

GIST, 구부릴 수 있으면서 내구성 높은 고성능 수소생산 광전극 개발

- 이상한 교수(신소재공학부)·주종훈 교수(환경·에너지공학부) 공동연구팀, 유연하면서도 내구성 강한 지르코니아 소재(3YSZ) 활용한 플렉서블 광전극 개발
- 반복 구부림(3천회→ 1만회)에도 장시간(9시간→ 24시간) 안정적 수소생산
- “태양에너지 기반 수소생산 실용화 가능성 확인”《Journal of Materials Chemistry A》 게재



▲ (왼쪽부터) 신소재공학부 이상한 교수, 환경·에너지공학부 주종훈 교수, 신소재공학부 황준범 박사과정생·이정수 석사

태양광을 활용하여 물에서 친환경 수소를 생산하는 '광전기화학적 물분해'는 차세대 청정에너지 기술로 각광받고 있다. 이 기술을 구현하기 위해서는 무엇보다 다양한 구동 조건에서도 장시간 성능을 유지하는 광전극*이 필요한데 국내 연구진이 가혹한 환경에서도 뛰어난 성능과 높은 내구성을 지닌 광전극을 개발하는 데 성공했다.

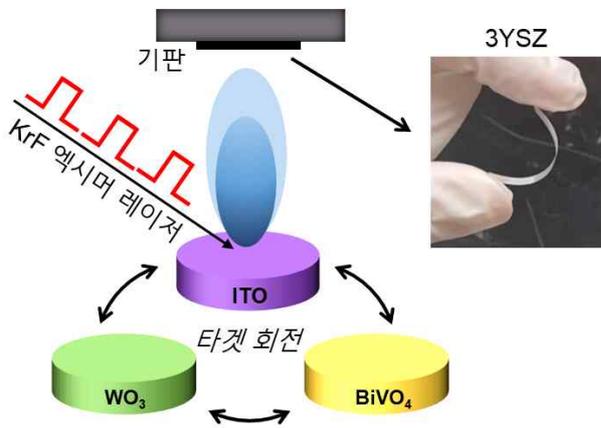
* **광전극**: 빛을 흡수해 전자와 정공을 생성하여 이를 전달해 화학 반응을 일으키는 역할을 하는 소재이다.

광주과학기술원(GIST, 총장 임기철)은 신소재공학부 이상한 교수와 환경·에너지공학부 주종훈 교수 공동연구팀이 **유연하면서도 내구성이 강한 지르코니아 소재(3YSZ)를 활용하여 반복 구부림에도 장시간 안정적으로 수소를 생산할 수 있는 광전극을 개발했다고 밝혔다.**

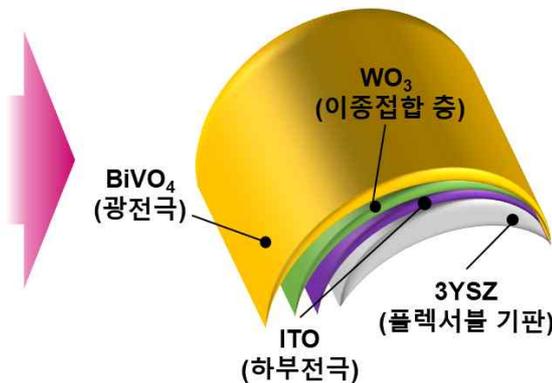
플렉서블 광전극은 비정형 구조물에 부착하거나 적용할 수 있어 딱딱한 기판에 비해 설치가 용이하다. 또한 **태양광 수집 면적을 극대화하고, 다양한 응용 환경에 효과적으로 적용할 수 있는 장점이 있다.**

연구팀은 이트리아 첨가 농도를 정밀하게 조절하여 기존 이트리아 안정화 지르코니아(8YSZ)와 차별화된 **3YSZ 소재를 제작하였다.** 이 과정에서 **전체 결정 구조의 최대 95%까지 안정된 형태로 유지하고, 결정의 불안정한 상(phase)을 5% 이하로 억제하여 지르코니아의 구조를 최적화했으며, 이를 통해 구부릴 수 있는 유연성을 부여했다.**

