

방음벽 PVT의 공기유로 설계를 위한 CFD 시뮬레이션 사전 분석 연구

김유진¹⁾ · 김기봉²⁾ · 이의준³⁾ · 강은철^{3)*}

Pre-Analysis CFD Simulation of Air Path Design for Soundproof Photovoltaic-Thermal Wall

Yu-Jin Kim¹⁾ · Ki-Bong Kim²⁾ · Euy-Joon Lee³⁾ · Eun-Chul Kang^{3)*}

Received 8 September 2020 Revised 30 July 2021 Accepted 2 August 2021 Published online 3 September 2021

ABSTRACT The Korean government announced various energy policies, such as the to reduce 37% of the business-as-usual (BAU) greenhouse gas emissions by 2030. The policies aim to increase the renewable electricity generation ratio to 20% by 2030. PVT is a hybrid technology, which combines photovoltaic (PV) and solar collectors. It is capable of generating electricity and thermal energy simultaneously. It has a great potential to be used as a renewable and clean solar energy. However, there exists a shortage of space for the installation of PVT systems in Korea. To overcome this, in this paper proposes four types of soundproof wall PVT air channels, which were designed and optimized, based on the CFD (Computation Fluid Dynamic) analysis results. The thermal energy generation for multiple PVT units connected in series and pressure drop sensitivity were analyzed, depending on inlet velocity.

Key words PV(Photovoltaic: 태양광), PVT(Photovoltaic thermal: 태양광열), CFD(Computation fluid dynamic), Solar collector(태양열 집열기)

Nomenclature

D : hydraulic diameter [m]
C_p : heat capacity [kJ/kg·°C]
f : friction factor
g : gravity force [m/s²]
L : pipe length

P : pressure [Pa]
Q : flow rate [m³/s]
Q_{thermal} : thermal energy [kJ]
W_{pumping} : pumping consumption [W]
W_{pumping} : pumping power [W]
T : temperature
T_i : inlet temperature
T_o : outlet temperature
T_{p_v} : PV panel back surface temperature
γ : specific weight
η_{pump} : pump efficiency

1) Ph.D Candidate, Department of Renewable Energy Engineering, University of Science and Technology

2) Ph.D Candidate, Department of Mechanical Engineering, Korea University

3) Principle Researcher, Energy Efficiency Research Division, Korea Institute of Energy Research

*Corresponding author: kec8008@kire.re.kr
Tel: +82-42-860-3511

1. 서론

온실가스로 인해 지구 온난화 현상이 일어나고 있으며 세계 각국에서 온실가스 배출을 저감하기 위해 다양한 정책을 발표하였다. 대한민국 정부는 온실가스 배출을 BAU 대비 37% 감축하기 위해 재생에너지 3020 이행계획 등 다양한 에너지 정책을 발표하였으며, 2030년 까지 재생에너지 발전량 비중을 20%, 2040년 까지 재생에너지 발전 비중을 30~35%를 목표로 하고 있다.^[1] 이렇게 정부는 재생에너지 설비 보급에 많은 노력을 하고 있지만, 재생에너지 설비를 설치하기 용이한 장소 및 시설이 부족한 현실이다.

태양광열(Photovoltaic Thermal) 모듈은 태양광(Photo-voltaic) 패널 뒤에 태양열(Solar Thermal Collector) 모듈을 결합한 융합 기술으로써 태양광 패널에서 전기를 태양 열 모듈에서 열을 동시에 생산가능하며, 단위 면적 대비 태양에너지 이용률이 높은 기술이다. 이러한 장점이 있어 건물의 난방 및 급탕 시스템에 생산된 에너지를 공급하여 에너지 절감효과를 볼 수 있다.

Kan et al.^[2]은 건물 지붕과 외벽에 BIPVT를 설치하였을 때 열에너지 및 전력 생산량을 비교 실험을 수행하여 지붕 BIPVT의 에너지 생산량이 우수함을 증명하였다. Park et al.^[3]은 공기식 PVT의 입구온도 및 일사량에 따른 열 효율 민감도를 실험을 통해 분석하였으며 PV 패널 냉각(Cooling)효과에 의한 전력 생산 향상을 정략적으로 분석하였다.

