

태양전지용 기판재료 시장동향

글 _ 왕중희, 최의석 || 요업(세라믹)기술원
jhwang@kicet.re.kr

태양광 발전(photovoltaic power generation) 기술은 입사된 태양광(photon)으로부터 전기를 생산하는 무한, 청정 발전(發電) 기술로서, Fig. 1¹⁾에 나타낸 바와 같이 태양광 어레이(photovoltaic array)와 주변장치(BOS: balance of system)로 구성된다.

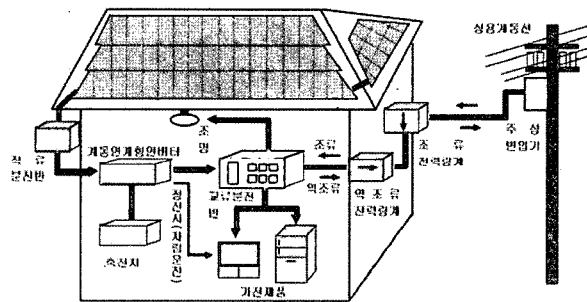


Fig. 1. 태양광발전시스템의 구성도¹⁾

태양광 어레이는 입사된 태양광으로부터 전기(직류)를 발생하는 기능을 하며 최소단위인 태양전지(solar cell), 태양전지의 조합인 모듈(module), 그리고 실제 사용부하에 적합하도록 여러 장의 모듈을 배열한 어레이(array)로 구성된다. 태양전지는 비, 눈 또는 구름에 의해 태양광이 비치지 않는 날과 밤에는 전기를 발생하지 않을 뿐만 아니라 일사량의 강도에 따라 불균일한 직류전기가 발생되므로, 태양광 어레이와 함께 안정된 전기공급을 위한 전력 조정기(power controller) 또는 직, 교류 변환장치(inverter), 전력저장용 축전기(storage battery) 등의 주변장치로 구성된다.

태양전지는 다양한 기판(유리, 플라스틱, 실리콘 기판, 금속 포일 등) 위에 제조될 수 있으나, Table 1²⁾에서 나타낸 바와 같이 현재 전 세계 태양전지 생산량의 약 85%

Table 1. 2003 World Cell/Module Production by Cell Technology²⁾

Technology	Production (MW)					Total	Proportion of total
	US	Japan	Europe	ROW			
Polycrystalline	13.42	271.23	114.50	60.65	459.80	61.79%	
Single crystal flat-plate	68.00	44.17	71.15	17.15	200.47	26.94%	
Single and polycrystalline total	81.42	315.40	185.65	77.80	660.27	88.73%	
Amorphous silicon	7.10	0.01	7.70	3.00	17.81	2.40%	
Amorphous silicon indoor use	0.00	5.00	0.00	3.00	8.00	1.00%	
Amorphous silicon total	7.10	5.01	7.70	6.00	25.81	3.40%	
Crystal silicon concentrators	0.70	-	-	-	0.70	0.10%	
Ribbon (silicon)	6.80	-	-	-	6.80	0.90%	
Cadmium telluride indoor	0.00	0.00a	-	-	-	-	
Cadmium telluride outdoor	3.00	-	-	-	3.00	0.40%	
Copper indium diselenide	4.00	-	-	-	4.00	0.54%	
Microcrystalline Si/single Si	-	13.50	-	-	13.50	1.82%	
Si on low-cost substrate	0.00	-	-	-	0.00	0.00%	
A-Si on Cz slice	-	30.00	-	-	30.00	4.00%	
Total	103.02	363.91	193.35	83.80	744.08	99.89%	
Total indoor use (8.0 A-Si + 1.5 CdTe)					9.60		
Total terrestrial production					734.48		

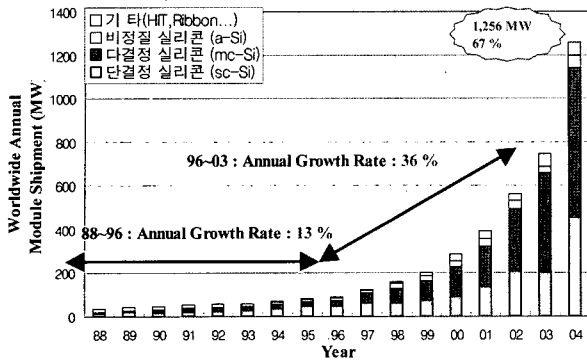


Fig. 2. Annual module shipment³⁾.

