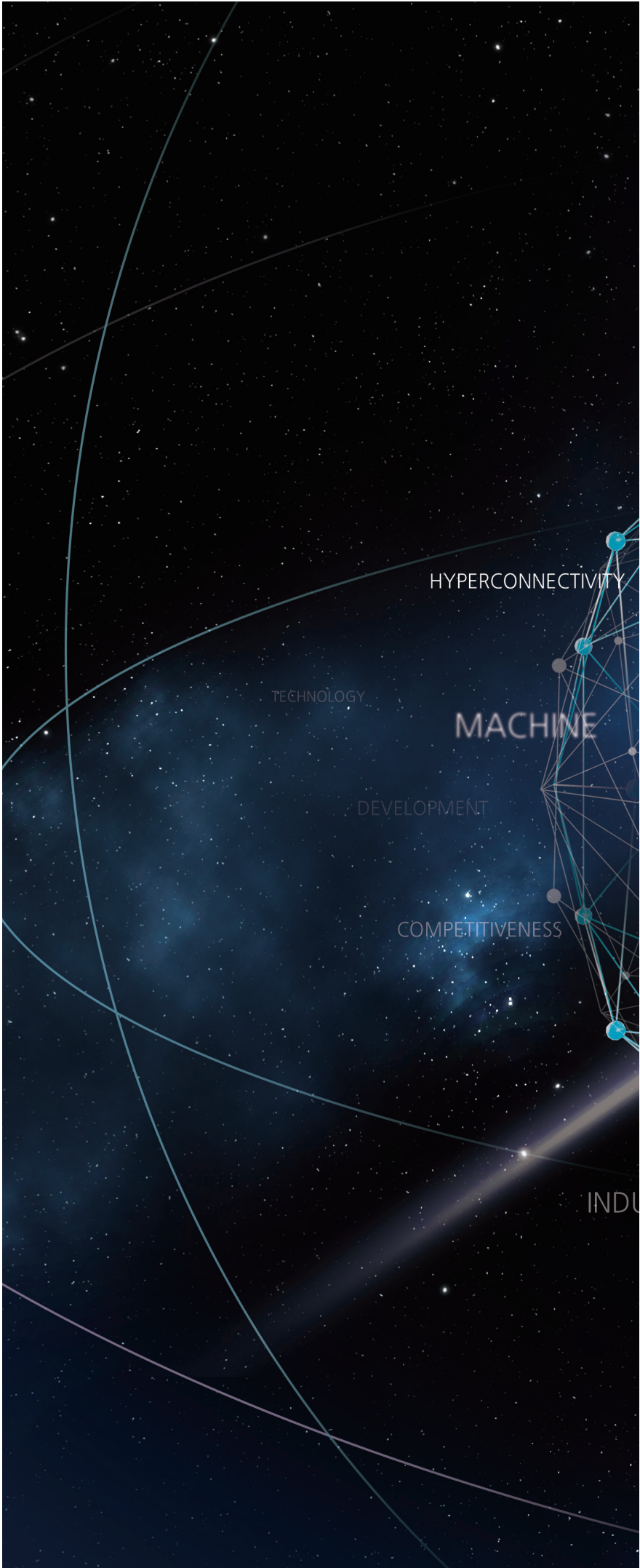
KAIST'S TOP 10 RESEARCH ACHIEVEMENTS OF 2018

http://www.kaist.ac.kr



10대 우수성과

KAIST는 2018년 로이터통신의
'세계에서 가장 혁신적인 100대 대학' 순위에서
11위에 올랐습니다.
또한 "아시아에서 가장 혁신적인 75대 대학"에서
1위를 기록하였습니다.

KAIST의 교수와 연구진들은 세계 속에
한국 과학기술의 저력을 알려왔습니다.
세계 유수의 학술지에 게재된 2018년을 빛낸
KAIST의 10대 연구 성과를 소개합니다.

ECONOMY
TECHNOLOGY
COMPETITIVENESS
HYPERCONNECTIVITY
ECONOMY
INDUSTRIAL
DEVELOPMENT
TECHNOLOGY
ECONOMY
USTRIAL
TECHNOLOGY
DEVELOPMENT

KAIST'S
TOP 10 RESEARCH
ACHIEVEMENTS OF 2018

리드버그원자 양자시뮬레이터 개발

물리학과
안 재 욱
심 흥 선

양자컴퓨팅이 중요한 미래기술의 하나로 대두되고 있다. 최근 KAIST의 물리학 연구진들이 초기 단계의 양자컴퓨팅에 해당하는 리드버그 원자를 이용한 25큐빗 양자 시뮬레이터를 실험-이론의 공동연구를 통하여 개발하였다. 이 양자시뮬레이터는 양자-아이징모델로 잘 알려진 중요한 물리문제를 계산하는 데 활용되어, 양자얽힘 다체계의 열화과정을 실험적으로 관찰하는데 성공하였다. 이 시스템은 프로그램이 가능한 범용 양자컴퓨터 수준에 아직 도달하지 못하였으나, 제한된 물리 문제를 계산하는 데에는 활용할 수 있음을 보여주었다.

● 최근 양자컴퓨터에 대한 관심이 높아지고 있다. 양자컴퓨터는 중첩, 얽힘, 비국소성 등의 양자역학적 현상을 정보계산에 직접적으로 활용하는 기계장치이며, 디지털 컴퓨터가 원리적으로 감당할 수 없는 계산을 수행할 것으로 예상되어, 이를 개발하기 위한 연구경쟁이 전세계적으로 진행되고 있다. 양자컴퓨터의 핵심기술은 양자역학적 정보단위인 양자비트(큐빗)를 저장하는 입자들 간의 상호작용을 외부잡음으로부터 철저히 분리하면서 프로그램하는 것이며, 현재까지 이러한 기술을 구현하는 물리계로는 이온덫과 초전도체 회로가 알려져 있다. 양자컴퓨터가 50개 정도의 큐빗 입자를 임의로 프로그램할 수 있으면 디지털 컴퓨터의 성능을 앞서게 되지만, 최근의 빠른 발전에도 불구하고, 현재의 양자컴퓨터는 최대 20개 정도의 큐빗만을 구동하고 있다.

● KAIST 연구진은 2016년에 광학집게덫을 이용하여 새로운 중성원자 배치기술을 개발하였다. 그리고 2018년에는 이를 이용하여 리드버그원자 양자시뮬레이터 (양자컴퓨터 전단계의 기계장치로서 프로그램 능력이 제한적임)을 개발하였다. 이 장치는 고진공에서 극저온으로 냉각된 중성원자를 임의의 마이크로미터 크기의 구조체로 배열한 후에, 리드버그원자(마이크로미터 크기의 원자상태)를 형성하여, 양자얽힘 원자-다체계를 달성하는 실험장치이다. 레이저 원자냉각장치, 광학집게열의 생성 및 이동장치, 단일원자 현미경과 초고성능 분석계산장치로 구성되어 있다. 현재까지 약 40큐빗 규모의 양자얽힘

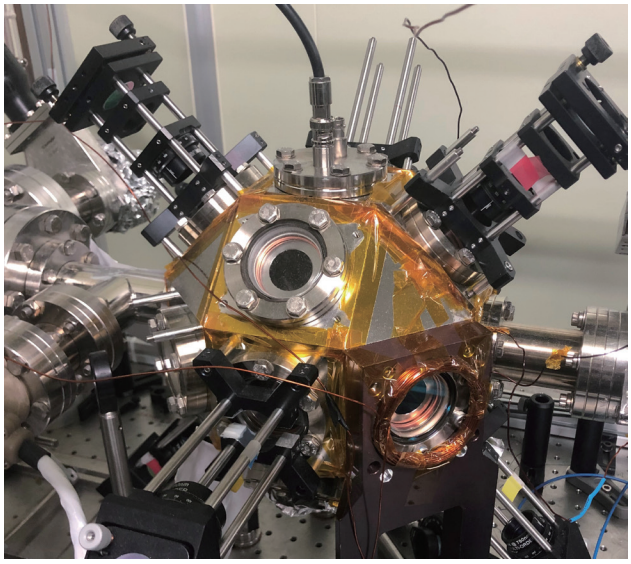


그림 1. 리드버그원자 양자시뮬레이터

원자열을 구성할 수 있으며, 약 25큐빗까지 동적상태를 분석할 수 있다. 프로그램 능력은 아직 제한적이지만, 일부 중요한 물리문제의 해밀토니안을 구현할 수 있다.

개발한 양자 시뮬레이터를 활용하여 첫번째로 얻은 실험결과는 다음과 같다. 양자-아이징 헤밀토니안을 구동하여 양자 다체계(quantum many-body system)가 평형상태(steady state)로 진행할 때 그 근간에 놓인 동역학이 무엇인지를 연구하였다. 루비듐 단원자(single atom)가 스핀-1/2 입자의 특성을 모방할 수 있음에 착안하였다. 원자들을 공간상에 지그재그로 배치하여 각도를 조절하면서, 원자간의 상호작용이 가장 가까운 원자끼리 또는 다음 가까운 거리까지 미치는 양자 아이징모델 (또는 transverse-field Ising model)를 구현하였고, 각 원자의 스핀 상태의 시간 변화(time evolution)을 실험 측정을 통해 실시간 추적하였다. 힐버트 공간 전체의 확률분포를 분석한 결과, 스핀계의 동역학이 최초의 결맞음 진동(coherent oscillation)에서 이론적으로 예측된 평형상태로 수렴함을 보였고, 수렴하는 방식이 열화과정(thermalization)의 미세균형(detailed balance) 조건을 만족함을 확인할 수 있었다. 이는 양자스핀계의 열화가 분산(diffusion)에 기반한 통계역학적 열화방식과 대응되는 경우가 존재함을 실험적으로 보인 것에 해당한다.

● 양자시뮬레이터는 양자컴퓨터의 전단계 연구용 기계장치로서, 관련 연구와 양자컴퓨터 개발을 위한 기술수준을 발전시키는 중요한 역할을 한다. 현재 리드버그원자 양자시뮬레이터는 KAIST, 하버드대, 프랑스 광학연구소가 보유하여 연구하고 있으며, 구동 정확도 (gate operation fidelity)가 다른 양자컴퓨터 경쟁모델 (이온덫과 초전도체회로)에 비해 부족하지만, 큐빗 개수를 확장할 수 있는 장점이 있다. 50개 큐빗 규모의 양자얽힘을 구현할 수 있으며, 최근 물리학에 중요하게 대두되고 있는 다양한 양자 다체계 문제에 활용될 것으로 기대된다.

연구성과

[논문] • Hyosub Kim, Yeje Park, Kyungtae Kim, H.-S. Sim, and Jaewook Ahn, "Detailed balance of thermalization dynamics in Rydberg atom quantum simulators," Physical Review Letters 120, 180502 (2018).
이 논문은 Physical Review Letters 저널에서 주목할 논문(Editors suggestion)으로 선정되었다.

• Woojun Lee, Hyosub Kim, and Jaewook Ahn, "Defect-free atomic array formation using the Hungarian matching algorithm," Physical Review A 95, 053424 (2017).

[특허] Jaewook Ahn, Hyosub Kim, Woojun Lee, "Dynamic holographic single atom tweezers and tweezing method using thereof," Korea Patent 1017834040000 (2017-09-25).