펄스 레이저 증착 시스템



고안정성·고효율 플렉서블 광전극 (BVO/WO/ITO/3YSZ)



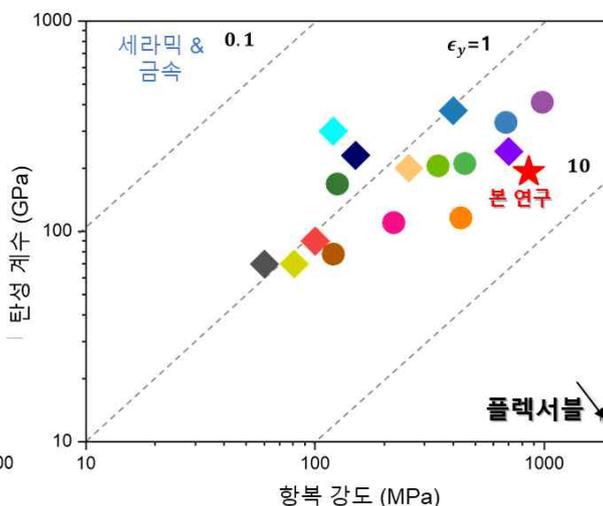
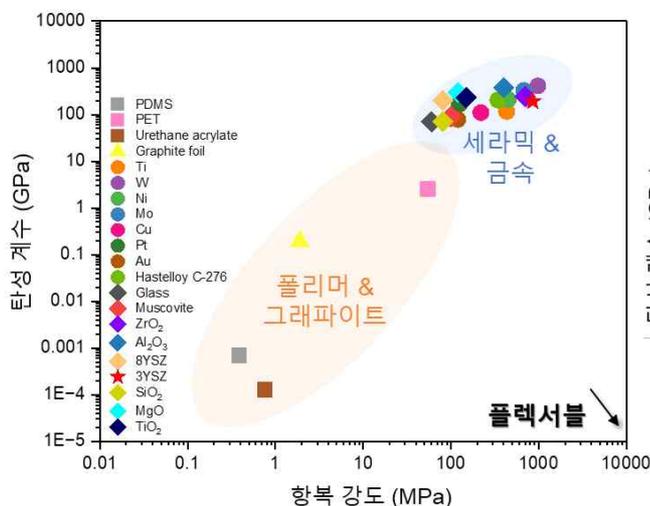
▲ 펄스 레이저 증착법을 이용한 고안정성고효율 플렉서블 광전극 제작 모식도. 연구팀은 펄스 레이저 증착법을 활용하여 플렉서블 3YSZ 기판 위에 고품질의 이중접합 광전극을 제작하였다.

연구팀은 이번에 개발된 3YSZ 기판이 현재까지 보고된 플렉서블 기판 중 가장 높은 탄성 계수*(192 GPa, 기존 대비 2.7배)와 항복 강도*(856 MPa, 기존 대비 14.3 배)를 나타냈다고 설명했다. 이는 3YSZ가 우수한 기계적 물성을 유지하면서도 구부림과 같은 변형에 뛰어난 저항성을 가진다는 것을 의미한다.

* **이트리아 안정화 지르코니아 3YSZ:** 이트리아 안정화 지르코니아는 지르코니아에 이트리아를 첨가하여 상온에서도 안정하도록 만든 세라믹 재료이다. 3YSZ는 지르코니아(ZrO_2)에 약 3몰%의 이트리아(Y_2O_3)를 첨가하여 8몰%의 이트리아가 지르코니아 결정에 도핑된 8YSZ에 비해 높은 열적 안정성, 화학적 저항성, 기계적 강도를 동시에 갖추고 있으며 고온 및 가혹한 환경에서도 물질의 구조적 안정성을 유지한다. 여기서 '3몰%'는 전체 물질 중 이트리아가 약 3%의 비율로 포함된 것을 의미한다.

* **탄성 계수 (Elastic Modulus):** 재료가 외부에서 힘을 받을 때 늘어나거나 휘는 정도를 결정하는 기준으로, 값이 높을수록 재료는 잘 변형되지 않는다.

