공기식 태양광/열 집열기 내 공기층에서 비균일 단면을 갖는 돌출부 설치 조건에 따른 전열 성능에 관한 분석

문광암¹ · 최휘웅¹ · 김영복² · 손창호³ · 윤정인³ · 최광환^{3†}

¹부경대학교 냉동공조공학과, 대학원생

²부경대학교 기계시스템공학과, 교수

³부경대학교 냉동공조공학과, 교수

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

Moon Kwang-Am¹ · Choi Hwi-Ung¹ · Kim Young-Bok² · Son Chang-Hyo³ · Yoon Jung-In³ · Choi Kwang-Hwan^{3†}

¹Graduate Student, Graduate School of Refrigeration and Air-conditioning Engineering, Pukyong National University

²Professor, Dept. of Mechanical Engineering, Pukyong National University

³Professor, Dept. of Refrigeration and Air-conditioning Engineering, Pukyong National University

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

Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.41, No.1, pp.79-92, February 2021
<https://doi.org/10.7836/kjes.2021.41.1.079>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 29 December 2020

Revised: 26 January 2021

Accepted: 26 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.

Abstract

Air-type photovoltaic/thermal (PV/T) collectors attached to ducts beneath the solar panels are devices that can recover heat while the panel cools. By contrast, water-type PV/T is easily used because the air of an air-type PV/T has a lower heat capacity than water. A number of studies have been conducted on the installation of ribs as a way to increase the heat recovery capacity of air through ducts. In this study, a protrusion with a non-uniform cross-section was selected to increase the contact area of the air side as well as to promote turbulence. A computational fluid dynamics (CFD) analysis was conducted to confirm the heat transfer performance and the characteristics of the pressure drop according to different shape conditions. As a result, the heat transfer performance was improved by 1.3- to 1.9-fold depending on the conditions of the protrusion installation. However, the pressure drops also increased from 2.534- to 4.685-fold. It is therefore necessary to identify those factors of the thermal hydraulic performance that consider both the heat transfer and pressure drop. As a result, the maximum heat-recoverable shape condition achieved the largest performance coefficient value of 1.24 when $e/H = 0.16$, $P/e = 20$, and $W_p/e = 5$.

Keywords: 공기식 태양광/열 집열기(Air-type photovoltaic thermal collector), 돌출부(Protrusion), 전산 유체해석(Computational fluid dynamics), 에너지 절약(Energy saving)

기호설명

C_p	: Specific heat (J/kgK)
D_h	: Hydraulic diameter (m)
f	: Friction factor (-)
h	: Heat transfer coefficient (W/m ² K)
H	: Height (m)
k_f	: Thermal conductivity (W/mK)
L	: Length (m)
Nu	: Nusselt Number (-)
P	: Pitch (m)
ΔP	: Pressure drop (Pa)
Pr	: Prandtl number (-)
Re	: Reynolds number (-)
T	: Temperature (°C)
THPP	: Thermal hydraulic performance parameter (-)
V	: Air velocity (m/s)
W	: Width (m)

그리스 문자

α	: Thermal expansion coefficient (1/K)
Γ	: Molecular thermal diffusivity (m ² /s)
ρ	: Density (kg/m ³)
μ	: Viscosity (Ns/m ²)
τ	: Deviatoric stress tensor (Pa)
ϕ	: Viscous dissipation (W/m ³)

