



제로에너지캠퍼스 구현을 위한 태양광·열시스템 적용성 분석

Applicability of Photovoltaic and Thermal System for Net Zero Energy Campus

박경은* · 최원종** · 홍주영*** · 김민휘****

Kyung-Eun Park* · Won-Jong Choi** · Joo-Young Hong*** · Min-Hwi Kim****

* Undergraduate Student, Dept. of Smart City and Architectural Engineering, Chungnam Univ., South Korea (202102417@o.cnu.ac.kr)

** Coauthor, Undergraduate Student, Dept. of Smart City and Architectural Engineering, Chungnam Univ., South Korea (cwj2867@o.cnu.ac.kr)

*** Coauthor, Associate Professor, Dept. of Smart City and Architectural Engineering, Chungnam Univ., South Korea (jyhong@cnu.ac.kr)

**** Corresponding author, Senior Researcher, Renewable Energy System Laboratory, Korea Institute of Energy Research, South Korea (mhkim001@kier.re.kr)

ABSTRACT

Purpose : For sustainable development and carbon neutralisation, research into reducing the energy consumption of buildings is essential. The aim of this study was to analyse the applicability of a photovoltaic and thermal system integrated with a district cooling and heating system for a net zero energy campus. **Method :** For this study, building electrical and thermal loads were estimated using Design-Builder software and the photovoltaic and thermal system was simulated using SAM software. The case study test campus was selected at G University and consisted of four buildings. This paper assumed that the four buildings are connected to district heating and cooling network and building roof and south facing walls were selected for PVT installation area. **Result :** In the study, it was analysed that the annual renewable energy share for heat pump operation of the buildings can be achieved by 51.9 % and the annual renewable energy share for the campus buildings can be achieved by 8.0 % by using PVT system.

KEYWORD

지역냉난방
태양광·열시스템
히트펌프
캠퍼스 제로에너지District Cooling and Heating
Photovoltaic and Thermal System
Heat Pump
Campus Zero Energy

ACCEPTANCE INFO

Received Feb. 4, 2024

Final revision received Mar. 21, 2024

Accepted Mar. 27, 2024

© 2024. KIEAE all rights reserved.

1. 서론

산업혁명 이후 화석연료의 사용이 폭발적으로 늘어나면서 지구 연평균 기온은 산업혁명 이전보다 1.15°C 증가했다. 유엔 산하 기상학 전문기구인 세계기상기구는 World Meteorological Organization (WMO)(2023)에서 2027년 이전에 세계 연평균 기온이 산업혁명 이전에 비해 1.5°C 이상 높아질 확률이 66%에 달한다고 밝혔다[1]. 증가하는 연평균 기온을 억제하기 위해서는 전세계 총 에너지 소비량의 40 % 이상을 차지하는 건물 부문의 에너지를 절감해야한다[2].

건물에서의 에너지 사용량 절감을 위한 기술로 다양한 신재생에너지에 대한 적용기술과 지역냉난방 시스템을 이용하는 기술이 각광받고 있다[3]. 지역냉난방 시스템은 다양한 미활용에너지와 신재생에너지원으로부터 얻을 수 있는 에너지를 단일 건물뿐만 아니라 커뮤니티단위에서 높은 효율로 활용할 수 있다[4]. 특히 최근 지역냉난방시스템과 더불어 태양광·열시스템은 열네트워크 내에서 신재생에너지 활용도가 높기 때문에 기존 냉난방시스템에 비해 탄소중립을 실현하기에 유리하다[4, 5].

지역냉난방 시스템은 중앙에서 생산된 온수와 냉수를 활용하여 지역단위 건물의 난방, 급탕과 냉방을 위해 사용하는 시스템을 말한다. 기존 3세대 지역난방 시스템은 중앙 플랜트에서 발전소 및 보일

러에서 생산된 온열을 100°C 이상의 스팀을 건물에 공급하여 냉방, 난방 및 급탕에 활용하는 시스템이다. 반면 4세대 지역냉난방(4th generation district heating and cooling, 4GDHC) 시스템은 기존 3세대 지역난방 시스템과 달리 50~60°C의 중저온수와 10°C 수준의 냉수를 공급하는 방식이다. 이는 3세대 지역난방에 비해 열네트워크에서의 열손실이 낮아 시스템의 효율을 높일 수 있는 장점이 있다. 또한, 기존 지역난방 네트워크에서 활용되지 못한 신재생에너지 및 폐열원을 효과적으로 이용할 수 있다[6].

PVT 시스템은 태양광 전지 모듈과 태양열 집열기를 융합하여 태양에너지로부터 전기와 열에너지를 동시에 생산하는 시스템을 말한다. 생산된 전기를 직접 사용하거나, 모듈 후면에서 집열된 열을 공기 혹은 액체와 같은 유체를 통해 축열탱크에 저장 후 필요시 사용하기도 한다. 태양광·열 시스템은 태양광 모듈의 온도상승으로 인한 발전효율 감소도 해결할 수 있다[7].

최근까지 태양광·열 시스템(Photovoltaic and thermal system, PVT)에 대한 다양한 연구들이 진행되어 왔다. Joo et al.(2023)에서는 건물 내 과열 방지 기술을 적용한 액체식 PVT 모듈의 성능과 건물 적용성을 평가했다[8]. Qureshi et al.(2023)에서는 태양광 모듈의 후면의 온도를 제어하는 방법과 양면 모듈의 후면에서 열을 활용하는 기능을 추가하는 방법 중 어떤 것이 효율성 측면에서 유리할지 분석하였다[9]. Swayze & Singh(2023)은 태양열 및 천연 가스 기반 삼중 발전 시스템에 대한 효율성과 경제성에 대해 비교 분석하였다

[10]. Tao et al.(2023)에서는 도하, 테헤란, 앙카라 3개 도시를 대상으로 PVT에 결합된 Kalina cycle과 organic Rankine cycle(ORC)을 이용하여 효율과 경제성을 분석하였다[11]. Seddik et al.(2022)은 모로코의 6개 기후 구역에 매개변수 성능이 최적화된 PVT 패널에 대한 에너지 생산 성능을 분석하였다[12].

이러한 PVT 시스템과 지역냉난방 시스템의 적용성과 관련된 연구도 최근 진행되어오고 있다. Pakere et al.(2018)은 지역난방 시스템에 PVT 시스템이 적용되었을 때, 시장 전기 가격이 지역난방 시스템의 열 요금보다 낮은 경우 초과 전력을 열로 전환하는 것이 경제성이 높은 것으로 분석하였다[13]. Behzadi & Arabkoohsar(2020)은 지역냉난방 시스템에 통합된 PVT가 열과 전기의 잉여생산량을 그리드에 공급해 건물에서의 에너지 소비량을 줄일 수 있는 것으로 분석하였다[14]. Bordignon et al.(2022)은 한랭건조한 지역에서 지열 히트펌프와 PVT의 적용에 따른 지역에 전력공급과 지열 히트펌프의 COP를 증대시킬 수 있는 것으로 확인하였다[15].

