

유기 복합재를 이용한 고분자 태양전지

김 희 주 · 이 광 희

1. 서론

현재 인류는 지금까지 이룩한 문명의 원동력인 화석연료의 점진적인 고갈로 인해 미래 대체에너지 개발에 박차를 가하고 있다. 이러한 대체에너지 중에서 가장 유망하고 활발하게 연구되고 있는 분야는 태양광 발전이라고 할 수 있다. 현재 사용되고 있는 에너지원인 석유, 석탄 등의 화석연료 들은 매장량의 한계, 원자력 발전은 안정성과 환경오염 등의 문제를 가지고 있는 점을 고려한다면, 거의 50억년의 수명을 가진 태양을 에너지원으로 이용하는 태양광 발전은 여러 가지 이점이 있다고 하겠다.

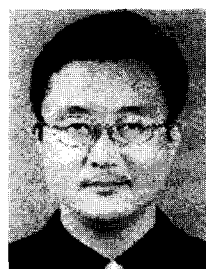
태양광 발전을 하기 위해서는 태양광을 효율적으로 전기에너지로 전환시키는 것이 중요하다. 이를 위해서는 입사된 빛이 물질 내에서 생성시키는 광전하의 생성 효율이 높아야 할 뿐만 아니라, 전기 에너지로의 전환 효율도 높은 우수한 신소재의 개발

이 필수적이라고 할 수 있다. 이와 더불어 이를 이용하여 제작하는 태양전지의 제작 단가를 낮출 수 있는 기술 개발이 관건이다.

현재 태양에너지 개발의 방향은 높은 광전하 생성효율을 가진 신소재의 개발을 위하여 silicon, amorphous silicon, GaAs, CdS/CdTe 등의 무기물을 이용한 태양전지를 개발 완료 또는 개발 중이며, 태양전지의 저가화를 위해서 박막형 태양전지의 개발을 추진 중이다.¹ 그리고, 반도체 고분자 (conjugated polymer), 단분자 등의 유기물을 이용한 태양전지 개발도 시도되고 있다.^{2,3} 유기물, 특히 그 중에서 고분자를 이용한 태양전지는 고분자 고유의 제조 공정상의 간편함, 즉 상온에서의 제작 가능, 쉬운 박막 형성방법, 그리고 대면적의 태양전지 개발 가능 등으로 인한 소자의 저가화가 가능한 광전자 소자로의 연구가 많이 되고 있다.³ 그러나, 가장 주목할 만한 고분자 태양전지의 연구는 반도체 고



김희주
1998 부산대학교 물리학과 (학사)
2000 부산대학교 물리학과 (석사)
2000~ 부산대학교 물리학과 박사과정
현재



이광희
1983 서울대학교 원자핵 공학과 (학사)
1985 한국과학기술원 물리학과 (석사)
1983~ 한국원자력연구소 선임 연구원
1990
1995 미국 캘리포니아 주립대 산타바바라 분교 물리학과 (박사)
1995~ 미국 캘리포니아 주립대
1997 산타바바라 분교 고분자 연구소 (Institute for Polymer and Organic Solid) (Post-Doc)
1997~ 부산대학교 물리학과 조교수
현재

Polymer Solar Cells Based On Conjugated Polymer/Fullerene Composites

부산대학교 물리학과 (Heejoon Kim and Kwanghee Lee, Department of Physics, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea) e-mail:kwhee@hyowon.pusan.ac.kr

분자에 풀러린 (C₆₀)을 첨가한 유기 복합재에서 발견된 고효율의 광여기 전하 이동 현상 (photoinduced charge transfer)을 태양전지에 응용함으로써 획기적인 발전이 이루어지게 되었다.⁴

