

공기식 태양광/열 시스템 공기채널 내 여러 저항체 설치에 따른 전열성능에 관한 CFD 해석

최희웅* · 파쿠르 로커만* · 김영복** · 윤정인*** · 손창호*** · 최광환****

*부경대학교 냉동공조공학과 대학원

**부경대학교 기계시스템공학과

***부경대학교 냉동공조공학과

CFD Analysis on the Heat Transfer Performance with Various Obstacles in Air Channel of Air-Type PV/Thermal Module

Choi Hwi-Ung* · Fatkhur Rokhman* · Kim Young-Bok** · Yoon Jung-In*** · Son Chang-Hyo*** · Choi Kwang-Hwan****

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

**Dept. of Mechanical System Engineering, Pukyong National University

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

†Corresponding author: choikh@pknu.ac.kr

Abstract

PV/Thermal module is the combined system, which consist of a photovoltaic module and solar thermal collector that can obtain electrical power and thermal energy simultaneously. Thus the power generation can be increase by decreasing the temperature of photovoltaic module and thermal energy retrieved from module also can be used for heating system. In this study, Heat transfer performance of air type PV/Thermal module was confirmed with various bottom obstacles that can be installed easily to real photovoltaic module by CFD (computational fluid dynamics) analysis. Eight type obstacles were investigated according to the shape and arrangement. As a result, nusselt number represent heat transfer performance was increased about 86% compare with the basic type PV/Thermal module that has no obstacle and triangle type obstacle had higher value than other types. But pressure drop was also increased with increment of heat transfer enhancement. Thus the performance factor considering both heat transfer and pressure drop was confirmed and V-fin type obstacle arranged in a row for Reynolds number below 9,600 and protrusion type obstacle arranged in zigzag for Reynolds number above 14,400 were shown higher performance factor than other types. From these results, V-fin type obstacle arranged in row and protrusion type obstacle arranged in zigzag were considered as a proper type for applying to real PV/thermal module according to operating condition. But the heat transfer performance can be changed by the geometric conditions of obstacle such as height, width, length and arrangement. Thus, it could also confirmed that the optimal condition and arrangement of this obstacle need to be found in further study.

Keywords: 태양광/열 시스템(PV/Thermal system), 공기식 태양광열 모듈(Air type PV/Thermal module), 전산유체역학(Computational fluid dynamics), 에너지절약(Energy conservation)



Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.38, No.1, pp.33-43, April 2018
<https://doi.org/10.7836/kjes.2018.38.2.033>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 28 December 2017

Revised: 19 April 2018

Accepted: 23 April 2018

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

- \dot{Q} : Heat transfer rate [W]
 \dot{m} : Mass flow rate [kg/s]
 T : Temperature [°C]
 T_s : Temperature of heat plate [°C]
 C_p : Specific heat of heating medium [J/kgK]
 A_s : Heat transfer area [m²]
 h : Convective heat transfer coefficient [W/m²K]
 k_f : Thermal conductivity [W/mK]
 V : Velocity [m/s]
 D_h : Hydraulic diameter [m]
 ΔP : Pressure drop [Pa]
 Nu : Nusselt number [-]
 Re : Reynold's number [-]
 f : Friction factor [-]
 PF : Performance factor [-]

그리스 문자

- ρ : Density [kg/m³]

하첨자

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

1. 서론

화석연료 사용 급증으로 인한 에너지 고갈과 환경오염 문제로 최근 신재생에너지에 대한 관심이 급증하고 있다. 이 중 태양전지는 효율향상과 단가 감소로 인해 그 보급량이 크게 증가하고 있으며, 국내에서도 2015년 연간 설치용량 세계 7위에 이르며 많은 보급이 이루어지고 있다¹⁾. 하지만 이러한 태양전지의 경우 모듈 온도 상승

에 따라 발전 효율이 감소하게 되며, 이로 인해 일사조건이 유리한 여름철에 봄, 가을보다 오히려 발전 효율이 감소하게 되는 현상이 나타나게 된다. 따라서 이러한 문제의 해결 방안 중 하나로 태양전지 발생 열을 회수하여 모듈 온도 감소로 인한 발전 효율 저감을 방지하고 회수된 열을 난방에 사용하고자 하는 태양광·열 모듈에 관한 연구가 진행된 바 있다.

