

# 태양전지 기술 동향

## Trends of the Solar Cell Technology

글 \_ 배동식  
 창원대학교 나노·신소재공학부

### 1. 서론

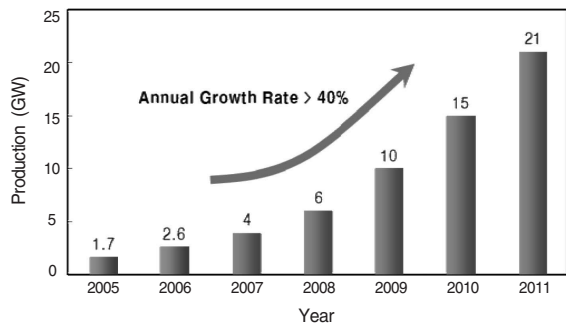
최근 심각한 환경 오염 문제와 화석 에너지 고갈로 차세대 청정 에너지 개방에 대한 중요성이 증대되고 있다. 태양전지는 계속 사용해도 고갈되지 않는 영구적인 에너지이며, 환경 오염이 없는 무공해 에너지, 규모나 지역에 관계없이 설치가능하며 유지비용이 거의 없고, 상대적으로 기술혁신을 통한 원가 절감이 가능하며, 원재료에서부터 모듈 설치에 이르기까지 산업화가 가능하여 미래 에너지 문제를 해결할 수 있는 에너지원으로 기대되고 있다. 태양전지의 역사는 1839년 Edmond becquerel에 의한 광전효과가 발견되었고, 1876년 Heinrich Hertz에 의한 고체에서의 광전효과 발견되었다. 1883년 C. Fritts의 최초의 Se 태양전지가 제작되었고, 1954년 Bell연구소에서 결정질 Si 태양전지의 효율이 4%인 것을 개발하였다. 1958년 미국우주선(Vanguard) 보조전원으로 사용하여 태양광 산업이 태동하였고, 1970년 석유파동으로 지상용 전원으로 활용 모색하였으며, 1980년대에 본격적인 기술 개발(새로운 태양전지, 즉 CdTe, CuInSe<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub> 등이 탄생)이 추진되었다.

1997년 35개 회원국이 교토에서 “온실가스 배출 감소의무” 의정서를 체결하면서 태양광에 대한 관심이 급부상하였고, 그 후 태양전지는 효율 향상과 대면적화, 대량생산화 되면서 생산 단가가 계속 낮아져 산업화에 성공하였다. 1997년 전세계 생산량이 연간 100MWp 돌파하였고, 2000년에는 단결정 다결정 실리콘 태양전지 중심

의 지상용 발전설비 구축하여 새로운 소재나 구조에 대한 연구가 본격화되었다.

현재 태양전지 산업은 매년 40% 이상의 성장율을 나타내고 있으며(Fig. 1) 이중에서 80% 이상을 실리콘 태양전지가 차지하고 있다(Fig. 2). 하지만 2000년 이후 실리콘 태양전지의 효율이 한계치에 도달하고, 갑작스러운 수요 증가로 실리콘 원재료 및 실리콘 기판 수급 문제가 발생하여 태양전지 제조 단가가 상승하게 됨으로써, 태양전지는 제조 단가 절감과 효율 향상 문제 이외에도 원자재 수급 등을 해결해야 하는 문제가 생겼다. 실리콘 태양전지를 이용한 태양광 발전 시스템이 정부 보조금 지급으로 인해 많이 보급되었지만, 변환효율이 20% 미만으로 다른 재생에너지에 비해 발전 단가가 높은 문제점을 가지고 있다. 태양광 발전 시스템에 있어서 태양전지

· Market Size in year 2010  
 - 6 GWp, \$36 billion (CLSA, 2005. 7) → 10 GWp (2006. 4) → 15 GWp (2007. 4)



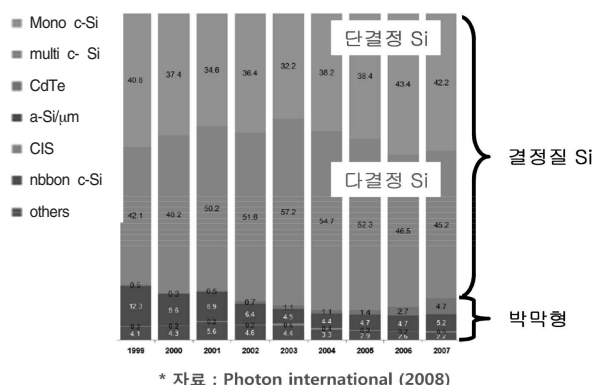
Photon Consulting, Apr. 2007

Fig. 1. 태양전지 생산의 연간 증가율.

