

태양광 發電技術과 開發 動向

韓電電力研究院
先任研究員 黃仁豪

1. 서론

현재 전 세계적으로 에너지 공급은 석유, 석탄, 천연가스 등 화석연료와 원자력에 의해 이루어지고 있다. 화석연료의 사용은 CO₂, NO_x, SO_x 등을 비롯한 공해물질의 배출로 인하여 지구환경 보호 측면에서 환경 규제가 점점 강화되고 있고, 오일 쇼크와 같은 국제정세에 따라 에너지의 안정적인 확보에 위협을 받고 있다.

한편 부존자원이 거의 없는 국내 실정에서는 에너지의 자급 노력의 일환으로 원자력 발전의 필요성을 강조하고 있으나 이 또한 대안 없는 반대에 직면하고 있는 실정이다.

이러한 상황에서 태양광 발전을 비롯한 신에너지 개발은 깨끗하고 무한한 대체에너지원 개발이라는 목적에 부합된다. 그러나 대부분의 신에너지 기술이 해결해야 할 문제는 경제성과 실용화 기술 개발을 들 수 있다.

신에너지 분야 중에서도 가장 가까운 시일내에 실용화 될 것으로 예상되는 태양광 발전의 경우에 도 통신, 인공위성, 무인 계측 등 특수한 용도를

제외하고는 태양전지 모듈을 비롯한 시스템의 높은 가격 때문에 실용화가 어려운 실정이다.

따라서 미국, 일본 등 선진국을 비롯한 각국에서는 태양전지 모듈의 가격저감을 위한 저가격 제조기법 및 효율개선 연구를 통하여 실용화 시기를 앞당기기 위한 노력을 기울이고 있고, 이와 병행하여 인버터 등 주변장치의 효율개선 및 신뢰성 확보를 위한 연구를 수행하고 있다.

본고에서는 최근에 대체에너지원으로 주목받고 있는 태양광발전 기술의 개요와 국내의 개발동향에 대하여 기술 하고자 한다.

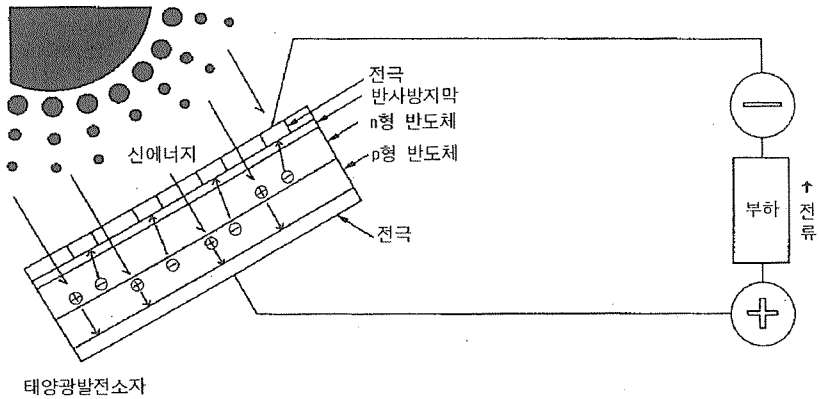
2. 태양광 발전의 원리와 특징

2-1 태양광 발전의 원리

태양전지는 광기전력 효과(photovoltaic effect)를 이용하여 태양에너지를 직접 전기에너지로 변환시키는 반도체 소자이다. 태양전지 구조는 단결정 규소 태양전지의 경우 Si에 5족 원소(인, 비소, 안티몬)등을 침투시켜 만든 n형 반도체와 3족 원소(붕소, 갈륨)등을 침투시켜 만든 p형 반

도체로 이루어진 p-n 접합구조이다. 이렇게 p형 반도체와 n형 반도체가 하나의 단결정으로 접합이 되면 불순물의 농도차에 의하여 n형 반도체의 잉여전자가 p형으로 확산해 가고 반대로 정공은 p형에서 n형으로 확산하며, 이에 따라 p형 반도체의 전도대(conduction band)내에 있는 전자의 에너지는 n형의 경우보다 높아지고, n형 반도체의 가전자대(valance band)내에 있는 정공(hole)이

갖는 에너지는 p형 반도체보다 높아지게 된다. 즉 (그림 1)과 같이 내부 전위차가 발생한다. 이때 금지대폭(Fermi level)이상의 높은 에너지를 갖는 빛(photon)이 들어오면 가전자대에 있는 전자는 여기되어 금지대폭을 뛰어넘어 전자대로 이동함으로써 가전자대에는 전자의 자리가 비게되어 양전하 처럼 행동하는 정공이 발생됨으로 양전하(hole)와 음전하(electron)의 쌍을 형성한다.



