

광전기화학전지를 이용한 수소 생산

민병권

1. 서론

지구상 존재하는 화석연료의 고갈에 대한 우려와 함께 최근 들어 지구 온난화로 인해 야기되고 있는 심각한 지구환경 문제에 대한 관심이 고조되고 있다. 이산화탄소로 대표되는 지구 온난화를 일으키는 공해물질의 많은 부분이 현재 주에너지원으로 사용되는 화석연료에 기인하기 때문에 이를 대체할 수 있는 청정에너지 개발은 이미 세계적 당면 과제라고 할 수 있다.

알려진 여러 청정에너지원 중 수소는 저장과 이동이 용이한 화학연료라는 점에서 화석연료를 대체할 수 있는 가장 유망한 에너지원이라고 할 수 있다. 또한 이상적인 수소 연소 과정에서 배출될 수 있는 부산물이 물 이외에는 없기 때문에 이산화탄소와 같은 공해물질의 대기 방출을 획기적으로 감축할 수 있다. 특히 수소는 연료전지의 연계를 통해 전기에너지로 쉽게 전환이 가능하기 때문에 다양한 용도로의 응용이 가능한 장점을 가지고 있다.

이러한 청정에너지원으로서 수소의 여러 가지 장점에도 불구하고 수소를 생산하는 방법에 있어 이산화탄소와 같은 공해물질의 발생이 수반된다면 수소 또한 화석연료를 대체할 친환경적 에너지원이라고 할 수 없을 것이다. 수소는 일반적으로 석탄과 같은 화석연료의 가스화로 부터 생산되며 또한 천연가스의 개질, 바이오메스 등으로부터도 얻을 수 있다. 하지만 이러한 생산 방법에는 이산화탄소의 발생이 동반되기 때문에 앞서 언급한 환경적 측면에서는 여전히 문제점을 지니고 있다. 이에 반해 수소 생산이 친환경적 무한에너지원인 태양광과 물을 원료로 가능한다면 환경적 측면에서 가장 이상적 에너지 생산 시스템이라고 할 수 있을 것이다.

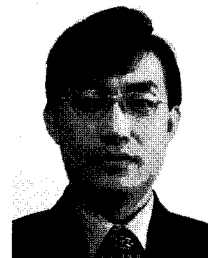
태양광을 에너지원으로, 물을 원료로 수소생산을 할 수 있는 방법은 크게 두 가지 종류로 나누어 볼 수 있다.¹ 첫째는 태양전지를 이용하여 전기를 생산한 후 물의 전기 분해를 통해 수소를 생산하는 방법 [PV(photovoltaics)+electrolysis]을 들 수 있다. 둘째로는 첫 번째 시스템에서 나뉘어져 있는 전기 생산 시스템과 물 분해 시스템을 합친 형태의 일체형 시스템을 이용한 직접 수소 생산 방법 [PEC(photoelectrochemical cells) 또는 photolysis]을 들 수 있다. 두 가지 방법 모두 반도체 물질을 사용하여 태양광을 흡수, 생성된 전자-정공 쌍을 이용해 물을 분해시켜 수소를 생성한다는 원리 면에서 큰 차이는 없으나 물 분해 반응이 광전극과 전해질 계면에서 일어나는지 여부에

따라 일반적으로 구분되고 있다. 즉 반도체 물질로 이루어진 광전극이 수용액과 직접적으로 계면을 형성하여 물 분해 수소 생산을 하는 시스템을 광전기화학전지(PEC)라고 일컫는다.

하지만 최근의 연구 동향을 보면 광전극이 직접 전해질과 계면을 이루지는 않지만 광전극 반대 면에 촉매막을 구성하여 전해질과의 계면을 이루게 한 형태의 일체형 시스템에 대한 연구가 많이 진행되고 있으며 이 또한 직접적으로 물 분해를 통한 수소 생산이 가능하다는 점에서 광의 광전기화학전지로 구분되고 있다. 본 기고에서는 광전기화학전지를 크게 담금형(immersion type)과 창문형(window type)으로 구분하여 소개하고자 한다.

