Journal of Korean Powder Metallurgy Institute
Vol. 15, No. 3, 2008

PM 리뷰

# CIGS계 태양전지 기술 동향 및 전망

장연익 · 김경훈 · 최벽파 · 박종구
한국과학기술연구원 나노과학연구본부

# Current Status and Future of CIGS Solar Cells Technology

**Yeon-Ik Jang, Kyunghoon Kim, Pyuck-Pa Choi and Jong-Ku Park**
*Nano-Science Research Division, KIST, Seoul 136-719, Korea*

## 1. CIGS계 태양전지 개발의 배경

지구온난화의 진행으로 기후변화에 대한 우려가 점점 커지고 있다. 또한 전례 없는 석유가의 급등으로 인하여 화석연료를 에너지 기반으로 하는 현재의 산업구조가 크게 영향을 받고 있다. 그림 1은 향후(현재로부터 2075년까지) 전기에너지 생산수요 및 각 에너지원의 비중을 예측한 그래프이다[1]. 온실가스인 이산화탄소($CO_2$) 농도규제 목표치인 450 ppmv를 유지하면서 경제성장과 인구증가에 따른 전력 수요에 대응하는데 필요한 신재생 에너지(renewable energy)가 그림 1의 가장 윗부분에 해당하는 영역(solar (PV)) 이다. 신재생 에너지는 핵에너지(nuclear)와 함께 가장 큰 영역을 차지할 전망이다. 반면에 화석연료인 석탄(coal)이나 석유(oil)가 차지하는 비중은 2040년 이후 거의 사라질 전망이다.

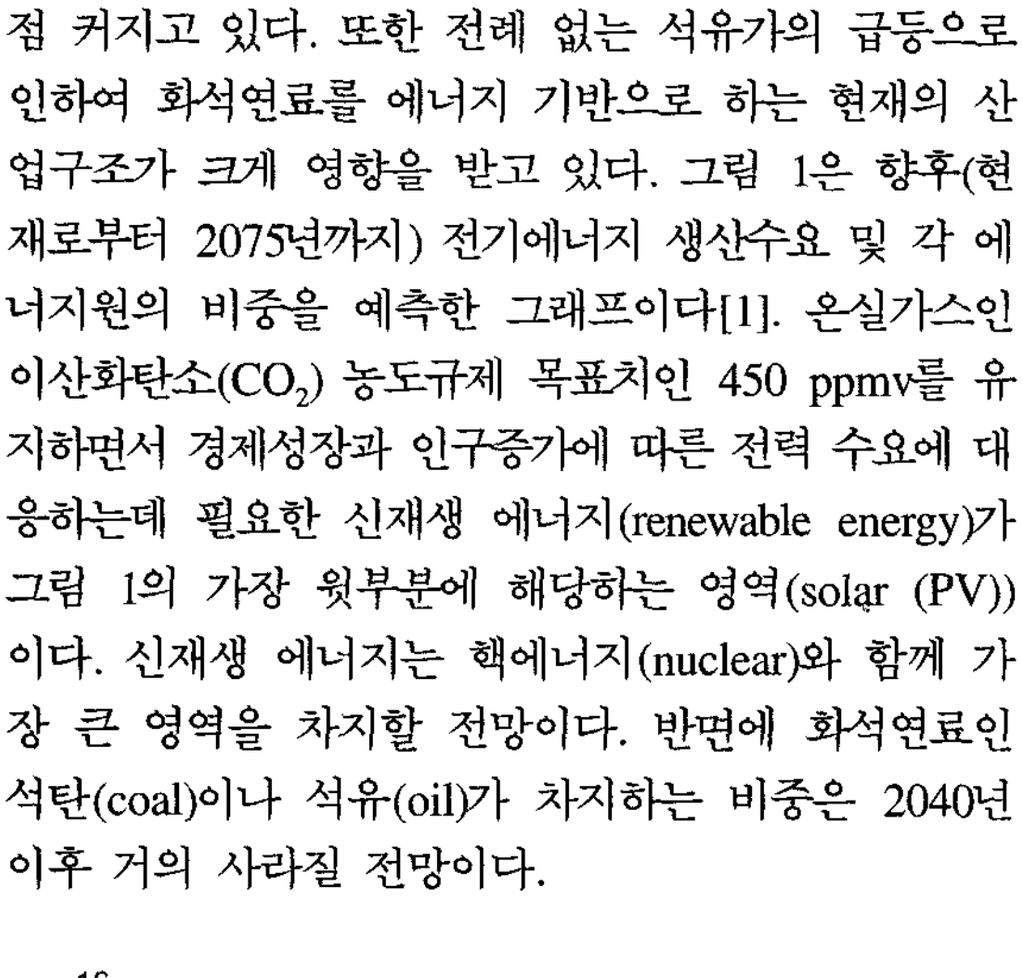



**그림 1. 전기에너지 수요 및 그 구성의 예측 곡선[1].**

본고에서는 2010년 이후 신재생 에너지 수요의 상당부분을 담당하게 될 태양전지 중 최근 주목받고 있는 CIGS계 태양전지 기술의 개발 현황 및 전망을 살펴보고자 한다.

청정에너지인 태양전지에 대한 관심이 고조되면서 1960년대 이후 느리게 증가되어 오던 태양전지 시장이 최근 들어 급격히 팽창하고 있다. 태양전지 개발 붐과 함께 그동안 주류를 이루어왔던 실리콘계 태양전지 외에도 높은 광전변환 효율을 지향하는 다양한 태양전지들이 개발되고 있다. 표 1은 지금까지 보고된 최고 효율의 태양전지 셀 및 모듈을 나타낸 것이다[2]. 단결정(crystalline), 다결정(multicrystalline) 실리콘 태양전지 외에도 HIT 셀, CdTe, CIGS($CuInGaSe_2$, II-VI compounds) 태양전지 등이 상당히 높은 광전변환 효율을 나타내고 있으며 대면적 모듈로서 산업적 가치를 보여주고 있다.

최근 태양전지 수요의 급팽창으로 태양전지의 주원료인 실리콘 가격이 최근 2년 동안 3배 가까이 폭등하고 있다. 향후 태양전지 설치는 지속적으로 증가하여 2010년에는 세계적으로 약 20GW에 도달할 것이라는 전망과 함께 한정된 실리콘 생산업체, 태양전지급 실리콘 소재가 필요로 하는 높은 기술력이 맞물려 실리콘의 공급 부족과 이에 따른 가격 급등은 당분간 지속될 것으로 보인다.

이러한 원료문제의 해결과 태양전지의 고효율화 요구에 대응하여 기판의 두께를 혁신적으로 줄이는 기술 또는 유리와 같이 값싼 기판 위에 박막형태의 태양전지(thin film solar cells)를 증착시키는 기술이 주목 받고 있다(박막 태양전지 기술). 박막형 태

**표 1. 최고 효율의 태양전지 셀 및 모듈 (재인용)[2]**

| 태양전지 형태 | 보고된 최고의 셀 효율 (작은 면적) | | | 보고된 최고의 모듈 효율 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 효율(%) | 면적($cm^2$) | 제작사 | 효율(%) | 면적($cm^2$) | 제작사 |
| 단결정 실리콘 | 24.7 | 4.0 | UNSW (PERL) | 22.7 | 778 | UNSW/Gochemann |
| 다결정 실리콘 | 20.3 | 1.0 | FhG-ISE | 15.3 | 1017 | Sandia/HEM |
| 비결정(나노결정) 실리콘 | 10.1 | 1.2 | Kaneka (단일접합) | 10.4 | 905 | USSC (삼중접합) |
| μc-Si/α-Si:H | 11.7 | 14.2 | Kaneka (미니모듈) | 11.7 | 14.2 | Kaneka (미니모듈) |
| HIT 셀 | 21.8 | 100.4 | Sanyo | 17.3 | 11000 | Sanyo |
| GaAs 셀 | 25.8 | 3.9 | Kopin | - | - | - |
| InP 셀 | 21.9 | 4.0 | Spire | - | - | - |
| $GaInP_2$/GaAs/Ge 다중접합셀 | 39.3 | 0.4 | Spectrolab (집광기) | - | - | - |
| CdTe | 16.5 | 1.0 | NREL | 10.7 | 4874 | BP Solarex |
| CIGS | 19.5 | 0.4 | NREL | 13.4 | 3459 | Showa Shell |