Jin et al.^[4,5]은 V자 형태의 립(Rib)을 PVT 유로에 활용하여 열에너지 생산량 변화를 CFD를 통해 연구를 수행하였다. 립의 피치(Pitch)와 높이 그리고 립의 설계각에 따른 민감도 분석을 수행하였다. Buonomano et al.^[6]은 T 거주용 건물 BIPVT 시스템 TRNSYS 시뮬레이션 모델을 연구하였다. 건물과 독립적 PV 패널이 설치된 모델, 건물과 독립적 PVT 시스템이 설치되어 있는 모델 그리고 건물 외피에 BIPVT 시스템이 적용된 모델 총 3가지 Case를 연구 수행하였으며 요구되는 건물 에너지 부하, 전력 및 열에너지 생산량을 분석하였다. Gautam et al.^[7]은 TRNSYS 시뮬레이션 프로그램을 통해 무창형과 유창형 BIPVT 모듈을 전형적으로 추운 덴마크 오르후스(Arhus) 기상과 전형적으로 따뜻한 스페인 세비아(Seville) 기상에 따른 전기

생산량과 열에너지생산량을 비교 분석하였다. Kim et al.^[8]은 PVT 모듈 공기유로 배플(Baffle)의 길이와 설계각에 따른 출구온도 및 감압을 CFD(Computation Fluid Dynamic)을 통해 연구하였고, 최적의 공기유로 배플의 길이 및 설계각을 제안하였다. Calise et al.^[9]은 TRNSYS 프로그램을 통해 BIPV와 BIPVT AWHP(Air to Water Heat Pump)와 연계하여 냉난방 시스템 동적모델을 구축하였고, 두 가지의 모델을 동적 비교분석하였다. 이렇게 PVT의 효율을 높이는 연구와 보급을 확대하기 위해 BIPVT를 활용한 연구가 활발히 이뤄지고 있다.

본 연구에서는 공기식 PVT 기본 설계를 위한 모듈 내부 공기 유동 해석을 수행하였다. 1) PVT 열에너지 생산을 위한 공기유로 Case 1에서 4가지 총 4개의 형상을 설계하였고, 2) CFD 분석을 통해 4개의 Case에 대해 감압 대비 최대 열에너지생산량을 분석하고 최적의 공기유로 형상을 제안하였다. 또한 3) PVT 작동유량에 따른 열에너지생산량 및 감압 민감도 분석을 수행하였고, 4) 여러 PVT 방음벽 유닛을 연계하였을 때 열에너지 생산량과 유용한 열의 온도를 예측하였다.

2. PVT 공기유로 형상 설계

Fig. 1은 PVT 방음벽 모듈이며 가로 1,950 mm, 세로 950 mm, 두께 130 mm 크기로 설계되었다. 흡입부와 토출부는 가로 80 mm와 세로 200 mm의 크기로 설계하였으며, 흡입부와 토출부를 통해 PVT내의 공기유동이 형성된다. 공기유로를 형성하는 배플(Baffle)은 알루미늄으로 두께 0.5 mm로 설계 하였다. 내부에 80 mm 두께의 공기유로와 50 mm 두께의 흡음재로 구성되어 있다. PVT 방음벽

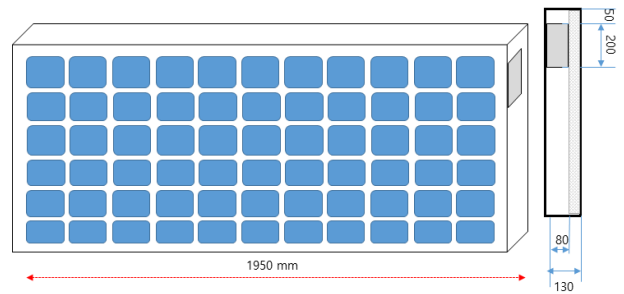


Fig. 1. Soundproof wall PVT module geometry

모듈의 흡음재는 소리를 흡수하고 PVT 방음벽 모듈의 흡음재는 소리의 파동을 흡수하고 약하게 하여 방음벽으로 기능을 할 수 있을 뿐만 아니라 PVT의 열손실을 방지하는 단열재 역할을 한다. 본 연구에서는 방음벽의 열성능 및 공기유동에 대한 사전 분석을 위해 CFD 시뮬레이션을 수행하였으며, PVT의 공기유로를 단순화 하여 연구를 수행하였다.

