

유기태양전지 모듈의 제작기술 연구 동향

Research Trends on Organic Photovoltaic Modules

정수현¹ · 홍순일^{1,2} · 이진호¹ · 백형철¹ · 장수영² · 김근진¹ · 강홍규^{1,3} · 이광희^{1,2,3}

| Suhyun Jung¹ · Soonil Hong^{1,2} · Jinho Lee¹ · Hyungcheol Back¹

Soo-Young Jang² · Geunjin Kim¹ · Hongkyu Kang^{1,3} · Kwanghee Lee^{1,2,3}

¹Heeger Center for Advanced Materials, Gwangju Institute of Science and Technology,
123 Cheomdangwagi-ro, Buk-gu, Gwangju 61005, Korea

²School of Materials Science and Engineering, Gwangju Institute of Science and Technology,
123 Cheomdangwagi-ro, Buk-gu, Gwangju 61005, Korea

³Research Institute for Solar and Sustainable Energies, Gwangju Institute of Science and Technology,
123 Cheomdangwagi-ro, Buk-gu, Gwangju 61005, Korea
E-mail: gemk@gist.ac.kr

1. 서론

산업혁명부터 현대까지 화석연료는 주요 에너지원으로써 인류의 역사와 함께하여 왔다. 하지만 최근 화석연료의 무분별한 사용은 전 세계적으로 자원 고갈 및 기후 변화와 같은 문제를 야기하게 되었고, 이에 따라 인류는 친환경적이면서도 재생 가능한 에너지원에 대해 관심을 갖게 되었다. 이 중 태양전지는 태양에너지를 전기에너지로 바꾸어주는 장치로 친환경적이고 무한한 에너지원인 태양광을 이용한다는 점에서 차세대 에너지원으로써 크게 각광 받고 있다. 태양전지에 대한 기원은 인류가 광기전 효과(photovoltaic) 현상을 처음 관측한 1800년대까지 거슬러 올라간다. 그 후 1954년 벨연구소에서 최초의 현대적인 태양전지가 발명되었고, 태양전지 1세대라 할 수 있는 결정질 실리콘을 시작으로 비정질 실리콘, 카드뮴 텔루라이드(CdTe), 사원계 화합물 반도체인 CIGS 등으로 대표되는 2세대 무기박막 태양전지가 개발되었으며 현재 차세대 태양전지라 불리는 3세대 박막 태양전지인 페로브스카이트, 양자점, 염료감응, 유기태양전지에 이르기까지 태양전지는 지속적인 발전을 거듭

Author



정수현
2009 성균관대학교 화학공학과 (학사)
2017 GIST 신소재공학부 (박사)
2017-현재 GIST 히가신소재 연구센터 선임연구원



홍순일
2010 한양대학교 신소재공학부 (학사)
2012 GIST 신소재공학부 (석사)
2012-현재 GIST 신소재공학부 (박사과정)



이진호
2010 광운대학교 전자재료공학과 (학사)
2017 GIST 나노바이오 재료전자공학과 (박사)
2017-현재 GIST 히가신소재 연구센터 선임연구원



백형철
2008 충북대학교 공업화학 (학사)
2010 GIST 신소재공학부 (석사)
2016 GIST 신소재공학부 (박사)
2016-현재 GIST 히가신소재 연구센터 선임연구원



장수영
2008 부산대학교 고분자공학과 (학사)
2010 GIST 신소재공학부 (석사)
2015 GIST 신소재공학부 (박사)
2015-2016 GIST 차세대에너지 연구소 선임연구원
2016-2017 Imperial College London 방문연구원
2016-현재 GIST 신소재공학부 (박사후연구원)



김근진
2005 경북대학교 물리학과(학사)
2008 한국과학기술원 물리학과 (석사)
2015 GIST 신소재공학부 (박사)
2015-현재 GIST 히가신소재 연구센터 (박사후연구원)



강홍규
2008 부산대학교 화학공학과 (학사)
2010 GIST 신소재공학부 (석사)
2015 GIST 신소재공학부 (박사)
2015 GIST 차세대에너지연구소 (박사후연구원)
2016-2017 Imperial College London 방문연구원
2015-현재 GIST 차세대에너지연구소 연구교수



이광희
1983 서울대학교 원자핵공학과 (학사)
1985 한국과학기술원 물리학과 (석사)
1995 미국 샌타바버라 캘리포니아 주립대학교 물리학과 (박사)
1985-1990 한국원자력연구소 선임연구원
1995-1997 미국 샌타바버라 캘리포니아 주립대학교 (박사후연구원)
1997-2006 부산대학교 물리학과 조교수/부교수
2007-현재 GIST 신소재공학부 교수
2015-현재 GIST 특훈교수

