

'사람 뇌' 닮은 차세대 AI 반도체 소자 개발 전기는 7배 덜 먹는다

- GIST 신소재공학과 이상한 교수가 이끈 공동연구팀 나노입자 규칙 배열로 균일한 '나노 틸' 구현
- 입자 사이 틸 좁히자 작동에 필요한 전압 1/7로 대폭 감소.. 소자 간 성능 오차 9% 미만 극복
- 전기 자극 세기 따라 '단기장기 기억' 특성 확인.. 저전력 뉴로모픽 정보처리 소자 활용 기대
- 국제학술지《Advanced Composites and Hybrid Materials》게재



▲ (왼쪽부터) GIST 신소재공학과 이상한 교수, KENTECH 에너지공학부 오명환 교수, GIST 신소재공학과 오인혁 박사과정생, 황준범 박사, KENTECH 에너지공학부 강민우 석박사통합과정생

광주과학기술원(GIST·지스트, 총장 임기철)은 신소재공학과 이상한 교수 연구팀이 한국에너지공과대학교(KENTECH) 에너지공학부 오명환 교수 연구팀과 공동으로 산화코발트(Co_3O_4) 단결정 나노입자를 규칙적으로 배열하고 입자 사이의 미세한 '틈'을 정밀하게 제어해 안정적으로 작동하는 차세대 휘발성 메모리스터(memristor)*를 개발했다고 밝혔다.

이번 연구는 전자소자의 성능이 '무엇으로 만드는가'라는 소재의 특성뿐 아니라 나노입자를 '어떻게 배열하는가'라는 구조에 따라서도 달라질 수 있음을 보여주며, 나노미터 수준의 구조를 정밀하게 설계해 차세대 전자소자 설계의 새로운 방향을 제시했다.

* **메모리스터(memristor)**: 가해진 전압이나 전류에 따라 저항 상태가 변하는 특성을 이용해 정보를 저장하거나 처리할 수 있는 차세대 전자소자이다.

인공지능(AI)과 사물인터넷(Internet of Things, IoT) 등의 발전으로 처리해야 할 정보량이 빠르게 늘면서, 적은 전력으로 작동하면서도 소자마다 성능 차이가 크지 않은 전자소자를 구현하는 기술의 중요성이 커지고 있다.

특히 전기 자극을 받으면 저항이 변하고, 자극이 사라지면 다시 원래 상태로 돌아

오는 '휘발성 스위칭'은 외부 자극에 따라 일시적으로 신호를 기억했다가 잊는 생물학적 신경세포의 특성을 모사할 수 있어 뉴로모픽 컴퓨팅(Neuromorphic Computing)* 등 차세대 정보처리 기술에 활용될 수 있다.

기존 산화물 기반 휘발성 멤리스터는 전기 자극을 받으면 소자 내부에 전류가 집중적으로 흐르는 가느다란 길, 즉 '전도 경로'가 만들어졌다가 사라지는 방식으로 작동한다. 그런데 이 경로가 매번 다른 곳에, 다른 형태로 만들어질 수 있어 소자마다 동작 특성이 달라지는 문제가 있었다.

* 뉴로모픽 컴퓨팅(Neuromorphic Computing): 인간의 뇌와 신경계가 정보를 처리하는 방식을 모방해 방대한 정보를 적은 에너지로 빠르게 처리하는 차세대 컴퓨팅 기술이다.

연구팀은 이 문제를 해결하기 위해 전류가 흐르는 길을 작동할 때마다 새로 만들지 않고, 소자를 만들 때부터 정해 두는 방법에 주목했다. 전류가 무작위로 새로운 길을 만드는 대신, 나노입자 사이의 일정한 틈을 따라 흐르도록 구조를 설계한 것이다.

이를 위해 약 10 nm(나노미터) 크기의 산화코발트 단결정 나노 입자를 바둑판처럼 규칙적으로 배열하고, 입자 사이에 평균 약 3 nm의 균일한 '나노 틈(nanogap)'이 반복되는 구조를 구현했다. 이 나노입자 배열을 두 전극 사이에 넣어 멤리스터 소자를 제작했다.

나노입자의 배열에는 입자들이 외부에서 하나씩 배치되지 않아도 스스로 규칙적인 구조를 이루는 '자기조립(self-assembly)*' 방식을 활용했다.

이 과정에는 와인잔 벽에서 액체가 방울져 흘러내리는 '와인의 눈물'의 원리로 알려진 '마랑고니(Marangoni) 효과'를 이용했다. 용매가 증발하면서 생기는 표면장력의 차이가 나노입자를 이동시키고, 나노입자들이 넓은 영역에서 규칙적인 2차원 격자 구조를 이루도록 한 것이다.

