

플렉시블 플라스틱 태양전지 생산공정 기술 개발

글 | 김동수 _ 한국기계연구원 나노기계연구본부 롤투롤인쇄전자공정장비팀장 kds671@kimm.re.kr

그 래 들어 심각한 환경오염과 화석에너지 고갈로 인해 차세대 청정에너지 개발에 대한 중요성이 커지고 있다. 그 중에서 태양전지는 공해가 적고 자원이 무한하며 반영구적인 수명을 가지고 있어 미래의 에너지 문제를 해결할 수 있는 에너지원으로 기대되고 있다. 현재 태양전지 산업의 90%는 실리콘 태양전지가 차지하고 있다. 그러나 2000년 이후 실리콘 원재료 및 실리콘 기판 수급 문제가 발생하여 태양전지 제조단가가 상승함에 따라 태양전지

는 효율 향상이라는 과제 외에도 원자재 수급 및 제조단가 문제를 해결해야 하는 상황에 직면하고 있다.

유기태양전지 에너지변환효율 6.5%까지 도달

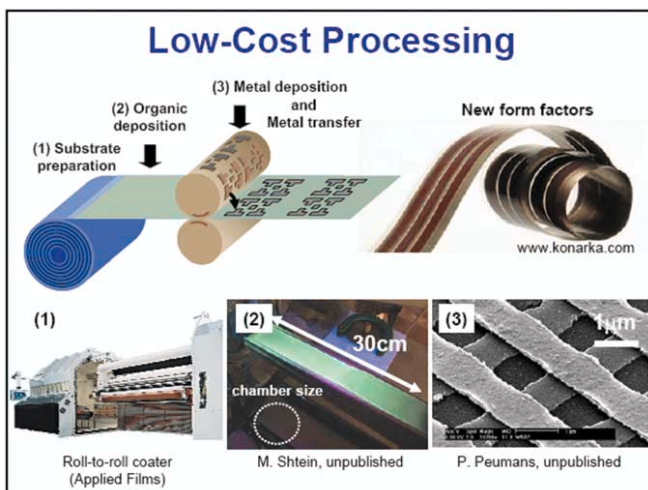
유기 반도체는 합성 방법이 다양하고 섬유나 필름 형태로 성형이 용이하며 상대적으로 제조비용이 저렴하다. 또한 유기 반도체를 이용하면 100°C 이하의 온도에서 소자 제조가 가능해지므로 플라스틱 기판의 사용이 가능하다. 또한 스핀 코팅, 잉크젯 프린팅 등의 대면적 소자제작 방법으로 각종 플렉시블 소자의 공정과정을 단순화하여 제작단가를 낮출 수 있다. 플렉시블 유기태양전지는 경제성 외에도 휘어지는 플라스틱을 소재로 했다는 점에서 벽지, 옷, 커튼, 입는 컴퓨터, 휴대용 전자신문, 휴대용 전자기기 등 활용분야가 넓어 새로운 블루오션을 창출할 수 있을 것으로 기대된다. 실제로 미국의 코나카, 샌타바버라, 광주과학기술원 등에서는 유기태양전지의 발전 및 실용화 가능성에 주목하여 본격적인 개발을 하고 있다.

유기 태양전지는 1970년대부터 그 가능성이 제시되어 왔지만, 효율이 너무 낮아 실용성이 크지 않았다. 하지만, 1980년 이후에 반도체 고분자와 C₆₀의 유도체를 이용한 고분자 태양전지가 개발되면서, 유기 태양전지에 대한 관심과 연구가 증폭되었다. 이들 태양전지는 초기에 1% 전후의 효율을 보였으나, 최근 몇 년 간의 집중적인 연구로 인해 현재 6.5% 정도의 에너지 전환 효율이 발표되고 있다.

유기태양전지의 효율을 향상시키기 위해 유기 광전 변환층 제조공정과 재료 개발에 초점을 맞추어 연구가 진행되고 있다. 유기 태양전지의 효율을 제한하는 큰 문제 중의 하나는 벌크 상태에서 유기물 내의 캐리어(전자와 정공) 이동 속도가 느리다는 것이다. 유기

