RESEARCH ARTICLE

공기식 태양광/열 집열기 내 반원 난류 촉진제 형상조건과 유동 조건에 따른 열전달 성능 평가

김준엽[1] · 김성빈[2] · 안병화[3] · 최휘웅[4] · 최광환[5†]

[1]부경대학교 냉동공조공학과 대학원, 석사과정
[2]부경대학교 냉동공조공학과 대학원, 박사과정
[3](주)야베스, 연구원
[4]부경대학교 산학협력단, 연구교수
[5]부경대학교 냉동공조공학과, 교수

Evaluation of Heat Transfer Performance Depending on Semicircular Turbulence Promoter Shape Conditions and Flow Conditions in the Air-Type PV/T Collector

Kim Junyeop[1] · Kim Seongbhin[2] · An Byunghwa[3] · Choi Hwiung[4] · Choi Kwanghwan[5†]

[1]MS Candidate, Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University
[2]Ph.D. Candidate, Depart of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University
[3]Researcher, Yabes Co., Ltd
[4]Research Professor, Industry-University Cooperation Foundation, Pukyong National University
[5]Professor, Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University

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

OPEN ACCESS

Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.42, No.3, pp.47-61, June 2022
https://doi.org/10.7836/kses.2022.42.3.047

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 1 April 2022

Revised: 22 April 2022

Accepted: 28 April 2022

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 have a lower heat recovery rate than liquid-type collectors. Therefore, in this study, semicircular turbulence promoters were attached to the back of the PV cell to improve the heat recovery rate. Based on computational fluid dynamics, the heat-transfer performance and pressure drop were evaluated by changing the Reynolds number (Re) and semicircular turbulence promoter shape conditions. The turbulence promoter shape conditions include the relative height and relative pitch of the turbulence promoter. In addition, the increasing ratio, which means an increase in height of the turbulence promoter in the direction of flowing air, the length of the turbulence promoter, and the distance between the turbulence promoters were considered as design parameters. Consequently, the heat transfer performance increased with a decrease in relative height of turbulence promoter, while the pressure drop increased with an increase in relative height of turbulence promoter. Also, both the heat transfer performance and pressure drop show better performance as the increasing ratio of turbulence promoter decreased. The thermos-hydraulic performance parameter considering both the heat transfer performance and pressure drop presented the maximum value of 1.92 for the relative height of 0.02, increasing ratio of 1.

Keywords: 공기식 PV/T 집열기(Air-type PV/T collector), 난류 촉진제(Turbulence promoter), 레이놀즈수(Reynolds number), 열전달 성능계수(Thermohydraulic performance parameter), CFD(Computational Fluid Dynamics)

기호 및 약어 설명

W : Duct Width [mm]

H : Duct Height [mm]

L : Duct Length [mm]

e : Height of Turbulence Promoter [mm]

P : Pitch of Turbulence Promoter [mm]

l : Length of Turbulence Promoter [mm]

D_h : Hydraulic Diameter [m]

V_a : Air Velocity [m/s]

I : Turbulence Intensity [%]

Nu : Nusselt Number [−]

Pr : Prandtl Number [−]

Re : Reynolds Number [−]

n : Number of Times [−]

f : Friction Factor [−]

h : Heat Transfer Coefficient [$W/m^2 \cdot K$]

k : Thermal Conductivity [W/m·K]

ΔP : Pressure Drop [Pa]

C_p : Specific Heat [J/kg·K]

그리스 기호 설명

α : Increase Ratio [−]

ρ : Density [kg/m^3]

μ : Dynamic Viscosity [kg/m·s]

하첨자 설명

s : Smooth Duct

a : Air

1. 서론

화석연료 사용의 증가는 대기 오염과 지구 온난화 등 환경문제를 불러왔다. 이에 전 세계적으로 녹색 성장과 탄소 중립이 대두되면서 신재생에너지가 환경문제에 대한 해결책으로 부상했다. 신재생에너지 기술 중에서 가장 주목받고 있는 에너지는 태양으로부터 직접 전기를 생산하는 태양광 발전이다. 태양광 발전은 진동 및 소음 발생이 없고, 오염 물질을 배출하지 않는 장점을 바탕으로 현재 빠르게 성장하고 있다. 그러나 기존 태양광 발전의 경우 PV 모듈 온도 상승으로 발전효율이 감소하게 된다. 따라서 이를 해결하기 위해 PV 모듈로 공기를 보내 발생 열을 회수하고 나아가 회수된 열을 여름철 재생 열원 및 겨울철 난방 열원으로 활용할 수 있는 공기식 태양광/열(PV/T) 발전에 관한 연구가 진행되었다. 이러한 공기식 PV/T는 저렴한 비용, 낮은 유지 보수, 단순한 디자인 등의 강점으로 액체식 PV/T보다 많이 사용되지만, 유동 공기와 PV 모듈 간 대류 열전달 속도가 느리고 공기의 열용량 또한 작아 열효율이 낮다는 단점이 있다. 이는 완전 난류 유동을 만들고 적절한 압력강하를 통해 열손실을 최소화하면 개선될 수 있다. 공기식 PV/T의 열효율을 높이기 위해 PV 모듈 뒷면에 유동 공기 방향으로 거칠기를 주거나 난류 촉진제를 설치하는 등의 상당수 연구 논문이 발표되었다.

