

# 2 태양광-수소생산을 위한 BVO 광전극 기반 광전기화학전지의 대면적 연구 개발 현황

글\_김태우 책임연구원 | 한국에너지기술연구원

## 1. 서론

산업혁명이후 급진적인 경제발전으로 인류는 삶의 질 향상과 많은 윤택함을 누려왔다. 현재까지의 경제 개발은 화석연료기반의 에너지시스템을 활용하고 있다. 그러나 화석연료의 무분별한 사용은 화석연료의 고갈 문제, 화석연료의 사용으로부터 방출되는 온실가스로 인한 지구온난화 문제 및 환경문제를 일으키고 있다. 최근 유례없는 이상기후와 환경변화는 인류의 생활환경에 많은 피해를 야기하며 막대한 경제적 손실을 주고 있다. 이에, 국제사회는 문제의 심각성을 인식하고 다양한 국제정책과 협력을 위한 협약을 도출하고 있다. 세계 인류는 현 화석연료기반 에너지시스템을 대체하기 위해 태양광, 풍력, 지열, 바이오, 연료전지 등 신재생에너지기반 시스템으

로부터 재생가능하며 청정한 대체에너지 생산 및 활용을 위한 새로운 에너지 전환의 위치에서 있다. 이러한 흐름 속에 신재생에너지 중심 체제로부터 청정한 수소를 얻기 위한 기술 개발에 많은 집중과 투자를 아끼지 않고 있다.

재생에너지 중 태양에너지는 무한한 풍부성, 청정성을 가지고 있어 연구개발에 가장 많이 활용되고 있다. 연간 지구 지표면에 도달하는 태양에너지는 약  $1.2 \times 10^5$  TW이며 이는 화석연료 에너지로부터 현 인류가 연간 필요로 하는 평균 에너지(약 13~15 TW)의 약 1만 배에 해당한다 [1,2]. 막대한 양의 태양에너지에도 불구하고 현 시점의 태양광을 이용한 수소생산기술의 경제성은 현 수소생산기술(예, 부생수소 및 개질수소) 대비 매우 큰 격차를 보이는 게 현실이다. 이러한 격차를 해소하기 위해서는 지구상에 들어오는 전체 태양

에너지의 단 0.1%를 태양광-수소생산 전환 효율(solar-to-hydrogen conversion efficiency, STH)  $\geq 10\%$  갖는 태양광-수소생산 시스템 기술 개발이 절실히 요구되고 있다.

태양에너지로부터 수소를 생산 할 수 있는 대표적인 기술에는 광촉매, 태양전자-수전해, 광전기화학전지가 있다. 본 기고에서는 이 세 기술에 대한 특징 및 장단점을 간단히 설명하고, 이 중 광전기화학전지에 대해 자세히 알아보고자 한다. 특히, 광전기화학전지의 광전극으로써 적용되는 금속산화물 반도체인  $\text{BiVO}_4$  (BVO) 광흡수 소재를 중심으로, 이 소재의 특징, 성능 향상을 위한 연구전략에 대해 간략히 소개할 것이다. 더욱이, 최근 이 소재에 대한 집중 연구개발로 광전극 성능은 비약적인 발전을 보였으며, 이에 실험실규모의 연구개발에서 벗어나 실용화를 위한 대면적화 연구개발에 관한 최신 연구동향을 살펴보고자 한다.

## 2. 태양광기반 수소생산

2010년에 보고된 문헌에 따르면  $5 \times 5 \text{ km}^2$  면적에 STH 효율 10%를 갖는 태양광-수소생산 발전소 1만개 ( $250,000 \text{ km}^2$ 의 크기는 지구 상에 있는 전체 사막 크기의 약 1%에 해당함)를 설치하여 가동할 경우 하루에 약 570만톤 규모의 수소를 생산할 수 있음을 추산하였다(그림 1) [3]. 이 수치는 2050년 기준으로 전 세계가 필요로 하는 에너지의 약 1/3 수준에 해

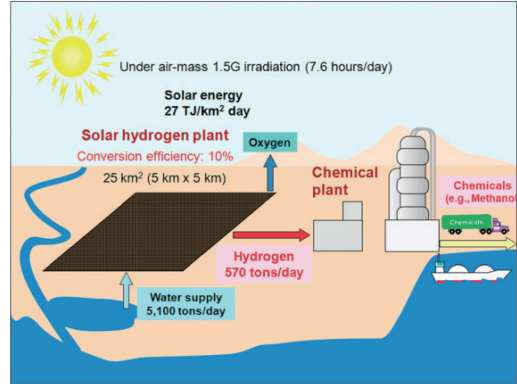


그림 1 ▶ 미래 태양광-수소생산 기술을 적용한 산업 발전소 개념 [3].

당한다. 이 추산을 바탕으로 태양광-수소생산 발전소로부터 매일 같은 양을 생산한다면 연간 약 21억만 톤의 막대한 양의 수소를 생산할 수 있다.

### 2.1 태양광기반 수소생산 기술

태양광을 이용하여 수소를 생산하는 기술에는 크게 세 가지로 나눌 수 있으며, 그림 2는 세 기술의 광효율과 시스템 경제성에 대한 비교 그림을 보여준다. 첫 번째 기술은 분말 형태의 광촉매소재(photocatalyst, PC)를 이용하는 것이다. 태양광과 광흡수를 할 수 있는 촉매소재만 있으면 물을 분해하여 수소를 생산할 수 있는 기술로 가장 이상적인 방식이다 [3,4]. 그러나 수십 년간 다양한 전략으로 소재의 성능을 개선해보고자 노력을 해왔지만 여전히 낮은 STH 효율( $< 1\%$ )로 실질적인 상용화가 어려운 실정이다. 두 번째 기술은 태양전지(photovoltaic cell, PV)를 이용하여 태양광에 의해 생성된 전자로부터 전기를 유도하고 이를 전해조 전기분해(electrolysis cell, EC)로부

터 물 분해를 유도하는 PV-EC 방식이다 [5]. 이 기술로부터 실험실규모에서 STH 효율 10% 이상 달성한 연구가 보고되고 있으며 세 기술 중 실용화에 가장 가깝다. 그러나 고가의 태양전지 이용(실리콘 태양전지, 무기 태양전지 등), 낮은 개방 전압 (<0.6 V), 전해조에 이용되는 고가의 촉매소재 사용 등으로 경제성 확보가 과제로 남아있다. 최근 염료감응-, 유기-, 및 페로브스카이트 태양전지 등 저가이며 고효율, 높은 개방전압을 갖는 대체 태양전지 및 고가의 귀금속 위주의 촉매소재에서 저가의 금속소재를 적용하는 연구개발이 수행되고 있다 [5,6].

