

# BIPV 응용을 위한 플렉서블 $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$ 박막태양전지의 연구현황 및 전망



신동협  
한국에너지  
기술연구원  
태양광연구실



김기환  
한국에너지  
기술연구원  
태양광연구실



조준식  
한국에너지  
기술연구원  
태양광연구실



어영주  
한국에너지  
기술연구원  
태양광연구실



안승규  
한국에너지  
기술연구원  
태양광연구실



정인명  
한국에너지  
기술연구원  
태양광연구실



조유나  
한국에너지  
기술연구원  
태양광연구실



송수민  
한국에너지  
기술연구원  
태양광연구실



곽지혜  
한국에너지  
기술연구원  
태양광연구실



윤재호  
한국에너지  
기술연구원  
태양광연구실

## 초 록

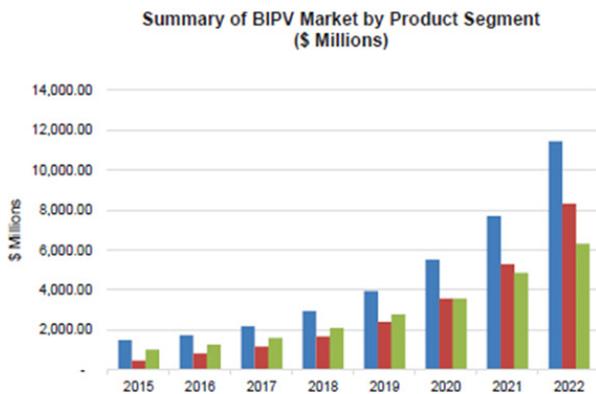
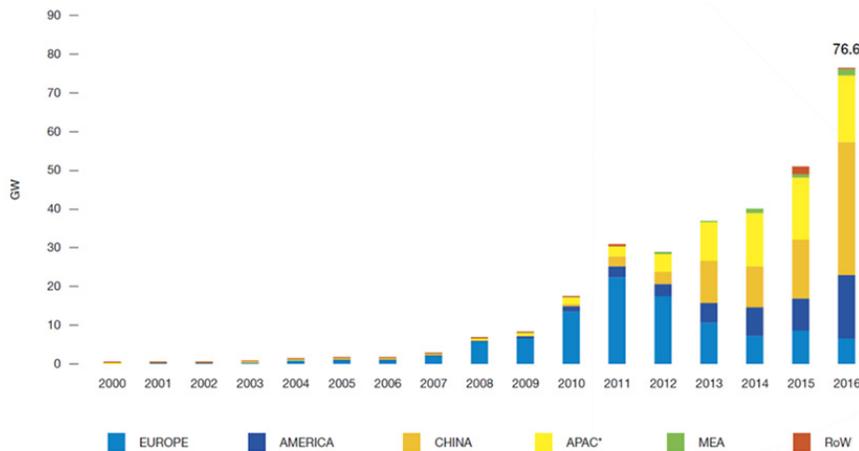
$\text{Cu(In,Ga)Se}_2$  (CIGS) 태양전지 기술은 1970년대 처음으로 소개된 이래 지속적인 기술적 진보를 통해 현재 소면적 유리 기판기준으로 세계최고효율 22.6%를 달성하였다. 최근에는 유리 기판뿐만 아니라 플렉서블 기판에도 적용되어 20%가 넘는 고효율이 유지됨으로써, 플렉서블 CIGS 박막태양전지의 BIPV로 응용에 대한 관심이 증가하고 있다. 따라서 본 글에서는 플렉서블 CIGS 박막태양전지의 주요 요소 기술에 대해서 살펴보고, 국내외 연구 및 산업적 현황 및 향후 전망에 대해서 기술하고자 한다.

## 서론

최근 기후변화협약 당사국총회(COP21)에서 “파리협정”이 채택됨에 따라 세계 각국은 전지구적인 기후변화에 대응하기 위해서 산업화 이전 대비 지구 평균기온 상승을 2°C보다 낮은 수준으로 유지하고, 지구 평균기온 상승폭을 1.5°C 이하로 제한하도록 합의하였다. 이런 파리협정을 성공적으로 이행하기 위해서는 화석연료를 대체할 수 있는 신재생에너지원에 대한 요구가 앞으로 더욱 증가할 것으로 예상된다. 다양한 신재생에너지 기술 중 태양광발전은 햇빛을 받으면 반도체의 광기전력효과(Photovoltaic effect)에 의해 전기를 발생하는 태양전지를 이용하는 발전기술로 풍력, 지열 등과 달리 설치의 제약이 비교적 적

은 편이다. 그래서 태양광발전 시스템의 신규 설치량은 그림 1에 나타난 것처럼 매년 급속한 성장세를 보이고 있다. 2016년에는 전세계적으로 약 76.6 GW의 신규 태양광발전 시스템이 설치되었고 국내에서도 한국에너지공단 신재생에너지센터 통계치에 따르면 2016년에는 약 904 MW의 신규 태양광발전 시스템이 설치되었다. 향후 현정부의 주요에너지 정책 중 하나인 신재생에너지3020을 고려한다면, 2GW 이상의 규모로 더욱 확대될 것으로 전망된다.

태양전지를 이용하는 태양광발전 시스템은 대규모의 태양광발전소급과 가정의 지붕 혹은 건물의 외벽에 부착되는 건물 일체형 태양전지(Building Integrated Photovoltaics: BIPV)로 크게 구분될 수 있다. 최근에는 공공 및 민간 건물의 제로에너지화를 위한 방안으로 BIPV와 같은