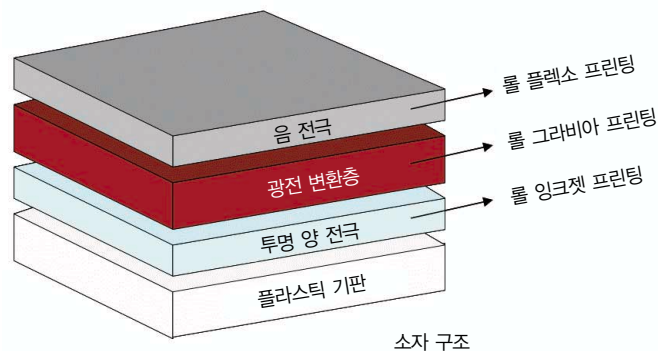


벽지, 옷, 휴대용 전자제품 전원 등

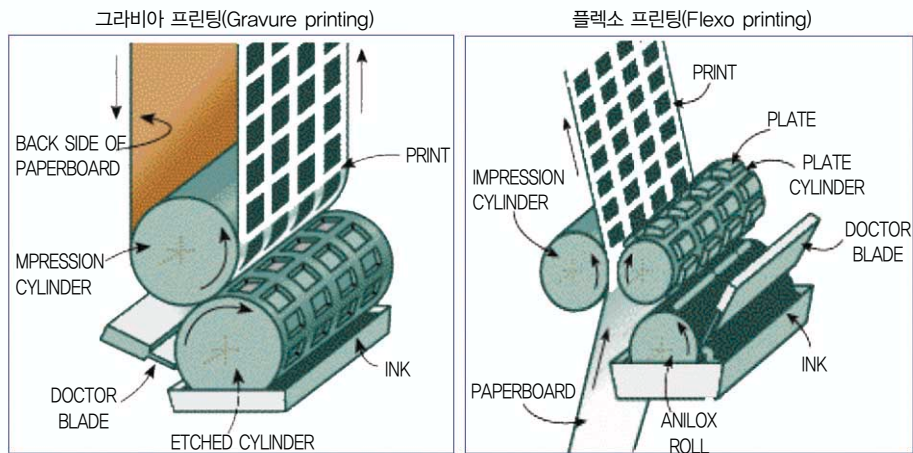


선진국의 유기태양전지 개발 사례

〈그림 1〉 유기태양전지 응용 분야 및 선진국 개발 사례



소자 구조



그라비아 및 플렉소 인쇄기법

〈그림 2〉 플렉시블 유기 태양전지 소자의 구조와 최적 인쇄기법 적용

물은 무기물에 비해 계면의 상태, 결정면, 분자사슬 간의 결합으로 이동도를 제한하고 있다. 따라서 이동도 향상을 위한 많은 연구가 진행되었는데, 박막형성 시 모폴로지 개선법, 박막형성 후 열처리를 이용한 유기 반도체의 결정성 향상법이 있다. 또한, 현재 유기태양전지에 사용되는 상당수의 물질들은 태양광 스펙트럼을 충분히 흡수할 수 있는 파장대를 가지고 있지 않다. 따라서 태양광을 충분히 흡수할 수 있는 작은 밴드 갭의 물질 개발에 관한 연구를 하고 있다.

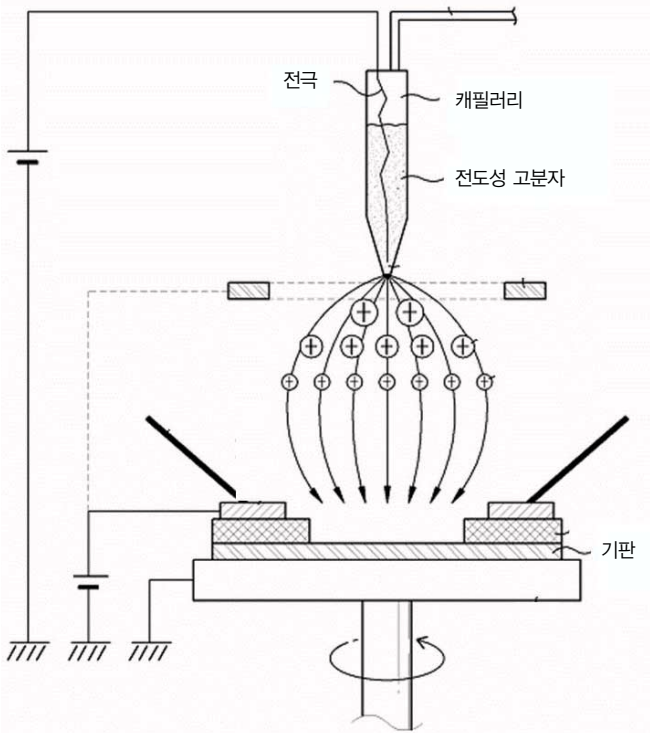
그러나 현재 유기태양전지는 상용화 단계인 10%의 광전변환 효율에는 미치지 못하고 있으며, 제 과정 또한 진공공정과 프린팅공정의 복합으로 이루어져 있어 롤-투-롤 제조가 힘들며, 상대적으로 가격이 비싼 편이다. 차세대 플렉시블 유기 태양전지에서 해결해야 할 문제는 상온, 대기압에서 완전 프린팅하는 롤-투-롤 제조법을 개발하여 제조 단가를 현저히 낮추는 것이다. 또한 유기 태양

