

곡선형 집열 베플이 적용된 공기식 PVT 컬렉터의 연간 시뮬레이션 성능분석

안중권¹ · 유지숙¹ · 김진희² · 김준태^{3†}

¹국립공주대학교 에너지시스템공학과, 박사과정

²국립공주대학교 그린에너지기술연구소, 연구교수

³국립공주대학교 건축공학전공/에너지시스템공학과(대학원), 교수

Simulation Performance Analysis of an Air-type PVT Collector with Curved Baffles

Ahn Jong-Gwon¹ · Yu Ji-Suk¹ · Kim Jin-Hee² · Kim Jun-Tae^{3†}

¹Ph.D. Candidate, Department of Energy Systems Engineering, Kongju National University

²Research Professor, Green Energy Technology Research Center, Kongju National University

³Professor, Department of Architectural Engineering & Energy Systems Engineering, Kongju National University

†Corresponding author: jtkim@kongju.ac.kr

Abstract

A photovoltaic thermal (PVT) collector uses solar energy efficiently to produce heat and electricity simultaneously. In particular, an air-type PVT collector has advantages over a water type collector because the latter is prone to fluid leakage and condensation problems. However, the performance of an air-type PVT collector is affected by design criteria such as the inner structure (baffle or fins) and fluid path. For this research, PV cell lines arranged alternately with empty lines and curved absorbers were installed in the collecting space of a PVT collector. The absorber was utilized as a baffle to improve its thermal performance. In this study, an outdoor experiment of the PVT collector was conducted. Furthermore, the experimental and simulation results were compared. In addition, the annual thermal and electrical performance of the PVT were evaluated based on TRNSYS modeling.

Keywords: 태양광·열복합(Photovoltaic thermal), 트랜시스(TRNSYS), 곡선형 베플(Curved baffle), 연간성능(Yearly performance), 열효율(Thermal efficiency)

기호설명

η_{th} : PVT 컬렉터 열효율(-)

η_{el} : PVT 컬렉터 전기효율(-)

C_p : 비열(J/kg·K)

A_{pvt} : PVT 컬렉터 면적(m²)

E_{pv} : PV 모듈 방사율(-)

OPEN ACCESS



Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.41, No.4, pp.27-38, August 2021
<https://doi.org/10.7836/kjes.2021.41.4.027>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 12 April 2021

Accepted: 4 May 2021

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.

- $A_{b_{pv}}$: 집열판 집열율(-)
- C_{pv} : PV 모듈 온도계수(-)
- Eff_{pv} : 정상상태에서의 PV 모듈 전기효율(%)
- T_i : PVT 유체 입구온도(°C)
- F_{pvt} : PVT 유체 유량(kg/h)
- T_a : 외기 건구온도(°C)
- G_{pvt} : PVT 컬렉터에 도달하는 일사량(W/m²)
- A_{pv} : PV 모듈 면적(m²)

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

태양광·열 복합발전(PVT; Photovoltaic Thermal) 컬렉터는 열과 전기를 동시에 생산하며, 전면 PV 모듈 후면에 발생하는 열을 효과적으로 이용, 과열에 따른 PV 모듈의 전기효율 저감을 방지할 수 있는 특징이 있다. PVT 컬렉터는 집열을 위한 작동 유체에 따라 크게 공기식과 액체식으로 구분될 수 있다.

공기식 PVT 컬렉터는 누수나 동결처럼 작동 유체의 상태변화에 따라 발생하는 문제가 없어, 액체식 PVT 컬렉터 대비 관리가 쉬운 장점이 있다. 또한, 팬(Fan) 이외의 기타 추가설비 없이, 공기식 컬렉터 후면에서 집열되는 열원을 손쉽게 이용할 수 있다. 그러나 작동유체의 특성에 따라 액체식 대비 집열효율이 낮으며 이를 개선하기 위한 다양한 연구가 수행되고 있다. 공기식 PVT 컬렉터의 성능은 전면 PV모듈의 종류, 형태뿐만 아니라, 컬렉터 층별(Layer) 구성, 내부디자인에 따른 유로설계 등 다양한 설계요소에 의해 개선될 수 있다.

본 연구에서는 집열 성능 개선을 위한 공기식 PVT 컬렉터를 설계하고, 옥외성능실험 데이터를 기반으로 설계된 공기식 PVT 컬렉터의 전기생산, 집열성능분석을 목적으로 한다. 이를 위해 새로운 디자인의 공기식 PVT 컬렉터를 설계 및 시제작하고, 옥외성능실험을 통해 공기식 PVT 컬렉터의 집열 및 전기성능을 분석하였다. 또한, 옥외성능실험을 통해 수집된 실험데이터를 기반으로한 시뮬레이션 분석을 통해, 개발된 공기식 PVT 컬렉터의 연간 전력발생량 및 집열량을 검토하였다.

1.2 문헌고찰

Lammle et al.¹⁾은 공기식 PVT 컬렉터의 과열을 막기 위한 장치(OHP; Overheating Protection)로서, Cooling fins이 적용된 PVT컬렉터와 switchable film이 적용된 PVT 컬렉터의 성능을 분석했다. Cooling fins가 적용된 PVT의 경우, 적용 여부에 따라, 흡열판의 온도가 약 36°C 감소하였으며 switchable film이 적용된 PVT의 경우, 기존 대비 약 61°C가 감소하는 것으로 분석되었다.