하고 있다.¹ 특히, 유기태양전지는 제작 단가가 저렴할 뿐 아니라 가볍고, 유연하여 유비쿼터스 시대에 가장 주목받고 있는 태양전지이다. 유기태양전지는 지난 20년간의 꾸준한 연구개발로 광전변환효율이 10%에 도달하였으며, 최근 1-2년 사이 비폴러렌 계열 물질 등의 신규 소재가 개발되면서 13% 이상의 높은 효율을 달성함에 따라 상용화에 대한 기대가 커지고 있다.² 그러나 이러한 유기태양전지의 상용화를 위해서는 실험실 수준의 작은 면적(광활성층 면적 $\leq 20 \text{ mm}^2$)에 해당하는 광전변환효율을 상용화 수준의 대면적 소자에서 달성해야 한다. 그러나 유기태양전지의 면적이 커지게 되면 광활성층으로부터 수집된 전하의 전극내 이동거리가 길어지면서 투명전극의 낮은 전도도로 인한 저항손실(ohmic loss)이 일어나 광전변환효율이 저하되는 문제가 발생한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 한번에 대면적의 태양전지를 만드는 것이 아니라 투명 전극과 유기태양전지를 구성하는 각 층의 패턴을 통해 여러 개의 단위소자를 제작하고 이들을 연결하여 저항손실을 줄이는 방식인 모듈 구조에 대한 연구가 진행되고 있다. 현재 가장 높은 유기태양전지 모듈 효율은 7.5%로, 단위소자에서 최대 10%의 효율을 보이는 물질을 사용했다는 점에서 단위소자대비 75% 수준이나 상용화를 위해서 아직은 대면적화가 더 필요한 실정이다.³ 본 고에서는 유기태양전지 상용화에 초점을 맞추어 고효율의 대면적 모듈 제작을 위한 핵심 기술요소인 모듈 구조 및 다양한 인쇄 공정 기술에 대해 소개 하고 더 나아가 유기태양전지의 향후 연구와 전망에 대해 논의하려 한다.

2. 본론

2.1 유기태양전지 모듈

유기태양전지의 상용화를 위한 핵심 기술 중 하나인 모듈화는 2007년 덴마크 공대의 F. C. Krebs 교수 그룹에서

0.0002%(면적 0.1 m^2)⁴ 효율의 모듈 제작을 시작으로 Konarka 사 (미국)에서 2009년 세계 최초로 약 3%의 효율을 가지는 모듈 제작에 성공하였으며 이를 가방에 부착한 형태의 제품이나 충전기 등에 응용하여 상품화를 시도하기에 이르렀다. 하지만 당시 유기태양전지 제작에 주로 사용되던 P3HT:PC₆₁BM 광활성층의 낮은 효율과 안정성 및 제작 비용 문제로 인해 상용화에 한계를 보인 사례로 기억되고 있다. 현재 Toshiba (일본), Imec(벨기에), Solarmer Energy(미국) 등의 기업 및 연구소에서도 유기태양전지의 상용화를 위한 연구 개발을 진행하고 있지만 아직까지 뚜렷하게 제품화에 성공한 사례는 나오지 않고 있다. 2016년에는 GIST의 이광희 교수 그룹에서 기능층 패턴을 제거한 모듈 구조를 인쇄공정으로 제작하여 7.5%(면적 4.15 cm^2)의 모듈 효율을 달성하였고, 한국 화학연구원에서도 7.45%(광활성영역 면적 77.8 cm^2)의 효율을 보고하였다.³⁵ 하지만 이러한 결과는 현재까지 보고된 단위소자의 최고 광전변환효율(13.8%)²에 비해 현저히 낮은 수준이기 때문에 상용화 단계에 도달하기 위해서는 유기태양전지 모듈에 관한 많은 연구가 필요할 것으로 보인다.

2.1.1 유기태양전지 모듈 구조

일반적으로 태양전지 모듈은 인접한 단위소자들의 상·하부 전극이 연결되도록 박막을 패턴하고, 이들을 직렬로 연결하여 제작한다. 그러나 패턴과정을 통해 소실되는 광활성층의 면적이 모듈의 비활성 영역(전기를 생산할 수 없는 영역)이 되기 때문에 모듈 효율 저하의 원인이 되기도 한다. 초기 대면적 유기태양전지 모듈의 연구는 후처리 공정을 통해 패턴을 하는 방식과 인쇄 공정을 이용하여 소자 제작 시 패턴을 동시에 하는 두가지 방식으로 나누어 진행되었다.

