

광전기화학전지를 이용한 수소 생산 / (1) 원리와 장치

윤송학 (Institute for Materials Science, University of Stuttgart)

먼저 이 글은 본인이 2016 년에 작성하여 한국과학기술단체총연합회(KOFST)에 제출한 해외과학기술분야 기술 트렌드 보고서에서 발췌, 부분 수정하였음을 알려드립니다.

들어가며

2015 년 유엔 기후 변화 회의 (2015 United Nations Climate Change Conference, COP21)를 기억하십니까 ? 2015 년 11 월 30 일 부터 12 월 12 일까지 세계 190 개국 이상의 나라에서, 각 나라를 대표하는 정부 관계자들이 프랑스 파리에 모여, 지구온난화를 늦추고 이산화탄소 배출을 줄이기 위한 국제회의를 진행하였습니다. 향후 지구 표면의 평균 온도 상승을 2 도 이하로 낮추려는 노력을 담은 이 기후협정이 체결된 것은 석유 시대를 살아가는 현재의 우리가 미래를 대비하는 중요한 결정이라고 개인적으로 생각합니다. 그래서 파리기후협약의 체결은 1997 년 12 월 11 일 일본 교토에서 채택된 교토의정서에 버금가는, 혹은 그 이상의 파급효과를 기대할 수 있는 역사적으로 매우 의미있는 결과로 평가되고 있기도 하지요. 사실 지구온난화 문제는 환경운동가들이 퍼뜨린 허구에 불과하다고 믿는 사람들도 있고, 이상 기후로 고생하는 지금 이 순간에도 대부분의 사람들은 사태의 심각성을 깨닫지 못하고 있는게 사실입니다. 그러나 이미 오래전부터 많은 전문가들이 지구온난화 문제의 심각성을 경고해 오고 있으며, 불행히도 그 예견은 현실로 진행되는 추세입니다. (그림 1) 예를 들어, 2015 년은 1880 년 기상 관측 이래 가장 더웠던 해라고 미국 국립해양대기청 (NOAA) 및 미 항공우주국 (NASA)이 발표한 것은 지구온난화가 현재 진행형임을 알려줍니다.



그림 1. I don't believe in global warming [1]

주지하다시피 지구온난화의 주범 중 하나는 이산화탄소이고, 우리는 현재 너무 많은 양의 이산화탄소를 대기중으로 내보내고 있습니다. 왜 우리는 이산화탄소를 배출하는가? 그 답은 간단합니다. 이산화탄소는 주로 화석연료를 사용함으로써 배출되며, 현재 인류는 화석연료에 지나치게 의존하고 있기 때문입니다. 인류가 사용하는 에너지의 공급량은 그림 2 에서와 같이 점점 증가하고 있습니다. 해가 지나 갈수록, 인류가 필요로 하는 에너지의 수요가 증가할 것은 명약관화(明若觀火) 한 것이고, 간단히 말해서는 하루하루의 우리의 일상 생활이 더욱 많은 에너지를 사용하는 쪽으로 진행되고 있다는 것이다. 그러므로, 화석연료에 의존하는 지금의 에너지 공급 시스템을 바꾸지 않는한 이산화탄소의 배출을 더 줄일 수는 없으며, 결과적으로 지구 온난화를 늦추기는 어려운 현실을 직시해야 합니다. 국제에너지기구(IEA) 보고서에 따르면, 2012 년 기준으로 한국은 세계에서 일곱번째로 많은 탄소를 배출하고 있고, 세계 1 인당 평균 배출량 4.5t 에 비하면 2 배를 훨씬 넘는다고 합니다.

Total Primary Energy Supply by resource 1993, 2011 and 2020

Source: WEC Survey of Energy Resources 1995, World Energy Resources 2013 and WEC World Energy Scenarios to 2050

