

지열원 및 수열원 비율에 따른 복합열원 히트펌프시스템 성능 평가 연구 A Study on the Performance Evaluation of Combined Heat Pump System according to the Ratio of Ground Heat Source and Water Heat Source

박시훈(Sihun Park), 고유진(Yujin Ko), 민준기(Joonki Min)^{*†}

경희대학교 기계공학과 석사과정, *경희대학교 기계공학과 학술연구교수
Graduate Student, Department of Mechanical Engineering, KyungHee University, Yongin 17104, Korea
*R&D Professor, Department of Mechanical Engineering, KyungHee University, Yongin 17104, Korea

Abstract

In this study, combined heat source heat pump system was implemented with 4 single heat source heat pumps each applied with a geothermal source and a water source. Five cases (Case1~Case5) were configured to conduct a performance comparison and analysis of the combined heat source heat pump system. First of all, as a result of analyzing the heat source, the case when 4 ground heat sources were applied (Case1) showed a uniform EST(Entering Source Temperature) distribution throughout the year since it is less affected by outside air compared to the case when 4 water heat sources were applied (Case5). In both winter and summer, the ground heat source maintained higher EST than the water heat source. Therefore, the system with high ratio of geothermal sources is advantageous for heating, and with high ratio of water heat sources is advantageous for cooling.

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

[†]Corresponding author

E-mail: jkmin@khu.ac.kr

접수일: 2021년 04월 22일; 심사일: 1차: 2021년 05월 15일, 2차: 2021년 05월 27일; 채택일: 2021년 05월 28일

1. 서 론

세계적으로 환경보호에 대한 관심이 증가하는 추세로 인하여 신재생에너지원에 대한 관심이 높아지고 있다. 냉동공조 분야에서는 저온열원으로 많이 활용되고 있는 지열원과 수열원을 적용한 히트펌프에 대한 연구를 활발히 진행하고 있다[1-3]. 지열원과 수열원은 히트펌프의 열원으로 일반적으로 많이 사용되고 있는 공기 열원보다 낮은 소비전력과 높은 냉·난방 능력을 낼 수 있다는 장점이 있다. 지열원은 외기 온도에 크게 영향을 받지 않아 비교적 일정한 에너지 공급이 가능하며, 수열원은 유량에 따라 대규모 시스템 까지도 구축할 수 있다. 단점은 공통적으로 초기 설치와 유지 관리의 비용이 높다는 점이다. 또한 지열원의 경우 지중 조건에 따라 효율이 떨어지거나 설치 불가능할 수 있으며, 건물의 냉방 부하와 난방 부하의 차이가 큰 경우 지중의 에너지 축적으로 인하여 열교환 효율의 저하가 올 수 있다는 단점이 있다. 수열원의 경우 열교환에 필요한 충분한 유량에 따라 설치 가능 지역이 한정적이고 지열원 대비 외기 온도에 영향을 받는다. 이와 같은 장·단점을 상호보완하는 지열원과 수열원을 동시에 적용한 복합열원 히트펌프 시스템에 관한 연구가 필요하다.

복합열원 히트펌프 시스템의 선행 연구로는 지열원과 수열원이 각각 적용된 히트펌프 시스템의 입·출구 온도에 따른 히트펌프의 성능 및 에너지 소요량을 비교 분석을 진행한 연구[4]와 간절기에 공기열원과 지열원을 각각 적용한 단일열원 히트펌프 시스템과 두 열원을 동시에 적용한 복합열원 히트펌프 시스템의 비교 분석 연구[5], 냉각탑과 지열을 직렬방식으로 연결한 시스템을 지열 히트펌프만 가동했을 때와 하이브리드 시스템을 가동했을 때의 냉난방 성능을 비교 분석 연구 등이 있다[6]. 지열원과 수열원이 동시에 적용된 복합열원 히트펌프 시스템을 위한 수열원과 지열원 적용 비율에 따른 성능 분석에 관한 연구는 다른 열원의 복합열원 시스템에 비하여 미비한 실정이다.

본 연구에서는 동적 열부하 시뮬레이션 프로그램인 TRNSYS18[7]을 활용하여 지열원과 수열원이 적용된 복합열원 히트펌프 시스템을 구현하였다. 지열원과 수열원을 적용한 열원의 적용 비율에 따른 다섯 가지의 경우(Case)로 구분하였다. 복합열원 시스템의 성능 평가에 앞서 지열원과 수열원이 각각 적용된 히트펌프 시스템의 온도 특성을 비교하였으며, 이를 바탕으로 열원에 따라 복합열원 시스템의 성능을 분석하였다.

