

햇빛발전의 세계시장과 전망

유 권 중

(한국에너지기술연구소 신발전연구부 책임연구원)

1. 서 론

최근 지구환경문제와 화석에너지 고갈, 원자력발전의 폐기물처리 및 신규발전소 건설에 따른 위치선정 등의 문제로 인하여 신·재생에너지에 대한 관심이 고조되고 있으며, 그 중에서도 무공해·무진장의 에너지원인 햇빛발전에 대한 연구개발이 국내외적으로 활발하게 진행되어 있다.⁽¹⁾

본 보고에서는 햇빛발전에 대한 국내·외의 연구개발 현황 및 기술수준, 세계시장 동향과 전망에 대하여 보고하여, 국내의 기술개발 방향에 대하여 의견을 제시하고자 한다.

2. 햇빛발전의 정의

용어 정의 : 먼저, 햇빛발전에 대한 언어적인 정의부터 언급하면, 지금까지는 햇빛발전을 태양광발전으로 불려지고 있으며, 영어로는 "Photovoltaic Generation 혹은 Photovoltaic"으로 사용되고 있다.

여기서 용어의 표현 방법에 대하여 논쟁을 하고자 하는 생각은 전혀 없으며, 단지 한글 표현으로도 충분히 그 뜻을 전달할 수 있고 어색하지 않는 전문용어가 될 수 있다고 사려되어 앞으로 필자는 태양광발전의 학술용어로서 햇빛발전으로 불려지기를 희망하면서 본고에서부터 햇빛발전으로 사용하고 자 한다.

덧붙여서 태양열에 대해서도 햇별이라는 용어를 사용하여, 햇별발전 및 햇별이용 등의 용어가 학술용어로 불려지기를 희망한다.

2.1 햇빛발전의 pn접합에 의한 발전원리

햇빛발전기술은 햇빛에너지를 직류 전기에너지로 변환하는 태양전지와 태양전지로부터의 직류전력을 교류전력으로 변환

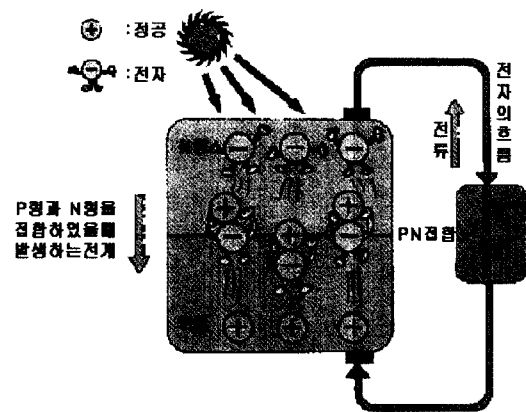


그림 1 태양전지의 구조 및 pn접합의 발전원리

하는 전력변환 및 제어기술이라고 정의 할 수 있다.

태양전지는 실리콘으로 대표되는 반도체이며, 반도체는 전자기기의 LSI(대규모집적회로)나 트랜지스터, 포토다이오드 등에 사용되고 있는 전자산업에서 빠질 수 없는 중요한 재료이다. 태양전지는 반도체기술의 발달과 반도체 특성에 의해서 자연스럽게 개발되었다고 생각할 수 있다.

태양전지는 그림 1과 같이 전기적 성질이 서로 다른 N형의 반도체와 P형의 반도체를 접합시킨 구조를 하고 있으며, 2개의 반도체 경계부분을 PN접합이라고 부른다. 이러한 태양전지에 태양빛이 닿으면 태양빛은 태양전지 속으로 흡수되며, 흡수된 태양빛이 가지고 있는 에너지에서 +와 -의 전기를 갖는 입자(정공과 전자)가 발생하여 각각 자유롭게 태양전지 속을 움직이게 되지만, 전자-는 N형 반도체 쪽으로, 정공+는 P형 반도체 쪽으로 모이게 되어 전위가 발생하게 되며, 이 때문에 앞면과 뒷면에 붙여 만든 전극에 전구나 모터와 같은

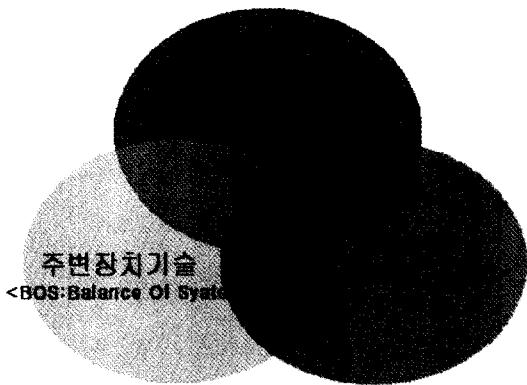


그림 2 햇빛발전의 주요핵심기술

부하를 연결하게 되면 전류가 흐르게 되는데, 이것이 태양전지의 pn접합에 의한 햇빛발전의 원리이다.

2.2 햇빛발전의 핵심기술

햇빛발전기술은 그림 2에서와 같이 크게 태양전지 제조기술과 Power Conditioner기술, 기타 구성요소기술 및 시스템의 최적설계 등의 주변장치기술로 구성되는 종합기술의 융합이라고 할 수 있다.

태양전지 제조기술은 태양전지 종류에 따라 실리콘 태양전지와 화합물 반도체 태양전지 등으로 크게 분류할 수 있으며, 현재 상용화되어 시판되고 있는 태양전지는 단결정 및 다결정 실리콘 태양전지, 비정질 실리콘 태양전지 등으로 태양전지의 에너지변환효율은 단결정 실리콘 태양전지가 18%, 다결정 실리콘 태양전지 15%, 비정질 실리콘 태양전지 10% 정도이다. 태양전지 제조기술 개발은 주로 신뢰성 및 에너지 변환효율 향상, 저가화에 주요 포인트를 두고 기술개발을 추진하고 있으며, 태양광발전시스템의 설치비용 중 태양전지가 약 40%이상을 차지하고 있어 태양전지의 저가화는 햇빛발전의 핵심기술이라고 할 수 있다.

