공기식 태양광/열 집열기 내 저항체 형상조건과 유동 조건에 따른 열전달 성능 및 압력강하 분석

김성빈¹ · 김준엽¹ · 안병화² · 김영복³ · 손창호⁴ · 윤정인⁴ · 최광환^{4†}

¹부경대학교 냉동공조공학과 대학원, 석사과정

²(주)야베스, 연구원

³부경대학교 기계시스템공학과, 교수

⁴부경대학교 냉동공조공학과, 교수

Heat Transfer Performance and Pressure Drop Analysis According to Shape Conditions of Turbulent Promoters and Flow Conditions in Air-Type PV/T Collectors

Kim Seongbhin¹ · Kim Junyeop¹ · An Byunghwa² · Kim Youngbok³ · Son Changhyo⁴ · Yoon Jungin⁴ · Choi Kwanghwan^{4†}

¹Ms Course, Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, PuKyong National University

²Researcher, Yabes Co., Ltd.

³Professor, Department of Mechanical System Engineering, PuKyong National University

⁴Professor, Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, PuKyong National University

[†]Corresponding author: choikh@pknu.ac.kr

Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.42, No.1, pp.87-101, February 2022
<https://doi.org/10.7836/kjes.2022.42.1.087>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 1 November 2021

Revised: 15 November 2021

Accepted: 6 December 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.

Abstract

Air-type photovoltaic and thermal (PV/T) has a lower thermal capacity than liquid-type one; therefore, studies are being conducted turbulence promoters to improve heat transfer in a duct. This study aims to evaluate heat transfer performance and pressure drop while changing the increasing and decreasing ratio of turbulence promoters by using computational fluid dynamics (CFD). The increasing and decreasing ratio is a concept focused on increasing the height of turbulence promoters n times from the first row to the last row to generate high air temperatures at the outlet side. As a result, the difference in heat transfer performance according to the increasing and decreasing ratio was minimal; however, it was confirmed that the pressure drop increased in the order of 1.3, 1.2, and 1.1, because the increased resistance to air flow due to increased installation height of the turbulent promoters. Accordingly, it was found that the thermohydraulic performance parameter (THPP) increased in the order of 1.1, 1.2, and 1.3. Because of the changes for various shape conditions were not taken into account, additional consideration is required to select suitable conditions.

Keywords: 공기식 태양광/열 집열기(Air-type PV/T), 누셀 수(Nusselt number), 마찰계수(Friction factor), 열전달 성능계수(THPP), 저항체(Turbulent promoter)

기호 및 약어 설명

L	: Duct Length [mm]
W	: Duct Width [mm]
H	: Duct Height [mm]
e	: Height of Turbulent Promoter [mm]
P	: Pitch of Turbulent Promoter [mm]
l	: Length of Turbulent Promoter [mm]
D_h	: Hydraulic Diameter [m]
V	: Air Velocity [m/s]
Re	: Reynolds Number [-]
Nu	: Nusselt Number [-]
Pr	: Prandtl Number [-]
n	: Number of Times [-]
f	: Friction Factor [-]
k	: Thermal Conductivity [W/m·K]
h	: Heat Transfer Coefficient [W/m ² ·K]
C_p	: Specific Heat [J/kg·K]
ΔP	: Pressure Drop [Pa]
T	: Temperature [°C]
THPP	: Thermal Hydraulic Performance Parameter [-]

그리스 기호 설명

α	: Increase Ratio [-]
β	: Decrease Ratio [-]
ρ	: Density [kg/m ³]
ν	: Kinetic Viscosity [m ² /s]