반도체 고분자는 1977년 polyacetylene에 도핑을 시킴으로써 전기 전도도를 급격히 증가시킨 전도성 고분자의 발견 이후 많은 관심을 받고 연구가 진행중인 물질이다.⁵ 그러한 중요성의 결과로써, 최초의 발전자인 A. G. MacDiamid, A. J. Heeger, H. Shirakawa는 2000년에 노벨 화학상을 수상했다.⁶ 전도성 고분자와는 달리 도핑을 시키지 않은 반도체 고분자는 1990년 영국 Cambridge 대학의 R. Friend 교수팀에서 poly(*p*-phenylenevinylene) (PPV)을 이용하여 발광소자 (polymer light emitting diode : PLED)를 제작한 이후로 많은 관심을 받게 되었다.⁷ PLED의 성공으로 인하여 반도체 고분자를 이용하여 다른 전자 소자 분야로의 응용이 시작되었는데 고분자 태양전지도 그 중의 하나였다. 하지만, 초기의 반도체 고분자를 이용한 태양전지는 Schottky diode 구조를 가지고 있었고, 그 에너지 전환 효율이 1%를 넘지 못하였다.⁸ 그래서, 고분자를 이용한 태양전지는 그 연구가 부진한 듯 하다가, 1992년 University of California at Santa Barbara (UCSB) 그룹의 N. S. Sariciftci 박사가 PPV유도체에 풀러린을 첨가한 복합재에서 고효율의 광여기 전하 이동 현상을 발견하고, 곧이어 이를 이용한 태양전지로의 응용 및 복합재에서의 광전도도 측정을 통하여 반도체 고분자/풀러린 복합재가 아주 효과적인 고분자 태양전지의 재료로써 사용이 가능함이 확인되었다.^{4,9,10} 그 후 1995년 UCSB의 Heeger 교수팀의 G. Yu 박사가 고분자와 가용성 풀러린을 이용한 블렌드 형태의 고분자 태양전지를 만들어 단색 여기광 하에서 2.9%의 에너지 전환 효율을 보고하여 고분자 태양전지의 비약적인 발전을 이루었다.² 최근에는 오스트리아의 LIOS (Linz Institute of Organic Solar Cell) 그룹에서는 A.M.1.5 조건하에서 3%의 에너지 전환 효율을 가지는 고분자 태양전지를 발표하였다.¹¹

현재 세계적으로 이렇게 고분자 태양전지에 대하여 많은 연구 및 발전이 계속되고 있는 있으므로, 본 저자들은 고분자 태양전지에 대한 간단한 소개를 통하여 국내 학계에서 고분자 태양전지의 관심을 가지는 계기가 되었으면 한다. 그러므로, 본 글에서는 고분자 태양전지의 동작 원리와 사용되는

재료, 연구 현황 그리고 앞으로의 연구 방향에 대하여 간단히 정리해 보겠다.

2. 고분자 태양전지의 원리

2.1 태양전지의 특성 변수들

일반적으로 태양전지의 에너지 전환 효율 (power conversion efficiency: η_e)은 다음과 같이 정의 되어진다.

$$\eta_e = FF \cdot \frac{I_{sc} V_{oc}}{P_m}$$

이 때, V_{oc} , I_{sc} , FF , P_m 은 각각 개방 전압, 단락 전류, *Fill Factor*, 입사된 빛의 세기를 나타낸다. **그림 1**에서 보는 바와 같이 개방 전압은 광전류가 흐르지 않을 때의 전압을 의미하며, 전압을 걸지 않았을 때 태양전지에서 외부로 흐르는 전류를 단락 전류, 그리고 빛을 쬐었을 때 얻어지는 *I-V* 특성 곡선에서 제 4분면 내의 곡선에서 그려지는 사각형의 최대 면적으로부터 다음과 같은 *Fill Factor*를 정의 할 수 있다.

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}}$$

따라서, 태양전지의 효율을 증대 시키려면, I_{sc} , V_{oc} , 그리고 FF 가 큰 소자를 제작해야 된다.

2.2 고분자 태양전지에서의 광기전력 효과

고분자 태양전지에서 광기전력 효과 (photovoltaic

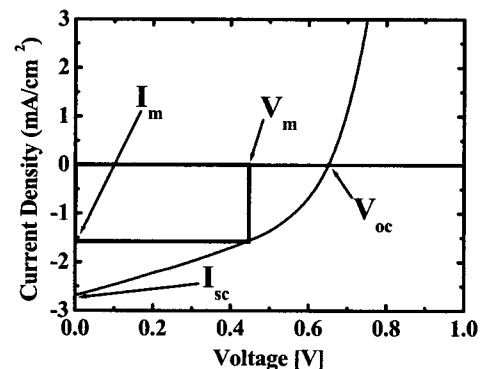


그림 1. 빛을 쬐었을 때 태양전지의 *I-V* 특성 곡선.

effect)는 빛의 흡수, 전자-정공의 분리, 전하의 수집 등의 세 가지 과정으로 설명된다.

