

# 전면 액체식 흡열판을 적용한 Unglazed PVT(태양광·열) 모듈의 성능 실험연구

## The Experimental Performance of an Unglazed PV-Thermal Module with Fully Wetted Absorber

김진희\*      천진아\*\*      김준태\*\*\*  
Kim, Jin-Hee      Chun, Jin-Aha      Kim, Jun-Tae

### Abstract

In general, there are two types of PVT module depending on the existence of the glass in front of PV module: glazed and unglazed. On the other hand, the water-type PVT modules can be classified into two types, according to absorber type: the sheet-and-tube absorber PVT module and the fully wetted absorber PVT module.

The aim of this study is to analyze the electrical and thermal performance of a water-type PVT module with fully wetted absorber. For this study, a prototype of unglazed PVT module with fully wetted absorber was designed and built, and both the thermal and electrical performances of the prototype module were measured in outdoor conditions. A conventional mono-crystalline Si PV module was tested alongside the PVT module for their electrical performance comparison. The results showed that the thermal efficiency of the PVT module was average 51% and its electrical efficiency was average 14.3% in mean fluid temperature 10-40 °C, whereas the electrical efficiency of the conventional PV module was average 12.6%. It is found that the electrical efficiency of the PVT module was improved by approximately 14% compared to that of the PV module. The temperature of PVT module becomes lower due to the cooling effect by the fluid of the absorber. The results proved that the electrical efficiency was higher when the mean fluid temperature was lower.

키워드 : Unglazed 태양광·열 모듈, 전면 액체식 흡열판, 튜브부착형 흡열판, PV모듈, 열효율, 전기효율

Keywords : Unglazed photovoltaic-thermal module, Fully wetted absorber, Sheet-and-tube absorber, Conventional PV module, Thermal efficiency, Electrical efficiency

## 1. 서론

### 1.1 연구배경 및 목적

태양광발전(PV) 시스템은 신재생에너지 중 비교적 낮은 효율의 설비로, 전체 효율을 결정짓는 주된 요소는 태양전지(Solar Cell) 및 태양광발전(PV) 모듈의 효율이라 할 수 있다. 현재 일반적으로 보급되고 있는 결정질계 PV모듈은 표준실험조건(Standard Test Conditions: Air mass 1.5, Irradiation intensity 1000W/m<sup>2</sup>, Cell temperature 25°C) 하에서 12~14%의 비교적 낮은 전기변환효율을 갖고 있다. 그러나 PV모듈을 건물에 일체화하여 적용하는 경우 통풍이 원활하지 않으면 PV모듈의 온도상승으로 그 효율이 더욱 낮아질 우려가 있다.

최근 고효율 태양전지 개발과 함께 건물에서 태양광발전(PV) 모듈의 고효율화를 실현하기 위한 노력이 활발히 이루어지고 있다. 이 중에서도 건물에 적용된 PV모듈의 열기를 제거하여 효율을 높이거나 PV모듈이 발생시키는 열기를 적극적으로 이용하려는 기술개발이 활발하다.

PVT시스템은 PV모듈의 전기생산과 동시에 발생하는 열을 효율적으로 이용하여 급탕이나 난방 등에 활용하기 위한 설비이다. 즉, PV모듈의 열기를 제거하여 전기효율을 개선하고, 이 제거된 열을 적극적으로 이용하기 위한 것이다. PVT시스템은 전기와 열을 동시에 생산하기 때문에 태양광발전시스템과 태양열 집열기를 개별적으로 설치하는 것에 비해 설치면적을 줄일 수 있다. 이미 성능시험과 에너지 해석 모델링 기법을 통해 다양한 형태의 PVT시스템이 소개<sup>1)</sup>되었다. 또한 최근 여러 국가에서 개발된 다양한 형태의 평판형 PVT시스템을 공기식과 액체

\* 주저자, 공주대 대학원 박사수료(jiny@kongju.ac.kr)

\*\* 공주대 대학원 석사과정(jina.c@kongju.ac.kr)

\*\*\* 교신저자, 공주대 건축학부 교수, 공학박사(jtkim@kongju.ac.kr)

1) A. Pascal, et al. (2006) *PVT Roadmap; A European Guide for the Development and Market Introduction of PV-Thermal Technology*. Netherlands: ECN

식으로 분류하여 PVT시스템의 디자인을 분석한 연구<sup>2)</sup>가 발표된 바 있다. 한편, 기존의 연구<sup>3)</sup>들은 디자인 형태에 따라서 집열기와 유사한 외관으로 PVT컬렉터 또는 하이브리드 PVT시스템이라 명명하기도 한다. 본 논문에서는 이러한 태양광·열 복합컬렉터 또는 시스템을 ‘PVT모듈’이라 칭하였다.

