

타공형 배플이 적용된 공기식 PVT 컬렉터의 열 및 전기 성능 분석

김상명¹⁾ · 기혜란²⁾ · 김진희³⁾ · 김준태^{4)*}

Thermal and Electrical Performance of an Air-Type PVT Collector with a Perforated Baffle for Building Energy Systems

Sang-Myung Kim¹⁾ · Hye-Ran Ki²⁾ · Jin-Hee Kim³⁾ · Jun-Tae Kim^{4)*}

Received 2 April 2026 Revised 21 May 2026 Accepted 22 May 2026 Published online 22 June 2026

ABSTRACT The building sector is a significant contributor to global energy consumption and carbon emissions, necessitating the integration of renewable energy technologies. Photovoltaic-thermal (PVT) systems, which simultaneously generate electrical and thermal energy, can improve overall energy utilization efficiency in buildings. In particular, air-type PVT collectors are considered suitable for building applications because of their simple design and low leakage and freezing risks. However, their thermal performance is relatively limited owing to the low heat transfer coefficient of air. This study experimentally fabricated an air-type PVT collector with a perforated baffle plate designed to enhance internal airflow and heat transfer. Its thermal and electrical performances under outdoor conditions were analyzed, and compared with those of a conventional collector without a baffle plate. The results showed that the baffle plate improved the outlet air temperature increase, enhanced heat transfer within the collector, and increased the thermal and electrical efficiency coefficients from 0.2715 to 0.3175 and 0.138 to 0.154, respectively. Thus, by promoting airflow mixing and turbulence inside the collector, the perforated baffle plate effectively enhanced both its thermal and electrical performances. The proposed system shows potential for application in building-integrated renewable energy systems such as BIPV systems.

Key words PVT collector(태양광·열 복합 컬렉터), Air-type PVT(공기식 PVT), Perforated baffle(타공형 배플), Thermal and electrical efficiency(열 및 전기 효율), Standard performance(표준성능)

Nomenclature

- 1) Postdoctoral Researcher, Green Energy Technology Research Center, Kongju National University
2) Researcher, Korea Institute of Green Climate Technology
3) Research Professor, Green Energy Technology Research Center, Kongju National University
4) Professor, Department of Green Smart Architectural Engineering/ Department of Energy System Engineering(Graduated School), Kongju National University

*Corresponding author: jtkim@kongju.ac.kr
Tel: +82-41-521-9333

- η_{th} : thermal efficiency
 η_{el} : electrical efficiency
 \dot{m}_i : inlet air mass flow rate, kg/s
 \dot{m}_e : outlet air mass flow rate, kg/s
 $C_{f,i}$: specific heat of inlet air, J/kg°C
 $C_{f,e}$: specific heat of outlet air, J/kg°C
 $C_{f,a}$: specific heat of ambient air, J/kg°C

- ϑ_i : inlet air temperature, °C
- ϑ_e : outlet air temperature, °C
- ϑ_a : ambient air temperature, °C
- G : solar irradiance, W/m²
- A_{put} : collector aperture area, m²
- P_{max} : maximum electrical power, W
- V_{mp} : maximum voltage, V
- I_{mp} : maximum current, A

1. 서론

건물 부문은 전 세계 에너지 소비의 약 34% 비중을 차지하고 있으며, 에너지 관련 온실가스 배출량은 약 37%를 유발하며 지구 온난화 가속화의 핵심 변수로 부상하였다.^[1] 이에 따라 2050 탄소중립 달성을 위해 건물 에너지 효율 향상과 신재생에너지 기술 적용 확대를 통한 에너지 소비 및 온실가스 배출 저감이 핵심 과제로 강조되고 있다. 국내에서는 2050 탄소중립을 달성하기 위해 신축 건물의 제로에너지건축물 인증과 기축 건물의 그린리모델링 사업 등이 수행되고 있다.^[2] 특히 제로에너지건축물(ZEB) 인증 의무화 제도는 공공건물에서 시작하여 2025년에는 민간 건물까지 확대됨에 따라 건물에 적용 가능한 신재생에너지 기술의 중요성이 더욱 증가하고 있다.^[3] 국내에서 태양광 발전 시스템은 건물에 적용 가능한 대표적인 신·재생에너지 기술로 활용되고 있다. 하지만 건물의 외벽과 지붕 등 외피에 적용되는 건물 일체형 태양광 발전시스템의 경우 태양광 모듈로 입사되는 태양에너지의 약 20%가 전기로 변환되고, 약 70%는 열로 전환되어 태양광 모듈 온도를 상승시킨다.^[4] 태양광 모듈의 온도 상승은 발전 효율 저하로 이어지며, 이는 여전히 해결해야 할 과제로 지적되고 있다.

이와 같은 문제를 해결하기 위한 기술로 태양광·열 복합 발전시스템(Photovoltaic/Thermal, PVT)이 제안되었다. PVT 시스템은 태양광 모듈을 통해 전기를 생산하는 동시에 발생하는 열을 회수하여 열에너지로 활용함으로써 단위 면적당 에너지 이용 효율을 향상시킬 수 있는 장점을 가진다.^[5] 특히 건물에 적용되는 PVT 시스템은 태양광 발전 시 발생하는 열을 회수하여 건물의 설비와 연계하여 건물 난

방이나 급탕 등의 열원으로 활용할 수 있어 적용 측면에서 높은 잠재력을 가진 기술로 평가되고 있다.^[6]

PVT 컬렉터는 열전달 매체에 따라 액체식(Liquid-type)과 공기식(Air-type)으로 구분된다. 액체식 PVT 시스템은 열전달 성능이 우수한 장점이 있지만, 누수 및 동파 등의 문제로 인해 건물 적용 시 유지관리 측면에서 어려움이 있다. 반면 공기식 PVT 컬렉터는 구조가 액체식에 비해 비교적 단순하고 유지관리가 용이하며, 동파에 대한 위험이 없기 때문에 건물 적용에 적합한 시스템으로 평가되고 있다.^[7] 그러나 공기식 PVT 시스템은 공기의 낮은 열전달 계수로 인해 열 성능이 상대적으로 낮다는 한계를 가지며, 이를 개선하기 위한 다양한 연구가 수행되고 있다.