* 자기조립(self-assembly): 입자들이 외부에서 하나하나 배치되지 않아도 상호작용에 의해 스스로 규칙적인 구조를 이루는 현상이다.

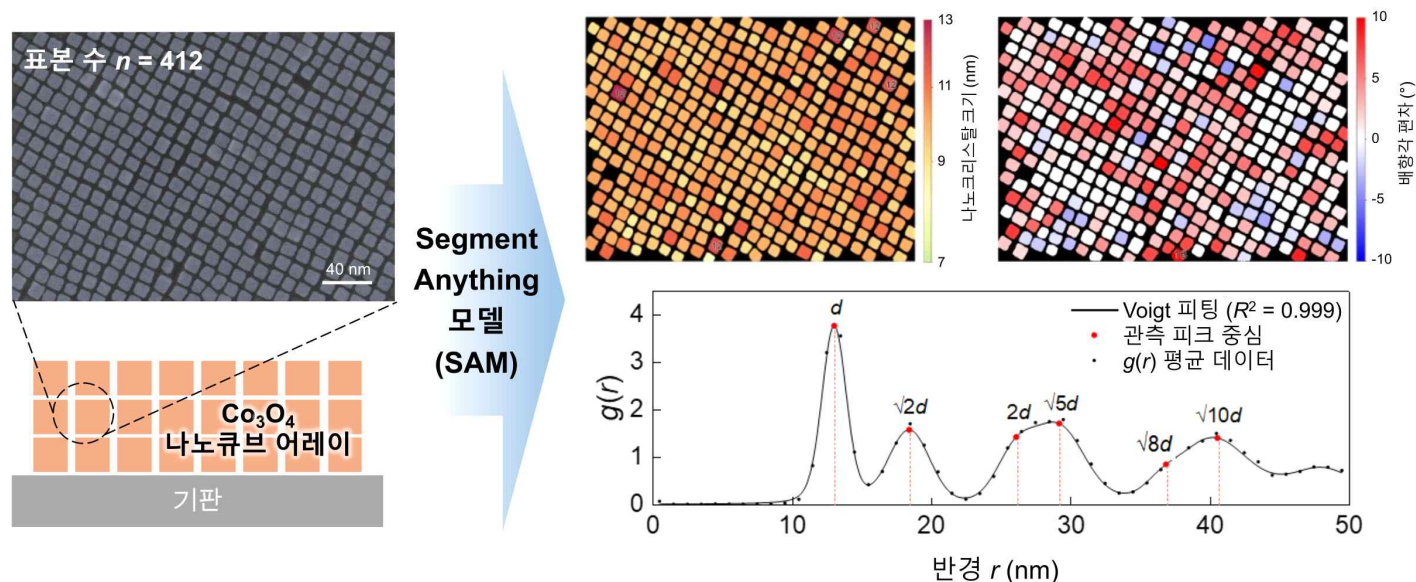
연구팀은 나노입자 사이의 규칙적인 '틈'이 멤리스터의 동작에 어떤 영향을 미치는지 확인하기 위해, 동일한 산화코발트 소재로 입자 사이에 틈이 없는 연속적인 '박막'과 나노입자가 규칙적으로 배열된 소자를 각각 만들어 비교했다.

그 결과, 연속적인 산화코발트 박막에서는 안정적인 메모리 스위칭이 나타나지 않은 반면, 나노입자 사이에 규칙적인 '틈'이 형성된 소자에서는 안정적이고 반복 가능한 휘발성 스위칭이 나타났다. 나노입자 사이의 틈이 전류가 흐르는 경로를 일정하게 만들어 소자의 동작을 안정화한 것이다.

개발된 메모리스터는 약 10 nA(나노암페어)의 매우 낮은 전류에서 작동했으며, 100회 연속 측정에서도 스위칭 전압의 변동계수가 9% 미만에 그쳐 높은 동작 균일성과 재현성을 보였다.

실제 측정에서 스위칭이 시작되는 평균 전압은 8.75 V(볼트), 스위칭이 원래 상태로 돌아가는 평균 전압은 4.38 V였으며, 각각의 변동계수는 6.17%와 8.90%로 나타났다.

특히 연구팀은 나노 튜브의 크기를 조절하면 메모리스터가 작동하는 전압도 바꿀 수 있는지 확인했다. 나노 튜브를 약 3 nm에서 약 1 nm로 좁히자, 스위칭이 시작되는 평균 전압도 8.75 V(볼트)에서 1.20 V로 약 7분의 1 수준까지 낮아졌다. 즉 같은 소재를 사용하더라도 입자 사이의 튜브를 좁히는 것만으로 소자가 작동하는 데 필요한 전압을 크게 낮출 수 있음을 보여준다.

