

“열변화를 색으로 경고한다!”

GIST-KAIST, 80도 되기 전에 알려주는 ‘나노광학 온도 시각화 센서’ 개발

- GIST 정현호·KAIST 송영민 교수 공동연구팀, 열변색 나노광소자로 80도 이하의 배터리 온도를 1초 이내 감지해 화재 전조를 실시간 시각적으로 경고
- 전기차, 스마트기기 등 배터리 화재 예방 및 안전성 향상 기대... 국제학술지 《어드밴스드 머티리얼스(Advanced Materials)》 게재

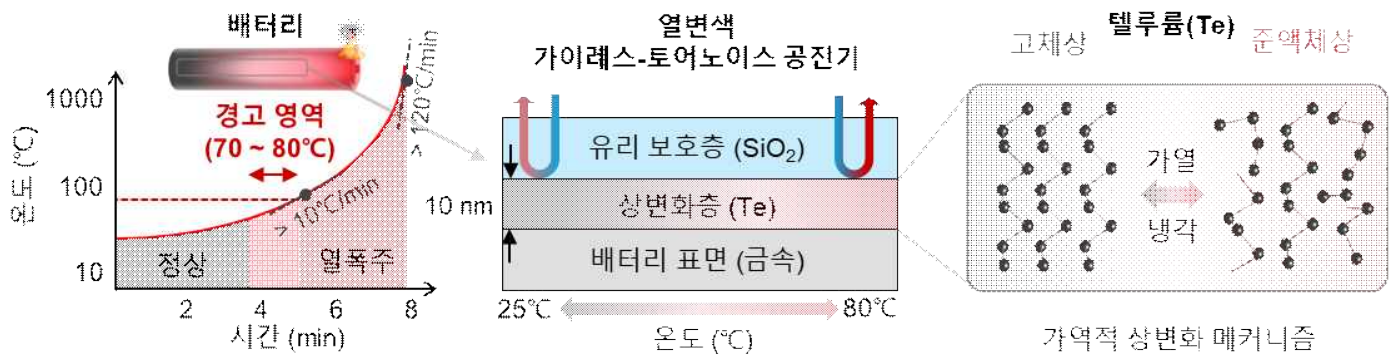


▲ (앞줄 좌측부터) KAIST 전기 및 전자공학부 송영민 교수, GIST 전기전자컴퓨터공학과 정현호 교수, (뒷줄 좌측부터) GIST 전기전자컴퓨터공학과 김주환·김현민·이주형 연구원

전기차 배터리 화재 위험을 사전에 감지할 수 있는 기술이 국내 연구진에 의해 개발됐다. 이 기술은 **배터리 내부 이상 징후를 조기에 포착함으로써, 화재나 폭발과 같은 중대 사고를 예방할 수 있을 것으로** 기대된다.

광주과학기술원(GIST, 총장 임기철)은 전기전자컴퓨터공학과 정현호 교수와 한국과학기술원(KAIST) 전기 및 전자공학부 송영민 교수 공동 연구팀이 **배터리 내부 온도가 위험 수준에 도달하기 전인 80도 이하에서 열폭주 위험을 실시간으로 감지하고 사용자에게 직관적으로 경고할 수 있는 나노광학 온도센서를 개발했다.**

배터리는 전기차, 웨어러블 디바이스, 도심항공모빌리티(UAM) 등 첨단 기술의 에너지 원으로 필수적이지만, 열폭주로 인한 화재·폭발 사고가 잇따르며 안전 문제가 대두되고 있다.



▲ **나노광학 온도 시각화 센서:** (좌) 배터리 온도와 구동 상태의 관계와 (우) 이를 기반으로 배터리 열폭주를 사전 감지하기 위해 본 연구에서 제작한 나노광소자 구조와 동작 원리.

특히 **배터리 내부 온도가 80도를 넘으면 전해질, 분리막 등 내부 주요 구성 요소가 손상되기 시작하고, 1분 이내에 500도 이상으로 급격히 온도가 치솟을 수 있어, 온도를 조기에 감지하고 위험을 사전에 경고할 수 있는 기술 개발이 시급하다.**

