



RESEARCH ARTICLE

주거용 건물을 위한 냉난방 및 급탕 통합 히트펌프 시스템의 에너지 절감 가능성 분석

황유진¹ · 정재원^{2*}

¹한양대학교 건축공학과 석사과정, ²한양대학교 건축공학과 교수

Energy Saving Potential of Air-source Heat Pump System for Cooling, Heating and Hot Water Supply in Residential Buildings

Hwang, Yu-Jin¹ · Jeong, Jae-Weon^{2*}

¹MS Student, Department of Architectural Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea

²Professor, Department of Architectural Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea

*Corresponding author: Jeong, Jae-Weon, Tel: +82-2-2220-2370, E-mail: jjwarc@hanyang.ac.kr

ABSTRACT

The present study aims to evaluate energy saving potential of heat pump system functioning as cooling, heating and hot water supply applicable for residential buildings. To analyze the advantage of integrating heating and cooling, existing mono function air-source heat pump and radiant floor heating system were set to the reference case. The model building was established in TRNSYS 18, and integrated energy simulation in annual was conducted with all system model equations in EES program. The results show that proposed heat pump system reduced 11-12.5% energy consumption in simulation cases, compared to the reference system.

주요어 : 공기열원 히트펌프, 다기능 히트펌프, 냉난방 및 급탕 시스템

Keywords: Air Source Heat Pump, Multi-functional Heat Pump, Heating, Cooling and Hot Water Supply System



OPEN ACCESS

Journal of KIAEBS 2020 October, 14(5): 503-514
<https://doi.org/10.22696/jkiaeb.20200043>

pISSN : 1976-6483
eISSN : 2586-0666

Received: September 15, 2020

Revised: October 23, 2020

Accepted: October 23, 2020

© 2020 Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems.



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서론

최근 제로에너지 관련 정책이 강화되면서 제로에너지 건물을 실현시키는 다양한 친환경 설비 시스템들에 관심이 몰리며 새로운 기술들이 제안되고 있다. 그 중 하나로 이미 시장에서 큰 비중을 차지하고 있는 히트펌프 시스템은 유럽에서는 신재생 에너지로 분류되며 그 가능성을 인정받고 있다(Hewitt et al., 2011). 국내에서도 상업용 건물 등 다양한 다중이용시설에 히트펌프 시스템이 활발히 적용되고 있지만 주거용 건물에서는 냉방 시스템(에어컨)으로서 제한적으로 사용되고 있으며, 난방 혹은 급탕 시스템에는 보일러 시스템이 사용되고 있다. 즉, 주거용 건물에서 공기열원 히트펌프 시스템으로 냉난방, 급탕 기능을 담당하는 설비 시스템에 대한 적용이 미흡한 상황이다.

한편, 해외에서는 공기열원 히트펌프 기반 냉난방, 급탕 설비에 대한 연구가 활발히 이루어져왔다. 냉난방 및 급탕을 동시에 담당하는 히트펌프 시스템으로 Sakai et al. (1976)과 Xu et al. (2009)는 히트펌프 시스템과 태양열 시스템을 접목시켜 급탕열을 태양열로부터 보충하여 사용하는 시스템을 제안하였고 Biau and Bernier (2008)은 지열과 태양광 시스템을 히트펌프 시스템과 결합해 열과 전기를 모두 얻는 시스템을 여러가지 적용가능한 대안들을 비교함으로써 제안하였다. Sebarchievici and Sarbu (2015)은 히트펌프 시스템과 지열 시스템을 결합함으로써 히트펌프의 방열과 흡열에서 얻은 이득을 실험을 통해 검증하였고, 시뮬레이션 데이터와 비교하였다. Jung et al. (2013)과 Wu et al. (2014)은 냉난방용 히트펌프 이외에 급탕용 히트펌프를 추가로 두어 급탕이 가능한 온도까지 올리는 시스템을 제안하였고 Jung et al. (2014)은 이에 추가적으로 여러 모드에 따른 최적의 운전 방안을 도출하였다.

히트펌프를 적용한 다양한 설비 시스템의 제안이 기존 연구를 통해 이루어졌지만, 냉난방 및 급탕의 개별운전 혹은 동시운전을 모두 구현하며 주거용 건물의 냉난방 및 급탕부하 특성에 맞는 시스템을 제안하는 연구는 미비하였다. 따라서 본 연구에서는 거주용 건물에 적용한 공기열원 히트펌프 기반 냉난방, 급탕 시스템을 제안하며, 현재 일반적으로 적용되고 있는 냉난방 및 급탕 시스템인 보일러·에어컨과 비교함으로써 에너지 절감을 이루는 설비 시스템으로 적용 가능성을 제안하고자 한다.

시스템 개요

비교 케이스

본 연구에서 비교하고자 하는 시스템(i.e., Ref. case, Case 1 - Case 2)들은 Figure 1과 같다.

(1) 기준 시스템 (Ref. case)

Ref. case는 보일러를 통해 온수 탱크에 공급되는 시수를 가열하여 온수를 탱크($m_{\text{storage}} = 250 \text{ kg}$)에 저장한다. 가열된 온수로 급탕 및 바닥난방 공급수를 실내로 공급하고, 냉방은 보일러와 별도로 실내 히트펌프(i.e., 에어컨)를 통해 실내로 공급하는 시스템이다.

