

# 유기 태양전지의 최근 기술 개발 동향

박해정 석사과정, 신경식 공학석사, 김상우 교수 (성균관대학교 신소재공학부)

## 1. 서론

오늘날 지구에서 소비되는 에너지는 1년에 약 13 테라와트 (1 테라와트는  $10^{12}$ 와트)이고 그 양은 2050년에는 약 30~60 테라와트로 증가한다는 예상과 더불어, 현재 주 에너지원인 화석 연료의 매장량의 유한성으로 인해 10년 안에 그 생산량이 급격히 감소할 것이며, 화석연료 소비 증가로 필연적으로 발생하는 이산화탄소 양 또한 증가됨에 따라 온실효과의 심각성이 대두되고 있다. 이러한 화석연료의 고갈 및 환경적 문제로 인하여, 전 세계적으로 화석연료를 대체할 친 환경적인 에너지 전환 기술에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 대체 에너지들 중에서도 태양 에너지는 우리가 이용할 수 있는 대표적인 청정 에너지원이다. 연간 태양으로부터 지구 전체로 도달되고 있는 막대한 양의 에너지는 12만 테라와트에 달하며, 이는 전 세계가 연간 소비하는 에너지 총량의 10,000배에 해당 된다 [1-3]. 이는 에너지 전환 효율이 10%인 태양 전지를 지구 전체 면적의 0.1%만 채워도 전 세계가 사용하는 에너지를 충분히 공급할 수 있는 양이다. 이러한 이유로 태양의 광 에너지를 전기 에너지로 전환해주는 장치인 태양전지의 고효율적 기술 개발이 더욱 필요한 상태이다. 이러한 태양전지는 우선 물질에 따라 무기 태양전지와 유기 태양전지로 구분되는데, 실리콘 및 화합물 반도체를 이용하고 효율 무기 태양전지의 상업화가 점차 가속화되어 가고 있으나 고가의 제작 비용, 제작 공정 시

파생되는 환경오염 및 플렉시블 태양전지 구현이 어려운 관계로 새로운 형태의 저가·고효율 플렉시블 유기 태양전지를 구현하기 위한 신소재 개발 및 공정 구현에 많은 관심이 모아지고 있다 [4,5].

사실 유기 태양전지는 1970년대부터 그 가능성이 제시되어 왔지만 효율이 너무 낮아 관심을 크게 끌지 못하다가, 1986년 미국 Kodak의 C. W. Tang이 CuPc와 유기재료인 Perylene을 적층한 이중층 구조를 이용하여 AM 2 ( $75 \text{ mW/cm}^2$ ) 조건에서 0.95%의 에너지 전환 효율을 얻었음을 발표하면서 주목을 받기 시작하였다 [6]. 그 후에도 다양한 종류의 유기 반도체 재료를 이용하여 연구되었지만 뚜렷한 성과를 내지 못하다가 1995년 A. J. Heeger 그룹에서 PPV 계열의 전도성 고분자와 Acceptor인  $C_{60}$  (풀러렌)과 유기물과 잘 섞이는 풀러렌 유도체인 PCBM을 섞어 한 층으로 태양전지를 구현하여 약 3%에 근접하는 효율을 얻었다 [7]. 풀러렌은 80년대 중반에 개발된 획기적 전자 재료로써, 이를 응용하고자 많은 연구가 진행되었다. 그 중에서도 이 풀러렌을 유기 태양전지에 도입하면서 주목할 만한 발전을 이루게 되었다. 이러한 꾸준한 연구 발전으로, 유기 반도체의 에너지 준위와 광전기적 물성을 잘 조절하면 단층구조 기준 10% 이상의 에너지 전환 효율도 가능하다는 최근의 이론적인 예측은 유기 태양전지에 대한 실용화 가능성을 긍정적으로 평가받게 되었다. 실제로 미국의 Konarka나 Plectronics 등의 회사들이 유기 태양전지의 발전 및 실용화 가능성으로 인해 본격적인 개발 및 실용화 프로젝트를 이미 진행시키고 있음은

특히 주목할 만하다. 이러한 유기 태양전지로서의 기술적 원리와 종류, 현재의 개발 동향과 문제점, 그리고 발전 방향에 대해 간략히 살펴보고자 한다 [8].