2. 담금형 광전기화학전지

태양에너지는 적외선을 포함하는 열에너지, 가시광선 및 자외선의 빛 에너지로 구성되어 있다. 열에너지를 이용한 태양열 발전은 잘 알려져 있으나 지구에 도달하는 적외선 부분의 에너지는 태양에너지의 극히 일부분이라는 점과 열에너지는 에너지 중 방향성이 낮은 저급 에너지로 방향성을 가지는 고급 에너지인 전기에너지로 변환 시 일함수의 손해를 많이 보아야 한다는 점에서 자체 한계를 가지고 있다. 반면 물 분자의 분해와 이산화탄소의 고정을 통하여 탄수화물을 생산하는 자연계의 광합성과 최근 활발히 연구 개발되고 있는 빛을 이용한 전기발전 시스템인 태양전지는 가시광선영역의 빛에너지를 이용하는 부분으로 지상에 도달하는 태양에너지의 대부분의 영역을 이용할 수 있다는 면에서 미래 에너지 발전 방향으로 관심이 모아지고 있다. 태



민병권
 1996~ 고려대학교 화학과(석사)
 1998
 1989~ 고려대학교 화학과(학사)
 1996
 1999~ Texas A&M University 화학과(박사)
 2004
 2004 Tokyo University 화학과(방문연구원)
 2004~ Harvard University 화학과
 2006 (post-doctoral fellow)
 2006~ 한국과학기술연구원 청정에너지연구센터
 현재 (선임연구원)

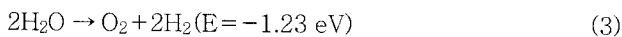
Hydrogen Production by Photoelectrochemical Cells

한국과학기술연구원 청정에너지연구센터(Byoung Koun Min, Clean Energy Research Center, Korea Institute of Science and Technology, 39-1 Hawolgok-dong, Seongbuk-gu, Seoul 136-791, Korea) e-mail: bkmin@kist.re.kr

양전지와 태양열 발전에 의해 생산된 전기에너지의 양은 일교차로 인하여 효과적인 이용을 위하여서는 축전시스템이 필요로 하게 되나 미래에 전력 대부분을 이러한 방향으로 저장하는 데에는 무리가 있다. 이러한 점에서 자연계의 광합성은 운송과 저장에 용이한 탄수화물이라는 화학에너지를 생산해 내는 시스템으로 인류가 개발해온 태양열 발전과 태양전지와 구분되는 우수한 에너지 전환 시스템이라 할 수 있다.

인류의 전기발전 시스템을 이용하여 물을 분해하여 화학에너지인 수소를 생산하는 기술들이 개발되고 있으나 여러 단계의 시스템을 거치는 동안의 많은 에너지의 손실이 발생한다. 이에 전기 전달 과정에서 발생하는 에너지 손실을 최소화하기 위하여 전력을 생산하지 않고 직접적으로 물을 분해하여 수소와 산소를 생산하는 시스템이 제안되었으며 이를 일반적으로 광전기화학적 수소 제조라 한다. 초기의 광전기화학전지는 광전극과 촉매막 역할을 동시에 할 수 있는 반도체 물질로 이루어진 산화 전극이 전해질에 담겨진 형태로서 전극과 전해질의 접촉에 의한 반도체 표면에서의 전위차를 발생시켜 띠 굽음(band bending) 현상을 유도하여 태양광 흡수로 인해 반도체 물질 내에 생산되는 전자-정공 쌍의 분리 현상을 이용한다. 이때 반도체 물질 내부와 외부 회로를 통해 환원 전극으로 전자가 이동하고 정공은 전해질에 포함된 OH⁻ 이온을 산화시켜 산소를 발생시키게 되며 환원 전극에서는 H⁺ 이온이 환원되어 수소가 발생하게 된다(그림 1).

물을 분해하여 수소와 산소로 변화하는 반응 식 (3)은 열역학적으로 Uphill 반응으로 양의 ΔG를 가지므로 에너지를 제공하여 주어야 만이 자발적으로 발생할 수 있다. 또한 반응은 열역학적인 자발성과 동시에 반응속도론적인 가능성을 충족시켜야 만이 진행될 수 있다.



