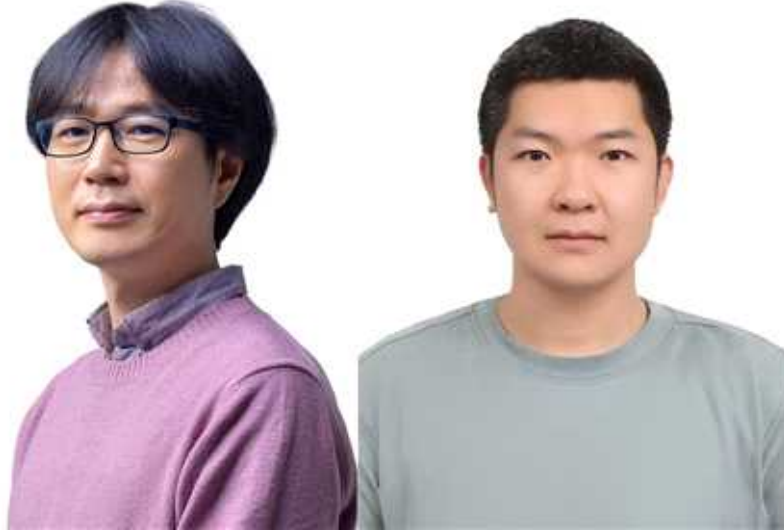


이론으로 제기돼 온 '교자성',

초박막 물질에서 실험 단서 확인... GIST-미네소타대

- GIST 물리·광학과 이종석 교수가 이끈 국제 공동연구팀 초박막 루테늄 산화물에서 강자성·반강자성 장점 결합한 '교자성' 실험 규명... 국제학술지《PNAS》게재
- AI·고성능 컴퓨팅용 차세대 초고속저전력 스핀 전자소자 연구에 새로운 단서 제시



▲ (왼쪽부터) GIST 물리·광학과 이종석 교수, 최인혁 박사

광주과학기술원(GIST·지스트, 총장 임기철)은 물리·광학과 이종석 교수 연구팀이 미국 미네소타대학교(University of Minnesota)와의 공동연구를 통해 **머리카락 두께의 약 5만분의 1에 불과한 극도로 얇은 루테늄 산화물(RuO_2)*에서 새로운 자석 성질이 나타날 수 있음을 실험적으로 규명했다고 밝혔다.**

* **루테늄 산화물(RuO_2):** 루테늄이라는 금속과 산소가 결합해 만든 금속 산화물이다. 전기가 잘 통하고 열과 화학 반응에도 강한 성질을 가지고 있어 배터리, 전자기기, 촉매 등 다양한 첨단 기술 분야에 활용되는 소재다.

컴퓨터와 스마트폰 등 대부분의 전자기기에는 정보를 저장하고 전달하기 위해 자석 성질이 활용된다. 예를 들어 하드디스크나 일부 반도체 메모리는 자성의 방향 차이를 0과 1로 구분해 데이터를 기록한다.

하지만 현재 널리 사용되는 **강자성*** 물질은 외부 자기장이나 주변 환경의 영향을 비교적 쉽게 받아 안정성이 떨어질 수 있고, 자성의 방향을 바꾸는 속도에도 한계가 있어 기기의 작동 속도를 크게 높이기 어렵다는 문제가 있다.