Table 1. 재생에너지 공급현황

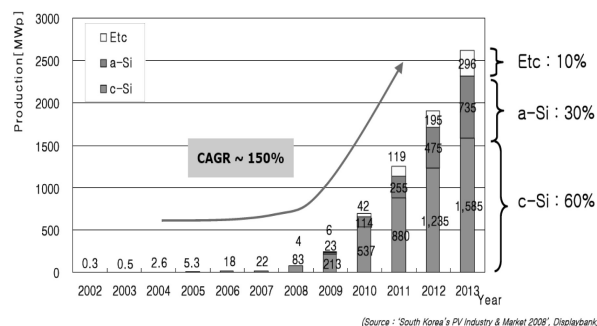
Classification	Year											
	'96	'97	'98	'99	'00	'01	'02	'03	'04	'05	'06	~'11
Total 1st Energy (x1,000 toe)	165,209	180,639	165,932	181,365	192,888	198,410	208,636	215,067	220,238	228,622	233,372	269,000
Renewable Energy (x1,000 toe)	1,160	1,419	1,713	1,897	2,127	2,453	2,917	4,437	4,582	4,879	5,225	13,335
Renewable Energy Ratio(%)	0.70%	0.79%	1.03%	1.05%	1.10%	1.24%	1.40%	2.06%	2.08%	2.13%	2.24%	5.00%

(Source : KEMC 2007)



\* 자료 : Photon international (2008)

Fig. 2. 태양전지 종류별 생산량 변화.



(Source : 'South Korea's PV Industry &amp; Market 2008', Displaybank)

Fig. 3. 태양광 모듈 증가율.

모듈 가격이 차지하는 비중이 크고 태양광 발전 시스템을 설치할 때 드는 모듈 설치 비용, 설치에 필요한 땅값, 유지 관리비 등 태양전지 이외의 비용이 태양전지의 총 면적에 비례하기 때문에 태양전지의 효율증가는 태양광 발전 시스템의 제조 단가를 낮추는 효과도 있지만 발전 단가를 낮추는 중요한 변수이다. 따라서, 태양 에너지를 지상 전력용으로 도입을 확대 하기 위해서는 태양전지의 고효율화 기술과 저가화 기술이 중요한 핵심 기술이라고

할 수 있다.

국내의 재생에너지 공급현황은 Table 1과 같이 2011년에는 5% 정도까지 상승할 것으로 예측하고, 태양광 모듈 생산은 Fig. 3과 같이 급격하게 증가할 것으로 예상되고 있다.

## 2. 태양전지 기술 개발 동향

### 2.1. 태양전지의 종류

현재 태양전지를 물질 별로 구분하면 Fig. 4와 같이 무기물 태양전지(inorganic solar cell), 염료감응 태양전지(dye-sensitized solar cell)와 유기물 태양전지(organic solar cell)로 나눌 수 있다.

#### 2.1.1. 무기물 태양전지

실리콘 계열 태양전지와 CdTe, GaAs, CIGS와 같은 반도체 태양전지가 이에 속한다. Fig. 5와 같이 n형 반도체 물질과 p형 반도체 물질을 접합하여 태양전지를 제조하며, n형 반도체는 전자(electron)가, p형 반도체는 양공(hole)이 전달체 역할을 한다. 반도체 밴드갭 에너지보다 큰 에너지를 가지고 빛(photon)이 입사되면 p-n 접합 계면 근처에서 빛을 흡수하여 전자-양공쌍을 생성하고, 내부 전장(built-in electric field)에 의해 양공은 p형 반도체 쪽으로, 전자는 n형 반도체 전극으로 이동하여 합선 회로 전류(short-circuit current,  $I_{sc}$ )를 발생하고, 개방회로 전압(open-circuit voltage,  $V_{oc}$ )은 두 반도체의 밴드갭 에너지 차이에 의해 결정된다. 실리콘 단결정은 효율이 높은 반면 wafer의 단가가 다결정실리콘에 비하여 높아

서 양산에 불리하다. CdTe계는 저가 공정을 이용할 수 있으며, 가격에 비하여 비교적 높은 효율을 나타내고 있다. GaAs계는 제조 단가가 높은 반면 높은 효율(25% 이상)의 효율을 나타내고 있다. 또한 무기물을 박막화하여 제조하는 경우는 고가의 Si bulk wafer를 유리나 금속 기판상에 박막화 시켜 고가의 Si 재료비를 감소시킬 수 있으며, 기존의 박막 공정을 이용하여 여러 가지 구조의 태양전지 제작이 가능하고, 저온공정을 이용하여 플렉시블(flexible) 태양전지 제작 가능하다.