Kim et al.[1] 공기식 PV/T 내 난류 촉진제가 설치되었을 때 난류 촉진제 형상조건과 유동 조건을 변형하면서 열전달 및 압력강하 성능을 평가하였다. 그 결과 유동 속도가 감소할수록, 형상은 반원형, 삼각형, 사각형 순으로 증감비는 1.1, 1.2, 1.3 순으로 높은 성능을 가졌다. Choi[2]의 경우 삼각형 난류 촉진제가 공기 채널 하단에 설치된 모델에 대해 시뮬레이션을 하였고, 삼각형 난류 촉진제의 높이와 길이가 길수록, 공기 유동이 느릴수록 성능이 높았다. 또한, 난류 촉진제 사이의 간격은 150 mm일 때 최고 성능을 보였다. Kim et al.[3]은 새로운 형태의 공기식 PV/T를 제작하였으며, 실험을 통해 열효율 및 전기효율을 분석하였다. 제작된 공기식 PV/T의 열효율 및 전기효율은 각각 37.99%, 16.21%로 입구 유량이 100 m^3/h일 때 최대 성능임을 확인하였다. Yu et al.[4]은 타공 베플판이 적용된 새로운 형태의 공기식 PV/T를 제작하여 열효율 및 전기효율을 분석하였다. 입구 유량이 100 m^3/h일 때, 열효율 및 전기효율은 각각 34.7%, 16.1%, 입구 유량이 200 m^3/h일 때, 열효율 및 전기효율은 각각 49.9%, 16.39%의 결과를 보였다. Choi et al.[5]은 사각형 난류 촉진제가 공기 채널 내 설치되었을 때 난류 촉진제 설치 조건에 따른 열전달 및 압력강하 성능을 확인하였다. 그 결과 열전달 성능의 경우 난류 촉진제를 설치하지 않은 모델에 비해 최소 1.2배에서 최대 3.32배까지 향상되었으나, 압력강하도 또한 최소 2.8배에서 최대 180배까지 그 값이 증가하였다. Moon et al.[6]은 공기식 PV/T 내 비균일 단면을 갖는 난류 촉진제가 설치되었을 때 난류 촉진제 설치 조건을 변형하면서 열전달 및 압력강하 성능을 평가하였다. 그 결과 난류 촉진제 너비가 클수록, 높이가 높을수록, 설치 간격이 좁을수록 높은 성능을 가졌다. Kumar et al.[7]은 공기식 PV/T 내 핀이 설치되었을 때와 핀이 설치되지 않았을 때의 열 및 전기 성능을 전산 열유체 해석을 통해 분석하였으며 핀이 설치되었을 때 열효율 및 전기효율이 높음을 확인하였다. Baissi et al.[8]은 휘어진 델타 모양의 베플과 다른 모양의 베플이 공기 채널 내 설치되었을 때 전열 성능을 비교하였고, 휘어진 델타 모양의 베플이 설치되었을 때 열적 성능이 높음을 보였다. Gupta et al.[9]은 점점 가늘어지는 직사각형 난류 촉진제를 공기식 PV/T 내에 설치해 CFD를

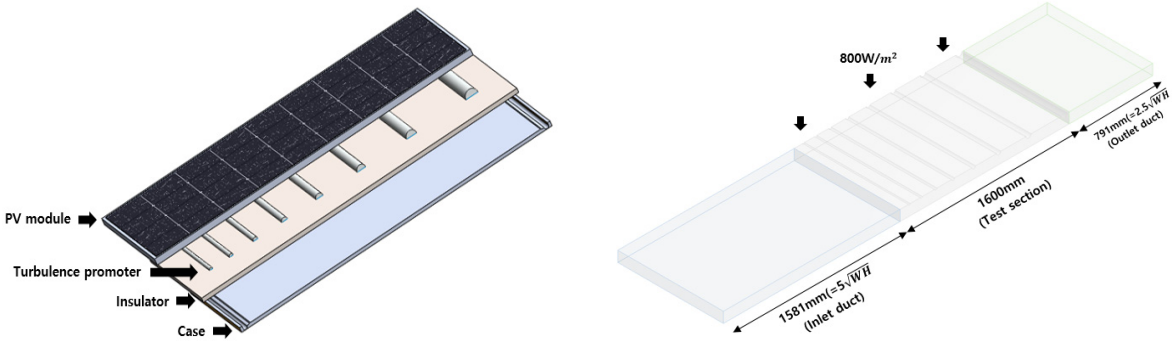
사용하여 열전달 및 압력강하 성능을 평가하였다. 그 결과 Re=12000, P/e=1.6과 1.7일 때 가장 높은 성능을 확인하였다. Singh et al.[10]은 공기식 PV/T 내 여러 형상의 난류 촉진제를 부착하여 CFD를 이용해 전열 성능을 평가하였다. Heo et al.[11]은 공기식 PV/T 내 다양한 난류 촉진제 및 베플, 홈의 설치 각도에 따른 열전달 성능 및 압력강하를 분석하였고, 홈이 60° 로 설치되었을 때 가장 높은 성능을 보였다.

위와 같은 선행 연구들을 통해 공기식 PV/T에 난류 촉진제 등을 적용하면 열전달 성능이 향상됨을 확인할 수 있다. 이는 난류 촉진제가 경계층을 파괴하면서 발생한 주유동부와 경계층부 유동 유체 혼합이 유동 공기와 PV 모듈 사이의 열전달 계수 값을 증가시키기 때문이다. 그러나 동시에 압력강하가 발생할 수 있으므로 이를 방지하기 위해 공기식 PV/T 내부의 공기 유동이 원활하도록 난류 촉진제를 부착할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 사전연구에서 삼각형, 사각형 난류 촉진제보다 열전달 성능 향상과 압력강하 증가를 동시에 고려한 성능계수(THPP)가 좀 더 우수하게 나타난 반원 난류 촉진제 대상으로 해석을 수행하였다[1]. 해석은 전산 해석 기법을 통해 수행되었고, 공기 채널 내 유동 조건 및 반원 난류 촉진제 형상조건에 따른 열전달 및 압력강하 성능을 평가하였으며, 가장 높은 성능을 가지는 반원 난류 촉진제 형상을 찾는 데 그 목적을 두었다.

2. 시뮬레이션 모델 및 방법

2.1 시뮬레이션 모델

Fig. 1(a)는 반원 난류 촉진제가 부착된 공기식 PV/T를 도식적으로 나타내었다. 반원 난류 촉진제는 PV 모듈 밑에 설치하였으며 공기 유동부 아래는 단열재가 설치되어있다. 해석은 해당 공기식 PV/T의 유동장에 대해 수행하였고, Fig. 1(b)에는 수치해석을 위해 모델링된 유동장을 나타내었다. 해석은 Ansys Fluent 17.2를 사용하여 진행하였으며, 3D 모델을 대상으로 시뮬레이션 되었다.



(a) Schematic view (b) Simulation model

Fig. 1 Schematic view and simulation model of air-type PV/T

공기식 PV/T 시뮬레이션 모델의 치수는 Fig. 1(b)와 같이 길이(L) 1600 mm, 높이(H) 100 mm, 너비(W) 1000 mm로 고정하였다. 또한, ASHRAE Standard 93-1977[12]을 참고하여 입구 측 완전 발달 유동 형성과 출구 측 후류 영향을 배제하기 위해 시뮬레이션 모델 앞뒤로 입·출구 덕트를 생성하였다. 입·출구 덕트의 길이는 기준에 나타난 최소 덕트 길이 $5\sqrt{WH}$, $2.5\sqrt{WH}$에 맞춰 1581 mm, 791 mm로 설계하였다. 입구 공기 온도는 300 K이며 Table 1에는 해당 온도에서의 공기 물성치를 나타내었다.