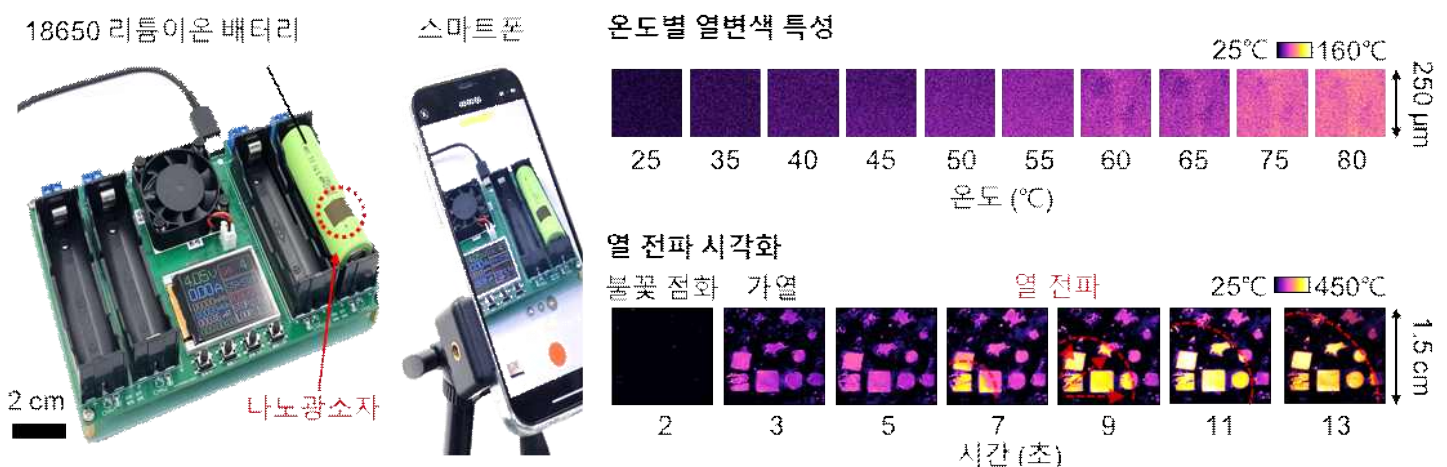
기존의 온도 센서는 열전대*가 직접 접촉한 부분만 측정할 수 있어 전체 온도 분포를 파악하기 어렵고, 적외선 카메라는 표면 재질에 따라 측정 정확도가 떨어지는 한계가 있다. 또한 열변색 물질을 활용한 기존 기술은 반응 속도가 느려 실시간 감지에는 적합하지 않았다.

* **열전대(thermocouple):** 서로 다른 두 금속선을 접합한 센서로, 접합부의 온도 차이에 의해 발생하는 전압 변화를 측정해 온도를 감지하는 장치이다.

연구팀은 **1960년대 보고된 단원소 물질인 '텔루륨(tellurium)'의 특이한 광변조 특성에 주목해** 10 나노미터(nm) 두께의 텔루륨 초박막(ultrathin film)을 활용한 열변색 나노광소자를 개발했다.

텔루륨은 상온에서 80도로 온도가 상승할 때 **고체 상태에서 준액체(quasi-liquid)*** 상태로 부분적으로 녹으며 **가시광 영역에서 굴절률이 0.7 이상 변화하는** 우수한 광변조 특성이 있어 1억분의 1초 단위로 **초고속 온도 감지가 가능하다.**

* **준액체(quasi-liquid):** 고체와 액체의 중간 상태로, 물질이 완전한 고체처럼 딱딱하지 않고 일부가 액체처럼 흐르거나 움직이는 특징을 가진다. 이 상태에서는 고체와 액체가 혼재되어 있어 온도 상승에 따라 물질 내부에서 두 상태가 함께 존재하며 부분적인 유동성이 나타난다.



▲ **제작된 나노광소자의 온도 감지 성능:** 본 연구에서 개발한 나노광소자의 온도에 따른 색 변화와 열 전파 시각화.

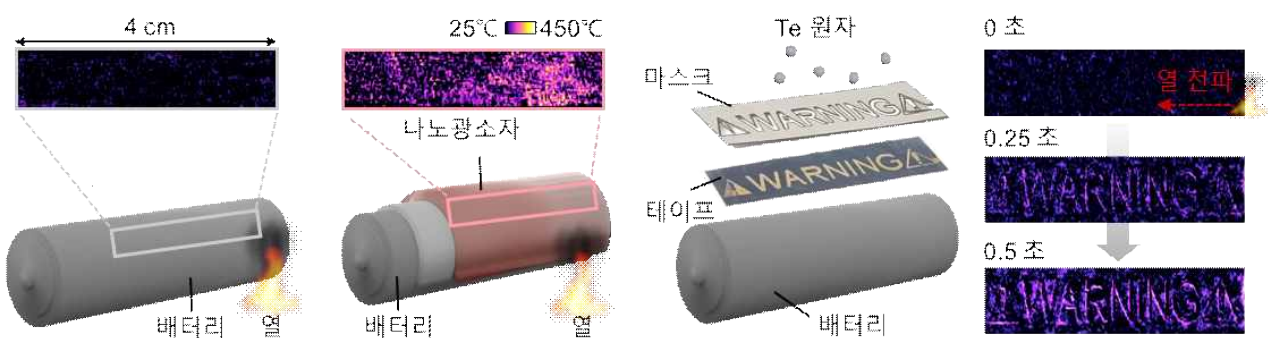
연구진은 알루미늄 기반 배터리 표면 위에 10 나노미터(nm) 두께의 매우 얇은 텔루륨층(Te)을 증착하고, 그 위에 수십 나노미터 두께의 유리(SiO₂) 보호층을 적층하여 온도에 따라 반사색이 변하는 **가이레스-토어노이스 공진기(Gires-Tournois resonator)***를 제작했다.