식 (1)은 4개의 전자와 반응도중 삼중상태의 산소분자가 단일상태의 물분자와 결합을 통하여 생성되어야 하므로 반응 활성화 에너

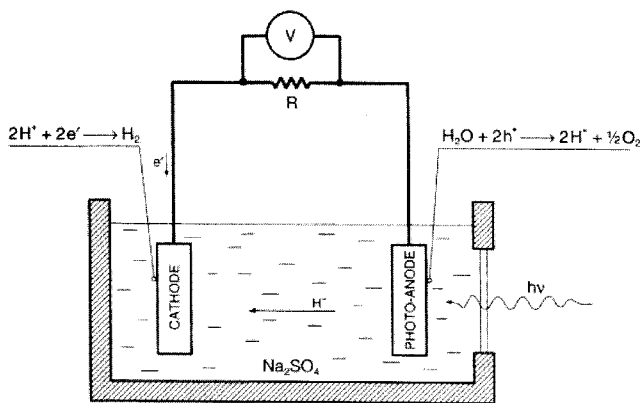


그림 1. 광전기화학전지의 개념도 [ref. Int. J. Hydrogen Energy, 27, 991 (2002)].

지가 매우 높은 반응이라 할 수 있다. 자연계에서는 식 (1)을 원활히 진행시키기 위해서 Photosystem II라 알려진 곳에 Mn로 구성된 생체 촉매 즉 효소를 이용하게 된다. 하지만 촉매 없이 일반적으로 금속 표면을 이용할 경우 약 0.6~0.8 eV의 과전압이 발생하는 것으로 알려져 있다. 이에 반해 식 (2)는 금속표면에서 과전압이 거의 발생하지 않는 단계이다. 따라서 식 (3)을 촉매 없이 진행시킬 경우 약 1.8~2.0 eV의 전압을 필요로 하게 된다.

일반적으로 광전기화학전지에서 빛을 흡수하는 물질로서 반도체 물질을 이용하게 되는데 이러한 무기고체화합물의 광화학적인 활성은 띠 이론 전자구조를 이용하여 이해할 수 있다. 고체를 구성하는 입자의 수가 무수히 많아질 경우 분자궤도 간의 에너지 차이는 무시할 만큼 작아져서 결국 연속덩어리인 에너지의 띠를 형성한다. 이러한 띠와 띠 사이에 전자가 점유할 수 없는 금지된 에너지 간격이 존재한다. 그림 2에서 보듯이 반도체의 에너지 띠구조에 의해 가득하게 점유된 가장 높은 에너지의 띠를 공유띠(valance band), 그리고 전자에 의해 채워지지 않은 가장 낮은 에너지의 띠를 전도띠(conduction band)라 한다. 공유띠와 전도띠의 에너지차를 띠간격 에너지(band gap), E_g라 하며 반도체에 빛이 조사될 경우 반도체의 E_g 이상의 에너지를 갖는 광자(photon)만이 흡수되어 공유띠에서 전도띠로 전자를 여기시킨다. 이때 공유띠에는 정공이 생성된다. 이때 그림 2의 오른쪽에 보인 바와 같이 환원반응이 일어나는 분자의 전위는 전도띠보다 양전위를 가져야 하며 산화반응이 일어나는 분자의 전위는 공유띠보다 음전위를 가져야 한다. 이렇게 물 분해와 수소생성 반응의 산화환원 전위가 띠 간격 내에 위치하여야 만이 열역학적 조건이 만족하게 된다.²

여러 반도체 물질의 공유띠와 전도띠의 간격을 그림 3에 나타내었다. 이중 과전압을 무시할 때 pH=0에서 물을 산화시켜 산소를 발생시키는 데 약 1.23 V와 수소를 환원시키는 데 약 0 V가 필요하다.

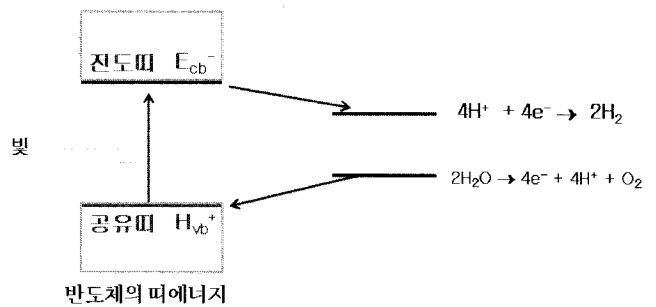


그림 2. 반도체의 에너지 띠구조와 반도체 계면에서 전자전이가 일어나기 위한 열역학적 조건.

