플러 신호의 실시간 변화를 확인하였다. 또한, *In vivo* 실험 결과 rat의 대퇴정맥에서 그림(6)과 같이 정맥혈의 맥동성 파형을 확인하였다.

이를 통해, 본 연구에서는 FPGA 기반 실시간 고주파 도플러 시스템을 단일 PCB로 통합하여 구현하였고, 팬텀 및 생체 실험을 통해 임상 환경에서 실시간으로 혈류 속도를 측정할 수 있는 가능성을 확인하였다. 따라서, 추후 시스템의 소형화를 통해 휴대용 기기 또는 임상 환경에서의 실시간 모니터링 환경 개선에 기여할 것으로 기대한다.



그림(5). 회전 주기에 따른 스트링 속도와 회전 방향 전환 시 도플러 스펙트럼 변화



그림(6). Rat의 대퇴정맥에서 얻은 도플러 스펙트럼 시각화

4. Acknowledgements

이 연구는 National Research Foundation of Korea(NRF) 과제의 지원을 받아 수행하였음. (RS-2025-00265524 and RS-2025-00348848)

5.참고 문헌

[1] Offermann, Elizabeth A et al. “Reliability and Clinical Correlation of Transcranial Doppler Ultrasound in Sturge-Weber Syndrome.” Pediatric neurology vol. 74 (2017)

[2] Zarins, C K et al. “Carotid bifurcation atherosclerosis. Quantitative correlation of plaque localization with flow velocity profiles and wall shear stress.” Circulation research vol. 53,4 (1983)

[3] R. Chad Webb et al., Epidermal devices for noninvasive, precise, and continuous mapping of macrovascular and microvascular blood flow. Sci. Adv.1,e1500701(2015)

[4] Rajaraman, B., Darlong, V., Soni, K.D. et al. Renal Doppler ultrasound to predict acute kidney injury in critically ill patients with acute circulatory failure. J Clin Monit Comput 39, 757–765 (2025)

[5] Boutry, C.M., Beker, L., Kaizawa, Y. et al. Biodegradable and flexible arterial-pulse sensor for the wireless monitoring of blood flow. Nat Biomed Eng 3, 47–57 (2019)

[6] Kenny, JÉ.S., Munding, C.E., Eibl, J.K. et al. A novel, hands-free ultrasound patch for continuous monitoring of quantitative Doppler in the carotid artery. Sci Rep 11, 7780 (2021)

[7] W. Hu, H. Zhang, Z. Zhao, Y. Wang and X. Wang, "Real-time remote vital sign detection using a portable Doppler sensor system," 2014 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS), Queenstown, New Zealand, 2014

Poster-265

희소 초음파 원신호 기반 웨어러블 연속 방광 부피 추정용 End-to-End 딥러닝 모델

김민성[1], 이문환[2], 황재윤[1,2,3]

디지스트 기초학부[1] , 디지스트 전기전자컴퓨터공학과[2], 디지스트 학제학과 의생명공학전공[3],

Wearable Continuous Bladder Volume Estimation from Sparse Ultrasound RF Signals Using Deep Learning

Minseong Kim[1], Moon Hwan Lee[2], Jae Youn Hwang[1, 2, 3]

School of Undergraduate Studies[1], Department of Electrical Engineering and Computer Science[2]

Dept. of Interdisciplinary Studies, Biomedical Science & Engineering[3], DGIST, S. Korea

pushsoneg@dgist.ac.kr

Abstract

With the advent of an aging society, lower urinary tract dysfunction is becoming increasingly prevalent, highlighting the need for continuous and automated bladder volume monitoring. Conventional B-mode ultrasound–based approaches require image reconstruction and segmentation, which depend on high-cost equipment and expert operators, limiting their applicability for real-time or continuous wearable monitoring. To address these limitations, this study proposes an end-to-end regression model that directly estimates bladder volume from sparse raw ultrasound RF signals without image reconstruction. The model employs 1-dimensional convolutional encoders that independently process transverse and sagittal multi-channel RF inputs, followed by feature integration for direct volume regression. By utilizing both amplitude and phase information from RF signals, the proposed framework simplifies computation and enables real-time inference. Experimental results demonstrate that direction-specific (individual) encoders learn distinct acoustic reflection patterns more effectively than a shared encoder design. The shared encoder model achieved an MAE of 70.9 mL and RMSE of 93.0 mL ($R^2 = 0.52$), while the separated encoder model achieved MAE = 33.0 mL, RMSE = 42.2 mL, $R^2 = 0.90$, and ±50 mL accuracy = 88.2 %, showing a substantial improvement in prediction accuracy. The final model size is 24.8 MB with an average inference time of 2.3 ms, meeting clinical real-time requirements. These results verify the feasibility of RF-only end-to-end regression for bladder volume estimation and highlight that learning direction-specific ultrasound representations is crucial for modeling spatial acoustic variations. The proposed framework demonstrates that accurate, real-time bladder volume prediction can be achieved directly from RF signals, suggesting its potential for simplified, signal-level ultrasound wearable monitoring systems in future clinical applications.

1. 연구 배경

고령화 사회의 도래와 함께 하부요로기능장애(Lower Urinary Tract Dysfunction, LUTD) 환자의 수가 급격히 증가하고 있다. LUTD는 배뇨 장애, 과민성 방광, 요폐 등의 증상으로 이어지며, 환자의 삶의 질 저하뿐만 아니라 의료비 부담 증가와 사회적 비용 상승을 초래한다. 특히 고령 환자의 경우, 질병의 조기 발견과 상태 변화 모니터링이 치료 예후에 중요한 영향을 미치기 때문에, 정확하고 지속적인 방광 용적 모니터링 기술의 필요성이 높아지고 있다. 현재 임상에서 표준적으로 사용되는 방광 부피 측정 방법은 B-mode 초음파 영상을 이용한 접근이다. 이 방식은 초음파 빔포밍을 통해 영상을 복원한 뒤, 의료진이 방광의 단면을 분할하여 타원체 근사 모델을 적용함으로써 부피를 계산한다. 이러한 접근은 임상적으로 검증된 신뢰성을 갖지만, 고가의 장비와 숙련된 인력이 필요하며, 영상 복원 및 분할 과정이 복잡하여 웨어러블 기기를 위한 실시간 자동화 및 연속 모니터링에 부적합하다는 한계를 지닌다. 이에 따라 최근에는 최소한의 원시 초음파 RF 신호를 직접 활용하는 연구가 주목받고 있다. RF 신호는 초음파의 반사 강도와 위상 정보를 그대로 포함하고 있어, 영상 복원 없이도 조직의 물리적 특성을 반영할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 RF 신호를 인공지능 모델에 직접 입력하면, 기존의 B-mode 영상 복원 과정을 생략하고도 방광의 부피를 예측할 수 있는 가능성이 생긴다. 본 연구는 이러한 접근을 기반으로, 1차원 합성곱 신경망(1D CNN)을 이용해 최소한의 초음파 RF 신호로부터 직접 방광 부피를 회귀하는 End-to-End 초음파 신호 예측 모델을 제안한다. 특히, 초음파의 전후방(Transverse) 및 측면(Sagittal) 방향 신호가 서로 다른 반사 특성과 공간 정보를 지니는 점에 착안하여, 방향별 인코더를 분리한 구조(Individual Encoder)와 공유 인코더(Shared Encoder)를 비교, 분석하였다. 이를 통해 RF 신호의 방향성에 따른 특징 학습의 효율성을 검증하고, 기존 영상 기반 방법 대비 단순하면서도 정확한 부피 예측이 가능한 새로운 방법론을 제시하고자 한다.

2.연구 방법

본 연구에서는 정제된 환경에서 획득한 서울대학교 병원 RF 데이터를 활용하였다. 특히, 각 데이터마다 복부 초음파 프로브를 이용해 얻은 전후방 방향과 측면 방향의 데이터 각 3개의 채널과 4개의 채널로 총 7개 신호로 구성하였다. 각 채널은 초음파의 반사 강도와 위상정보를 포함하고 있어, 동일한 방광이라도 방향별로 상이한 반사 패턴을 나타낸다. 이로 인해 다채널 RF 데이터는 다양한 시각적 관점을 제공하며, 부피 예측 모델의 입력 다양성을 확보할 수 있다. 데이터 전처리는 RF 신호의 품질 향상과 안정적인 학습을 위해 수행되었다.

RF 데이터의 양이 제한적이기 때문에, 본 연구에서는 채널 조합 기반 증강방식을 설계하였다. 7개의 채널 중에서 전후방(H) 3채널과 측면(S) 4채널을 각각 무작위로 선택해 새로운 조합을 구성함으로써, 동일한 환자에서도 매번 다른 신호 패턴을 생성할 수 있도록 하였다. 이 방식은 단순한

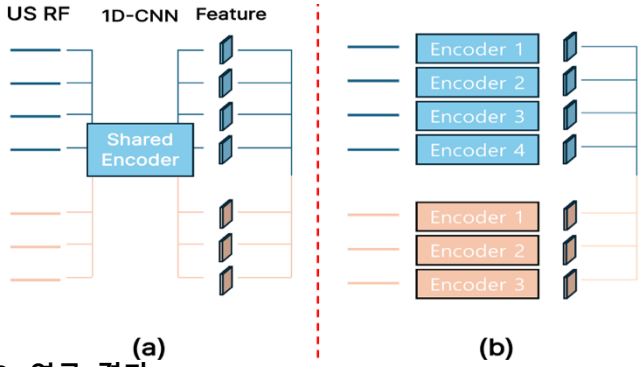
노이즈 삽입보다 물리적으로 타당한 다양성을 제공하며, 모델이 방향, 입사각 변화에 대해 더 강건하게 학습할 수 있도록 돕는다. 또한 극단적인 부피 구간(≤150 mL 또는 ≥600 mL) 에서는 데이터 불균형이 존재하므로, 해당 구간의 샘플을 2배 증폭하여 분포를 균형화하였다. 이렇게 증강된 데이터는 전체적으로 약 5배(×5)의 훈련 샘플을 확보하는 효과를 가져왔다. 데이터셋은 Train:Validation:Test = 6:2:2 비율로 분할하였다.

Table 1: Train dataset composition after augmentation

Dataset	Original Size	After Augmentation
Clinical (SNUH)	276	660

이후 전처리 된 신호는 1차원 1D-CNN 기반의 End-to-End 모델에 입력되었다. 각 채널 신호를 독립적으로 인코딩한 후, 각 특징들을 연결 하여 하나의 통합 표현으로 변환하고, 완전연결 회귀층을 통해 부피를 예측한다. 특히, 본 연구에서는 인코더를 공유하는 구조와 방향별로 분리된 인코더를 각각 구현하여 비교하였다. 분리된 구조에서는 H 방향과 S 방향의 신호가 별도의 경로로 학습되어, 방향별 반사 특성과 공간 정보를 독립적으로 표현하게 하였다.

Figure 1: Architectural Overview of Shared (a) and Individual (b) Encoder Models for RF-Based Learning



3. 연구 결과

본 연구에서는 제안된 희소 RF 신호 기반 End-to-End 회귀 모델의 성능을 검증하기 위해, 인코더 공유 구조(Shared Encoder)와 인코더 분리 구조(Individual Encoder)를 비교하였다. 두 모델은 동일한 학습 조건에서 훈련되었으며, 성능 평가는 MAE, RMSE, 결정계수(R^2), 정확도 지표를 기준으로 수행하였다. 실험 결과, 인코더를 분리하여 학습한 모델이 전반적인 성능에서 뚜렷하게 우수한 결과를 보였다.