햇빛발전용 Power Conditioner 기술은 일반 산업용 인버터 기술과는 상당한 차이점을 갖고 있기에 필자는 Power Conditioner(이하 파워컨이라고 칭함)라고 칭하였으며, 햇빛발전용 파워컨 기술은 전력전자기술 중에서도 디지털기술의 발전으로 많은 기술 향상을 가져 왔으나, 기존의 기술적 개념으로는 저가화 및 신뢰성 및 전력변환효율에 한계가 있다고 판단하여 선진 각국은 햇빛발전시스템의 잠재력과 부가가치 향상을 위한 기능의 다양화에 대한 연구가 추진 중에 있으며, 전력변환효율은 95%이상을 상회하는 기술수준에 도달하고 있다. 현재의 기술수준으로 시스템 설치비용 중 파워컨디셔너가 차지하는 비중은 약 25~30%를 차지하고 있다.

주변장치(BOS : Balance Of System)기술은 햇빛발전시

스템을 구성하기 위한 태양전지 및 파워컨디셔너를 제외한 태양전지어레이, 가대, 전력저장장치, 시스템의 설계기술, 구성요소간의 최적매칭기술 등과 같은 기타기술을 주변장치기술로 정의하고 있다. 주변장치 기술개발은 선진국의 경우 햇빛발전에 대한 연구개발이 1970년대 초의 제1차 오일쇼크로부터 시작되었기에 주변장치의 연구개발 성과도 국내기술과는 상당한 기술격차를 보이고 있으며, 실용화 및 상용화에 문제가 되는 기술은 대부분 해결되어 표준화 혹은 규격화에 기술개발 포인트를 두고 추진 중이다.

햇빛발전의 주요 핵심기술의 구성으로 알 수 있듯이 햇빛발전시스템은 종합기술의 융합으로서 미래에너지의 다원화 및 환경문제와 관련하여 세계시장에서 주목을 받고 있는 신·재생에너지 중의 하나이다.

특히, 주택용 햇빛발전시스템 및 빌딩적용 햇빛발전시스템의 연구개발 및 확대보급이 선진국을 중심으로 주목을 받고 있으며, 주택용 햇빛발전시스템 연구개발은 선진국을 중심으로 많은 연구가 추진되어 미국 및 독일의 100만호 보급 계획을 비롯하여 일본의 모니터사업 등에 의하여 새로운 시장이 형성되어 가고 있는 추세이다. 이에 부흥하여 우리 나라에서도 2002년까지 300호 보급계획을 발표하여 세부계획을 추진 중에 있다.

3. 태양전지 생산현황

햇빛발전기술과 관련된 제품의 생산현황은 앞절에서 언급하였듯이 햇빛발전시스템을 구성하는 태양전지와 Power Conditioner, 주변장치로 구분하여 현황을 파악할 수 있으나, 일반적인 생산 현황 또는 시장규모는 태양전지로 나타내는 것이 일반적이다.

인공위성의 전원으로 사용되는 위성용 태양전지의 경우 1970년대 초반부터 실용화가 되었으나, 지상용 태양전지의 경우 1970년대 후반부터 미국과 일본을 중심으로 생산되었으며, 초기 단계의 정부주도에 의한 시장창출과 보급확대를 지나 1980년대 후반부터 본격적으로 상품화된 제품시장이 형성되었다. 햇빛발전시장은 현재 계통전력의 혜택을 받지 못하고 있는 개발도상국을 대상으로 그 수요가 급속히 팽창할 것으로 사려되며, 특히 선진국을 중심으로 지구환경보호와 화석에너지 고갈에 따른 장기적인 에너지 수급계획의 일환으로 향후 20년간 35억\$이 기술개발에 투자될 예정이며, 최근에는 태양전지 모듈 생산업체의 생산성이 나아지기 시작하였고 계속적으로 재정기여도가 증진될 것으로 예측된다. 그림 3은 1996년 Maycock 자료에 보고된 2010년까지의 태양전지 연간 생산량 및 시장규모 예측 추이를 나타낸 것이다. 2010년 연간생산량은 800~1000MWp로 추정되며, 태양전지 모듈의 연간 시장규모도 100억~130억 US\$에 달할 것으

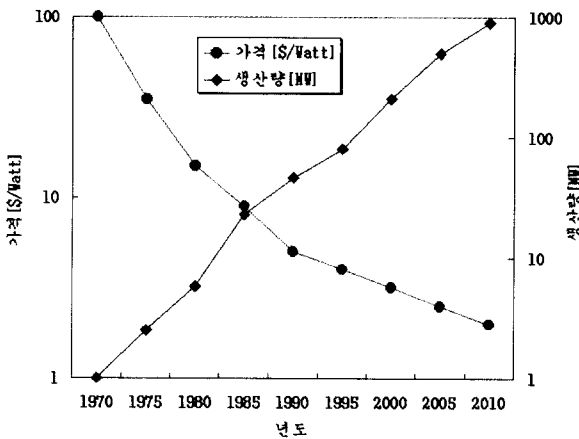


그림 3 태양전지 생산량 및 시장 규모 예측⁽⁶⁾

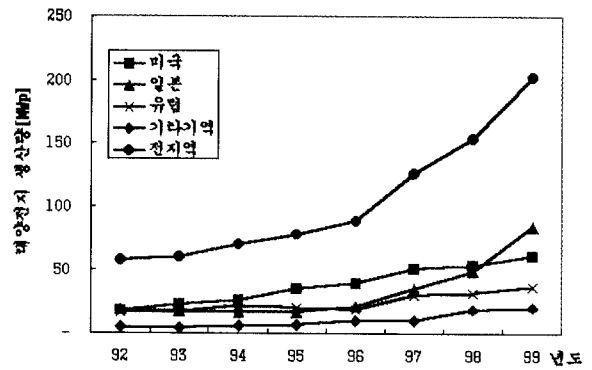


그림 4 세계의 태양전지 국가별 생산량(MWp)⁽²⁾

로 예측하고 있다.⁽⁶⁾ 「Photovoltaic Insider's Report, 1998」 예측 보고서에서는 2005년의 태양전지 시장을 640MW, 2010년에는 1,920MW로 보고 있다. 또한 세계 태양전지 생산의 주요 업체인 Spire사는 2003년 350MW, 태양전지 모듈 가격도 3.5\$/W로 예측하고 있다. 그후 생산속도가 더욱 가속화 될 경우 2010년도에 750~4,000MW로 확대될 것으로 전망하고 있다. 이와 같이 향후 세계 태양전지의 생산량에 대해 상이한 예측치를 보고하고는 있으나, 모두가 화석연료의 고갈이나 심각한 지구환경문제가 대두될 경우 장기적인 관점에서 햇빛발전산업 전망은 매우 밝을 것으로 예측하고 있는 것이다.⁽³⁻⁴⁾

