綜 說
REVIEW

太陽에너지 活用 硏究

Ⅲ. 集光集熱器, 太陽熱發電 및 太陽光發電

朴 元 勳 · 李 時 雨 · 朴 源 熙

韓國科學技術硏究所

Solar Energy Utilization

Part III. Solar Concentrator, Solar Thermal Power Generation and Solar Photovoltaic Conversion

Won-Hoon Park, Shi-Woo Rhee, and Won-Hee Park

Korea Institute of Science and Technology, Seoul 132, *Korea.*

要 約

이번의 다지막 第Ⅲ部에서는 太陽熱의 中間溫度 및 高溫에서의 活用에 가장 기본적인 集光集熱器와 集光集熱의 原理를 응용한 太陽熱發電, 그리고 太陽電池를 이용하는 太陽光發電에 대하여 記述하고자 한다. 이 分野에서는 太陽熱의 大規模 工業的 活用이 效率的으로 가능하나, 技術的인 면에서 앞으로 해결되어야 할 難題가 많다. 硏究開發에도 막대한 투자를 필요로 하기 때문에 今世紀末에나 그 實用性이 立證될 것으로 보고 있다.

Abstract

In this last part of review series intermediate and high temperature applicatin of solar concentrator, solar thermal power generation, and solar photovoltaic conversion are described. At higher temperatures efficient and large-scale industrial utilization of solar energy are expected by generating electricity. However, since R&D works on these fields require large investment and highly advanced technology, economic and technical feasibility is not forseeable in the near future.

Ⅰ. 集光集熱器(Solar Concentrator)

太陽에너지의 集光式 集熱은 平板集熱의 한 특수한 예라고 볼 수도 있으며 단지 光學器機를 활용하여 太陽光線을 反射 또는 屈折시켜 集熱板에 吸收시켜 集熱度를 증가시키는 것이 다르다. 平板集熱에 비해 집열면적당 많은 熱이 모이므로 높은 온도를 얻을 수 있는 集光集熱의 利點은 오래전부터 알려져 있어서 1878年의 파리에서 있은 세계박람회에는 포물면경을 사용해 수증기를 발생시켜 蒸氣機關을 作動시키는 장치가 出品되기도 했다. 이후로도 集光集熱의 原理를 應用한 여러 형태의 장치가 기술적으로는 성공적으로 제작되었으나 集光을 위해서는 集熱裝置를 太陽의 移動을 追跡하여 움직여야만 하는 까다로운 短點 때문에 經濟性이 적어 이렇다 하게 實用化 된 예는 드물다. 太陽爐의 경우는 2,000°C 이상의 高溫을 주위 대기의 汚染이 없이 얻을 수 있어 科學技術 分野에 널리 응용되고 있다[CCI].

1. 集光 集熱의 特性

太陽熱의 集光集熱은 集熱板에 와 닿는 熱의 强度가 平板集熱보다 크므로 얻고자 하는 총 열량에 대한 集熱板 면적이 작아지고 여기에서 얻어지는 溫度는 높아진다. 集熱板의 面積이 작아지므로 熱損失이 줄어들고 集熱板을 斷熱하거나 표면 처리하는데 비용이 절감된다. 또한 平板集熱裝置보다 반사 혹은 굴절을 위한 光學器機가 단위 면적당 재료비가 적게 든다.

集光集熱에서는 熱媒體의 溫度가 높으므로 冷·暖房시 그 효율이 높고 蓄熱에 필요한 장치가 작아지며 發電을 할 수 있어 年中 熱의 이용율이 높다. 반면에 직사광선이 아니면 集熱하기 힘들어 간접적인 太陽輻射熱은 손실되며 직사광을 集熱板에 효율적으로 모으기 위해서는 반사 혹은 굴절면의 위치를 太陽의 이동을 따라 조정하거나 集熱부분을 이동시켜야 할 필요성이 있다.

실제로 太陽의 광선은 거의 평행이라 할 수 있으므로 集光集熱器의 방향을 太陽의 위치에 따라 변화시켜 가며 조업하여 높은 集光比의 太陽熱을 얻을 수 있으나 太陽의 위치변화를 정확히 따라갈 수 있는 方向調節機를 製作하는 것은 기술적으로나 경제적으로 쉽지 않은 문제이다. 또한 光學器機의 정상조업을 위해서는 먼지나 기상조건 때문에 종종 닦아주어야 하는 조업상의 문제점들이 있다.

아직까지 集光集熱器는 平板集熱器에 비해 운영 경험이 부족하고 기술적으로나 경제성에 있어서 뒤지고 있지만 平板集熱器의 한계를 넘어서 높은 溫度를 얻을 수 있으므로 앞으로 그 효용성이 增大될 것이다.

集光集熱器는 設計에 따라 얻을 수 있는 溫度를 調節할 수 있으며 높은 溫度를 얻으려 할수록 더욱 정밀한 光學器機를 製作해야 하므로 가격이 올라간다.

集光集熱裝置를 細分하여 說明하기 전에 이에 관계되는 용어를 간추리면 아래와 같다.

- 集光集熱器 : 太陽熱을 集光하여 吸熱器에서熱을 얻는 裝置 전체를 말한다(collector).
- 集光器 : 集光集熱器 중에서 太陽의 직사 광선을 받아 吸熱器에 보내 주는 반사 또는 굴절용의 光學器機(concentrator).
- 吸熱器 : 集光器에서 보내은 熱을 받아 吸收하는 부분(absorber).
- 方向調節機 : 太陽의 빛을 효과적으로 集熱하기 위해 集光集熱器의 일부 또는 전부를 太陽의 위치에 따라 이동시키는 裝置 (orienting system).
- 集光比 : 太陽熱이 集光된 정도, C (concentration ratio)

$$C=\frac{\text{集光器 入口의 면적}}{\text{吸熱器의 면적}}$$

- 許容角 : 集光集熱器의 전부 또는 일부를 움직이지 않고도 직사광선을 받아들일 수 있는 角

  θ_c (acceptance angle)

- 遮斷率 : 集光器에서 보내온 빛이 吸熱器에 의해 遮斷되는 정도(interception factor)

2. 焦點形集光集熱器(Focusing type concentrator)

일정한 촛점을 가진 集光集熱器로서 圓錐形과 圓筒形으로 구분할 수 있다.

2-1. 圓錐形集光集熱器(Point focusing type)

圓錐形의 集光集熱器는 x 軸, y 軸의 兩軸으로 방향 조절이 가능한 조절장치가 필요하므로 제작비가 많이 드나 集光比가 높아지므로 高溫을 얻도록 설계할 수 있다. 焦點에 최대한의 빛을 모을 수 있는 포물면경이 가장 보편적으로 사용된다.

가) 포물면경 집열기(paraboloidal collector)

포물면경 집열기의 槪略的인 構造는 그림 1과 같다.

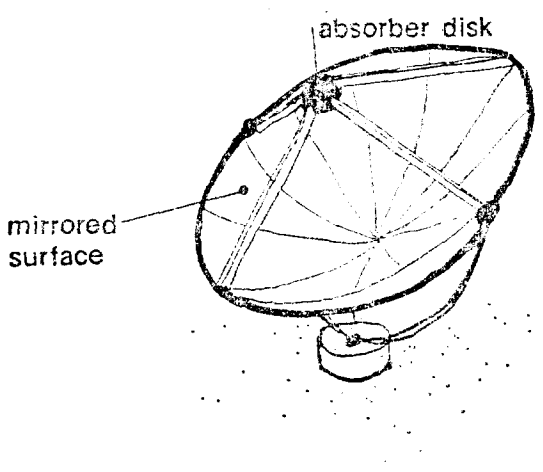

그림 1, 포물면경 集熱器[GR12]

포물면의 축에 평행하게 들어오는 빛은 모두 초점에 모이는 光學原理를 이용한 것으로 方向調節機를 써서 集熱器 전체를 太陽의 움직임을 따라 이동시켜 포물면경의 축을 태양빛과 평행하게 유지시켜야 효과적인 集光을 할 수 있다. 높은 集光比를 얻을 수 있으므로 高溫을 얻고자 할 때는 거의 이 형태를 택하게 된다. 이 集熱器에서 중요한 점은 완전한 포물면에서 벗어나는 실제 光學器機의 오차, 方向調節機의 오차, 반사면의 반사율, 반사경의 口徑과 초점에 있는 吸熱器의 모양과 크기, 초점에서의 에너지 분포와 차단율 등을 복합해 裝置를 最適化 하는 데 있다.

