

진동형 히트파이프 흡열관이 결합된 하이브리드 태양광/열 시스템

김창희[†]·전동환^{**}·공상운^{**}·김종수^{*}

Hybrid Photovoltaic/Thermal Solar System with Pulsating Heat Pipe Type Absorber

Changhee Kim, Donghwan Jeon, Sangun Kong and Jongsu Kim

Key Words: Pulsating heat pipe (진동형 히트파이프), PV (태양광 발전 모듈), Solar photovoltaic /thermal system (태양광/열 시스템)

Abstract

The electricity conversion-efficiency of solar cell for commercial application is about 6-15%. More than 85% of the incoming solar energy is either reflected or absorbed as heat energy. Consequently, the working temperature of the photovoltaic cells increases considerably after prolonged operations and the cell's efficiency drops significantly. PV/T refers to the integration of a PV module and a solar thermal collector in a single piece of equipment. By cooling the PV module with a fluid steam like air or water, the electricity yield can be improved. At the same time, the heat pick-up by the fluid can be to support space heating or service hot-water systems.

In this study, a pulsating heat pipe solar heat collector was combined with single-crystal silicon photovoltaic cell in hybrid energy-generating unit that simultaneously produced low temperature heat and heat and electricity. This experiment was investigating thermal and electrical efficiency for evaluation of a PV/T system.

기호설명

ΔT : T_i 와 T_f 의 온도차(°C)

A_c : 집열관 표면면적(m^2)

그리스문자

G : 집열관 표면면적에 대한 태양광(W/m^2)

η_o : 전체 효율(-)

H : 집열관에 대한 일일 태양광($MJ/(m^2 day)$)

η_e : 전기 효율(-)

M : 저장탱크안 물의 질량(kg)

η_{th} : 온도 효율(-)

$\overline{T_a}$: 일일 평균 공기온도(°C)

T_i : 저장탱크안 초기온도(°C)

T_f : 저장탱크안 최종온도(°C)

T_w : 저장탱크안 물의 온도(°C)

1. 서론

최근 국제적으로 유가 상승추세에 대응하기 위하여 연료의 안정적인 확보 대책 및 온실가스(CO2) 배출 규제에 관련된 환경 문제 대두로 인해 대체 에너지 기술 개발과 보급, 확산에 관한 중요성이 강조되고 있는 실정이다. 이러한 문제 해결을 위해 대체 에너지에 대한 관심이 극히 고조되고 있는데, 대체 에너지 중 태양 에너지의

[†] 부경대학교 대학원

E-mail : k2k200@naver.com

TEL : (051)620-1502 FAX : (051)611-6368

* 부경대학교 기계공학부

** 부경대학교 대학원

경우 그 양과 질적인 면에서 무한하며, 무공해인 에너지원일 뿐만 아니라 비교적 적은 연구개발 비용과 짧은 개발 기간에 실용화가 가능한 분야 중의 하나이다. 그러나 광과 열로 대별되는 태양 에너지는 다른 에너지원에 비하여 상대적으로 변환효율이 낮아서 초기투자비가 많이 소요되고 넓은 설치공간을 필요로 한다. 따라서 설치공간이 제한적인 건축물에서의 태양에너지의 보급 확대를 위해서는 변환기구의 효율향상이 필요하다.