하첨자 설명

a	: Air
s	: Smooth Duct

1. 서론

오늘날 우리의 편리한 삶은 각종 기계와 화석연료로 만들어내는 풍부한 에너지를 기반으로 만들어졌다. 하지만 화석연료의 고갈이 눈앞에 다가왔고 이에 신재생에너지로의 전환이 이루어지고 있다. 이 중 태양광은 1970년 이래 다른 모든 자원의 기반 에너지산업과 비교해 수백 배에서 수천 배에 이르기까지 원가를 개선했다. 게다가 자원 채굴 에너지산업의 원가는 계속 증가하는 반면 태양광은 원가가 하락하고 있어 신재생에너지의 대표 주자로 떠오르며 그 수요가 또한 증가하는 추세를 보인다. 하지만 기존의 태양광 패널은 발전 과정에서 발생한 자연적인 열이 패널 온도 상승을 초래해 발전효율 또한 낮아진다. 이에 발전 과정에서 발생한 열을 난방 및 급탕으로 활용해 폐열을 사용함과 동시에 발전효율을 높이는 태양광/열 집열기에 관한 연구가 이루어졌다. 태양광/열 집열기에는 열전달 매개체의 종류에 따라 공기식 태양광/열 집열기(PV/T)와 액체식 PV/T로 나뉜다. 공기식 PV/T는 펌프나 축열조 등의 추가 설비가 필요하지 않아 별도의 설치 공간이 필요 없다는 장점이 있지만 액체식 PV/T보다 열용량이 낮아, 이를 보완하기 위해 덕트 내에 난류 촉진 및 열전달을 향상시키는 저항체를 설치하는 다양한 연구가 진행되고 있다.

Moon et al.¹⁾은 공기식 PV/T 내 공기층에서 비균일 단면을 갖는 저항체 설치 조건에 따른 전열 성능을 분석하였다. 그 결과 저항체가 없는 매끈한 덕트보다 최소 1.4배에서 최대 1.8배까지 향상될 수 있음을 확인하였고, 열전달 성능과 압력강하를 동시에 고려한 성능계수도 설치 조건에 따라 최소 1.0배에서 최대 1.2배의 값을 보였다. 저항체 높이가 높을수록, 저항체 설치 간격이 조밀할수록, 저항체 너비가 클수록 성능계수 값은 증가하였다. Yu et al.²⁾은 공기식 PV/T 내 하부 공기 덕트 채널에 설치된 삼각형 형태의 배플 배열에 따른 열전달 성능을 CFD 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 그 결과 배플 사이의 수평 거리가 넓을수록, 수직 거리가 좁을수록 열전달 성능이 향상함을 확인하였다. Choi et al.³⁾은 공기식 PV/T 내 공기층에서 8가지 저항체 형상 및 배치에 따른 전열 성능을 수치해석 기법을 통해 평가하였고 모든 풍량 조건에 대해 삼각 저항체가 교차로 설치된 모델이 저항체가 없는 매끈한 덕트보다 최대 1.86배의 가장 큰 열전달 향상 결과를 보였다. Choi⁴⁾의 경우 비균일 삼각형 단면을 갖는 저항체가 설치된 공기식 PV/T 내 공기 유량에 따른 전열 성능에 관한 실험을 진행하였고, 유량 조건은 0.01977 kg/s, 0.02704 kg/s, 0.05402 kg/s, 0.07698 kg/s 4개로 고정하였다. 실험 결과 유량 조건 0.07698 kg/s에서 평균 열효율 56.72%, 평균 전기효율 14.81%, 평균 시스템 총 효율 71.54%로 최댓값을 가졌고, 이를 토대로 유량이 클수록 전체 효율이 증가함을 확인하였다. Yu et al.⁵⁾은 타공 배플이 적용된 공기식 PV/T의 실험을 통한 열 및 전기 성능을 평가하였으며, 일사량(950 W/m^2)과 외기온도가 같은 조건에서 유량이 $200 \text{ m}^3/\text{h}$ 일 때 $100 \text{ m}^3/\text{h}$ 보다 열효율은 15.2%, 전기효율은 0.29% 큰 것을 입증하였다. Kim et al.⁶⁾은 새로운 형태의 공기식 PV/T를 설계 및 제작하여 실험을 통해 열효율을 분석하는 연구를 진행하였다. 평균 일사량 950 W/m^2 , 외기온도 0°C 조건에서 입구 유량이 $60 \sim 200 \text{ m}^3/\text{h}$ 로 증가함에 따라 열효율도 약 26 ~ 45%로 증가하였다. Delisle et al.⁷⁾은 곡면형 배플이 적용된 공기식 PV/T 내 유량 조건에 따른 열전달 성능을 평가하였다. 유량 조건은 0.01528 kg/s, 0.05556 kg/s, 0.09722 kg/s 3개로 고정하였고, 공기 유량 증가에 따라 열효율이 증가