공기식 PVT 컬렉터의 성능을 향상시키기 위해 공기 유로 구조 개선, 공기 채널 구조 최적화, 난류 촉진 구조 적용 등 다양한 요소들을 중심으로 진행되어 왔다. Hegazy^[8]는 4가지 형태의 공기식 PVT 컬렉터를 디자인하여 성능을 비교 분석하였으며, 공기 유로 설계가 공기식 PVT 컬렉터 성능에 중요한 영향을 미친다는 것을 확인하였다. Tonui와 Tripanagnostopoulos^[9]는 공기 순환 방식에 따른 PVT 컬렉터 성능을 분석하여 공기 흐름 제어가 열 성능 향상에 중요한 요소임을 제시하였다. 또한 Kumar와 Rosen^[10]은 이중 패스 공기식 PVT 시스템을 대상으로 핀 구조 적용에 따른 PVT 컬렉터의 열전달 성능 향상 효과를 수치해석을 통해 분석하였으며, Othman 등^[11]은 핀 구조를 적용한 PVT 컬렉터에서 열교환 면적 증가에 따른 PVT 컬렉터의 열 및 전기 성능 향상 효과를 수치해석과 실험을 통해 확인하였다.

또한, 공기 유동을 개선하고 열전달 성능을 향상시키기 위한 방법으로 난류 촉진 구조나 배플(baffle) 구조를 적용하는 다양한 연구도 보고되고 있다. Choi *et al.*^[12]은 단일 패스 이중 공기 유로 PVT 컬렉터에 균일하지 않은 리브 구조를 적용하여 열전달 성능이 개선되도록 설계 및 제작하여 옥외 실험을 수행하였으며, 실험결과 공기 유량의 증가에 따라 열 및 전기 효율이 증가하는 것을 확인하였다. An *et al.*^[13]은 공기식 PVT 컬렉터의 열 전달을 향상시키기 위해 설계된 난류 촉진 구조(turbulator)를 적용한 공기식 PVT 컬렉터 성능 실험을 수행하여 내부 공기 유동 구조가 열전달 성능에 중요한 영향을 미친다는 결과를 보고하였다. 이외에도 다양한 배플 형상 구조에 따른 공기식 PVT 컬렉터

의 성능 분석에 대한 연구들^[14~16]이 수행되었으며, 이러한 연구 결과는 배플 구조가 공기식 PVT 컬렉터의 열전달 성능 향상에 효과적인 설계 요소가 될 수 있음을 시사한다.

그러나 기존 연구의 대부분은 수치해석 및 해석모델에 근거한 분석이거나 제한된 실험 조건에서 열 성능 중심으로 수행된 경우가 많으며, 실제 옥외 환경에서 표준에 기반한 공기식 PVT 컬렉터의 열 및 전기 성능을 분석한 실험 연구는 미흡한 실정이다. 특히 타공형(perforated) 배플 구조의 적용 여부에 따른 공기식 PVT 컬렉터의 열 및 전기 성능을 정량적으로 비교 분석한 연구는 제한적으로 수행되고 있다.

본 연구에서는 공기식 PVT 컬렉터 내부 공기 유동을 개선하고 열전달 성능을 향상시키기 위해 타공형 배플 플레이트(perforated baffle plate; 이하 배플)를 적용한 공기식 PVT 컬렉터를 설계 및 제작하였다. 또한 ISO 9806 기반 옥외 표준성능시험을 통해 공기식 PVT 컬렉터의 열 및 전기 성능을 분석하였다. 추가로 동일 조건에서 배플이 적용되지 않은 기본형 공기식 PVT 컬렉터와 비교 분석을 수행함으로써 배플 적용에 따른 열 및 전기 성능 변화와 특성을 정량적으로 평가하였다.

2. 공기식 PVT 컬렉터

본 연구에서는 배플 적용 여부에 따른 공기식 PVT 컬렉터의 성능 차이를 비교·분석하기 위해 배플이 적용된 PVT 컬렉터와 적용되지 않은 기본형 컬렉터를 각각 제작하였다. 이후 동일 조건에서 옥외 표준 성능 실험을 수행하여 두 컬렉터의 열 및 전기 성능을 비교하였다.

2.1 배플 플레이트 설계

공기식 PVT 컬렉터 실험을 위해 배플 적용 여부에 따른 2종의 공기식 PVT 컬렉터를 설계하였다. Fig. 1은 배플 적용 여부에 따른 PVT 컬렉터 내부로 유입되는 공기의 흐름을 보여주고 있는 개념도이다. Fig. 1 (a)는 배플이 적용되지 않은 기본형 공기식 PVT 컬렉터이며, (b)는 배플이 적용된 모델을 보여주고 있다. 기본형 PVT의 경우 유입된 공기는 일정한 흐름으로 통과하는 반면에, 배플이 적용된 PVT 컬렉터는 배플에 영향을 받아 공기의 유로가 증가함을 확

