

“자석 방향 바꾸자 열 흐름도 달라졌다”

GIST-표준연, 자성 이용해

절연체의 열 흐름 달라지는 현상 규명

- 물리·광과학과 이종석·신동빈 교수가 이끈 공동연구팀, 자성 금속막과 카이랄 석영이 결합해 자화 방향에 따라 열전달 특성이 달라지는 현상 확인
- 유효 열전도도 상온 약 7%이하 223℃ 약 20% 차이... 전기 절연 유지하며 열 흐름 조절하는 기술 개발에 단서
- 국제학술지《Advanced Materials》 게재



▲ (왼쪽부터) GIST 물리·광과학과 신동빈 교수, 이종석 교수, 최인혁 박사, 김대헌 박사과정생

광주과학기술원(GIST·지스트, 총장 임기철)은 물리·광과학과 이종석·신동빈 교수팀이 한국표준과학연구원 등과 공동으로 자성을 띠는 얇은 금속막의 자기적 방향을 반대로 바꾸면, 맞닿아 있는 전기 절연체에서 열이 전달되는 정도가 달라진다는 사실을 확인했다고 밝혔다.

이번 연구는 자성을 이용해 열 흐름을 조절할 수 있는 가능성을 보여준 것으로, 향후 전기 절연이 필요한 전자소자의 열 관리 기술이나 열을 이용한 정보 소자 개발에 활용될 것으로 기대된다.

반도체 등 전자소자가 작아지고 내부에 더 많은 부품이 집적되면서, 발생한 열을 효율적으로 배출하고 조절하는 기술의 중요성이 커지고 있다.

전기가 통하지 않는 절연체에서도 열은 이동한다. 고체를 이루는 원자들이 진동하며 주변으로 에너지를 전달하기 때문이다. 이처럼 열을 운반하는 원자들의 집단적인 진동을 ‘포논(phonon)’이라고 한다.

포논 중에는 원자들이 회전하듯 진동하는 특성을 지닌 것도 있다. 공동연구팀은 이러한 진동의 회전 성향과 카이랄 구조*를 가진 절연체 내부의 원자 배열에 따라 열이 전달되는 정도가 달라질 수 있다는 점에 주목했다.

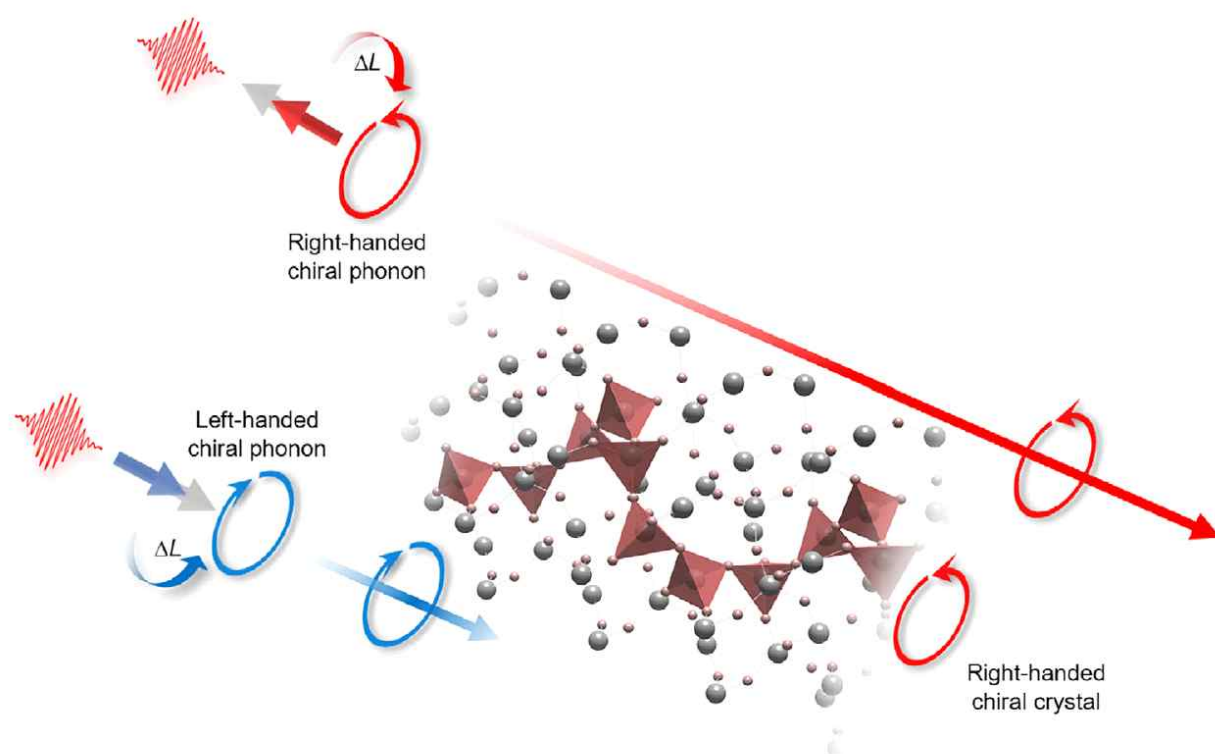
* **카이랄 구조(chiral structure)**: 왼손과 오른손처럼 서로 거울에 비친 형태이지만, 회전하거나 뒤집어도 완전히 겹쳐지지 않는 구조다.

이를 확인하기 위해 **코발트(Co)와 백금(Pt)을 여러 층으로 쌓은 자성 금속막을 카이랄 석영* 결정 위에 결합한 '자성체-카이랄 석영 결합 구조'**를 제작했다.