### 2.1.2. 염료감응 태양전지

Fig. 6과 같이 표면에 화학적으로 흡착된 n형 반도체 산화물 전극이 빛을 흡수하면 염료분자는 전자를 생성하고, 전자는 산화타이타늄 입자를 지나 외부로 전자가 흘러나가기 시작하고, 최종적으로 전해액 안으로 전자가 되돌아 다시 환원된다. 다른 태양전지에 비하여 낮은 효율을 보이고 있다.

### 2.1.3. 유기물 태양전지

유기분자접합 태양전지의 작동 원리는 전자주개(elec-

tron donor D)특성과 전자받개(electron acceptor A)특성을 갖는 유기물로 구성되어 있어, 빛을 흡수하면 전자-양공쌍을 생성하고 전자-양공쌍은 D-A 계면으로 이동하여 전하가 분리되고 전자는 전자받개로, 양공은 전자주개로 이동하여 전류를 발생한다.

### 2.2. 태양전지의 세대별 분류

태양전지를 일반적으로 소재에 따라 분류를 하여 실리콘 태양전지, 화합물 반도체 태양전지, 염료감응 태양전지, 유기분자접합 태양전지 등으로 분류하여 현재까지

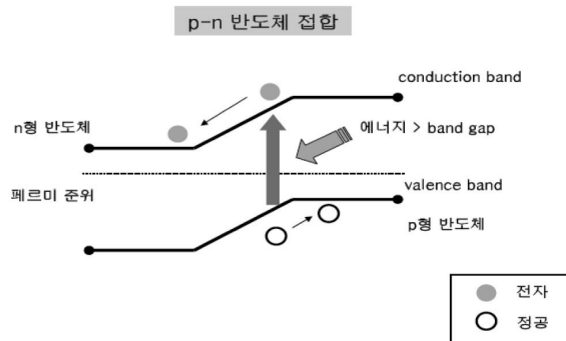
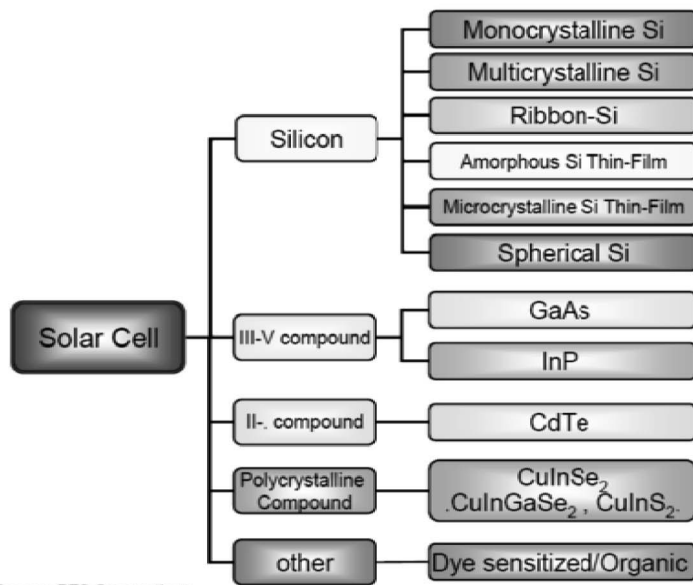


Fig. 5. P-N 반도체 집합.



Source: RTS Corporation©

Fig. 4. 태양전지 종류.



