

인쇄공정을 이용한 CIGS 박막 태양전지

윤재호·조아라·안세진·곽지혜·안승규 (한국에너지기술연구원)

지금까지 사용하는 에너지의 대부분은 화석연료에 의해 생산되어 왔다. 그러나 화석연료의 매장량은 이제 한 세기가 채 남지 않았고, 그럼에도 불구하고 세계적으로 에너지의 수요량은 늘어나고 있는 추세이다. 우리나라의 경우를 보더라도 2030년의 에너지 수요 전망이 2012년의 두배에 육박할 전망이다.

최근에는 지구촌 곳곳에 화석연료의 소모로 발생한 대기 오염 등으로 이상 기후현상이 속속 나타나고 있고, 일본에서는 원자력 발전소의 냉각수 이상으로 인한 방사능 누출 사고로 전세계가 원자력 발전의 위험성에 다시한번 몸사리게 되었다.

이러한 상황속에서 환경에 영향을 주지 않는 청정에너지인 신재생에너지가 더욱 주목받고 있으며 특히 최근에는 차세대 태양전지 기술 개발과 실용화에 관한 관심과 기대가 높아지고 있다.

지금까지는 1세대 태양전지라 알려져 있는 다결정 실리콘을 이용한 태양전지가 시장의 대부분을 점유하고 있으나, 소자의 주원료인 실리콘 가격의 급등 문제라는 측면에서 최근 우리나라에서도 차세대 태양전지 기술에 대한 연구 및 투자 역시 매우 활발하다. 특히 실리콘 박막을 이용한 박막형 태양

전지, 칼코지나이드 재료를 이용한 CIGS 태양전지, 염료를 이용한 염료감응 태양전지, 유기 재료를 이용한 유기박막 태양전지 등을 들 수 있다.

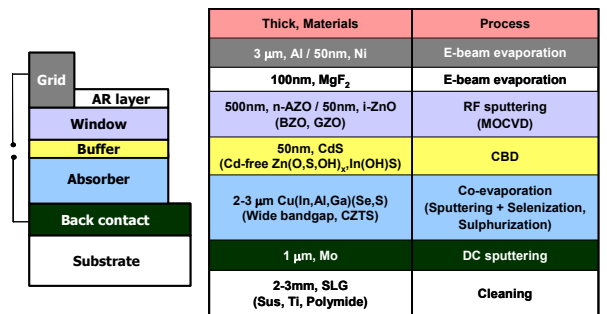
이 중에서 대표적인 것으로 Cu-In-Ga-Se계 재료를 사용하는 CIGS형 태양전지는 장기적으로 1세대 태양전지인 다결정 실리콘 태양전지에 필적할만한 변환효율을 달성할 수 있을 것으로 기대되어 많은 주목을 받고 있는 박막 태양전지 기술의 하나이다.

CIS는 직접 천이형 반도체 화합물로 낮은 밴드갭 에너지 (~1.04 eV)와 높은 광흡수 계수 (~10⁵ /cm)를 가지는 우수한 물질로서, 개방전압 (밴드갭 1.4eV)을 높이기 위하여 In의 일부를 Ga으로 치환하여 CIGS로 제조할 경우 적절한 개방 전압과 높은 단락전류값을 가지며, 상대적으로 장시간 사용에 대한 안전성이 높아 현재 가장 각광받는 물질이다. <그림 2>에 보인바와 같이, CIGS 박막 태양전지는 기판(Substrate), 후면전극(Back contact), 광흡수층(Absorber), 버퍼층(Buffer), 투명전극(Window) 등으로 구성된다.

