

CIGS 박막 태양전지의 산업동향 및 미래기술

윤재호(한국에너지기술연구원)

1. CIGS 박막 태양전지 개요

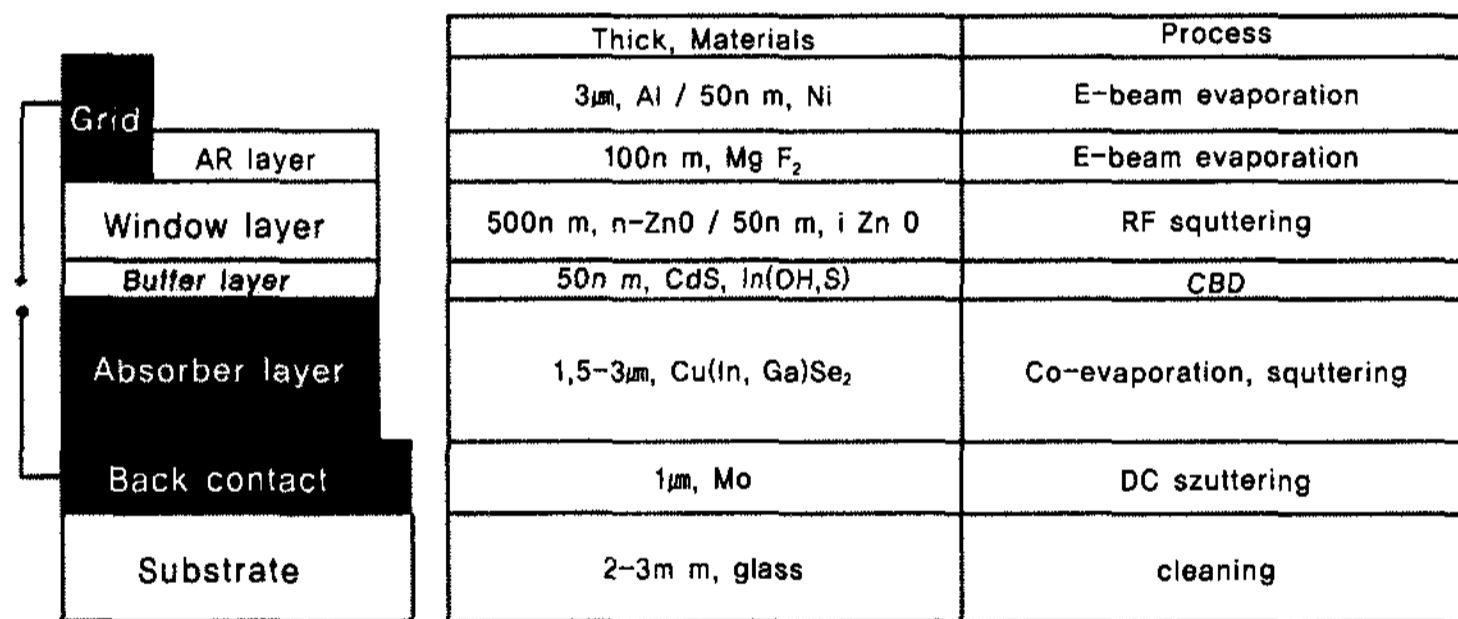
급격한 태양전지 시장의 성장에 따른 실리콘 원소재 부족 문제로 인하여 박막 태양전지에 대한 관심이 높아지고 있다. 박막 태양전지는 소재에 따라 비정질/결정질 실리콘 박막 태양전지, CIGS 박막 태양전지, CdTe 박막 태양전지, 염료감응 태양전지 등으로 구분할 수 있으며 소재의 특성에 따라 각기 다른 장·단점을 가지고 있다. Cu, In, Ga, Se의 4가지 원소로 구성된 $\text{Cu}(\text{InGa})\text{Se}_2$ (이하 CIGS) 박막 태양전지는 10^5 cm^{-1} 이상의 높은 광흡수계수로 인하여 두께 1-2 μm 의 박막으로도 고효율의 태양전지 제조가 가능하고, 또한 장기적으로 전기광학적 안정성이 우수한 특성을 지니고 있다. 이러한 장점으로 인하여 실험실 수준에서 19.9%의 변환효율을 얻었는데¹⁾, 이는 여타 박막 태양전지에 비해서도 높을 뿐만 아니라 기존의 다결정 실리콘 태양전지의 최고 효율 20.2%에도 근접하는 것이다. 모듈의 최고 효율 또한 14%대에 근접하고 있어 효율 면에서 매우 뚜렷한 장점을 가지고 있다. 또한 원소재의 소비가 매우 적고 연속적인 박막 증

착 공정을 채택하고 있기 때문에 저가 태양전지의 구현이 가능하다. [그림 1]은 태양전지 소재별 생산단가와 효율에 대한 예측치를 나타내고 있는데, CIGS 박막 태양전지의 경우 공정단가는 결정질 실리콘 보다 낮고 변환효율은 박막 태양전지 중에서 가장 높을 것으로 전망되고 있다. 즉 고가의 결정질 실리콘 태양전지를 대체할 수 있는 저가·고효율의 태양전지로 CIGS 박막 태양전지가 잠재력을 가지고 있다는 것을 의미한다.

