

# 최신 유기태양전지 연구 동향

김봉수 교수 (이화여자대학교 과학교육과)

## 1. 서론

현재 잔존하는 양이 제한되어 있으며 연료의 소모 시 이산화탄소 등의 온실 가스 방출의 주요 원인이 되는 석유에너지를 대체할 수 있는 에너지 개발에 대한 관심이 증폭되어 가고 있으며, 이에 대한 정부, 민간기업, 학계 연구진들의 연구 및 투자는 그 어느 때보다 절실히 요구되고 있다. 다양한 에너지원들 중에서 태양에너지에 대해 생각해 볼 때, 단 1시간 내에 태양으로부터 방사되어 나오는 태양에너지가 바로 현 세계가 1년간 사용하는 에너지 양에 해당된다는 사실에 비추어보면 현재 엄청난 양의 에너지가 활용되고 있지 못하고 있음을 깨닫게 된다. 또한 2009년 미국의 연간 에너지 리뷰자료 (그림 1)에 따르면 현재 태

양전지 산업은 전체 에너지 산업에서 단 0.08%를 공급하고 있다 [1]. 따라서, 태양광 관련 기술의 발전은 이 무한한 미래 청정 에너지원인 태양광을 인류가 활용할 수 있도록 해 줄 것이다. 이에 우리나라를 비롯한 다른 유수 선진국에서 몇 해전 공급 과잉으로 잠시 주춤했던 태양광 시설 공급과 수요는 현재 다시 증가되고 있으며, 태양광 기술의 발전을 위한 투자 규모는 여전히 성장하고 있다.

태양에너지를 이용하는 기술은 크게 광활성층을 이루는 물질에 기반하여 무기태양전지와 유기태양전지로 구분지어 볼 수 있다. 실리콘과 CIGS, CZTS 계열의 태양전지 등 무기태양전지는 광흡수 및 전하 전송을 할 수 있는 물질로서 무기물을 활용하며, 염료감응 태양전지 및 유기태양전지는 유기물인 유기염료 및 전도성 유기물질을 광활성층을 이루고 있다. 물론 최근 들어 높은 광전효율을 보고하고 있는 메틸암모니움 납아이오딘에 기반한 유무기 하이브리드 태양전지도 있다. 실리콘 태양전지는 현재 가장 많이 사용되고 있으며 (>90%), CIGS 계열의 태양전지는 고효율 (~20%) 이라는 장점으로 새로운 무기태양전지의 중요한 분야로 대두되고 있다. 하지만 이러한 무기물에 기초한 태양전지는 비싼 생산단가와 유연성이 떨어지는 단점이 있다. 이에 반해 유기물을 이용한 태양전지들은 저렴한 제조단가, 가벼운 소자 무게, 높은 유연성 등의 장점으로 미래 그린에너지 산업의 핵심기술, 특히 유연태양전지

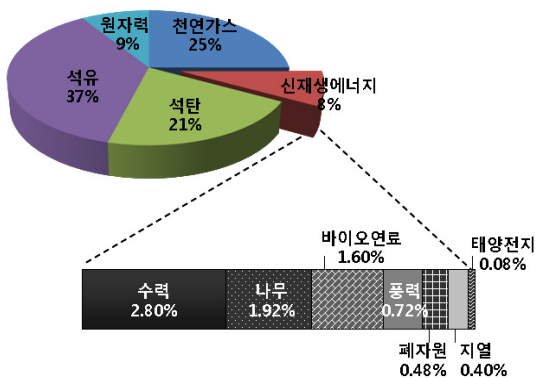


그림 1. 에너지원별 사용 비중 (2009년).

로 중점적인 연구가 진행되고 있다. 현재 유기 태양전지는 새로운 물질의 개발과 소자 제작 기술 발전을 통해 광전변환효율 12% 달성이 보고되었으며, 이미 초기적인 플렉시블 (flexible) 유기 태양전지는 제작된 바가 있다. 일본, 유럽, 한국의 여러 회사에서 휴대용 충전기, 스마트 충전섬유, 건물 외장용 유기 태양전지를 이용한 상업화를 위한 많은 연구가 진행 중에 있다.

본 글에서는 유기 태양전지의 소자 구조, 작동 원리 및 여러가지 주요 소재별 유기 태양전지의 발전 동향을 소개한다.