## 2. 유기태양전지의 구조 및 원리

유기 태양전지는 투명 기판 / 투명 전극 / 광활성 층 (약 100 nm) / 상대 전극으로 구성된다. 일반적으로 높은 Work function (일함수)를 가지는 투명전극 물질인 Indium tin oxide (ITO)이 주로 이용되며, 최근에는 금속 Grid 또는 전도성 고분자가 일부 이용되고 있다. 낮은 일함수를 가진 Al, Ca, Mg 등의 금속 상대 전극으로 사용하며, 경우에 따라서 Au와 같은 높은 일함수의 금속을 사용하기도 한다. 이러한 두 전극의 일함수의 차이로 인한 전기장 형성으로 인해 광활성 층에서 생성된 전자와 정공 쌍이 분리되어 이동시키는 역할을 한다. Buffer층으로 광활성 층과 각각의 상하부 전극 사이에 Hole transport layer (정공 이송 층)과 Electron transport layer (전자 이송 층)를 끼워 넣음으로써 정공과 전자가 좀 더 수월하게 이동할 수 있게 하며, 정공과 전자가 역방향으로 흐르지 못하도록 Blocking하는 역할도 한다. 광활성 층은 2종 이상의 유기 반도체 물질이 전기를 발생할 수 있도록 혼합물로 구성되며, 에너지 전환 효율에 영향을 주는 핵심 소재로서 두께는 약 100 nm 이다. 플라스틱 기판을 적용 가능하며, 이를 통해 가볍고 휘어지는 구조의 특징을 가질 수 있게 된다. 광활성 층은 외부의 산소 및 수분에 민감하며 작동 수명에 영향을 주기 때문에 이들과의 접촉을 제어할 수 있도록 플라스틱 필름은 수분과 산소를 차단할 수 있는 Barrier 층이 코팅되어 있어야 한다 [8].

그림 2를 보면 알 수 있듯이, 유기 태양전지의 공액 고분자는 전자들이 원자의 핵 사이가 상대적으로 멀어 시그마 결합보다는 상대적으로 약한 파이 결합으로 이루어져 있다. 파이 결합에 있는 전자는 상대적으로 작은 핵의 영향으로 인해 파이 결합 사이를 자유롭게 이동할 수 있게 된다. 이로 인해 파이 결합 내에 존재하는 전자는 외부로부터 작은 에너지를 받아도 파이 결합의 바닥 상태에서 전자를 쉽게 여기시킬 수 있

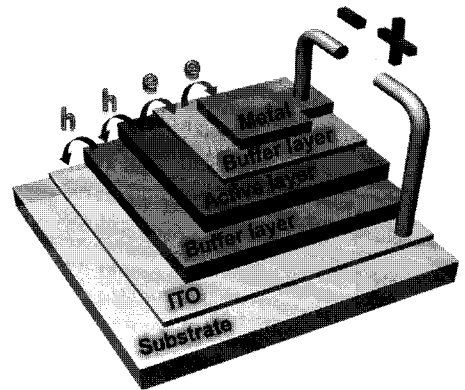


그림 1. 유기 태양전지의 구조.

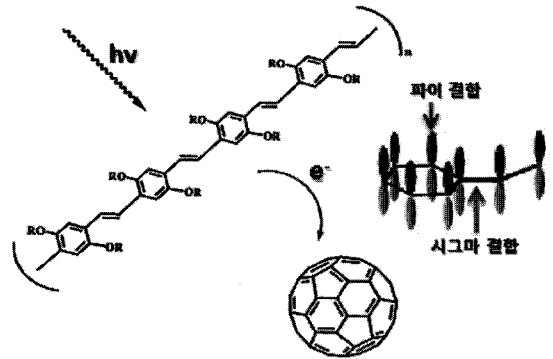


그림 2. 대표적 반도체 고분자의 전자 생성 [9].

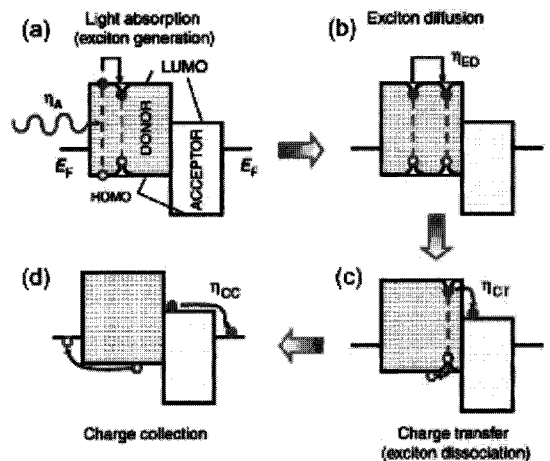


그림 3. 유기 태양전지의 구동 원리 [11].

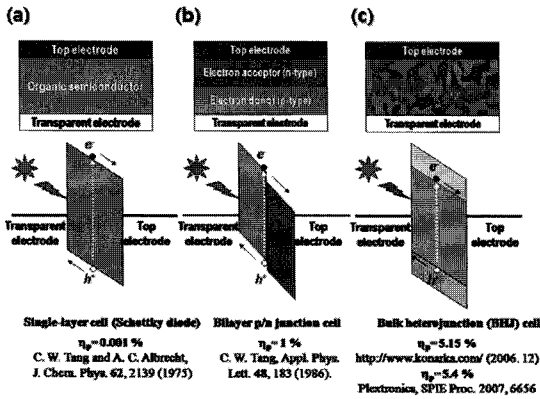


그림 4. 유기 태양전지 광활성 층의 구조로써, (a) 단일층, (b) 이중층, (c) BHJ [12].

