

태양광 발전의 최근 업계 동향

이수홍, 조은철, 김동섭, 조영현, 민요셉, A.U. Ebong

삼성종합기술원 재료섹터 전자재료Lab 태양전지팀, 수원, 440-600

Recent trends in photovoltaic industries

Soo Hong Lee, Eun Chel Cho, Dong Seop Kim, Young Hyun Cho, Yo Sep Min and A.U. Ebong
Photovoltaics Team, Electronic Materials Lab, Material Sector, Samsung Advanced Institute of Technology, Suwon 440-600, Korea

요 약 태양전지를 이용한 태양광 발전은 조용하고 안전하게 무한한 에너지원인 태양에너지를 이용하여 전기에너지를 얻는 청정에너지 발생법이다. 1995년 태양전지의 출하량은 약 84.8 MW로, 매년 20% 이상의 시장성장이 예상된다. 본 논문에서는 태양광 발전의 원리, 특징, 종류, 주변기자재 등을 조사하였고, 최신의 태양전지 업계의 동향을 살펴보았다.

Abstract A solar cell is a device which converts solar energy into electricity without any polluting by-product. Solar cells are useful when they are connected together to form modules. Total production of PV modules worldwide jumped 20 % in 1995 to reach a new record 84.8 MW. In this paper, the recent market trends in photovoltaic industries, principles and characteristics of solar cells and photovoltaic systems are reviewed.

1. 서 론

태양광 발전은 최근 10년간 그 기술 개발이 급속도로 진보하여 우리들의 주변에서도 각종의 전자계산기, 전자시계를 비롯하여 무인등대, 무선전신의 중계기지의 전원, 개인 주택용 전원, 인공위성의 주전원 등으로 널

리 쓰여지고 있다.

태양광 발전은 입사되는 태양복사 에너지가 “무한정”으로 경비가 들지 않는다는 본래의 장점이외에도, 반도체의 양자 광전효과를 이용하여, 열 에너지를 매개로 하지 않는 점에서 가동 부분이 없어 조용하고 안전하게 공해없이 전기 에너지를 일으키는 청정에너

지 발생법이다.

2. 태양광 발전의 특징

태양전지를 이용한 태양광 발전은 열에너지를 매개로 하는 화력, 원자력 등의 다른 발전시스템과 달리 조용하고 안전하며 공해 없이 전기에너지를 생산하는 것으로 다음과 같은 독특한 특징을 가진다.

2.1. 가동부분이 없이 조용하게 청정에너지를 발생한다.

반도체 특유의 양자효과에 의해서 광을 전기 에너지로 바꾸는 변환 법이기 때문에 화력이나 원자력 발전에서 쓰이는 터빈이나 발전기와 같은 가동부분이 없다.

2.2. 유지가 간단하고 자동화 무인화가 용이하다.

회전기나 고온고압 부분이 없다고 하는 것은 기계적으로 마모가 될 일도 없고 윤활유도 불필요하다. 즉 인공위성이나 무인등대 등의 전원으로서 이미 실증된 바와 같이 운전유지가 간단하고 시스템의 무인화나 자동화하기가 쉽다.

2.3. 규모의 대소에 관계없이 일정효율로 발전된다.

태양전지의 변환효율은, 이용되고 있는 시스템의 규모에 관계없이 거의 일정하다. 예를 들면 5 MW의 대규모 발전소나 전자 계산기용의 20 mW와 같은 모듈에서나 사용되는 태양전지의 수량이 변화할 뿐 같은 변환

효율로 발전된다. 이 장점은 태양전지가 내부 광전효과라고 하는 양자효과에 의한 에너지 변환과정에 기초하는 본질적인 것으로, 원자력 발전이나 태양열 발전 시스템과 같이, 열에너지를 매개로 한 발전법에서는 흉내낼 수 없는 특징이다.

2.4. 모듈구조이기 때문에 양산성이 뛰어나다.

태양전지는 콤팩트한 모듈구조로서 제조되기 때문에, 양산성이 뛰어나고 수요의 확대에 따른 연속자동화 제조공정 등에 의한 저コスト화를 꾀할 수 있다.

2.5. 확산광에 의해서도 발전한다.

솔라 계산기가 형광등하에서도 동작하는 것처럼, 태양광 발전은 직사광은 물론이고, 확산입사광의 에너지에 따른 발전이 가능하다.

2.6. 광 발전은 방치된 에너지의 유효이용

태양광 발전은 변환효율이 낮기 때문에 안 된다고 얘기하는 사람도 있다. 그러나 이것은 예를 들면 화석연료를 사용했을 때 증기터빈이 좋은가, 가스터빈이 좋은가라고 하는 변환효율에 관한 토론과 혼동해서는 안된다. 즉 화력발전에서 변환효율이 38 %라고 하는 것은 62 %의 중유를 태워 낭비한 것이다. 이것과 비교해서, 태양전지의 변환효율이 15 %라고 하는 경우는, 그 연료는 원래 무경비인 것으로, 본래는 폐기되는 에너지를 15 %의 전기에너지로 전환하여 유효 적절하게 사용한다고 하는데 큰 차이점이 있는 것이다.

3. 태양전지의 에너지 변환효율

태양전지의 변환효율(Energy conversion efficiency)은 입사되는 태양복사광 에너지와 태양전지의 단자에서 나오는 전기 출력에너지의 비를 퍼센트로 표시한 것이다.

국제전기규격표준화위원회(IEC TC-82)에서는, 지상용 태양전지에 관해서는, 태양복사의 공기질량통과 조건이 AM(Air mass : 통과공기질량) 1.5로, 100 mW/cm²의 입력광 파워에 대해서, 부하조건을 바꾼 경우의 최대 출력과의 비를 백분율로 표시한 것을 공칭효율이라 정의하고 있다. 그래서 이 측정 조건으로 구한 효율이 태양전지의 카탈로그에 실리던가, 연구개발 단계에서 학회에 발표되는 수치이다. 실제의 태양전지의 공칭효율의 측정에는 미리 자연 태양방사광 스펙트럼을 모의한 솔라 시뮬레이터를 사용하여, 그 출력파워가 지상용 태양전지에서는 AM 1.5, 100 mW/cm² 우주용 태양전지에서는 AM 0, 135.3 mW/cm²로 미리 입사광 조건을 설정해서 측정을 행한다.