하첨자

air	: Air
avg	: Average
in	: Inlet
out	: Outlet

p : Protrusion
 s : Smooth duct
 t : Turbulent

1. 서론

일반적으로 태양광 발전 효율이 낮은 이유로는 패널의 방향 및 설치 각도, 그리고 패널 자체 성능도 영향을 미치지만, 태양광 패널의 고온화 현상에 의해 발전효율이 많이 감소한다. 이때 태양광 패널의 발전과정에서 자연적으로 열이 발생하는데, 이는 곧 패널의 온도 상승으로 이어져 역으로 태양광 발전효율이 저하된다. 이러한 패널 고온화를 방지하기 위하여 종래에는 자연 대류에 의한 냉각이나 스프링클러를 설치하여 직접 살수를 통한 냉각 등의 방법을 적용해왔다. 그러나 기존의 방식 모두 패널을 냉각시켜 발전효율 저하 방지에 효과를 보였으나, 냉각 과정에서 제거된 열은 모두 대기 중으로 버려진다. 따라서 이를 회수하여 냉난방 시스템 열원으로 활용할 수 있는 PV/T (PV/T, Photovoltaic thermal)는 태양광 패널 후면부에 덕트나 배관을 설치해서 유체를 흘려보내 패널에서 발생하는 열을 냉각시킴과 동시에, 이 과정에서 회수된 열로 온수나 가열 공기를 변환하여 주로 난방 및 급탕으로 사용한다. 그중에서 후면에 관(Pipe)을 설치하여 유체를 직접 흘려보내 패널의 표면 온도 상승을 억제하는 액체식 PV/T과 덕트를 설치해서 공기를 흘려보내 열을 제거하는 기체식 PV/T가 주로 사용된다. 그러나 제거된 열을 그냥 버리기 보다는 냉난방열원으로 활용하고자 하는 방법을 연구하게 되면, 기체식 PV/T의 경우가 더 높은 온도 레벨의 열원을 얻을 수가 있어 여러 방면에서 활용될 수 있다. 그러나 공기 열원이 수열원보다 열용량이 낮아 PV 패널 냉각성능에 다소 불리한 문제점을 갖는다. 이를 방지하기 위하여 덕트 내에서 전열을 촉진하는 구조체를 설치하는 등의 연구가 진행되고 있다. 이 과정에서 구조체의 형상과 설치 조건에 따라 패널에서 발생하는 열을 제거하는 능력이 달라지기 때문에 많은 국내외에서 연구자들이 이와 관련된 연구를 수행하고 있다.

Heo et al.¹⁾은 공기식 태양열 집열기 덕트에 홈(groove), 배플(baffle), 물결(wave) 모양의 립(Rib) 설치 각도에 따른 열전달 성능 분석을 진행하였고, groove 60°인 형상에서 가장 높은 성능계수 값을 도출하였다. Abhay et al.²⁾은 공기식 태양열 집열기 흡수판 후면부에 수평형 사각형 립의 설치 간격에 따른 수치해석 수행 및 그 결과를 바탕으로 열전달 성능이 최소 37.84%에서 최대 112.85% 향상됨을 확인하였다. Singh et al.³⁾은 Square wave shaped rib과 Multiple broken transverse rib 형상에 따른 CFD 해석 및 실험을 진행하였고, 이를 비교하였고, 열 효율은 각각 44.26%, 71.64% ~ 72.25%의 결과를 보였다.

공기식 태양열 집열기 실험 연구의 경우 Kim et al.⁴⁾ 흡열판에 삼각 개구부가 설치된 공기식 태양열 집열기의 실험 연구를 통해 실제 기상조건에서 개구부 설치로 14°C ~ 18°C 온도 상승을 확인하였고, 집열 성능 증진 효과를 입증하였다. Son et al.⁵⁾은 공기 열원 평판형 태양열 집열기 chambered-rib 형상의 덕트를 제작하고 기존 덕트와 비교하여 열전달 성능 향상 정도를 확인하였다. Abdul-Malik et al.⁶⁾은 공기식 태양열 집열기 덕트 내 V-shaped rib 설치 각도에 따른 연구를, Jaurker et al.⁷⁾은 사각 덕트 내 rib-groove 설치에 따른 실험 연구를

통해 집열기의 열전달 성능과 마찰계수 상관 관계식을 제시하였다.

Yu et al.⁸⁾은 공기식 PV/T 하부 공기 덕트 채널 내에 타공 배플(baffle)이 설치된 집열기에 대한 시뮬레이션을 수행하여 다양한 형상 조건에 따른 집열기 내 공기 흐름 균일성 및 열성능을 조사하였고, 그 결과 기존 공기식 PV/T 대비 출구온도는 1.45배, 열효율은 39.6% (469 Wth) ~ 42.7% (506.7 Wth) 향상됨을 확인하였다. Kim et al.⁹⁾은 기존 PV 패널 사이 흡열 동판을 설치하여 내부로 더 많은 태양열이 유입할 수 있는 공기식 PV/T를 설계 및 제작하였으며, 실제 기상조건에서 개발된 공기식 PV/T에 관한 실험 연구를 진행하였다. 입구 유량에 따른 열효율은 26% ~ 45% 향상됨을 확인하였다.

