

# Thema | 결정질 실리콘 태양전지 현황과 전망

## 1. 서론

이준신 교수  
(성균관대 정보통신공학부)

1970년대 이후부터 세계 각국에서는 대체에너지의 필요성을 절감하고 있는 상황이다. 고려되고 있는 대체에너지의 종류로는 풍력, 수력, 파력, 지열, 태양광 등이 거론되고 있지만 그 중에 가장 크게 관심을 두고 있는 대체에너지는 태양광을 사용하여 에너지를 생산하는 태양전지 분야이다. 태양전지의 사용은 1839년 프랑스의 물리학자 E. Becquerel가 전해질(Electrolyte)속에 담긴 전극에 빛 조사 시 발생하는 광전효과(Photovoltaic Effect)를 처음으로 발견한 이후 관심을 가지기 시작하여[1], 1954년 D.M. Chapin과 Bell Telephone 연구소에서 5% 효율의 최초의 p-n 접합 실리콘 태양전지 개발을 시작으로 태양전지는 차세대 에너지 자원으로 주목을 받게 되었다[2]. 태양전지 동작원리는 빛에너지를 흡수, 전하 캐리어(정공, 전자)를 생성, 분리, 수집하여 외부에 전기에너지를 공급한다. 태양전지 내부에 서로 다른 극성을 가지는 n-형과 p-형을 접합하면 태양전지 내부에 생성된 전위차에 의해서 빛에 의해 생성된 전하가 분리되어 전극으로 수집됨으로써 전류를 흐르게 한다. 이것이 태양전지의 p-n 접합에 의한 태양광발전의 원리이다.

태양전지의 저가 고효율화를 이루기 위한 많은 연구들이 지속적으로 추진되어 왔다[3,4]. 다양한 반도체 재료들, 예를 들면 실리콘(Silicon; Si) CdS(Cadmium Sulphide), GaAs(Gallium Arsenide), CdTe(Cadmium Telluride), CIS(Copper Indium Di-selenide) 등의 물질들이 새로운 구조들로 발전에 발전을 거듭하여 저가화와 고효율화가 진행되고 있다. 이와 같은 태양 전지는 모물질인 기관용 재료 측면에서 단결정, 다결정, 리본형, 저가 기관의 다결정, 구상 규소 및 집광형등의 결정질 실리콘 태양전지와 비결정 규소, CdTe, CIS 화합물 반도체 등의 박막 태양전지로 구분된다.

이러한 재료 중 단결정 실리콘은 공업화 면에서나 자원적인 면에서 풍부하고 우수한 재료이다. 태양전지 태동 시점부터 현재 시점까지의 태양전지 효율변화를 그림1에 도시하였다. 1960년대에는 우주용 태양전지가 15%의 효율을 나타내고 있다. 실리콘 태양전지로 PERL(Passivated

Emitter Rear Locally-diffused) 구조인 경우 최고 24%의 변환효율을 보이고 있다. 이러한 초고효율 태양전지는 공정이 30단계 이상이고 고난도, 고가의 장비와 고비용 제조공정을 사용하고 있어 현재 연구실 수준에서 이루어질 뿐 산업계에 적용하기에는 현실적인 어려움이 있는 실정이다. 산업계에 적용이 가능한 태양전지는 양산화와 대면적화의 요구조건을 만족하는 태양전지 에너지 변환효율은 16% 내외이다.

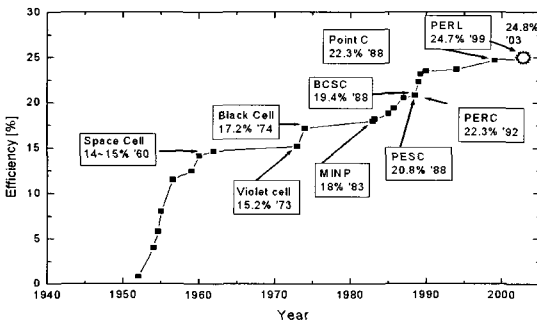


그림 1. 년도에 따른 태양전지 효율의 변화.

다결정 실리콘 태양전지의 효율은 그림2에서와 같이 지난 20년 동안 꾸준히 발전 되어 왔음을 알 수 있다. 이러한 발전은 고품질 재료의 개발과 태양전지 제작 공정의 개발에 의해 이루어진 것이다. 그림2에서와 같이 다결정 태양전지의 효율에 대한 발전은 3개의 범주로 나뉜다. 첫째는 소면적(1.4 cm<sup>2</sup>) 연구용 태양전지로서 고가의 기술의 발전 그룹이다. 둘째는 양산용 및 연구용 대면적( $\geq 100$  cm<sup>2</sup>) 태양전지 기술이다. 셋째는 양산용 대면적 태양전지 기술이다. 현재는 양산용의 일반적인 다결정 태양전지의 효율은 12.5-15.0%이다.

