

유기태양전지의 개발현황

방창현¹ · 박근희² · 정등근² · 채희엽¹

¹성균관대학교 화학공학과

²성균관대학교 물리학과, 수원, 440-746

(2007년 2월 6일 받음)

세계적으로 석유자원의 고갈로 대체 에너지 중에서도 태양전지는 가장 주목 받는 기술 중에 하나이며, 크게 무기물 태양전지와 유기태양전지로 구분된다. 그 중에서 유기태양전지의 변환효율은 무기물 태양전지에 상당히 미치지 못하지만, 제작공정의 비용이 낮고, 투명하고 다양한 색을 낼 수 있으며, 유연성을 띠는 장점으로 인하여 무기물 태양전지가 사용될 수 없는 시장을 중심으로 저비용 제품으로 사용될 가능성이 높아지고 있다. 현재 유기태양전지의 효율, 수명, 그리고, 안정성이 태양전지의 보급화에 중요한 이슈이며, 다양한 연구가 진행되고 있다. 본 글은 유기태양전지의 기술적 원리, 현재 개발 동향 및 이슈, 그리고 발전 방향에 대하여 정리하였다.

주제어 : 대체에너지, 유기태양전지, 전도성 고분자, 광기전력

I. 서 론

최근 세계적으로 에너지 자원의 확보는 각국의 생존 전략과 직접 관련된 문제로 받아들여지고 있으며, 기존에 사용되어 왔던 화석연료외의 신재생 에너지에 관심이 모아지고 있다. 신재생 에너지 중에서도 태양전지는 가장 주목 받는 기술 중에 하나이다. 현재 실리콘을 중심으로 한 무기물 태양전지는 기술적으로 발전을 이루어 많은 효율향상을 이루고 있다. 유기태양전지의 변환효율은 실리콘 등의 무기물을 기반으로 한 경우보다 낮은 값인 10%에 절대적으로 미치지 못하지만, 많은 장점으로 발전가능성을 인정받으면서 높은 관심을 모으고 있다. 유기태양전지는 제작공정의 비용이 낮고, 투명하고 다양한 색을 낼 수 있으며, 유연성을 띠는 장점으로 인하여 무기물 태양전지가 사용될 수 없는 시장을 중심으로 저비용 제품으로 사용될 가능성이 높아지고 있다. 본 글에서는 차세대 신형 전지로 주목 받고 있는 나노박막형 유기 태양전지의 기술적 원리, 현재 개발 동향 및 이슈, 그리고 발전 방향에 대해 살펴보고자 한다.

투명 전극인 indium tin oxide (ITO)를 양극으로, 낮은 일함수를 갖는 Al 등의 metal 전극을 음극물질을 사용한다. 광활성층(active layer)은 100nm 정도의 두께로 전자 주개 물질(electron donor)과 전자받개 물질(electron acceptor)로 구성되며, 아래 그림과 같이 2층 구조(bi-layer structure)와 복합박막 구조(bulk hetero-junction)를 이용한다.(그림 1 (a) 및 (b))

광활성층에서 빛을 받아 전하를 생성시키는 것은 반도체 고분자(electron donor)이다. 이러한 반도체 고분자는 탄소의 Pz 궤도 함수와 π -결합을 이루면서 사슬을 따라서 편재되어 있으며, π -전자 파동함수들의 중첩에 의해 이들은 각각 가전자대(Valence band)와 전도대(Conduction band)를 이룬다. 그리고 가전자대와 전도대 사이의 에너지 간격은 1.5~3 eV 정도의 가시광 영역에서의 값을 가진다[1].

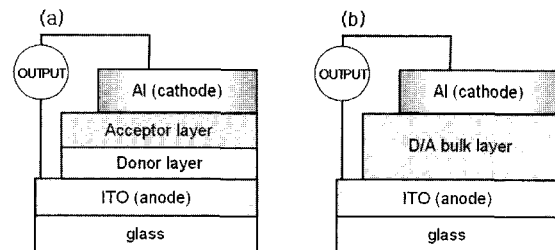


그림 1. Schematic device of typical organic photovoltaic cells ; (a) bi-layer structure, (b) bulk hetero-junction structure.