Table 1 Air properties

Parameter	Value
Density [kg/m^3]	1.1771
Dynamic viscosity [kg/m·s]	1.8531 e-05
Specific heat [J/kg·K]	1006.3
Thermal conductivity [W/m·K]	2.6107 e-02
Prandtl number [-]	0.7143

2.2 시뮬레이션 경계조건

본 연구에서는 선행 연구를 참고하여[13] 일정 열 유속조건인 800W/m^{2}를 PV 모듈 표면에 적용하였다. Hydraulic diameter (D_h)는 식(1)을 사용해 0.1818의 값을 얻었다. 공기식 PV/T 시뮬레이션 모델을 제외한 입·출구 덕트에는 단열조건을 주었고, 출구 측 압력은 대기압 101.325 Pa로 고정하였다. 입구 측 난류 강도는 식(2)에 의해 얻어지며 Re=3000, 8000, 13000, 18000에 따라 각각 5.8814, 5.2028, 4.8964, 4.7012의 값을 가진다. 입구 측 공기 유속은 식(3)에 의해 얻어지며 Re=3000, 8000, 13000, 18000에 따라 각각 0.2598, 0.6927, 1.1256, 1.5585의 값을 가진다. 유동 조건은 종래 연구들을 바탕으로[14] 설정하였고, 모든 고체 표면은 No Slip Condition으로 설정하였다. Table 2는 시뮬레이션 경계조건을 나타내었다.

Table 2 Boundary conditions

Parameter	Value
Reynolds number [-]	3000, 8000, 13000, 18000
Inlet velocity [m/s]	0.2598, 0.6927, 1.1256, 1.5585
Turbulence intensity [%]	5.8814, 5.2028, 4.8964, 4.7012
Heat flux [w/m^2]	800
Hydraulic diameter [m]	0.1818
Outlet side pressure [Pa]	101325

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

$$V = \frac{\mu Re}{\rho D_h} \tag{2}$$

$$I = 0.16 Re^{-0.125} \tag{3}$$

2.3 지배방정식

반원 난류 촉진제가 부착된 공기식 PV/T 시뮬레이션 모델 내 정상상태 비압축성 난류 유동은 연속방정식(4), 운동방정식(5), 에너지방정식(6)에 의해[15] 지배된다. 또한, 정상상태 비압축성 난류 유동 모델 해석을 위해 Transport equation for the Realizable k-ε model(7)이 사용된다.

Continuity equation

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

Momentum equation

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

Energy equation

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

Transport equation for the Realizable k-ε model

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

여기서 G_k는 평균 속도 기울기에 의한 난류 운동 에너지 생산, G_b는 부력에 의한 난류 운동 에너지 생산, Y_M은 전체 소실률에 대한 변동 팽창 비압축성 난류의 기여, S_k는 사용자가 정의한 소스텀을 말한다.

2.4 난류 모델선정 및 타당성 검증

난류 모델선정 및 타당성 검증을 위해 난류 촉진제가 없는 공기 유동 채널을 가진 5개의 난류 모델에 의해 예측된 Nu과 식(8)의 Dittus-Boelter 실험식에 의해 계산된 Nu_s를 비교하였다. Nu는 시뮬레이션 결과와 식(9)로

부터 얻을 수 있는데 공기의 대류 열전달 계수(h_a)는 시뮬레이션을 통해 구했고, 공기의 열전도도 (k_a)는 Table 1을 참고하였다.

$$Nu_s = 0.023 Re^{0.8} \mathrm{Pr}^{0.4} \tag{8}$$

$$Nu = \frac{D_h h_a}{k_a} \tag{9}$$

오차율을 확인하기 위해 k-ω standard, k-ε Realizable & standard wall treatment, k-ε Realizable & enhanced wall treatment, k-ε Rng & standard wall treatment, k-ε Rng & enhanced wall treatment를 사용하여 얻은 Nu 값과 Dittus-Boelter 실험식을 Fig. 2에 나타내었다. 그 결과 평균 오차율 6.8%로 5개의 모델 중 오차가 가장 작은 k-ε Realizable & standard wall treatment를 난류 모델로 선정했다.

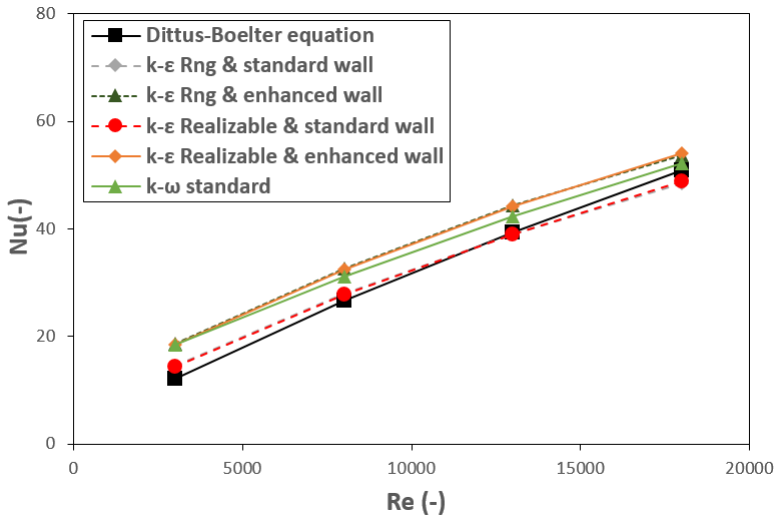
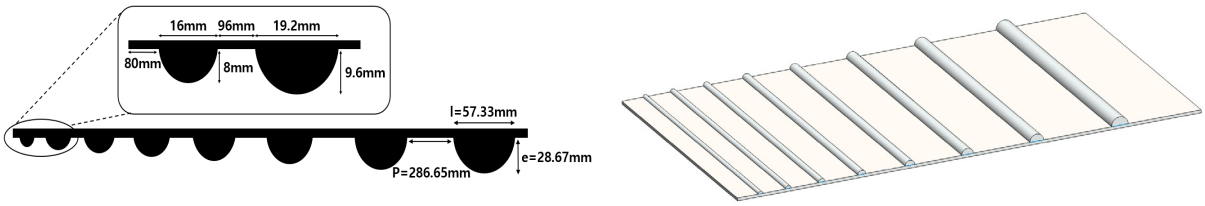