그림 2에서 보는 바와 같이 PC와 PV-EC 기술은 실제 시스템 적용 시 수소생산 효율과 기술 경제성에서 현저한 상충 관계를 갖고 있다. 마지막 세 번째 기술은 STH 10% 이상과 가격 경쟁력 두 조건을 모두 만족시킬 수 있는 기술로 각광받고 있는 광전기화학적(photoelectrochemical cell, PEC) 방식이 있다 [4,6]. 이 기술은 최근 20년 동안 두드러진 연구 진보를 보이고 있다. PEC 기술은 PV와 유사한 메커니즘을 갖지만 태양광에 의해 PEC에서 생성된

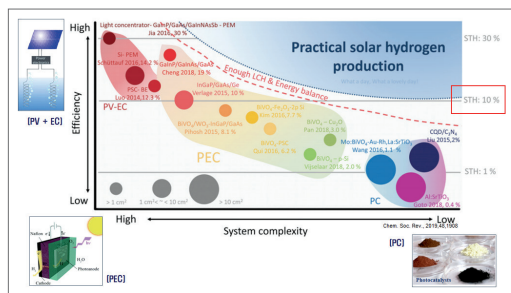


그림 2 ▶ 태양광-수소생산 기술들(PC, PV+EC, 및 PEC)의 태양광-수소생산 전환 효율과 기술개발 난이도(경제성) 비교 [6].

전자가 전극 표면에서 직접 물과 접촉하여 화학적 반응을 통해 수소를 생산한다.

## 2.2 PEC에 의한 수소생산 원리

그림 3(a)는 광전기화학적 물분해 개념도를 보여준다. 이 시스템은 직접 전해질에 산화 전극과 환원전극이 담겨진 형태로 전극과 전해질의 접촉에 의해 반도체 전극 표면에서 띠 휨(band bending) 현상을 유도하여 전위차를 형성한다. 입사되는 태양광을 광흡수 반도체가 흡수하면 반도체 내에 가전자띠(valence band)에 존재하는 전자가 전도띠(conduction band)로 여기 하게 된다. 이때 전자-정공 쌍이 분리와 뿔뿔으로 생성된 전위차로 인해 반도체 내부와 외부 회로를 통해 전자가 이동하게 된다(그림 3(b)). 사용된 전극이 p형 반도체일

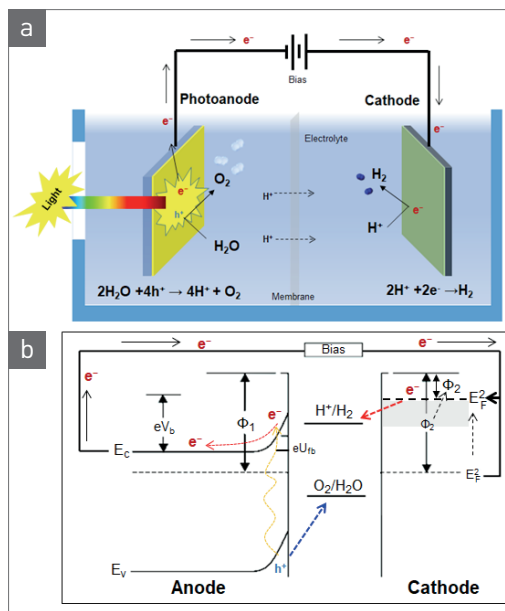


그림 3 ▶ (a) 광전기화학전지의 물분해 및 (b) 광-인가전압 하에서 광전기화학적(n형 반도체 예시) 물분해 원리 개념도.

경우 반도체 표면에서 전해질에 포함된 H<sup>+</sup>와 반응하여 수소를 발생시키고 반대 전극에서 산소가 발생한다. 반대로 n형 반도체일 경우 전극에서 생성된 정공은 전해질에 포함된 OH<sup>-</sup> 이온과 반응하여 산소를 발생시키고 반대 전극에서 수소를 발생하게 된다 [4,6].

### 3. BVO 광전극(photoanode)

물을 분해하여 수소와 산소로 변환하는 반응은 양의 ΔG를 갖는 열역학적 비자발(up-hill) 반응으로 외부 에너지를 제공해 주어야만 반응이 진행된다. 광흡수 반도체가 물 분해를 자발적으로 일으키기 위해서 반도체 내의 VB와 CB의 위치가 중요하다. VB는 물 산화반응이 일어나는 전위(2H<sub>2</sub>O → O<sub>2</sub> + 4H<sup>+</sup> + 4e<sup>-</sup>, E° = 1.23V at pH=0)보다 양전위를, CB는 환원반응이 일어나는 전위(4H<sup>+</sup> + 4e<sup>-</sup> → 2H<sub>2</sub>, E° = 0.0V at pH=0)보다 음전위에 위치해야만 열역학적으로 만족하게 된다. 그림 4(a)는 여러 광흡수 반도체 소재의 VB와 CB의 위치를 보여준다. 수십 년 동안 광전극소재 개발에서 소재의 선택성 및 내구성을 고려하였을 때 주로 n형 반도체의 소재를 적용한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 또한 칼코겐나이드기반 및 실리콘기반 전극소재에 비해 금속산화물기반 전극소재는 값이 싸고, 제조의 용이성, 광학적·화학적 높은 내구성의 장점을 갖고 있다. 금속산화물기반 광흡수 소재 중 TiO<sub>2</sub>의