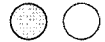
이상이 단결정 또는 다결정 실리콘 기판을 사용하여 제조되고 있다. Fig. 2³⁾는 년도별 annual module shipment을 나타낸 것으로 2001년도는 global installed capacity가 1GW 이상을, 2004년도는 annual production이 1GW 이상을 기록하였다.

단결정 실리콘 태양전지의 원가구조에서 태양전지 기판재료가 차지하는 비율은 60%이상이다.⁴⁾ 이런 고비용 원부자재에 대한 현실적인 대안으로 다결정 실리콘 태양전지를 집중적으로 개발하여 태양전지 제조공정을 개선함으로써 기존의 단결정 실리콘 태양전지에 근접한 변환 효율을 달성하였고 시장점유율 구조에서 이미 단결정 실리콘 태양전지를 앞지르고 있다. 하지만 단결정 실리콘 태양전지의 시장 점유율이 1999년 36.4%에서 2000년과 2003년에 약 30%로 떨어진 것을 제외하고는 시장이 급팽창함에도 꾸준히 36% 정도를 유지하고 있다는 것도 주목할 만하다. 다결정 실리콘 태양전지는 최근 몇 년간 45-60% 범위에서 안정된 시장점유율을 보여주고 있는데 이는 다결정 실리콘 기판의 대량생산화가 용이하여 일반적인 형태의 스크린 프티팅 태양전지를 제조하는 업체들이 선호하기 때문으로 생각된다. 다결정 실리콘의 기판 원부자재는 단결정 실리콘에 비해 30%정도 저렴하다. 그러나 기판의 품질은 단결정 실리콘보다 낮다. 특히 소수 반송자 수명이 결정결함으로 인해 현저히 낮으며 이는 에너지변환 효율에 치명적인 저하를 가져오는 광생성된 전하의 재결합 손실로 이어진다. 이를 극복하기 위한 공정 기술로 표면 부동태(surface passivation)와 최적 도핑, 게터링, 선택적 에미터 접합, 반사방지막, 텍스처링,

스크린인쇄, 급속열처리, 후면전계 구조 등을 적절하게 이용하여 다결정 실리콘의 태생적인 결함을 보완하여 단결정 실리콘에 근접한 고효율을 달성하고, 원부자재의 가격경쟁력을 바탕으로 가격과 효율을 조화시킴으로써 시장을 확대하고 있다. 2003년 다결정 실리콘 태양전지를 이용하여 실리콘 질화막으로 반사방지막과 표면 부동태화를 달성하고 스크린 인쇄기술로 금속을 형성하여 기존의 14%에서 16% 변환효율 달성을 보고하고 있다. 또한 다결정 실리콘 태양전지를 이용하여 실험실 규모에서 가장 높은 에너지 변환효율인 19.8%로 초고효율 기술의 잠재력을 제시하였다.

그러나 단결정 기판 시장의 지속적인 성장도 역시 주목할 만하다. 저가격 대량 보급형의 다결정 태양전지에 비해서 단결정 태양전지의 장점도 무시할 수가 없다. 현재 세계적인 3대 고효율 태양전지 회사들(Sanyo, BP solar, SunPower)은 기존의 상용화 태양전지와 구조가 다른 고효율 태양전지를 양산화 하고 있는데 아직은 고효율 태양전지를 양산화하기 위해서는 단결정이 필수적이다. 더구나 고효율은 설치 면적을 줄일 뿐만 아니라 모듈 면적을 줄일 수가 있어서 모듈에 소요되는 재료비를 포함한 모듈제조 단가를 줄일 수가 있고 설치에 필요한 공사비, 땅 값 등도 줄일 수 있기 때문에 최종적인 설치 가격은 다결정과 단결정태양전지가 비슷한 상태다. 현재 전문가들 사이에도 어떤 것이 좋다는 결론을 내리지는 못하고 있다. 따라서 기판에 따른 태양전지 시장은 최소한 2010년까지는 지금의 추세가 이어지리라고 예상된다.