상용 태양전지의 전기변환 효율은 6-15% 정도이다. 태양전지 모듈은 전기를 발전하는 과정에서 자체적으로 발생하는 열과 주변대기의 상태에 따라 온도가 상승하게 되어 실질적 변환효율은 더 낮아지게 된다. 이에 관한 연구에 의하면 태양전지 모듈의 자체온도가 1°C 상승함에 따라 변환효율은 0.5% 정도 떨어진다고 한다.¹⁾ 또한 태양전지 모듈 표면에 조사되는 일사량이 많다고 해도 발전량이 비례적으로 증가되는 것이 아니다. 결국 태양전지 모듈 자체 온도를 가능한 낮게 유지할수록 변환효율에 유리하므로 시스템 주변온도로부터 PV 모듈의 온도저감방안이 고려되어야 한다. 대부분 일반적인 PV/T 시스템 타입은 평판형 집열기 구조에서 고안된 sheet & tube 개념에 기초한 것들이다. 집열기 흰 효율과 튜브의 접촉 정도에 따라 얻을 수 있는 전체 효율의 한계를 결정하는 중요한 설계 요소들이다. PV 모듈에 평판 구조의 흡열관이 결합되었을 때 시스템의 성능에 대한 종래연구로써, Tin-Tai Chow 등은 전면 유리가 있고, 집열 면적이 0.7875 m²이며, 표준 조건에서 사용하였을 경우 14.5%의 변환효율을 갖는 다결정질 실리콘 태양전지 모듈 성능에 대해 보고하였다.^{2),3)} 흡열관은 사출된 알루미늄 합금의 평평한 박스구조의 흡열관을 사용하였다. 흡열관은 서머사이폰 구조를 이루고 있으며, M/Ac 비가 65.2 kg/m²일 때 4.6%의 전기 효율을 나타내었으며, 40%의 열효율로 기존의 사이펀형 태양열 집열기 효율의 약 80% 정도이지만 주 에너지 저장 효율(primary energy-saving efficiency)은 기존의 시스템보다 높다. 그러나 열효율을 높이기 위하여 태양열 집열관과 결합되어 있어 PV 모듈에서 발생한 열만 저장하였을 경우 이보다 효율이 낮아질 것이다. 따라서 본 연구에서는 태양전지 모듈의 방열 및 열 회수를 위한 흡열관으로서 제작비용이 저렴하고, 다양한 형상으로서의

제작이 가능하며, 열전도도가 구리의 2000배 정도로 뛰어난 진동형 히트파이프(pulsating heat pipe)의 적용가능성과 이를 이용한 PV/T 시스템의 효율 등을 실험적으로 평가하여 보고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서는 두 가지의 실험을 진행하였다. 실험 I 은 PV/T 시스템에서 진동형 히트파이프의 흡열관으로서의 최적 작동조건을 확인하고 작동유체와 경사각 및 충전율을 변화에 따른 열전달 성능을 평가하였다. 실험 I 의 결과를 토대로 흡열관을 제작하여 흡열관이 없는 PV 시스템과 흡열관이 장착된 PV/T 시스템의 성능을 평가하기 위하여 실험 II 를 수행하였다.

2.1 진동형 히트파이프 열전달 성능평가

2.1.1 실험장치 I

Fig. 1은 각각 본 실험 사용된 진동형 히트파이프의 열 응답성을 실험하기 위한 장치도이다. Fig. 1에 나타낸 바와 같이, 장치는 크게 열원부, 계측부, 제어부, 시험부로 구성되었다. 먼저 시험부로는 진동형 히트파이프의 경사각 조절을 위한 받침대와 진동형 히트파이프로 구성되어졌으며 사용될 진동형 히트파이프는 알루미늄 압출관의 채널 벽 일부를 제거하여 serpentine 구조를 갖도록 제작하였다, 알루미늄 압출관은 93.295 mm²의 단면적을 가지며 수력직경이 1.26 mm², 아랫