II. 유기태양전지의 기술적 원리

유기 태양전지는 기본적으로 박막형 구조를 가지고 있으

* [전자우편] hchae@skku.edu

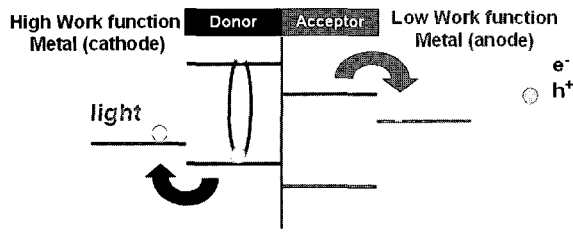


그림 2. Energy level diagram representing the phenomena of photoinduced charge transfer

따라서 이 영역에서의 에너지를 가지는 빛을 쬐어주게 되면 $\pi-\pi^*$ 천이($\pi-\pi^*$ transition)가 일어나고 이를 통해서 전자-정공 쌍(electron-hole pair 혹은 excitation)이 형성된다 [1,2]. 형광(Photoluminescence)에 의해 빛을 내어 놓는 전자-정공 쌍의 재결합은 소자의 광기전력에 기여할 수 없으며, 광여기 전하이동(photoinduced charge transfer, PICT) 현상으로 인해 전자주개 물질과 전자받개 물질 사이에서 일어나는 전자와 정공의 재결합을 극복할 수 있게 된다 [1-3].

PICT 현상에 의해 donor와 acceptor로 분리된 전자와 정공은 각각의 전극으로 주입되어 수집된다. 또한 두 전극의 일함수 차이는 반도체 박막을 가로질러 내부 전기장을 형성하게 되는데, 생성된 전자와 정공은 이 내부전기장에 의해 각각 음극과 양극으로 쉽게 이동하여 광기전력을 일으키는 과정이 된다 [1].

유기태양 전지 형성의 핵심인 광활성층의 대표적인 재료는 아래 그림과 같이 저분자 물질, 전도성 고분자 물질, C_{60} 와 그 유도체가 acceptor로서 사용된다.(그림 3) Donor 물질은 태양광의 광흡수도가 높으며, 전하의 이동도가 높은 물질이어야 하며, PPV(para-phenylene vinylene) 계열과 PT(polythiophene)의 유도체가 연구되었다. 최근에는 low band gap donor 물질 및 자외선 광안정성 물질로 PF(polyfourene)계 물질이 연구되고 있다. 반면에 Acceptor 물질은 광흡수가 상대적으로 적어야 하며, donor와 비교하여 높은 전자친화도를 가진 물질이 적합하다 [1].

III. 유기태양전지의 개발과정 및 최근동향

최초의 유기 태양전지는 1986년 미국 Eastman Kodak 사의 C. W. Tang의 연구 결과로 발표되었는데, Donor 물질로는 CuPc를 Acceptor 물질로는 perylene tetracar-

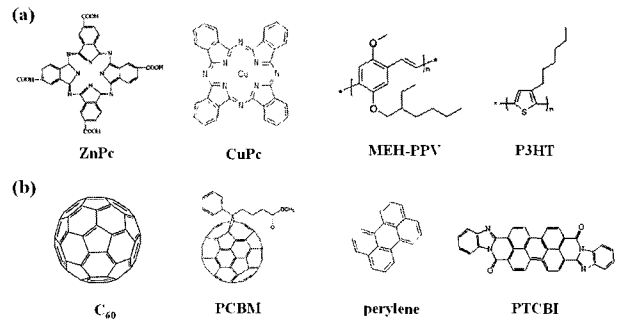


그림 3. Typical semiconducting polymers and small molecules of (a)Donor and (b)Acceptor

boxylic derivative의 물질로 구성되어 발표하였다. 최초의 유기 태양전지의 효율은 1%미만으로 매우 낮은 값을 보였으나, 유기 태양전지의 가능성을 확인하였다 [4]. 그 후 1995년 A.J Heeger 그룹에서 PPV계열의 전도성 고분자와 Acceptor로서 C_{60} 와 유기물과 잘 섞이는 C_{60} 유도체인 PCBM을 섞어 한 층으로 태양전지를 구현하였다. 이렇게 만들어진 유기태양전지의 효율은 약 3%에 근접하는 값으로 기존의 유기 태양전지에 비하여 높은 효율을 나타내었다 [5]. 이후 유기 태양전지는 꾸준한 발전을 이루었고 2004년에는 미국 Princeton 대학교의 S. R. Forrest교수 팀에 의해 D/A mixed layer를 donor와 acceptor 사이에 도입한 단분자 Heterojunction bi-layer를 형성하여 넓은 파장 영역의 햇빛을 전환하여 5%이상의 태양광 에너지 전환효율을 보였다 [6-8].