반사면의 光學的인 정확도와 초점에 있어서의 에너지 분포, 吸熱器의 最適値와 효율등은 Liu와 Jordan[CC2]에 의해 연구되었고 반사경의 口徑과 吸熱器의 口徑의 比에 대한 차단율의 관계, 이들의 最適化에 관해서는 Lŏf와 Duffie[CC3]에 의해 연구되었다. 또한 經濟性의 검토로서 재료비 유지비 등 기타 여러 가격이 集熱器의 가격에 미치는 영향이 Shaner와 Wilson[CC4]에 의해 수행되었다.

포물면경의 응용에는 여러가지가 있는데 동일한 점에 빛을 모으는 여러 포물면경의 조합으로 이루어진 集熱器[CC5], 운반하기에 편한 우산형, 꽃잎형 등이 있다[CC2]. 여기에서 얻어지는 熱은 直接 住居의 冷·暖房으로 쓰이기도 하고 수증기를 만들어 發電을 할 수도 있다.

나) Solar tower

포물면경은 실제 평면경보다 제작하기 힘들 뿐 아니라 그 크기에도 제약을 받는다. 이러한 결점을 극복해 많은 양의 에너지를 얻을 수 있는 것이 Solar tower이다(그림 2).

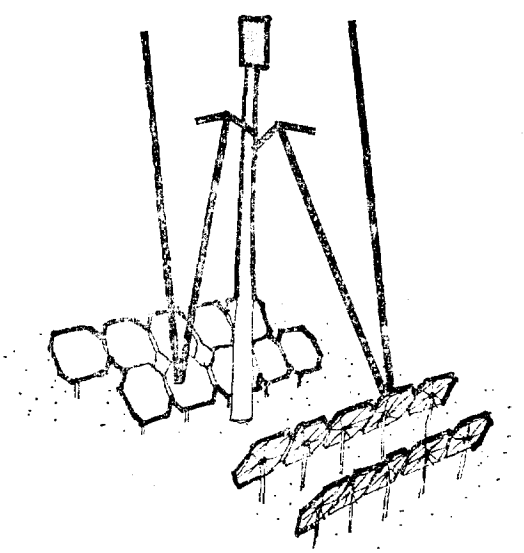

그림 2. Solar tower[GR12]

이것은 地面에 여러개의 평면경을 놓아 太陽의 빛을 반사시켜 중앙에 설치된 塔의 꼭대기에 있는 吸熱器에 集光시키는 것이다. 이때 얻으려고 하는 에너지는 塔 높이의 제곱에 비례하고 거울을 배열하는 地面의 직경은 塔 높이의 3~5배가 한계이다. 각각의 평면경은 太陽의 빛을 중앙의 탑 꼭대기에 있는 吸熱器에 보내기 위해 太陽의 위치에 따라 움직여야 하므로 하나 하나가 자동조절이 되어야 한다. Hildebrandt[CC6] 등은 塔의 높이와 얻을 수 있는 에너지와의 관계, 이 에너지를 電氣로 변환시키는 문제, solar tower의 經濟性 등에 관해 검토하였다. 실제로 發電所 하나를 지을만한 에너지를 얻으려면 200~600m의 塔을 설치해야 하며 막대한 설비투자를 필요로 한다. Vant-Hull과 Hildebrandt는[CC7] 塔의 높이에 대한 거울을 배치할 지면의 면적, 거울면의 각이 集光比에 미치는 영향, 地面에서의 塔의 위치와 거울의 배치 등에 관해 연구하였다. Sobin과 Wagner는[CC8] 塔 꼭대기에 설치할 集熱器의 設計와 熱效率이 높고 가벼운 보일러의 設計에 관해 발표하였다.

2-2. 圓筒形集光集熱器(Line focusing type)

太陽이 비치는 낮동안 集熱器를 太陽을 따라 움직여야 하는 문제점을 없애고 계절에 따르는 太陽의 高度 변화에 대해서만 조절하도록 고안된 것이 圓筒形集光集熱器이다. 반면에 集光比는 圓錐形보다는 작아진다.

가) 포물면경 집열기

圓筒形 포물면경 집열기의 모양은 그림 3과 같다.

吸熱器는 촛점에 놓여져 있는 파이프로서 東西로 향하고 太陽빛을 받는 입구는 계절에 따르는 高度의 변화에 따라 일주일 혹은 1년에 몇번 정도 그 위치를 조절한다.

Tabor는[CC9,17] 이러한 集熱器를 낮동안 太陽을 따라 움직일 필요가 없을 정도의 許容角으로 설계할 때 그 集光比가 3 정도를 넘지 못함을 밝혔다.

Lōf와 Duffie는[CC3] 앞서 언급한 圓錐形 포물면경의 最適化와 함께 圓筒形 포물면경의 最適化에 관한 연구도 하였다.

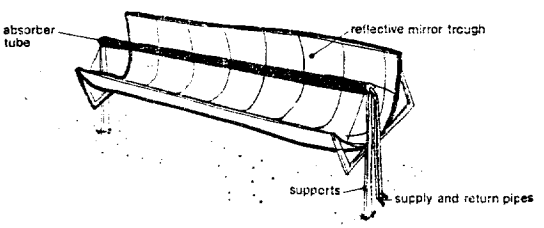

그림 3. 원통형 포물면경 집열기[GR12]

또한 Lōf[CC10] 등은 圓筒形 포물면경 集熱器에 대한 熱收支式과 여러가지 實驗結果로 부터 太陽熱輻射量과 集熱器의 溫度, 大氣溫度, 風速 등에 따르는 集熱器의 效率, 吸熱器의 半徑에 대한 效率 등을 구해 理論値와 비교하였다.

Singh와 Chema는[CC11] 圓筒形 포물면경의 吸熱器의 모양이 平面일 때, 圓筒形일 때 등의 集光比를 理論的으로 구하였다.

나) Fresnel lens 集熱器

빛의 굴절을 이용해 集光하는 것으로 그 槪略的인 모양은 그림 4와 같다.

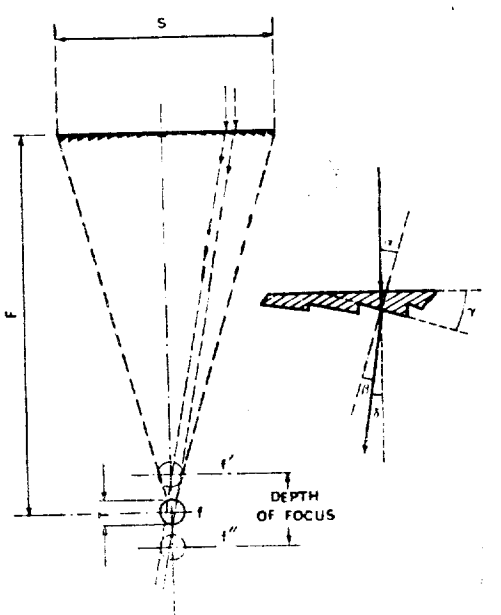

그림 4. Fresnel lens concentrator

투명한 플라스틱을 사용하여 햇빛을 받는 面은 평면으로 하고 뒷면은 톱니 모양으로 成型하여 투과된 빛을 굴절시켜 吸熱器에 모으는 것이다. 플라스틱 판으로 제작할 경우는 싼값으로 大量生産이 가능하고 운반 및 설치가 간단하다는 장점이 있다. 이를 이용한 集熱器의 集光比, 效率에 대한 연구가 Szulmayer[CC12]에 의해 행하여졌고 Nelson[CC13]에 의해 이 裝置의 設計, 吸熱器의 크기와 위치에 대한 集光比, 太陽의 각도에 대한 集光比 등이 연구되었다.

