

실험에 의한 공기식 PVT 컬렉터의 열·전기 성능에 관한 연구

김상명* · 김진희** · 김준태****

*공주대학교 에너지시스템공학과, 박사과정

**공주대학교 그린에너지기술연구소, 연구교수

***공주대학교 건축학부 건축공학전공/에너지시스템공학과, 교수

An Experimental Study on Thermal and Electrical Performance of an Air-type PVT Collector

Kim Sang-Myung* · Kim Jin-Hee** · Kim Jun-Tae****

*Department of Energy System Engineering, Kongju National University, Ph.D Student

**Green Energy Technology Research Center, Kongju National University, Research Professor

***Department of Architecture & Energy System Engineering, Kongju National University, Professor

†Corresponding author: jtkim@kongju.ac.kr

Abstract

PVT (Photovoltaic/thermal) system is technology that combines PV and solar thermal collector to produce and use both solar heat and electricity. PVT has the advantage that the energy production per unit area is higher than any single use of PV or solar thermal energy systems because it can produce and use heat and electricity simultaneously. Air-type PVT collectors use air as the heat transfer medium, and the air flow rate and flow pattern are important factors affecting the performance of the PVT collector. In this study, a new air-type PVT collector with improved thermal performance was designed and manufactured. And then thermal and electrical performance and characteristics of air-type PVT collector were analyzed through experiments. For the thermal performance analysis of the PVT collector, the experiment was conducted under the test conditions of ISO 9806:2017 and the electrical performance was analyzed under the same conditions. As a result, the thermal efficiency increased to 26~45% as the inlet flow rate of PVT collector increased from 60~200 m³/h. Also, it was confirmed that the air-type PVT collector prevents the PV surface temperature rise according to the operating conditions.

Keywords: 태양광열(Photovoltaic/Thermal), 건물 일체형 PVT(Building integrated PVT), 공기식 컬렉터(Air-type collector), ISO 9806:2017, 전기 성능(Electrical performance), 열 성능(Thermal performance)

기호설명

η_{th} : 열효율 [-]

A_{pvt} : PVT 컬렉터 면적 [m²]

A_{pv} : PV 컬렉터 면적 [m²]

OPEN ACCESS



Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.39, No.2, pp.23-32, April 2019
<https://doi.org/10.7836/kjes.2019.39.2.023>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 14 January 2019

Revised: 24 March 2019

Accepted: 25 March 2019

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

- T_a : 외기온도 [$^{\circ}\text{C}$]
 T_o : PVT 컬렉터 출구 온도 [$^{\circ}\text{C}$]
 T_i : PVT 컬렉터 입구 온도 [$^{\circ}\text{C}$]
 \dot{m} : 열매체 유량 [kg/s]
 C_p : 비열 [J/kgK]
 G : 일사량 [W/m^2]
 η_{el} : 전기 효율 [-]
 I_m : 최대전류 [A]
 V_m : 최대전압 [V]

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

최근 건물에 태양광발전 시스템을 적용하기 위한 노력의 일환으로 건물 일체형 태양광발전 시스템(BIPV: Building-integrated photovoltaic)이 많은 관심을 받고 있다. BIPV 시스템은 PV 모듈을 건물 외장재로 적용하여, 건설비용 및 PV 설치를 위한 공간을 줄일 수 있다는 장점이 있다. 하지만 BIPV 시스템은 개방형으로 설치되는 일반적인 설치 방식과 비교할 때 PV 모듈의 온도상승 가능성이 크며 이에 따른 발전량이 감소가 우려되기도 한다. 25°C 이상 조건에서 PV 모듈 온도가 1°C 상승할 때마다 PV의 전력생산량이 약 0.4~0.5%의 전력이 감소하게 된다¹⁾. PV 모듈로 입사되는 태양 일사는 PV 모듈의 종류 및 설치 방식에 따라 다르지만, 최대 약 12~18%가 전기로 전환된다고 할 수 있다. 그리고 나머지 태양에너지는 열로 전환되어 PV 모듈 온도를 상승시키며, 이는 PV 시스템의 발전량 저하로 이어진다. 건물의 외피로 적용되는 BIPV의 경우 상대적으로 생성된 열기의 배출이 더 어려워 PV 모듈의 온도가 더 높게 상승할 우려가 있다.