Fudholi et al.²⁾은 역삼각형(inverted triangle) 형태의 흡열판을 적용하여 공기식 PVT 컬렉터를 제작, 실내 성능시험 통해 12.89% (이론적 13.36%)의 엑서지효율을 확인하였으며, Bambrook et al.³⁾은 호주 기후조건에서, 110 Wp의 PV모듈을 이용하여 제작된 공기식 PVT 컬렉터를 설비조건(덕트의 직경, 팬 동력 등)에 따른 실험 성능을 분석하였으며, 컬렉터의 성능은 집열효율 28 ~ 55%, 발전효율 10.6 ~ 12.2%로 확인되었으며, 에너지소비 측면에서의 적정 유량은 0.03 ~ 0.05 kg/s·m²으로 분석되었다.

Golzari et al.⁴⁾은 이온풍(Corona wind)을 이용하여 PVT컬렉터의 열전달계수가 기존 대비 약 65% 가까이 상승하는 결과를 도출했으며, 이에 따라 약 28.9%의 집열 효율을 나타냈다. Kim et al.⁵⁾의 연구에서는 사각형 베플이 설치된 공기식 PVT와 폐열회수장치(HRV: Heat Recovery Ventilator)연계한 시스템을 제안했다. 공기식 PVT 컬렉터의 열 및 전기효율은 각각 23%, 15%으로 나타났으며, 기존 HRV 시스템 대비 10%의 효율향상을 확인했다.

Shahsavari et al.⁶⁾의 연구에서는 이란(Kermanshah)기후에서 건물통합형(Building Integrated) PVT 컬렉터의 연간에너지성능을 시뮬레이션 통해 분석했으며, 발전량은 7월에 가장 높고(125.4 kWh), 12월에 가장 낮게(53.1 kWh) 나타났다. 컬렉터의 연간 발전량은 1096.1 kWh, 집열량은 32774.2 kWh로 분석되었다. 또한, 이론적 계산식을 통해 PVT 컬렉터의 열 및 전기성능을 분석하고 옥외성능실험을 통해 이론적 계산치와 상호검증하는 연구가 수행되었으며^{7,8)}, 다른 논문⁹⁾에서는 수치해석을 통해 나노유체를 이용한 PVT 컬렉터의 성능을 예측하고 문헌리뷰를 통한 실험결과 값과 비교검토 및 연간 에너지성능을 분석하였다. 이와 유사한 한 연구¹⁰⁾는 PVT 컬렉터의 성능을 수치해석을 통해 분석하고, 옥외성능실험을 통해 이론적 결과치와 비교, 검증하였다. 다른 논문¹¹⁾에서는 반투명한(semi-transparent) PV모듈이 적용된 집광형 PVT 컬렉터의 성능이 옥외실험을 통해 분석되었으며, 수학적 모델링(mathematical modelling)을 통한 예측값과 비교분석하고 이에 따른 PVT 컬렉터의 연간 집열량 및 발전량을 예측하였다.

2. 공기식 PVT 컬렉터 디자인

2.1 곡선형 집열베플이 적용된 공기식 PVT 컬렉터 설계

본 연구를 위해 설계된 공기식 PVT 컬렉터의 크기는 약 1.6 m²이며, 컬렉터 후면 집열 공간은 0.08 m으로 구성되었다. 공기식 PVT 컬렉터의 집열 성능을 개선하기 위해, 컬렉터 전면이 PV cells로 뒤덮여 있는 기존 공기식 PVT 컬렉터와 달리, PV모듈의 cells 라인이 빈 공간과 교차 형태로 적용된 PV모듈을 설계하여 적용하였다(Fig. 1).

또한, 전면 PV모듈의 cells 라인과 다음 cells 라인 사이의 투명한 공간을 통하여 유입되는 일사를 효과적으로 획득하기 위해, 공기식 PVT 컬렉터의 후면 집열공간 내 곡선형태의 집열판을 구성하였다. 설치된 곡선형 집열판은 공기식 PVT 컬렉터의 내부의 효과적인 공기유동을 위한 베플(Baffle) 역할도 한다. 특히 유체(공기)의 열 획득을 위한 유로를 늘리고, 전면 PV 모듈의 후면을 훑고(swipe) 감으로써, 적용된 PV 모듈의 효과적인 냉각과

동시에 컬렉터에서의 효율적인 집열이 가능하도록 설계하였다(Fig. 1).

설계된 공기식 PVT 컬렉터는 특히 집열성능향상에 초점을 맞추어 개발되었다. 컬렉터 시 제작에 사용된 PV 모듈은 Glass to Glass 타입으로, 123.3 W의 용량, 17.29%의 전기효율을 가지며, 자세한 사양은 아래에 나타나 있다(Table 1).