2. 시뮬레이션 구성

열원의 적용 비율에 따른 성능 비교 분석을 위하여 건물 모델링 프로그램인 SketchUp을 활용하여 기준 건물을 모델링하였다. 시뮬레이션의 경우 TRNSYS18을 활용하여 본 건물의 냉·난방 부하를 산출하였으며, 이에 따라 히트펌프 용량을 선정하였다.

2.1 기준 건물 구성

본 건물은 공조면적 528.93 m² (연면적 881.55 m²)인 한 층의 사무실로 설정하였다. 동서남북 기준 4개의 구역으로 나누어 나눠 실내 온도 제어를 진행하였으며, 구역(zone) 사이를 가상 벽으로 처리한 중심코어 방식으로 모델링하였다. 또한 창면적비는 외벽의 40%로 적용하였으며, 벽체와 창 조건의 경우 에너지 절약설계계획서(고시 2017-881)[8]에 근거하여 열관류율과 표면열전달저항을 적용하였다. 기상 및 수열원의 온도 조건의 경우 기상청의 2020년도 인천시 데이터를 활용하였다. 실내·외 부하, 기상자료 등의 건물의 냉·난방 부하 계산에 적용한 데이터와 건물의 모델링 형상은 각각 Table 1과 Fig. 1에 나타내었다.

Table 1. Simulation input conditions

weather	Temperatures		2020 incheon
	Humidity		
	Solar radiation		
Gross area(HVAC area)	881.55 m ² (528.93 m ²)		
U-Value(W/m ² ·K)	External wall : 0.22 Window : 1.3		
Light load	16 W/m ²		
Occupancy load	27 people 70 W/person		
SHGC	0.7		
Infiltration	0.3 /h		
Ventilation	0.57 CMM/person		
Set temperature	Cooling : 26°C Heating : 20°C		
Operation period	Cooling : May.~Oct. Heating : Jan.~Apr.&Nov.~Dec.		