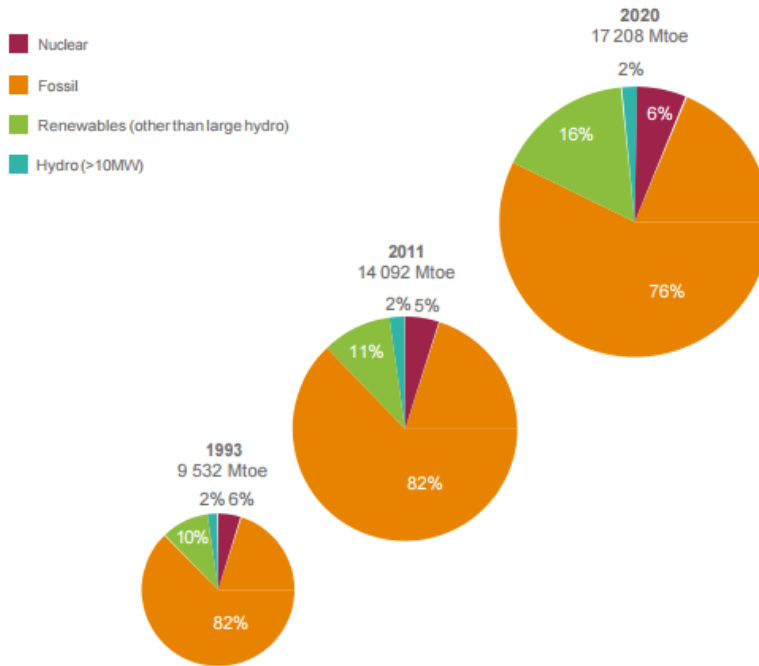


그림 2. 세계 총에너지의 공급량 변화 추이 [2]

그동안 화석 연료를 대체하기 위한 다양한 방법들이 모색되어 왔으며, 현재는 원자력을 이용한 핵연료 사용이 일반화 되었다. 원자력발전은 값싼 에너지 (이에 대해, 환경보호단체 그린피스 등은 핵연료 처리비용, 원전해체 철거비용, 사고 시 피해보상금 등이 포함되어 있지 않아, 실제로는 값싸지 않다는 주장도 있습니다)로 온실가스 배출을 현저히 낮추는 훌륭한 에너지 대체 자원입니다만, 태생적으로 원자력 발전은 핵폐기물을 처리, 처분하는 것에 잠재적 위험성이 도사리고 있는 것이 가장 큰 문제입니다. 주지하다시피 1986 년 4 월 우크라이나에서 일어난 체르노빌 원자력 발전소 사고나 2011 년 3 월 일본 후쿠시마에서 일어난 원자력 발전소 사고는, 방사능 오염이 현 인류에 얼마나 큰 재앙이 될 수 있는지를 극명하게 보여주었습니다. (그림 3) 이미 후쿠시마 원전 사고 발생 후 독일에서는 2022 년까지 17 개의 원자력 발전소 모두를 전면 폐쇄하기로 결정을 내렸으며, 결론적으로 에너지 공급의 상당 부분을 차지하던 핵 연료에 대한 대안으로 친환경 신기술을 이용한 신재생에너지에 대한 관심이 더 높아질 것으로 기대가 됩니다.



그림 3. 2011 년 후쿠시마 원전 사고 당시 모습 [3]

다시말해, 신재생에너지를 개발하고, 이용하고자 하는 것은 당연한 시대의 요구라 할 수 있으며, 이를 위해 전세계 여러국가들이 다양한 접근법들을 시도하고 있습니다. 대표적인 신재생에너지 분야는 수력, 풍력, 태양광, 태양열, 지열, 바이오, 폐기물, 해양등이 있으며, 신재생에너지 가운데 광전기화학전지는 다른 신재생에너지 기술과 비교하여, 태양광 에너지를 수소 에너지로 직접 변환 할 수 있는 큰 장점이 있는 기술입니다. 본 칼럼에서는 광전기화학전지를 이용하여 어떻게 수소를 생산하는지 그 원리와 장치에 대해 알아보겠습니다.물리와 화학에 대한 사전 지식이 없이는 많은 부분 원리를 이해하기는 어려울 거 같습니다만,최대한 비전공자들이 알기 쉽게 설명하고자 하였습니다.