(2) 급탕 및 난방용 히트펌프와 냉방용 히트펌프 시스템 (Case 1)

기준 시스템에서 온수 생산을 위한 보일러를 히트펌프로 대체하였으며, 냉방 및 난방 시스템 구성은 Ref. case와 동일하다. 독립된 히트펌프를 통해 온수를 생산하여 온수 탱크($m_{\text{storage}} = 250 \text{ kg}$)에 저장하며 실내로 급탕 및 바닥난방 공급수로 실내에 보내주어 난방을 공급한다. 냉방도 동일하게 히트펌프 에어컨을 통해 실내에 공급된다.

(3) 급탕용 히트펌프와 냉난방용 히트펌프 시스템 (Case 2)

Case 2에서는 역사이클로 난방 운전이 가능한 히트펌프의 장점을 취해 사방밸브를 추가하여 냉방뿐만 아니라 난방까지 처리하고, Case 1의 급탕 및 난방용 히트펌프는 Case 2에서는 급탕만을 처리한다. 급탕을 위한 온수만을 생산하기 때문에 탱크 용량 산정 방식(급탕설비 설계기준: KDS 313020, 2016)에 따라 온수 탱크의 용량(m_{storage})이 150 kg으로 축소되었다. 난

방이 냉방 시스템과 통합하게 되면서 바닥난방으로 실내에 난방을 공급하는 Ref. case와 Case 1과 달리 Case 2는 공기로 실내에 난방을 공급한다.

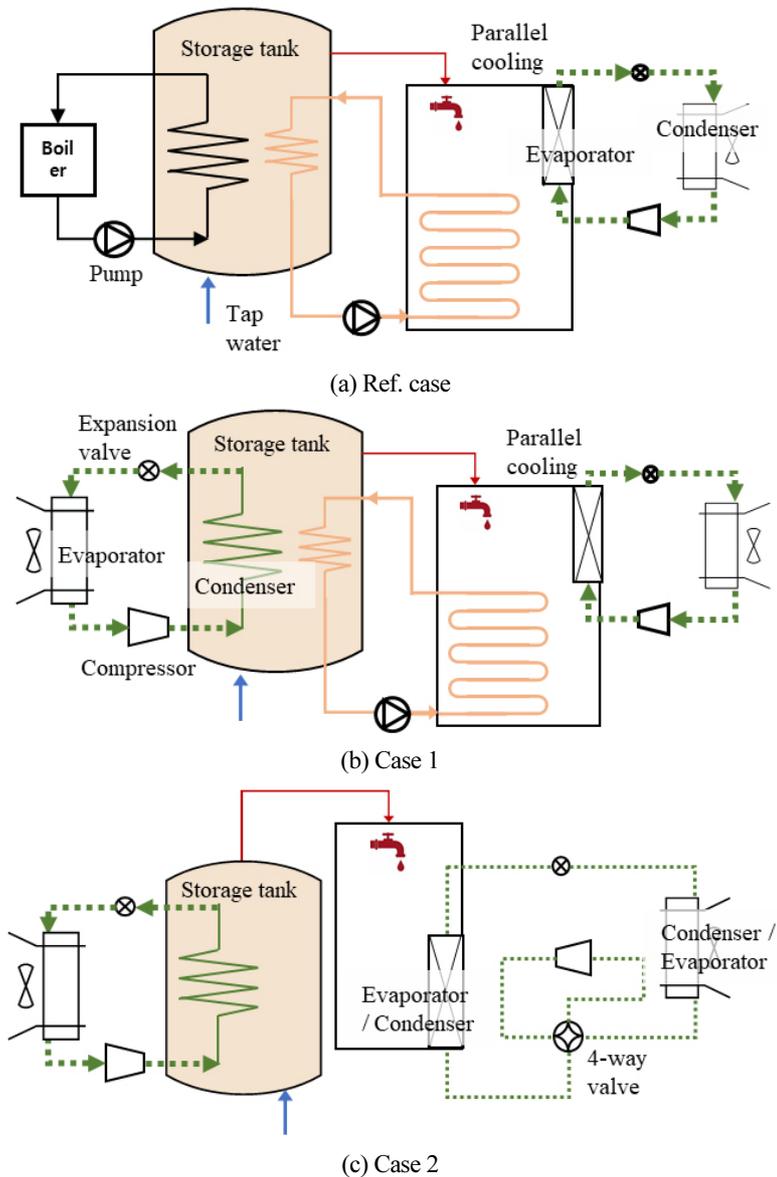


Figure 1. Schematics of simulation cases

시뮬레이션

시뮬레이션 대상 건물

앞서 제시된 세 가지 케이스를 비교하는 시뮬레이션을 위해 서울에 위치하는 바닥면적이 84 m^2 인 건물이 TRNSYS 18을 통해 모델링 되었으며, 벽체를 포함한 모든 구조체와 창문의 열관류율은 제로에너지건물의 필수 설계 조건인 에너지절약 설계기준에 맞춰 설계되었다.

