

지열원과 수열원을 이용한 하이브리드 히트펌프 시스템의 에너지 성능 비교 분석 연구

A Study on Comparative Analysis of Energy Performance of Hybrid Heat Pump Systems Using Ground Heat Source and Water Heat Source

박시훈(Sihun Park), 김종현(Jonghyun Kim)*, 민준기(Joonki Min)**†

경희대학교 기계공학과 석사과정, *한국폴리텍1대학 서울정수캠퍼스 그린에너지설비과 조교수, **경희대학교 기계공학과 학술연구교수

Graduate Student, Department of Mechanical Engineering, KyungHee University, Yongin 17104, Korea

*Assistant Professor, Department of Green Energy Installation, Seoul Jungsu Campus of Korea Polytechnic, Seoul 04392, Korea

**R&D Professor, Department of Mechanical Engineering, KyungHee University, Yongin 17104, Korea

Abstract

In this study, the performance of the single heat source system and the hybrid system was comparatively analyzed. Case 1 is a ground heat source system, and Case 2 is a water heat source system. Case 3, a hybrid system, reduced the capacity of the ground heat source and applied a water heat source as an auxiliary heat source, and Case 4 was composed of a system that applied a water heat source as an auxiliary heat source to the ground heat source system. As a result of the simulation, in case 3, energy consumption was reduced by up to 2.67% compared to ground sources for cooling. In Case 4, COP was improved by up to 10.02% compared to ground sources during cooling, and EST was calculated to be 2.42°C lower. During heating, 0.83% was improved compared to the water heat source. At this time, the EST was calculated to be 2.25°C higher than the water heat source.

Key words: Ground heat source(지열원), Water heat source(수열원), Hybrid heat pump(하이브리드 히트펌프), Heat pump(히트펌프), COP(Coefficient Of Performance, 성능계수)

†Corresponding author

E-mail: jkmin@khu.ac.kr

접수일: 2021년 11월 01일, 심사일 1차: 2021년 11월 16일, 2차: 2021년 11월 26일; 채택일: 2021년 11월 26일

기호 설명

CMM : 분당 입방 미터(Cubic meter per minute)

LPM : 분당 리터(liter per minute)

COMP: 압축기(Compressor)

HX : 열교환기(Heat Exchanger)

FCU : 팬 코일 유닛(Fan Coil Unit)

EEV : 팽창밸브(Electronic Expansion Valve)

EST : 열원-히트펌프 입구 순환수 온도(Entering Source Temperature) [°C]

1. 서론

에너지 절약 및 환경보호가 대두되는 시점에서 신재생에너지는 필연적으로 활용되는 자원이다. 그 중 저온열원은 히트펌프 등의 열원으로 사용되며 성능 및 에너지 효율을 높여주는 역할을 한다. 히트펌프에 적용되는 저온 열원 중에는 지열원과 수열원이 있으며, 지열원과 수열원은 공기 열원 대비 외기 온도에 영향을 적게 받아 비교적 일정하게 온도가 유지되어 안정적으로 에너지를 공급할 수 있다. 여름철에는 수열원의 열원측 순환수 온도가 낮아 여름철 냉방에 유리하며, 겨울철에는 지열원의 순환수 온도가 높아 겨울철 난방에 유리함을 보인다[1]. 지열원의 경우 외기의 영향을 적게 받아 겨울철 난방에 유리하지만, 지질의 조건에 따라 효율이 떨어지거나 설치 불가능할 수 있으며, 건물의 냉방 부하와 난방부하의 격차가 큰 경우 지중 열축적으로 인한 장기적으로 시스템 성능 저하가 발생한다는 특징이 있다. 또한 초기 설치와 유지 관리가 어렵고 비용적인 측면에서 불리하다. 수열원의 경우 여름철 냉방 효율이 높다는 특징이 있지만, 설치 가능 지역이 한정적이고 지열원 대비 외기 온도에 영향을 크게 받으며, 하천수를 적용할 경우 겨울철 빙결에 대한 대비책이 필요하다. 이러한 지열원과 수열원의 장·단점을 상호보완하는 시스템인 하이브리드 히트펌프 시스템(이하, 하이브리드 시스템)에 관한 연구가 필요하다.