KAIST'S
TOP 10 RESEARCH
ACHIEVEMENTS OF 2018

상온에서 가능한 탄소-수소 결합촉매반응

화학과
백 무 현

탄화수소는 자연상태에 많이 존재하지만 일반적 조건에서는 반응성이 낮아 합성의 원료로 사용되기 어렵다. 본 연구는 합성실험과 계산화학연구를 바탕으로 지금까지 불가능 하다고 여겨졌던 값싼 탄화수소의 아릴화 반응을 상온에서 이리듐을 이용해서 성공했다. 이 새로운 방법을 통해 의약품 및 재료 물질과 같은 중요한 화합물을 쉽고 빠르게 합성할 수 있을 것으로 기대된다.

● 탄화수소는 자연상태에 많이 존재하지만 일반적 조건에서는 반응성이 낮아 합성의 원료로 사용되기 어렵다. 반응을 촉진시키기 위해 금속 촉매를 활용하는 등 다양한 연구가 이루어지고 있다. 특히 의 · 약학이나 재료화학분야에서 중요하게 활용되는 대다수의 화합물들이 분자 내에 아릴기를 포함하고 있기 때문에, 효율적이고 위치 선택적으로 아릴기를 도입할 수 있는 반응의 개발은 유기화학 분야의 지속적인 연구주제이다. 안정한 탄소–수소 결합에 아릴기 도입 반응을 유도하기 위해서는 탄소–수소 결합에 할로젠 원자나 유기금속을 붙여 사전활성화하거나 이 과정 없이 탄소–수소 결합을 직접 활성화(C–H functionalization)하는 과정을 거친다. 직접 활성화하는 방법이 효율성과 경제성이 뛰어나지만 개발된 반응 대부분이 고온의 반응온도, 과량의 첨가물이 필요한 격렬한 반응 조건을 필요로 하고 탄소–수소 결합이 분자 내에 많이 존재하므로 선택성 확보 역시 어려웠다.

● 본 연구진은 이리듐 촉매 하에서 아릴실레인(arylsilanes)을 반응제로 사용하여 탄소–수소 결합 활성화를 통한 아릴화 반응을 상온에서 구현하는 데 성공하였다. 여태껏 전이금속 촉매를 사용하는 탄소–수소 결합 활성화를 통한 아릴화 반응이 대부분 높은 온도에서 이루어진 것과 달리, 상온(25℃)에서도 이 반응이 가능할 뿐 아니라, 분자 내에서 위치 선택적으로 아릴기를 도입할 수 있다. 상온에서 아릴기 도입 반응에 성공할 수 있었던 것은 실험과 이론연구가 동시에 이루어졌기 때문이다. 기존에 알려진 아릴화 반응경로는 과정 중 생성되는 금속교환반응 중간체(transmetallation intermediate)의 안정성

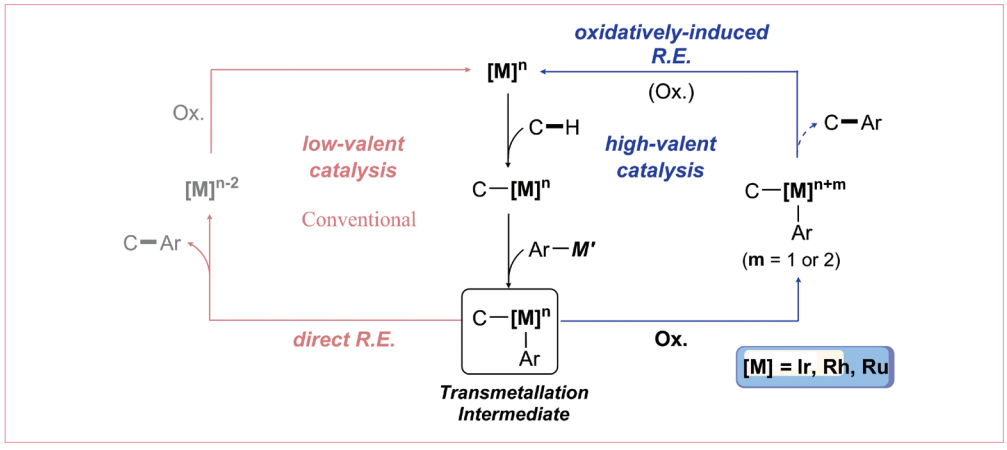


그림 1. 상온에서 진행 가능한 새로운 촉매 반응 경로 설계

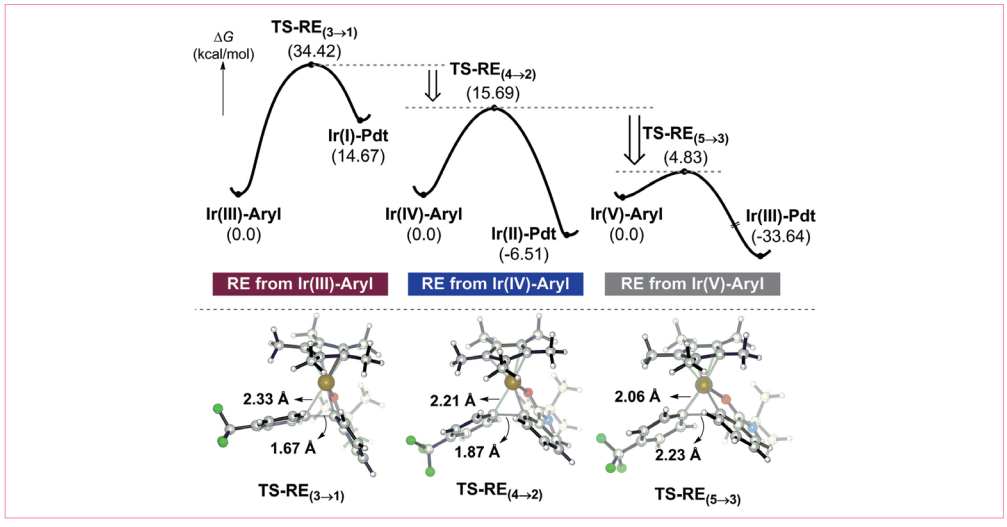


그림2. 범함수이론을 활용한 새로운 반응 경로의 이론적 검증

때문에 반응과정에서 높은 에너지가 요구되었다. 메커니즘 연구를 통해 전이금속을 촉매로 하는 탄소–수소 결합 활성화를 통한 아릴화 반응에서최초로 금속교환반응 중간체를 분리 · 분석해 내었다. 이를 바탕으로 금속교환반응 중간체만을 선택적으로 산화시키는 새로운 경로를 개발하여 에너지 장벽을 효과적으로 낮추었다. 또한, 밀도범함수 이론을 활용한 계산화학으로 실험 결과를 토대로 제안된 반응경로의 타당성을 검증하였다.

● 본 연구는 기존의 아릴화 반응에서 고온 조건의 필요성을 해결함과 더불어, 온화한 조건에서 촉매를 활용하여 유용한 화합물 합성에 성공하였다. 즉, 본 연구는 메커니즘적 이해를 바탕으로 효율적인 유기 합성을 가능하게 하였고, 이를 응용하여 의약품과 같은 중요한 화합물 생성에 있어서 상당한 부가가치를 창출할 수 있을 것으로 기대된다.

연구성과

[논문] • "Iridium–catalysed arylation of C–H bonds enabled by oxidatively induced reductive elimination" Kwangmin Shin, Yoonsu Park, Mu–Hyun Baik and Sukbok Chang, Nat. Chem. 2018, 10, 218–224 – DOI:10.1038/nchem.2900

• "Selective Formation of gamma–lactams via C–H Amidation Enabled by Tailored Iridium Catalysts" Seung Youn Hong, Yoonsu Park, Yeongyu Hwang, Yeong Bum Kim, Mu–Hyun Baik and Sukbok Chang, Science 2018, 359, 1016–1021 – DOI: 10.1126/science.aap7503

KAIST'S
TOP 10 RESEARCH
ACHIEVEMENTS OF 2018

DNA 사이의 상호작용에서 막대모양 이온의 역할 규명

나노과학기술대학원
김 용 운

스페르민이나 스페르미딘 같은 막대모양의 폴리아민 이온들이 DNA나 세포 미소관 같이 전하를 띈 다양한 생체 고분자들 사이에 인력적 상호작용을 유도하고 이를 통해 생체 기능에 반드시 필요한 고분자들의 응집상을 촉발한다는 것이 최근 들어 실험적으로 알려졌다. 그러나 같은 전하를 띈 생체 고분자는 항상 정전기적 척력을 경험할 수밖에 없다는 것이 지난 백 년 동안 이러한 이온 용액을 기술하는데 널리 사용되어 온 포아송-볼츠만 이론의 예측이었다. 본 이론 연구에서는 막대모양의 이온들을 명시적으로 고려함으로써 이와 같은 모순을 해결하고, DNA 사이에 인력적 상호작용이 가능함을 최초로 보였다. 본 연구의 결과는 막대모양의 폴리아민 이온들이 생체조건에서 같은 전하를 띈 고분자들의 응집상을 어떻게 효과적으로 유도하는지 물리적 기작을 밝혀냄으로써 전하를 띈 생체물질들의 상호작용에 대한 근원적 이해를 넓힐 것으로 기대된다.

● 디옥시리보 핵산(DNA), 미세관(micotubule), 액틴필라멘트(actin filament)와 같이 전기적 전하를 띈 생체 고분자들은 세포 내에서 특징적인 자기조립 구조를 만들고 이를 통해 생명현상에 필요한 다양한 기능을 수행하기 때문에 생물학 분야에서 많은 관심의 대상이 되어왔다. 특히, 같은 전하를 띈 고분자들이 어떻게 전기적 척력을 극복하고 평형상태에서 특징적인 자기조립 구조 및 응집상을 만들 수 있는가란 질문은 비단 생물학자들뿐만 아니라 물리학자들에게도 오랫동안 풀리지 않는 수수께끼였다. 고분자 전해질 같은 이온 용액을 기술하는데 지난 한 세기 동안 성공적으로 사용되어온 포아송–볼츠만 방정식(Poisson–Boltzmann equation)의 해에 의하면 고분자 전해질은 항상 서로 밀어내는 척력을 보일 수밖에 없다는 점에서 인력적 상호작용을 의미하는 고분자의 자기조립 구조는 물론 응집 물질 물리 분야의 대표적 퍼즐 가운데 하나로 인식되었다.

● 이 질문에 대해, 지난 20년 동안의 연구를 통해 받아들여지고 있는 설명은 다음과 같다. 세포 내에는 고분자 전해질과 반대 전하를 띈 다가(multivalent) 이온들이 존재하며, 다가 이온들이 만들어내는 강한 정전기적 상관관계(strong electrostatic correlations)가 고분자 전해질들 사이의 인력을 만들어 내고, 이러한 정전기적 상관관계는 일종의 평균장 이론인 포아송–볼츠만 방정식에 의해 기술될 수 없다는 것이다. 위와 같은 설명은 포아송–볼츠만 방정식의 예측과 반대되는 실제 현상을 설명할 수 있기에 얼핏 만족스러워 보인다. 그러나 실제 세포 내에는 많은 양의 일가(monovalent) 전해질 이온들이 존재하는데, 이

러한 경우 이온들 사이의 강한 정전기적 상호작용이 중요하지 않게 되고 포아송–볼츠만 방정식이 여전히 유효하다는 사실 또한 잘 알려져 있다. 즉, 평균장 근사가 유효하리라 기대되는 실제 생체 조건에서 고분자 전해질들 사이의 인력적 상호작용을 어떻게 설명할 수 있는가에 대한 해답은 아직 명확하지 않으며 이것이 본 연구의 주된 관심사였다.