건물일체형 태양광발전(BIPV)용 모듈의 후면에서 데워진 열기를 건물의 난방열원으로 이용하기 위한 공기식 PVT시스템에 대한 연구<sup>4)</sup>와 함께 상대적으로 공기식보다 열성능이 우수한 액체식 PVT시스템에 대한 연구<sup>5)6)7)</sup>들이 최근 몇 년간 활발히 진행되었다. 최근 발표된 연구<sup>8)</sup>에서는 Unglazed PVT 성능을 유체 입구온도에 의한 PVT모듈의 온도특성과 함께 분석하기도 하였다. 이러한 연구들은 기존 태양열 집열기의 흡수판(튜브부착형 흡수판)을 이용해 제작된 Glazed와 Unglazed PVT의 열적 전기적 성능을 실험을 통해 분석한 것이다.

일반적으로 액체식 PVT모듈의 경우 유리커버 유무에 따라 Glazed형과 Unglazed형으로 분류할 수 있다. 또한 PVT모듈은 PV모듈 후면에 부착되는 태양열 흡열판의 형태에 따라 튜브부착형 타입과 전면 액체식 타입으로 분류할 수 있다.

앞서 언급된 연구들이나 일반적으로 상용화된 액체식 PVT모듈은 태양열 흡열판이 튜브부착형 흡열판을 갖는 유형들이 대부분이며 집열효율을 높이기 위한 전면액체식 흡열판 부착 모델에 대한 연구는 미비한 실정이다. 이에 본 연구의 목적은 기존 국내연구에서 발표된 튜브부착형 흡열판이 적용된 PVT모듈이 아닌, PV모듈 후면에 전면 액체식 태양열 흡열판이 부착된 액체식 Unglazed PVT모듈을 대상으로 실험을 통해 열적, 전기적 성능을 분석하고, 이를 기존 PV모듈의 성능과 비교 분석하는데 있다.

### 1.2 연구방법

본 연구를 위해 PV모듈 후면에 전면 액체식 흡열판이 부착된 액체식 Unglazed PVT모듈을 시제작하였다. 그리고 이 Unglazed PVT모듈 제작을 위해 사용된 동일한

PV모듈을 대상으로 Unglazed PVT모듈과 함께 동일한 외기조건에서 실험을 수행하였다. 열성능과 전기성능 실험은 ASHRAE기준<sup>9)</sup> 과 ECN의 PVT 성능측정 가이드라인<sup>10)</sup>의 성능측정 및 분석 방법에 따라 수행하였다.

본 논문은 PVT모듈의 전기성능을 기존 PV모듈과 비교함에 있어, PV모듈자체 온도특성 비교내용은 포함되지 않았다.

### 2. 액체식 PVT모듈의 분류

액체식 PVT모듈은 앞서 언급된 바와 같이 유리커버 유무에 따라 또는 PV모듈 후면에 부착된 흡열판의 형태에 따라 분류할 수 있다.

그림 1은 Glazed PVT모듈의 단면을 나타낸 것으로, 기존의 태양열 집열기와 같은 외관을 갖으며 집열기 내부의 태양열 흡수판 위에 PV모듈이 부착된 것이다. 흡열판과 결합된 PV모듈 전면에 일정한 공간을 두고 유리커버가 추가적으로 구성되므로 집열기 내의 열손실을 줄여 열효율이 높게 유지될 수 있다. 그러나 유리커버에 의해 일사에너지의 투과가 감소되고 내부에 있는 PV모듈의 온도가 상승하게 되어 Unglazed형 보다 상대적으로 전기적인 효율은 낮아지게 된다.

