



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](#)

공학석사학위논문

도시 에너지 저감을 위한 공동주택  
바닥복사 난방시스템의 데이터 기반  
외기보상제어 공급 온수 온도 설정

Supply Water Temperature setting for Residential  
Energy Reduction for City with Radiant Floor Heating  
Systems by Data-driven Outdoor Reset Control

2023 년 2 월

서울대학교 대학원  
건설환경공학부 스마트도시공학전공  
박 동 성

# 도시 에너지 저감을 위한 공동주택 바닥복사 난방시스템의 데이터 기반 외기보상제어 공급 온수 온도 설정

Supply Water Temperature setting for Residential  
Energy Reduction for City with Radiant Floor Heating  
Systems by Data-driven Outdoor Reset Control

지도교수 여 명 석

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2022년 10월

서울대학교 대학원

건설환경공학부 스마트도시공학전공

박 동 성

박동성의 공학석사 학위논문을 인준함

2023년 1월

위원장	권영상	인
-----	-----	---

부위원장	여명석	인
------	-----	---

위원	김희강	인
----	-----	---

## 국문 초록

세계 각국은 기후 온난화의 영향으로 이상 현상을 막기 위해 2050년까지 탄소 순 배출량을 제로로 낮추기 위한 탄소 중립계획을 발표하면서 이를 위한 계획과 방안이 중요시되고 있다. 특히 세계적으로 전체 에너지 소비의 40%가 건물에서 소비되고, 이 중 건물의 난방에너지에 27%가 소비된다. 이에 따라 탄소 배출과 건물에너지 소비를 줄이기 위한 건물에너지 시스템 모델링과 시뮬레이션 연구가 지속해서 이루어지고 있다. 따라서 건물에너지관리시스템(BEMS)의 데이터를 기반으로 건물에너지 시뮬레이션과 결합하여 건물의 실내환경 쾌적과 효율적인 에너지 관리방안을 도출하고, 나아가 도시의 지속가능한 발전을 위해 도시 건물에너지 모델링(UBEM)으로 나아가고 있다. 또한, 탄소 중립을 위한 신재생 에너지 사용이 증가하고, 지역난방에서는 4세대 지역난방 시스템으로 발전하여 저온 온수(60 ℃이하) 공급을 통해 지열 및 태양열 에너지와 같은 신재생 에너지 비중을 높이고 있다.

본 연구에서는 국내 공동주택에서 바닥복사 난방 시 탄소 배출과 에너지 소비량 저감을 위해 4세대 지역난방 시스템의 지역난방 열교환 유닛(HIU)를 통한 세대별 수집된 데이터를 기반으로 최적의 난방 공급 온수 온도 설정 방법을 제시하였다. 제안된 방법이 적용되었을 때 기존 제어방법과 비교하여 성능과 에너지 소비량을 분석하여 적절성을 판단하였다.

제안한 방법을 구축하기 위해 공동주택 국내 기준을 참고하여 EnergyPlus를 활용하여 건물 에너지 시뮬레이션 모델을 형성하고 제어방법을 적용하여 시뮬레이션 결과 분석을 통한 실효성을 판단하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 시뮬레이션 모델 설정과 바닥복사 난방의 제어 변수의 방열량을 분석하여 바닥복사 난방을 제어하기 위한 제어 변수로 공급 온수 온도를

설정하였다. 공급 온수 온도를 이용한 외기보상제의 기존 두 가지 방법인 룰 기반 방법과 시행착오 방법의 난방곡선을 도출한 후 시뮬레이션 결과를 분석하였다.

(2) 시뮬레이션 모델을 이용하여 바닥복사 난방 시 발생하는 데이터를 산포도와 특성중요도를 이용하여 System Identification에 적용할 입력 변수를 외기온도, 난방 공급 온수 온도, 일사량으로 설정하였고, 출력 변수를 실내온도로 설정하였다. 선택된 변수를 이용하여 ARX, NARX 모델의 System Identification을 진행하였으며 실내온도 예측하였고 예측 시간을 분석하였다. 이후 Data-driven 방법을 활용하여 외기보상 제어를 위한 난방곡선 도출방법으로 일정 온수 공급을 통한 단순 회귀법 두 가지와 System Identification을 통해 형성된 ARX, NARX 모델을 활용한 도출법을 제안하고 시뮬레이션하였다.

(3) 기존 난방곡선 도출법과 본 연구에서 제안한 난방곡선 도출법을 통한 외기보상제어의 시뮬레이션 결과를 분석하였다. 외기보상제어와 외기보상+개폐식 뱅뱅 제어의 시뮬레이션 결과를 통해 성능 분석과 에너지 소비량 분석을 진행하였다. 본 연구에서 제안한 방법이 성능 분석에서 실내 설정 온도 유지, 오버슈팅과 에너지 소비량에서 모두 개선된 결과를 보여 실효성이 있다고 판단되었다.

**주요어** : 바닥복사 난방, 지역난방 열교환 유닛(HIU), 외기보상 제어, Data-driven model

**학 번** : 2021-26239

## 목 차

제 1 장 서론 .....	1
1.1 연구의 배경 및 목적 .....	1
1.2 연구의 범위 및 방법 .....	3
제 2 장 바닥복사 난방 제어를 위한 이론 고찰 .....	6
2.1 개요 .....	6
2.2 바닥 복사난방 제어 방식 .....	6
2.2.1 개폐식 뱅뱅 제어 .....	8
2.2.2 외기보상 제어 .....	9
2.3 바닥복사 난방 제어를 위한 System Identification .....	11
2.3.1 System Identification .....	11
2.3.2 ARX, NARX .....	14
2.4 지역난방을 통한 바닥복사 난방 .....	15
2.4.1 지역난방 .....	15
2.4.2 국내 지역난방 제어 현황 .....	17
2.4.3 지역난방 열교환 유닛(HIU) .....	18
2.5 소결 .....	20
제 3 장 바닥복사 난방 제어방법 설정 및 기존 외기보상 제어 .....	22
3.1 개요 .....	22
3.2 시뮬레이션 모델 .....	22
3.2.1 대상 모델 개요 .....	22
3.2.2 바닥복사 난방시스템 .....	26
3.2.3 data set .....	28
3.3 공급 온수 온도 & 공급 유량에 따른 방열량 .....	29
3.3.1 공급 온수 온도에 따른 방열량 .....	29
3.3.2 공급 유량에 따른 방열량 .....	31
3.3.3 EnergyPlus 시뮬레이션 모델 비교 .....	33
3.3.4 시뮬레이션 제어인자 설정 .....	34
3.4 기존 외기보상제어를 활용한 시뮬레이션 .....	35

3.4.1 룰 기반 방법 .....	36
3.4.2 시행착오 방법 .....	38
3.5 소결 .....	41
제 4 장 Data-driven 방법을 활용한 제어 .....	43
4.1 개요 .....	43
4.2 특성선택(Feature selection) .....	43
4.2.1 산포도(Scatter plot) .....	43
4.2.2 특성 중요도(Feature importance) .....	45
4.3 System Identification .....	46
4.3.1 System Identification 변수 설정 .....	46
4.3.2 ARX .....	46
4.3.3 NARX .....	52
4.4 Data-driven 방법을 활용한 난방곡선 도출 및 시뮬레이션 .....	58
4.4.1 일정 난방 온수 온도 공급을 통한 단순 회귀법 .....	58
4.4.2 ARX, NARX 모델을 통한 난방곡선 도출법 .....	68
4.5 소결 .....	74
제 5 장 시뮬레이션 결과 분석 .....	76
5.1 개요 .....	76
5.2 성능 분석 .....	76
5.2.1 실내 설정온도 유지 성능평가 .....	76
5.2.2 오버슈팅 & 언더슈팅 평가 .....	81
5.3 에너지 소비량 분석 .....	85
5.3.1 외기보상제어 에너지 소비량 평가 .....	85
5.3.2 외기보상+ 개폐식 뱅뱅 제어 에너지 소비량 평가 .....	88
5.4 소결 .....	90
제 6 장 결론 .....	93
참고 문헌 .....	99
ABSTRACT .....	103

## 표 목차

<표 2.1> 바닥복사 난방의 제어방법 분류 .....	8
<표 2.2> 한국지역난방공사 난방열교환기 복사난방 설계온도 .....	18
<표 2.3> 서울에너지공사 외기보상제어 난방공급수 온도 .....	18
<표 3.1> 2022년 기준 중부2지역 공동주택 부위의 열관류율표 .....	23
<표 3.2> 대상 모델의 설명 및 경계 조건 .....	25
<표 3.3> 표준바닥구조1 기준 .....	26
<표 3.4> 시뮬레이션 Data-set 구성 .....	28
<표 5.1> 시뮬레이션 결과 분석을 위한 기준 및 제안 방법으로 도출된 난방곡선	77
<표 5.2> 도출된 난방곡선의 외기보상 제어 설정온도 유지 성능 평가 .....	81
<표 5.3> 도출된 난방곡선의 외기보상+ 개폐식 뱅뱅제어 On/off 횟수 및 IAE 값	84
<표 5.4> 각 난방곡선의 외기보상제어 1/18~1/25 에너지 소비량 .....	87
<표 5.5> 각 난방곡선의 외기보상+ 개폐식 뱅뱅 제어 1/18~1/25 에너지 소비량	89



## 그림 목차

[그림 1.1] 연구 흐름도 .....	5
[그림 2.1] 개폐식 뱅뱅 제어 .....	9
[그림 2.2] 난방곡선의 설정과 조정 .....	10
[그림 2.3] input-output 데이터를 통한 수학적 모델 형성 .....	11
[그림 2.4] 두 가지 모델링 방법: 기초원리와 실험적 방법 .....	12
[그림 2.5] system identification 과정 .....	13
[그림 2.6] 지역난방 시스템 개념도 .....	16
[그림 2.7] 지역난방 시스템 발전 과정 .....	17
[그림 2.8] 공동주택 세대별 지역난방 HIU 적용 계통도 .....	19
[그림 3.1] 시뮬레이션 대상 평면 .....	24
[그림 3.2] 표준바닥구조 1 단면 상세 .....	27
[그림 3.3] 바닥 난방 공급온도에 따른 바닥 표면 온도 변화 .....	30
[그림 3.4] 실내온도와 평균바닥표면온도 차에 따른 방열량 .....	30
[그림 3.5] 공급온도 비율에 따른 방열량 비율 .....	31
[그림 3.6] 바닥 난방 유량에 따른 바닥 표면 온도 변화 .....	32
[그림 3.7] 유량 비율에 따른 방열량 비율 .....	32
[그림 3.8] EnergyPlus 시뮬레이션 모델의 공급 온수 온도 변화율에 따른 방열량 비율 .....	33
[그림 3.9] EnergyPlus 시뮬레이션 모델의 유량 변화율에 따른 방열량 비율 .....	34
[그림 3.10] 룰 기반 방법 난방 곡선 .....	35
[그림 3.11] 룰 기반 방법 외기보상제어 시뮬레이션을 통한 실내온도 & 외기온도와 일사량(1/18~1/24) .....	37
[그림 3.12] 시행착오 방법 난방곡선 .....	38
[그림 3.13] 시행착오 방법 외기보상제어 시뮬레이션을 통한 실내온도 & 외기온도와 일사량(1/18~1/24) .....	40

