尖端産業

未來의 代替 에너지源 - 太陽電池

任 縞 彬
〈韓國科學技術院教授・工博〉

1. 序 論

人類가 현재의 高度化된 物質文明을 이룩할 수 있었던 것은 에너지 資源의 활용에 있다고 해도 과언이 아니다. 이러한 에너지 資源의 활용은 앞으로도 모든 産業分野에서 그 規模가 肥大해짐에 따라 더욱 증가될 추세에 있다. 그러나 오래 전부터 사용해온 石炭이나 石油, 天然가스와 같은 화석연료는 그 매장량이 한정되어 있기 때문에 현재의 추세대로라면 向後 20년 내에 天然 에너지 資源의 고갈이라는 심각한 문제에 당면하게 될 것이며 또한 일부 에너지 資源의 地域的 偏在로 인한 政治的・社會的 不均衡으로 不安定한 에너지 資源의 需給 문제가 복합적으로 에너지 문제를 加重시키고 있다.

1973년 油類波動 이후 전세계는 이러한 에너지 문제를 해결하기 위해 代替 에너지 개발에 박차를 가하기 시작하였으며 이에 대한 硏究들이 꾸준히 지속되어 오고 있다. 연구되고 있는 여러가지 代替 에너지源 중에서도 태양 에너지가 전 세계적으로 각광을 받고 있는 것은 기존의 화석연료를 사용함에 따른 공해문제가 야기되지 않고 無料・無限定한 에너지源이기 때문이다. 태양 에너지 技術 중에서도 태양의 빛 에너지를 이용한 太陽電池의 개발은 태양 에너지를 직접 電氣로 변환시킬 수 있는 유일한 기술이라는 점에서 그 매력이 있다고 할 수 있다.

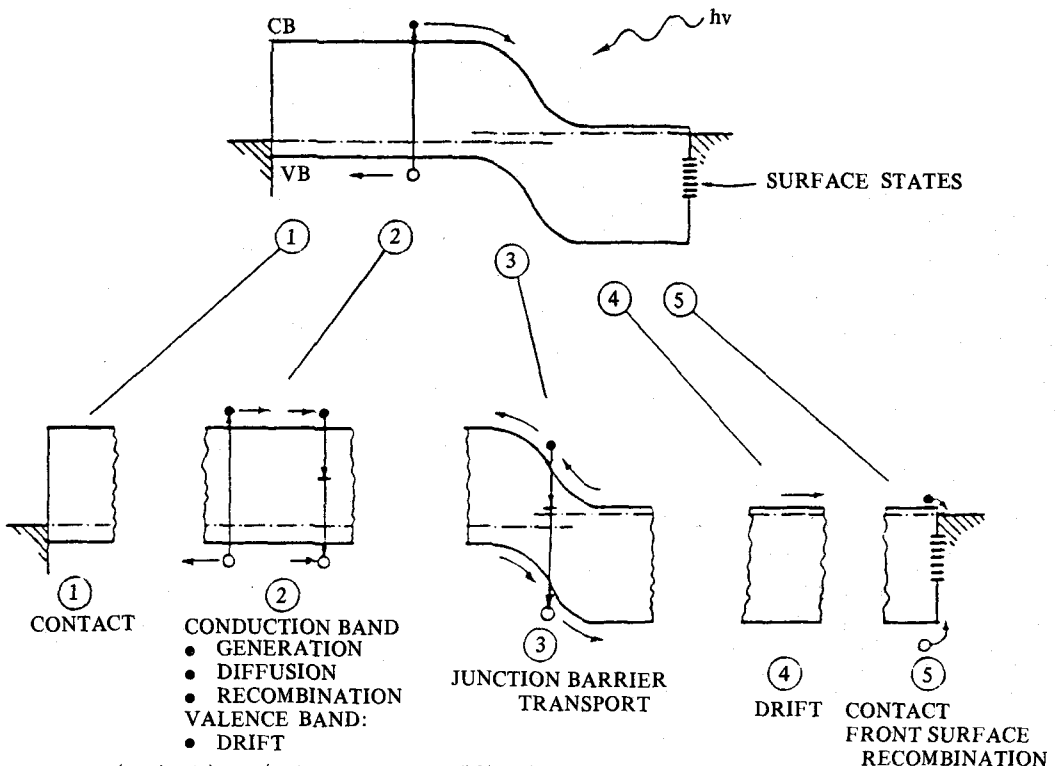
이러한 太陽電池를 이용한 太陽光發電 시스템은 연료가 필요없어 유지비가 들지 않으며 기계적인 부분이 없으므로 소음이 없을 뿐만 아니라 고장이 날 염려가 없고 공해 또한 일체 없다는 長點을 지니고 있다. 이러한 장점에도 불구하고 널리 보급되지 못하는 이유는 太陽電池의 가격이 비싸서 기존의 에너지源보다 經濟性이 떨어진다는 점이다. 따라서 현재는 代替 에너지源으로서 크게 이용되지 못하고 있으며 인공위성, 벽지의 무선 중계소 및 기상 관측소, 무인 등대 등 이른바 계통선을 연결할 수 없는 地域의 한정된 용도에만 사용되고 있다. 그러나 계속적인 기술개발 및 연구발전을 거듭하여 30년전 peak watt (Wp)당 제조단가가 $350이던 것이 1986년 최근엔 단결정 太陽電池의 가격이 $5/Wp 수준까지 낮아졌으며, 非晶質이나 多結晶 薄膜型 太陽電池를 이용한 低價格, 高效率의 太陽電池 개발이 이루어지고 있어 머지않아 代替 에너지源으로서 一翼을 담당하리라 믿어 의심치 않는다.

