

태양광 발전기술의 개발 및 보급동향

송진수*, 윤경훈, 유권중
한국에너지기술연구소

Trends of Photovoltaic Research, Development and Diffusion

J. Song*, K. H. Yoon, K. J. Yu
Korea Institute of Energy Research

Abstract The Korean National Photovoltaic Project was initiated in October 1989 to develop technologies for the generation of economically competitive electric power by photovoltaic systems. It consists of four stages through the year 2006 with technical goals and cost targets related with solar cells, balance of systems and system application.

The objectives of the project are to utilize photovoltaic technology, to transfer developed technology to industries and end users by research activities and to diffuse photovoltaic systems by demonstration projects.

This paper reviews long-term plan and status of technology R&D, and markets of photovoltaics. Some activities designed to promote collaboration with foreign countries are also introduced.

1. 서론

태양광발전은 무한정, 무공해의 햇빛을 직접 전기로 바꿀 수 있는 첨단기술이다. 태양광발전의 기본원리는 반도체 pn 접합으로 구성된 태양전지(solar cell)에 태양전지 재료의 금지대 폭보다 큰 에너지를 가진 파장영역의 태양광이 입사되면 광에너지에 의해 전자-정공 쌍이 여기되고, 분리된 전자와 정공이 이동하여 n층과 p층을 각각 음극과 양극으로 대전시킴으로써 기전력이 발생하며, 외부에 접속된 부하에 전류가 흐른다.

이러한 태양전지는 필요에 따라 직병렬로 연결하여 내후성과 신뢰성을 가진 재료와 구조의 용기 내에 봉입함으로써 단위 용량의 태양전지 모듈(solar cell module)로 제품화된다. 그러나 태양전지는 바늘 또는 구름에 의해 태양광이 비치지 않는 날과 밤에는 전기를 발생하지 않을 뿐만 아니라 일사량의 강도에 따라 불균일한 직류전기가 발생되므로, 독립형 태양광발전시스템은 모듈을 직병렬로 연결한 태양전지 어레이(solar cell array)와 안정된 전기공급을 위한 전력조정기(power controller) 또는 직·교류변환장치(inverter)와 전력저장용 축전지(storage battery) 등의 주변장치(balance of system)로 구성된다. 그러나 계통연계형 시스템은 전력저장용 축전지 대신에 상용전원과 연결하여 부하변동에 따라 계통선과 전력을 상호 교류할 수 있도록 구성된다.

한편 태양광발전 기술의 분류는, 핵심소자인 태양전지의 제조기술과 주변장치를 포함한 시스템용 기술로 대분된다. 세부 분류는 형태와 구성에 따라 달라질수 있으며 기술내용이 중복될 수도 있으나, 재료별 태양전지 제조기술과 태양광발전시스템의 사용목적에 따른 이용기술로 구분하는 것이 일반적이다.

2. 기술개발 및 보급정책

2.1 개발정책 및 장기계획

태양광발전 분야의 기술선진국인 미국일본 및 유럽의 개발정책은, 2000년대 초까지 태양광발전에 의한 발전단가가 기

존의 발전방식과 경쟁이 가능한 수준까지 도달할 수 있는 기술의 실용화를 목표로 설정하고, 저가고효율의 태양전지 및 이용기술개발에 주력하고 있다. 그러나 이러한 기술개발은 장기간의 막대한 투자와 고급인력의 확보가 필요할 뿐만 아니라 대량생산에 의한 저가화 노력도 병행하여야 하므로, 지속적 연구개발을 위한 장기계획과 시장창출을 위한 보급지원정책을 수립하여 국가주도로 추진하고 있다.

미국의 경우 연방에너지부(DOE)의 주관하에 1972년부터 5년 주기의 National PV Program⁽¹⁾을 수립하고, 국립연구소인 NREL과 SNL을 중심으로 기술개발 사업을 수행하고 있다. 이러한 기술개발과 병행하여 Solar 2000, PVMaT, PVUSA, PV-BONUS의 실용화를 위한 대형 프로젝트를 수립하고 연방정부, 주정부, 산업체와 전력회사가 공동으로 사업을 추진중이다.