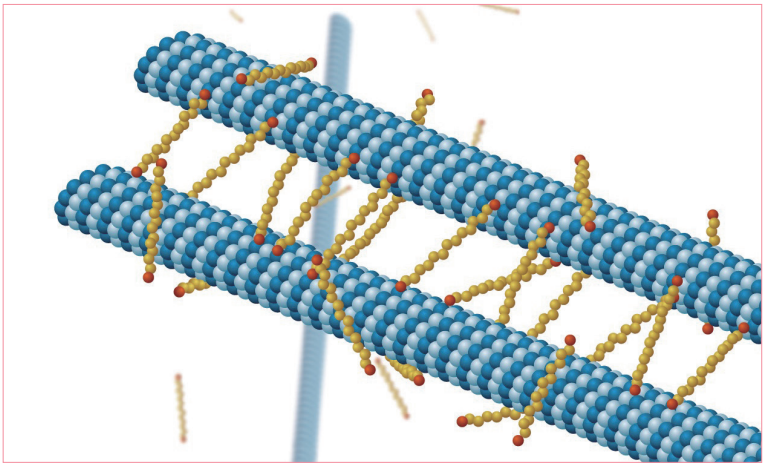


그림 1. 전하를 띤 두 고분자와 막대 모양의 이온

본 연구에서는 고분자의 자기조립 과정에서 스페르민(spermine), 스페르미딘(spermidine)과 같은 다가 이온들이 중요한 역할을 수행한다는 실험 결과에 주목하였다. 이러한 이온들은 막대모양을 가지고 있으며 막대모양의 뼈대를 따라 이산적인 전하 분포를 가지고 있다. 따라서 포아송–볼츠만 방정식에서 흔히 쓰이는 점전하 근사가 더 이상 유효하지 않게 된다. 이에 본 연구에서는 몬테카를로 시뮬레기(Monte Carlo simulations)를 통해, 용액 속에 아령 모양의 막대형 이온들이 존재할 때, 전하를 띤 고분자들 사이의 상호작용을 계산하였다(그림 1). 그 결과, 막대형 이온의 길이가 일정 이상이 되면 포아송–볼츠만 방정식이 유효한 약한 상호작용의 영역에서도 고분자들이 인력적 상호작용을 한다는 것을 최초로 보였다(그림 2, 왼쪽). 이는 고분자들 사이에 분포하는 막대 모양의 이온들이 두 고분자들을 연결(bridge)하는 형태로 고분자 축에 수직한 방향으로 배열함으로써 고분자 사이 공간의 삼투압력이 음의 값을 가지기 때문이라는 것을 밝혔다(그림 2, 오른쪽).

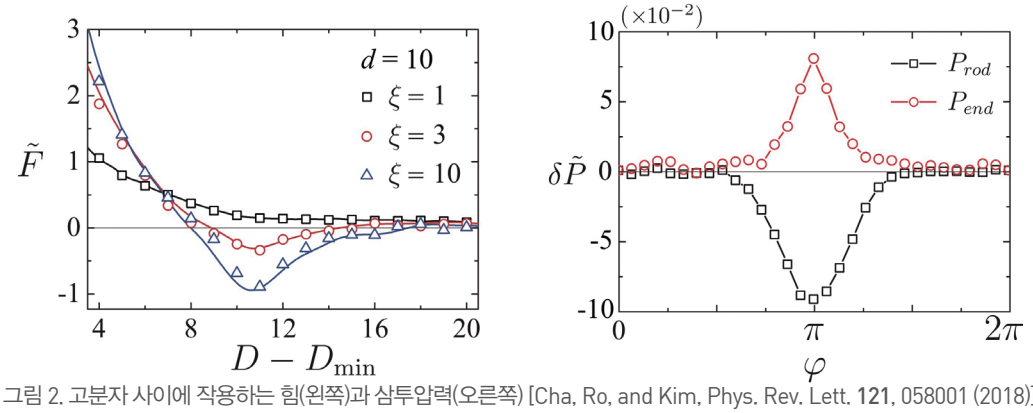


그림 2. 고분자 사이에 작용하는 힘(왼쪽)과 삼투압력(오른쪽) [Cha, Ro, and Kim, Phys. Rev. Lett. **121**, 058001 (2018)]

● 본 연구는 다가 이온의 막대형 구조와 이로 인한 비등방적 삼투압력을 고려하는 것이 고분자 전해질 사이의 상호작용을 이해하는데 중요함을 보였다는 점에서 학문적으로 큰 의의가 있다. 특히, 이러한 결과는 생체내에 소량으로 존재하는 폴리아민 계열 이온들이 왜 생체 고분자의 응집상 형성에 중요한 역할을 수행하는지, 그 물리적 기작을 밝힌 최초의 연구로서 폴리아민을 이용하여 생체 고분자의 자기조립상을 제어하기 위한 후속 연구들의 이론적 토대를 마련할 것으로 기대한다. 또한 지난 백 년 동안 포아송–볼츠만 방정식에서 사용되어온 점전하 근사를 뛰어 넘어 이온들의 형태적 자유도를 고려한 최초의 이론 연구라는 점에서 큰 학문적 가치를 지니고 있다.

연구성과

[논문] M. Cha, S. Ro, and Y. W. Kim*, "Rodlike counterions near charged cylinders: counterion condensation and inter–cylinder interaction", Phys. Rev. Lett. 121, 058001 (2018)

연구비 지원

This research was supported by a National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korean government (Grant No. NRF–2017R1A2B4007608)

KAIST'S
TOP 10 RESEARCH
ACHIEVEMENTS OF 2018

자원의 탐색 및 획득을 조절하는 신경회로 발견 및 조절

생명과학과
김 대 수

유용한 목표를 획득하기 위해 노력하는 신경회로 발견

"김대수 교수 연구팀은 광유전학적(optogenetics)뇌 연구를 통해 물체에 대한'소유'행동을 조절하는 핵심 신경회로(core-neural circuit)를 최초로 발견하였다. 본능 행동의 동기를 담당하는 시상하부 (hypothalamus) 중 빛으로 생쥐의 전시각중추 (medial preoptic area, MPA)의 특정 회로를 자극했을 때 생존 가치에 개의치 않고 목표 물체를 '획득' 및 '보유'하는 현상이 관찰되며, 공중에 떠 있는 물체와 같이 목표 물체를 직접 획득하기 어려운 환경 에서도 획득을 위해 노력하는 행동이 (목표 물체를 향한 도약) 관찰되었다. 본 연구에서는 첨단 연결체학 (connectomics)을 활용하여 소유관련 행동을 조절하는 신경회로의 세부지도를 완성하고 이 신경회로가 궁극적으로 먹이활동과 사냥행동 조절에 기여한다는 생태학적인 원리를 밝혔다. 또한 본 연구팀은 위 소유행동 신경회로를 응용하여 동물의 행동을 조절할 수 있는 MIDAS (MPA-induced drive assisted steering) 기술을 개발하였다. 본 연구결과는 물건에 집착하는 수집증이나 쇼핑중독 등 뇌 질환을 치료할 수 있는 단서를 제공할 수 있고, 단순 행동조절에 더해 동물과 인간의 행동을 일으키는 동기 자체를 활용하는 기술개발에 도움을 줌으로써 신경경제학 및 국방, 재난구조 등에 기여할 수 있다.

● 동물들의 먹이 활동을(foraging) 위한 호기심 표현 및 탐색, 획득 행동들은 궁극적으로 소유하고자하는 근본적 욕구와 연관이 있으나 정작 이해 대한 생물학적인 이해는 전무한 실정이다. 동물이 유용한 자원 혹은 먹이를 확보하려는 것은 생존을 위한 강력한 욕구이다. 따라서 뇌는 이러한 욕구를 바탕으로 유용한 목표를 탐색하고 획득하는 행동을 만들어 낸다. 그러나 현재까지 이러한 욕구를 만들어내는 신경회로 기전에 관해서 알려진 바 없었다.

물건 및 재화, 사회적 지위를 획득, 소유하려는 욕구는 인간행동의 생물학적 근간이 된다. 유년기에는 처음 보는 물건이나 장난감에 대한 소유 및 놀이행동이 나타나고 이는 성인이 되면서 점차 복잡한 형태의 전략으로 발달한다. 나아가 이러한 욕구는 한정된 재화를 소유하기 위해 사회적 경쟁을 유발하며 합리적인 경쟁을 위한 다양한 사회체제의 확립과 연관이 있다.

전시각 중추 (Medial preoptic area) 는 시상하부의 일부 구조체로 많은 종류의 서로 다른 신경들로 구성되어 있다. 선행 연구들은 이 신경들이 주로 사회적 대상에 대한 행동을 조절하는데 중요하다고 제안하였다. 그러나 전시각 중추가 목표 물체나 먹이감을 획득하는 비사회적 대상에 대한 행동 발현에 기여한다는 것은 알려진 바 없었다.

● 본 연구팀은, 사물을 탐색하고 획득하는 전시각중추의 기능을 연구하기 위하여 빛으로 신경을 자극 또는 억제할 수 있는 광유전학 (optogenetics) 기법을 활용하였다.

생쥐의 뇌에서 CaMKII 유전자를 발현하는 전시각 중추

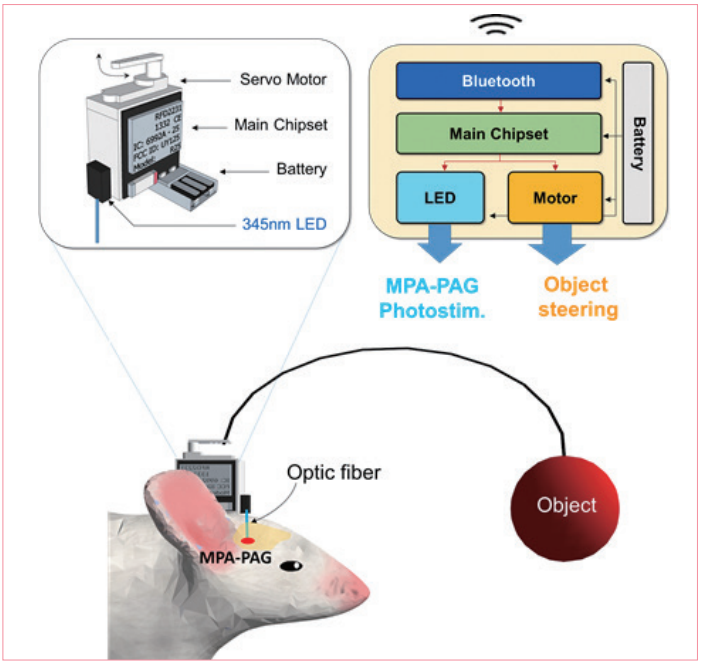


그림1. 자원탐색신경회로를 활용하여 동물의 행동을 조절하는 MIDAS 기술

신경을 빛으로 자극할 시, 생쥐가 물건에 집착하는 이상행동을 보인다.