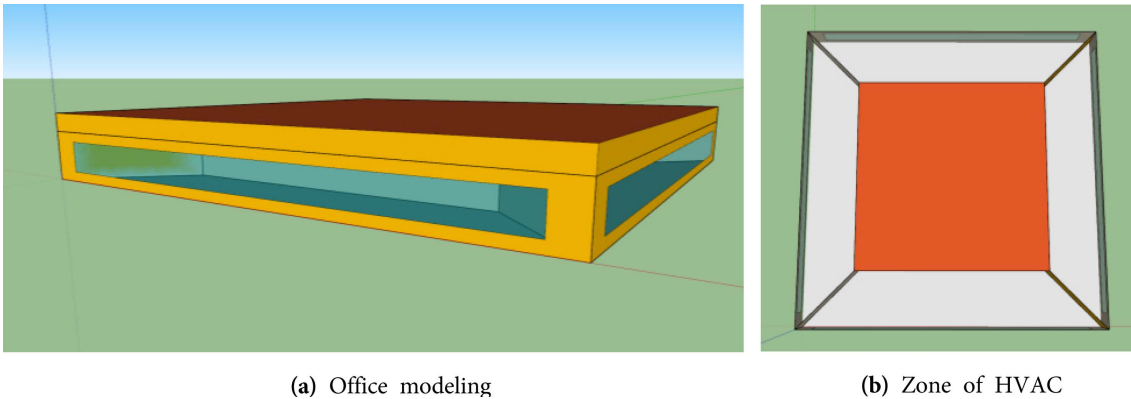


Fig. 1. Standard office modeling

2.2 시뮬레이션에 적용된 시스템 조건

본 연구에서는 열교환 방식을 지열원은 수직밀폐형 지중열교환 방식으로 설정하였으며, 수열원은 인천 해수를 적용한 직접열교환 방식으로 설정하였다. 모든 경우(Case)에 물-물 히트펌프 4대를 적용하였으며, 4개의 FCU를 통해 축열조에 저장되어있는 에너지를 실내에 공급하였다. 또한 환기는 판형 열교환기를 적용한 열회수형 환기장치(Energy Recovery Ventilator, ERV)를 적용하였다. 시스템 제어는 온도에 따른 단속 운전으로 설정하였으며, 1, 2차측의 펌프와 히트펌프 제어는 축열조의 내부온도가 냉방 시에는 7°C 이상인 경우, 난방 시에는 50°C 이하인 경우에 운전하도록 설정하였다. Fan Coil Unit(FCU)과 FCU 펌프는 실내온도가 냉방 시에는 26°C 이상인 경우, 난방 시에는 20°C 이하인 경우에 운전하도록 설정하였다. 냉·난방 시간은 평일 9시부터 18시까지이고 주말에는 작동시키지 않았다. 열원의 조건과 시뮬레이션에 적용된 장치들의 제원들은 각각 Table 2와 Table 3에 나타내었다.

2.3 단독 열원 시스템의 히트펌프 입·출구 순환수 온도 비교

열원에 따른 히트펌프 입·출구 순환수의 연중 온도양상을 비교 분석하기 위하여 지열원 단독 시스템, 수열원 단독 시스템의 히트펌프 입·출구 순환수의 연중 온도를 각각 Fig. 2(a), (b)에 나타내었다.

열원-히트펌프 입구 순환수 평균 온도(Entering Source Temperature, EST)는 냉방 시에 지열원 단독 시스템의 경우 25.2°C이었으며, 수열원 단독 시스템의 경우 평균 21.5°C이었다. 난방 시에 지열원 단독 시스템의 경우 평균 11.4°C이며, 수열원 단독 시스템의 경우 평균 8.1°C이었다. 따라서 냉방의 경우 지열원 단독

Table 2. Specification of source

Element	Value	
Geothermal heat exchanger	Borehole depth	150 m
	Borehole radius	150 mm
	Heat capacity	2,520 kJ/m ³ ·K
	Thermal conductivity	3.5 W/m·K
	Outlet/inner radius of U-Tube pipe	30/24 mm
	Fluid heat capacity	4.19 kJ/kg·K
heat exchanger	2020 Incheon sea water	

Table 3. Specification of components

Element		Value
Heat pump	Rated cooling capacity	16.4 kW
	Rated cooling power	2.9 kW
	COP _C	5.6
	Rated heating capacity	15.6 kW
	Rated heating power	3.8 kW
	COP _H	4.1
	Rated source flowrate	46 LPM
	Rated load flowrate	46 LPM
	Source/load specific heat	4.19 kJ/kg·K
Heat storage tank	Tank volume	1.8 m ³
	Fluid specific heat	4.19 kJ/kg·K
	Deadband	2.5°C
FCU	Rated air flowrate	2,940 CMH
	Rated flowrate	3,120 kg/h
	Rated fan power	520 W
Source Pump	Rated flowrate	2,754 kg/h
	Rated power	0.4 kW
FCU Pump	Rated flowrate	12,480 kg/h
	Rated power	7.5 kW
ERV	Sensible effectiveness	Heating : 0.79 Cooling : 0.7
	Latent effectiveness	Heating : 0.56 Cooling : 0.35

시스템의 EST가 평균 3.8°C 낮았으며, 난방의 경우 지열원 단독 시스템의 EST가 평균 3.3°C 높았다. 축열조 제어에 영향을 받는 히트펌프-축열조 입구 순환수 온도(Entering Load Temperature, ELT)와 히트 펌프-축열조 출구 순환수 온도(Leaving Load Temperature, LLT)는 제어방식이 같으므로 비슷한 양상을 보