한편 일본은 1974년에 태양광발전기술을 개발하기 위한 국가주도의 Sunshine Project를 수립하였으며, 1980년에는 신에너지 산업기술 총합개발기구(NEDO)를 설립함으로써 본격적인 기술개발에 착수하였다. 이와 함께 1987년 관련 기업과 연구기관 등이 태양광발전간학회(JPEA)를 구성하여 기술 및 시장에 관한 정보 교환과 공동 연구를 추진하고 있으며, 1990년에는 24개 회사와 2개 단체로써 태양광발전기술연구조합(PVTEC)을 결성하여 정부와 기업 및 연구소의 정보교환, 대인 홍보와 연구개발의 기능을 수행하고 있다. 특히 1993년에는 경제 성장, 에너지 확보, 환경 보전에 대한 균형 있는 대책과 종합적인 기술개발을 위하여 Sunshine Project, Moonlight Project 및 지구환경 기술개발 계획을 통합한 New Sunshine Program⁽²⁾을 수립하여 체계화 하였으며, 태양광발전기술은 중장기적 첨단기술 개발과 단기적 실용화과제를 병행한 연구개발을 수행하고 있다.

또한 유럽은 1975년 이후 EC를 중심으로 DGXII(과학연구개발)이 주관하는 연구개발을 위한 JOULE 프로그램과, DGXVIII(에너지)이 주관하는 시범실증을 위한 THERMIE 프로그램 및 보급지원을 위한 ALTENER에 의해 태양광발전 기술개발을 꾸준히 추진하고 있다⁽³⁾. 이와는 별도로 유럽 각국은 자체적인 장기 계획에 의해 태양광발전 기술개발을 추진하고 있으며, 특히 성능측정 및 표준화, 대규모 시범단지의 조성 및 실증사업은 국가간의 협력사업으로 추진하고 있다.

국내의 기술개발⁽⁴⁾은 1987년 12월에 제정된 「대체에너지 기술개발 촉진법」을 근거로 1988년부터 대체에너지 기술개발 기본계획이 수립됨으로써 본격적인 기술개발이 추진되었다. 태양광발전기술은 개발필요성과 중요도에 따라 범국가적 연구사업으로 수행되었으며, 1단계('89~'91) 기간동안 결정질 실리콘 태양전지 및 주변장치의 국산화와 이용기술을 개발하고, 2단계('92~'96) 기간은 저가고효율 박막 태양전지의 기초기술 및 주변장치의 저가화와 신뢰도를 확립함으로써 실용화 기반을 구축하며, 3단계('97~2001) 기간은 박막 태양전지의 상품화와 응용 제품 개발에 의한 태양전지의 보급확대 및 태양광발전시스템의 실용화를 목표로 설정하고 있다.

2단계 사업기간이 종료된 1996년 12월에는 그 동안의 기술개발성과 경험에 바탕으로 보다 효과적인 추진전략을 위하여 「에너지기술개발 10개년 계획」을 수립하였으며, 1997년 12월 「대체에너지 개발 및 이용 보급촉진법」으로 개정하였

다. 이러한 기본법과 장기계획을 근거로 2006년까지 총 에너지 수요의 2%를 대체에너지로 공급하기 위한 기술개발과 보급 목표를 설정하였고, 제 3단계(97~2001)기간동안 시장창출을 위한 실용화 기술을 개발하며, 제 4단계(2002~2006) 기간에는 기술의 상용화에 의한 목표확대를 추진할 계획이다.

또한 기술개발과 보급을 효과적으로 추진하기 위하여, 대체에너지의 중점 프로그램인 태양광 발전분야는 1997년 8월부터 산·학·연의 전문가들로 구성된 태양광발전 연구회를 운영 중이다.

2.2 보급정책 및 지원제도

선진국에서는 태양광발전 분야의 시장개척과 고용증대 및 환경보전을 목적으로 국가주도의 대규모 보급사업을 전개하고 있으며, 이와 병행하여 중앙 및 지방정부, 전력회사, 공공기관 등에서 다양한 지원제도를 시행 중이다.

