

플렉시블 CIGS 태양전지 기술 동향



정용덕
한국전자통신연구원
책임연구원



신명훈
한국항공대학교
항공전자
정보공학부
조교수

개 요

플렉시블 태양전지는 높은 기계적 유연성으로 다양한 형태로 쉽게 변형될 수 있으며 다양한 크기와 모양으로 제작될 수 있다. 또한, 유리과 같이 무거운 기판을 사용하지 않기 때문에 모듈의 두께가 얇고, 무게가 혁신적으로 가벼운 장점이 있다.^[1] 플렉시블 태양전지가 대용량의 전력생산용으로도 충분한 경쟁력을 확보해 가고 있지만, 타 기술과 융합을 통한 응용 산업분야 신시장 창출에 더 유리한 점이 있다. 플렉시블 모듈은 형태가 제한적이지 않기 때문에 직물에도 적용 가능하며, 대규모 건물의 곡면에도 설치 응용이 쉽다. 또한 가벼운 기판 소재를 활용하기 때문에, 자동차 및 비행기와 같은 곳에도 적용할 수 있다. 또한, 플렉시블 모듈은 부서질 수 있는 유리기판 모듈에 비하여 파손에 강한 장점이 있고, 저가의 롤투롤(roll-to-roll) 공정을 이용하게 되면 낮은 생산 에너지가 투입되기 때문에 에너지 회수기간이 짧은 장점이 있다. 그림 1은 플렉시블 박막 태양전지의 다양한 적용 사례를 보

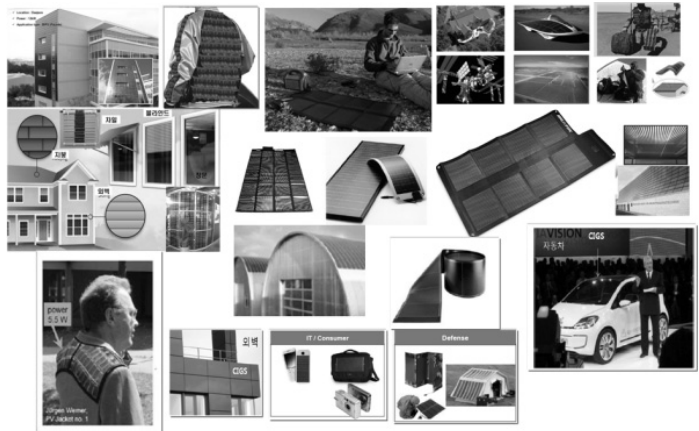


그림 1. 다양한 플렉시블 CIGS 박막 태양전지 제품군

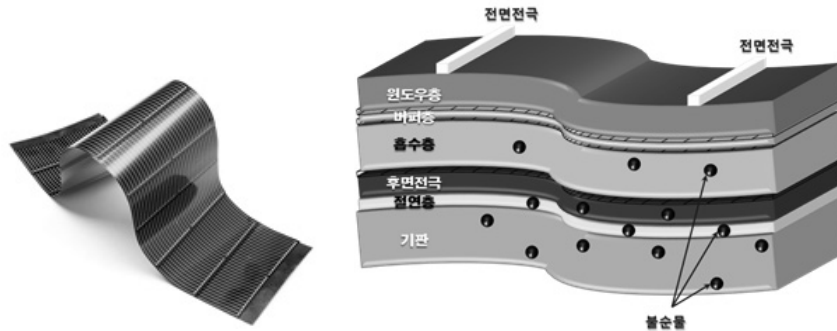


그림 2. 플렉시블 CIGS 태양전지 셀 사진 및 구조도

표 1. CIGS 박막 태양전지의 상용 모듈 현황

기판 소재	기업명	Nominal output (W)	Open circuit voltage (V)	Short circuit current (A)	Dimension (mm)	Weight (kg)	Specific Power (W/kg)
유리	Miasole	111	24.9	6.80	665×1611×28	18.0	6.17
	Solar Frontier	165	110	2.20	977×1257×35	20.0	8.25
금속	Global Solar Energy	62	28	4.2	368×216×36 (fold) 1333×762×2.5 (deployed)	1.41	43.97
플라스틱	Solarion	115	24.1	7.61	800×1320×11.5	1.40	82.14

출처: 각사 홈페이지(Miasole (www.miasole.com), Solar Frontier (www.solar-frontier.com), Global Solar Energy (www.globalsolar.com), Solarion (www.solarion.net))

표 2. 플렉시블 CIGS 박막 태양전지 제조업체 현황

업체	국가	증착법	유연기판	셀	모듈	비고
Ascent Solar(TFG Radiant)	미국(중국)	동시증발법	PI	14%	11.7%	-
Flisom	독일	동시증발법	PI	-	14.8%	서브모듈, EMPA
Fujifilm	일본	동시증발법	AI	-	15.9%	서브모듈, AIST
Global Solar(Hanergy)	미국(중국)	동시증발법	STS	15.5%	13.2%	서브모듈, R2R
Solarion	독일	동시증발법	PI	15.7%	-	-
XsunX	미국	동시증발법	STS	16.4%	-	Si셀 크기
NuvoSun(DOW)	미국	스퍼터링	STS	13.0%	-	지붕
Midsummer	스웨덴	스퍼터링	STS	15.8%	14.1%	Cd-free
Miasole(Hanergy)	미국(중국)	스퍼터링	STS	17.3%	15.7%	All Sputter
Solopower	미국	전착법	STS	15.7%	13.4%	Certified
Nanosolar	미국	프린팅	AI	17.1%	-	-

PI: 폴리이미드(polyimide)
STS: 스테인리스스틸(stainless steel)

