



에너지 변환 및 저장 연구실 (Energy Conversion & Storage Laboratory, ECSL)

박 종 혁 (연세대학교 화공생명공학과 언더우드 특훈교수)

주소 : 서울특별시 서대문구 연세로 50 GS칼텍스 산학협력관 304호
전화 : 02-2123-8329
이메일 : lutt@yonsei.ac.kr
홈페이지 : <https://sites.google.com/view/econsto/home>

1. 연구실 소개

최근 화석연료 사용에 따른 이산화탄소 배출량 증가, 환경오염 및 기후 변화 문제로 인해 청정에너지 개발에 대한 필요성이 대두되고 있다. 수소는 지구상에 풍부한 물로부터 얻을 수 있으며 높은 에너지 밀도(141.9MJkg^{-1})와 운송 및 저장의 용이성 등의 다양한 장점을 갖고 있어 화석연료를 대체할 수 있는 신재생에너지로 주목받고 있다. 그러나 현재의 수소 생산 기술 대부분은 천연가스를 이용한 수증기 개질법에 의존하고 있다. 이 방법은 부생가스로 과량의 이산화탄소를 배출할 뿐만 아니라 고온 고압의 높은 에너지가 필요하므로 진정한 의미의 청정에너지로서의 수소 생산 기술에 관한 연구가 필요하다. 전기와 태양광 등의 에너지를 활용한 물 분해 기술은 탄소를 배출하지 않고 친환경적으로 물로부터 수소를 생산할 수 있는 기술로 활발히 연구되어왔다.

에너지 변환 및 저장 연구실(Energy

Conversion & Storage Laboratory)은 2008년에 설립되어 뛰어난 아이디어와 도전적인 실험정신을 바탕으로 에너지 변환과 저장을 위한 다양한 에너지 소재 및 디바이스 개발 연구를 수행하고 있다. 본 원고에서는 특히 광활성을 갖는 반도체 물질을 활용하여 미래의 친환경적인 에너지 솔루션을 도출해내기 위한 연구를 소개하고자 한다.

본 연구실의 주제는 크게 다음과 같이 구분된다.

- 1) 높은 태양광-수소 전환율을 위한 광전극 소재 및 수전해 광전기화학 셀 개발
- 2) 페로브스카이트 태양전지 기반 PEC 디바이스 디자인
- 3) H_2O_2 생산, glycerol 산화 반응 등 고부가가치 화합물 생산을 위한 광전기화학 촉매 개발

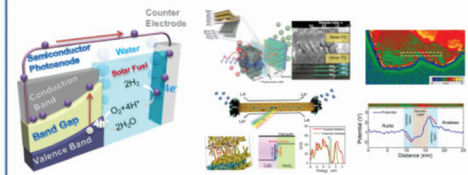
에너지 변환 및 저장 연구실에서는 촉매의 광-수소 전환율을 비롯하여 흡광 성능, 선



