

Special

# Thema | 실리콘 박막 태양전지 현황 및 전망

이정철 선임연구원

(한국에너지기술연구원 태양광발전연구단)

송진수 책임연구원

(한국에너지기술연구원 태양광발전연구단)

윤경훈 책임연구원

(한국에너지기술연구원 태양광발전연구단)

## 1. 서론

태양광발전은 태양광으로부터 전기를 생산하는 무한·청정 발전기술로서, 태양광을 받아 전기를 발생하는 태양전지(모듈)와 발생된 직류 전기를 교류로 변환시키는 전력조절 장치 및 주간에 생성된 전기를 저장하는 축전지 등의 주변장치(BOS: Balance of System)로 구성된다. 태양전지는 기본적으로 *pn*접합으로 구성된 다이오드로서, 광 흡수층으로 사용되는 물질에 따라 다양한 종류로 구분된다. 광 흡수층으로 실리콘을 이용하는 태양전지는 결정질(단, 다결정) 기판(Wafer)형 태양전지와 박막형(결정질, 비정질) 태양전지로 구분된다. 또한 CdTe나 CIS(CuInSe<sub>2</sub>)의 화합물 박막 태양전지, III-V족 태양전지, 염료감응 태양전지, 유기 태양전지를 대표적인 태양전지로 꼽을 수 있다. 태양전지 종류별 기술개발 현황을 살펴보면 III-V 화합물 태양전지를 이용한 다중접합 집광형(Multi-junction Concentration) 태양전지의 효율이 40%에 육박하였다. 실리콘 태양전지는 단결정 FZ(Float Zone) 기판을 사용한 태양전지가 24%이상의 변환효율을 보이고 있으며, 다결정 실리콘 기판의 경우 최고 효율은 약 20%에 이른다. 박막 태양전지 가운데에서는 Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> 화합물 박막 태양전지 효율이 약 20%를 기록 중이며, CdTe 박막 태양전지가 그 뒤를 따르고 있다. 실리콘계 박막 태양전지는 미국의 United Solar에서 제조된 a-Si/a-SiGe/a-SiGe Triple Junction 태양전지가 안정화 효율 12%를 갖는 것으로 알려져 있다. 기타 염료감응 태양전지 및 유기 태양전지는 저가화 잠재력이 매우 높은 것으로 평가되나 현재까지 개발된 전지 효율은 다른 태양전지에 비해 매우 낮은 실정이다. 이상에서 보고된 태양전지 변환효율은 실험실 단위의 소면적(약 1 cm<sup>2</sup>) 태양전지 효율로서, 일부 태양전지의 경우 대면적 또는 양산화에 적용하기에는 공정 및 구조가 복잡한 단점이 있으며 현재 상용화 되고 있는 c-Si 기판형 태양전지의 변환효율은 14~17%이며, 20~21%의 고 효율 태양전지를 생산하는 업체도 있다.

태양광발전 기술이 현재 앓고 있는 가장 큰 문제점은 시스템의 높은 가격에 의한 높은 발전단가로서 태양광 발전이 대량으로 보급되는데 가장 큰 걸림돌로 작용하고 있다. 태양광발전 시스템의 구성요소별 가격을 살

퍼보면 모듈(60%), 주변장치(25%), 설치비(15%)로 모듈이 전체 시스템 가격의 가장 큰 비중을 차지하는 것으로 알려져 있다. 전체 시스템 가격의 60%를 차지하는 모듈 가격은 다시 기판(40%, 실리콘), 태양전지 제조공정(25%), 모듈조립(35%)으로 구성된다. 2004년 기준 전 세계 태양전지 재료별 생산현황에서 실리콘 기판 태양전지(단, 다결정)의 시장점유율이 약 90% 이상임을 감안할 때, 현재 태양광발전 시스템의 높은 가격은 태양광 모듈의 높은 가격 즉, 태양전지를 구성하는 실리콘 기판의 높은 가격비중에 기인한 것으로 분석된다.

단·다결정 c-Si 태양전지의 경우 현재 사용되는 실리콘 기판의 두께는 250~350 μm이다. 이중 입사광을 받아 전류를 생성하는데 필요한 실리콘의 두께는 50 μm이면 충분한 것으로 보고되고 있으나, 여러 가지 공정상의 문제로 인해 두께를 최소화 하는데 어려움이 따른다. 따라서 가격 상승의 주된 요인인 실리콘 기판을 사용하는 대신 태양전지에 필요한 최소한의 물질을 저가의 기판위에 박막 형태로 증착하여 소자를 제조할 경우 태양전지 및 시스템 가격을 획기적으로 줄일 수 있다. 대표적인 박막 태양전지로는 사용되는 광 흡수층 물질에 따라 실리콘계, CuInSe<sub>2</sub>계, CdTe 박막 태양전지를 들 수 있는데, 이러한 박막 태양전지의 장점은 고가의 실리콘 기판 대신 유리나 금속판과 같은 저가의 기판을 사용할 수 있고 두께 수 마이크로미터 내외의 박막 증착을 통해 물질 소모량을 최소화 하여 태양전지를 저가로 제조할 수 있다는 것이다. 또한 대면적의 모듈을 In-line 공정을 이용하여 제조함으로써 생산성 향상 및 제조단가의 저가화가 가능한 것도 또 하나의 장점으로 들 수 있다.

본 논문에서는 현재까지 알려진 다양한 종류의 실리콘 박막 태양전지 중 유일하게 상용화에 성공한 비정질 실리콘과 결정질 실리콘 중에서 증착온도가 350 °C 이하로 낮아 비정질(Amorphous) 실리콘과 함께 유리나 금속판과 같은 저가의 기판 사용이 가능한 미세결정(Microcrystalline) 실리콘 박막 태양전지의 기술개발 현황 및 향후 전망에 관해서 살펴 보고자 한다.