위와 같은 선행 연구들을 통해 저항체, 림(rib), 배플(baffle), 핀(fin)과 같이 공기 덕트 형상 변화를 통해 공기식 PV/T 성능 향상에 많은 영향을 주었다. 하지만 강제로 난류를 형성하기 위한 저항체 관련 연구들이 주를 이루었다. 공기식 PV/T의 경우 태양광 패널에서 발생하는 열을 최대한 회수하기 위해서는 난류 촉진뿐만 아니라 전열 면적을 늘리는 것 또한, 중요한 요소로 판단할 수 있다.

Fig. 1 Experimental results of prior research about air-type PV/T with non-uniform cross-section protrusion

Fig. 1은 비균일 단면을 갖는 돌출부가 설치된 공기식 PV/T에 대한 성능 평가를 위해 덕트 내부에서 공기가 유동할 때 수직단면이 삼각형이며, 전열 면적을 늘리기 위하여 돌출부 사이를 공기가 유동할 수 있도록 일정한 공간이 확보된 비균일 단면을 갖는 돌출부에 대한 전열 성능에 관한 실험을 진행하였다. 그 결과 입구 유량에 따라 공기 온도는 5.21°C ~ 33.96°C까지 상승하였고, 열효율은 30.97% ~ 59.91%, 전기효율은 11.05% ~ 16.27%, 시스템 총 효율은 최소 46.24%에서 75.3%까지 증가함을 확인하였다¹⁰⁾. 위 결과를 통해 비균일 단면이 설치를 통해 공기식 PV/T의 성능 향상 가능성을 확인하였다. 그리하여 본 연구에서는 돌출부 높이와 설치 간격, 그리고 돌출부 너비와 같이 설치 조건에 따라 열전달 성능 및 압력강하가 모두 변하므로, 이를 비교 분석하기 위해 모델링 및 CFD를 통해 열전달 성능 및 압력강하, 성능계수를 산출하여 최대 열 획득이 가능한 최적 구조를 제시하는 데 목적을 두었다.

2. 수치해석 모델 및 방법

2.1 수치해석 모델

본 연구에서는 Fig. 2와 같이 비균일 단면을 갖는 돌출부가 설치된 공기식 PV/T에서 해당 돌출부 설치 조건에 따른 열전달 및 압력강하 성능을 평가하고자 하였다. 본 수치해석 모델은 흡열판 후면부에 비균일 단면을 갖는 돌출부가 공기 유동의 수평 방향($\nabla-\nabla$)으로 대칭인 공기식 PV/T 모델링 작업 수행 및 시뮬레이션에 진행하였다.

본 연구에 적용된 해당 집열기 모델의 치수는 총 길이(L, Length) 1,542 mm, 너비(W, Width) 800 mm, 높이(H, Height) 50 mm이었다. 그리고 'ASHRAE Standard 93-2002'¹¹⁾에서 제시한 안정적 시험을 위한 최소 이격 거리는 시험부 길이 480 mm를 기준으로 입구 길이 $\sqrt{5WH}$, 출구 길이 $\sqrt{2.5WH}$ 에 맞추어 각각 708 mm, 354 mm 이상을 확보하여 기류의 영향을 최소화한 덕트로 구성하였다. 입구 측 덕트는 입구 측 유입 공기의 완전

Fig. 2 Schematic of the air type PV/T with non-uniform cross-section protrusions

발달 유동을 형성하고 출구 측 덕트의 경우 시험부를 지난 공기의 유동 교란을 최소화하고자 하였다. 또한 일사를 받는 시험부에서는 변화량이 많은 일사량 대신에 1000 W/m^2 의 일정한 열 유속 조건으로 고정하였다.

2.2 수치해석 방법

본 연구에서는 공기식 태양광/열 집열기 하부 덕트 내 비균일 단면을 갖는 돌출부 설치 조건에 따른 전열 성능을 분석하기 위해 ANSYS Fluent 17.2를 사용하였다. Table 1은 시뮬레이션에 이용한 수치 모델의 상세 치수 및 설치 조건을 나타내었다.