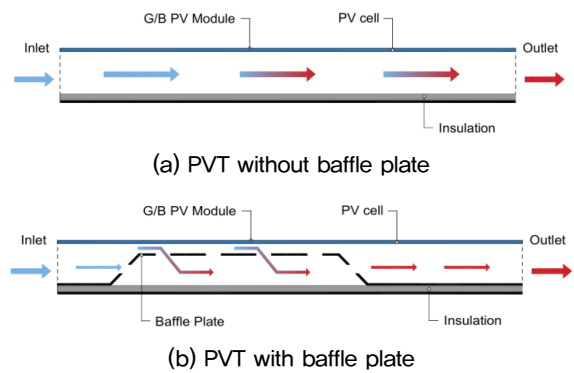
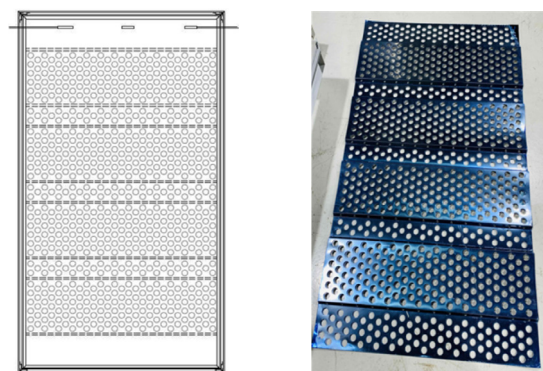


Fig. 1. Schematic diagram of airflow in the air-type PVT collector

인할 수 있다. 이는 PVT 내부 공기의 체류 시간을 증가시키고 공기와 흡열판 사이의 열전달을 향상시킬 수 있다.

본 연구에서 적용된 타공형 배플은 사전 CFD 기반 유동 해석 결과^[17]를 바탕으로 공기 유동 혼합 및 난류 형성을 통한 열전달 성능 향상과 압력강하를 고려하여 설계되었다. 제작된 배플은 PVT 컬렉터 내부에서 더 많은 열교환이 이루어질 수 있도록 전도율이 높은 알루미늄 재질로 제작되었으며, 일정 간격으로 반복 절곡된 구조로 설계되었다. 기존의 일반 배플 구조가 공기 유동을 단순 차단하거나 유로를 변화시키는 방식인 것과 달리, 본 연구에 적용된 배플은 절곡 구조와 타공 구조를 동시에 적용하여 공기의 유로를 증가시키고, 배플 타공을 통해 공기의 난류 및 유동 혼합이 발생하도록 유도함으로써 공기층 내부의 열교환을 촉진함으로써 열전달 성능을 향상시키도록 설계하였다. 배플의 전



(a) drawing of perforated baffle plate (b) fabricated baffle plate

Fig. 2. Configuration of perforated baffle plate used in the PVT collector

Table 1. Specification of the perforated baffle plate

Parameters	Values
Baffle material	Aluminum
Baffle width	996 mm
Baffle length	1,730 mm
Baffle height	20 mm
Upper flat length	280 mm
Open ratio	34%
Hole diameter (upper flat section)	30 mm
Hole diameter (inclined section)	15 mm

체 크기는 996 mm × 1,730 mm이며, 배플의 높이는 20 mm로 설계되었다. 타공 직경은 상부 평면부에서 30 mm, 절곡 경사면에서 15 mm를 적용하였으며, 배플의 타공 개구율은 약 34%로 적용되었다. Fig. 2 (a)는 배플 제작을 위한 설계 도면을 나타낸 이미지이며, (b)는 실제 제작된 배플을 보여주고 있다. 또한, Table 1은 배플의 상세 사양을 나타낸다.

2.2 공기식 PVT 컬렉터 구성

Fig. 3은 본 연구를 위해 제작한 공기식 PVT 컬렉터의 구조와 주요 구성요소를 나타낸 것이다. 컬렉터 전면에는 G/B 타입의 PV 모듈이 적용되었으며, PVT 컬렉터로 공기가 유입되어 통과하는 공기층에 배플이 설치되었다. 또한 후면으로의 공기 열손실을 최소화하기 위하여 단열재가 설치되었다. 공기식 PVT 컬렉터의 크기는 1,913 × 1,119 × 73.5 mm이며, 적용된 PV 모듈의 사양은 Table 2와 같다.

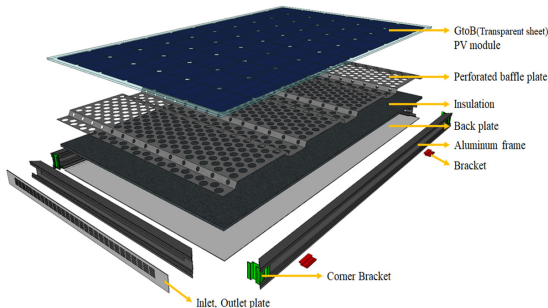


Fig. 3. Schematic configuration of the air-type PVT collector with perforated baffle plate

Table 2. Specification of PV module

Parameters	Values
Cell type	Mono-crystalline Silicon (66 cells)
Module Type	Glass-to-backsheet
Module Size	1,066(W) × 1,860(L) × 6(D) mm
Module Efficiency	16.1%
Maximum Power (P_{max})	318.46 Wp
Maximum Voltage (V_{mpp})	36.97 V
Maximum Current (I_{mpp})	8.61 A
Open-circuit Voltage (V_{oc})	44.66 V
Short-circuit Current (I_{sc})	9.06 A
Fill Factor	78.67%

3. 실험방법

3.1 실험 장비

공기식 PVT 컬렉터의 표준성능시험은 2025년 10월부터 11월까지 국립공주대학교 천안캠퍼스 옥외 실험동(위도 36.85°, 경도 127.15°)에서 수행되었다. PVT는 수평(0°~160°), 수직(15°~90°)으로 조절이 가능한 2축 솔라 트래커 위에 설치되었으며, 실험은 PVT 컬렉터가 태양과 법선면을 유지하도록 설정하여 실험을 수행하였다. Fig. 4는 표준성능시험 진행을 위해 설치된 PVT 컬렉터를 나타낸다.