다결정 태양전지의 생산은 21년 전부터 시작하였다[5]. 현재는 전 세계의 태양광 모듈의 41%를 차지하고 있다. 1995년 이후로 다결정 실리콘 기판의 사용은 매년 증가하여 미래에는 더욱 더 가속화 될 것을 볼 수 있다[6]. 2000년에 세계 7개의 태양전지 Top 회사들은 생산량의 60%를 다결정 실리콘 기판에 두

고 있다[6]. 1980년에 8%의 산업용 태양전지의 효율로부터 시작하여 2000년에는 14.5%의 양산용 태양전지의 효율을 보이고 있다. 또한 산업용 태양전지의 크기는 90에서 230 cm<sup>2</sup>으로 변화되었다. 다결정 실리콘 태양전지의 성장의 필요는 무엇 보다는 CZ 단결정 실리콘 태양전지와 비교하여 저가의 기판이기 때문이다. 90년대에 들어서면서 정부는 태양광 개발 사업을 위한 단계적인 계획을 갖고 태양광 회사들을 지원하기 시작하였다. Casting 공정 개발에 대한 몇 개의 우수한 논문들이 출판되었다[7-9]. 1980년에 Solarex(현재 BP Solar)는 산업용 다결정 실리콘 태양전지의 개발의 선두주자이었다[6]). 지난 20년 동안 산업용 DOE 지원의 NREL 프로그램과 EU 지원 Joule 프로그램과 NEDO 지원의 Sunshine 프로그램을 통해 산업용 Casting 기술은 놀라운 발전을 이루었다[10-11]. 1996년의 DOE 지원의 PVMaT 프로그램을 통해 Casting 공정과 장비는 Solarex에서 4개의 설비공장에서 9개로 증설되었다[12]. 1980년의 양산용 태양전지는 8%이었지만 1990년에는 12%의 양산용 태양전지를 개발하였다. 이것은 BSF와 SiN의 패시베이션이 없는 태양전지로서 효율의 향상의 주원인은 기판의 고품질이었다. 현재는 14.5%의 양산용 태양전지를 만들고 있다.

단결정 웨이퍼는 많은 독립적인 웨이퍼 공급업체들이 있지만 다결정 웨이퍼는 주로 독립적이지는 않다. 1995년까지 단 한 개의 웨이퍼 공급업체가 있었다. Crystalox와 GT Solar의 다결정 실리콘의 개발은 Deutche Solar(Bayer Solar)나 Scanwafer社와 같은 독립적인 웨이퍼 공급업체를 태양광 산업으로 발전시켰다. 80년대에는 대면적을 자를 수 없었으나 1995년부터 15 × 15 cm<sup>2</sup> 크기의 산업용 태양전지를 위하여 웨이퍼 절단 기술이 발전되었다[13]. 특별히 Shaping Wywtems, Meyer+Berger, M. Setek와 같은 회사에 의해 웨이퍼 절단 기술이 발달되었다. 1990년까지 다결정 실리콘 태양전지의 성장에 대한 보고가 여러 기관에 의해 되었다[14]. 연구용 태양전지 개발에 있어서는 게더링과 결함 패시베이션을 통한 효율의 향상이 있었다. 1989년에는 UNSW에서 17.8%의 다결정 실리콘 태양전지를 처음으로 개발하였다[15]. 이러한 작은 면적의 태양전지의 공정 기술은 양

산에 적용하기에는 많은 문제점이 있다. 이러한 소면적의 태양전지의 연구는 결국 양산을 위한 태양전지의 개발의 기초가 되는 중요한 밑거름이 된다. 즉, 소면적의 게더링과 패시베이션 기술은 산업용 태양전지에 적용되어서 훌륭한 성과를 거두었다. Kyocera는 Bifacial SiN를 이용하여 100 cm<sup>2</sup>의 크기의 15.72%를 가지는 다결정 태양전지를 개발하였다 [16]. 1989년에는 ENE에서 400 cm<sup>2</sup>의 크기의 9.6%의 효율을 보이는 태양전지를 개발하였다. 많은 대학에서 태양전지의 효율의 개선을 위하여 노력하고 있는 중에 태양광 회사들은 저가화와 대량생산 기술에 주력하였다. 80년대 말까지 대부분의 태양광 회사들은 리소그래피 대신에 스크린 인쇄를 이용하였다. 또한 Solarex(현BP Solar)는 튜브형의 확산 공정을 벨트 퍼니스 확산 공정으로 개발시키면서 특허를 내었다[17].

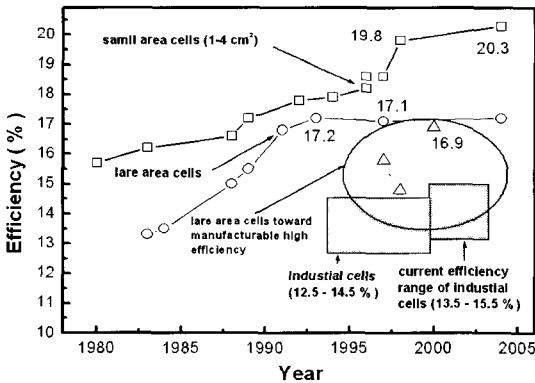


그림 2. 지난 20년 동안 다결정 실리콘 태양전지 효율의 발전.

GIT는 포토리소그래피와 이베퍼레이터와 Forming Gas 열처리를 이용하여 18.6%의 다결정 태양전지를 제작하였다[18]. UNSW는 포토리소그래피와 이베퍼레이터 또한 벌집모양의 텍스처를 이용한 PERL 구조를 가진 19.8%의 다결정 태양전지를 개발하였다[19]. 연구용의 태양전지 기술은 대면적 태양전지의 개발에 쉽게 접목 되지는 않는다. 많은 공정 장비의 개발과 공정이 필요하다. IMEC는 이러한 어려움을 극복하며 개발해 나갔다. 1992년