이고 있다. 건물 응용분야와 솔라 충전기, 태양전지 충전 핸드폰과 같은 IT부품용 독립전원, 군용 에너지 텐트와 같은 국방응용 및 차량 탑재형 태양전지등과 같은 교통수단과의 융합을 통한 새로운 산업 분야로 확장해 나가고 있다. 그림 2는 플렉시블 CIGS 태양전지 셀과 구조도이다. CIGS 태양전지의 기본 구조인 기판, 후면전극, 광흡수층, 버퍼

층, 윈도우층과 그리드 전극을 순차적으로 형성하여 제작하게 된다. 유리기판을 사용하지 않기 때문에 필요에 따라 기판과 후면 전극 사이에 절연층을 삽입하기도 한다. 플렉시블 CIGS 박막 태양전지 세계 최고의 셀 효율은 0.52cm² 폴리이미드기판을 이용하여 구현한 20.4%이다.^[2]

대표적인 CIGS 박막 태양전지 제조업체에서 제공하는

모듈 사양은 표 1과 같다. 기존의 유리 기판을 이용한 박막 태양전지의 비출력(specific power, 比出力)은 8W/kg 내 외이며, 금속 기판을 이용한 박막 태양전지의 비출력은 약 44W/kg이다. 플라스틱 기판을 이용한 박막 태양전지는 82W/kg 정도의 비출력을 기록하였으며, 이는 유리 기판을 이용한 박막 태양전지보다 약 10배 높은 수치이다.^[3] 플라스틱 기판을 이용한 박막 태양전지는 하중을 고려하지 않아도 되는 건축물 또는 경량을 요구하는 비행기, 자동차 등에 적합하다. 표 2는 플렉시블 CIGS 박막 태양전지 제조업체 현황을 정리한 것이다.

플렉시블 CIGS 태양전지 제조 기술

기판 선정

CIGS 박막 태양전지는 기판은 소재 및 제작 공정에 있어 고려해야 할 몇 가지 중요한 점이 있다. CIGS 박막 태양전지는 일반적으로 여러 층의 박막이 적층되는 구조로 제작되는데, 대부분의 공정이 진공 공정을 사용하여 제작되기 때문에 기판의 진공 적합성을 검토해야 한다. 특히, 고온에서의 진공 특성에 부합되어야 한다. CIGS 흡수층은 기판온도가 최대 500~600°C 정도로 유지되어야 하며, 통상 350°C 이하의 기판온도에서 전지의 변환 효율이 급격하게 저하된다. 따라서, 기판은 최소한 350°C 이상에서 열적 안정성을 확보해야 한다. 고온 공정 특성 때문에 사용되는 기판 열팽창계수가 CIGS 흡수층과 유사하지 않으면 급격한 온도 변화에 따른 스트레스로 인하여 박막의 박리 및 균열 현상이 나타날 수 있으므로, 기판 소재의 열팽창계수를 함께 고려해야 한다. CIGS의 Se 원소는 강한 반응성을 갖고 있고 고온 중에 공정이 진행되므로, 기판 소재의 내화학성을 고려해야 한다. 또한, 버퍼층으로 사용되는 황화합물도 제작 공정 중에 사용되는 화학약품 및 물질 그 자체의 특성으로 부식에 강한 기판 소재를 검토해야 한다. 태양전지는 강한 태양광 아래에서의 실외에서 사용되는 부품으로 습기에 대한 우수한 특성을 확보하여야 한다.

습기에 대한 특성을 확보하지 못한 모듈을 단 시간 내에 급격한 성능 저하가 나타나게 된다. 기판의 매끈한 표면은 표면의 돌기나 공동 등과 같은 표면형상의 급격한 변화가 있을 경우 상하부 전극 사이에 분리를 형성할 우려가 높다. 또한, 불순물에 대한 확산방지막이나 전기적인 절연막을 형성할 때도 표면의 거칠기는 소자 특성에 많은 영향을 미치게 된다. 이상적인 기판소재는 싸고, 제조상 에너지 소모가 적고, 시장에서 구입하기 쉽고 가벼울수록 좋다. 소다석회유리는 상기한 모든 요구조건들을 만족하기 때문에, 유연성이 요구되지 않는 CIGS 박막 태양전지 제작에 가장 많이 사용되고 있다. 또한, 유리 기판에 포함되어 있는 Na는 CIGS의 박막 특성을 향상시키는 효과도 얻을 수 있는 장점도 있다. 그러나, 유리는 깨지기 쉽고, 구부림 특성이 매우 제한적인 단점이 있다.^[4]

가장 유력한 플렉시블 기판은 금속과 고분자 소재이다. 앞서 언급한 바와 같이, 플렉시블 기판을 선택하는데 있어서 고려해야 할 기준은 기판의 열팽창계수, 내열성, 내화학성, 롤투를 적합성, 그리고 가격 경쟁력이다. 물리, 화학적인 요구조건만을 고려한다면 금속 소재의 선택범위는 매우 다양하다. 현재까지 평가된 금속 소재 중 오스테나이트 구조의 Cr강, 타이타늄, 몰리브데늄, 알루미늄, 그리고 기타 몇가지 합금이 적용되고 있다. 저비용의 Cr강과 경량 금속인 Ti가 적절한 반면, 알루미늄 포일과 오스테나이트 강은 CIGS 동시증발 공정 중의 높은 열팽창계수에 기인된 심각한 밀착력 문제가 야기되는 것으로 알려져 있다. 금속 소재를 사용하는 가장 큰 장점은 높은 기계적, 열적 안정성에 있어, 유리 기판보다 높은 온도에서 공정이 가능한 점이다. 반면, 고온 공정 중에 기판으로 부터의 불순물 확산을 억제할 수 있는 확산방지막을 필수적으로 형성시켜 줘야 하는 복잡성을 안고 있다. 공정온도가 높을수록 불순물의 확산계수 및 열적 스트레스가 커지므로 확산방지막의 엄밀한 제어가 필요하게 된다. 단순히 확산 방지막 자체의 추가 공정뿐만 아니라, 이로 인한 후면 전극 또는 흡수층의 박막 특성이 달라지게 되므로 에너지 변환 효율을 확보하기 위한 공정 검토가 필요하다. 확산 방지막은 금속



