

(Fresnel 렌즈-DCPC-集光形太陽電池-放熱板)形 Solar Module에 관한 研究

論	文
30~10~3	

Fresnel Lens-DCPC-Concentrating Solar Cell-Heat Sink Type Solar Module

宋 鎮 洙*
(Jinsoo Song)

Abstract

The concentrating solar module with high concentration ratio(320)has been studied in this paper. The solar module was composed of the EMVJ solar cell,(Fresnel Lens-DCPC)concentrator and heat sink, and was measured by using the PASTF system.

The experimental result and the result analysis for the individual item of the module were as follows;

- (1) The conversion efficiency of the module was 8.3%.
- (2) The optical efficiency of the concentrator was 46.5% (DCPC; 84.8%, Fresnel Lens; 54.8%).
- (3) The thermal loss of the solar cell was 4.9%.

And methods for the futher improvement of the concentrating solar module efficiency have been suggested.

1. 序 論

集光形 Solar module은 集光裝置, 集光形 太陽電池 및 放熱板으로 구성되며, 太陽電池보다 低價인 集光裝置를 이용하여 太陽電池의 受光面積當 入射光量을 증가시킴으로서 單位出力當의 시스템 가격을 低下하는데 目的이 있다.

이러한 集光形 Solar module은 集光裝置와 集光形 太陽電池를 중심으로 최근 활발히 研究되고 있으며, 특히 Focusing type의 Fresnel 렌즈를 사용한 Solar module의 경우 集光率 39에서 10.4%⁽¹⁾, Non-focusing type의 DCPC(Dielectric Compound Parabolic Concentrator)의 경우 集光率 6.37에서 10.9%⁽²⁾의 변환효율이 발표되었다. 이는 太陽電池의 單位面積當 出力이 각각 405.6mW/cm²와 69.43mW/cm²의 高出力임을 의미한다. 그러나 Fresnel렌즈⁽³⁾는 光學的 收差 때문에 太陽電池 表面上에서 不均一한 光分布를 나타내며, DCPC⁽⁴⁾는 TIR (Total Internal Reflection) Mechan-

ism에 의한 入射許容角의 한계성 때문에 高集光率을 얻을 수 없으므로, 本 研究에서는 이러한 상호 問題點을 改善하기 위하여 Fresnel렌즈와 DCPC의 複合形인 高集光率의 集光裝置를 제작하였다. 이때 DCPC는 Fresnel 렌즈에 의해 集光된 후 Fresnel의 入射許容角 이 내에 入射한 光束을 太陽電池 표면상에 再集光 함으로서 光學效率를 증가시키는 2次集光裝置의 역할을 하나 集光率에는 직접적인 영향을 미치지 않으며, 集光裝置의 集光率은 Fresnel렌즈에 의해서만 결정된다.

한편 集光形 太陽電池는 高集光에 의한 高光度 또는 高溫의 특수조건하에서 變換效率의 감소없이 동작되어야 하고, 한정된 Fresnel렌즈의 크기로서 高集光率을 얻기 위해서는 소형이어야 하므로 최근 개발된 EMVJ (Etched Multiple Vertical Junction) 太陽電池를 사용하였으며, 熱設計에 의해 제작된 放熱板상에 부락되었다.

2. 集光形 Solar module의 製作

1. Module의 構成

1.1. Fresnel 렌즈

* 正 會 員 : 韓國動力資源研究所 先任研究員

接受日字 : 1981年 7月 16日

Module의 幾何學的 集光率(Geometric Concentration Ratio)은 Fresnel 렌즈와 太陽電池 크기의 對比率에 의해 결정되며 太陽電池의 變換効率は 實際集光率(Actual Concentration Ratio)의 증가에 따라 증가하나 限界値를 가진다. 이때 實際集光率は,

$$C_a = C_g \times \eta_0 \quad (1)$$

η_0 : Module의 光學効率

으로 나타낼 수 있다. 따라서 Fresnel 렌즈의 크기는 Module의 光學効率 즉, 렌즈 자체 및 DCPC의 光學的 結合부분에서 발생하는 諸般 光學的 損失을 고려하여 實際集光率이 太陽電池의 集光率 限界値를 초과하지 않는 범위내에서 설계되어야 한다. 太陽光에 대한 Fresnel 렌즈의 理論的 光學効率は⁽⁵⁾

表面反射損失: 4%

Facet angle에 의한 裏面反射損失: 6%

吸收 및 散亂損失: 1%

를 제외한 89%이며, EMVJ 太陽電池의 경우 集光率 300에서도 變換効率が 감소하지 않으므로 幾何學的 集光率이 400 이상인 Fresnel 렌즈의 사용이 가능하나, 高集光에 의한 DCPC의 劣化現象과 間接冷却方式의 熱的 限界性 때문에 幾何學的 集光率 320의 Cast acrylic Fresnel 렌즈를 선택하였다.