이 공진기는 80도 이하의 비교적 낮은 온도에서도 **텔루륨의 고체-준액체 상변화에 의한 광특성 변화를 극대화**하며, 유리 보호층을 통해 외부 환경으로부터 **텔루륨의 손상을 방지하여 안정성을 확보**하도록 설계됐다.

또한, 복잡한 회로나 별도의 외부 전원 없이 작동하며, 특정 온도에 도달하면 색이 변했다가 다시 상온으로 냉각되면 **원래 색으로 되돌아가는 가역적(reversible) 특성**을 갖고 있다.

* **가이레스-토어노이스 공진기(Gires-Tournois resonator):** 특정 파장의 빛을 반사하면서 위상 변화를 일으키는 광학 장치로, 얇은 막 구조를 이용해 빛의 간섭 현상을 조절한다. 이를 통해 빛의 반사율과 색깔을 정밀하게 제어할 수 있어, 온도 변화에 따른 광학 신호 변화를 극대화하는 데 활용된다.

제작된 나노광소자는 상온(25도)부터 80도까지 온도 변화를 색깔로 정밀하게 구분할 수 있으며, 상용 열전대와 유사한 수준의 온도 감지 성능을 보인다. 나아가 17 밀리초(ms) 단위의 빠른 동영상 프레임 간격으로 배터리 표면의 온도 분포와 열 확산 과정을 실시간으로 시각화한다.



▲ **배터리 표면 온도 분포 시각화:** 다양한 형태로 패터닝된 나노광소자를 활용하여 배터리의 온도 분포 및 열 전파 실시간 모니터링.

또한, 수십 번의 가열-냉각 사이클과 주변 습도 변화에도 안정적으로 온도를 감지하며, 9개월 이후에도 열변색 특성이 유지되는 우수한 내구성도 입증됐다.

연구팀은 개발한 나노광소자를 상용 18650 배터리와 스마트폰에 적용해 충전 및 방전 시 발생하는 발열을 실시간으로 모니터링하는 데 성공하며 기술의 실제 활용 가능성을 입증했다.

이 광소자는 배터리 셀 위에 직접 증착하거나 간단히 테이프로 부착할 수 있어 산업 현장에 손쉽게 도입할 수 있으며, 별도의 전문 장비나 분석가의 도움 없이도 스마트폰이나 디지털 카메라만으로 누구나 배터리 온도 상태를 쉽게 확인할 수 있어 상용화 가능성이 매우 높다.

GIST 정현호 교수는 “텔루륨의 광변조 특성을 나노포토닉스 기술과 결합해 배터리 폭발 위험을 조기에 경고할 수 있는 원천기술을 확보했다”며 “향후 전기차, 항공, 우주, 소방, 웨어러블 기기 등 다양한 분야에서 활용될 전망”이라고 설명했다.

KAIST 송영민 교수는 “최근 국내외에서 배터리 화재 사고가 잇따르면서 안전성 확보가 중요해졌다”며 “이번 기술이 차세대 배터리 안전을 위한 새로운 패러다임을 제시하고 사회 문제 해결에 기여할 것으로 기대한다”고 말했다.

GIST 전기전자컴퓨터공학과 정현호 교수와 KAIST 전기 및 전자공학부 송영민 교수가 지도하고 GIST 김현민, 이주형, 김주환, 김규린, 한장환, 고주환 연구원이 수행한 이번 연구는 과학기술정보통신부와 한국연구재단의 우수신진연구사업, 미래기술연구실사업 및 GIST-MIT AI국제협력사업의 지원을 받았으며, 재료 분야 저명 국제학술지《어드밴스드 머티리얼즈(Advanced Materials)》에 2025년 7월 23일 온라인 게재됐다.

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

논문의 주요 정보

1. 논문명, 저자정보

- 저널명 : Advanced Materials (IF: 26.8, Materials Science, Multidisciplinary 분야 상위 2.1%, 2024년 기준)
- 논문명 : Thermochromic Gires-Tournois resonators with tellurium for battery thermal runaway warning
- 저자 정보 : 김현민(제1저자, GIST), 이주형(공동저자, GIST), 김주환(공동저자, GIST), 김규린(공동저자, GIST), 한장환(공동저자, GIST), 고주환(공동저자, GIST), 송영민(교신저자, KAIST), 정현호(교신저자, GIST)