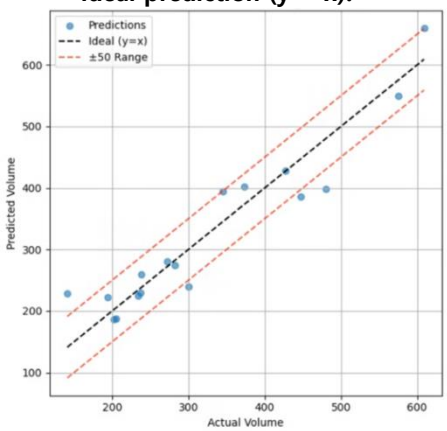
Table 2: Performance comparison between models on RF-based bladder volume estimation

Model	Encoder	MAE (ml)	RMSE (ml)	R^2	Accuracy (%)
Resnet-18	Shared	69.42	86.76	0.579	52.9
Resnet-18	Individual	51.63	66.67	0.751	70.6
SqueezeNet-1D	Shared	84.04	113.36	0.283	41.2
SqueezeNet-1D	Individual	88.16	110.73	0.316	35.3
TCN-1D	Individual	93.24	126.15	0.112	52.9
CNN-BiGRU	Individual	110.21	148.97	-0.239	35.3
Ours (Shared)	Shared	70.94	92.98	0.517	78.9
Ours (Individual)	Individual	**33.00**	**42.19**	**0.901**	**88.2**

인코더를 공유한 구조의 경우 MAE 70.9 mL, RMSE 93.0 mL, R^2 = 0.52를 기록한 반면, 인코더를 분리한 구조에서는 MAE 33.0 mL, RMSE 42.2 mL, R^2 = 0.90, ±50 mL 정확도 88.2%를 달성하였다. 이는 약 50% 이상의 오차 감소와 36% 이상의 예측 정확도 향상을 의미한다. 이러한 성능 차이는 초음파 신호의 방향별 물리적 특성과 관련이 있다. 초음파는 전후방 방향과 측면 방향에 따라 반사 강도, 감쇠율, 그리고 조직 경계면에서의 위상 변이가 다르게 나타난다. 인코더를 공유하는 구조에서는 이러한 방향성 차이가 동일한 필터에 혼합되어 표현력이 제한되지만, 분리된 인코더 구조에서는 각 방향의 반사 패턴이 독립적으로 학습되어 더 풍부한 특징 표현이 가능하다. 결과적으로, 모델이 RF 신호의 공간적 이질성을 효과적으로 학습하게 되어 정확도가 향상된 것으로 분석된다. 또한, 모델의 전체 크기는 약 24.8 MB, 평균 추론 시간은 2.3 ms로 측정되어, 연산 효율성 측면에서도 실시간 추론이 가능한 수준임을 확인하였다.

이는 제안된 방식이 B-mode 영상 복원 과정을 거치지 않고도 부피를 예측할 수 있음을 실험적으로 입증한 것이다. 결과를 종합하면, 제안된 모델은 단순히 영상 복원 단계를 제거한 구조적 단축이 아니라, 초음파 신호의 방향적 특성과 반사 패턴 차이를 인코더 분리로 반영함으로써 학습 효율을 극대화한 새로운 접근이다. 본 연구의 결과는 최소한의 RF 신호만을 이용해 방광 부피를 정량적으로 추정할 수 있음을 보여주었으며, 향후 초음파 신호 분석 기반 웨어러블 자동화 모니터링 시스템으로 확장될 가능성을 제시한다.

Figure 2: Relationship between predicted and actual bladder volumes. The black dashed line indicates the ideal prediction (y = x).



4. Acknowledgements

This work was supported by the Technology Innovation Program (20014214) funded by the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, South Korea). This work was supported by the Technology Innovation Program (20014214) funded by the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, South Korea).

5.참고 문헌

[1] K. Lee, M. H. Lee, D. Kang, et al., *"Intelligent bladder volume monitoring for wearable ultrasound devices: Enhancing accuracy through deep learning-based coarse-to-fine shape estimation," IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr., Freq. Control*, vol. 71, no. 7, pp. 775–785, 2024.

[2] H. Kim, D. Lee, and C. Choi, *"Deep learning model for quality assessment of urinary bladder ultrasound images using multi-scale and higher-order processing," Medical Image Analysis*, vol. 85, p. 102754, 2023.

[3] J. Y. Hwang, S.-S. Byun, S.-J. Oh, and H. C. Kim, *"Novel algorithm for improving accuracy of ultrasound measurement of residual urine volume according to bladder shape," Urology*, vol. 64, no. 5, pp. 887–891, 2004.

Poster-266

스캐너 간 초음파 영상의 성능 향상을 위한 확산 기반 조화화

박세현[1] , 이문환[2] , 이혜윤[4], 황재윤[1,2,3*]

대구경북과학기술원 인공지능전공[1], 대구경북과학기술원 전기전자컴퓨터공학과[2], 대구경북과학기술원 학제학과 의생명공학 전공[3], 한국기술교육대학교 컴퓨터공학과[4]

Diffusion-Based Harmonization for Performance Improvement in Cross-Scanner Ultrasound Imaging

Sehyun Park[1] , Moon Hwan Lee[2], Haeyun Lee[4] , and Jae Youn Hwang[1,2,3*]

Dept of. Artificial Intelligence[1], Department of Electrical Engineering and Computer Science[2], Department of Interdisciplinary Studies, Biomedical Science and Engineering[3], DGIST, Daegu, Republic of Korea,

Dept of. Computer Science and Engineering Koreatech ,Cheonan, Republic of Korea[4]

*Corresponding email: jyhwang@dgist.ac.kr

Abstract

Ultrasound imaging faces severe domain shifts across scanners due to hardware and signal processing differences, degrading model generalization. We propose a diffusion-based harmonization framework that normalizes scanner-specific styles while preserving anatomical fidelity. By integrating a vision–language model into a latent diffusion process, the method aligns texture and contrast across devices without structural distortion. Experiments demonstrate improved inter-scanner consistency and significant gains in classification and segmentation performance, showing the potential of diffusion models for reliable and generalizable ultrasound harmonization

1. 연구 배경

딥러닝 기술은 다양한 의료 영상 분석 분야에서 탁월한 성능을 보여 왔다. 그러나 한 기관 또는 특정 장비에서 학습된 모델은 다른 환경으로 적용될 때 성능이 급격히 저하되는 도메인 불일치(domain shift) 문제를 자주 겪는다[1]. 이러한 현상은 영상 취득 과정에서의 하드웨어 차이, 스캔 프로토콜, 환자 특성 등의 요인으로 인해 발생한다. 특히 초음파 영상은 빔포밍, 신호 처리, 후처리 과정 등 복합적인 요인에 의해 영상의 명암 대비, 스펙클(speckle) 질감, 공간적 스케일이 달라지기 쉬워, 특정 장비에서 우수하게 동작하던 딥러닝 모델이 다른 장비에서는 성능이 크게 저하되는 경우가 빈번하다[2]. 이러한 문제는 임상 적용 시 모델의 일반화 가능성을 저해하고, 더 나아가 의료 인공지능의 신뢰성 을 약화시킨다.

이러한 도메인 불일치를 완화하기 위해 다양한 접근이 시도되어 왔다. 전통적인 접근법인 도메인 일반화 기법은 데이터 증강, 특징 정렬(feature alignment), 적대적 정규화등을 통해 견고한 표현 학습을 시도하지만, 도메인 차이가 큰 경우에는 이미지 정렬 효과가 제한적이며 결과 영상의 스타일을 정밀하게 제어하기 어렵다. 이를 보완하기 위해 영상 간 변환(image-to-image translation) 기법이 제안되었으며, 서로 다른 장비에서 획득된 초음파 영상을 특정 장비의 스타일로 정규화하려는 연구들이 활발히 이루어졌다. 초기에는 CycleGAN 등 GAN 기반 접근법이 초음파 영상 조화(harmonization)에 적용되어 유망한 결과를 보였으나, 학습 불안정성, 모드 붕괴(mode collapse), 미세 구조 왜곡(hallucination) 등으로 인해 임상적 신뢰성 확보에 한계가 있었다[4].

최근에는 이러한 한계를 극복하기 위한 대안으로 확산 모델이 주목받고 있다. 확산 모델은 노이즈로부터 이미지를 점진적으로 복원하는 과정을 학습함으로써 데이터 분포를 안정적으로 포괄하며, 구조 보존적이면서 조건부 제어가 용이하다는 장점을 가진다[5]. 의료 영상 분야에서도 사실적 합성, 쌍-기반 영상 변환, 텍스트 조건 제어(text-conditioned generation) 등 다양한 응용이 시도되고 있으며, 이는 내용 보존과 스타일 제어가 동시에 요구되는 초음파 영상 조화 문제에 특히 적합하다.

더 나아가, CLIP 기반의 대규모 대조 학습(contrastive learning)은 방대한 쌍 데이터 없이도 텍스트 프롬프트를 통해 조건 제어가 가능하다는 점에서 큰 잠재력을 보여준다[6]. 특히 UniMed-CLIP[7]과 같은 의료 특화 VLM(Vision-Language Model) 은 X-ray, CT, MRI, US 등 다양한 모달리티를 아우르며 학습되어, 초음파 도메인에서도 활용 가능성이 제시되고 있다.

최근 연구들은 초음파 영상이 장비 간 차이에 매우 민감함을 실증적으로 보여주고 있다. 동일한 해부학적 구조를 촬영하더라도 서로 다른 스캐너는 전혀 다른 스펙클 패턴과 조직 질감을 생성하며, 이는 수작업 기반 특징뿐 아니라 학습된 표현까지 교란시켜, 후속 분석 모델에 편향을 유발한다. 이에 따라 MRI, CT 등에서 적용되어 온 영상 조화개념을 초음파 영상에도 도입하여, 해부학적 정보를 보존하면서 장비·기관 간 특성을 최소화하는 접근이 요구된다[3].

이에 본 연구에서는 초음파 영상에서 정확한 질병 분류를 위해 서로 다른 초음파 스캐너 간 영상 특성의 불일치로 인해 발생하는 도메인 차이를 완화하기 위해, 확산 모델기반의 초음파 영상 조화화(harmonization) 프레임워크를 제안하였다. 제안된 방법은 해부학적 정보 보존을 위해 조화 손실 함수를 설계하였으며, 장비 특유의 스타일은 텍스트 프롬프트 또는 학습된 스타일 토큰(style token)을 통해 제어하도록 구현하였다. 본 논문에서는 스타일 토큰을 이용한 스캐너 간 조화 결과를 t-SNE 시각화를 통해 해부학적 보존 및 스타일 일치 여부를 검증하고, 질병 분류 및 병변 분할성능 향상을 통해 제안 기법의 효과를 입증하였다.

2.연구 방법

제안된 프레임워크를 개발하기 위해 8 종류의 초음파 영상 공개 데이터셋을 수집하여 스캐너별 데이터 분포의 다양성을 확보하였다. 각 영상은 병변의 종류(benign, malignant, normal)에 따라 라벨링되었으며, 영상 전처리 과정에서는 해상도 통일(256×256), 강도 정규화,

아티팩트제거를 수행하여 입력 품질의 일관성을 확보하였다.

그림 1에서 제안한 모델은 확산 기반 초음파 조화화 프레임워크의 구조를 나타낸다. 본 모델은 UniMed-CLIP 기반 비전-언어 임베딩(Vision-Language Embedding)과 Latent Diffusion Model(LDM)을 결합하여, 서로 다른 스캐너 간 영상 스타일을 조화롭게 정규화하면서 해부학적 정보를 유지하도록 설계했다. 또한 U-Net 형태의 노이즈 제거 네트워크(denoiser)를 사용하였다. 학습 과정에서 모델은 노이즈가 점진적으로 추가된 영상에서 원본 영상을 복원하도록 훈련되며, 이 과정에서 스캐너별 영상의 통계적 특성을 학습한다. 손실 함수는 L2 복원 손실(reconstruction loss)과 해부학적 경계 손실(anatomical consistency loss)을 함께 사용하여, 구조적 보존을 유도하였다.

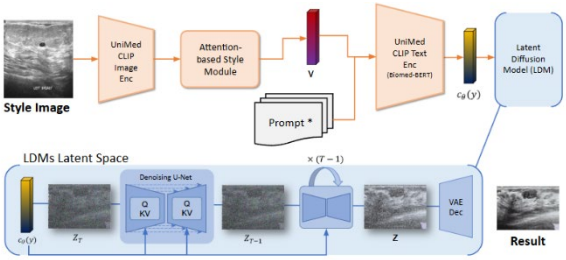


그림 1. Med-InST 모델 구조도

훈련이 완료된 모델은 서로 다른 스캐너에서 촬영된 영상을 입력받아, 공통적인 해부학적 표현을 유지하면서 장비 특유의 스펙클 패턴과 명암 차이를 완화한 조화화 결과를 생성한다. 생성된 영상은 시각적 품질뿐 아니라, Classification을 사용하여 정량적으로 검증하였다.

평가 단계에서는 (1) T-SNE 시각화를 통해 조화화 전후의 잠재 공간 분포를 비교하여, 스캐너 간 클러스터링 경향이 완화되는지 확인하였고, (2) 조화화된 영상을 이용한 분류(classification)에서 정확도(accuracy) 및 F1 score을 계산하였다. 이러한 정량적 평가를 통해 제안된 방법이 스캐너 간 도메인 차이를 효과적으로 줄이고, 모델의 일반화 성능을 향상시킴을 검증하였다.

