

염료태양전지 최신기술 동향

한치환 <한국에너지기술연구원 미래원천기술연구본부 선임연구원>

1 서론

인류의 발전과정은 인류가 사용한 에너지에 의해서 구분될 수 있다. 그림 1은 에너지 사용에 따른 인류의 발전 과정을 나타낸다. 증기기관 및 내연기관의 개발에 따른 화석에너지의 사용은 인류의 전반적인 생활 수준을 크게 향상시켰지만, 원유공급 차질에 의한 유가 급등과, 이산화탄소 배출에 따른 지구 온난화 현상에 의하여 차세대 친환경 에너지인 수소에너지에 대한 관심이 급증하고 있다. 수소에너지는 풍부하고, 재생이 가능하며, 환경 친화적이고, 현재의 연소엔진 뿐만 아니라 미래의 연료전지의 에너지원으로 사용될 수 있다 [1-4].

하지만 수소에너지는 여전히 석유에너지에 비해서 제조비용이 비싸기 때문에 널리 활용되지 못하고 있는 실정이며, 수소에너지의 제조비용을 낮추고 친환경적으로 재생하기 위해서는 신재생에너지의 개발이 필수적이다. 대표적인 신재생에너지는 태양광, 태양열, 풍력, 바이오, 폐기물, 지열, 수력, 해양에너지 등이다. 그중 태양광에너지는 태양으로부터 제공되는 빛에너지를 의미하며, 일 년에 태양으로부터 지구에 제공 되는 에너지는 3×10^{24} [J]로 현재 지구 전체의 에너지 소비량의 10,000배에 해당한다. 계산상으로 0.1(%)의 지구 표면을 10(%) 효율의 태양전지로 덮을 경우 현재의 에너지 소비를 충족시킬 수

있는 엄청난 양이다. 따라서 태양광 에너지의 효율적 이용을 위한 태양전지의 개발은 현재의 에너지난과 환경문제를 동시에 해결할 수 있는 매우 중요한 기술이다[5].

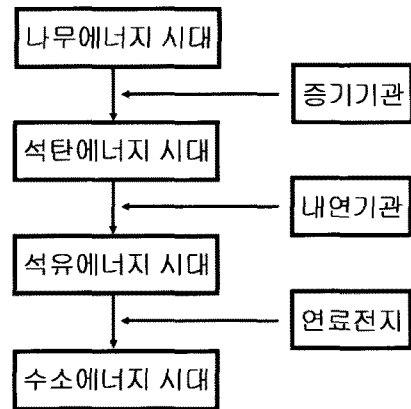


그림 1. 에너지 사용에 따른 인류의 발전과정

2. 태양전지의 종류

태양전지의 종류를 구분하는 방법에는 두 가지가 있다. 하나는 태양전지의 구성물질에 의한 구분이다. 태양전지를 구성물질에 의해 구분하면 크게 실리콘 태양전지, 화합물 태양전지, 유기 및 무유기 혼합 태양전지로 구분된다[6]. 태양전지의 구성물질에 따른 종류를 그림 2에 나타내었다.

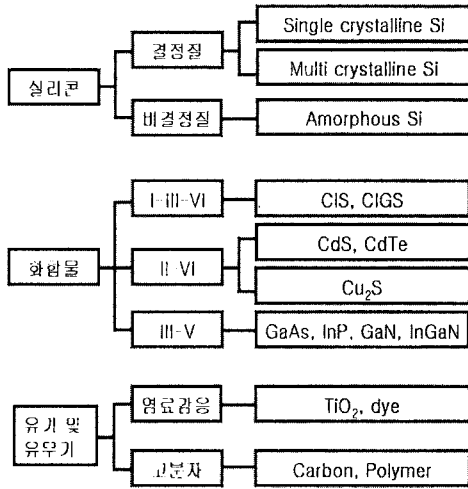
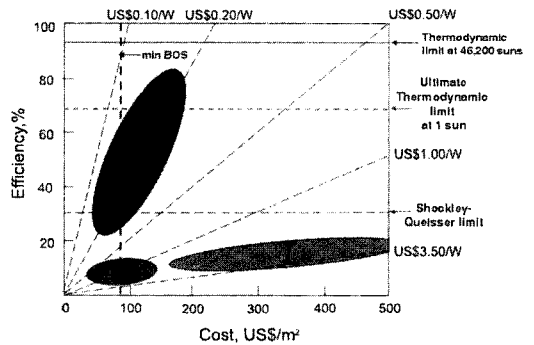


