



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

제 141 회 석사학위논문

지도교수 문진우

냉난방 에너지 소비량 절감을 위한 다중열원  
히트펌프 시스템의 최적 제어알고리즘 개발

Development of Optimal Control Algorithms for  
Multi-Source Heat Pump System to Reduce Heating and  
Cooling Energy Consumption

중앙대학교 대학원

건축학과 건축환경계획전공

박동혁

2024년 8월

냉난방 에너지 소비량 절감을 위한 다중열원  
히트펌프 시스템의 최적 제어알고리즘 개발

Development of Optimal Control Algorithms for  
Multi-Source Heat Pump System to Reduce Heating and  
Cooling Energy Consumption

이 논문을 석사학위논문으로 제출함

2024년 8월

중앙대학교 대학원  
건축학과 건축환경계획전공

박 동 혁

# 박동혁의 석사학위논문으로 인정함

심 사 위 원 장 \_\_\_\_\_ (인)

심 사 위 원 \_\_\_\_\_ (인)

심 사 위 원 \_\_\_\_\_ (인)

중앙대학교 대학원

2024년 8월



# 목 차

제 1 장 서 론 .....	1
1.1 연구의 배경 및 목적 .....	1
1.2 연구의 범위 및 방법 .....	6
제 2 장 이론 고찰 .....	9
2.1 다중열원 히트펌프 시스템 연구 동향 .....	9
2.1.1 다중열원 히트펌프 시스템 개요 .....	9
2.2 다중열원 히트펌프 시스템 선행연구 .....	13
2.2.1 다중열원 히트펌프 개발 현황 .....	14
2.2.2 다중열원 히트펌프 제어 기술 현황 .....	21
2.3 소 결 .....	28
제 3 장 다중열원 히트펌프 시스템 모델링 .....	29
3.1 다중열원 히트펌프 시스템 구성 .....	29
3.2 시뮬레이션 모델링 .....	31
3.2.1 시뮬레이션 모델링 개요 .....	31
3.2.2 Base model 모델링 .....	32
3.2.3 Base model 시스템 용량 타당성 분석 .....	37
3.3 소 결 .....	39

제 4 장 예측모델 및 제어알고리즘 개발 .....	40
4.1 예측모델 개발 .....	40
4.1.1 예측모델 학습데이터 구축 .....	41
4.1.2 예측모델 최적화 .....	44
4.2 규칙기반 제어알고리즘 .....	48
4.3 최적 제어알고리즘 개발 .....	55
4.4 소  결 .....	64
제 5 장 예측모델 및 최적 제어알고리즘 성능평가 .....	66
5.1 예측모델 성능평가 .....	66
5.2 최적 제어알고리즘 성능평가 .....	73
5.2.1 최적 제어알고리즘 성능평가 개요 .....	73
5.2.2 최적 제어알고리즘 성능평가 .....	75
5.2.3 최적 제어알고리즘의 적응성 평가 .....	87
5.3 소  결 .....	97
제 6 장 결  론 .....	99

참고문헌 .....	102
국문초록 .....	110
ABSTRACT .....	112

## 표 목차

Table 1. 국내 다중열원 히트펌프 시스템 개발 선행연구 .....	19
Table 2 국외 다중열원 히트펌프 시스템 개발 선행연구 .....	20
Table. 3 국내 다중열원 히트펌프 시스템 제어 기술 선행연구 .....	26
Table. 4 국외 다중열원 히트펌프 시스템 제어 기술 선행연구 .....	27
Table. 5 시뮬레이션 모델링 입력 값 .....	35
Table. 6 하이퍼 파라미터 최적화 변수 및 탐색범위 .....	45
Table. 7 축열조 온도 예측모델 구조 및 파라미터 .....	46
Table. 8 에너지 소비량 예측모델 구조 및 파라미터 .....	46
Table. 9 실내온도 예측모델 구조 및 파라미터 .....	47
Table. 10 축열조 온도 예측모델 성능평가 .....	68
Table. 11 에너지 소비량 예측모델 성능평가 지표 .....	69
Table. 12 실내온도 예측모델 성능평가 지표 .....	69
Table. 13 서울 제어방법에 따른 축열조 온도 제어 성능지표 .....	83
Table. 14 서울 제어방법에 따른 실내온도 제어 성능지표 .....	83
Table. 15 제어 방식에 따른 시스템 요소별 가동시간 [Hour] .....	86
Table. 16 규칙기반 제어 대비 에너지 소비량 변화 [kWh] .....	86
Table 17 부산 피크부하에 따른 시스템 용량 변화 .....	93
Table. 18 부산 제어방법에 따른 축열조 온도 제어 성능지표 .....	93
Table. 19 부산 제어방법에 따른 실내온도 제어 성능지표 .....	94
Table. 20 부산 시스템 요소별 On/Off 대비 에너지 소비량 변화 [kWh] ·	96
Table 21 부산 시스템 요소별 가동시간 [Hour] .....	96

## 그림 목차

Fig. 1 전 세계 2021-2030년 건물 난방 및 급탕 시 CO2 발생량 <sup>16)</sup> .....	4
Fig. 2 연구 흐름도 .....	8
Fig. 3 히트펌프 작동 원리 <sup>15)</sup> .....	10
Fig. 4 태양광/열-공기열원-지중열원 다중열원 히트펌프 시스템 .....	30
Fig. 5 다중열원 히트펌프 시스템 Simulation Base modeling .....	34
Fig. 6 DOE Reference Building Small Office .....	35
Fig. 7 냉난방 가동 시 연중 Unmet load hour .....	38
Fig. 8 난방기간 1월 Unmet load hour .....	38
Fig. 9 냉방기간 8월 Unmet load hour .....	38
Fig. 10 예측모델 피어슨 상관관계 분석 .....	43
Fig. 11 규칙기반 제어알고리즘 흐름도 .....	50
Fig. 12 규칙기반 제어알고리즘 Part A&B .....	51
Fig. 13 규칙기반 제어알고리즘 Part C .....	52
Fig. 14 규칙기반 제어알고리즘 Part D&E .....	53
Fig. 15 규칙기반 제어알고리즘 Part A to E .....	54
Fig. 16 최적 제어알고리즘 흐름도 .....	58
Fig. 17 최적 제어알고리즘 Part A & B .....	59
Fig. 18 최적 제어알고리즘 Part C .....	60
Fig. 19 최적 제어알고리즘 Part D .....	61
Fig. 20 최적 제어알고리즘 Part E & F .....	62
Fig. 21 최적 제어알고리즘 Part A to F .....	63
Fig. 22 냉난방기간 축열조 온도 예측모델 산점도 .....	70
Fig. 23 난방기간 시스템 에너지 소비량 예측모델 산점도 .....	71
Fig. 24 냉방기간 시스템 에너지 소비량 예측모델 산점도 .....	71
Fig. 25 냉난방기간 실내온도 예측모델 산점도 .....	72
Fig. 26 서울 난방기간 Typical day 중 축열조 온도 및 제어 유량 .....	78
Fig. 27 서울 난방기간 Typical day 중 실내온도 및 제어 유량 .....	78

Fig. 28 서울 난방기간 Peak day 중 축열조 온도 및 제어 유량 .....	79
Fig. 29 서울 난방기간 Peak day 중 실내온도 및 제어 유량 .....	79
Fig. 30 서울 냉방기간 Typical day 중 축열조 온도 및 제어 유량 .....	81
Fig. 31 서울 냉방기간 Typical day 중 실내온도 및 제어 유량 .....	81
Fig. 32 서울 냉방기간 Peak day 중 축열조 온도 및 제어 유량 .....	82
Fig. 33 서울 냉방기간 Peak day 중 실내온도 및 제어 유량 .....	82
Fig. 34 제어 방식별 냉난방 에너지 소비량 .....	85
Fig. 35 부산 난방기간 Typical day 중 축열조 온도 및 제어 유량 .....	88
Fig. 36 부산 난방기간 Typical day 중 실내온도 및 제어 유량 .....	88
Fig. 37 부산 난방기간 Peak day 중 축열조 온도 및 제어 유량 .....	89
Fig. 38 부산 난방기간 Peak day 중 실내온도 및 제어 유량 .....	89
Fig. 39 부산 냉방기간 Typical day 중 축열조 온도 및 제어 유량 .....	91
Fig. 40 부산 냉방기간 Typical day 중 실내온도 및 제어 유량 .....	91
Fig. 41 부산 냉방기간 Peak day 중 축열조 온도 및 제어 유량 .....	92
Fig. 42 부산 냉방기간 Peak day 중 실내온도 및 제어 유량 .....	92
Fig. 43 외기 환경 변화에 따른 월별 에너지 소비량 .....	95

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구의 배경 및 목적

기후 변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)의 보고서에 따르면 지구 평균기온이 산업화 이전 대비 2020년까지 약 1.09°C 상승했다고 보고되며, 지구 평균온도의 급격한 상승으로 온실가스 배출과 기후 변화에 대한 심각성이 대두되고 있다<sup>1)</sup>. 또한, 2022년 제27차 유엔기후변화협약 당사국총회(COP27)에서 Antonio Guterres 국제협약(United Nations, UN) 사무총장은 현 지구의 상황을 ‘기후 재앙’, ‘기후 지옥’과 같은 단어로 비유하며 기후 변화 문제 심각성 및 화석 연료 절감 필요를 더욱 강조하였다.

기후 변화에 대응하기 위해 1997년 교토의정서는 선진국 중심 지구온난화 규제 및 방지를 위한 기후변화협약의 구체적 이행 방안과 온실가스 감축 목표치를 규정하였다. 2015년 파리협정을 통해 지구 평균온도 상승을 기존 2.0°C에서 1.5°C로 제한하고 탄소중립 추진 계획을 발효하며, 전 세계적으로 ‘2050 탄소중립 목표’ 수립 및 관련 정책을 법제화하는 등 다양한 노력을 이행하고 있다<sup>2)</sup>.

건축 분야에서 탄소중립을 위해 저탄소 자재 및 고효율 단열재 사용, 등 다양한 전략이 마련되고 있으며 이 중 건물의 에너지 소비량 절감을 통한 전략이 중요한 요소로 부각되고 있다<sup>3)</sup>. 국제 에너지 기구(International Energy Agency, IEA) 보고서에 따르면 전세계 에너지 소비량 중 건물 분야 에너지 소비량은 약 40%를 차지하며, 이 중 건물의 냉난방에 사용되는 에너지가 50% 이상을

1) IPCC. (2021). Climate Change 2021 : The Physical Science Basis, p.6

2) UNFCCC. (2015). Paris agreement (Vol. FCCC/CP/20). Bonn.

3) International Energy Agency. (2023). World Energy Outlook 2023. Paris: IEA

차지하는 것으로 보고되었다.<sup>4)</sup> 이에 건물 에너지 절감을 목표로 2030 Zero carbon ready Building 전략 비전을 통해 Net Zero by 2050 Roadmap에서 제시된 건물부문 단기 목표를 설정하여 고효율 히트펌프 보급, 주택 지붕 태양광 설치, 태양열 및 풍력 설비 보급, 냉난방에너지 절감 유도 등 건물 에너지를 신재생에너지로의 전환을 위한 지원사업이 진행되고 있다. 이에 따라 신재생에너지와 고효율 설비시스템 도입 확대를 통해 제로에너지 빌딩(Zero Energy Building) 구현에 대한 관심이 증가하고 있다<sup>5)</sup>.

미국은 2015년 신재생에너지 정책을 강화하기 위해 청정전력기획(Clean Power Plan, CPP)를 발표하였다. 2030년까지 자국 내 발전소의 탄소 배출량 감축을 목표로 하여 재생 가능 에너지원 사용을 주된 전략으로 설정하였다. 특히 신재생에너지 중 풍력과 태양광을 주된 대체 에너지원으로 채택하고 고효율 설비 사용 권장 등 탄소절감을 위한 장비 보급 촉진 정책을 실시하였다<sup>6)</sup>. 유럽연합은 2009년 신재생에너지법을 채택하여 2020년까지 신재생에너지 사용 비율 20% 향상을 목표로 신재생에너지로의 전환을 추진하였다. 특히, 히트펌프 사용을 주된 냉난방 에너지 절감 전략으로 설정하며, 신재생에너지 전략에 포함하며 장기적인 지속 가능성 확보를 도모하였다<sup>7)</sup>.

대한민국 정부는 2014년 ‘녹색건축물 조성 지원법’과 ‘녹색건축물 기본계획’을 수립하며 제로에너지 빌딩 활성화 방안 발표를 시작으로 2017년 제로에너지 건축물 인증제를 시행하였다. 이에 따라 제로에너지 건축물 대상을 2020년부터 공공 건축물 부문에서 2024년 민간 건축까지 확대하였다<sup>8)9)</sup>. 또한, 2004년부터 시행된 ‘신재생에너지 의무화’ 제도의 의무화 비율은 2011년 10%, 2020년 30%, 2030년

---

4) US. Energy Information Administration (IEA). (2016). International Energy Outlook.

5) IEA. (2022). Technology and Innovation Pathways for Zero-carbon-ready Buildings by 2030

6) U.S. Environmental Protection Agency, (2015). "Fact Sheet: Clean Power Plan - Key Changes and Improvements,"

7) EU. (2009). "Renewable Energy Directive (2009/28/EC)"

8) 국토교통부. (2014). "녹색건축물 조성 지원법".

9) 국토교통부. (2014). "제1차 녹색건축물 기본계획".



40%로 확대되었다. 2020년 그린뉴딜 정책<sup>10)</sup>을 시행하며 신재생에너지 보급과 건축물의 에너지 소비 절감을 위한 고효율 냉난방 장비 설치가 확대되고 있다<sup>11)</sup>.

최근 건축물의 냉난방 에너지 절감을 위한 기술로 태양열 및 지열과 같은 신재생열원 시스템, 에너지 회수 환기 시스템, 폐열 재사용 시스템 등이 있으며 이중 히트펌프 시스템이 주목받고 있다<sup>12)</sup>. 히트펌프 시스템은 소비되는 전기에너지 대비 최대 3배의 열 에너지를 생산하는 냉난방 시스템으로 기존 화석연료를 사용한 가스 보일러 대비 3~5배 높은 효율을 보이며, 기존 냉난방 시스템 대비 온실가스 배출량을 현저히 줄일 수 있다<sup>13)14)</sup>. 이러한 이유로 미국, 일본, 유럽 등 다양한 국가에서 보급 지원금 정책을 실시하며 히트펌프 보급에 힘쓰고 있다. IEA의 The Future of Heat Pumps에는 기존 냉난방 기기를 히트펌프로 전환 시 2030년 전 세계 이산화탄소 배출량을 최소 5억톤 이상 절감할 수 있는 잠재력이 있다고 판단하였다. 또한, 히트펌프는 공기열원, 태양열, 지열, 수열 등 다양한 열원 사용이 가능하며, 이를 통해 높은 안정성 및 높은 에너지 효율을 보인다.

그러나 기존 히트펌프를 사용한 냉난방 시스템은 공기열원, 지열원, 수열원 등 단일열원으로 사용될 경우 기상 조건에 따른 에너지 수급 불안정 및 장기간 지열 사용 시 발생하는 성능 저하 등 한계점이 발생한다.<sup>15)</sup> 이러한 한계를 극복하기 위해 히트펌프와 신재생에너지 열원의 설비 요소를 결합한 다중열원 히트펌프 시스템에 대한 관심이 증가하고 있다.

---

10) 기획재정부. (2021.12). <https://www.moef.go.kr/>

11) 산업통상자원부.(2020). 그린뉴딜지원을위한신·재생에너지법령개정·시행보도자료,

12) Rumsey, P., Le Garrec, J., & Levas, A. (2022). How Building Decarbonization Can Transform HVAC. ASHRAE Journal.

13) DOE. (2023). <https://www.energy.gov/energysaver/>.

14) IEA. (2023) <https://www.iea.org/reports/>

15) Xu, Z., Li, H., Xu, W., Shao, S., Wang, Z., Gou, X., ... & Li, J. (2022). Investigation on the efficiency degradation characterization of low ambient temperature air source heat pump under partial load operation. International Journal of Refrigeration, 133, 99-110.

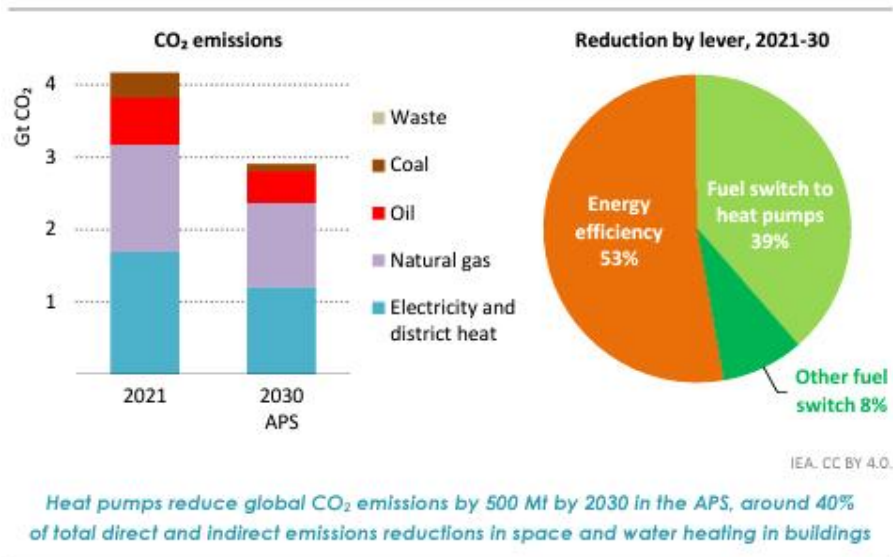


Fig. 1 전 세계 2021-2030년 건물 난방 및 급탕 시 CO<sub>2</sub> 발생량<sup>16)</sup>

다중열원 히트펌프 시스템은 주 열원인 히트펌프와 보조 설비기인 축열조(Heat Storage Tank, HST), 신재생에너지 등이 결합된 시스템을 말한다. 다중열원 히트펌프 시스템은 구성된 설비 요소에 따라 효율적인 에너지 활용이 가능하여 <Fig. 1>과 같이 기존 화석연료 사용 및 CO<sub>2</sub> 배출 절감이 가능하기 때문에 건물 에너지 소비량 절감 기술로 주목받고 있다.<sup>16)17)</sup> 이러한 다중열원 히트펌프 시스템은 기존 단일열원 히트펌프 운용 시 발생하던 장비 효율 저하 및 제어 성능 저하 문제를 보조 열원을 통해 상호 보완이 가능하며 이를 통해 보다 효율이 높고 안정적인 냉난방이 가능하다.

그러나 다수의 설비 요소의 복합적인 결합으로 인해 시스템 통합 제어가 어렵다는 문제가 발생한다. 이로 인해 현재 대부분의 다중열원 히트펌프 시스템의 제어는 전문가의 지식에 의존한 경험적 제어와 온도에 의한 규칙기반 제어에 의존하고 있는 현실이다. 이러한 규칙기반 제어는 고정된 조건에 의해

16) IEA HPT Annex 49. (2019). Hybrid Heat Pumps Final Report, Report no. HPT-AN45-1

17) Element energy. (2017). Hybrid Heat Pumps, Final report. Department for Business, Energy & Industrial Strategy.

점유 및 사용패턴 변화와 같은 환경의 동적 변화에 대응하지 못해 장비가 과도하게 가동되어 효율 저하의 원인이 될 수 있다. 이는 에너지 낭비와 운영 비용 증가로 이어질 수 있음을 의미한다<sup>18)</sup>. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 실내외 및 열원 설비 조건 변화에 유동적으로 대응이 가능한 제어 방안이 필요하다. 이와 같은 제어 방안 적용을 통해 시스템의 전체적인 성능과 에너지 효율을 높이고 환경 변화에도 최적화된 활용을 기대할 수 있다.

다양한 설비 요소의 결합과 실내외 조건 변화에서 발생하는 비선형적 관계 사이를 복합적으로 고려한 제어를 위해 모델 예측 제어(Model Predictive Control, MPC), 심층 강화 학습(Deep Reinforcement Learning, DRL), 모델 프리 제어(Model-Free Control)등을 적용한 제어 방안이 제안되고 있다. 그중 인공지능 기술을 적용한 모델 프리 제어 방안은 다양한 시스템 및 환경변화에 대한 유연성과 적응성인 특성으로 주목받고 있다<sup>19)</sup>.

인공지능 기술은 이와 같은 이유로 최근 건축 분야 중 건축 설비 분야에서 에너지 예측을 통한 냉난방 설비 효율 향상, 고장 및 유지보수 최적화, 사용자 행동 학습을 통한 제어 등에 사용되고 있다. 그러나 기존 연구는 대부분 그레이박스 모델(gray box)기반으로 복잡한 모델 구조로 개발 난이도가 높고 범용성 부족 및 연산량 증가로 인한 실시간 제어가 어렵다는 문제가 발생한다<sup>20)</sup>.

이와 같이 다중열원 히트펌프 시스템의 성능 향상 및 설비 요소의 효율적 제어를 위해 기존 제어방식 대비 환경 변화 및 시스템 변화에 대응이 가능한 새로운 최적 제어 방안이 필요하다.

---

18) Kim, D., Lee, J., Do, S., Mago, P. J., Lee, K. H., & Cho, H. (2022). Energy modeling and model predictive control for HVAC in buildings: A review of current research trends. *Energies*, 15(19), 7231.

19) Zhang, Z., Zhang, R., & Zhang, C. (2018). Comparative study of model-based and model-free reinforcement learning for HVAC systems. *Energy and Buildings*, 177, 310-320.

20) Li, Y., O'Neill, Z., Zhang, L., Chen, J., Im, P., & DeGraw, J. (2021). Grey-box modeling and application for building energy simulations-A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 146, 111174.

따라서, 본 연구의 목적은 다중열원 히트펌프 시스템에 적용되어 실내외 환경 및 시스템 변화에도 냉난방 에너지 소비량 절감 및 제어 안정성 확보가 가능한 인공지능 기반 최적 제어알고리즘을 개발하는 것이다. 이를 통해 기존 다중열원 히트펌프 시스템에 이용된 규칙기반 제어 대비 에너지 효율적인 제어 방안을 제시한다. 또한, 실시간 학습을 통해 다양한 환경 변화에 대응하여 최적 실내 열 환경 제공 및 냉난방 시스템의 에너지 소비량 절감이 가능할 것으로 예상된다.

## 1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구의 다중열원 히트펌프 시스템의 최적 제어알고리즘 개발 및 성능 평가를 위한 연구 범위 및 방법은 다음과 <Fig. 2>로 요약된다.

제1장에서는 연구의 배경과 목적을 서술하였으며, 제2장에서는 신재생에너지 열원과 히트펌프의 결합 형태인 다중열원 히트펌프 시스템의 구성 요소 선정 및 제어기술에 대한 개념의 선행연구 분석을 실시하였다. 선행연구분석 결과를 바탕으로 기존연구 방향 및 기술수준을 확인하여 본 연구의 목적 및 방향을 정립하였다.

제 3장은 예측모델 학습 데이터 취득 및 최적 제어알고리즘 성능평가를 위한 시뮬레이션 모델링을 실시한다. 구성은 크게 세 단계로 나뉜다. 1) 다중열원 히트펌프 시스템 구성 제시, 2) TRNSYS(transient system simulation tool) version 18 시뮬레이션을 사용한 대상 건물 모델링 및 다중열원 히트펌프 시스템의 용량을 산정한다. 구현된 시뮬레이션 모델은 다중열원 히트펌프 시스템 용량 및 전산모사 신뢰도 확인을 위하여 타당성 검증과정을 추가하였다.

제 4장에서는 Base model을 통해 취득된 데이터를 기반으로 축열조 온도 예측모델, 에너지 소비량 예측모델, 실내온도 예측모델을 개발하며, 각 열원의 입·출수 온도를 기준으로 On/Off 제어하는 규칙기반 제어알고리즘을 제시한다.

이후 개발된 예측모델과 실시간 재학습 과정을 적용한 최적 제어알고리즘의 제어 과정에 대하여 설명한다.

제5장에서는 예측모델과 최적 제어알고리즘의 성능을 평가한다. 최적 제어알고리즘은 앞서 제시된 규칙기반 제어알고리즘과 비적응형 제어알고리즘 간의 예측 정확도, 제어 안정성, 에너지 소비량 비교·분석을 통해 성능을 평가한다. 이후 기후 및 시스템 용량 변경을 통한 성능을 분석하여 최적 제어알고리즘의 적응성을 평가한다. 마지막으로 본 연구의 결론과 한계점 및 추후 연구 진행 계획을 제시한다.

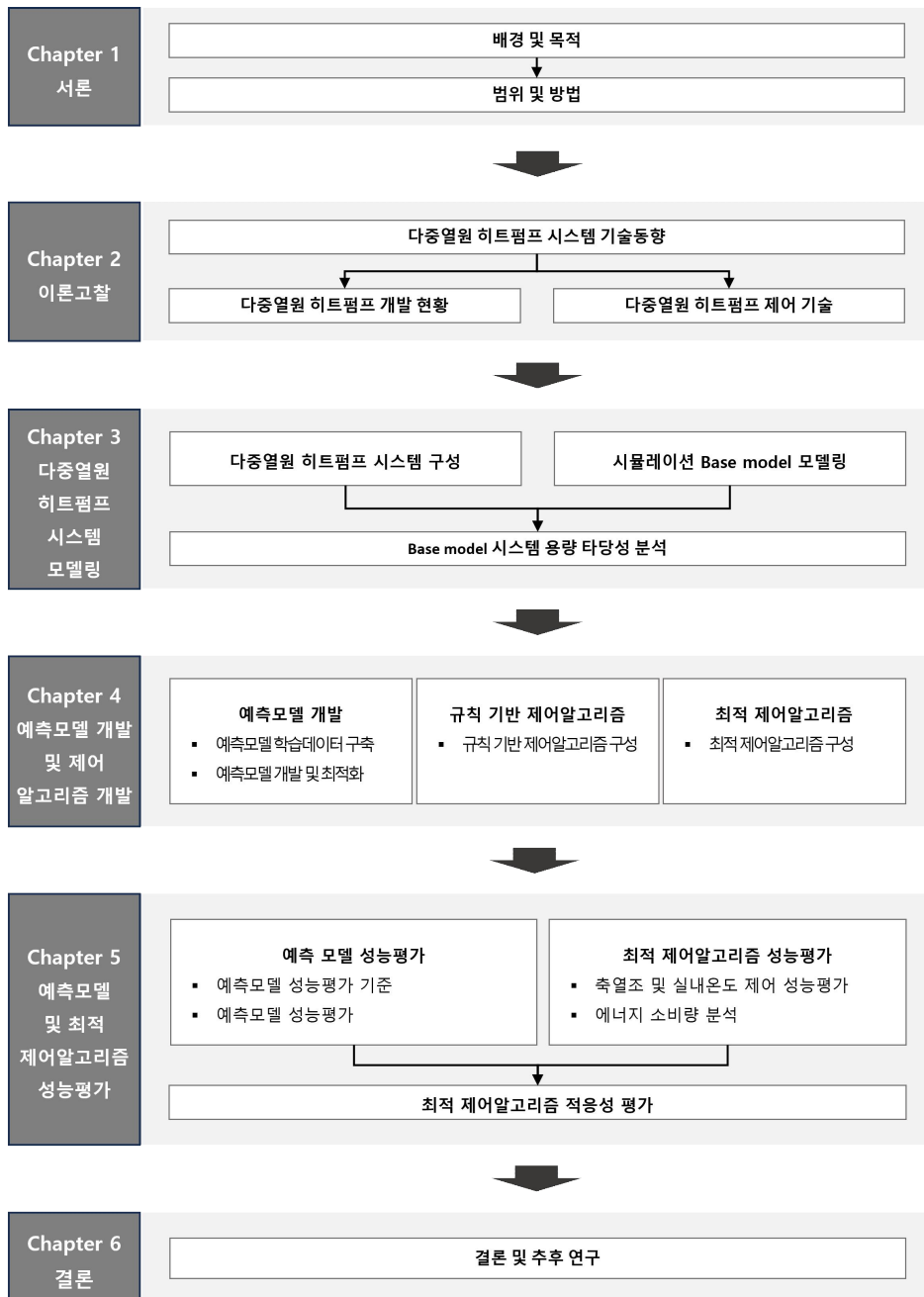


Fig. 2 연구 흐름도

## 제 2 장 이론고찰

본 장에서는 다중열원 히트펌프 시스템 개념 및 시스템 종류, 제어 전략 부문 선행연구 고찰을 수행하였다. 이를 통해, 다중열원 히트펌프 시스템 개발 및 제어 분야 개발기술 수준, 한계점, 연구방향을 분석하였다. 분석내용을 기반으로 본 연구의 방향 및 수준을 설정하였다.

### 2.1 다중열원 히트펌프 시스템 연구 동향

#### 2.1.1 다중열원 히트펌프 시스템 개요

다중열원 히트펌프 시스템은 냉난방을 위한 주 열원 설비로 히트펌프를 이용하며 하나 이상의 열원을 결합한 복합적 설비시스템을 의미한다. 히트펌프 기술은 미활용열 저온의 열원에서 열을 흡수하여, 고온의 열을 생산하는 역 열역학적 원리를 이용한 냉난방 겸용 기기이다<sup>21)</sup>. 히트펌프 시스템은 <Fig. 3><sup>22)</sup>과 같이 냉매의 카르노 사이클의 압축-응축-팽창-증발 과정을 통해 작동한다.

히트펌프는 크게 작동 원리 및 구동원에 따라 구분되며, 적용 열원, 열전달 대상 등으로 세부 구분된다. 작동 원리에 따른 구분으로 증기 압축식, 흡수식, 화학식, 흡착식 등이 있다. 구동원에 따른 전기 구동식, 전기 구동식, 가스 구동식 등으로 구분된다. 또한, 적용 열원과 열전달 대상에 따라 구분되며, 적용되는 주 열원에 따른 구분으로는 크게 공기열원, 지열원, 수열원 방식이 있다.

21) 대한설비공학회. (2011). 설비공학 편람 제3권 냉동

22) Chelmer Heating Solutions. (n.d.). How Heat Pumps Work. Retrieved June 10, 2024, <http://www.chelmerheating.co.uk/self-build/renewable-heating-systems/heat-pump/heat-pumps-how-they-work.html>

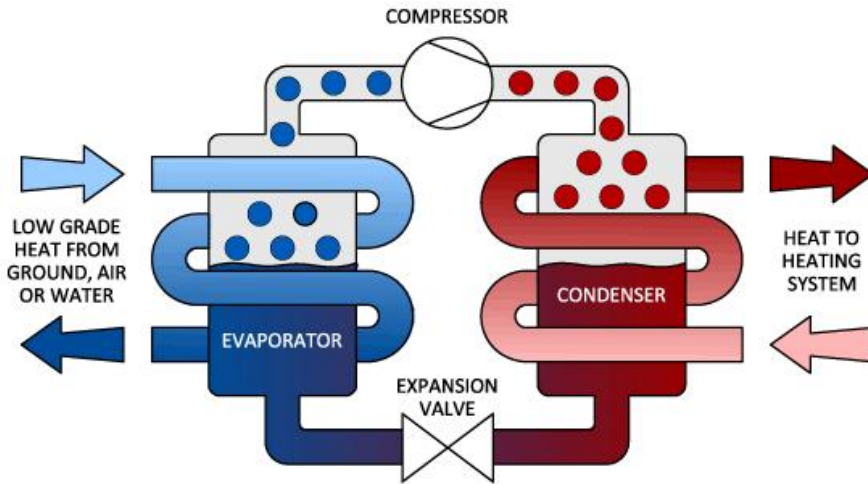


Fig. 3 히트펌프 작동 원리<sup>15)</sup>

공기열원 히트펌프는 가장 대중적으로 사용되는 히트펌프로 주 열원인 대기와의 열전달을 통해 열흡수 및 방출을 통해 실내 열 환경을 제어한다. 그러나 외기 조건 변화에 따라 채열 및 방열량의 변화로 일정한 효율을 유지하기 어렵다는 단점이 존재한다. 지중열원 히트펌프는 크게 폐쇄형 루프 시스템과 개방형 루프 시스템으로 나뉜다. 폐쇄형 루프 시스템은 수평형, 수직형, 연못형 루프 시스템이 있으며, 개방형 루프 시스템은 지하수, 지표수 시스템이 있다. 대중적으로 사용되는 지중열원 시스템은 수직형 루프 시스템이 사용되며, 지중의 항온성을 바탕으로 공기열원 대비 안정적인 성능 확보가 가능하지만 실내 냉난방 부하 차로 연간 채열 및 방열이 균일하지 않을 시 지중온도 변화로 인해 장기적인 성능 저하 문제가 발생할 수 있다. 수열원 히트펌프는 해수, 하천수, 호소수 등을 열원으로 이용하는 시스템으로 공기 및 지열원과 같은 다 열원보다 높은 열 보존량을 갖으나 지열원 대비 외기온도 영향을 받아 성능 저하가 발생한다는 단점이 있다.

다중열원 히트펌프 시스템은 단일열원 이용에 따라 발생하는 단점을 보완 및 개선 가능한 시스템으로 각 열원의 장점을 활용하고 단점을 최소화하기 위해 축열조 및 냉각탑, 보일러 등 부가적인 열원 시스템 또는 신재생에너지를 결합하여



설계된다. 타 열원 및 시스템과의 결합을 통해 열원 측 순환수 예열·재열을 통한 부하 절감, 가동 시 시스템 운전모드 선택을 통한 채열·방열 효율 향상 등 열원 활용도 개선이 가능하다<sup>23)24)</sup>. 다중열원 히트펌프에 주 열원으로 사용되고 있는 공기열원과 지중열원은 타 열원과의 결합을 통해 다음과 같은 이점을 갖는다.