3. 非焦點形集光集熱器 (Non-focusing type concentrator)

3-1. SRTA (Stationary reflector/Tracking absorber)

集光集熱器는 대부분이 직사광선의 集光이 잘되기 위하여 太陽의 위치에 따라 방향조절이 필요한데 集熱器 전체를 움직이기 보다는 크기가 작은 吸熱器만을 움직여 集光하는 것이 바로 SRTA의 특징이다.

가) 球面鏡 (Spherical mirror)

球面의 거울은 太陽의 빛을 光線에 평행한 선에 모은다는 원리를 이용한 것으로 거울을 고정시켜 놓고 球의 중심에 회전축을 놓은 다음 圓筒形의 吸熱器를 회전축에 달아 球面위에 놓는다. 그 形態와 조업 원리는 그림 5와 같다.

회전축을 돌려 吸熱器를 太陽빛에 평행하게 놓으면 球面에서 반사되는 빛을 모을 수 있다. 이 개념은 Steward[CC14]에 의해 特許가 출원 중이며 이 裝置에 대한 設計 및 暖房에의 응용, 集熱效率, 經濟性에 관한 說明은 문헌 (GR6)를 참조하기 바란다.

나) Faceted fiixed mirror concentrator (FFMC)

이 裝置의 단면도와 위에서 본 槪略的인 모양은 그림 6과 같다.

폭이 좁고 길다란 띠 모양의 평면경을 아래로 볼록한 원통면에 배열하며 吸熱器는 원의 중심인 x축을 회전축으로 하여 원주 위를 돌게 하고 東西方向으로 놓는다. y축 면은 그 지역의 緯度

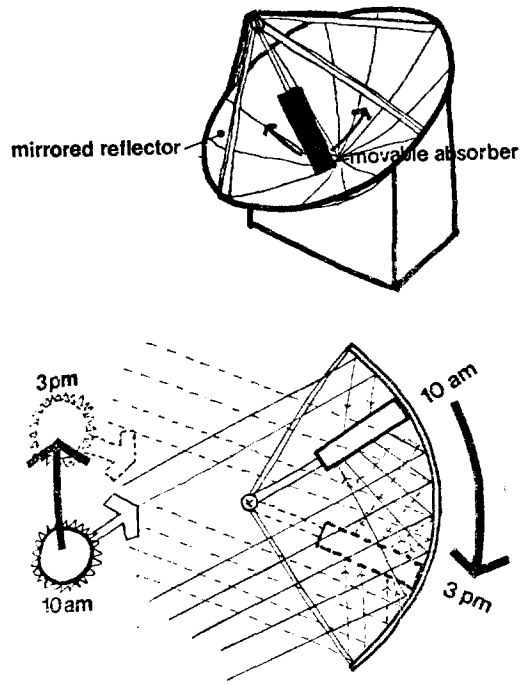

그림 5. 球形 SRTA concentrator 와 조업원리[GR12]

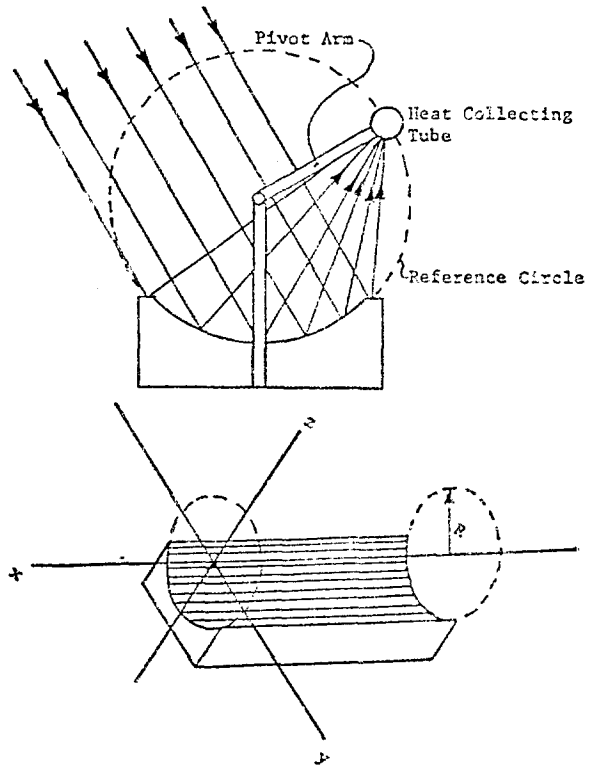

그림 6. Faceted fixed mirror concentrator

만큼 地面으로 부터 경사지게 놓는다. 거울면에 들어오는 빛은 太陽의 위치에 따라 R을 반경으로 하는 圓周위에 모이게 되는데 吸熱器의 위치를 圓周를 따라 변화시키며 모아진 빛을 吸收한다. 이 集熱器에 대한 裝置 및 操業에 관한 資料는 문헌(CC15, 16)을 참조하기 바란다.

3-2. V-trough

槪略的인 構造는 그림 7과 같다.

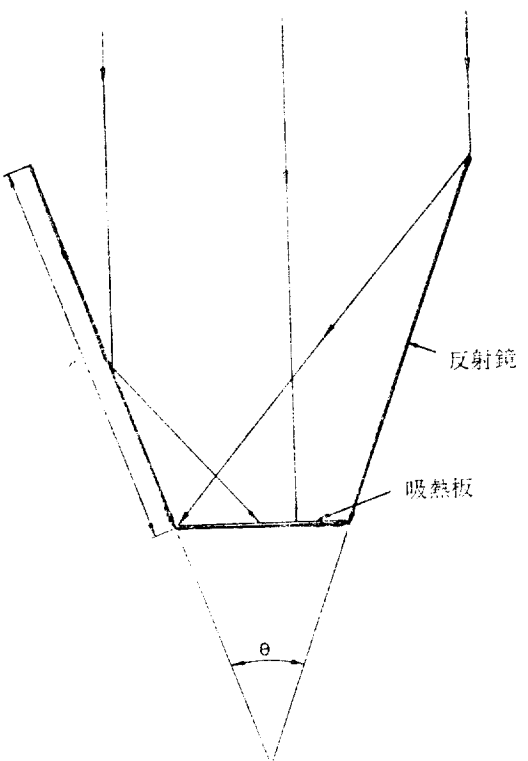

그림 7. V-trcugh concentrator

사다리꼴 모양의 단면에서 양쪽 측면이 반사경이 되고 밑면이 吸熱板이 된다. 축은 역시 東西方向으로 놓고 太陽의 高度에 따라 경사각을 조절한다. 平面鏡으로 조립할 수 있어 비교적 製作이 용이하나 2~3 정도의 集光比 이상은 얻기 힘들다. Hollands[CC18]는 이 裝置의 측면 반사경의 반사율과 투시각에 대한 集光比의 年平均値, 확산된 빛에 대한 集光比 등을 구하였다.

Bannerot와 Howell[CC19]은 이 裝置에서 사다리꼴의 높이와 吸熱板의 폭의 比에 대한 太陽熱 吸收率, 集光比의 관계를 구하였고, 사다리꼴 옆면의 연장선이 만나 이루는 각 θ에 대한 集光比의 변화와 이들의 最適化에 대한 연구를 하였다.

3-3. Compound parabolic concentrator (CPC)

Winston[CC20]에 의해 製作된 이 光學器機는 그림 8과 같다.