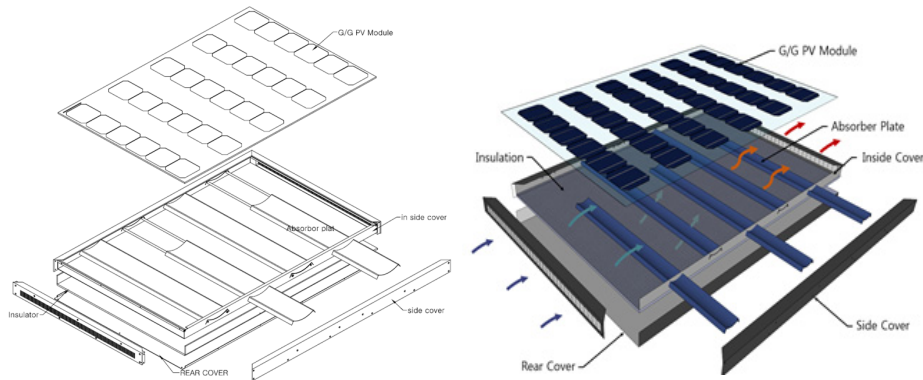


Fig. 1 New design of Air-type PVT collector for efficient thermal performance

Table 1 PV specification applied to air-type PVT collector

Cell type	Mono-crystalline silicon
Cell (Module) efficiency	17.29 (7.43)%
Maximum power	123.3 W
Maximum voltage	15.08 V
Maximum current	8.18 A
Open voltage	19.05 V
Short current	8.61 A
Size	1,584 × 1,031

3. 공기식 PVT 컬렉터 옥외성능평가

3.1 공기식 PVT 컬렉터 옥외성능시험

시제작된 공기식 PVT 컬렉터의 옥외 발전성능과 집열성능을 평가하기 위해, 충남 천안에 위치한 공주대학교 6공학관 옥상에서 옥외실험을 수행하였다. 시 제작된 컬렉터는 (x, y)축 각도 조절이 가능한 트랙커(Tracker) 위에 설치되었으며, 컬렉터의 상, 하단부에 순환 유체의 공급 및 회수를 위한 헤더(Header)가 적용되었다(Fig. 2). 해당 옥외시험설비는 오픈루프(Open loop) 형태로서, 집열을 위한 유체(공기)는 팬과 덕트를 통해 컬렉터 입구(하단부)로 공급되며, 컬렉터 내부 집열공간에서 열을 획득한 후, 컬렉터 출구(상단부) 헤더 및 덕트를 통해 외부로 배출된다.

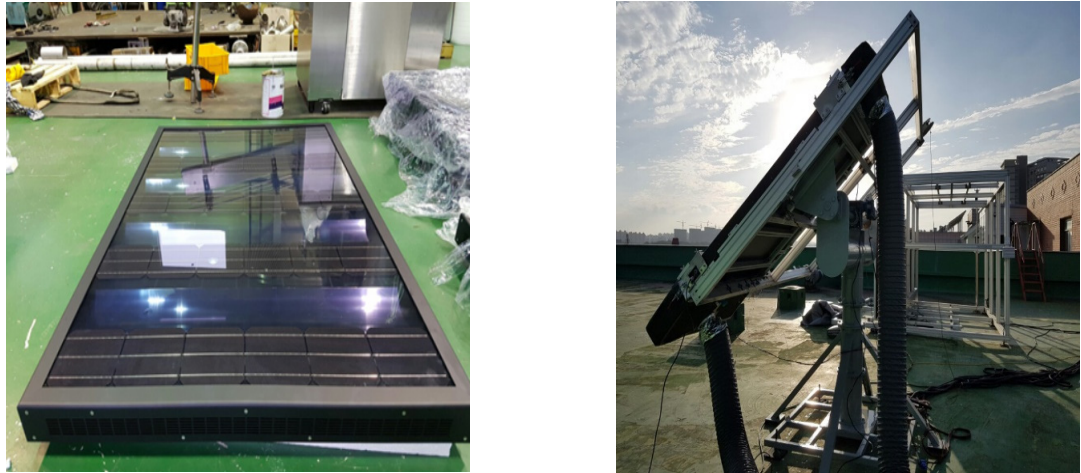


Fig. 2 Air-type PVT collector and outdoor experiment

실험데이터 측정을 위해, 공기식 PVT 컬렉터의 입,출구의 덕트 내에 온습도센서(Th1, Th2) 및 유량계(Fm1, Fm2)가 각각 설치되었으며, 일사량계(Rad)는 공기식 PVT 컬렉터와 동일한 경사도로 컬렉터의 좌측 1 m 지점에 설치되었다(Fig. 3). 또한 공기식 PVT 컬렉터 상,하단부 헤더에 가까운 덕트에 8포인트 센서(8 points thermocouple)가 각각 설치되어 유체 온도의 불균일성을 확인하였다.