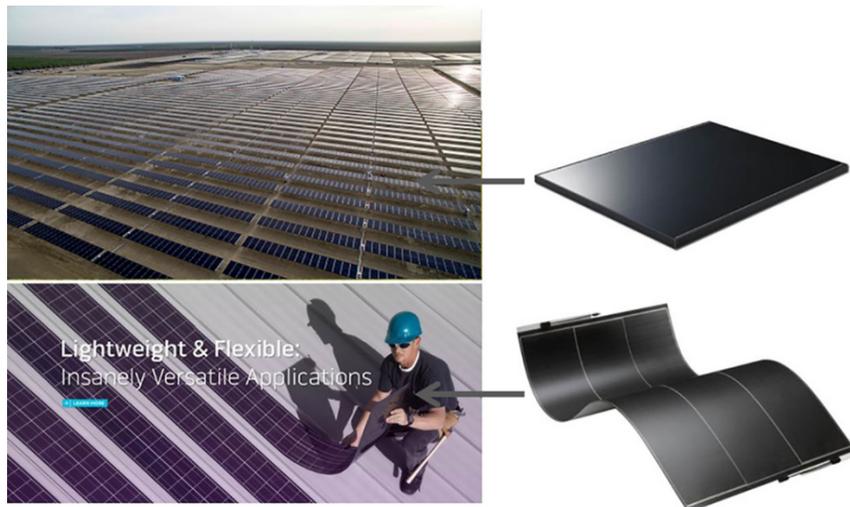
**그림 1.** 연도별 전세계 태양광발전 시스템 신규 설치량(상, 출처: Global Market Outlook for Solar Power 2017–2021, Solar Power Europe, 2017). BIPV 태양전지 시장 전망 및 BIPV가 적용된 건축물(하좌, 출처: BIPV Technologies and Markets: 2015–2022, N-tech Research Report, 2015; 하우, 출처: <http://www.romag.co.uk/solar/building-integrated-pv/>)

태양광발전 시스템이 적극적으로 사용되고 있다. 전통적으로는 결정질 실리콘 태양전지가 BIPV용으로 주로 선택되었고 태양광 입사각의 제약이 적은 지붕에 주로 설치되었다. 하지만 제한적인 지붕의 면적은 BIPV에 의한 건물의 제로에너지화 달성에 큰 걸림돌로 작용하고 있다. 이를 극복하기 위한 방법으로 태양전지를 건물의 모든 유효 공간인 지붕, 벽면, 그리고 창호 등에 설치하는 방식이 필요할 것으로 생각된다(그림 1). 또한 건물의 다양한 환경에 대응하기 위해서는 태양전지가 플렉서블(flexible)한 특성을 가지는 것이 유리할 것으로 판단된다. 그래서 최근까지 플렉서블 박막태양전지를 BIPV용으로 적용하는 다양한 시도가 이루어지고 있다. 그리고 수요 측면에서도 BIPV용 플렉서블 태양전지의 시장은 2022년까지 계속해서 확대될 것으로 전망된다(그림 1).

플렉서블 태양전지를 구현하기 위해서는 실리콘 웨이퍼 혹은 유리와의 같은 깨지기 쉬운 소재 대신 플렉서블한 특성을 띠는 기판 위에 태양광 소재를 박막으로 증착할 수 있어야 한다. 이에 적합한 소재로는  $Cu(In,Ga)Se_2$ (CIGS), CdTe, Si 박막, 유기, 무기 페로브스카이트 등이 보고되고 있다. 이 중 태양전지의 에너지변환 효율, 친환경성, 안정성 등을 종합적으로 고려하였을 때, 현재 CIGS가 BIPV용 플렉서블 박막태양전지를 위한 소재로 최적일 것으로

판단된다. CIGS 박막태양전지는 소면적에서 22% 이상 그리고 서브모듈에서는 18% 이상의 높은 에너지변환 효율을 보일 뿐만 아니라 소자의 장기안정성도 검증되었다. 그래서 그림 2에 보이는 것처럼 유리기판의 대면적 CIGS 태양광모듈은 태양광발전소용으로 사용되고 있으며, 플렉서블 기판에서 제조된 CIGS 태양광모듈은 지붕과 벽면 등 다양한 건축물의 외벽에 설치되고 있다.

BIPV로 설치된 태양전지는 태양광의 입사각 및 세기 그리고 그림자 등에 의해서 옥외에서는 발전량이 크게 영향을 받게 된다. 또한 태양광 소재에 따라서도 발전에 불리한 환경에서는 실제 발전량이 큰 폭으로 감소하게 된다고 알려져 있다. 그림 3의 CIGS 박막 태양전지 실증 테스트 결과에 따르면, CIGS 박막태양전지는 옥외의 열악한 환경(예를 들어, 사막과 같은 높은 온도, 구름이 많고 태양빛이 약한 날씨 등)에서 결정질 실리콘 태양전지에 비해 안정적이면서 더 높은 발전량을 보이는 것으로 알려져 있다. 이와 더불어 플렉서블 CIGS 박막태양전지는 대량생산이 가능한 롤투롤(roll-to-roll) 공정에 적용이 가능하여 태양전지의 제조단가를 더욱 줄일 수 있을 것으로 기대도 된다. 따라서 본 글에서는 BIPV용으로 주목을 받고 있는 플렉서블 CIGS 태양전지의 기술과 국내외 연구개발 동향과 향후 전망에 대해서 살펴보고자 한다.



**그림 2** CIGS 태양광발전소 및 유리기판 CIGS 태양광모듈상, 출처: <http://www.solar-frontier.com>과 플렉서블 CIGS 태양광모듈의 지붕 설치사례 (하, 출처: <http://solopower.com/>)

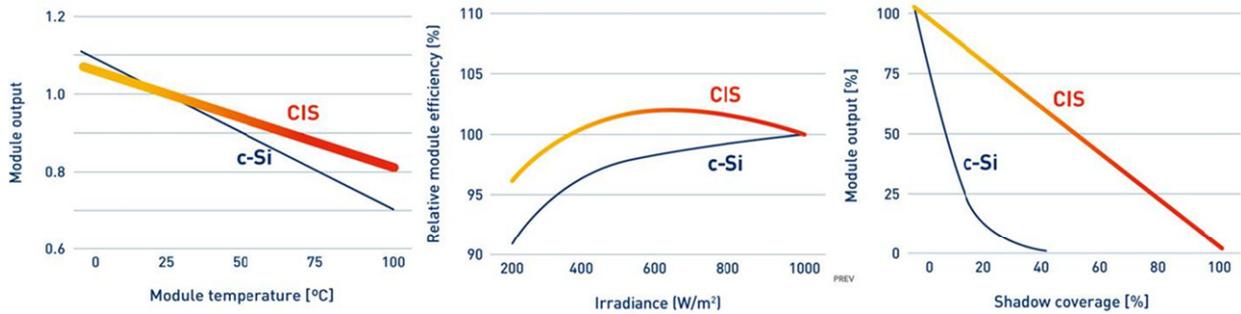


그림 3. 모듈 온도, 태양광 세기, 그늘짐 정도에 따른 CIS와 결정질 실리콘 태양전지의 성능 거동 변화(출처: <http://www.solar-frontier.com>)