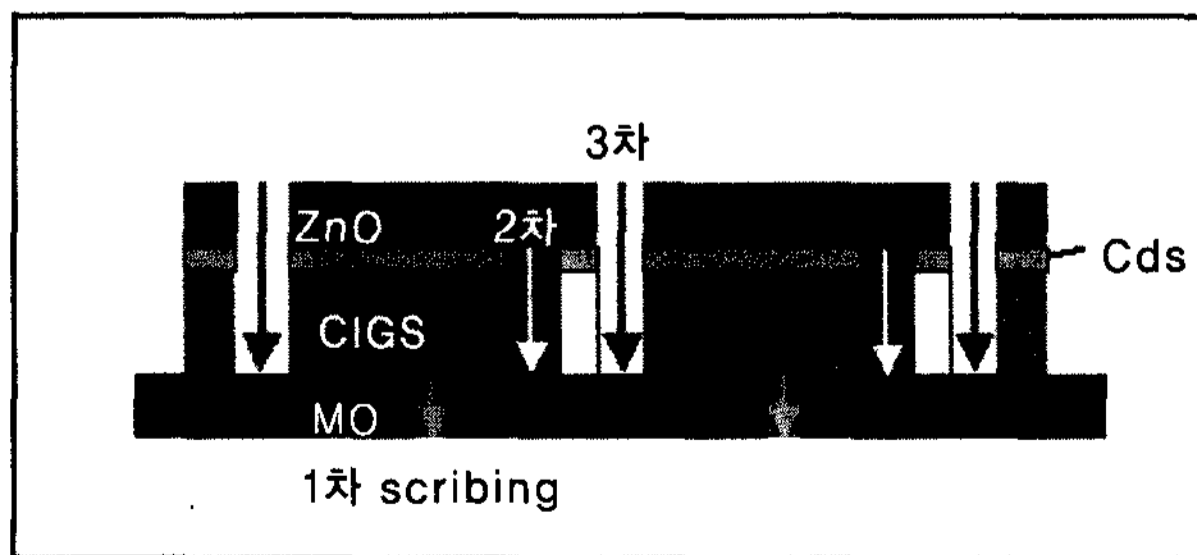
CIGS 박막 태양전지는 [그림 2]에서 나타난 바와 같이 배면전극, 광흡수층, 버퍼층, 투명전극 및 반사방지막으로 구성된다. 배면전극에는 일반적으로 Mo 전극이 사용되며 버퍼층은 CdS 혹은 In계 Zn계 Cd-free 버퍼가 사용된다. 투명전극으로는 ZnO, ITO 등이 사용되며 단위 박막에 따라 다양한 물리적, 화학적 제조 방법이 사용된다. 태양전지의 면적이 커지면 면저항의 증가로 인하여 효율이 감소하게 되기 때문에 [그림 3]과 같이 대면적 모듈의 경우는 일정한 간격으로 직렬연결이 되도록 패터닝하는 것이 일반적이다. 유연기판을 사용하는 Flexible CIGS 박막 태양전지의 경우는

태양전지소재	2007년	2010년	2015년
	제조단가 (S/W) (효율%)	제조단가 (S/W) (효율%)	제조단가 (S/W) (효율%)
결정질 실리콘(c-Si)			
초고효율 단결정	\$2.96(17.5%)	\$1.80(22%)	\$1.50(24%)
단결정	\$2.77(14.2%)	\$2.00(20%)	\$1.40(20%)
다결정	\$2.77(13.8%)	\$1.95(17%)	\$1.40(20%)
박막/취로 다결정	\$2.77(13.0%)	\$1.60(16%)	\$1.20(18%)
박막			
비정질 실리콘(a-Si)	\$2.34(7.0%)	\$1.00(7.5%)	\$0.75(10.0%)
CdTe	\$1.28(9.4%)	\$0.90(10.0%)	\$0.80(11.0%)
CIGS	-	\$1.00(11.5%)	\$0.75(13.0%)
Dye & Organic	-	-	\$0.60(7.0%)
Stable Market Price	\$2.50~4.00	\$1.59~2.55	\$1.39~2.00

〈그림 1〉 소재별 태양전지 모듈 제조단가 예측^[2]



〈그림 2〉 CIGS 박막 태양전지 기본구조



〈그림 3〉 CIGS 박막 모듈의 구조

패터닝을 적용하지 않고 금속 그리드를 사용하여 모듈을 제조한다.