Fig. 2 Comparison of Nu predicted by five different turbulence models with Dittus-Boelter equation

2.5 난류 촉진제 형상조건 및 mesh 생성

Table 3은 반원 난류 촉진제 형상조건을 나타내었고, 상대 난류 촉진제 설치 높이(e/H) 3가지, 상대 난류 촉진제 설치 간격(P/e) 3가지, 증가비(α) 3가지로 총 27가지의 형상조건에 대한 시뮬레이션을 진행하였다. 여기서 α란 난류 촉진제 1열에서부터 끝 열까지 난류 촉진제의 길이(l), 높이(e), 간격(P)을 이전 열을 기준으로 n배 증가시키는 개념이다. Fig. 3(a)는 e/H=0.08, P/e=10, α=1.2일 때 반원 난류 촉진제 형상의 옆면을 시각화하여 표현하였다. α=1.2를 적용하면 Fig. 3(a)에서 확인할 수 있듯 반원 난류 촉진제 1열의 e=8 mm, 2열의 e는 바로

이전 열인 1열을 기준으로 9.6 mm가 된다. 또한, 1열의 P=80 mm, l=16 mm에 α=1.2를 적용하면 2열의 P=96 mm, l=19.2 mm가 된다. 이는 난류 촉진제 끝 열까지 적용되며, 끝 열의 난류 촉진제 e=28.67 mm, l=57.33, P=286.65 mm의 값을 보였다. 공기식 PVT 시뮬레이션 모델에 설치되는 반원 난류 촉진제의 개수는 난류 촉진제 형상조건에 따라 달라지며, e/H=8, P/e=20, α=1.2일 때 최소 5개에서 e/H=2, P/e=10, α=1일 때 최대 66개까지 설치된다. Fig. 3(b)는 e/H=0.08, P/e=10, α=1.2일 때 반원 난류 촉진제 형상을 선정해 도식화하여 나타내었으며 8개의 반원 난류 촉진제가 설치되었다.



(a) Side view (b) Schematic view

Fig. 3 Side and schematic view of turbulence promoters (e/H=8, P/e=10, α=1.2)

Table 3 Turbulence promoter shape conditions

Parameter	Value
e/H [-]	0.02, 0.04, 0.08
P/e [-]	10, 15, 20
α [-]	1, 1.1, 1.2

Mesh 생성은 시뮬레이션의 수렴률과 정확도에 직접적인 영향을 미치므로 정밀한 설정이 요구된다. Mesh 설정에서 Sizing-Size Function은 Proximity and Curvature, Max Face Size는 5 mm, Inflation-Maximum Layers는 5, Growth Rate는 1.2를 선택하였다. 이를 통해 Fig. 4에서 곡면부와 전열 부에 집중하여 mesh가 생성된 것을 확인할 수 있다. 총 mesh 수는 반원 난류 촉진제 형상조건에 따라 최소 60만 개 ~ 최대 150만 개까지 생성되었다. Table 4는 Re=18000, e/H=0.04, P/e=20, α = 1.1인 조건에서 Adaptation Growth를 사용하였을 때 변화된 셀의 수와 Nu 값을 나타내었다. Adaptation Growth를 사용하여 Temperature, Pressure, Velocity Magnitude, Wall Shear Stress, Turbulence Intensity 순으로 mesh 수를 증가시켰고, 이를 5회 반복하여 시뮬레이션하였다. 과정을 통해 Nu 값의 수렴률이 높아져 시뮬레이션 결과의 정확도를 높일 수 있었다.

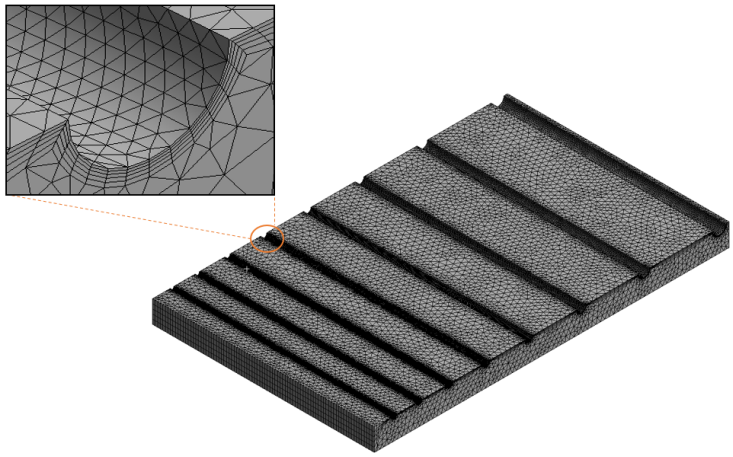


Fig. 4 Mesh generation of PV/T simulation model with turbulence promoters

Table 4 Changes in the number of cells and Nusselt number using Adaptation Growth

	Number of cells	Nusselt number
No Adaptation	400,127	58.15
Temperature	558,376	60.83
Pressure	572,554	61.38
Velocity Magnitude	612,497	61.95
Wall Shear Stress	1,146,248	62.07
Turbulence Intensity	1,376,357	61.99

