

# 공기식 PVT 컬렉터에 적용된 타공 베플의 변수에 따른 열 성능 향상을 위한 연구

유지숙\* · 김진희\*\* · 김준태\*\*\*\*

\*공주대학교 에너지시스템공학전공, 박사과정

\*\*공주대학교 그린에너지기술연구소, 연구교수

\*\*\*공주대학교 건축공학전공, 교수

## A Study for Improving Thermal Performance According to Variables of Perforated Baffle in Air-type PVT Collector

Yu Ji-Suk\* · Kim Jin-Hee\*\* · Kim Jun-Tae\*\*\*\*

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

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

\*\*\*Professor, Department of Architectural Engineering, Kongju National University

†Corresponding author: jtkim@kongju.ac.kr

### Abstract

Photovoltaic thermal (PVT) collectors are devices that simultaneously produce electricity and heat. Research on conventional air-type PVT collector focuses on installing baffles to enhance the collector's thermal performance. However, the baffles have pressure drop inside the collector which degrades the thermal performance. Thus, it is necessary to design baffles to smoothen the flow inside the air-type PVT collector. Alternatively, installing perforated baffles in air-type PVT collectors can reduce the collector weight, but parameters such as the diameter of the perforated holes and the height of the perforated plates should be considered. Therefore, the main aim of this study was to analyze thermal characteristics of each variable of perforated baffles installed inside air-type PVT collector. For this purpose, the uniformity of air flow in the collector was compared through NX program, and the resultant heat gain and thermal efficiency of the air-type PVT collector were compared and analyzed. Therefore, the main aim of this study was to analyze thermal characteristics of each variable (Baffle angle, length, height, pitch, perforated ratio) of perforated baffles installed inside air-type PVT collector. For this purpose, the uniformity of air flow in the collector was compared through CFD program, and the resultant heat gain and thermal efficiency of the air-type PVT collector were compared and analyzed. As a result, the maximum outlet temperature was increased by 1.45 times and the heat gain was increased by 193.8 Wth, depending on the perforated baffle plate, compared to the collector without the baffle. The heat transfer performance showed that the maximum internal velocity was 1.61 times higher and the Reynolds number was 1.06 times higher depending on the parameters of the baffle plate.

**Keywords:** 공기식 PVT 컬렉터(Air-type PVT collector), 타공 베플(Perforated Baffle), 공기 유동(Air flow), 변수(Variables), 열 성능(Thermal Performance), CFD(Computational Fluid Dynamics)



Journal of the Korean Solar Energy Society  
Vol.39, No.6, pp.83-91, December 2019  
<https://doi.org/10.7836/kjes.2019.39.6.083>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 10 October 2019

Revised: 20 December 2019

Accepted: 23 December 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.

## 기호설명

$A_{PVT}$	: 공기식 PVT 면적( $m^2$ )
$a$	: 베플의 각도( $^\circ$ )
$l$	: 베플의 길이(mm)
$p$	: 베플의 간격(mm)
$e$	: 베플의 높이(mm)
$h$	: 컬렉터 내 공기층 높이(mm)
$C_p$	: 비열( $J/kg^\circ C$ )
$G$	: 일사량( $W/m^2$ )
$\dot{m}$	: 유량( $kg/h$ )
$T_{inlet}$	: 입구온도( $^\circ C$ )
$T_{outlet}$	: 출구온도( $^\circ C$ )

## 1. 서론

PVT 컬렉터는 PV의 전면의 전기생산과 동시에 후면에서 발생하는 열을 사용하는 장치이다. PVT 컬렉터는 열전달 매체로 사용되는 유체에 따라 공기식과 액체식으로 분류되는데 공기식 PVT 컬렉터는 관리가 쉬운 장점이 있다. 최근까지 연구된 공기식 PVT 컬렉터의 전기 효율과 열효율은 각각 9 ~ 12%, 40 ~ 60%로 분석되었고<sup>1)</sup>, 이러한 공기식 PVT 컬렉터의 효율을 상승시키기 위해 수치해석 모델링과 실험 등을 통해 컬렉터 자체의 성능을 평가하는 연구가 꾸준히 수행되고 있다.