Unglazed PVT모듈(그림 2)의 경우 저철분 강화유리로 마감된 PV모듈이 흡열판과 결합된 채 그대로 외기에 면하는 형태로 기존 PV모듈과 유사한 외관을 갖는다. 따라서 대류에 의한 PV모듈의 냉각이 Glazed PVT모듈보다 용이하여 전기효율이 증진된다. 그러나 집열기 자체의 열손실은 Glazed형 보다 높아 열성능 측면에서는 불리하다.

그림 3은 서로 다른 유형의 흡열판을 부착한 Unglazed PVT모듈의 단면상세를 보여주고 있다. 튜브부착형 타입의 경우 기존 태양열 집열기와 동일한 흡열판이며 일정한 간격을 두고 원형유로가 흡수판에 부착된 형태이다. 전면 액체식 타입의 경우 별도의 흡수판 없이 사각 채널 형태로 배열된 유로가 흡수판 역할을 하는 형태이다.

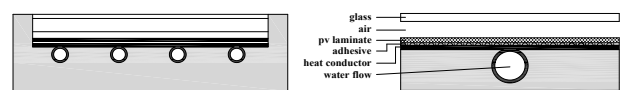


그림 1. Glazed PVT모듈의 단면과 상세

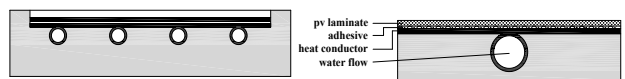


그림 2. Unglazed PVT모듈의 단면과 상세

2) A. Ibrahim, et al. (2011) Recent advances in flat plate photovoltaic/thermal(PV/T) solar collectors, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), pp.352-365

3) Y. Tripanagnostopoulos. (2002) Hybrid Photovoltaic/Thermal Solar System, *Solar Energy*, 72(3) pp.217-234

4) 김준태. (2008) 「에너지절약형 다목적 공기식 집열 지붕시스템 개발 보고서」, 지식경제부

5) 김진희, 김준태. (2007) 문헌고찰을 통해 PV/Thermal 시스템의 유형별 성능특성비교, *한국건축환경설비학회 논문집*, 1(2), pp.15-21

6) 김진희 외 2인. (2008) 액체식 Unglazed PVT 복합모듈의 성능 실험연구, *한국태양에너지학회 추계학술발표대회 논문집*, pp.184-189

7) 김진희 외 2인. (2009) 실험에 의한 Glazed형과 Unglazed형 액체식 PVT 집열기의 에너지성능 비교 분석 연구, *한국생태환경건축학회 논문집*, 9(4), pp.37-42

8) 천진아 외 3인. (2010) 실험에 의한 액체식 Unglazed PVT모듈의 성능 분석, *한국태양에너지학회 추계학술발표대회 논문집*, pp.21-26

9) ASHRAE. (1991) *ASHARE 93-77; Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors*. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc.

10) H. Zondag, N. Borg, W. Eisenmann. (2005) *D8-6: PVT performance measurement guidelines*, Petten: ECN and Emmerthal: ISFH

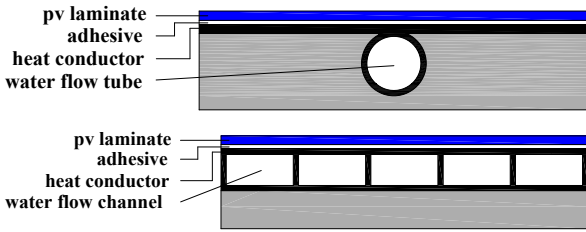


그림 3. 튜브부착형(상)과 전면 액체식(하) 흡열판이 부착된 Unglazed PVT모듈의 단면 상세

### 3. 성능실험

#### 3.1 실험장치 및 방법

본 연구에 사용된 PVT모듈은 단결정 실리콘 PV모듈 후면에 전면 액체식 흡열판을 덧붙인 평판형 액체식 PVT모듈이다. 집열면적 1.44m<sup>2</sup>로 PV모듈과 흡열판 그리고 단열재로 구성되었다. 제작에 사용된 PV모듈은 표준 실험조건(STC)에서 전기효율 16.5%인 240W<sub>p</sub> 단결정 실리콘 PV모듈을 사용하였으며, PV모듈의 상세사양은 표 1과 같다.