공기식 PVT 컬렉터의 열 및 전기 성능을 평가하기 위해



Fig. 4. Standard performance test of air-type PVT collector

옥외 실험 설비를 구축하였으며, Fig. 5는 공기식 PVT 컬렉터 표준성능시험을 보여주고 있다. PVT 컬렉터로 유입되는 공기 온도와 유량을 설정하기 위하여 PVT 컬렉터의



Fig. 5. Standard performance test of air-type PVT collector



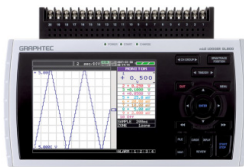
(a) humidity and temperature transmitter



(b) insertion mass flow meter



(c) pyranometer



(d) data logger



(e) I-V curve tracer



(f) thermocouple

Fig. 6. Measurement instruments used in the outdoor experiment

입구와 출구 덕트가 공기조화 챔버에 연결하여 공기 온도와 유량을 제어하였다.

Fig. 6은 데이터 측정을 위해 설치된 계측기를 나타낸다. PVT 컬렉터의 입·출구 온도와 유량을 측정하기 위하여 온·습도계(a)와 유량계(b)를 PVT 컬렉터의 입구와 출구에 설치하였다. 일사량 측정을 위한 일사량계(c)는 PVT 컬렉터와 동일한 면에 설치되어 PVT 컬렉터로 유입되는 일사량을 측정하였다. 또한 배플 적용 여부에 따른 PVT 컬렉터의 온도 특성을 분석하기 위하여 PV 모듈 후면에 열전대(f)를 부착하였으며, 부착된 열전대는 데이터 로거(d)에 연결하여 온도를 측정하였다. PVT 컬렉터의 전기 성능은 I-V curve tracer(e)에 연결하여 전압 및 전류 등 전기 요소를 측정하였다. Table 3은 실험에 사용된 계측 장비의 측정 범위와 정확도를 나타낸 표이다. 측정 장비의 오차 범위는 ISO 9806에서 요구하는 측정 정확도 수준을 만족하도록 구성하였으며, 이를 통해 실험 데이터의 신뢰성을 확보하였다. 또한 계측장비의 정확도를 기반으로 측정 온도 및 효율 값에 대한 불확도를 검토하였으며, 배플 적용에 따

Table 3. Specifications and accuracy of measurement instruments

Type	Specification
Pyranometer (Solar irradiance)	Model: EKO MS-60 Operating temperature: -40°C to $+80^{\circ}\text{C}$ Measurement range: 0 to 2000 W/m^2 Accuracy: $\pm 1\%$ at $<1000\text{ W/m}^2$
Insertion mass flow meter (inlet and outlet flow rate)	Model: Steel Mass 640S Operating temperature: -20°C to $+50^{\circ}\text{C}$ Measurement range: 0 to $200\text{ m}^3/\text{h}$ Accuracy: $\pm 1\%$ of reading $\pm 0.5\%$ of full scale
Humidity and temperature transmitter (inlet/outlet air temperature and relative humidity)	Model: Humidity Transmitter HF 5 Operating temperature: -40°C to $+60^{\circ}\text{C}$ Measurement range: -50°C to $+100^{\circ}\text{C}/0\%$ RH to 100% RH Accuracy: $\pm 0.1\text{ K}$ at $23^{\circ}\text{C}/\pm 0.8\%$ RH
Thermocouple (PV temperature)	Model : Omega T type thermocouple Operating temperature: -60°C to $+100^{\circ}\text{C}$ Measurement range: -250°C to $+350^{\circ}\text{C}$ Accuracy: $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$
I-V curve tracer	Measurement range: Voltage: 0 to 500 V, Current: 0 to 20 A Accuracy: Current: $\pm 1\text{ mA}$, Voltage: $\pm 5\text{ mV}$

른 성능 차이는 측정 불확도 범위를 초과하는 것으로 나타났다.

3.2 성능 평가 방법

공기식 PVT 컬렉터의 표준성능시험은 ISO 9806:2017 「Solar energy - Solar thermal collectors - Test methods」에서 제시하고 있는 열 성능 시험 방법에 따라 수행되었다. 표준에서 제시하고 있는 열 성능 평가 방법에는 개방형(open) 시험방법과 폐루프 시험방법(closed-loop test method)이 있으며, 본 연구에서는 폐루프 시험방법으로 진행되었다. Fig. 7은 공기식 태양열 집열기의 폐루프 시험방법을 나타내고 있다.^[18]

공기식 PVT 컬렉터의 표준성능시험은 ISO 9806 옥외 시험 기준에 따라 PVT로 입사되는 일사량이 700 W/m² 이상이고, 컬렉터의 입·출구 온도 및 습도, 유량, 풍속이 정상 상태일 때 데이터는 10초 간격으로 10분간 수집하였다. 정상 상태는 Table 4에 제시된 허용 범위를 만족하는 경우로

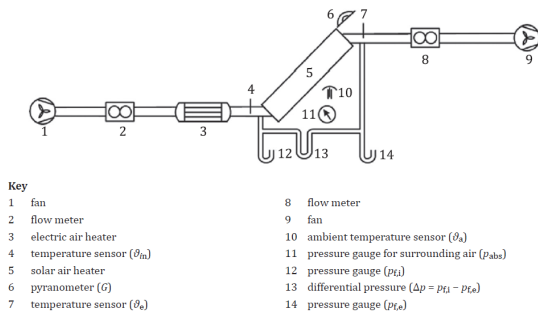


Fig. 7. Example of a closed test loop

Table 4. Permitted deviation of measured parameters during a measurement period

Parameters	Value
Hemispherical solar irradiance	± 50 W/m ²
Thermal irradiance	± 20 W/m ²
Ambient air temperature	± 1.5 K
Fluid mass flowrate	± 2%
Fluid temperature at the collector inlet	± 1.5 K
Fluid temperature at the collector outlet	± 1.5 K
Surrounding air speed	± 1.0 m/s deviation from set value

정의하였다. 또한, 열 성능시험이 진행되는 동안 전기 성능 또한 동일한 조건에서 동시에 측정을 진행하였다.