산업용 태양전지를 위한 Pilot Line을 구성하고 대량 생산을 이루어 나갔다. 이러한 노력으로 저가화와 대량 생산의 가속화를 이루었다. 여러 크기의 면적을 가진 태양전지가 개발되었다. 이러한 효율의 개선은 태양전지의 모델과 특성 분석 기계적인 텍스처, 급속열처리 기술의 개발로 이루어졌다[20-24]. 또한 연구기관에서도 Pilot Line을 구성하여 연구기술을 양산기술로의 접목에 노력하고 있다. 이러한 노력은 또한 태양광 산업을 위하여 많은 과학자들과 기술자들을 배출하였다. 1965년에 PECVD를 이용하여 SiN가 증착되었다[25]. 수소를 포함하고 있는 SiN 반사방지막은 금속 접촉을 위한 열처리시 웨이퍼 속으로 확산되어 벌크 패시베이션을 이룬다. 수소의 포함과 결정 결함의 패시베이션에 대한 메커니즘은 참고문헌[26,27]에서 보고하고 있다. 첫 번째 SiN 반사방지막을 이용한 산업용 다결정 태양전지는 1984년에 개발되었다[28]. 그러나 90년대 말까지 이러한 패시베이션 공정이 널리 쓰이지는 않았다. IMEC은 한 번의 열처리로 급속 접촉을 이루는 동시 열처리 공정과 SiN를 뚫고 열처리하는 공정을 개발하였다[29]. 이러한 공정은 16.3%의 효율의 다결정 태양전지를 가능하게 하였으며 열처리 공정의 단계를 축소 시켰다.

태양광발전은 경제, 에너지, 환경을 조화롭게 번영 발전시킬 수 있는 일석삼조의 유망한 기술이다. 본 논문은 태양전지 분야 시장현황을 살펴보고, 지상전력용 태양전지의 고효율화 동향과, 저가화 동향을 논의하고 향후 태양전지 산업에 대한 전망으로 결론을 맺는다.

## 2. 시장현황

태양전지 분야 세계시장은 지난 5년간 30% 이상의 성장률을 보이고 있다[30-32]. 이러한 고성장은 태양전지 산업체의 기술개발 결과에 기인한 것일 뿐만 아니라 선진국가의 보급촉진 정책과 중앙과 지방 정부의 인센티브 제도의 결과이다. 태양전지 생산 업체는 크게 일본, 미국, 유럽, 나머지 국가 등으로 분류될 수 있다. 현재 일본이 생산과 소비에서 세계

를 선두에서 이끌고 있다. 이는 과감한 연구개발 투자와 생산에 민간자본의 대규모 투자, 새로운 재료와 생산기술 개발로 태양전지 단가 하락 그리고 '쿄토 의정서'와 같은 국제환경 규제와 압력 등의 요소로 어느 국가보다도 보급정책을 입법화하여 실행하고 있기 때문으로 분석된다. 일본 회사들은 일본이 정책적으로 설정한 목표를 약속대로 충실하게 이행하고 있는 반면에 여타의 다른 국가들은 일본만큼 생산량이나 생산 기반기술 관련하여 일본보다 기술 경쟁 우위를 점유하지 못하고 있다. 태양전지를 지상전력에 이용하고자 하는 일본의 정책과 실행은 세계 나머지 국가들에게 어떻게 중앙정부와 지방정부 그리고 민간자본이 유기적으로 결합해야 하는지를 보여주는 좋은 본보기가 되고 있다.

일본은 세계에서 상위 10위권에 위치한 회사를 4개나 가지고 있다. 또한 일본의 Sharp사는 세계 최

선두 1위 태양전지 생산업체로 2005년 기준 연간 450 MW를 생산하였다[3]. 일본에서 태양전지 분야 다른 주요 생산업체는 Kyocera, Sanyo 그리고 Mitsubishi 등이 있다. 유사하게 미국의 BP-Solar社は 2005년 연간 생산량이 105 MW로 세계 5위의 업체를 유지하고 있다[32]. 미국에서 세계 10위권에 위치한 다른 태양전지 생산업체는 Shell Solar사와 GE(구 Astropower)社이다. 유럽에서 Isofoton社가 2005년도에 연간 생산량 75 MW를 기록하고 있으며, 2006년도에는 연간 생산량 90 MW를 목표로 하고 있다. 지난 12년 동안 태양전지와 태양전지 모듈 효율과 생산량 측면에서 괄목할 만한 성장이 있었다. 2001년 태양전지 연간 생산량은 400 MW였고, 2002년의 생산규모는 900 MW, 2006년의 생산규모의 시설용량은 3,500 MW(3.5 GW)를 가지고 있다. 현재 생산규모로 상위 10위 이내에 위치한 회사는