이러한 BIPV 시스템의 PV 온도상승에 따른 전력저감 문제를 해결하기 위한 대안으로 BIPVT(Building-integrated photovoltaic/thermal) 시스템이 개발되었다. BIPVT 시스템은 건물통합형 태양광·열 복합 시스템으로 PV 모듈과 태양열 집열기가 결합된 시스템이다. BIPVT 시스템은 컬렉터 전면 PV를 통해 전기를 생산하며, 동시에 PV 모듈에서 발생하는 열을 이용하여 건물에 필요한 냉난방, 급탕 등의 에너지원으로 사용할 수 있는 기술이다. PVT 시스템은 PV 후면의 열을 적극적으로 사용함으로써 기존의 BIPV 시스템의 문제점이었던 PV의 온도상승을 제어하는 데 도움이 될 수 있다. 또한 전기뿐만 아니라 태양열 에너지까지 활용할 수 있어 기존 BIPV 시스템보다 단위면적당 에너지 효율이 높다는 장점이 있다.

태양광발전·열 복합(Photovoltaic Thermal; PVT) 시스템의 종류는 사용하는 열매체에 따라 공기식과 액체식 그리고 복합형으로 나누어진다. 이 중 공기식 PVT 시스템은 공기를 열매체로 사용하며, 건물적용에 있어 시공이 간단하고 운영비용이 저렴하다는 장점이 있다. 또한 공기식 PVT 시스템은 팬 이외에 별도의 설비 없이 가

열된 공기를 실내 난방에 이용할 수 있으며, 공기를 이용하기 때문에 동결이나 누수에 의한 시스템 손상도 없다²⁾. BIPVT 시스템의 경우 건축물 외피의 기능도 가능하여 제로 에너지건축 인증제도의 시행과 함께 건축 시장에서 새로운 경쟁력을 갖추고 있다고 할 수 있다. 하지만 현재 공기식 PVT 컬렉터의 열 및 전기 성능에 대한 표준이 없는 실정이며, 국내에서는 공기식 PVT 컬렉터에 대한 성능 및 특성에 관한 연구가 부족한 상황이다.

공기식 PVT 컬렉터는 공기 열원을 적극적으로 집열하고 발전성능을 증진 시킬 수 있도록 컬렉터 및 공기층의 디자인 고려가 필요하다. 또한 열과 전기를 동시에 생산하는 설비로서 컬렉터의 집열 작동조건에서 발전 성능 분석이 요구되며 기존 단독의 태양열 및 태양광발전 시스템의 시험표준에 근거하여 평가되어야 한다.

본 논문에서는 집열 및 발전성능을 개선할 수 있도록 새로운 유형의 공기식 PVT 컬렉터를 개발하고, 기존 시험표준에 근거한 실험을 통해 열 및 전기 성능 특성을 분석하였다.

1.2 연구방법

본 연구를 위해 전면에 PV 셀 및 모듈이 구성된 기존의 PVT와 다른 형태의 새로운 공기식 PVT 컬렉터를 설계하였다. 개발된 공기식 PVT 컬렉터는 시스템의 열 성능평가를 위하여 ISO 9806:2017³⁾ 「Solar energy-Solar thermal collectors-Test methods」의 열 성능 실험조건을 기준으로 실험을 진행하였으며, 동일한 실험조건에서 전기 성능도 동시에 측정하였다. 또한 컬렉터의 입구 유량 및 온도상승에 따른 공기식 PVT의 열 특성 및 전기 특성을 분석하였다.