표 1과 그림 4는 1992년부터 1999년까지의 세계 태양전지의 국가별 생산량을 나타낸 것이다. 연도별 태양전지 총 생산량은 매년 안정된 증가현상을 나타내고 있다. 1992년도 57.9MWp에서 1999년도에는 202.2MWp로 약 4배정도 성장하였으며, 1998년의 153.2MWp에 비해 전년대비 32%로 높은 성장세를 나타내고 있다. 특히 일본의 경우 태양전지 생산량은 꾸준한 증가를 보이고 있으며, 최근에는 미국과 유럽을 월등히 앞서고 있다.^{(2), (5)}

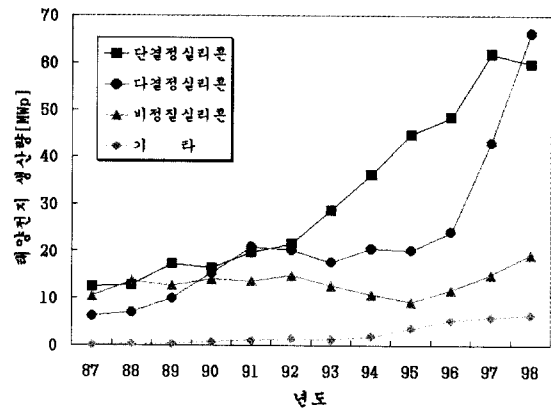


그림 5 세계 태양전지의 재료별 생산량 (MWp)⁽²⁾

이러한 이유에는 1996년 이후 추진되고 있는 태양광발전보급기반 정비사업의 꾸준한 추진과 2010년까지의 5000MWp 보급목표 달성을 위한 정부의 지속적인 지원에 기인한 것이다. 세계 태양전지의 재료별 생산량을 표 2와 그림 5에 나타내었다. 단결정 실리콘 태양전지의 경우 매년 꾸준한 증가 추세를 유지하고 있으며, 1999년도 총 생산량 202.2MWp의

표 1 세계의 태양전지 국가별 생산량(MWp)⁽²⁾

국가	년도	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998		1999		전년대비 증가량·증가율	
								MWp	%	MWp	%	MWp	%
미국		18.2	22.4	25.6	34.8	38.9	53.0	58.2	35.1	60.8	30.1	7.1	13.2
일본		18.8	16.7	16.5	16.4	21.2	35.0	47.5	32.0	84.5	41.8	35.5	72.4
유럽		16.4	16.6	21.7	20.1	18.8	29.3	35.8	20.8	36.4	18.0	4.6	14.5
기타		4.6	4.4	5.6	6.4	9.8	9.4	16.3	12.2	20.5	10.1	1.8	9.6
합계		57.9	60.1	69.4	77.6	88.6	126.7	153.2	100	202.2	100	49	32.0

표 2 세계 태양전지의 재료별 생산량 (MWp)⁽²⁾

국가 \ 년도	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
단결정 실리콘	17.25	16.4	19.7	21.5	28.65	36.2	44.7	48.4	61.9	59.8	73.2
다결정 실리콘	10.0	15.3	20.9	20.2	17.6	20.5	20.1	24.0	43.0	66.3	88.4
비정질 실리콘	12.7	14.1	13.7	14.8	12.6	10.8	9.2	11.7	15.0	19.2	23.9
기 타	0.35	0.68	1.04	1.4	1.22	1.9	3.6	5.3	5.9	7.9	16.5
합계	40.3	46.5	55.3	57.9	60.1	69.4	77.6	89.6	125.8	153.2	202

표 3 주요 태양전지 생산업체의 태양전지 생산량(MWp) (1992년~1999년)⁽²⁾

제조회사 \ 년도	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
Siemens Solar	9.6	12.5	13.0	17.1	17.0	24.0	20.0	26.0
Kyocera	5.1	4.8	5.3	6.1	9.1	15.4	24.5	30.3
Solarex	5.7	6.5	7.5	9.5	10.8	14.0	15.9	32.6
BP/AMOCO	3.5	4.5	6.1	7.2	8.5	11.3	13.4	
Sharp	1.0	1.0	2.0	4.0	5.0	10.6	14.0	30.0
Sanyo/Solec	7.8	7.5	6.8	7.7	8.1	8.7	10.5	13.0
ASE(GMBH)	2.9	2.8	3.0	3.7	3.0	4.0	4.0	10.0
Eurosolare	2.6	3.2	3.5	2.7	3.5	2.7		
Astropower	0.6	0.92	1.7	2.5	2.9	4.3	7.2	12.0
Photowatt	2.0	1.7	1.8	2.1	2.6	5.7	12.0	10.0
Others	17.1	14.17	18.24	16.95	15.9	26.0	31.7	38.3
총 생산량	57.9	60.09	69.44	79.60	89.6	126.7	153.2	202.2

36.2%에 해당하는 73.2MWp가 생산되었다. 다결정 실리콘 태양전지도 최근에는 급격하게 증가하여 1999년도에는 총 생산량의 43.8%인 88.4MWp를 생산하였다.⁽²⁾

대표적인 태양전지 제조업체의 연도별 생산현황을 표 3에 나타내었다. 태양전지 및 모듈 제조업체는 전세계에 30개사를 넘고 있으며, 1MWp 이상의 태양전지를 생산하는 회사는 16개사이다. 그 중에서 10개의 제조업체가 전세계 모듈 출하량의 65%(1990년도) ~ 79%(1997년도)를 차지하고 있다. 1997년도에는 연간 8MWp 이상을 생산하는 6개의 대량생산업체가 전세계 생산량의 약 66%를 차지하고 있다. 이러한 대형업체는 계속 생산용량을 증가하고 있으며, 대량생산에 의한 가격 저하효과 때문에 업체의 대형화가 가속될 전망이다.⁽²⁾

미국의 생산설비 제조업체인 Spire사는, 2003년에는 수요의 증가와 업체의 대형화 추세에 따라 연간 생산능력이 25MW인 제조회사가 10개, 2MW이하가 50개의 제조업체에 달하며, 태양전지의 종류도 80%가 결정질 실리콘, 20%가 비정질 실리콘이 차지할 것으로 추정하고 있다.