선행 연구들의 리뷰 논문은 공기식 PVT 시스템의 공기 유동 및 단일/이중 유로, 다양한 흡수 장치(베플) 구성(fin, V-groove, Round tube 등)에 대한 결과를 분석했다. 이를 통해, 컬렉터의 전기 효율은 10 ~ 25%, 열효율은 40 ~ 70%로 나타났다. 또한 엑서지 효율은 5 ~ 25% 범위로 나타났다<sup>2,3)</sup>. Suffa<sup>4)</sup>는 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. 또 다른 논문들에서 베플의 수는 증가할수록 열효율은 증가하지만, 일정 개수 이상으로는 열 효율의 상승폭이 감소하기 때문에 압력강하를 고려하여 적절한 베플의 수를 설정해야한다고 결론짓고 있다<sup>5,6)</sup>. 타공된 흡열판을 이용하여 베플을 제작한 것은 1998년 타이완에서 처음 연구되었으며<sup>7)</sup>, 컬렉터 전면부 후면에 핀의 형태로 설치되어 연구되었다. Karwa의 연구<sup>8)</sup>는 공기식 집열기 내부에 타공된 베플의 높이, 폭, 타공홀의 직경을 변수로 선정하여 수행하였고, 베플의 개구면적이 클수록 마찰손실계수가 작고, 동일 유량에서 가장 높은 성능을 나타내는 것을 확인하였다. 이어서 연구한 내용<sup>9)</sup>은 베플의 개구율(46.8%와 26%로 설정)에

다른 마찰계수와 열성능을 분석하였다. 또한, Sahel<sup>10)</sup>의 연구는 천공된 베플은 컬렉터 내부의 상단과 하단에 엇갈려 설치하는 것의 성능을 비교하였고, 베플판의 타공홀 위치 비에 따른 마찰손실계수, 압력강하, 열전달성능을 분석하였다. 기존 타공 베플들은 공기식 집열기에 사용되었으며, 전면 유리판 후면에 핀의 형태로 설치되었다. 이는 PVT 컬렉터의 경우에서 PV모듈 후면에 설치가 어렵고, 핀의 온도로 인해 PV 모듈의 국부적 온도상승이 우려되므로 공기식 PVT 컬렉터 설계 시 타공 베플판의 위치를 고려해야 한다.

컬렉터 내 베플 적용은 열 성능을 저하시키는 dead space와 압력강하가 발생하기 때문에, 이를 막기 위해 공기식 PVT 컬렉터 내부 유동이 원활하도록 베플을 설계하는 것이 필요하다. 공기식 PVT 컬렉터 내 타공 베플을 설치하면, 컬렉터 무게를 감소시킬 수 있는 장점이 있기 때문에, 열 성능을 높일 수 있도록 타공 베플판의 개구율-타공 베플판의 높이 등의 변수를 고려하여 설계 되어야한다.

따라서 본 연구는 공기식 PVT 컬렉터의 내 후면 단열재 위에 타공 베플판을 설치하였고, 해당 베플판의 각 변수(베플의 각도, 길이, 높이, 간격, 타공 개구율)에 따른 열 특성을 분석하였다. 이를 위해, NX CFD 프로그램을 통해 컬렉터 내 공기 흐름의 균일성을 비교하고, 공기식 PVT 컬렉터의 획득 열량 및 열효율을 비교 분석하는 것을 목적으로 하였다.