[그림 4.1] 대상 모델 비난방 상태 시뮬레이션 데이터 산포도 .....	44
[그림 4.2] 지니중요도 & 순열중요도 .....	45
[그림 4.3] ARX 네트워크 구조 .....	47
[그림 4.4] Train-set 비중에 따른 ARX 모델 RMSE 성능평가 .....	48
[그림 4.5] ARX 모델의 입력 시간지연에 따른 결과값 .....	49
[그림 4.6] ARX 모델의 60분 후 예측 실내온도와 실제 실내온도 및 외기온도, 일사량 .....	50
[그림 4.7] 예측 시간에 따른 ARX 모델 RMSE 성능평가 .....	51
[그림 4.8] NARX 네트워크 구조 .....	52
[그림 4.9] NARX 뉴런의 개수에 따른 RMSE를 이용한 모델 성능 평가 .....	53
[그림 4.10] Train-set 비중에 따른 NARX 모델 RMSE 성능 평가 .....	54
[그림 4.11] NARX 모델의 60분 후 예측 실내온도와 실제 실내온도 및 외기온도, 일사량 .....	56
[그림 4.12] 예측 시간에 따른 NARX 모델 RMSE 성능평가 .....	57
[그림 4.13] 30℃ 난방 온수 일정 공급을 통한 실내온도 외기온도 선형관계 .....	59
[그림 4.14] 하나의 일정 난방 공급 온수 온도를 통한 실내 설정 온도 20℃, 22℃의 난방곡선 .....	60
[그림 4.15] 하나의 일정 난방 온수 공급을 통해 도출된 난방곡선의 외기보상 제어 시뮬레이션(1/18~1/24) .....	62
[그림 4.16] 30℃ 난방 온수 일정 공급을 통한 실내온도 외기온도 선형관계 .....	63
[그림 4.17] 33℃ 난방 온수 일정 공급을 통한 실내온도 외기온도 선형관계 .....	64
[그림 4.18] 두 개의 난방 공급 온수 온도를 통한 실내 설정 온도 20℃의 난방곡선 .....	65
[그림 4.19] 두 개의 일정 난방 온수 공급을 통해 도출된 난방곡선의 외기보상 제어 시뮬레이션(1/18~1/24) .....	67
[그림 4.20] ARX 모델을 통해 도출한 실내 설정온도 20℃ 난방곡선 .....	69
[그림 4.21] ARX 모델을 통해 도출한 난방곡선의 외기보상제어와 일사량을 고려	

한 외기보상제어(1/18~1/25) .....	70
[그림 4.22] NARX 모델을 통해 도출한 실내 설정온도 20℃ 난방곡선 .....	71
[그림 4.23] NARX 모델을 통해 도출한 난방곡선의 외기보상제어와 일사량을 고려 한 외기보상제어(1/18~1/25) .....	73
[그림 5.1] NARX 모델을 통해 도출한 실내 설정온도 20℃ 난방곡선 .....	78
[그림 5.2] 외기보상제어 시뮬레이션 결과(1/18~1/25) .....	80
[그림 5.3] 외기보상+ 개폐식 뱅뱅 제어 시뮬레이션 결과(1/15~1/25) .....	83

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구의 배경 및 목적

기후 온난화의 영향으로 이상 현상이 나타나면서 IPCC의 ‘지구온난화 1.5℃ 특별보고서’에 따르면 산업혁명 이전 대비 지구 온도의 1.5℃ 상승이 인류생존을 위한 한계 온도라고 발표하였고, 2050년까지 탄소 순 배출량을 0으로 낮춰야 한다고 하였다.<sup>1)</sup> 이에 따라 세계 각국은 2050년까지 탄소 중립계획을 발표하면서 이를 위한 계획과 방안이 중요시되고 있다. 특히, 세계적으로 전체 에너지 소비의 약 40%는 건물에서 소비하고, 이 중 주거 건물의 난방에 사용하는 에너지는 27%를 차지한다.<sup>2)</sup> 또한, 국토교통부에 따르면 2021년 전체 건축물 에너지 사용량 중 주거용이 전체의 약 60%를 차지하고 있다고 발표하였다.

이에 따른 탄소 배출과 건물에너지 소비를 줄이기 위한 건물에너지 시스템 모델링과 건물에너지 시뮬레이션 연구가 지속해서 이루어지고 있다.<sup>3)</sup> 건물에너지 관리시스템(Building Energy Management System)은 전력, 가스, 수도 등에 구축된 센서 및 미터링 시스템을 통하여 에너지 사용량을 수집하여 에너지 저감 및 관리하는 기술이다.<sup>4)</sup> 건물에너지 시뮬레이션은 실제 건물에 적용하여 분석하기 어려운 다양한 조건들을 분석할 수 있기에 다양한 프로그램들이 개발되어왔다.<sup>5)</sup> 따라서 BEMS의 데이터를 기반으로 건물에너지 시뮬레이션과 결합

---

1) IPCC, Global Warming of 1.5℃, (2018)

2) Harish, V. S. K. V., and Arun Kumar. "A review on modeling and simulation of building energy systems." Renewable and sustainable energy reviews 56 (2016): 1272-1292.

3) Ibid.

4) Sin, Yeong-Gi. "BEMS의 최신기술 개발 동향." The Magazine of the Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea 43.5 (2014): 18-25.

하여 건물의 실내환경 쾌적과 효율적인 에너지 관리방안을 도출하고, 건물과 더불어 도시의 지속가능한 발전을 위해 도시 건물에너지 모델링(Urban Building Energy Modeling)으로 나아가고 있다.<sup>6)</sup>

또한, 탄소 중립을 이루기 위한 신재생 에너지의 도입이 가속화되고 있다.<sup>7)</sup> 지역난방은 4세대 지역난방 시스템으로 발전하면서 저온(60℃ 이하) 온수 공급을 통해 지열 및 태양열 에너지와 같은 신재생 에너지 활용에 이점이 있고 신재생 에너지 비중을 높일 수 있다.<sup>8)</sup> 또한, 지역난방 열교환 유닛(HIU)를 통해 세대별로 제어 및 데이터를 수집할 수 있다.<sup>9)</sup> 이와 같은 발전과 함께 지역난방 시스템은 에너지 및 성능의 효율성 증가, 환경 영향 등 이점을 가지고 있다.<sup>10)</sup>

국내 주거 건물의 난방 방식은 바닥복사 난방시스템이기에 바닥복사 난방의 에너지 소비개선은 건물에너지 사용량 저감에 큰 효과를 가져올 수 있다.<sup>11)</sup> 이에 따라 본 연구에서는 국내 공동주택에서 신재생 에너지 비중을 높일 수 있는 4세대 지역난방 시스템을 적용하여 지역난방 열교환 유닛(HIU)를 통한 세대별 난방운전 시 수집할 수 있는 데이터를 기반으로 최적의 난방 공급 온수 온도 설정 방법을 도출하고자 한다. 제안된 방법이 적용되었을 때 기존 제어방법과 비교하여 성능과 에너지 소비량을 분석하여 실효성을 확인하고자 한다.

---

5) Crawley, Drury B., et al. "Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs." *Building and environment* 43.4 (2008): 661-673.

6) Johari, Fatemeh, et al. "Urban building energy modeling: State of the art and future prospects." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 128 (2020): 109902.

7) Twidell, John. *Renewable energy resources*. Routledge, 2021.

8) 광현주, et al. "서울 지역난방 시스템의 4 세대 저온지역난방으로의 전환." *대한기계학회 논문집 B 권* 45.12 (2021): 691-699.

9) 김은영, et al. "공동주택 세대용 지역난방 열교환 유닛 (HIU) 개발 방안." *한국건축친환경설비학회 논문집* 14.5 (2020): 464-474.

10) Harvey, LD Danny. *A handbook on low-energy buildings and district-energy systems: fundamentals, techniques and examples*. Routledge, 2012.

11) Park, Duk Joon, et al. "Analysis of a building energy efficiency certification system in Korea." *Sustainability* 7.12 (2015): 16086-16107.

## 1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구에서는 난방운전 시 발생하는 데이터를 기반으로 제어방법을 제안하고자, 공동주택을 참고하여 EnergyPlus를 활용하여 건물 에너지 시뮬레이션을 구축하고 제어방법을 적용하여 시뮬레이션 결과 분석을 통한 실효성을 판단하고자 한다. 공동주택의 바닥복사 난방을 제어하기 위해 난방시스템은 4세대 지역난방 시스템을 적용하여 지역난방 열교환 유닛(HIU)을 통해 세대별 난방 온수를 공급할 수 있는 난방시스템으로 한정하였다. 위 난방시스템은 세대 내에서 실별로 공급 온도 온도를 달리할 수 없기에 세대 내 실에서 난방 부하가 가장 큰 존을 기준으로 진행하였다.

위 연구의 범위에 따라 연구 방법은 다음 순서와 같다.

### (1) 바닥복사 난방 제어를 위한 이론 고찰

바닥복사 난방에 의한 실내온도를 제어하기 위해 기존 바닥복사 난방에 사용되는 선행연구와 배경 이론을 파악하고자 한다. 이에 따라 제어 방식의 분류와 제어인자에 따른 바닥 복사난방 현황을 조사하였다. 또한, 난방운전 시 발생하는 데이터를 활용하여 제어에 적용하기 위해 System Identification에 대한 이론을 고찰하였다. 열원 공급 방식 중 지역난방 방식에 대한 이론과 최근 4세대 지역난방 시스템에 적용되고 있는 지역난방 열교환 유닛(HIU)에 대해 알아보았고, 국내 지역난방의 제어 현황을 조사하였다.

### (2) 시뮬레이션 모델 구축 및 기존 외기보상 제어

시뮬레이션 모델을 만들어 공동주택의 바닥복사 난방의 적절한 제어 변수와 제어방법을 찾고 시뮬레이션 결과를 분석하였다. 국내 공동주택을 참고하여 국내 기준에 맞춰 시뮬레이션 모델을 설계하고 바닥복사 난방에 적용하는

난방 시스템을 설정하였다. 난방패널의 방열량을 제어하기 위해 공급 온수 온도와 유량 조절에 따른 난방패널 방열량을 분석하여 바닥복사 난방을 제어하기 위한 제어 변수로 공급 온수 온도를 설정하였다. 공급 온수 온도를 이용한 외기보상제의 기존 두 가지 방법인 (1) 룰 기반 방법 (2) 시행착오 방법의 난방곡선을 도출한 후 시뮬레이션 결과를 분석하였다.

### (3) Data-driven 방법을 활용한 제어

시뮬레이션 모델을 이용하여 공동주택의 바닥복사 난방 시 발생하는 데이터(공급 온수 온도, 환수 온수 온도, 실내온도)와 날씨 데이터 중 실내온도에 영향을 미치는 변수를 선택하고, 선택된 변수를 통해 Data-driven 방법을 활용하여 실내온도 제어법을 제안하였다. 외기보상 제어에 적용하기 위해 (1) 일정온수 온도 공급을 통한 단순 회귀법, (2) System Identification 중 ARX, NARX 모델을 활용한 방법을 통해 난방 곡선을 도출하였고, 위 난방곡선을 이용하여 시뮬레이션하였다. 또한, System Identification을 통한 온도 예측 및 MPC제어를 시뮬레이션 하였다.

### (4) 시뮬레이션 결과 분석

위 기존 외기보상 제어의 두 가지 방법, Data-driven 방법을 활용하여 도출한 외기보상 제어의 두 가지 방법 그리고 MPC제어의 시뮬레이션에 대한 결과를 분석하였다. 실내 설정온도 유지성능 평가와 에너지 소비량 평가를 통해 제안된 제어방법에 대해 기존 대비 적절성을 판단하였다.

이상에서 서술한 본 연구의 연구 진행은 다음 [그림 1.1]과 같다.