## 본 론

### CIGS 박막태양전지의 구조 및 공정기술

CIGS 박막태양전지는 결정질 실리콘 태양전지와 달리 이종의 다양한 박막들이 적층되어있는 구조를 가지고 있다(그림 4). 일반적으로 기판/후면전극/CIGS 광흡수층/버퍼층/윈도우층/그리드 전극의 구조로 구성되어 있다. 가장 일반적으로 사용되는 기판은 Na 원소가 포함된 소다라

임유리를 사용하고 있다. 후면전극으로 가장 많이 사용되는 Mo 박막은 스퍼터링법을 이용하여 형성하며, 광흡수층인 CIGS 박막은 동시진공증발법(co-evaporation) 혹은 Cu-In-Ga 금속전구체 박막의 셀렌/황화 열처리의 2단계 법(two-step method)으로 주로 증착된다. 그 다음, 버퍼층은 용액성장법의 CdS가 가장 널리 사용되고 있고, 윈도우층은 i-ZnO/ZnO:Al 혹은 i-ZnO/ITO 구조로 스퍼터링법 혹은 화학기상증착법(chemical vapor deposition)을

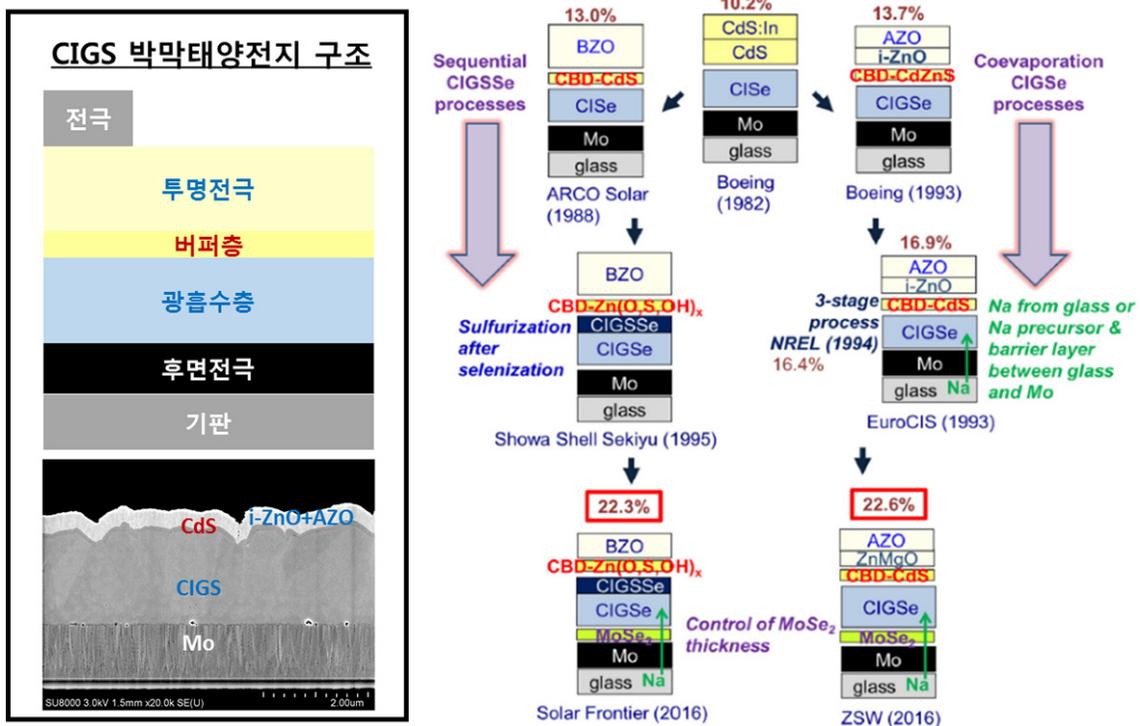


그림 4. CIGS 박막태양전지 구조 개략도 및 SEM 이미지 그리고 CIGS 박막태양전지 연구개발 변천(우, 출처: D. Abou-Ras et al., Thin Solid Films, 2017, 663, 2)

이용하여 형성된다. 마지막으로 그리드 전극은 e-beam 진공증착법으로 형성된 Al/Ni가 주로 사용된다.

다층 박막의 CIGS 태양전지 중 가장 핵심층은 광흡수층인 CIGS 박막이며, 이 CIGS의 품질에 의해 태양전지의 효율이 크게 좌우된다. 그래서 우선적으로 CIGS 박막의 연구기술 발전에 대해서 간략히 소개하려고 한다. 1974년 미국의 Bell 연구소에서  $\text{CuInSe}_2/\text{CdS}$  이종접합 연구를 시작하였다. 1980년대 미국의 Boeing사는 In의 일부를 Ga으로 치환한 CIGS 광흡수층을 사용하기 시작하였으며, 기존의  $\text{CdS}/\text{In}/\text{CdS}/\text{CIS}$ 에서  $\text{ZnO}/\text{Al}/\text{i-ZnO}/\text{CdZnS}/\text{CIGS}$ 의 태양전지 구조로 변경함으로써 13% 이상의 고효율화를 달성할 수 있었다. 이후 1990년대 EuroCIS에서는 소다라임 유리 기판에서 열확산되는 Na이 CIGS 박막태양전지의 고효율화에 큰 역할을 한다는 것을 처음 발견하였고, 미국의 국립신재생에너지연구소(NREL)은 현재 가장 보편적으로 사용되는 CIGS 박막 증착법인 3단계법(3-stage process)을 정립하였다. 무엇보다도 3단계법을 통하여 CIGS 박막 내의 Ga 분포의 제어가 가능하게 됨에 따라 20% 이상의 CIGS 박막태양전지가 제조될 수 있는 토대가 마련되었다. 이 3단계법에 기반한 동시진공증발법과 더불어 일본의 Solar Frontier사(이전 Showa Shell Sekiyu)는 Arco solar 사에서 개발한 2단계법(즉 대면적 양산화에 유리한 스퍼터링법으로 Cu-In-Ga 금속전구체 박막을 증착하고, 이를 셀렌/황화 열처리하는 기술)을 더욱 발전시켜 20% 이상의

효율을 보이는 CIGSSe 박막태양전지를 제조하였다. 특히 2단계법으로 제조된 광흡수층은 황화열처리를 통해서 S의 분포를 제어함으로써 CIGSSe 박막 내부의 에너지 밴드갭 분포를 제어하게 된다.

