

[논문] 한국태양에너지학회 논문집

Journal of the Korean Solar Energy Society

Vol. 21, No. 2, 2001

반사판을 이용한 고정식 집속형 복합 Panel에 대한 연구

김규조, 김완태, 이태호, 유형철, 허창수

인하대학교 전기공학과

A Study on the Fixed-Concentrating Hybrid Panel using Reflector

Kiu-Jo Kim, Wan-Tae Kim, Tae-Ho Lee, Hung-Chul Yoo, Chang-Su Huh

Department of Electrical Engineering, Inha University

Abstract

The most effective methods for utilizing solar energy are to use the sunlight and solar thermal energy such as hybrid panel simultaneously and to use concentrator. From such a view point systems using various kinds of photovoltaic panels are constructed in the world. However, there has not been a hybrid panel with a concentrator. If the sunlight is concentrated on solar cell, cell conversion efficiency increases and the temperature of the solar cells increases. As the temperature of the solar cells increases, the cell conversion efficiency gradually decreases. For maintaining the cell conversion efficiency constant, it is necessary to keep solar cell at low temperature. In this paper, after designing a concentration rate for concentrating, we propose a model for cooling the cell and for using wasted heat. And, we compare it with conventional panels after calculating the electrical and thermal efficiency, using the energy balance equation.

1. 서 론

태양에너지는 그 막대한 양과 청정성으로 인하여 대체에너지원으로 많은 연구가 진행되고 있다. 태양에너지는 특성상 에너지 밀도가 낮아 에너지 회수대비 투자비가 다른 에너지원에 비하여 높게 산정 되고 있으며¹⁾ 현재 사용되고있는 태양에너지 변환소자들은 주로 태양에너지가 갖고 있는 광 에너지와 열 에너지를 별도의 기구로 사용함으로써 그나마 낮은 에너지의 밀도를 더 저감시켜 사용하고 있는 실정이다.²⁾ 이를 개선하기 위하여 광, 열 복합 시스템²⁻⁵⁾이 연구되고 있으나 아직까지 이론적 변환효율에 크게 못 미치고 있는 실정이다. 광 전지의 변환효율은 광전류를 증가시킴으로서 상승시킬 수 있는데 이는 광 집속에 의하여 가능하다. 그러나 광 집속은 광 에너지만 사용하고자 하는 경우 온도상승을 유발하며 변환효율을 크게 저하시킨다⁶⁾. 하지만 적절한 냉각 구조와 열 이용이 설계되는 경우 그 이상의 광 변환효율을 가질 수 있다.

일반 태양전지의 경우 입력에너지의 약 70 % 정도가 열로 재 방출되어 전체적 효율을 저하시키고 있어 집속형 태양전지의 경우 태양열 에너지의 이용은 전체적 효율 향상에 매우 중요한 에너지원인 것이다⁷⁾. 또한 태양열 에너지 이용 기기 측면에서도 집속에 의한 온도 상승은 변환기기의 효율을 향상시키게 되어 총체적 태양에너지 변환기기의 효율을 향상시킬 수가 있다. 이러한 기기의 개발을 위해서는 광학적 에너지 변환효율과 열에너지 변환효율을 같이 검토하며 최적의 조건과 설계가 필요하다

또한 기존의 태양광, 열 에너지의 panel은 수광 면적이 바로 손실 면적이 됨으로서 열 손실이 증가하게 되는데 집광을 하면 이러한 손실 면적이 줄어들음으로서 흡수된 에너지의 재 발산을 줄일 수 있다. 전체적 효율 향상을 위해서는 태양광 추적 시스템의 도입이 필요하나 소형 및 중

형 시스템의 경우 경제성을 고려하여 최적의 고정 집속기를 선택하였다.

이에 본 논문은 반사판을 이용하여 태양광을 집속시킴으로서 Solar Cell을 통한 태양에너지의 변환효율을 증가시키고 폐열을 열적인 측면에 활용하여 총체적으로 태양에너지의 변환 효율을 증가시킬 수 있는 방법을 제안하였다.