최근 유기태양전지는 새로운 소자 구성 및 제조 공정조건의 변화 등으로 효율이 두드러지게 향상되고 있다. 유기 태양전지는 단분자 물질의 증착을 통해서 활성층을 도입하는 단분자 유기태양전지와 고분자를 스핀코팅, 스크린 프린팅, Roll-to-roll printing과 같은 상대적으로 간단한 공정으로 활성층을 도입할 수 있는 고분자 태양전지로 구분되나, 최근에는 고분자를 donor 물질로 사용하고, 고분자 donor 물질에 비해 전자친화도가 큰 C_{60} 유도체를 acceptor로 사용하고 있다.

플러렌 유도체가 도입되면서 donor 고분자와 blending 현상이 향상되었다. 이러한 물리적 성질로부터 고분자 bulk hetero-junction 태양 전지의 개발이 이루어졌으며, 유기태양전지의 효율을 급속히 향상시킴으로써 상용화의 기반을 마련하였다. 재료자체의 개발이외에도 다양한 공정의 개발로 유기태양전지의 효율을 향상시키는 연구가 활발하다. 한 예로서, QSEL의 F. Padinger 그룹에서 열처

리의 도입으로 효율을 높인 연구가 진행되었다. Donor 고분자 P3HT와 acceptor 고분자 PCBM을 사용하여 active layer를 형성하였으며, 열처리를 하지 않은 소자의 경우 0.4%의 낮은 효율을 보였지만, 소자를 만든 후 75°C에서 4분 동안 열처리 하여 P3HT 고분자의 결정성을 증가함으로써 효율이 2.5%로 급격하게 향상된다 [9]. 또한, 열처리 과정 중에 전기장을 추가로 걸어주면 효율이 3.5%까지 증가 된다 [9,10].

용매를 건조시키는 공정 방법에 따라서 정공과 전기 이동도를 향상시키는 연구가 2005년 Yang Yang 그룹에서 진행되었다. PH3T:PCBN=1:1인 Active layer를 210~230nm의 다소 두꺼운 두께로 spin coating한 후 활성층에 포함되어있는 용매를 서서히 건조시키는 방법을 통해 효율이 증가함을 보고하였다. 전자와 정공의 이동도의 조화로 에너지 변환 효율이 AM 1.5, 100mW/cm²의 조건에서 4.4%까지 향상됨을 보여주었다 [11]. 또한, Heeger 그룹도 P3HT:PCBM=1:0.8 100nm의 active layer를 음극까지 제작한 후 150°C에서 30분 열처리 해줌으로써 고분자의 결정성을 향상시키고 활성층의 전극 계면 접촉을 증가시켜 AM 1.5, 80mW/cm²의 조건 5%에 근접할 정도로 효율을 향상 시켰다 [12]. 두 물질로 활성층을 제작 시 비율과 공정 조건, 또한 전처리, 후처리 조건의 변화, 사용 용매 등 그 제작 공정에 따라 현저한 효율 차이가 나고 있다. 이를 통해 P3HT의 결정화 정도와 두 물질의 혼합도 및 전극과의 흡착 정도에 따라 결과의 차이가 있는 것으로 결론을 내릴 수 있다 [10]. 앞에서의 다른 연구그룹과 같은 맥락에서 본 연구진은 ITO 전극 표면에 O₂와 CF₄의 표면 처리를 통하여 전극 표면의 저항을 감소시키고, 전극과 활성층의 흡착을 증가시켜 효율을 향상시킨 연구를 진행하였다. CF₄플라즈마를 이용하여 표면처리를 하였을 경우, 하지 않았을 경우보다 약 40% 가량의 효율향상을 얻을 수 있었다 [13].

앞에서 서술한 바와 같이, 유기 태양전지에 대한 연구 확대와 관심은 유기태양전지의 상용화 가능성을 높이고 있다. 선진국과는 다르게 국내의 유기태양전지의 연구는 기간이 짧고 연구층도 부족하지만, 유기 태양전지와 비슷한 분야인 유기발광소자(organic/polymer light emitting display)기술을 유기 태양전지 개발에 응용한다면 선진국과의 기술 격차는 매우 빠른 시간 내에 줄일 수 있을 것으로 보인다. 유기 발광 소자와 마찬가지로 유기물질로 구성

된 유기태양전지 역시 수명과 안정성이 태양전지의 보급화에 중요한 이슈이며, 체계적인 연구가 필요하다. 결국, 본 유기 태양전지 분야는 이제 막 기술적 가능성을 확인하고 본격적인 연구개발이 시작되고 있는 분야로서, 선진국이나 국내 모두 효율과 수명 향상, 대면적화 등 실용화를 위해 훨씬 많은 일이 요구되는 초기 개발단계라고 전문가들은 보고 있다.