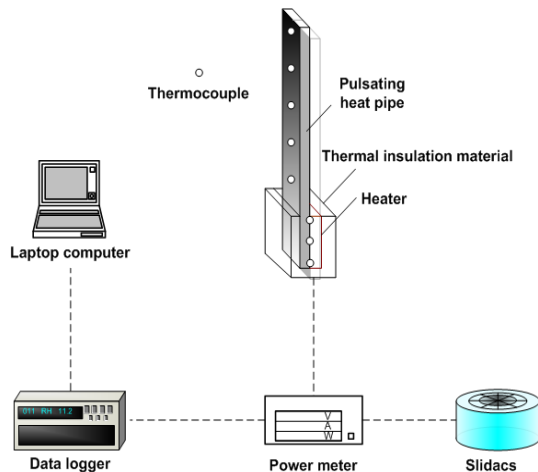


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

변이 1.825 mm, 윗변이 1.225 mm인 사다리꼴 모양으로 25개의 채널로 이루어져 있다. 채널 내부 면에는 흰 역할을 할 수 있도록 물결모양으로 제작하여 열전달 성능이 향상될 수 있도록 제작되었다. 알루미늄 압출관의 단면도를 Fig. 2에 나타내었다. 열원부로는 최대출력이 240 W이고, 크기는 폭 56 mm 길이 200 mm인 판형 히터가 사용되었으며, 제어부는 열원부에 일정한 열량을 공급하기 위하여 슬라이더스로 구성되었다. 계측부는 열원부의 입열량을 측정하기 위한 Digital power meter와 다점의 온도를 측정하기 위하여 Hybrid Recorder(yokogawa, DR-230)와 인터페이스를 위한 PC로 구성되어있다.

2.1.2 실험방법 I

PV/T 시스템은 건물의 벽면이나 지붕 등 다양한 각도로 설치될 수 있으며, 또한 국내의 기후 조건에서는 계절에 따라 조사되는 일사량의 편차가 클 뿐만 아니라 하루 동안에도 그 양의 편차가 심하여 PV/T 모듈의 뒷면 온도는 시시각각으로 변한다. 따라서 이러한 PV/T 시스템의 흡열판으로 진동형 히트파이프를 적용하기 위해서는 열량, 각도 등 다양한 조건에서 그 성능이 입증되어야 한다. 즉, 히트파이프 전체적으로 작동액의 진동과 순환이 이루어져, 온도가 고르게 분포하는데 대해서 실험을 통하여 알아 보아야 한다. 그러므로 본 실험에서는 작동 유체의 종류와 그

리고 경사각에 따른 히트파이프의 성능을 조사하기 위하여 선행연구에서 우수한 성능을 나타낸 R-22, R-134a를 작동 유체로 선정하고 가열에 필요한 충분한 온도를 얻기 위하여 판히터(240 W)를 사용하여 40 W의 입열량의 조건으로 차징을 30%, 40%로 구분하고, 설치 경사각도도 수평, 30°, 45°, 60°, 수직으로 변화시키며 수행하여 보았다. 폭 56 mm, 길이 114 mm의 진동형 히트파이프의 가열부와 냉각부의 온도차와 온도분포를 알기위해 일정한 간격으로 T형 열전대를 5점 부착하였고, 가열부에 3점, 그리고 실내온도를 측정하기 위하여 열전대를 실내공기에 노출시켜 그 온도를 측정하였다. 이렇게 부착된 열전대는 직접 데이터로거(yokogawa, DR-230)와 연결되어 매 2초 간격으로 정상상태에 이를 때까지 측정하여

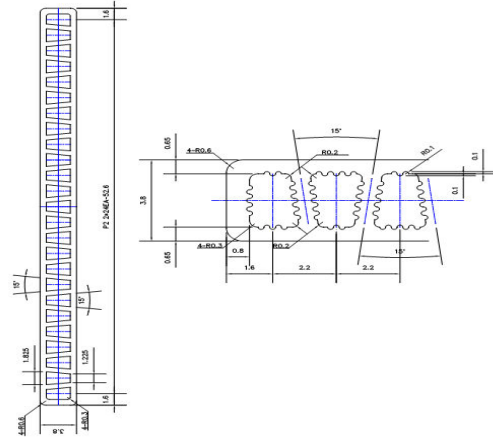


Fig. 2 Cross section of aluminium alloy extruded flat tube

PC에 모든 측정값을 받아 프로그램 상에서 1분 단위로 평균온도를 구하여 처리하였다.

