



2023

Korea Advanced Institute of Science and Technology

KAIST ANNUAL R&D REPORT

contents



KAIST ANNUAL R&D REPORT

05
06
07
08
09
21

발간사

Message from the President

신문화전략

KAIST's New Culture Strategy, QAIST

예산 및 지원 현황

Research & Development Budget

연구성과 통계자료

Research Outcomes

KAIST 10대 우수성과

KAIST's Top 10 Research Achievements of 2022

KAIST 주요 연구성과

KAIST's Research Highlights of 2022

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.

World Class Science and Technology University

세계속의 KAIST는
쉼없이 달려온 51년, 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.

세계의 중심에서
세상을 움직이는
최고의 과학기술대학

한국속의 KAIST

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

세계속의 KAIST

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

KAIST속의 세계

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

KAIST





Message from the President

발간사

2022년은 코로나19 팬데믹의 영향으로 여전히 대내·외 환경이 많이 위축된 한 해였습니다. KAIST 역시 많은 변화와 도전에 직면한 시간이었지만, 신문화전략 'QAIST'를 추진하며 과학기술 기반의 혁신을 위해 노력하였습니다. 이제 우리 대학은 세계를 선도하는 연구중심 대학으로, '최초·최고'의 연구를 목표로 미래 50년을 새롭게 만들어 갑니다.

『2023년 KAIST Annual R&D Report』에는 2022년 한 해 동안 KAIST가 일구어낸 43건의 주요 연구성과와 혁신의 노력이 고스란히 담겨있습니다.

많은 분의 고민과 노력, 끝없는 도전을 통해 최우수 성과 1건을 포함하여 총 5건의 연구성과가 「2022년 국가연구개발 우수성과 100선」에 선정되었습니다. 또 2023 QS 세계 대학평가 공학&기술(Engineering&Technology) 분야에서 세계 24위(국내 1위)를 기록하며, 세계 10위권 대학의 목표에 한 걸음 더 다가설 수 있었습니다.

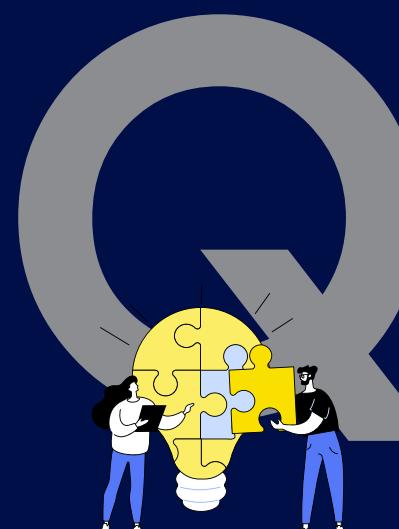
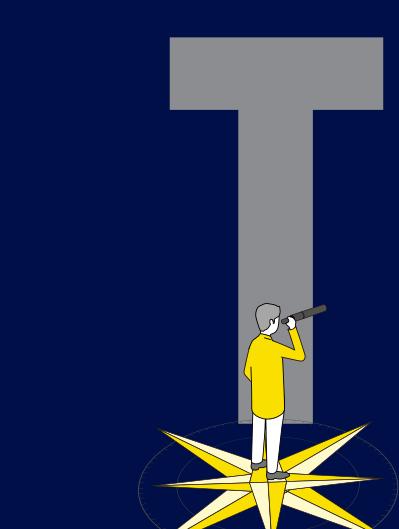
이번에 발간하는 연례보고서가 단순히 연구성과를 소개하는 데 그치지 않고, KAIST 구성원은 물론 과학기술계 연구자들에게 영감을 주어, 국가의 성장과 인류의 번영에 공헌할 수 있는 소중한 자료로 활용되기를 희망합니다.

앞으로도 KAIST는 지속적인 연구혁신을 통해, 국가와 인류 그리고 지구를 위한 독특한 빛깔의 세계 10위권 대학으로 발돋움함으로써 인류의 행복과 번영을 실현할 수 있도록 최선을 다하겠습니다.

여러분의 많은 관심과 성원을 부탁드립니다.

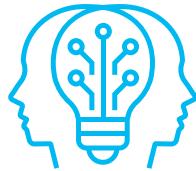
감사합니다.

2023년 6월
KAIST 총장 이 광 형

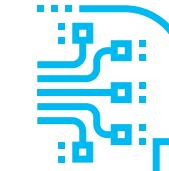
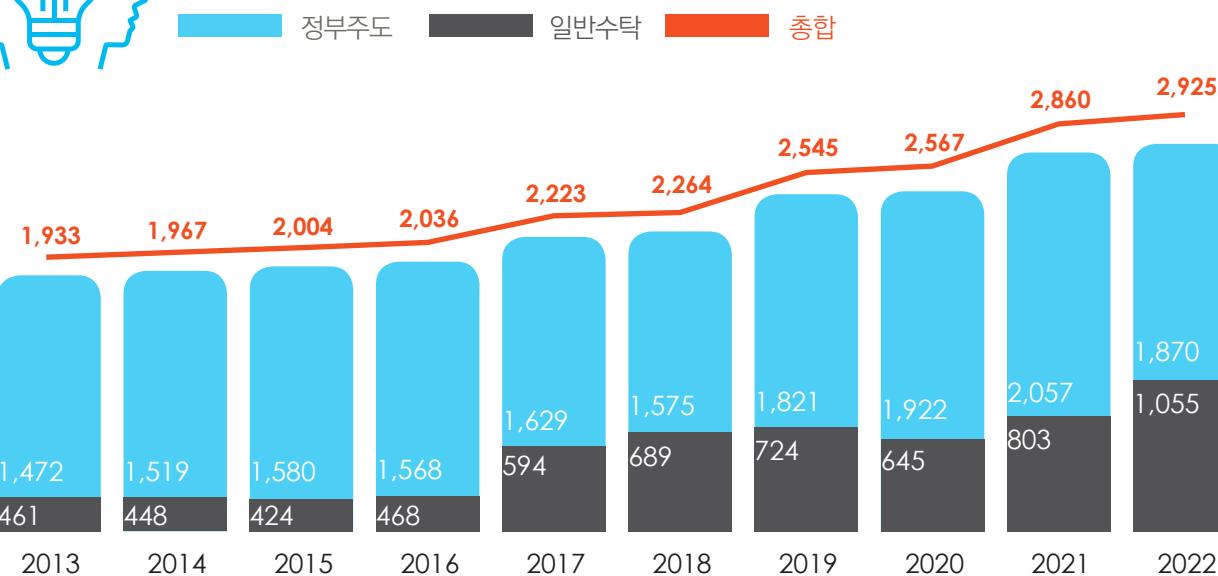
창의인재	Post AI 연구	글로벌 인재	재정자립	비전공유
Question	Advanced Research	Internationalization	Start-up	Trust
<p>신문화전략 핵심 가치</p> <p>KAIST 미래 50년을 위한 신문화 전략</p> 				
교육	연구	국제화	기술사업화	신뢰가치
<p>질문하는 인재</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 교육과정혁신 ● 교육방식혁신 ● 인성 리더십 ● 1랩 1독서 	<p>문제정의연구</p> <ul style="list-style-type: none"> ● How보다 What ● 창의/도전 연구 ● 감성 AI, 뇌연구 ● 1랩 1최초 	<p>World Bridge KAIST</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 캠퍼스 글로벌화 ● 국제공동연구 ● KAIST 모델 확산 ● 1랩 1외국인 	<p>글로벌 가치창출</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 창업지원제도 ● 현장/해외 실습 ● 기술사업화로 재정확보 ● 1랩 1벤처 	<p>신뢰 확립</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 신뢰 인재양성 ● 신뢰 재정운영 ● 신뢰경영혁신 ● 1랩 1봉사

예산 및 지원 현황

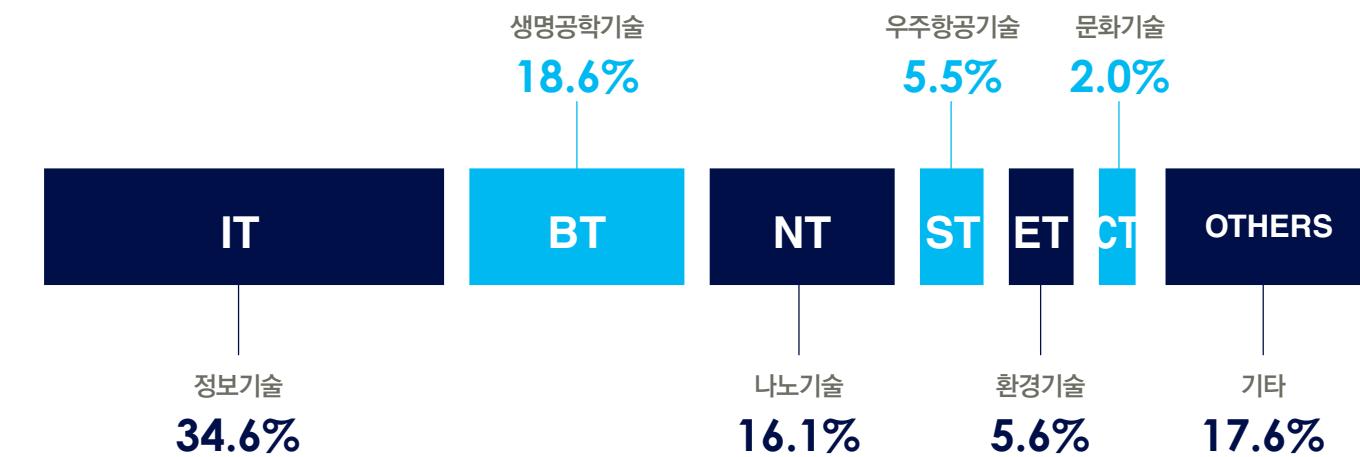
Research and Development Budget



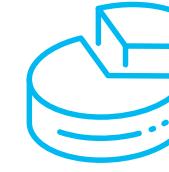
최근 10년간 연구실적(과제수) 단위: 건



6T 연관 비중별 구성비율



최근 10년간 연구실적(연구비) 단위: 백만원



연구 계약금액 구성비 단위: 백만원

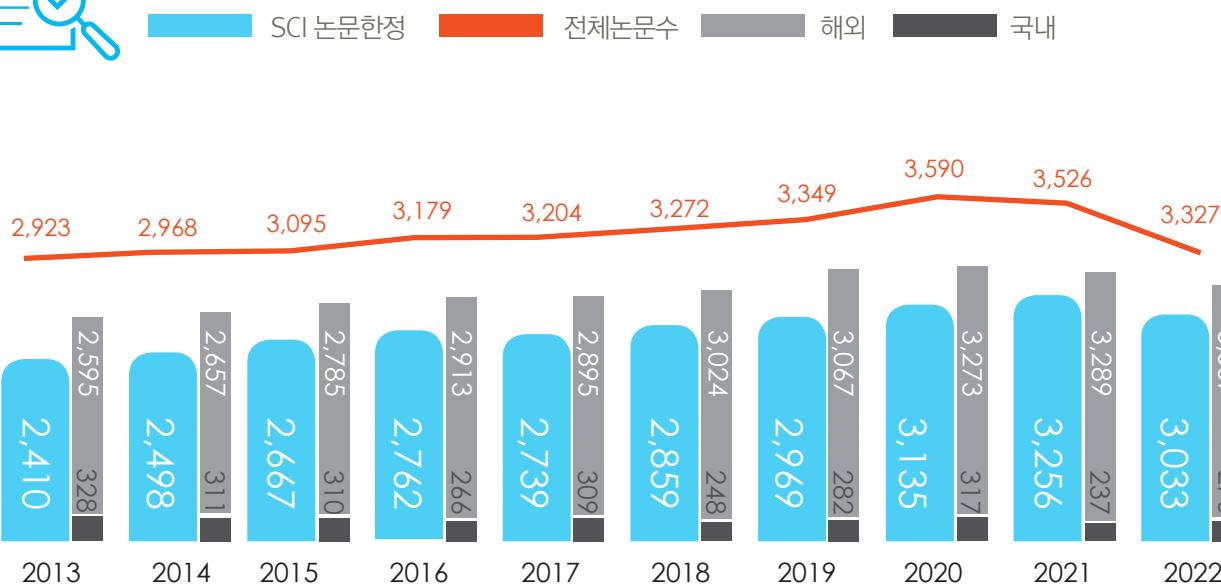


연구성과 통계자료

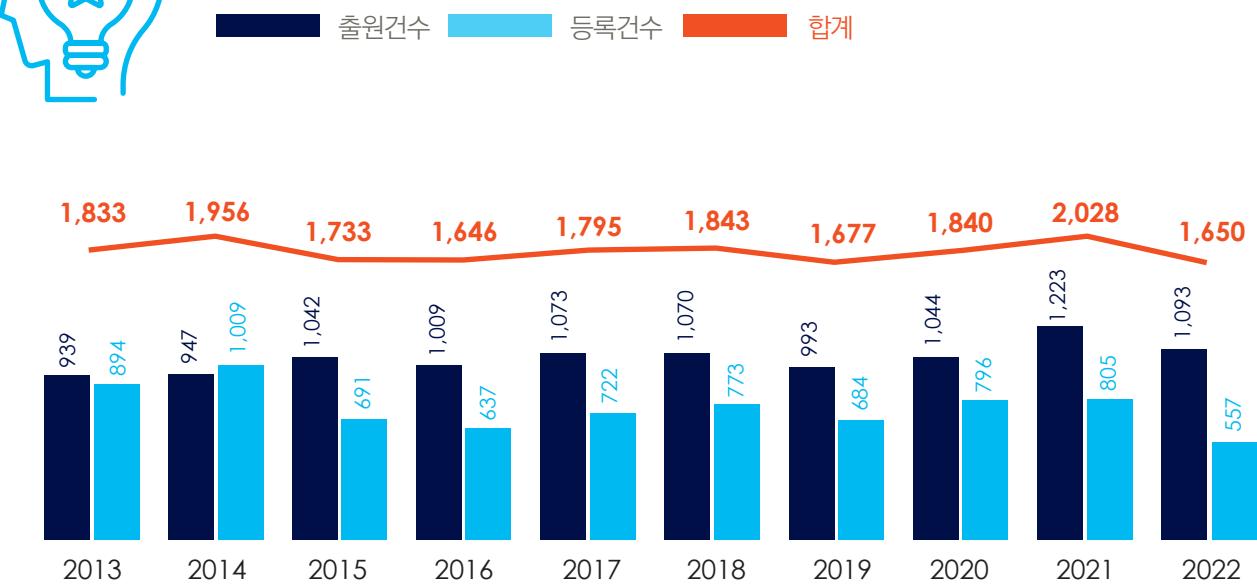
Research Outcomes



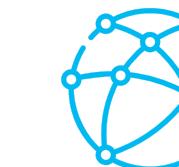
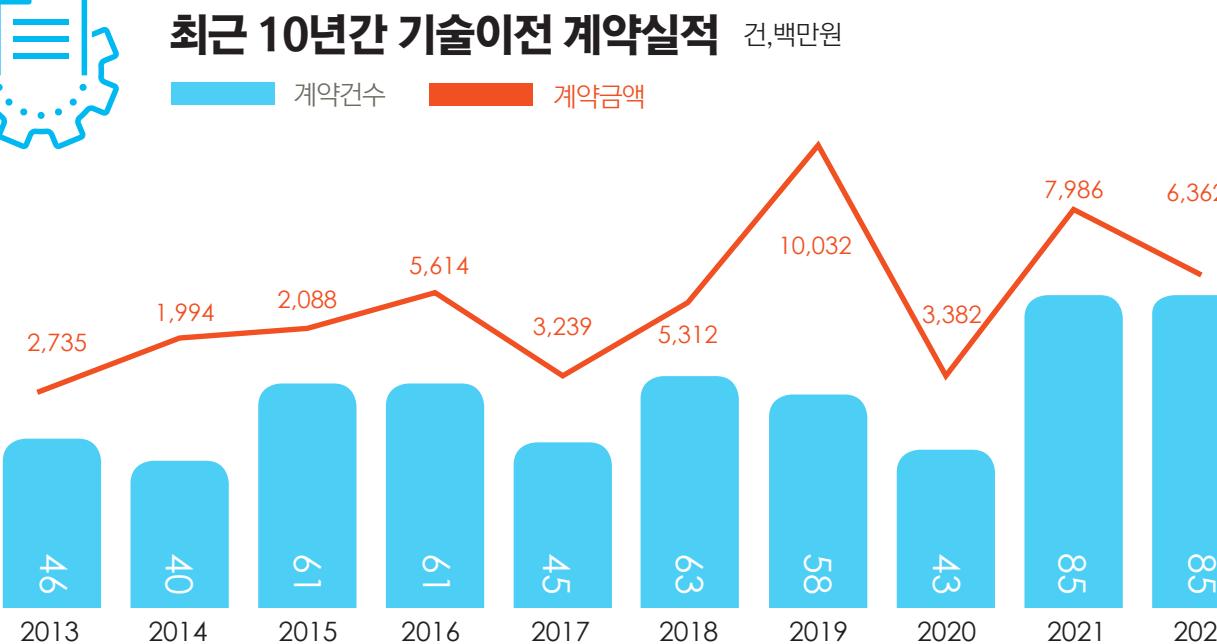
최근 10년간 논문수



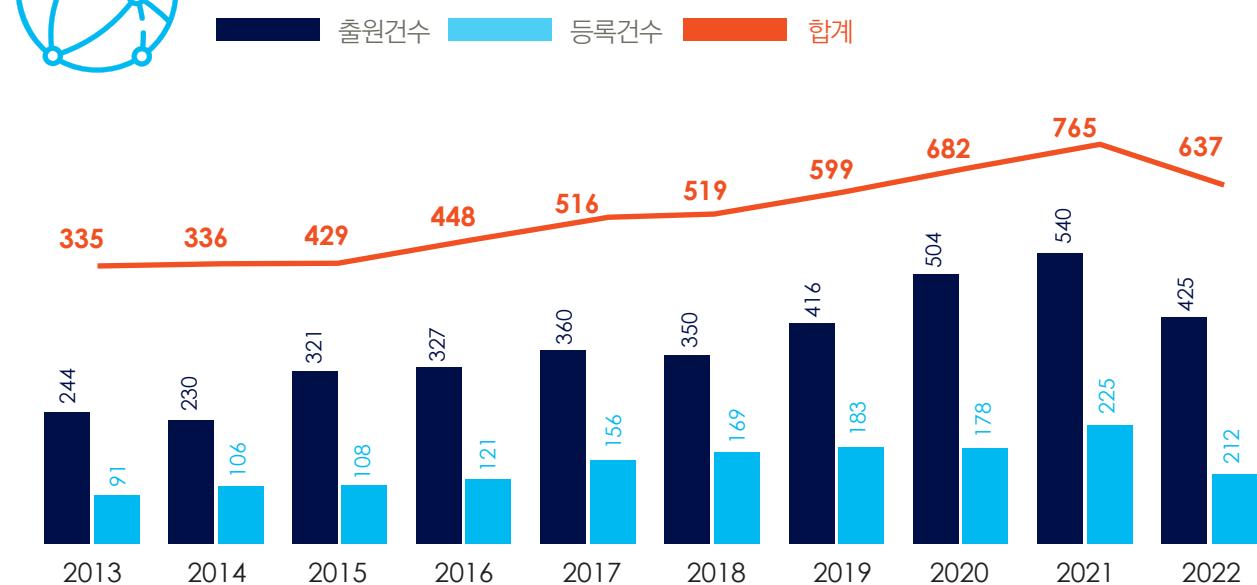
최근 10년간 국내 특허 실적



최근 10년간 기술이전 계약실적



최근 10년간 국외 특허 실적





2022 KAIST 10대 우수성과

KAIST'S TOP 10 RESEARCH ACHIEVEMENTS of 2022

011	Spontaneous generation and dynamic manipulation of quasiparticle-like optical vortices	+ 준입자적 특성을 가지는 빛 소용돌이의 자발적 생성과 동역학적 제어
012	Rydberg quantum computer	+ 리드버그원자 양자컴퓨터 개발
013	A novel therapeutic approach for Alzheimer's disease without inflammatory side effects	+ 염증반응 없이 아밀로이드베타를 제거하는 새로운 치매 치료제 개발
014	A biomimetic elastomeric robot skin using electrical impedance and acoustic tomography for tactile sensing	+ 사람처럼 느끼고 상처 치유가 가능한 로봇 피부 기술 개발
015	Closed-loop ultrasound brain stimulation for sleep modulation	+ 수면 조절을 위한 페루프 초음파 자극 기술 개발
016	Development of cancer reversion technology to reprogram malignant breast cancer cells into endocrine therapy vulnerable cells	+ 악성 유방암 세포를 치료 가능한 상태로 되돌리는 암세포 리프로그래밍 기술 개발
017	Neoantigen identification for mRNA cancer vaccine	+ mRNA 암백신 핵심기술 개발
018	Metabolically Engineered Bacterium Produces Lutein	+ 미생물 이용한 루테인 생산 기술 개발
019	Universal assembly of liquid metal particles in polymers enables elastic printed circuit board	+ 신축성 인쇄 전자회로 기판 구현을 위한 액체 금속 입자 네트워크 개발
020	Attributing Typhoon Heavy Rainfall to Global Warming Using Meta-Earth Technology	+ 지구 메타버스 기술을 이용한 지구온난화와 태풍 호우 빈도의 상관관계 증명

준입자적 특성을 가지는 빛 소용돌이의 자발적 생성과 동역학적 제어

연구책임자 | 서민교 소속학과 | 물리학과 참여연구원 | 김동하, Arthur Baucour, 최윤석, 신종화
연구실 홈페이지 | <http://swol.kaist.ac.kr>

빛 소용돌이는 전자기장 위상 분포의 공간적인 꼬임으로 기초 물리량인 궤도 각운동량을 전자기파에 싣는다. 전자기파의 궤도 각운동량은 고전적/양자역학적 회전 특성을 광학 현상과 기술에 도입함으로써, 초고해상도 현미경, 고차원 광통신, 양자 얹힘 등 다양한 분야에서 주목받아 왔다. 그러나, 다른 물리계의 소용돌이와 달리, 기존의 빛 소용돌이/궤도 각운동량의 생성은 구조적 특이점을 갖는 소자를 통해서만 구현되었고 역학적 변화를 가할 수 없는 수동적 특성을 가졌다. 본 연구에서는 구조적 특이점 없이도 자발적으로 생성되며 외부 자기장(전자기장, 전기장, 열 등)에 따라 준입자적(quasi-particle-like) 거동을 보이는 빛 소용돌이를 최초로 구현하였다. 이는 앞으로 광학 시스템에서 다양한 위상학적 전자기장 텍스처와 그들의 준입자적 상호작용에 대해 연구하는 시작점이 될 것으로 기대한다.

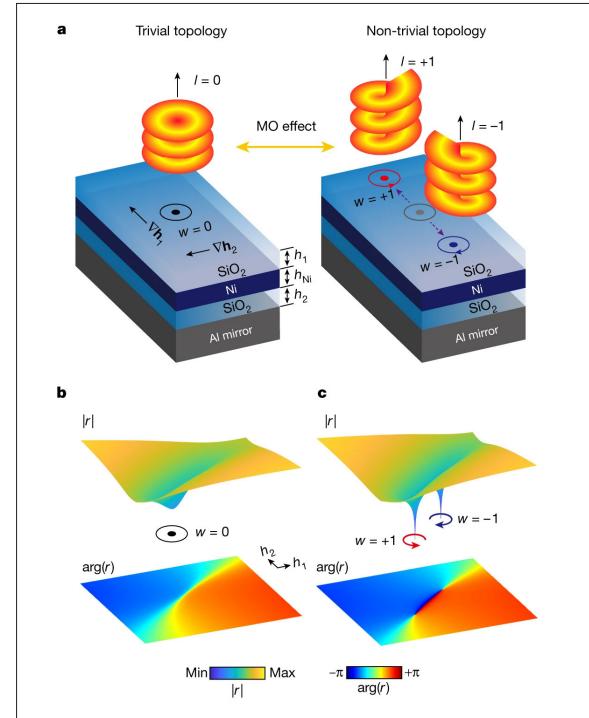
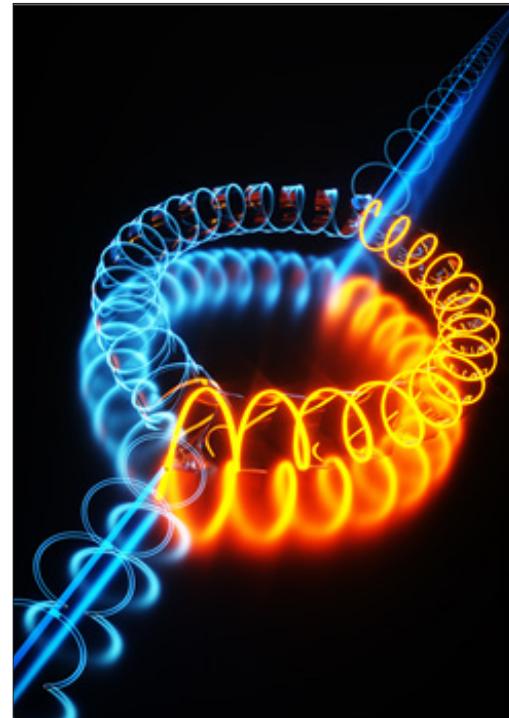
연구배경

빛 소용돌이(optical vortice)는 전자기장의 위상 분포의 공간적인 꼬임으로 기초 물리량 중 하나인 궤도 각운동량(orbital angular momentum)을 전자기장 텍스처(texture)에 싣는 역할을 한다. 전자기적 궤도 각운동량은 고전적/양자역학적 회전 특성을 광학 현상 및 기술에 도입할 수 있어, 초고해상도 현미경, 고차원 광통신, 광 집게, 양자 얹힘 등 다양한 분야로의 응용이 주목받아 왔다. 그러나, 다른 물리계(등집물질계, 유체계 등)의 소용돌이와 달리, 광학적 소용돌이의 생성은 그동안 나선형 구조적 특이점(structural singularity)을 통해서만 가능했다. 이로 인해 준입자적(quasi-particle-like) 특성은 커녕 동역학적 변화조차 기대할 수 없는 수동적 형태와 특성만을 지녀왔다.

연구내용

연구팀은 구조적 특이점 없이도 빛 소용돌이가 자발적으로 생성될 수 있는 플랫폼을 광학적 다층 박막 구조를 통해 구현하였다. 이 플랫폼은 광학적 반사율이 완전히 “0”이 되는 수학적 특이점을 가지는 자명하지 않은 위상학적 상(nontrivial topological phase)을 실 공간(real space)에 만들어 내며, 그 특이점을 중심으로 빛 소용돌이가 자발적으로 나타난다. 다층 박막 구조내의 자기 광학 효과를 이용하여, 외부 자기장에 의해 수학적 특이점을 가지는 자명하지 않은 위상학적 상과 특이점을 가지지 않는 일반적 위상학적 상 사이의 전이를 야기하였고 빛 소용돌이의 생성과 소멸을 제어하였다. 나아가, 빛 소용돌이들이 외부 자기장 하에서 광학적 위상전하에 따라 다른 양상의 움직임들을 보이거나 소용돌이-반 소용돌이쌍(vortex-antivortex pair)이 생성되는 등의 준입자적 양상을 실증하였다.

Spontaneous generation and dynamic manipulation of quasiparticle-like optical vortices



GTOC(gradient-thickness optical cavity)에서 자가적으로 제어 가능하며, 자발적으로 생성되는 광학 와류-항와류 쌍

기대효과

본 연구는 빛 소용돌이도 실공간에서 자발적 생성/소멸과 동역학적 움직임을 보이는 준입자적 양상을 가질 수 있음을 최초로 보고한 성과이다. 광학 시스템 내의 다양한 위상학적 전자기장 텍스처와 그들의 준입자적 특성 및 상호작용에 대한 연구의 시작점이 될 것이 기대된다. 특히, 본 연구팀이 개발한 광학적 다층 박막 플랫폼은 구성 물질에 따라 외부 자기장뿐만 아니라 전기장이나 열에 의한 구동도 가능해 다양한 능동적 위상 광학 소자 개발 및 빛 소용돌이 생성 소자의 개발로 활용이 기대된다.