2. 문헌고찰

PVT의 성능 및 특징에 관한 연구는 시뮬레이션 및 실험을 통한 다양한 방법으로 연구 및 분석되고 있다. 어승희 등⁴⁾은 실험을 통한 PV, 태양열 집열기와 PVT 시스템의 성능 및 효율 비교·분석하였다. 또한 PV 및 PVT에서 생산되는 전기에너지를 에너지 획득의 고급 방식으로 고려하여, 발전소에서 전기에너지로 변환 이전의 열에너지로 계산하여 에너지 축적효율(the energy saving efficiency)을 구하였다. 실험결과 PVT의 에너지 축적효율은 90.8%로 태양열 집열기(71.5%)와 PV(40.0%)보다 높게 나타났으며, 이를 통해 PVT 시스템이 단위면적당 태양에너지 축적률이 가장 높은 것으로 분석되었다. Saffa B. Riffat et al.⁵⁾은 다양한 종류의 PVT 시스템의 전기 및 열 성능에 미치는 매개 변수에 관한 내용을 연구하였다. PVT 시스템 성능에 영향을 미치는 매개 변수로는 PVT의 최적 유량, 컬렉터 디자인, 흡열판의 적용 유무, 공기층의 두께 등을 포함하고 있으며, 특히 매개 변수 중 하나인 흡열판은 PVT 시스템의 열효율에 큰 영향을 미친다고 설명하고 있다. 김진희 등⁶⁾은 단결정 PV 모듈이 적용된 공기식 PVT 컬렉터를 제작하여 실험을 통해 열 및 전기 성능을 분석하였다. 실험결과 공기식 PVT 컬렉터를 통해 배출되는 공기의 온도는 외기보다 5°C 이상 높은 것으로 나타났으며, 컬렉터의 열 및 전기 효율은 22%와 15%로 분석되었다. 또한 PV 모듈의 전기 생산량은 STC 조건에서의 전기 생산량과 유사하게 나타났으며, 이는 PVT 후면의 가열된 공기를 배출함으로써 PV 온도상승에 따른 효율 저감이 방지된 것으로 분석된다.

Hasan et al.⁷⁾은 PVT의 성능을 개선하기 위한 파라미터에 관한 연구를 진행하였으며, 공기식 PVT 성능을 향상시키기 위하여 공기를 이용한 열 추출이 효율적으로 수행될 수 있는 다양한 방법들을 제안하고 있다. 이 연구에서는 공기식 PVT 컬렉터의 열 성능을 개선하기 위해서 PVT 내부의 공기 흐름에 따라 공기 채널 내부에 주름진 시트를 설치하는 방식과 높은 방사율의 벽면을 활용하거나 다양한 형상의 요소를 배치함으로써 공기식 PVT 컬렉터의 열효율을 개선할 수 있다고 말하고 있다. Hu et al.⁸⁾은 내부 베플이 적용된 단순 구조의 기계 환기형 태양열 집열기를 연구하여 내부 공기 유동의 흐름 및 열전달 특성을 예측하기 위한 수치 모델을 개발하였다. 실험 결과 태양열 집열기 내부에 베플이 적용됨으로써 대류 열전달 과정에서 열 성능을 강화하였으며, 복사열 손실을 줄임으로써 태양열 집열기의 열효율을 향상시킨다는 것을 확인하였다.

3. 공기식 PVT 컬렉터 제작 및 실험

3.1 공기식 PVT 컬렉터 제작

선행연구된 기존 PVT 컬렉터^{4,6,9)}의 경우 PVT 컬렉터의 적용된 PV 모듈은 전면이 PV 셀로 이루어져 있으며, 컬렉터 내부에 적용된 베플은 주로 공기의 유로를 증가시키기 위하여 적용되었다. 본 연구에서는 공기식 PVT 컬렉터는 열 성능을 향상시키기 위하여 새로운 디자인의 컬렉터를 Fig. 1과 같이 설계하였다. PVT 컬렉터 전면 에 부착된 PV는 G/G 타입의 모듈을 사용하였으며, PV 셀 간의 일정한 간격을 유지하여 컬렉터 내부로 더 많은 태양열이 유입되도록 설계하였다. 또한 PV 셀 사이에 열전도율이 높은 흡열 동판을 컬렉터 내부에 설치하여 유리면을 통해 내부로 들어오는 태양열을 직접 받을 수 있도록 설계되었다. PVT 컬렉터 내부에 설치된 흡열 판은 평평하지 않은 둥근 형태로 설계하여 더 많은 일사를 획득하게 하여 컬렉터 내부 온도를 상승시켜 열 성능을 높일 수 있도록 하였다. 또한 절곡된 모양의 흡열 동판은 컬렉터 내부에서 공기의 유로를 길어지게 하고 집열기 내부에 와류를 유도하여 컬렉터의 열전달을 증가시키는 베플(Baffle)의 역할을 하도록 고려되었다⁸⁾. 또한 열전달을 증가시키므로 PV 모듈의 표면 온도를 낮추어 온도상승에 의한 PV 모듈의 발전량 저하를 효과적으로 방지하도록 설계되었다. 공기식 PVT 컬렉터의 면적은 1.63 m²이며, 제작된 PV 모듈의 상세 규격은 Table 1과 같다.