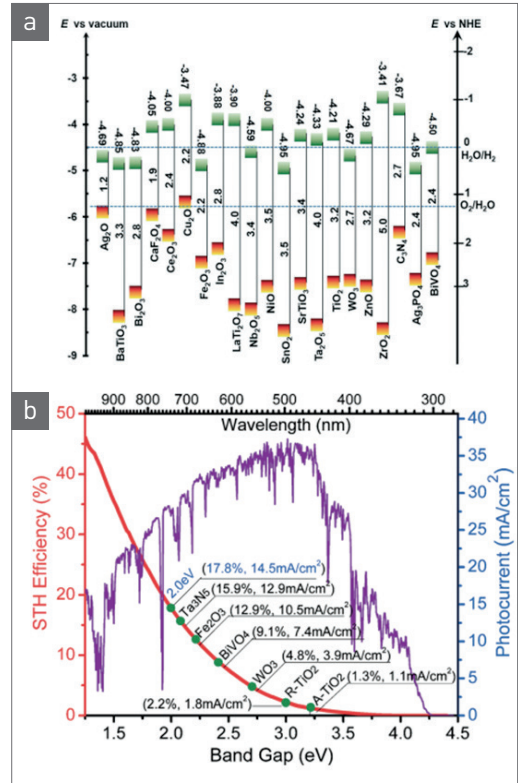


그림 4 ▶ (a) 다양한 금속산화물 반도체의 밴드갭과 밴드띠 위치 (b) 대표적인 광전극소재의 밴드갭으로부터 계산된 이론적 최대 광전류밀도 및 STH 효율 (AM 1.5G, 100 mA/cm<sup>2</sup>) [4].

이용이 활발히 수행되었지만 넓은 밴드갭(E<sub>g</sub> = 3.2 eV 이상)을 지녀 자외선 영역의 빛만 흡수를 하기 때문에 광전환 효율이 매우 낮다. 이러한 광전환 효율을 높이기 위해 태양광의 절반을 차지하는 가시광 영역에서 작동될 수 있는 광흡수체에 대한 연구가 진행되었다. 이러한 소재 중 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, WO<sub>3</sub>, BVO 등이 대표 후보군으로 선정되어 가장 많은 연구가 진행되어 왔다. 그림 4(b)는 이들 소재가 갖는 밴드갭(bandgap)을 통해 얻을 수 있는 최대 이론적 광전류밀도와 STH 효율을 나타낸다 [4]. 20년 동안 이들 소재에 대한 연구가 꾸준히 진행

되고 있는 가운데 BVO 광전극 소재는 다음 서술된 이유로 최고의 소재로 각광받고 있다.

### 3.1 BVO 소재 특성 및 광전극 효율 향상 연구

1998년도에 일본그룹에 의해 BVO 소재가 물을 산화시킬 수 있는 광촉매로써 활용 될 수 있음을 보고한 이래로 현재까지 약 20년 넘게 이 소재에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다 [7]. PEC에 적용되는 BVO 소재에 대한 소재 자체 특성(intrinsic 성질), 합성방법, 성능 등 자세한 내용을 다루는 문헌은 이미 수십 편 보고가 되었기 때문에 관련문헌을 참고하길 바라며 본 기고에서는 이에 대해서 간략하게 살펴본다 [7-9]. BVO는 크게 두 가지 결정구조(tetragonal과 monoclinic 구조)를 가지고 있으며 이 중 monoclinic 구조를 갖는 BVO 소재가 전극으로서 가장 많이 연구가 되고 있다. 이 구조를 갖는 BVO는 2.4 eV의 밴드갭을 가지고 있다. 그림 4(b)에서도 알 수 있듯이 밴드갭 2.4 eV 이상(약  $\lambda \leq 500$  nm)의 에너지를 흡수하여 전환한 최대 이론적 전류밀도는 약 7.5 mA/cm<sup>2</sup>이다. 따라서 이 전류밀도로 생산할 수 있는 최대 STH 효율은 약 9.2%이다. 앞서 언급하였듯이 STH 10%는 태양광-수소 생산 시스템의 실용화를 위한 중요 목표 수치이기 때문에 BVO 소재 하나 만으로도 이 목표에 근접할 수 있다.

또한 BVO의 CB 위치는 수소의 환원전위 근처에 있으며 VB의 위치는 물 산화전위 보다 1V 이상 양의 전위를 갖고 있어 매우 열역학적 물 분해 가능성이 높은 소재이다. 또한 광학적,

화학적 내구성이 높다. 이러한 특성이 인식되면서 BVO는 매력적인 광전극 소재임에 틀림이 없지만 여전히 다음과 같은 주된 문제들이 (i) 낮은 전자전도도 ( $\sim 0.01$  cm<sup>2</sup>/Vs), (ii) 정공의 짧은 확산거리 ( $< 80\sim 100$  nm), (iii) 광에 의해 형성된 전자-정공의 벌크 및 표면에서 빠른 재결합(recombination) 반응, (iv) 소재 표면의 낮은 촉매 특성 등) 소재의 광전극 효율을 감소시키는 주요 원인으로 작용한다 [7-9].

### 3.2 BVO 광전극 성능 향상 연구

앞서 언급한 BVO 소재의 여러 문제점을 해결하기 위해 다양한 연구 전략들이 보고되었으며 다음과 같은 주요 연구가 수행되었다 [4,7-9]. (i) 전하의 이동성(charge transport) 및 전하량을 높이기 위해 W 이나 Mo과 같은 이종 금속 양이온을 V 자리에 도핑(doping)하는 연구, 산소자리에 N과 같은 다른 음이온을 도핑 및 산소 결핍을 유도하는 연구가 수행되었다. (ii) 이종원소 도핑뿐 만 아니라 이종무기 분자(산화물, 칼코겐나이드, 양자점, 금속나노입자, 그래핀 등)와 계면접합, 코팅, 및 파장이 다른 금속산화물과 dual layer 연결 방식을 통해 전하의 분리 및 이동성 향상과 함께 태양광의 흡수 파장영역을 넓혀 광효율을 증가시키는 연구가 수행되었다. (iii) 벌크 혹은 표면에서 생성된 전자-정공 쌍의 재결합을 억제하기 위한 전략으로 BVO 자체의 형태학적 제어를 통해 특정 결정면을 노출하거나 성장시키는 연구와 BVO의 표면에서 재결합 반응 및 촉매적 특성을 향상시키기 위해 표면에 여러 물



산화촉매(oxygen evolution catalysts, OECs:  $\text{CoO}_x$ ,  $\text{NiO}_x$ ,  $\text{CoPi}$ ,  $\text{FeOOH}$ ,  $\text{NiOOH}$ ,  $\text{NiFeO}_x$ , 등)를 도입하는 연구가 수행 되어 왔다.