함을 확인했다. Jha et al.⁸⁾은 물결형태의 흡열판이 설치된 공기식 PV/T와 매끈한 형태의 흡열판이 설치된 PV/T의 성능 비교 분석 실험을 진행하였다. 그 결과 물결형태의 흡열판이 설치된 공기식 PV/T에서 전체 연간 에너지 및 엑서지 획득이 매끈한 형태의 흡열판이 설치된 PV/T보다 각각 8.2%, 2.3% 높았다. Othman et al.⁹⁾은 공기식 PV/T내 이중 공기 덕트 채널에 설치된 핀의 여부에 따른 열 및 전기 성능을 분석하였고, 핀의 열 및 전기 성능 증진 효과를 입증했다. Kumar et al.¹⁰⁾은 공기식 PV/T 내 하부 공기 채널에서 핀의 유무에 따른 열효율, 전기효율, 전체 효율을 분석하였으며 하부 공기 채널에 핀이 설치되었을 때 열효율, 전기효율, 전체 효율이 더 높음을 확인하였다.

이 이외에도 저항체 형상에 대한 다수의 연구가 진행되었으나¹¹⁾ 이미 거의 모든 저항체 형상에 관한 연구가 이루어졌다. 따라서 본 연구에서는 기존 연구와는 차별된 레이놀즈수(Re)와 저항체 형상 증감비를 변형하면서 시뮬레이션을 진행하였다. 저항체 형상은 공기식 PV/T 내에 적용될 수 있는 형상 중 구조가 단순하며 효율이 좋은 삼각형, 사각형, 반원형으로¹²⁾ 설정하였다. 따라서 공기식 PV/T 내 저항체 형상조건과 유동 조건에 따른 열전달 성능 및 압력강하 성능을 전산 열유체 해석에 근거해 평가해보고자 한다. 여기서 저항체 형상조건은 저항체 형상 증감비와 저항체 형상을 모두 포함한 개념이다.

2. 시뮬레이션 모델 및 방법

2.1 시뮬레이션 모델

본 연구에서는 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 저항체가 설치된 공기식 PV/T에서 저항체 형상조건과 유동 조건에 따른 열전달 성능 및 압력강하 성능을 평가하였다. 공기식 PV/T의 구조는 PV module 밑에 저항체를 부착하였으며, 덕트 부분은 모두 덕트 주재료인 알루미늄으로 선정하였으며 단열조건으로 PV module 밑부분에 생성하여 만들었다.

Fig. 1 Schematic diagram of Air-type PV/T

공기식 PV/T 모델의 치수는 Fig. 2와 같이 길이(L, Length) 1600 mm, 너비(W, Width) 1000 mm, 높이(H, Height) 100 mm로 설계하였다. 그리고 덕트 설계 기준이 되는 ASHRAE Standard 93-1977¹³⁾을 참고하여 입구측 최소 덕트 길이 $5\sqrt{WH}$, 출구측 최소 덕트 길이 $2.5\sqrt{WH}$ 에 맞춰 각각 1581 mm, 791 mm로 설계하였다. 또한, 일사를 받는 PV module에서는 800 W/m^2 의 일정 열 유속조건으로 고정하였다.

Fig. 2 Rough view of air-type PV/T duct

2.2 시뮬레이션 방법

본 연구에서는 공기식 PV/T 내 저항체 형상조건과 유동 조건에 따른 열전달 성능 및 압력강하 성능을 분석하기 위해 상용 열유동해석 프로그램 ANSYS FLUENT 17.2¹⁴⁾를 사용하였고, 3D 모델로 시뮬레이션을 진행하였다. Table 1은 공기식 PV/T 상세 치수 및 시뮬레이션 경계조건을 나타내었다. 유동 조건은 종래 연구들을 바탕으로 $Re=3000, 8000, 13000, 18000$ 으로¹⁵⁾ 수행하였으며 Hydraulic diameter(D_h)는 식(1)을 이용해 0.181818의 값을 사용하였다. 입구측 공기 유속은 식(2)과 같이 나타낼 수 있고 $Re=3000, 8000, 13000, 18000$ 이므로, 각각 0.2598, 0.6927, 1.1256, 1.5585로 설정하였다. 출구측 압력조건은 대기압 101,325 Pa로 설정했고 입·출구 및 전열부를 제외한 나머지 외면은 완전 단열로 하였다. Table 2는 작동 유체인 공기에 대한 물성치를 나타내었다.