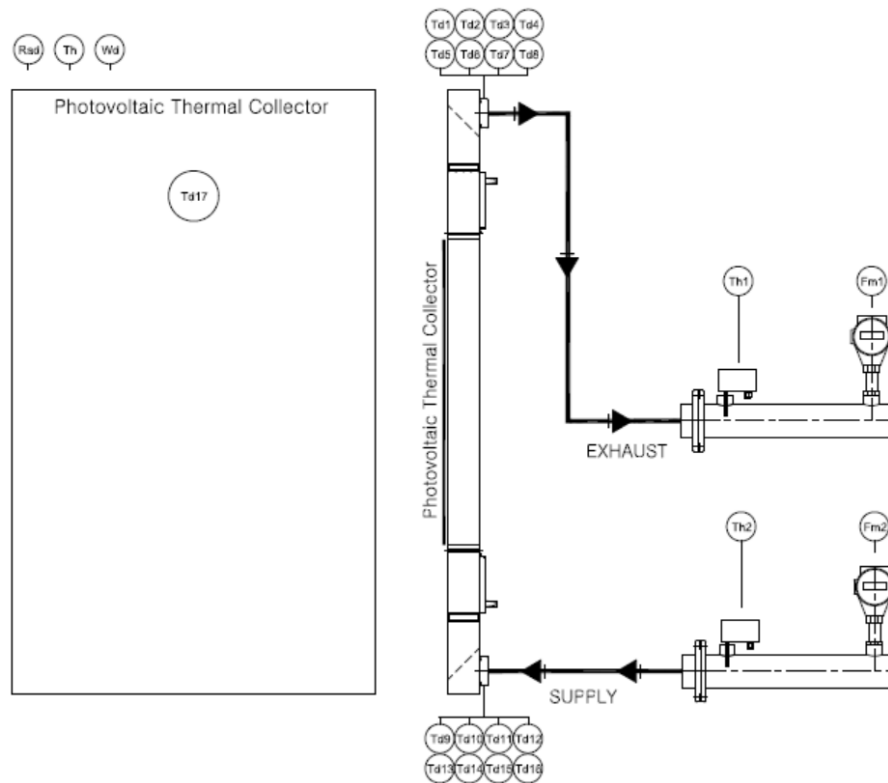


Fig. 3 Location of measurement sensors for the experiment

공기식PVT 컬렉터의 옥외성능실험은 일사량 700 W/m^2 이상, 유체의 유량 약 80 kg/h , 입, 출구의 유체온도 및 외기온도의 변화폭(Fluctuation)이 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 의 조건에서 수행되었으며, 동일한 조건에서 공기식 PVT 컬렉터의 전기성능을 확인하였다. 공기식 PVT 컬렉터의 내부순환을 위해 공급되는 유체의 온도는 $20 \sim 40^\circ\text{C}$ 로 설정하여 실험을 수행하였다.

3.2 공기식 PVT 컬렉터 옥외성능시험 결과분석

(1) 공기식 PVT 컬렉터 온도특성

Fig. 4는 정상상태에서의 공기식 PVT 컬렉터의 온도특성을 나타낸 그래프이다. 이때 일사량은 $870 (\pm 30) \text{ W/m}^2$ 이며, 외기온도는 $29 (\pm 0.5)^\circ\text{C}$, 유체유량은 약 80 kg/h 로 측정되었다. 동일 조건에서, 공기식 PVT 컬렉터로 유입되는 공기유체의 온도가 $35 (\pm 0.5)^\circ\text{C}$ 일 때, 출구온도는 약 $53 (\pm 0.5)^\circ\text{C}$ 로 나타났으며, 공기식 PVT 컬렉터의 집열을 통한 유체의 온도차(ΔT)는 약 $18^\circ\text{C} (\pm 0.5)$ 로 확인되었다. 이 때 공기식 PVT 컬렉터에 적용된 PV모듈의 후면 상단부의 온도는 약 $63.5 (\pm 1)^\circ\text{C}$ 로 나타났다.

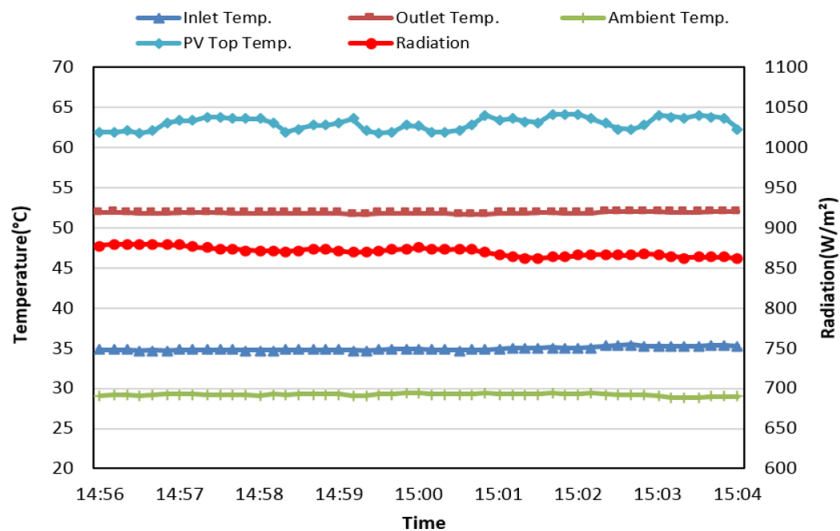


Fig. 4 Temperature characteristics of the PVT module

(2) 공기식 PVT 컬렉터 열 및 전기효율

Fig. 5는 정상상태에서 공기식 PVT 컬렉터의 열 및 전기효율을 나타낸 그래프이다. x축은 외기온도와 공기식 PVT 컬렉터로 공급되는 유체온도, 일사량의 관계식에 따른 계수값으로 설정하였으며 y축은 이에 따른 공기식 PVT 컬렉터의 열 및 전기효율을 나타냈다. 공기식 PVT 컬렉터로 공급되는 유체온도와 외기온도가 동일하고 외부 열손실이 없을 때, 공기식 PVT 컬렉터의 열 및 전기효율은 컬렉터 면적기준, 각각 37.1%, 6.5%로 분석되었으며, 일사량 및 외기온도의 변화에도 유체순환에 따른 PV모듈의 냉각효과로 인해 공기식 PVT 컬렉터의 전

기효율 저감이 발생하지 않았다.