1.2. DCPC

DCPC는 Argonne Nat'l Lab과 Univ of Chicago에서 개발된 그림 1과 같은 CPC⁽⁶⁾(Compound Parabolic Concentrator, 또는 Winston Concentrator)의 내부를 굴절율 $n > \sqrt{2}$ 인 투명유전체로 충전하여 TIR mechanism에 의해 入射許容角을 증가시킨 集光裝置이다. 이때 入射許容角 θ_c 로서 얻을 수 있는 理想的인 最大 集光率は 熱力學 第2法則에 따라 3次元 構造인 경우

$$C = n^2 / \sin^2 \theta_c \quad (2)$$

이다.

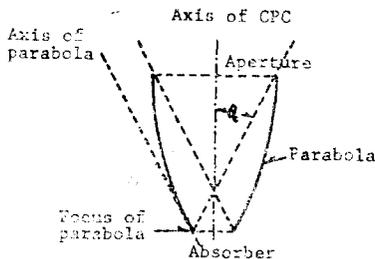


그림 1. CPC의 단면도

Fig. 1. Cross section of CPC

제작된 DCPC는 Injection molding方法에 의해 굴절율 1.49인 Acrylic으로 제조되었다.

1.3. 集光形 太陽電池

일반적으로 종래의 太陽電池는 高集光에 의한 高光度 또는 高溫의 動作條件에서는 電氣의 特性變化를 초래한다.⁽⁷⁾ 즉, 一定光量下에서의 溫度에 따른 太陽電池의 電氣의 特性變化는 材料特性—眞性電荷密度, 擴散거리 또는 吸收係數—과 素子特性에 의존하므로 開放電壓(V_{oc})은 暗電流의 증가에 의해 감소하고 短絡電流(I_{sc})은 電荷의 壽命 및 擴散거리의 증가에 의해 약간 증가하며, Fill Factor(F.F)는 直列抵抗의 크기에 따라 200°K 이하에서는 포화 또는 감소, 200°K 이상에서는 급격히 감소한다. 한편 一定溫度下에서의 光量 증가에 따른 太陽電池의 特性變化는 短絡電流의 경우 비례적으로 증가하며 開放電壓은 log 함수적으로 증가한다. 또 Fill Factor는 太陽電池의 材料特性 및 設計와 工程에 의해 결정되는 A_0 (diode constant), R_s , R_{sh} 와 V_{oc} 에 의존하므로 低光度에서는 주로 누설전류의 증가를 초래하는 R_{sh} 와 A_0 에 의해 감소하나 거의 무시할 수 있으며, 高光度에서는 R_s 의 증가와 High injection level effect⁽⁸⁾에 의한 Dember起電力의 증가때문에 V_{oc} 의 감소 또는 포화현상의 복합적인 영향으로 급격히 감소하게 된다.

EMVJ 太陽電池⁽⁹⁾는 結晶方位角에 따라 Etching速度가 다른 Si의 특성을 이용하여 그림 2와 같이 Si 表面에 Groove를 形成하고 Groove內에 接合 및 電極을 形成함으로써,

- 電極面積의 증가에 따른 R_s 의 감소
- 接合 및 有效受光面積의 증가
- 從的인 接合構造와 BSF構造로서 生成電荷의 收集効率 向上
- groove 面上的 電極形成으로 Shading effect⁽¹⁰⁾의 제거