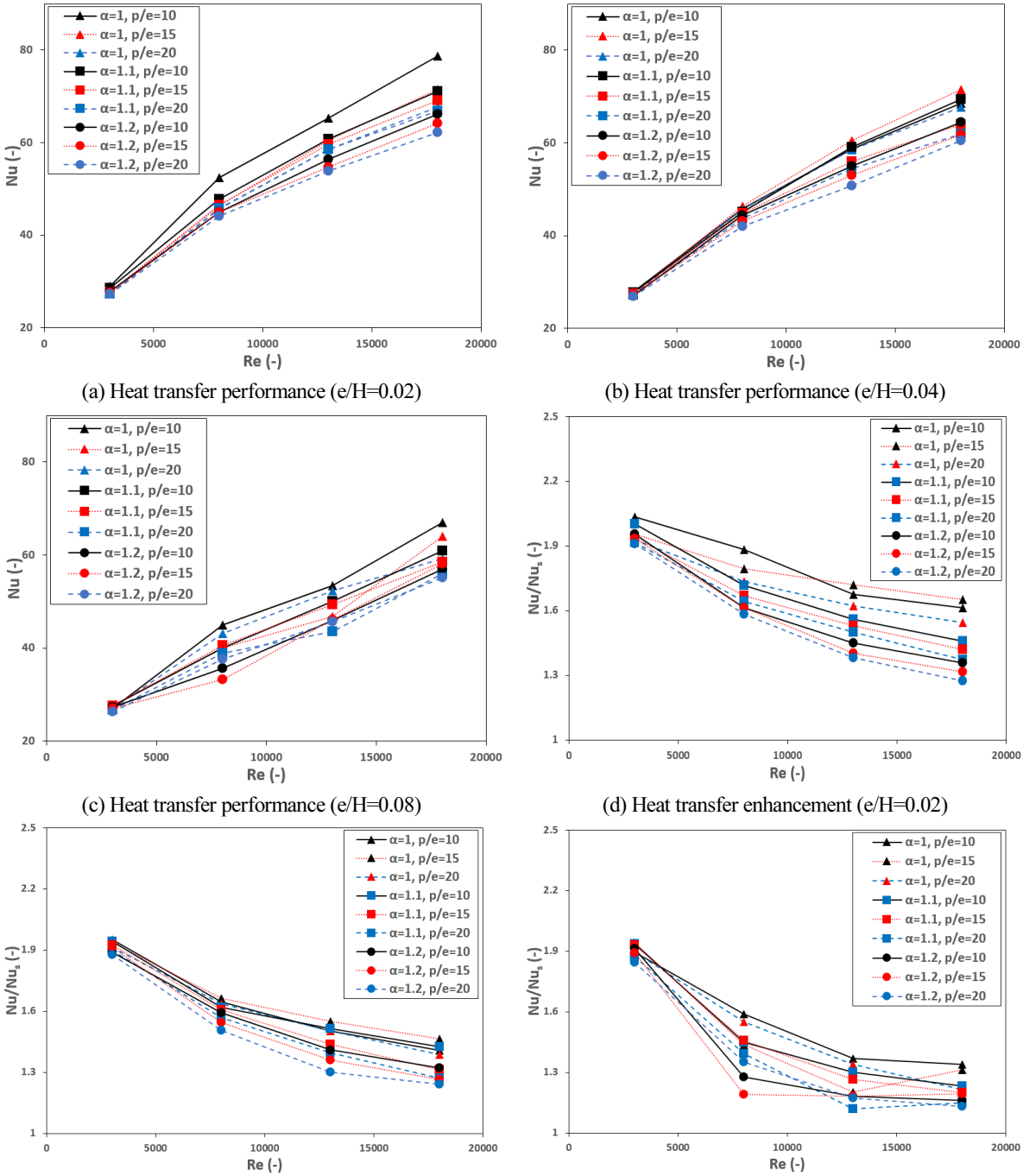
3. 결과 및 고찰

3.1 열전달 성능

본 연구에서는 공기식 PV/T 시뮬레이션 모델 내 유동 조건과 반원 난류 촉진제 형상조건에 따른 열전달 성능을 평가하기 위해 Nu를 이용하였다. Fig. 5(a), (b), (c)는 각각 e/H=0.02, e/H=0.04, e/H=0.08일 때 열전달 성능을 나타낸 그래프이다. (a), (b), (c)에서 모두 공기 유동이 빠를수록 열전달 성능이 증가함을 확인할 수 있다. 다른 조건이 같을 때 e/H=0.02, 0.04, 0.08 순으로 α = 1, 1.1, 1.2 순으로 열전달 성능이 큼을 알 수 있는데, 이는 난류 촉진제 길이가 짧을수록 국부적인 속도 증가영역에서 난류 촉진제에 의한 마찰을 덜 받기 때문으로 판단된다. 또한, 다른 조건이 동일할 때 P/e=10, 15, 20 순으로 열전달 성능이 큰 경향성을 보였는데, 이는 반원 난류 촉진제 설치 간격이 조밀할수록 난류 촉진제 설치 개수가 늘어나면서 속도 증가 구간이 많아졌기 때문으로 생각된다. Re=3000, e/H=0.08, P/e=20, α=1.2일 때 최소 Nu=26.37에서 Re=18000, e/H=0.02, P/e=10, α=1일 때 최대 Nu=78.72의 값을 보였다.

Fig. 5(d), (e), (f)는 각각 e/H=0.02, e/H=0.04, e/H=0.08일 때 난류 촉진제가 없는 공기 유동 채널을 가진 난류 모델과 열전달 성능 비교를 통해 Nu/Nu_s를 계산하여 열전달 향상 정도를 나타내었다. 반원 난류 촉진제 형

상조건에 따른 열전달 향상 정도는 (a), (b), (c)의 열전달 성능을 나타낸 그래프와 유사한 경향성을 보였으나, 유동 조건에 따른 열전달 향상 정도는 유속이 증가할수록 반대되는 경향성을 보였다. 열전달 향상 정도는 난류 촉진제가 없는 모델과 비교해 최소 1.13배에서 최대 2.04배까지 증가했다. 최종적으로 공기 유동이 빠를수록, e/H=0.02, 0.04, 0.08 순으로 α = 1, 1.1, 1.2 순으로 P/e=10, 15, 20 순으로 열전달 성능이 큼을 확인하였다.