Fig. 2는 PVT 방음벽의 공기유로 형상이며, 총 4가지 모델을 제시하였다. Case 1과 2는 흔히 쉽게 찾아볼 수 있는 엘보우(Elbows)를 가진 굴곡(Serpentine) 형태의 공기

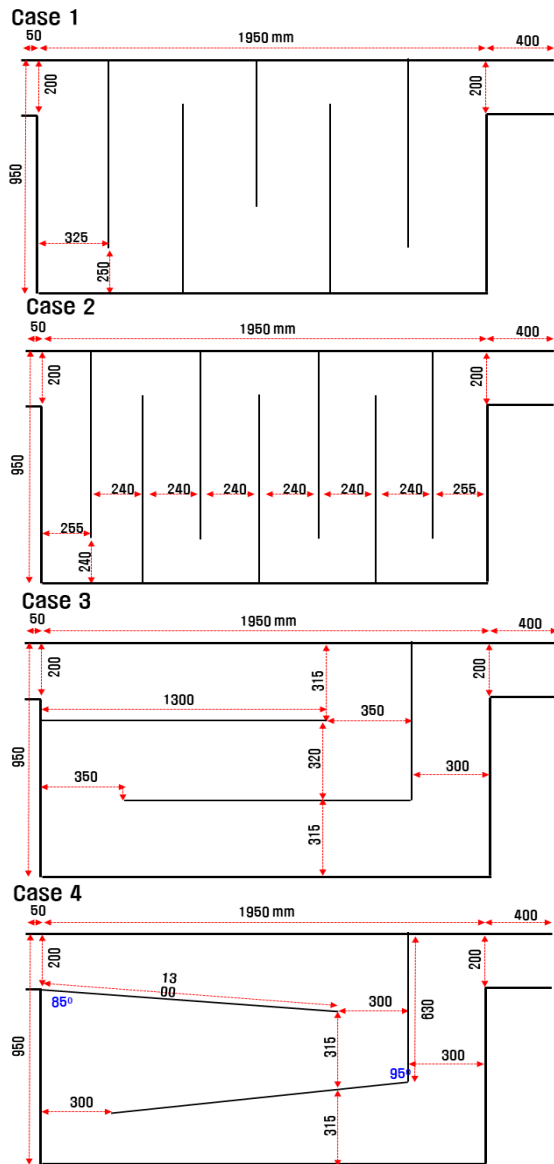


Fig. 2. Soundproof wall PVT module air baffle configuration

Table 1. PVT air baffle case

	Type	Path length (m)	Duct size (mm)	Slope (°)
Case 1	Vertical path	6.2	325 × 80	–
Case 2	Vertical path	7.6	240 × 80	–
Case 3	Horizontal path	5.1	315 × 80	–
Case 4	Horizontal path	5.1	315 × 80	5

유로이며, Case 1은 325 mm, Case 2는 240 mm의 유로 폭을 가지고 있다. 두 Case의 유로 폭을 다르게 하여 유로 길이에 따른 열전달 향상 민감도를 분석 하고자 하였다.