4. 시장전망

태양전지의 기술개발에 따른 종류별 변환효율 및 향후 2010년 예상되는 모듈가격을 표 4에 나타내었다.⁽⁷⁾ 이러한 가격 및 효율 목표를 달성하기 위한 여러 가지 혁신적인 제조공정이 결정질 실리콘 태양전지 모듈에 대해 개발중이며, 개선된 박막기술들이 실험실 수준에서 개발중이거나 실용화단

계에 있다.

태양전지는 단결정, 다결정, 리본형, 저가 기관상의 다결정, 구상 규소 및 집광형등의 결정질 실리콘 태양전지와, 비결정 규소, CdTe, CIS 화합물 반도체등의 박막 태양전지로 구분된다. 결정질 실리콘 태양전지는 현재의 변환효율 12~15%가 꾸준히 향상되어, 2010년도에는 15~23%에 이를 것으로 전망하고 있다. 또한 대량생산과 공정 자동화를 통한 원가절감으로 2010년의 모듈가격은 현재의 절반수준인 \$2/Wp에 이를 것으로 예측된다. 또한 아직까지 상용화되지 않은 박막 태양전지의 상용화가 가능한 2010년에는 태양전지 모듈의 가격이 \$1.2/Wp까지 내려가서 상용전원과 경쟁이 가능한 수준까지 도달할 것으로 기대된다.

표 5와 그림 6은 세계의 태양전지 모듈의 용도별 출하량 추이와 예측을 나타내고 있다. 1997년 기준으로 세계 태양전지 시장은 2000년도에는 210MWp, 2005년도 640MWp, 2010년도에는 1920MWp로 급격히 증가될 것으로 예측하고 있다.⁽⁸⁾ 이처럼 태양전지 시장의 확대를 예측

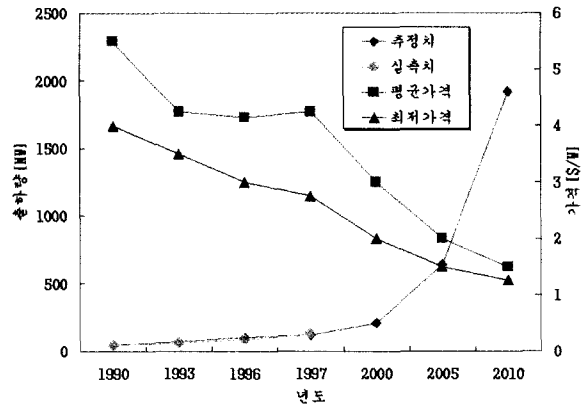


그림 6 태양전지의 용도별 출하량 추정치와 실측치⁽⁹⁾

하는 이유는 세계적으로 지구환경문제의 대두됨에 따른 새로운 무공해 에너지의 개발에 대한 관심과 이로 인한 태양전지산업의 활성화가 주된 동기이며, 구체적으로는 1997년도부터 시행되고 있는 일본의 주택용 태양광발전시스템의 보급정책과 미국, 독일의 「100만호의 Solar 계획」, 유럽의 「10MW건물 일체형 프로젝트」등 새로운 보급 시나리오가 제안되고 있기 때문이며, 이와 같은 선진국의 보급정책은 시장확대 및 가격하락을 가속화시키는 효과와 연결된다. 1990년도의 태양전지 모듈가격은 1W당 5.5\$, 1993년도 4.25%, 1996년도 4.15\$, 1997년도에 4.25\$로 가격의 증감이 반복되고 있으며, 대량구매에 따른 최저가격의 경우 1990년도에 4.0\$에서 1997년도에 2.75\$까지 하락하였다. 2000년도에는 2.0\$, 2010년도에는 최저가격은 1.26\$로 예측하고 있다.

표 6과 표 7에 나타낸바와 같이 1995년까지의 도입량과 향후 2010년 세계 태양광발전시스템의 주요 생산국의 도입목표량이 실현될 경우에는 Maycock의 가속화 시장 예측 시나리오는 매우 가능성이 높아 보인다.⁽⁸⁻¹³⁾

또한 그림 7은 2010년 전 세계 태양전지 시장의 성장률을 “Business as usual” 시나리오에 근거해서 예측한 것이다. 매년 10~15%의 꾸준한 증가추세를 보이고 있음을 알 수가 있다.⁽¹⁴⁾ 마찬가지로 2010년 세계 태양전지의 시장 성장률이 15%이고 판매량에 따른 설비 투자율이 7.2%일 때 연간 출하량은 630MW가 되고 전세계 축적 설치량은 3,900MWp로 전망하였고, 유럽의 경우 축적 설치량이 1,200MWp에 이를 것으로 전망하고 있다. 따라서 세계 태양전지의 시장 성장률과 판매이익에 대한 설비 투자비가 증가할 경우 연간 출하량과 전세계 축적 설치량도 증가할 것이다. 이러한 전망은 1996년 Maycock 자료에 보고된 2010년까지의 태양전지 연간 생산량 및 시장규모 예측 추

표 4 태양전지 기술개발에 따른 종류별 변환 효율⁽⁷⁾

태양전지 종류	상업화 시기 (현재 및 중장기)	태양전지 변환효율 (%)		모듈 가격 (\$/W)	
		1997	2010	1997	2010
단결정 실리콘	현재	13~15	22	3.90~4.35	2.00
다결정 실리콘	현재	12~13	20	3.90~4.35	2.00
리본형 실리콘	현재	13~14	20	3.90~4.35	2.00
박막형 실리콘	중단기	-	15	N/A	1.256
Spherical-Si	중단기	10	11	N/A	1.25
집광형	현재	22	30	4.00	1.33
비결정질 실리콘	현재	5~8	14	3.00~3.50	1.25
CdTe	중단기	7~9	14	-	1.25
CIS	중단기	7~9	14	-	1.25

표 5 세계의 태양전지 모듈의 용도별 출하량 추이와 예측(MWp)