이러한 물건에 대한 집착은 CaMKII 전시각중추 신경들이 수도관주의 회색질신경 (PAG, periaueductal grey) 으로 정보를 보내어 만들어진다는 것을 밝혔다. 이러한 MPA–PAG 신경회로를 억제하면 새로운 물건에 대한 호기심 및 욕심이 감소함을 밝혔다.

본 연구팀은 MPA–PAG 신경회로를 자극할 시, 눈앞의 목표를 획득하려는 성질을 활용하여 세계 최초로 포유류 행동조절에 성공하였다. MIDAS (MPA–induced drive assisted steering) 라고 명명된 이 기술을 통해 실험자가 원하는 장소로 생쥐가 장애물들을 스스로 극복하며 이동하도록 할 수 있었다. MPA–PAG 신경회로는 다양한 생물종에서 진화적으로 보존된 신경회로이기 때문에 다양한 동물의 행동조절에 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

● 본 연구를 통해 동물이 먹이나 사물을 탐색하고 획득하는 뇌 기능에 대한 이해가 증진될 것으로 사료된다. MPA–PAG 신경회로를 다양한 동물에서 연구하면 어떻게 많은 동물들이 선택적으로 먹이사슬을 이루는 지에 대한 생태학적 원리를 규명하는데도 유용할 것이다.

본 연구에서 개발된 MIDAS 기술을 활용하면 다양한 동물의 행동을 조절할 수 있는 길이 열린다. 동물의 행동조절을 농업에 활용하여 고대 농업혁명의 시작이 되었듯이 MIDAS 기반의 자유로운 행동조절 방법은 현재 로보틱스의 한계를 극복하는데 유용한 수단이 될 것이다.

MIDAS 동물은 스스로 먹이 활동을 하기에 로봇과 같이 에너지 공급 문제가 없으며, 스스로 장애물을 극복할 수 있으므로, 섬세한 조종이 필요없다. 네비게이션과 같이 경로만 선택해 주면 동물이 스스로 목표지점을 찾아가도록 설계할 수 있다.

본 연구의 '자원에 대한 소유행동 조절기전 발견'은 인간이 다양한 형태로 소유욕을 발전시켜 현대 사회 및 경제, 문화를 이루게 된 단서를 제공하게 될 것이다. 나아가, 소유행동 신경회로를 자극 또는 조절할 수 있는 기술로 발전될 가능성을 열어준다. 이는 4차 산업 혁명의 흐름에 따라 산업 및 경제 발전에 이바지할 수 있게 될 것이다.

연구성과

[논문] Sae–Geun Park, Yong–Cheol Jeong, Dae–Gun Kim, Min–Hyung Lee,Anna Shin, Geunhong Park, Jia Ryoo, Jiso Hong, Seohui Bae, Cheol–Hu Kim, Phill–Seung Lee and Daesoo Kim (2018) Medial preoptic circuit induces hunting–like actions to non–social objects and prey, Nature Neuroscience.

[특허] Park, S and Kim, D et al., PCT/KR2017/001470, Method for controlling behavior of animals using object seeking behavior Park, S and Kim, D et al., KR10/2016/0016473, An animal whose behavior can be regulated by light and use thereof

[언론 보도] Highlighted in INSCPOPIX news (must–read neural circuit papers in Jan, 2018), USA

KAIST'S
TOP 10 RESEARCH
ACHIEVEMENTS OF 2018

뇌종양의 원인 규명과 새로운 치료법 제시

의과학대학원
이 정 호

이정호 교수팀은 뇌 종양을 유발하는 돌연변이의 기원과 새로운 병인 기전을 분자 수준에서 규명하였으며 한걸음 더 나아가 새로운 치료법을 제시하는 연구 성과를 내었다.

1. 교모세포종은 가장 예후가 좋지 않은 암 종중 하나로, 암 발생의 근본적인 원인에 대한 이해가 부족하며, 치료법이 묘연한 암이다. 연구팀은 교모세포종 유발 돌연변이는 암 부위가 아니라, 암에서 멀리 떨어진 뇌실하영역 부위에서 기원된다는 사실을 세계 최초로 규명하였고 이는 기존 치료법과 연구의 한계를 뛰어 넘어 암이 존재하지 않는 뇌실하영역에서 암이 시작된다는 새로운 발상으로 교모세포종 치료의 새로운 전기가 마련될 것으로 예상된다. (2018 Nature 게재).
2. 소아 뇌종양은 성인 뇌종양에 비해 난치성 뇌전증이 빈번하게 동반되는 특징을 갖고 있으나 난치성 뇌전증의 발생 원인에 대해서는 밝혀진 바가 없으며 현존하는 항 뇌전증 약물에 반응하지 않기 때문에 환자 치료에 많은 어려움을 겪고 있다. 연구팀은 난치성 뇌전증을 일으키는 소아 뇌종양의 근본 원인과 뇌전증 발생의 원리를 규명해 새로운 치료법을 제시하였다. (2018 Nature Medicine 게재).

● 성인과 소아의 뇌에서 모두 발생할 수 있는 뇌 종양은 그 근본적인 원인과 병인 기전에 대한 이해가 부족하여 치료법이 요원한 상황이다. 이정호 교수팀은 인간의 뇌의 발달 및 노화과정에 후천적으로 발생하는 돌연변이를 연구하여 소아 뇌종양 및 성인 악성 뇌종양을 일으키는 돌연변이의 기원, 분자유전학적 병인기전 및 새로운 치료법을 제시하는 연구 성과를 내었다.

● 성인 악성 뇌종양의 근본 원인 규명과 새로운 치료법 제시

교모세포종은 가장 예후가 좋지 않은 암 종중 하나로, 암 발생의 근본적인 원인에 대한 이해가 부족하며, 수술적 치료가 가장 중요하지만 수술만으로 치료할 수 없고 항암치료, 방사선치료, 표적항암제 등이 사용 중이나 아직도 그 치료법이 묘연한 암이다. 연구팀은 교모세포종 유발 돌연변이가 암 부위가 아니라, 암에서 멀리 떨어진 뇌실하영역 부위에서 기원된다는 사실을 세계 최초로 규명 하였다.

교모세포종의 근본 원인을 규명한 획기적 연구 결과로, 기존 치료법과 연구의 한계를 뛰어 넘어 암이 존재하지 않는 뇌실하영역에서 암이 시작된다는 새로운 발상으로 교모세포종 치료의 새로운 전기가 마련 될 것으로 예상된다. (2018 Nature 게재)

난치성 뇌전증(간질) 동반 소아 뇌종양의 근본 원인 규명과 새로운 치료법 제시

소아 뇌종양은 성인 뇌종양에 비해 난치성 뇌전증이 빈번

하게 동반되는 특징을 갖고 있다. 그러나 소아 뇌종양에서 특이적으로 난치성 뇌전증이 발생하는 원인에 대해서는 밝혀진 바가 없으며 현존하는 항 뇌전증 약물에 반응하지 않기 때문에 환자의 치료에 많은 어려움을 겪고 있다. 난치성 뇌전증을 일으키는 소아 뇌종양의 근본 원인과 뇌전증 발생의 원리를 규명해 새로운 치료법을 제시하였다.

● 이번 연구 결과를 통해 수술 치료에 어려움이 있는 소아 뇌종양 기반의 난치성 뇌전증 치료에 큰 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다. (2018 Nature Medicine 게재).

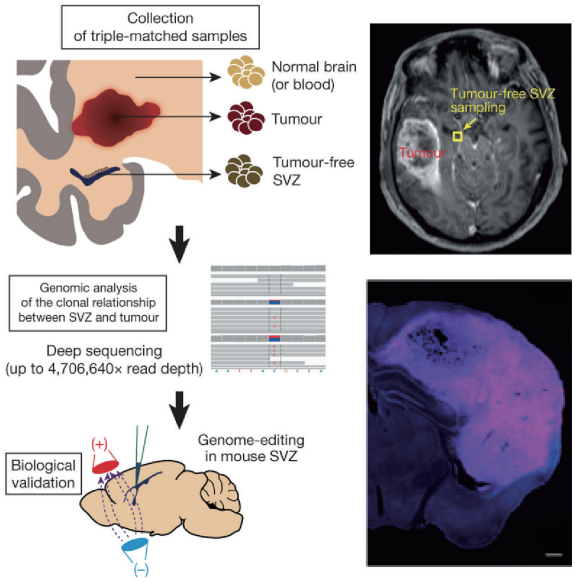


그림1. 교모세포종 환자의 종양, 정상, 뇌실하 조직을 얻어 변이 분석 후 생물학적 모델링을 하는 과정

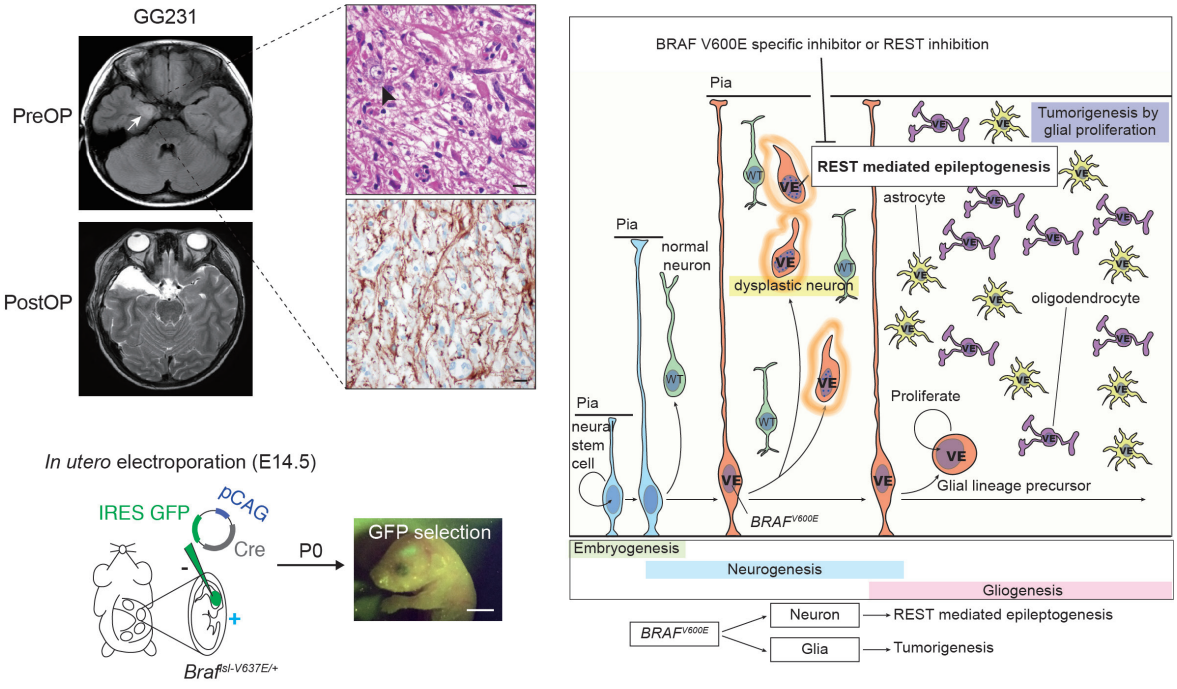


그림2. 뇌전증을 유발하는 소아 뇌종양 환자의 조직을 분석 후 생물학적 모델링을 하는 과정과 뇌전증 발생 기전.