2.2 PV/T 시스템 작동성능 평가

2.2.1 실험장치 II

본 연구에 사용된 PV/T 시스템의 흡열판과 실험장치의 개략적인 구성은 Fig. 3에 나타내었다. 실험 I의 결과에 따라 작동유체로는 R-22, 충전율은 40%로 봉입하였다. 진동형 히트파이프는 태양전지 모듈 후면에 얇은 접착층을 갖는 에폭시와 알루미늄 지지대를 사용하여 압착하여 부착하였으며 후면에는 두께 45 mm로 단열하였다.

Table 1에 나타낸바와 같이 0.534 m^2 의 상용 태양전지 모듈(최대출력 75 W_p , 최대전압 16.8 V)을 사용하였다. 태양전지 모듈은 4면이 0.083 m^2 이고 다른 4면은 0.003 m^2 의 크기를 갖는 8각면을 형성하고 있는 셀 36개(9×4)가 구성되어있으며, 직렬로 연결되었다. 태양전지 모듈은 공기층에 의해 태양전지와 전면유리가 분리되어있고, 태양전지 위에는 TPT(tedlar polyester tedlar)와 EVA(ethylene-vinyl acetate)가 놓이며 아래에는 EVA와 후면 커버가 구성되어있다. TPT는 절연체이고 EVA는 접착제이다. 저장탱크는 40 l 압력용기에 30 l의 물을 사용하였고 외부에는 30 mm 두께로 단열하였다. 흡열판으로 사용된 진동형 히트파이프의 응축부에는 태양전지 모듈 후면에서 받은 열을 저장탱크로 자연대류에 의해 수송

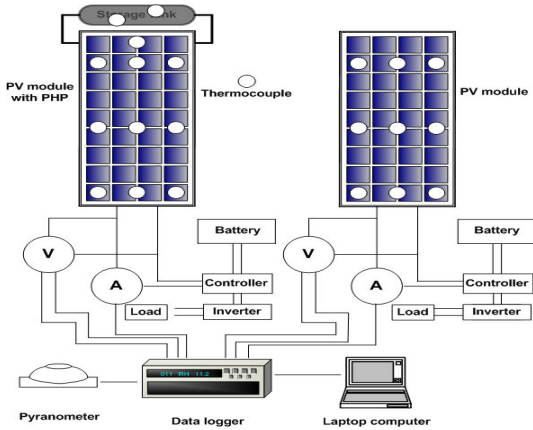


Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus II

할 수 있는 직경 17.7 mm, 폭이 80 mm의 수관이 부착되었다. 태양전지 모듈은 정남향으로 설치하였으며 경사각은 실험 I의 결과와 집열기의 설치 경사각을 고려하여, 히트파이프의 최적 설치 경사각인 45°로 하였다. 그리고 일사량계는 태양전지 모듈의 설치각도와 동일하게 하였다. 측정장비로는 태양전지 모듈에서 생산된 전력을 측정하기 위해 전류계와 전압계를 직·병렬로 연결하였으며, PV/T 시스템의 집열 성능을 평가하기 위해 시험부의 온도 측정하기 위한 Hybrid Recorder(yokogawa, DR-230)와 시간에 따른 일사량을 측정하기 위한 High Precision Pyranometer(EKO, MS-801)와 이와 인터페이스를 위한 PC가 사용되었다.

2.2.2 실험방법 II

PV/T 시스템의 성능평가를 위한 측정은 11월에 걸쳐 진행되었으며, 9시부터 16시까지 7시간동안 1분 간격으로 데이터 저장하여 5분 동안의 평균으로 표시하였다. 시스템의 온도를 측정하기 위해 T형 열전대를 이용하였으며, Fig. 3에 나타낸 바와 같이 측정점은 흡열판이 장착된 태양전지 모듈 후면에 9점, 흡열판이 장착되지 않은 모듈 후면에 9점, 집열매체 도관에 1점, 그리고 외기온도에 1점이며 저장탱크는 자연순환으로 인하여 온도차가 존재하기 때문에 상부와 하부에 각각에 1점씩 모두 22점이다. 또한, 시스템의 발전량을 구하기 위해 전류와 전압을 측정하였다.