IV. 전망 및 결론

유기태양전지는 서론에서부터 살펴본 바와 같이 잠재적인 발전가능성이 큰 연구 분야이자, 새로운 시장이다. 무기태양전지에 비하여 손쉬운 제조 공정뿐만 아니라, 수십 나노 이내 두께의 박막으로 만들 수 있는 장점이 있다. 그러한 장점으로 flexible 구조로의 적용이 용이하며, 유비쿼터스 전자제품을 지원하는 미래의 이동식 정보시스템 에너지 원으로도 손색이 없다. 또한 대면적화 기술을 접목하여 많은 양의 에너지를 소비하는 복합 시스템에도 적용할 수 있는 잠재적인 가능성을 가지고 있다. 유기태양전지는 최근 많은 연구그룹의 노력으로 인해 5%대의 에너지 변환 효율을 기록하고 있다. 하지만, 경제적인 측면에서 활용가치를 높이기 위해서는 최소 10% 이상의 효율이 필요하다 [10]. 기술적 난제로 분류되는 넓은 광흡수대의 확보, 전자와 정공의 이동도 향상, 자외선으로부터의 광안정성 확보 등 앞으로도 연구를 통해 해결해야할 문제가 남아있다 [1]. 공정 기술 또한 많은 과제를 안고 있다. 따라서 화학, 고분자, 전자 등 기초과학과 공학 전반에 걸친 심도 높은 연구가 필요하며, 국내의 기존 산업적 기반과 연구개발력을 활용한다면 세계적인 수준의 연구결과가 기대될 것이라고 전문가들은 예견하고 있다.

참고문헌

- [1] 문상진, 김희주, 고분자과학과 기술, **17**, 409-410, (2006).
- [2] G. Yu, J. Gao, J. C. Hummelen, F. Wudl and A. J. Heeger, *Science* **270**, 1789 (1995)
- [3] X. Wang, E. Perzon, J.L. Delgado, P. de la Cruz,

- F. Zhang, F. Langa, M. R. Andersson, and O. Inganäs, *Appl. Phys. Lett.*, **85**, 5081 (2004).
- [4] C. W. Tang, *Appl. Phys. Lett.*, **48**, 183 (1986).
- [5] G. Yu and A. J. Heeger, *J. Appl. Phys.*, **78**, 4510 (1995).
- [6] P. Peumans and S. R. Forrest, *Appl. Phys. Lett.*, **79**, 126 (2001).
- [7] S. Uchida, J. Xue, B. P. Rand, and S. R. Forrest, *Appl. Phys. Lett.*, **84**, 4218 (2004).
- [8] J. Xue, B. P. Rand, S. Uchida, and S. R. Forrest, *Adv. Mater.*, **17**, 66 (2005).
- [9] F. Padinger, R. S. Rittberger, and N. S. Sariciftci, *Adv. Funct. Mater.*, **13**, 85 (2003).
- [10] 신원석, 진성호, *Polymer Science and Technology* **17**, 416-424. (2006)
- [11] G. Li, V. Shrotriya, J. Huang, Y. Yao, T. Moriarty, K. Emery, and Y. Yang, *Nature Mater.*, **4**, 864 (2005).
- [12] W. Ma, C. Yang, X. Gong, K. Lee, and A. J. Heeger, *Adv. Funct. Mater.*, **15**, 1617 (2005).
- [13] S. Sohn, G. Kim, K. Park, E. Nam, D. Jung, S. Jang, H. Chae, H. Kim, M. H. Kim, and Y. U. Kwon, *Proceedings of International Symposium on Dry Process*, 157, (2006).

Recent Development Status of Organic Solar Cells

Changhyun Pang¹, Keunhee Park², Donggeun Jung² and Heeyeop Chae¹

¹*Department of Chemical Engineering,*

²*Department of Physics, Sungkyunkwan University, Suwon, 440-746*

(Received February 6, 2007)

Currently, the alternative energy is one of the critical issues because of exhaustion of petroleum resources and its high cost. The solar cell is considered as the one of the promising alternative energy. And the solar cell can be classified to inorganic solar cell and organic solar cell. Although the efficiency of organic solar cell is very lower than the that of inorganic solar cell, organic solar cells have many advantages including low process cost, high transmittance, color variation, and flexibility. For these reasons, organic solar cells have the potential in low cost solar cell market that is challenging for inorganic solar cells. Recent researches of organic solar cell is concentrating on enhancement of efficiency, lifetime, and stability to order to commercially use. Working principles and the development issues of organic solar cells are discussed in this paper.

Keyword : Alternative energy, Organic solar cell, Conductive polymer, photovoltaic effect.

* [E-mail] hchae@skku.edu