II CIGS 박막 태양전지 산업 동향

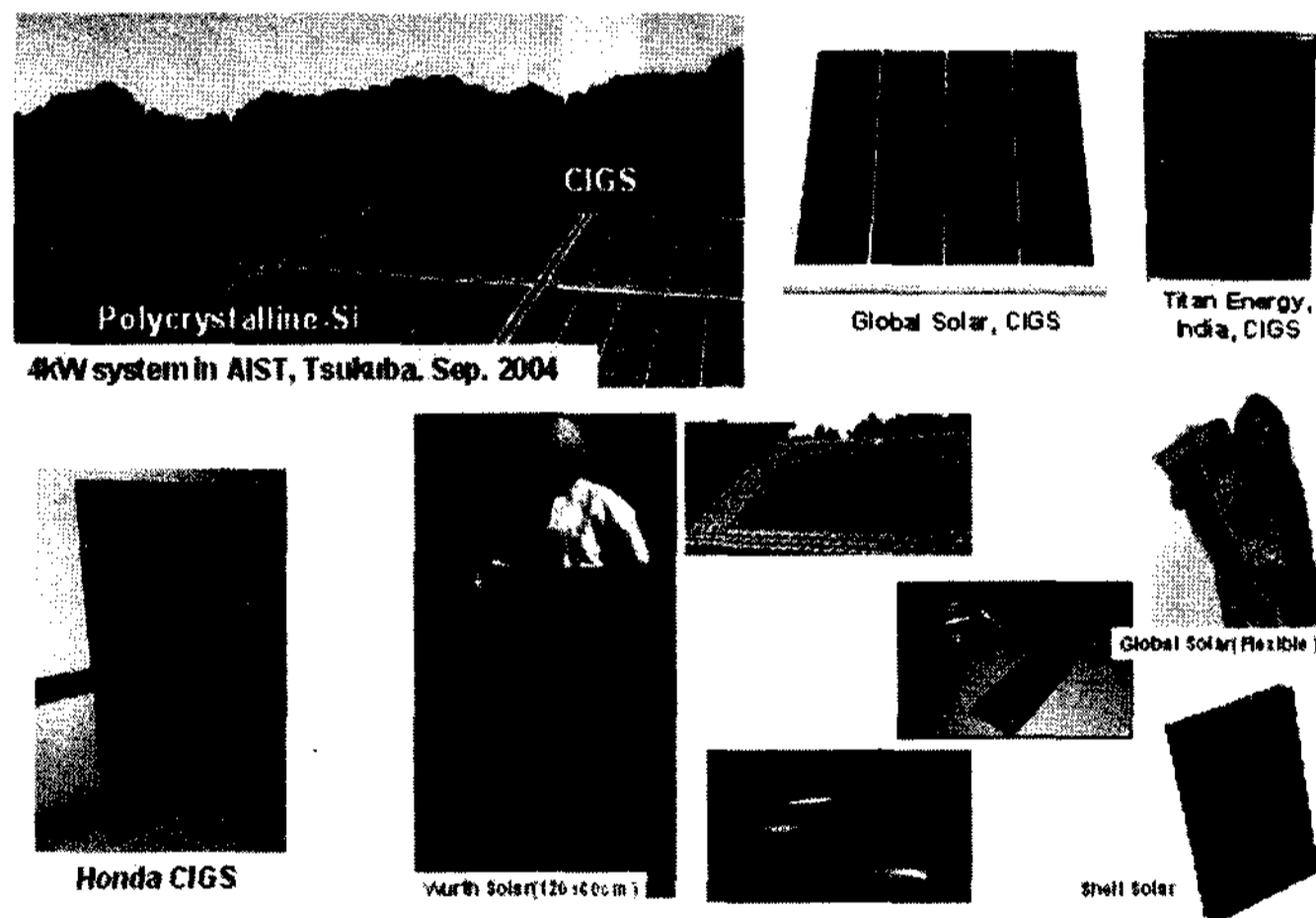
CIGS 박막 태양전지는 1980년대 이후 연구 개발이 진행되어 실험실 수준에서의 변환효율이 꾸준한 증가를 보여 왔으며, 최근 미국의 NREL은 19.9%의 최고효율을 달성하였다. 하지만 4성분계 화합물 박막 태양전지가 가지고 있는 대량생산의 어려움과 함께 그간 성숙되지 않은 박막 태양전지 시장으로 인하여 2000년대 초반에서야 몇몇 기업체를 중심으로 대면적 모듈 기술이 개발되었다. 모듈 기술 개발에 있어서도 CIGS 박막 태양전지용 성막 장치들의 미개발로 인하여 소면적 태양전지와 모듈의 효율차이가 다른 태양전지보다 크게 나타나는 문제가 발생하였다. 하지만 각 연구기관의 기술 개발과 스퍼터링 및 evaporation 장치들의 개발로 인하여 모듈의 효율 및 안정성이 개선되었다. 독일의 Wurth solar의 경우, 2000년을 전후하여 ZSW와 공동으로 60X1200 cm² 모듈의 시제품 연구를 시작하였고 2007년도에 15MW 급 대량 생산 라인을 구축하게 되었다. 일본의 Showa Shell Sekiyu, Honda Soltec, 독일의 Solibro, 미국의 Global solar 등 현재 CIGS 박막 태양전지 생산을 주도하고 있는 모든 기업들의 발전과정 역시 이와 유사하다. 따라서 현재 시점은 각 생산기업별로 장기간의 연구개발에 바탕을 둔 1기 대량 생산 라인 운영 및 이를 통한 제품 생산 단계라고 할 수 있으며, 향후 시장 상황에 따라 생산량이 증가할 것으로 전망된다. 최근 2009년까지