## 2. 구조 및 동작원리

### 2.1 비정질 실리콘 박막 태양전지

비정질 실리콘(a-Si:H) 박막 태양전지의 대표적인 구조를 그림1에 나타내었다[1]. 앞서 언급하였듯이, a-Si:H 박막은 물질 자체의 특성으로 인해 캐리어의 확산거리(Diffusion Length)가 단결정(또는 다결정) 실리콘 기판에 비해 매우 낮아 np 구조로 제조될 경우 빛에 의해 생성된 전자-정공 쌍(Electron-hole Pairs)의 수집효율이 매우 낮다. 따라서 그림에 나타내었듯이 불순물이 첨가되지 않은 무첨가(Intrinsic)

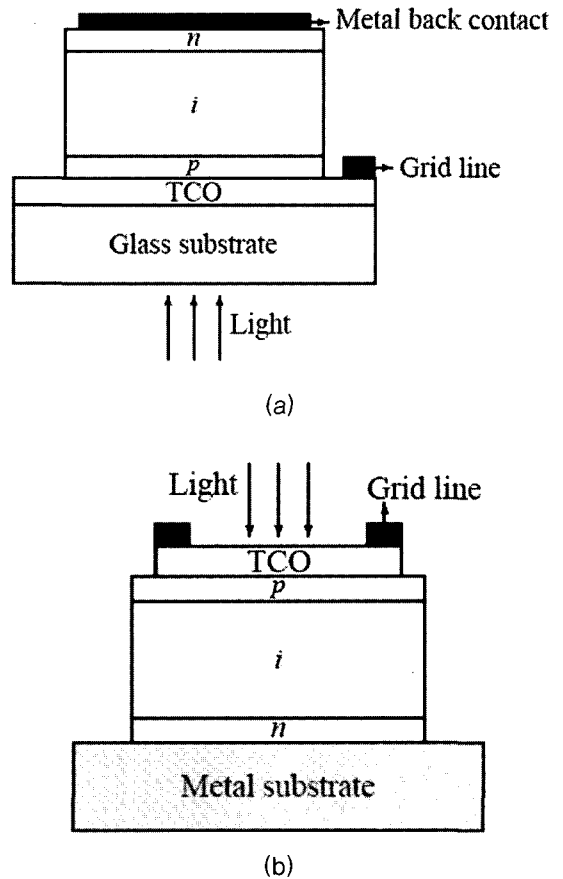
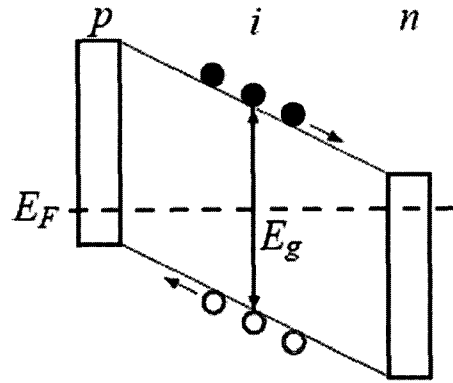


그림 1. 단일접합 a-Si:H 박막 태양전지 구조 : (a)pin Superstrate형, (b)nip Substrate형[1].

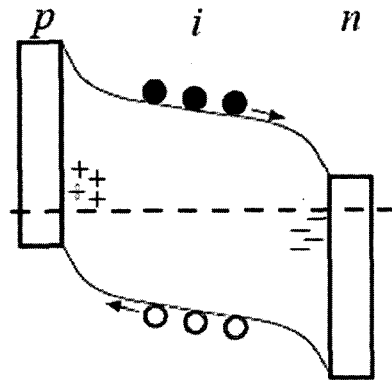
a-Si:H 광 흡수층을 높은 도우핑 농도를 갖는 p형 a-Si:H와 n형 a-Si:H 중간에 삽입한 pin 구조를 갖게 된다. 이러한 구조에서 i a-Si:H 광 흡수층은 상하의 높은 도우핑 농도를 갖는 p와 n층에 의해 공핍(Depletion)이 되며 내부에 전기장(Electric Field)이 발생하게 된다. 따라서 i a-Si:H에서 입사광에 의해 생성된 전자-정공쌍은 확산(Diffusion)이 아닌 내부 전기장에 의한 드리프트(Drift)에 의해 n층과 p층으로 수집되어 전류를 발생하게 된다.

태양전지의 구조는 크게 유리 기판을 사용한 "TCO/p-i-n/metal" 구조의 Superstrate형과 금속판을 이용한 "Metal/n-i-p/TCO/grid" 구조의 substrate형으로 구분할 수 있다. 두 구조 모두에서 태양광은 TCO/p를 통하여 i a-Si:H 광 흡수층으로 입사되는 공통점을 갖는데, 이는 입사광에 의해 생성된 전자(Electron)와 정공(Hole)의 Drift Mobility 차이에 의한 것이다. 일반적으로 정공의 Drift Mobility가 전자에 비해 낮기 때문에 입사광에 의한 캐리어의 수집효율을 극대화하기 위해서는 대부분의 캐리어들이 pi 계면에서 생성하도록 하여 정공의 이동거리를 최소화 하여야 한다(그림2(a)). 이러한 이유로 인해 Superstrate형과 Substrate형 모두에서 태양광은 p층을 통하여 광 흡수층으로 입사된다. 따라서 p a-Si:H층은 높은 전기전도도외에도 높은 광학적 Band-gap( $E_g$ )을 갖추어야 한다.