예를 들면, 지상용 태양전지의 입사광조건 하에서 측정된 최대 출력점 P (V_{max}, I_{max})와 개방전압 V_{oc}, 단락광 전류 I_{sc}가 구해지면, 공칭변환효율 η_n은 유효 수광면적을 S(cm²)로 하면

$$\begin{aligned} \eta_n &= \{(V_{max} \cdot I_{max}) / P_{in} \cdot S\} \times 100(\%) \\ &= \{(V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF) / 100(mW/cm^2)S\} \times 100(\%) \\ &= V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF / S(\%) \end{aligned} \quad (1)$$

$$FF = V_{max} \cdot I_{max} / V_{oc} \cdot I_{sc} \quad (2)$$

로 된다. 여기서 FF는 곡선인자(curve fill factor)라고 하여 태양전지의 성능의 정도를

표시하는 중요한 지수이다. 식(1)에서 알 수 있듯이 입력파워를 100 mW/cm²로 규격화한 측정에서는, 실험에서 구해진 V_{oc}를 비롯하여 J_{sc}와 FF를 알아내 전부 곱한 것이 공칭효율을 나타내는 것이 된다. Fig. 1에 태양전지 상수들을 나타내었다.

실리콘계 태양전지의 경우 소면적(4 cm²)에서의 변환효율은 호주 UNSW (University of New South Wales)의 24 %가 최고이며, 이어서 독일의 후라운호퍼 태양전지 연구소가 22.3 %의 기록을 내고 있다. 면적이 45.7 cm²의 경우는 UNSW가 21.3 %의 기록을 갖고 있다. 미국의 Sun Power사의 경우는 면적이 21 cm²의 경우 21.4 %의 기록을 갖고 있다. 이러한 태양전지들은 제조공정이 복잡하고 청정시설이 필요하여 제조단가가 비싸서 특수 목적으로 한정되어 쓰이고 있다. 실용적인 모듈의 변환효율은 단결정 실리콘의 경우 12~14 %가 일반적이다.

4. 태양전지의 핵심기술

태양광발전 프로젝트를 성공으로 이끄는 핵심기술은 무엇보다도 태양전지의 고효율화와 저코스트화이므로, 요소요소의 재료, 원재료의 제조법에서부터 전지의 구조, pn접합 등의 집합형성기술, 모듈화에서 시스템에 이

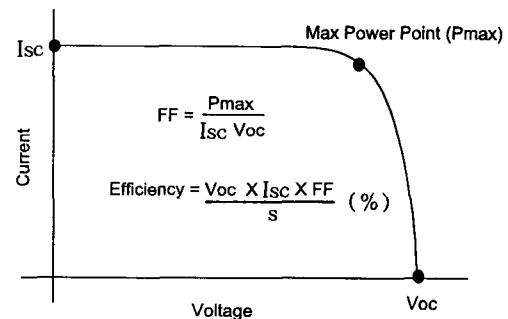


Fig. 1. Current-voltage curve of solar cell.

르기까지 실제로 여러 가지 연구개발 노력이 중첩되어 있다.

식(1)에 주어진 공칭효율도, 태양전지에 쓰여지는 반도체 재료나 접합구성에 의해 변화한다. 그 중요한 요소들을 들어보면, 우선 (A) 어떻게 하면 태양방사 에너지를 가장 유효적절하게 반도체로 끌어들이 수 있을까?, (B) 반도체의 광흡수 스펙트럼과 태양 스펙트럼의 정합성을 향상시킬 수 있는 방법, (C) 반도체에 흡수된 광 에너지에서 전자나 정공의 자유 캐리어를 생성하는 비율의 향상(광전양자효율)과 이러한 캐리어들이 재결합하기 전에 유효 적절하게 전극으로 이동시키는 기술, (D) 발전전력을 되도록 주울 손실을 적게하여 양 단자에서 꺼낼 수 있는 방법을 연구하는 전기적 요소 기술 등이다. 즉 (A)-(D)의 과정을 비용까지 계산하여, 어떻게 설계할 것인가가 열쇠가 된다. 예를 들면 (A)에서는 무 반사 코팅이나 투명전극의 재질, 헤테로페이즈 접합전극의 이용, (B)에서는 헤테로 접합이라든가, 멀티밴드 갭 스택접합이나 탄담형 태양전지, (C)의 예로서는 BSF(Back Surface Field)처리나 그 레이디드 캡 접합 등 내장전장을 활용한 캐리어의 밀폐나 가속효과, (D)에서는 전극금속이나 그 패턴의 최적설계 등이 실용기술로서 이용되고 있다.

5. 태양전지의 종류

5.1. 실리콘 태양전지

5.1.1. 단결정 실리콘 태양전지

시판되고 있는 단결정 실리콘 태양전지 기판은, 그 대부분이 IC 제조용으로 생산된 실리콘 규격제품을 다시 채용용하여 결정을 성

장시켜 사용하고 있다. 현재 달성하고 있는 단결정 실리콘 태양전지의 최고 변환효율은 호주의 UNSW(Univ. of New South Wales) 대학이 발표한 24 % (4 cm²)이다[1]. 단결정 실리콘 태양전지의 변환효율을 향상시키기 위해서는 새로운 구조의 개발, 결정의 고순도화·고품질화가 필요하며 이를 위해서는 광전효과를 발생하는 캐리어의 재결합(특히, 후면전극 부근에서 재결합을 억제하는 후면 표면전계 구조)이나 입사광의 기판표면에서의 반사량 감소를 위한 기판표면에 피라미드상의 기공, 전지내의 입사한 광의 이용효율을 향상시키기 위한 packing 기술의 개발 등이 추진되고 있다[2].

5.1.2. 다결정 실리콘 태양전지

다결정 태양전지는 기판으로 고순도 다결정체를 사용하여, 원리적으로는 단결정체와 거의 동일하다. 단결정 실리콘, 다결정 실리콘 기판의 제조는 고도의 기술과 다량의 에너지가 필요하며, 필연적으로 태양전지 제조 단가가 높다. 실리콘 태양전지는 고효율이지만 가격이 비싸다는 문제가 있고, 이에 대한 대책의 하나는 박막형 태양전지이다.

5.1.3. 박막 태양전지

결정질 박막태양전지의 재료로는 가격이 저렴해야 하며, 장래의 대량사용을 고려하면 자원공급적인 면에서 문제가 없는 재료를 선택해야 한다. 실리콘 박막을 형성하기 위한 기판재료로는 박막형성 온도에서 기판이 Si와 반응하지 않고 더욱 밀착성을 가지며, 열팽창 계수가 좋고 Si박막과 정합하여 비틀림이나 깨짐이 일어나지 않으며, 평탄한 표면이 용이하게 형성하며, 형성되는 실리콘 막중에 혼입하여 유해물 발생이 되지 않고 전기저항이 작은 특성등을 갖는 재료이다. 이

러한 특성을 만족하는 후보재료로는 그래파이트(graphite) 세라믹, 내연성 금속, 보로실리케이트(borosilicate) 유리, 석영(quartz) 유리, 알루미늄 판, 강철판 등이 있으나, 어떤 경우도 반도체 재료적 관점에서 보면 기관재료의 순도가 불충분하며, 처리온도가 높은 막 형성 조건에 있어서는 그 영향이 문제가 된다.