## 2. 유기 태양전지 구조와 작동원리

일반적으로 유기 태양전지 (organic photovoltaic, OPV)는 정상(normal) 또는 역상(inverted) 형태의 소자 구조를 가지고 있다.

그림 2는 이 두 가지 소자의 구조와 광활성층, 전극 및 각 전극으로의 전하전송에 유리하도록 디자인된 각 전하전송층의 에너지 준위를 보여주고 있다. 정상 구조 소자는 투명한 전극인 indium tin oxide (ITO)/정공전송층 (hole extraction layer, HEL)/광활성층(photoactive layer)/전자전송층 (electron extraction layer, EEL)/금속전극 (예, Al, Ca) 으로 이루어져 있다. 이에 반해 역상 소자는 ITO/전자전송층/광활성층/정공전송층/금속전극 (예, Ag) 으로 이루어져 있다. 현재 투명하여 빛을 들어오게 하는 ITO 전극이 거의 독점적으로 널리 사용되고 있으나 은나노선이나 더욱 저렴한 구리나노선을 이용한 플렉시블 투명전극이 많이 개발되고 있다. 광활성층은 태양전지에서 가장 중요한 태양빛을 받아 정공과 전자를 발생시키고 이렇게 생성된 정공과 전자를 각각 양극과 음극으로 전달시키는 역할을 하며, p-형과 n-형 유기반도체 물질로 이루어져 있다. 정공전송층과 전자전송층은 각 전극으로의 해당 전하를 잘 전달할 수 있도록 전하이동도가 좋아야 하며, 무엇보다 해당 전하에 대한 에너지 준위

가 전극의 페르미 준위와 광활성층에서 해당 전하를 전송시키는 물질의 에너지 준위의 가운데 위치시켜 원활한 전하이동을 유도할 수 있는 물질이어야 한다. 즉, 정공전송층의 최상위 채워진분자궤도(highest occupied molecular orbital, HOMO) 에너지 준위는 양극의 페르미 준위와 광활성층 내 p-형 물질의 HOMO 준위의 중간에 위치하며, 전자전송층은 최하위빈분자궤도(lowest unoccupied molecular orbital) 에너지 준위는 음극의 페르미 준위와 광활성층 내 n-형 물질의 LUMO 준위의 중간에 위치하는 것이 이상적이다. 전자전송층은 대체로 얇은 1~20 nm 정도의 두께를 사용하고 있다. 정공수송층의 대표적인 예로는 poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrenesulfonate) (PEDOT:PSS)와 copper phthalocyanine (CuPc)가 있으며, 전자수송층으로는 lithium fluoride (LiF)와 2,9-dimethyl-4,7-diphenyl-1,10-phenanthroline (BCP), zinc oxide (ZnO), titanium oxide (TiO<sub>2</sub>) 등이 있다.

유기 태양전지의 가장 중요한 요소인 광활성층은 p-형 유기반도체 및 n-형 유기반도체 물질의 조합으로 이루어진다. 활성층의 구조에 대해 좀 더 자세히 살펴보면 그 형태에 따라 크게 두 가지로 나뉜다. 첫째는 초기 연구단계에서 쓰인 이층박막 (bilayer)형이고 두 번째는 벌크헤테로정선 (bulk heterojunction)형이다. C. W. Tang은 1986년에 세계 최초로 1%의 효율을 보이는 이층박막형 태양전지를 발표했다. 이 때는 진공증착을 통해 p-형 물질과 n-형 물질을 개별적인 층으로 나누어 태양전지를 만들었다. 하지만, 여기자의 정공과 전자가 재결합하는데 100 피코초 (피코초는 10<sup>-12</sup>초임) 정도 밖에 걸리지 않아 여기자 확산 거리 (exciton diffusion length)는 약 10 나노미터 (nm) 밖에 되지 않는다는 점과 이러한 이층박막형 태양전지는 p-형과 n-형 물질간의 접촉 면적이 한계가 있어 자유 정공과 자유 전자의 형성에 한계를 가지고 있다. 이 한계를 극복하기 위해 이 p-형과 n-형 물질을 적절히 섞여진 벌크헤테로정선형 유

