

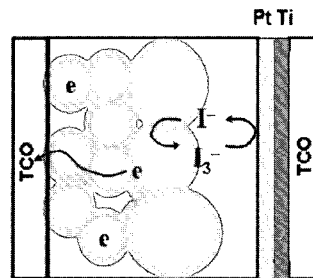
Thema | 플렉시블 염료감응 태양전지 기술

1. 서론

강만구 선임연구원/팀장
 (한국전자통신연구원 IT융합부품연구소 IT-NT 그룹, 이오닉스 소자팀)
김종대 그룹장
 (한국전자통신연구원 IT융합부품연구소 IT-NT 그룹)

반도체 접합 태양전지와는 달리 광합성 원리를 이용한 광전기화학적 염료감응 태양전지가 Grätzel에 의하여 처음으로 발표된 이후[1], 염료감응 태양전지는 비정질 실리콘태양전지에 버금가는 10%이상의 높은 에너지 변환 효율[2]과 매우 저렴한 제조단가로 연구계 및 산업계의 비상한 관심을 모으고 있다. 고효율 염료감응 태양전지의 구조는 그림 1과 같으며, 염료가 흡착된 나노입자 산화물 반도체 작동 전극, 백금 반대 전극, 그리고 두 전극 사이에 채워진 전해질로 구성되어 있다.

작동원리는 n-형 나노입자 반도체 산화물 전극에 흡착된 염료가 빛을 흡수하여 전자를 반도체 산화물 전극의 전도띠로 주입한다.



Blocking layer
Nanoparticles (~20nm) ~ 12 μ m
Big particles (~300nm) ~ 4 μ m

그림 1. 염료감응 태양전지의 구조.

나노입자 반도체 산화물에 주입된 전자는 나노입자들 사이의 계면을 통하여 투명전도성막, 그리고 외부회로로 전달하게 된다. 외부회로에서 전기적 작업을 수행하고 백금 반대 전극에 도달한 전자는 전해질의 산화/환원작용에 의하여 산화된 염료를 환원시켜 작동이 완성된다(그림2).

고효율 염료감응 태양전지의 반도체 산화물층은 그림1과 같이 전도성기판(TCO)에 전달된 전자와 산화/환원 전해질과의 재결합에 의한 전자 손실을 차단하기 위한 보호막층(Blocking Layer), 루테늄계 염료가 흡착되어 전자 주입이 이루어지는 나노입자 산화물층, 그리고 가시광선을 산란시켜 빛의 이용을 극대화하기 위한 산란입자 산화물층으로 구성되어 있다. 현재까지는 이산화티탄이 가장 효과적인 반도체 산화물로 알려져 있다.

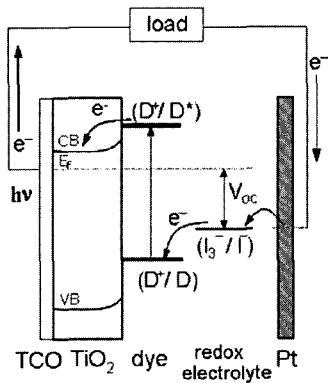


그림 2. 염료감응 태양전지의 작동 원리.

빛에너지를 흡수한 루테늄계 염료는 기저상태에서 들뜬상태로 전이한 후, 반도체 전도띠로 전자를 주입하는 전자 주입 속도는 펨토-피코초의 매우 빠른 속도이며, 산화된 염료는 산화/환원 전해질로부터 수 나노초 내에 재생된다. 반면 주입된 전자가 나노입자 반도체 산화물의 표면 에너지 준위에 머무르는 동안 산화/환원 전해질과의 재결합 (Recombination 또는 Back Reaction)의 속도는 마이크로~밀리초로 전자주입 속도와 염료 환원 속도에 비하여 느리기 때문에 대부분의 광전자는 반도체 전도띠로 주입되고, 나노입자 산화물들 사이의 전자전달이 가능하게 된다. 따라서 염료감응 태양전지는 에너지 변환효율이 우수하고, 경제적 장점으로 차세대 신재생에너지 후보의 하나로 관심이 고조되고 있다[3].