<p><b>예비적 고찰</b></p>	<p><b>제 2장. 바닥복사 난방 제어를 위한 이론 고찰</b></p> <p><b>바닥복사 난방 제어 방식</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 개폐식 뱅뱅 제어</li> <li>• 외기보상 제어</li> </ul> <p><b>바닥복사 난방 제어를 위한 System Identification</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• System Identification</li> <li>• ARX, NARX</li> </ul> <p><b>지역난방을 통한 바닥복사 난방</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 지역난방</li> <li>• 국내 지역난방 현황</li> <li>• 지역난방 열교환 유닛(HIU)</li> </ul>
<p><b>설정 및 분석</b></p>	<p><b>제 3장. 바닥복사 난방 제어방법 및 기존 외기보상 제어</b></p> <p><b>시뮬레이션 모델</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 대상 모델 개요</li> <li>• 바닥 난방 시스템</li> <li>• Data set</li> </ul> <p><b>공급 온수 온도 &amp; 공급유량에 따른 방열량</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 공급 온수 온도에 따른 방열량</li> <li>• 공급 유량에 따른 방열량</li> <li>• 시뮬레이션 제어 방법 설정</li> </ul> <p><b>기존 외기 보상제어를 활용한 시뮬레이션</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 룰 기반 방법</li> <li>• 시행착오 방법</li> </ul>
<p><b>제안</b></p>	<p><b>제 4장. Data-driven 방법을 활용한 제어</b></p> <p><b>특성 선택(Feature selection)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 산포도(Scatter Plot)</li> <li>• 특성 중요도(Feature importance)</li> </ul> <p><b>System Identification</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• System Identification 변수 설정</li> <li>• ARX</li> <li>• NARX</li> </ul> <p><b>Data-driven 모델을 활용한 난방 곡선 도출 및 시뮬레이션</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 일정 난방 온수 공급을 통한 단순 회귀법</li> <li>• ARX, NARX를 통한 난방곡선 도출법</li> </ul>
<p><b>결과 분석</b></p>	<p><b>제 5장. 시뮬레이션 결과 분석</b></p> <p><b>성능 분석</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 외기보상제어 실내 설정온도 유지 성능 평가</li> <li>• 외기보상+개폐식 뱅뱅 제어 오버슈팅&amp;언더슈팅 평가</li> </ul> <p><b>에너지 소비 평가</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 외기보상제어 에너지 소비량 평가</li> <li>• 외기보상+개폐식 뱅뱅 제어 에너지 소비량 평가</li> </ul>

[그림 1.1] 연구 흐름도



## 제 2 장 바닥복사 난방 제어를 위한 이론 고찰

### 2.1 개요

바닥 복사난방에 의한 실내온도를 제어하기 위해 기존 바닥복사 난방에 사용되는 선행연구와 배경 이론을 파악하고자 한다. 이에 따라 제어 방식의 분류와 제어인자에 따른 바닥 복사난방 현황을 조사하였다. 또한, 난방운전 시 발생하는 데이터를 활용하여 제어에 적용하기 위해 System Identification에 대한 이론을 고찰하였다. 열원 공급 방식 중 지역난방 방식에 대한 이론과 최근 4세대 지역난방 시스템에 적용되고 있는 지역난방 열교환 유닛(HIU)에 대해 알아보았고, 국내 지역난방의 제어 현황을 조사하였다.

### 2.2 바닥복사 난방 제어 방식

바닥복사 난방패널에서 방열량은 식(1)과 같이 정의된다. 따라서 바닥복사 난방시스템의 제어인자에 따른 분류는 크게 유량 제어와 온수 온도 제어로 나눌 수 있다.

$$Q = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (1)$$

온수 온도와 방열량 사이에는 선형관계<sup>12)</sup>가 있어 유량을 일정하게 유지하여 공급 온수 온도의 비례제어를 통해 방열량을 제어할 수 있다. 반면, 유량과 방열량 사이에는 비선형<sup>13)</sup>관계가 있어 공급 온수 온도를 일정하게 유지하고 유량 조절을 통한 방열량 제어에 어려움이 있다.

12) Leigh, Seung-Bok. An experimental approach for evaluating control strategies of hydronic radiant floor heating systems. Diss. University of Michigan, 1991.

13) Bourne, R. C. "Hydronic radiant heating handbook." Hydronic Radiant Heating WorkShop NoteS. Davis Energy Group. 1989.

여명석<sup>14)15)</sup>은 바닥복사 난방시스템의 제어방법의 이론을 체계화한 후 시뮬레이션을 통한 분석을 통해 국내 공동주택에 적용성을 평가하였다. <표 2.1>은 제어방법에 따른 분류를 정리한 것이다.

온수 온도를 제어하는 방법은 외기온에 따라 조절하는 외기보상제어(Outdoor reset control)와 실온 피드백을 통한 실온 피드백 외기보상제어가 있다.<sup>16)</sup> 외기보상제어는 외기온과 난방 공급 온수 온도 사이에 선형관계가 있어 외기온도에 따른 난방 공급 온수 온도를 제어하는 방법이다.<sup>17)18)</sup> 유량 제어 방법은 연속 공급을 통한 연속 유량 제어(Continuous flow control)와 간헐 공급을 통한 개폐식 제어(On/off control)와 펄스 제어(Pulse width modulation control)가 있다.<sup>19)</sup> 열원을 통한 제어는 바닥구조체에 전달되는 열 전달량을 제어하는 플럭스제어(Flux modulation control)가 있다.<sup>20)</sup> 유럽에서는 일반적으로 3-way 밸브를 사용하여 급수 온도를 조절하여 외기보상제어를 적용하고 있다. 국내에서는 개별보일러를 통해 일정한 공급 온수 온도에 개폐식 뱅뱅 제어를 통해 제어하고 있고, 지역난방을 통해 외기보상제어를 통한 공급 온수 온도 조절과 개폐식 뱅뱅 제어를 사용하고 있다.

---

14) 여명석, 석호태 and 김광우, 공동주택 온수온도 바닥복사 난방시스템의 온수온도 제어방법에 관한 연구 (A Study on the Water Temperature Control Method of Hydronic Radiant Floor Heating System in Apartment Buildings). 대한건축학회 논문집, 14.12 (1998): 203-210.

15) 여명석 and 김광우, 공동주택 온수온도 바닥복사 난방시스템의 제어방법에 관한 연구 (A Study on the Control Methods of Hydronic Radiant Floor Heating Systems in Apartment Buildings). 대한건축학회 논문집-계획계, 15.3 (1999): 119-126.

16) MacCluer, C. R. "The response of radiant heating systems controlled by outdoor reset with feedback." ASHRAE Transactions 97.2 (1991): 795-9.

17) Adelman, D. "Some control strategies for radiant floor heating." Radiant times (1988): 4-5.

18) Friedlander, M. "Premium heating with radiant slabs." Solar Age (1986): 66-71.

19) Gibbs, D. R. "Control of multizone hydronic radiant floor heating systems." ASHRAE Transactions-American Society of Heating Refrigerating Airconditioning Engin 100.1 (1994): 1003-1010.

20) MacCluer, C. R. "Temperature variations of flux-modulated radiant slab systems." ASHRAE transactions 95.1 (1989): 1010-1014.

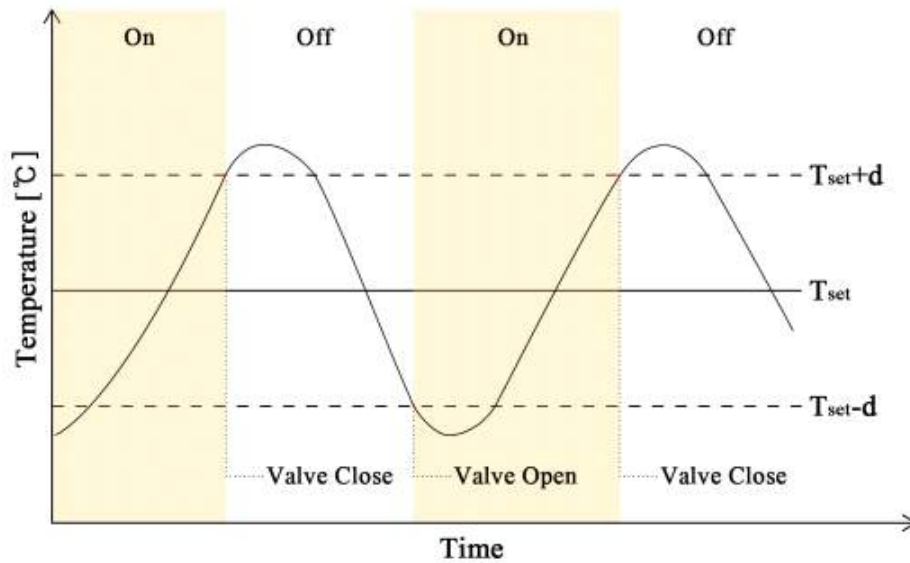
<표 2.1> 바닥복사 난방의 제어방법 분류<sup>21)</sup>

제어인자		공급 온수 온도			열원
		정온수	변온수		
공급 온수 유량	연속 공급	정유량	-	외기보상제어 실온 피드백 외기보상제어	플럭스제어
		변유량	변유량 제어	-	-
	간헐 공급	뱅뱅 제어	개폐식 뱅뱅 제어 (on/off bang-bang control)	외기보상+ 개폐식 뱅뱅 제어	-
		펄스 제어	개폐식 펄스 제어 (on/off pulse control)	외기보상+ 개폐식 펄스 제어	-

### 2.2.2. 개폐식 뱅뱅 제어(on/off bang-bang control)

개폐식 뱅뱅 제어는 가장 일반적으로 사용되는 제어 방식으로 on/off 제어라고 불린다. 개폐식 뱅뱅 제어의 제어방법은 [그림 2.1]과 같다. 설정 온도(set point)를 기준으로 불감대(dead band)를 설정하여 제어하고자 하는 실내온도를 기준으로 on/off된다. 실내온도가 설정 온도+ 불감대(set point + dead band)를 초과할 경우 컨트롤러가 off 되어 유량이 차단되고, 실내온도가 설정 온도-불감대(set point - dead band) 미만일 경우 컨트롤러가 on이 되어 일정한 유량이 흐른다. 설정 온도에 필요한 열량보다 과도하게 높은 온수 온도를 공급하게 되면 불감대를 벗어나 제어가 off가 된 이후 실내온도 상승이 커져 오버슈팅(over shooting)이 크게 발생한다. 반면, 필요한 온도보다 낮은 온도가 공급된다면 설정 온도에 도달하지 못해 언더슈팅(under shooting)이 된다. 따라서 적절한 공급 온수 온도를 통한 개폐식 뱅뱅 제어가 요구된다.

21) 여명석 and 김광우, 공동주택 온수온돌 바닥복사 난방시스템의 제어방법에 관한 연구 (A Study on the Control Methods of Hydronic Radiant Floor Heating Systems in Apartment Buildings). 대한건축학회 논문집-계획계, 15.3 (1999): 119-126.



[그림 2.1] 개폐식 뱅뱅 제어<sup>22)</sup>

### 2.2.3. 외기보상 제어(outdoor reset control)

바닥복사 난방은 일정한 실온을 유지하기 위해 외기온도와 공급 온수 온도에 선형관계가 있기에 외기온에 따른 공급온도 제어가 적합하고, 바닥복사 난방의 시간지연으로 인해 실온 피드백보다 외기에 따른 제어가 효과적이다.<sup>23)</sup> MacCluer<sup>24)</sup>는 외기와 설정온도에 따른 공급온도를 조절하는 식 (1)을 정의하였다. H는 외기 보상율이고 다음식을 난방곡선(Heating curve)이라고 한다. 난방곡선은 건물 혹은 건물 내 공간에 따라 디자인, 외피의 열적 특성 등에 따라 결정되는 고유한 값이기에 기존에는 난방운전을 통해 시행 착오법으로 구한다.<sup>8)</sup> 난방곡선의 조정은 초기 설정한 난방곡선에 의해 운전을 실시하여 외기온

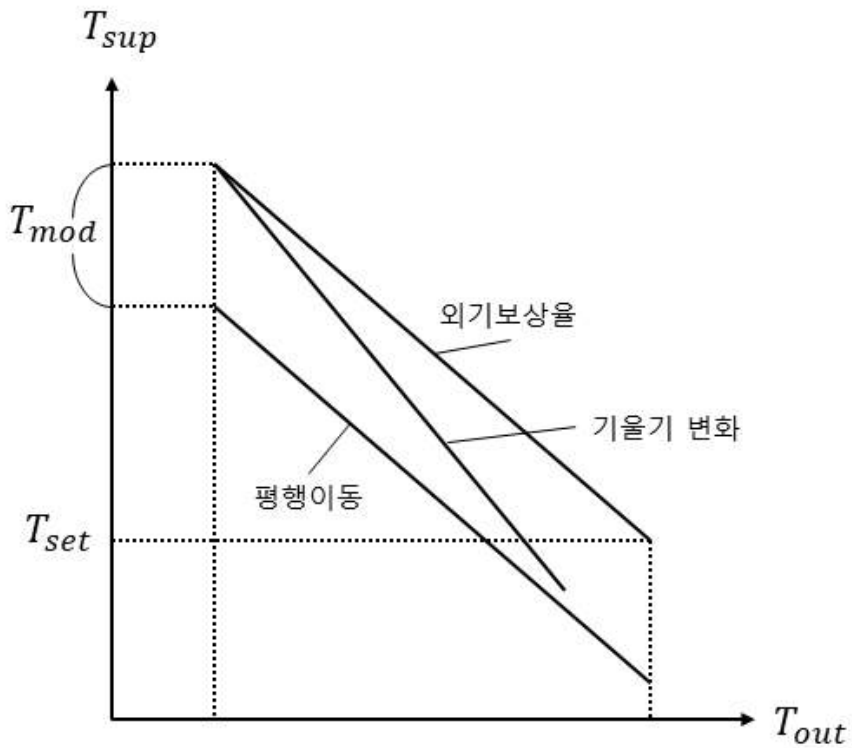
22) 문승현. 지역난방열원을 이용하는 공동주택의 난방부하 감소에 따른 바닥 복사난방시스템 설계 및 제어방법. Diss. 서울대학교 대학원, 2019.  
 23) Barma, M. C., et al. "A review on boilers energy use, energy savings, and emissions reductions." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 79 (2017): 970-983.  
 24) MacCluer, C. R. "The response of radiant heating systems controlled by outdoor reset with feedback." *ASHRAE Transactions* 97.2 (1991): 795-9.