공기열원의 경우 타 열원 결합을 통해 외기 온도 변화에 따라 채열 및 방열 시 효율 저하로 인한 안정성 문제 보완이 가능하다<sup>25)</sup>. 또한, 지중열원은 타 열원을 활용한 부하 분담으로 지중 열교환기의 설치 규모 축소를 통한 설치 절감과 지중온도 변화에 따른 효율 저하 문제 극복이 가능하다<sup>26)</sup>. 특히 변동성이 큰 외부 환경에서도 안정적인 냉난방 성능을 제공하여 겨울철에 심한 온도 변화가 있는 지역에서 큰 이점을 제공한다<sup>27)</sup>. 따라서 다양한 열원을 결합한 다중열원 히트펌프 시스템은 안정성 확보를 통한 열원 및 부하에 효율적으로 대응하고 부하 조건에 맞는 적절한 열원 선택을 통해 시스템 성능 저하 방지 및 부하 분담이 가능하다. 이를 통해 전체 시스템의 성능을 높이고 장기적인 운영 비용 절감 및 에너지 소비량 절감에 기여할 수 있다.

축열조는 히트펌프, 태양광/열 패널 등 냉난방 및 급수 설비와 같은 시스템과 결합되어 서로 가열 및 냉각 과정에서 발생하는 열 에너지 저장을 통해 시스템의 비용적, 에너지 효율을 높이기 위해 사용된다. 또한, 축열조는 열에너지 수요와

---

23) Nam, Y., Ooka, R., & Shiba, Y. (2010). Development of dual-source hybrid heat pump system using groundwater and air. *Energy and Buildings*, 42(6), 909-916.

24) Corberán, J. M., Cazorla-Marín, A., Marchante-Avellaneda, J., & Montagud, C. (2018). Dual source heat pump, a high efficiency and cost-effective alternative for heating, cooling and DHW production. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 13(2), 161-176.

25) Zheng, C., You, S., Zhang, H., Liu, Z., Zheng, W., Wu, Z., & Fan, M. (2020). Defrosting performance improvement of air-source heat pump combined refrigerant direct-condensation radiant floor heating system with phase change material. *Energies*, 13(18), 4594.

26) Pardo, N., Montero, Á., Martos, J., & Urchueguía, J. F. (2010). Optimization of hybrid-ground coupled and air source-heat pump systems in combination with thermal storage. *Applied Thermal Engineering*, 30(8-9), 1073-1077.

27) Sporleder, M., Rath, M., & Ragwitz, M. (2022). Design optimization of district heating systems: A review. *Frontiers in Energy Research*, 10, 971912.

공급 사이 발생하는 시간적, 양적 차이를 극복하여 피크 부하 감소 및 비용적 절감에 기여한다<sup>28)</sup>. 축열의 방법은 현열 및 잠열 저장이 사용되며 현열은 열 매체의 온도를 변화시켜 열을 저장하는 반면 잠열의 경우 상변화 물질 상태 변화를 과정에서 발생하는 열을 이용한다. 축열조에 사용되는 상변화 물질은 높은 열 저장 및 열 전달 효율, 경제적 이점의 특성을 갖춘 물을 주 매체로 사용된다<sup>29)</sup>.

이와 같은 축열조의 특성은 기존 단일열원 히트펌프 사용 시 발생하던 시스템 성능 및 에너지 효율 저하와 같은 문제 보완이 가능하며, 특히 에너지 수요가 적은 시간에 에너지를 저장하고 피크 시간대 이를 사용하여 안정적인 에너지 확보 및 냉난방 에너지 소비량 절감에 효과적이다. 이러한 장점들로 히트펌프와 결합 시 과도한 시스템 가동을 방지하여 냉난방 에너지 효율 향상 관점에서 우수한 효과를 낼 수 있다는 것은 이미 입증된 바 있다.<sup>30)31)</sup>

다중열원 히트펌프의 형태는 시스템 목적에 따라 필요한 시스템을 결합하며 주로 공기열원 및 지중열원 히트펌프와 같은 단일열원 히트펌프와 태양광/열 (Photovoltaic Thermal, PVT) 패널, 축열조를 결합한 형태이다. 이때 PVT 패널은 전력 생산 시 일사로부터 취득된 열을 이용하여 기존 단일열원의 단점을 보완하고 전력 생산 효율을 높여 제로에너지 빌딩 구현을 위한 주요 기술로 평가된다<sup>32)</sup>.

다중열원 히트펌프 시스템은 이처럼 복수의 설비 요소 결합과 고가의 초기 설치비용, 다소 넓은 설치 공간 필요와 같은 제약이 수반되지만 기존 단일열원

28) Sarbu, I., & Sebarchievici, C. (2018). A comprehensive review of thermal energy storage. *Sustainability*, 10(1), 191.

29) Boshell, F., Salgado, A., Goussous, N., Ravishankar, M., Richards, O., Walker, J., ... & Buchanan, F. (2020). Innovation outlook: Thermal energy storage.

30) Le, K. X., Huang, M. J., Shah, N., Wilson, C., Mac Artain, P., Byrne, R., & Hewitt, N. J. (2019). High temperature air source heat pump coupled with thermal energy storage: Comparative performances and retrofit analysis. *Energy Procedia*, 158, 3878-3885.

31) Wang, Z., Zheng, Y., Wang, F., Song, M., & Ma, Z. (2019). Study on performance evaluation of CO<sub>2</sub> heat pump system integrated with thermal energy storage for space heating. *Energy Procedia*, 158, 1380-1387.

32) Department for Business, Energy & Industrial Strategy(2016), Evidence gathering - Hybrid solar photovoltaic thermal panels (PVT).

대비 높은 효율로 장기간 사용 시 에너지 비용 절감이 가능해 다양한 형태의 시스템이 개발되었다<sup>33)</sup>. 그러나, 대부분 시스템의 최적 용량과 실내외 환경에 대한 최적 제어 방안이 확보되지 않고 일률적으로 규칙기반 제어만을 진행하고 있는 현실이다. 다중열원 히트펌프는 실내외 환경 및 적용 대상 건물, 부하 조건 등에 따라 성능이 크게 좌우되는 특성으로 효율적 향상을 위해 최적 시스템 용량 산정 및 조건 변화에 대응 가능한 최적 제어 적용이 필수적이다.

따라서, 본 연구에서는 공기열원 히트펌프, 지중열원 히트펌프, 축열조, 태양광/열 패널을 결합한 다중열원 히트펌프 시스템의 환경 조건 변화에 대응이 가능하며, 에너지 소비량 절감을 위한 축열조 온도 및 실내온도 최적 제어알고리즘 개발을 연구 대상으로 선정하였다.

## 2.2 다중열원 히트펌프 시스템 선행연구

다중열원 히트펌프 시스템은 설비 요소의 구성과 설치된 실내외 환경 조건 및 제어 방식에 따라 시스템 성능에 영향을 미친다. 따라서, 본 연구의 목표 및 필요성과 차별성을 입증하고자, 다중열원 히트펌프 시스템 관련 선행연구 분석을 실시하였다. 선행연구 분석은 다중열원 히트펌프의 개발 현황과 제어 기술 현황으로 나누어 진행하였다.

선행연구는 10개년도(2014년~2024년)의 국내외에 게재된 논문을 대상으로 하였다. 주요 키워드는 다중열원, 하이브리드, 융복합 시스템, 연동 히트펌프로 설정하였으며 연구 현황 요약은 <Table. 1>, <Table. 2>와 같다.

---

33) International Energy Agency. (2023). Heat pumps: Tracking clean energy progress.

## 2.2.1 다중열원 히트펌프 개발 현황

### 1) 국내 연구 현황

남유진 et al.(2014)<sup>34</sup>은 공기열원과 지중열원을 동시에 사용가능한 다중열원 히트펌프 시스템을 개발하였다. 각 열원 냉난방 가동 시 발생하는 성능계수(Coefficient of Performance, COP) 산출을 위해 순환수 온도 및 유량, 에너지 소비량을 측정하였다. 그 결과 기존 공기열원 대비 약 47% 에너지 절감을 보이며 성능적, 경제성 측면 모두 우수함을 확인하였다.

도규형 et al.(2016)<sup>35</sup>은 태양열과 공기열을 활용한 복합집열기 적용 하이브리드 히트펌프 시스템을 개발하였다. 제시된 시스템의 직렬식과 병렬식으로 설계하여 두 설계 방식간의 열 취득효율, 압축기 능력, 집열기 순환수 온도 변화에 따른 난방 능력 및 성능계수(COP) 분석을 분석하였다.

정용대 et al.(2017)<sup>36</sup> 태양광열 및 지열 하이브리드 시스템 최적 용량 설계를 위한 동적 시뮬레이션을 수행하고, 성능을 분석하였다. 그 결과 연간 성능계수(SPF)는 3.82로 가장 높은 성능을 보였으며, 소비전력이 약 10.91% 감소하였다.

김민지 et al.(2018)<sup>37</sup> 축열조와 수직밀폐형 지중열원 히트펌프 결합 시스템을 결합하고 일반 공조 시스템과 냉난방 에너지 성능 및 경제성 분석을 진행하였다. 성능 평가는 EnergyPlus 프로그램을 사용하였으며, 10층 사무실 건물을 모델로 시뮬레이션을 수행하였다. 이때 일반 공조 시스템과 축열조가 없는 지중열

34) 남유진, 채호병. (2014). 공기 및 지열 이용 Dual-Source 히트펌프 시스템의 성능실험 및 경제성 분석. 설비공학논문집, 26(5), 212-217.

35) 도규형, 최병일, 한용식, 김명배, & 김태훈. (2016). 태양열/공기열 복합 집열기를 가지는 하이브리드히트펌프 시스템의 열성능에 관한 연구. 한국수소및신에너지학회논문집, 27(2), 182-191.

36) 정용대, 남유진, 여성구. (2017). 태양광열 · 지열 하이브리드 시스템의 적정 용량 설계를 위한 동적 에너지 시뮬레이션. 대한건축학회 논문집 - 구조계, 33(7), 53-61.

37) 김민지, 도성록, 최종민, 이광호. (2018). 일반공조 시스템 대비 축열조와 연동된 수직 밀폐형 지열히트펌프의 냉난방 에너지 성능 및 경제성 분석. 대한건축학회 논문집 - 구조계, 34(11), 81-87.

시스템, 축열조 연동 시스템 간의 비교하였다. 그 결과 축열조 연동 시스템에서 난방 77%, 냉방 20% 에너지 절감 효과를 보였으며, 투자 회수가간은 11,8년으로 일반 공조 시스템 대비 우수성을 입증하였다.

손병후(2020)<sup>38)</sup>은 수직 지중 열환기와 지표수 열교환, 축열조를 결합한 수열원과 지열원 다중열원 히트펌프 시스템을 개발하였다. 각 열원의 부하 분담 비율이 시스템에 미치는 영향을 분석하기 위해 실험을 진행하여 난방 시 지중 열교환기를 적용한 시스템에서 평균 COP 4.0으로 나타났으며, 수열원은 난방기간 중 비교적 외기온도가 낮은 지열원 보다 높은 안정성을 보여주어 다중열원 복합 적용을 통한 성능 보완 가능성을 확인하였다.

박시훈 et al.(2021)<sup>39)</sup>은 밀폐형 지중 열교환기와 해수를 활용한 관형 열교환기가 결합된 형태의 시스템을 개발하여 각각 단일열원 사용과 지열원과 수열원을 서로의 보조열원으로 사용 시 발생하는 에너지 소비량을 분석하였다. 이를 통해 다중열원의 상호보완성을 입증하자 시뮬레이션을 진행하였으며, 그 결과 수열원을 보조열원으로 사용 시 냉방 가동 중 발생하는 지중 열 축적 문제를 해소하여 가장 높은 COP를 확인하였다.

임효재 et al.(2021)<sup>40)</sup>은 물 대 물 히트펌프 시스템과 지표수 열교환기, 수직 지중 열교환기를 결합한 시스템을 개발하고 난방 성능 확인을 위한 실험을 진행하였다. 그 결과 난방 시 히트펌프 COP는 약 4.0, 이중열원 시스템 COP는 2.7로 유지되며 우수한 에너지 성능을 확인하였다.

채수원 et al.(2022)<sup>41)</sup>은 태양광/열 패널, 공기열원 히트펌프, 축열조를 결합한

---

38) 손병후. (2020). 하이브리드 지중열교환기 적용 지열 히트펌프 시스템의 난방 성능 분석. 한국지열·수열에너지학회논문집, 16(3), 8-16.

39) 박시훈, 김종현, 민준기. (2021). 지열원과 수열원을 이용한 하이브리드 히트펌프 시스템의 에너지 성능 비교·분석 연구. 한국지열·수열에너지학회논문집, 17(4), 59-67.

40) 임효재, 손병후. (2021). 이중 열원 히트펌프 시스템의 난방 성능과 운전 특성. 한국지열·수열에너지학회논문집, 17(2), 30-41.

41) 채수원, 배상무, 남유진. (2022). 공기열원 히트펌프 융복합시스템의 최적제어를 위한 해석적 연구: 부하율 및 펌프유량에 따른 시스템 성능검토. 실비공학논문집, 34(11), 523-532.

융복합 히트펌프 시스템의 최적 제어 방안 도출을 위해 시스템 부하율 및 순환펌프 유량에 따른 시스템 성능 분석을 진행하였다. 이를 위해 By-pass 운전, 축열조를 이용한 운전 간 난방 에너지 소비량 및 성능을 비교·분석 하였다.

임희원 et al.(2023)<sup>42)</sup>은 지중열원 히트펌프와 태양열원 연계를 통한 융복합시스템을 개발하여 난방 성능 분석과 시스템의 용량 최적화를 진행하였다. 시뮬레이션을 통한 분석 결과 시스템의 난방 COP는 3.28로 태양열 의존도는 30.2%로 난방 시설에 적응성을 확인하였다.

주홍진 et al.(2023)<sup>43)</sup> PVT 복합 모듈과 공기열원 히트펌프 시스템 결합을 통해 실외기 난방 성능 향상을 목적으로 개발 연구를 진행하였으며, 실험을 통해 성능을 평가하였다. 그 결과 PVT 집열 효율 34%, 발전효율 12% 증가하고 COP는 약 20% 증가하는 결과를 보였다.

## 2) 국외 연구 현황

Chargui, R., & Sammouda, H.(2014)<sup>44)</sup>는 태양열 집열기와 지중열원을 포함한 이중 열원 시스템을 개발하고 주택에 적용 후 난방 성능을 분석하였다. 이중 열원 히트펌프는 외기 온도가 30℃일 때 COP 6.95, 10℃일 때 5.53으로 외기 온도가 더 높은 조건에서 시스템 성능이 보다 향상된 결과를 확인하였다.

Wang, G. et al.(2015)<sup>45)</sup>은 태양광/열과 공기열원 히트펌프 시스템을 개발하여 난방 가동 시 시스템 효율을 분석하였다. 단일열원과의 비교 결과 이중 열원은 COP 2.49, 단일열원 COP 1.40으로 복수 열원 사용 시 성능이 향상됨을 확인하였다.

42) 임희원, 이왕제, 신우철. (2023). TRNSYS을 이용한 온실 적용 태양열 연계 지열히트펌프 융복합 난방시스템 열성능 해석. 설비공학논문집, 35(6), 286-298.

43) 주홍진, 안영섭, 이경호. (2023). 태양광열 복합 모듈을 활용한 공기열원 히트펌프 실외기 가열 시스템 개발. 한국태양에너지학회 논문집, 43(6), 163-180.

44) Chargui, R., & Sammouda, H. (2014). Modeling of a residential house coupled with a dual source heat pump using TRNSYS software. Energy Conversion and Management, 81, 384-399.

45) Wang, G., Quan, Z., Zhao, Y., Sun, C., Deng, Y., & Tong, J. (2015). Experimental study on a novel PV/T air dual-heat-source composite heat pump hot water system. Energy and Buildings, 108, 175-184.

Deng, W. et al.(2016)<sup>46)</sup> 태양열과 공기열을 동시에 사용하는 듀얼 소스 히트펌프를 개발 및 단일열원 대비 에너지 성능 향상 가능성을 평가하였다. 시뮬레이션 조건 중 주변 공기온도가 10℃로 낮고 태양복사량이 100 W/m<sup>2</sup>일 때 COP 3.80, 가열 시간 685분으로 가장 높은 성능을 보였다.

Cai, J et al.(2017)<sup>47)</sup>은 태양광/열 패널 하이브리드 지중열원 히트펌프 시스템을 개발 후 해당 시스템의 에너지 소비량 절감 성능을 입증하기 위해 중국 다롄에 위치한 건물을 대상으로 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션 결과 태양광/열 패널에서 전력 생산 시 발생한 열을 난방에 사용하여 PVT패널 온도는 10℃ 감소, 생산 효율은 약 25% 향상되었으며 시스템의 COP는 평균 3으로 유지되었다, 전력 생산 및 히트펌프 시스템 성능 향상을 통해 투자 회수 기간은 7.9년에서 6.1년으로 확인되며 에너지 성능 및 경제성 향상을 확인하였다.

Dong, X et al.(2017)<sup>48)</sup>은 태양열 통합 공기열원 히트펌프를 제안하며 기존 공기열원 히트펌프 단일 가동 시 발생하는 계절 부분 부하와 통합 부분 부하 값을 평가하였다. 통합 히트펌프 시스템과 단일열원 시스템의 부분 부하 비율을 25~100% 까지 25%단위로 변화를 주어 난방 성능 비교실험을 진행하였다. 그 결과 난방 성능은 태양열 통합 공기열원 히트펌프가 약 14.9% 상승하였으며, 부분 부하 비율에 따른 성능 결과에서 약 9.8% 상승하는 효과를 확인하였다.

Grossi, I et al.(2018)<sup>49)</sup> 공기열원 및 지중열원 히트펌프 결합시스템의 에너지 성능 평가를 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과 단일 공기열원

---

46) Deng, W., & Yu, J. (2016). Simulation analysis on dynamic performance of a combined solar/air dual source heat pump water heater. *Energy Conversion and Management*, 120, 378-387.

47) Cai, J., Quan, Z., Li, T., Hou, L., Zhao, Y., & Yao, M. (2017). Performance study of a novel hybrid solar PV/T ground-source heat pump system. *Procedia Engineering*, 205, 1642-1649.

48) Dong, X., Tian, Q., & Li, Z. (2017). Experimental investigation on heating performance of solar integrated air source heat pump. *Applied thermal engineering*, 123, 1013-1020.

49) Grossi, I., Dongellini, M., Piazzzi, A., & Morini, G. L. (2018). Dynamic modelling and energy performance analysis of an innovative dual-source heat pump system. *Applied Thermal Engineering*, 142, 745-759.



대비 에너지 성능은 약 25% 증가, 지중열원 대비 약 50% 감소하며 해당 시스템의 에너지 절감 성능을 확인하였다.

Nouri, G.(2019)<sup>50)</sup>는 태양열 집열기를 보조 열원으로 결합한 지중열원 히트펌프용 사용하여 LCC 평가 및 시스템 COP 분석을 진행하였다. 중국을 대상으로 지중 열교환기 길이 최적화에 따른 COP는 최대 23%까지 증가하였으며 투자 회수기간은 8년에서 5년까지 단축됨을 확인하였다.

Abu-Rumman, M.(2020)<sup>51)</sup>는 PVT와 지열 히트펌프에 축열조를 결합된 하이브리드 시스템의 성능 분석을 진행하였다. 시뮬레이션을 기반으로 요르단의 난방 분석을 진행하여 PVT 패널은 냉방 시 20℃ 온도 저하로 인한 전력 생산 효율 9.5% 상승과 난방 시 COP 4.6에서 6.2로, 에너지 소비량은 25.7% 감소하였다.

Qu, M.(2022)<sup>52)</sup>은 태양광/열 통합 수열 히트펌프 시스템의 경제 및 환경적 이점 분석을 위한 시뮬레이션을 진행하였다. 통합 히트펌프와 태양광/열, 수열 히트펌프 세가지 시스템의 성능을 비교하여 통합 히트펌프 시스템은 에너지 측면에서 약 25.3% 효율이 향상 하였으며, 연간 자원 사용량 관점에서 0.50~0.62톤의 석탄이 절약될 것으로 분석하였다. 이를 통해 태양광/열 통합 수열 히트펌프 시스템의 환경 친화적 잠재력을 확인하였다.

---

50) Nouri, G., Noorollahi, Y., & Yousefi, H. (2019). Solar assisted ground source heat pump systems - A review. *Applied Thermal Engineering*, 163, 114351.

51) Abu-Rumman, M., Hamdan, M., & Ayadi, O. (2020). Performance enhancement of a photovoltaic thermal (PVT) and ground-source heat pump system. *Geothermics*, 85, 101809.

52) Qu, M., Yan, X., Wang, H., Hei, Y., Liu, H., & Li, Z. (2022). Energy, exergy, economic and environmental analysis of photovoltaic/thermal integrated water source heat pump water heater. *Renewable Energy*, 194, 1084-1097.



Table 1. 국내 다중열원 히트펌프 시스템 개발 선행연구

저자	연구 내용	주요 결과
남유진 et al. (2014)	공기열-지중열 활용 히트펌프 시스템의 경제성 및 성능평가 진행	기존 공기열원 대비 약 47% 에너지 절감 효과확인
도규형 et al. (2016)	태양열-공기열 활용 복합 집열기를 적용 하이브리드 히트펌프의 집열관 열전달율, 난방 능력, 열 취득량 분석	두 열원의 결합 방식에 따른 성능 분석 결과 직렬 연결 시 더 높은 COP를 확인함
정용대 et al.(2017)	PVT 및 지열 히트펌프 적용 시스템을 개발하고 최적 용량 설계를 위해 시뮬레이션을 진행	성능계수(SPF) 3.82, 소비전력이 약 10.91% 감소
김민지 et al.(2018)	축열조-수직밀폐형 지중열원 히트펌프 시스템 개발 및 시뮬레이션을 통한 에너지 절감 성능 및 경제성 분석	난방 77%, 냉방 20% 에너지 절감
손병후 (2020)	지중열-수열 히트펌프 개발과 최적 설계 및 제어 전략 제시를 위한 시스템 순환수 온도 및 난방 COP 성능 분석	지중열원 COP 4.0, 수열원에서 가장 높은 안정성확인
박시훈 et al. (2021)	지중열과 해수열을 이용한 히트펌프 개발 및 주 열원 우선 순위 변경에 따른 COP 분석	수열원을 보조열원으로 사용 시 가장 높은 COP 확인
임효재 et al.(2021)	지표수 열교환기와 수직 지중 열교환기 결합 시스템 개발 및 난방 성능 분석	히트펌프 및 이중열원 시스템의 COP는 4.0, 2.7로 난방 성능 확인
채수원 et al. (2022)	태양광/열-공기열원 융복합 시스템의 최적 제어방안 도출을 위한 부하율 및 펌프 유량에 따른 시스템 성능분석	난방 시 부하율 상승 시 COP가 증가
임희원 et al. (2023)	태양열-지중열원 개발 및 시뮬레이션을 통한 에너지 성능과 최적 용량 산정	난방 COP 3.28, 태양열 의존도 30.2%, 난방 시설에 적응성을 확인
주홍진 et al.(2023)	PVT-공기열원 히트펌프 시스템을 개발하고 이를 통해 실외기 효율 향상을 위한 실험 진행	PVT 집열 효율 34%, 발전효율 12% 증가하고 COP는 약 20% 증가

Table 2 국외 다중열원 히트펌프 시스템 개발 선행연구

저자	연구 내용	주요 결과
Chargui, R., & Sammouda, H.(2014)	태양열 및 지열을 포함한 이중 열원 시스템을 개발하고 주택에 적용을 통한 난방 성능 분석	외기 온도가 높은 환경에서 최대 COP 6.95
Wang, G. et al.(2015)	태양광/열과 공기열원 히트펌프 시스템으로 단일 열원과 시스템 성능 비교를 위한 시뮬레이션	이중열원 COP 2.49, 단일열원 COP 1.40
Deng, W. et al.(2016)	태양열과 공기열원을 동시에 사용하는 듀얼 소스 히트펌프를 개발하고 단일열원을 사용하는 시스템과의 성능을 비교	COP 3.80, 가열 시간 685분으로 단일열원 대비 높은 성능을 확인
Cal, J et al. (2017)	태양광/열 패널 지중열원 히트펌프 시스템의 운영 성능 및 에너지 절감 효과 분석	PVT 패널 전력 생산 25% 증가 및 COP 3 유지
Dong, X et al. (2017)	태양열 통합 공기열원 히트펌프 시스템 성능 분석을 위한 부분 부하 조정 난방 실험	난방 성능 약 14.3% 증가
Grossi, I. et al.(2018)	공기열원-지중열원 히트펌프 융합 시스템 개발 후 기존 단일열원 대비 에너지 성능을 분석	공기열원 대비 약 25%, 지중열원 대비 약 50% 에너지 절감 확인
Nouri, G. et al. (2019)	태양열 보조 지중열원 히트펌프와 공기열원 간의 LCC 및 COP 평가	열교환기 길이 최적화에 따른 COP 23%증가
Abu-Rumman, M et al. (2020)	태양열과 지중열원 히트펌프 시스템의 전력 생산 효율 및 난방 성능 분석	PVT 전력 생산 9.5% 상승 및 에너지 소비량 25.7% 절감
Qu, M. et al. (2022)	태양광/열 통합 수열 히트펌프의 에너지 효율과 자원 소비량 절감 분석	에너지 효율 25.3% 향상 및 연간 자원 소비량 최대 0.65톤 절감 효과 확인

## 2.2.2 다중열원 히트펌프 제어 기술 현황

다중열원 히트펌프 시스템의 제어 기술 선행연구 조사를 위해 지난 10년을 기준으로 히트펌프 제어, 다중열원 히트펌프 제어 등의 키워드를 사용해 조사하였다. 국내외 히트펌프 제어 현황은 다음 <Table. 3>, <Table, 4>와 같다.

### 1) 국내 연구 현황

강은철 et al.(2014)<sup>53)</sup>은 지중연계 히트펌프 시스템의 양방향 설정온도 제어를 통한 건물의 에너지 소비량과 시스템 효율을 평가하였다. 약 20% 에너지 절감율과 히트펌프 효율 15%를 확인하였다. 그러나 제안된 제어알고리즘은 모든 환경에서의 성능을 기대할 수는 없으며, 특정 조건에서만 유효한 결과를 보일 것으로 판단하였다.

이두영 et al.(2016)<sup>54)</sup>은 지중열원 히트펌프 시스템의 On/Off 제어 방식 별 성능을 비교하였다. 이를 위해 시뮬레이션을 사용하며 두 제어 방식은 고정된 설정 온도 제어와 가변 설정 온도 제어방식으로 시스템의 전력은 약 7.6% 절감, 간절기 히트펌프 COP는 최대 6.4% 증가하였다.

김동준 et al.(2018)<sup>55)</sup>은 시뮬레이션을 통해 축열식 히트펌프 시스템의 부하 대응 제어 방식에 대한 성능을 평가하며, 난방 에너지 31%, 냉방 에너지는 62% 감소하는 결과를 보이며 축열조 사용과 부하 대응 제어의 우수성을 확인하였다.

신지현 et al.(2018)<sup>56)</sup>은 지중 순환수 변유량 제어를 통한 지중열원 히트펌프 성능을 평가하였다. 그 결과 정유량 제어 대비 에너지 소비량은 22%, 시스템

---

53) 강은철, 이의준, & 민경천. (2014). 양방향 설정온도 제어에 따른 지중연계 히트펌프 시스템의 에너지 절감량 평가 연구. 한국지열·수열에너지학회논문집, 10(2), 7-12.

54) 이두영, 최재호, 민경천, & 손병후. (2016). 제어 방식에 따른 지열 히트펌프 시스템의 성능 시뮬레이션. 대한기계학회 논문집 C 권, 4(1), 35-41.

55) 김동준, 강병하, & 장영수. (2018). 부하 대응 제어방식을 적용한 축열식 히트펌프시스템의 성능 해석. 설비공학논문집, 30(3), 130-142.

56) 신지현, 최동희, & 조영흠. (2018). 지열시스템 순환펌프 변유량 제어를 활용한 운영 방안 개발. 한국건축친환경설비학회 논문집, 12(5), 510-518.

COP 13.6% 증가하며, 순환펌프 변유량 제어 시 에너지 소비량과 COP 측면에서 유리한 효과를 입증하였다.

고유진 et al.(2020)<sup>57)</sup> 수열과 지열을 결합한 하이브리드 시스템의 최적 제어를 위한 선행연구로서 각 열원 시스템의 COP 순환수 온도 변화를 분석하였다. 이는 시스템 제어 시 열원별 COP 계산을 통한 열원 선택 수단으로 사용되며, 난방 기간 수열 적용 시 지열 대비 최대 27.3% COP 증가하며 에너지 소비량은 약 21.1% 감소하는 결과를 보였다.

조혜운 et al.(2021)<sup>58)</sup>은 태양광/열 공기열원 융복합 시스템의 부하 측 순환펌프 유량 예측 제어를 통한 최적 제어 방안을 제시하였다. ANN을 기반으로 10분뒤 실내온도를 예측하여 해당 온도를 만족하는 순환펌프 유량 제어를 실시한다. 이를 통해 On/Off 제어, 비적응형 제어, 적응형 제어간 냉난방 에너지를 비교하여 난방기간 0.64% 증가, 냉방기간 7.42% 절감되어 최종적으로 약 3.75% 에너지 소비량 절감을 확인하였다.

배상무 et al.(2022)<sup>59)</sup>은 공기열원 히트펌프와 태양광/열 패널을 결합한 다중열원 히트펌프 시스템 제어 시 성능 예측을 통한 시스템 제어를 위한 선행연구로 인공지능경망 모델을 기반으로 예측모델을 개발하였다. 초기 시스템 설계 단계에서의 설계 용량의 적정성 평가를 위해 연구를 진행하였다.

박종갑 et al.(2023)<sup>60)</sup>은 지중 열교환기 순환펌프 유량 및 온도 제어에 따른

---

57) 고유진, 박시훈, 민준기. (2020). 복합열원 히트펌프 최적 제어를 위한 열원에 따른 히트펌프 성능 및 에너지 소요량 패턴 비교. 한국지열·수열에너지학회논문집, 16(4), 31-38.

58) 조혜운, 최영재, 최은지, 김태원, 문진우. (2021). 시뮬레이션을 통한 융복합 히트펌프 시스템의 적응형 예측제어 알고리즘 성능평가. KIEAE Journal, 21(6), 55-62, 10.12813/kieae.2021.21.6.055

59) 배상무, 채호병, 오진환, 채수원, 문진우, 남유진. (2022). 심층신경망 기반 태양광열-공기열원 히트펌프 융복합 시스템의 성능예측모델 개발. 설비공학논문집, 34(8), 390-398, 10.6110/KJACR.2022.34.8.390

60) 박종갑, 김선혜, 신정수. (2023). 열원 버퍼 탱크와 인버터 펌프를 이용하여 지중 순환수 유량 및 열원 입구온도를 제어하는 지열 히트펌프 시스템. 설비공학논문집, 35(8), 412-420, 10.6110/KJACR.2023.35.8.412

지중열원 히트펌프 성능을 검토하고 열원 버퍼 탱크 결합에 대한 성능과 비교 분석을 진행하였다. 그 결과 변유량 제어와 열원 버퍼 탱크를 결합한 시스템에서 열원 버퍼 탱크 없이 정유량 제어만 하는 시스템 대비 에너지 소비량은 난방 8.4%, 냉방 15.8% 절감되었다. 또한, 시스템 COP는 각각 21.7%, 14.5% 향상된 결과를 보였다.

## 2) 국외 연구 현황

Gang, W et al.(2014)<sup>61)</sup>은 인공신경망 모델을 적용하여 냉각탑, 지중열 다중열원 히트펌프 시스템의 냉방 성능 개선하고자 하였다. 예측모델은 30분 후 지중열교환기 및 냉각탑의 출수온도를 예측하여 제어 시점에 더 유리한 열원을 가동하도록 유도한다. 또한, 에너지 분석 결과 기존 스케줄 및 규칙기반 제어 대비 우수한 에너지 성능을 확인하였다.

Edwards, K. C. et al.(2016)<sup>62)</sup>은 부하 조건에 따른 지중열원 히트펌프 순환수 변유량 제어 방안을 제시하며 시뮬레이션과 실증실험을 통한 검증을 진행하였다. 그 결과 계절 성능 계수가 난방기간 23%, 냉방기간 38% 향상되었다.

Jung, Y. J. et al.(2016)<sup>63)</sup>은 지열 히트펌프의 COP를 기반으로 제어를 실시하여 연간 총 에너지 소비는 46%까지 절감되는 효과를 확인하였다. Hu, P. et al.(2017)<sup>64)</sup> 또한 COP를 기반으로 다양한 제어 방법 중 변유량 제어를 통한

---

61) Gang, W., Wang, J., & Wang, S. (2014). Performance analysis of hybrid ground source heat pump systems based on ANN predictive control. *Applied energy*, 136, 1138-1144.

62) Edwards, K. C., & Finn, D. P. (2015). Generalised water flow rate control strategy for optimal part load operation of ground source heat pump systems. *applied energy*, 150, 50-60.