박막, 산화물 또는 질화물과 같은 유전체 박막 등이 사용되고 있는데, 앞서 언급한 Na으로 대표되는 알칼리 금속 공급 방법과 함께 플렉시블 CIGS 박막 태양전지의 가장 큰 이슈 중의 하나이다. 확산 방지막은 금속박판이나 포일이 제조 과정상 갖고 있는 섬유상조직을 인한 표면 거칠기를 완화하는 역할을 함께 수행하기도 한다. 기판 제조 공정 개선으로 표면 거칠기 특성을 확보하느냐, 확산 방지막으로 표면 거칠기 특성을 확보하느냐는 실제 적용 과정에서 함께 고려해야 하는 점이다. 확산 방지막을 형성하는 기술로는 확산 방지막의 종류에 따라 스퍼터링, PECVD, ALD 등 진공 방식과, 졸겔 코팅 등과 같은 비진공 방식이 활용되고 있다. 확산방지막 제조 공정은 롤투를 공정 적용 가능성을 고려하여 최적의 공정을 선택해야 한다. 금속 소재 기판 이외에 상용화된 고분자 소재로는 몇몇 폴리이미드만이 400°C 이상의 고온에서 견딜 수 있다. 폴리이미드는 가벼운 절연체로서 금속보다 매끈한 표면을 갖고 있으나, 열적 안정성이 낮고 열팽창계수가 비교적 높은 단점을 갖고 있다. 적합한 열팽창 계수를 갖는 동시에 진공 공정을 견딜 수 있는 폴리이미드는 기판을 확보하는 것이 중요하다. 통상 폴리이미드의 열팽창계수는 유리전이온도 이상에서 증가하는데, 이 온도는 분해온도보다 훨씬 낮다. 따라서, CIGS 증착온도는 폴리이미드의 열적 안정성보다는 열팽창계수의 측면에서 제한된다. CIGS 증착에 적합한 폴리이미드 소재로는 Upilex S, Kapton E를 들 수 있으며, 이들은 모두 고온 특성이 우수하며, 다른 폴리이미드들에 비해 열팽창 계수가 비교적 낮다. 고온 공정에 따른 문제점을 해결하기 위해, 기판의 열에너지 이외의 추가적인 에너지 공급원을 활용하여 공정 온도를 낮추려는 연구 그룹도 있다. 추가적인 에너지 공급 방법으로는 흡수층 제조 과정 중 또는 흡수층 제조 후에, 하전 입자를 조사하거나 빛을 조사하는 방법, 표면 열처리 방법 등이 있다. 이와 같은 공정은 유리기판과는 다른 공정을 적용하게 되며 추가적인 비용이 발생할 가능성이 있다. 금속포일이나 폴리이미드 모두 Na으로 대표되는 알칼리 금속을 포함하지 않고 있기 때문에, CIGS 박막 특성을 향상시키기 위한 알칼리

금속을 인위적으로 공급해 주어야 하는 문제점이 있다. 일부 연구 그룹은 유리기판을 사용하는 경우에도 균일성 및 재연성을 위해 기판의 Na 대신 별도의 알칼리 금속 공급 공정을 채택하기도 한다. 알칼리 금속을 공급하는 방법으로는 후면 전극에 도핑하는 방법, 확산 방지막에 도핑하는 방법, CIGS 흡수층 형성 시 함께 공급하는 방법, CIGS 흡수층 형성 후 공급하는 방법 등이 있다.

박막 성장 기술

CIGS 박막 태양전지는 앞서 언급한 대로 몇 개의 박막이 적층된 형태로 제작되는데, 그중 가장 중요한 CIGS 흡수층 제조 공정에 대해 알아보도록 한다. 플렉시블 CIGS 박막 태양전지에서 흡수층의 제조 기술은 유리기판의 경우와 유사하나, 롤투를 공정을 적용하는 점에서 차이가 있다. 일반적으로 CIGS 흡수층 제조 방법은 알려진 동시증발법과 전구체 증착 후 열처리에 의한 2단계 공정법으로 크게 구별할 수 있다. 2단계 공정법은 다시 전구체 형성 방법에 따라 진공 방식과 비진공 방식으로 구별될 수 있다. 동시 증발법은 단위 원소인 Cu, In, Ga 및 Se을 열 증발원을 이용하여 동시에 증발시켜 고온 기판에 박막을 형성하는 방법이다(그림 3). 각각의 증발원을 독립적으로 사용하기 때문에 원소의 조성 제어가 용이하다. 롤투를 공정 시, 기판을 장착한 후 수 km의 박막을 제작하여야 하기 때문에 롤의 수평방향 및 길이방향에 대한 균일성 확보가 매우 중요하다. 수평방향 균일성을 위한 선형증발원 개발이 몇몇 기관에서 진행되고 있으며 롤투를 공정에 적합한 대용량 증발원 개발도 아직 개발이 필요한 실정이다. 이를 위해 증착 물질의 외부 충전 방식 등을 고려한 새로운 개념의 증발원을 개발하는 움직임이 있다. 다음은 전구체 증착 후 열처리에 의한 2단계 공정법이 있다. 대표적으로 알려진 것은 스퍼터링법에 의해 Cu, In, Ga 금속 박막을 순차적으로 진공 증착한 다음 고온에서 셀렌화 공정을 진행하는 것이다. 이 방법은 동시증발법에 비하여 박막의 균일성이 좋고 소재의 활용도도 높일 수 있기 때문에 제작공정의 저가화 가능성이 기대된다. 그러나 스퍼터링에 의한 전구