과 실온의 관계를 부분적으로 수정할 경우 기울기 변화를, 외기온과 실온의 관계가 전체적으로 높거나 낮으면 평행이동을 통해 조정된다.

$$T_s = H(T_{set} - T_{out}) + T_{set} + T_{mod} \quad \text{식 (1)}$$

여기서,

- $T_s$  바닥복사 난방 공급 온수 온도 [°C]
- $T_{set}$  실내 설정 온도 [°C]
- $T_{out}$  바닥복사 난방 환수 온도 [°C]
- $T_{mod}$  난방곡선 평행 조절 온도 [°C]
- $H$  외기보상율



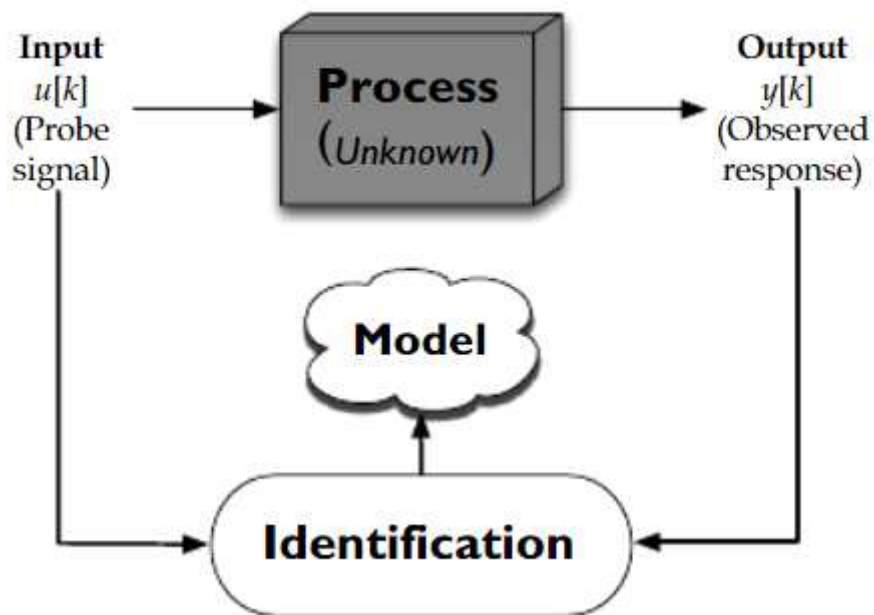
[그림 2.2] 난방곡선의 설정과 조정

## 2.3 바닥복사 난방 제어를 위한 System Identification

바닥복사 난방 시 발생하는 데이터를 활용하여 시스템 모델 형성하고 이를 통해 실내온도 예측 및 제어방법을 도출하고자 System Identification 배경 이론을 고찰하고자 한다. 따라서 데이터를 활용한 System Identification 이론 및 방법과 그 중 ARX, NARX의 이론과 바닥복사 난방에 적용된 선행연구를 조사하였다.

### 2.3.2. System Identification

System Identification은 시스템의 관측 또는 측정된 데이터를 바탕으로 input과 output을 통해 수학적 관계(모델)를 형성하는 방법이다.<sup>25)</sup> [그림 2.3]은 System Identification 과정을 추상화한 것이다.

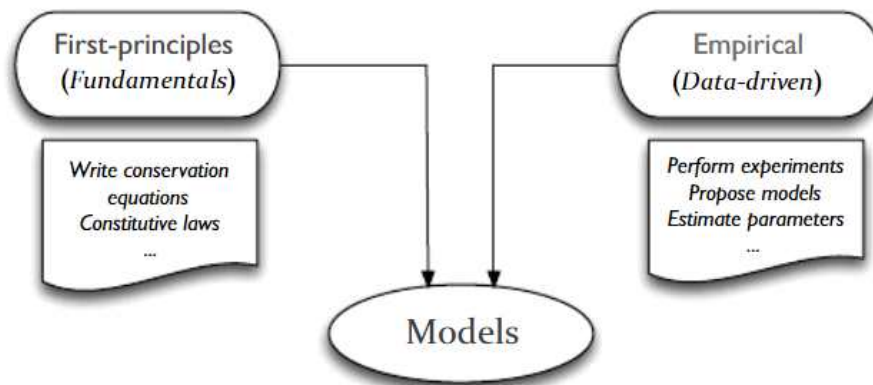


[그림 2.3] input-output 데이터를 통한 수학적 모델 형성<sup>25)</sup>

25) Tangirala, Arun K. Principles of System Identification : Theory and Practice. p.2

따라서, System Identification은 신호처리(signal processing)의 한 분야로서, 수학적 모델을 실제 시스템의 입력과 출력데이터를 활용하여 물리적 또는 화학적 기초원리(first principles)로부터 시스템 모델을 얻기 어렵거나 매우 복잡한 경우에 주로 쓰이고 있으며, 산업현장에서도 점차 그 역할이 중요해지고 있다.<sup>26)</sup> 본 연구에서는 바닥복사 난방 시, System Identification 과정에서 input은 날씨 데이터 및 바닥복사 난방에 영향을 주는 여러 요소이고, output은 실내온도가 된다. 따라서 실내온도 예측 및 제어에 영향을 주는 요인(input)과 그로 인해 변한 실내온도(output)의 수학적 모델을 형성할 수 있다.

시스템의 수학적 모델을 얻는 방법은 물리적 기초원리(first principles)로 접근하는 방법과 Data-driven 방법으로 접근하는 방법이 있다. 기초원리로 도출된 모델을 white box 모델이라고 하며, Data-driven 방법으로 도출된 모델을 black box 모델이라고 한다. black box 모델의 경우 input-output 관계를 추정하여 만든 모델로 복잡하거나 기초원리로 도출하기 어려운 모델을 해석할 수 있다.

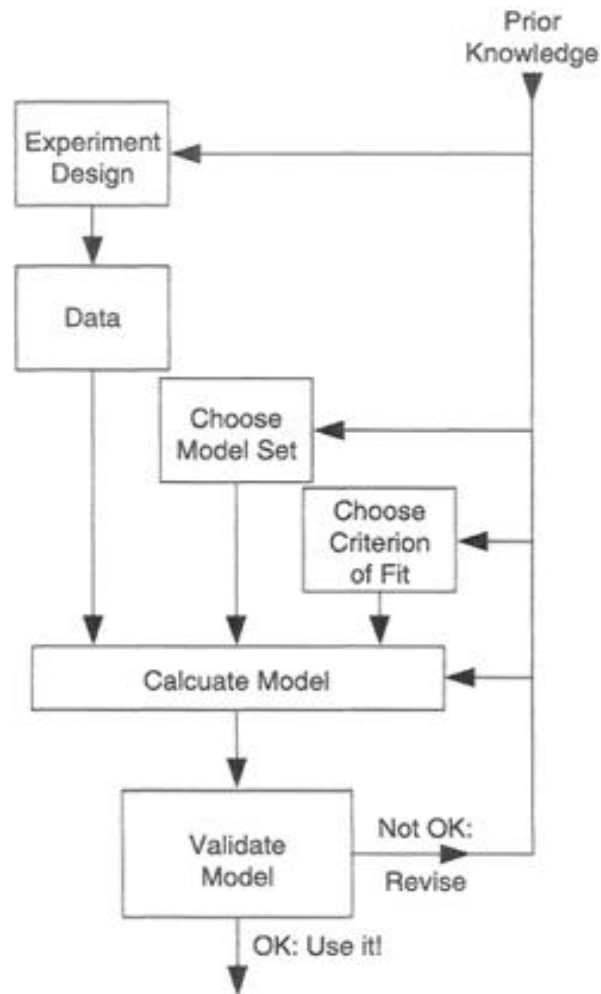


[그림 2.4] 두 가지 모델링 방법: 기초원리와 실험적 방법<sup>27)</sup>

26) 고상호. 시스템 식별에 대한 소개와 기초이론 맛보기. 제어로봇시스템학회지, 18.2 (2012): 33-38.

27) Tangirala, Arun K. Principles of System Identification : Theory and Practice. p.9

System Identification의 과정은 [그림 2.5]와 같다. 크게 데이터 생성 및 수집, 모델 설정 및 추정, 모델 검증 단계로 이뤄져 있다. 각 모든 단계에서 사전지식(Prior Knowledge)을 활용하여 System identification이 잘 이루어질 수 있도록 판단한다. 이와 같은 과정의 반복을 통해 정확도를 판단하여 최종의 모델을 도출한다.



[그림 2.5] system identification 과정<sup>28)</sup>

28) Ljung, Lennart. "System identification." Signal analysis and prediction. Birkhäuser, Boston, MA, 1998. 163-173.



데이터 생성 및 수집 단계는 시스템에 영향을 주는 input을 설정하고 시스템을 통해 output을 얻는 과정이다. 보통 실험을 통해 이루어지지만 본 연구에서는 시뮬레이션을 통해 진행하였다.

이후 적절한 모델을 설정하고 모델의 input과 output의 데이터로부터 목적함수(오차)를 최소화하는 파라미터를 선정한다. 목적함수를 최소화하는 방법에는 최소 제곱법(Least-square method), 최대우도법(Maximum Likelihood Method) 등이 있다.

### 2.3.3. ARX, NARX

시스템 선형모델 중 ARX는 식(2)와 같이 정의된다. 여러 모델 중에서 ARX 모델은 최소제곱법을 이용하여 모델의 매개변수들을 추정할 수 있어 계산이 복잡하지 않고 모델 구조도 비교적 단순하다.<sup>29)</sup>

$$y_{t+1} = \sum_{i=1}^{n_a} a_i y_{t-i+1} + \sum_{i=1}^{n_b} b_i u_{t-i+1-n_k} + e_{t+1} \quad \text{식(2)}$$

ARX 모델에서 예측 오차를 가장 작게하는 차수( $n_a, n_b$ )와 입력 시간지연( $n_k$ )을 결정하면 최종 모델이 도출된다.

NARX 모델은 기존 ARX 모델에서 비선형 함수( $f$ )가 추가된 것으로 식(3)과 같이 정의된다.

$$y_{(t+1)} = f(y_{(t)}, \dots, y_{(t-n_a)}, u_{(t-n_k)}, \dots, u_{(t-n_b-n_k)}) + e_{(k+1)} \quad \text{식(3)}$$

NARX 모델의 비선형 시스템은 은닉층을 통한 신경망(Neural Network)에서 활성화 함수를 사용하여 얻을 수 있다. NARX 모델링에서 은닉층의 활성화 함수(Activation Function)는 Sigmoid, ReLU, Gaussian 등이 있다.

29) 고상호. 매개변수 시스템 식별법 (2). 제어로봇시스템학회지, 18.4 (2012): 55-62.

