RESEARCH ARTICLE

실제 건물 적용을 고려한 태양광열 및 공기열원 융복합 시스템의 동적 해석

채수원[1] · 배상무[2] · 남유진[3†]

[1]부산대학교 건축공학과, 석박사통합과정
[2]부산대학교 건축공학과, 박사과정
[3]부산대학교 건축공학과, 교수

Dynamic Analysis of the Integrated System using Photovoltaic-Thermal and Air Source Heat Pump Considering Real Building Application

Chae Soowon[1] · Bae Sangmu[2] · Nam Yujin[3†]

[1]Graduate Student, Department of Architectural Engineering, Pusan National University
[2]Ph.D. Candidate, Department of Architectural Engineering, Pusan National University
[3]Professor, Department of Architectural Engineering, Pusan National University

[†]Corresponding author: namyujin@pusan.ac.kr

Abstract

As regulations on renewable energy are strengthened and zero-energy buildings are becoming mandatory, research on the commercialization of renewable energy for heating and cooling buildings is accelerating. However, geothermal, photovoltaic, and solar heat are mostly applied as single systems, and there are few cases in which the disadvantages of individual systems are overcome or where the advantages are maximized. The purpose of this study is to develop an analysis model that can respond stably to heating and cooling loads in buildings and to analyze system performance. To stabilize the control of cooling, heating, and hot water supply, the operation method is divided into four cycles. In seasons when cooling and heating loads are significantly decreased, heating and cooling are performed directly by the heat pump without using storage tanks. In addition, a case study using late-night power was conducted to investigate efficient electricity use. Without late-night power, the heat pump coefficient of performance (COP) during the heating period was 2.5 and the monthly average heat exchange rate (HER) was 240 kWh; meanwhile, the COP during the cooling period was 3.99 and the HER was 880 kWh. The energy self-sufficiency rate during the heating period was 2.02 times higher than the cooling period. However, as a result of using late-night power, the electricity rate and COP during heating decreased by 2.5% and 2.04%, respectively, and the COP during cooling increased by 0.1%. This study presents basic data for the implementation of renewable energy systems and the design of predictive models.

Keywords: 공기열원히트펌프(Air source heat pump), 태양광열 모듈(Photovoltaic-thermal module), 해석모델(Analysis model), 냉난방부하(Heating and cooling load), 심야전력(Late-night power), 에너지자립률(Energy self-sufficiency rate)

OPEN ACCESS

Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.42, No.2, pp.35-43, April 2022
https://doi.org/10.7836/kses.2022.42.2.035

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 1 November 2021

Revised: 28 March 2022

Accepted: 6 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.

1. 서 론

최근 제로에너지 건축물 의무화 확대 및 신재생 에너지 공급의무비율 상향함에 따라 신재생에너지 보급기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 또한, 공공건물 제로에너지건축물 의무화가 시행되고 2025년까지 30세대 이상의 공동주택을 대상으로 범위가 확대될 예정이다[1]. 하지만 신재생에너지로 사용되는 지열과 태양광, 태양열은 대부분 단일시스템으로 적용되는 경우가 많으며 개별 시스템의 피크부하 대응의 단점을 극복하거나 장점을 극대화 시키는 사례들은 드물다. 최근 기존 단일시스템의 한계를 극복하기 위한 방법으로, 두 개의 열원으로부터 건물 냉난방 부하에 대응하는 복합열원 시스템의 개발 및 상용화 연구가 가속화되고 있다. Nam[2]은 태양열 및 지열을 이용한 복합열원 시스템의 최적설계를 위해 동적 에너지 시뮬레이션을 사용하여 시스템 성능해석을 진행하였고, 태양열 집열판 및 지중열교환기의 설치용량을 변경하여 케이스 스터디를 실시하였다. 하지만, 다양한 조건의 해석에도 불구하고 태양열 집열면적은 전체 시스템 성능에 큰 영향을 미치지 못함을 확인하였다. 한편 Mark et al.[3]은 태양열 사용 효율을 개선하기 위하여 태양광과 태양열을 융합한 태양광열 모듈을 이용하여 복합열원 실증실험을 진행하였다. 복합열원 시스템은 하나의 태양광열 모듈과 히트펌프, 고온 및 저온 축열조로 구성되며, 태양광열 모듈의 관내 유체 온도가 고온축열조 온도보다 높아질 경우 고온축열조로 열을 공급하게 된다. 하지만, 겨울철 지나친 축냉과 부족한 축열은 난방 및 급탕사용에 있어 불안정한 에너지 공급을 야기하였다. 따라서 태양열을 보다 효율적으로 이용하고 난방 및 급탕 부하에 대응이 가능한 설계수법이 필요한 실정이다. 본 연구에서는 태양광열 시스템과 공기열원 히트펌프 시스템의 융복합 가능성을 분석하기 위해 건물 부하모델을 포함한 전체 시스템 모델을 구축하고 연간 시뮬레이션을 통해 본 시스템의 실현가능성을 분석하였다. 본 논문에서는 운전방법에 따른 해석모델을 구축하고 케이스 스터디에 관한 복합열원 시스템 성능해석 결과를 서술한다.

