박막 태양전지 기술개발 현황

윤 경 훈

(한국에너지기술연구원)

박막 태양전지 기술개발 현황

윤경훈

한국에너지기술연구원

Trends in Technology Development of Thin Film Solar Cells

Kyung-Hoon YOON

Korea Institute of Energy Research

1. 서 론

무공해, 무한정의 태양광발전기술은 미래 가장 유망한 대체에너지기술의 하나로 인정받고 있다. 전세계 태양광모듈 생산량은 최근 빠른 속도로 증가하고 있다. 연간 총 생산량이 1990년도에는 46.5 MW에 불과하였지만 1997년에 100 MW를 넘었고, 이어 1999년에는 200MW를 돌파하고, 2000년에는 1999년에 비해 약 40% 증가한 288 MW를 달성하였다. 특히 일본은 단일국가로는 처음으로 2000년에 100 MW 이상을 생산하는 새로운 기록을 수립하였다[1].

이는 각국 정부의 적극적인 보급 정책과 함께 그 동안의 기술개발결과 태양광발전의 경제성이 대폭 향상되었기 때문이다. [그림 1]에 나타낸 바와 같이 지난 20여년 동안의 기술개발 결과 80년대초에 비해 태양광모듈의 가격은 1/6로 대폭 하락하였고, 변환효율은 2배로 향상되었다[2,3].

하지만 최근 수년동안의 가격 하락폭은 현저히 둔화되고 있음을 볼 수 있는데, 물론 지속적으로 추진되고 있는 저가 고효율화를 목표로 한 연구 및 기술개발에 따라 앞으로도 개선의 여지가 있고, 또한 대량생산에 의한 가격 하락 여지도 매우 크긴 하지만 bulk 상태의 실리콘을 원재료로 하는 기존의 결정질 실리콘 태양전지는 원재료의 비용이 높은 점이 가장 큰 단점이다.

그러므로 기존의 발전방식과 경쟁가능한 태양광발전기술은 기존의 결정질실리콘 태양전

지와는 차별화된 재료나 제조공정을 이용한 저가·고효율·고신뢰도의 태양전지 개발을 필요로 하는데, 이러한 태양전지는 원재료 절감 및 제조공정의 일관화에 의해 획기적으로 제조원가 절감이 가능한 박막형이어야 한다. 우선 박막 태양전지는 두께 수 μm으로 제조 가능하기 때문에 기존 결정질 실리콘 태양전지(두께 : 수백 μm)에 비해 원재료의 사용을 획기적으로 절감할 수 있는 점이 가장 큰 장점이다.

현재 박막 태양전지의 재료로 비정질실리콘(a-Si), CdTe, CIGS($CuInGaSe_2$) 및 다결정실리콘, 염료감응형 태양전지 등이 집중적인 조명을 받고 있는데, 여기에서는 박막 태양전지에 대한 국내외의 기술개발 현황 소개와 함께 최근 전문가들 사이에서 논의되고 있는 향후 연구개발 방향 및 전망에 대해 기술하고자 한다.

2. 박막 태양전지의 범위 및 종류

[그림 2]는 태양전지를 재료별로 분류한 것으로 위에서 언급한 것 외에 박막 태양전지의 범주에는 최근에 관심이 증대되고 있는 다결정실리콘(미결정실리콘 포함), 나노크기의 이산화티탄을 소재로 한 염료감응형(Dye-sensitized) 태양전지도 포함이 된다. 또한 폴리머나 카본, 기타 나노 결정을 소재로 한 태양전지도 궁극적으로는 기판 위에 형성할 것이므로 박막의 범주에 포함시킬 수 있을 것이다. 그 밖에도 우주용으로 GaAs 등의 III-V족 화합물 태양전지도 당연히 박막의 범주에 들어간다. 하지만 현재의 기술개발 수준에서 박막 태양전지로 널리 일컬어지는 것은 a-Si, CdTe, CIGS, 다결정실리콘(미결정실리콘 포함), 염료감응형(Dye-sensitized) 태양전지의 5가지로 보는 것이 가장 일반적이다.

[그림 3, 4]는 박막 태양전지의 구조를 나타낸 것으로 유리, 금속, 플라스틱과 같이 값싼 기판 위에 금속전극, 광흡수층, 투명전극 등을 차례로 적층한 형태로 전체 박막의 두께는 불과 수 μm으로 그 구조가 유사함을 볼 수 있다.

박막 태양전지의 제조에는 다양한 종류의 물리화학적 박막 제조공정이 이용되고 있는데, CVD, Dipping, sputtering, evaporation 등이 그 대표적인 기술이다. 이는 금속전극, 투명전극의 제조에서도 마찬가지이다.

가장 중요한 광흡수층의 경우 a-Si 태양전지에서는 현재 PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition)가 생산공정에 사용되고 있다. [그림 5]는 미국 USSC사의 생산설비의 외관으로 flexible SUS 기판 위에 3중접합 태양전지 제조에 사용되는 것이다. 박막의 성능향상 또는 박막 성장속도의 향상을 목적으로 CVD의 변형인 Photo-CVD,

Hot Wire CVD 공정 등이 현재 실험실적으로 연구개발되고 있다.

CdTe 박막의 제조에는 scren printing, spraying, electrodeposition, close-spaced sublimation 등의 공정이 사용 또는 연구개발되고 있는데, 가장 높은 효율의 태양전지는 close-spaced sublimation 공정에서 얻은 것이다. [그림 6]은 독일 ANTEC사의 설비 사진이다.

CIGS 박막은 금속원소의 동시 진공증착, sputtering으로 만든 Cu-In(Ga) precursor를 Se 분위기에서 열처리하는 방법, 또는 electrodeposition 등의 방법으로 제조하고 있다. 가장 높은 효율의 태양전지는 금속원소의 동시 진공증착에 의한 것이다. [그림 7]은 독일 Wurth Solar사의 설비이다.

다결정실리콘(미결정실리콘 포함)의 제조 기법은 a-Si 태양전지의 제조기법(PECVD)과 유사한데, 다만 다결정 박막의 제조에는 기판온도가 높고, 또한 Si 전구체의 분해를 촉진시키기 위해 외부에서 여분의 에너지원(고주파 > 13.56 MHz, laser, hot wire)을 공급하는 것이 필요하다. 직접 박막 제조법과는 별도로 비정질 박막을 먼저 제조한 후 이를 고온에서 열처리하여 다결정박막을 제조하는 공정도 활발하게 추진되고 있다.

염료감응형(Dye-sensitized) 태양전지는 투명전극이 입혀진 유리기판에 sol-gel등의 공정으로 나노미터 크기의TiO2 박막을 약 10 μm 내외로 입히고 그 위에 염료를 흡착시킨다. 반대쪽 전극과의 사이에 spacer를 두고 그 사이에 전해질을 채워 태양전지를 만든다.

박막 태양전지의 면적이 커지면 면저항의 증가로 인하여 효율이 감소하게 된다. 따라서 대면적 모듈의 경우는 [그림 8]의 CIGS 박막 태양전지의 예에서와 같이 일정한 간격으로 직렬연결이 되도록 패터닝한다. 패터닝은 3회에 걸쳐 이루어지는데, 1차로 Mo 층은 레이저로, 2차 CIS+CdS 층과 3차 ZnO 층은 기계적인 방법을 이용하는 것이 일반적이다. 이 때 기판의 준비로부터 시작하여 모듈까지의 제조 공정은 [그림 9]와 같다.

3. 박막 태양전지의 상업화 현황

[그림 10]은 1991-2000 기간 재료별 전세계 태양전지 생산량의 추이를 나타낸 것이다[5]. 2000년의 경우 총 생산량은 288 MW로, 이 중 단결정실리콘(sc-Si)이 89.7 MW, 다결정실리콘(mc-Si)이 140.6 MW로 웨이퍼 형태의 전지 생산량이 총 80%에 달한다. 박막 태양전지로는 a-Si가 27.0 MW, 다결정실리콘(p-Si) 박막이 2.0 MW, CdTe 1.2 MW, 그리고 이중접합 a-Si/sc-Si가 12.0 MW이다. 합계가 43 MW 이지만 대부분이 a-Si이고 또한 a-Si의 대부분

은 전력용이 아닌 소규모 민수용 가전제품의 전원용이기 때문에 실제적인 박막 태양전지의 비율은 미미하다. 하지만 최근 5년간 생산량이 꾸준히 증가하고 있는 점이 관심을 끈다.

