

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 촉매 구조를 구현했다.

황(S)을 텽스텐산화물(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 텽스텐산화물(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.

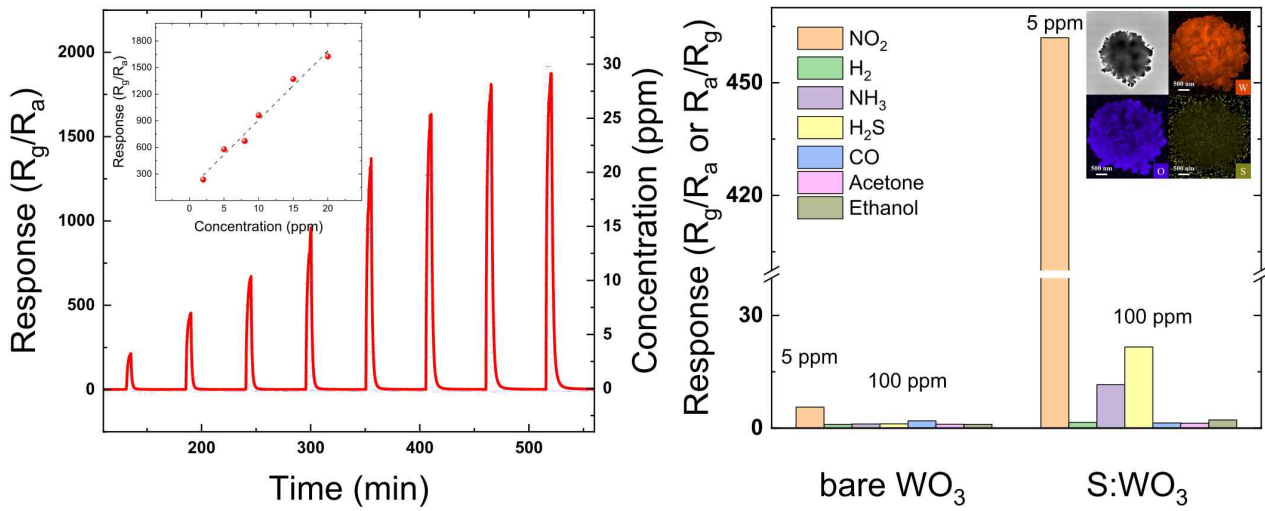
연구팀은 전자에너지손실분광(EELS), X선 광전자분광(XPS), 적외선분광(IR) 등 다양한 분석 기법을 활용해 황(S) 기반 촉매 설계가 실제로 센서 표면 특성을 어떻게 변화시키는지 정밀하게 확인했다.

그 결과, 황(S)을 적용한 텽스텐산화물(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 → 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 촉매를 사용한 텽스텐산화물(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.

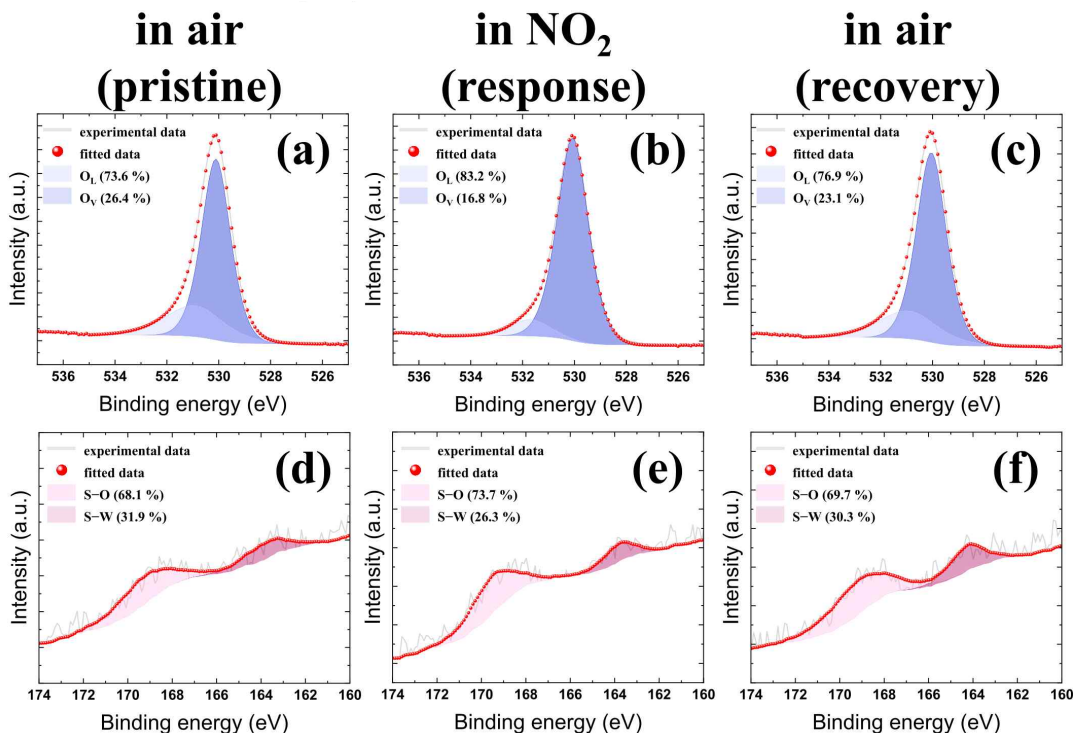


▲ **가스 감지 특성 평가.** 황이 첨가된 산화텅스텐 센서는 이론적으로 약 50 ppb 수준의 매우 낮은 이산화질소 검출 한계를 보이며, 대기 중 함께 존재하는 다양한 독성 가스와 비교했을 때 이산화질소에 대해 특히 뛰어난 민감도를 나타낸다.

또한 황(S) 기반 텅스텐산화물(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 돌아올 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 진행할 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)