2.2.1 빛의 흡수

반도체 고분자/풀러린 복합재에서 빛을 받아 전하를 생성시키는 것은 반도체 고분자이다. 반도체 고분자, 즉 π -공액 고분자에서는 주사슬을 이루고 있는 탄소 원자의 최외곽 전자 4개중 3개만이 σ -결합을 이루고 있고, 나머지 하나는 p_z 궤도 함수를 이루어 이웃하는 탄소의 p_z 궤도 함수와 π -결합을 이루면서 사슬을 따라서 비국소화(delocalization)되어 있다. π -전자(π^* -전자)의 파동함수들이 중첩에 의해 이들은 각각 가전도 띠(valence band)와 전도 띠(conduction band)를 이룬다. 그리고, 가전도 띠와 전도 띠 사이의 에너지 간격은 반도체의 에너지 간격과 비슷한 1.5~3 eV 정도의 가시광 영역에서의 값을 가진다. 따라서, 이 영역에서의 에너지를 가지는 빛을 쬐어주게 되면 π - π^* 전이가 일어나고 이를 통해서 전자-정공 쌍이 형성된다.

2.2.2 전자-정공의 분리

반도체 고분자의 밴드갭 이상의 에너지를 가진 빛의 입사로 생성된 전자와 정공이 광기전력에 기여를 하기 위해서는 전자-정공 쌍의 분리가 필요하다. 반도체 고분자/풀러린 복합재에서는 이것을 광여기 전하이동 현상이라는 매우 흥미있는 과정으로 설명한다. 광여기 전하이동 현상은 반도체 고분자의 에너지 밴드갭 이상의 에너지를 가진 빛을 쬐어주었을 때 고분자(전자 주계)에서 여기된 전자가 풀러린(전자 받계)으로 이동하는 현상이다(그림 2 참조). 이것은 풀러린의 매우 높은 전자 친화도에 기인한 것인데 전자가 이동하는 시간은 50 fs ($\sim 10^{-14}$ s) 이내에 일어나므로 고분자 내의 어떠한 재결합 과정보다 더 빠르므로 매우 효율적이다.¹² 반면, 풀러린으로 이동한 전자는 고분자의 정공과 재결합하는데 걸리는 시간이 ms ($\sim 10^{-3}$ s) 이내에 일어난다.⁴ 따라서, 이러한 비대칭적인 시간 반응은 높은 효율의 광여기 전자 이동 효율을 뒷받침해 주고 그 효율은 거의 100%에 이른다. 그리고, 전자 주계와 받계 사이의 광여기 전하이동 현상은 반도체 고분자 내에서 보여지는 빠른 전자-정공의 재결합을 막아주고, 이것은 광전자 소자에서 분리된 전자-정공 쌍이 만들 수 있는 광반응을 증가시켜 줄 수 있는 효과적인 방법을 제시해 준다. 결과적으로 반도체 고분자/풀러린 복합재에서는 광여기 전

하이동 현상에 의해 매우 좋은 형광(photoluminescence; PL) 효율을 가진 반도체 고분자에서 형광이 보이지 않는 “형광 소멸(PL quenching)”이 관찰된다(그림 3).

2.2.3 전하의 수집 : 내부 전기장의 형성

분리된 전하의 수집은 소자 구조에서 설명되어진다. 그림 4는 고분자 태양전지의 구조를 나타내고

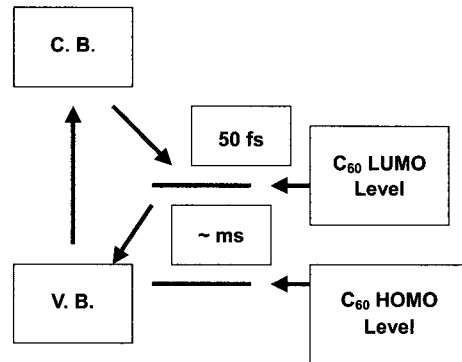
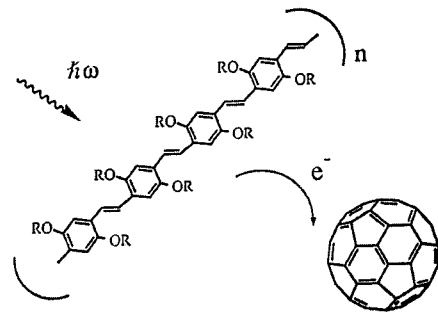


그림 2. 반도체 고분자/풀러린 간의 광여기 전하이동 현상.