2. 집속비 산정⁸⁾

그림 1에서 선분 AB는 수평면 수광부의 폭이며, 반사판이 위치하는 시작점은 수광부의 가장자리 A와 B이다. 각각의 반사판 요소의 수광부 표면에 대한 경사각 θ 와 각각의 반사판 요소들의 폭 W 는 집속기 개구부에 수직으로 입사하는 광선 ($\delta=0$)과 반사판 요소의 하위 극단 가장자리에 부딪히는 광선은 반사후에 수광부의 가장자리 B에서 만나고, 허용반각(acceptance half-angle)

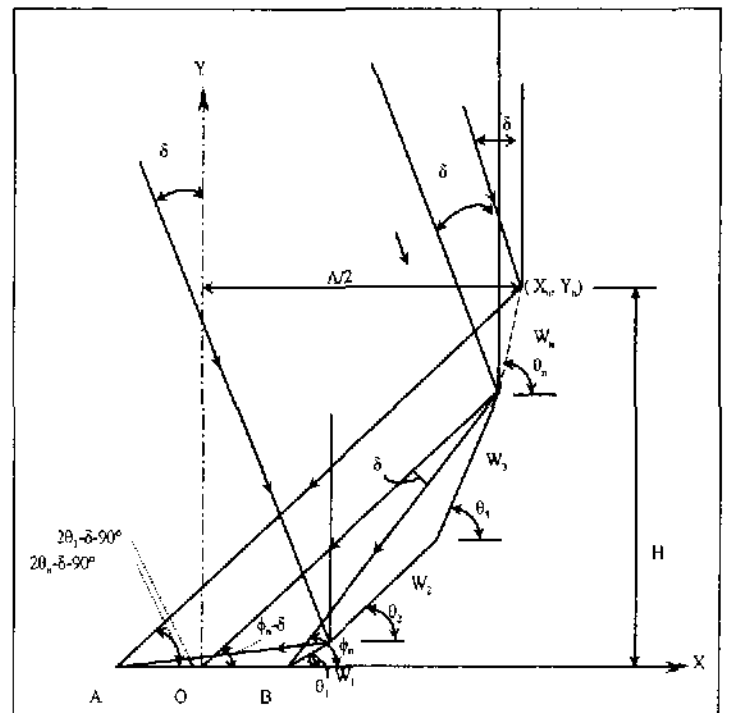


Fig. 1. Geometrical constraint imposed by the one-reflection criterion for driving the design of a nontracking linear solar concentrator with a flat horizontal absorber

δ 에서 반사판 요소의 상위 극단 가장자리에 부딪히는 광선은 반사후에 수광부의 가장자리 A에서 만나는 방법으로 결정된다. 반사판 요소의 경사각에 강요되는 이 조건은 δ 와 집속기에 수직인 각도 사이로 집속기로 입사되는 모든 태양조사가 반사판 요소로부터 반사 후에 단반사로 수광부에 전달된다.

n 번째 반사판 요소의 수광부 표면에 대한 경사각이 θ_n 이라면, A 점에서 수광부와 만나는 반사된 광선의 기울기는 $(2\theta_n - \delta - 90^\circ)$ 가 된다. 따라서 첫 번째 반사판 요소의 경사는 주어진 δ 에 대해 $90^\circ > \theta_1 > 45^\circ + \delta$ 범위가 될 수 있다. $\tan \theta_1 = \alpha_1$, $\tan(2\theta_1 - \delta - 90^\circ) = \beta_1$ 이라 하면, 다음과 같은 반사판의 경사각과 반사광의 관계식이 성립한다.

$$\alpha_1 = \frac{\beta_1 + \tan \delta}{1 - \beta_1 \tan \delta} + \sqrt{1 + \left(\frac{\beta_1 + \tan \delta}{1 - \beta_1 \tan \delta}\right)^2} \quad (1)$$

$$W_1 = \frac{X_1 - X_0}{\cos \theta_1} \quad (2)$$

단, X_0 는 하위 반사판 요소의 가장자리의 X좌표, X_1 은 상위 반사판 요소의 가장자리의 X좌표이며 X_1 은 다음과 같다.