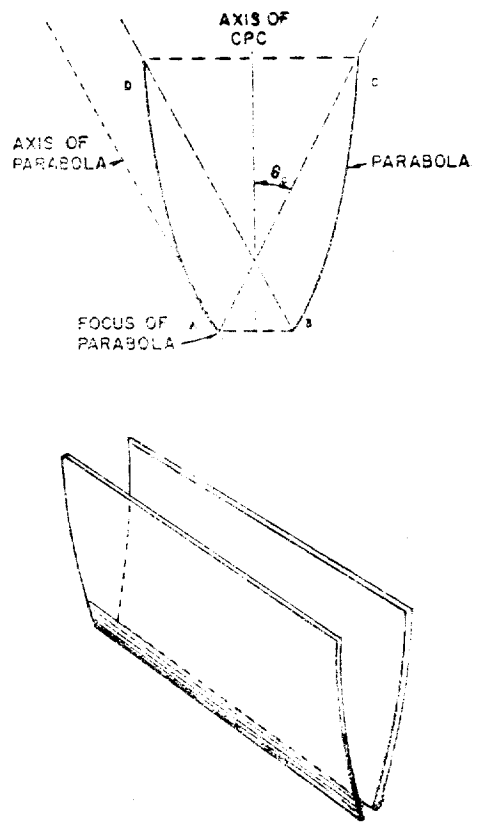

그림 8. Compound paraboljc concentrator (CPC)

두개의 포물면경을 서로 마주보게 한 것으로 그림 8에 圖示된 斷面圖를 보면 A點이 포물면경 BC의 촛점이 되고 B點이 포물면경 AD의 촛점이 되게끔 배열하였다. A點을 지나 BD방향으로 이어진 點線은 BC 포물면경의 軸이 된다. 일정한 許容角(θ_c) 안으로 들어오는 빛은 한번의 反射로 두 포물면경의 끝점을 잇는 AB線上에 모이게 된다.

이 集光器는 비슷한 形態인 圓筒形 포물면경 集

光器보다 2~4배의 集光比를 얻을 수 있으나 상대적으로 反射鏡의 面積이 넓어지므로 製作費가 많이 든다. 이 裝置를 이용한 集光集熱器의 製作이 Winston[CC21]에 의해 연구되었으며 許容角과 反射面의 넓이 및 球徑이 集光比에 미치는 영향, 吸熱器의 변형 등이 Rabl[CC22]에 의해 硏究되었다. 또한 Winston[CC23]은 이러한 集熱器에서 여러 모양의 吸熱器를 사용할 경우 集光比에 미치는 영향을 연구하였다.

이제까지 소개한 集光熱器 외에도 여러 가지 특수한 形態가 많이 있으며 Duff[CC24] 등은 여러 변수에 대한 集光熱器의 操業狀態와 가격 모델을 세워 經濟性 검토를 하였으나 어떤 結論을 내리기에는 미흡한 상태이고 앞으로 좀 더 많은 操業經驗과 기술 개발이 필요하다.

Ⅱ. 太陽熱發電 (Solar Thermal Power Generation)

太陽에너지는 熱機關을 利用하여 機械的인 에너지로 전환이 가능하며 이로부터 펌프를 作動시켜 물을 끌어 올린다든가 發電機를 돌려 電氣를 얻는 등 여러가지로 活用할 수 있다. 이 때 熱媒體가 되는 물질에 따라 그 作動溫度가 달라지는데 水蒸氣, 空氣 등은 그 作動溫度가 높아 集光集熱器를 사용해야 하고 프레온(freon) 같은 熱媒體는 平板集熱器에서 얻는 溫度로도 作動이 가능하다.

Jordan[TP1]은 太陽熱을 機械的인 에너지로 바꾸려는 이제까지의 硏究를 요약 하였으며, Hottel[TP2]은 平板集熱器를 이용하여 30~150°C에서 作動하는 熱機關에 대한 硏究를 수행하였고 Masson[TP3] 등도 이에 대한 實驗을 하였다.

美國의 NSF(National Science Foundation)의 RANN 개획에 의해 太陽熱로부터 動力을 얻는 것에 대한 새로운 實驗들이 수행되었는데 그 예로 콜로라도大學[TP4]에서는 平板集熱器와 集光集熱器를 이용한 熱機關에 대한 일반적인 硏究를 수행하였으며 미네소타大學[TP5]에서는 圓筒形포물면경을 이용한 熱機關의 기술적인 문제에 대해 연구하였다. 플로리다大學[TP6]에서는 총괄적인 太陽에너지 개발에 대한 硏究의 일환으로 蒸氣機關, 空氣를 利用한 熱機關, 펌프, 터빈 등에 대한 硏究를 하고 있다.

1. 太陽熱發電시스템

太陽熱發電 시스템은 크게 나누어 集光系, 吸熱系, 蓄熱系 및 發電系로 나눌 수 있다.

1-1. 集光系

集光系는 吸熱系에서 高溫을 얻을 수 있도록 빛을 모아 주는 것으로 규모가 큰 集光器를 使用한다. 애리조나 대학에서는 수천개의 圓筒形포물면경으로 된 集光系를 구상하고 있으며 이외에도 커다란 圓錐形포물면경 solar tower 등이 이용된다.

1-2. 吸熱系

吸熱系는 들어오는 빛은 투과시키고 吸熱面에서 발산되는 熱은 투과시키지 않는 선택 투과막과 吸熱面, 吸熱된 熱을 전달하는 熱媒體로 이루어진다.

吸熱系의 溫度가 높기 대문에 투과막과 吸熱面의 材質선택이 중요하며 이에 대한 기초 硏究가 미네소타大學의 R. C. Jordan, 아리조나大學의 A. B. Meinel 등에 의해 수행되고 있다. 熱媒體로는 空氣, 물 등이 쓰이며 액체 금속으로 Na·NaK 등이 쓰인다.

1-3. 蓄熱系

太陽熱은 그 强度가 時間에 따라 달라지고 氣象조건에 따라 변하므로 밤이나 흐린 날씨에 계속적으로 利用하기 위해서는 太陽輻射熱이 많을 때 蓄熱하는 裝置가 필요하다. 蓄熱裝置는 容量이 큰 斷熱容器와 蓄熱媒體로 이루어져 있는데 蓄熱媒體는 比熱과 融解熱이 커야 하고 사용 온도에 적당한 融點을 가져야 한다. 이에 대한 硏究가 美國의 Georgia Tech에서 수행되고 있는데[TP9] hydrocarbon oil의 경우 300°C에서 蓄熱할 수 있고 無機鹽의 共融化合物은 450°C 정도에서 蓄熱할 수 있으며 蓄熱하는 溫度는 發電系

에서 쓰는 조건에 따라 정해진다. Georgia Tech에서 계획하고 있는 畜熱系는 400°C, 600psi의 水蒸氣를 발생시킬 수 있다.

畜熱媒體로 쓰이는 여러 共融鹽의 融點과 融解熱, 가격 등은 문헌(TP7)에 나와 있다.

1-4. 發電系

吸熱系 및 畜熱系에서 얻어진 熱은 作動流體에 공급되어 發電系에서 發電을 하게 된다. 가장 많이 쓰이는 것이 수증기 터어빈으로써 吸熱系에서의 熱媒體가 물이어서 직접 공급되거나 혹은 다른 熱媒體로부터 열을 받아 공급된다.

Georgia Tech에서는 EPRI (Electric Power Research Institute)의 지원으로 제트엔진과 같은 원리로 空氣를 熱媒體로 하는 Brayton cycle에 의한 가스 터어빈에 관해 研究하고 있다[TP9]. 가스 터어빈의 長點은 가격이 저렴하고 冷却시스템이 필요없으며 熱效率이 높다는 것인데 비해 短點은 流體의 溫度가 1,000°C 이상이어야 하기 때문에 吸熱器 부분을 窯業材料로 만들어야 하며 이로 인해 製作이 힘들다는 것이다.