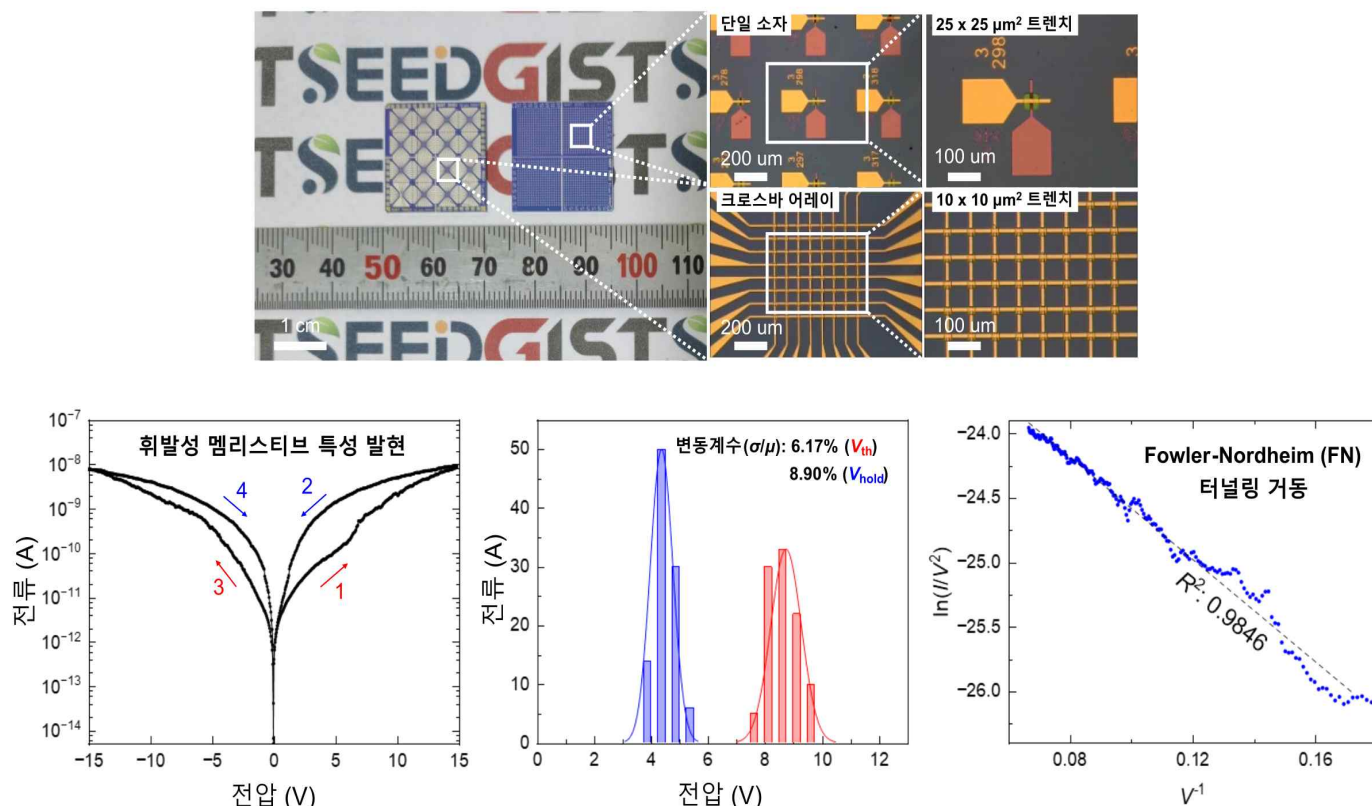


▲ 인공지능(AI) 분석으로 확인한 나노 입자의 규칙적인 배열. (좌) 마랑고니 효과를 이용한 자기조립으로 산화코발트(Co_3O_4) 나노 입자를 바둑판처럼 규칙적으로 배열한 모습과 구조 모식도이다. (우) 인공지능 이미지 분석 모델인 '세그먼트 애니싱 모델(Segment Anything Model, SAM)'을 활용해 전자현미경 사진 속 나노 입자의 크기와 방향, 배열 간격을 분석한 결과, 나노 입자들이 평균 약 10나노미터의 균일한 크기를 가지며 정사각 격자 형태로 규칙적으로 배열돼 있음을 확인했다.

