

GIST, 저비용·고성능 대기 오염물질 감지 센서 개발

귀금속 촉매 없이도 감지 성능 100배 향상

- 신소재공학과 이상한 교수팀, 귀금속 없이 황(S)만으로 센서 표면 산소 공극 조절해 이산화질소(NO_2) 민감도 100배 향상... 초미량 오염물질까지 정밀 탐지
- 다른 기체에는 거의 반응하지 않는 높은 선택성도 갖춰... 저비용·대량 생산 가능해 도시 대기질 모니터링, 산업 현장 유해가스 감지, 공기청정기 등 다양한 분야 활용 가능
- '기기 및 계측' 분야 상위 1.9% 국제학술지 《Sensors and Actuators B: Chemical》 게재



▲ (왼쪽부터) GIST 신소재공학과 이상한 교수·박준철 박사, KENTECH 에너지공학부 오명환 교수, 한국에너지기술연구원 김승규 박사

대기오염의 주요 원인 가운데 하나인 **이산화질소(NO_2)**를 보다 정확하게 감시해야 할 필요성이 커지고 있다. 이산화질소는 자동차 배기가스와 산업 활동 등에서 발생해 건강과 환경에 영향을 미치는 물질로, 이를 정밀하게 감지할 수 있는 기술은 도시 대기질 관리의 핵심 요소로 꼽힌다.

광주과학기술원(GIST, 총장 임기철)은 신소재공학과 이상한 교수 연구팀이 백금, 금 등 값비싼 귀금속 재료를 사용하지 않고도 이산화질소를 매우 민감하게 감지할 수 있는 새로운 가스센서 기술을 개발하는 데 성공했다고 밝혔다.

이번 연구는 센서 성능을 높이기 위해 사용돼 온 기존 방식의 한계를 넘어, 비용 부담을 낮추면서도 성능을 끌어올릴 수 있는 새로운 해법을 제시했다.

일반적으로 금속산화물 가스센서는 공기 중 특정 기체가 센서 표면과 반응할 때 나타나는 전기적 변화를 감지해 유해가스 농도를 측정한다. 그동안 널리 사용돼 온 텅스텐산화물(WO_3) 센서는 구조가 안정적이지만, 반응이 느리고 민감도가 낮다는 한계가 있었다.

이를 보완하기 위해 센서 표면에 반응을 도와주는 물질, 즉 '촉매'를 추가하는 방식이 활용돼 왔으며, 주로 금(Au)-백금(Pt)-팔라듐(Pd)과 같은 귀금속이 사용돼 왔다. 그러나 이러한 귀금속 촉매는 가격이 높고 수급이 불안정해 상용화의 걸림돌로 작용해 왔다.

연구팀은 이러한 문제를 해결하기 위해 값이 싸고 자연계에 풍부한 원소인 황(S)을 활용해 센서 표면이 가스에 더 잘 반응하도록 만드는 새로운 측매 구조를 구현했다.

황(S)을 텅스텐산화물(WO_3)에 도입하면 기본적인 결정 구조는 유지되면서도 센서 표면에 미세한 빈자리가 늘어나 이산화질소(NO_2)가 더 쉽게 붙고, 반응이 끝난 뒤에는 더 빨리 떨어질 수 있다. 이로 인해 센서는 아주 적은 양의 이산화질소도 빠르게 감지하고, 짧은 시간 안에 다시 측정을 이어갈 수 있게 됐다. 이러한 특성은 제조 비용을 낮추는 동시에 대량 생산과 센서 소형화에도 유리한 장점으로 작용한다.

연구팀은 텅스텐산화물(WO_3) 표면에 황(S)을 도입함으로써 가스 반응에 중요한 역할을 하는 '산소 공극'*을 눈에 띄게 늘리는 데 성공했다. 산소 공극이 많아지면 센서 표면이 가스에 더욱 민감하게 반응해, 아주 적은 양의 이산화질소도 빠르게 감지할 수 있고, 반응이 끝난 뒤에는 원래 상태로 돌아오는 속도도 한층 빨라진다.

* 산소 공극(oxygen vacancy): 금속산화물 결정 구조에서 원래 존재해야 할 산소 원자가 빠져 생긴 빈자리로, 전자 이동과 표면 반응성을 높여 가스 분자가 표면에 더 쉽게 흡착·반응하도록 만든다. 이로 인해 센서 감지 민감도가 향상되며, 금속산화물 기반 가스센서의 성능을 결정하는 핵심 요인으로 꼽힌다.