UNSW: University of New South Wales
PERL: passivated emitter real locally diffused
FhG-ISE: Fraunhofer Institure for Solar Energy Systems
USSC: United Solar Systems Corporation
HIT: Heterojunction with intrinsic thin layer
NREL: national Renewable Energy Laboratory
CIGS: copper indium gallium diselenide

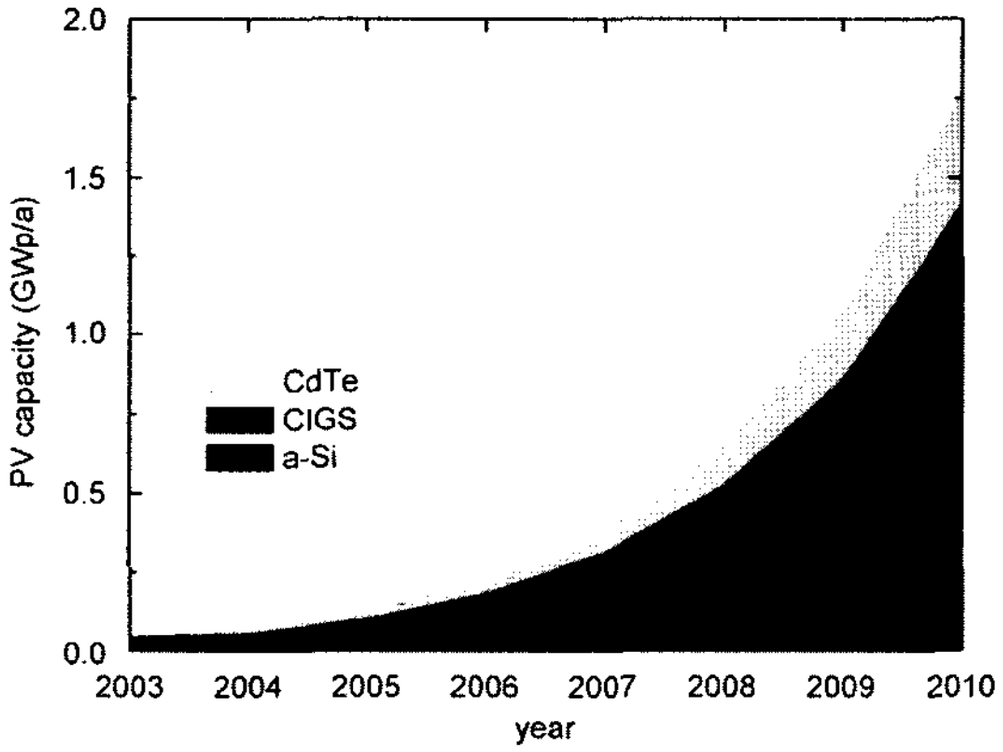



**그림 2. 2010년까지 박막형 태양전지의 발전 용량[3].**

양전지에는 실리콘 박막 태양전지 외에도 광전변환 효율이 높은 태양전지들이 있어 주목 받고 있다. 그림 2는 실리콘 박막 태양전지(a-Si)과 함께 화합물 태양전지인 CdTe, CIGS의 발전량을 나타낸 그래프이다(2003~2010)[3]. 2003년 이후 실리콘계 박막 태양전지와 함께 CdTe계 박막 태양전지의 발전량이 빠르게 성장하고 있으며 2006년 이후 CIGS계 박막 태양전지의 발전량 또한 빠르게 성장하고 있다.

그림 2에서 보는 바와 같이 전체 태양전지 시장에서 CIGS계 박막 태양전지의 비중이 점점 늘어나고 있으며 2006년 전체 태양전지 시장(판매기준)의 0.3%를 차지하고 있다(그림 3[4]). 그림 4는 태양전지 핵심소재별 시장규모를 나타낸 그래프이다[4]. CIGS계 소재는 전체시장의 약 7%를 차지하며 아직까지 유사형태의 태양전지인 CdTe계 태양전지의 비중(indoor+outdoor)인 11%보다는 적다. CIGS계 태양전지 소재는 실리콘 소재, CdTe 소재 다음으로 중요한 소재이며 향후 성장이 더욱 빨라질 것으로 예측하고 있다.

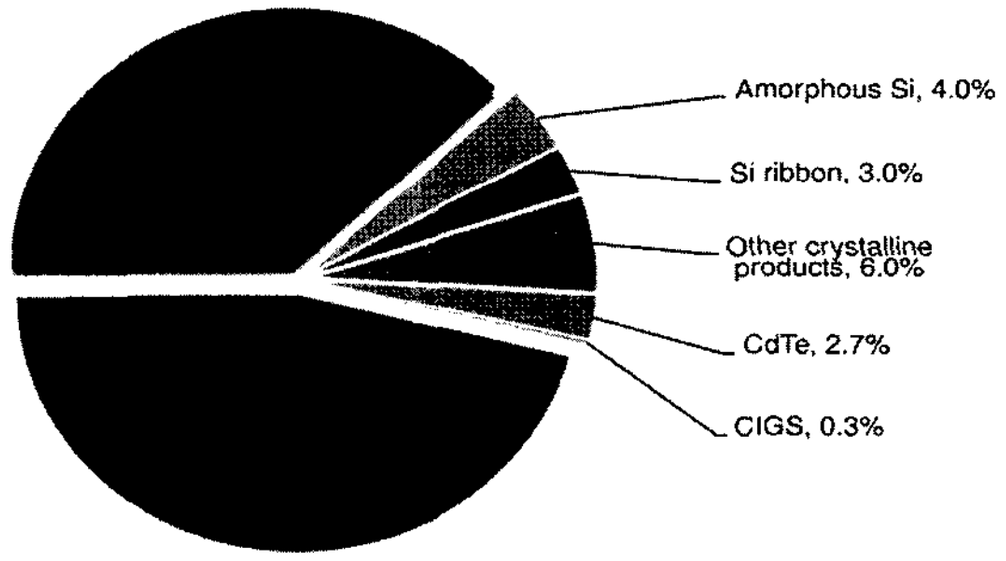



**그림 3. 2006년 태양전지 종류별 시장 점유율 (판매액 기준)[4].**

박막형 태양전지 중 CIGS 박막형 태양전지는 1~2 μm의 두께로 얇게 제작되므로 재료의 소모량이 적고,

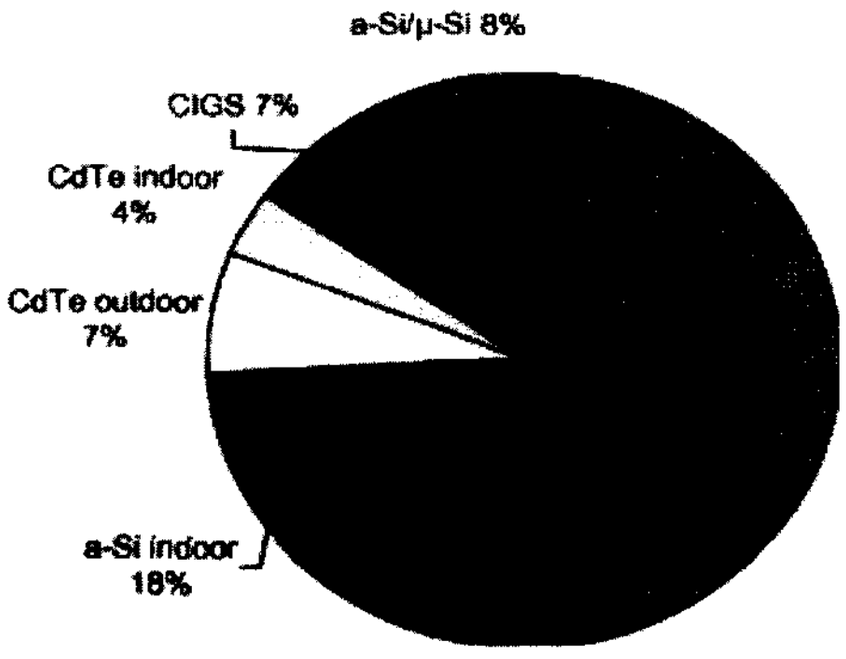



**그림 4. 소재별 태양전지 시장 점유율[4].**

가볍기 때문에 휴대가 가능하여 활용범위가 넓다. 또한, 아름답게 제작할 수 있어 건물일체형 태양광 발전 시스템(building integrated photovoltaic, BIPV) 등에 적용될 수 있다. 현재 CIGS 태양전지는 여러 가지 공정방법의 적용으로 가격을 낮추고 효율을 높이는 연구가 진행 중이다. 또한, 일부 기업에서는 이미 상업화에 도달했고 화합물 반도체 중 가장 상업화 가능성이 높게 평가되면서 많은 기업들이 기술개발에 참여하고 있다.