5.1.4. 비정질 실리콘 태양전지[3,4]

비정질 실리콘 태양전지의 특징은 광흡수 계수가 결정질 태양전지의 10배 이상 높기 때문에 0.5~1 μm 정도의 실리콘 막으로도 충분히 제조가 가능하여 기관 소재비가 결정질 태양전지에 비해 1 % 이하이다. 결점은 광전변환 효율이 낮아 연구용으로는 10 %를 약간 넘는 것이 발표되고는 있지만 실용적인 전지는 7~8 % 수준이다. 비정질 실리콘 태양전지의 광전효율을 향상시키기 위해서는 비정질 실리콘과 다결정 실리콘을 적층한 다층구조 전지나 커버유리위에 비정질 실리콘 막을 직접 형성하여 유리기관이 불필요한 기술 등이 연구·개발되고 있다. a-Si용의 기관 유리는 투명전도막을 피복하여 디바이스로 공급되며 투명전도막은 저항이 낮은 것이 바람직하다.

비정질 실리콘 태양전지의 가장 큰 문제점은 빛의 조사에 의해 효율감소 현상인 광열화 현상의 발생이다. 이것은 광발생에 의한 캐리어가 갭(gap) 준위에 포획되어 재결합의 원인으로 알려지고 있으며, 이 광열화 현상을 피하기 위해서는 태양전지를 얇게 해서 발생된 캐리어를 단시간에 사용하는 것이 효과적이다[5].

비정질 실리콘 기술은 최근 2~3년간 액정표시 패널용(LCD)의 비정질 실리콘 TFT 생산설비에 투자가 계속되었고, 재료물성에

서 제작기술에 이르기까지 비정질 실리콘 태양전지 연구개발 자산이 유효하게 활용되고 있다.

5.2. III - V 족 화합물 태양전지

단결정 화합물 III - V 족 태양전지는 주로 집광 발전용이나 우주용 태양전지로 개발되고 있으며, GaAs 태양전지는 25.7 %, AlGaAs/GaAs 탄뎀형은 27.6 %, GaAs와 GaSb를 붙여 만든 탄뎀형은 집광시에 35.8 %에의 변환효율이 보고되고 있다. InP 태양전지는 22 %의 변환효율이 실현되고 있으며, 이 전지는 우주선에 의한 열화가 광조사, 순방향전류에 의하여 회복되는 등 우주에서 응용시 잇점이 되는 특성을 가지고 있다.

III - V 족 화합물 반도체 중에서 태양전지 재료로서 가장 개발이 많이 된 것이 GaAs이며 기초적 물성이나 결정 성장법이 가장 명확히 되어 있다. GaAs 태양전지를 실리콘 태양전지와 비교하면 다음과 같은 잇점이 있다.

(1) GaAs의 밴드갭은 1.43 eV로 태양광 방사스펙트럼을 효율 좋게 흡수하는데 적당한 값이다. 따라서 변환효율이 AM 1에서 20 % 이상으로 극히 높다.

(2) 금지대폭이 넓기 때문에 Si 태양전지와 비교하여 본질적으로 고온동작이 가능하다. GaAs 태양전지의 온도상승에 의한 변환효율의 감소율은 Si태양전지의 50 % 정도이다.

(3) GaAs가 직접 천이형 반도체이기 때문에 소수 캐리어의 수명이 짧고 방사선에 의한 열화가 Si보다 작다. 실리콘에서는 캐리어의 수명이 길기 때문에 전자선과 같은 자외선 영역의 태양광에 의하여 캐리어 수명의 저하가 심하고 단락광전류와 개방전압 저

하의 요인이 된다.

(4) 개방전압(V_{oc})과 단락광전류(J_{sc})를 GaAs와 Si의 경우를 비교하여 보면 동일한 변환효율에도 개방전압은 GaAs가, 단락광전류는 Si쪽이 크다. 따라서 본질적으로 GaAs 쪽이 전류가 작고 직렬저항의 영향을 받기 어렵다. 이러한 특징은 특히 고배율을 집광해서 대전류를 흘리는 경우에 현저하게 나타난다.

(5) GaAs는 직접 천이형의 특성을 나타내기 때문에 흡수계수가 크고, 태양광의 90% 이상을 흡수하기 때문에 $5\ \mu\text{m}$ 의 두께로 충분하다.

(6) GaAs 다결정 박막 태양전지는 결정의 크기가 수 μm 정도이면 단결정과 비슷한 변환효율이 얻어진다.

반대로 GaAs 태양전지의 결점은 다음과 같다.

(1) GaAs 단결정 기관의 가격이 높다.

(2) Si에 비해 무겁다. 따라서 무게당 출력(w/g)은 작아질 우려가 있다. 그러나 무게가 문제가 되는 것은 태양전지를 인공위성에 탑재할 때 뿐이다.

(3) 표면재결합 속도가 크다. 따라서 GaAs는 흡수계수가 크고 광여기에 의해서 표면에서 $1\ \mu\text{m}$ 정도의 영역에서 전자-정공쌍이 형성하기 때문에 표면재결합의 영향을 크게 받는다.

5.3. 그외의 태양전지

주기율표 II족의 원소(Zn, Cd 등)과 VI족의 원소(S, Se, Te 등)들로 구성되는 반도체는 II-VI족 화합물 반도체로 불린다. ZnS, ZnSe, ZnTe, CdS, CdSe와 CdTe 등의 반도체는 직접 천이형 에너지 구조를 갖고 있어, 흡수단 이하의 파장광에 대한 흡수계수가 크

다. 따라서 II-VI족 화합물 반도체를 광흡수 재료로 사용하면 반도체의 두께가 얇아도 되어 재료비를 낮출 수 있고, 과잉소수 캐리어의 확산길이가 짧아도 되기 때문에 반도체 품질에 대한 요구가 완화되어 제조가 용이한 잇점이 있다. 비교적 용이하게 여러 가지 방법으로 박막제조가 가능하다는 것도 II-VI족 반도체의 특징이다. II-VI족 화합물 반도체로 만들어지는 태양전지로는 CdS/Cu₂S계, CdS/CdTe계[6,7], CdS/InP계와 CdTe/Cu₂Te계 태양전지 등이 있다.