$$X_1 = \frac{1}{\alpha_1 - \beta_1} (\alpha_1 X_0 + \beta_1 X_0) \quad (3)$$

이와 같은 방법으로, n 번째 반사판 요소에 대해서는 다음과 같은 일반화된 관계식이 성립한다.

$$\alpha_n = \frac{\beta_n + \tan \delta}{1 - \beta_n \tan \delta} + \sqrt{1 + \left(\frac{\beta_n + \tan \delta}{1 - \beta_n \tan \delta}\right)^2} \quad (4)$$

$$\beta_n = \tan(2\theta_n - \delta - 90^\circ) \quad (5)$$

$$W_n = \frac{X_n - X_{n-1}}{\cos \theta_n} \quad (6)$$

$$X_n = \frac{1}{\alpha_n - \beta_n} (\alpha_n X_{n-1} + \beta_n X_0 - Y_{n-1}) \quad (7)$$

$$Y_n = \beta_n (X_n + X_0) \quad (8)$$

따라서 집속비 (concentration ratio)는 다음과 같이 산출된다.

$$C = \frac{\text{aperture width}}{\text{absorber width}} = \frac{2X_n}{2X_0} \quad (9)$$

본 논문에서는 제작 시의 공정의 간단화를 위해 그림 2와 같이 반사판 요소를 하나만 사용한 V-trough 형태의 저 집속기를 설계하였다.