2006년말부터 2007년 사이 각 제조회사별 CIS계 혹은 CIGS계 태양전지 셀의 제조능력은 다음의 표 2와 같다. 일본계 회사인 Honda와 Showa Shell Sekiyu가 빠르게 생산능력을 늘리고 있다. 표 2에 나타나 있지 않지만 이 회사들 외에도 Nanosolar 등 여러 회사들이 본격적으로 CIGS계 태양전지 제조에 투자를 하고 있다.

**표 2. 각 제조회사별 CIS계 혹은 CIGS계 태양전지 제조능력 (2006~2007)[3]**

| 제조회사 | 생산능력 (MWp) | |
|---|---|---|
| | 2006 | 2007 |
| Daystar Technologies Inc. | 2.0 | 2.0 |
| Global Solar Energy | 1.7 | 2.0 |
| Honda | 2.8 | 28.0 |
| Miasole | 5.0 | 5.0 |
| Shell Solar | - | - |
| Showa Shell Sekiyu | - | 20.0 |
| Sulfurcell | 1.5 | |
| Wuerth Solar | 1.5 | 15.0 |
| Total CIS/CIGS | 14.5 | 72.0 |

*참고문헌 3이 제시한 표의 부분 인용.

## 2. CIGS계 박막 태양전지

### 2.1. CIGS계 박막 태양전지의 특징

$CuInSe_2$(CIS)로 대표되는 I-III-$VI_2$족 chalcopyrite계 화합물 반도체는 직접천이형 띠에너지 간격을 갖고 있다. CIS계 반도체 소재는 광흡수계수가 $1\times10^5$ $cm^{-1}$로 반도체 중에서 가장 큰 광흡수계수를 갖고 있어서 두께 1~2 μm의 박막으로도 고효율의 태양전지 제조가 가능하다[5]. 또한 CIS계 소재는 전기광학적으로 장기 안정성이 매우 뛰어나 박막 태양전지로서 큰 잠재력을 갖고 있다(CIGS계 태양전지는 우주방사선에 대한 안정성(저항성)이 매우 뛰어나고 광전변환 효율이 높아 태양계 밖의 우주를 탐사하는 우주탐사선의 태양전지로 개발되어 활용되어 왔다.).

$CuInSe_2$계 화합물은 띠에너지 간격이 1.04 eV로 태양전지 소재로서의 이상적인 띠에너지 간격인 1.4 eV를 맞추기 위하여 In의 일부를 Ga으로, Se의 일부를 S로 치환하기도 한다. In의 일부를 Ga으로, Se의 일부를 S로 대체한 5원 화합물은 CIGS[$Cu(In_xGa_{1-x})Se_2$] 혹은 CIGSS[$Cu(In_xGa_{1-x})(Se_yS_{1-y})_2$]로 표기되며, 대표적으로 이들을 'CIS계' 또는 'CIGS계' 태양전지라 표기한다(여기서는 'CIGS계 태양전지'로 통칭한다). CIGS계 태양전지의 효율은 비정질 실리콘, CdTe 등 일부 실용화되어 있는 박막 태양전지에 비하여 높을 뿐만 아니라 기존의 다결정 실리콘 태양전지에 근접하는 광전변환 효율이 보고되고 있다.

또한, CIGS계 태양전지는 구성하는 소재가격이 다른 종류의 태양전지 소재에 비해 저렴하고 유연하게 제작할 수 있을 뿐만 아니라 오랜 시간 동안 현장실험(NREL, 20년간)에서 성능이 약화되지 않는 우수한 특성을 보였다.

### 2.2. CIGS계 태양전지의 구조 및 제조공정

다층구조로 구성되는 CIGS계 태양전지는 현재 주로 박막공정에 의해 제조된다. 그림 5는 CIGS계 태양전지의 기본구조와 대표적인 공정방법을 나타내고 있다. 일반적으로 유리를 기판으로 사용하고 5개의 단위박막(배면전극, 광흡수층, 버퍼층, 앞면 투명전극, 반사방지막)을 순차적으로 형성(적층)시켜 제작한다. 구성박막별로 각기 다른 소재와 조성, 제조방법으로 제조되고 있다. 태양전지의 면적이 커지면 면저항의 증가로 인하여 효율이 감소하게 되므로 대면적 모듈

| Process | Materials |
|---|---|
| E-beam evaporation | 3㎛, Al / 50nm, Ni |
| E-beam evaporation | 100nm, $MgF_2$ |
| RF sputtering | 500nm, n-ZnO / 50nm, i-ZnO |
| CBD | 50nm, CdS, In(OH,S) |
| Co-evaporation, Sputtering | 1~3㎛, $Cu(In,Ga)Se_2$ |
| DC sputtering | 1㎛, Mo |
| Cleaning | Glass |