연구성과

[논문] • Lee et al, Human glioblastoma arises from subventricular zone cells with low–level driver mutations. Nature. 2018 Aug;560(7717):243–247. (IF=41.6)

• Koh et al, BRAF somatic mutation contributes to intrinsic epileptogenicity in pediatric brain tumors. Nature Medicine. 2018 Nov;24(11):1662–1668. (IF=32.6)

[언론 보도] 두 논문 모두 10개 이상의 주요 언론사에 홍보 됨.

연구비 지원

Suh Kyungbae Foundation
IBS–R002–D1
Korean Health Technology R&D Project, Ministry of Health & Welfare (H15C3143 and H16C0415)
Citizens United for Research in Epileps

KAIST'S
TOP 10 RESEARCH
ACHIEVEMENTS OF 2018

시공간 경계를 이용한 빛의 선형 주파수 변환 기술 개발

기계공학과
민 범 기

빛의 주파수 변환 기술은 거의 모든 경우, 비선형 물질이나 소자를 이용하여 개발되어 왔다. 본 연구에서는 이러한 기존 접근 방법에서 벗어나 전자기파가 매질의 시간 경계를 지나는 경우, 비선형성에 의존하지 않는 선형적 주파수 변환이 생기는 점에 착안하여 설계가 가능한 선형 주파수 변환 소자를 최초로 구현하였으며, 더 나아가 변환된 빛의 위상 역시 제어가 가능함을 보였다. 제안된 기술은 매우 낮은 입력 세기를 가지는 빛 주파수 변환을 가능케 할 것이며, 더불어 변환된 빛의 위상 제어 가능성은 새로운 광학 파면 제어 기술로 발전될 것으로 기대된다.

● 지난 20여 년간 진행된 메타물질 연구는 마이크로/나노 공정의 도움으로 파장 이하 스케일에서 유효 매질의 공간적인 변화 (공간 구조체)를 극한까지 이용하였다. 하지만, 일반적으로 구현된 메타물질의 성질은 시간 영역에서 변하지 않거나 상호작용하는 전자기파의 진동 주파수에 비해 느린 시간 영역에서 변하는 한계를 가지고 있었다. 최근 2~3년간, 극소수의 선도적인 연구자들에 의해 유효 매질의 시간적인 변화 (시공간 구조체)를 이용하여 시간적으로 고정된 유효 물성의 한계를 극복하고 메타물질의 기능적인 유효 물성을 더욱 넓히려는 연구가 태동되었다. 매질의 시간적인 특성 변화를 이용하여 광학 물질 더 나아가 광학 소자의 기능성을 넓히고자 하는 접근 방법은 빛의 비가역적 투과 (Nonreciprocal transmission)와 시간 역행파의 생성에 관한 연구 등에서 찾아볼 수 있다. 본 연구는 시변 매질을 이용한 또 다른 시도로 전자기파의 주파수 변환에 관한 연구이다. 일반적으로 주파수 변환은 비선형 (메타)물질이나 (메타)소자를 이용하여 구현되었으나, 전자기파의 주파수 변환은 시변 물질과 전자기파의 상호작용을 통하여도 얻어질 수 있다. 물질의 급격한 공간적 물성 변화, 즉, 공간적 경계면 (Spatial boundary or discontinuity)을 빛이 지나가는 경우, 빛의 운동량 (파수벡터)은 보존되지 않으나 빛의 에너지 (주파수)는 보존된다. 반면, 빛이 물질의 급격한 시간적 물성 변화, 즉, 시간적 경계면 (temporal boundary or discontinuity)을 지나는 경우, 빛의 에너지 (주파수)는 보존되지 않으나 빛의 운동량 (파수벡터)은 보존된다. 이러한 원리는 대칭성과 보존량에 대한 관계를 기술하는 뇌터 정리 (Noether's theorem)에도 부합한다. 따라서, 시변

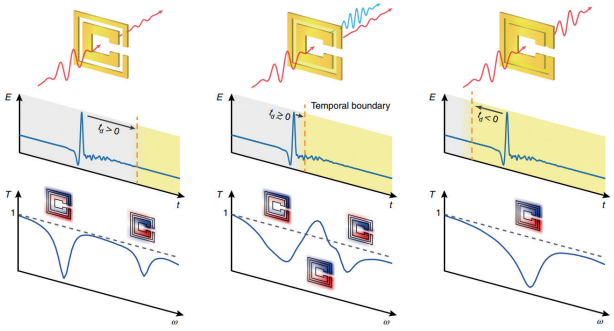


그림 1. 시간 변화 메타표면을 이용한 주파수 변환의 개념도과정

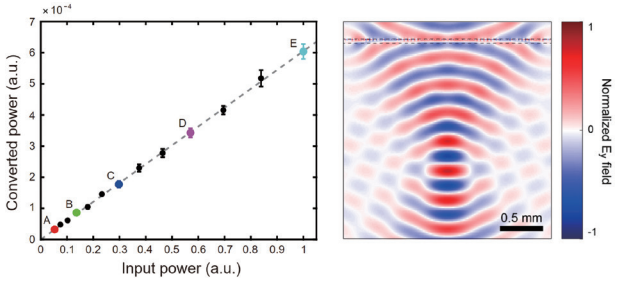


그림 2. (좌) 주파수 변환량의 선형성 (우) 메타 원자 각각의 위상 제어를 통한 변환 주파수 성분 집속

또는 시공 변화를 가진 매질을 이용하면 주파수 변환을 효과적으로 얻을 수 있다.

● 본 연구에서는 시공간 경계면을 구현하기 위하여 능동적으로 변화 가능한 메타표면을 이용하였다. 메타표면, 특히 금속 메타원자로 구성된 유효 표면은 능동적으로 빠르게 변화 가능한 물질과 결합 시 섭동적인 영역을 벗어나는 커다란 시간 경계면을 구현하는 데에 이상적이다. 보다 구체적으로 초고속 광학적 여기 (Ultrafast optical excitation)에 의해 전도성이 계단식으로 변화되는 반절연성 (Semi-insulating) GaAs 위에 테라헤르츠 대역에서 2개의 기본 공진모드를 가지는 금속 메타 원자를 설계하였다. 제작된 소자가 광학적으로 여기되는 경우, 2개의 기본 공진모드가 1개의 합병된 공진모드를 가지게 되어 주파수 대역에서 분산적인 시공간 경계면이 형성되도록 하였다.

입사하는 테라헤르츠 대역 전자기파가 광학적 여기에 의해 생성된 시간 경계면과 상호 작용하는 경우, 주파수 변환이 일어나며 입사파의 세기와 변환된 전자기파의 세기가 선형적인 관계가 있음을 실험적으로 증명하였다. 이러한 실험적 결과는 이론적인 계산과 수치해석적인 검증을 통하여 검증되었으며 선형적 주파수 변환의 메커니즘을 명확히 하였다. 이론적인 계산을 통하여 상대적 주파수 변화량과 변환효율의 곱이 일정한 것을 보임으로써 선형적 주파수 변환의 변환 효율의 최대치를 이론적으로 밝혀내었으며, 선형적 주파수 변환에 있어 주파수의 상향 변환 (Up-conversion) 및 하향 변환 (Down-conversion) 모두 가능함 또한 보였다. 제안된 주파수 변환 기술은 기존의 광학에서 이용되던 비선형 주파수 변환 소자에 비하여 새로운 주파수 성분의 생성에 있어 훨씬 더 높은 자유도를 가지게 된다. 또한, 변환된 주파수 성분의 위상 역시 시간 경계면의 위치를 조절함으로써 제어가 가능함을 보였다. 이러한 위상 제어 가능성은 변환된 전자기파의 파면제어에 응용 가능할 것이다.

● 본 연구에서는 메타표면의 시공간 경계를 설계할 수 있는 방법론을 제시하였을 뿐만 아니라 이에 관한 독자적인 해석 이론을 제시하였다. 즉, 기존의 시변 매질 연구 분야에서 이론적으로만 탐구되어 오던 매우 급격하게 변화하는 물성을 구현할 수 있는 방식을 메타표면을 이용해서 증명하였을 뿐만 아니라 이를 이용하여 주파수 변환을 세계 최초로 관측하였다. 제안된 선형적 주파수 변환 방식은 기존의 테라헤르츠 비선형 기반의 주파수 변환 방식에서 얻어진 가장 높은 변환 효율과 비등한 결과를 보여주었다. 학술적으로는 독립적인 두 연구 분야였던 시변 매질과 메타표면 연구를 접목하여 새로운 연구 방향을 제시하였으며, 기술적으로는 강한 빛을 사용할 수 없는 신호처리 및 통신 분야에 적용할 수 있을 것으로 예상된다. 따라서, 새로운 개념의 주파수 변환 소자에 관한 시장을 선점할 수 있는 기술이라 생각하며, 기존의 비선형성 기반의 광학 소자를 시변 매질 기반의 소자로의 대체 할 수 있을 것이라 예상한다.

연구성과

[논문] • Kanghee Lee, Jaehyeon Son, Jagang Park, Byungsoo Kang, Wonju Jeon, Fabian Rotermund, and Bumki Min, "Linear frequency conversion via sudden merging of meta-atoms in time-variant metasurfaces", *Nature Photonics* 12, 765–773 (2018) [Impact factor = 32.521]

• Teun-Teun Kim, Sangsoon Oh, Hyeon-Don Kim, Hyun Sung Park, Ortwin Hess, Bumki Min, and Shuang Zhang, "Electrical access to critical coupling of circular polarized waves in graphene chiral metamaterials", *Science Advances* 3, e1701377 (2017) [Impact factor = 11.51]

[기조 강연] Bumki Min, "Rapidly time-variant metadevices for linear frequency conversion", SPIE Optics+Photonics 2018, San Diego, http://spie.org/newsroom/op18_landing/op18_min

KAIST'S
TOP 10 RESEARCH
ACHIEVEMENTS OF 2018

상용화 가능한 투명 유연 포스 터치 센서 개발

전기 및 전자공학부
윤 준 보

포스 터치 센서는 외부로부터 가해진 압력의 위치뿐만 아니라 크기까지도 인식 가능하여 스마트폰, 로봇, 웨어러블 장치 등 다양한 제품에 적용하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 하지만 지금까지 개발된 포스 터치 센서는 민감도와 같은 특정 성능만 향상 시켰을 뿐 상용화에 필요한 민감도, 투과도, 유연성, 동작 신뢰성 및 재현성 등 모두를 만족시키지 못해 아직 상용화에 한계를 가지고 있다.

이에 본 연구는 나노 복합 절연층 및 유연 나노그레이팅 기판에서 발생되는 응력 집중 현상과 센서 전극 디자인을 이용하여 상용화에 필요한 모든 성능을 만족시키는 세계 최고 수준의 고민감도 투명 유연 포스 터치 센서를 제작하였다. 더불어, 이를 맥박 모니터링 헬스케어와 스마트폰에 성공적으로 적용함으로써 본 센서가 다양한 응용 제품에 적용 가능한 상용화 수준의 센서임을 확인하였다

● 포스 터치 센서는 인식되는 터치의 위치 정보와 더불어 누르는 압력도 인식 가능한 기술로 실제 스마트폰에 집적돼 한 번의 터치만으로 다양한 기능을 제공할 수 있어 많은 관심을 받고 있다. 최근 포스 터치 센서를 스마트폰 뿐 아니라 플렉서블 기기를 포함한 다양한 응용 제품에 적용하기 위해 마이크로-나노 크기의 미세 구조를 이용한 민감도 및 유연성 향상 연구가 활발히 진행되고 있다.