3. 연구 결과

먼저, 시각적 정성 평가(qualitative evaluation)를 통해 서로 다른 장비에서 획득된 영상 간의 스타일 차이가 줄어드는 것을 확인했다.

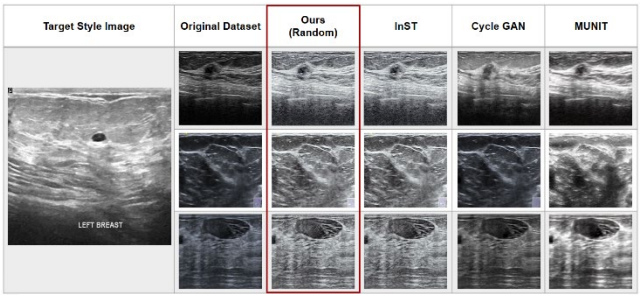


그림 2. 모델별로 harmonization한 이미지들의 비교

제안한 모델은 기존 GAN 기반 변환 모델과 달리 해부학적 경계나 조직 형태를 왜곡하지 않고, 원본 구조를 안정적으로 유지한 채 스캐너 간 스타일 차이를 효과적으로 줄였다. 스타일 차이를 정량적으로 분석하기 위해 T-SNE를 사용하여 기존 데이터셋들과 조화를 한 후의 T-SNE를 비교하였다. 조화를 하기 전 간격이 멀어져 있던

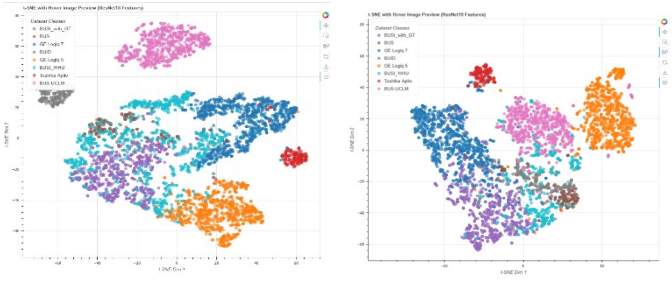


그림 3. harmonization 전 후의 T-SNE

데이터셋들이 좁혀지는 것을 확인할 수 있다.

정량적 평가에서는 조화화 전·후 영상을 이용한 분류(Classification) 모델의 성능을 비교하였다. 조화화된 모델로 학습한 경우, 조화를 하기 전 데이터셋에 비해 정확도와 F1 score가 각각 평균 10% 이상 향상되었으며, 이는 도메인 일반화 성능이 크게 개선되었음을 의미한다.

향후 연구에서는 조화화 모델을 병변 분할(Segmentation) 및 진단 보조 시스템과 연계하여 실제 임상 환경에서의 적용 가능성을 검증하고자 한다. 또한 다양한 장비와 기관 데이터를 포함한 대규모 멀티센터 학습을 통해, 스캐너 간 스타일 차이를 더욱 정밀하게 제어할 수 있는 확산 기반 조화화 프레임워크로 확장할 계획이다.

Classification (Resnet18)		
Dataset	**F1 score**	**Accuracy**
Original dataset (combined)	0.822	0.824
Med-InST (Class)	**0.958**	**0.969**
Med-InST(random)	0.873	0.863
CycleGAN	0.809	0.810

표 1. Classification 정확도와 f1 score 비교 표

5. Acknowledgements

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Science, ICT & Future Planning(RS-2025-02305555).

6.참고 문헌

[1] Guan, H., & Liu, M.,al., “Domain Adaptation for Medical Image Analysis: A Survey,” IEEE Trans. Biomed. Eng., vol. 69, no. 3, 2022.

[2] Aubreville, M., Bertram, C., Veta, M., al., “Quantifying the Scanner-Induced Domain Gap in Mitosis Detection.” arXiv preprint arXiv:2103.16515. 2021

[3] J.-Y. Yang et al., “Cross-scanner harmonization methods for structural MRI may need more than style transfer,” PMCID Article, 2022.

[4] X. Li, Y. JIang, al,. “When medical images meet generative adversarial network: recent development and research opportunities,” Journal on AI in Medical Imaging, 2021

[5] P. Dhariwal and A. Nichol, “Diffusion models beat GANs on image synthesis,” NeurIPS, 2021.

[6] Zhao, Z., Liu, Y., Wu, H., Wang, M., al,. “CLIP in medical imaging: A comprehensive survey,” Medical Image Analysis, 2025.

[7] Khattak, M. U., Kunhimon, S., Naseer, M., al,. “UniMed-CLIP: Towards a Unified Image-Text Pretraining Paradigm for Diverse Medical Imaging Modalities,” arXiv preprint arXiv:2412.10372, 2024.

Poster-267

깊이 유지형 구조화 조명을 이용한 내시경 초음파 초고해상도 영상

최현수[1] , 이문환[1] , 황재윤[1,2,3*]

디지스트 전기전자컴퓨터공학과[1], 디지스트 인공지능전공[2], 디지스트 의생명공학전공[3]

Depth-Stable Structured Illumination for Super-Resolution Endoscopic Ultrasound Imaging

Hyunsu Choi[1] , Moon Hwan Lee[1] , Jae Yoon Hwang[1*]

Dept. of Electrical Engineering and Computer Science[1], Dept. of Artificial Intelligence[2], Dept. of Interdisciplinary Studies, Biomedical Science & Engineering[3], DGIST, Daegu 42988, South Korea

jyhwang@dgist.ac.kr

Abstract

Conventional ultrasound imaging in endoscopic settings is limited by aperture size and attenuation, which restricts spatial resolution at depth. We present a structured acoustic illumination approach that maintains a periodic field profile along the axial direction, enabling depth-preserving super-resolution ultrasound imaging for endoscopic ultrasound (EUS). A depth-stable structured beam was designed to retain its pattern as it propagates, and the concept was evaluated in simulation using phantoms containing point targets and anechoic cysts. Multi-angle transmissions were combined to achieve uniform field coverage, and images were reconstructed to assess resolution and contrast. The structured illumination preserved its periodic profile to approximately 15 mm depth and delivered consistent resolution gains across the field of view. These findings indicate that structured acoustic illumination can encode and recover higher spatial frequencies while remaining robust at depth, offering a practical route to super-resolution ultrasound in constrained EUS geometries and providing a foundation for future experimental validation and real-time implementation.

1. 연구 배경

초음파 영상은 인체 내부의 구조를 비침습적이며 실시간으로 관찰할 수 있는 대표적인 영상 기법으로, 의료 진단과 치료 모니터링 등 다양한 분야에서 활용되고 있다. 그러나 초음파 영상의 공간 분해능은 파장의 물리적 한계와 회절 현상으로 제약을 받는다. 특히 임상적으로 널리 사용되는 수 MHz 대역의 초음파에서는 파장이 수백 마이크로미터 수준에 달해, 미세 혈관이나 세포 단위의 구조를 구분하기 어렵다. 이러한 해상도 한계를 극복하기 위해 고주파 트랜스듀서, 합성 개구, 다중 평면파 합성 등의 기법이 연구되어 왔으나, 각각 고유한 한계를 지닌다.[1] 고주파를 사용할 경우 감쇠가 급격히 증가하여 투과 깊이가 감소하는 trade-off가 존재하고, 합성 개구나 다중 평면파 합성의 경우 이전보다 개선된 공간 분해능을 보였지만 여전히 한계가 존재한다.

광학 영상 분야에서는 이러한 회절 한계를 극복하기 위해 구조화 조명 현미경(Structured Illumination Microscopy, SIM)이 제안되었다.[2] SIM은 조명광의 위상 또는 진폭을 주기적으로 변조하여 모아레(Moiré) 효과를 유도함으로써, 관측 가능한 주파수 대역 내에 고주파 정보를 인코딩하는 방식으로 초해상도를 구현한다. 이 원리를 초음파 영상에 적용하면, 조명 단계에서부터 고주파 성분을 부호화할 수 있어 기존 평면파 영상보다 높은 해상도를 달성할 수 있다. 그러나 초음파는 광학과 달리 전파 과정에서 매질의 감쇠와 산란의 영향을 받기 때문에, 구조화된 음향 패턴이 깊은 영역으로 전파되면서 급격히 왜곡되거나 소멸하는 문제가 발생한다. 결과적으로, 단순한 위상 변조만으로는 깊이 방향에서 구조적 패턴을 안정적으로 유지하는 데 한계가 존재한다.

본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해, Talbot 효과와 개선된 Gerchberg–Saxton(GS) 알고리즘을 결합하여 깊이 방향으로 자기복제되는 구조화 음향장을 설계하였다. Talbot 효과는 주기적인 파면이 매질을 따라 전파될 때 일정한 거리마다 원래의 주기적 구조가 재현되는 현상으로, 이를 초음파 음향장 설계에 적용하면 깊이에 따라 패턴이 안정적으로 반복되는 음향장을 구현할 수 있다. 또한, 개선된 GS 알고리즘을 통해 목표 깊이 범위 내에서 위상과 진폭을 반복적으로 최적화함으로써, 깊은 영역에서도 일정한 공간주파수 특성을 유지하는 구조화된 빔 패턴을 생성하였다.

결과적으로 본 연구는 기존 초음파 영상의 공간 분해능 한계를 극복하기 위해, Talbot 자기복제 원리와 위상 최적화 알고리즘을 결합한 새로운 구조화 음향 장 설계 방법을 제안한다. 이는 깊은 영역에서도 구조적 패턴의 안정성을 유지하면서 초음파 빔의 공간 주파수 대역을 확장시켜, 향후 실시간 초해상도 영상 구현의 기반을 마련할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 연구 방법

본 연구에서는 초음파의 구조화 조명을 깊은 영역까지 안정적으로 유지하기 위해 Talbot 효과와 개선된 Gerchberg–Saxton(GS) 알고리즘을 결합하여 구조화 음향장을 설계하였다. 전체 과정은 Talbot 기반 목표 음향장 설정, GS 반복 최적화, 수치 시뮬레이션 구현의 세 단계로 구성된다.

먼저, Talbot 효과의 자기복제 특성을 이용하여 목표 음향장을 정의하였다. Talbot 효과는 주기적 구조의 파면이 매질을 따라 전파될 때 일정 거리마다 원래의 주기적 구조가 재현되는 현상으로, 이를 초음파 영역에 적용하면 깊이 방향으로 주기적 패턴이 유지되는 구조화 음향장을 구현할 수 있다. Talbot 거리 $zT = 2d^2/\lambda$로 표현되며, d는 횡방향 주기, λ는 전송되는 초음파의 파장이다.

본 연구에서는 트랜스듀서 사양을 중심 주파수 $f = 6.5\,\mathrm{MHz}$, 음속 $c = 1540\,\mathrm{m/s}$을 상정하였고, 구조화 음향장의 횡방향 주기는 어레이 샘플링 제약과 개구 일치성을 고려하여 $d = 1.2\,\mathrm{mm}$로 설정하였다. 이는 pitch $= 0.1\,\mathrm{mm}$,

요소 수 128개의 1차원 선형 어레이(유효 개구 12.8 mm)에서 $d = 12 \times$ pitch로 정합되어 위상/진폭 양자화에 따른 고차 회절 성분을 억제하고 주기적 패턴의 공간 반복성을 확보하기 위함이다. Talbot 조건에 따르면, 선택한 주기에 대응하는 Talbot 조건은 약 12.2 mm 로 산정되며, 이는 본 연구의 관심 심도 범위 내에서 자기복제 되는 구조화 패턴이 형성되도록 하는 기준 깊이이다.

두 번째 단계에서는 개선된 Gerchberg–Saxton(GS) 알고리즘을 이용해 원하는 음향장을 구현하기 위해 트랜스듀서의 아포디제이션과 지연을 최적화하였다. GS 알고리즘은 주어진 목표 음향장과 트랜스듀서 송신 면 간의 위상 관계를 반복적으로 갱신하는 위상 복원 기법으로, 본 연구에서는 이를 다심도 조건에 맞게 확장하였다.

이 과정을 통해 얻어진 최적 위상은 트랜스듀서의 각 요소에 대응되는 지연으로 변환되며, 각 요소의 진폭은 아포디제이션으로 적용되어 구조화 음향장의 강도 분포를 형성한다.