2. 연구 배경과 동향

최근 염료감응 태양전지의 연구는 기초 분야부터 상용화까지 다양하고 폭넓은 연구가 진행되고 있으며, 염료감응 태양전지를 구성하는 소재의 관점에서 반도체 전극 분야에서는 나노입자 산화물의 합성 (TiO_2 , ZnO 등, 그리고 코아-셸 구조의 복합체)과 전자전달 해석, 그리고 빛 흡수영역 확대 및 다양한 색상의 염료감응 태양전지 개발을 위한 염료 합성 연구를, 그리고 백금전극 부분은 백금-복합체 합성 및 탄소소재에 관한 연구들이 진행되고 있다.

염료감응 태양전지를 구성하고 있는 액체 전해질은 직사광선에 의한 용매의 휘발 가능성이 지적되어 왔다. 이러한 휘발 가능성은 염료감응 태양전지의 상용화 관점에서 매우 중요한 분야로 장기 안전성에 관한 신뢰성 확보를 위하여 고온에서도 안정한 전해질의 개발이 활발히 진행되고 있다.

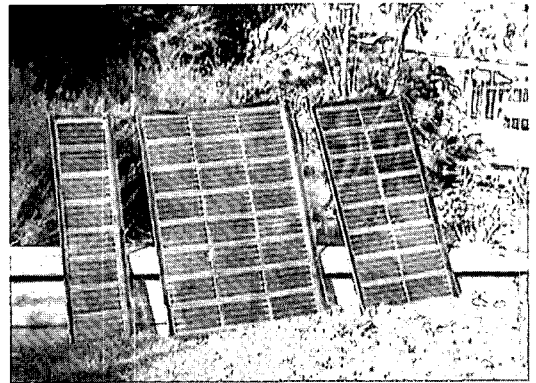


그림 3. DyeSol의 염료감응 태양전지 모듈.

염료감응 태양전지의 상용화 연구 동향을 살펴보면, 유럽의 경우에는 ECN, 프라운호프 연구소 (Fraunhofer), 솔라로닉스(Solaronix), 그리고 EPFL 등에서 활발히 추진하고 있으며, 호주는 신재생에너지 분야를 집중 육성하는 정부 정책에 따라 DyeSol이 염료감응 태양전지의 소재와 0.5 MW 규모의 모듈 생산 라인을 갖추고 있다. DyeSol이 생산하고 있는 염료감응 태양전지 모듈은 그림3과 같다. 나노입자 산화물 태양전지의 상용화 기술 개발이 가장 활

발한 곳은 일본으로, 2000년 이후부터 샤프, 도요타, 후지쿠라, 산요 등 대기업을 포함한 상당수의 기업에서 염료감응 태양전지 소재부터 모듈 제조까지 상용화 기술을 개발하여 염료감응 태양전지 산업의 신규 시장 개척을 가장 활발히 추진할 것으로 예측되고 있다.

최근 고유가 시대의 고착화와 도쿄 의정서의 영향으로 국내에서도 신재생에너지 분야에 대한 관심이 고조되고 있으며, 에너지 자립화를 위한 국가적 미래 산업 육성 정책으로 인하여 향후 지속적으로 염료감응 태양전지 분야의 관심도 증가할 것으로 예측된다. 현재 국내의 염료감응 태양전지 분야의 연구 동향은 기초연구와 상용화 연구를 병행하고 있으며, 일부 대학에서 기초연구를, 국가출원연구기관들에서 기초와 상용화 연구를, 그리고 대기업을 중앙연구소에서 사업화 관점에서 염료감응 태양전지의 가능성을 점검하고 있으며, 매년 상당수의 연구 그룹들이 신규로 염료감응 태양전지 연구에 참여하고 있다. 그림4~그림6은 한국전자통신연구원(ETRI)에서 개발한 염료감응 투명 태양전지창[4]과 모듈 그리고 모듈의 전류-전압 곡선을 보여주고 있다. 염료감응 태양전지의 전압(V_{oc} , 그림2)은 ~ 0.7 V이며, 염료감응 태양전지의 내부에 직렬 연결 회로를 도입하면 고전압의 모듈 제작이 가능하다.