국내의 경우 공기를 매체로 열을 회수하는 공기식 태양광·열 모듈의 디자인 및 성능 관련 연구 동향에 대해 분석된 바 있으며²⁾, 건물 일체형 공기식 태양광/열 모듈의 시스템 유형별 실증 실험³⁾ 및 폐열회수 환기 시스템 적용에 따른 시뮬레이션 연구 등이 진행된 바 있다⁴⁾. 또한 액체를 열매체로 열을 회수하는 액체식 태양광/열 모듈의 경우 기존 태양전지와 태양광/열 모듈의 성능 비교⁵⁾, 유리커버 유무에 따른 성능 평가⁶⁾ 및 건물통합형 태양광/열 난방 시스템의 실험 성능 분석⁷⁾ 등의 연구들이 진행된 바 있다. 국외에서는 공기식 태양광/열 모듈 성능 향상을 위해 핀 설치, 벌집구조 및 V자 흡열판, 립 설치 및 물결모양 시트 등의 적용에 따른 성능 평가 관련 연구들이 수행된 바 있으며^{8,9)}, 태양광/열 모듈 성능 향상에 관한 연구뿐만 아니라^{10,11)} 난방을 위한 히트펌프 열원으로써의 태양광/열 모듈 이용¹²⁻¹⁴⁾ 및 열원구동 냉방 시스템과의 연계 성능 분석¹⁵⁻¹⁷⁾ 등 다양한 응용 연구가 진행되고 있다.

이때 공기층 구성 변경, 유리층 제작 등이 포함되는 성능 향상형 태양광/열 모듈의 경우 기존 설치된 태양전지로의 적용이 다소 어려우며, 이미 설치가 이뤄진 태양전지의 경우 모듈 하부 단순 공기 채널 부착 등의 제작 및 시공이 비교적 수월한 방법을 통해 태양광/열 모듈로의 전환이 좀 더 용이해질 수 있다. 하지만 단순 공기 채널 설치 시 낮은 공기 측 열효율을 보일 수 있어 태양전지에서 유동 공기로의 전열 성능 향상이 필요하게 된다²⁾. 이때 공기 채널 내 핀, 베플 등의 저항체가 설치될 시 난류 촉진으로 열교환이 일어나는 상부 공기와 열교환이 일어나지 않는 하부 공기의 혼합 및 전열부 유동 공기 속도 증가 등으로 태양전지 후면부에서 유동 공기로의 전열 성능 촉진이 가능하게 되나^{18,19)} 저항체 형상 및 배치에 따라 그 정도가 변하게 되므로 이에 대한 확인이 선행될 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 기존 설치 태양전지 하부에 적용되어 태양광/열 모듈로써의 역할을 수행하게 할 수 있는 공기 채널 내 저항체의 형상 및 배치에 따른 전열 성능을 수치해석을 통해 평가해보고자 하였으며, 추후 실제 제작에 적합한 형상을 모색해보는 데 그 목적을 두었다.

2. 수치해석 모델 및 방법

2.1 수치해석 모델

본 연구에서 사용된 모델은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 태양전지 하부에 공기채널을 갖는 태양광/열 모듈로 알루미늄 재질이 부여된 태양전지 후면부 모사 발열 평판과 하부 공기 채널, 공기 입출구 덕트로 구성되었으며, 열전달이 일어나는 실험부는 2000 (L) × 1000 (W) × 100 (H) mm의 조건으로 실제작 모델과 동일하도록 하였다.

저항체의 경우 Fig. 2에 나타난 바와 같이 제작 및 설치의 용이함을 고려하여 돌출형, V-핀, 실린더, 삼각 기둥 형상의 네가지 조건을 취하였고, 모두 동일한 배치간격 200 mm와 높이 50 mm를 주었다. 또한 각 형상별로 일렬 배치인 경우와 교차 배치인 경우에 대해 해석을 실시하여 총 8가지 형상 및 배치 조건에 대해 조사가 수행되었다. Fig. 3에는 각 저항체 설치 조건을 좀 더 상세히 나타내었다.

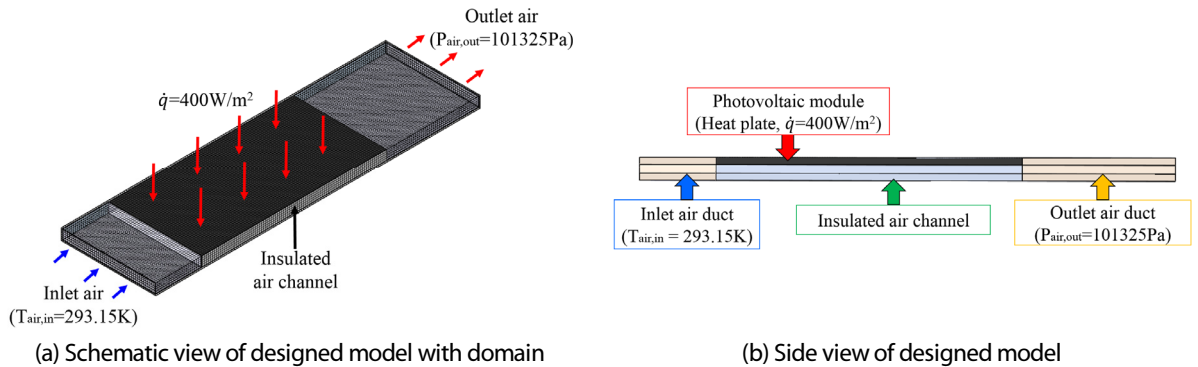


Fig. 1 Designed model for analysis of heat transfer performance in air-type PV/Thermal module