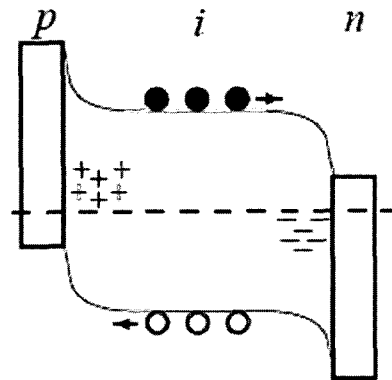
그림2는 pin a-Si:H 태양전지의 Band Diagram을 나타낸 것이다. 그림2(a)의 이상적인 소자의 경우 내부에 전기장이 균일하게 발생하여 전자-정공쌍의 Drift가 원활하게 발생한다. 그러나 실 소자에서는 i a-Si:H 내부에 존재하는 결함(Defects)에 의해 pi 및 ni 계면에서 Space-charge 밀도가 증가하게 되고 i a-Si:H bulk에서 전기장이 감소하는 현상이 발생한다. 이러한 현상은 i a-Si:H 광 흡수층이 두꺼울 경우에도 동일하게 발생하므로 대부분의 a-Si:H 태양전지에서 i a-Si:H 층의 두께는 200-500 nm로 제조되게 된다. 일반적으로 a-Si:H 태양전지는 빛에 노출될 경우 특성 열화현상(Staebler-Wronski Effect)[2]이 나타나는데, 광 흡수층의 두께 및 물성에 따라 최대 30%까지 태양전지의 특성이 감소한다. 그림2(c)는 빛에 장시간 노출된 후 a-Si:H 태양전지의 Band Diagram을



(a)



(b)



(c)

그림 2. pin a-Si:H 박막 태양전지 Band Diagram ; (a)Ideal, (b)Realistic, (c)Light-soaked Solar Cells[1].

도식화 한 것으로서, Light-soaking에 의해  $a\text{-Si:H}$  내부의 Dangling Bonds 밀도가 증가하고 내부 전기장이 감소하여 빛에 의해 발생된 전자-정공쌍의 재결합이 더욱더 가속화되어 태양전지의 특성 열화가 일어난다.

## 2.2 미세결정 실리콘 박막 태양전지

미세결정 실리콘( $\mu\text{c-Si:H}$ )은 비정질과 단결정 실리콘의 경계물질로서 증착방법에 따라 수십 nm에서 수백 nm의 결정크기를 가지며, 결정과 결정사이(결정경계 : Grain Boundary)에는 흔히 비정질 상이 존재하며 높은 결합밀도로 인해 대부분의 캐리어 재결합(Recombination)이 결정경계에서 발생한다.  $\mu\text{c-Si:H}$  박막은 에너지 Band-gap이 단결정 실리콘(1.1 eV)과 같으며, 흡수계수는  $a\text{-Si:H}$  및 단결정 실리콘에 비해 높은 것으로 알려져 있다. 또한,  $a\text{-Si:H}$  박막 태양전지에서 나타나는 열화현상이 없는 장점을 가지고 있다[3].  $\mu\text{c-Si:H}$  박막 태양전지 역시  $a\text{-Si:H}$  박막 태양전지와 동일하게  $pin$  구조로 제조되는데, 이는  $\mu\text{c-Si:H}$ 의 Grain Size가 작고 비정질 Matrix를 많이 포함하고 있어 캐리어의 확산거리가  $a\text{-Si:H}$  보다 크지만 np 구조로 확산에 의한 캐리어 수집을 하기에는 부족하기 때문이다.  $a\text{-Si:H}$ 과 마찬가지로  $pin$  Superstrate형과  $nip$  Substrate형 두 가지 구조로 제조되며 광 흡수층으로 사용되는  $\mu\text{c-Si:H}$  박막을 제외하고는  $a\text{-Si:H}$  태양전지와 구조가 매우 유사한 특징을 갖는다.

## 2.3 적층형 박막 태양전지

$a\text{-Si:H}$ 과  $\mu\text{c-Si:H}$ 을 이용한 박막 태양전지는 광 흡수층으로 두께 수 마이크로 이하의 박막을 사용하고 실리콘 자체의 광 흡수계수가 낮아, 단일  $pin$  접합으로는 고 효율을 달성하는데 한계가 있다. 적층형 태양전지는  $pin$  구조의  $a\text{-Si:H}$  또는  $\mu\text{c-Si:H}$  태양전지를 2층 또는 3층으로 적층하여 제조된 태양전지로서 입사된 태양광을 효율적으로 이용할 수 있으며, 태양전지를 직렬 연결함으로써 개방전압을 높일 수 있는 장점이 있어 현재 상용화 되고 있는  $a\text{-Si:H}$  및  $\mu\text{c-Si:H}$  태양전지 모듈은 대부분 이러한 적층형 구조를 사용하고 있다. 적층형 태양전지의 종류로는 크게 Tandem( $pin/pin$ )형과 Triple( $pin/pin/pin$ )형으로 나눌 수 있다. Tandem형 태양전지는 사용되는 광 흡수

층의 물질 또는 Band-gap에 따라 다시  $a\text{-Si:H}/a\text{-Si:H}$ (또는  $a\text{-SiGe:H}$ ),  $a\text{-Si:H}/\mu\text{c-Si:H}$ 으로 나눌 수 있다. Triple형 태양전지 역시  $a\text{-Si:H}(1.8\text{ eV})/a\text{-SiGe:H}(1.6\text{ eV})/a\text{-SiGe:H}(1.4\text{ eV})$ 와  $a\text{-Si:H}/a\text{-SiGe:H}/\mu\text{c-Si:H}(1.1\text{ eV})$ 으로 구분할 수 있는데,  $\mu\text{c-Si:H}$ 을 Bottom Cell로 사용할 경우  $a\text{-Si:H}$ 에 의한 열화를 줄일 수 있는 장점이 있다.