이런 의미에서 太陽電池의 原理 및 發達史와 연구되어온 太陽電池의 種類 및 材料 또한 産業的 이용현황과 앞으로의 展望 및 국내 硏究動向 등 尖端産業으로서의 太陽電池의 현주소를 約述코자 한다.

2. 太陽電池의 歷史 및 作動原理

1839년 E. Becquerel이 전해질 용액중의 전극이 태양광을 받으면 전기가 발생한다는 光氣電力效果(photovoltaic effect)를 처음으로 발견한 이후, 이로부터 38년 후에 Adam과 Day가 selenium에서 이와같은 效果를 관찰했다. 1900년대에 들어서서 Lange, Grondall, Schottky 와 같은 고체물리학을 하는 학자들에 의해서 selenium과 cuprous oxide를 이용한 photovoltaic cell이 연구되었으나 1954년에 이르러서야 Chapin, Fuller 및 Pearson 등에 의해 silicon 단결정을 이용한 6% 효율의 實用的인 太陽電池를 제조하여 太陽光發電의 章을 열었다. silicon 太陽電池는 곧 우주계획에 응용되어서 1958년에 인공위성 VANGUARD I에 장착하여 우주선용으로 처음 사용하게 되었다. 이후로 수많은 과학자들의 기술개발과 연구로 silicon단결정의 경우 변환효율이 15%에 이르렀고 우주선의 동력이 miliwatt에서 수십 kilowatt 로 증가했으며 인공위성의 생명도 불과 몇 개월이던 것이 수년으로 연장되기도 하였다. 실로 우주계획은 적절한 시기에 이러한 太陽電池의 개발이 없었다면 그 발전이 불가능했을 것이다. 1973년 油類波動 이후 太陽 에너지源을 이용한 代替 에너지 개발에 관심이 더욱 高潮되어 地上用으로 사용하기 위한 低價格, 高效率의 太陽電池 개발에 대한 연구가 현재까지 활발히 진행 중이다.