(a) Heat transfer performance (e/H=0.02)

(b) Heat transfer performance (e/H=0.04)

(c) Heat transfer performance (e/H=0.08)

(d) Heat transfer enhancement (e/H=0.02)

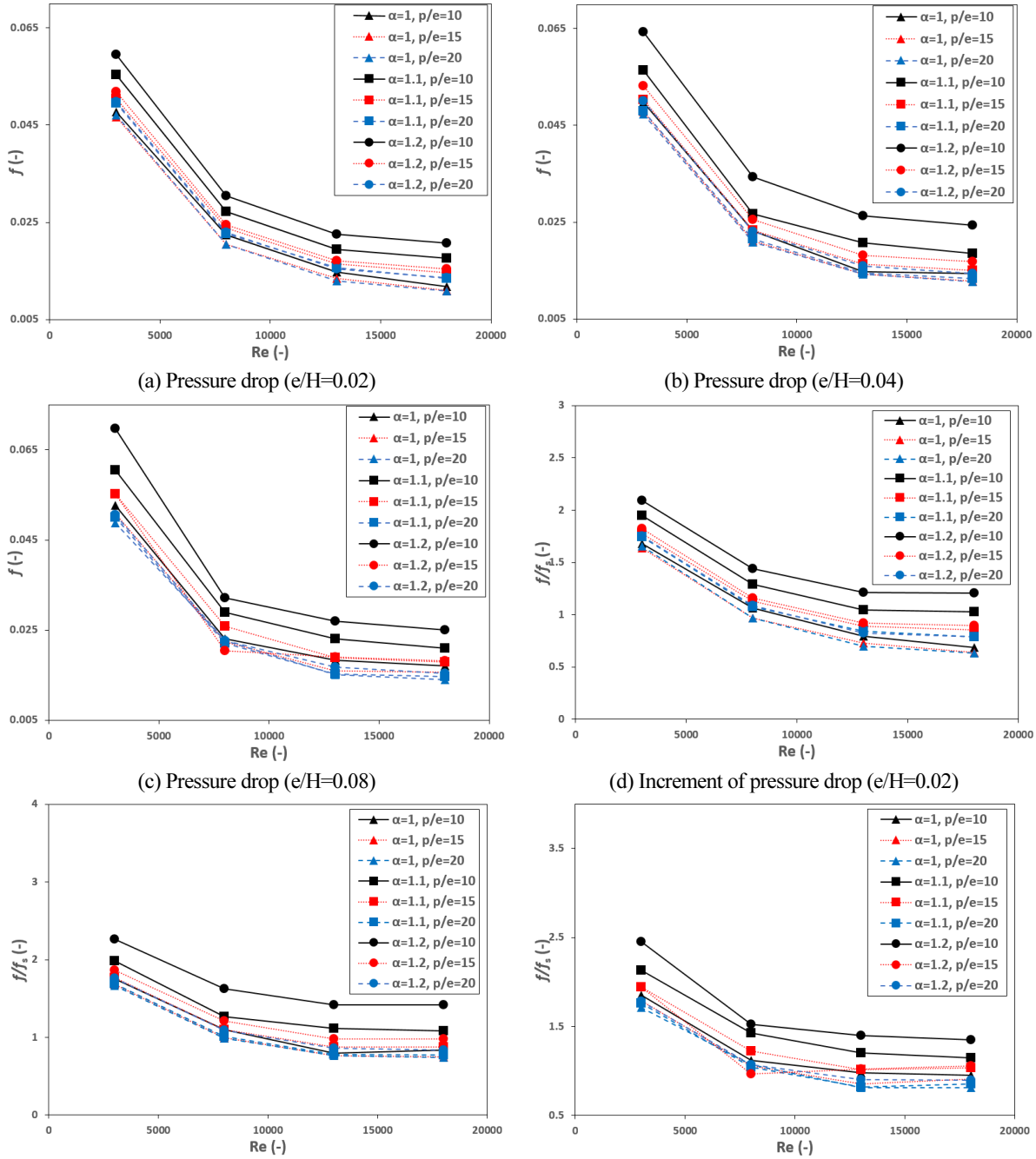
(e) Heat transfer enhancement (e/H=0.04)

(f) Heat transfer enhancement (e/H=0.08)

Fig. 5 Heat transfer performance depending on flow conditions and shape conditions of turbulence promoters

3.2 압력강하

공기식 PV/T 시뮬레이션 모델 내 반원 난류 촉진제를 설치하면 열전달 성능은 향상되지만, 이에 따라 유동 저항이 생겨 압력강하가 발생하므로 추가적인 분석이 필요하다. 따라서 압력강하를 확인하기 위해 마찰계수(f)를 이용하였다. f는 시뮬레이션 결과와 식(10)으로부터 얻을 수 있는데 압력강하(⊿P)는 시뮬레이션을 통해 구했고, 나머지는 Tables 1, 2를 참고하였다.



(a) Pressure drop (e/H=0.02)

(b) Pressure drop (e/H=0.04)

(c) Pressure drop (e/H=0.08)

(d) Increment of pressure drop (e/H=0.02)

(e) Increment of pressure drop (e/H=0.04)

(f) Increment of pressure drop (e/H=0.08)

Fig. 6 Pressure drop depending on flow conditions and shape conditions of turbulence promoters

$$f = \Delta P \frac{D_h}{L} \frac{1}{2\rho V^2} \tag{10}$$

Fig. 6(a), (b), (c)는 각각 e/H=0.02, e/H=0.04, e/H=0.08일 때 압력강하를 나타낸 그래프이다. (a), (b), (c)에서 모두 공기 유동이 빠를수록 압력강하가 감소함을 확인할 수 있다. 다른 조건이 같을 때 e/H=0.02, 0.04, 0.08 순으로 α = 1, 1.1, 1.2 순으로 압력강하가 작음을 알 수 있는데, 이는 난류 촉진제 높이와 면적이 작을수록 와류 영역이 감소함에 따라 난류 촉진제 상부로 주 유동이 형성될 뿐 아니라 유동 공기에 저항으로 작용하는 부분이 줄어들었기 때문으로 판단된다. 또한, 다른 조건이 동일할 때 P/e=10, 15, 20 순으로 압력강하가 큰 경향성을 보였는데, 이는 반원 난류 촉진제 설치 간격이 조밀할수록 난류 촉진제 설치 개수가 늘어나면서 압력강하가 증가했기 때문으로 생각된다. Re=18000, e/H=0.02, P/e=20, α =1일 때 최소 f=0.0109에서 Re=3000, e/H=0.08, P/e=10, α =1.2일 때 최대 f=0.0697의 값을 보였다.