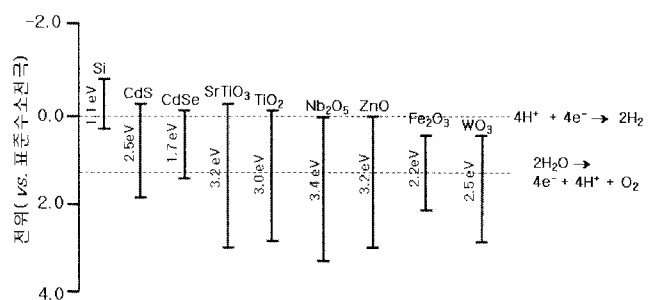


그림 3. 반도체의 띠간격 에너지 준위(pH=0).

따라서 CdS, CdSe, SrTiO₃, TiO₂ 등의 반도체가 활용될 수 있다. 그러나 TiO₂와 같이 E_g가 매우 큰 경우 자외선영역의 빛만을 물 분해를 위하여 사용하고 나머지 빛에너지의 대부분을 차지하는 부분을 사용하지 못하는 단점을 가지고 있다. 그러므로 TiO₂를 사용할 경우 태양광 스펙트럼의 약 5%만을 사용하여 수소를 발생하게 됨으로 광효율이 매우 낮은 것으로 알려져 있다.

앞서 언급했듯이 광전기화학전지를 이용하여 효율적으로 수소를 생산하기 위해서는 산화 전극에 사용된 반도체 물질이 물의 산화환원 에너지 준위를 포함해야 하며 동시에 태양광의 대부분을 차지하고 있는 가시광 영역의 에너지에서 전자-정공 쌍을 생성할 수 있어야 한다. 또한 산화 전극에 사용되는 물질은 광부식 뿐만 아니라 전해질에서도 안정성이 확보되어야 만 하고 물분해의 과전압을 낮출 수 있는 촉매적 특성을 동시에 가지고 있어야 한다. 하지만 실제로 이러한 특성을 모두 가지고 있는 반도체 물질은 극히 한정되어 있기 때문에 초기의 광전기화학전지 시스템으로는 대량의 수소 생산이 무척 어렵다고 할 수 있다.

담금형 형태의 광전기화학전지를 이용한 수소생산은 1972년 일본의 Honda와 Fujishima에 의해 최초로 구현되었다.³ 이들의 연구에서는 TiO₂ 전극을 이용하여 반도체와 전해질 사이에 형성되는 띠틈현상에 의한 전자-정공 쌍 분리를 이용하여 물 분해를 통해 수소를 생산하였다. 하지만 앞서도 언급했듯이 TiO₂ 자체는 띠틈격 에너지가 가시광 영역의 태양광을 흡수하기에 너무 크기 때문에 많은 연구들이 TiO₂ 물질에 다른 원소를 도핑(doping)하는 등의 방법을 이용해 보다 많은 가시광 영역의 빛을 이용할 수 있는 물질 개발에 집중되어 왔다. 예를 들면 Khan과 공동 연구자들은 탄소 원자를 TiO₂에 도핑한 물질을 합성하여 11%의 광전환 수소 생산 효율을 얻은 연구결과를 Science 지에 보고하였다.⁴ 이 밖에도 S, N 등의 음이온 원소를 도핑하는 방법, 금속 이온을 도핑하는 방법 등을 이용한 가시광 영역의 빛 흡수 증대를 통한 광전환 수소 생산 효율을 증가시키는 연구들이 보고되고 있다.

또 다른 형태의 담금형 광전기화학전지는 p/n 접합(junction)을 이루는 반도체 물질을 이용하는 것이다. 예로서 p/n 접합이 생성된 결정질 실리콘을 들 수 있으며 마치 실리콘 PV 소자를 전해질에 담금 형태라고 볼 수 있다. 하지만 이 경우 전해질 내에서 반도체 물질의 부식을 방지하기 위해 코팅 등의 방법을 통해 반도체 물질을 보호해 주어야 하는 과정이 필요하게 된다. 또한 실리콘 PV 소자의 경우 발생할 수 있는 전압이 0.55 V 이하이기 때문에 적어도 세 개 이상의 단위셀을 직렬 연결해야 물 분해에 필요한 전압을 얻을 수 있다.