2. 연구방법

2.1 해석모델 개요

본 연구에서는 융복합 모델을 제안하기 위해 TRNSYS18 소프트웨어를 사용하여 시스템 성능을 동적으로 해석하였다. Fig. 1은 복합열원 시스템의 개념도를 나타내며, 실증사이트에 구축된 복합열원 시스템에 기반한다. 태양광열 모듈(Photovoltaic-thermal module, PVT module)은 급탕 축열조(Storage tank1, ST1)와 냉난방 축열조(Storage tank2, ST2)의 온도에 의해 열 공급이 제어되고, 공기열원 히트펌프(Air source heat pump, ASHP)는 ST2 온도에 의해 열 공급이 제어된다. 또한, 보일러는 PVT 모듈 온도와 ST1 온도에 의해 열 공급이 제어되며, 팬 코일 유닛(Fan coil unit, FCU)과 삼방밸브인 FD (Flow diverter)와 FM (Flow mixer)은 운전 기간과 재실자 유무 그리고 실내온도에 의하여 운전이 제어된다. Fig. 2는 기간별 냉난방 및 급탕 운전방법에 대한 개요도이며, 안정적인 냉난방 및 급탕 부하 대응을 위하여 운전은 4주기로 구분하였다. 실내 냉난방 부하가 낮

은 간절기에는 ST2를 이용하지 않고 히트펌프 직접운전을 통하여 냉난방운전을 하도록 설정하였다. ST2 축열운전은 PVT의 온도가 ST2의 온도보다 높을 경우 PVT의 집열량이 축열되며, 이외에는 히트펌프에서 생산된 열이 축열된다. 또한, PVT 모듈의 온도가 ST1 설정온도 이하일 경우, 보일러를 이용하여 축열운전을 수행하게 된다.