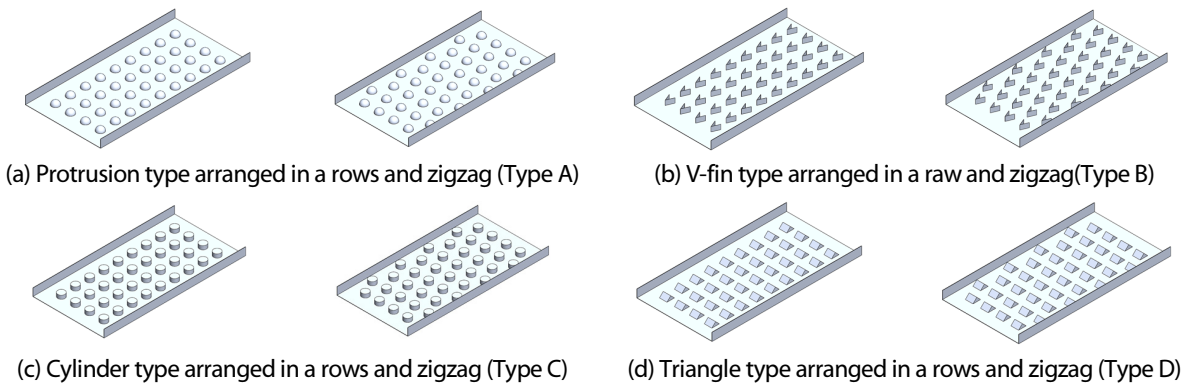


Fig. 2 Shape and arrangement of installed obstacles in air channel of PV/T module

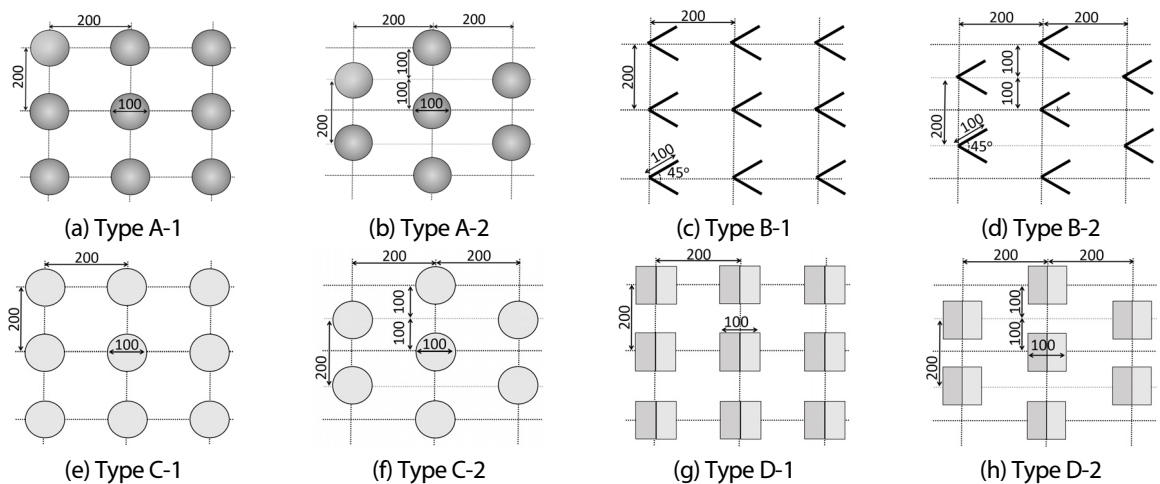


Fig. 3 Install conditions of obstacles in air channel of PV/T module (height of obstacles=50 mm)

2.2 수치해석 방법

본 연구에서는 태양전지 후면부로 모사된 발열 평판에서 유동 공기로의 전열 성능을 공기 채널 내 저항체 형상 및 배치에 따라 확인하고자 하였으며, 발열량의 경우 일반적인 공기 측 열효율이 유입 일사 중 전기에너지 변환 및 대기로의 기타 손실로 30~50% 정도에 분포함을 고려하여⁸⁾ 400 W/m²의 일정 발열 조건을 주었고, 유입 공기의 경우 외기 유입을 가정한 20°C의 조건을 주었다.