(그림 1) 태양전지의 동작원리

여기서 생성된 전자와 정공은 내부 전위차에 의하여 각각 전자는 n형으로 정공은 p형으로 이동하여 외부에 연결된 회로에 전류가 흐르게 된다.

내부저항을 무시한 이상적인 태양전지의 등가회로는 (그림 2)와 같이 태양광이 입사할때 태양광에 의한 광전류(photo current)와 암전류(diode current)로 구분이 된다.

여기서 암전류는 빛을 받지 않는 상태에서 태양전지로 부터 출력을 얻을때 태양전지 양단에 순방향 바이어스 전압(forward bias voltage)에 의해 생성되는 전류로서 광전류와 반대방향을 갖는다.

그러므로 태양전지의 출력전류는

$$I = I_{ph} - I_D$$

$$= I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{A_0KT} - 1\right) \right] \quad (2.1)$$

여기서 I_0 는 다이오드 포화전류(diode saturation current)이다. 식 2.1에서 태양전지 양단의 출력전압을 구해보면 다음과 같다.

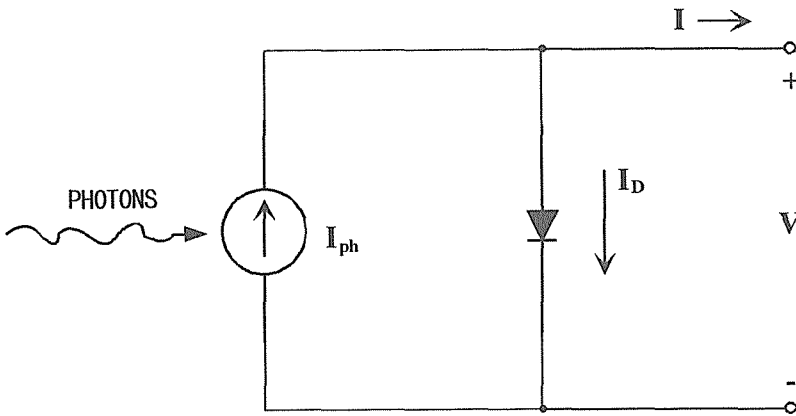
$$V = A_0KT/q \ln\{(I_{ph} - I/I_0) + 1\} \quad (2.2)$$

2-2 태양광 발전의 특징

태양광 발전은 태양전지라는 반도체를 사용하여

태양의 빛에너지를 직접 전기에너지로 변환하는 발전 방식이다. 발전 출력은 직류 출력이므로 보통 직교류 변환장치(인버터)를 사용하여 교류전력으로 변환한다. 즉, 태양광 발전은 그 발전의 기본 unit인 태양전지 이외에 직류를 교류로 변환하기 위한 Inverter등, Electronics 기술에 의한 발전 기술이다.

태양전지는 가벼워 어디에도 설치 가능하고, 더구나 일사량은 별로 지역차가 없기 때문에 규모의 크기 및 설치장소의 상이함에 따라 발전 특성이 기본적으로 변하지는 않고, 축전지 및 인버터 등의 주변기기의 조합에 따라 여러가지 이용 시스템 형태가 있을 수 있다.



(그림 2) 이상적인 태양전지 등가회로

태양광 발전의 특징으로서는,

- ① 태양 에너지의 밀도가 작기 때문에 대전력을 얻기 위해서는 큰 면적이 필요하다는 것
- ② 태양 전지로부터의 출력이 직류 이므로, 교류 이용을 위해서는 인버터 등 변환장치가 필요하다는 것
- ③ 태양광을 에너지원으로 이용하는 것이므로 자연 조건에 따른 출력 변동이 발생한다는 것