## 2.4 지역난방을 통한 바닥복사 난방

공동주택의 바닥복사 난방의 열원을 공급하는 방법은 크게 개별보일러 방식과 지역난방이 있다. 개별보일러의 경우 세대별 보일러를 통한 난방 열원을 공급하는 것이고, 지역난방의 경우 지역에서 건물에 열을 공급하여 난방하는 방식이다. 개별보일러를 통한 난방의 경우 일정 온수를 공급하여 제어되는 반면, 지역난방의 경우 외기온도에 따라 공급온도를 설정하는 외기보상제어가 사용되고 있다. 외기보상제어의 경우 일정한 온수를 공급하는 것보다 불필요한 난방에너지를 줄일 수 있다. 또한, 지역난방은 에너지 효율과 환경 측면에서 효과를 인정받고 있다.<sup>30)</sup> 유럽에서 신재생 에너지로 생산한 저온(60℃ 이하) 온수를 공급하는 지역난방 열교환 유닛(HIU)이 활용되고 있다. 최근 국내에서도 세대용 지역난방 열교환 유닛(HIU) 관련 연구가 진행되고 있다. 따라서 지역난방과 지역난방 열교환 유닛(HIU)에 관해 고찰하였다.

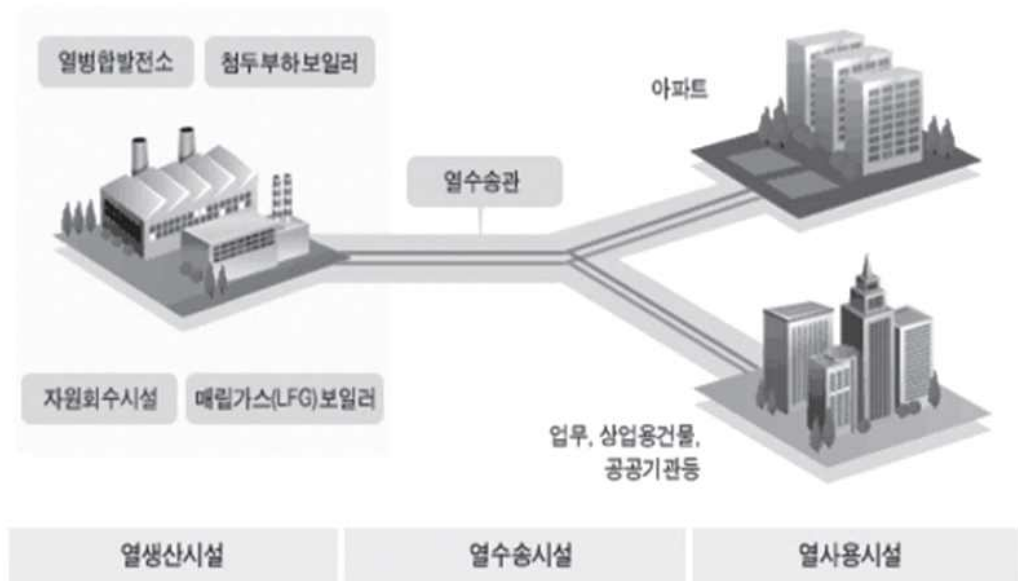
### 2.4.2. 지역난방

지역난방의 경우 열병합발전소 또는 쓰레기 소각장 등에서 발생하는 열을 열 배관을 통해 개별 건물에 열을 전달하여 난방하는 방식이다. 지역난방은 영국의 건축가 M.I 브루넬이 고안해 1872년 스위스에서 처음 실시되어, 북유럽 중심으로 전 세계에 빠른 속도로 확산되었다.<sup>31)</sup> 국내에서도 신도시 건설과 함께 지역난방이 설치되었다. 국내 지역난방시설의 개념도는 [그림 2.6]과 같다. 열원시설에서 공급되는 온수를 각 단지 또는 건물별 열교환기를 통해 세대별로 공급 공급되는 것으로 1차측과 2차측으로 구분되어 있다. 1차측에서 열원이 열교환기를 통해 2차측에서 외기보상제어를 통한 난방 온수가 공급된다. 범용적

30) 정광섭, and 김성민. "지역난방 공동주택에서 외기온도가 난방부하 패턴에 미치는 영향에 관한 연구." 대한건축학회 논문집-계획계 25.2 (2009): 233-240.

31) 김원욱. 지역난방의 변화와 열교환기 기술동향. 한국설비기술협회지, No.12, (2017): 34-41.

외기보상제어 방법은 부하가 가장 큰 세대를 기준으로 온수 온도를 공급하는 것이다.<sup>32)</sup> 지역난방 열원을 사용하는 공동주택의 난방시스템은 [그림 2.7]와 같이 발전하였다. 국내에서는 3세대의 지역난방 시스템을 사용하고 있고, 3세대의 경우 신재생 에너지를 활용하여도 기존의 열병합 플랜트나 열전용 보일러로 생산한 열과 함께 승온하여 100℃ 미만의 고온 고압수를 중앙시스템에서 공급하는 방식을 사용하고 있다.<sup>33)</sup>

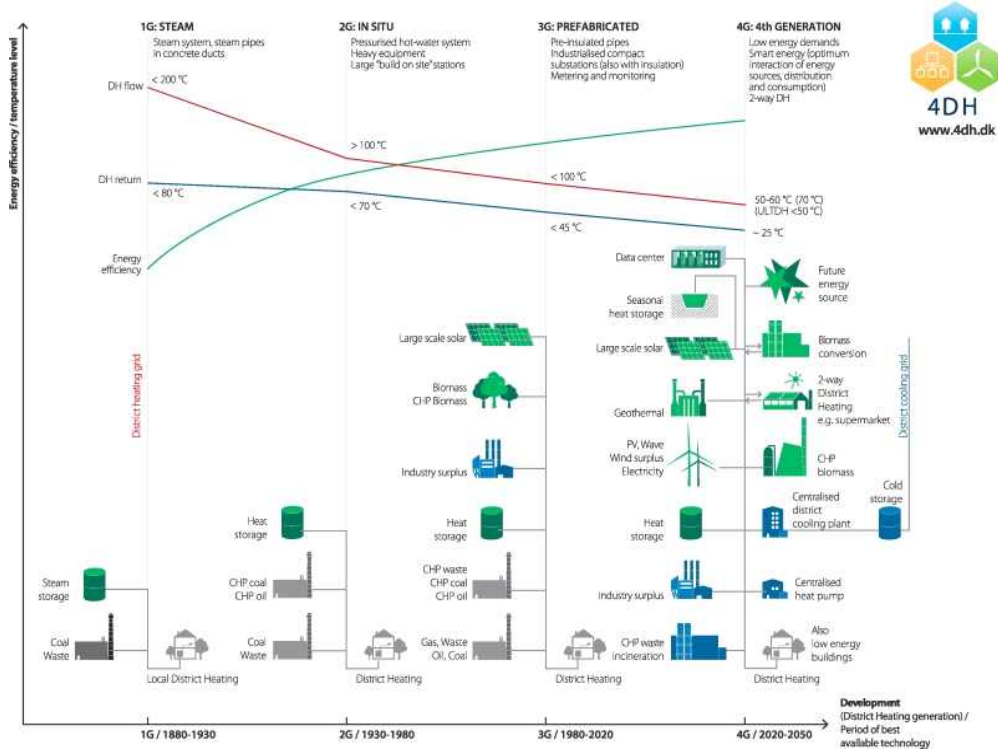


[그림 2.6] 지역난방 시스템 개념도<sup>34)</sup>

32) Harish, V. S. K. V., and Arun Kumar. "A review on modeling and simulation of building energy systems." *Renewable and sustainable energy reviews* 56 (2016): 1272-1292.

33) 김원욱. 지역난방의 변화와 열교환기 기술동향. *한국설비기술협회지*, No.12, (2017): 34-41.

34) 이훈. "국내 지역냉, 난방 기술의 발전." *The Magazine of the Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea* 40.12 (2011): 39-45.



[그림 2.7] 지역난방 시스템 발전 과정<sup>35)</sup>

## 2.4.2 국내 지역난방 제어 현황

한국지역난방공사에서는 현재 3세대 지역난방 시스템을 사용하고 있으며, 열사용시설기준<sup>36)</sup> 난방열교환기 제어장치의 난방제어기기에 외기온도 보상기능이 포함되어야 하고, 단위 열교환 설비의 설계온도 기준은 <표 2.2>와 같이 공고하고 있다. 서울에너지공사의 열사용시설 관리자 기술교재<sup>37)</sup>에 따르면 외기온에 따른 2차측 난방 공급수 온도를 <표 2.3>과 같이 제시하고 있다.

35) Lund, Henrik, et al. "The status of 4th generation district heating: Research and results." Energy 164 (2018): 147-159.

36) 한국지역난방공사, 열사용시설기준, 2020.4.29. 시행

37) 서울에너지공사, 사용시설 관리자 기술교재

<표 2.2> 한국지역난방공사 난방열교환기 복사난방 설계온도

구분			설계온도[°C]		
			공급	회수	공급·회수 온도차( $\Delta t$ )
난방 열교환기	1차측	복사난방	115	50	-
	2차측	복사난방	45+ $\Delta t$	45	15이상

<표 2.3> 서울에너지공사 외기보상제어 난방공급수 온도

외기온도(°C)		-12	-5	0
난방공급수 온도(°C)	기본모드	60	50	47
	절약모드	53	47	42

최창식 외 4인<sup>38)</sup>은 공동주택 10개 단지 중 외기보상제어를 통해 동절기 난방 온수 공급온도를 파악한 결과, 관리자의 경험을 기반으로 거주자의 난방성향과 단지 특성을 반영하여 운영되어 공급온도의 범위가 상이한 것으로 나타났다. 이태원 외 5인<sup>39)</sup>은 지역난방을 공급받는 공동주택 2곳의 외기보상제어를 통한 난방 온수 공급온도를 파악한 결과 44~57°C로 제어가 적용되고 있는 것으로 조사하였다.

### 2.4.3. 지역난방 열교환 유닛(HIU)

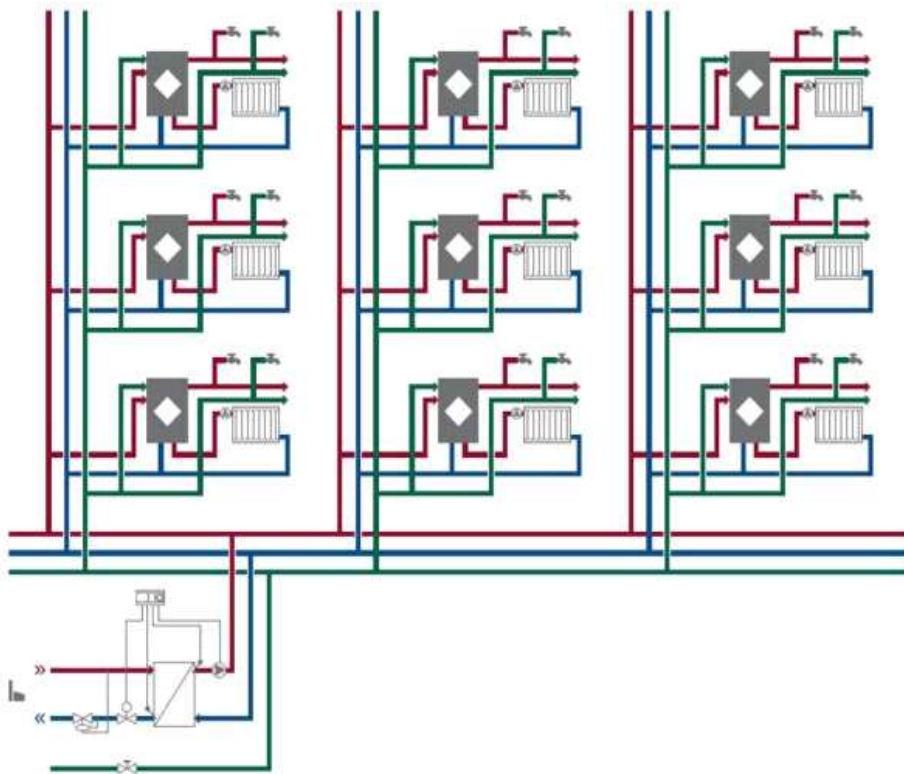
최근 4세대 지역난방 시스템(4DH)에서는 건물의 기밀성이 높아짐에 따라 신재생 에너지를 열원으로하여 저온(60°C 이하)의 온수를 공급하여 지역난방 열교환 유닛(HIU)를 통해 난방 및 급탕 에너지를 세대별 공급하는 것이다. [그림 2.8]은 공동주택 세대별 지역난방 HIU 적용 계통도를 나타낸 것이다.