위와같은 BVO 소재의 본질적 문제를 해결 함으로써 BVO의 이론적 성능에 근접한 결과가 보고되면서 PEC의 실용화 가능성에 대한 기대가 커지고 있다. 그러나 여전히 현 BVO 기반의 광전기화학적 시스템에서는 인가전압 없이는 완전하게 물을 분해하여 수소로 전환할 수 없다. 반쪽 전극(half-cell)하에서 1.23 V(vs RHE)의 인가전압을 주었을 때 STH 효율로 계산하면 0%이다. 이에, 외부 인가전압 없이 (bias-free system) 태양에너지만으로 독립적으로 작동하기 위해서 태양전지(PV)와 결합한 PEC-PV tandem 시스템이 대안으로 인식되어 활발히 연구가 수행되고 있다 [10]. 최근 BVO기반의 PEC 전지의 높은 STH 효율을 보고하는 연구결과들은 대부분 태양전지와 결합한 Tandem 시스템에서 이루어졌다. 태양전지로는 Si 태양전지를 비롯해, 무기 태양전지, 페로브스카이트 태양전지, 염료감응 태양전지 등이 활용되고 있다.

## 4. BVO기반 대면적 PEC 개발

지난 20년 동안 BVO기반 PEC 연구는 비약적인 진보를 보였다. 소재가 갖는 본질적인 문제를 개선함으로써 BVO가 갖는 이론적 최대 광전류값에 근접한 결과들이 보고되었다. 앞

서 언급한 성능향상을 위한 전략을 바탕으로 연구결과를 간단히 살펴보면, 자체 BVO 소재의 물성을 제어하는 전략으로 1.23 V(vs RHE)에서  $6.1 \text{ mA/cm}^2$ 의 높은 광전류밀도를 보고하였으며,  $\text{WO}_3$ 와 이중접합 전략을 통해 개발된 BVO 광전극의 경우 1.23 V(vs RHE)에서  $6.7 \text{ mA/cm}^2$ 까지 광전류밀도를 보고하였다 [11,12]. 한편, BVO 광전극과 photocathode 혹은 PV와 결합한 tandem 형태의 경우 현재까지 가장 높은 광전류밀도( $7.0 \text{ mA/cm}^2$  at 1.23 V vs RHE)를 보고하였으며 이는 7.7%의 STH 효율을 갖는다 [13]. 이러한 BVO기반 PEC의 진보는 10% 이상의 STH 효율 달성과 함께 상용화에 한 걸음 더 다가갈 수 있는 기대감을 만든다.

### 4.1 대면적 BVO 광전극 개발 동향

현재까지 달성한 BVO기반 PEC의 연구결과는 실험실규모에서 매우 작은 활성면적( $0.1 < X < 1 \text{ cm}^2$ )을 통해 성취한 결과들이다. 다양한 전기전자 소자의 개발에서 대면적화를 위한 많은 노력 및 경험의 발자취와 유사하게 앞으로 PEC를 실용화하기 위해서도 고효율을 갖는 대면적 PEC 개발은 반드시 해결해야만 하는 숙제이다. 대면적화 및 나아가 실용화를 위해서는 여전히 소재의 본질적 특성에서부터 대면적 셀 개발 공정까지 개선해야 할 많은 어려운 점이 있다. 저가의 원료를 사용한 전구체 개발, 전극의 균일성 및 가격 경쟁력을 갖춘 BVO 대면적 제조 공정개발이 필요하다. 예컨대 대면적화를 위해서 용액전구체를 기반으로

로 하는 전기도금법, 스프레이법, 및 스핀코팅법은 산업에서 실행 가능한 제조방법으로 쉽게 접근이 가능하다. 또한 전자재료에 흔히 활용되는 스퍼터링, 가스상 기반의 물리적, 화학적 증착 제조법도 고려할 수 있다. 또한, BVO 제조뿐 아니라 BVO의 특성을 발현하기 위한 OECs의 대면적화 적용 제조법도 같이 수반되어야 한다. 많은 문헌에서 OECs 소재가 보고되고 있지만 여전히 제조의 어려움, 장기 내구성, 고가의 소재 사용 등 개선할 부분이 많이 남아있다. 나아가 PEC의 실용화를 위해서는 소재의 장기 내구성 확보가 반드시 필요하다.

최근 기존 소면적에 적용된 합성전략 중 대면적화에 용이한 전략을 활용하여 전극의 대면적( $\geq 1 \text{ cm}^2$ )화를 위한 연구가 점차 시도되고 있다. Yao et al. 연구팀은 소면적에서 고효율의 성능을 보이는  $\text{WO}_3/\text{Mo-BVO}$ 를 Metal-

organic decomposition(MOD)법과 drop casting법으로  $25 \text{ cm}^2$  크기의 대면적 BVO 광전극을 제조하였다 [14]. CoPi-OEC와 결합하여  $1.23 \text{ V}$ (vs RHE)에서 면적별로  $0.125$ ,  $2$ , 및  $25 \text{ cm}^2$ 에 대해 각각,  $2.32 \text{ cm}^2$ ,  $1.38 \text{ cm}^2$ , 및  $0.74 \text{ mA/cm}^2$ 의 성능을 보고하였다. Lu et al. 연구팀은 단일 전구체 용매(single-source precursor)를 개발하여 FTO 위에 균일한 BVO 및 여러 Metal이 도핑된 BVO( $M=\text{Co}, \text{Ni}, \text{Cu}, \text{Zn}$ ) 대면적 전극을 제조하였다 [15].  $25 \text{ cm}^2$  및  $300 \text{ cm}^2$  크기의 BVO 대면적 전극을 쉽고 균일하게 제조가 가능하나 전극의 성능은  $1.23 \text{ V}$ (vs RHE)에서 각각  $0.82 \text{ mA/cm}^2$  와  $0.22 \text{ mA/cm}^2$ 로 매우 낮은 광전류밀도를 보였다. 이 연구팀에서 개발한 single-source는 제조의 복잡성 및 원소재의 가격 등 해결해야할 숙제가 있지만 대면적 제조에 매우 용이성이 높은 것이 장

