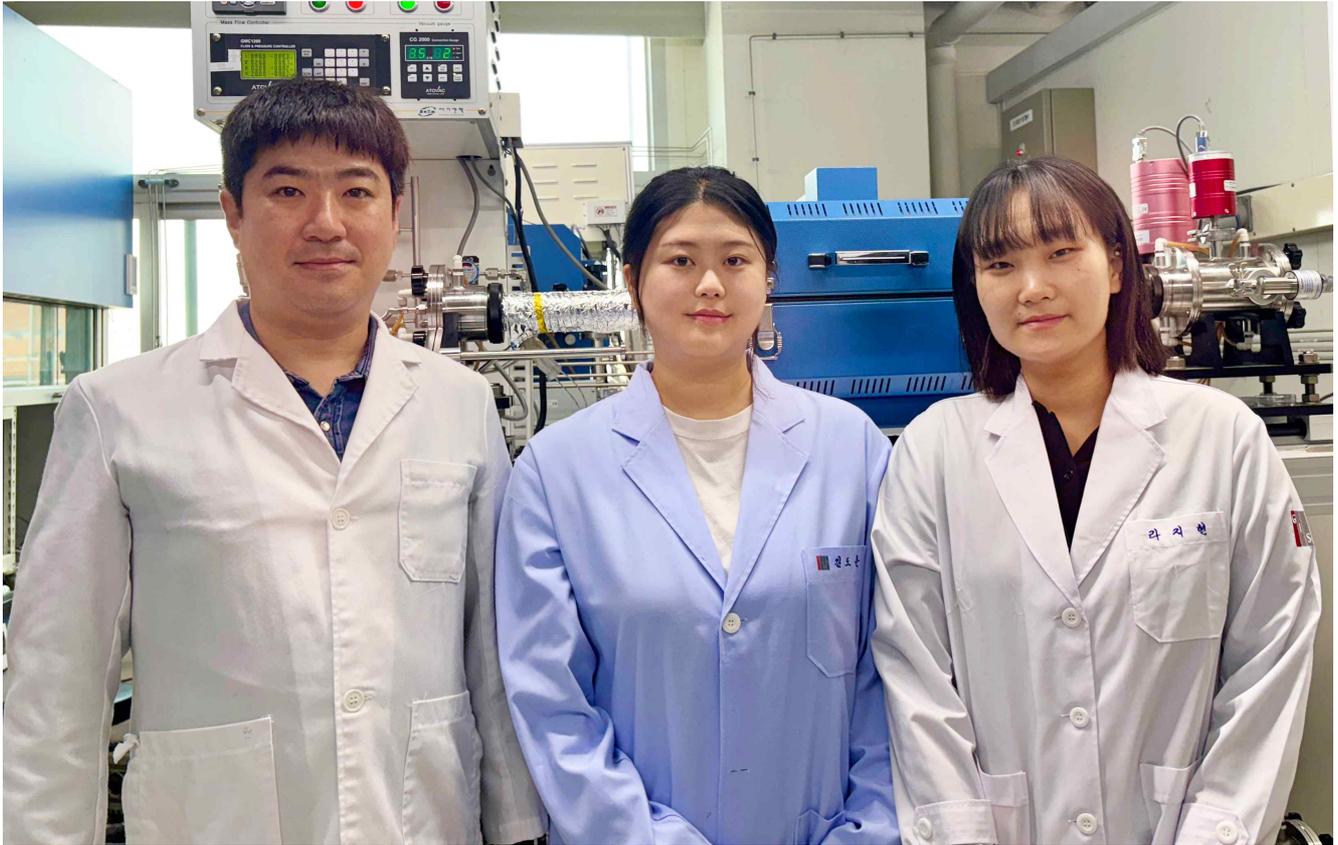


# GIST, 강알칼리 환경에서도 안정적인 차세대 나노구조체 'Au@h-BN' 합성 성공 “에너지·촉매 기술 혁신 기대”

- 화학과 임현섭 교수팀, 1나노미터 두께 육방정계 질화붕소(h-BN) 쉘 적용해 기존 실리카 기반 코어-쉘 구조체 한계 극복... 120시간 이상 안전성 유지하며 실시간 라만 분광 가능
- 미래 에너지 기술 연구의 핵심 기반 마련... 국제학술지《Advanced Functional Materials》 게재