공기유로가 직선이 아닌 엘보우가 있는 형상은 엘보우로 인해 감압(Pressure loss)이 발생하며, 그로인해 PVT의 송풍기 소비동력이 아래 수식과 같이 증가한다.^[10~12]

$$W_{consumption} = \frac{W_{pumping}}{\eta_{pump}} = \frac{\Delta P \times Q}{\eta_{pump}} \quad (1)$$

Case 3과 4는 공기유로의 엘보우를 적게 설계하여 유로 내부에 감압을 최소화 하고 송풍기 소비동력을 절감하려고 안된 유로이다. Case 3과 4는 315 mm의 유로 폭을 모두 가지고 있지만, Case 4는 배플에 85°의 설계각(Slope)을 주어 설계각에 따른 민감도를 분석 하고자 하였다. PVT 내부 모듈의 공기 유동 해석 CFD 프로그램으로 ANSYS 19 Fluent를 사용하여 연구를 수행하였다.

3. PVT 공기유로 CFD 모델

Fig. 3은 PVT 방음벽의 Mesh 구성을 나타내고 있다. Mesh는 Table 2와 같이 총 4개의 Tetrahedron 타입의

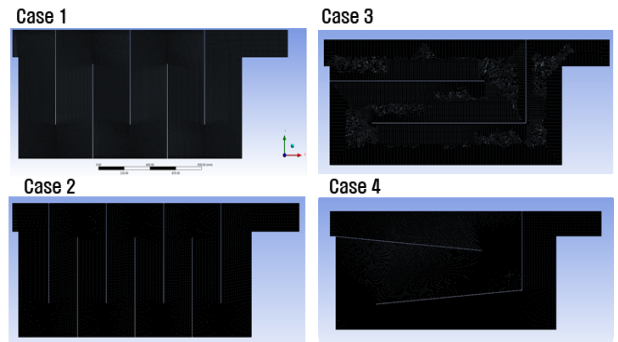


Fig. 3. PVT air baffle CFD model mesh

Table 2. PVT air baffle mesh model independence

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Min size (mm)	0.02			
Max face/ tetrahedron size (mm)	4	4	8	8
Fin/edge size (mm)	3	4	6	7
T _i (°C)	15.69	15.82	16.32	16.55
T _o (°C)	26.76	27.12	28.29	28.95
ΔT (°C)	11.07	11.3	11.97	12.4

Mesh 모델을 구성하였다. PV 표면 온도 50°C, 유량 0.043 m³/s·m²일 때 입출구 온도를 분석하였고, Mesh 모델 분석결과 Case 1에서 입출구 온도가 수렴하였다. 따라서 본 연구의 CFD 모델의 Mesh는 Min size는 0.02 mm, Max size는 4 mm, Edge는 3 mm 그리고 Face는 3 mm 크기로 Mesh를 구성하였다. 총 4~5 백만 개의 Mesh로 CFD 모델을 구성하였으며, PVT 방음벽 CFD 모델의 경계조건으로 Constant Temperature 경계조건을 사용하였으며, PV 패널 배면에 경계조건을 입력하였다. 실제 PVT 모듈에서는 4~5 cm 두께의 단열재를 활용한 단열이 이뤄지기에 외부와의 열손실은 고려하지 않았다.^[8] 본 연구에서는 공기식 PVT 모듈 내부 공기 유동 해석을 수행하는데 있어 견고하고 경제적인 κ-ε standard 난류 유동 모델을 사용하였고, Tubulent Intensity와 Viscosity Ratio값으로 각각 5%와 10 default 값을 사용하였다. 모멘텀, 에너지 등 허용오차(Residuals)값은 0.001 default 값을 사용하여 수렴성을 판별하였고, 1,000번의 계산(Iteration)을 통해 결과값을 산출하였다.