선행 연구를 분석한 결과 지역냉난방 시스템과 PVT를 결합하였을 때 얻을 수 있는 에너지 성능 향상효과 및 건물에서의 적용성에 대한 연구가 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 지역냉난방 시스템을 기반으로 PVT 시스템의 적용을 통해 얻을 수 있는 에너지 절감효과 및 자립률 향상 효과를 분석하였다. 이를 위해 사례 분석으로 경기도 G대학 캠퍼스를 대상으로 시뮬레이션을 진행하였다. 건물의 에너지 성능은 DesignBuilder 시뮬레이션 프로그램을 통해 정량적으로 분석하였으며, PVT에 대한 에너지 생산 성능을 분석하기 위해 System Adviser Model(SAM) 프로그램을 이용하여 시뮬레이션을 진행하였다.

2. 분석 개요

2.1. 태양광·열시스템 기반 차세대 지역냉난방 시스템 개요

본 연구에서는 Fig. 1.과 같이, 지역냉난방시스템과 PVT의 연계 방안을 제안하고자 한다. 지역냉난방시스템을 통해 커뮤니티 내 건물에서 필요하는 냉방, 난방 및 온수를 공급하고, 이때 필요한 열은 중앙의 히트펌프를 통해 생산하여 공급한다. 이때, 히트펌프에서 생산된 냉수와 온수는 각 축열조에 저장한 후 공급하도록 구성되었다. 각 건물에 위치한 PVT는 자체 버퍼 축열조와 연계하여, 연중 PVT에서 생산된 온수를 버퍼축열조에 저장한다. 이를 통해 히트펌프의 온수 생산을 위한 에너지 소비량 절감효과를 기대할 수 있다.

2.2. 분석 개요

Fig. 2.는 연구에 수행된 분석 과정을 나타내었다. 첫 번째로 분석 대상 건물(G 대학 4개 건물)을 선정하고, 건물의 난방, 급탕, 냉방 부하를 상용 프로그램을 통해 산정하였다. 이후 PVT를 설정하고 프로그램을 이용해 발전량과 집열량을 도출하였다. 도출된 데이터를 이용해 중앙 히트펌프에 대한 에너지 소비량을 분석하고, PVT에 대한 적용성을 분석하였다.

건물 부하를 계산하기 위해 DesignBuilder 프로그램으로 시뮬레이션을 진행하였다. 히트펌프에 대한 에너지 소비량은 히트 펌프 제

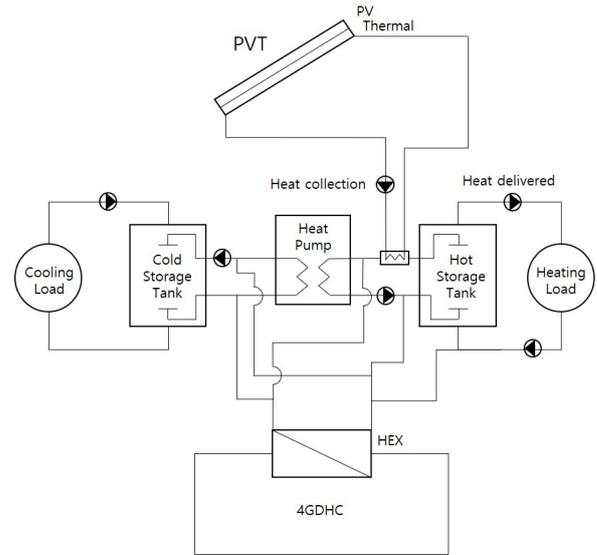


Fig. 1. Schematic of district heating and cooling system integrated with PVT system

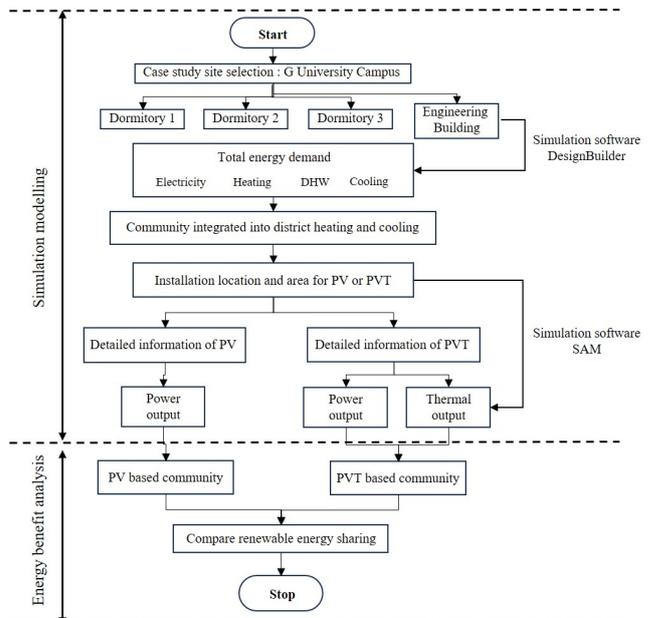


Fig. 2. Overall simulation process

조사인 D사에서 제공한 제품에 대한 히트펌프의 성능계수(Coefficient of Performance, COP) 데이터를 기반으로 분석을 진행하였다. 본 분석에서 사용된 COP 값은 난방 운전모드의 경우 2.4, 냉방 운전모드의 경우 3.9로 분석을 진행하였다[4].

PVT에서의 전력 및 열에너지 생산량을 분석하기 위해 SAM 프로그램을 이용하였다. SAM은 National Renewable Energy Laboratory에서 개발한 시뮬레이션 프로그램이다. 시간별, 월별, 연간 태양열 발전량과 태양열 집열량을 계산할 수 있다[9]. 본 SAM 프로그램을 활용하여 PVT의 집열량과 발전량을 산정하기 위해, 선행연구[8]를 통해 분석된 PVT의 실증 데이터를 통해 분석된 모델 파라미터를 활용하여 시뮬레이션을 진행하였다. PVT의 발전량은 photovoltaic 모듈을 활용하였으며, 집열량 분석을 위해 solar water heating 모듈을 활용하여 분석하였다.

본 프로그램은 선행연구[16]에서 동적해석 프로그램인 TRNSYS와의 비교검증을 통해 10% 이내의 오차범위로 분석결과를 도출할 수 있는 것으로 나타나 검증된 프로그램임을 알 수 있다.