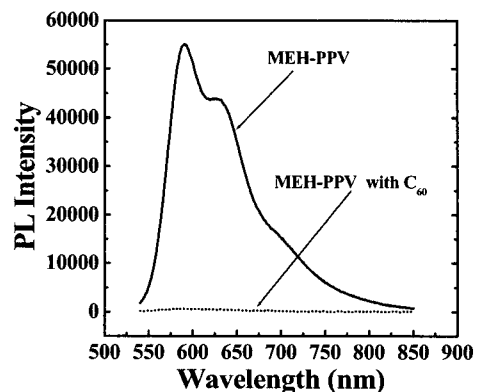


그림 3. 반도체 고분자(MEH-PPV)와 C₆₀ 복합재에서의 형광 소멸.

있다. 고분자 태양전지는 전형적인 금속/반도체/금속 구조로 높은 일함수를 가진 투명전극인 ITO를 양극으로, 낮은 일함수를 가진 Al 이나 Ca 등을 음극으로 사용한다. 고분자 박막 층은 고분자 용액을 spin cast 방법이나 ink-jet print 방법, 또는 screen print 방법을 이용하여 100 nm 정도의 두께로 코팅을 한다. 일반적으로 반도체 고분자는 진성 반도체이므로 두 개의 전극 사이에서 고분자 층 자체가 공핍영역을 형성하게 된다. 그리고, 비대칭적인 일함수 차이는 반도체 박막을 가로질러 내부 전기장을 형성시키고, 이것은 광전하 생성시 분리된 전자와 정공이 각각 음극과 양극으로 쉽게 이동할 수 있도록 한다. 따라서, 태양전지에 반도체 고분자의 밴드갭 이상의 에너지를 가진 빛을 쬐어 주었을 때, 생성된 전자는 광여기 전하이동에 의해서 풀러렌의 LUMO (lowest unoccupied molecular orbital) 준위로 이동하게 되고 정공은 고분자 사

슬에 남게 된다. 이 전자와 정공은 소자 구조에서 형성된 내부 전기장에 의해 각각 음극과 양극으로 이동하게 되고 이것이 광기전력 효과를 일으키는 과정이 된다.³ 그리고, 소자에 순방향의 전압을 가하게 되면 어느 순간에 광전류가 '0'이 되는 순간이 있는데, 이 때의 전압이 앞에서 언급한 개방 전압이다. 따라서 고분자 태양전지 내의 내부 전기장의 크기는 개방 전압의 값과 연관이 되는 것이다. 반도체 고분자에서의 내부 전기장 형성에 대한 원인은 비대칭적인 일함수 차이에 의한 것으로 설명되고 있었으나,¹³ 최근의 LIOS 그룹의 연구 결과는 반도체 고분자의 HOMO (highest occupied molecular orbital) 준위와 전자 받개의 LUMO의 차이가 이 값을 결정한다고 보고하고 있다.¹⁴ 이 과정을 에너지 준위 다이어그램으로 나타낸 것이 **그림 5**이다.

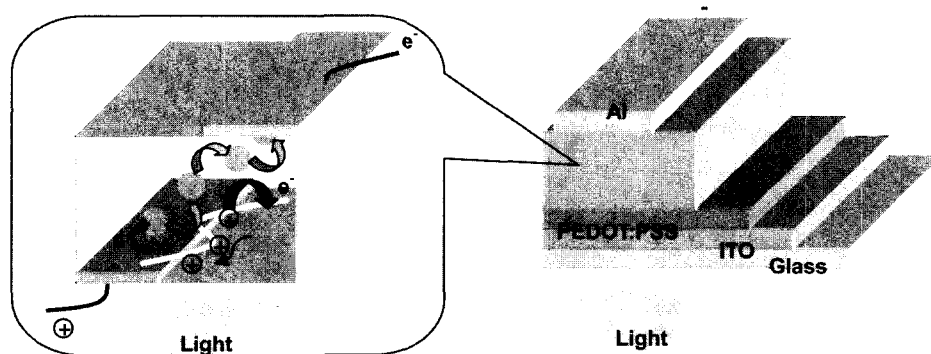


그림 4. 반도체 고분자의 태양전지의 구조.