그림 4. 태양광을 이용하는 것, 미래를 위한 것 (photo source: Empa, Switzerland)

광전기화학전지 원리 (General principle of PEC)

광전기화학전지는 아래 그림에서와 같이 기본적으로 3 개의 부분으로 나뉘는데, 광양극 (photoanode), 광음극 (photocathode) 그리고 전해질 (electrolyte) 입니다. 여기서는 태양광이 광양극에 입사되는 경우를 예로 들고자 합니다만, 광음극에 입사되는 경우도 생각해 볼 수 있습니다. 태양광이 광양극에 입사하면, 충분한 태양광에너지를 가진 광자 (광양극의 띠간격 에너지 이상의 에너지를 가지는 광자)는 광양극에 흡수되어, 전자와 정공의 쌍 (electron-hole pair)이 형성되며, 이 전자와 정공의 쌍들은 광양극과 전해질계면에서의 휘는 띠 굽음 (band bending)에 의해서 분리됩니다. 대부분의 경우, 외부 바이어스 (external bias)가 제공되므로 휘는 띠 굽음은 더 심해지게 되고, 전자와 정공의 분리는 더 용이해 집니다. 분리된 전자는 외부 회로를 통해 유용한 일을 하게 되고, 반대쪽 광음극에 도달하여, 광음극-전해질 계면에서 물을 환원시켜 수소를 발생시킵니다. 한편, 광양극에 남아 있는 정공은 광양극-전해질 계면에서 물을 산화시켜 산소를 발생시킵니다. 간단히 말해서, 광전기화학전지를 이용하면 물을 분해해서 수소와 산소를 만들 수 있습니다. 그것도 물리적으로 구별된 공간에서 말이죠. 그래서 순수한 수소만을 포집할 수 있다는 분명한 장점이 있는 기술입니다.

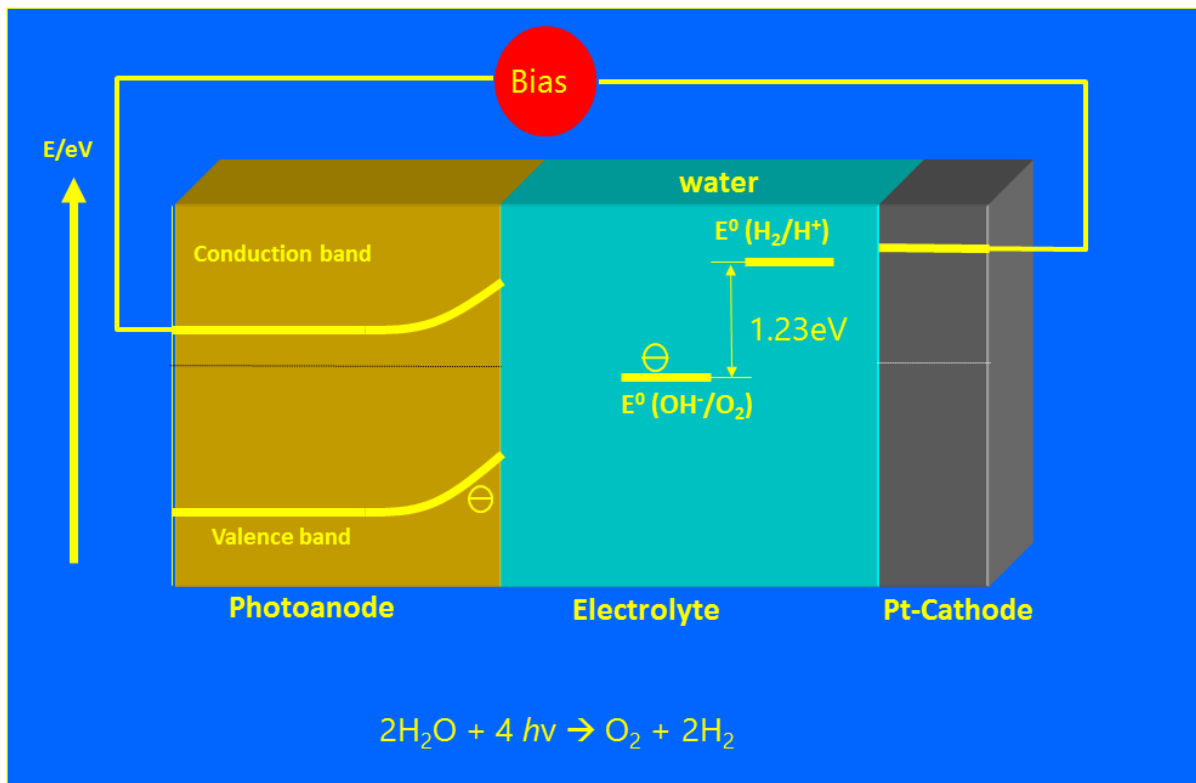


그림 5. 광전기화학전지를 이용한 물 분해 (source: NanoPEC) [4]

광전기화학전지 장비 (PEC equipment for measurement)

아래 그림 6 은 카푸치노 셀이라는 고유 명사를 가진 광전기화학셀 (PEC cell) 을 이용하여 광전기화학전지특성을 평가하는 장치를 예로 보여주고 있습니다. 광전기화학전지 장비는 크게 solar simulator, PEC cell 그리고 photentiostat 의 3 부분으로 이루어 집니다.