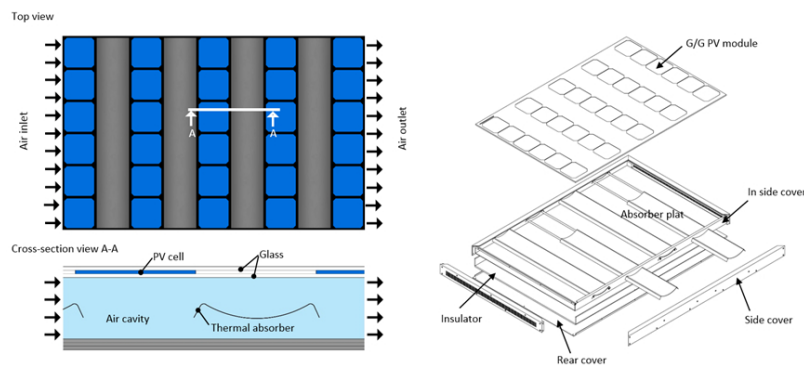


Fig. 1 Schematic diagram of air-type PVT collector design¹⁰⁾

Table 1 PV module specification

Cell type	Mono-crystalline silicon
PV cell efficiency	17.29%
Module efficiency	7.55%
Maximum power (P_{max})	123.3 W
Maxium voltage (V_{mp})	15.08 V
Maximum current (I_{mp})	8.18 A
Open voltage (V_{oc})	19.05 V
Short current (I_{sc})	8.61 A
Module size	1584*1031*84.5 mm

3.2 실험방법

제작된 공기식 PVT 컬렉터는 ISO 9806:2017의 태양열 집열기 실험 표준에 기초하여 성능평가가 수행되었다. PVT 컬렉터는 법선 면으로 태양을 향하도록 설정하기 위하여 동쪽에서 서쪽으로 수평(0~160°)조절이 가능하며, 수직(15~90°) 각도 조절이 가능한 2축 트래커에 설치되었다(Fig. 2). 공기식 PVT 컬렉터의 열 및 전기 성능을 평가하기 위하여 컬렉터의 입·출구 온도 및 유량, 전력량, 일사량, 외기온도, PV 표면 온도 등이 측정되었다. 데이터 실측 기간은 '17년 11~12월에 진행되었으며, ISO 9806:2017의 실험방법에 따라 집열기 평면의 수평면 일사강도가 700 W/m² 이상에서 일사량과 컬렉터 입·출구 유량 및 온도가 정상상태일 때의 실험 데이터를 10초 간격으로 수집 및 분석하였다. 정상상태는 실험 데이터가 다음 Table 2에 주어진 범위의 편차를 유지할 경우 정상상태 조건으로 간주하였다.