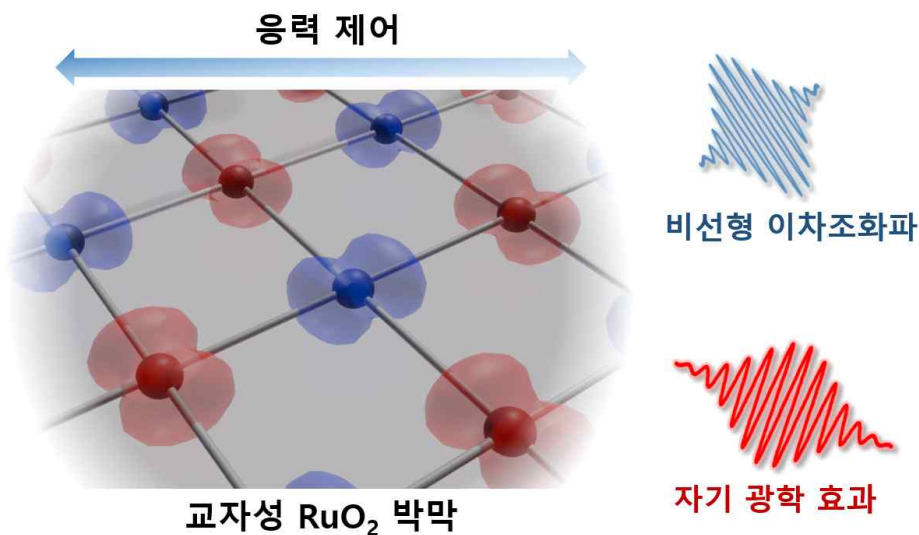
최근에는 이러한 한계를 극복할 수 있는 새로운 자성 상태인 **교자성***이 이론적 제안됐다. 교자성은 정보를 빠르게 처리할 수 있으면서도 주변 환경의 영향을 덜 받는 장점이 있어 차세대 초고속·저전력 전자소자에 활용될 가능성이 있는 물리적 상태로 주목받고 있다. 다만 아직 자성을 정밀하게 제어하는 기술이 충분히 확립되지 않아 실제 소자에 적용되기까지는 추가 연구가 필요한 상황이다.

* **강자성(ferromagnetism)**: 자기장이 없어도 스스로 자석처럼 행동하는 물질로 자석의 방향이 서로 다른 상태를 이용해 정보를 저장할 수 있지만, 환경 변화에 상대적으로 민감하고 자석 방향을 바꾸는 속도에도 한계가 있다.

* **교자성(altermagnetism)**: 기존 자석(강자성)처럼 정보를 저장할 수 있으면서도 반강자성 물질처럼 빠르게 작동할 수 있는 새로운 자성 상태다.

연구팀은 기존 자석 소재의 속도와 안정성 한계를 극복하기 위해 **전기가 잘 통하고 열과 화학 반응에도 강한 금속 물질인 루테늄 산화물**에 주목했다. 특히 이 물질을 **매우 얇은 막 형태로 만들고 내부 구조에 미세한 변형을 가하면 기존에는 나타나지 않던 새로운 자성 상태가 나타날 수 있다**는 점에 착안했다.

연구팀은 '하이브리드 분자빔 에피택시(hMBE)'라는 **첨단 박막 제작 기술**을 이용해 루테늄 산화물을 원자 한 층씩 정밀하게 쌓아 올렸다. 이 기술은 진공 상태에서 물질을 매우 얇게 분사해 기판 위에 한 층씩 쌓는 방식으로, 머리카락 두께의 약 5만분의 1 수준인 나노미터(nm) 두께의 극도로 얇은 막을 결함 없이 균일하게 제작할 수 있는 정밀 공정 기술이다.



▲ **응력 제어를 통한 루테늄 산화물(RuO_2) 박막의 교자성 성질 발현**. 연구팀은 원자층 단위로 정밀하게 쌓아 올리며 두께를 조절하고, 외부에서 힘(응력)을 가해 구조를 비틀어 만든 박막(루테늄 산화물, RuO_2)을 만들었다. 박막에 빛을 쏘아 내부에서 빛의 파장이 변하는 '비선형 이차조화파' 현상과 빛이 반사될 때 자석의 성질에 반응하는 '자기 광학 효과'를 확인했다. 이를 통해 박막의 두께를 조절함에 따라 물질이 새로운 자석 성질인 '교자성'을 띠고 있음을 확인했다.

연구팀은 이렇게 제작한 **초박막(ultra-thin)의 두께와 구조를 정밀하게 제어하면서 자석 성질이 어떻게 변하는지 실시간으로 관찰**했다. 또한 물질 내부에 물리적인 힘인 '응력(strain)'을 가해 마치 신축성 있는 천을 팽팽하게 잡아당기듯 결정 구조를 미세하게 변형시켜 새로운 자성 상태가 나타나는 조건을 확인했다.