그림5는 전도성 기판을 10개 부분으로 에칭하여 전기적으로 단락된 각각의 전도성 기판에 태양전지를 구성하고 내부에 직렬 연결하여 제작된 6 V급 염료감응 태양전지 모듈은 우수한 광전기적 특성을 보여주고 있다(그림6).

3. 플렉시블 태양전지

정보-지식-지능화 사회는 끊임없는 인간의 욕구를 충족시키기 위하여 지능화, 이동화, 인간화를 지향하며 건강관리, 안전보장 등 개인/가정 삶의 질 향상을 추구하고 있다. 이러한 유비쿼터스 시대의 언젠, 어디서나 요구되는 다양한 정보서비스에 대한 욕구를 충족시켜주기 위하여 자유로운 통신이 가능한 미래사회의 정보통신용 전자기기의 발전은 고정

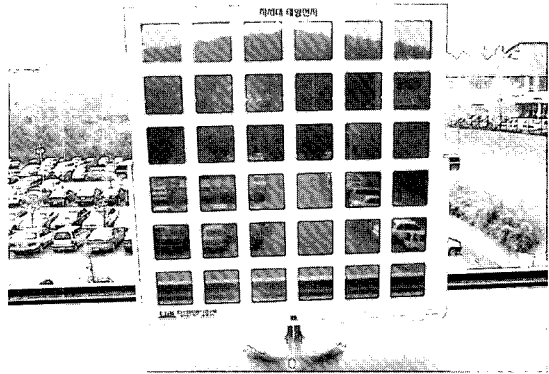


그림 4. 투명태양전지창(ETRI, 2003년).

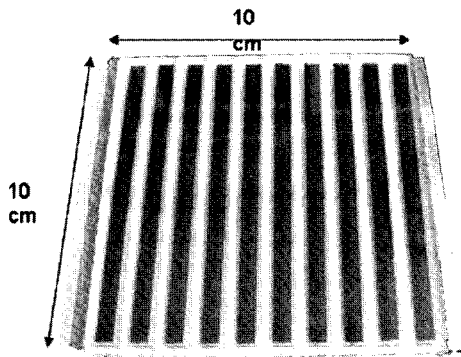


그림 5. 염료감응 태양전지 모듈(ETRI, 2005년).

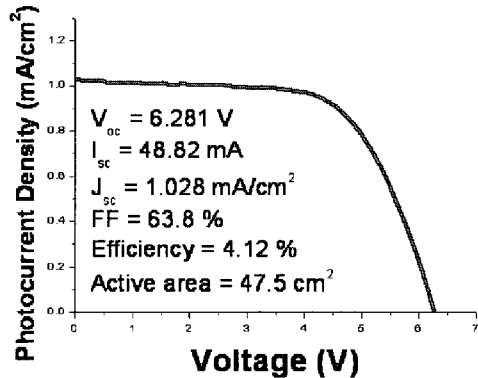


그림 6. 모듈의 전류-전압 곡선.

형에서 웨어러블 컴퓨터(Wearable PC)와 같이 휴대하거나 인체에 내장하는 임플란트 컴퓨터(Implanted PC)와 같은 형태로 발전할 것으로 예측된다. 따라서 이러한 미래 정보통신 장비의 보조 전원 공급 장치로 그림7과 같이 가볍고 박막형의 유연한 플렉시블 태양전지의 필요성이 요구되어질 것으로 예측된다[5].