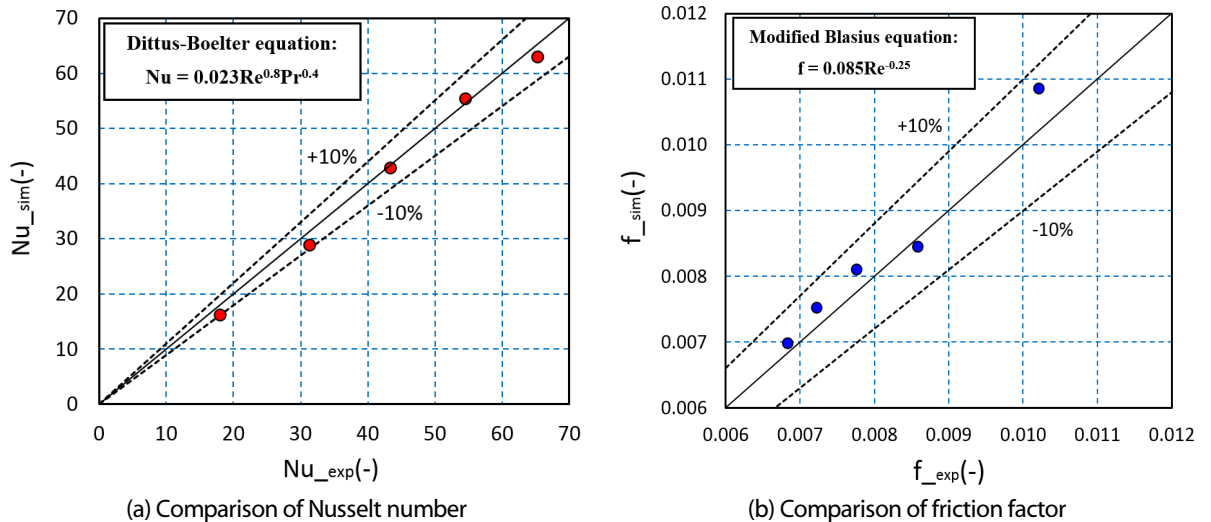


Fig. 4 Comparison between simulation results and empirical correlation for heat transfer and pressure drop

Table 1 Simulation conditions

Parameter		Value
Air channel	Length (mm)	2000
	Width (mm)	1000
	Height (mm)	100
Photovoltaic module (Heat plate)	Area (m ²)	2
	Length (mm)	2000
	Width (mm)	1000
Heat flux (W/m ²)		400
Air Mass flow rate (kg/s)		0.048, 0.096, 0.144, 0.192, 0.240
Reynold's number (-)		4,800, 9,600, 14,400, 19,200, 24,000
Inlet air temperature (°C)		20

전열 성능 평가는 각각의 형상 및 배치 조건에서 0.048 kg/s, 0.096 kg/s, 0.144 kg/s, 0.192 kg/s, 0.240 kg/s의 다섯 가지 풍량 조건에 대해 수행되었고, 수력직경(D_h)과 동점성계수를 고려한 Reynolds 수는 각 풍량 조건에서 4,800, 9,600, 14,400, 19,200, 24,000으로 난류 조건에 해당한다. 상기 해석은 상용 열유체 프로그램 중 하나인 Solid Works의 Flow simulation을 이용하여 수행되었으며, 수치해석 결과의 타당성을 확인하기 위해 저항

체가 설치되지 않은 덕트에서의 열전달 성능과 압력강하를 나타내는 실험식인 Dittus-Boelter식 및 Modified Blasius식을 이용해 산출된 값을 제작 모델의 해석 결과와 각각 비교하였다²⁰⁾. Fig. 4에는 실험식과 수치해석으로부터 얻어진 값을 비교한 결과를 나타내었으며, 열전달 성능의 경우 평균 퍼센트 오차 4.87%, 압력강하의 경우 4.02% 정도로 해당 모델이 실제 현상을 비교적 잘 묘사하는 것으로 판단되었다. Table 1에는 제작 모델 및 해석 조건을 좀 더 상세히 나타내었다.

2.3 데이터 분석

본 연구에서는 각 저항체가 열전달 성능에 미치는 영향을 평가하기 위해 다음과 같은 식을 통해 평균 Nusselt 수를 구하였다²¹⁾.

$$Nu = \frac{\bar{h}_{air} D_h}{k_f} \quad (1)$$

이때 평균 대류열전달계수의 경우 해석 결과에서 얻어진 발열 평판 평균 온도 및 공기 입출구 평균 온도와 아래 식으로부터 얻어질 수 있다.

$$\bar{h}_{air} = \frac{\dot{q}_{air}}{A_s (T_{s,avg} - T_{air,avg})} \quad (2)$$

위의 열전달량의 경우 해석 조건으로 부여된 일정 열유속 조건이며, 공기 평균온도의 경우 해석 결과에서 얻은 공기 입출구 온도와 아래 식을 통해 구한 값을 이용하였다.

$$T_{air,avg} = \frac{T_{air,out} + T_{air,in}}{2} \quad (3)$$

저항체 설치에 따른 압력강하 증가 정도를 확인하기 위한 마찰인자의 경우 다음 식을 이용하여 구하였다.

$$f = \frac{D_h}{L} \frac{\Delta P}{2\rho V_{avg}^2} \quad (4)$$

이때 저항체 설치로 인한 열전달 성능 향상 시 해당 저항체가 공기 유동에 저항으로 작용하여 압력강하 증가 또한 같이 수반된다. 따라서 동일 압력강하에서의 열전달 성능 향상 정도에 대한 평가가 필요하며, 이를 위해 본