63) Jung, Y. J., Kim, H. J., Choi, B. E., Jo, J. H., & Cho, Y. H. (2016). A study on the efficiency improvement of multi-geothermal heat pump systems in Korea using coefficient of performance. *Energies*, 9(5), 356.

64) Hu, P., Hu, Q., Lin, Y., Yang, W., & Xing, L. (2017). Energy and exergy analysis of a ground source heat pump system for a public building in Wuhan, China under different control strategies. *Energy and Buildings*, 152, 301-312.

제어에서 가장 우수한 제어 결과를 확인하였다.

Xia, L. et al.(2018)<sup>65)</sup>은 지중열원-태양광/열 융합 히트펌프의 최적 제어 전략 개발을 위해 단순 적응 모델과 유전 알고리즘(Genetic algorithm, GA)를 사용하여 에너지 효율적 제어 방안을 제시하였다. 이때 냉방기간 에너지 7.8%, 난방기간 7.1%, 간절기 7.5% 에너지 절감을 확인하였다.

Weeratunge, H. et al.(2018)<sup>66)</sup> MPC 개념 도입을 통한 태양열, 지중열원 히트펌프 시스템의 COP 및 비용 최소화가 가능한 제어방식을 개발하였다. 이때 시스템의 축열조 축열 성능을 유지해 시스템 효율을 향상을 조건으로 하였다.

Bae, S. et al.(2019)<sup>67)</sup>은 시뮬레이션을 통해 태양광/열 지중열원 히트펌프 시스템에 히트펌프 출수온도 기준 열원 선택에 따른 각 기후대별 경제성을 분석하였다. 또한, 에너지 자립도 분석을 진행하여 nZEB 구현 가능성을 확인하였다.

Betchel, S. et al.(2020)<sup>68)</sup>모델 예측 제어(MPC)를 통해 운영 비용과 에너지 소비량을 최소화할 목적으로한 제어 방식을 제시하였다. 실내온도 20~22℃ 제어 범위로 설정하고 비용과 에너지 소비량을 고려한 최적 축열조 용량을 산정하였으며, 이는 nZEB구현에 효과적인 방안이 될 것이라 판단하였다.

Jung, Y. G. et al.(2024)<sup>69)</sup>은 공기열원 히트펌프와 태양광/열을 결합한

---

65) Xia, L., Ma, Z., Kokogiannakis, G., Wang, S., & Gong, X. (2018). A model-based optimal control strategy for ground source heat pump systems with integrated solar photovoltaic thermal collectors. *Applied energy*, 228, 1399-1412.

66) Weeratunge, H., Narsilio, G., De Hoog, J., Dunstall, S., & Halgamuge, S. (2018). Model predictive control for a solar assisted ground source heat pump system. *Energy*, 152, 974-984.

67) Bae, S., Nam, Y., & da Cunha, I. (2019). Economic solution of the tri-generation system using photovoltaic-thermal and ground source heat pump for zero energy building (ZEB) realization. *Energies*, 12(17), 3304.

68) Bechtel, S., Rafei-Tabrizi, S., Scholzen, F., Hadji-Minaglou, J. R., & Maas, S. (2020). Influence of thermal energy storage and heat pump parametrization for demand-side-management in a nearly-zero-energy-building using model predictive control. *Energy and Buildings*, 226, 110364.

69) Jung, Y. G., Lee, K. H., Park, B. R., Kim, T. W., & Moon, J. W. (2024). Development and performance evaluation of intelligent algorithm for optimal control

히트펌프 시스템에 예측모델이 적용된 최적 제어알고리즘을 제안하고 이를 실증 실험을 통한 성능평가를 진행하였다. 이를 통해 규칙기반 제어 대비 에너지 소비량 절감을 확인하였으며 축열조 및 실내온도 제어 성능 향상을 확인하였다.

선행연구 분석결과 다중열원 히트펌프 시스템 개발에 대한 연구는 국내와 국외 모두 활발한 연구가 진행되고 있는 것으로 조사되었다. 국내외에서 개발된 다중열원 히트펌프에 이용되는 열원은 앞서 언급된 바와 같이 제어 대상과 조건에 따라 다양한 조합으로 구성되고 있다. 특히, PVT와 축열조를 보조열원으로 결합한 형태의 시스템이 다수 확인되었으며, 이를 통해 다중열원 히트펌프 시스템이 기존 단일열원 시스템 대비 시스템 성능 및 에너지 절약 측면에서의 우수성을 확인하였다.

제어 방식의 경우 국내 다중열원 히트펌프 시스템의 제어 방안에 대한 연구는 현재까지 연구를 진행한 수는 적으며 대부분 열원의 온도 및 부하, COP 등 열원 측 일부 조건에 따른 규칙기반 제어를 통한 성능분석을 진행하는데 그쳤다. 최근 인공지능망 기술과 머신러닝 기술을 활용한 연구가 진행 중이긴 하나 아직 국외에 비해 미비한 수준으로 판단된다.

국외 다중열원 히트펌프 시스템의 제어 관련 선행연구 현황은 국내 대비 많은 연구가 진행되었으며 시스템의 경제성 및 성능 향상을 위한 제어 전략에 대한 연구가 주를 이루었다. 또한, 최근 인공지능망, 머신러닝과 같은 기술을 이용하여 성능 예측, 온도 예측, 에너지 소비량 예측 등 다양한 조건을 고려한 제어 방식에 대한 연구가 늘어나고 있다. 그러나 대부분 부하 측 조건과 통합적으로 고려된 제어 방안이 부족한 현실이다. 또한 기후 및 시스템 용량, 제어 대상 변경, 시스템 노후화 등 가동 환경에 최적화되어 대응이 가능한 제어 방안은 제시되고 있지 않아 이에 최적화된 추가적인 대안이 필요하다.

---

of a hybrid heat pump system during the cooling season. Energy and Buildings, 306, 113934..

Table. 3 국내 다중열원 히트펌프 시스템 제어 기술 선행연구

저자	연구 내용	주요 결과
강은철 et al.(2014)	지중연계 히트펌프의 양방향 설정온도 제어에 따른 에너지 소비량 및 효율성 평가	기존 시스템 대비 20% 에너지 절감, 히트펌프 효율 15%증가
이두영 et al.(2016)	지열 히트펌프 시스템에 두 가지 다른 제어 방식을 적용하여 에너지 및 히트펌프 성능을 비교 분석	시스템 전력 소비량 약 7.6% 절감, 간질기 히트펌프 COP 최대 6.4% 증가
김동준 et al.(2018)	시뮬레이션을 통한 축열식 히트펌프 시스템의 부하 대응 제어 성능 평가	기존 제어 대비 난방 31%, 냉방 62% 에너지 절감
신지현 et al.(2018)	지중열원 히트펌프의 지중 순환수 변유량 제어 방안을 제시	정류량 제어 대비 에너지 22% 절감, COP 13.6% 향상
고유진 et al.(2020)	지열 및 수열 통합 하이브리드 히트펌프 최적 제어를 위한 시스템 COP 분석	난방기간 수열 적용 시 지열 대비 최대 27.3% COP 증가
조혜운 et al.(2021)	PVT, 공기열원 축열조 결합 하이브리드 히트펌프 최적 제어를 위한 ANN기반 예측 제어 알고리즘 개발	On/Off 제어 대비 실시간 학습을 통해 에너지는 난방 0.64%증가, 냉방 3.75% 감소
배상무 et al.(2022)	PVT-공기열원 히트펌프 최적 제어 방안 제시를 위한 심층신경망 기반 성능 예측모델 개발	냉난방 시 각 열원의 성능 예측모델 오차율 5%
박종갑 et al.(2023)	지중 열교환기 순환펌프 변유량 제어와 열원 버퍼 탱크 결합에 제어에 따른 지중열원 히트펌프 성능 평가	에너지 소비량은 난방 8.4%, 냉방 15.8% 절감, COP 21.7%, 14.5% 향상됨



Table. 4 국외 다중열원 히트펌프 시스템 제어 기술 선행연구

저자	연구 내용	주요 결과
Gang, W et al. (2014)	인공신경망을 이용한 냉각탑 및 지중열교환기 순환수 출수온도 예측을 통한 열원 선정 제어	기존 제어 대비 토양 온도 0.5℃ 낮고 에너지 2.91% 감소
Edwards, K, C., et al.(2016)	지중열원 히트펌프의 부하 조건에 따른 변유량 제어 방안 제시	계절 성능 계수 난방 23%, 냉방 38% 향상
Jung, Y. J et al.(2016)	다중 지열 히트펌프 시스템의 COP 기반 제어를 통해 순환수 유량 제어	COP 기반 제어 시 연간 46% 에너지 절감
Hu, p. et al.(2017)	지열 히트펌프 제어 방식에 따른 에너지 및 COP 비교	On/Off 대비 순환수 유량 제어 시 COP, 에너지 모두 향상됨
Xia, L. et al. (2018)	유전 알고리즘을 이용하여 에너지 최소화 및 시스템 성능 향상이 가능한 제어 방안 제시	난방 7.1%, 냉방 7.7%, 간절기 7.5% 에너지 절감
Weerantunge, H. et al. (2018)	모델 예측 제어(MPC) 제어 방안 도입으로 융복합 시스템의 경제성 확보 및 효율 최대화	MPC 제어 시 전기 비용 7.8% 감소
Bae, S et al. (2019)	태양열-지중열원 통합 시스템의 출수온도 기준 가동 열원 선정 제어 방식 도입을 통한 기후대별 성능 분석	출수온도 기준 제어 시 최대 50%까지 투자회수 기간 감소
Betchel, S et al. (2020)	MPC를 기반으로 시스템 용량 변수화를 통한 에너지 최소화 제어 전략 제시	MPC 적용 시 4.7%에너지 절감 및 6.8% 비용절감
Jung, Y. G. et al. (2024)	ANN 기반 예측모델을 적용한 최적 제어알고리즘의 실증 실험 진행	냉방 실험 결과 총 17.57 kW (52.8%) 에너지 절감

## 2.3 소결

본 장에서는 다중열원 히트펌프 시스템에 대한 정의와 특성을 확인하며 고찰 및 국내외 시스템 개발과 제어 기술 관련 선행연구를 분석하였다.

다중열원 히트펌프 시스템은 기존 단일열원 히트펌프 시스템의 단점을 보완 및 개선하기 위해 고안된 시스템으로 제로에너지 빌딩 및 탄소중립 실현을 위한 주요 기술이다. 그러나 신재생에너지와 다양한 설비 조합으로 열원의 입·출수 온도와 같은 단순화된 규칙을 기반으로 한 제어 방식이 주로 적용되고 있다.

다중열원 히트펌프 시스템의 국내외 선행연구 조사 결과 시스템 개발 연구의 경우 국내외 모두에서 다양한 열원 및 설비요소의 조합으로 활발한 연구가 진행 중인 것으로 나타났다. 복수의 열원 결합을 통한 COP 향상 및 에너지 소비량 절감, 경제성 등 기존 단일열원 시스템 대비 우수함을 보였다.

그러나 제어 방식의 경우는 이와 달리 국내는 국외에 비해 연구가 활발히 진행되고 있지 않으며, 대부분 각 열원의 부하 및 순환수 온도를 기준으로 가동 우선순위를 선정하는 규칙기반 제어 형식에 그쳤다. 그에 반해 국외의 경우 MPC, 인공지능경망 기술을 적용하여 열원 설비 조건에 따른 실내온도, 에너지 소비량 등 예측 제어를 실시하며 최적 제어방안에 대한 연구가 증가하고 있다. 또한, 다중열원 히트펌프 제어 시 국내외 모두 열원 측 순환수 유량 제어, 열원의 COP 예측 등 부하 측을 고려한 통합 제어 방안이 부족한 현실이다.

따라서, 본 연구에서는 다중열원 히트펌프 시스템의 에너지 소비량 절감을 위해 순화펌프 변유량 제어를 통해 열원 및 부하 측 통합 예측 제어를 적용한 최적 제어 방안을 제시하고자 하였다.

## 제 3 장 다중열원 히트펌프 시스템 모델링

본 장에서는 예측모델의 학습 데이터 수집 및 최적 제어알고리즘의 제어 성능평가를 위한 컴퓨터 시뮬레이션 모델링 과정을 다룬다. 또한, 구축된 시뮬레이션 모델의 시스템 적정 용량의 적정성을 확인하기 위한 타당성 분석을 진행하였다.

### 3.1 다중열원 히트펌프 시스템 구성

다중열원 히트펌프 시스템의 구성은 <Fig. 4>와 같다. 시스템 주 열원은 1) 태양광 패널 발전 시 발생하는 열을 난방 및 급탕에 사용하는 PVT 패널, 2) 압축, 응축, 팽창, 증발의 카르노 사이클을 통해 외기와 열교환하여 냉난방 열원을 공급하는 공기열원 히트펌프(air source heat pump, ASHP), 3) 연중 일정한 온도를 유지하는 지반과 열교환하여 일정한 효율을 보이는 지중열원 히트펌프(ground source heat pump, GSHP)가 있다. 또한, 열원에서 생산된 열에너지를 저장하여 보조열원 역할을 하는 축열조, 각 열원의 열에너지 전달을 위한 순환펌프, 축열조를 열원으로 냉난방 시 실내 부하에 대응하여 온도 제어를 위한 FCU로 구성된다. 축열조는 두 종류로 나누어 냉난방을 위한 축열조와 PVT 패널과 연결되어 건물의 급탕 온수(domestic hot water, DHW) 제공을 위한 축열조가 있다. 이때, DHW 축열조는 PVT 패널을 통해 충분한 열에너지를 제동받지 못했을 경우 급탕 보조 보일러 (auxiliary boiler, AUX)를 통해 열을 제공받는다.

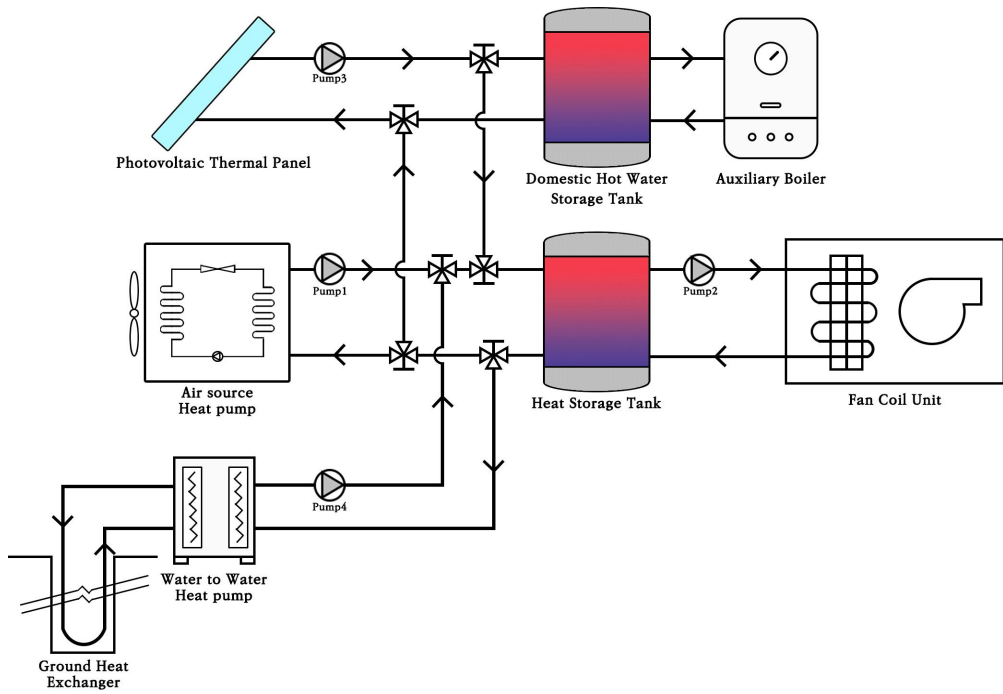


Fig. 4 태양광/열-공기열원-지중열원 다중열원 히트펌프 시스템

## 3.2 시뮬레이션 모델링

### 3.2.1 시뮬레이션 모델링 개요

본 연구의 Base model은 다중열원 히트펌프 시스템의 축열조 온도, 시스템 에너지 소비량, 실내온도 예측모델 개발을 위한 학습데이터 취득에 사용되며 최적 제어알고리즘 제어 및 에너지 소비량 절감 성능평가를 목적으로 구현되었다.

Base model 모델링은 동적 시뮬레이션 TRNSYS version 18 프로그램을 통해 <Fig. 5>와 같이 구현된다. TRNSYS는 University of Wisconsin의 Solar Energy Laboratory에서 개발되어 1975년 처음 공개된 개발된 유동적인 그래픽 기반의 시뮬레이션 프로그램이다.<sup>70)</sup> 다양한 시스템 요소는 수학적 방정식을 근거하여 모듈화된 컴퍼넌트(component) 라이브러리를 제공하고 있으며, 주로 건물의 열 성능 및 부하 해석, 신재생에너지 설비 에너지 성능 예측 분야에서 주로 이용된다. 또한 앞서 설명한 모듈화된 컴퍼넌트 및 Python, MATLAB, Fortran, C 같은 언어와 Contam, EnergyPlus, THERM과 같은 각종 프로그램과의 호환성을 강점으로 다양한 시스템의 구축 및 제어 성능 분석 시뮬레이션으로 주로 이용된다.

건물 및 다중열원 히트펌프 시스템 모델링은 TRNSYS 내 제공된 컴퍼넌트를 사용하여 구축한다. 시스템에 적용될 최적 제어알고리즘은 MATLAB 환경에서 구현되며, TRNSYS와 최적 제어알고리즘의 성능평가를 진행하였다.

---

70) Transient system simulation tool, TRNSYS18. (2021.12). <http://www.TRNSYS18.com/>

MATLAB은 수치 계산 및 행렬 기반의 연산 수행을 위한 공학용 프로그래밍 언어로 데이터 분석 및 처리, 알고리즘 개발에 주로 사용된다.<sup>71)</sup> 또한, 여러 운영체제 및 프로그램과의 연동성이 높다는 장점이 있다. TRNSYS version 18 Library에서 제공되는 컴퍼넌트 중 Type155는 MATLAB을 컴퍼넌트화하여 TRNSYS와 연결을 통해 제어 코드 실행이 가능하다.

### 3.2.2 Base model 모델링

DOE에서 제공하는 commercial reference buildings는 다양한 연구에서 사용되는 표준화된 건물 모델로 타 연구와 비교 및 재현이 용이하다는 특징이 있다. 그 중 small office의 유형으로 대상 건물을 선정하였으며 형태는 <Fig. 6>과 같다. 적용 기후는 실제 적용 가능성이 높은 지역의 기후 조건을 반영하여 대한민국 서울특별시의 기후로 선정하였다.

대상 건물은 연면적 511m<sup>2</sup>, 높이 3.05m의 단층 업무시설로 TRNSYS 내 TRNBuild를 이용하여 모델링 하였다. TRNSYS의 simulation studio을 사용해 건물 컴퍼넌트와 다중열원 히트펌프 시스템을 연결하여 시뮬레이션 모델링을 <Fig. 7>과 같이 진행하였다. 각 설비 요소 용량과 건물 입력변수는 DOE에서 제공하는 building zone summary 데이터를 기반으로 하며, 제공되지 않는 변수는 현행 기준 및 미국냉난방공조학회(American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, ASHRAE) 기준에 근거하여 <Table 5>과 같이 선정하였다.

기후대는 대한민국 서울로 설정하였으며, 서울의 연평균 기온은 12.8°C로 쾨펜 기후 구분(köppen-geiger climate classification)과 ASHRAE 기준 습한 대륙성 기후(Dwa / 4A)로 나타난다<sup>72)73)</sup>. 건물의 외벽, 내벽 및 창호 열관류율은

---

71) MathWork. (2021.12). www.mathwork.com

건축물의 에너지절약설계기준<sup>74)</sup> 중 지역별 건축물 부위의 열관류율표를 기준으로하였다. 중부2지역 기준 외벽 0.150 W/m<sup>2</sup>K, 지붕 0.150 W/m<sup>2</sup>K, 바닥 0.200 W/m<sup>2</sup>K, 창호 1.500 W/m<sup>2</sup>K로 설정하였다. 건물 내부에서 발생하는 재실자, 기기, 조명 및 환기 부하의 경우 위에서 언급한 DOE reference building의 데이터를 사용하였다. 이때 사용된 실내 부하는 ASHRAE standard 90.1, 62.1, 55의 기준에 따라 선정하였다<sup>75)76)77)</sup>. 실내 냉난방 가동 시간은 09시부터 18시로 설정하며, 실내 setpoint 온도는 ASHRAE standard 55의 office 기준 난방 21℃, 냉방 26℃로 한다.

시뮬레이션 내 구축된 다중열원 히트펌프 시스템의 용량은 대상 건물 모델링 후 산출된 냉난방 기간 피크 부하에 안전율을 적용하여 설정하였다. 대상 건물의 난방기간 피크 부하는 13.50 kW, 냉방기간 피크 부하 15.01 kW이며, 열원 시스템 및 순환펌프의 전력소비량 및 유량 입력을 위해 피크 부하와 유사한 용량인 시스템의 카탈로그 데이터를 참고하였다. 공기열원 히트펌프의 난방 용량은 23.71 kW, 냉방 용량 21.15 kW로 설정하며<sup>78)</sup>, 지중열원 히트펌프의 경우 냉난방 용량은 각각 난방 28.03 kW, 냉방 25.01 kW, 지중열교환기는 1공당 3RT의 용량에 대응하고 있다고 가정하여 2공으로 설정한다<sup>79)80)</sup>. 또한, 지중열교환기의

72) Beck et al.. (2018). Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution., Scientific data, 5(1), 2018, pp.1-12.

73) ASHRAE. (2021). Climatic Design Information. ASHRAE Handbook – Fundamentals

74) 국가법령정보센터. (2021.12). 건축물의에너지절약설계기준. <https://www.law.go.kr/>

75) ASHRAE. (2010). Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings. ASHRAE 90.1-2010.

76) ASHRAE. (2013). Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. ASHRAE 55-2013.

77) ASHRAE. (2013). Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. ASHRAE 62.1-2013.

78) Carrier Air conditioner Engineering Product Data Book. (2019. 07). <http://www.carrier.co.kr/>

79) Water-Cooled and Condenserless Liquid Chillers Water-Sourced Heat Pumps Product Data Book. (2020). <http://www.carrier.co.kr/>

80) 권영식, 배상무, 남유진, 윤린, 박창용, & 이호성. (2021). 동적 에너지 시뮬레이션을

깊이는 항온층에 해당하는 지중 150m 지점 지중온도 16°C로 설정하여 열 교환을 실시한다. FCU 및 순환펌프는 제품 카탈로그<sup>81)82)</sup>와 TRNSYS 18 카탈로그<sup>83)</sup> 데이터를 참고하여 FCU의 난방 용량 26.73 kW, 냉방 용량 24.95 kW, 순환 펌프의 정격 순환수 유량은 3,800 kg/hr을 입력 값으로 적용하였다.

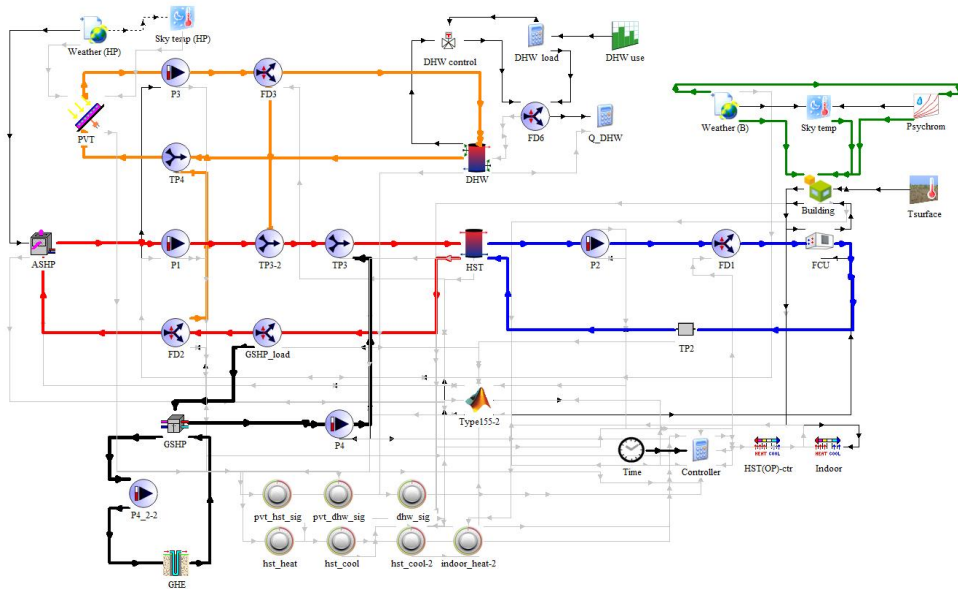


Fig. 5 다중열원 히트펌프 시스템 Simulation Base modeling

이용한 수열원, 지열원 및 공기열원 히트펌프 시스템의 성능 비교·분석. 한국태양에너지학회 논문집, 41(4), 1-12.

81) Carrier Air conditioner Engineering Product Data Book. (2023.06).

<http://www.carrier.co.kr/>

82) HANIL. Pump Test Report. <https://www.hanilec.co.kr/>

83) TRNSYS18 17. HVAC Library Mathematical Reference; TESS Libs 17: Milwaukee, WI, USA, 2012; Volume 6.



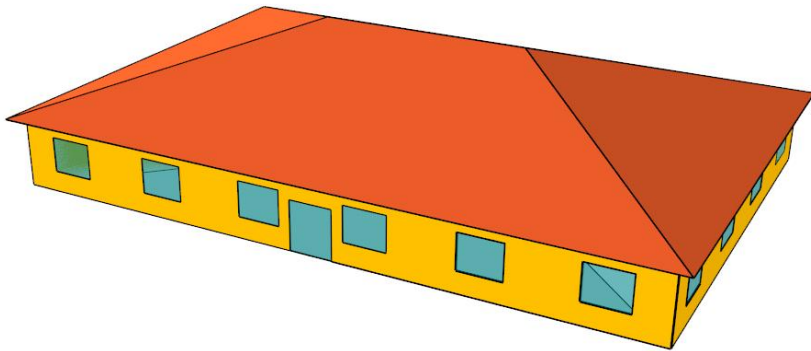


Fig. 6 DOE Reference Building Small Office

Table. 5 시뮬레이션 모델링 입력 값

컴포넌트	구분		파라미터		
Building	위치		서울특별시		
	용도		업무시설		
	바닥면적		27.69 m x 18.45 m		
	높이		511 m <sup>2</sup>		
			3.05 m		
	외피	외벽	U-Value (W/m <sup>2</sup> K)	0.24	
				바닥	0.20
				지붕	0.15
		창호		1.50	
				SHGC	0.37
			WWR	21.31%	
	재실기간		09:00~18:00		
	실내부하	재실자		0.07 kW/hr (31명)	
기기		8.07 W/m <sup>2</sup>			
조명		10.76 W/m <sup>2</sup>			
환기		0.66 ACH			
Heating/Cooling	난방	기간	Jan., Feb., Nov., Dec.		
		실내 setpoint	21 °C		
	냉방	기간	Jun., Jul., Aug., Sep.		
		실내 setpoint	26 °C		
	deadband		2 °C (±1 °C)		

컴포넌트	구분	파라미터	
PVT module	규격	1.012 m x 37.62 m	
	열 전도성	386.00 W/m·K	
	패널 내 튜브 수	359 EA	
	PV 효율	16 %	
	경사도	45°	
Air to Water Heat Pump	난방 용량	23.71 kW	
	난방 전력 소비량	5.17 kW	
	냉방 용량	21.15 kW	
	냉방 전력 소비량	4.49 kW	
Ground Source Heat Pump	난방 용량	28.00 kW	
	난방 전력 소비량	5.13 kW	
	냉방 용량	25.00 kW	
	냉방 전력 소비량	4.72 kW	
Ground Heat Exchanger	보어홀 수	2 EA	
	보어홀 깊이	150.00 m	
	열전도율	2.50 W/m·K	
	초기 온도	16°C	
Heat Storage Tank	규격	687.00 L	
	높이	1.00 m	
	단열 두께	50.00 mm	
	Stratified layer	8 EA	
	열 손실계수	0.60 W/m <sup>2</sup> ·K	
	스케일 열 손실량	1.20 W/m <sup>2</sup> ·K	
	Setpoint	축열 시	45°C
		축냉 시	10°C
	Deadband	4°C (±2°C)	
Fan Coil Unit	유형	4-pipe	
	난방 용량	26.73 kW	
	냉방 용량	24.95 kW	
	팬 동력	0.20 kW	
	팬 효율	90.00%	
Water Circulation Pump	정격유량	3,800.00 kg/hr	
	유량 가변 범위	50~100%	
	정격 전력소비량	0.17 kW	
	전력 가변 범위	50~100%	

### 3.2.3 Base model 시스템 용량 타당성 분석

Base model의 다중열원 히트펌프 시스템 용량 산정 타당성 분석을 위해 ASHRAE standard 90.1에서 제공하는 unmet load hour 사용하여 분석하였다. unmet load hour 분석은 일반적으로 시스템 냉난방이 가동되는 재실시간 중 설정온도를 유지할 수 없는 불충족 부하 발생 시간의 총계를 나타낸다. unmet load hour은 최대 연간 300시간 미만을 기준으로 이를 초과할 경우 냉난방 시스템이 부적합하게 설계되었다 판단한다.

다중열원 히트펌프 시스템의 연중 unmet load hour 분석을 위해 냉난방 기간 setpoint를 기준으로 재실시간인 09:00부터 18:00 사이 deadband 범위를 벗어난 온도가 확인되는 시간을 분석한다. 그 결과 난방기간이 약 46시간, 냉방기간은 2시간으로 총 48시간의 부하 불충족 시간이 발생하였으며, 대부분의 불충족 시간이 난방기간 중 발생하는 결과를 확인하였다 <Fig 7>.

난방기간 중 가장 긴 부하 불충족 시간이 발생한 기간은 1월로, <Fig. 8>과 같이 1월 한달 동안 발생 시간은 약 25시간이며, 시스템 가동 직전에 부하 불충족 시간이 증가하는 모습을 보였다. 냉방기간의 경우 가장 긴 부하 불충족 시간대가 발생한 기간은 8월로 <Fig. 9>와 같이 약 1.5시간이며, 냉방기간 또한 난방기간과 유사하게 시스템 가동 직후와 가동 종료 직전에 부하 불충족 시간이 발생하는 것으로 확인되었다.

따라서, 시뮬레이션 내 구현된 다중열원 히트펌프 시스템의 냉난방 가동에 따른 unmet load hour은 ASHRAE 90.1 기준 300시간 미만인 총 48시간으로 나타났다. 따라서, 본 시스템은 대상 건물에 대한 적정 용량 평가 기준을 충족한 결과를 확인하였다.

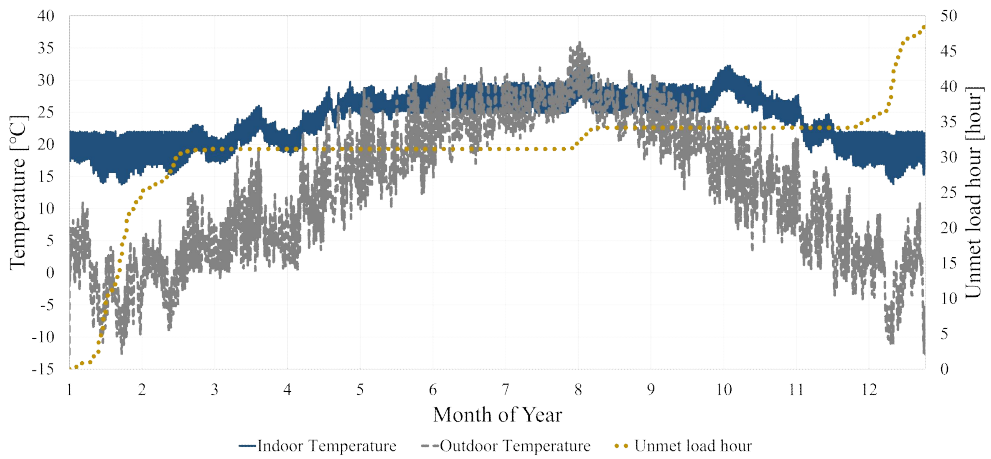


Fig. 7 냉난방 가동 시 연중 Unmet load hour

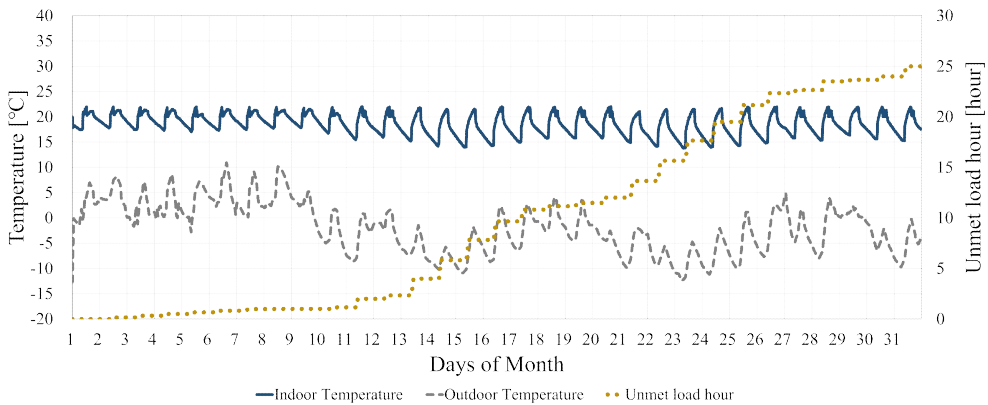


Fig. 8 난방기간 1월 Unmet load hour

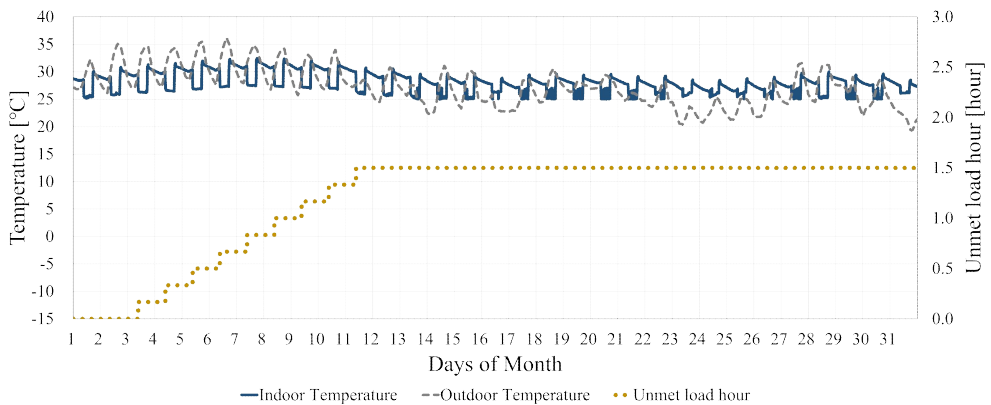


Fig. 9 냉방기간 8월 Unmet load hour

### 3.3 소 결

본 장에서는 예측모델 학습 데이터 취득 및 최적 제어알고리즘 성능평가를 위해 다중열원 히트펌프 시스템의 시뮬레이션 모델링을 진행하였다. 모델링 된 다중열원 히트펌프 시스템 용량에 대한 타당성을 분석하여 검증되었으며, 상세 과정 및 결과는 아래와 같다.