## 2. 공기식 PVT 컬렉터의 시뮬레이션 모델

### 2.1 모델 디자인

본 연구에서 디자인된 공기식 PVT 컬렉터는 Fig. 1에서 보여진다. 컬렉터 전면은 일반적인 PV 모듈로 덮여있고, 사이즈는 1013 × 1672 × 32 mm이다. PV 모듈은 기존 모듈처럼 셀이 전면을 덮고 있으며, 60개의 단결정 셀로 두 개의 유리 사이에 구성되어 있다(G/G 모듈). 컬렉터 내부에 열 흡수 장치 및 베플의 역할을 하는 타공된 홀이 있는 흡열판이 있다. 따라서 방해물인 베플이 유동에서 난류를 발생시키며, 열전달 성능을 높이기 위한 요소로 사용된다.

공기식 PVT 컬렉터의 타공된 베플판의 변수들은 컬렉터 내 와류영역을 생성하여 내부 유속 및 압력강하에

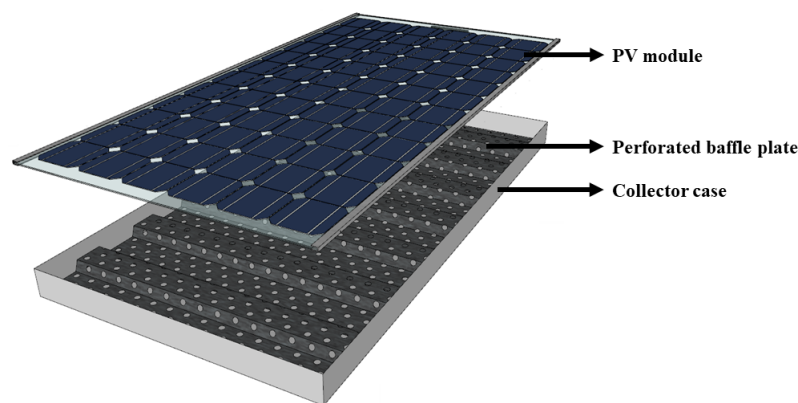


Fig. 1 Concept of the air-type PVT collector

영향을 주며, 이로 인해 열 성능에 영향을 미치는 5가지 요소들로 설정하였다. 컬렉터 내 베플판의 변수는 Fig. 2와 Table 1에 작성된 입력 값과 같이 베플의 각도( $a$ ), 베플의 상부 길이( $l$ ), 베플의 간격( $p$ ), 베플의 높이( $e$ ), 타공 개구율(Open ratio)이다. 베플의 각도( $a$ )는 30°, 45°, 60°, 베플 상부의 길이( $l$ )와 베플의 간격( $p$ )는 280 mm, 100 mm와 200 mm, 180 mm, 베플판 높이( $e$ )는 20 mm, 25.6 mm, 베플판의 타공된 개구율(타공된 개구 면적/베플판의 전면적)은 43.5%와 34%로 모델링하였다. 추가적으로 베플이 없는 단일 공기층을 갖는 PVT 컬렉터를 레퍼런스로 비교하여 총 25가지의 공기식 PVT 컬렉터를 시뮬레이션하였다.