그 결과 연구팀은 응력이 가해진 초박막 루테늄 산화물에서 기존 자석과는 다른 새로운 자성 현상, 즉 교자성 특성이 나타날 수 있음을 실험적으로 확인했다.

특히 수 나노미터 수준의 초박막 상태에서 전기가 잘 흐르는 금속 성질을 유지하면서도 구조적으로 비대칭적인 '극성 금속(polar metal)' 특성과 교자성이 동시에 나타나는 새로운 물리 상태가 형성될 수 있음을 실험적으로 확인했다.

이는 금속의 전기적 특성과 새로운 자성 특성이 결합된 물질 상태를 구현한 사례로, 차세대 스핀 기반 전자소자* 연구에 중요한 단서를 제공한다.

또한 연구팀은 실온보다 훨씬 높은 약 500K(약 227°C) 수준에서도 자석 성질이 변화하는 현상(자성 전이)이 나타나는 것을 관찰해, 비교적 높은 온도에서도 자성 특성이 유지될 수 있음을 확인했다. 이는 실제 전자소자가 작동하는 환경에서도 활용될 가능성을 보여주는 결과다.

이러한 특성은 향후 AI 슈퍼컴퓨터와 같은 고성능 컴퓨팅 장치에서 정보를 더 빠르고 안정적으로 처리하는 차세대 스핀 기반 전자소자 개발에 활용될 가능성이 있다. 또한 에너지 효율을 높여 전력 소모를 줄이는 저전력 전자소자 기술로도 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

* 스핀 기반 전자소자(spintronic): 전자의 전하뿐 아니라 자석처럼 작용하는 전자의 미세한 자기 성질(스핀)까지 함께 활용해 정보를 저장하고 처리하는 차세대 전자소자 기술이다.

이종석 교수는 "이번 연구는 루테늄 산화물에서 논의돼 온 교자성 존재 가능성을 실험적으로 검증했다는 점에서 의미가 크다"며 "자성과 극성을 동시에 제어할 수 있는 새로운 기능성 소재 개발의 가능성을 제시함으로써 차세대 초고속·저전력 스핀 기반 전자소자 연구에 기여할 것으로 기대된다"고 밝혔다.

이종석 교수 연구팀이 미국 미네소타대학교 연구팀과 공동으로 수행한 이번 연구는 과학기술정보통신부·한국연구재단 중견연구자지원사업, 삼성미래기술육성재단, 미국 공군과학연구국(AFOSR)·에너지부(US DOE)·국립과학재단(NSF)의 지원을 받았다.

연구 결과는 미국 국립과학원이 발행하는 국제학술지《PNAS(Proceedings of the National Academy of Sciences)》에 2026년 3월 6일 온라인으로 공개됐다.

한편 GIST는 이번 연구 성과가 학술적 의의와 함께 산업적 응용 가능성까지 기대되는 것으로, 기술이전 관련 협의는 기술사업화실(hgmoon@gist.ac.kr)을 통해 진행할 수 있다고 밝혔다.

논문의 주요 정보

1. 논문명, 저자정보

- 저널명 : Proceedings of the National Academy of Sciences
- 논문명 : Altermagnetic Polar Metallic phase in Ultra-Thin Epitaxially Strained RuO₂ Films
- 저자 정보 : 정승교 박사 (제1저자, University of Minnesota), 최인혁 박사 (제1저자, GIST), Sreejith Nair (공저자, University of Minnesota), Luca Buiarelli (공저자, University of Minnesota), Bita Pourbahari (공저자, McMaster University), 오진영 (공저자, 성균관대학교), Bonnie Y.X. Lin (공저자, MIT), James M. LeBeau (공저자, MIT), Nabil Bassim (공저자, McMaster University), Daigorou Hirai (공저자, Nagoya University), Ambrose Seo (공저자, University of Kentucky), 최우석 (공저자, 성균관대학교), Rafael M. Fernandes (공저자, University of Illinois Urbana-Champaign), Turan Birol (공저자, University of Minnesota), Liuyan Zhao (공저자, University of Michigan), 이종석 (교신저자, GIST), and Bharat Jalan (교신저자, University of Minnesota)