연구성과

■ [논문] Dongha Kim, Arthur Baucour, Yun-Seok Choi, Jonghwa Shin, Min-Kyo Seo, "Spontaneous generation and active manipulation of real-space optical vortices," *Nature*, 611, 48 (2022). [2021 Impact Factor = 69.504]

연구비 지원

■ KAIST 초세대협업연구실(나노포토닉스연구실) 사업
■ 한국연구재단 중견연구자지원사업, 기초연구실사업

리드버그원자 양자컴퓨터 개발

Rydberg quantum computer

연구책임자 | 안재욱 소속학과 | 물리학과 참여연구원 | 김민혁, 김강흔, 황재용, 문은국
연구실 홈페이지 | <http://qcl.kaist.ac.kr>

양자단열 방식의 범용양자컴퓨터는 큐비트간 임의의 연결성을 프로그램할 수 있어야 한다. 관련하여 초전도체 큐비트 기반의 D-wave 양자컴퓨터는 고정형 큐비트를 연결하는 체인(chain, 초전도체 큐비트열)을 이용한다. 본 연구에서는 리드버그 양자컴퓨팅에서 큐비트간 임의의 연결성을 가능하게 하는 리드버그 양자선(중성원자열)을 제안하고 실험적으로 구현하였다. 기존의 평면 그래프에 추가하여, 쿠로토푸스키 그래프들(K_5 와 $K_{3:3}$)을 실험적으로 구현함으로써, 모든 큐비트 그래프 구조의 구현이 원리적으로 가능함을 증명하였다. 아래 그림은 리드버그 양자선(각각 빨강, 주황, 노랑 꼭지점들)을 이용하여 간선으로 연결되지 않는 데이터 큐비트(하얀 꼭지점들)를 연결하는 3차원 큐비트 구조체의 모식도이다. 이 구조는 쿠라토프스키 그래프로 잘 알려진 $K_{3:3}$ 그래프이다. 참고로 쿠라토프스키 K_5 와 $K_{3:3}$ 그래프쌍은 만들기 쉬운 평면그래프와 조합하여 모든 그래프를 만들 수 있다. 본 연구는 K_5 와 $K_{3:3}$ 을 실험적으로 최초 구현하였다.

연구배경
양자컴퓨터는 양자역학의 원리를 사용하여, 디지털컴퓨터로는 불가능한 계산을 수행할 것으로 예상되는 대표적 미래기술이다. 가령 20큐비트급 양자컴퓨터는 기존 컴퓨터가 백만(10^6)회 순차 처리해야 하는 계산량을 한 번에 처리하는 계산성능을 갖는다. 세계 주요국들은 양자컴퓨팅을 전략기술로 분류해, 국가적 연구역량을 집중하고 있으며 글로벌 대기업, 기술벤처, 국가연구소와 주요 대학의 막대한 시설과 인력, 연구비가 동원되고 있다. 우리나라 정부도 양자기술을 10대 전략기술의 하나로 선정해 투자를 확대하고 있다. 소형(20~50큐비트급)의 양자컴퓨터가 속속 개발되고 있는 현시점에서, 가장 중요한 이슈 중 하나는 '디지털컴퓨팅 알고리즘으로는 비효율적인 계산 문제(NP-문제로 분류됨)를 양자컴퓨터가 계산할 수 있는지'이다. 여행자 문제(Traveling Salesman Problem), 최대독립집합 문제 등으로 대표되는 NP-문제들은 디지털 컴퓨팅의 알고리즘으로는 효율적으로 계산할 수 없음이 잘 알려져 있다. 따라서, 양자컴퓨터가 NP-문제들을 계산할 수 있을지가 큰 관심사다.

연구내용
본 연구에서 KAIST 물리학과의 양자컴퓨팅팀은 최대 126개의 리드버그 원자를 이용하는 양자단열 방식의 양자컴퓨터를 개발하고, 이를 이용하여 NP-문제의 하나인 최대독립집합 문제를 20큐비트급 그래프에 대하여 계산하는데 성공했다. 또한 원거리 꼭지점들을 잇는 리드버그 양자선 개념을 최초로 개발해 모든 꼭지점(큐비트)들을 임의로 연결하는 초기하학적 그래프를 구현할 수 있음을 보였다.
양자 단열형 양자컴퓨팅은 양자 회로형(또는 양자디지털형), 측정기반형과 함께 범용양자컴퓨팅 방식으로 알려져 있다. 양자단열 양자컴퓨팅은 범용양자컴퓨팅을 구현하기 위해서는 큐비트간 임의의 연결성을 프로그램할 수 있어야 한다. 관련하여 대표적인 양자단열컴퓨터인 D-wave 양자컴퓨터는 고정형 큐비트를 연결하기 위해 체인(chain,

초전도체 큐비트열)을 이용한다. 본 연구에서는 리드버그 양자컴퓨팅에서 큐비트간 임의의 연결성을 가능하게 하는 리드버그 양자선(중성원자열)을 제안하고 실험적으로 구현하였다. 기존의 평면 그래프에 추가하여, 쿠로토푸스키 그래프들(K_5 와 $K_{3:3}$)을 실험적으로 구현함으로써, 모든 큐비트 그래프 구조의 구현이 원리적으로 가능함을 증명하였다. 아래 그림은 리드버그 양자선(각각 빨강, 주황, 노랑 꼭지점들)을 이용하여 간선으로 연결되지 않는 데이터 큐비트(하얀 꼭지점들)를 연결하는 3차원 큐비트 구조체의 모식도이다. 이 구조는 쿠라토프스키 그래프로 잘 알려진 $K_{3:3}$ 그래프이다. 참고로 쿠라토프스키 K_5 와 $K_{3:3}$ 그래프쌍은 만들기 쉬운 평면그래프와 조합하여 모든 그래프를 만들 수 있다. 본 연구는 K_5 와 $K_{3:3}$ 을 실험적으로 최초 구현하였다.



리드버그 양자컴퓨터의 모식도:

양자단열컴퓨팅을 위해 초고진공 공간에 5–10 마이크로미터의 간격으로 리드버그 원자들이 배열된다. 20개의 리드버그 원자들이 데이터 큐비트(백색 꼭지점)과 보조 양자선 큐비트(유색 꼭지점)로 구성된 쿠라토프스키 그래프 $K_{3:3}$ 을 구현하고 있다.

기대효과

국내 최초로 일정규모(20큐비트급)에서 양자컴퓨팅 계산을 수행하는 장치를 개발하여 보고하였다. 해당 장치(리드버그 양자컴퓨터)는 NP-완전문제의 하나인 최대독립집합 문제 계산에 특화된 물리적 특성을 갖고 있어서, 다양한 조화 최적화 문제에 적용가능하다. 따라서, 본 리드버그 양자컴퓨터의 성능(큐비트 수 등)을 향상하면 물류, 생산관리, 작업관리, 네트워크 디자인 등에서 경제가치를 창출할 가능성이 있다.

연구성과

- [논문1] Minhyuk Kim, Kangheun Kim, Jaeyong Hwang, Eun-Gook Moon, and Jaewook Ahn*, "Rydberg Quantum Wires for Maximum Independent Set Problems," *Nature Physics* 18, 755 (2022/06/20) [2021 Impact Factor = 19.68].
- [논문2] Andrew Byun, Minhyuk Kim, and Jaewook Ahn, "Finding the maximum independent sets of Platonic graphs using Rydberg atoms," *PRX Quantum* 3, 030305 (2022). [2021 Impact Factor = 6.1].

연구비 지원

- 삼성미래기술육성재단(리드버그 양자 시뮬레이터 얹힘제어 연구)

염증반응 없이 아밀로이드베타를 제거하는 새로운 치매 치료제 개발

연구책임자 | 김찬혁, 정원석 소속학과 | 생명과학과

연구실 홈페이지 | <https://immunotherapylab.wpc.comstaging.com/>, <https://www.kaistglia.org/>

알츠하이머병은 노인성 치매의 대표적 원인이나 아직 효과적인 치료제가 존재하지 않는다. 최근 베타 아밀로이드를 표적으로 하는 항체 기반 치료제가 미국 식약처의 승인을 받았으나 치료 효과 및 부작용에 관한 논란이 여전히 지속되고 있다. 이는 항체 기반 치료제들이 면역세포에서 발현되는 Fc 수용체를 통해서 베타아밀로이드를 제거할 때 필연적으로 염증 반응을 동반하기 때문이다. 따라서 심각한 염증 부작용을 근본적으로 예방하면서 베타 아밀로이드 응집체를 효과적으로 제거하는 치료제를 개발하는 것은 알츠하이머병 치료의 오랜 딜레마였다. 연구팀은 이러한 문제를 기존 항체의 틀에서 벗어나 새로운 기전의 단백질 치료제를 디자인함으로써 해결했다. 우리 몸에는 끊임없이 죽어 나가는 세포들을 제거하기 위한 특수한 포식작용 경로가 존재하는데, 연구팀은 이에 관여하는 Gas6라는 단백질을 인위적으로 조작해 베타 아밀로이드를 표적으로 하는 융합단백질을 제작했다. 연구팀은 실험을 통해 이 융합단백질(anti-Abeta-Gas6)이 뇌 안에서 선택적으로 베타 아밀로이드를 제거함과 동시에 염증반응을 오히려 억제한다는 것을 증명했다. 본 연구팀이 개발한 융합단백질은 새로운 형태의 작용기전을 적용한 최초의 알츠하이머병 치료제이며, 이러한 형태의 치료제는 다양한 퇴행성 뇌 질환 및 자가 면역질환에 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

연구배경

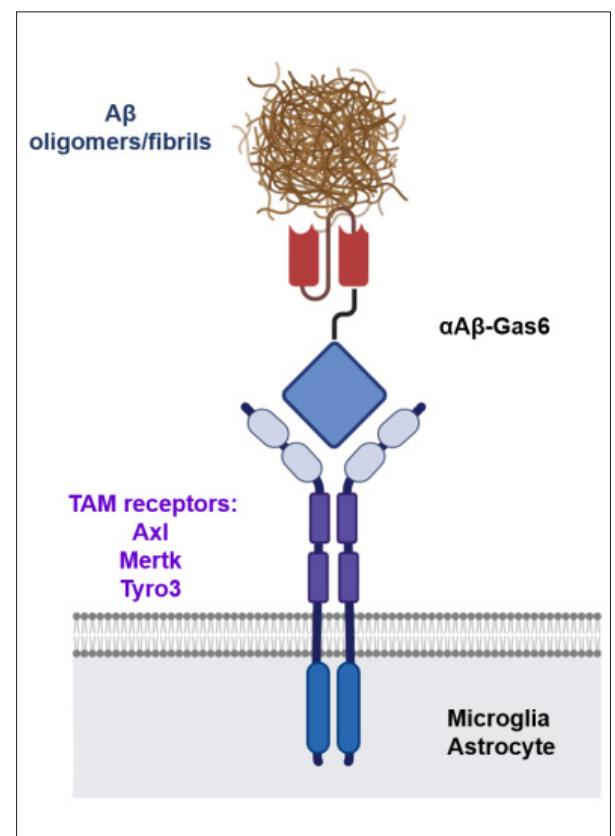
알츠하이머 질병은 퇴행성 신경질환으로 전 세계적으로 가장 흔한 형태의 치매 중 하나이다. 이 질병의 원인은 아직 완전히 밝혀지지 않았지만, 뇌 안의 베타 아밀로이드 단백질로 구성된 플라크 덩어리와 타우 단백질의 엉킴으로 인한 신경 세포변형이 주된 원인으로 여겨진다. 2021년 6월, 최초의 질병 근원 치료제인 아두카누맙 (아두헬름)이 승인되었으나, 인지능력의 향상 또는 질병의 진행 속도 완화에 대한 임상 및 과학적 증거가 불명확하여, 허가된 치료제에 대한 논란이 지속적으로 야기되고 있다. 더불어 아두헬름과 같은 항체 치료제를 처방받은 환자들에게서 뇌 부종 (ARIA-E) 및 뇌 미세혈관출혈(ARIA-H)과 같은 뇌 염증성 부작용들이 빈번하게 나타나고 있어, 알츠하이머 병의 항체 기반 치료제에 대한 의구심이 더욱 증폭되었다.

연구내용

베타 아밀로이드를 표적으로 하는 항체 치료제는, 면역 세포에 존재하는 항체 Fc 수용체의 활성 증가에 따른 베타 아밀로이드의 제거를 주요 기전으로 한다. 하지만 이 과정에서 Fc 수용체의 활성화에 의한 염증성 면역 반응이 필수 불가결하게 증가하기 때문에, 염증에 취약한 뇌에 부종이나 출혈이 생길 수 있음이 보고되어 왔으며, 뿐만 아니라 시냅스 손상과 인지 기능 회복 저하가 예상되고 있다. 이 같은 현 알츠하이머 병 치료 전략의 문제점들을 극복하고자 본 연구에서는 Gas6라는 세포 제거에 관련된 단백질을 인위적으로 조작하여, 베타 아밀로이드를 표적으로 하는 새

A novel therapeutic approach for Alzheimer's disease without inflammatory side effects

로운 융합단백질을 제작하였다. Gas6는 우리 몸에서 자연적으로 죽은 세포들을 제거하는 과정을 매개하고 하고 있는데, 이러한 현상은 항염증 효과를 통해 조직의 항성성 유지에 필수적임이 잘 알려져 있다. 따라서 Gas6 단백질의 죽은 세포를 인지하는 부위를, 항체의 베타 아밀로이드를 표적하는 부위로 교체함으로써, 선택적으로 베타 아밀로이드를 제거하면서 항염증 효과를 가진 융합단백질(anti-Abeta-Gas6)를 제작 및 생산한 것이다. 이 융합단백질은 아두카누맙과 같은 기존의 항체 치료제가 가지는 면역반응에 의한 염증작용을 유발하지 않으면서도, 알츠하이머 질병 쥐 모델에서 뇌 안에 쌓여있는 베타 아밀로이드를 효과적으로 감소시켰다. 뿐만 아니라, 항체 치료제의 부작용을 유발하는 혈관에 쌓인 베타 아밀로이드를 뇌 미세혈관출혈 없이 유의미하게 줄였으며, 또한 알츠하이머 병에서 무분별하게 일어나는 미세아교세포에 의한 시냅스 제거 현상도 현격하게 억제하는 효과를 나타내었다. 이 같은 다양한 장점들로 인해 Gas6 융합단백질은 항체 치료제보다도 더 효과적으로 알츠하이머 질병 쥐 모델의 인지 기능을 개선하는 것으로 나타났다.



기대효과

Gas6 융합단백질은 다양한 뇌질환에서 뇌 안의 침착을 보이는 독성 물질을 염증 반응 없이 선택적으로 제거 가능한 다목적 플랫폼이다. 이러한 형태의 치료제 플랫폼은 알츠하이머 질병뿐만 아니라 다양한 퇴행성 신경질환 및 자가 면역질환에도 적용될 수 있을 것으로 예상된다.

연구성과

- [논문] Jung H, Lee SY, Lim S, Choi HR, Choi Y, Kim M, Kim S, Lee Y, Han KH, Chung WS, Kim CH. "Anti-inflammatory clearance of amyloid- by a chimeric Gas6 fusion protein," *Nature Medicine* 2022 Sep;28(9):1802-1812
- [홍보] *Nature Medicine Research Briefing*, C&EN, Science Daily 등 주요 과학 외신 및 국내 언론에 다수 소개
- [창업 · 기술이전] 관련 특히 기반으로 바이오벤처 (주)일리미스 테라퓨틱스 창업 및 기술이전

연구비 지원

- KAIST 글로벌 특이점사업(프렙과제)
- 치매극복연구개발사업단

사람처럼 느끼고 상처 치유가 가능한 로봇 피부 기술 개발

연구책임자 | 김정 소속학과 | 기계공학과 참여연구원 | 박경서, 양민진, 조준휘

연구실 홈페이지 | <http://biorobotics.kaist.ac.kr>

본 연구에서 로봇 피부는 피부의 다층구조를 생체 모방하여 넓은 영역에 대해 외부 충격으로부터의 회복력과 유연함을 제공한다. 동시에 인간과 같은 넓은 대역의 촉각을 실시간으로 감지하고 국지화가 가능하다. 또한 깊게 찢어지거나 베여도 절상부위 외 영역에서 촉각 감지 능력이 유지될 뿐만 아니라, 피부의 구조적 특성 및 촉각 감지 기능까지 절단 이전 상태의 수준으로 손쉽게 회복이 가능하다. 이에 인간형 로봇이나 서비스 로봇과 같이 사람과의 다양한 접촉과 상호작용이 필요한 분야와 인간형 의수/의족 피부로 활용이 기대된다.

연구배경

사람의 피부는 외부 충격으로부터 내부를 보호함과 동시에 물리적 자극을 전달하는 통로이며, 피부를 이용한 정보 전달은 풍부한 비언어적 감정 표현과 교류를 가능하게 한다. 그러나 비약적인 기술 발전에도 불구하고 대부분의 로봇은 딱딱한 소재의 외피를 가지며 인간과의 물리적 상호작용은 터치스크린과 같은 특정한 부위로 제한하고 있다. 이는 현재의 로봇 촉각 기술로는 인간의 피부와 같은 부드러운 물성과 복잡한 3차원 형상을 가지면서 동시에 섬세한 촉각 정보를 수용하는 로봇 피부 개발이 어렵기 때문이다.

연구내용

본 연구는 인간의 피부 구조 및 촉각 추정 원리를 생체 모사한 하이드로겔-엘라스토머 구성의 다층구조와 단층촬영 기법 기반의 로봇 피부 기술을 제안한다.

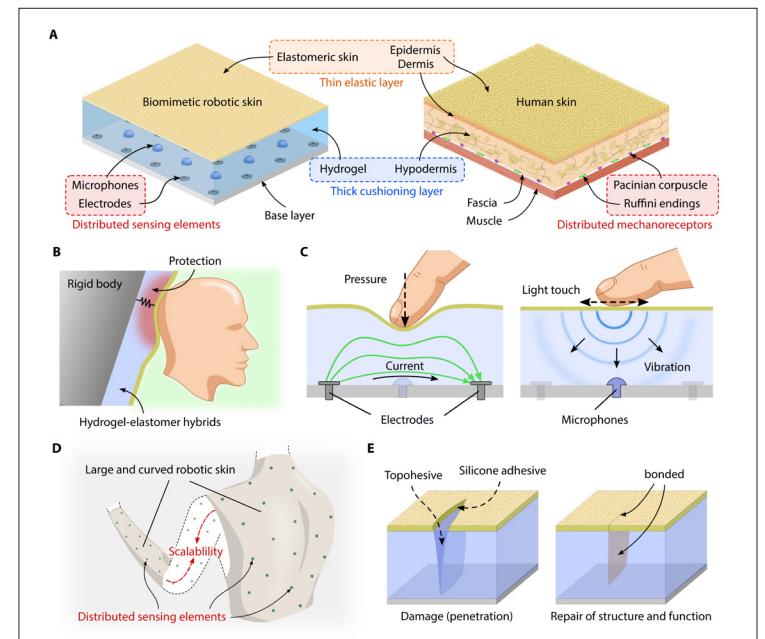
하이드로겔과 실리콘 엘라스토머로 구성된 로봇 피부는 사람 피부의 다층구조를 모방하여 외부 충격으로부터의 회복력과 유연함을 제공한다. 실리콘 외피는 실제 인간의 표피 및 진피와 같이 얇은 탄성 외피의 역할을 하고, 내부의 하이드로겔은 인간의 피하지방과 같이 두꺼운 쿠셔닝 레이어로써 로봇 뿐 아니라 이와 상호작용하는 사람 또한 충격 흡수 기능으로 안전함을 보장할 수 있다.

또한 사람 피부의 물성 뿐 아니라 정적 압력 및 동적 진동을 감지하는 촉각 감지능력도 생체를 모방하여 구현하였다. 촉각을 구현하는 기계수용기인 루피니 소체, 파치니안 소체는 분산 배치되어 각각 촉각 자극의 저주파수인 정적 압력과 고주파수인 동적 진동을 감지하도록 했다. 분산배치된 금속전극을 활용한 전기임피던스 단층촬영기법(Electrical impedance tomography) 및 콘덴서 마이크를 활용한 수동음향 단층촬영기법(Passive acoustic tomography)을 기반으로 넓은 수용영역을 갖는 측정 요소들을 겹치게 배치해 적은 수의 측정 요소만으로도 3차원 넓은 표면에서의 정적 압력과 동적 진동을 실시간으로 감지하고 국지화가 가능하다. 촉각 신호는 인공지능 신경망으로 처리함으로써, 인간 피부수준의 높은 정확도로 자극 국지화 성능 구현 및 합성곱 신경망(Convolutional neural network)을 기반으로 일상생

A biomimetic elastomeric robot skin using electrical impedance and acoustic tomography for tactile sensing

활에서의 대표적 촉각 자극 종류인 누르기, 쓰다듬기, 두드리기 등의 자극 종류를 분류할 수 있다.

본 로봇 피부는 분산배치된 금속 전극 및 콘덴서 마이크 구조와 하이드로겔-엘라스토머 복합층으로 구현되어 있어 깊게 찢어지거나 베여도 절상부위 외 영역에서는 촉각 감지 능력이 유지될 뿐만 아니라, 피부의 구조적 특성 및 촉각 감지 기능은 절단 이전 상태로 손쉽게 회복이 가능하다. 사람 피부와 같은 물성 제작으로 의수 형태의 로봇 피부 구현에 성공하였다.



로봇 피부를 위한
생체 모방 다층 구조의 개념

기대효과

본 연구에서 제안하는 로봇 피부 기술은 정교한 촉각 뿐만 아니라 사람의 피부처럼 부드러운 물성을 가지며 대면적의 복잡한 3차원 형상을 덮을 수 있어, 인간형 로봇이나 서빙 로봇 등 서비스 로봇과 같이 사람과 다양한 접촉과 상호 작용이 필요한 분야에 유용하게 활용될 것으로 기대한다. 더 나아가, 로봇 피부를 의수/의족의 피부로 사용한다면 실제 사람의 손 및 다리와 똑같은 외형과 촉감 감각을 절단 환자들에게 제공할 수 있으며, 인간형 로봇에게는 사람과 같은 기능과 외형의 피부를 가지며 상처가 나더라도 피부 기능을 복구하는 치유능력을 갖게 할 수도 있다.

연구성과

- [논문1] Park, K., et al. "A biomimetic elastomeric robot skin using electrical impedance and acoustic tomography for tactile sensing." *Science Robotics* 7.67 (2022): eabm7187.[2020 Impact Factor = 23.748]
- [논문2] Park, Kyungseo, and Jung Kim. "Neural-Gas Network-Based Optimal Design Method for ERT-Based Whole-Body Robotic Skin." *IEEE Transactions on Robotics* (2022). [2022 Impact Factor = 6.835]
- [특허] "Tactile sensor, and tactile stimulation sensing method using the same, and robot skin and robot comprising the same"(US, PCT, JP 출원, 국내특허등록번호:10-2443421)
- [수상] 2022 휴먼테크논문대상 은상 수상

연구비 지원 ■ 한국연구재단 중견연구자지원사업

수면 조절을 위한 페루프 초음파 자극 기술 개발

연구책임자 | 이현주 소속학과 | 전기및전자공학부 연구실 홈페이지 | <http://bmm.kaist.ac.kr>

참여연구원 | 조예현, 이상목, 정태섭, 박기재, 이찬희, 임근호, 이성주, 박진수, 오채린, 국건, 김형국, 김성연, 이병철, 서성배, 김성기, 김정연

기존 신경 자극과는 달리 초음파는 수술 없이 뇌 심부의 국소적인 작은 영역까지도 자극할 수 있어 차세대 치료 기술로 주목 받고 있다. 신경 자극의 효능을 확인하기 위해 생체신호 측정과 행동 관찰이 필요한데, 기존의 자극기술로는 질병 모델이 많이 존재하는 소형 동물에 적용하는 것이 어렵다. 본 연구에서 개발한 초음파 자극 시스템은 초음파로 소형 동물의 뇌를 비침습적으로 자극하고, 동시에 뇌파를 측정하여 특정 수면 상태에서만 뇌를 조절할 수 있다. 실시간 페루프 시스템을 이용하여 비 급속 안구 운동 (NREM) 수면 시 전전두엽 (PFC)을 실시간으로 자극하여 수면 및 단기 기억력 조절이 가능함을 밝혔다. 본 기술은 초음파 뇌 자극의 효과를 평가하는데 널리 활용되어 수술 없이 비침습적으로 뇌 질환을 조절하는데 큰 역할을 할 것으로 기대된다.

연구배경

기존 신경 자극과는 달리 초음파는 수술 없이 뇌 심부의 국소적인 작은 영역까지도 자극할 수 있기 때문에, 저 강도 접촉 초음파 치료 기술이 주목받고 있다. 최근 저강도 접촉 초음파 기술의 치료 효과와 유효성에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 초음파를 뇌 또는 인체에 조사하였더니, 알츠하이머병, 파킨슨병, 간질, 비만, 관절염 등이 호전되는 연구들이 다수 발표되고 있다. 신경 자극의 효능을 확인하기 위해 생체 내 신호 측정과 행동 관찰이 필요한데, 기존의 초음파 시스템으로는 질병 모델이 많이 존재하는 소형 동물에 적용하는 것이 불가능하다. 기존의 초음파 자극 기술은 부피가 커서 움직이는 생쥐에 사용이 불가능하고, 작동할 때 생기는 잡음 신호로 동시 전기 생리 신호 측정이 어렵다. 생쥐처럼 작은 동물에서 장기간으로 초음파 자극을 주면서 생체 내 반응을 실시간으로 측정하는 시스템이 존재하지 않아, 동물에 인가되는 초음파 자극 실험은 통상적으로 짧게 자극 후 즉각적인 반응을 보거나 마취 상태에서 여러 차례 자극을 인가하고 장기적인 반응을 본 연구들이 주를 이루고 있다.

연구내용

이번 연구에서 개발한 초음파 자극 시스템은 초음파로 소형 동물에서 비침습적으로 뇌를 자극하고, 동시에 뇌파를 측정하여 뇌를 조절할 수 있는 시스템이다. 초음파 자극 소자는 미세 전자 기계 시스템(MEMS, Micro Electro Mechanical Systems)의 실리콘 공정을 활용하였기 때문에 매우 정밀하고 초소형으로 제작이 가능하며 대량생산이 가능하다. 따라서, 개발된 초소형 초음파 자극 및 뇌파 측정 시스템은 기존의 마취가 필요한 시스템과는 달리 자유롭게 행동하는 쥐에 장기간 동안 동시 자극과 측정이 가능하다(그림 1).

수면 상태에 따라 실시간으로 초음파 뇌 자극이 가능한 해당 페루프 기술을 이용하여, 비 급속 안구 운동 (NREM, Non-rapid-eye Movement) 수면 시 전전두엽 (PFC, Prefrontal cortex)을 실시간으로 자극하여 수면 및 단기 기

Closed-loop ultrasound brain stimulation for sleep modulation

억력 조절이 가능함을 밝혔다. 개발한 페루프 자극 알고리즘은 6초 단위로 수면 단계를 실시간으로 분석해서 비 급속 안구 운동 (NREM) 수면 단계일 때 초음파 자극을 전달한다. 이 시스템은 잡음 신호 없이 자극과 측정이 동시에 가능하다(그림 2). NREM 상태 시 10시간 동안 수면 박탈 쥐의 전전두엽을 자극한 결과, 단기 공간 기억력이 보호되고 급속 안구 운동(REM) 수면량이 증가됨을 보였다(그림 3.).

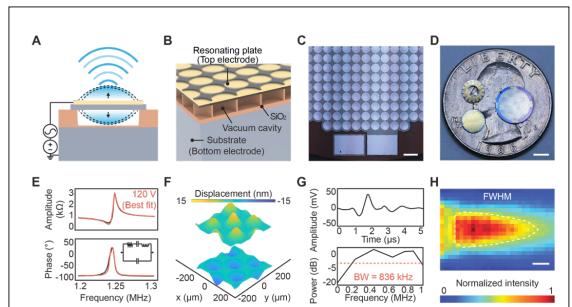


그림 1. 초경량 MEMS기반의 초음파 소자

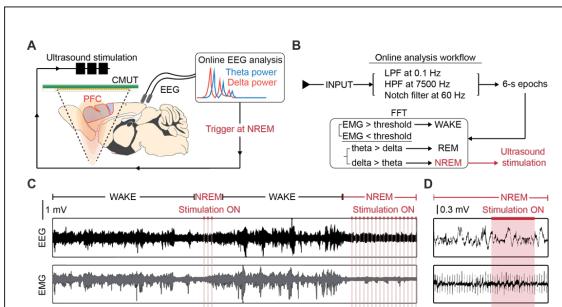


그림 2. 페루프 뇌 자극 시스템

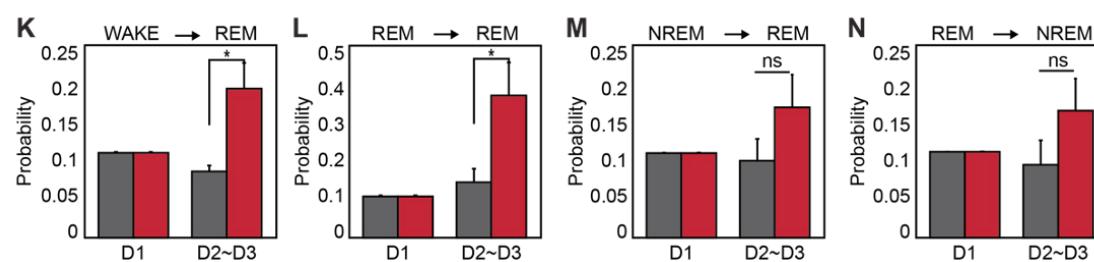


그림 3. 수면 조절 결과

기대효과

본 연구에서 개발된 초소형 초음파 자극 및 뇌파 측정 시스템은 기존의 마취가 필요한 시스템과는 달리 자유롭게 행동하는 쥐에 장기간 동안 동시 자극과 측정이 가능하다. 따라서, 초경량의 해당 시스템을 향후 다양한 뇌 질환 동물 모델에 적용한다면, 여러 뇌 질환에 대한 초음파 뇌 자극 효과를 평가할 수 있고, 수술 없이 비침습적으로 수면 질환, 알츠하이머병, 파킨슨병 등 뇌 질환 치료의 길이 열릴 것으로 기대된다.