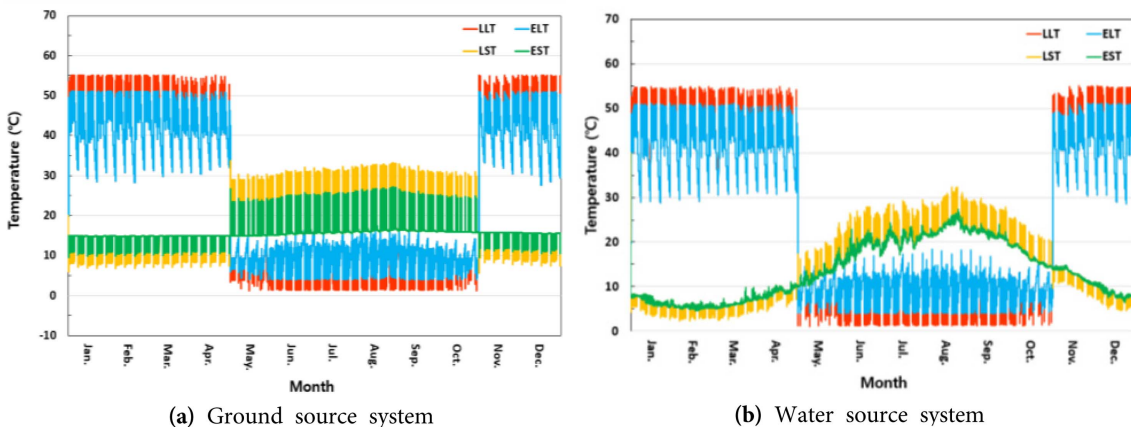


Fig. 2. Annual heat pump circulating water temperature

인다. 지열원 히트펌프의 경우 밀폐형 지중열교환 방식이기 때문에 EST가 열원-히트펌프 출구 순환수 온도(Leaving Source Temperature, LST)의 영향을 받는다. 따라서 냉방으로 전환되는 4~5월과 난방으로 전환되는 10~11월 사이에 온도 변화의 step 현상이 나타난다. 반면, 수열원 히트펌프의 경우 개방형 열교환 방식이기 때문에 이러한 현상을 보이지 않았다(Fig. 2(a), Fig. 2(b) 참조).

2.4 Case 별 히트펌프 및 열원 구성

본 연구에서는 지열원과 수열원이 각각 적용된 히트펌프 4대로 복합열원 히트펌프 시스템을 설정하여 시뮬레이션을 진행하였으며, 단독 히트펌프 시스템을 포함하여 총 다섯 가지의 경우(Case 1~Case 5)를 설정하였다. 지열원의 경우 히트펌프 대수당 2개의 지중열교환기(천공)로 설정하였으며 수열원은 히트펌프 대수에 비례하게 유량을 설정하였다. Case별로 적용한 수열원 히트펌프와 지열원 히트펌프 대수 및 지중열교환기 개수를 Table 4에 나타내었다.

각각의 열원이 연결된 히트펌프 4대가 한 대의 축열조에 연결되고 축열조는 FCU와 연결되어 냉·난방 운전하는 복합열원 시스템으로 구성하였다(Fig. 3). 열원 부분의 컴포넌트 연결을 바꿔가며 다섯 가지 Case를 TRNSYS18에 구현하였다. Fig. 4는 시스템을 구성하는 컴포넌트와 이들 컴포넌트를 연결한 시스템 구성도를 보여준다.

Table 4. Number of heat pumps and number of boreholes by case

	Number of Water source Heat pump	number of Ground source Heat pump / number of borehole
Case 1	0	4 / 8
Case 2	1	3 / 6
Case 3	2	2 / 4
Case 4	3	1 / 2
Case 5	4	0 / 0