유럽은 에너지 로드맵 2050에서 4세대 지역난방을 통한 온실가스 및 에너지 목표

38) 이태원, et al. "지역난방 사용자시설 운전현황 분석 및 에너지절감 방안 연구." 대한설비공학회 학술 발표대회논문집 (2012): 239-242.

39) 최창식, et al. "현장조사를 통한 지역난방 열원 사용 공동주택 단지의 열원 및 분배 시스템 운영현황 분석." 대한건축학회 학술발표대회 논문집 (2015): 545-546.

를 계획하고 운영 중에 있다.<sup>40)</sup> 4세대 지역난방을 위한 주요 연구 주제는 스마트 에너지 시스템(smart Energy System), 분산형 에너지(Distributed Energy), 에너지 계획 수립 방안(Energy Planning and Tools), 저온 지역난방 네트워크(Low-temperature District Heating Grids) 등이 있다.<sup>41)</sup> 이는 기존 지역난방의 열원 공급자에서 소비자의 일방적 방향이 아닌 양 방향으로 에너지를 거래할 수 있다는 특징을 가지고 있다. 국내에서도 한국지역난방공사에서 회수열과 신재생 에너지를 활용한 4세대 지역난방 시스템을 적용 사업을 진행 중이다.



[그림 2.8] 공동주택 세대별 지역난방 HIU 적용 계통도 <sup>42)</sup>

40) Connolly, David, et al. "Heat Roadmap Europe: Combining district heating with heat savings to decarbonise the EU energy system." Energy policy 65 (2014): 475-489.

41) 임용훈. 4세대 지역난방의 기술 및 정책 동향, No.14 (2017): 79-98

42) Olsen, Peter Kaarup, et al. "Guidelines for low-temperature district heating." EUDP-DEA.

## 2.5 소결

본 장에서는 바닥복사 난방의 제어 방식과 열원을 공급하는 방식 중 지역난방을 조사하여 본 연구에서 공동주택의 바닥복사 난방의 최적 제어방법을 도출하기 위한 적용 방법을 구체화하였다. 또한, 본 연구의 진행 과정에서 데이터를 활용한 적용 방법 및 근거를 마련하기 위해 System Identification에 대한 이론을 고찰하였다. 따라서 공동주택의 바닥복사 난방을 위한 적용 방법을 설정하고 난방운전 시 발생하는 데이터를 활용하여 제어하는 방법을 확인하였다.

본 장의 내용을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 바닥복사 난방의 제어에 관한 문헌을 통해 바닥복사 난방패널의 방열량의 제어인자인 공급 온수 온도, 공급 유량, 열량에 따른 제어 방식의 분류를 파악하였다. 이 중 바닥복사 난방에 일반적으로 적용되는 개폐식 뱅뱅 제어방법과 지역난방에서 사용되는 외기보상제어에 대하여 고찰하였다.
- (2) System Identification에 관한 이론적 고찰을 통해 바닥복사 난방운전 시 얻을 수 있는 데이터를 활용하여 시스템 모델 생성을 통한 적용 방법에 대하여 파악하였다. 시스템 모델 중 선형모델인 ARX와 ARX 모델에 다층 퍼셉트론(MLP-ANN)을 적용한 비선형 시스템 NARX을 이용하여 Data-driven 모델을 생성할 수 있을 것으로 판단된다.
- (3) 공동주택의 열원 공급 방식 중 지역난방에 대한 이론적 고찰을 하였다. 국내 지역난방 적용 현황을 조사하여 외기보상제어를 통해 외기 온도에 따라 설정된 온도에 따라 난방 온수 온도가 공급되거나 관리자의 경험에 의존하여 조절되는 것으로 파악하였다. 최근 4세대 지역

---

Denmark (2014).

난방 시스템에서 적용하고 있는 지역난방 열교환 유닛(HIU)에 대한 조사를 통해 공동주택에서 세대별 열교환기를 통해 난방 공급 온수 온도를 공급하는 것을 파악하였다. 본 연구에서 바닥복사 난방의 최적 제어방법에 지역난방 열교환 유닛(HIU)를 적용하여 세대별로 적용할 수 있을 것으로 판단된다.



## 제 3 장 바닥복사 난방 제어방법 및 기존 외기보상 제어

### 3.1 개요

본 장은 시뮬레이션과 수치해석 모델을 만들어 공동주택의 바닥복사 난방의 적절한 제어 변수와 제어방법을 찾고 해당 제어를 통한 시뮬레이션 결과를 분석하였다. 국내 공동주택을 참고하여 국내 기준에 맞춰 시뮬레이션 모델을 설계하고 바닥복사 난방에 적용하는 난방시스템을 설정하였다. 난방패널의 방열량을 제어하기 위해 공급 온수 온도와 유량 조절에 따른 난방패널 방열량을 수치해석 모델을 통해 분석하여 바닥복사 난방을 제어하기 위한 제어 변수로 공급 온수 온도를 설정하였다. 따라서 공급 온수 온도를 이용한 외기보상제의 기존 두 가지 방법인 (1) 룰 기반 방법 (2) 시행착오 방법의 난방곡선을 도출한 후 시뮬레이션하였다.

### 3.2 시뮬레이션 모델

#### 3.2.1. 시뮬레이션 모델 개요

시뮬레이션 모델은 공동주택 84m<sup>2</sup>의 중간층(15층) 세대를 참고하여 EnergyPlus를 이용하여 모델링하였다. 건물 모델의 평면은 [그림 3.1]과 같고 서쪽 모서리 세대로 선정하였다. 거실 및 부엌, 방 3개로 이루어진 모델로 정남향으로 설정하였다. 외벽과 창호 등 외피 구성은 <표 3.1>에 따라서 서울특별시 기준 2022년 에너지 절약 설계기준의 열관류율 수치를 만족하도록 설계하였다. 시뮬레이션 모델의 난방 부하에 영향을 미치는 경계조건은 외기온도, 내부 발열, 침기와 환기가 있다. 자연 침기량은 공동주택의 각 방마다 침기율을 측정한 최근 연구의 결과를 참고하여 0.2ACH로<sup>43)</sup> 하였고, 건축물의 설비

기준 등에 관한 규칙에 따라 환기횟수는 0.5ACH로<sup>44)</sup> 하였다. 따라서 환기 및 침기를 합하여 0.7ACH로 설정하였다. 내부 발열은 인체, 조명, 기기 발열이 있으며, 스케줄에 따라 내부 발열이 발생하도록 하였다. 4인 가족을 기준으로 하였으며 인체의 내부 발열은 ASHRAE Handbook을 참고하여 현열 70W/명, 잠열 45W/명으로, 조명은 5.9W/m<sup>2</sup>으로 설정하였다. 기기에 의한 내부 발열은 고려하지 않았다. 시뮬레이션 모델의 설명 및 경계 조건은 <표 3.2>와 같다. 설정 실내온도는 20℃로 설정하였다.

<표 3.1> 2022년 기준 중부2지역 공동주택 부위의 열관류율표

구분		열관류율[W/m <sup>2</sup> ·K]
거실의 외벽	외기 직접	0.170
	외기 간접	0.240
지붕	외기 직접	0.150
	외기 간접	0.210
바닥(바닥난방)	외기 직접	0.170
	외기 간접	0.240
창 및 문	외기 직접	1.000
	외기 간접	1.500
세대현관문 및 방화문	외기 직접	1.400
	외기 간접	1.800

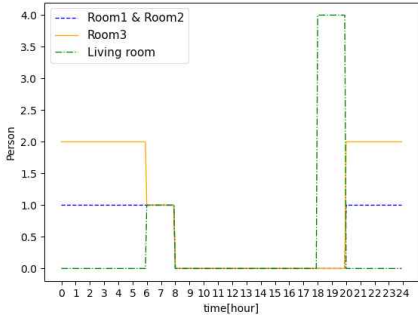
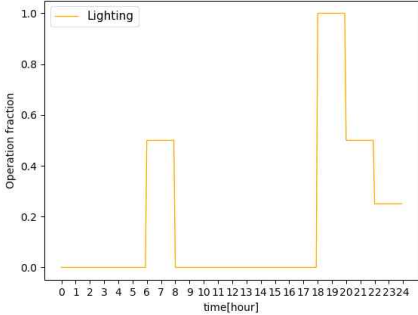
43) 조경주, and 조동우. "주택 침실의 침기 및 기계 환기에 따른 CO<sub>2</sub> 농도 변화 분석." 한국건축친환경설비학회 논문집 15.4 (2021): 386-394.

44) 건축물의 설비기준 등에 관한 규칙 제11조. 시행 2021. 8. 27.



[그림 3.1] 시뮬레이션 대상 평면

<표 3.2> 대상 모델의 설명 및 경계 조건

구분		상세 내용
대상		공동주택 중간층 모서리 세대
면적 / 향		84m <sup>2</sup> / 남향
환기 및 침기량		침기 : 0.2 ACH 환기 : 0.5 ACH
내부 발열	인체	현열: 70W/명 잠열: 45W/명 
	조명	6.5W/m <sup>2</sup> 
	기기	-
설정 실내온도		20℃

### 3.2.2. 바닥복사 난방시스템

바닥복사 난방시스템은 난방패널과 열원을 공급하는 난방시스템으로 구성된다. 본 절에서는 바닥 난방패널의 구조와 설계기준으로 시뮬레이션 모델의 기본 설계값을 설정하고, 시뮬레이션 모델에 적용할 난방시스템을 설정하였다. 난방패널은 국내 공동주택에 적용하고 있는 기준에 맞춰 설정하였고, 난방시스템은 2장 문헌 고찰에서 소개한 지열 난방을 통한 2차 측 열원이 세대까지 공급되고 세대별 열교환기를 통해 난방 및 급탕 온수가 공급되는 지역난방 열교환 유닛(HIU)으로 설정하였다.

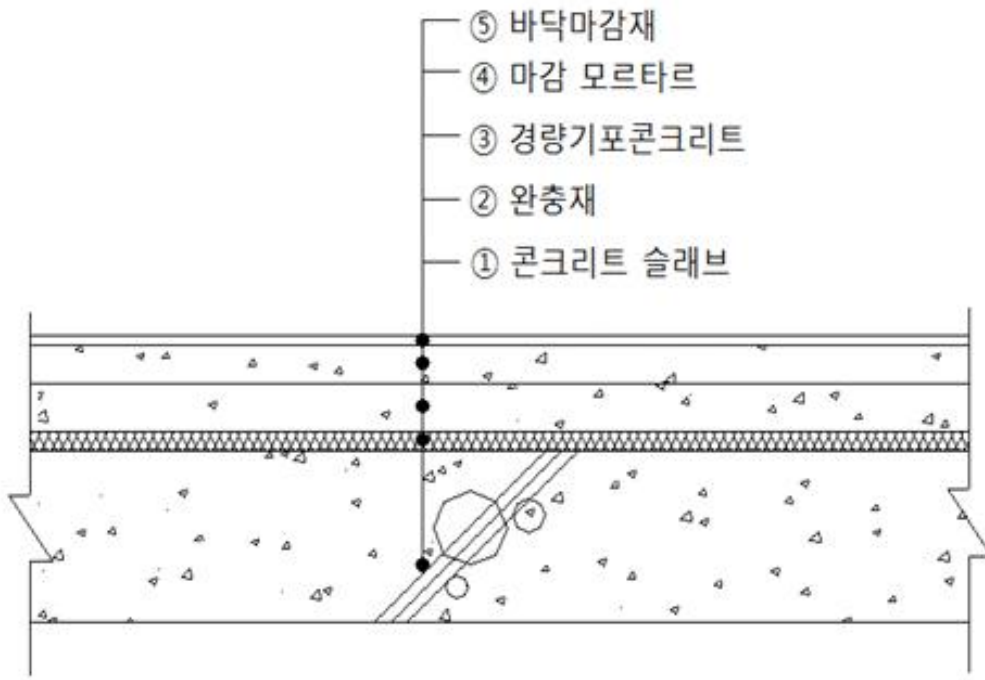
#### 가. 바닥 난방패널

바닥 난방패널의 바닥 구조는 국토교통부에서 고시한 소음방지를 위한 층간 바닥충격음 차단 구조기준<sup>45)</sup>을 참고하여 표준바닥구조 1에 따라 바닥 난방패널을 모델링하였다. 바닥 난방패널의 표준바닥구조1은 [그림 3.2]와 같다. <표 3.3>의 표준 바닥기준1의 구조별 재료 두께 조건을 참고하여 벽식 및 혼합구조에 해당하는 기준으로 시뮬레이션 모델에 입력하였다. 난방 배관은 12A(외경 16mm) 규격에 맞춰 적용하였다.