열원에 따른 히트펌프 성능 분석의 선행연구로는 지열원과 수열원 및 공기열원 등의 히트펌프의 저온열원으로 사용 가능한 열원들에 따른 히트펌프 성능 비교 연구 등이 있다[1~3]. 또한 지열원과 수열원, 태양열 등 신재생에너지를 활용한 복합열원 히트펌프 시스템에 관한 연구 등이 활발히 진행 중이다[4~5].

기존의 연구들은 지열원과 수열원을 단일열원으로 적용한 히트펌프 시스템이나 태양열 및 공기열원 등의 연구는 활발히 진행되고 있지만, 지열원과 수열원을 적용한 하이브리드 시스템에 관한 연구는 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 하이브리드 시스템의 단일열원 히트펌프 시스템과의 성능 차를 비교 분석하고자 한다. 동적 열부하 시뮬레이션 프로그램인 TRNSYS18[6]을 활용하여 지열원과 수열원을 적용한 하이브리드 시스템과 공기열원, 지열원 그리고 수열원의 단일열원 히트펌프 시스템을 구현하여 총 4가지 Case의 시뮬레이션을 진행하였으며, 이를 통해 산출된 열원별 입·출구 온도와 COP, 에너지소요량을 활용하여 열원 온도에 따른 히트펌프 성능을 비교 분석하고자 한다.

2. 시뮬레이션 구성

본 연구에서는 단일열원 히트펌프 시스템과 하이브리드 시스템의 에너지 성능 비교 분석을 진행하였다. 동적 열부하 시뮬레이션 프로그램인 TRNSYS18을 활용하여 냉·난방부하를 분석하여 최대 부하 산출 및 기준 건물에 맞는 시스템을 구성하여 온도 및 COP, 에너지소요량을 산출하였다. 기준 건물은 사무실로 설정하였으며 건물 모델링 프로그램인 Sketch Up을 활용하여 모델링하였다. Time step은 6분으로 설정하여 진행하였다.

2.1 기준 건물 제원 구성 및 부하 조건

본 연구의 시뮬레이션에 적용된 건물은 공조 면적 1,197.67 m² (연면적 1,996.30 m²)인 중간층 사무실을 방위에 따라 조닝(Zoning)을 하였으며, 구역(zone) 사이를 가상 벽으로 처리한 중심 코어 방식으로 모델링하였다. 벽체와 창 열관류율과 표면열전달저항 등의 조건은 에너지절약설계계획서(고시 2017-881)[7]의 중부 2의 조건에 근거하여 적용하였다. 창면적은 외벽의 40%의 면적을 차지하게 설계하였으며, 플레넘 공간은 1 m 높이로 설계하였다. 기준 건물의 모델링과 Zone의 형상은 Fig. 1에 나타내었다.

외기 조건은 기상청으로부터 인천광역시 2020년도 온·습도, 일사량 데이터를 제공 받아 적용하였다. 조명 부하와 기기 발열 부하를 적용하였다. 재실 인원 에 대한 부하는 앉아서 가벼운 작업을 하는 인체 발열