CuInS₂, CuInSe₂[8,9]등의 I-III-VI족 화합물은 직접천이형이며 Cd와 태양전지에 적당한 접합이 가능하다. Cd은 인체에 유해한 특정화학 물질로 태양전지를 제조, 사용할 때에 충분한 안전관리가 필요하다. 이 계통의 박막태양전지는 광열화 문제는 없으나, 재료의 원자조성이 복잡하기 때문에 재료 조성과정 고효율 다결정 재료의 과학적 해명이 되어 있지 않다.

6. 확장되는 응용시스템

트랜지스터나 IC와 같은 반도체 제품인 태양전지는, 양산화에 의한 규모 메리트가 크다. 즉 응용분야가 넓어짐에 따라서, 수요가 증가하면 상당정도의 저 코스트화가 달성될 수 있는 요인을 갖고 있다. 이러한 스케일 메리트의 이용에 의한 저 코스트화의 관점에서 넓은 용도를 갖는 응용시스템의 개발도, 이 분야의 산업육성에 필요한 과제의 하나라고 말할 수 있다.

사실, 지난 10년간 솔라 계산기로 대표되는 민생용 전자기기, 고속도로나 철도의 신호기, 양수펌프, 골프카트, 솔라 자동제초기, 솔라자동차, 솔라보트 등 새로운 응용분야도

개척되어 제작하고 있다.

한편 전력용으로 각종 규모의 실험 프란트가 전세계에서, 각국의 건설 프로젝트로서 건설되고 있다.

태양광 발전 시스템의 다음 단계의 최 우선은 전력망과 연계한 태양광 발전소의 건설이다. 1990년 기준으로 전세계의 상황을 보면, 국제연합을 포함한 정부지원 프로젝트로서, 10~20 kW_p 정도의 중 규모 발전소가 미국, 이탈리아, 스위스, 사우디아라비아, 독일 등의 각국에서 총계 200개소에서 가동중이거나 건설중이다. 이것과는 별도로 유럽공동체에서는 15~30 kW_p 정도의 중 규모 발전소가 152개소에 건설되고, 일본에서도 3~200 kW_p 규모의 발전소가 40개소 이상에서 가동되고 있다. 한편 대규모 집중발전의 사례로서는 일본의 시코쿠 전력에서 1985년 2월부터 에히메현에서 1 MW_p의 발전소를 가동시키고 있다. 미국의 에너지성에서는, PVMaT라고 하는 산업체-정부-대학 공동의 양산화를 목적으로 한 프로젝트가 1991년부터 설정된 한편 민간의 전력업계와 태양전지 메카가 중심이 되어, 전력용 태양광 발전 프로젝트(PVISA)등, 장대한 태양광 발전 프로그램이 짜여져, 세계적으로 추진되고 있다. 현재 가동중인 세계 최대의 태양광 발전소는 ARCO SOLAR사가 미국의 캘리포니아주에 건설한 7.2 MW_p 규모의 발전소이다. 대기오염 등 환경문제를 생각하여 무공해 자동차로서 Solar자동차, 비행기 등의 개발도 시작되고 있다.

태양전지의 모듈가격이 어느 정도까지 내려가면 실용화 될 수 있는가 하는 문제는 사용장소에서의 평균일조시간, 기존 발전기술의 발전원가, 태양전지의 에너지 회수시간 등과 맞물려 각종의 케이스 스터디가 진행되고 있고 한 구체적인 시산 결과에 의하면 대

규모 집중발전에서 BOS(Balance of System)의 점유율이 50 %로 가정하여도, 모듈원가가 2800원/W_p이 되어 향후 10년 정도에 상용전력으로서도 채산이 맞을 것으로 예상되고 있다.

7. 주변기자재와 부품

태양전지 자체는 상당히 얇은 구조를 가지고 있기 때문에 파손되기 쉬운 구조를 가지고 있다. 이 태양전지의 안전보호, 강화를 위한 대책이 필요하고 태양전지를 이용하기 위한 각종 장치가 필요하다. 주변기재, 장치, 부품의 시장은 상당히 큰 것으로 예상하고 있다.

7.1. 카바글라스

카바 글라스는 일반용과 우주선용으로 분류된다. 일반적으로 50~500 μm 두께의 창유리(소다라임 글라스)가 사용되고 있지만, 자외선 방지를 위해서는 Ce이 첨가되기도 하고, 일부에서는 합성 실리카 글라스가 사용되기도 한다. 이 글라스들은 일반적으로 실리콘 계 접착제로 태양전지에 접착되고 있다. 우주선용으로는 내방사성을 위하여 MgF를 코팅하거나, 자외선 방지를 위하여 TiO₂, SiO₂, Ta₂O₅ 등의 다층 코팅이 된다.

7.2. 2차전지

태양전지는 야간에는 사용할 수 없기 때문에 주간에 발생한 전력을 저장할 필요가 있다. 특히 분산형 전원으로 이용할 때는 중요한 것이 2차전지이다. 현재는 역사와 비용의 관점에서 납전지가 주류를 이루지만, 일부에서는 효율과 경량성을 감안해서 Ni-Cd도 이

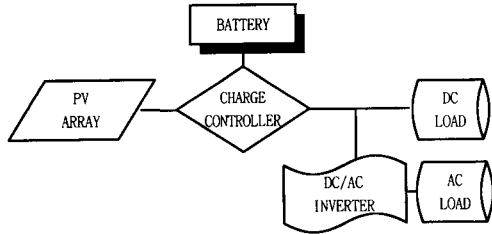


Fig. 2. Block diagram of a conventional PV system.

용되고 있다. 납전지의 에너지 밀도는 35~40 Wh/kg, Ni-Cd는 25~57 Wh/kg이지만, 충방전 리사이클 수명의 면에서는 Ni-Cd전지가 한결 우수하다[10]. 일반적으로 시판되는 2차전지(전력용)는 12 V가 많고, 사용전력에도 따르지만 적어도 10개 이상 전지의 직병렬 사용이 필요하게 된다. 특히 원격지 주거용으로는 필수적인 것이 되며 비용도 큰 비중을 차지하고 있다. 기존 전력의 보조용으로 쓰이는 개인 주택용에서는 이 2차전지는 불필요하지만, 여분 전력의 매전 시스템의 완비가 필요하다. Fig. 2는 전형적인 독립형 태양전지 system을 나타내었다.

7.3. 컨버터등 기타

태양전지에서 얻어진 전력의 출력을 변환시키기 위하여 『직병 변환 장치』 『직교 변환 장치(인버터)』, 기존 전력계에의 『연계장치』와 이러한 것들을 제어하는 『제어 장치』가 필요하다. 실제적으로 태양전지만을 전원으로 하는 경우에는 전압제어 다이오드, 역류방지 다이오드나 전압 안정화 회로등이 필요하다. 인버터는 직류전력을 교류로 변환하는 장치로, 전압 조정능력이나 주파수 조정능력이 요구된다. 방식적으로는 사이리스터식과 트랜지스터식이 있고, 트랜지스터식이 경량으로 소음도 작다.