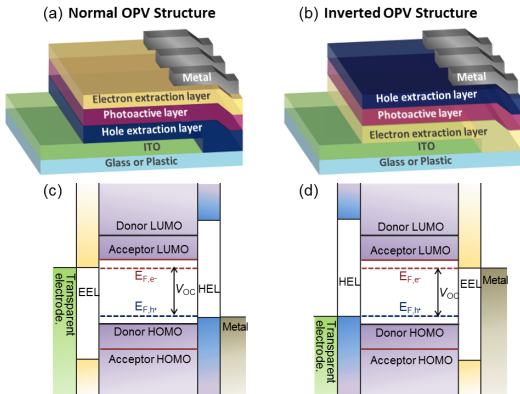


그림 2. (a) 정상 및 (b) 역상 유기태양전지 소자 구조, (c) 정상 및 (d) 역상 유기태양전지를 이루는 각 요소층의 명칭과 적절한 에너지 준위, 빛 조사시 광활성층에서 형성되는 정공들의 페르미준위( $E_{F,h^+}$ ) 및 전자들의 페르미준위( $E_{F,e^-}$ )와 그 두 준위의 차이에 의해 결정되는 개방 회로 전압(open-circuit voltage,  $V_{oc}$ )이 함께 나타나 있음.

기태양전지가 개발되었다. 특히 1995년 A. J. Heeger 그룹에 의해서 진공 증착에 비해 공정비가 훨씬 저렴한 용액 공정으로 이 벌크헤테로정선 형태의 태양전지가 효율 향상에 크게 도움이 된다는 사실이 발표되었다. 따라서 현재의 유기태양전지 연구는 벌크헤테로정선타입(bulk heterojunction, BHJ)을 주로 사용하고 있다. 이러한 BHJ 소자에서 높은 광전변환 효율을 달성하기 위한 가장 적절한 광활성층의 두께는 70~200 nm 정도인 경우가 많으나 최근 대량생산에 유리한 롤투롤(roll-to-roll) 공정에서 필름형성이 유리한 더 두꺼운 층에서도 고효율을 나타내도록 하는 연구가 활발히 진행 중이다.

유기태양전지에서 광전현상이 일어나는 원리는 크게 4가지 단계로 설명할 수 있다 [2]: (1) 광활성층 내의 p-형과 n-형 물질에 의한 빛(즉, 광자(photon))의 흡수를 통한 여기자(즉, 여기된 상태에서의 정공-전자가 쿨롱힘에 의해 묶힌 입자, exciton)들의 형성, (2)이 여기자들의 p-형과 n-형 물질이 접촉해있는 계면으로의 램덤워크 확산(random work diffusion)이

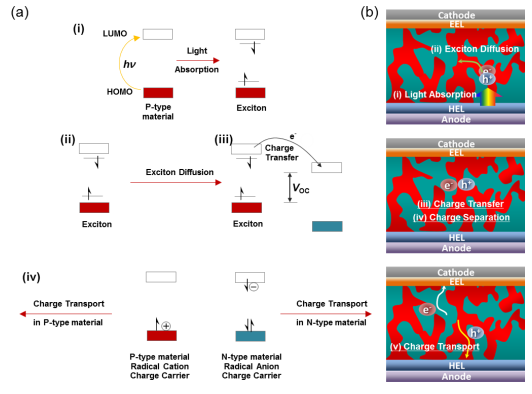


그림 3. (a) p-형 유기소재에서 형성되는 여기자로부터 자유 정공, 자유 전자가 형성되는 과정을 에너지 준위로 기본으로 나타내는 개략도, (b) 동일한 현상을 각 소재층 내에서 전하의 형성과 이동을 나타내는 개략도. n-형 유기소재에서도 여기자는 형성될 수 있으며 단순화를 위해 p-형 유기소재에 대해서만 표현됨.