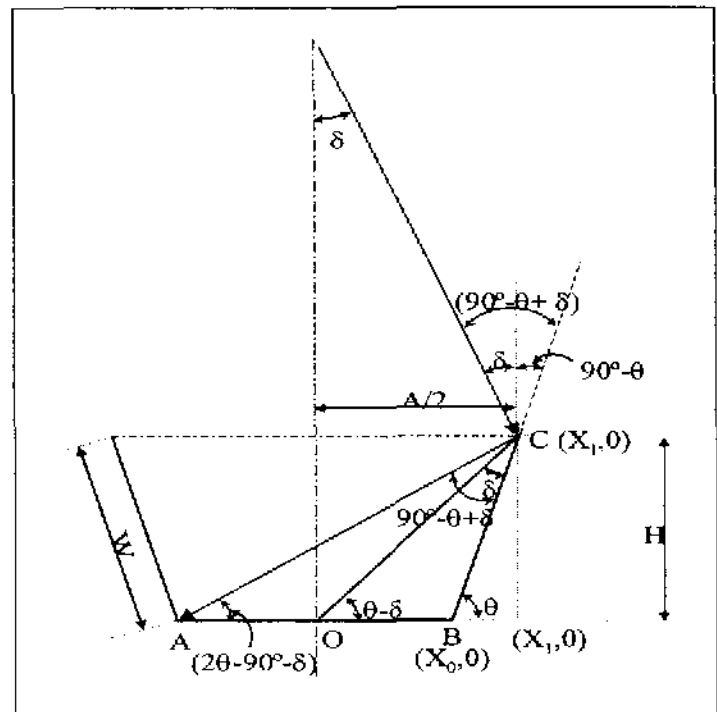


Fig. 2. V-trough 형태의 집속기

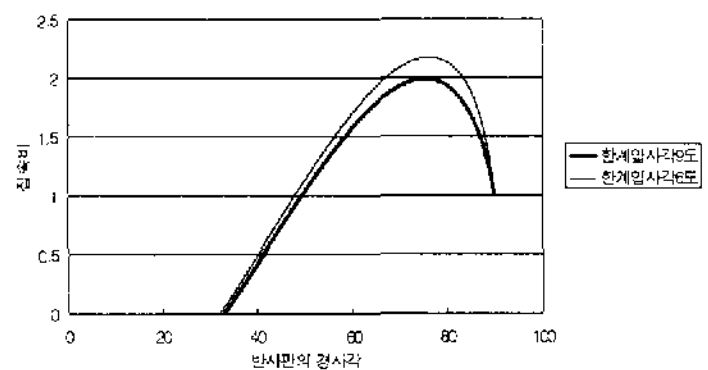


Fig. 3. 반사판의 경사각에 따른 집속비의 변화

그림 3은 반사판의 경사각도에 따른 집속비의 변화를 나타낸 것으로서 반사판의 Panel 반사판의 경사각도가 75.5도 일 때 최고의 집속비 2가 나오는 것을 알 수 있다.

3. 집속형 태양광 열 복합 Panel

본 연구의 목적은 태양에너지를 집속할 수 있는 집속기를 이용하여 태양전지의 변환효율을 증가시키고, 적절한 냉각 구조 및 열 이용으로 광 집속에 따른 태양전지 온도 상승 방지와 폐열 이용을 할 수 있는 집속형 태양광, 열 복합 패널을 제공하는데 있다.

따라서 본 연구에 따른 집속형 태양광-열 복합 패널은 집속된 태양 에너지를 전기 및 열로 변환시켜 사용하는 장치로서 기존의 문제점들을 해결하기 위하여 다음과 같은 수단을 사용하였다. 먼저, 태양 에너지를 집속하도록 반사판을 설치하였고, 전기 에너지를 생산하는 태양 전지(solar cell), 열을 흡수하는 흡열부 그리고 흡수된 열을 부하에 전달해주는 열매체 부분을 포함하는 것을 특징으로 한다. 또한 반사판 및 태양 전지에 도달하는 태양에너지는 유리덮개를 통해 들어오도록 하였다.

자세한 설계도는 그림 4에 나타내었다. 설계되어진 집속형 태양광, 열 복합 Panel의 기술적 수단 및 작용에 대해서 자세히 기술하면

첫째, 유리덮개는 Panel의 오염을 막고 또한 Panel에서 발생한 열을 외부로 유출하지 못하게 하는 작용을 하여준다. 즉 전체적인 열 손실을 줄이는 작용을 한다.

둘째, 반사판은 유리덮개를 통해 들어온 태양 광을 실제 사용할 수 있는 전기에너지와 열에너지로 변환시켜주는 solar cell 및 흡열판 위로 집속시켜준다. 따라서 면적 당 태양일사량의 양이 커진다.

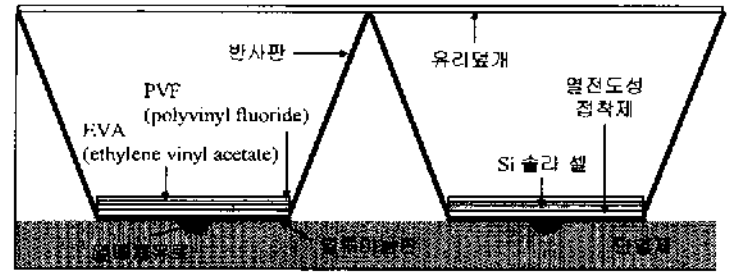


Fig. 4. 집속형 PV/T 패널의 단면도

셋째, solar cell은 집속된 광을 광전효과에 의해 바로 전기에너지로 변환시켜준다

넷째, 흡열판은 solar cell이 온도가 올라갈 때 그 열을 열매개체에 전달해준다.

다섯째, 열매개체는 흡열판에 의해 전달된 열을 그 필요에 따라 난방 및 온수를 데우도록 사용된다.

4. 에너지 평형식 및 효율 산정

우리는 집열 효율을 산정하기 위해 에너지 평형식¹⁾을 이용하였고 이를 위해 다음과 같은 가정을 두었다.

첫째, Panel의 side와 back을 통한 열에너지손실은 없다.