그림3은  $a\text{-Si:H}$  태양전지에서  $pin$  단일접합,  $pin/pin$  Tandem 및  $pin/pin/pin$  Triple 접합 태양전지의 구조 및 동작특성을 비교해 나타낸 것이다[4]. 태양전지의 적층 수가 증가할수록 단락전류 밀도( $J_{sc}$ )는 감소하고 개방전압( $V_{oc}$ )은 증가하는데 이는 태양전지가 직렬로 연결되어 전체 전류는 최소 전류를 발생하는 유니트 태양전지에 의해 제한되고, 전압은 각 유니트 전지의 합으로 나타나 Triple 접합에서 약 2.3 V를 보인다. 태양전지의 효율은 단일  $pin$  접합보다 Tandem형이 높으며,  $a\text{-Si:H}/a\text{-SiGe:H}$ 과 같이 서로 다른 Band-gap을 갖는 광 흡수층을 사용한 태양전지의 효율이  $a\text{-Si:H}/a\text{-Si:H}$ 과 같이 동일한 Band-gap을 광 흡수층으로 사용한 태양전지에 비해 높음을 알 있다. Triple 접합 태양전지에서는  $a\text{-SiGe:H}$  광 흡수층 증착시 Ge의 농도를 변화시켜 물질의 Band-gap 조절이 가능한데, Middle과 Bottom Cell에 사용되는  $a\text{-SiGe:H}$ 의 Band-gap은 1.6 eV와 1.4 eV인 것으로 보고되고 있다[4]. 이상에서 살펴본 바와 같이  $a\text{-Si:H}$ 과  $\mu\text{c-Si:H}$ 을 이용한 태양전지의  $pin$  적층수가 증가할수록 태양전지의 높은 변환효율을 얻을 수 있으나, 이러한 적층수 증가는 제조 공정수 증가에 따른 공정비용 상승과 연관되므로 적층수의 증가가 태양전지의 제조원가(\$/Wp) 하락과 반드시 일치하는 것은 아니다. 그림3의 태양전지 특성비교에서 알 수 있듯이,  $a\text{-Si:H}$  태양전지는 적층수에 관계없이 약 10%이상의 특성열화 현상이 발생한다. 따라서 태양전지의 안정성을 높이기 위해 열화가 없는  $\mu\text{c-Si:H}$ 과의 Tandem 또는 Triple 접합 태양전지의 관심이 높아지고 있는데,  $a\text{-Si:H}/\mu\text{c-Si:H}$  Tandem[5] 및  $a\text{-Si:H}/a\text{-SiGe:H}/\mu\text{c-Si:H}$ ,  $a\text{-Si:H}/nc\text{-Si:H}/\mu\text{c-Si:H}$  Triple 접합 태양전지를 그 예로 들 수 있다.

### 2.4 실리콘 박막 태양전지 모듈

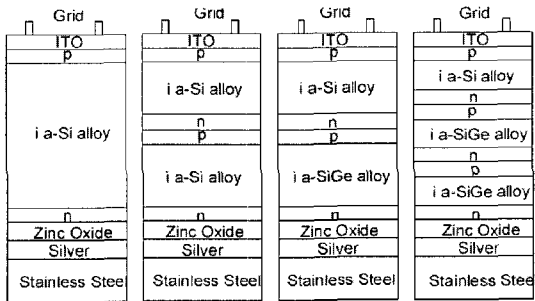
실리콘 박막 태양전지 모듈은 실리콘 기판을 이용한 c-Si 태양전지 모듈과는 구조 및 제조방법에 있어 많은 차이점이 있다. c-Si 태양전지 모듈은 각 태양전지를 직렬 배열한 후 Ribbon을 이용해 전기적으로 연결한 다음 유리와 EVA 등으로 Lamination을 하게 된다. 박막 실리콘 태양전지는 대면적(Meter Scale) 유리나 금속판에 투명전극 및 실리콘 박막을 차례로 증착하여 모듈을 제조하게 된다. 따라서 c-Si 기판형 태양전지와는 달리 태양전지와 모듈의 제조공정이 동일하기 때문에 양산시 생산성을 높일 수 있는 장점이 있다. 박막 실리콘 역시 전면 투명전도막의 저항성분으로 인해 일반적으로 일정한 폭을 갖는 태양전지의 직렬연결로 제조된다. 따라서 각 단위박막 증착 후 레이저를 이용한 패터닝 공정이 요구되는데, 그림4에서 나타내었듯이 전면 투명전도막을 기판에 증착한 후 1차 레이저 패터닝을 하고 pin 실리콘 박막을 증착한다. 실리콘 박막 증착

후 실리콘 박막만을 2차 패터닝하게 되는데, 이때 전면 투명전도막이 손상되는 것을 방지하기 위하여 레이저의 파장이나 파워의 조절이 중요하다. 마지막으로 후면 전극을 형성한 후 3차 패터닝을 하며 이때도 역시 전면의 투명전도막과 실리콘 박막이 손상되지 않도록 하는 것이 중요하다. 마지막으로 c-Si 태양전지와 마찬가지로 전면에 절연물질을 이용하여 Lamination을 수행하여 모듈을 제조한다.

## 3. 기술개발 및 상용화 현황

### 3.1 국외현황

a-Si:H 및  $\mu\text{c-Si:H}$  박막 태양전지에 관한 연구가 일본, 미국, 유럽을 중심으로 활발히 이루어지고 있다. 표1은 현재까지 보고된 a-Si:H 및  $\mu\text{c-Si:H}$  박막 태양전지의 기술개발 현황을 나타낸 것이다[6]. 소면적(1cm<sup>2</sup>)에서 현재까지 보고된 a-Si:H 박막 태양전지의 최고 효율은 a-Si/a-SiGe/a-SiGe의 Triple Junction 구조에서 초기효율 15.6%, 안정화 효율 13%(미국 United Solr)이며,  $\mu\text{c-Si:H}$  태양전지는 a-Si/ $\mu\text{c-Si:H}$  Tandem 구조에서 초기효율 14.7%(일본 Kaneka)로 알려져 있다. 대면적 모듈에서는 일본 Sharp의 a-Si/