동, (3) 계면에서의 정공들은 더욱 안정한 p-형 물질의 HOMO 에너지 준위로, 전자들은 더욱 안정한 n-형 물질의 LUMO에너지 준위로의 이동(이 때 각 전하의 이동에 동반되는 전하의 안정화 에너지는 최초의 여기자 상태에서의 정공-전자간의 쿨롱인력에 의한 에너지보다 커야한다. 대체로 ~0.3 eV 만큼의 안정화에너지가 필요하다고 알려져 있다.), (4) 분리된 각 전하들은 일함수가 작은 전극과 큰 전극을 전기적으로 연결 시 이 두 전극 사이의 페르미 레벨(Fermi level)이 평준화되면서 두 전극 사이에 놓인 층 내에 형성되는 내부확산전위(built-in potential)에 의해 정공은 양극으로 전자는 음극으로 이끌리어 전극으로 전달된다. 이에 대한 이해를 돕기 위해 p-형 유기소재에서의 여기자 형성 및 자유 정공, 자유 전자의 형성 과정을 에너지 준위와 물리적 위치에 대해 그림 3에 나타내었다.

태양전지 소자의 특성을 측정하기 위해서 1 태양광 세기 하에 전압을 가하면서 전류의 변화를 측정하게 되는데 그 전류-전압 특성 곡선으로부터 광전변환효율(power conversion efficiency, PCE)을 구할 수 있다. 그림 4에 있

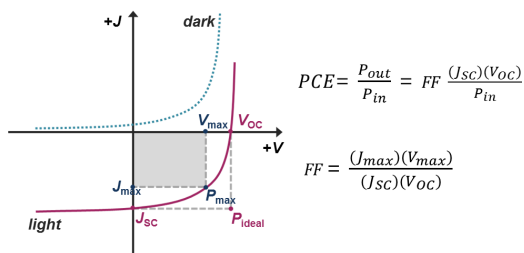


그림 4. 태양전지 소자의 전류-전압 곡선 및 광전변환효율 계산식.

는 가상의 전류-전압 곡선에서 x-축과 만나는 점을 개방회로전압 ( $V_{oc}$ ), y-축과 만나는 점을 단락전류밀도 ( $J_{sc}$ ), 마지막으로 이 두 인자의 곱으로 얻을 수 있는 이론적인 최대전력 ( $J_{sc} \times V_{oc}$ )과 실제 얻을 수 있는 최대 전압 ( $V_{max}$ )과 면적당 최대 단락전류 ( $J_{max}$ )의 곱에 의해 결정되는 실제 가용 최대전력 ( $J_{max} \times V_{max}$ )의 비에 의해 결정되는 충전계수 (FF)라는 인자의 곱으로 광전변환효율이 구해진다.

### 3. 유기태양전지에서 중요한 인자들

높은 광전변환효율을 달성하기 위해서는 자유전하 형성 메커니즘에 따르면 유기태양전지의 광활성층 물질은 넓은 파장영역대에 대해 광자흡수 계수가 높을수록 유리하고, p-형과 n-형 물질간의 적절한 에너지 준위를 가지며 넓은 계면 형성을 통해 효과적인 전하전이 (charge transfer)가 이루어져야 한다. 넓은 계면 형성을 위해 p-형과 n-형 물질은 매우 잘 섞이는 것이 좋으나, 전하전이에 의해 형성된 자유전자와 정공이 서로 다시 만나는 현상을 줄이기 위해 약 10 nm 정도의 잘 연결된 도메인 형성이 필수적으로 필요하다. 이러한 구조를 잘 이끌어내기 위해 열어닐링이나 용매어닐링, 높은 끓는점을 지니는 용매 첨가법 등이 알려져 있다. 물론 높은 전하이동도를 가지는 p-형과 n-형 물질을 이용하는 것도 중요하나, 속도의 균형 또한 중요하다. 현재 높은 효율을 보이

는 p형 물질의 정공 이동도(mobility)는 약  $10^{-2} \sim 10^{-4} \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 이며, n형 물질의 전자 이동도는 약  $10^{-3} \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$  정도이다. 마지막으로, p-형과 n-형 에너지 준위는 개방회로 전압에 크게 영향을 주어 낮은 HOMO 준위를 가지는 p-형 소재와 높은 LUMO를 가지는 n-형을 사용하여 BHJ 광활성층을 형성함이 좋겠다.

## 4. 유기태양전지의 대한 연구 동향

유기태양전지의 연구 동향에 대한 광활성층에 쓰이는 주요 물질 개발 및 광활성층 외 구성층의 개발에 대한 연구들을 아래에 소개하겠다.