등의 제약이 있는 반면에,

- ① 연료가 필요 없어 연료의 연소에 따른 환경 오염의 염려가 없다는 것
- ② 가동부분이 없기 때문에 소음의 발생이 없

고, 또 유지보수가 용이하다는 것

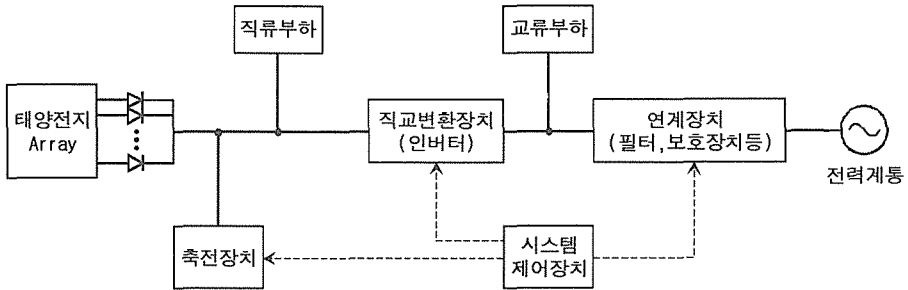
- ③ 태양전지는 Module화가 가능하기 때문에 양산화에 적합하고, 또 규모의 Flexibility가 크다는 것
- 등의 장점을 갖고 있다.

3. 태양광 발전시스템의 구성 및 분류

현재까지 널리 실용화 되어 사용되고 있는 태양광 발전시스템은 대부분이 직류부하를 대상으로 한 소규모 용량의 것으로 시스템 구성은 태양전지와 축전지가 결합되어 있는 간단한 형태이지만, 본격적인 전력용으로서의 일반적인 시스템은 교류

부하를 대상으로 한 것이 많고, 전력계통과의 연계가 고려되고 있다.

태양광 발전 시스템의 구성은 그 이용 형태에 따라 다르지만, 기본구성은 (그림 3)과 같다.



(그림 3) 태양광 발전시스템의 구성도

태양전지 Array는 원하는 전압, 전류를 얻기 위하여 그에 맞도록 여러개의 태양 전지를 직·병렬로 접속한다. 직류 부하만 있을 경우는 이것에 축전장치(일반적으로 축전지 사용)가 접속될 뿐이지만, 교류부하를 대상으로 한 경우는 반드시 인버터가 필요하다.

인버터는 태양전지에서 발생하는 직류 전력을 상용 60Hz의 교류 전력으로 변환하는 장치로, 부하측에서 필요로 하는 전압 및 주파수의 조정등이 요구되고 있다.

태양광 발전시스템은 전력계통과의 연계 유무에 따라 크게 독립형 시스템과 계통 연계 시스템으로 분류할 수 있고, 또한 전력계통과 연계할 경우에는 별도의 연계장치가 필요하게 된다.

연계장치는 태양광 발전시스템 또는 전력계통의 이상시에, 쌍방을 신속히 분리하는 보호 제어장치가 추가 되지만, 고조파 억제 필터 및 전력계통으로부터의 침입 서지의 방지 그리고 전력 조류의 방향에 따라 별도로 계량할 수 있는 전력량계등도

필요하다. 시스템 제어장치는 전체적으로 이상적인 운전이 가능하도록, 각 시스템 구성기기를 감시, 제어하는 것이 있지만 규모에 따라 생략되어 인버터의 제어회로에 포함되고 있다.

태양광 발전시스템의 특징을 고려하여 그 시스템 이용형태를 대별하면 아래와 같이 독립형 시스템과 계통연계형 시스템으로 분류할 수 있다.

○ 독립형 시스템

- ┌ 각 시설, 기기 독립 : 등대, 중계소, 인공위성 등
- └ 집단 독립 : 도서, 산간 벽지 전원

○ 통연계형 시스템

- ┌ 분산형 시스템 : 주택, 빌딩 등의 옥상
- └ 집중형 시스템 : 대규모(수 MW급) 발전시스템

<표 1>은 이용 형태별 시스템 구성예를 각 구성기기의 유무에 따라 분류한 것이다.

