타공 베플이 적용된 공기식 PVT 컬렉터의 실험을 통한 열·전기성능 평가 연구

유지숙¹ · 이길선² · 김진희³ · 김준태^{4†}

¹공주대학교 에너지시스템공학전공, 박사과정

²공주대학교 에너지시스템공학전공, 석사과정

³공주대학교 그린에너지기술연구소, 연구교수

⁴공주대학교 에너지시스템공학전공, 교수

Study on Electrical and Thermal Performance Assessment of an Air-Type PVT Collector with Perforated Baffle

Yu Ji-Suk¹ · Lee Kil-Seon² · Kim Jin-Hee³ · Kim Jun-Tae^{4†}

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

²MS Candidate, Department of Energy Systems Engineering, Kongju National University

³Research Professor, Green Energy Technology Research Center, Kongju National University

⁴Professor, Department of Energy Systems Engineering, Kongju National University

[†]Corresponding author: jtkim@kongju.ac.kr

Abstract

BIPV (Building Integrated Photovoltaic) is a building envelope technology that converts solar energy into electrical energy, but heat is dissipated at the back of the BIPV module during the production of electrical energy. However, PVT collectors are devices that produce electricity on the front of the PV and concurrently use heat generated from the back of the PV module. Therefore, in buildings that require heating loads, the PVT system can use both electrical and thermal energies directly; hence, its solar energy utilization rate is higher than that of the BIPV and solar thermal systems. In this study, a new PVT collector using air as the heating medium was newly designed and fabricated, and the thermal and electrical performances were analyzed through outdoor experiments. A baffle applied to the air layer in the collector was designed earlier to improve the thermal performance through CFD simulation analysis. This study analyzed the thermal and electrical characteristics according to the inlet flow rate, solar radiation intensity, and temperature at the back of the PV module of a new type of air-type PVT collector. Consequently, when the inlet flow rate of the collector increased to 100 ~ 200 m³/h, it was confirmed that the thermal efficiency was 22.7 ~ 50% and the electrical efficiency was 15.75 ~ 16.54%.

Keywords: 공기식 PVT 컬렉터(Air-type PVT collector), 전기 특성(Electrical performance), 열 특성(Thermal performance), ISO 9806, 옥외성능평가(Outdoor testing)

Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.41, No.1, pp.25-34, February 2021
<https://doi.org/10.7836/kjes.2021.41.1.025>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 5 October 2020

Revised: 5 January 2021

Accepted: 6 January 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.

1. 서론

신재생 3020 이행계획으로 태양광발전분야의 용량 확대가 필요하며 설치면적 확보 측면에서 건물일체형 태양광발전(BIPV; Building-Integrated Photovoltaic) 시스템이 활성화되고 있다. BIPV 시스템은 태양에너지를 전기로 변환하여 에너지를 생산하는 건물 외피 기술이지만, 전기에너지를 생산하고 나머지 태양에너지는 열로 전달되어 BIPV 모듈 후면의 온도를 상승시키며, 전기효율을 감소시키는 문제가 발생한다. 반면 PVT (Photovoltaic Thermal) 컬렉터는 PV 모듈에서 전기를 생산하고 동시에 컬렉터 내 공기층으로 전달된 열을 이용하는 장치이다. 따라서 냉·난방 부하가 필요한 건물에서 PVT 시스템은 전기 및 열에너지를 모두 사용할 수 있으므로 기존 BIPV 시스템보다 설치면적 대비 태양에너지 이용률이 높다.

최근까지 연구된 공기식 PVT 컬렉터의 전기 효율과 열효율은 각각 9 ~ 12%, 40 ~ 60%로 분석되었고¹⁾, 컬렉터의 열 및 전기효율을 상승시키기 위해 수치해석 모델링이 수행되고 있으며 실내·외 실험을 통해 컬렉터 자체의 성능을 평가하는 연구가 수행되고 있다.