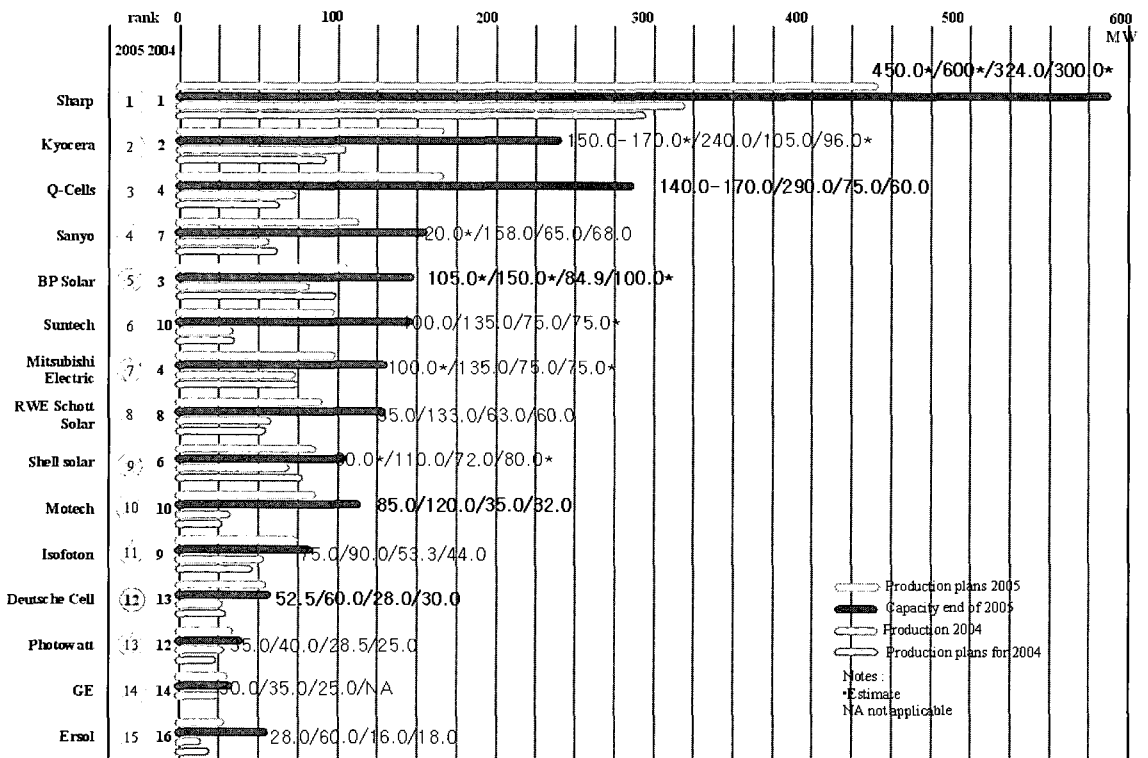


그림 3. 태양전지 산업계의 생산용량 분야의 상위 15위권 이내 회사의 생산량변화도.

Sharp : 600 MW, Q-Cell : 350 MW, Kyocera : 240 MW, Sanyo : 165 MW, Suntech: 300 MW, Motech : 180 MW, Mitsuhsbi Electric : 140 MW, Schott Solar : 132 MW, Shell: 160MW, BP Solar : 200 MW, GE : 35 MW, Photowatt, Lsofoton, RWE 각社의 생산용량 : 50 MW 미만 그리고 2005년을 거치면서 중국의 괄목할 만한 성장이다. Sunpower : 65MW, Ningbo Solar Cell Factory : 100 MW, Shenzhen Toray Solar : 50 MW, CEEG Najing PV-Tech : 160 MW, Jiang-Ao Solar 75 MW 등 참으로 급성장하는 중국의 시장은 중국정부의 계획과 체계적인 보급지원이 시장에서 결과로 나타나고 있으며 2006년에도 급속한 성장은 가속될 것이다. 비록 10위권 이내에는 들지 않았으나 Kaneka, Solartech, ASE, United Solar System, Evergreen Solar와 그리고 Eurosolare 등이 연간 생산량 규모로 30 MW 내외의 생산을 담당하고 있다. 그림4의 2004년 말 태양전지 발전규모는 거래규모는 1,195 MW/년 이며, 현재 시점의 세계규모는 보다 증가한 상황이다.

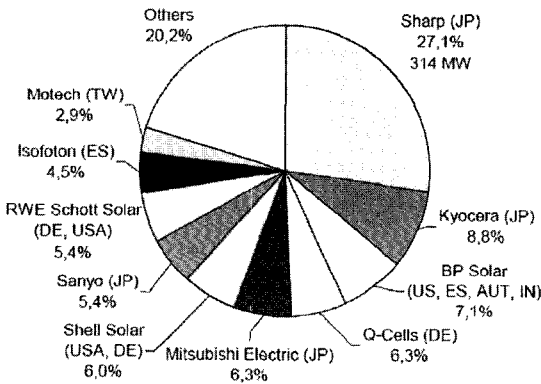


그림 4. 2004년 말 기준의 태양전지 거래규모[34,35].

재료측면에서 태양전지 시장 점유율 현황은 단결정 실리콘: 36.4 %, 다결정 실리콘: 54.7 %, CdTe (Cadmium Telluride) : 1 %, 비정질계 실리콘 박막 태양전지 : 4.4 %, CIS(Copper Indium Diselenide) : 0.4 %, 박판 실리콘 : 3.3 %. 태양전지 시장의 98.6 % 가 실리콘을 기반으로 한 태양전지 재료를 구성하고 있다[34]. 그림5에서는 태양전지 재료별 세계 태양전

지 산업계의 현황을 보여주고 있다. Si 태양전지가 세계 생산량의 99% 정도를 차지하고 있으며, Si 중에서도 결정계 Si 태양전지가 세계 생산량의 90% 이상을 차지하고 비정질 Si 태양전지는 3% 내외를 차지하고 있다. 실리콘 이외의 태양전지로서 CdTe, CIS, GaAs 등은 전체를 합하여 약 1%이며 아직 대량생산 단계에는 도달하지 못하고 있다. 실리콘 태양전지로 효율 16%는 이미 일반적으로 구입 가능하며, 단결정과 다결정 실리콘이 현재의 시장에서 가장 성공적이다. 국내에서는 이런 결정질 실리콘을 기반으로 하여 (주)KPE(Kyungdong Photovoltaic Energy, 구 포톤반도체에너지)가 국내 최초로 자동화 양산체제를 가지고 연간 36 MW 생산규모로 창원에 생산기지를 두고 태양전지 양산을 수행하여 70% 이상의 생산량을 수출에 공급하고 있는 상황이다.