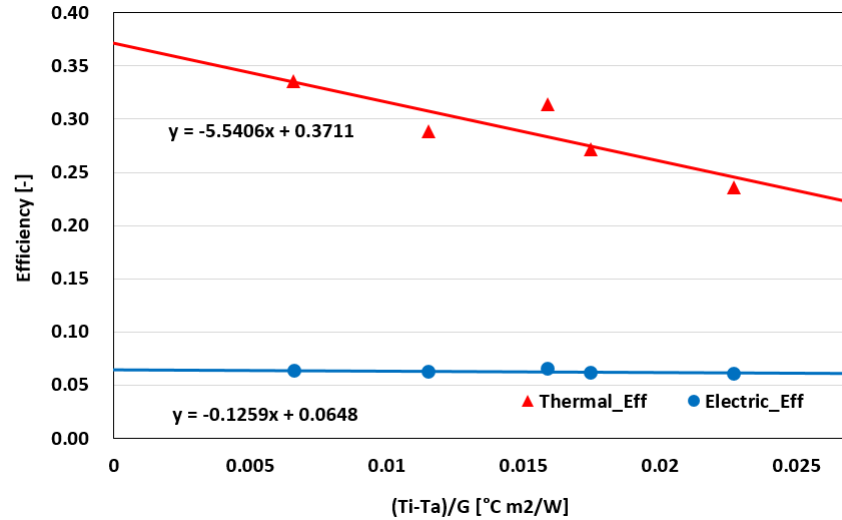


Fig. 5 Thermal and electrical efficiency of Air-type PVT collector with experiment results

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

$$\eta_{el} = (I_{mp} \cdot V_{mp}) / (A_{pvt} \cdot G) \tag{2}$$

- | | |
|---|---|
| η_{th} : Thermal efficiency [-] | η_{el} : Electrical efficiency [-] |
| m : Air flow rate [kg/h] | I_m : Maximum current [A] |
| C_p : Specific heat of air at constant pressure [J/kg °C] | V_m : Maximum voltage [V] |
| T_o : Outlet air temperature [°C] | T_a : Ambient temperature [°C] |
| T_i : Inlet air temperature [°C] | G : Radiation [W/m ²] |
| A_{pvt} : Surface area of the collector [m ²] | |

4. 공기식 PVT 컬렉터 시뮬레이션 성능분석

4.1 공기식 PVT 컬렉터 컴포넌트(Type 203)

개발된 공기식 PVT 컬렉터는 기존 PVT 컬렉터와 다른 디자인 및 성능 특성을 가지고 있으며, 이를 시뮬레이션에 반영하기 위해 Type 203 TRNSYS 컴포넌트가 개발되었다¹²⁾. Type 203 TRNSYS 컴포넌트는 캐나다 천연자원부 산하 연구소인 CanmetENERGY와 공주대학교의 국제공동연구를 통해 개발되었으며, 실내 성능시험 데이터를 기반으로 개발 및 검증되었다. 해당 컴포넌트는 개발된 컬렉터의 전면 PV 디자인, 곡선형태의 흡열

판, 내부유로 등의 특성이 반영되었으며 주요 파라미터는 Table 2와 같다.

이에 따라, 공기식 PVT 컬렉터의 옥외성능데이터와 시뮬레이션 결과의 교차검토 및 오차범위를 확인하기 위해 옥외실험 데이터를 기반으로 시뮬레이션이 수행되었으며 풍향, 풍속에 대한 고려는 제외되었다.

Table 2 Type 203 component parameters for simulation (based on indoor experiment)

Parameter	Description	Value	Unit
A_{pvt}	Air-type PVT collector area	1.63	m ²
E_{pv}	PV glazing emissivity	0.9	-
Ab_{ab}	Absorber absorptance	0.95	-
Ab_{pv}	PV cells absorptance	0.36	-
C_{pv}	Module temperature coefficient for efficiency (%/°C)	-0.5	-
Eff_{pv}	Cell (Module) electrical efficiency at reference conditions	15.77 (6.78)	%
T_i	Fluid inlet temperature	35	
F_{pvt}	Fluid flowrate	80	kg/h
T_a	Outdoor ambient air temperature	29	°C
G_{pvt}	Incident beam radiation on the PVT collector	870	W/m ²