국내의 경우 Park et al.²⁾은 폐열회수 환기시스템과 연계하기 위해 환기 구조를 갖는 공기식 PVT 컬렉터를 제작하여 옥외에서 성능 평가하였다. 240 m³/h의 유량에서 열효율은 22%, 전기효율은 16%로 나타났다. Choi et al.³⁾은 공기와 액체를 동시에 가열할 수 있는 복합형 컬렉터를 유량(0.0203 ~ 0.1262 kg/s) 제어하여 옥외 실험하였으며, 이후 컬렉터의 출구 공기를 리턴 시켜 가열공기로 유입하는 시스템의 성능을 평가하였다⁴⁾. Kim et al.⁵⁾은 개발한 공기식 PVT 컬렉터를 유량(100, 150, 200 m³/h) 조건을 달리하여 실험하였으며, 결과로 입·출구 온도 차 8℃, 전기효율 15.5%, 열효율 32.56%로 분석하였다. Kim et al.⁶⁾은 열 성능을 향상시키기 위해 베플을 적용한 새로운 공기식 PVT 컬렉터를 개발하고, 옥외에서 ISO 9806 시험표준에 근거하여 실험하였다. 실험 조건은 입구 유량(60, 100, 160, 200 m³/h)이며, 컬렉터의 열 및 전기효율은 37.99%, 16.21%로 확인되었다.

Suffa et al.⁷⁾은 다양한 종류의 PVT 시스템의 전기 및 열 성능에 영향을 미치는 매개 변수의 연구를 하였다. 매개 변수로는 PVT 컬렉터 내부를 순환하는 최적 유량, 흡열판의 유무, 공기층 두께로 설정하였으며, 특히 흡열판이 PVT 시스템의 열효율에 가장 영향을 미치는 것으로 분석되었다. Tomar et al.⁸⁾은 실외에서 팬의 유무와 PV 모듈의 종류에 따른 PVT 컬렉터의 계절별 성능을 측정하였으며, 수치해석과 실험의 결과 값을 비교분석하였다. Saygin et al.⁹⁾은 공기식 PVT 컬렉터의 높이에 따른 성능 실험을 진행하였으며, 높이가 낮을수록 열 성능이 높게 나타났다. Franklin et al.¹⁰⁾은 PV 모듈 후면의 핀의 유무에 따른 성능을 수치해석과 실험을 통해 분석하였다. 유량 조건은 0.181, 0.215, 0.232 kg/s로 설정하였고, 핀이 있는 컬렉터의 열 에너지가 최대 3배 증가, 전력 생산량은 7 ~ 25% 증가하였다. Fudholi et al.¹¹⁾은 ▽형태의 흡열판이 적용된 컬렉터의 성능을 평가하였으며, 유량 조건을 0.0069 ~ 0.0491 kg/s로 달리하여 수치해석과 실험을 통해 엑서지 성능을 평가하였다. Delisle et al.¹²⁾은 새로 개발한 곡면형 베플이 적용된 공기식 PVT 컬렉터를 ISO 9806의 기준에 따라 실내외 성능평가를 진행했으며, 실외 실험에서 유량 조건은 55, 200, 350 kg/h로 변경하여 진행하였다. Jha et al.¹³⁾은 물결형태의 흡열판이 적용된 공기식 PVT 컬렉터의 성능평가를 실험을 통해 다양한 유량 조건(0.0047 ~ 0.0165 kg/s)에서

열효율과 엑서지 효율을 분석하였다. 이처럼 현재 다양한 유량 조건을 통한 공기식 PVT 컬렉터의 성능평가가 이뤄지고 있지만, 국내·외 공기식 PVT 컬렉터의 성능을 정량적으로 평가할 수 있는 표준은 없는 실정이다.

본 연구는 새로운 디자인의 타공형 베플판이 적용된 공기식 PVT 컬렉터의 열 성능평가를 위해 ISO 9806 Solar energy-Solar thermal collectors-Test methods의 열 성능 실험 조건(700 W/m^2 이상의 일사량, 균등하게 분포한 3개의 유량 값)으로 옥외 실험하여 열 및 전기 성능 특성을 분석하였다. 공기층 내 적용되는 타공형 베플판은 사전에 열 성능을 향상시키기 위해 CFD 시뮬레이션 분석을 통해 최적 설계하였다. 따라서 본 연구는 옥외 실험을 통해 열 성능 실험을 진행하였으며, 동시에 전기 성능을 측정하였다. 또한, 컬렉터의 입구 유량, 일사강도 그리고 PV 모듈 후면 온도에 따른 열 및 발전 특성을 분석하였다.