다. 가시광선 영역의 빛 에너지가 공액 고분자에 가해지면, 파이 결합 내에 있는 전자가 여기된 상태가 되고, 여기된 전자와 전자가 여기되고 남은 빈자리에 정공이 쿨롱 힘에 의해 서로 쌍을 이뤄 엑시톤을 생성하게 된다. 태양 빛 에너지로 생성된 엑시톤이 전기에너지로 전환되기 위해서는 엑시톤이 쪼개지고, 쪼개진 각각의 전자와 정공들이 전극으로 흘러야 되는데, 이는 앞서 말했듯이 두 전극의 일함수 차이로 인해 엑시톤이 분리되어 각각의 전극으로 이동하게 되면서, Donor 물질과 Acceptor 물질 사이에서 일어나는 전자와 정공의 재결합을 극복할 수 있게 된다 [1,10].

단일층 태양전지의 효율은 0.1%도 되지 않았는데, 그 이유는 엑시톤의 짧은 확산 거리 때문이다. 공액 고분자는 빛을 받으면 엑시톤이 생성되는데 이 엑시톤은 p-n 접합 계면에서 전자와 정공으로 분리되고, 엑시톤이 다시 재결합하여 없어지는데 걸리는 시간은 10 피코초 (1 피코초는  $10^{-12}$ 초)이다. 이는 매우 짧은 시간이기 때문에 엑시톤이 재결합 없이 공액 고분자 내에서 움직일 수 있는 제한 거리는 약 10 nm이다. 그러므로 빛을 받아서 생긴 엑시톤이 재결합 없이 쪼개져 전자와 정공을 생성하려는 p-n 접합 계면이 엑시톤이 생긴 곳으로부터 10 nm 이내에 존재하여야 한다. 보통 유기 태양전지의 광활성 층의 두께는 100 nm 정도이므로, 광활성 층의 중간에서 생긴 엑시톤

의 경우, 계면으로 이동하지 못하고 대부분 재결합되어 전기 에너지 전환 효율 자체가 저조해지게 된다. 광활성 층의 두께를 줄이면 그만큼 태양 빛 흡수가 줄어들기 때문에 구조적인 해결이 필요시 되었다. 이러한 유기 태양전지의 단점은 1990년 초 Heeger 그룹에서 폴리렌을 공액 고분자와 섞어 p-n 접촉 면적을 넓힌 Bulk Heterojunction (BHJ) 태양전지가 개발됨으로써 어느 정도 개선 될 수 있었다. BHJ 구조는 Donor 물질과 Acceptor 물질의 영역 크기를 ~10 nm 이내 수준으로 섞어 놓아 Bi-layer 구조에 비해 계면의 면적이 수백 배 이상 커지는 효과로 인해, 엑시톤 분리의 가능성을 더 크게 높일 뿐만 아니라, 미세 광산란에 의해 광흡수 효율을 높이게 된다 [13-16].

### 3. Donor 및 Acceptor 물질의 종류

현재 유기 태양전지의 Donor 및 Acceptor로 사용되고 있는 대표적인 물질들은 그림 5에 나타난 바와 같다. Donor 물질들은 광 흡수 파장 범위가 태양광 스펙트럼과 잘 맞거나 매우 강한 광 흡수도를 가지고 있어야 하고, 정공의 Mobility (이동도) 등 전기적 물성이 우수한 물질을 이용해야 Acceptor의 정공 수송 저항이 감소하게 된다. 이러한 Donor 물질로는 반도체 고분자의 경우, Poly (Para-phenylene vinylene)(PPV) 계열의 물질과 Polythiophene (PT)의 유도체들이 주로 연구되어 왔으며, 최근에는 Polythiophene (PF)계 물질 및 이들의 공중합체들도 낮은 밴드 갭을 가지는 Donor 물질로 사용되고 있다 [18]. 유기 단분자 물질의 경우에는 CuPc, ZnPc 등 Phthalocyanine계 물질이 많이 이용되고 있다. Acceptor 물질들은 가시광선 영역에서 광흡수가 적어야 하며 동시에 Donor 물질과 비교하여 전자 친화도가 커야 되는 조건을 만족해야 한다. 이러한 Acceptor 물질로는, 폴리렌 자체 혹은 유기 용매에 잘 녹도록 설계된 폴리렌계 물질인 PCBM 등이 사용되고 있으며 [19], 그 외 단분자로 Perylene, PTCBI 등이 사용되고 있다. 이 중에서 폴리렌의 유도체들은 대체로 반도체 고분자와 복합하여 BHJ 구조재료로 많이 사용되고 있으나, Perylene, PTCBI 등 단분