60 MW 급 생산라인을 건설하겠다는 일본 Showa Shell Sekiyu의 발표는 이러한 전망을 뒷받침 할 수 있는 좋은 사례라고 할 수 있다.

[표1]은 현재 CIGS 박막 태양전지를 생산하고 있는 대표적인 회사들을 정리한 것이다. 일본의 Honda는 1995년부터 CIGS 박막 태양전지 개발을 시작했음을 최근 발표한 바 있으며 30 MW 정도의 생산라인을 가동하고 있다. 특히 기존의 CIGS 모듈과는 달리 0.72x0.45 m² 모듈을 세장을 연결하는 형태의 모듈을 생산하고 있다. Showa Shell Sekiyu의 경우 가장 높은 모듈 효율을 보유하고 있으며, 0.3x1.2 m² 크기의 모듈을 주로 생산하였으나 최근 0.6x1.2m² 모듈을 생산하고 있으며 13%대의 최고 효율을 얻었다³⁾. 미국의 Global Solar 와 Miasole는 대표적인 Flexible CIGS 태양전지 생산 기업으로 효율은 유리 기판을 사용했을 때보다 낮지만 여러 가지 장점을 가지고 있기 때문에 향후 생산량의 증가가 기대된다. 독일의 Avancis, Wurth solar, Solibro, Surfur cell은 0.6x1.2 m² 이상의 크기를 가지는 모듈을 생산하고 있다. 모듈 제조 공정에 있어서 가장 핵심이라고 할 수 있는 CIGS 박막 제조공정에 있어서는 대면적 증착이 용이한 스퍼터링법을 이용한 셀렌화 공정이 대다수이지만 Wurth solar, Solibro, Global solar 등은 진공증발법을 이용하여 대량생산을 하고 있다. 이 밖에도 현재 많은 회사들이 각자의 독창적인 기술을 바탕으로 CIGS 박막 태양전지 분야에 진출하고 있다. [그림 4]는 기업별로 생산하고 있는 CIGS 박막 태양전지 모듈을 나타낸다.

〈표 1〉 CIGS 박막 태양전지 기업체 별 생산 동향 ^[4]

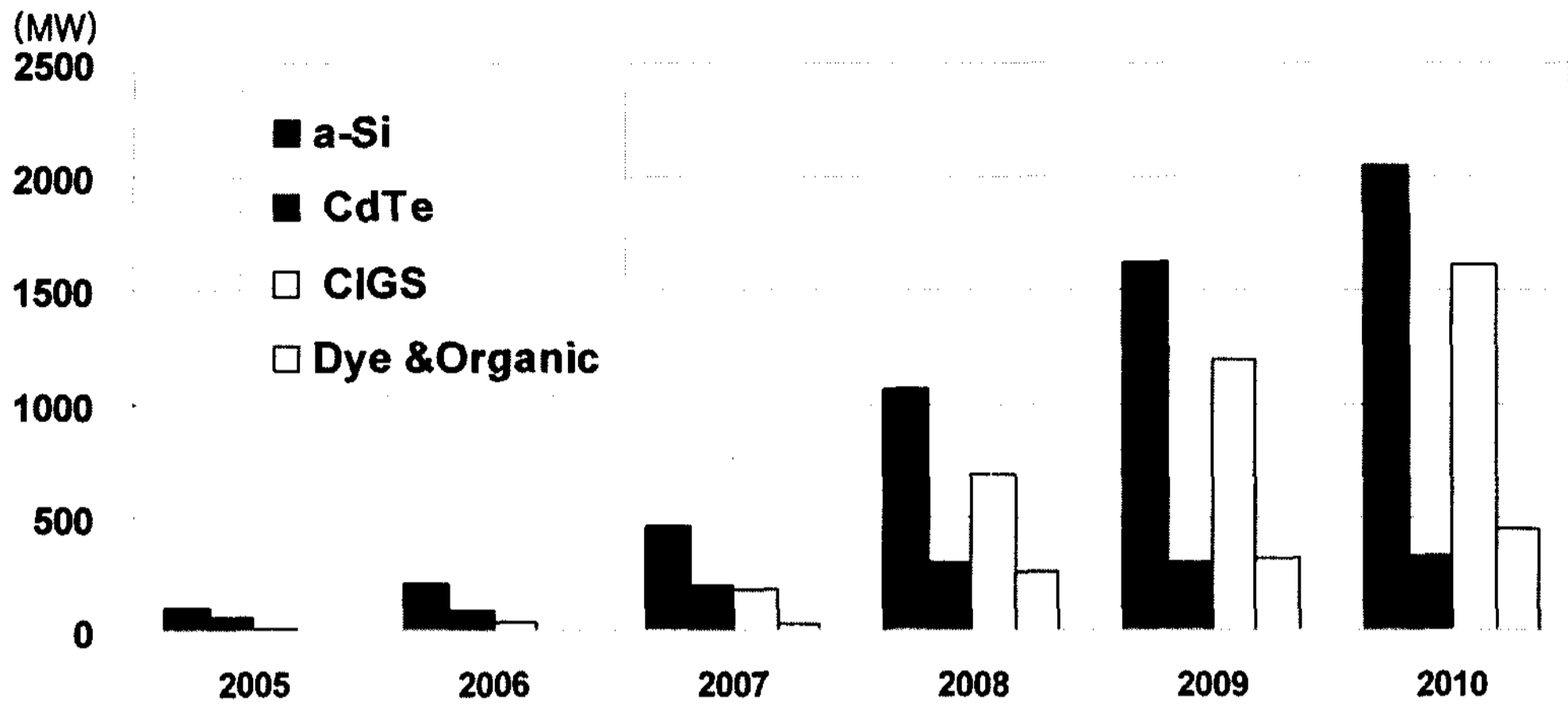
회 사	생산량(MW)	기 판 종 류 /크기(m ²)	효율(최대/평균)	생산계획(MW)	CIGS 제조공정
Honda Soltec (일본)	27.7(2008)	유리 0.72x0.45 3장	125Wp		셀렌화
Showa Shell Sekiyu (일본)	20(2007)	유리 0.3(0.6)x1.2	14.2%/11.8%	60 (2009)	셀렌화
Global Solar (미국)	4.2 (2006)	Metal foil 1ft wide	10%/8%	40 (2008)	진공증발
Miasole (미국)	40 (2008)	Metal foil	10%/8%	100 (2010)	셀렌화
Avancis (독일)	30 (2008)	유리 0.8x1.4	13.1%	80 (2010)	셀렌화
Wurth Solar (독일)	15 (2007)	유리 0.6x1.2	14%/12%	30 (2008)	진공증발
Johanna Solar	30 (2008)	0.5x1.2	11.1%/10%	60 (2010)	셀렌화
Solibro	25 (2008)	0.6x1.2	> 10%	100 (2010)	진공증발
Sulfur cell	0.5 (2007)	0.65x1.25	8.7%/7.5%	4 (2008) 50 (2010)	셀렌화