첫번째 방식은 기존의 a-Si, CIGS와 같은 박막 태양전지 모듈의 제작에 사용되는 패턴 공정을 유기태양전지 모듈 제작에 도입하는 것이다. 유기태양전지 모듈을 구성하는 모든

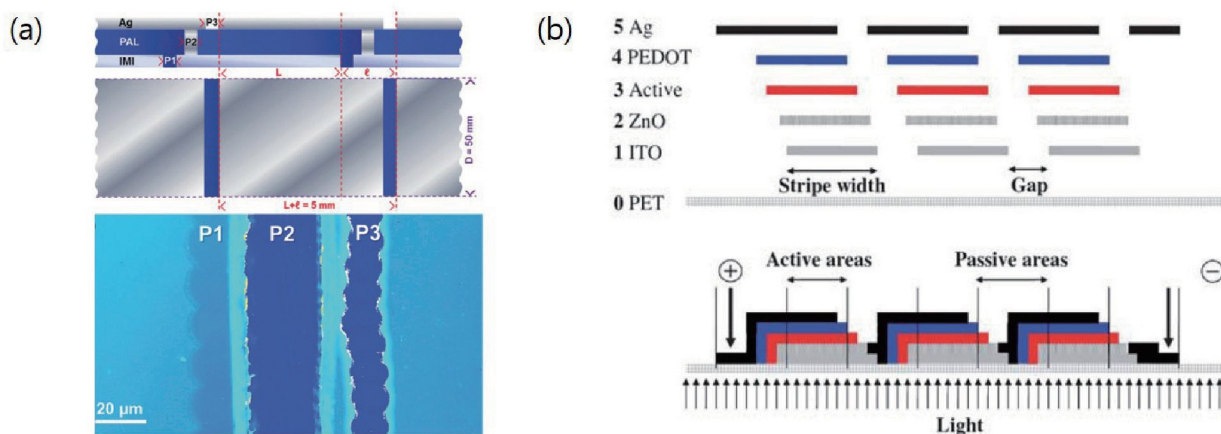


그림 1. (a) 레이저 스크라이빙을 통한 패턴을 통해 제작한 모듈의 구조 개념도,⁸ (b) 인쇄형 모듈 제작 시 필요한 패턴 공정 개념도.⁹

박막을 패턴 없이 형성한 후에 레이저 스크라이빙과 같은 후처리 패턴 공정을 이용하여 여러 개의 단위소자를 형성하는데, 미국 Plextronics의 Ritesh Tipnis 그룹은 스펀 코팅과 레이저 스크라이빙 방식을 이용하여 효율 1.1%(면적 233 cm^2)의 유기태양전지 모듈을 제작하였다. 후처리 패턴 공정을 통해 유기태양전지 모듈을 제작하는 경우에는 후처리 공정 기술의 패턴 해상도가 모듈의 성능을 결정하는데, 초기에 이 패턴 해상도는 mm 단위였기 때문에 모듈 제작 시 비활성 영역이 커져 낮은 모듈 효율의 원인이 되었다.⁶ 최근에는 독일의 C. J. Brabec 교수 그룹에서 레이저 스크라이빙 공정 기술의 패턴 해상도를 μm 단위까지 향상시켜 효율 5.3%(면적 $3,500 \text{ mm}^2$)를 가지며 비활성 영역이 2%이하던 모듈을 제작하였다(그림 1a).^{7,8} 두번째는 용액 공정이 가능한 유기태양전지의 특징을 이용하여 슬롯다이 등 1차원 패턴이 가능한 인쇄공정을 대면적 소자 모듈에 적용하는 방식이다. F. C. Krebs 교수 그룹에서는 인쇄 공정을 이용하여 최고 효율 1.69%(면적 360 cm^2)를 갖는 유기태양전지 모듈을 제작하였다. 이 경우 박막을 형성하는 공정과 형성된 박막에 패턴을 주는 공정이 동시에 이루어지게 되어 패턴을 위한 후처리 공정이 필요 없다는 장점이 있다(그림 1b).⁹ 그러나 인쇄 공정 기술의 낮은 해상도 때문에 패턴 공정 시 발생하게 되는 비활성 영역이 총 모듈 면적의 약 30% 이상이 되는 문제점이 있다.