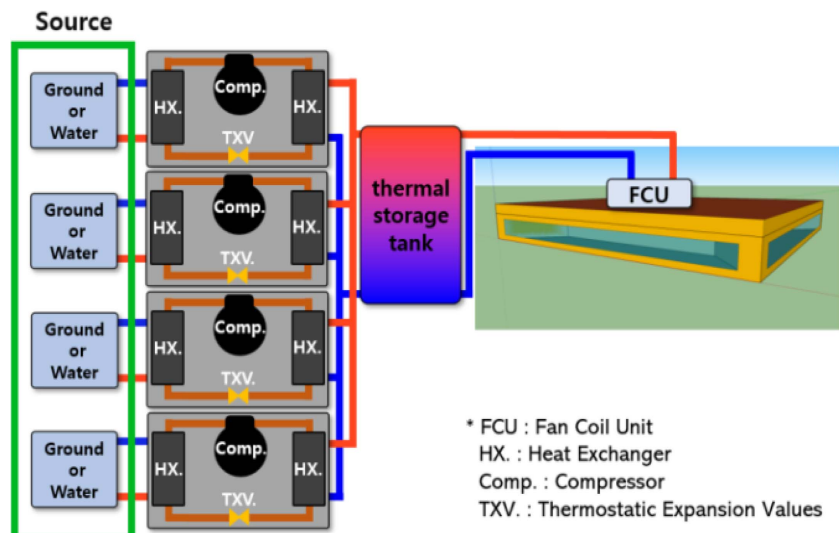


Fig. 3. Schematic diagram of combined heat source heat pump system

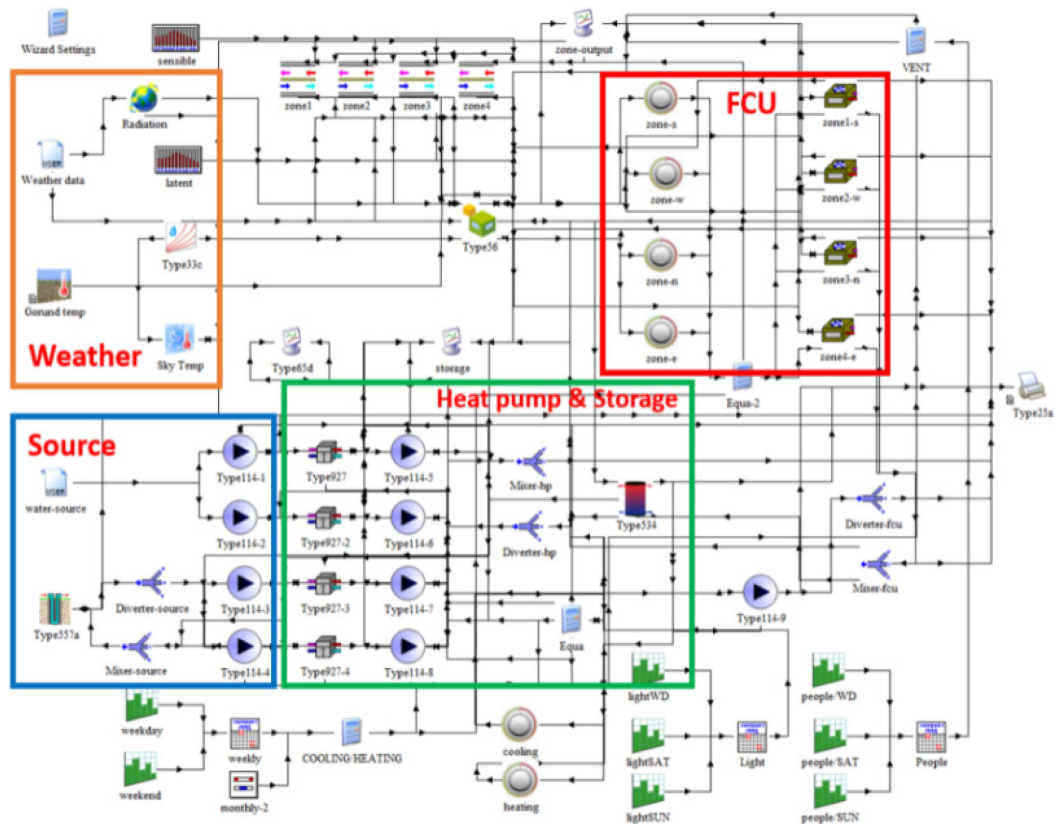


Fig. 4. Configuration of simulation

3. 시뮬레이션 결과

복합열원 히트펌프 시스템의 성능을 비교하기 위해 시스템 에너지 소요량과 성능계수(Coefficient Of Performance, COP)를 이용하였다. 에너지 소요량의 경우 Case 별로 적용된 히트펌프 4대의 총합, COP의 경우 Case 별로 적용된 히트펌프 4대의 평균 COP 값으로 비교 분석을 진행하였다.

3.1 히트펌프 에너지 소요량 비교

Case별로 적용한 히트펌프 4대의 에너지 소요량의 합산한 값을 비교하였다. 전반적으로 간절기에는 시스템의 운전 횟수가 줄어 소요량이 적으며, 냉방 부하가 가장 큰 8월과 난방의 부하가 가장 큰 12월에 에너지 소요량이 가장 높은 것을 볼 수 있다.

냉방 시의 에너지 소요량은 7월을 비교하였으며, Case 1의 경우 1011.10 kWh, Case 2의 경우 982.77 kWh, Case 3의 경우 955.59 kWh, Case 4의 경우 926.98 kWh, Case 5의 경우 898.24 kWh이었다. 난방 시의 에너지 소요량은 2월을 비교하였으며, 그 값은 Case 1의 경우 1007.32 kWh, Case 2은 1024.17 kWh, Case 3의 경우 1037.14 kWh, Case 4은 1043.43 kWh, Case 5의 경우 1059.06 kWh이었다.