PVT의 적용성을 분석하기 위해, PVT의 설치 위치를 지붕과 벽면에 설치할 경우 에너지 생산량을 분석하고 캠퍼스의 자립율에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 기존 시스템 대비 에너지 절감효과를 분석하기 위해 PVT와 동일한 면적에 기존 PV를 적용한 경우에 대해서 시뮬레이션을 진행하였다. 기존 PV는 PVT와 동일한 효율을 가지는 태양광 모듈을 사용한 것으로 가정하여 분석을 진행하였다.

2.3. PVT 정보

Fig. 3.은 PVT의 구조를 나타내었다. 유리는 외부로부터 패널을 보호해주고, EVA는 필름으로 구조들을 고정시켜주는 접착제 역할을 한다. 태양전지는 태양의 빛에너지를 전기에너지로 변환시켜 전기를 생산하는 부분이다. 백시트는 전기가 통하지 않는 절연체로 흡수판과 태양광 모듈사이 누설전류를 막기 위해 설치한다. 흡수판은 구리로 구성된 판으로 태양으로부터의 복사열을 흡수하기 위해 짙은 색의 코팅을 한다. 구리판은 내부에 글리콜과 물이 섞인 부동액이 흘러, 흡수된 열을 축열조로 공급한다.

Table 1.은 PVT 성능표이다. Voc는 출력에 아무 부하를 걸지 않

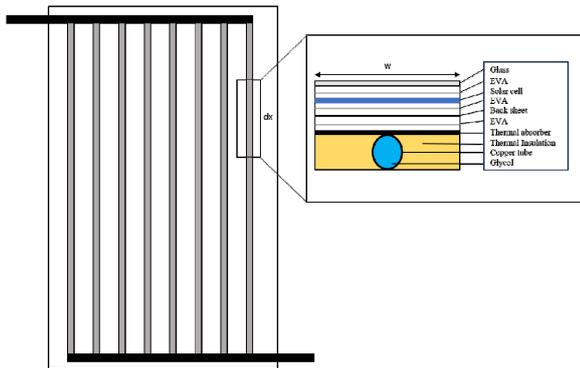


Fig. 3. Schematic of PVT system

Table 1. Information of PVT system

Parameters	Value
V _{oc} (V)	64.4
I (A)	6.0
V (V)	54.7
P (W)	310.2
Efficiency of Module (%)	19.02

Table 2. Design information of PVT in buildings

Location	Roof	South-facing wall
Type	Fixed	Fixed
Tilt(°)	20	90
Azimuth(°)	180	180
GCR(Ground coverage ratio)	0.3	0.3

았을 때의 전압으로 64.4 V이다. I와 V는 각각 전류와 전압값으로 6.0 A, 54.7 V이다. P는 태양광 발전용량을 나타내는 값으로 310.2 W이고 PVT의 효율은 19.02%로 설정하였다. I-V Curve는 태양광 발전 효율을 나타내는 전류-전압 곡선이며, 인버터 효율은 98.2%로 설정하였다.

Table 2.는 건물 지붕에 설치한 PVT 설계 정보이다. 태양의 위치에 따라 변하지 않고 고정되어 있는 타입이고, 바닥과 PVT의 각도인 Tilt는 지붕에 설치된 PVT는 20°, 벽면에 설치된 PVT는 90°로 설정하였다. 방위각인 Azimuth는 180°이다. 지붕 설치 비율인 GCR(Ground coverage ratio)은 0.3이다.

Fig. 4.는 PVT가 어떻게 설치되어 있는지 보여주는 모식도이다. 모듈 세로 길이는 3.33m, 모듈 설치 간격은 11.1m이다. PVT 설치 면적은 지붕 면적의 60%이며, 총 22,050개를 설치하였다.

Table 3.은 PVT 중 태양열 집열부에 해당하는 정보이며, 선행연구[8]를 통해 실증 분석된 성능을 기반으로 시뮬레이션을 진행하였다. 단위 집열기 면적은 2m²이다. 식 (1)과 같이, 태양열 집열기의 효율을 산정하기 위해서는 최대효율과 열손실 계수에 대한 정보로 분석이 가능하다. 본 연구에서는 최대효율인 F_R(τ) FRta계수가 0.5788, 온도에 따른 열손실인 F_RU_L 계수는 7.507W/m²°C로 설정하였다. 입시각 수정계수 손실인 IAM은 0.2이다. 내부 순환 유체는 글리콜이며, 모듈당 유량은 0.046kg/s이다. 또한 축열탱크는 200m³ 규모로 설계하였다. 출구 설정 온도는 55°C이고, 축열탱크 열손실을 산정하기 위한 기계실 실내 설정 온도는 20°C로 설정하였다. 축열 탱크의 지름과 높이 비율은 2로, 지름은 5.03m, 높이는 10.06m이다.

$$\eta_{PVT} = F_R(\tau) - F_R U_L \frac{T_i - T_a}{I_b} \tag{1}$$

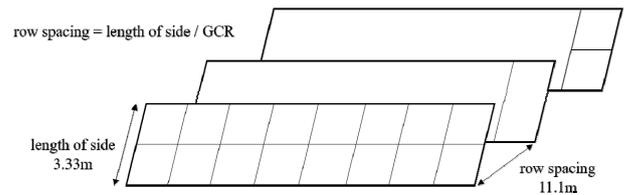


Fig. 4. Schematic of PVT installation on the roof

Table 3. Information of PVT in thermal collector part

Parameters	Value
Collector area (m ²)	2
F _R (τ)	0.5788
F _R U _L (W/m ² °C)	7.507
IAM coefficient	0.2
Test fluid	Glycol
Test flow (kg/s)	0.046
Solar tank volume (m ³)	200
Outlet set temperature (°C)	55
Mechanical room temperature (°C)	20

2.4. 캠퍼스 에너지 자립율 산정

아래 식 (2)와 (3)은 캠퍼스 에너지 자립율을 산정하는 방법에 관한 식이다. 식 (2)는 히트펌프의 전력소비량(P_{HP}) 대비 PVT 발전량(P_{PVT})과 집열량의 연간 열생산에너지 자립율($R_{ZEB,HP}$)을 이용하여 계산하는 방법이다. 식 (3)은 P_{HP} 와 플러그 전력소비량(P_{plug}), 조명 전력소비량($P_{lighting}$)을 포함한 캠퍼스 건물 전체 전력소비량(P_{campus}) 대비 PVT 발전량과 집열량의 연간 에너지 자립율(R_{ZEB})을 계산한 결과이다.

$$R_{ZEB,HP} = \frac{P_{PVT}}{P_{HP}} \times 100 \quad (2)$$

$$R_{ZEB} = \frac{P_{PVT}}{P_{HP} + P_{plug} + P_{lighting}} \times 100 = \frac{P_{PVT}}{P_{campus}} \times 100 \quad (3)$$