4. PVT 공기유로 CFD 모델 분석 결과

4.1 PVT 공기유로 CFD 모델 Case별 민감도 분석 결과

PVT 모듈 내부 공기 유동 해석하기 위해 Case 1~4의 PVT 배면온도(T_{pv})를 50°C로 가정하여 Constant Temperature 경계조건을 사용하였다. 입구온도(T_i) 15°C 유량 0.026 m³/s·m²의 유동을 CFD를 통해 출구온도(T_o), 입출구 온도차(ΔT)와 입출구 감압(ΔP) 등 결과를 도출하였고, 집열

Table 3. PVT air baffle CFD model condition

Boundary condition T _{pv}	T _i	Q
50°C	15°C	0.026 m ³ /s·m ²

기에서 생산된 열에너지는 아래 수식과 같이 산출된다.^[13]

$$Q_{thermal} = \dot{m} C_P (T_o - T_i) \quad (2)$$

Fig. 4는 Case 1~4의 PVT의 입출구 온도차를 나타내고 있으며 Case 2의 입출구 온도차가 18.9°C로 가장 크게 나타났으며, Case 4가 12.4°C로 가장 낮은 입출구 온도차를 나타내었다. Case 2는 7.6 m로 가장 긴 유로를 가지고 있으며, 타 Case 유로에 비해 더 많은 PV 패널과 공기사이에 더 많은 열전달량을 보여주었다 판단된다. Case 3과 4는 5.1 m로 가장 짧은 유로를 가지고 있지만, Case 4는 배플의 설계각의 영향으로 Case 3보다 상대적으로 적은 열전달량을 나타내었다.

Case 2는 유로 길이가 길어진 만큼 타 Case에 비해 가장 큰 열전달량을 보여주지만 동시에 가장 큰 257.7 Pa의 감압을 보여주고 있다. Case 2는 감압대비 입출구 온도차로 0.07°C/Pa를 나타내었으며 Case 1~4에서 가장 낮은