Table 1 Parameter of geometry and boundary conditions on air type photovoltaic thermal

Parameter		Value
Duct size	Entrance	708
	Length, L [mm]	Test section
		480
	Exit	354
	Width, W [mm]	800
	Height, H [mm]	50
Heat flux [W/m^2]		1000
Prandtl No. [-]		0.71432
Reynolds No. [-]		8000
Inlet velocity [m/s]		1.4169

비균일 단면을 갖는 돌출부가 설치된 공기식 PV/T의 모델링 작업은 ANSYS FLUENT 17.2에 내장된 ‘Design Modeler’를 사용하였다. 선 공기 유동 영역 및 돌출부는 모두 덕트 주재료인 알루미늄으로 선정하였다. 또한 입·출구 및 전열부를 제외한 나머지 벽면은 완전 단열로 가정하였다.

Table 2는 무차원 설치 조건을 나타낸 표이며, 돌출부 설치 조건의 경우 시험부 치수에 맞춰 돌출부가 균일하게 설치되도록 상대 돌출부 높이(e/H) 조건 3가지, 상대 돌출부 설치 간격(P/e) 4가지, 상대 돌출부 너비(W_p/e) 조건 3가지로 총 36가지의 설치 조건에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 공기식 PV/T에 설치되는 돌출부 개수 및 Line 수는 덕트 높이(H)를 기준으로 돌출부 높이(e)에 따라 설치 간격(P) 및 돌출부 너비(W_p)가 각각 정해지며 Line 개수는 2 ~ 40개, Line 당 돌출부 설치 개수는 최소 20개에서 최대 400개까지 설치된다.

Table 2 Dimensionless variables of protrusion

Parameter	Value
e/H [-]	0.04, 0.08, 0.16
P/e [-]	6, 10, 15, 20
W_p/e [-]	1, 2, 5

격자 생성을 위해 ‘Size Function’ 설정 중 ‘Proximity and Curvature’ 지정하여 Mesh를 생성하였으며, Fig. 3은 수치해석 영역을 나타낸 그림이다. Fig. 3(a)는 돌출부 개수가 가장 많은 설치 조건인 $e/H = 0.04$, $P/e = 6$, $W_p/e = 1$ 에 대한 Mesh 생성 후 해석 영역이며, Fig. 3(b)는 돌출부 개수가 가장 적은 설치 조건인 $e/H = 0.16$, $P/e = 20$, $W_p/e = 5$ 의 해석 영역을 나타내고 있다. Mesh는 돌출부 개수에 따라 정해지며 최소 31,870개에서 최대 2,155,755개까지 생성되었다. 또한 돌출부 설치 영역에 Mesh가 집중적으로 분포함을 확인하였다.

Fig. 3 Computational domain and mesh generation

Table 3은 공기 온도 300 K ($=26.85^{\circ}\text{C}$)에 대한 물성치를 나타냈다. 시뮬레이션 유동 조건에 있어서 Reynolds 수는 선행 연구들을 참고하여 Reynolds 수의 범위를 2000 ~ 14000의 중간값인 8000으로 고정하였으며¹²⁻¹⁴⁾, 수력직경(D_h)은 입구 측 전면부 덕트의 폭 및 높이를 사용하면 식(1)에서 직접 계산할 수 있다. 또한 덕트로 유동하는 공기 유속은 식(2)를 속도에 대한 식으로 변형하면 식(3)과 같이 나타낼 수 있는데 이 식을 이용한 결과 수력직경은 0.09 m, 공기 유속은 1.41 m/s이다.

Table 3 Properties of working fluid (air)

Properties	Working fluid (air)
Specific heat [J/kg·K]	1006.3
Thermal conductivity [W/m·K]	0.026107
Density [kg/m ³]	1.1771
Dynamic viscosity [kg/m·s]	1.8531 e-05

$$D_h = \frac{4WH}{2(W+H)} \quad (1)$$

$$Re = \frac{\rho V D_h}{\mu} \quad (2)$$

$$V = \frac{\mu Re}{\rho D_h} \quad (3)$$

한편, 돌출부가 설치된 덕트를 지나는 공기 흐름은 압축성 유체에 대한 시간 독립적 연속방정식, 운동방정식, 그리고 에너지 방정식에 의해 결정된다. 연속방정식(Continuity equation)은 질량 보존의 법칙에 근거하였으며, 운동방정식(Momentum equation)은 정상 상태의 비압축성 유동 흐름을 설명하기 위해 Navier-Stokes 방정식을 사용하였다. 에너지 방정식(Energy equation)은 유입 공기가 출구로 이동하는 과정에서 공기의 온도 변화에 따른 열전달을 추정하는 데 사용하였다. 아래의 식(4)는 연속방정식, 식(5)는 운동방정식, 그리고 식(6)은 에너지 방정식을 나타낸다.¹⁵⁾