Table 1 Specification of photovoltaic module

Power maximum (Pmax)	75 W
Power voltage (Vmpp)	16.8 V
Power current (Impp)	4.47 A
Open circuit voltage (Voc)	21.3 V
Short circuit current (Isc)	5.0 A
Operating temperature	From -20 to 60 °C
Storage temperature	From -20 to 60 °C
Number of cells & connection	36EA (4 × 9)
Dimension (H×W×D)	1185 × 536 × 35 mm ³
Weight	7.9 kg

3. 실험결과 및 고찰

PV/T 시스템의 성능은 열효율(thermal efficiency) η_{th} 와 전기 효율(electrical efficiency) η_e 를 조합하여 나타낼 수 있다. 이 두 가지 용어는 각각 주어진 시간 내에 태양전지 모듈에 입사된 일사량(irradiation)으로부터 생산된 열과 전력의 비를 의미한다. 열 효율과 전기 효율을 합한 것이 전체 효율 η_o 이며, 일반적으로 전체 성능을 평가할 때 사용되며 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta_o = \eta_{th} + \eta_e \quad (1)$$

진동형 히트파이프로 만들어진 흡열판의 열 성능은 여러 작동 조건에 영향을 받는다. PV/T 시스템은 설치 각도, 일사량의 변화, 대기온도, 풍속의 조건에 의해 성능이 변화한다. 따라서 다양한 조건에서의 실험이 진행되어야 하며 일일 효율(daily efficiency) η_{th} 는 식 (2)에 의해 구해졌다.

$$\eta_{th} = \frac{MC_p(T_f - T_i)}{HA_c} \quad (2)$$

여기서, M 은 PV/T 시스템 내에서 물의 질량이고, C_p 는 물의 비열, H 는 9시부터 16시까지 태양전지 모듈 표면에 입사된 일사량, T_i 와 T_f 는 각각 저장 탱크 내 초기 물의 온도와 최종 온도를 말한다.

3.1 히트파이프의 충전률에 의한 온도분포

PV 모듈을 냉각하여 발전효율을 향상시키고 모듈에서 발생하는 열을 회수함으로써 인하여 시스템의 전체 효율을 향상시키고자 열응답성이 우수한 진동형 히트파이프를 적용한 시스템에 대한 연구를 진행하여 Fig 4와 같은 결과를 얻었다.

진동형 히트파이프를 PV/T 시스템에 적용하기 위한 기초 실험결과 R-22 40%가 다양한 각도에서 가열부와 냉각부의 온도차가 7.3~9.4℃로 가장 우수한 열전달 성능을 나타내었다.

3.2 PV/T 시스템의 성능 평가

Fig. 5에 11월 중 맑은 날의 일사량과 외기 온도, 그리고 저장탱크내의 물의 온도를 그래프로 나타내었다. 일사량이 증가할수록 저장탱크내의 물의 온도 상승 폭이 크고, 물의 온도가 최종 온도에 임박할수록 온도 폭이 작은 것을 확인할 수 있다. 저장탱크내 물의 온도는 초기에 14.6℃였으며, 최종온도는 36.8℃까지 상승하여 30.16%의 집열효율을 보였다.