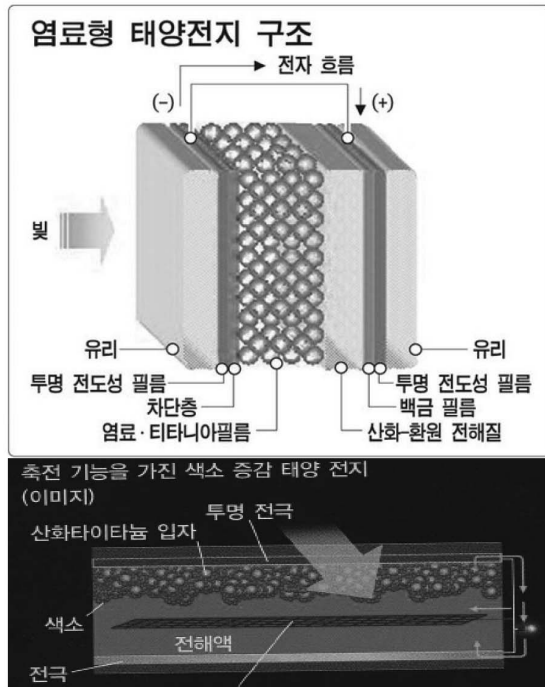


Fig. 6. 염료감응형 태양전지의 구조도.

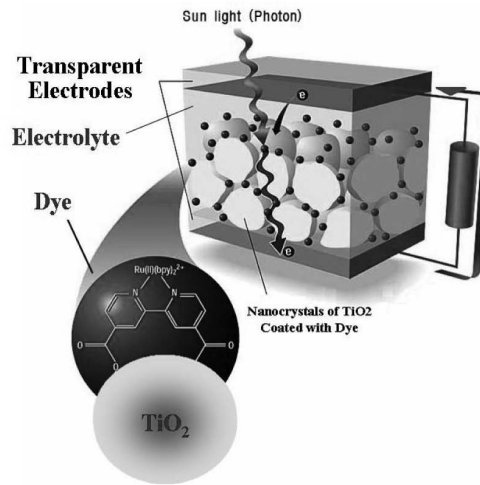


Table 2. 태양전지 재료별 효율과 비용

	이론효율 (%)	실측최고효율 (%)	비용 (2007) (\$/W)	상업제품효율 (%)
Si (mono)	28	24.8	3	13~14
Si (poly)	27 (?)	19.8	2.5	12~13
GaAs	31	25.1	5	18~20
CIGS	28	18.8	1	11~12
Si-a	(?)	12.1	1	10~11
DSSC	31	11.1	1	7~9

\*자료 : N. G. Park, KAIST EMDEC (2008), J. H. Yoon, 예기연 (2008)

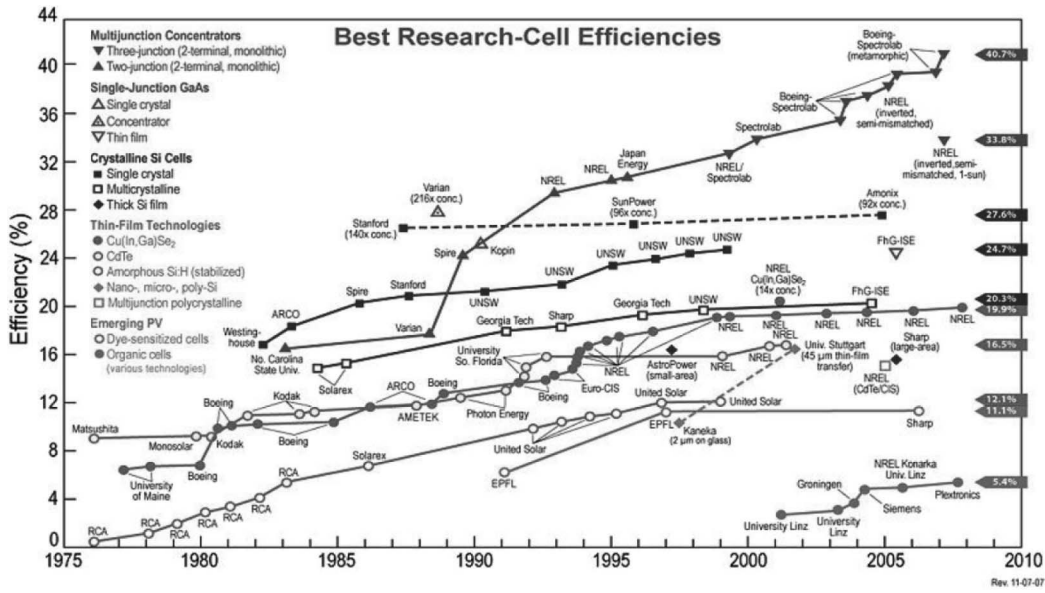
나타난 최고의 효율은 Fig. 7과 같고, 태양전지 효율은 화합물>실리콘>CIGS>CdTe>유기물로 보고 되었다. 또한 비용대비 효율은 Table 2와 같이 발표되었다.