Fig. 6(d), (e), (f)는 각각 e/H=0.02, e/H=0.04, e/H=0.08일 때 난류 촉진제가 없는 공기 유동 채널을 가진 난류 모델과 압력강하 비교를 통해 f/f_s를 계산하여 압력강하 증가 정도를 나타내었다. f_s는 식(11)의 Blasius 식으로부터 얻을 수 있다. 반원 난류 촉진제 형상조건과 유동 조건에 따른 압력강하 증가 정도는 (a), (b), (c)의 압력강하를 나타낸 그래프와 유사한 경향성을 보였다. 압력강하 증가 정도는 난류 촉진제가 없는 모델과 비교해 최소 0.63배에서 최대 2.45배까지 증가했다. 최종적으로 공기 유동이 빠를수록, e/H=0.02, 0.04, 0.08 순으로 α = 1, 1.1, 1.2 순으로 P/e=20, 15, 10 순으로 압력강하가 작음을 확인하였다.

$$f_s = 0.0791 Re^{-0.25} \tag{11}$$

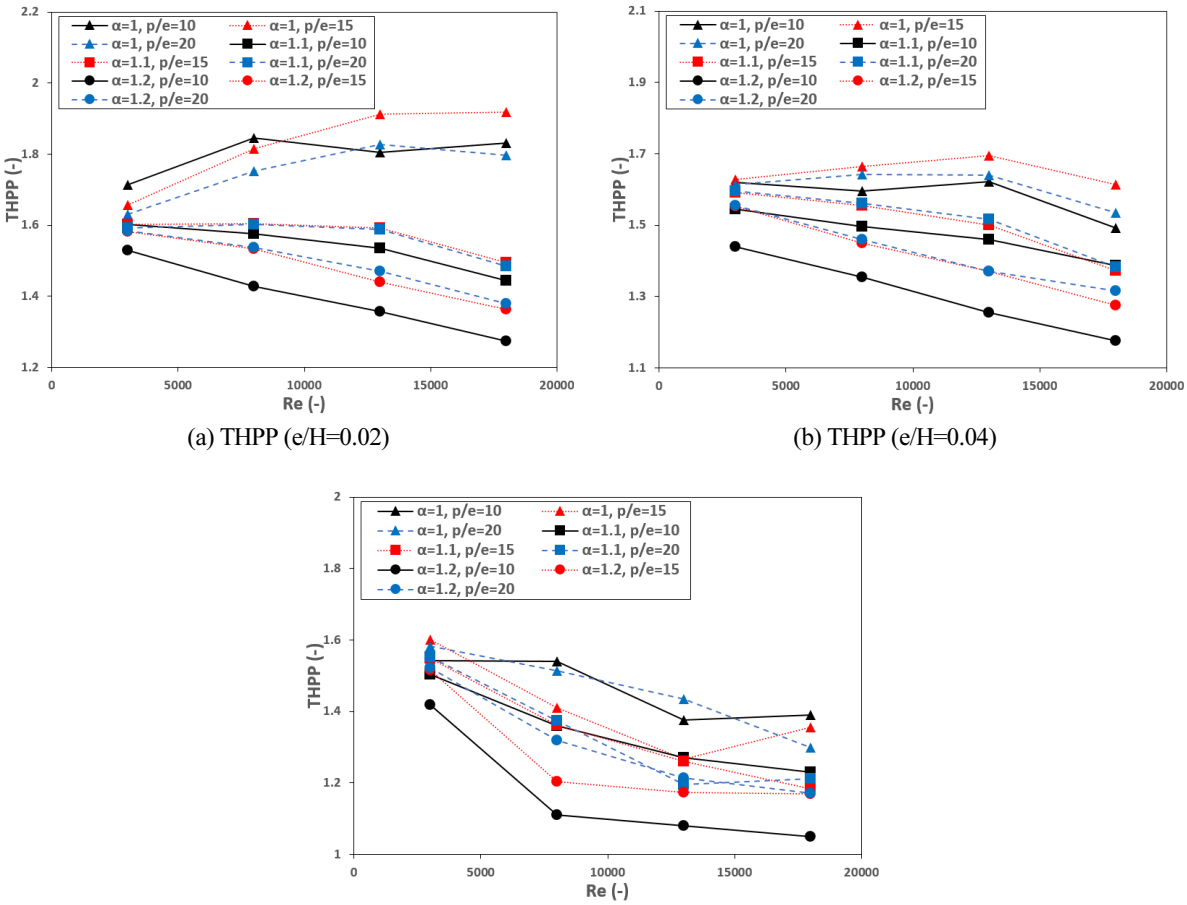
3.3 성능계수

위의 결과들로부터 공기식 PV/T 시뮬레이션 모델 내 반원 난류 촉진제 설치로 인한 열전달 성능 향상에 압력강하 증가가 수반됨을 확인하였다. 따라서 반원 난류 촉진제 설치에 따른 열전달 성능 향상과 압력강하 증가를 동시에 고려할 필요가 있으며, 이에 본 연구에서는 Webb and Gee[16]가 제시한 성능계수(THPP) 식(12)를 사용하였다.

$$THPP = \frac{Nu/Nu_s}{(f/f_s)^{1/3}} \tag{12}$$

Fig. 7(a), (b), (c)는 각각 e/H=0.02, e/H=0.04, e/H=0.08일 때 THPP를 나타낸 그래프이다. (a), (b), (c)에서 모두 공기 유동이 빠를수록 THPP가 증가하는 경향성을 보였다. 다른 조건이 같을 때 e/H=0.02, 0.04, 0.08 순으로 THPP가 높음을 알 수 있는데, 이는 난류 촉진제 높이와 면적이 작을수록 국부적인 속도 증가 시 난류 촉

진제에 의한 영향을 덜 받아 열전달 성능이 커질 뿐 아니라 유동 공기에 저항으로 작용하는 부분이 줄어들어 압력강하가 감소하기 때문으로 판단된다. 또한, 다른 조건이 동일할 때 α = 1, 1.1, 1.2 순으로 THPP가 큼을 알 수 있는데, 이는 α가 커질수록 와류 영역이 증가해 압력강하가 발생하고 이로 인해 난류 촉진제 상부로 주 유동이 형성되지 못하면서 열전달 성능이 감소했기 때문으로 생각된다. 다른 조건이 같을 때 P/e에 따른 THPP는 경향성이 드러나지 않았는데, 이는 반원 난류 촉진제 설치 간격이 조밀할수록 난류 촉진제 설치 개수가 늘어나면서 속도 증가 구간이 많아져 열전달 성능이 커지나, 압력강하 또한 증가했기 때문으로 보인다. Re=18000, e/H=0.08, P/e=10, α=1.2일 때 최소 THPP=1.05에서 Re=18000, e/H=0.02, P/e=15, α=1일 때 최대 THPP=1.92의 값을 보였다. 최종적으로 공기 유동이 빠를수록, e/H=0.02, 0.04, 0.08 순으로 α = 1, 1.1, 1.2 순으로 THPP가 높음을 확인하였다. 위와 같은 결과로부터 가장 높은 성능을 가지는 반원 난류 촉진제 형상조건은 e/H=0.02, α = 1임을 알 수 있다.