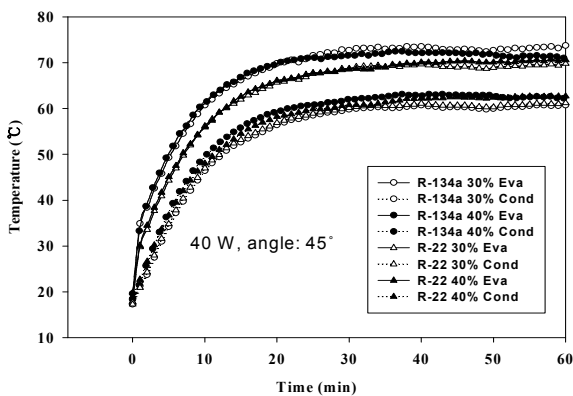


Fig. 4 Temperature profile with time at an angle of 45 degrees

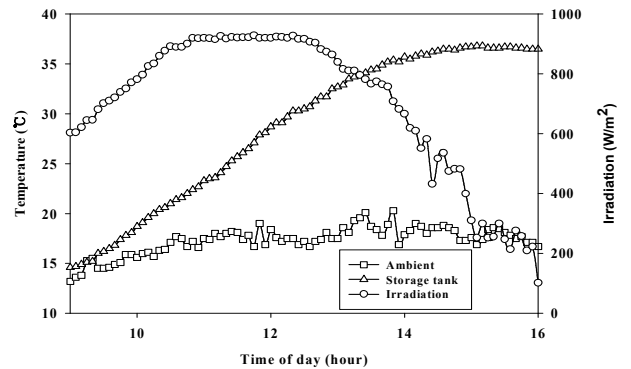


Fig. 5 Daily variation of water storage tank temperature with ambient temperature and irradiation

Fig. 6에는 PV/T 시스템에 사용된 PV 모듈 (PV-1)의 배면온도와 흡열판이 결합되지 않은 PV 모듈(PV-2)의 배면온도를 나타내었다. PV-2의 배면온도는 일사량에 따라 29.8~49.3℃로 하루 중에 변화 폭이 상당히 컸다. 진동형 히트파이프 흡열판의 결합으로 인하여 PV-1의 배면온도는 일사량에 따라 32~44.2℃로 온도 변화 폭이 현저히 줄었으며, 더욱 낮은 온도를 유지하였다. 두 시스템의 배면온도차는 하루평균 1.67℃였으며, 일사량이 많은 시간대인 10-14시까지는 평균 3.81℃의 차이를 나타내었다. 그러나 일사량이 적어 모듈의 배면온도가 저장탱크내의 물의 온도보다 작아지는 16시 근처에서는 오히려 PV-1의 배면온도가 높아지는 현상을 보였다.

Fig. 7에는 시간에 따른 발전효율과 발전량을 나타내었다. 효율과 발전량은 PV-1과 PV-2의 배면온도와 밀접한 관계를 보여준다. 일사량이 동일한 조건에서 배면온도에 따라 효율과 발전량이 변하는 것을 확인할 수 있다. 흡열판으로 인한 냉각효과로 인하여 PV-1, PV-2의 발전효율은 각각 11.07%, 10.6%로 4.43%증가하였으며, 일사량이 많은 시간대인 10시에서 14시까지 7.02%증가하였다. 발전효율의 향상으로 인하여 발전량은 PV-1은 41.59 W, PV-2는 39.48 W로 5.4% 증가하였으며, 10-14시에는 각각의 발전량이 51.28 W, 48.2 W로 6.4%가 증가하였다. PV/T 시스템의 흡열판에 의해 셀이 냉각되어 전체효율이 30.63% 증가하였다. 집열효율은 기존의 연구자들의 실험 결과보다 7-10%정도 낮았으나 기존의 연구자들은

