

“전기 없이 오직 햇빛만으로 폐기물을 자원으로” GIST, 태양광 기반 무전압 업사이클링 기술 세계 최고 성능 달성

- 신소재공학과 이상한 교수팀, 바이오디젤 산업의 폐기물 '글리세롤'과 환경오염원 '질산염'을 산업용 자원인 암모니아 및 포름산으로 전환하는 무전압 태양광 업사이클링 시스템 개발
- 세계 최고 성능(반응 전류밀도 11.04mA/cm², 패러데이 효율 95% 이상) 구현으로 지속 가능한 차세대 화학에너지 공정의 기술적 돌파구 제시... 국제학술지 《Advanced Materials》 게재



▲ (왼쪽부터) 신소재공학과 이상한 교수, 김예준 석박통합과정생

광주과학기술원(GIST, 총장 임기철)은 신소재공학과 이상한 교수 연구팀이 **태양광만으로 산업 폐기물을 고부가가치 화학물질로 전환하는 '무전압 업사이클링(Bias-free Upcycling)*'** 기술을 세계 최고 성능으로 구현하는 데 성공했다고 밝혔다.

연구팀은 유기반도체 기반의 광전극*과 니켈-철-인(Ni-Fe-P) 촉매를 결합한 **광전기화학 시스템***을 개발해, 바이오디젤 산업에서 발생하는 주요 폐기물인 글리세롤과 질산염(NO₃⁻)을 각각 포름산(개미산)과 암모니아로 동시에 전환하는 데 성공했다.

* **무전압 업사이클링(Bias-free Upcycling)**: 업사이클링은 산업 폐기물이나 낮은 가치의 물질을 고부가가치 제품으로 재활용하는 기술로, 이 재활용에 필요한 에너지를 신재생 에너지만으로 충족시켰을 경우 무전압 업사이클링이라 부른다.

* **유기 반도체 광전극**: 탄소 기반 분자로 구성된 반도체 물질을 기반으로 광전기화학 시스템에 필수적인 광전극을 제작한 것으로, 태양광을 전기에너지로 변환시킴과 동시에 화학반응에 참여시킨다.

* **광전기화학(Photoelectrochemical) 시스템**: 태양광을 전기에너지와 화학반응으로 직접 전환시키는 시스템. 광전기화학 시스템의 핵심 요소는 광전극으로, 태양광을 전기에너지로 변환시킬 뿐만 아니라 화학 반응을 위한 촉매로서의 역할도 수행한다.

바이오디젤*은 육·해·공 대규모 장거리 운송 분야에 가장 적합한 친환경 에너지원으로 주목받고 있으나, 생산 과정에서 저가 폐기물인 글리세롤이 대량 발생하며, 비료 사용으로 인한 수질·토양 내 질산염 농도 증가가 사회적 문제로 지적돼 왔다.

글리세롤과 질산염에 대한 기존의 업사이클링 기술은 높은 외부 전압이 필요하고, 원하는 물질로 선택적으로 전환하기 어려워 상용화에 제약이 있었다.

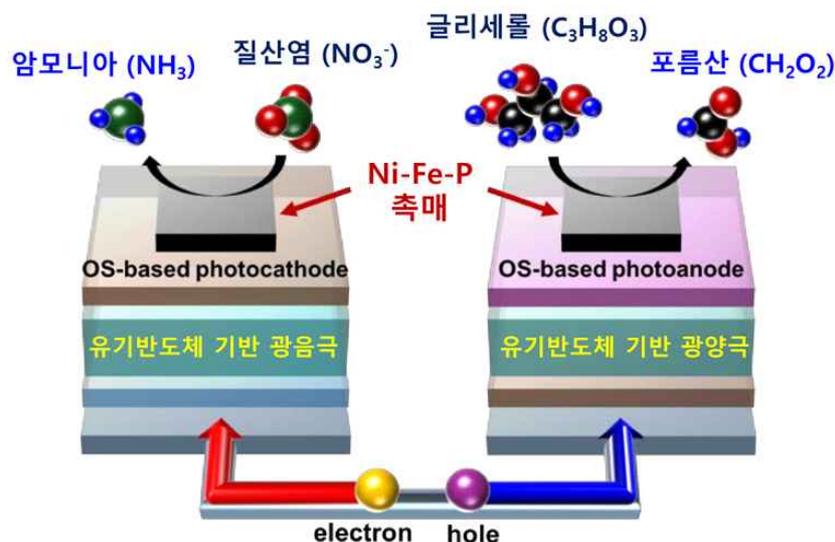
* **바이오디젤(Biodiesel)**: 식물성 기름이나 동물성 지방 같은 생물 유래 자원을 원료로 만든 재생 가능 친환경 연료이다. 디젤 엔진 차량이나 발전기에서 기존의 석유계 디젤 대신 사용하거나 혼합해 쓸 수 있다.