둘째, 실제로 집열판에 의해 반사된 빛은 유리에 흡수되거나 다시 반사되기는 하지만 그 양이 무시할 만큼 적어 반사된 빛은 유리를 통해 완전히 없어진다.

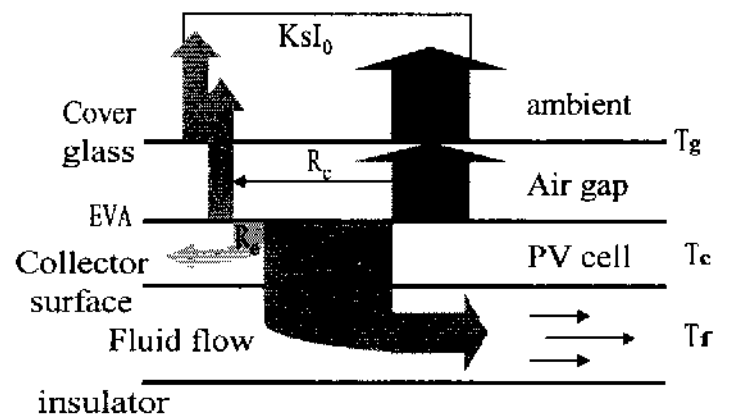


Fig. 5. 에너지 흐름 모델도

셋째, 모든 빛은 반사판을 통해서 집열판에 도달한다. Panel에서의 열은 집열판을 통하여 열매로 전달된다. 이같은 집열기 표면으로부터 열매로 전달되는 열은 또한 표면 각각은 일정한 온도에 있다고 가정함으로써 계산되어진다. 그림 5는 위의 가정하의 에너지 흐름 모델도이다.

각 Panel 요소에서의 에너지 보존법칙의 적용은 Panel의 다음 식들을 산출한다.

4.1 집열판에 들어오는 에너지

유리표면과 반사판에 의한 흡수와 여러 표면들 사이의 일사의 반사를 무시하면 단위 면적 당 집열판 즉 cell에 들어오는 정량의 에너지는 다음과 같다.

$$R_c [W/m^2] = K_s I_0 \tau_g R_r \tau_e \alpha_c \quad (10)$$

여기서, K_s 는 Panel의 집속비, I_0 는 경사면에 들어오는 일사강도로 이것은 수평면 일사량과 경사각도 보정 계수의 곱으로 나타낼 수 있다. 또한 τ_g 는 유리덮개의 투과율, R_r 은 반사판의 반사율, τ_e 는 태양전지 보호막인 EVA(etylen vinyl acetate)의 투과율 그리고 α_c 는 집열판 즉 태양전지의 일사강도 흡수율을 말한다.

4.2 단위면적 당 집열판으로부터 유리로 잃어버리는 열에너지 손실

cell에 의해 양도된 열 에너지는 부분적으로 유리 덮개로 전달되어지는데 그때의 열에너지는 다음과 같다.

$$R_{cg} [W/m^2] = \epsilon_{c(ir)} \sigma (T_c^4 - T_g^4) + U_{cg} (T_c - T_g) \quad (11)$$

$\epsilon_{c(ir)}$: 원적외선으로 방사되는 집열판의 방사율

σ : 볼츠만 상수 ($5.67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$)

U_{cg} : 집열판과 유리덮개 사이에서의 free convection에 대한 열 전달 계수

T_c : 집열판의 온도 즉 태양전지 판의 온도($^{\circ}K$)

T_g : 유리의 온도($^{\circ}K$)

4.3 단위 면적 당 유리로부터 주위로 잃어버리는 열에너지 손실

cell에 의해 양도된 부분적인 열 에너지는 최종적으로 유리 덮개에서 잃어버리게 되는데 이때의 덮개유리에서의 손실은 다음과 같다.

$$\text{- 복사 열 손실 : } \epsilon_{g(ir)} \sigma (T_g^4 - T_a^4) \quad (12)$$

$$\text{- 대류 열 손실 : } U_{ga} (T_g - T_a) \quad (13)$$

여기서, $\epsilon_{g(ir)}$: 원적외선으로 방사되는 유리의 방사율, T_a 는 주위의 온도($^{\circ}K$)