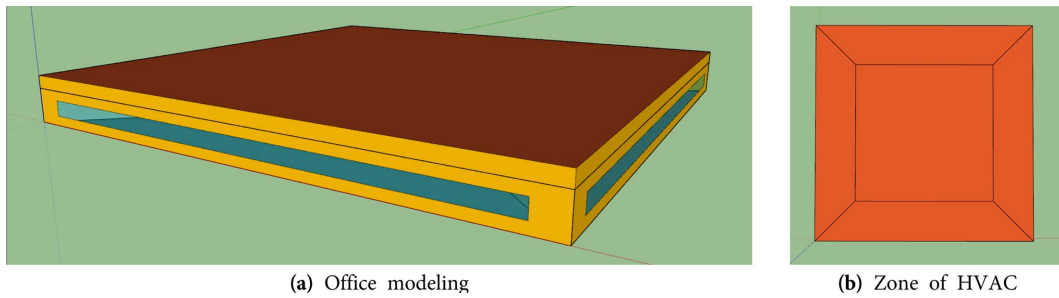


Fig. 1. Standard office modeling

Table 1. Simulation input conditions

Weather	Temperatures		2020 Incheon Weather Data
	Humidity		
	Solar radiation		
Gross Area (HVAC Area)	1,996.30 m ² (1,197.67 m ²)		
U-Value(W/m ² ·K)	Roof & Ceiling : 0.16 External wall : 0.24 Window : 1.35		
Light load	6.28 W/m ²		
Device load	10 W/m ²		
Occupancy load	60 people 70 W/person		
Infiltration	0.3 times/hr		
Ventilation	0.57 CMM/person		
Set Temperature	Cooling : 26°C Heating : 20°C		
Operation period	Cooling : May.~Oct. Heating : Jan.~Apr.&Nov.~Dec.		

량을 적용하였으며, 침기와 환기량은 각각 0.3 times/hr와 0.57 CMM/person를 적용하였다. 난방은 1~4월, 11~12월 동안 실내온도가 20°C 이하로 떨어졌을 때, 냉방은 5~10월 동안 26°C 이상일 때 진행하였다. 이와 같은 부하 조건 및 냉난방 제어조건 등을 Table 1에 나타내었다.

2.2 시스템 제원 및 제어

히트펌프는 G사의 물-물 방식 히트펌프를 적용하였으며, TRNSYS18에서 열원측 순환수 입구 온도에 따른 히트펌프의 성능곡선을 Fig. 2에 나타내었다. 열원은 지열원과 수열원을 적용하였으며, 지열원의 경우 1 m 당 58.6 W로 계산하여 한 공당 8.79 kW의 능력을 생산할 수 있는 150 m의 수직 밀폐형 지중열교환기(이하 지중열교환기)를 적용하였다[8]. 수열원의 경우 기상청으로부터 제공받은 2020년도 인천 해수 온도 자료를 적용하였으며, 판형열교환기를 활용한 간접방식으로 열교환하여 적용하였다. 시스템 제어는 온도에 따른 단속 운전으로 설정하였다. 해수 온도분포를 Fig. 3에 나타내었다. FCU는 ZONE 당 하나씩 적용하였으며, 실내온도에 따라 작동하게 설정하였고, 1, 2차 측 순환수 펌프와 히트펌프 제어는 4개의 ZONE 중 한 곳에서라도 냉·난방 가동 온도 조건에 충족되는 경우 운전하도록 설정하였다. 열원 및 장치의 제원은 Table 2와 Table 3에 나타내었다.