### 4.1 고분자/플러렌 유도체 태양전지

유기태양전지에서 현재 널리 연구되고 있으며 단위셀에서 고효율을 나타내는 고분자 태양전지는 고분자를 p-형 물질로 쓰고 플러렌 유도체인 [6,6]-phenyl-C61-butyrac acid methyl ester (PC<sub>61</sub>BM) 또는 [6,6]-phenyl-C<sub>71</sub>-butyrac acid methyl ester (PC<sub>71</sub>BM)을 n-형 물질을 광활성층을 이루는 물질로 사용하고 있다.

그림 5는 학계에 발표된 높은 효율을 보인 고분자 태양전지를 이루는 고분자의 화학구조를 보여주고 있다. 2005년 P3HT 고분자는 합성법의 발달에 의해 태양전지에 적합한 분자량을 가지게 되고, 또한 n-형 물질인 PC<sub>61</sub>BM과의 적절한 morphology를 가능토록 하는 열어닐링 (thermal annealing) 및 용매어닐링 (solvent annealing) 법이 개발되면서 그 효율은 1~2%에서 4~5%로 증가하였다. 특히 알루미늄 전극을 활성층 위에 증착한 후 열어닐링을 했을 때 5%에 도달할 수 있다는 사실은 2005년에 A. J. Heeger 그룹과 D. Carroll 그룹에서 비슷한 시기에 보고되었다. 그 이후 더욱 더 많은 연구가 이 P3HT라는 고분자에 대한 연구가 진행되었지만, 그 효율의 향상은 고

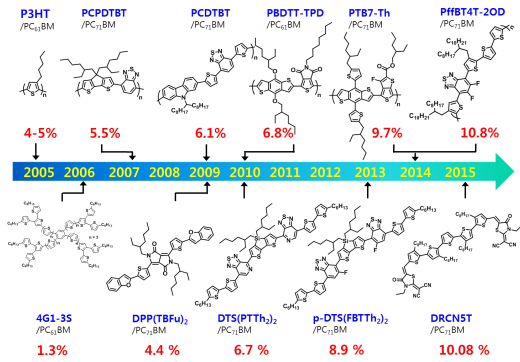


그림 5. 용액공정 가능 유기태양전지용 p형 물질의 화학구조 및 연도별 효율 향상 추이.

분자의 흡수파장 영역이 약 650 nm 정도 밖에 되지 못하고, HOMO 준위가 5.2 eV로 높아서 개방회로전압 ( $V_{oc}$ ) 값이 0.6 V밖에 이르지 못하는 한계를 지니고 있었다. 이로 인해, 태양광을 더욱 넓은 파장 영역을 흡수할 수 있는, 즉 낮은 밴드갭을 가지는, 신물질의 개발에 과학계는 더욱 박차를 가하게 되었다. 이러한 노력은 결실로 이어지고 있으며, 2007년부터 PCPDTBT, PCDTBT, PBDTT-TPD, PTB7-Th, PffBT4T-2OD 등의 낮은 밴드갭 고분자들이 만들어 졌으며, 효율은 해가 거듭될수록 증가해서 현재 10.8% 정도까지 발표되고 있다.

이러한 고효율 고분자와 짝을 이루는 n형 물질로 PC<sub>61</sub>BM 과 PC<sub>71</sub>BM (그림 6)이 널리 사용되고 있다. 이 두 물질은 에너지 준위는 거의 같으나 흡광계수와 영역 측면에서 PC<sub>71</sub>BM이 더욱 뛰어나서 낮은 밴드갭을 가지는 고분자들과 짝을 이뤄 높은 효율을 내는 경우가 흔히 있다. 하지만 항상 그렇지 않은 이유는 이 n-형 물질들과 고분자 물질이 이루는 모폴로지의 적절성 등 때문에 각 물질에 따라 둘 중의 한 물질이 더 좋은 짝을 이루게 된다.

### 4.2 단분자/플러렌 유도체 태양전지

진공증착을 이용한 p형 단분자의 연구는 위에서 언급한대로 가장 초기적인 유기태양전지

의 소자 제작법이었다. 가장 기본적인 이층구조형의 낮은 효율은 다양한 종류의 다층막 구조 (ITO/정공전송층/p-형 물질/p-형:n-형 혼합층/n-형 물질/전자전송층/음극)를 가지면서 효율은 6% 정도까지 향상되었다. 하지만 이러한 진공증착을 통한 다층막 소자제작은 대량생산이 용이하지 않고 공정시 물질의 손실이 크다는 단점이 있다. 이를 개선하기 위해 몇 년 전부터 용액 공정이 가능도록 흡광계수가 높은 염료 분자 구조를 변형하여 만든 p-형 단분자를 플러렌 유도체와 함께 섞어 벌크 헤테로접선으로 소자를 만드는 노력이 점차 늘어나고 있다.