* **항복 강도 (Yield Strength):** 재료가 외부의 힘에 의해 영구적으로 변형되기 시작하는 한계점을 의미하며, 값이 높을수록 더 큰 힘에도 형태를 유지하고 쉽게 변형되지 않는다.



▲ 플렉서블 소재의 항복 강도와 탄성 계수 비교. 세라믹과 금속군은 강도와 탄성 계수가 높은 위치에 자리하며, 본 연구에서 활용한 3YSZ(붉은 별)는 우수한 기계적 특성과 플렉서블 특성을 동시에 충족하는 소재임을 나타낸다.

연구팀은 또한 이렇게 제작된 3YSZ 기판 위에 펄스 레이저 증착법(PLD)*을 활용하여 고품질의 비스무스 바나데이트*/텅스텐 산화물* 이종접합 구조(BiVO₄/WO₃)의 제작에도 성공했다.

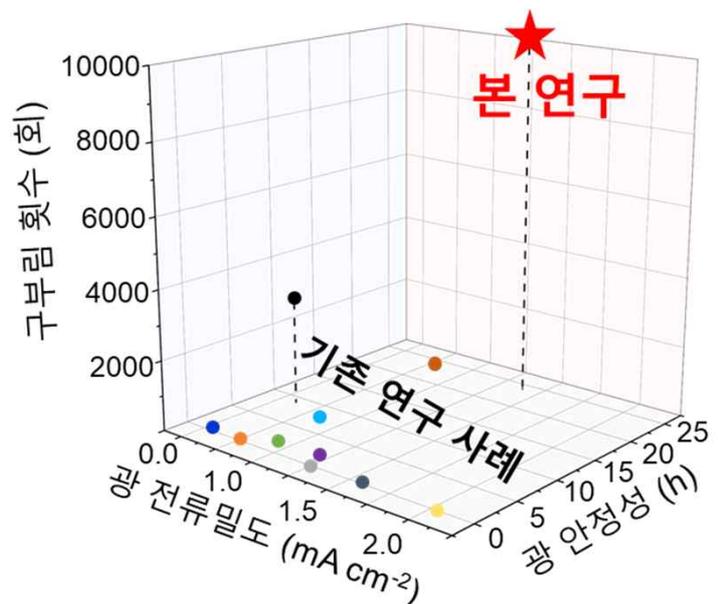
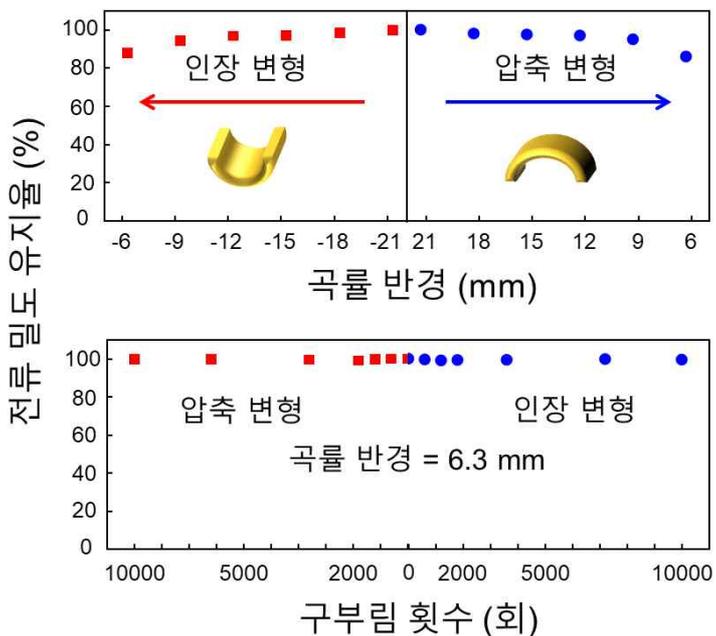
이종접합 구조 형성을 통해 광생성 전자의 재결합을 억제하고 전하 분리 및 이동을 개선해 광전류 밀도가 기존 대비 약 2.3배 증가 (0.78→1.78 mA/cm²)하였다. 또한, 10,000번의 구부림 테스트 후에도 초기 성능의 99.8%를 유지했으며, 구부린 상태에서 24시간 안정적으로 작동해 뛰어난 내구성과 장시간 안정성을 입증하였다.