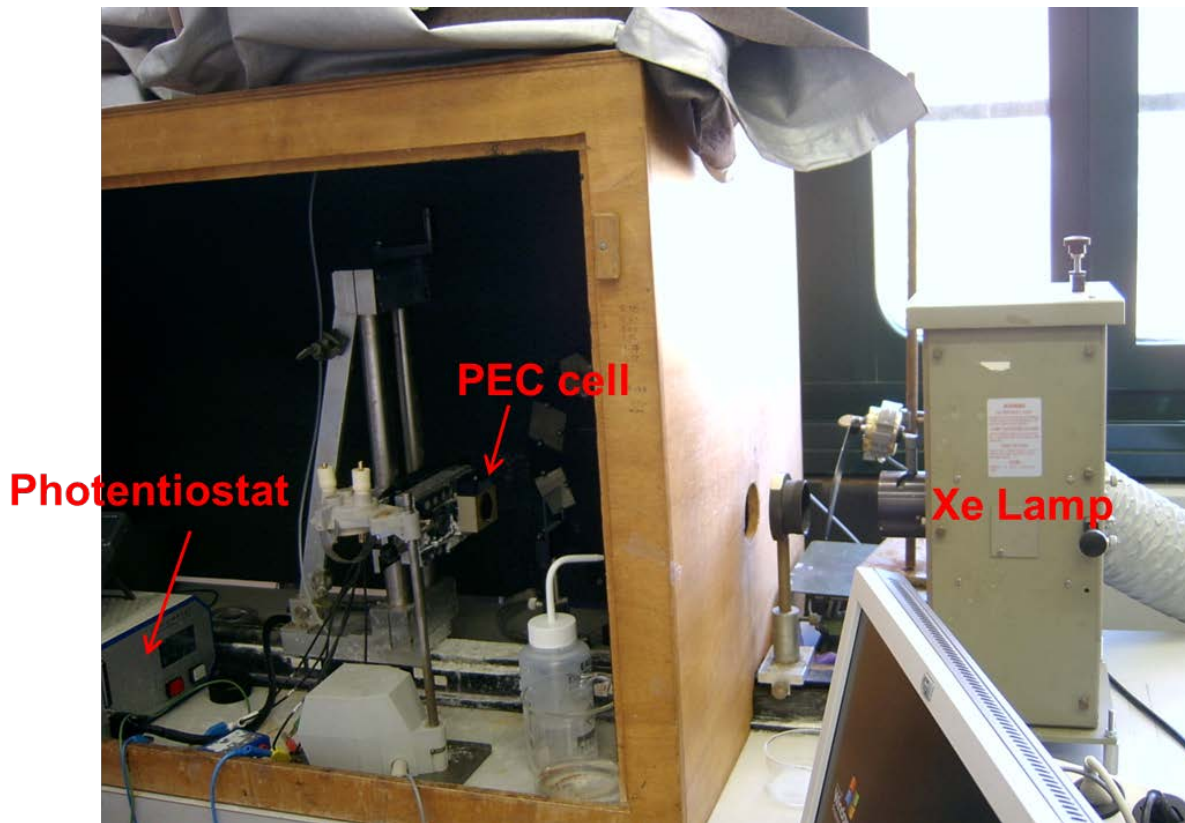


그림 6. 광전기화학전지 장비의 예

광전기화학전지를 연구하는 전세계의 많은 실험실에서 제 각각 다양한 종류의 전지가 디자인되고, 개발되어 사용되고 있습니다. 카푸치노 셀은 빠른 시간 안에 작은 크기의 샘플을 측정하는데 있어 장점이 많습니다. 자세한 카푸치노 셀 특징은 참고 문헌 [5]을 참조하기 바라며, 그 외 다른 종류의 셀에 관심이 있는 연구자들은 참고문헌 목록에 인용된 두 권의 책에 나온 내용을 참조하면 좋겠습니다. [6,7]