<표 3.3> 표준바닥구조1 기준

형식	구조	콘크리트슬래브	완충재	경량기포콘크리트	마감모르타르
1	벽식 및 혼합구조	210mm 이상	20mm 이상	40mm 이상	40mm 이상
	라멘구조	150mm 이상			
	무량판구조	180mm 이상			

45) 소음방지를 위한 층간 바닥충격음 차단 구조기준. 국토교통부 고시 제2018-585호. 시행 2018. 9. 21



[그림 3.2] 표준바닥구조 1 단면 상세

#### 나. 난방시스템

난방시스템은 2장 문헌 고찰에서 소개한 최근 유럽에서 적용된 4세대 지역난방 시스템을 적용하고자 한다. 4세대 지역난방 시스템은 신재생 에너지를 활용하여 저온(60℃ 이하)으로 열원을 공급하기에 열원을 생성하기 위한 발전에너지 소비가 줄어들어 탄소 중립 목표에 효과적일 것으로 판단한다. 4세대 지역난방은 지역난방 열교환 유닛(HIU)을 세대마다 설치하여 세대별 난방공급 온수 온도를 설정할 수 있어 적절한 공급 온수 온도 설정을 통한 온열쾌적과 에너지 소비를 저감할 수 있을 것으로 예상된다. 또한, 국내에서도 4세대 지역난방의 적용이 계획되어 있어 HIU를 적용한 난방시스템을 선정하였다.

### 3.2.3 Data set

4개의 존(Living room, Room1, Room2, Room3)에 대한 시뮬레이션을 통해 얻은 데이터(실내온도, 온수공급온도, 외기온도, 일사량 등)를 Data set으로 구성하였다. EnergyPlus를 이용하여 시뮬레이션하였으며, 기상데이터는 서울지역 표준 기상데이터를 사용하였다. 시뮬레이션 기간은 난방 기간 중 11/15~2/15이고, time-step은 10분으로 하였다. 이후 난방곡선을 찾는 과정에서 단순 회귀법에서는 데이터를 그대로 사용하였고, System Identification 시에는 모든 데이터를 (0, 1)로 정규화하여 진행하였다.

<표 3.4> 시뮬레이션 Data-set 구성

시뮬레이션 프로그램	EnergyPlus
기상데이터	서울지역 표준 기상데이터
시뮬레이션 기간	11/15 ~ 2/15
time step	10 min
Data	실내온도, 외기온도, 난방 공급 온수 온도, 일사량
정규화	Min-Max scaling

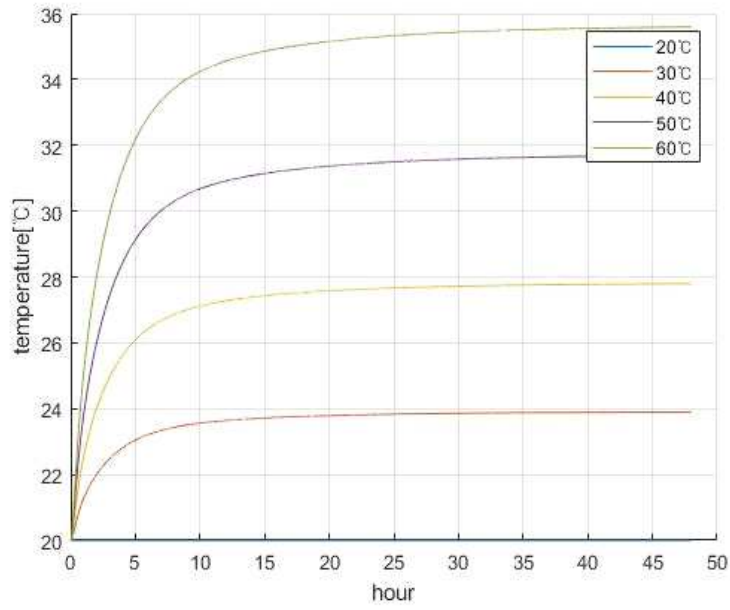
### 3.3 공급 온수 온도 & 공급 유량에 따른 방열량

공급 온수 온도 및 유량에 따른 방열량을 분석하기 위해 바닥난방 패널을 모사하여 MATLAB을 이용하여 수치해석 하였다. 바닥난방 패널은 [그림 3.2]의 표준 바닥 구조1에 따라 구성하였다. 초기 조건 및 경계 조건을 설정하고 격자를 설정하였다. 초기 및 경계 조건은 유럽 표준 EN1264를 참고하여 실내온도는 20℃, 공급 및 회수 열매의 온도 차가 거의 0이 되도록 정상상태에 도달하였을 때 방열량을 구하였다. 이산화 방법은 유한차분법으로 음해법(Implicit Method)을 사용하였다. 공급온도에 따른 방열량을 분석할 때 유량은 통제 변인으로서 일정하게 유지하였다. 또한, 유량에 따른 방열량을 분석할 때는 온도를 일정하게 유지하였다. Energy Plus에서 해당 모델에서 동일 조건에서 방열량을 분석하여 MATLAB을 통해 수치해석과 결과를 비교하였다.

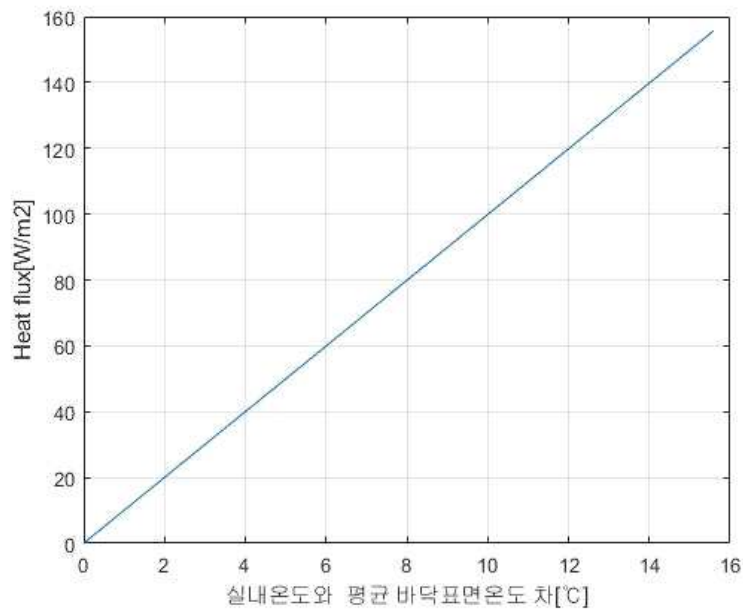
#### 3.3.1. 공급 온수 온도에 따른 방열량

공급 온수 온도에 따른 방열량을 산출하기 위해 경계 조건으로 실내온도 20℃, 배관 및 슬래브 초기 조건을 20℃로 설정하고 유량을 0.015kg/s로 일정하게 유지하였을 때, 바닥난방 공급온도를 20~60℃로 공급하여 정상상태가 도달하도록 하였다. [그림 3.3]은 공급온도에 따른 바닥 표면 온도의 변화를 시간에 따라 나타낸 것이다. [그림 3.4]는 정상상태에 도달하여 공급 및 회수 온도 차가 거의 나지 않았을 때, 실내온도(20℃)와 평균 바닥 표면 온도 차에 따른 방열량을 도출한 것이다. 이를 통해 공급온도 비율에 따른 방열량 비율을 [그림 3.5]와 같이 비례하는 것으로 판단할 수 있다.