등의 長點이 있다. 따라서 300 이상의 高集光率에서도

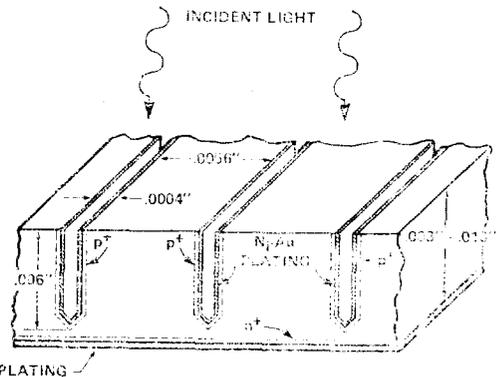


그림 2. EMVJ 태양전지의 구조

Fig. 2. Schematic of EMVJ cell structure

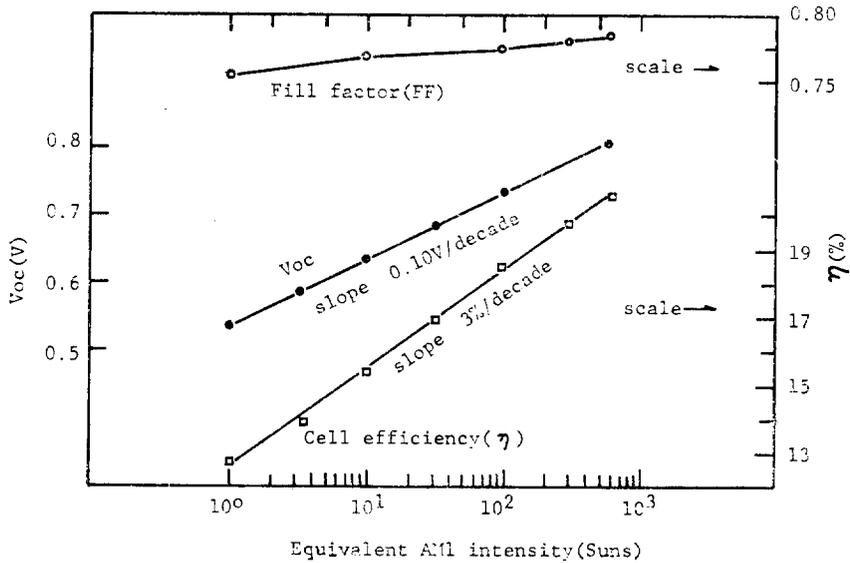


그림 3. EMVJ 태양전지의 전기적 특성
 Fig. 3. Electrical characteristics of EMVJ cell

Voc 및 F.F의 감소없이 동작할 수 있는 高効率 集光形 太陽電池로서 그 電氣의 特性은 그림 3과 같다.

1.4. 放熱板

일반적으로 Solar module에서의 Energy balance⁽⁴⁾는

$$P = \eta_0 SA_0 - Q \tag{3}$$

η_0 : Module의 光學效率, S : 入射光量[W/cm²]
 A_0 : 렌즈의 面積[cm²], P : 出力[W], Q : 發生熱[W]

의 式으로 나타낼 수 있으며, 出力 P 는

$$P = \eta \cdot \eta_0 SA_0 \tag{4}$$

이므로 (3) (4)式으로 부터

$$Q = \eta_0 SA_0 (1 - \eta) \tag{5}$$

이다.

한편 發生熱의 放熱을 위한 放熱板 사용시,

$$Q = K_s A_s (T_c - T_0) \tag{6}$$

K_s : 放熱板의 熱傳導度[W/cm²·°C]
 T_c, T_0 : 太陽電池 및 放熱板의 溫度[°C]
 A_s : 放熱板의 面積[cm²]

이며, Fresnel 렌즈와 放熱板의 크기는 Module의 구조 設計상 같아야 하므로,

$$K_s = \frac{\eta_0 S (1 - \eta)}{T_c - T_0} \tag{7}$$

의 관계식이 성립한다. 放熱板의 設計를 위해, Solar

module에서의 光學效率을 50%, AM1에서의 太陽電池 變換效率을 20%로 가정하면, 集光時 太陽電池의 溫度上昇을 10°C 이하로 줄이기 위해서는 熱傳導度 $K_s > 4 \times 10^{-3}$ 의 條件을 만족해야 한다.

2. module의 製作

設計에 의해 주문, 제작된 部品의 주요 特性은 다음과 같다.

① Cast acrylic Fresnel 렌즈

제조업체: Swedlow Inc. S-360

(12122 Western Ave., Garden Grove, CA.)

크기: 10.28cm × 10.28cm

굴절율: 1.49

광투과율: 0.93

② Injection molded plastic DCPC

제조업체: Plastic Tooling Aids Lab. Inc.