<표 1>

이용 형태별 주변장치 유무

용 도	축 전 지	직교변환장치	상용전력계통과의 연계
등대, 무선 중계소, 가로등 전원	○	○ or ×	×
직류 펌프에 의한 관계시스템	×	×	×
교류 펌프에 의한 관계시스템	×	○	×
산간벽지, 도서지역 전원시스템	○	○	×
주택, 빌딩용 및 MW급 시스템	×	○	○

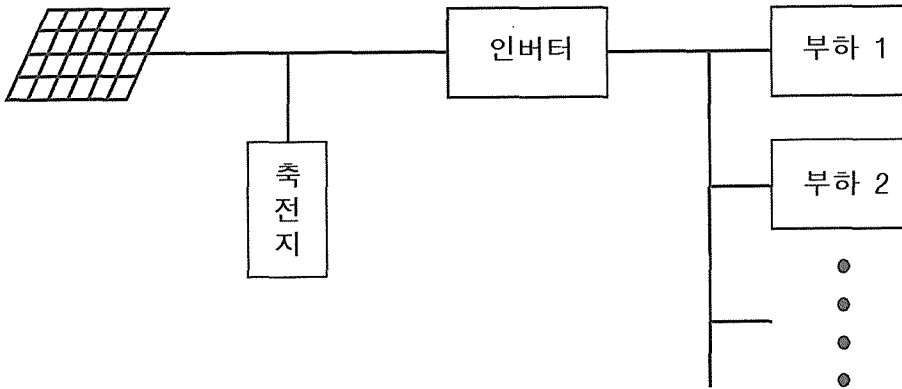
(주) ○ : 필요, × : 불필요

3-1 독립형 태양광 발전시스템

독립형 시스템은 전력계통과 분리된 고립지역, 즉 산간벽지나 도서지역의 통신, 무인 측정계측기,

유·무인 등대 또는 전화사업용 전원시스템으로 이용되는 형태이다.

(그림 4)는 전형적인 독립형 태양광 발전시스템의 구성을 보인 것이다.



(그림 4) 독립형 태양광 발전시스템의 구성

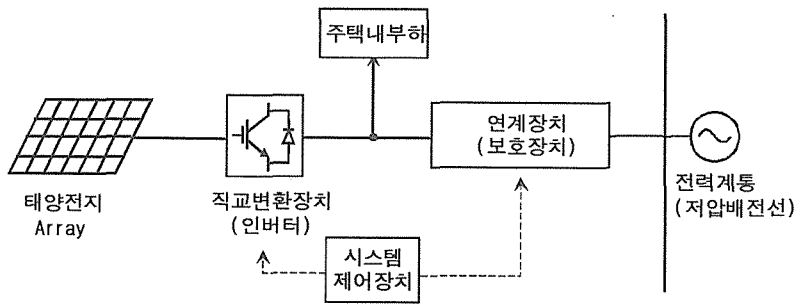
(그림 4)에 보이는 것처럼 독립형 태양광 발전 시스템용 인버터는 불특정 다수의 부하와 연결되어 있어 무엇보다도 독립전원으로서 높은 운전신뢰성이 요구되고 있다. 독립형 태양광 발전시스템은 기존의 UPS시스템과 마찬가지로 DC전원, DC/AC 인버터, LC필터 등으로 구성된다.

3-2 계통연계형 태양광 발전시스템

계통연계형 태양광 발전시스템은 (그림 5)와 같이 배전계통과 연계하여 대규모 발전소를 보완하는 분산전원의 역할을 하는데 시스템 이용 형태를 대별하면 주택, 빌딩 등의 옥상에 설치되는 분산형 시스템과 대규모(수 MW) 발전시스템에 이

용되는 집중형 시스템으로 분류할 수 있다. 연계 장치는 태양광 발전시스템 또는 전력계통의 이상 시에, 쌍방을 신속히 분리하는 보호 제어장치가 주가 되지만, 고조파 억제 필터 및 전력계통으로부터의 침입 서지의 방지 그리고 전력 조류의 방

향에 따라 별도로 계량할 수 있는 전력량계등도 필요하다. 시스템 제어장치는 전체적으로 이상적인 운전이 가능하도록, 각 시스템 구성기기를 감시, 제어하는 것이 있지만 규모에 따라 생략되어 인버터의 제어회로에 포함되고 있다.



(그림 5) 계통연계 태양광 발전시스템의 구성도

4. 각국의 개발 동향

4-1 미국

1972년부터 지상용 태양광 발전시스템의 실용화를 위하여 5년 주기의 National Photovoltaic Program을 수립하고, 기술개발 목표와 가격목표를 설정하여 장기계획을 추진해온 미국은 Department of Energy(DOE)의 주도하에 National Renewable Energy Laboratory(NREL, 전 SERI)와 Sandia National Laboratory(SNL)가 중추적 역할을 담당하고 있다.