Table 1 Simulation boundary conditions

Parameter		Value
Duct Length [mm]	Inlet side	1581
	Test section	1600
	Outlet side	791
Duct Width [mm]		1000
Duct height [mm]		100
Heat flux [W/m^2]		800
Reynolds number [-]		3000, 8000, 13000, 18000
Inlet velocity [m/s]		0.2598, 0.6927, 1.1256, 1.5585
Hydraulic diameter [m]		0.181818
Outlet side pressure [Pa]		101325

Table 2 Properties of air

Parameter	Value
Temperature [K]	300
Prandtl number [-]	0.71432
Specific heat [J/kg·K]	1006.3
Thermal conductivity [W/m·K]	2.6107 e-02
Density [kg/m ³]	1.1771
Dynamic viscosity [kg/m·s]	1.8531 e-05
Kinematic viscosity [m ² /s]	1.57429 e-05

$$D_h = \frac{2WH}{(W+H)} \quad (1)$$

$$V_a = \frac{\nu Re}{D_h} \quad (2)$$

본 연구에서는 저항체에 증감비를 변형하면서 열전달 성능 및 압력강하를 평가하고자 한다. 증감비란 증가비와 감소비를 모두 포함한 단어로 저항체 1열에서부터 끝 열까지 저항체의 높이 'e'와 저항체의 길이 'l'을 'n'배 증가 또는 감소시켜 출구 측 덕트 공기 온도를 가장 높게 만드는 것을 목표로 하는 개념이다. 저항체 사이의 거리 'P'에도 똑같이 증감비가 적용되어 저항체 1열에서부터 끝 열까지 n배 증가 또는 감소하게 된다. 이때 기준은 바로 이전 열로 한다. 예를 들어 5번째 열에 있는 저항체에 증감비 1.1을 적용한다고 할 때 4번째 열에 있는 저항체의 e, l과 P에 1.1배 증가 또는 감소시키는 것이다.

저항체 설치 조건은 상대 저항체 설치 높이(e/H) 0.08, 상대 저항체 설치 간격(P/e) 10으로¹⁶⁾ 고정하였다. 형상은 가장 구조가 단순하며 효율이 좋은 삼각형, 사각형, 반원형으로 진행하였으며 증가비(α) 1.1, 1.2, 1.3과 감소비(β) 1.1, 1.2, 1.3을 설정하여 총 18개의 모델을 생성하였다. 저항체의 길이는 형상과 관계없이 1000 mm(W)로 일정하며 저항체의 개수 즉 Line 수는 증감비에 따라 달라진다. Fig. 3과 같이 저항체 개수는 증감비에 영향을 받으며 $\alpha=1.1$ 일 때 10개, $\alpha=1.2$ 일 때 8개, $\alpha=1.3$ 일 때 7개이고 β 에 따라서는 α 와 같은 저항체 개수를 갖는다. Fig. 3은 18가지 모델 중 각각 $\alpha=1.1$ 일 때 삼각형, $\alpha=1.2$ 일 때 사각형, $\alpha=1.3$ 일 때 반원형의 저항체를 가진 3가지 모델을 선정해 저항체 형상조건을 시각화하였다. α 를 기준으로 저항체 1열의 P는 80 mm, e는 8 mm, l은 삼각형과 사각형 저항체일 때는 8 mm, 반원형 저항체일 때는 $l=2e$ 이므로 16 mm로 고정하였다. 증감비가 1.1일 때 저항체의 e는 최대 18.86 mm, P는 최대 188.64 mm를 가졌고 증감비가 1.2일 때 저항체의 e는 최대 28.67 mm, P는 최대 286.65 mm를, 증감비가 1.3일 때 저항체의 e는 최대 38.61 mm, P는 최대 386.14 mm의 값을 보였다.

Fig. 3 Side view of Air-type PV/T for turbulent promoter condition

Mesh 설정 중 'Size function'은 'Proximity and curvature'을 사용하였으며, 'Max face size'는 20 mm로 설정한 후 나머지 값은 기본값으로 설정하였다. 총 Mesh 수는 형상조건에 따라 약 50만 개~ 200만 개까지 생성되었다.

2.3 지배방정식 및 난류 모델선정

저항체가 있는 덕트를 지나는 공기 흐름이 정상상태, 난류 흐름, 비압축성 기체라고 가정하고 시뮬레이션을 진행하였다. 이때 공기 흐름은 연속방정식(3), 운동방정식(4), 에너지방정식(5)에 의해¹⁷⁾ 지배된다.