연구성과

- [논문] General-purpose ultrasound neuromodulation system for chronic, closed-loop preclinical studies in freely behaving rodent, Advanced Science, 2022
- [특허] Method for stimulating, and apparatus performing the same, US 11241592 B2
- [홍보] Advanced Science Research Headline 선정 및 인터뷰
 - <https://www.eurekalert.org/news-releases/968076>
 - <https://www.advancedsciencenews.com/general-purpose-ultrasound-therapy-also-monitors-brain-activity-in-real-time/>
- [수상] 2022년 과기정통부장관 표창 수상, 2022년도 제4회 에쓰-오일 차세대과학자상 수상

연구비 지원 ■ 한국연구재단 차세대지능형반도체사업

악성 유방암 세포를 치료 가능한 상태로 되돌리는 암세포 리프로그래밍 기술 개발

연구책임자 | 조광현 소속학과 | 바이오및뇌공학과 참여연구원 | 최새롬, 황채영, 이종훈

연구실 홈페이지 | <http://sbie.kaist.ac.kr>

인간 세포의 암화는 지금까지 비가역적 생명현상으로 여겨졌다. 특히 유방암 세포의 분화과정에서 암화가 진행될수록 더욱 악화되어 전이를 유발할 수 있다고 알려져 있는데 본 연구에서는 유방암에서 이를 가역화할 수 있는 암가역화 원천기술을 세계 최초로 개발하였다. 이를 위해 본 연구자는 인간 유방암 특이적 유전자 네트워크의 수학모델을 개발하고 네트워크 제어기술을 통해 HDAC1/2 (histone deacetylase 1/2) 와 BCL11A (BAF chromatin remodeling complex subunit) 를 암가역화 타겟으로 발굴하였다. 또한, 이를 분자 세포실험 및 수학적 모델의 컴퓨터시뮬레이션 분석을 통해 삼중음성 유방암세포에서 HDAC1/2와 BCL11A를 억제했을 때 세포의 분열이 감소하고, 호르몬 치료가 가능한 루미날-A 유방암세포로 변환되는 것을 확인하였다. 특히 이 리버스컨트롤 기술은 (주)바이오리버트 사에 기술이전 되어 치료가 불가능한 악성유방암을 치료 가능한 상태로 리프로그래밍 시키기 위한 약물로서 개발 중이다.

연구배경

암은 대표적 만성 난치성 질환으로 그 사회경제적 비용이 매우 크며, 특히 서구화된 식습관, 비만 등으로 인해 최근 암 발병률 및 이로 인한 사망이 급증하고 있다. 더욱이 인구의 급격한 고령화에 따라 암환자의 발생 및 사망이 더 가파르게 증가하고 있다. 현재 삼중음성 유방암 (basal-like or triple negative) 환자들에게 적용되는 항암 화학요법은 빠르게 분열하여 전이를 일으키는 암세포를 공격해 죽임으로써 암세포의 증식을 억제하는 방식이다. 하지만 이러한 치료는 신체 내 정상적으로 분열하고 있는 세포들까지도 함께 사멸시켜 심각한 부작용을 일으킨다. 또한 삼중음성 유방암세포들은 이와 같은 독성항암제에 처음부터 내성을 갖거나 또는 새로운 내성을 획득하면서 결국 약물에 높은 저항성을 가지는 암세포로 진화하게 된다. 따라서 삼중음성 유방암에 대한 현재의 항암치료는 내성을 갖는 암세포를 없애기 위해 더 많은 정상세포의 사멸을 감수해야만 하는 큰 한계를 지니고 있다. 이로 인해 암세포의 약물내성 획득으로 인한 암의 재발 및 정상세포 사멸 등의 부작용을 피할 수 없기 때문이다. 이러한 이유로 새로운 개념의 치료원리를 개발하는 것이 절실한 실정이다.

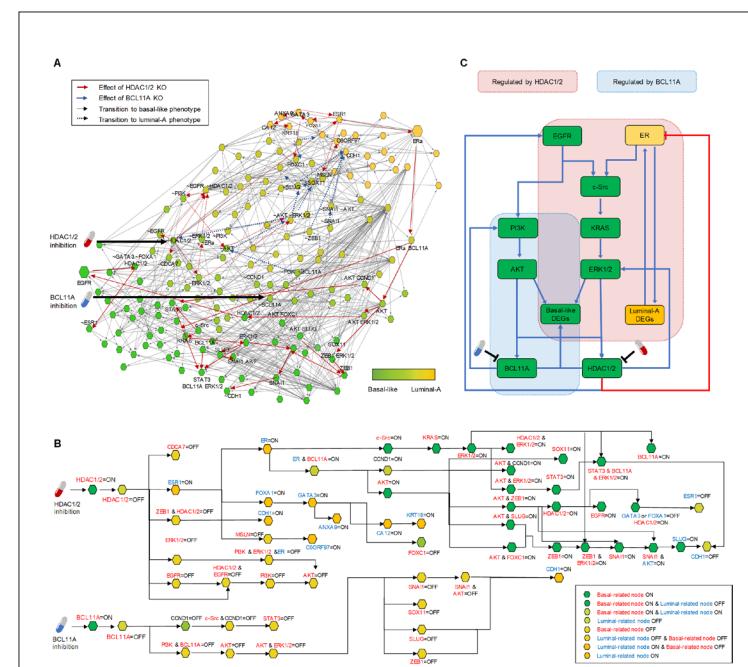
연구내용

본 연구자는 유방암 아류 중에서 가장 악성으로 알려진 삼중음성 유방암 환자들과 호르몬 치료가 가능한 루미날-A 유방암(luminal-A) 환자들의 유전자 네트워크를 컴퓨터시뮬레이션을 통해 분석함으로써 삼중음성 유방암세포를 루미날-A 유방암세포로 변환하는데 필요한 핵심 인자를 규명하고, 이를 조절해 삼중음성 유방암세포를 루미날-A 유방암세포로 리프로그래밍한 뒤 호르몬 치료를 시행하는 새로운 치료 원리를 개발했다. 이를 위해 유전자 네트워

Development of cancer reversion technology to reprogram malignant breast cancer cells into endocrine therapy vulnerable cells

크의 수학모델을 개발하고 대규모 컴퓨터시뮬레이션 분석과 복잡계 네트워크 제어기술을 적용한 결과 두 개의 핵심 분자 타겟인 'BCL11A'와 'HDAC1/2'를 발굴했다.

본 연구자는 삼중음성 유방암세포에서 이 핵심 인자들을 억제했을 때 세포의 분열이 감소하고, 삼중음성 유방암세포의 주요 세포성장 신호 흐름 경로인 'EGFR'과 관련된 인자들의 활동이 감소했으며, 루미날-A 유방암세포의 주요 세포성장 신호흐름 경로인 'ERα' 신호전달 경로 인자들의 활성이 회복되는 것을 확인했다. 이러한 결과는 치료가 불가능한 악성종양을 치료 가능한 상태로 리프로그래밍시켰다는 의미에서 리버스컨트롤의 가능성을 제시해주었다.



대규모 컴퓨터 시뮬레이션 분석과 복잡계 네트워크 제어기술 적용을 통한 리프로그래밍 분자타겟 발굴.

악성 유방암세포를 호르몬 치료가 가능한 루미날-A유방암세포로 리프로그래밍하기 위한 핵심인자로서 BCL11A와 HDAC1/2를 발굴하였다. 또한 구축한 수학모델과 대규모 시뮬레이션 분석을 통해 이러한 핵심인자들이 (HDAC1/2: 빨간색 약으로 표시; BCL11A: 파란색 약으로 표시) 분자네트워크의 다른 유전자들에게 어떻게 영향을 주는지 신호흐름 경로를 파악하여 삼중음성 유방암세포가 루미날-A 세포로 리프로그래밍되는 메카니즘을 상세히 파악할 수 있었다 (그림 A와 B).

기대효과

대규모 유전체 데이터를 기반으로 시스템생물학 접근방식을 통해 악성 유방암세포를 호르몬 치료가 가능한 암세포로 리프로그래밍하여 변환시키는 치료전략은 지금까지 시도된 바 없으며, 이번 연구에서 개발된 원천기술은 유방암뿐 아니라 다른 여러 암종에 대해서도 적용 가능하여 향후 다양한 암종에서 현재 항암치료가 가지고 있는 부작용 및 한계를 극복해갈 수 있을 것으로 기대된다.

연구성과

- [논문] S. R. Choi, C. Y. Hwang, J. Lee & K.-H.Cho, Network analysis identifies regulators of basal-like breast cancer reprogramming and endocrine therapy vulnerability. *Cancer Research* 82 (2), 320–333 (2022). [2022 Impact Factor =13.312].
- [특허] Pharmaceutical Composition for Treating or Preventing Breast Cancer, PCT No. PCT/KR2022/001622 (Jan. 28, 2021)
- [기술이전] (주)바이오리버트 사에 기술이전 (2022년 4월)
- [수상] 기초연구진흥 유공자 표창 (과학기술정보통신부 장관상) (2022년 4월)

연구비 지원

- 한국연구재단 중견연구자지원사업 ■ KAIST 그랜드챌린지 30 (KC30) 프로젝트
- 한국전자통신연구원 연구운영지원사업 [20ZS1100, 자율성장형 복합인공지능 원천기술 연구]

mRNA 암백신 핵심기술 개발

Neoantigen identification for mRNA cancer vaccine

연구책임자 | 최정균 소속학과 | 바이오및뇌공학과 참여연구원 | 김정연

연구실 홈페이지 | <http://omics.kaist.ac.kr>

암세포에서 발생하는 수많은 돌연변이 중 일부는 MHC라 불리는 단백질과 결합되어 peptide-MHC complex를 형성하며, 이 복합체가 T세포 수용체 (T cell receptor)를 자극하여 면역반응이 유도되는 경우 이를 신생항원이라 한다. 본 연구에서는 치료 효과가 있는 암백신 개발을 위해서 각 암환자의 수많은 돌연변이 중 해당 환자의 MHC와 유전학적으로 일치하고 T세포 수용체를 자극할 수 있는 타겟을 도출하는 기술을 개발한다.

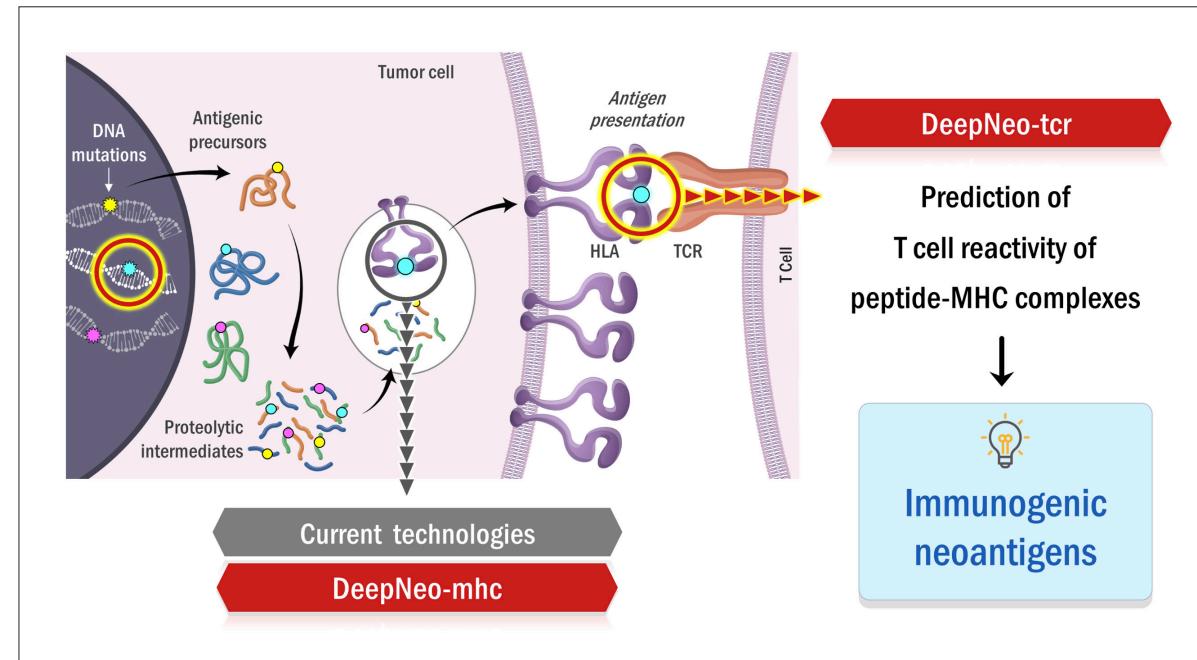
연구배경

신생항원이란 암세포의 돌연변이에서 나온 단백질 조각이 해당 환자의 MHC (HLA)와 결합하여 세포표면에 도출되는 항원을 의미하는데, 정상세포에서는 나타나지 않는 암특이성으로 인해 이상적인 백신 타겟으로서 많은 기대를 받고 있다. 모더나 및 바이오엔텍은 신생항원 백신용으로 개발하던 mRNA 플랫폼을 이용하여 COVID-19 백신을 성공적으로 개발한 바 있으며 현재 다수의 신생항원 백신 임상시험을 진행하고 있다.

암세포에서 발생하는 수많은 돌연변이 중 일부는 MHC라 불리는 단백질과 결합되어 peptide-MHC complex를 형성하며, 이 복합체가 T세포 수용체 (T cell receptor)를 자극하는 경우 우리 몸의 면역반응이 유도된다. 치료 효과가 있는 암백신 개발을 위해서는 각 암환자의 수많은 돌연변이 중 해당 환자의 MHC와 유전학적으로 일치하고 T세포 수용체를 자극할 수 있는 타겟을 도출해야 한다. 그러나 현재의 신생항원 밸굴은 돌연변이 단백질과 MHC (HLA) 단백질 간의 물리적 결합을 예측하는 데에만 주로 한정되어 있으며, 실제로 이 복합체가 T세포 수용체와 결합하여 몸의 면역반응을 자극할 수 있는지에 대해서는 미지수로 남아 있다.

연구내용

본 연구에서는 우선 돌연변이가 나타난 유전자들이 암세포의 생존에 필수적인지를 딥러닝 기반으로 예측하는 DeepDependency 알고리즘을 통하여, 암세포가 의존 (depend) 하는 유전자로부터 나오는 신생항원일수록 암세포의 면역회피를 피할 수 있는 좋은 타겟이 될 수 있음을 대규모 면역치료 환자 데이터로부터 밝혀냈다. 또한 DeepNeo라는 알고리즘을 통하여 신생항원-MHC 복합체가 실제로 T 세포 면역반응을 유도할 수 있는지를 예측하는 방법을 개발하였으며, 대규모 암환자 데이터, 면역치료 환자 데이터, *in vitro* 및 동물실험 등을 통하여 검증하였다. 이 방법론은 T 세포 반응성을 예측할 수 있는 최초 기술일 뿐만 아니라, 현재 기술의 한계점인 MHC class II에 대한 예측 정확도를 획기적으로 향상시켰다는 점에서 중요하다.



세포의 DNA에서 발생한 돌연변이가 MHC (HLA)와 결합하고 T세포 수용체 (TCR)를 자극하는 과정. TCR 자극을 예측하는 난제를 해당 기술에서 해결하였다.

기대효과

최근 전세계적인 관심을 받고 있으며 활발한 임상시험이 진행되고 있는 mRNA 암백신 개발에 있어서 핵심적인 단계인 환자 맞춤형 신생항원 타겟 발굴 과정에서 활용될 수 있는 핵심 원천기술로 사용될 것으로 기대된다.

연구성과

■ [논문] J.Y. Kim, H. Cha, K. Kim, C. Sung, J. An, H. Bang, H. Kim, J.O. Yang, S. Chang, I.C. Shin, S.J. Noh, I.K. Shin, D.Y. Cho*, S.H. Lee*, J.K. Choi*, "MHC II immunogenicity shapes the neoepitope landscape in human tumors," *Nature Genetics*, 55, 221-231 (2023) [2021 Impact Factor = 41.379].

연구비 지원

■ 한국연구재단 바이오의료기술개발사업

미생물 이용한 루테인 생산 기술 개발

Metabolically Engineered Bacterium Produces Lutein

연구책임자 | 이상엽 소속학과 | 생명화학공학과

참여연구원 | 박선영, 은현민, 이문희

연구실 홈페이지 | <http://mbel.kaist.ac.kr>

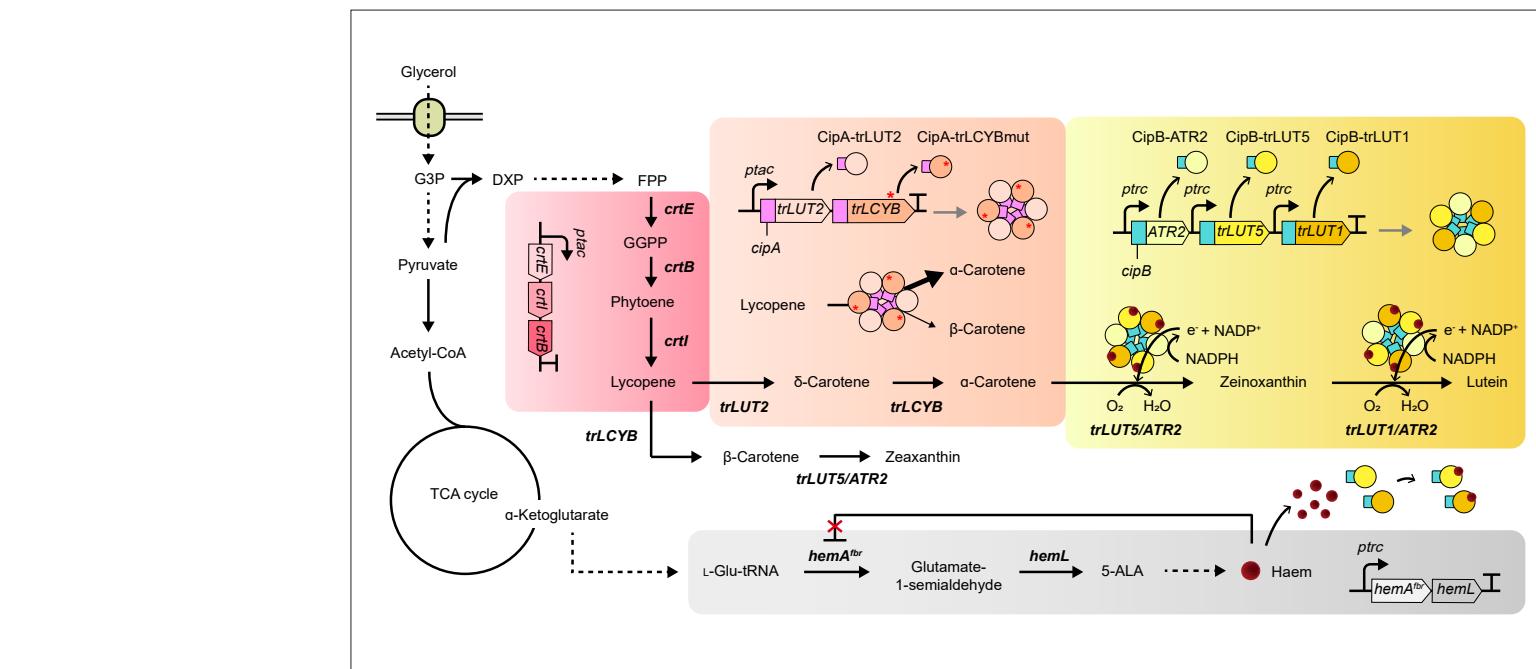
본 연구팀에서는 '루테인을 생산하는 미생물 균주 개발'에 성공하였다. 루테인(lutein)은 눈을 산화 손상과 자외선으로부터 보호하며, 주로 계란의 난황과 과일 등에 함유된 영양물질이다. 루테인은 노안, 백내장 등의 예방 및 치료 효과가 있어 눈 영양제로 많이 판매되며, 이외에도 화장품과 동물사료에도 사용되고 있다. KAIST 이상엽 특훈교수 연구팀은 미생물의 대사회로를 조작하는 기술인 대사공학을 이용해 대장균 내 루테인 생산 대사회로를 구축했으며, 이로써 값싼 바이오매스의 주원료인 글리세롤을 탄소원으로 사용해 고부가가치의 루테인을 생산하는 대장균 균주를 개발했다고 연구팀 관계자는 설명했다. 연구팀은 개발한 대장균 균주에 추가로 시스템 대사공학 기술과 대사회로의 전자 채널링 전략을 도입함으로써 대장균으로부터 루테인을 고효율로 생산할 수 있는 기술 개발에 성공했다.

연구배경

디지털 기기의 사용량이 급증함에 따라 안구질환도 함께 증가하는 추세이며, 눈 건강 관리에 대한 필요성이 증가하였다. 눈 건강을 위한 영양제로 잘 알려진 루테인은 잔토필(Xanthophyll) 계열의 황반색소로서 눈을 산화 손상과 자외선으로부터 보호하며, 주로 계란의 난황과 과일 등에 함유되어 있다. 루테인은 노안, 백내장 등의 예방 및 치료 효과가 있어서 눈 영양제로 많이 판매되며, 이외에도 화장품과 동물사료에도 사용되고 있다. 현재 시장에 공급되는 루테인은 금잔화 꽃에서 추출된 형태로 판매되고 있지만, 이는 대지, 재배, 노동이 많이 요구된다는 한계가 있다. 루테인 대량생산을 위한 화학적 합성 방법도 제시되어 왔지만 비대칭 화학 구조와 다양한 이성질체의 존재로 인해 이 또한 비효율적이다. 따라서 본 연구팀은 위와 같은 문제를 해결하기 위하여, 값싼 탄소원인 글리세롤을 이용하여 루테인을 미생물로부터 고효율로 생산하는 방법 개발 연구를 수행하게 되었다.

연구내용

그동안 미생물 내 대사회로를 조작하여 루테인을 생산하고자 하는 연구들이 많이 이루어져 왔지만, 루테인 외의 부산물이 많이 생산되었기에 특정량 이상의 루테인을 생산할 수 없었다. 이는 루테인 생산쪽으로의 대사 흐름을 강화하는 단계가 주 병목 단계인 것으로 파악되었다. 본 연구진은 루테인 생산 경로 상의 병목 단계로 파악되는 대사반응에 기질 채널링과 전자 채널링 전략을 도입하였다. 효소들을 스캐폴드화 하여 세포 내 효소 주변의 기질들과 전자들의 농도를 높일 수 있는 기질 채널링 및 전자 채널링 효과를 만들었으며, 그 결과 루테인 생산을 위한 대사 흐름이 강화되면서 대장균을 이용하여 루테인을 고효율로 생산하는 데 성공했다. 이번 연구를 통해 폐목재, 잡초 등의 산업공정의 부산물로 생산되는 값싼 바이오매스인 글리세롤을 탄소원으로 사용해 루테인을 고효율로 생산하는 대장균 균주를 개발하였다.



루테인 생합성 경로 개요도

루테인 대사경로 내 기질 채널링과 전자 채널링 시스템을 도입하여 대장균으로부터 고효율로 루테인을 성공적으로 생산할 수 있다.

기대효과

본 연구진이 위와 같이 개발한 기질채널링과 전자 채널링기술은 루테인 생산뿐만 아니라 다른 천연물의 생산에도 널리 적용될 수 있는 대사공학 원천 기술이다. 특히, 본 연구 성과는 합성 생물학, 효소공학, 발효공정공학 등이 융합되어 나타난 결과로써 고부가가치 산물의 고효율 생산뿐만 아니라 최첨단 대사공학 학문의 발전에 기여하였다는 점에서 의미가 크다. 기존의 바이오 공학 기술을 이용하여 루테인을 생산해낼 수 있었으나 산업화를 위한 한계를 넘어서는 것이 불가능하였다. 본 연구는 통해 루테인 생산량을 획기적으로 끌어올려 산업화를 위한 발판을 마련하였으며. 그뿐만 아니라 생활에 유용하게 활용될 수 있는 다른 카로티노이드 계열의 물질들을 발굴하여 생산하여 미생물 세포공장을 통한 지속 가능한 카로티노이드 생산 공정의 산업화를 가시화 할 수 있으리라 기대된다.

연구성과

- [논문] Park S.Y., Eun, H., Lee, M.H., and Lee, S.Y., Metabolic engineering of *Escherichia coli* with electron channeling for the production of natural products. *Nature Catalysis* 5(8), 726-737 doi: 10.1038/s41929-022-00820-4 (2022) [2022 Impact factor = 41.813]
- [특허] 루테인 고생산능을 가지는 재조합 미생물 및 이를 이용한 루테인 생산 방법, 대한민국 특허등록, 10-2021-0005806 (2023. 03. 06)
- [홍보] KBS 지상파 TV, 경향신문, 부산일보, 인터넷신문 등 30여건, 해외홍보 9건

연구비 지원

- 과학기술정보통신부 기후환경연구개발사업 (바이오화학산업 선도를 위한 차세대 바이오리파이너리 원천기술 개발)
- 농촌진흥청, 농업미생물사업단 (카로티노이드 생산 미생물 세포공장 개발)

신축성 인쇄 전자회로 기판 구현을 위한 액체 금속 입자 네트워크 개발

연구책임자 | 강지형 소속학과 | 신소재공학과 연구실 홈페이지 | <https://www.jiheongkanglab.com/>

참여연구원 | 이원범, 김현준, 강인호, 박홍준, 정지영, 이해승, 박현창, 박지수, 육종민, 류승화, 정재웅

신축성 전자기기의 실현을 위해서는 고집적 전자기기 제작의 바탕이 되는 신축성 인쇄회로기판이 요구된다. 기존 연구는 늘어나면 저항이 변하는 재료의 한계로 인해 구조 공학을 이용해 신축성 인쇄회로기판을 구현했으나, 이는 신축성이 제한되고 전자 부품의 밀도가 줄어든다는 한계가 있다. 본 연구에서는 초음파를 이용하여 고분자 내에서 액체금속 입자를 조립시켜 전도성 네트워크를 형성해 신축과정에서 저항이 변하지 않는 전극을 개발했고, 이를 이용해 세계 최초로 구조 공학 없이 신축성 인쇄회로기판을 구현했다.

연구배경

최근 체내 삽입형 전자소자, 웨어러블 전자소자, 소프트 로보틱스 등에 관한 관심이 증가하면서 우수한 신축성 및 전기적 성질을 갖는 신축성 전자기기에 관한 다양한 연구가 진행됐다. 이의 실현을 위해서는 고집적 전자기기 제작의 바탕이 되는 신축성 인쇄 회로 기판이 요구된다. 최근 신축성 인쇄 회로 기판 재료로 액체금속이 큰 관심을 받게 됐다. 액체금속은 상온에서 액체의 형태를 띠는 금속으로, 높은 전기전도성과 액체와 같은 자유로운 변형성으로 인해 신축성 전자소자에 사용하기에 적합한 재료로 평가를 받는다. 하지만 액체 상태가 갖는 외부 충격에 대한 불안정성으로 인해 실제 인쇄 회로 기판의 배선으로 사용하는 것에 한계가 있었다.

연구내용

본 연구에서는 입자 간 연결이 형성되지 않은 액체금속 입자-고분자 복합체를 물 속에서 초음파를 가해줌으로써 마이크로 크기의 액체금속 입자 사이에 나노 입자를 형성하여 고분자 지지체 내에서 액체금속 입자들을 조립시켜 전도성 네트워크를 형성했다.

만들어진 네트워크는 거의 결함이 없는 수준의 전도성 네트워크를 형성하기에 이론상 가능한 최대에 근접하는 수준의 전기 전도도를 갖는다. 또한 만들어진 전도성 네트워크는 재료를 늘렸을 때에도 거의 저항이 변하지 않는다. 이는 네트워크를 구성하고 있는 입자 크기의 차이에 기인한다. 마이크로 크기 입자의 경우 외부의 인장이 가해지면 형태가 변하려는 액체의 성질이 주도적으로 작용해 늘어나지만, 나노 크기의 입자는 액체의 성질보다 원래의 형태를 유지하려는 표면장력이 더 주도적으로 작용해 거의 형태가 변하지 않고 구체의 형태를 유지하게 된다. 이러한 메커니즘으로 인해 재료를 늘렸을 때에도 마이크로 크기의 입자는 형태가 늘어나고 작은 크기의 입자는 원래의 형태를 유지함으로써 액체금속 입자 간 거리가 유지돼 전자가 흐를 수 있는 전도성 네트워크가 유지되어 앞서 언급한 것과 같이 저항이 변하지 않게 된다(그림 1). 뿐만 아니라 액체 금속 입자 네트워크를 둘러싸고 있는 고분자의 역할로 인해 재료가 우수한 기계적 성질(hightoughness)을 갖기에 순수한 액체금속의 경우와 달리 cohesive failure로부터 자

Universal assembly of liquid metal particles in polymers enables elastic printed circuit board

유로워 적절한 고분자와 표면을 이용함으로써 다른 재료와 우수한 접착성을 부여할 수 있다. 더불어 우수한 기계적 성질로 인해 외부에서 충격이 가해져도 재료에 손상이 가해지지 않고 뛰어난 전기적 성질을 유지할 수 있다. 이러한 액체금속 입자 네트워크는 기존의 액체금속 입자-고분자 복합체에 물리적 손상을 가해서 만들었던 기존의 통념을 벗어난 새로운 접근법으로, 초음파라는 비파괴적인 방법을 이용해 재료에 손상을 주지 않으면서 우수한 전기적, 기계적 성질을 동시에 갖는 효과적인 신축성 전도체를 만들 수 있다.