실내 거주자, 조명, 실내 기기 스케줄은 ASHRAE Standard 90.1(2010)를 참고하여 설정되었다. 시스템이 적용되어 시뮬레이션이 이뤄지는 대상 모델 건물에 대한 더 자세한 정보는 Table 1에 기술되어 있다. 대상 건물의 연중 냉난방 부하 프로파일은 Figure 2에서 확인할 수 있고, 급탕 부하는 관련 Fuentes et al. (2018)의 연구를 참고하여 스케줄에 맞춰 수정하여 반영하였다. 시스템 설계에는 연중 부하 중 각각의 피크 부하를 선정하여 반영되었다.

Table 1. Specific information of model space building

Location	Seoul, South Korea	
Volume	84 m ² (floor area), 3 m (height)	
Indoor air condition	Summer	Dry-bulb temperature (T_{ra}) = 26°C Relative humidity (RH) = 50%
	Winter	Dry-bulb temperature (T_{ra}) = 20°C Relative humidity (RH) = 30%
U-value	Exterior wall	0.145 W/m ² K
	Window	0.62 W/m ² K
Building load	Summer	4.54 kW/h (cooling)
	Winter	2.02 kW/h (heating)
Hot water Load	Annual peak	4.42 kW/h (heating) (Fuentes et al., 2018)

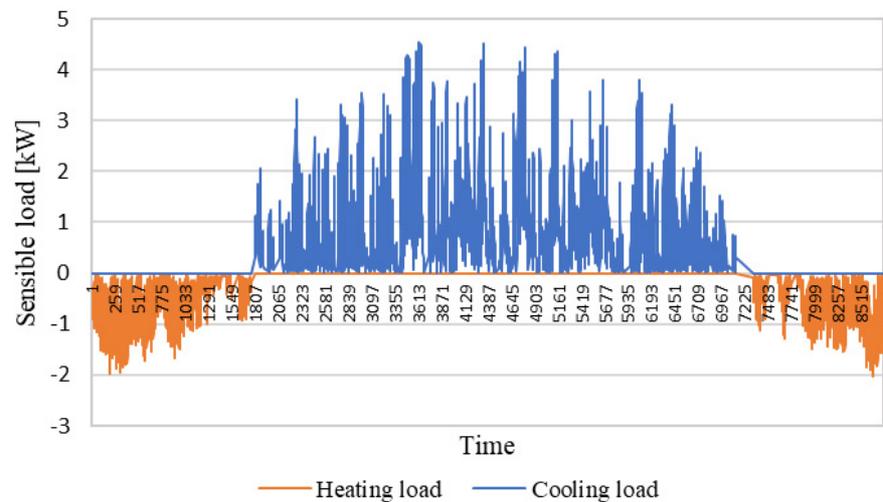


Figure 2. Annual profile of sensible load

시뮬레이션 개요

본 연구의 시뮬레이션은 앞서 제시된 모델 건물 선정과 냉난방 및 급탕 부하를 도출되면 부하를 처리하기 위해 각 케이스를 구성하는 컴포넌트들의 용량이 산정된다. 분기 별로 부하를 처리할 수 있도록 시뮬레이션 조건 별로 분리되어 1시간의 timestep을 가지고 연중 부하를 처리하도록 시스템이 운전되었다. 각 케이스 별로 동일한 설정 조건과 운전 조건을 가지고 시뮬레이션이 진행되었다.

시뮬레이션 모델

(1) 공기열원 히트펌프

본 연구에서 적용된 공기열원 히트펌프는 앞서 제시한 ASHRAE Standard 기준에 따라 설계된 대상 건물의 냉난방 부하 및 급탕 부하를 처리할 수 있는 용량으로 설계되었다. 실내 냉난방을 위한 히트펌프의 응축기와 증발기의 온도 설정은 여름철 및 겨울철의 실내 급기 조건 (i.e., $T_{sa,sum} = 14^{\circ}\text{C}$ in summer, $T_{sa,wint} = 36^{\circ}\text{C}$ in winter)을 만족시킬 수 있는 온도(i.e., $T_{evap,sum} = 10^{\circ}\text{C}$ at the evaporator, $T_{cond,wint} = 40^{\circ}\text{C}$ at the condenser)로 설정되었다. 또한, 급탕 및 난방 공급 온수 조건(i.e., $T_{sw} = 60^{\circ}\text{C}$ in annual)을 달성하기 위해 온수 탱크를 가열하는 응축기는 75°C ($T_{cond,hws}$)로 설정되었다(LG Electronics business Catalog, 2020). 실내기의 급기 조건을 만족시키기 위해서는 먼저 실외기에서 외기와와의 열교환을 통해 충분한 방열(at the condenser in summer) 또는 흡열(at the evaporator in winter)이 이루어져야 한다. 여름철에는 방열을 위해 응축기는 55°C ($T_{cond,sum}$)로 고정되어 운전되었고, 겨울철의 경우 증발기는 히트펌프의 성능 저하를 방지하기 위해 외기와와의 최소 온도차(i.e., 3°C)를 두고 필요 흡열량을 달성하지 못할 시 팽창밸브 제어를 통해 증발기 온도를 1°C 낮추는 운전 로직에 따라 히트펌프가 운전되었다. 열교환기 효율 및 시스템 효율은 75%로 가정되었다.