2.1.2 신규 모듈 구조

최근에는 유기태양전지 모듈 제작 시 공정상의 비용을 줄이기 위해 후처리 패턴 공정 보다는 인쇄 공정을 이용하여

모듈을 제작하는 연구가 집중적으로 이루어지고 있다. 특히 유기태양전지를 구성하는 각 박막의 패턴 시 발생하게 되는 비활성 영역의 면적을 줄이기 위해 인쇄 공정에 적합한 새로운 유기태양전지 모듈 구조의 개발이 활발히 진행되고 있다. 최근 GIST의 이광희 교수 그룹에서는 유기태양전지를 구성하는 모든 층을 패턴 하여 모듈을 제작하는 기존 방식과 달리 박막을 부분적으로 패턴하여 비활성 영역이 10% 이하인 다양한 모듈 구조를 개발하였으며, 본문에서는 세가지 방식의 새로운 모듈 구조에 대해 설명할 것이다.^{3,10,11} 먼저 유기태양전지 광활성층의 극성이 기능층의 배치에 따라 조절되는 특징을 이용하여 광활성층을 패턴하지 않는 모듈 구조를 개발하였다.¹⁰ 기존의 모듈에서 단위소자를 연결 할 때 인접한 단위소자의 하부 전극과 상부 전극을 직렬 연결하는 방식과는 달리 이러한 모듈 구조에서는 패턴하지 않은 광활성층에 정구조와 역구조의 유기태양전지 단위소자를 동시에 구현하여 인접한 소자 간 상·하부 전극을 공유함으로써 직렬 연결하여 모듈을 구성하는 특징을 가진다(그림 2a).¹⁰ 다음으로, 유기태양전지의 기능층은 통상 수 nm에서 수십 nm의 얇은 두께로 구현되는 점에 착안하여 기능층의 패턴 없이 광활성층만을 패턴 하는 새로운 모듈 구조를 개발하였다. 즉 모듈의 단위소자 간 연결 시 상·하부 전극 사이에 중간층이 존재하더라도 전기적 특성이 크게 변하지 않는다는 것을 이용한 것이다. 인쇄 공정을 통해 제작된 본 구조의 유기태양전지 모듈은 당시 최고 효율인 7.5%의 공인 효율을 기록하였다(그림 2b).³ 마지막으로 인쇄 공정 시에 패턴 없이 유기태양전지의 모든 박막을 형성한 후 새로운 후처리 방법을 이용하여 모듈을 제작하는 방법을 개발하였다(그림 2c).

이 연구의 핵심은 은 나노 입자를 첨가한 광활성층을 이용하여 패턴 없이 대면적 소자를 제작 후 인접한 단위소자들 사이에 국부적인 전기장을 인가해 금속 필라멘트 나노 전극을 형성시키는 기술로, 패턴형성 과정이 필요 없을 뿐 아니라 후처리 방법이 매우 간단하여 아직까지 낮은 기술수준을 보이는 인쇄 공정용 유기태양전지의 개발에 널리 활용될 수 있을 것으로 예상된다.¹¹

2.2 인쇄 공정

고효율의 인쇄형 유기태양전지 모듈의 상용화를 위해서는 인쇄 공정 기술에 대한 연구가 필수적이다. 최근 단위소자에서 10% 이상의 효율이 보고되면서 유기태양전지의 상용화에 대한 가능성과 관심이 높아짐에 따라 인쇄 공정에 대한 연구도 점점 활발해지는 추세이다. 인쇄 공정의 종류로는 연구실 단위에서 가장 많이 사용되고 있는 닥터블레이드 코팅을 비롯하여 슬롯다이 코팅, 나이프오버에지 코팅, 스프레이 코팅, 잉크젯 프린팅, 그라비아 프린팅, 플렉소그래픽 프린팅, 스크린 프린팅, 오프셋 프린팅 등이 있다. 또한 최근에는

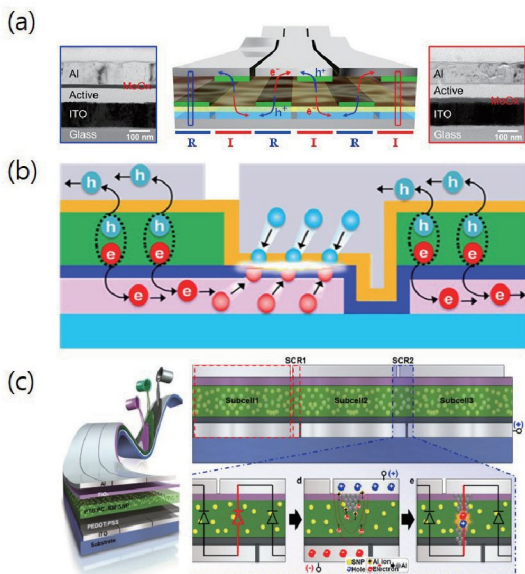


그림 2. (a) 광활성층을 패턴 하지 않는 유기태양전지 모듈 구조 개념도.¹⁰ (b) 광활성층만을 패턴 하는 유기태양전지 모듈 구조 개념도.³ (c) 은 나노 입자를 함유한 광활성층과 새로운 후처리 공정을 통해 제작한 유기태양전지 모듈의 개념도.¹¹

브러쉬를 이용한 코팅이나 3-D 프린팅 기술까지 인쇄형 유기태양전지 개발을 위해 연구되고 있다. 프린팅과 코팅의 차이점은 기판에 잉크층을 형성시킬 때 상대적으로 복잡한 패턴이 잉크를 전사하는 매개체에 들어가면 프린팅이라 부르고 그렇지 않으면 코팅이라고 부르고 있다. 하지만 통상적으로 코팅 방법 또한 큰 범주에서 프린팅으로 포함되고 있어서, 모두 아울러 프린팅 또는 인쇄 공정으로 볼 수 있다. 지금부터는 최근 관심이 집중되고 있는 다양한 종류의 인쇄 공정에 대해 소개하고자 한다.