#### (1) 다중열원 히트펌프 시스템 구성

본 연구에서 개발된 다중열원 히트펌프 시스템의 구성은 열원인 PVT 패널, 공기열원 히트펌프, 지중열원 히트펌프와 축열조가 결합 된 형태이다. 각 열원은 순환펌프를 통해 축열조에 열을 저장하며, 저장된 열은 부하 측 순환펌프를 통해 FCU에 전달된다.

#### (2) 시뮬레이션 모델링

다중열원 히트펌프 시스템 모델링을 위해 TRNSYS 시뮬레이션 프로그램을 사용하였다. 대상 건물은 DOE의 reference building 중 small office로 선정하였으며 시스템 용량은 냉난방 피크 부하와 안전율을 고려하여 이와 유사한 제품의 카탈로그 데이터를 기반으로 선정하였다.

#### (3) 시스템 용량 타당성 분석

ASHRAE 90.1의 연간 냉난방 부하 불충족 시간(unmet load hour) 분석을 통해 다중열원 히트펌프 시스템의 적정 용량 타당성을 평가하였다. 분석 결과, 난방기간 46시간, 냉방기간 2시간으로 총 48시간이 확인되었다. 연간 300시간 미만 기준을 만족하여 다중열원 히트펌프 시스템 용량에 대한 타당성을 입증하였다

## 제 4 장 예측모델 개발 및 제어 알고리즘 개발

### 4.1 예측모델 개발

본 연구에서 예측모델은 지중열원 히트펌프와 축열조를 결합된 시스템의 COP 예측을 위해 ANN, Support vector machine(SVM), Tree ensemble 간 비교를 통해 뛰어난 성능이 입증된 ANN 모델을 선정한다.<sup>84)</sup> 다중열원 히트펌프 시스템의 열원 측과 부하 측 순환펌프 유량 및 최적 열원 선택을 통해 실내의 최적 열 환경 제공 및 에너지 소비량 절감을 위한 수단으로 사용된다.

다중열원 히트펌프 시스템 제어 시 주요 제어 변수인 열원 선택과 순환펌프 유량 도출을 위해 예측모델은 크게 3가지 분류로 개발되었다. 개발된 예측모델은 1) 축열조 설정온도에 맞는 각 열원에 결합된 순환펌프 유량 산출을 위한 축열조 온도 예측모델, 2) 각 열원별 적정 순환펌프 유량이 도출 후 해당 유량 사용 시 발생하는 에너지 소비량 예측으로 최적 열원을 선택을 위한 에너지 소비량 예측모델, 3) 부하 측 순환펌프 유량에 따른 실내온도를 예측하여 적정 유량을 산출하는 실내온도 예측모델이 있다.

각 예측모델 개발 시 냉난방 기간 각각의 순환수 유량 증가에 따라 축열조 및 실내온도가 상승과 하락으로 반대되는 결과가 나타난다. 이러한 상반된 데이터 학습 시 혼선을 방지하기 위해 냉난방 기간을 나누어 개발되었다.

---

84) Cho, H. U., Nam, Y., Choi, E. J., Choi, Y. J., Kim, H., Bae, S., & Moon, J. W. (2021). Comparative analysis of the optimized ANN, SVM, and tree ensemble models using Bayesian optimization for predicting GSHP COP. *Journal of Building Engineering*, 44, 103411.

#### 4.1.1 예측모델 학습데이터 구축

예측모델 개발을 위해 필요한 학습데이터는 Base model 내 각 열원과 연결된 열원 측 순환펌프와 축열조와 FCU로 사이 부하 측 순환펌프에 유량 시나리오를 입력하여 취득하였다. 유량 시나리오는 히트펌프의 최소 작동 유량을 참고하여 80kg/h 단위로 2,200 ~ 3,800kg/h까지 총 21단계로 열원 측과 부하 측 순환펌프 유량을 단계별 10분 단위로 취득하였다. 학습 데이터 취득을 위한 시뮬레이션 기간은 난방 1월과 냉방 8월로 설정하여, 피크 부하 시기의 극단적인 조건에서 데이터 학습을 통해 예측모델의 정확도를 높이고자 하였다.

예측모델의 입력값은 피어슨 상관관계(pearson correlation)를 분석하여 그 결과는 <Fig. 10>과 같으며 0.4 이상인 변수와 열 교환식 및 성능계수 계산식을 참고하여 설정하였다. 축열조 온도 예측모델은 식(1) 같은 열 교환식을 바탕으로 각 열원의 입·출수 온도, 축열조 온도, 실내온도, 외기온도, 열원 측 순환펌프 유량, 부하 측 순환펌프 유량으로 총 7개 데이터를 선정하였다. 위와 같은 입력값을 선정한 이유는 열원 및 부하 측 순환펌프 유량을 모두 취득하여 복합적으로 고려하기 위함이다.

실내온도 예측모델은 식(2)를 참고하여 축열조 입·출수 온도, 부하 측 순환펌프 유량, 실내온도, 외기온도로 선정하였다. 에너지 소비량 예측모델은 식(3)을 통해 기존 축열조 온도 예측모델 입력값과 순환펌프 및 각 열원의 에너지 소비량으로 선정하였다. 각 예측모델의 출력값은 다음 timestep 10분 후의 축열조 온도, 실내온도, 에너지 소비량을 출력한다.

$$Q_{source} = m_{fluid} \times c_{fluid} \times (T_{SS} - T_{SR}) \dots\dots\dots \text{식(1)}$$

$$Q_{load} = m_{fluid} \times c_{fluid} \times (T_{LS} - T_{LR}) \dots\dots\dots \text{식(2)}$$

여기서,

$Q_{source}$  : 열원 측 순환수 열교환량 (kcal/hr)

$Q_{load}$  : 부하 측 열교환량 (kcal/hr)

$m_{fluid}$ ,  $c_{fluid}$  : 순환수 유량 및 정압비열 (kg/hr, kcal/kg $^{\circ}$ C)

$T_{SS}$ ,  $T_{SR}$  : 열원 측 순환수 입·출수 온도 ( $^{\circ}$ C)

$T_{LS}$ ,  $T_{LR}$  : 부하 측 입출 공기 온도 ( $^{\circ}$ C)

$$COP_{SYS} = \frac{Q_{PVT} + Q_{ASHP} + Q_{GSHP}}{P_{ASHP} + P_{GSHP} + P_{PUMP1} + P_{PUMP3} + P_{PUMP4}} \dots\dots\dots \text{식(3)}$$

여기서

$COP_{SYS}$  : 시스템 성능계수

$Q_{PVT}$ ,  $Q_{ASHP}$ ,  $Q_{GSHP}$  : PVT, 공기열원 및 지중열원 히트펌프 열 교환량 (kcal/h)

$P_{ASHP}$ ,  $P_{GSHP}$  : 공기열원 히트펌프, 지중열원 히트펌프 소비전력 (kW)

$P_{PUMP1}$ ,  $P_{PUMP3}$ ,  $P_{PUMP4}$  : 열원 측 순환펌프 소비전력 (kW)



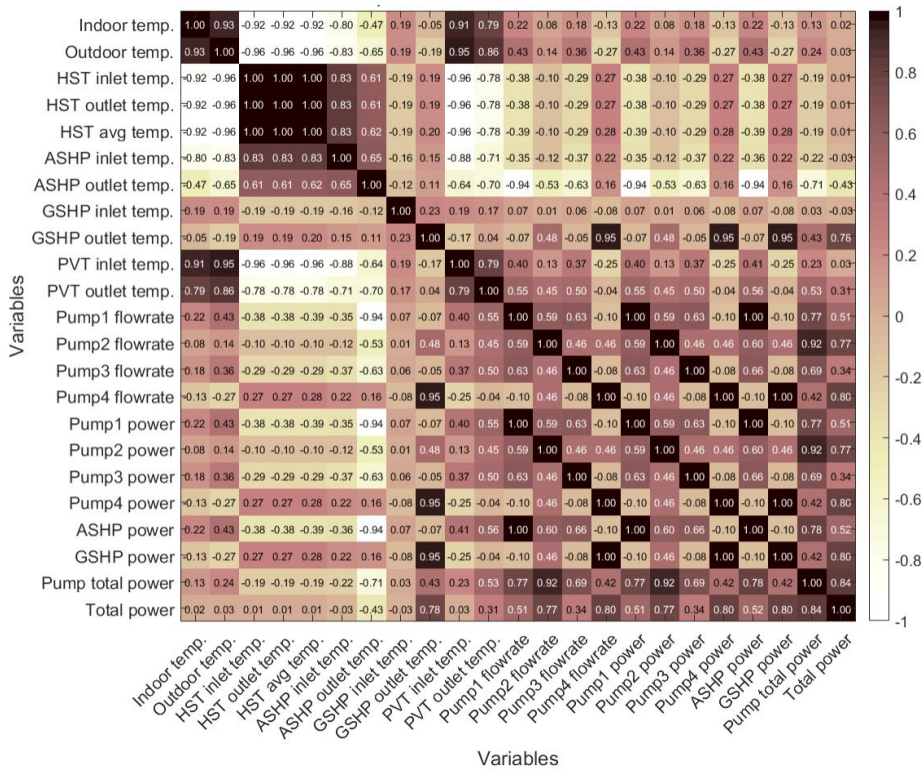


Fig. 10 예측모델 피어슨 상관관계 분석

취득된 학습데이터는 각 예측모델의 입력값 가중치를 조절하여 훈련과 과적합(Overfitting)방지를 위해 훈련(Train set), 검증(Validation set), 시험(Test set)으로 분리 학습을 진행한다. Simple Validation 방법을 사용하여 훈련(60%), 검증(20%), 시험 (20%)로 나누는 것이 일반적이다<sup>85)</sup>. 예측모델에 사용된 데이터는 냉난방 각각 426,907개로 Simple Validation 방법에 따라 학습 256,144개, 검증 8,581개, 시험 8,581개로 분류하여 예측모델 개발을 진행하였다.

예측모델은 학습과정에서 학습데이터에 과적합할 수 있어 데이터에 동일한 가중치를 부여하는 전처리 과정이 필요하다. 데이터 전처리에 가장

85) Aurelien Geron, Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn & TensorFlow, O'Reilly. 2017

일반적으로 사용되는 방법인 최대 최소 정규화(Min-Max Normalization)는 식(4)과 같은 계산을 통해 정규화를 진행한다. 모든 데이터 구간을 0~1 값을 가지도록 변환하여 데이터 분포를 조정하고 가중치 편향을 최소화한다<sup>86)</sup>.

$$x'_i = \frac{x_i - \min(X)}{\max(X) - \min(X)} \dots\dots\dots \text{식(4)}$$

여기서,

$X$  : 입력변수 데이터세트

$x'_i$  : Min-Max 정규화된  $X$  데이터세트 내  $i$ 번째 값

$x_i$  :  $X$  데이터세트 내  $i$ 번째 데이터

#### 4.1.2 예측모델 최적화

예측모델 개발은 선행연구를 통해 ANN, SVM, Tree ensemble간의 성능 비교를 통해 ANN의 우수한 성능을 입증하였으며<sup>84)</sup>, ANN 구조 중 다중 은닉층 구조를 갖는 심층신경망 모델을 사용하였다. 예측모델은 최적의 은닉층, 은닉층의 뉴런 수 학습률(Learning Rate), 학습횟수(Epoch)등 최적화된 구조를 결정하기 위해 베이지안 최적화(Bayesian Optimization)을 진행하였다. 베이지안 최적화는 불확실성 추적을 위해 가우시안 프로세스를 사용한다. 매 단계에서 샘플을 선택하고 목적함수 관찰을 통해 최적의 답을 찾는다. 이 과정에서 목표 학습률은  $1e-3$ , 학습횟수 300회로 설정하고, 최적 신경망 학습 및 성능평가를 위해 평균 제곱근 오차(Mean Squared Error, MSE)를 비용함수로 설정한다. 이때 출력되는 MSE의 값이 실제

---

86) Orr, G. B., & Müller, K. R. (Eds.). (1998). Neural networks: tricks of the trade. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

값과 예측값 간의 오차를 기반으로 0에 근접할수록 성능이 높음을 의미하며 식(5)와 같다. 예측모델의 베이지안 최적화 진행 시 하이퍼 파라미터의 탐색 범위는 <Table. 6>과 같다. 베이지안 최적화는 주어진 조건 내 앞서 설정한 MSE가 최소가 되는 조합을 산출할 때까지 해당 과정을 반복하여 실시한다. 최적화 과정을 통해 도출된 결과와 예측모델의 구성 및 예측모델 종류에 분류는 <Table. 7~9>와 같다.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \dots\dots\dots \text{식(5)}$$

여기서,

n: 데이터 개수

$y_i$ : 시험데이터의 실제값

$\hat{y}_i$ : 시험데이터에 대한 예측모델의 예측값

Table. 6 하이퍼 파라미터 최적화 변수 및 탐색범위

하이퍼 파라미터	범위
은닉층 수	1~10
뉴런 수	5~50
학습률	1e-3
학습횟수	300

Table. 7 축열조 온도 예측모델 구조 및 파라미터

구 분		난방기간			냉방기간	
		PVT	ASHP	GSHP	ASHP	GSHP
예측모델 구조	입력층	<ul style="list-style-type: none"> <li>실내온도 (n)[°C]</li> <li>외기온도 (n)[°C]</li> <li>축열조 온도 (n)[°C]</li> <li>열원 압·출수 온도 (n)[°C]</li> <li>Pump 열원·부하 측 순환수 유량 (n)[kg/hr]</li> </ul>				
	은닉층 수	3	4	4	5	3
	뉴런 수	19	25	20	24	20
훈련 파라미터	출력층	<ul style="list-style-type: none"> <li>축열조 온도 (n+1)[°C]</li> </ul>				
	Epoch	171	298	235	259	299
	학습률	1e-3				

Table. 8 에너지 소비량 예측모델 구조 및 파라미터

구 분		난방기간			냉방기간	
		PVT	ASHP	GSHP	ASHP	GSHP
예측모델 구조	입력층	<ul style="list-style-type: none"> <li>실내온도 (n)[°C]</li> <li>외기온도 (n)[°C]</li> <li>축열조 온도 (n)[°C]</li> <li>열원 압·출수 온도 (n)[°C]</li> <li>Pump 열원·부하 측 순환수 유량 (n)[kg/hr]</li> <li>Pump 에너지 소비량 (n)[kW]</li> <li>히트펌프 에너지 소비량 (n)[kW]</li> </ul>				
	은닉층 수	5	3	4	3	5
	뉴런 수	24	20	21	14	24
훈련 파라미터	출력층	<ul style="list-style-type: none"> <li>시스템 에너지 소비량 (n+1)[kW]</li> </ul>				
	Epoch	171	298	235	259	299
	학습률	1e-3				

Table. 9 실내온도 예측모델 구조 및 파라미터

구 분		난방기간	냉방기간
		축열조	
예측모델 구조	입력층	<ul style="list-style-type: none"> <li>실내온도 (n)[°C]</li> <li>외기온도 (n)[°C]</li> <li>축열조 입·출수 온도 (n)[°C]</li> <li>Pump 부하 측 순환수 유량 (n)[kg/hr]</li> </ul>	
	은닉층 수	4	5
	뉴런 수	20	19
훈련 파라미터	출력층	<ul style="list-style-type: none"> <li>실내온도 (n+1)[°C]</li> </ul>	
	Epoch	257	300
	학습률	1e-3	

## 4.2 규칙기반 제어알고리즘

규칙기반 제어의 프로세스는 <Fig. 11>과 전체적인 알고리즘은 <Fig. 12~15>와 같으며, 제어 과정 중 편의상 DHW 축열조는 ST1, 냉난방 축열조는 ST2로 명시하였다. 예측모델 학습을 위한 데이터 취득 시 규칙기반 제어알고리즘으로 제어를 진행하였다. 규칙기반 제어 단계는 크게 5개 단계로 진행된다. 그 과정은 1) 데이터 취득, 2) 급탕 축열조 운전결정, 3) 냉난방 축열조 운전 결정, 4) 실내 냉난방 운전 결정, 5) 마지막 제어 신호 전달 후 알고리즘을 종료한다.

Part A는 데이터 취득 단계

시물레이션 내 시간, 실내온도, 실외온도, 각 열원의 입·출수 온도, 축열조 입·출수 온도, 축열조 평균 온도, 순환펌프 유량을 취득한다.

Part B DHW 운전 결정

다중열원 히트펌프 시스템의 DHW 축열조 축열을 위한 PVT 가동 모드 선택 단계이다. PVT와 급탕 축열조의 온도를 비교하여 PVT 출수 온도가 DHW 축열조보다 높을 때 PVT는 DHW 축열조 축열을 위해 가동된다. 그러나 PVT 출수 온도가 DHW 축열조 온도보다 낮을 때 PVT는 냉난방 축열조 축열·냉을 위해 가동 조건을 확인한다. 또한, 이때 DHW 축열조는 AUX를 통해 축열한다.

Part C 냉난방 축열조 운전 결정

다중열원 히트펌프 시스템 냉난방을 위한 열원 사이클로 냉난방 축열조는 난방기간 setpoint 45°C, 냉방기간 setpoint 10°C에 deadband는  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 이다. 난방기간 중 축열조가 43°C 미만으로 축열이 필요할 때 PVT가 DHW 축열조 축열 가동중이지 않으면서 출수 온도가 냉난방 축열조 setpoint 보다 온도가 높을 경우 PVT를 이용하여 축열을 진행하며, 온도가 낮다면

지중열원 히트펌프를 통한 축열을 실시한다. 냉방기간의 경우 공기열원 히트펌프만을 이용하여 축냉을 진행한다.

#### Part D 실내 냉난방 운전 결정

다중열원 히트펌프의 부하 측 사이클로 실내온도와 setpoint를 기준으로 순환펌프와 실내에 설치된 FCU의 ON/OFF 제어를 실시한다. 실내의 난방, 냉방 setpoint는 각각 21℃, 26℃ 이며 deadband는  $\pm 1^\circ\text{C}$ 로 실내 냉난방 필요 여부를 확인하여 setpoint 범위를 유지하는 냉난방 축열조를 열원으로한다.

#### Part E 제어 신호 전달 및 종료

앞선 단계에서 결정된 DHW 축열조 축열, 냉난방 축열조 축열/축냉, FCU 냉난방 가동 모드에 따라 각 시스템에 제어 신호 전달 및 제어를 실시하는 단계이다.

기존 규칙기반 제어알고리즘은 열원의 입·출수 온도 비교를 통한 열원을 선택한다. 냉난방 가동 중 공기열원 히트펌프와 지중열원 히트펌프는 제어 신호 입력 시 정해진 냉난방 용량으로 작동하여 열원 선택에 제한이 발생하였다. 이에 난방기간은 일정한 효율로 공기열원 히트펌프 보다 안정성을 보이는 지열 히트펌프를 사용하며, 냉방기간은 높은 효율을 보이는 공기열원 히트펌프만을 열원으로 사용하였다<sup>87)</sup>.

---

87) Safa, A. A., Fung, A. S., & Kumar, R. (2015). Comparative thermal performances of a ground source heat pump and a variable capacity air source heat pump systems for sustainable houses. *Applied Thermal Engineering*, 81, 279-287.

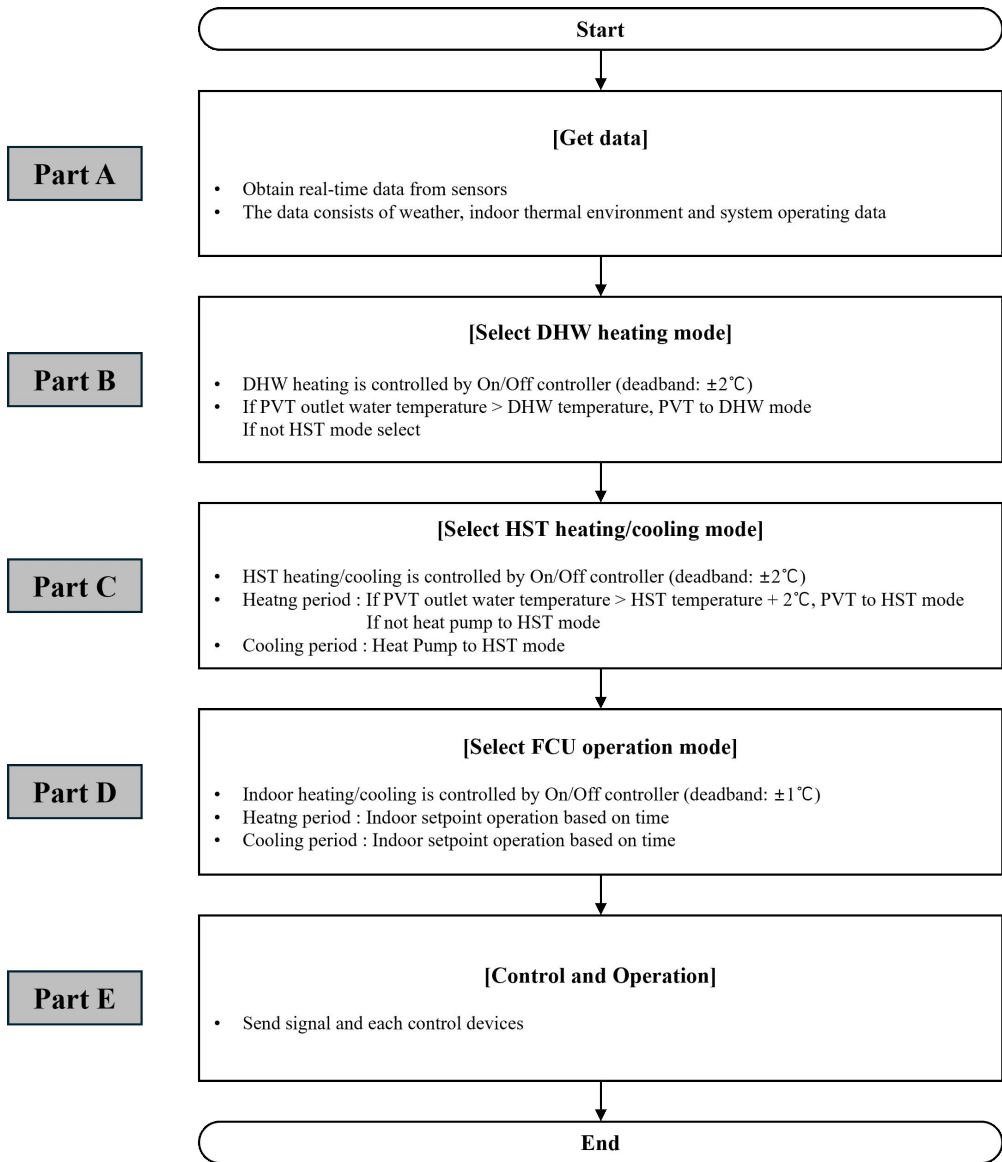


Fig. 11 규칙기반 제어알고리즘 흐름도



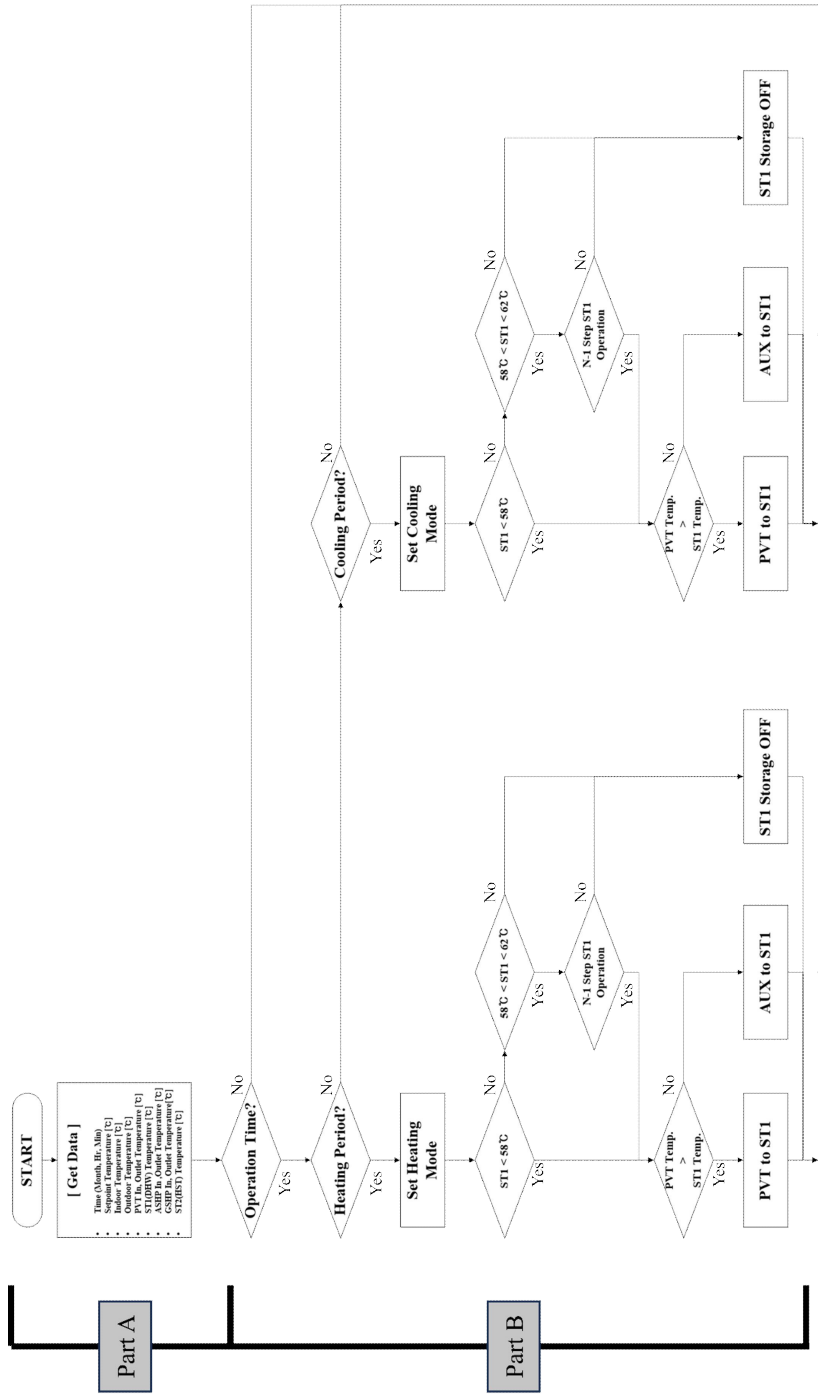


Fig. 12 규칙기반 제어알고리즘 Part A&B

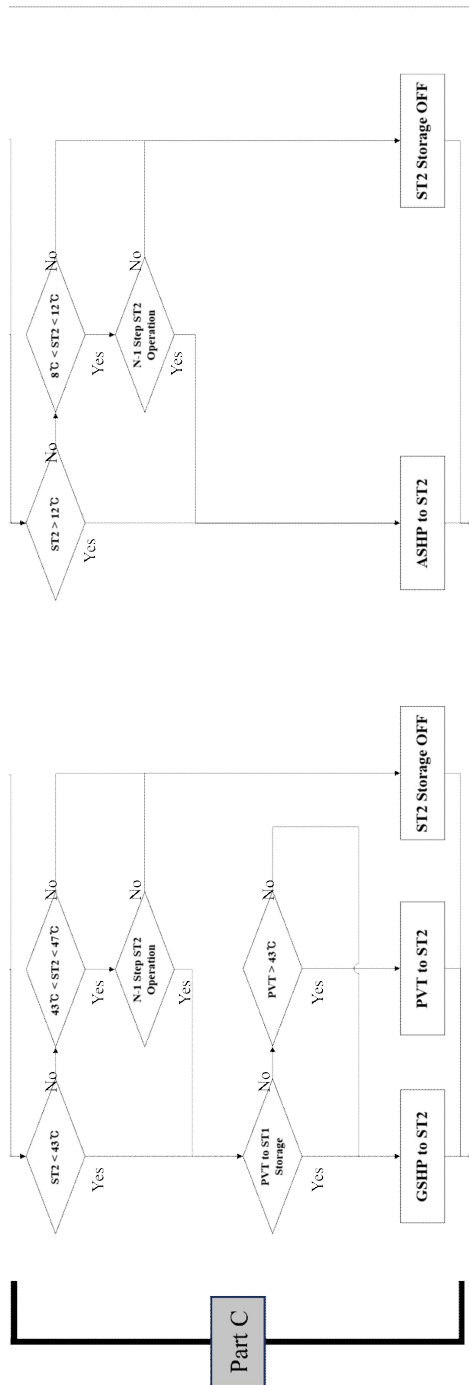


Fig. 13 규칙기반 제어알고리즘 Part C

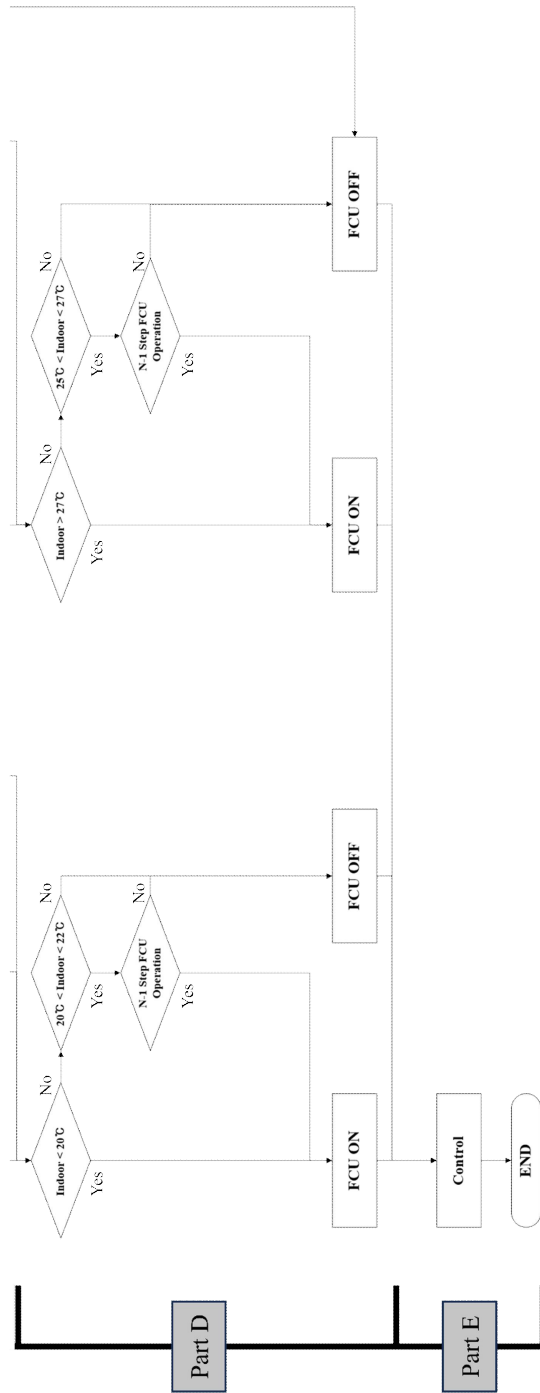


Fig. 14 규칙기반 제어알고리즘 Part D&E

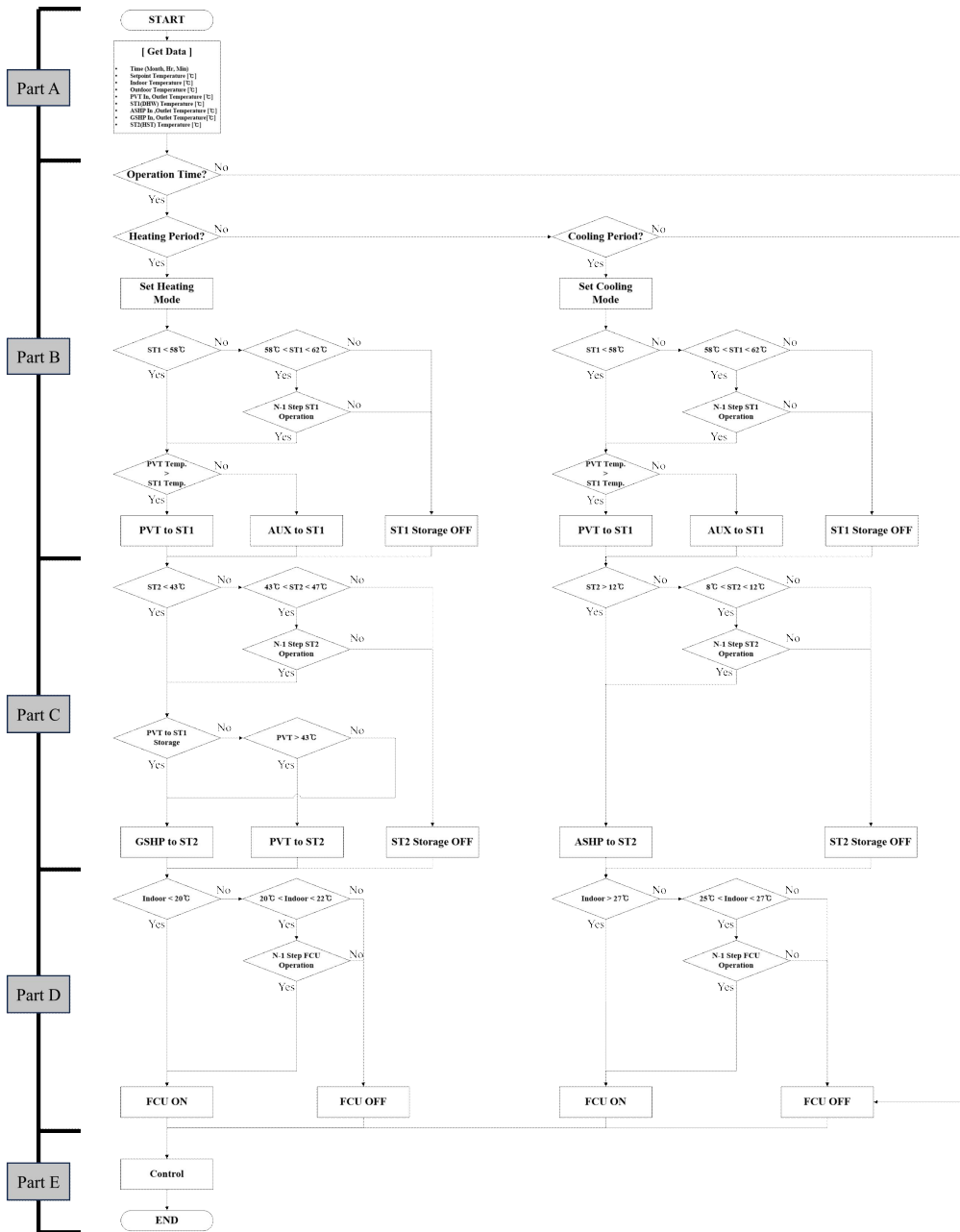


Fig. 15 규칙기반 제어알고리즘 Part A to E

### 4.3 최적 제어알고리즘 개발

최적 제어알고리즘은 각 설비 요소 입·출수 온도에 따라 On/Off 제어되는 규칙기반 제어알고리즘과 달리 개발된 예측모델을 내포하여 제어 과정 중 축열조 온도, 에너지 소비량, 실내온도 예측 제어를 실시한다. 또한, 제어 중 오차 발생 시 실시간 데이터 재학습하여 환경 변수 변화에 대응하여 에너지 소비량 절감 및 최적 실내 열 환경 제공이 가능하다. 최적 제어알고리즘의 제어 과정과 구성은 <Fig. 16~21>과 같으며 총 6가지 과정으로 진행된다.