지난 수십 년 동안, 광전기화학전지 연구 분야에서 현저한 기술의 진보발전이 있어왔다고 할 수 있습니다만, 그 발전들은 대부분 소위 말하는 큰 실험실에서 나왔습니다. 수많은 혁신적 아이디어가 실제로 실현되고, 다른 연구자들에 의해 재현되었음에도 불구하고, 이러한 연구결과들이 실생활에 적용하는데는 아직까지 많은 어려움을 안고 있는게 현실입니다. 아래 그림 7 에서와 같이, 실리콘 태양전지는 이미 우리의 실생활 곳곳에 적용되어 사용되고 있고, 염료감응형 태양전지 (DSSC, dye-sensitized solar

cell)는 실제로 유리 외관에 적용되어 사용되고 있습니다만, 광전기화학전지의 경우 대부분의 실험실에서 1 cm^2 이하의 동전보다 작은 크기의 영역에 빛을 비추어 그 특성을 평가하는 수준에 그치고 있습니다.

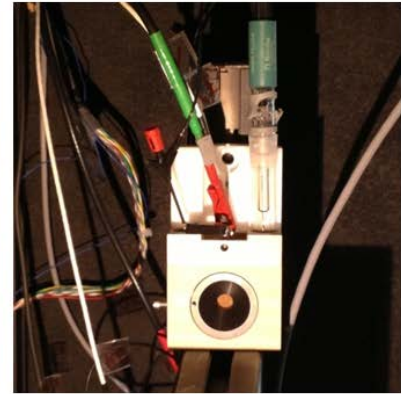
몇몇 연구자들은 그림 8에서와 같이 아웃도어 테스트 디바이스를 만들어, 실제 태양광이 비치는 조건에서 물분해를 통해 수소를 획득하는 실험을 진행하고 있으며, 그 효율이 다른 태양전지와 비교하여 미미하더라도, 계속해서 이런 시도를 할 수밖에 없는 것이 과학자의宿命이라 생각합니다. 시행 착오를 통해, 광전기화학전지의 각 요소를 최적화하는 연구와는 별도로, 실제 상황에서의 광전기화학전지 시스템의 엔지니어링 측면에서의 문제를 파악하고, 이를 해결하는데 중점을 두는 것도 쉽게 간과할 수 없는 연구의 한 축이 되어야 한다고 생각합니다.



Commercial PV Systems



DSSC from EPFL



In House Test Setup at Empa



그림 7. 실리콘 태양전지, 염료감응형 태양전지, 광전기화학전지의 비교

나오며

사우디아라비아의 석유 장관을 역임했던 셰이크 자키 야마니는 30 여년 전에 이런 말을 하였습니다. “석기 시대는 돌이 부족해서 끝난 것이 아니다. 마찬가지로 석유 시대도 세상에 석유가 고갈되기 훨씬 전에 끝날 것이다.” (“The Stone Age did not end for lack of stone, and the Oil Age will end long before the world runs out of oil.” – Sheikh Zaki Yamani –) 헤안이 담긴 이 경구는 30 년이 지난 지금도 우리에게 시사하는 바가 크다고 생각합니다.

이상으로 기후 변화에 대처하기 위한 방법으로, 태양광을 이용하는 신재생에너지 연구 분야, 특히 광전기화학전지 분야에서의 원리와 장치에 대해 알아보았습니다. 다음 글에서는 대표적인 광양극 재료들과 디바이스에 대한 보다 자세한 최신 연구 결과와 본 연구자가 생각하는 광전기화학전지 분야에서 가장 중요한 이슈에 대해서 다루어 보겠습니다.



그림 8. 광전기화학전지 아웃도어 테스트 디바이스(photo source: Empa, Switzerland)

References

- [1] <http://www.cop21.gouv.fr/en/learn/10-photos-of-a-changing-world/>
- [2] <http://www.worldenergy.org/work-programme/>
- [3] https://en.wikipedia.org/wiki/Fukushima_Daiichi_nuclear_disaster
- [4] <http://nanopec.epfl.ch>
- [5] Int. J. Hydrogen Energ. 35 (2010) 11601–11608
- [6] Photoelectrochemical hydrogen production, eds. Roel van de Krol and Michael Graätzel, 2012, New York, Springer
- [7] Photoelectrochemical Water Splitting, eds. Zhebo Chen, Huyen N. Dinh, Eric Miller, 2013, New York, Springer