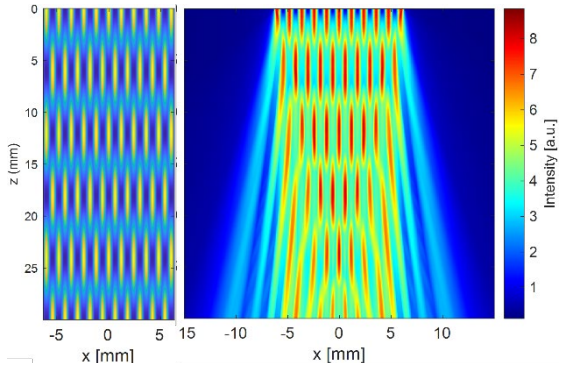


그림 1. 목표 음향 장 강도 맵(좌), GS 알고리즘 최적화로 도출한 송신 파라미터로 출력한 실제 음향 장(우)

마지막 단계에서는 최적화된 구조화 패턴과 파라미터를 적용하여 이미지 획득 시뮬레이션을 수행하였다. 구현 환경은 MATLAB의 k-Wave Toolbox이며, 매질은 조직 모사를 위한 팬텀으로 구성하였다.[3] 팬텀 내부에는 포인트 타깃과 무에코 낭종을 배치하여 해상도 및 콘트라스트 특성을 동시에 평가할 수 있도록 하였다. 송신 시퀀스는 스티어링 각도 $-10°$ 부터 $+10°$ 까지, 스텝 사이즈 $1°$ 로 설계하여 총 21개 각도에 대해 데이터를 획득하였고, 각 각도별로 아포디제이션 시프트를 6회 적용하여 전 시야(FOV)에서의 균일한 신호 취득을 도모하였다.

획득된 원신호는 Delay-and-Sum(DAS) 빔포밍으로 영상화하였으며, 이후 그림 2의 복원 파이프라인에 따라 처리하였다.[4]

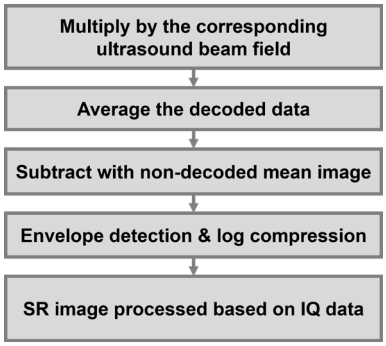


그림 2. 고해상도 복원 알고리즘

3. 연구 결과

본 연구에서는 제안된 구조화 음향 조명 기법의 성능을 기존 평면파 영상과 비교하였다. 그림 3은 동일한 팬텀에 대해 평면파 이미징과 본 연구에서 설계한 구조화 빔 조명 조건에서 획득한 영상을 각각 나타낸다. 제안된 구조화 조명 조건에서는 포인트 타깃 영역에서 세부 구조가 보다 명확히 구분되었으며, 얕은 영역 뿐만 아니라 심부(약 15 mm)에서도 주기적 패턴이 안정적으로 유지됨을 확인하였다.

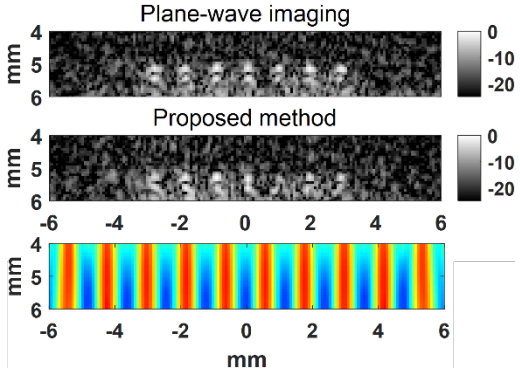


그림 3. 평면파 이미징(상)과 제안된 기법(중)을 이용한 고해상도 복원 결과, 음향장(하)

또한, 정량적 분석을 위해 측 방향 해상도를 FWHM(Full Width at Half Maximum) 기준으로 평가한 결과, 기존 평면파 영상의 평균 측 방향 FWHM은 약 351.2 $\boldsymbol{\mu m}$였던 반면, 제안된 구조화 조명 기법에서는 약 298 $\boldsymbol{\mu m}$로 개선되어 약 15%의 분해능 향상을 달성하였다. 이러한 결과는 Talbot 기반 구조화 음향장이 깊이 방향으로 안정적인 패턴을 형성하며, 초음파 영상의 공간 분해능을 효과적으로 향상시킬 수 있음을 입증한다.

결과적으로, 본 연구에서 제안한 구조화 음향장은 깊이 방향 안정성과 높은 공간 주파수 전달 능력을 동시에 확보하였으며, 이는 내시경 초음파 환경에서의 초고해상도 영상 구현 가능성을 제시한다.

4. Acknowledgements

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (No.RS-2024-00354020).

This work was supported by the Technology Innovation Program (RS-2024-00441704) funded by the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, South Korea).

5. 참고 문헌

[1] Montaldo, Gabriel, et al. "Coherent plane-wave compounding for very high frame rate ultrasonography and transient elastography." *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 56, no. 3, p.489-506, 2009.

[2] M. G. Gustafsson, "Surpassing the lateral resolution limit by a factor of two using structured illumination microscopy," Journal of microscopy, vol. 198, no. 2, p.82-87, 2000.

[3] B. E. Treeby et al, "k-Wave: MATLAB toolbox for the simulation and reconstruction of photoacoustic wave fields", *Journal of biomedical optics*, Vol 15, No.2, p.021314-021314-12, 2010.

[4] Ilovitsh, T., Ilovitsh, A., Foiret, J., Fite, B. Z., & Ferrara, K. W., "Acoustical structured illumination for super resolution ultrasound imaging", *Communications biology*, Vol 1, No. 1, 3, 2018.

Poster-268

분음 도플러 초음파 이미지를 이용한 임의 혈류 파형 구현 시스템의 평가

황시헌[1], 김민서[1], 김유민[1], 김지우[1], 정희석[1], 윤용현[1*]

[1]대림대학교 바이오헬스케어과

Evaluation of the arbitrary blood flow waveform generation system using spectral Doppler ultrasound images

Siheon Hwang[1], Minseo Kim[1], Yumin Kim[1], Jiwoo Kim[1], Heeseok Jeong[1], and Yonghyeon Yun[1*]

[1]Department of Biomedical Engineering, Daelim University College, Korea

[*]yhyun@daelim.ac.kr

Abstract

In this paper, we evaluated the performance of an arbitrary waveform blood flow generation system developed by our research team to control blood flow in a phantom for the maintenance of a Doppler ultrasound imaging device. To assess its performance, Spectral Doppler ultrasound images were acquired for simulated blood flow generated at heart rates of 60, 80, 100, 120, and 140 beats per minute, and sound speed data were extracted from the acquired images using the ImageJ image processing program. The extracted sound speed data were cross-correlated with the control waveform used for blood flow generation. The cross-correlation coefficients were 0.806, 0.806, 0.881, 0.913, and 0.785 for heart rates of 60, 80, 100, 120, and 140 beats per minute, respectively. These results were statistically significant across all conditions, confirming the usefulness of the developed system.

1. 연구 배경

도플러 초음파는 심혈관 질환의 진단과 혈류 평가에 필수적인 영상기술로, 혈류 속도의 정량적 분석을 가능하게 한다. 그러나 G. Howard 등의 연구에 따르면, 서로 다른 도플러 장치 간에 시스템 성능에 상당한 이질성이 존재할 수 있음이 보고되었다[1]. 도플러 초음파 장치의 성능을 정량적으로 평가하고 유지관리하기 위해서는 실제 혈류를 모사할 수 있는 표준화된 테스트 환경이 필요하며 이를 위해서 본 연구진은 임의 혈류 파형을 생성하고 제어할 수 있는 시스템에 대한 기초 연구를 수행하여 왔다[2-3].

한편, 분음(Spectral) 도플러 초음파는 혈류의 시간적 변화를 세밀하게 관찰할 수 있어 임상 및 연구에서 널리 활용되고 있다. 기존 연구에서는 혈류 팬텀을 활용한 장치 성능 평가가 이루어졌으나, 다양한 심박수와 복잡한 혈류 파형의 재현을 통한 평가는 이루어 지지 않고 있으며 실제 혈액은 적혈구 등 고형분과 혈장 등 액체 성분으로 구성되어 있어 점도와 유동 특성이 다양하게 변화할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 본 연구진에 의해 개발된 임의 혈류 파형 구현 시스템과 팬텀에 대한 평가를 수행함에 있어 점도 등의 다양한 물리적 변수를 제한하기 위해 순수한 물을 모의혈액으로 사용하고 분음 도플러 초음파를 통해 혈류 속도를 추출하여, 제어 신호와의 상관분석을 통해 시스템 성능을 평가하였다.

2.연구 방법

2.1 임의 혈류파형 구현 시스템

평가에 사용된 임의 혈류 파형 구현 시스템은 본 연구진들에 의해 개발된 시스템으로 텍사스인스트루먼트사의 MSP430G2553 마이크로컨트롤러를 기반으로 설계되었으며, 펄스폭변조(pulse width modulation)를 이용하여 파형을 생성하고 워터펌프를 구동하여 혈류의 흐름을 생성하여 모사할 수 있도록 설계되었다[2-3]. 혈류의 흐름을 시험하기 위한 도플러 초음파 팬텀 몰드는 Autodesk사의 Inventor 2020을 이용해 3D 모델링을 수행한 후, 3D 프린터(3DWOX 1, Sindoh Co., Ltd.)를 사용하여 ABS 소재로 출력 및 제작되었다. 혈액을 모사물질로는 정수(pure water)를 사용하였으며, 혈관 모사물질로는 수액세트를 활용하였으며, gelatin 10w%의 농도로 연조직을 구성하였다. 임의 혈류파형 구현 시스템과 팬텀을 그림 1의 A와 같다.

2.2 Spectral Doppler Image

분음 도플러 초음파 영상의 수집은 알피니언메디칼 시스템즈사의 초음파 영상진단기(Infinite Insight X-CUBE 90)와 선형 프로브(SL3-19X)를 이용하여 획득하였다. B-mode 영상과 분음 도플러(spectral doppler) 신호를 수집하기 위한 선형 프로브의 구동 주파수는 각각 13 MHz와 5 MHz였다. 혈류 파형의 구동은 분당 심박수를 60, 80, 100, 120, 140 bpm으로 설정하여 수행하였으며, 수집된 결과는 그림 1의 B–F와 같다.

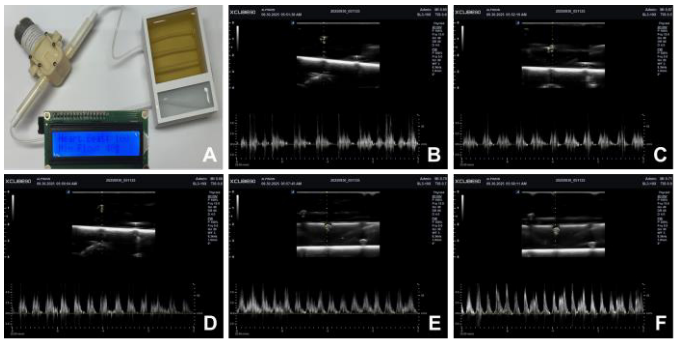


그림 1. 임의 혈류파형 구현 시스템과 팬텀(**A**)의 분당심박수 조건에 따른 분음 도플러 영상(**B**: 60 bpm, **C**: 80 bpm, **D**: 100 bpm, **E**: 120 bpm, **F**: 140 bpm)

2.3 혈류 속도 데이터 추출

수집된 분음 도플러 영상의 혈류 속도 데이터를 추출은 과학적 이미지를 처리하고 분석하는 퍼블릭 도메인 소프트웨어인 ImageJ를 이용하여 수행되었다[4]. 그림 2의 A에 나타낸 바와 같이, 분음 도플러 영상에서 관심영역(ROI, Region of Interest)을 설정한 후 가로축에 대한 스케일을 설정하여 픽셀과 시간에 대한 보정을 수행하고

분음 도플러 신호의 포락선을 그림 2의 B와 C와 같이 검출하여 CSV(Comma-Separated Values)형식으로 저장하였다. 이후 Microsoft® Excel Microsoft 365용 MSO (버전 2509 빌드 16.0.19231.20138) 64비트를 사용하여 각각의 파형의 시작위치에 따라 분할한 후 중첩 (super-imposion)하여 평균값과 함께 그림 2. D에 나타냈다. 각각의 심박수 조건에서 추출된 분음 스펙트럼 신호의 평균값은 그림 2의 E와 같다.