그림 5를 보면 2008년까지는 1% 정도의 효율로 머물러 있었으나 2008년부터 염료분자 구조를 이용한 DPP 계열의 단분자들은 3% 정도의 효율을 보이며 가능성을 보이기 시작했으며, 2009년에는 T.-Q. Nguyen 그룹에서 ITO/PEDOT:PSS/DPP(TBFu)<sub>2</sub>:PC<sub>71</sub>BM/Al 소자구조로 효율 4.5%를 이루어 발표하였다. 이 효율은 최근 첨가제의 이용과 전자전송층에 대한 연구를 통해 급격한 증가를 가져왔으며 2013년 Heeger 그룹에서는 p-DTS(FBTTh)<sub>2</sub> 라는 물질로 8.9%를 발표하였으며, 최근에는 Y. Chen 그룹에서 DRCNST라는 분자를 개발하여 10.08%에 이르는 매우 높은 광전변환효율을 발표하였다. 이렇듯 단분자들을 이용하여 만든 태양전지의 더 높은 효율향상을 이루게 된다면, 단분자 물질들의 정제가 고분자에 비해 용이하고 재현성 있게 물질을 대량 합성할 수 있기 때문에 유기태양전지의 상업화를 더욱 앞당길 수 있다는 가능성을 지니고 있다. 물론 고분자태양전지에 비해 낮은 열안정성은 그 단점으로 지적되고 있으며 이를 더욱 개선해나가야 할 것이다.

### 4.3 고분자/비플러렌 단분자 태양전지

위에서 언급한 태양전지들은 기본적으로 n-형 물질로 플러렌유도체를 사용하고 있다. 이는 플러렌 (C<sub>60</sub> 또는 C<sub>70</sub>) 기반으로 상당한 기간 동

안 연구 개발되고 있어 왔으며, 용해도 증가를 위해 페닐(phenyl)과 알킬체인(alkyl chain)이 붙어있는 PC<sub>61</sub>BM과 PC<sub>71</sub>BM이 현재 가장 높은 효율을 보이고 있기 때문이다. 하지만, 플러렌 기반 소재는 합성하는 동안 다양한 아이소머들을 함께 형성되고, 분리 정제한 배치 내에 존재하는 아이소머들의 종류/분포도에 따라 광전변환 효율이 다르게 되는 단점을 지니고 있다. 또한, 가격적인 부분에서도 기본적으로 플러렌 기반 소재의 합성 수율이 낮으며 (~20%) 정제가 까다롭기 때문에 대량합성 시에도 가격이 낮아 지기가 어려운 단점을 지니고 있다. 따라서, 가격도 낮으며, 안정성이 뛰어난 새로운 고분자태양전지용 비플러렌유도체 n-형 단분자 또는 고분자 소재의 개발이 최근 들어 활발히 이루어지고 있으며 상당한 진전을 이루었다. 먼저 비플러렌 단분자를 이용한 유기태양전지 연구에 대해 소개하도록 하겠다.

비플러렌 n-형 단분자를 이용한 고분자태양전지는 2000년도부터 꾸준히 연구되어 왔다. 2007년 미국의 UC, Santa Barbara 대에 있는 Wudl 그룹에서는 그림 6에 나와 있는 4번 화합물을 poly(3-hexylthiophene) (P3HT) 고분자와 함께 사용하여 1.4%를 달성하였다. 특히, 주목할 점은 개방전압 ( $V_{oc}$ )가 1.10 V로 매우 높은 점이다. 이는 non-fullerene계 n-type 단분자가 현재의 고분자태양전지 효율을 더욱 향상시킬 수 있을 가능성을 제시하였다. 이후 다양한 n-type 단분자를 이용한 고분자태양전지 결과가 발표되었다. 특히, 2014년에 다양한 perylene diimide (PDI) 유도체들이 중국, 미국에서 개발되면서 고분자태양전지 효율은 5.9%까지 발전하였다. 미국의 Columbia university의 Nuckolls 그룹은 PDI 구조를 fused 형태로 ethylene을 통한 결합을 통해 만들어진 Helical PDI I을 통해 효율 5.94%를 달성보고 하였으며, 올해 더욱 더 긴 hPDI4라는 분자를 플레렌 유도체 기반 고분자태양전지에서 가장 좋은 효율이 나오는 PTB7-Th 고분자와 혼합한 광활성층에서 8.3%라는 아주 높은 효율을 달성하였