한편, TiO₂ 표면 위에 띠틈격 에너지가 작은 화합물 반도체 물질을 나노 입자 형태로 형성하여 가시광 흡수를 증가시킬 수 있다. 특히 CdSe나 CdS와 같은 화합물 반도체는 물의 산화환원 에너지 준위가 이 반도체의 공유틈와 전도띠 에너지 준위 안에 위치하기 때문에 물 분해 반응에 효과적으로 응용될 수 있다. 하지만 이러한 반도체 물질은 빛에 대해 부식되는 성질이 있어 실제 응용상 문제점을 가지고 있다.

태양광을 흡수하는 물질로 유기물이 응용될 수 있다. 특히 태양전지 분야에서 염료감응 태양전지로 알려져 있는 유기 염료를 이용한 형태를 광전기화학전지에 응용할 수 있다. 이 경우 염료에 의해 흡수된 빛에 의해 전자-정공 쌍이 생성되며 전자는 TiO₂를 통해 환원전극으로 이동하게 되어 수소를 발생하게 된다. 하지만 유기물인 염료 자체가 전해질 내에 생성된 정공에 의해 산화될 수 있기 때문에 심각

한 안정성의 문제를 가지고 있다.

3. 창문형 광전기화학전지

앞서 소개한 담금형 광전기화학전지의 낮은 효율과 안정성 등의 문제점을 해결하여 수소의 보다 효율적, 대량 생산이 가능한 시스템을 구현하기 위해 창문형 광전기화학전지가 제안되었다. 이 시스템을 PV+electrolysis 시스템과 유사하다고 할 수 있으나 광전극이 촉매막과 일체형을 이루어 전선의 사용을 최소화 하여 효율의 손실을 줄일 수 있다는 점에서 차별성이 있다. 이러한 형태의 광전기화학전지 시스템의 가장 핵심 사항은 기존의 산화전극이 동시에 가져야만 하는 광전극과 촉매막의 역할을 분리시켜 광전극과 촉매막을 각각 구성한다는 데 있다. 특히 광전극의 경우 전해질 내에 위치시키지 않고 전해질 외부로 분리시켜 전해질에 의한 부식 문제를 해결할 수 있다. 또한 전해질 내에서 안정하면서 효율적 촉매 특성을 갖는 물질로 촉매막을 구성하여 수소 생산 효율과 안정성을 동시에 높일 수 있다. 또한 광전극에서 생성된 정공이 촉매막으로 이동하는 과정에서 예상되는 손실을 최소화하기 위해 광전극을 촉매막과 같은 기판위에 만들어 기판을 중심으로 광전극은 외부에 노출되고 촉매막은 전해질 쪽으로 노출되는 형태로 구성되어 있다. 이러한 형태의 광전기화학전지는 그림 4에서 보듯이 크게 4가지 구성 요소로 이루어져 있다. 구체적으로 광전기화학전지는 태양광을 흡수하여 전자-정공 쌍을 만드는 역할을 하는 광전극, 물분해의 과전압을 낮추는 역할을 하는 양전극, 음전극 촉매막, H⁺ 또는 OH⁻ 이온의 선택적 투과를 위한 분리막으로 구성된다.

광전극은 태양광으로부터 전기를 생성하는 태양전지와 원리면에서 많은 유사점이 있다. 특히 효율적으로 전자-정공 쌍을 만들어야 하며 생성된 전자-정공 쌍의 재결합이 일어나지 않도록 분리하는 것이 가장 핵심적인 요소 기술이라는 점에서 그렇다. 하지만 태양전지와 원리상, 소재상 유사성에 불구하고 구체적인 구현 형태나 목적은 크게 다르다고 할 수 있다. 먼저 최종 생성물의 경우 태양전지는 전기, 광전기화학전지는 수소를 생성한다는 점에서 근본적인 차이가 있다. 또한 태양전지의 경우 높은 광효율 즉 태양광으로부터 전기의 전환율을 높이는 것이 기술 개발의 목표이며 이를 위해서는 높은 전류 및 전

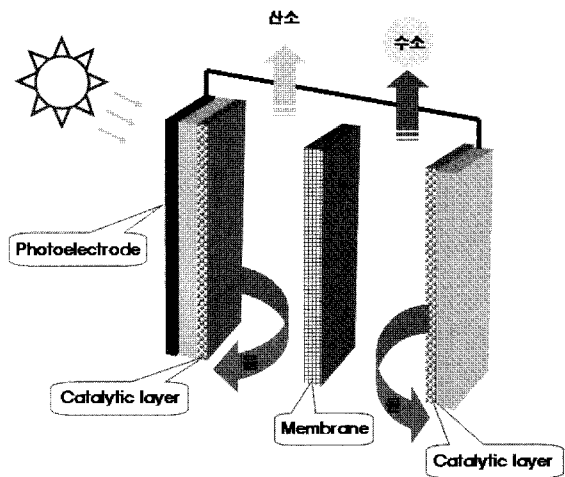


그림 4. 창문형 광전기화학전지 개념도.

