

KVIST

ANNUAL R&D REPORT

Korea Advanced Institute of Science and Technology

2025



Contents

09



발간사

Message from the President

10



신문화전략

KAIST's New Culture Strategy,
QAIST

12



예산 및 지원 현황

Research & Development
Budget

14



연구성과 통계자료

Research Outcomes

16



KAIST 10대 우수성과

KAIST's Top 10
Research Achievements
of 2024

38



KAIST 주요 연구성과

KAIST's Research Highlights
of 2024



Global value-creative world-leading university

세계를 선도하는 과학기술의 중심, 바로 창의와
도전 속의 KAIST입니다.

우리는 새로운 생각을 멈추지 않습니다.
새로운 생각이 더 많은 가능성을 만듭니다.

상상 그 이상의 아이디어는 멈추지 않는 열정과
도전 정신으로 세상을 바꾸는
가장 혁신적인 힘이 될 것입니다.

세계의 중심에서 세상을 움직이는 최고의 과학기술대학

한국속의 KAIST



KAIST는 국가 발전에 필요한
고급 과학기술 인력을 양성하고
이공계 연구중심대학의
본보기를 제시하기 위해
1971년 설립되었다.

KAIST속의 세계



KAIST는 최상의 교육으로,
최초의 발명을 주도하는,
최고의 리더를 배출하여
세계 과학계가 선망하는 초일류
대학으로서의 미래를 지향한다.

세계속의 KAIST



KAIST는 학문적 수월성과
창의성을 겸비한
인재를 배출하여
세계 과학계의 존경받는
일원이 되었다.

World Class Science and Technology University

세계 속의 KAIST는 쉼 없이 달려온 54년,
KAIST는 끊임없는 연구에 꺼지지 않는 불을 밝히며
한국 과학기술의 등불 역할을 수행해 왔습니다.

KAIST는 한국을 넘어 세계 속의 연구기관으로서
인류의 미래를 밝히는 길잡이가 될 것입니다.



| 발간사

2024년은 KAIST가 국가와 인류의 미래를 위한 혁신적 연구에 매진한 한 해였습니다. 글로벌 과학기술 패권 경쟁이 더욱 심화되는 가운데, KAIST는 미래지향적 연구와 교육을 통해 이러한 흐름에 적극적으로 대응해 왔습니다.

신문화전략 'QAIST'를 기반으로 반도체, 인공지능(AI), 양자기술, 첨단바이오, 우주항공 등 국가전략기술 분야에서 괄목할 만한 성과를 이루어냈으며, KAIST-NYU Joint Campus는 교육 프로그램 운영과 공동연구를 통해 글로벌 연구 네트워크를 확장하는 중요한 발판이 되고 있습니다.

또한 4대 과학기술원의 자율성 확보 이후, KAIST는 더욱 유연하고 창의적인 연구 환경을 조성하여 우수 연구자 유치와 혁신적 연구 성과 창출에 주력해 왔습니다. 이러한 노력들의 결실로, KAIST의 연구 성과 5건이 「2024년 국가연구개발 우수성과 100선」에 선정되는 쾌거를 이루었습니다.

이번에 발간하는 「2025년 KAIST Annual R&D Report」에는 KAIST를 대표하는 연구 성과 10선을 비롯하여, 지난 한 해 동안 우리 대학이 이뤄낸 주요 연구 성과와 혁신의 노력이 담겨 있습니다. 이 보고서가 단순히 연구 성과를 소개하는 데 그치지 않고, KAIST 구성원은 물론 과학기술계 연구자들에게 영감을 주어, 국가의 성장과 인류 번영에 공헌할 수 있는 소중한 자료로 활용되기를 희망합니다.

앞으로도 KAIST는 '최초·최고'의 연구를 바탕으로 미래 50년을 준비하며, 끊임없는 연구혁신으로 대한민국을 넘어 인류의 행복과 번영을 실현할 수 있도록 최선을 다하겠습니다. 여러분의 많은 관심과 성원을 부탁드립니다.

감사합니다.

2025년 4월
KAIST 총장 이 광 형



예산 및 지원 현황

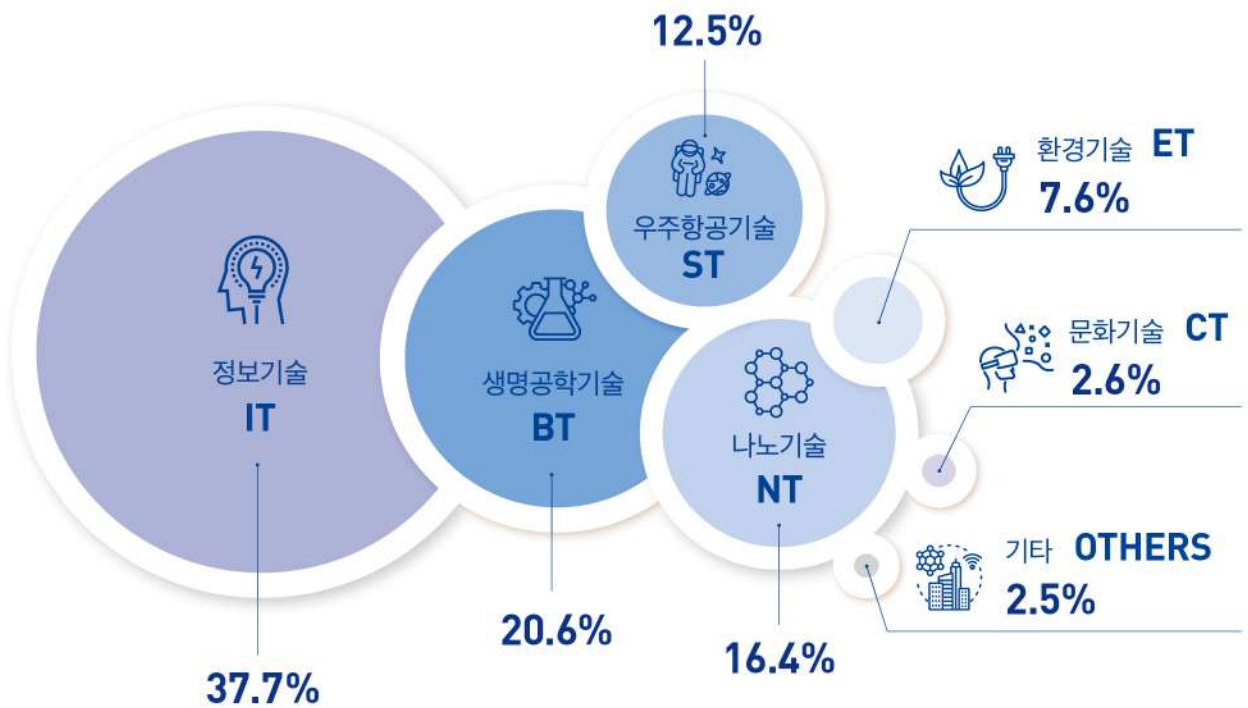
Research and Development Budget

최근 10년간 연구실적 (과제수)

단위: 건



6T 연관 비중별 구성비율 (연구비 비율)



최근 10년간 연구실적 (연구비)

단위: 백만원



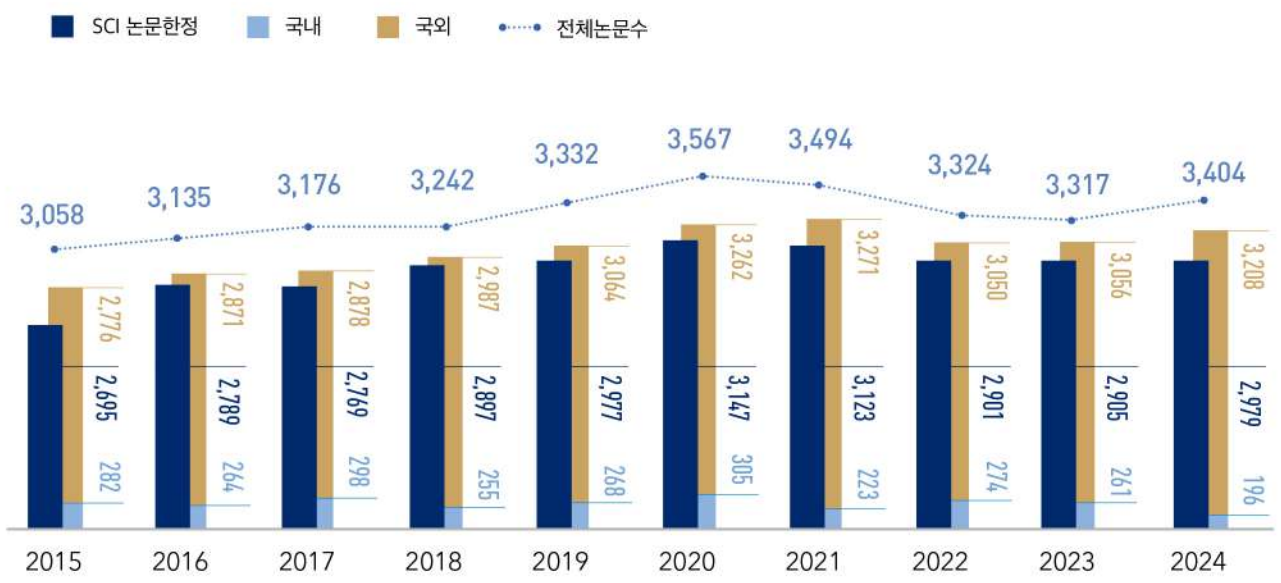
연구계약금액 구성비

단위: 백만원



최근 10년간 논문수

단위: 건



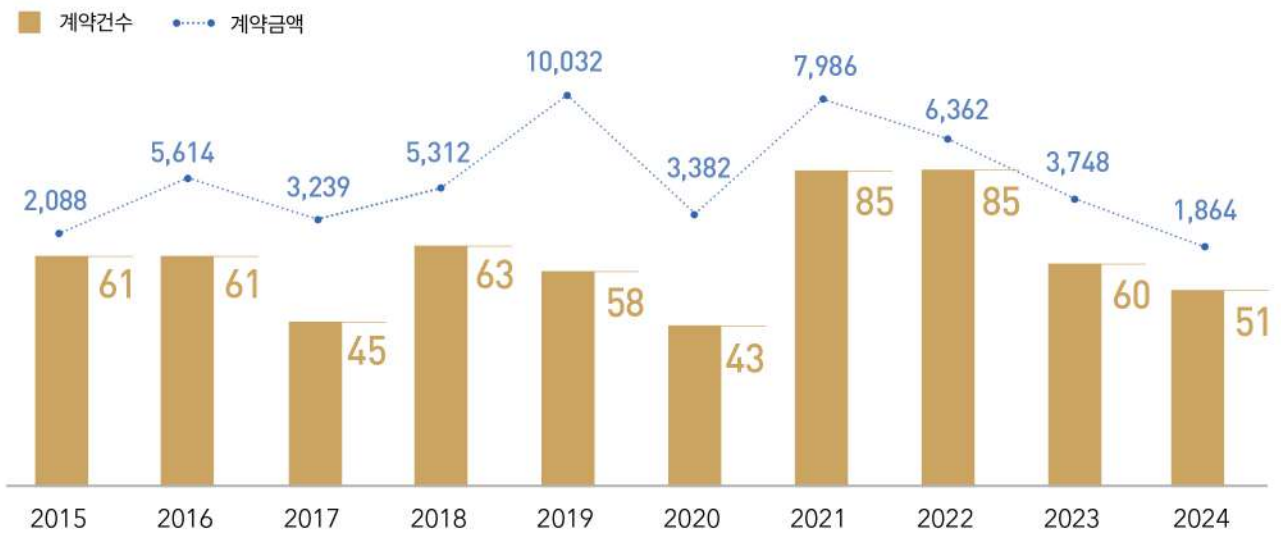
최근 10년간 국내 특허 실적

출원건수, 등록건수, 합계



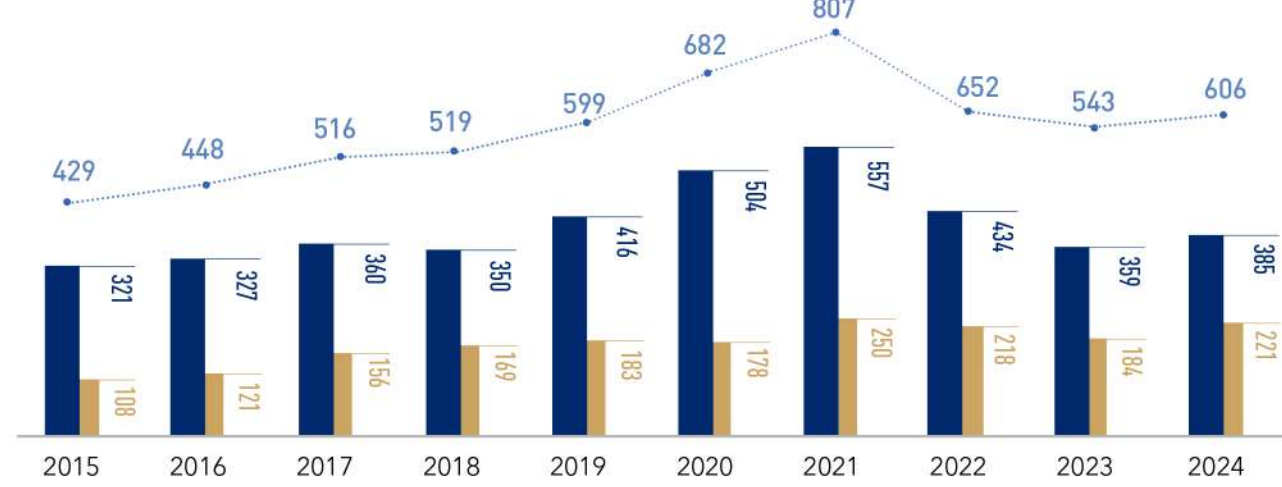
최근 10년간 기술이전 계약실적

단위: 건, 백만원



최근 10년간 국외 특허 실적

출원건수, 등록건수, 합계



KAIST'S TOP 10 RESEARCH ACHIEVEMENTS of 2024

2024년 KAIST 10대 우수성과

1. 40년 난제 매듭 문제 해결 / 18
수리과학과 | 박정환
2. 단일 원자 편집 기술 개발 / 20
화학과 | 박윤수
3. 학습/기억의 물리적 단위인 시냅스 형성 및
소멸 영상기술 개발 / 22
생명과학과 | 허원도
4. 사족 보행 로봇 라이보2 / 24
기계공학과 | 황보제민
5. 요도 카테터 삽입 없이 방광 기능을 모니터링하기 위한
무선 이식형 생체전자 시스템 / 26
전기및전자공학부 | 권경하
6. uPIMulator: 범용 PIM 아키텍처를 위한
빠르고 유연한 시뮬레이션 프레임워크 / 28
전기및전자공학부 | 유민수
7. iPhone, Android처럼 비순차적으로 명령을
실행하는 CPU에서 발생하는 동시성 버그와
보안 문제를 발견하는 시스템 / 30
전산학부 | 권영진
8. 실세계 인공지능 훈련 비용 최소화 기술 및
감염병 관리 문제 응용 / 32
전산학부 | 이재길
9. 바이오폴리머를 이용한 친환경 지반 건설 재료 및
시공 기술 개발 / 34
건설및환경공학과 | 조계춘
10. 인류세의 다학문적 의미와 과학 교육을 위한
인류세 문해력 / 36
과학기술정책대학원 | 박범순

40년 난제 매듭 문제 해결

KAIST'S TOP 10
RESEARCH ACHIEVEMENTS of 2024

연구책임자 | 박정환 **참여연구원** | Irving Dai, Sungkyung Kang, Abhishek Mallick, Matthew Stoffregen
소속학과 | 수리과학과 **연구실 홈페이지** | <https://mathsci.kaist.ac.kr/~jungpark0817>

매듭 이론에서 40년간 풀리지 않았던 팔자 매듭의 (2,1)-케이블이 단면 매듭인지에 대한 문제를 연구자와 그의 공동 연구자들이 해결했다. 기존의 접근법을 넘어서는 혁신적인 방법을 통해 이 매듭이 단면 매듭이 아님을 증명했다. 단면 매듭 여부는 4차원 공간에서 매듭이 가장 단순한 곡면의 경계가 될 수 있는지를 묻는 질문이다. 1920년 마이클 아르틴 교수가 다양한 매듭들이 단면 매듭이 될 수 있음을 발견한 이후, 단면 매듭에 대한 연구는 저차원 위상수학에서 가장 중요한 주제 중 하나로 자리 잡았다. 특히 팔자 매듭의 (2,1)-케이블은 1960년대에 제안된 단면-리본 추측과 밀접하게 연결되어 오랫동안 수학자들의 주목을 받아왔다. 이번 업적은 2022년 풀리처상 해설 보도 부문을 수상한 켄타 매거진에 자세히 소개되었다.

연구배경



매듭이 4차원 공간에서 가장 단순한 곡면의 경계 역할을 할 수 있을 때, 이를 단면 매듭이라고 한다. 1920년, 마이클 아르틴 교수가 여러 매듭이 단면 매듭이 될 수 있음을 발견한 이후, 단면 매듭을 분류하고 연구하는 것은 저차원 위상수학의 핵심 주제 중 하나로 자리 잡았다. 이 문제는 본질적인 학문적 가치를 지닐 뿐만 아니라, 위상수학의 다른 중요한 문제들과도 깊은 연관이 있다.

오랜 기간 동안 연구가 이루어진 분야인 만큼 다양한 기술이 개발되었지만, 매듭의 기본적인 연산 중 하나인 케이블링(cabling)에 대해서는 문제 해결의 진전이 더딘 편이다. [그림 1]의 왼쪽에는 가장 단순한 매듭 중 하나로 꼽히는 팔자 매듭이, 오른쪽에는 이를 두 번 복제하여 연결한 팔자 매듭의 (2,1)-케이블이 그려져 있다.

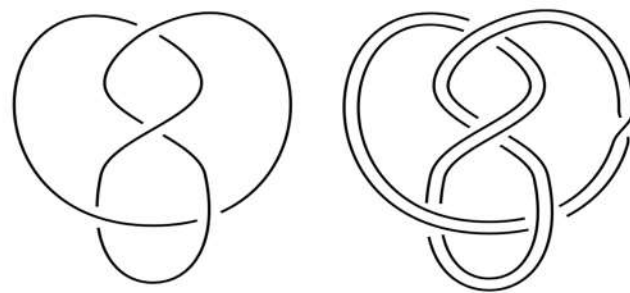


그림 1. 팔자 매듭과 (2,1)-케이블

팔자 매듭의 (2,1)-케이블은 1960년대에 제안된 단면-리본 추측과 깊은 관련이 있어 오랜 시간 동안 수학자들의 큰 관심을 받아왔다. 이 추측은 모든 단면 매듭이 리본 매듭일 것이라는 내용이다. 1980년, 카와우치 교수는 자신의 논문에서 팔자 매듭의 (2,1)-케이블이 단면 매듭인지에 대해 구체적으로 질문하였고, 1990년에는 미야자키 교수는 이 매듭이 리본 매듭이 아님을 증명하였다. 그러나 시간이 지나도 이 매듭이 단면 매듭이 아니라는 증명은 나오지 않았다. 이에 따라 팔자 매듭의 (2,1)-케이블이 단면-리본 추측의 반례가 될 수 있다는 기대감이 점점 높아졌다.

연구내용



최근 연구자와 그의 공동 연구자들이 마침내 팔자 매듭의 (2,1)-케이블이 단면 매듭이 아니라는 사실을 증명하였다. 이로써 수십 년간 이어져 온 수학계의 의문이 풀리게 되었고, 단면-리본 추측에 대한 이해도 한층 깊어지게 되었다.

이번 증명은 기존의 방법에서 벗어나 혁신적인 새로운 접근법을 제시하였다. 이를 좀 더 구체적으로 설명하자면, 3차원 구에 있는 매듭이 4차원 공간에서 위상적으로 가장 단순한 곡면의 경계를 이룰 경우, 4차원 공간에서 해당 곡면의 순환 덮개(branched cyclic cover)와 덱 변환(deck transformation)을 3차원 매듭의 순환 덮개와 덱 변환의 확장으로 해석할 수 있다. 기존 연구들은 이러한 3차원 공간의 대칭성과 확장성보다는 4차원 공간에서 생성되는 위상적 성질에 초점을 맞추는 경향이 있었다. 예를 들어, 매듭의 순환 덮개가 특정 위상적 특성을 가진 3차원 공간의 경계가 될 수 없음을 증명함으로써 매듭의 4차원적 성질, 즉 단면 매듭 여부를 연구하는 방식이 일반적이었다. 그러나 이번 연구에서는 기존 접근을 넘어 3차원 공간의 대칭성과 그 확장성을 심층적으로 연구함으로써 새로운 성과를 이끌어냈다.

특히, 팔자 매듭의 (2,1)-케이블의 순환 덮개의 대칭성의 아래 매듭의 대칭성으로부터 이해 할 수 있다는 위상적 사실이 증명에서 중요하게 사용되었다.

또한, 이러한 대칭성을 이볼루티브 헤가드 플로어 호몰로지(involutive Heegaard Floer homology)에 접목하여 연구한 점도 이번 연구의 핵심 내용 중 하나였다.

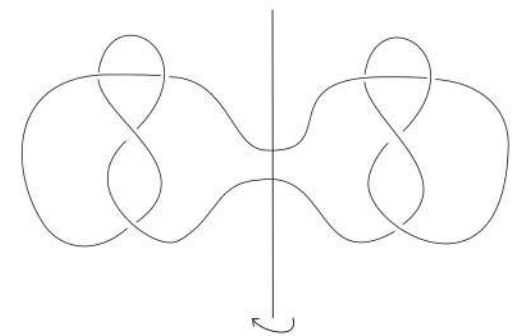


그림 2. 순환 덮개의 대칭성

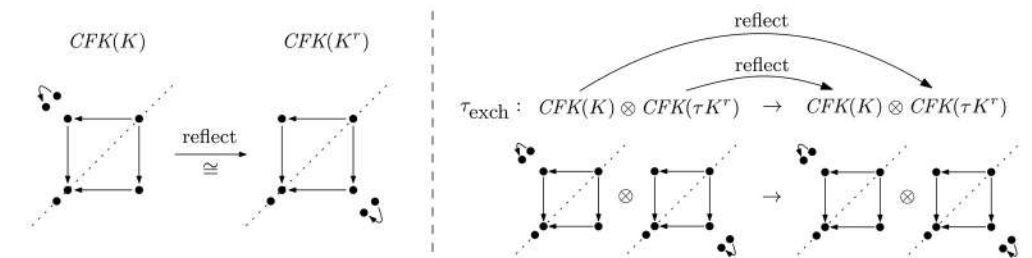


그림 3. 대칭성의 헤가드 플로어 호몰로지에 대한 작용

기대효과



이 논문은 3차원 다양체의 대칭성을 4차원 공간으로 확장하는 문제를 고전적인 위상수학의 질문과 결합하며, 새로운 연구의 장을 열었다. 특히, 최근 4차원 공간 속 이국적 곡면의 이해, 이국적 미분 동형사상의 안정성, 그리고 단면-리본 추측과 같은 난제들에 대해 대칭성 확장의 관점을 도입한 연구가 활발히 전개되고 있다. 본 연구는 이볼루티브 헤가드 플로어 호몰로지(involutive Heegaard Floer homology)와 대칭성을 결합하여 중요한 진전을 이루었으며, 현재는 코바노브 호몰로지(Khovanov homology)와 사이버그-위튼 이론(Seiberg-Witten theory) 등 다양한 이론과 융합되어 더욱 폭넓은 연구가 이루어지고 있다. 이러한 접근법은 특정 문제 해결에 그치지 않고, 위상수학 전반에 걸친 심도 있는 연구를 촉진하며, 새로운 수학적 통찰과 발견의 기틀을 마련하는 데 크게 기여할 것으로 기대된다.

연구성과

[논문] The (2,1)-cable of the figure-eight knot is not smoothly slice (Invent. Math. 2024)
 [홍보] Mathematicians Eliminate Long-Standing Threat to Knot Conjecture

연구비 지원

[삼성미래기술육성재단] 4-dimensional topology and surface singularities
 [포스코청암재단] Unknotting number of satellite knots

단일 원자 편집 기술 개발

KAIST'S TOP 10
RESEARCH ACHIEVEMENTS of 2024

연구책임자 | 박윤수 **참여연구원** | 김동현, 유재현, 이다혜, 홍호진, 김동욱
소속학과 | 화학과 **연구실 홈페이지** | <http://ypark-lab.com>

의약품의 약효와 특성은 그 분자를 구성하는 원자들의 종류와 배열에 크게 좌우된다. 예를 들어, 하나의 헤테로고리(탄소 이외의 원소를 포함하는 분자 고리) 내에서 단일 원자의 종류를 변경하는 것만으로도 약물의 효능이 크게 바뀌곤 한다. 그러나 복잡한 유기 분자에서 하나의 원자만을 정확하게 편집하는 기술은 기초 과학 분야의 난제로 여겨져 왔다. 본 연구를 통해 박윤수 교수 연구팀은 헤테로고리에 포함된 산소 원자를 질소 원자단으로 직접 교환하여 구조적 유사체를 합성하는 “단일 원자 편집 기술”을 개발했다. 새로운 광촉매를 활용해 기존에 불가능하다고 여겨졌던 화학 합성 반응을 가능케 하여, 전통적인 방법으로는 합성할 수 없었던 천연물의 유도체 라이브러리의 합성에 성공했다. 본 연구는 신약 개발 단계에서 구조-활성 관계(Structure-Activity Relationship) 연구의 병목을 해소하여, 새로운 화합물 설계와 검증 과정의 효율성을 극대화할 것으로 기대된다. 기존에 만들 수 없었던 화학적 공간을 탐구할 수 있는 도구를 제공하며, 향후 유기화학, 의약화학, 농약 개발 등 다양한 응용 분야에서 광범위한 영향을 미칠 것으로 평가할 수 있다.

연구배경



천연물은 신약개발의 초기 후보 물질로 활용되어 치료적 효능을 나타내는 유효한 구조적 골격 정보를 제공한다. 천연물 기반의 유화 화합물의 핵심 구조를 변형하거나, 유효한 구조적 정보를 바탕으로 유도체 후보군 라이브러리를 구축하여 임상 실험 과정에서의 약효를 최적화하는 방식으로 신약 개발이 이루어진다. 이 때문에 현대 신약 개발 단계에서는 점점 더 혁신적인 합성법들을 활용한 라이브러리의 구축이 중요한 역할을 한다. 일례로, 약리 활성을 나타내는 대표적인 기질인 퓨란과 피롤은 오각고리를 갖는 헤테로고리 방향족성 화합물로 천연물 및 의약품에 주요 골격으로 알려져 왔다. 퓨란과 피롤의 구조적 차이는 고리를 구성하는 산소 혹은 질소 원자에서 오는데, 원자의 종류에 따라 의약품의 약효가 크게 달라진다. 골격을 구성하는 원자 종류나 개수가 분자의 특성에 지대한 영향을 미친다고 알려져 있지만, 고리형 구조를 끊고 재조립 하는 ‘편집 과정’은 복잡한 단계의 메커니즘을 수반한다. 따라서, 천연물에 흔히 존재하는 다양한 작용기에 영향을 받지 않고, 퓨란 혹은 피롤의 특정 원자만을 선택적으로 편집하는 기술은 유기화학 분야의 기초과학적 난제로 여겨진다.