연구에서는 Webb과 Gee에 의해 제시된 다음과 같은 성능계수 값을 이용하였다²²⁾.

$$PF = \frac{Nu/Nu_o}{(f/f_o)^{1/3}} \quad (5)$$

여기서 Nu_o 및 f_o 는 저항체가 설치되지 않았을 때의 Nusselt수 및 마찰인자를 나타내며 해당 인자가 클수록 저항체 설치에 따른 압력강하 증가 대비 열전달 성능 향상이 우수함을 의미한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 열전달 성능

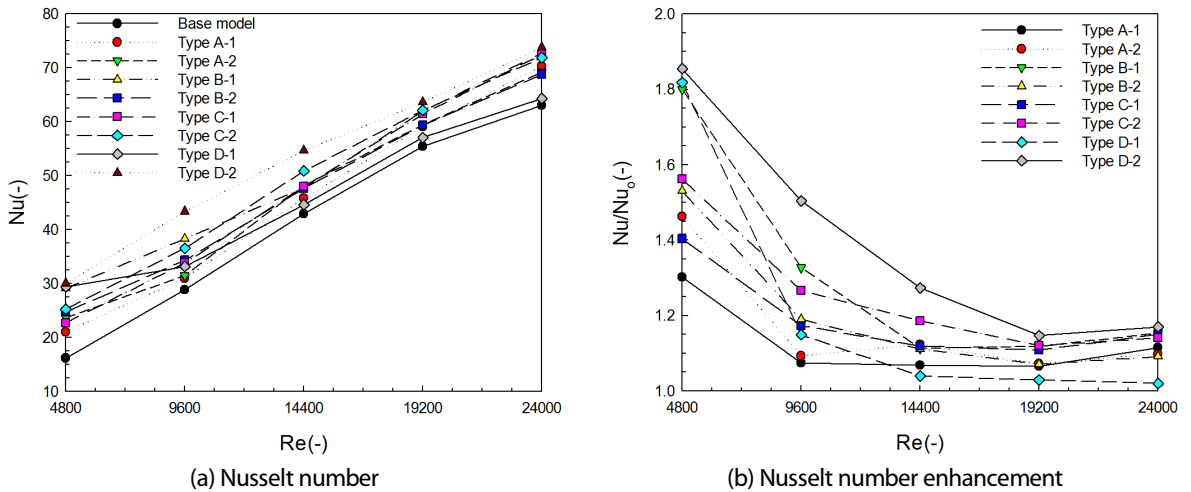


Fig. 5 Nusselt number of air side with respect to obstacle types

Fig. 5에는 저항체 형상 및 배치에 따른 발열 평판에서 유동 공기로의 열전달 성능을 나타내었다. 공기 측으로의 전열 성능의 경우 Type D-2, Type B-1, Type C-2, Type D-1 순으로 높은 값을 나타냈으며, 돌출형 저항체가 일렬 배치된 경우인 Type A-1에서 풍량 변화에 따라 1.06배에서 1.3배 정도의 열전달 성능 향상을 보이며 가장 낮은 열전달 향상 정도를 보였다. 또한 삼각 저항체가 교차되어 배치된 Type D-2의 경우 풍량에 따라 최소 30에서 73.76 정도의 Nusselt 수를 보이며 저항체가 설치되지 않은 경우 대비 최소 1.15배에서 최대 1.86배의 열전달 성능 향상이 이뤄져 다른 형상 및 배치보다 더 높은 성능 향상을 나타내었다. 이는 V-fin 형태나 실린더 및 돌출형과 같이 기류가 저항체 측면으로 유도되는 경우보다 삼각 저항체와 같이 열전달이 발생하는 발열 평판으로의 기류 유도 및 이로 인한 저항체와 발열 평판 사이에서의 국부적인 유속도 증가가 열전달 성능에 좀 더 큰 영향을 미쳤기 때문으로 판단되었다. 또한 배치에 따른 열전달 성능 향상의 경우 V-fin 형태를 제외하고 모두 교차 배치된 경우가 일렬 배치보다 높은 성능을 보였으며, 이는 다른 저항체의 경우 교차 배치일 때 유동

공기가 상부로 더 많이 유도되게 되나 V-fin 형태의 경우 저항체 형태로 인해 교차로 배치되어도 상부로 유도되는 공기는 적고 주 유동에 저항으로 작용하는 부분이 더 많아졌기 때문에 사료되었다.