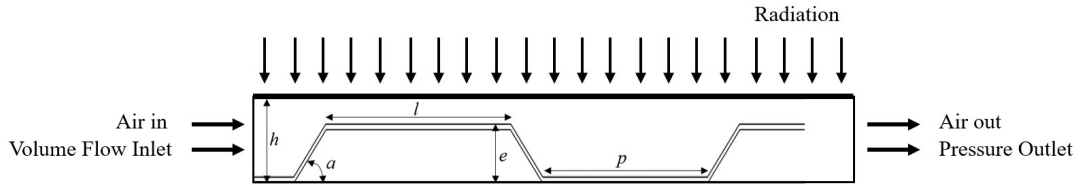


Fig. 2 Computational domain of the air-type PVT collector

Table 1 Information of collector by variables

$a$	$e/h$	$l(p)$	Open ratio	$a$	$e/h$	$l(p)$	Open ratio	$a$	$e/h$	$l(p)$	Open ratio
30°	0.625 $e=20\text{ mm}$	280 (100)	43.5%	45°	0.625 $e=20\text{ mm}$	280 (100)	43.5%	60°	0.625 $e=20\text{ mm}$	280 (100)	43.5%
		280 (100)	34%			280 (100)	34%			280 (100)	34%
		200 (180)	43.5%			200 (180)	43.5%			200 (180)	43.5%
		200 (180)	34%			200 (180)	34%			200 (180)	34%
		280 (100)	43.5%			280 (100)	43.5%			280 (100)	43.5%
		280 (100)	34%			280 (100)	34%			280 (100)	34%
	0.8 $e=25.6\text{ mm}$	200 (180)	43.5%	45°	0.8 $e=25.6\text{ mm}$	200 (180)	43.5%	60°	0.8 $e=25.6\text{ mm}$	200 (180)	43.5%
		200 (180)	34%			200 (180)	34%			200 (180)	34%
		280 (100)	43.5%			280 (100)	43.5%			280 (100)	43.5%
		280 (100)	34%			280 (100)	34%			280 (100)	34%
		200 (180)	43.5%			200 (180)	43.5%			200 (180)	43.5%
		200 (180)	34%			200 (180)	34%			200 (180)	34%

## 2.2 모델링 조건

본 논문에서 사용된 NX 프로그램은 복잡한 기하학 도형의 유동 영역을 빠르게 생성하고 전산 유체 역학을 수행하여 유체 흐름(CFD) 효과를 분석하는 프로그램이다. 또한 전도, 대류, 복사 및 복잡한 열전달을 위한 열 해석 기능을 복합적으로 적용하여 수행한다<sup>1)</sup>.

베플판의 변수에 따른 25가지 공기식 PVT 컬렉터를 NX 프로그램을 사용하여 모델링 후 CFD 분석을 수행

하였고, 컬렉터 열 성능을 비교 분석 하였다. 공기식 PVT 컬렉터의 시뮬레이션을 위해 컬렉터 면적은 1.69 m<sup>2</sup>로 설정되었으며, PV 표면에 700W의 열에너지가 고르게 공급되었다. 컬렉터의 표면 열 손실을 고려하기 위해 외부 온도 값은 5°C로 설정하였으며, 컬렉터의 내부 온도와 외부의 온도로 인한 열손실이 많은 겨울철을 기준으로 하였다. 온도에 따라 적용되는 공기 밀도는 1.225 kg/m<sup>3</sup>로 지정하였고, 중력 가속도 값은 9.81 m/s<sup>2</sup>, 공기 온도 상승으로 인한 부력이 적용되었다(Table 2).

본 논문의 해석을 위해 모델 자체가 단순하여 계산 수렴 측면에서 유리한 난류 모델(k-ε model)을 사용하였다. 여기서 k는 난류 운동 에너지이고 ε는 난류 에너지의 소산 속도이다<sup>12)</sup>.

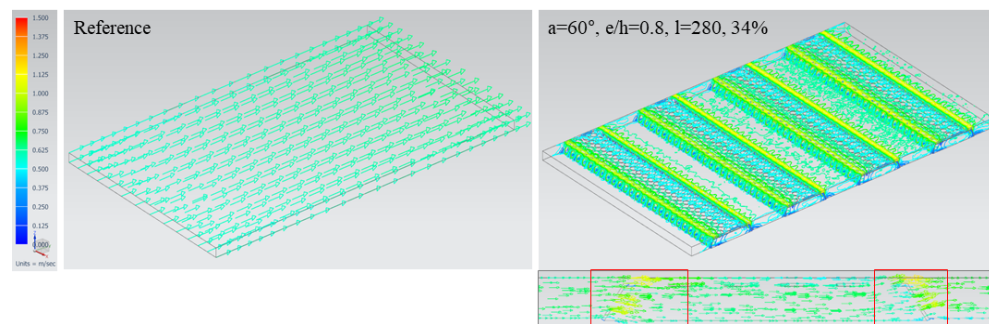
**Table 2** Simulation conditions for air-type PVT collector