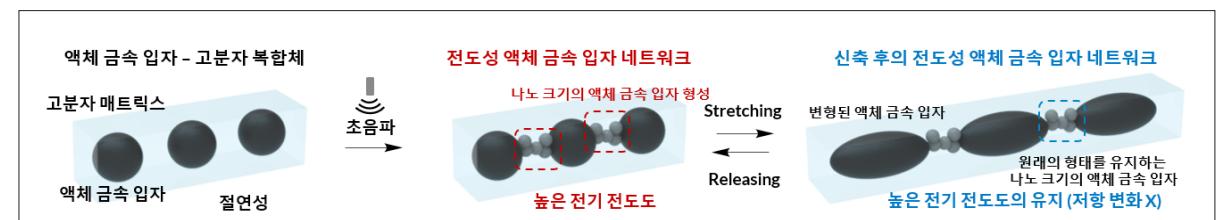
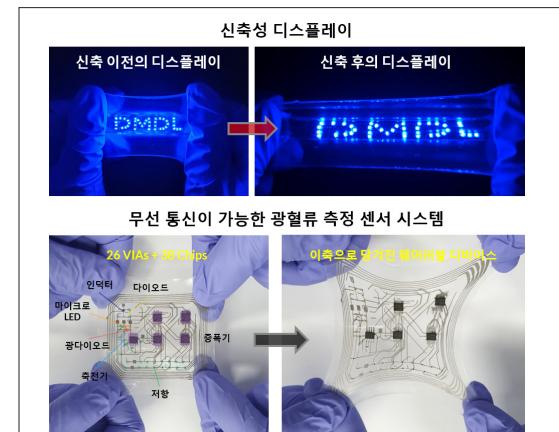


그림 1. 초음파를 이용하여 고분자 내에서 액체금속 입자를 조립시켜 전도성 네트워크를 형성



기대효과

우수한 전기적, 기계적 성질 및 접착성을 갖는 액체금속 입자 네트워크를 이용해 기존에 구현할 수 없었던 신축성 인쇄회로기판을 구현할 수 있고, 이를 기반으로 늘어날 수 있는 디스플레이 및 헬스케어 전자기기와 같은 다양한 신축성 전자소자를 제작(그림2)할 수 있다. 뿐만 아니라 초음파에 기반한 액체금속입자 네트워크의 조립은 모든 고분자에도 적용될 수 있기에 포토레지스트, 하이드로겔, 자가 치유 고분자 등에 적용함으로써 고해상도 광 패터닝, 체내 삽입형 전자소자를 위한 낮은 임피던스를 갖는 전극, 자가 치유가 가능한 액체금속 기반 전극 등 다양한 응용이 가능할 것으로 기대된다.

연구성과

- [논문] W. Lee, H. Kim, I. Kang, H. Park, J. Jung, H. Lee, H. Park, J. S. Park, J. M. Yuk, S. Ryu, J.-W. Jeong, J. Kang*, "Universal assembly of liquid metal particles in polymers enables elastic printed circuit board," *Science* 378, 637-641 (2022) [2022 Impact Factor = 63.714]
- [홍보] *Science* 표지 논문으로 선정
- [특허] 국내 특허 출원 1건, 미국 특허 출원 1건

연구비 지원

- 한국연구재단, 나노소재기술개발사업, 웨어러블 플랫폼 소재기술 선도센터

지구 메타버스 기술을 이용한 지구온난화와 태풍 호우 빈도의 상관관계 증명

연구책임자 | 김형준 소속학과 | 문술미래전략대학원

연구실 홈페이지 | <http://hklab.org>

태풍은 우리 사회에 막대한 피해를 주는 자연재해 중 하나로, 태풍 유래의 호우 빈도에 인간 활동에 의한 온난화가 어느 정도 영향을 미치는지 연구하였다. 본 연구에서는 과거 약 50년간 중국 남동부의 연안 영역부터 한반도 그리고 일본에 걸친 지역에서 태풍 호우의 빈도가 증가하고 동아시아의 남쪽 지역에서는 감소한 사실을 발견했다. 인간 활동에 의한 온실가스의 배출이 있는 지구와 그렇지 않은 지구를 시뮬레이션 한 지구 메타버스 실험을 이용한 결과 이와 같은 변화가 인간 활동에 의한 온난화의 영향이 지배적이었음을 세계 최초로 증명했다.

연구배경

태풍에 의한 호우는 홍수나 산사태 등 인간 사회에 커다란 위협이다. 따라서 태풍이 초래하는 호우(이하, 태풍호우)는 방재, 보험, 농업, 관광업 등, 다양한 분야에서 중요한 정보이다. 기후모델을 이용한 미래 시뮬레이션에 따르면, 온난화에 의해 미래 태풍의 변화가 예측되고 있으며, 관측의 결과 태풍호우의 빈도가 과거 몇십년 동안 변화되어왔음이 세계 각지에서 보고되고 있다. 하지만 태풍의 활동은 우연성이나 기후 시스템의 자연변동성에 의해 크게 영향을 받으므로 과거에 관측된 변화가 자연변동에 의한 것인지, 인간활동에 의한 온난화의 영향인지는 명확하게 밝혀진 바가 없다.

연구내용

본 연구에서는 한반도와 일본을 포함하는 북서태평양 영역 태풍호우의 빈도가 과거 50년간 유의미하게 변했음을 확인했다. 나아가 기후모델에 의한 지구 메타버스 시뮬레이션 데이터를 이용함으로써 관측된 변화는 인간활동에 의한 온난화의 영향임을 밝혔다.

그림1(좌)는 북서태평양 영역의 관측 데이터에 근거한 과거 약 50년간(1961년~2015년)의 태풍호우 빈도변화이다. 동아시아의 연안 지역은 태풍호우의 빈도가 증가하는 한편 북위 22도 남쪽은 태풍호우 빈도가 감소한 지역을 많이 볼 수 있으며 이는 북서태평양 영역 내에서도 태풍호우의 변화는 균일하지 않음을 알 수 있다. 기후모델은 서로 다른 가상의 지구(즉, 온난화와 비온난화 지구)에서 태풍호우 빈도를 비교함으로써 인간활동에 의한 온난화가 태풍호우에 주는 영향을 조사했다(즉, 지구 메타버스 실험). 그림1(우)는 지구 메타버스 실험을 이용해 추산한 태풍호우의 빈도변화이다. 온난화의 영향은 동아시아 연안 지역에서 태풍호우의 빈도를 증가시키거나 저위도의 넓은 영역에서 감소시키는 것을 알 수 있다. 이런 지리적 분포는 그림1(좌)에서 보이는 특징과 일치하며, 관측된 태풍호우의 빈도 변화는 인간 활동에 의한 온난화가 영향을 주고 있다는 점을 시사한다.

관측과 시뮬레이션의 공간 패턴이 일치하는 것이 우연성 혹은 자연변동성이 아닌 인류세적 기후변화에 의한 필연적

Attributing Typhoon Heavy Rainfall to Global Warming Using Meta-Earth Technology

결과임을 확인하기 위해 지구 메타버스 실험과 핑거프린트 분석을 이용했다. 그림2는 관측 데이터와 비온난화실험 각각에 대해 인간에 의한 기후변동 지문(이하 인류세 지문)의 신호를 보인다. 비온난화 지구에서 인류세 지문은 신호가 대체로 0부근에 머무르나 관측 데이터에서 나타나는 인류세 지문의 신호는 1970년대 이후 강한 증가를 보인다. 관측 데이터와 비온난화 지구에 대한 인류세 지문의 시간변화율(그림2 각각의 선의 기울기)을 서로 비교하고 전자가 후자보다 우연으로는 설명하기 힘들 만큼 클 때 온난화의 영향에 대한 가설을 검증할 수 있으며, 그림3으로 인간활동에 의한 온난화의 영향이 태풍호우의 빈도변화에 명백함을 증명하였다.

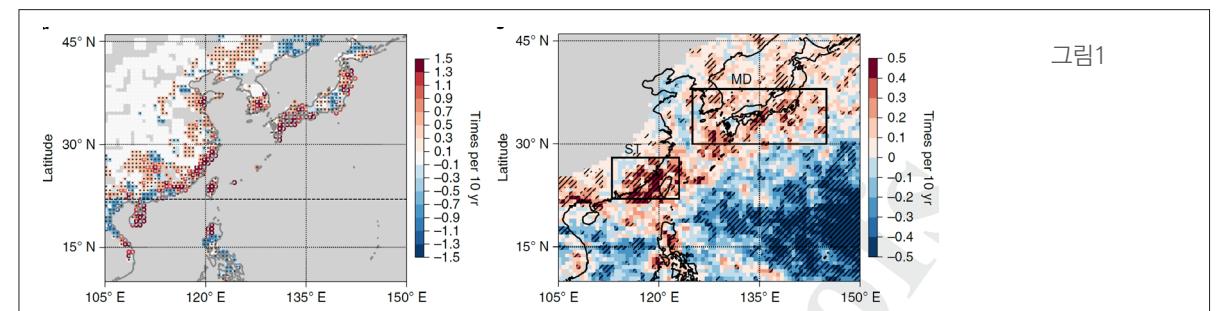


그림1

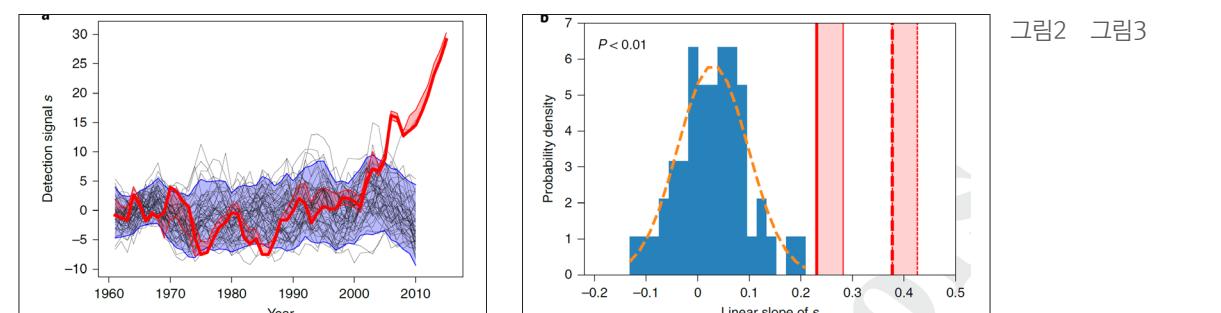


그림2 그림3

기대효과

본 연구는 북서태평양 지역 태풍호우의 빈도변화에서 인간 활동에 의한 온난화의 영향이 이미 뚜렷하게 나타나 있음을 밝혔다. 북서태평양 지역은 전 세계적으로 태풍의 활동이 가장 활발한 지역 중 하나이며, 특히 태풍의 영향이 큰 연안 지역에는 많은 인구가 집중되어 있고 경제 규모가 큰 메가시티(Mega-city)가 다수 존재한다. 기후변화 대책에 있어서 투자 비용과 효과를 최적화하기 위해서는 정확한 기후변화 영향평가가 필수적이다. 본 연구는 최근 일어난 그리고 가까운 미래에 일어날 기후변화가 극단적인 기상현상 중 특히 동아시아 지역 태풍에 주는 영향을 이해하고 평가하는데 매우 중요한 정보를 제공한다.

연구성과

- [논문 1] Utsumi, N. and H. Kim (2022) Observed influence of anthropogenic climate change on typhoon heavy rainfall, *Nature Climate Change*, 12, 436–440 [Impact Factor = 28.862]
- [논문 2] Shiogama, H., M. Watanabe, H. Kim and N. Hirota (2022) Emergent constraints on future precipitation changes, *Nature*, 602, 612–616 [Impact Factor = 69.504]

연구비 지원

- 한국연구재단 해외우수과학자유학자사업(BP+), 인류세연구센터



2022 KAIST 주요 우수성과

KAIST'S RESEARCH HIGHLIGHTS of 2022

023 AI·AI+X

- + 지속적으로 공정한 멀티모달 기반 상황 인지 기술 개발
- + 사람처럼 사물의 개념을 스스로 학습하는 인공지능 기술
- + 심층 강화학습을 활용한 센서 폐색 하에서의 신뢰 기반 로봇 주행 기법
- + 악천후에서도 자율주행을 가능하게 하는 4D 레이더 객체 인식 인공지능 기술 개발
- + 자기 지도 학습을 이용한 그래프 어텐션 신경망 디자인
- + 설명 가능한 오정보 탐지와 팩트체크 연구

026 SW·IT

- + 대규모 사물인터넷을 위한 무전원 통신 시스템 개발
- + 희소타원해석법을 이용한 4차원 편광 반사계 텍스쳐 및 3차원 형상의 획득 기술 개발
- + 자연어만으로 3D 객체의 파트를 찾아내는 기술 개발

027 기계·로봇·항공우주

- + 카메라-레이이다 융합 기반 고성능 인지 기술 개발
- + 스텔스 전자기 특성 평가를 위한 스캐닝 자유공간 측정 시스템 개발

028 기초과학·인문·경영

- + 서비스 근로자의 AI 기술기반 생산성 개선
- + 무질서에서 질서가 만들어지는 원리 제시
- + 금속 나노물질 내부 원자들을 하나하나 3차원적으로 관측
- + 고차시컨트 다양체들의 마트료시카 구조 및 일반화된 Bronowski 추측
- + 전기이중층 구조의 이론적 규명과 측매 활성 제어 기작 이해

031 도시·환경·에너지

- + 낙엽을 활용한 친환경 생분해성 플렉서블마이크로 슈퍼커패시터 개발
- + 지속 가능한 해양 모니터링을 위한 친환경, 재활용 해양 에너지 수확 소자 개발
- + 전자레인지 원리를 이용한 차세대 에너지 변환 소자 제조 기술 개발
- + 양자점수를 이용한 광화학반응을 통한 이산화탄소 전환 및 암모니아 생산
- + 태양빛과 전기를 이용한 미세플라스틱 업사이클링 구축
- + 인쇄성이 뛰어난 생분해성 3D 프린팅 필라멘트
- + 마찰전기 발생 원리 세계 최초 규명
- + 자율형 무봉산 소형원자로 ATOM 개념 및 핵심기술 개발 (선도연구센터)

035 반도체디스플레이

- + 2차원 반데르발스 물질 이미지 폴라리톤 측정 기술 개발
- + 커피링 완벽제어 프린팅 기술
- + 6G 통신의 핵심기술인 CMOS 공정 기반 초저잡음 서브테라헤르츠 신호 생성 반도체 회로 개발

036 헬스·바이오·뇌

- + 학습 없이 자연발생하는 뇌신경망 인지 지능 발생 원리 규명
- + 슬기로운 직장생활: 성인 자폐스펙트럼인의 업무-사회 기술 증진을 위한 생체 신호 기반 가상 현실 기술 개발
- + 미생물 이용한 천연 붉은 색소 카르민산 생산 기술 개발
- + 액체금속 입자의 프린팅 및 전자문신 기술 개발
- + 악성 뇌종양 면역미세환경 조절 기전 규명
- + 알츠하이머 베타-아밀로이드 응집체의 자기전기 해리 기술 개발

지속적으로 공정한 멀티모달 기반 상황 인지 기술 개발

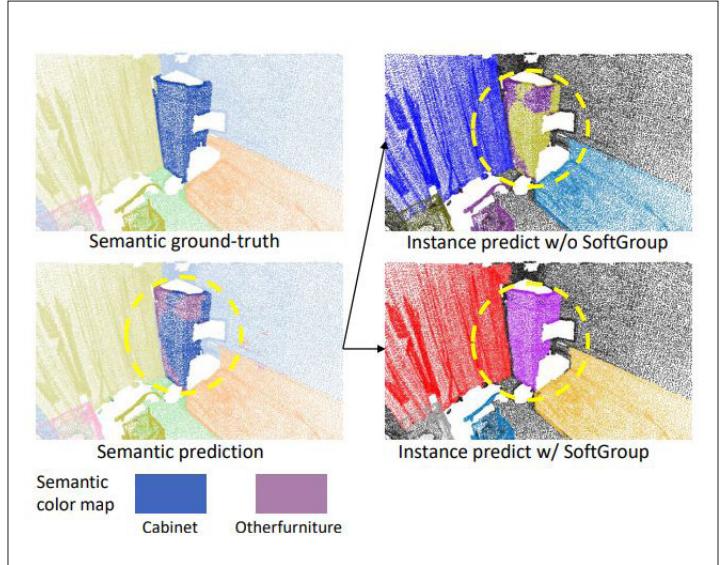
01

유창동

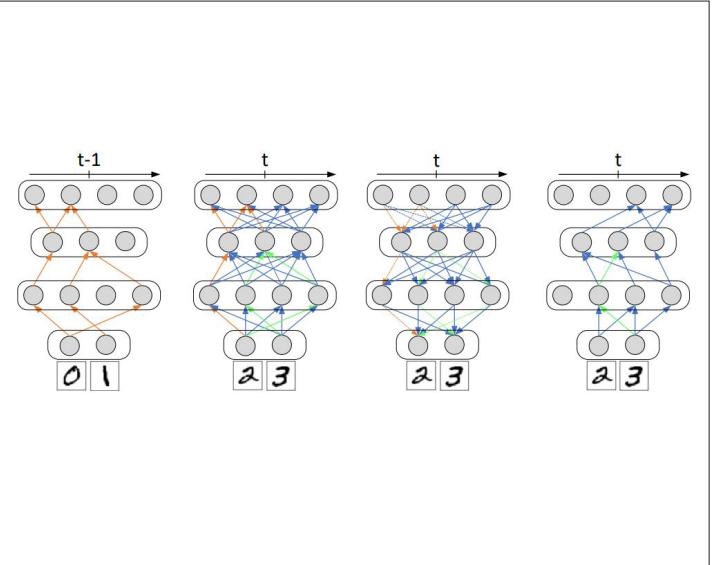
전기및전자공학부

<http://sanctusfactory.com/u-aim>

인공지능의 최종목표는 인간 생활을 잘 이해하고 필요한 도움을 사람한테 제공하는 것이다. 전문가들은 이러한 인공지능이 영화나 드라마를 보고 어떤 질문에도 정확하게 답할 수 있도록 개발되어 진다면, 인공지능이 인간의 생활도 잘 이해할 수 있을 것으로 생각하고 있다. 이를 위해서 과거를 잊지 않고 지속적으로 학습할 수 있어야 하며 (continual learning) 데이터에 담겨있는 한정된 상황에 편향되지 않은 공정한 (fair and unbiased) 학습을 해야 할 것이며 비디오, 오디오, 텍스트, 라이다 기반 point cloud 데이터를 포함한 다양한 형태의 입력을 받아 멀티모달 상황인지를 해야 할 것이다. 무엇보다 라벨이 많이 적은 상황에서 자가 학습 (self-supervised learning)을 할 수 있어야 하는 것은 필수이다. 본 연구에서 공정한 차원축소를 기법을 통하여 방대한 입력 데이터를 편향되지 않게 축소시키고 효율적인 지속학습 방법을 고안하고, 더불어 강인한 자가학습을 하면서, 편향되지 않은 비디오 인식 (video QA and video retrieval), 편향되지 않은 다이얼로그 이해에 관한 연구를 수행하였다.



라이다 기반 Point cloud 데이터를 활용한 삼차원 객체 인지 시스템: SoftGroup



인공지능의 계속적 학습을 위해 최적의 하위 네트워크들을 선택 및 학습 할 수 있는 모델: Winning SubNetwork

사람처럼 사물의 개념을 스스로 학습하는 인공지능 기술

02

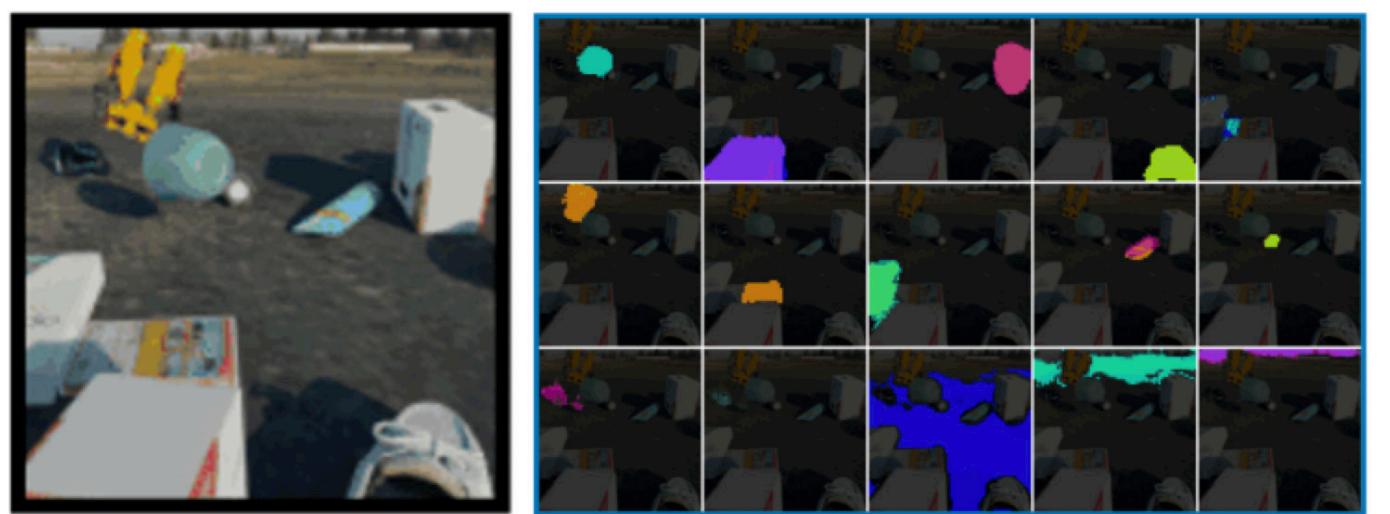
안성진, Gautam Singh,

Yi-Fu Wu

전산학부

<http://www.sungjinahn.com>

본 연구에서는 일일이 수작업으로 사물을 라벨링하는 기준의 지도적 학습방식과 달리, 사람이 시각적으로 세상의 구조를 학습하는 방식과 유사하게 자기지도적인 방식으로 장면의 사물중심 구조를 스스로 학습할 수 있는 인공지능 기술을 제안하였다. 본 기술을 차세대 시각인지분야의 핵심기술로서, 실세계와 같은 복잡한 장면에 적용 가능하도록 만든 세계최초의 기술이다. 지능형 로봇, 자율주행, 공장자동화 등 시각 인공지능 기술 전반과 관련 산업에서 파급력이 클 것으로 기대된다.



SLATE, SSlot-Attention TransformEr라는 모델과 이를 비디오로 확장한 STEVE(Slot TransformEr for VidEo) 모델을 제안. 슬롯 기반 어텐션을 통해 장면에서 사물 중심의 구조를 추출하고 이렇게 얻어진 사물슬롯들 매우 높은 표현력을 갖는 트랜스포머 디코더 참조하여 이미지를 복원하는 방식을 취함

연구성과

- [논문] - Thang Vu, Kookhoi Kim, Tung Luu, Thanh Nguyen, Chang D. Yoo, "SoftGroup for 3D Instance Segmentation on Point Clouds", Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) 2022, [Oral presentation (top 4%)] H5-index =389 Citation=25
- Haeyoung Kang, Rusty John Lloyd Mina, Sultan Rizky Hikmawan Madjid, Jaehong Yoon, Mark Hasegawa-Johnson, Sung Ju Hwang, and Chang D. Yoo, Forget-free Continual Learning with Winning Subnetworks, International Conference on Machine Learning (ICML) 2022 H5-index=237 Citation=2

연구성과

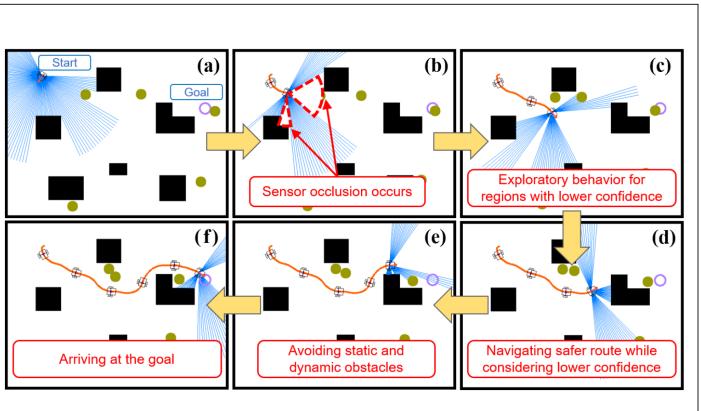
- [논문] - Gautam Singh, Fei Deng, Sungjin Ahn, "Illiterate DALLE Learns to Compose", International Conference on Learning Representations (ICLR) 2022 [Google Scholar 기준 AI분야 학회 랭킹 1위]
- Gautam Singh, Yi-Fu Wu, Sungjin Ahn, "Simple Unsupervised Object-Centric Learning for Complex and Naturalistic Videos", Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS) 2022 [Google Scholar 기준 AI분야 학회 랭킹 2위]

심층 강화학습을 활용한 센서 폐색 하에서의 신뢰 기반 로봇 주행 기법

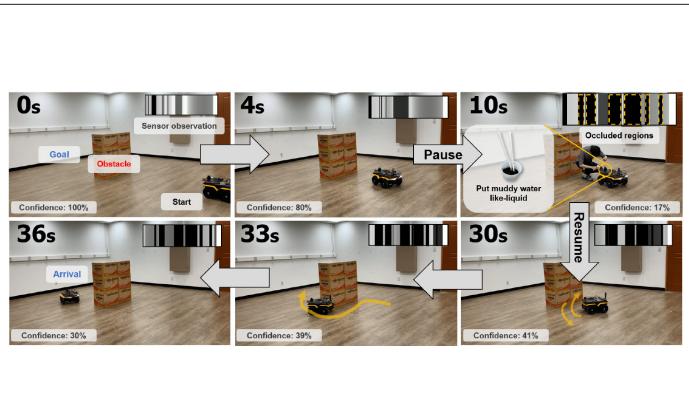
03

윤성의, 유형열, 윤민성, 박대형
전산학부<https://sgvr.kaist.ac.kr/>

본 연구팀은 물리적 센서 외란에 의한 센서 폐색 상에도 강인하게 자율 주행(모바일 내비게이션)을 수행할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 다양한 외부 변수들이 잘 제어된 실험실과 같은 환경에서 벗어나 실제 외부 환경에서 로봇들이 사용됨으로써, 다양한 외부 요인들에 의해 완전한 센서 데이터를 얻지 못하는 경우가 발생한다. 이는 곧 센서의 가시성을 낮추고 정보의 불확실성을 높여 잠재적인 충돌을 일으킬 수 있기에 해결해야 할 중요한 문제이다. 연구팀은 임의의 센서 폐색 상에서도 유효한 센서 데이터를 기반으로 충돌 없이 목표 지점까지 도달하기 위해 신뢰 기반에 주행기법을 도입하였고 심층 강화학습을 사용하여 최적에 행동 정책을 학습하였다. 연구팀은 이번 연구성과를 통해 공업환경, 농업환경, 또는 서비스를 제공하는 환경과 같이 제어할 수 없는 외부 변수들이 많은 환경에서 로봇의 강인한 자율 주행에 도움이 될 것으로 기대한다. 본 연구 논문은 ICRA 2022 (IEEE International Conference on Robotics and Automation)에서 연구의 우수성을 인정받아 Outstanding Navigation Award Finalist에 선정되었으며, 이는 해당 학회에서 발표된 전체 1,498편의 발표 논문 중 39편의 논문만 우수성을 인정받아 선정되었다.



고정된 물체와 동적 물체가 동시에 존재하는 가상 환경에서 갑작스럽게 센서의 폐색이 발생하여도 로봇의 앞쪽 방향에 신뢰성을 확보하며 충돌 없이 목표에 도달.



실 환경에서의 센서 폐색 하에서 시연. 임의의 폐색을 만들기 위해 로봇의 모든 기능을 일시 중지하고 센서 표면에 잉크를 묻힘. 그로 인해 낮아진 신뢰도를 높이는 방식으로 충돌 없이 목표에 도달.

연구성과

[논문] - Ryu, H., Yoon, M., Park, D., & Yoon, S. E. (2022, May). Confidence-Based Robot Navigation Under Sensor Occlusion with Deep Reinforcement Learning. In 2022 International Conference on Robotics and Automation (ICRA) (pp. 8231-8237). IEEE.