2. 공기식 PVT 컬렉터 디자인 및 실험

2.1 공기식 PVT 컬렉터 디자인

본 연구의 공기식 PVT 컬렉터는 G to B (Glass to Back-sheet) type PV 모듈, 공기층, 단열부로 구성되고, 사이즈는 $1013 \times 1672 \times 32 \text{ mm}$ 이다(Fig. 1). PV 모듈은 60개의 단결정 셀이 전면의 유리와 투명 백시트 사이에 구성되어 있으며, 제작된 PV 모듈의 상세 규격은 Table 1과 같다. 컬렉터 내 공기는 하단의 입구를 통해 유입되어, 상단의 출구를 통해 배출된다. 컬렉터의 공기층은 PV 모듈과 후면 단열부 사이에 위치하며, 열 흡수와 베플의 역할을 하는 타공된 흡열판이 있다. 흡열판(베플)은 공기층 내 유동에서 난류를 발생시키며, 열전달 성능을 높이기 위한 요소로 사용된다. 또한 흡열판을 타공함으로써 PVT 컬렉터의 무게를 감소시킬 수 있는 장점이 있고,

Fig. 1 Concept of the air-type PVT collector: (a) 3D blown-up picture and (b) cross sectional profile showing air flow direction

흡열판의 타공된 형태로 인해 열 성능을 저하시키는 dead space와 압력강하를 적게 발생시켜 컬렉터 내 공기 흐름을 균일하게 할 수 있다.

Table 1 PV module specification

Parameters	Value
Cell type	Mono-crystalline silicon (60 cell)
Module size	1638 × 996 × 6 mm
Module efficiency	17.73%
Maximum power (P_{max})	289 W
Maximum voltage (V_{mp})	33.1 V
Maximum current (I_{mp})	8.7 A
Open voltage (V_{oc})	40.1 V
Short current (I_{sc})	9.2 A

이전 연구¹⁴⁾에서, 공기식 PVT 컬렉터의 열성능을 향상을 위해 타공된 흡열판 디자인에 대한 CFD 모델링 분석 연구가 수행되었다. 분석 결과, 타공된 흡열판은 베플의 절곡 각도 60°, 공기층 높이에 대한 베플의 높이 비 0.8, 베플판의 절곡된 상부 길이 280 mm, 흡열판 면적에 대한 타공된 개구율 34%로 최적 설계 되었으며 외기온도 5°C, 일사량 700 W/m² 조건에서 공기식 PVT 컬렉터의 열효율이 42.5% (506.7 Wth)로 가장 높은 성능을 나타냈다.

2.2 공기식 PVT 컬렉터 실험방법

공기식 PVT 컬렉터는 ISO 9806의 태양열 집열기 실험 표준에 기초하여 옥외성능평가가 수행되었다. PVT 컬렉터는 천안 소재 K대(36.85 N, 127.15 E) 건물 옥상에 설치되었고, 수평(0° ~ 160°)과 수직(15° ~ 90°)으로 조절이 가능한 2축 트래커에 설치되어, 법선 면으로 일사를 유입하도록 각도를 조정하여 실험하였다(Fig. 2). 공기식 PVT 컬렉터의 열 및 전기 성능을 평가하기 위하여 컬렉터의 입·출구 온도 및 유량, 전력량, PV모듈 후면 온도(10개), 일사량, 외기온도, 풍향·풍속이 측정되었다. 데이터 실측 기간은 ‘20년 4~5월’에 진행되었으며, ISO 9806¹⁵⁾의 실험방법에 따라 공기식 PVT 컬렉터 경사면 일사 강도가 700 W/m² 이상과 균등한 간격의 3가지 컬렉터 입·출구 유량(100, 150, 200 m³/h)에서 측정하였다. 실험데이터는 입·출구 유량 및 온도, 외기온도가 정상상태일 때 10분 동안 수집 및 분석하였으며, 정상상태는 Table 2에 주어진 범위의 편차를 유지하는 조건으로 간주하였다.