(a) 실내기(Evaporator in summer, Condenser in winter)

실내기는 사방밸브를 통해 여름철에는 실내를 냉각하는 증발기로, 겨울철에는 난방을 제공하는 응축기로 교번 운전하며 기능한다. 여름철 실내에 공급하는 냉각량은 대상 모델에 필요한 부하에 따라 급기 풍량(\dot{V}_{sa})을 변화시켜가며 여름철 실내 공기 및 급기 조건으로 식 (1)을 통해 계산할 수 있다. 마찬가지로 겨울철에는 겨울철 실내 공기 및 급기 조건과 변풍량(\dot{V}_{sa})으로 실내에 필요한 난방량(i.e., 식 (2))만큼 공급한다.

$$Q_{cl,indoor} = \dot{V}_{sa} \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T_{ra,sum} - T_{sa,sum}) \quad (1)$$

$$Q_{ht,indoor} = \dot{V}_{sa} \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T_{sa,wint} - T_{ra,wint}) \quad (2)$$

(b) 급탕용 응축기(Condenser in annual)

급탕 유닛은 연중 히트펌프의 응축기로서 기능하며 급탕 유닛이 On 될 때 온수 탱크로 식 (3)만큼 방열한다. 공급온수온도 60°C 로 부하 변화에 따라 변화하는 유량(\dot{m}_{sw})을 실내에 공급하며 공급된 만큼의 시수가 15°C (T_{tw})의 온도로 온수탱크에 채워진다.

$$Q_{ht,hotwater} = \dot{m}_{sw} \cdot \rho_w \cdot C_{p,w} \cdot (T_{sw} - T_{tw}) \quad (3)$$

(c) 실외기(Condenser in summer, Evaporator in winter)

실외기는 사방밸브를 통해 여름철에는 응축기로, 겨울철에는 증발기로 교번 운전하며 기

능한다. 여름철 실내의 열을 빼앗아 외기에 방열하며 방열이 필요한 만큼 풍량을 변동시켜 식 (4)만큼 방열한다. 겨울철에는 외기에서 식 (5)만큼 흡열하여 실내기 및 급탕 유닛에 방열한다.

$$Q_{ht,outdoor} = \dot{V}_{oa} \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T_{cond} - T_{oa}) \quad (4)$$

$$Q_{cl,outdoor} = \dot{V}_{oa} \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T_{oa} - T_{evap}) \quad (5)$$

(d) 압축기(Compressor)

냉난방 및 급탕 부하를 처리하는 실내기(급탕용 응축기 포함)와 실외기의 적절한 열전달량을 만족시키기 위해 필요한 압축기 용량은 식 (6)으로 계산할 수 있다. 여름철 필요한 냉방 부하 대비 겨울철 난방 및 급탕 부하를 처리 하는 데 더 큰 용량을 필요로 하므로 겨울철 피크 부하에 맞춰 용량이 설계되었다.

$$W_{comp} = Q_{ht,indoor} + Q_{ht,hotwater} - Q_{cl,outdoor} \quad (6)$$

(2) 보일러

기존 시스템에서 급탕 및 난방용으로 사용되는 보일러는 일반적인 가스 보일러를 적용하였다. 가스 보일러 모델은 에너지 플러스에서 제공하는 보일러 효율 곡선이 적용된 보일러 성능 모델을 참고하여(EnergyPlus Documentation, 2016) 이를 시뮬레이션에 적용하였다. 적용된 식은 다음과 같다. 다음과 같은 식을 적용하여 필요한 급탕 및 난방 부하를 처리하는 온수를 생산하는 보일러 열량(Q_{boiler})을 식 (7)로 계산하였다.

$$Q_{boiler} = Q_{heating} / (Boiler\ Efficiency\ Curve \cdot \eta_{boiler}) \quad (7)$$

(3) 온수 탱크

Figure 3는 한 시간의 timestep에서 급탕유닛의 On/Off를 결정하는 로직이다. 기존 시스템에서는 보일러, Case 1와 Case 2에서는 히트펌프의 응축기를 통해 급탕 및 난방을 위한 온수를 생산하게 된다. 먼저 이전의 timestep에서 받은 탱크 온도($T_{st,old}$)를 기준으로 60°C보다 낮으면 급탕유닛의 운전이 On된다. 식 (8)을 통해 필요 풍량(\dot{V}_{evap})을 계산한 후 공기의 열용량으로 전달할 수 있는 열교환량($Q_{evap,air}$)을 식 (9)로 계산한다. 식 (10)으로 계산되는 필요 흡열량($Q_{evap,hp}$)과 비교해서 필요 흡열량보다 작으면 보조 열원으로 부족한 열량을 채우고 한 시간의 timestep을 마무리하게 된다.

$$\dot{V}_{evap} = \dot{Q}_{evap} / (\rho_a \cdot c_{p,a} \cdot (T_{oa} - T_{ea})) \quad (8)$$

$$Q_{evap,air} = \dot{V}_{oa,1} \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T_{oa} - T_{evap}) \quad (9)$$

$$Q_{evap,hp} = G \cdot (h_{evap,in} - h_{evap,out}) / 3600 \quad (10)$$

탱크 내부의 온수가 이상적으로 완전히 섞인다고 가정했을 때 탱크를 기준으로 나가고 들어가는 열량을 식(11)과 식(12)로 도출한 후, 이를 바탕으로 식(13)를 통해 열교환 후의 탱크의 온도가 계산된다.