참고로 2000년 업체별 태양전지 생산량은 일본 Sharp(50.4 MW)를 선두로 Kyocera(일본, 42.0 MW), Siemens Solar(미국, 28.0 MW), Solarex(미국, 20.5 MW), Astropower(미국, 18.0 MW), Sanyo Electric(일본, 17.0 MW), Photowatt(프랑스, 14.0 MW), Mitsubishi Electric(일본, 12.0 MW), ASE(독일, 10.0 MW), Isophoton(스페인, 9.5 MW)의 순이다.

<표 1>은 박막 태양전지 재료별 전세계 기업의 현황 및 향후 계획을 요약한 것으로 생산 용량 면에서도 a-Si가 가장 우위에 있고, 이어 CdTe, CIGS의 순으로 생산설비 증대 및 향후 신설 계획이 잡혀 있다[6,7]. 다결정실리콘 박막은 기술적으로 a-Si와 유사하여 그 구분이 쉽지 않은데, 일본 Kaneka사의 20 MW 설비에는 2가지가 혼합된 것으로 보아야 한다. 한편 Dye 태양전지의 경우 금년에 호주의 Sustainable Technologies Australia사에서 효율 5%, 발전용량 22 W, 크기 60 x 90 cm의 모듈 시제품을 선보인바 있다[8].

[그림 11]은 현재 시판 중인 박막 태양광 모듈의 사진이다.

4. 박막 태양전지의 기술개발 현황 및 문제점

가. 기술개발 현황

태양전지의 저가화를 목표로 한 박막 태양전지의 개발 노력은 그 역사가 매우 오래되었는데, 이는 초기의 태양전지가 우주용을 겨냥한 것으로 효율이 높으면서도 가벼운 박막 태양전지의 개발 필요성이 절실히 요구되었기 때문이다[4]. [그림 12]는 지금까지 개발 또는 개발 중인 박막 태양전지의 효율을 결정질실리콘 태양전지의 효율과 비교한 것인데, 1950년대 말과 1960년대 초에 이미 Cu_2S와 CdTe 박막 태양전지의 개발이 착수된 것을 볼 수 있다. Cu_2S는 1980년대 초반까지 가장 큰 관심의 대상이 된 박막 태양전지의 소재로 효율이 10%에 도달하였으나 전기화학적인 열화현상 때문에 더 이상 진전을 보지 못하고 연구개발이 중단된 경우이다. 그 다음으로 나타난 것이 비정질실리콘(a-Si)과 CIGS 태양전지이다.

현재도 지속적으로 연구개발이 추진되고 있는 a-Si, CdTe, CIGS 태양전지는 최소 20년 이상의 개발 역사를 가지고 있음에도 불구하고 시장 진출에 돌파구를 열지 못하고 최근에 시장진입을 시작하였다. 특히 a-Si는 1980년대 초 이후 한 동안 민수용 전자제품의 전원용으로 시장을 지배해 왔으나 전력용 시장에는 최근에 진출하기 시작하였다.

[그림 13]은 재료별 태양전지 변환효율을 나타낸 것으로 각각 실험실, 시제품 모듈 및 상업용 모듈로 구분하여 비교한 것이다[6,9]. 현재 변환효율에서는 CIGS > CdTe > a-Si > Dye의 순으로 이는 면적이 큰 모듈의 경우도 마찬가지이다. 특히 CIGS의 경우 실험실 최고 효율이 다결정실리콘 태양전지에 근접하고 있음을 볼 수 있다. 하지만 제조원가 측면에서는 현재까지 정확한 계산 결과는 발표 또는 공개된 바 없지만 변환효율의 역순인 것으로 판단되고 있다.

<표 2>는 각 기술별로 대면적 태양광 모듈의 개발 기업 및 지금까지의 모듈에서 얻은 최고의 기록을 요약한 것이다[6].

나. 문제점

[그림 12]의 태양전지 개발 추이를 보면 박막 태양전지의 효율이 결정질실리콘 태양전지의 효율에 비해 항상 7-8% 뒤떨어지고, 시간상으로는 약 20년 정도의 격차가 있음을 알 수 있다. 이와 같은 효율 격차의 요인으로 다음 몇 가지를 들 수가 있다[4].

- 결정질실리콘 태양전지는 반도체 산업의 활성화를 거치면서 엄청난 규모의 연구개발 혜택을 누린 점
- 따라서 결정질실리콘은 가장 철저하게 연구, 이해된 반도체 재료라는 점
- 박막 태양전지용 비정질실리콘과 화합물반도체는 재료의 특성이 매우 복잡한 점
- 또한 기판위에 성장된 박막의 질이 결정질실리콘에 비해 완벽도가 떨어지는 점

우선 비정질실리콘의 경우 1980년대부터 집중적으로 기술개발이 추진되었고, 또한 디스플레이에 동일한 기술이 사용되고 있어 관련 제조장치의 개발이 상당한 수준에 있음에도 불구하고 비정질실리콘이 지닌 특성의 한계 때문에 효율의 개선이 이루어지지 않고 있다. 그 대처 방안으로 비정질실리콘 자체의 다중접합과 또는 다결정실리콘과 접합 등 다양한 기술이 개발되고 있다.

한편 실험실적으로 매우 높은 효율을 기록하고 있는 화합물(CdTe, CIGS) 태양전지는 실리콘에 비해 그 동안의 기술개발 노력이 상대적으로 크게 모자라는 점이 가장 큰 이유로 인식하고 있는데, 특히 비정질실리콘과는 달리 새로운 제조장치의 개발을 필요로 하는 점이 장애로 대두되어 있다. 실험실 태양전지 효율과 모듈 시제품의 효율이 큰 차이가 나는 것도 이러한 이유에서이다.

실험실 태양전지 효율과 모듈의 효율이 큰 차이가 나는 것은 비정질실리콘의 경우도 마찬가지인데, 이는 대면적 위에서 박막의 균일도 저하, 대면적의 패터닝에 따른 손실 면적의 증가, 기타 대면적 처리 장치의 제조조건이 실험실 소규모 장치의 조건과 상이하기 때문이다.

최근에 관심을 끌고 있는 다결정실리콘 박막과 염료감응형 태양전지는 개발 초기라 현 시점에서 그 가능성을 단정할 수는 없지만 다결정실리콘 박막의 경우 비정질실리콘보다 성능이 우수한 태양전지 제작이 가능할 지는 모르지만 공정온도가 높고, 또한 새로운 장치의 사용이 수반될 경우 이 것이 제조원가의 상승으로 이어질 가능성도 배제할 수가 없다. 염료감응형 태양전지는 공정 자체가 매우 간단하여 현재로서는 최저가로 만들 수 있는 태양전지로 인정받고 있으나 장기적인 신뢰성, 대면적화의 어려움 등이 문제점으로 지적되고 있다.

5. 외국의 연구개발 목표

미국, 일본, 유럽에서는 기존의 결정질실리콘을 대체하고 나아가서는 기존의 발전방식과 경쟁이 가능한 박막 태양전지의 연구개발을 국가적인 차원에서 계획하고 추진하고 있다. 산학연이 공동으로 참여하고 있는 것이 공통적이다.

장기적인 목표는 나라마다 유사한데, <표 3>과 같이 중장기적으로 미국 DOE는 박막 재료에 무관하게 상업용 모듈의 효율을 2005년에 10%, 2020-2030년에 15%를 목표로 하고 있다. 이를 토대로 한 시스템의 비용은 2005년에 $4-8/W, 2020-2030년에 $1-1.5W를 목표로 설정해 놓고 있다[10].