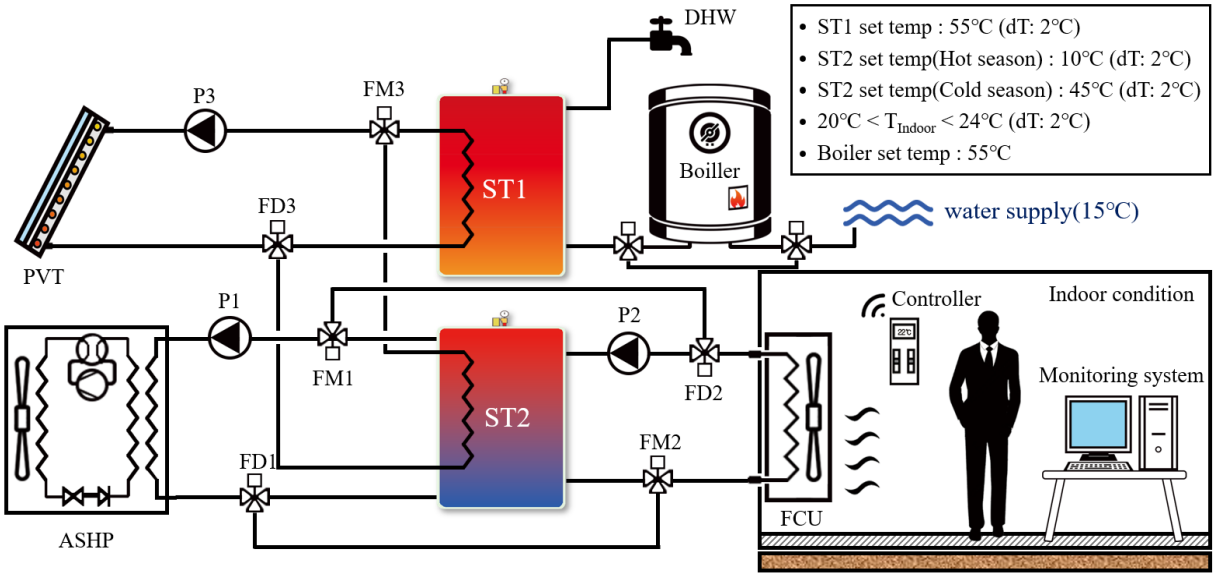


Fig. 1 Schematic diagram of the integrated system

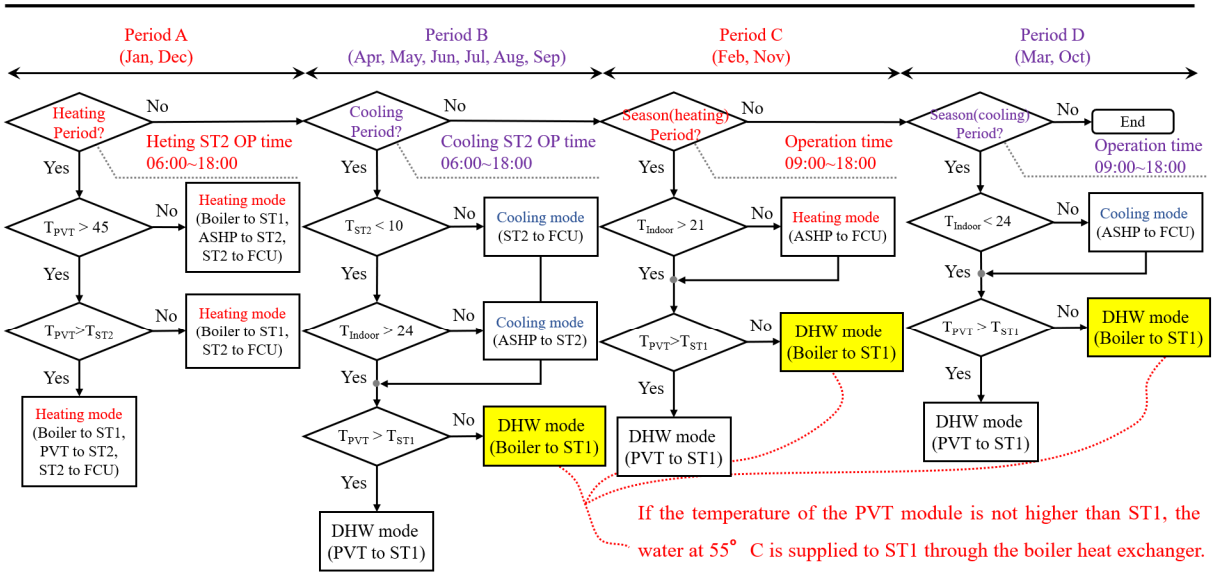


Fig. 2 Conceptual diagram of operation method by period

2.2 건물 부하모델

시뮬레이션 모델은 부산광역시 기장군에 위치한 실증사이트를 기반으로 설계하였으며, Fig. 3은 실증사이트 실내 및 구축된 시스템을 나타낸다. 부하모델의 바닥면적은 120 m^2, 공조공간은 324 m^2, 창면적은 남향 22.8 m^2, 북향 3.24 m^2이며, 건물 재료 물성은 국토교통부고시 건축물의 에너지절약설계기준[4]을 기준을 참고하였다. 또한, 실내부하(인체부하, 조명부하, 기기부하)는 ASHRAE standard를 참고하여 Table 1과 같이 산정하였다[5]. 한편, 기상데이터는 국내 도시별 기상데이터를 제시하고 있는 한국패시브건축협회의 표준기상데이터 자료[6]를 사용하였다.