악천후에서도 자율주행을 가능하게 하는 4D 레이더 객체 인식 인공지능 기술 개발

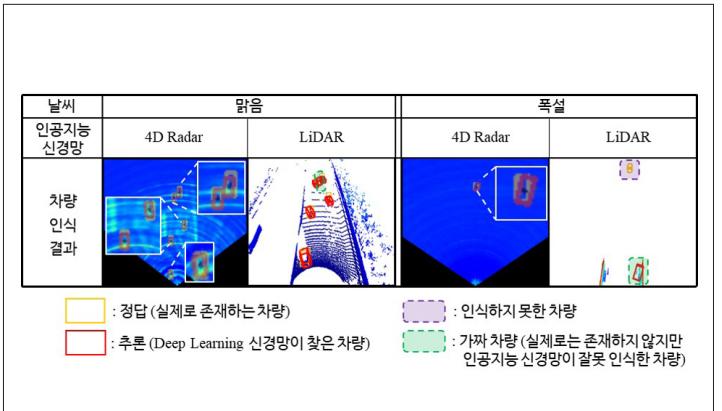
04

공승현, 백동희,
Kevin Tirta Wijaya
조천식모빌리티대학원
<http://ave.kaist.ac.kr>

적외선을 사용하는 라이다와는 달리 77GHz 대역의 전파를 사용하는 자동차 레이더는 눈, 비, 안개 등의 악천후상황에 매우 강건하며 표면에 눈이나 흙먼지가 묻은 상황에서도 안정적인 측정 결과를 보인다. 최근에는 고해상도의 4D 레이더(Range, Azimuth, Elevation, Doppler 주파수를 출력)가 상용화되고 있으며, 그 HW 성능도 빠르게 향상되고 있다. 이에 따라서 전 세계적으로 4D 레이더에 인공지능을 이용한 주변 인지 기술 연구가 시작되고 있지만, 고성능 인공지능 개발에 필수적인 대용량 데이터셋의 부재로 인하여 4D 레이더에 필요한 인공지능 연구는 매우 더디게 진행되고 있다. 따라서 공승현 교수 연구팀은 악천후를 포함한 다양한 날씨 및 교통 상황에서 수집되고, 정확히 동기된 카메라와 라이다 측정 데이터와 함께 구축된 13TB에 이르는 대용량의 4D 레이더 데이터셋인 KAIST-Radar (K-Radar)를 세계 최초로 구축하고 배포한다. 또한 연구팀은 4D 레이더 데이터로부터 도로 상의 주요 객체를 인식하는 세계 최고 수준의 4D 레이더 인공지능 신경망을 개발하여 공개하는 동시에, 세계의 연구자들이 자체적으로 심화 연구를 진행할 수 있도록 데이터의 추가 구축과 다양한 딥러닝 기술을 개발하고 그 성능을 비교 평가할 수 있도록 연구자들을 위한 4D 레이더 딥러닝 플랫폼도 공개한다.



K-Radar 구축을 위한 자율주행 센서 수트; 자동차 지붕에 설치한 외부 라이다와 카메라, 그리고 전방 범퍼 위에 설치한 4D 레이더와 실내 카메라 등으로 구성되어 있다. 측정치를 보면 4D 레이더가 악천후 상황과 흙먼지에 가장 강인한 센서임을 확인할 수 있다.



4D 레이더 인공지능 신경망 및 라이다 인공지능 신경망 차량 인식 결과 비교; 위 그림은 동일한 위치에서 4D 레이더 인공지능 신경망과 라이다 인공지능 신경망의 차량 인식 결과(추론: 빨간색 실선 사각형으로 표시)와 도로상의 실제 차량(정답: 노란색 실선 사각형으로 표시)을 표시한 그림이다.

연구성과

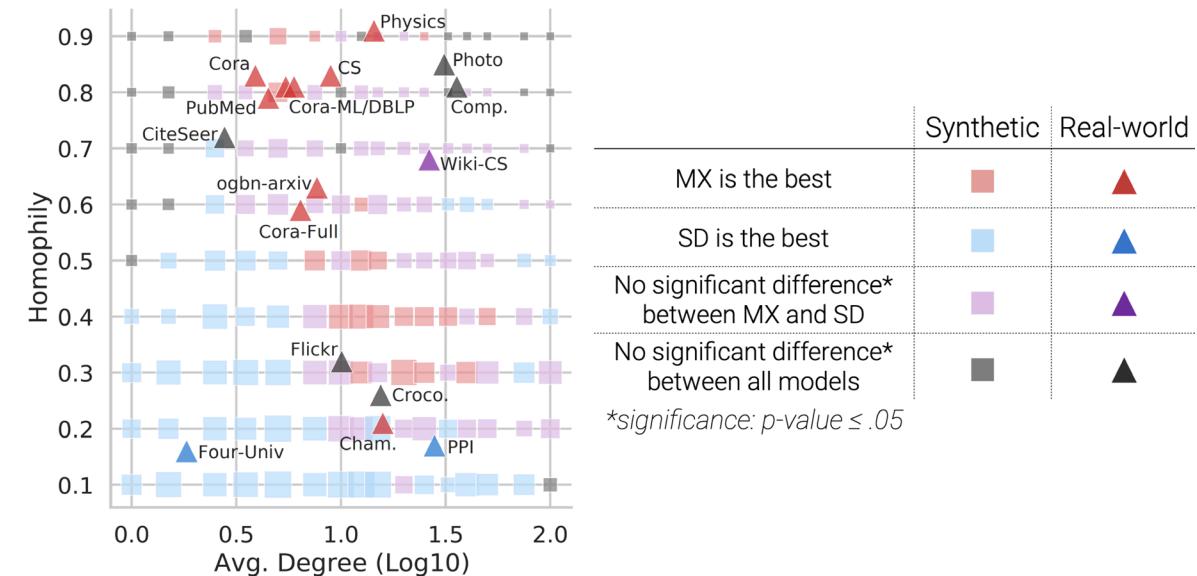
[논문] - Paek, Dong-Hee†, Seung-Hyun Kong†*, and Kevin Tirta Wijaya. "K-Radar: 4D Radar Object Detection Dataset and Benchmark for Autonomous Driving in Various Weather Conditions." Thirty-sixth Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS) Datasets and Benchmarks Track. 2022.

자기 지도 학습을 이용한 그래프 어텐션 신경망 디자인

05

오혜연, 김동관
전산학부
<http://uilab.kr>

그래프 신경망의 어텐션 메커니즘은 더 나은 표현을 얻기 위해 중요한 이웃 노드에 더 큰 가중치를 할당하도록 설계되었다. 그러나 그래프 어텐션이, 특히 그래프에 잡음이 많을 때, 실제로 무엇을 학습하는지에 대해서는 이해가 아직 부족하다. 본 연구는 잡음이 있는 그래프에 대해, 개선된 그래프 어텐션 모델인 SuperGAT(자기 지도 그래프 어텐션 신경망)를 제안한다. 이 연구에서는 노드 사이의 관계에서, 상호 간의 중요성에 대한 정보를 담고 있는 간선을 예측하는 자기 지도 태스크를 개발하였다. 이 태스크는 본 연구에서 개발된 두 가지 어텐션 메커니즘에 적용된다. 간선에 대한 정보를 인코딩함으로써 SuperGAT는 잘못 연결된 이웃 노드를 구별할 수 있는, 보다 표현력이 증강된 어텐션을 학습한다. 나아가, 동질성과 평균 차수라는 두 가지 그래프 특성을 알고 있을 때, 어떤 어텐션 형태를 사용해야 하는지에 대한 가이드를 제공한다. 17개의 실제 데이터 세트에 대한 실험은 본 가이드라인이 15개의 데이터셋에 걸쳐 일반화되고, 이것으로 설계된 모델의 성능이 기존 연구의 성능 보다 향상되었음을 보인다.



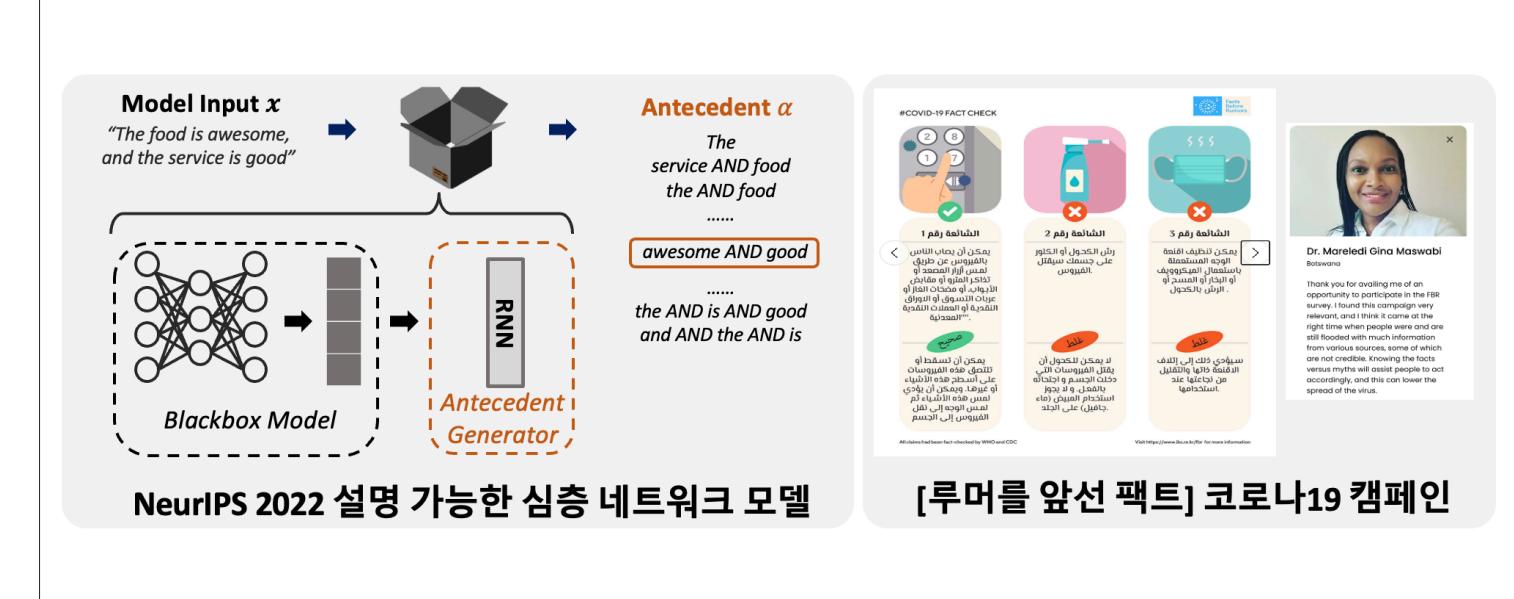
평균 차수와 동종성이 다른 합성(synthetic) 그래프와 현실(real-world) 그래프에서의 모델 비교.

06

차미영, 한성원, 이승언,
Gabriel Lima
전산학부
<https://ds.kaist.ac.kr/>

설명 가능한 오정보 탐지와 팩트체크 연구

오정보(misinformation) 확산으로 인한 막대한 피해가 발생하며 이의 탐지와 처리 문제는 현대 사회의 중요한 챌린지가 되었다. 연구팀은 머신 뿐만 아니라 인간이 이해 가능한 수준의 human-logic을 고려한 설명 가능한 심층네트워크(explainable deep learning) 알고리즘을 제시해 이론적 선도를 하고, 코로나19 오정보에 빨빠르게 대처하기 위해 주요 팩트를 선제적으로 전달하는 “루머를 앞선 팩트체크(facts before rumor)” 캠페인을 통해 151개국 5만여 명에 이르는 소셜임팩트 성과를 이뤘다. 데이터를 통해 인프라가 약한 개발도상국이 인포데믹에 더 많이 노출된다는 발견을 했고 이러한 착안점은 세계보건기구(WHO)에서 초청 발표되었다. 오정보에 대한 지속적 이론 연구와 개발도상국에 팩트체크 전달을 한 실증 연구로 연구팀은 과기부 장관상(2022년)을 받았으며, 카이스트 일원으로 사회적 가치 실현에 크게 기여했다.



설명 가능한 오정보의 탐지 이론 연구와 151개국을 대상으로 한 팩트체크 실증 연구 자료화면

연구성과

[논문] - Kim, Dongkwan, and Alice Oh. "How to Find Your Friendly Neighborhood: Graph Attention Design with Self-Supervision." International Conference on Learning Representations (ICLR). 2021.

연구성과

[논문] - Lee et al., Self-explaining deep models with logic rule reasoning, NeurIPS 2022 (이론연구)

- Singh et al., Misinformation, believability, and vaccine acceptance over 40 countries: Takeaways from the initial phase of the COVID-19 infodemic, PLoS One 2022 (151개국 캠페인)

[수상] - 오정보 탐지 연구로 과기부 장관상 표창(2022)

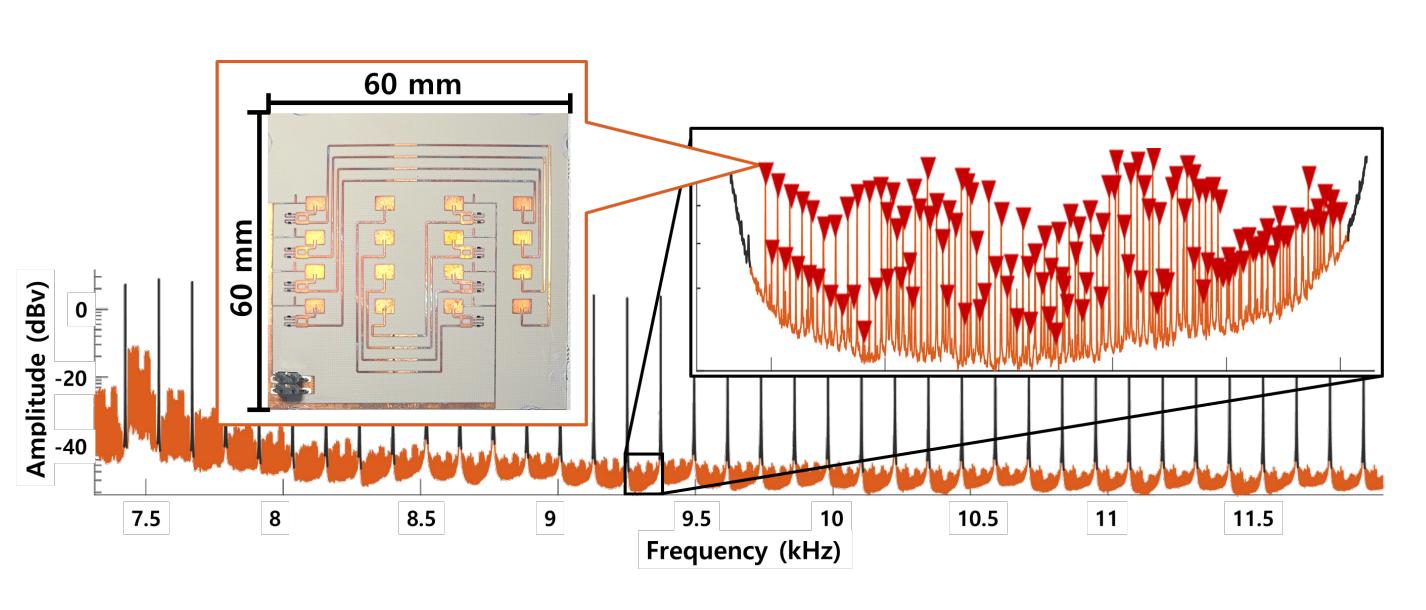
대규모 사물인터넷을 위한 무전원 통신 시스템 개발

07

김성민, 배강민, 안남조
전기 및 전자공학부

<https://smile.kaist.ac.kr/>

2035년 까지 IoT 수가 1조 개에 이를 것으로 예상됨에 따라, 대규모 접속성이 미래 서비스의 핵심으로 인식되고 있다. 하지만 현재 사용되는 IoT통신 기술은, 주파수 부족과 높은 에너지 소모로 인해 대규모 IoT 기기를 수용할 수 없다. 본 연구는 세계 최초 수만 개 이상의 대규모 사물인터넷(IoT) 동시 무선 통신 시스템이다. 특히 무전원 통신 시스템인 밀리미터파 백스캐터와 FMCW(주파수 변조 연속파) 레이더의 상호작용을 이용한 융합 기술로서, 기존 IoT통신 기술에 비해 에너지 효율이 수백 배에 달하며 주파수 공유 스케일을 대폭 향상시킨다. 소비 전력이 $10 \mu\text{W}$ 에 불과해 태양 전지 등 에너지 하베스터로 무전원 동작하며 (코인 전지 1개로 40년 작동) 수만 개에 이르는 대량 IoT의 동시 통신이 가능하여 5G/6G에 비해 수천 배에 이르는 연결성을 제공한다. 또한 160m의 거리에서 1cm 이내의 초정밀 위치 인식과 다양한 센서의 부착이 가능하여 VR/AR, 보행자 안전, 재활, 게임, 스포츠 과학 등 무궁무진한 활용성이 있으며 모바일 시스템 최고 권위 학회인 ACM MobiSys 2022에서 최고 논문상을 수상하였다.



1,100개의 백스캐터 동시 통신 실험. 각각의 신호가 붉은색 삼각형으로 표시되어 있다. 이들이 충돌 없이 통신하고 있음을 확인할 수 있으며, 동일한 방법으로 수만 개의 기기로 확장이 가능하다.

연구성과

[논문] - Kang Min Bae, Namjo Ahn, Yoon Chae, Parth Pathak, Sung-Min Sohn, Song Min Kim, "OmniScatter: extreme sensitivity mmWave backscattering using commodity FMCW radar", ACM MobiSys 2022

[수상] - Best Paper Award, ACM MobiSys 2022

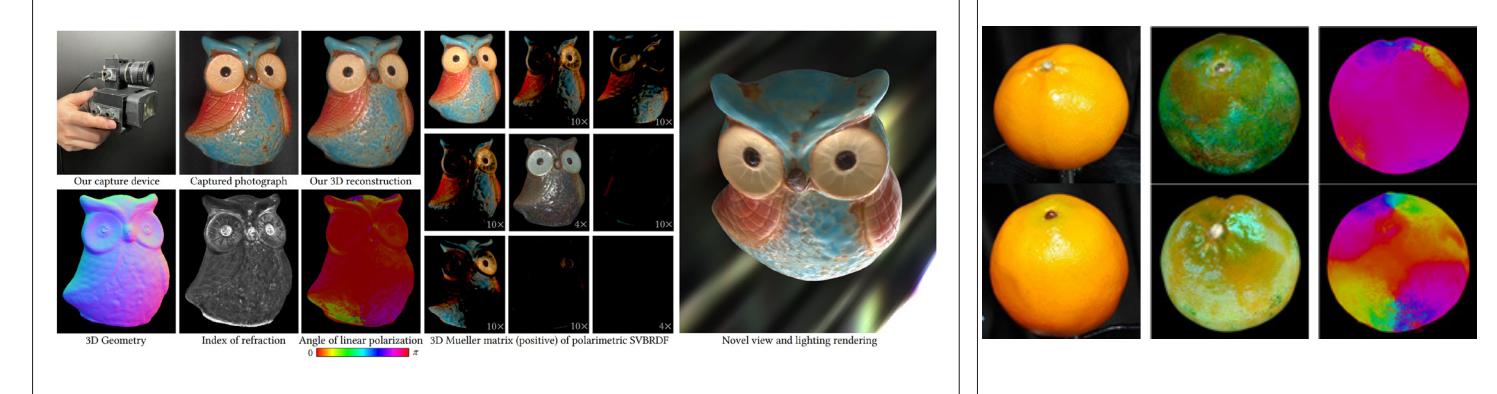
희소타원해석법을 이용한 4차원 편광 반사계 텍스쳐 및 3차원 형상의 획득 기술 개발

08

김민혁, 황인승, 전석준
전산학부

<http://vclab.kaist.ac.kr/>

편광은 전자기파인 빛의 진동 방향에 대한 성질로 물체의 기하 및 물질 속성에 대한 유용한 정보를 제공한다. 이를 이용하여 컴퓨터 그래픽스, 컴퓨터 비전, 컴퓨터 이미징 등의 분야에서 응용된다. 물체의 편광 성질 데이터를 취득하기 위하여 현재까지는 이미지 기반 타원계측법을 이용하는데, 이는 정밀한 광학 기구를 이용하여 수일에 걸친 긴 측정이 요구되며, 특정 형태의 균일한 물체만을 측정할 수 있었다. 본 연구는 확산 및 반사 구성 요소와 단일 산란을 포함하는 완전한 편광 반사계 모델을 개발하였고, 이를 기반으로 편광 반사도와 3차원 형상을 동시에 취득하는 휴대용 편광 취득 방법인 희소타원해석법(sparse ellipsometry)을 제안하였다. 이를 통해 간단한 휴대용 촬영 장비로 다양한 형태의 물체의 기하 구조 및 편광 반사 성질을 짧은 시간에 획득할 수 있게 했다.



본 연구의 촬영 시스템 및 복원 결과물, 3D 뮐러 행렬, 그리고 가상의 시점 및 광원 렌더링 결과물.

실제 오렌지(위)와 모형 오렌지(아래)의 이미지 비교.
(좌) 촬영된 일반 이미지 (중) 단일 산란
(우) 선형편광 각도 이미지

연구성과

[논문] - Inseung Hwang, Daniel S. Jeon, Adolfo Munoz, Diego Gutierrez, Xin Tong, Min H. Kim, (2022), "Sparse Ellipsometry: Portable Acquisition of Polarimetric SVBRDF and Shape With Unstructured Flash Photography," ACM Transactions on Graphics (TOG), 41(4), Presented at SIGGRAPH 2022.

[수상] - SIGGRAPH Technical Paper Award Honorable Mention 국내 연구팀 최초 수상

자연어만으로 3D 객체의 파트를 찾아내는 기술 개발

09

성민혁, 구주일
전산학부
<http://mhsung.github.io>

3D 객체는 하나의 블록이 아닌 여러 파트들의 집합으로 구성된다. 따라서 3D 객체를 기본 구성 단위인 파트별로 분할하는 3D part segmentation은 3D 객체를 이해하고 다루는데 필수적인 기술 중 하나이다. 하지만 최근 딥러닝 기반의 지도학습 방법론들은 학습과정에서 대규모의 파트 레이블을 필요로 한다는 문제점을 갖고 있다. 3D 파트 레이블링은 많은 비용을 요구로 하는 어려운 작업이지만, 이와 반대로 3D 객체를 자연어로 묘사하는 일은 상대적으로 매우 쉬운 일이다. 본 연구에서는 비교적 얄기 쉬운 3D 객체의 자연어 서술만으로 3D part segmentation을 학습할 수 있는 프레임워크를 제시한다. 해당 기술은 3D 객체의 파트와 자연어 사이의 조밀한 연관성을 처음으로 제시하였으며, 뉴럴넷 학습과정에 아무런 정답 레이블을 요구하지 않음에도 불구하고 지도학습으로 학습된 모델과 유사한 3D part segmentation 성능을 보여준다. 따라서 해당 기술은 3D 객체의 파트 레이블링 비용을 크게 절감할 수 있을 것으로 기대된다.

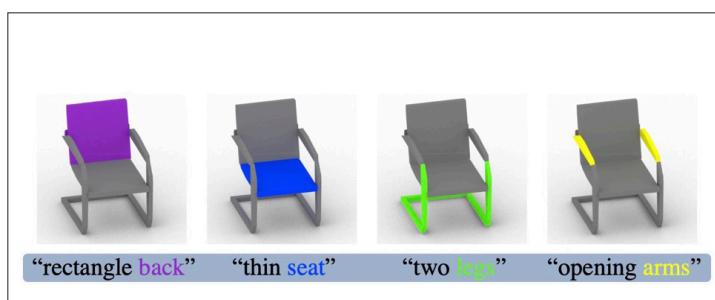
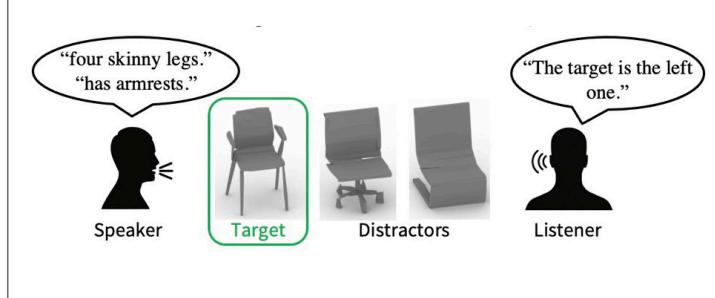
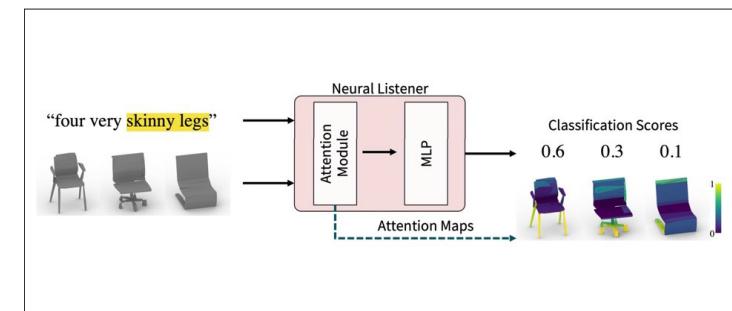


그림1. Reference game 예시

그림2. PartGlot 구조

그림3. PartGlot이 입력 문장으로부터 해당 파트를 찾아낸 결과

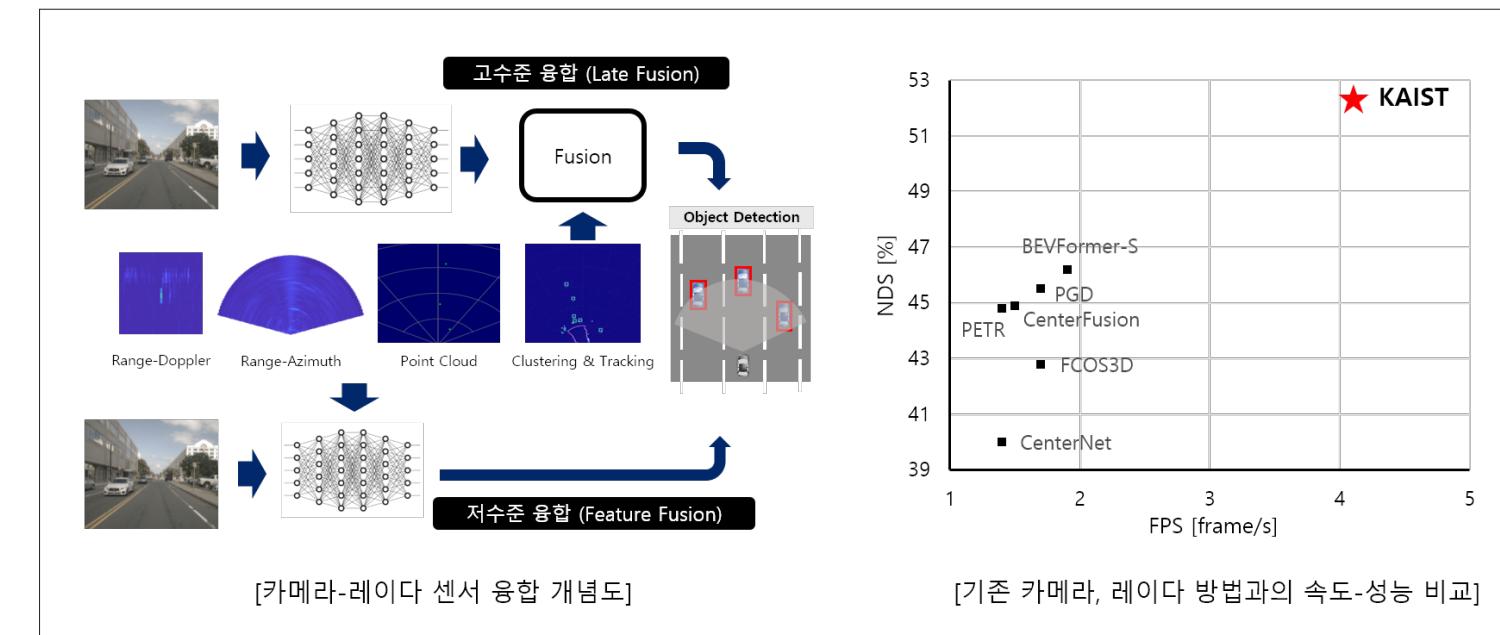


10

김동석, 김영석
조천식모빌리티대학원
<http://vdclab.kaist.ac.kr>

카메라-레이이다 융합 기반 고성능 인지 기술 개발

본 연구에서는 세계 최초로 카메라-레이이다 피처 융합을 통해 라이다 수준의 고성능 3차원 인지 기술을 개발하였다. 카메라와 레이더는 저렴한 가격 및 높은 내구성의 장점으로 양산 차량에서 첨단 운전자 보조 시스템으로 활용되고 있으나, 기존의 객체 단계 융합 방식은 인지 성능에 한계가 있다. 이러한 이유로 자율주행을 위해서는 고가의 라이다 센서가 주로 사용되지만 매우 높은 가격과 낮은 내구성 등으로 양산 차량 적용에는 어려움이 있다. 본 연구에서는 딥러닝을 통해 추출한 카메라와 레이더의 정보를 어텐션 메커니즘을 활용하여 잠재공간에서 융합하는 방법을 최초로 제시하였으며, 이를 통해 저가의 카메라와 레이더만을 이용하여 라이다 수준의 실시간 3차원 객체 인지 성능을 달성하는데 성공하였다. 본 기술은 자율주행 또는 ADAS에 적용되어 차량의 지능화, 안전성 향상에 크게 기여할 것으로 기대된다.