미국의 DOE가 설정한 박막 모듈의 제조비용의 최종 목표는 $0.33/W로 모듈의 목표 효율 15%, 모듈 제조가 $50/m^{2}에 해당하는 것이다. <표 4>에 나타낸 바와 같이 1998년 시점에 박막 모듈의 평균 제조가는 $200/m^2, 효율은 약 6.25%로 제조비용은 $3.3/W으로 위 목표의 10배이다[11].

모듈 제조가 목표 $50/m^2 와 효율 15% 목표를 달성하기 위해서는 앞으로도 지속적인 연구개발이 필요한데, 연간 CdTe 20 MW 규모 생산설비를 기준으로 하여 K. Zweibel이 <표 5>의 결과를 제시한 바 있다. 가장 중요한 반도체 재료비의 경우 약 $5로 전체 비용의 10%에 해당한다. 달성방안에 적시한 바와 같이 목표달성에는 설비의 대용량화도 포함되어 있다. 참고로 [그림 14]는 일본의 PVTEC에서 생산규모에 따른 a-Si 박막 태양전지의 제조

원가를 계산한 결과인데 생산규모가 연산 20 MW일때의 제조가는 약 380엔/W이고, 생산규모가 1 GW로 대폭 증대되었을 때의 제조원가는 약 110엔/W으로 나타나 있다.

6. 국내의 연구개발

국내에서 태양광 분야의 기술개발 투자는 1987년 12월에 제정된 「대체에너지 기술개발 촉진법」을 근거로 1988년부터 대체에너지 기술개발 기본계획이 수립됨으로써 체계적으로 추진되기 시작하였다. 지금까지 추진된 태양전지 분야의 연구개발 과제는 [그림 15]에 나타낸 바와 같이 광범위한 세부 기술부문에 걸쳐있다. 단결정실리콘(sc-Si)과 다결정실리콘(mc-Si), 박막 태양전지로는 비정질실리콘(a-Si)과 a-Si 태양전지용 산화물 투명전도막(TCO), $CuInSe_2$(CIS)와 CdTe 다결정 화합물반도체 태양전지, a-Si/다결정 박막 실리콘(p-Si) 과제를 완료 또는 추진 중에 있고, 기타 GaAs, 염료(Dye) 태양전지를 추진한 바 있다. 국내의 태양전지 종류별 변환효율은 [그림 16]과 같다. 단결정실리콘 태양전지의 효율은 삼성 SDI, a-Si 태양전지는 KAIST, (주) SK, CdTe는 KAIST, CIS 는 한국에너지기술연구원에서, 그리고 Dye 태양전지 효율은 한국화학연구원과 한국전자통신연구원에서 얻은 것이다.

7. 박막 태양전지의 향후 전망

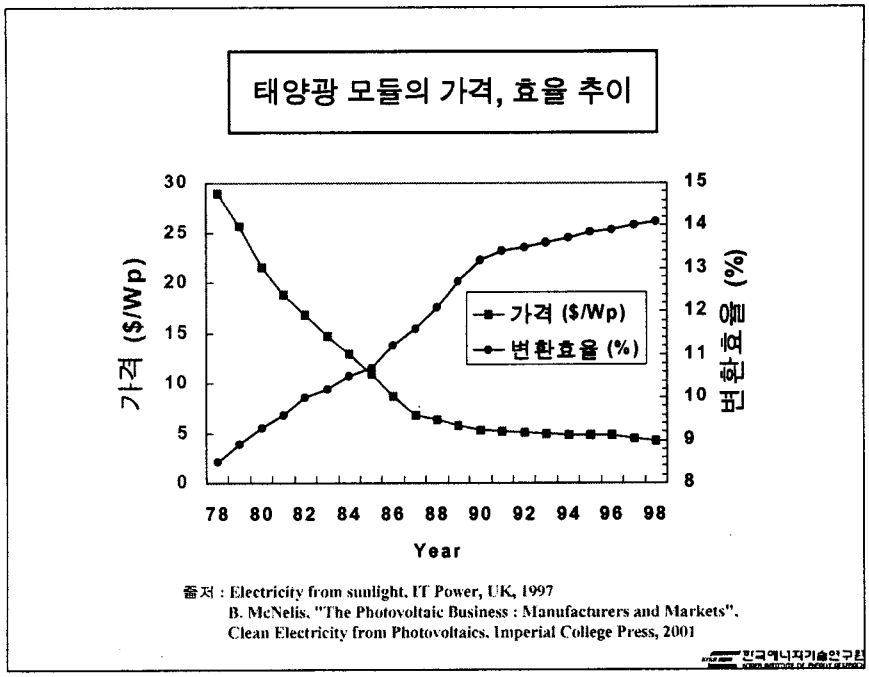
웨이퍼 형태의 기존 결정질실리콘 태양전지가 저가 대량생산이 가능한 박막 태양전지로 대체될 것임에는 이론의 여지가 없지만 현 단계에서는 위에서 설명한 박막 태양전지 재료 중 어떤 것이 향후 가장 유망할 것인지에 대해서는 판단하기 어렵다. 미국, 일본, 유럽에서 현재 거론되는 모든 재료들을 전부 연구개발의 대상으로 하는 이유도 각기 재료별로 장단점을 가지고 있어 기술적으로 새로운 돌파구가 열리기 전에는 우열을 가리기 어렵기 때문이다. 이와 관련하여 미국 NREL의 B.v. Roedern은 <표 6>과 같이 재료별 미래 잠재성 및 위험도를 제시한 바 있다. 가장 대비되는 것이 a-Si와 CIGS 태양전지로 미래 잠재성 및 위험도가 서로 상반되는 위치에 있다[12].

독일의 Goetzberger 박사는 최근 발표한 자료에서 [그림 17]에 나타낸 바와 같이 현재 거론되고 있는 박막 태양전지(특히 CIS, p-Si)의 효율이 앞으로 지속적으로 향상되어 기존의 결정질실리콘 태양전지 효율과의 격차를 좁혀가겠지만 이 보다는 획기적으로 저가 고효율화가 가능한 새로운 태양전지 재료가 출현할 수도 있을 것으로 예측한 바 있다[13]. 태양전지

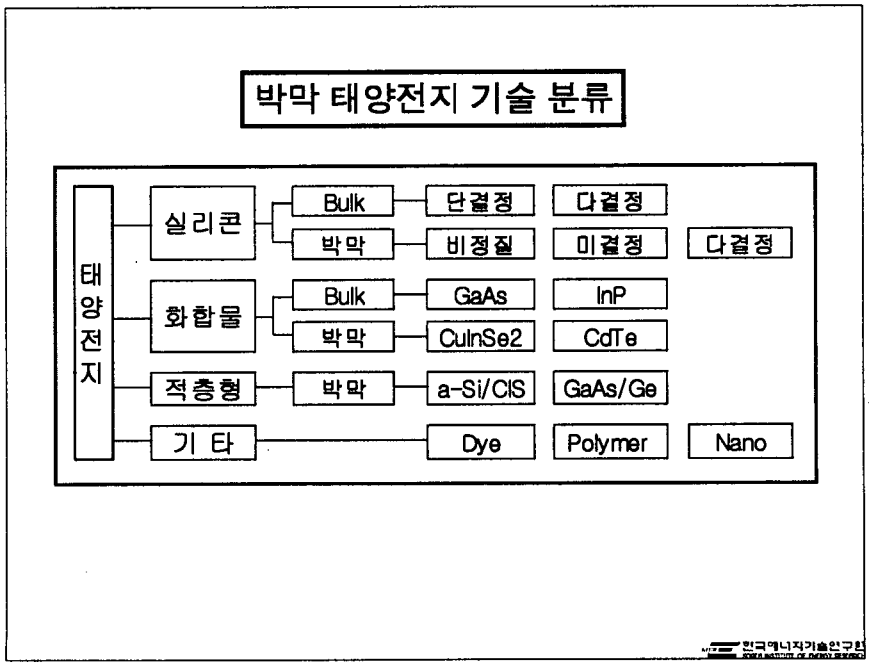
의 시장은 앞으로도 계속 빠른 속도로 증대될 것으로 전망되는데, 당분간은 기존의 결정질 실리콘 태양전지가 시장을 계속 주도해 나아갈 것임에 의심의 여지는 없다. 하지만 박막 태양전지는 현재 시장이 급성장하고 있는 주택이나 건물의 지붕이나 외벽용으로 더 적합하기 때문에 시장의 진입속도도 그 만큼 더 빨라질 것이고, 생산규모의 증대로 인한 제조원가의 절감효과가 매우 큰 것이 부각될 수 있다. 궁극적으로는 저가 고효율화를 위한 지속적인 연구개발이 최우선임은 물론이다. 국내적으로는 기술수준이 선진국에 비해 열세에 있어 전 분야에 걸쳐 연구개발을 추진하여 경쟁력을 갖추기는 어려우므로 2-3개 기술에 집중하는 것이 바람직하다. 태양전지 기술과 유사한 국내의 반도체 및 디스플레이 산업의 인프라를 활용할 경우 조기에 선진국과 어깨를 나란히 할 수 도 있을 것으로 전망되어 국내 전력시장 뿐아니라 수출산업으로서의 육성도 가능할 것이다.