(a) THPP (e/H=0.02)

(b) THPP (e/H=0.04)

(c) THPP (e/H=0.08)

Fig. 7 THPP depending on flow conditions and shape conditions of turbulence promoters

4. 결 론

본 연구에서는 공기식 PV/T 시뮬레이션 모델 내 반원 난류 촉진제를 설치하여 유동 조건 및 반원 난류 촉진제 형상조건에 따른 열전달 및 압력강하 성능을 평가해 가장 높은 성능을 가지는 반원 난류 촉진제 형상조건을 확인하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 공기식 PV/T 시뮬레이션 모델 내 유동 조건과 반원 난류 촉진제 형상조건에 따른 열전달 성능을 평가하기 위해 Nu를 이용하였고, Re=3000, e/H=0.08, P/e=20, α=1.2일 때 최소 Nu=26.37에서 Re=18000, e/H=0.02, P/e=10, α=1일 때 최대 Nu=78.72의 값을 보였다. 공기 유동이 빠를수록, e/H=0.02, 0.04, 0.08 순으로 α=1, 1.1, 1.2 순으로 P/e=10, 15, 20 순으로 열전달 성능이 큼을 확인하였다.

(2) 공기식 PV/T 시뮬레이션 모델 내 반원 난류 촉진제를 설치하면 열전달 성능은 향상되지만, 이에 따라 유동 저항이 생겨 압력강하가 발생하므로 이를 확인하기 위해 마찰계수(f)를 이용하였고, Re=18000, e/H=0.02, P/e=20, α=1일 때 최소 f=0.0109에서 Re=3000, e/H=0.08, P/e=10, α=1.2일 때 최대 f=0.0697의 값을 보였다. 공기 유동이 빠를수록, e/H=0.02, 0.04, 0.08 순으로 α=1, 1.1, 1.2 순으로 P/e=20, 15, 10 순으로 압력강하가 작음을 확인하였다.

(3) 공기식 PV/T 시뮬레이션 모델 내 반원 난류 촉진제 설치에 따른 열전달 성능 향상과 압력강하 증가를 동시에 고려하기 위해 THPP를 이용하였고, Re=18000, e/H=0.08, P/e=10, α=1.2일 때 최소 THPP=1.05에서 Re=18000, e/H=0.02, P/e=15, α=1일 때 최대 THPP=1.92의 값을 보였다. 공기 유동이 빠를수록, e/H=0.02, 0.04, 0.08 순으로 α=1, 1.1, 1.2 순으로 THPP가 높음을 확인하였다.

(4) 위와 같은 결과로부터 가장 높은 성능을 가지는 반원 난류 촉진제 형상조건은 e/H=0.02, α=1임을 알 수 있다. 하지만, 추후 실제 실험에 적합한 최적 반원 난류 촉진제 형상을 얻기 위해서는 유동 조건 및 반원 난류 촉진제 형상조건에 대한 상관관계식 제시가 필요할 것으로 판단된다. 또한, 시뮬레이션 결과 타당성 검증을 위해 최적 반원 난류 촉진제 형상이 부착된 PV/T 실험과의 비교 분석 등의 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2021년)에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

1. Kim, S. B., Kim, J. Y., Kim, Y. B., An, B. H., Kim, Y. B., Son, C. H., and Choi, K. H., Heat Transfer Performance and Pressure Drop Analysis According to Shape Conditions of Turbulent Promoters and Flow Conditions in Air-Type PV/T Collectors, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 42, No. 1, pp. 87-101, 2022, https://doi.org/10.7836/kses.2022.42.1.087.

2. 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, 2020, https://doi.org/10.3390/en13051099.
3. 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, https://doi.org/10.7836/kses.2019.39.2.023.
4. 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, https://doi.org/10.7836/kses.2021.41.1.025
5. Choi, H. W., Kim, Y. B., Son, C. H., Yoon, J. I., and Choi, K. H., Research on the Heat Transfer and Pressure Drop by Installation Conditions of Rectangular Obstacle in a Solar Air Heater Based on CFD, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 39, No. 1, pp. 77-89, 2019, https://doi.org/10.7836/kses.2019.39.1.077
6. 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, https://doi.org/10.7836/kses.2021.41.1.079
7. 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, https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.12.037.
8. Baissi, M. T., Brima, A., Aoues, K., Khanniche, R., and Moummi, N., Thermal Behavior in a Solar Air Heater Channel Roughened with Delta-Shaped Vortex Generators, Appl. Therm. Eng, Vol. 165, 2019, https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.03.134.
9. Gupta, A. D. and Varshney, L., Performance Prediction for Solar Air Heater Having Rectangular Sectioned Tapered Rib Roughness Using CFD, Appl. Therm. Eng, Vol. 4, pp. 122-132, 2017, https://doi.org/10.1016/j.tsep.2017.09.005.
10. Singh, A. P., Thermal Performance Analysis of Semicircular and Triangular Cross-Sectioned Duct Solar Air Heaters Under External Recycle, Appl. Therm. Eng, Vol. 20, pp. 316-336, 2018, https://doi.org/10.1016/j.est.2018.10.003.
11. 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, https://doi.org/10.5916/jkosme.2013.37.4.316.
12. 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.
13. Kamali, R. and Binesh, A. R., The Importance of Rib Shape Effects on the Local Transfer and Flow Friction Characteristics of Square Ducts with Ribbed Internal Surfaces, Appl. Therm. Eng, Vol. 35, pp. 1032-1040, 2008, https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2008.04.012.
14. 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, 10.1016/j.energy.2015.03.015.
15. Yadav, A. S. and Bhagoria, J. L., A Numerical Investigation of Square Sectioned Transverse Rib Roughened Solar Air Heater, Appl. Therm. Eng, Vol. 79, pp. 111-131, 2014, https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2014.01.008.
16. 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, https://doi.org/10.1016/0017-9310(80)90177-5.