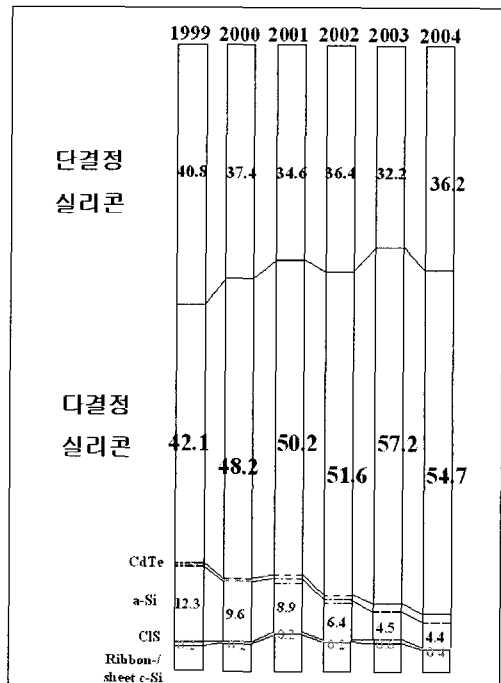


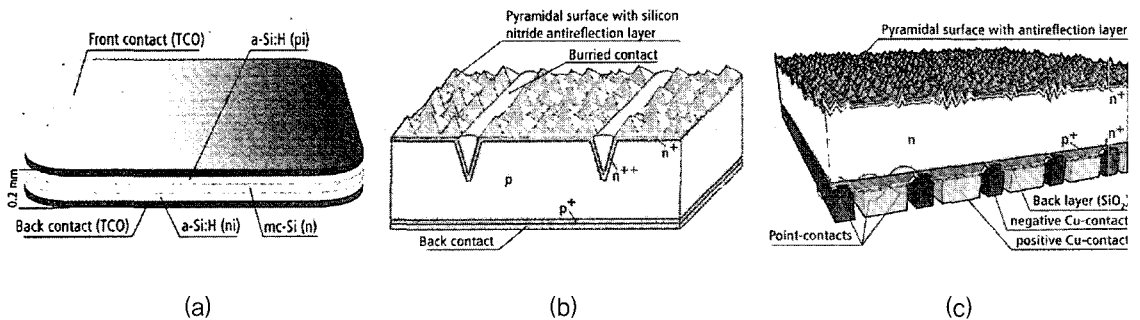
그림 5. 태양전지 산업현황은 결정질 실리콘계 태양전지가 가장 활발함[34].

### 3. 지상전력용 태양전지의 고효율화 동향

세계적으로 3개의 회사만이 제 1세대 초고효율 태양전지 양산을 실행하고 있다(그림6). 그중에서 Sanyo는 단결정 실리콘 기판에 비정질 실리콘 박막을 성장하는 이중접합 구조인 Heterojunction with Intrinsic Thin-layer(HIT) 태양전지로 양산기준 에너지 변환효율 19.5%를 달성하여 200W 모듈을 시장에 선보이고 있다. 실험실 수준에서는 21.4% 내외의 에너지 변환 효율을 달성하여 초고효율 태양전지 제조분야 기술력을 확보하였다. Sanyo HIT 태양전지는 0.2mm 두께, n-type 단결정 실리콘 기판에 수소화된 진성 비정질 실리콘 층과 투명전도막을 이용한다[35,36]. 두 번째 상용으로 초고효율 태양전지를 양산하고 있는 회사인 BP-solar사에서 생산하는 태양전지는 125mm x 125mm 크기에서 레이저 스크

라이빙과 무전해 도금을 이용한 함몰형 금속 태양전지(Buried Contact Solar Cell, BCSC)이다. 기존의 스크린 인쇄 전극형성 보다 3% 높은 18.3%의 에너지 변환효율을 달성 판매하고 있다. 레이저 스크라이빙을 이용한 홈 형성이 절연박막을 성막한 후에 형성되기 때문에 레이저 스크라이빙된 홈을 따라서 무전해 도금으로 Ni, Cu 그리고 Ag를 차례로 도포한다. 호주의 New South Wales(UNSW)[37,38] 대학에서 개발되어, 2003년부터 BP Solar사에서 연간 생산량 30MW를 BCSC형 초고효율 태양전지를 양산하고 있다.

미국의 Sun Power사는 후면에 모든 전극이 집적화된 태양전지인(Back Integrated Cell, BIC) 제3의 초고효율 태양전지 양산 대열에 뛰어들고 있다. Sun Power사는 2004년에 비교적 기판 재료가 고품질로 고가인 FZ 실리콘 기판을 고품질인 CZ 기판을 이용



회사	장·단점	구조	장점	단점	비고
Sanyo(HIT)	P+/i type a-Si:Hi/ CZ n-형 단결정, 200 $\mu$ m / i/n+ type a-Si:H	그림(a)	저온 공정 기존 비정질 생산라인 활용	초기 투자비과다 대면적 양산 불리 (100mm, TCO) 대량생산 불리	연구: 21% 양산: 17%
BP(BCSC)	Ag/Cu/ Ni/n+/ CZ p-형 단결정, 270 $\mu$ m / P+/Al/Ni/Cu/Ag	그림(b)	기존공정 활용 박형 가능 대면적 가능 (현재 125mm)	제조시간 장시간 무전해 도금 3층 금속 공정 불리 공정 단순화 불리	연구: 22% 양산: 18%
Sun power(BIC)	SiO <sub>2</sub> /N+/n-형 단결정 FZ, 280 $\mu$ m / p+/Cu or n+/Cu(전극 후면)	그림(c)	모듈화가 저가 고품질 기판 전면손실 저감 스크린 인쇄	초고속도 FZ 기판 기판고가, 소면적 (125mm 이하) 단가, 모듈불리	연구: 21% 양산: 개시

그림 6. 제1세대 초고효율 태양전지 양산을 수행하고 있는 세계적으로 3개의 회사.

하여 양산을 개시하고 있다. 국내에서는 삼성 SDI 연구실에서 70 mm x 70 mm 면적에서 BCSC 라는 21 %내외의 초고효율 태양전지 개발에 성공하여 대한민국 10대 신기술 상을 수상한 바 있다.