▲ (왼쪽부터) 화학과 임현섭 교수, 김지현 박사과정생, 라지현 석사과정생

광주과학기술원(GIST, 총장 임기철)은 화학과 임현섭 교수 연구팀이 새로운 나노구조체인 'Au@h-BN'을 합성하는 데 성공했다고 밝혔다.

이 구조체는 두께 1nm(나노미터·10억 분의 1미터)의 균일한 육방정계 질화붕소(h-BN)\* 층을 쉘(외부 보호층)로 적용한 것으로, **강한 알칼리 환경에서도 안정적으로 작동하는 실시간 라만 분광법\***을 구현할 수 있는 것이 특징이다.

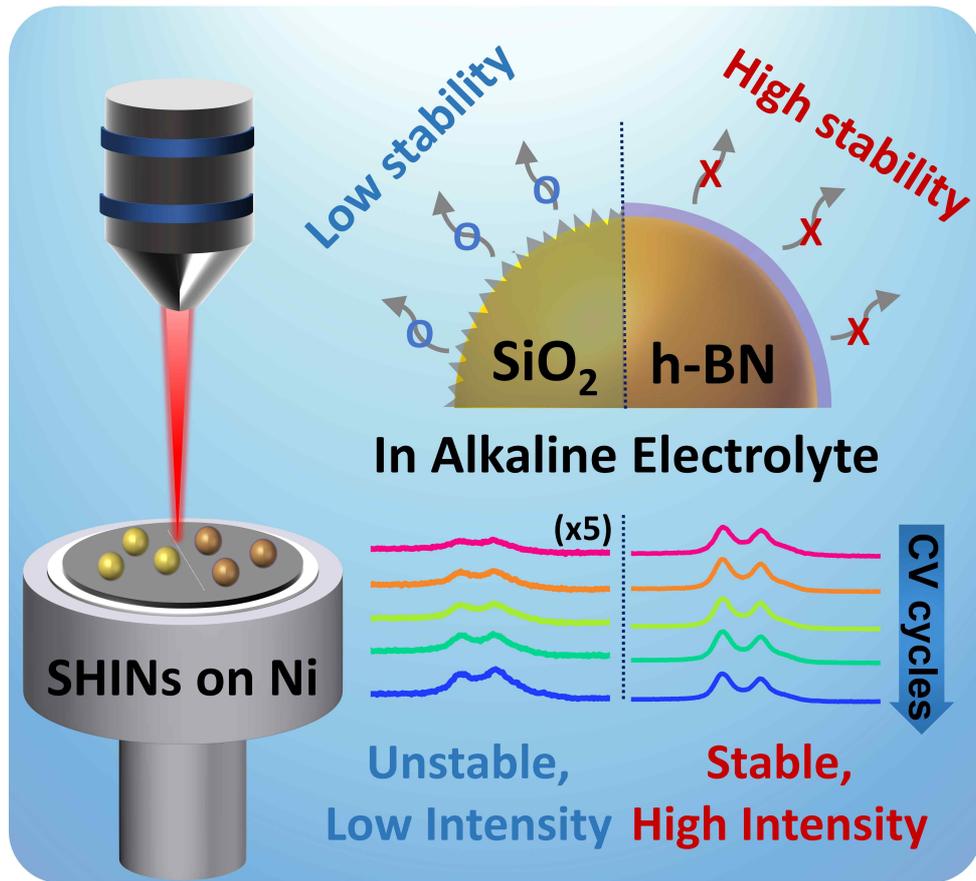
\* **h-질화붕소(hexagonal boron nitride, h-BN)**: 그래핀과 유사한 구조를 가진 2차원 물질로, 높은 화학적 안정성과 전기 절연성을 갖추어 다양한 전자 및 촉매 응용에 사용된다.

