“탄소 배출 없이 햇빛과 물로만 수소 뽑아낸다”
GIST·성균관대·전남대, 물속에서도 작동하는 고효율 태양광 수소 생산 기술 개발

- GIST 이창열 수석연구원 및 성균관대 김정규·전남대 김태훈 교수팀, 물에 취약한 나노 소재 ‘양자점’을 초박막 실리카로 감싸 안정성과 전하 이동 효율 동시 확보한 복합 광전극 개발
- 수소 생산 효율 2.2배 향상 및 12시간 연속 가동 성공… 국제학술지 《SusMat》 게재

▲ (왼쪽부터) GIST 이창열 고등광기술연구원 수석연구원, 성균관대학교 김정규 화학공학부 교수, 전남대학교 김태훈 신소재공학부 교수, 성균관대학교 홍원태 화학공학과 박사과정생, Yuankai Li 연구원

광주과학기술원(GIST·지스트, 총장 임기철)은 고등광기술연구원(APRI) 이창열 수석연구원과 성균관대학교 화학공학부 김정규 교수, 전남대학교 신소재공학부 김태훈 교수 공동 연구팀이 **물속에서도 안정적으로 작동하는 고효율 ‘양자점 복합 광전극 (PQD@SiO_2/WO_3)’을 개발**했다고 밝혔다.

이 기술은 **태양광과 물만으로 탄소 배출 없이 수소를 생산하는 ‘태양광 수소 생산’의 상용화를 앞당길 수 있는 핵심 원천기술**로 기대된다.

태양광을 이용해 물을 수소(H_2)와 산소(O_2)로 분해하려면, **빛을 받아 전기를 생성하고 물 분해 반응을 유도하는 ‘광양극(photoanode)’이 필수적**이다.

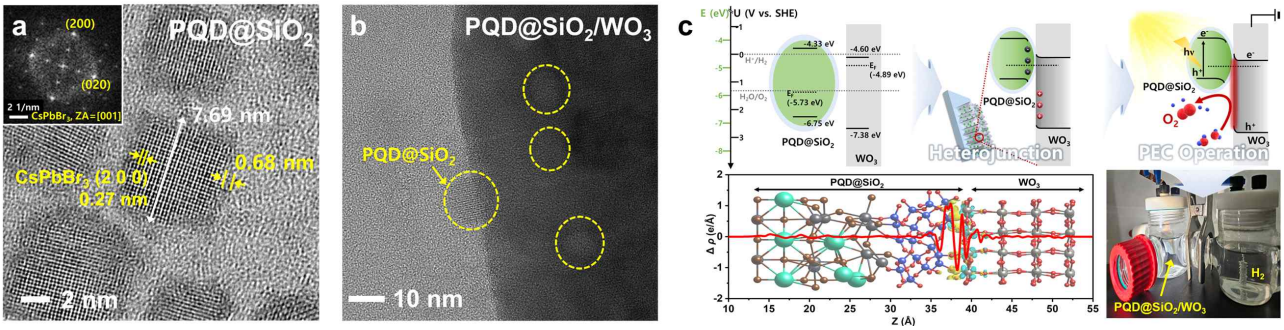
대표적 광양극 소재인 **‘산화텅스텐(WO_3)’은 물속에서도 안정적이지만 빛을 전하로 변환하는 효율이 낮다**는 한계가 있다.

반면 **빛을 잘 흡수하는 나노 소재인 ‘페로브스카이트 양자점($CsPbBr_3$)’은 물과 빛에 노출되면 쉽게 분해되는 불안정성이 한계로 지적돼 왔다.**

연구팀은 이 두 소재의 장점을 결합하면서 단점을 극복하기 위해, **빛을 잘 흡수하는 나노 입자인 ‘양자점’을 매우 얇은 보호막으로 감싼 ‘핵-껍질(core–shell)’ 구조를 설계**했다.

페로브스카이트 양자점을 두께 약 0.7 나노미터(nm, 머리카락 굵기의 수십만 분의 1 수준)**의 실리카(SiO_2) 보호층*으로 감싸 물로부터 보호함과 동시에 구조적·광학적 특**

성을 유지하도록 설계**하였으며, 이를 **산화텅스텐 전극 위에 배열하여 광양극으로 활용**했다.



▲ 이종접합 광전극의 구조 및 계면 특성. (a) 실리카(SiO_2) 보호층으로 감싼 $CsPbBr_3$ 양자점의 고해상도 투과전자현미경(HR-TEM) 이미지로, 약 0.7 nm 두께의 보호층과 0.27 nm 격자 간격을 확인했다. (b) WO_3 나노박막 위에 양자점이 결합된 PQD@SiO_2/WO_3 이종접합 구조의 고해상도투과전자현미경 이미지. (c) 내부 전기장에 따른 광전하 분리 및 수소 생성 과정을 나타낸다.

이 보호층은 **물과 전해질의 침투는 막으면서도 전하는 통과시킬 만큼 얇아, 전기적 성능 저하 없이 안정성을 확보**했다.