Energy Conversion & Storage Lab

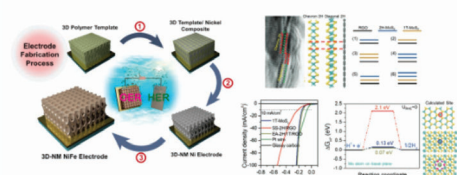
Photoelectrochemical Cells

• Engineering PEC Cells for Solar Water Splitting



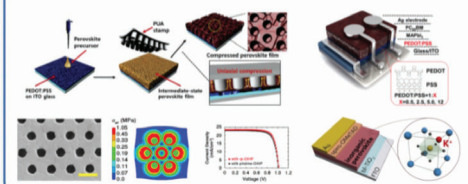
Electrochemical Water Splitting

• Designing Water Splitting Electrocatalysts



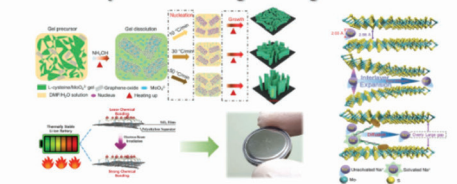
Perovskite Solar Cells

• Fabrication and Modification of PSCs



Li & Na Ion Batteries

• Secondary Batteries Engineering



[그림 1] 에너지 변환 및 저장 연구실 연구 개요

택도, 내구성 등을 종합적으로 평가하여 고성능의 광전기화학 촉매 소재 개발 및 원천 기술 확보를 추구하고 있다. 본 연구실은 다양한 연구진과의 협력 연구를 통해 Energy & Environmental Science, Advanced materials, Joule, Nature communications 등을 비롯한 에너지 저장 및 변환 분야의 SCI급 저널에 총 360여 편의 학술논문을 게재하였으며, 100여 건의 국내외 특허를 등록하는 등 활발한 연구 활동을 이어가고 있다.

2. 연구 분야 및 연구내용

본 연구실은 다양한 광활성 에너지 소재의 나노 구조체 및 이종 접합체 합성 기술, 표면 선

택적 환원 엔지니어링을 통한 소재의 물리화학적 특성 제어 등의 연구실의 핵심기술을 활용해 촉매 특성을 최적화하고, PV-EC 또는 PV-PEC 텐덤 구조 기반 고효율 광전기화학 디바이스 제작과 고부가가치 산물 생산을 위한 촉매 소재 개발을 통해 원천기술을 확보하고 에너지 변환 시스템의 성능을 향상시키는 것이 목표이다.

2-1. 고성능 수전해용 광전기화학 셀 개발

풍부한 에너지원인 태양에너지를 활용한 물분해 기술은 크게 Photocatalyst(PC), Photovoltaic-electrochemical cell(PV-EC), Photoelectrochemical cell (PEC)로 분류될 수 있다. 광촉매(PC) 시스템은 일반적으로 광활성

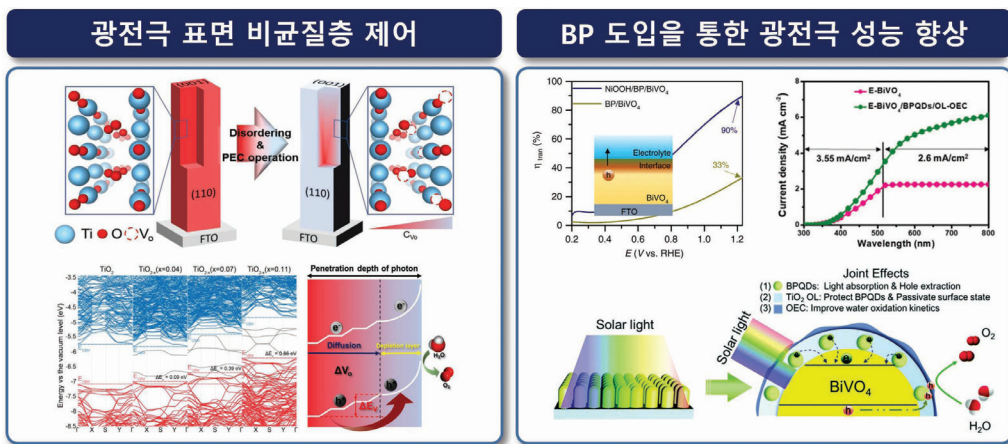


을 갖는 반도체 입자가 전해질에 분산된 형태로 사용된다. 광촉매에 빛이 조사되면, 고유의 밴드갭 이상의 에너지를 갖는 광자를 흡수하여 전자여기에 의한 전자-정공쌍을 생성한다. 이렇게 생성된 정공과 전자는 반도체 입자 표면의 띠급음으로 발생한 전위차에 의해 서로 다른 방향으로 이동하면서 전하 분리가 일어나고, 입자 표면에서 각각 산화/환원 반응에 참여하게 된다. 비교적 단순한 동작 원리를 갖는 광촉매(PC) 시스템은 광흡수, 전하 수송, 안정성 면에서 많은 부족함을 가지며 약 1%의 낮은 광-수소 전환효율의 한계를 갖는다. 반면 PV-EC는 빛을 흡수하여 전기에너지를 생산하는 태양전지로부터 생성된 전기에너지를 화학에너지로 변환하는 전기화학 촉매로 구성된 시스템으로, 높은 광-수소 전환효율을 보이지만, 시스템의 복잡성으로 인해 생산 및 운용 비용이 높은 것이 단점이다.