기타로 전력용 태양전지의 발전을 위해서는 주변장치와 그 재료들을 개발할 여지가 아직도 많으며 또 에너지를 유용하게 사용하기 위해서는 천정, 벽, 마루의 단열효과를 올리기 위해 뛰어난 단열재가 많이 필요하게 되며, 더욱이 창유리도 이중 창유리가 필수적인 것으로 생각된다.

8. 지구환경문제에 공헌할 수 있는 점

화석연료는 본래 태양에너지가 생태계의 순환 사이클을 통해서, 유사이래, 유구한 세월동안 저장되어 온 지구의 재산이다. 짧은 시간동안에 태워 없애지 말고, 석유제품제조 의 자원으로써 자손들에게 남겨주었으면 한다.

환경오염에 관계치 않고 경제중심 주의로 발전해온 20세기의 문명은 서서히 종말을 고하고 생태학에 중점을 둔 문명이 막을 열고 있다. 그래서 문명유지에 필요한 에너지도 태양에너지를 중심으로 하는 청정에너지 기술이 싹을 키우고 있다.

태양광 발전은 그 자체가 청정발전일 뿐만 아니라 연료경비가 들지 않고 무인운전이 가능하다고 하는 특징을 살려서 새로운 프로젝트들이 추진되고 있다. 예를 들면, 태양광 발전기술을 진흥 시킴으로서 청정에너지 발전, 공기의 정화, 물의 정화, 음료수 확보를 위한 해수의 담수화, 수소에너지의 발생, 사막의 녹지화, 의료용 비상용전원, 의료용 약품등의 냉장보관 등이다. 특히 해수의 담수화나 수소 에너지의 발생 등은 이미 중근동 지역에서는 수십년의 경험이 있다. 이 때의 전원을 태양광 발전에서 얻는다는데 큰 의의가 있다.

사막의 녹지화는 태양전지를 이용한 양수

펌프로 지하수를 퍼 올려, 이 물을 점적법으로 식물을 재배하는데 이용한 것으로, 예를 들면 “고비 프로젝트”나 “사하라 프로젝트”가 발족되서 연구가 진행되고 있다.

이와 같이 항구적인 크린에너지 기술로서 기대되어 온 태양광 발전 시스템의 실용화에의 전망은 의외로 빠르게 현실적으로 되어가고 있다. 그러나 이 기술을 훌륭한 산업으로 육성하기 위해서는 끊임없는 연구와 지구 규모의 강력한 국제협력으로, 우리가 살고 있는 이 지구행성을 후손들에게까지도 청정한 상태에서 문명을 전승해 주는 것이 필요하다. 다행히 이 기술은 현재 동서 선진제국간의 기술협력 및 남북간의 기술원조에 대해서도 원활하게 국제협력이 진전되고 있다.

일본의 Sanyo에서 제안하고 있는 GENESIS(Global Energy Network Equipped with Solar cells and International Superconductor grids : 구약성서에서 창세기라는 뜻)[11] 계획이라는 것은 태양광 발전 시스템을 세계 각지에 설치하여, 이 시스템들을 고온초전도 케이블을 이용하여 네트워크화 하여, 태양전지로 발전한 전력을 지구 전역에 무손실로 공급하려는 계획이다. 초전도 케이블의 제조가 불가능한 경우는 고압직류 송전법을 사용할 수도 있다고 한다.

9. 관련 기관·업계의 동향

다음의 글은 최근 일본에서 발행되는 일간 공업신문, 전파신문, 일본경제신문, 일본산업신문에 게재된 태양광 발전기사와 기능재료, 일렉트로닉스 등에 게재된 태양전지 관련 기초논문들을 일반인들의 이해를 돕기 위해 요약 발췌한 것이다. Fig. 3에는 최근 4년간의 세계 태양전지 시장 동향을 나타내었다[12].

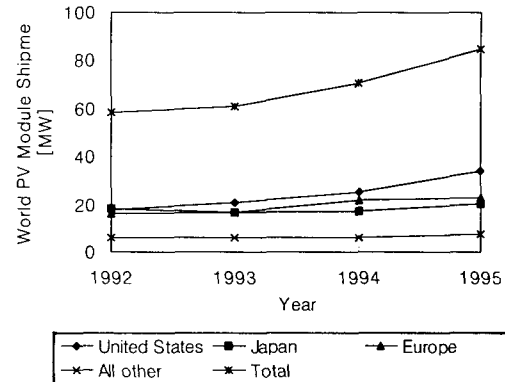


Fig. 3. World PV module shipment from 1992 to 1995.

세계 태양전지 모듈의 총 생산량의 1994년도의 70.7 MW에서 1995년에는 84.8 MW로 20 %로 증가하였다.

9.1 미국의 경우

9.1.1. 백악관

96년 10월부터 시작되는 미국의 97회계년도 예산안 작성에 있어서, 클린턴 대통령이 에너지성에 대해서, 태양에너지 관련예산을 96년도 실적의 33 % 증액한 것에 해당하는 2억6천5백10만 달러를 계상하도록 3월 20일 지시한 것으로 밝혀졌다.

9.1.2. 지멘스 솔라

태양전지의 톱 메이커인 Siemens Solar Industries사의 태양전지와 모듈의 누적 출하량이 96년 중에 100 MW를 넘어설 전망이다. 이 양은 세계 총 누적출하량의 20 %에 해당되는 것으로 중앙 유럽의 평균가정 25000 가구분에 해당된다. Washington에 박막공장 건설을 위한 기공식을 가졌다.

9.1.3. 국무성

군사시설에서는 무소음의 태양광 발전이 디젤 발전보다 유리하다고 판단하여 금후 태양광 발전화 계획을 더욱 넓혀갈 예정이다.

9.1.4. Photocomm

96년 여름 애틀란타 올림픽 개최지 근처인 마틴 루터 킹 기념공원에 미국의 ASE사가 만든 태양전지를 이용하여 65개의 가로등을 설치하였다.

9.1.5. Amoco/Enron

세계 제2의 태양전지 제조업체인 "Solarex"의 모회사인 이 회사는 인도의 Thar사막에 50 MW이상의 세계 최대의 실용형 태양광 발전소를 건설하기 위한 매전계약을 인도의 라자스탄주 전력국과 체결하였다. 사용되는 태양전지는 비정질 태양전지일 것으로 보임.