미국의 경우 1997년 Clinton 대통령이 공포한 'Million Roofs Solar Power Initiative' 계획은, 2010년까지 매년 1천만불의 예산을 투입하여 1백만호의 주택에 태양광발전시스템을 보급하고, 총 보급목표 3,025MWp(최종연도 생산용량 610 MWp), 발전단가 목표 7.7¢/kWh 및 3,510 천T-C의 CO₂ 감축목표를 달성함으로써 세계시장의 주도권과 기후변화협약의 대처 및 고용증대효과를 기대하는 원대한 내용을 포함하고 있다.⁵⁾

일본의 보급확산 프로그램은 통상산업성 주관 하에 신에너지계단과 NEDO가 각각 수행하고 있으며, '94년부터 추진해 온 주택용 태양광발전시스템 모니터링사업('97년부터 주택용 태양광발전 도입기반 정비사업으로 변경)은 개인주택에 최대 4kWp의 태양광발전시스템을 적용할 경우 설치비의 1/3까지 보조해 주는 제도로서, '97년까지 203억엔을 투입하여 총 45MWp(11,919건)의 주택용 태양광발전시스템을 보급하기 위한 계획이다. 또한 '92년부터 총 81.3억엔을 투입하여 박물관, 학교, 공민관 등의 공공시설에 5MWp(179건) 태양광발전시스템을 설치하는 Field Test사업과, '98년(24억엔)부터 착수한 산업용 태양광 Field Test사업을 전개하고 있다.⁶⁾

또한 1997년에는 「신에너지 이용 등의 촉진에 관한 특별조치법」을 제정하여 정부의 보급정책과 에너지 사용자 및 공급사업자에 대한 조치, 그리고 보급촉진에 필요한 행정·금융 지원 및 제도개선의 법적 근거를 마련하였으며, 특히 2000년 1월에는 태양광발전, 풍력발전 등의 자연에너지 발전사업자에 대한 재정지원과 전력회사의 구입의무화를 2001년부터 시행하기 위한 「자연에너지촉진법」을 국회에 상정하였다.⁷⁾

한편 대부분의 유럽국가들도 국가주도의 정책수립과 보급사업⁸⁾을 추진중이며, 독일의 태양광발전 실증시험 및 개인주택의 보급을 위한 2250 Roofs Project, 이탈리아의 100kW급 태양광발전 시스템의 표준화 및 보급을 위한 PLUG Project, 스위스의 MW House Project 및 프랑스의 PV 20 Project 등이 수행되고 있다. 이와 병행하여 독일 및 네덜란드를 중심으로 태양광발전 시스템을 적용한 대규모 복합건물 또는 주거단지까지 건설되어 운용되고 있다.

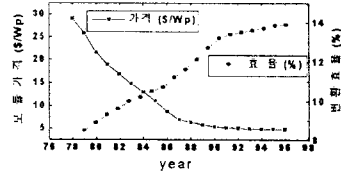
3. 기술개발 현황

3.1 외국현황

태양광발전기술의 개발목표는 저가·고효율의 태양전지 및 이용기술개발과 대량생산에 의해 상용 전원과 경쟁 가능한 발전단가의 수준에 도달하는 것이다. 따라서 일정수준의 생산용량(대량 생산에 의한 저가화)을 감안한 절대적 개발목표는 발전단가와 태양전지의 변환효율로 설정한다.

선진국의 가격목표는 미국의 경우 단기적(2000-2010)으로는 12-20¢/kWh, 장기적으로는 5-6¢/kWh의 발전단가를 제시하고 있다.⁹⁾ 이에 비해 일본은 2005년까지 ¥25-30/kWh, 2010년까지 ¥20-25/kWh의 발전단가 목표와 ¥140-250/Wp 및 ¥100-210/Wp의 태양전지 가격목표¹⁰⁾를 제시하고 있다. 이러한 가격목표는 기준년도의 설정과 환율에 따른 차이를 감안하면 유사한 수준으로써, 상용전원과 경쟁 가능한 태양광발전의 개발목표를 의미한다.