3.2 압력강하

압력강하의 경우 송풍 동력과 연관되므로 열전달 성능 못지않게 중요한 인자이다. 따라서 본 연구에서는 해석결과에서 얻어진 압력강하와 식 (4)를 이용해 Fig. 6에 나타난 바와 같이 저항체 설치로 인한 마찰인자 값을 확인해보았다. 그 결과 형상 및 배치 조건에 따라 Type D-2, Type D-1, Type C-2, Type B-2 순으로 큰 값을 나타내었으며, 삼각저항체가 교차 배치된 Type D-2의 마찰인자 값 최소 0.0525에서 0.0664, 저항체가 설치되지 않은 경우 대비 6.1배에서 7.5배 정도의 증가로 다른 설치조건보다 큰 압력강하 증가를 보였다. 돌출형 저항체가 일렬 배치된 Type A-1 조건에서는 마찰인자 0.0171에서 0.0271, 저항체가 설치되지 않은 경우 대비 2.2배에서 2.5배의 압력강하 증가로 가장 낮은 증가 정도를 나타내었으며, 이로부터 열전달 성능 향상이 클수록 압력강하 증가 정도도 대체로 커지는 것을 확인할 수 있었다.

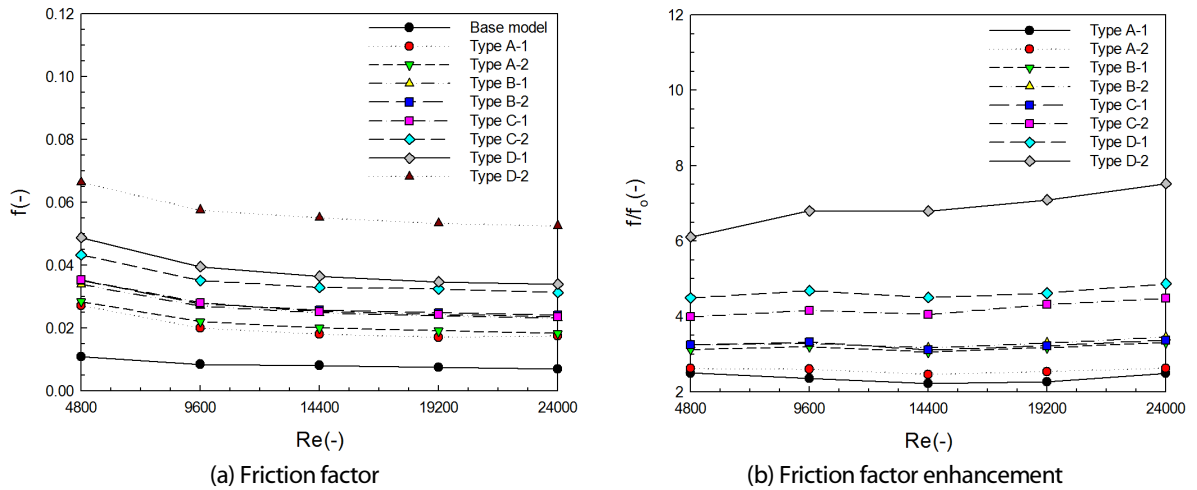


Fig. 6 Friction factor of air side with respect to obstacle types

3.3 PF (Performance Factor)

위의 결과들로부터 공기 채널 내 저항체 설치로 인한 열전달 성능 향상에 압력강하 증가가 함께 수반됨을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 열전달 성능 향상과 압력강하 증가를 같이 고려한 성능계수를 확인해보았으며 Fig. 7에 그 결과를 나타내었다. 각 형상 별 성능계수의 경우 압력강하를 고려함으로써 V-fin 저항체가 일렬로 배치된 Type B-1에서 0.76에서 1.23 정도의 값을 보였으며 Re 수에 따른 평균값 0.89로 가장 큰 값을 나타내었다. 또한 열전달 성능 향상이 가장 큰 값을 보인 삼각저항체가 교차 배치된 Type D-2의 경우 압력강하 고려로 인해 다른 저항체보다 더 낮은 성능을 나타내었다.