그러나 기존의 고성능 센서들은 특정 성능만을 향상시킴으로써 실제로 필요한 민감도, 유연성, 투명도, 재현성, 다양한 사용 환경에서의 동작 신뢰성 등의 총체적인 성능을 동시에 만족시키지 못해 상용화에 한계가 있었다. 대표적으로 압력에 따른 전도성 미세 구조의 접촉면적 변화를 이용한 압전 저항 센서는 고민감도의 센서 구현은 가능하였지만, 접촉 부분에서의 마모로 인해 반복 동작에 대한 낮은 신뢰성을 가지는 문제점이 있었다. 반면 압력에 따른 전극 사이의 거리 변화를 극대화 하기 위해 다공성 절연층을 사용한 정전용량 센서는 민감도 향상과 반복 동작 신뢰성을 향상 시킬 수 있었지만, 다공성 구조 내부에서의 빛 굴절로 인한 낮은 투과도와 적층 구조의 두꺼운 두께로 인한 굽힘 시 스트레스 및 변형이 발생하여 감지 성능 변화한다는 문제가 있었다. 따라서 아직까지 상용화에 필요한 모든 성능들을 동시에 향상 시킨 상용화 수준의 포스 터치 센서가 필요한 상황이다.

● 본 연구팀은 기존 정전용량 센서의 문제 해결을 위해 포스 터치 센서는 공기를 포함한 간격을 갖는다는 기존 상식에서 벗어나 속이 가득 찬 센서를 제안하였다. 제안한 포스

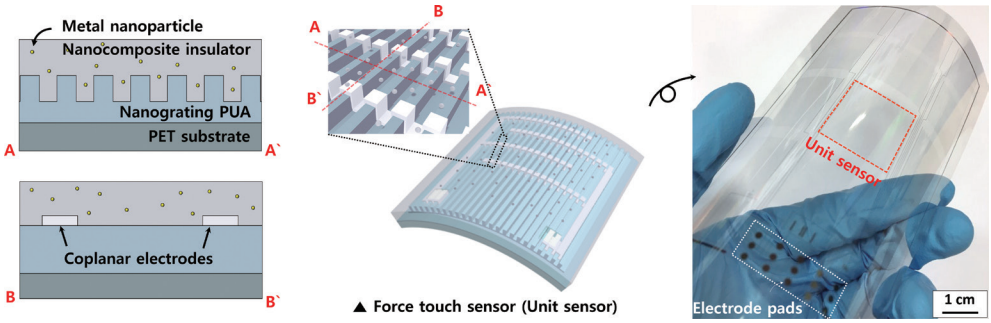


그림 1. 제안하는 투명 유연 포스 터치 센서와 7인치 대면적 센서 어레이

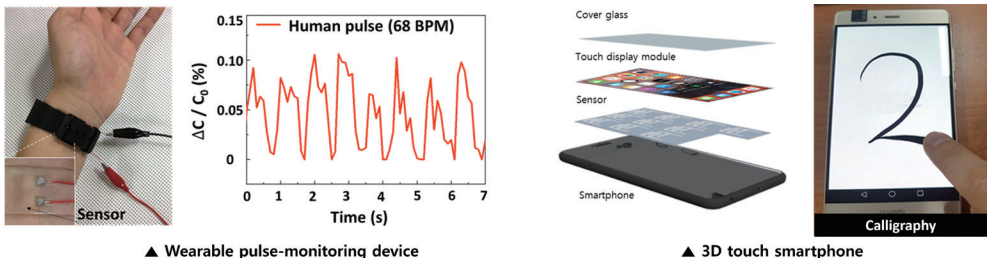


그림 2. 웨어러블 맥박 센서 구현과 포스 터치 센서가 집적된 스마트폰을 이용한 3D 터치 데모

터치 센서는 내부에 압력에 따른 유전율 변화를 극대화할 수 있는 금속 나노 입자가 포함된 투명 나노 복합 절연층, 전극에 의한 빛 가림을 최소화하여 높은 투과도를 가지게 하는 동일 평면 전극과, 가해진 압력을 집중시켜 민감도를 높일 수 있는 나노그레이팅 구조의 유연 기판으로 구성되어 있다.

연구팀은 나노 복합 절연층과 유연 나노그레이팅 기판을 이용하여, 나노그레이팅의 골짜기 부분에 가해진 응력을 집중 시켜 절연층 내부 나노파티클의 밀집도 변화를 증가시킴과 동시에 정전용량(유전율)의 변화를 증가시킴으로써 세계 최고 수준의 고민감도 투명 유연 포스 터치 센서를 제작하는 데 성공하였다. 또한, 연구팀은 감지 전극을 감지층의 상하부에 형성한다는 기존 방식에서 벗어나 동일 평면(기계적 중립면)에 배치함으로써 볼펜심 정도의 극대화된 굽힘 정도에서도 성능의 변화 없이 동작하는 것을 확인했다.

마지막으로 대량 양산 시 주요 고려 사항인 대면적 균일성, 제작 재현성, 온도, 습도 및 장기 사용에 따른 신뢰성 등 역시 간단한 제작 공정과 온도 및 수분에 대해 높은 내구성을 가지는 절연층을 공극 없이 센서를 제작함으로써 상용화 수준의 성능을 보여 주었다.

연구팀은 상용화 수준의 센서를 맥박 모니터링이 가능한 헬스케어 웨어러블 기기에 적용해 미세 압력인 실시간 맥박을 감지하였으며, 국내 포스 터치 센서 기업인 ㈜하이딥과 함께 7인치 대면적 센서를 스마트폰에 실제 장착해 실시간 압력 분포를 확인해 상용화 가능한 수준임을 증명 하였다.

● 간단한 구조와 공정을 이용하여 개발된 상용화 수준의 포스 터치 센서는 상용화에 필요한 다양한 성능 향상 방법을 획기적으로 제안하여 포스 터치 센서 분야이외에 다양한 분야에서도 응용이 가능할 뿐만 아니라, 다양한 사용 환경에서 높은 신뢰성을 요구하는 사용자 터치 인터페이스와 웨어러블 기기에 널리 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

연구성과

[논문] • J. Y. Yoo, M. H. Seo, J. S. Lee, K. W. Choi, M. S. Jo, J. B. Yoon "Industrial Grade, Bending–Insensitive, Transparent Nanoforce Touch Sensor via Enhanced Percolation Effect in a Hierarchical Nanocomposite Film." Advanced Functional Materials 28, 1804721 (2018). [2017 Impact Factor = 13.33].

• J. Y. Yoo, M. H. Seo, J. S. Lee, K. W. Choi, M. S. Jo, H. J. Song, J. B. Yoon "Maximizing Percolation Effect Using Sub–100 nm Nano–valley for High Performance Wearable Transparent Pressure Sensor"32nd IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems(MEMS) 2019.

[특허] 국내 특허 7건과 해외 특허 2건 출원

[언론보도] • 연합 뉴스, 전자 신문, Science Daily을 비롯한 24개 국내외 언론보도

• 어드밴스드 사이언스 뉴스(Advanced Science News)에 영상 초록(Video Abstract) 소개

• Advanced Functional Materials Journal 후면 표지 논문 선정

[수상] 논문 2는 IEEE MEMS 2019 conference에서 우수 학생 논문상(Outstanding Student Paper Award) 수상 (490편의 학생 논문 중 3편에만 수여, 한국 소속 학생으로 최초 수상)

KAIST'S
TOP 10 RESEARCH
ACHIEVEMENTS OF 2018

반도체 웨이퍼 내 혼합된 형태의 결함 패턴 탐지 및 분류 방법 개발

산업 및 시스템공학과
김 희 영

반도체 제조 공정에서 각 칩의 불량 여부 테스트 결과에 따라 일정값을 부여한 맵을 웨이퍼빈맵이라고 한다. 웨이퍼빈맵의 불량칩 패턴은 공정 이상 원인에 따라 다르게 형성된다고 알려져 있다. 불량칩의 분포 패턴을 분석하는 것은 공정 이상을 탐지하고 그 원인을 파악하는데 중요한 단서를 제공한다. 최근 반도체 제조 공정이 점점 복잡해 짐에 따라 한 웨이퍼 안에 여러 형태의 불량칩 패턴이 혼재되어 있는 경우가 증가하게 되었다. 이러한 경우, 1) 사전에 서로 다른 몇 개의 패턴이 혼재되어 있는지 알지 못한다는 점, 2) 각 패턴이 복잡한 모양을 가진다는 점, 3) 일정 패턴을 형성하지 않고 랜덤하게 분포하는 불량칩이 패턴 탐지를 방해하는 점이 어려움으로 작용한다. 본 연구에서는 일정 패턴을 형성하는 불량칩을 탐지하는 필터링 기술을 개발하고, 데이터 스스로 패턴 수를 결정하되 복잡한 모양의 실제 패턴을 데이터의 잠재공간에서 단순한 모양으로 변환시켜 효과적으로 분류하는 방법을 제안하였다.

● 반도체 웨이퍼 제조공정은 웨이퍼 표면에 집적회로를 형성하는 복잡한 일련의 공정으로 구성된다. 웨이퍼 제조가 끝난 후 웨이퍼 내 각 칩의 불량 여부를 테스트해서 테스트 결과에 따라 일정값을 부여한 맵을 웨이퍼빈맵이라고 한다. 이때 웨이퍼빈맵의 불량칩 패턴은 공정 이상 원인에 따라 다르게 (예: 원, 링, 스크래치 등) 형성된다고 알려져 있다. 따라서 불량칩의 분포 패턴을 분석하는 것은 공정 이상을 탐지하고 그 원인을 파악하는데 중요한 단서를 제공한다. 최근 반도체 제조 공정이 점점 복잡해 짐에 따라 한 웨이퍼 안에 여러 형태의 불량칩 패턴이 혼재되어 있는 경우가 증가하게 되었다. 이러한 경우 1) 사전에 서로 다른 몇 개의 패턴이 혼합되어 있는지 알지 못하고, 2) 각각의 패턴이 복잡한 모양을 가질 수 있으며, 3) 패턴을 형성하지 않고 랜덤하게 분포하는 불량칩이 노이즈로 작용하여 패턴 탐지를 방해할 수 있어서, 몇 개의 어떤 패턴이 존재하는지 정확히 분석하는 것이 어려워졌다.