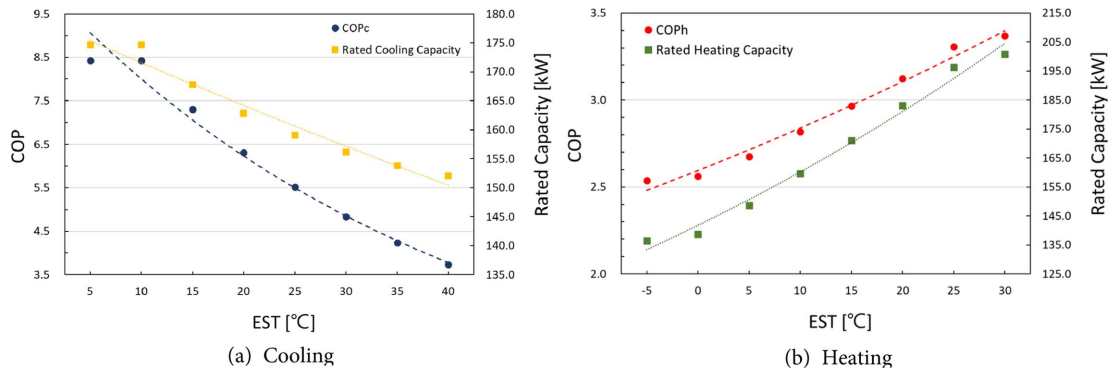


Fig. 2. Heat pump performance curve

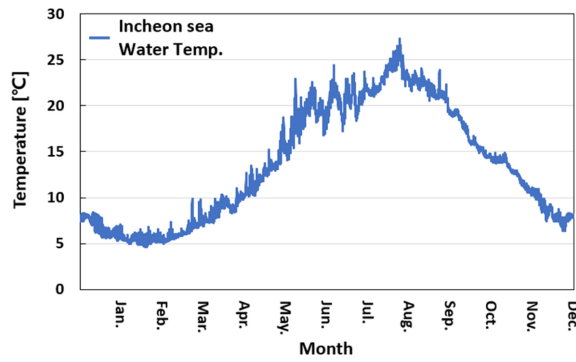


Fig. 3. Incheon sea Water Temperature

Table 2. Specification of source

Element	Value	
Ground heat Source	Borehole depth	150 m
	Borehole radius	150 mm
	Heat capacity	2,520 kJ/m ³ ·K
	Thermal conductivity	3.5 W/m·K
	Outer/Inner radius of U-Tube pipe	30/24 mm
	Fluid heat capacity	4.19 kJ/kg·K
Water heat Source	Temperature Data	2020 Incheon sea water

2.3 Case 별 열원 구성

본 연구의 Case 구성은 단일열원 시스템과 하이브리드 시스템의 성능을 비교 분석하기 위해 구성하였다. 모든 Case는 열원을 제외한 모든 조건 및 시스템 구성을 동일하게 진행하였으며, 하이브리드 시스템의 경우 지열원 시스템을 기반에 수열원을 보조열원으로 활용하는 방식으로 설계하였다. Case 1은 지열원 히트펌프 시스템, Case 2는 수열원 히트펌프 시스템, Case 3은 지중열교환기 16개와 수열원의 유량이 67.5 LPM인 하이브리드 시스템, Case 4은 지중열교환기 18개와 수열원의 유량이 67.5 LPM인 하이브리드 시스템으로 구성하였다. Case 별 적용된 열원들의 제원은 Table 4에 나타내었다.

하이브리드 시스템의 열원 구성은 지열원 열교환기인 지중열교환기 전단에 판형열교환기를 설치하여 히

Table 3. Specification of components

	Element	Value
Heat pump	Rated cooling capacity	158.12 kW
	Rated cooling power	29.84 kW
	COP _c	5.3
	Rated heating capacity	166.49 kW
	Rated heating power	41.26 kW
	COP _h	4.0
	Rated source flow rate	540 LPM
	Rated load flow rate	540 LPM
	Source/load specific heat	4.19 kJ/kg·K
FCU	Rated air flow rate	5760 CMH
	Rated water flow rate	100 LPM
	Rated fan power	1 kW
Source & Load pump	Rated flow rate	540 LPM
	Rated power	2.2 kW
Water heat source pump in Hybrid system	Rated flow rate	67.5 LPM
	Rated power	0.27 kW

Table 4. Number of boreholes and flow rate by case

	Number of Ground Source borehole	Flow rate of Water Source [LPM]
Case 1	18	0
Case 2	0	540
Case 3	16	67.5
Case 4	18	67.5

트펌프에서 나온 열원측 순환수가 수열원과 열교환한 후 지중열교환기를 통과하는 방식으로 구성하였다. 열원의 제어로직은 냉방 시에는 수열원 온도가 지열원 온도보다 더 낮을 때 순환수와 해수를 열교환 하도록 제어하였고, 난방 시에는 수열원 온도가 지열원 온도보다 높을 때 순환수와 해수가 열교환 하도록 제어하였다. TRNSYS18로 구성한 시스템을 Fig. 4에 나타내었으며, Source 부분 컴포넌트 및 컴포넌트 내부 값을 변경하여 4가지 Case를 구현하였다. Case 별 열원 구성과 시스템의 개략도는 Fig. 5(a), (b), (c)에 도시화하였다.

3. 시뮬레이션 결과

하이브리드 시스템의 특징을 분석하기 위해 EST와 Case 별 온도와 에너지소요량, COP를 산출하였다. EST는 열원측 순환수 입구 온도를 나타내며, 에너지소요량은 Case 별 히트펌프 시스템에 적용된 모든 장치들의 소비전력 총합을 나타낸다. 또한 COP는 Case 별로 적용된 히트펌프의 월평균을 나타낸다. 시뮬레이션 결과 4월은 실내온도가 20~26℃를 유지하여 냉·난방 모두 작동되지 않아 4월을 제외하고 비교 분석하였다.