그러면 太陽電池는 어떻게 빛 에너지를 電氣에너지로 변환하는가. 그 作動原理에 대하여 간략히 살펴 보기로 한다. 太陽電池는 빛을 흡수하여 生成된 전자-정공 쌍을 分離시킬 수 있는 p-n 접합이나 Schottky 접합 및 분리된 電荷를 捕集하는 전극으로 構成된 소자이다. p-n 접합인 경우 빛 에너지를 전기 에너지로 변환하는 과정에는 다음과 같은 기본적인 단계가 있다. ① 光子(photon)가 흡수되어 p와 n형 半導體에서 전자-정공의 쌍이 生成된다. ② 접합부



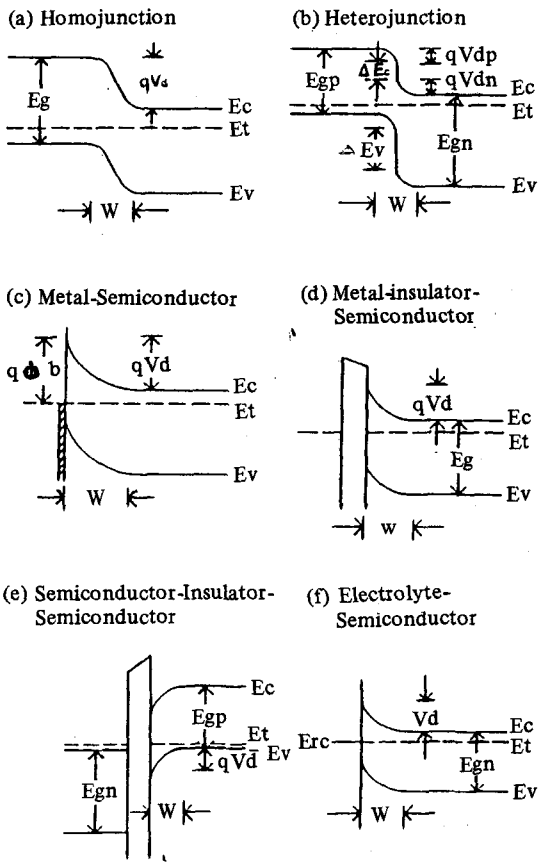
〈그림-1〉 **P/n homojunction** 태양전지에서 일어나는 기본 현상

(junction)로부터 확산거리 이내에 생성된 전자-정공의 쌍이 접합부 부근에 생성된 공간 전하 지역(*space-charge region*)에 도달된다. ③ 도달된 전자와 정공이 공간 전하 지역의 강한 電場에 의해 분리된다. 즉 p형 半導體에서 생성된 전자는 n쪽으로, 전자는 이와 반대로 移動하게 된다. ④ 만약 p-n diode가 개방되어 있으면 접합부를 중심으로 양쪽에 전자와 정공이 축적되어 개방전압(open-circuit voltage)을 만들며, 부하를 diode에 연결하면 전류가 회로를 통해 이동하게 되는데 이때 흐르는 최대전류를 단락전류(short-circuit current)라고 한다. 〈그림-1〉은 위의 과정 즉, 빛이 入射되었을 때 太陽電池에서 일어나는 현상을 도식화한 energy band diagram이다.

3. 太陽電池의 種類 및 材料

太陽電池를 제작하는데 사용되는 材料의 미세구조에 중점을 두었을 때 크게 세 가지로 分類하여 短結晶, 多結晶, 非晶質 太陽電池라 할 수 있다. 단결정은 주로 silicon이 사용되며 높은 효율을 낼 수 있는 반면에 제조방법에 따른 단가가 높기 때문에 비싸다는 단점을 갖고 있다. 다결정 태양전지는 주로 薄膜型으로 제작되며 단결정에 비하여 제조공정이 간편해 가격을 낮출 수 있어 경제성이 좋다. 박막형 태양전지는 evaporation, sputtering, ion-beam deposite, spray pyrolysis, screen printing 등의 제조방법을 사용한다. 이러한 다결정 박막형 태양전지는 가격이 저렴한 반면 단결정에 비하여 효율 및 내부결함에 따른 안정도가 떨어진다는 단점이 있다. 비정질 규소 태양전지는 그 제조가격이 다른 태양전지에 비해 저렴하며 이론적인 최대 효율은 15%로 알려져 있다. 전기적 거동이 단결정이나 다결정과는 다르기 때문에 많은 연구가 진행되어야 하며 효율의 증진과 안정도가 개선된다면 앞으로 가장 저렴한 태양전지로서 각광을 받을 것이다.