참고문헌

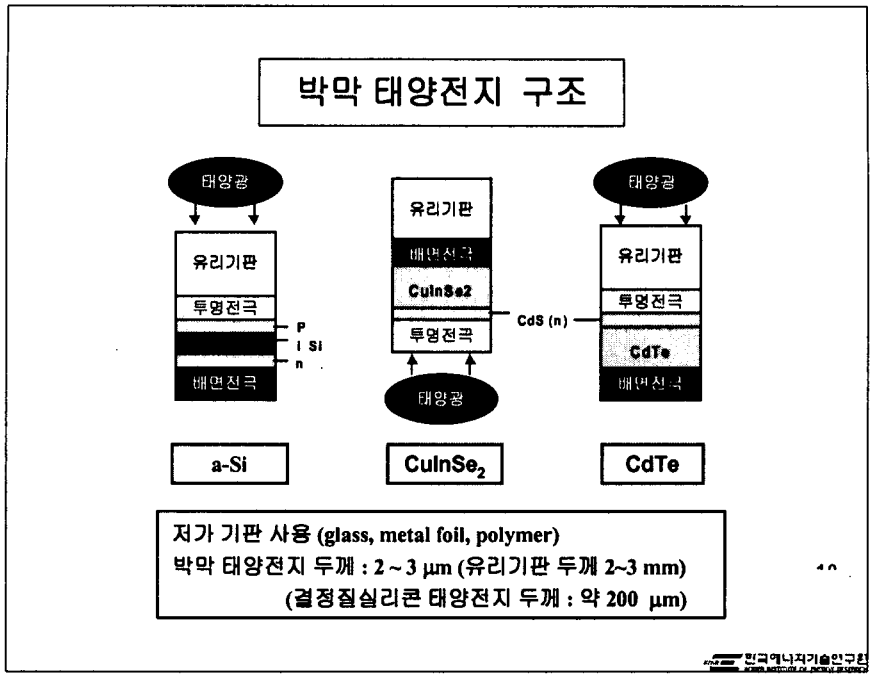
1. Photovoltaic News, Vol. 20, No. 2, Feb., 2001.
2. Electricity from sunlight, IT Power, UK, 1997
3. B. McNelis, "The Photovoltaic Business : Manufacturers and Markets", Clean Electricity from Photovoltaics, Imperial College Press, 2001, pp. 713-739
4. H. Schock et al, " Thin-Film Solar cells : Past, Present and Future", Renewable Energy World, Vol. 4(2), March 2001, pp. 74-87.
5. PV Activities in Japan, Vol. 7(3), March 2001.
6. Photovoltaic Energy Program Overview Fiscal 2000, US DOE, Feb. 2001.
7. K. Zweibel, Solar Energy Materials & Solar Cells, Vol. 63, 2000, pp.375-386.
8. PV Power, IEA/PVPS, No. 15, Oct. 2001.
9. Progress in PV : Research & Applications, Vol. 9(1), Jan. 2001.
10. DOE : The National Photovoltaics Program Plan for 2000-2004, USA, Feb. 2000.
11. K. Zweibel, Solar Energy Materials & Solar Cells, Vol. 59(2), 1999.
12. B.v. Roedern, "Advances in Photovoltaics at NREL", NREL/CP-520-26686, Sep. 1999.
13. A. Goetzberger et al, Solar Cells : Past, Present, Future , Proc. PVSEC 12, Korea, June 2001, pp. 5-10.


태양광 모듈의 가격, 효율 추이
가격 ($/Wp)
변환효율 (%)
Year
가격 ($/Wp)
변환효율 (%)
30
25
20
15
10
5
0
15
14
13
12
11
10
9
8
78 80 82 84 86 88 90 92 94 96 98
출처 : Electricity from sunlight, IT Power, UK, 1997
B. McNelis, "The Photovoltaic Business : Manufacturers and Markets",
Clean Electricity from Photovoltaics, Imperial College Press, 2001

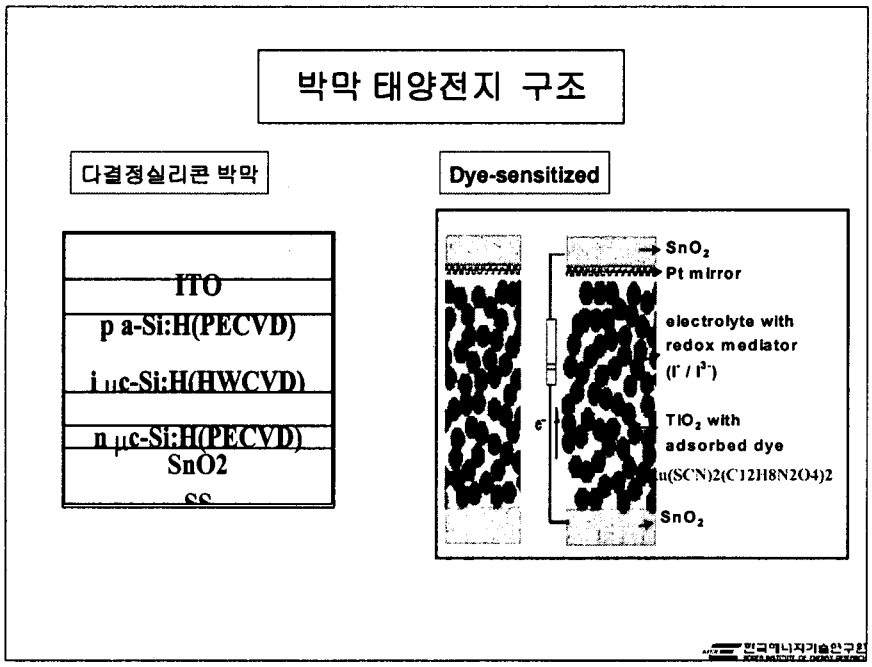
[그림 1]


박막 태양전지 기술 분류
태양전지
실리콘
Bulk
박막
단결정
비정질
다결정
미결정
다결정
화합물
Bulk
박막
GaAs
CuInSe2
InP
CdTe
적층형
박막
a-Si/CIS
GaAs/Ge
기 타
Dye
Polymer
Nano

[그림 2]

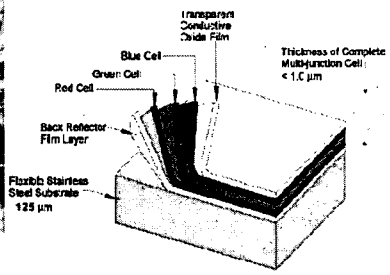

박막 태양전지 구조
태양광
유리기판
투명전극
P
I Si
n
배면전극
a-Si
유리기판
배면전극
CuInSe2
투명전곡
태양광
CuInSe2
CdS (n)
태양광
유리기판
투명전극
CdTe
배면전극
CdTe
저가 기판 사용 (glass, metal foil, polymer)
박막 태양전지 두께 : 2 ~ 3 μm (유리기판 두께 2~3 mm)
(결정질실리콘 태양전지 두께 : 약 200 μm)