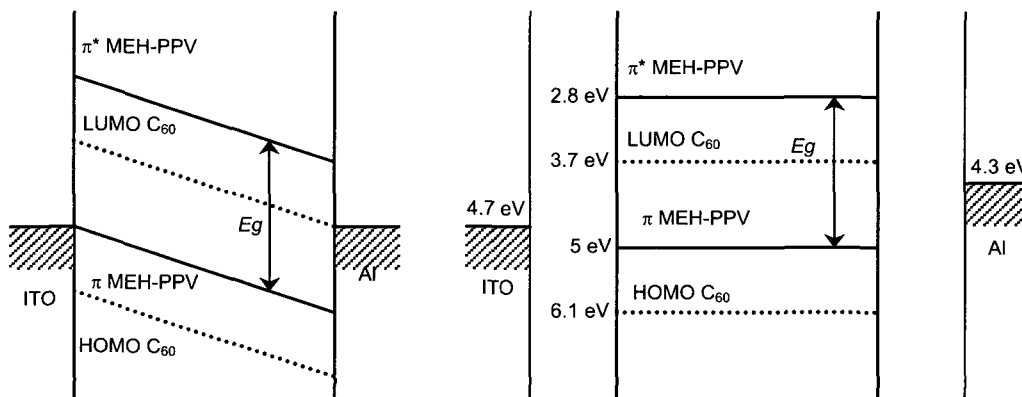


그림 5. 반도체 고분자 태양전지의 단락상태(좌)와 개방상태(우)에서의 에너지 준위 다이어그램.

3. 고분자 태양전지 재료 및 고분자 태양전지의 개발 현황

반도체 고분자/풀러린 복합재를 이용한 고분자 태양전지는 1995년 UCSB그룹의 G. Yu 박사에 의해 처음 발표되었다. 이 때 제시된 개념이 **그림 6**에서 보이고 있는 interpenetrating donor-acceptor network composite 이다.² 즉, 풀러린이 고분자 내에 고르게 분산되어 그물망을 형성하여 전자 주계와 받게 사이에 접촉 면적을 늘여 광여기 전하 이동이 많이 일어날 수 있는 구조이다. 이를 위하여 유기 용매에 잘 녹도록 설계된 가용성 풀러린이 도입되었고, 그 결과 PPV 유도체인 poly(2-methoxy-5-(2'-ethylhexyloxy)1,4-phenylene vinylene) (MEH-PPV)와 풀러린 유도체인 [6,6]PCBM을 1:3의 비로 섞은 태양전지에서 480 nm (20 mW/cm²)의 단색광으로 여기시켰을 때 2.9%의 고효율의 에너지 전환효율을 보였다. 이것은 이전의 고분자 태양전지들이 1%를 넘지 못했던 것을 고려한다면, 매우 획기적인 발전이었다. 그 후 다양한 전자 주계와 전자 받게 들이 합성되어 이를 이용한 고분자 태양전지들이 개발되었다. 최근에 LIOS 그룹에서 polyester 기판을 이용하여 소자 전체가 휘어질 수 있는 구조의 대면적 고분자 태양전지를 제작하여, poly[2-methyl, 5-(3,7-dimethyloctyloxy)]-p-phenylene vinylene (MDMO-PPV)와 PCBM을

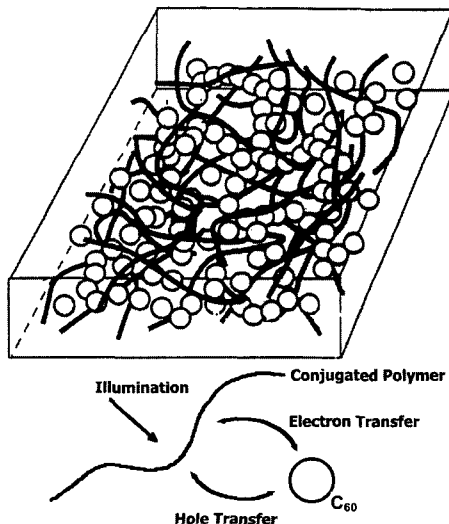


그림 6. Interpenetrating donor-acceptor network composite.