Mechanical room　　Photovoltaic-thermal module　　Indoor (PC room)

Fig. 3 Demonstration site of integrated system

Table 1 Condition of load model

Parameter		Input Value	Reference
Infiltration flow		0.730 kg/h	ASHRAE standard 62.1-2019[7]
Ventilation flow		3.65 kg/h	
Floor area per person		0.050 person/m^2	
Internal heat gain	People	122 W/person	ASHRAE standard 55-2020[8]
	Light	6.89 W/m^2	ASHRAE standard 90.1-2019[9]
	Equipment	10.8 W/m^2	ASHRAE handbook hvac application-2015[10]

2.3 기기 모델

실증사이트 건물은 공기열원 히트펌프, 태양광열 모듈, 순환펌프, 팬 코일 유닛, 냉난방 축열조, 급탕 축열조, 보일러, PLC 제어기판, 컨트롤러, 인버터로 구성된 복합열원 시스템을 갖추었다. 해석모델의 시스템 용량은 실증사이트를 기반으로 Table 2와 같이 구성하였다. 해석모델은 태양광열 시스템(Type 560), 공기열원 히트펌프(Type 941), 3대의 Fan Coil Unit (Type 987)를 두 개의 축열조와 결합한 것으로 시스템을 구성으로 하였으며, 각각의 모델은 미분방정식에 모듈화되어 있다.

Table 2 Performance of integrated system

Parameter		Input Value	Reference
PVT module	Size	20 m × 10 m	Demonstration site
	Angle	45.0°	
	Number of tubes	210	
	Thermal conductivity of the absorber	237 W/m·K	
Air source heat pump	Rated cooling capacity	8,000 W	
	Rated cooling power	2,400 W	
	Rated heating capacity	9,000 W	
	Rated heating power	2,400 W	
Fan coil unit	Cooling capacity	15,900 W	
	Heating capacity	21,500 W	
Pump 1	Rated flow rate	1,740 kg/h	
Pump 2	Rated flow rate	1,740 kg/h	
Pump 3	Rated flow rate	2,700 kg/h	
Boiler	Rated capacity	25,700 W	
	Rated flow rate	750 kg/h	
	Boiler efficiency	87.4%	

3. 시스템 성능해석

3.1 융복합 시스템 해석

(1) 난방 대표일 성능해석

Fig. 4는 난방 대표일 기준 복합열원 시스템 성능해석을 나타내며, 난방부하가 가장 높은 날을 난방 대표일로 선정하였다. 해석모델은 ST2의 온도가 45℃ 이하일 경우, ST2 온도가 47℃에 도달할 때까지 PVT와 히트펌프를 이용한 축열운전을 실시하고, ST2의 온도가 43℃ 이상이며 실내온도가 21℃ 이하일 경우, ST2 열원을 이용하여 실내온도가 23℃에 도달할 때까지 난방운전을 실시한다. 이때, 난방 대표일 기준 히트펌프 소비전력은 10.2 kWh, 히트펌프 생산 열량은 22.5 kWh이며, 히트펌프 COP (Coefficient of performance)는 2.22이다. COP는 외기온이 높아짐에 따라 증가하는 것을 확인하였다.

(2) 냉방 대표일 성능해석

Fig. 5는 복합열원 시스템의 냉방 대표일 성능해석을 나타내며, 냉방부하가 가장 높은 날을 냉방 대표일로 선정하였다. 냉방 운전은 ST2의 온도가 10℃ 이상일 경우, 히트펌프를 이용하여 ST2의 온도가 8℃에 도달할 때까지 축냉운전을 실시하고, ST2의 온도가 10℃ 이하이며 실내온도가 24℃ 이상일 경우, ST2 열원을 이용하여 실내온도가 22℃에 도달할 때까지 냉방운전을 실시한다. 이때, 냉방 대표일 기준 히트펌프 소비전력은 12.2 kWh, 히트펌프 생산 열량은 47.3 kWh, 히트펌프 COP는 3.88으로 확인하였다.