또한 휴스톤 大學의 Hildebrandt[CC6]는 solar tower 太陽熱發電에 대한 그의 研究에서 電磁流體發電(MHD: Magneto hydro dynamics) 方法을 제안하였다. 이 MHD 方式은 熱에너지로 流體를 高溫으로 가열해 자유 전자를 방출하게 하고 磁場을 걸어줌으로써 電氣를 얻는 方法인데 터어빈과 같은 회전부분이 필요없고 2,000°K정도에서 作動하므로 效率이 50% 정도이며 어떤 發電시스템보다 가볍게 만들 수 있다는 장점이 있으나 아직까지는 기술적으로 解決해야 할 문제점들이 있다.

2. 太陽熱發電의 實例

2-1. Francia의 模型 發電所[TP8]

이는 NATO의 후원으로 이태리 제노아大學에서 實驗에 성공한 것으로 圓錐形포물면경을 몇십개 배열한 시스템이며 그 모양은 그림 9와 같다.

이 시스템은 150기압, 600°C의 水蒸氣를 發生시켜 100kW의 動力을 얻었다.

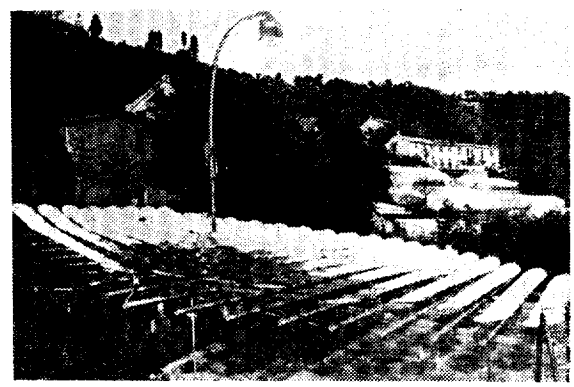

그림 9. Francia의 模型 發電所

주요 研究結果는 吸熱裝置를 honeycomb形의 anti-radiating 구조로 設計했다는 것과 效率과 한계온도를 吸熱裝置의 높이와 크기의 함수로 實驗資料를 얻었다는 것이다. 이 模型 太陽發電所는 반사경, 보일러, thermic fly-wheel, 기타 보조장치로 구성되어 있으며 建設費는 1968年 가격으로 $15~30/m^{2}로 되어 있다. 이상의 Francia 교수의 研究結果로 St. Ilario of Narvi에 太陽熱發電所가 建設되었는데 200m^{2}의 面積에 271개의 kinematic motion[TP8]으로 움직여지고 있다.

美國의 Georgia Tech에서는 ERDA의 후원으로 이 Francia의 模型을 그대로 본떠 400kW 규모의 실험 시설을 대학 구내에 $475,000의 建設費로 설치중이며 建設費의 약 절반에 해당하는 금액이 이태리에서 부품을 구입하는데 소요된다고 알려져 있다.

프랑스의 마르세이유大學에서도 프랑스 국립중앙과학기술연구소(CNRS)와 NATO의 후원으로 圓筒形 포물면경을 이용한 수증기 발생장치를 시험한 바 있다[TP8].

2-2. ERDA의 개발 계획

美國의 경우 20~30年 후 太陽熱發電 시스템을 완성한다는 목표로 1974年에 시작하여 연구계획의 작성에 1年, 기초 연구 3년을 거쳐 77年에는 1만kW의 太陽熱發電에 대한 設計를 마무리 짓고 곧 建設에 착수 1980年에는 이를 챳

가동시킨다는 계획을 세우고 있다.

이것이 성공하게 되면 이를 기초로 5만kW의 中型 發電所를 建設하고 이어 10~30만kW의 發電所를 계속 建設하여 2000年代에는 4千萬kW의 電力을 太陽으로부터 얻는다는 계획을 세우고 있다. 現在 美國에너지 研究開發廳(ERDA)이 지원하고 있는 1萬kW 규모의 太陽熱發電 시범 공장의 建設은 다음의 네 研究팀에 의해 동시에 독자적으로 추진되어 그 가능성을 서로 비교 검토하고 있는데 최종적인 結論은 이들의 研究結果의 종합으로 나타날 것으로 보인다.

1) Martin Marietta, Foster-Wheeler, Betchel, Georgia Tech
2) Honeywell, Black & Veatch, Babcock & Wiecox
3) McDonnell-Douglas, Rocketdyne, Sheldahl, Univ. of Houston
4) Boeing (mirror subsystem only)

이상의 發電原理는 Rankine cycle을 이용한 것으로서 Martin Marietta 팀에 의해 설계된 것을 대표적으로 소개하면 그림 10과 같다.

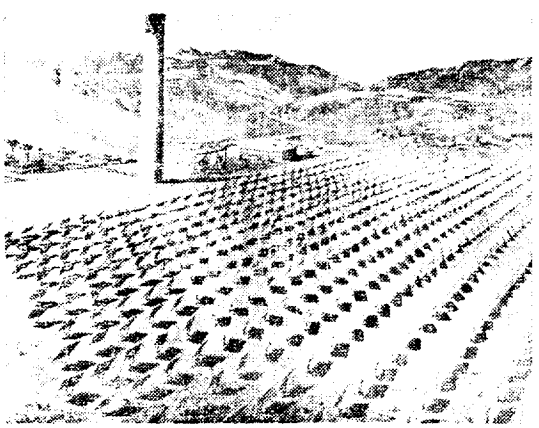

그림 10. Martin marietta의 太陽熱 發電所

設計內容을 알아보면 solar tower의 높이는 100m이며 6×7m 크기의 平面鏡 1,665개가 탑의 북쪽에 배치되어 있고 한 개의 平面鏡은 1.22×1.22m 크기의 작은 反射鏡 25개 또는 2.03×2.03m 크기 9개가 조립되어 있다. 畜熱容量은 6시간분에 해당된다. 각 平面鏡은 太陽빛을 反射시켜 탑 꼭대기의 吸熱器에 보낸다.

이들의 계산에 의하면 10만kW 규모의 太陽熱發電所 建設에는 위의 1,665개의 heliostat로 된 module이 14개 필요하고 反射鏡이 배치될 地面은 사방 2.5km가 필요하다고 한다.

ERDA는 New Mexico주에 5,000kW 규모의 시험 발전소를 동시에 建設하여 太陽熱發電 기술개발 사항을 시험할 수 있도록 하고 있어 前述한 4개의 프로젝트의 研究結果를 여기서 시험한 후 最適시스템을 선정할 계획으로 있다.

2-3. 오데이요의 太陽爐

프랑스 국립중앙과학연구소(CNRS)에서 피레네 산맥의 오데이요에 세운 太陽爐는 그림 11과 같다.

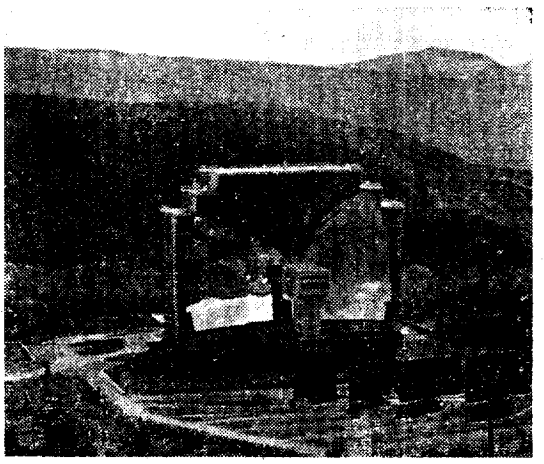

그림 11. 오데이요의 1,000kW 태양로

빛을 모으는 부분은 높이 40m, 폭 54m의 건물에 45×45cm 크기의 平面鏡 9,500개 붙여 만든 촛점거리 17.7m의 포물면경이다. 太陽빛을 한점에 모으기 위해서는 항상 이 포물면경의 축에 평행하게 빛을 보내야 하는데 이것은 포물면경의 정면에 높이 6×7m의 平面鏡 63개를 8층으로 층층이 세워 太陽의 위치에 따라 平面鏡의 각도를 컴퓨어터로 자동 조절하므로써 이루어진다.