냉방 시 월평균 히트펌프의 에너지 소요량의 경우 지열원을 많이 적용된 Case 순서대로 높은 에너지 소요량을 나타내고 있으며, 난방 시에는 수열원이 많이 적용된 Case 순서대로 높은 에너지 소요량을 나타내

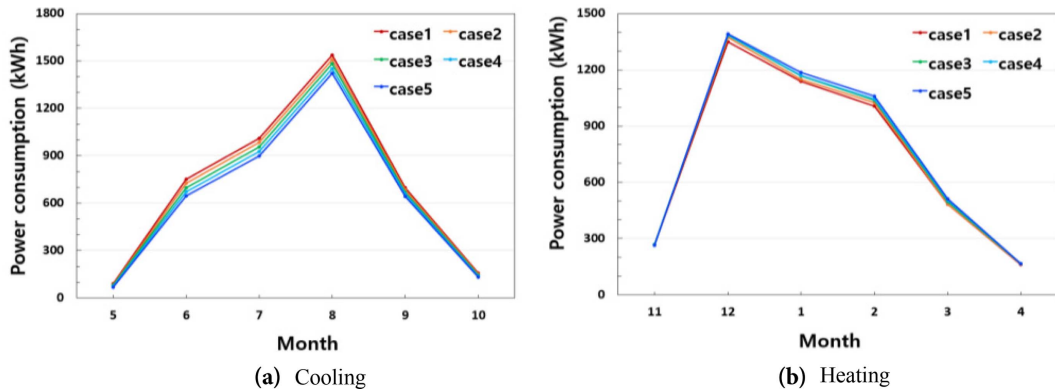


Fig. 5. Monthly average heat pump total power consumption

고 있는 것을 볼 수 있었다. 냉방 시와 난방 시의 월 평균 Case별 히트펌프 4대의 총 에너지 소요량을 각각 Fig. 5의(a), (b)에 나타내었다.

3.2 Case 별 평균 COP 비교

복합열원 시스템의 열원 적용 비율에 따른 성능 차이를 보기 위해 앞서 분석한 에너지 소요량 외에 Case 별로 적용된 히트펌프 4대의 평균 COP 값을 비교 분석하였으며, 냉방과 난방의 각각의 COP 값을 Fig. 6 (a)와 (b)에 나타내었다.

냉방을 하는 5월의 경우에 격차가 가장 크게 나타내며 Case 1의 경우 COP 5.64, Case 2의 경우 COP 6.12, Case 3의 경우 COP 6.62, Case 4의 경우 COP 7.12, Case 5의 경우 COP 7.60이었다. 난방을 하는 3월의 경우 COP의 격차가 가장 크게 나타나며 Case 1의 경우 COP 2.43, Case 2의 경우 COP 2.42, Case 3의 경우 COP 2.38, Case 4의 경우 COP 2.35, Case 5의 경우 COP 2.32이었다.

복합열원 시스템인 Case 2~4 중에 냉방 시에는 수열원이 많이 적용된 Case 4, 난방 시에는 지열원이 가장 많이 적용된 Case 2가 가장 높은 COP를 보인다. 난방 시의 COP 격차보다 냉방 시의 COP 격차가 더 크게 나타나며 최대 25.8%의 차이를 보인다(Fig. 6 참조).

Fig. 6 (b)의 11월의 COP의 값이 수열원이 더 많은 Case들이 더 큰 값을 보이는데, 11월 EST 지열원의 평균값은 11.50°C, 수열원의 평균값은 12.11°C로 난방 시에 유리한 조건을 갖췄기 때문으로 분석된다.