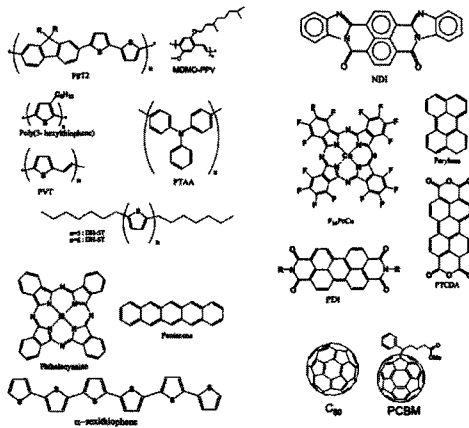
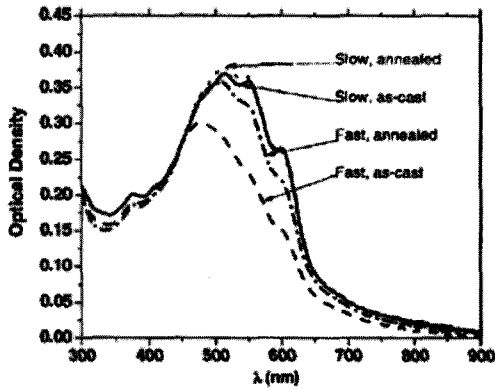
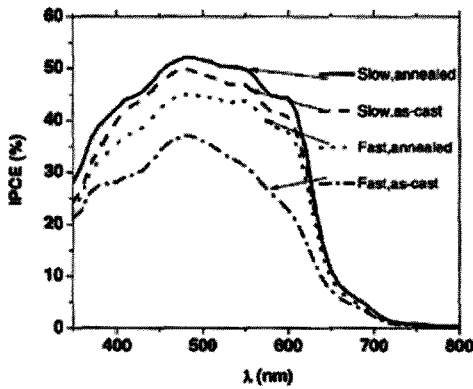


그림 5. 도너 및 억셉터 물질들 [17].



(a)



(b)

그림 6. P3HT:PCBM 광활성 층의 Solvent annealing과 Thermal annealing에 의한 광학적 특성 변화 [21].

자 폴리렌 물질 자체의 경우 진공 증착법을 이용하여 이중층 구조의 소자에 자주 쓰이고 있다 [9].

#### 4. Annealing

BHJ 구조를 가지는 유기 태양전지는 p-n 접합 표면적을 증가하는 장점이 있으나, p형 반도체와 n형 반도체가 섞여있기 때문에 n형 반도체에서 모아진 전자가 전극으로 이동하기 위해서는 반드시 p형 반도체인 고분자를 지나가야 한다. 이 과정에서 p형 반도체에 있던 정공과 n형 반도체로부터 이동한 전자가 재결합되어 전극까지 전자가 도달하지 못하는 단점이 있었다. 또한 고분자의 낮은 전자 이동도 때문에 전자와 정공이 재결합될 가능성이 더욱더 커지게 된다. 이러한 단점은 광학적, 전기적 특성이 뛰어난 결정성 높은 고분자 반도체 재료인 P3HT를 사용해 만든 유기 태양전지를 유리전이온도 이상으로 열처리하는 Post annealing 과정을 추가하는 방법이 도입됨으로써 개선될 수 있었다. 이 방법은 QSEL의 F. Padinger 그룹에서 열처리의 도입으로 효율을 높인 연구가 되었는데, Donor 고분자 P3HT와 Acceptor 고분자 PCBM을 광활성 층으로 사용하여 열처리를 하지 않은 소자의 경우 0.4%의 낮은 효율을 보였지만, 소자를 만든 후 4분 동안 열처리하여 P3HT 고분자의 결정성을 증가시킴으로써 효율이 2.5%로 드라

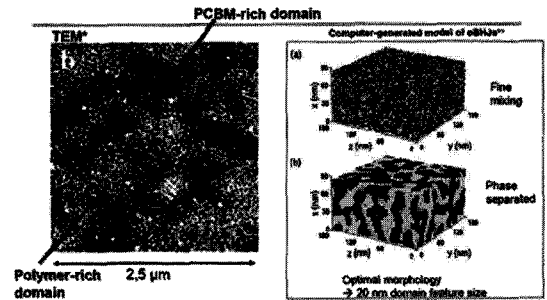


그림 7. P3HT:PCBM 광활성 층의 TEM 분석 및 전사 모사에 의한 Annealing 전/후의 모폴로지 변화 [22].