하나의 平面鏡은 50×50cm의 작은 平面鏡으로 조립되어 있다. 포물면경에 도달하는 빛은

17.7m의 촛점거리에 세워진 27m의 建物 꼭대기에 직경 60cm 정도의 圓形으로 맺혀지게 된다. 최고 3,000°C까지의 溫度를 얻을 수 있으며 여러 종류의 材料시험에 이용되고 있다. 美國의 Georgia Tech에서는 CNRS와의 협력으로 이 시스템을 이용하여 강한 熱흐름에서의 레이다 투과 성능과 熱遮斷材料 등의 硏究로 國防 및 宇宙開發분야에 공헌하고 있다.

최근에 보도된 바에 의하면 프랑스는 이 太陽爐를 利用해 發電에 성공하였으며 太陽熱이 풍부한 中東 지방에 기술제공을 고려하고 있다고 한다.

2-4. 기 타

이외에도 소련에서는 1955年 아루메니아의 아라라트 평원에 出力 2千kW의 太陽熱 보일러發電所 建設 계획이 발표되었다. 그 방법은 1,293개의 反射鏡을 23개의 레일로 이동시키며 중앙 보일러에 太陽熱을 集熱해 400°C의 水蒸氣를 시간당 130톤 發生시킬 계획인데 그 완성 여부는 아직 발표된 바 없으나 大容量의 太陽熱 發電所를 구상하고 있는 것은 틀림이 없다.

日本도 선샤인 계획의 일환으로 1977年까지 1천kW, 80年까지 1만kW, 85年까지 10만kW, 2000年代에는 100~200만 kW의 太陽熱 發電所를 建設할 계획으로 있다[TP7].

Ⅲ. 太陽光發電(Solar Photovoltaic Power Generation)

太陽에너지로부터 電氣를 얻는 方法에는 太陽熱發電 이외에 太陽電池를 이용하여 太陽光으로부터 직접 電氣를 얻는 방법이 있다. 太陽電池는 보통 얇은 막의 半導體로서 太陽光線을 直流로 바꾸는데 그 效率은 3~30%로서 太陽電池의 材質과 溫度, 太陽電池의 設計 및 太陽光의 强度에 좌우된다.

하나의 太陽電池는 0.5V 정도의 低電壓電池라 볼 수 있으며 그 충전량은 太陽光의 세기에 비례하여 계속 보충된다. 이러한 太陽電池의 直列 또는 並列 연결로 太陽電池板을 設計하여 높은 電壓과 電流를 얻을 수 있어 太陽光發電所를 建設할 수 있다.

이러한 光發電 시스템은 연료가 필요없게 되고 機械的인 부분이 없어 소음이 없기 때문에 공해문제가 해결된다. 또한 소규모 發電에서 대규모 發電까지 쉽게 活用할 수 있다는 장점이 있으나 裝置의 製作費가 많이 들어 현재로서는 실용화가 힘든 상태이다.

1955年 實用的인 太陽電池가 發明된 이후 그 용도는 지상에서의 특수한 경우를 제외하고는 주로 인공위성의 중요한 動力供給源으로 이용되고 있으며 많은 통신위성들이 이 동력으로 전파중계소 역할을 하고 있다.

현재 太陽電池의 生産量은 매년 100kW 정도로 미국, 일본, 영국, 독일, 프랑스 등에서 製作하고 있다[PV1]. 지상에서 太陽電池를 活用하고 있는 곳은 100여 군데로 미국, 카나다, 일본 및 동남 아시아, 중동, 아프리카, 남아메리카등지에서 벽지의 無人燈臺, 라디오·TV의 중계소, 기상관측소, 통신소, 관제탑 등의 動力源으로 이용된다, 예를 들면 미국에서는 近海의 석유탐사선에 보안 등을 켜는데 太陽電池를 이용하고 있고 나이제리아에서는 전기가 없는 벽지의 국민학교에 텔레비젼 교육방송을 보급시키기 위해 太陽電池로부터 動力을 얻는 실험을 하고 있으며 1985年에는 이의 보급율을 80%로 늘릴 계획이다[PV2].

이외에도 계산기, 시계, 라이터 등에 太陽電池를 부착하여 만든 제품들이 상품화 되고 있다.

1. 太陽光發電 시스템

그림 12에 太陽光發電시스템의 간단한 例를 실었다. 太陽光發電시스템은 太陽電池板과 蓄電系로 나눌 수 있다.

1-1. 太陽電池

현재 活用되고 있는 太陽電池는 대부분이 실리콘 電池로서 수명이 길고 電氣的 특성이 잘 알려져 있어 設計 製作 기술이 다른 太陽電池보다는 발달해 있다. 이 太陽電池의 구조는 단일 結晶의 고순도 실리콘에 극소량의 5가 화합물(인

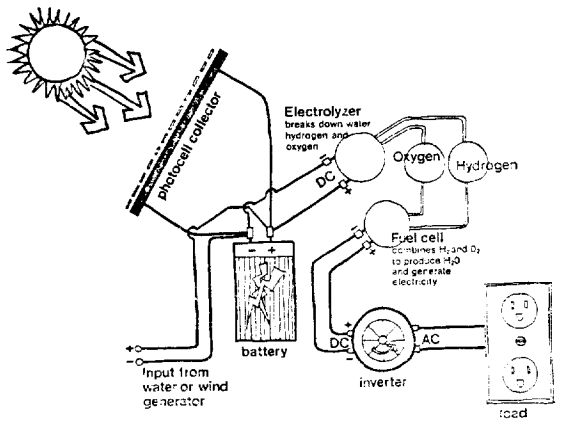

그림 12. 太陽光發電 시스템의 例[GR12)]

비소, 안티몬 등)을 침투시켜 만든 n-type 반도체와 3가의 화합물(보론, 갈리움 등)을 침투시켜 만든 반도체의 접합으로 되어 있다. 이렇게 p-type 반도체와 n-type 반도체가 하나의 結晶으로 접합이 되면 n-type 반도체의 전자가 p-type 반도체로 확산해 가고 반대로 hole은 p에서 n으로 확산해 가게 되며 이에 따라 p-type 반도체는 陰電位가 높아지게 된다. 이 때 valence, band와 conduction band의 에너지 차보다 높은 에너지의 빛이 들어오게 되면 valence band의 電子가 conduction band로 轉移하게 되며 이 電子는 陰電位가 낮은 n-type 반도체로 흐르게 되고 이에 따라 그림 13에서 보는 바와 같이 외부회로에 電流가 흐르게된다[PV1)].

실리콘 太陽電池의 경우 실제 太陽 빛 중에 23% 정도는 吸收되지 못하며 30% 정도는 熱로 損失되고 20% 정도가 접합부에서 損失이 되어 이론적인 最大 效率은 25% 정도이나 이 외에도 여러 접점의 저항에 의한 損失로 실제 操業效率은 10~15% 정도이다. 太陽빛의 强度에 따라 실리콘 電池에서 발생하는 電壓과 電流 등 실리콘 電池의 여러가지 특성은 문헌(PV1)을 참조하기 바란다.