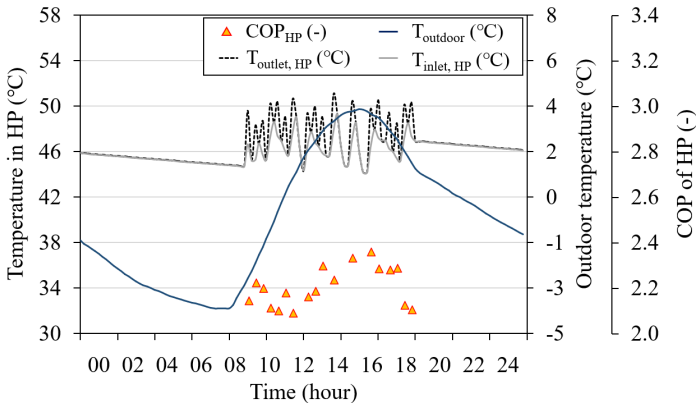


Fig. 4 Performance of heating operation (representative day)

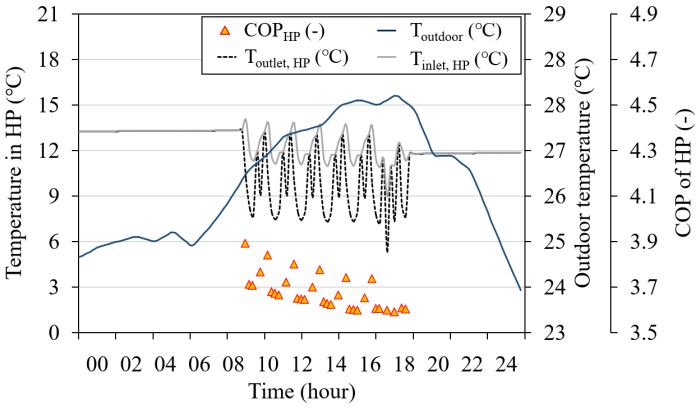
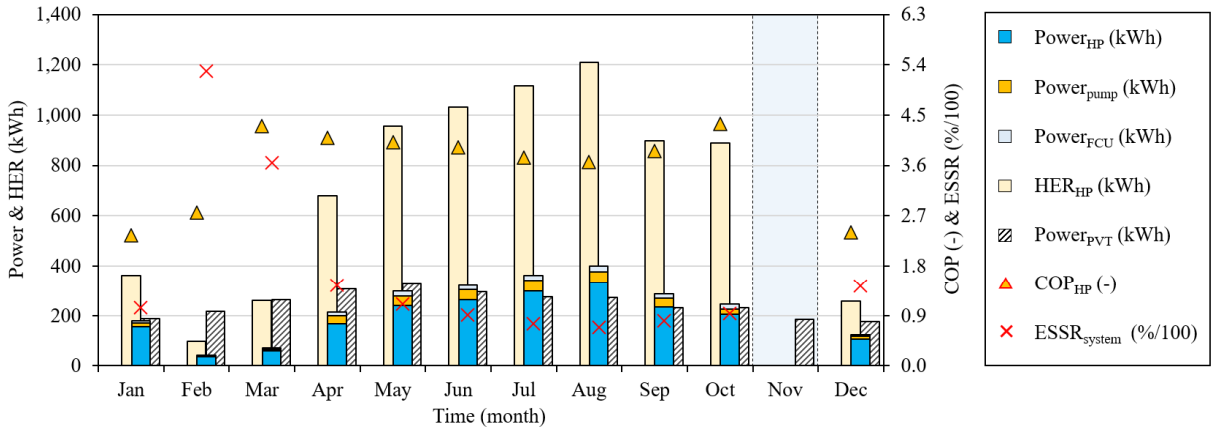


Fig. 5 Performance of cooling operation (representative day)

(3) 연간 시스템 성능해석

Fig. 6은 연간 시스템 성능해석을 나타낸다. 난방기간 Period A와 Period C의 히트펌프 월평균 COP는 2.38, 2.76, HER (Heat exchange rate)[11]은 310 kWh, 98.3 kWh로 나타났다. 또한 실내 난방부하가 발생하지 않은 11월에는 히트펌프가 동작하지 않은 것을 확인하였다. 냉방기간인 Period B와 Period D의 COP는 3.88, 4.32, HER은 982 kWh, 574 kWh로 나타났다. 한편, 전력 생산효율을 확인하기 위하여 건축물 에너지효율등급 인증 및 제로에너지건축물 인증 기준[12]에서 제시한 에너지자립률(Energy self sufficiency rate, ESSR)을 활용하였으며, 식(1)로 산출하였다. ESSR은 2월에 가장 높게 나타났으며, 난방기간이 냉방기간에 비해 약 2배 더 높은 수치를 보였다.

$$ESSR[\%] = \frac{Electricity\,ge \neq ration\,(kWh)}{Electricity\,consumption\,(kWh)} \times 100 \quad (1)$$



※ The heating operation using ASHP is operated for heating supply using ST2 when period A (Jan, Dec).
The cooling operation using ASHP is operated for cooling supply using ST2 when period B (Apr, May, Jun, Jul, Aug, Sep).
The heating operation using ST2 is operated for heating supply using ASHP when period C (Feb, Nov).
The cooling operation using ST2 is operated for cooling supply using ASHP when period D (Mar, Oct).