CIGS 박막 태양전지에서, 막을 형성하는 방법은 크게 세 가지로 나눌 수 있는데, 첫번째로 전착법(Electrodeposition), 두번째로 Evaporator나 Sputtering 장치를 이용한 진공분위



<그림 1> 우리나라의 에너지 수요 전망



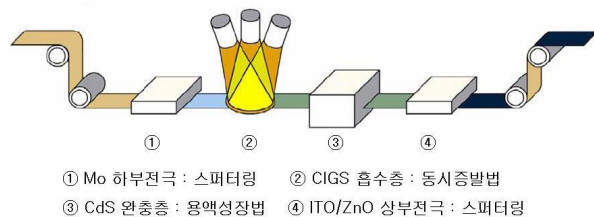
<그림 2> CIGS 박막 태양전지의 구조

기 증착법(Evaporation), 마지막으로 인쇄공정을 이용한 증착법(Printing)이다. 이러한 방법들 중에서, 대표적인 CIGS 제조업체인 일본의 Honda soltec, Showa Shell Sekiyu, 독일의 Wurth Solar, AVANCIS, 미국의 MIASOLE 등의 업체들은 현재 최고 효율 기록을 가진 공정으로 알려져 있는 진공증착법을 주로 사용하고 있다. 그러나 진공증착법은 CIGS층을 형성하기 위한 고가의 진공 성막 장비인 증착기나 스퍼터를 사용해야 하므로 많은 설비 투자비가 들고, 성막하려는 기판을 고진공상태로 유지해야 하므로 많은 시간이 필요하며 소실되는 원재료의 양이 막 형성을 위해 필요한 양보다 많다는 단점이 있다. 그에 비해, 인쇄 공정을 이용한 CIGS 제조 공정은 고가의 진공 성막 장비에 비해 설비 투자비가 적게 들고, 막의 성막 속도도 빠르며, 막 형성을 위해 원재료가 아닌 CIGS 잉크를 사용하므로 인쇄에서 사용하고 남은 잉크를 재 사용할 수 있다는 장점을 가진다. 또한 막 제작 과정에 진공 분위기가 필요치 않으므로, 생산성이 높은 R2R(Roll-to-Roll) 장비를 도입하여 유연성 기판을 사용한 연속공정이 가능하다. <그림 3>은 일반적인 플렉서블 CIGS 태양전지의 롤투롤 공정의 개략도이다.

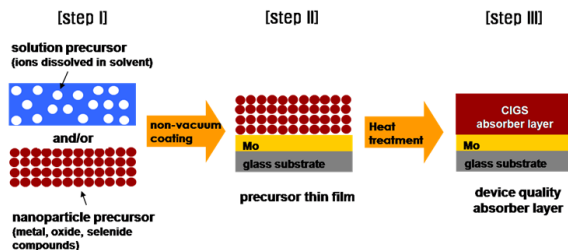
인쇄공정을 진행하기 위한 기초로서, 진공 공정과는 다르게 비진공 공정으로 앞에 언급한 CIGS 잉크를 제조하는 것도 또한 중요한 연구주제이다. 이러한 CIGS 박막을 형성하는 잉크를 제조하는 방법은 크게 두가지로 나누어 지는데, 하나는 CIGS 나노입자를 합성한 후, 퍼짐성이 좋은 용매와 바인더를 일정 비율로 혼합하여 만드는 나노입자 공정과 다른 하나는 Cu, In, Ga의 유기 화합물을 용액에 녹여 바르는 용액 공정이다. 이 두가지 공정 모두 기판에 바른후 건조 및 열처리 과정을 거친다. 이러한 공정의 모식도는 <그림 4>와 같다.

그러나 이러한 인쇄공정 또한 CIGS 나노 파우더 제작 및 잉크 제작 과정에서 발생하는 재료비와 낮은 효율 등의 문제점을 안고 있는 것도 사실이다.

인쇄공정에는 막 형성시에 일정 형태의 매개물 여하에 따라 매개물이 없는 분사방식인 스프레이(Spraying)가 주를 이루는 요구 시 패턴(pattern-on-demand) 방식과 잉크를 매개물에 묻혀 블레이드(Blading)하는 고정 패턴(fixed pattern) 방식으로 구분된다.