#### Part A) 데이터 취득

먼저 다중열원 히트펌프 시스템의 최적 제어를 위해 선별된 11가지 데이터를 매 timestep 마다 실시간으로 취득하며 이는 <Fig. 15>와 같다. 취득된 데이터는 현재 시간 (Time (n)), 축열조와 실내 설정온도(setpoint Temp. (n)), PVT 입·출수 온도(PVT In, Outlet Water Temp. (n)), 공기열원 히트펌프 입·출수 온도(ASHP In, Outlet Water Temp. (n)), 지열 히트펌프 입·출수 온도(GSHP In, Outler Water Temp. (n)), 순환펌프 에너지 소비량(Pump 1, 2, 3, 4 Power (n)), 실내온도(Indoor Temp. (n)), 실외온도(Outdoor Temp. (n)), 축열조 온도(HST Temp. (n)), 순환펌프 유량(Pump Flowrate (n)), 각 열원의 에너지 소비량(System Power (n))으로 구성된다.

#### Part B) 급탕 운전 조건 설정

이 단계는 DHW 축열조 축열을 위한 PVT 측 운전 단계로 4.3장의 규칙기반 제어알고리즘의 Part B와 같은 제어 과정을 거친다. DHW 축열조 setpoint 60°C, deadband  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  범위 내 PVT 출수 온도를 확인하여 축열 가능 시 우선적으로 PVT를 이용한 급탕 축열조 축열을 실시한다. PVT 출수 온도가 급탕 축열조 온도 범위 미만으로 축열이 불가능할 경우

AUX를 열원으로 축열을 진행한다.

#### Part C) 냉난방 축열조 축열·냉을 위한 열원별 유량 선정

냉난방 축열조의 축열·냉을 위해 열원 및 순환펌프의 최적 유량을 선정하는 과정으로 <Fig. 18>과 같다. 앞서 개발된 축열조 온도 예측모델을 적용하여 각 열원별 순환펌프 유량을 2,200 kg/h부터 80kg/h씩 유량을 증가시키며 총 21개의 시나리오로 중 다음 timestep(n+1) 축열조 온도 조건을 만족하는 열원과 순환펌프 유량을 선정한다. 냉난방 축열조 설정 온도는 난방 setpoint 45℃, 냉방 setpoint 10℃이다.

난방기간 중 이용 가능한 열원은 PVT, 공기열원 히트펌프, 지중열원 히트펌프로 이전 단계에서 PVT가 급탕에 사용될 경우 공기열원 및 지중열원 히트펌프만을 냉난방 축열조 축열에 적용한다. 또한, 냉방기간은 PVT를 제외한 두 열원만을 이용하여 다음 timestep(n+1)의 축열조 온도를 만족하는 유량을 선정한다. 이때 이전 timestep(n-1)의 예측 결과와 현재 timestep(n) 축열조 온도 간 오차 발생 시 이전 timestep(n-1)의 데이터를 사용하여 재학습을 진행한다.

#### Part D) 에너지 소비량 비교를 통한 최적 열원 및 유량 선정

Part C에서 냉난방 축열조 온도 조건을 만족하는 각 열원 순환펌프 유량 가동에 따른 다음 timestep(n+1) 에너지 소비량 예측을 통해 최소 에너지를 소비하는 가동 조건 선정을 위한 단계다. 또한, 이전 timestep(n-1)에서 예측된 에너지 소비량과 현재 에너지 소비량을 비교하여 오차가 없을 경우 다음 단계로 넘어가지만 오차 발생 시 이전 timestep(n-1) 데이터로 재학습 진행 후 다시 다음 timestep(n+1) 에너지 소비량을 예측한다.

#### Step E) 실내온도 예측 및 순환펌프 유량 선정

현재 실내온도, 실외온도, 축열조 입·출수 온도, 순환펌프 유량의 데이터를 학습하여 앞서 Step C에서의 순환펌프 유량 시나리오를 변수로

산정하여 실내온도 예측을 진행한다. 이때 제어 전 현재 실내온도와 예측된 미래 실내온도와의 오차를 비교하여 가장 적은 오차를 보이는 순환펌프 시나리오를 추출한다. 이후 가장 적은 오차를 보인 순환펌프 유량 사용 시 결과 이전 timestep(n-1)의 예측된 실내온도를 이용하여 재학습 여부를 판단한다.

#### Step F) 제어 신호 전달

위 과정들을 거치며 선정된 결과는 1) 냉난방 축열조 온도 조건을 만족하며 최소 에너지 소비량을 보이는 열원과 순환펌프 유량, 2) 실내온도 조건 충족을 위한 부하 측 최적 순환펌프 유량이다. 해당 결과를 시스템에 전송하여 다중열원 히트펌프 시스템의 최적 제어를 진행한다.

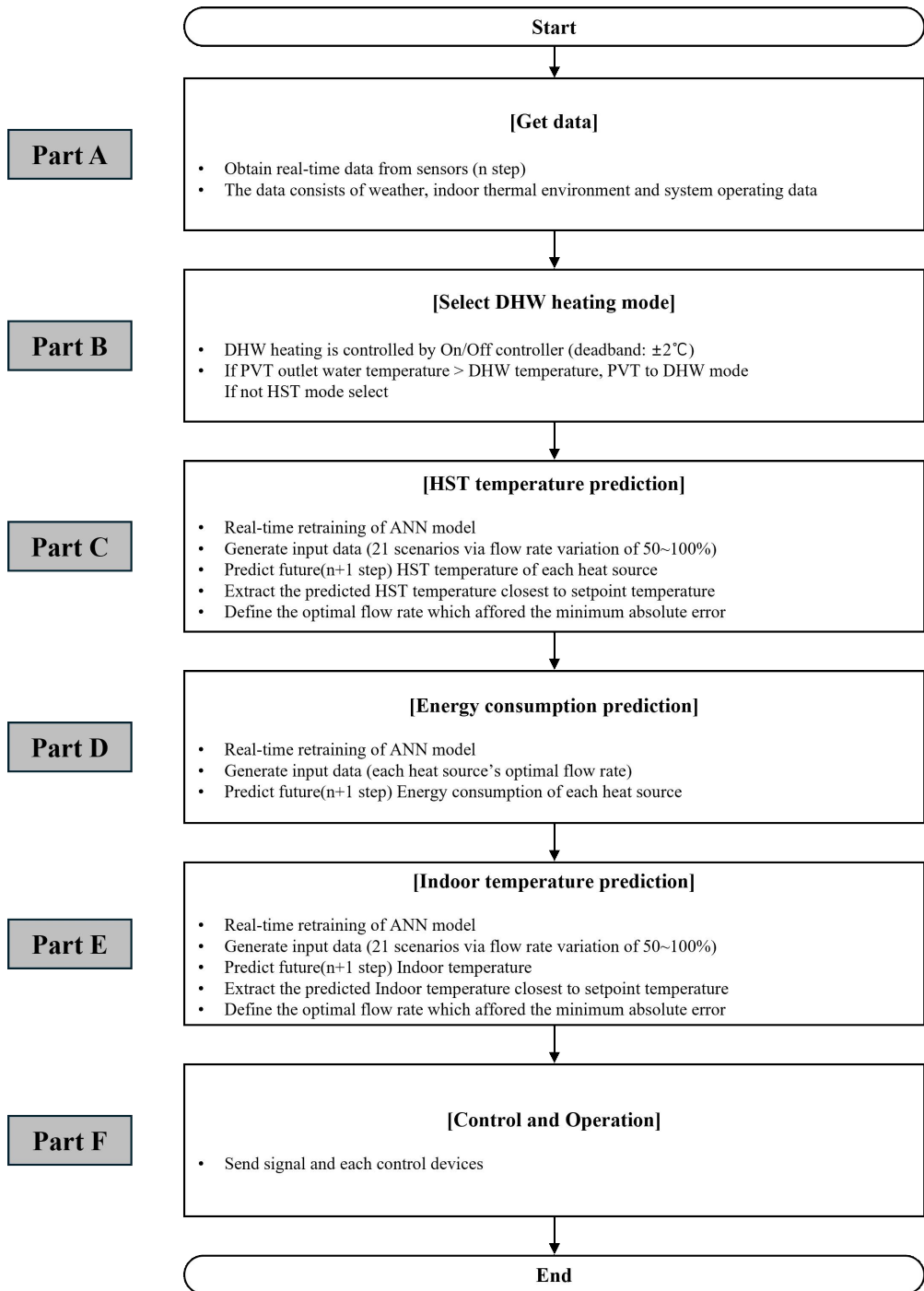


Fig. 16 최적 제어알고리즘 흐름도



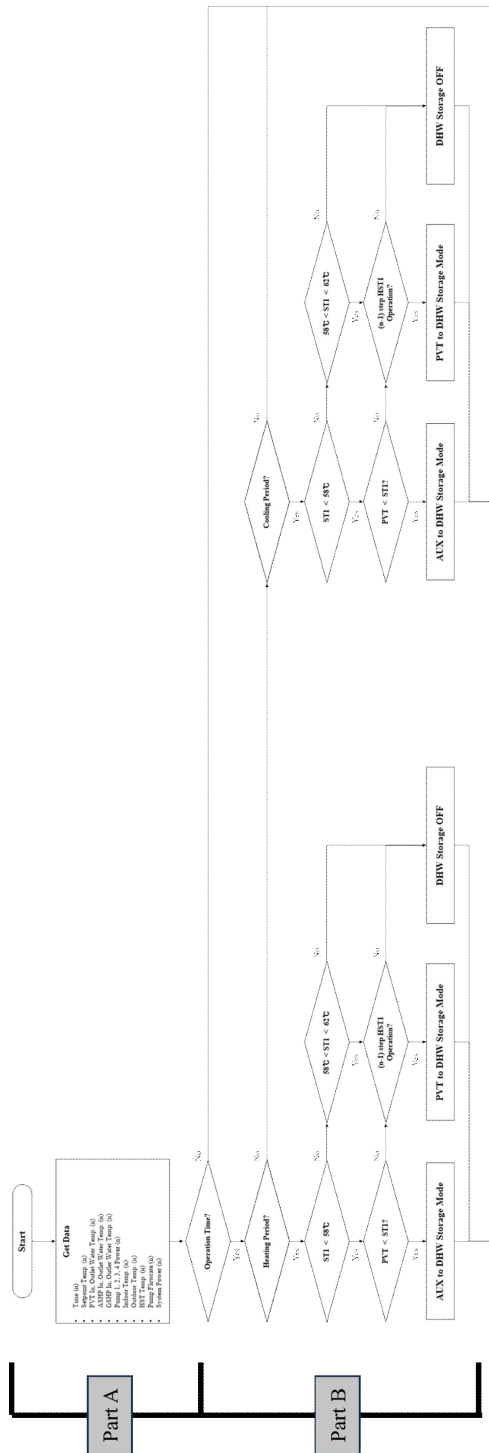


Fig. 17 최적 제어알고리즘 Part A & B

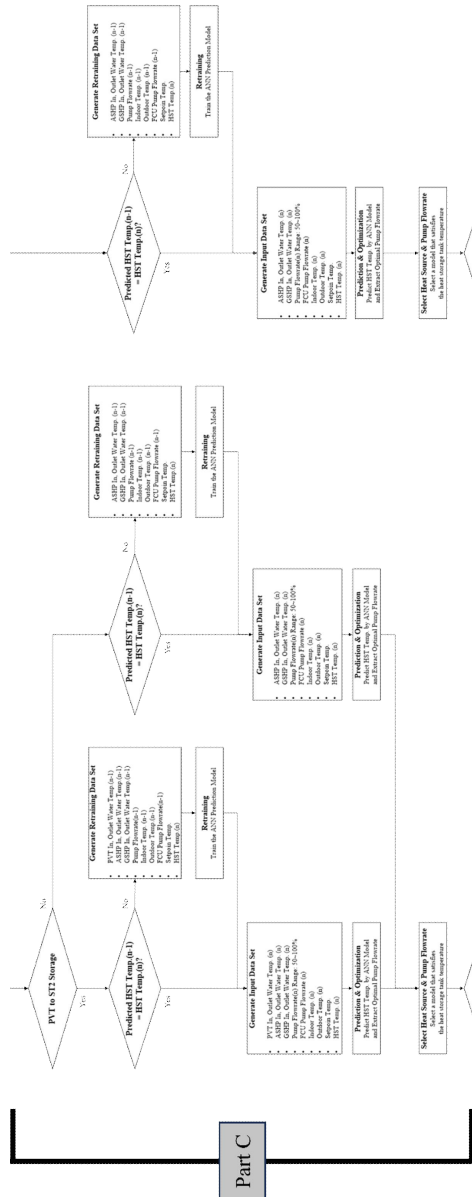


Fig. 18 최적 제어알고리즘 Part C



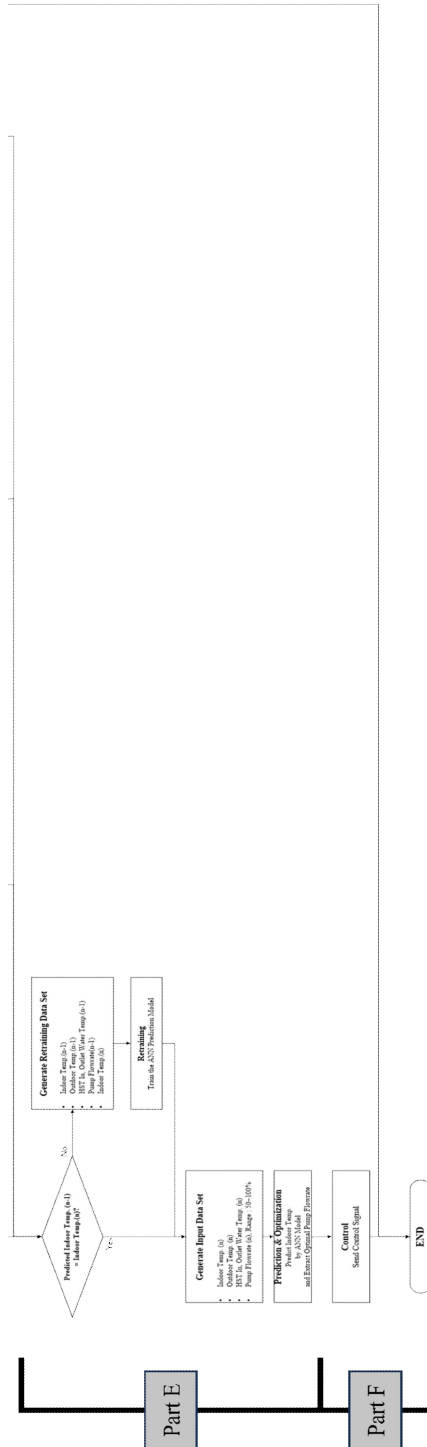


Fig. 20 최적 제어알고리즘 Part E & F

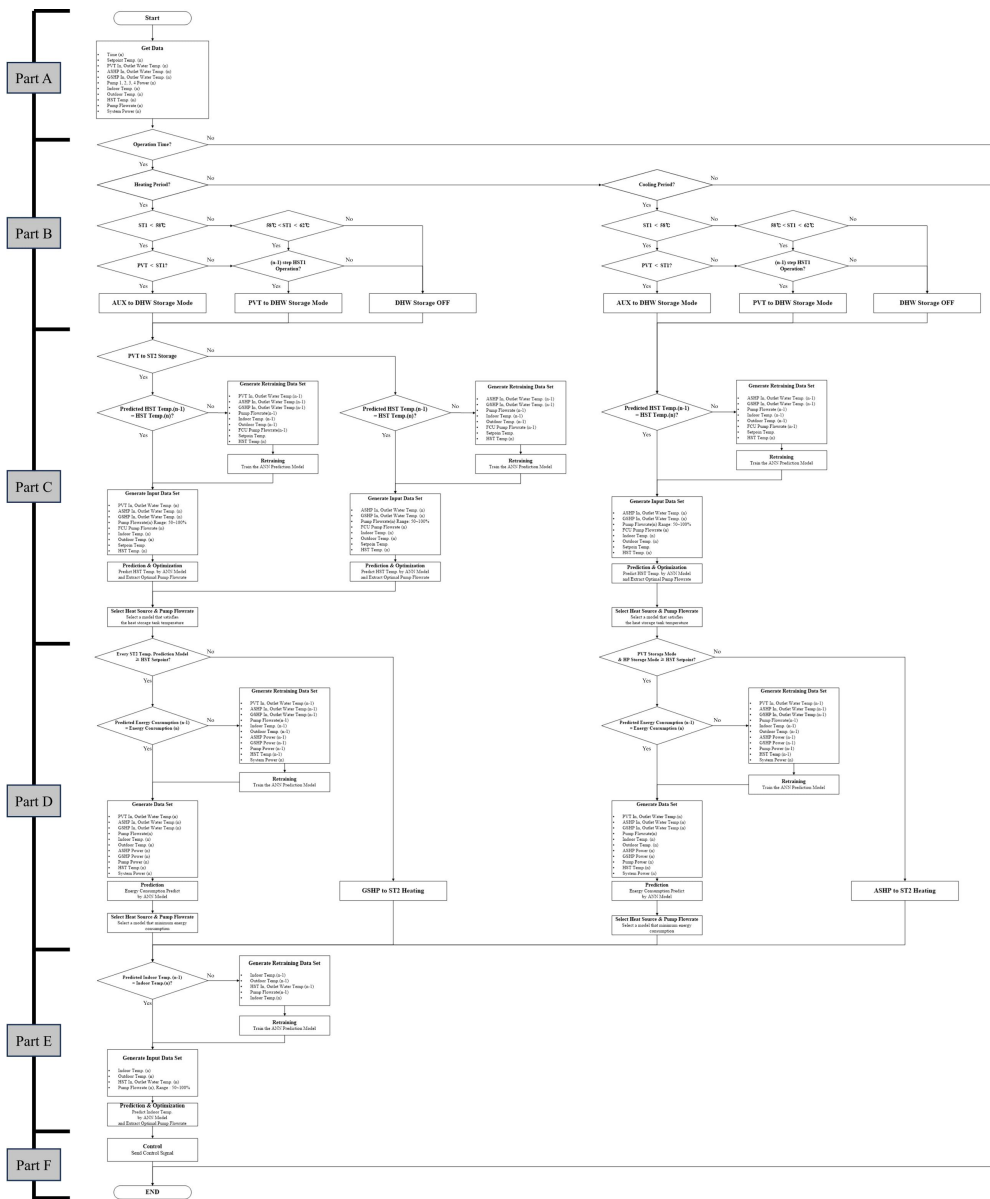


Fig. 21 최적 제어알고리즘 Part A to F

## 4.4 소결

본 장에서는 학습 데이터 선정 및 최적화를 통한 예측모델 개발과 이를 적용한 최적 제어알고리즘을 개발하였다. 자세한 내용은 다음과 같다.

### (1) 학습 데이터 구축

예측모델 학습을 위한 데이터 세트는 시뮬레이션을 이용하여 취득되며 피어슨 상관관계 분석 및 식(1~3)에 의해 필요한 입력 변수를 선정한다. 학습 데이터는 21개의 유량 시나리오로 냉난방기간 각각 1개월의 10분 단위 데이터를 취득하며 총 426,907개의 데이터 세트를 구성한다. 해당 데이터는 최대-최소 정규화 전처리 과정을 진행한다.

### (2) 예측모델 개발

예측모델은 1) 축열조 온도 예측모델, 2) 에너지 소비량 예측모델, 3) 실내온도 예측모델로 각 모델은 열원별 냉난방기간에 따라 나뉘어 총 12개 모델이 개발되었다. 예측모델 개발은 컴퓨터 프로그래밍 언어인 MATLAB를 이용해 개발되었다. 은닉층 뉴런 및 layer 수, 학습 횟수, 학습률을 파라미터로 설정하여 베이지안 최적화 과정을 통해 평균 제곱 오차(MSE)의 성능이 가장 우수한 구성을 선정하였다. 이후 학습 데이터 60%, 테스트 데이터 20%, 시험 데이터 20%로 나누어 학습을 진행하도록 설정하였다.

### (3) 규칙기반 제어알고리즘

규칙기반 제어알고리즘은 각 열원 및 부하 측 입·출수 온도를 비교하여 축열조와 실내 설정온도 범위를 유지하기 위해 ON/OFF 제어를 진행한다. 우선적으로 PVT는 급탕 축열조 축열 조건을 확인하며, 이후

냉난방 축열조 축열·냉을 위해 해당 setpoint 온도를 기준으로 난방기간 PVT, 지열 히트펌프를 열원으로 사용하며 냉방기간은 공기열원 히트펌프만을 열원으로 이용한다. 또한, 냉난방 축열조 setpoint 온도 범위 만족 시 실내온도에 따라 부하 측 순환펌프와 FCU 작동 여부를 결정하여 제어를 실시한다.

#### (4) 최적 제어알고리즘 개발

최적 제어알고리즘은 앞서 개발된 예측모델을 적용하여 실시간 학습 및 재학습과정을 통해 적응성을 확보한다. 최적 제어알고리즘 제어 과정은 다음과 같다.

- 1) 시뮬레이션을 통해 매 timestep의 환경변수를 실시간으로 취득
- 2) PVT 입·출수 온도를 비교하여 DHW 축열조 축열 검토
- 3) 축열조 온도 예측모델을 통해 다음 timestep의 축열조 온도를 예측 후 축열조 온도를 만족하는 열원별 순환수 유량 선정
- 4) 축열조 setpoint 온도를 만족하는 열원과 순환펌프 유량 사용에 따른 에너지 소비량 예측 후 최소 에너지를 소비하는 열원 및 순환펌프 유량 선정
- 5) 실내 온도 예측을 통한 부하 측 순환펌프 최적 유량 선정
- 6) 최종 선택된 열원, 열원 측 순환펌프 유량, 부하 측 순환펌프 유량 제어 신호를 송출한다.

최적 제어알고리즘 내 적용을 위한 예측모델 개발 및 제어 성능평가를 위한 규칙기반 제어알고리즘을 제시하였다. 본 장에서 개발된 예측모델과 최적 제어알고리즘 성능평가는 5장에서 예측 정확도 및 안정성 분석을 진행한다.

## 제 5 장 예측모델 및 최적 제어알고리즘 성능평가

본 장에서는 개발된 예측모델과 최적 제어알고리즘의 성능을 평가하였다. 예측모델은 통계지표를 사용하여 성능평가를 진행하며, 최적 제어알고리즘은 규칙기반 제어알고리즘과의 비교·분석을 통해 제어 안정성 및 에너지 소비량 절감 성능을 확인하였다.

### 5.1 예측모델 성능평가

예측모델의 성능을 평가하는 지표는 ASHRAE guideline 14-2014<sup>88)</sup>에서 제공하는 결정계수(R-squared,  $R^2$ )와 평균 제곱근 오차의 변동계수(Coefficient of Variation of Root Mean Square Error, CV(RMSE))는 식 (6), 식(7)과 같다.  $R^2$ 는 예측값과 실제값의 상관관계를 평가하는 지표로 1에 근접할수록 높은 상관관계를 의미한다. CV(RMSE)는 예측값과 실제값의 오차를 제공하여 그 합을 전체 데이터 수로 나눈 후 다시 제곱근을 취하여 변동계수를 곱한 값의 백분율 값으로 0에 근접할수록 높은 예측 정확도를 의미한다. 또한, 평균절대오차(Mean Absolute Error, MAE)는 식(8)과 같으며, MAE를 이용하여 예측값과 실제값의 오차 분석을 진행한다. 성능평가 지표의 기준은  $R^2$  0.8 이상, CV(RMSE)는 30% 이하를 적정기준으로 한다.

---

88) ASHRAE. (2014). ASHRAE Guideline 14. Measurement of Energy and Demand Savings.



$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \dots\dots\dots \text{식 (6)}$$

$$CV(RMSE) = \frac{1}{\bar{y}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \times 100 (\%) \dots\dots\dots \text{식 (7)}$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (|y_i - \hat{y}_i|) \dots\dots\dots \text{식 (8)}$$

여기서,

$y_i$ : 실제값

$\hat{y}_i$ : 예측값

$\bar{y}$ : 실제값의 평균

$n$ : 데이터 수

개발된 예측모델은 냉난방기간 각 열원별 축열조 온도 예측모델, 에너지 소비량 예측모델, 실내온도 예측모델 총 12개 모델의 성능평가 결과는 <Table. 10~12>와 같다. 또한, 성능평가 지표 중  $R^2$ 는 <Fig. 22~25>과 같다.

1) 축열조 온도 예측모델

난방기간, 냉방기간 각 열원에 따른 축열조 온도 예측모델의 실제값과 예측값 사이의 상관 관계  $R^2$ 는 모두 0.9이상으로 두 값 간의 높은 관계성을 확인하였다. 또한, CV(RMSE)는 난방기간에서 0.749%, 0.933%, 0.889%와 냉방기간 4.994%, 4.167%로 높은 예측 정확도를 나타냈다. MAE의 경우 실제 온도와 예측 온도 간 오차의 평균이 모두 1℃ 미만으로 확인하였다.

### 3) 에너지 소비량 예측모델

난방기간 중 PVT, ASHP, GSHP 각 열원에 따른 에너지 소비량 예측모델의  $R^2$ 는 각 0.9765, 0.9939, 0.9779로 높은 상관관계 보였으며, CV(RMSE)는 4.552%, 5.349%, 17.550%의 예측 정확도를 보였다. MAE는 0.003 kW, 0.030 kW, 0.122 kW의 오차를 나타냈다. 냉방기간 ASHP, GSHP의  $R^2$  0.9716, 0.9729, CV(RMSE) 16.797%, 2.537%를 보였으며, MAE는 0.074 kW, 0.010 kW로 모두 높은 상관관계와 예측 정확도를 보였다.

### 2) 실내온도 예측모델

난방기간과 냉방기간 각각  $R^2$ 는 0.9938, 0.9793의 높은 상관 관계 값을 보여주고 있다. 또한, CV(RMSE) 난방 0.851%, 냉방 0.736%로 두 예측모델 모두 아주 높은 예측성능을 나타내며, MAE는 0.085℃, 0.83℃로 실내온도 예측모델의 우수한 성능을 확인하였다.

위와 같이 개발된 예측모델은 모두 ASHRAE 권장 기준을 상회하는 결과를 보이며 예측모델 성능의 우수성을 확인하였다.