하지만, 태양전지 세대 구분은 단순 전지 소자가 아닌 차세대 에너지 관점에서 소재나 제조 기술 보다는 광변환 효율 향상을 위한 메커니즘에 따른 분류가 필요하다.

### 2.2.1. 1세대 태양전지

1세대 태양전지는 빛에너지를 전지에너지로 변환 가능한 물질을 이용한 단일 접합(single junction) 구조이다.

1세대 태양전지는 p형 n형 반도체 물질을 접합한 단일 접합 구조를 가지고 있으며, 광 변환 효율은 물질의 광 흡수율과 광 흡수 대역폭에 의해 결정된다. 대표적인 1세대 태양전지인 실리콘 태양전지는 1985년 passivation 기술을 적용한 rear point contact 태양전지로 최초로 22% 효율을 달성 하였으며, 전지의 전면은 passivated emitter 태양전지와 유사하고 후면은 point contact 태양전지에서 사용한 전극 형태를 이용한 PERL 태양전지가 개발되었으며 광변환 효율이 24%로 현재 실리콘 태양전지 중 가장 높은 효율을 기록하고 있다<sup>2)</sup>. 실리콘 태양전지는 빛을 흡수할 수 있는 흡수 대역이 좁아 이론적 변환 효율이 30% 미만이다<sup>3)</sup>. 현재 정부에서 보조금을 지급하는 방법으로 실리콘 태양전지 기반의 태양광 발전 시스템 보급을 확대하고 있으나 변환 효율이 낮아 다른 재생 에너지에 비해 발전 단가가 매우 높아 재생에너지로서의 효용성이 낮아 미래 에너지로서의 입지를 확보하지 못하고 있다.



Ref. refocus July 2005, pp. 35.

Fig. 7. 태양전지의 재료별 세계 최고의 효율.

**2.2.2. 2세대 태양전지**

2세대 태양전지는 빛 흡수를 극대화하기 위해 빛 흡수 대역을 넓혀 광 흡수율을 높이는 구조를 가진다. 1세대 태양전지의 이론적 최대 효율이 30%를 넘지 못하는 이유는 p-n 접합을 이루는 반도체 박막의 밴드갭 에너지보다 매우 큰 에너지를 가지는 빛을 흡수하면 여기된 전자들이 열로 소멸되고 밴드갭 에너지 보다 낮은 에너지를 가지는 빛은 투과됨으로써 좁은 흡수 대역으로 인한 손실이 매우 크기 때문이다. 이러한 손실을 최소화 하기 위해 2세대 태양전지는 광 흡수 대역이 서로 다른 단일 접합 태양전지를 적층 함으로써 광 흡수 넓힐 수 있다. 2세대 태양전지는 MOCVD와 MBE 같은 박막 증착 장비의 발달로 인하여 III-V 화합물 반도체 분야에서 빠르게 발전하고 있다. III-V 화합물 반도체는 다양한 밴드갭 에너지를 가지는 박막 제조가 용이 하고, 직접천이(direct bandgap) 구조를 가지고 있어 실리콘에 비해 광 흡수율이 높다. 또한 터널정선(tunnel junction) 구조를 이용하여 pn 접합 태양전지를 금속 전극 없이 반도체 박막만으로 직렬 연결이 가능하여 한 번의 박막 증착 공정으로 넓은 흡수대역을 가지는 다중 접합 태양전지 제작이 가능하다.

2006년 Spectralab에서 GaInP/GaInAs/Ge 3중 접합 태양전지 구조를 이용하여 AM 1.5에서 x240배 집광하여 변환 효율 40.7%를 얻었다. 또한 4중 접합이상의 접합 태양전지는 이론적으로 최대 59% 효율을 얻을 수 있을 것으로 예상된다<sup>3)</sup>. III-V 화합물 반도체 태양전지는 제조 단가가 실리콘 태양전지에 비해 매우 높아 인공위성과 같은 특수 용도로 주로 사용되었지만, 최근 효율이 실리콘 태양전지의 2배가 되면서 지상용 전원으로 사용하려는 연구가 선진국에서 주도적으로 진행 중이다.