상용제품의 주종을 이루는 실리콘 태양전지의 기술개발에 의한 가격저감 추이는 (그림 1)에 나타난 바와 같이, 현재의 시판가격은 1978년에 비해 약 1/6까지 떨어졌으며, 변환효율은 약 1.7배 가량 향상되었다¹¹⁾. 이러한 추이는 효율이 향상될수록 가격이 저하되는 상반된 상관성이 있으나 대량생산에 의한 저가화도 중요한 가격저하의 변수이다. 그러나 1990년 이후 가격과 효율의 변동이 포화상태에 이른 근본적인 원인은, 단결정 또는 다결정 실리콘 태양전지의 재료와 제조기술 개발에 의한 가격저감 효과의 한계성을 의미하므로, 태양전지의 개발동향은 저가·고효율 박막태양전지에 집중되고 있다.



〔그림 1〕 실리콘 태양전지의 가격 및 변환효율

〈표 1〉 모듈 제조가격의 현황 및 전망(\$/Wp)

구분	1997	2000	2010
결정질 실리콘	3.90-4.25	1.50/2.50	1.20/2.00
비정질 실리콘	2.50-4.50	1.20/2.00	0.75/1.25
CIS	-	1.20/2.00	0.75/1.25
CdTe	-	1.20/2.00	0.75/1.25
실리콘 박막	-	1.20/2.00	0.75/1.25

〈표 1〉은 재료별 태양전지 모듈의 현재 가격과 향후 예상가격을 나타낸 것으로서, 현재 세계시장의 주종을 이루는 결정질 실리콘의 가격은 포화상태에 이르러 기술개발과 생산량 급증에도 불구하고 장기적으로 가격하락을 기대하기 어렵다. 그러나 현재 실용화 단계의 박막 태양전지가 상용화 될 2010년 경에는 태양전지의 가격이 현저하게 저하하여 세계시장의 대부분을 차지하며, 태양광발전 기술에 의한 발전단가도 상용전원과 경쟁 가능한 수준에 도달하여 보급이 급격히 증가할 것으로 기대된다. 이러한 가격목표를 달성하기 위하여 일본을 비롯한 선진국은 박막 태양전지의 효율향상 뿐만 아니라 대면적화 및 양산기술의 개발에 집중투자하고 있다. 현재의 박막태양전지 제조기술은 실험실적으로 이미 목표효율인 12%를 달성하였으나 생산수율과 양산기술에 의한 상용화 수준은 2000년대 초에 실현될 것으로 기대된다.

3.2 국내현황

국내의 기술개발현황은 산업자원부가 주관하는 대체에너지 기술개발사업에 의해 체계적으로 추진됨으로써 제 1단계(88-91)의 짧은 기간동안

- 단결정 Si 태양전지의 상품화 및 대량생산 체제확립
- 태양광발전용 작고류변환장치의 국산화
- 태양광발전용 연속전지의 성능개선
- 낙도전원용 태양광발전 시스템의 표준화 등의 광범위한 성과를 얻었다.

이러한 연구결과를 활용하여 '93년 1월 충남 보령군 호도에 90kWp 태양광발전시스템을 건설함으로써 자체 개발 제품과 기술만으로 성공적인 도서전화사업이 완료되었으며, 다른 섬지역에서도 보급되었다. 그러나 1992년부터 현재까지 개발된 성과중

- 다결정 실리콘 기관의 개발
 - 비정질 실리콘 태양전지모듈의 개발
 - 부하평준화를 위한 솔라어콘의 개발
 - 저가·고효율 CuInSe₂ 태양전지 개발
 - 농어촌 전화사업을 위한 태양광·풍력 복합시스템
- 등은 충분한 실용화 가능성에도 불구하고 개발성과가 활용되지 못하고 있는 실정이다.

태양광발전기술의 활성화를 위해서는, 지금까지의 개발성과

를 정밀분석하고, 기술내용에 따라 기초연구, 개발, 실용화의 단계별로 구분하여 상용화가 가능한 과제를 중점 지원하여야 하며, 제품의 성능향상과 시스템의 신뢰도 확립을 위한 실증 시험 및 시장개척을 위한 이용기술 연구를 수행하여 보급촉진과 연계하여야 한다.