Parameters	Value
Turbulent model	k-ε model
Total air-type PVT area	1.69 m <sup>2</sup>
Heat flux	700 W/m <sup>2</sup> on the PV surface
Inlet temperature	5°C
Inlet condition	Volume flow inlet (Flow rate 67 m <sup>3</sup> /h)
Outlet condition	Pressure outlet atmospheric
Outdoor temperature	5°C
Outdoor velocity	Natural convection
Gravity	9.81 m/s <sup>2</sup>

### 3. 시뮬레이션 결과 및 분석

#### 3.1 열전달 성능

Fig. 3과 4는 공기식 PVT 컬렉터 내부에 베플의 유무에 따른 유속과 온도 분포를 나타낸 것이다. 해석 결과 베플이 없는 컬렉터(Reference) 내부의 유동은 정체하는 곳 없이 원활하게 나타났으며, 베플이 설치된 컬렉터는 베플판과 PV모듈 후면의 사이 공간과 베플판의 타공홀에서 국부적으로 유속이 빨라지는 경향을 보였다. 따라서 베플이 없는 컬렉터와 비교하여 베플이 있는 컬렉터의 내부 유속이 더 빠르게 나타나는 것을 알 수 있다. 유



**Fig. 3** Velocity distribution of Air-type PVT collector

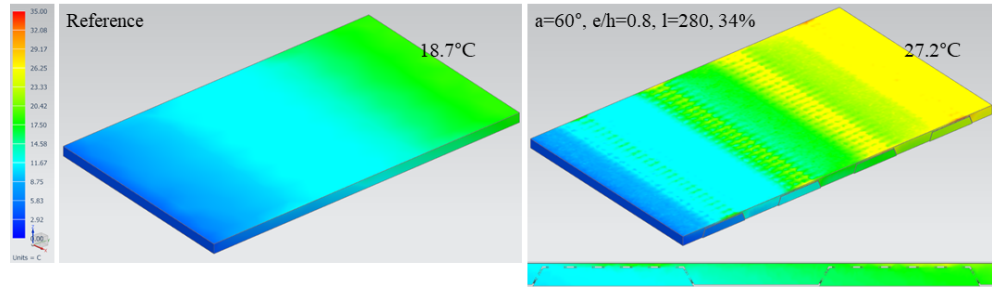


Fig. 4 Temperature distribution of Air-type PVT collector

속 분포와 동일하게 온도분포 또한 베플의 유무에 상관없이 컬렉터 내 공기 유동은 원활하게 나타났지만, 베플이 적용된 컬렉터의 출구온도가 최대 27.2°C로 베플이 없는 컬렉터의 출구온도보다 9°C 더 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

레이놀즈 수는 관성에 의한 힘과 점성에 의한 힘의 비로써, 층류와 난류를 판단하는 요소이다. 레이놀즈 수가 높으면 유동이 난류로 분류된다. 이러한 유동의 특성(난류)은 유속이 빠르며, 와류 같은 불규칙한 유동이 발생하게 된다. 따라서 PVT 컬렉터 내에서 열전달과 열 확산 효과가 강하게 나타나는 것이다.

Fig. 5는 레이놀즈 수에 따른 공기식 PVT 컬렉터 내 평균 유속을 나타낸 그래프이다. 베플의 각도는 30°와 45°일 때 대비 60°의 경우에 컬렉터 내부 유속은 각각 최대 1.61과 1.42배로 나타났고, 레이놀즈 수는 1.06과 1.04배 높게 나타났다. 또한,  $e/h$ 의 비는 0.625보다 0.8의 경우 내부 유속이 크게 나타났으며, 이는 PV 모듈 후면과 베플판 사이의 공기 유로가 좁기 때문인 것으로 분석되었다. 따라서  $a=60^\circ$ ,  $e/h=0.8$ ,  $l=200$  mm, 타공 개구율=34%일 때 내부 유속은 빠르고, 레이놀즈 수는 가장 높다는 것을 확인할 수 있다.