**2.2.3. 3세대 태양전지**

1, 2세대 태양전지의 광전 변환 방법은 흡수되는 광자의 에너지에는 무관하고 오직 흡수된 광자의 수에 비례하여 전자-양공쌍을 생성함으로써 높은 에너지를 가지는 광자의 남은 에너지는 열로 손실되므로 매우 비효율적이다. 그러나, 3세대 태양전지는 높은 에너지 광자를 흡수하여 여기 상태에 생성된 전자와 양공이 낮은 에너지 상태로 천이하면서 1개의 전자-양공쌍을 생성하고, 천이 때 생성되는 빛에너지를 재흡수하여 2개 이상의 전자-양공쌍을 생성하는 매커니즘을 이용하고 있으며 이러

한 태양전지를 MEG 태양전지라고 한다<sup>4)</sup>. 태양의 빛 에너지를 보다 효율적으로 전기에너지로 전환이 가능함으로써 3세대 태양전지는 획기적으로 효율을 증가시킬 수 있을 것이다. 현재 양자점과 나노 입자 등을 이용한 MEG 태양전지 연구가 진행되고 있으나 아직까지 이론적 가능성만을 보여주고 있는 상태이다<sup>5)</sup>.

### 3. 차세대 태양전지 개발 현황

21세기에 접어들면서 재생에너지에 대한 요구가 급증하면서 태양전지에 관심이 집중되었다. 그리고 태양광 발전 시스템 증설이 급증하면서 실리콘 원자재 및 실리콘 기판의 공급 부족으로 인하여 태양전지 제조 단가가 증가하는 문제가 발생하였다. 이러한 이유로 단결정 실리콘 태양전지보다 제조단가가 낮고, 원자재 소모가 적고, 재료 공급이 원활한 박막 실리콘 태양전지, 염료감응 태양전지, 플라스틱 태양전지 등이 각광 받게 되었다. 그러나 낮은 제조 단가에도 불구하고 낮은 변환 효율과 짧은 수명이 산업화에 걸림돌이 되고 있다. 태양전지 제조 단가는 저렴하지만 태양광 발전 시스템을 구축할 때 드는 interconnection, encapsulation, 모듈 설치, 설치에 필요한 땅값 등 태양전지 이외의 비용이 전지의 총 면적에

비례하기 때문에 태양전지 제조 단가 보다는 태양전지의 효율 증가가 태양광 발전 시스템의 발전 단가를 낮추는 중요한 변수로 작용한다. 일본 NEDO(National Energy Development Organization, Japan, 2004)에서 발표한 기술적인 문제를 극복하고 단가를 줄이는 로드맵은 Fig. 8과 같다. 모듈 제조 가격이 2010년에 100Yen/W에서 2020년에는 75Yen/W, 2030년에는 50Yen/W로 가능할 것으로 예측하고 있다.

최근에는 실리콘 태양전지를 비롯한 저가의 1세대 태양전지보다는 효율이 높은 2세대 태양전지의 발전 단가를 낮추어 지상용 전력으로 사용하기 위한 연구가 증가하고 있다. 태양전지가 30%의 변환 효율을 극복하기 위해서는 2세대 태양전지와 같이 변환 효율을 극대화하기 위해 광 흡수 대역을 넓히기 위한 방법으로 입사되는 빛을 여러 개의 파장 대역으로 분리하고 각각의 파장 대역에 알맞은 태양전지를 수평 배치하는 방법과 빛의 입사 방향으로 흡수대역이 에너지가 큰 태양전지부터 차례로 적응하는 방법이 있다. 파장분리형은 다양한 물질의 태양전지를 이용하여 각각의 파장대역에 가장 적합한 태양전지를 배치함으로써 광 흡수를 극대화 할 수 있는 장점이 있다. 그러나 광학계를 사용함으로써 제작이 복잡하여 대면적으로 제작이 어렵고 대량 생산에 한계가 있다.