연구성과

[논문] - J. Koo, I. Huang, P. Achlioptas, L. Guibas, M. Sung, "PartGlot: Learning Shape Part Segmentation from Language Reference Games", IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR) 2022.

연구성과

[논문] - Y. Kim, S. Kim, J.W. Choi, and D. Kum*, "CRAFT: Camera-Radar 3D Object Detection with Spatio-Contextual Fusion Transformer," AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI), 2023 [2022 h5-index = 180].

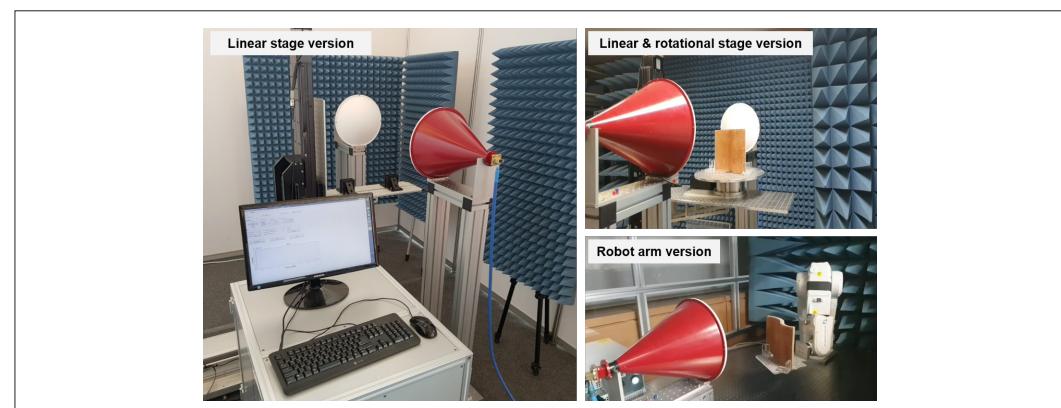
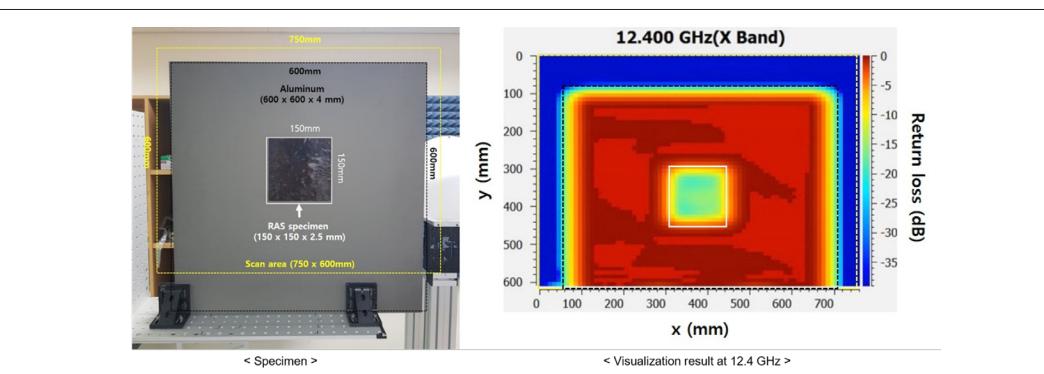
[특허] - "Electronic Device for Obtaining Three-Dimension Object Based on Camera and Radar Sensor Fusion, and Operating Method Thereof," 대한민국 특허 등록, 미국, 독일, PCT 특허 출원

스텔스 전자기 특성 평가를 위한 스캐닝 자유공간 측정 시스템 개발

11

다차원 스텔스 구조 전체에 대한 전자기 특성을 자동으로 평가 할 수 있는 스캐닝 자유공간 측정 시스템을 개발하였다. 집중형 혼 안테나를 적용한 자유공간 측정 방법에 선형 및 회전 스테이지, 로봇팔을 결합하여 전영역에 대한 전자기 특성 분포를 실시간으로 가시화할 수 있으며, 실구조에 대한 전자기 특성 평가에 성공하였다. 본 연구에서 제안한 기술은 대한항공에 기술 이전을 완료하였으며, 향후 KF-21 및 스텔스 무인기 등 차세대 스텔스 체계의 운용에 활용될 것으로 전망하고 있다.

이정률, 현종민
항공우주공학과
<http://oerl.kaist.ac.kr>



연구성과

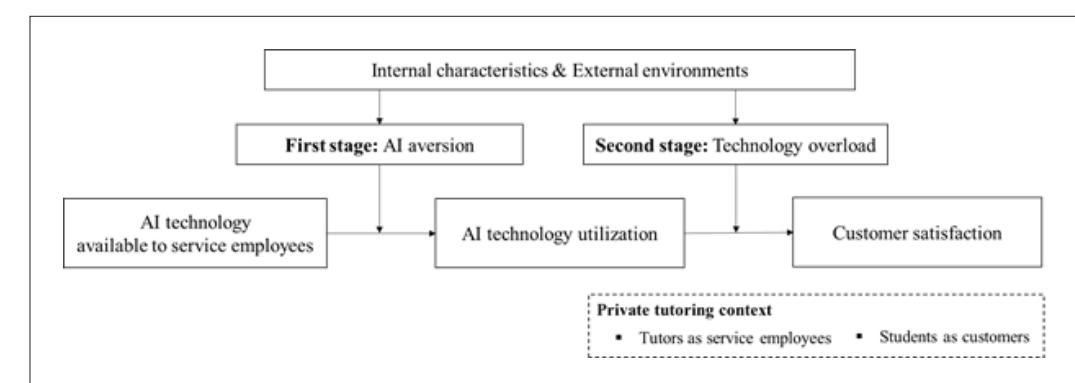
- [논문] - S U Din, J M Hyun, D S Son and J R Lee*, Robotic scanning free-space measurement system for electromagnetic performance evaluation of curved radar absorbing structures, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 19(4), pp. 1-15, Jul. 2022 (IF: 1.714)
- S U Din, J M Hyun, D S Son and J R Lee*, Rotation included 3-axis scanning free-space measurement and curvature compensation for electromagnetic evaluation of leading-edge and curved stealth structures, *Measurement Science and Technology*, 33, 055903 (pp.20), Feb. 2022 (IF: 2.398)
- [기술이전] - 전자기적 성능 전영역 평가 및 가시화에 대한 노하우, 대한항공, 1.82억원, 2022년 2월 10일

서비스 근로자의 AI 기술기반 생산성 개선

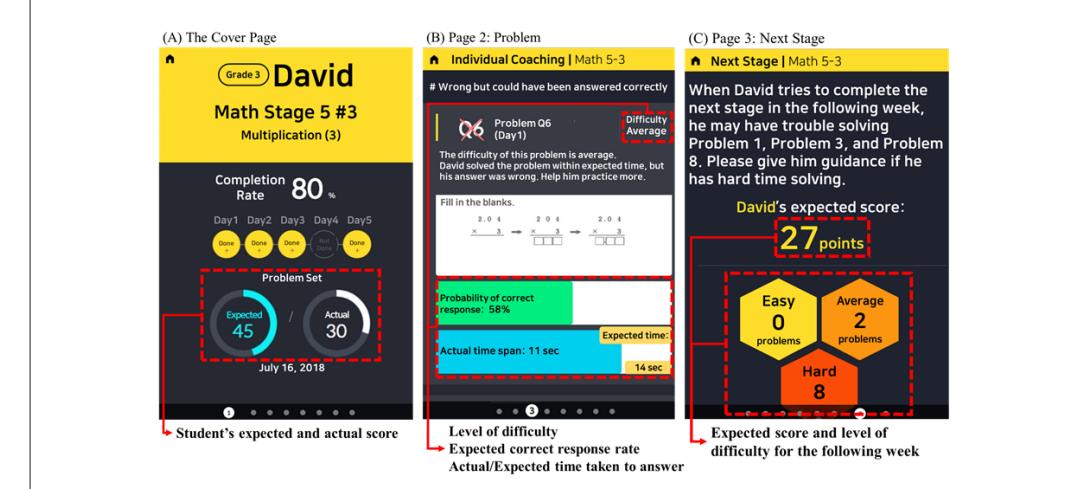
12

김민기
경영공학부
<https://sites.google.com/site/minkikimquant/qabe-lab>

AI 기반 생산성 결정
프레임워크



AI 분석 보고서 예시



연구성과

- [논문] - J. Kim, M. Kim, D. Kwak, S. Lee, "Home-tutoring services assisted with technology: Investigating the role of artificial intelligence using a randomized field experiment", *Journal of Marketing Research* 59(1), 79-96 (2022) [2022 Impact Factor = 6.664].

무질서에서 질서가 만들어지는 원리 제시

13

서명은, 윤동기
화학과
<https://nanopsg.kaist.ac.kr>

무작위성은 흔히 무질서와 동일하게 생각되나, 본 연구에서는 수용성과 지용성 부분이 무작위하게 섞인 공중합체(copolymer)가 세포막과 같은 이중 층(bilayer) 구조를 만들 때 필연적으로 짹이 맞지 않는 부분들이 나타나면서 규칙적으로 접히는 새로운 질서를 창출하는 것을 세계 최초로 발견하였다. 이는 거시적으로는 균일하나 미시적으로는 매우 불균일한 특성을 지니는 무작위한 시스템에서 어떻게 질서가 태동할 수 있는지 하나의 가능성을 엿보여주며, 무작위성에 대한 이해를 심화하고 연성나노소재 개발에 혁신적 시작점을 제공할 것으로 기대된다.



이중층 접힘 액정상의 모식도와 이중층 접힘구조 연구가 영향을 미칠 것으로 예상되는 분야

연구성과

[논문] - M. Shin, H. Kim, G. Park, J. Park, H. Ahn, D. K. Yoon, E. Lee, and M. Seo*, "Bilayer-folded lamellar mesophase induced by random polymer sequence", *Nature Communications* 13, 2433 (2022) [2022 Impact Factor = 17.690]

[홍보] - 과학기술정보통신부 공식인플루언서 “과학책장” 유튜브 소개

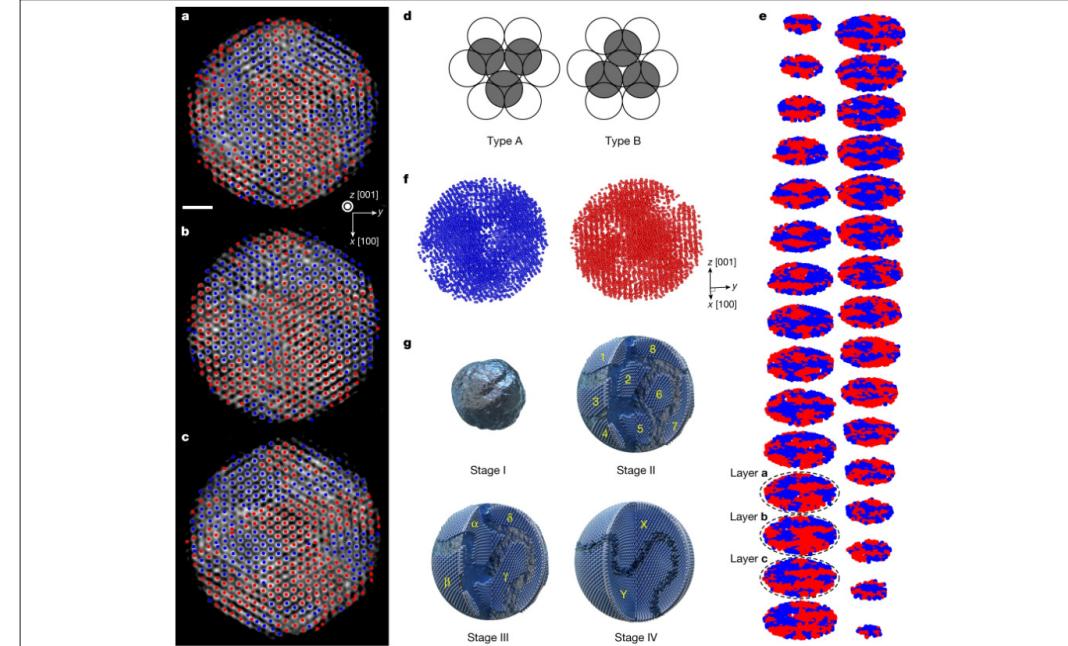
금속 나노물질 내부 원자들을 하나하나 3차원적으로 관측

14

양용수
물리학과
<http://mdail.kaist.ac.kr>

의료계통에서 흔히 사용되는 컴퓨터단층촬영(Computed Tomography: CT)과 비슷한 방식으로, 투과전자현미경을 이용하여 다양한 각도에서 찍은 원자분해능 이미지들을 재구성하면 물질 내부의 원자들 하나하나를 3차원적으로 직접 관측할 수 있다. 본 연구에서는 인공신경망의 도움으로 이 기술을 구현하여 약 15 picometer의 표면 원자 위치 정밀도(수소 원자의 반지름인 50 picometer의 약 1/3 수준)를 달성하였으며, 안정성이 떨어져 이론적으로는 합성이 불가능할 것으로 알려진 준안정상의 육방정계 팔라듐 나노입자 구조가 어떻게 실험적으로 안정화될 수 있는지, 어떻게 인위적으로 준안정 상태의 신물질을 만들어낼 수 있는지에 대한 실마리를 최초로 제시하였다. 물질 표면 및 내부의 3차원적 원자 배열과 직접적으로 연관된 응집물리분야의 다양한 난제를 해결하는 새로운 접근법으로 큰 파급 효과가 기대된다.

액체 셀 TEM의 준안정 육각형 밀집 팔라듐 수소화물



연구성과

[논문] - J. Hong*, J.-H. Bae*, H. Jo, H.-Y. Park, S. Lee, S. J. Hong, H. Chun, M. K. Cho, J. Kim, J. Kim, Y. Son, H. Jin, J.-Y. Suh, S.-C. Kim, H.-K. Roh, K. H. Lee, H.-S. Kim, K. Y. Chung, C. W. Yoon, K. Lee, S. H. Kim, J.-P. Ahn, H. Baik, G. H. Kim, B. Han, S. Jin, T. Hyeon, J. Park, C. Y. Son#, Y. Yang#, Y.-S. Lee#, S. J. Yoo# and D. W. Chun#, "Metastable hexagonal close-packed palladium hydride in liquid cell TEM", *Nature* 603, 631-636 (2022).

- J. Lee, C. Jeong and Y. Yang, "Single-atom level determination of 3-dimensional surface atomic structure via neural network-assisted atomic electron tomography", *Nat. Commun.* 12, 1962 (2021).

고차시컨트 다양체들의 마트료시카 구조 및 일반화된 Bronowski 추측

15

곽시종
수리과학과
[http://asarc.kaist.ac.kr/
kwak/kwak.html](http://asarc.kaist.ac.kr/kwak/kwak.html)

복소사영 대수기하학의 주된 연구대상인 복소사영다양체들 중에서 가장 중요한 두 가지 연구대상은 최저차수 다양체(variety of minimal degree)와 del Pezzo 다양체들이며 이들의 분류(classification)와 고유한 성질(characterization)을 규명하는 연구는 1900년대 초부터 시작하여 현재까지 고차복소 방정식들의 공통근들인 복소사영다양체들의 기하학적 성질과 이들 결정방정식들의 상호 연결되어진 대수구조, 즉 시지지(syzygy)구조를 규명하는 연구분야에서 가장 오래되고 매우 중요하게 다뤄져왔다.

최근에 이러한 고전적인 연구를 고차시컨트 다양체들의 범주로 일반화하는 연구를 수행하였으며 이러한 새로운 범주 안에서도 매우 상대적으로 비슷한 대상들이 존재한다는 것을 규명하였으며 이를 최저차수 고차시컨트 다양체와 del Pezzo 시컨트 다양체라고 이름지었다. 이러한 고차 시컨트 다양체들이 기존의 고전적인 최저차수 다양체(variety of minimal degree)와 del Pezzo 다양체에서 성립하는 여러 결과들과 매우 똑같은 구조를 가지고 있음을 규명하여 이러한 현상들을 마트료시카 (Matryoshka) 구조라고 이름 지었다. 이러한 이름은 러시아 수학자 Fyodor Zak 교수와의 학술교류를 통해 러시아 전통 인형인 마트료시카를 본따서 이름을 붙였으며 앞으로 고차시컨트 다양체들에 대해서 마트료시카 구조의 관점에서 많은 연구문제들을 제시하고 있다. 예를 들면 일반화된 gonality 추측과 다양한 parallel한 여러 성질들을 예상하고 연구방향을 잡을 수 있어서 복소사영 기하학의 새로운 연구방향을 제시한다. 고차 시컨트 다양체들은 최근에 많은 응용가능성 때문에 많은 관심을 가지고 있는 연구대상이어서 의미가 매우 높다고 생각한다. 이를 통해 대수다양체들의 Koszul 코호모로지군들의 대수적 구조와 복소사영다양체들의 기하적 구조에 관한 새로운 연구를 계속적으로 수행할 수 있는 계기를 마련하였다.

결론적으로 최소차수 시컨트 다양체들과 del Pezzo 시컨트 다양체들의 존재성과 이들의 대수구조와 기하학적 성질들을 “Matryoshka structure” 관점에서 규명하였으며 이를 위해 일반화된 Bronowski 추측의 weak form을 증명하고 탄젠트 사영사상의 기하학적 성질과의 연관성을 규명하였다.

연구성과

[논문] - A matryoshka structure of higher secant varieties and the generalized Bronowski conjecture, *Advances in Math.* (2022), vol. 406, 108526.

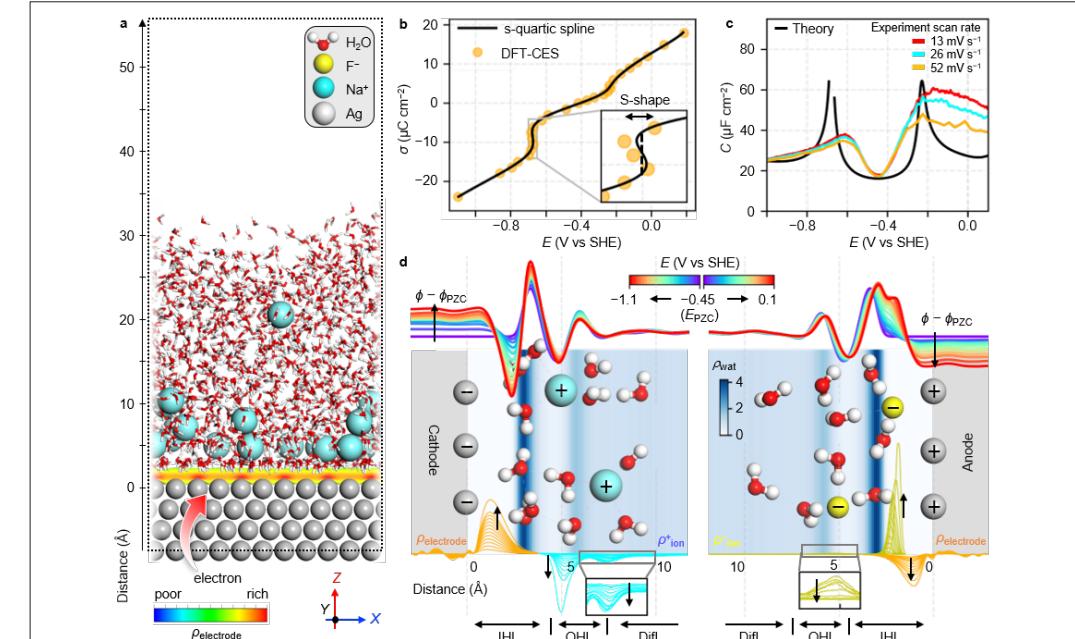
전기이중층 구조의 이론적 규명과 촉매 활성 제어 기작 이해

16

김형준
화학과
<http://m-design-lab.net>

“전기 이중층”이란 전기화학 분야에서 전극과 전해질 계면에 형성되는 복잡한 액체 구조를 일컫는다. 전기화학 반응의 핵심인 전자 전달이 바로 이 전기 이중층 내에서 이루어지기 때문에 전기 이중층 성질과 전기화학적 성질은 밀접한 관계를 가지고 있다. 하지만, 전기 이중층의 실제 구조를 정확하게 이해하는 것은 전기화학 분야에 100년 간의 난제로 남아있으며, 더욱이 전기 이중층 구조를 제어하여 전기-화학 에너지 전환 프로세스를 제어하는 것은 더욱 어려운 난제로 여겨져왔다. 두 별크상에 묻혀 있는 계면을 실험적으로 직접 관찰하기는 매우 어렵기 때문에, 이를 극복하고자 전기 이중층 구조 규명을 위한 새로운 계산화학 방법을 개발하였고, 이를 이용하여 실제 전기 이중층 구조와 이중층 측전량, 그리고 전기화학적 이산화탄소 전환 촉매 효율성 간의 상관관계를 분자 레벨에서 최초로 밝혔다.

(A) 전기 이중층 구조 규명을 위한 DFT-CES 시뮬레이션, (B, C) 전기 이중층 측전량 예측과 실험 비교, (D) 분자 수준의 전기 이중층 상세 구조



연구성과

[논문] - S.-J. Shin, D.H. Kim, G. Bae, S. Ringe, H. Choi, H.-K. Lim, C.H. Choi*, and H. Kim*, “On the importance of the electric double layer structure in aqueous electrocatalysis”, *Nat. Commun.*, 13, 174 (2022) [2021 Impact Factor = 17.694]
- S.-J. Shin, H. Choi, S. Ringe, D.H. Won, H.-S. Oh, D.H. Kim, T. Lee, D.-H. Nam, H. Kim*, and C.H. Choi*, “A unifying mechanism for cation effect modulating C1 and C2 productions from CO2 electroreduction”, *Nat. Commun.*, 13, 5482 (2022) [2021 Impact Factor = 17.694]

낙엽을 활용한 친환경 생분해성 플렉서블마이크로 슈퍼커패시터 개발

17

김영진
기계공학과
<https://sites.google.com/site/yjkimpem>

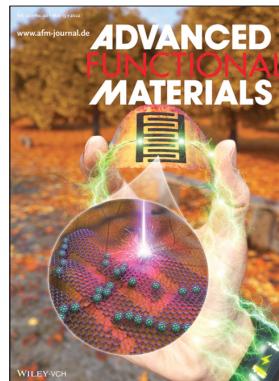
연구팀은 한국에너지기술연구원과의 공동연구를 통해, 극초단 펨토초 레이저 직접묘화 기술을 기반으로, 세계최초 낙엽 상 그래핀-무기-하이브리드 마이크로 슈퍼커패시터 제작에 성공하였다.

연구팀은 친환경의 생분해성 바이오매스인 낙엽 위에 추가 재료 없이 펨토초 레이저 필스를 조사하여, 대기 중에서 특별한 처리 없이 단일 단계로 높은 전기 전도성을 지닌 미세 전극인 3D 다공성 그래핀을 생성하는 기술을 개발하였다. 또한 이를 활용하여 유연한 마이크로 슈퍼커패시터를 제작하는 방안을 제시하였다. 해당 연구를 통해 낙엽으로부터 쉽고 저렴하며 빠르게 메조포러스한 그래핀-무기결정 하이브리드 전극을 제작할 수 있음을 보였으며, 제작된 그래핀 마이크로 슈퍼커패시터를 LED 발광을 위한 전원 공급 및 온,습도계 타이머/카운터 기능의 전자시계 전원 공급을 테스트함으로써 성능을 검증하였다. 이는 저가의 녹색 그래핀 기반 유연한 전자 제품의 대량 생산을 위한 길을 열 수 있음을 의미한다.

본 연구결과는 현재 감당이 어려운 산림 바이오매스인 낙엽을 차세대 에너지 저장 소자로 재사용함으로써, 폐자원의 재사용 및 에너지 선순환 시스템 확립을 가능하게 한다. 나아가, 본 기술은 친환경 산업의 기술 혁신 및 고부가가치 신재생에너지 및 이차전지 사업으로써의 신시장 창출 뿐 아니라 국가의 사회적, 경제적 비용을 크게 감소시킬 수 있을 것이며, 더 나아가 웨어러블 전자 제품 및 스마트 흄이나 사물인터넷에도 적용될 것으로 기대된다.

연구성과

- [논문] - T.-S.D. Le, Y.A. Lee, H.K. Nam, K.Y. Jang, D. Yang, B. Kim, K. Yim, S.-W. Kim, H. Yoon, Y.-J. Kim. "Green flexible graphene-inorganic-hybrid micro-supercapacitors made of fallen leaves enabled by ultrafast laser pulses", *Advanced Functional Materials*, 32(20), 2107768 (2022). [2021 Impact Factor = 19.92]
- T.-S.D. Le, H.P. Phan, S. Kwon, S. Park, Y. Jung, J. Min, B.J. Chun, H. Yoon, S.H. Ko, S.-W. Kim, and Y.-J. Kim. "Recent Advances in Laser-Induced Graphene: Mechanism, Fabrication, Properties, and Applications in Flexible Electronics", *Advanced Functional Materials*, 32(48), 2205158 (2022). [2021 Impact Factor = 19.92]
- Advanced Functional Materials 표지논문 선정
Vol 32, Issue 48, 2022. Link: <https://doi.org/10.1002/adfm.202270276>
- YTN Science News, (March 16, 2022).



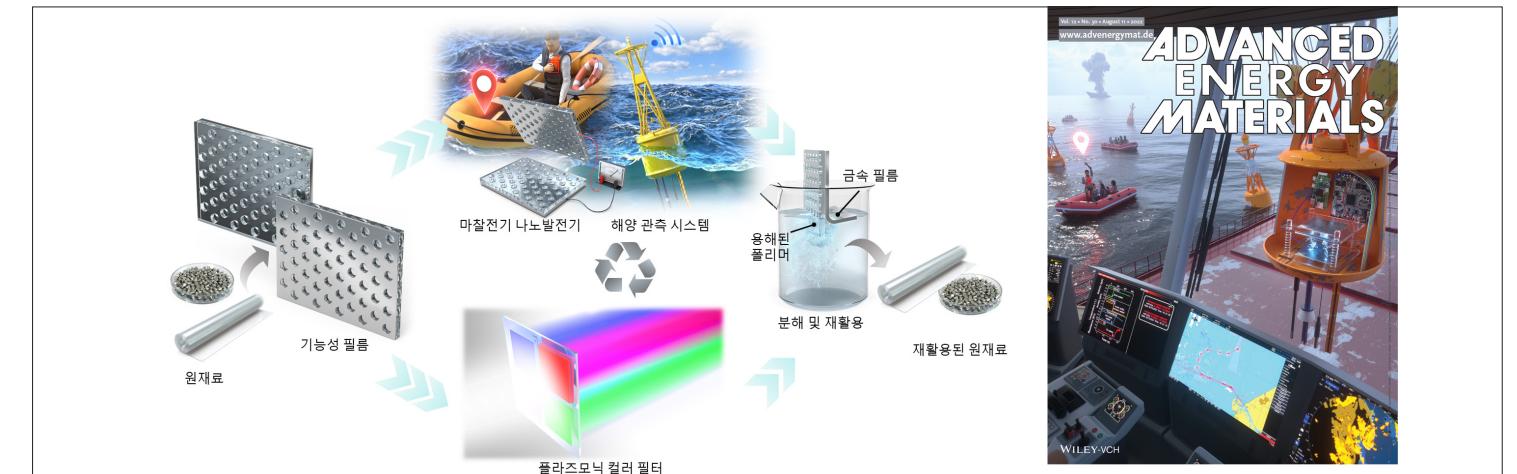
지속 가능한 해양 모니터링을 위한 친환경, 재활용 해양 에너지 수확 소자 개발

18

박인규, 안준성, 김지석, 정윤상
황순형, 유현준, 정용록, 구지민
Manmatha Mahato, 고지우
전소희, 하지환, 서희선, 최중락
강민구, 한찬규, 조요한, 이종현
정준호, 오일권
기계공학과

<http://mintlab1.kaist.ac.kr/>

본 연구에서는 소자 전체 재활용이 가능하며 기계화학적 내구성이 뛰어난 소재/구조 설계를 통해 해양 환경에서 고성능/고안정성을 나타내는 친환경 TENG를 개발하였다. 개발된 TENG 소자에서 수확된 해양 에너지를 통해 배터리를 충전하고, 바다 상태 (산도, 염도, 온도, 오일 유출) 및 응급 상황 모니터링에 사용되는 전자 소자와 무선 통신 모듈을 구동하였다. 추가적으로 개발된 TENG 소자는 사용 후 손쉽게 분해되어 환경오염 없이 플라즈모닉 컬러 필터로 재사용될 수 있다. 이는 해양 에너지를 수확하여 다양한 바다 환경을 모니터링할 수 있는 상용 소자들을 구동할 수 있을 뿐만 아니라 폐기 과정에서 새로운 소자로 재활용하여 환경 오염을 없앨 수 있음을 보인 것에서 그 의미가 크다.