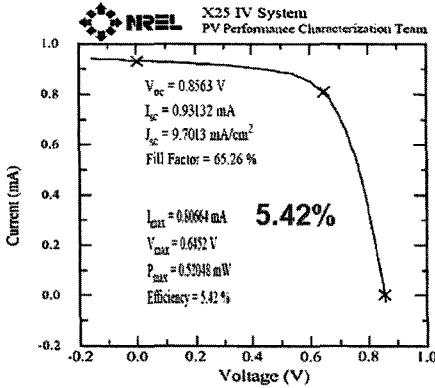


그림 8. 2007년 NREL에서 인증한 미국 Plextronics 사의 5.42%의 유기태양전지 [23].

마퍽하게 향상되었다 [20]. 또한 열처리 과정 중에 전기장을 추가로 걸어주게 되면 효율이 3.5%까지 증가되며, 2005년 Yang Yang 그룹에서 용매를 건조시키는 Solvent annealing 공정 방법에 따라서 정공과 전자 이동도를 향상시킴으로써 에너지 전환 효율을 4.4%까지 얻었다 [21]. 이후 지속적인 연구 결과, 열처리 과정 중 온도를 올려주었다가 식히는 과정에서 Donor 고분자 P3HT의 결정성 향상으로 P3HT와 PCBM의 나노 도메인이 형성된다는 것이 밝혀졌으며, 이러한 나노 도메인들이 각각 전자와 정공이 전극으로 잘 이동할 수 있는 통로를 만들어 주는 역할을 하게 되기 때문에, 그만큼 에너지 전환 효율 또한 드라마틱하게 증가하게 된다.

### 5. 국내·외 개발 현황

1993년 미국 UCSB의 A. J. Heeger 그룹에서 고분자 Donor 물질과 플러렌계 Acceptor를 혼합한 BHJ 유기 태양전지를 최초로 개발하여 원천 특허 확보하였다. 2004년 Siemens社의 C. J. Brabec 그룹에서 에너지 전환 효율 5%의 소자를 발표하여 상업화의 가능성 제시하였다. 2006년 11월 독일 Fraunhofer ISE 연구소는 저렴한 가격과 대면적의 유기 태양전지 구현을 위해 ITO 투명전극을 Metal Grid와 PEDOT:PSS로 대체한 Inverted layer 방식으로 회로를 구현하여

2 cm<sup>2</sup> 크기의 에너지 전환 효율 3.4%임을 발표하였다. 2006년 12월 미국 Konarka社에서 에너지 전환 효율이 5.15%인 유기 태양전지를 NREL에서 인증 받았으며, 2007년 미국 UCSB의 G. C. Bazan 그룹에서는 Konarka社의 PCPDTBT라는 저밴드갭 Donor 물질을 사용하고 1,8-octanedithiol 및 Alkyl dihalide 등의 첨가제를 넣어 소자 특성을 향상하여 5.5%의 에너지 전환 효율을 얻었다. 미국 Plextronics社는 2007년 새로운 재료를 개발로 0.856 V의 높은 Voc를 달성함으로써 5.42%의 에너지 전환 효율을 달성하였다. 그림 8을 보면 알 수 있듯이, 0.1 cm<sup>2</sup> 유효 면적에서 Jsc와 FF는 각각 9.7 mA/cm<sup>2</sup>, 65.3%로 매우 우수한 결과임을 알 수 있다. 2008년 P. W. M Blom 그룹에서는 치환기를 두 개 포함한 형태의 물질인 PCBM 유도체를 이용하여 Voc를 0.73 V로 개선하였다고 보고하였는데, 이 결과는 기존의 PCBM 대비 0.15 V 정도 높은 Voc값 증가로 에너지 전환 효율도 3.8%에서 4.5%로 개선한 결과로서, 고분자 Donor의 밴드갭 뿐만 아니라 Acceptor의 LUMO 준위를 조절함으로써 Voc를 개선하여 에너지 전환 효율을 증대할 수 있는 새로운 방향을 제시함으로써 그 의미가 크다. 2008년 일본 Kanazawa 대학의 K. Takahashi 그룹에서는 1 cm<sup>2</sup>의 광활성 면적을 갖는 Inverted-structure 유기태양전지(ITO/TiO<sub>x</sub>/PCBM:P3HT/PEDOT:PSS/Au)를 제작하여 2.47%의 에너지 전환 효율을 보여주었는데, 이 소자는 120시간 동안 광 조사를 한 후에도 96%의 에너지 전환 효율을 유지하는 특성을 유지하여 기존 소자 대비 긴 수명을 가진다는 장점이 있다 [23].