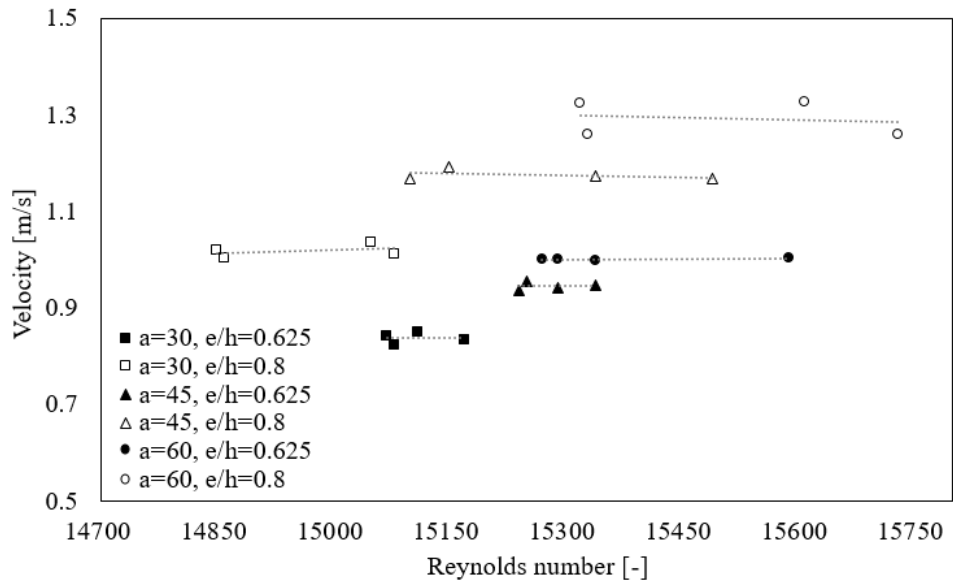


Fig. 5 Reynolds number and average velocity by variables

### 3.2 압력강하 및 열효율

공기식 PVT 컬렉터 내부의 압력강하는 송풍 동력과 연관되므로 열전달 성능만큼 중요한 인자이다. Fig. 6은 공기식 PVT 컬렉터의 압력강하를 나타낸 것이며, 베플이 없는 컬렉터의 압력강하는 0.244 Pa로 낮게 나타났다. 베플판의 변수에 따른 압력강하는  $a=60^\circ$ ,  $e/h=0.8$ , 타공 개구율=34%의 경우 가장 높은 것으로 확인되었고,  $e/h$ 의 변수에 의한 증가폭이 크게 나타났다. 베플판의 경사와  $e/h$ 의 비가 클수록 와류영역이 증가하여 압력강하 값이 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 타공 개구율이 클수록 공기 유동이 원활하여 와류가 덜 발생한 것으로 분석되었다.