3.1 Case 별 EST 비교

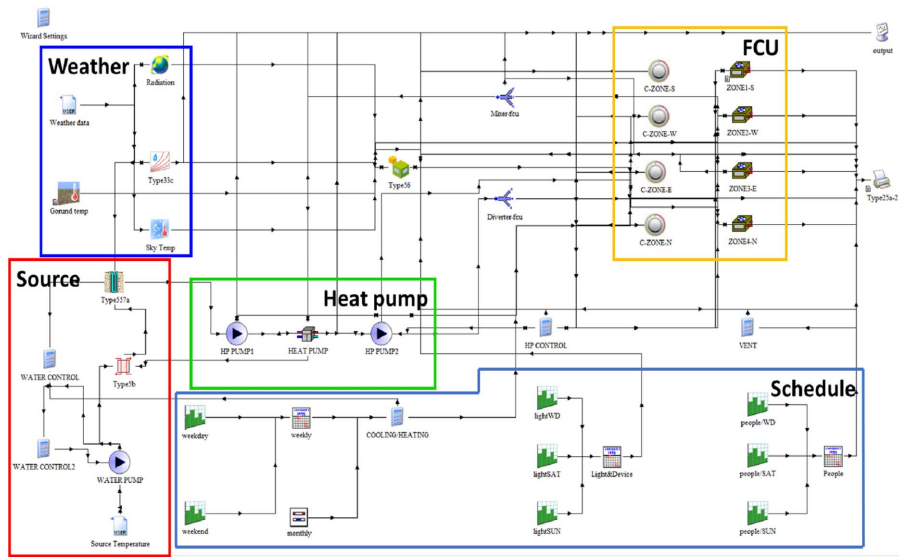


Fig. 4. Configuration of simulation

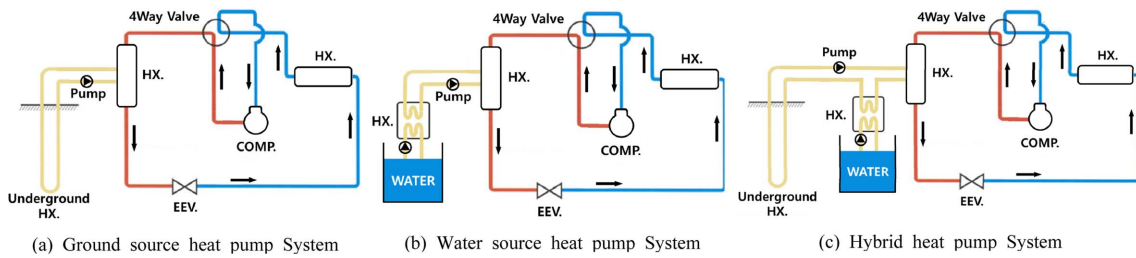


Fig. 5. Schematic diagram of heat pump system

열원 종류에 따른 EST의 특성을 분석하기 위해 4가지 Case의 연중 온도와 월 평균 온도를 산출하였다. 4 가지 Case의 연중 EST를 Fig. 6에 나타냈으며, 월평균 EST 값은 Table 5에 나타내었다. 수열원의 경우 8 월을 11월을 제외한 모든 달에서 낮은 온도를 보인다. 지열원만 적용된 Case 1 대비 하이브리드 시스템인 Case 3, 4의 경우 냉방 시에는 가동되는 동안 최고 온도가 더 높은 모습을 보이며, 난방 시에는 최저 온도가 더 높은 낮은 양상을 보인다. EST 평균 온도의 경우 대표적으로 8월에서 Case 1은 28.66℃, Case 2는 25.32℃, Case 3은 27.24℃, Case 4는 26.06℃로 나타났다. 12월에 Case 1은 9.91℃, Case 2는 7.51℃, Case 3은 9.08℃, Case 4는 9.79℃로 나타났다.