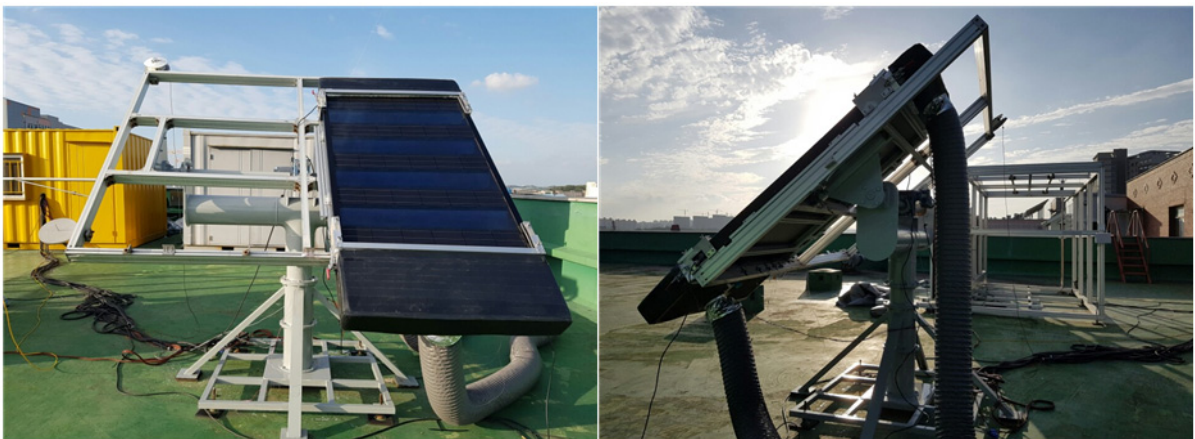


Fig. 2 Experiment of air-type PVT collector

Table 2 Permitted deviation of measured parameters during a measurement period³⁾

Parameter	Permitted deviation from the mean value	
	Liquid heating collector	Air heating collector
Hemispherical solar irradiance	± 50 W/m ²	
Thermal irradiance (WISC only)	± 20 W/m ²	
Ambient air temperature	± 1,5 K	
Fluid mass flow rate	± 1 %	± 2 %
Fluid temperature at the collector inlet	± 0,1 K	± 1, 5 K
Fluid temperature at the collector outlet	± 0, 4 K	± 1, 5 K
Surrounding air speed	± 1,0 m/s deviation from set value	

4. 실험결과 및 분석

4.1 열 및 전기 성능

PVT 컬렉터의 열 성능을 평가하는 열효율은 다음 식 (1)³⁾과 같이 산정된다.

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m} C_p (T_o - T_i)}{A_{pvt} G} \tag{1}$$

또한 PVT 컬렉터의 전기 효율을 산정하는 방식은 아래 식 (2)⁴⁾와 같다.

$$\eta_{el} = \frac{I_m V_m}{A_{pv} G} \tag{2}$$

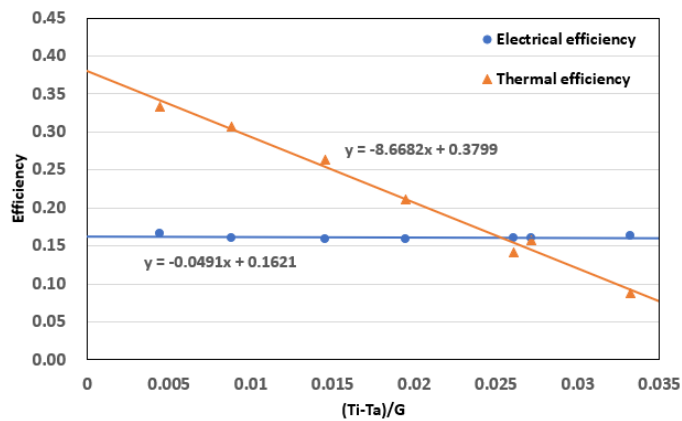


Fig. 3 Thermal and electrical efficiency of PVT collector

Fig. 3은 공기식 PVT 컬렉터의 입구 유량이 100 m³/h일 때, 공기식 PVT 컬렉터의 열 및 전기 성능을 분석한 그래프이다. 실험은 평균 일사량 950W/m², 평균 외기온도 영하 2.5°C에서 진행되었다. 그래프에 나타난 바와 같이, 공기식 PVT 컬렉터의 열효율 계수는 37.99이며 열 손실 계수는 -8.6으로 분석되었다. 열효율 시험 동작 조건에서 전기 효율은 16.21%로 분석되었다.