연구내용



본 연구팀은 퓨란 화합물에 존재하는 산소 원자를 선택적으로 질소 원자로 “편집”하는 새로운 유기합성법 개발에 성공했다. (그림 1)

퓨란을 포함하는 시작 물질에 존재하는 산소 원자를 선택적으로 제거하고, 이를 질소 기체로부터 유래한 암모니아를 첨가하여 퓨란→피롤 전환 반응 개발에 성공했다.

온화한 조건에서 단일원자 교환을 촉진하기 위한 핵심 아이디어는 광촉매와 의 전자 전달을 통해 퓨란의 극성 반전(polarity inversion) 및 탈 방향족화(dearomatization)을 유도하는 것이다. 이를 위해 가시광선 조사 하에 산화-환원 반응의 릴레이를 유도하는 광산화환원촉매(Photoredox catalysis)의 활용을 제안했다.

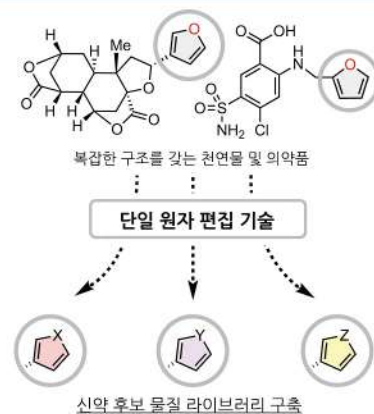


그림1. 단일 원자 편집 기술 모식도

반응 개발 단계에서 중요했던 점은 퓨란 기질을 효과적으로 산화시킬 수 있는 광촉매를 발굴하는 것이었다. 다양한 범위의 산화 준위를 갖는 광촉매를 반응 조건에 적용했을 때, 아크리디늄 염(acridinium salt)에 기반한 유기 광촉매가 효과적으로 전환 반응을 매개했다.

해당 아크리디늄 광촉매는 상업적으로 값싼 가격에 구입할 수 있을 뿐 아니라, 귀금속이 포함되지 않은 유기물질 기반 촉매이므로 반응의 경제성 또한 확보할 수 있다. 반응의 유기 혹은 과산화 부산물은 관찰되지 않았다. 특히, 기존의 다단계 산화 및 환원 과정을 필요로 하지 않으며 단일 촉매 반응 조건에서 높은 수율로 반응이 완결되었다는 점이 고무적이다.

퓨란→피롤 전환 과정에 필수적인 반응 경로를 분석하기 위해 이론적 계산과 실험적 검증을 병행했다. 본 연구팀은 밀도 범함수 이론(density functional theory)을 활용해 예상 메커니즘의 포텐셜 에너지 준위를 계산하고, 결과를 토대로 상온에서 쉽게 진행될 수 있는지 확인했다.

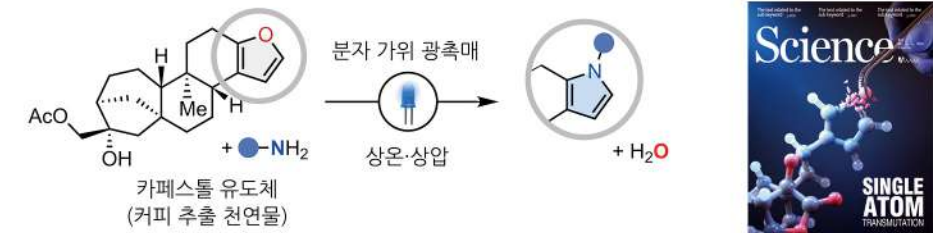


그림2. 세계 최초 퓨란의 단일 원자 편집 반응 개발

본 반응은 다양한 형태의 퓨란 기질 및 아민 반응물에 대해 광범위한 적용이 가능하다.

특히 주목할 특징은 의약품 및 천연 물질에 해당 기술이 적용 가능했다는 점이다. 예를 들어, 카페스톨 유도체(Cafestol)는 커피 원두에서 추출한 퓨란 기반 디테르페노이드 화합물로 항암 활성이 주목받고 있다.(그림 2) 해당 기질에 반응 조건을 적용하였을 때, 퓨란 부분만 성공적으로 피롤로 전환됨을 확인했다.

같은 맥락에서, 부종 치료 약물인 푸로세미드(Furosemide)에서도 해당 반응성이 관찰됐다. 약리 활성에 핵심적인 역할을 하는 퓨란 부분이 피롤로 직접 전환되었고, 카복실산, 설포닐 아마이드, 염화 작용기 등의 존재하에서도 성공적으로 반응이 진행됐다. Diosbulbin B는 고무마에서 추출한 천연 대사산물로 항염증 활성 연구가 활발히 진행되고 있는 물질이다. 본 연구에서 개발한 반응 조건을 적용한 결과, 이 천연물에 포함된 퓨란 골격을 선택적으로 피롤 유사체로 전환할 수 있었다.

이러한 사례들은 다단계 합성이 필요했던 피롤 유사체의 합성이 단일 단계의 산소 → 질소 원자단 교환만으로도 가능해졌음을 의미한다.

기대효과



본 연구는 신약 개발 단계에서 구조-활성 관계(Structure-Activity Relationship) 연구의 병목을 해소하여, 새로운 화합물 설계와 검증 과정의 효율성을 극대화할 것으로 기대된다. 기존에 만들 수 없었던 화학적 공간을 탐구할 수 있는 도구를 제공하며, 향후 유기화학, 의약화학, 농약 개발 등 다양한 응용 분야에서 광범위한 영향을 미칠 것으로 평가된다.

해당 반응은 기존의 다단계 합성 과정 없이 단일 반응으로 이루어지기 때문에 효율적인 약물 개발이 가능하며, 개발 과정에서의 시간과 비용을 절감할 수 있다는 장점이 있다.

연구성과

[논문] 국제 학술지 사이언스지에 단독 교신 저자로 출판 (Photocatalytic furan-to-pyrrole conversion, Science 2024, 386, 99.)
[홍보1] 국외 학술지 및 매스컴 홍보 실적: <Science>, <Nature Catalysis>의 Perspective 섹션에 단독으로 소개. 화학 분야 주요 학회인 미국화학회(American Chemical Society), 영국 왕립화학회(Royal Society of Chemistry)가 발간하는 잡지인 <C&EN>, <Chemistry World> 매거진에 단독 기사로 다뤄짐.
[홍보2] 국내 매스컴 홍보 실적: MBC 뉴스데스크, SBS, 중앙일보, 사이언스조선, 연합뉴스, The Science Times, 동아사이언스, 헤럴드경제, 매일경제 등 국내 매스컴에 단독으로 소개.

연구비 지원

[기관고유과제] UP도약연구, 초세대협업연구실 [정부과제] 한국연구재단 우수신진연구(RS-2023-00213491) [기업과제] 포스코사이언스펠로우십

학습/기억의 물리적 단위인 시냅스 형성 및 소멸 영상기술 개발

KAIST'S TOP 10
RESEARCH ACHIEVEMENTS of 2024

연구책임자 | 허원도 **참여연구원** | 손승규, 유정혜, 이진수
소속학과 | 생명과학과 **연구실 홈페이지** | <https://sites.google.com/view/heolab/home>

‘Real-time visualization of reversible synapse formation in live cells in vivo’이라는 주제로 “실시간 시냅스 영상 센서” 기술을 개발하는 데 성공하여, 독창성과 범용성을 인정받아 2024년 1월, 세계적인 학술지 Nature Methods (IF: 36.1) 지에 게재하였다. 이 기술을 시냅스 (Synapse)와 스냅샷 (Snapshot)을 조합한 시냅샷 (SynapShot)이라고 명명하였다. SynapShot 기술은 기존에는 구현하기 어려웠던 시냅스의 형성과 소멸 그리고 역동적인 변화 과정을 살아 있는 실시간으로 추적, 관찰할 수 있다. 살아있는 마우스가 인지하는 동안 뇌에서 시냅스의 변화를 실시간으로 세계 최초로 관찰한 연구성과이다.

연구배경



허원도 교수는 2008년 KAIST 생명과학과에 부임하여 지난 15년 이상 KAIST에서 지속적으로 축적해 온 연구를 기반으로 살아있는 세포와 생쥐 뇌에서 DNA, mRNA, 단백질 등 생명체 핵심 분자들의 기능을 시각화하는 바이오이미징 기술 개발과 빛으로 시공간적으로 제어하는 분자광유전학 분야를 개척하여 새로운 패러다임의 세포생물학 및 뇌과학 연구를 이끌고 있는 등, 광유전학이라는 첨단바이오기술 개발의 세계적 리더이다. 허원도 교수는 1세대 광유전학 기술의 한계를 극복하고, 독창적이고 혁신적인 분자광유전학 기술을 개발하여, 다양한 뇌 연구 분야로 확장하는 데 성공했다. 최근의 연구성과로 세포 내 다양한 분자들을 빛으로 시공간 특이적으로 제어하고 시각화하는 첨단바이오기술을 개발하여 기억 연구, 우울증, 치매 및 파킨슨병 치료 등 뇌 기능연구 전반에 걸쳐 중요한 업적을 이루었다.

연구내용



- 논문: 학습/기억의 물리적 단위인 시냅스 형성 시각화 세계 최초 성공 (Nature Methods지 2024년 1월)
 * 2024년 대표연구논문

‘Real-time visualization of reversible synapse formation in live cells in vivo’ 연구주제로 수행하면서 “실시간 시냅스 센서”라는 기술을 개발하는 데 성공하였고, 해당 연구 내용은 그 독창성과 범용성을 인정받아 2024년 1월 세계적인 학술지인 Nature Methods(IF: 36.1) 지에 게재되었다.

시냅스 (Synapse)와 스냅샷 (Snapshot)을 조합한 시냅샷 (SynapShot)이라고 명명하였다.

SynapShot 기술은 기존에는 구현하기 어려웠던 시냅스의 형성과 소멸 그리고 역동적인 변화 과정을 실시간으로 추적, 관찰할 수 있다. 이는 살아있는 포유류의 시냅스 변화를 실시간으로 세계 최초로 관찰한 연구성과이다.

- 2024년 논문2 및 해외특허출원: 빛으로 제어 가능한 유전자가위 기술 개발(Nature Commu. 2024년 1월; 2022년 해외특허지원사업 선정 S 등급)

세계 최초로 RNA 유전자 가위 기술인 CRISPR/Cas13의 활성을 광유전학으로 조절하여 시간 및 공간적으로 표적 RNA의 염기편집을 성공했다.

- 2024년 논문3: 빛으로 기억을 조절해 PTSD 마우스 치료 성공(Science Advances. 2024년 6월; 2022년 해외특허지원사업 선정 S 등급)

빛으로 제어하는 광유전학 기술을 개발하여 단백질(PLCβ1)의 기능을 정밀하게 조절하여 뇌의 특정 부위에서 일어나는 신경 활동을 정밀하게 제어 성공했다.



그림1. 생쥐의 대뇌 시각 피질에서 생체 내 이미징 기술로 실시간으로 시냅스의 변화 관찰

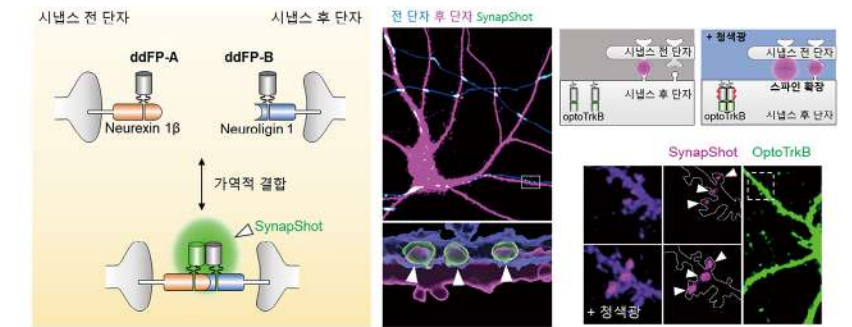


그림2. 시냅스 관찰 기술 SynapShot의 모식도와 신경세포에서 관찰된 시냅스의 현미경 사진

기대효과



이 기술은 신경과학과 정밀의학에서 새로운 연구도구이며, SynapShot 기술을 통해 뇌 시냅스 변화와 연결 과정을 실시간으로 관찰할 수 있을 것이라 기대된다. 또한 퇴행성 뇌질환의 원인을 규명하고 치료 전략을 설계하는 데 핵심 도구로 활용될 것이라 기대된다.

퇴행성 뇌질환의 조기 진단 및 치료 설계

SynapShot을 활용해 알츠하이머병이나 파킨슨병 초기 단계에서 시냅스의 구조적 변화를 포착하여, 발병초기의 메커니즘 연구가 가능해지고 환자 맞춤형 치료 전략을 개발할 수 있다.

약물 개발 효율 극대화

신경세포 간 시냅스 연결 변화를 실시간으로 관찰해 새로운 신경 보호제나 치료제를 검증하는 데 활용될 것이라 기대된다. 이를 통해 약물 개발 기간과 비용을 크게 절감할 수 있다.

기억력 강화 및 학습 촉진 기술 개발

SynapShot은 기억 형성과 학습 과정에서 시냅스의 변화를 실시간으로 추적하여, 학습 능력을 향상시키는 새로운 뇌 자극 기술 개발에 기여할 것이다.

정신질환 정밀연구 가능

특정 신경세포의 시냅스를 선택적으로 관찰·조작함으로써 우울증, 불안 장애, 조현병 등과 관련된 신경 네트워크를 구체적으로 이해하고, 이들 질환의 치료 전략을 혁신적으로 개선할 수 있을 것이라 기대한다.

뇌 연구의 차세대 이미징 도구로 활용

SynapShot 기술은 향후 뇌 기능 및 질병 연구의 기본 영상 도구로 널리 사용될 것이며, 신경과학 연구에 새로운 기준을 제시할 것이다.

연구성과

- [논문] 학습/기억의 물리적 단위인 시냅스 형성 시각화 세계 최초 성공(Nature Methods지 2024년 1월)
 *2024년 대표연구논문
- [수상] 분자광유전학 분야를 개척하여, 광유전학 분야 세계적리더로 성장(제 20회 경암상 수상 2024년 11월)
 *2024년 대표 수상업적

연구비 지원

- [기관고유과제] KAIST 글로벌 특이점 과제
 · 분자광유전학을 통한 뇌 기능 재설계 연구
- [정부과제] 중견과제 및 삼성미래재단과제
 · 중견: 분자광유전학기술을 통한 인지/기억 및 성체신경발생 연구
 · 삼성: 메신저 RNA 기능의 시공간 조절원리 및 신생단백질 기능 규명

사족 보행 로봇 라이보2

KAIST'S TOP 10
RESEARCH ACHIEVEMENTS of 2024

연구책임자 | 황보제민 **참여연구원** | 이충인, 염동훈, 박정수
소속학과 | 기계공학과 **연구실 홈페이지** | [http:// railab.kaist.ac.kr](http://railab.kaist.ac.kr)

사족 로봇은 정찰, 감시, 보조 등 다양한 임무를 무인으로 수행할 수 있는 범용적인 로봇 플랫폼이다. 기존 바퀴형 로봇들이 가지 못했던 다양한 지형을 갈 수 있다는 장점이 있다. 하지만 실외에서 작업하기에는 항상 배터리 성능이 부족했다. 예를 들어 현재 가장 많이 팔리고 있는 보스턴다이나믹스사의 스팟의 경우 1시간 정도 작업이 가능하며 최대 3km정도 보행이 가능하다. 따라서 충전소에서 반경 1km정도로 작업 환경이 제한된다. 또한, 2시간정도 충전시간을 감안하면 하나의 작업을 지속적으로 수행하기 위해서는 3대의 로봇으로 작업해야 된다는 점이 사족 로봇의 경제성을 떨어트렸다. 황보제민 교수팀이 개발한 라이보2는 42kg의 중형 로봇으로 한번 충전으로 10시간 지속 보행이 가능하며 60km 이상의 거리를 달릴 수 있다. 이번 마라톤을 통해 이런 기술적 우위를 증명했다. 이는 효율적인 모션제어와 로봇 설계 기술이 융합되어 가능했다. 강화학습을 통해 에너지 소모가 적으면서 안정적인 모션을 찾았고 기존 라이보1 설계를 개선해 가볍게 만들면서 전장부의 효율도 높였다. 사족 로봇의 에너지 소모를 수치적으로 모델링 하였고 최적화 기법을 통해 보행에 최적화된 시스템을 개발할 수 있었다. 이를 통해 라이보2는 반경 20km에서 자유롭게 작업하고 돌아와 충전할 수 있게 개발되었다. 또한, 높은 에너지 효율은 발열이 적다는 것을 의미하며 섭씨 45도의 무더운 환경에서도 작업이 가능해졌다. 이러한 로봇은 군에서는 순찰, 보조 등의 임무를 수행할 수 있으며 정찰 인력 대신 밤에 길거리를 순찰 할 수도 있다. 또한, 긴 배터리 시간을 통해 기존의 불가능했던 재난환경에서의 생존자 수색이나 산불 감시 등 수없이 많은 새로운 야외 임무들도 수행할 수 있다. 이러한 임무들은 넓은 범위의 환경에서 오래 작업해야 되기 때문에 기존 로봇들로는 한계가 있다. 황보제민 교수는 교원창업을 통해 라이온로보틱스를 설립하였고 회사를 통해 라이보2를 제작 판매하고 있다.

연구배경



사족 보행 로봇은 정찰, 감시, 순찰 등 다양한 임무를 무인으로 수행할 수 있는 범용적인 로봇 플랫폼이다. 모래, 얼음, 산악 지형을 포함한 다양한 환경에서 우수한 보행성능을 보여주며 기존 바퀴형 로봇들이 가지 못했던 지형을 극복할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 바퀴 기반 주행 로봇에 비해 주행 거리 및 운용 시간이 짧아 주로 실내 위주의 임무에 제한되어 사용되는데 한계가 있었다.

이러한 한계는 보행로봇이 배터리를 포함한 몸통의 무게를 지탱하기 위해 에너지를 사용하고, 보행의 특성상 불연속적인 지면 접촉에 의해 접촉 순간에 에너지를 잃는 특성 때문이다. 현재 가장 많이 사용되는 보스턴다이나믹스사의 스팟의 경우 1시간 정도 작업이 가능하며 최대 3km 정도 보행이 가능해 충전소에서 반경 1km 정도로 작업 환경이 제한된다. 또한 2시간 정도의 충전시간을 감안하면 하나의 작업을 지속적으로 수행하기 위해서는 3대의 로봇으로 작업해야 한다는 점이 사족 로봇의 경제성을 떨어트렸다.

보행 로봇의 손실을 줄이기 어려운 이유는 몸통의 무게를 지탱하느라 발생하는 손실과 지면 접촉 과정에서 발생하는 손실 사이에 상충관계가 존재하기 때문이다. 이런 상충관계로 인해 하나의 손실을 개선하려는 시도가 다른 손실을 높이는 경우가 있어, 손실에 대한 정확한 이해 없이는 전체적인 손실을 효과적으로 줄이기 어렵다. 또한 주행거리를 늘리기 위해 단순히 배터리 용량을 늘리면 몸통 무게가 무거워져 결국 보행 효율이 떨어지는 악순환이 발생하게 된다.

연구내용



연구팀은 기구, 전장, 제어 전 영역에서 모든 부분을 직접 손실을 저감하도록 하는 최적의 설계 기법을 시도하였다. 설계에 들어가기에 앞서서 손실에 대한 정확한 이해를 위하여 보행 손실을 측정할 수 있는 단위 모듈로 나누어 다양한 상황 속에서 측정할 수 있는 환경을 구축했고, 측정된 손실을 전장부 손실, 구동부 손실, 기구부 손실로 세분화했다. 전장부 손실은 PC, 센서, 전력 변환 소자 등에서 발생하며 보행 속도나 환경에 크게 영향을 받지 않는다. 구동부 손실은 모터와 모터 구동 회로에서 열로 소모되는 에너지로, 로봇이 지탱하는 무게와 자속에 영향을 받는다. 기구부 손실은 구동기에서의 출력전력을 통해 측정되며 보행 속도가 높아질수록 증가한다.

주행거리를 늘리기 위해서는 단순히 시간당 소모 에너지가 아닌 거리당 소모에너지를 줄이는 것이 핵심이다. 이를 위해서는 속도를 높여서 단위 시간당 이동거리를 늘리는 것이 중요하데, 속도가 빨라질수록 추가적으로 발생하는 손실에 대한 면밀한 분석과 그 손실을 줄이는 방법이 연구의 주요 초점이었다. 고속으로 보행하는 경우에 추가적으로 발생하는 손실은 발이 지면과 충돌할 때 손실되는 운동에너지와 지면 접촉 상황에서 미끄러져 발생하는 손실이 있는데, 이는 강화학습 기반 제어기의 보상함수를 통해 개선할 수 있었다.



특히 내리막길에서 에너지를 효율적으로 흡수할 수 있는 메커니즘을 구현했으며, 모터 구동 회로에서 손실이 발생하는 소자의 특성 파라미터를 면밀히 분석하여 최적화함으로써 전력 손실을 개선했다.

이런 기술을 바탕으로 개발된, 42kg의 중형 로봇인 라이보2는 한 번 충전으로 10시간 지속 보행이 가능하며 60km 이상의 거리를 달릴 수 있게 되었고, 이를 증명하기 위해 상주 곶감 마라톤 대회 풀코스(42.195km)에 참가해 4시간 10분의 기록으로 완주에 성공했다.

기대효과



라이보2는 반경 20km에서 자유롭게 작업하고 돌아와 충전할 수 있게 개발되었으며, 높은 에너지 효율로 인한 낮은 발열 덕분에 섭씨 45도의 무더운 환경에서도 작업이 가능해졌다.

이런 기술적 우위를 바탕으로 사족 로봇의 운용 영역을 도시 단위로 확장할 수 있게 되었다. 군에서는 순찰, 보조 등의 임무를 수행할 수 있으며, 야간 순찰이나 재난환경에서의 생존자 수색, 산불 감시 등 기존에는 불가능했던 새로운 야외 임무들도 수행할 수 있게 되었다. 이러한 임무들은 넓은 범위의 환경에서 오래 작업해야 하기 때문에 기존 로봇들로는 한계가 있었다.

또한 연구 과정에서 얻어진, 다양한 조건에서 모듈별로 변화하는 손실 데이터와 측정 방법은 사족 보행 로봇뿐만 아니라 휴머노이드 로봇이나 다리와 바퀴가 결합된 휠-레그드 로봇에도 적용될 수 있어, 다양한 로봇의 실외 환경에서의 넓은 범위 운용에 활용될 것으로 기대된다.

황보제민 교수는 이러한 기술을 산업화하기 위해 교원창업을 통해 라이온로보틱스를 설립하였고, 회사를 통해 라이보2를 제작 판매하고 있다.

연구성과

[논문1] Choi, Suyoung, Gwanghyeon Ji, Jeongsoo Park, Hyeongjun Kim, Juhyeok Mun, Jeong Hyun Lee, and Jemin Hwangbo. "Learning quadrupedal locomotion on deformable terrain." Science Robotics 8, no. 74 (2023): eade2256.

[논문2] Kim, Yunho, Hyunsik Oh, Jeonghyun Lee, Jinhyeok Choi, Gwanghyeon Ji, Moonkyu Jung, Donghoon Youm, and Jemin Hwangbo. "Not only rewards but also constraints: Applications on legged robot locomotion." IEEE Transactions on Robotics (2024).

연구비 지원

[삼성미래육성센터] 강화학습을 이용한 통합된 보행 로봇 제어와 경로 탐색 체계 개발(2020년도)

요도 카테터 삽입 없이 방광 기능을 모니터링하기 위한 무선 이식형 생체전자 시스템

KAIST'S TOP 10
RESEARCH ACHIEVEMENTS of 2024

연구책임자 | 권경하 **참여연구원** | 박도윤
소속학과 | 전기및전자공학부 **연구실 홈페이지** | <http://krg.kaist.ac.kr>

수술 후 방광 기능을 모니터링하는 무선 이식형 바이오전자 시스템을 개발하였다. 방광을 감싸는 신축성 스트레인 게이지와 블루투스 저전력 데이터 전송 무선 모듈로 구성되었다. 설치류 실험에서 30일까지, 비인간 영장류 (개코원숭이) 실험에서는 8주까지 최소 염증 반응으로 안정적 성능을 입증하였다. 방광의 실시간 연속 측정이 가능하며, 장기 수술 후 모니터링을 위한 기존 요역동학 검사의 대안을 제시하였다. 단기 모니터링 후 인체 내에서 녹아 없어져 추가 수술이나 염증 위험을 줄이는 생분해성 센싱 모듈도 추가 제작하여 그 성능을 입증하였다.

연구배경



부분적 방광절제술*은 긴 회복 기간이 필요하며, 이 기간에 요역동학 검사(이하 UDS)를 통해 몸 밖으로 소변을 배출하는 기능을 간헐적으로 평가한다. 그러나 UDS는 환자 친화적이지 않으며 사용자마다 결과에 변동성이 있고, 연속적인 데이터 수집 능력이 제한된다. 또한 카테터 (그림 1) 관련 요로 감염의 위험을 초래하며, 고위험 환자에게는 상행성 신우신염으로 진행되기도 한다. 이러한 UDS의 적절한 대안으로, 요로에 카테터를 삽입하지 않고 방광의 상태를 연속적이고 실시간으로 모니터링할 수 있는 기술이 필요하다.

*방광에 종양이 있는 부위를 잘라내고 나머지 방광을 이어 붙여주는 수술

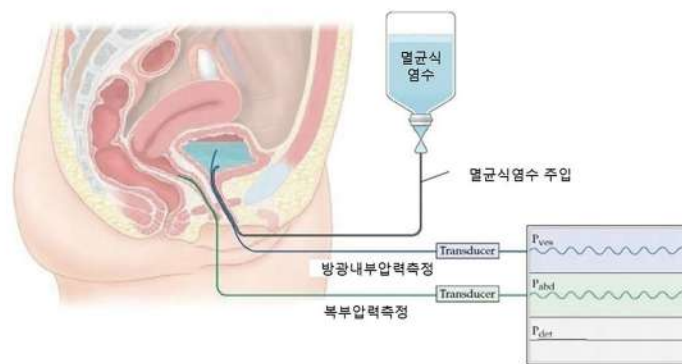


그림1. 요도 카테터 삽입을 통한 기존 방식

연구내용



이에 연구팀은 방광의 충전 및 배뇨와 관련된 기계적 변형 변화를 무선 원격 측정할 수 있는 이식형 방광 플랫폼을 개발했다 (그림 2). 이 시스템은 생분해성 스트레인 센서를 이용해 방광의 크기와 압력 변화를 실시간으로 측정하고, 회복 기간이 끝나면 해당 센서가 신체 내에서 자연스럽게 용해돼 사라지는 것이 특징이다. 모니터링 장비 제거를 위한 추가 수술이 필요 없고 합병증 위험을 줄이는 것은 물론 환자의 편안함과 회복 시간을 개선한다. 연구팀은 이 플랫폼을 이식 후 최대 30일까지 실시간 변화를 재현적으로 측정할 수 있음을 쥐 모델에서 입증했다. 또한 개코원숭이 실험을 통해, 해당 기술이 전통적인 UDS와 비교해 최대 8주까지 압력 측정의 일치성을 보였다. 이러한 결과는 해당 시스템이 장기간 수술 후 방광 회복 모니터링을 위한 UDS의 적절한 대안으로 사용될 수 있음을 시사한다.