Continuity equations

$$\frac{\delta(\rho u_j)}{\delta x_j} = 0 \quad (3)$$

Momentum equation

$$\frac{\delta}{\delta x_j}(\rho \mu_i \mu_j) = \frac{\delta p}{\delta x_i} + \frac{\delta p}{\delta x_j} \left[\mu \left(\frac{\delta \mu_i}{\delta x_j} + \frac{\delta u_j}{\delta x_i} \right) \right] + \frac{\delta}{\delta x_j} (-\rho \overline{\mu_i' \mu_j'}) \quad (4)$$

Energy equation

$$\frac{\delta}{\delta x_i}(\rho \mu_j T) = \frac{\delta}{\delta x_j} \left[\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\delta T}{\delta x_j} \right] \quad (5)$$

해당 연구에서 수행한 유동 조건 중 $Re=3000, 8000, 13000, 18000$ 으로 난류 영역에 속하므로 적합한 난류 모델의 선정을 위해 저항체가 없는 매끈한 덕트에서 총 6개의 난류 모델($k-\varepsilon$ standard & enhanced wall treatment, $k-\varepsilon$ Rng & standard wall treatment, $k-\varepsilon$ Rng & enhanced wall treatment, $k-\varepsilon$ Realizable & standard wall treatment, $k-\varepsilon$ Realizable & enhanced wall treatment, $k-\omega$ standard)을 사용하여 얻어진 Nusselt number (Nu) 값과 매끈한 덕트에서의 열전달 성능을 나타내는 Dittus-Boelter 식(6)의 Nu_s 값을 비교하였다. 그 결과는 Fig. 4와 같으며, 평균 오차율 11.06%로 오차가 가장 적은 $k-\varepsilon$ Realizable & standard wall treatment 난류 모델을 선정하였다. 선정된 모델의 해석을 위해 Transport equation for the Realizable $k-\varepsilon$ model(7)을¹⁸⁾ 사용하였다.

Dittus-Boelter equation

$$Nu_s = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (6)$$

Transport equation for the Realizable $k-\varepsilon$ model

$$\frac{\delta}{\delta t}(\rho k) + \frac{\delta}{\delta x_j}(\rho k \mu_j) = \frac{\delta}{\delta x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\delta k}{\delta x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (7)$$

Fig. 4 Comparison between Dittus-Boelter equation and six different turbulence models

3. 결과 및 고찰

3.1 열전달 성능

본 연구에서는 공기식 PV/T 내 저항체 형상조건과 유동 조건에 따른 열전달 성능을 비교하기 위해서 Nu를 사용하였다. Nu는 식(8)와 시뮬레이션 결과로부터 구할 수 있는데 식(8)의 대류 열전달 계수(h_a)는 시뮬레이션을 통해 구했으며, 공기 측 열전도도(k_a)는 Table 2의 값을 사용하였다. 또한, 저항체가 없는 매끈한 덕트와의 열전달 성능 비교를 위해 Nu/Nu_s 를 구하였다.

$$Nu = \frac{h_a D_h}{k_a} \quad (8)$$

Fig. 5(a)는 α 에 따른 열전달 성능을, Fig. 5(b)는 β 에 따른 열전달 성능을 나타낸 그래프이다. 그래프 결과와 같이 Re가 커짐에 따라 Nu도 증가함을 확인하였으며, Re=3000, 형상은 사각형, $\beta=1.3$ 일 때 최소 Nu=23.55에서 Re=18000, 형상은 삼각형, $\alpha=1.2$ 일 때 최대 Nu=90.18의 값을 보였다. Re와 증감비가 동일한 조건에서 형상은 삼각형, 반원형, 사각형 순으로 열전달 성능이 좋았으나, Re와 형상이 같을 때 증감비에 따른 열전달 성능은 뚜렷한 경향성이 드러나지 않았다. 이는 열전달 성능이 증감비보다 저항체의 형상에 더 많은 영향을 받기 때문으로 사료된다.