$$Q_{st,in} = Q_{cond}/\eta_{st} \quad (11)$$

$$Q_{st,out} = L_{sen} + L_{hws} \quad (12)$$

$$T_{st} = T_{st,old} + 3600 \cdot (Q_{st,in} - Q_{st,out}) / m_{st} \cdot cp_w \quad (13)$$

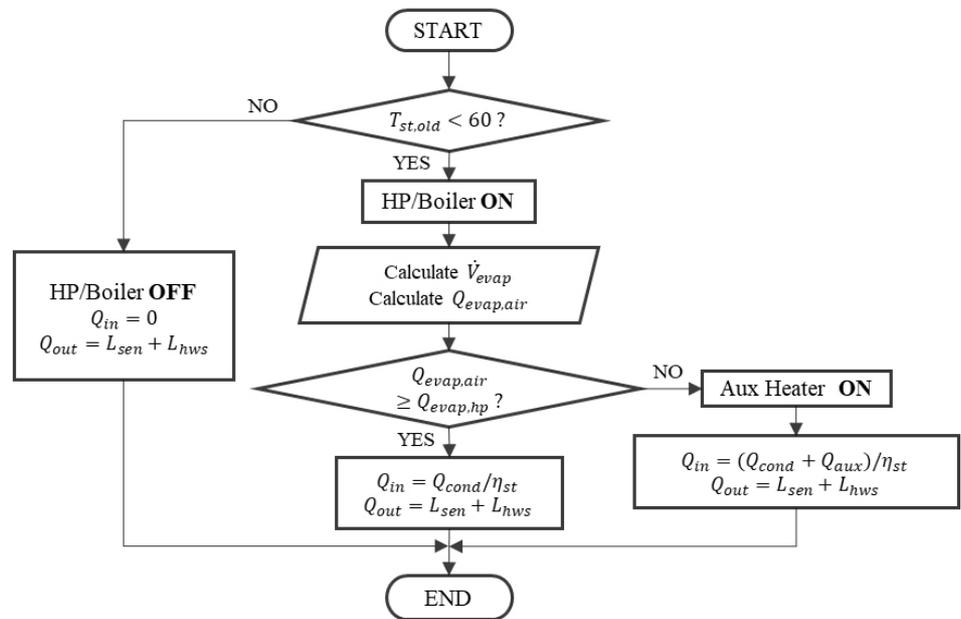
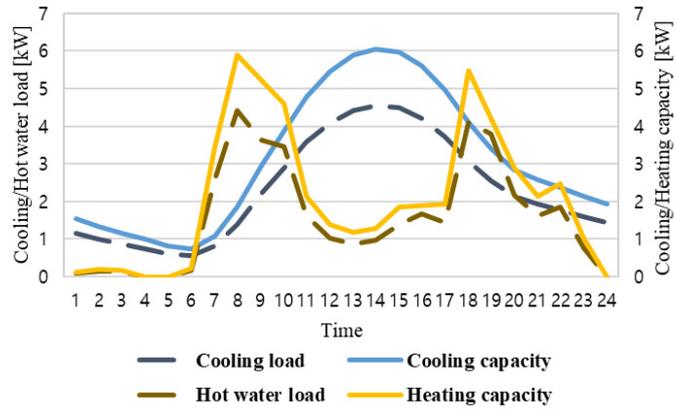