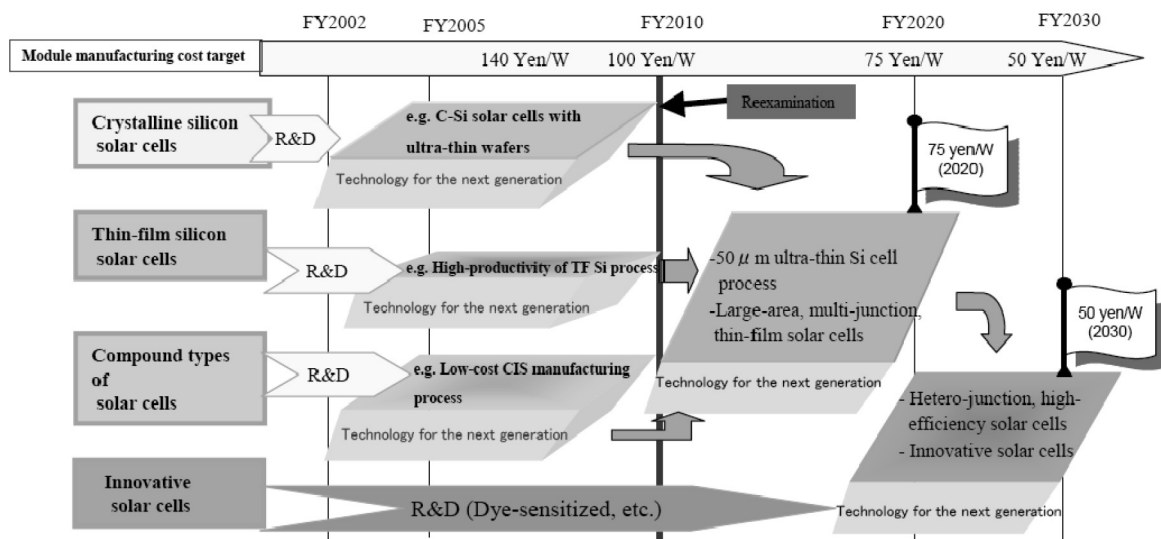


Fig. 8. 태양전지 가격 로드맵.

적층형 태양전지는 각각의 파장 대역에 적합한 태양전지를 흡수 에너지 대역이 높은 순서로 수직으로 배치하고 각각에 전극을 연결하는 방법이 있으나 각 태양전지 증착 시 사용한 기판을 제거하거나 최대한 얇게 제작해야 하며, 하부전극을 최소화 하거나 투명 전극을 사용하여 빛 투과를 최대화해야 하는 많은 기술적인 어려움이 있다. 박막형 실리콘 태양전지 등에서 시도되고 있지만 전극 제작 공정이 까다로워 높은 효율을 얻지 못하고 있으며, 대면적으로 제작이 어려워 제작 단가가 비싼 문제가 있다.

그러나, MOCVD와 MBE 같은 박막 증착 장비의 발달로 III-V 화합물 반도체 태양전지분야에서는 터널정선 기술 개발로 단일 접합 태양전지 사이에 금속 전극 없이 반도체 박막만으로 직렬 연결 기술이 개발되면서 가능하게 되었다. 서로 다른 흡수대역을 가지는 태양전지들 사이에 터널 정선 구조를 삽입하여 한 번의 박막 증착 공정만으로 monolithic하게 다중접합 태양전지 제작이 가능하다<sup>6)</sup>. 단일 접합 태양전지 간의 직렬 연결 시 별도의 전극 공정이 필요하지 않으므로 단일 접합 태양전지 제작 공정과 동일하다. 따라서 적층 수가 증가하여도 제조 공정에 별도의 비용 증가가 없고 공정이 단순해 대량 생산이 용이하여 차세대 태양전지로 주목 받고 있다. III-V 화합물 반도체 태양전지는 다중접합구조를 이용하여 매우 높은 효율을 얻고 있지만 고가의 원재료를 사용하고 있어 제조 단가가 비싼 단점을 가지고 있다. 그러나 효율이 높아 지상용 에너지원으로 사용하기 위해 집광장치(concentrator)와 III-V 화합물 반도체 태양전지를 결합하여 제조 단가 문제를 해결하고자 연구 개발하고 있다. 집광형 태양전지는 태양광을 렌즈나 거울 등을 이용하여 넓은 면적의 태양광을 작은 면적의 태양전지에 빛을 모으는 방법을 사용한다. 집광형 태양전지는 가격이 저렴한 플라스틱 렌즈나 알루미늄 코팅 거울을 사용함으로써 태양광의 집광도가 높을수록 제조 단가가 비싼 태양전지의 면적을 줄일 수 있어 태양전지 모듈 제조 단가를 대폭 줄일 수 있다. 집광형 태양전지는 1970년대 초반부터 연구가 시작되었지만 실리콘 태양전지는 20배 이상 집광시 효율이 급격히 감소하는 문제로 인하여 고배율 집광이 어