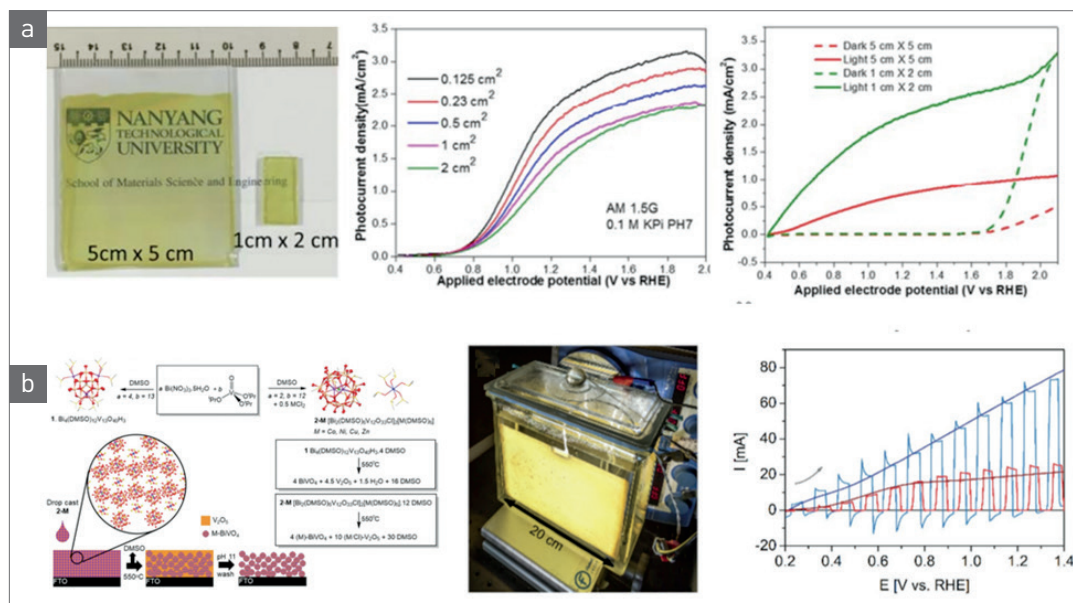


그림 5 ▶ 대면적 BVO 광전극 영상 및 광전류 특성: (a) ref14에서 보고한  $25 \text{ cm}^2$  BVO 광전극, (b) ref15에서 보고한  $300 \text{ cm}^2$  크기의 BVO 광전극.

접이다.

Ahmet et al. 연구팀은 Spray pyrolysis법으로 50 cm<sup>2</sup> 크기의 대면적 BVO(W-doped) 전극을 제조하였다(그림 6(a)) [16]. CoPi를 OEC로 도입하였으며 대면적에서 나타나는 면저항을 줄이고 생성된 전자의 이동을 원활하게 하기 위해 Ni 금속 라인을 도입하였다. 50 cm<sup>2</sup> 크기의 BVO 광전극에서 Ni 라인이 없을 때는 1.23 V (vs RHE)에서 약 0.7 mA/cm<sup>2</sup>의 광전류 밀도를 보였지만 Ni 라인을 도입 후 1.5 mA/

cm<sup>2</sup>로 향상되었다. 이 연구팀은 BVO 전극 두 장을 dual layer 방식으로 연결하여 후단에 Si-태양전지를 결합한 tandem 시스템을 구성하였다. 인가전압 없는(Bias-free) tandem 구동방식으로 1.23 V(vs RHE)에서 약 1.7 mA/cm<sup>2</sup>의 광전류밀도와 2.1%의 STH 효율을 보고하였다. Qayum et al. 연구팀은 Spray 코팅과 Combustion 법을 통해서 100 cm<sup>2</sup> 크기의 다공성 BVO 광전극을 제조하였다(그림 6(b)) [17]. 제안된 개발법을 통해 1에서 100 cm<sup>2</sup>까지