스크린 인쇄를 이용한 유기태양전지는 미국 Arizona 대학의 G. E. Jabbour 연구팀은 MDMO-PPV/PCBM을 광활성 층을 스크린 프린팅을 통해 박막화한 소자로 27 mW/cm<sup>2</sup>의 488 nm 단색광하에서 4.3%의 에너지 전환 효율을 보고하였다. 2005년 일본 Matsushita社는 PPV 유도체와 PCBM 조합의 유기 태양전지를 스크린 인쇄를 통해 구현하였고, 스핀 코팅과 거의 유사한 2% 내외의 에너지 전환 효율을 보고하였다. 통상적으로 인쇄 공정을 통한 소자는 스핀코팅을 통해 제작한 소자 대비 특성이 현저하게 떨어지는데 반해 매우 이례적인 결과로서 인쇄공정을 통한 저가·대량생산의 가능성을 제시하

였다. 2007년 8월 Konarka社는 32 channel OPV의 수명시험을 통해 1,000시간 경과 후에도 90% 이상의 효율을 유지함으로써 긴 수명의 유기 태양전지에 대한 가능성을 제시하였다. 2008년 미국 Solarmer社는 양극에 ITO를 이용하여 반투명한 유기 태양전지 모듈을 제작하였는데, 10.7 cm<sup>2</sup>의 면적에서 2.7%의 에너지 전환 효율을 보여준다. 2008년 6월 핀란드 VTT 국영연구소는 롤투를 인쇄장비로 ITO/ PEDOT:PSS / P3HT:PCBM/ Ca/ Ag 구조의 유기 태양전지를 제작하여 4.6%의 에너지 전환 효율을 달성하여 롤투를 인쇄의 가능성을 제시하였다. 2009년 Konarka社는 WVTR이 0.05g/m<sup>2</sup>·day인 우수한 Barrier 특성을 가지는 모듈을 생산하여 3년 정도의 안정성을 확보하였다고 발표하였다. 2010년 모듈 효율은 2-3% 수준이며 Riso DTU (덴마크), Konarka (미국), Solarmer (미국)에서 모듈관련해서 가장 앞선 기술을 보유하고 있다. 2010년 Konarka에서는 폭 34 cm의 다양한 길이로 상업화된 모듈을 생산하고 있으며 에너지 전환 효율은 1.4~1.7% 수준이며, 미국에서는 Konarka, Solarmer, Sarnoff, IBM, Bell Labs, UDC, E-Ink, Palo Alto Research Center HP, Dupont社 등이 롤투를 인쇄 공정 등을 이용한 플렉시블 소자 대량 생산 공정 개발 중에 있다. 일본은 신에너지 산업 기술 종합 개발 기구를 통해 Seiko-Epson社의 잉크젯 연구개발을 지원, Future Vision 컨소시엄을 통해 Sharp, Seiko-Epson, DNP 등을 지원하였고, 소재와 부품 그리고 장비에 걸친 막강한 연구 인프라와 기술을 바탕으로 AIST, Hitachi, Sony 등의 기업 및 연구소에서 유연성 소자에 대한 연구 수행 중에 있다. ITI社의 경우 R2R 웹 이송 시스템 기반 하에 피에조 잉크젯 헤드를 접목하여 다양한 패턴이 가능한 시스템을 개발 하였고, CIT社의 경우 Metallization 모듈을 추가하여 PET와 같은 플렉시블 기판 위에 전도성 물질을 패턴링하여 얇은 선폭을 이루는 플렉시블 전자 기판의 제작이 가능한 시스템을 개발하였다 [23,24].

국내 유기 태양전지 연구는 외국에 비해 6~7년 정도 늦은 2000년대 초반부터 시작되었다. 코오롱 등 몇몇 기업에서 연구 개발을 진행 중에 있으나, 현재 상업화된 모듈을 생산하는 회사는 아직까지 없는 실

정이다. 연구소 및 대학을 중심으로 핵심 기술 확보를 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며, KIST에서는 열처리 공정이 필요 없이 플라스틱 기판에서 약 2.8%정도의 소자 제작 기술을 확보하고 있으며 산화물 나노 입자를 이용한 유기 태양전지의 수명 향상 연구 및 탠덤 셀 연구를 수행하고 있다. 화학연구원에서는 유리 기판 위에 자체 개발한 반도체 고분자를 이용하여, 에너지 전환 효율 5%를 달성하였다. 또한 높은 광 전압을 나타내는 새로운 Acceptor 물질 개발 연구를 수행하고 있다. 국내 여러 대학교에서는 다양한 연구를 진행하고 있으며, 그 중에서 GIST 같은 경우, 2005년 Heeger 신소재 연구센터를 세워 미국 UCSB와 공동으로 유기 태양전지 연구를 수행하고 있으며, 그 결과로 Science지에 Solution 공정으로 Konarka社의 새로운 물질을 이용해 제작된 Tandem 유기 태양전지에서 최고 에너지 전환 효율인 6.5%를 보고하였다 [23,24].