[그림 3]


박막 태양전지 구조
다결정실리콘 박막
ITO
p a-Si:H(PECVD)
i μc-Si:H(HWCVD)
n μc-Si:H(PECVD)
SnO2
SS
Dye-sensitized
SnO2
Pt mirror
electrolyte with
redox mediator
(I- / I3-)
TiO2 with
adsorbed dye
Ru(SCN)2(C12H8N2O4)2
SnO2

[그림 4]

UNI-SOLAR® multi-layer amorphous silicon thin-film solar cell
continuous roll-to-roll PECVD deposition process

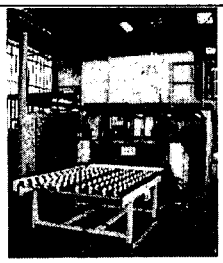


http://www.ovonic.com/unitedsolar/technology.html

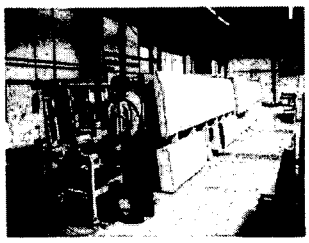
[그림 5]

박막 태양전지 연속 제조 장치

ANTEC CdTe

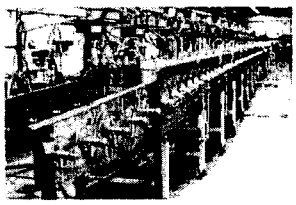


Glas-Waschanlage



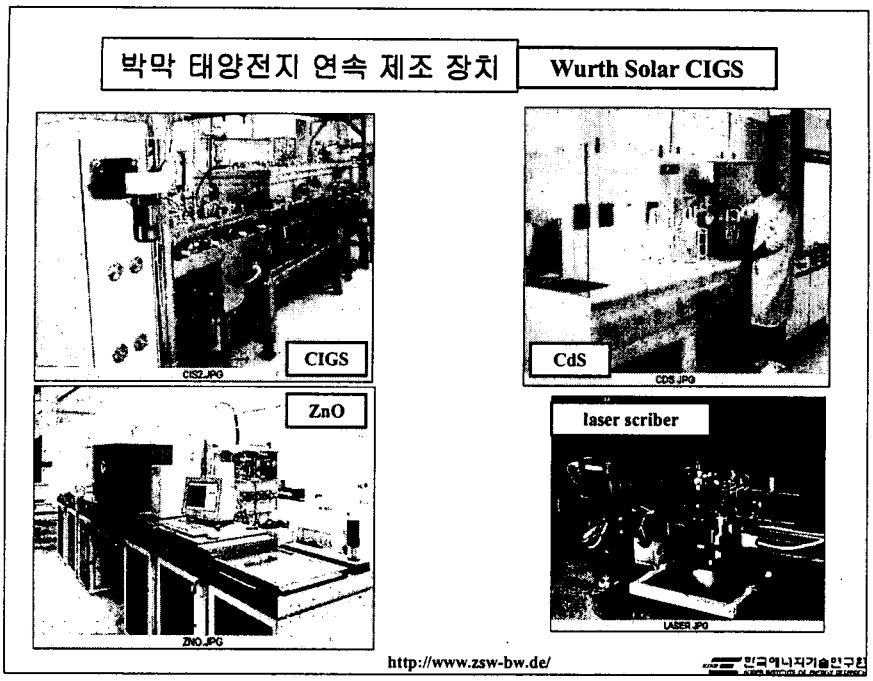
Rückkontakt-Linie

Laminier-Linie

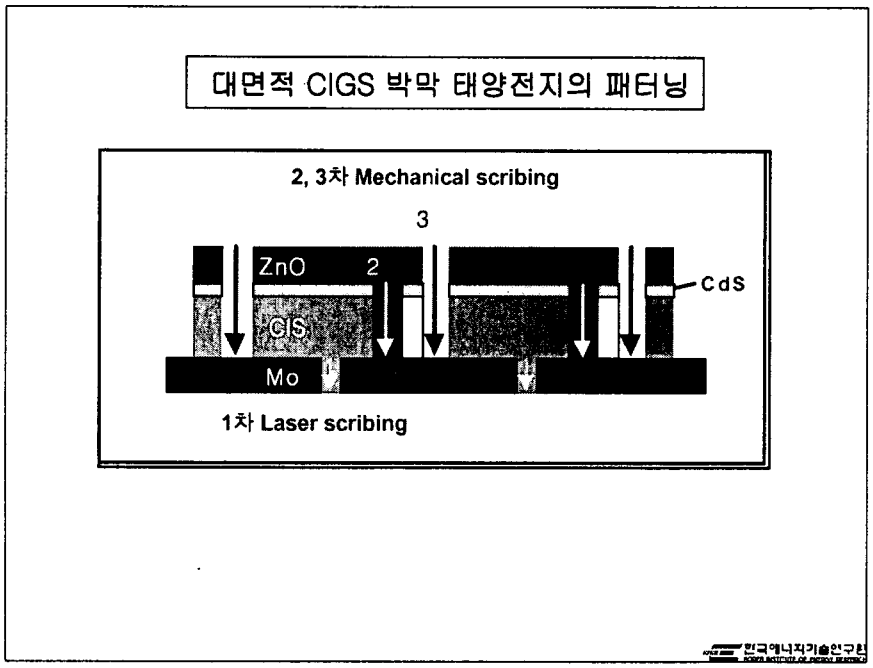


CSS-Linie

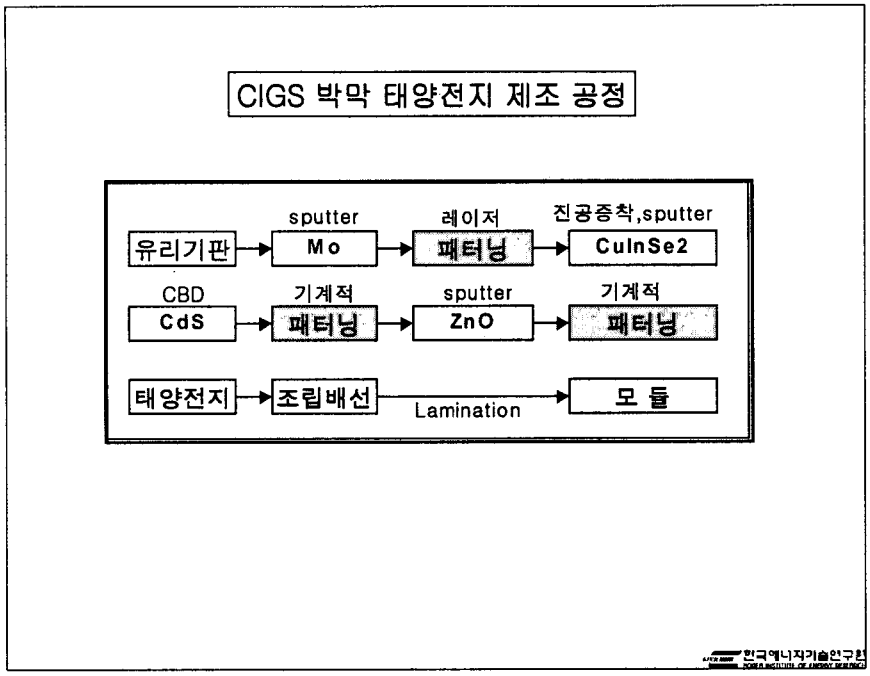
[그림 6]


박막 태양전지 연속 제조 장치
Wurth Solar CIGS
CIGS
CdS
ZnO
laser scriber
http://www.zsw-bw.de/

