

태양 전지 기술 현황 및 전망

결정질 실리콘 태양 전지로 대표되는 현재의 상업화 기술과 함께 저가화 방안으로 대두되고 있는 차세대 박막 태양 전지의 기술 개발 현황과 그 전망에 대해 소개한다.

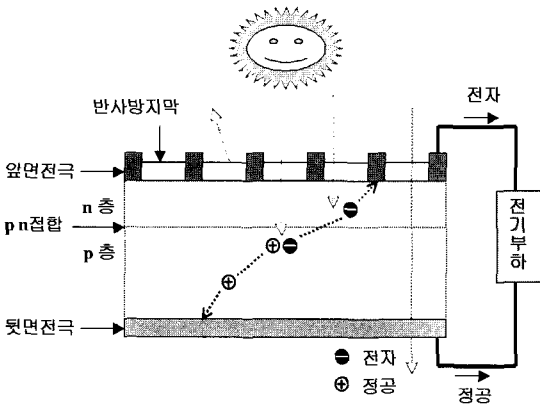
윤 경 훈

한국에너지기술연구원 태양전지연구센터(y-kh@kier.re.kr)

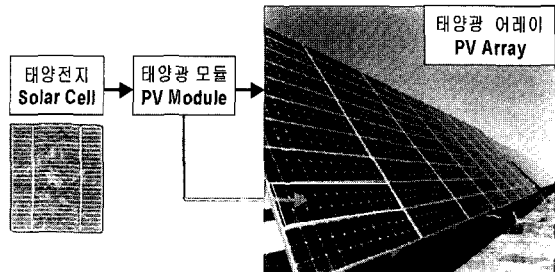
태양 전지 동작 원리 및 구성

태양광 발전(photovoltaic power generation)은 태양광을 직접 전기로 변환시키는 발전 방식으로 그 핵심은 태양 전지(solar cell 또는 photovoltaic cell)이다. 그림 1과 같이 반도체의 pn 접합으로 만든 태양 전지에 반도체의 금지대폭(eg : band-gap energy)보다 큰 에너지를 가진 태양광이 입사되면 전자-정공 쌍이 생성되는데, 이들 전자-정공이 pn 접합부에 형성된 전기장에 의해 전자는 n층으로, 정공은 p층으로 모이게 됨에 따라 pn 간에 기전력(광기전력: photovoltage)이 발생하게 된다. 이 때 양단의 전극에 부하를 연결하면 전류가 흐르게 되는 것이 동작 원리이다.

이러한 태양 전지는 필요에 따라 직병렬로 연결하여 장기간 자연 환경 및 외부 충격에 견딜 수 있는 구조로 만들어 사용하게 되는데, 그림 2와 같이 그 최소 단위를 태양광 모듈(photovoltaic module)이라 한다. 그리고 실제 사용 부하에 맞추어 모듈을 어레이(photovoltaic array) 형태로 구성하여 설치하게 된다. 태양광 발전을 위해서는 핵심 구성품인 태양광 어레이와 함께 태양 전지로부터 생성되는 직류 전기를 교류로 변환시키는 인버터, 비 또는 눈이 며칠간 계속되는 경우를 대비한 축전지 등의 주변 장치(balance of system)가 필수적이다. 주간 태양광에 의해 발전된 전기는 가정의 가전 제품용으로 사용되기도 하고 잉여 전기는 계통선으로 보내진다.