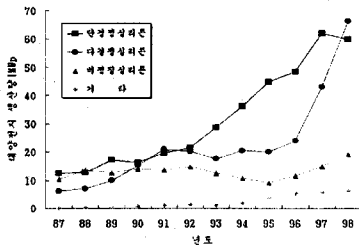
이와 같은 관점에서 수행되어야 할 중점과제는 태양전지 제조기술의 경우, 결정질 실리콘 태양전지에 비해 저가화가 기대되며 차세대 태양전지의 가장 큰 가능성을 지닌 CuInSe₂계 태양전지의 연구를 지원하여 현재 14.8%의 소면적 태양전지를 세계 최고수준으로 향상시키고 다결정 실리콘 박막태양전지를 상용화함으로써 미래시장에 참여할 수 있어야 한다.

또한 세계시장의 가장 큰 응용분야로 전망되는 주택건물용 태양광발전시스템의 개발 및 보급을 정책적으로 추진하여야 하며, 국내시장에서 가장 큰 비중을 차지할 50호 미만의 낙도 전화사업을 위해서도 태양광풍력 복합발전시스템의 적용연구를 지속하는 것이 바람직하다.

4. 생산현황과 시장전망

4.1 생산현황

태양전지의 세계시장 규모는 [그림 2]에서와 같이 1998년의 경우 151.7MW로써 1987년 이후 매년 15% 이상의 증가율을 나타내며, 특히 최근의 1997년과 1998년에는 전년 대비 42%와 24%의 급격한 시장증가 추세를 보인다.



[그림 2] 연도별 태양전지 생산량

태양전지 세계시장의 재료별 분포는 a-Si의 경우 민수용 전원으로 각광받던 1990년까지는 결정질 Si와 비슷한 규모의 시장을 형성하였으나, 기술과 가격의 한계성 때문에 생산량이 계속 감소 또는 침체된 상태이다. 이에 비해 신뢰도가 확립된 결정질 Si 태양전지는 1992년 이후 전력용 수요가 증가함에 따라 세계시장의 주종을 이루며, CdTe, CIS 박막 태양전지도 저가화 가능성과 Si 재료의 품귀현상 때문에 서서히 증가하는 추세이다. 따라서 향후 5년간 태양전지 시장의 재료별 분포는 결정질 Si가 주도하고 a-Si의 시장은 화합물 반도체 박막 태양전지에 의해 교체될 것으로 전망된다. 특히 단결정 Si에 비해 저가화 및 대면적화가 기대되는 다결정 Si 태양전지는 1996년 이후 시장점유율이 급격히 증가하여 1998년에는 단결정 Si를 추월하였으며, 이러한 추세는 지속될 것으로 예상된다.

최근 입수된 비공식 통계^[13]에 따르면, 1999년도의 세계 태양전지 생산량은 201.5MW로 집계되어 전년 대비 32.8%의 증가율을 나타내었다. 또한 국가별 시장점유율은 미국 32.0%, 일본 39.7%, 유럽 18.0%로써 일본의 시장점유율이 1992년 이후 처음으로 미국을 추월하였으며, 단결정 실리콘 및 다결정 실리콘 태양전지가 80.1%를 점유하여 시장을 주도하고 있다. 특히 주목할 점은 10MW 이상을 생산하는 8개 대형업체가 세계 총 생산량의 80.8%를 차지함으로써 태양전지 생산업체의 생산설비 증가와 합병에 의한 초대형화 추세를 반영하고 있다.

4.2 시장전망

태양전지의 향후 시장전망은 1996년까지의 매년 10-15% 시장 증가율을 감안하여 2010년에는 연간 생산량 630MW, 전세계 누적 설치량 3,900MW로 예측되어왔다^[14]. 그러나 최근의 급격한 시장증가 추세를 감안한 낙관적 시나리오^[12]는