Fig. 5(c), Fig. 5(d)는 각각 유동조건 및 형상조건에 따라 저항체가 없는 매끈한 덕트와의 열전달 성능 비교를 통해 열전달 향상 정도를 보여주고 있으며, 최소 1.1배에서 최대 2.5배까지 열전달 성능이 향상됨을 알 수 있었다. 저항체 형상조건에 따른 열전달 향상 정도는 Fig. 5(a), Fig. 5(b)와 유사한 경향성을 보였으나, 유동 조건에

따라서는 반대로 열전달 향상 정도는 유속이 증가할수록 감소했다. 최종적으로 유속이 증가할수록 Nu 값은 증가하며 Nu/Nu_s 형상은 삼각형, 반원형, 사각형 순으로 열전달 성능이 향상됨을 알 수 있었다.

Fig. 5 Heat transfer performance according to shape conditions of turbulent promoters and flow conditions

3.2 압력강하

유속이 증가함에 따라 열전달 성능이 증가되나, 이에 따라 저항체가 유동에 저항으로 작용하며 압력강하가 발생하게 된다. 공기식 PV/T 내 저항체 형상조건과 유동 조건에 따른 압력강하 증가 정도를 확인하기 위해서 마찰계수(f)를 분석하였다. Friction factor(f)는 식(9)과 시뮬레이션 결과로부터 구할 수 있는데 식(9)의 압력강하(ΔP)는 시뮬레이션 결과로부터 구했으며 나머지 기호는 Table 1, Table 2의 값을 사용하였다. 또한, 저항체가 없는 매끈한 덕트와의 마찰 인자 값 비교를 위해 f/f_s 를 구하였다. f_s 는 식(10)의 Blasius 식을 이용하여 구하였다.

Friction factor equation

$$f = \Delta P \frac{D_h}{2L\rho V^2} \quad (9)$$

Modified Blasius equation

$$f_s = 0.0791 Re^{-0.25} \quad (10)$$

Fig. 6(a)은 α 에 따른 마찰계수를, Fig. 6(b)은 β 에 따른 마찰계수를 나타낸 그래프이다. 그 결과 Re가 커짐에 따라 f 는 감소함을 확인하였다. Re=18000, 형상은 반원형, $\beta=1.1$ 일 때 최소 $f=0.0192$ 에서 Re=3000, 형상은 삼각형, $\beta=1.3$ 일 때 최대 $f=0.1033$ 의 값을 보였다. Re와 증감비가 동일한 조건에서 형상은 삼각형, 사각형, 반원형 순으로 f 가 높았다. Re와 형상이 같을 때 증감비에 따른 f 는 1.3, 1.2, 1.1 순으로 증가하는 경향을 보였다.

Fig. 6 Pressure drop according to shape conditions of turbulent promoters and flow conditions

이는 저항체 설치 높이와 면적 증가에 따라 유동 공기에 대한 저항이 커졌기 때문으로 생각된다.

Fig. 6(c), Fig. 6(d)는 각각 α 와 β 에 따라 저항체가 없는 매끈한 덕트와의 마찰계수 비교를 통해 압력강하 증가 정도를 보여주고 있는데, 최소 1.03배에서 최대 5.30배까지 압력강하가 증가함을 알 수 있었다. 저항체 형상 조건에 따른 압력강하 증가 정도는 Fig. 6(a), Fig. 6(b)와 유사한 경향성을 보였으나 유동 조건에 따라서는 반대의 경향성을 보였다. Re가 커질수록 감소하는 f 와 달리 압력강하 향상 정도(f/f_s)는 유속이 증가할수록 높아졌다. 최종적으로 유속이 증가할수록, 형상은 삼각형, 사각형, 반원형 순으로 증감비는 1.3, 1.2, 1.1 순으로 압력강하가 높음을 알 수 있었다.

3.3 열전달 성능계수(THPP)

앞서 공기식 PV/T 내 저항체 형상조건과 유동 조건에 따른 열전달 성능과 압력강하 분석을 통해 열전달 성능 향상에 압력강하가 증가가 수반됨을 알 수 있었다. 이에 열전달 성능 향상과 압력강하 증가를 동시에 고려하기 위해 Webb와 Gee¹⁹⁾에 의해 제시된 열전달 성능 향상 대비 압력강하 증가를 나타내는 성능계수(THPP) 식(11)을 이용하였다.