또다른 분류는 junction 형성 방법에 따라 다음의 6가지로 분류할 수 있다. 〈그림-2〉는 이



〈그림-2〉 **Junction 형태에 따른 energy-band diagram**

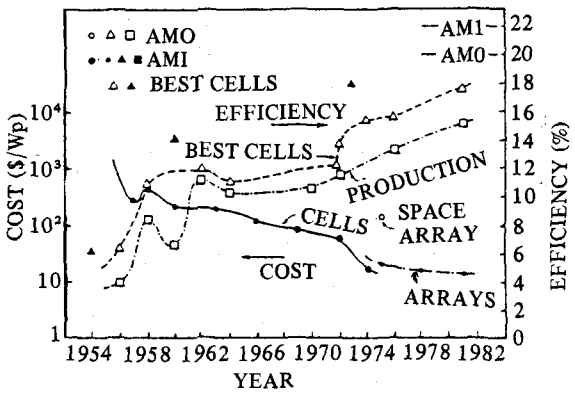
들의 energy band diagram을 나타낸 것이다. Homojunction은 같은 두개의 반도체 물질(예, Si)에 doping시켜서(예 B,P) n형과 p형 반도체를 형성시켜 접합한 것을 말한다. 만약 서로 다른 n형과 p형 반도체(예, CdS와 CdTe)로서 접합시켜 만들었다면 이것은 heterojunction이 된다. 〈그림-2〉(c)는 금속과 반도체간의 접합에 의해 형성된 전지를 나타내며 이것을 Schottky barrier 태양전지라고도 한다. 얇은 부도체 막을 금속과 반도체 사이에 넣어 접합, 형성시킨 metal-insulator-semiconductor 또는 MIS 구조가 있다. 여기서 부도체(대개 반도체의 산화물)의 역할은 출력전압을 상승시키는데 있다. 대개 부도체의 두께는 10~30 Å 정도이다. 이

MIS 구조에서 금속을 반도체(예, ITO)로 대체시킨 것이 semiconductor-insulator-semiconductor 또는 SIS 구조이다. 마지막으로 전해액을 반도체의 전극으로 사용하는 것을 광화학전지라고 하며 〈그림-2〉(f)에 나타냈다.

지상용 태양전지로서 많이 연구되고 있는 것은 silicon을 중심으로 한 homojunction형과 다결정 박막형의 heterojunction이 주종을 이루고 있으며 최근에 비정질 규소를 이용한 태양전지 개발에도 많은 연구가 이루어지고 있다. 따라서 이들을 중심으로 태양전지에 이용되는 재료와 이들 태양전지의 특성 및 연구동향을 살펴보겠다.

1) Silicon 태양전지

모든 반도체 재료들 중에서 그 성질이 가장 잘 알려진 재료 중의 하나이다. 1953년 Bell 연구소에서 Si 태양전지가 개발되면서부터 이미 미래의 수요를 추측케 했다. 그 당시 Chapin은 격리된 지역에서의 통신 시스템에 동력원으로 시험하였다. 또한 Pearson은 Li를 확산에 의해 doping시켜 태양광하에서 4%의 변환효율을 얻었는데 이는 Si 이전부터 사용해온 Se보다 약 5배에 해당하는 것이었다. 그러나 Li의 높은 확산도로 인해 제작된 전지의 안정도가 떨어지는 단점이 있었으며 1954년 Chapin 등은 boron을 첨가하여 6%의 안정도가 높은 Si 태양전지를 제작하는데 성공했다. 이후 기술의 발달로 Si 전지의 가격이 급격히 떨어졌으며(〈그림-3〉) 효율은 증가해서 우주선용 전지로서는



〈그림-3〉 단결정 Si의 효율 및 단가

15~17%의 수준까지 향상됐다.