PEC 시스템은 PV-EC 시스템과 다르게 빛 흡수와 수전해 반응이 광촉매 물질로 만들어진

하나의 광전극에서 발생해 비교적 간단한 시스템으로 구성된다. PEC 광전극의 광여기 전하는 외부회로로 연결된 상대전극으로 이동하게 된다. 이를 통해 전하의 재결합이 억제되며 전하 분리가 효율적으로 이루어져 높은 광-수소 변환 효율을 기대할 수 있다. 또한 광촉매 시스템과 달리 산화, 환원 반응이 각각 다른 전극에서 발생하기 때문에 생성물의 분리가 용이한 장점을 갖는다. 이러한 특성으로 인해 PEC 시스템을 활용한 물분해 분야는 1972년 TiO_2 소재를 활용한 연구를 시작으로 많은 주목을 받아왔다.

본 연구실에서는 상용화가 가능한 고효율의 광전극을 구현하기 위해 Li-EDA 용액을 활용하여 TiO_2 광전극 물질 표면의 결함을 선택적으로 유도하는 연구를 수행해왔다. 이를 통해 광전극 표면에 비결정질 층을 형성하여 전극 소재의 전기 전도도를 향상시키고 전자 확산 길이를 증가시켜 높은 물 분해 성능을 달성하였다.



[그림 2] 고성능 PEC 광전극 소재 개발

또한 본 연구실은 높은 정공 수송(mobility) 특성을 갖는 p-type 반도체인 black phosphorene(BP)을 활용해 BiVO₄ 기반 광전극의 성능을 개선하는 연구를 수행하였다. 광전극과 조촉매의 접합 계면에 BP층을 도입하여 p-n 접합에 의한 전기장을 형성하여 정공 추출 특성을 향상시켰으며, 후속 연구에서 식각 처리로 넓은 표면적을 갖는 BiVO₄ 전극 표면에 2D BP가 아닌 black phosphorous quantum dots(BPQDs)를 도입하여 광전극 물질의 흡광 성능을 극대화할 수 있었다. 이에 TiO₂ overlay와 조촉매를 추가적으로 도입함으로써 광전극의 높은 안정성과 6.2mA/cm²의 높은 광전류밀도를 달성하여 고효율의 광전기화학적 물분해 시스템을 구현하였다.

2.2 페로브스카이트 기반 PEC 디바이스 개발

납 할라이드계 페로브스카이트(LHPs)는 경제적이고 쉽게 합성이 가능하며, 높은 흡광 성능을 가지고 있어 고성능의 태양전지뿐만 아니라 기존의 금속산화물 기반 광전극을 대체할 수 있는 유망한 물질로 평가받는다. LHPs의 작은 밴드갭은 금속산화물보다 넓은 파장대의 빛을 흡수할 수 있을 뿐만 아니라 충분한 양의 전하를 촉매 물질에 전달할 수 있으며, 제어 가능한 밴드갭의 최적화를 통해 다양한 촉매 물질로써 활용될 수 있다. 그러나 이러한 장점에도 불구하고 LHPs는 수분에 매우 민감하여 매우 낮은 수분 안정성을 갖는다. 이로 인해 LHPs를 수전해 디바이스로 직접 사용하는 것은 한계가 있다.

이러한 문제점에 대응하기 위해 다양한 연

구에서 LHPs 기반 광전극 표면에 필즈 메탈(Field's metal, FM)이나 니켈 기반의 보호층을 도입하여 수분 안정성을 향상시키려는 시도가 이루어졌다. 그러나 이러한 시도들은 FM의 낮은 녹는점과 니켈 접촉 계면에서의 높은 저항 등에 의해 구동 환경에서의 장기적인 안정성과 높은 성능을 보장하지 못하였다.