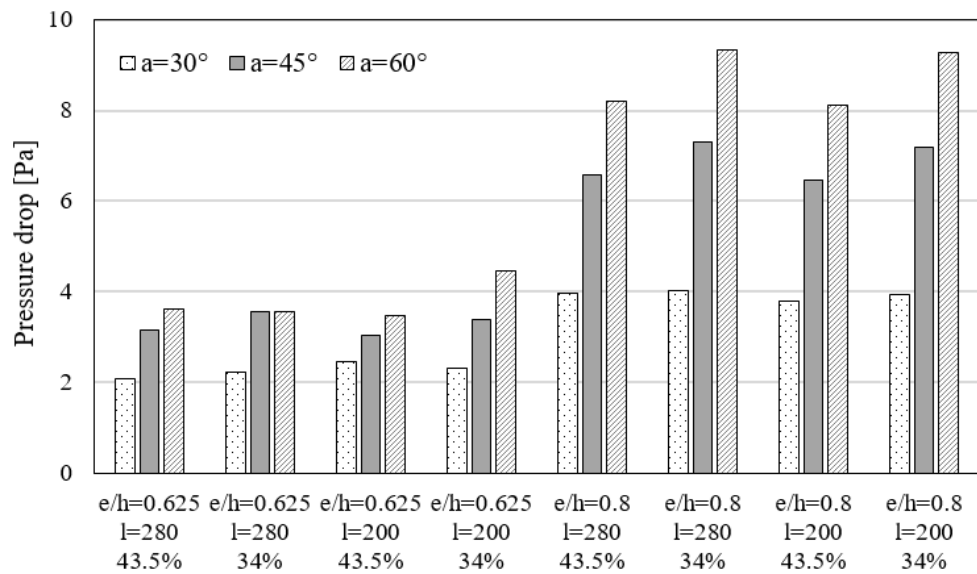


Fig. 6 Pressure drop of air-type PVT collector

압력강하 수치는 크지 않았으며, 이는 컬렉터 재료가 알루미늄으로 물성치의 거칠기 계수(Roughness coefficient) 값이 작기 때문이다.

다음으로 Table 3은 베플판의 변수에 따른 공기식 PVT 컬렉터의 열 획득량과 열효율을 나타낸 것이다. 공기식 PVT 컬렉터의 열효율은 식(1)로 산출할 수 있으며, 본 시뮬레이션 결과 값으로 얻어진 컬렉터의 입·출구의 온도를 적용하여 계산하였다. 이러한 분석을 바탕으로 공기식 PVT 컬렉터의 열효율은 39.6% (469 Wth) ~ 42.7% (506.7 Wth)로 나타났으며, 가장 열효율과 열획득량이 높은 조건은  $a=60^\circ$ ,  $e/h=0.8$ ,  $l=280$  mm, 타공 개구율=34%이다. 베플이 없는 컬렉터의 열효율과 열획득량은 26.4%와 312.9 Wth로 나타났으며, 타공 베플판의 유무에 따라 열효율은 최대 16.3%p의 차로 나타났다. 열효율 및 열 획득량은  $e/h$ 에 따른 효과가 가장 크게 나타났다. PV 모듈 후면과 베플판의 사이가 좁을수록( $e/h=0.8$ ) 열 전달 성능이 높아지고, 열 전달 거리가 짧기 때문에 높은 열 성능을 나타내는 것으로 분석되었다. 또한 PV 후면과 베플판 사이의 길이가 긴 경우( $l=280$

mm)와 타공 개구율이 작은 경우에 열 성능이 높게 확인되었다. 이는 컬렉터 내부에서 집열할 수 있는 면적이 넓어졌기 때문이다.

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m} C_p (T_{outlet} - T_{inlet})}{A_{PVT} G} \tag{1}$$

**Table 3** Heat gain and thermal efficiency of the air-type PVT collector

<i>a</i>	<i>e/h</i>	<i>l</i>	Effth	<i>a</i>	<i>e/h</i>	<i>l</i>	Effth	<i>a</i>	<i>e/h</i>	<i>l</i>	Effth
30°	0.625	280	0.397	45°	0.625	280	0.396	60°	0.625	280	0.397
		(43.5%)	471.2 Wth			(43.5%)	470 Wth			(43.5%)	470.6 Wth
		280	0.397			280	0.396			280	0.400
		(34%)	470.9 Wth			(34%)	469 Wth			(34%)	474.7 Wth
		200	0.400		200	0.402		200	0.403		
		(43.5%)	474 Wth		(43.5%)	476.5 Wth		(43.5%)	477.5 Wth		
		200	0.398		200	0.402		200	0.401		
		(34%)	471.4 Wth		(34%)	476.5 Wth		(34%)	475.2 Wth		
		280	0.419		280	0.423		280	0.425		
		(43.5%)	496.7 Wth		(43.5%)	501 Wth		(43.5%)	503.8 Wth		
		280	0.421		280	0.425		280	0.427		
		(34%)	498.9 Wth		(34%)	503.6 Wth		(34%)	506.7 Wth		
0.8		200	0.417	0.8		200	0.423	0.8		200	0.424
		(43.5%)	494.8 Wth			(43.5%)	501.1 Wth			(43.5%)	502.9 Wth
		200	0.42			200	0.424			200	0.426
		(34%)	497.7 Wth			(34%)	502.8 Wth			(34%)	504.9 Wth