다. 미래 더욱 저가의 대량 양산이 가능한 고성능 비플러렌 n-형 단분자들이 더욱 많이 개발될 것으로 생각된다.

#### 4.4 고분자/고분자 태양전지

p-형 고분자와 n-형 고분자의 조합을 이용한 고분자/고분자 태양전지는 효율적인 부분에서 아직까지 많은 개선을 요구하지만 고분자와 고분자의 조합을 통한 좋은 기기적인 강도 및 내구성이 예측되어 플렉시블 유기태양전지 제작에 특히 가능성이 높은 전지이다. 고분자/고분자 태양전지의 제작과 그 특성 연구는 1995년 Friend 그룹과 Heeger 그룹에서 동시에 PPV 계열 p-type 고분자와 CN-PPV 계열의 고분자를 이용하여 0.9%의 효율을 달성함과 동시에 시작되었다. 주요 특징은 개방전압 ( $V_{oc}$ )이 1.25 V까지 달성되어 CN-PPV 계열을 n-type 고분자로 사용 시 높은  $V_{oc}$ 를 달성 가능함을 시사하였다. 이후 CN-PPV 계열의 고분자인 2005년 CN-Ether-PPV 개발로 1.7% 효율로 개선되었으며, 2009년 Frechet 그룹은 POPT 고분자와 CN-PPV 고분자를 이용하여 2.0% 효율을 달성보고 하였다. Bilayer 구조에서는 2004년 BBL 고분자를 이용하여 Jenekhe 그룹은 공기 중에서 소자를 제작하여 1.5%를 달성보고 하였다. 이와 동시에 benzothiadiazole 계열의 고분자들이 합성되어 고분자/고분자 태양전지가 제작되어 왔으며, PF12TBT 고분자는 P3HT 고분자와 블렌드를 만들었을 때 2.0%를 달성할 수 있게 되었다. 최근 들어, rylene 계열의 n-type 고분자들이 두드러지게 고분자/고분자 태양전지에서 좋은 특성을 나타내어 보고하고 있다. 먼저, rylene 계열의 n-type 고분자의 유기태양전지에의 적용은 2007년 Mader 그룹에 의해 P(PDI-PEPEP) 고분자를 이용하면서 시작되었다. 당시 효율은 1.03%로 높지 않았으나, 이후 신규 n-type 고분자들의 개발로 인해 효율은 지속적으로 상승하고 있다. 2011년 Hashimoto 그룹은 carbazole과 perylene

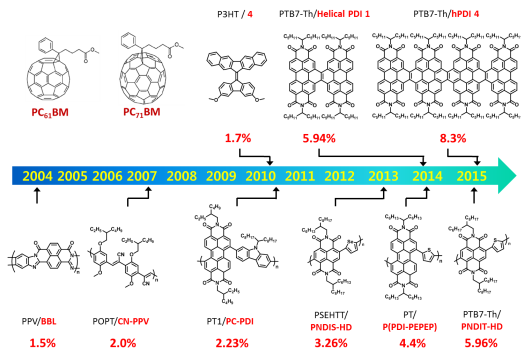


그림 6. 용액공정 가능 유기태양전지용 n-형 물질의 화학구조와 광전변환효율.

diimide (PDI) 를 중합하여 PC-PDI 고분자를 만들었으며, 이는 2.23%의 효율을 보였다. 2013년 Jenekhe 그룹은 naphthalene diimide (NDI)를 thiophene, selenophene 등과 연결하여 고분자/고분자 태양전지를 제작하여 3.3%라는 당시 최고 효율을 달성하였다. 이후 n-type 고분자를 이용한 고분자/고분자 태양전지 연구는 더욱 활성화 되어 Bao 그룹은 4.4%를 달성 발표하였다. 국내연구진인 한국과학기술원 김범준 교수 그룹에 의해 5.96%까지 상승한 상태이다. 현재 문헌상 가장 높은 효율은 2015년 Jenekhe 그룹에서 발표한 NDI와 PDI 구조를 공중합한 3OPDI 구조의 고분자로 만든 소자로부터 얻었으며, 그 광전변환효율 6.3%를 나타내었다.