3. 사례 분석

3.1. 대상 건물 분석

본 연구에서는 경기도 성남시에 위치한 G대학 대상 건물 4개를 선정하여 차세대 지역난방시스템과 PVT를 통한 에너지 절감 효과를 분석해보고자 한다. 대상 건물은 G대학의 제1기숙사, 제2기숙사, 제3기숙사, 공학관이다. Fig. 5.는 G대학 4개 건물의 위성사진이



Fig. 5. Location of case study buildings(G campus)

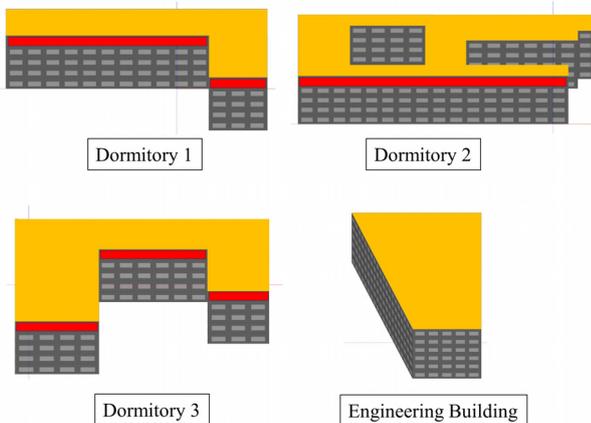


Fig. 6. Simulation buildings and PVT installation site

다. 붉은색으로 표시된 부분은 남쪽 벽면으로 제일 상단에 한줄로 총 704개의 PVT를 설치하였다. Fig. 6.은 실제 건물에 PVT가 설치된 위치를 나타내는 나타낸 모식도이다. 지붕에 설치된 PVT 노란색으로 표시된 부분에 설치하였고, 남쪽 벽면에 설치된 PVT는 붉은색으로 표시된 부분에 설치하였다. Table 4.는 대상 건물 정보로 총 바닥 면적, 지붕 면적 및 평균 벽체 열관류율 정보를 나타내었다.

3.2. 기후데이터 분석

기후데이터로 경기도 가천시의 TMY2(Typical Meteorological Year 2) 기상 데이터를 사용하였다. TMY2 기상 데이터는 특정 지역의 1년 이상의 기상 데이터를 연간 평균으로 계산한 데이터로 건물 시뮬레이션이나 태양광 및 태양열 시스템을 설계할 때 사용된다. Fig. 7.은 경기도 가천시의 월평균 외기 온도와 월평균 수평면 일사량 그래프이다. 월평균 일사량은 5월에 최고 195W/m², 12월에 최저 73W/m²이다. 국내는 여름철 장마 등으로 인해 4월에서 6월이 가장 높은 일사량을 나타낸다. 연평균 기온은 12.4°C이다.

4. 결과

4.1. PVT 시스템 발전량과 집열량

본 연구에서는 PVT의 발전량 및 집열량에 대한 계절별 특성을 분석하였다. 이를 위해 각 계절별 시간단위 에너지 생산량을 합산하여 분석을 진행하였다. 3월부터 5월을 봄, 6월부터 8월을 여름, 9월부터 11월을 가을, 12월부터 2월을 겨울로 설정하여 분석을 진행하였

Table 4. Simulation building information

	Total floor area (m ²)	Roof area (m ²)	U-value (W/m ² K)	PVT installation area (m ²)		PVT capacity (kW)	
				Roof	South facing wall	Roof	South facing wall
Dormitory 1	9,072	1,814	0.35	5,443	254	1,925	90
Dormitory 2	16,231	3,246	0.35	9,739	289	3,444	102
Dormitory 3	15,993	3,199	0.35	9,596	252	3,393	89
Engineering Building	18,652	3,731	0.35	11,191	331	3,957	117

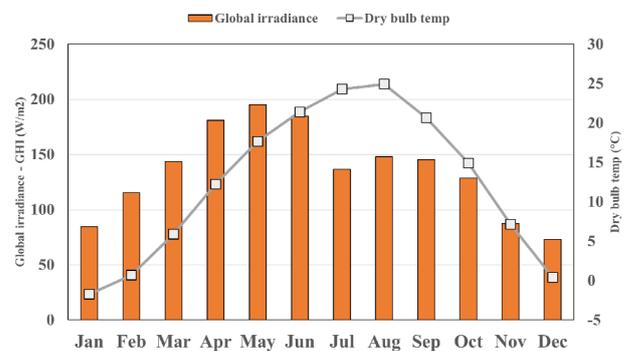


Fig. 7. Monthly average outdoor air temperature and global irradiance

다. Fig. 8.(a)는 지붕에만 PVT를 설치했을 경우 각 계절의 전력에 대한 생산 패턴을 시간별로 나타낸 그래프를 나타내었다. 태양광 발전량은 가을, 겨울에는 13시에, 봄, 여름에는 12시에 가장 많은 것으로 나타났다. 계절별 최대 태양광 발전량은 봄철 29.6MWh, 가을철 25.9MWh, 여름철 25.0MWh, 겨울철 24.14MWh 순으로 많은 것으로 분석되었다.

Fig. 8.(b)는 남쪽 벽면에만 PVT를 설치했을 경우 각 계절의 전력에 대한 생산 패턴을 시간별로 나타낸 그래프이다. 태양광 발전량은 가을, 겨울에는 13시에, 봄, 여름에는 12시에 가장 많은 것으로 나타났다. 계절별 최대 태양광 발전량은 겨울철 5.2MWh, 가을철 4.7MWh, 봄철 4.2MWh, 여름철 2.8MWh 순으로 분석되었다.

Fig. 8.(c)는 건물에 설치한 PVT를 모두 합했을 경우 각 계절의 전력에 대한 생산 패턴을 시간별로 나타낸 그래프이다. 태양광 발전량은 가을, 겨울에는 13시에, 봄, 여름에는 12시에 가장 많은 것으로 나타났다. 계절별 최대 태양광 발전량은 봄철 33.8MWh, 가을철

30.6MWh, 여름철 27.8MWh, 겨울철 29.0MWh 순으로 많은 것으로 분석되었다.