9.1.6. 태양기술과 재생 가능자원공동조합(C-STRR)

네바다주의 핵실험을 했던 장소에 270 MW 규모의 대규모 태양광 발전소를 중심으로 한 재생가능 에너지 발전소 건설계획을 세우고 있다. 이 규모는 1995년의 세계의 태양전지의 총 출하량 80 MW의 총 3.4배에 해당된다. CSTRR이 선정한 4건의 제안 기업의 내용은 다음과 같다.

Amoco/Enron : 100 MW의 박막태양전지 모듈에 의한 태양광 발전소

Cummins Power Generation : 25 MW의 태양열 발전소

Kenetech Corp의 3사 공동 : 100 MW의 태양광, 풍력 하이브리드 발전시스템

Nevada전력의 2사 공동 : 70 MW의 태양광 발전 시스템

9.1.7. Atlantis Energy Systmes사

건축 자재용 태양전지 모듈조립공장을 본격 가동하여 연간 600 kW-수 MW 까지 조립이 가능하다.

9.1.8. Spire Corporation

남아프리카의 Renaissance사와 합작하여 태양광 발전용 모듈 제조공장(Sun Corp)을 설립하여 관련기술 및 지원을 하기로 했음. 연간 생산능력은 500 kW로 현 시장의 10% 정도를 공급하기로 함. 남아프리카의 태양광 발전시장은 2015년까지 375 MW까지 증가할 것으로 예상된다. 이 회사는 이미 러시아에도 태양전지 모듈공장을 세웠다고 발표하였다.

9.1.9. United Solar Systems Corporation

미시간의 Troy에 박막 태양전지 공장을 위한 기공식을 가졌다.

9.1.10. Solarex Corporation

버지니아주에 년 산 10 MW 규모의 태양전지 공장건설을 위한 기공식을 95년 10월 16일에 가졌다. 이 회사의 다결정 실리콘 태양전지가 독일의 본에 위치한 산업기술 센터의 옥상에 500 kW발전 시스템에 채용되었다. 옥상에 설치한 단일 규모로는 세계 최대 규모이다. 이 때까지의 최대 규모는 조지아 공과대학의 실내 수영장 옥상에 설치된 349 kW 시스템이었다.

9.2. 일본의 경우

주택용 태양광 발전 시스템이 일본에서는 본격 보급단계를 맞이하고 있다. 통산성은 동 시스템의 보급계획, 시장규모를 1994년에는 420억원, 95년에는 860억원, 96년에는

960억원, 2000년에는 약 1조 2000억원으로 예상하고 있다.

한편 가정에서 쓰고있는 평균적인 전기 사용량을 고려하면, 4인 가족으로 연간 대략 3000 kWh. 현재 발매되고 있는 3 kW의 태양광 발전 시스템은, 그 전기의 대부분을 자가 발전할 수가 있고 우기나 야간 등 태양광이 없을 때에는 전력회사로부터 전기를 사고, 반대로 쓰고 남은 태양광 발전의 전기는 전력회사에 파는 것으로 되어 있다.

태양광 발전 시스템은 일본에서는 1. 지붕 위에 설치하는 태양전지 모듈(태양광에너지를 전기로 바꾸는 판넬) 2. 접속상자(태양전지 모듈로 얻은 전기를 모은다) 3. 인버터(자가 발전한 직류의 전기를 가정용의 교류로 변환한다)로 구성되어, 분전반에서 각 전기제품으로 전기가 흐른다.

이외에 태양광 발전과 전력회사의 전기의 교류측 개폐기, 파는 전기와 사는 전기의 양을 나타내는 전력양계가 세트되어 있다.

9.2.1. 산요전기

산요전기는 아프리카의 최 서단에 위치한 세네갈 공화국으로부터 10개의 낙도중 6개의 섬에 해수의 담수화를 위한 태양광 발전 시스템 설치공사를 수주하여 이미 작년부터 공사중이다. 이 시스템은 태양전지로 얻어진 전력을 콘트롤러를 통하여 교류로 변환시킨 다음, 펌프와 해수 담수화 장치를 구동시키는 것이 기본 시스템이다. 이미 4개의 섬에 설치된 디젤발전 시스템과 함께 이용하여 하루에 100톤의 담수를 생산하여 약 20000명의 주민들에게 음료수를 공급하려는 프로젝트이다.

1995년 말에 “산요 솔라 인더스트리”를 설립하고 연간 생산능력 1만 2000 kW를 갖추고 있다. 1995년 12월에는 미국의 캘리포

니아 소재인 Solec사의 주식을 취득하여 단결정 전지를 수입하여 업계 최대의 단결정 전지를 이용하여 고효율 모듈을 채용한 시스템을 96년 가을에 발매할 예정이다. 2000년에 국내시장 점유율을 20%로 잡아 2000억원의 매출을 기대하고 있다. Solec사를 인수함으로써 실리콘 결정 제조기술을 얻게 된 산요는 결정단계에서부터 태양전지의 모듈화까지를 일관 생산할 수 있는 일본 유일의 업체가 되었다.

산요는 태양전지 분야에 왕성한 의욕을 보여 1980년에 비정질 태양전지가 장착된 전자계산기를 발매하고, 1987년에 태양전지 기와를 개발, 90년에는 기관재로 플라스틱을 이용한 경량의 비정질 태양전지를 이용하여 솔라 비행기를 발표 미국대륙 횡단을 한 바 있다. 91년에는 마스다 자동차인 센티아에 차내의 열기 방지를 위해 선루프를 발매하고 또 가정용 솔라 에어컨을 발매하고 있다. 최근에는 오오사카에 창과 벽면전체를 태양전지로 설치한(창은 투과형) 솔라빌딩도 완성하였다.

9.2.2. 산관공동

태양전지용의 고순도 실리콘 기관의 양산 기술 확립을 위하여 산관공동 프로젝트가 1996년 8월에 발족한다. 가와사키제철, 교세라, 샤프, 산요전기, 다이도 흑산, 쇼와 셀석유, 스미토모 시척스 등이 기술연구 조합을 설립하여 태양전지용 실리콘에 가장 적합하고 경제성이 높은 제조기술을 누구보다도 먼저 실용화 한다는 계획이다. 개발하는 것은 태양전지의 심장부인 실리콘 기관과 그 원료인 고순도 실리콘을 대량으로 값싸게 하는 기술이다. 산관에서는 200~300억원을 투입, 개발하여 2001년에 실용화할 것이다. 태양전지의 보급이 활발해짐에 따라서 원재료의 공

급부족이 예상되기 때문이다. 현재 반도체용 실리콘 재료의 가격은 1그램당 약 50원이고 태양전지 제조용으로 공급되고 있는 것은 1그램당 10원 정도로 알려지고 있어 이 프로젝트의 목적은 10~20원으로 제조할 수 있는 기술의 확립이다.