표 1. PV모듈 상세 사양

셀 타입	mono crystalline silicon
최대 출력	240W
최대 전압	29.93V
최대 전류	8.15A
단락 전류	8.56A
개방 전압	37.55V
크기	1656×997×50mm

실험은 2011년 3~4월 동안 천안(위도 36°47' 경도 127°9')에 위치한 K대학교 학생회관 옥상에서 실시되었다. 실험조건으로는 일사량 790W/m<sup>2</sup> 이상에서 수행하였으며, 유량 104kg/h로 고정된 상태에서, PVT모듈의 유체 평균온도를 외기온도 이상의 온도에서 약 10℃씩 변화를 주어 실험하였다. 실험은 온도 및 유량변화가 정상상태를 유지하는 조건에서 실험되었으며, 기타 실험조건 및 분석 방법은 ASHRAE 93-77 실험기준과 ECN의 PVT 성능측정 가이드라인의 성능측정 및 분석 방법에 따랐다.

PVT모듈은 태양열 집열기와 같이 집열기 입구온도 및 유체평균온도, 외기온도, 일사량에 따라 열성능 및 효율이 다르게 나타난다. 또한 유체의 유량에 따라 입구온도와 출구온도 차가 크게 달라지며, 동일 실험조건에서 열효율이 일정하지 않게 되는 특성이 있다. 따라서 ASHRAE 93-77 '태양열 집열기 성능 시험방법' 기준에서는 태양열집열기의 성능시험의 실험유량을 0.02kg/sm<sup>2</sup>로 정하여 시험하도록 규정하고 있고, 일사량도 790W/m<sup>2</sup> 이상에서 성능시험을 수행하도록 규정하고 있다. 또한 시

험체 유수입구온도를 외기온도 이상에서 일정 간격의 온도로 변화를 주어 시험하도록 규정하고 있다.

ECN의 PVT성능측정 가이드라인에서는 기존 태양열 집열기와 유사한 시험조건에 따라 평판형 액체식 PVT모듈의 성능을 시험하도록 규정하고 있다. 다만, 전기성능은 PVT흡열판의 종류에 따라 흡수판온도 및 유체평균온도와 일사량에 따른 전력생산량을 측정하여 분석하도록 되어있다. 여기서 흡열판이 전면액체식 타입의 경우 유체평균온도에 의한 전기성능을 분석하도록 규정하고 있다. 이는 PVT모듈온도는 PV모듈후면에 접하고 있는 흡수판 및 유체의 온도에 의존되고 이에 따라 전기성능에 영향을 주기 때문이다.

실험 장치는 유수의 온도를 일정하게 유지시키기 위한 온수탱크와 유량계로 구성되었으며 온수탱크를 이용하여 필요한 시수 온도를 설정하고, 밸브를 조작함으로써 실험조건이 요구하는 유량을 일정하게 유지할 수 있다.

그림 4는 PVT모듈과 PV모듈이 거치대에 장착된 모습으로, 집열기 거치대는 정남향을 기준으로 수평(0~160°) 및 수직(15~90°)으로 각도조절이 가능하다. 일사량계는 실험가대에 실험체와 수평이 되도록 설치하였으며, 태양 위치를 추적하기 위한 태양 추적판을 장착하였다. PVT모듈의 입·출구 온도 및 외기온도를 측정하기 위한 온도센서(RTD타입 및 T타입)가 설치되었다.



그림 4. 전면 액체식 흡열판을 적용한 Unglazed PVT모듈

### 4. 실험결과 및 분석

PVT모듈의 열효율은 식 (1)에 의해 계산되었다. 즉, 태양열 집열기의 열효율은 흡열판에서 얻어지는 총 획득 에너지인 집열면적의 일사량 Q<sub>1</sub>에 대한 집열기 자체의 획득에너지 Q<sub>2</sub>의 비율로서 산출하였다.