고분자 층으로 사용하였을 때, A.M. 1.5 조건 하에서 2.5%의 에너지 전환 효율을 가지는 고분자 태양전지 개발을 발표하였다.¹⁵ 이는 고분자 표면의 모폴로지 개선에 의한 것으로 고분자 박막의 표면에서 굴곡이 0.1 μm 이하가 되도록 조절할 때 고분자 태양전지의 효율이 월등하게 높아진 것으로 조사되었다. 이러한 과정 중에서 고분자 층과 전극 사이의 계면 특성이 좋아지도록 ITO와 고분자 층 사이에 전도성 고분자인 poly(3,4-ethylenedioxythiophene)-poly(styrenesulfonate) (PEDOT:PSS)를 도입하거나, 고분자 층과 음극 사이에 LiF 층을 도입하여 효율을 향상시키는 연구가 계속 되어 3.3%의 에너지 전환 효율이 보고되었다.¹¹ 이와 더불어 미국 애리조나 대학의 S. E. Shaheen은 screen print 방법을 이용하여 MDMO-PPV/PCBM 복합재를 이용한 태양전지를 제작하여 488 nm (27 mW/cm²)의 단색광 하에서 4.3%의 에너지 전환 효율을 가지는 태양전지를 제작하였다.¹⁶ 이러한 높은 값의 에너지 전환 효율은 screen print 방법을 통해서 얻은 두께가 수십 nm에 이르면서도 표면 거칠기가 2.6 nm에 불과한 매우 우수한 모폴로지를 가지는 고분자 블렌드 박막 형성의 결과였다.

복합재 태양전지의 발전과 더불어 이중층 구조 (bi-layer structure)의 태양전지도 개발이 되었다. 1993년 ITO/MEH-PPV/C₆₀/Au 구조의 태양전지는 514.5 nm (1 mW/cm²)의 단색광 하에서 0.04%의 에너지 전환 효율을 보였다.⁹ 하지만, 1998년 Cambridge 그룹에서는 PPV 유도체인 MEH-CN-PPV를 전자 받게 물질로, polythiophene (PT) 유도체인 POPT를 전자 주계로 하는 다층 구조의 태양전지를 제작하여 480 nm (34 $\mu\text{W/cm}^2$)의 여기광 하에서 4.8%의 에너지 전환 효율을 가지는 태양전지를 제작하였다.¹⁷ 이외에도 스웨덴의 Linköping 대학의 O. Inganäs 교수팀은 PT의 유도체인 poly(3-(4'-(1',4''),7''-trioxaocetyl)phenyl) thiophene (PEOPT)와 C₆₀의 두 층 구조를 가진 태양전지를 제작하여 효율이 최대화 될 수 있는 C₆₀ 층의 두께를 조사 및, 계산하는 작업을 수행하였다.¹⁸ 그 결과로써 30 nm 두께의 PEOPT층과 35 nm 두께의 C₆₀ 층을 이용하여 두 층 구조의 태양전지를 제작하였을 때, 460 nm (15 $\mu\text{W/cm}^2$)의 단색 여기광 하에서 1.7%의 에너지 전환 효율을 얻었다.

고분자-풀러린, 고분자-고분자 태양전지 외에도 다양한 방향에서의 고분자 태양전지 개발이 이루어

졌는데, 그 대표적이 예가 최근에 UC Berkeley 대학의 A. P. Alivisato 교수팀에서 이루어졌다. 이들은 PT 유도체인 P3HT와 CdSe 나노 입자 및 나노 막대의 복합체를 이용한 태양전지를 제작하여 A.M. 1.5조건에서 1.7%의 에너지 전환 효율을 보였다.¹⁹ 이를 통하여 고분자 태양전지는 유기-무기 하이브리드 개념을 이용하는 영역까지 넓혀지고 있다. 근본적으로 고분자 태양전지는 나노 크기에서의 광전하 이동현상을 이용하므로 장래에는 나노 테크놀로지로의 영역 확장도 가능할 것으로 생각된다.