[그림 1] 결정질 실리콘 태양 전지 기본구조



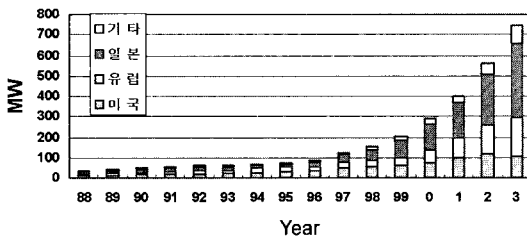
[그림 2] 태양 전지, 태양광 모듈과 어레이

태양 전지의 역사 및 시장 추이

태양 전지는 1839년 프랑스 과학자 Becquerel이 전해질 속에 담겨진 2 개의 금속 전극으로부터 발생하는 전력이 빛에 노출시 그 크기가 증가하는 광기 전력(photovoltaic) 효과를 발견한 것과 그 역사를 같이하고 있다. 1954년에는 미국 Bell Lab에서 실리콘을 소재로 한 최초의 태양 전지가 개발되었고, 이어서 1958년에는 우주선 Vanguard I호의 전원 공급용으로 최초로 실용화되기에 이르렀다. 우주선의 전원용으로만 사용이 국한된 태양 전지는 1970년대 2 차례의 석유 파동을 겪으면서 지상용 전원으로 활용하기 위한 가능성에 주목을 받게 된다. 이어 선진국의 체계적이고 집중적인 연구 개발에 힘입어 1980년 대부터 제한적이긴 하지만 지상 발전용으로 사용이 시작되고, 이어서 에너지 환경 문제가 지구적 차원의 문제로 부각됨에 따라 가장 유망한 신에너지 기술의 하나로 인식되기에 이르렀다.

일본, 유럽, 미국 등 선진국의 대규모 정부 지원에 따른 시장의 확대와 함께 기술 개발이 한층 더 강화되어 최근 수년간은 그림 3에 나타낸 바와 같이 그 시장 규모도 매년 35% 이상씩 크게 성장하고 있다. 특히 일본은 최근 주택용 태양광 발전 시스템을 대량 보급함으로써 세계 시장을 주도하고 있다. 미국의 경우 기술 개발과 보급 사업을 정책적으로 추진하고 있으나 최근 시장은 침체되어 있다. 유럽의 경우 개발도상국의 Solar Home System 수출과 주택, 건물용 시스템 활성화 및 대규모 주거 단지의 시범 건설에 따라 시장 점유율이 지속적으로 증가하고 있다.

2003년도의 시장은 태양광 발전 기준으로 약 47억



[그림 3] 국가 및 지역별 태양 전지 생산 추이

\$로 추산되고 있다. 지금까지의 추세로 보아 향후 태양광 발전 시장의 성장률을 연간 25%로 잡아도 2010년에는 연간 3,500 MW의 시장이 형성되게 된다. Clean Edge가 발간한 Clean Energy Trends 2004에 의하면 2013년에는 약 308억\$의 시장이 형성될 것으로 예측되고 있다.

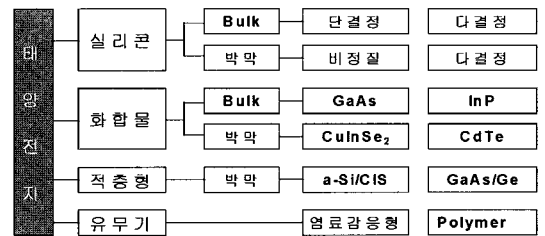
태양 전지의 구분

태양 전지의 종류는 그 재료에 따라 그림 4와 같이 구분하는 것이 보통이다. 현재 상용화되어 있는 단결정 및 다결정 실리콘 태양 전지를 제 1 세대 태양 전지, 실리콘과 화합물 반도체를 소재로 한 박막 태양 전지를 제 2 세대 태양 전지, 그리고 현재 실험실에서 태동 중이거나, 미래에 출현할 적층형 또는 나노 구조 태양 전지, 유무기 복합 소재의 태양 전지를 제 3 세대 태양 전지로 분류하고 있다.

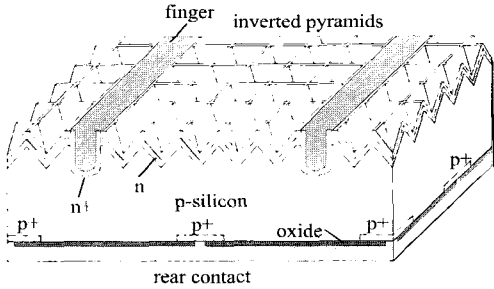
제 1 세대 결정질 실리콘 태양 전지

태양 전지 기술 및 시장을 선도하고 있는 일본의 경우 2000년 현재 모듈 기준 태양 전지의 제조 단가는 약 140 엔/W이고, 이를 이용한 태양광 발전의 전력 단가는 대략 70 엔/kWh로 추정하고 있다. 이 전력 단가를 우리 나라에 적용할 경우 일반 가정용 전력 요금의 거의 10 배에 달한다. 현재 사용되고 있는 지상용 태양 전지는 웨이퍼 형태의 단결정 및 다결정 실리콘 태양 전지로 전체 시장의 약 85%를 점유하고 있다.