본 연구실에서는 페로브스카이트 PV 전지와 3D OER 전기촉매를 결합한 일체형 구조의 광전극 디바이스를 제작하는 연구를 수행하고 있다. 전기촉매가 로딩된 니켈폼과 PV전지의 접촉계면에 Conductive carbon powder(CCP)를 도입하여 페로브스카이트를 성공적으로 인캡슐레이션함과 동시에 계면의 접촉 저항을 줄여 전하의 손실을 최소화하는 시스템을 구성하였고, 이를 통해 24.26mA/cm²의 높은 광전류밀도와 9.16%의 ABPE, 높은 안정성을 확보하였다. 또한, 수소 발생 반응에 적합한 전이금속 인화물 전기촉매가 결합된 페로브스카이트 광양극을 추가적으로 도입하여 무전원(unbiased) 수전해 장치를 성공적으로 구현하였다.

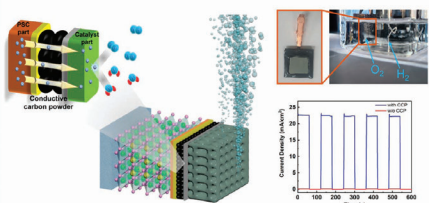
2.3 고부가가치 화합물 생산

전기화학적 또는 광전기화학적 산소 발생반응(OER)은 낮은 반응속도를 가질 뿐 아니라 높은 과전압을 필요로 하는 특성 때문에 PEC 또는 PC 시스템의 전체 물 분해 반응의 성능을 저하시킨다고 알려져 있다. 이에 따라 최근에는 산소 발생 반응을 과산화수소(H₂O₂) 또는 Dihydroxyacetone(DHA)과 같은 산소보다 경제적 가치가 높은 고부가가치 산물 생성 반응으로 대체함으로써 전체 산화·환원 반응의 경

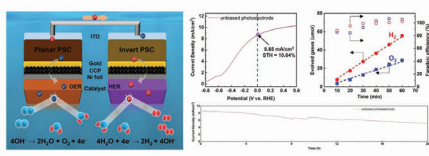


페로브스카이트 PV-PEC 시스템

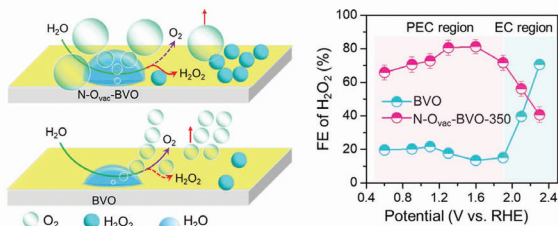
일체형 구조의 광전극 디바이스



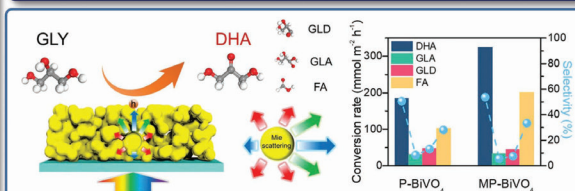
무전원 수전해 디바이스



광전기화학적 H₂O₂ 생산



광전기화학적 글리세롤 전환



[그림 3] 페로브스카이트 PV-PEC 시스템 및 고부가가치 산물 생산 모식도

제성을 향상시키기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

광전기화학적 과산화수소 생산 반응의 경우 OER 보다 빠른 반응속도뿐만 아니라 산물의 가치가 높고, 기상 혹은 액상 산물의 분리 공정이 더 간단하다는 장점을 갖고 있다. 하지만, 동시에 낮은 광전환 효율과 과산화수소 생산에 대한 낮은 선택도 및 생산 속도 등의 어려움을 겪고 있다. 이러한 문제를 극복하기 위해 과산화수소 생산 반응에 높은 활성을 갖는 것으로 알려진 BiVO₄ 기반 광전극의 경우, 광변환 효율을 증가시키기 위해 이원자 도핑, 표면 패시베이션, 이중접합 구조 도입 등의 다양한 전략이 연구되어왔다.