Webb and Gee equation

$$THPP = \frac{(Nu/Nu_s)}{(f/f_s)^{1/3}} \quad (11)$$

Fig. 7(a)은 α 에 따른 THPP를, Fig. 7(b)은 β 에 따른 THPP를 나타낸 그래프이다. 그래프를 분석한 결과 Re가 커짐에 따라 THPP가 감소하는 경향을 보였는데, 이는 유속의 증가에 따른 열전달 성능 향상보다 더 큰 압력강하가 수반되기 때문이다. Re=18000, 형상은 사각형, $\beta=1.3$ 일 때 최소 THPP=0.8902에서 Re=3000, 형상은 삼각형, $\beta=1.1$ 일 때 최대 THPP=1.8141의 값을 보였다. Re와 증감비가 동일한 조건에서 형상은 반원형, 삼각형, 사각형 순으로 THPP가 높았다. 공기의 유동 속도가 작을 때는 압력강하가 상대적으로 작으므로 열전달 성능과 압력강하가 가장 높은 삼각형이 반원형보다 THPP가 높은 것으로 보이고, 공기의 유동 속도가 커짐에 따라 열전달 성능보다 압력강하가 THPP에 더 큰 영향을 미쳐 반원형이 삼각형보다 THPP 값이 커진 것으로 판단된다. Re와 형상이 같을 때 증감비에 따른 THPP는 1.1, 1.2, 1.3 순으로 증가하는 경향을 보였다. 이는 증감비에 따른 열전달 성능의 차이는 거의 없으나 저항체 설치 높이와 면적 증가에 따른 유동 공기에 대한 저항으로 압력강하가 1.3, 1.2, 1.1 순으로 높기 때문으로 사료된다. 최종적으로 유동 속도가 감소할수록, 형상은 반원형, 삼각형, 사각형 순으로 증감비는 1.1, 1.2, 1.3 순으로 THPP가 높음을 알 수 있었다.

Fig. 7 THPP according to shape conditions of turbulent promoters and flow conditions

4. 결론

본 연구에서는 공기식 PV/T 내 저항체가 설치되었을 때 저항체 형상조건과 유동 조건을 변형하면서 열전달 및 압력강하 성능을 평가해보고자 하였고 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 열전달 성능의 경우 저항체가 없는 매끈한 덕트보다 최소 1.1배에서 최대 2.5배까지 열전달 성능이 향상됨을 알 수 있었다. Re가 커짐에 따라 Nu도 증가하였고, Re와 증감비가 동일한 조건에서 형상은 삼각형, 반원형, 사각형 순으로 열전달 성능이 좋았다. Re와 형상이 같을 때 증감비에 따른 열전달 성능은 뚜렷한 경향성이 드러나지 않았다.
- (2) 저항체가 없는 매끈한 덕트와의 마찰계수 비교를 통해 압력강하 증가 정도를 확인해본 결과 최소 1.03배에서 최대 5.30배까지 압력강하가 증가함을 알 수 있었다. Re가 커짐에 따라 f 는 감소하였고, Re와 증감비가 동일한 조건에서 형상은 삼각형, 사각형, 반원형 순으로 f 가 높았으며, Re와 형상이 같을 때 증감비에 따른 f 는 1.3, 1.2, 1.1 순으로 증가하는 경향을 보였다.
- (3) 열전달 성능 향상과 압력강하 증가를 동시에 고려하기 위해 THPP를 확인하였으며, Re=18000, 형상은 사각형, $\beta=1.3$ 일 때 최소 THPP=0.8902에서 Re=3000, 형상은 삼각형, $\beta=1.1$ 일 때 최대 THPP=1.8141의 값을 보였다. Re가 커짐에 따라 THPP는 감소하는 경향을 보였고, Re와 증감비가 동일한 조건에서 형상은 대부분 반원형, 삼각형, 사각형 순으로 THPP가 높았다. Re와 형상이 같을 때 증감비에 따른 THPP는 1.1, 1.2, 1.3 순으로 증가하는 경향을 보였다.
- (4) 위 결과를 바탕으로 유동 속도가 감소할수록, 형상은 반원형, 삼각형, 사각형 순으로 증감비는 1.1, 1.2, 1.3 순으로 높은 성능을 가질 수 있음을 알 수 있었다. 그러나 유동조건 및 형상조건에 대해 결과값들이 불균일하게 변화되었기 때문에, 최대 성능 및 목적에 맞는 적합한 형상을 얻기 위해서는 형상조건 및 유동조건에 대한 상관관계식을 제시할 필요가 있다고 사료된다. 또한, 상관관계식을 활용한 최적 저항체를

실험장치에 설치한 후 실험을 통한 연구를 진행하여 열전달 성능을 평가하여 시뮬레이션 결과에 대한 타당성을 검증할 것이다.