3.2 월평균 히트펌프 COP 비교

Case 별 히트펌프 성능을 분석하기 위해 COP를 월평균으로 산출하여 Fig. 7에 나타내었다. 냉방 시 수 열원으로만 구성된 Case 2가 가장 높은 성능을 보이지만, 8월과 9월의 경우 하이브리드 시스템인 Case 4와 성능 차가 적게 나는 것을 볼 수 있다. Case 1과 Case 3의 경우 8월과 9월을 제외한 달에서는 Case 3 번이 더 높은 성능을 보인다. 겨울철 난방 시 지열원으로 구성된 Case 1이 11월을 제외한 모든 달에서 가장 높은 COP를 보인다. 다음으로는 Case 4가 전반적으로 우세한 성능을 보이지만, Case 2와 큰 차이가 없는 것을 볼 수 있다.

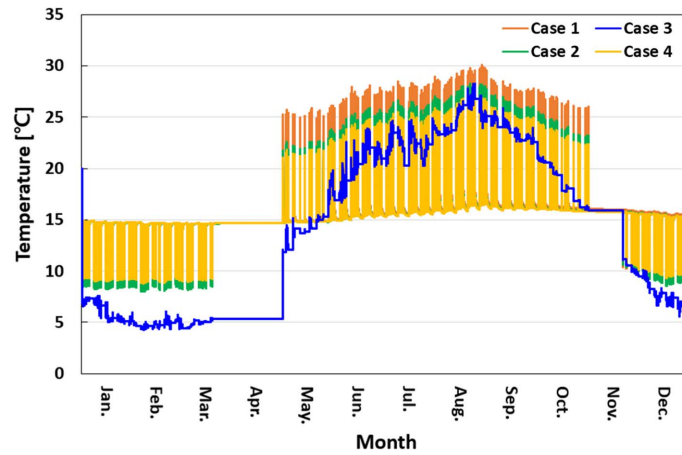


Fig. 6. Annual EST in Cases

Table 5. Monthly average EST

	Heating				Cooling				Heating			
	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May.	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
Case 1 [°C]	9.25	9.09	9.14	-	25.33	26.82	27.47	28.66	27.54	26.72	10.28	9.91
Case 2 [°C]	6.13	4.78	4.82	-	15.56	20.84	22.77	25.32	23.89	19.86	10.12	7.51
Case 3 [°C]	8.49	8.31	8.39	-	22.59	24.87	25.79	27.24	26.10	24.55	10.25	9.08
Case 4 [°C]	9.25	9.09	9.14	-	21.81	23.87	24.71	26.06	25.02	23.62	10.73	9.76