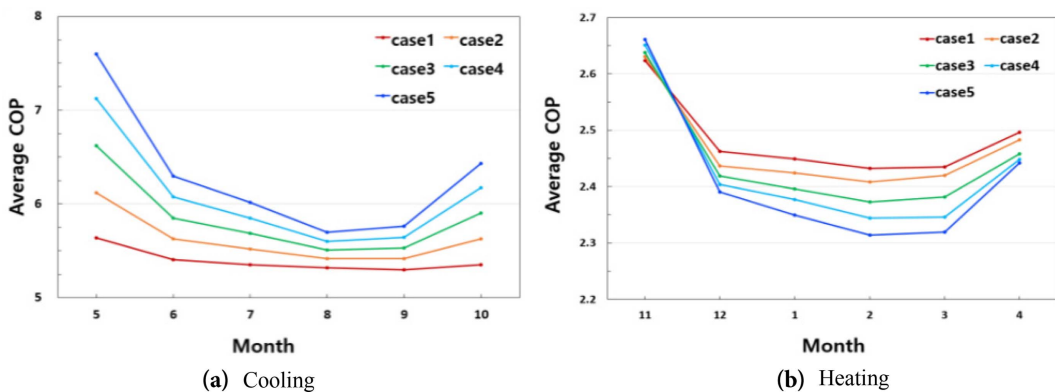


Fig. 6. Average COP of 4 heat pumps by monthly average case

3.3 결과 및 고찰

본 연구에서는 4대의 수-수 히트펌프를 지열원과 수열원을 Case별 다른 비율로 적용하여 비율에 따른 성능을 비교 분석하였다. 시뮬레이션 그 결과는 다음과 같다.

열원에 따른 히트펌프 입·출구 순환수의 연중 온도양상을 분석하였을 때 수열원은 지열원 대비 열원 온도가 외기에 따라 크게 변하는 것을 볼 수 있으며, 반대로 지열원의 경우 외기에 따라 온도의 변화 폭은 적지만 필폐형이기 때문에 시스템이 운전하는 시간 동안 에너지가 계속 축적되어 EST가 오르는 것을 볼 수 있다.

Case 별 적용한 4대의 히트펌프의 합산 소비전력의 경우 Case 3에 대비하여 냉방 시 최대 Case 1은 14.29%, Case 2는 6.97%, Case 4는 -8.02%, Case 5는 -12.76%의 차를 보여주며, 난방 시 최대 Case 1은 -2.87%, Case 2는 -2.64%, Case 4는 1.54%, Case 5는 2.80%의 차를 보인다. 냉방 시에는 수열원 적용 비율이 높아질수록 높은 성능을 보여주고, 난방 시에는 지열원 적용 비율이 높아질수록 높은 성능을 보여준다.

월평균 Case별 히트펌프 4대 평균 COP의 경우 Case 3에 대비하여 냉방 시 최대 Case 1은 -14.84%, Case 2는 -7.60%, Case 4는 7.56%, Case 5는 14.76%의 차를 보여주며, 난방 시 최대 Case 1은 2.53%, Case 2는 1.64%, Case 4는 -1.46%, Case 5는 -2.58%의 차를 보여준다. 냉방 시에는 수열원 적용 비율이 높아질수록 낮은 소비전력을 보이고 난방 시 지열원의 비율이 높아질수록 낮은 소비전력 보여주는 것을 알 수 있다. 또한 Case 별로 간절기에 성능 격차가 커지는 것을 볼 수 있다.

냉방의 경우 수열원 단독 시스템(Case 5)이 지열원 단독 시스템(Case 1)에 대비하여 평균 EST가 3.8°C 낮으며, 수열원 단독 시스템 COP의 경우에는 7.60이며, 지열원 단독 시스템 COP의 5.64보다 25.8% 높은 성능을 보여준다. 난방의 경우 지열원 단독 시스템(Case 1)이 수열원 단독 시스템(Case 5)에 대비하여 평균 EST가 3.3°C 높으며, 수열원 단독 시스템 COP의 경우에는 2.43이며, 지열원 단독 시스템 COP의 경우 2.32보다 4.5% 높은 성능을 보여준다. 이를 통해 COP와 에너지 소요량은 EST에 따라 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 시뮬레이션 상에서 출력된 COP 값이 제원상의 COP 값에 대비하여 낮은 것을 볼 수 있다. 원인을 분석하기 위해, 시뮬레이션에 적용한 히트펌프의 정격운전조건(EST 냉방 : 25°C 난방 : 12°C, ELT 냉방 : 40°C 난방 : 5°C)에서 시뮬레이션과 제원 상의 COP를 비교하였으며, 제원상의 경우 COP_c : 5.61 COP_h : 4.08, TRNSYS18의 경우 COP_c : 4.21 COP_h : 2.60으로 나타난다. 따라서 TRNSYS18상의 수-수 방식 히트펌프 컴포넌트의 냉·난방 성능 데이터가 본 연구에서 적용한 히트펌프보다 낮은 효율의 히트펌프를 기준으로 제작되었기 때문에 낮은 성능을 나타내는 것으로 분석된다.