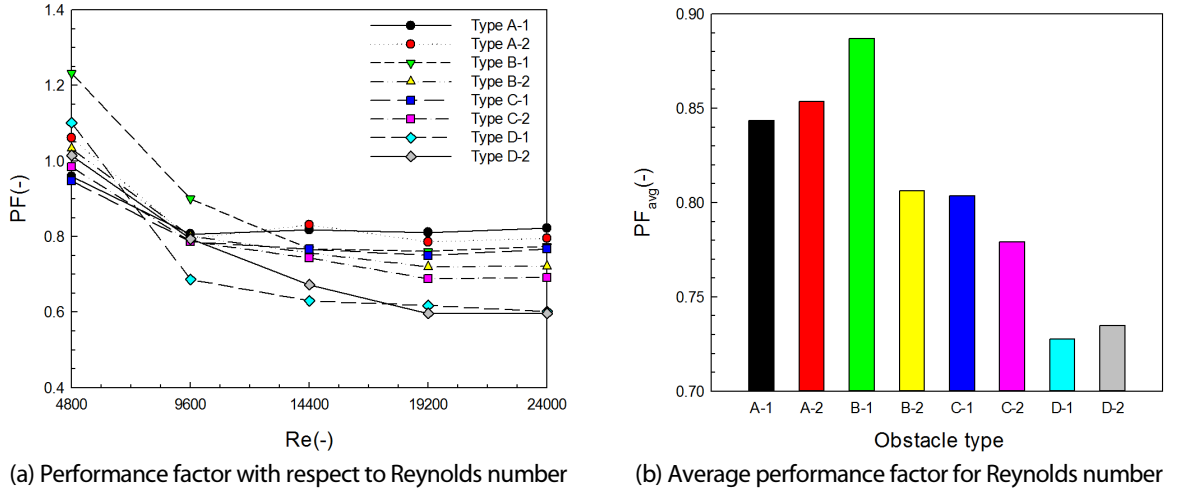


Fig. 7 Comparison of performance factor with respect to obstacle types

풍량 변화에 따른 성능계수의 경우 풍량 증가에 따라 그 값이 감소하는 모습을 보여, 풍량 증가로 인한 열전달 성능 향상보다 압력강하 증가가 더 큼을 알 수 있었다. 또한 Re수 9,600 이하의 조건에서는 V-fin 저항체가 일렬로 배치된 Type B-1이 가장 높은 값을 보였으며 Re수 14,400 이상의 조건에서는 돌출형 저항체가 설치된 Type A-2에서 0.8 이상의 값을 보이며 다른 조건보다 높은 성능을 나타내 Re수 9,600 이하의 운전조건인 경우 V-fin 저항체가 일렬 배치된 Type B-1, Re수 14,400 이상의 운전 조건인 경우 돌출형 저항체가 교차 배치된 Type A-2가 실제 적용에 적합할 것으로 사료되었다.

다만 V-fin 및 돌출형 저항체의 배치 간격, 높이, 너비 등의 변화에 따라 그 성능이 변할 수 있으므로 추후 해당 저항체의 설치 조건에 따른 전열 성능 변화에 대한 추가적인 검토가 필요할 것으로 판단되었다.

4. 결론

본 연구에서는 공기식 태양광/열 모듈 제작을 위한 사전 단계로써 공기채널 내 저항체 형상 및 배치에 따른 전열성능을 수치해석 기법을 통해 평가해보았으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 열전달 성능은 공기채널 내 저항체 설치로 인해 저항체가 설치되지 않은 경우 대비 최소 1.06배에서 최대 1.86배까지 그 성능이 향상되는 모습을 보였으며, 모든 풍량 조건에 대해 삼각 저항체가 교차로 설치된 Type D-2의 경우 1.15배에서 1.86배의 가장 큰 열전달 성능 향상을 보였고 돌출형 저항체가 일렬 배치된 Type A-1에서 열전달 성능 향상 1.06배에서 1.3배의 가장 낮은 향상 정도를 나타내었다.
- (2) 압력강하의 경우 저항체 설치로 인해 최소 2.2배에서 최대 7.5배까지 증가하였다. 또한 삼각저항체가 교차 배치된 Type D-2에서 풍량에 따라 최소 6.1배, 최대 7.5배까지 증가하여 가장 큰 압력강하 증가를 보였고, 돌출형 저항체가 일렬 배치된 Type A-1에서 최소 2.2배, 최대 2.5배 정도 압력강하가 증가하여 가장 낮은 증가 정도를 나타내었으며, 이로부터 공기채널 내 저항체 설치로 인한 열전달 성능 향상에 압력

강하 증가가 같이 수반됨을 확인할 수 있었다.

- (3) 저항체 설치로 인한 열전달 성능 향상 및 압력강하 증가 정도를 같이 고려하기 위해 성능계수를 확인해 본 결과 압력강하의 고려로 열전달 성능과 달리 V-fin이 일렬 배치된 Type B-1이 가장 높은 성능을 나타냄을 알 수 있었다. 다만 Re수에 따라 Re수 9,600 이하의 조건에서 V-fin 저항체가 일렬 배치된 Type B-1, Re수 14,400 이상의 조건에서 돌출형 저항체가 교차 배치된 Type A-2가 높은 성능을 보여 실제 운전에서의 Re수 범위에 따라 태양광/열 모듈 적용 적합 형상이 다를 수 있음을 확인할 수 있었다.
- (4) 또한 V-fin 및 돌출형 저항체의 경우 설치 간격 및 높이, 너비 등의 조건에 따라 그 성능이 변할 수 있으므로 추후 해당 저항체 설치 조건에 따른 전열 성능 평가가 좀 더 수반될 필요가 있을 것으로 사료되었다.