그림 2. 물질별 태양전지 분류

다른 하나는 태양전지 성능의 세대별 구분이다. 그림 3에 세대별 태양전지의 효율 및 생산단가를 나타내었다(7). 1세대 태양전지는 벌크형 태양전지로 발전효율이 좋지만 발전 비용이 비싼 단점이 있다. 2세대 태양전지는 박막형 태양전지로 유리나 유연성이 있는 기판에 태양전지 물질을 박막으로 증착하여 제조하기 때문에 원재료가 적게 들어가 태양전지 제조 비용이 낮은 장점이 있지만 1세대 태양전지에 비해서 발전효율이 낮은 단점이 있다. 3세대 태양전지는 아직까지 상용화가 되지 않은 태양전지로 발전 비용이 낮으면서 높은 모듈 효율을 갖는 차세대 태양전지로 구분된다.

태양전지 종류별 국내의 기술개발 현황은 태양광 사업단 홈페이지에 잘 정리되어 있다(8). 실리콘 기판은 동양제철화학 및 KCC와 같은 기업에서 기술개발 중이거나 개발 완료 후 시판 중이며, 결정질 실리콘 태양전지는 현대중공업에서 양산 중에 있다. 그림 4에 실리콘 태양전지의 구조를 나타내었다. 기본적으로 반도체의 p-n 접합 구조를 가지는 실리콘 태양전지는 높은 효율을 가지고 있지만 고가의 장비와 고비용 제조공정을 사용하고 있어 가격이 높은 단점을 가

진다. 최근에는 초박막 실리콘 웨이퍼를 이용한 플렉시블 단결정 실리콘 태양전지도 개발되었다(9). 그림 5에 플렉시블 단결정 실리콘 태양전지를 나타내었다. 국내에서의 실리콘 및 화합물 박막형 태양전지 기술은 한국과학기술원(KAIST) 및 에너지기술연구원(KIER)에서 연구개발을 진행하여 최근 LG 마이크로론에서 양산화 기술 개발에 착수 하였다.



For PV or PEC to provide the full level of C-free energy required for electricity and fuel—solar power cost needs to be ~2 cents/kWh (\$0.40/W_p).

그림 3. 태양전지 세대별 발전비용 및 모듈 효율

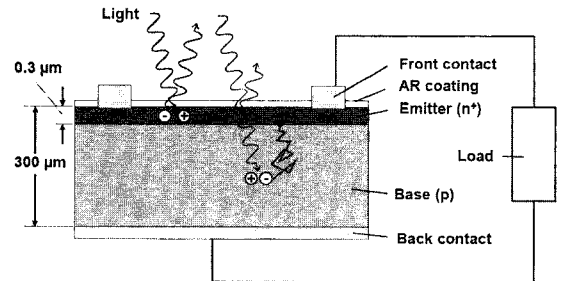


그림 4. 실리콘 태양전지의 구조

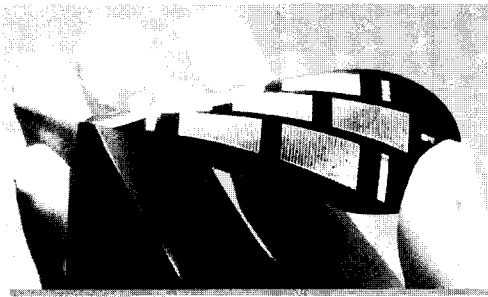
2세대 태양전지로 분류되기도 하고, 3세대 태양전지로 분류되기도 하는 염료감응형 태양전지 및 유기 박막태양전지는 아직까지 국내에서 양산화에 성공하지는 못했지만 전자통신연구원, 과학기술원, 에너지기술연구원, 전기연구원, 화학연구원 등의 정부출연 연구기관 및 여러 대학에서 활발히 연구개발이 진행