U_{ga} : 유리에서 주위로의 대류에 대한 열전달계수 (바람 10mph 에서 $U = 13.6 W/m^2 \cdot K$)

- 유리로부터 주위로 잃어버리는 전체 열에너지 손실

$$R_{ga} [W/m^2] = \epsilon_{g(ir)} \sigma (T_g^4 - T_a^4) + U_{ga} (T_g - T_a) \quad (14)$$

4.4 단위면적 당 태양전지에 의해 발생하는 전기 에너지

cell에 의해 흡수되는 일사로부터 그것에 의해 생산되는 단위 cell당 전기적 에너지는 다음과 같다.

$$R_e = \eta_0 K_s I_0 \tau_g R_r \tau_e \alpha_c \rho f (1 - \delta (T_c - 298)) \quad (15)$$

여기서, η_0 는 기준상태($1000 W/m^2, 25^{\circ}C$)에서의 태양전지의 전기 변환효율이고, ρf 는 셀 점유율로서 광 흡수 면적 당 셀 점유면적이고 마지막으로 δ 는 광전변환효율의 온도보정계수($0.00448 / ^{\circ}C$) [Baltus et al., 1995]이다

4.5 단위 면적 당 열매체에 의해 전달되는 에너지: R_w

결과적으로 손실에너지면에서 $R_{cg} = R_{ga}$ 이고 Panel에서의 열 에너지 평형식을 통하여 열매체에 전달되는 에너지를 구할 수 있다.

열 흡수기에 의해 흡수되는 단위 지역 당 에너지는 다음과 같다.

$$R_w = R_c - R_{cg} - R_e = R_c - R_{ga} - R_e \quad (16)$$

마지막으로, Panel에서의 전기적 효율과 집열 효율 그리고 전체 Panel의 효율을 구하여 보면 전기적 효율과 집열 효율은 다음과 같다.

$$\eta_e = \frac{R_e}{I_0}, \quad \eta_t = \frac{R_w}{I_0} \quad (17)$$

5. 수치해석

표 1은 수치해석에 적용할 모델의 주요한 사양이고 표 2에는 집속형 태양광, 열 Panel을 구성하는 물질들의 열복사특성을 나타냈다.

Table 1. 모델의 주요한 사양

광전지 부분		열 부분	
cell	Mono-Si	표면 물질	Al
효율 η_0 (%)	11	집열면적	4m ²
packing factor	0.98	열 매체	에틸렌 글리콜

Table 2. 물질의 열 복사 특성

	유리덮개	반사판	PVF	EVA	cell	흡열판
τ_g	0.90	-	0.94	0.93	0.10	-
R_f	-	0.95	-	-	-	-
ϵ	0.05	-	0.10	-	0.01	0.50
α	0.05	-	-	-	0.90	0.50

집속형 PV/T 특성을 검사하기 위해 비교 대조로서 태양광, 열 복합 패널(PV/T), 종래의 태양 전지 모듈(PV) 그리고 태양열 집열판(SC)에 대해서도 위와 같은 에너지 평형식을 만들어 해석했다.

5.1 일사량에 따른 특성변화

수치해석에 쓰일 변수들인 유리덮개 온도 T_g , 셀온도 T_c 를 수치 대입법을 이용하여 계산했다. 또한 환경 데이터인 외기온도 T_a 를 25°C로 결정하고 일사강도 I_0 (0-1000W/m²)를 파라미터로 했다. 그림 6은 위에서 기술한 에너지 평형식을 기초로 단위면적 당 집열판에 들어오는 에너지의 일사량에 따른 변화를 나타낸 것이다. 이 그림에서 집속형 Panel이 일사강도가 증가함에 따라 더 많은 에너지를 받는 것을 알 수 있다.