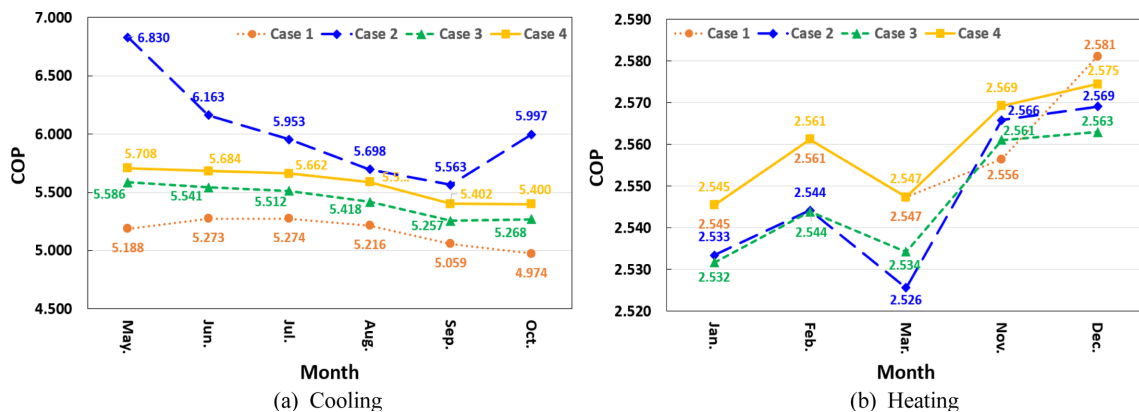


Fig. 7. Monthly average heat pump COP

3.3 월평균 Case 별 시스템 에너지소요량

Case 별 성능 차를 분석하기 위해 에너지소요량을 산출하였으며, 하이브리드 시스템의 경우 펌프가 추가되었기 때문에 시스템 전체의 월 총합 에너지소요량을 비교하였다. Case 별 월 총합 에너지소요량은 Table 6에 나타내었다. 냉방 시 Case 2의 월별 총 에너지소요량이 다른 Case 대비 낮게 나타나며 5~10월 총합량도 가장 낮은 것을 볼 수 있으며, Case 4는 Case 1 대비 920 kWh의 낮은 값을 보인다. 난방 시에는

Table 6. Monthly energy requirement

	Heating				Cooling				Heating				Total	
	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May.	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Cooling	Heating
Case 1 [MWh]	4.51	3.21	1.39	-	1.30	3.92	4.59	6.37	3.29	1.19	1.20	4.79	20.66	15.10
Case 2 [MWh]	4.55	3.24	1.38	-	1.11	3.54	4.24	6.00	3.10	1.06	1.22	4.86	19.06	15.28
Case 3 [MWh]	4.52	3.22	1.38	-	1.25	3.80	4.47	6.20	3.22	1.15	1.20	4.82	20.10	15.14
Case 4 [MWh]	4.51	3.21	1.39	-	1.24	3.74	4.39	6.08	3.17	1.13	1.20	4.83	19.74	15.14

Case 1의 값이 낮으며, Case 3, 4는 비슷한 값을 보인다. 전반적으로 냉방 대비 난방의 격차가 작은 것을 볼 수 있다.

3.4 결과 및 고찰

본 연구에서는 단일열원 시스템과 하이브리드 시스템의 성능 분석을 진행하였다. 하이브리드 시스템인 Case 3은 지열원에서 얻는 열량을 줄이고 수열원으로 보충하는 방식으로 구성하였으며, Case 4의 경우 지열원 시스템에 추가적으로 수열원을 적용하여 성능을 높이는 시스템을 구성하였다.

히트펌프 시스템이 같은 상태에서의 공기열원과 지열원 및 수열원에 따른 성능 비교가 어렵다고 판단되어 공기열원을 제외한 지열원, 수열원 및 하이브리드 시스템을 비교 분석하였다. 해당 내용의 경우 권영식 등(2021)의 연구에 따르면 같은 히트펌프 시스템에서 분석한 결과 안정적인 타열원에 비해 외기온도를 사용한 공기열원의 성능이 낮은 것을 확인하였다고 한다[2].

성능 비교 분석을 위하여 냉방 시 열원의 특징을 가장 잘 보여주는 8월과 난방 시 특징을 가장 잘 나타내는 12월의 값을 비교하였다.

8월의 Case 1은 28.66℃, Case 2는 25.32℃, Case 3은 27.24℃, Case 4는 26.06℃로 나타났다. 난방 시 12월에 Case 1은 9.91℃, Case 2는 7.51℃, Case 3은 9.08℃, Case 4는 9.79℃로 나타났다. 하이브리드 시스템인 Case 4가 지열원 시스템인 Case 1 대비 냉방 시에 최대 2.42℃까지 낮출 수 있었다.

냉방 시 8월에서 Case 1은 5.22, Case 2는 5.70, Case 3은 5.42, Case 4는 5.59로 나타났으며, 난방 시 12월에 Case 1은 2.55, Case 2는 2.53, Case 3은 2.53, Case 4는 2.55으로 나타났다. 하이브리드 시스템인 Case 4는 냉방 시 지열원 대비 최대 10.02% 향상되었으며, 난방 시 수열원 대비 0.83% 향상되었다.

에너지소요량은 냉방 시 8월에서 Case 1은 6.37 MWh, Case 2는 6.00 MWh, Case 3은 6.20 MWh, Case 4는 6.08 MWh로 나타났으며, 난방 시 12월에 Case 1은 4.79 MWh, Case 2는 4.86 MWh, Case 3은 4.82 MWh, Case 4는 4.83 MWh로 나타났다.