4.2 열 특성

공기식 PVT 컬렉터의 열 특성은 유량에 따른 열효율과 입·출구 온도상승을 통해 분석하였다. Fig. 4는 입구 유량에 따른 열효율을 분석한 그래프이며, 실험 데이터의 평균 일사량 및 외기온도는 956 W/m², 0.2°C에서 측정되었다. 분석결과 입구 유량이 60, 100, 160, 200 m³/h로 증가함에 따라 PVT 컬렉터의 열효율은 약 27%, 38%, 45%로 점점 증가하는 것으로 나타났다. Fig. 5를 보면 입구 유량의 증가에 따라 열효율이 증가한 것과는 반대로 PVT 컬렉터의 입·출구의 온도상승은 입구 유량이 증가함에 따라 점점 작아지는 것으로 분석되었다. PVT 입구 유량의 증가는 PVT 컬렉터 내부에서 열을 운반하는 열매체를 증가시켜 많은 열을 운반함으로써 열

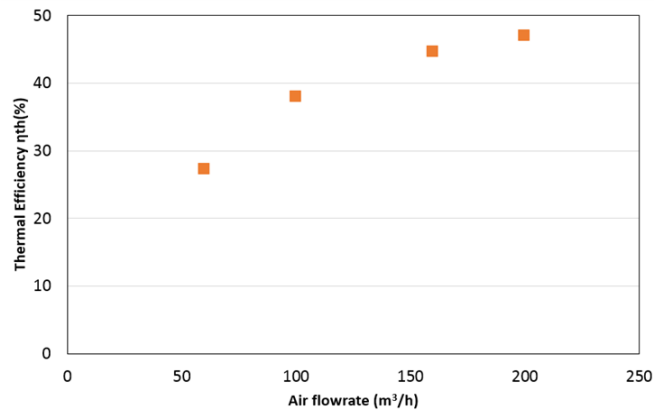


Fig. 4 Thermal efficiency by air flowrate

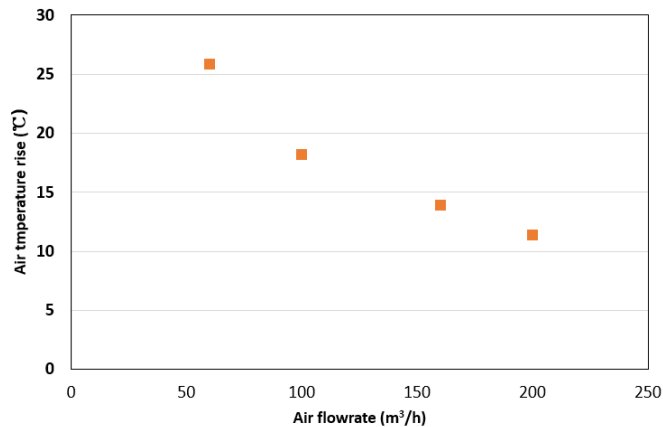


Fig. 5 Air temperature rise of inlet and outlet by air-flowrate

효율이 크게 상승한 것으로 분석된다. 동시에 입구의 유량이 증가하면서 컬렉터 내부를 지나가는 공기의 유속이 증가하게 되고 이로 인해 입·출구 온도상승이 감소한 것으로 분석된다.

4.3 전기 특성

Fig. 6은 일사 강도에 따른 PV 모듈의 전력 및 PV 모듈의 표면 온도를 분석한 그래프이며, 공기식 PVT 컬렉터는 일사 강도가 증가할수록 PV 모듈 출력전력 또한 증가하는 것으로 나타났다. 하지만 PV 모듈의 경우 일사 강도가 증가할 경우 PV 모듈의 표면 온도 또한 증가¹¹⁾하지만, 공기식 PVT 컬렉터의 경우 일사 강도가 증가하여도 작동조건에 따라 PV 표면 온도가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 일사 강도가 높아짐에도 PV 모듈의 표면 온도의 증가 없이 온도를 낮게 유지함으로써 PV 모듈의 출력전력을 높일 수 있다는 장점이 있다. Fig. 7은 PV 모듈 표면 온도에 따른 PV 출력전력과 일사 강도를 나타낸 그래프이다. 그래프를 보면 일사 강도가 1000 W/m² 이상, PV 모듈 출력전력이 STC 조건인 123.3 W에 근접한 약 120 W의 시험조건에서 PV 온도는 30°C 미만으로