후기

본 연구는 중소벤처기업부와 한국산업기술진흥원의 지역특화산업육성+(R&D)으로 수행된 연구결과입니다(과제번호: S3092070).

REFERENCES

1. Moon, K. W., Choi, H. U., Kim, Y. B., Yoon, J. I., Son, C. H., and Choi, K. H., Analysis of Heat Transfer Performance According to Installation Conditions of Various Protrusions with Non-uniform Cross-section in Air Space of Air-Type PV/T System, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 41, No. 1, pp. 79-92, 2021.
2. Yu, J. S., Kim, J. H., and Kim, J. T., Effect of Triangular Baffle Arrangement on Heat Transfer Enhancement of Air-Type PVT Collector, *Sustainability*, Vol. 12, No. 18, 7469, 2020.
3. Choi, H. U., Fatkhur, R., Kim, Y. B., Yoon, J. I., Son, C. H., and Choi, K. H., CFD analysis on the heat transfer performance with various obstacles in air channel of air-type PV/Thermal module, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 38, No. 1, pp. 33-43, 2018.
4. Choi, H. U. and Choi, K. H., Performance Evaluation of PV/T Air Collector Having a Single-Pass Double-Flow Air Channel and Non-Uniform Cross-Section Transverse Rib, *Energies*, Vol. 13, No. 9, 2203, 2020.
5. Yu, J. S., Lee, K. S., Kim, J. H., and Kim, J. T., Study on Electrical and Thermal Performance Assessment of an Air-Type PVT Collector with Perforated Baffle, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 41, No. 1, pp. 25-34, 2021.
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. 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.
8. 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.
9. Othman, M. Y., Yatim, B., Sopian, K., and Abu Bakar, M. N., Performance studies on a finned double-pass photovoltaic-thermal (PV/T) solar collector. *Desalination*, Vol. 209, pp. 43-49, 2007.
10. Kumar, R. and Rosen, M. A., Performance evaluation of a double pass PV/T solar air heater with and without fins. *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 31, pp. 1402-1410, 2011.
11. Anil Singh Yadav, J. L., and Bhagoria, A., CFD (Computational Fluid Dynamics) based Heat Transfer and Fluid Flow Analysis of a Solar Air Heater Provided with Circular Transverse Wire Rib Roughness on the Absorber Plate, *Energy*, Vol. 55, pp. 1127-1142, 2013.
12. Anil Singh Yadav, J. L., and Bhagoria, A., CFD based Thermo-hydraulic Performance Analysis of an Artificially Roughened Solar Air Heater Having Equilateral Triangular Sectioned Rib Roughness on the Absorber Plate, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 70, pp. 1016-1039, 2014.

13. ASHRAE Standard 93, Method of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors, GA:American Society of Heat, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, 2003.
14. ANSYS Fluent, Version 17.2, ANSYS Inc, 2016.
15. Singh, S., Singh, B., Hans, V. S., and Gill, R. S., CFD (Computational Fluid Dynamics) Investigation on Nusselt Number and Friction Factor of Solar Air Heater Duct Roughened with Non-uniform Cross-section Transverse Rib, Energy, Vol. 84, pp. 509-517, 2015.
16. Kumar, B. V., Manikandan, G., Kanna, P. R., Taler, D., Taler, J., Oclon, M. N., Mzyk, K., and Toh, H. T., A Performance Evaluation of a Solar Air Heater Using Different Shaped Ribs Mounted on the Absorber Plate-A Review, Energies, Vol. 11, 3104, 2018.
17. Choi, H. U. and Choi, K. H., CFD Analysis on the Heat Transfer and Fluid Flow of Solar Air Heater having Transverse Triangular Block at the Bottom of Air Duct, Energies, Vol. 13, No. 5, 1099, 2020.
18. Ansys Inc., ANSYS Fluent 12.0 User's Guide; Fluent Inc.: Lebanon, NH, USA, 2009.
19. Webb, R. L. and Gee, D. L., Forced Convection Heat Transfer in Helically Rib-roughened Tubes, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 23, pp. 1127-1136, 1980.