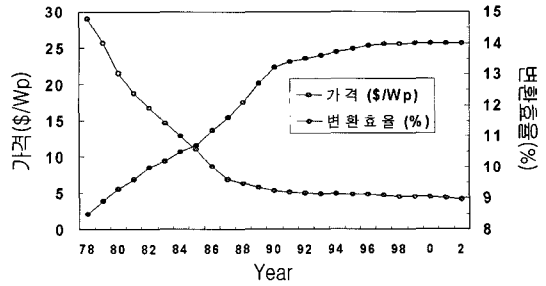
1980년대 이후 태양 전지 제조에 가장 먼저 사용된 반도체 재료가 단결정 실리콘이다. 현재 태양 전지



[그림 4] 태양 전지의 종류



[그림 5] 변환 효율 24.7%의 PERL 태양 전기 구조

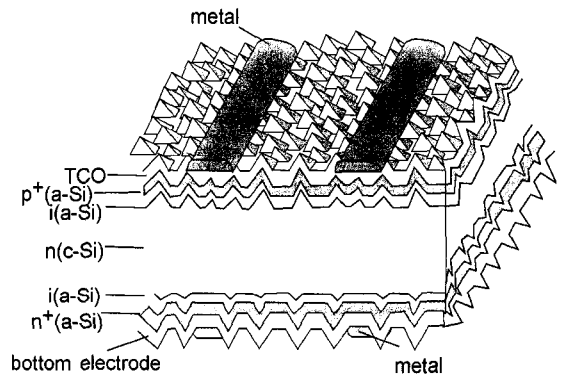


[그림 6] 결정질 실리콘 태양 전기 효율 및 가격 추이

시장에서 차지하는 비중이 이후 많이 떨어지긴 하였지만 현재로서도 시장, 특히 대규모 발전 시스템 분야에서 가장 널리 이용되고 있다. 이는 단결정 실리콘으로 만든 태양 전지의 효율이 기타 재료로 만든 태양 전지에 비해 변환 효율이 높기 때문이다. 그림 5는 현재까지 가장 높은 24.7%의 변환 효율을 기록한 PERL(passivated emitter, rear locally-diffused) 단결정 실리콘 태양 전지의 구조로 실제 제조 공정이 매우 복잡하고 공정에 소요되는 시간도 매우 긴 것이 단점이다. 따라서 그 용도도 우주용이나 태양광 자동차 등 고효율을 필요로 하는 분야에 한정되어 있어 지상용으로는 부적합하다. 그 해결 방안으로 보다 저급의 실리콘을 이용하는 방법, 대량 생산 및 공정 개선에 의한 방법 등이 시도 또는 계획되고 있다. 다결정 실리콘 태양 전지는 원재료로 저급의 실리콘 웨이퍼를 사용하는데, 따라서 효율은 단결정 실리콘에 비해 낮은 반면 가격은 싸다. 그리고 이용 분야도 주택용 시스템 등이 주 대상이다.

그림 6은 결정질 실리콘 태양전기 모듈의 변환 효율과 가격 추이를 나타낸 것으로 지난 20여년간 기술 개발의 결과로 가격이 크게 하락하는 추세이지만 최근에는 가격 변화가 거의 없음을 볼 수 있다. 단결정 및 다결정 실리콘은 벌크 상태의 원재료로부터 태양 전지를 만들기 때문에 원재료비가 비싸고, 공정 자체가 복잡하여 가격의 절감 측면에서는 한계가 있을 수밖에 없다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위한 방안으로 기관의 두께를 혁신적으로 줄이는 기술, 또는 유리와 같이 값싼 기관 위에 박막 형태의 태양 전지를 증착시키는 기술이 주목을 받고 있다.