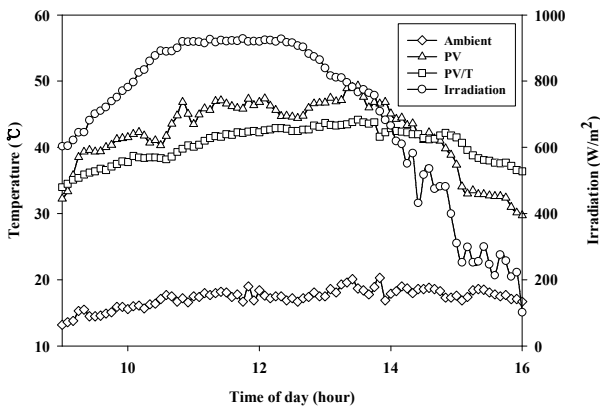


Fig. 6 Daily variation of back temperature of photovoltaic module with ambient temperature and irradiation

펌프로 인한 전력을 소비하였으므로 실제 효율은 이보다 낮을 것이다. 따라서 본 연구의 시스템의 성능이 더 우수한 것으로 사료된다.

4. 결론

PV 모듈을 냉각하여 발전효율을 향상시키고 모듈에서 발생하는 열을 회수함으로써 인하여 시스템의 전체 효율을 향상시키고자 열응답성이 우수한 진동형 히트파이프를 적용한 시스템에 대한 연구를 진행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 진동형 히트파이프를 PV/T 시스템에 적용하기 위한 기초 실험결과 R-22 40%가 다양한 각도에서 가열부와 냉각부의 온도차가 7.3 ~ 9.4°C로 가장 우수한 열적 성능을 나타내었다.

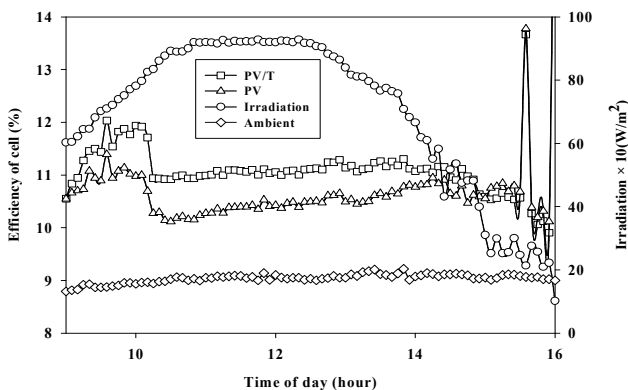


Fig. 7 Daily variation of electrical efficiency of photovoltaic module with ambient temperature and irradiation

(2) 흡열판을 설치하지 않은 경우 모듈의 배면 온도는 29.8 ~ 49.3°C로 변화폭이 컸으며, 흡열판이

결합되었을 경우는 32 ~ 44.2°C로 변화폭을 줄여 모듈의 열응력을 줄여 수명을 연장시킬 수 있을 것으로 여겨지며, 하루 평균도차는 1.67°C이며 일사량이 많은 10 ~ 14시에는 3.81°C의 온도차를 보였다.

(3) 흡열판의 설치로 배면온도를 낮게 유지한 결과 발전효율과 발전량은 흡열판이 설치되지 않은 경우보다 각각 4.43%와 5.4% 증가하였으며, 10 ~ 14시에는 각각 7.02%, 6.3% 증가하였다.

(4) 흡열판이 결합된 PV/T 시스템의 집열효율은 30.16%이며, 전체효율 41.23%로 흡열판이 없는 경우보다 30.63% 증가하였다.

참고문헌

- (1) Anja Royne, Christopher J. Dey and David R. Mills, 2005, "Cooling of photovoltaic cells under concentrated illumination: a critical review", Solar Energy Materials & Solar Cells. 86, pp. 451-483.
- (2) oru Fujisawa and Tatsuo Tani, 1997, "Annual exergy evaluation on photovoltaic-thermal hybrid collector", Solar Energy Materials and Solar Cells. 47, pp. 135-148.
- (3) Wei. He, Tin-Tai Chow, Jie Ji, Jianping Lu, Gang Pei, Lok-shun Chan, 2006, "Hybrid photovoltaic and thermal solar-collector designed for naural circulation of water", Applied Energy 83, pp. 199-210.1. 서론