Table. 10 축열조 온도 예측모델 성능평가

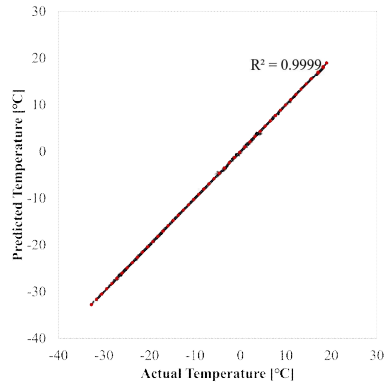
운전 기간	열 원	R2	CV(RMSE)	MAE
난방기간	PVT	0.9999	0.749 %	0.036 ℃
	ASHP	0.9903	0.933 %	0.174 ℃
	GSHP	0.9236	0.889 %	0.147 ℃
냉방기간	ASHP	0.9691	4.994 %	0.179 ℃
	GSHP	0.9763	4.167 %	0.087 ℃

Table. 11 에너지 소비량 예측모델 성능평가 지표

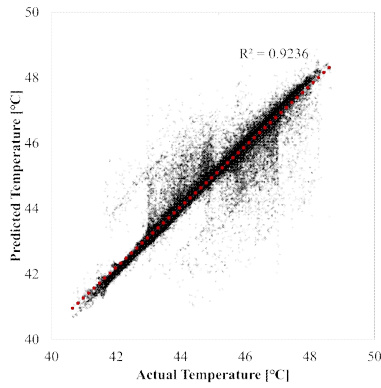
운전 기간	열 원	R <sup>2</sup>	CV(RMSE)	MAE
난방기간	PVT	0.9765	4.552 %	0.003 kW
	ASHP	0.9939	5.349 %	0.030 kW
	GSHP	0.9779	17.550 %	0.122 kW
냉방기간	ASHP	0.9716	16.797 %	0.074 kW
	GSHP	0.9729	2.537 %	0.010 kW

Table. 12 실내온도 예측모델 성능평가 지표

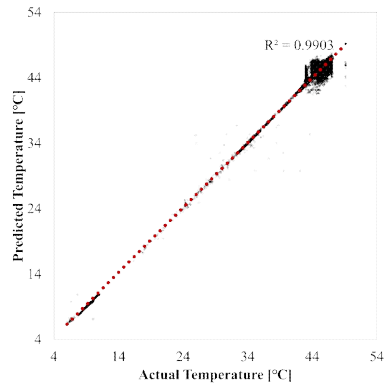
운전 기간	열 원	R <sup>2</sup>	CV(RMSE)	MAE
난방기간	HST	0.9938	0.851 %	0.085 °C
냉방기간		0.9793	0.736 %	0.083 °C



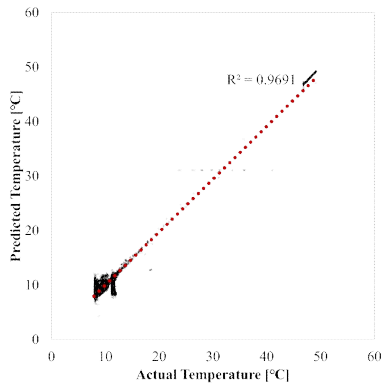
(a) PVT-Heating period HST temperature



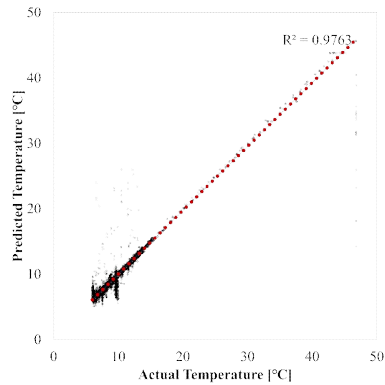
(b) ASHP-Heating period HST temperature



(c) GSHP-Heating period HST temperature

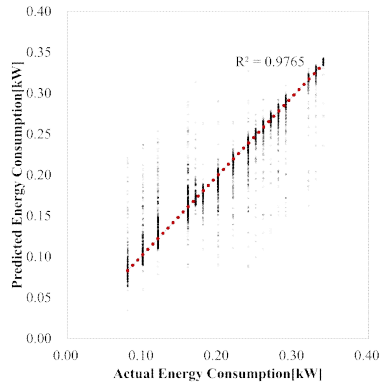


(d) ASHP-Cooling period HST temperature

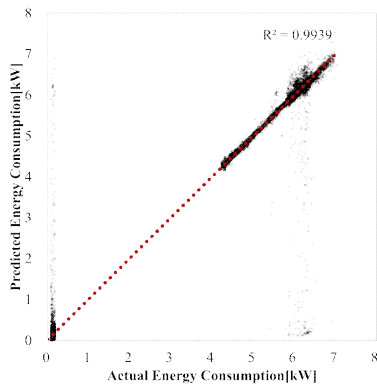


(e) GSHP-Cooling period HST temperature

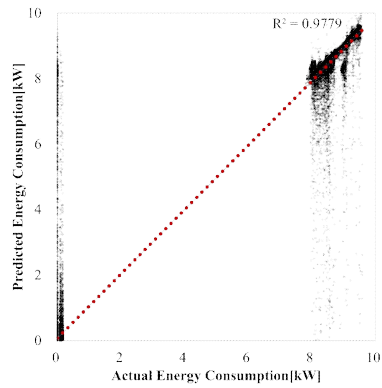
Fig. 22 냉난방기간 축열조 온도 예측모델 산점도



(a) PVT-Heating period power consumption

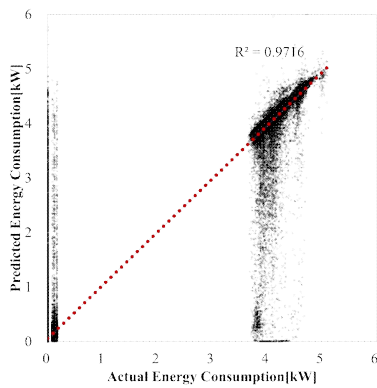


(b) ASHP-Heating period power consumption

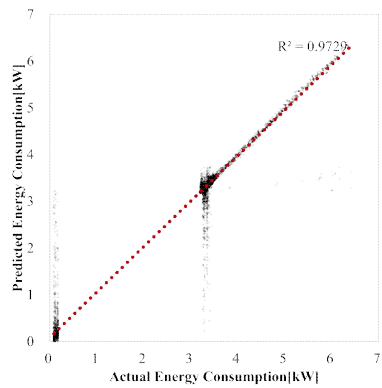


(c) GSHP-Heating period power consumption

Fig. 23 난방기간 시스템 에너지 소비량 예측모델 산점도

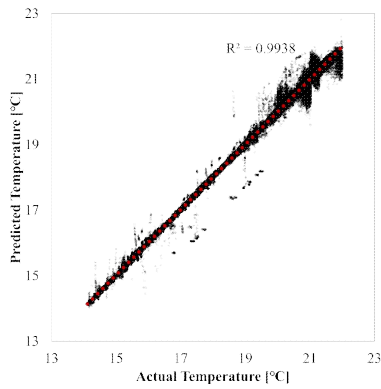


(a) ASHP-Cooling period power consumption

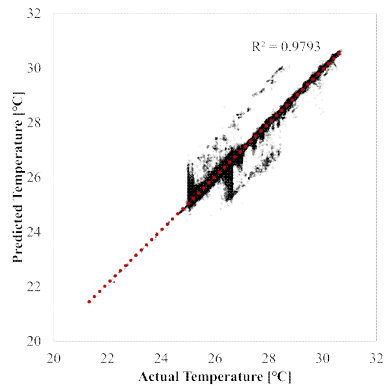


(b) GSHP-Cooling period power consumption

Fig. 24 냉방기간 시스템 에너지 소비량 예측모델 산점도



(a) Heating period Indoor temperature



(b) Cooling period Indoor temperature

Fig. 25 냉난방기간 실내온도 예측모델 산점도

## 5.2 최적 제어알고리즘 성능평가

### 5.2.1 최적 제어알고리즘 성능평가 개요

본 장에서는 개발된 최적 제어알고리즘의 성능평가를 진행하였으며, 축열조 및 실내 제어 성능과 에너지 소비량을 중점으로 하였다. 최적 제어알고리즘의 성능평가를 위해 규칙기반, 비적응형 제어, 최적 제어간의 비교·분석을 진행한다. 이후 실내외 조건 변화에 따른 적응성 평가를 위해 기후대 변경 후 성능을 평가하였다.

최적 제어알고리즘 제어 성능 및 에너지 소비량 저감 평가를 위해 Base model 내 3가지 제어알고리즘을 적용하여 성능을 평가하였다. 1) 규칙기반 제어알고리즘, 2) 실시간 재학습 과정이 포함되지 않은 비적응형 제어알고리즘, 3) 재학습 과정이 포함된 최적 제어알고리즘의 축열조 및 실내온도 제어성능과 에너지 소비량 비교·분석을 진행하였다.

이후 최적 제어알고리즘의 적응성 및 확장성 평가를 위해 기존 Base model의 적용 기후를 서울에서 습윤 아열대 기후로 분류되는 대한민국 부산으로 (Cfa / 3A)로 변경하였다. 해당 기후의 외부 환경 조건 변화에 따른 냉난방 피크 부하를 고려하여 시스템 용량 및 시스템 내 설정값, 피크부하 발생일 등을 재설정하였다. 또한, 변경된 기후대별 기존의 규칙기반 제어알고리즘과 최적 제어알고리즘의 냉난방 에너지 소비량 및 실내온도 제어 성능을 확인한다.

#### (1) 축열조 및 실내온도 제어 성능평가 기준

개발된 최적 제어알고리즘은 축열조 및 실내온도 제어 안정성 및 에너지 소비량 분석을 통해 평가를 진행하였다. 제어 정확도 평가를 위해 비적응형 제어알고리즘과 최적 제어알고리즘에 적용된 축열조 온도 및 실내온도

예측모델의 제어 예측 정확도 평가를 진행하였다. 이는 냉난방 가동 시 매 timestep(10분) 마다 예측된 축열조 온도 및 실내온도와 실제 온도와 실제 제어된 축열조 및 실내온도와의 예측 정확도 평가는 CV(RMSE)를 사용하였다. 예측 정확도 평가 시 CV(RMSE)는 앞서 언급된 식(7)을 사용하여 산출하였다. 이때  $y_i$ 는 예측 모델에 의해 산출된 순환펌프의 최적 유량으로 제어된 축열조 및 실내온도이며,  $\hat{y}_i$ 는 이전 timestep에서 예측모델을 통해 예측된 축열조 및 실내온도 예측값이다.

제어 안정성 분석의 경우 제어알고리즘 적용에 따른 냉난방 제어 시 축열조 및 실내온도와 setpoint 온도의 오차에 대한 CV(RMSE), MAE 활용한 통계적 평가를 진행한다. 이를 위해 식(6), 식(7)을 사용하며, 각 식에서의  $y_i$ 는 축열조 및 실내 냉난방 setpoint,  $\hat{y}_i$ 는 제어알고리즘에 의해 제어된 축열조 및 실내온도를 의미한다. 제어 오차 계산 시 음수(-)면 setpoint보다 높은 온도로 제어됨을 의미하며, 양수(+)일 경우 낮은 온도로 제어된 것을 의미한다. 따라서, 난방 가동시 음수 오차(-)면 과난방을 의미하며 냉방 가동시 양수 오차(+)는 과냉방 상태를 의미한다.

제어 안정성 평가 지표로 사용되는 MAE는 오차의 절댓값 평균으로 전반적인 오차 정도를 파악하기 위해 사용된다. CV(RMSE)는 setpoint 온도와 시스템에 의해 제어된 축열조 및 실내온도 간의 오차 변동성을 상대적 크기로 나타낸 지표이다. 사용된 3가지의 통계적 지표 성능 기준은 CV(RMSE)는 30% 이하로 하며, MAE는 0에 근접할수록 제어 안정성이 높다고 판단할 수 있다.

## (2) 축열조 및 실내온도 제어 성능평가 범위 설정

제어 방식 중 규칙기반 제어알고리즘은 On/Off 제어 방식을 사용하여 온도 제어 필요시 순환펌프는 정유량 방식 정격 출력으로 작동하여 온도



제어를 실시한다. 또한, 축열조 및 실내 setpoint 온도 기준의 deadband를 설정하여 축열조 온도  $\text{deadband} \pm 2^\circ\text{C}$ , 실내온도  $\text{deadband} \pm 1^\circ\text{C}$  내에서 작동한다. 최적 제어알고리즘의 경우 냉난방 시스템 가동 시 유량에 따른 다음 timestep인 10분 뒤 축열조 및 실내온도를 예측하여 각 제어 대상 setpoint에 가장 근접한 온도를 유지하도록 유량을 제어한다. 따라서 각 제어 방법별 축열조 및 실내온도 제어 성능평가 범위 및 기간을 다음과 같이 설정하였다.

각 제어 방법에 따른 평가 시점은 냉난방기간 중 시스템이 작동하는 재실시간 (09:00~18:00)로 설정하였다. 온도 제어 성능평가를 위한 온도 기준은 난방기간의 축열조 setpoint  $45^\circ\text{C}$ , 실내 setpoint  $21^\circ\text{C}$ 로 하며, 냉방기간의 경우 축열조 setpoint  $10^\circ\text{C}$ , 실내 setpoint  $26^\circ\text{C}$ 를 기준으로 제어 성능 분석을 진행하였다. 또한, 제어 안정성 평가 시 냉난방 부하가 낮아 시스템 가동 없이 실내 setpoint를 만족하는 시점은 제외하였다.

### 5.2.2 최적 제어알고리즘 성능평가

최적 제어알고리즘은 냉난방 시스템 가동에 따라 취득되는 각 설비 요소별 데이터를 통해 실시간 학습을 진행하여 축열조 및 실내온도 제어성능을 개선한다. 최적 제어알고리즘의 제어 성능평가를 위해 앞서 시물레이션 프로그램에 구축된 Base model 내 규칙기반 제어 방식, 실시간 재학습 과정을 제외한 비적응 제어알고리즘, 최적 제어알고리즘을 적용하여 제어 안정성 및 에너지 소비량 비교·분석을 진행하였다.

#### (1) 축열조 및 실내온도 제어 성능평가

냉난방기간의 재실시간 중 평균기온과 최고·최저기온이 확인되는 날을 Typical day, Peak day로 선정하여 제어 방법별 온도 제어 결과와 이에

다른 순환펌프 유량을 확인하였다. 난방기간 Typical day의 축열조 및 실내 온도 제어 결과는 <Fig. 26>, <Fig. 27>와 같으며 Peak day 축열조 온도 제어는 <Fig. 28>, 실내온도 제어 결과는 <Fig. 29>와 같다. 냉방기간 Typical day의 축열조 및 실내온도는<Fig. 30>, <Fig. 31>, Peak day는 각각 <Fig. 32>, <Fig. 33>이다.

각 제어 방식별 축열조 및 실내온도 예측 성능 및 제어 안정성 평가 결과는 <Table. 13>, <Table. 14>와 같다. 난방기간 시스템 가동 시 비적응형 제어알고리즘과 최적 제어알고리즘의 축열조 온도 예측 정확도는 CV(RMSE) 0.91%, 0.75%이며, 실내온도 예측 정확도는 1.37%, 0.72%이다. 이는 ASHRAE guidelin 권장기준 30% 이하를 만족하는 결과로 최적 제어알고리즘은 비적응형 제어알고리즘 대비 축열조 및 실내온도 예측 정확도는 약 17.58%, 14.29% 향상되었음을 확인하였다.

축열조 setpoint 대비 MAE, CV(RMSE)는 규칙기반 제어 시 1.50℃, 4.02%, 비적응형 제어가 0.40℃, 1.08%, 최적 제어 0.36℃, 0.93%로 나타났다. 규칙기반 제어 대비 비적응형 및 최적 제어 시 비적응형 제어는 MAE는 약 73.33%, CV(RMSE) 73.13%가 향상되었으며, 최적 제어는 76.00%, 76.87% 향상되어 최적 제어알고리즘 적용 시 가장 안정적인 제어를 수행한 것으로 확인되었다.

난방기간 중 실내온도 제어 시 비적응형 제어와 최적 제어의 실내온도 예측 정확도는 CV(RMSE) 0.84%, 0.72%로 두 제어 방식 모두 ASHRAE 권장 기준인 30%에 상회하는 결과를 보였다, 이때 최적 제어알고리즘 제어 정확도는 비적응형 제어알고리즘 대비 약 14.29% 향상된 결과가 나타나 실시간 재학습을 통해 예측성능이 향상되었음을 확인하였다.

또한, 실내온도 setpoint 대비 MAE, CV(RMSE)는 규칙기반 제어 시 0.61℃, 4.68%, 비적응형 제어가 0.33℃, 1.84%, 최적 제어 0.12℃, 0.86%로

나타났다. 규칙기반 제어 대비 비적응형 및 최적 제어 시 비적응형 제어는 MAE는 약 48.43%, CV(RMSE) 60.69%가 향상되었다. 최적 제어는 81.25%, 81.62% 향상되어 최적 제어알고리즘 적용 시 가장 안정적인 제어를 수행한 것으로 확인되었다.

Typical day에서의 축열조는 실내온도 제어 시와 유사한 경향을 보이며 setpoint에 최적 제어알고리즘 제어가 먼저 도달하였다. 또한, 규칙기반 제어에서 하루 중 외기 기온이 낮은 오전 시간대 deadband 제어가 진행되며 이후 오후는 가동을 정지하였다. 비적응형 제어와 최적 제어알고리즘 모두 오후 시간대 가동되는 모습을 보이나 규칙기반 제어 보다 낮은 유량으로 가동되었다.

Typical day에서 실내온도 제어 결과는 <Fig. 24>와 같이 최적 제어알고리즘에서 setpoint에 가장 먼저 도달하고 그 뒤 비적응형 제어알고리즘, 규칙기반 제어 순서이다. 규칙기반 제어의 경우 최초 기동 시점에서 deadband 기준인 22℃까지 도달하기 위해 11:00까지 가동 이후 오후 시간대 높아진 외기 온도로 추가 가동이 없음에도 실내가 deadband 범위 내 유지되었다. 비적응형 및 최적 제어알고리즘의 경우 규칙기반 제어와 달리 deadband 없이 setpoint 21℃유지를 위해 오후 시간대에서 시스템 가동이 확인되었다.

난방기간 중 가장 낮은 외기온도를 보이는 Peak day의 난방기간 Peak day의 축열조 온도 제어의 경우 <Fig. 25>와 같으며 setpoint에 규칙기반 제어 시 가장 먼저 도달하였다. 이 경우 Peak day 전날의 축열조 온도에 영향을 받아 제어 시작 시점의 온도가 달라 발생한 현상으로 분석되며, 이후 최적 제어, 비적응형 제어 순으로 도달하였다. Peak day의 실내온도 제어 결과는 <Fig. 26>에서 확인이 가능하다. 재실시간 중 외기온도가 -12.4℃까지 내려가는 만큼 세가지 제어 방식 모두 Typical day 보다 많은

난방을 진행한다. 또한, 규칙기반 제어의 경우 난방 가동 없이 실내온도를 유지할 수 있는 기간이 발생하지 않아 재실시간동안 지속적으로 deadband 내 제어를 진행하였다. 비적응형 제어 및 최적 제어알고리즘의 경우 유량의 변화는 있지만 13:00까지 가동 정지 없이 대부분의 시간동안 제어를 수행함에 따라 제어 오차가 점차 감소한 것을 확인하였다.

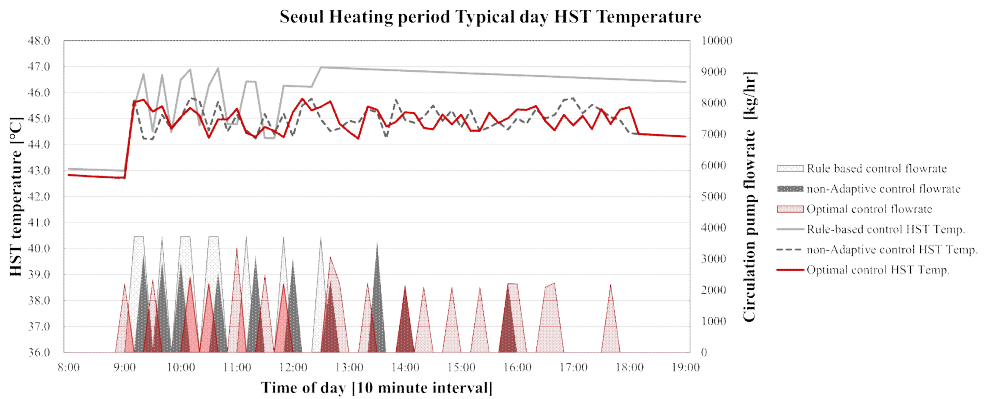


Fig. 26 서울 난방기간 Typical day 중 축열조 온도 및 제어 유량

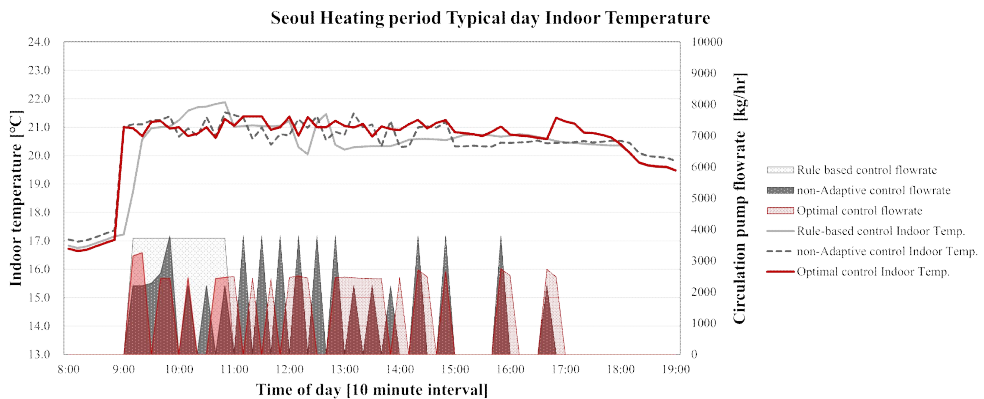


Fig. 27 서울 난방기간 Typical day 중 실내온도 및 제어 유량

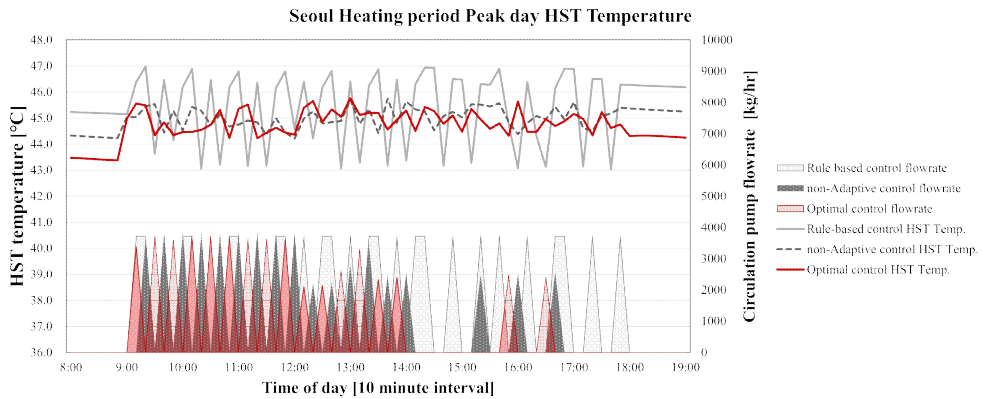


Fig. 28 서울 난방기간 Peak day 중 축열조 온도 및 제어 유량

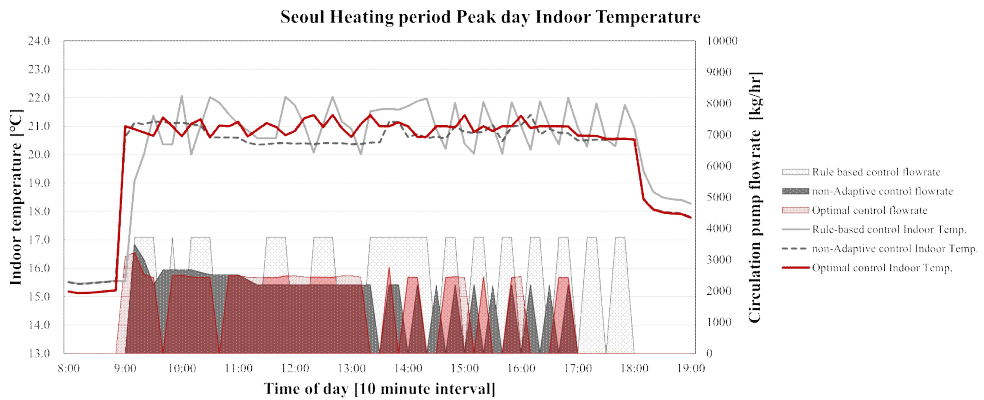


Fig. 29 서울 난방기간 Peak day 중 실내온도 및 제어 유량

난방기간의 경우 축열조 온도 예측 정확도는 비적응형 제어 및 최적 제어알고리즘 CV(RMSE) 각각 1.26%, 0.98%로 최적 제어알고리즘이 재학습 과정을 통해 성능이 약 22.22% 향상되었다.

제어 방식에 따른 축열조 setpoint 대비 MAE, CV(RMSE)는 규칙기반 제어 1.27°C, 5.36%, 비적응형 제어 0.64°C, 1.66%, 최적 제어 0.61°C 1.41%로 ASHRAE Guideline 권장기준 30%이내를 만족하는 성능을 확인하였다. 또한, 최대 오차 비교시 비적응형 제어에서 -1.31°C, 최적 제어 -1.13°C까지 발생하여 동일한 환경에서 재학습을 통해 예측 성능이 향상된 것을 확인하였다. 난방기간

실내온도 예측 정확도 CV(RMSE)는 비적응형 제어가 0.88%, 최적 제어에서 0.56으로 재학습을 통해 성능이 약 36.36% 향상되었다.

실내온도 제어 안정성 확인을 위해 제어 방식별 실내온도 setpoint 대비 MAE, CV(RMSE)는 규칙기반 제어 0.53°C, 2.41%, 비적응형 제어 0.47, 2.64%, 최적 제어 시 0.20°C, 1.12%로 최적 제어알고리즘에서 가장 높은 안정성을 보였다. 또한, 비적응형 제어와 최적 제어의 최대 오차를 비교한 결과 각각 -2.03°C, -0.59°C 동일한 환경에서 최적 제어알고리즘을 통한 제어 시 보다 높은 안정성 확보가 가능함을 확인하였다.

냉방기간 Typical day에서 실내온도 제어 시 비적응형 제어와 최적 제어는 재실시간 시작 시점 setpoint 도달을 위한 최대 유량 가동 이후 규칙기반 제어 대비 적은 유량으로 제어되었다. 비적응형 제어의 경우 냉방 가동이 진행됨에 따라 최적 제어 보다 높은 유량으로 가동되어 낮은 실내온도를 유지한다.

축열조 온도 제어 시 가동 시작 시점에 실내온도 제어를 위해 축열조에 많은 부하가 발생하여 높은 유량으로 가동된다. 또한, 비적응형 제어와 최적 제어에서 규칙기반 제어 대비 적은 오차로 제어되었다.

Peak day 실내온도 제어 시 규칙기반 제어는 가동 시작 이후 1시간동안 지속적으로 가동 후 11:00이후 18:00까지 지속적으로 가동되며 평균적으로 setpoint보다 약 0.45°C 높은 온도를 유지하며 제어되었다. 비적응형 제어는 setpoint 도달 이후 2.2°C 오차가 크게 발행하였으며 냉방 가동이 진행됨에 따라 점차 오차가 감소하였다. 최적 제어는 setpoint에 근접한 온도로 가장 적은 오차를 보이며 제어됨을 확인하였다.

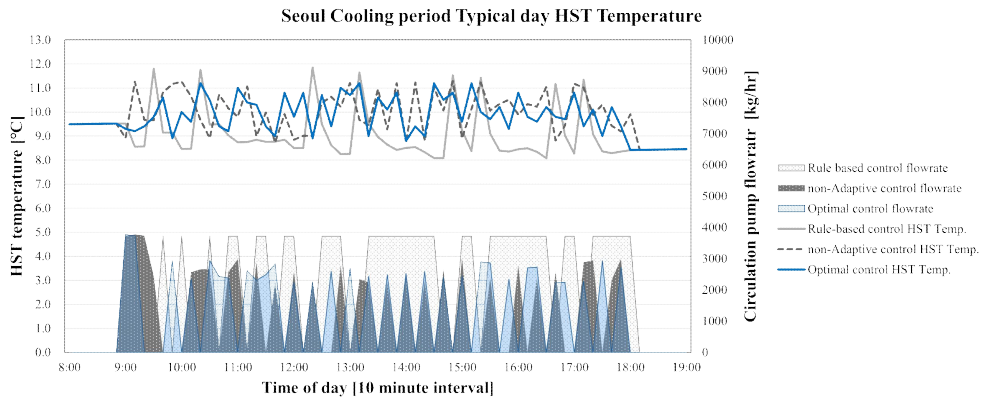


Fig. 30 서울 냉방기간 Typical day 중 축열조 온도 및 제어 유량

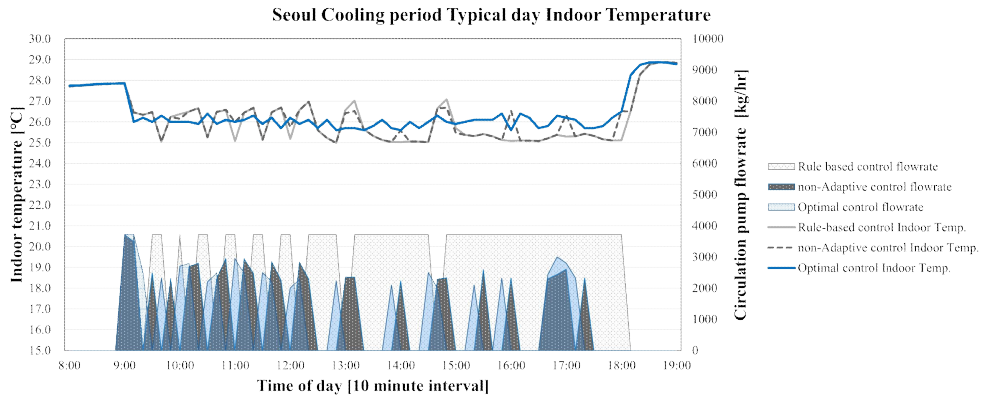


Fig. 31 서울 냉방기간 Typical day 중 실내온도 및 제어 유량

Peak day 축열조 온도 제어의 경우 가장 먼저 비적응형 제어 방식이 setpoint에 도달하였다. 규칙기반 제어는 재실 시간 중 대부분 연속적으로 가동되며 setpoint 보다 최대  $-2.03^{\circ}\text{C}$ 를 보이며 deadband 시적점인  $8^{\circ}\text{C}$ 에 근접한 온도를 유지하였다. 난방기간의 Typical day와 Peak day는 setpoint 도달까지 시간은 제어 방식별 큰 차이가 없으며, 난방기간 Typical day와 달리 외기온도 영향으로 시스템 가동 없이 적정 온도를 유지하는 시점은 발생하지 않았다. 이는 여름철 늦은 오전부터 피크부하가 발생하는 특성과 실내 기기 부하 및 재실 부하가 지속적으로 발생하는 업무시설의 특성으로 인한 것으로 판단된다.

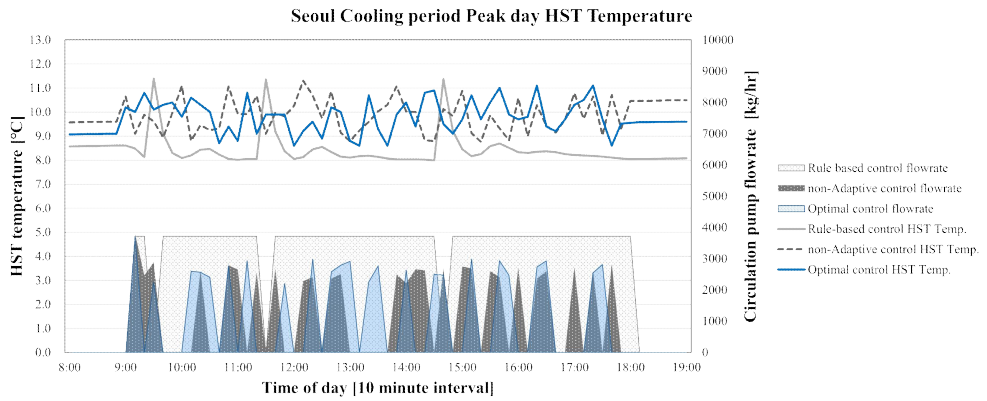


Fig. 32 서울 냉방기간 Peak day 중 축열조 온도 및 제어 유량

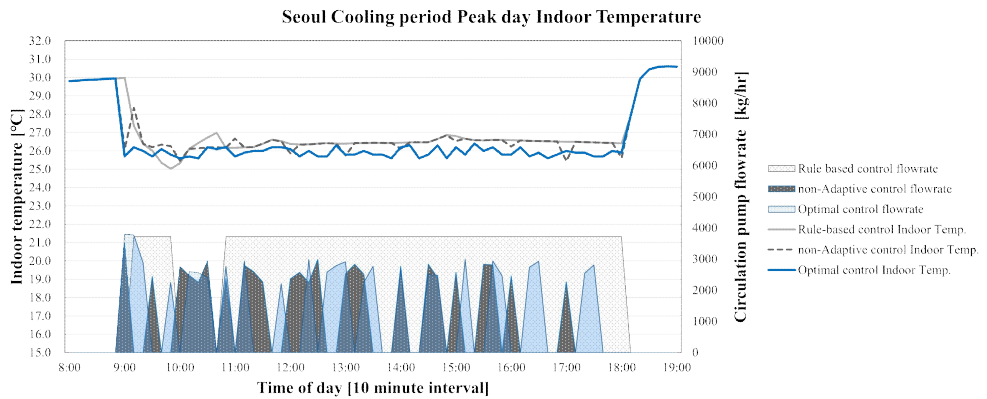


Fig. 33 서울 냉방기간 Peak day 중 실내온도 및 제어 유량



Table. 13 서울 제어방법에 따른 축열조 온도 제어 성능지표

구 분	난방기간			냉방기간		
	Base case	비적용 제어	최적 제어	Base case	비적용 제어	최적 제어
예측 정확도 CV(RMSE) [%]	-	0.91	0.75	-	1.26	0.98
Max (+) error [°C]	2.09	1.39	0.81	2.04	1.30	1.04
Max (-) error [°C]	-2.05	-0.80	-0.80	-2.03	-1.31	-1.13
MAE [°C]	1.50	0.40	0.36	1.27	0.64	0.61
CV(RMSE) [%]	4.02	1.08	0.93	5.36	1.66	1.41

Table. 14 서울 제어방법에 따른 실내온도 제어 성능지표

구 분	난방기간			냉방기간		
	Base case	비적용 제어	최적 제어	Base case	비적용 제어	최적 제어
예측 정확도 CV(RMSE) [%]	-	0.84	0.72	-	0.88	0.56
Max (+) error [°C]	1.18	0.70	0.40	1.02	0.82	0.55
Max (-) error [°C]	-1.95	-0.91	-0.40	-1.23	-2.06	-0.59
MAE [°C]	0.64	0.33	0.12	0.53	0.47	0.20
CV(RMSE) [%]	4.68	1.84	0.86	2.41	2.64	1.12

## (2) 에너지 소비량 분석

제어 방식에 따른 월별 냉난방 에너지 소비량은 <Fig. 34>와 같다. 연간 총 냉난방 에너지 소비량은 비적응형 제어알고리즘 5082.4 kWh로 가장 많은 에너지 소비량이 발생하였다. 다음으로 규칙기반 제어알고리즘 4995.9 kWh, 최적 제어알고리즘 4911.6 kWh 순으로 확인되었다. 규칙기반 제어 대비 비적응형 제어는 86.5 kWh(1.73%) 증가하였으나 최적 제어알고리즘 적용 시 - 84.3 kWh(-1.69%) 감소하였다.

규칙기반 제어는 난방 에너지 2111.5 kWh, 냉방 에너지 2884.4 kWh로 연간 총 에너지 소비량 중 냉방 가동 시 더 많은 에너지 소비가 이뤄지고 있는 것을 확인하였다. 이는 난방기간의 평균 외기온도가 비교적 온난한 2월과 11월에 난방 부하가 작게 발생하고 업무시설의 특성인 내부 기기 발열로 인해 난방이 가동하지 않아 발생한 것으로 판단된다.