Fig. 6 System performance of integrated system

3.2 운전방법에 따른 전기료 분석

(1) 운전방법 결정

복합열원 시스템의 전기료 절감 및 COP를 높이기 위하여, 심야전력 및 ST2 이용에 관한 케이스 스터디를 실시하였다. 운전방법은 ST2를 이용하지 않은 히트펌프 단독운전, ST2를 이용한 냉난방운전, 심야전력 사용 여부로 구분한다. Table 3은 운전방법에 따른 Case를 나타낸다.

Table 3 Classification of operation methods

	Case A	Case B	Case C	Case D	Case E
Independent operation of HP	○	×	○	○	×
Using ST2	○	○	×	○	○
Using late night power	×	×	×	○	○

(2) 케이스별 전기료 분석

Table 4는 운전방법에 따른 시스템 전기료와 히트펌프 COP를 나타낸다. 심야전력을 이용한 Case D와 Case E는 Case A와 Case B에 비교하여 연간 약 2.5% 전기료 절감 효과를 보였다. 하지만 히트펌프 단독운전을 실시하지 않은 Case E의 경우 난방운전 전기료가 약 3% 증가한 것을 확인하였다. 이는 새벽 시간 낮은 외기온을 사용하여 ST2 축열운전을 실시하였기 때문으로 판단된다.

Table 4 Case study on operation performance and electricity cost

month	Case A		Case B		Case C		Case D		Case E	
	COP_{HP} (-)	Fee_{system} (KRW)	COP_{HP} (-)	Fee_{system} (KRW)	COP_{HP} (-)	Fee_{system} (KRW)	COP_{HP} (-)	Fee_{system} (KRW)	COP_{HP} (-)	Fee_{system} (KRW)
Jan	2.35	23,800	2.34	24,000	2.82	21,600	2.33	23,600	2.33	23,300
Feb	2.76	11,000	2.37	12,300	2.76	10,800	2.76	11,000	2.33	11,700
Mar	4.30	13,900	4.17	12,700	4.30	13,900	4.30	13,900	4.17	12,300
Apr	4.10	27,000	4.10	27,600	4.41	28,700	4.10	26,100	4.10	26,000
May	4.02	34,800	4.02	35,300	4.37	38,500	4.02	34,100	4.02	34,300
Jun	3.92	37,300	3.92	37,400	4.24	42,300	3.93	36,000	3.93	36,000
Jul	3.75	40,900	3.75	41,200	4.09	47,200	3.75	40,100	3.75	40,100
Aug	3.66	44,400	3.66	44,500	4.01	51,700	3.67	43,500	3.67	43,500
Sep	3.86	33,800	3.86	34,100	4.22	36,700	3.87	33,400	3.87	33,400
Oct	4.34	30,200	4.00	29,500	4.34	30,000	4.34	30,200	4.00	29,000
Nov	-	0	2.98	8,400	-	0	-	0	2.75	7,600
Dec	2.41	18,600	2.36	18,000	2.80	16,500	2.36	17,800	2.35	18,000
Average	3.59	26,300	3.46	27,000	3.85	28,200	3.58	25,800	3.44	26,300