최근에는 1991년에 발표된 Photovoltaic Program Plan(1991-1995)에 의한 태양전지의 효율향상과 가격목표를 달성하기 위한 PVMat(Photovoltaic Manufacturing Technology) Project와 태양광 발전의 상업화에 필요한 실증시험과 주

변장치의 가격절감을 위한 시스템 기술개발을 목적으로 하는 PVUSA(Photovoltaic Utility Scale Application) Project, 2000년까지 1000MW의 시스템을 설치보급하기 위한 'SOLAR 2000'계획 및 태양광 발전기술을 건물에 적용하기 위한 PV: BONUS 계획이 동시에 추진되고 있다.

또한 1992년에는 PVUSA Project에 의해 개발된 제조기술을 상업화하기 위하여 관련업체들로 구성된 Photovoltaic Utility Group이 주관하는 TEAM-UP(Technical Experience to Accelerate Market) Project도 추진되고 있다.

4-2 일본

일본은 1974년 국가 주도의 태양광 발전기술을 개발하기 위한 Sunshine Project를 수립하였으며, 1980년에는 신에너지 산업기술 총합개발기

(NEDO, New Energy and Industrial Technology Development Organization)를 설립함과 아울러 대체에너지 개발 촉진법이 제정되고, 전기요금에 전원개발 촉진세를 부가할 수 있는 특별회계법이 제정됨에 따라 본격적인 기술개발과 지속적인 정책 및 재정지원이 가능하게 되었다.

이러한 정부 주도형의 추진체제로 결과적으로 가장 효율적인 목표달성을 이룩할 수 있었으며, 특히 첨단 반도체 기술을 기반으로 한 정부의 민간업체에 대한 강력한 상품화 유도는 결정질 실리콘과 비정질 실리콘 태양전지의 기술수준이 미국을 앞지를 수 있게 하였다.

이와 함께 1987년 관련기업과 연구기관등으로 태양광발전협회(Japan Photovoltaic Energy Association)를 구성하여 기술 및 시장 정보의 상호교환과 협력체계를 구성 하였으며, 1990년에는 24개 회사와 2개 단체를 구성원으로 하는 태양광 발전기술연구조합(PVTEC, Photovoltaic Power Generation Technology Research Association)

이 결성됨으로써 정부기관과 기술개발에 참여하는 기업이 연구소의 상호 협력뿐만 아니라, 대민 홍보와 연구개발의 중심기관으로서의 기능을 수행하고 있다. 특히 1993년에는 경제성장, 에너지, 환경보전에 대한 균형 있는 대책과 종합적인 기술개발을 위하여 Sunshine Project, Moonlight Project 및 지구환경 기술개발을 일체화한 New Sunshine Program(에너지, 환경영역 종합기술개발 추진계획)을 수립하여 수행하고 있다.

4-3 유럽

유럽공동체(EC)의 태양광발전 기술개발은 비록 소규모이지만 1975년 이후 꾸준히 계속되고 있으며, 1989년부터 3년 3개월간 계획된 Non-Nuclear Energy Program JOULE(Joint Opportunities for Unconventional or Long-term Energy Supply)계획을 수립하여 태양광 발전기술의 연구개발을 추진하였다. 이 계획의 2000년까

(표 2) 국가별 태양광 관련 개발 목표

구 분	미 국	일 본	유 럽
개발정책	PVMat PVUSA, Solar 2000	New Sunshine Program	JOULE I, II THERMIE
가격목표	(2010년 기준)	(2000년 기준)	(2000년 기준)
- 모듈가격(\$/Wp)	1	1	2
- 발전단가(¢/kWh)	5-6	7	9
주관기관			
- 요소기술	NREL, SNL	NEDO, PVTEC	유럽연합
- 이용기술	전력회사	전력회사, 제조업체	국가간 연계
중점분야			
- 태양전지	단결정/화합물	다결정/비정질	다결정/화합물
- 이용기술	대규모 발전소	주택용, 제품화	독립형, 건물용

지의 모듈가격 목표는 1ECU/Wp이며, 이러한 목표달성을 위하여 최근 발표된 1994년까지의 JOULE II 계획은 상업화를 목적으로 다결정 실리콘 태양전지 제조기술 개선과 태양광 발전 시스템에 대한 연구에 중점을 두고 있다. 또한 저가의 박막 태양전지를 개발하기 위한 EUROICIS 컨소시엄을 형성하여 독일을 중심으로 CuInSe2 태양전지를 집중 연구함으로써 괄목할 만한 연구성과를 얻고 있다.