측정된 데이터를 이용하여 공기식 PVT 컬렉터의 열 및 전기 효율을 산출하였다. PVT 컬렉터의 열 효율은 ISO 9806:2017에서 제시된 식 (1)을 이용하여 계산하였으며, 전기 효율은 IEC 61215에 따른 식 (2)를 적용하여 산출되었다.^[18,19]

$$\eta_{th} = \frac{(\dot{m}_e C_{f,e} \vartheta_e) - (\dot{m}_i C_{f,i} \vartheta_i) - [(\dot{m}_e - \dot{m}_i) C_{f,a} \vartheta_a]}{A_{put} G} [-] \quad (1)$$

$$\eta_{el} = \frac{I_{mp} V_{mp}}{A_{put} G} = \frac{P_{max}}{A_{put} G} [-] \quad (2)$$

4. 결과분석 및 고찰

공기식 PVT 컬렉터의 시험은 일사 조건 약 700~900 W/m²에서 수행되었으며, 시험 기간동안 외기 온도는 약 20~30°C 범위였다. 공기식 PVT 컬렉터의 성능 평가를 위해서 PVT 컬렉터로 유입되는 입구 유량은 50, 100, 150 m³/h로 설정하였다.

4.1 온도 특성

Fig. 8은 공기식 PVT 컬렉터의 유량이 150 m³/h 일 때, 배플이 적용되지 않은 기본형 PVT 컬렉터의 PV 모듈 후면 온도를 나타낸 그래프이다. Fig. 8에서 나타난 바와 같이 PVT 컬렉터의 상단부 중단부, 하단부 온도는 각각 약 51.5°C, 47.5°C 및 40.5°C로 나타났다. 이는 컬렉터 하부로 유입된

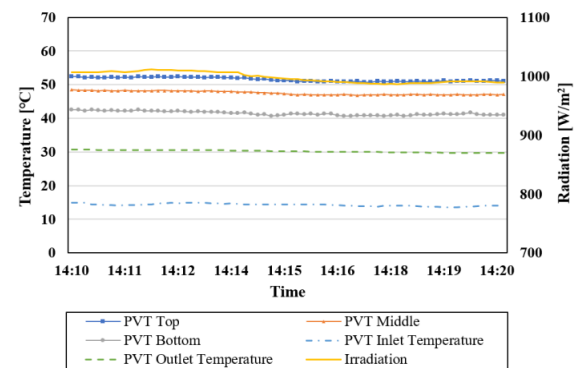


Fig. 8. Temperature characteristics of PVT collector without baffle plate

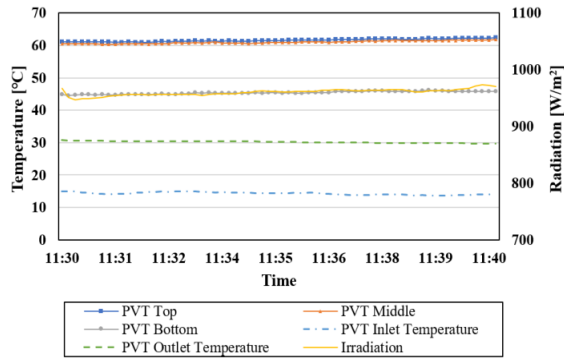


Fig. 9. Temperature characteristics of PVT collector with baffle plate

공기가 PVT 컬렉터를 통과하면서 열교환이 진행되고 이에 따라 출구가 있는 상부로 올라갈수록 온도가 상승한 것으로 판단된다.

Fig. 9는 유량 150 m³/h에서 배플이 적용된 공기식 PVT 컬렉터의 온도 특성을 나타낸 그래프이다. Fig. 9에서 나타난 바와 같이, 유량 150 m³/h 조건에서 배플이 적용된 공기식 PVT 컬렉터의 상단부, 중단부 및 하단부 온도는 각각 약 61.5°C, 60.5°C 및 44.5°C로 나타났다. 이는 기본형 PVT 컬렉터와 동일하게 컬렉터 하부에서 상부로 올라갈수록 공기 온도가 상승하는 것으로 분석되었다. 두 컬렉터의 상·하단부 온도 차이를 비교해 보면 기본형 PVT 컬렉터의 경우 약 11°C의 온도 상승이 나타난 반면, 배플이 적용된 PVT 컬렉터에서는 약 17°C의 온도 상승이 확인되었다. 이는 배플이 적용된 PVT의 경우 배플에 의한 공기의 열교환 면적 증가와 난류 유도로 인해 기본형 PVT 컬렉터보다 더 많은 열교환이 진행되었고, 이를 통해 더 높은 온도의 공기를 생산한 것으로 분석된다. 따라서 배플 적용은 공기식 PVT 컬렉터의 열회수 성능 향상에 효과적인 것으로 판단된다.