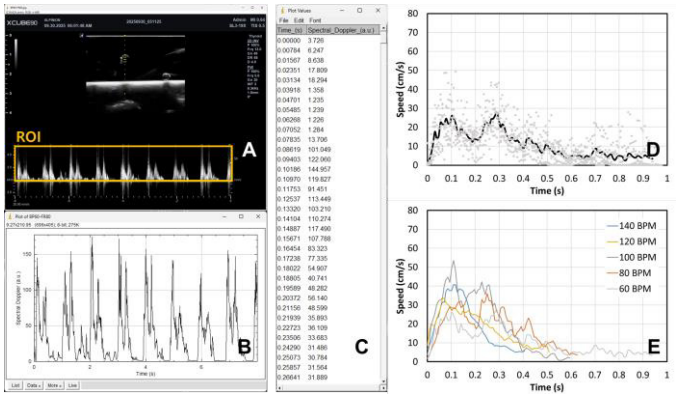


그림 2. ImageJ를 이용한 혈류 속도 데이터의 추출

2.4 혈류 파형의 유사도 평가

임의 혈류 파형 구현 시스템에서 생성된 제어신호는 워터펌프를 구동하여 혈류 속도 변화와 흐름을 발생시키게 된다. 본 논문에서는 분당 심박수에 따른 혈류 변화를 분음 초음파 영상을 획득하고 ImageJ를 사용하여 혈류 속도 데이터를 추출하였다. 추출된 혈류속도 데이터와 제어신호와의 상호 유사성을 평가하기 위하여 각각의 조건하에서 추출된 혈류 속도 데이터와 제어신호의 상호상관분석(cross correlation)을 수행하였다. 또한 양측 검정을 수행하여 상관성에 대한 통계적 유의성 검정을 수행하였다.

3. 연구 결과

분당 심박수 60, 80, 100, 120, 140 bpm의 각 조건에서 수집된 분음 초음파 영상으로부터 추출한 혈류 속도 데이터와 임의 혈류 파형 구현 시스템의 제어 신호 간 유사도 평가 결과는 표 1과 같다. 상호상관분석을 통해 얻은 상관계수는 각각 0.806, 0.806, 0.881, 0.913, 0.785로 나타났으며, 120 bpm 조건에서 0.913으로 가장 높은 상관을 보였다. 반면 140 bpm에서는 0.785로 가장 낮은 상관을 보였으나, 모든 조건에서 전반적으로 높은 상관관계를 보였다. 한편, 통계적 유의성 검정 결과는 모든 조건에서 p값이 0.001 이하로 나타나 높은 상관성이 통계적으로 유의함을 확인하였다.

그러나, 본 연구에서는 실제 혈액을 구성하는 적혈구 등 고형분과 혈장 등 액체 성분에 의해 영향을 받을 수 있는 점도 등의 물리적 변수를 고려하지 못한 한계가 있다. 향후 연구에서는 혈액 모사물질의 점성 등 물리적 특성을 반영하여, 임의 혈류 파형 구현 시스템의 성능과 특성을 지속적으로 개선할 계획이다.

표 1. 혈류 파형의 유사도 평가 결과

Pulse Rate (bpm)	60	80	100	120	140
Correlation	0.806	0.806	0.881	0.913	0.785
p - value	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

4. Acknowledgements

본 과제(결과물)는 2025년도 교육부 및 경기도의 재원으로 경기RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학 지원체계(RISE)의 결과입니다. (2025-RISE-09-B09)

5.참고 문헌

[1] G. Howard, W. H. Baker, L. E. Chambless, V. J. Howard, A. M. Jones, and J.F. Toole, "An approach for the use of Doppler ultrasound as a screening tool for hemodynamically significant stenosis (despite heterogeneity of Doppler performance): A multicenter experience", *Stroke*, Vol 27, No. 11, p.1951–1957,1996.

[2] 강경민, 이영주, 윤용현, "펄스폭변조를 활용한 초음파 혈류 팬텀의 혈류속도 제어 관련 기초연구", *CICS '24 정보 및 제어학술대회 논문집*, p.201-202, 2024

[3] 황시헌, 김지우, 김유민, 김민서, 이지민, 정희석, 윤용현, "도플러 초음파 팬텀의 혈류 속도 제어를 위한 펄스폭 변조 기반 임의 혈류 파형 구현", *2025년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집*, p.2,313-2,314, 2025

[4] Schneider, C. A., Rasband, W. S., and Eliceiri, K. W. "NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis" *Nature Methods*, Vol 9, No.7, p.671-675, 2012

Poster-269

수술 후 지속적인 혈류 모니터링을 위한 이식형 초음파 센서

이창양[1], 김지훈[4], 김인걸[5], 정은재[5*], 박진형[2,3*]

성균관대학교 지능형정밀헬스케어연구소[1], 성균관대학교 지능형정밀헬스케어융합전공[2], 성균관대학교 바이오메디컬공학과[3],
강남대학교 전자반도체공학부[4], 서울대학교병원 이비인후과[5]

Implantable Ultrasound Sensor for Postoperative Monitoring of Blood Flow

Changyang Lee[1], Jihun Kim[4], In Gul Kim[5], Eun-Jae Chung[5*], Jinhyoung Park[2,3*]

Intelligent Precision Healthcare Research Center, Sungkyunkwan University, Republic of Korea[1]
Department of Intelligent Precision Healthcare Convergence, Sungkyunkwan University, Republic of Korea[2]
Department of Biomedical Engineering, Sungkyunkwan University, Republic of Korea[3]
Division of Electronic and Semiconductor Engineering, Kangnam University, Republic of Korea[4]
Department of Otorhinolaryngology-Head and Neck Surgery, Seoul National University Hospital, Republic of Korea[5]
*jin.park@g.skku.edu, *voicechung@snu.ac.kr

Abstract

Postoperative blood flow monitoring is essential for ensuring the viability of free flap transplants and the success of cardiovascular reconstructive procedures. However, conventional monitoring techniques are limited by their reliance on exposed tissue surfaces and often require additional surgical intervention for sensor removal. To address these limitations, we developed a compact, implantable ultrasound Doppler sensor utilizing a biocompatible and biodegradable polymer film, poly(caprolactone-co-glycolide) (PGCL), and a high-frequency piezoelectric element (DL-46). The sensor, measuring 0.85 mm in thickness, 0.8 mm in width, and 2 mm in length, operates at a center frequency of 22.55 MHz with a bandwidth of 35.5%. It was encapsulated in a flexible PGCL matrix via solvent evaporation and implanted into the carotid artery of rabbits. A custom Doppler monitoring system integrated with the Verasonics ultrasound platform enabled stable in vivo blood flow monitoring. The sensor demonstrated reliable acoustic and electrical performance and could be safely removed without additional surgery. These results support the clinical potential of this implantable sensor for continuous, real-time vascular monitoring in postoperative settings.

1. 연구 배경

유리피판 이식 또는 심혈관 재건 수술 중 및 수술 후 혈류를 지속적으로 모니터링하는 것은 혈류의 회복과 유지 상태를 실시간으로 파악할 수 있게 해주며, 이는 수술의 성공과 환자의 예후에 결정적인 역할을 한다[1].

하지만 수술 후에는 외부 압박, 부종, 혈관의 꼬임 등 다양한 요인으로 인해 혈류가 차단되어 폐색이 발생할 수 있으며, 이는 이식 조직의 괴사나 심각한 합병증을 초래해 수술 실패로 이어질 수 있다. 따라서 수술 후 혈류 이상을 조기에 감지하고 신속하게 대응하는 것은 이식 조직의 생존율을 높이는 핵심 요소이다[2].

지금까지 다양한 혈류 모니터링 기술이 개발되었지만, 대부분은 피부 표면이 노출된 피판에만 적용 가능하며, 상처가 봉합된 이후에는 모니터링이 어렵다는 한계가 있다. 경피적 초음파 도플러 유량 측정은 혈관의 정확한 위치를 맞추기 어렵고, 연속적인 모니터링이 불가능하다는 단점이 있다. 또한 기존의 이식형 센서들은 제거를 위해 추가적인 수술이 필요하거나 구조적 제약으로 인해 측정의 정확성이 떨어지는 문제가 있다[3][4][5].

이러한 한계를 극복하기 위해 본 연구에서는 생체적합성과 생분해성을 갖춘 고분자 필름과 펄스 초음파 도플러 기술을 기반으로 이식형 도플러 혈류 센서를 제안한다. 이식형 초음파 센서는 토끼의 혈관에 이식하여 생체 내(in vivo) 실험을 수행하였으며, 수술 후 미세혈관 내 혈류를 안정적으로 모니터링할 수 있었고, 추가적인 수술 없이 안전하게 센서를 제거할 수 있는 가능성을 확인하였다.

2. 연구 방법

이식하여 인체내에서 혈류속도를 모니터링 하기 위해서 DL-46 압전소자(DeL Piezo Specialties, LLC, USA)를 사용하였다.

혈관에 부착하여 혈관 내 혈류를 모니터링을 하기 위해서 800um의 좁은 폭과 혈관 벽에서 안정적으로 고정되어 초음파 신호를 획득하기 위하여 2mm 길이를 가지는 단일소자의 초음파 센서의 크기가 결정되었다, 1mm 이하의 혈관 내부에서의 혈류 속도를 측정하기 위해서 20MHz의 고주파 초음파 주파수를 가지는 센서를 설계 제작하였다.

초음파 센서의 생체 이식을 위해서, 생체적합하고 생분해성을 가지는 고분자 Poly(caprolactone-co-glycolide)(PGCL, 40:60, viscosity 1.6 dL/g, Sigma-Aldrich, USA)를 Dimethylformamide(DMF, Sigma-Aldrich, USA) 용매에 용해시켜 유연한 고분자 필름을 용매 증발법을 이용하여 제조하였다. PGCL 1g과 DMF 용액 9g을 삼각 플라스크에 넣어 가열 교반기에서 80°C, 300rpm으로 12시간 교반하여 10wt% PGCL 용액을 제조하였다. 제조된 PGCL 폴리머 용액을 Polydimethylsiloxane (PDMS) 몰드에 도포한 후, 70°C에서 12시간동안 송풍 건조하였다. 1차 건조 후 에탄올로 세척함과 동시에 PDMS 몰드에서 분리하고, 증류수로 세척하여 상온에서 24시간 송풍 건조하여 유연한 생체적합, 생분해성 PGCL 고분자 필름을 제조하였다.

이식형 초음파 센서 제작을 위하여, PDMS 몰드 내에 초음파 센서를 위치시키고, PGCL 폴리머 용액을 2mm 두께로 도포하여 그림 1 과 같은 형태의 이식형 초음파 센서를 제작하였다.

초음파 센서의 구동과 혈류 모니터링을 위한 도플러 측정 프로그램을 Matlab과 초음파 영상 플랫폼 (Vantage 64LE, Verasonics Inc., USA) Verasonics 장비를 이용하여 그림 2와 같이 구현하여, 제작된 혈류 모니터링 이식형 초음파 센서를 토끼 경동맥 혈관에 이식하여 혈류 모니터링을 통하여 성능평가를 진행하였다.

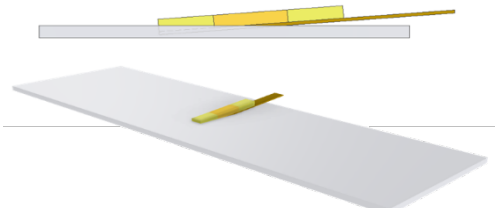


그림 1. 제안된 이식형 초음파 센서 모식도

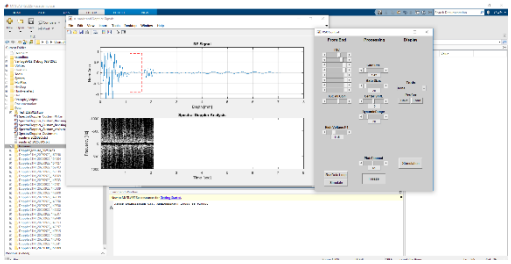


그림 2. 혈류 모니터링을 위한 Verasonics 프로그램 Interface

3. 연구 결과

최적화 과정을 통하여 압전소자의 두께 0.85mm, 폭 0.8mm, 길이 2mm크기의 초음파 압전소자에 FPCB에 Epoxy(Epotek301, Epoxy Technology, USA)에 접착하여 제작되었다. Polyimide 0.1mm 정합층과 Epotek301 0.5mm의 흡음층과 10um의 Parylene을 증착하여 전체 두께 1.5mm의 초음파 센서가 제작되었다. 센서의 성능평가는 주파수 스펙트럼 분석과 전기적 임피던스 및 Pulse-Echo 방법으로 음향특성을 평가하였다.

이식형 초음파 센서는 중심주파수 22.55MHz, 주파수 대역폭 35.5%, 중심주파수에서 35.47 Ohm의 전기적 임피던스로 제작되었다.