현재 CIGS 박막태양전지의 세계최고효율은 22.6%이며, 독일의 ZSW에 의해서 달성되었다. 22.6%의 효율을 보이는 CIGS 광흡수층은 상기한 3단계법에 기반한 동시진공증발법에 의해 형성되었다. 그림 5에 도시된 것처럼, 이 3단계법은 1단계에서 In, Ga, Se 원소를 공급하여  $(\text{In,Ga})_2\text{Se}_3$  전구체 박막을 형성한 후, 기판의 온도를  $550^\circ\text{C}$  이상의 고온으로 승온하고 Cu와 Se 원소를 공급하여 Cu가 과잉인 조성의 CIGS 박막을 형성하게 된다(2단계). 여기서 Cu가 과잉의 조성이 필요한 이유는 결정립계와 표면에 석출된  $\text{Cu}_{2-x}\text{Se}$ 의 화합물이 고온에서 액상으로 존재하며, 결정립간 확산을 촉진시켜 CIGS 결정립 크기를 증가시키게 된다. 이후 3단계에서는 다시 In, Ga, Se 원소를 공급하여 적정 수준의 Cu가 결핍된 조성의 CIGS 박막을 증착하게 된다. 이렇게 제조된 Cu가 결핍된 CIGS 박막은 큰 결정립을 가지고 있으며, Cu 공공(vacancy)에 의해 p-타입 반도체 특성을 띄게 된다. 그리고 3단계법에서는 Cu, In, Ga 원소의 플럭스(flux)를 실시간으로 제어할 수 있기 때문에 CIGS 박막 내의 Ga 분포를 다양하게 구현할 수 있다. 이는 CIGS 박막의 에너지 밴드갭이 In/Ga의 비율에 의해서 제어된다는 점을 고려할 때, CIGS 단위 박막

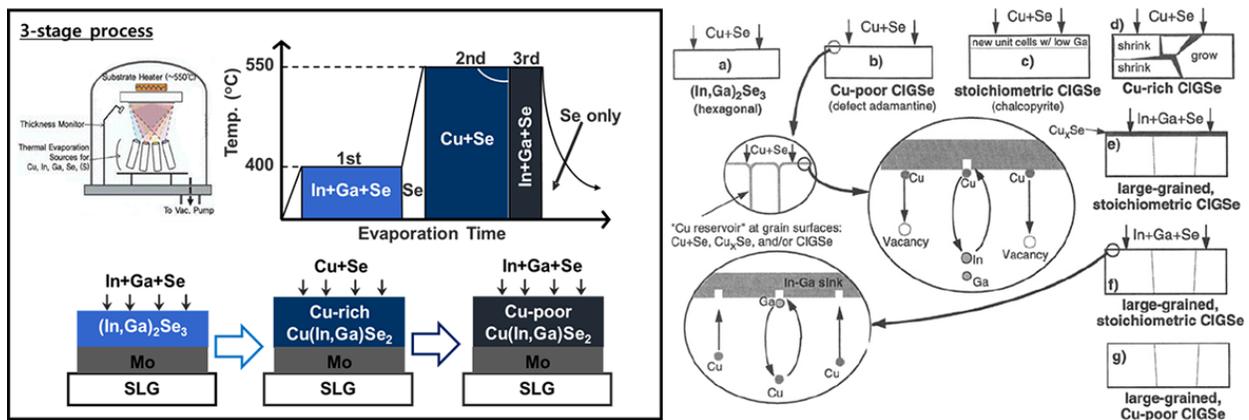


그림 5. 3단계법의 공정온도-공정시간 곡선 및 공정 흐름도 그리고 3단계법으로 제조되는 CIGS 박막의 성장메커니즘(우, 출처: A. M. Gabor et al., Sol. Energy Mater. & Sol. Cells, 1996, 41/42, 247)

내에서 에너지 밴드갭 분포를 제어할 수 있다는 것을 의미한다. 실제로 고효율을 보이는 CIGS 박막태양전지의 CIGS 박막 내부에서는 Ga 분포가 V-형상을 가지고 있다. 그 이유는 CdS와 접합을 형성하는 영역에서 높은 Ga 농도는 개방전압을 증가시키고, Mo 전극 부근의 높은 Ga 농도는 후면재결합을 줄이면서 여기된 전자의 수집율을 높이는데 기여한다고 알려져 있다. 또한 Ga의 농도가 가장 낮은 지점에서는 단락전류밀도를 향상시킨다.

3단계법과 더불어 상기한 2단계법 또한 고품질 CIGS 박막을 제조하기 위한 증착법으로 많이 사용된다. 2단계법은 그림 6에 도시된 것처럼, Cu-In-Ga이 포함된 전구체를 진공법(스퍼터링법, 진공증발법 등) 혹은 비진공법(전기도금법, 스프레이코팅, 스피노코팅 등)의 다양한 방법으로 균일한 박막을 형성하고, 이 전구체 박막을 550°C 이상의 고온에서 셀레늄 혹은 황의 분위기에서 열처리하여 Cu가 결핍된 조성의 CIGS 박막을 제조하게 된다. 특히 2단계법으로 형성된 CIGS 박막에서는 Ga의 분포가 V-형상을 띄지 않고, Mo 부근에 축적되는 경향을 보인다. 그래서 개방전압을 높이기 위한 방안으로 셀레늄 열처리 후 추가적으로 황화 열처리를 통하여 에너지 밴드갭을 증가시키게 된다. 현재 스퍼터링법에 기반한 2단계법은 대면적 태양전지 제조에 유리하여 Solar Frontier사와 같은 태양전지 제조사에서 많이 채택하여 사용하고 있다. 최근 일본에서 개최된 PVSEC-27 학회에서 Solar Frontier사는 비공인 23.3%

의 고효율을 달성하였다고 발표하였다.