	$J_s$ (m A/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (V)	FF	$\eta$ (%)	Deg. (%)
a-Si:H single junction	Initial 14.65 Stable 14.36	0.992 0.965	0.730 0.672	10.6 9.3	12.3
a-Si:H/a-Si:H same gap double junction	Initial 7.9 Stable 7.9	1.89 1.83	0.76 0.70	11.4 10.1	11.4
a-Si:H/a-SiGe/H dual gap double junction	Initial 11.04 Stable 10.68	1.762 1.713	0.738 0.676	14.5 12.4	13.9
a-Si:H/a-SiGe/H triple junction	Initial 8.57 Stable 8.27	2.357 2.294	0.723 0.684	14.6 13.0	11.0

triple junction > double (dual gap) > double (same gap) > single junction

그림 3. a-Si:H을 이용한 적층형 태양전지 구조 및 동작특성 비교[4].

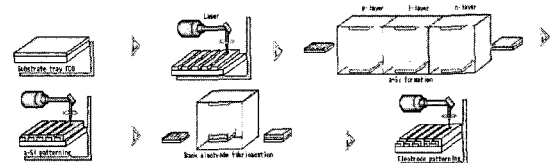
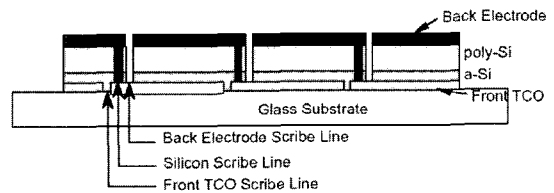


그림 4. 실리콘 박막 태양전지 모듈 구조 및 제조 공정도.

$\mu\text{c-Si:H}$  Tandem 태양전지에서 초기 12.14%, 안정화 효율 11% (면적  $56\text{ cm} \times 92.5\text{ cm}$ )로 보고되고 있다. 표2는 박막 태양전지 생산업체별 생산량 및 최대 생산용량을 나타낸 것으로서[7], a-Si 및  $\mu\text{c-Si}$  박막 태양전지는 일본, 미국, 독일 등의 업체에서 수 MW/년의 용량을 갖추고 있으며, 미국 United Solar가 최대 30 MW/년의 가장 높은 생산능력을 보유하고 있다[8].  $\mu\text{c-Si:H}$  태양전지 역시 기존의 a-Si 생산업체가  $\mu\text{c-Si:H}$  태양전지 개발에 박차를 가하고 있으며, 일본 Kaneka와 Canon이 년 10 MW의 생산능력을 보유하고 있다. 표3은 2005년 현재 대면적 박막 태양전지 모듈의 물질별 최고 효율 및 전력을 나타낸 것이다[9]. 실리콘계 박막 태양전지의 경우 일본의 Mitsubishi 중공업의  $15,625\text{ cm}^2$  a-Si 단일 pin 접합 모듈이 6.4%의 안정화 효율을 보이고 있으며, 최대 출력전력은 100 W이다. 미국의 United Solar는  $9,276$

$\text{cm}^2$ 의 a-Si/a-SiGe/a-SiGe의 Triple Junction 모듈에서 안정화 효율 7.6%, 최대 출력전력 70.8W를 기록하고 있다. 일본 Sharp에서 최근 개발된 a-Si/nc-Si Tandem 태양전지 모듈은  $4,770\text{ cm}^2$  면적에서 11%의 안정화효율을 기록해 현재까지 개발된 대면적 실리콘 박막 태양전지 모듈 중에서 가장 높은 안정화 효율을 기록하고 있으나, 여전히 CIGS 박막 태양전지 모듈(약 13%)에 비해서는 효율이 낮은 실정이다.

그림5는 현재 시중에 판매되고 있는 다양한 형태의 실리콘 박막 태양전지 모듈을 나타낸 것이다. 유리 기판을 사용한 모듈의 경우 반투명 형태의 모듈이 판매되고 있으며, 금속판을 기판으로 이용한 Flexible 모듈도 판매되고 있다. 또한, 실리콘 박막 태양전지와 LED를 결합한 모듈이 최근 일본 Sharp에서 개발되었는데, 주간에 태양전지로부터 생산된 전력을 이용해 야간에는 모듈에 내장된 LED 발광을

표 1. 실리콘 박막 태양전지 및 모듈 연구현황[6].