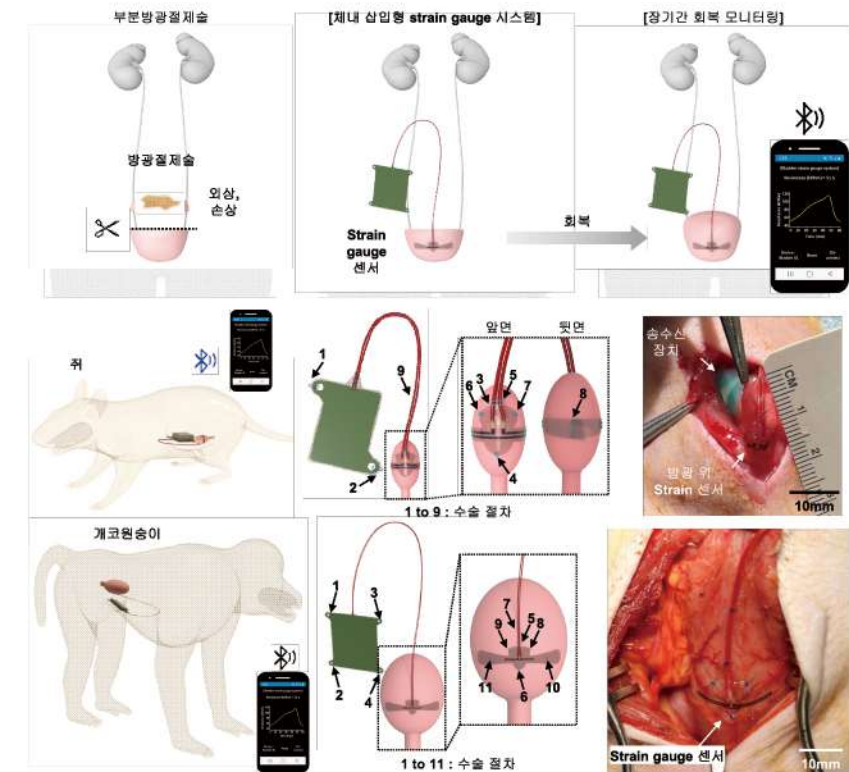


그림2. 방광 기능 모니터링을 위한 무선 이식형 플랫폼 (위), 쥐 모델 실험 셋업 (중간), 개코원숭이 실험 셋업(아래)

기대효과



비인간 영장류(개코원숭이)를 활용한 광범위한 실험을 통해 방광 기능에 대한 정확하고 신뢰할 수 있는 데이터를 제공하는 임플란트 장치의 효능을 입증했다. 추후 임상실험을 통해, 실제 환자들의 회복 시간을 단축하고 전반적인 수술 결과를 개선하는데 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

연구성과

[논문] 1914년에 설립되어 100년 이상의 역사를 보유한 미국국립과학회보 Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS; IF 9.4, JIF 9.3%) 2024에 게재 ("A Wireless, implantable bioelectronic system for monitoring urinary bladder function following surgical recovery")

[수상] KI 융합연구상 수상 (2024년)

[홍보] 관련 언론보도 25건

연구비 지원

[한국연구재단] 개인연구사업 (기초연구), 개인연구사업 (우수신진과제), 집단연구사업 (지역혁신 선도연구센터 과제)

uPIMulator: 범용 PIM 아키텍처를 위한 빠르고 유연한 시뮬레이션 프레임워크

KAIST'S TOP 10
RESEARCH ACHIEVEMENTS of 2024

연구책임자 | 유민수 **참여연구원** | 현봉준, 김태훈, 이동재
소속학과 | 전기및전자공학부 **연구실 홈페이지** | <https://sites.google.com/view/kaist-via>

본 연구성과는 메모리 내 연산 기술(Processing-In-Memory, PIM)을 분석하고 이를 기반으로 미래의 PIM 아키텍처 설계를 제안하는 내용을 담고 있다. 본 연구의 대표적인 업적인 uPIMulator 시뮬레이터는 상용화된 PIM 제품인 UPMEM-PIM의 사이클 단위 성능을 시뮬레이션하며 실제 하드웨어와 유사한 성능을 제공한다. 본 연구에서 UPMEM-PIM 아키텍처 분석, 하드웨어 구조, 프로그래밍 모델, 시스템 소프트웨어를 심층적으로 분석하여 장점과 한계를 도출한다. 또한, 다양한 애플리케이션 도메인에서 UPMEM-PIM의 성능을 평가하고 병목 현상과 개선 가능성을 식별하여, 현재 PIM 시스템의 한계를 극복하기 위해 필요한 미래지향적 아키텍처적 특징을 제안한다. 요약하면, 본 연구는 PIM 기술이 메모리 병목 현상을 해소하고 데이터 집약적 응용에 대한 효율성을 높일 가능성을 제시하며, 향후 PIM 아키텍처 설계를 위한 방향성을 제공한다.

연구배경



메모리와 프로세서 간의 성능 격차, 즉 메모리 대역폭 병목현상은 과학적 계산, 그래프 처리, 머신러닝 등과 같은 메모리 집약적 응용에서 중요한 성능 저하 요인으로 작용해왔다. 전통적인 폰 노이만 아키텍처에서는 프로세서와 메모리 간의 데이터 이동에 소요되는 시간이 점점 더 증가하며 시스템 성능의 병목으로 작용하고 있다. 이를 해결하기 위한 접근법으로 메모리 내 연산 기술(Processing-In-Memory, PIM) 아키텍처가 오랜 시간 동안 연구되었다. PIM은 메모리 근처에 계산 로직을 배치함으로써 데이터 이동 비용을 줄이고 메모리 대역폭 문제를 완화할 수 있다.

하지만 PIM 기술은 설계 복잡성과 높은 비용, 소프트웨어 스택의 불안정성 등 여러 문제로 인해 상용화가 어려웠다. DRAM 밀도 감소, 열 관리 문제, 프로그래밍 모델의 제약 등이 PIM 설계의 주요 난제로 지적되었고, 이는 대부분의 연구가 학문적 탐구 수준에 머무르게 하였다. 그러나 최근 몇 년 동안 메모리 집약적 작업의 폭발적인 증가와 함께, 삼성과 SK하이닉스와 같은 주요 메모리 공급업체들이 도메인 특화 PIM 설계를 도입하며 새로운 활로를 열었다. 예를 들어, 특정 애플리케이션 도메인에 맞게 최적화된 행렬 곱셈과 같은 계산을 지원하는 도메인 특화 PIM 기술은 딥러닝과 같은 응용을 가속화할 수 있다.

반면, UPMEM과 같은 범용 PIM 기술은 더 일반적인 병렬 프로그래밍 언어와 LLVM 기반 컴파일러 스택을 제공하여 개발자들이 다양한 병렬 프로그램을 작성할 수 있는 유연성을 제공한다. GPU가 하드웨어 및 소프트웨어의 지속적인 개선을 통해 일반적인 컴퓨팅 장치로 자리 잡은 것처럼, 범용 PIM 기술도 유사한 발전 가능성을 가지고 있다. 이러한 배경에서, 본 연구진은 UPMEM의 범용 PIM 기술을 심층적으로 분석하여 그 설계 특성과 성능을 규명하고, 미래 PIM 아키텍처 설계에 중요한 통찰을 제공하는 것을 목표로 하였다.

연구내용



본 연구진은 UPMEM의 PIM 기술을 분석하기 위해 “uPIMulator”라는 시뮬레이션 프레임워크를 개발하였다. uPIMulator는 UPMEM의 ISA(명령어 집합 아키텍처)를 지원하며, 소스 코드를 기계 수준 명령어로 변환한 후 이를 하드웨어 수준에서 시뮬레이션하여 성능 특성을 파악할 수 있도록 설계되었다.

uPIMulator는 UPMEM-PIM 하드웨어의 동작을 정밀하게 모델링하여 실제 시스템과 유사한 수준의 정확성을 제공할 수 있다. 특히, UPMEM의 독특한 파이프라인 구조와 스레드 스케줄링 규칙 등을 상세히 모사하고 있다. 본 연구진은 uPIMulator를 활용, Prim 벤치마크를 사용해 다양한 응용들을 실행하고, 병목현상을 분석하여 PIM 아키텍처 개선 방향을 제안하였다.

첫째, UPMEM의 기존 설계와 성능 특성을 분석하여 주요 병목현상을 규명하였다. 둘째, 데이터 병렬 처리를 위한 SIMT(Single Instruction, Multiple Threads) 아키텍처와 지시어 레벨 병렬성(ILP)을 높이기 위한 마이크로 아키텍처 개선을 제안하였다. 셋째, 멀티테넌시 지원과 캐시 기반 아키텍처로의 전환 가능성을 실험하여 PIM의 실질적인 상용화를 위한 다양한 방향성을 제시하고자 하였다.

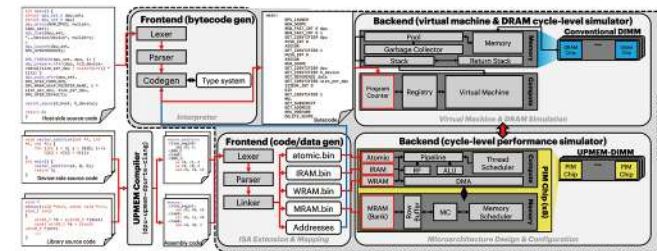


그림1. uPIMulator 시뮬레이션 프레임워크 개요



사진1. HPCA 최우수논문상(Best Paper Award) 국내 최초 수상

기대효과



본 연구진의 연구 성과는 PIM 기술의 발전과 실질적인 상용화를 위해 중요한 여러 가지 기여를 하였다. 먼저, UPMEM의 현재 설계에서 나타나는 병목현상을 정량적으로 분석하고, 이를 해결하기 위한 아키텍처적 대안을 제시함으로써 PIM 기술이 메모리 병목현상을 효과적으로 완화할 수 있는 방법을 탐구하였다.

또한, uPIMulator를 오픈 소스화하여 전세계 각국의 연구진이 활용할 수 있게 하였다. uPIMulator는 향후 데이터 병렬 처리, ILP 향상, 멀티테넌시 지원, MMU(메모리 관리 유닛) 도입과 같은 혁신적인 아키텍처 개선 방향을 연구하는데 활용될 수 있을 것으로 보인다. 이를 통해 연구자와 산업계가 새로운 PIM 기술을 실험하고 평가하는 데 중요한 도구로 활용될 것으로 예상된다. 궁극적으로 이렇게 제안된 개선 사항은 PIM 기술의 범용 컴퓨팅 장치로의 발전 가능성을 높이며, 특히 클라우드 환경에서의 활용 가능성을 열어줄 수 있다.

결론

본 연구는 UPMEM의 PIM 기술이 제공하는 고유한 유연성과 프로그래밍 가능성을 분석하며, 이를 바탕으로 현재 설계의 제약을 보완하기 위한 구체적인 대안을 제시하였다. 특히, 병렬 처리 성능을 최적화하기 위해 SIMT 아키텍처와 ILP 향상을 도입하고, 멀티테넌시 지원 및 캐시 기반 설계로의 전환 가능성을 실험하여 PIM 기술이 다양한 응용에서 효과적으로 작동할 수 있음을 보였다. 향후 PIM 기술의 성공적인 상용화를 위해서는 설계 복잡성과 비용을 줄이면서도 높은 성능과 유연성을 제공할 수 있는 새로운 아키텍처적 접근이 필요하다. 본 연구는 이를 위한 중요한 첫걸음으로, PIM 기술이 기존 CPU와 GPU를 보완하는 범용 컴퓨팅 장치로 발전하는 데 기여할 것이다.

연구성과

[논문] 컴퓨터 아키텍처 분야 최우수 국제 학술대회인 HPCA에서 “Pathfinding Future PIM Architectures by Demystifying a Commercial PIM Technology” 제목의 논문 발표

[수상1] HPCA에 제출된 410편의 논문들 중 1편에게만 선정되는 HPCA 최우수논문상(Best Paper Award)을 국내 최초이자 유일한 수상

[수상2] IEEE Micro Top Picks - Honorable Mention으로 선정

연구비 지원

- 대규모 그래프 신경망 기반의 개인화 추천 알고리즘 학습을 위한 데이터-근접 프로세싱 인공지능 가속 시스템 연구, 중견연구자지원사업, 과학기술정보통신부
- DRAM 기반 고성능 PIM 메모리 반도체 기술 개발, PIM인공지능반도체핵심기술개발, 과학기술정보통신부
- 대규모-대용량 기계학습 알고리즘을 위한 차세대 메모리-스토리지 시스템 설계 및 클라우드-엣지 컴퓨팅에서의 응용 연구, 삼성전자
- Memory Centric System Architecture 연구, 삼성전자
- 인공지능대학원지원, 과학기술정보통신부

iPhone, Android처럼 비순차적으로 명령을 실행하는 CPU에서 발생하는 동시성 버그와 보안 문제를 발견하는 시스템

KAIST'S TOP 10
RESEARCH ACHIVEMENTS of 2024

연구책임자 | 권영진

참여연구원 | 정대룡, 최예원, 신인식, 이병영(서울대)

소속학과 | 전산학과

연구실 홈페이지 | <http://casys.kaist.ac.kr>

커널 동시성 버그는 식별하기 매우 어렵고, 그 결과는 시스템의 신뢰성과 보안을 심각하게 위협한다. 특히 커널에서는 잠금(lock)뿐만 아니라 메모리 장벽(memory barrier)도 고려하여 비순차 실행(out-of-order execution)으로 인해 동시 실행의 올바름이 깨지지 않도록 해야 한다. 메모리 장벽의 잘못된 사용은 비순차 실행으로 인해 발생하는 직관적이지 않은 동시성 버그를 야기할 수 있으며, 이를 OOO(Out-Of-Order) 버그라고 합니다. 본 논문은 커널 내 OOO 버그를 식별하는 것을 목표로 한다. 우리는 커널 코드가 실행되는 동안 비순차 실행을 에뮬레이션하는 OEMU라는 메커니즘을 고안하였다. OEMU는 프로세서가 메모리 접근을 재배치하는 방식에서 영감을 받아 비순차 실행의 미묘하고 비결정적인 동작을 체계적으로 제어할 수 있도록 한다. OEMU를 기반으로 우리는 커널 OOO 버그를 효과적으로 식별할 수 있는 새로운 테스트 도구인 OZZ를 제안한다. OZZ의 핵심 특징은 비순차 실행과 스레드 교차(thread interleaving)에 의해 발생하는 동시 실행을 결정론적으로 제어할 수 있는 능력으로, 이들의 결합된 효과를 포괄적으로 테스트할 수 있다는 점이다.

평가 결과 OEMU는 이전에 보고된 커널 OOO 버그를 재현하는 데 효과적임을 보여주었으며, 비순차 실행을 강력히 제어할 수 있는 능력을 입증하였다. 또한, OZZ를 통해 최신 리눅스 커널 버전에서 11개의 새로운 OOO 버그를 식별했으며, 이는 커널 개발자들에 의해 확인되고 패치되었다.

연구배경



멀티코어 시대에서는 동시성이 시스템 성능 최적화의 핵심 요소로 자리 잡고 있다. 이를 실현하기 위해 커널과 같은 시스템 소프트웨어는 Read-Copy-Update(RCU), 참조 카운터(reference counters), 락 프리 데이터 구조(lock-free data structures) 등 다양한 기술을 채택해 왔다. 하지만 이러한 기술들은 개발자들에게 스레드 간 동기화 문제를 야기하며, 이를 제대로 처리하지 못할 경우 동시성 버그가 발생하여 시스템 소프트웨어의 신뢰성과 보안을 저하시킬 수 있다.

특히, 약한 메모리 모델(예: ARM 기반 프로세서)에서는 비순차 실행(out-of-order execution)으로 인해 동시성 버그가 더욱 쉽게 나타날 수 있다. 비순차 실행은 프로세서가 메모리 접근 순서를 최적화하면서 발생하며, 메모리 장벽(memory barrier)이 없을 경우 이러한 재정렬이 의도치 않은 버그를 유발할 수 있다. 이러한 OOO(Out-Of-Order) 버그는 시스템 충돌, 데이터 손실, 메모리 손상 등 심각한 문제를 초래할 수 있지만, 그 특유의 비결정성(non-deterministic)으로 인해 식별이 매우 어렵다. 기존 도구는 스레드 간 교차(thread interleaving)를 제어하는 데는 유용하지만, 비순차 실행의 효과를 체계적으로 테스트하기에는 한계가 있다.

연구내용



본 연구는 커널에서 발생하는 OOO 버그를 식별하기 위한 새로운 접근법을 제안한다. 이를 위해 "실시간 비순차 실행 에뮬레이션(In-Vivo Out-of-Order Execution Emulation, OEMU)"이라는 메커니즘을 설계하였으며, 이를 통해 메모리 접근 순서를 결정론적으로 제어하고 테스트할 수 있도록 했다. OEMU는 다음과 같은 주요 특징을 가지고 있다:

실행 중인 커널 코드의 메모리 접근 순서를 명시적으로 재정렬하여, 비순차 실행을 관찰하고 제어 가능하게 만든다.

기존 커널 디버깅 도구(예: Sanitizer, Kernel Assertions)와 통합하여 버그 탐지에 활용할 수 있도록 한다.

OEMU를 기반으로, 본 연구는 OOO 버그를 발견하기 위한 새로운 테스트 도구인 OZZ를 제안한다. OZZ의 주요 기능은 다음과 같다:

- **결정론적 테스트:** OZZ는 비순차 실행과 스레드 간 교차를 모두 제어하여, 이들이 결합된 상황에서 발생할 수 있는 OOO 버그를 포괄적으로 테스트한다.
- **가설적 메모리 장벽 테스트:** OZZ는 특정 메모리 장벽이 누락된 상태를 가정하고, 메모리 접근 순서를 재구성하여 버그 발생 여부를 관찰한다.
- **버그 위치 식별:** OOO 버그가 발생하는 메모리 접근 순서와 누락된 메모리 장벽 위치를 개발자에게 제공하여 수정 방향을 제시한다.

기대효과



OZZ는 최신 리눅스 커널(버전 6.5~6.8)을 대상으로 테스트를 수행하여 총 11개의 새로운 OOO 버그를 발견하였다. 이러한 버그는 TLS, BPF 등 주요 커널 서브시스템에서 나타났으며, 커널 개발자들에 의해 확인 및 패치되었다. OZZ의 도입은 다음과 같은 실질적인 효과를 기대할 수 있다:

- **효율적인 버그 식별:** 기존 도구로는 탐지가 어려운 OOO 버그를 체계적으로 발견하여, 커널 개발 과정에서 발생하는 잠재적인 오류를 미리 방지할 수 있다.
- **리소스 절약:** Google과 같은 대규모 시스템 운영 조직에서는 ARM 머신에서 OOO 버그를 식별하기 위해 많은 리소스를 투자해야 했으나, OZZ는 이를 가상 환경에서도 탐지할 수 있어 비용을 절감할 수 있다.
- **개발자 지원:** OZZ가 제공하는 상세한 버그 리포트는 개발자들이 OOO 버그의 근본 원인을 이해하고, 적절한 메모리 장벽을 삽입하는 데 도움을 준다.

결론적으로, 본 연구는 커널 내 OOO 버그를 식별하는 새로운 기준을 제시하며, 신뢰성과 보안성이 향상된 커널 개발에 기여할 것으로 기대된다.

연구성과

연구비 지원

[논문] OZZ: Identifying Kernel Out-of-Order Concurrency Bugswith In-Vivo Memory Access Reordering, ACM SOSP 2025 Accepted

[수상] ACM SOSP 2025 Best Paper Award 수상

[홍보] <https://zdnet.co.kr/view/?no=20241201141503> (외 11건)

[정부과제] 한국연구재단 (RS- 2024-00347516 and RS-2024-00359979), 정보통신기획평가원 (RS-2023- 00232728), 한국과학기술정보연구원 (TIPS 00262147), K-Startup (20144069)

[기업과제] 삼성전자

실세계 인공지능 훈련 비용 최소화 기술 및 감염병 관리 문제 응용

KAIST'S TOP 10
RESEARCH ACHIEVEMENTS of 2024

연구책임자 | 이재길 **참여연구원** | -
소속학과 | 전산학부 **연구실 홈페이지** | <https://kaistdmlab.org>

실세계 인공지능 훈련 데이터에 내재한 다양한 형태의 품질 문제로 훈련 비용이 불가피하게 증가할 수 있다. 본 성과에서는 다음 세 가지 문제를 해결하여 세계적인 연구 성과를 창출하였다. (1) 레이블 오류 문제: 레이블 오류를 자동으로 탐지하고 대응하여 전처리 시간을 줄인다. 제안 방법과 기존 방법을 총망라한 논문은 2년(2023~2024) 만에 1,200회가량 인용되는 엄청난 파급효과를 주었고 해당 분야 연구를 크게 촉진하고 있음이 자명하다. (2) 레이블 부족 문제: 레이블을 자동으로 유추하고 사용하여 레이블 취득 비용을 줄인다. (3) 데이터 중복 문제: 자동으로 데이터 중복을 제거하고 핵심 집합을 선별하여 정확도 저하 없이 훈련 비용을 최소화한다. 대표적으로 모델 정확도를 유지하면서 모델 훈련 시간 자체를 1/10까지 단축하였다. 본 성과를 코로나19와 같은 감염병 관리에 응용하여 K-방역과 긴급재난지원금 책정에 사용될 수 있는 인공지능 기술을 개발하고 미국, 한국 특허로 등록하였다.

연구배경



실세계 인공지능 훈련 데이터에 내재한 다양한 형태의 품질 문제 때문에 훈련 비용이 불가피하게 증가할 수 있어, 이를 극복하고 인공지능 훈련 파이프라인 비용을 최소화하는 것이 매우 중요하다.

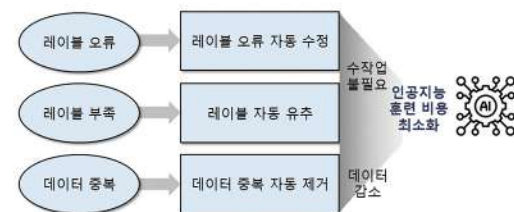
- 레이블 오류 문제:** 예를 들어, 이미지 분류 모델 훈련 데이터에서 강아지 사진에 고양이라고 표시되어 있다. → 레이블 오류를 자동으로 탐지하고 대응하며 모델을 훈련함으로써 데이터 전처리 과정 없이 훈련 비용을 최소화한다. [IEEE Trans. Neural Networks Learn. Syst. 논문]
- 레이블 부족 문제:** 예를 들어, 시계열 분류(건강상태 모니터링) 모델 훈련 데이터에서 심방세동 지점이 모두 표시되어 있지 않다. → 레이블을 자동으로 유추하고 사용하여 레이블 취득 비용과 훈련 비용을 최소화한다. [ICML23, NeurIPS24, 홍보]
- 데이터 중복 문제:** 예를 들어, 이미지 분류 모델 훈련 데이터에서 유사한 강아지 사진이 여러 개 포함되어 있다. → 데이터 중복을 자동으로 제거하고 핵심 집합을 선별하여 정확도 저하 없이 훈련 비용을 최소화한다. [NeurIPS23, 홍보]

연구내용



오른쪽 그림은 본 연구의 전체적인 구성을 보이며, 세 가지 품질 문제를 해결하여 인공지능 훈련 비용 최소화에 크게 기여했다.

- IEEE TNNLS 논문 (약 1,200회 인용)
- NeurIPS, ICML 등에 논문 다수 발표
- 미국특허 1건, 대한민국특허 1건 등록

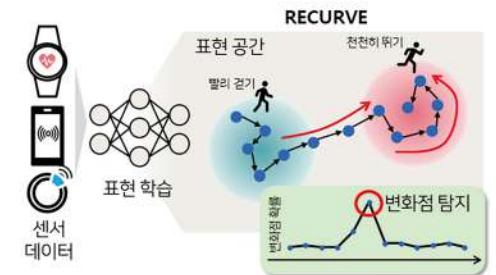


[레이블 오류] 레이블 오류 자동 수정: 훈련 데이터의 샘플에 부여된 레이블의 신뢰도를 모델 훈련 도중에 검사하여 신뢰도가 높은 레이블만 그대로 사용하고, 그렇지 않은 샘플은 수정 가능성을 판단하여 수정 가능성이 높으면 부여된 레이블 대신 수정된 레이블을 사용한다.

- 최초로 샘플 선택 방식과 레이블 수정 방식을 결합하는 하이브리드 방식을 제시한다.
- 레이블 오류 비율이 40%일 때도 95% 이상의 정확도로 오류를 수정한다.
- 실세계 이미지 데이터(WebVision)에서 분류 정확도를 최대 9%포인트 향상시킨다.

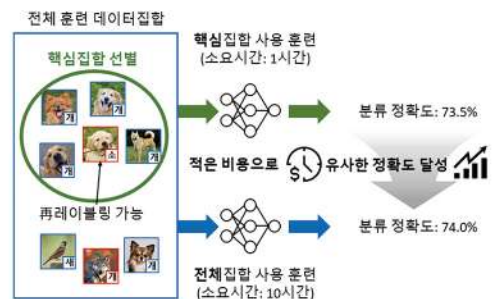
[레이블 부족] 데이터 레이블 자동 유추: 시계열 데이터에서 시점별 임베딩 벡터를 비교하여 레이블이 변경되는 시점(예: 걷기→뛰기)을 정확하게 유추하고 추가 레이블 부여에 활용한다.

- 기존 방법에서는 임베딩 간 거리를 비교하였으나 오른쪽 그림과 같이 임베딩 궤적의 곡률을 비교하는 혁신적인 방식을 제안한다.
- 특히 헬스케어 센서 데이터에서 점진적으로 변화하는 시점을 찾는 데 효과적임을 보인다.
- 최신 방법 대비 최대 12.7% 정확도를 향상시킨다.
- 2024년 11월 12일 국내 일간지 보도



[데이터 중복] 데이터 핵심집합 선별: 훈련 데이터에서 모델 훈련에 가장 도움이 될 샘플을 순차적으로 선택하여 적은 양의 훈련 데이터로도 전체와 대등한 정확도를 달성한다.

- 최초로 레이블 오류를 수정하는 동시에 핵심집합을 선별하는 방식을 제안했다.
- 오른쪽 그림과 같이 레이블 오류 수정에 필요한 최소한의 훈련 데이터가 가장 효과적인 핵심 집합이라는 점을 입증하였다.
- 모델 정확도를 유지하면서 모델 훈련 시간 자체를 1/10까지 단축시킨다.



[사회 문제 해결] 감염병 관리: 상기 연구 성과와 노하우를 코로나19와 같은 감염병 관리에 적용하여 K-방역과 긴급재난지원금 책정에 사용될 수 있는 기술을 개발한다.