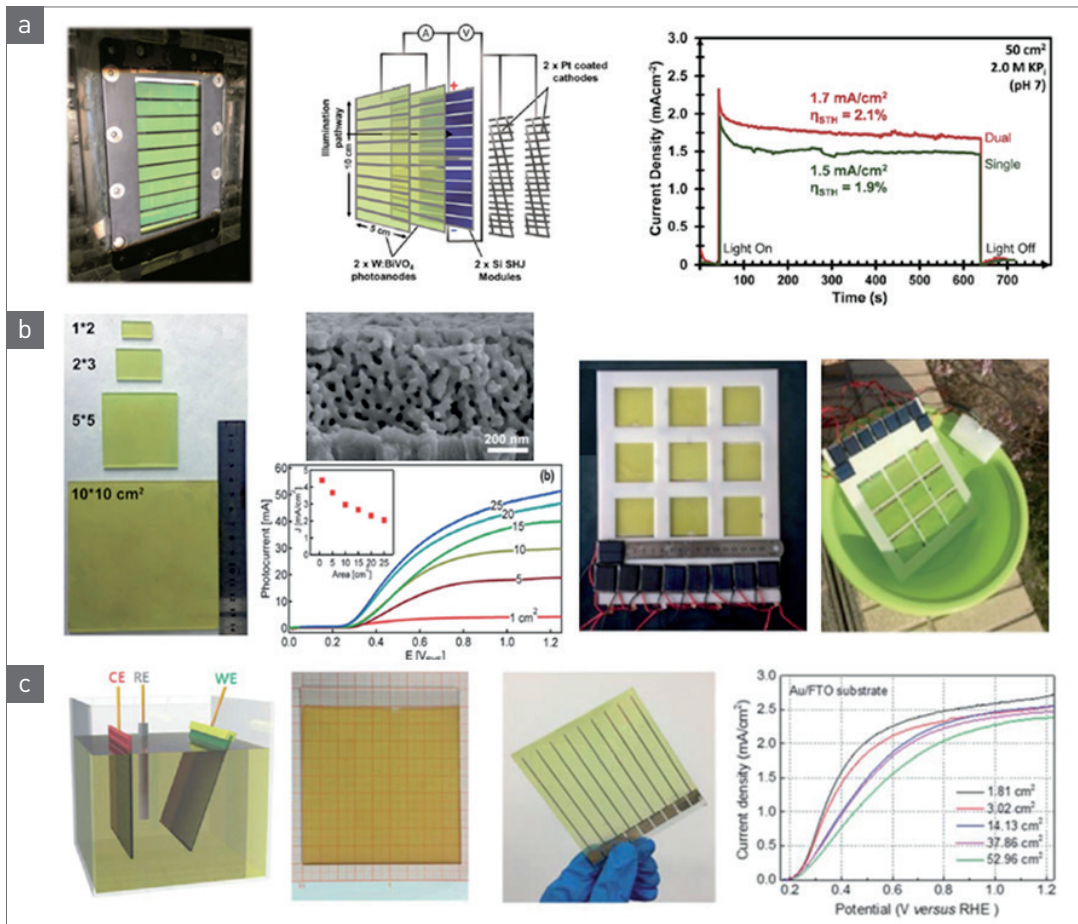


그림 6 ▶ 대면적 BVO 광전극 영상 및 광전류 특성: (a) ref16에서 보고한 50 cm<sup>2</sup> BVO 광전극, (b) ref17에서 보고한 100 cm<sup>2</sup> BVO 광전극, 및 (c) ref18에서 보고한 54.32 cm<sup>2</sup> BVO 광전극.



제조하였으며 비표면적이 넓은 다공성 BVO 전극은 높은 균일성을 보였다. NiFeO<sub>x</sub> OEC 를 도입을 도입하여 1.23V vs RHE 기준에서 1 cm<sup>2</sup> 면적에서는 4.4 mA/cm<sup>2</sup>, 25 cm<sup>2</sup> 에서는 2.05 mA/cm<sup>2</sup>의 높은 광전류밀도를 보였다. 그러나 여전히 면적이 증가하면서 광전류밀도가 감소되는 것을 확인할 수 있다. 이 연구팀은 5 × 5 cm<sup>2</sup> BVO 광전극 9개를 이용하여 tandem 이 아닌 side-by-side 시스템을 구현하여 실제 태양광하에서 실증테스트를 실시하였고 매우 안정한 성능을 보고하였다. 한편, Huang et al. 연구팀은 전기도금법으로 전극의 기울기를 제어하여 BiOI 막을 제조하였으며 V을 첨가하여 대면적 BVO 전극을 제조하였다 (그림 6(c)) [18]. 이 연구에서 주목할 점은 1.66 cm<sup>2</sup> 활성 면적에서 2.85 mA/cm<sup>2</sup>(1.23 V vs RHE, Ni/Fe

OECs 도입)의 광전류밀도를 보였으며 약 33배 크기의 54.32 cm<sup>2</sup> 면적에서는 2.55 mA/cm<sup>2</sup>의 광전류밀도를 달성하였다. 활성면적의 크기가 커졌음에도 불구하고 기존 연구들에서 보고한 크기에 따른 감소폭이 매우 적었다.

앞에서 최근 대면적 연구개발 동향에 대해 간단히 살펴보았듯이 광전극을 대면적화 하였을 때 막의 불균일성, 생성된 전하의 원활한 이동 제한, 먼 저항 등 다양한 요인으로부터 광전류밀도가 현저히 감소됨을 알 수 있었으며, 한편으로는 원료의 종류, 제조법에 따라 대면적 전극의 균일성과 성능을 향상시킬 수 있음을 알 수 있었다.

## 4.2 대면적 BVO 광전극 실증연구

앞서 BVO의 대면적 개발 연구 동향에 대해

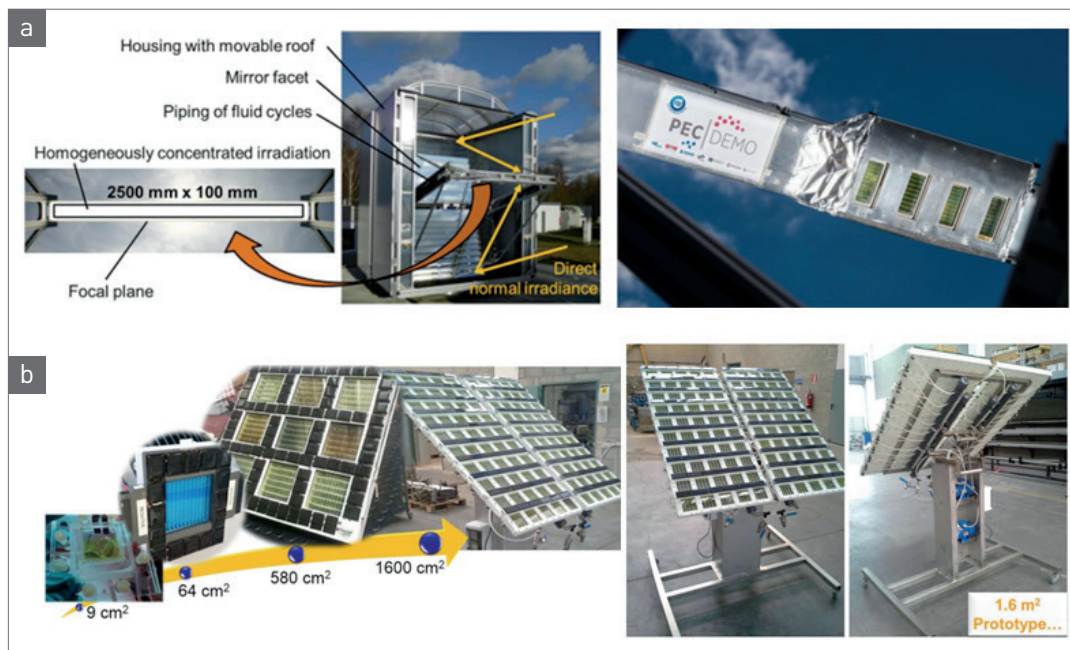


그림 7 ▶ BVO기반 광전기화학전지 prototype 모듈 실증 테스트: (a) PECDEMO project에서 BVO기반 PEC-PV tandem 구조의 광전기화학전지 모듈 (단위셀 면적 50 cm<sup>2</sup>, 200 cm<sup>2</sup>) 영상, (b) Artiphyction project에서 BVO기반 광전기화학전지 모듈 (단위셀 면적 64 cm<sup>2</sup>, 총 면적 1,600 cm<sup>2</sup>)영상, 이 모듈은 tandem 구조가 아닌 side-by-side 구조로 제작함.