Table 2⁵⁾는 태양전지 산업 예측 자료로서 태양전지 산업은 현재 US\$7bn에서 2010년 US\$30bn으로 추정하며 생산 단가는 계속 떨어지는데 반해 가격은 안정설치가 가격은 안정되게 형성될 것으로 추정이 되기 때문에 태양광 관련회사들의 수익이 꾸준히 증가할 것으로 예상된다. 앞으로 약 3년 정도는 실리콘 feed stock의 공급이 부족하여 US\$32/kg의 높은 가격이 형성될 것으로 추정되고 앞으로 원료 공장들의 추가 설립이나 생산량의 증가로 다시 가격이 내려 갈 것으로 예상된다.⁶⁾ 그리고 Table 2에 나타낸 것과 같은 시장 성장률에 대응하여 태양전지를 생산하기 위해서는 대량 생산 기술의 중요성이

Table 2. Outlook for Solar Power Sector⁵⁾

Outlook for solar power sector*								
	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Demand (gigawatt)	0.7	1.0	1.4	1.9	2.4	3.2	4.1	5.3
Demand growth (% Increase in MW)	0.0	40.0	38.0	35.0	30.0	30.0	30.0	30.0
Average installed price (US\$/watt)	7.0	7.1	7.0	6.8	6.5	6.2	5.8	5.5
Revenue pool (US\$billion)	5.0	7.0	10.0	13.0	16.0	19.0	24.0	30.0
Industry avg. operating margin (%)	8.0	11.0	13.0	14.0	14.0	13.0	12.0	11.0
Operating profit pool (US\$billion)	0.4	0.8	1.2	1.8	2.3	2.6	3.0	3.3

* Estimates based on > 60 interviews with solar industry executives, government officials, and customers. Average prices are higher than typical price due to higher-price small wattage modules, higher price installations (often in more remote areas), customer design services, processing fees in some markets, use of additional components (e.g. batteries) in small percentage of installations.

증대될 것으로 판단되며, 현재 태양광 산업은 유아기를 벗어나 대량생산 단계로 이행하는 과도기에 있다. 이러한 추세는 현재 관련업계의 집중과 경쟁 상대의 인수 등과 연관되는 것으로, 새로운 대규모 태양전지 제조업체가 규모의 생산을 통한 저가화 전략을 활용하면 소비자들은 보다 값싸게 시스템을 구입할 수 있으므로 시장의 성장이 가속화될 수 있다.

국내 태양광 발전 시스템 개발 목표를⁷⁾ 통해 확인할 수 있듯이, 2010년까지 현재의 태양 전지 변환 효율 12%를 18%까지 높이고, 시스템 및 발전 단가를 각각 45백만원/3kW와 700원/kWh에서 15백만원/3kW와 270원/kWh로 낮추기 위한 기술개발 노력이 진행될 예정이다. 이를 위해서는 태양 전지 효율의 향상과 함께 원재료 절감과 공정 단순화로 대량 보급이 가능한 태양 전지 개발이 진행되어야 하며, 무엇보다도 태양전지 모듈 가격의 저감을 통해 상용전원과 경쟁이 가능한 수준까지 도달해야 할 것이다. 이를 위해서는 태양전지용(solar grade) 실리콘 기판의 품질향상 및 저가화 기술개발이 가장 시급한 실정이다.

현재 태양전지용으로 사용되는 대표적인 단결정 실리콘 잉곳(ingot) 제조 방법으로는 Czochralski(CZ)법과 Float Zone(FZ)법을 들 수 있다. 두 가지 방법 모두 EG(electronic grade) 다결정 실리콘을 녹여 단결정의 실리콘 잉곳을 성장시킨다. 단결정 실리콘 잉곳 제조용으로 이용되는 CZ법은 실리콘 도가니에 용해된 실리콘이 담겨져 있고, 종자결정을 실리콘 용액에 접촉시킨 후 서서히 끌어올리며 종자결정과 동일한 결정방향성을 갖는 단결정 실리콘을 성장시키는 기술로 태양전지뿐만 아니