## 6. 기술적 문제점과 발전 방향

전체 태양전지 시장은 급속도로 성장하고 있는 가운데, 유기 태양전지의 장점으로 부각되던 요소인 플렉시블, 우수한 채광 효율, 저렴한 제조 원가 이 3가지가 오히려 한계점으로 작용하여 R&D와 시장 진입이 지연되고 있다. 이러한 유기 태양전지의 기술적 발전 장애 요인으로는 크게 공정과 플렉시블 기판 소재, 광활성 층 소재, 에너지 전환 효율 특성

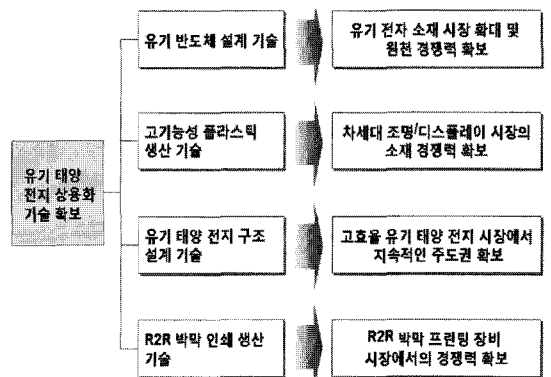


그림 9. 유기 태양전지의 발전 방향 [25].

분야로 이야기 할 수 있다. 우선 공정분야 먼저 이야기하자면, 유기 태양전지는 기존의 OLED와 거의 유사한 소자 구조를 갖고 있지만, Solution 공정을 통한 소자제작 공정에 개선해야 할 부분이 많으며, 향후 롤투를 인쇄 공정을 통한 저가·대면적 양산 공정이 필수적이다. 저가·대면적 양산을 위한 롤투를 인쇄 공정을 구현하기 위해서는 고내열성 플렉시블 필름이 필요하며 유기 태양전지의 내구성 향상을 위해 수분과 산소를 차단할 수 있는 Carrier층 형성에 필름 연구가 집중되고 있다. 에너지 전환 효율 특성 분야로는, 유기 태양전지의 낮은 효율을 극복하기 위해 전극과 광활성 층의 계면 간 접합 문제, 프린팅을 위한 광활성 층의 잉크 물성 제어, 프린팅 공정의 건조·열처리 및 정밀도 등 공정 구현을 위한 생산 파라미터 규명을 위한 연구가 필요하다. 광활성 층 소재인 기존의 P3HT와 PCBM의 경우, 재료의 순도와 중합 조건 등이 소자의 특성에 밀접한 관련이 있지만, 현재 고품질의 재료를 원활하게 공급받을 수 없는 상황이므로 기존 재료의 양산화 및 고품질화는 꼭 해결해야 한다. 상업화를 위해서는 새로운 저밴드 Donor 물질이나 전하이동도가 향상된 Acceptor 물질의 개발에 대한 연구가 필수적이다. 최근에 Solarmer에서 8% 이상의 효율을 낼 수 있는 소재들이 개발되었으나, 소재의 양산성에는 의문이 제기되고 있다. 따라서 소재 개발에는 효율뿐만 아니라 양산성 검증도 필요하다 [23].