PVT모듈과 PV모듈의 전기효율은 식 (2)에 의해 계산되었다. 즉 PVT모듈 집열면적의 일사량에 대한 전력생산량의 비율로 산출되며 전력생산량은 출력전압과 출력전류의 곱으로 계산된다.

$$Q_1 = A_{pvt} \times G_i$$

$$Q_2 = \dot{m} C_p (T_o - T_i)$$

$$\eta_{th} = Q_2 / Q_1 = \dot{m} C_p (T_o - T_i) / (A_{pvt} \times G_i) \quad (1)$$

$$\eta_{el} = (I_m V_m) / (A_{pvt} G_i) \quad (2)$$

$A_{pvt}$  : PVT모듈 면적 [ $m^2$ ]

$C_p$  : 열매체 비열 [ $J/kg^\circ C$ ]

$G_i$  : 경사면 일사량 [ $W/m^2$ ]

$I_m$  : 최대전류 [ $A$ ]

$T_i$  : PVT 입구에서의 열매체 온도 [ $^\circ C$ ]

$T_o$  : PVT 출구에서의 열매체 온도 [ $^\circ C$ ]

$T_a$  : 외기온도 [ $^\circ C$ ]

$V_m$  : 최대전압 [ $V$ ]

$\dot{m}$  : 열매체 유량 [ $kg/hr$ ]

$\eta_{th}$  : 열효율

$\eta_{el}$  : 전기효율

#### 4.1 열성능

태양열 집열기의 열성능은 ECN의 PVT 성능측정 가이드라인에 따라 전면 액체식 흡열관을 갖는 PVT모듈의 경우 PVT모듈을 통과하는 유체평균온도( $T_m : (T_o + T_i)/2$ ), 외기온도( $T_a$ ) 그리고 일사량( $G_i$ )의 상관계수인 x축 계수( $(T_m - T_a)/G_i$ )의 값으로 하여 집열기의 열효율을 그래프로 나타낸다.

PVT모듈의 열성능은 그림 5와 같으며  $\eta_{th} = 0.70 - 13.29((T_m - T_a)/G_i)$ 로 나타낼 수 있다. 따라서 x축에 대한 열손실계수는 -13.29, 열효율계수는 0.70인 것을 알 수 있다. 전체 평균열효율은 x축 계수의 실험조건하에서 약 51%로 나타났다. 그래프에 나타난바와 같이 외기온도와

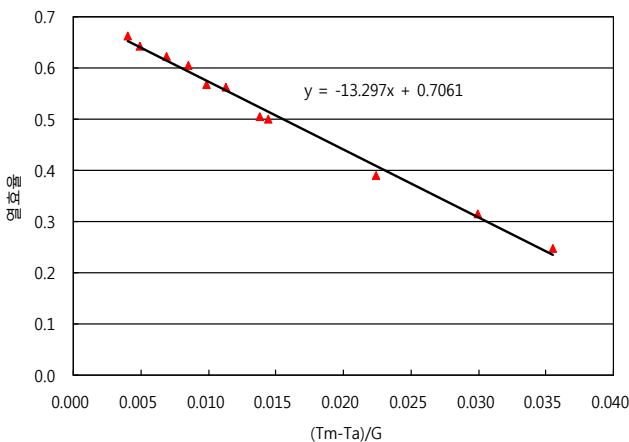


그림 5. PVT모듈의 열성능

유체평균온도, 일사량에 따른 x축 계수 값에 대한 효율을 보면, x축 계수가 작을수록 효율이 높은 것을 알 수 있다. 따라서 열효율은 일사량이 높고 외기온도와 유체평균온도의 차이가 적을수록 외기에 대한 흡열관의 열손실이 적기 때문에 높아지는 것으로 분석되었다.

#### 4.2 전기성능

PVT모듈의 전기성능은 ECN의 PVT 성능측정 가이드라인에 따라 PVT모듈 후면을 지나는 유체평균온도와 일사량에 따른 전력생산량으로 나타낼 수 있다. PVT모듈의 유체평균온도는 PVT모듈온도에 직접적인 영향을 미치는 온도이며, 이에 따라 전기효율 및 전력생산량에 영향을 준다.