되고 있으며, 조만간 양산화가 가능할 것으로 예측되고 있다. n-형 고분자와 p-형 탄소화합물을 이용하는 유기태양전지 분야에서는 작년에 광주과학기술원에서 미국 산타바바라 소재 캘리포니아주립대학(UCSB)과의 공동연구로 고분자 유기물을 이용한 플라스틱 태양전지에 탠덤구조를 적용하여 유기물 태양전지로는 세계 최고 효율인 6.5[%]를 달성하여 사이언스지에 게재하기도 하였다. 그림 6에 유기태양전지의 구조를 나타내었다. 염료감응형 태양전지 및 유기태양전지가 차세대 태양전지로 각광받는 이유는 스크린 프린팅 법과 같은 매우 단순한 공정에 의해서 태양전지 제조가 가능하기 때문에 제조단가를 크게 낮출 수 있을 것으로 예측되기 때문이다.

3. 염료감응형 태양전지

나뭇잎과 같이 큰 표면적과 넓은 영역의 가시광을 흡수하는 염료를 이용한 염료감응형 태양전지는 반투명한 유리형태의 제조가 가능하고, 제조공정이 매우 단순하며, 제조비용이 낮은 장점을 가지고 있어 많은 관심이 집중되고 있는 기술이다. 최근 고유가가 지속되고 실리콘 태양전지의 원료가 품귀현상을 나타내면서 스위스, 호주 및 일본 등의 국가에서 양산화를 시도하고 있으나 원천특허, 장기안정성, 제조비용 등의 문제 때문에 활성화 되지는 못하고 있는 실정이다. 그림 7 및 8에 염료감응형 태양전지의 구조 및 사진을 나타내었다.

$d = 37 \mu\text{m}$, $\eta = 20.2\%$, $A = 4 \text{ cm}^2$



Monocrystalline Silicon

그림 5. 플렉시블 단결정 실리콘 태양전지

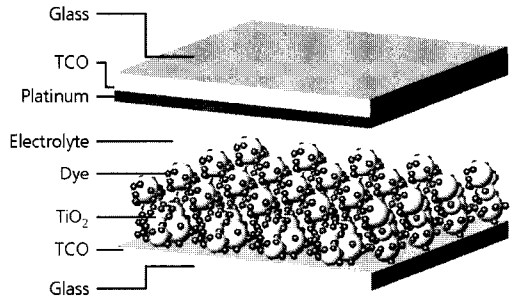


그림 7. 염료감응형 태양전지의 구조

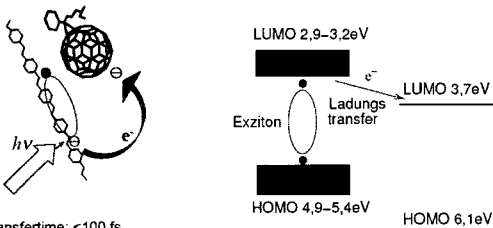


그림 6. 유기태양전지의 구조



그림 8. 반투명 유리형태의 염료감응 태양전지

염료감응형 태양전지의 제조과정을 간단히 설명하면, 우선 투명전도성 기판에 나노입자(15~20(nm))의 TiO_2 를 스크린 프린팅법에 의해 코팅한 후 450 [°C]에서 열처리하여 15마이크론 두께로 형성한 후 염료가 녹아있는 에탄올 용액에 넣어 염료를 TiO_2 표면에 흡착시켜 작업전극을 제조한다. 또 다른 투명전도성 기판에 백금을 코팅하여 상대전극을 제조한다. 작업전극과 상대전극의 테두리에 열가소성 수지를 놓고 핫프레스를 이용하여 두 전극을 접합시킨다. 접합된 전극 사이에 전해액을 주입하고 밀봉하면 염료태양전지가 완성된다.