Fig. 9.는 캠퍼스 내 설치된 PVT의 위치별 연간 시간단위 태양광

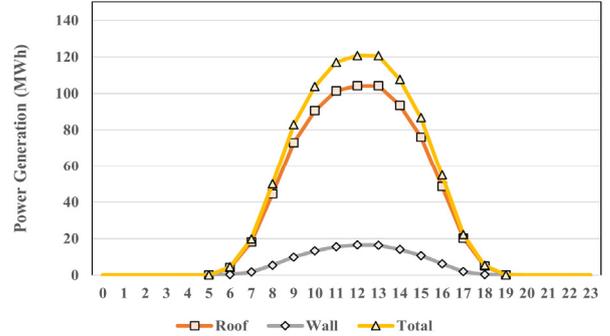
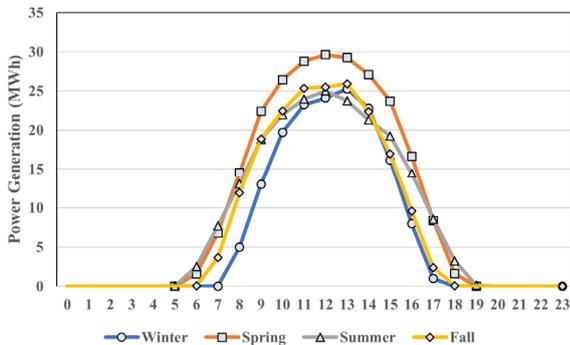
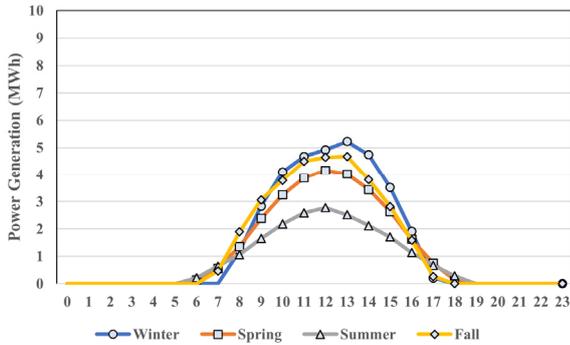


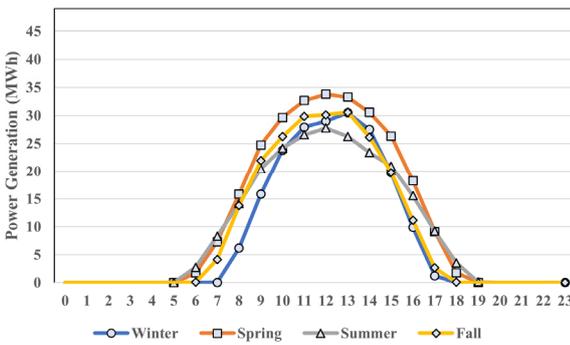
Fig. 9. Yearly PVT power generation in time series



(a) PVT on the roof of the building

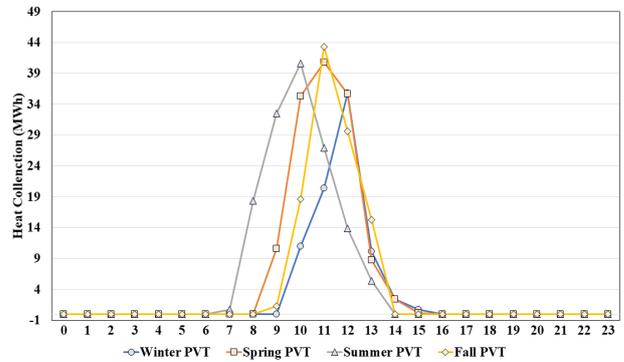


(b) PVT on the wall of the building

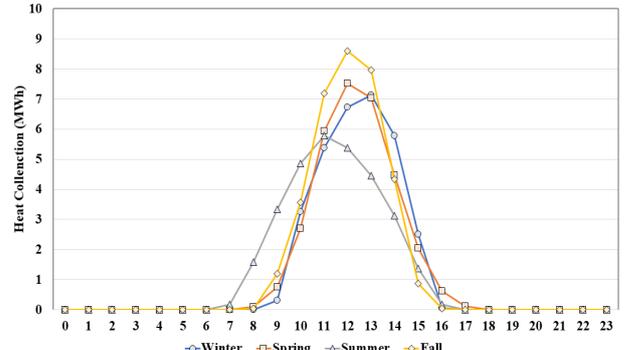


(c) PVT on the entire building

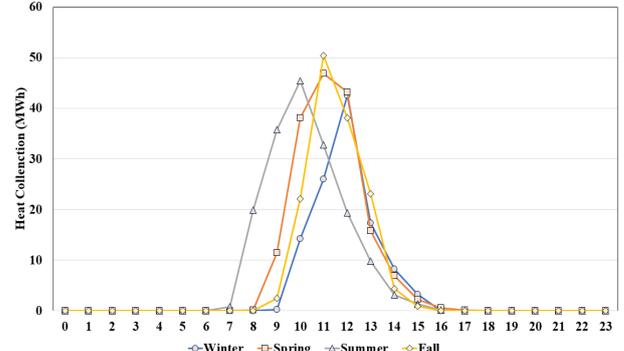
Fig. 8. Seasonal PVT power generation in time series



(a) PVT on the roof of the building



(b) PVT on the wall of the building



(c) PVT on the entire building

Fig. 10. Seasonal PVT thermal collection in time series

발전량 그래프이다. 지붕에만 PVT를 설치했을 경우 12시에 104.2MWh로 가장 높은 발전량을 보이는 것을 확인할 수 있다. 남쪽 벽면에만 PVT를 설치했을 경우 12시에 16.5MWh를 발전하며, 결과적으로 건물에 설치한 PVT를 모두 합했을 경우 12시에 120.7MWh의 전력을 생산하는 것으로 나타났다.

Fig. 10.(a)는 지붕에만 PVT를 설치했을 경우 각 계절의 열 생산 패턴을 시간별로 나타낸 그래프이다. 태양열 집열량은 겨울에는 12시에, 봄에는 11시에, 여름에는 10시에, 가을에는 11시에 가장 많은 것으로 나타났다. 각 계절별 최고 집열량은 가을철 43.3MWh, 봄철 40.9MWh, 여름철 40.6MWh, 겨울철 35.8MWh 순으로 나타났다.

Fig. 10.(b)는 남쪽 벽면에만 PVT를 설치했을 경우 각 계절의 열에 대한 생산 패턴을 시간별로 나타낸 그래프이다. 태양열 집열량은 겨울에는 13시에, 봄에는 12시에, 여름에는 11시에, 가을에는 12시에 가장 많았다. 각 계절별 최고 집열량은 가을철 8.6MWh, 봄철 7.5MWh, 겨울철 7.1MWh, 여름철 5.8MWh인 것으로 분석되었다.

Fig. 10.(c)는 건물에 설치한 PVT를 모두 합했을 경우 각 계절의 열에 대한 생산 패턴을 시간별로 나타낸 그래프이다. 결과적으로 태양열 집열량은 겨울에는 12시에, 봄에는 11시에, 여름에는 10시에, 가을에는 11시에 가장 많았다. 각 계절별 최고 집열량은 가을철 50.5MWh, 봄철 46.8MWh, 여름철 45.4MWh, 겨울철 42.5MWh 순으로 나타났다.