● 본 연구에서는 위와 같이 여러 형태의 불량칩 패턴이 혼합되어 있는 웨이퍼빈맵에서 자동으로 패턴을 탐지하고 분류하는 방법을 개발하였다. 먼저, 랜덤 분포가 아닌 일정 패턴을 형성하고 있는 불량칩을 효과적으로 탐지할 수 있는 connected–path filtering (CPF) 방법을 개발하였다. CPF 방법은, 특히 스크래치 (가늘고 긴 선) 형태로 분포하는 불량칩을 탐지하는 데 있어서 기존 방법에 비해 탁월한 성능향상을 보였다. 또한, CPF 방법으로 탐지된

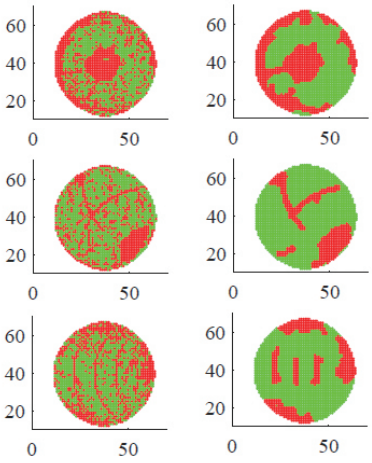


그림 1. (좌) 원본데이터, (우) 제안하는 방법을 이용하여 랜덤불량칩을 제거한 후의 결과

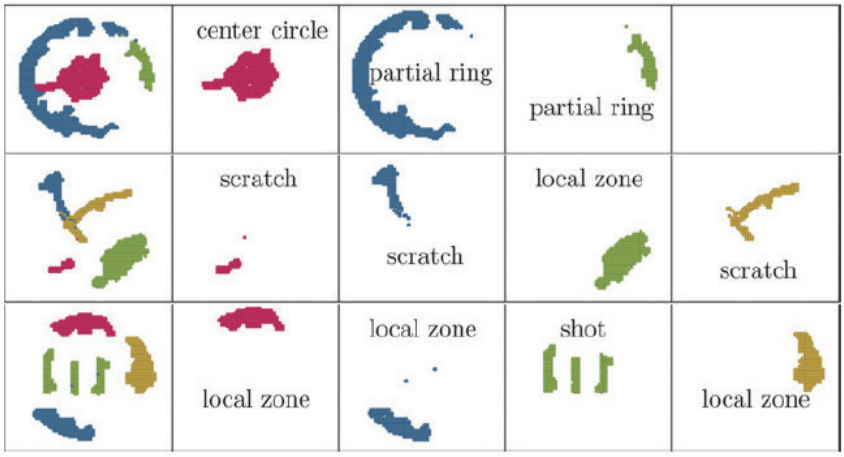


그림 2. (첫번째 열) 여러형태의 혼합된 불량칩 패턴, (두번째~네번째 열) 제안하는 방법을 이용하여 각 특정 패턴으로 분류한 불량칩 패턴

불량칩들을 다수의 패턴 별로 분류하기 위해서 infinite warped mixture model을 이용할 것을 제안하였다. 그리하여 분류 과정에서 데이터가 스스로 패턴 수를 결정할 수 있도록 하였으며, 복잡한 모양의 실제 패턴을 바로 이용하는 대신 데이터의 잠재공간(latent space)에서의 단순한 모양의 패턴을 이용함으로써 보다 효과적으로 다수의 복잡한 모양의 불량칩 패턴을 분류할 수 있도록 하였다. 실제 반도체 회사에서 수집한 웨이퍼빈맵 데이터를 이용하여 제안하는 방법의 탁월한 성능을 검증하였다.

● 이전에는 웨이퍼 한 장에 하나의 불량패턴만 있는 단순한 경우를 가정하여 연구가 진행되어, 여러 형태의 불량패턴이 혼합된 현실적인 상황에서는 실제로 적용하는 데 한계가 있었다. 본 연구에서는 실제 반도체 현장에서 수집한 여러 형태의 불량패턴이 혼합된 웨이퍼빈맵 데이터를 가정하여 연구를 진행하고 결과를 검증하였다. 과거에는 웨이퍼 테스트 후 전문가가 일일이 웨이퍼빈맵 데이터를 눈으로 확인하면서 공정이상 여부를 판단하였다. 본 연구에서 제안하는 방법을 이용하면 여러 불량패턴이 혼합되어 있는 경우에도 자동으로 몇 개의 서로 다른 패턴이 존재하는지 탐지 가능하게 되어, 이전 공정에서 어떠한 공정 이상이 있었는지 쉽게 파악하고 문제를 해결할 수 있다. 이로써 반도체 공정에서 비용을 절감하고 품질을 향상시킬 수 있으며, 우리나라 반도체 산업의 중요성을 생각할 때 큰 경제적인 효과를 기대할 수 있다.

연구성과

[논문] • J. Kim, Y. Lee, and H. Kim (2018), "Detection and clustering of mixed-type defect patterns in wafer bin maps," IISE Transactions, 50(2), 99–111. **(Selected as a featured article)**

[언론 보도] • [국제산업공학회 매거진 특집기사] J. Kim, Y. Lee, and H. Kim (2018), "Can different defect patterns be recognized when they are mixed over a wafer?," IISE magazine, January, 2018

• YTN 뉴스, YTN 사이언스 포함 다수의 언로보도 (featured in YTN News, YTN Science, and so on.)

연구비 지원

National Research Foundation of Korea (NRF), 2015R1C1A1A02037090

KAIST'S
TOP 10 RESEARCH
ACHIEVEMENTS OF 2018

프로그램이 가능한 스핀기반 로직소자 기술 개발

신소재공학과
박 병 국

현재 사용되는 컴퓨팅 기술은 논리 연산을 수행하는 프로세스와 기억을 하는 메모리가 물리적으로 분리된 폰노이만 구조를 사용하고 있다. 따라서 정보처리를 위해서 두 소자 사이에 데이터의 전송이 필수적이고 이에 따른 에너지 소모와 시간 지연이 발생한다. 이러한 폰노이만 병목현상은 특히 인공지능, 사물인터넷, 빅데이터 등 대용량 정보처리가 요구되는 최첨단 컴퓨팅 기술에서는 특히 심각한 문제를 야기합니다. 본 연구에서는 스핀오빗 토크 스위칭 임계전류를 전계로 제어하는 기술을 이용하여 메모리와 로직을 동시에 수행하는 스핀기반 로직소자를 개발하였다. 또한 전계효과의 극성을 제어함으로 "n형"과 "p 형" 특성을 지닌 스핀로직 소자를 최초로 개발하여 상보성 로직동작을 보고하였다. 본 연구에서 개발된 소자는 비휘발성과 프로그램이 가능한 특성을 가져, 향후 폰노이만 병목현상, 고집적의 물리적 한계 등 기존 반도체기반 소자의 한계를 극복할 기술로 활용될 것으로 기대된다.

● 차세대 반도체 소재 기술

현재 사용되는 컴퓨팅 기술은 논리소자와 메모리소자가 공간적으로 분리되어 있는 폰노이만 구조를 사용하고 있다 (그림 1a). 따라서 정보처리를 위해서 두 소자 사이의 신호 전달에 의한 전력소모 및 신호지연을 피할 수 없고, 휘발성 특성으로 정보유지를 위한 지속적인 전력 공급으로 전력소모의 문제점을 야기한다. 또한 컴퓨터 CPU 및 스마트폰 AP의 성능은 메모리/논리 소자 개수에 비례하기 때문에 성능 향상을 위한 지속적인 용량 증가를 위해서는 소자의 집적도 향상 및 소모전력 감소 기술이 선행되어야 한다.

이러한 근본적인 문제를 해결하는 방법 중 하나는 논리소자에 정보저장 기능을 탑재한 로직메모리 소자를 도입하는 것으로 (그림 1b), 이를 위해서 비휘발성이면서 프로그램이 가능한 로직소자를 개발해야 한다.

스핀트로닉스는 전자의 고유의 성질인 전하와 스핀을 모두 사용하여 기존 소재/소자가 갖지 못한 새로운 기능의 전자소자를 개발하는 연구 분야이다. 스핀트로닉스의 대표적인 소자는 자성메모리(MRAM)로 비휘발성 및 고속동작 특성을 가지고 있어 삼성, Hynix, Intel, Qualcomm 등 국내외 반도체 기업에서 차세대 메모리로 활발히 개발 중에 있다. 자성메모리의 성공에 이어 최근 스핀트로닉스 기반의 로직소자의 개발에 관심이 집중되고 있고, 비휘발성, 프로그램 가능성, 간단한 구조 등의 장점으로 기존의 반도체 기반의 CMOS를 대체할 경우 그 기술적/산업적 파급효과가 클 것으로 예상된다. 하지만 아직 스핀트로닉스 기반의 로직소자는 동작원리를 시연하는 수준의 연구가 진행되었고, 특히 로직소자를 구성하기 위한 핵심 기술인 상보성 로직기능 (Complementary logic operation)은 아직 개발되지 않았다.

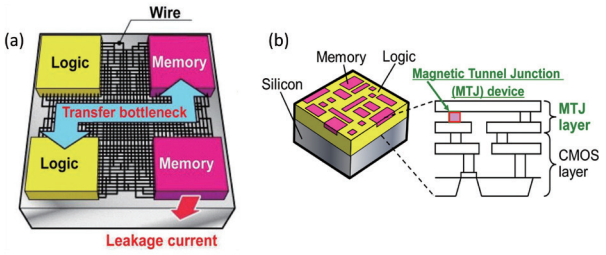


그림 1. 컴퓨터 구조. (a) 논리소자와 메모리 소자가 분리된 기존 메모리. (b) 논리소자와 메모리 소자가 결합된 스핀로직 소자

● **상보성 스핀로직 소자 개발 : 논리와 기억을 동시에 하는 스마트 전자소자**

본 연구에서는 차세대 자성메모리의 동작방식의 하나인 스핀궤도토크(Spin orbit torque)를 외부 전기장을 이용하여 제어하는 기술을 이용하여 스핀 기반 로직소자를 개발하였다 (그림 2a). 스핀궤도토크는 전자의 스핀과 궤도간의 상호작용을 이용하여 자화방향을 제어하는 기술로 자화반전 속도가 기존의 스핀전달토크보다 약 10배 이상 빠르기 때문에 로직소자 적용에 매우 유리하다.

수직이방성을 갖는 Ta/CoFeB/MgO 구조의 소자에 약 5MV/cm의 전기장을 인가함으로 스핀궤도토크 스위칭 임계전류를 30% 이상 조절하는 것을 성공하였다 (그림 2b). 이러한 특성을 바탕으로 "AND", "OR" 등의 로직함수를 구현하는 스핀기반 로직소자를 개발하였다.

또한 CoFeB/MgO 계면의 산화 상태를 조절하여 전계효과의 극성을 제어할 수 있었다. 즉 산화 상태에 따라서 (+) 전기장 인가에서 스위칭이 용이한 "n–형" 로직소자와 (–) 전기장 인가에서 스위칭이 용이한 "p–형" 로직소자를 개발하였다 (그림 2b). 이러한 "n–형" 소자와 "p–형" 소자를 결합하여 상보성 로직함수를 수행하는 로직소자를 개발하였다 (그림 2c). 이는 기존 반도체 로직소자를 구성하는 기본 구조인 CMOS를 대체할 수 있는 소자로 스핀기반 기술로는 최초로 구현되었다.

본 연구팀은 소자 전산모사를 이용하여 스핀기반 로직소자가 기존의 반도체기반의 소자에 비해서 집적도 획기적으로 높이고 전력소모를 줄일 수 있음을 보였고, 이를 바탕으로 AI나 IoT 칩을 설계하고 그 성능을 평가하고 있다.

이 결과 외에 스핀 로직소자 성능향상을 위한 소재기술을 개발하였다. 특히 강자성/비자성 계면유도 스핀전류 생성 소재는 스핀의 방향을 임의로 제어할 수 있어 스위칭 효율 증가 및 무자기장 동작을 가능하게 하여 저전력, 고집적 스핀궤도토크 기반 소자개발에 활용될 것으로 판단된다.