- 특히 인공지능 훈련 비용 최소화를 위해 대규모의 훈련 데이터 수집 없이도 소량의 제한적인 훈련 데이터만으로도 높은 정확도를 내는 데 집중한다.
- 인공지능 기술로 향후 2주간의 감염병 해외 유입 확진자 수를 예측한다. [미국특허]
- 인공지능 기술로 집단감염이 지역경제(소비 변화)에 미치는 영향을 예측한다. [대한민국특허]

기대효과



본 연구는 12대 국가전략기술 중 인공지능의 「효율적 학습 및 AI인프라 고도화」 중점기술에 직접적으로 적용될 수 있어, 향후 해당 기술을 위해 발주되는 정부 투자 및 산업체 연구를 더욱 활성화할 수 있을 것으로 기대한다.

Gartner는 AIOps(Artificial Intelligence for IT Operations)를 빅데이터와 인공지능을 결합하여 다양한 IT 작업을 자동화하는 기술로 정의하였으며, 본 연구 성과는 AIOps 플랫폼의 다양한 기반 기술로 활용될 수 있다.

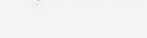
- AIOps 플랫폼의 전 세계 시장 규모는 2024년에 272.4억 달러로 추산되며 연평균 24.01%의 성장률을 보여 2029년까지 799.1억 달러로 증가할 것으로 예상된다.

연구성과



- [논문1] Learning From Noisy Labels With Deep Neural Networks: A Survey, IEEE Trans. Neural Networks Learn. Syst. 34(11): 8135-8153 (2023) (약 1,200회 인용, IF=10.2)
[논문2] Robust Data Pruning under Label Noise via Maximizing Re-labeling Accuracy, NeurIPS 2023
[특허1] Method and Apparatus for Predicting Imported Infectious Disease Information Based on Deep Neural Networks, 미국특허 등록, US 11,507,401 B2, Jan. 17, 2023
[특허2] 심층 신경망 기반 집단 감염의 경제 영향 예측 장치 및 방법, 대한민국특허 등록, 제10-2583776호, 2023년 9월 22일
[홍보1] KAIST, AI 챗봇 이미지 데이터 훈련 비용 최소화하다, 2023년 11월 2일, TV조선, 연합뉴스, 헤럴드경제, 이데일리, 인공지능신문 등 국내 다수 일간지 보도
[홍보2] KAIST, 천천히 걸음 속도 높여도 다 아는 인공지능 기술 개발, 2024년 11월 12일, YTN사이언스, 헤럴드경제, 전자신문, 인공지능신문 등 국내 다수 일간지 보도
[수상] 국무총리표창, 2023년 과학·정보통신의 날 기념식, 2023년 4월 21일

연구비 지원



- [DB4DL] 딥러닝 지원 고사용성 및 고성능 분산 인메모리 DBMS 개발, 정보통신기획평가원, SW스타랩, 2020년 4월~2027년 12월, 연구책임자, 총 22억원
· 강건하고 공정하며 확장 가능한 데이터 중심의 연속 학습, 정보통신기획평가원, 2022년 4월~2026년 12월, 연구책임자, 총 49억원

바이오폴리머를 이용한 친환경 지반 건설 재료 및 시공 기술 개발

KAIST'S TOP 10
RESEARCH ACHIEVEMENTS of 2024

연구책임자 | 조계춘 **참여연구원** | 장일한, 임주영, 권영만, 이민형, 박동엽, 임상훈
소속학과 | 건설및환경공학과 **연구실 홈페이지** | <http://geosystems.kaist.ac.kr>

최근, 전 세계적인 기후 변화와 극단적인 기상 현상으로, 다양한 지반 재해가 발생하고 있다. 그러나 재해 방지를 위한 기존의 시멘트 기반 지반 보강 공법은 이산화탄소 배출과 환경오염 등의 문제점을 지닌다. 따라서 친환경과 지속 가능한 지반 개량을 위해 바이오폴리머를 활용한 연구가 주목받고 있다. 바이오폴리머는 생물 및 미생물에서 기인한 고분자 화합물로, 흙과의 상호작용 및 결합을 형성하여 흙의 강도를 증진시킨다. 나아가 시멘트보다 적은 양으로도 그 성능을 발휘해 경제적 이점과 친환경적 특성을 모두 만족하는 재료로써 평가받고 있다. 본 연구진은, 바이오폴리머를 활용하여 지반 재해 방지를 위한 친환경 지반 보강 재료 개발을 목표로 한다. 문헌 연구와 실내 규모 실험을 바탕으로 목적에 부합하는 레시피를 도출하고, 이를 검증하기 위해 다양한 실제 현장에서 적용을 통해 도출된 레시피와 개발된 공법에 대한 우수성을 입증하였다.

연구배경



연구의 필요성

기후 변화로 인해 전 세계적으로 지반공학적 재해가 증가하고 있다. 홍수, 산사태, 토양 유실 등의 재해는 인류의 전반적인 생활환경을 위협하고 있으며, 이를 해결하기 위한 지반 보강 공법은 필연적이다. 그러나 기존의 지반 보강 재료인 시멘트는 생산과 이후 시공 과정에서 다량의 이산화탄소를 배출하며, 환경오염을 가속화시킨다. 또한 중금속과 같은 유해물질의 유출 가능성으로 인해 생태계와 인체에 직접적인 악영향을 끼칠 수 있다. 따라서 지반공학 분야 내에서도 이러한 문제점들을 해결하기 위한, 친환경적이고 지속가능한 재료의 개발의 중요성이 대두되고 있다. 특히, 친환경적이면서 동시에 지반 개량의 우수한 성능을 발휘할 수 있는 바이오폴리머가 주목을 받고 있다.

바이오폴리머란?

바이오폴리머란, 생물 및 미생물에서 기인한 고분자 화합물로, 식품 및 의약 산업 분야에서 재료의 안정적 특징을 인정받고 활용되고 있다. 특히, 질적 양적 제어가 가능하며 소량(시멘트 대비 1/10)으로도 흙과의 상호작용을 통한 결합으로 지반의 전반적인 공학적 정수를 증진할 수 있으며, 건조 상태에서 시멘트보다 높은 강도 증진 효과를 보여 경제적·친환경적 장점을 모두 갖춘 재료이다. 이에 따라 본 연구는 바이오폴리머를 이용한 친환경 지반 보강 공법을 개발하고, 그 공학적 증진 효과를 규명하기 위해 다양한 문헌 연구와 실내 실험을 수행 하였다. 나아가 증진 효과의 극대화를 위한 최적의 레시피를 도출하고 해당 레시피의 우수성을 확인하기 위해 실제 현장 규모에서 효과의 실증을 위한 연구를 수행하였다.

연구내용



1. 실내 실험 (Laboratory-scale test)

- 미시 단위(Micro-scale) 에서의 바이오폴리머-흙 입자 결합 메커니즘 확인하였다.
- 실내 실험을 통한 흙 입자 코팅 및 입자간 정전기적 결합을 통한 흙의 강도 및 강성 증진을 확인하였다.
- 기존 흙 결합제(흙 중량의 10%) 대비 소량 처리(흙 중량 0.5~1%)로 효과를 발현하였다.

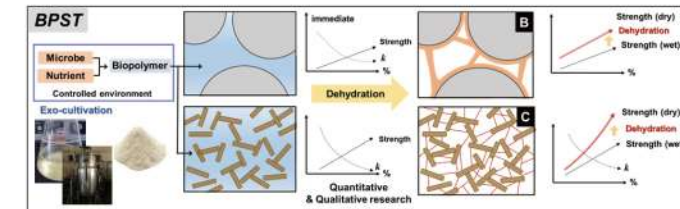


그림1. 바이오폴리머의 강도 발현 메커니즘

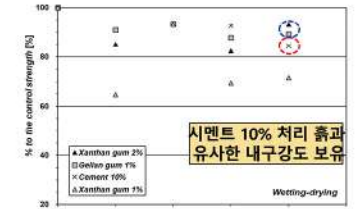


그림2. 바이오폴리머의 강도 증진 효과

2. 현장 적용 (Field application)

- 최근 급변하는 기후와 이상 현상으로 강도 높은 국지성 호우 발생이 빈번하다. 이러한 폭우 및 홍수는 주로 제방의 붕괴로 이어지며, 주된 호우 피해는 약 40%가 제방의 붕괴로 나타난다. 따라서 제방을 위한 재료의 강도 증진과 침식 저항성을 증진시키기 위해 친환경 지반 신소재인 바이오폴리머를 적용하였다. 최적의 제방을 위한 레시피를 개발하고, 효과적이며 효율적인 시공을 위한 시공법을 개발하고 제시하였다.
- 결과적으로, 실태형 제방 실험을 통해 바이오폴리머 처리 시공 이후 빠른 유속에서도 높은 제방 효과를 보이는 바이오폴리머의 우수성을 현장에서 확인하였다.



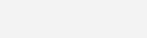
그림3. 바이오폴리머 제방의 우수성 확인을 위한 현장 적용 실험

기대효과



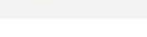
- 실태형 현장 적용 실험을 통해 높은 강도를 가지는 바이오폴리머 제방의 우수성을 확인함으로써 제방의 성능과 환경성을 검증하며, 기후변화 대응과 환경보전을 동시에 가능하게 하는 기술로 활용도가 매우 높다.
- 제방 재료를 넘어 바이오폴리머는 도로포장, 건축 자재, 식물 방초 재료 등 다양한 건설 및 환경 분야에서 재료의 특성을 이용한 다양한 접목 가능성을 기대한다.
- 향후 10년간 관련 시장 규모는 최소 국내 27조원 및 해외 1,400조원으로 추정되며, 세계적으로 신시장을 제시함은 물론이고 국내 산업 발전 및 국내 기업 해외 진출에 크게 기여할 것으로 예상된다.

연구성과



- [논문1] Effects of Xanthan gum biopolymer on soil strengthening / Construction and Building Materials (IF: 7.4, 피인용수 682건)
 [논문2] Review on biopolymer-based soil treatment (BPST) technology in geotechnical engineering practices / Transportation Geotechnics (IF: 4.9, 피인용수 285건)
 [특허1] 토양 보강재용 바이오폴리머 및 이의 제조방법 (등록번호: 1021819470000, 등록일자: 2020. 11. 17)
 [특허2] 가교 바이오폴리머를 포함하는 지반 강화용 토양 조성물 및 이를 이용한 지반 강화용 시공방법 (등록번호: 10-2635646, 등록일자: 2024.02.06.)
 [홍보] '100년 홍수'버텨낸대...가공할 내구성의 친환경 제방 보강 (2022.08.23. YTN)
 [기술이전] 유기산에 의한 교차-결합된 바이오폴리머를 포함하는 흙조성물 및 이의 제조 방법 (2021.11.01. 계약 금액:30백만원)
 [정부과제] 국토교통과학기술진흥원, 친환경 신소재를 이용한 고강도 제방 기술 개발 (2016. 02~2021.12), 한국연구재단, 바이오폴리머를 이용한 친환경 지반개량 기술 개발 (2023.02 ~ 2028.02), 해양수산부, 해저공간 창출 및 활용 기술 개발 (2022.01 ~ 2024.12)

연구비 지원



인류세의 다학문적 의미와 과학 교육을 위한 인류세 문해력

KAIST'S TOP 10
RESEARCH ACHIEVEMENTS of 2024

연구책임자 박범순 | **참여연구원** 이슬기, 인류세실무단(국제연구단)
소속학과 과학기술정책대학원 | **연구실 홈페이지** <https://anthropocenestudies.com/>

본 연구자는 국내에서 유일하게 인류세실무단의 위원으로 참여하면서 앞으로 인류세 연구가 나아갈 방향을 제시하는 연구를 수행했다. 그 하나로 인류세 개념의 다학문적 특성, 논란, 의미, 향후 과제를 다루는 인류세실무단의 논문 작업에 참여해 Nature에 출판했다(주저자 5명 공동 저자 리스트는 별도 첨부). 이와 더불어, 박사과정생과 함께 쓴 논문에서는 “인류세 문해력(Anthropocene literacy)”이라는 개념을 새롭게 제시하고, 과학 교육에서 인류세를 활용할 커리큘럼을 제안했다. 구체적으로는 인류세 교육을 통해 (1) 다학문적 연구의 특성, (2) 과학논쟁을 통한 ‘과학의 본질(Nature of Science)’ 탐구, (3) 기후변화와 같은 ‘사회-과학적 이슈(Socio-Scientific Issues)’에 대한 이해 증진을 추구했다. 이 논문은 과학교육학계에서 최고 학술지로 손꼽히는 Science and Education에 실렸다.

이 연구를 통해 인류세 개념이 지질학이라는 한 학문의 경계를 넘어서 여러 분야에서 유용하게 활용될 수 있는 길을 개척하는 데 공헌했다.

연구배경



인간의 활동으로 인해 크게 바뀐 지구를 나타내기 위해 2000년에 새롭게 제안된 지질시대 명칭인 “인류세(Anthropocene)”는 과학의 테두리를 넘어 인문학, 사회과학, 문화예술 등 여러 분야에 빠르게 퍼져 나가 시대의 화두로 자리 잡았다. 이에 지질학계는 2009년 “인류세실무단(Anthropocene Working Group)”을 조직해 이 개념의 타당성을 검토하기 시작했고, 인류세실무단은 2023년 14년간의 조사 결과를 바탕으로 인류세를 공식 채택을 제안했다. 2024년 초 국제지질학연합은 투표를 통해 이 제안을 부결하면서, 그럼에도 불구하고 이 개념이 인간의 책임성을 나타내는 유용한 개념임을 인정한 바 있다. 본 연구자는 국내에서 유일하게 인류세실무단의 위원으로 참여하면서 앞으로 인류세 연구가 나아갈 방향을 제시하는 연구를 수행했다.

연구내용



1. 인류세의 의미 (Nature 출판)

인류세실무단 위원들과 함께 쓴 이 논문은 인류세 개념을 유용하게 활용하기 위한 전제 조건을 다룬다. 이는 분야 간 불필요한 오해와 논란을 최소화하기 위한 작업으로, 먼저 이 개념이 지구시스템과학에서 나왔고 그 이후에 지질학적 증거를 찾는 사실을 분명히 했다. 노벨상 수상자이며 대기화학자인 파울 크뤼천이 이 개념을 제안하면서 강조하려고 했던 것은 현재 우리가 목도하는 행성적 변화가 기존의 지질시대, 즉 홀로세에서 다루는 범주를 훨씬 넘어섰다는 점이었기 때문이다. 그는 18세기 말 시작한 산업혁명을 그 시작점으로 생각했지만, 그 이후 여러 지구시스템 데이터 분석을 통해 큰 변화가 일어난 것은 1950년 전후임이 밝혀졌다. 이에 인류세연구단은 대표적인 지질학적 마커로 핵폭탄 실험에서 배출되는 플루토늄을 지목했고, 인류세의 시작점을 첫 번째 수소폭탄 실험으로 플루토늄이 전 세계에 퍼진 1952년으로 보았다. 이는 다른 지구시스

템의 지표나 사회경제적 지표와 정확히 일치하지는 않아서 많은 혼동과 논란이 수반되었지만, 이것을 더 유용한 논의를 할 기준점(reference point)으로 삼을 수 있음을 주장했다.

이 논문에서는 인류세가 단순히 지구에 대한 인간 활동의 영향을 가리키는 것이 아니라(과거 농업의 확산으로 인한 생태계 변화의 사례에서 발견되듯이), 지구시스템의 “급격하고 불가역적(abrupt and irreversible)” 변화를 의미한다고 강조했다. 또한, 일부 인문학자와 사회과학자들이 제기하듯이 인류세 연구가 인류 공동의 책임을 강조한 나머지 각 지역 개별 집단의 차별적 책임성을 간과한다는 비판에 대해서는, 바로 그런 이유에서 다학문적 접근이 필요함을 설명했다.

이러한 작업을 통해 이 논문은 인류세와 관련된 연구가 과학에 기반한 다학문적 특성을 가지며 그러기에 더욱 활발한 소통과 의견 교환이 필요한 분야이며, 최근 지질학계에서의 부결 결정에도 불구하고 앞으로 더 발전할 방향을 제시했다.

2. 과학교육을 위한 인류세 문해력 (Science and Education 출판)

본 연구자는 인류세 개념을 STEM 학생들을 대상으로 하는 과학교육에 도입할 수 있는 커리큘럼 개발을 목적으로 이슬기 박사과정생과 함께 연구를 수행했다. 이를 위해 “인류세 문해력(Anthropocene literacy)”이라는 개념을 새롭게 제안하고, 인류세 관련 논의를 통해 얻을 수 있는 교육적 효과를 다음과 같이 구분해 제시했다. (1) 현대 과학의 특징이라고 볼 수 있는 학문 간 경계를 넘어 수행하는 다학문적 연구의 사례를 분석하고, (2) 과학논쟁을 통해 과학적 사실과 이론이 어떤 절차를 거쳐 확립되는지를 다루는 ‘과학의 본질(Nature of Science)’을 탐구할 기회를 제공하며, (3) 기후변화와 같은 ‘사회-과학적 이슈(socio-scientific issues)’에 대한 이해 증진을 추구했다. 구체적으로 학생들에게 제공할 주요 주제, 리딩 리스트, 토론을 위한 질문 등을 커리큘럼의 일부로 제시했다.

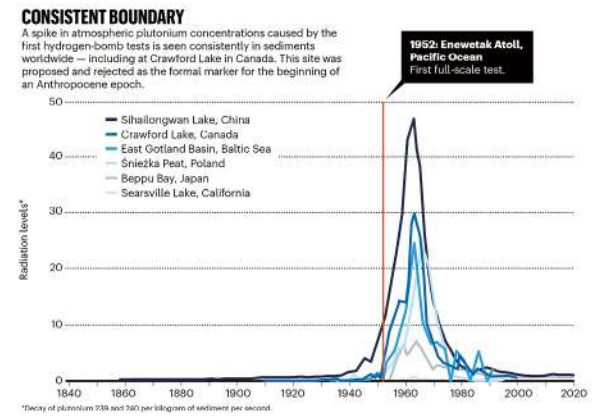


그림 1. 인류세의 시작 경계로 1952년을 삼은 근거가 되는 세계 각지의 플루토늄 농도의 증가 그래프

기대효과



1. 인류세 연구의 활성화

Nature에 실린 논문으로 인류세에 대한 논란이 잠재워지지는 않을 것이다. 앞으로 지질학계에서, 지구시스템 연구 분야에서, 그리고 인문사회학, 문화예술, 정책 분야에서 인류세 개념은 더욱 중요하게 논의될 것이다. 이 논문은 활발한 논의가 소모적인 논쟁으로 번지지 않고, 다학문적으로 인간과 비인간, 기술과 행성에 대한 깊이 있는 연구로 발전하게 할 길잡이 역할을 할 것으로 기대한다. 이와 관련해, 이 논문은 인류세 연구를 활발히 진행하고 있는 기관으로 스웨덴 KTH와 독일 막스플랑크연구소와 함께 카이스트의 인류세연구센터를 지목한 바 있다.

2. 인류세 관련 교육과 정책

교육과 정책은 인류세 연구의 주요 응용 분야이다. 교육적인 측면에서, 현재 진행 중인 과학에서의 논쟁을 출판된 논문과 기사를 통해 학생들 스스로 보고 판단할 기회를 제공하면 과학에 대한 흥미를 증진할 수 있다. 또한 기후위기 또는 지속가능성과 같은 이슈를 단편적인 지식제공으로 해결할 문제가 아니라, 과학과 사회의 접점에서 발생하는 이슈의 복잡성을 이해하는 중요한 기회로 삼을 수 있다. 정책적 문제는 단순히 과학기술의 발전으로만 해결할 수 없으며, 또한 정치적인 이해관계 속에서만 이해할 수 없기에 신뢰에 기반한 소통의 중요성을 배울 수 있을 것으로 기대한다.

연구성과

연구비 지원

[논문1] “What Should the Anthropocene Mean?” Nature 2024, 632: 980–984 (with the Anthropocene Working group members)
 [논문2] “Anthropocene Literacy for Science Education,” Science and Education (2024, online) (with Seul-gi Lee)
 [저서1] 번역: 『인류세 책: 행성적 위기의 다면적 시선』 (이음, 2024)
 [저서2] 편저: 『인류세 풍경: 우리 걸의 파국들과 희망들』 (이음, 2024)
 [수상] KAIST Q-Day 교원 특별 표창 (연구 부문)
 [홍보] 국제 인류세심포지움 카이스트 개최: “Projecting the Anthropocene: A Multidisciplinary Approach,” 홍보 다큐멘터리 (<https://youtu.be/1-jrcnRyyQ4>), 여러 신문 인터뷰 취재
 [정부과제] 한국연구재단, 선도연구센터지원사업(CRC 융합연구센터), “인류세연구센터” (2018.6 ~ 2025.2), 7년간 96억원, 한국연구재단, 글로벌인문사회융합연구지원사업(연구소형), “인류세의 대가속 연구” (2024.9 ~ 2030.8), 6.5년간 47억

KAIST'S RESEARCH HIGHLIGHTS OF 2024

2024년 주요 연구성과



AI · AI+X / 40

1. 차세대 2차원 소재 맥신의 광대한 화학 공간을 빠르고 정확하게 탐색할 수 있는 인공지능 개발
2. 현미경 사진을 이용한 딥러닝 기반 나노스케일 3D 반도체 표면 예측
3. 군집 무인수상정 협업 임무 계획 알고리즘 실효성 검증
4. 고효율 고품질 시각 콘텐츠 생성을 위한 객체 표현 및 샘플링 방법론
5. 소량의 데이터만으로 강한 일반화를 달성하는 데이터 효율적 기계학습 기술 개발
6. 로봇 작업계획 생성을 위한 멀티모달 파운데이션 모델 연구
7. 제조 설계 프로세스를 혁신하는 AI 기반 Generative Design 기술 개발 및 상용화

SW · IT / 47

8. 거대언어모델(LLM) 서빙 가속을 위한 이기종 AI반도체 (GPU/NPU/PIM) 기반 클라우드 시스템 연구
9. 프로토타입 제작을 통한 창의성 촉진 및 촉각 분야의 사례 응용

기계 · 로봇 · 항공우주 / 49

10. 오그제틱 메타구조로 매듭지어진 옷감형 웨어러블 멀티모달 햅틱 인터페이스 개발
11. 능동형 열화상 검사 기술을 활용한 스마트 제조업 AI 자동화 솔루션

기초과학 · 인문 · 경영 / 51

12. 비평형 양자 동역학의 보편성 분류
13. 세계 최초 초고속 전자 회절 실험을 통한 이온의 탄생 및 구조 동역학 연구
14. 음식에 대한 소비자의 인지가 건강, 환경, 세대 간에 미치는 영향 규명

도시 · 환경 · 에너지 / 54

15. 생체모방형 나무뿌리 앵커의 인발거동 규명
16. 이제 전자제품도 완전히 생분해될 수 있다!
17. 고체전해질층 재구성 기술을 통한 전기차 리튬금속전지 기술 혁신
18. 고무처럼 자유롭게 늘어나는 고효율 태양전지 개발
19. 도시 기후변화 적응력 강화를 위한 그린 인프라, 주거 이동성, 인구 동태의 상호작용 메커니즘 규명

반도체 · 디스플레이 / 59

20. 초저전력 프로그래머블 광집적회로 개발
21. 차세대 메모리/컴퓨터용 신개념 초저전력 소자 개발 및 하드웨어 통합 시스템 개발
22. 생생한 메타버스 디스플레이를 위한 청색광 발광 친환경 신소재 개발

첨단소재 · 부품 / 62

23. 자기 치유 및 CNT 기반 복합재를 활용한 3D 프린팅 기술 개발
24. 극초단 펄스 레이저 직접 묘화 기반 그래핀 스마트 섬유 제작

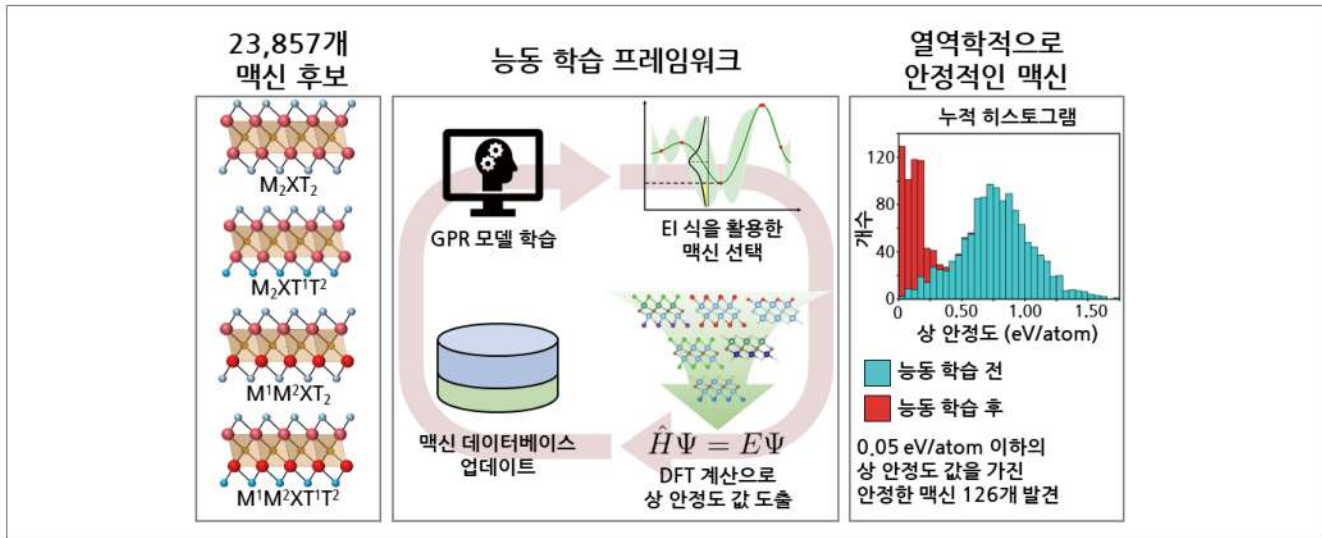
헬스 · 바이오 · 뇌 / 64

25. 코로나 엔데믹 시대의 면역반응 변화 규명
26. 흡입형 유전자 전달 기술
27. 대사 네트워크 모델 및 유전자 변이 데이터 기반 암 유발 대사물질 예측
28. PET 대체 가능한 차세대 바이오 플라스틱 생산 기술 개발

01 차세대 2차원 소재 맥신의 광대한 화학 공간을 빠르고 정확하게 탐색할 수 있는 인공지능 개발

연구책임자 이승철 참여연구자 박재정 소속학과 기계공학과 연구실 홈페이지 <https://iailab.kaist.ac.kr>

본 연구는 2차원 나노물질인 맥신의 광대한 화학 공간을 효율적으로 탐색하여 열역학적으로 안정적인 맥신을 찾기 위한 능동 학습 프레임워크를 제안한다. 이는 인공지능 기반 대리 모델과 유틸리티 함수를 활용하여 맥신의 열역학적 안정성 지표인 상 안정도를 빠르게 예측하고, DFT 계산을 진행할 가치가 높은 맥신 40개를 추천한다. 추천된 맥신에 대해 DFT 계산을 진행한 후, 그 결과를 바탕으로 대리 모델을 재학습해 반복적으로 안정적인 맥신을 탐색한다. 이를 통해 총 480번의 DFT 계산만으로 상 안정도 값이 0.05eV/atom 이하인 126개의 안정한 맥신을 발견하였으며, 이 중 89개는 이전 연구에서 보고된 적이 없는 맥신이다. 이러한 결과는 인공지능의 도움 없이 광대한 화학 공간을 탐색하는 것보다 약 100배 더 많은 안정적인 맥신을 찾을 수 있음을 보여주며, 발견한 안정적인 맥신들은 안정성이 필수로 요구되는 이차전지 및 촉매 분야에서의 응용이 기대된다.