구분	구조	초기 효율(%)	안정화 효율(%)	면적	기관		
$\mu\text{c-Si}$ 박막	소면적	a-Si/ $\mu\text{c-Si}$	12.3	10.8	$1\text{cm}^2$ 이하	Neuchatel(스)	
		a-Si/ $\mu\text{c-Si}$	-	11.2	$1\text{cm}^2$ 이하	Jülich IPV(독)	
		a-Si/ $\mu\text{c-Si}$	14.7	-	$1\text{cm}^2$ 이하	Kaneka(일)	
		a-Si/ $\mu\text{c-Si}$	12.8	-	$1\text{cm}^2$ 이하	Canon(일)	
		a-Si/ $\mu\text{c-Si}/\mu\text{c-Si}$	-	12.0	$1\text{cm}^2$ 이하	Kaneka(일)	
		$\mu\text{c-Si}$	10.9	-	$1\text{cm}^2$ 이하	Canon(일)	
	대면적	a-Si/ $\mu\text{c-Si}$	10.8	-	$64\text{cm}^2$	Jülich(독)	
		a-Si/ $\mu\text{c-Si}$	10.1	-	$64\text{cm}^2$	Jülich(독)	
		a-Si/ $\mu\text{c-Si}$	12.3	-	$100\text{cm}^2$	Kaneka(일)	
		a-Si/ $\mu\text{c-Si}$	11.6	-	$4141\text{cm}^2$	Kaneka(일)	
	a-Si/nc-Si	12.14	11	$5180\text{cm}^2$	Sharp(일)		
a-Si:H 계 박막	소면적	a-Si/a-SiGe/a-SiGe	15.6	13.0	$1\text{cm}^2$ 이하	United Solar(미)	
		a-Si/a-SiGe/a-SiGe	11.7	11.0	"	Fuji(일)	
		a-Si/a-SiGe/a-SiGe	12.5	10.7	"	U. Toledo(미)	
		a-Si/a-SiGe/a-SiGe	-	10.2	"	Sharp(일)	
		a-Si/a-SiGe	11.6	10.6	"	BP Solar(미)	
		a-Si/a-SiGe	-	10.6	"	Sanyo(일)	
		a-Si/a-SiGe	-	12.4	"	United Solar(미)	
		a-SiGe	12.5	10.4	"	U. Toledo(미)	
		a-Si	-	9.47	"	Neuchatel	
	대면적	R&D 모듈	a-Si/a-SiGe/a-SiGe		10.7	$0.09\text{m}^2$	United Solar(미)
			a-Si/a-SiGe		9.1	$0.08\text{m}^2$	BP Solar(미)
			a-Si/a-SiGe		9.5	$0.12\text{m}^2$	Sanyo(일)
		양산 모듈	a-Si/a-SiGe/a-SiGe		9.0	$0.32\text{m}^2$	Fuji(일)
			a-Si/a-SiGe/a-SiGe		7.9	$0.45\text{m}^2$	United Solar(미)
			a-Si/a-SiGe/a-SiGe		7.8	$0.39\text{m}^2$	ECD
			a-Si/a-SiGe		9.3	$0.52\text{m}^2$	Sanyo(일)
			a-Si/a-SiGe		8.1	$0.36\text{m}^2$	BP Solar(미)

이용한 조명기능까지 갖추고 있어 태양광 모듈의 부가가치를 높이고 있다.

### 3.2 국내현황

태양전지 선진국에 비해 실리콘 박막 태양전지 연구에 관한 국내 상황은 초기단계로 볼 수 있다. 비정질 실리콘 박막 태양전지의 경우 (주)SK가 1990년대 초반 모듈 시제작에 성공하였으나, 현재는 사업을 중단한 상태이다. 현재 몇몇 학교와 연구소를 중심으로 기초연구가 진행되고 있다. 한국과학기술원

(KAIST)은 a-Si:H 박막 태양전지에 관한 연구를 오래 동안 수행해 오고 있으며, 태양전지의 열화특성 개선 등을 통한 고 효율의 태양전지를 이미 개발하였으며, 최근에는 산업자원부 지원으로 a-Si:H/ $\mu$ C-Si:H Tandem 태양전지에 관한 연구도 착수하였다. 한국에너지기술연구원(KIER)은 1990년대 후반부터  $\mu$ C-Si:H 및 a-Si:H/ $\mu$ C-Si:H 태양전지 연구를 시작하여, 태양전지 제조에 필요한 장치를 자체적으로 보유하고 있어, 다층구조의 박막 태양전지의 일괄적인

표 2. 박막 태양전지 생산업체별 생산량 및 최대 생산용량 (\*2002년 사업 중단)[7].

종류 및 구조	회사	총 생산량(MW/년)		최대 생산용량(MW/년)	
		전지	모듈	전지	모듈
a-Si계 tandem (a-Si/a-SiGe tandem a-Si/a-SiGe/a-SiGe)	RWE Schott Solar GmbH(독)	-	1	-	1
	Free Energy Europe(프)	0.5	0.5	1	1
	Intersolar	2.3	2.3	3	3
	Sharp(일)	0.01	0.01	-	-
	MSK(일)	-	0.5	-	3
	Kaneka(일)	4	4	10	10
	Mitsubishi Heavy Indus.(일)	0.1	0.1	2	2
	United Solar Systems(미)	4	4	30	30
	BP Solar(미)*	7	7	9	9
a-Si/ $\mu$ C-Si tandem	Kaneka(일)	3.5	3.5	10	10
	Canon(일)	0.72	0.72	10	10
CIS	Würth Solar GmbH(독)	-	0.15	-	0.35
	Shell Solar(미)	3	3	3	3
CdTe	AnTec Solar GmbH(독)	-	1.5	-	10
	AstroPower(미)*	0.3	0.3	-	-

표 3. 최고 효율을 갖는 박막 태양전지 모듈(Standard Conditions, Aperture Area)[9].

Company	Device	Size(cm <sup>2</sup> )	Efficiency	Power	Date
Mitsubishi Heavy*	Glass/a-Si	15,625	6.4% (stabilized)	100W	7/05
United Solar	a-Si/a-SiGe/a-SiGe/SS	9,276	7.6% (stabilized)	70.8W	9/97
Sharp*	Glass/a-Si/nano-Si	4,770	11% (stabilized)	52.5W	7/05
Kaneka	Glass/a-Si	8,100	6.3% (stabilized)	51W	7/04
EPV	Glass/a-Si/a-Si	7,432	5.7% (stabilized)	42.3W	10/02
United Solar	a-Si triple/SS	4,519	7.9% (stabilized)	35.7W	6/97
Global Solar Energy	CdS/CIGS/SS	8,709	10.2%	88.9W	5/05
Würth Solar	CdS/CIGS/Glass	6,500	13%	84.6W	6/04
Shell Solar GMBH	CIS-alloy/CdS/glass	4,938	13.1%	64.8W	6/04
Shell Solar Industries	CdS/CIS-alloy	3,626	12.8%	46.5W	3/03
Showa Shell*	Zn(O,S,OH)/CIGS/glass	3,459	13.4%	46.45W	8/02
First Solar	Glass/CdS/CdTe	6,624	10.2%	67.4W	2/04
Antec Solar*	Glass/CdS/CdTe	6,633	7.3%	52.3W	6/04