그림 6은 유체평균온도 10-24 $^\circ C$ , 25-40 $^\circ C$ 에서 각각 일사량에 따른 전력생산량을 그래프로 나타낸 것이다. 그래프에서 보면, 유체평균온도가 낮은 범위인 10-24 $^\circ C$ 에서 전력생산량이 더 높은 것을 알 수 있다.

그림 7은 PVT모듈의 유체평균온도에 따른 PVT모듈의 전기효율을 나타낸 것이며, 기존 단독으로 적용되는 PV모듈의 전기성능과 비교하기 위해 동일한 실험조건에서 시험한 PV모듈의 효율을 함께 나타낸 그래프이다. 그래프에 나타난 바와 같이, PVT모듈의 유체평균온도의 증가에 따라 전기효율은 감소되며, 이에 따라 기존 PV모듈과 비교해 점차 효율차이는 적어지는 것으로 분석되었다.

기존 PV모듈의 전기효율을 보면, 전기효율의 분포가 PVT모듈에 비해 추세선 상에서 불균일하게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 일사량이 900-950 $W/m^2$ 의 동일 일사조건에도 불구하고 외기온도 및 풍속 등 외기조건에 따라 PV모듈 온도가 다르기 때문인 것으로 판단된다.

동일한 실험조건에서 PVT모듈과 PV모듈의 전기효율은 평균 14.3%, 12.6%로 각각 나타났으며, 효율차이는 최대 2.4%, 평균 1.7%로, 전면액체식 흡열관을 부착한 PVT모듈의 전기효율이 기존 PV모듈 효율대비 평균 약 14%가량 높은 것권 14.3%, 1이는 PVT모듈을 지나는 유체에 의해 PV모듈이 냉각되어 기존 PV모듈 보다 전기효율이 개선된 것으로 분석되었다.

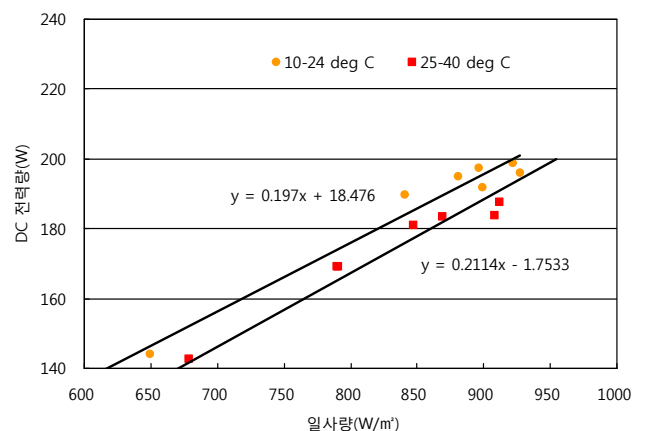


그림 6. PVT모듈의 일사량과 유체평균온도에 따른 전력생산량

참고문헌

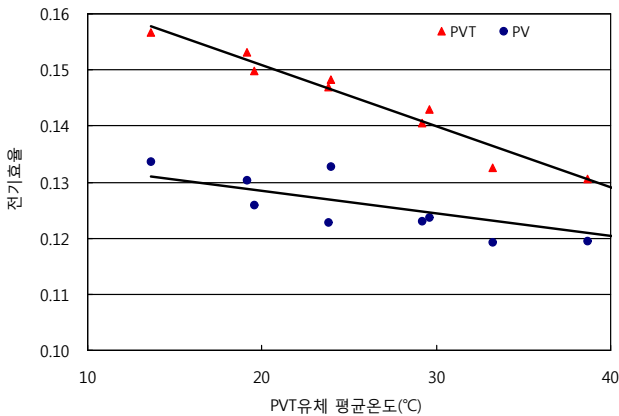


그림 7. PVT모듈의 유체평균온도에 따른 전기효율과 PV모듈의 전기효율(일사량 900-950W/m<sup>2</sup>)

5. 결론

본 연구에서는 전면 액체식 흡열판을 적용한 Unglazed PVT모듈에 대한 성능실험을 수행하고 열효율과 전기효율을 분석하였다. 그리고 기존 PV모듈의 전기성능 실험을 동시에 수행하여 전기성능을 비교하였다.