열역학적으로 안정적인 맥신을 찾기 위한 능동 학습 프레임워크

연구성과

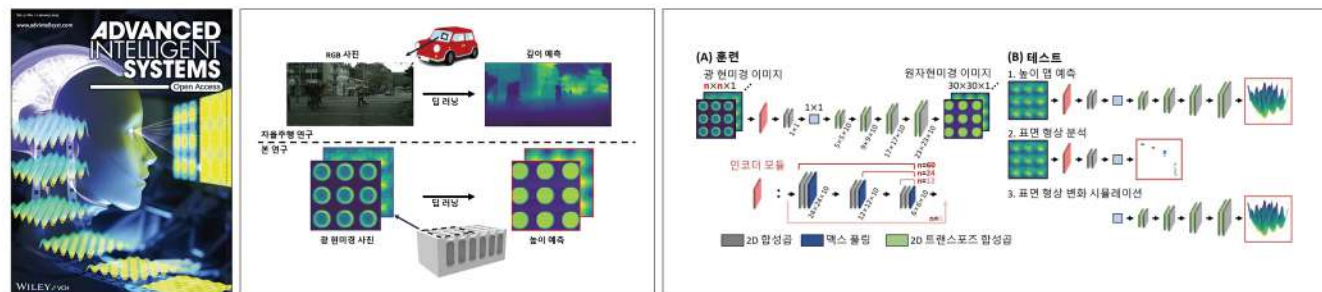
논문 Jaejung Park, Jongmok Lee, Jaejun Lee, Kyoungmin Min, Haesun Park*, and Seungchul Lee*, "Active Learning Framework for Expediting the Search of Thermodynamically Stable MXenes in the Extensive Chemical Space," ACS Nano 18, 29678-29688 (2024) [2023 Impact Factor = 15.8]

홍보 인공지능신문 홍보 (<https://www.aitimes.kr/news/articleView.html?idxno=32579>)

02 현미경 사진을 이용한 딥러닝 기반 나노스케일 3D 반도체 표면 예측

연구책임자 이정철 참여연구자 정재우 김태영 이봉재 소속학과 기계공학과 연구실 홈페이지 <https://mnil.kaist.ac.kr>

물리적 접촉 기반으로 나노 스케일의 표면 형상을 3차원 측정하는 원자현미경은 웨이퍼 소자 검사 등 반도체 산업에서 사용되고 있다. 하지만, 원자현미경은 물리적으로 표면을 스캔하기 때문에 측정 속도가 느리고, 고온 극한 환경에서는 작동하기 어려운 단점을 지닌다. 이 문제를 해결하기 위해 비접촉 측정 방법인 광학현미경에서 딥러닝을 이용하여 원자현미경으로 얻어질 수 있는 나노스케일 3D 표면을 예측하였다. 쉽게 설명하면 2차원 사진에서 깊이를 예측하는 기술이고, 이는 최근 자율주행을 위해 많이 연구되고 있는 분야이다. 이러한 기술이 적용되는 스케일을 일상생활 범위에서 나노스케일 범위로 옮겨 인공지능 모델을 훈련시켰다. 인공지능 모델로는 입력 데이터에서 대상의 특징을 추출하고, 추출된 특징에서 출력 데이터를 표현하는 인코더-디코더 구조를 활용하였다. 광학현미경 사진을 하나의 변수로 표현하고, 이 변수에서 현미경 사진을 3차원 표면으로 계산하여 나타내는데 성공하였다. 제안한 방법론을 반도체 산업의 센서, 태양 전지 및 나노 입자 제작에 응용되는 저마늄 (germanium) 자가조립 구조의 공정 분석 및 검사를 위해 적용하였다. 광학현미경 사진을 이용해 15% 오차 수준 이내에서 1.72배 더 높은 해상도의 높이 지도를 예측하였는데, 이를 기반으로 각 응용에 필요한 형상의 자가조립 구조가 만들어지도록 실시간으로 공정 과정을 검사하였다. 또한, 같은 딥러닝 모델로 어닐링 중 변화하는 표면 형상을 시뮬레이션하고, 이를 활용해 공정 과정을 분석 및 최적화하여 기존에 구할 수 없었던 공정의 형상을 만들 수 있었다.



연구성과

- 논문**
- [1] J. Jeong, T. Kim, B. Lee and J. Lee, "Predicting AFM topography from optical microscope images using deep-learning", Advanced Intelligent Systems, 5(1), 2200317, (2023)
 - [2] J. Jeong, T. Kim, B. Lee, and J. Lee*, "PCA-based sub-surface analysis and surface defect inspection of Germanium-on-Nothing structures using AFM and SEM surface images", Scientific Reports, 12, 7205 (2022)
- 수상**
- [1] 정재우, 김태영, 이봉재, 이정철 "자가 조립 저마늄 구조를 위한 PCA 기반 표면 검사 및 분석 방법론", 2021년 마이크로나노시스템학회 추계 학술대회 우수논문상,
 - [2] 정재우, 김태영, 이봉재, 이정철 "Encoder-decoder neural network and PCA-based surface inspection methodology for GON structures", 2022년 Nano Convergence Conference 우수학생구두발표상

03 군집 무인수상정 협업 임무 계획 알고리즘 실험역 검증

연구책임자

최한림

참여연구자

문일철 박진규

소속학과

항공우주공학과 산업및시스템공학과

연구실 홈페이지

http://lics.kaist.ac.kr

본 연구에서는 군집 자율 무인수상정을 운용하여 복잡한 다대다 임무를 수행하도록 하는 협업 임무계획 알고리즘을 개발하고, 이를 무인수상정 실험 플랫폼에 탑재하여 실제 해역에서 10:5의 다대다 방호전투 임무 시나리오에서 그 타당성을 검증하였다. 이 규모의 무인수상정 군집을 다대다 임무에서 실험역 검증한 것은 세계 최초이며, 이는 우리나라 국방 기술의 선도성 향상에 크게 기여하였다. 구체적으로, 협업 임무계획을 위한 두 종류의 알고리즘(최적할당, 분산강화학습)을 개발하였고, 이를 국방과학연구소, 한화시스템, 선박해양플랜트연구소와 협력하여 군집 무인수상정 플랫폼에 탑재하고 실험역에서 도서를 방호하는 전투 임무 시나리오에서 타당성을 검증하였다. 개발한 알고리즘은 고충실도 시뮬레이션 환경에서 30:30 다대다 방호임무에서도 성능이 검증되었으며, 이는 세계 최대 규모의 다대다 군집 임무에 대한 임무계획 알고리즘을 검증한 사례이다. 또한, 이 협업 임무계획 알고리즘 개발 과정에서 학습과 검증을 위한 가속 시뮬레이터를 개발함으로써 관련 연구개발 방법론의 틀을 제시하기도 하였다.



| 군집 무인수상정 실험역 시연 장면

연구성과

홍보

- [1] 군집 무인수상정 운용기술 시연 (2024.10.10., 해군참모총장, ADD소장 참석) - 방위사업청 유튜브채널, 주요 방송사 비록 다수 언론 보도
- [2] 방위사업청 유튜브: <https://www.youtube.com/watch?v=67JIHHExlk&t=6s>
- [3] 연합뉴스 기사: <https://www.yna.co.kr/view/AKR20241010057900504>

04 고효율 고품질 시각 콘텐츠 생성을 위한 객체 표현 및 샘플링 방법론

연구책임자

김준모

참여연구자

한교진 이동재 허지완 최재현

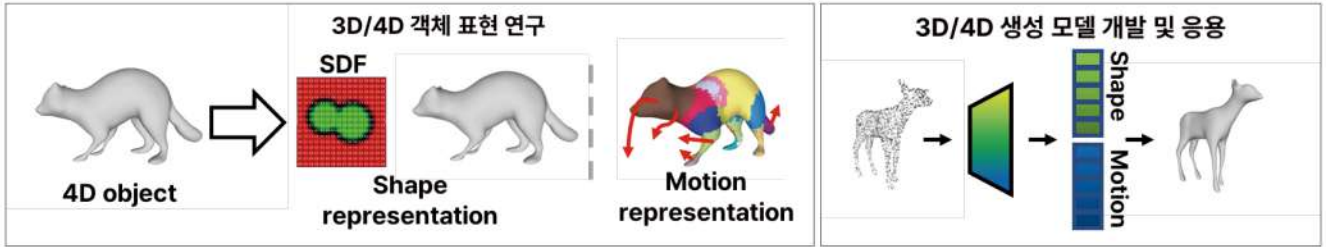
소속학과

전기및전자공학부

연구실 홈페이지

http://siit.kaist.ac.kr

기존 2D 기반 이미지, 비디오 생성 연구들은 느린 생성 속도 및 생성된 물체의 일관성 결여, 부자연스러운 움직임 등의 문제가 있다. 이를 개선한 차세대 생성 AI로 3D/4D 기반의 생성 모델을 연구하여 객체를 특정 시점(View)이 아니라 객체 그 자체로 이해하여 사실적인 객체 생성 및 움직임을 표현하는 기술과 생성 비용을 절감하는 고품질, 고효율 생성 기술을 개발하였다. 이는 생성 AI 분야에서 학술적 응용성과 더불어 미래 산업 선행연구로의 활용성이 매우 높다. 해당 기술을 통해 시간에 따라 연속적이고 안정적인 움직임을 훨씬 적은 렌더링 시간에도 생성할 수 있으며 고효율, 고품질 이미지 생성의 기술적 기반이 될 수 있다. 장기적으로 VR, AR, 게임산업 등의 AI 기반 서비스에서 더욱 풍부하고 몰입감 있는 콘텐츠를 제공하고 AI 사용에 따른 전력 문제를 해결하고 실시간성을 확보하는 데 기여하여 지속가능한 실시간 멀티모달 인터랙티브 생성 AI 개발에 적극 활용하고자 한다.



| 3D/4D 객체 표현 연구

| 3D/4D 생성 모델 개발 및 응용



| 이산 확산 생성 모델 기반 고효율, 저품질 생성 이미지 (위), 제안된 이산 확산 생성 모델의 정보 기반 샘플링 지도를 통한 고효율, 고품질 생성 이미지 (아래).

연구성과

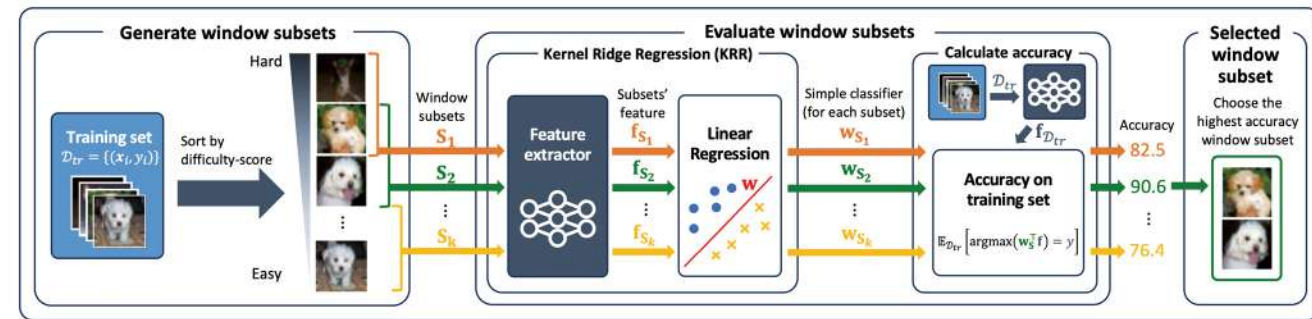
논문

- [1] Han, Gyojin, Jiwan Hur, Jaehyun Choi, and Junmo Kim. "Learning Neural Deformation Representation for 4D Dynamic Shape Generation." The European Conference on Computer Vision (ECCV) (72), 2024, pp. 186-203. Springer.
- [2] Hur, Jiwan, Dong-Jae Lee, Gyojin Han, Jaehyun Choi, Yunho Jeon, and Junmo Kim. "Unlocking the Capabilities of Masked Generative Models for Image Synthesis via Self-Guidance." The Thirty-eighth Annual Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS), 2024

05 소량의 데이터만으로 강한 일반화를 달성하는 데이터 효율적 기계학습 기술 개발

연구책임자 정혜원 참여연구자 기노현 최호용 이용민
소속학과 전기및전자공학부 연구실 홈페이지 <http://iids.kaist.ac.kr>

최근 AI 기술은 초거대 규모로 발전하며 높은 성능을 달성했으나, 정제되지 않은 대규모의 인터넷 데이터를 활용한 기반 모델 개발 과정은 훈련에 필요한 시간과 비용을 기하급수적으로 증가시켰으며 이로 인한 비용·시간·자원 문제가 대두되고 있다. 본 연구는 소량의 데이터로도 대규모 데이터 활용 시와 유사한 일반화 성능을 달성하는 데이터 효율적 기계학습 기술을 개발하였다. 심층 신경망 최적화 및 일반화 성능에 대한 이론적 분석을 통해 각 데이터 샘플의 가치(학습 기여도)를 정량화하고, 가치가 낮은 샘플을 제거하면서도 전체 데이터를 사용한 훈련과 유사한 성능을 유지하는 소규모 가치 데이터셋 선별 기법을 제안하였다. 더 나아가 데이터 사용 비율별로 모델 성능 향상에 유용한 샘플을 자동 선별하는 알고리즘을 개발하고, 대규모 학습 경로를 소량의 응축 데이터로 모방함으로써 공공 데이터셋인 CIFAR-10 기준 약 40% 선별데이터 또는 약 10% 응축데이터로 전체 데이터를 활용한 모델의 일반화 성능에 근접하였다. 이와 같은 접근은 초거대 AI 기술의 효율적인 소형화·최적화를 위한 핵심 기술로서, AI 모델의 “가격 대비 성능비”를 획기적으로 개선시켰다.



신경망 훈련 계산량에 제한이 있는 현실적 상황에서, 모델 일반화 성능을 극대화할 수 있는 데이터 부분 집합을 자동으로 선별하는 알고리즘. 선별 비율에 따른 최적 데이터 집합을 빠르게 결정할 수 있는 대리 모델을 제안하고, 이론적 분석을 통해 데이터 선별 경향의 변화를 규명함.

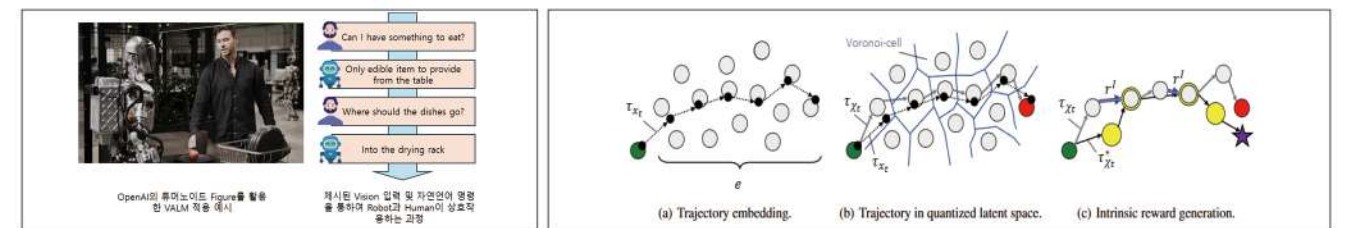
연구성과

- 논문**
- [1] “BWS: Best Window Selection Based on Sample Scores for Data Pruning across Broad Ranges,” International Conference on Machine Learning (ICML), 2024.
 - [2] “SelMatch: Effectively Scaling Up Dataset Distillation via Selection-Based Initialization and Partial Updates by Trajectory Matching,” ICML, 2024.
- 특허**
- 학습 없이 데이터의 가치를 평가하는 방법 및 장치 (출원 10-2023-0119227)
- 강연**
- IEEE International Conference on Information Theory (ISIT) 2024

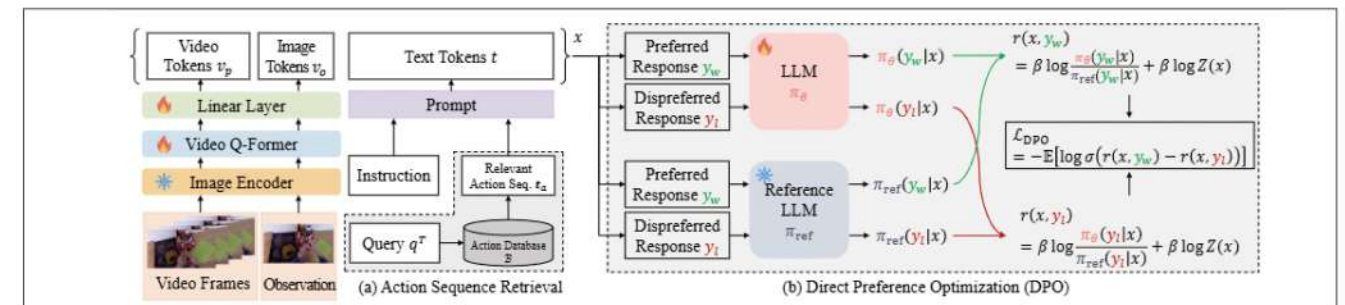
06 로봇 작업계획 생성을 위한 멀티모달 파운데이션 모델 연구

연구책임자 문일철 참여연구자 이광현 배희선 김영민 강미나 나병후 김태우 나형호 신승재 윤승민
소속학과 산업및시스템공학과 연구실 홈페이지 <http://aai.kaist.ac.kr>

본 연구는 로봇의 상식기반추론을 통하여 임의의 환경에서 수집한 비디오정보와 사용자의 텍스트 명령을 활용하여, 작업계획을 생성하는 것이 목표이다. 테스트된 환경은 부엌에서 음식을 조리하는 과정에서 조리과정 생성이었다. 테스트 환경 및 데이터는 세계적으로 공유된 벤치마크 데이터이며, 해당 데이터를 활용하여, ICML 2024에서 EgoPlan Challenge로써 세계유수의 기관과 성능 경쟁을 수행하였으며, KAIST가 영국의 ICL, 중국의 북경대 등보다 월등히 좋은 성능을 보였다. 이 결과 ICML 2024 EgoPlan Challenge에서 최고성능으로 우승상 및 기술적 혁신으로 혁신상을 동시에 수상하였다. 본 연구는 최근 테슬라 및 피규어 등이 자동차 생산공정에 휴머노이드를 투입하는 공장 작업계획 생성으로 발전할 수 있으며, 미래 휴머노이드 등의 활용에 중요한 역할을 할 것이다.



최근 휴머노이드의 상식기반 추론 및 상호작용 사례(OpenAI의 Foundation Model이 Figure에 탑재)



DPO를 활용한 VALM 모델의 Finetuning Framework 구조도

연구성과

- 수상**
- [1] ICML 2024 EgoPlan Challenge 우승상(Outstanding Champion) 및 혁신상(Innovation Award)
- 논문**
- [1] LAGMA: LATent Goal-guided Multi-agent Reinforcement Learning, The Forty-First International Conference on Machine Learning (ICML 2024), Vienna, Austria, Jul 21-27, 2024.
 - [2] DPO-Finetuned Large Multi-Modal Planner with Retrieval-Augmented Generation, Multi-modal Foundation Model meets Embodied AI Workshop, ICML2024, Jul 26, Vienna, Austria
- 홍보**
- [1] 연합뉴스, “KAIST, 베이징대·英 ICL 제치고 국제머신러닝학회 챌린지 우승” 24/07/30 (<https://www.yna.co.kr/view/AKR20240730040500063>)
 - [2] 매일경제, “국제머신러닝학회 챌린지 KAIST, 베이징대 꺾고 우승” 24/07/30 (<https://www.mk.co.kr/news/it/11080660>)

07

제조 설계 프로세스를 혁신하는 AI 기반 Generative Design 기술 개발 및 상용화

연구책임자 강남우 참여연구자 KAIST스마트설계연구실 연구원 전원

소속학과 조천식모빌리티 대학원

연구실 홈페이지 <https://www.smartdesignlab.org>

제너레이티브 디자인 기술 개발 및 상용화

1. 학계를 선도하는 기술 개발

- 제조업에서 공학적 성능, 심미성, 경제성을 모두 충족하는 3D 설계안을 생성하는 세계 최고 수준의 AI 기반 Generative Design 기술을 개발하였다.
- 기계역학(물리)과 AI가 융합된 가상제품개발을 가능하게 하여, 제품 설계 시간과 비용을 혁신적으로 절감하고, 시장에서 성공 가능성이 높은 설계를 제시한다.

2. 교원 창업을 통한 상용화와 기술력 증명

- 나니아랩스(2022년 설립)를 통해 교원 창업을 실현, 제조업 설계를 위한 Low-code AI 플랫폼 개발로 기술을 제품화하는데 성공했다.
- 20여 개의 글로벌 제조기업과 협력해 40여 개의 프로젝트를 통해 Generative Design 기술의 실질적 가치를 입증하였다.



제너레이티브 디자인을 통한 제조업 제품 개발 프로세스 혁신

연구성과

- 논문
- [1] Yang, S., Kim, H., Hong, Y., Yee, K., Maulik, R., and Kang, N.* (2024) "Data-driven Physics-Informed Neural Networks: A Digital Twin Perspective", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 428, 117075 (IF:6.9, 2.6%)
- [2] Shin, S. and Kang, N.* (2024) "Weighted Unsupervised Domain Adaptation Considering Geometry Features and Engineering Performance of 3D Design Data", Expert Systems with Applications, 256, 124928 (IF:7.5, 5.2%)
- 홍보
- [1] 2024.11.5. "나니아랩스, CAE 컨퍼런스 2024'서 생성형 AI기반 제조 설계 전략 제시", 이투데이 (<https://www.e2news.com/news/articleView.html?idxno=314060>)
- [2] 2024.1.3. "나니아랩스, CES2024서 제조 설계 분야 위한 Generative AI Tool 데모 글로벌 최초 공개", 데일리경제 (<http://www.kdpress.co.kr/news/articleView.html?idxno=125605>)
- 참고: CES2024 & VIVATech2024에 KAIST관을 통해 참여함
- 특허
- 작업기반 메커니즘 최적 설계 방법 및 그 장치, 10-2024-0025770 (출원)
- 수상
- [1] 2024.5. 대한기계학회 CAE 및 응용역학부문 감사패
- [2] 2024.2. "Readers' Choice Award", KAIST 공과대학 Breakthroughs

08

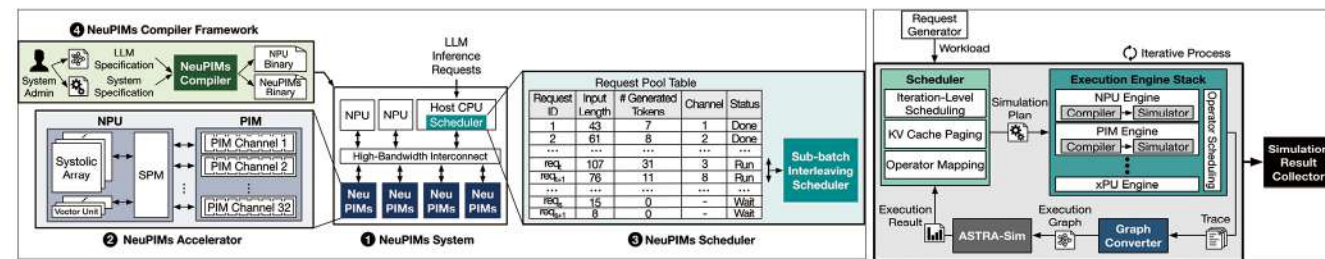
거대언어모델(LLM) 서빙 가속을 위한 이기종 AI반도체(GPU/NPU/PIM) 기반 클라우드 시스템 연구

연구책임자 박종세 참여연구자 허구슬 최현민 함형규 (POSTECH) 이상엽 이상현 김광선 (POSTECH) 조재홍 김민수 Divya Mahajan (Georgia Institute of Technology)

소속학과 전산학부

연구실 홈페이지 <https://jongse-park.github.io>

거대언어모델(LLM) 서빙 가속을 위해 GPU, NPU, PIM과 같은 이기종 AI 반도체의 특성을 활용한 하드웨어-소프트웨어 공동 설계를 제안했다. 연산 집약적인 GEMM과 메모리 대역폭에 의존적인 GEMV의 상이한 특성을 고려하여, 두 연산을 병렬로 처리할 수 있는 효율적인 아키텍처를 설계하고, 알고리즘적 기법을 적용해 자원 활용도를 극대화했다. 이 설계는 LLM 추론 과정에서 자주 발생하는 병목 문제를 해결하며, 대규모 모델 서빙의 성능과 확장성을 개선하는 데 기여했다. 또한, 반복 연산의 재활용과 동적 배치 스케줄링 기법을 도입한 시뮬레이션 인프라를 통해, 다양한 시스템 설계와 성능 평가를 빠르고 정확하게 지원할 수 있는 환경을 구축했다. 이러한 접근은 LLM 추론의 자원 효율성을 크게 향상시키고, 대규모 클라우드 서빙 시스템의 실질적인 운영 효율성을 높이는 데 중요한 기반을 마련했다.



NeuPIMs 시스템의 개요

LLMervingSim의 작업 흐름도

연구성과

- 논문
- [1] Jaehong Cho, Minsu Kim, Hyunmin Choi, Guseul Heo, Jongse Park, "LLMServingSim: A HW/SW Co-Simulation Infrastructure for LLM Inference Serving at Scale", in IISWC 2024.
- [2] Guseul Heo, Sangyeop Lee, Jaehong Cho, Hyunmin Choi, Sanghyeon Lee, Hyungkyu Ham, Gwangsun Kim, Divya Mahajan, Jongse Park, "NeuPIMs: NPU-PIM Heterogeneous Acceleration for Batched LLM Inferencing", in ASPLOS 2024.
- 수상
- [1] Best Paper Award, IISWC 2024
- [2] Distinguished Artifact Award, IISWC 2024
- 홍보
- 2024년 인공지능일보, KAIST 박종세 교수팀, 'AI 인프라' 시뮬레이션 오픈소스 툴 개발... 'IISWC 2024'서 다수 상 동시 석권 (<https://www.aitimes.kr/news/articleView.html?idxno=32409>) 외 16건
- 특허
- 거대 언어모델의 배치 추론을 위한 NPU-PIM 이종 가속화 방법과 장치, 10-2024-0053181 (출원), 2024년 4월 22일 (출원일)

9 프로토타입 제작을 통한 창의성 촉진 및 촉각 분야의 사례 응용

연구책임자 안드리아 비앙키 **참여연구자** Austin Z. Henley (Microsoft, USA)
Valkyrie Savage (University of Copenhagen, DK)
Ryo Suzuki (University of Calgary, CA)
Artem Dementyev (Google, USA)
Clement Zheng (NUS, SG)
Seungwoo Je (SUSTech, CH)
Jeeun Kim (Texas A&M, USA)
Eyal Ofek (Microsoft Research, USA)
Michel Pahud (Microsoft Research, USA)
Mike Sinclair (Microsoft Research, USA)

소속학과 산업디자인학과
연구실 홈페이지 <http://make.kaist.ac.kr>

본 프로젝트는 여러 학술 기관 및 기업과의 협업을 강조하며, 인간-컴퓨터 상호작용(HCI) 분야의 연구를 생산하는 것을 목표로 하고 있다. 구체적으로, 본 연구는 디자이너와 제작자가 3D 프린팅 프로토타입이나 내장 전자 장치가 포함된 기능적 프로토타입과 같은 기능적 물리적 객체를 보다 쉽게, 효과적으로, 저렴하게 만들 수 있도록 하는 프로토타이핑 툴킷과 소프트웨어 파이프라인을 만드는 것을 목표로 하고 있다. 열 기반 인쇄 방법(3D 피로그래피) 또는 열변색 재료를 사용하여 색상의 음영으로 3D 객체를 인쇄하는 새로운 방법과 회로 토폴로지 또는 내장 시스템에서 실행되는 내부 지침을 시각화 하는 물리적 컴퓨팅 시스템(BlinkBoard 및 Inline 시스템)이 포함된다.