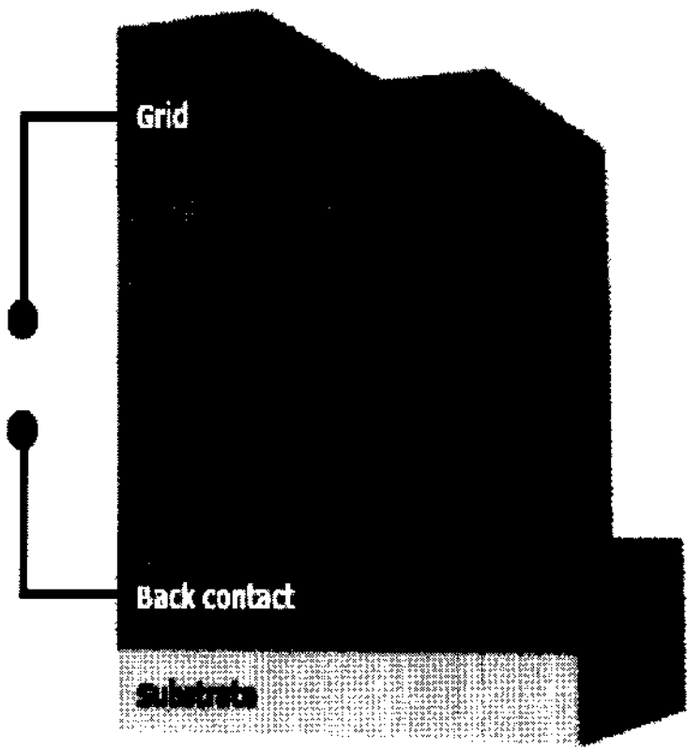



**그림 5. CIGS계 태양전지의 기본구조와 공정.**

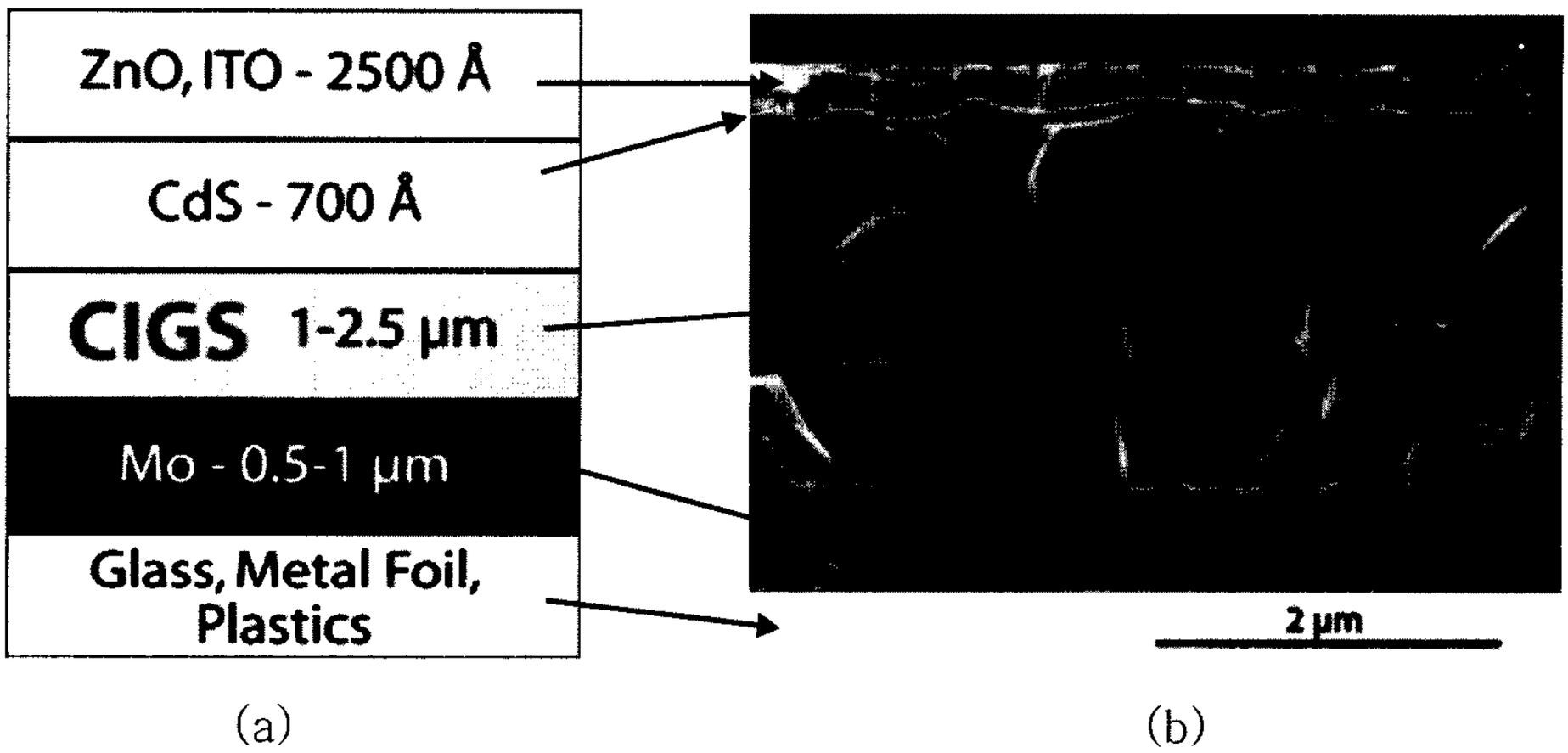



**그림 6. CIGS계 태양전지의 단면구성(a) 및 미세조직(b).**

의 경우는 일정한 간격으로 직렬연결이 되도록 패터닝한다. 그림 6은 그림 5의 내용을 실제적으로 나타낸 CIGS계 태양전지의 단면조직 사진이다.

2.2.1. 기판

일반적으로 CIGS계 태양전지 제작을 위한 기판재료로는 값싼 소다회 유리(sodalime glass)가 주로 사용되고 있다. 알루미나와 같은 세라믹 기판, 스테인레스 강판, 구리(Cu) 테이프 같은 금속 기판, 고분자(polymer) 필름 등도 사용이 가능하다. 미국 NREL이 기록한 19.5%의 광전변환 효율은 소다회 유리를 기판으로 사용하여 얻은 결과이다. CIGS계 태양전지의 효율향상에 관한 연구를 통하여 소다회 유리로부터 광흡수층인 CIGS 층으로 확산해 들어간 나트륨(Na) 이온이 CIGS계 태양전지의 광전압 특성을 향상시킨다는 사실이 알려지게 되었고, CIGS계 태양전지 제작에서 소다회 유리가 가장 널리 사용되고 있다[6].

2.2.2. 배면전극

배면전극으로는 금속 몰리브데늄(Mo) 막이 가장 일반적으로 사용되고 있다. Mo이 가장 널리 사용되고 있는 이유는 Mo의 높은 전기전도도, CIGS 박막과의 오믹 접합(ohmic contact) 형성 특성, 셀레늄(Se) 분위기 하에서의 고온 안정성 때문이다. Mo 박막은 주로 직류 스퍼터링(DC sputtering)으로 제작되고 있다. Mo 박막은 전극으로서 비저항이 낮아야 하고 열팽창계수의 차이로 인하여 박리현상이 일어나지 않도록 유리 기판에의 점착성이 뛰어나야 한다.

2.2.3. 버퍼(buffer) 층

CIGS계 태양전지의 구조에서 p형 반도체인 CIGS 박막과 n형 반도체인 ZnO 박막(window 층)이 p-n 접합을 형성한다. 이 두 물질은 격자상수와 띠에너지 간격이 서로 다르기 때문에 양호한 접합을 위해 두 물질 사이에 버퍼층을 배치하는 것이 필요하다. 버퍼 소재로는 약 2.46 eV의 띠에너지 간격을 갖는 CdS가 주로 사용되고 있다. CdS 박막은 화학조증착법(CBD, chemical bath deposition)을 사용하여 약 500Å 정도 두께로 형성된다. CBD 법은 표면 거칠기와 관계 없이 고른 두께로 박막이 생성되는 것과 80°C 이하의 낮은 온도에서 막 형성이 가능한 장점이 있다. 하지만 전체 태양전지 공정을 일관된 진공 공정으로 할 수 없고, 카드뮴이 포함된 폐용액에 의한 환경오염 문제 등의 단점이 있다. 그 대안으로 $In_xSe_y$, $Zn(O, S, OH)_x$, $In(OH)_xS_y$, $ZnIn_xSe_y$, ZnSe 등이 대체재료로 연구되고 있지만 현재는 CdS에 비해 광전변환 효율이 낮다[7].

2.2.4. 광흡수층 (CIGS 층)

삼원화합물인 $CuInSe_2$ 소재는 띠에너지 간격이 1.04 eV로 단락전류는 높으나, 개방전압이 낮아 높은 효율을 얻을 수 없었다. 현재는 개방전압을 높이기 위해 In의 일부를 Ga으로, Se를 S로 대치하는 방법을 사용하고 있다. CIGS계 화합물 반도체의 띠에너지 간격은 Ga 첨가량에 따라 조절이 가능하다. 하지만 광흡수층의 띠에너지 간격이 클 경우 개방전압은 증가하지만, 오히려 단락전류가 감소하므로 Ga의 적정한 함량조절이 필요하다.

광흡수층을 형성시키는 과정으로는 다음의 세 가지를 생각할 수 있다.

(1) Cu + In +Ga → Cu:In:Ga 화합물
Cu:In:Ga 화합물 + $H_2Se$ (혹은 Se)
→ $Cu(In,Ga)Se_2$ (셀레늄화)

(2) $Cu_2Se + (In,Ga)_2Se_3 \rightarrow Cu(In,Ga)Se_2$

(3) Cu + In +Ga + Se → $Cu(In,Ga)Se_2$

첫 번째 과정은 Cu, In, Ga 성분을 동시에 증발시켜 증착시킴(동시증발법(co-evaporation))으로써 Cu:In:Ga 화합물의 층(막)을 미리 만든 다음 셀레늄 혹은 셀레늄 화합물(예: $H_2Se$)의 증기를 불어넣어 셀레늄이 Cu:In:Ga 화합물과 반응하여 $Cu(In, Ga)Se_2$이 되게 하는 방법(selenization)이다. 공정이 복잡하고 광흡수층 내 셀레늄의 분포가 일정하지 않은 문제점이 있을 수 있다. 두 번째 방법은 안정도가 높은 화합물 성분의 요소분말을 먼저 만든 다음 혼합하여 막을 구성하고 열처리하는 동안 CIGS 광흡수층이 형성되게 하는 방법이다. 분말공정을 선택하기에 적합한 방법이다. 세 번째 방법은 각 원소들의 혼합으로부터 CIGS 화합물을 직접 제조하는 방법이다. 이 방법은 각 성분을 포함하는 네 가지 전구체를 이용하는 화학증착법(CVD)을 이용하여 직접 광흡수층을 얻는 방법이다. 다른 공정으로 두 번째 및 세 번째 방법으로 먼저 $Cu(In,Ga)Se_2$ 화합물(주로 분말형태)을 만든 다음 성형 및 소결을 거쳐 타겟 소재로 벌크화하고 스퍼터링법(sputtering)으로 광흡수층을 제조하는 방법이 있다.