● 스핀기반 로직소자는 연산과 기억을 동시에 할 수 있는 전혀 새로운 소자로 기존 컴퓨팅 기술의 근본적 한계를 극복할 수 있는 기술이다. 예를 들면, 기존의 DRAM, FLASH 등의 메모리 소자와 로직소자를 단일 비휘발성 로직소자로 통합하여 소자의 단순화로 공정단가를 낮추는 효과뿐만 아니라 기존의 논리/메모리 분리되어 있는 폰노이만 구조의 컴퓨터 구동방식을 넘어 논리와 기억을 동시에 하는 뉴로모픽 컴퓨팅에 응용될 수 있을 것이다

또한 본 연구에서 개발된 스핀궤도토크 기술은 고속 동작이 가능하여 자성메모리에 적용할 경우 기존의 SRAM 기반 캐시메모리를 대체할 수 있는 핵심 기술이다. 이는 비휘발성으로 메모리 전력소모를 감소시켜 웨어러블, 모바일, 바이오센서 및 사물인터넷과 같은 저전력 동작을 필수적으로 요구하는 전자기기에 응용되어 관련 기술 발전에 기여할 것이다.

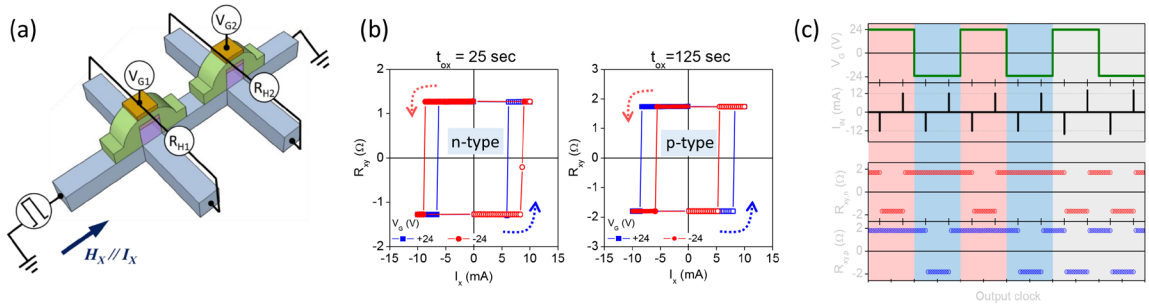


그림 2. 스핀기반 로직소자. (a) 스핀로직소자 개략도, (b) "n–형", "p–형" 스핀로직소자 구동, (c) 상보성 스핀로직 함수 구현 결과

연구성과

[논문] • "Complementary logic operation based on electric–field controlled spin–orbit torques", Nature Electronics 1, 398 (2018)
• "Spin currents and spin–orbit torques in ferromagnetic trilayers", Nature Materials 17, 509 (2018)
[특허] 반도체 소자 및 반도체 로직소자 (2017–0117642, 2017–0101259, US 15/723278, JP 2017–203154)
[언론보도] "고효율 스핀전류 생성 신소재 개발" 중앙일보 등 10건 이상 보도 (2018.04.11.)

KAIST'S
TOP 10 RESEARCH
ACHIEVEMENTS OF 2018

탄소나노튜브 기반의 초소형 X-선 튜브 및 이를 이용한 근접 암치료장비 개발

원자력 및 양자공학과
조 성 오

탄소나노튜브를 이용해 직경 5 mm인 진공밀봉형 초소형 X-선 튜브를 최초로 개발하고, 이를 이용하여 상용화 수준의 X-선 근접 암치료장비를 개발했다. 개발한 암치료장비는 인체 표면에 근접하거나 몸 속으로 삽입해서 피부암, 식도암, 기관지암, 자궁암, 직장암, 췌장암 등 다양한 암을 치료할 수 있다. 이 장비는 대형 선형가속기를 이용한 기존의 방사선 암치료장비보다 정상세포의 손상을 줄이면서 암만을 선택적으로 치료할 수 있고, 가격이 1/20 이하로 저렴하고 크기가 1/10 이하로 작은 장점이 있다. 이로 인해, 지금까지 대형 종합병원에서나 도입이 가능했던 방사선 치료장비가 중소형 병원에까지 보급이 되어, 부작용이 적으면서도 쉽고 값싸게 더 많은 암 환자들을 치료할 수 있는 길이 열릴 것으로 기대한다.

● 암을 치료하는 전통적인 방법에는 수술과 화학요법이 있다. 수술은 장기의 손실이 불가피하며 입원을 요하고 화학요법은 부작용을 유발하는 단점이 있다. 이러한 단점들은 방사선 치료법으로 상당히 극복될 수 있다. 현재의 방사선 치료는 선형가속기로 인체 외부에서 고에너지 방사선을 발생하여 인체내부로 조사함으로써 암을 치료한다. 그런데, 고에너지 방사선이 인체를 통과하면서 암이 아닌 정상세포들을 손상시키는 부작용을 유발한다. 반면 근접 암치료장비는 초소형 X-선 튜브를 몸 안에 삽입하거나 피부 근처에 위치한 암에 근접시켜, 암 주위의 국소적 부위에만 저에너지 방사선을 발생시켜 암을 치료하기 때문에 정상세포의 손상을 최소화할 수 있는 장점이 있다. 초소형 X-선 튜브 기반의 근접 암치료장비는 미국과 독일에서 개발되어 있다. 그러나, 이러한 초소형 X-선 튜브들은 소형 필라멘트를 가열하는 열전자방출 방식으로 동작하므로 수명이 10시간 이내로 짧고 동작 안정성이 떨어져 실제 암치료에 널리 사용되지 못하고 있다. 따라서, 이러한 단점을 극복하는 새로운 근접 암치료장비가 필요하다.

● 본 연구에서는 탄소나노튜브 (carbon nanotube; CNT)를 이용한 전계방출 방식으로 진공밀봉형 초소형 X-선 튜브를 최초로 개발하였다. 이 방식은, 필라멘트와 달리, 가열이 필요하지 않아 X-선 튜브의 수명을 늘릴 수 있고 소형화가 가능하다. 개발된 초소형 X-선 튜브의 직경은 5 mm이고 길이는 치료 목적에 맞게 조절이 가능하다 (그림 1). 더불어, CNT 기반의 X-선 튜브가 실용화되지 못한 가장 큰 이유였던 고전압 방전으로 인한 CNT의 파괴현상을 극복할 수 있는 새로운 기술을 개발하여, X-선 튜브의 동작안정성을 획기적으로 향상시켰으며 동작 수명을 500

시간 이상으로 증가시켰다. 한편, 초소형 X-선 튜브를 이용하여 암치료를 하기 위해서는 발생하는 X-선의 공간분포를 조절하는 어플리케이터 (applicator)가 필요한데, 피부암, 췌장암, 켈로이드 등을 치료하는 surface applicator와 자궁암, 직장암, 유방암 등을 치료하는 cylindrical applicator를 3D 프린터를 이용하여 환자맞춤형으로 제작하는 기술도 개발하였다.

개발된 초소형 X-선 튜브와 어플리케이터를 이용하여 상용화 수준의 근접 암치료장비를 개발하였다 (그림 2). 전체 시스템과 각 부품 및 구동 소프트웨어 등은 이 장치를 사용할 방사선 종양학과 교수들과 의료기기 인증 자문사의 자문을 받아 실제 병원에서의 사용적합성과 의료기기 인증조건을 만족하도록 개발되었다. 이 장비는 내장된 터치스크린이나 외부 PC로 구동할 수 있고 방사선 치료량을 실시간으로 측정가능하며 방사선 안전성이 확보된 경우에만 동작되도록 설계, 제작되었다. 한편, 개발된 근접 암치료장비를 이용하여 암세포와 동물실험을 수행한 결과, 기존 선형가속기 기반의 방사선 암치료장비와 동등한 치료효과를 보여줌을 확인하였다.

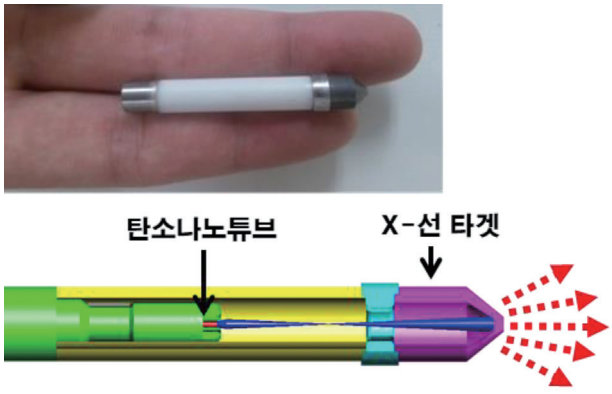


그림 1. 탄소나노튜브를 이용하여 만든 초소형 X-선 튜브

그림 2. 개발한 근접 암치료장비

● 기존의 선형가속기를 이용한 방사선 치료장비는 가격이 50억 이상으로 비싸고 넓은 설치공간을 필요로 하기 때문에 종합병원과 같은 대형 병원에서만 보유가 가능하였다. 반면 본 연구에서 개발한 근접 암치료장비는 2~3억대 가격으로 기존 장비보다 20배 이상 저렴하고 소형이어서, 대형병원뿐 아니라 중소형 병원에서도 도입이 가능하다. 또한 앞에서 언급한 것과 같이, 정상세포의 손상을 최소화하면서 암을 치료할 수 있다. 따라서, 더 많은 암환자들이 부작용이 적으면서 쉽고 값싸게 암을 치료받을 수 있고, 기존 방사선 치료법과는 다른 새로운 암치료기술을 개발 및 발전시키는 데에도 기여할 것이다.

연구성과

[논문] • Hyun Nam Kim, Ju Hyuk. Lee, Han Beom Park, Sung Oh Cho, "Surface applicator of a miniature X-ray tube for superficial electronic brachytherapy of skin cancer, Medical Physics 45, 29–36 (2018)

• Han Beom Park, Hyun Nam Kim, Ju Hyuck Lee, Ik Jae Lee, Sung Oh Cho, "Dosimetric characterization and commissioning of a superficial electronic brachytherapy device for skin cancer treatment", Nuclear Engineering and Technology 50, 937–943 (2018)

[특허] • 조성오, 김현진, 김현남, 박한범, "탄소나노튜브 기반의 X-선 튜브를 이용한 켈로이드 및 피부암 치료용 X-선 근접 치료 시스템", 등록번호: 10-1837593-0000, 등록일: 2018. 3. 6

• 조성오, 김현진, 김현남, 박한범, "탄소나노튜브 기반의 X-선 튜브를 이용한 켈로이드 및 피부암 치료용 X-선 근접 치료 장치에 사용되는 초소형 X-선튜브시스템", 등록번호: 10-1837599-0000, 등록일: 2018. 3. 6

[언론 보도] • YTN 뉴스보도, TJB 뉴스보도, 대전 CBS 인터뷰보도, 연합뉴스 등 일간지 보도 33회 (2018. 11. 22 ~ 11. 29)

[기술 이전] • 기타 위 장치개발과 관련된 2017년 이전 실적 (2009년 ~2017년)

• 논문 9편, 국제특허 2건, 국내특허 11건, 기술이전 1건 (165,000,000원 + 경상료 2% + 기술개발비 50,000,000원)