2) GaAs-Based 태양전지

GaAs는 에너지 금지대 폭(energy band gap)이 1.43 eV로서 태양전지 이용에 적합하며 이론효율은 AMI(적도에서 맑은 날 정오에 비추는 햇빛의 세기)에서 26~29%에 이른다. 또한 직접천이형 에너지 금지대 폭과 광 흡수계수가 크기 때문에 2 μm 이내에 97%의 광자를 흡수하게 된다. 1962년 Gobat 등에 의해 발표된 GaAs p/n 태양전지는 효율이 11%에 달하였고 1970년 Alferov는 처음으로 p-AlGaAs/n-GaAs heterojunction으로 10~11%의 효율을 보고하였다. 효율에서 급격한 상승을 이룩한 것은 1972년에 Woodall과 Hovel이 LPE 방법으로 $P-Al_{0.7}Ga_{0.3}As/P-GaAs/n-GaAs$ 구조로 AMI에서 15.3%의 효율을 얻었다. 1978년 Fan과 Bozler는 $n^+/P/P^+$ homojunction GaAs를 보고하였는데 CVD 방법으로 P와 n^+층을 제작한 이 전지는 AMI에서 20%의 효율을 얻었으며 이밖에도 Hovel 등이 20%를 약간 상회하는 고효율의 태양전지를 보고하고 있다. 그러나 제조단가 및 재료가 비싸므로 일반 지상용으로 사용하기엔 어려우며 현재는 우주계획에 사용되고 있다.

3) Cu_xS/CdS 태양전지

1950년대 후반부터 연구되어 온 $P-Cu_xS/n-CdS$는 시스템의 복잡성에도 불구하고 공정이 비교적 간단해 제작단가가 낮고 넓은 면적에 적용될 수 있어 지상용으로 많이 연구되어 왔다. Cu_xS/CdS계의 복잡성은 다음과 같은 이유들이 있다. 첫째로, 두 물질이 서로 다른 전자 친화력, 결정구조, 에너지 금지대 폭을 갖고 있으므로 접합부에서 내부적인 복잡성을 갖게 된다. 둘째는, lattice mismatch와 성분들의 상호확산에 의해 접합부나 부근에 결함을 만들어 junction의 특성에 영향을 미치게 된다. 특히 Cu가 접합부 부근에 있는 CdS내로 확산하여 들어가게 되는데 Cu가 doping된 CdS층은 다양한 광전기적 효과를 가져오기 때문이다. 세째는, 상

온에서 다양한 Cu_xS 상이 존재하게 되는데 이들은 각기 다른 광전압 성질을 갖는다. 제작 도중 혹은 사용도중 한 相에서 다른 相으로 변하게 되는데 이것은 Cu가 CdS로 확산되어 들어가거나 대기환경과 반응해서 손실되기 때문이다. 이러한 어려움에도 불구하고 제작방법이 간단해서, 진공증착 등을 이용하여 CdS층을 만든 후 Cu 이온을 함유한 수용액에 침적시켜 Cu_xS층을 형성, 제작한다. 1980년 Bragagnolo 등이 Cu_xS/CdS 전지를 제작하여 9.1%의 효율을 보고한 바 있으며 1981년 Hall 등은 $Cu_xS/Zn_yCd_{5y}S$ 시스팀으로 10.2%의 효율을 얻었다.