$$\frac{\delta(\rho u_j)}{\delta x_j} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\delta}{\delta x_j}(\rho u_i u_j) + \frac{\delta P}{\delta x_i} = \frac{\delta}{\delta x_j} \left[\mu \left(\frac{\delta u_i}{\delta x_j} + \frac{\delta u_j}{\delta x_i} \right) \right] + \frac{\delta}{\delta x_j} \left[\mu_t \left(\frac{\delta u_i}{\delta x_j} + \frac{\delta u_j}{\delta x_i} \right) \right] \quad (5)$$

$$\frac{\delta}{\delta x_i}(\rho u_j T) - \frac{\delta}{\delta x_j} \left[(\Gamma + \Gamma_t) \frac{\delta T}{\delta x_j} \right] = 0 \quad (6)$$

2.3 난류 모델 선정

본 연구에서 선정한 유동 조건이 난류 영역에 속하므로 전산해석 시 타당성을 검증하기 위해 돌출부가 설치되지 않은 smooth duct에 다양한 난류해석 모델을 선정한 후, 시뮬레이션 결과를 토대로 열전달 성능을 확인하였다. 난류 모델 선정하는 과정에서는 검증된 선행 연구를 참고하였으며^{16,17)}, 난류 모델의 타당성 검증을 위해서는 smooth duct에서의 열전달 성능을 나타내는 Dittus-Boelter 식의 결과 값과 비교하여 오차가 가장 적은 k-ε RNG & Enhanced wall treatment 난류 모델을 선정하였다. Fig. 4에 이들의 결과가 나타나 있다.

Fig. 4 Prediction of Nusselt number by various turbulent models

3. 결과 및 고찰

3.1 열전달 성능

본 연구에서는 태양광/열 집열기 하부 공기 덕트 내 돌출부 설치 조건에 따른 열전달 성능을 비교하기 위하여 무차원수인 Nusselt 수와 열전달률로 비교하였다. Nusselt 수는 CFD 해석 결과와 식(7)로부터 구할 수 있는데, 이때 공기층 열전달 계수(h_{air})를 계산할 때는 해석의 결과로부터 얻어진 전열부의 평균 열전달 계수 값을 사용하였고, 공기 측 열전도도(k_f)는 공기가 300 K (=26.85°C)일 때의 값을 사용하였다. 또한 열전달 성능 향상 정도를 확인하기 위하여 매끄러운 덕트(smooth duct)의 열전달 성능과 돌출부 설치 조건에 따른 열전달 성능을 다음 식(8)을 이용하여 비교하였다^{18,19}.

$$Nu = \frac{h_{air} D_h}{k_f} \quad (7)$$

$$Nu_s = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (8)$$

Fig. 5(a)는 설치 간격에 따른 열전달 성능을 나타낸 그래프이다. 돌출부 설치 조건에 대체로 유사한 열전달 성능을 보였으며 유속이 증가함에 따라 열전달 성능이 점차 증가함을 확인하였는데 Nusselt 수는 37.93에서 48.5의 범위 값을 보였다. 상대 높이(e/H) 및 상대 너비(W_p/e)가 증가할수록 열전달 성능이 향상됨을 확인할 수 있는데, 이는 상대 높이 증가(e/H) 공기 유동 시 난류가 형성되어 더 많은 열전달이 이루어졌기 때문으로 판단된다. 반면에 설치 간격(P/e)의 경우 상대 높이(e/H)가 낮은 0.04에서는 증가 추세를 보였지만, 상대 높이(e/H) 0.08 ~ 0.16 구간에서는 감소하는 경향을 보였다. 또한 설치 간격은 덕트 내 설치되는 돌출부 설치 개수에 반비례하므로 전열부 접촉 면적이 감소하여 열전달 성능이 오히려 감소하는 경향을 보였다.