Fig. 11.은 연간 시간별 태양열 집열량이다. 지붕에만 PVT를 설치했을 경우 11시에 131.7MWh로 최고치이다. 남쪽 벽면에만 PVT를 설치했을 경우 12시에 26.6MWh로 최고치이다. 건물에 설치한 PVT를 모두 합했을 경우 12시에 156.0MWh로 최고치이다.

Table 5.는 지붕에 설치된 PVT와 남쪽 벽면에 설치한 PVT의 면적을 기반으로 SAM 프로그램을 통해 산정된 연간 태양광 발전량 및 태양열 집열량 비율을 나타내었다. 그 결과, 지붕에 설치한 PVT의 면적은 전체 PVT 설치 면적 대비 97%, 남쪽 벽면에 설치한 PVT

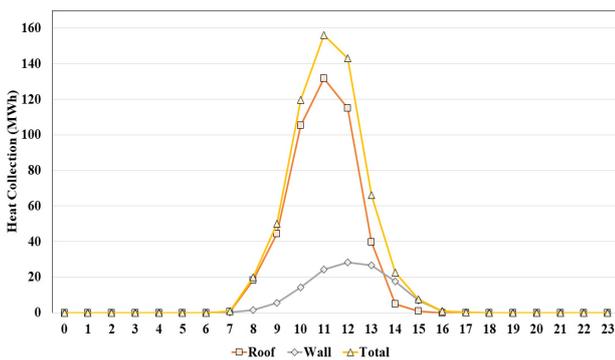


Fig. 11. Yearly PVT thermal collection in time series

Table 5. Proportion of PVT installation and energy generation

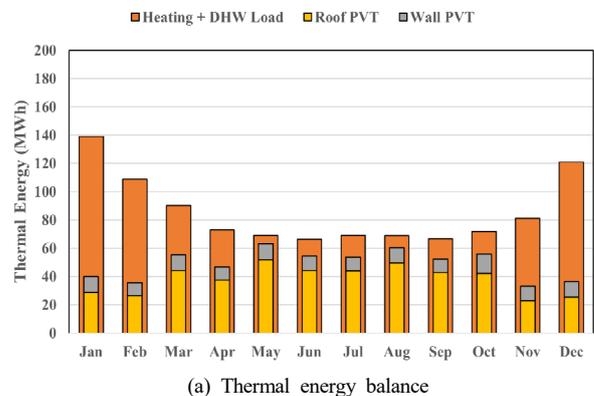
		Roof PVT	Wall PVT	Total PVT
Installation area	(m ²)	35,969.1	1,126.2	37,095.3
	(%)	97.0	3.0	100
Power generation	(MWh/y)	783.8	112.6	896.5
	(%)	87.4	12.6	100
Heat collection	(MWh/y)	463.2	128.8	592.0
	(%)	78.5	21.5	100

면적은 3%로 나타났다. 반면, 태양광 발전량에 대해서 지붕에 설치한 PVT는 전체 발전량의 87.4%이고, 남쪽 벽면에 설치한 PVT는 12.6%를 보이는 것으로 나타났다. 태양열 집열량에 대해서 지붕에 설치한 PVT는 전체 집열량의 78.5%이고, 남쪽 벽면에 설치한 PVT는 21.5%를 보이는 것으로 나타났다.

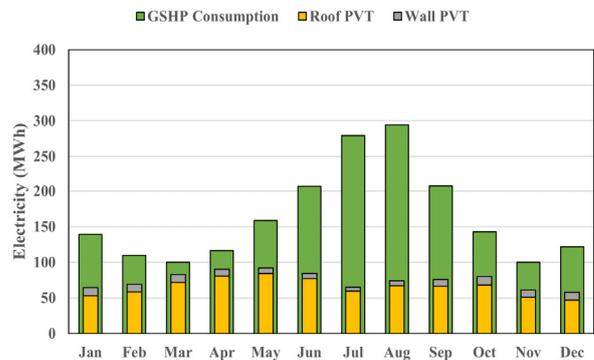
4.2. 연간 캠퍼스 에너지 자립율

Fig. 12.는 월별 캠퍼스의 열 및 전력 공급 밸런스를 나타낸 그래프이다. Fig. 12.(a)는 캠퍼스의 월별 난방, 급탕 부하량과 PVT 시스템의 집열량 비율을 나타내었다. 난방 및 급탕 부하량의 경우 최대값이 1월의 139.1MWh이고, 최소값이 6월의 66.4MWh이다. 지붕에만 PVT를 설치했을 경우 부하 대비 태양열 집열량의 최대값은 5월의 74.0%이고, 최소값은 1월의 20.9%이다. 남쪽 벽면에만 PVT를 설치했을 경우 부하 대비 태양열 집열량의 최대값은 10월의 19.3%, 최소값은 1월의 7.8%이다. 건물에 설치한 PVT를 모두 더한 경우 부하 대비 태양열 집열량의 최대값은 5월의 91.2%, 최소값은 1월의 28.6%까지 증대되는 것으로 나타났다. 지붕과 벽면에 PVT를 적용할 경우, 난방 부하가 적고 태양열 집열량이 많은 5월부터 10월까지 태양열 집열량이 난방 부하의 80% 이상 담당할 수 있는 것으로 나타났다.

Fig. 12.(b)는 열네트워크의 중앙 히트펌프에서 건물의 난방, 난방 및 급탕에 필요한 전력소비량 전체를 나타내고, PVT 발전량 그래프를 나타내었다. 히트펌프의 전력소비량은 최대값이 8월의 294.5MWh이고, 최소값이 11월의 99.8MWh이다. 이는 여름철 많은 냉방부하로 인해 히트펌프의 전력소비량이 증가한 것임을 확인할 수 있었다. 이러



(a) Thermal energy balance



(b) Electricity energy balance

Fig. 12. Monthly campus and renewable energy balance

한 히트펌프의 전력소비량을 PVT로 담당하기 위한 방안으로 지붕과 벽면에 설치하였을 때, 지붕에만 PVT를 설치했을 경우 히트펌프 전력 소비량 대비 태양광 발전량의 최대값은 3월의 71.9%이고, 최소값은 7월의 21.2%이다. 3월과 4월은 급탕부하를 제외하고 냉방 및 난방부하 요소는 작았기 때문에, 높은 자립율을 보일 수 있었으나, 여름철에는 높은 냉방부하를 보임에도 불구하고 낮은 발전량으로 자립율이 낮은 것을 확인할 수 있었다. 남쪽 벽면에만 PVT를 설치했을 경우 히트펌프 전력소비량 대비 태양광 발전량의 최대값은 3월의 10.8%, 최소값은 7월의 2.0%이다. 건물에 설치한 PVT를 모두 합했을 경우 히트펌프 전력소비량 대비 태양광 발전량의 최대값은 3월의 82.7%, 최소값은 7월의 23.2%이다. 히트펌프의 전력소비량은 8월에 가장 높고 태양광 발전량은 5월 달에 가장 많은 발전량을 보여, 계절간 부하와 발전량의 차이를 확인할 수 있었다.