체 형성은 이미 잘 알려진 방법으로서 쉽게 해결할 수 있지만 화학적 조성을 맞추는 셀렌화 공정의 기술 수준은 아직 만족스럽지 못한 상황이다. 비진공 방식으로 전구체를 만드는 방법으로 CIGS 나노입자를 이용한 잉크프린팅법, 전기화학 증착법 등이 이용되고 있다. 이러한 기술들은 소재의 활용률이 높다는 장점이 있지만 변환 효율이 아직 만족스럽지 못해 기술 개발이 필요한 상황이다.^[5]

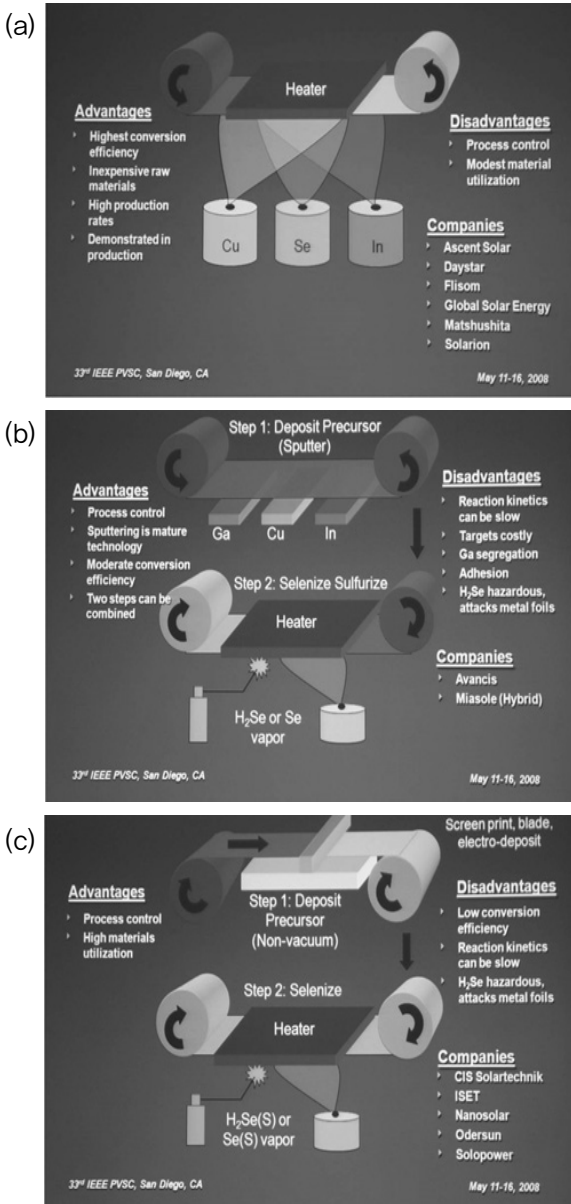


그림 3. CIGS 흡수층 제조방법: (a)동시증발법, (b)스퍼터링 증착 후 열처리법 (c)비진공 증착 후 열처리법

플렉시블 CIGS 모듈 제작 및 양산 기술

모듈 제작 기술

유리기판 CIGS 박막 태양전지 모듈은 모노리식 집적공정을 통하여 박막 제작 공정 단계 중에 셀 집적을 진행한다. 박막 모듈 제작 공정이 결정질 실리콘 태양전지와 대표적으로 차별화되는 점이다. 한편, 플렉시블 기판을 이용하여 태양전지 모듈을 제작할 경우, 셀 제작이 두께가 매우 얇은 포일 기판에 이루어지기 때문에 통상적인 레이저 스크라이빙을 이용한 모노리식 집적화가 유리기판에 비하여 어렵다고 알려져 있으며, 특히 니들을 이용하는 기계적 스크라이빙에 어려움을 겪고 있다. 모노리식 집적방식의 경우 기판이 도체인 경우와 절연체의 경우에 따라 셀 영역 구분이 공정 적용 단계가 달라진다. 앞서 언급한 금속 기판의 유전체 확산 방지막이 단일 집적 공정에서 절연층으로 활용되기도 한다. 플렉시블 CIGS 셀을 모듈화하는 방법은 모노리식 집적방식과 전통적인 개별연결 방식이 그룹에 따라 각각 채택되고 있다. 그림 3은 플렉시블 CIGS 태양전지 모듈 제작 공정을 보여주고 있다. 개별연결 방식은 이미 결정질 실리콘 태양전지에서 많이 사용되는 것과 유사한 방법이다. 즉, 플렉시블 CIGS 태양전지를 제작한 후 일정 크기로 절단하고 적절한 크기와 전력에 맞추어 모듈을 구성하는 방식이다(그림 4).^[6]