4. 고분자 태양전지의 나아가야 할 방향

현재 고분자 태양전지의 미래는 밝다고 하겠다. 그 이유는 고분자 태양전지의 효율 향상은 지난 10년간 무기물 태양전지의 발전 속도와는 비교할 수 없을 정도로 빠르게 발전해 왔기 때문이다. 하지만, 아직까지 그 효율이 상용화될 정도로 높지 않기 때문에 다양한 방향에서 효율 개선을 위한 접근이 필요하다. 이를 위해서는 앞에서 언급한 태양전지의 세 가지 변수 즉, 단락 전류, 개방 전압, 그리고 *Fill Factor*의 개선이 필요하다. 단락 전류 즉, 광전류의 향상을 위해서 전자 주체가 전자의 광생성 효율 다시 말해서 PL 효율이 높아야 한다. 동시에 고분자 내에서 전자나 정공의 이동도 (mobility)가 좋아야 한다. 최근의 연구 결과에 따르면 고분자 내에서 전하의 이동도가 커질수록 광전류가 증가한다고 보고되고 있다.²⁰ 두 번째, 개방 전압은 전자 주체의 HOMO 준위와 전자 받개의 LUMO 준위가 결정짓는다고 보고되고 있는데 이를 위해서 고분자와 가용성 풀러렌의 이온화 에너지와 전자 친화도를 조절하는 주의 깊은 설계가 요구된다. 마지막으로 *Fill Factor*의 개선이 있는데 이것은 고분자 박막의 모폴로지의 향상, 그리고 고분자 층과 전극과의 에너지 문턱을 낮추어 전자나 정공이 고분자 층에서 전극으로 잘 빠져 나가도록 하여 향상시킬 수 있다. 이를 위한 노력으로 그 동안 PEDOT: PSS나 LiF, SiO_x 층의 도입을 통해 효과를 보고 있는 중이다.^{11,20} 그리고, 이 세 가지 변수 외에 근본적으로 태양광의 스펙트럼과 잘 일치하는 에너지 밴드 갭을 가진 고분자의 설계가 필요하다. 현재까지는 주로 PPV 계열을 이용한 태양전지가 연구되어 왔으나, **그림 7**에서 보듯이 태양광 스펙트럼과 PPV

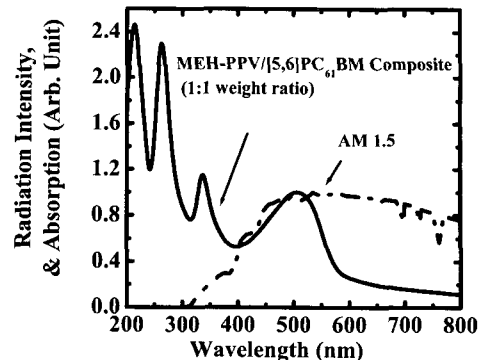


그림 7. PPV 유도체의 흡수 스펙트럼과 태양광 스펙트럼의 비교.

유도체의 흡수 스펙트럼은 잘 일치하지 않는다. 그래서 최근에는 고효율의 발광 효율을 가지면서 태양광 스펙트럼과 어느 정도 일치하는 PPV 계열보다 더 낮은 에너지 갭을 가지는 PT유도체를 이용한 태양전지가 개발되고 있는 중이다.²¹ PT유도체는 PPV 계열보다 안정성이 우수하므로 고분자 태양전지의 좋은 물질로 여겨지고 있으나 아직까지 그 효율이 높게 보고되고 있지 않다. 하지만, 이 물질에 대하여 많은 연구가 진행되고 있으므로 짧은 기간 내에 이를 극복할 수 있을 것이다.

5. 맺음말

이전까지 반도체 고분자를 이용한 광전자 소자로는 PLED가 대표적인 예였지만, 반도체 고분자와 풀러렌 복합체에서 발견되는 고효율의 ‘광여기 전하 이동 현상’은 이 물질을 태양전지로의 응용 가능의 기회를 제공하게 되었다. 그리고, 기존의 무기물 태양전지에 비해서 고분자를 기본으로 하는 태양전지는 가공성, 유연성, 그리고 대면적의 용이함 등으로 인한 태양전지의 저가화 가능성의 이점을 가지고 있기 때문에 많은 관심을 받고 있다. 현재, 고분자를 이용한 태양전지의 에너지 전환 효율은 A.M. 1.5 조건 하에서 3%에 도달하고 있다. 이 값은 무기물 태양전지에 비해서 그렇게 높지 않지만, 과거 10년 간의 발전 속도와 현재까지 축적된 기술과 역량으로 볼 때, 이를 상용화하는데 많은 시간이 걸리지 않으리라고 보여진다. 그리고, 최근의 수 년 간의 세계적인 연구 경향을 보면, 고분자 태양전지에 대한 연구가 2~3년 동안에 급증했음을 알 수 있