2008년 미국 NREL에서 3단계법의 공정을 최적화하여서 19.9%( $V_{oc} = 0.69V$ ,  $J_{sc} = 35.5mA/cm^2$ ,  $FF = 81.2\%$ )을 달성한 이후, CIGS 박막태양전지의 효율이 20%에서 22.6%(세계최고기록)까지 상승되는데 가장 큰 기여를 한 부분은 알칼리 post-deposition treatment(PDT)의 도입이다. 그래서 CIGS 박막의 알칼리 도핑효과에 대해서도 간략히 살펴보고자 한다. CIGS 박막태양전지 연구 초기에서는 Na과 같은 alkali 원소의 함량이 매우 적은 borosilicate 유리를 기판으로 사용하였다. 이후 EuroCIS에서는 borosilicate 유리 대신 CIGS 박막과 열팽창 계수가 유사한 Na 함량이 높은 소다라임유리를 사용하기 시작하였다. 상기하였듯이 CIGS 박막은 고온에서 형성되기 때문에 CIGS 박막이 성장되는 동안 열확산에 의해 0.1 at% 이상의 Na 원소가 도핑되게 된다. 이런 Na 도핑은 CIGS 박막태양전지의 효율을 15%대 수준으로 크게 향상시켰다. 현재는 적정수준의 Na 도핑이 고효율 CIGS 박막태양전지를 제조하기 위한 필수적인 것으로 여겨지고 있으며, 이런 고효율을 보이는 이유는 CIGS 결정립 크기 증가, p-형 반도체 특성 개선, 혹은 결정립계 결함 패시베이션(defect passivation) 등에 기인한 것으로 이해되고 있다.

플렉서블 CIGS 박막태양전지를 제조하기 위해서는 깨지기 쉬운 기존의 소다라임유리 기판 대신 플렉서블한 금속 포일(SUS, Ti, Mo 등) 혹은 폴리머(폴리이미드) 기판

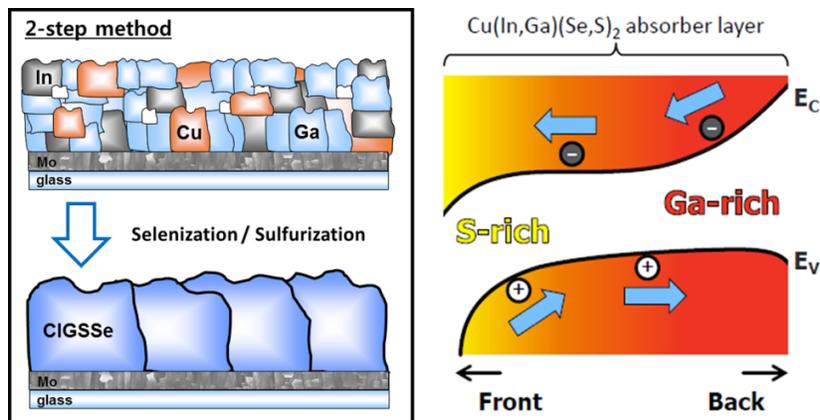
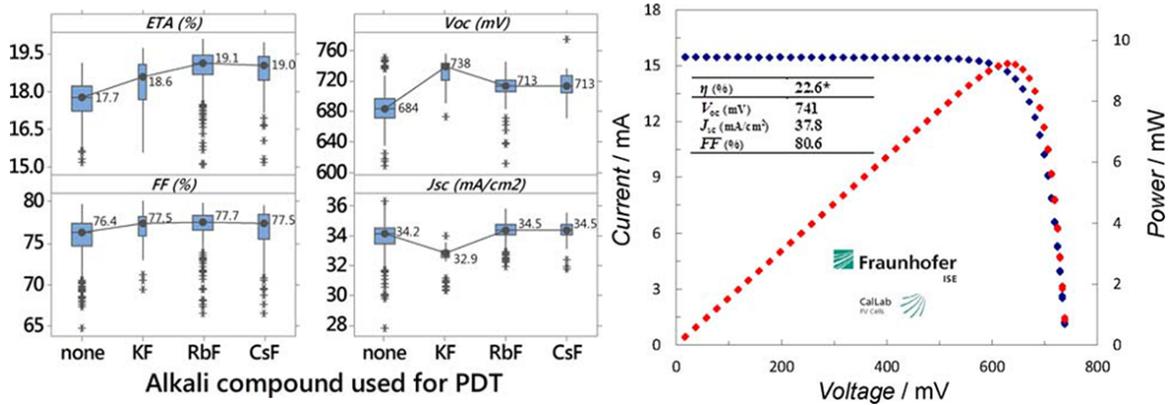
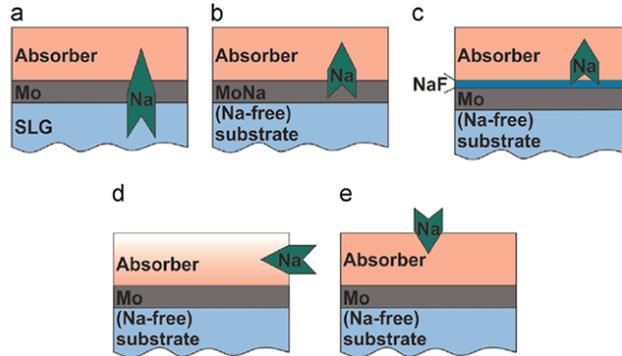


그림 6. 2단계법의 공정 계략도 그리고 2단계법으로 제조된 CIGSSe 박막 내부의 에너지 밴드갭 분포도(우, 출처: T. Kato, Jap J. Appl. Phys, 2017, 56, 04CA2)