〈그림 4〉 CIGS 박막 태양전지모듈

[그림 5]는 박막 태양전지 생산 기업의 현재 생산량과 생산 계획량을 나타낸 것으로 위에서 설명한 CIGS 관련 회사들의 급격한 시장진출로 인하여 2010년에는 1.5 GW 이상의 CIGS 박막 태양전지 시장이 창출될 것으로

전망하고 있다. 이는 2010년 기준으로 전체 태양전지 시장의 10%에 달하는 것이다. 또한 향후에는 점차적으로 전체태양전지 시장에서 차지하는 비중을 높일 것으로 전망된다.



〈그림 5〉 전 세계 박막 태양전지 생산용량 예측 (기업 발표)^[2]

III. CIGS 박막 태양전지 미래기술

앞서 설명한 바와 같이, CIGS 박막 태양전지가 보유하고 있는 장점으로 인하여 생산량이 급증할 것으로 예상된다. 그러나 향후 화석연료와 경쟁하기 위해서는 현재보다 효율은 높아져야 하고 생산단가는 낮아져야 한다. 이는 현재의 CIGS 박막 태양전지를 개선할 수 있는 새로운 기술이 개발되어야 함을 의미하는 것이다. 전 세계적으로 이와 관련된 다양한 시도들이 진행되고 있는데, 이를 다음과 같이 크게 고효율화 기술과 저가화 기술로 나눌 수 있다.

1. CIGS 박막 태양전지 저가화 기술

태양전지의 저가화는 구성 물질의 저가화 및 공정의 저가화를 의미하며 기판, 광흡수층의 저가화 및 비진공방식 공정이 여기에 해당된다.

기판 물질의 저가화는 기존의 유리기판을 대체하여 저가 플렉서블 기판을 적용하는 기

술이다. 이는 앞서 설명한 Global solar, Miasole 등에서 채택하고 있는 기술로써 기존의 유리기판을 스테인리스스틸이나 폴리머 기판으로 대체하는 기술이다. 유리 기판에 비해 저가 태양전지를 제조할 수 있을 뿐만 아니라 가볍고 유연한 태양전지를 구현할 수 있어 다양한 용도로 사용될 수 있다. 특히 roll-to-roll 공정을 적용할 경우 생산단가는 더욱더 낮아질 수 있다. 최근 새롭게 CIGS 박막 태양전지 시장에 진출하는 신규 기업의 경우 대부분 플렉서블 기판을 채택하고 있는 것도 이러한 장점들에 기인한다. 하지만 기판으로부터의 불순물 확산 방지, 소자 isolation을 위한 절연막 증착, 별도의 Na 첨가 공정 등 해결해야 하는 기술적인 문제들도 존재한다.

두 번째는 광흡수층의 저가화 기술이다. 현재 $2\mu\text{m}$ 내외로 사용되고 있는 CIGS 박막의 두께를 $1\mu\text{m}$ 이하로 줄이는 기술과 In, Ga 등의 상대적인 고가 원소들을 저가 원소로 대체하는 기술 등이 여기에 포함된다. [표2]와 같이 광흡수층의 두께를 $1\mu\text{m}$ 이하로 줄일 경우 단

〈표 2〉 광흡수층 두께에 따른 태양전지 특성^[7]