\* **라만 분광법(Raman Spectroscopy)**: 빛이 물질과 상호작용할 때 발생하는 진동 에너지를 분석하여 물질의 화학적 조성 and 구조를 확인하는 기법이다.

그동안 h-질화붕소를 쉘 물질\*로 활용하려는 시도가 있었지만, 이를 실제로 구현할 수 있는 합성법은 개발되지 못했다.

이번 연구 성과는 전기화학 촉매와 에너지 변환 기술 분야의 발전에 새로운 돌파구를 제시하는 계기가 될 것으로 기대된다.

\* **셸 물질(Shell Material)**: 나노구조체에서 코어(Core)를 감싸는 층으로, 보호, 기능성 부여, 안정성 향상 등의 역할을 한다. 나노 입자 표면을 코팅하는 형태로 존재하며, 다양한 물리·화학적 특성을 조절할 수 있다.



▲ 알칼리 전해질에서도 뛰어난 안정성과 향상된 라만 신호 강도: h-질화붕소(h-BN) 기반 코어-셸 나노입자는 기존 실리카(SiO<sub>2</sub>) 기반 코어-셸 나노입자의 한계를 극복하며, 강한 알칼리 환경에서도 장기적인 실시간 라만 분석이 가능하다.

기존의 실리카 기반 코어-셸(core-shell) 나노구조체는 강한 알칼리 환경에서 쉽게 변형되거나 손상되는 단점이 있었다. 이에 연구팀은 이러한 한계를 극복하기 위해 세계 최초로 금(Au) 나노 입자에 h-질화붕소 셸을 코팅하는 기술을 고안했다.

이 새로운 나노구조체는 강한 라만 신호\*를 생성할 뿐만 아니라, 장기간 사용 시에도 높은 안정성을 유지하는 것으로 확인되었다.

또한, 니켈(Ni)과 구리(Cu) 전극에서의 산화 반응을 실시간으로 분석한 결과, 기존의 실리카 셸을 적용한 구조체에 비해 라만 신호의 강도와 지속성이 현저히 우수했다. 이를 통해 전기화학 촉매 및 에너지 변환 분야에서 보다 정밀한 연구와 분석이 가능할 것으로 기대된다.

\* **라만 신호(Raman Signal)**: 라만 분광법(Raman Spectroscopy)에서 검출되는 빛의 신호로, 물질의 분자 구조 및 화학적 조성을 분석하는 데 활용된다. 이는 빛이 물질과 상호작용할 때 발생하는 비탄성 산란(Inelastic Scattering) 현상에서 비롯되며, 이 과정에서 빛의 주파수가 변하게 된다.

전기화학 반응은 배터리, 연료전지, 수소 생산, 이산화탄소 변환 등 다양한 친환경·지속가능 에너지 기술의 핵심 과정이다. 그러나 이러한 반응이 일어나는 **전극 표면을 실시간으로 분석하는 것은 여전히 기술적으로 큰 도전 과제로 남아 있다.**

특히, 전극과 전해질 사이의 계면에서 일어나는 전기화학적 변화는 나노미터(nm) 수준에서 발생하기 때문에 이를 **정확히 관측하려면 매우 높은 민감도를 갖춘 분광 기술이 필수적이다.**

라만 분광법은 전기화학 반응 메커니즘을 분석하는 데 유용한 도구로 널리 활용되고 있다. 그러나 **라만 산란(Raman scattering)\* 신호가 약해 신뢰할 수 있는 데이터를 확보하는 데 한계가 있었다.**

이 문제를 해결하기 위해 국소 표면 플라즈몬 나노입자를 활용해 라만 신호를 증폭하는 기술이 개발되었다. 그러나 금(Au)이나 은(Ag)과 같은 기존의 나노입자는 촉매 반응에 관여할 수 있으며, 이는 실험 결과에 영향을 미칠 우려가 있다.