실험결과 Unglazed PVT모듈의 열효율은 x축 계수의 실험조건하에서 열손실이 "0" 인 최대 열효율 계수는 70%로 비교적 높게 나타났다. 그러나 외기조건에 따라 열효율감소에 많은 영향을 미치는 열손실계수는 13.29로 매우 큰 것으로 분석되었다. 따라서 x축 계수의 실험조건하에서 PVT모듈의 열효율은 평균 약 51%로 나타났다.

전기효율은 PVT모듈온도에 직접적인 영향을 주는 유체 평균온도와 밀접한 관계가 있으며, 유체 평균온도가 낮은 범위에서 전력생산량이 높은 것으로 분석되었다.

동일한 일사조건에서 PVT모듈은 유체 평균온도의 증가에 따라 전기효율은 감소되며, 이에 따라 기존 PV모듈과 비교해 점차 전기효율 차이는 적어지는 것으로 분석되었다. 그러나 유체평균온도에 따라 PVT모듈의 전기효율은 달라지지만 동일한 일사조건에도 불구하고 PVT모듈의 전기효율은 기존 PV모듈 효율대비 최대 19%, 평균 약 14% 가량 높은 것으로 분석되었다.

향후 추가적으로 전면 액체식 흡열판을 적용한 Unglazed PVT모듈의 유체평균온도에 따른 전기성능과 함께 기존 PV모듈의 셀 및 후면 온도특성에 의한 전기성능의 영향에 대한 상세한 분석이 이루어져야 할 것이다.

후 기

이 논문은 2010년도 한국연구재단 지원 지역거점연구 단육성사업(에너지자립형 그린빌리지 핵심기술사업단)과 지식경제부의 광역경제권선도산업 육성사업(실리콘 PV모듈의 고효율 및 PVT시스템 상용화)으로부터 지원받아 수행된 연구임.

1. 김준태. (2008) 「에너지절약형 다목적 공기식 집열 지붕시스템 개발 보고서」 지식경제부
2. 김진희, 강준구, 김준태. (2008) 액체식 Unglazed PVT 복합모듈의 성능실험연구. *한국태양에너지학회 추계학술발표대회 논문집*, pp.184-189
3. 김진희, 강준구, 김준태. (2009) 실험에 의한 Glazed형과 Unglazed형 액체식 PVT 집열기의 에너지성능 비교 분석 연구. *한국생태환경건축학회 논문집*, 9(4), pp.37-42
4. 김진희, 김준태. (2007) 문헌고찰을 통해 PV/Thermal 시스템의 유형별 성능특성비교. *한국건축환경설비학회 논문집*, 1(2), pp.15-21
5. 신성CS, [http://www.shinsungcs.co.kr/kor/business/energy\\_module.asp?pageNum=2&subNum=2&thirdNum=1](http://www.shinsungcs.co.kr/kor/business/energy_module.asp?pageNum=2&subNum=2&thirdNum=1)
6. 천진아, 김진희, 강준구, 김준태. (2010) 실험에 의한 액체식 Unglazed PVT모듈의 성능 분석, *한국태양에너지학회 추계학술발표대회 논문집*, pp.21-26
7. Affolter P., Eisenmann, W., Fechner, H., Rommel, M., Schaap, A., Serensen, H., Tripanagnostopoulos, Y. and Zondag, H. (2006) *PVT roadmap: a European guide for the development and market introduction of PV-Thermal technology*. Petten: ECN
8. ASHRAE. (1991) *ASHARE 93-77: Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors*. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc.
9. Kim, J. H., Kim, J. T., Kang, J. G., Moon, J. H., Shim, H. and Chun, J. A. (2010) The Comparison of The Electrical and Thermal Performance of Glazed and Unglazed PVT Collectors. *Proceedings of 8th EuroSun Conference, Graz*
10. Tripanagnostopoulos, Y. (2002) Hybrid Photovoltaic/Thermal Solar System. *Solar Energy*, 72(3), pp.217-234
11. Zondag, H., Borg, N. and Eisenmann, W. (2005) *D8-6: PVT performance measurement guidelines*, Petten: ECN and Emmertal: ISFH

투고(접수)일자: 2011년 5월 16일

심사일자: 2010년 5월 18일

게재확정일자: 2011년 6월 23일