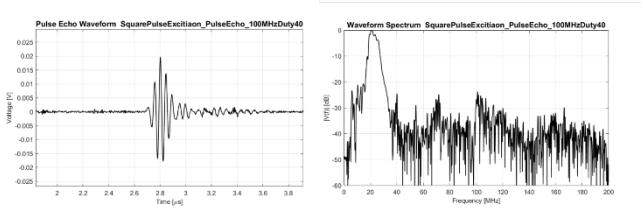


그림 3. 초음파 센서의 Pulse-Echo 및 주파수 분석

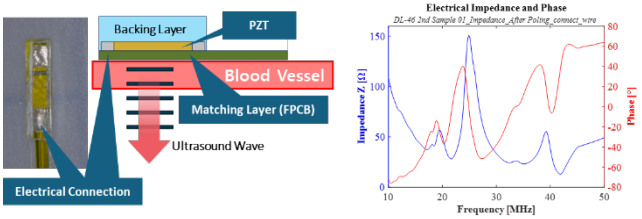


그림 4. 초음파 센서의 구조 및 전기적 임피던스

PGCL 생체적합 및 생분해성 유연 고분자 필름과 결합된 이식형 초음파 센서가 PDMS 몰드를 이용하여 40 x 10mm의 직사각형 모양으로 제작되었다(그림5).

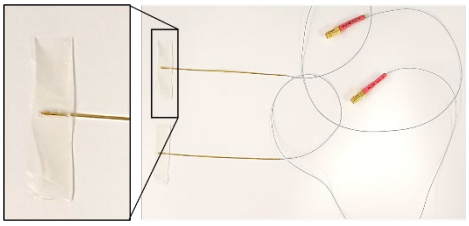


그림 5. 혈류 모니터링을 위한 이식형 초음파 센서

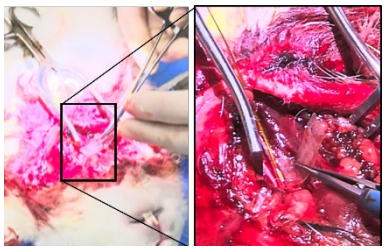


그림 6. 이식형 초음파 센서의 혈관 이식

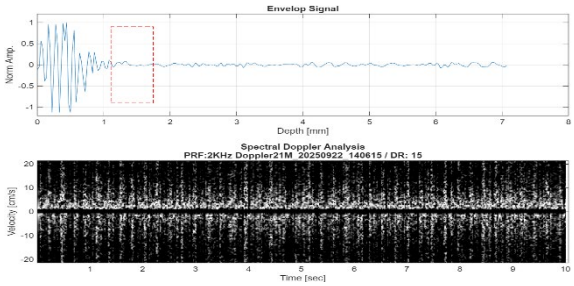


그림 7. 토끼 경동맥에서의 혈류 모니터링 영상

토끼 경동맥에 이식형 초음파 센서를 이식 후 초음파 영상 플랫폼인 Verasonics 장비를 이용하여 Custom 제작된 혈류 모니터링 프로그램으로 동맥혈에서의 RF 초음파 신호와 혈관에서의 펄스 도플러 신호를 영상으로 나타내었다. 이를 통해, 본 연구에서는 수술 후 지속적인 혈류 모니터링을 위한 이식형 초음파 센서를 설계 제작하여, 생체 실험을 통해 임상 환경에 적용할 수 있음을 확인하였다.

4. Acknowledgements

이 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행하였음. (RS-2025-00265524 and RS-2025-00348848)

5.참고 문헌

[1] Rabinovitz RS et al., Implantable sensor for intraoperative and postoperative monitoring of blood flow: a preliminary report. J Vasc Surg. 1990 Aug;12(2):148-57.

[2] Roberts JO et al., An implanted ultrasound Doppler probe for microvascular monitoring: an experimental study. Br J Plast Surg. 1986 Jan;39(1):118-24.

[3] Cannata JM et al., Development of a flexible implantable sensor for postoperative monitoring of blood flow. J Ultrasound Med. 2012 Nov;31(11):1795-802.

[4] Knoedler S. et al., Postoperative free flap monitoring in reconstructive surgery-man or machine? Front Surg. 2023 Feb 22;10:1130566.

[5] Zhao, B. et al., Implantable Sensors for Post-Surgical Monitoring of Vascular Complications. Adv. Sensor Res., 2023, 2: 2200095.

일반대학원 신입생 모집

의료기기산업학과



국내 1호 의료기기산업 특성화대학원 동국대학교 의료기기산업학과는 한국보건산업진흥원의 지원을 받아 산업계 수요 맞춤형 교육 커리큘럼을 운영하여 실무 중심의 융합형 인재를 양성하고 있습니다.

"의료기기 인허가 및 **품질 관리 전문가**,
의료기기 제품 기획 및 **마케팅 전문가**"



실무 교육 커리큘럼

- 의료기기 산업 맞춤형 전문 교육과정 운영
  - 의료기기 전주기 교육 커리큘럼 운영
  - 산업현장에 적용 가능한 이론 및 실습 교육
  - 의료기기 규제과학(RA)전문가 교육 프로그램 운영
  - 최신 의료기기 산업 동향 세미나/심포지움 개최



장학금 지원

- 전일제 수업료 100% 지원
- 부분제 수업료 25% 지원
  (신입생 전원지급, 재학생 직전학기 성적에 근거하여 지급)



취업 지원

- 채용 조건형 인턴십 프로그램 운영
- 취업률 100% (2022년 2월 기준)



학생 활동 지원

- 국내 유수 기업 및 기관 인턴십 프로그램 운영
- 해외 장기 인턴십 지원
  (싱가포르, 일본 등)
- 소속 연구실별 산학협력 프로젝트 기반 인건비 지급
- 학술대회 발표 및 논문 게재 등 연구활동 지원

모집과정

- 석사 과정 00명
- 박사 과정 00명
- 석·박사 통합 과정 00명

모집일정

- **일반전형** : 전기 10-11월경, 후기 5-6월경
- **특별전형** : 전기 12-1월경, 후기 6-7월경
- **수시전형** : 전기 2월경, 후기 8월경
- **접수방법** : 본교 일반대학원 홈페이지 참조
  (https://gs.dongguk.edu/)
  인터넷 원서 접수
  (https://uwayapply.com)

지원자격

- 학사학위 취득자 또는 예정자
  (모든전공 연계 지원 가능)

문 의

- Tel: 02-2290-1449
- E-mail: dmed@dongguk.edu

동국대학교 dongguk university

사람투자

의료 AI반도체 전문인력 양성 사업단

Check!!

의료 AI반도체 전문인력 양성센터 구축 사업이란?



사업기간

– 전체 연구개발기간: 2024. 5. 1. ~ 2028. 12. 31.
– 당해연도 사업기간: 2025. 1. 1. ~ 2025. 12. 31.

사 업 비

– 총 연구개발비: 12,115,250천원

사업내용

– 의료 AI반도체 전문인력 양성을 위한 교육·연구 플랫폼 구축

사업 소개

비전 의료 AI반도체 전문인력 양성을 통한 AI 의료기기 산업 생태계 조성

목표 의료 AI솔루션 및 AI반도체 설계 **엔지니어 총 1,015명 육성**

전략
지능형 의료기기 솔루션, 반도체 설계 엔지니어 육성을 위한 **교육 체계 마련**
AI솔루션 발굴, 반도체 설계 교육 및 연계 프로젝트 **수행 인프라 구축**

사업별 추진과제

전후방 엔지니어 육성

교육과정
AI반도체 전문인력 양성 교육과정 기획
교육과정을 통해 AI 반도체 전문인력 양성

프로젝트
AI반도체 인력양성 기업공동과제 기획
AI반도체 인력양성 기업공동과제 수행

취업·창업
AI반도체 전문인력 취업 지원 및 연계
AI 및 반도체 관련 창업지원 및 육성

교육·연구 플랫폼 구축

AI솔루션 교육센터 구축
AI솔루션 교육 환경 구축
데이터 및 인공지능 플랫폼 구축

AI반도체 교육센터 구축
AI반도체 전문인력 양성 교육 장비 구축
AI반도체 교육 과정 및 환경 구축

교육연구 및 개발 지원
AI반도체 및 솔루션 교육연구 지원체계 구축
AI반도체 및 솔루션 기반 창업 지원체계 구축

연세대학교 미래캠퍼스
의료AI반도체 전문인력양성 사업단

IEC 62366-1:2020

의료기기사용적합성

KOLAS 공인시험기관

사용적합성평가란?
환자, 사용자의 의료기기 사용 관련 안전을 제공하기 위해 유효성, 효율성 및 사용자 만족도를 확립하는 과정으로 2022년 이후 의료기기 인허가 등록 절차 중 의료기기 적합성평가가 의무화됨에 따라 그 중요성이 점점 대두되고 있습니다.

사용적합성평가의 솔루션! 계명대학교 사용성평가연구센터만의 특징

빠른 평가결과서



- 기업별 맞춤형 평가시험
- 니즈 파악으로 시간 절약
- 정부과제 성과검증 평가서

전문의료진 기반 평가



- 10여개 진료과 의료진
- 의료기기 전문 평가시험
- 휴먼팩터기반 평가실시

의료기기 인허가 및 디자인 컨설팅 제공



- 의료기기 인허가 연계
- 의료기기 디자인 분석
- 디자인 컨설팅 제공

C A T T 사용성평가연구센터

대구광역시 달서구 달구벌대로 1095
계명대학교 사용성평가연구센터

www.catt.center
평가 문의 053.580.8980

CoreMotion

골반저근 재활 전문기업

Integrated Solutions
for Pelvic Health
& Wellness



Our Product



PHYSIOWAND

A self-care device that promotes pelvic floor relaxation and strength through gentle vibration and heat therapy.



PERIK SYSTEM

An AI-powered pelvic floor assessment and training system that quantifies muscle tone, strength, and coordination.



DRUDA BELT

Sacroiliac joint support belt that stabilizes pelvic alignment and enhances functional balance.

Core Motion
MOTION CREATES DRIVE

여성.골반건강 재활기반 제품/연구/교육
www.coremotion.net
대전시 유성구 테크노2로 187 C동 223-8호
042-1660-1338 / iphmedi@gmail.com

디지털 인지재활 솔루션

아이어스

시선추적 중심

인지재활 치료 & 인지저하 예방

종합 브레인 헬스케어

최적화 디지털 솔루션





아이어스
소개영상

지에이치랩
홈페이지

지에이치랩
GHLAB

CE 인증

우수 조달품목
지정 제품

의료기기
GMP 인증

ISO 13485
품질경영시스템인증

1등급
GOOD Software
소프트웨어
GS 인증

WELLMATIX

Wellmatix AI

AI기반 신약개발 초기 단계 최적화 설계

신약 후보 단백질 우선 식별 + AI 이용 연합학습과 딥러닝 기법 통합

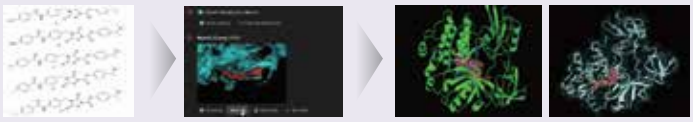
=

신약 개발의 초기 설계 단계 가속화

AI 기반 신약 개발 초기단계 최적화 설계

타겟탐색 → 후보물질 스크리닝 → 유망후보 물질발굴 → 후보물질 최적화 → 전임상 → 임상 시험 → 허가 및 출시

웰메틱스의 AI 플랫폼 적용
신약개발 시간 및 비용 단축



- **AI 신약개발 시장 규모(2025년) :** 국내시장 **1,080억원** / 글로벌 시장 **2.12조원**

신약 개발의 **초기 설계 단계 시간 및 비용 절감**

신약 개발 전체 비용 중 약 32%가 초기 탐색 단계에 사용

- **제약 및 바이오 기업** — 신경퇴행성 질환 포함 치료제 개발 협력
- **학계 및 연구기관** — 신경퇴행성 질환 등 연구 협업
- **병원 및 의료센터** — 물질 검증 및 시험 수행
- **정부 및 공공보건 기관** — AI 기반 시약 개발 지원

- **신약 개발의 설계 구간에서 시간과 비용을 혁신적으로 단축**하는 글로벌 범용 플랫폼
- 신경퇴행성 질환 신약 설계 중심으로 플랫폼 고도화
- 단계적으로 **천연물 기반 기능성 약품 설계 등 플랫폼 범위 확장 예정**

- **2025** 글로벌기업협업프로그램 등 다수 프로그램 선정
- 글로벌 스타트업 프로그램 선정 및 파트너십 보유
- 경상국립대학교 등 국내외 기관과 PoC진행
- **독자적 단백질 개발 및 AI 알고리즘 특허 출원(3건)**
- **10x Faster Discovery & 70% Cost Reduction**

웰메틱스 AI 제공 서비스

- **Target Validation**
- **Hit to Lead**
- **Hit Identification**
- **Lead Optimization**

- AI와LLM을 통하여 신약 개발에 가장 효율적인 'Hit' 분자를 빠르게 식별
- 기준 미달 이하 분자 결합 탈락, 가능성 높은 분자 결합 순차 제시
- 강화학습을 통한 데이터 생성
  리간드 생성 → ADMET 예측까지 End-to-End 자동화
- 가상 시뮬레이션 및 시각화 지원, 결과 리포트 생성

AI를 기반으로 더욱 빠르고 효율적인 신약 개발 최적화 설계 솔루션 제안

Wellnatix AI 플랫폼



도킹 이미지



3D 시각화



분석 리포트



CONTACT | James S(james@well-matix.com)
wellmatixinfo@well-matix.com

MERIHAND

Dia-Grip ✳ 손 재활 ALL IN ONE 진단/치료 통합 솔루션



Our Strategy

- ✳ 손 재활 데이터 표준화
- ✳ 임상 협력 기반 기술 확산
- ✳ 맞춤형 인증 & 박람회(CES)



MERIHAND는 병원 및 대학과 협력해 임상 데이터를 축적하며 **손 재활 데이터의 표준화를 목표**로 하고 있습니다.
이를 통해 글로벌 인증(FDA/CE) 확보와 국제 전시회(CES 등) 참가로 기술 확산을 추진합니다.