4) 비정질 Si 태양전지

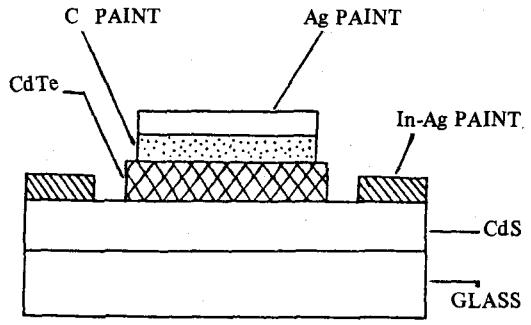
수소가 첨가된 비정질 규소(hydrogenated amorphous silicon)는 1969년 최초로 Chittick 등에 의해 연구되었으며 이들은 고주파 방전(rf electrodeless discharge)을 사용하여 약 1 Torr의 압력하에서 SiH_4 가스로부터 비정질 규소 박막을 제조하였다. 연구 결과 비정질 규소의 비저항은 기판온도에 따라 크게 달라지며 광전도도는 전자선증착법으로 제조된 비정질 규소의 경우보다 훨씬 크다는 것이 알려졌다. 그 이후 방전에 의해 제조되는 비정질 규소는 5~50 atomic%의 수소를 함유한다는 사실과 이러한 수소는 비정질 규소내의 dangling bonds에 결합하여 금지대내의 localized states를 감소시킨다는 것도 알려졌다. 따라서 이러한 비정질 규소의 금지대 상태밀도는 비교적 낮으며 PH_3나 B_2H_6와 같은 dopant로서 n형 혹은 p형으로 만들 수 있어 태양전지 재료로서의 인식을 새롭게 했다. 비정질 규소의 박막 제조에는 글로우 방전, 스퍼터링 및 전자선 증착법이 주로 이용되나 스퍼터링 및 전자선 증착법에 의하여 제조된 비정질 규소는 글로우 방전에 의해 제조된 것보다 많은 defect state를 포함하는 것으로 알려져 있다. 1977년 Carlson은 비정질 Si에 Pt로 Schottky barrier를 형성시켜 5.5%의 효율을 낸 바 있으며 1980년에는 p/i/n junction형으로 6.1%의 효율을 얻었다. 비정질 규소 태양전지의 제조가격은 다른 태양전지에 비해 저렴하기 때문에 효율의 개선만 뒤따른다면 좋은 경제성을 지닐 것으로 기대된다.

5) InP-Based 태양전지

InP는 재료가 비싸기 때문에 필요한 최소한의 두께로 제작해야 한다. InP는 광흡수계수가 커서 2 μm 이내에 대부분의 태양광을 흡수한다. 1976년 Bachmann과 1977년 Shay 등은 carbon 기판위에 다결정 InP를 증착시켜 박막 CdS/InP junction을 형성시켜 2.8%의 효율을 얻었다. 이러한 저효율은 InP와 carbon의 접촉 불량으로 이것을 개선하기 위해 25 μm 두께의 P^+-GaAs층을 carbon과 InP 사이에 형성시켜 5.7%의 효율을 얻었다. 이후에 InP 위에 CVD 방법으로 CdS를 입힌 단결정 InP/CdS 태양전지를 제작하여 15%의 효율을 얻었다.

6) CdTe-Based 태양전지

CdTe는 에너지 금지대 폭이 1.5 eV로서 태양광을 효과적으로 사용할 수 있는 최적 이론치에 해당하는 금지대 폭에 근접해 있다는 장점이 있어 광 흡수층 물질로서 적합하다. CdTe와 함께 광투과층 물질로서 heterojunction을 만드는데 적합한 것으로는 CdS/CdTe, ITO/CdTe, ZnO/CdTe가 연구되었다. 이중에서도 CdS/CdTe 이종 접합 태양전지는 Bonnet와 Rabinhorst에 의해 CVD 방법으로 제조되어 5~6%의 효율을 낸데 이어 1977년 Mitchell 등은 단결정 CdTe 위에 CdS를 증착시켜 8%의 효율을 얻었다. 다른 직접천이형 에너지 금지대 폭을 갖는 물질과 마찬가지로 경제성을 갖기 위해서는 CdTe와 CdS를 다결정 박막 형태로 제작할 필요가 있다. 이러한 다결정 박막형 CdS/CdTe 태양전지를 제조하는 방법에는 CVD나 CSVT(Tyan, 1980)과 screen-printing(Nakayama 등, 1976) 등이 있다. 이 가운데 screen-printing과 소결법에 의한 방법은 제조공정이 간단하고 쉽게 자동화할 수 있어 대량생산에 적합하며 제조과정 중 재료의 손실이 거의 없기 때문에 저가격 태양전지의 제조방법에 적합하다. screen-printing 방법은 먼저 CdS를 반