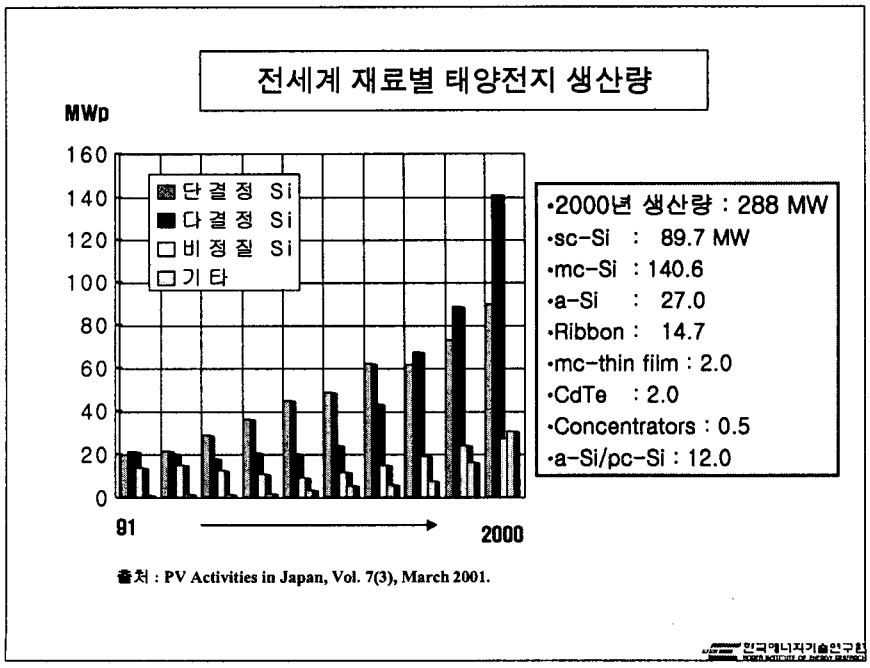
[그림 7]


대면적 CIGS 박막 태양전지의 패터닝
2, 3차 Mechanical scribing
3
ZnO
2
CdS
CIS
Mo
1차 Laser scribing

[그림 8]


CIGS 박막 태양전지 제조 공정
유리기판
sputter
Mo
레이저
패터닝
진공증착,sputter
CuInSe2
CBD
CdS
기계적
패터닝
sputter
ZnO
기계적
패터닝
태양전지
조립배선
Lamination
모 듈

[그림 9]


전세계 재료별 태양전지 생산량
MWp
160
140
120
100
80
60
40
20
0
단결정 Si
다결정 Si
비정질 Si
기타
91
2000
•2000년 생산량 : 288 MW
•sc-Si : 89.7 MW
•mc-Si : 140.6
•a-Si : 27.0
•Ribbon : 14.7
•mc-thin film : 2.0
•CdTe : 2.0
•Concentrators : 0.5
•a-Si/pc-Si : 12.0
출처 : PV Activities in Japan, Vol. 7(3), March 2001.

[그림 10]

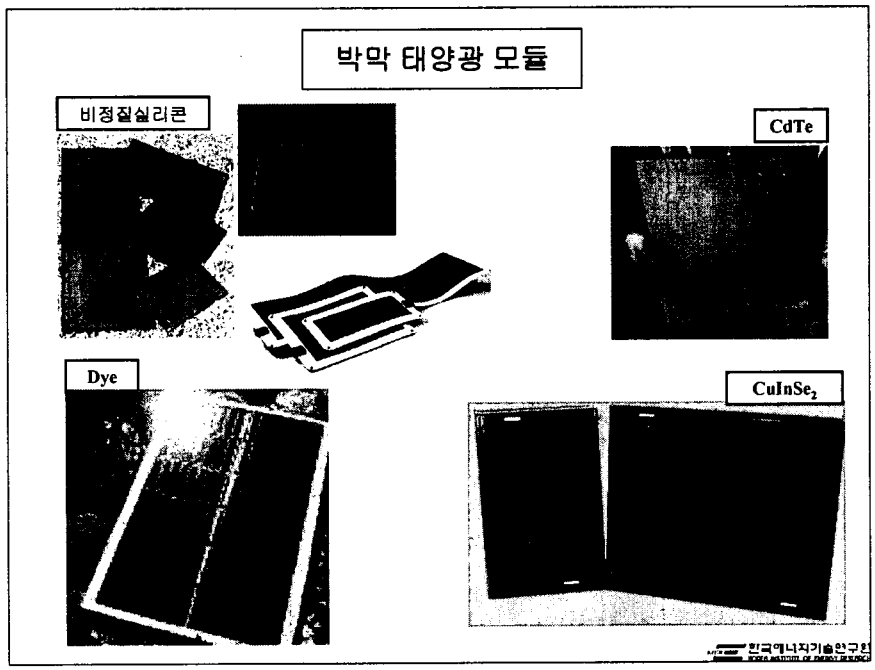
<표 1>

박막 모듈 상업화 현황 및 계획

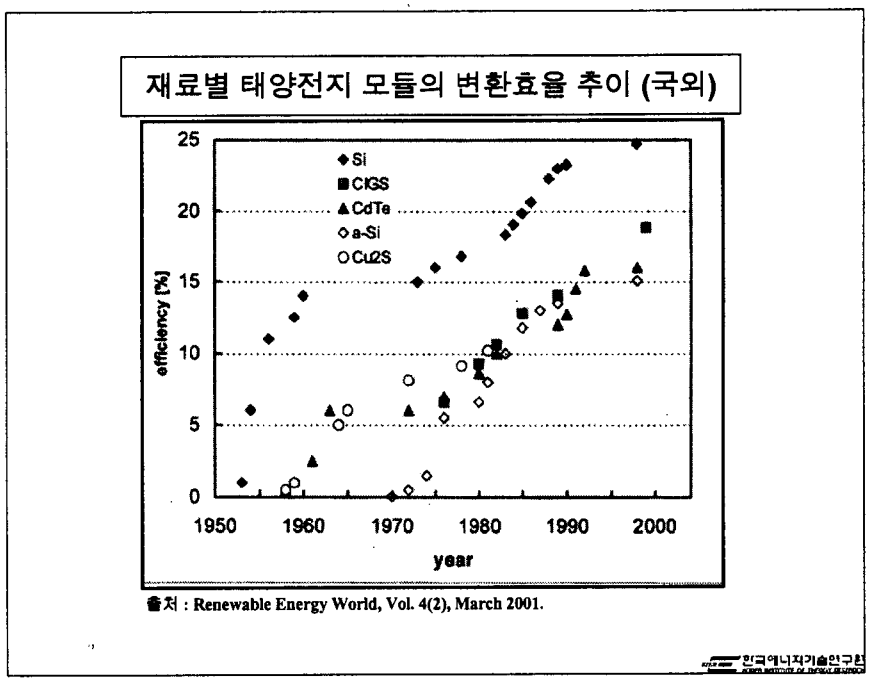
Device	Company/Lab.	Status
a-Si	United Solar	5MW, flexible SUS sub., triple
	BP Solarex	10MW, dual cell
	Iowa Thin Films	Flexible
	EPV	
	Sanyo	Consumer
	Fuji	Polymer sub.
	Kaneka	20MW, single
	Sharp	24MW under construction
	ASE	1MW pilot
CdTe	First Solar	Demo, 10 MW planned
	BP Solarex	10 MW planned
	Matsushita	Production planned
	ANTEC-Solar	10 MW under construction
CIS	Siemens Solar	0.5MW pilot
	Global Solar	10MW, polymer sub. planned
	EPV	Production planned
	ISET	0.02 pilot
	Wurth Solar	1MW under construction
	Showa	Pilot
Thin Si	AstroPower	Pre-thin film
Dye-sensitized	Toshiba	Consumer, scale-up underway

출처 : 1) Photovoltaic Energy Program Overview Fiscal 2000, US DOE, Feb. 2001
2) K. Zweibel, Solar Energy Materials & Solar Cells, 63, pp. 375-386, 2000.