Fig. 5 Comparison of heat transfer performance of air duct with various protrusion conditions

Fig. 5(b)는 smooth duct 대비 돌출부 설치에 따른 열전달 성능 향상 정도를 보여주고 있는데, 최소 1.4배에서 최대 1.8배까지 열전달 성능이 향상됨을 확인할 수 있었다. 설치 간격에 따른 열전달 향상 정도는 Nu 수 변화와 유사한 경향성을 보였다. 최종적으로 상대 높이(e/H) 및 상대 너비(W_p/e)가 증가할수록, 설치 간격(P/e)이 감소할수록 열전달 성능이 향상됨을 확인하였다.

3.2 압력강하

태양광/열 집열기에 부착된 공기 덕트에 비균일 단면을 갖는 돌출부를 설치하면 열전달 성능은 향상되지만, 유동 저항이 발생함에 따라 압력강하가 발생하여 이에 대한 추가적인 분석이 필요하다.

따라서 CFD 해석 결과로부터 덕트 입·출구 압력차에 관한 값들을 정리하면 Table 4에 나타낸 바와 같다. 표에서 상대 높이(e/H)가 낮을 때 압력강하 증감 정도는 비교적 작은 편이며, 상대 높이가 증가함에 따라 압력차는 점차 큰 폭으로 변화함을 확인할 수 있다. 압력차의 최고점과 최저점의 변화량을 비교하면 상대 높이(e/H) 0.04일 경우 10%, 0.08일 때 25%, 0.16일 때 58% 값을 보이며, 상대 높이(e/H) 증가에 따라 보다 큰 압력차가 발생함을 알 수 있다. 그러나 설치 간격(P/e)이나 돌출부 너비(W_p/e)에 의한 변화량은 미미하다.

Table 4 Effect of pressure drop with shape conditions of protrusion

e/H	P/e	W_p/e	ΔP	e/H	P/e	W_p/e	ΔP	e/H	P/e	W_p/e	ΔP
0.04	6	1	0.584	0.08	6	1	0.718	0.16	6	1	0.977
	6	2	0.576		6	2	0.714		6	2	0.949
	6	5	0.573		6	5	0.711		6	5	0.92
	10	1	0.58		10	1	0.683		10	1	0.842
	10	2	0.575		10	2	0.66		10	2	0.805
	10	5	0.563		10	5	0.652		10	5	0.777
	15	1	0.563		15	1	0.63		15	1	0.714
	15	2	0.55		15	2	0.607		15	2	0.691
	15	5	0.546		15	5	0.604		15	5	0.68
	20	1	0.549		20	1	0.595		20	1	0.648
	20	2	0.534		20	2	0.577		20	2	0.625
	20	5	0.53		20	5	0.574		20	5	0.617

이렇게 구해진 값들을 식(9)의 Darcy-Weisbach 식에 대입하면 마찰손실 계수를 계산할 수 있다. 그리고 열전달 성능과 마찬가지로 압력강하 증가의 정도를 판단할 필요가 있는데, 이를 위해서 식(10)의 Blasius 식을 이용하여 smooth duct와 입구 및 출구의 압력강하 정도를 비교하였다.

$$f = \Delta P \frac{D_h}{L} \frac{1}{2\rho V_{avg}^2} \quad (9)$$

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

Fig. 6(a)는 설치 간격(P/e)에 따른 마찰계수와 관계의 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯이 설치 조건에 따라 열전달 성능과 유사한 경향성을 보였으며, 마찰계수는 최소 0.0208에서 최대 0.0383의 값을 보였다. 상대 높이(e/H)의 증가로 마찰계수도 증가하였는데, 이는 공기 유동 시 저항 면적이 증가했기 때문으로 판단된다. 게다가 설치 간격(P/e)의 증가로 돌출부 개수가 감소하여 유동 저항 횡수가 그만큼 적어지므로 마찰계수가 감소하는 경향을 보인다. 그리고 상대 너비(W_p/e)가 증가할수록 마찰계수가 감소하는 경향을 보였는데, 이는 돌출부의 횡렬의 총 단면적은 같지만 각 돌출부 사이를 빠져나가는 유동 가능 면적이 감소하여 국부적인 유동 저항이 더 많이 발생하였기 때문으로 생각된다.