〈그림 - 4〉 **CdS/CdTe** 태양전지의 구조

죽상태(slurry)로 만들어 유리기판 위에 screen printing한 후 소결하여 CdS 박막을 제조하고, CdTe 반죽을 CdS 소결막 위에 도포한 후 소결하는 방법이다. 여기에 전극을 발라서 태양전지를 완성하게 되는데 그 구조를 〈그림-4〉에 나타냈다. 韓國科學技術院의 電子材料實驗室에서는 screen printing 방법을 이용하여 CdS/CdTe 태양전지 개발에 주력, 많은 논문을 발표한 바 있다. 연구결과 이 태양전지의 특성은 CdS층 및 CdTe층의 소결시, 소결 촉진제로 첨가하는 $CdCl_2$의 증발속도와 잔유량에 크게 지배됨을 알았으며 현재는 11.7%의 높은 효율을 얻었다.

4. 太陽電池의 産業的 利用

태양전지의 개발로 인하여 세계 각국에서는 이미 여러 분야에서 이용되고 있으며 앞으로도 계속 그 분야가 넓어질 것이다. 현재 태양전지가 이용되고 있는 분야와 앞으로 이용될 수 있는 분야에 대해 간략히 기술해 보고자 한다.

1) 현재 이용되는 분야

① 무인 등대나 航海燈
② 遠隔 항공기의 관제등
③ 인공위성의 동력원
④ 자동 기상 관측소나 지진계와 같은 격리된 지역의 기구에 이용
⑤ 격리된 지역의 T.V. 동력원
⑥ 원격 전기통신
⑦ 교통 통제 신호등
⑧ 각종 경보 시스템
⑨ 태양전지 트랜지스터 라디오, 포켓 계산기, 시계 등의 battery 대용
⑩ 격리 지역의 전력원이나 이동시의 전력원이 요구되는 군사용 목적
⑪ 灌漑 : 논이나 밭에 물을 대기 위해서 사용하는 펌프는 주로 낮에 이용되며, 따로 전기를 저장하는 축전기가 필요없어서 태양전지를 사용하면 매우 효과적이며 유용하다고 할 수 있다.
⑫ 지방 내지는 격리지역의 전력원

2) 앞으로 이용될 수 있는 분야

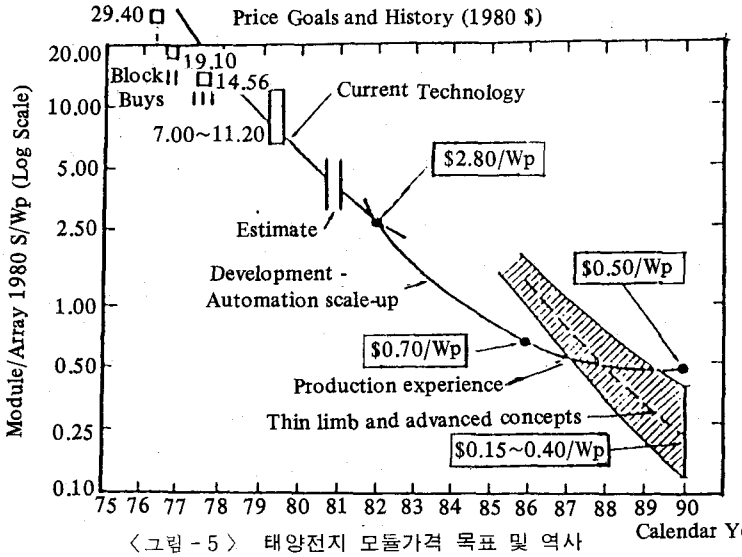
① **現地 발전**(On-site generation) : 미국 에너지성의 보고에 의하면 module 값을 $0.70/Wp 정도로 낮추면 현지 발전을 실현할 수 있는 경제성을 갖게 된다고 전망했다. 이렇게 되면 회사나 병원, 학교 또는 쇼핑센터, 공장 등에서 자가 발전 능력을 갖추어 동력을 얻을 수 있을 것으로 본다.

② **중앙 광전압 발전소**(Central photovoltaic power station) : 미국 에너지성의 보고에 의하면 모듈 가격이 $0.1~$0.3/Wp(1978 dollars) 수준이 된다면 경제성이 있다고 전망하고 있다.