**그림 7.** Na 원소 도핑을 위한 다양한 공정 개략도: (a) 소다라임유리 기판 상에서 자연확산, (b) Na가 포함된 Mo 전극 사용, (c) NaF 전구체 박막 확산, (d) 광흡수층 증착 중 실시간 Na 외부도핑, (e) Se과 NaF 전구체 박막을 동시에 증착하는 PDT 공정(상, 출처: P.M,P Salome et al., Sol. Energy Mater. & Sol. Cells, 2015, 143, 9) 그리고 다양한 alkali 원소에 따른 CIGSe 박막태양전지 성능 변화 및 CIGS 박막태양전지 세계최고효율 J-V 곡선(하, 출처: P. Jackson et al., Phys. Status Solidi RRL, 2016, 8, 583)

등이 사용되어야 한다. 하지만 금속 포일과 폴리머 기판에는 Na와 같은 알칼리 원소가 포함되어 있지 않기 때문에, Na 원소를 외부에서 인위적으로 공급하여 주는 방법이 활발히 개발되었다. 그림 7에 도시된 것처럼 대표적인 방법으로는 Na가 포함된 전구체인 NaF 박막 증착, Na가 포함된 Mo 전극 사용, CIGS 증착 중 Na-화합물( $\text{Na}_2\text{S}$ ,  $\text{Na}_2\text{Se}$ , NaF 등) 실시간 외부도핑 등이 있다. 이 중 가장 효과적인 방법은 광흡수층 증착 후에 Se과 NaF 전구체 박막을 동시에 증착하는 PDT 공정이다. Na 이외 K, Rb, Cs 알칼리족 원소의 PDT공정도 CIGS 박막태양전지의 효율 향상에 긍정적인 효과를 준다고 알려져 있다. 특히 RbF 전구체의 PDT 공정이 적용되었을 때, 22.6%의 세계최고효율이 달성되었다고 한다(그림 7). 현재에도 알칼리 원소 효과에 대한 이해와 최적화에 대한 연구는 가장 활발히 진행되고 있다.

### 플렉서블 CIGS 박막태양전지의 구조 및 공정기술

플렉서블 CIGS 박막태양전지는 일반적으로 플렉서블 기판/확산방지막/후면전극/CIGS 광흡수층/버퍼층/윈도우층/그리드 전극의 구조로 구성되어 있다. 그리고 플렉서블 기판을 제외한 박막들은 유리기판 CIGS 박막태양전지와 동일하다. 대표적인 플렉서블 기판으로는 금속포일과 폴리머 기판이 있다. SUS, Ti, Mo 등의 금속 포일 기판의 경우, 기계적 특성이 우수하고 고온공정에 잘 견딜 수 있는 장점을 갖고 있지만, 불순물의 확산차단을 위한 확산방지막과 금속표면의 거칠기를 줄이기 위한 추가적인 폴리싱 공정이 필요하다. 또한 monolithic 모듈 제조 시 절연층을 추가해야 되기 때문에 공정상 복잡성이 크다. 이와 반해 폴리머 기판의 경우, 가볍고 가격이 저렴하며 유연성이 우수한 장점들이 있지만, 열적 안정성이 낮아 고온공정에 적합하

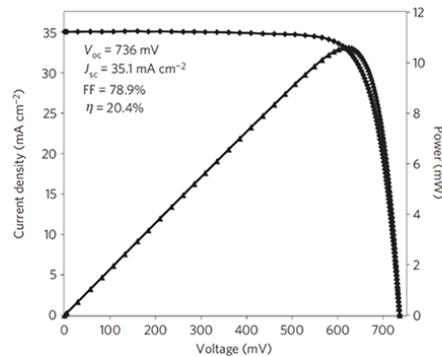
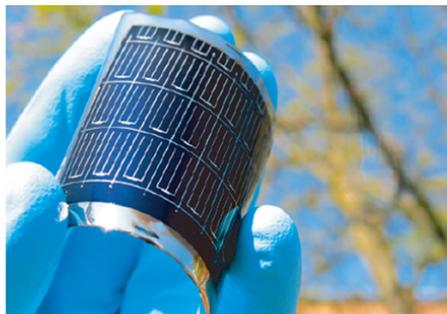
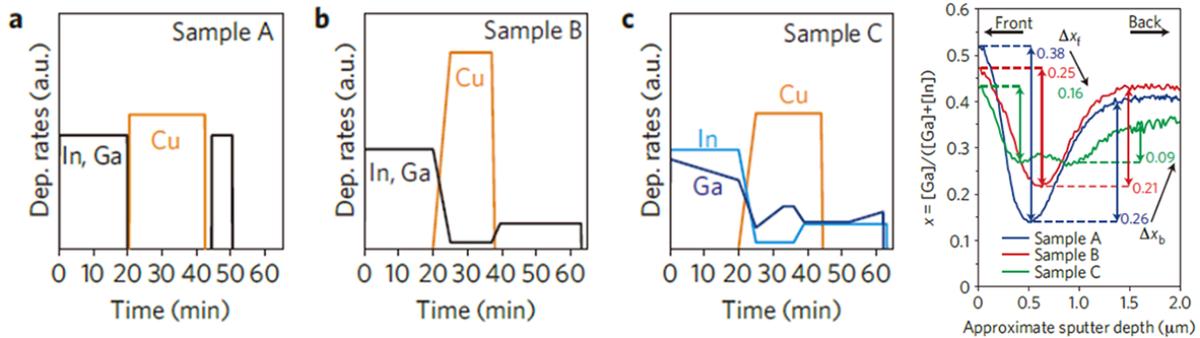
지 않은 단점이 있다. 그럼에도 불구하고 스위스 EMPA에서는 고내열성을 가지는 폴리이미드(polyimide) 기판을 이용하여 플렉서블 CIGS 박막태양전지 세계최고효율인 20.4%를 달성하였다. 현재 폴리머 기반의 플렉서블 CIGS 박막태양전지는 저비용, 고효율, 경량성 BIPV 구현이 가능하므로 더욱 많은 관심을 받고 있다. 그래서 스위스 EMPA에서 개발한 고효율 플렉서블 CIGS 박막태양전지를 제조하는 기술을 간략히 살펴보고자 한다.