Fig. 2 Experiment of air-type PVT collector

Table 2 Permitted deviation of measured parameters during a measurement period¹⁵⁾

Parameters	Permitted deviation from the mean value - Air heating collector -
Hemispherical solar irradiance	$\pm 50 \text{ W/m}^2$
Thermal irradiance	$\pm 20 \text{ W/m}^2$
Ambient air temperature	$\pm 1.5 \text{ K}$
Fluid mass flowrate	$\pm 2\%$
Fluid temperature at the collector inlet	$\pm 1.5 \text{ K}$
Fluid temperature at the collector outlet	$\pm 1.5 \text{ K}$
Surrounding air speed	$\pm 1.0 \text{ m/s}$ deviation from set value

3. 실험결과 및 분석

공기식 PVT 컬렉터의 성능 특성은 컬렉터의 100, 150, 200 m³/h의 입구 유량별 일사량에 따른 열 및 전기 효율로 분석되었다. 컬렉터 입구로 유입되는 유량과 PV 모듈에 입사되는 일사량은 공기식 PVT 컬렉터의 출구 온도에 영향을 미치고, 이에 따른 열 성능을 분석하였다. 또한 모듈 전면에 입사되는 일사량에 따라 모듈 후면 온도는 영향을 받고, 모듈 후면 온도 상승에 따른 전기 효율 저감을 포함한 전기 성능을 분석하였다. 실험 기간의 평균 외기온도는 24.78℃, 평균 풍속은 1.39 m/s, 일사량은 716 ~ 958 W/m²로 나타났다.

3.1 열 특성

공기식 PVT 컬렉터의 열 성능을 평가하는 열효율은 다음 식(1)¹⁵⁾과 같이 산정된다.

$$\eta_{th} = \frac{\dot{Q}}{A_{pvt} G} \quad (1)$$

$$\dot{Q} = (\dot{m}_e C_{f,e} \vartheta_e) - (\dot{m}_i C_{f,i} \vartheta_i) - [(\dot{m}_e - \dot{m}_i) C_{f,a} \vartheta_a] \quad (2)$$

η_{th} : 열효율, $\dot{Q}$: 유효 획득 열량(W), A_{pvt} : 공기식 PVT 면적(m²), G : 일사량(W/m²), $\dot{m}_e$: 출구 유량(kg/h), $C_{f,e}$: 출구 공기 비열(J/kg°C), ϑ_e : 출구 공기 온도(°C), $\dot{m}_i$: 입구 유량(kg/h), $C_{f,i}$: 입구 공기 비열(J/kg°C), ϑ_i : 입구 공기 온도(°C), $C_{f,a}$: 외기 비열(J/kg°C), ϑ_a : 외기온도(°C)

공기식 PVT 컬렉터의 열 특성은 일사량과 입구 유량에 따른 열효율과 입·출구 온도차를 통해 분석하였다. Fig. 3은 일사량에 따른 입구 유량 별 열효율을 분석한 그래프이며, 분석결과 일사량이 800 W/m²에서 950 W/m²로 증가함에 따라 PVT 컬렉터의 평균 열효율은 유량 100 m³/h은 28.1%, 150 m³/h은 37.9%, 200 m³/h은 47%로 분석되었다. 또한 입구 유량이 100 m³/h에서 200 m³/h로 높을수록 열효율이 높았고, 일사량이 약 950 W/m²일 때 열효율은 유량 100 m³/h에서 34.7%, 150 m³/h에서 41.2%, 200 m³/h에서 49.9%로 분석되었다.

Fig. 3 Effect of the irradiance on the thermal efficiency

반면 입·출구 온도 상승폭은 입구 유량이 증가함에 따라 점점 작아지는 것으로 분석되었다(Fig. 4). 공기식 PVT 컬렉터 공기층 내 유량의 증가는 공기층 내 유속이 증가하게 되어 PV 모듈 후면과 공기층, 타공된 베플판에서 열전달 시간이 짧아지기 때문에, 컬렉터의 입·출구 온도 상승폭이 감소된다. 하지만 동일 유량에서 일사량이 증가할수록 온도 상승폭은 증가하는 것으로 나타났다. 입구 유량 100 m³/h일 때, 최소 9.79°C에서 최대 17.11°C로 나타났으며, 입구 유량이 증가할수록 일사량 별 최소 6% (850 W/m²)에서 최대 16% (950 W/m²)까

지 감소되는 것으로 분석되었다.