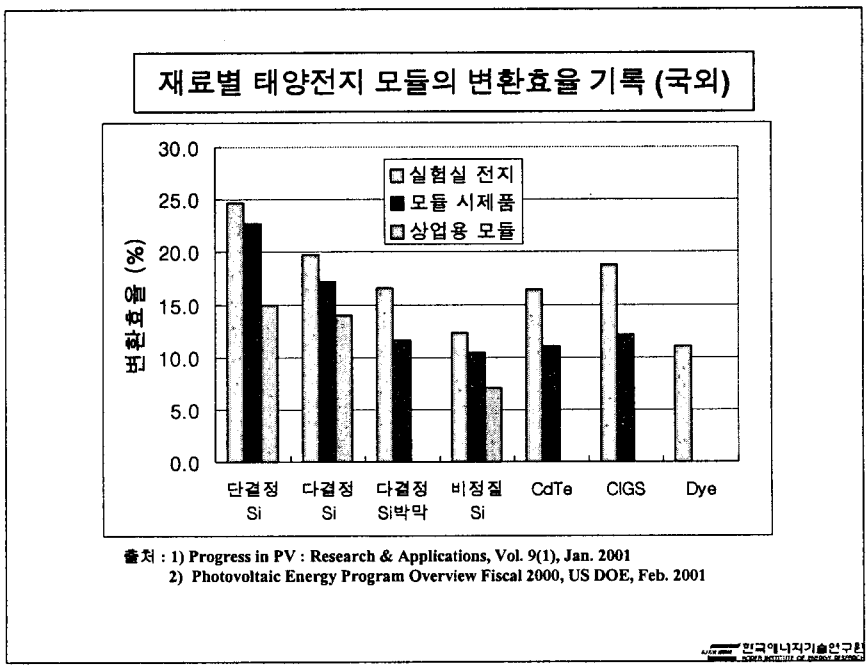
한국에너지기술연구원



[그림 11]


재료별 태양전지 모듈의 변환효율 추이 (국외)
Si
CIGS
CdTe
a-Si
Cu2S
efficiency [%]
year
25
20
15
10
5
0
1950
1960
1970
1980
1990
2000
출처 : Renewable Energy World, Vol. 4(2), March 2001.

[그림 12]


재료별 태양전지 모듈의 변환효율 기록 (국외)
실험실 전지
모듈 시제품
상업용 모듈
변환효율 (%)
30.0
25.0
20.0
15.0
10.0
5.0
0.0
단결정 Si
다결정 Si
다결정 Si박막
비정질 Si
CdTe
CIGS
Dye
출처 : 1) Progress in PV : Research & Applications, Vol. 9(1), Jan. 2001
2) Photovoltaic Energy Program Overview Fiscal 2000, US DOE, Feb. 2001

[그림 13]

<표 2>

대면적 박막 모듈 상업화 개발

Device	Power (W)	Comp	eSize (ft^2)	Eff. (%)
a-Si/a-SiGe/a-SiGe/SS	70.8	United Solar, 9/97	10.2	7.6
a-Si/a-SiGe	56.0	BP Solar, 9/96	8.2	7.6
a-Si triple	35.7	United Solar, 6/97	5.0	7.9
a-Si/c-Si/glass	38.0	Kaneka, 9/00	4.1	9.7(stab)
CdS/CdTe	91.5	BP Solar, 5/00	9.5	10.6
CdS/CdTe	61.3	First Solar, 6/96	7.8	9.1
CdS/CdTe	59.0	Matsushita, 6/00	6.0	11.0
CdS/CdTe	53.9	BP Solar, 4/00	5.4	10.8
CdS/CdTe	31.0	Golden Photon, 4/97	3.7	9.2
CIS/CdS	44.3	Siemens Solar, 3/99	4.0	12.1

Photovoltaic Energy Program Overview Fiscal 2000, US DOE, Feb. 2001

한국에너지기술연구원

<표 3>

미국 *National Photovoltaic Program* 목표

		1995년	2000년	2005년	2020~2030
모듈효율	(%)	7~17	8~18	10~20	15~25
설치단가	($/Wp)	7~15	5~12	4~8	1~1.5
수 명	(years)	10~20	>20	>25	>30
누적보급량	(MWp)	175	500	1,000~1,500	>50,000

- 최종 목표 : 효율 15%, 모듈 제조가 $50/m2, 단가 $0.33/W
- 2001년
  실험실 a-Si 13%, CIS 20%

출처 : The National Photovoltaics Program Plan for 2000-2004, DOE, USA, Jan. 2000

한국에너지기술연구원

<표 4>

박막 모듈 효율과 직접제조비용에 따른 모듈가격

모듈 효율	직접 제조 비용			
	$200/m^2	$150/m^2	$100/m^2	$50/m^2
6.25%	$3.30	$2.50	$1.70	$0.80
8%	$2.50	$1.90	$1.35	$0.63
10%	$2.00	$1.50	$1.00	$0.50
12%	$1.70	$1.25	$0.83	$0.42
15%	$1.30	$1.00	$0.67	$0.33/Wp

주) K. Zweibel, Solar Energy Materials & Solar Cells, Vol. 63, 2000, pp.375-386.