Why Choose Us

- ✳ MRI 검증 AI 해석 기술
- ✳ ROM 자동 측정 알고리즘
- ✳ FES 연동 통합 치료
- ✳ 국제 규격 기반 설계

Dia-Grip 올인원 시스템

- ✳ 진단 : AI 기반 ROM 측정 & 근육 분석
- ✳ 치료 : FES 연동 전기자극 치료
- ✳ 관리 : 환자/의료진 데이터 공유 플랫폼

Our Services



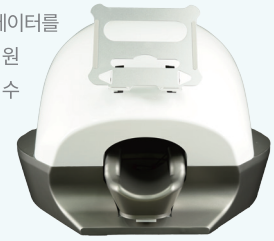
- ✳ 진단 기기 – AI 기반 ROM 자동 측정
- ✳ 치료 보조 기기 – FES 전기자극 치료
- ✳ 웹 플랫폼 – 환자 데이터 모니터링

진단 기기(디지털 의료제품) : AI 기반 ROM 자동 측정, MRI 데이터로 검증된 근육 분석
치료 보조 기기(FES) : 분석 결과와 연동된 치료, 맞춤형 자극 제공
웹 플랫폼 : 환자 데이터 시각화, 의료진 협업 지원, MediSupporter 등 기존 병원 시스템 연동

Dia-Grip은

진단부터 치료, 관리까지 One-Stop System을 제공합니다.
AI 기반 ROM 자동 측정과 MRI 검증 근육 분석으로 정확한 진단을 지원하고, FES 전기자극 치료 장치를 통해 환자 맞춤형 치료를 제공합니다.

또한, 웹 플랫폼을 통해 의료진과 환자가 데이터를 공유하고 기존 병원 시스템과 연동할 수 있습니다.



Vision - K-SDGs 3.1 / 3.8

✳ 인류 건강을 위한 안전한 진단·치료 ✳ 고령화 사회 맞춤형 재활 솔루션 ✳ 글로벌 인증 기반 세계 시장 진출

MERIHAND는 지속 가능한 재활 시스템 구축을 목표로 합니다.
국제 기준에 부합하는 안전성과 신뢰성을 기반으로 고령화 사회에 **맞춤형 솔루션을 통해 세계 시장에 진출합니다.**



의사용 웹

환자의 의료데이터 관리와 모니터링을 통한 연속성 있는 재활 시스템 확보

환자용 앱

환자 본인의 직관적 의료 데이터, 치료 가이던스 제공



경제 활동 인구의 10%가 손 재활 치료를 필요로 합니다.

MERIHAND는 AI 기반 분석과 FES (기능적 전기자극) 연동 치료를 하나의 시스템으로 통합하여, 환자의 회복 여정을 더욱 빠르고 정확하게 지원합니다.

메타하트
Meta Heart

BIO PULSE
Multi - Biosignal Monitor

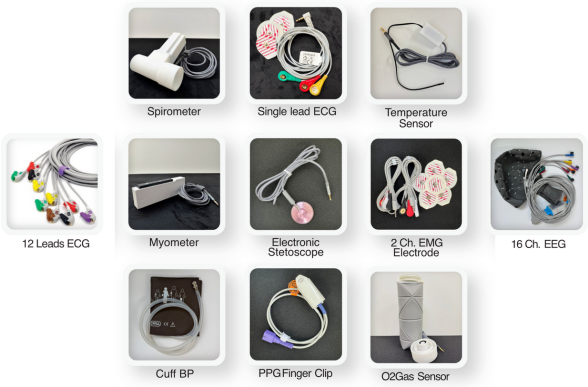


BioPulse

Transforming Research/Education Through Integrated Biosignal Analysis
통합된 생체신호 분석을 통한 연구/교육의 혁신

- **BioPulse**는 기존의 단일 신호 측정 방식을 넘어, **ECG, PCG, PPG, EEG, EMG** 등을 포함한 10종류의 생체신호를 동시에 통합적으로 측정 및 분석할 수 있는 첨단 연구 및 교육용 플랫폼입니다.
- 다양한 생리 신호를 실시간으로 수집하여 **맥파 전파 시간(PTT), 전기역학적 지연(EMD), 자율신경계(ANS)** 조절에 따른 **Baroreflex 활동** 등 주요 생리 지표를 정밀하게 계산합니다. 특히, 딥러닝 기술을 활용해 혈압을 추정하고, 동맥 경직도 및 부정맥 등 심혈관 질환과의 연관성을 심층 분석할 수 있습니다.
- BioPulse는 **의학**, **의공학**, **생명과학** 분야의 전문가 양성을 위한 대학 교육 및 연구 활동을 위해 최적화된 장비로, 학생 및 연구자들이 실제 생체신호 기반 데이터 분석 및 융합 기술을 직접 실습 할 수 있도록 설계되었습니다.

KEY FEATURES & ADVANTAGES







다중 생체신호의 통합 모니터링

ECG, PCG, PPG를 포함한 10가지 생체신호를 정밀하게 동시 측정하여, 실험 및 연구 환경에서 심층적인 생체 분석을 지원합니다.

직관적 인터페이스를 갖춘 휴대형 알루미늄 케이스

알루미늄 케이스와 직관적인 인터페이스 설계로, 사용자는 간편하게 장비를 운용하고 다양한 생체신호를 손쉽게 측정할 수 있습니다.

EDUCATIONAL CURRICULUM

1장: 12리드 심전도(ECG) 신호 기록 및 해석의 기초
2장: 자율신경계(ANS) 평가를 위한 심박수 변이도 분석
3장: 정상 심음과 이상 심음의 스펙트럼 분석 및 특징 비교
4장: 심전도, 심음의 동시 분석: 심실전기역학적 지연 (EMD)
5장: PPG 데이터 활용 혈류/SpO2/심혈관 지수 계산
6장: 혈압 측정의 원리 및 방법론 별 비교
7장: 심음, PPG 분석을 통한 맥파전달시간, 동맥 경직도 계산
8장: 뇌파(EEG) 패턴 분석: 알파파, 베타파, 델타파의 이해
9장: 자극 및 인지 활동에 대한 뇌파 반응 분석
10장: 운동 중 근전도(EMG) 패턴 및 신호 분석
11장: 근전도 신호와 근력 간의 관계 조사
12장: 호흡 교환비(RER)를 이용한 대사율 분석
13장: 폐활량 측정 및 호흡 패턴 분석
14장: 심혈관 디지털 트윈 구축
15장: 심전도, 심음, PPG 기반 ,연속적 혈압 추정 알고리즘
16장: 부정맥 예측 모델의 소개

metaheart@metaheart.kr
MetaHeart
+82 54-478-7780

보건복지부 | 의료기기산업 특성화대학원 지원사업

2026학년도 전기 대학원 신입생 모집

연세대학교 의과대학
의료기기산업학과

접 수 2025. **10. 10**(금) ~ **10. 15**(수) 17:00 마감
100% 인터넷접수 (연세대학교 일반대학원 홈페이지 : http://graduate.yonsei.ac.kr)

모집분야 의료기기 규제과학, 의료기기 기술사업화

모집과정 석사, 박사, 통합과정

모집과정 석사 00명, 박사 00명, 통합 0명 ※ 통합과정은 전일제(Full-Time)만 선발

지원자격 국내외 정규 대학에서 학사학위 또는 석사학위 취득(예정)자

전형방법 서류 및 구술시험

전형일정
1) **구술시험 대상자 발표 :** 2025. 11. 7(금) 17:00
2) **구술시험 일정 및 장소 :** 대상자 개별통보
3) **최종합격자 발표 :** 2025. 12. 5(금) 17:00

제출서류
- **석사과정/통합과정 :** 입학원서, 대학졸업증명서, 대학성적증명서, 학업 및 연구계획서, 공인영어성적표(선택), 재직증명서(해당 시 제출 필수)
- **박사과정 :** 입학원서, 대학 및 대학원 졸업증명서, 대학 및 대학원 성적증명서, 학업 및 연구계획서, 석사 논문 초록, 공인영어성적표(선택), 재직증명서(해당 시 제출 필수)

특 전
- **장학금 지원**

구 분	석사과정	박사과정	통합과정
전일제	등록금 80%	등록금 50% (영어성적 충족시 80%)	
부분제	등록금 25%		-
리더십장학금	등록금 10%		

※ 대학원 의료기기산업학과 장학금 규정에 따라 지급하며 자퇴, 제적 시 수혜받은 장학금은 반납해야 함.

- 국내 및 해외 장기현장실습비 지원(석사과정 전일제)

유의사항 의료기기산업학과 교과과정 확인 필수(http://mdi.yonsei.ac.kr)

문 의 MDI@yuhs.ac, 02-2019-3277

연세대학교 의과대학 YONSEI UNIVERSITY COLLEGE OF MEDICINE | 의료기기산업학과 DEPARTMENT OF MEDICAL DEVICE INDUSTRY

의료기기 산업의 발상지!

(재)원주의료기기산업진흥원은 항상 여러분과 함께 하겠습니다.

Mission	메디컬-헬스케어 산업을 선도하는 글로벌 One-Top 클러스터 구축
Vision	기업과 함께 지속가능 혁신성장을 위한 메디컬-헬스케어 One-Stop 플랫폼
Keyword	신뢰(지원역량 강화) 상생(협력네트워크 구축) 가치(기술 및 산업 간 융복합화)



아이디어 컨설팅

- 의료기기 시장정보·규격열람
- 아이디어 컨설팅 및 제품화 연구
- 제품의 기술적 타당성 검토

마케팅·수출 지원

- 국내외 전시회 참가 지원
- 강원의료기기전시회 개최
- 해외 시장정보 제공
- 수출 활성화 기업지원

디자인·설계 및 시제품 제작

- 제품 디자인 컨셉 설정
- 디자인 설계 및 모델링·렌더링
- 2D 도면화&3D 모델링
- 구동부 메커니즘 설계
- 부품 정밀가공
- 3D 프린팅
- 후처리가공 조립·검토

인·허가 지원

- 국내외 인·허가 획득을 위한 컨설팅 지원
- 임상시험 및 사용적합성평가 연계 지원
- 규제과학(RA) 전문가 교육

시험검사

- 개발된 신제품의 신뢰성·내구성 검증
- 국내외 공통 시험 환경 제공
- 의료기기 EMC예비시험 지원
- 계측장비 지원

One-Stop 기업지원 서비스의 새로운 이름, MEDISTRY는 'MEDICAL'과 'INDUSTRY'를 결합한 단어로서 의료기기 기업의 성공 스토리를 만들어주는 서비스를 의미합니다.

거동불편 환자를 1인의 간호·간병인이 안전하게

전동식 환자리프트 아나케어







WHO 누가 사용하나요?