본 연구 목표를 달성하기 위해 Microsoft, Microsoft Research, Google(DeepMind) 및 여러 대학(싱가포르 국립대학교·NUS, 코펜하겐 대학교, 텍사스 A&M, SUSTech, 켈러리 대학교)과 같은 기업 및 연구 센터와 협업 네트워크를 구축했다. 2024년에는 여러 프리미엄 저널에 논문을 작성하였다. 이 논문에는 2개의 CHI 논문(구글 #1 HCI), 1개의 적층 제조 논문(구글 톱 #1 제조), 1개의 ACM 회의록 논문(구글 톱 #2 HCI) 및 기타 저널이 포함된다. 이 작업 중 두 개는 최우수 논문 우수상(CHI 및 PACM)을 수상했으며, 하나는 IEEE 세계 촉각 회의에서 최우수 학생 발표상을, 하나는 KAIST에서 대학원생 우수논문상을 수상했다.

이러한 결과를 바탕으로, 저는 2023년 김대중 평화 포럼에서 물리적 상호작용과 인터랙티브 시스템의 하드웨어가 디지털 산업 혁명의 미래를 어떻게 형성할 것인지에 대해 발표하도록 초청받았으며, 독일의 권위 있는 Dagstuhl 세미나에서도 발표자로 초청받았다. 그 결과, KAIST 대표로 유튜브 소프트드래곤 SOD (구독자 706K)와 KAIST 간의 협업 다큐멘터리 프로젝트를 위한 온라인 인터뷰에 참여하라는 요청을 받았다. 이 영상은 2024년 9월에 게시되었으며, 2024년 12월 기준으로 607,000회의 조회수를 기록하였다.

연구성과

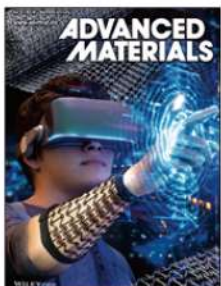
논문 (Physical Prototyping)	[1] Andrea Bianchi, Zhi Lin Yap, Punni Lertjaturaphat, Austin Z. Henley, Kongpyung Justin Moon, and Yoonji Kim. 2024. Inline Visualization and Manipulation of Real-Time Hardware Log for Supporting Debugging of Embedded Programs. Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction (Google Top#2 HCI). Honorable Mention Award. [2] Kongpyung (Justin) Moon, Jaeseong Yi, Valkyrie Savage, and Andrea Bianchi. 3D printed pyrography: Using wood filament and dynamic control of nozzle temperature for embedding shades of color in objects. In Additive Manufacturing, Volume 83, 2024. SCI Q1. KAIST 대학원생 우수논문상. [3] Kongpyung (Justin) Moon, Zofia Marciniak, Ryo Suzuki, and Andrea Bianchi. 2024. 3D Printing Locally Activated Visual-Displays Embedded in 3D Objects via Electrically Conductive and Thermochromic Materials. In Proceedings of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (Google Top#1 HCI). [4] Himani Deshpande, Bo Han, Kongpyung (Justin) Moon, Andrea Bianchi, Clement Zheng, and Jeeun Kim. 2024. Reconfigurable Interfaces by Shape Change and Embedded Magnets. In Proceedings of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (Google Top#1 HCI). [5] Andrea Bianchi, Kongpyung Justin Moon, Artem Dementyev, Seungwoo Je. 2024. BlinkBoard: Guiding and monitoring circuit assembly for synchronous and remote physical computing education. In HardwareX.
강연	[1] Myung Jin Kim, Eyal Ofek, Michel Pahud, Mike J Sinclair, and Andrea Bianchi. 2024. Big or Small, It's All in Your Head: Visuo-Haptic Illusion of Size-Change Using Finger-Repositioning. In Proceedings of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (Google Top#1 HCI). Honorable Mention Award. [2] Wooje Chang, Seungwoo Je, Michel Pahud, Mike Sinclair, and Andrea Bianchi. Rendering Perceived Terrain Stiffness in VR via Preload Variation Against Body-Weight. In IEEE Transactions on Haptics (SCI). Best student presentation award at IEEE World Haptics 2023.
홍보	[1] Embracing Physical Interactions and Hardware in Interactive Systems Invited talk at the Kim Dae-jung Peace Forum 2023 (김대중평화회의 2023), Shinan-gun C-One resort Jaeundo, Mokpo [2] Dagstuhl Seminar 23212 - Designing the Human-Machine Symbiosis Invited seminar at Schloss Dagstuhl, Germany [1] YouTube interview with Softdragon SOD 애플은 진짜 미친놈입니다. 이 대단한 결 왜 안 일러줄걸까? ㄷㅈ 카이스트 Ep4 (2024.09.02) 604,493 views [2] YouTube interview with Softdragon SOD 버려진 국장, 한국의 미래는? (2024.11.18) 38,678 views

10 오그제틱 메타구조로 매듭지어진 옷감형 웨어러블 멀티모달 햅틱 인터페이스 개발

연구책임자 오일권 **참여연구자** 오세웅 이명준
송태은 Manmatha Mahato
김지석 Mannan Khan
유현준

소속학과 기계공학과
연구실 홈페이지 <http://srim.kaist.ac.kr>

KAIST 기계공학과 오일권 교수 연구팀은 형상기억합금 (shape memory alloy) 와이어를 오그제틱 메타 구조 형태로 매듭지어 형상 적응이 가능한 옷감 형태의 착용형 햅틱 인터페이스를 개발하였다.



‘Advanced Materials’ cover image 선정

연구팀은 기존의 천 제작 방식을 활용해 와이어 형태의 형상기억합금을 매듭지어 옷감처럼 제작하는 방식을 활용하였고, 특히, 형상기억합금 와이어를 오그제틱 (auxetic) 구조로 매듭지어 일반 구조에서는 볼 수 없는 3D 방향으로 구조 전체가 동시에 수축 및 이완 하는 특성을 구현하였다. 이런 비자연적 특성을 통해, 마치 영화 속 스파이더맨 슈트처럼 사이즈가 자동으로 조절되는 기능을 연상케 하는, 굴곡진 신체의 표면에 순응하여 사이즈가 자동으로 조절되는 옷감형 액추에이터를 세계 최초로 선보였다.

연구팀이 개발한 옷감형 액추에이터는 사용자의 팔목에 착용해 가상현실(VR) 속 모빌리티 로봇 주변의 공간적 정보를 촉각 피드백으로 전달하는 착용형 햅틱 인터페이스로서 응용되었다. 시각 및 청각 정보가 제한된 상황에서 연구팀이 개발한 착용형 햅틱 인터페이스를 팔목에 입은 사용자는 가상현실 속 모빌리티 로봇 주변의 위치정보를 파악하고, 장애물을 피해 로봇을 안정적으로 주행하는 것이 선보여졌다.

연구성과

논문	[1] Advanced Materials (IF=29.4)에 게재 (“Easy-To-Wear Auxetic SMA Knot-Architecture for Spatiotemporal and Multimodal Haptic Feedbacks”, 2023.11) [2] Advanced Materials의 cover image로 ‘선정 (Volume 35, Issue 47, 2023.11) [3] Advanced Materials Technology에서 “Hot Topics:Robotics”로 선정
홍보	‘연합뉴스 TV’, ‘KBS 과학으로 보는 세상 SEE’, ‘YTN 사이언스 투데이’ 외 9건 이상 보도·홍보



형상기억합금 와이어를 오그제틱(auxetic) 구조로 매듭지어 제작한 옷감형 액추에이터와 이를 활용해 개발한 착용형 햅틱 인터페이스



3D 방향 전체 수축기능을 보이고, 굴곡진 형상에 맞게 구조를 감싸며, 자동으로 사이즈가 조절되어 팔목의 형상에 착 맞춰지는 셀프 피팅 구현

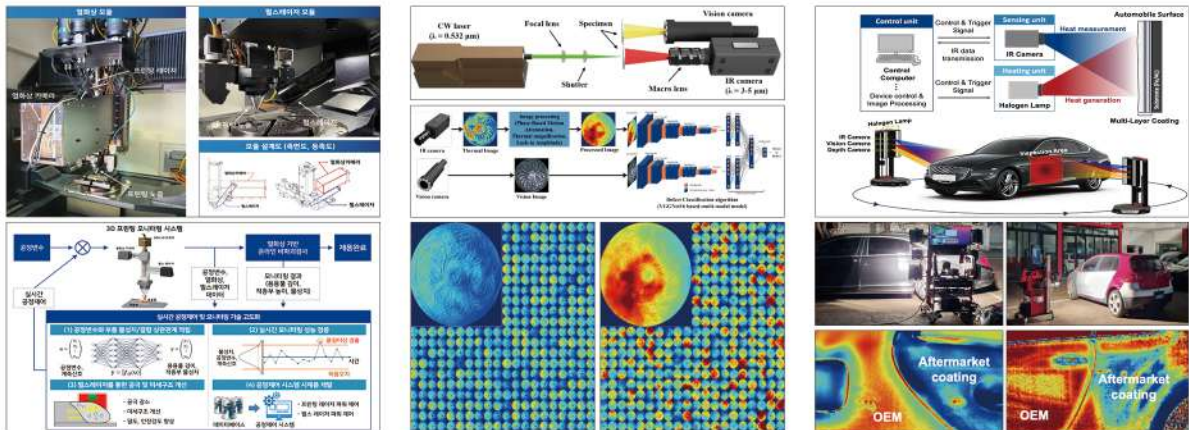


오그제틱 패턴으로 매듭지어진 착용형 햅틱 인터페이스를 통해 VR 환경 속 모바일 로봇의 주변 환경에 대한 정보를 전달받고 모바일 로봇을 제어

11 능동형 열화상 검사 기술을 활용한 스마트 제조업 AI 자동화 솔루션

연구책임자 손 훈 참여연구자 Liu Yang 신수빈 김현진 박정훈 이기윤 김용민 소속학과 건설및환경공학과 연구실 홈페이지 <https://ssslab.kaist.ac.kr>

본 연구는 금속 DED 3D 프린팅, 이차전지 제조, 중고차 검사 분야에서 AI 기반 능동형 열화상 기술을 활용한 스마트 제조업 자동화 솔루션을 개발하여 품질 관리와 생산성 혁신을 목표로 한다. 금속 DED 공정에서는 실시간 모니터링 및 공정 제어 기술로 공극률을 0.1% 이하로 줄이고, Fe계 580MPa, Ti계 1000MPa 이상의 인장강도를 달성하여 고강도 부품의 신뢰성을 크게 향상시켰다. 이차전지 제조에서는 능동형 열화상 기술과 Multi-modal AI 모델을 적용하여 미세 결함을 99% 정확도로 검출하고, 생산성을 30% 이상 향상시킴으로써 전기차와 에너지 저장 장치의 안전성을 보장한다. 중고차 검사에서는 열화상 기술과 머신러닝 기술을 결합해 수리 이력을 95% 이상의 정확도로 판별, 도막 두께를 정밀 측정하여 신뢰성 높은 검사 기준을 정립한다. 이를 통해 제조 원가 20% 절감, 중고차 거래의 투명성 강화, 전기차 배터리 재활용 확대 등 경제적·사회적 기여를 실현한다. 본 연구는 스마트 제조업 품질 관리의 새로운 표준을 제시하며, 다양한 산업 분야에서 기술적 우위를 확보하고 지속 가능한 성장에 기여할 것으로 기대된다.



금속 DED 3D 프린팅 실시간 모니터링 및 공정관리 기술 | 전기차 이차전지 실시간 인라인 검사기술 | 능동형 열화상 기반 중고차 도막상태 평가 기술 개발 및 상용화

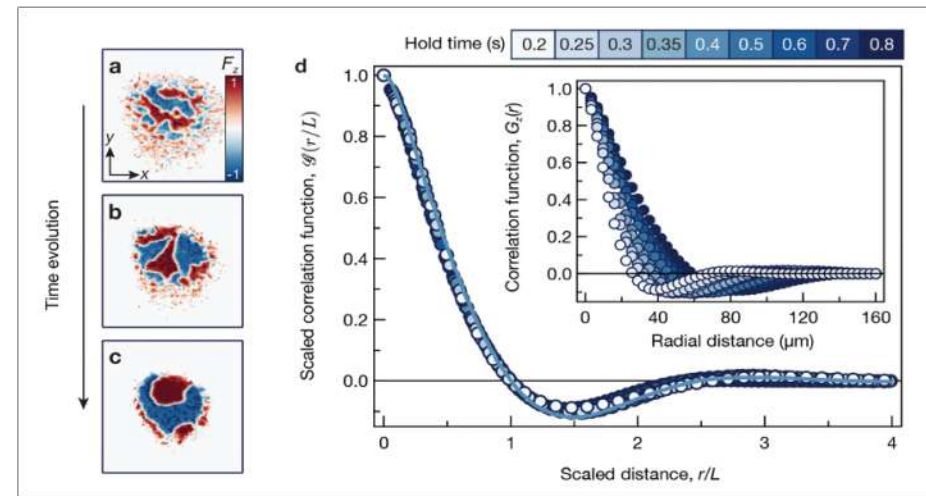
연구성과

논문	[1] Liu Yang, Jack C.P. Cheng, Zhanxiang Ma, Ikgeun Jeon, Peipei Liu, HoonSohn, "Real-time Layer Height Estimation during Multi-Layer Directed Energy Deposition Using Domain Adaptive Neural Networks", Computers in Industry, June 2023 (Impact factor: 10.0) [2] Soonkyu Hwang, Hyeonjin Kim, HyungJin Lim, Peipei Liu, HoonSohn, "Automated visualization of steel structure coating thickness using line laser scanning thermography", Automation in Construction, 4th May 2022, (Impact factor: 10.3)
수상	[1] KAIST 국제화 최우수 연구실 선정 (2024) [2] KAIST 글로벌 연구 협력상 (2024)
특허	[1] 3D 프린팅 공정 중 형성되는 용융물 깊이를 추정하는 방법 및 장치, 그리고 이를 구비한 3D 프린팅 시스템 (대한민국(KR), 미국(US) 중국(CN) 특허 등록 완료) [2] 강구조물의 도막 상태 검사 및 평가 방법과 이를 위한 시스템 (대한민국(KR), 미국(US) 중국(CN) 특허 등록 완료)
기술이전	[1] 열화상 영상계측 및 열파 시각화 기술(하나기술, 2.0억원) [2] 강구조물의 도막 상태 검사 및 평가 방법과 이를 위한 시스템(오토피디아, 2.2억원)

12 비평형 양자 동역학의 보편성 분류

연구책임자 최재윤 참여연구자 허승정 소속학과 물리학과 연구실 홈페이지 <https://sites.google.com/view/jylab>

비평형 상태란 평형에서 벗어난 상태를 의미하며, 초기 우주를 비롯하여 대부분의 자연현상은 비평형 상태이며, 시간이 지나감에 따라 평형을 찾아가는 과정으로 볼 수 있다. 흥미로운 질문은 과연 비평형 상태에 놓여진 양자계가 과연 어떻게 평형점을 찾아가는지, 그 복잡한 동역학 속에 어떤 새로운 물리 법칙을 발견할 수 있을지, 우리가 고전세계에서 정립한 물리적 개념들이 적용가능할지 가능하다면 왜 적용이 되는지 등이 있다. 이와 같이 흥미로운 질문에 대해 우리는 아직 대부분을 답을 하지 못하고 있으며, 이에 양자 물리학계에서는 비평형 양자 동역학을 주요하게 연구하고 있다. 최재윤 교수 연구팀은 중성원자 기반의 양자 시뮬레이터 (양자 컴퓨터의 한 종류)를 개발하여, 비평형 양자 동역학에서도 보편적인 물리 법칙이 존재하며, 무엇보다 이러한 보편성을 분류할 수 있는 기준을 마련하였다. 즉, 연구팀은 시스템의 갖고 있는 대칭성과 이에 따라 생성되는 위상 여기체가 비평형 동역학을 분류 할 수 있음을 실험적으로 보여주었다.



a-c, 자기에너지 담금질(quench) 이후에 일어나는 자기 도메인들의 초대화 동역학. 초기에 생성된 자기 도메인들은 시간이 지남에 따라(위에서 아랫방향), 크기가 점점 커지는 것을 확인 할 수 있다. d, 스핀 상관관계 함수를 자기 도메인의 길이 L로 나눠주면, 서로 다른 시간대의 스핀 상관관계 함수가 (삽입그림) 하나의 곡선으로 포개어지는 것을 확인 할 수 있다. 실선은 수치계산을 통해 얻은 결과값을 의미한다.

연구성과

논문	Nature Physics 20, 402 (2024), 3월호 표지논문
홍보	디지털 뉴스 17회
수상	과학기술정보통신부 장관 표창 (2024.06.25)

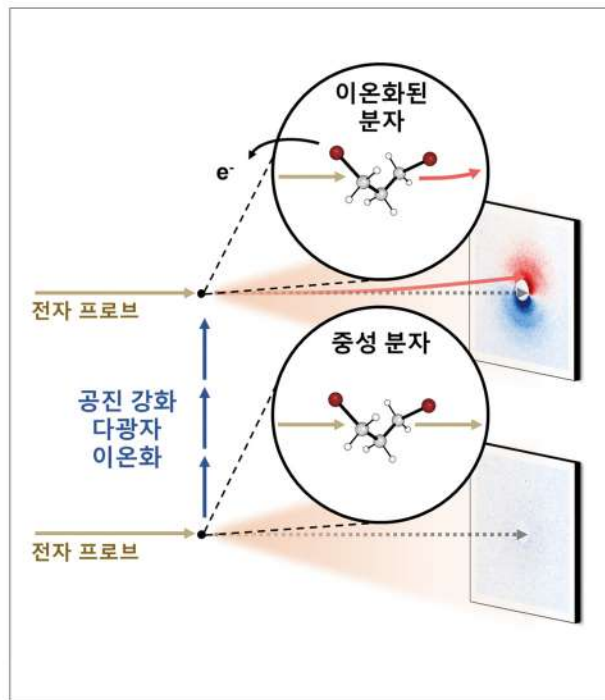
13 세계 최초 초고속 전자 회절 실험을 통한 이온의 탄생 및 구조 동역학 연구

연구책임자 이효철 **참여연구자** 허준 기호성 이경원 김도영 이성곤 지예 양 안두식 김종민 페드로 누네스 시제 왕 차용준 알레코스 세갈리나

소속학과 카이스트 화학과 기초과학연구원 첨단반응동역학 연구단 SLAC 국립 가속기 연구소

연구실 홈페이지 <http://iheelab.com>

이온은 우리의 삶 전반에 널리 존재한다. 화학 반응에서 이온은 유기 합성, 대기 중 기체 반응, 우주 공간에서의 성간 물질 생성 등 다양한 반응의 중간체로서 중요한 역할을 하며, 그 구조는 반응성과 선택성에 결정적인 영향을 미친다. 그러나 이온의 분자 구조와 형태 변환은 실험적 한계로 인해 충분히 탐구되지 못했으며, 특히 가스 상태에서 이온의 구조적 동역학을 포착하는 것은 더욱 어려운 과제로 남아 있었다. 본 연구는 메가전자볼트 초고속 전자 회절을 사용하여 중성 상태의 1,3-디브로모프로판(DBP)으로부터 양이온(DBP⁺)이 생성되는 과정과 그 구조 동역학을 추적하였다. 실험 결과, 공명 강화 다광자 이온화로 생성된 DBP⁺는 약 4피코초 동안 바닥 상태와 매우 유사한 구조를 가진 “구조적으로 어두운 상태”에 머무는 것으로 나타났다. 이후, DBP⁺는 4 원자 고리를 가진 느슨하게 결합된 브로민을 포함한 비정상적인 중간체인 iso-DBP⁺로 붕괴되었으며, 최종적으로는 느슨하게 결합된 브로민을 잃고 3원자 고리 구조를 가진 브로모늄 이온으로 변환되었다. 특히, 생성된 이온의 거동은 기존에 알려진 중성 분자들의 거동과는 구별되는 독특한 움직임을 보이는 것을 실험을 통해 관찰하였다. 이는 기체상에서 이온의 구조 변화를 직접적으로 규명한 첫 사례로, 이온 구조 동역학 연구의 중요한 초석을 마련한 연구로 평가될 수 있다.



1,3-DBP에 대한 메가전자볼트 초고속 전자 회절 실험의 구성도

연구성과

- 논문** Heo, D. Kim, A. Segalina, H. Ki, D.-S. Ahn, S. Lee, J. Kim, Y. Cha, K. W. Lee, J. Yang, J. P. F. Nunes, X. Wang, H. Ihee*, "Capturing the generation and structural transformations of molecular ions", *Nature*, 625, 710-714 (2024)
- 홍보** 논문에 대하여 언론보도 10여 회

14 음식에 대한 소비자의 인지가 건강, 환경, 세대 간에 미치는 영향 규명

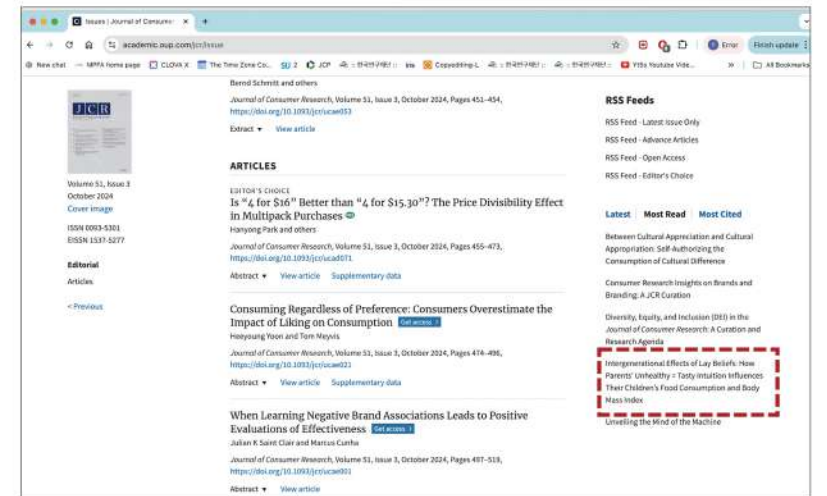
연구책임자 허영은 **참여연구자** Barbara Briers Elaine Chan Anirban Mukhopadhyay Christine Kim Brent McFerran

소속학과 기술경영학부

연구실 홈페이지 <https://sites.google.com/site/youngeunhuh>

본 연구는 소비자들이 음식에 대해 가지는 인식이 가족, 개인, 그리고 더 나아가 사회에 미치는 영향을 연구하였다. Briers, Huh, Chan, and Mukhopadhyay (2024)의 연구는 부모가 가진 '건강하지 않은 음식 = 맛있는 음식'이라는 인식이 자녀의 음식 소비 및 신체 지수(BMI)에 미치는 장기적으로 어떤 영향을 미치는 지를 조사하였다. 연구 결과, 이러한 잘못된 인식은 세대 간 전달되며, 어린 세대의 건강 문제와 비만으로 이어질 수 있음을 확인하였다. 이는 건강 교육 프로그램과 식습관 개선을 위한 사회적 개입의 필요성을 강조한다. 또한 Kim, Huh, and McFerran (Forthcoming at JM)의 연구는 음식의 건강성에 대한 인식이 소비자가 유통기한이 임박한 음식을 소비하거나 폐기하는 의사 결정에 중요한 영향을 미치는 것을 보여주었다. 이러한 결과는 음식 낭비를 줄이고 지속 가능한 소비 행동을 촉진하는 데 있어 중요한 시사점을 제공한다.

이 연구들은 음식에 대한 인지가 건강, 환경(음식 낭비 문제), 그리고 세대 간 전파에 미치는 영향을 통합적으로 분석하였다. 이를 통해 건강한 식습관을 형성하고 지속 가능한 소비문화를 조성하며, 가족 단위에서 세대 간의 부정적 영향을 긍정적으로 전환할 수 있는 새로운 전략을 마련할 수 있는 가능성을 제시한다.



연구성과

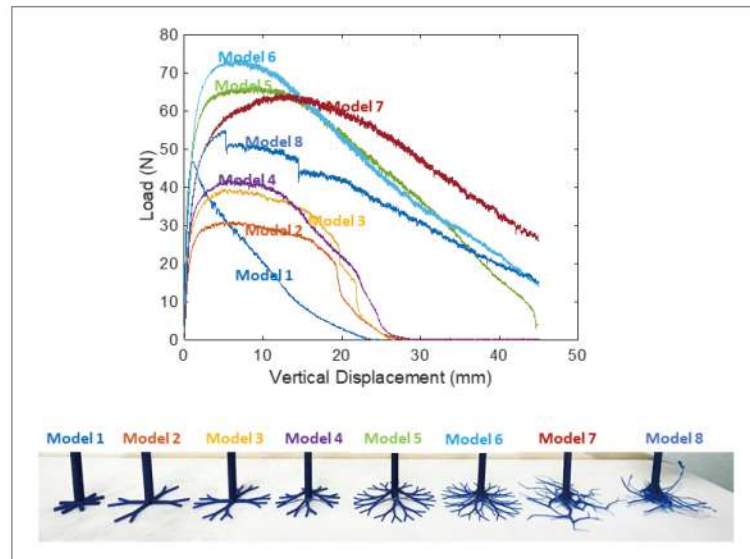
논문

- [1] Briers, Barbara, Young Eun Huh*, Elaine Chan, and Anirban Mukhopadhyay (2024) "Intergenerational Effects of Lay Beliefs: How Parents' Unhealthy = Tasty Intuition Influences their Children's Food Consumption and Body Mass Index," *Journal of Consumer Research*, 50(6), 1074-1096 (Lead Article).
- [2] Christine Kim, Young Eun Huh, and Brent McFerran, "To Dispose or Eat? The Impact of Perceived Healthiness on Consumption Decisions for About-to-Expire Foods," *Journal of Marketing*, Forthcoming.