(Skokie, Illinois)

크기: 1.28cm dia. (surface), 0.64cm dia. (bottom)

굴절율: 1.49

용융점: 90~105°C

③ 太陽電池

제조업체: Microwave Associates

(Burlington, Mass)

크기 : 1.28cm dia. (surface), 0.64cm dia. (bottom)
구조 : EMJV형, Ni-Au 전극 및 BeO ceramic결연

④ 放熱板

제조업체 : AHAM Co.

(2 Gill St. Bldg. 5, Woburn, Mass.)

크기 : Fresnel 렌즈와 동일

구조 및 재질 : Al plane strip

熱傳導度 : $\sim 6 \times 10^{-3} / W^{-1} \cdot cm^2 \cdot ^\circ C$ (220cm/sec. wind)

이러한 部品들은,

① 基板(放熱板)상의 太陽電池 배열

② 太陽電池 상호간의 결선

③ Fresnel 렌즈, DCPC 및 太陽電池 상호간의 光學的 結合의 공정을 거쳐 그림 4와 같은 단위구조를 형성 하였으며 6개의 단위구조를 직렬 연결하여 module을 제작하였다. 또 Fresnel 렌즈의 開閉가 가능하도록 제작되었으며, 開閉與否에 따라

Module#1 : 太陽電池-DCPC

Module#2 : 太陽電池-DCPC-Fresnel 렌즈

로 區分하였다.

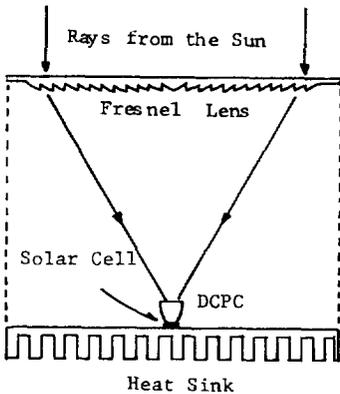


그림 4. 집광형 Solar module의 구조

Fig. 4. Schematic of concentrator solar module structure

module에서의 太陽電池 배열⁽¹²⁾은 最適負荷抵抗值 및 전기적 특성이 동일한 단위 太陽電池의 조합이 이상적이나, 실제로는 각 太陽電池의 특성이 조금씩 相異하여 直列連結인 경우 Module의 最大出力이 단위 太陽電池의 最大出力의 畧보다 적게 된다. 따라서 太陽電池의 배열은 측정후 유사한 전기적 특성을 가진 太陽電池만을 선별하여 直列連結하였다. 한편 Fresnel 렌즈와 DCPC의 간격은 入射角의 許容誤差를 보다 증가하여 Tracking error에 의한 손실을 감소시키기 위해 Fresnel 렌즈의 초점거리와 동일한 간격으로 설치하였

다. 그리고 DCPC, 太陽電池 및 放熱板의 상호 결합은 接着劑의 材料特性과 製作條件 및 工程方法에 따라 境界面에서 光學的, 熱的 손실을 초래하여 Module의 變換效率를 저하시키므로 接着劑의 선택에 신중을 기 하였으며, 工程時 異物質의 介入 및 汚染을 방지하고 均一度와 再現性을 유지할 수 있도록 노력하였다. 특히 接着劑는 用途와 特性에 따라 적절한 材料를 선택 해야 하므로 제작된 Module에서는 太陽電池의 電極과 Extended Cu plate의 電氣的 結合은 液相의 Silver epoxy(Ablebond 36-2, Ablestic Lab.), DCPC와 太陽電池의 光學的 結合은 투명한 Silicone rubber compound (RTV 615A, GE), 太陽電池와 放熱板의 熱的 結合은 電氣的 絕緣性인 Speed bonder 325와 Activator 707 (Loctite Co.)을 사용하였다.

3. 測定과 結果의 分析

1. module의 測定

集光形 Solar module의 測定은 종래의 非集光形 Solar module과는 달리 集光裝置의 受光面積에 수직으로 入射할 수 있는 光源과 高集光에 따른 Tracking system이 필요하므로, 제작된 Module은 自然(太陽)光源 下에서 Sandia Lab.의 PASTF⁽¹³⁾(the Photovoltaic Advanced Systems Test Facility)로서 측정하였다. 측정된 Module#1.과 Module#2.의 集光率은 각각 4 와 320이며 각 Module의 集光率은 集光裝置의 機學的 集光率을 의미한다.

그림 5와 그림 6은 각각 Module#1.과 Module#2.의 측정결과이다.