이와는 별도로 유럽각국은 자체적인 장기계획에 의해 태양광발전 기술개발을 추진하고 있으며, 독일의 소규모 태양광발전 시스템의 실증시험 및 개인주택에서의 실용화 보급을 위한 '2250 Roofs Project', 이탈리아의 100kW급 태양광발전 시스템의 표준화 및 보급을 위한 PLUG Project, 스위스의 MW House Project 및 프랑스의 PV 20 Project가 수행되고 있다.

(표 3) 주요 국가의 태양광 도입 계획

구 분	미 국	유 럽	일 본
프로젝트	Solar 2000	EUPV 2000	NEDU*
목표(년도)	1GW(2000)	2GW(2010)	400MW(2000)
현재(1994년 기준)	56MW	75MW	27MW

* The fundamental principles to promote New Energy Development and Utilization

4-4 국내 기술현황

국내 태양광 발전기술은 1970년대 초부터 대학과 연구소를 중심으로 연구되어 왔으나 두 차례의 석유파동을 거치면서 대체에너지에 대한 인식이 고조됨에 따라서 정부차원의 대책이 가시화되기 시작하였다.

1987년 12월 대체에너지개발촉진법이 제정되고 이에 따라 1988년 6월 동력자원부(현 통상산업부) 주관하에 대체에너지기술개발 기본계획이 수립되었으며, 개발 필요성과 중요성을 감안하여 1989년 7월 태양광발전 범국가적 연구사업 세부 추진 계획과 장기 개발 계획이 수립 되었다. 또한 1993년부터 과학기술의 선진화를 위한 『G7 프로젝트』의 신에너지분야에 태양광 발전기술이 포함

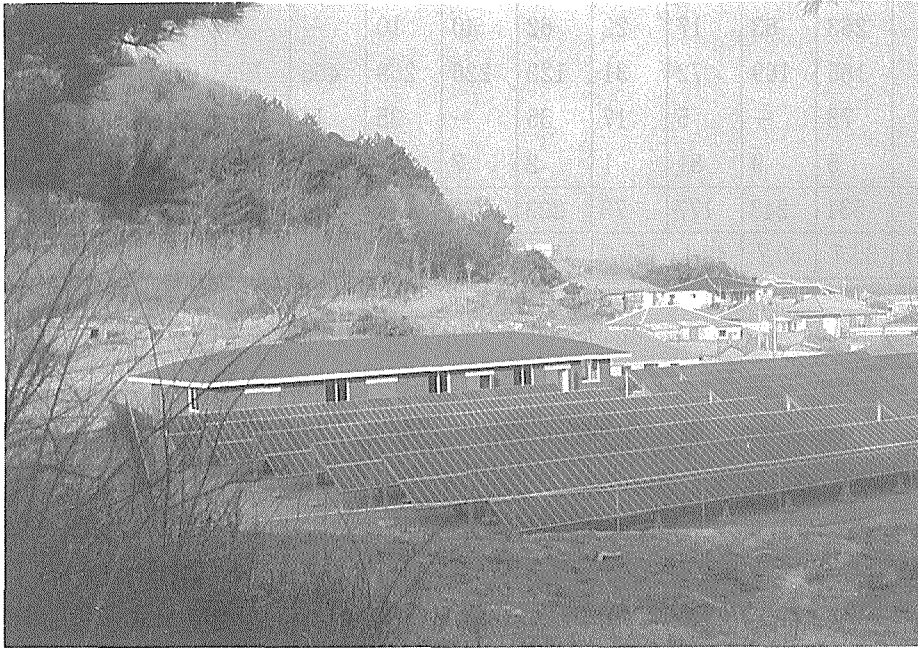
됨으로써 기술개발과 보급촉진을 보다 강화할 수 있는 기틀이 마련되었다.