#### 4. 지상전력용 태양전지의 저가와 동향

단결정 실리콘 태양전지는 원가구조상, 60% 이상 이 태양전지 기판재료비에 소모된다. 이런 고비용 원부자재에 대한 현실적인 대안으로 다결정 실리콘 태양전지가 집중적으로 연구개발 되어 태양전지 제조공정을 저비용 체재로 개선하고 기존의 단결정 실리콘 태양전지에 근접한 변환효율을 달성함으로써 시장점유율 구조에서 이미 단결정 실리콘 태양전지를 앞지르고 있다. 단결정 실리콘 태양전지의 시장 점유율은 1999년 40.1%에서 2005년 36.2%로 감소하고 있는 반면에 다결정 실리콘 태양전지는 1999년 42%의 시장점유율에서 2005년 54%로 증가하고 있어 다결정 실리콘을 이용한 태양전지 저가와 고효율 공정개선에서 강점을 가지고 있음을 알 수 있다. 다결정 실리콘의 기판원부자재는 단결정 실리콘에 비해 30%정도 저렴하다. 그러나 기판의 품질면에서는 단결정보다 저하되며, 특히 결정결함으로 인해 소수 반송자 수명이 현저히 낮으며 이는 에너지변환 효율에 치명적인 저하를 가져오는 광생성된 전하의 재결합 손실로 이어진다. 이를 극복하기 위한 공정 기술로 표면 부동태화(Surface Passivation), 최적 도핑, 게터링, 선택적 에미터 접합, 반사방지막, 텍스처링, 스크린 인쇄, 급속열처리, 후면전계 구조 등을 적절하게 이용하여 다결정실리의 태생적인 결함을 보완하여 단결정 실리콘에 근접한 고효율을 달성하고, 원부자재의 가격경쟁력을 바탕으로 가격과 효율을 조화시킴으로 시장을 확대하고 있다. 2006년 현재 다결정 실리콘 태양전지를 이용하고 실리콘 질화막으로 반사방지막과 표면 부동태화를 달성하고 스크린 인쇄기술로 금속을 형성하여 기존의 14%에서 16% 변환효율 달성을 보고하고 있다. 또한 다결정 실리콘 태양전지를 이용했을 경우 실험실 규모에서 가장 높은 에너지 변환효율로는 20.3%로 다결정 실리

콘 태양전지의 초고효율 달성 잠재력을 제시하였다.

미래의 태양전지 소재와 태양전지 가격 하락을 위해서는 2가지 시나리오가 존재한다. 첫 번째는 현재 단결정과 다결정 실리콘의 기판 두께가 0.35 mm 인 기판재료를 0.1 mm 두께로 얇게하여 원부자재 비중을 1/3로 축소하고 제조공정에 파손을 최소화 하는 방안이다. 이런 접근 방안은 향후 5년 이후에 시장을 지배할 기술로 예상된다. 이런 접근법을 사용하여 시장을 확대하고 있는 회사로는 GE(구 Astropower, Si Sheet), RWE(EFG), Evergreen (String Ribbon) 등이 기초 기반기술에서 우위를 보이고 있으며, 국내현황은 동분야에 대한 기술개발이나 상용화가 전무한 상황이나 향후 무게 중심을 두어 연구개발과 상용화를 추진해야 한다. 그 이외의 회사들은 Multi-wire Saw를 이용하여 최대한 기판을 얇게 만들어 태양전지를 제조하는 기술을 확보하고자 한다. 2006년 현재 0.05 mm 두께의 기판까지 Multi-wire Saw로 절단이 가능함을 보이고 있어 근시일 내에 첫 번째 시나리오가 현실로 다가올 것이다. 두 번째 시나리오는 향후 10년 이후에 시장을 주도할 박막형 실리콘 태양전지 접근법이다. 막 태양전지는 현재 소모되는 기판 두께 보다 1/100 정도 얇은 활성박막 층이 저가의 기판재료에 성막된다. Sharp社는 이미 이런 결정질 실리콘 후막을 이용한 Flexible 태양전지 모듈을 상품화하여 출시하였다. 박막 실리콘 태양전지 접근법은 Sanyo社에서 가장 먼저 진행하여 Kaneka, Unisolar 등에서 추진하고 있으나 초기 투자비용이 과다하며, 무엇보다도 태양전지의 신뢰도 측면에서 보완이 필요하다. 이에 대한 연구개발이 진행되고 있으며 효율 개선을 위한 노력도 병행되고 있어 향후 10년 이후에는 시장의 점유율을 확대할 것으로 예상된다. 이런 박막 태양전지의 장점은 기존의 태양전지는 개별 전지를 독립적으로 제조한 후에 다시 모듈화 하는 과정을 거치지만 박막형 태양전지는 직접 태양전지 제조과정에서 모듈로 제조가 가능하므로 지상전력용에서 제조단가를 축소할 여지를 가지고 있다. 이런 박막 태양전지 재료로는 수소화된 실리콘 화합물(Si:Ge, a-Si:H, Poly-Si, Si:C) CIS(Copper Indium Diselenide), CdTe(Cadmium Telluride), 염료 태양전지 등이다.