4.2 공기식 PVT 컬렉터 시뮬레이션 분석 및 오차검토

옥외실험데이터를 기반으로, 시뮬레이션을 통해 공기식 PVT 컬렉터의 열 및 전기성능을 분석하였다(Fig. 6). 옥외실험과 동일한 조건에서 공기식 PVT 컬렉터의 열 및 전기효율은 컬렉터 면적 기준으로 각각 32.3%, 6.0%로 분석되었다. 시뮬레이션을 통한 공기식 PVT 컬렉터의 열 효율은 옥외성능 대비, 약 87%, 전기효율은 약

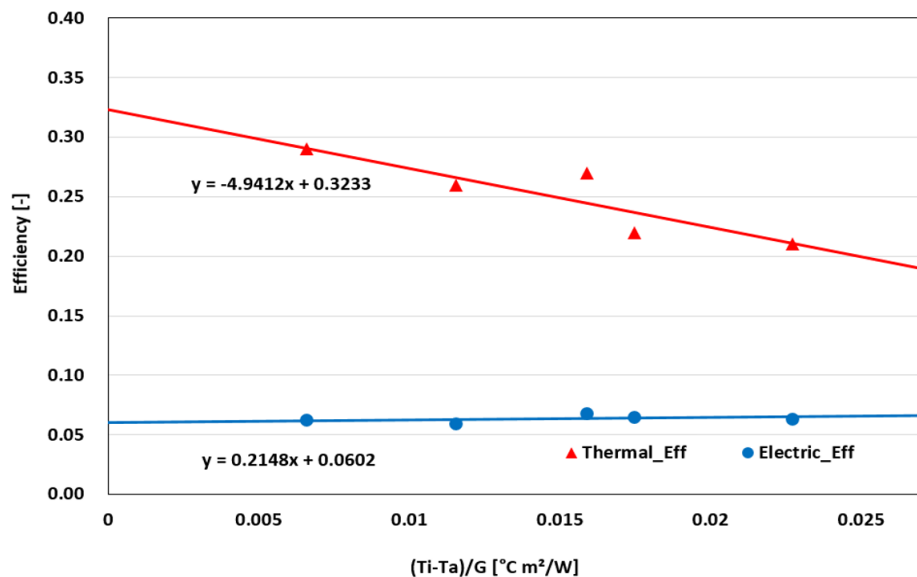


Fig. 6 Thermal and electrical efficiency of Air-type PVT collector with simulation results

92%로 확인되었으며, 열 효율의 편차가 약 5% 크게 나타났다. 이는 직달, 산란일사의 비율 및 풍향풍속 등, 공기식 PVT 컬렉터의 집열 성능에 영향을 미치는 인자가 크기 때문으로 판단된다.

Figs. 7, 8은 공기식 PVT 컬렉터의 옥외실험데이터와 Type 203에 기반한 TRNSYS 시뮬레이션 결과 값을 비교하여 나타낸 그래프이다. 옥외성능실험 및 시뮬레이션을 통한 열효율은 일사량에 따라, 각각 24 ~ 34%, 21 ~ 29%에 분포하였으며, 동일 조건에서 전기효율은 각각 6.1 ~ 6.5%, 5.9 ~ 6.8%로 나타났다. 이에 따라, 공기식 PVT 컬렉터의 옥외실험데이터와 시뮬레이션 결과의 오차(bias error)범위는 열효율의 경우 약 -5%, 전기효율은 -0.4%로 확인되며, 공기식 PVT 컬렉터의 옥외성능실험조건에 따른 다양한 변수 및 특성에 따라 오차가 발생하는 것으로 판단된다. 열 효율의 경우, 시뮬레이션 결과치가 실험성능 대비, 전반적으로 낮게 나타났으며, 전기효율은 유사하게 나타났다.