Fig. 4 Effect of the air flowrate on the rise in air temperature between inlet and outlet

3.2 전기 특성

공기식 PVT 컬렉터의 전기성능을 평가하는 전기 효율은 다음 식(3)¹⁶⁾과 같이 산정되며, η_{el} 은 전기효율, I_{mp} 은 최대전류(A), V_{mp} 은 최대전압(V), P_{max} 은 최대전력(W)을 나타낸다.

$$\eta_{el} = \frac{I_{mp} V_{mp}}{A_{pvt} G} = \frac{P_{max}}{A_{pvt} G} \quad (3)$$

Fig. 5는 일사량에 따른 PV 모듈의 전력과 PV 모듈 후면 온도를 분석한 그래프이다. 외기온도가 22.83°C ~ 30.89°C일 때, 공기식 PVT 컬렉터는 일사량이 증가할수록 PV 모듈의 출력 전력은 217.33 Wp에서 262.53 Wp까지 증가하는 것으로 나타났다. 해당 외기 조건에서 PV 모듈 후면온도는 44.04°C ~ 51.97°C로 나타났고, 일사량이 증가함에 따라 PVT 컬렉터의 입·출구 온도 상승폭은 증가하지만 PV 모듈 후면온도는 크게 증가하지 않는 추세로 나타났다. 이는 PV 모듈 후면과 공기층에서 유동으로 열전달이 발생하기 때문에, PV 모듈 후면에서 냉각효과가 나타나는 것을 확인하였다. 따라서 공기식 PVT 컬렉터로 유입되는 일사에 의해 PV 모듈 후면 온도는 증가하지만 PV 모듈의 발전량의 감소가 완화될 수 있다는 장점이 있다.

Fig. 5 Effect of PV power and temperature by irradiance

Fig. 6은 PV 모듈 후면 온도에 따른 PVT 컬렉터의 전기효율을 나타낸 그래프이며, PV 모듈 온도가 상승함에 따라 전기효율은 감소하는 추세로 나타났다. PV 후면 온도가 42°C에서 58°C로 16°C증가할 때 PV 전기 효율은 16.74%에서 15.75%로 감소했다. 이는 해당 실험조건(평균 외기온도는 24.78°C, 일사량은 716 ~ 958 W/m²)에서 PV 모듈 1°C상승 시 전기효율은 0.381%씩 감소하는 것으로 분석되었다.

Fig. 6 Electrical efficiency by PV module rear temperature

4. 결론

본 연구는 타공된 베플판이 적용된 새로운 형태의 공기식 PVT 컬렉터를 제작하여, ISO 9806의 기준에 따른 옥외성능평가 실험을 수행하였다. 컬렉터의 입구 유량, 일사량 그리고 PV 모듈 후면 온도에 따른 공기식 PVT 컬렉터의 열 및 발전 특성을 분석하였다.

개발된 공기식 PVT 컬렉터는 일사량이 $800 \sim 950 \text{ W/m}^2$ 의 조건에서 컬렉터의 열효율은 유량 $100 \text{ m}^3/\text{h}$ 에서 평균 28.1%, 유량 $200 \text{ m}^3/\text{h}$ 에서 평균 47%로 나타났으며, 유량이 증가함에 따라 컬렉터 내부의 열매체 이동을 증가시켜 열효율은 40% 증가되었다. 입·출구 온도 차는 유량이 증가함에 따라 감소하는 추세로 나타났으며, $100 \sim 200 \text{ m}^3/\text{h}$ 유량으로 갈수록 일사량에 따른 입·출구 온도 차도 감소하는 것으로 확인되었다.

열 성능을 측정한 동시조건에서 일사량이 증가함에 따라 개발된 공기식 PVT 컬렉터의 전기효율은 16.06 ~ 16.55% ($217.33 \sim 262.53 \text{ Wp}$)로 증가하였다. 하지만 공기층 유동에 의한 PV 모듈 후면의 냉각효과로 인해, 일사량이 증가함에도 불구하고 PV 모듈 후면 온도는 크게 상승하지 않는 것으로 확인되었다. 또한, 평균 외기온도 24.78°C , 일사량 $716 \sim 958 \text{ W/m}^2$ 의 시험 조건에서 모듈 후면 온도가 1°C 상승할 때 -0.381% 로 확인되었다.