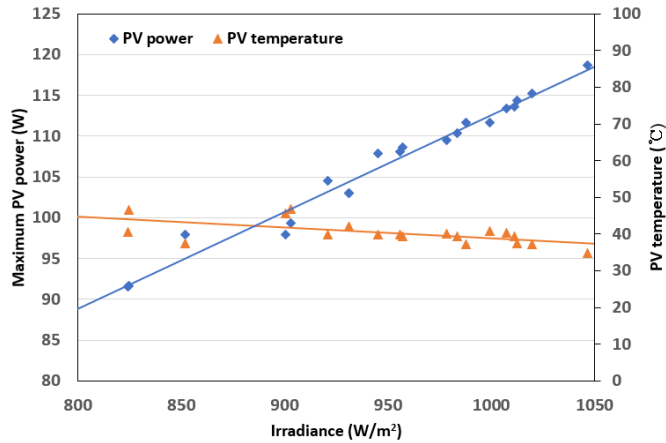


Fig. 6 Maximum PV power by irradiance

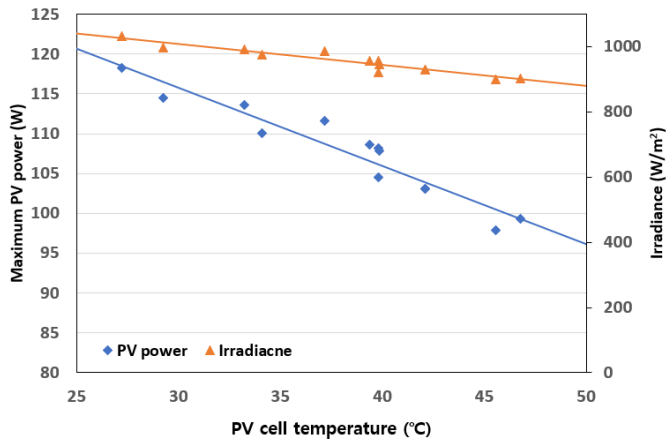


Fig. 7 Maximum PV power by average PV temperature

유지되고 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 일반적인 PV 모듈이 작동할 때(일사 강도 800 W/m^2 , 외기온도 20°C , 풍속 1 m/s)¹²⁾ PV 모듈 온도를 나타내는 지표인 공칭 작동 셀 온도(NOCT; Nominal Operation Cell Temperature)가 40°C 이상¹³⁾인 것에 비해 약 10°C 가량 낮은 것으로 분석되었다. 이를 통해 공기식 PVT 컬렉터는 작동되는 유체 온도 조건에 따라 달라지는 PV 모듈의 표면 온도 및 발전량이 달라지는 것으로 확인되었다. 따라서 PVT는 작동조건에 따라 PV 모듈의 표면 온도 상승을 방지하여 온도상승에 의한 전력감소를 방지할 수 있는 것으로 분석되었다.

5. 결론

본 연구에서는 새로운 형태의 공기식 PVT 컬렉터를 설계 및 제작하였으며, 실험을 통해 열 및 전기 성능을 분석하였다. 컬렉터의 입구 유량, 일사 강도 그리고 PV 모듈 표면 온도에 따른 공기식 PVT 컬렉터의 열 및 발전 특성을 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) 공기식 PVT 컬렉터는 평균 일사량 950 W/m^2 , 외기온도 0°C 에서 입구 유량이 $60\sim 200 \text{ m}^3/\text{h}$ 로 증가할 때, 열효율은 약 $26\sim 45\%$ 로 확인되었다. 공기식 PVT 컬렉터의 입구 유량이 증가함에 따라 컬렉터의 입·출구 온도상승은 $25.8\sim 11.4^\circ\text{C}$ 로 점점 감소하였다.