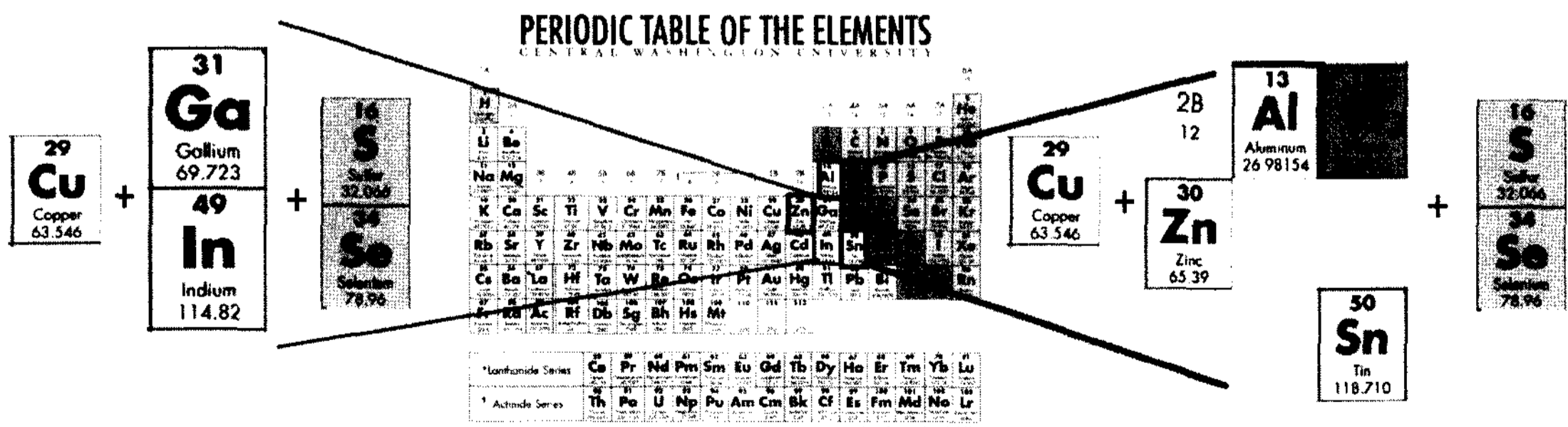
λ(μm)	VOC(V)	JSC(mA/cm ²)	FF(%)	Efficiency(%)	기관
1.0 CIGS	0.676	31.96	79.47	17.16	NREL
0.75 CIGS	0.652	26.0	74.0	12.5	
0.40 CIGS	0.565	21.3	75.7	9.1	
0.47 CIGS	0.576	26.8	64.2	9.9	EPV
1.0 CIGSS Module	25.26	2.66	69.2	12.8	Shell Solar

락전류밀도가 감소하게 되는데 이는 광흡수층 두께 감소로 인하여 빛의 흡수가 감소했기 때문이다. 즉 CIGS 화합물 반도체의 경우 광흡수계수가 높지만 1μm 이하의 두께일 경우 빛의 투과도가 감소한다는 것이고 이를 해결하기 위해서는 실리콘 박막 태양전지에서 적용하고 있는 후면 reflection 및 light trapping 기술 등을 활용해야 한다.

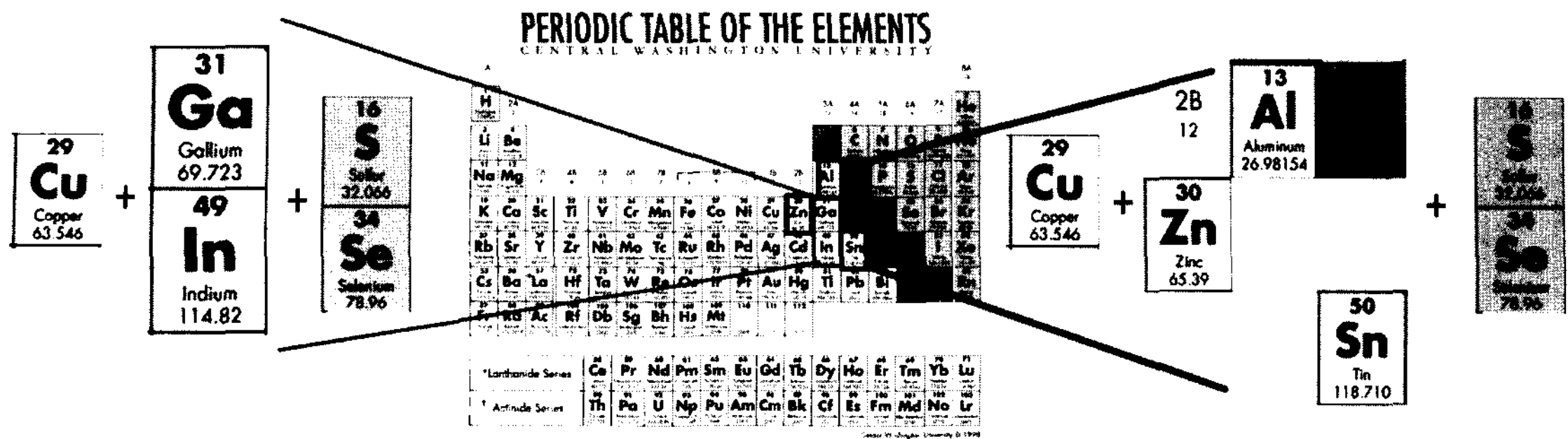
광흡수층의 두께를 줄이는 것과 함께 고가 희유 원소인 In, Ga을 Zn, Sn, Al등과 같은 범용원소로 치환하는 것도 저가화의 유력한 방안이다. [그림 6]과 같이 III 족인 In, Ga을 치환하기 위하여 II족과 IV 족 원소를 결합하는

형태로 현재로는 Zn, Sn으로 치환하는 기술에 대한 연구가 가장 활발하다. 특히 Nagoya National College of Technology (NNCT)에서 Electron-beam을 활용하여 전구체를 합성하고 Surfurization 공정을 거쳐 약 6% 내외의 변환 효율을 얻었다. 최근에는 태양전지의 효율을 높이기 위하여 MBE 시스템을 적용하는 연구를 진행하고 있다. 하지만 전체적으로 다양한 소재 개발이 진행되고 있지 못하며 변환효율도 매우 낮은 실정이다.