(좌) 지속 가능한 해양 모니터링을 위한 에너지 수확 소자 연구 개념도 (우) Advanced Energy Materials 저널 후면 표지 (back cover figure)

연구성과

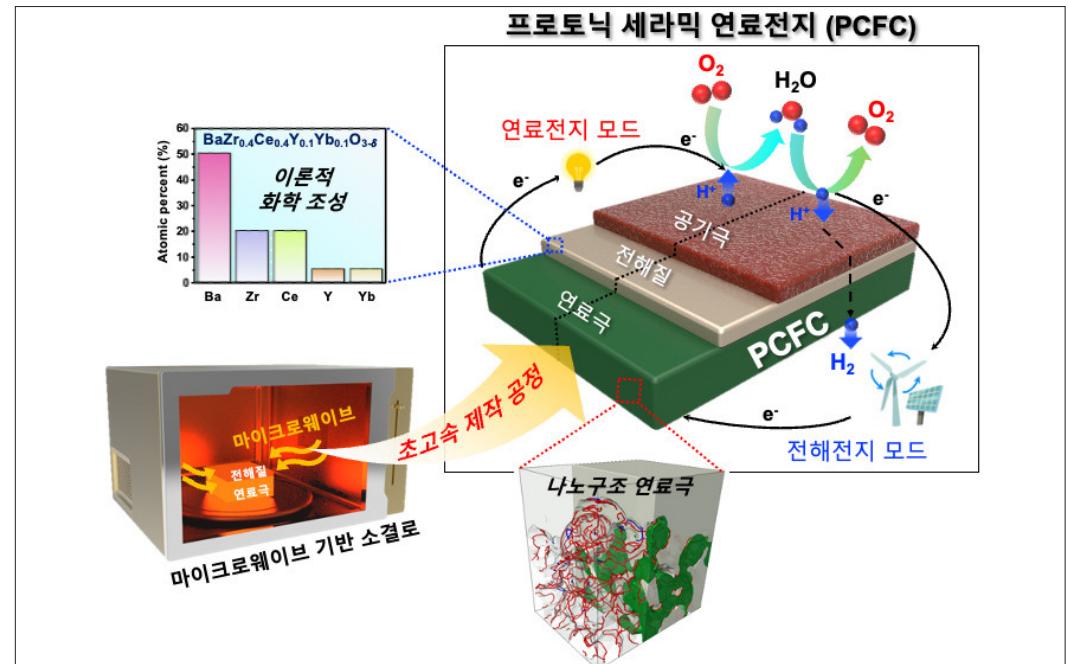
- [논문] - J. Ahn, J.-S. Kim, Y. Jeong, S. Hwang, H. Yoo, Y. Jeong, J. Gu, M. Mahato, J. Ko, S. Jeon, J.-H. Ha, H.-S. Seo, J. Choi, M. Kang, C. Han, Y. Cho, C. H. Lee, J.-H. Jeong*, I.-K. Oh*, and I. Park*, "All-Recyclable Triboelectric Nanogenerator for Sustainable Ocean Monitoring Systems", *Advanced Energy Materials*, 12, 30, 2201341 (2022), Back cover article. [2022 Impact Factor = 29.698]

전자레인지 원리를 이용한 차세대 에너지 변환 소자 제조 기술 개발

19

이강택, 김동연, 배경택, 김경준
임하니, 장승수, 오세은, 이상원
신태호
기계공학과
<http://www.ktlee.kaist.ac.kr>

프로토닉 세라믹 연료전지는 프로톤 전도성 세라믹 전해질의 높은 이온 전도도와 낮은 활성화 에너지 특성으로 인해 기존의 산소 이온 전도성 고체 산화물 연료전지 보다 600도 이하 저온에서 고효율로 전력 변환 및 수소 생산이 가역적으로 가능하여 차세대 에너지 변환 핵심 기술로 떠오르고 있다. 이러한 프로토닉 세라믹 연료전자는 난소결성 바륨 기반 산화물 전해질을 사용하는데, 이를 치밀화하기 위해서 1500도 이상 고온에서 장시간 소결 공정이 필수적이다. 하지만, 이러한 극한 공정 중에 산화물 내부에서 발생하는 양이온 확산으로 화학적 조성이 불안정해지는 치명적인 문제가 있다. 본 연구에서는 전자레인지의 마이크로파 원리를 사용해 5분만에 초고속 소결을 해 이론적 화학조성의 전해질을 갖는 프로토닉 세라믹 연료전지를 개발하는 데 성공하였다. 본 기술은 마이크로파를 이용한 초고속 제조 공정이 기존 공정의 난제를 해결하고 프로토닉 세라믹 연료전지 성능을 극대화할 수 있음을 실험적으로 증명했고, 이는 탄소중립 사회 실현을 앞당길 수 있는 고성능 차세대 에너지 변환기술 발전의 촉매 역할을 할 것으로 기대된다.



마이크로파 기반 초고속 제작 공정을 적용한 고성능 프로토닉 세라믹 연료전지 및 구동 모식도

연구성과

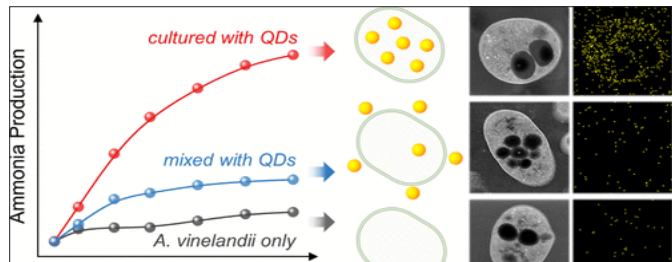
[논문] - D. Kim, K. T. Bae, K. J. Kim, H. -N. Im, S. Jang, S. Oh, S. W. Lee, T. H. Shin, K. T. Lee*, "High-Performance Protonic Ceramic Electrochemical Cells", *ACS Energy Letters*, 7, 2393 (2022)
[2022 Impact Factor = 23.991]

양자점을 이용한 광화학반응을 통한 이산화탄소 전환 및 암모니아 생산

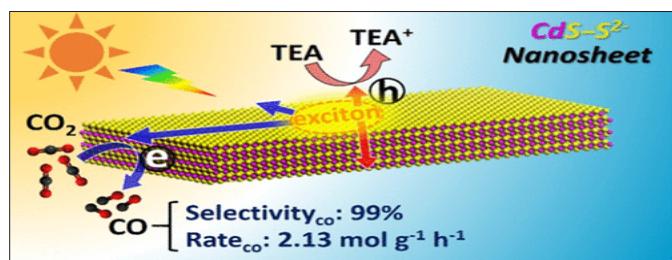
20

이도창, 고성준
Nianfang Wang
생명화학공학과
<http://dclee.kaist.ac.kr>

양자점(QD)은 풍부한 태양에너지를 활용한 광화학 반응의 효율적인 후보로 각광받고 있다. QD 기반 광화학반응은 탄소 중립을 달성할 수 있는 유망한 해결책이다. 이에 따라, 우리 연구팀은 (1) QD와 호기성 질소고정 박테리아인 *Azotobacter vinelandii*로 구성된 하이브리드 시스템을 사용한 광유도 질소 고정 및 (2) 초박형 CdS 나노시트를 사용한 효율적이고 선택적인 이산화탄소 광환원이라는 두 가지 유망한 QD 기반 광화학 응용 분야에서 높은 성과를 이루었다. 질소 고정의 경우, QD-*A.vinelandii* 하이브리드시스템에서 QD를 흡수하면 박테리아의 암모니아 생성이 크게 증가한다. QD-박테리아 계면에 대한 포괄적인 이해는 화학물질 생산을 위한 새롭고 효율적인 나노-바이오하이브리드 시스템의 길을 열어준다. 또한 이산화탄소 광환원의 경우, CdS 나노시트에서 원자 수준의 표면 공학을 통해 환원 활성 부위와 산화 활성 부위를 지정된 표면으로 공간적으로 분리할 수 있었다. 표면 분리된 산화 환원 활성구역은 CdS 나노시트에서 효율적인 전하 분리를 가능하게 하여 이산화탄소에서 일산화탄소로의 전환율을 2배 증가시킨다. 이러한 QD 기반 광화학 반응에서 달성된 획기적인 성능은 탄소중립 사회 구축에 대한 새로운 통찰력을 제공한다.



콜로이드 양자점을 포함하는 배지에서 배양된 *Azotobacter vinelandii*에 의한 광구동 암모니아 생산



콜로이드 CdS 나노시트의 표면 분리 산화 환원 활성 부위에 의해 가능한 향상된 효율적이고 선택적인 이산화탄소 광환원

연구성과

[논문] - Koh, S. et al. Light-Driven Ammonia Production by *Azotobacter vinelandii* Cultured in Medium Containing Colloidal Quantum Dots. *J. Am. Chem. Soc.* 2022, 144, 24, 10798–10808
- Wang, N. et al. Efficient, Selective CO₂ Photoreduction Enabled by Facet-Resolved Redox-Active Sites on Colloidal CdS Nanosheets. *J. Am. Chem. Soc.* 2022, 144, 37, 16974–16983



(좌) 양자점-박테리아 복합체 기반 암모니아 생산 과정을 모식화한 이미지
(우) 공간 분리된 산화활성 부위를 가진 CdS 나노시트 광촉매 (JACS 저널 표지로 선정)

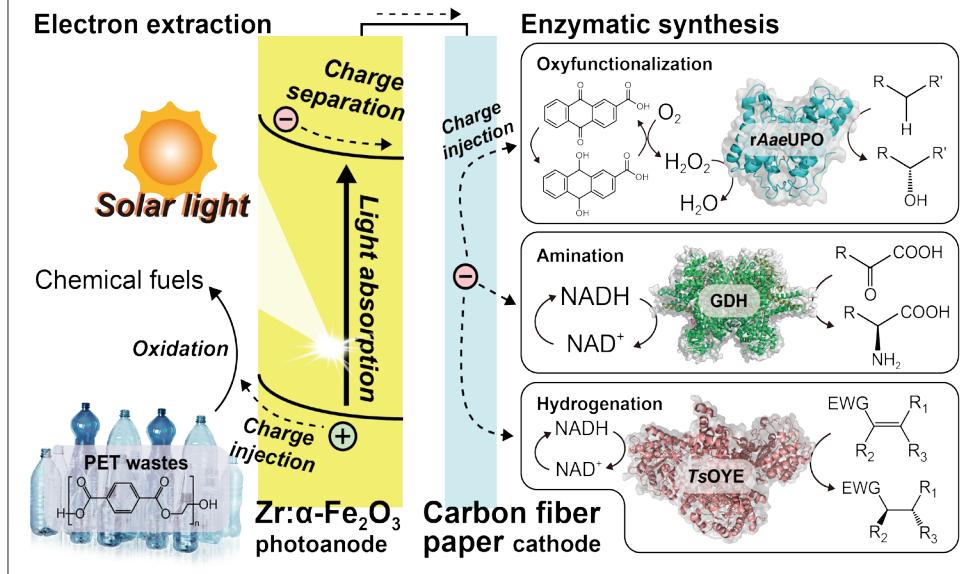
태양빛과 전기를 이용한 미세플라스틱 업사이클링 구축

21

박찬범, 김진현, 장진하
신소재공학과

<http://biomaterials.kaist.ac.kr/>

플라스틱은 현대 생활에서 필수적인 재료로, 매년 약 3억 9천만 톤이 전 세계적으로 생산되고 있다. 최근 코로나바이러스 대유행 때문에 포장재와 개인 보호 장비의 사용이 증가해 플라스틱 수요가 더욱 증가했다. 하지만, 대부분의 플라스틱 폐기물은 소각되거나 자연환경에 매립하는 방식으로 처리되고 있어 환경적/경제적 문제를 일으키고 있다. 또한, 이 과정에서 생성되는 미세플라스틱은 생체에 축적되기 때문에 생태적 위협이 되고 있다. 이 연구에서는 헤마タイト 광촉매, 태양에너지, 및 전기에너지를 이용해 미세플라스틱을 업사이클링하는 광전기화학 방식을 구축했다. 더 나아가 플라스틱 업사이클링 광촉매반응을 여러 생체촉매 반응과 연합하여 산화환원 효소의 반응을 가속했을 뿐만 아니라 양극과 음극에서 동시에 고부가가치 화합물을 생성했다.



표지논문으로 선정

연구성과

[논문] - J. Kim, J. Jang, T. Hilberath, F. Hollmann, and C. B. Park*, "Photoelectrocatalytic biosynthesis fuelled by microplastics", *Nature Synthesis* 1, 776-786 (2022)

인쇄성이 뛰어난 생분해성 3D 프린팅 필라멘트

22

명재우, 최신형, 김유진
건설및환경공학과

<https://sites.google.com/view/withlab>

플라스틱 오염 문제는 반드시 해결되어야 하는 환경 난제이며, 3D 프린팅 시장에서도 대량의 플라스틱 폐기물이 발생하고 있다. 본 연구에서는 생분해성 플라스틱(PLA, PHB)과 난분해성 플라스틱(HDPE, PE)를 블렌드하여 3D 프린팅에 적용하고 생분해성을 분석한 결과, 3D 인쇄 시제품이 자연환경에서의 모방 테스트에서 생분해 되었음을 입증하였다. 본 연구를 통해 인쇄성과 친환경성이 동시에 뛰어난 바이오 기반 제품을 3D 프린팅 시장에 선보일 수 있는 상업화 가능성을 제시하였다.



연구성과

[논문] - S. Choe, Y. Kim, G. Park, D.H. Lee, J. Park, A.T. Mossisa, S. Lee, J. Myung, Biodegradation of 3D-printed biodegradable/non-biodegradable plastic blends, *ACS Appl. Polym. Mater.* 4, 5077–5090 (2022).

[홍보] - Highlighted in Newsweek: <https://www.newsweek.com/plastic-nondegradable-scientist-explains-viral-red-dit-thread-1711628>

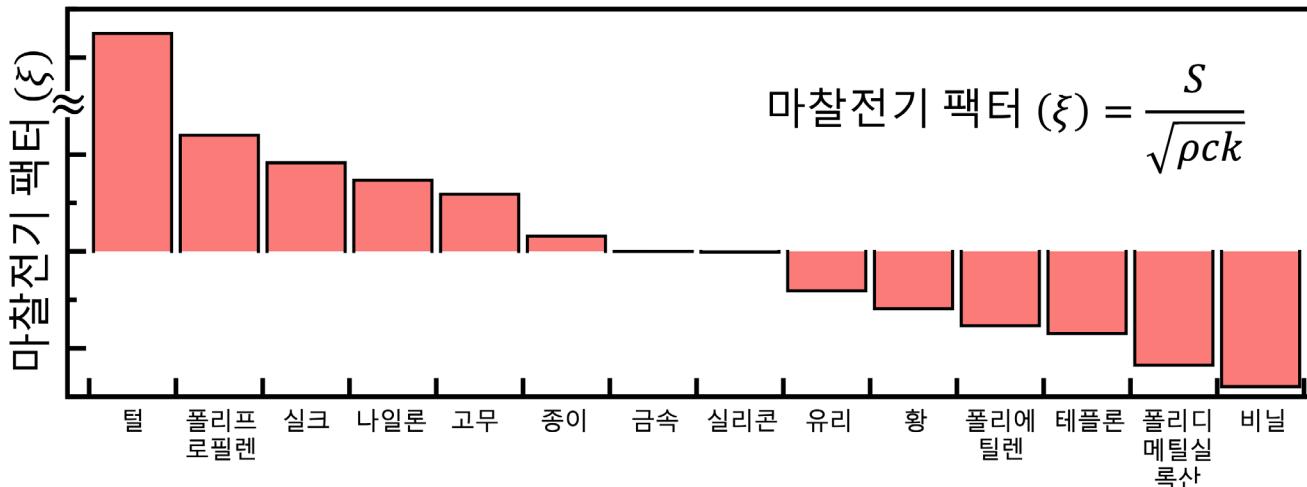
[수상] - 2022 ASPIRE(APEC 혁신연구교육과학상) 대한민국 대표 선발

마찰전기 발생 원리 세계 최초 규명

23

김용현
물리학과<https://qnmmsg.kaist.ac.kr>

마찰전기는 수천년간 발생원리가 명확하게 규명되지 않은 인류의 난제 중의 하나이다. 양자역학과 나노기술이 최첨단으로 발전한 오늘날에도 마찰전기를 정량적으로 설명하는 물리 이론이 없었다. KAIST 물리학과 연구팀은 2013년 두 물질간의 경계면에서 급격한 온도변화에 의해 열전현상이 원자수준으로 증폭된다는 사실을 발견하였고, 이 개념을 이용해 마찰에 의한 대전현상을 설명할 수 있을 것으로 예상했다. 지난 9년간의 연구결과 경계면에서의 마찰열에 의해 두 물질간에 급격한 온도변화가 발생하고 이에 의해 전하가 두 물질 사이에서 이동할 수 있음을 증명하였다. 전하의 이동 방향과 세기가 제백계수, 밀도, 비열, 열전도도에 의해 결정된다는 사실을 발견하고 기존 마찰전기 실험결과를 설명하는 매우 간단한 지배 공식을 유도하였다. 이는 마찰전기 발생에 대한 최초의 정량적 공식이다.



세계최초 정량화된 마찰대전열과 마찰전기팩터 공식.

연구성과

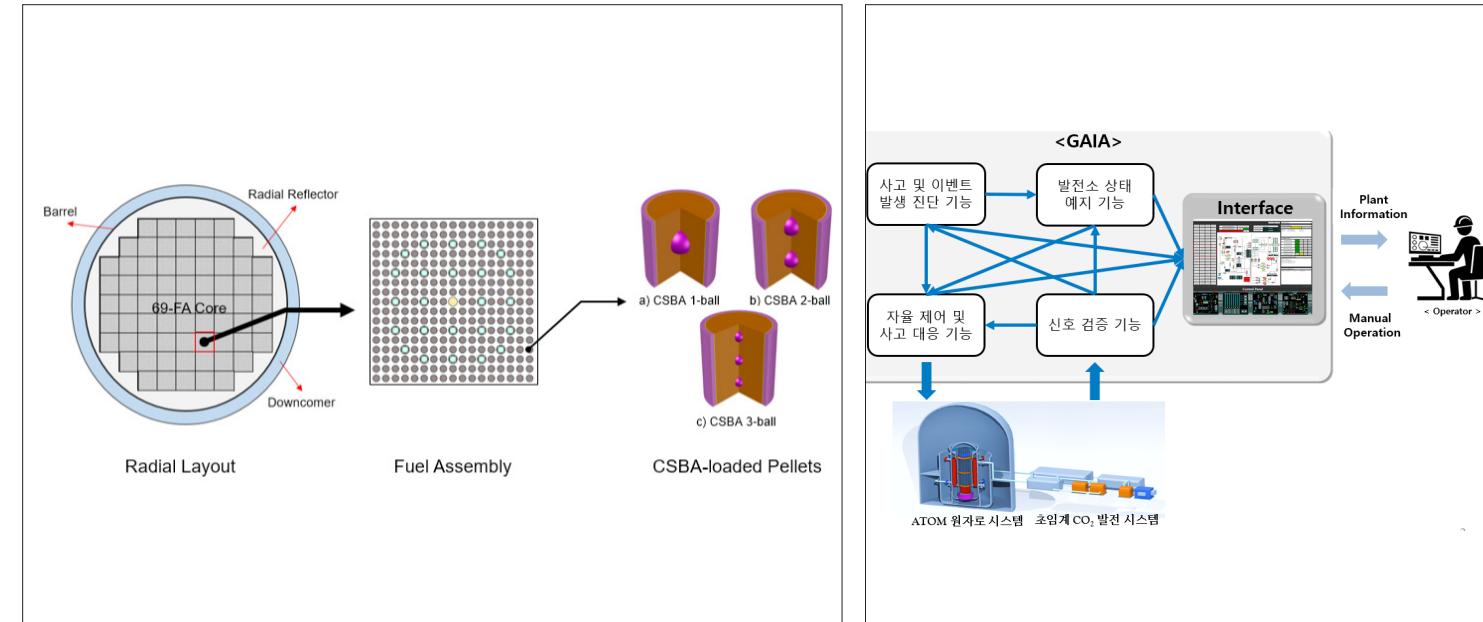
[논문] - E.-C. Shin, J.-H. Ko, H.-K. Lyeo, and Y.-H. Kim, Derivation of a governing rule in triboelectric charging and series from thermoelectricity, Phys. Rev. Research 4, 023131 (2022)

자율형 무봉산 소형원자로 ATOM 개념 및 핵심기술 개발 (선도연구센터)

24

김용희, 장창희, 이정익, 임만성
윤종일, 정용훈, 오태석
원자력및양자공학과<http://casmrr.kaist.ac.kr/>

극한의 안전성을 갖는 ATOM이라 불리는 소형모듈형원자로(SMR) 시스템 개념을 도출하고 관련 다양한 핵심기술을 개발하였다. 자율운전이 가능한 SMR 구현을 위해 CSBA(Centrally Shielded Burnable Absorber)라는 혁신적 가연성흡수체 기술과 TOP(Truly Optimized PWR)라는 핵연료집합체 개념에 기초하여 무봉산 고성능 노심설계를 구현하고 제어봉을 움직이지 않고도 부하증운전이 완전히 피동적이고 자율적으로 가능함을 확인하였다. 세계 최초로 SMR을 위한 초임계이산화탄소(SCO₂) 사이클 개념을 개발하고 그 타당성을 확인하였다. 중대사고 배제를 위해 피동적으로 원자로를 냉각시킬 수 있도록 ATOM은 설계되었으며, 인공지능에 진단, 감시, 제어 기능을 수행하는 인공지능 시스템도 개발되었다. NC-ARES라 불리는 초고성능 구조재와 축관(swaging)에 기반한 고성능 사고저항성(ATF) 피복재 기술을 개발하여 국내외 특허를 획득하였으며, NC-ARES의 ASME 등재를 추진하고 있다. 개발된 ATOM 개념 및 핵심기술은 한국수력원자력(주) 주도로 개발되는 국가 혁신형 SMR 개발에서 활용될 계획이다.



무봉산 자율형 ATOM의 TOP 노심설계 개념도

자율형 ATOM을 위한 인공지능 시스템 GAIA 개발

연구성과

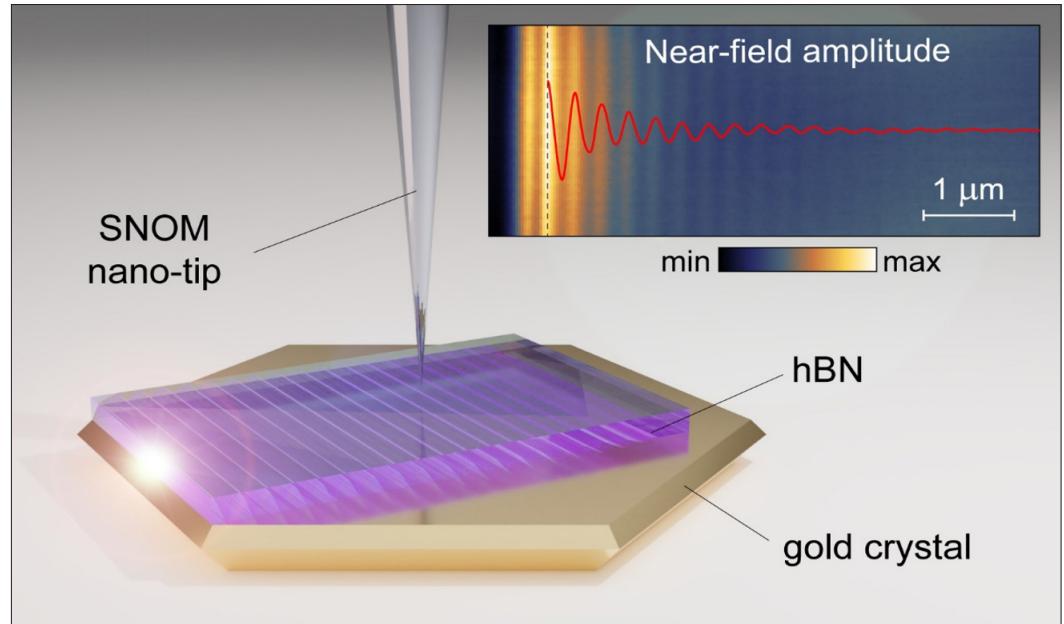
[논문] - Jong Woo Kim et al., "Study of structural stability at high temperature of pseudo-single tube with double layer as an alternative method for accident-tolerant fuel cladding," J. of Nuc. Materials, Vol. 566, 2022.

2차원 반데르발스 물질 이미지 폴라리톤 측정 기술 개발

25

장민석
전기및전자공학부
<http://janglab.org>

자유공간의 빛은 회절 한계로 인해 파장의 절반 이하의 공간에 집속될 수 없다. 금속의 플라즈몬을 이용하면 이러한 한계를 어느정도 극복할 수 있으나 광손실도 동시에 커진다는 문제가 있었다. 금속 기판 위에 놓인 2차원 반데르발스 물질을 이용하면 원자 수 층 수준의 좁은 틈(파장의 1/1000 수준)에 강하게 집속되면서도 낮은 광손실을 가지는 이미지 폴라리톤을 형성할 수 있다. 이 연구는 그래핀의 이미지 플라즈몬을 최초로 근접장 검출하였으며, 하이퍼볼릭하면서 극도로 낮은 광손실을 보이는 h-BN 및 α -MoO₃ 이미지 포논-폴라리톤을 분석하는데 성공하였다. 제안 기술을 이용하면 강력한 빛-물질 상호작용을 유도할 수 있어, 향후 센서 및 양자 소자에 활용될 것으로 기대된다.



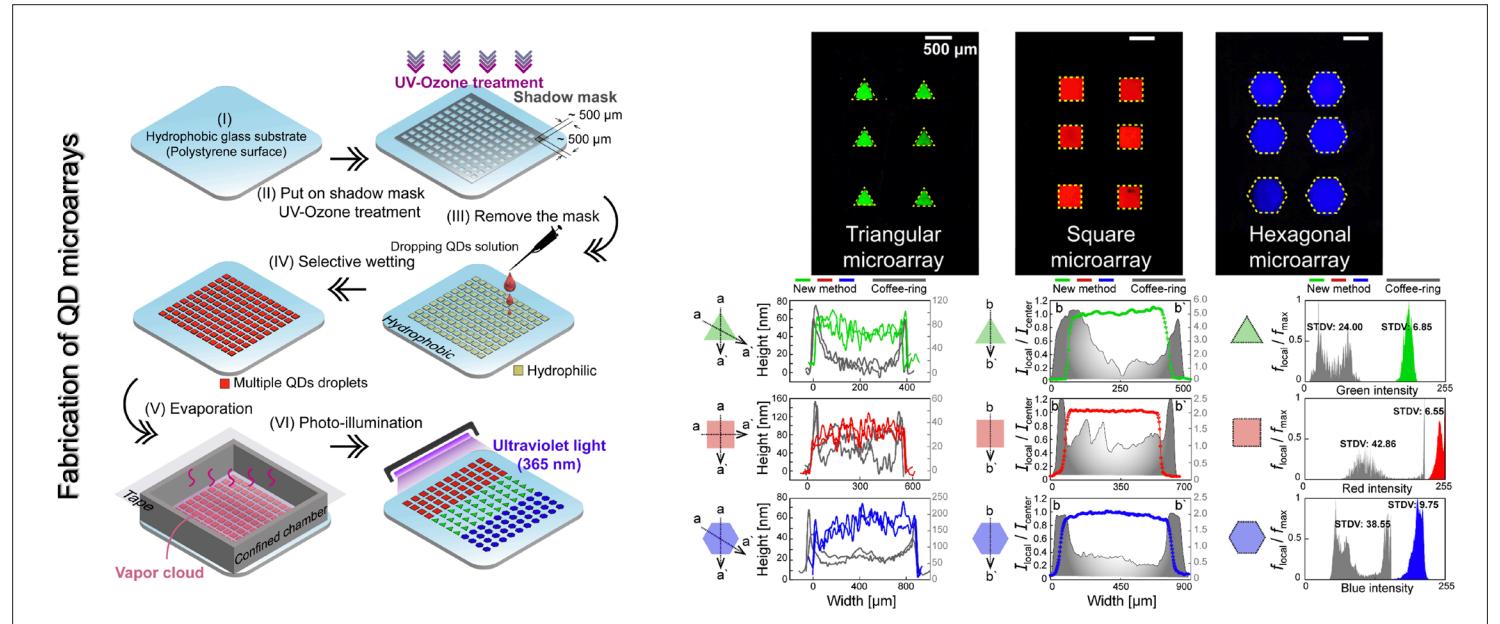
2차원 반데르발스 물질을 따라 진행하는 이미지 포논-폴라리톤의 근접장 측정

26

김형수, 편정수
기계공학과
<http://fil.kaist.ac.kr>

커피링 완벽제어 프린팅 기술

커피링 얼룩은 프린팅 액이 고체 표면 위에서 마르면서 액적 표면의 상대적 불균일 증발율 때문에 발생하는 피할 수 없는 현상으로 알려져 있다. 불균일한 커피링 얼룩은 저비용, 고효율, 초정밀 패터닝 기술이 필요한 인쇄전자 분야에서 반드시 해결되어야 하는 난제 중에 하나이다. 특히, QD-LED와 같은 고해상도 디스플레이 소자인 양자점(Quantum-Dots)의 경우 제작 공정에 따라 그 성질이 민감하게 변화하므로 손실을 막고 본연의 성질 유지가 그 무엇보다 중요하다. 본 연구팀은 잉크젯 기반의 토출식 프린팅 기술에 집단 액적의 증발을 통해 자발적으로 발생하는 상호 마랑고니 작용 효과를 이용하여 소재의 손상을 방지하고 커피링 얼룩을 완벽하게 제어할 수 있는 기술을 개발하였다. 해당 기술은 인쇄전자에 사용되는 값비싼 소재들을 대면적에 효율적이고 균일하게 프린팅 할 수 있고 패터닝 공정도 간소화시켜 경제성을 높일 수 있을 것으로 기대한다.