따라서 새로운 형태의 타공 베플이 적용된 공기식 PVT 컬렉터는 외기온도와 일사량(950 W/m^2)이 동일한 조건에서 유량 $100 \text{ m}^3/\text{h}$ 일 때 열효율과 전기효율은 각각 34.7%, 16.1%, 유량 $200 \text{ m}^3/\text{h}$ 일 때 각각 49.9%, 16.39%로 확인되었다.

따라서 공기식 PVT 컬렉터를 건물에 적용할 시 건물 난방 부하에 필요한 전력량, 열량(컬렉터의 출구 온도)을 파악하여 최적 유량을 설정하는 것이 필요하다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20188550000480).

REFERENCES

1. Abuska, M. and Sevik, S., Energy, Exergy, Economic and Environmental (4E) Analyses of Flat-plate and V-groove Solar Air Collectors based on Aluminium and Copper, Solar Energy, Vol. 158, pp. 259-277, 2017.
2. Park, S. H., Bang, A. Y., Kim, J. H., and Kim, J. T., An Experimental Study of Air Type Photovoltaic/thermal Collector, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 33, No. 1, pp. 157-161, 2013.
3. Choi, H. W., Yoon, J. I., Son, C. H., and Choi, K. H., Performance Estimation of Hybrid Solar Air-water Heater on Single Working of Heating Medium, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 34, No. 6, pp. 49-56, 2014.
4. Choi, H. W., Yoon, J. I., Son, C. H., and Choi, K. H., Performance Evaluation of Hybrid Solar Air-water Heater when the Heated Air is used as Inlet Air during Air and Water is Heated Simultaneously, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 35, No. 5, pp. 21-29, 2015.

5. Kim, Y. J., Lee, K. S., Kang, E. C., and Lee, E. J., The Impact of a PVT Air Flow Rate and Panel Temperature on Thermal and Power Efficiency, The Korean Society of Mechanical Engineers, pp. 85-87, 2017.
6. Kim, S. M., Kim, J. H., and Kim, J. T., An Experimental Study on Thermal and Electrical Performance of an Air-type PVT Collector, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 39, No. 2, pp. 23-32, 2019.
7. Riffat, S. B. and Cuce, E., A Review on Hybrid Photovoltaic/thermal Collectors and Systems, International Journal of Low-Carbon Technologies, Vol. 6, pp. 212-241, 2011.
8. Tomar, V., Tiwari, G. N. and Bhatti, T. S., Performance of Different Photovoltaic-Thermal (PVT) Configurations Integrated on Prototype Test Cells: An Experimental Approach, Energy Conversion and Management, Vol. 154, pp. 394-419, 2017.
9. Saygin, H., Nowzari, R., Mirzaei, N., and Aldabbagh, L. B. Y., Performance Evaluation of a Modified PV/T Solar Collector: A Case Study in Design and Analysis of Experiment, Solar Energy, Vol. 141, pp. 210-221, 2017.
10. Franklin, J. C. and Chandrasekar, M., Performance Enhancement of a Single Pass Solar Photovoltaic Thermal System using Staves in the Trailing Portion of the Air Channel, Renewable Energy, Vol. 135, pp. 248-258, 2019.
11. 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.
12. 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, 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, pp. 2590-2595, 2017.
13. Jha, P., Das, B., and Gupta, R., An Experimental Study of a Photovoltaic Thermal Air Collector (PVTAG): A Comparison of a Flat and the Wavy Collector, Applied Thermal Engineering, Vol. 163, pp. 1-13, 2019.
14. Yu, J. S., Kim, J. H., and Kim, J. T., A Study for Improving Thermal Performance According to Variables of Perforated Baffle in Air-type PVT Collector, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 39, No. 6, pp. 83-91, 2019.
15. International Organization for Standard, BS EN ISO 9806:2017, Solar Energy - Solar Thermal Collectors - Test Methods, UK, 2017.
16. International Electrotechnical Commission, IEC 61215:2016, Crystalline Silicon Terrestrial Photovoltaic (PV) Modules - Design Qualification and Type Approval, UK, 2016.
17. Lindig, S., Moser, D., Avesani, S., and Lollini, R., Performance Evaluation Towards Improved BiPV-Systems- Simulation of BiPV-systems Installed on Existing Building Facades using TRNSYS, Building Simulation Applications, pp. 1-8, 2015.