려워 널리 사용되지 못하였다. 그러나 III-V 화합물 반도체 태양전지는 집광률이 200배까지 집광률 증가에 따라 효율이 증가하고 500배 이후에는 고집광으로 인해 많은 전류가 발생하여 전극에 저항이 발생하여 효율이 감소한다<sup>7)</sup>. 그러나 III-V 화합물 반도체 태양전지는 1000배 집광시 효율이 1% 감소하므로 고집광형 태양광 발전시스템에 적합하다. 고효율 III-V 태양전지와 집광장치를 결합한 태양광 발전 시스템이 실리콘 태양광 발전 시스템보다 발전단가가 낮아 보다 경제적인 것으로 보고되고 있다<sup>8)</sup>. 또한 집광형 III-V 화합물 반도체 태양광 발전시스템은 많은 장점을 가지고 있어 기존의 평판형 실리콘 태양광 발전 시스템보다 경제적이고 친환경적이다.

#### 4. 결론

최근까지 태양전지 기술 개발 방향은 발전 단가를 낮추는 저가형 태양전지 개발 연구와 변환 효율을 높이는 고효율 태양전지 개발 연구가 진행 되어 왔다. 태양전지의 발전 단가를 낮추기 위하여 저가로 대량 생산이 가능하도록 다양한 물질과 공정이 개발되었지만, 변환 효율이 낮아 상용화에 큰 걸림돌이 되고 있다. 또한 변환 효율 향상을 위한 연구는 과거에는 변환 효율이 높은 물질을 찾기 위해 다양한 기도가 이루어졌으며, 현재는 물질 합성과 적층 구조 등을 이용하여 광흡수 대역을 넓혀 변환 효율을 높이는데 주력하고 있다. 최근에는 양자점과 나노 기술을 이용하여 기존의 광전 변환 메커니즘의 비효율성을 개선한 신개념의 태양전지에 대한 연구 개발이 추진되고 있다.

#### 참고문헌

1. Frank Dimorth and Saeah Kurtz. "High-efficiency Multijunction Solar Cells." *MRS BULLETIN*, **32** 230-235 (2007).
2. Martin A, Green, Keith Emery, David I. King, Yoshihiro Hishikawa, and Waita, "Solar Cell Efficiency Tables(version 29)." *Prog.Photovolt.Res.Appl.*, **15** 35-40 (2007).
3. R.R. King, D.C. Law, Edmondson, C.M. Fetzer, G.s. Kinsey, H. Yoon, R.A. Shgerif, and N.H. Karam, "40%



- Efficient Metamorphic GaInP/GaInAs<sub>3</sub>/Ge Multijunction Solar Cells." *Appl. Phys. Lett.*, **90** 183416 (2007).
4. Sntonia Luque, Antonio Marti, and J. Nozik, "Solar Cells Based on Quantum dots: Multiple Exciton Generation and Intermediate Bands." *MRS BULLETIN*, **32** 235-241 (2007).
  5. Randy I. Ellingson, Matthew C. Beard, Justin C. Johnson, Pingrong Yu, Olga I. Micic, Atthur J. Nozik, Andrew Shabaev, and Alexander L. Efros, "Highly Efficient Multiple Exciton Generation in Colloidal PbSe and PbS Quantum Dots." *Nano Lett.*, **5** [5] 865-871 (2005).
  6. Lawrence L. Kazmerski, "Solar Photovoltaics R&D at the Tipping Point: A2005 Technology Overview." *J. Elec. Speelrosopy and Related Phenomens*, **150** 105-35 (2006).
  7. Masafunii Yamaguch, Tsutsuya Takamoto, and Kenji Araki. "Super High-efficiency Multijunction and Concentrator Slar Cells." *Solar Energy Msterials & Solar Cells*, **90** 3068-3077 (2006).
  8. Richard M. Swanson. "Prmisc of Concentrators." *Prog. Photovolt, Res. Appl.*, **8** 93-111 (2000).

### ◎◎ 배동식



- 1994-1997 한양대학교 무기재료공학과 공학박사
- 1999-2000 PennState University, MRL post-doc.
- 1990-2003 KIST 연구원, 선임연구원
- 2003-현재 창원대학교 나노신소재공학부 부교수