후기

본 연구는 중소기업청에서 지원하는 2016년도 산학연 기술개발사업(No.C0443886)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

REFERENCES

1. Renewable Energy Center, 2016 NEW & RENEWABLE ENERGY WHITE PAPER, KOREA ENERGY AGENCY, Republic of Korea, 2016.
2. Kim, J. H. and Kim, J. T., A Literature Review on Hybrid PV/Thermal Air Collector in terms of its Design and Performance, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 34, No. 3, pp. 30-41, 2014.
3. Kang, J. G., Kim, J. H., and Kim, J. T., A Study on the Performance Comparisons of Air Type BIPVT Collector Applied on Roofs and Facades, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 30, No. 5, pp. 56-62, 2010.
4. Park, S. H., Kim, J. H., and Kim, J. T., The Simulation Performance Study of Heat Recovery Ventilation System with Air Type PV/T Collector, Proceedings of the KSES 2012 Autumn Annual Conference, Vol. 32, No. 2, pp. 271-275, 2012.
5. Euh, S. H., Lee, J. B., Choi, Y. S., and Kim, D. H., The Performance and Efficiency Analysis of a PVT System Compared with a PV module and a Solar collector, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 32, No. 2, pp. 1-10, 2012.
6. Kim, J. H., Kang, J. G. and Kim, J. T., The Experimental Performance Comparison of a Water Type Glazed and Unglazed PV-Thermal Combined Modules, Proceedings of the SAREK 2009 Summer Annual Conference, pp. 792-797, 2009.
7. Jeong, S. O., Kim, J. H., and Kim, J. T., The Experimental Performance Analysis of Heating System with Building-Integrated Photovoltaic/Thermal Module, Proceedings of the KSES 2012 Autumn Annual Conference, Vol. 32, No. 2, pp. 276-281, 2012.
8. Tripanagnostopoulos, Y., Aspects and Improvements of Hybrid Photovoltaic/thermal Solar Energy Systems, Solar Energy, Vol. 81, No. 9, pp. 1117-1131, 2007.
9. Hussain, F., Othman, M. Y., Sopian, K., Yatim, B., Ruslan, H., and Othman, H., Design Development and Performance Evaluation of Photovoltaic/thermal(PVT) Air Base Solar Collector, Renewable and Sustainable Energy Review, Vol. 25, No. 9, pp. 431-441, 2013.

10. Ali, H. A., Al, W., Sopian, K., Hussein, A. K., and Miqdam, T. C., Photovoltaic/Thermal (PV/T) Systems: Status and future prospects, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 77, No. 9, pp. 109- 130, 2017.
11. Sohail, R. R., Mohamad, A. E., and Lin, C. X., A Review of PV-T Systems: Thermal Management and Efficiency with Single Phase Cooling, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 91, No. 12, pp. 861-871, 2015.
12. Tsai, H. L., Modeling and Validation of Refrigerant-based PVT-assisted Heat Pump Water Heating (PVT-HPWH) System, *Solar Energy*, Vol. 122, No. 12, pp. 36-47, 2015.
13. Fine, J. P., Friedman, J., and Dworkin, S. B., Detailed Modeling of a Novel Photovoltaic Thermal Cascade Heat Pump Domestic Water Heating System, *Renewable Energy*, Vol. 101, No. 2, pp. 500-513, 2017.
14. Giuseppe, E., Angelo, Z., and Michele, D.C., A Heat Pump Coupled with Photovoltaic Thermal Hybrid Solar Collectors: A Case Study of a Multi-source Energy System, *Energy Conversion and Management*, Vol. 151, No. 11, pp. 386-399, 2017.
15. Mahmut, S. B., Blaise, M., and Saffa, B. R., Experiment Investigation of a Building Integrated Photovoltaic/thermal Roof Collector Combined with a Liquid Desiccant Enhanced Indirect Evaporative Cooling System, *Energy Conversion and Management*, Vol. 101, No. 12, pp. 239-254, 2015.
16. Mahmut, S. B. and Saffa, B. R., Performance Analysis of a Combined Building Integrated PV/T Collector with a Liquid Desiccant Enhanced Dew Point Cooler, *Energy Procedia*, Vol. 91, No. 6, pp. 717-727, 2016.
17. Mohammad, S. and Mohamed, G., Performance Assessment of Integrated PV/T and Solid Desiccant Air-conditioning Systems for Cooling Buildings Using Maisotsenko Cooling Cycle, *Solar Energy*, Vol. 127, No. 4, pp. 79-95, 2016.
18. Ebru, K. A. and Faith, K., Experimental Investigation of Thermal Performance of Solar Air Heater Having Different Obstacles on Absorber Plates, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, No. 4, pp. 416-421, 2010.
19. Deniz, A., Emin, B., Ertekin, C., and Osman, Y., Experimental Investigation of Three Different Solar Air Heaters: Energy and Exergy Analyses, *Applied Energy*, Vol. 87, No. 10, pp. 2953-2973, 2010.
20. Alam, T., Saini, R. P., and Saini, J. S., Experimental Investigation on Heat Transfer Enhancement Due to V-shaped Perforated Blocks in a Rectangular Duct of Solar Air Heater, *Energy Conversion and Management*, Vol. 81, No. 5, pp. 374-383, 2014.
21. Yunus, A. C. and Afshin, J. G., *Heat and Mass Transfer Fundamentals and Applications*, Fourth Edition, Singapore: McGrawHill, pp. 473-474, 2013.
22. 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, No. 8, pp. 1127-1136, 1980.