공정의 측면에서 나노입자를 이용하여 광흡수층을 프린팅 하는 기술이 연구되고 있다. 미국의 Nano solar, ISET등에서 관련 기술을 개



〈그림 6〉 범용원소 이용 CIGS 박막 태양전지의 개념



〈그림 7〉 나노 입자 프린팅 공정 개략도 [6]

발하고 있으며 CIS, CIGS 나노 입자 전구체와 CI, CIG-산화물 나노 입자 전구체등을 프린팅한 후 열처리하여 광흡수층을 성막 하는 방식이다. [그림 7]에 나타난 바와 같이 기존의 진공 공정을 적용하지 않기 때문에 초기 설비 투자비 및 공정비가 적어 초저가 태양전지의 구현이 가능하다. 미국의 Nano solar에서 최근 14% 이상의 소면적 태양전지 효율을 발표하였으며^[6] 생산 모듈 판매도 일부 발표되었으나 공개된 정보가 많지는 않은 상황이다.

2. CIGS 박막 태양전지 고효율화 기술

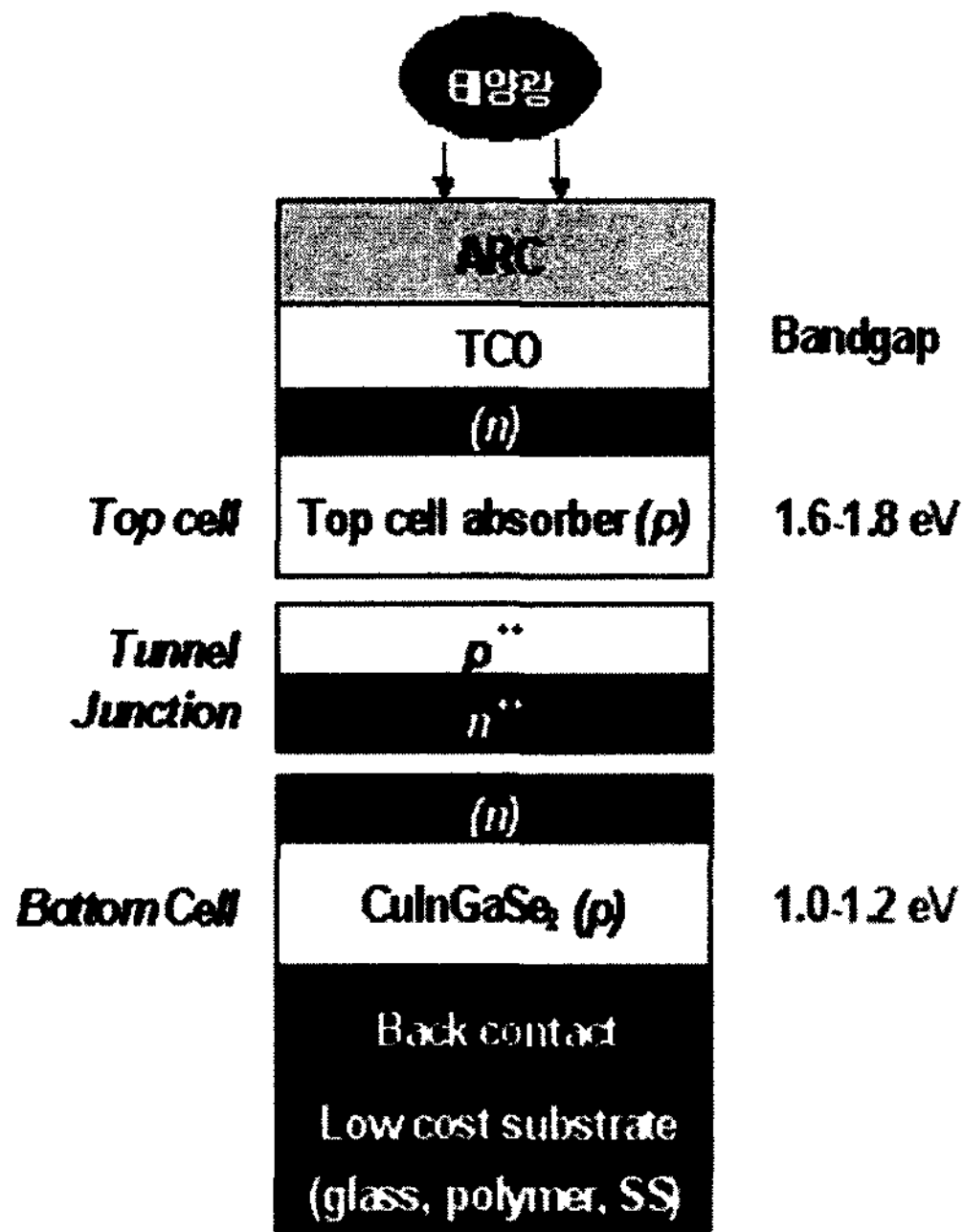
현재의 단일접합 태양전지에서는 밴드갭 보다 장파장의 복사에너지는 태양전지에 흡수되지 않고 통과하고, 밴드갭 보다 짧은 파장의 복사 에너지만 흡수되어 발전에 기여한다. 또한 흡수된 복사에너지 중 밴드갭 이상 여분의 에너지는 열로 바뀌어 소실된다. 따라서 태양전지의 변환효율을 극대화하기 위해서는 파장대별로 태양광 복사에너지를 흡수 변환할 수 있도록 밴드갭 크기에 따라 태양전지를 다층구조로 설계 제조해야한다. 이론적으로 다층구조 태양전지로부터 얻을 수 있는 변환효

율의 최고치는 집광을 하지 않은 평판형의 경우 67%이며 이중접합인 탠덤구조에서는 28%이다.