Fig. 6(b)는 돌출부 설치 조건에 따른 마찰계수의 증가 정도를 보여주는데, 최소 2.5배에서 최대 4.6배 증가하였다. 마찰계수의 증가 정도 또한 열전달 성능과 유사한 결과가 나타남을 확인할 수 있었다. 그 결과, 마찰계수의 경우 상대 높이(e/H) 및 상대 너비(W_p/e)가 증가할수록, 그리고 설치 간격이 줄어들수록 증가하는 경향을 보였다.

Fig. 6 Comparison of friction factor of air duct with various of the protrusion conditions

3.3 성능계수

본 연구에서 얻어진 결과를 중심으로 공기 덕트 내 돌출부 설치 조건에 따른 열전달 성능과 압력강하를 확인하였는데, 열전달 성능이 향상됨에 그만큼 따라 압력강하 증가도 수반됨을 알 수 있다. 따라서 열전달 성능과 압력강하를 모두 고려하기 위하여 Gee and Webb¹⁸⁾가 제시한 성능계수 식(11)을 이용하여 비교·분석하였다.

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

Fig. 7은 설치 간격(P/e)에 따른 성능계수(THPP) 그래프로, 최소 1.0배에서 최대 1.2배 값의 범위를 보였다. 돌출부 설치 조건에 따른 성능계수의 경우 상대 높이(e/H)가 높아짐에 따라 성능계수가 증가하였으나 점차 상승 폭이 감소하는 모습을 보였다. 이는 일정 높이까지는 열전달 성능 향상 정도가 더 높으나, 높이가 더 높을 때는 그 이후 더 큰 압력강하가 수반되어 성능계수가 감소한 것으로 생각한다. 또한 설치 간격(P/e)이 증가할수록 성능계수가 증가하는 경향을 보였다. 그러나 열전달 성능 및 마찰계수는 개별적으로 확인하였을 때 설치 간격 증가에 따라 감소하는 경향을 보였으나, 성능계수의 경우는 증가하는 경향을 보였다. 이는 설치 간격(P/e)에 따른 열전달 성능 향상이 마찰계수 증가보다 더 컸기 때문으로 사료된다. 그리고 상대 너비(W_p/e)가 증가할수록 열전달 성능 향상보다 더 큰 압력강하가 이루어져 성능계수가 감소한 것으로 확인되었다.

Fig. 7 Comparison of thermal hydraulic performance parameter of various protrusion conditions

위와 같은 결과로부터 성능계수가 가장 높은 설치 조건은 상대 높이 $e/H = 0.16$ ($e = 8$ mm), $P/e = 20$ ($P = 160$ mm), $W_p/e = 5$ ($W_p = 40$ mm)일 때 가장 높은 성능계수 값을 가졌다. 이는 공기 덕트 내에 돌출부를 설치 함으로써 열전달 성능 향상보다 더 큰 압력강하가 수반되었기 때문이라고 판단되기에, 향후 돌출부 설치 선정을 위한 추가적인 열전달 성능 및 압력강하에 대한 면밀한 조사 및 추가 연구가 필요할 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 태양광 발전 시 발생한 열의 회수가 가능한 공기식 PV/T 덕트 내 비균일 단면을 갖는 돌출부가 설치되었을 때, 돌출부 설치 조건에 따른 열전달 성능 및 압력강하, 그리고 성능계수를 통해 최대 열 회수가 가능한 최적 설치 조건을 확인하였으며 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- (1) 공기 덕트 내 설치되는 비균일 단면을 갖는 돌출부 설치 조건에 따라 smooth duct보다 최소 1.4배에서 최대 1.8배까지 향상될 수 있음을 확인하였고, 설치 조건에 따라 상대 높이(e/H)가 높을수록, 설치 간격(P/e)이 넓을수록, 상대 너비(W_p/e)가 클수록 열전달 성능이 향상됨을 알 수 있었다.
- (2) 돌출부 설치 조건에 따른 압력강하 정도를 비교하기 위해 마찰계수를 이용했을 때, 마찰계수가 최소 2.5배에서 최대 4.6배까지 증가하였고 설치 조건에 따른 압력강하 증감은 열전달 성능 향상과 유사한 경향성을 갖는 모습을 보였다.
- (3) 돌출부 설치에 따른 열전달 성능 향상 및 압력강하 정도를 동시에 고려하기 위해 성능계수(Thermal-hydraulic performance parameter)를 확인하였는데 설치 조건에 따라 최소 1.0배에서 1.2배의 값을 보였으며 높이가 높을수록, 설치 간격이 조밀할수록, 돌출부 너비가 클수록 성능계수가 증가함을 알 수 있다. 또한 최대 열 회수가 가능한 최적 설치 조건은 상대 높이(e/H)가 0.16, 설치 간격(P/e)이 20, 상대 너비(W_p/e)가 5일 때 가장 큰 성능계수 값을 가졌다.
- (4) 공기식 PV/T 덕트 내 돌출부 부착으로 기존 smooth duct보다 높은 성능을 가질 수 있음을 확인하였다. 그 결과 열전달 성능 향상에 따라 더 큰 압력강하를 수반하므로 설치 조건에 따른 열효율 및 상관관계에 관한 세밀한 연구가 필요한 것으로 판단된다. 실제 기상조건에서 실험을 통해 수치해석 결과와 비교 분석 등의 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2019년)에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