그림 5는 유리기판 모듈과 플렉시블 모듈의 개략도이다. 플렉시블 박막 태양전지 모듈은 유리기판 모듈과 달리

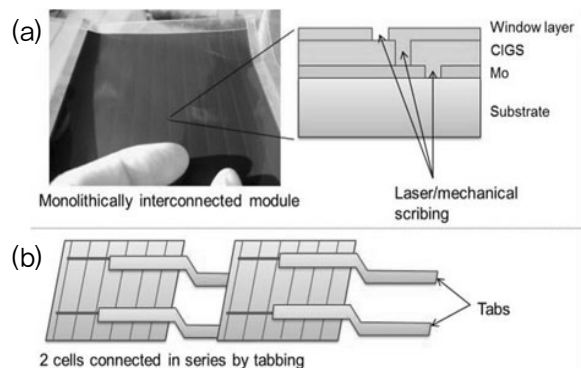


그림 4. 플렉시블 CIGS 태양전지 모듈화 공정: (a) 모노리식과 (b) 개별연결

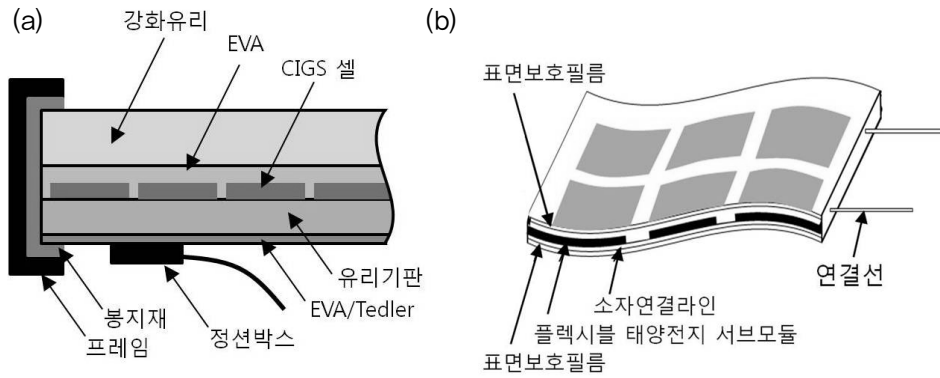


그림 5. (a) 유리기판 CIGS 태양전지 모듈과 (b) 플렉시블 CIGS 태양전지 모듈 구성

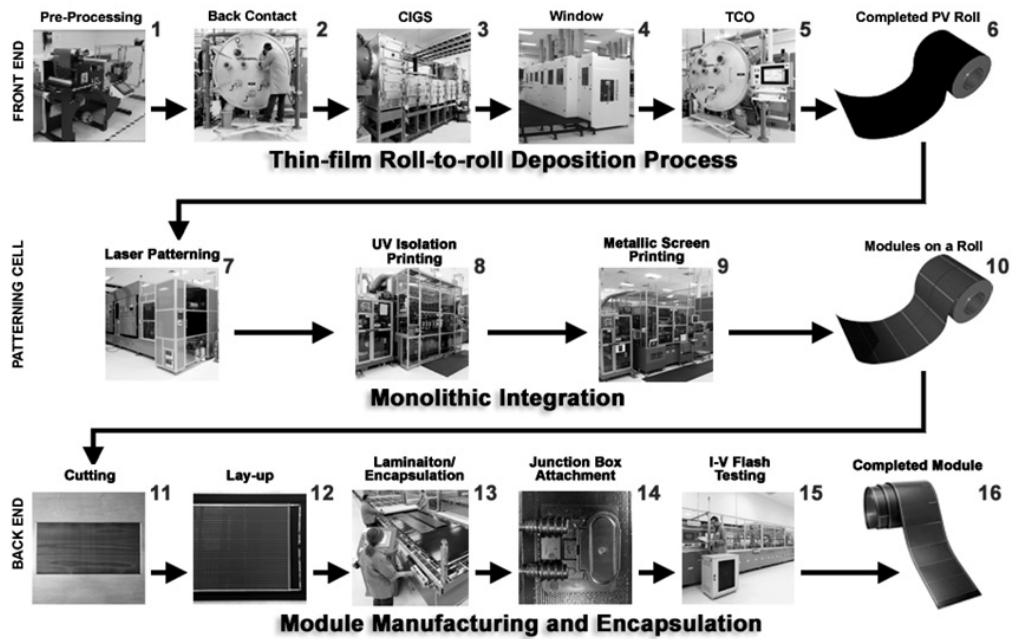


그림 6. 롤투롤 배치타입 공정 개략도

인캡슐레이션 소재로 유리를 사용할 수 없는데, 이를 위한 저가의 표면보호필름 소재가 필요하다. 이에 요구되는 습기투과도 특성과 산소투과도 특성을 만족 시키는 소재 개발 연구가 진행되고 있다.^[7]

양산 기술

플렉시블 CIGS 태양전지는 높은 전환효율을 유지하면서도 생산성 향상과 효율적인 소재 사용을 통해 가격 경쟁력 확보가 가능할 것으로 기대된다. 포일 형태의 기판을 풀고 되감으면서 박막 공정을 연속적으로 진행할 수 있어

생산성 향상이 기대되는데, 현재 산업화가 이루어지고 있는 롤투롤 공정은 두 가지 방법으로 진행되고 있다. 먼저, 기판 롤을 CIGS 박막 제조공정 마다 풀기-되감기를 되풀이 하면서 진행하는 방식이다(그림 6).^[8] 대부분 이 방법을 채택하고 있는데 그 이유는 증착속도, 진공 및 비진공 환경 등 각 단위 공정의 최적화된 증착조건에 따라 박막제조를 수행할 수 있기 때문이며, 따라서 롤을 각 박막층의 공정마다 옮겨가면서 전 과정을 마치게 된다. 한편, 모든 과정을 하나의 롤을 공급하여 태양전지 제조를 마치는 방법이 있다(그림 7).^[9] 각 단위공정의 박막제조 특성이 다르기