스위스 EMPA에서는 고효율 플렉서블 CIGS 박막태양전지를 제조하기 위해서 폴리이미드의 물성이 유지되는 500°C 이하의 저온 CIGS 박막 제조공정을 개발하였다. 일반적으로 CIGS 박막을 저온에서 증착할 경우, 그림 8에 나타난 것처럼 Ga의 분포가 V-형상을 나타내지만, 매우 깊은 notch 형태가 형성된다. 그래서 태양광에 여기된 전자들은 깊은 notch 영역에 트랩(trap)되어 재결합이 증가하는 경향을 보이게 된다. 이를 개선하기 위해서 기존의 3

단계법에서 In과 Ga의 플렉스를 좀더 세분화하여 제어한 결과, 저온에서 증착된 CIGS 박막 내의 Ga 분포는 고온공정에서 제조된 Ga 분포와 유사하게 되었다. 이런 저온 CIGS 박막 제조공정에 의해서 태양전지의 효율이 18% 이상 달성되었다. 또한 폴리이미드 기판에는 Na와 같은 알칼리 원소가 존재하지 않기 때문에 추가적으로 NaF와 KF PDT 공정을 적용한 결과, 20.4%의 세계최고효율을 달성할 수 있게 되었다.

### 플렉서블 CIGS 박막태양전지 국내외 연구동향

상기하였듯이 플렉서블 CIGS 박막태양전지의 가장 선도하는 연구기관은 스위스 EMPA이며 세계최고효율인 20.4%를 달성하였다. 또한 미국의 델라웨어 IEC에서도 폴리이미드 기판 위에 동시진공증발법으로 제조한 (Ag,Cu)(In,Ga)Se<sub>2</sub> 박막을 이용하여 19.9%의 고효율을 달성하였다. 일본의 Tokyo Univ. of Science(이전 Aoyama Gakuin



**그림 8.** 저온 CIGS 박막 제조공정을 위한 3단계법의 변형과 이에 의한 CIGS 박막 내의 Ga 분포 변화 그리고 플렉서블 CIGS 태양전지(상, 하좌 출처: A. Chirila et al., Nat. Mater., 2011, 10, 857) 그리고 세계최고효율 플렉서블 CIGS 박막태양전지의 J-V 곡선(하우, 출처: A. Chirila et al., Nat. Mater., 2013, 12, 1107)

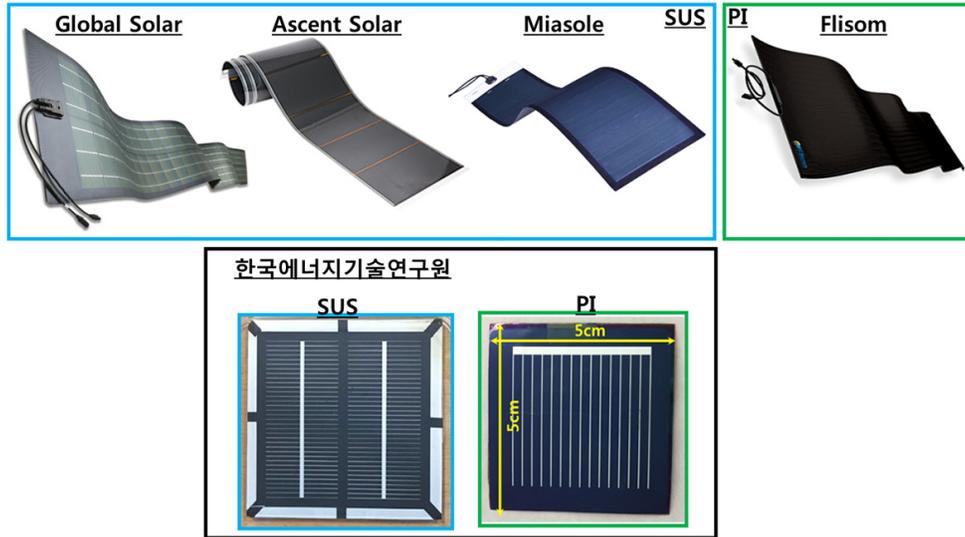


그림 9. 회사별 플렉서블 CIGS 박막태양전지 모듈 양산제품들(출처: <http://www.globalsolar.com/>, <http://www.ascentsolar.com/>, <http://miasole.com/>, <https://flisom.com/>) 그리고 한국에너지기술연구원 SUS 및 폴리이미드 기판 위의 대면적 플렉서블 CIGS 박막태양전지

Univ.)에서는 Ti 금속 기판의 표면 거칠기를 최소화하여서 17.9%의 플렉서블 CIGS 박막 태양전지를 달성하였다. 이 뿐만 아니라, 독일의 ZSW, HZB 등의 여러 연구기관에서도 금속 및 폴리머 기판을 이용하여 10~16% 내외의 플렉서블 CIGS 박막태양전지를 제조하고 있다. 국내의 경우 한국에너지기술연구원에서 3단계법기반의 동시증발법을 이용하여 SUS 기판에서 18% 및 폴리이미드 기판에서 15% 이상의 국내최고효율을 달성하였다. 최근에는 대량생산에 유리한 롤투롤 공정 개발에도 노력하고 있다. 이외에 한국 전자통신연구원, 한국과학기술연구원, 한국생산기술연구원 등에서도 플렉서블 CIGS 박막태양전지에 대한 연구개발을 활발히 진행하고 있다.

산업적으로 대표적인 플렉서블 CIGS 박막태양전지 제조사에는 미국의 Global Solar, Ascent Solar, Miasole, Solo Power, NuvoSun 등이 있으며, 유럽에는 스위스 Flisom, 스웨덴 Midsummer 등이 있다. 특히 중국의 Hanergy Solar Group사는 미국의 Global Solar, Ascent Solar, Miasole사를 인수하여 플렉서블 CIGS 박막태양전지 양산화에 집중하고 있다. 그래서 최근 Global Solar사의 경우, SUS 기판을 이용하여 CIGS 박막태양전지의 소면적에서 17.7%, 모듈에서 14.7%의 효율을 달성하고, 롤투롤 공정

에 기반한 플렉서블 태양전지 제조기술도 확보하였다. 그리고 스위스 EMPA에서 기술을 이전 받은 Flisom사는 폴리이미드 기판을 이용하여 서브모듈크기의 플렉서블 CIGS 박막태양전지에서 16.9% 효율을 달성하였다. 국내에서도 플렉서블 CIGS 박막태양전지 양산화를 위해서 (주)대양금속에서 등에서 해외기술 및 장비 도입을 통해 금속 기판기반한 롤투롤 양산공정을 진행한 바가 있고, (주)다쓰테크에서는 전착법에 기반한 롤투롤 공정 확보를 위한 연구개발을 진행하고 있다. 그리고 (주)솔리플렉스, (주)솔리딘, (주)솔란드 등의 회사에서도 플렉서블 CIGS 박막태양전지 장비 개발 및 양산화를 도모하고 있지만, 본격적인 양산화 단계까지는 이르지 못한 것으로 알려져 있다.