염료감응형 태양전지의 활성화의 관건은 낮은 생산단가(Low Cost), 높은 광변환 효율(Photon-to-current Conversion Efficiency)과 장기안정성(Long Term Stability)의 확보로 요약될 수 있으며, 현재 효율향상에 대한 연구가 국내의 연구소 및 대학을 중심으로 많이 진행되고 있으나, 상대적으로 생산단가를 낮추기 위한 연구는 많이 진행되지 못하고 있다. 염료감응형 태양전지는 스크린 프린팅법에 의해서 제조가 가능하기 때문에 제조공정에 비해서 소재가 큰 생산단가의 비중을 차지한다. 중요 소재를 살펴보면 염료, 나노 TiO_2 , 투명 전도성 전극, 전해질 등이 있으며 이중 투명전도성 기판(Transparent Conductive Oxides, TCO)의 가격이 높기 때문에 염료태양전지의 생산단가를 낮추는데 걸림돌이 되고 있다. 그림 9에는 네덜란드 에너지 센터에서 분석한 염료감응 태양전지 중 투명전도성 기판이 차지하는 비중을 나타내었다. 1[MWpeak/year] 용량의 염료감응 태양전지를 생산할 경우 투명전도성 기판이 생산단가에서 차지하는 비율은 16[%]이지만 4[MWpeak/year] 용량의 염료감응 태양전지를 생산할 경우에는 24[%]로 증가한다[10]. 이는 염료감응 태양전지 제조단가의 약 1/4이며 이를 줄일 경우 매우 낮은 생산단가의 염료감응 태양전지를 제조할 수 있을 것이다.

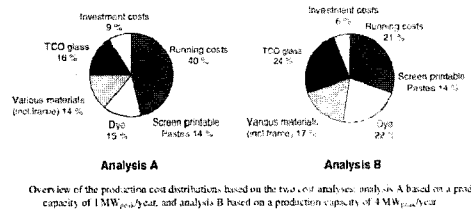
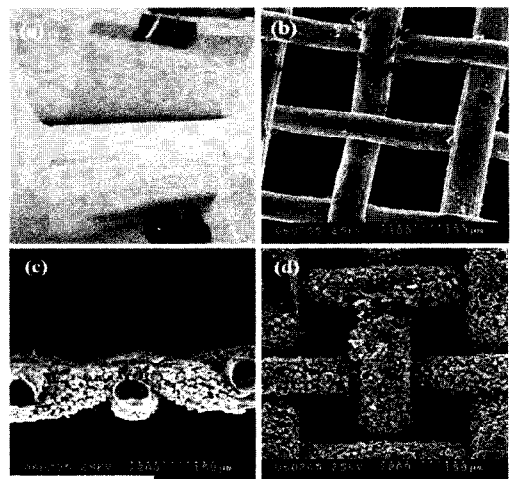


그림 9. 네덜란드 에너지연구센터에서 분석한 염료감응 태양전지 생산단가 비율

4. 투명전도성 기판을 사용하지 않은 염료감응형 태양전지

최근에 염료감응형 태양전지의 생산단가를 낮추기 위한 연구 중에 주목할 만한 것은 투명전도성 기판을 사용하지 않은 염료감응 태양전지이다. 투명전도성 기판을 사용하지 않은 염료태양전지는 크게 두 가지로 분류될 수 있는데 하나는 스테인레스스틸 망(mesh)을 사용하는 염료태양전지이고, 다른 하나는 TiO_2 코팅면의 뒤쪽에 금속전극을 형성하는 방법이다.



(a) Optical photo of the as-prepared electrode (upper, 4.5 x 7 cm²) and the net substrate (lower, 4.8 x 5.5 cm²); (b) SEM photos of the mesh substrate; [(c) and (d)] top and sectional views of the as-prepared electrode.

그림 10. 베이징 대학에서 개발한 염료감응형 태양전지용 스테인레스스틸망 작업전극

스테인레스 스틸 망을 이용한 염료태양전지에 대한 연구는 베이징 대학에서 연구되었다. 베이징 대학에서는 120메쉬(meshes)의 스테인레스스틸 망을 이용한 작업전극의 제조 및 TiO_2 두께에 따른 태양전지 효율 변화에 대한 연구를 하여, 약 10(μm)의 두께를 가질 경우 1.49(%)의 최고효율을 가진다고 Applied Physics Letters에 2007년 발표하였다(11). 그림 10에 베이징 대학에서 개발한 스테인레스스틸 망을 이용한 염료태양전지용 작업전극을 나타내었다.