전지의 에너지 전환 효율을 향상시키는 것이다.

본 글에서는 이러한 차세대 유기 태양전지의 발전방향, 즉 저가격화와 고효율화를 위한 프린팅 공정과 소자 설계, 롤-투-롤 제조 공정에 대하여 살펴보고자 한다.

저가격화·고효율화 위한 인쇄 기술이 관건

플렉시블 유기 태양전지의 기본구조는 애노드 전극과 캐소드 전극 사이에 폴리머와 같은 유기물질로 광전 변환층을 형성한다. 유기 태양전지의 저가격화를 위해서는 애노드 전극, 캐소드 전극, 광전 변환층 모두 프린팅 공정을 이용하여 롤-투-롤 방법으로 제조되어야 한다. 광전 변환층은 유기반도체를 용액 형태로 그라비아 프린팅, 스핀코팅이나, 잉크젯 프린팅과 같은 방법으로 형성될 수 있다. 캐소드 전극은 일반적으로 진공 열 증착으로 형성되고 있으나, 나노입자 잉크나 페이스트를 이용하여 다양한 프린팅 기법으로



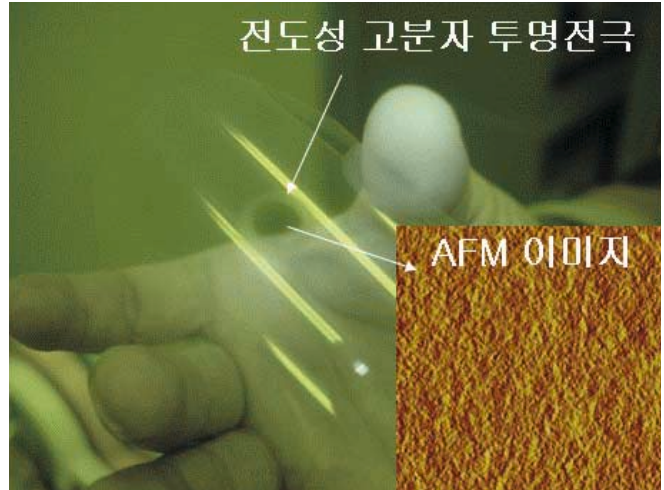
〈그림 3〉 정전기 스프레이 잉크젯 프린팅 시스템

형성될 수 있다.

그러나 기존의 유기 태양전지는 애노드 전극으로 투명하고 전기 전도성이 있는 ITO를 주로 사용하고 있다. ITO는 값이 비싼 인듐을 주성분으로 사용하고 있고, 전극 박막 제조를 위해 진공 공정을 필요로 하므로 제조비용이 높을 뿐만 아니라, 쉽게 부서지거나 깨지는 특성 때문에 유연성을 요구하는 플렉시블 유기 태양전지에 부적합하다. 졸겔법을 이용한 ITO 분산액의 경우 프린팅 공정을 이용하여 전극을 제조할 수 있기 때문에 스퍼터 공정으로 형성된 ITO에 비해 제조비용은 저렴하지만 전도성이나 투명도 등이 매우 부족하다.

플렉시블 태양전지 투명전극 재료로는 유연성, 접착성, 열팽창 특성, 프린팅가능성 등을 고려하였을 때, 플라스틱 기판과 물성의 조화를 가장 잘 이루는 유기물 재료를 이용하는 것이 바람직하다. 현재 가장 많이 연구되고 있는 것은 전도성 고분자를 이용한 투명전극이나 아직 투과도 대비 전도도 특성이 ITO에 못 미치고 있다.