추후 연구과제로 지열원 히트펌프 시스템의 시뮬레이션 상으로 구현하지 못한 에너지 축적에 의한 지중 열교환 효율 저하에 따른 연구가 필요하다.

4. 결 론

본 연구는 수열원과 지열원 적용 비율에 따른 히트펌프 시스템 성능 비교를 Case 별로 동적 열부하 시뮬레이션인 TRNSYS18로 구현하여 소비전력 및 COP로 성능 비교 분석을 진행하였다.

(1) 냉방의 경우 수열원 단독 시스템이 지열원 단독 시스템에 대비하여 평균 EST가 3.8°C 낮으며, COP의 경우에는 7.60이며, 지열원 단독 시스템의 COP인 5.64보다 25.8% 높은 성능을 보여준다. 또한 에너지 소요량은 11.16% 낮은 것을 보여준다. 난방의 경우 지열원 단독 시스템이 수열원 단독 시스템에 대비하여 평균 EST가 3.3°C 높으며, COP의 경우에는 2.43이며, 지열원 단독 시스템의 COP인 2.32보다 4.5% 높은 성능을 보여준다. 또한 에너지 소요량은 5.14% 낮은 것을 보여준다.

(2) 냉방 시는 수열원 히트펌프 적용 비율이 많은 Case가, 난방 시에는 지열원 히트펌프 적용 비율이 많

은 Case의 순서대로 COP는 큰 값이 에너지 소요량은 작은 값이 산출되었다. 따라서 복합열원 히트펌프 시스템을 적용할 대상 건물의 냉방 부하가 큰 경우 수열원의 비율을 높이고, 난방 부하가 큰 경우 지열원 비율을 높여야 한다.

(3) 추후 연구를 통해 열원의 종류와 제원을 상세하게 구현하여 시뮬레이션을 진행할 계획이다. 열원의 특성인 지중열교환기의 종류와 연중 수열원의 온도가 중요한 요소로 작용하기에, 큰 차이를 보일 것으로 분석된다. 아울러 여러 종류의 변수를 지정하여 그에 따른 제어로직을 설정하여 비교 분석을 진행하여, 복합열원 히트펌프 시스템의 최적 제어로직을 제시하고자 한다.

후 기

이 논문은 정부(환경부 환경기술개발사업)의 재원으로, 한국환경산업기술원의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2020003160021).

References

1. Bea, S., Jeon, J. Y., Kwon, Y. S., and Nam, Y., Study on the Operation Method of Ground Source Heat Pump System Considering Recovery of Ground Temperature, Korea Society of Geothermal Energy Engineers, Vol. 16, No. 4, pp. 24-30.
2. Bae, H. H., Lee, D. H., Lee, S., Kim, B., and Ahn, Y. C., A Study on the Performance Improvement of a Simultaneous Heating and Cooling Water Source Heat Pump System by Controlling of the Refrigerant Flow Rate in an Outdoor Unit, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 25, No. 3, pp. 131-136.
3. Sohn, B., Design of Ground-Coupled Heat Pump (GCHP) System and Analysis of Ground Source Temperature Variation for School Building, Korea Society of Geothermal Energy Engineers, Vol. 16, No. 1, pp. 17-25.
4. Ko, Y., Park, S., and Min, J., 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.
5. Cho, Y. U., Woo, T., Chung, K. S., and Kim, Y., Study on Energy Consumption of Air-source, Ground-source and Dual-source Heat Pump during Intermediate Season, Korea Society of Geothermal Energy Engineers, Vol. 9, No. 4, pp. 1-7.
6. Sohn, B., Lee, D. Y., Choi, J. H., and Min, K. C., Performance Analysis of Cooling Tower-Assisted Hybrid Ground-Coupled Heat Pump (HGCHP) System, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. C, Vol. 4, No. 1, pp. 19-26.
7. Klein, S. A., 2019, TRNSYS18 Base Manual, KESTech, Kocaeli, Turkey.
8. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2017, Standard of Building Saving, MLIT criteria 2017-881.