압을 동시에 달성할 수 있는 방향으로 기술 개발이 이루어져야 한다. 이에 반해 광전기화학전지의 경우 발생 전압이 물 분해에 필요한 전압 (1.23 V)과 최소화된 과전압을 극복할 수 있는 추가 전압을 합한 정도이면 되며 더 높은 전압을 발생할 경우 오히려 효율을 떨어뜨리는 효과를 나타내게 된다. 즉 광전기화학전지에서는 최소의 필요 전압의 달성과 최대의 전류 생산을 할 수 있는 소자 제작이 연구 방향이라고 할 수 있다.

촉매막의 경우, 담금형 광전기화학전지에서는 광전극과 촉매막 두 가지 성질을 모두 가지는 반도체 물질이 산화전극에 이용되었다. 또한 환원전극의 경우 물에서의 안정성과 효율면에서 Pt 전극이 가장 뛰어나며 일반적으로 이용되어 왔다. 하지만 창문형 광전기화학전지에서는 산화전극이 광전극의 역할을 할 필요가 없기 때문에 광흡수 성질보다는 물에서의 안정성과 전도성 그리고 산소 발생 반응의 과전압을 최소화할 수 있는 촉매 활성이 우수한 물질을 선택해야 한다. 환원전극 촉매막의 경우 일반적으로 Pt가 이용되고 있다.

현재 문헌에 발표된 창문형 광전기화학전지에 이용되는 광전극은 크게 두 가지 형태로 나누어 볼 수 있다. 먼저 최근 Peharz와 공동 연구자들에 의해서 발표된 III-V족 물질을 이용한 광전극을 들 수

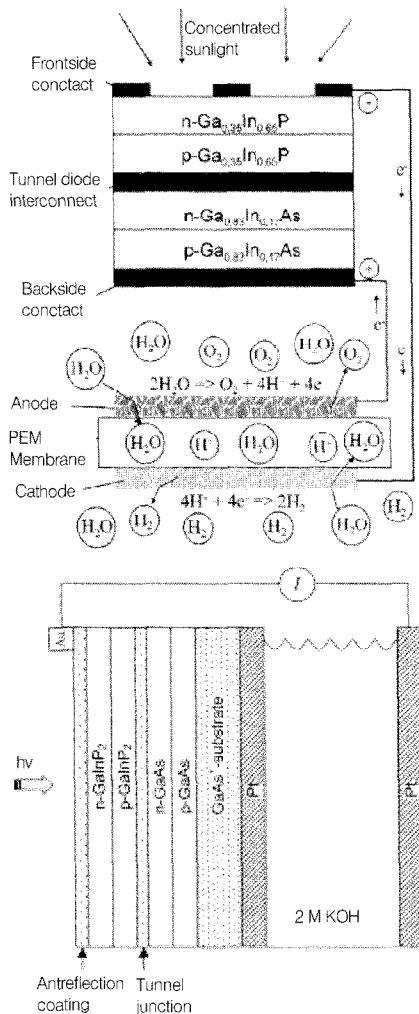


그림 5. III-V 족 물질을 이용한 substrate type 광전기화학전지 예(ref. [Int. J. Hydrogen Energy, **32**, 3248 (2007), Int. J. Hydrogen Energy, **26**, 127 (2001)]).