따라서 플렉시블 유기태양전지 개발을 위한 핵심적인 사항은 애노드 투명전극을 프린팅 공정법으로 쉽게 형성하되 기존의 금속산화물 투명전극에 필적할 만큼의 우수한 전기적 특성을 가지는 것



〈그림 4〉 전도성 고분자 투명전극의 광학현미경 및 AFM 이미지

이다.

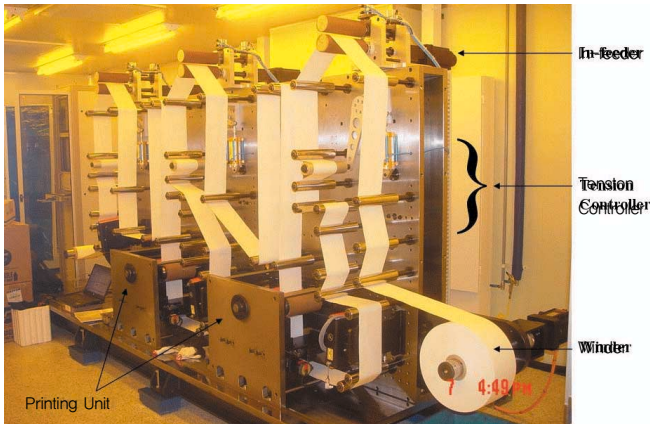
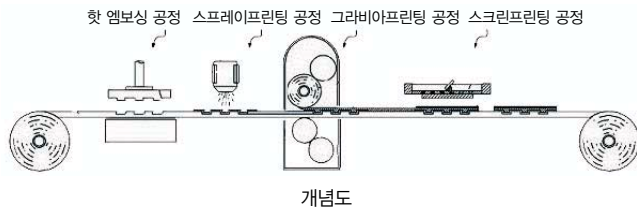
필자는 '정전기 스프레이 잉크젯 프린팅법'으로 기판상에 전도성 고분자 입자를 적층하여 투명전극을 제조하는 방법을 개발하였다. 〈그림 3〉은 정전기 스프레이 프린팅 시스템을 나타내는 개략도이다. 먼저 기판 홀더 상에 기판을 배치하고, 전도성 고분자 잉크를 캐필러리 안에 담는다. 그 다음 기판 홀더가 접지된 상태에서 캐필러리 안의 전도성 고분자 잉크에 전압을 인가한다. 고전압이 인가되면, 전기장 집중 효과에 의해 캐필러리 끝에 극도로 큰 전기장이 발생한다. 이 때의 전기장 세기(E_c)는 다음과 같다.

$$E_c = \frac{2V_c}{r_c \ln(4d/r_c)}$$

여기서 V_c 는 인가 전압, r_c 는 캐필러리 끝의 외경, d 는 캐필러리와 기판 간의 거리이다.

이 식에서 알 수 있듯이, 전기장 집중의 세기는 인가전압이 클수록, 캐필러리 끝의 외경이 작을수록 커진다. 캐필러리 끝부분에 집중 형성된 전기장은 전도성 고분자 물질을 양이온과 음이온으로 분리하여 이온화된 입자, 즉 대전된 입자들을 만든다. 대전 입자들은 용액의 표면에 집중되고 표면이 불안정해지면서 캐필러리로부터 제트 분사된다. 분사된 미세 방울은 전기장에 의해 기판 쪽으로 유도되고 아주 작은 입자 형태로 기판 상에 적층된다.

투명전극의 전기적 특성을 살펴보기 위해 실험을 실시하였다. 기판으로는 일반적인 OHP 필름을 사용하였고, 전도성 고분자 잉크는 H.C. 스타사의 PEDOT : PSS와 글리세롤을 적정 비율로 혼합해 사용하였다. 글리세롤은 전도성 고분자 잉크가 제트 분사될



인쇄태양전지 생산 롤투롤 인쇄기계

<그림 5> 플라스틱 유기 태양전지의 롤투롤 제조방법을 나타내는 개념도 및 롤투롤 인쇄기계

때 분사 효율을 높이고, 전기 전도성을 향상시키는 역할을 한다. 정전기 스프레이 잉크젯 프린팅 시스템의 인가전압은 7kV이며, 프린팅 후 120°C에서 30분 간 충분히 건조 공정을 진행하였다. 전기적 특성 분석은 4점 프로브 시스템을 이용하여 면저항을 측정하는 것으로 하였다. 일반적인 전도성 고분자 투명전극의 면저항은 수백Ω/□(옴/스퀘어)이상이나, 연구 결과 24Ω/□, 27Ω/□, 40Ω/□, 27Ω/□으로 면저항 값이 매우 균일하면서 평균값이 30Ω/□ 정도에 불과하였다.