Figure 3. Calculation flow chart of hot water storage tank

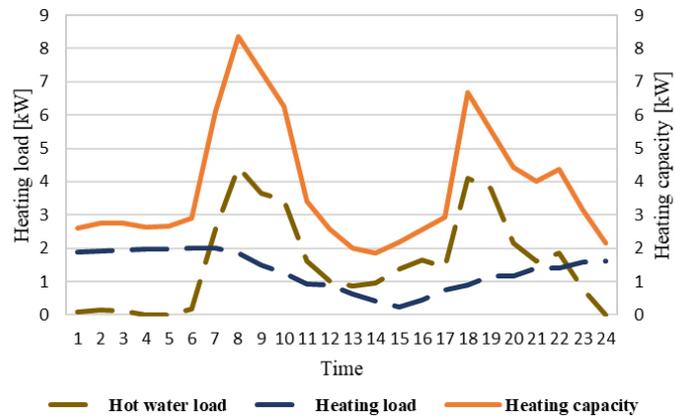
시뮬레이션 결과

냉난방 및 급탕 공급 성능

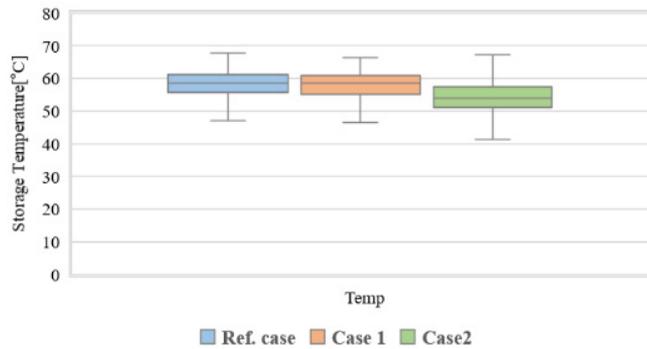
앞서 시스템 설계 단계에서 서술한 대로 시뮬레이션을 진행했을 때의 부하에 따른 냉난방 및 급탕 공급 성능을 Figure 4에서 확인할 수 있다. 모든 케이스에서 동일하게 설계된 급기 온도 및 풍량으로 필요한 냉난방 부하를 충분히 만족시키는 것을 확인하였다. Figure 4(a)는 연중 부하 프로파일에서 피크부하를 보이는 디자인 데이의 여름철 냉방 및 급탕을, Figure 4(b)는 겨울철 난방 및 급탕을 동시에 운전할 때의 히트펌프 성능을 보여준다. Figure 4(c)는 각 케이스에 해당하는 온수 탱크의 온도 변화를 나타낸다. Ref. case와 Case 1에서는 탱크 안의 온수로 급탕 뿐만 아니라 난방까지 담당하므로 탱크 용량이 커 시간에 따른 온도 변화가 크지 않은 것으로 나타났다. 이에 비해 Case 2의 경우에는 급탕만을 담당하면서 상대적으로 작은 탱크 용량으로 인한 온도 변동이 있었지만, 모든 케이스에서 중간값이 55°C 이상으로 온수 공급 온도에는 영향이 없는 것으로 확인하였다.



(a) Cooling/hot water load and cooling/heating capacity on peak day in summer



(b) Heating/hot water supply load and heating capacity on peak day in winter



(c) Variation of storage tank temperature

Figure 4. Performance of cooling, heating and hot water supply

히트펌프 COP

Figure 5는 Ref. case와 Case 1에 적용된 냉방용 히트펌프, Case 1에 적용된 급탕 및 난방용 히트펌프, Case 2의 급탕과 냉난방용 히트펌프의 COP를 나타낸다. Ref. case, Case 1, Case 2의 모든 케이스에서 냉방 운전 시, 실내기 및 실외기의 온도가 모두 고정되고 팬 풍량이 조절되면서 실내 냉방량과 실외 방열량을 만족시키기 때문에 온도로의 함수로 계산되는 히트펌프 냉방 COP는 고정값이 된다. Case 1과 Case 2에서의 급탕 및 난방용 히트펌프는 COP의 급격한 저하를 방지하기 위해서 외기에서 흡열이 가능한 최소 온도차로 설정한 후, 냉매

순환량과 팬 풍량이 조절되었기 때문에 마찬가지로 온도의 함수로 계산되는 히트펌프 난방 및 급탕 COP는 외기에 따라 변동된다. Case 2에서는 겨울철 난방과 급탕이 따로 운전되므로 급탕온도까지 올릴 필요가 없는 난방용 히트펌프는 COP가 더욱 향상되는 결과를 보였다.

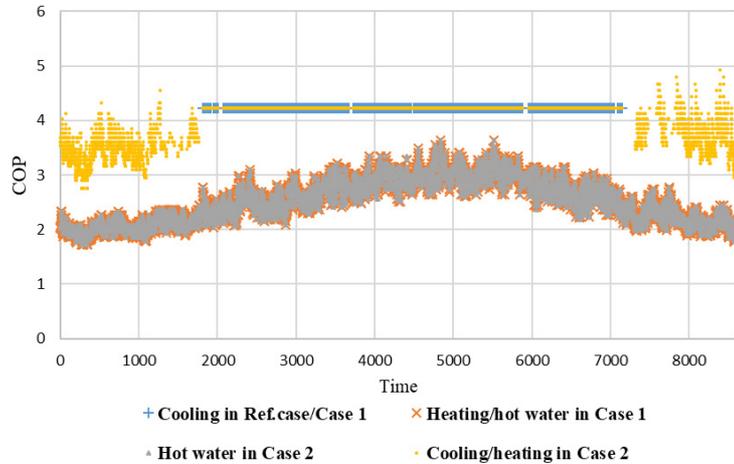


Figure 5. Heat pump COP

시스템 COP

Figure 6는 각 케이스별 전체 시스템 COP를 연간으로 나타낸다. 시스템 COP는 식 (14)와 같이 얻게 되는 냉난방 및 급탕 열량에서 팬, 펌프를 포함한 모든 컴포넌트에서 사용되는 에너지로 나눈 값으로 계산되었다. 모든 케이스에서 대체적으로 시스템 COP가 1이하로 나타