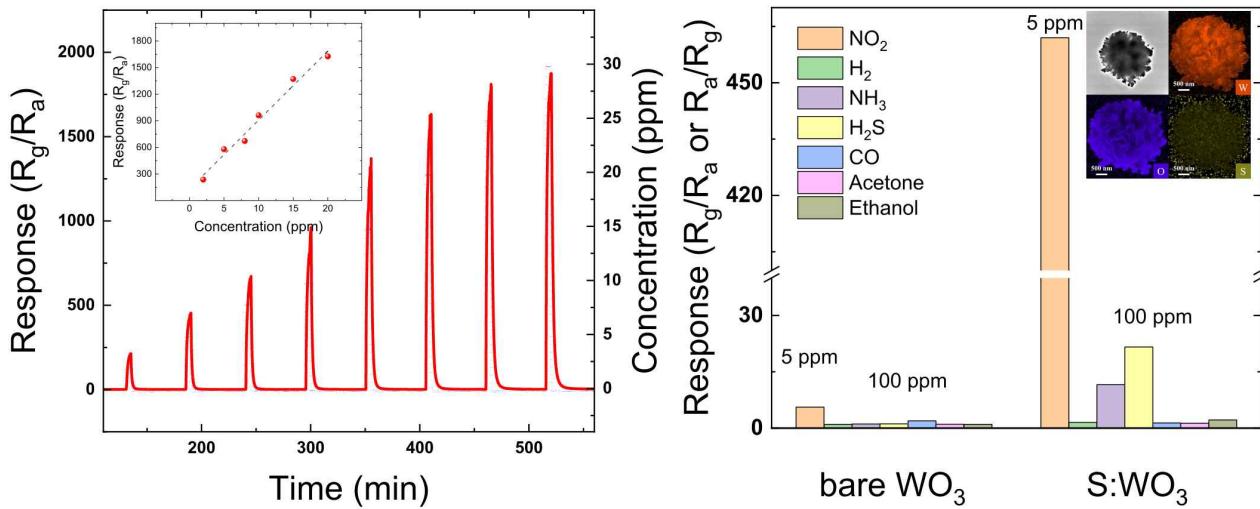
연구팀은 전자에너지손실분광(EELS), X선 광전자분광(XPS), 적외선분광(IR) 등 다양한 분석 기법을 활용해 황(S) 기반 측매 설계가 실제로 센서 표면 특성을 어떻게 변화시키는지를 정밀하게 확인했다.

그 결과, 황(S)을 적용한 텅스텐산화물(WO_3)에서는 산소 공극이 뚜렷하게 늘어났으며, 이러한 구조 변화가 센서 성능 향상으로 이어진다는 사실을 실험으로 입증했다.

실제 센서 시험에서 이 센서는 150°C 환경에서 공기 100만 분자 중 5개 정도에 해당하는 5 ppm 농도의 이산화질소(NO_2)를 측정할 수 있었고, 기존 대비 약 100배 향상된 반응 성능(반응값 $5.6 \rightarrow 578$)을 보였다. 또한 센서가 구별할 수 있는 가장 낮은 농도(감지 한계(LOD)*)는 공기 10억 분자 중 50개 정도에 해당하는 50 ppb 수준으로, 아주 적은 양의 오염물질도 감지할 수 있었다.

이는 금(Au)·백금(Pt)·팔라듐(Pd) 등 귀금속 측매를 사용한 텅스텐산화물(WO_3) 센서와 비교해도 동등하거나 오히려 더 우수한 수준이다.

* 감지 한계(LOD, Limit of Detection): 센서나 분석 장비가 신뢰할 수 있는 범위에서 구별할 수 있는 가장 낮은 농도를 의미한다. 즉, 측정 신호가 배경 잡음을 넘어 실제 물질의 존재를 확인할 수 있는 최소 농도로, 값이 낮을수록 아주 미세한 양까지 감지할 수 있는 고감도 성능을 뜻한다.