1. Heo, J. N, Shin, J. Y., Lee, D. H., and Son, Y. S., Numerical Study on the Pressure Drop and Heat Transfer Enhancement in a Flat-plate Solar Collector, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 37, No. 4, pp. 316-323, 2013.
2. Abhay L., Chandramohan V. P., and Raju V. R. K., Numerical Analysis on Solar Air Collector Provided with Artificial Square Shaped Roughness for Indirect Type Solar Dryer, Journal of Cleaner Production, Vol. 190, pp. 353-367, 2018.
3. Singh, I., Vardhan, S., Singh, S., and Singh, A., Experimental and CFD Analysis of Solar Air Heater Duct Roughened with Multiple Broken Transverse Ribs: A Comparative Study, Solar Energy, Vol. 188, pp. 519-532, 2019.

4. Kim, H. G. and Boo, J. H., Experimental Study on the Thermal Performance of a Domestic Solar Air Heater with Protruding Triangular Openings on the Absorber Plate, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 36, No. 2, pp. 41-51, 2016.
5. Son, Y. S., Study on the Heat Transfer Enhancement in a Flat Plate Solar Collector with Various Ribs, *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 22, No. 2, pp. 45-52, 2018.
6. Momin, A. M. E., Saini, J. S., and Solanki, S. C., Heat Transfer and Friction in Solar Air Heater Duct with V-Shaped Rib Roughness on Absorber Plate, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 3383-3396, 2002.
7. Jaurker, A. R., Saini, J. S., and Gandhi, B. K., Heat Transfer and Friction Characteristics of Rectangular Solar Air Heater Duct using Rib-grooved Artificial Roughness, *Solar Energy*, Vol. 80, pp. 895-907, 2006.
8. 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 PV/T Collector, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 39, No. 6, pp. 83-91, 2019.
9. Kim, S. M, Kim, J. H., and Kim, J. T., An Experimental Study on Thermal and Electrical Performance of an Air-type PV/T Collector, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 39, No. 2, pp. 23-33, 2019.
10. Choi, H. W. 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.
11. 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.
12. Prasad, B. N., Thermal Performance of Artificially Roughened Solar Air Collector, *Solar Energy*, Vol. 93, pp. 59-67, 2013.
13. Karwa, R., Solanki, S. C., and Saini, J. S., Thermo-hydraulic Performance of Solar Air Heaters Having Integral Chamfered Rib Roughness on Absorber Plate, *Energy*, Vol. 26, pp. 161-176, 2001.
14. Varun, R. P. Saini, and S. K. Singal, Investigation of Thermal Performance of Solar Air Heater Having Roughness Elements as a Combination of Inclined and Transverse Ribs on the Absorber Plate, *Renewable Energy*, Vol. 33, pp. 1398-1405, 2008.
15. Kumar, R., Goel, V., and Kumar, A., Investigation of Heat Transfer Augmentation and Friction Factor in Triangular Duct Solar Air Heater due to Forward Facing Chamfered Rectangular Ribs: A CFD based Analysis, *Renewable Energy*, Vol. 115, pp. 824-835, 2018.
16. Yadav A. S. and Bhagoria, J. L., 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.
17. 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.
18. 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.
19. Mahanand, Y. and Senapati, H. R., Thermo-hydraulic Performance Analysis of a Solar Air Heater (SAH) with Quarter-circular Ribs on The Absorber Plate A Comparative Study, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 161, 2021.