구분	1990	1993	1996	1997	2000	2005	2010
소비제품용	16	18	22	26	40	70	100
독립형 주거용	3	5	8	9	20	30	50
독립형 산업용	6	8	15	19	30	80	200
통신·신호용	14	16	23	28	30	60	150
디젤발전기 조합	7	10	12	16	30	50	120
계통연계 시스템	1	2	7	27	50	200	700
100.kW이상의 발전소용	1	2	2	2	10	150	600
예측치(추이)	48	70	100	120	210	640	1920
실측치	48	61	89	126	-	-	-
평균가격(\$/W)	5.5	4.25	4.15	4.25	3.00	2.00	1.50
최저가격(\$/W)	4.0	3.5	3.0	2.75	2.0	1.5	1.26

표 6 세계의 햇빛발전시스템 도입량^(9~13)

국명	생산능력	대상기간	
일본	38MW	1981~1995년도	
미국	67MW	1981~1995년도	
유럽	독일	25MW	1981~1995년도
	이탈리아	17MW	
	스위스	9MW	
	스페인	9MW	
	프랑스	7MW	
	올란드	3MW	
	이란	2MW	
	오스트리아	2MW	
	기타	12MW	
	소계	86MW	
합계	191MW		

표 7 세계의 햇빛발전시스템 도입목표량⁽⁸⁾

국명	도입목표량	출전
일본	2000년 400MW	통산성
	2010년 4,600MW	
미국	2000년 국내 1,000MW	미국에너지성(DOE)
	해외 500MW	
독일	없음	-
이탈리아	1995년 25MW	the Italian National Agency for New Technology, Eneprgy and the Environment(ENEA)
스위스	2000년 50MW	the Swiss government (Federal Council)
프랑스	없음	-
올란드	1999년 10MW	Netherlands Agency for Energy and The Environment(NOVEM)
	2010년 250MW	
전 유럽	2005년 500MW	European Commission Directorate General
	2010년 옥상 900MW	
	파사드 400MW	
	광발전소 400MW	
	원격지 100MW	
	기타 200MW	
	합계 2,000MW	

이, 「Photovoltaic Insider's Report, 1998」예측 보고서 및 세계 태양전지 생산의 주요 업체인 Spire사 등에서 보고된 바와 같이 점차적으로 생산속도가 더욱 가속화 될 경우 장기적인 관점에서 햇빛발전산업 전망은 매우 밝을 것으로 예측된다.

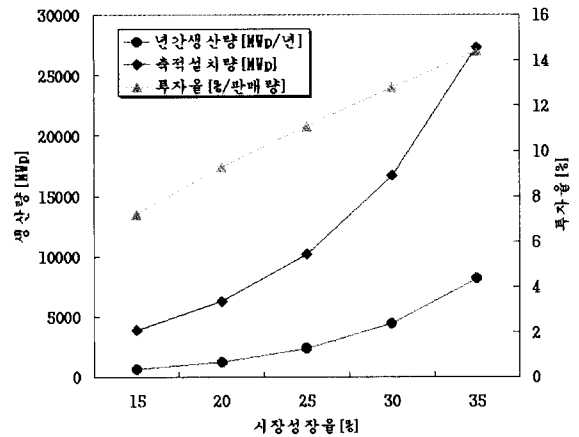


그림 7 시장성장률 증가에 따른 예측 시나리오(2010년)⁽¹⁴⁾

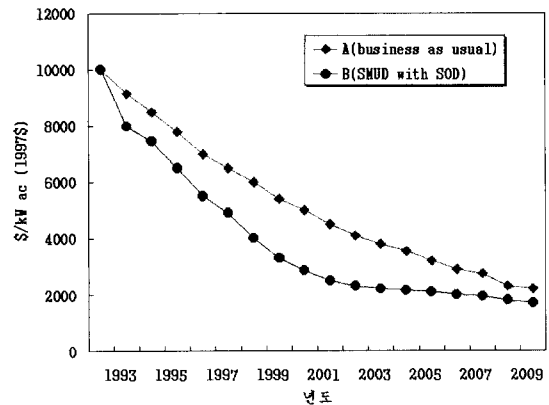


그림 8 햇빛발전시스템의 가격감소 예상 추이⁽¹⁵⁾

표 8 SMUD PV Pioneer 시스템의 가격 예상 추이⁽¹⁵⁾

년도	Turn-key Cost	SMUD Added Cost	Total Cost	30yr cents/kWh*
1993	\$ 7.70/W	\$ 1.80/W	\$ 8.78/W	23 cents
1994	\$ 6.23/W	\$ 0.90/W	\$ 7.13/W	20 cents
1995	\$ 5.98/W	\$ 0.89/W	\$ 6.87/W	18 cents
1996	\$ 5.36/W	\$ 0.85/W	\$ 6.21/W	17 cents
1998	\$ 4.25/W	\$ 0.82/W	\$ 5.07/W	16 cents
2000	<\$ 2.60/W	<\$ 0.40/W	<\$ 7.70/W	8~9 cents

표 8과 그림 8은 SMUD PV pioneer시스템에서 분석한 2010년까지의 햇빛발전시스템의 가격 예상 추이를 나타낸 것이다.⁽¹⁵⁾ 황축은 기상을 고려한 경제 환경평가의 가치이며 종축은 1993년부터 1997년까지의 실적을 토대로 1998년부터 2010년까지의 예측치이다. 곡선 A는 SMUD가 판매 계획을 갖고 있는 경우의 예상치이며, 곡선 B는 SMUD가

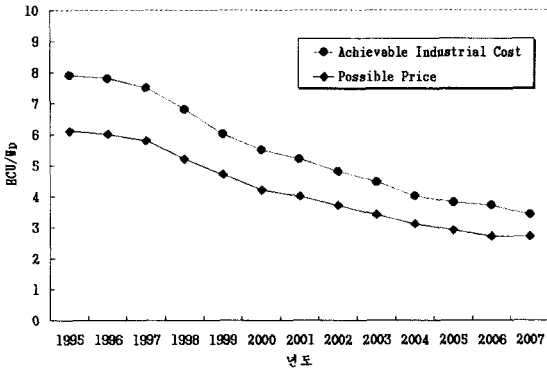


그림 9 햇빛발전시스템의 가격 예상 추이⁽¹⁴⁾

표 9 햇빛발전의 전망과 목표⁽¹⁶⁾

년도	1991	1995	2000	2010-2030
전기비용 (¢/kWh)	40~75	25~50	12~20	< 6
모듈효율(%)	5~14	7~17	10~20	15~25
시스템가격(\$/W)	10~20	7~15	3~7	1~1.5
시스템 수명(년)	5~10	10~20	> 20	> 30
U.S. 축적량(MWp)	75	175	400~600	> 10,000