4. 결 론

본 연구에서는 태양광열 모듈과 공기열원 히트펌프를 융합한 성능해석 모델을 구축하고 시스템 성능 향상 및 전기료 절감을 위하여 시뮬레이션 모델에 관한 성능해석을 실시하였다. 공기열원 히트펌프는 설치 및 유지보수 비용이 저렴하여 다양한 기후조건 및 지형에서의 이용을 용이하게 한다. 하지만, 혹한기와 혹서기에 발생하는 피크부하에 대응하기 어려운 점이 있다. 본 논문에서 제안한 복합열원 시스템은 기간별로 운전방법을 다르게 하여 건물 냉난방 부하에 안정적으로 대응할 수 있게 해석모델을 구축하였으며, 동적 에너지 시뮬레이션을 이용하여 복합열원 시스템에 관한 해석을 실시하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 복합열원 시스템의 연 평균 히트펌프 COP는 3.59, HER은 706 kWh이며, 태양광을 이용하여 생산한 전력량은 연간 총 2,968 kWh, 복합열원 시스템에서 소비한 전력량은 연간 총 2,543 kWh이다. 전력생산량에 따른 에너지자립률은 116%로, 개별 시스템보다 피크부하에 안정적인 대응이 가능할 것으로 기대된다.

(2) 주간에 발생하는 피크부하의 안정적인 대응을 위하여, 운전방법에 따른 케이스 스터디를 수행하여 심야전력 사용률을 검토하였다. 기간에 따라 간헐적인 ST2 축열운전을 실시한 Case D의 경우, 월 평균 전기요금은 25,800원으로 운전방법 중 가장 저렴한 결과를 나타냈다. Case D가 다른 운전방법에 비해 전기료가 저렴한 이유는 냉방운전 중 심야시간대의 낮은 외기온을 열원으로 이용하여 ST2 축냉운전을 실시하여 심야전력 사용량을 높이고, 간절기 ST2의 축열부하가 발생하지 않았기 때문으로 판단된다. 특히 심야전력을 사용하지 않은 운전방법에 비하여 연간 약 2% 이상의 전력 사용량 절감 효과를 보였다.

(3) 케이스 스터디를 기간별로 해석한 결과, 1월과 12월은 히트펌프 단독 난방운전, 2월과 11월은 축열조 및

심야전력을 이용한 난방운전, 3월과 10월은 히트펌프를 이용한 단독 냉방운전, 4월~9월은 축열조 및 심야전력을 이용한 냉방운전을 실시하는 것이 융복합 시스템의 전력사용량을 획기적으로 낮출 수 있을 것으로 사료된다.

해석 연구의 경우, 해석 조건의 정확성이나 기상데이터의 신뢰성에 따라 성능 예측 결과에 오차가 발생할 수 있다. 따라서, 향후, 실증사이트에서 측정된 실측 결과와의 비교 분석을 실시하여 해석 모델의 타당성을 검증할 계획이다.

후 기

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2021R1A2C2014259).

REFERENCES

1. Ministry of Trade, Industry and Energy, Act on the Promotion of the Development, Use, and Diffusion of New And Renewable Energy, 2021.
2. Nam, Y. J., Study on the Optimum Design of A Heat Pump System using Solar and Ground Heat, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 24, No. 6, pp. 509-514, 2012. http://dx.doi.org/10.6110/KJACR.2012.24.6.509.
3. Mark, D., Bengt, P., and Simon, F., Performance of a Demonstration Solar PVT Assisted Heat Pump System with Cold Buffer Storage and Domestic Hot Water Storage Tanks, Energy and Buildings, Vol. 188-189, pp. 46-57, 2019. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.12.042.
4. Ministry of land, Infrastructure and Transport, Green Buildings Construction Support Act, 2018.
5. Bae, S. M., Chae, S. W., and Nam, Y. J., Performance Analysis of Integrated Photovoltaic-thermal and Air Source Heat Pump System through Energy Simulation, Energies, Vol. 15, No. 2, pp. 528, 2022. https://doi.org/10.3390/en15020528.
6. Passive House Institute Korea, Climate Data, 2013.
7. ASHRAE, Standard 62.1-2019, Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality, 2019.
8. ASHRAE, Standard 55-2020, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, 2020.
9. ASHRAE, Standard 90.1-2019, Energy standard for buildings except low-rise residential buildings, 2019.
10. ASHRAE, Handbook, Heating, Ventilating, a ND Air-conditioning Applications, 2015.
11. Nam, Y. J., Feasibility Study of Ground Source Heat Pump System according to the Local Climate Condition, Korea Institute of Ecological Architecture and Environment, Vol. 14, No. 4, pp. 127-131, 2014. https://doi.org/10.12813/kieae.2014.14.4.127.
12. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Certification of Green Buildings, 2021.