베이징 대학에서 연구개발한 스테인레스스틸 망을 이용한 염료태양전지의 단점은 세 가지 정도이다. 첫 번째는 스테인레스 스틸 망을 사용하기 때문에 열팽창계수가 커서 많은 양의 TiO_2 를 코팅할 수 없다는 점이다. 두 번째는 스테인레스스틸 전극의 전도도가 좋지 때문에 전해질 산화환원반응에 TiO_2 로부터 전달된 전자가 참여한다는 것이다. 셋째는 구부러지고 전도도가 좋은 스테인레스스틸 망을 전극으로 사용하기 때문에 양극과 음극간의 단락이 잘 일어난다는 것이다. 베이징 대학에서 발표한 논문에는 상대전극 및 셀 조립에 대한 구체적인 설명이 언급되어 있지 않아 양극과 음극간의 단락을 어떻게 방지하였는지 알 수 없다.

두 번째 방법인 TiO_2 뒷면에 금속을 증착하는 방법이다. 네덜란드의 에너지연구센터에서는 TiO_2 를 코팅한 후 티타늄 금속을 얇게 증착하여 투명전도성 기판이 없는 작업전극을 제작하였다(12). 그림 11에 구조와 효율을 나타내었다. 이러한 구조의 염료태양전지의 경우 전해액이 염료가 흡착된 TiO_2 층으로 쉽게 이동하지 못해 전하전달이 늦어져서 효율이 낮아지는 것으로 알려져 있다. 일본의 큐슈공대에서는 배면의 티타늄 박막에 전해액이 자유롭게 이동할 수 있는 구멍을 형성하여 이러한 문제를 극복한 형태의 투명전도성 기판이 없는 염료태양전지에 대한 연구결과를 2008년 Applied Physics Letter에 보고하였으며(13), 그 구조를 그림 12에 나타내었다. 하지만 생

산단가를 낮추기 위해서 투명전도성 기판을 사용하지 않는 염료태양전지를 개발하였는데, 그 제조방법이 매우 복잡하고 고가의 증착장비를 사용하기 때문에 생산단가를 얼마만큼 낮출 수 있을지는 의문이다.

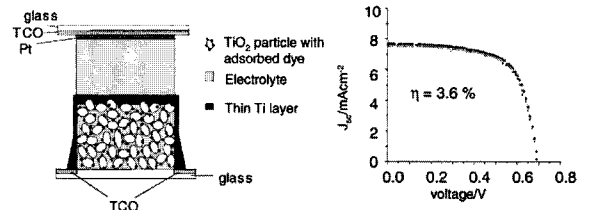


그림 11. 네덜란드 에너지 연구센터에서 개발한 배면 Ti전극 염료태양전지

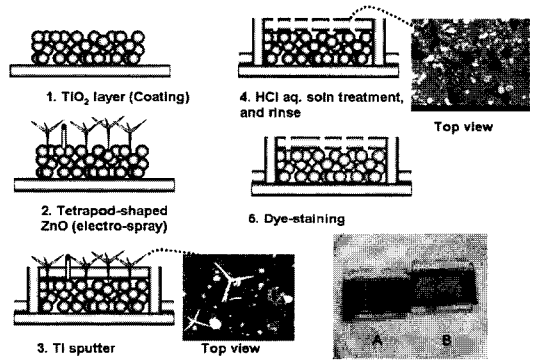


그림 12. 큐슈공대에서 개발한 다공성 Ti 전극 염료태양전지

5. 결 론

태양전지 시장의 90(%) 이상을 차지하고 있는 결정질 실리콘 태양전지 기술은 고가의 장비와 고비용 제조공정을 사용하기 때문에 현재까지 다른 에너지 기술에 비해서 가격경쟁력을 확보하지 못하고 있다. 이러한 문제점을 해결하고자 보다 저렴한 재료를 이용하고 공정비용을 줄여 태양전지의 가격을 낮추면서 우수한 성능을 얻으려는 노력이 계속되고 있다. 박막 형태의 실리콘 태양전지 개발이나 박막 화합물 반도체