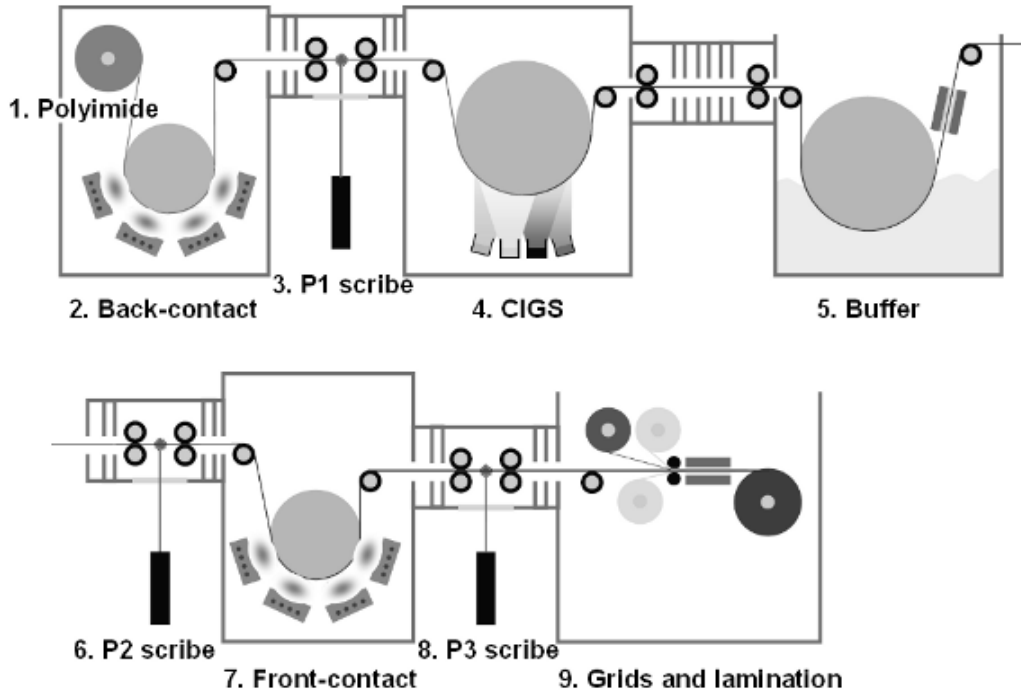


그림 7. 롤투롤 연속 공정 개략도

때문에 한 롤의 포일기판을 공급하여 태양전지를 제작하는 것은 상당한 기술적인 어려움이 있는 공정방식이다.

시장 및 산업 동향

CIGS 플렉시블 박막 태양전지의 성장 가능성

지난 수년간 중국 등 태양광관련 생산설비의 과잉 투자와 전 세계적인 금융위기 등으로 인해 태양광 시장의 거품이 제거되면서 태양광산업이 조정기를 겪어 왔다. 그 기간 동안, 태양광 발전 시스템의 전력 생산 원가가 유럽 및 미국 등의 국가에서 기존 화력발전의 전력 생산 원가와 같아지는 그리드 패러티를 달성하고, 유럽의 미국과 아시아(중국/일본) 국가들로 그 시장으로의 다변화 되었다. 또한, 각국 정부의 꾸준한 지원 정책과 태양광 모듈 수급 균형 등에 힘입어 2020년까지 15~20% 성장 예측되고 있다(연평균 20%내외, 그림 8^[10]). 또한, 기존 태양전지와는 다른 구조적 특징을 갖는 플렉시블 태양전지 시장도 점진적으로

계속 확대 될 것으로 기대하고 있다. 특히 결정질 태양전지나 유리 기판 기반의 박막태양전지는 무겁고, 충격에 취약하며 설치비용이 높아 응용에 제약이 있는 반면, 최근에는 교통, 운송, 항공, 선박 등 다양한 운송수단에 필요한 태양전지나 이동식 정보기기 혹은 굴곡이 있는 건물집적형(BIPV)으로의 수요가 급증하고 있어서 이에 적합한 플렉시블 기판을 사용한 박막태양전지에 대한 수요가 증가하고 있다고 하겠다(그림 9).^[11]

국내외 시장현황 및 전망

CIGS를 생산하는 국내외 대형 기업들도, 지난 수년간 태양광산업의 조정기를 거치면서 2011년의 50여개 기업에서 10여개 수준으로 그 수가 감소하였다. 그러나, 아직 다국적 초거대기업들은 포기하지 않고 남아서 시장의 반등을 지켜보고 있다. 태양전지 제조원가는 c-Si 제품이 0.65~0.75\$/Watt의 현 시세기에서 2021년 0.4~0.45\$/Watt까지 하락 할 것으로 예상되기 때문에, CIGS 제품도 꾸준한 기술 개발을 통해 유사한 제조원가를 달성할 것으로 보