최근 일본의 Sanyo에서는 그림 7과 같이 실리콘

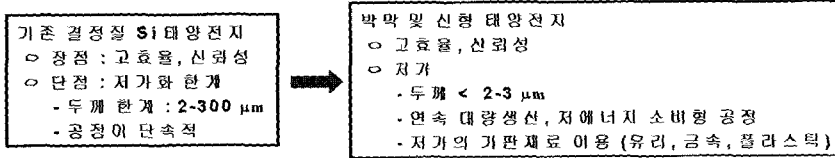


[그림 7] 효율 21.4%의 HIT 태양 전기 구조

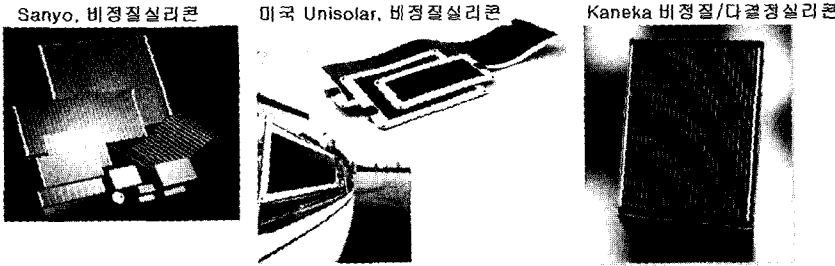
기관 위에 비정질 실리콘 박막을 입힌 새로운 형태의 HIT(heterojunction with intrinsic thin-layer) 구조의 태양 전지를 개발하여 지상용으로도 판매 중에 있는데, 이는 기존 결정질 실리콘 기술과 박막 태양 전지 기술이 접목된 것이다. 현재의 박막 제조 공정을 이용할 경우, 보다 값싼 방법으로 태양 전지의 대량 생산이 가능하기 때문이다.

제 2 세대 박막 태양 전기 - 실리콘 소재

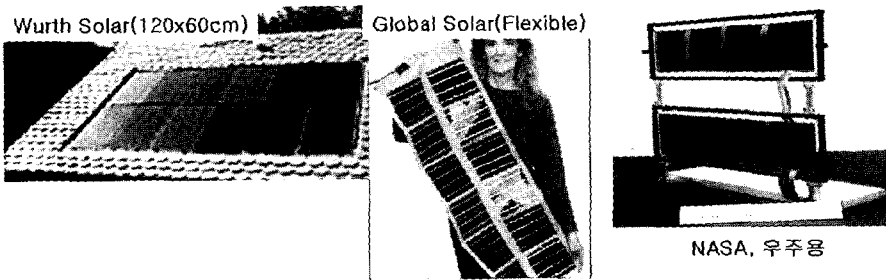
박막 태양 전기 중 가장 처음으로 개발된 것이 비정질 실리콘으로 기존 결정질 실리콘 태양 전지의 약 1/100에 해당하는 두께만으로도 태양 전지의 제조가 가능하다. 또한 그림 8에 요약한 것과 같이 값싼 기관을 사용하여 일관 공정으로 대면적 모듈의 대량 생산이 가능하고 생산에 소요되는 에너지가 적은 것이 장점이다. 하지만 결정질 실리콘 태양 전기



[그림 8] 결정질 실리콘 태양 전지와 박막 실리콘 태양 전지의 장단점 비교



[그림 9] 실리콘 박막 태양광 모듈



[그림 10] CIS 화합물 박막 태양광 모듈

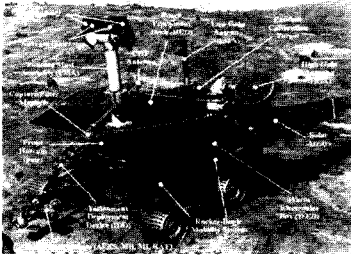
에 비해 효율이 낮고, 특히 초기 빛에 노출될 경우 효율이 급격히 떨어지는 단점이 있다. 따라서 대규모 발전용으로는 사용되지 못하고, 시계, 라디오, 완구 등 소규모 가전 제품의 전원용으로 주로 사용되고 있었는데, 최근 효율의 향상과 함께 초기 열화 현상을 최소화할 수 있는 다중 접합 구조의 비정질 실리콘 태양 전지의 개발과 함께 일부 전력용으로 이용이 되기 시작하였다.