체 태양전지 기술개발은 이러한 노력의 일환이다. 최근에는 보다 단순한 공정에 의해서 태양전지의 제조가 가능한 유기물을 이용한 태양전지 개발이 활발히 이루어지고 있다. 특히 염료감응형 태양전지의 경우 조만간 상용화 될 것으로 예측될 만큼 기술이 성숙되고 있다. 하지만 염료감응형 태양전지의 상용화가 가격경쟁력을 갖출지는 여전히 의문이다. 최근의 염료감응형 태양전지의 가격을 낮추려는 연구의 하나로 고가의 부품인 투명전도성 기판이 없는 염료감응형 태양전지 기술 개발은 분명 의미 있는 연구일 것이다. 이러한 지속적인 태양전지 가격저하 연구개발은 태양전지의 활성화에 크게 기여할 것으로 판단된다.

이 논문은 2007년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임.(No. R01-2007-000-20932-0)

참고문헌

- [1] D. C. Young, G. A. Mill, Rob Wall, "Feasibility of renewable energy storage using hydrogen in remote communities in Bhutan", International J. of Hydrogen Energy, 2006, in press.
- [2] V. A. Goltsov, T. N. Veziroglu, "A step on the road to hydrogen civilization", International J. of Hydrogen Energy, vol. 27, pp.719-723, 2004.
- [3] M. A. Del uchi, "Hydrogen vehicles: an evaluation of fuel storage, performance, safety, environmental impacts and costs", International J. of Hydrogen Energy, vol. 14, pp. 81-130, 1989.
- [4] S. H. Browne, D. R. Neill, P. K. Takahashi, "The Hawaii hydrogen from renewable energy program", International J. of Hydrogen Energy, vol. 13, pp. 483-488, 1989.
- [5] 에너지관리공단 신재생에너지 연구센터, <http://www.knrec.or.kr/>
- [6] 이시원, "태양전지 기술 전망 및 동향" 화학세계 2월호 pp. 34-41, 2008.
- [7] "Basic research needs for solar energy utilization" Report of the basic energy sciences workshop on solar energy utilization, April 18-21, 2005.
- [8] 지식경제부 태양광 사업단, <http://www.solarkorea.org/>
- [9] ECF Seminar "Renewable Energies" 9.-10. Feb.2006, Kassel
- [10] Energy Research Center of the Netherlands, <http://www.ecn.nl/>
- [11] Xing Fan, Fuzhi Wang, Zengze Chu, Lin Chen, Chao Zhang, and Dexun Zou, "Conductive mesh based flexible dye-sensitized solar cells", APPLIED PHYSICS LETTERS 90, 073501 2007.
- [12] J. M. Kroonl, N. J. Bakker, H. J. P. Smit, P. Liska, K. R. Thampi, P. Wang, S. M. Zakeeruddin, M. Gratzel, A. Hinsch,

S. Hore, U. Würfel, R. Sastrawan, J. R. Durrant, E. Palomares, H. Pettersson, T. Gruszcki, J. Walter, K. Skupien and G. E. Tulloch, "Nanocrystalline Dye-sensitized Solar Cells Having Maximum Performance", Prog. Photovolt: Res. Appl. 2007, 15, 1-18.

[13] Yohei Kashiwa, Yorikazu Yoshida, and Shuzi Hayase, "All-metal-electrode-type dye sensitized solar cells.. 'transparent conductive oxide-less dye sensitized solar cell... consisting of thick and porous Ti electrode with straight pores" APPLIED PHYSICS LETTERS 92, 033308 2008.

◇ 저자 소개 ◇



한치환(韓治煥)

1972년 2월 3일생.

1994년 고려대 화학과 졸업. 1996년 고려대 화학과 졸업(석사). 2001년 고려대 화학과 졸업(박사). 2002년~2003년 프랑스 보르도 1대학(박사후과정).

2003년~현재 한국에너지기술연구원 선임연구원.

Tel : 042-860-3061

Fax : 042-860-3307

E-mail : hanchi@kier.re.kr