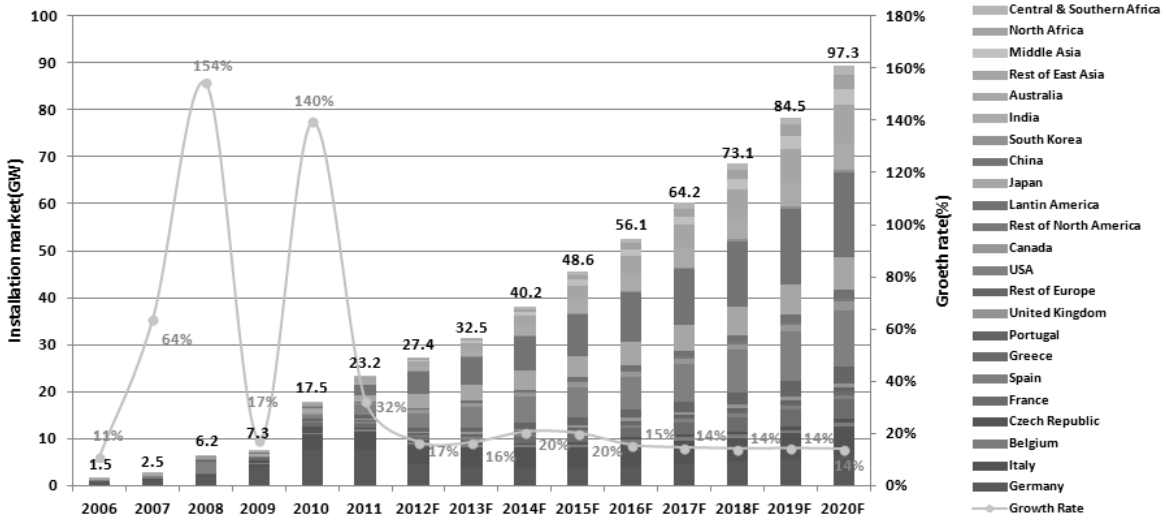


그림 8. 세계 태양광 시장 규모 전망

Flexible Products Revenues Using CIGS (\$ Millions)

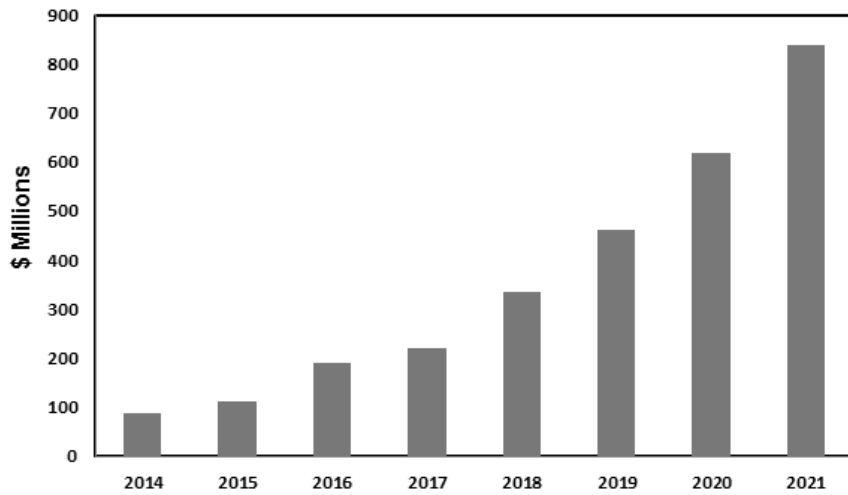


그림 9. 연도별 플렉시블 기반 CIGS 시장 규모 전망(출처: 나노마켓)

인다. CIGS 태양전지 시장의 경우 2014년 보다 2021년 (> 4 B\$) 3배 이상 성장할 것으로 예상하고 있으나, 아직은 CIGS 제품은 유리기판 기반의 Rigid type이 주류를 이루고 있다. 때문에 록투를 제품의 경우 주류시장진입을 위해서는 지금의 높은 제조원가를 더 낮춰야 하는 상황이다. 그러나 장기적으로 제조원가를 더 낮출 수 있다면, BIPV 시장을 중심으로 점차 성장할 것으로 예상하고 있다(그림 10).

플렉시블 CIGS시장은 그림 11(a)에서처럼 2014년에 비해 2021년 약 8.5배 이상(연평균 ~38% CAGR) 성장할 것

으로 예상되며, 이는 주로 BIPV시장의 성장에 수요가 많기 때문이다(그림 11(b)). 사실, CIGS 태양전지는 개발 초기 단계에서 부터 BIPV 시장과 관련이 깊다고 하겠다. 지금까지는 주로 유리기판과 같은 rigid type이 주류가 되었으나 향후 플렉시블 BIPV제품의 성장이 두드러질 것으로 예상되는데, 이는 가볍고 곡률이 많은 건축물의 특성상 기존의 c-Si 태양전지로는 이러한 기술적 특성을 달성하기 어려운, 플렉시블 태양전지만이 제공할 수 있는 차별화된 시장이라고 하겠다. 따라서 2021년 BIPV시장에서 플렉시