일본 Kaneka에서는 비정질 실리콘 박막 태양 전지와 미결정 또는 다결정 실리콘 태양 전지를 2층, 3층으로 쌓은 구조의 다중 접합 태양 전지를 개발하여 판매 중에 있는데, 그림 9의 우측에 있는 것이 그것이다. 소면적의 실험실 태양 전지의 효율이

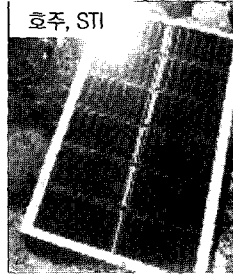
14.7%, 시판 중인 대면적 모듈의 효율은 약 10~11% 수준이다.

제 2 세대 박막 태양 전지-화합물 반도체 소재

뒤이어 출현한 박막 태양 전지가 CdTe, CuInSe₂ (CIS)계의 화합물 반도체를 소재로 한 것이다. 비정질 실리콘에 비해 효율이 높고, 또한 초기 열화 현상이 없는 등 비교적 안정성이 높은 태양 전지로 현재 CdTe는 대규모 전력용으로 사용을 위한 실증 시험 중에 있다. CuInSe₂는 실험실적으로 만든 박막 태양 전지 중에서 가장 높은 19.2% 변환 효율을 기록하여 현재 상업화 되어 있는 다결정 실리콘 태양 전지의



[그림 11] 화성 탐사선 Spirit Rover



[그림 12] 염료 감응형 태양전지 및 모듈

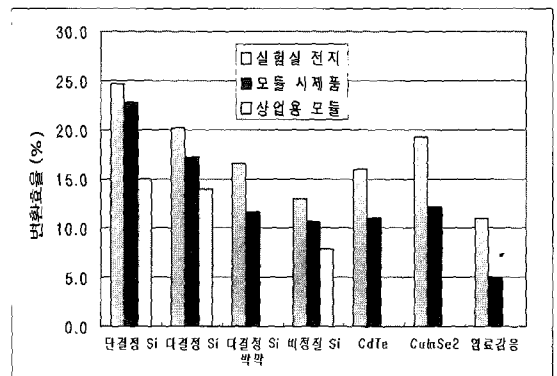
최고 효율 19.8%에 육박하고 있다. 이들 박막 태양 전지는 전력용으로 사용되기까지는 앞으로도 더 많은 연구 개발이 필요할 것으로 예상되고 있다.

일본, 미국, 유럽 등 여러 기업에서 기술 개발을 추진 중에 있는데, 일부 회사에서는 그림 10과 같이 시제품을 생산 판매하기도 한다. 유리 대신 금속 포일을 기판으로 하면 접어 보관할 수 있는 모듈도 만들 수 있고, 또한 CIS 화합물 태양 전지는 우주에서의 높은 에너지를 가진 입자에 대한 내성이 높아 그림 10의 우측에 있는 것과 같이 우주용으로서의 활용도 모색되고 있다.

GaAs, InP 등의 단결정으로부터 만든 화합물 태양 전지는 결정질 실리콘 태양 전지 보다 더 높은 효율을 나타내는데, 가장 큰 단점은 가격이 매우 비싸다는 점이다. 따라서 그 용도도 지상 발전용보다는 우주선 등의 전원 공급용에 국한되어 있는데, 가격도 지상용 태양 전지의 수백 배에 이른다. 가격을 절감하여 지상용으로 사용하기 위해서는 값싼 기판 위에 박막으로 제조하여야 하는데, 아직까지 실용화 단계에 이르지 못하고 있다. 그림 11은 미국이 화성에 보낸 탐사선 Spirit Rover로 GaInP/GaAs/Ge를 소재로 한 3층 구조의 태양 전지를 탑재한 것을 볼 수 있다.