5.2 온도에 따른 특성 변화

집속 복합 PV/T 패널에서의 온도에 따른 전기적 열적 특성을 알아보기 위해 외부 온도와 유리 온도 25°C로 일사강도를 일정한 800W/m²로 하여 PV/T, PV 그리고 SC와 비교하였다.

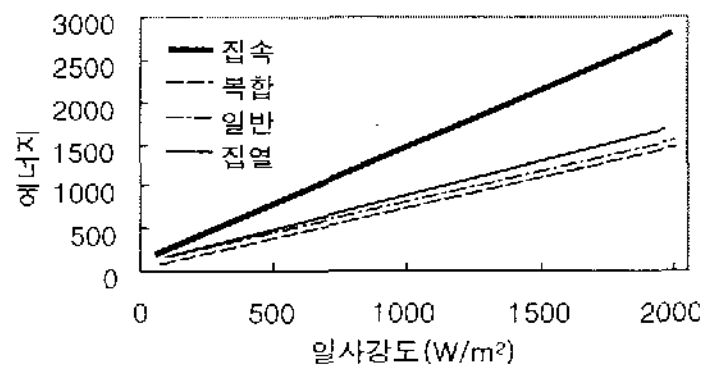


Fig. 6. 일사강도에 따른 유입 에너지의 변화

5.2.1. 광전 변환 특성

그림 7에서 셀 온도가 30°C일 때 패널의 전기적 효율은 집속형 PV/T가 15%, PV/T가 8%, PV가 9%가 되는 것을 알 수 있는데 PV/T가 PV

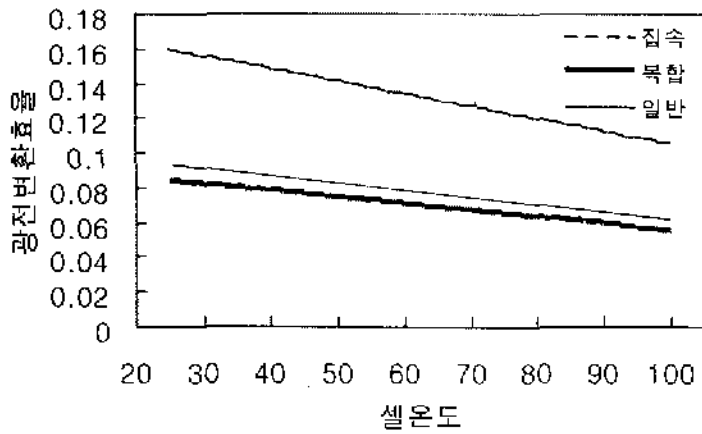


Fig. 7. 광전변환 효율의 온도특성

보다 전기적 효율이 적은 것은 유리덮개에 의한 광량적인 손실에 따른 것이다.

이러한 사실에서 모듈 구조가 전기적 효율에 영향을 주고 있다는 것이 밝혀지게 되었으며 집속함으로써 전기적 효율을 올릴 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

5.2.2 집열 특성

집열판 온도 T_c 가 50°C (외부온도 $T_a = 25^{\circ}\text{C}$, 일사강도 $I_0 = 800\text{W}/\text{m}^2$)일 때 각 패널 집열효율은 SC가 76%, PV/T가 53%, 집속형 PV/T가 105%가 되는 것을 그림 8에서 알 수 있다. 이러한 사실에서 모듈 구조가 집열 특성에 상당한 영향을 주고 있다는 것을 알 수 있고 광전 변환 특성과 마찬가지로 집속으로 인해 집열 특성이 상당히 올라갔다.