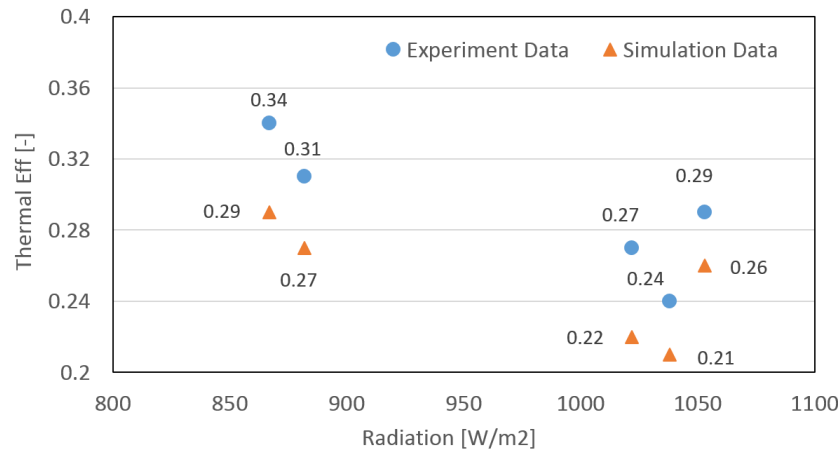


Fig. 7 Thermal efficiency comparison of experiment and simulation

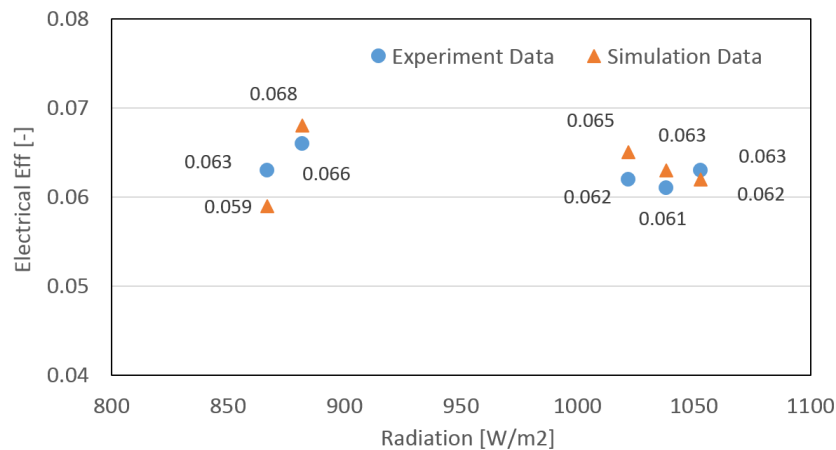


Fig. 8 Electrical efficiency comparison of experiment and simulation

4.3 공기식 PVT 컬렉터 연간시뮬레이션 분석

Fig. 9는 단일 공기식 PVT 컬렉터의 월별 집열량, 발전량을 나타낸 그래프이다. 기상조건은 대전지역 (latitude 36° 21'0" north; longitude 127° 23'0" east, 1 year data, Text format) 기상데이터를 이용하였으며 시뮬레이션 결과, 개발된 공기식 PVT 컬렉터의 월 별 최소, 최대 집열량은 각각 29.24 kWh (12월), 81.67 kWh (5월), 최소, 최대 발전량은 6.36 kWh (12월), 11.85 kWh (5월)로 확인되었다. 일사량이 가장 많은 5월의 경우, 높은 일사량에 따라 공기식 PVT모듈의 온도가 높게 나타나지만, 컬렉터 후면에서의 집열 및 환기에 따른 전면 PV의 냉각을 효과적으로 수행함으로써, 높은 온도에 의한 공기식 PVT 컬렉터의 전기효율저감이 발생하지 않은 것으로 분석되었다. 이에따라 다른 월(month)보다 컬렉터의 발전량 및 집열량이 높게 나타난 것으로 판단된다. 7월에는 장마의 영향이 크며, 이에 따라 5월, 6월 그리고 8월보다 상대적으로 낮게 나타났다.

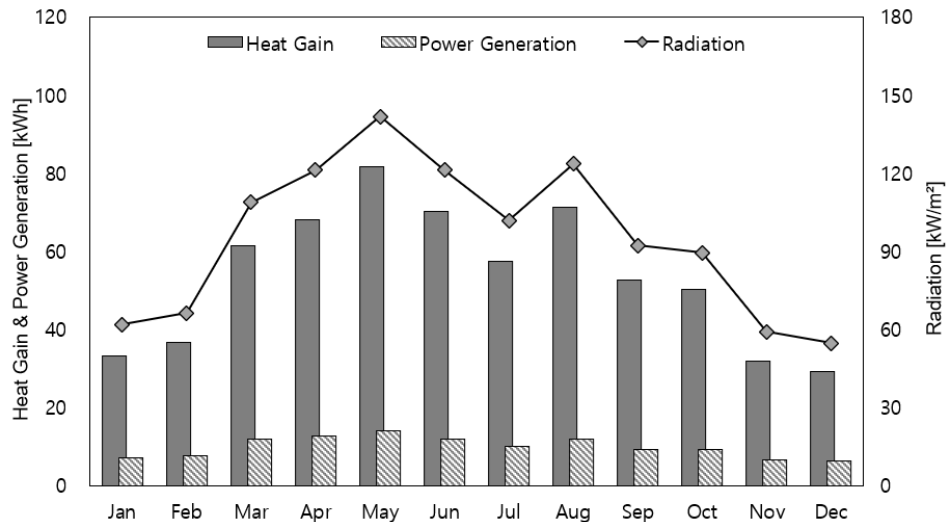


Fig. 9 Monthly heat gain and power generation of the PVT module

열 성능이 개선된 공기식 PVT 컬렉터의 디자인 특성에 따라, 계절별 공기식 PVT 컬렉터의 집열량은 하절기 (6 ~ 8월), 동절기(12월 ~ 2월), 간절기 1 (3 ~ 5월), 간절기 2 (9 ~ 11월), 각각 (198.97 kWh_{th}), (99.12 kWh_{th}), (211.19 kWh_{th}), (134.80 kWh_{th}), 발전량은(33.63 kWh_{el}), (21.27 kWh_{el}), (38.54 kWh_{el}), (25.24 kWh_{el})로 분석되었다. 하절기 높은 외기 온도조건에도 PVT컬렉터의 발전량이 가장 높게 분석되었다.

5. 결론

본 연구는 곡선형 배플을 이용한 공기식 PVT 컬렉터를 설계 및 시제작하고, 옥외 성능시험을 통해 컬렉터의 집열 및 발전 특성을 분석하였다. 또한 개발 PVT 컬렉터의 특성을 반영한 컴포넌트를 이용하여 시뮬레이션 검토 및 연간 에너지 성능을 분석하였다.