1993년부터 1997년까지의 판매 실적을 토대로 이 제도가 계속적으로 유지되는 경우 1998~2010 기간동안 예상치이다. 금년 이후 5년간 매년 10MW의 태양전지를 매년 계속 구입이 가능한 지원기업이 유치된다면 2003년까지는 기존 전력과 가격경쟁이 가능한 본격적인 보급기에 달할 것으로 전망하고 있다.

그림 9은 1996년도「Photovoltaic in 2000」에서 발췌한 것으로 1.25\$/ECU이로 가정하고 환산하면, 태양전지 모듈가격은 1W당 단가는 1996년도에는 4.0\$이 되고 2005년도에는 2.25\$/W이 될 것으로 전망되며,⁽¹⁴⁾ SMUD PV pioneer시스템에서 분석한 자료나, Maycock등이 분석한 추정가격과 유사하다. 또 다른 표 9 “The National Photovoltaic Program for 1996-2000”에서는 현재의 상용전원 가격이 25~50cents/kWh에서 2010년 이후에는 6cents/kWh 이하로 보고 있으며, 태양전지 시스템의 가격은 7~15\$/W에서 2010년 이후에 1~1.5\$/W로 예측하고 있어 충분히 상용전원과 경쟁력이 있을 것으로 전망하고 있다.⁽¹⁶⁾ 또한 그림 10에서와 같이 태양전지 모듈의 생산단가를 낮추기 위한 노력과 더불어 웨이퍼 두께감소나 대면적화, 태양전지 변환효율 향상 및 시장확대를 통한 태양전지 모듈의 대량생산체제가 이루어질 경우, 이들이 추정하고 있는 예상치는 상당히 신뢰성이 있을 것으로 판단된다.⁽¹⁴⁾

5. 햇빛발전의 경제성 분석

햇빛발전시스템의 경제성 평가는 “value chain analysis” 방법이 타당하며, 이의 분석을 위해서는 3단계의 가격 부가 단계 즉, 태양전지 모듈 생산, 태양전지 모듈 판매, 햇빛발전 시스템 설치비용의 3단계를 고려해야 한다.

첫째, 모듈 생산가는 기술개발의 선도적인 역할을 하고 있는 대기업의 자동화된 결정질 실리콘 태양전지 모듈 생산의 경우 대략 2.50\$/Wp이다. 여기서 웨이퍼 제조비용이 전체의 50%, 태양전지 제조비용이 22%, 모듈 조립 비용이 28%를 차지한다.

둘째, 모듈 판매가는 생산자로부터 최종 소비자에 이르는 판매 단계에 따른 가격형성으로 일반적으로 60% (2.50\$/Wp × 1.60) 정도의 이윤이 할당된 4.00\$/Wp로 판매되고 있다. 그러나 시스템 설치자나 딜러가 포함되는 경우에는 이 가격에 50%의 이윤이 추가된 6.33\$/Wp에 최종 소비자에게 판매되고 있다.

셋째, 시스템 설치 단가는 태양전지 모듈 및 주변기기를 포함하여 현지 설치를 위한 설치비용 및 설제 비용이 추가로 포함된다. 시스템 설치 비용은 시스템 용도와 설치장소에 따라

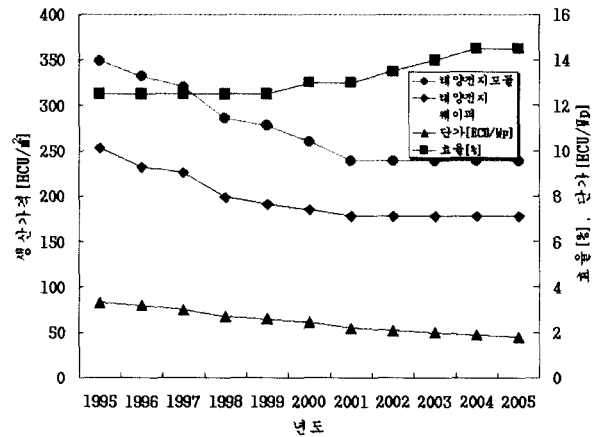


그림 10 태양전지 모듈의 생산단가 추이⁽¹⁴⁾

표 10 햇빛발전 시스템 부품 가격⁽⁷⁾

Typical System Cost Item	Off-grid Cottage (\$/Wp)	Off-grid Telecom (\$/Wp)	On-grid Distributed (\$/Wp)
1995	Module	6.00	4.50
	BOS	12.67	2.55
	Total	18.67	7.05
2010	Module	3.33	2.00
	BOS	8.67	1.35
	Total	12.00	3.35

표 11 햇빛발전 시스템의 경제성 비교⁽⁷⁾

Year	Cottage (\$/kWh)	Telecom (\$/kWh)	Grid-connected (\$/kWh)
1995	1.26 ~ 2.52	1.01 ~ 2.02	0.29 ~ 0.59
2010	0.82 ~ 1.64	0.67 ~ 1.34	0.14 ~ 0.33
Target	Cost-effective	Cost-effective	0.02 ~ 0.10

표 12 1995년도 기준 태양전지 모듈 생산 원가⁽⁷⁾

생산 원가	재료비 (\$/Wp)	인건비 (\$/Wp)	고정비 (\$/Wp)	합계 (\$/Wp)	비율 (%)
웨이퍼 제작	\$0.44	\$0.07	\$0.74	\$1.25	50%
태양전지 제작	\$0.23	\$0.20	\$0.12	\$0.55	22%
모듈 제작	\$0.50	\$0.10	\$0.10	\$0.70	28%
합계 (\$/Wp)	\$1.17	\$0.37	\$0.96	\$2.50	-
비율 (%)	47%	15%	38%	-	100%

매우 유동적이다.