본 연구실에서는 BiVO₄ 기반 광전극의 광전환 효율뿐만 아니라 반응 산물의 선택도를 높이는 연구를 수행해왔다. 특히, 높은 H₂O₂ 선

택도를 달성하기 위해서는 광전극 표면에서 정공 제거제(hole scavenger) 역할을 하는 액상 과산화수소를 반응 표면에서 분리시키고, 산소발생 반응을 억제해야한다. 본 연구실은 이러한 경쟁 반응을 억제하기 위해 광식각(photo etching) 공정을 활용하여 BiVO₄ 광전극 표면에 산소 결함을 형성하고, 질소 처리를 통해 표면의 젖음성을 하락시켰다. 이를 통해 산소 기체의 방출 속도를 조절하여 전극 표면에서의 산소 기체와 액상 과산화수소의 비율을 효과적으로 제어하였다. 결과적으로 과산화수소 분해 반응과 산소 발생 반응을 억제하여 최대 81.2%의 패러데이 효율과 높은 과산화수소 생산 속도를 보이는 광전극을 제조하였다. 이러한 연구를 통해 광전극 표면의 미세환경 제어의 중요성을 밝히고 경쟁 반응 억제를 위한 광전극 개발의 가이드라인을 제시하였다.

한편, 바이오디젤의 생산량이 증가함에 따라 그 생산공정의 주요 부생 산물인 글리세롤의 연간 생산량 역시 증가하고 있다. 그러나 글리세롤의 매우 낮은 경제적 가치로 인해 다양한 촉매를 활용하여 글리세롤을 산화시켜 고부가가치 화합물을 합성하는 연구가 활발히 진행되어왔다.

전기화학적 또는 광전기화학적 글리세롤 산화는 기존 물분해 반응의 산소 발생 반응을 대체하여 전체 반응에 필요한 에너지 소비를 줄일 수 있을 뿐 아니라 안전한 반응 환경 등의 장점으로 효율적으로 고부가가치 산물을 생산하는 공정으로 주목받고 있다. 일반적으로 다양한 반응조건에 따라 글리세롤 산화반응을 통해 glyceric acid(GLA), glyceraldehyde(GAD), dihydroxyacetone(DHA), glycolic acid(GCA) 등의 산물을 얻을 수 있으며, 그중 DHA는 킬로그램 당 \$150의 매우 높은 가치를 갖는다.

본 연구실에서는 BiVO_4 기반 광전극을 활용하여 글리세롤 산화반응을 통해 DHA를 생산하는 연구를 진행하고 있으며, 간단한 열처리

공정을 거침으로써 BiVO_4 기반 광전극의 다공성 나노구조를 제어해 빛의 미 산란 (Mie scattering) 효과를 강화하였다. 이를 통해 기존 BiVO_4 기반 광전극의 부족한 흡광 성능을 개선하였으며, 글리세롤 산화반응에 광음극으로 활용하여 $6.04\text{mA}/\text{cm}^2$ 의 광전류밀도와 $325.2\text{mmolm}^{-2}\text{h}^{-1}$ 의 높은 DHA 생산속도를 달성하였다.

3. 연구실의 비전

본 연구실은 에너지의 변환과 저장을 위한 다양한 소재의 특성을 분석하고, 이를 기반으로 다양한 전략을 통해 기존 소재와 차별성을 갖는 차세대 에너지 소재를 개발하고 원천기술을 확보하고자 한다. 이를 통해 고성능/고안정성의 광 기반 청정에너지원 생산 시스템 기술을 선점하고, 미래의 환경문제와 자원 고갈 문제를 해결하는데 새로운 패러다임을 제시할 수 있을 것이라 기대한다.

•• 박종혁 ••



학력 및 경력

1995-1999 연세대학교 화공생명공학 학사
1999-2001 한국과학기술원 화공생명공학 석사
2001-2004 한국과학기술원 화공생명공학 박사
2004-2005 Univ. Texas at Austin, Post-doctoral Fellow
2005-2007 LG화학 선임 연구원
2007-2008 ETRI 선임 연구원
2008-2014 성균관대학교 부교수
2014-2015 Stanford University Visiting associate professor
2015-현재 연세대학교 언더우드 특훈교수