### 참고 문헌

- [1] 손경인, 김경곤, "폴리머 태양전지 기술", 공업화학 전망, Vol. 11, No. 6, p25-32 (2009).
- [2] M. S. Dresselhaus and I. L. Thomas, "Alternative energy technologies", Nature, Vol. 414, p332-337 (2001)
- [3] A. Shah, P. Torres, R. Tscharnner, N. Wyrsh, H. Keppner, "Photovoltaic Technology: The Case for Thin-Film Solar Cells", Science, Vol. 285, p692-699 (1999)
- [4] 이일형, 소대섭, 서주환, 박남규, "유기 태양전지의 연구개발 동향", KIC News, Vol. 10, No. 6, p51-70 (2007)
- [5] 윤지현, 류광선, "유기태양전지의 기술 개요와 연구 개발 동향", KIC News, Vol. 11, No. 6, p15-24 (2008)
- [6] C. W. Tang, "Two-layer organic photovoltaic cell", Appl. Phys. Lett., Vol. 48, p183-185 (1986).
- [7] G. Yu and A. J. Heeger, "Charge separation and photovoltaic conversion in polymer composites with internal donor/acceptor heterojunctions", J. Appl. Phys., Vol. 78, p4510-4515 (1995)
- [8] 신원석, 윤성철, 문상진, "유기박막 태양전지 개발 동향", Polymer Science and Technology, Vol. 19, No. 3, p212-219 (2008)
- [9] H. Hoppe and N. S. Sariciftci, "Organic solar cells: An overview", J. Mater. Res., Vol. 19, p1924-1945 (2004)
- [10] 문상진, 김희주, "나노박막형 유기 태양전지의 기술 동향", 고분자과학과 기술, Vol. 17, No. 4, p407-415 (2006).
- [11] <http://www.scienceall.com/issue/sciencelibrary.sca?todo=view&classid=CS010004&articleid=35894&bbsid=33&popissue=flash>
- [12] [http://www.exposolar.org/2010/kor/center/contents.asp?idx=85&page=1&search=&searchstring=&news\\_type=D](http://www.exposolar.org/2010/kor/center/contents.asp?idx=85&page=1&search=&searchstring=&news_type=D)
- [13] 신원석, 진성호, "고분자 태양전지의 최근 개발 경향", Vol. 17, No. 4, p416-424 (2006)
- [14] H. Hoppe and N. S. Sariciftci, "Morphology of polymer/fullerene bulk heterojunction solar cells", J. Mater. Chem., Vol. 16, p45-61 (2006)
- [15] 문상진, "유기박막 태양전지 기술", 물리학과 첨단 기술, 7-8월호, p30-36 (2008)
- [16] G. Yu, J. Gao, J. C. Hummelen, F. Wudl, and A. J. Heeger, "Polymer Photovoltaic Cells: Enhanced Efficiencies via a Network of Internal Donor-Acceptor Heterojunctions", Science, Vol. 270, No. 5243, p1789-1791 (1995)
- [17] S. Gunes, H. Neugebauer, and N. S. Sariciftci, "Conjugated Polymer-Based Organic Solar Cells", Chem. Rev., Vol. 107, p1324-1338 (2007)
- [18] X. Wang, E. Perzon, J. L. Delgado, P. de la Cruz, F. Zhang, F. Langa, M.R. Andersson and O. Inganäs, "Infrared photocurrent spectral response from plastic solar cell with low-band-gap polyfluorene and fullerene derivative", Appl. Phys. Lett., Vol. 85, p5081-5083 (2004)
- [19] J. C. Hummelen, B. W. Knight, F. Lepeq, F. Wudl, J. Yao and C. L. Wilkins, "Preparation and Characterization of Fulleroid and

Methanofullerene Derivatives", J. Org. Chem., Vol. 60, p532-638 (1995)

- [20] F. Padinger, R. S. Rittberger, and N. S. Sariciftci, "Effects of postproduction treatment on plastic solar cells", Adv. funct. Mater., Vol. 13, p85-88 (2003)
- [21] L. M. Chen, Z. Hong, G. Li, and Y. Yang, "Recent Progress in Polymer Solar Cells: Manipulation of Polymer:Fullerene Morphology and the Formation of Efficient Inverted Polymer Solar Cells", Adv. Mater., Vol. 21, p1434-1449 (2009)
- [22] <http://blog.moneta.co.kr/blog.log.view.screen?blogId=phong72&listType=4&logId=4582818&olderType=2&category=4139033>
- [23] "그린에너지 전략 로드맵 보고서", KETEP 한국에너지 기술평가원 (2008)
- [24] 문상진, 류변환, 윤경훈, 김동수, 박희선, 이동현, 이승희, 김길중, 김석순, 김재영, 조규진, 안병태, 이수형, 유승협, "용액공정/인쇄기법을 이용한 초저가 나노박막태양전지 기술개발에 관한 연구기획", 산업기술연구회 (2008)
- [25] C. J. Brabec, S. Gowrisanker, J. J. M. Halls, D. Laird, S. Jia, and S. P. Williams, "Polymer-Fullerene Bulk-Heterojunction Solar Cells", Adv. Mater., Vol. 22, p3839-3856 (2010)

## 저|자|약|력|



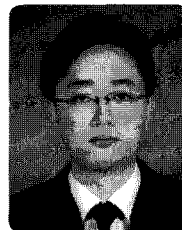
**성 명 : 박혜정**

- ◆ 학 력
- 2005년  
단국대학교 공과대학 화학공학과  
공학사
- 현재  
성균관대학교 대학원 신소재공학부  
석사과정



**성 명 : 신경식**

- ◆ 학 력
- 2009년  
금오공과대학교 공과대학 신소재  
시스템공학부 공학사
- 2011년  
성균관대학교 대학원 신소재공학부  
공학석사



**성 명 : 김상우**

- ◆ 학 력
- 1998년  
성균관대학교 공과대학 금속공학과  
공학사
- 2000년  
광주과학기술원 신소재공학과 공학  
석사
- 2004년  
Kyoto Univ. 전자공학과 공학  
박사

- ◆ 경 력
- 2004년 - 2004년 일본 교토대학 International Innovation Center 박사 후 연구원
- 2004년 - 2005년 영국 케임브리지 대학교 Nanoscience Centre Research Associate
- 2005년 - 2009년 금오공과대학교 신소재시스템공학부 전임강사, 조교수
- 2009년 - 현재 성균관대학교 신소재공학부 조교수