비적응형 제어와 최적 제어 시 연중 난방 에너지 소비량은 2385.5 kWh, 2274.9 kWh 이며 냉방 에너지 소비량은 2697.0 kWh, 2636.7 kWh이다. 두 제어 방식 모두 난방기간 중 규칙기반 제어알고리즘 보다 높은 에너지 소비량을 보였다. 이는 난방기간 규칙기반 제어 시 지중열원 히트펌프만을 사용하지만 재실시간 중 축열조 온도를 만족하지 못하는 지점이 발생한다. 이때 비적응형 제어 및 최적 제어 시 공기열원 히트펌프가 가동되며 난방 에너지 소비량 증가하는 결과를 보였다고 판단하였다. 또한, 각 시스템의 가동시간은 <Table. 14>와 같으며, 난방 가동 시 비적응형 제어는 열원 측 가동시간 255.9시간, 실내온도 제어를 위한 부하 측 가동시간은 654.0시간으로 규칙기반 제어 대비 7.3%, 76.9% 증가함을 확인하였다. 최적 제어의 경우 열원 측 가동시간 253.0시간, 부하 측 가동시간 657.5시간으로 증가한 결과로 보인다.

냉방기간은 비적응형 제어에서 열원 측 가동시간 588.2시간, 실내 냉방 가동시간 986.1시간이며, 최적 제어의 열원 측과 실내 냉방 가동시간은 각각 542.3시간, 975.6시간 가동됨을 확인하였다. 최적 제어 시 시스템 가동시간은 규칙기반 제어 대비 난방기간 열원 및 부하 측 제어 가동시간은 각 +6.9%, +78.4%, 냉방기간 열원 측 가동시간 -10.75%, 부하 측 가동시간 +29.3% 증가하였다.

규칙기반 제어알고리즘 대비 제어 방법에 따른 시스템 요소의 에너지 소비량 변화는 <Table. 15>와 같다. 최적 제어알고리즘은 규칙기반 제어 대비 난방 시 열원 및 부하 측 시스템 가동시간 증가로 열원 측 +91.7 kWh, 부하 측 +71.7 kWh로 총 +163.5 kWh 증가하였다. 냉방에서 열원 측 -228.4 kWh, 부하 측은 -19.4 kWh로 총 -247.7 kWh 감소하였다.

최적 제어알고리즘 냉방 가동 시 열원 측 시스템 가동시간 감소에 따라 높은 정격 출력이 요구되는 히트펌프에서 많은 에너지 소비량이 절감되었다. 또한, 냉방기간 부하 측 시스템의 경우 가동시간은 증가하였지만 에너지 소비량이 감소하였다. 이는 순환펌프가 정유량으로 가동되는 규칙기반 제어와 달리 변유량 제어를 통해 보다 적은 유량으로 제어되며 에너지 소비량이 절감된 것으로 판단되었다.

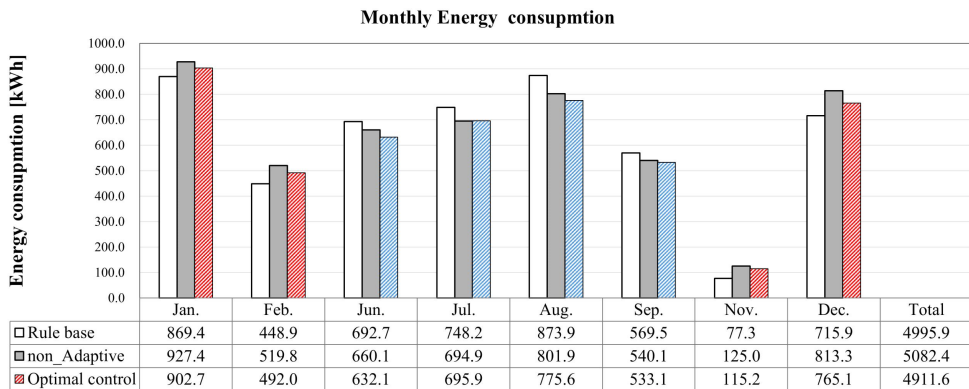


Fig. 34 제어 방식별 냉난방 에너지 소비량

Table. 15 제어 방식에 따른 시스템 요소별 가동시간 [Hour]

구 분	난방기간			냉방기간		
	On/Off 제어	비적응 제어	최적 제어	On/Off 제어	비적응 제어	최적 제어
히트펌프	238.5	255.9 (+7.3%)	253.0 (+6.5%)	623.3	588.2 (-5.6%)	542.3 (-15.9%)
축열/축냉 순환수 펌프	238.5	255.9 (+7.3%)	253.0 (+6.5%)	623.3	588.2 (-5.6%)	542.3 (-15.9%)
냉난방 순환수 펌프	369.7	654.0 (+76.9%)	657.5 (+79.9%)	758.8	986.1 (+30.0%)	975.6 (+28.6%)
FCU 팬	369.7	654.0 (+76.9%)	657.5 (+79.9%)	758.8	986.1 (+30.0%)	975.6 (+28.6%)

Table. 16 규칙기반 제어 대비 에너지 소비량 변화 [kWh]

구 분 (제어방법/월)		시스템 요소					
		히트펌프	열원 측 순환펌프	부하 측 순환펌프	FCU 팬	Total	
비적응 제어	난방 기간	Jan.	+ 21.61	+ 7.97	+ 3.26	+ 25.16	+ 58.00
		Feb.	+ 26.53	+ 8.09	+ 5.05	+ 31.23	+ 70.90
		Nov.	+ 18.46	+ 6.00	+ 1.57	+ 21.67	+ 47.70
		Dec.	+ 46.58	+ 9.49	+ 6.53	+ 34.80	+ 97.40
		Total	+113.18	+31.55	+16.41	+112.86	+ 274.00
	냉방 기간	Jun.	- 36.47	- 5.29	- 9.91	+ 19.07	-32.60
		Jul.	- 42.82	- 9.03	- 14.32	+ 12.87	-53.30
		Aug.	- 52.47	- 12.01	- 15.39	+ 8.87	-72.00
		Sep.	- 26.97	- 7.22	- 11.74	+ 16.43	-29.50
		Total	- 159.73	- 33.55	- 51.36	+57.24	-187.40
최적 제어	난방 기간	Jan.	+ 11.61	+ 4.58	+ 1.87	+ 15.23	+ 33.29
		Feb.	+ 20.21	+ 6.05	+ 2.59	+ 14.23	+ 43.08
		Nov.	+ 13.17	+ 3.52	+ 0.84	+ 20.45	+ 37.98
		Dec.	+ 28.40	+ 4.09	+ 4.84	+ 11.73	+ 49.14
		Total	+ 73.47	+ 18.24	+ 10.14	+ 61.64	+ 163.49
	냉방 기간	Jun.	- 48.47	- 8.34	- 17.23	+ 13.41	- 60.63
		Jul.	- 41.82	- 7.13	- 18.02	+ 14.66	- 52.31
		Aug.	- 68.24	- 13.92	- 25.82	+ 9.68	- 98.30
		Sep.	- 32.75	- 7.35	- 14.82	+ 18.74	- 36.50
		Total	- 191.28	- 37.06	- 75.89	+ 56.49	247.74

### 5.2.3 최적 제어알고리즘 적응성 평가

최적 제어알고리즘의 적응성 평가를 위해 규칙기반 제어와 최적 제어간 제어 성능을 비교하며, 앞서 성능평가를 진행한 환경에서 외기 조건을 변경하고 그 후 피크 부하를 고려하여 시스템 용량을 변경하였다. 대상지는 기존 서울에서 부산으로 변경하여 시스템 요소 중 공기열원 히트펌프, 지중열원 히트펌프, 순환펌프, FCU의 용량 변경 사항은 다음 <Table. 17>과 같으며 이외의 값은 <Table. 3>과 같다.

#### (1) 축열조 및 실내온도 제어 성능

냉난방 기간 내 평균 외기온도와 최고·최저 외기온도가 확인되는 날을 각각 Typical day, Peak day로 설정하며, 난방기간은 각각 <Fig. 35~38> 냉방기간은 <Fig. 39~42>이다. 또한, 각 제어 방식에 따른 예측정확도 CV(RMSE) 및 축열조 온도와 실내온도 제어에 따른 MAE, CV(RMSE)는 <Table. 18~19>와 같이 나타났다.

난방기간 최적 제어알고리즘의 축열조 및 실내온도 제어 예측 정확도는 각각 1.25%, 0.91%로 높은 수준의 정확도를 보이며 외부 환경 및 시스템 용량 변화에 대한 적응성을 확인하였다.

최적 제어알고리즘의 축열조 및 실내 온도의 setpoint 대비 MAE, CV(RMSE)는 축열조 온도 제어는 0.68℃, 2.19%, 실내온도 제어의 경우 0.46℃, 3.89%로 높은 안정성을 보였다. 또한, 최대 제어 오차는 축열조 온도 제어 시 Max (+) error 0.63℃, Max (-) error - 0.60℃이며, 실내온도 제어 시 Max (+) error 0.79℃, Max (-) error - 1.11℃로 다소 크게 발생하였으나 이는 과난방으로 인한 결과로 판단된다.

Typical day 축열조 온도 제어의 경우 축열조 setpoint에 최적 제어 방식이 먼저 도달하며, 이는 이전날 제어 종료 시점의 축열조 온도로 인하여 가동

시작 시점에 이미 setpoint에 근접한 지점에서 시작되었기 때문이라 판단된다. 또한, 이날 오후 외기온도가 7.8°C 이상으로 올라가며 난방 부하 감소로 인해 규칙기반 제어는 11:00경 제어를 멈추지만 최적 제어의 경우 setpoint를 유지하기 위해 지속적으로 제어를 실시하였다. 실내온도 제어 시 setpoint 온도에 먼저 도달한 제어 방식은 최적 제어이며, 축열조 온도 제어와 유사하게 11:00 이후 난방 부하가 줄어들며 규칙기반 제어는 가동되지 않는다.

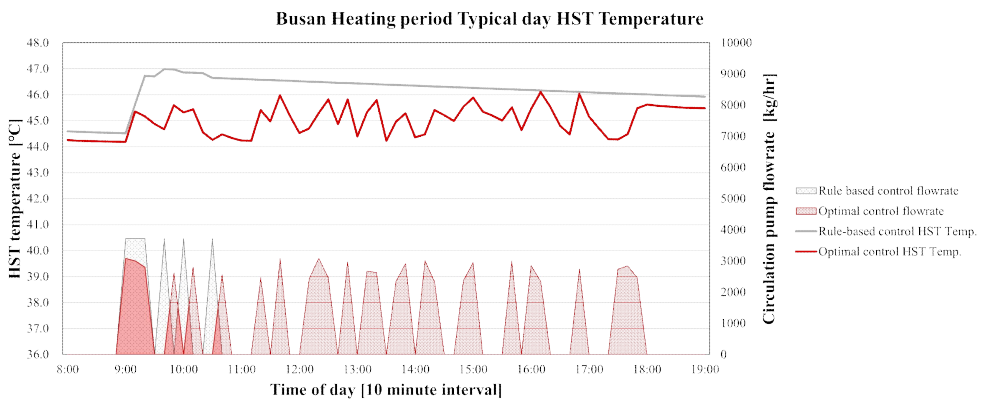


Fig. 35 부산 난방기간 Typical day 중 축열조 온도 및 제어 유량

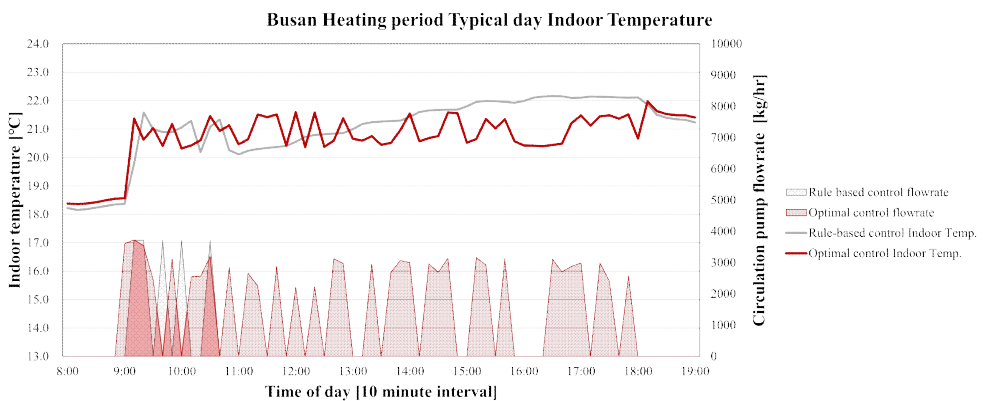


Fig. 36 부산 난방기간 Typical day 중 실내온도 및 제어 유량

난방기간 Peak day에 최적 제어 방식은 재실시간 시작 시점 난방 부하가 큰 오전 시간대 setpoint에 도달하기 위해 높은 유량으로 가동되었다. 이후 규칙기반 제어 대비 낮은 유량으로 제어되었으며, 이날 setpoint 이상의 -1.11℃의 오차로 과난방이 확인되었다.

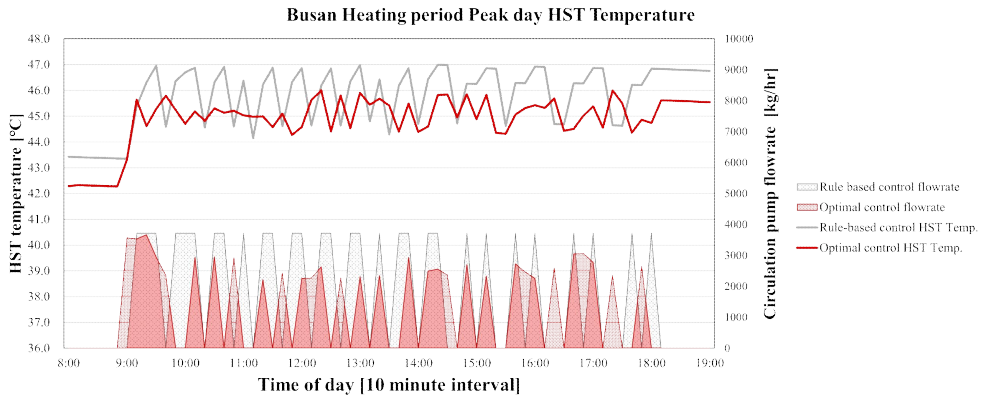


Fig. 37 부산 난방기간 Peak day 중 축열조 온도 및 제어 유량

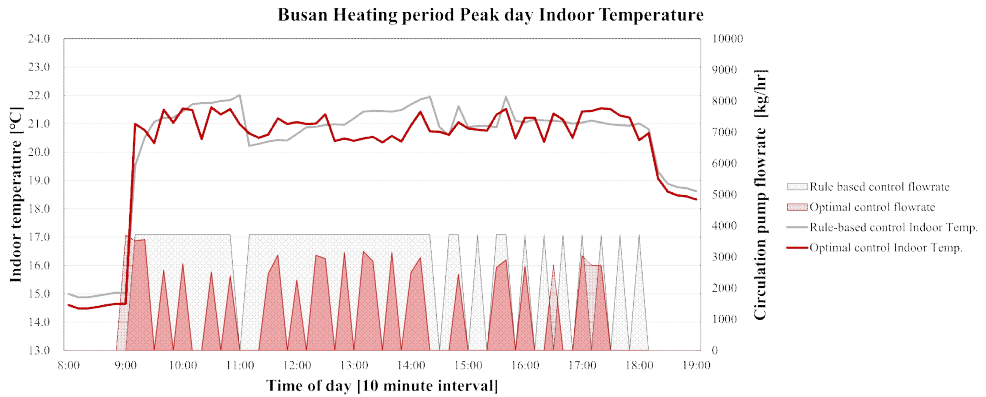


Fig. 38 부산 난방기간 Peak day 중 실내온도 및 제어 유량

냉방기간 중 최적 제어의 제어 예측정확도 CV(RMSE)는 축열조 온도 제어 1.25%, 실내온도 제어는 0.88%로 높은 성능이 나타났다. 또한, 제어 안정성을

보기 위한 지표인 MAE, CV(RMSE)는 축열조 온도 제어는  $0.13^{\circ}\text{C}$ , 2.31%, 실내온도 제어는  $0.09^{\circ}\text{C}$ , 1.93%로 외기 환경과 시스템 용량이 변경된 조건에서 난방기간 보다 높은 적응성을 보였다.

냉방기간 Typical day 축열조 온도 제어는 규칙기반 제어에서 이전날 가동종료 시점 축열조 온도의 영향으로 09:00에 이미 setpoint를 만족하여 이후 10:00부터 다시 가동된다. 또한, 최적 제어는 축열조 setpoint인  $10^{\circ}\text{C}$  도달을 위해 09:00부터 가동되어 총 4.66시간으로 규칙기반 제어 대비 약 1.50시간을 더 가동된 것을 확인하였다. 최적 제어알고리즘 적용 시 규칙기반 제어 대비 보다 긴 시간으로 가동되지만 최대오차  $1.2^{\circ}\text{C}$ 로 최대 오차가  $2.4^{\circ}\text{C}$ 인 규칙기반 제어 보다 안정적인 제어 성능을 확인하였다.

Typical day 실내온도 제어의 경우 최적 제어알고리즘 가동 시 실내 setpoint에 먼저 도달하여 최대오차  $0.4^{\circ}\text{C}$ 를 보이며 setpoint에 근접하게 온도를 유지한다. 또한, 규칙기반 제어는 가동시간 5.66시간, 최적 제어 3.33 시간으로 최적 제어 시 약 2시간 적은 가동시간을 보였다.

냉방기간 Peak day 축열조 온도 제어는 <Fig.38>과 같으며, 최적 제어 시 규칙 제어보다 먼저 setpoint에 도달한다. 최적 제어는 최대 오차  $1.3^{\circ}\text{C}$ 로 약 3.17시간 가동되었으며, 규칙기반 제어는 7.50시간 가동되어 재실시간 중 대부분의 시간동안 가동된 것을 확인하였다.

Peak day 실내온도 제어 시 높은 외부온도로 인한 냉방 부하가 높아져 규칙기반 제어는 실내온도 유지를 위해 09:00부터 18:00까지 재실 시간 중 가동 정지 없이 가동된다. 또한, 최대 오차  $1.20^{\circ}\text{C}$ 로 최적 제어의 최대 오차  $0.73^{\circ}\text{C}$  보다 낮은 제어 정확성을 나타냈다.



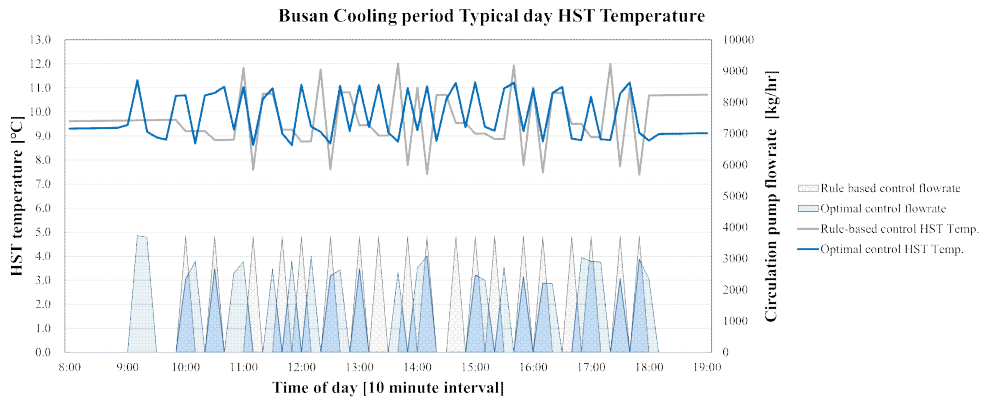


Fig. 39 부산 냉방기간 Typical day 중 축열조 온도 및 제어 유량

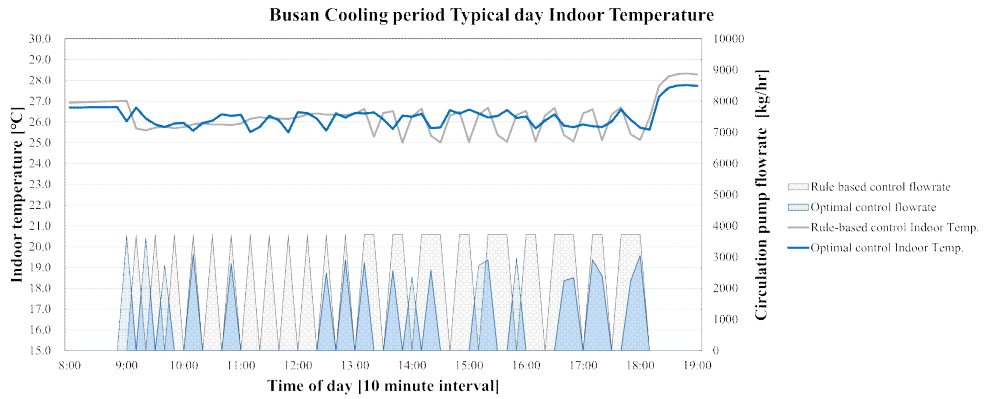


Fig. 40 부산 냉방기간 Typical day 중 실내온도 및 제어 유량

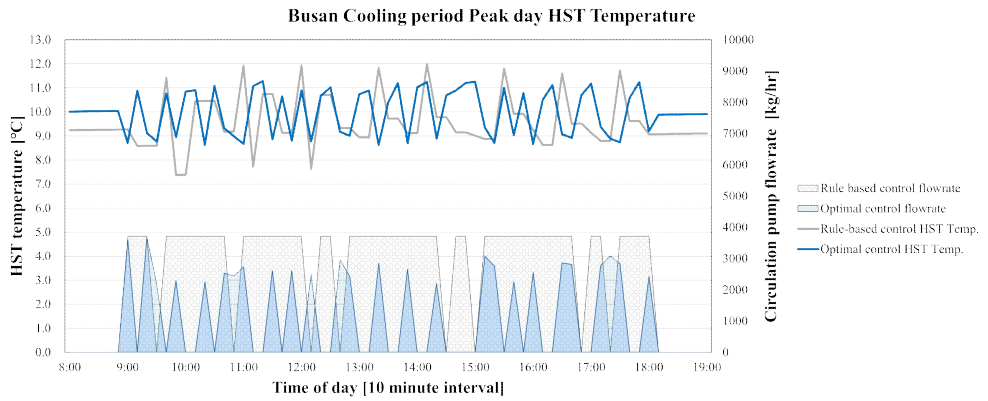


Fig. 41 부산 냉방기간 Peak day 중 축열조 온도 및 제어 유량

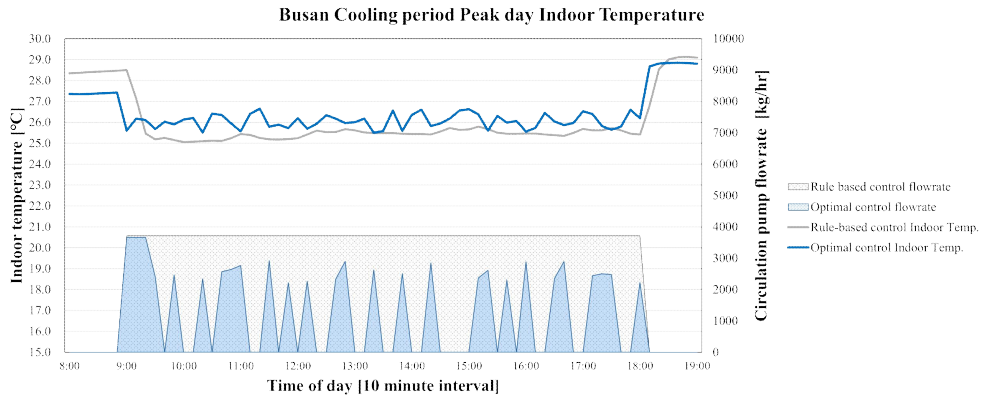


Fig. 42 부산 냉방기간 Peak day 중 실내온도 및 제어 유량

Table 17 부산 피크부하에 따른 시스템 용량 변화

컴포넌트	정보	입력값
Air Source Heat Pump	난방 용량	17.565 kW
	난방 전력 소비량	4.97 kW
	냉방 용량	15.66kW
	냉방 전력 소비량	4.09 kW
Ground Source Heat Pump	난방 용량	20.741 kW
	난방 전력 소비량	4.83 kW
	냉방 용량	18.519 kW
	냉방 전력 소비량	3.95 kW
Fan Coil Unit	유형	4-pipe
	난방 용량	19.799 kW
	냉방 용량	22.478 kW
	팬 동력	0.16 kW
	팬 효율	90%
Water Circulation Pump	정격유량	3720 kg/hr
	유량 가변 범위	50~100%
	정격 전력소비량	0.165 kW
	전력 가변 범위	50~100%

Table. 18 부산 제어방법에 따른 축열조 온도 제어 성능지표

구 분	난방기간		냉방기간	
	On/Off	최적 제어	On/Off	최적 제어
예측정확도 CV(RMSE) [%]	-	1.25	-	0.88
Max (+) error [°C]	2.09	0.79	2.01	1.02
Max (-) error [°C]	-2.00	-1.11	-2.10	-1.05
MAE [°C]	0.68	0.15	1.00	0.09
NMBE [%]	-0.9673	-0.0044	0.9472	0.0741
CV(RMSE) [%]	2.19	0.97	2.92	2.31

Table. 19 부산 제어방법에 따른 실내온도 제어 성능지표

구 분	난방기간		냉방기간	
	On/Off	최적 제어	On/Off	최적 제어
예측정확도 CV(RMSE) [%]	-	0.91	-	0.64
Max (+) error [°C]	1.02	0.63	1.20	0.71
Max (-) error [°C]	-1.03	-0.60	-1.00	-1.11
MAE [°C]	0.46	0.15	0.52	0.13
NMBE [%]	-0.9468	-0.0044	0.5666	-0.0017
CV(RMSE) [%]	3.89	3.73	2.92	1.93

(2) 에너지 소비량 분석

최적 제어알고리즘 적응성 평가를 위해 외기 환경 조건 변화에 따른 제어 시 발생한 에너지 소비량은 다음 <Fig. 43>과 같다. 또한, 규칙기반 제어 대비 최적 제어의 시스템 요소별 에너지 소비량 및 가동 시간 변화는 다음 <Table. 120>, <Table. 21>과 같다.

연간 규칙기반 제어의 냉난방 에너지 소비량은 4151.8 kWh로 난방과 냉방기간 에너지 소비량은 각각 1497.8 kWh, 2654.0 kWh이다. 최적 제어 시 연간 냉난방 에너지 소비량은 4102.6 kWh이며, 난방 에너지 소비량 1659.4 kWh, 냉방 에너지 소비량 2443.2 kWh로 두 제어 방식 모두 냉방 가동 시 난방가동 보다 높은 에너지 소비량을 보였다. 이는 난방기간 특히 11월에 높은 외기 온도로 인한 난방 부하 감소로 인한 것으로 판단된다. 규칙기반 제어와 최적 제어 냉난방 기간 각각 에너지 소비량을 비교해본 결과 난방기간은 최적 제어에서 약 161.6 kWh가 더

소비되었으며, 냉방기간에서는 약 210.8 kWh 감소된 에너지 소비량을 확인하였다. 이는 앞선 서울의 제어 환경과 같이 난방기간 중 규칙기반 제어 시 난방 부하 절감으로 인한 축열조 및 실내온도가 유지됨에 따라 시스템 가동이 정지하지만 최적 제어의 경우 지속적인 온도 제어를 유지하기 위하여 제어를 실시하는 경향을 보인 이유로 판단된다. 이와 같은 이유로 서울과 부산 두 환경 조건 모두 축열조 온도 제어를 위한 열원 측 순환펌프와 히트펌프 및 실내온도 제어를 위한 부하 측 순환펌프, FCU 가동시간 모두 증가하였다.

냉방기간의 경우 최적 제어알고리즘을 통한 제어 시 규칙기반 제어 대비 약 7.94%의 절감 효과를 보이며 에너지 소비량 절감 측면에서 우수한 것으로 나타났다. 또한, 서울 환경과 유사하게 축열조 온도 제어를 위한 열원 측 순환펌프 및 히트펌프와 실내온도 제어를 위한 순환펌프 모두 에너지 소비량은 변유량 제어를 통해 절감됨을 확인하였다. 그러나 FCU의 경우 고정된 정격 출력으로 제어되며 가동시간 증가에 따라 에너지 소비량이 증가한 것으로 판단된다.

부산의 외기 환경 조건에서 최적 제어알고리즘 적용 시 규칙기반 제어 대비 난방 에너지는 약 10.80% 증가, 냉방 에너지 7.94% 감소하였다. 이는 연중 에너지 소비량 기준으로 규칙기반 제어 대비 약 1.19% 감소하며 최적 제어알고리즘을 통한 냉난방 시스템 가동 시 규칙기반 제어 대비 우수한 성능을 보임을 의미한다.

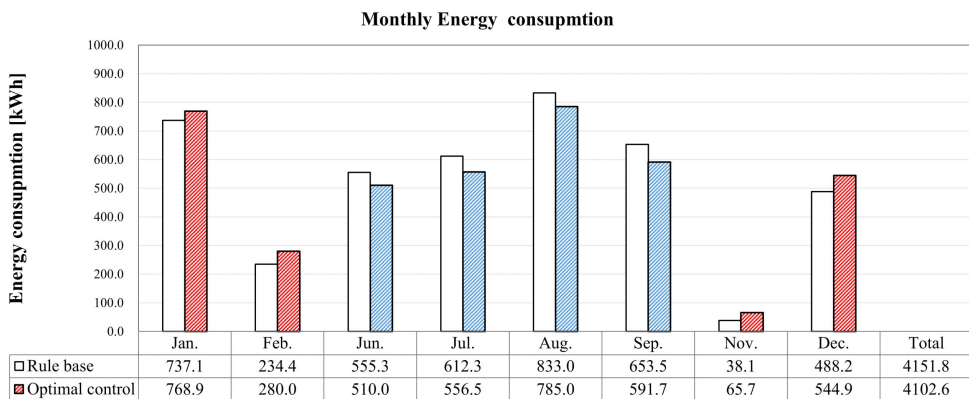


Fig. 43 외기 환경 변화에 따른 월별 에너지 소비량

Table. 20 부산 시스템 요소별 On/Off 대비 에너지 소비량 변화 [kWh]

구 분 (기간/월)		시스템 요소				
		히트펌프	축열/축냉 순환수 펌프	냉난방 순환수 펌프	FCU 팬	합계
난방 기간	Jan.	+ 6.46	+ 5.62	+ 4.54	+ 15.20	+ 31.83
	Feb.	+ 27.41	+ 3.48	+ 5.03	+ 9.69	+ 45.61
	Nov.	+ 15.65	+ 1.37	+ 1.87	+ 8.68	+ 27.56
	Dec.	+ 33.13	+ 8.99	+ 6.19	+ 7.53	+ 56.66
냉방 기간	Jun.	- 47.18	- 2.24	- 4.17	+ 8.32	- 45.27
	Jul.	- 52.47	- 2.58	- 6.86	+ 6.10	- 55.81
	Aug.	- 39.04	- 3.82	- 9.83	+ 4.68	- 48.02
	Sep.	- 58.79	- 3.75	- 6.72	+ 7.47	- 61.80
합계		- 114.01	+ 7.06	- 9.95	+ 67.67	- 49.24

Table 21 부산 시스템 요소별 가동시간 [Hour]

구 분	난방기간		냉방기간	
	On/Off 제어	최적 제어	On/Off 제어	최적 제어
히트펌프	208.7	231.4 (+10.9%)	617.2	559.2 (-9.4%)
축열/축냉 순환수 펌프	208.7	231.4 (+10.9%)	617.2	559.2 (-9.4%)
냉난방 순환수 펌프	416.2	632.3 (+51.9%)	748.8	908.2 (+21.3%)
FCU 팬	416.2	632.3 (+51.9%)	748.8	908.2 (+21.3%)

## 5.3 소결

본 장에서는 개발된 축열조 온도 예측모델, 에너지 소비량 예측모델, 실내온도 예측모델의 성능평가를 진행하였다. 이후 이를 적용한 최적 제어알고리즘의 제어 성능평가 및 에너지 소비량 분석과 적응성을 평가하였다.

### (1) 예측모델 성능평가

예측모델 성능평가는 통계 지표인  $R^2$ ,  $CV(RMSE)$ , MAE를 사용하여 평가를 진행하였다. 시험 데이터에 대한  $R^2$ 는 모두 1에 근접한 결과를 보이며 실제값과 예측값 간의 높은 상관관계를 보였다. 실제값과 예측값의 예측 정확도를 평가하는  $CV(RMSE)$ 는 모든 예측모델에서 ASHRAE Guideline 14에서 제시한 30%를 만족하는 결과를 보였으며, 예측 정확도는 난방기간보다 냉방기간에서 더 높은 정확도 확인하였다.