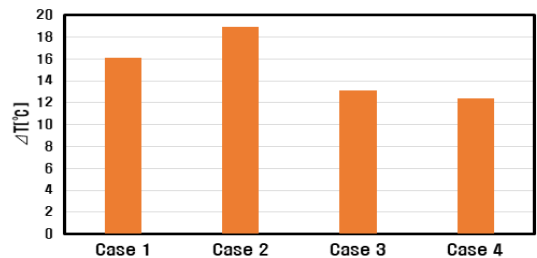


Fig. 4. PVT air inlet - Outlet temperature difference

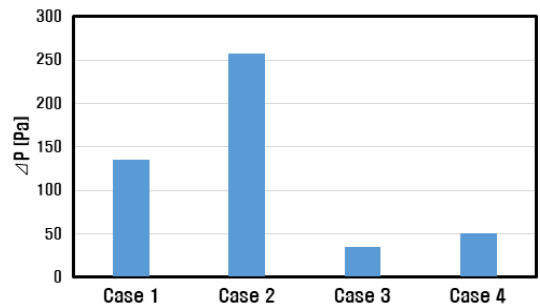


Fig. 5. PVT air inlet - Outlet pressure loss

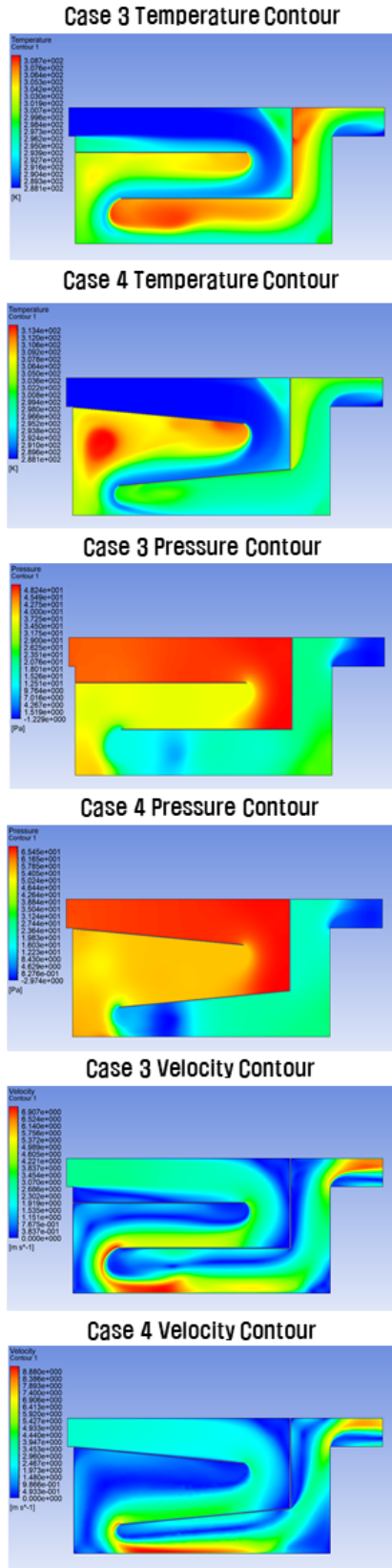


Fig. 6. PVT air baffle temperature, pressure and velocity contour

Table 4. PVT module CFD results by air baffle case

Cases	Path (m)	ΔT ($^{\circ}C$)	ΔP (Pa)	$Q_{thermal}$ (W)	$Q_{thermal}/\Delta P$ (W/Pa)
Case 1	6.2	16.1	135	958.3	7.10
Case 2	7.6	18.9	257.7	1124.9	3.72
Case 3	5.1	13.1	34.1	779.7	22.87
Case 4	5.1	12.4	50.8	738.0	14.53

값을 나타내었다. Case 3과 4는 동일한 유로 길이로 설계 되었지만, Case 4의 경우 배플의 설계각으로 인해 Case 3의 감압보다 16.7 Pa만큼 더 큰 감압을 나타내었다.

Fig. 6은 Case 3과 4의 Temperature, Pressure와 Velocity Contour에 대한 그림이며, Case 4가 Case 3에 비해 공기 입출구 차압이 크게 발생한 이유를 분석하기 위해 Case 3과 4의 Temperature, Pressure와 Velocity Contour를 비교하였다. Case 3에 비해 Case 4의 공기 유로 Baffle의 Slope에 의해 공기 유로가 확장되고 좁아짐에 따라 차압이 크게 발생하였고 특히 Case 4의 하단 유로에서 유로의 입구가 좁아짐에 따라 유속이 빨라지면서 차압이 크게 발생하였다.

Case 3의 감압대비 열에너지 생산량은 22.87 W/Pa로 가장 큰 Case로 나타났으며, 유로의 길이는 가장 짧지만 적은 엘보우를 보유하여 열전달량과 송풍기의 소비동력 측면에서 4가지 Case 공기 배플 중 가장 이상적인 공기 배플 설계로 판단된다. 자세한 데이터는 Table 4에 정리하였다.

4.2 PVT의 작동유량 민감도 분석 결과

PVT의 열에너지 생산량은 수식 (2)와 같이 작동유체의 유량이 증가하면 비례하게 증가하며, 감압 또한 아래 수식 3과 같이 유속의 제곱과 비례하여 증가한다.^[11,12]

$$\Delta P = f \frac{L \cdot V^2 \cdot \gamma}{D \cdot 2g} \tag{3}$$

이 때문에 PVT의 열에너지 생산량을 증가시키려 단순히 유량을 키우게 되면 송풍기 및 펌프의 소비동력이 같이 증가한다. 작은 유량으로 PVT로써 활용이 가능한 40% 열효율 열에너지 생산 750 W를 달성하기 위해 유량을 변화시키며 열에너지 생산 및 감압을 산출하여 적정 유량을 분석하였다.

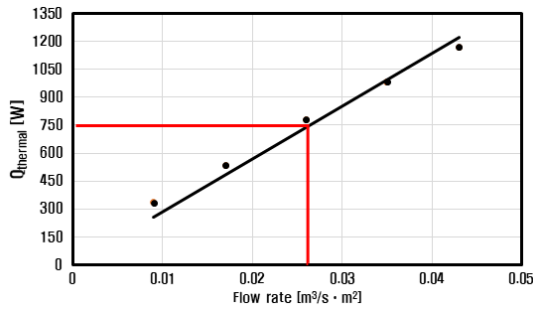


Fig. 7. PVT thermal energy produce depending on flow rate

Table 5. PVT module CFD results by flow rate at case 3

Inlet (m³/s·m²)	T _i (°C)	T _o (°C)	ΔT (°C)	ΔP (Pa)	Q _{thermal} (W)	Q/ΔP (W/Pa)
0,016	15	31,9	16,9	3,5	335,3	95,80
0,017	15	28,5	13,5	14,0	535,7	38,26
0,026	15	28,1	13,1	34,1	779,7	22,87
0,035	15	27,4	12,4	62,8	984,1	15,67
0,043	15	26,8	11,8	90,7	1170,6	12,91