기존의 염료감응 태양전지는 나노입자들 간의 전기적 접촉과 나노입자 박막과 기판과의 부착력을 위하여 전도성 유리 기판을 사용하여 500℃ 내외의 가열과정으로 산화물 반도체 박막과 백금박막을 형성하였다. 그러나 플렉시블 태양전지를 구현하기 위하여서는 구부림이 가능한 전도성 고분자 기판에 나노입자 반도체 박막을 구현하여야 하는데, 200℃ 이상의 온도에서는 플렉시블 전도성 고분자 기판이 변형되어 기존의 나노입자 제조에 필요한 가열과정이 불가능하다. 따라서 전도성 고분자 기판을 사용한 플렉시블 염료감응 태양전지 개발은 저온 과정으로 ~10μm 두께의 나노입자 박막을 형성하기 위한 다양한 연구들이 진행되고 있다[6,7]. 그러나 나노입자들 사이의 전자 전달을 위한 전기적 접촉과 전도성 기판과의 부착력 등의 문제점이 저온과정으로는 완전히 해결되지 않아 전도성 유리 기판을 사용한 태양전지에 비하여 낮은 에너지 변환 효율의 결과들이 보고되고 있다.

그림8은 일본의 벤처기업인 Peccell에서 개발한 플렉시블 태양전지이며, 그림9는 Konarka의 플렉시블 염료감응 태양전지 셀 제조 공정을 보여주고 있다. 이러한 플렉시블 태양전지는 Roll-to-roll 제조 공정으로 대량 생산이 용이하여 제품의 가격 경쟁력도 기존의 유리형 염료감응 태양전지에 비하여 우수한 것으로 알려져 있다.

한편으로 한국전자통신연구원에서는 기존의 전도성 고분자 기판을 사용한 플렉시블 태양전지의 한계점을 극복하기 위하여 구부림이 가능하고, 전자전달이 가능하며, 500℃의 고온 과정에서 안정한 재료로 금속을 선정하여 금속판형 플렉시블 염료감응 태양전지를 개발하였다[8,9].

티탄늄, 텅스텐, 아연, 스테인레스 스틸, 알루미늄, 백금, 니켈, 코발트 금속 기판에 나노입자 산화물 박

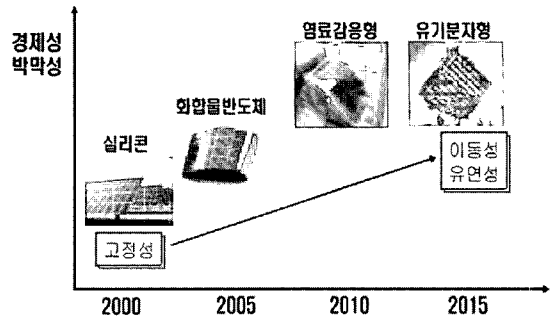


그림 7. 정보통신용 전원의 변화 전망.

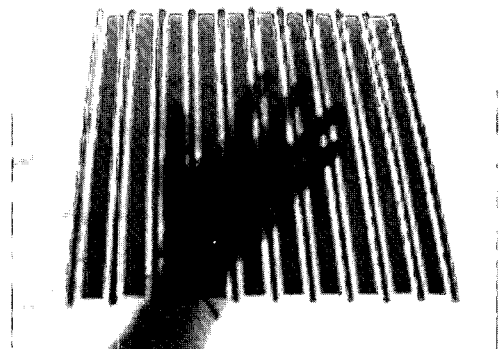


그림 8. Peccell(일본)의 플렉시블 태양전지

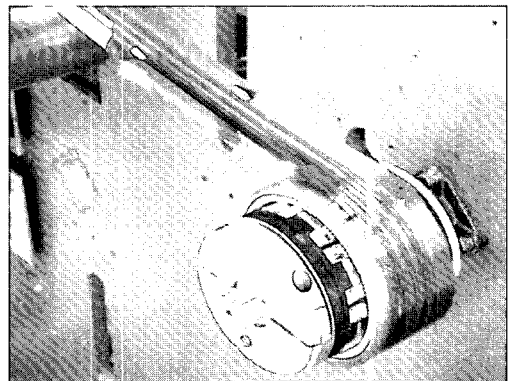


그림 9. Konarka(미국)의 셀 공정.

