

물과 햇빛으로 수소를 만드는 유기소재의 진화: 흑연 보호층을 적용한 이중 접합 유기 광산화전극

이택호 | 부산대학교 화학소재학과 (E-mail: tackho@pusan.ac.kr)

본 연구에서는 유기 벌크이중접합 광활성층에 NiFeOOH 촉매가 전착된 흑연 시트를 결합하여, 수중 환경에서 높은 광전류밀도(26.4 mA cm^{-2})와 장시간 안정성을 갖는 태양전지 통합형 광산화전극을 개발하였다. 흑연 시트는 전기적 손실 없이 광활성층을 보호하며, 촉매와의 계면 효율을 극대화하는 역할을 한다. 또한 이중접합 구조를 통해 무전압으로 5% 광-수소 변환효율을 달성하였다. 본 기술이 유기반도체 기반의 고효율-저비용 수소 생산 시스템 구현에 크게 기여할 것으로 보인다.

고 성능 유기 광활성층은 차세대 광전기화학 (photoelectrochemical, PEC) 시스템에서 수소 생산을 위한 핵심 소재로 주목받고 있다. 그러나, 유기소재는 수중 환경에서의 낮은 안정성과 촉매 계면에서의 재결합 손실 문제로 인해 실제 PEC 소자로의 적용에 어려움이 있었다. 본 연구에서는 유기 벌크이중접합 광활성층 위에 NiFeOOH 촉매가 전착된 흑연 시트(graphite sheet)를 보호층으로 적용함으로써, 수중 환경에서도 장시간 안정성을 유지하면서 높은 광전류를 구현할 수 있는 태양전지 통합형 광산화전극을 개발하였다.

연구진은 대표적인 삼원계 유기 광활성층(PM6:D18:L8-BO)을 사용하여, pH 14 조건의 1 M NaOH 수용액 내에서 $1.23 V_{\text{RHE}}$ 기준 최대 26.4 mA cm^{-2} 의 높은 광전류밀도를 달성하였으며, 이는 기존의 유기 광전극들이 보인 $2\text{-}15 \text{ mA cm}^{-2}$ 범위보다 현저히 향상된 수치이다. 특히, 본 시스템은 광전극 보호층인 흑연 시트가 물리적 보호와 전기적 접촉을 동시에 제공하여, 광활성층의 손상을 효과적으로 억제하고 촉매와의 계면 손실을 최소화하였다.

단일 접합에서 더 나아가, 이중 접합 구조에 기반한 무전압 태양광 물분해를 구현하였다. PM6:D18:L8-BO와 PTQ10:GS-ISO 광활성층을 직렬로 구성한 이중 접합 전극은 5% 광-수소 변환효율을 달성하였고, 백금 상대전극과 함께 2전극 셀에서 실제로 수소와 산소 발생을 입증하였다. 이와 같이 외부전원 없이 달성한 성능은 유기소재 기반 PEC 시스템의 태양광 수소 생산 적용 가능성을 보여주는 결과로 평가된다.

한편, 장시간 안정성 실험에서는 UV 필터 사용 및 흑연 시트 교체를 통해 40시간 이상 70% 이상의 초기 성능을 유지하였으며, 한 번 더 교체 시 최대 100시간까지 동작 가능성이 확인되었다. 열화 메커니즘 분석 결과, 유기 광활성층의 모폴로지 안정성과 흑연 보호층의 점진적 손상이 주요 원인으로 지적되었으며, 향후 광활성층 내 재결합 손실 저감과 전극 표면의 수소 기포 관리를 통한 효율 향상이 가능성을 제시하였다.

본 연구는 고성능 유기 광활성층을 기반으로 한 광전극이 기존 무기 반도체에 비해 공정 단순성과 비용 측면에서 유리함을 입증하며, 차세대 수소 생산 기술의 상용화 가능성을 크게 높인다는 점에서 학술적·기술적으로 중요한 기반을 제공할 것으로 기대한다.

본 연구결과는 *Nature Energy*에 “Enhanced solar water oxidation and unassisted water splitting using graphite-protected bulk heterojunction organic photoactive layers”의 제목으로 2025년 3월에 게재되었다 (DOI: 10.1038/s41560-025-01736-6).

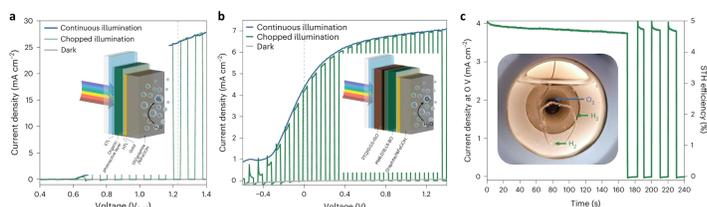


그림 1. (a) 단일 접합 유기 광산화전극의 전류밀도-전압 그래프. (b) 백금 상대전극과 2전극 구조에서 이중 접합 유기 광산화전극의 전류밀도-전압 그래프. (c) 무전압 조건에서 이중 접합 유기 광산화전극의 구동 광전류밀도 변화.