공기식 PVT 컬렉터의 열효율은 열을 전달하는 열매체의 유량과 컬렉터 입·출구 온도 차이에 비례하는데, 특히 열매체의 유량이 PVT 컬렉터의 열효율 증가에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

- (2) 공기식 PVT 컬렉터는 일사 강도가 증가함에 따라 전기발전량이 증가하였다. 그러나 공기식 PVT 컬렉터의 작동조건에 따라 일사 강도가 증가해도 PV모듈 표면 온도는 상승하지 않는 것으로 확인되었다. 공기식 PVT 컬렉터는 집열특성에 따라 열을 생산하면서 전기를 생산하는 동안 PV 온도상승은 크게 나타나지 않았으며, 최대발전량 조건에서 PV 온도는 30°C 미만을 유지하는 것으로 확인되었다.
- (3) 입구 유량이 $100 \text{ m}^3/\text{h}$ 일 때, 개발된 공기식 PVT 컬렉터의 열효율 및 전기 효율은 37.99% , 16.21% 이며, 전체 효율은 54.2% 로 확인되었다.

이러한 연구 결과를 통해, 공기식 PVT 컬렉터는 건물 설비시스템과 연동 시 건물에서 난방을 위해 요구되는 공급온도 및 유량 등이 고려되어야 하며, 최적으로 작동하기 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP), 2016년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지역신산업선도인력양성사업 성과임(No. 20173010013420, No. NRF-2016H1D5A1910875).

REFERENCES

1. Sathe, T. M. and Dhoble, A. S., A review on recent advancements in photovoltaic thermal techniques, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 76, pp. 645-672, 2017.
2. Kim, J. H. and Kim, J. T., A Literature Review on Hybrid PV/Thermal Air Collector in terms of its Design and Performance, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 34, pp. 30-41, 2014.
3. ISO 9806:2017, Solar energy-Solar thermal collectors-Test methods, International Organization for Standard, 2017.
4. Euh, S. H., Lee, J. B., Choi, Y. S., and Kim, D. H., The Performance and Efficiency Analysis of a PVT System Compared with a PV Module and a Solar Collector, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 32, pp. 1-10, 2012.
5. Riffat, Saffa B. and Erdem Cuce., A Review on Hybrid Photovoltaic/thermal Collectors and Systems, *International Journal of Low-Carbon Technologies*, Vol. 6, pp. 212-241, 2011.
6. Kim, J. H., Park, S. H., and Kim, J. T., Experimental Performance of a Photovoltaic-thermal Air Collector, *Energy Procedia*, Vol. 48, pp. 888-894, 2014.
7. Hasan, M. Arif, and K. Sumathy, Photovoltaic Thermal Module Concepts and Their Performance Analysis: A Review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 17, pp. 1845-1859, 2010.
8. Hu, J., Sun, X., Xu, J., and Li, Z., Numerical Analysis of Mechanical Ventilation Solar Air Collector with Internal Baffles, *Energy and Buildings*, Vol. 62, pp. 230-238, 2013.
9. Kang, J. G., Kim, J. H., and Kim, J. T., A Study on the Performance Comparisons of Air Type BIPVT Collector Applied on Roofs and Facades, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 30, pp. 56-62, 2010.
10. Delisle, V., Kim, J. T., Kim, J. H., Gagne, A., and Ayoub, J., Performance Assessment of a New Air-Based Building-Integrated Photovoltaic Thermal Solar Collector, *EU PVSEC*, 2017.
11. Charles Lawrence Kamuyu, W., Lim, J., Won, C., and Ahn, H., Prediction Model of Photovoltaic Module Temperature for Power Performance of Floating PVs, *Energies*, Vol. 11, 2018.
12. KS C IEC 61215:2016, Crystalline silicon terrestrial photovoltaic(PV) modules – Design qualification and type approval, International Electrotechnical Commission, 2016.
13. Kim, K. S., Kang, G. H., Yu, G. J., Yoon, S. G., Roof-attached Crystalline Silicon Photovoltaic Module's Thermal Characteristics, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 32, pp. 11-18, 2012.