15 생체모방형 나무뿌리 앵커의 인발거동 규명

연구책임자 권태혁 참여연구자 김윤아 소속학과 건설및환경공학과 연구실 홈페이지 <http://kwon.kaist.ac.kr>

나무뿌리 시스템은 비교적 적은 공간의 사용으로 효율적으로 나무를 인발하중으로부터 지지하는 것으로 알려져 있으며, 이에 착안하여 앵커를 개발한다면 재료의 양적인 측면에서의 효율성 개선을 기대할 수 있다. 본 연구는 나무뿌리와 같이 유연성이 증진된 생체모방형 나무뿌리 기반 앵커의 인발 거동을 규명하고자 하였으며, 구조, 재료 강성, 근입 깊이가 인발성능에 미치는 영향을 평가하였다. 이를 위해 투명 흙 매질을 사용하여 비교적 간단한 형태의 앵커의 인발 시 변형을 영상화하였다. 또한 단순화된 모델에서부터 복잡한 실제 나무뿌리까지 다양한 생체모사형 나무뿌리 앵커를 개발하고 원심 모형실험을 통해 인발실험을 수행하였다. 실험 결과, 유연한 재료와 복잡한 구조는 최대 인발지지력이 발현된 이후에도 지속적인 지지력을 제공하며 성능을 향상시키는 반면, 강성이 높은 재료는 초기 강성과 최대 지지력을 증가시키지만 유연성은 감소시키는 것으로 나타났다. 본 연구는 생체모방형 나무뿌리 앵커의 인발 거동에 대한 중요한 기본적인 이해와 향후 효율적이고 회복력 있는 앵커 시스템 개발을 위한 기반을 제공한다.



3D printed root-inspired anchor models, and load-vertical displacement responses for eight root models

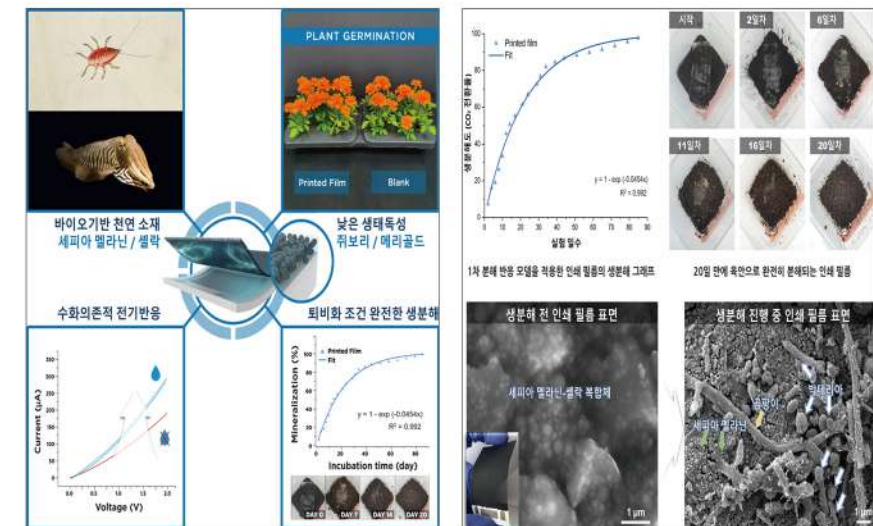
연구성과

논문 Kim, Y. A., Burrall, M., Jeon, M. K., DeJong, J. T., Martinez, A., & Kwon, T. H. (2024). Pullout behavior of tree root-inspired anchors: development of root architecture models and centrifuge tests. *Acta Geotechnica*, 19(3), 1211-1229.

16 이제 전자제품도 완전히 생분해될 수 있다!

연구책임자 명재욱 참여연구자 최신행 조용준 김영주 소속학과 건설및환경공학과 연구실 홈페이지 <https://sites.google.com/view/withlab>

전자폐기물의 급증과 환경 문제 해결을 위해 생분해성과 저독성을 가진 지속가능한 전자소재의 필요성이 대두되었다. 세피아 멜라닌 기반 전기 활성 필름을 플렉소그래피 인쇄 기술로 개발하여 친환경적 대량 생산 가능성을 제시하였다. 생분해 평가 결과, 85일 만에 약 97%가 CO₂로 전환 (자연상태에서 생분해)되며, 생태 독성을 나타내지 않음을 확인하였다. 전기전도도 분석에서 10⁻⁴ S/cm의 특성을 보이며 습도에 따라 전도도가 증가함을 확인하였다. 본 연구는 전자폐기물 문제 해결과 탄소중립 실현에 기여할 친환경 전자소재 개발의 첫 사례이다.



연구성과

- 논문** [1] A. Camus*, S. Choe*, C. Bour-Cardinal, J. Isasmendi, Y. Cho, Y. Kim, C.V. Irimia, C. Yumusak, M. Irimia-Vladu, D. Rho**, J. Myung**, C. Santato**, Electrical response and biodegradation of Sepia melanin-shellac films printed on paper, *Commun. Mater.* 5, 173 (2024).
[2] S. Choe, S. You, K. Park, Y. Kim, J. Park, Y. Cho, J. Seo, H. Yang, J. Myung, Boric acid-crosslinked poly(vinyl alcohol): biodegradable, biocompatible, robust, and high-barrier paper coating, *Green Chem.* 26, 8230–8241 (2024).
- 홍보** [1] “생분해되는 전자제품 코 앞...KAIST, 친환경 전기 필름 개발”, TV조선, 2024.09.25.
[2] [KAIST 공과대학 뉴스레터] 제2024-2호 공학자의 오리엔트
- 수상** 2024년 대전시 환경상(연구·개발부문)

17 고체전해질층 재구성 기술을 통한 전기차 리튬금속전지 기술 혁신

연구책임자 김희탁 소속학과 생명화학공학과 연구실 홈페이지 http://eed.kaist.ac.kr

리튬 금속 전지 향 첨단 액체 전해액의 개발은 균일한 리튬 전착이 가능하게 하였고, 이는 고립 리튬(isolated Li 또는 dead-Li)의 형성을 효과적으로 감소시킴으로써 리튬의 전착/탈리 가역성을 크게 향상시켰다. 그러나 액체 전해액과의 화학적 반응에 의한 리튬 부식 및 이에 따른 전해액 및 리튬 소모는 여전히 심각하고, 이 때문에 상용화 수준의 성능을 충족시키지 못한다.

본 연구에서는 액체 전해액에 의한 리튬 부식을 최소화하는 borate-pyran 전해질을 보고한다. 극저온 투과 전자 현미경(cryo-TEM)을 통해 기존 전해액과 리튬의 계면에서 지속적인 부식 반응이 관찰된 반면, borate-pyran 전해액과 리튬의 계면에서는 결정상(crystal phase) 분포의 미세화에 의해 액체 전해액과 리튬 금속의 계면이 치밀하게 부동화(passivation)되는 것이 관찰되었다.

Borate-pyran 전해액, high-Ni 층상 산화물계 양극(>3.8 mAh cm⁻²),박막 리튬 금속 음극(40 μm)으로 제조된 상용화 수준의 에너지 밀도(>400 Wh kg⁻¹)를 가지는 리튬 금속 전지는 세계 최고 수준의 성능(450회)을 보였다.



| 연구내용 인포그래픽

1000km 달라는 배터리가 이긴다

세계 최대의 자동차 배터리 제조사 LG화학이 1000km 달라는 배터리를 개발했다고 발표했다. LG화학은 1000km 달라는 배터리를 개발했다고 발표했다. LG화학은 1000km 달라는 배터리를 개발했다고 발표했다.

LG엔솔 ‘주행 900km’ 배터리 기술 확보

LG엔솔은 900km 달라는 배터리를 개발했다고 발표했다. LG엔솔은 900km 달라는 배터리를 개발했다고 발표했다. LG엔솔은 900km 달라는 배터리를 개발했다고 발표했다.

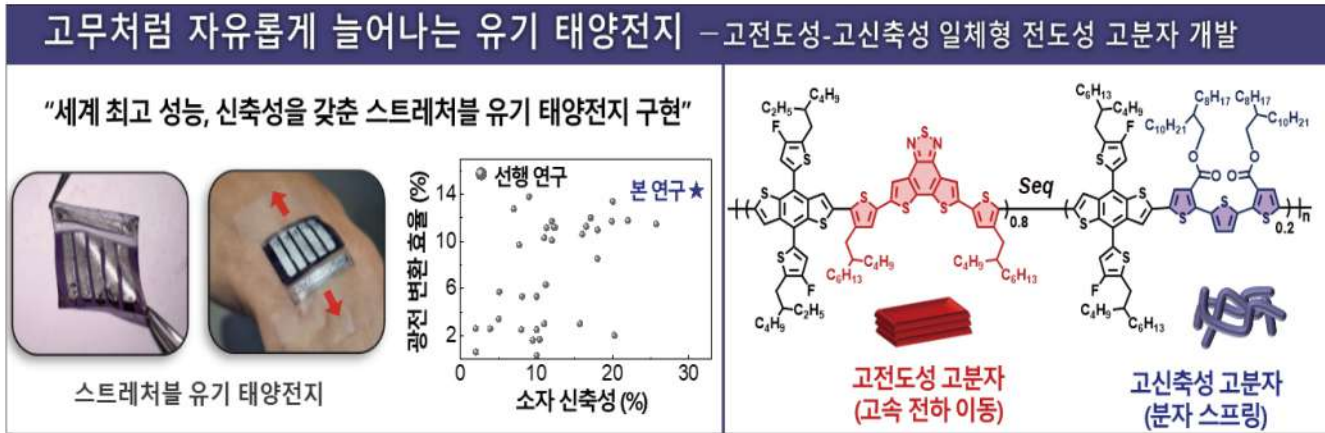
| 연구내용 주요기사

연구성과	
논문	Nature Energy volume 9, 57–69 (2024)
홍보	조선일보, 한국일보 등 (23. 12. 08)

18 고무처럼 자유롭게 늘어나는 고효율 태양전지 개발

연구책임자 김범준 참여연구자 이진우 이흥구 Lan Phan 소속학과 생명화학공학과 연구실 홈페이지 https://peel.kaist.ac.kr

본 연구에서는 (1)고속 전하 이동이 가능한 고전도성 고분자와 (2)고무와 같이 쉽게 늘어날 수 있는 고신축성 고분자가 하나의 고분자 사슬에 결합된 새로운 개념의 전도성 고분자를 개발하였으며, 이를 통해, 세계 최고 수준의 광전변환 효율(14.3%)과 신축성을 동시에 갖추며, 고무처럼 다방향으로 자유롭게 늘어날 수 있는 스트레처블 유기 태양전지를 구현하는 데 성공했다. 또한, 개발된 스트레처블 유기 태양전지는 신축에 의해 수광 면적이 증가하므로, 소자가 늘어날 때 태양전지의 전력 출력을 유지하는 것에 그치지 않고 오히려 향상시킬 수 있다는 사실을 밝혀냈다. 본 연구 결과는 “웨어러블 전자소자는 신축에 따른 성능 저하가 불가피하다”는 기존의 통념을 뛰어넘는 혁신적인 발견이다. 본 연구는 새로운 개념의 고분자 소재를 개발하여 자유형상 및 신축성이 요구되는 다양한 전자소자에 응용 가능한 소재 원천 기술을 제시한 점에서 큰 의미를 갖는다. 이를 통해 상시 자가 전력 공급이 가능한 웨어러블 전자소자 기술의 상용화가 크게 앞당겨질 것으로 기대된다.



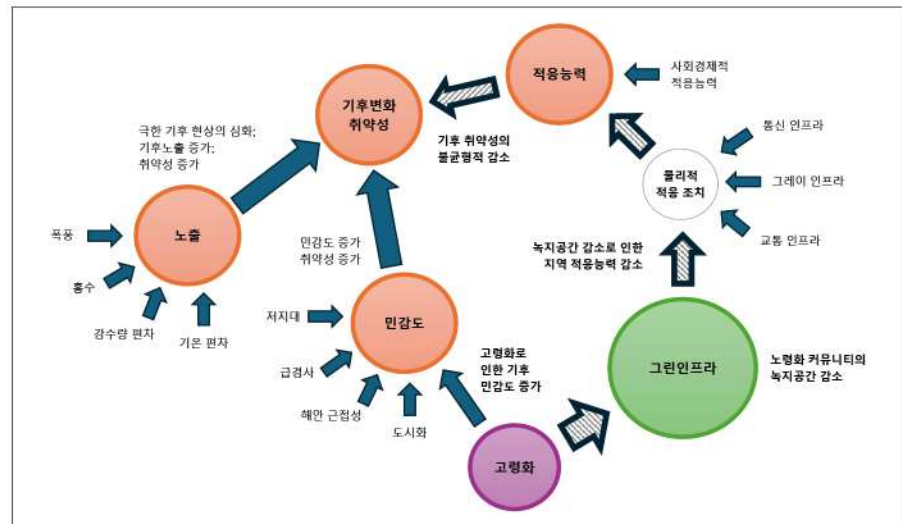
| 본 연구에서 개발된 스트레처블 유기 태양전지 성능 및 전도성 고분자 화학 구조.

연구성과	
논문	[1] J.-W. Lee, B.J. Kim* et al. (2024). Strain-Induced Power Output Enhancement in Intrinsically Stretchable Organic Solar Cells. Joule [IF= 38.6], 2024, DOI#j.oule.2024.11.009. [2] J.-W. Lee, B.J. Kim*, et al. (2024). Rigid and Soft Block-Copolymerized Conjugated Polymers Enable High-Performance Intrinsically-Stretchable Organic Solar Cells. Joule [IF= 38.6], 2024, 8, 204. [3] J.-W. Lee, B.J. Kim*, et al. Joule [IF= 38.6], 2023, 7, 416. [4] J.-W. Lee, B.J. Kim*, et al. Energy Environ. Sci. [IF= 32.4], 2023, 16, 3339. [5] S. Seo, B.J. Kim*, et al. Adv. Mater. [IF= 27.4], 2023, 35, 2300230. [6] J.-W. Lee, B.J. Kim*, et al. Chem. Soc. Rev. [IF= 40.4], 2024, 53, 4674. [7] S. Seo, B.J. Kim*, et al. J. Am. Chem. Soc. 2023, 145, 11914.
홍보	해외 및 국내 언론 보도 PV magazine 외 15 건
특허	관련 특허 2건 출원, 1건 등록

19 도시 기후변화 적응력 강화를 위한 그린 인프라, 주거 이동성, 인구 동태의 상호작용 메커니즘 규명

연구책임자 김승겸 참여연구자 김지수 소속학과 문술미래전략대학원 연구실 홈페이지 <https://sites.google.com/view/skim-lab>

본 연구는 기후변화와 주거 이동성이 도시의 사회적·환경적 전환에 상호작용하며, 서로 영향을 주고받는 복합적 관계를 심층적으로 분석하였다. 첫 번째 연구는 동남아시아 9개국, 26,885개의 커뮤니티를 대상으로 고령화 지역의 그린 인프라 시공간적 변화 패턴을 분석하여, 고령화가 두드러진 지역에서 녹지 공간이 감소하는 경향을 발견하였다. 이는 고령화로 인해 도시 기후 적응 정책의 우선순위가 낮아지면서, 그린 인프라 투자가 감소하고 기후 변화 취약성이 심화될 수 있음을 시사한다. 두 번째 연구는 미국 431개의 해안 도시들을 대상으로 40년간의 주택 매매 데이터를 활용하여, 기후 위험이 주거 이동성을 통해 기후 젠트리피케이션을 유발하는 과정을 규명하였다. 연구 결과, 기후 위험이 낮은 지역으로의 이주가 중간 소득 증가와 특정 인구 감소 등 인구통계학적 변화를 초래하며, 공간적 불평등을 심화시키는 것으로 나타났다. 이 두 연구는 기후변화 대응 정책 설계 시 고령화, 그린 인프라의 변화, 주거 이동성, 주택시장과 같은 요소 간의 상호작용을 체계적으로 반영해야 함을 강조하며, 사회적·환경적 불평등을 해소하고 지속가능한 도시 전략 수립에 기여할 수 있는 중요한 학술적 기반을 제시한다.



연구성과

논문

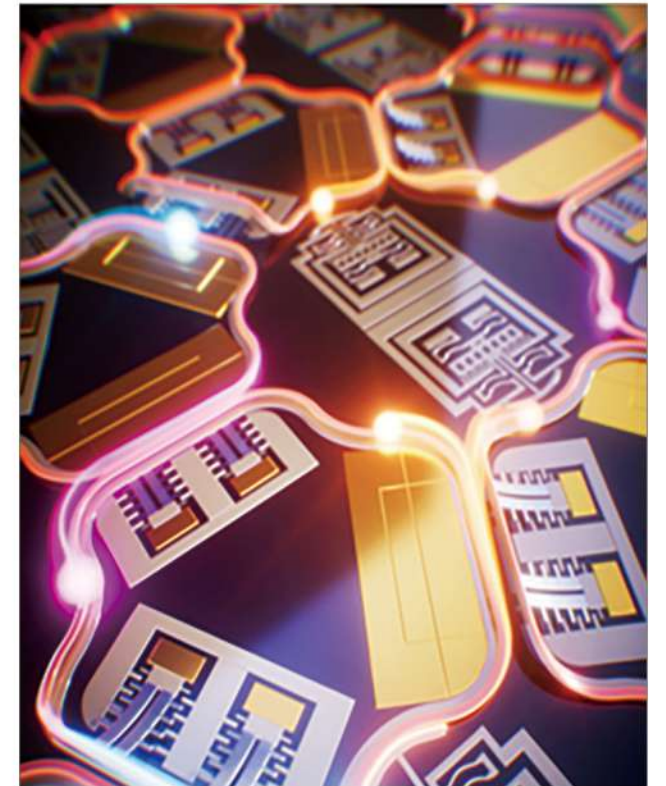
- [1] Kim, J. S., & Kim, S. K. (2024). Ageing population and green space dynamics for climate change adaptation in Southeast Asia. *Nature Climate Change*, 14(5), 490-495. (<https://doi.org/10.1038/s41558-024-01980-w>)
* 연합뉴스, 코리아헤럴드 포함 논문 관련 언론보도 40회 이상
- [2] Kim, S. K. & Park, S. (2023). How does exposure to climate risk contribute to gentrification? *Cities*, 137, 104321, (<https://doi.org/10.1016/j.cities.2023.104321>)
* This research is highlighted by Nature Climate Change (Unequal transformations), (<https://www.nature.com/articles/s41558-023-01672-x>)

20 초저전력 프로그래머블 광집적회로 개발

연구책임자 유경식 소속학과 전기및전자공학부 연구실 홈페이지 <https://kaist-yu.notion.site>

광자 기반 양자 정보처리 및 통신을 위하여 광집적회로 기술이 전세계적으로 활발히 연구되고 있다. 하지만, 대규모 정보처리 및 초저온 동작을 위해서는 광집적회로의 전력소모가 획기적으로 감소되어야 할 필요가 있다. 특히, 목표 상황에 따라 재구성 가능한 대규모 초저전력 프로그래머블 광집적회로의 중요성이 부각되고 있다.

본 연구에서는 초미세 전자기계기술 (MicroElectroMechanical Systems, MEMS)을 광집적회로 기술에 접목하여 광정보처리를 위한 가변형 광소자의 대기전력을 femtowatt (10^{-15} W) 수준으로 낮추고 에너지 소모를 수십 picojoule (10^{-12} J) 수준으로 감소시켰다. 집적회로의 핵심 구성 요소인 가변형 광결합기와 위상 변조기를 초저전력 MEMS 기술로 구현하여 전력 소모를 최소화하였으며, 해당 광소자를 70개 이상 집적하여 세계 최고 수준의 집적도를 달성하였다. 특히, 기존 열광학 기반 가변 광소자에 비하여 100만 배 낮은 대기전력을 소모하는 것이 특징이다. 해당 연구결과는 광공학 분야 최고 권위의 저널인 *Nature Photonics* 2023년 12월호에 게재되었다.



연구성과

논문

Programmable photonic arrays based on microelectromechanical elements with femtowatt-level standby power consumption, *Nature Photonics*, December, 2023

특허

Programmable photonic circuit (미국 특허출원 18/315,829)

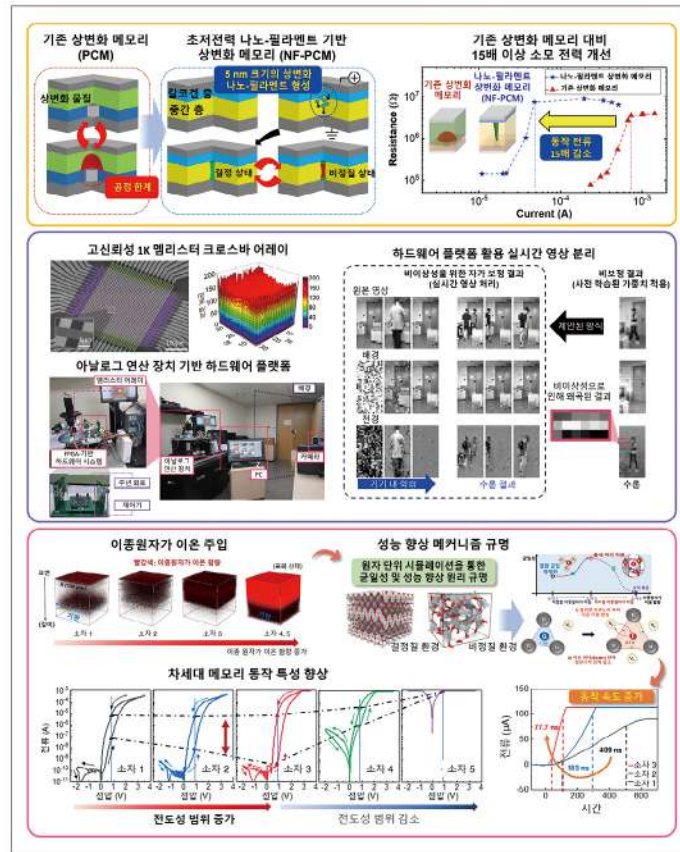
21 차세대 메모리/컴퓨터용 신개념 초저전력 소자 개발 및 하드웨어 통합 시스템 개발

연구책임자 최신현 참여연구자 박시은 정학천 배종민
소속학과 전기및전자공학부 연구실 홈페이지 <https://shinhyunlab.kaist.ac.kr>

차세대 메모리/컴퓨팅용 소자로 각광받고 있는 상변화소자 (PRAM)의 큰 문제점으로 지적되었던 소비 전력 문제 및 가격 문제를 기존 연구와는 다른 방법인 극소 상변화 나노 필라멘트 형성 방법을 고안하여 기존의 값비싼 초미세 노광공정을 이용한 기존 상변화 소자보다 소비 전력을 15배 이상 낮추고, 적응 가능한 방식을 제안하여 집적도를 획기적으로 향상할 수 있는 방법을 제시하였다.

소자의 신뢰성 개선으로 소자당 8-bit 연산을 처리할 수 있는 고집적 차세대/컴퓨팅 메모리 어레이 기반 실시간 대용량 데이터 처리 시스템을 개발하였으며, 이를 이용하여 용량이 큰 실시간 동적 이미지를 경량화 하는 연구를 진행하였음. 이는 빅데이터를 효율적으로 처리할 수 있는 새로운 하드웨어 플랫폼을 제시하였다.

차세대 메모리/컴퓨팅 소자의 개발을 위해서는 소자 동작을 뒷받침하는 원리에 대한 이해가 필수적임. 특히 소자의 신뢰성을 개선할 수 있는 방법을 원자단위 및 제1원리 분석을 통하여 증명하였으며, 플루오린 도핑 방식을 통한 신뢰성 개선 효과를 실험적/계산적으로 증명하였다.



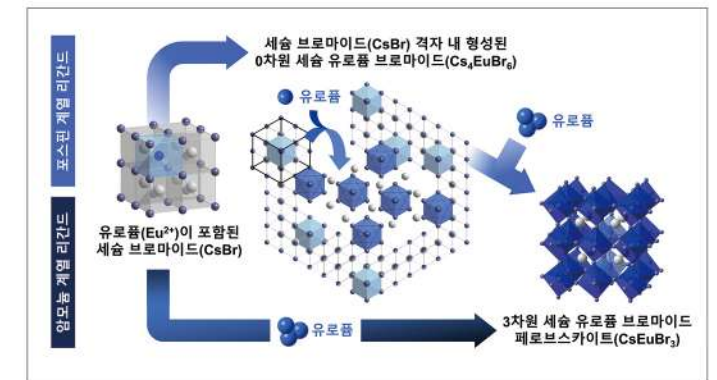
연구성과

- 논문**
- [1] Phase-change memory via a phase-changeable self-confined nano-filament, Nature 628, 293-298 (2024)
 - [2] Self-supervised video processing with self-calibration on an analogue selector-less memristor array-based platform, Nature Electronics, Accepted (2024)
- 홍보**
- [1] KAIST 연구 뉴스 "뉴로모픽 반도체 신개념 메모리 소자 개발" 외 국내외 언론에 다수 연구 소개
 - [2] KAIST 연구 뉴스 "차세대 뉴로모픽 컴퓨팅 신뢰성 문제를 푼다" 외 국내외 언론에 다수 연구 소개
- 수상**
- [1] 2024 KAIST 14대 미래선도기술 대표연구성과 선정
 - [2] 2024 QAIST Q-Day 교원 특별표창 선정 (연구부문)

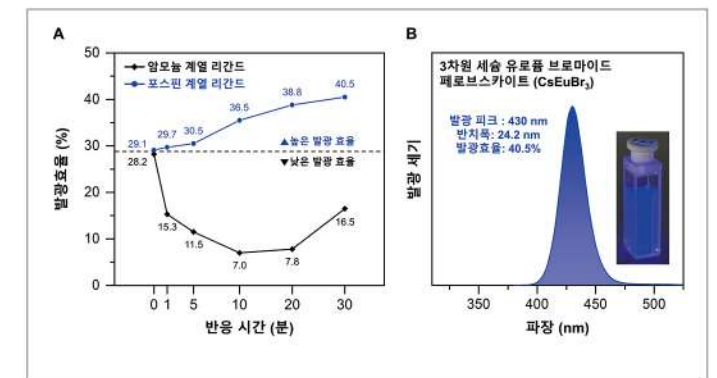
22 생생한 메타버스 디스플레이를 위한 청색광 발광 친환경 신소재 개발

연구책임자 조희찬 참여연구자 하재영 연성범 이재환 이형도
소속학과 신소재공학과 연구실 홈페이지 <http://www.ngonlab.com>

메타버스 시대의 도래로 더욱 생생한 이미지를 제공하는 디스플레이와 광학기기에 대한 수요가 증가하며, 고성능과 친환경성을 동시에 갖춘 발광 소재 개발이 중요해지고 있다. 납 기반 페로브스카이트는 높은 색 순도와 발광효율로 주목받고 있지만, 납의 유독성과 청색 발광 구현의 한계로 산업적 응용에 제약이 있다. 이에 신소재 공학과 조희찬 교수 연구팀은 납 대신 유로퓸 이온(Eu^{2+})을 도입한 세슘 유로퓸 브로마이드(CsEuBr_3) 페로브스카이트 나노결정을 개발해 청색 발광 소재의 한계를 극복했다. 연구팀은 합성에 사용된 유기 리간드가 나노결정의 구조와 광학적 특성에 미치는 메커니즘을 최초로 규명함으로써 안정적인 합성을 실현했다. 이 소재는 420-450 nm 파장에서 진청색 발광 특성을 보이며 약 40%의 발광 효율 (PLQY)과 24 nm의 매우 좁은 스펙트럼 반치폭 (FWHM)을 달성했다. 이 연구는 청색 빛을 내는 비납계 페로브스카이트 중 최고 수준의 성과로, 친환경적이고 산업적으로 활용 가능성이 높은 차세대 디스플레이 소재 개발의 기반을 마련했다. 본 연구는 11월 '에이시에스 나노 (ACS Nano)' 18권 46호에 게재됐다.