Fig. 13.은 캠퍼스 건물의 열에너지 공급 및 생산을 위한 연간 에너지 밸런스를 나타내었다. 시뮬레이션을 통해 분석된 캠퍼스 전체 연간 냉방 부하는 3,702.1MWh이고, 난방 부하는 514.6MWh, 급탕 부하는 1,947.2MWh인 것으로 분석되었다. Fig. 13.(a)은 PV만 적용하였을 경우의 연간 에너지 밸런스이다. 지붕에 설치한 PV의 태양광 발전량은 783.9MWh이고, 남쪽 벽면에 설치한 PV의 태양광 발전량은 112.6MWh인 것으로 분석되었다. 지붕과 남쪽 벽면에 설치된 PV가 생산한 총 태양광 발전량은 896.5MWh로 히트펌프에 사용된다. 히트펌프의 난방, 급탕 전력소비량은 2,461.8MWh이고 냉방 전력소비량은 3,702.1MWh이다.

Fig. 13.(b)는 PVT를 적용하였을 경우의 연간 에너지 밸런스를 나타내었다. 지붕에 설치한 PVT의 태양열 생산량은 460.9MWh이고, 남쪽 벽면에 설치한 PVT의 태양열 생산량은 126.5MWh이다. 지붕 및 벽면 PVT에서 생산된 태양열은 200m³규모의 축열탱크에 각각 생산량의 15.8%와 8.2%인 72.7MWh, 10.4MWh의 열 손실을 제외하고 건물의 급탕 및 난방에 각각 389.2MWh와 116.1MWh의 온열이 공급된다. 태양광 발전량의 경우 Fig. 13.(a)와 마찬가지로 지붕과 남쪽 벽면에 설치된 PVT가 생산한 총 태양광 발전량은 896.5MWh로 히트펌프에 사용되는 것으로 나타났다.

Table 6.은 건물의 지붕 및 벽면에 PV를 설치하는 경우와 PVT를 설치하는 경우 연간 에너지 자립율을 분석하였다. 이때, 히트펌프의 전력소비량(P_{HP}) 대비 연간 에너지 자립율(R_{ZEB,HP})과 플러그 전력 소비량(P_{plug}) 및 조명 전력소비량(P_{lighting})을 포함한 캠퍼스 전력 소비량(P_{campus}) 대비 연간 에너지 자립율도 산정하였다.

그 결과, 지붕에만 PVT를 설치하는 경우, 연간 열생산에너지 자립율은 44.0%이며, PVT에서의 열공급으로 히트펌프전력소비량이 9.7% 감소하고, PV만 설치하는 방식 대비 열생산 에너지 자립율이 4.3% 증가한다고 분석되었다. 이때, 캠퍼스 전체 자립율 측면에서는 PVT를 이용했을 때 연간 에너지 자립율이 7.0%인 것을 알 수 있다. 또한 전력소비량이 1.7% 줄어들고, 에너지 자립율은 0.1% 증가하는 것으로 나타났다.

남쪽 벽면에만 PVT를 설치하는 경우, 연간 열생산에너지 자립율은 5.9%로 나타났으며, 전력소비량이 2.7% 감소하고, 열생산 에너지 자립율이 0.2% 증가하는 것으로 분석되었다.

결과적으로 지붕 및 벽면에 모두 PVT를 설치하는 경우, PVT의

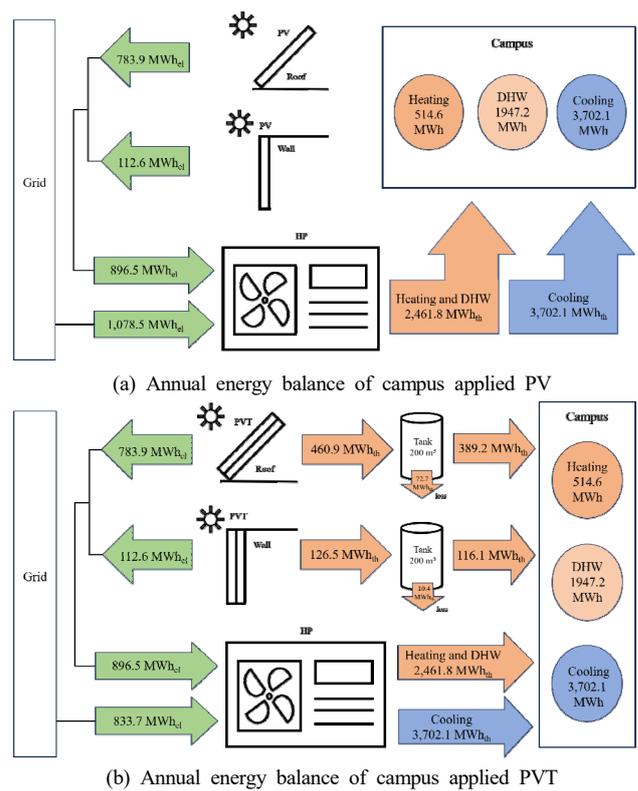


Fig. 13. Annual energy balance of campus

Table 6. Renewable share of energy used in campus

	PV			PVT		
	Roof	South facing wall	Total	Roof	South facing wall	Total
P _{campus} (MWh)	11,415.9			11,223.8	11,363.2	11,171.1
P _{HP} (MWh)	1,975.0			1,782.9	1,922.3	1,730.2
P _{gen} (MWh)	783.9	112.6	896.5	783.9	112.6	896.5
Q _{collect} (MWh)	-			460.9	126.5	587.4
R _{ZEB,HP} (%)	39.7	5.7	45.4	44.0	5.9	51.9
R _{ZEB} (%)	6.9	1.0	7.9	7.0	1.0	8.0

연간 열생산에너지 자립율은 51.9%이고, 열생산에 위한 히트펌프 전력소비량이 12.4% 감소하여 열생산 에너지 자립율이 6.5% 증가한다고 분석되었다. 지붕 위에만 PVT를 설치한 경우보다 열생산 에너지 자립율이 44.0%에서 51.9%로 7.9% 증가하는 것으로 나타났다. 캠퍼스 에너지 전체의 에너지 자립율을 산정하면, PVT를 이용했을 때 연간 에너지 자립율이 8.0%를 나타낼 수 있는 것으로 분석되었다.