제 2 세대 태양 전지-염료 감응형, 유기 고분자형

1990년대 초반부터는 반도체 무기 소재 대신 유기 염료를 소재로 광합성 원리를 이용한 염료 감응 태양 전지와 전자주개(donor)와 전자받개(acceptor) 특성을 갖는 유기 분자형 태양 전지와 같은 유기 태

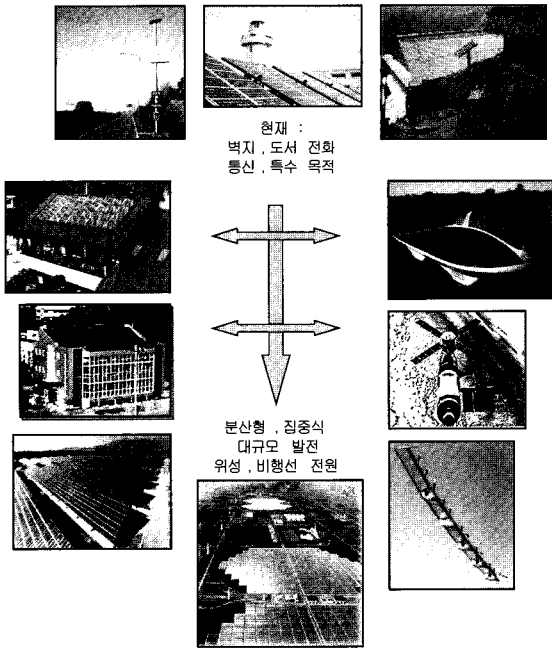


[그림 13] 재료별 세계 최고 태양 전지 변환 효율

양 전지 연구가 진행되고 있다. 유기 분자형 태양 전지는 에너지 변환 효율이 2003년 현재 2~3% 정도로 매우 낮지만 매우 얇고 가벼운 플라스틱 태양 전지의 실현을 가능케 할 수 있다. 1991년 스위스 Gratzel 그룹에서 보고한 염료 감응 광전기 화학 태양 전지는 제조 단가가 실리콘의 1/5 수준으로 매우 낮아 가격 경쟁력이 우수한 기술로 평가받고 있다. 2003년 현재 소면적 태양 전지의 에너지 변환 효율이 최고 11%이고, 그림 12와 같이 호주 STI 등 일부 기업에서는 모듈의 시제품을 개발 중인데, 아직 효율은 5% 정도로 낮다. 염료 감응형 태양 전지는 투명하게 만들 수 있어 그림 12의 우측과 같이 채광과 발전을 겸한 창호용으로도 사용될 수 있다.

현재 박막 태양 전지 기술 수준 비교

그림 13은 재료별 태양 전지 변환 효율을 나타낸



[그림 14] 태양 전지의 현재 및 미래 활용 분야

것으로 각각 실험실, 시제품 모듈 및 상업용 모듈로 구분하여 비교한 것이다. 현재 변환 효율은 $CuInSe_2$ > $CdTe$ > 실리콘 > 염료 감응형의 순으로 이는 면적이 큰 모듈의 경우도 마찬가지이다. 특히 $CuInSe_2$ 의 경우 실험실 최고 효율이 다결정 실리콘 태양 전지에 근접하고 있음을 볼 수 있다. 하지만 제조 원가 측면에서는 현재까지 정확한 계산 결과는 발표 또는 공개된 바 없지만 변환 효율의 역순으로 예상된다. 현재 시판 중인 시제품 모듈의 경우도 기존 결정질 실리콘 태양 전지와 비슷한 수준이다.

그동안 많은 기술 개발에도 불구하고 박막 태양 전지가 아직까지 전체 태양 전지 생산량에 크게 기여하지 못하고 최근엔야 시장 진입을 하기 시작한 것은 기술적으로 해결해야 할 문제점이 아직 많기 때문이다.