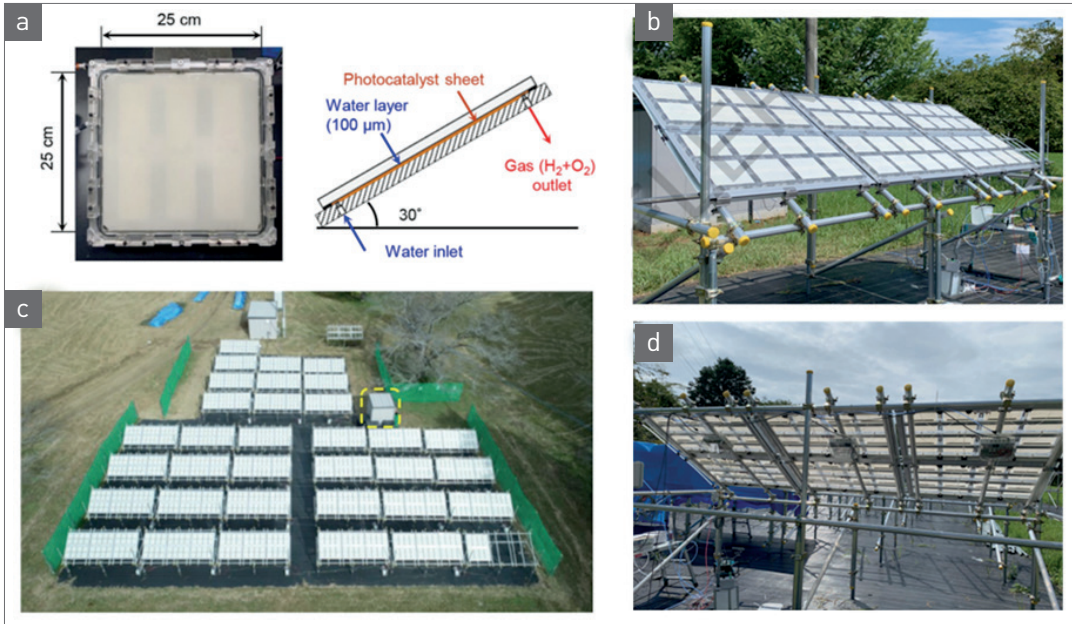


그림 8 ▶ 광촉매(PC)를 적용한 태양광-수소생산 발전소 영상: (a) 광촉매 분말이 코팅된 단위 셀 영상, (b-d) 100 m<sup>2</sup> 크기의 PC를 통한 수소생산 발전소 영상 [21].


간단히 살펴보았다. 점차 PEC의 실용화 기대가 커지면서 실험실규모에서 수행된 연구를 넘어 점차 규모를 키어 Prototype 형태의 모듈 연구개발이 보고되고 있다. 그림 7에서 볼 수 있듯이, 유럽의 여러 기관들이 협력을 통해 광전기화학전지기반의 태양광-수소생산 시스템 연구개발을 수행하였다. 예로, PECDEMO 프로젝트(그림 7(a))를 통해서  $5 \times 10 \text{ cm}^2$  규모의 대면적 BVO 광전극을 개발하고 후단에 실리콘 태양전지를 결합한 tandem 형태의 시스템을 구현하고 4개의 단위셀을 결합한 모듈의 실증 연구를 수행하였다 [19]. 또한 ArtipHyction 프로젝트에서는 앞선 연합그룹보다 큰  $8 \times 8 \text{ cm}^2$  크기의 단위 셀이 적용된, 1,600 cm<sup>2</sup> 규모의 모듈을 제작하여 실증 테스트를 실시하였다 [20]. 이 모듈의 경우 tandem 구조가

아닌 PEC와 PV가 나란히 결합한 Side-by-side 구조로 제작하였다. 소개한 두 모듈 모두 매우 낮은 STH 효율을 보고하고 있지만 실증 테스트로부터 앞으로 PEC 시스템의 실용화에 기대감을 높였다.

## 5. 맺음말

현 화석연료기반 에너지시스템을 청정에너지기반 시스템으로의 전환은 전 세계적으로 해결해야 할 숙제임에 틀림이 없다. 본문에서 살펴본 것처럼, 태양에너지를 활용하여 물로부터 수소를 생산하는 기술 중 PEC는 대단히 매력적이며 미래에 가장 전망 있는 기술이다. 특

히, PEC에 적용되는 BVO 광전극 소재는 근 20년 동안 비약적인 연구발전이 이루어졌으며 실험실규모에서 이미 소재의 최대 이론적 광전류 밀도 약 80~90%의 신뢰성 있는 성능을 확보한 연구결과가 보고되었다. 이러한 결과는 PEC가 실험실규모에서 실용화를 위한 대면적 연구개발로 한 계단 올라가는 계기를 마련하였다. 그림 8에서 보는바와 같이, 최근에 일본의 한 연구팀은 PEC는 아니지만 PC가 코팅된 대면적 막을 적용한 대규모 태양광-수소생산 실증단지를 설계 및 건립하고 이로부터 나온 연구 결과를 Nature 학술지에 보고하였다 [21]. 낮은 STH 효율 (약 0.4~0.5%)을 보고하고 있지만 PC를 이용한 태양광-수소생산 대규모 실증단지(100 m<sup>2</sup> 규모)를 실행한 것은 매우 괄목할 만하다. 게다가, 그림 8(b)에서 보듯이 도서산간 지역과 같이 장소에 구애를 받지 않고 설치가 용이함을 알 수 있다. 마찬가지로, PEC 시스템도 태양광이 있는 어느 곳이나 설치가 가능하기 때문에 에너지 공급이 다소 어려운 도서산간 지역에 소규모 분산형 시스템으로써 보급이 가능하다. 나아가 실용화 기술이 확립되면 화석연료기반의 수소생산 단가와 견줄 수 있을 만큼 경제성 확보도 충분할 것으로 판단된다. 한편, 국내 정책도 지속적으로 수소경제활성화로드맵(2019.01), 한국판 뉴딜(2020.07) 및 2050년 탄소중립 선언(2020.10) 등 일련의 정책안을 발표하고 있으며 다양한 수소관련 기술 특화사업을 추진하고 있다. 이에 맞춰, PEC 시스템 기술 실용화를 위한 전극의 고효율 확보, 내구성 확보, 원자재 경제성 확보, 및 양산공정 확