5. 결론

본 연구에서는 캠퍼스 건물을 대상으로 PVT를 적용한 경우에 대한 열에너지부하 절감율 및 전력 에너지 자립율 증대효과를 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 그 결과, 에너지 자립율 측면에서 지붕에만 PVT를 설치하였을 경우 연간 열생산에너지 자립율은 44.0%, 연간 에너지 자립율은 7.0%로 나타났다. 남쪽 벽면에만 PVT를 설치

한 경우 연간 열생산에너지 자립율은 5.9%로 분석되었으며, 지붕 및 벽면에 모두 PVT를 설치한 경우 연간 열생산에너지 자립율은 51.9%, 연간 에너지 자립율은 8.0%를 달성하는 것으로 분석되었다. 건물 전체의 에너지 자립율은 히트펌프의 열생산에너지 자립율에 비해 큰 변화는 없는 것으로 분석되었으나, PVT 시스템의 적용을 통해 열공급에 대한 중요한 에너지 절감효과를 나타낼 수 있는 것으로 분석되었다. 추가적으로 건물 에너지 자립율을 높이기 위해서는 겨울철 히트펌프의 열원 온도를 더 높이기 위한 방안 등 히트펌프의 COP를 높이는 방안이 요구되는 것으로 분석되었다.

난방 및 급탕 부하량과 태양열 집열량의 경우 난방 수요 증가에 따라 겨울철에는 부하량과 집열량이 차이가 나지만, 5월부터 10월에는 집열량이 부하의 75% 이상을 담당할 수 있는 것으로 분석되었다. 히트펌프 전력소비량과 태양광 발전량의 경우에도 난방 수요 증가에 따라 여름철에는 전력소비량과 발전량이 차이가 나지만, 11월부터 4월에는 발전량이 전력소비량의 45% 이상을 담당한다. 전력소비량 대비 발전량이 난방 및 급탕 부하 대비 집열량 보다 낮은 점을 보아 캠퍼스의 자립율을 더욱 높이기 위해서는 PV를 유희공간 혹은 주변건물에 추가로 설치해 전기 생산량을 증대시키는 방안이 적절한 것으로 나타났다. 결론적으로 차세대 지역냉난방시스템에 PVT를 적용하였을 때 히트펌프의 전력소비량과 건물 전체 전력 소비량이 감소하였고, 열생산에너지 자립율과 에너지 자립율이 높아지는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 차세대 지역냉난방시스템에 적용된 PVT의 커뮤니티에서의 에너지 절감 효과를 보일 수 있는 것으로 분석되었다. 추가적으로 후속 연구에서는 차세대 지역냉난방시스템에 PVT 적용에 따른 열네트워크에 대한 상세 분석과 시스템 전반에 대한 에너지비용 절감효과 및 초기투자비용을 고려한 최적 용량 산정에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

본 연구는 2023년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(과제번호 : RS-2023-00236325)의 지원과 한국에너지기술연구원의 주요사업(C4-2421)을 재원으로 수행한 연구과제의 결과입니다.

References

- [1] World Meteorological Organization (WMO), WMO global annual to decadal climate update, 2023, p.2.
- [2] Z. Liu et al., Near-real-time monitoring of global CO2 emissions reveals the effects of the COVID-19 pandemic, *Nature Communications*, 11, 2020, 5172.
- [3] B. Mittertutzner et al., Review of heating and cooling technologies for buildings: A techno-economic case study of eleven European countries, *Energy*, 284, 2023, 129252.
- [4] 최원종 외 4인, 제로에너지 커뮤니티 구현을 위한 동시냉난방 히트펌프기반 지역냉난방 시스템의 에너지 저감 효과 분석, 한국건축환경설비학회 논문집, 제17권 제6호, 2023.12, pp.434-445. // (W.J. Choi et al., Energy saving potential of simultaneous heating and cooling heat pump-based district heating and cooling systems for a zero-energy community, *Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems*, 17(6), 2023.12,

- pp.434-445.)
- [5] 김민휘 외 4인, 플러스에너지커뮤니티 구현을 위한 5세대 지역냉난방시스템 적용성 분석, 한국태양에너지학회 2023년도 춘계학술발표대회논문집, 2023.04, p.147. // (M.H. Kim et al., Energy performance analysis of 5th generation district heating and cooling system for plus energy community, 2023 Korea Solar Energy Society Annual Spring Conference, 2023.04, p.147.)
- [6] H. Lund et al., 4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems, *Energy*, 68, 2014.04, pp.1-11.
- [7] 김강현, 최영진, 공기식 PVT 시스템의 태양에너지 활용 효과 분석, 대한건축학회 추계학술발표대회논문집, 2022.10, p.923. // (K.H. Kim, Y.J. Choi, Analysis of solar energy utilization effect of Air-based PVT system, Autumn Annual Conference of AIK, 2022.10, p.923.)
- [8] H.J. Joo et al., Long-term performance evaluation of liquid-based photovoltaic thermal (PVT) modules with overheating-prevention technique, *Energy Conversion and Management*, 296, 2023.11, 117682.
- [9] O.A. Qureshi et al., Thermal or photovoltaic rear sides? A parametric comparison between photovoltaic thermal and bifacial technology, *Energy Conversion and Management*, 289, 2023.08, 117134.
- [10] E. Swayze, K. Signh, Techno-economic-environmental decision-making approach for the adoption of solar and natural gas-based trigeneration systems, *Energy Conversion and Management*, 289, 2023.08, 117189.
- [11] H. Tao, J. Zhou, F. Musharavati, Techno-economic examination and optimization of a combined solar power and heating plant to achieve a clean energy conversion plant, *Process Safety and Environmental Protection*, 174, 2023.06, pp.223-234.
- [12] Z.B. Seddik et al., Hybridization of Taguchi method and genetic algorithm to optimize a PVT in different Moroccan climatic zones, *Energy*, 250, 2022.07, 123802.
- [13] I. Pakere, D. Lauka, D. Blumberga, Solar power and heat production via photovoltaic thermal panels for district heating and industrial plant, *Energy*, 154, 2018.07, pp.424-432.
- [14] A. Behzadi, A. Arabkoohsar, Comparative performance assessment of a novel cogeneration solar-driven building energy system integrating with various district heating designs, *Energy Conversion and Management*, 220, 2020.09, 113101.
- [15] S. Bordignon et al., A solar-assisted low-temperature district heating and cooling network coupled with a ground-source heat pump, *Energy Conversion and Management*, 267, 2020.09, 115838.
- [16] C. Christensen et al., Simplified solar water heater simulation using on a multi-mode tank model, National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2014.