### (2) 최적 제어알고리즘 성능평가

서울 기후의 Base model에서는 규칙기반 제어, 비적응형 제어알고리즘, 최적 제어알고리즘 간의 축열조 및 실내온도 제어 결과를 비교·분석하였다. 난방기간 축열조 온도 예측 정확도  $CV(RMSE)$ 는 비적응형 제어 0.91%, 최적 제어 0.75%, 냉방 기간은 각각 1.26%, 0.98%로 높은 정확도를 확인하였다. 또한, 난방기간 실내온도 제어의 경우 비적응형 제어와 최적 제어는 각각 0.84%, 0.72%, 냉방기간 0.88%, 0.56%로 축열조 및 실내온도 제어 냉난방 가동이 진행됨에 따라 실시간 학습을 통해 정확도가 향상됨을 확인하였다.

각 제어 방식에 따른 제어 안정성은 난방기간 축열조 온도 제어 시 규칙기반 제어 4.02%, 비적응형 제어 1.08%, 최적 제어 0.93%이며, 냉방기간에서 각각 5.36%, 1.66%, 1.41%로 최적 제어 시 가장 높은 성능을 확인하였다. 실내온도 제어 시 규칙기반 제어, 비적응형 제어, 최적 제어의 제어 정확도  $CV(RMSE)$ 는

각각 난방기간 4.68%, 1.84%, 0.86%, 냉방기간 2.41%, 2.64%, 1.12%로 제어 과정 중 재학습 과정을 통해 제어성능이 향상되는 것으로 분석되었다.

연간 냉난방 에너지 소비량을 비적응형 제어 5082.4 kWh, 규칙기반 제어 4995.9 kWh, 최적 제어 4911.6 kWh 순으로 확인되었다. 최적 제어 시 난방에너지는 규칙기반 제어 대비 약 7.75% 증가하였으나, 냉방에너지가 약 6.05% 절감되었다. 이를 통해 연간 냉난방 에너지는 약 1.69% 절감효과를 확인하였다.

### (3) 최적 제어알고리즘 적응성 평가

최적 제어알고리즘의 적응성 평가를 위해 기후와 시스템 용량을 변경하여 그 결과를 규칙기반 제어와 비교·분석을 진행하였다. 최적 제어알고리즘의 축열조 및 실내온도 예측 정확도 CV(RMSE)는 각각 난방기간 축열조 온도 예측 시 1.25%, 0.91%이며 냉방기간의 경우 0.88%, 0.64%로 높은 예측 정확도를 나타냈다.

축열조 온도 제어 성능의 경우 난방기간 규칙기반 제어는 2.19%, 최적 제어 0.97%이며, 냉방기간 2.92%, 2.31%로 최적 제어 시 setpoint온도에 보다 더 근접한 온도로 제어되는 것을 보였다. 실내온도 제어 시 제어 성능은 규칙기반 제어 난방기간 3.89%, 냉방기간 2.92%, 최적 제어 난방기간 3.73%, 1.93%로 규칙기반 제어 대비 향상된 성능을 보였다.

에너지 소비량의 경우 앞서 서울 기후 조건과 유사하게 난방가동 시 최적 제어알고리즘은 규칙기반 제어 대비 약 10.80% 증가하였으나 냉방 에너지 7.94% 감소하여 총 49.2 kWh 절감되며 약 1.19% 절감을 확인하였다.

위 결과와 같이 최적 제어알고리즘 적용 시 규칙기반 제어알고리즘 대비 높은 제어 안정성 및 에너지 소비량 절감 성능이 우수함을 확인하였다. 또한, 기후 및 시스템 용량 변화에도 실시간 재학습을 통해 최적 제어알고리즘은 적응성을 갖으며 우수한 제어 안정성을 보였지만 난방가동 시 에너지 소비량이 다소 증가함이 확인되어 이를 위한 추가적인 제어 경계 조건 설정이 필요할 것으로 사료된다.



## 제 6 장 결론

최근 전세계적으로 탄소중립을 선언하며 건물 에너지 절감을 수요가 증가함에 따라 제로에너지 빌딩 구현을 위한 신재생에너지 및 고효율 설비시스템 도입이 추진되고 있다. 이중 다중열원 히트펌프 시스템은 기존 단일열원 히트펌프의 단점을 추가 열원 결합을 통해 보완하기 위해 개발된 시스템이다. 또한, 신재생에너지 및 효율적인 열원 추가하여 기존 시스템 대비 에너지 효율 향상이 가능하여 제로에너지 빌딩 구현을 위한 핵심 기술로 평가된다. 그러나 복수의 설비시스템 결합으로 인한 높은 설치 비용과 복잡한 설비 요소로 인해 효과적인 제어가 어려워 효율적인 제어 방안이 필요한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 태양광/열 패널, 공기열원 히트펌프, 지중열원 히트펌프 및 축열조로 구성된 다중열원 히트펌프를 제시하며, 해당 시스템에 적용돼 실내외 환경 변화에 대응하여 최적 열원 선택 및 실내온도 제공을 위한 예측모델을 개발하였다. 또한, 개발된 예측모델을 내재하여 에너지 소비량 절감이 가능한 최적 제어알고리즘을 개발하고자 하였다.

### (1) 예측모델 성능평가

개발된 예측모델은 크게 3종류로 축열조 온도 예측모델, 에너지 소비량 예측모델, 실내온도 예측모델이며, 각 열원별 냉난방 기간에 따라 총 12개 모델이 개발되었다. 예측모델은 변수 및 환경변화에 대한 우수한 성능을 보이는 인공신경망을 기반으로 개발되었으며, 다중열원 히트펌프 시스템의 각 열원 및 부하 측 순환펌프 유량 제어를 위해 환경 변수와 총 21단계의 유량 시나리오를 학습하고 베이지안 최적화를 통해 최대 성능 및 최적 구조를 도출하였다. 예측모델 성능평가를 위해 통계지표인 R<sup>2</sup>, NMBE, CV(RMSE), MAE를 사용하며 개발된 예측모델 모두 ASHRAE Guideline 14 권장 기준을 만족하는 성능을 보였다.

## (2) 최적 제어알고리즘 성능평가

최적 제어알고리즘의 성능평가를 위해 앞서 구축된 Base model에 적용 후 규칙기반 제어알고리즘, 재학습 과정을 제외한 비적응형 제어알고리즘 간의 축열조 및 실내온도 제어 성능과 에너지 소비량을 비교·분석하였다.

최적 제어알고리즘 제어 시 예측 정확도 CV(RMSE) 및 제어 안정성 CV(RMSE), MAE는 난방기간 축열조 온도 제어 시 0.75%, 1.08%, 0.40°C, 냉방기간 0.98%, 1.41%, 0.61°C이다. 실내온도 제어의 경우 난방기간 0.72%, 0.86%, 0.12°C이며 냉방기간은 0.56%, 1.12% 0.20°C로 냉난방 기간 모두 다른 제어 방식 보다 우수한 성능을 보였다. 또한, 최적 제어알고리즘은 비적응형 제어알고리즘 보다 성능이 향상되는 모습을 보이며 재학습 과정으로 예측 정확도 및 제어 안정성이 향상에 영향을 미쳤다고 판단된다.

에너지 소비량의 경우 최적 제어알고리즘에서 가장 적은 에너지 소비량을 확인하였다. 최적 제어 시 기존 규칙기반 제어 대비 난방에너지는 +163.4 kWh로 약 7.74% 증가하였지만 냉방에너지 -247.7 kWh로 약 6.05% 감소하여 총 -84.3 kWh 감소하여 약 1.69%의 절감을 확인하였다.

## (3) 최적 제어알고리즘 적응성 평가

최적 제어알고리즘의 적응성 평가를 위해 대상 기후 및 변경된 기후의 부하를 고려하여 시스템 용량을 변경하였다. 이후 규칙기반 제어알고리즘과 제어 성능 및 에너지 소비량을 비교·분석하였다.

기후대와 시스템 용량을 변경한 최적 제어알고리즘의 예측 정확도 CV(RMSE) 및 제어 안정성 CV(RMSE), MAE는 난방기간 축열조 온도 제어 시 1.25%, 0.97%, 0.15°C이며 냉방기간은 0.88%, 2.31%, 0.09°C이다. 또한, 실내온도 제어의 경우 난방기간 0.91%, 3.73%, 0.15°C, 냉방기간 0.64%, 1.93%, 0.13°C로 축열조 온도 및 실내온도 제어 모두 규칙기반 제어 알고리즘 대비 높은 제어 성능을 보였다. 이를 통해 최적 제어알고리즘의 적응성이 우수함을 확인하였다.

에너지 소비량의 경우 최적 제어 시 난방기간 +161.6 kWh로 약 10.79% 증가하였으며 냉방기간 -210.9 kWh로 약 7.95% 감소하여 총 49.2 kWh인 1.19%의 에너지 소비량 절감 효과를 확인하였다.

다중열원 히트펌프 시스템 제어 시 최적 제어알고리즘은 기존 규칙기반 제어알고리즘 대비 축열조 및 실내온도 제어 성능 향상이 가능함을 확인하였다. 또한, 실시간 재학습을 통해 새로운 환경 조건 및 시스템 용량 변화에 대응이 가능하며, 최적 열원 선정 및 순환펌프 유량 제어와 부하 측 순환펌프 유량을 유동적인 제어를 통해 에너지 소비량 절감이 가능한 것으로 판단되었다.

그러나 난방에너지 소비량은 최적 제어알고리즘 적용 시 규칙기반 제어알고리즘 대비 증가하였다. 이는 deadband 범위 내 ON/OFF 제어되는 규칙기반 제어와 달리 최적 제어는 setpoint를 최대한 유지하기 위해 가동되어 가동 중지 조건에 도달하기 이전 과난방 구간에 의한 것으로 판단된다. 이를 해결하기 위해 최적 제어알고리즘 내 가동 중지 조건을 재설정할 필요할 것으로 판단되었다. 또한, 냉난방 부하가 발생하지 않는 시점에서는 최소 유량에 의한 제어보다 시스템 가동을 정지하는 것이 더 효율적일 것으로 판단되었다.

본 연구에서는 시뮬레이션 환경 내 시스템 구축 및 성능평가를 진행하였다. 시뮬레이션의 경우 시스템 및 실내외 조건 등과 같은 주요 요소가 수학적 모델링으로 구성되어 있다. 이로 인해 이상적인 조건이 아닌 실제 현장에서 발생하는 외란의 영향을 반영하지 못하고 일관성을 갖는 한계가 존재한다.

따라서, 본 연구에서 개발된 최적 제어알고리즘을 실제 현장에 설치된 유사한 시스템 내 적용함으로써, 최적 제어알고리즘의 적용 성능평가가 필요할 것으로 보인다. 추가적으로 본 연구에서 제안된 다중열원 히트펌프 시스템과 동일하지 않더라도, 다수의 열원과 축열조가 결합된 시스템은 설비 요소에 따른 예측모델 입력값과 변수 수정을 통한 최적 제어알고리즘 적용이 가능할 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

### <국내문헌>

1. 국토교통부. (2014). “녹색건축물 조성 지원법”.
2. 국토교통부. (2014). “제1차 녹색건축물 기본계획”.
3. 산업통상자원부.(,2020). 그린뉴딜지원을위한신·재생에너지법령개정·시행보도자료.
4. 대한설비공학회. (2011). 설비공학 편람 제3권 냉동
5. 남유진, 채호병. (2014). 공기 및 지열 이용 Dual-Source 히트펌프 시스템의 성능실험 및 경제성 분석. 설비공학논문집, 26(5), 212-217..
6. 도규형, 최병일, 한용식, 김명배, 김태훈. (2016). 태양열/공기열 복합 집열기를 가지는 하이브리드히트펌프 시스템의 열성능에 관한 연구. 한국수소및신에너지학회논문집, 27(2), 182-191.
7. 정용대, 남유진, 여성구. (2017). 태양광열 · 지열 하이브리드 시스템의 적정 용량 설계를 위한 동적 에너지 시뮬레이션. 대한건축학회 논문집 - 구조계, 33(7), 53-61.
8. 김민지, 도성록, 최종민, 이광호. (2018). 일반공조 시스템 대비 축열조와 연동된 수직밀폐형 지열히트펌프의 냉난방 에너지 성능 및 경제성 분석. 대한건축학회 논문집 - 구조계, 34(11), 81-87.
9. 손병후. (2020). 하이브리드 지중열교환기 적용 지열 히트펌프 시스템의 난방 성능 분석. 한국지열·수열에너지학회논문집, 16(3), 8-16.
10. 박시훈, 김종현, 민준기. (2021). 지열원과 수열원을 이용한 하이브리드 히트펌프 시스템의 에너지 성능 비교·분석 연구. 한국지열·수열에너지학회논문집, 17(4), 59-67.
11. 임효재, 손병후. (2021). 이중 열원 히트펌프 시스템의 난방 성능과 운전 특성. 한국지열·수열에너지학회논문집, 17(2), 30-41.
12. 채수원, 배상무, 남유진. (2022). 공기열원 히트펌프 융복합시스템의 최적제어를 위한 해석적 연구: 부하율 및 펌프유량에 따른 시스템 성능검토. 설비공학논문집, 34(11), 523-532.
13. 임희원, 이왕제, 신우철. (2023). TRNSYS을 이용한 온실 적용 태양열 연계 지열히트펌프 융복합 난방시스템 열성능 해석. 설비공학논문집, 35(6), 286-298.
14. 주홍진, 안영섭, 이경호. (2023). 태양광열 복합 모듈을 활용한 공기열원

- 히트펌프 실외기 가열 시스템 개발. 한국태양에너지학회 논문집, 43(6), 163-180.
15. 강은철, 이의준, 민경천. (2014). 양방향 설정온도 제어에 따른 지중연계 히트펌프 시스템의 에너지 절감량 평가 연구. 한국지열·수열에너지학회논문집, 10(2), 7-12.
  16. 이두영, 최재호, 민경천, 손병후. (2016). 제어 방식에 따른 지열 히트펌프 시스템의 성능 시뮬레이션. 대한기계학회 논문집 C 권, 4(1), 35-41.
  17. 김동준, 강병하, 장영수. (2018). 부하 대응 제어방식을 적용한 축열식 히트펌프시스템의 성능 해석. 설비공학논문집, 30(3), 130-142.
  18. 신지현, 최동희, 조영흠. (2018). 지열시스템 순환펌프 변유량 제어를 활용한 운영 방안 개발. 한국건축친환경설비학회 논문집, 12(5), 510-518.
  19. 고유진, 박시훈, 민준기. (2020). 복합열원 히트펌프 최적 제어를 위한 열원에 따른 히트펌프 성능 및 에너지 소요량 패턴 비교. 한국지열·수열에너지학회논문집, 16(4), 31-38.
  20. 조혜운, 최영재, 최은지, 김태원, 문진우. (2021). 시뮬레이션을 통한 융복합 히트펌프 시스템의 적용형 예측제어 알고리즘 성능평가. KIEAE Journal, 21(6), 55-62, 10.12813/kieae.2021.21.6.055
  21. 배상무, 채호병, 오진환, 채수원, 문진우, 남유진. (2022). 심층신경망 기반 태양광열-공기열원 히트펌프 융복합 시스템의 성능예측모델 개발. 설비공학논문집, 34(8), 390-398, 10.6110/KJACR.2022.34.8.390
  22. 박종갑, 김선혜, 신정수. (2023). 열원 버퍼 탱크와 인버터 펌프를 이용하여 지중 순환수 유량 및 열원 입구온도를 제어하는 지열 히트펌프 시스템. 설비공학논문집, 35(8), 412-420, 10.6110/KJACR.2023.35.8.412
  23. 권영식, 배상무, 남유진, 윤린, 박창용, 이호성. (2021). 동적 에너지 시뮬레이션을 이용한 수열원, 지열원 및 공기열원 히트펌프 시스템의 성능 비교·분석. 한국태양에너지학회 논문집, 41(4), 1-12.

## <국외문헌>

1. IPCC. (2021) Climate Change 2021 : The Physical Science Basis, p.6.
2. UNFCCC. (2015). Paris agreement (Vol. FCCC/CP/20). Bonn.
3. International Energy Agency. (2023). World Energy Outlook 2023. Paris: IEA.
4. US. Energy Information Administration (IEA). (2016). International Energy Outlook.
5. IEA. (2022). Technology and Innovation Pathways for Zero-carbon-ready Buildings by 2030.
6. U.S. Environmental Protection Agency. (2015). Fact Sheet: Clean Power Plan - Key Changes and Improvements.
7. EU. (2009). Renewable Energy Directive.
8. Rumsey, P., Le Garrec, J., Levas, A. (2022). How Building Decarbonization Can Transform HVAC. ASHRAE Journal.
9. Xu, Z., Li, H., Xu, W., Shao, S., Wang, Z., Gou, X., ... & Li, J. (2022). Investigation on the efficiency degradation characterization of low ambient temperature air source heat pump under partial load operation. International Journal of Refrigeration, 133, 99-110.
10. IEA HPT Annex 49. (2019). Hybrid Heat Pumps Final Report. Report no. HPT-AN45-1.
11. Element energy. (2017). Hybrid Heat Pumps, Final report. Department for Business, Energy & Industrial Strategy.
12. Kim, D., Lee, J., Do, S., Mago, P. J., Lee, K. H., & Cho, H. (2022). Energy modeling and model predictive control for HVAC in buildings: A review of current research trends. Energies, 15(19), 7231.
13. Zhang, Z., Zhang, R., & Zhang, C. (2018). Comparative study of model-based and model-free reinforcement learning for HVAC systems. Energy and Buildings, 177, 310-320.
14. Li, Y., O'Neill, Z., Zhang, L., Chen, J., Im, P., & DeGraw, J. (2021). Grey-box modeling and application for building energy simulations-A

- critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 146, 111174.
15. Nam, Y., Ooka, R., & Shiba, Y. (2010). Development of dual-source hybrid heat pump system using groundwater and air. *Energy and Buildings*, 42(6), 909–916.
  16. Corberán, J. M., Cazorla-Marín, A., Marchante-Avellaneda, J., & Montagud, C. (2018). Dual source heat pump, a high efficiency and cost-effective alternative for heating, cooling and DHW production. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 13(2), 161–176.
  17. Zheng, C., You, S., Zhang, H., Liu, Z., Zheng, W., Wu, Z., & Fan, M. (2020). Defrosting performance improvement of air-source heat pump combined refrigerant direct-condensation radiant floor heating system with phase change material. *Energies*, 13(18), 4594.
  18. Pardo, N., Montero, Á., Martos, J., & Urchueguía, J. F. (2010). Optimization of hybrid - ground coupled and air source - heat pump systems in combination with thermal storage. *Applied Thermal Engineering*, 30(8–9), 1073–1077.
  19. Sporleder, M., Rath, M., & Ragwitz, M. (2022). Design optimization of district heating systems: A review. *Frontiers in Energy Research*, 10, 971912.
  20. Sarbu, I., & Sebarchievici, C. (2018). A comprehensive review of thermal energy storage. *Sustainability*, 10(1), 191.
  21. Boshell, F., Salgado, A., Goussous, N., Ravishankar, M., Richards, O., Walker, J., ... & Buchanan, F. (2020). Innovation outlook: Thermal energy storage.
  22. Le, K. X., Huang, M. J., Shah, N., Wilson, C., Mac Artain, P., Byrne, R., & Hewitt, N. J. (2019). High temperature air source heat pump coupled with thermal energy storage: Comparative performances and retrofit analysis. *Energy Procedia*, 158, 3878–3885.
  23. Wang, Z., Zheng, Y., Wang, F., Song, M., & Ma, Z. (2019). Study on performance evaluation of CO<sub>2</sub> heat pump system integrated with thermal energy storage for space heating. *Energy Procedia*, 158, 1380–1387.

24. Department for Business, Energy & Industrial Strategy. (2016). Evidence gathering - Hybrid solar photovoltaic thermal panels (PVT).
25. International Energy Agency. (2023). Heat pumps: Tracking clean energy progress.
26. Chargui, R., & Sammouda, H. (2014). Modeling of a residential house coupled with a dual source heat pump using TRNSYS software. *Energy Conversion and Management*, 81, 384-399.
27. Wang, G., Quan, Z., Zhao, Y., Sun, C., Deng, Y., & Tong, J. (2015). Experimental study on a novel PV/T air dual-heat-source composite heat pump hot water system. *Energy and Buildings*, 108, 175-184.
28. Deng, W., & Yu, J. (2016). Simulation analysis on dynamic performance of a combined solar/air dual source heat pump water heater. *Energy Conversion and Management*, 120, 378-387.
29. Cai, J., Quan, Z., Li, T., Hou, L., Zhao, Y., & Yao, M. (2017). Performance study of a novel hybrid solar PV/T ground-source heat pump system. *Procedia Engineering*, 205, 1642-1649.
30. Dong, X., Tian, Q., & Li, Z. (2017). Experimental investigation on heating performance of solar integrated air source heat pump. *Applied thermal engineering*, 123, 1013-1020.
31. Grossi, I., Dongellini, M., Piazzzi, A., & Morini, G. L. (2018). Dynamic modelling and energy performance analysis of an innovative dual-source heat pump system. *Applied Thermal Engineering*, 142, 745-759.
32. Nouri, G., Noorollahi, Y., & Yousefi, H. (2019). Solar assisted ground source heat pump systems - A review. *Applied Thermal Engineering*, 163, 114351.
33. Abu-Rumman, M., Hamdan, M., & Ayadi, O. (2020). Performance enhancement of a photovoltaic thermal (PVT) and ground-source heat pump system. *Geothermics*, 85, 101809.
34. Qu, M., Yan, X., Wang, H., Hei, Y., Liu, H., & Li, Z. (2022). Energy, exergy, economic and environmental analysis of photovoltaic/thermal integrated water



- source heat pump water heater. *Renewable Energy*, 194, 1084–1097.
35. Gang, W., Wang, J., & Wang, S. (2014). Performance analysis of hybrid ground source heat pump systems based on ANN predictive control. *Applied energy*, 136, 1138–1144.
  36. Edwards, K. C., & Finn, D. P. (2015). Generalised water flow rate control strategy for optimal part load operation of ground source heat pump systems. *applied energy*, 150, 50–60.
  37. Jung, Y. J., Kim, H. J., Choi, B. E., Jo, J. H., & Cho, Y. H. (2016). A study on the efficiency improvement of multi-geothermal heat pump systems in Korea using coefficient of performance. *Energies*, 9(5), 356.
  38. Hu, P., Hu, Q., Lin, Y., Yang, W., & Xing, L. (2017). Energy and exergy analysis of a ground source heat pump system for a public building in Wuhan, China under different control strategies. *Energy and Buildings*, 152, 301–312.
  39. Xia, L., Ma, Z., Kokogiannakis, G., Wang, S., & Gong, X. (2018). A model-based optimal control strategy for ground source heat pump systems with integrated solar photovoltaic thermal collectors. *Applied energy*, 228, 1399–1412.
  40. Weeratunge, H., Narsilio, G., De Hoog, J., Dunstall, S., & Halgamuge, S. (2018). Model predictive control for a solar assisted ground source heat pump system. *Energy*, 152, 974–984.
  41. Bae, S., Nam, Y., & da Cunha, I. (2019). Economic solution of the tri-generation system using photovoltaic-thermal and ground source heat pump for zero energy building (ZEB) realization. *Energies*, 12(17), 3304.
  42. Bechtel, S., Rafei-Tabrizi, S., Scholzen, F., Hadji-Minaglou, J. R., & Maas, S. (2020). Influence of thermal energy storage and heat pump parametrization for demand-side-management in a nearly-zero-energy-building using model predictive control. *Energy and Buildings*, 226, 110364.
  43. Jung, Y. G., Lee, K. H., Park, B. R., Kim, T. W., & Moon, J. W. (2024).

- Development and performance evaluation of intelligent algorithm for optimal control of a hybrid heat pump system during the cooling season. *Energy and Buildings*, 306, 113934.
44. Beck et al. (2018). Present and future Köppen–Geiger climate classification maps at 1-km resolution., *Scientific data*, 5(1), 2018, pp.1–12.
  45. ASHRAE. (2021). *Climatic Design Information. ASHRAE Handbook – Fundamentals*.
  46. ASHRAE. (2010). *Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings. ASHRAE 90.1–2010*.
  47. ASHRAE, (2013). *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. ASHRAE 55–2013*.
  48. ASHRAE. (2013). *Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. ASHRAE 62.1–2013*.
  49. TRNSYS18 17. (2012). *HVAC Library Mathematical Reference; TESS Libs 17: Milwaukee, WI, USA, Volume 6*.
  50. Cho, H. U., Nam, Y., Choi, E. J., Choi, Y. J., Kim, H., Bae, S., & Moon, J. W. (2021). Comparative analysis of the optimized ANN, SVM, and tree ensemble models using Bayesian optimization for predicting GSHP COP. *Journal of Building Engineering*, 44, 103411.
  51. Aurelien Geron. (2017). *Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn & TensorFlow*, O'Reilly.
  52. Orr, G. B., & Müller, K. R. (Eds.). (1998). *Neural networks: tricks of the trade*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
  53. Safa, A. A., Fung, A. S., & Kumar, R. (2015). Comparative thermal performances of a ground source heat pump and a variable capacity air source heat pump systems for sustainable houses. *Applied Thermal Engineering*, 81, 279–287.
  54. ASHRAE. (2014). *ASHRAE Guideline 14. Measurement of Energy and Demand Savings*.

## <Web Site>

1. 기획재정부. (2021.12). <https://www.moef.go.kr/>
2. 산업통산자원부. (2021). 고시 제2016-127호. <http://www.motie.go.kr/www/main.do>
3. DOE. (2023). <https://www.energy.gov/energysaver/>.
4. IEA. (2023) <https://www.iea.org/reports/>
5. Transient system simulation tool, TRNSYS. (2021). <http://www.trnsys.com/>
6. MathWork. (2021). [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com)
7. 기상청. (2023). 한국 지역별 기후 특성, <https://www.weather.go.kr/>
8. 국가법령정보센터. (2021). 건축물의에너지절약설계기준. <https://www.law.go.kr/>
9. Carrier Air conditioner Engineering Product Data Book. (2019). <http://www.carrier.co.kr/>
10. Water-Cooled and Condenserless Liquid Chillers Water-Sourced Heat Pumps Product Data Book. (2020). <http://www.carrier.co.kr/>
11. Carrier Air conditioner Engineering Product Data Book. (2023). <http://www.carrier.co.kr/>
12. HANIL. Pump Test Report. <https://www.hanilelec.co.kr/>

## 국 문 초 록

# 냉난방 에너지 소비량 절감을 위한 다중열원 히트펌프 시스템의 최적 제어알고리즘 개발

박 동 혁  
건축학과 건축환경계획전공  
중앙대학교 대학원

최근 지속적인 건물 부분 에너지 소비량 증가에 따라 탄소중립 및 제로에너지 빌딩에 관심이 커지며 건물 에너지 소비량 저감을 위해 신재생에너지를 적용한 다중열원 히트펌프 기술에 대한 관심이 증가하고 있다. 다중열원 히트펌프 시스템은 구성된 설비 요소를 냉난방 가동 시 선택하여 단일열원 시스템 대비 높은 성능을 갖는다. 그러나 다양한 설비 요소의 결합으로 인하여 통합적인 제어에 어려움이 발생하며 전문가의 경험적 제어나 규칙기반 제어에 의존하고 있다. 따라서, 다중열원 히트펌프 시스템의 실내외 환경 조건 변화에 대응하여 에너지 소비량 절감이 가능한 최적 제어알고리즘을 개발하였다.

다중열원 히트펌프 시스템은 태양광/열(Photovoltaic/thermal)과 공기열원 히트펌프, 지중열원 히트펌프, 축열조로 구성되며 온도 제어는 각 열원과 연결된 순환펌프 유량제어를 통해 제어된다. 축열조는 각 열원과 연결된 순환펌프를 통해 축열하며 실내는 축열조와 FCU(Fan coil unit) 사이 순환펌프에 열을 제공받는다. 데이터 취득 및 최적 제어알고리즘 성능평가를 위해 TRNSYS를 사용하여 대상 건물 및 시스템을 모델링하였다. 개발된 예측모델은 크게 축열조 온도 예측모델, 에너지 소비량 예측모델, 실내온도 예측모델이며 각 예측모델은 냉난방 기간과 열원에 따라 총 12개 모델이 개발되었다. 개발된 예측모델은

최적화를 통해 구조 및 학습률을 도출한 결과  $R^2$ , CV(RMSE) 모두 높은 성능을 확인되었다.

개발된 예측모델은 최적 제어알고리즘에 적용되어 냉난방 가동 시 열원 선택 및 순환펌프 유량을 도출한다. 또한 예측오차를 줄이기 위해 실시간 재학습 기능을 통해 환경 변수 변화에 대응한다.

최적 제어알고리즘 성능평가 및 적응성 평가를 위해 규칙기반 제어알고리즘, 비적응형 제어알고리즘과 제어 예측 정확도, 제어 안정성, 에너지 소비량을 비교·분석하였다. 축열조 온도 제어 시 제어 정확도 CV(RMSE)는 난방 0.75%, 냉방 0.98%, 제어 안정성 CV(RMSE)는 난방 0.93%, 냉방 1.41%이다. 실내온도 제어의 경우 제어 정확도는 난방 0.72%, 냉방 0.56%, 제어 안정성은 각각 0.86%, 1.12%이다. 에너지 소비량은 난방기간 제어알고리즘 내 경계조건으로 인한 가동시간 증가로 약 7.75% 증가하였으며 냉방에너지는 약 6.05% 감소하여 총 에너지 소비량은 규칙기반 제어 대비 약 2.85% 절감되었다.

적응성 평가 시 최적 제어알고리즘의 축열조 예측 정확도는 난방 1.26%, 냉방 0.88이며 제어 안정성은 난방 0.97%, 냉방 2.31%로 확인되었다. 에너지 소비량은 난방에너지가 약 10.80% 증가, 냉방에너지 7.94% 감소로 총 1.19% 감소하였다.

이를 통해 다중열원 히트펌프의 실내외 환경조건 변화 시 축열조 및 실내온도 제어 성능과 적응성을 갖음을 증명하였다. 그러나 난방 제어 시 규칙기반 제어 대비 에너지 소비량이 증가하는 점과 시뮬레이션으로 진행된 연구임에 제어알고리즘 내 경계 조건 수정과 실증 실험을 통해 추가연구를 진행해야 할 것으로 판단된다..

---

**핵심어 : 다중열원 히트펌프 시스템, 최적 제어, 냉난방 에너지, 적응형 제어알고리즘**

# ABSTRACT

## Development of Optimal Control Algorithms for Multi-Source Heat Pump System to Reduce Heating and Cooling Energy Consumption

Park, Dong Hyuk

Major in Environmental Design in Architecture  
Department of Architecture and Building Science  
The Graduate School of Chung-Ang University

In response to the continuous increase in building energy consumption, there is a growing interest in carbon neutrality and zero-energy buildings, emphasizing the reduction of building energy consumption through the application of renewable energy-based multi-source heat pump technology. The multi-source heat pump system is designed to select different equipment components during heating and cooling operations, offering superior performance compared to single-source systems. However, the integration of diverse equipment components introduces challenges in unified control, often relying on empirical or rule-based control methods. Thus, an optimal control algorithm capable of reducing energy consumption by adapting to changes in indoor and outdoor environmental conditions has been developed.

The multi-source heat pump system comprises photovoltaic/thermal (PV/T), air source heat pumps (ASHP), ground source heat pumps (GSHP), and thermal storage tanks. Temperature control is managed by adjusting the flow rates of circulation pumps connected to each heat source. The thermal storage tank accumulates heat via circulation pumps

linked to each heat source, and indoor heating is provided through circulation pumps between the thermal storage tank and fan coil units (FCU). TRNSYS was used for modeling the target building and system to acquire data and evaluate the performance of the optimal control algorithm. The developed prediction models include a thermal storage tank temperature prediction model, an energy consumption prediction model, and an indoor temperature prediction model, resulting in a total of 12 models based on different heating/cooling periods and heat sources. The prediction models demonstrated high performance with satisfactory  $R^2$ , and CV(RMSE) values through optimization of structure and learning rate.

The prediction models were applied to the optimal control algorithm to determine heat source selection and circulation pump flow rates during heating and cooling operations. To minimize prediction errors, the algorithm incorporates real-time retraining to adapt to environmental variable changes. The performance and Adaptability of the optimal control algorithm were evaluated by comparing control prediction accuracy, control stability, and energy consumption with rule-based control algorithms and non-adaptive control algorithms. The control accuracy for thermal storage temperature control showed CV(RMSE) values of 0.75% for heating and 0.98% for cooling, while control stability demonstrated CV(RMSE) values of 0.93% for heating and 1.41% for cooling. For indoor temperature control, the control accuracy was 0.72% for heating and 0.56% for cooling, and control stability was 0.86% and 1.12%, respectively. Energy consumption increased by approximately 7.75% during the heating period due to extended operation times under control algorithm boundary conditions, while cooling energy consumption decreased by about 6.05%, resulting in an overall energy consumption reduction of approximately 2.85% compared to rule-based control.

Applicability evaluation indicated that the optimal control algorithm achieved thermal storage prediction accuracy of 1.26% for heating and 0.88% for cooling, with control stability values of 0.97% for heating and 2.31% for cooling. Energy consumption increased by about 10.80% for heating energy but decreased by 7.94% for cooling energy, leading to a total reduction of 1.19%. This demonstrates the system's capability in maintaining performance and applicability under varying indoor and outdoor environmental conditions. However, the increase in energy consumption during heating compared to rule-based control and the simulation-based nature of the study suggest the need for further research, including adjustments to control algorithm boundary conditions and empirical experiments.

---

**Keywords :** Hybrid heat pump system, prediction model, Optimal indoor temperature control, Adaptive control algorithm