표 10은 독립형 및 계통형 시스템의 3가지 유형에 따른 최종 소비자 설치 단가이다. 위의 설치 단가를 기준으로 분석한 햇빛 발전시스템의 발전단가는 표 11과 같다.⁽¹³⁾ 독립형 가옥 및 중계소용의 경우 계통연계형 시스템보다 발전단가가 높으나, 설치장소까지 계통선을 연장하여야 하는 경우와 디젤 발전기를 사용할 경우와 비교할 때는 경제성이 있는 것으로 평가되고 있다. 그리고 계통연계형의 경우에는 2010년 이후에나 경제성이 있는 것으로 판단된다.

표 12에는 태양전지 모듈 생산원가를 분석 요약한 것을 나타내고 있는 것으로 총 모듈 제조비용은 대략 \$2.50/Wp이며, 재료비가 전체의 47%인 \$1.17/Wp를 차지하고 있다. 제조장비, 공간 및 시설 등의 고정비용이 전체의 38%(\$0.96/Wp)이고 인건비가 대략 15%(\$0.37/Wp)를 차지하고 있다.⁽⁷⁾

PV 모듈 비용의 가장 많은 비율은 제조시설 및 장비(\$0.74/Wp)를 포함하는 웨이퍼 제조공정(\$1.25/Wp)으로 전체의 50%를 차지하고 있다. 고정비용은 그들의 생산능력 이하로 시설을 가동할 경우는 매우 크게 증가할 수 있다. 주로 고순도 실리콘인 재료비는 \$0.44/Wp이다. 이 비용은 대부분의 대규모 모듈 제조업체가 실리콘 공급업자(\$4~7/kg)로부터 장기 계약으로 구매한다면 매우 안정적일 수 있다.

웨이퍼 제조 인건비는 상대적으로 낮은편(\$0.07/Wp)이다. 결정질 태양전지 가격은 주로 실리콘 웨이퍼 가격에 의존하며 대기업은 자체적으로 웨이퍼를 생산한다. 대기업으로부터 웨이퍼를 구매하는 영세 전지 제조업체는 상대적으로 높은 비용을 지불한다.

태양전지 제조비용은 100cm²을 기준으로 할 때 약 \$0.55/Wp로서 PV 모듈 전체 비용의 22%정도이다. 인건비와 고정비는 기본적으로 태양전지의 크기와 무관하므로 제조비용은 대면적 웨이퍼를 사용할 때는 감소한다. 또 다른 보고서(Mitchell et al., 1994)에서는 태양전지 제조비용이 현재 모듈 가격의 약 20% 정도라고 보고된 바 있다. 태양전지는 \$1.00/Wp 이하의 비용으로 모듈이 제작된다. 총 모듈 비용은 \$0.70~0.80/Wp이며, 전체 모듈 조립 가격의 28% 정도이다. 여기에서 모듈 가격은 총 \$2.50/W를 기준한 것이며 최소 10MWp 결정질 실리콘 시설로 제조될 경우를 말한다. 이 비용은 비효율적인 제조업체에 대해서는 \$3.10/Wp 이상일 수도 있다.

제조업체로부터 도매상 또는 전력회사 등에 판매되는 PV 모듈 판매가격은 \$3.90~4.35/Wp이다(PV News). 제조업체의 제조비용 \$2.50/Wp에 판매 이윤이 56%(총마진 36%)~74%(총마진 42%) 추가된다.

표 13 태양전지 모듈 공급가⁽⁷⁾

태양전지 공급자	모듈 가격 (\$/Wp)	비율 (%)	모듈 가격 (\$/Wp)
생산자	\$2.50	60%	\$4.00
도매업자	\$4.00	12%	\$4.50
시스템 설치업자	\$4.50	3%	\$6.00

표 13은 1995년도 다단계 판매구조에 따른 모듈 비용 및 가격을 나타낸 것이다. PV 모듈 가격 \$4.00/Wp은 도매업자에게 판매되는 가격이며 도매업자는 여기에 12~15%의 마진을 붙인다. 따라서 시스템 설치업자 또는 딜러는 \$4.50/Wp의 가격으로 구매한다. 시스템 설치업자는 여기에 (\$4.50/Wp) 다시 30~50%의 서비스 비용을 추가하므로 최종 PV 모듈 가격은 \$6.00/Wp이 된다.

PV 시스템은 모듈, 전력 관리 시스템 및 설치 구조물로 구성되며, 토지가격 및 시스템 설계 인건비와 설치비 등이 소요된다. 이러한 가격은 설치장소, 국내 시장 여건 및 시스템 규모에 따라 달라진다. 여러가지 PV 시스템 부품에 대한 소비자 가격을 표 14와 그림 11에 나타내었다. 이 수치는 최근 북미시장에서 유통되고 있는 시장 가격이다.⁽⁷⁾

향후 15년 후의 PV 시스템의 경제성은 초기 투자 비용 및 수명분석에 근거하여 보수적인 "business-as-usual" 시나리오를 사용하여 예측하면, 태양전지 모듈의 도매 가격은 2010년에 \$2.00/Wp에 달할 것으로 전망하고 있다. 인버터와 조정기 가격은 계속하여 떨어질 것으로 예측되며, 태양전지 모듈과 및 주변기기의 설계 및 설치의 표준화와 판매량 증가에 따른 유통체계 개선 등으로 기타 비용도 줄어들 것이다.