실리콘 太陽電池 이외에도 CdS, GaAs, GaAlAs, CdTe, 등의 여러 물질이 있는데 CdS와 GaAs는 인공 위성에서 실용화가 이루어져 있고 나머지는 아직 실험단계이다[PV2)]. CdS電池는 CdS를

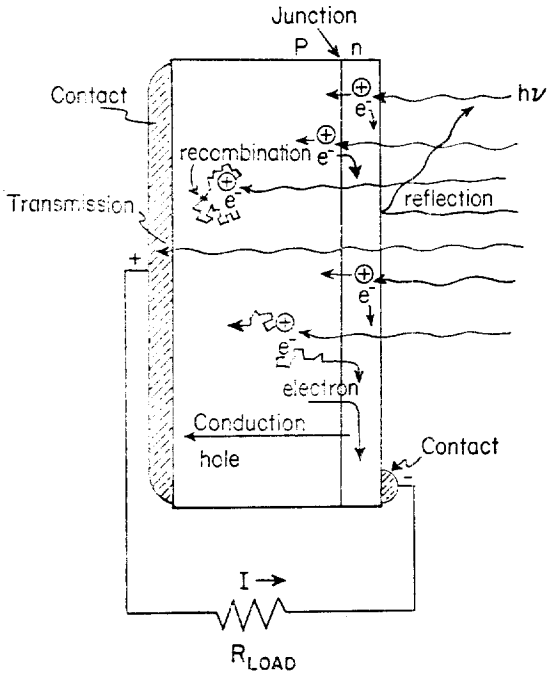

그림 13. 光電池와 빛의 相互作用과 電流의 흐름[PV1)]

Cu^{+1} 용액으로 처리하여 Cu_2S층을 만들므로써 n-p 접합을 형성하게 된다. 실리콘 電池보다는 싼 값으로 大量生産이 가능할 것으로 기대되나 수명이 짧고 操業狀態가 不安定한 것이 短點이다. 效率은 6~9%로 되어 있다[PV1)].

1-2. 集光 및 冷却裝置

太陽電池板은 보통 平板으로 되어 있으나 빛의 强度가 커지면 얻어지는 電力量도 커지게 되므로[PV3)] 集光器를 이용하여 단위 면적당 많은太陽빛을 모음으로써 太陽電池板의 面積을 줄이는 것이 고려되었다[PV4)]. 반면에 太陽電池의 效率은 太陽電池의 溫度가 높아지면 감소하므로(실리콘 電池의 경우 최대 이론 효율은 20°C에서 25%이고 100°C에서는 13% 정도) 集光器를 쓰는 경우는 冷却이 필요하게 된다. 最適 集光比는 결국 集光器에 소요되는 비용과 冷却器를 설치하는 비용, 集光器를 사용하므로써 절약되는 太陽

電池의 비용등을 고려하여 단위 電氣量당 최소의 비용을 들이게 하는 값이 되겠다[PV5]. Ralph는 集光器의 集光比가 증가함에 따라 冷却을 하는 경우와 하지 않는 경우 太陽電池에서 얻어지는 電力을 비교하였고[PV8] 圓錐形集光器를 이용하여 集光比 3 정도는 冷却없이도 그 效率이 감소하지 않고 操業할 수 있음을 밝혔으며[PV7], V-trough形 集光器로 操業하여 여러 資料를 얻었다[PV8]. 冷却器에는 空氣를 이용하는 것과 물을 이용하는 것이 있으며 물을 이용하여 冷却을 하는 경우 최대로 10배의 電力을 더 얻을 수 있는 반면에 물의 순환에 필요한 電力은 太陽電池에서 얻을 수 있는 電力의 10% 정도가 된다[PV9].

1-3. 蓄電方式

太陽빛이 비치는 동안 얻은 電力은 필요할 때 사용하기 위해 蓄電을 해야 할 필요가 있다. 그 방법으로는 이제까지 活用되어 왔던 납 蓄電池를 쓰거나 펌프를 써서 물을 높은 곳으로 끌어올린 다음 필요할 때 터빈을 돌리는 방법, 또는 물을 전기 분해하여 수소를 만들어 연료로 쓰거나 fuel-cell을 가동시켜 다시 전기를 얻는 방법이 고려되고 있다. 소규모의 경우는 납 蓄電池를 이용하는 것이 가장 보편적이고 대규모의 경우는 에너지 밀도가 높고 부피가 작은 산소—수소 燃料電池가 적당하나 후자의 경우는 아직 가격이 비싸고 실용화되기에는 앞으로의 기술개발이 필요하다[PV10].

2. 衛星太陽發電所 (SSPS:Satellite Solar Power System)

美 航空宇宙局(NASA)에서 1973年에 발표한 계획으로 氣候의 영향을 받지 않는 宇宙空間에 수백만개의 太陽電池를 設置하여 3,000~15,000 MW 정도의 電力을 얻어 지구로 送電한다는 계획이다. 76年까지는 기초 硏究를 끝내고 79年까지 模型을 제작 85년에는 소규모 發電所를 가동시키며 2000年까지는 實用化한다는 목표를 세우고 있다. 이 계획은 64km²의 面積에 달하는 太陽電池를 地球로부터 35,600km 떨어진 宇宙空間에 설치하여 여기서 얻어진 電力을 microwave로 바꾸어 送電하면 地球에서는 안테나에서 이를 받아 發電所에서 교류로 바꾼 후 실수요자에게 공급한다는 것으로 되어 있다.

이 때 宇宙의 送電 안테나의 면적은 2.6km², 地上의 안테나는 100km²에 달한다. 이 SSPS는 重量이 2만~5만톤에 달해 200~400회의 로켓트 발사로 裝置를 운반해 宇宙에서 조립하여야 하며 총 建設費는 50억불에 달할 것으로 보고있다. 이 원대한 계획은 앞으로의 기술개발과 원가 절감문제로 2,000年경에나 實用化 될 수 있을 것으로 보고 있다.

3. 經濟性

현재 가장 많이 쓰이고 있는 실리콘 太陽電池의 원료인 실리콘은 地殼에서 둘째로 많이 존재하는 物質이며 보통 96~99%의 純度이면 톤당 600불 정도로 이것으로 太陽電池를 만든다면 $0.4/m² 정도에 지나지 않는다. 그러나 실제太陽電池는 光子의 損失과 再結合을 막기 위해 高純度의 單結晶이 필요하므로 그 製作費는 현재 $7,000/m²에 달하고 있다. 太陽電池로부터 얻어지는 電力의 값은 70年代에 기대되는 太陽電池의 가격을 $2,000/m²라 할 때 $20,000/kW가 된다.

在來의 發電으로 얻어지는 電力 가격을 고려하면 蓄電 부분을 제외한 太陽電池의 값이 $20~30/m²가 되어야 太陽電池의 實用化가 이루어질 전망이며 蓄電시스템은 현재 가격의 1/2~1/5로 감소하여야 할 것이다.

앞으로 太陽電池의 가격을 어느 정도까지 감소시킬 수 있는지 쉽게 점칠 수 없으나 실리콘 太陽電池의 效率을 현재의 12% 정도에서 25%로 증가시키고 製作 기술을 발전시키며 기타 여러 공정상에서의 낭비를 줄인다면 $200~400/kW까지 원가 절감을 할 수 있을 것으로 보고 있다.[PV1] 그림 14에 앞으로 실리콘 太陽電池에서 얻는 電力값의 예상치를 도시하였다.

반면에 기존 電力을 활용할 수 없는 벽지의 경우 고바야시가[PV12] 밝힌 바에 의하면 50W 이하의 動力을 쓸 경우 1km 이상에서 電氣를 끌어와야 한다면 太陽電池와 蓄電시스템을 活用하

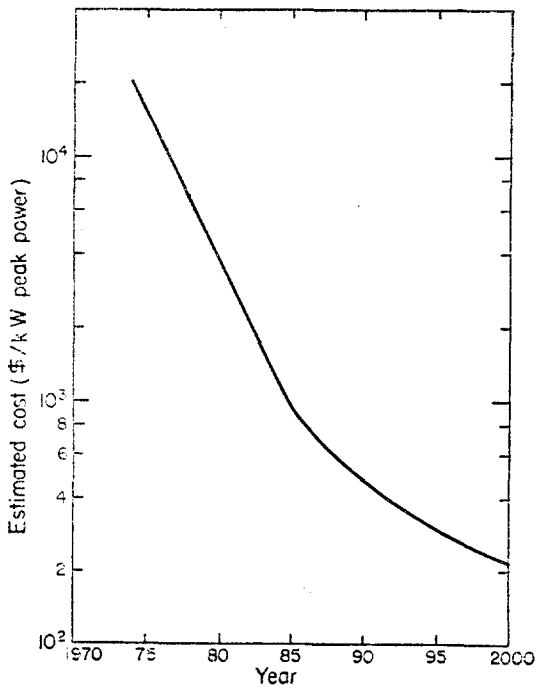

그림 14. 실리콘 太陽電池의 價格推定置[PV1]

는 것이 기존 動力源을 活用하는 것 보다 유리하다. 이외에도 인공 위성의 動力源으로는 太陽電池가 독점적인 위치를 차지하고 있으며 시계나 계산기 등의 動力源으로 상품화되고 있다.