<그림 4>는 전도성 고분자 투명전극의 광학현미경 사진과 AFM 이미지이다. 전도성 고분자 투명전극의 표면거칠기가 약 4.6nm에 불과하며, 균일도가 우수하였고, 투명성과 유연성이 매우 뛰어난 것을 알 수 있다. 따라서 정전기 스프레이 잉크젯 프린팅 기법으로 형성된 전도성고분자 투명전극은 플렉시블 유기태양전지의 애노드 전극으로 사용가능하다.

롤-투-롤 기법으로 플렉시블 유기태양전지 제조

<그림 5>는 플라스틱 유기태양전지의 롤-투-롤 프린팅 제조 방법을 나타내는 개념도이다. 먼저 기판 상에 핫 엠보싱 기법으로 미세패턴을 형성한다. 미세패턴은 이어서 형성될 애노드 전극과 광전

변환층 사이의 접촉면적을 증가시켜 단위 면적당 유효 면적을 증가시킨다. 즉, 미세패턴은 태양전지의 크기를 증가시키지 않으면서도 빛을 흡수하는 유효면적을 증가시켜 광전변환 효율을 향상시킬 수 있다. 핫 엠보싱 공정은 성형패턴을 갖는 금형을 이용하여 수지 재료로 형성되는 기판을 가열 가압함으로써, 기판 상에 미세패턴이 성형되도록 하는 것이다. 미세패턴의 형태는 다양한 변형이 가능하다. 이어서, 앞서 설명한 롤 정전기 스프레이 잉크젯 프린팅 공정을 이용하여 전도성고분자 투명전극을 형성한다.

그 다음 전공수용체와 전자수용체가 혼합된 잉크재료를 롤 그라비아 프린팅기법으로 애노드 전극 위에 광전 변환층을 형성한다. 그라비아 프린트 장비는 그라비아 실린더, 가압 롤러, 잉크통, 그라비아 잉크, 닥터 블레이드로 구성된다. 그라비아 실린더가 회전할 때, 잉크통의 그라비아 잉크가 묻은 채 기판 쪽으로 제공되며, 이때 닥터 블레이드는 정해진 양만큼 그라비아 잉크가 공급될 수 있도록 그 양을 조절시킨다.

마지막으로 음전극은 로터리 스크린 프린팅기법으로 광전 변환층 위에 형성한다. 로터리 스크린 프린트 설비는 스크린, 페이스트, 스퀴즈로 구성된다. 스크린 위에 페이스트가 공급된 상태에서 스퀴즈로 스크린을 통해 페이스트를 밀어 넣으면서 전극이 형성된다. 이와 같이 플렉시블 유기 태양전지는 롤-투-롤 기법으로 제조할 수 있으며, 종래의 반도체 공정에 비해 생산시간과 생산원가 및 인력이 대폭 절감되며, 이에 의해 생산성이 현격하게 향상된다.

지금까지 플렉시블 유기 태양전지의 저가격화, 고효율화를 위한 프린팅기법에 대하여 살펴보았다. 플렉시블 유기 태양전지의 저가격화를 위해서 투명전극을 프린팅 기법으로 형성하는 공정을 개발하였다. 또한 태양전지의 고효율화를 위한 소자 구조를 설계하였고, 롤-투-롤 제조방법을 제안하였다.

아직 해결해야 할 문제는 많지만, 박막형성이 용이하고 가볍고 유연하며, 어느 곳에서든 설치가 가능한 플렉시블 유기 태양전지는 많은 장점이 있음이 분명하다. 플렉시블 유기 태양전지는 기술적인 측면에서 그 수준이 초기 개발 단계이지만 산·학·연이 협력하여 원 패키지 솔루션 시스템을 구축하고 난 후, 장기적이고 지속적으로 연구가 이루어진다면, 유비쿼터스 시대에서 휴대용 전자제품의 차세대 전원으로 사용할 수 있을 것으로 기대된다. ㉔



글쓴이는 영남대학교 기계공학과를 졸업하고, 동대학원 기계공학과 공압제어 부문으로 박사학위를 받았으며, 1991년부터 한국기계연구원에서 인쇄전자소자(유기태양전지, RFID Tag, Drug package, E-Paper 등)를 생산하는 롤투롤프린팅공정장비 국산화개발을 수행하고 있다.