표 14 기준 햇빛발전시스템 설치 가격 (\$/Wp)⁽⁷⁾

전체시스템 가격구성 (\$/Wp)	독립형 주거지 150Wp		독립형 VHF 통신용 300 Wp		연계형 분산식 2kWp		연계형 집중식 1MWp	
	1995	2010	1995	2010	1995	2010	1995	2010
태양전지모듈	6.00	3.33	5.33	3.00	4.50	2.00	4.00	2.00
가격(%)	(32%)	(28%)	(33%)	(28%)	(64%)	(60%)	(54%)	(48%)
인버터	3.33	2.00	N/A	N/A	1.00	0.50	0.40	0.20
전력조절기 및 부품	2.67	2.00	1.67	1.00	0.50	0.30	0.25	0.20
축전지	2.67	2.00	3.67	2.67	N/A	N/A	N/A	N/A
구조물	0.67	0.67	1.00	0.67	0.10	0.05	1.25	1.00
설계 및 설치	3.33	2.00	4.66	3.33	0.95	0.50	1.50	0.75
합계 (\$/Wp)	18.67	12.00	16.33	10.67	7.05	3.35	7.40	4.15
합계 (\$)	2,800	1,800	4,900	3,200	14,100	6,700	7,400,000	4,150,000

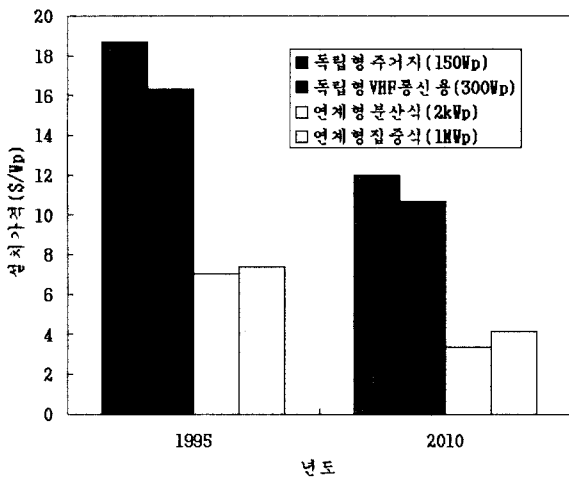


그림 11 햇빛발전시스템의 설치가격⁽⁷⁾

독립형 주거지의 경우 현재 \$18.67/Wp에서 \$12.00/Wp로 대략 35%의 가격 저하가 예상되며, VHF 통신용은 현재 \$16.33/Wp에서 \$10.67/Wp로 하락될 전망이다. 계통연계 시스템의 분산형 시스템의 경우는 52%(현재 \$7.05에서 \$3.35/Wp)로 중앙 집중형 시스템의 경우는 44%(\$7.40/Wp에서 \$4.15/Wp)로 감소할 전망이다. 중앙 집중형 시스템은 토지비용으로 가격저하가 어렵지만 분산형 시스템은 지붕, 건물 등에 설치되므로 토지비용이 전혀 들지 않는다.

또한 소규모 독립형 시스템의 발전단가는 대략 \$0.67~\$1.64/kWh이며, 계통 연계형 시스템의 경제성은 분산형 시스템의 경우 \$0.14/kWh이다. 따라서 분산형 시스템은 전력 송전 비용 및 연료 비용이 높은 곳에서는 상당히 경제적인 것으로 나타났다. 원격지의 통신시설에는 디젤 발전기가 사용

표 15 business-as-usual and accelerated 시나리오에 따른 생산량 예측⁽⁷⁾

응용 분야	시나리오		가속 시 2010년
	현상태로 진행시	1995년	
소형 제품	2	160	500
독립형 주거용	16	260	700
독립형 산업용1	33	270	1200
연계형 분산식	5	80	600
연계형 집중식	4	60	1000
합계	80	830	4000
평균 모듈가격 (\$/Wp)	4.00	2.00	1.50

되고 있어 연료비용이 매우 높기 때문에 PV 시스템이 매우 경제적이 될 수 있다.

전 세계적으로 PV 모듈 출하량은 1987년의 29.2MWp에서 10년후인 1997년에 126.7MWp로 거의 430%가 증가하였다. 경제성이 있는 독립형 시스템이 매년 15~30% 증가할 것으로 가정하면, 2010년에 PV 출하량은 800~1,000MWp에 이를 것으로 보인다. 독립형 및 계통연계형 시스템의 시장 예측을 표 15에 나타내었다.⁽⁷⁾

특히, Maycock은 PV 시장 성장을 정상적인 상태와 가속화 상태의 두 경우의 시나리오를 가지고 분석하였다. 두 개의 시나리오는 여러 가지 응용시장의 PV 보급 속도를 다른 시각에서 보았다. BAU 시나리오는 전문가와 정부기관에서 예측한 시장성을 기준으로 하였으며, 가속화 시나리오는 매년 오일 가격이 2%이상 상승하고, 정부의 계통연계형 시스템에 대한 상당한 재정 보조의 가정하에 분석하였다. 만일 지구 환경변

화 문제가 미래 인류의 매우 중요한 사안이 될 경우에는 Maycock의 가속화 시장 예측 시나리오는 매우 실현 가능성이 높아 보인다.

참고 문헌

- [1] DOE and EPRI, Renewable Energy Technology Characterization, TR-10949 6, 1997
- [2] Photovoltaic News, 2000년 3월호
- [3] 新エネルギー海外情報, 2000년 2월호
- [4] エネルギー総合推進委員会, 新エネルギーの将来コストと導入量の見通し, 1998년 3월
- [5] Status Report on Solar Thermal Power Plants, Pilkington, 1996
- [6] Photovoltaic Technology Price Market Forecast to 2010, Maycock, 1996
- [7] Maycock의 "Photovoltaic Technology, Performance, Cost and Market forecast : 1975~2010", 1996년
- [8] Maycock의 "Photovoltaic Technology, Performance, Cost and Market forecast : 1975~2010", 1998년 8월
- [9] 光産業技術振興協會 資料
- [10] Solar Collector Manufacturing Activity 1993, (DOE, 1994년 8월)

- [11] PV News
- [12] Renewable Energy Annual 1995, (DOE/EIA 1995년 12월)
- [13] Photovoltaic in 2010, (EC ALTENER Program, 1996년)
- [14] Photovoltaic in 2000, 1996
- [15] Photovoltaic News 1998년 5월호
- [16] The National Photovoltaic Program for 1996-2000
- [17] Maycock의 "Photovoltaic Technology, Performance, Cost and Market forecast : 1975~2010"

〈 저 자 소 개 〉



유권중(劉權鍾)

1954년 8월 5일생. 1982년 2월 조선대 공대 전기공학과 졸업. 1985년 10월 일본 KOBE대학 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 8월 태양에너지학회 학술상 수상. 1989년~1990년 일본 Fuji전기(주) 종합연구소 주임연구원. 1997년 2월~동년 7월 일본전력중앙연구소 객원연구원. 현재 한국에너지기술연구소 신발전연구부 책임연구원. 당 학회 학술이사.