다. 이 사실은 고분자 태양전지의 미래가 밝음을 반영한다고 할 수 있다. 하지만, 고분자 태양전지가 현실화 되기 위해서는 아직까지 많은 장벽이 남아 있다. 고분자 내에서의 전하의 생성 효율 향상, 그리고 전하의 이동도 향상 등의 문제인데, 현재 이러한 면에 중점을 두고 많은 연구가 진행되고 있는 중이다. 그러므로, 고분자 발광소자의 발전이 그러했듯이, 고분자 태양전지의 현실화도 머지 않았다고 생각되며 그것을 반영하는 새로운 결과들이 계속 나타날 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. A. Goetzberger and C. Hebling, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **62**, 1 (2000).
2. G. Yu, J. Gao, J. C. Hummelen, F. Wudl, and A. J. Heeger, *Science*, **270**, 1789 (1995).
3. C. J. Brabec, N. S. Sariciftci, and J. C. Hummelen, *Adv. Funct. Mater.*, **11**, 15 (2001).
4. N. S. Sariciftci, L. Smilowitz, A. J. Heeger, and F. Wudl, *Science*, **258**, 1474 (1992).
5. C. K. Chaing, C. R. Fincher, Y. W. Park, A. J. Heeger, H. Shirakawa, and E. J. Louis, *Phys. Rev. Lett.*, **39**, 1098 (1997).
6. <http://www.nobel.se/chemistry/laureates/2000>.
7. J. H. Burroughes, D. D. C. Bradley, A. R. Brown, R. N. Marks, R. H. Friend, P. L. Burns, and A. B. Holmes, *Nature*, **335**, 539 (1990).
8. "Handbook on Conducting Polymers", ed. by T. Skotheim, vol. 2, Dekker, New York, 1986.
9. N. S. Sariciftci, D. Braun, C. Zhang, V. I. Srdanov, A. J. Heeger, G. Stucky, and F. Wudl, *Appl. Phys. Lett.*, **62**, 585 (1993).
10. C. H. Lee, G. Yu, N. S. Sariciftci, D. Moses, K. Pakbaz, C. Zhang, A. J. Heeger, and F. Wudl, *Phys. Rev. B*, **48**, 15425 (1993).
11. C. J. Brabec, S. E. Shaheen, C. Winder, N. S. Sariciftci, and P. Denk, *Appl. Phys. Lett.*, **80**, 1288 (2002).
12. C. J. Brabec, G. Zerza, G. Cerullo, S. P. Silvetri, J. C. Hummelen, and N. S. Sariciftci, *Chem. Phys. Lett.*, **340**, 232 (2001).
13. I. D. Parker, *J. Appl. Phys.*, **75**, 1656 (1994).
14. C. J. Brabec, A. Cravino, D. Meissner, N. S. Sariciftci, T. Fromherz, M. T. Rispens, L. Sanchez, and J. C. Hummelen, *Adv. Funct. Mater.*, **11**, 374 (2001).
15. S. E. Shaheen, C. J. Brabec, N. S. Sariciftci, F. Padinger, T. Fromherz, and J. C. Hummelen, *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 841 (2001).
16. S. E. Shaheen, R. Radspinner, N. Peyghambarian, and G. E. Jabbour, *Appl. Phys. Lett.*, **79**, 2996 (2001).
17. M. Granström, K. Petritsch, A. C. Arias, A. Lux, M. R. Andersson, and R. H. Friend, *Nature*, **395**, 257 (1998).
18. L. S. Roman, W. Mammo, L. A. A. Pettersson, M. R. Andersson, and O. Inganäs, *Adv. Mater.*, **10**, 774 (1998).
19. W. U. Huynh, J. J. Dittner, and A. P. Alivisatos, *Science*, **295**, 2425 (2002).
20. C. J. Brabec, S. E. Shaheen, T. Fromherz, F. Padinger, J. C. Hummelen, A. Dhanabalan, R. A. J. Janssen, and N. S. Sariciftci, *Synth. Met.*, **121**, 1517 (2001).
21. C. J. Brabec, C. Winder, N. S. Sariciftci, J. C. Hummelen, A. Dhanabalan, P. A. Hal, and R. A. J. Janssen, *Adv. Funct. Mater.*, **12**, 709 (2002).