현재까지 개발되고 있는 동시증발법, 스퍼터링법, 전착법(electro-deposition), 유기금속 화학기상증착법(MOCVD) 등 다양한 방법들 중에서 상용화가 추진중인 제작방법은 동시증발법과 스퍼터링법이다. 동시증발법은 진공 챔버 내에 설치된 작은 전기로의 내부에 각 원소(Cu, In, Ga, Se)를 넣고, 이를 저항가열하여 기판에 진공증착시켜 CIGS 박막을 제작하는 기술이다. 대면적화가 어렵고, 진공장치 내부의 오염이 심각하며, 양질의 박막 제작이 용이치 않은 단점이 있지만, 미국 NREL에서 이 방법으로 19.5%의 높은 효율의 CIGS 태양전지를 제작한 바 있다[8]. 그림 7은 NREL이 사용한 동시증발장치의 개략도이다.

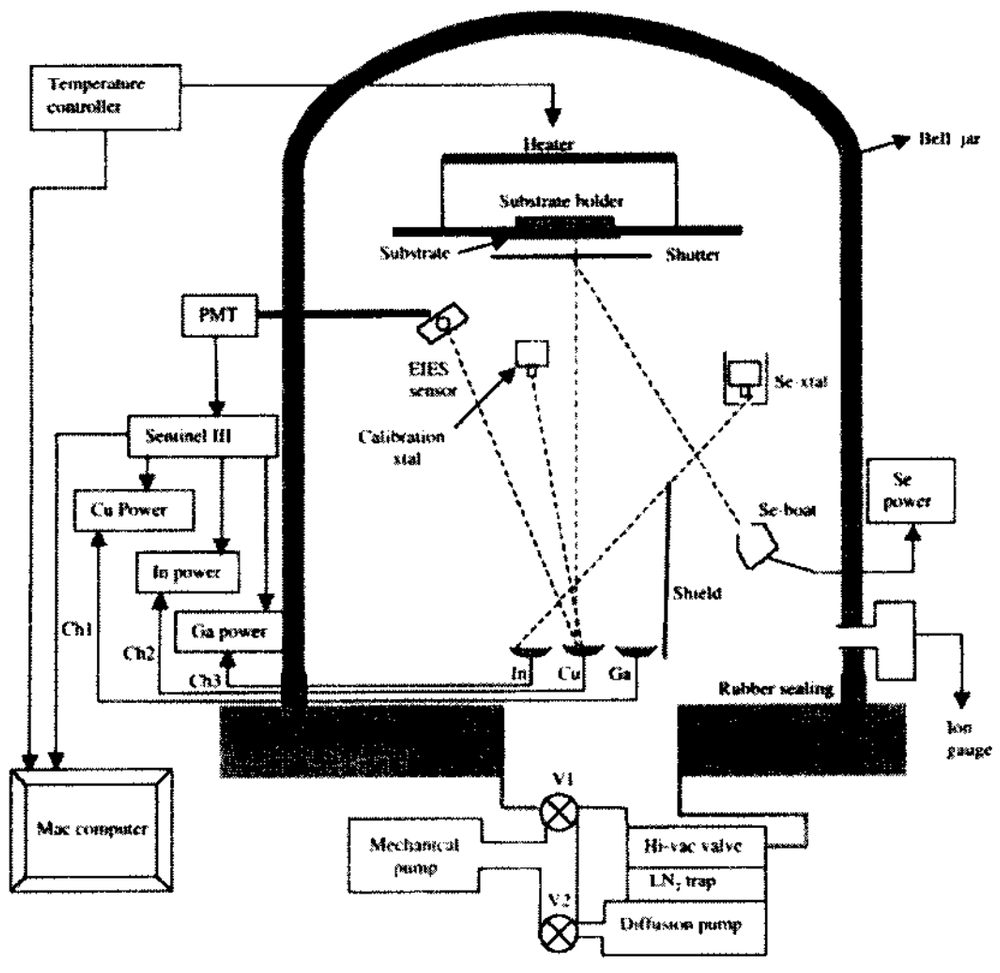



**그림 7. 동시증발법에 의한 CIGS계 박막 태양전지의 제조장치(미국 NREL).**

스퍼터링법은 비교적 장치가 간단하고 손쉽게 금속 또는 절연체를 증착할 수 있어 연구용뿐만 아니라 생산용으로 폭넓게 활용되고 있는 방법이다. 특히, 아르곤(Ar)과 함께 다른 혼합가스를 사용함으로써 반응을 수반한 화합물 증착이 가능하여 산화물 박막의 제작이 가능하다. 스퍼터링법은 넓은 면적의 박막을 제작할 수 있기 때문에 CIGS계 태양전지 상용화에 적합한 기술로 평가받고 있다. 스퍼터링법에 의한 CIGS계 태양전지 제조에서는 정밀한 성분제어가 가능한 타겟 제조 기술과 균일한 대면적 성막 기술이 핵심기술에 해당한다.

한편, CIGS계 태양전지의 생산단가를 더욱 낮추기 위한 제작방법으로 나노입자를 이용한 연구도 진행 중이다[5-12]. CIS계 및 CIGS계 광흡수층을 제조하기 위해서는 해당 원소들을 포함하는 나노입자 전구체를 기계적, 화학적 방법 등으로 합성한 후 CIGS계 나노입자를 분산시킨 슬러리를 스크린 프린팅법, 닥터블레이드법, 스프레이 법 등으로 코팅하여 박막을 만든다. 일반적으로 입자가 나노크기로 작아지면 띠에너지 간격이 증가하는 것으로 알려져 있는데 이러한 원리를 이용하면 입자 크기의 조절을 통해 다양한 띠에너지 간격을 갖는 탠덤형으로 제조도 가능할 수 있다. 미국의 ISET에서는 나노입자 전구체 및 프린팅법을 이용하여 작은 면적에서 11.7%의 효율을 얻은 바 있다.