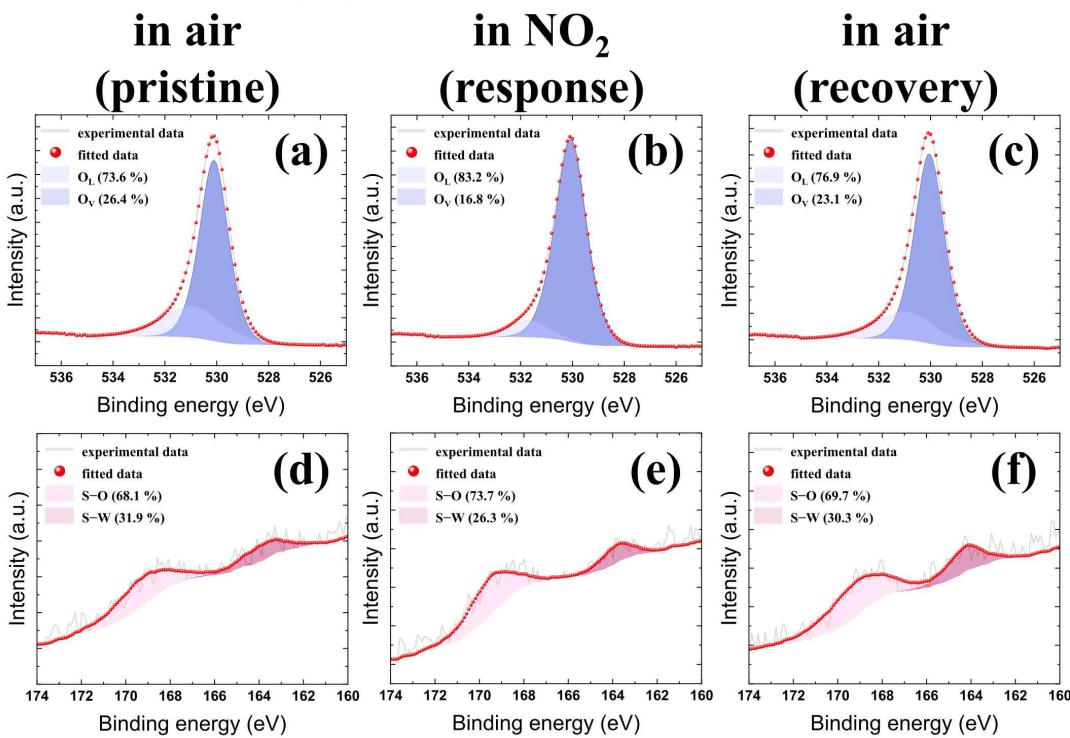


▲ 가스 감지 특성 평가. 황이 첨가된 산화텅스텐 센서는 이론적으로 약 50 ppb 수준의 매우 낮은 이산화질소 검출 한계를 보이며, 대기 중 함께 존재하는 다양한 독성 가스와 비교했을 때 이산화질소에 대해 특히 뛰어난 민감도를 나타낸다.

또한 황(S) 기반 텡스텐산화물(WO_3) 센서는 반응 후 회복 속도가 빠르고, 감지 대상이 분명하다는 점에서도 강점을 보였다.

이산화질소(NO_2)에 노출된 뒤 약 2분 만에 초기 상태로 돌아온 정도로 회복이 빨라, 연속 측정에도 적합하다. 아울러 아세톤·에탄올·일산화탄소(CO)·황화수소(H_2S)·암모니아(NH_3) 등 실제 환경에서 함께 존재할 수 있는 다른 기체들에는 거의 반응하지 않고, 이산화질소에만 민감하게 반응해 측정 신뢰성을 크게 높였다.

고온 조건에서도 습도 변화의 영향을 적게 받아, 다양한 환경에서도 안정적으로 작동하는 점 역시 장점으로 꼽힌다.



▲ 이산화질소 감지 성능 향상. 연구팀이 제작한 산화텅스텐 기반 이산화질소 센서는 황을 첨가함으로써 표면에 더 많은 산소 공극이 형성되어, 이산화질소가 센서에 흡착될 때 반응이 일어날 수 있는 활성 영역이 크게 증가한다. 이를 통해 기존 대비 훨씬 높은 감지 반응성을 확보할 수 있음을 확인하였다.

연구팀은 이번 기술이 도시 대기질을 상시로 관측하는 장비부터 산업 현장의 유해 가스 감지 시스템, 공기청정기와 환기 장치용 센서, 웨어러블 환경 감지 기기까지 폭넓게 활용될 수 있을 것으로 내다봤다.

이상한 교수는 “이번에 제안한 황(S) 기반 센서 표면 조절 방식은 텅스텐산화물 (WO_3)에만 국한되지 않고, 다양한 금속산화물 가스센서에 적용할 수 있는 범용 기술”이라며, “성능은 유지하면서 비용 부담을 낮출 수 있어 대기오염 감시 기기의 실질적인 상용화를 앞당길 수 있을 것”이라고 말했다.

GIST 이상한 교수가 주도하고 한국에너지공과대학교(KENTECH) 에너지공학부 오명환 교수가 공동 참여했으며, GIST 신소재공학과 박준철 박사와 한국에너지기술연구원 김승규 박사가 함께 수행한 이번 연구는 GIST-MIT 공동연구사업, GIST 미래선도형 특성화 연구사업 등의 지원을 받았다.

연구 결과는 세계적 학술지 평가 지표인 JCR(저널 인용 보고서) 기준 ‘측정 기기 및 계측 기술(Instrument & Instrumentation)’ 분야 상위 1.9%에 해당하는 국제학술지 《Sensors and Actuators B: Chemical》에 온라인으로 게재됐으며, 2026년 1월 15일 발간되는 인쇄본(447호)에 실릴 예정이다.

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

논문의 주요 내용

1. 논문명, 저자정보

- 저널명 : Sensors and Actuators B: Chemical (IF=7.7, Instrument & Instrumentation 분야 상위 1.9%, JCR 2024)
- 논문명 : Non-noble metal catalyst embedded WO_3 microspheres for enhancement of NO_2 gas sensing
- 저자 정보 : 박준철 (공동 제1저자, GIST), 김승규 (공동 제1저자, 현 소속: 한국에너지기술연구원, 한국에너지공과대학교·UC Berkeley), 오명환 (공동 교신저자, 한국에너지공과대학교), 이상한 (대표 교신저자, GIST)