막을 구성하여 금속종류에 따른 광전기화학적 특성을 평가하였다. 티타늄, 텅스텐, 아연 그리고 스테인레스 스틸의 경우에는 전형적인 태양전지 특성을 보여주었으나, 알루미늄, 백금, 니켈, 코발트 등의 금속 기판의 경우에는 전기적 저항체에 의한 전류-전압 특성을 보여주었다. 그 이유는 금속 기판에 TiO_2 나노입자 박막을 구성하고 가열하는 과정에서 금속표면이 산화하여 금속과 나노입자 TiO_2 박막 사이에 형성되는 금속산화막 특성 차이로부터 발생하게 된다.

반도체 특성의 금속 산화물이 생성된 경우에는 염료로부터 TiO_2 의 전도띠에 주입된 전자가 금속 산화물의 전도띠에 전자전달이 가능하여 외부 회로로 전자 이동이 가능하며, 금속 산화물의 전도띠의 에너지 준위와 나노입자 TiO_2 전도대의 에너지 준위차가 작을수록 전자 이동에 대한 에너지 소비가 작아 에너지 변환 효율이 증가하게 된다. 티탄늄 기판의 경우에 티탄늄 표면에 생성된 이산화티탄늄과 나노입자 TiO_2 가 같은 물질로 전자 이동을 위한 에너지 소지가 가장 적어 가장 좋은 효율을 나타내었다.

반도체 특성이 없는 금속 기판의 경우에도 금속 기판에 ITO를 코팅하여 나노입자 TiO_2 박막을 형성하면 나노입자 TiO_2 에 주입된 전자가 ITO를 통하여 외부 회로로 전자 이동이 가능하여 태양전지 특성을 보여주게 된다. 그림10은 경제성이 있는 금속인 스테인레스 스틸에 ITO 박막을 코팅하여 구부림이 가능한 염료감응 태양전지 시제품을 개발하여 소형 모듈을 작동하는 것을 보여주고 있다. 최적화된 조건으로 그림11과 같이 스테인레스 스틸을 사용하여 5% 에너지 변환효율의 플렉시블 태양전지 제작이 가능하였다.

4. 결론

차세대 신재생에너지 후보의 하나로 관심이 고조되고 있는 염료감응 태양전지의 연구는 기초 분야부터 상용화까지 다양하고 폭넓은 연구가 진행되고 있으며, 유비쿼터스 시대의 언제, 어디서나 요구되는 다양한 정보서비스에 대한 정보통신 기기의 발전에

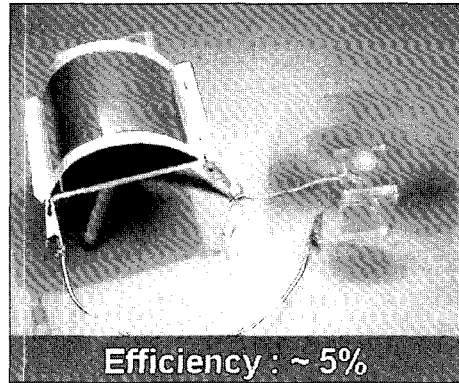


그림 10. 금속판 플렉시블 염료감응 태양전지(ETRI, 2005년).

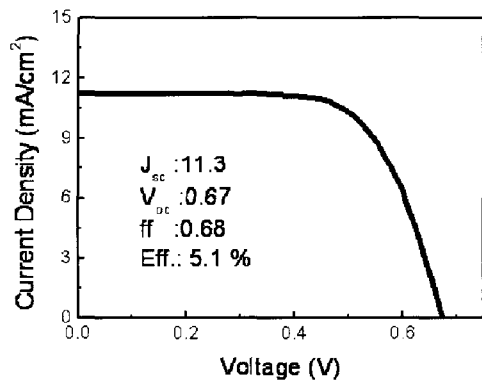


그림 11. 금속판 플렉시블 태양전지의 전류-전압곡선.