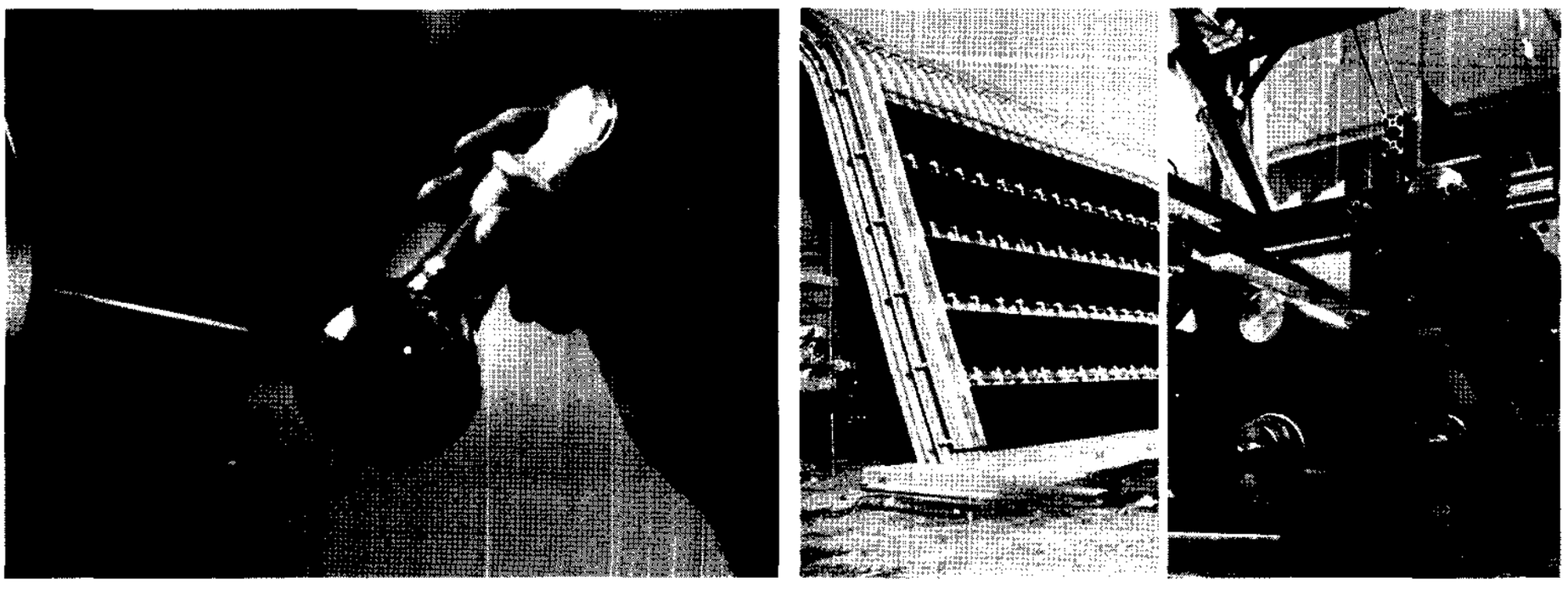
2.2.5. Window 층

광흡수층과 p-n 접합을 형성하는 window 층은 태양전지 전면의 투명전극으로서의 기능을 하기 때문에 광투과율이 높고 전기전도성이 좋아야 한다. CIGS계 태양전지의 window 층으로 사용되고 있는 ZnO는 띠에너지 간격이 약 3.3 eV이고, 80% 이상의 높은 광투과도를 가진다. ZnO 박막증착에는 MOCVD와 스퍼터링법이 사용되지만 CIGS계 태양전지에서는 주로 스퍼터링법이 사용되고 있다. 현재는 ITO(indium tin oxide) 박막을 ZnO 박막 위에 증착한 2중 구조나 CdS 박막 위에 i형의 ZnO와 낮은 저항을 가진 n형의 ZnO 박막을 증착하여 효율을 개선하는 방법 등이 이용되고 있다.

## 3. 국내외 기술개발 현황 및 전망

### 3.1. CIGS계 태양전지 기술개발의 현황

태양광 기술 분야를 선도하고 있는 일본, 미국, 유럽 등에서는 결정질실리콘 태양전지뿐만 아니라 박막형, 유기, 염료감응 태양전지 등 차세대 태양전지 연구개발과 상업화를 국가적인 차원에서 추진하고 있다. 특히 박막 태양전지는 결정질실리콘을 대체하여 미래의 태양전지 산업분야를 주도할 것으로 예상되기 때문에 기술개발에 매우 적극적이다. CIS계 박막 태양전지는 미국의 Boeing이 1980년대에 이미 효율 10% 이상을 달성하였고, 2004년 미국의 NREL은 효율 19.5%의 CIGS계 태양전지를 개발했다. 또한, 미국의 Siemens Solar Industries에서는 40W 크기의 모듈 시제품을 선보이기도 했다. 그림 8은 분말공정을 도입하여 CIGS계 박막 태양전지의 상용화를 추진하고 있는 Nanosolar 사의 분말슬러리(왼쪽 사진의 유리병 속의 물질) 및 이를 이용한 코팅(같은 왼쪽



(a) (b) (c)

**그림 8. 분말공정에 의한 CIGS계 태양전지의 제조 (Nanosolar 사)[13].**

사진의 왼쪽), 제작한 CIGS계 태양전지 패널(중간 사진), 고분자 필름표면의 연속코팅 장치(오른쪽 사진)를 보여준다[13].

한편 독일의 Wurth Solar는 최고 효율 13%의 모듈 시제품을 생산하고, 일본의 Matsushita 전기는 동시진공증착에 의한 박막 태양전지 모듈 개발을 주도하고 있다. 2007년에 일본의 Showa Shell과 Honda가 각각 CIGS계 박막 태양전지의 양산을 시작하면서, 국내 기업들의 사업화 관심도 더욱 높아지고 있다.

국내의 경우 CIS계 태양전지 기술의 사업화에 대한 관심은 많지만 구체적인 사업화 계획은 아직까지 발표되지 않고 있다. 연구개발로는 한국에너지기술연구원(KIER)과 한국과학기술원(KAIST), 서울대학교가 공동연구를 통하여 작은 면적에서 효율 15% 이상을 기록한 바 있다. 그 외에도 한국에너지기술연구원(KIER), 한국과학기술연구원(KIST) 등 정부출연연구소와 대학을 중심으로 동시진공증착법, 나노입자를 이용한 프린팅법 등 다양한 방법으로 연구가 진행 중이다. 2007년에는 LG마이크론이 한국에너지기술연구원과 기술이전을 계약함으로써 미니모듈 수준의 연구개발을 통해 장기적으로 대면적 모듈 상용화를 목표하고 있다.

### 3.2. CIGS계 태양전지 기술의 전망

매년 30% 이상의 초고속 성장을 하고 있는 태양전지 시장에서 CIGS계 태양전지 역시 빠르게 성장하고 있고 시장에서의 비중 역시 확대될 것으로 예측되고 있다(그림 2 참조), 이러한 낙관적인 전망을 가능하게 하는 이유는 태양전지 소재로서의 CIGS계

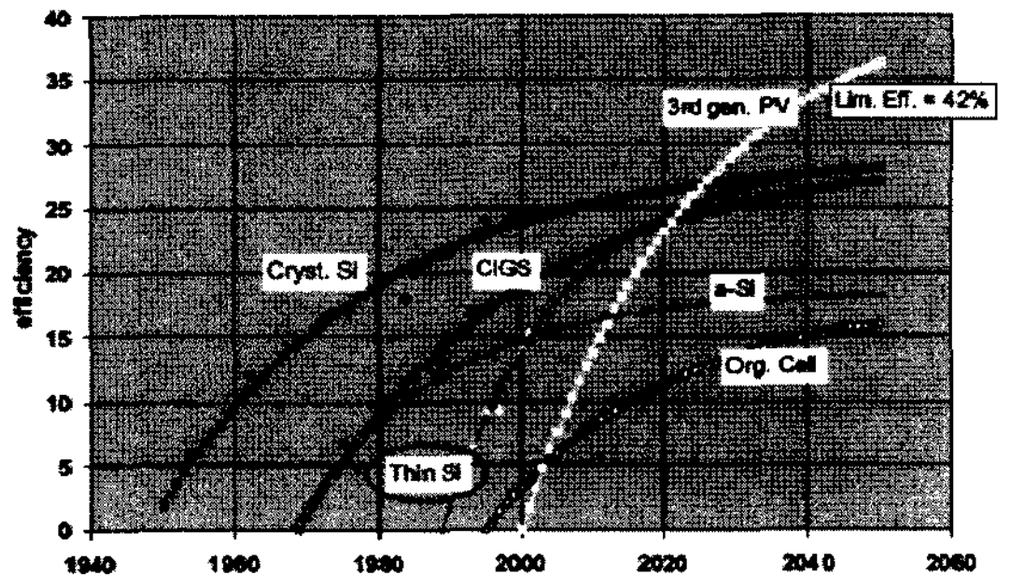



**그림 9. 소재별 태양전지 변환효율 전망 (재인용)[4].**

소재의 가능성을 보여주는 그림 9에서 찾아볼 수 있다[4]. CIGS계 소재는 적어도 2020년까지 결정질 실리콘 소재 다음으로 중요한 자리를 유지할 것이다. 그 이후에는 박막형 실리콘 태양전지와 3세대 태양전지와 경쟁하게 될 전망이다(박막형 실리콘 태양전지와 3세대 태양전지는 소재보다는 공정기술이 핵심이라고 할 수 있다).

향후 각국의 시장 점유에 영향을 줄 특허분포를 보면 일본이 반 이상(50.7%)을 점유하고 있고 미국(30.3%), 유럽(9.5%)이 그 뒤를 잇고 있다(그림 10). 우리나라는 3.4%를 점유하고 있다. 일본, 미국이 시장을 주도할 것으로 예측된다.