4.2 열 성능

Fig. 10은 PVT 컬렉터의 열효율 계수를 나타낸 그래프로, 실험 결과 배플이 적용된 PVT 컬렉터의 열효율이 기본형 PVT 컬렉터보다 전반적으로 높은 열효율 계수를 가지는 것으로 나타났다. 기본형 공기식 PVT 컬렉터의 열효율 계수는 0.2715로 나타났으며, 배플이 적용된 PVT 컬렉터의 열효율 계수는 0.3175로 나타났다. 이는 공기식 PVT 컬렉터에 타공형 배플을 적용함에 따라 기본형 PVT 컬렉터

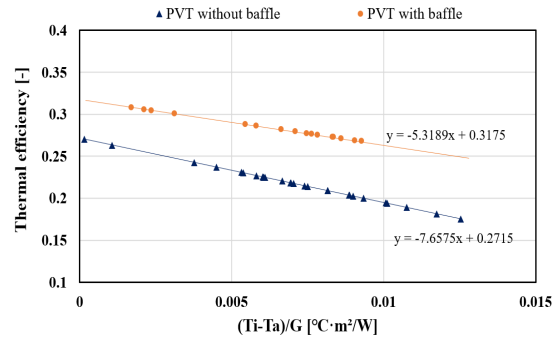


Fig. 10. Thermal efficiencies of the air-type PVT collector

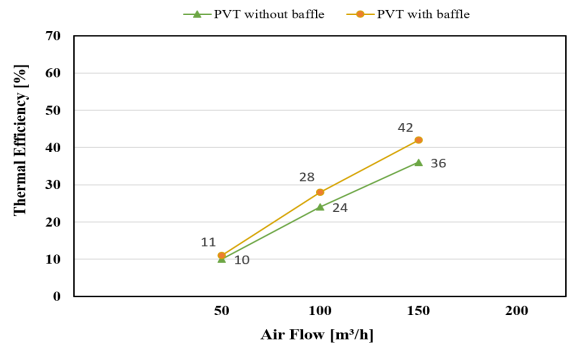


Fig. 11. Average thermal efficiencies of the air-type PVT collector with and without baffle plate

보다 열효율 계수가 약 4.6%p 향상되었으며, 상대적으로 열효율 계수는 약 17% 증가한 것으로 나타났다.

Fig. 11은 배플 유무에 따른 PVT 컬렉터의 유량 별 평균 열효율을 나타낸 그래프이다. 공기식 PVT 컬렉터의 유량이 증가함에 따라 2종류의 PVT 컬렉터 모두 평균 열효율이 증가하는 추세를 나타냈다. 유량이 50, 100, 150 m³/h 증가함에 따라 기본형 PVT 컬렉터의 평균 열효율은 각 약 10%, 24%, 36%로 나타났으며, 배플이 적용된 PVT 컬렉터는 약 11%, 28%, 42%로 나타났다. 동일한 유량일지라도 배플 적용 여부에 따라 열효율은 다르게 차이가 나타났으며, 배플이 적용된 PVT 컬렉터가 기본형 컬렉터보다 약 1~6% 더 높은 열효율을 가지는 것으로 분석된다.

4.3 전기 성능

Fig. 12는 배플 적용 여부에 따른 공기식 PVT 컬렉터의 전기 효율 계수를 비교한 그래프이다.

실험 결과 배플이 적용된 공기식 PVT 컬렉터의 경우 기본형 컬렉터보다 전반적으로 전기 효율 계수가 향상되는 경

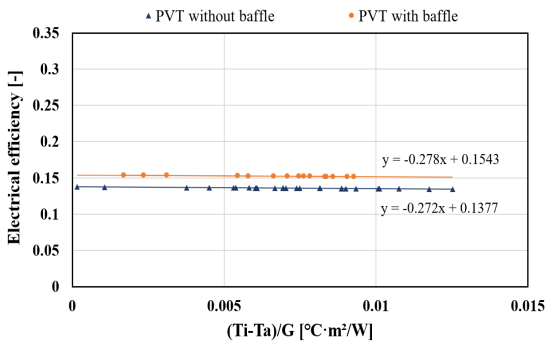


Fig. 12. Electrical efficiencies of the air-type PVT collector

향을 보였다. 기본형 컬렉터의 전기 효율 계수는 0.1377로 나타났으며, 배플이 적용된 경우 0.1543으로 나타났다.

이는 배플 적용에 따른 공기 유동 증가로 PV 모듈 후면 온도가 감소하였으며, 모듈 온도 상승에 따른 전기 효율 저하 특성이 완화된 결과로 분석된다.

Fig. 13은 유량에 따른 전기 효율 변화를 나타낸 그래프이며, 유량이 증가함에 따라 PVT 컬렉터의 전기 효율도 증가한 것으로 나타났다. 배플이 없는 PVT 컬렉터의 경우 50, 100, 150 m³/h로 유량 증가에 따른 전기 효율은 각각 13.4%, 14% 및 14.2%로 나타났으며, 배플이 적용된 PVT 컬렉터에서는 13.8%, 14.5% 그리고 15.1%로 나타났다. 유량이 증가할수록 전기 효율은 향상하였으며, 배플이 적용된 PVT 컬렉터의 효율 개선은 기본형 PVT 컬렉터보다 더 크게 나타났다.

유량이 증가할수록 배플 적용 여부에 따른 열 및 전기 성능 차이는 더욱 크게 나타났다. 이는 공기 유량 증가에 따라 내부 유동의 혼합 및 난류 효과가 강화되기 때문으로 판단되며, 건물 설비 시스템과 연계 적용 시 운전 유량 조건

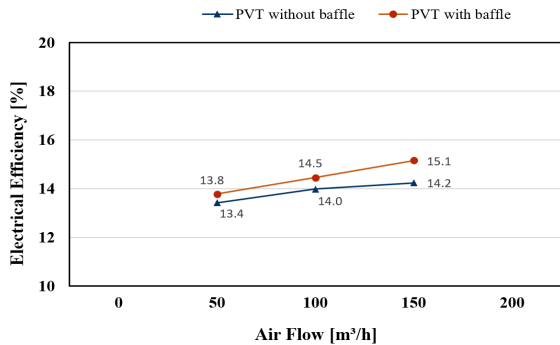


Fig. 13. Electrical efficiencies of the air-type PVT collector

에 따라 배플 적용에 따른 성능 향상 효과가 더욱 크게 나타날 수 있음을 시사한다.