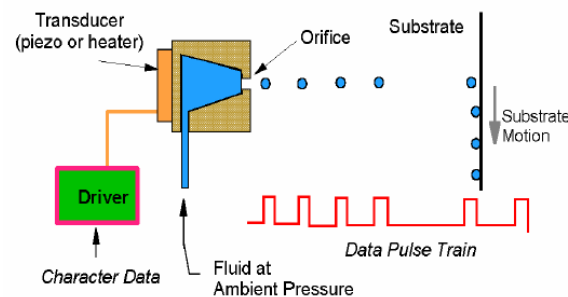
<그림 3> 플렉서블 CIGS 박막 태양전지의 롤투롤 공정 모식도



<그림 4> 비진공 방식의 CIGS 박막 형성 모식도

스프레이 방식 중 가장 잘 알려진 잉크젯은 잉크가 채워진 챔버(chamber)에 압력 변화를 일으켜 작은 노즐(nozzle)을 통해 잉크를 적출하는 패터닝 방식으로서, 기판과의 직접적인 접촉이 없기 때문에 굴곡이 있는 기판이나 곡면 기판 상의 막 패터닝이 가능하며 특히 기판 상에 기 형성된 패턴 위에 다층의 패턴을 형성하고자 하는 경우 이러한 비접촉식 다이렉트 패터닝 방식이 매우 유용하다. 다음은 스프레이 방식의 모식도이다.

현재 잉크젯 기술은 RFID의 안테나, PCB의 도체 패턴 및 수동 소자 일체 형성 기술, LCD의 컬러필터, PI 배양막, 컬럼 스페이서, PDP의 EMI filter, 배선용 전극, OLED, 태양 전지, 바이오 분야 등에서 적용이 활발히 모색되고 있으며, 잉크젯을 통한 패터닝의 요소 기술로는 부피 조절 기술(토출 잉크 부피의 정확도), 위치 제어 기술(잉크 토출 위치의 정밀도), 형상 제어 기술(토출 잉크가 기판 상에서 퍼지는 형상의 균일도), 및 성능 제어 기술이 있다. 잉크젯 기술은 수 μm 이상의 두께를 가지는 후막 형성이 어렵고, 20 μm 이하의 선폴을 가지는 고해상도 패턴이 어렵다는 한계가 있고, 잉크젯 방식으로 분사가 가능하기 위해서는 잉크의 점도가 대략적으로 20 cP 이하의 값을 가져야 하는데, 이러한 낮은 점도로 인하여 잉크 방울이 기판에 접촉한 후에 그 형상을 유지하지 못하고 퍼지는 현상이 발생하여 형성되는 패턴의 두께는 얇아지고 폭은 넓어지는 현상이 발생하기도 한다. 기판 표면 개질을 통해서 이러한 퍼짐 현상을 개선하고자 하는 시도가 있으나 근본적인 해결책이 되지 않는 실정이다. 물리적으로 분사되는 방울의 크기가 10 μm 이하의 경우는 기판 방향으로



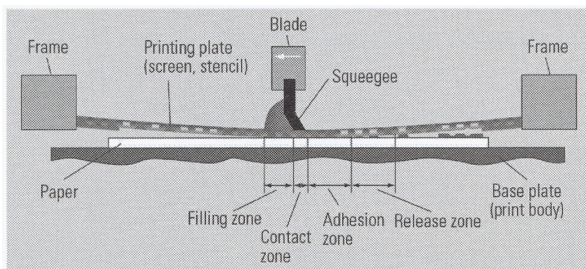
<그림 5> 스프레이 방식을 이용한 CIGS 박막 태양전지 공정 모식도

잉크 방울에 추가되는 운동 에너지가 부족하기 때문에 표면 에너지가 지배하게 되어 탄착군이 제대로 형성되지 못하는데, 패턴의 폭은 잉크 방울 지름의 1.5 ~ 2 배 정도로 형성되는 것이 일반적임을 고려할 때, 잉크젯 방식으로 해상도 (resolution) 20 μ m 이하의 패턴 형성은 어렵다.