아나케어는 거동이 불편한 환자(고령자, 장애인 포함)를 침대, 휠체어, 변기등으로 이승 및 이송을 도와주는 전동식 의료기기 입니다. 돌봄인(간병인)이 거동을 전혀 할 수 없는 '거동불가환자'부터 상체의 힘이 충분하여 스스로 앉아 있을 수 있는 '거동불편환자'까지, 환자를 옮겨 앉히고(눕히고) 이동시킬 수 있도록 도와줍니다.

또한, 병원/·요양시설에서는 환자의 안전한 이송은 물론, 직원들의 근골격계 부상의 위험을 예방할 수 있으며, 거동이 불편한 외래환자가 있는 진료과의 경우에도 사용하실 수 있습니다.

WHAT 무엇을 할 수 있나요?



아나케어는 **IPX6 수준의 방수설계**로 샤워기 물줄기에 안전합니다.

휠체어로 이승하여 **바깥산책 및 병원 검진을 위한 외부출입**이 가능합니다.

와병환자가 **기저귀 사용에서 벗어나 변기로 이동**하여 배변활동이 가능합니다.

RKnD Med.
Reconcile Knowledge and Develop
www.rkndmed.com / 070-8891-0717

newpong

초음파 의료기기 전문 기업, 뉴퐁

뉴퐁은 초음파 기술을 기반으로, 수술·치료·미용용 의료기기를
연구개발 · 제조 · 판매하는 전문 기업입니다.

주요 제품

#LSSA®

초음파 수술기

세계 최소 직경 0.9 mm 프로브를 비롯해
다양한 프로브를 통해 얼굴 및
바디 지방 융해 수술을 지원합니다.

sonocare

초음파 자극기

피부 관리 및 여성용 관리에 사용되며,
듀얼 주파수 기술을 적용해
보다 안전하고 정밀한 치료를 제공합니다.

LINCURVE

가정용 HIFU 디바이스

병원용 고출력 트랜스듀서를 탑재한
홈케어 장비로, 곡면 부위에도 들뜸 없이
밀착되는 프리미엄 탄력 케어 디바이스입니다.

LINCURVE PRO
린커브 프로

- 곡률 설계 커브 하이푸 장비
- 피부 곡면에 균일하게 밀착
- 에너지 전달 효율을 높인 구조
- 안정적이고 균일한 에너지 전달



newpong 주식회사 뉴퐁 서울특별시 금천구 벚꽃로 278 SJ테크노빌 1212호 | TEL. 02-541-0145 | info@newpong.com | www.newpong.com

TESSOL

시험 기기, 실험실 장비, 교정 및 검증 서비스 분야의 글로벌 리더

고품질의 계측기 판매 및 교정 / 밸리데이션 그리고 수리까지

AII -IN - One Service

SALES and SOLUTION 판매 및 솔루션

데이터로거



온도,습도,압력,충격,전력 등
100여종 이상의 제품군

IoT 솔루션



무선 IoT 센서 / 모니터링 시스템

측정 장비



현장 계측기 / 전자 테스터 / 교정기

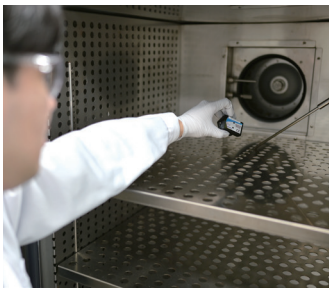
CALIBRATION SERVICES KOLAS 국제공인교정기관



온도 / 습도 분야



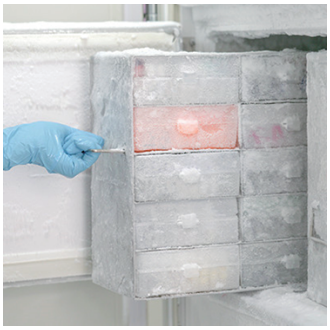
길이 / 질량 / 압력 분야



부피 / 화학 / 유량 분야



전기 / 시간, 주파수 분야



초저온 냉장고



공조기



생물 안전 작업대(BSC)

VALIDATION SERVICES

밸리데이션 서비스

TESSOL 경기도 용인시 기흥구 흥덕1로 13,
흥덕IT밸리 P동 102-A호 (주)테솔
031-713-5988
sales@tessol.com

ISO17025
국제공인교정기관

세계로 향하는 **대한민국**
첨단의료산업의 중심

K-의료산업 생태계를 선도하는 글로벌 리더

KBIOHEALTH
오송첨단의료산업진흥재단



HealthUp
스마트 건강 지갑

흩어진건강데이터를모아서
앱하나로 완성되는스마트 건강 지갑

건강기록 및 건강정보 연동

- 걷기 기록
- 수기 및 연동
- 분석 차트
- 나의 오늘

- 다양한PHR수기입력및간편연동기능제공
- 나의오늘건강타임라인목록제공
- 시간대별패턴과최적화된분석차트제공

병원 방문 전/후 관리

- 진료 내역
- 처방 기록
- 처방약 분석
- 건강 검진

- 진료내역/처방기록연동하여한눈에확인
- 처방약AI 성분분석및알림
  (중복및금기성분, 과용량체크및부작용안내)

만성 질환 건강관리

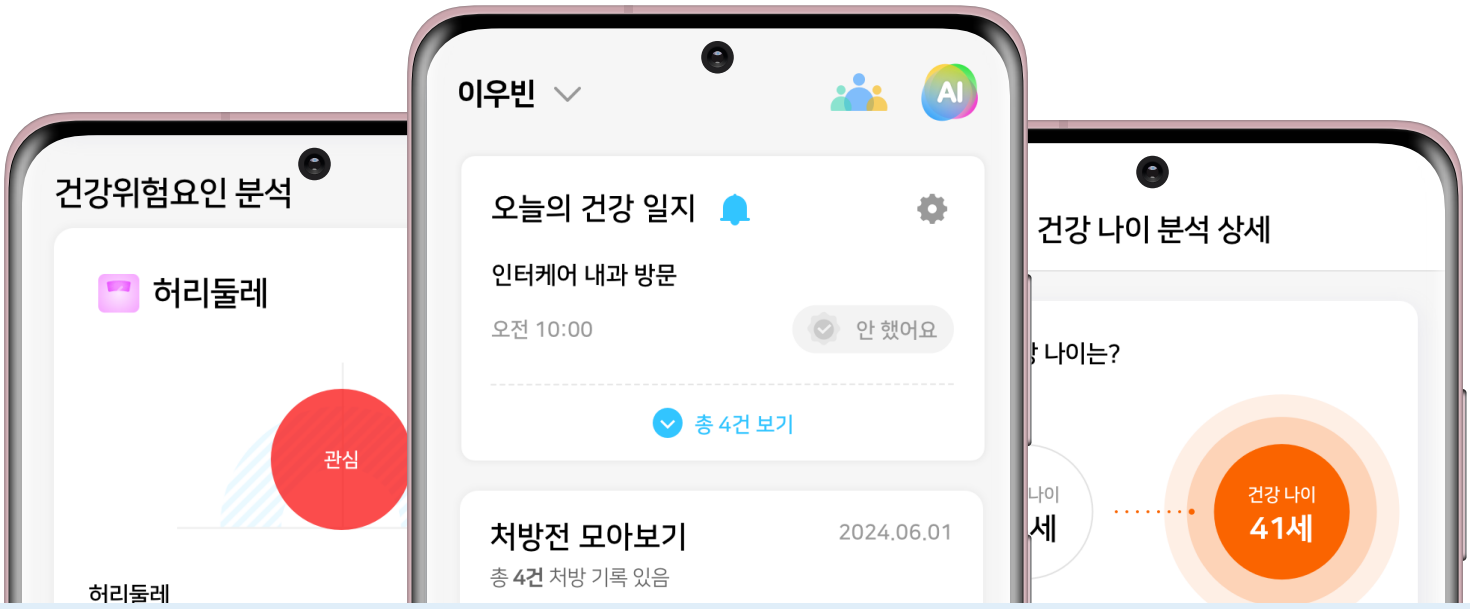
- 혈압 관리
- 혈당 관리
- 비만 관리
- 복약 관리

- 혈압,혈당기기연동및터치로편리한기록
- 꾸준한복약및투약을위한정시복약알림서비스

돌봄/가족 관리

- 대상자 등록
- 노인 건강
- 영유아 검진
- 청소년 검진

- 가족, 아이/노인돌봄등보호대상자등록관리기능
- 보호대상자연령별건강기록분석및AI 조언



OPENIT
shbyeon@openit.co.kr
Tel 02-1566-5811 Fax 02-465-5811
강원특별자치도 원주시 흥업면 연세대길 1, 산학관 512호

App Store Google Play

Where Generative AI Meets Medical Engineering

Pioneering Generative AI for Healthcare



DEEP NOID

(08377) 서울특별시 구로구 디지털로33길 48, 19층 (구로동, 대륭포스트타워7차)
www.deepnoid.com TEL. 070-4681-0622 Mail. medical@deepnoid.com

NIDS 한국의료기기안전정보원
National Institute of Medical Device Safety Information

한국의료기기안전정보원
(식약처 산하 공공기관)



의료기기 니즈를 해결하는
국제적인 전문기관

비 전

NIDS

미 션

의료기기 안전 생태계 조성과
산업 역량 증진에 기여

전략목표

- 국민 NIDS 안전관리 강화
- 산업 NIDS 혁신성장 견인
- 상생 NIDS 사회적 가치 실현

NIDS

주요 연혁

- **2012. 5.18** 의료기기정보기술지원센터 설립허가 부작용 보고 수집, 분석, 평가
- **2015. 7. 29** 체외진단의료기기 등 의료기기 위탁인증(1·2등급) 수행
- **2019. 6.12** 희소·긴급도입 필요 의료기기 공급 업무 수행
- **2019. 7.1** 의료기기 통합정보센터(UDI 운영 등) 지정
- **2020. 5.1** 의료기기 혁신 장려를 위한 혁신 의료기기 제품화 지원
- **2024. 5. 7** 의료기기 갱신(1·2등급) 수행
- **2025.1. 24** 디지털의료기기 인증(1·2등급) 및 GMP 심사 수행

2012 · 2015 · 2019 · 2020 · 2024 · 2025

주요 역할

사전 승인
- 저위험 의료기기(1·2등급) 신고·인증
- 2등급 의료기기 기술문서 심사
- 디지털의료기기(1·2등급) 신고·인증
- 디지털의료기기 GMP 심사

사후 관리
- 부작용 인과관계 조사 및 수집·분석·평가
  * 전국 안전정보 모니터링센터 운영
- 표준코드(UDI) 기반 유통정보 수집·분석
- 저위험 의료기기(1·2등급) 품목 갱신

산업계 지원
- 혁신의료기기 등 제품화 기술지원
- 규제조화(IMDRF, ISO/IEC 등)
- 국가공인 RA 전문가 시험 시행
- 산업계 규제 대응력 강화 교육

사회적 가치 실현
- 희소·긴급 의료기기 공급
  * 의료 취약계층 지원
- 의료기기 수입요건확인 면제 지원
- 의료기기 안전정보 제공

한국의료기기협동조합

메타하트 (주)메타하트

INSUNG 인성메디칼

연세대학교 원주산학협력단 연세대학교 원주산학협력단

(주)우영메디칼 (주)우영메디칼

wmit (재)원주의료기기산업진흥원

dongguk UNIVERSITY 의료기기 산업 특성화 대학원 동국대학교

RKnD Med. 주식회사 알케이앤디메드

연세대학교 미래캠퍼스 의료AI반도체 전문인력양성 사업단 연세대학교 원주산학협력단

KETI 한국전자기술연구원 Korea Electronics Technology Institute

CATT 사용성평가연구센터 계명대학교 사용성평가연구센터

newpong (주)뉴퐁

Core Motion MOTION CREATES DRIVE (주)코어모션

TESSOL (주)테솔

GHLAB 지에이치랩 (주)지에이치랩

KBIOHEALTH 오송첨단의료산업진흥재단 오송첨단의료산업진흥재단

WELLMATIX (주)웰메틱스

인제대학교 RISE사업본부 인제대학교 RISE사업본부

InceptionLAB (주)인셉션랩

NIDS 한국의료기기안전정보원 한국의료기기안전정보원

MERIHAND (주)메리핸드

OPENIT OPENIT

YONSEI 글로벌 혁신의료기술 실증지원센터 YONSEI Global Innovative Medical Technology Evaluation and Development Center 연세 글로벌 혁신의료기술 실증지원센터

[DEEP NOID] 딥노이드

연세대학교 의과대학 의료기기산업학과 YONSEI UNIVERSITY COLLEGE OF MEDICINE 연세대학교 의료기기산업학과

식품의약품안전처 식품의약품안전평가원 식품의약품안전평가원