4.4 고찰

본 연구에서는 배플이 적용된 공기식 PVT 컬렉터의 열 및 전기 성능을 ISO 9806 표준에 근거하여 실험적으로 분석하였다. 실험 결과, 배플이 적용된 컬렉터는 배플이 없는 기본형 컬렉터에 비해 열 및 전기 성능이 모두 향상되는 경향을 보였다.

이러한 성능 향상은 배플 구조에 의해 공기 유동 특성이 변화하면서 PVT 컬렉터를 통과하는 내부 공기 혼합이 증가하고 난류가 형성되었기 때문으로 판단된다. 일반적으로 공기식 PVT 컬렉터는 공기의 낮은 열전달 계수로 인해 열 성능이 제한되는 특성을 가지며, 이를 극복하기 위한 대안으로 배플과 같은 난류 촉진 구조체를 적용하여 공기와 흡열판 사이의 열전달 향상을 유도할 수 있다. 특히 본 연구에서 적용된 배플은 공기 흐름을 분산시키는 동시에 유로를 증가시켜 공기의 체류 시간을 증가시키고, 열교환 효과를 향상시키는 것으로 분석된다.

본 연구 결과 배플 구조가 공기식 PVT 컬렉터의 열전달 성능 향상에 효과적인 설계 요소로 확인되었다.

또한 열 성능 향상과 함께 전기 효율 또한 증가하는 경향이 나타났는데, 이는 공기 유동 증가에 따른 태양광 모듈의 냉각 효과에 기인한 것으로 판단된다. 태양광 모듈은 온도가 증가할수록 전기 효율이 감소하는 특성을 가지므로, PVT 시스템과 같이 모듈 후면에서 열을 회수하는 경우 냉각 효과에 의해 전기 성능이 함께 개선될 수 있다. 본 연구에서도 배플 구조로 인해 공기 유동이 활성화되면서 모듈 후면의 열 회수가 증가하여 전기 효율이 향상된 것으로 판단된다.

종합적으로, 본 연구에 적용된 배플 구조는 공기식 PVT 컬렉터 내부 공기 유동을 개선하고 열전달을 향상시켜 열 및 전기 성능을 동시에 향상시킬 수 있는 효과적인 설계 요소로 확인되었다. 다만 배플 구조의 적용은 내부 공기 유동 저항 증가에 따른 압력강하를 유발할 수 있으며, 실제 시스템 적용 시 팬 소비전력 증가에 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 사전 CFD 기반 유동해석 과정에서 압력강하 영향을 함께 고려하여 배플 형상을 설계하였으며, 실제 건물 적용 시에는 팬 소비전력 및 경제성을 포함한 시스템

단위의 종합적인 분석이 추가적으로 필요할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 공기식 PVT 컬렉터의 열전달 성능 향상을 위해 배플이 적용된 공기식 PVT 컬렉터를 설계·제작하고, 옥외 실험을 통해 열 및 전기 성능을 분석하였다. 또한 배플이 적용되지 않은 기본형 공기식 PVT 컬렉터와 비교 실험을 수행하여 성능 향상 효과를 정량적으로 평가하였다. 본 연구의 주요 결과는 다음과 같다.

- (1) 배플이 적용된 공기식 PVT 컬렉터는 내부 공기 유동 특성 개선을 통해 열전달 성능이 향상되는 것으로 나타났다.
- (2) 열 성능 분석 결과, 배플이 적용된 PVT 컬렉터는 기본형 대비 약 17%의 열효율 향상이 확인되었다.
- (3) 전기 성능 분석 결과, 배플 적용 시 기본형 컬렉터 대비 약 11.6%의 전기 효율 향상 효과가 나타났다.
- (4) 공기 유량이 증가할수록 열 및 전기 효율은 전반적으로 증가하는 경향을 보였으며, 특히 배플이 적용된 경우 유량 증가에 따른 성능 향상 효과가 더욱 크게 나타났다.

본 연구를 통해 배플이 적용된 공기식 PVT 컬렉터는 내부 공기 유동의 혼합 및 난류 형성을 촉진함으로써 열전달 성능을 향상시키고, 이에 따라 열 및 전기 성능이 동시에 개선될 수 있음을 확인하였다. 이는 배플 적용에 따른 컬렉터 내부 유동 구조 변화가 성능에 직접적인 영향을 미치는 핵심 설계 요소임을 의미한다.

본 연구에서 적용된 배플은 사전에 CFD 기반 해석을 통해 공기층 두께, 타공 형상 및 절곡 구조에 따른 유동 및 난류 특성을 분석하여 설계·제작되었으며, 이를 ISO 9806 표준 성능시험 조건에서 실험적으로 검증하였다. 이를 통해 배플 설계의 유동 특성 및 성능 향상 효과에 대한 타당성을 확인하였다.

다만 본 연구는 표준 성능시험 조건에서의 PVT 컬렉터 성능 평가를 중심으로 수행되었기 때문에, 실제 건물 적용

시 다양한 운전 조건 및 환경 변화에 따른 성능 특성을 충분히 반영하지는 못한다는 한계가 있다.