라 반도체용 실리콘 잉곳 제조용으로 가장 널리 사용되고 있다. 이때 불활성 가스인 아르곤을 흘리게 되며, 도가니와 종자결정은 일반적으로 반대방향으로 회전하게 된다. 이 회전속도와 결정인상 속도에 따라 결정의 직경 크기 및 결정내의 산소량을 조절할 수 있다. 단결정 성장 장치는 단열재 및 가열기 배치, 온도 변화, 진동, 가스의 주입 등에 매우 민감하기 때문에 안정적인 성장 조건을 결정하기 위해 다양한 조업 변수의 영향을 이론적으로 해석할 수 있는 컴퓨터 시뮬레이션기법이 사용되고 있으며, 현재에도 공정최적화를 위한 많은 연구가 진행되고 있다. CZ법의 경우 도가니로 실리카(silica, SiO₂)를 사용함으로 인해 성장된 잉곳 내부에 다량의 산소가 존재(10¹⁷-10¹⁸/cm³)하는 것이 단점으로 지적되고 있다. 반면 FZ법의 경우 산소오염원인 도가니를 사용하지 않으므로 잉곳의 특성이 우수하며 FZ 실리콘 기판으로 제작된 태양전지의 변환효율이 높은 것이 장점이나, 높은 제조비용으로 인해 태양전지 양산생산에 부적합한 것으로 생각된다. 일반적으로 알려진 다결정 실리콘 잉곳 제조방법으로는 일방향응고법, 상향식 연속주조법, 수평연속주조법 등이 있다. 다결정 실리콘 성장법은 결정성장 기술이 용이하여 자동화 및 대량생산이 가능하며, 대구경 실리콘 잉곳의 제조가 가능하며 결정성장 속도가 빨라 생산성을 높일 수 있는 장점이 있으나, 다결정 실리콘 자체가 갖는 재료적 단점을 극복해야 할 과제로 남아있다.

CZ나 casting법 등으로 제조된 실리콘 잉곳을 웨이퍼 형태로 절단(sawing)하여 태양전지용 기판재료로 활용하고 있다. 태양전지에 사용되는 기판의 두께는 일반적으로 350-400μm이다. 기판 재료를 더욱 얇게 사용하고자

하는 연구가 진행 중이며 실리콘 재료는 태양광에 대해 최고의 광전 변환효율에 근접하는 26% 이상의 효율을 얻을 수 있으나 최대의 약점은 실리콘이 indirect bandgap 반도체 재료이므로 광흡수율이 낮다는 것이다. 90% 이상의 광흡수율을 얻기 위해서는 실리콘 기판의 두께가 100 μ m 이상 되어야 한다. 실리콘 웨이퍼의 두께는 태양 전지의 성능 및 가격을 결정하는 중요한 변수로 공정 최적화를 통해 제조원가 절감을 기대할 수 있다.

현재의 시장 성장률에 대응하여 태양전지를 생산하기 위해서는 대량 생산 기술의 중요성이 증대될 것으로 판단되며, 새로운 대규모 태양전지 제조업체가 규모의 생산을 통한 저가화 전략을 활용하면 소비자들은 보다 값

싸게 시스템을 구입할 수 있으므로 시장의 성장이 가속화될 수 있다고 판단된다.

참고문헌

1. 산업자원부 태양광사업단 (<http://www.solarkorea.org>), 태양광발전시스템의 구성.
2. Paul Maycock, PV News, Annual review of the PV market 2004.
3. Paul Maycock, PV News, Photon International (2004)
4. 태양전지 시장조사, 한국과학기술정보연구원 (2005).
5. CLSA Asia-Pacific Markets.
6. Paul Maycock, PV News, Photon International, May (2005).
7. 산업자원부 "Solar Land 2010" Program (2002).

●● 왕종희



- 1993년 한양대학교 화학공학과 학사
- 1995년 한국과학기술원 화학공학과 석사
- 1999년 한국과학기술원 화학공학과 박사
- 1997년-2003년 LG실트론 결정성장연구팀 선임연구원
- 2003년-현재 요업(세라믹)기술원 선임연구원
- 2005년-현재 한국산업기술대학교 신소재 공학과 겸임교수

●● 최의석



- 1973년 한양대학교 요업공학과 학사
- 1982년 한양대학교 무기재료공학과 석사
- 1993년 경희대학교 화학공학과 박사
- 1975년-1984년 요업공장 기술이사/공장장
- 1984년-1999년 국립공업기술원 요업기술원 공업연구사/연구관
- 2000년-현재 요업(세라믹)기술원 수석연구원 /이천분원사업단장