한편 集光形 Solar module에서의 日射量은⁽¹²⁾

Accepted insolation

$$= \text{Direct insolation} + \frac{n}{c} \text{Diffused insolation} \quad (8)$$

n : 集光裝置 媒質의 굴절율

c : 集光率

이며, 高集光時에는 $c \gg n$ 이므로 Diffused insolation은 무시될 수 있다. 따라서 入射光量은 측정된 DNI(Direct Normal Insolation)의 平均値를 택하였으며, 이때의 변환효율은,

$$\eta = \frac{\text{最大出力}}{\text{入射光量}} \times 100$$

$$= \frac{P_{\max}}{(\text{DNI}(\text{start}) + \text{DNI}(\text{end})) / 2 \times \text{aperture}} \times 100(\%) \quad (9)$$

Aperture : 集光裝置의 光 入射面積

으로 산출하였다.

2. 測定結果의 分析

集光形의 Solar module의 變換効率は, Module을 구성하고 있는 각 부분에서의 모든 손실요인을 內包하고 있으므로,

$\eta_m = \eta_o \eta_c \eta_r \eta_s$ (10)

η_c : 太陽電池의 變換効률

η_r : 溫度上昇에 따른 効률變化

η_s : Tracking(또는 aligning, focusing)에 의한 効率變化

η_o : 電氣의 結線 및 기타 効률

으로 나타낼 수 있다. 한편 集光率에 따른 太陽電池의 變換効率は,

$\eta_c = \eta_{c0} + \alpha \log C_a = \eta_{c0} + \alpha \log (C_s, \eta_o)$ (11)

η_{c0} : 非集光時 AM1에서의 太陽電池 變換効률

α : 効率變化曲線의 勾配

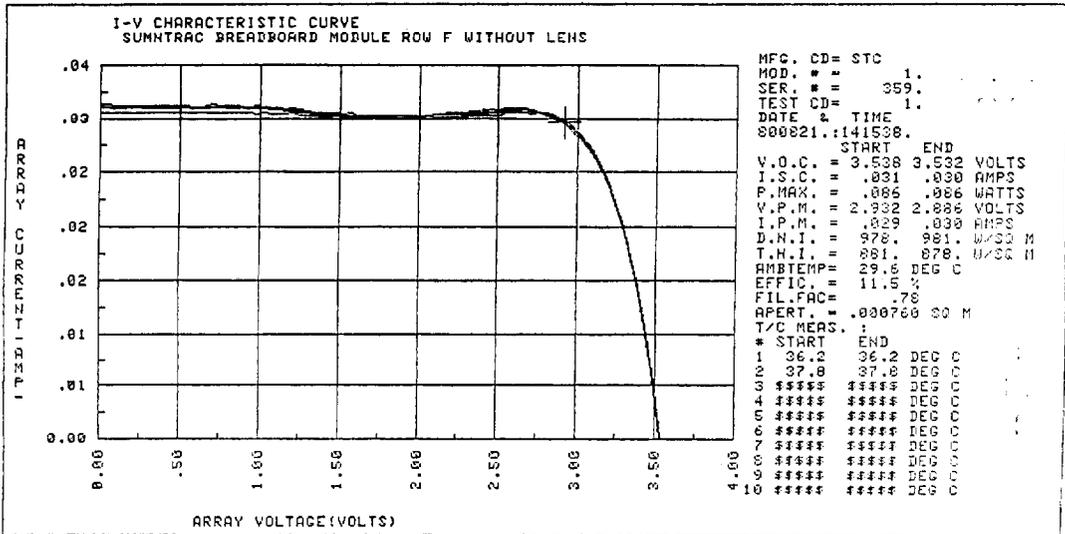


그림 5. Module #1.의 측정결과

Fig. 5. Experimental results of module #1.