특허 내용을 구체적으로 살펴보면 전체 특허 중 광흡수층이 52.9%, 화합물 박막 태양전지(시스템)가 12.8%, 기판(8.6%) 등의 순으로 나타나고 있다(그림 10)[4]. 광흡수층 관련 내용으로는 조성 18.9%, 나노분말 16.6%, 진공증착 14.3%, 전착 12.7%, 스퍼터

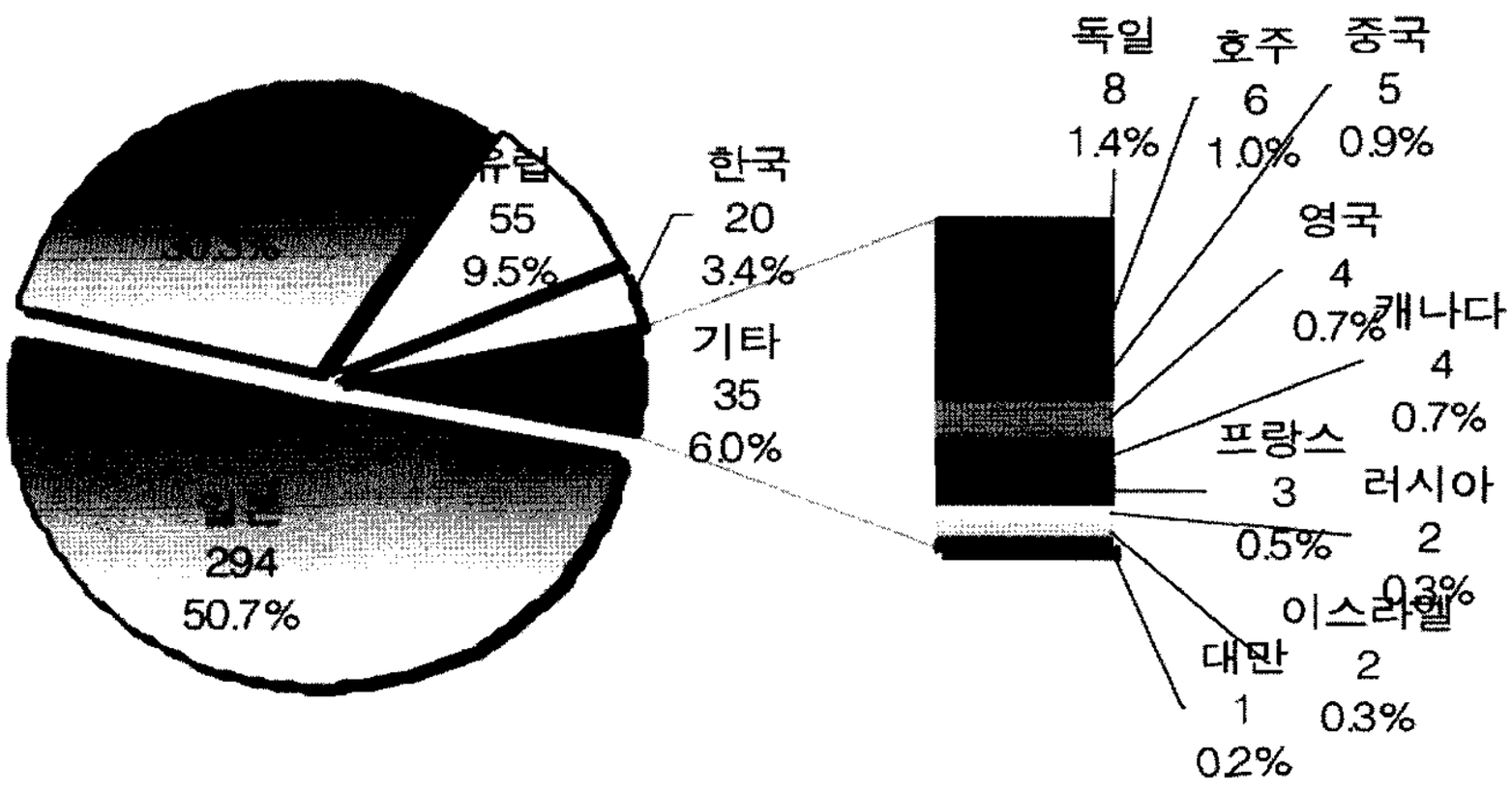



**그림 10. CIGS계 태양전지 기술의 국가별 점유율 (1974.7.29.-2007.4.17.; 출원기준)[4].**

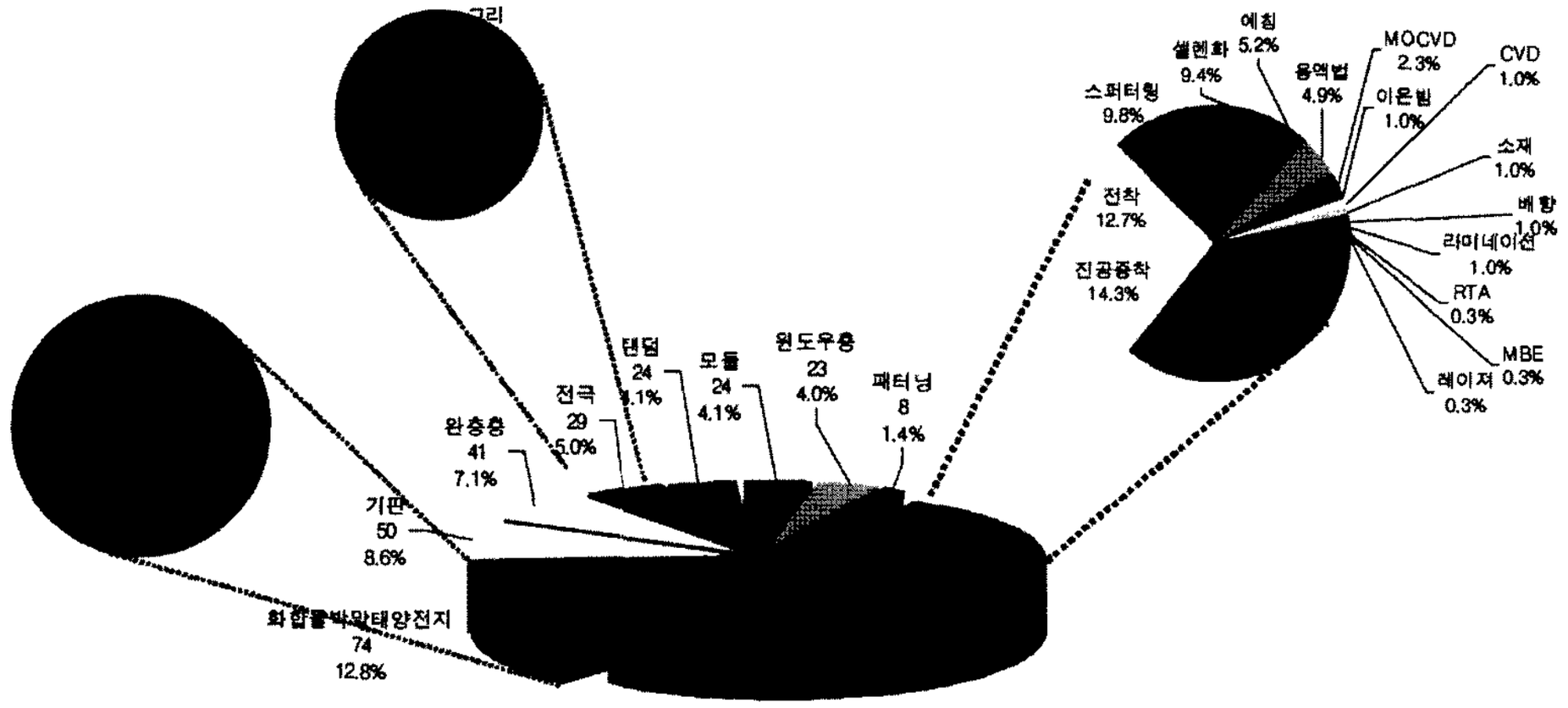



**그림 11. 세부기술별 특허비율 (전체)[4].**

**표 3. 주요 출원인의 세부기술별 특허출원 현황[4]**

| 주요 출원인 | 광흡수층 | 화합물박막 태양전지 | 완충층 | 기판 | 전극 | 윈도우층 | 패터닝 | 모듈 | 탠덤 | 합계 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Matsushita Electric | 63 | 24 | 8 | 7 | 6 | 6 | 3 | 3 | - | 120 |
| Yazaki | 36 | 4 | 2 | 2 | 4 | 1 | 1 | - | - | 50 |
| Fuji Electric | 19 | 1 | - | 2 | 1 | 3 | 1 | 1 | 2 | 30 |
| Honda | 14 | 1 | 2 | 8 | 2 | - | - | 1 | 1 | 29 |
| Showa Shell | 10 | 2 | 1 | - | 1 | 5 | 2 | 2 | - | 23 |
| Siemens Solar | 5 | 8 | 1 | - | 2 | 1 | - | 1 | - | 18 |
| Atlantic Richfield | 5 | 2 | 1 | 2 | - | 1 | - | - | 2 | 13 |
| Midwest Research Institute | 6 | - | 1 | 1 | - | 1 | - | - | 2 | 11 |
| Nanosolar | 4 | 1 | - | 2 | - | - | - | - | - | 7 |
| AIST | 4 | - | - | - | - | - | - | - | - | 4 |
| Forschungzentrum | 1 | - | - | - | - | - | - | - | - | 1 |
| Photon Energy | 1 | - | - | - | - | - | - | - | - | 1 |
| 합 계 | 168 | 43 | 16 | 24 | 16 | 18 | 7 | 8 | 7 | 307 |

링 9.8% 등의 순으로 나타나고 있다. 그림 11으로부터 끌어낼 수 있는 전망은 광흡수층 소재(조성) 기술이 가장 중요하게 될 것이며 공정기술로는 나노분말을 이용하는 기술이 될 것이라는 점이다. 현재 주류를 이루고 있는 스퍼터링법이나 진공증착법이 값싸고 소재이용율이 높은 분말공정으로 대체될 가능성이 상당히 크다.

그림 11의 세부기술별 주요 출원인의 특허출원 내용분포를 보면 표 3과 같다. 가장 많은 수의 특허를 출원한 주체는 Matsushita 전기를 비롯한 일본회사들이다(83% 이상 점유). 각 주체들은 주로 광흡수층 분야에 특허를 출원하고 있다(55% 이상을 점유하며 조성 및 공정을 포함하고 있음). Siemens Solar 사는 광흡수층보다도 태양전지 제작 부분에 더 많은 특허를 출원하고 있다.

다음의 표 4는 미국 NREL이 작년 6월에 발표한 CIGS계 태양전지 기술 개발의 로드맵을 요약한 표이다. 상업화된 모듈 기준으로 효율이 현재의 5~11% 범위에서 2015년 10~15% 수준이 될 것이다(최고 효율 기준으로는 현재 19.5%에서 21~23% 수준이 될 것임). 모듈 가격 및 설치 비용이 2015년 현재의 1/2 내지 1/4 수준으로 낮아질 전망이다. 그 외에도 안정성의 현저한 개선, 유연성이 큰 태양전지의 제작 등이 가능해질 것으로 전망하고 있다[14].

**표 4. CIGS계 태양전지 기술의 발전 전망[14]**

| 파라메터 | 현재 (2007) | 향후 목표 (2015) |
|---|---|---|
| 상업 모듈 효율 (%) | 5~11 | 10~15 |
| 최고 소자 효율 (%) | 19.5 | 21~23 |
| 모듈 비용 ($/Wp) | 자료 없음, <$2/Wp | ~$1/Wp |
| 설치 비용 ($/watt) | $5~12/Wp (다른 평판기술과 유사) | $3/Wp |
| 신뢰성 목표 (감소비율, %) | 0~6%/년 (파일럿 규모) | <1% (상업 제품) |
| 전체 수율 | 평가 불가능 | >95% |
| 새로운 제조공정 (도입될) | Roll-to-roll 공정 (Global Solar, 파일럿 규모) | 새로운 패키징 기술, 가속수명시험법 |
| 증착속도 및 셀 두께 | 5 μm/h, CIGS 광흡수층 두께 1.25~3 μm | 30~40 μm/h, CIGS 광흡수층 두께 <1 μm |