이를 해결하기 위해 연구팀은 질산염 환원과 글리세롤 산화를 동시에 처리할 수 있는 니켈-철-인(Ni-Fe-P) 전기촉매를 개발하고, 유기반도체 기반 광전극에 금속 호일 캡슐화 기술*을 적용해 내구성을 크게 향상시켰다.

니켈-철-인(Ni-Fe-P) 촉매는 니켈-철 합금에 인(P)을 도핑시킨 것으로, 금속 촉매의 전자구조를 조절시켜 높은 부식 저항성과 반응 선택성을 보인다.

* **금속 호일 캡슐화 기술**: 광전극에 전기증착된 촉매가 전해질과 직접 접촉하는 것을 방지하기 위해 금속 호일로 보호막을 형성하는 기술이다. 이를 통해 촉매의 반응 활성은 그대로 유지하면서, 전해질로 인한 부식이나 손상을 막아 광전극의 내구성과 안정성을 크게 향상시킨다.

연구팀은 구리 호일 위에 전기증착한 니켈-철-인(Ni-Fe-P) 촉매를 유기반도체 광전극과 결합해, 광음극에서는 질산염 환원 반응, 광양극에서는 글리세롤 산화 반응을 동시에 구동하는 무전압 광전기화학 시스템을 구축했다. 이를 통해 외부 전력 없이 태양광만으로 두 가지 산업 폐기물을 동시에 업사이클링하는 데 성공했다.



▲ 본 연구에서 사용한 무전압 태양광 업사이클링 모식도. 유기 반도체 기반 광전극과 Ni-Fe-P 촉매를 통하여 매우 높은 효율과 안정성을 보이는 질산염-글리세롤 태양광 업사이클링 기술을 개발함.

이 시스템은 글리세롤을 포름산(개미산으로, 질산염을 암모니아로 전환하며, 전력 공급 없이도 두 폐기물을 동시에 고부가가치 화학물질로 변환할 수 있다.

실제 반응 실험에서 이 시스템은 **11.04 밀리암페어 퍼 제곱센티미터(mA/cm^2)**의 반응 전류밀도를 나타냈으며, 포름산과 암모니아 생산에 대한 패러데이 효율*은 모두 **95% 이상**을 기록해 높은 반응 활성도와 선택성을 입증했다.

생성된 암모니아*는 전 세계 비료 산업을 비롯해 플라스틱, 냉매, 수소 저장 등 다양한 분야에서 활용되는 핵심 산업 원료이며, 포름산*은 방부제·염색제 외에도 최근 수소 운반체 및 연료전지용 액체 연료로 주목받고 있는 친환경 에너지원이다.

* **반응 전류밀도(Reaction Current Density):** 전기화학에서 매우 중요한 개념으로, 단위 면적당 흐르는 전류의 양을 의미한다. 주로 전극 표면에서 발생하는 전기화학 반응의 활성도를 평가하는데 사용된다.