9.2.3. 후지전기

이미 연간 1 MW 분의 태양전지를 양산할 수 있는 라인을 갖추어 놓고 주택용 태양광 발전 시스템 사업에 참가한다. 플라스틱 기판을 이용하여 변환효율 8.5 %의 비정질 실리콘 태양전지를 양산하여 미사와홈과 공동으로 모델주택에 채용할 것이다.

9.2.4. 교세라

교세라는 태양광 발전 시스템을 금후 2000년을 목표로 생산능력을 현재의 4.6배인 60 MW체제로 가지고 갈 것이며 주택용에 관해서는 장래 1년간에 60000건의 예상수요의 30 % 이상을 획득할 것으로 보고있다. 97년에 13 MW, 98년 24 MW, 99년에 40 MW, 그리고 2000년에는 60 MW로 계획을 잡고 있으며, 신제품으로서는 성능을 한층 향상시킨 1.16 kW 타입에서 5.22 kW 타입까지 신시리즈 14기종을 9월 1일부터 판매하다. 특히 신개발의 4.4 kW 인버터인 “에코라인 440”은 주택용의 양산품으로서 세계 최고의 전력변환효율 94.5 %를 실현하고(동사 종래 93 %) 자립운전기능내장, 종래에는 필요했던 냉각팬을 없애 모터등의 구동부분이 불필요하게 되어 조용하고 기계적인 문제가 없다.

이 회사의 주택용 태양광 발전 시스템의 수주 실적은 94, 95년도에 480건이었으나 96년도에는 2000건을 획득할 계획이다. 종래의 10 cm 각이었던 태양전지를 15 cm 각으로 한 양산기술이 확립되어 토탈코스트가 상

당히 인하되었다.

1993년부터 건재일체형 모듈의 개발에도 참여해 요시다 공업과 공동으로 금속커튼월 타입 모듈개발에도 임하고 있다.

9.2.5. 미쓰비시 전기

미쓰비시에서는 태양광 발전사업에 대해서 정부나 전력회사의 위탁을 받아서 3개소에서 대형 태양광 발전 시스템의 실증연구, 독립 운전 등을 운영하고 있다. 이러한 기술이 주택용 태양광 발전 시스템의 신제품 개발에도 응용되고 있다. 시스템의 판매는 6월 21일부터 단결정으로 발전용량 1.03 kW, 2.06 kW, 3.10 kW, 4.13 kW, 5.16 kW 시스템의 5종류를 판매한다. 96년 국내 시장점유율 10 %로 잡고 가까운 장래에 20 %를 목표로 하고 있다. 한편 인공위성용 태양전지 판넬을 미국의 우주선 시스템 관련회사인 SSL사에 3년간 공급하기로 계약을 체결하였다. 이로써 연간 200-300억원 정도의 경상매출을 잡고 있다.

9.2.6. 마쓰시다전기

17 %의 변환효율을 갖는 CIS(동-인듐-셀렌)계 태양전지의 개발에 성공하여 97년도부터 제품화를 할 예정이다. 96년도의 태양광 발전 시스템사업을 “태양전지원년”으로 정하고 판매목표를 95년도의 3배로 잡고 있다. 9월부터 발매하는 상품으로는 고급기종이 단결정 타입으로 출력이 1.02 kW, 2.04 kW, 3.06 kW, 4.08 kW, 5.10 kW, 중급기종은 다결정으로 1.03 kW, 2.06 kW, 3.09 kW, 4.12 kW, 5.15 kW의 총 10종이다.

현재 태양전지는 영국의 BP Solar사의 실리콘 단결정, 다결정을 매입하고 있으며, 당사에서 개발중인 박막형태의 화합물 반도체 태양전지는 2000년 이후에 판매가 가능할

것으로 보고 있다.

한편 판매 촉진책의 일환으로 소비자들을 대상으로 “태양전지 동우회”를 만들어 주택용 태양광 발전 시스템의 시공법을 설명하는 것을 비롯 태양광 관련 궁금증을 풀어 줌으로써 소비자들로부터 많은 호응을 얻고 있다.

9.2.7. 캐논

비정질 실리콘 태양전지와 지붕을 일체화시킨 3종류 타입을 본격생산하고 있으며, 94년 이후 주택용 태양광 발전 시스템의 수주가 꾸준히 늘고 있다.

한편 유럽에도 사무소를 개설하여 유럽시장을 겨냥하고 있다.

9.2.8. 구보다

산요전기와 구보다는 태양전지와 지붕기능을 유니트화해서, 시공성을 용이하게한 전채 일체형 태양전지 모듈을 공동개발하여, 모델주택에의 실증시험을 개시하였다. 태양전지는 실리콘 단결정 태양전지이다.

9.2.9. 엠에스 케이

미사와 홉과 주택용 태양광 발전 시스템을 공동개발하여 양산중으로, 양산으로 인한 원가 절감으로 시스템의 가격을 기존의 대기업 제품들보다 30% 인하하였다.

이밖에 휴대용의 비상전원 등의 응용제품을 개발, 판매하고 있다. 95년 6월의 매출은 약 130억원으로 잡고 있다.

9.2.10. 일본전지

4종류의 개인주택용 단결정 태양광 발전 시스템을 6월 31일부터 발매한다.

9.2.11. 환경청

일본 환경청의 외각단체인 환경정보 보급 센터는 일본에서의 태양광 발전 도입 가능성을 시산한 보고서를 정리하였다. 이 보고서에 의하면 잠재적으로 도입가능한 양은 현재의 화력발전 능력의 1.15배에 해당하는 1억 3천 4백만 킬로와트. 이 경우 지구 온난화의 원인인 이산화탄소의 배출을 약 10% 억제 가능하다고 한다.

시산에서는 공장이나 학교, 연립주택 등의 태양광 발전설비를 설치할 수 있는 건물 수를 계산, 가장 많이 도입되는 경우를 산정하였다. 1억 3천 4백만 kW의 내역은 주택용 건물이 9천 7백만 kW, 민간공장이 2천 3백만 kW, 병원을 포함한 업무용 건물이 8백 6십만 kW등. 동규모의 태양광 발전 설비가 도입되어 그 만큼 화력발전량이 감소하면, 90년 일본의 이산화탄소 배출량의 8.5%에 해당하는 연간 2천 7백만톤(탄소환산)의 배출 삭감이 이루어지는 것으로 되어 있다.

한편 환경청은 태양전지의 보급을 촉진하기 위하여 청량음료의 자판기에 설치하는 것을 고려중이며, 우선 센다이, 요코하마, 북큐슈시의 3개소에서 대규모 필드 테스트를 개시한다.