#### 4. 결론

공기식 PVT 컬렉터는 높은 온도의 공기열원을 얻고, 컬렉터 내부의 공기 유동이 균일하게 유지하는 것이 중요하다. 본 연구는 공기식 PVT 컬렉터의 내부에 설치되는 타공 베플의 각 변수들을 NX CFD 프로그램을 통해 컬렉터 내 공기 흐름의 균일성과 열 특성을 비교 분석하였다.

시뮬레이션 분석결과 열전달과 열획득량 측면에서 공기식 PVT 컬렉터의 베플판의 변수 중  $a=60^\circ$ ,  $e/h=0.8$ ,  $l=280$  mm, 타공 개구율=34%일 때 가장 높은 성능을 나타냈다. 베플이 없는 컬렉터 대비 변수에 따라 최대 출구온도는 1.45배, 열획득량은 193.8 Wth 증가되었다. 열 전달 성능은 베플판의 변수에 따라 최대 내부 유속은 1.61배, 레이놀즈 수는 1.06배 높게 나타나는 것을 확인하였으며, 해당 조건에서 압력강하는 약 7 Pa 상승하였다.

따라서 공기식 PVT 컬렉터 내에 타공된 베플판을 적용할 시 필요한 출구온도, 열획득량, 허용 압력강하를 파악하여 베플판의 변수들을 설정하는 것이 필요할 것으로 판단된다.



## 후기

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. Rukman, N. S. B., Fudholi, A., Taslim, I., Indrianti, M. A., Manyoe, I. N., Lestari, U., and Sopian, K., Electrical and Thermal Efficiency of Air-based Photovoltaic Thermal (PVT) Systems: An Overview, *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, Vol. 14, pp. 1134-1140, 2019.
3. Mustapha, M., Fudholi, A., Yen, C. H., Ruslan, M. H., and Sopian, K., Review on Energy and Exergy Analysis of Air and Water Based Photovoltaic Thermal (PVT) Collector, *International Journal of Power Electronics and Drive System*, Vol. 9, pp. 1367-1373, 2018.
4. 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.
5. Bakari, R., Heat Transfer Optimization in Air Flat Plate Solar Collectors Integrated with Baffles, *Journal of Power and Energy Engineering*, Vol. 60, pp. 70-84, 2018.
6. Amraoui, M. A. and Aliane, K., Numerical Analysis of a Three Dimensional Fluid Flow in a Flat Plate Solar Collector, *International Journal of Renewable and Sustainable Energy*, Vol. 3, pp. 68-75, 2014.
7. Liou, T. M. and Chen, S. H., Turbulent Heat and Fluid Flow in a Passage Disturbed by Detached Perforated Ribs of Different Heights, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 41, pp. 1795-1806, 1998.
8. Karwa, R., Maheshwari, B. K., and Karwa, N., Experimental Study of Heat Transfer Enhancement in an Asymmetrically Heated Rectangular Duct with Perforated Baffles, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 32, pp. 275-284, 2005.
9. Karwa, R. and Maheshwari, B. K., Heat Transfer and Friction in an Asymmetrically Heated Rectangular Duct with Half and Fully Perforated Baffles at Different Pitches, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, pp. 264-268, 2009.
10. Sahel, D., Ameer, H., Benzeguir, R., and Kamla, Y., Enhancement of Heat Transfer in a Rectangular Channel with Perforated Baffles, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 101, pp. 156-164, 2016.
11. Siemens PLM Software, Explore NX and Discover your Solution, <http://www.plm.automation.siemens.com/products/nx/about-nx-software.shtml>, 2019.09.25.
12. Launder, B. E. and Spalding, D. B., The Numerical Computation of Turbulent Flows. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, Vol. 3, pp. 269-289, 1974.