일반적으로 CIGS 계 탠덤구조 태양전지의 구조를 살펴보면 밴드갭이 작은 CIS 혹은 CIGS가 bottom cell의 광흡수층으로, 밴드갭이 큰 CuGaSe₂(CGS) 등이 top cell 로 사용된다. Bottom cell의 경우는 많은 기술이 확보되어 있기 때문에 탠덤구조 태양전지의 변환효율을 극대화하기 위해서는 top cell용 와이드 밴드갭 물질을 개발하는 것과 tunnel junction 을 개발하는 것이 중요하다.([그림 8] 참조)

탠덤구조를 위한 Interconnection에서는 아래 위의 두전지를 기계적으로 쌓아 각각의 출력을 따로 계산하는 4단자 탠덤 태양전지 방식과, tunnel junction을 이용하여 monolithic 하게 아래 위층을 순차적으로 형성하는 2단자 방식이 있다. 전자에서는 배면전극에 투명한 재질이 필요하고, 후자에서는 높은 투과도, 낮은 비저항, 우수한 격자정합 및 고농도 도핑 접합이 가능한 소재 및 소자를 개발하여야 한다.

최근에 미국의 NREL에서는 4단자형 CGS/CIS 탠덤구조를 이용하여 개방전압 1.32 V, 효율 10.7%, CdTe/CIS 구조를 이용하여 개



〈그림 8〉 2단자 탠덤구조 태양전지

만 대면적 모듈에 대한 연구는 시도된 바가 없다. 따라서 국내 기업에 의한 CIGS 태양전지의 상용화를 위해서는 확보된 16-20 cm²의 미니모듈 기술을 바탕으로 광흡수층 및 단위박막의 균일도 개선, 패터닝을 비롯한 모듈화 기술 등을 개발하고 축적된 기술을 통하여 1200cm² (30x40) 및 7200cm² (600X1200) 모듈의 개발이 진행되어야 한다. 또한 현재의 CIGS 박막 태양전지 기술을 능가하는 플렉서블 CIGS, 나노 입자 CIGS, 탠덤구조 CIGS 태양전지 원천 기술에 대한 연구가 추진되어야 한다.

방전압 1.144 V, 효율 15.31%을 얻었으며 그 밖의 독일과 일본 등지에서 탠덤구조 태양전지 실현을 위해 노력중이다.

IV. 결 론

박막 태양전지의 효율이 상용화 가능여부의 직접적인 판단기준으로 간주됨에 따라 효율이 상대적으로 높은 CIGS 박막 태양전지에 대한 관심이 매우 높다. 국외의 경우 이미 설명한 바와 같이 독일, 일본, 미국을 중심으로 하여 대량생산 체제에 진입하고 있는 상황이다. 하지만 국내의 경우는 한국에너지기술연구원을 중심으로 소면적 및 미니모듈에 대한 연구가 일부 진행되어 소면적 태양전지의 경우 선진국 대비 80% 이상의 기술 수준을 확보하였지

참고문헌

- [1] Ingrid Repins, Miguel A. Contreras, Brian Egaas, Clay DeHart, John Scharf, Craig L Perkins, Bobby To and Rommel Noufi, Prog. Photovolt: Res. Appl. (2008) DOI: 10.1002/pip.822.
- [2] The Future of Thin Film Solar, Vol. 1, No. 1, August 2007, Greentechmedia
- [3] K. Kushiya, "Key Near-term R&D Issues for Continuous Improvement in CIS-based Thin-film PV Modules, 17th PVSEC, Fukuoka, Japan, (2007).
- [4] M. Powalla, 'Highly efficiency CIS Modules: Status and R&D Challenges, Proc. of 4th Workshop on the Future Direction of Photovoltaic, Tokyo, Japan (2008).
- [5] "High Performance of Thin Film Photovoltaics using Low Cost Processing Technology", 17th PVSEC, Fukuoka, Japan, (2007).
- [6] M. Kaelin, D. Rudmann, A. N. Tiwari, Solar Energy, 77(2004) 749-756.
- [7] R. Noufi et.al.; 4th World Conf. on Photovoltaic Energy, Conversion, Hawaii, USA, (2006).

저자소개



윤재호

1997년 2월 한국과학기술원 재료공학과 학사
 1999년 2월 한국과학기술원 재료공학과 석사
 2004년 2월 한국과학기술원 신소재공학과 박사
 2003년 9월-현재 한국에너지기술연구원

주관심 분야 : 화합물 박막 태양전지

용어에설

원칩 멀티펑션

One Chip Multi-function [데이터통신]

하나의 통합 IC 칩으로 बैं킹, 카드, 결제, 멤버십, 교통 등의 다양한 기능을 수행하는 칩. 비동기식 3세대(G) 이동통신에서 사용하는 USIM에 대응하기 위해 동기식 3G 이동통신에서 개발한 IC 칩이다. 통합 IC칩은 휴대폰 배터리를 뺀 뒷면에 엄지손톱 크기의 칩을 장착하면 바로 사용할 수 있고, 가입자 인증기능을 제외하면 기능과 사용 측면에서 USIM과 동일하다.