6, 7년 후를 목표로 전대수의 10%에 해당하는 19만3천대에 도입할 목표를 세우고 있으며, 자판기 제조업자 및 관련 기관들과도 합의를 마쳤다. 환경청은 청량음료의 자판기는 1. 태양광이 강할 때 소비전력도 증가한다 2. 1대당의 소비전력이 태양전지가 만드는 전력에 가깝다 3. 규격제품으로 한번에 대량 도입할 수 있는 점 등을 고려하여 태양전지의 이용에 착안하였다.

9.2.12. 히다찌

히다찌 제작소는 재해 시에도 전력과 물 등의 생명선을 확보하여 에너지를 완전 자립

할 수 있는 “주유소용 태양광 발전”이나 “학교용 태양광 발전 라이프 스포트” “비상용 확장실 급수”등 태양광 발전을 이용하여 방재 시스템의 제안영업을 시작한다.

9.2.13. 샤프

주택용 태양광 발전 시스템의 95년도 판매 목표인 1000 시스템의 설치를 거의 달성하였다. 작년도(1994)와 비교하면 대수비로 5배 정도, 판매비로 4배의 증가를 보였는데 금년도 대폭 신장의 요인으로서 1. 인공위성과 등대에 납품실적이 많아 회사의 지명도가 높은 점 2. 높은 변환효율과 함께 기능 면에서도 타사와 차별화가 가능했다. 3. 소비자들에게 질 좋은 정보를 제공하고 소비자들의 needs를 꼼꼼히 챙겼다는 것이다.

이 회사는 인공위성용을 위시하여 솔라카, 가정용 전원에 이르기까지 넓은 범위에서의 태양전지를 개발하여 상품화에 노력을 경주하고 있다. 납품실적은 인공위성 56기, 등대 608개소에 달하고 있다.

9.2.14. 에바라 제작소

청정에너지로서의 태양전지의 장래성에 착안하여 10여년 전부터 연구개발을 해오고 있으며 94년 2월에는 미국의 웨스팅하우스사에서 솔라 사업부문을 인수해 에바라 솔라로서 스타트하였다. 이 때까지의 우주개발에 많이 사용된 솔라시스템의 기술축적이 있는 웨스팅하우스의 기술을 그대로 인계한 것이 강점이다.

9.2.15. 쇼와셀석유

고효율 단결정모듈을 NEDO, 전력회사, 자치단체 등에 납품하여 품질이 좋다는 평가를 받고 있으며, 세계 최대의 태양전지 제조업체인 미국의 지멘스솔라와의 기술제휴 관계

를 유효하게 활용하면서 품질관리가 잘되는 국내공장에서 제조하는 이점이 있다. 또한 코스트다운을 목적으로 단결정전지의 고효율화, 대면적화, 박막화 등을 지향하는 한편, 차세대의 태양전지로 일컬어지는 CIS의 연구개발도 진행시키고 있다.

9.2.16. NTT

NTT는 멀티미디어 보급이 진전되면서 증가하는 전력수요의 반정도를 태양에너지로 채울 계획으로 전국에 산재해 있는 10여개의 NTT건물에 96년에 300 kW를 설치할 것이다. 이 계획이 성공하면 장래에 1500개소의 NTT시설에 태양광 발전 시스템을 설치하여 연간 10만 kWh의 전력을 보충해 나갈 것이다.

9.2.17. YKK

교세라와 공동개발하여 온 태양전지 모듈을, 빌딩오벽의 커튼 월에 조립한 “커튼 월 일체형 태양전지모듈”을 개발하여 실증시험에 들어갔다. 사용한 태양전지는 다결정 실리콘이다.

10. 결 론

21세기를 살아가는 인류에게 있어서 가장 중요한 문제는 어떻게 깨끗하고 공해없는 지구환경을 후세에게 물려주는가 하는 것이다. 인류가 살아가기 위해서는 에너지원이 필요하다. 그러나 현재까지 우리는 불행하게도 많은 공해와 환경과피를 유발시키는 화석연료를 주 에너지원으로 사용하고 있다. 이러한 문제를 해결할 수 있는 방법 중의 하나가 바로 무한한 청정에너지원인 태양광 발전이다. 이것은 우리 인류에게 적어도 앞으로 50

억년 이상은 무료로 에너지를 사용할 수 있게 해준다. 이러한 태양광 발전의 실용화는 이미 구미 선진국을 중심으로 현재 활발하게 전개되고 있다. 미국은 정부의 주도로 대규모 태양광 발전소를 계속적으로 증설하고 있으며, 전기자동차의 생산을 의무적으로 늘려나가는 법안을 통과시켜 이미 시행하고 있다. 산업체는 또한 새로운 공장과 생산량을 꾸준히 늘려가고 있다. 일본은 정부 주도로 개인주택용 태양광 발전 시스템의 설치비용을 50 % 무상지원해 주고 있으며 "Sunshine Project"라는 국가차원의 대규모 태양 에너지 개발 계획을 진행중에 있다. 이제, 우리나라도 태양광 발전이 더이상 남의 나라 이야기만은 아니다. 또다시 페르시아만의 긴장이 고조되고 또한 환경 오염이 날로 극심해져 가고 있는 현실에서 대체에너지 개발은 바로 우리나라의 생존을 위해서 절대적으로 필요한 것이다. 앞으로 대체에너지의 총아인 태양광발전의 개발이 정부나 산업체에서 더욱 활기를 띠고 이루어져야 하겠다.

참 고 문 헌

- [1] J. Zhao, A. Wang, P. Altermatt and M.A. Green, Applied Physics Letters 66(26) (1995) 3636.
- [2] L.D. Partain, Solar Cells and Their Applications (John Wiley Inc., 1995) p. 79.
- [3] H. Takakura et al., J. Appl. Phys. 31 (1992) 2394.
- [4] D.E. Carlson, IEEE Trans. on Electron Dev., ED-24 (1977) 449.
- [5] K.L. Chopra and S.R. Das, Thin Film Solar Cells (Plenum Press, 1983) p. 427.
- [6] J.S. Lee and H.B. Im, J. Electrochem. Soc. 134 (1987) 1790.
- [7] D.S. Kim and H.B. Im, Powder Metallurgy 35 (1992) 57.
- [8] J.L. Shay and S. Wagner, Appl. Phys. Lett. 25 (1974) 434.
- [9] K. Aweibel, H.S. Ullal and R.L. Mitchell, Processing of 21st IEEE Photovoltaic Specialist Conference (1990) p. 458.
- [10] R.M. Hord, Handbook of Space Technology Status and Projections, CRC Press, Boca Raton, FL, (1985) pp. 56-61.
- [11] Y. Kuwano and K. Sayama, Optoelectronics Devices and Technologies 9(4) (1994) 447.
- [12] Photovoltaic Insider's Report, February 1996.