반응 시간에 따른 유로퓸 페로브스카이트의 상변화 거동에 대한 개략도.



(A) 두 가지 브로민계 유기 리간드 전구체를 사용하여 합성한 유로퓸 페로브스카이트의 반응 시간에 따른 발광효율. (B) 높은 색순도와 발광효율을 갖는 3차원 세슘 유로퓸 브로마이드 페로브스카이트.

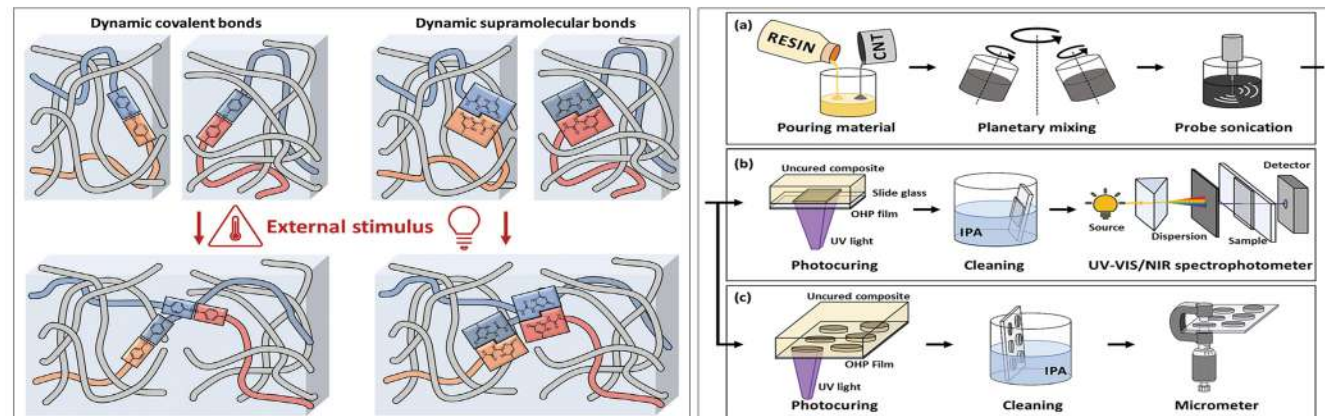
연구성과

- 논문**
- ACS Nano 2024, 18, 46, 31891–31902 (Supplementary Cover of issue 46)
- 특허**
- 국내 특허 출원 1건 (유로퓸 기반 발광 나노결정 및 용액 합성을 통한 유로퓸 기반 발광 나노결정의 제조 방법)
- 홍보**
- 언론 홍보 24건 (지디넷코리아 "납 없는 친환경 발광 소재로 선명한 화면 즐긴다", 헤럴드경제 "발광효율 40% 높은 차세대 디스플레이 소재 개발", 동아사이언스 "납 없는 친환경 발광 소재로 선명한 화면 즐긴다" 등)
- 수상**
- [국제 2건] MRS Best Poster Award, ENGE Best Poster Award
 - [국내 2건] 공업화학회 우수 포스터 발표, 대한금속재료학회 학생포스터발표 우수상

23 자기 치유 및 CNT 기반 복합재를 활용한 3D 프린팅 기술 개발

연구책임자 윤용진 **참여연구자** 김인섭 김정환
안드레우 알베르토 이원희 이태협
소속학과 기계공학과 **연구실 홈페이지** <http://iids.kaist.ac.kr>

3D 프린팅 기술의 내구성과 기능성 한계를 극복하기 위해 자기 치유 소재와 CNT 기반 복합재를 연구하였다. 자기 치유 소재는 손상 부위를 자가 복구하여 구조물의 수명과 신뢰성을 크게 향상시킬 수 있다. CNT는 뛰어난 전기적, 열적, 기계적 특성을 제공하지만 응집 문제로 인해 인쇄 품질에 어려움이 존재한다. 연구는 자기 치유 메커니즘(내재적/외재적)을 분석하고, 다양한 3D 프린팅 기술에 적합한 소재 설계를 제안하였다. 또한, CNT의 분산 품질과 농도를 기반으로 광중합 3D 프린팅 경화 깊이를 예측하는 이론 모델을 개발하였다. 지속 가능한 제조 공정을 실현하며, 비용 효율성을 극대화할 수 있다. 나아가 다양한 산업 분야에서 고기능성 소재로 활용 가능성을 확장하며, 차세대 제조 기술을 선도할 수 있는 새로운 복합재 개발로 기술 혁신을 이끌 수 있을 것으로 기대된다.



자기 치유 3D 프린팅 메커니즘 기작 모식도(좌), CNT복합재 연구 과정 모식도(우)

연구성과

- 논문**
- [1] A. Andreu et al., Self-healing materials for 3D printing, *Advanced Functional Materials* 34 (2024) 2315046 (※ Impact Factor 18.5, 분야상위 4.1%)
 - [2] T. Lee et al., Prediction of curing depth dependence on CNT nanofiller dispersion for vat photopolymerization 3D printing, *Chemical Engineering Journal* 482 (2024) 149110 (※ Impact Factor 13.4, 분야상위 3.1%)
- 홍보**
- [1] 아세안익스프레스, “윤용진 카이스트 교수팀, 자기 치유 3D 프린팅 기술 국제 학술지에 게재”, (<https://www.aseanexpress.co.kr/news/article.html?no=10048>)
 - [2] 조선일보, “‘우크라가 최고 실험실됐다’... 전쟁이 키운 드론, 무한 확장 중”, (https://www.chosun.com/economy/weeklybiz/2024/04/04/EZ6R24PTFVUJJVENNMMGF20XM/?utm_source=naver&utm_medium=referral&utm_campaign=naver-news)
- 강연**
- [1] IEEE Technology Engineering Management Society, “Enhancing Flight of Time for Advanced Drone”, 2024.08.02.
 - [2] National TsingHua University, “AI Advanced Drones for Superiority in the Defense Industry”, 2024.08.19

24 극초단 펄스 레이저 직접 묘화 기반 그래핀 스마트 섬유 제작

연구책임자 김영진 **참여연구자** 양동욱
Le Dinh Truong Son
소속학과 기계공학과 **연구실 홈페이지** <http://upm2.kaist.ac.kr>

김영진 교수 연구팀은 펄스 레이저를 활용한 직접 패터닝 기술을 통해 다양한 섬유 구조에 레이저-유도 그래핀(LIG)을 형성하여 고성능 스마트 섬유를 구현하는 데 성공하였다. 이 기술은 화학적 공정을 사용하지 않고도 친환경적이며, 단일 공정을 통해 LIG를 형성할 수 있어 웨어러블 센서, 에너지 저장 장치, 우주 소재, 해수 담수화 기술 등 다양한 응용 분야에 적합하다. 연구팀은 다양한 섬유 구조에 최적화된 스마트 섬유를 설계하였으며, 높은 유연성과 민감도를 제공하는 인장 및 굽힘 센서, 우주 환경에서도 안정적으로 작동하는 우주복과 망원경용 소재, 그리고 고효율 해수 담수화 기술 등 다각적인 활용 가능성을 입증하였다. 이러한 기술은 기존 스마트 섬유 제조 방식의 복잡성과 한계를 극복하며, 대량생산과 맞춤형 설계를 가능하게 해 스마트 섬유의 상용화를 가속화할 것으로 보인다. 더 나아가, 웨어러블 디바이스, 우주 공학, 에너지 및 환경 기술 등 미래 사회의 핵심 산업 분야에서 높은 수요를 충족할 수 있는 잠재력을 보이며, 글로벌 기술 경쟁력 확보에 크게 기여할 것으로 기대된다.



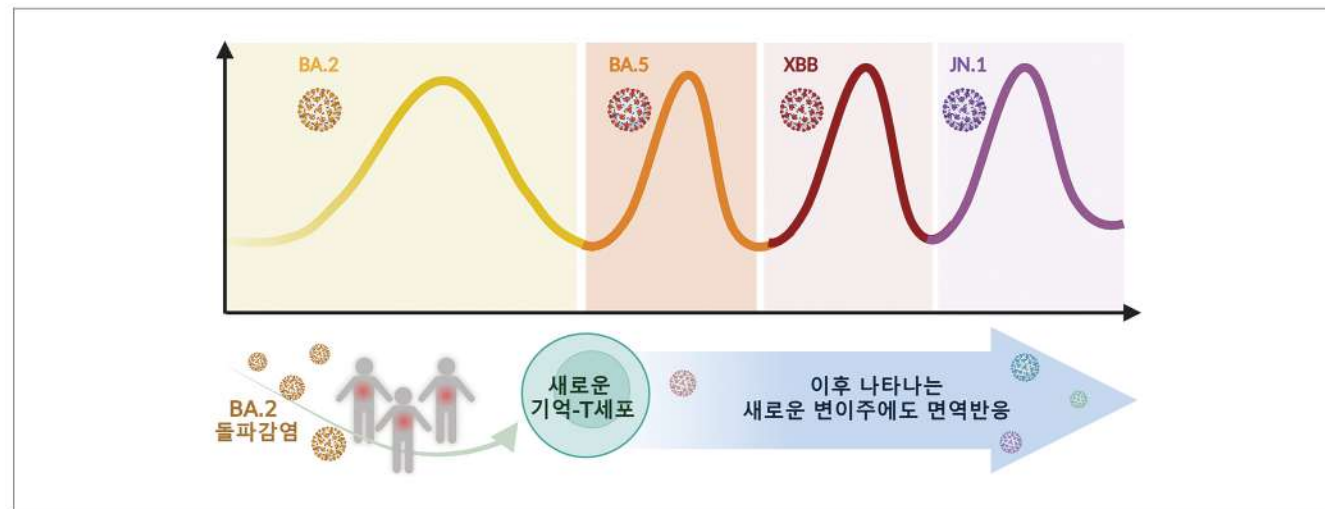
연구성과

- 논문**
- [1] D. Yang, H. K. Nam, Y. Lee, S. Kwon, J. Lee, H. Yoon, Y. J. Kim, *Adv. Funct. Mater.* 2024, 2411257, 1.
 - [2] T. S. D. Le, D. Yang, H. K. Nam, Y. Lee, C. T. Lim, B. J. Lee, S. W. Kim, Y. J. Kim, *ACS Nano* 2024.
 - [3] D. Yang, H. K. Nam, T. S. D. Le, J. Yeo, Y. Lee, Y. R. Kim, S. W. Kim, H. J. Choi, H. C. Shim, S. Ryu, S. Kwon, Y. J. Kim, *ACS Nano* 2023, 17, 18893.
 - [4] Y. Kim, D. Yang, H. Ku, T. D. Le, Y. Lee, *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* 2022, 4.
- 특허**
- [1] Y. -J. Kim, D. Yang, H. K. Nam, Y. Lee, Y. Kim. T. -S. D. Le, S. -W. Kim, “Method for Manufacturing Laser-Induced Graphene based E-textile and Laser System Implementing the Method”, *OPP20239006US*
 - [2] Y. -J. Kim, D. Yang, H. K. Nam, Y. Lee, Y. Kim. T. -S. D. Le, S. -W. Kim, “전자섬유 생산을 위한 펄스 레이저 기반 섬유상 그래핀 생성 방법 및 장치”, *KR 10-2022-0174202*
- 수상**
- Best Paper Award, Dongwook Yang, Young-Jin Kim*, *ISMTII* 2023, September 2023.

25 코로나 엔데믹 시대의 면역반응 변화 규명

연구책임자 신의철 참여연구자 박수형 소속학과 의과대학원 연구실 홈페이지 <http://liid.kaist.ac.kr/>

오미크론 돌파감염을 겪은 회복자를 대상으로, 다양한 오미크론 변이주에 반응하는 기억-T세포를 분석한 결과, 초기 오미크론 변이주에 의한 돌파 감염을 겪으면 감염 변이주에 대한 면역반응뿐만 아니라 그 이후에 출현한 변이주에 대한 면역반응도 더불어 강화된 것을 확인했다. 오미크론 돌파 감염을 겪음으로써 미래에 새롭게 출현할 변이주 바이러스에 대한 면역까지 증강된 것이다. 이 연구 결과는 오미크론 돌파감염을 경험하면 추후 새롭게 출현하는 변이 바이러스에 감염되더라도 중증 코로나로 진행되지 않을 것을 의미하는 결과로서, 코로나19 팬데믹이 엔데믹으로 전환되면서 우리 신체의 면역반응은 어떻게 이에 적응하여 변화하여가지를 체계적으로 분석한 연구로 평가받고 있다. 또한 이러한 적응 변화의 원인이 되는 에피토프를 이용하여 백신을 개량할 수도 있음을 보여 특허가 등록되었다.



오미크론 돌파감염으로 형성된 기억-T세포의 새로운 변이주에 대한 면역반응. BA.2 오미크론 돌파감염으로 새롭게 형성된 기억-T세포는 BA.2 뿐만 아니라 그 이후에 출현한 BA.4/BA.5, XBB 계열 등 새로운 변이 바이러스에 대해서도 강한 면역반응을 나타냄을 확인했다. 오미크론 돌파감염을 겪음으로써 미래에 새롭게 출현한 변이 바이러스에 대한 면역까지 증강된 것이다. 이는 오미크론 돌파감염을 경험하면 추후 새롭게 출현하는 변이 바이러스에 감염되더라도 중증 코로나로 진행되지 않을 것을 시사한다.

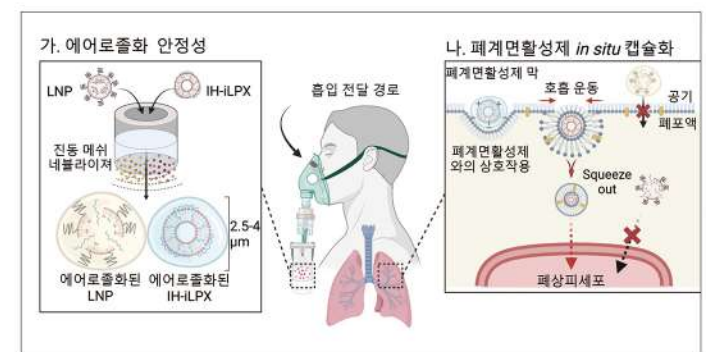
연구성과

논문	[1] Omicron BA.2 breakthrough infection elicits CD8+ T cell responses recognizing the spike of later Omicron subvariants. Sci Immunol 9:eade6132, 2024 [2] SARS-CoV-2 spike-specific nasal-resident CD49a+CD8+ memory T cells exert immediate effector functions with enhanced IFN-γ production. Nat Commun 15:8355, 2024
특허	신규한 코로나바이러스의 에피토프 및 이의 용도(특허 제10-2723171호, 2024/10/24 등록)
홍보	TIME지 기사 소개: https://time.com/6564464/covid-19-changing-immune-system

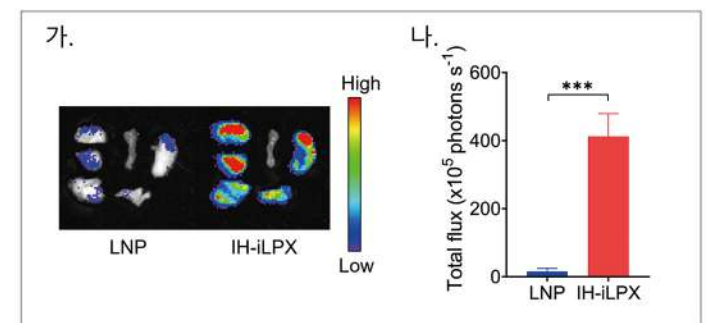
26 흡입형 유전자 전달 기술

연구책임자 박지호 참여연구자 장민철, 염경환, 한준희, Erinn Fagan 소속학과 바이오및뇌공학과 연구실 홈페이지 https://openwetware.org/wiki/Park_Lab_:Publications

코로나19의 전 세계적 유행 이후, 호흡기 질병에 대비하기 위한 mRNA 백신 및 치료제는 차세대 치료제로 주목받고 있다. 본 연구에서는 호흡기 바이러스 감염증 및 난치성 폐질환에 대해서 흡입 유전자 치료를 가능케 하는 흡입형 유전자 전달체를 개발하여 호흡기 질병을 위한 새로운 개념의 유전자 치료 방법을 제시하였다. 기존 mRNA 전달을 위해 활용되던 지질나노입자(이하 lipid nanoparticle, LNP)의 에어로졸화 과정에서의 불안정성과 폐 미세환경에서의 낮은 전달 효율을 해결하기 위해 이온화성 지질나노복합체(이하 ionizable lipocomplex, iLPX)를 설계하였다. iLPX는 에어로졸화 과정에서 입자의 구조를 유지하기 때문에 흡입 전달에 용이하고, 폐 미세환경 내에서 폐계면활성제와의 상호작용을 유도해 호흡 운동을 활용, mRNA를 높은 효율로 폐 세포 내로 전달할 수 있다. 개발된 전달체는 호흡기 바이러스 백신, 난치성 폐섬유증과 같은 다양한 폐질환에 적용되어 유전자 폐 치료의 적용 범위를 넓힐 것으로 기대된다.



흡입 최적화 지질 나노 복합체의 mRNA 흡입 전달 전략 모식도



기존 mRNA 전달체(LNP)와 개발된 흡입용 전달체(iH-iLPX)의 흡입전달 후 마우스 폐에서의 단백질 발현량 비교. 나노입자에는 루시퍼레이스 암호화 mRNA를 탑재하였으며, 신호 세기(Total flux)는 단백질 발현량을 의미함.

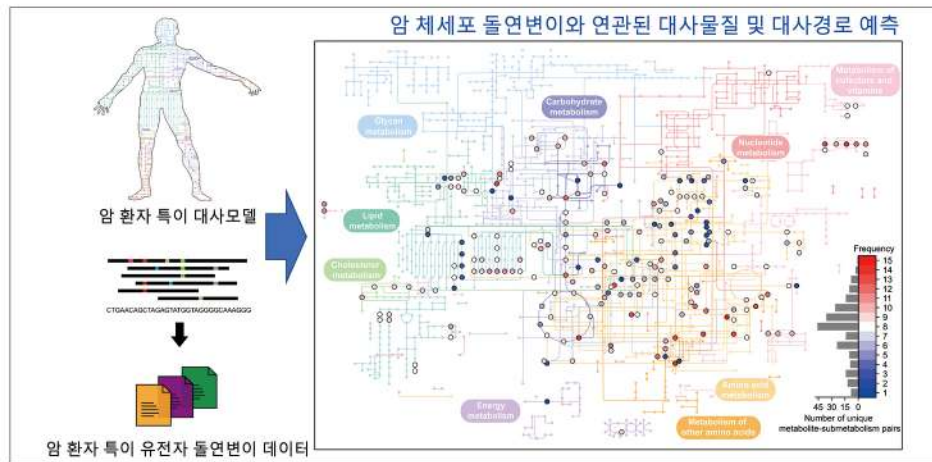
연구성과

논문	Inhalable mRNA nanoparticle with enhanced nebulization stability and pulmonary microenvironment infiltration, ACS Nano 18 (2024) 24204-24218
특허	흡입 전달용 mRNA-지질 나노복합체, 10-2024-0055946 (출원번호), 2024년 4월 26일 (출원일)

27 대사 네트워크 모델 및 유전자 변이 데이터 기반 암 유발 대사물질 예측

연구책임자 김현욱 참여연구자 이상미 이가령 소속학과 생명화학공학과 연구실 홈페이지 <https://sbml.kaist.ac.kr>

본 연구는 암 유발 대사물질을 체계적으로 탐색하기 위해 게놈 수준 대사 모델(genome-scale metabolic model)과 유전자 변이 데이터를 활용한 컴퓨터 방법론을 개발하여, 암 연구의 효율성을 크게 향상시켰다. 연구팀은 24개 암종에서 1천 명 이상의 암 환자 특이 대사 모델을 구축하고, 각 환자의 돌연변이 유전자와 대사물질 및 대사경로 간의 연관성을 통계적으로 분석하였다. 서울대학교병원에서 수집한 급성골수성백혈병 및 신장암 환자 유래 데이터를 활용한 검증 결과, 컴퓨터 모델로 예측된 대사물질과 대사경로의 농도 변화가 유전자 돌연변이 여부에 따라 유의미하게 달라짐을 확인하였다. 특히 뇌암 데이터에서 약 70%의 예측이 기존 출판된 논문 데이터와 일치하며, 방법론의 높은 정확성을 입증하였다. 이번 연구는 암 유발 대사물질 및 대사 기반 항암 표적 연구를 위한 중요한 참고 데이터를 제공하며, 실험 횟수를 줄이고 효율적인 검증 실험으로 암 치료 연구를 가속화하는 데에 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다. 향후 더 다양한 암종과 유전자 돌연변이와 관련된 질병, 예컨대 치매 연구로도 확장 가능성이 제시되며, 유전자-대사물질-대사경로의 체계적인 분석을 통한 연구가 가능할 것이다.



암 체세포 돌연변이와 연관된 대사물질 및 대사경로를 예측하는 컴퓨터 방법론 모식도

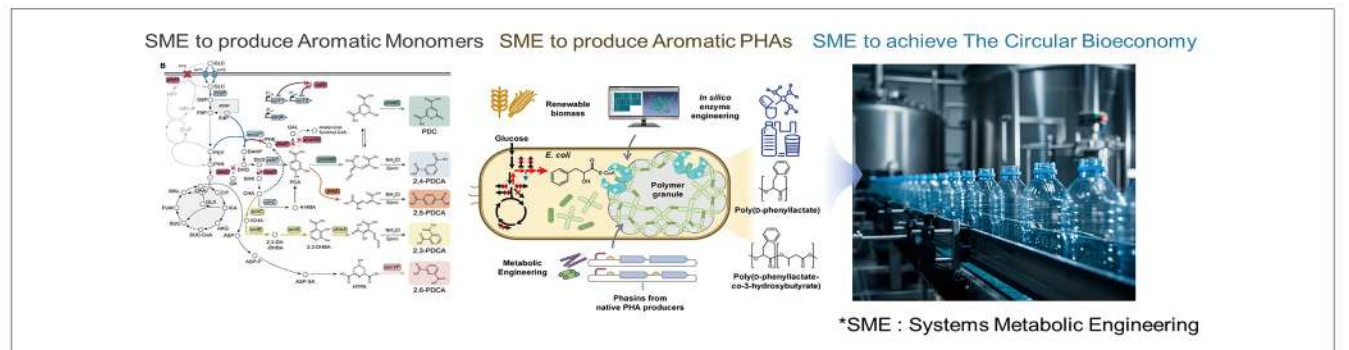
연구성과

- 논문**
- [1] Lee G, Lee SM, Lee S, Jeong CW, Song H, Lee SY, Yun H*, Koh Y*, Kim HU*. Prediction of metabolites associated with somatic mutations in cancers by using genome-scale metabolic models and mutation data. *Genome Biology* 25, 66 (March 2024)
 - [2] Song S, Koh Y, Kim S, Lee SM, Kim HU*, Ko JM*, Lee SH*, Yoon SS* & Park S*. Systematic analysis of Mendelian disease-associated gene variants reveals new classes of cancer-predisposing genes. *Genome Medicine* 15, 107 (December 2023)
- 홍보**
- 동아사이언스 등: 암 유발 물질 컴퓨터로 예측하다

28 PET 대체 가능한 차세대 바이오 플라스틱 생산 기술 개발

연구책임자 이상엽 참여연구자 조재성 장우대 씨웨이루 신디 프리시리아 이영준 최소영 문천우 양정은 강민주 소속학과 생명화학공학과 연구실 홈페이지 <https://mbel.kaist.ac.kr>

본 연구에서는 대사공학 기법을 이용하여 PET를 대체할 수 있는 친환경 바이오 플라스틱 소재 생산 기술을 개발하였다. 먼저, 테레프탈산 유사 방향족 다이카복실산 (PDCA) 생산을 위해 전구체인 프로토키테추산의 대사 흐름을 강화하고 손실을 방지하는 플랫폼 미생물 균주를 구축했으며, 전사체 분석 및 유전자 조작을 통해 5종의 PDCA (2-피론-4,6-다이카복실산, 2,3-피리딘 다이카복실산, 2,4-피리딘 다이카복실산, 2,5-피리딘 다이카복실산, 2,6-피리딘 다이카복실산)를 고효율로 생산하는 데 성공하였다. 특히, 2,4-, 2,5-, 2,6-피리딘 다이카복실산은 세계 최고 농도로 생산하였다. 이를 기반으로 PET를 대체할 수 있는 친환경 플라스틱의 단량체를 미생물을 통해 고효율로 생산할 수 있는 플랫폼 구축에 성공하였다. 세포 내 고효율 방향족 단량체 생산 뿐 아니라, 세포 내 방향족 단량체들의 원스텝 중합을 실현시키기 위해 추가 연구를 수행하였다. 대장균 내에서 방향족 단량체인 페닐 젖산 (PhLA) 생합성 경로를 강화하고, 세포 내 고분자 축적을 증가시켰으며, 컴퓨터 시뮬레이션을 활용하여 PHA 합성 효소의 구조를 예측하고 효소 개량을 통해 세계 최고 농도 (12.3 ± 0.1 g/L)의 폴리(PhLA) 생산을 달성하였다. 30L 규모의 유가식 발효를 통해 폴리에스터 생산에 성공하여 산업화 수준 생산의 가능성도 확인하였다. 본 연구를 통해 개발된 기술은 미생물 유래 친환경 플라스틱의 상업적 활용 가능성을 높여 폐플라스틱 오염 문제 해결에 기여할 것으로 기대된다. 또한, 새로운 바이오 플라스틱 소재 개발을 통해 지속 가능한 사회 구축에 기여할 수 있으며, 바이오화학 제조산업에서 시스템 대사공학의 중요성을 보여주는 사례로서 친환경 플라스틱 생산을 위한 바이오화학 제조산업 원천기술 개발에 크게 기여할 것이다.



미생물 세포공장을 활용한 PET 대체 플라스틱 생산 기술 개발

연구성과

- 논문**
- [1] Cho, J.S., Luo, Z.W., Moon, C.W., Cindy, P.S.P, Lee, S. Y. (2024). Metabolic engineering of *Corynebacterium glutamicum* for the production of pyrone and pyridine dicarboxylic acids. *Proceedings of the National Academy of Science*.
 - [2] Lee, Y., Kang, M., Jang, W. D., Choi, S. Y., Yang, J. E., & Lee, S. Y. (2024). Microbial production of an aromatic homopolyester. *Trends in Biotechnology*.
- 홍보**
- 해외 언론 보도 Eurek alert 외 19 건
- 수상**
- 2024 국제학술발표대회 및 국제심포지엄 우수논문발표상 수상



KAIST

ANNUAL R&D REPORT



34141 대전광역시 유성구 대학로 291 한국과학기술원
Tel. 042-350-2114 Fax. 042-350-2210 Web. www.kaist.ac.kr