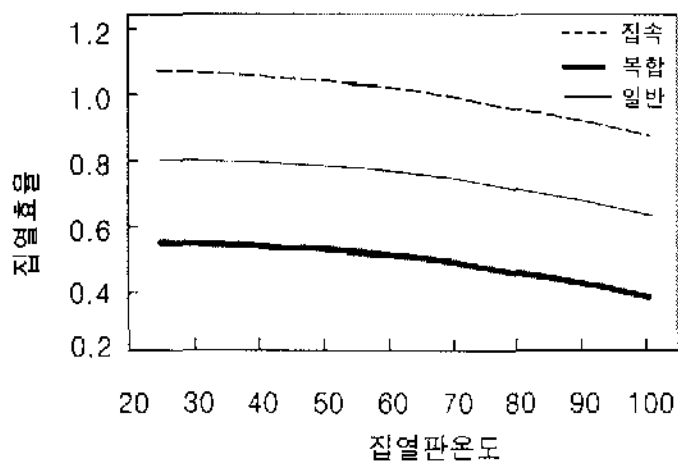


Fig. 8. 집열효율특성

6. 결 과

본 연구는 현재 실용화되어 있는 집열판(SC)과 태양전지모듈(PV)의 단점을 배제하고 장점만을 부각시켜 하나의 패널로 구현하는데 목적이 있다. 또한 패널의 이용 효율을 높이기 위해 집속을 사용하였다. 반사판을 이용한 집속형 태양광, 열복합 패널을 제안하였고 PV/T, PV 그리고 SC와 수치해석을 통해 패널의 특성들을 비교 대조하였다. 그 결과로서 제안한 패널이 다른 3종류보다 일사강도가 증가함에 따라 더 많은 에너지를 모을 수 있고 또한 복합적인 구조로 인해 전기적 열적 효율이 기존의 패널들보다 약 2배정도 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 기존의 개별적인 에너지를 제안된 패널을 사용하여 복합적으로 얻음으로써 전체적인 에너지 이용률도 크게 증가시킬 수 있었다. 따라서 집속형 복합 패널은 태양 에너지를 가장 효과적으로 이용하는 방법이고 또한 태양 에너지 이용 확산의 측면에도 큰 기여를 할 것이다.

감사의 글

본 논문은 산업자원부에서 시행한 에너지·자원기술개발사업의 사업수행결과의 일부로 관계자들에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Matthew Buresch, "Photovoltaic Energy Systems", McGraw-Hill Book Company, 1983, pp.1~23.
2. C. H. COX, III and P. Raghuraman, "Design Considerations For Flat-Plate-Photovoltaic/Thermal Collectors", Solar Energy Vol. 35.

- No. 3, 1985, pp.227~241.
3. H.P. GARG and R. S. ADHIKARI, "Transient Simulation of Conventional Hybrid Photovoltaic/Thermal(PV/T) Air Heating Collector". International Journal of Energy Research, 22, 1998, pp.547~562.
 4. Takumi Takashima, Tadayoshi Tanaka, Takuya Doi, Junji Kamoshida, Tatsuo Tani and Takashi Horigome, "New Proposal for Photovoltaic-Thermal Solar Energy Utilization Method", solar energy, Vol. 52, No 3, 1994, pp.241~245.
 5. Toru Fujisawa, Tatsuo Tani, "Consideration on Photovoltaic Thermal Binary Utilization for Residential Building(Evaluation by Solar Energy Fraction)". T. IEE, Japan, Vol. 119-8. No. 3, 1999.
 6. 朴昌樺, "에너지 변환 工學(太陽電池)", 金英社, 1986, pp.52~57.
 7. Viorel Badescu, Peter T. Landsberg, Alexis De Vos, "Statistical thermodynamic foundation for photovoltaic and photothermal conversion III:Application to hybrid solar converters", J. Appl. Phys. 81(8), 15 April, 1997.
 8. R. P. Goswami, G. D. Sootha, B. S. Negi, Z. H. Zaidi, "a New Design of Nontracking Seasonally Adjusted Plane Mirror Linear trough Solar Concentrator with a Flat Horizontal Absorber", International Journal of Energy Research, Vol 44, 1992, pp.837~849.
 9. Yasushi Morita, Toru Fujisawa, Tatsuo Tani, "Moment performance of Photovoltaic /Thermal Hybrid Panel(Numerical analysis and Exergetic Evaluation)", T. IEE Japan, Vol. 119-D, No. 1 (1999)