Case 3 공기 유로 모델에 PVT 배면온도와 입구온도는 각각 50°C와 15°C로 위와 동일하게 진행하였다. Fig. 7은 유량에 따른 PVT의 열에너지 생산량 변화에 대한 그래프이며, 유속 0.009 m³/s·m²에서 0.043 m³/s·m²까지 증가할 때 열에너지 생산량이 335.3 W에서 1170.6 W로 선형적으로 증가하였다. 750 W 열에너지를 생산하기 위한 적정 공기 유속은 약 0.026 m³/s·m²로 판단되며 그 이상 유속으로 PVT를 작동하였을 경우, 감압이 34.1 Pa에서 62.8 Pa로 약 2배 증가하여 송풍기 소비동력 측면에서 적절하지 않다 판단된다. 자세한 데이터는 Table 5에 정리하였다.

4.3 PVT 방음벽 유닛 연계 분석

열교환기를 길게 직렬(Series)연결하면, 특정구간에서 입출구 온도차 및 열에너지 생산량이 특정 값에 수렴한다. 이 특정 값에 도달하게 되면 더 열교환 유로를 길게 연결하여도 그 이상 열에너지를 생산하지 못하며 무의미한 열교환 유로가 된다. PVT 모듈을 직렬로 연결하였을 때 최대 유닛 개수와 열에너지 생산량을 분석하였다.

Fig. 8은 PVT 유닛을 직렬로 연결하였을 때 PVT 공기의 입출구 온도차 및 열에너지 생산량에 대한 그래프이다. PVT 유닛이 증가할 때 입출구 온도차 및 열에너지 생산이

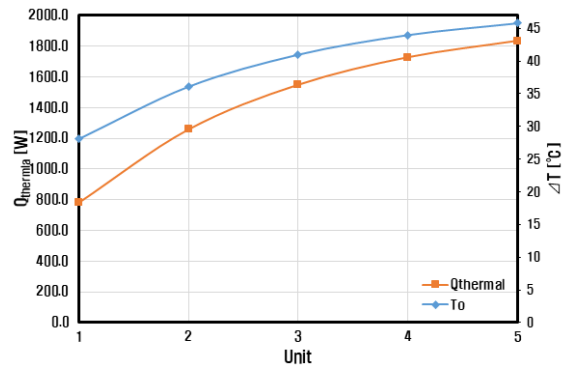


Fig. 8. PVT unit connection effect

Table 6. PVT module unit connection effect

Unit	T _o (°C)	ΔT (°C)	Q _{thermal} (W)	Q _{Area} (W/m²)
1	28,1	13,1	779,7	487
2	36,1	21,1	1256,8	785
3	41,0	26,0	1548,2	967
4	44,0	29,0	1727,5	1079
5	45,8	30,8	1834,8	1146

증가하지만, 유닛 4에서 5로 증가할 때 입출구 온도차는 0,2°C, 열에너지 생산은 67 W로 증가하였다. PVT 유닛을 5개 직렬 연결하였을 때 열에너지 생산량이 수렴하였다 판단되고, 최대 연결 PVT 유닛수는 5대로 판단된다. 자세한 데이터는 Table 6에 정리하였다.

5. 결론

본 연구에서는 방음벽 공기식 PVT 모듈의 공기유로를 설계하였고, CFD 시뮬레이션 모델을 통해 설계된 공기유로 중 최적화 유로를 선정 하였다. 또한 PVT의 유량 변화에 따른 열에너지 생산량 변화에 대해 분석을 하였으며, 여러 유닛을 연개 하였을 때 열에너지 생산량을 분석하였다.