2.2.1 닥터블레이드 코팅

블레이드와 접지면 사이에 매니스커스를 형성하여 평면 코팅에 사용되는 장비이며 주로 패턴이 필요없는 연구실 단위의 작은 단위소자 제작 시 사용한다(그림 3). 최근 연구 동향을 살펴보면 C. J. Brabec 교수 그룹에서 닥터블레이드 코팅을 이용해서 10.3% 효율의 적층형 태양전지를 개발하였으며, 이는 현재까지 인쇄 공정으로 제작된 유기태양전지 소자 중 가장 높은 효율로 기록되고 있다.¹² 하지만 닥터블레이드 코팅은 연속적인 용액 주입이 어렵고 패턴 공정에 부적합하기 때문에 롤투롤 형태의 대면적 연속 인쇄 공정 시에는 사용하기 어렵다.

2.2.2 슬롯다이 코팅

1-D 패턴이 가능한 코팅 방법이기 때문에 대면적 소자 및 모듈 제작에서 광활성층 영역을 코팅할 때 많이 사용된다(그림 4). F. C. Krebs 교수 그룹에서 ZnO/P3HT:PC₆₁BM/PEDOT:PSS 층을 모두 롤투롤 슬롯다이 코팅 방법을 이용해서 적층하여 대면적 유기태양전지 효율 1.61%(면적 360 cm²)를 달성한 바가 있으며, 최근에는 Thomas. P. Russell 교수 그룹에서 미니 슬롯다이 장비를 이용하여 단위소자 효율 5.5%를 기록하였다.^{9,13} 또한, GIST의 이광희 교수 그룹에서 적층형 태양전지를 미니 슬롯다리로 제작하여 8.2%의 효율(면적 1 cm²)을 달성하였으며 0.5 μm 정밀 패턴을 슬롯다리로 구현하여 유효면적 90%, 전체 모듈 효율 7.5%(면적 4.15 cm²)를 달성하였다.^{3,14}

2.2.3 나이프오버에지 코팅

닥터블레이드와 유사한 코팅법으로, 차이점은 이 경우 나

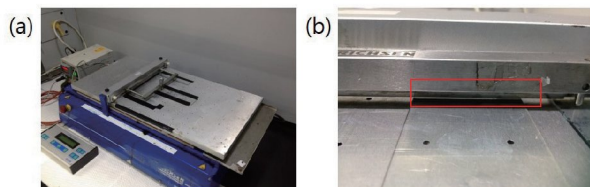


그림 3. (a) 닥터블레이드 코팅 장비, (b) 블레이드와 기판 사이의 매니스커스 형성.³

이프가 고정되어 있고 기판이 움직이면서 코팅이 된다는 점이다. 또한 잉크 저장고가 나이프 앞에 있기 때문에 잉크의 지속적인 공급이 가능하여 롤투롤 공정에 적합하다(그림 5). 다만 모듈 구성에 있어서 필수적인 1-D 패턴에 부적합하므로 여타 패턴이 가능한 인쇄 장비에 비하여 상대적으로 활용성이 떨어진다고 볼 수 있다. 하지만 최근의 연구 동향에서 레이저 패터닝 기술이 개발되고 있는 추세이므로 추후 패턴이 필요 없는 대면적 인쇄에 사용될 수 있을 것이다.

2.2.4 스프레이 코팅, 잉크젯 프린팅

스프레이 코팅 방법은 초창기 인쇄 공정을 이용한 유기태양전지 제작 시 많이 연구되던 방법이다(그림 6a). 하지만 노즐을 통한 방사 시스템의 경우 균일한 필름 표면 형성이 어렵다는 단점이 있다.¹⁶ 그럼에도 불구하고 2007년 GIST 김동유 교수 그룹에서는 스프레이 코팅으로 제작한 단위소자에서 2.8%의 효율을 보고하였으며,¹⁷ 이후 W. Zhang 그룹은 PEDOT:PSS층과 PBDTTT-EFT:PC₇₁BM층을 스프레이 코팅 기법을 통해 형성하여 정구조 유기태양전지 단위소자 효율 8.06%를 달성하였다.¹⁸ 잉크젯 프린팅은 다른 인쇄 기법과 달리 디지털 방식의 높은 해상도(~1,000 dpi)를 가지는 코팅이 가능하기 때문에 많은 연구자들이 사용하고 있는 장비이다(그림 6b). 하지만 공정이 상당히 복잡하고, 한번에 코팅되는 면적이 작기 때문에 속도가 느리다는 단점이 있다. 따라서 유기태양전지보다는 집적화가 필요한 트랜지스터 등의 소자에 응용되는 경우가 많다.