#### 4.5 활성층외의 구성층에 대한 연구

현재 유기태양전지에서 가장 중요한 활성층 외에도 다양한 소재 개발에 대한 연구가 동시에 진행되고 있다. 먼저 정공수송층으로 널리 사용되고 있는 PEDOT:PSS층은 강산성이어서 장기안정성에 문제를 가지고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 중성적이며 더욱 안정적인 다른 금속산화물 (MoO<sub>3</sub>, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, NiO, WO<sub>3</sub> 등)으로 PEDOT:PSS층을 대체하려는 연구가 진행되고 있다. 한 예로 2008년 T. J. Marks 그룹

에서 NiO층의 경우 효율을 P3HT:PC<sub>61</sub>BM 활성층을 사용한 경우 효율이 5.2%로 향상되고 소자의 구동이 더욱 안정적이라는 것이 발표되었다. 하지만 현재 이러한 금속산화물은 고가의 장비를 이용해야 하기 때문에 상업화를 위해서 더욱 저렴한 방법으로 금속산화막을 제작하려는 연구가 현재 진행 중에 있다. 또한 점점 가격이 오르고 있는 ITO 기판을 더욱 저렴한 투명전극으로 대체하려는 연구가 진행되고 있다. 주로 금속나노선 (Ag, Cu, CuO) 또는 나노물질 (carbon nanotube, graphene 등)을 이용한 기술들이 개발되고 있다.

### 5. 맺는말

현 시점에서 유기태양전지 기술의 상용화는 아직 한계가 있다. 시장성 확보를 위해서는 현재의 약 12% 정도의 셀효율과 8% 모듈 효율이 더욱 향상되어야 한다. 또한 유기태양전지용 소재 및 소자의 안정성 확보, 고순도 p-형 및 n-형 물질들의 대량 양산, 대면적에서의 고효율 확보 등의 과제들이 해결되어야 한다. 하지만 이러한 문제를 극복하기 위한 기업체 연구소, 기관, 대학 등에서는 많은 연구 노력이 진행되고 있으며, 위에서 보여준 것처럼 최근 이 분야에서 거두어 온 거둬진 셀 효율의 향상은 현재의 10~12% 셀효율을 수년 내에 15% 정도의 효율로 향상시킬 수 있을 것으로 보인다. 이러한 효율의 향상은 다른 태양전지 기술에 의한 시장의 상품을 대체하고, 또한 투명성이 좋고 다양한 색감을 통한 디자인 효과까지 살리는 방향으로 이어질 것으로 생각되며, 다각적인 연구로 안정성 향상과 모듈 효율의 향상 등도 함께 이루어져, 궁극적으로는 대량 습식 양산 방식인 롤투롤 (roll-to-roll)이라는 방법을 이용하여 저렴하면서도 투명하며 플렉시블 제품으로 유기태양전지 기술은 시장에 선을 보일 것으로 예상된다.

## 참고 문헌

- [1] Annual energy review 2009 (U.S. energy information administration)
- [2] K. M. Coakley et al., "Conjugated Polymer Photovoltaic Cells", Chemistry of Materials Vol. 16, pp. 4533-4542, 2004.

### 저자약력



성명 : 김봉수

◆ 학력

• 2000년  
고려대학교 이과대학  
화학과 이학학사

• 2002년  
고려대학교 이과대학  
화학과 이학석사

• 2008년  
University of Minnesota,  
Twin Cities 대학원 화학과  
이학박사

◆ 경력

- 2008년 - 2010년 University of California,  
Berkeley 박사후 연구원
- 2010년 - 2014년 한국과학기술연구원(KIST)  
선임연구원
- 2014년 - 2015년 한국과학기술연구원(KIST)  
책임연구원
- 2015년 - 현재 이화여자대학교  
과학교육과 조교수