美國에서는 太陽電池의 개발 硏究에 1975年도에 800만불을 투자하고 있으며 다른 여러 나라에서도 값싸고 效率이 좋은 太陽電池의 硏究에 몰두하고 있어 2000年代에 가서는 太陽電池에서 얻은 電氣가 일반 動力源으로 사용될 수있을 것으로 기대된다.

References

集光集熱器

CC 1. T. S. Laszlo, Image Furnace Techniques, New York, Wiley-Interscience, 1965.

CC 2. B. Y. H. Liu and R. C. Jordan, "Performance and evaluation of Concentrating Solar Collectors for Power Generation," *J. Engr. Power, Trans. ASME*, **87**, 1-12 (1965)

CC 3. G. O. G. Lŏf and J. A. Duffie, "Optimization of Focusing Solar-Collector Design," *J. Engr. Power, Trans. ASME*, **85A** (1963), 221.

CC 4. W. W. Shaner and H. S. Wilson, "Cost of Paraboloidal Collectors for Solar to Thermal Electric Conversion," *Solar Energy*, **17** (1975), 351.

CC 5. H. Tabor, "A Solar Cooker for developing countries," *Solar Energy*, **10**(1966), 153.

CC 6. A. F. Hildebrandt, G. M. Haas, W. R. Jenkins and J. P. Calaco, "Large Scale concentration and conversion of Solar Energy, "*Trans. American Geophysical Union*, **53** (1972), 684.

CC 7. L. L. Vant-Hull and A. F. Hilderbrandt, "Solar Thermal Power System Based on Optical Transmission," *Solar Energy*, **18** (1976), 31.

CC 8. A. Sobin and W. Wagner, "Central Collector Solar Energy Receivers," *Solar Energy*, **18** (1976), 21.

CC 9. H. Tabor and H. Zeimer, "Low-cost Focusing Collector for Solar power Units," *Solar Energy*, **6** (1962), 55.

CC10. G. O. G. Lŏf, D. A. Fester and J. A. Duffie, "Energy Balances on a Parabolic Cylinder Solar Collector," *J. Engr. Power, Trans. ASME* **84** A (1962), 24.

CC11. Parmpal Singh and L. S. Cheema, "Performance and Optimization of a Cylindrical-parabolar Collector," *Solar Energy*, **18** (1976), 135.

CC12. W. Szulmayer, "A Solar Strip Concentrator," *Solar Energy*, **14** (1973), 327.

CC13. D. T. Nelson, D. L. Evans and R. K. Bansal, "Linear Fresnel Lens Concentra-

tors," *Solar Energy*, **17** (1975), 285.

CC14. W. G. Steward, "A Concentration Solar Energy System Employing a Stationary Spherical Mirror and Movable Collector," Proceedings of the NSF/RANN Solar Heating and Cooling of Buildings Workshop, NSF/RANN-73-004, pp. 17-20, July 1973.

CC15. J. R. Williams and S. F. Hutchins, "Development of a 540 ft^2 Prototype Faceted Fixed mirror Solar Concentrator," IECEC '75 Report pp. 195-201 (1975)

CC16. Progress Report, "Fixed Faceted Mirror Solar Concentrator," Scientific-Atlanta Inc., 1976.

CC17. H. Tabor, "Stationary mirror Systems for solar cellectors", *Solar Energy*, **2** (1958), 27.

CC18. K. G. T. Hollands, "A Concentrator for Thin-film Solar Cells, "*Solar Energy*, **13** (1971), 149.

CC19. R. B. Bannerot and J. R. Howell, "Moderately Concentrating Flat-plate Solar Energy Collectors," ASME Publication 75-HT-54 (1975).

CC20. R. Winston, "Light Collection within the Framework of Geometrical Optics," *J. Opt. Soc. Am.*, **60** (1974), 245.

CC21. R. Winston, "Principles of Solar Concentrators of a Novel Design," *Solar Energy*, **16** (1974), 89.

CC22. A. Rabl, "Comparison of Solar Concentrators," *Solar Energy*, **18** (1976), 93.

CC23. R. Winston, "Principles of Cylindrical Concentrator for Solar Energy," *Solar Energy*, **17** (1975), 255.

CC24. W. S. Duff, G. F. Lamero and G. O. G. Löf, "Parametric Performance and cost Models for Solar Concentrators," *Solar Energy*. **17** (1975), 47.

太陽熱發電

TP 1. R. C. Jordan, "Mechanical energy from solar energy," Proceedings of the world symposium on applied solar energy, Phoenix Arizona, Stanford Research Institute, Menlo Park, Calif. (1956).

TP 2. H. C. Hottel "Power generation with solar energy," Solar energy research, Madison, University of Wisconsin Press, 85 (1955).

TP 3. H. Masson and J. P. Girardier, "Solar motors with flat plate collectors," *Solar Energy*, **10** (1966), 165.

TP 4. Colorado State University-Westing house Report to NSF, Report NSF/RANN/SE/GI-37815/PR/73/3. "Solar thermal electric power system.

TP 5. University of Minnesota-Honeywell Report to NSF, Report NSF/RANN/SE/GI-34871/PR/73/2. "Research applied to solar-thermal power systems.

TP 6. E. R. Farber, "Solar energy, its conversion and utilization," *Solar Energy*, **14** (1973), 243.

TP 7. 新エネルギー技術研究開發計劃（サンシャイン計劃）財團法人日本産業技術振興協會 1974

TP 8. G. Francia, "Pilot plants of solar steam generating stations," *Solar Energy*, **12** (1968), 51.

TP 9. S. H. Bomar, Jr., J. M. Akridge, N. E. Poulos, "Summary of the Solar Energy Program," Engineering Experiment Station, Georgia Institute of Technology, Jan. 1976.

太陽光發電

PV 1. J. A. Merrigan, "Sunlight to electricity-prospects for solar energy conversion by photovoltaics," The MIT press, Cambridge Massachusetts, 1975.

PV 2. "Energy for Rural Development," Report of an Ad Hoc Panel of the Advisory Comittee on Technology Innovation, National Academy of Sciences, 1976.

PV 3. P. A. Berman, *Solar Energy*, **11** (1967), 180.

PV 4. K. G. T. Hollands, "A concentrator for thin-film solar cells," *Solar Energy*, **13** (1971), 149.

PV 5. I. Savchenko and B. Tarnizhevskii, *Applied Solar Energy*, **8**(3-4) (1973), 83.

PV 6. E. L. Ralph, "Large scale solar electric power generation", *Solar Energy*, **14** (1972), 11.

PV 7. E. L. Ralph, "Use of concentrated sunlight with solar cells for terrestrial applications," *Solar Energy*, **10** (1966), 67.

PV 8. E. L. Ralph, "A commercial solar cell array design," *Solar Energy*, **14** (1973), 279.

PV 9. W. Beckman, P. Schoffer, W. Hartman, Jr., and G. O. G. Löf, *Solar Energy*, **10** (1966), 133.

PV10. F. Daniels, "Energy Storage Problems," *Solar Energy*, **6** (1962), 78.

PV11. E. L. Ralph, "A plan to utilize solar energy as an electric power source", *Solar Energy*, **13** (1972), 326.

PV12. M. Kobayashi, "Utilization of silicon solar batteries," Proceedings of the UN Conference on New Sources of Energy, 4; 229, E/Conf. 35/5 Rome, 1961.