연구성과

- [논문] - SG Menabde, S Boroviks, J Ahn, JT Heiden, K Watanabe, T Taniguchi, T Low, DK Hwang, NA Mortensen, MS Jang, *Science Advances* 8, eabn0627 (2022) [IF: 14.980].
- SG Menabde, I-H Lee, S Lee, H Ha, JT Heiden, D Yoo, T-T Kim, T Low, YH Lee, SH Oh, MS Jang, *Nature Communications* 12, 938 (2021) [IF: 17.694]

연구성과

- [논문] - J. Pyeon, K.M. Song, Y.S. Jung, and H. Kim, "Self-Induced Solvent Marangoni Flows Realize Coffee-Ring-Less Quantum Dot Microarrays with Extensive Geometric Tunability and Scalability," *Advanced Science*, 9(11), p.2104519. (2022) [Impact factor: 17.521]
- [수상] - 삼성 디스플레이 산학협력 연구 금상 수상

6G 통신의 핵심기술인 CMOS 공정 기반 초저잡음 서브테라헤르츠 신호 생성 반도체 회로 개발

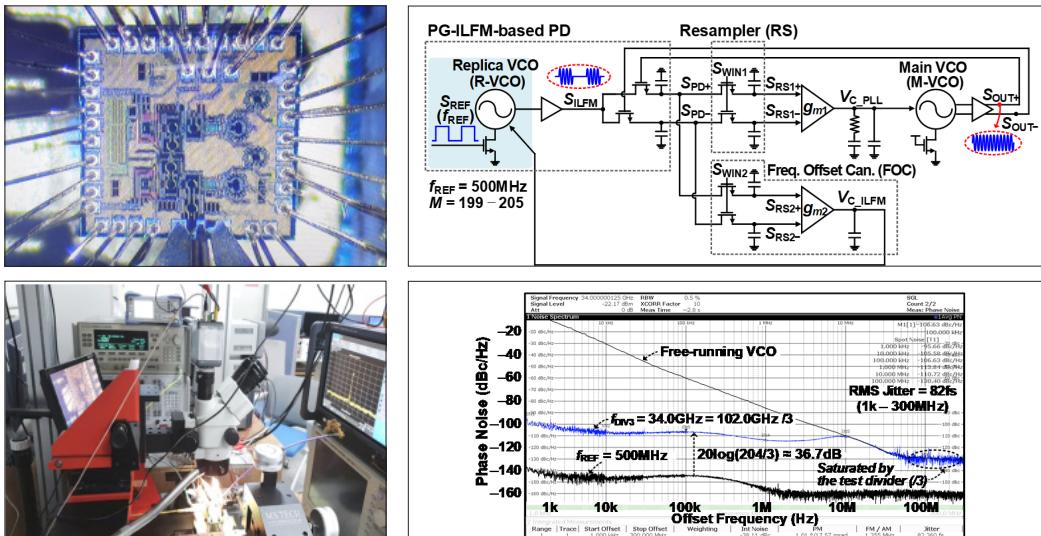
27

최재혁, 박선의, 조윤서
전기및전자공학부<https://www.icsl.kaist.ac.kr/>

6G 통신은 최대 20Gbps 전송 속도를 갖는 5G 통신 대비 최대 50배 빠른 1Tbps를 목표로 연구가 진행되고 있다. 일반적으로 통신 주파수 대역이 올라갈수록 넓은 통신 대역폭을 사용할 수 있어 데이터 전송 속도를 높일 수 있기 때문에, 6G 통신에서 요구하는 높은 데이터 전송 속도를 위해서는 100기가헤르츠 이상 Sub-THz 주파수 대역의 사용이 필수적이다. 하지만, 이러한 높은 주파수 대역에서 반송파로 사용될 수 있는 정확한 기준 신호를 CMOS 공정을 이용해 만드는 것은 큰 난제였다. CMOS 공정은 다른 반도체 공정에 비해 초소형, 저전력 설계에 유리하고 또한 디지털 회로와의 접속 면에서 큰 장점을 갖는다. 그럼에도, 동작 주파수와 고주파 대역 이득(gain) 면에서 한계가 있고, 잡음 특성이 SiGe, InP 등의 다른 공정에 비해 매우 불리하기 때문에 100기가헤르츠 이상의 주파수 대역에서 초저잡음 성능을 달성하는 것은 매우 어려운 것으로 여겨졌다. 하지만, 본 연구를 통해 최재혁 교수 연구팀은 새로운 신호처리 기법을 반도체 회로 설계에 도입함으로써 기존의 한계를 극복하고, CMOS 공정을 사용해 처음으로 100기가헤르츠 이상 대역에서 고차 변복조 기술을 지원할 수 있는 초저잡음 신호생성 반도체 칩을 선보였다. 이 기술은 CMOS 공정 기반으로도 6G 통신에서 요구하는 초저잡음 성능을 달성할 수 있다는 것을 보여주었으며, 미래 6G 통신 칩의 가격 경쟁력과 접속도 향상에 크게 기여할 것으로 기대된다.

1 2
3 4

1. 현미경으로 관찰한 반도체 칩
2. PG-ILFM 기반의 PD를 사용한 PLL
3. 측정 환경 사진
4. 102 GHz 출력신호의 phase noise 측정 결과



연구성과

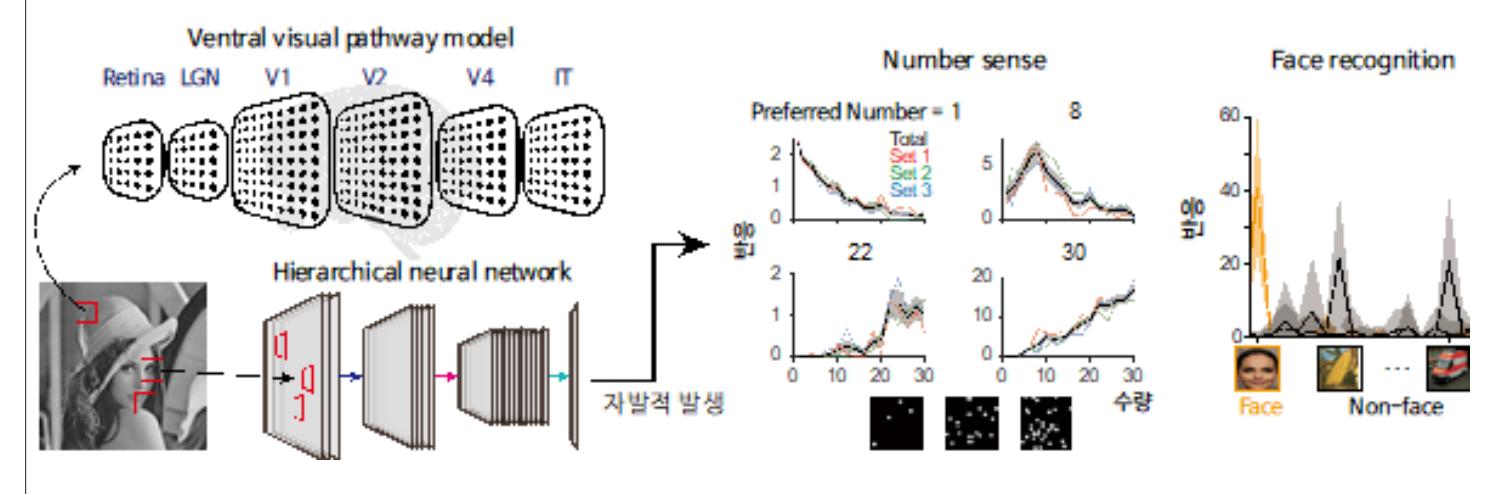
- [논문] - S. Park=, S. Choi=, S. Yoo*, Y. Cho, and J. Choi*, "An Ultra-Low Jitter, Low-Power, 102-GHz PLL Using a Power-Gating Injection-Locked Frequency Multiplier-Based Phase Detector," *IEEE Journal of Solid-State Circuits (JSSC)*, Sep. 2022. (= Equally-Credited Authors)
- S. Yoo=, S. Park=, S. Choi=, Y. Cho, H. Yoon, C. Hwang, J. Choi*, "An 82fsRMS-Jitter and 22.5mW-Power, 102GHz W-Band PLL Using a Power-Gating Injection-Locked Frequency Multiplier-Based Phase Detector in 65nm CMOS," *IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC)*, Feb. 2021. (= Equally-Credited Authors)
- [수상] - 제 22회 대한민국 반도체 설계대전, 대통령상 수상, 2021.10.26.
- 2021 IDEC Congress Chip Design Contest, Best Design Award, 2021.06.24.

학습 없이 자연발생하는 뇌신경망 인지 지능 발생 원리 규명

28

백세범
뇌인지과학과
<https://vs.kaist.ac.kr/>

뇌신경망에서 인지 지능은 어떻게 최초로 발생하는가? 방대한 양의 학습 데이터를 통한 훈련이 필요한 인공신경망과는 달리, 동물의 뇌신경망은 태어난 직후부터 학습 없이도 일정 수준의 인지 기능을 수행할 수 있다. 본 연구에서는 뇌신경망의 계산적 모델 시뮬레이션에 기반하여 “학습이 이루어지기 전, 최초의 신경망 인지 기능이 자발적으로 발생하는 원리”를 규명하였다. 이 결과는 궁극적으로 자연 뇌지능 발생의 원리를 이해하는 초석이 될 뿐만 아니라, 학습에 의존하는 현재의 인공지능 구현의 방법과 완전히 차별되는 새로운 관점의 인공지능 모델을 개발하고 진정한 “brain-equivalent AI”를 구현하는데 기여할 것으로 기대된다.



뇌신경망의 시각 시스템 Ventral visual pathway을 모사한 모델 신경망 시뮬레이션

연구성과

- [논문] - Baek S, Song M, Jang J, Kim G & Paik SB, "Face detection in untrained deep neural networks", *Nature Communications* 12, 7328 (2021) [Impact Factor = 17.694] (2021 Top 25 Life and Biological Sciences Articles 선정)
- Kim G, Jang J, Baek S, Song M & Paik SB, "Visual number sense in untrained deep neural networks", *Science Advances* 7(1), eabd6127 (2021) [Impact Factor = 14.980]
- [특허] - Electronic device for recognizing visual stimulus based on spontaneous selective neural response of deep artificial neural network and operating method thereof (US patent US 11,354,918 B2) (2022)

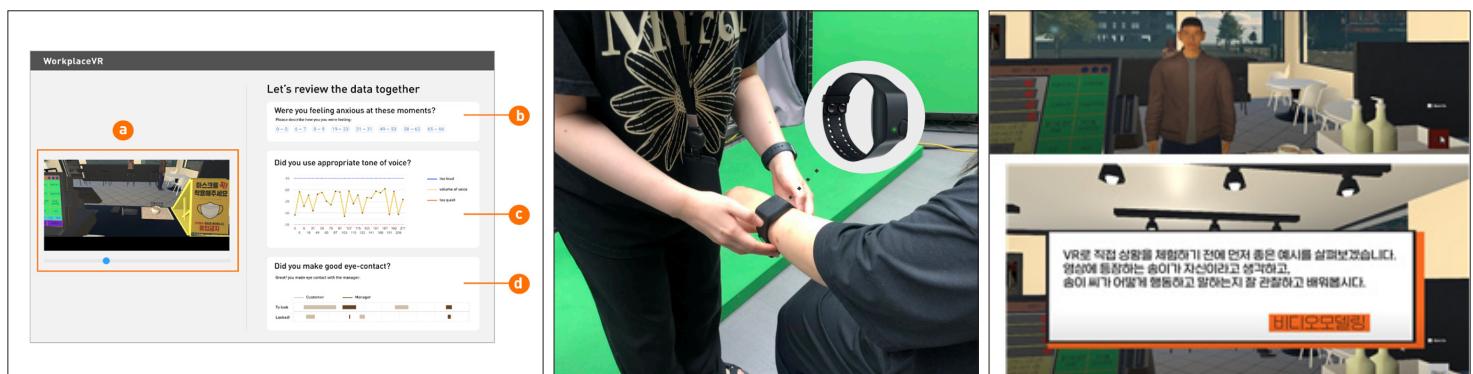
슬기로운 직장생활: 성인 자폐스펙트럼인의 업무- 사회 기술 증진을 위한 생체 신호 기반 가상 현실 기술 개발

29

자폐스펙트럼 장애를 가진 사람들은 의사소통의 문제, 정서 조절의 문제, 감각 처리의 문제 등으로 인해 직장 생활에서 다양한 어려움을 경험하고 있다. 성공적인 직장 생활에서 직무에 대한 기술 만큼 중요한 것이 직무를 둘러싼 사회적 규범을 이해하고 동료와 협력하는 기술이다. 자폐스펙트럼 성인들의 원활한 직장 적응을 위하여 VR기술과 센서데이터를 활용하여, 사용자 주도적으로 업무-사회 기술 증진을 가능하게 하는 ‘슬기로운 직장생활’ 시스템을 개발하고 실증하였다. 본 연구는 자폐스펙트럼 장애 연구의 세계적인 권위자인 분당서울대학교 병원의 소아청소년정신건강의학 전문의 유희정 교수 및 Georgia Tech의 컴퓨터공학과 Jennifer Kim, 한양대학교 인공지능학과 한경식 교수 연구팀과 함께 진행한 국제 공동 연구이다.

홍화정

산업디자인학과

<http://hwajunghong.com/>

1 2 3

1. 그래픽 기능을 사용하는 사용자 인터페이스를 활용한 데이터 확인 프로그램 예시. A: VR체험 영상 다시보기, B: 사용자가 체험 중 긴장했다고 분석되는 지점, C: 사용자의 목소리 크기 변화, D: 사용자와 VR 상의 캐릭터와의 눈맞춤 정도 변화.
2. VR 체험 상황에서 연속적이고 실시간으로 사용자의 생체신호를 전송할 수 있는 ematica사의 E4 밴드를 발명에서 이용하는 모습
3. 슬기로운 직장생활 VR 체험 컨텐츠

연구성과

[논문] - Jennifer G Kim, Taewan Kim, Sung-In Kim, So-youn Jang, Eun Bin (Stephanie) Lee, Heejeong Yoo, Kyungsik Han, Hwajung Hong. The Workplace Playbook VR: Exploring the Design Space of Virtual Reality to Foster Understanding of and Support for Autistic People. Proc. ACM on Human-Computer Interaction, CSCW 2022.

30

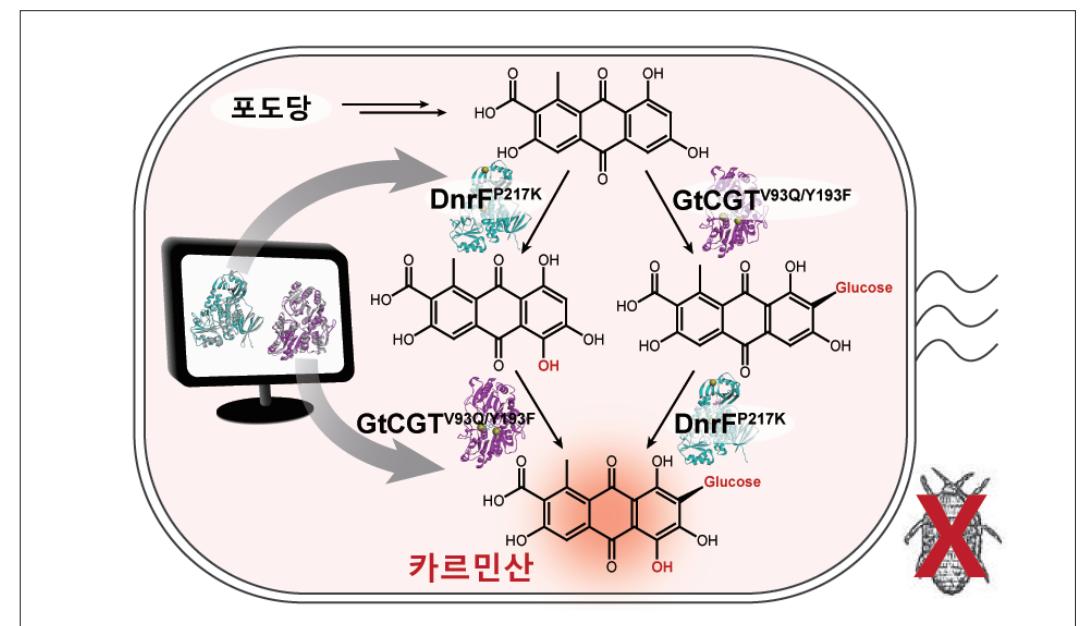
이상엽, 양동수, 장우대
생명화학공학과
<http://mbel.kaist.ac.kr>

미생물 이용한 천연 붉은 색소 카르민산 생산 기술 개발

카르민산(carmine acid)은 붉은색 천연색소로 딸기우유 등 식품과 매니큐어 등 화장품 분야에서 널리 활용되고 있다. 카르민산은 연지벌레(cochineal) 추출을 통해 얻어지는데, 이러한 생산 방법은 경제, 보건, 사회 등 여러 방면에서 문제를 지니고 있다. 연지벌레를 사용하지 않고 카르민산을 생산하기 위해 본 연구에서는 포도당으로부터 카르민산을 생산하는 미생물 균주를 최초로 개발하였다.

포도당으로부터 카르민산 생합성 경로

생화학 반응 분석 및 가상 시뮬레이션 기반 효소 개량을 통하여 카르민산 생합성 경로를 규명하였고, 대사공학적으로 개량된 대장균을 통하여 카르민산을 성공적으로 생산할 수 있었다.



연구성과

[논문] - Yang, D., Jang, W.D., and Lee, S.Y., "Production of carminic acid by metabolically engineered Escherichia coli", J. Am. Chem. Soc., 143(14): 5364-5377 (2021) [2021 Impact Factor = 16.383]
[특허] - 'C-글리코실전이효소 변이체 및 이의 용도', 대한민국 출원, 10-2022-0011630 (2022. 01. 26)

액체금속 입자의 프린팅 및 전자문신 기술 개발

31

액체금속 입자에 전해질을 부착하는 방식으로 혼탁액을 구현하여 프린팅 및 전자문신에 적용될 수 있는 잉크를 개발하였다. 혼탁액의 용매를 적절하게 조절하는 방식으로 프린팅에 적합한 잉크 혹은 피부에 직접 바를 수 있는 전자문신을 구현할 수 있었다. 프린팅으로 제작된 유연한 전자소자나 피부위에 부착된 전자문신을 이용하여 ECG, EMG와 같은 생체신호를 효과적으로 측정할 수 있는 웨어러블 시스템을 구현하는데 성공하였다.

스티브박, 이건희, 이예림, 우희진
신소재공학과

<http://steveparklab.kaist.ac.kr/>



연구성과

- [논문] - Lee, G. H., Lee, Y. R., Kim, H., Kwon, D. A., Kim, H., Yang, C., ... & Park, S. (2022). Rapid meniscus-guided printing of stable semi-solid-state liquid metal microgranular-particle for soft electronics. *Nature Communications*, 13(1), 1-10.
- Lee, G. H., Woo, H., Yoon, C., Yang, C., Bae, J. Y., Kim, W., ... & Park, S. (2022). A Personalized Electronic Tattoo for Healthcare Realized by On-the-Spot Assembly of an Intrinsically Conductive and Durable Liquid-Metal Composite. *Advanced Materials*, 34(32), 2204159.

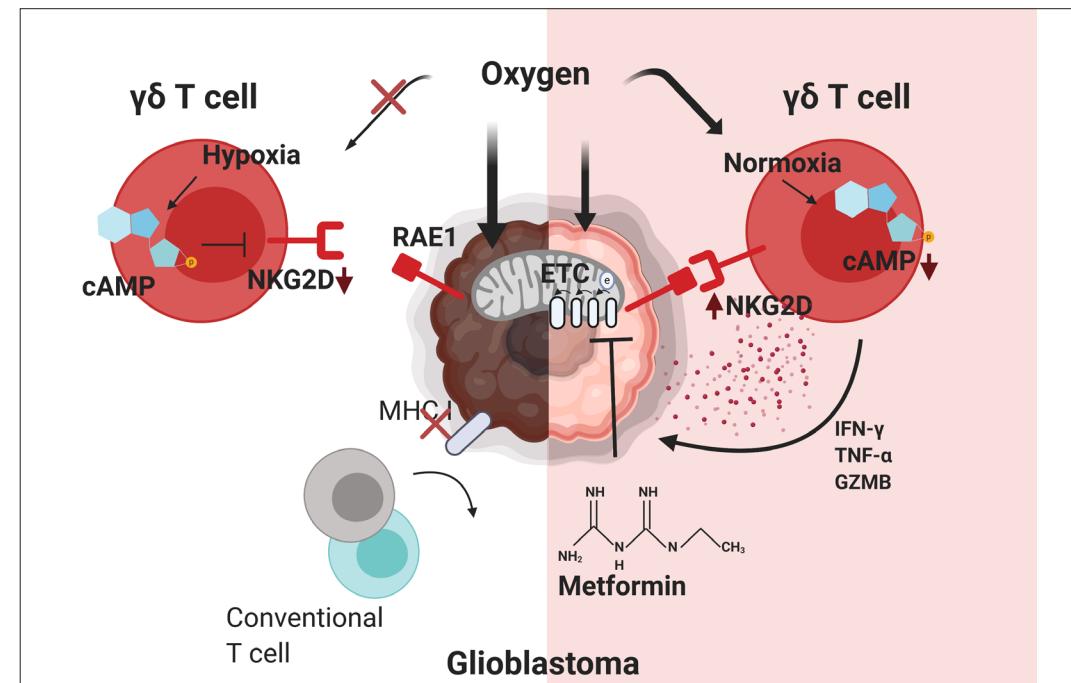
악성 뇌종양 면역미세환경 조절 기전 규명

32

이홍규
의과학대학원
<http://heungkyulee.kaist.ac.kr>

악성 뇌종양 세포의 과도한 산소 소비로 인한 감마델타 T 세포의 면역반응 저하 과정을 규명하였다. 저 산소 환경을 해소해 감마델타 T 세포에 적절한 산소를 공급, 세포의 생존을 도우면 면역반응이 정상화되는 과정을 규명하였다. 왕성하게 증식하며 주변 산소를 빠르게 소비하는 뇌종양 세포로의 산소유입을 막는 방식을 통해 감마델타 T 세포의 면역반응을 증대시켜 면역항암치료제의 낮은 반응성을 보완할 실마리가 될 것으로 기대된다.

감마델타 T 세포의 항뇌종양 면역반응
기전 규명



연구성과

- [논문] - J. Park, H. Kim, C. Kim, H. Kim, Y. Jung, H. Lee, Y. Lee, Y. Ju, J. Oh, H. Park, J. Lee, S. Lee, and H. Lee*, "Tumor hypoxia represses $\gamma\delta$ T cell-mediated antitumor immunity against brain tumors", *Nature Immunology*, 22(3):336-346. (2021) [2021 Impact Factor = 31.250].
- H. Kim, J. Park, C. H. Kim, Yu, C. Kim, and H. Lee*, "Blood monocyte-derived CD169+ macrophages contribute to antitumor immunity against glioblastoma", *Nature Communications*, Oct 20;13(1):6211. (2022) [2021 Impact Factor = 17.694].

알츠하이머 베타-아밀로이드 응집체의 자기전기 해리 기술 개발

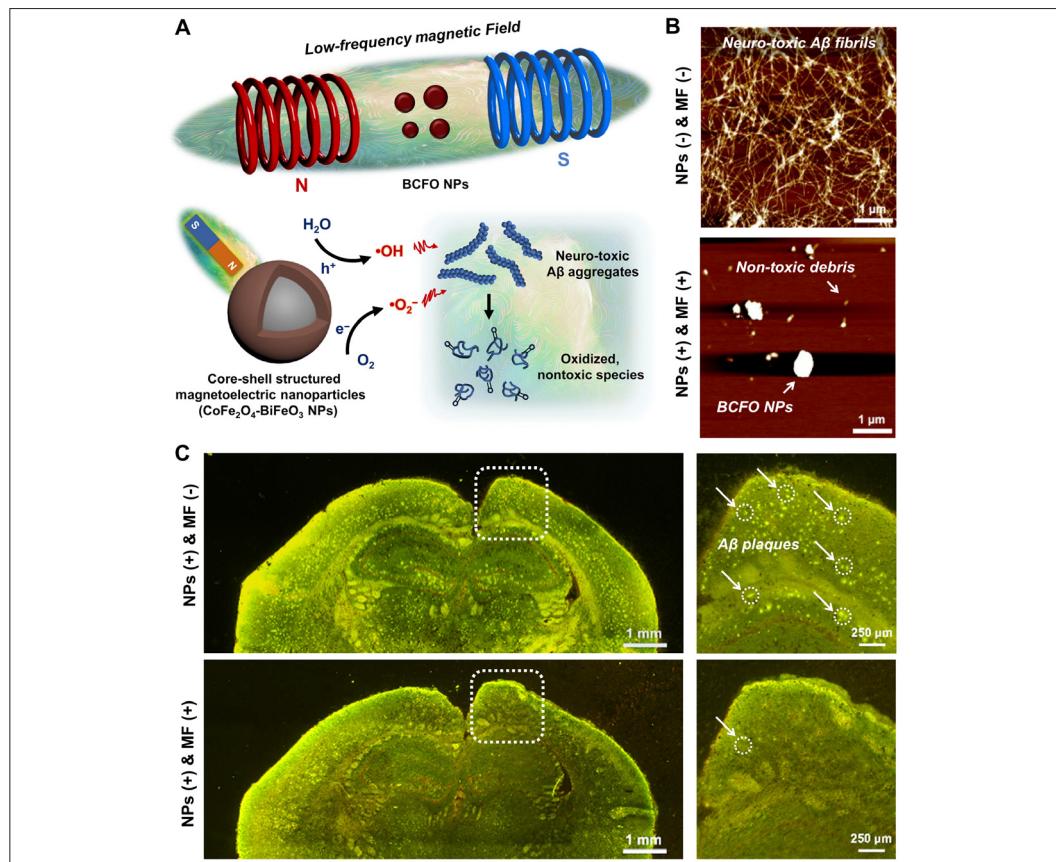
33

박찬범, 장진형
신소재공학과<http://biomaterials.kaist.ac.kr>

(A) 코어-쉘 구조를 지닌 자기전기 나노입자와 저주파 자기장을 이용한 베타-아밀로이드 응집체 구조의 해리에 대한 개략도. (B) 베타-아밀로이드 피브릴 분해에 대한 원자력현미경 이미지 및 (C) 베타아밀로이드 플라크 분해에 대한 알츠하이머병 마우스 모델 뇌 조직의 광학현미경 이미지.



베타-아밀로이드(β -amyloid) 펩타이드의 비정상적인 자기 조립 및 뇌 조직에서의 축적은 알츠하이머병의 주요한 병리학적 특징이다. 그러나 베타-아밀로이드 응집체는 물리화학적으로 안정한 구조를 지니기에 이들의 구조 분해는 제한적이었다. 본 연구에서는 저주파 자기장에 반응하여 열 발생 없이 베타-아밀로이드 응집체 구조를 해리할 수 있는 자기전기 나노 물질의 기능을 최초로 제시였으며, 이를 바탕으로 베타-아밀로이드 응집체의 신경독성을 중화시키는 데에 성공하였다. 이 연구는 향후 알츠하이머병 치료를 위한 헬스케어 및 첨단소재 분야에 있어서 새로운 대안으로 대두될 것으로 기대된다.



연구성과

[논문] - J. Jang, C. B. Park*, "Magnetoelectric dissociation of Alzheimer's β -amyloid aggregates", *Science Advances* 8, 19, eabn1675 (2022).

2023
KAIST ANNUAL R&D REPORT

KAIST