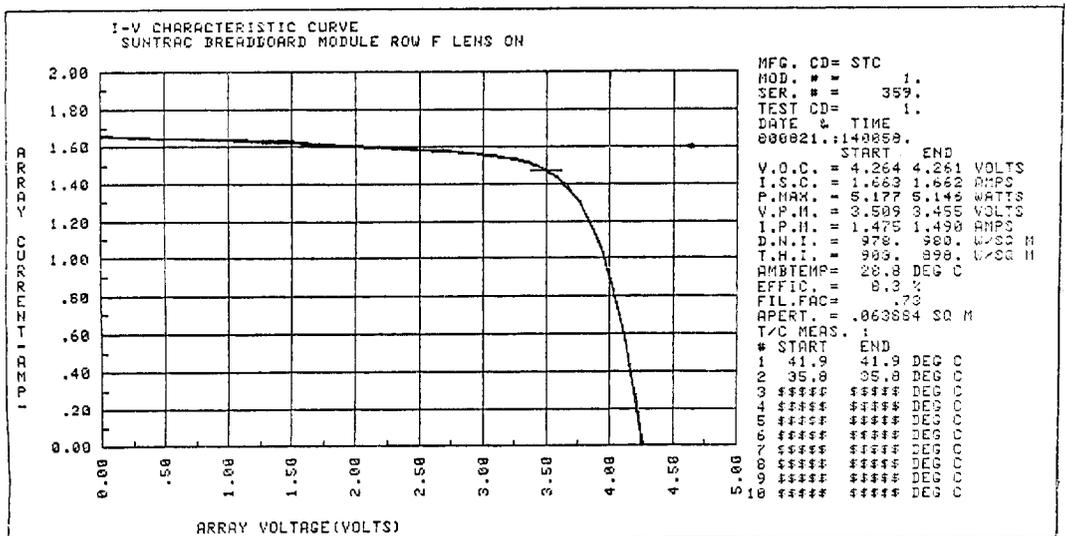


그림 6. Module #2.의 측정결과

Fig. 6. Experimental results of module #2.

표 1. 분석결과와 목표치의 비교

Table 1. Comparison between analysis of test results and target value

구 분	집 광 장 치	C_r	η_c	η_D	η_L	η_r	η_t	η_s	η_m
module #1.	DCPC	4	0.143	0.848		0.970	1.00	0.98	0.115
module #2.	DCPC+Fresnel lens	320	0.192	0.848	0.548	0.951	1.00	0.98	0.083
목 표 치	DCPC+Fresnel lens	320	0.20	0.87	0.80	0.97	1.00	0.98	0.13

이며, $\eta_r=1-\beta\Delta T$ (12)

또 그림 3, 그림 5, 그림 6 및 實驗結果로 부터

$$\left. \begin{aligned} \eta_{so} &= 0.127 \\ \alpha &= 0.03 \\ \beta &= 0.0033 \\ \Delta T_1 &= 9^\circ\text{C}, \Delta T_2 = 15^\circ\text{C} \\ \eta_t &\sim 1.00 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

이므로 $\eta_s=0.98^{(14)}$ 이라고 가정하면 각 Module에서의 變換效率는 (11)(12)(13)式으로 부터

$$(0.145+0.03 \log\eta_{01})\eta_{01}=0.121 \quad (14)$$

$$(0.202+0.03 \log\eta_{02}) \eta_{02}=0.089 \quad (15)$$

의 關係式을 얻을 수 있다.

따라서 (14) (15)式의 解를 구하면,

$$\eta_{01}=\eta_D=0.848 \quad (16)$$

$$\eta_{02}=\eta_D\eta_L=0.465 \quad (17)$$

η_D : DCPC의 光學效率

η_L : Frenel 렌즈의 光效率

이므로, $\eta_L=0.548$ (18)

이다.

이와 같은 分析結果를 經濟性있는 目標値와 비교하면 표 1.과 같다. 단 여기에서의 目標値는 高集光形인 Module #2를 기준으로 理論限界値 범위내에서 設定된 실현 가능한 값이다.

표 1.에서 알 수 있는 바와 같이 Module의 效率減少는 주로 集光裝置 光損失에 기인되었으며 특히 高集光形인 module #2의 경우 Fresnel 렌즈에서의 光損失은 현저한 效率減少를 초래한 것으로 分析되었다. 그러나 각 Module의 실제적인 光損失은 集光裝置 자체의 손실 이외에 光學的 결합층 내부 및 境界面에서의 손실도 內包한 복합적인 결과이다. 즉, Module #1에서는 DCPC와 太陽電池의 결합 工程時 異物質 介入과 氣泡生成, 接着劑의 不均一한 두께 및 Squeeze-out 現象에 의한 光吸收와 散亂이 光損失을 초래하였으며, Module #2에서는 이러한 손실 이외에 Fresnel 렌즈의 Groove 및 表面의 汚染에 의한 손실, 특히 高集光時 DCPC表面의 汚染 및 內在不純物의 熱吸收에 의한 DCPC의 劣化現象이 관측되었으며, 이러한 劣化現象이

光損失을 초래한 것으로 판단된다. 또한 實驗結果 高集光時의 太陽電池 表面은 大氣溫度보다 10°C 이상의 溫度上昇을 나타내었으며 이러한 溫度上昇은 연속작동시 熱蓄積을 유발하여 效率減少 및 주변 결합부분에 악영향을 미칠 것으로 우려된다.