공정이 가능하다. 또한 최근 A급의 태양광 시뮬레이터(Wacom, 일본) 설치를 완료하였으며, Light 바이어스 기능을 갖는 분광응답 측정 장치(PV Measurement, 미국)를 이용하여 a-Si:H/ $\mu$ c-Si:H과 같은 적층형 태양전지의 정확한 성능분석이 가능하게 되었다(그림6). 이러한 연구기반을 바탕으로, 동작특성 규명, 단위박막 및 계면 최적화를 통한 태양전지의 효율향상 연구가 필요하며, 나아가 양산화를 대비한 박막의 고속증착, 대면적화 및 모듈화 연구가 이루어져야 한다. 또한 정부의 정책적인 예산 지원과 함께 기업의 적극적인 참여가 이루어질 경우 c-Si 태양전지에 비해 아직까지 초기 단계인 실리콘 박막 태양전지 기술 및 시장은 충분히 극복할 수 있을 것으로 판단된다.

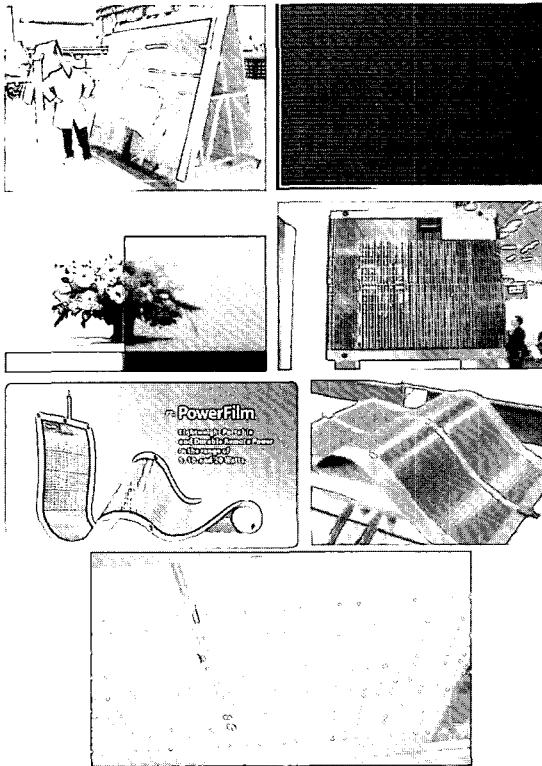
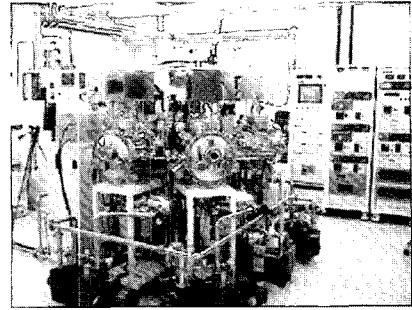
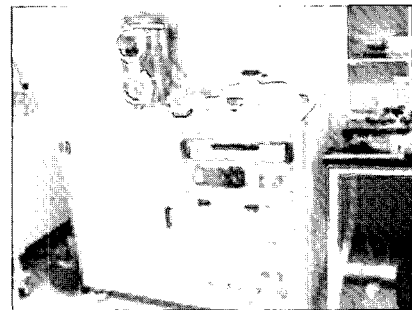


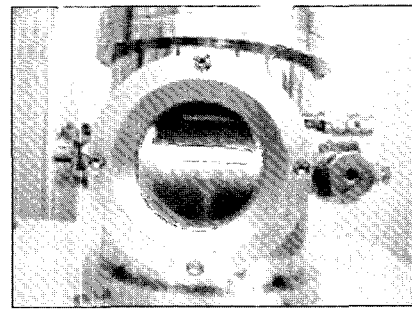
그림 5. 상용화 되고 있는 박막 실리콘 태양전지 모듈 종류.



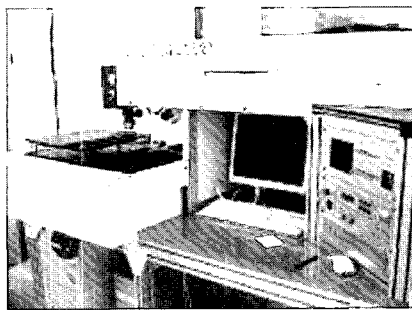
(a)



(b)

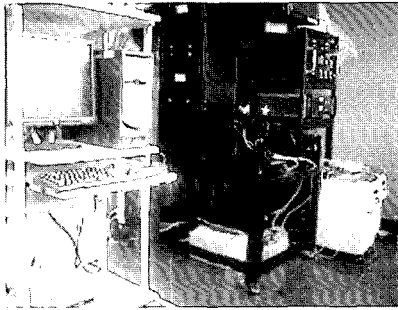


(c)

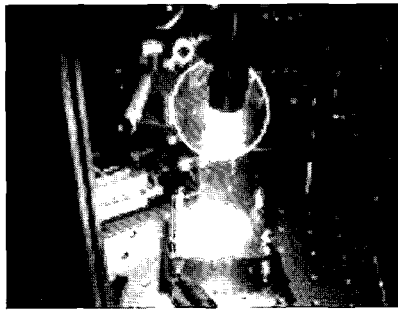


(d)





(e)



(f)

그림 6. 한국에너지기술연구원의 실리콘 박막 태양전지 제조 및 분석 장치 사진 : (a)다 반응실 Cluster-tool System(5 Chamber), (b)금속 전극 진공 열 증착기, (c)Dry Etching 장치, (d)Laser Scribing 장치, (e)Class-A Solar Simulator, (f)Tandem 태양전지 분광 응답 측정 장치