2.2.5 그라비아, 플렉소그래픽, 스크린, 오프셋 프린팅

이 프린팅 장비들은 모두 롤투롤 공정에 적합하여 대량생산이 가능하기 때문에 인쇄 전자 산업에서 유망한 기술로 여겨지고 있다(그림 7). 그라비아 프린팅 기술은 패턴이 되어있는 롤러에 잉크를 묻혀 기판에 전사하는 방식으로, 잉크 절감이나 정밀한 패턴 구현이 가능한 장점이 있다. 플렉소그래픽 프린팅도 이와 유사하지만 롤러와 기판 사이에 유연성 수지판이 있어서 롤러의 잉크가 이 유연성 수지판에 전사된 후

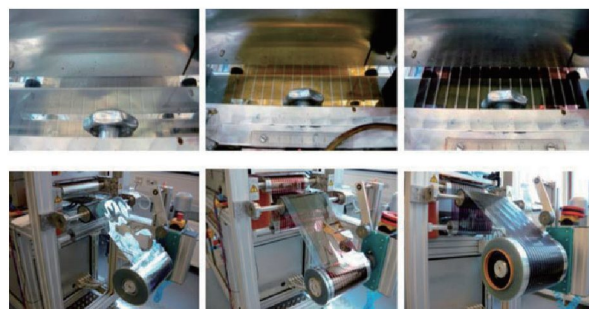


그림 4. ZnO nanoparticles(왼쪽), P3HT:PCBM(가운데)와 PEDOT:PSS(오른쪽)의 롤투롤 슬롯다이 코팅 과정.⁹

양각 패턴으로 기판에 인쇄된다는 차이점이 있다. 따라서 플렉소그래픽 방식이 그라비아 프린팅보다 좀 더 균일한 박막 형성이 가능하다고 알려져 있다. 스크린 프린팅은 20세기 초부터 사용된 오래된 인쇄 기술로 연구실 단위에서도 많이 사용하고 있다. 메쉬 형태로 패턴된 마스크 위에 용액을 스queezer로 문질러 마스크 밑에 있는 기판으로 전사하는 방식이다. 이와 같은 방식은 빠르게 인쇄할 수 있다는 장점이 있지만 저점도 용액의 인쇄에 있어서는 정밀도가 떨어지고 전체적으로 균일한 표면 형성에 어려움이 있어, 유기태양전지 소자 제작 시 100 nm 두께의 얇은 광활성층 박막보다는 μm 단위의 고점도 PEDOT:PSS나 Silver Paste 등의 인쇄에 많이 사용된다. 오프셋 프린팅 기법 또한 미래의 유망한 인쇄 방식으로 여겨지고 있는데, 앞서 설명한 프린팅 기법들과의 차이점은 인쇄면과 인쇄되지 않는 패턴된 면이 동일 면에 위치한다는 점이다. 이 면들 위에 블랭킷 실린더가 있어서 보다 정밀하고 선명한 인쇄가 가능하다. 이 인쇄 장비들은 이미 다양한 제품을 생산하기 위해 널리 사용되고 있는 기술들이지만 아직까지 유기태양전지 분야에서는 많은 연구가 진행되고 있지는 않다.

2.2.6 브러쉬 코팅, 3-D 프린팅

위의 인쇄 방법들 외에도 일상 생활에서 접근하기 쉬운 브러쉬를 이용한 유기태양전지의 제작에 관한 연구가 진행되고 있다(그림 8a). GIST의 김동유 교수 그룹에서 2007년에 보고한 연구 결과에 의하면 브러쉬를 이용해 광활성층을 코팅하였을 경우 고분자를 브러쉬의 진행 방향으로 유기물을 정렬할 수 있으며, 또한 스핀코팅과 비교하였을 때 용매의 자연 증발에 의하여 필름이 형성되기 때문에 유기태양전지에