- 1) PVT 열에너지 생산을 위한 공기유로 Case 1에서 4가지 총 4개의 형상을 설계하였다.
- 2) 4개의 Case에 대한 에너지 생산량 및 감압을 CFD를 통해 분석 하였으며, 최적의 공기유로 형상은 Case 3으로 나타났다.

- 3) PVT 작동유량에 따른 열에너지생산량 및 감압 민감도 분석을 수행하였고, 본 연구에 필요한 750 W 열에너지를 생산하기 위해 최적의 유속은 $0.026 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}^2$ 로 나타났다.
- 4) 여러 PVT 방음벽, 유닛을 직렬연결 하였을 때 최대 열에너지 생산량과 최대 도달 가능한 온도를 예측하였고, 최대 연결 유닛 수는 5대 이며 입출구 온도차 및 열에너지 생산량이 수렴하는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 2021년 국토교통부의 재원으로 국토교통기술 촉진연구사업의 지원을 받아 수행한 연구입니다(과제번호: 21CTAP-C152061-03).

References

- [1] MOTIE, 2017, "Implementation plan for renewable energy 3020(2017.12.)".
- [2] Kang, J.G., Kim, J.H., and Kim, J.T., 2010, "A study on the performance comparisons of air type BIPVT collector applied on roofs and facades", *J. Korean Solar Energy.*, **30**(5), 56-62.
- [3] Park, S.H., Bang, A.Y., Kim, J.H., and Kim, J.T., 2019, "An experimental study of air type photovoltaic thermal collector", *J. Korean Solar Energy*, **39**(2), 23-32.
- [4] Jin, D., Zhang, M., Wang, P., and Xu, S., 2015, "Numerical Investigation of heat transfer and fluid flow in a solar air heater duct with multi V-shaped ribs on the absorber plate", *Energy*, **89**, 178-190.
- [5] Jin, D., Zuo, J., Quan, S., Xu, S., and Gao, H., 2017 "Thermohydraulic performance of solar air heater with staggered multiple V-shaped ribs on the absorber plate", *Energy*, **127**, 68-77.
- [6] Buonomano, A., Calise, F., Palombo, A., and Vicidomini, M., 2016, "BIPVT systems for residential applications: An energy and economic analysis for European Climates", *Appl. Energy*, **184**, 1411-1431.
- [7] Gautam, K.R., and Andresen, G.B., 2017, "Performance comparison of building-integrated combined photovoltaic thermal solar collectors (BIPVT) with other building-integrated solar technologies", *Solar Energy*, **155**, 93-102.
- [8] Kim, Y.J., Lee, K.S., Yang, L., Entchev, E., Kang, E.C. and Lee, E.J., 2020, "Validation and numerical sensitivity study of air baffle photovoltaic-thermal module", *Energies*, **13**(8), 1-13.
- [9] Calise, F., Cappiello, F.L., d'Accadia, M.D., and Vicidomini, M., 2020, "Dynamic simulation, energy and economic comparison between BIPV and BIPVT collectors coupled with micro-wind turbines", *Energy*, **191**(15), 116439.
- [10] Kim, T.Y., and Kim, S.J., 2009, "Fluid flow and heat Transfer characteristics of cross-cut heat sinks", *Int. J. Heat Mass Transf.*, **52**(23-24), 5358-5370.
- [11] McQuiston, F.C., Paker, J.D., and Spitler, J.D. 2004, "Heating, ventilating, and air conditioning analysis and design", ohn Wiley & Sons, Inc, 6th edition, pp. 299-365, 425-437.
- [12] Pritchard, P.J., Fox, R.W., and McDonald, A.T., 2011, "Fox and McDonald's introduction to fluid mechanics", 8th edition, John Wiley & Sons, Inc, pp. 357-420.
- [13] International Standard ISO 9806, 2017, "Solar energy, solar thermal collectors test methods; ISO: Geneva", Switzerland.