#### 4. 과제 및 전망

실리콘 박막 태양전지의 높은 잠재력에도 불구하고 아직까지 시장점유율이 낮은 이유로는 앞서 살펴 보았듯이 c-Si 태양전지에 비해 박막 태양전지의 낮은 변환효율 및 낮은 생산용량에 의한 것으로 분석할 수 있다. 동일한 공정에서 효율을 높이거나, 제조원가를 줄임으로서 태양전지의 제조원가(\$/Wp)를 낮출 수 있는데, 현재로서는 태양전지의 효율이 c-Si 태양전지에 비해 낮으며 생산용량 또한 수 MW에서 수십 MW/년 수준이어서 상대적으로 저가화가 이루어지지 않고 있는 실정이다. 박막 태양전지 생산

업체 역시 c-Si 태양전지에 비해 3배 이상의 높은 장치 투자비가 요구되므로, 효율이나 생산성 측면에서 어느 정도의 경제성이 확보되지 않을 경우 생산용량 증설에 어려움이 따르는 실정이다. 따라서 박막 태양전지의 효율을 높이고 공정 개선을 통한 생산성 향상이 향후 저가화 및 시장점유율 증대를 위한 핵심기술이다. 독일의 대표적인 태양전지 제조회사인 RWE Schott Solar에서 최근 발표에 의하면, 향후 2030년 태양전지 시장은 130 GW로서 2005년 1 GW에 비해 130배까지 성장하고, 실리콘을 포함한 박막 태양전지의 시장 점유율 또한 30% 이상 증가할 것으로 예상하고 있다.

#### 5. 결론

현재 태양전지 시장의 90% 이상을 차지하고 있는 단·다결정 c-Si 태양전지는 높은 원재료(Poly-Si) 가격으로 인해 태양전지 및 태양광발전 시스템의 저가화를 가로 막는 가장 큰 장애요인이 되고 있다. 또한 최근 태양전지 시장의 급속한 성장으로 인해 실리콘 기관 수급이 큰 문제로 대두됨으로써 박막 태양전지에 대한 필요성이 한층 부각되고 있는 실정이다.

비정질 및 나노결정 실리콘 박막 태양전지는 현재 c-Si 태양전지에서 사용되는 실리콘의 약 1%(수 μm) 만을 저가의 기관위에 박막형태로 사용하므로 태양전지의 저가화가 가능하며, 적층형 구조로 태양광을 효율적으로 이용함으로써 태양전지의 효율 향상 또한 가능하다. 또한 유리를 기관으로 한 모듈의 경우 기존 건물의 창문 대신 활용할 수 있어 모듈의 상대적인 저가화가 가능하며, 금속 기관을 이용한 Flexible 구조의 모듈로 제작할 수 있어 그 적용분야가 다양한 장점이 있다.

그러나 실리콘 박막 태양전지는 c-Si 태양전지와는 달리 제조공정이 다소 복잡하고 고가의 진공증착 장비(높은 초기 투자비)가 요구되며 현재로서는 c-Si 태양전지에 효율이 낮고 생산용량 또한 낮아 충분한 가격 경쟁력을 갖지 못하는 실정이다. 일본, 유럽, 미국을 중심으로 한 태양전지 선진국에서는 산·학·연을 중심으로 효율향상 및 생산성 향상을 위한 기

술개발에 많은 비중을 두고 있는 실정이다.

국내의 경우 우선 고 효율의 태양전지 제조를 위한 기술개발이 학교와 연구소를 중심으로 체계적이고 조직적으로 선행되어야 하며, 나아가 관련 기업과 연계한 대면적 모듈기술, 양산기술 및 장비기술 개발이 요구된다.

**참고 문헌**

- [1] MARIEKE KATHERINE VAN VEEN, TANDEM SOLAR CELLS DEPOSITED USING HOT-WIRE CHEMICAL VAPOR DEPOSITION, Ph. D. Thesis, University of Utrecht, 2003.
- [2] K. Takahashi and M. Konagai, Amorphous Silicon Solar Cells, North Oxford Academic, 1986.
- [3] A.V. Shah, J. Meier, E. Vallat-Sauvain, N. Wyrsh, U. Kroll, C. Droz, U. Graf, Solar Energy Materials & Solar Cells 78 (2003) 469.491
- [4] J. Yang, A. Banerjee and S. Guha, Appl. Phys. Lett. 70(22), 2 June, 1997, 2975-2977.
- [5] J. Meier, et al, Journal of Non-Crystalline Solids 227-230 (1998), 1250-1256.
- [6] NCPV and Solar Program Review Meeting Proceedings, 2003.
- [7] Trends in Photovoltaic Applications Survey Report of Selected IEA Countries between 1992 and 2002 (Report IEA-PVPS T1-12: 2003).
- [8] <http://www.uni-solar.com>
- [9] <http://www.nrel.gov>

**저자|약력**



**성 명 : 이정철**

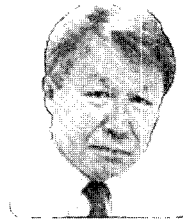
◆ 학 력

- 1995년 경남대 전자공학과 공학사
- 1997년 경북대 대학원 전자공학과 공학석사

◆ 경 력

· 1997년 - 현 재

한국에너지기술연구원 태양광발전 연구단 선임연구원



**성 명 : 송진수**

◆ 학 력

- 1971년 고려대 전기공학과 공학사
- 1976년 고려대 대학원 전기공학과 공학석사
- 1986년 고려대 대학원 전기공학과 공학박사

◆ 경 력

· 1979년 - 현 재

한국에너지기술연구원 태양광발전 연구단 책임연구원



**성 명 : 윤경훈**

◆ 학 력

- 1975년 서울대 재료공학과 공학사
- 1977년 서울대 대학원 요업공학과 공학석사
- 1986년 Limoges대(프) 재료공학과 공학박사

◆ 경 력

· 1980년 - 현 재

한국에너지기술연구원 태양광발전 연구단 책임연구원