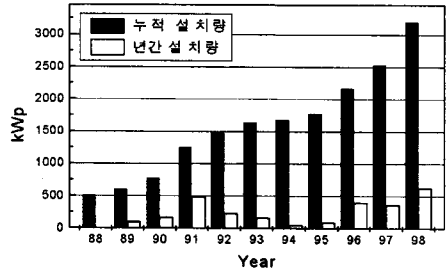
<표 3>에 나타난 바와 같이 2005년 650MW, 2010년에는 1700MW로 수정되었으며, 태양전지 가격이 기술개발성과에 의해 1.25 - 2.0\$/Wp로 하락하여 약 25억불의 태양전지 시장이 형성되고, 응용분야도 독립형 시스템에서 탈피하여 주택 및 건물적용 시스템으로 대량 보급될 경우 충분히 실현가능성이 있을 것으로 평가된다. 특히 2010년 이후의 장기전망은 현재 Solar Home System에 한정된 개발도상국의 응용분야가 주택·건물용으로 확대되고, 사막지역에 대규모 발전소 건설(VLS-PV)이 실현될 경우 연간 300MW 이상의 시장형성이 예측되며, 이러한 수요를 충족하기 위해서는 Si 재료 공급과 가격 한계성에 대비한 새로운 박막 태양전지의 상용화가 촉진될 것으로 전망된다.

<표 3> 태양전지 모듈의 효율현황 및 전망^[12]

구분	1998	2000	2010
비결정질 실리콘	6-8	10	14
CIS	7-8	12	14
CdTe	7-8	12	14
실리콘 박막	8-10	12	15

4.3 국내의 보급현황 및 전망

국내의 태양광발전시스템 이용분야는 '80년대 말까지 통신용 또는 측정용 전원과 등대용 전원 및 실증시험 목적으로 설치되었으나, '90년대부터 도서지역의 낙도전화사업과 시범보급사업으로 확대되고 있다.



[그림 3] 태양전지모듈의 국내보급추이

연도별 보급량은 [그림 3]에 나타난 바와 같이 '88년까지 500kWp의 소량이 설치되었으나 '96년에는 누적설치량이 2MWp를 초과하였으며, '98년말 현재 약 3.2MWp에 이른다. 이러한 보급량의 증가는 대체에너지 기술개발사업에 의해 단결정 실리콘 태양전지 및 모듈이 상용화되었고, 설계·설치·운영 및 유지관리를 위한 이용기술이 자체 개발되어 보급의 기틀이 마련되었기 때문이다.

그러나 연도별로 큰 편차를 나타낼 뿐만 아니라 지속적으로 증가하지 못한 문제점을 내포하고 있으며, 특히 국내에서는 연간 350kWp 생산용량의 태양전지 제조업체 1개와 총생산용량 2MWp의 모듈조립업체 3개가 있는데도 불구하고, 모듈 생산량은 '95년 452kWp, '96년 352kWp, '97년 370kWp로써 20%이하의 가동률과 세계 총 생산량의 0.3%에 불과한 점유율을 나타내고 있다.

5. 결 론

태양광발전기술의 이용보급을 확대하기 위해서는, 정부주도 하에 태양광발전 기술연구회를 중심으로 관련산업체, 대학 및 연구기관 그리고 소비자 측면에서의 에너지, 환경관련 시민단체의 협력체제 구축과 공동노력이 필요하다.

특히 태양광발전기술의 실용화 기술을 개발하기 위해서는 전기재료, 전력전자 및 시스템 제어의 연구개발과 상용화에 종사하는 국내 전기공학 전문가의 협력체제 구축과 적극적인 참여가 요망된다.

(참 고 문 헌)

1. DOE : The National Photovoltaic Program Plan for 1996~2000
2. 통상산업성 : New Sunshine Program Handbook, '93
3. EC, DGXVII : The Joule-Thermie Programme, '97
4. J. Song, Tech. Digest of 11th Int'l PVSEC, Sep. '99, Hokkaido, Japan
5. DOE: IEA/PVPS Ex-Co Meeting '99년 5월
6. 일본 자원에너지청: 신에너지 편람, '99년 3월
7. 일본 경제신문, 2000년 1월 8일자 기사
8. IEA: Energy Policies of IEA Countries, '96
9. DOE: Photovoltaic Program (<http://www.eren.doe.gov/pv>)
10. 일본 태양광발전 기술 연구조합: 태양광발전 pp.3-4, '98년 11월
11. IT Power: Electricity from Sunlight, UK, '97
12. P. Maycock: Renewable Energy World, Vol. 2, No. 4, July '99
13. Photovoltaic News, Vol. 19, No. 2, Feb., 2000
14. EC: Photovoltaics in 2010, Vol. 2, EPIA, '96