있다.⁵ 그림 5에서 보듯이 GaInP와 GaInAs 물질로 이루어진 박막의 tandem 구조를 이용해 광전극이 구성되어 있다. 특히 이 시스템의 경우 concentrator를 사용하여 18%의 광-수소 전환효율을 보고하고 있다. Turner와 공동 연구자들 또한 GaInP/GaAs 광전극을 이용하여 광전기화학전지를 구성하여 16%의 광-수소 전환효율을 보고하였다.⁶

III-V족 물질 대신 실리콘을 이용한 박막 형태의 광전극에 관한 연구도 보고되었다. 그림 6에서 보듯이 삼중접합(triple-junction) 실리콘 광전극을 이용한 광전기화학전지를 이용하여 7.8% 광-수소 전환효율이 보고되었다.⁶ 특히 2006년 DOE 보고에 의하면 실리콘 광전극을 이용하여 4 in×12 in 크기의 광전기화학전지를 구성하여 5.9 cc/min의 실제 수소 발생량을 측정하였고 이는 광-수소 전환효율 3.5% 정도에 해당하는 발생량이다.⁷ III-V족 물질과 실리콘을 동시에 사용한 tandem 구조의 광전극을 이용한 수소 생산도 Licht와 공동연구자들에 의해 제작되어 18.3%의 높은 광-수소 전환효율이 보고되었다.⁸

여러 형태의 창문형 광전기화학전지에 대한 연구들이 보고되고 있지만 태양전지에 비해 구현할 수 있는 형태가 다양하지는 못하다. 가장 큰 이유로서는 태양전지와는 달리 2 V에 가까운 광전압을 발생할 수 있는 광전극을 구현해야 하기 때문이다. 이를 위해 대부분의 보고된 광전극은 tandem 형태로 이루어져 있고 또한 박막 형태로 구현되고 있다.

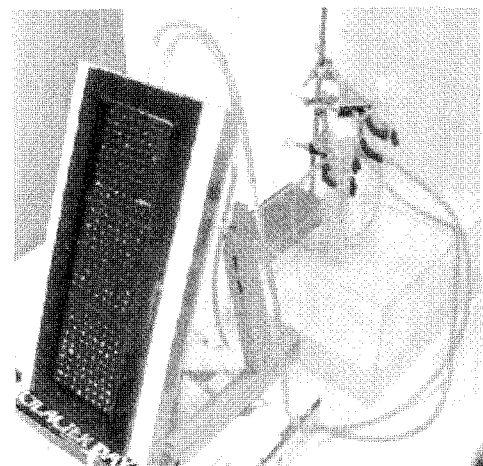
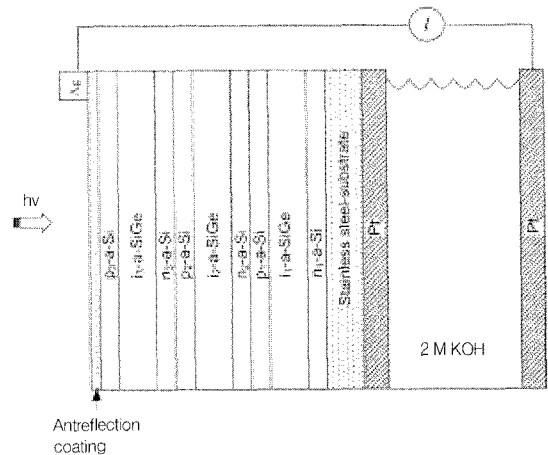


그림 6. 실리콘 광전극을 이용한 광전기화학전지의 예(ref. [Int. J. Hydrogen Energy, **26**, 127 (2001), FY 2006 Annual DOE Progress Reports]).

4. 광전기화학전지의 효율

앞서 언급된 광-수소 전환효율은 많은 경우 광전극으로부터 발생된 모든 전류가 물 분해 수소 발생에 사용되었다는 가정하에 광전극의 광전류를 측정해 예측된 값이다. 그러므로 실제 수소 발생 효율은 언급된 값보다 적을 가능성이 있다. 광전기화학전지의 효율을 계산하는 방법은 각 시스템의 종류에 따라 여러 가지가 알려져 있다.⁹ 가장 명확한 효율 계산 방법은 실제 수소 발생량을 측정함으로써 얼마만큼의 광에너지가 수소로 전환되었는지를 계산하는 것이라고 할 수 있다. 즉 사용된 광에너지의 크기 대비 생산된 수소량을 비교하는 것으로 다음과 같은 식 (4)에 의해 계산될 수 있다.

$$\mu_{STH} = \Delta G(H_2O) \times R(H_2) / P_m \times A \quad (4)$$

여기서 $\Delta G(H_2O)$ 는 standard free enthalpy(237.141 kJ/mol), $R(H_2)$ 은 수소 발생 속도(hydrogen production rate, L/hour), P_m 은 광원의 세기(input power, W/m²), A 는 조사 면적(irradiated area, m²)을 의미한다.