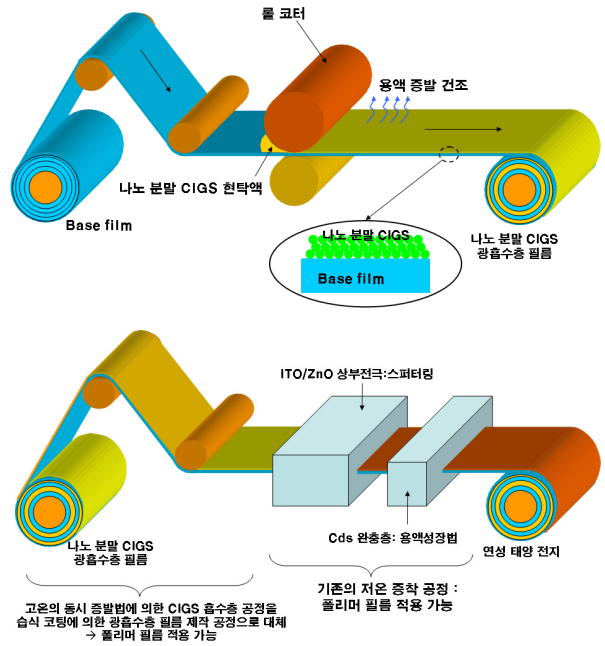
고정 패턴인 블레이드 방식 중 가장 유용하게 사용되고 있는 것은 롤투롤 인쇄기법과 스크린 인쇄기법이다. 이러한 고정 패턴방식은 높은 생산성이 장점이나, 굴곡 기판에 적용하기 힘들고 레이어 간의 중첩인쇄가 곤란하다는 단점이 있다. 기판 위에 원하는 막을 만들기 위해 페이스트(paste)를 밀어 넣어 인쇄하는 방법으로, 막의 형성을 위하여 높은 점성의 페이스트(paste)가 필요하며, 액상의 막 두께는 비교적 두꺼운 (> 1 μ m) 막이 형성되는 것이 특징이다. 박막 형성을 위해 점도가 낮은 잉크를 사용하게 되면 형성되는 패턴의 정밀도가 나빠지는 문제가 있으며, 구현 해상도는 메쉬의 크기에 의해 결정되는데 일반적으로 얻을 수 있는 해상도는 100 μ m 내외 수준으로서, 현재 태양전지의 전면 전극 형성 등에 많이 적용되고 있다. <그림 6>은 블레이드 방식의 모식도 이다.

이렇게 인쇄된 CIGS 박막은 열처리 과정을 거쳐 성막시키는데, 롤투롤 장비를 이용하여 만든 CIGS 박막을 성막시켜 태양전지를 제작하는 모식도는 <그림 7>과 같다.

이러한 인쇄방식의 CIGS 태양전지를 공정에 적용하여 생산하고 있는 것으로 유명한 미국 Nanosolar의 CIGS태양전지 제조 과정은, 일단 제조된 CIGS 잉크를 튜브를 통하여 공급하면서 Stainless Steel Foil을 이 잉크가 있는 곳을 통과시킴으로서 자동적으로 코팅되게 하며, 이렇게 코팅된 기판에는 CIGS뿐만 아니라 유기 바인더와 용제가 함유되어 있으므로 이를 제거하기 위해서 산소나 공기가 함유된 분위기에서 열처리 하여 유기물들이 산소와 반응하여 CO₂의 형태로 완전히 날아가게 한다. 그 후 다시 치밀한 주상의 CIGS 구조로 만들기 위해서 500도 이상의 고온 열처리를 수행한다. 이상과 같이 제작되는 CIGS의 경우 유기바인더가 완벽히 제거되기가 힘들고 또한 유기 바인더가 제거되는 과정에서 막의 밀도를 떨어뜨리기 때문에 일반적으로 증착으로 성막한 것 대비 효



<그림 6> 블레이드 방식을 이용한 CIGS 박막 태양전지 공정 모식도



<그림 7> 롤투롤 방식을 이용한 인쇄방식의 CIGS 박막 태양전지 공정 모식도

율이 낮은 특성을 가지고 있다.

<그림 8>은 Nanosolar의 CIGS 막 인쇄 과정 사진이다.