③ **우주 태양 발전소** : 1973년 Glaser가 제안한 것으로서 지구 궤도에 인공위성을 올리는데 이 인공위성에 매우 넓은(수십km^2) 태양전지를 설치해서 24시간 언제나 1,350W/m^2의 태양광을 이용, 수천 megawatt에 해당하는 전력을 생산하여 이것을 microwave로 지상의 발전소로 보내게 된다. 지상에선 인공위성으로부터 받은 microwave energy를 다시 전기에너지로 바꾸는 시스템이다.

5. 産業的 展望 및 國內研究動向

앞서 記述한 바와 같이 태양전지의 이용도는 매우 다양하다고 할 수 있다. 현재로서는 제작단가가 비싸서 그 이용 범위에는 아직 한계가 있으나 계속적인 기술개발과 연구발전을 통해



〈그림-5〉 태양전지 모듈가격 목표 및 역사

저가격, 고효율의 태양전지 개발이 세계 각국에서 진행 중이다. 〈그림-5〉는 미국 에너지성이 세운 module 가격의 목표 및 역사를 나타낸 것이다. 1975년에는 module 가격이 $25~$90/Wp이던 것이 1980년 현재는 $7~$15/Wp로 떨어졌으며 1990년대에는 $1/Wp 이하로 낮아질 전망이다.

우리나라의 에너지 수요는 과거 10여년(1965~1977) 동안 연 평균 8.7%씩 증가하여 왔다. 또한 소득이 증가함에 따라 에너지 소비 패턴도 달라져서, 사용하기 편리하다는 이유로 전력수요가 늘고 있고 또 제조업부분에서 제품의 생산능력이 확대됨에 따라 전력소비가 더욱 심화되어, 전력수요의 성장률은 GNP 성장률과 총 에너지수요 성장률을 상회하고 있는 실정이다. 이러한 수요에 적절히 대처하기 위해서는 에너지 공급원을 다양화시켜야 하며 특히 연료를 필요로 하지 않는 태양광 발전 시스템은 매우 유망하리라 판단된다. 왜냐하면 기존의 디젤엔진 발전 시스템의 경우 연료비가 대부분을 차지하는 반면 시설비의 대부분을 차지하는 태양전지는 그 가격이 점차 하락하고 있기 때문이다. 이와 아울러 공해 및 환경 측면도 고려되어야 할 것이다. 우리나라에서도 10년전부터 등대용 전원을 비롯하여 通信中繼所, 無人觀測所, 島嶼用 電源 등으로 普及되어 왔으며 여러 대학 및 연구소에서 태양전지에 관한 연구가 수행되고 있다. 앞서 잠깐 記述한 바 있지만 韓國科學技術院의 電子材料實驗室에서는 저가격, 고효율의 태양전지 개발을 위해 박막형 CdS/CdTe 태양전지에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 효율도 10% 선을 상회하고 있으며 태양전지의 안정도 문제, 염가의 재료로서 부착력이 우수하며 지속성 있는 ohmic 전극개발 등 몇가지 문제점 등을 해결한다면 국내에서도 대량생산 체제에 들어갈 수 있으리라 판단된다.

6. 結 論

앞서 太陽電池의 전반적인 현황을 記述한 바 아직 국내에선 그 이용이 미미하나 태양전지의 수입량이 날로 증가하고 있다. 이에 따라 우리도 太陽光發電 시스템의 국내 實用化에 대비한 利用技術의 確立과 太陽電池의 國産化를 위한 技術開發을 加速化하여야 할 것이다. 따라서 우리나라에서도 태양광발전 사업을 효율적으로 추진해 나갈 필요가 있으며 이 사업이 長期 에너지 문제 解決에 必須的인 중요 과제임을 감안하여 國家事業으로 추진함이 바람직하며, 短期的인 안목에서보다는 장기적인 안목으로서 수행되도록 정책상의 지원이 요망되고, 특히 연구투자비를 선진국형으로 지향해야 할 것이다. ♣