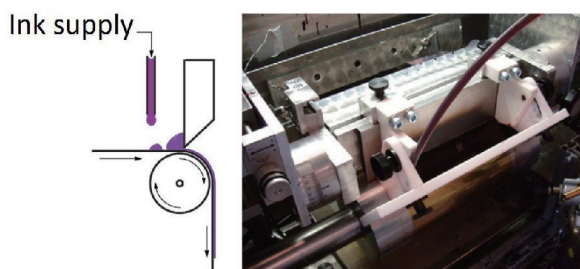


그림 5. 나이프오버에지 코팅장비의 모식도(왼쪽)와 실제 모습(오른쪽).¹⁵

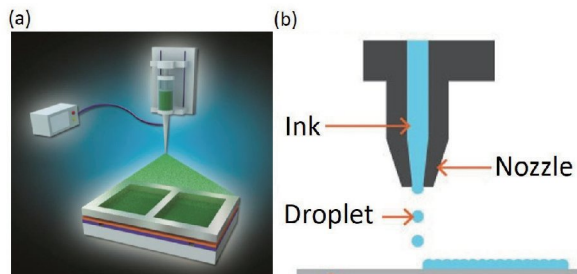


그림 6. (a) 스프레이 코팅 기법, (b) 잉크젯 프린팅 기법의 모식도.¹⁶

서 보다 높은 효율을 달성하였다.²⁰ 3-D 프린팅 기술의 경우 CSIRO의 박두진 박사 연구진과 김동유 교수 그룹의 협업으로 활발히 연구되고 있으며, 슬롯다이 코팅 장비를 3-D 프린터에 장착하여 1-D 패턴을 형성하였으며 이를 이용해 유기태양전지 모듈 제작에 성공하였다(그림 8b).²¹ 이러한 방법은 기존의 인쇄 공정에 디지털 방식을 추가해서 보다 정밀하게 코팅할 수 있다는 장점이 있다. 이 외에도 딥 코팅이나 바 코팅 같은 프린팅 기술도 있으나 아직까지 유기태양전지 연구에는 많이 적용되고 있지 않다.

3. 결론

유기태양전지 기술은 태양 에너지를 이용하기 때문에 친환경적이며 용액 공정이 가능하여 제작이 쉽다는 장점에 화석연료를 대체할 차세대에너지원으로써 크게 각광받고 있다. 하지만 현재 유기태양전지에 사용되는 투명전극의 낮은 전기 전도도는 상용화 수준의 대면적 소자를 제작하는

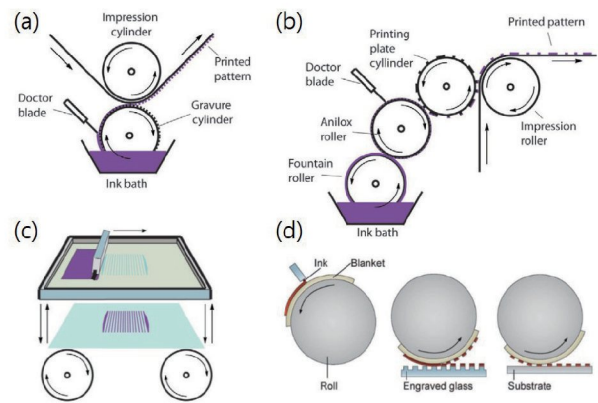


그림 7. (a) 그라비아 프린팅, (b) 플렉소그래픽 프린팅, (c) 스크린 프린팅, (d) 오프셋 프린팅 기법의 모식도.^{15,19}

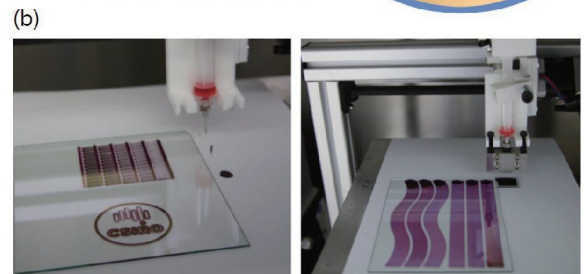
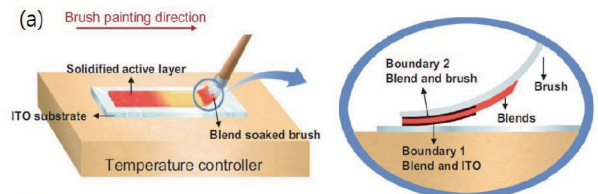


그림 8. (a) 브러쉬 코팅의 모식도, (b) 3-D 프린터를 이용한 코팅 모습.^{20,21}

데 있어 커다란 걸림돌이 되고 있다. 이에 본 글은 여러 개의 단위소자를 연결하여 대면적으로 제작이 가능한 유기태양전지 모듈 기술을 소개하였다. 유기태양전지 모듈 기술은 투명 전극의 낮은 전기 전도도로 인한 저항손실을 줄여 상용화 가능한 고효율의 대면적 유기태양전지를 제작할 수 있게 하는 기술이다. 유기태양전지 모듈에서 전체 모듈의 면적당 생산 가능한 전류의 양, 즉 모듈 효율의 향상은 단위소자들을 연결하기 위한 박막의 패턴 시 발생하는 비활성 영역을 얼마나 줄이는가에 달려있다. 유기태양전지의 용액 공정이 가능한 장점과 다양한 인쇄 기술을 결합하여 유기태양전지 모듈을 제작할 경우 제작 단가를 크게 낮출 수 있다. 또한 패턴 공정을 줄인 모듈 제작 기술은 모듈의 비활성 영역을 줄이고 모듈 효율을 향상시킬 수 있다. 아직 인쇄 공정의 낮은 기술 성숙도로 인해 인쇄형 유기태양전지 모듈의 효율은 스퍼 코팅 방법을 이용해 제작된 단위소자에 비해 낮지만, 본 글에 소개된 다양한 인쇄 공정들을 이용한 유기태양전지 모듈에 대한 연구가 전 세계적으로 활발히 진행되고 있으므로 머지 않은 미래에 상용화 가능한 고효율의 대면적 유기태양전지 모듈 제작이 가능할 것이라 기대한다. 또한 현재 연구되고 있는 유연 투명전극을 모듈에 적용할 경우 유연한 유기태양전지 모듈의 상용화 역시 가능할 것이라 전망한다.