하지만 많은 실험실 규모의 연구에서는 실제 발생하는 수소의 양이 극히 미미하기 때문에 수소의 발생량을 측정하기가 용이하지 않다. 이에 광전극에서 발생된 전류가 100% 모두 수소 생산에 사용된다는 가정하에 식 (5)를 이용하여 광-수소 전환효율을 계산하기도 한다.

$$\mu_{STH} = 100\% \times J_{PV} \times 1.23 \text{ V} / P_m \quad (5)$$

여기서 J_{PV} , P_m 는 각각 광전극의 광전류 밀도와 광원의 세기(input power)를 의미한다.

하지만 식 (5)의 적용에 사용된 가정이 항상 유효한 것은 아니며 광전극 또는 촉매막의 물질에 의존하기 때문에 실제 광-수소 전환효율은 식 (5)에 의해 계산된 효율보다 낮을 수 있다. 예를 들면 실제로 실리콘 박막 광전극을 이용한 경우 광전류로부터 계산된 효율은 7% 이상이지만 실제 수소 발생량을 측정하여 계산된 값은 3.5%로 50% 이상의 효율 손실이 발생하게 된다.

5. 광전기화학적 수소 생산의 전망

가장 이상적인 광전기화학전지의 형태는 효율의 손실을 최소화할

수 있는 담금형이라고 할 수 있다. 하지만 앞서도 언급했듯이 소재의 선택에 한계가 있고 또한 수소 발생 효율이나 안정성 면에서 아직은 상용화 단계까지 많은 연구가 필요한 분야라고 할 수 있다. 이에 비해 창문형 광전기화학전지는 태양전지 기술의 발전과 함께 동반 성장할 수 있기 때문에 보다 빠른 기간 안에 상용화가 가능한 분야라고 할 수 있다.

하지만 상용화에 근접하기 위해서는 광-수소 전환효율이 적어도 15% 이상이 되어야 하기 때문에 이 분야 역시 아직은 많은 연구가 필요하다 할 수 있다. 특히 현재까지는 III-V 반도체 물질 또는 실리콘으로 이루어진 박막 광전극에 관한 연구가 대부분을 차지하고 있으나 이들 소재는 고가라는 문제점을 가지고 있다. 그러므로 저가의 소재를 이용한 고효율 광전극의 제조는 광화학전지의 상용화를 위해 반드시 풀어야 할 숙제이다. 한편 태양광은 무한하다고 할 수 있으나 경우에 따라 물 특히 담수는 부족 자원이 될 수도 있기 때문에 담수 보다는 해수를 이용한 광전기화학적 수소 생산 기술의 개발이 보다 바람직한 방향이라고 할 수 있다.

광전기화학전지는 비단 수소 생산뿐만 아니라 궁극적으로 생태계의 광합성을 모사하여 물과 이산화탄소를 원료로 해서 알코올 등을 생산하는 시스템에 응용될 수 있다. 이러한 이상적 시스템이 구현된다면 전 세계가 현재 안고 있는 에너지, 환경 문제를 해결하는데 큰 기여를 할 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

1. J. A. Turner, *Science*, **285**, 687 (1999).
2. T. Bak, J. Nowotny, M. Rekas, and C. C. Sorrel, *Int. J. Hydrogen Energy*, **27**, 19 (2002).
3. A. Fujishima and K. Honda, *Nature*, **238**, 37 (1972).
4. S. U. M. Khan, M. Al-Shahry, and W. B. Ingler Jr., *Science*, **297**, 2243 (2002).
5. G. Peharz, F. Dimroth, and U. Wittstadt, *Int. J. Hydrogen Energy*, **32**, 3248 (2007).
6. O. Khaselev, A. Bansal, and J. A. Turner, *Int. J. Hydrogen Energy*, **26**, 127 (2001).
7. L. Xu, *FY2006 Annual DOE Progress Reports*.
8. S. Licht, B. Wang, S. Mukerji, T. Soga, M. Umeno, and H. Tributsch, *J. Phys. Chem. B*, **104**, 8920 (2000).
9. B. Parkinson, *Acc. Chem. Res.*, **17**, 431 (1984).