### 플렉서블 CIGS 박막태양전지 향후 전망

앞서 살펴본듯이 유리 기판 상에 제조되는 CIGS 박막 태양전지의 세계최고효율은 23%에 근접하였고, 대면적 모듈에서도 18% 이상의 고효율을 보이고 있다. 이처럼 유리 기판에 기반한 CIGS 박막태양전지 제조기술은 상당히 성숙된 것으로 판단된다. 이에 반해 플렉서블 CIGS 박막 태양전지의 연구개발은 유리 기판에 기반한 연구의 역사에 비해서 짧음에도 불구하고 기존에 축적된 연구개발에



대한 지식과 노하우에 의해 최근 20%가 넘는 셀효율이 달성되었고, 국외 선진기업에서는 플렉서블 CIGS 박막태양전지의 고효율화와 양산화를 위해서 활발한 연구개발에 집중하고 있다. 이에 반해 국내에서는 2010년대 초 삼성 등의 국내대기업이 유리 기판의 CIGS 박막태양전지 산업에 진출을 시도한 이후로 현재는 다소 주춤한 상태이다. 하지만 국내의 다수 연구기관에서도 플렉서블 태양전지의 고효율화에 대한 연구를 활발히 진행하고 있고, 여러 중소기업에서도 플렉서블 태양전지의 양산화에 대한 의지를 가지고 노력하고 있다.

앞으로 정부의 신재생에너지3020 계획을 성공적으로 이행하기 위해서는 태양광 발전의 수요는 필연적으로 증가할 것으로 기대된다. 이와 더불어 태양전지 시장이 대용량 발전 중심에서 단위 건물의 제로에너지화 혹은 분산발전으로 나아가고 있다는 점을 주목한다면, BIPV와 같이 건물의 외부에 부착되는 태양전지의 시장 또한 점진적으로 성장할 것으로 판단된다. 특히 BIPV와 같은 시장을 선점하기 위해서는 기술적 장벽이 높은 CIGS 박막태양전지에 대한 연구개발 인력과 인프라를 더욱 확충할 필요가 있고, 중소기업의 플렉서블 CIGS 박막태양전지 제조 기술 및 장비 확보를 통한 성공적인 태양전지 제조사로 거듭날 수 있도록 산학연의 협업과 많은 관심이 절대적으로 필요한 시점이라고 생각된다.

## 참고문헌

[1] "Global Market Outlook for Solar Power 2017-2021", Solar Power Europe, 2017.  
 [2] "BIPV Technologies and Markets: 2015-2022", N-tech Research Report, 2015.  
 [3] "2016 신재생에너지백서", 한국에너지공단 신재생에너지센터, 2017.  
 [4] 조준식, "저비용 고효율 플렉서블 CIGS 박막태양전지 제조기술", 세라믹코리아, 2017, 11, 54.

[5] D. Abou-Ras, S. Wagner, B.J. Stanbery, H.-W. Schock, R. Scheer, L. Stolt, S. Siebentritt, D. Lincot, C. Eberspacher, K. Kushiya, "Innovation highway: Breakthrough milestones and key developments in chalcopyrite photovoltaics from a retrospective viewpoint", *Thin Solid Films*, 2017, 663, 2.  
 [6] A.M. Gabor, J.R. Tuttle, M.H. Bode, A. Franz, A.L. Tennant, M.A. Contreras, R. Noufi, D.G. Jensen, A.M. Hermann, "Band-gap engineering in Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> thin films grown from (In,Ga)<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> precursors", *Sol. Energy Mater. & Sol. Cells*, 1996, 41/42, 247.  
 [7] T. Kato, "Cu(In,Ga)(Se,S)<sub>2</sub> solar cell research in Solar Frontier: Progress and current status", *Jap J. Appl. Phys.*, 2017, 56, 04CA2.  
 [8] P. M. P. Salome, H. Rodriguez-Alvarez, S. Sadewasser, *Sol. Energy Mater. & Sol. Cells*, 2015, 143, 9.  
 [9] P. Jackson, R. Wuerz, D. Hariskos, E. Lotter, W. Witte, M. Powalla, "Effects of heavy alkali elements in Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> solar cells with efficiencies up to 22.6%", *Phys. Status Solidi RRL*, 2016, 8, 583.  
 [10] A. Chirilă, S. Buecheler, F. Pianezzi, P. Bloesch, C. Gretener, A. R. Uhl, C. Fella, L. Kranz, J. Perrenoud, S. Seyrling, R. Verma, S. Nishiwaki, Y. E. Romanyuk, G. Bilger, A. N. Tiwari, "Highly efficient Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> solar cells grown on flexible polymer films", *Nat. Mater.*, 2011, 10, 857.  
 [11] A. Chirilă, P. Reinhard, F. Pianezzi, P. Bloesch, A.R. Uhl, C. Fella, L. Kranz, D. Keller, C. Gretener, H. Hagendorfer, "Potassium-induced surface modification of Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> thin films for high-efficiency solar cells", *Nat. Mater.*, 2013, 12, 1107.  
 [12] <http://www.solar-frontier.com>  
 [13] <http://solopower.com/>  
 [14] <http://www.globalsolar.com/>  
 [15] <http://www.ascentsolar.com/>  
 [16] <http://miasole.com/>  
 [17] <https://flisom.com/>  
 [18] <http://www.romag.co.uk/solar/building-integrated-pv/>