이는 3YSZ 기판의 기계적 안정성과 BiVO₄/WO₃ 이종접합 구조의 우수한 성능이 결합된 결과로, 가혹한 환경에서도 지속 가능한 플렉서블 태양에너지 변환 시스템의 실용화 가능성을 제시한다.

* 펄스 레이저 증착법(Pulsed Laser Deposition, PLD): PLD는 고에너지 레이저를 이용해 타겟 소재를 증발시킨 후 기판 위에 고품질의 박막을 형성하는 기술이다. 특히, 3YSZ와 같은 세라믹 소재에도 단시간에 별다른 버퍼층 없이 정밀하게 증착할 수 있어 복잡한 구조와 조성을 그대로 유지할 수 있다.

* 비스무스 바나데이트(BiVO₄, BVO): 뛰어난 광흡수 능력과 전하 이동 특성을 지닌 BVO는 산화물 광전극 소재로 주목받으며, 물분해 반응을 통해 수소 생산에 매우 유망한 물질로 평가된다.

* 텅스텐 산화물(WO₃, WO): 우수한 전기 전도성과 화학적 안정성을 갖춘 산화물 반도체로, BVO와 결합해 이종접합 구조를 형성할 경우 전하 재결합을 억제하고 전자 분리 및 이동 특성을 크게 향상시킬 수 있다.



▲ 곡률 반경 및 반복 구부림 횟수에 따른 전류 밀도 유지율과 기존 연구 사례와의 비교. 본 공동연구 결과(빨간 별)는 현재까지 보고된 연구 사례들과 비교해 광전류 밀도가 높고 안정성 유지 시간이 길면서도 10,000회의 반복 구부림에도 성능 저하 없는 뛰어난 내구성을 동시에 달성하여 가장 우수한 성능을 보여준다.

이상한 교수는 "이번 연구 성과는 기존 플렉서블 광전극의 구조적·성능적 한계를 극복하고, 태양에너지 기반 수소 생산의 실용화 가능성을 확인하였다"며 "또한, 주종훈 교수 연구팀에서 제공한 3YSZ 소재가 다양한 분야에 활용되어 차세대 에너지 시스템 개발을 위한 새로운 접근법이 될 수 있을 것으로 기대한다"고 말했다.

GIST 신소재공학부 이상한 교수와 환경·에너지공학부 주종훈 교수가 지도하고 신소재공학부 박사과정 황준범 학생과 이정수 석사가 수행한 이번 연구는 한국연구재단이 지원하는 도시형 생활폐기물 가스화 물질 혁신적 전환 선도연구센터 사업, 미래수소 원천기술개발 사업 등의 지원을 받아 수행되었으며, 국제학술지《Journal of Materials Chemistry A》48호에 2024년 12월 28일 게재되었다.

논문의 주요 내용

1. 논문명, 저자정보

- 저널명 : Journal of Materials Chemistry A (IF: 10.08, 2023년 기준)
- 논문명 : A highly durable photoelectrode on a bendable yttria-stabilized zirconia substrate for efficient photoelectrochemical water splitting
- 저자 정보 : 황준범 (공동 제1저자, GIST 신소재공학부), 이정수 (공동 제1저자, GIST 신소재공학부), 남경덕 (공저자, GIST 환경·에너지공학부), 최수민 (공저자, GIST 환경·에너지공학부), 양지웅 (공저자, GIST 신소재공학부), 정윤성 (공저자, GIST 신소재공학부), 김예준 (공저자, GIST 신소재공학부), 오인혁 (공저자, GIST 신소재공학부), 이상한 (공동 교신저자, GIST 신소재공학부), 주종훈 (공동 교신저자, GIST 환경·에너지공학부)