참고문헌

1. M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, and E. D. Dunlop, *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, **20**, 12 (2012).
2. W. Zhao, S. Li, H. Yao, S. Zhang, Y. Zhang, B. Yang, and J. Hou, *J. Am. Chem. Soc.*, **139**, 7148 (2017).
3. S. Hong, H. Kang, G. Kim, S. Lee, S. Kim, J.-H. Lee, J. Lee, M. Yi, J. Kim, H. Back, J.-R. Kim, and K. Lee, *Nat. Commun.*, **7**, 10279 (2016).
4. F. C. Krebs, H. Spanggaard, T. Kjær, M. Biancardo, and J. Alstrup, *Mater. Sci. Eng. B.*, **138**, 106 (2007).
5. S. Badgujar, G.-Y. Lee, T. Park, C. E. Song, S. Park, S. Oh, W. S. Shin, S.-J. Moon, J.-C. Lee, and S. K. Lee, *Adv. Energy Mater.*, **6**, 1600228 (2016).
6. R. Tipnis, J. Bernkopf, S. Jia, J. Krieg, S. Li, M. Storch, and D. Laird, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **93**, 442 (2009).
7. G. D. Spyropoulos, P. Kubis, N. Li, D. Baran, L. Lucera, M. Salvador, T. Ameri, M. M. Voigt, F. C. Krebs, and C. J. Brabec, *Energy Environ. Sci.*, **7**, 3284 (2014).
8. L. Lucera, F. Machui, P. Kubis, H. D. Schmidt, J. Adams, S. Strohm, T. Ahmad, K. Forberich, H.-J. Egelhaaf, and C. J. Brabec, *Energy Environ. Sci.*, **9**, 89 (2016).
9. F. C. Krebs, T. Tromholt, and M. Jorgensen, *Nanoscale*, **2**, 873 (2010).
10. J. Lee, H. Back, J. Kong, H. Kang, S. Song, H. Suh, S.-O. Kang, and K. Lee, *Energy Environ. Sci.*, **6**, 1152 (2013).
11. H. Kang, S. Hong, H. Back, and K. Lee, *Adv. Mater.*, **26**, 1602 (2014).
12. N. Li and C. J. Brabec, *Energy Environ. Sci.*, **8**, 2902 (2015).
13. F. Liu, S. Ferdous, E. Schaible, A. Hexemer, M. Church, X. Ding, C. Wang, and T. P. Russell, *Adv. Mater.*, **27**, 886 (2015).
14. S. Kim, H. Kang, S. Hong, J. Lee, S. Lee, B. Park, J. Kim, and K. Lee, *Adv. Funct. Mater.*, **26**, 3563 (2016).
15. R. Søndergaard, M. Hösel, D. Angmo, T. T. Larsen-Olsen, and F. C. Krebs, *Mater. Today*, **15**, 36 (2012).
16. H. Back, J. Kong, H. Kang, J. Kim, J.-R. Kim, and K. Lee, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **130**, 555 (2014).
17. D. Vak, S.-S. Kim, J. Jo, S.-H. Oh, S.-I. Na, J. Kim, and D.-Y. Kim, *Appl. Phys. Lett.*, **91**, 081102 (2007).
18. Y. Zhang, J. Griffin, N. W. Scarratt, T. Wang, and D. G. Lidzey, *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, **24**, 275 (2016).
19. K. Fukuda, Y. Yoshimura, T. Okamoto, Y. Takeda, D. Kumaki, Y. Katayama, and S. Tokito, *Adv. Electron. Mater.*, **1**, 1500145 (2015).
20. S.-S. Kim, S.-I. Na, J. Jo, G. Tae, and D.-Y. Kim, *Adv. Mater.*, **19**, 4410 (2007).
21. D. Vak, K. Hwang, A. Faulks, Y.-S. Jung, N. Clark, D.-Y. Kim, G. J. Wilson, and S. E. Watkins, *Adv. Energy Mater.*, **5**, 1401539 (2015).