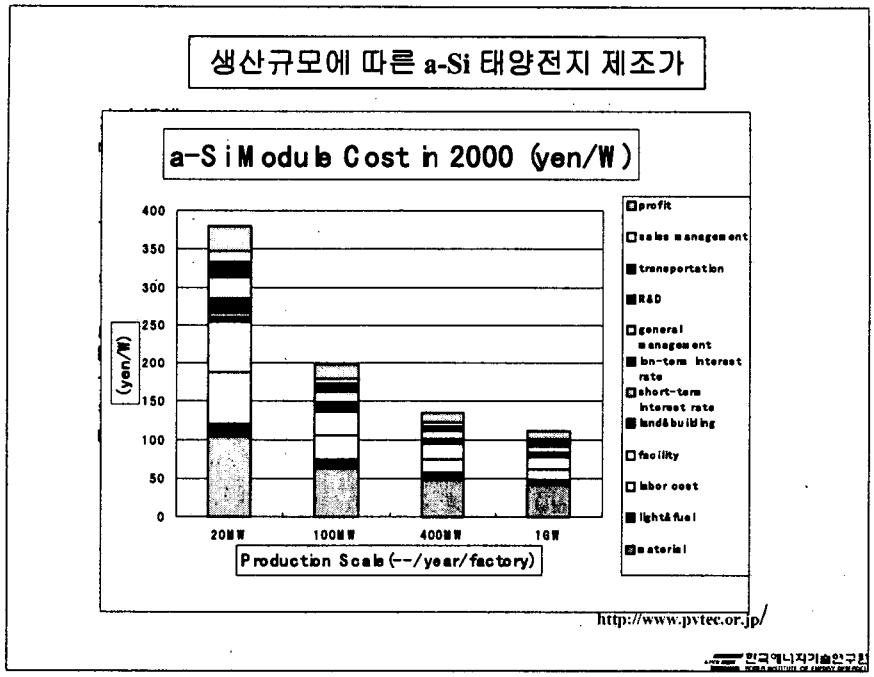
<표 5>

박막 모듈 제조비용

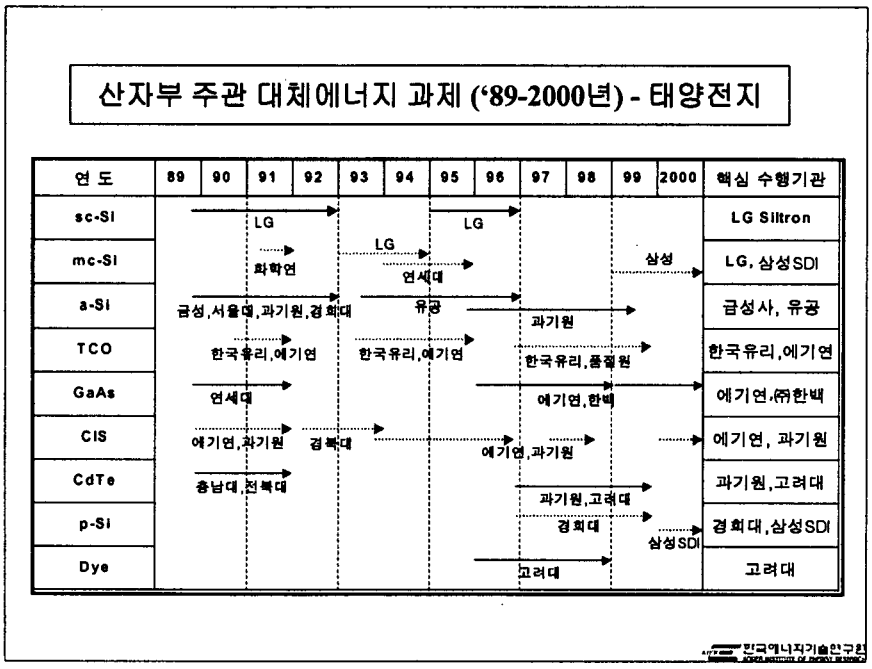
구 분	직접제조비용 ($/m^2)		제조비용 목표 달성 방안
	Baseline	목 표	
재 료	48	28	연구개발 - 효율향상 (15%, 150W/m^2) - 증착속도 증대, 단위박막 두께 보다 얇게 - 재료사용 효율 증대, 고수율 - 저온 공정, 쉬운 공정 - scribing, lamination, encapsulation, 모듈화 기술 개선 - 새로운 투명전도막 기술, 보다 혁신적인 기판
자 본	10	5	
전기, 열, 물	3	2	
인건비	12	6	
장비유지관리	3	2	대량생산 - 재료구입 값싸게 - 생산~판매에 이르는 오버헤드 비중 축소 - 장비 대형화에 따른 초기투자비 절감 - 모듈대형화에 따른 비용 절감 - 제품 제조 공정의 최적화 증대 - 제품보증 비용의 비중 하락 - 자동화 증대
연구개발	4	1	
제품보증	5	1	
임차 및 공장 오버헤드	5	5	
계	90	50	

* Baseline은 CdTe 20 MW/yr 규모, 반도체재료비는 약 $5

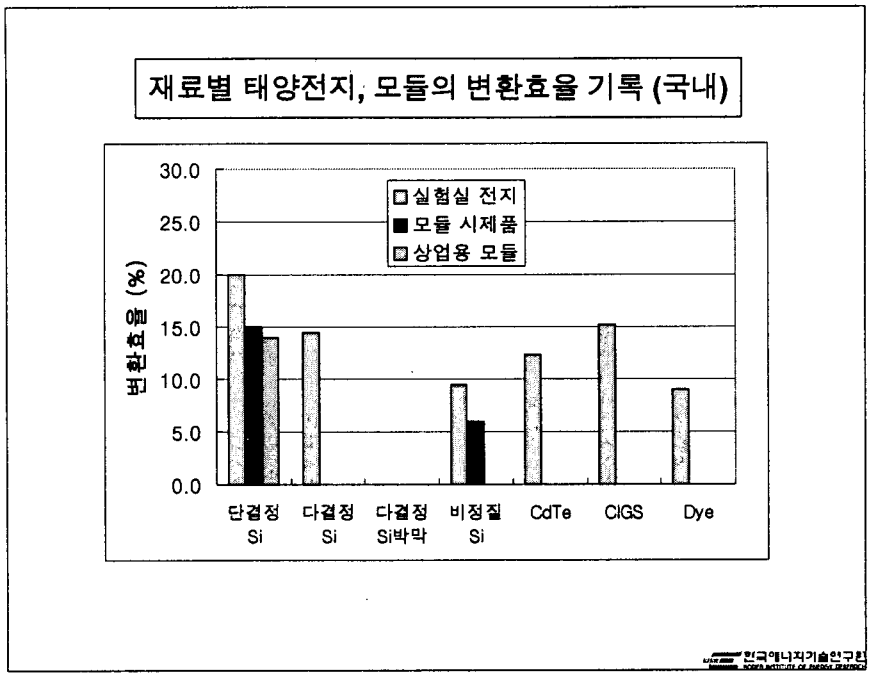
주) K. Zweibel, Solar Energy Materials & Solar Cells, Vol. 59(2), 1999.


생산규모에 따른 a-Si 태양전지 제조가
a-Si Module Cost in 2000 (yen/W)
(yen/W)
400
350
300
250
200
150
100
50
0
20MW
100MW
400MW
1GW
Production Scale (--/year/factory)
profit
sales management
transportation
R&D
general management
lon-term interest rate
short-term interest rate
land&building
facility
labor cost
light&fuel
material
http://www.pvtec.or.jp/

[그림 14]


산자부 주관 대체에너지 과제 ('89-2000년) - 태양전지
연 도
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
2000
핵심 수행기관
sc-Si
LG
LG
LG
LG Siltron
mc-Si
화학연
LG
연세대
삼성
LG, 삼성SDI
a-Si
금성,서울대,과기원,경희대
유공
과기원
금성사, 유공
TCO
한국유리,에기연
한국유리,에기연
한국유리,품질원
한국유리,에기연
GaAs
연세대
에기연,한백
에기연,㈜한백
CIS
에기연,과기원
경북대
에기연,과기원
에기연, 과기원
CdTe
충남대,전북대
과기원,고려대
과기원,고려대
p-Si
경희대
경희대,삼성SDI
삼성SDI
Dye
고려대
고려대

[그림 15]



[그림 16]

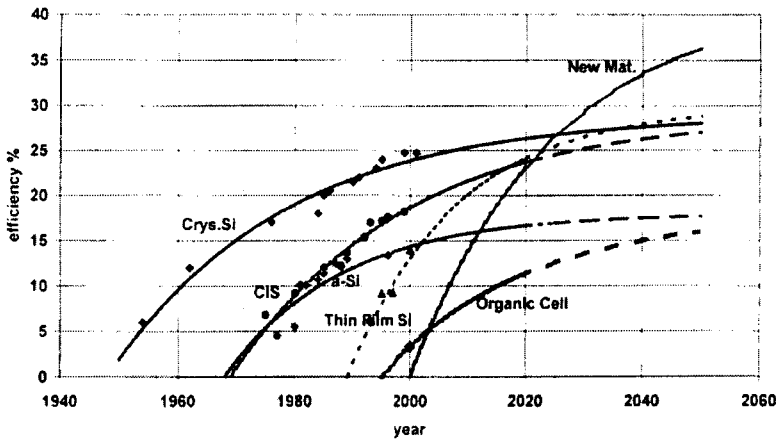
<표 6>

박막 태양전지 잠재성 및 위험도

재 료	Potential	Risk	장 점	문제점 및 해결책
a-Si	low	low	양산,실용성	안정화효율, 성장속도 향상
CdTe	medium	medium	안정성	폭로시 안정성, Cd, 대면적,고효율
CIS	high	high	최고효율,장수명	대면적화, In,Ga 자원, 고효율
pc-Si (thick)	? (medium)	low	자원 풍부	저효율
pc-Si (thin)	unknown	very high	자원 풍부	저효율
Dye			저가, 단순 공정	액체전해질, 기밀성, 대면적화

주) Bolko v. Roedern, Advances in PV at NREL, NREL/CP-520-26686, Sep. 1999.
M. Konagai, Best Mix Vol. 24, 2000.

태양전지 효율 전망



A. Goetzberger et al, "Solar Cells : Past, Present, Future", Proc. PVSEC 12, Korea, June 2001, pp. 5-10.

[그림 17]

요약 및 결론

- 단기적으로 태양전지 시장은 기존과 같이 결정질 Si 태양전지 주도
- 단기 및 중기적으로 박막 태양전지 시장 기존 시장과 대등한 수준에 도달
  : BIPV에 적합, 대량생산
- 신형 태양전지 등 출현으로 21세기 에너지사업 주도
- 국내 : 적어도 2-3개 박막 태양전지 기술 지속 개발 필요
  박막 태양전지에 대한 기업의 관심 필요
  * 반도체, 디스플레이 기술, 인력 활용 가능