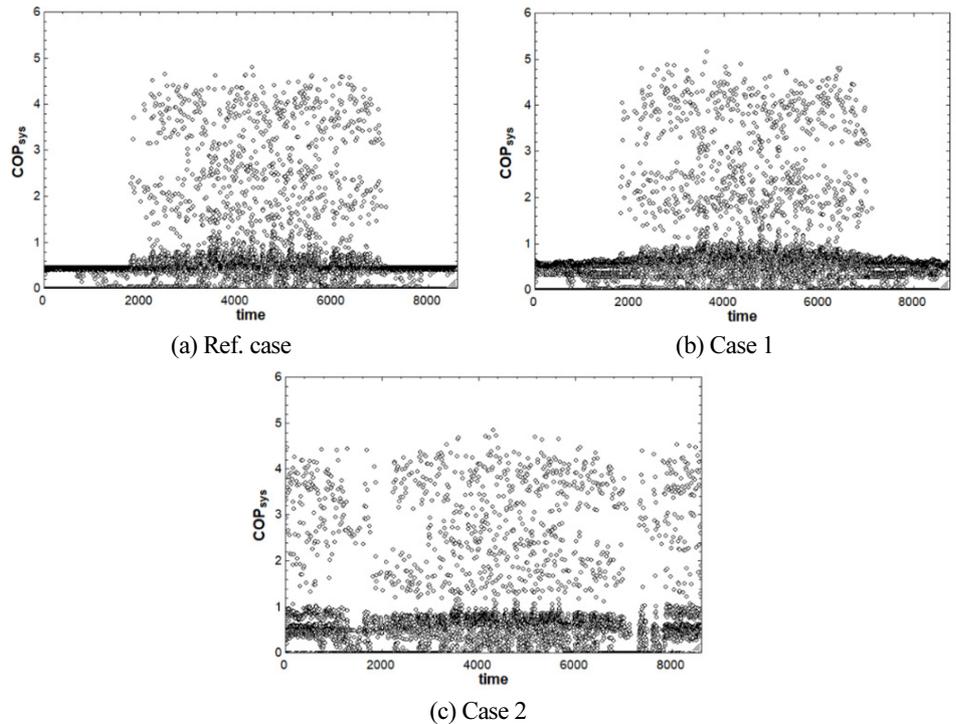


Figure 6. System COP

났고 Ref. case와 Case 1에서는 간헐적으로 여름철에 시스템 COP가 약 5 가까이 증가하는 경향을 나타냈다. 이는 여름철 급탕을 위한 온수 탱크의 온도가 60°C를 초과하면서 급탕용 보일러/히트펌프가 Off되고 탱크에 남아있는 잔열로 급탕을 공급할 때, 냉방을 위해 사용된 히트펌프의 에너지 소비 대비 냉방 및 급탕 부하를 함께 처리하면서 이러한 경향이 나타났다. Case 2에서는 히트펌프가 연중 운전되면서 시스템 COP의 향상이 연중 나타나는 것을 확인하였다.

$$COP_{sys} = \frac{L_{sen} + L_{hws}}{P_{boiler} + P_{hp} + P_{pump} + P_{fan}} \quad (14)$$

연간 1차에너지 소비량

각 케이스 별 컴포넌트의 총 운전 에너지 소비량을 비교하면 Figure 7와 같다. 결과적으로 Ref. case는 총 29.05 MWh, Case 1은 총 25.85 MWh, Case 2는 총 25.42 MWh를 사용하면, Ref. case 와 비교하여 Case 1은 약 11%, Case 2는 약 12.5%의 1차 에너지 절감 효과를 나타냈다. 이는 주로 난방 및 급탕을 담당하는 보일러(Ref. case)가 히트펌프(Case 1)로 교체되면서 난방 및 급탕의 소비에너지가 22.86 MWh에서 19.9 MWh로 감소하는 효과를 보였고, 냉방만을 담당하던 단일 기능의 히트펌프(Case 1)가 난방까지 담당하게 되면서(Case 2)