향후 연구에서는 컬렉터 단위 성능을 넘어 건물 적용 시 설비 시스템과의 연계를 고려한 다양한 운전 조건에서의 에너지 생산 및 열회수 성능에 대한 통합적인 분석이 필요하다. 또한 본 연구에서 적용된 배플은 별도의 추가 시스템 없이 기존 공기식 PVT 컬렉터에 적용하여 열 및 전기 성능을 향상시킬 수 있다는 측면에서 실제 시스템 적용 시 효과적인 기술로 활용될 수 있다. 다만 실제 적용 시에는 압력 강하에 따른 팬 소비전력 및 경제성을 포함한 시스템 단위의 종합적인 분석이 추가적으로 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토안전관리원 공공건축물 그린리모델링 사업의 지원과 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구입니다(No. RS-2023-00266248).

References

- [1] UNEP, 2022, “2022 global status report for buildings and construction”, United Nations Environment Programme, <https://www.unep.org/resources/publication/2022-global-status-report-buildings-and-construction>.
- [2] 2050 Carbon Neutrality Commission, 2021, “2050 Carbon Neutral Scenario”, Accessed 19 March 2026, <https://www.pcccr.go.kr/base/board/read?boardManagementNo=4&boardNo=101&page=1&searchCategory=&searchType=&searchWord=&menuLevel=2&menuNo=15>.
- [3] Korea Energy Agency, n.d., “Zero Energy Building Certification System”, Accessed 19 March 2026, https://zeb.energy.or.kr/BC/BC02/BC02_02_001.do.
- [4] Kalogirou, S.A., and Tripanagnostopoulos, Y., 2007, “Industrial application of PV/T solar energy systems”, *Appl. Therm. Eng.*, **27**(8-9), 1259-1270, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.11.003>.
- [5] Riffat, S.B., and Cuce, E., 2011, “A review on hybrid

- photovoltaic/thermal collectors and systems”, *Int. J. Low Carbon Technol.*, **6**(3), 212-241, <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctr016>.
- [6] Kim, S.M., Kim, J.H., and Kim, J.T., 2025, “Demonstration Performance Analysis of Heat Pump System with Air-based PVT System”, *New. Renew. Energy*, **21**(3), 20-28, <https://doi.org/10.7849/ksnre.2025.0017>.
- [7] Kim, S.M., Kim, J.H., and Kim, J.T., 2019, “An Experimental Study on Thermal and Electrical Performance of an Air-type PVT Collector”, *J. Korean Sol. Energy Soc.*, **39**(2), 23-32, <https://doi.org/10.7836/kses.2019.39.2.023>.
- [8] Hegazy, A.A., 2000, “Comparative study of the performances of four photovoltaic/thermal solar air collectors”, *Energy Convers. Manag.*, **41**(8), 861-881, [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(99\)00136-3](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(99)00136-3).
- [9] Tonui, J.K., and Tripanagnostopoulos, Y., 2007, “Improved PV/T solar collectors with heat extraction by forced or natural air circulation”, *Renew. Energy*, **32**(4), 623-637, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.03.006>.
- [10] Kumar, R., and Rosen, M.A., 2011, “Performance evaluation of a double pass photovoltaic thermal solar air heater with and without fins”, *Appl. Therm. Eng.*, **31**(8-9), 1402-1410, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.12.037>.
- [11] Othman, M.Y., Yatim, B., Sopian, K., and Bakar, M.N.A., 2007, “Performance studies on a finned double-pass photovoltaic thermal solar collector”, *Desalination*, **209** (1-3), 43-49, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.04.007>.
- [12] Choi, H.W., and Choi, K.H., 2020, “Performance Evaluation of PV/T Air Collector Having a Single-Pass Double-Flow Air Channel and Non-Uniform Cross-Section Transverse Rib”, *Energies*, **13**(9), 2203, <https://doi.org/10.3390/en13092203>.
- [13] An, B.H., Kim, S.B., Choi, H.U., and Choi, K.H., 2024, “Performance Evaluation of Air-Based Photovoltaic Thermal Collector Integrated with Dual Duct and Semi-circular Turbulator in Actual Climate Conditions”, *Energies*, **17**(11), 2752, <https://doi.org/10.3390/en17112752>.
- [14] Kang, Z., Lu, Z., Song, G., and Yao, Q., 2022, “A Numerical Study of Dual-Inlet Air-Cooled PV/T Solar Collectors with Various Airflow Channel Configurations”, *Sustainability*, **14**(16), 9897, <https://doi.org/10.3390/su14169897>.
- [15] Ahn, J.G., Yu, J.S., Kim, J.H., and Kim, J.T., 2017, “Simulation analysis on thermal performance of air-type photovoltaic thermal collector with diversity of baffles”, *Proc. ISES Solar World Congress*, 1-8, <https://proceedings.ises.org/conference/swc2017/papers/swc2017-0105-Ahn.pdf>.
- [16] Boussouar, G., Rostane, B., Aliane, K., Ravi, D., Gęca, M.J., and Gola, A., 2024, “Study of the Thermal Performance of Solar Air Collectors with and without Perforated Baffles”, *Energies*, **17**(15), 3812, <https://doi.org/10.3390/en17153812>.
- [17] Yu, J.S., Kim, J.H., and Kim, J.T., 2019, “A Study for Improving Thermal Performance According to Variables of Perforated Baffle in Air-type PVT Collector”, *J. Korean Sol. Energy Soc.*, **39**(6), 83-91, <https://doi.org/10.7836/kses.2019.39.6.083>.
- [18] International Organization for Standardization (ISO), 2017, “ISO 9806:2017 Solar energy - Solar thermal collectors - Test methods”, ISO, <https://www.iso.org/standard/67978.html>.
- [19] International Electrotechnical Commission (IEC), 2016, “IEC 61215: Terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval - Part 1: Test requirements”, IEC, <https://webstore.iec.ch/en/publication/61345>.