즉 **빛을 전기로 바꾸는 '초소형 엔진(양자점)'을 초박막 방수 코팅으로 감싼 핵-껍질 구조로 제작하여 기존 광전극 위에 도입**했다.

*** 실리카 보호층(SiO_2 shell):** 페로브스카이트 양자점의 표면을 매우 얇은 두께의 치밀한 보호막으로 감싸 수분·전해질 등 외부 환경으로부터 소재를 보호하는 층. 전하가 통과할 수 있을 만큼 얇아 광전하 이동을 방해하지 않으면서도 소재의 구조적·광학적 특성을 안정적으로 유지하는 역할을 한다.

특히 이 구조는 단순한 보호 역할을 넘어, **양자점과 산화텅스텐 사이의 에너지 차이로 인해 전자가 한 방향으로 이동하도록 유도하는 '내부 전기장'을 강화하는 효과**까지 만들어냈다.

이 과정에서 **빛으로 생성된 전하가 다시 사라지는 '재결합'은 줄어들고, 양전하와 음전하가 서로 반대 방향으로 빠르게 분리됐다.**

그 결과 **물 분해 반응 효율이 크게 향상되면서, 고효율 광전극 구현 가능성을 높였다.**

실제 성능 평가에서도 뚜렷한 개선이 확인됐다.

연구팀이 개발한 복합 전극은 **동일한 산성 조건과 표준 태양광 환경에서 기존 산화텅스텐 대비 약 2.2배 높은 전류**(3.08 mA·cm^{-2}, 제곱센티미터당 밀리암페어)**를 생성**했다.

또한 **12시간 동안 연속으로 작동했음에도 전류 감소가 거의 없어 수중 환경에서**

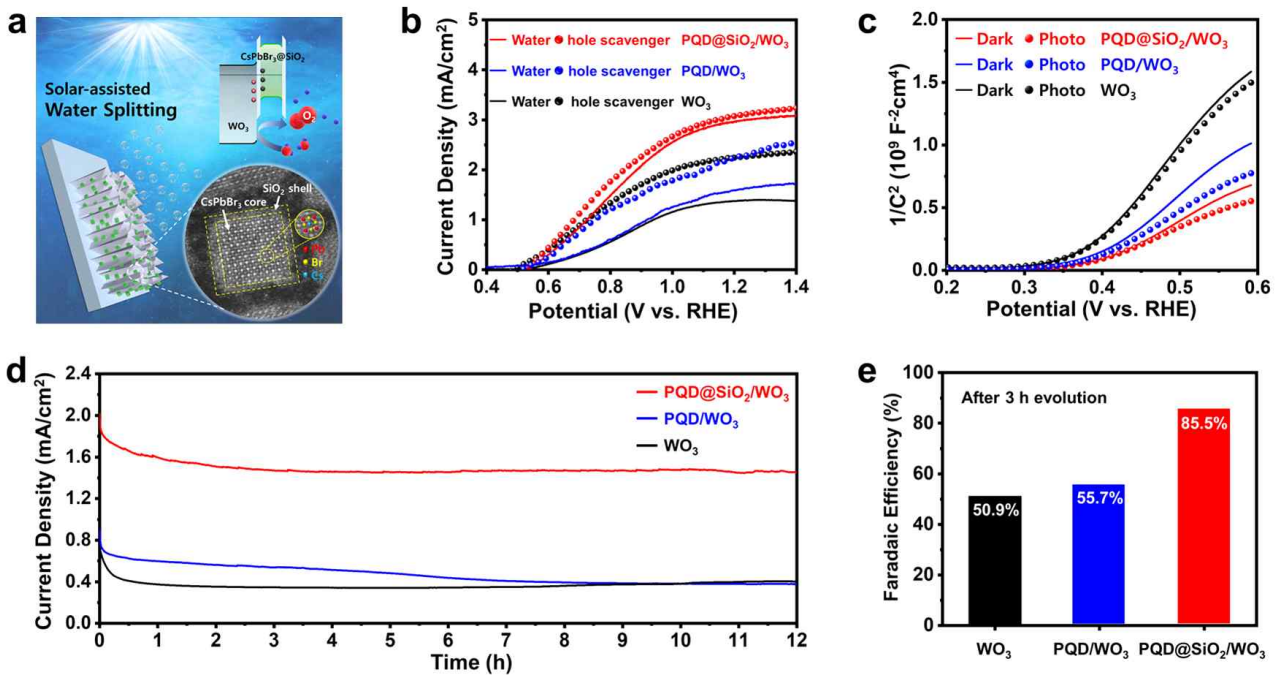
장기 안정성이 유지되는 것을 확인했다.

수소 생산 성능 평가에서도 높은 효율을 보였다.

물을 전기로 분해해 수소와 산소를 만드는 실험에서, **표준 태양광 조건(물 분해가 가능한 이론적 최소 전압인 1.23 볼트(V)를 적용하고 3시간 동안 반응을 유지한 조건)하에서 수소와 산소가 각각 80.05, 40.01(μmol·cm^{-2}, 제곱센티미터당 마이크로몰)의 양으로 생성**됐다.