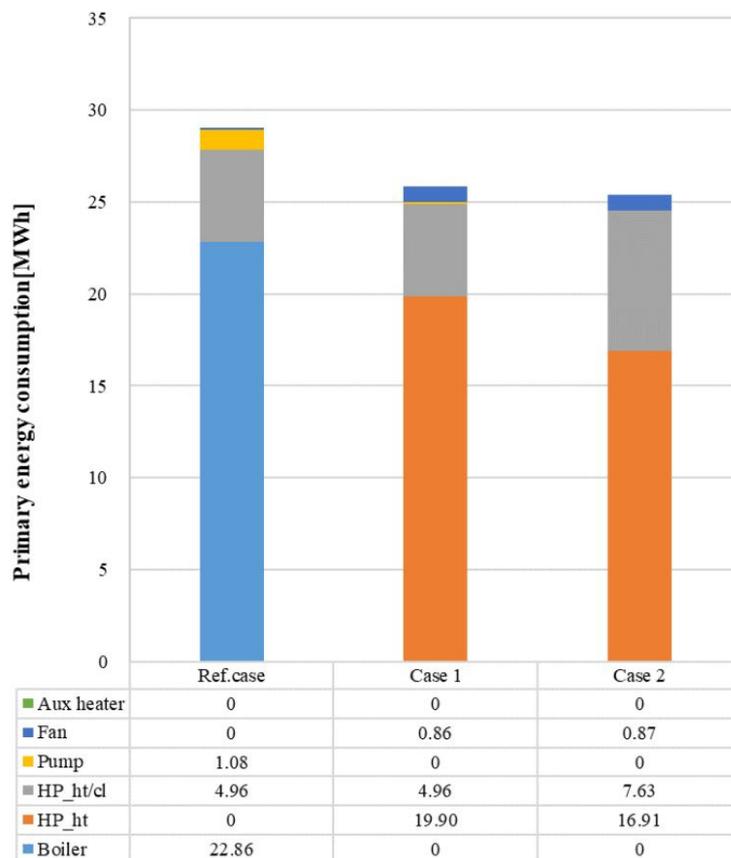


Figure 7. Sum of annual primary energy consumption by cases

냉난방 소비에너지($HP_{cl} + HP_{ht/cl}$)가 24.86 MWh에서 24.54 MWh로 감소하는 효과를 얻었다. 이러한 결과는 히트펌프의 시스템적 특성으로 나타난 결과로 압축기의 압축일량 대비 히트펌프의 COP만큼의 방열 혹은 흡열을 함으로써 열적 이득을 얻었기 때문이다. HP_{ht} 에서 소비된 에너지가 일부 $HP_{ht/cl}$ 로 넘어가면서 난방과 급탕을 통합한 Case 1과 분리된 Case 2의 히트펌프 소비량의 차이는 크지 않은 것으로 나타났고, Case 2에서의 난방용 히트펌프의 COP가 다소 향상되면서 에너지 소비량에서 약간의 이득을 보이는 것으로 나타났다.

결론 및 고찰

본 연구에서는 공동주택의 냉난방 및 급탕을 기능하는 히트펌프 시스템을 제안하며 기존의 냉난방 및 급탕 시스템인 보일러-에어컨 시스템과 비교하였다. 결과적으로 소비된 1차 에너지량을 비교해 보았을 때, Case 1은 Ref. case에 비해 11%, Case 2는 12.5%의 에너지를 덜 사용하였다. 이는 통합된 히트펌프의 건물 적용이 냉난방 및 급탕 부하를 동일하게 처리하면서도, 기존시스템보다 에너지를 절감할 수 있다는 결과를 나타낸다. Case 1과 Case 2의 결과를 비교하면 난방과 급탕을 분리하거나 통합하면서 나타나는 에너지소비 차이는 크지 않은 것으로 나타났고, 에너지 절감에 있어서는 히트펌프가 큰 영향을 미치는 것으로 확인했다. 겨울철 외기 온도가 낮아지는 상황을 고려하여도 히트펌프를 사용하는 케이스들이 에너지 이득을 보는 것으로 나타났지만, 제상운전 등으로 히트펌프 자체의 COP가 낮아지는 경우는 시뮬레이션 상에서 반영되지 못하였기 때문에 이에 대한 영향도 함께 고려하여 결과를 이해할 필요가 있다. 다만, 현대 주거의 특성이 좌식문화에서 입식으로 변해가고 있음에 따라 새로운 냉난방 및 급탕 시스템에 대한 연구가 더욱 필요하며 고효율 설비 시스템으로서 공기열원 히트펌프가 하나의 대안이 될 수 있을 것으로 사료된다.

후기

이 논문은 2019년도 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2019R1A2C2002514).

References

1. Biau, A.L., Bernier, M.A. (2008). Achieving total domestic hot water production with renewable energy. *Building and Environment*, 43, 651-660.
2. Fuentes, E., Arce, L., Salom, J. (2018). A review of domestic hot water consumption profiles for application in systems and buildings energy performance analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1530-1547.
3. Hewitt, N.J., Huang, M.J., Anderson, M., Quinn, M. (2011). Advanced air source heat pumps for UK and European domestic buildings. *Applied Thermal Engineering*, 31(17-18), 3713-3719.

4. Jung, H.W., Kang, H., Chung, H., Ahn, J.H., Kim, Y. (2014). Performance optimization of a cascade multi-functional heat pump in various operation modes, *International Journal of Refrigeration*, 42, 57-68.
5. Jung, H.W., Kang, H., Yoon, W.J., Kim, Y. (2013). Performance comparison between a single-stage and a cascade multi-functional heat pump for both air heating and hot water supply. *International Journal of Refrigeration*, 36(5), 1431-1441.
6. Sakai, I., Takagi, M., Terakawa, K., Ohue, J. (1976). Solar space heating and cooling with bi-heat source heat pump and hot water supply system. *Solar Energy*, 18(6), 525-532.
7. Sebarchievici, C., Sarbu, I. (2015). Performance of an experimental ground-coupled heat pump system for heating, cooling and domestic hot-water operation. *Renewable Energy*, 76, 148-159.
8. Wu, W., You, T., Wang, B., Shi, W., Li, X. (2014). Simulation of a combined heating, cooling and domestic hot water system based on ground source absorption heat pump. *Applied Energy*, 126, 113-122.
9. Xu, G., Deng, S., Zhang, X., Yang, L., Zhang, Y. (2009). Simulation of a photovoltaic/thermal heat pump system having a modified collector/evaporator. *Solar Energy*, 83(11), 1967-1976.
10. LG Electronics (2020). B2B Catalog, 22, 17-25.
11. US Department of Energy, EnergyPlus Documentation: Engineering Reference. (2016). 1-847.
12. ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1 (2010). Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings.
13. KDS 313020 (2016). Standard for Hot Water Supply System Design.