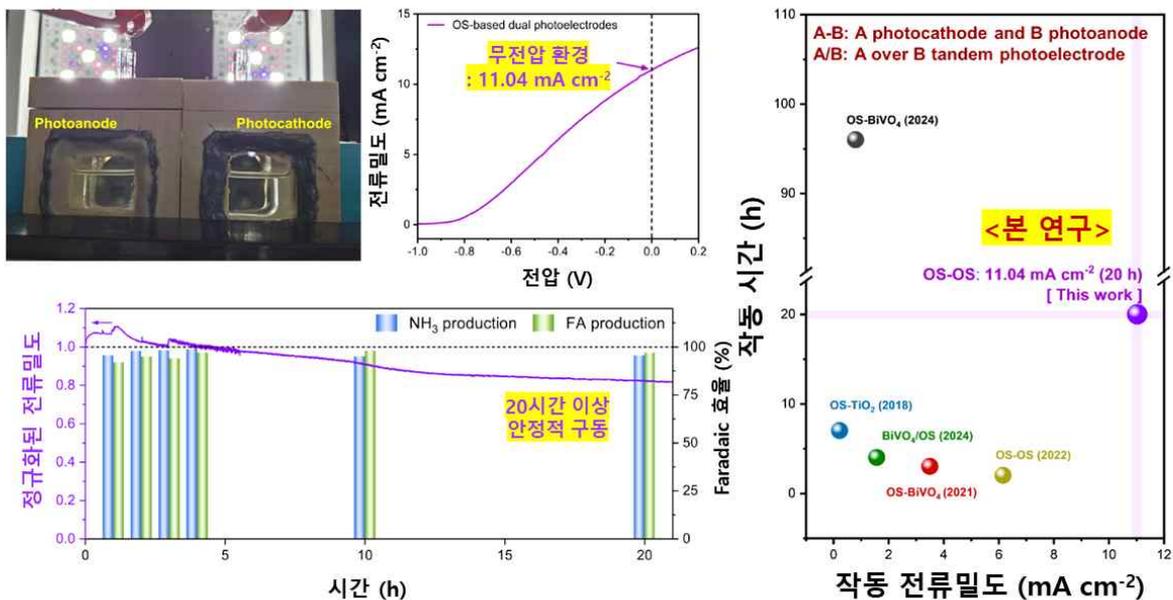
* **패러데이 효율(Faradaic efficiency):** 전기화학 반응에서 공급된 전류가 원하는 생성물 생산에 얼마나 효과적으로 사용됐는지를 나타내는 지표다. 효율이 높을수록 에너지 낭비 없이 반응이 선택적으로 잘 일어났다는 의미로, 이번 연구에서는 암모니아와 포름산 생산 모두에서 95% 이상의 패러데이 효율을 기록해, 시스템의 높은 반응 효율성과 선택성을 입증했다.

* **암모니아:** 전 세계 질소 비료 시장의 핵심 원료로, 농업 생산성을 좌우하는 필수 화학물질이다. 이외에도 플라스틱, 냉매, 수소 저장 등 다양한 산업에서 사용되며, 연간 수억 톤 규모로 소비되는 대표적인 산업 원료다.

* **포름산(개미산):** 방부제·소독제·염색제 등으로 활용되며, 최근에는 수소 운반체 및 연료전지용 액상 연료로 각광받고 있다. 특히 탄소중립 연료 후보로서 에너지 산업에서의 수요가 빠르게 증가하고 있다.

이번 연구는 암모니아뿐만 아니라 포름산 등 다양한 고부가가치 화학물질을 친환경적으로 생산할 수 있는 기술적 토대를 마련한 것으로, 향후 화학·에너지 산업 전반에 폭넓은 파급 효과가 기대된다.

특히 유기반도체 광전극의 내구성을 크게 향상시켜 대면적 태양광 기반 화학 공정으로의 확장 가능성도 높게 평가된다.



▲ 무전압 태양광 업사이클링 시스템의 실제 모습 및 성능, 그리고 타 연구와의 성능 비교. 높은 전류밀도와 안정성을 보이며, 다른 유기 반도체 기반 무전압 시스템들과 비교했을 때에 가장 우수한 성능을 보였음.

이상한 교수는 “이번 연구는 외부 전력 없이 태양광만으로 작동하는 친환경 업사이클링 시스템의 상용화를 앞당긴 결정적인 기술적 돌파구”라며, “산업 폐기물을 고부가가치 화학물질로 전환하는 지속 가능한 공정 개발에 새로운 가능성을 연 성과”라고 평가했다.

신소재공학과 이상한 교수가 지도하고 김예준 박사과정생이 수행한 이번 연구는 과학기술정보통신부·한국연구재단 개인기초연구사업(중견연구)과 미래수소원천기술 개발사업의 지원을 받았다. 연구 결과는 국제학술지 《어드밴스드 머티리얼스 (Advanced Materials)》에 2025년 8월 1일 온라인으로 게재됐다.

논문의 주요 정보

1. 논문명, 저자정보

- 저널명 : Advanced Materials (IF=26.8, 2024)
- 논문명 : Bias-Free Solar Upcycling of Nitrate and Glycerol with Highly Efficient and Durable Organic Semiconductor-Based Photoelectrodes
- 저자 정보 : 김예준(제1저자, GIST 신소재공학과), 김지현(공저자, GIST 화학과), 이에녹(공저자, GIST 신소재공학과), 이산성(공저자, GIST 신소재공학과), 정윤성(공저자, GIST 신소재공학과), 장윤서(공저자, GIST 신소재공학과), 오인혁(공저자, GIST 신소재공학과), 황준범(공저자, GIST 신소재공학과), 이정대(공저자, GIST 신소재공학과), 이광희(공저자, GIST 신소재공학과), 임현섭(공저자, GIST 화학과), 이상한(교신저자, GIST 신소재공학과)