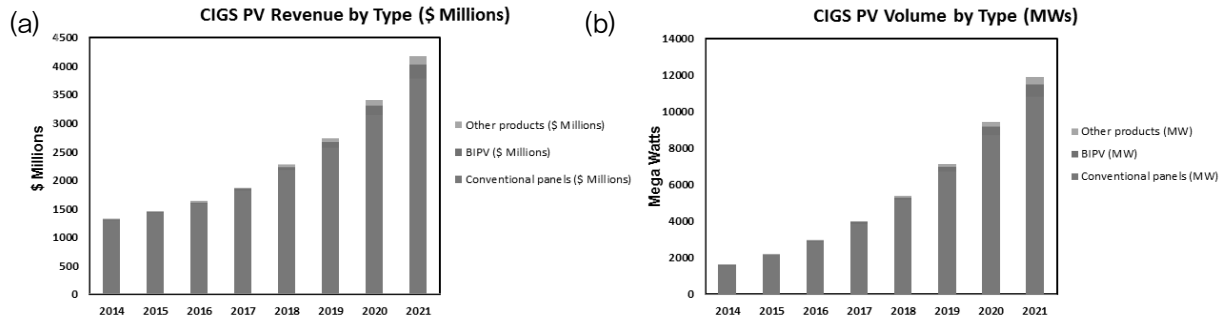


그림 10. (a) CIGS 시장 규모 전망, (b) 플렉시블 CIGS 시장전망

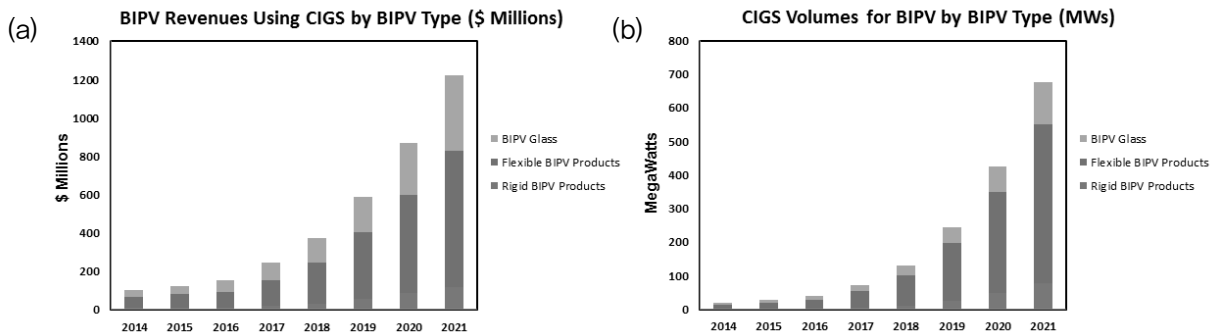


그림 11. (a) 제품별 BIPV - CIGS 시장 규모 전망, (b) BIPV - CIGS 시장의 제품별 생산 규모 전망

블 제품이 차지하는 비중은 생산과 매출 모두 50% 이상이 될 것으로 예상되고 있다. 또한, 폴리머 기판에서 제작된 플렉시블 CIGS 태양전지 효율이 20% 이상 보고되었으며, 이 정도 높은 효율을 갖는 유일한 박막 태양전지이기 때문에 향후 양산 제품에서도 지금보다 더 높은 효율이 기대된다. 현재 플렉시블 CIGS를 생산할 수 있는 기업은 지난 수년간의 시장 조정기를 거쳐서 한 자릿수로 감소한 상태지만, 향후 BIPV시장이 활성화되면 이들 소수 기업이 결국 독점적인 지위를 차지할 가능성이 높다고 하겠다. 또한 플렉시블 태양전지는 BIPV 시장 뿐만 아니라 향후 소형가전 위주의 portable 태양전지로도 확장이 가능하기 때문에 그 잠재성이 매우 크다. 지금까지는 롤투를 방식이 주된 플렉시블 태양전지의 기술적 방향이라고 여겨져 왔으나, 롤투를 방식의 제조 단가가 아직도 높기 때문에 여러 방식의 플렉시블 태양전지에 대한 기술 개발은 계속 필요하다고 하겠다.

맺음말

본고에서는 플렉시블 CIGS 박막 태양전지 셀과 모듈 기술에 대하여 기판의 요구 특성과 소자 구조 및 제조방법, 모듈 제작과 롤투를 양산 공정 대한 여러 이슈 등을 살펴 보았다. 본문에서 기술하였듯이 저가화의 가능성이 큰 분야로 예상되고 있지만 아직도 플렉시블 모듈가격은 유리판에 비하여 비싼 구조를 갖고 있다. 이는 셀 제작 보다는 습기방지용 플라스틱 패키징의 비용이 유리판에 비하여 월등히 비싸기 때문이다. 그러나 이러한 패키징 소재가 이미 출시되고 있기 때문에 가까운 미래에 고비용의 문제점도 해결될 것으로 전망되며, 유리기판 CIGS 태양전지 모듈과 대등한 경쟁을 할 수 있을 것으로 기대된다. 지금도 플렉시블 CIGS 태양전지 모듈은 태양전지 고효율, 유연성 및 경량성 등의 여러 장점을 활용하게 되면 다양한 형태의 융합형 에너지 기술로 발전할 수 있고, 새로운 시장도 창출할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] M. Pagliaro, G. Palmisano, and R. Ciriminna, "Flexible Solar Cells" WILEY-VCH Verlag GmbH & Co, Weinheim, 2008.
- [2] A. Chirilă, P. Reinhard, F. Pianezzi, P. Bloesch, A.R. Uhl, C. Fella, L. Kranz, D. Keller, C. Gretener, H. Hagendorfer, D. Jaeger, R. Erni, S. Nishiwaki, S. Buecheler, A.N. Tiwari, Potassium-induced surface modification of Cu(In,Ga)Se₂ thin films for high-efficiency solar cells, *Nature Mater.*, 12 (2013) 1107–1111.
- [3] 정용덕, 플렉시블 태양전지 기술 동향, 녹색기술동향보고서, 13–24, 2013.
- [4] F. Kessler, D. Rudmann, Technological aspects of flexible CIGS solar cells and modules, *Sol. Energy*, 77 (2004) 685–695.
- [5] J.S. Britt, S. Wiedeman, U. Schoop, D. Verebelyi, High-volume manufacturing of flexible and lightweight CIGS solar cells, in: *Photovoltaic Specialists Conference, 2008. PVSC. 33rd IEEE*, (2008).
- [6] P. Reinhard, A. Chirilă, P. Bloesch, F. Pianezzi, S. Nishiwaki, S. Buechelers, A.N. Tiwari, Review of Progress Toward 20% Efficiency Flexible CIGS Solar Cells and Manufacturing Issues of Solar Modules, *Photovoltaics, IEEE Journal of*, 3 (2013) 572–580.
- [7] Y. Hamakawa, "Thin-Film Solar Cells: Next Generation Photovoltaics and Its Applications" Springer, Heidelberg, 2004.
- [8] 어센트솔라, 현대 가능한 컨슈머 제품으로 승부, 솔라투데이, 2013.
- [9] <http://www.flisom.ch/technology>
- [10] 솔라앤에너지, "플렉시블 박막 태양전지 기술 및 시장전망", 2011.
- [11] Nanomarkets report: CIGS photovoltaics markets - 2014 and beyond, *Nano-717*, 2014.