우선 실험실에서의 효율을 향상시킬 수 있는 기술이 선결되어야 하고, 그 다음은 실험실에서 달성한 효율과 양산용 대면적 모듈의 효율 격차를 줄이는 것이다. 이는 대면적 박막에서 박막의 균일도가 떨어지는 점, 대면적 패터닝에 따른 손실 면적의 증

가, 기타 대면적 처리 장치의 제조 조건이 실험실 소규모 장치의 조건과 상이하기 때문이다. 염료 감응형 태양 전지는 공정 자체가 매우 간단하여 현재로서 가장 값싸게 만들 수 있는 태양 전지로 인정받고 있으나 장기적인 신뢰성, 대면적화의 어려움 등이 문제점으로 지적되고 있다.

태양 전지의 향후 전망

미국, 일본, 유럽에서는 기존의 결정질 실리콘을 대체하고 나아가서는 기존의 발전 방식과 경쟁이 가능한 박막 태양 전지의 연구 개발을 국가적인 차원에서 계획하고 추진하고 있다.

장기적인 목표는 나라와 관계없이 유사한데, 중장기적으로 미국 에너지부(DOE)는 박막 재료에 무관하게 상업용 모듈의 효율은 2005년에 10%, 2020~2030년에 15%를 목표로 하고 있다. 이를 토대로 한 시스템의 비용은 2005년에 \$4~8/W, 2020~2030년에 \$1~1.5/W를 목표로 설정해 놓고 있다.

미국의 DOE가 설정한 박막 모듈의 제조 비용의 최종 목표는 \$0.33/W로 모듈의 목표 효율 15%, 모듈 제조가 \$50/m²에 해당하는 것이다. 이는 현재의 제조가의 약 1/6에 해당된다. 이와 같은 목표를 달성하기 위해서는 앞으로도 지속적인 연구 개발이 필요한데, 그 핵심은 역시 태양 전지의 고효율화와 저가화를 동시에 겨냥하는 것이다. 그 밖에 생산 설비의 대용량화로 가격 절감을 도모하는 것도 중요한 요소이다. 실제로 생산 규모가 획기적으로 증대되면 지금의 기술로도 태양 전지의 가격을 크게 낮출 수 있다. 하지만 궁극적인 목표는 위에서 제시한 목표 수치를 달성하는 것으로 생산 규모의 증대 이전에 실험실적으로 완벽한 기술의 개발이 선행되어야 한다.

앞에서 열거한 태양 전지 재료 중 어떤 것이 향후 가장 유망할 것인지에 대해서는 현재로서는 판단하기 어렵다. 미국, 일본, 유럽에서 현재 거론되는 모든 재료들을 전부 연구 개발의 대상으로 하는 이유도 각기 재료별로 장단점을 가지고 있기 때문이다.

시장 측면에서는 앞으로도 최소한 5~10년 정도는 기존의 결정질 실리콘 태양 전지가 주도하면서 박막 태양 전지가 그 시장의 일부를 점차적으로 잠식해

나가는 추세가 이어질 것이다. 그리고 특정 기술이 경쟁에서 떨어져 완전히 배제되기 보다는 기술적으로 상호 보완 내지 융합을 통해 태양 전지의 경제성이 개선될 것으로 전망된다.

다른 한편에서는 현재 가장 유망한 기술로 거론되고 있는 박막 태양 전지(특히 CIS, 실리콘 박막)의 효율이 앞으로 지속적으로 향상되어 기존의 결정질 실리콘 태양 전지 효율과의 격차를 좁혀가겠지만 이보다는 획기적으로 저가 고효율화가 가능한 새로운 태양 전지 재료가 출현할 것이라는 예측이 있다. 그것이 기존 재료를 변형 또는 융합한 형태가 될지 아니

면 전혀 새로운 소재가 될지는 아직 미지수이나 그 가능성의 확인이 실험실에서 활발하게 이루어지고 있다. 특히 현재 과학 기술계에서 화두가 되고 있는 나노 기술의 개념이 태양 전지의 미래를 확실하게 밝혀 줄 수도 있을 것이다.

초저가 고효율의 태양 전지를 적용한 태양광 발전이 기존 발전 방식과 경쟁 가능할 경우 그 시장은 지상용, 우주용으로 폭발적으로 확대될 것이다. 현재 경제성을 확보하고 있는 특수 용도에서 분산형 발전 방식으로 나아가서는 대규모 집중식 발전 방식으로 자리 잡게 될 것이다. 