립 등 지속적인 노력을 한다면 태양광이 있는 어느 장소에서나 PEC 발전 단지를 쉽게 찾을 수 있는 시기가 곧 다가올 것으로 사료된다. 

- [1] BP, Statistical Review of World Energy, p.l.c, 1 St James's Square, London, SW1Y 4PD, UK, June 2016.
- [2] M. Z. Jacobson, M. A. Delucchi, Z. A. F. Bauer, S. C. Goodman, W. E. Chapman, M. A. Cameron, C. Bozonnat, L. Chobadi, H. A. Clonts, P. Enevoldsen, J. R. Erwin, S. N. Fobi, O. K. Goldstrom, E. M. Hennessy, J. Liu, J. Lo, C. B. Meyer, S. B. Morris, K. R. Moy, P. L. O'Neill, I. Petkov, S. Redfern, R. Schucker, M. A. Sontag, J. Wang, E. Weiner, and Al. S. Yachanin, *Joule*, 1, 108 (2017).
- [3] K. Maeda and K. Domen, *J. Phys. Chem. Lett.*, 1, 2655 (2010).
- [4] J. Li and N. Wu, *Catal. Sci. Technol.*, 5, 1360 (2015).
- [5] C. R. Cox, J. Z. Lee, D. G. Nocera, and T. Buonassisi, *Proc. Natl. Acad. Sci., USA*, 111, 10056 (2014).
- [6] J. H. Kim, D. Hansora, P. Sharma, J. W. Jang, and J. S. Lee, *Chem. Soc. Rev.*, 48, 1908 (2019).
- [7] A. Kudo, K. Ueda, H. Kato, and I. Mikami, *Catal. Lett.*, 53, 229 (1998).
- [8] Y. Park, K. J. McDonald, and K. S. Choi, *Chem. Soc. Rev.*, 42, 2321 (2013).
- [9] J. H. Kim and J. S. Lee, *Adv. Mater.*, 31, 1806938 (2019).
- [10] Q. Chen, G. Fan, H. Fu, Z. Li, and Z. Zou, *Adv. Phys.*, 3, 1487267 (2018).
- [11] X. Shi, I. Y. Choi, K. Zhang, J. Kwon, D. Y. Kim, J. K. Lee, S. H. Oh, J. K. Kim, and J. H. Park, *Nat. Commun.*, 5, 4775 (2014).
- [12] Y. Pihosh, I. Turkevych, K. Mawatari, J. Uemura, Y. Kazoe, S. Kosar, K. Makita, T. Sugaya, T. Matsui, D. Fujita, M. Tosa, M. Kondo, and T. Kitamori, *Sci. Rep.*, 5, 11141 (2015).
- [13] J. H. Kim, J. W. Jang, Y. H. Jo, F. F. Abdi, Y. H. Lee, R. v. d. Krol, and J. S. Lee, *Nat. Commun.*, 7, 13380 (2016).
- [14] X. Yao, D. Wang, X. Zhao, S. Ma, P. S. Bassi, G. Yang, W. Chen, Z. Chen, and T. Sritharan, *Energy Technol.*, 6, 100 (2017).
- [15] H. Lu, V. Andrei, K. J. Jenkinson, A. Regoutz, N. Li, C. E. Creissen, A. E. H. Wheatley, H. Hao, E. Reisner, D. S. Wright, and S. D. Pike, *Adv. Mater.*, 30, 1804033 (2018).
- [16] I. Y. Ahmet, Y. Ma, J. W. Jang, T. Henschel, B. Stannowski, T. Lopes, A. Vilanova, A. Mendes, F. F. Abdi, and R. v. d. Krol, *Sustainable Energy Fuels*, 3, 2366 (2019).
- [17] A. Qayum, M. Guo, J. Wei, S. Dong, X. Jiao, D. Chen, and T. Wang, *J. Mater. Chem. A*, 8, 10989 (2020).
- [18] M. Huang, W. Lei, M. Wang, S. Zhao, C. Li, M. Wang, and H. Zhu, *J. Mater. Chem. A*, 8, 3845 (2020).
- [19] PECDEMO project, <https://cordis.europa.eu/article/id/209834-innovative-system-turns-sunlight-into-fuel>
- [20] ArtipHyction project, [www.artipHyction.org](http://www.artipHyction.org).
- [21] H. Nishiyama, T. Yamada, M. Nakabayashi, Y. Maehara, M. Yamaguchi, Y. Kuromiya, Y. Nagatsuma, H. Tokudome, S. Akiyama, T. Watanabe, R. Narushima, S. Okunaka, N. Shibata, T. Takata, T. Hisatomi, and K. Domen, *Nature*, web-published, <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03907-3> (2021).

## 저/자/약/력

---



<b>성명</b>	김태우	
<b>학력</b>	2005년	건국대학교 응용화학과 이학사
	2011년	연세대학교 신소재공학과 박사
<b>경력</b>	2011년 ~ 2012년	이화여자대학교 화학·나노과학과 박사후연구원
	2012년 ~ 2015년	UW-Madison 화학과 박사후연구원
	2015년 ~ 현재	한국에너지기술연구원 책임연구원

---