카이랄 석영은 원자 배열에 따라 '**왼손형**'과 '**오른손형**' 결정 구조를 가지며, 이러한 특성을 '**카이랄성(chirality·손잡이성)**'이라고 한다.

공동연구팀은 자성 금속막이 자성을 띠는 방향인 '**자화 방향**'을 바꾸면 원자 진동의 회전 성향도 달라질 수 있다는 점에 착안해, 금속막의 자화 방향을 위쪽과 아래쪽으로 바뀌가며 왼손형과 오른손형 석영의 열전달 특성을 비교했다.

* **석영(quartz)**: 이산화규소(SiO_2)로 이루어진 광물로, 원자들이 규칙적으로 배열된 결정 구조를 갖는다.



▲ **자성 금속막과 카이랄 석영 사이의 열전달 원리 개념도**. 레이저를 쬔면 자성 금속막의 자화가 빠르게 감소하면서 원자 진동에 회전 성향이 생길 수 있다. 이때 발생한 진동이 인접한 석영으로 열을 전달하는 과정에서, 진동의 회전 성향과 석영의 결정 구조에 따라 열이 전달되는 정도가 달라질 수 있음을 보여준다.

실험에서는 금속막을 레이저로 가열한 뒤 시간에 따른 열의 이동을 측정했다. 이를 바탕으로 금속막과 석영이 맞닿은 부근에서 열이 얼마나 잘 전달되는지를 나타내는 '**유효 열전도도**'를 분석했다.

그 결과, 금속막의 자화 방향을 반대로 바꾸자 유효 열전도도가 달라졌다. 특히 왼손형 석영에서는 자화 방향이 위쪽일 때, 오른손형 석영에서는 아래쪽일 때 열이

더 잘 전달되는 것으로 나타났다.

열전달 차이가 석영의 카이랄성과 관련이 있는지 확인하기 위해, 석영과 마찬가지로 이산화규소로 이루어졌지만 원자들이 규칙적으로 배열되지 않은 '비정질 이산화규소'에서도 같은 실험을 진행했다.

그 결과, 비정질 이산화규소에서는 자화 방향을 바꿔도 유효 열전도도가 거의 달라지지 않았다. 이는 규칙적인 원자 배열을 가진 석영에서 나타난 열전달 변화가 석영의 결정 구조와 관련이 있음을 뒷받침하는 결과다.

공동연구팀은 온도를 달리해 자화 방향에 따른 열전달 차이를 비교했다. 그 결과, 자화 방향을 위쪽과 아래쪽으로 바꿨을 때 유효 열전도도의 최댓값과 최솟값은 상온에서 약 7% 차이가 났으며, 50K(약 영하 223℃)에서는 그 차이가 약 20%로 커졌다.

연구진은 온도가 낮아지면서 원자 진동 사이의 상호작용이 줄어들어, 진동의 회전 성향에 따른 열전달 차이가 더 뚜렷해진 것으로 분석했다.

양자역학 등 기본 물리 법칙에 따른 계산 결과를 활용하는 '제일원리 기반 기계학습' 시뮬레이션에서도 원자 진동의 회전 방향에 따라 석영으로 열이 전달되는 과정에 차이가 나타났다.

자성 금속막을 이루는 코발트 원자들이 시계 방향과 반시계 방향으로 각각 회전하듯 진동하는 상황을 모사한 결과, 같은 오른손형 석영에서도 회전 방향에 따라 열이 퍼지는 속도와 전달되는 정도가 달랐다.

이는 앞선 실험에서 확인한 열전달 변화에 포논의 회전 성향이 관여할 수 있다는 해석을 뒷받침한다.

신동빈 교수는 "이번 연구는 자성체의 자화 방향에 따라 절연체의 열전달 특성이 달라진다는 사실을 확인하고, 그 변화에 원자 진동의 회전 성향이 관여할 가능성을 제시한 성과"라고 말했다.

이종석 교수는 "향후 전기 절연을 유지하면서 열 흐름을 정밀하게 조절하는 소재와 소자 개발에 기초가 될 것으로 기대한다"고 말했다.

GIST 물리·광학과 이종석(현 KAIST)·신동빈 교수가 지도하고 최인혁 박사와 김대헌 박사과정생이 공동제1저자로 참여한 이번 연구는 ▲과학기술정보통신부 ▲양자포노닉스 연구센터 ▲산업통상자원부 ▲GIST 등의 지원을 받았으며, 국가슈퍼컴퓨

팅센터로부터 슈퍼컴퓨팅 자원과 기술 지원을 받았다.

연구 결과는 재료과학 분야 국제학술지 《어드밴스드 머티리얼즈(Advanced Materials)》에 2026년 10월 13일 온라인으로 게재됐다.

논문 정보

○ 논문명, 저자 정보

- 저널명 : Advanced Materials
- 논문명 : Demagnetization-Driven Nanoscale Chirality-Selective Phonon Transport
- 저자 정보 : 최인혁(공동제1저자, GIST), 김대헌(공동제1저자, GIST), 진연종(공저자, GIST), 양승모(공저자, 한국표준과학연구원 양자기술연구소·중앙대학교), 주태성(공저자, 한국표준과학연구원 양자기술연구소), 김창수(공저자, 한국표준과학연구원 양자기술연구소), 황찬영(공저자, 한국표준과학연구원 양자기술연구소), 신동빈(공동교신저자, GIST), 이종석(공동교신저자(공동교신저자, 전 GIST·현 KAIST)