수소화된 실리콘 화합물은 이미 상용화에 성공을 거두어 약 10% 내외의 태양전지 시장을 점유하고 있으며 계산기, 시계 등에 적용이 되고 있다. 파일롯 규모의 CIS 태양전지는 현재 연구개발이 가장 활발한 분야 중에 하나로 파일롯 규모의 태양전지 생산이 진행되고 있는 상황이다. 연구실 수준에서 CIS 태양전지 생산과정이 어려우나 18% 정도의 효율 달성이 가능함을 보고하고 있다[39]. CdTe를 기반으로 한 박막형 태양전지는 제조과정이 용이하다는 장점을 보이고 있으나, 원재료의 독성물질로 인해 환경과 재해요소를 극복해야 하는 어려움이 있다. 실제로 BP Solar社は 운영하고 있던 CdTe 태양전지 생산기지를 2002년에 폐쇄하고 결정질 실리콘 태양전지 생산기지로 전환하였다. 향후에도 이러한 어려움이 극복된다는 개발 결과가 제시되지 않는다면 차세대 태양전지로 고려되기 어렵다. 박막 태양전지 분류의 마지막 종으로  $TiO_2$ 와 염료를 기반으로 한 박막형 태양전지는 스위스에서 유기염료로 초기에 개발되어 미국의 플로리다 대학에서 15%에 근접한 태양전지제조가 가능함을 제시함으로써 세간의 주목을 받은 태양전지이다. 이러한 박막 태양전지 모두는 저가화를 기반으로 연구개발을 수행하여 향후 10년 이후를 대비해야 한다. 이런 박막 태양전지는 1  $\mu m$  두께로도 태양광전 변환이 충분하기 때문에 미래의 태양전지 저가화에 근본적인 해결방안이 될 것이다. 또한 유리나 금속 이외의 보다 저렴한 박막 기판재료로 플라스틱을 사용하는 방안도 저가화 달성에 비중을 두어서 개발을 진행하여야 할 것이다.

## 5. 태양전지 산업의 전망

태양광 발전시스템은 우주항공, 인공위성의 전력에서 섬이나 오지 등에 전력원으로 사용되어 왔고 근래에는 이미 일반주택, 아파트, 빌딩, 공장, 공공건물, 학교 등이 주요 응용시장으로 확대되고 있다. 일본, 중국, 스페인, 미국, 이탈리아, 독일, 오스트리아, 유럽공동체 등은 이미 태양전지를 이용한 발전용의 태양광주택 보급을 개시하였다. 일본은 이미 10년 앞선 1994년부터 보급을 시작하여 왔으며 현재는 이

러한 프로그램을 2006년까지 완성하는 단계이다. 이러한 보급 프로그램을 주요인자로 하여 일본의 태양광 산업계는 세계적으로 기술과 생산 분야에서 모두 선두 위치를 점유하고 있다. 1994년에 보급설치를 시작하여 1995년 577세대의 개인 주택에 3 kilowatts 급을 보급하였으며, 1996년에는 1,866 기의 태양광 시스템을 보급하였다. 이때 초기단계의 정부보조율은 시스템가의 50% 이상을 보조하였다. 2005년 말 기준 일본에 보급된 태양광 주택수는 306,600 가구를 넘고 있다. 독일은 태양광 주택 보급을 시작하여 "100,000 roof" 프로그램을 2003년 중반까지 완성하고 2004년 현재 차기 보급안과 입법화 프로그램을 재추진하고 있는 상황이다. 다양한 정부의 프로그램과 특정 전시지역의 데모를 통한 지역의 장벽을 제거하는 요인이 되고 있다. 이러한 프로그램은 2010년까지 지속적으로 있을 것으로 예상되며 2010년 이후는 상용전력단가와 경쟁 가능한 W당 60%에 전력을 생산할 것으로 예측되고 있다.

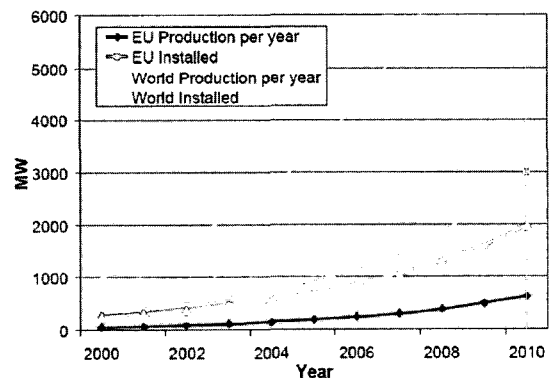


그림 7. 태양전지의 연간 생산량 추이와 향후 생산규모 예측도[42].

과거와 현재까지의 태양전지분야를 살펴보면, 우리는 태양광분야의 세계 추세를 예측할 수 있다. 현재 태양전지는 1세대에서 2세대 태양전지로 변화를 겪고 있는 과정으로서, 주요 재료는 현재 실리콘을 기반으로 한 태양전지가 시장을 주도하고 있으며 2세대에서도 물질변동 없이 두께를 얇게 하고 면적을 증가하는 방향으로 이동하여 향후 5년 이후까지



도 상당기간 지속할 것이다. 현재 비교적 소면적인 (103 mm x 103 mm, 125 mm x 125 mm) 태양전지는 대면적(200 mm x 200 mm 이상)으로 대치될 것이다. 시장 확대의 주요 원동력인 정부보조와 고급촉진 정책을 통해서 보다 높은 에너지 변환효율이 달성될 것이다. 향후 5년 이내에 25% 사용 태양전지 양산이 될 것으로 예상되며, 모듈 수명은 30년 이상이 될 것으로 예상된다. 이러한 기술 분야의 해결을 위해서는 산업계의 노력과 연구소와 학계가 공동으로 한계 극복을 위하여 꾸준히 노력하는 것이 중요하다. 지속적인 산·학·연 공동의 노력은 향후 새천년에 청정하고 지속가능한 발전을 하면서도 오염이 없는 환경을 구축하는데 기여할 것이다.