옥외 성능시험결과, 개발된 공기식 PVT 컬렉터의 집열효율은 약 37.1%, 전기효율은 6.5%로 확인(컬렉터 면적 기준)되었으며, 열 성능이 개선된 디자인 특성에 따라 발전량 대비, 높은 집열효율을 보였다. 컬렉터 컴포넌트를 이용한 시뮬레이션 결과, 집열 및 전기효율은 각각 32.3%, 6.0%로 분석되었다. 시뮬레이션 결과와 공기식 PVT 컬렉터의 옥외 성능시험을 교차 검토했을 때, 일사량 변화에 따른 컬렉터의 열 및 전기효율은 유사한 패턴을 보였다. 옥외 성능시험 결과와 시뮬레이션 결과의 열효율 및 전기효율의 오차(Bias error) 범위는 각각 -4%, -0.24%로 확인되었다.

공기식 PVT 컬렉터의 연간 집열량 및 발전량은 모두 하절기(6, 7, 8월)가 동절기(12, 1, 2월)보다 각각 99.85 kWh_{th}, 12.36 kWh_{el}, 높게 나타났으며, 이는 공기식 PVT 컬렉터의 효율적인 집열과 동시에, 하절기 PV 과열에 따른 전기효율 저감 문제가 효과적으로 개선된 것으로 판단된다. 이에 따라, 공기식 PVT 컬렉터의 연간 집열량 및 발전량은 각각 644 kWh/yr, 118 kWh/yr로 확인되며, 상대적으로 온수, 급탕 등, 전기에너지보다 열에너지 수요가 많은 기후의 지역에서 효과적으로 이용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 PVT컬렉터와 냉방시스템과의 연계를 통해, 히트펌프 등 하절기 높은 집열량을 이용한 냉방시스템의 효율적인 운용이 가능할 것으로 판단되며, 향후 이에 따른 추가 연구가 진행될 예정이다.

후기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원과(No. 20188550000480), 2020년도 신재생에너지 표준화 및 인증고도화 지원사업의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20012638).

REFERENCES

1. Lämmle, M., Hermann, P., Kramer, Y., Panzer, A., Piekarczyk, A., Thoma, C., and Fahr, S., Development of Highly Efficient, Glazed PVT Collectors with Overheating Protection to Increase Reliability and Enhance Energy Yields, *Solar Energy*, Vol. 176, pp. 87-97, 2018.
2. Fudholi, A., Zohri, M., Rukman, N. S. B., Nazri, N. S., Mustapha, M., Yen, C. H., Mohammad, M., and Sopian, K., Exergy and Sustainability Index of Photovoltaic Thermal (PVT) Air Collector: A Theoretical and Experimental Study, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 100, pp. 44-51, 2019.
3. Bambrook, S. M. and Sproul, A. B., Maximising the Energy Output of a PVT Air System, *Solar Energy*, Vol. 86, pp. 1857-1871, 2012.
4. Golzari, S., Kasaeian, A., Amidpour, M., Nasirivatan, S., and Mousavi, S., Experimental Investigation of the Effects of Corona Wind on the Performance of an Air-cooled PV/T, *Renewable Energy*, Vol. 127, pp. 284-297, 2018.
5. Kim, J. H., Ahn, J. G., and Kim, J. T., Demonstration of the Performance of an Air-Type Photovoltaic Thermal (PVT) System Coupled with a Heat-Recovery Ventilator, *Energies*, Vol. 9, pp. 1-15, 2016.
6. Shahsavari, A., Khanmohammida, S., Khaki, M., and Salmanzadeh, M., Performance Assessment of an Innovative Exhaust Air Energy Recovery System based on the PV/T-assisted Thermal Wheel, *Energy*, Vol. 162, pp. 682-696, 2018.

7. Zhou, C., Liang, R., and Zhang, J., Optimization Design Method and Experimental Validation of a Solar PVT Cogeneration System Based on Building Energy Demand, *Energies*, Vol. 10, pp. 1-20, 2017.
8. Aste, N., Chiesa, G., and Verri, F., Design, Development and Performance Monitoring of a Photovoltaic-Thermal (PVT) Air Collector, *Renewable Energy*, Vol. 33, pp. 914-927, 2008.
9. Bellos, E. and Tzivanidis, C., Yearly Performance of a Hybrid PV Operating with Nanofluid, *Renewable energy*, Vol. 113, pp. 867-884, 2017.
10. Yandri, E., Design, The effect of Joule Heating to Thermal Performance of Hybrid PVT Collector During Electricity Generation, *Renewable Energy*, Vol. 111, pp. 344-352, 2017.
11. Al-Waeli, A. H. A., Chaichan, M. T., Sopian, K., Kazem, H. A., Mahood, H. B., and Khadom, A. A., Modeling and Experimental Validation of a PVT System using Nanofluid Coolant and nano-PCM, *Solar Energy*, Vol. 177, pp. 178-191, 2019.
12. Delisle, V., Modelling of the Performance of a BIPV-T air Collector With Experimental Comparison, *CanmetENERGY and Kongju National Univeristy*, 2016.