따라 전원장치도 소형화, 박형화, 고용량화, 고효율화, 유연화, 무선충전 등의 기능을 추구할 것으로 예상되어, 미래사회의 보조 전원으로 플렉시블 태양전지의 신규 시장 창출이 가능할 것으로 판단된다. 플렉시블 염료감응 태양전지의 새로운 형태로 금속 기판을 이용한 플렉시블 염료감응 태양전지를 성공적으로 개발할 수 있었으며, 금속 종류에 따라 광전기적 특성 차이가 발생하였으며, 스테인레스 스틸을 사용하여 5%이상의 플렉시블 태양전지를 개발할 수 있었다.

감사의 글

염료감응 태양전지 연구는 정보통신부와 산업자
원부로부터 연구비를 지원받아 연구하였습니다.

참고 문헌

- [1] O'Regan, B., Gratzel, M., "Low-cost high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films", Nature, Vol. 353, p. 6346, 1991.
- [2] Hagfeldt, A., Grätzel, M., "Molecular Photovoltaics", Acc. Chem. Res., Vol. 33, pp. 269-277, 2000.
- [3] 박남규, 강만구, 류광선, 장순호, 이빈, "차세대 태양 전지 연구개발 동향", 화학세계, 9호, pp. 265-277, 2004.
- [4] Kang, M. G., Park, N. G., Chang, S. H., "Manufacturing method of transparent electric window using dye-sensitized TiO₂ solar cells", Sol. Energy Mater. Sol. Cells, Vol. 75, p. 475, 2003.
- [5] 박남규, 강만구, "차세대 정보전원 솔루션: 나노 포토볼타익스", ETRI CEO Information, Vol. 38, p. 1, 2006.
- [6] Lindström, H., Hornberg, A., Magnusson, E., Malmqvist, L., Hagfeldt, A., "A new method to make dye-sensitized nanocrystalline solar cells at room temperature", J. Photochem. Photobiol. A: Chem., Vol. 145, p. 107, 2001.
- [7] Miyasaka, T., Yujiro, Y., "Low-Temperature Fabrication of Dye-Sensitized Plastic Electrodes by Electrophoretic Preparation of Mesoporous TiO₂ Layers", J. Electrochem. Soc. Vol 151, p. A1767, 2004.
- [8] Kang, M. G., Park, N. G., Ryu, K. S., Chang, S. H., Kim, K. J., "Flexible Metallic Substrates for TiO₂ Film of Dye-sensitized Solar Cells", Chem. Lett., Vol. 34, p. 804, 2005.
- [9] Kang, M. G., Park, N. G., Ryu, K. S., Chang, S. H., Kim, K. J., "A 4.2% efficient flexible dye-sensitized TiO₂ solar cells using stainless steel substrate", Sol. Energy Mater. Sol. Cells, Vol. 90, p. 574, 2006.

저자약력



성명 : 강만구

◆ 학력

- 1988년 고려대 화학과 이학사
- 1990년 고려대 대학원 화학과 이학석사
- 2000년 고려대 대학원 화학과 이학박사

◆ 경력

- 1990년 - 1997년 동양그룹 중앙연구소 선임연구원
- 2000년 - 현재 한국전자통신연구원 IT융합부품연구소 IT-NT 그룹, 이오닉스 소자팀 선임연구원/팀장



성명 : 김종대

◆ 학력

- 1982년 경북대 전자공학과 공학사
- 1984년 경북대 대학원 전자공학과 공학석사
- 1994년 Univ. New Mexico

◆ 경력

- 1984년 - 1989년 한국전자통신연구원 연구원
- 1994년 - 현재 한국전자통신연구원 IT융합부품연구소 IT-NT 그룹 책임연구원/그룹장