4. 結 論

集光裝置를 이용한 集光形 Solar module의 研究結果에 대한 結論은 다음과 같다.

1. 集光形 太陽電池와 DCPC, Fresnel 렌즈를 集光裝置로서 사용하여 設計, 製作된 Solar module의 變換效率는 Module #1의 경우 11.5%, Module #2의 경우 8.3%로 측정되었다.

2. 測定値의 分析結果, DCPC와 Fresnel 렌즈의 光學效率는 각각 84.8%, 54.8%로서 Module의 效率減少는 주로 集光裝置에서의 光損失에 기인되었으며, 특히 高集光形인 Module #2의 경우 Fresnel 렌즈에서의 光損失은 현저한 效率減少를 초래한 것으로 分析되었다.

3. 이러한 集光裝置에서의 光損失은

—Fresnel 렌즈의 Groove 및 表面과 DCPC 表面의 汚染

—工程時 光學的 結合層 내부 및 境界面의 異物質 介入과 氣泡生成

—接着劑의 不均一한 두께와 Squeeze-out 現象에 의한 光吸收 및 散亂

—DCPC 및 Fresnel 렌즈의 經時劣化現象

(특히 DCPC 表面에 부착된 異物質의 熱吸收에 의한 熱集中現象)

등의 원인 때문에 발생된 것으로 思料된다.

4. 集光裝置의 光學效率 改善을 위해서는

—DCPC材料로서의 耐熱性, 透明誘電體의 개발

—接着劑의 最適선택 및 均一度와 再現性있는 結合 工程의 개발

—表面汚染 방지를 위한 對策

에 관한 研究가 계속되어야 한다.

5. 이러한 光學效率의 改善과 高集光時의 熱的 문제점의 改善 및 放熱板의 개발이 병행된다면 (Fresnel 렌즈-DCPC)形 集光裝置를 이용한 高集光形 Solar module로서 13%의 高效率을 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

附 記

本 研究는 1979년 12월부터 1980년 12월까지의 交換 研究期間中 美國의 Argonne Nat'l Lab.에서 수행한 研究結果이다.

研究期間中 Module의 製作에 협조해주신 Suntrac Co.의 Mr. J.G. Frommeyer, 集光裝置의 기술적인 검토와 자문에 응해주신 ANL의 Dr. W.W. Schertz와 Univ. of Chicago의 R. Winston교수, 그리고 集光形 Solar module의 測定에 협조해 주신 Sandia Lab.의 Dr. E. Bees에게 感謝드린다.

參 考 文 獻

- [1] R.L. Donovan et al; the Conf. Rec. of the 13th IEEE PVSC, pp.1125~1130, 1978.
- [2] R.L. Cole et al; ANL-77-42, Feb. 1977.
- [3] L.W. Janes et al; the Conf. Rec. of the 13th IEEE PVSC, pp.673~679, 1978.
- [4] R. Winston; Applied Optics 15, pp.291~292, 1976.
- [5] Swedlow Inc.; Technical information, Mar. 1980
- [6] R. Winston; Solar Energy, 16, pp.89~95, 1974.
- [7] H.J. Hovel; Semiconductor & Semimetal, Vol. 11. Academic Press, pp.166~180 1975.
- [8] A.M. Vasilev et al; Applied Solar Energy 11, pp. 72~77, 1975.
- [9] R.I. Frank et al; the Conf. Rec. of the 14th IEEE. PVSC pp.423~430, 1980.
- [10] C.M. Garner; SAND 79~1781, Dec. 1979.
- [11] C.E. Backus et al; Sandia Contract #.05-6037, 1978.
- [12] PRC Energy Analysis Co.; DOE/CS/32522-T1, July. 1980.
- [13] J.F.McMowell et al; SAND 80~0852, April, 1980.
- [14] E.L. Burgess et al; the Conf. Rec. of the 13th IEEE PVSC. pp.1121~1159, 1978.