이를 방지하기 위해 나노입자 표면을 **부도체 물질로 코팅해 내부 금속이 외부와 접촉하지 않도록 일종의 '포장지'처럼 감싸는 기술이 도입되었다.** 하지만 지금까지 사용된 실리카나 알루미나와 같은 세라믹 코팅 소재는 강한 알칼리 환경에서 쉽게 변형되거나 손상되어, **장기적인 전기화학 연구에는 적합하지 않았다.**

\* **라만 산란(Raman Scattering):** 빛이 물질과 상호작용할 때 발생하는 비탄성 산란 현상이다. 일반적으로 빛이 물질을 통과하거나 반사될 때 대부분의 광자는 에너지를 잃지 않고 그대로 산란되는 레일리 산란(Rayleigh Scattering)을 겪지만, 극히 일부의 광자는 물질의 분자 진동 모드와 상호작용하며 에너지를 주고받아 라만 산란을 일으킨다. 이로 인해 산란된 빛의 주파수가 변하며, 이를 분석하면 물질의 분자적 특성을 파악할 수 있다.

연구팀은 화학적으로 매우 안정적이며 전기 절연 특성을 지닌 2차원 소재 **h-질화붕소**를 새로운 **셸 재료로 활용해, 전기화학 반응 연구에서 라만 분광 기술의 적용 범위를 넓히는 데 성공했다.**

'화이트 그래핀'으로 불리는 h-질화붕소는 그래핀과 유사한 구조를 가지고 있지만 전도성이 없는 절연체다. 특히 **강한 알칼리 환경에서도 실리카 등 기존 세라믹 물질보다 훨씬 더 안정적이어서 장기간에 걸친 전기화학 반응 모니터링에 보다 효과적인 소재로 평가된다.**

기존 세라믹 셸을 적용한 나노입자는 강한 알칼리 용액에서 수십 시간 이내에 손상되는 반면, **h-질화붕소 셸은 120시간 이상의 강한 알칼리 환경에서도 구조적 변형 없이 안정성을 유지하는 것으로 확인되었다.**

이를 통해 장시간에 걸친 실시간 라만 분석이 요구되는 전기화학 반응 연구에 매우 효과적으로 활용될 수 있음이 입증되었다.

연구팀은 이 기술을 바탕으로, 산소 발생 반응(OER)과 이산화탄소 환원 반응(CO<sub>2</sub>RR) 등 주요 전기화학 반응을 보다 정밀하게 분석할 수 있을 것으로 기대하고 있다.

임현섭 교수는 "이번 연구는 기존 라만 기술이 강알칼리 환경에서 장기간 적용되기 어려웠던 한계를 극복한 성과로, 전기화학 반응 연구의 새로운 패러다임을 제시할 것으로 기대된다"고 밝혔다.

이어 "이 기술은 수소 경제와 차세대 에너지 저장 기술의 발전에 기여할 수 있는 핵심적 기반이 될 것이며, 수전해 시스템, 연료전지, 금속-공기 배터리, 이산화탄소 전환 촉매 등 다양한 분야에 폭넓게 활용될 수 있을 것"이라고 덧붙였다.

이번 연구는 한국연구재단(NRF)과 한국전력공사(KEPCO)의 연구개발 프로그램 지원을 받아 수행되었으며, 재료과학 분야의 권위 있는 국제학술지 《Advanced Functional Materials》에 2025년 4월 8일 온라인 게재되었다.

## 논문의 주요 정보

### 1. 논문명, 저자정보

- 저널명: Advanced Functional Materials (IF: 18.5 / 2023년 기준)
- 논문명: Au@h-BN Core-Shell Nanostructure as Advanced Shell-Isolated Nanoparticles for In-Situ Electrochemical Raman Spectroscopy in Alkaline Environments
- 저자 정보: 김지현(제1저자, GIST), 라지현(공동저자, GIST), 박용희(공동저자, GIST), 윤준연(공동저자, GIST), 이은지(공동저자, GIST), 임현섭(교신저자, GIST, IBS)