4. 결 론

본 연구는 지열원과 수열원을 적용한 하이브리드 시스템의 성능 비교 분석을 진행하였으며, 총 두 가지의 단일열원 시스템과 하이브리드 시스템을 비교 분석하였다. 연구 결과는 다음과 같다.

(1) 12월의 EST를 비교하여 하이브리드 시스템을 통해 연간 지중열에너지 축적을 해소할 수 있는 것으로 분석된다. 따라서 냉방부하량이 난방부하량 대비 상대적으로 큰 건물의 경우 하이브리드 시스템을 적

용하여 지중에 축적된 열을 해소시킬 수 있다.

(2) Case 3의 경우 하이브리드 시스템을 통해 시스템을 간소화시켜 초기 설치 비용 및 유지관리비를 낮출 목적으로 시뮬레이션을 진행하였다. 지열원 천공 개수를 줄였지만 보조열원으로 수열원을 사용하여 지열원 대비 냉방 시 최대 2.67% 에너지 소요량을 절감하였다.

(3) 하이브리드 시스템인 Case 4는 냉방 시 COP가 지열원 대비 최대 10.02% 향상되었으며 이때 EST는 2.42℃ 낮게 산출된다. 난방 시 수열원 대비 0.83% 향상되었으며 이때 EST는 수열원 대비 2.25℃ 높게 산출되었다.

(4) 현재 적용한 하이브리드 시스템은 수열원 온도가 낮아 지열원만을 사용하여 겨울철에는 효과가 미비하다는 것과 시뮬레이션 상에서 난방 COP 값이 실제 제원보다 낮아 겨울철에 높은 성능을 내는 지열원의 장점이 둔화되어 나타났다. 또한 설치비 및 유지관리비와 성능을 분석하는 연구가 필요하다. 추후 연구를 통해 설치 및 운영에 대한 측면과 비용적인 측면을 고려하여 최적의 하이브리드 히트펌프를 개발하는 것과 적절한 성능과 적정 비용의 하이브리드 시스템을 설치하였을 때 경제성 분석을 통해 투자회수기간을 분석할 예정이다.

후 기

이 논문은 2021년도 정부(환경부 환경기술개발사업)의 재원으로, 한국환경산업기술원의 지원을 받아 수행된 연구입니다. (No. 2020003160021, 수열원에너지를 효과적으로 활용하기 위한 능동형 고효율 하이브리드 히트펌프 개발)

References

1. Ko, Y., Park, S., and Min, J., 2020, Comparison of Heat Pump Performance and Energy Consumption Patterns according to Heat Sources for Optimal Control of Multi-Source Heat Pumps, Korea Society of Geothermal Energy Engineers, Vol. 16, No. 4, pp. 31-38.
2. Kwon, Y., Bae, S., Nam, Y., Park, C. Y., Lee, H., 2021, Comparative Analysis of System Performance for Water, Ground and Air Source Heat Pump System Using the Dynamic Energy Simulation, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 41, No. 4, pp. 1-12.
3. Yang, W. S., Kim, Y. I., Park, S. T., 2020, Performance Comparison of Electric Heater, Air Source and Geothermal Source Heat Pump type Agricultural Hot Air Dryer with Cycle Analysis, Vol. 32, No. 3, pp. 135-145.
4. Park, S., Ko, Y., and Min, J., 2021, A Study on the Performance Evaluation of Combined Heat Pump System according to the Ratio of Ground Heat Source and Water Heat Source, Korea Society of Geothermal Energy Engineers, Vol. 17, No. 2, pp. 11-19.
5. Yang, C. H., Kim, Y., Chung, K. S., 2012, Economical Analysis of a Small Capacity Heat Pump utilizing Heat Sources of Air, Geothermal and Underground Water Tank using Dynamic Simulation, Transactions of the Korea Society of Geothermal Energy Engineers, Vol. 8, No. 4, pp. 17-33.
6. Klein, S. A., 2019, TRNSYS18 Base Manual, KESTech, Kocaeli, Turkey.
7. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2017, Standard of Building Saving, MLIT criteria 2017-881.
8. Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 2015, Development of Installation Method of a Removal Heat Exchanger on the Ground for the Use of Geothermal Energy.