또한 개발된 메모리스터는 전기 자극의 세기와 시간에 따라 서로 다른 두 가지 회복 특성을 나타냈다.

짧은 전기 자극 뒤에는 약 1~2 μs (마이크로초) 수준에서 빠르게 원래 상태로 돌아온 반면, 강한 자극을 오래 가한 뒤에는 1분 이상에 걸쳐 천천히 회복됐다. 쉽게 말해 하나의 소자에서 금세 사라지는 '짧은 기억'과 비교적 오래 지속되는 '긴 기억'이 모두 나타난 것이다.

연구팀은 이러한 빠른 회복은 전자의 빠른 이동이나 계면에 붙잡혀 있던 전자의 방출 등 전자적 과정, 느린 회복은 나노 입자 사이 접합부에서 이동한 이온이 다시 확산하는 과정과 관련된 것으로 해석했다. 이러한 특성은 시간에 따라 변하는 신호를 처리하는 뉴로모픽 정보처리 소자 등에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.



▲ 나노 입자 배열을 이용한 멤리스터의 안정적인 휘발성 스위칭. (상) 규칙적으로 배열된 산화코발트 나노 입자를 이용해 제작한 멤리스터 칩과 광학현미경 확대 이미지로 여러 개의 멤리스터를 배열한 구조도 함께 보여준다. (좌하) 전압을 가하면 전류가 증가하고 전압을 없애면 다시 원래 상태로 돌아오는 휘발성 스위칭이 약 10 나노암페어(nA)의 낮은 전류에서 나타남을 보여준다. (중하) 여러 소자의 동작 전압을 비교한 결과, 전압의 변동이 9% 미만으로 나타나 균일하게 작동함을 확인했다. (우하) 전류가 나노 입자 사이의 좁은 틈을 통해 이동하는 특성을 분석한 결과이다.

GIST 신소재공학과 이상한 교수는 "이번 연구는 기존에는 전류 흐름을 불규칙하게 만들 수 있는 요소로 여겨졌던 나노입자 사이의 '틈'을 오히려 소자의 동작을 제어하는 설계 요소로 활용했다는 데 의미가 있다"며 "낮은 전류에서 안정적으로 작동하면서 서로 다른 시간대의 회복 특성까지 확인한 만큼, 향후 저전력 뉴로모픽 소자 개발에 활용될 것으로 기대한다"고 말했다.

KENTECH 에너지공학부 오명환 교수는 "균일한 나노입자가 스스로 규칙적인 구조를 이루도록 만들고, AI 기반 이미지 분석을 통해 입자들이 얼마나 일정하게 배열됐는지를 정량적으로 확인함으로써, 나노입자 사이에 일정한 틈이 반복되는 구조를 정밀하게 구현·분석할 수 있었다"고 말했다.

GIST 신소재공학과 이상한 교수와 KENTECH 에너지공학부 오명환 교수가 지도하고 GIST 신소재공학과 오인혁 박사과정생, 황준범 박사, KENTECH 에너지공학부 강민우 석박사통합과정생이 공동제1저자로 수행한 이번 연구는 ▲과학기술정보통신부·한국연구재단 미래수소원천기술개발사업 ▲과학기술정보통신부·한국연구재단 개인기초연구사업 ▲기후에너지환경부·한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받았다.

연구 결과는 **복합재료 분야 국제학술지 《Advanced Composites and Hybrid Materials》**에 2026년 7월 30일 온라인으로 게재됐다.

한편 GIST는 이번 연구 성과의 기술사업화 및 산업적 활용에 관심 있는 기업·기관의 문의를 창업혁신진흥원 기술사업화센터(hgmoon@gist.ac.kr)를 통해 받고 있다고 밝혔다.

논문 정보

○ 논문명, 저자 정보

- 저널명 : Advanced Composites and Hybrid Materials
(IF: 15.5, 2025년 기준)
- 논문명 : Engineering Structural Discontinuity in Ordered Co_3O_4 Nanocube Arrays for Volatile Memristive Dynamics
- 저자 정보 : 오인혁(공동제1저자, GIST 신소재공학과), 황준범(공동제1저자, GIST 신소재공학과), 강민우(공동제1저자, 한국에너지공과대학교 에너지공학부), 김대혁(공저자, 한국에너지공과대학교 에너지공학부), 김서현(공저자, GIST 신소재공학과), 이정대(공저자, GIST 신소재공학과), 김현(공저자, GIST 신소재공학과), 이동현(공저자, GIST 신소재공학과), 오명환(공동교신저자, 한국에너지공과대학교 에너지공학부), 이상한(대표교신저자, GIST 신소재공학과)