그러나 태양광 발전기술의 최종목표는 상용전원과 경쟁이 가능한 발전단가 수준의 제품을 개발하고, 동시에 신뢰성이 높고 효율적인 이용기술을 개발하여 태양광 발전기술을 실용화하는 것으로, 기술수준과 예산 및 연구인력 등의 개발 여건을 고려한 단계적 추진 방법을 취하고 있다. 따라서 우리나라의 장기계획은 1단계 기간('89-'91)동안 결정질 실리콘 태양전지 및 주변장치의 국산화와 이용기술을 개발하고, 2단계('92-'96)기간은 저가, 고효율 박막 태양전지를 중점 개발하고 주변 장치의 저가화와 신뢰도를 확립함으로써 실용화 기반을 구축하며, 3단계('97-2001)기간은 박막 태양전지의 상품화와 응용제품 개발에 의해 태양

전지의 보급확대 및 태양광 발전시스템의 실용화를 목표로 설정하고 있다.

제1단계 연구기간 동안 수행된 과제수는 총 27

개 과제로서 연인원 652명이 참여하였으며, 6,031백만원의 연구비가 투입되었고, 2,766백만원의 연구장비가 지원되었다.



(그림 6) 충남 호도 100kw 태양광 발전시스템

이러한 범국가적인 연구성과의 주요 결과로서 단결정 실리콘 웨이퍼 생산업체인 (주)실트론에서 연간 300kWp의 생산규모를 갖추고 1993년부터 변환효율 14%의 단결정 실리콘 태양전지를 생산할 수 있게 되었고 인버터, 축전지 등 주변장치의 국산화 및 성능개선을 달성하여 전력용으로 태양광 발전시스템이 응용되는 단계에 이르렀다.

국내 태양광 이용분야는 원격지 소규모 전원, 서비스용, 낙도통신용 시스템의 경우에는 이미 경제성을 확보한 단계로서 본격적인 보급단계에 있으며, 특히 항로 표시등, 무인등대, 도로 지시등, 고속도로 비상등, 무인 유량측정기, 유·무인 중계소, 도서지역 통신용 등 여러 가지 다양한 응용 분야에 이용되고 있다.

〈표 4〉

국내 태양광 보급현황

연도 구분	84년 이전	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	계
유인등대	—	2	2	2	2	2	1	1	2	5	2	1	22
무인등대	263	63	17	22	62	40	10	—	20	4	7	6	514
전화전원	185	169	72	31	122	226	269	465	793	510	790	305	3,937
우량추정	78	—	5	17	35	—	35	11	—	—	—	—	181
기 타	5	9	81	1	2	7	27	2	73	248	10	—	465
개 소	531	243	177	73	223	275	342	479	888	767	809	312	5,119
용량(kWp)	35.7	50.7	42.1	156.7	86.6	132.1	95.5	170.5	477.6	224.9	159.6	50.2	1,681

5. 결 론

태양광 발전기술은 환경문제 해결 및 에너지 안정 확보의 측면에서 새로운 대체 에너지원으로 주목받고 있으며 기술개발 여하에 따라 경제성면에서도 기존 상용 발전 단가 수준에 도달할 것으로 예상되고 있다.

현재 국내 태양광 설치 용량은 총 4.5MWp 정도로서 도서용 전원으로는 현재 원격지 유인등대에 디젤발전기를 대신하여 태양광 발전 시스템을 6-8kWp급 규모로 20여곳에 설치를 완료하였으며, 아울러 도서 전화사업을 목적으로 하화도(60kWp), 마라도(30kWp), 호도(90kWp)에 태양광 발전소가 시범 사업으로 건설되어 운영중에 있다. 특히 도서 전화사업의 경우 국가 농어촌전

화사업과 연계되어 50호 미만 유인도서 100여곳을 대상으로 태양광 발전을 중심으로 한 디젤, 풍력 등 복합 발전시스템이 건설될 것으로 예상하고 있다.

반면에 계통 연계형의 경우에는 향후 보급 잠재력은 가장 크지만, 관련 법규의 미비 및 기존 전력원과의 경제성에서 아직 뒤떨어지기 때문에 실용화의 예는 없지만 전반적으로 신발전 분야에 대한 인식이 새로워짐에 따라서 여름철 Peak 시간대의 전력공급을 위한 주택용 또는 솔라 에어컨 등의 계통 연계형 시스템에 관한 기술 연구가 활발히 진행되고 있으며, 아울러 중·대규모의 분산형 전원 형태의 계통 연계형 시스템의 개발보급이 가까운 시일내에 이루어질 것으로 전망된다.