## 4. 맺음말

CIGS계 태양전지는 다른 종류의 태양전지와 비교하여 박막화에 적합한 특성, 높은 광전변환 효율, 낮은 소재 비용, 유연성, 높은 안정성 등의 장점을 갖고 있다. CIGS계 태양전지는 현재 시장 진입단계에 있는 기술이지만 향후 태양전지 시장의 상당한 부분을 차지할 전망이다. 선진국의 몇몇 기업들이 특허권을 갖고 있는 부분이 많지만 새로운 기술개발의 가능성이 매우 크기 때문에 특허권을 확보할 가능성이 적지 않다. 특히 소재제조 공정으로부터 셀 제작 공정에 이르기까지 고난도의 기술을 필요로 하는 실리콘 태양전지와 달리 CIGS계 태양전지는 이미 개발된 값싼 공정들을 활용할 수 있어서 큰 설비투자나(CIGS 조성이나 핵심공정 등 몇 가지 기술을 제외하면) 특별한 기술 없이도 상용화가 가능한 이점이 있다.

현재 주종을 이루고 있는 스퍼터링법이나 동시증발법 외에도 분말공정을 이용하는 CIGS계 태양전지 제조법이 주목을 받고 있어서 분말공정에 강점이 있는 우리나라가 관심을 가져볼 필요가 있다. 분말을 이용하는 기술 개발에 종사하고 있는 연구자나 개발자들이 우수한 성능과 낮은 가격을 갖는 CIGS계 태양전지를 개발하여 국가 경제의 현안인 에너지 문제 해결에 큰 기여를 할 수 있게 되기를 기대한다.

## 참고문헌


[1] A. Feltrin and A. Freundlich: Material considerations for terawatt level deployment of photovoltaics, Renewable Energy, **33** (2008) 180.

[2] R. W. Miles, G. Zoppi and I. Forbes: Inorganic solar cells, Materials Today, **10** (2007) 20.

[3] W. G. J. H. M. van Sark, G. W. Brandsen, M. Fleuster and M. P. Hekkert: Analysis of the silicon market: Will thin films profit?, Energy Policy, **35** (2007) 3121.

[4] $CuInSe_2$계 및 Polymer 태양전지, 2007년 대학중점연구분야 특허맵, 특허청.

[5] J. R. Tuttle, M. A. Contreras, K. Ramanathan, S. E. Asher, R. N. Bhattacharya, T. A. Berens, J. Keane and R. Nuofi: "The Performance of $Cu(InGa)Se_2$ Based Solar Cells in Conventional and Concentration Applications", Proc. Spring MRS Meeting (1996) 134.

[6] J. E. Granata and J. R. Sites: Prog. of the second World Conf. on Photovoltaic Energy, Conversion, IEEE, New York, 1998.

[7] T. Nakada and M. Mizutani: Jpn. J. Appl. Phys. **41**, Part2, No. 2b (2002) 165.

[8] K. Ramanathan, M. A. Contreras, C. L. Perkins, S. Asher, F. S. Hasoon, J. Keane, D. Young, M. Romero: W. Metzger, R. Noufi, J. Ward and A. Duda: Progress in Photovoltaic, **11** (2003) 225.

[9] V. K. Kapur, A. Bansal, P. Le and O. I. Asensio: Thin Solid Films, **53** (2003) 431.

[10] C. Eberspacher, C. Fredic, K. Pauls and J. Serra: Thin Solid Films, **387** (2001) 18 .

[11] M. Kaelin, D. Rudmann, F. Kurdesau, H. Zogg, T. Meyer and A. N. Tiwari: Thin Solid Films, **486** (2005) 480.

[12] S. Tauniera, J. Sicx-Kurdia, P. P. Granda, A. Chomonta, O. Ramdania, L. Parissia, P. Panheleuxa, N. Naghavia, C. Huberta, M. Ben-Faraha, J. P. Fauvarquea, J. Connollya, O. Roussela, P. Mogensenb, E. Maheb, J. F. Guil-lemolesa, D. Lincota and O. Kerrec: Thin Solid Films, **526** (2005) 480.

[13] www.nanosolar.com

[14] Bolko von Roederm, National Solar Technology Roadmap: CIGS PV, Management Report NREL/MP-520-41737, June 2007.