이는 **생성된 전하가 대부분 실제 수소와 산소 생산 반응에 사용됐음을 의미하며, 투입된 전기가 얼마나 효율적으로 활용됐는지를 나타내는 패러데이 효율*은 85.5%를 기록**했다.

*** 패러데이 효율(Faraday efficiency)**: 전기화학 반응에서 실제로 투입된 전하량 대비 목표 생성물(수소, 산소 등)이 실제로 생성된 비율을 나타내는 지표로 값이 높을수록 전류가 원하는 반응(물 분해)에 효과적으로 사용되었음을 의미하며, 부반응이나 전하 손실이 적다는 것을 뜻한다.



▲ 광전류 향상 및 고효율 수소 생산 성능 비교. (a) 태양광 조건에서 PQD@SiO_2/WO_3는 기존 WO_3보다 약 2.2배 높은 광전류 밀도를 보여 더 효율적인 전하 생성 능력을 나타냈다. (b) 전기화학 분석 결과, 전하 밀도와 내부 전기장이 증가해 전하 이동이 더 활발해졌다. (c) 장시간 안정성 및 수소 생산 효율 평가에서 PQD@SiO_2/WO_3가 높은 안정성과 85.5% 패러데이 효율을 기록했다.

이번 연구는 **그동안 물속에서 불안정해 활용이 어려웠던 페로브스카이트 양자점을 실제 광전기화학 물 분해 시스템에 적용한 사례**로, **양자점이 직접 반응에 참여하는 것이 아니라 빛 흡수와 전하 이동을 돕는 '촉진자(promoter)' 역할을 한다는 점을 규명**했다.

특히 **양자점을 활용해 산화텅스텐 표면의 전기장을 강화함으로써 빛 조사 시 전하**

이동을 촉진하고 산소 생성 반응을 활성화하는 구조적 개선 효과를 확인했다.

이를 통해 **고효율·저비용 태양광 수소 생산 시스템 구현을 위한 새로운 설계 전략을 제시**했다.

GIST 고등광기술연구원 이창열 수석연구원은 "**이번 연구는 수중 환경에서 불안정해 활용이 어려웠던 페로브스카이트 양자점을 실제 물 분해 광전극에 적용하고, 전하 이동과 계면 구조를 동시에 개선한 최초 사례**"라며, "**양자점 기반 광전극 설계를 통해 고성능 태양광 수소 생산 소재 개발의 새로운 방향을 제시했다**"고 밝혔다.

성균관대학교 김정규 교수는 "**이번 연구는 수중에서 불안정했던 페로브스카이트 양자점의 안정성을 개선하고 전이금속 산화물 기반 광양극의 효율을 향상시켜, 기존 태양전지·발광소자 중심이던 양자점의 활용 범위를 수소 생산 등 에너지 변환 분야로 확장한 것**"이라고 말했다.

전남대학교 김태훈 교수는 "**나노소재 계면 구조를 정밀하게 제어함으로써 페로브스카이트 양자점의 수중 안정성과 광전기화학 성능을 동시에 확보할 수 있음을 보여준 성과로, 향후 다양한 에너지 변환 소재의 구조 설계에 중요한 기반이 될 것**"이라고 밝혔다.

GIST 고등광기술연구원 이창열 수석연구원·성균관대학교 화학공학부 김정규 교수·전남대학교 신소재공학부 김태훈 교수가 지도하고 성균관대학교 화학공학과 홍원태 박사과정생·이연개(Yuankai Li) 연구원이 제1저자로 수행한 이번 연구는 과학기술정보통신부·한국연구재단(NRF) 중견연구자지원사업, 슈퍼컴퓨팅센터, GIST 미래선도형특성화연구사업, 한국전력공사(KEPCO) 개방형 R&D 프로그램의 지원을 받았다.

연구 결과는 **지속가능소재 분야의 저명한 국제학술지《서스매트(SusMat)》에 2026년 4월 5일 온라인으로 게재**됐다.

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.

논문 정보

○ 논문명, 저자 정보

- 저널명 : SusMat (IF: 21.3, 2024년 기준)
- 논문명 : All-Inorganic Perovskite@SiO_2 Quantum Dots for Amplifying the

Interfacial Electric Field on WO_3 Toward Enhanced Photoelectrochemical Water Splitting

- 저자 정보 : 홍원태(제1저자, 성균관대 화학공학과), Yuankai Li(제1저자, 성균관대 화학공학과), 김재겸(공저자, 성균관대 화학공학과), 김도겸(공저자, GIST 고등광기술연구원), 박재민(공저자, 성균관대 화학공학과), 양우석(공저자, 성균관대 화학공학부), 박종욱(공저자, 경희대 화학공학과), 이한림(공저자, 명지대 화학·에너지융합학부), 최창혁(공저자, POSTECH 화학과), 김병현(공저자, 한양대 에너지바이오학과), 이창열(공동교신저자, GIST 고등광기술연구원), 김태훈(공동교신저자, 전남대 신소재공학부), 김정규(대표교신저자, 성균관대 화학공학부)