그러나 Nanosolar의 금속 호일을 기판으로 이용하여 롤투롤 인쇄 기술로 생산한 CIGS 태양전지 모듈의 경우, 유리기판을 사용한 혼다솔텍의 태양전지 모듈의 1W당 제조비용을 계산하면 다결정 실리콘형 태양전지와 비교하여 같은 수준에서 다소 낮은 정도임에 비해, 1W 발전에 필요한 면적의 제조비용이 0.99달러로 매우 낮다는 특징이 있다. <그림 9>는 Nanosolar가 인쇄 기술로 개발한 CIGS형 태양전지 패널이다.

비록 현재의 기술 수준에서는 진공 공정을 이용하여 제조한 CIGS 박막 모듈에 비해 효율이 낮다는 단점이 있다. 하지만 고효율 CIGS 박막 모듈 제조를 위한 인쇄 및 열처리 기술이 확보된다면 효율 격차는 줄어들 것으로 예상되며, 이 경우 인쇄공정이 가지는 가격경쟁력으로 인하여 시장 점유율 또한 급속도로 높아질 것으로 판단된다.

참고문헌



<그림 8> Nanosolar의 CIGS 박막 인쇄 공정



〈그림 9〉 Nanosolar의 CIGS 태양전지 패널

- [1] Nanosolar White Paper, The Nanosolar Utility Panel: An Overview of the Solar Panel and its Advantages, May, 2010.
- [2] Avaco, CIGS 박막 태양전지 기술동향 및 시장전망 (2006~2013), August, 2009.
- [3] 전황수, 김제하, 허필선, 박막 태양전지 시장전망 및 기술개발 동향, 전자통신동향분석 제 24권 제 4호 2009년 8월.
- [4] 산업기술연구회, 용액공정/인쇄기법을 이용한 초저가 나노박막태양전지 기술개발에 관한 연구 기획 최종보고서, 2008년 11월.



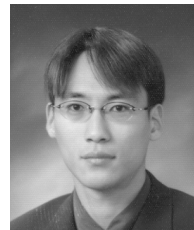
윤재호

1997년 2월 한국과학기술원 재료공학과 학사.
 1999년 2월 한국과학기술원 재료공학과 석사.
 2004년 2월 한국과학기술원 신소재공학과 박사.
 2003년 9월~현재 한국에너지기술연구원 태양광센터 선임연구원.
 〈관심분야〉 태양전지



조아라

1998년 2월 이화여자대학교 화학과 학사.
 2004년 8월 Univ. of Notre Dame 화학과 석사.
 2006년 3월~2009년 8월 한국에너지기술연구원 온실가스 연구센터 연구원.
 2009년 9월~현재 한국에너지기술연구원 태양광센터 연구원.
 〈관심분야〉 비진공 방식을 이용한 CIGS 박막 태양전지, Wide band gap CIGS 박막 태양전지



안세진

1998년 2월 한국과학기술원 재료공학과 학사.
 2000년 8월 한국과학기술원 재료공학과 석사.
 2004년 8월 한국과학기술원 신소재공학과 박사.
 2004년 9월~현재 한국에너지기술연구원 태양광센터 선임연구원.
 〈관심분야〉 화합물 박막 태양전지



박 지 혜

1996년 2월 이화여자대학교 화학과 학사.
 1998년 2월 이화여자대학교 화학과 석사.
 2003년 9월 Université Montpellier II 재료화학 박사.
 1998년 3월~2000년 2월 삼성종합기술원 전자방출원연구
 단 연구원.
 2000년 4월~2003년 11월 프랑스 Institut Européen des
 Membranes (IEM) 박사과정 연구원.
 2003년 11월~2005년 10월 일본 물질·재료연구기구
 (NIMS) JSPS 박사후 연구원.
 2005년 11월~현재 한국에너지기술연구원 태양광센터 선
 임연구원.
 <관심분야> 태양전지



안 승 규

2002년 2월 한양대학교 물리학과 학사.
 2004년 8월 한국과학기술원 물리학과 석사.
 2008년 8월 한국과학기술원 물리학과 박사.
 2008년 9월~2009년 12월 한국과학기술원 물리학과 연수
 연구원.
 2009년 12월~현재 한국에너지기술연구원 태양광센터 선
 임연구원.
 <관심분야> 태양전지 성능평가 및 분석