### 참고 문헌

- [1] D. M. Chapin, C. S. Fuller, and G. L. Pearson, "A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power", *Journal of Applied Physics*, 25, p.676, Mary 1954.
- [2] J. Yi, "Properties and Applications of Thin Films Amorphous and micro-crystalline(poly) Silicon", Ph.D. Dissertation, SUNY at Buffalo, NY, 1994.
- [3] Sarasin Studie: PV 2001 Markt, Akteure, und Prognosen, Sarasin Research, Bank Sarasin and Cie, Basel 2001
- [4] M. A. Green, "Recent developments in Photovoltaics", *Solar energy*, 2003 (Article in Press)
- [5] J. F. Hoelscher, *IEEE PVSC*, p. 745, 1981.
- [6] PV industry information service Report PC-11, Strategies Unlimited and Private communications, Bob Johnson Strategies Unlimited, July 2000.
- [7] A. Goetzberger, A. Ruber, 4-PVSEC., Sydney, p. 135, 1999.
- [8] H. Watanabe, 4-PVSEC., Sydney, p. 103, 1999.
- [9] F. Ferrazza, et al., Second World Conference and Exhibition on PV Solar Energy Conversion, Vienna, p. 1220, 1998.
- [10] R. L. Mitchel, et al., *IEEE PVSC*, p. 1073, 1997.
- [11] K. Kyojiro, et al., PVSEC-11, Sapporo, p. 119, 1999.
- [12] J. H. Wohlgemuth, et al., *IEEE PVSC*, p. 1055, 1997.
- [13] S. Fujii, et al., PVSEC-11, Sapporo, p. 123, 1999.
- [14] H. Watanabe, PVSEC-6, New Delhi, p. 745.
- [15] S. Narayanan, et al., PVSEC-4, Sydney, p. 111, 1989.
- [16] K. Shirasawa, et al., PVSEC-3, p. 97, 1987.
- [17] Tim Koval, US Patent 4360393, 1982.
- [18] A. Rohatgi, et al., *IEEE PVSC*, p. 741, 1996.
- [19] J. Zhao, et al., *IEEE Trans. Edu.* 46(10) p. 1978, 1999.
- [20] R. Mertens, 12th PVSEC, Amsterdam, p. 1, 1994.
- [21] T. Nunoi, et al., Tech digest 9th Sunshine Workshop, Tokyo, p. 125, 1996.
- [22] E. Van Kerschaver, et al., Second World Conference and Exhibition on PV Solar Energy Conversion, Vienna, p. 1479, 1998.
- [23] I. Perichaud, et al., Second World Conference and Exhibition on PV Solar Energy Conversion, Vienna, p. 1291, 1998.
- [24] W. Warta, et al., Second World Conference and Exhibition on PV Solar Energy Conversion, Vienna, p. 1650, 1998.
- [25] H. F. Streling, R. C. G. Swann, *Solid State Electron.* 8 p. 653, 1965.
- [26] B. S. Sopori, et al., PVSEC, Montreux, p. 246, 1992.
- [27] A. G. Aberle, PVSEC-11, Sapporo, p. 569, 1999.
- [28] K. Kimura, et al., PESCE 1, Kobe, p. 37, 1984.
- [29] F. Duerinckx, et al., 14th EC PVSEC, Barcelona, p. 792, 1997.
- [30] Sharp Corp, press release, 23 July 2002
- [31] BP Solar, press release, 5 July 2001
- [32] P. Maycock, PV news, February 2006
- [33] Research, Solar Cell Production and Market Implementation of Photovoltaics, PV Status Report 2005, August 2005
- [34] Photon International, 110, March 2006
- [35] A. Goetzberger, C. Hebling, H.W. Schock, "Photovoltaic materials, history, status and outlook", *Materials Science and Engineering R* 40, 2003
- [36] M. Taguchi, K. Kawamoto, T. Baba, H. Sakata, M. Morizane, K. Uchihashi, N. Nakamura, S.Kiyama, O. Oota, "HIT TM Cells high efficiency crystalline Si cell with novel structure", *progress in Photovoltaics*, 2000; 8: 503 -513.
- [37] M. A. Green, "Silicon Solar Cells: Advanced Principles and Practice", Bridge Printery, Sydney,

1995

- [38] J. Zhao, A. Wang, M. A. Green, " 19.8 % efficient ' honeycomb' textured multicrystalline and 24.4 % monocrystalline silicon solar cell", Applied Physics Letters 1998; 73: 1991-1993
- [39] A. Delahoy, P. Myers, " Thin Film Solar Cells: Course Notes , In: 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Anaheim, 1997
- [40] Arnulf Jager-Waldau, Status of PV Research, Solar Cell Production and Market Implementation in Japan, USA and the European Union, European Commission, DG JRC, Institute for Environment and Sustainability, Renewable Energies Unit Via Enrico Fermi 1: TP 450 I-21020 Ispra, Italia, September 2002
- [41] R. Tyagi, M. Bal, M. Singh, Satish Mohan, T. Haldar, A. Naik, Premveer Singh, M. Husain and S. K. Agarwal, Solar Energy Materials and Solar Cells, 3, p.257, 2003
- [42] PVNET, "European Roadmap for PV R&DR&D for PV Products Generating Clean Electricity", Contract Reference: ENK6-CT2001-20400, 2005.

저자약력



성 명 : 이준신

◆ 학 력

- 1989년 성균관대 전기공학과 공학사
- 1991년 뉴욕주립대 전기공학과 공학석사
- 1994년 뉴욕주립대 전기공학과 공학박사

◆ 경 력

- 1990년 - 1994년 뉴욕주립대 연구조교
- 1995년 - 2004년 산업전자응용연구소 연구원
- 1995년 - 현 재 성균관대 정보통신공학부 교수
- 1996년 - 2004년 정보통신연구소 연구원
- 1997년 - 2004년 반도체 생산기술 연구소 연구원