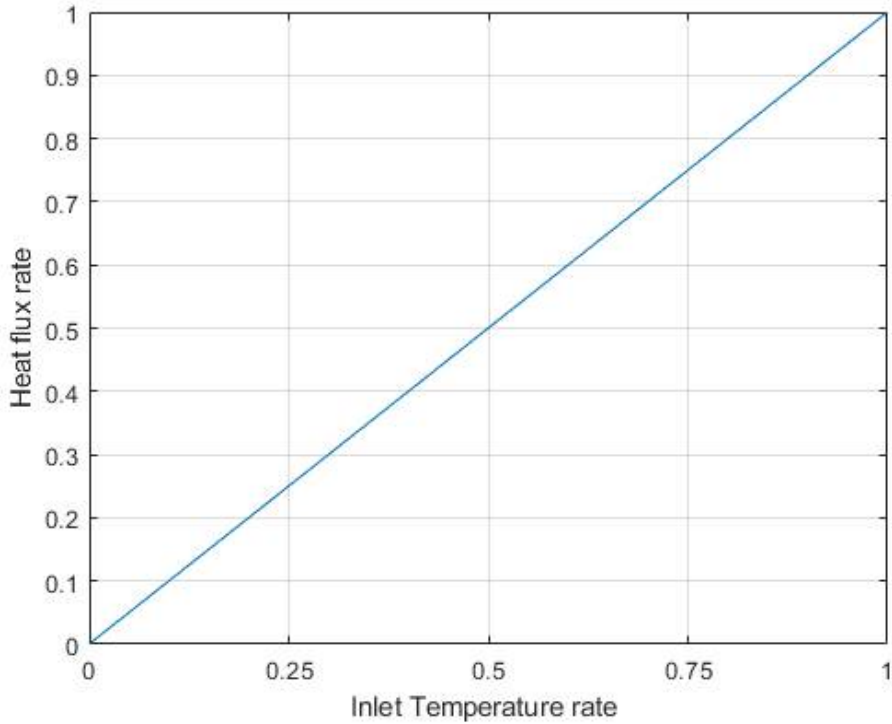




[그림 3.3] 바닥 난방 공급온도에 따른 바닥 표면 온도 변화



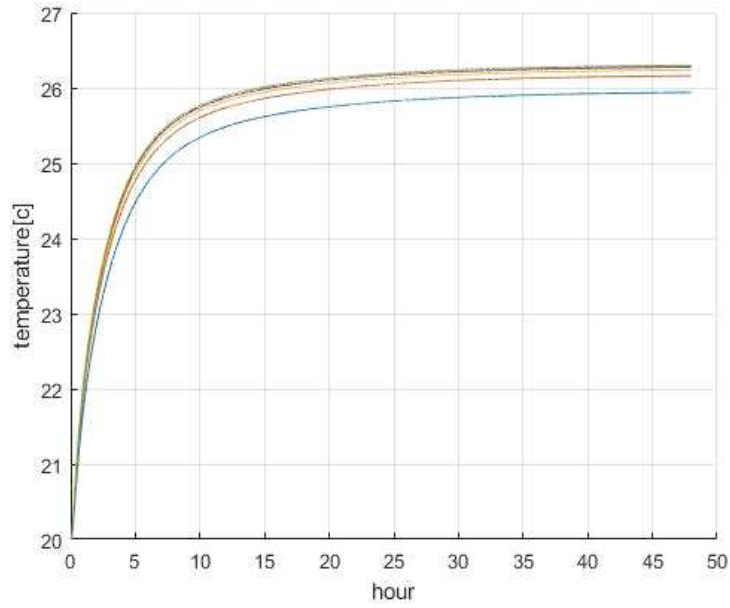
[그림 3.4] 실내온도와 평균바닥표면온도 차에 따른 방열량



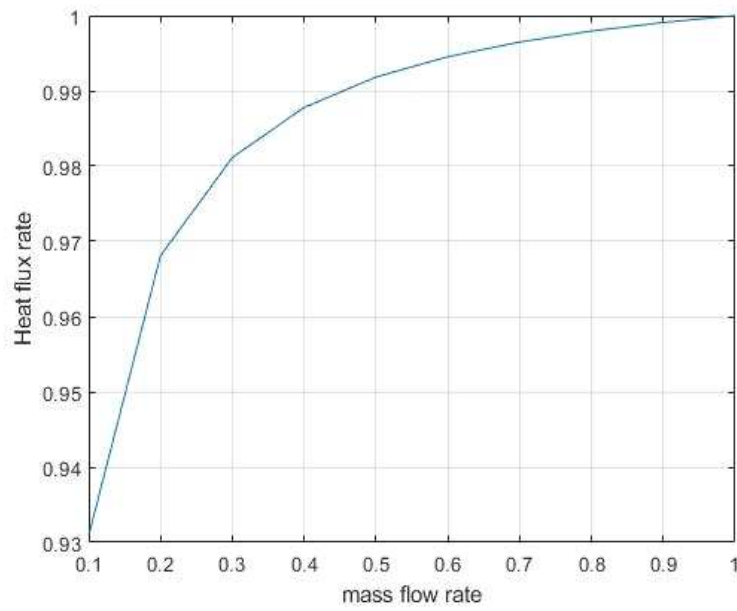
[그림 3.5] 공급온도 비율에 따른 방열량 비율

### 3.3.2 공급 유량에 따른 방열량

유량을 제외한 나머지 경제 조건을 동일하게 하고 공급온도를 36℃로 일정하게 유지하였을 때, 유량은 0.005~0.05kg/s로 공급하여 정상상태에 도달하도록 하였다. [그림 3.6]은 유량에 따른 바닥 표면온도의 변화를 시간에 따라 나타낸 것이다. [그림 3.7]는 정상상태에 도달하여 공급 및 회수 온도차가 거의 나지 않았을 때, 유량의 비율에 따른 방열량 비율을 도출한 것이다. 이를 통해 유량 비율에 따른 방열량 비율은 단순 선형적인 비례관계가 있지 않다는 것을 판단할 수 있다.



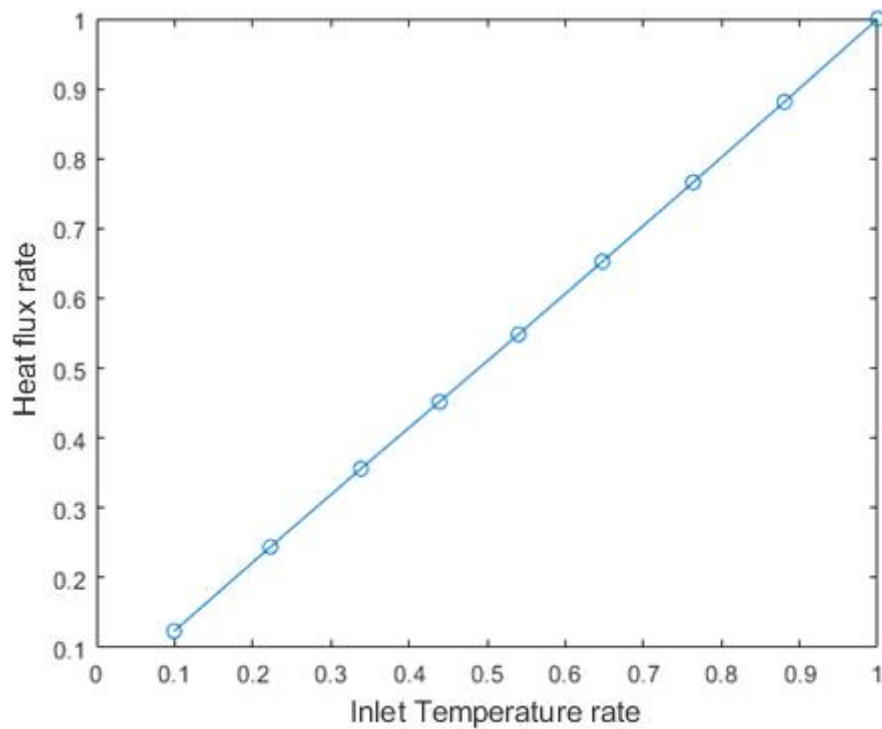
[그림 3.6] 바닥 난방 유량에 따른 바닥 표면 온도 변화



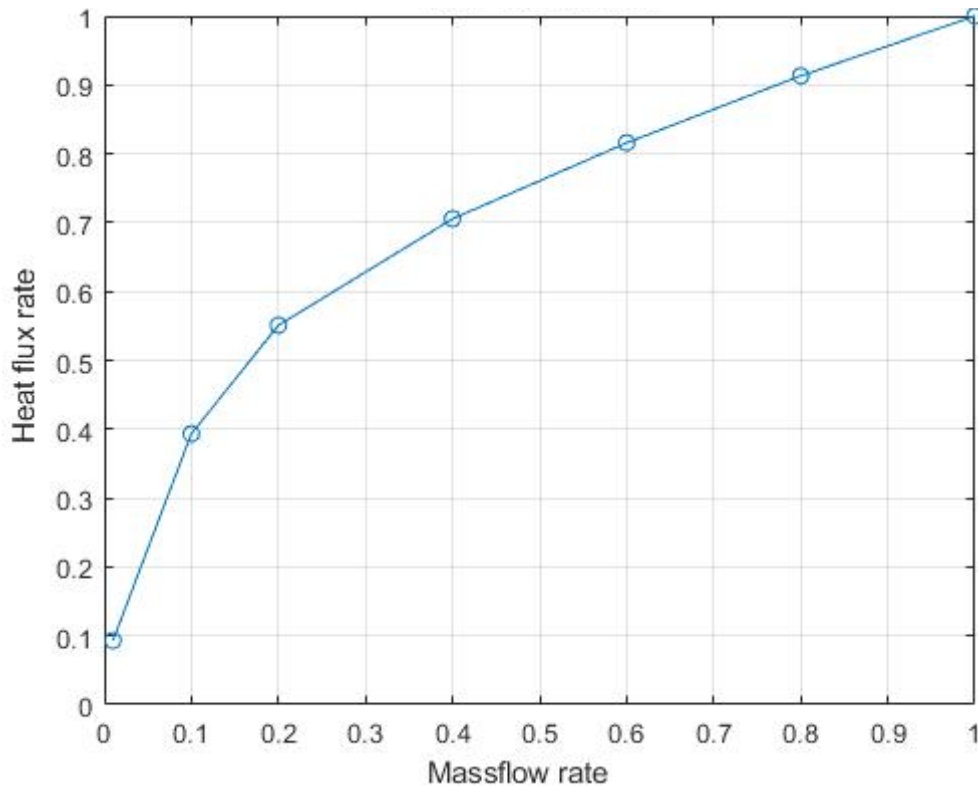
[그림 3.7] 유량 비율에 따른 방열량 비율

### 3.3.2. EnergyPlus 시뮬레이션 모델 비교

EnergyPlus 시뮬레이션 모델을 통해 공급온도와 유량에 따른 방열량 비율을 확인하여 보았다. 실내온도는 20℃로 유지된 상태에서 방열량을 구하였다. 공급온도에 따른 방열량을 도출하기 위해 유량은 일정하게 유지하고, 공급온도 20~36℃에 따른 방열량 비율을 [그림 3.8]과 같이 도출하였다. 유량에 따른 방열량을 도출하기 위해 공급온도를 36℃로 일정하게 유지하고, 유량 0.03~3LPM에 따른 방열량 비율을 [그림 3.9]와 같이 도출하였다. 수치해석을 통한 결과와 같이 공급온도와 방열량 사이의 1차 선형적인 관계를 확인하였고, 유량과 방열량 사이의 비선형적인 관계를 확인할 수 있다.



[그림 3.8] EnergyPlus 시뮬레이션 모델의 공급 온수 온도 변화율에 따른 방열량 비율



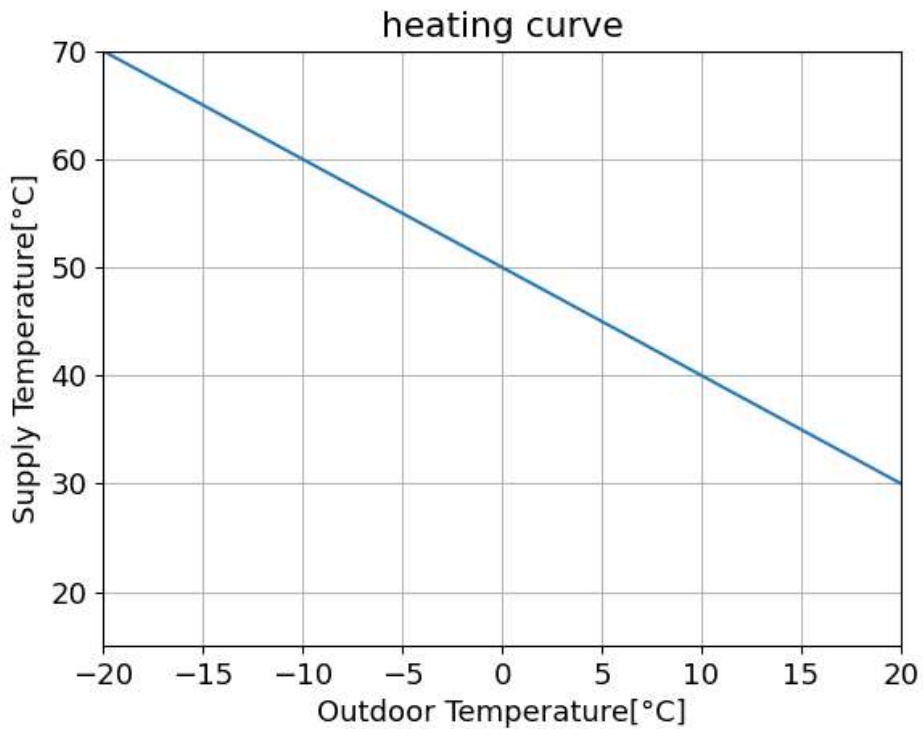
[그림 3.8] EnergyPlus 시뮬레이션 모델의 유량 변화율에 따른 방열량 비율

### 3.3.3. 시뮬레이션 제어인자 설정

위 결과를 통해 바닥복사 난방의 열매 공급온도와 방열량 사이에는 선형 비례 관계가 있어 공급온도 조절을 통해 간단하게 난방을 제어할 수 있다. 하지만 유량과 방열량 사이에는 비선형 관계로 비례제어가 가능하도록 등비율 밸브를 선정하여야 한다. 각 조건에 따른 유량과 방열량 사이의 관계가 일정하지 않기에 적절한 유량 제어 밸브를 선정하기 어려움이 있고, 이에 따라 난방 제어에 어려움이 있을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 유량을 일정하게 공급하고 공급 온수 온도를 통한 난방 제어를 진행할 것이다.

### 3.4 기존 외기보상 제어를 활용한 시뮬레이션

본 장은 설정한 시뮬레이션 모델 및 난방시스템을 기준으로 공급 온수 온도를 제어인자로 사용하는 외기보상제를 제어방법으로 설정하였다. 기존 국내 지역난방에서 사용하고 있는 난방곡선과 기존의 도출방법을 통해 구한 난방곡선을 이용하여 시뮬레이션하였다. 기존 난방곡선은 (1) 외기온도에 따라 난방 공급 온수 온도가 설정되어있는 룰 기반 방법, (2) 난방곡선을 가정하여 외기보상 제어를 통해 난방곡선을 수정하여 오차를 줄여 적절한 난방곡선을 도출하는 시행착오 방법이 있다. 두 기존 방법을 통해 시뮬레이션을 진행하였다.



[그림 3.10] 룰 기반 방법 난방 곡선

### 3.4.1. 룰 기반 방법

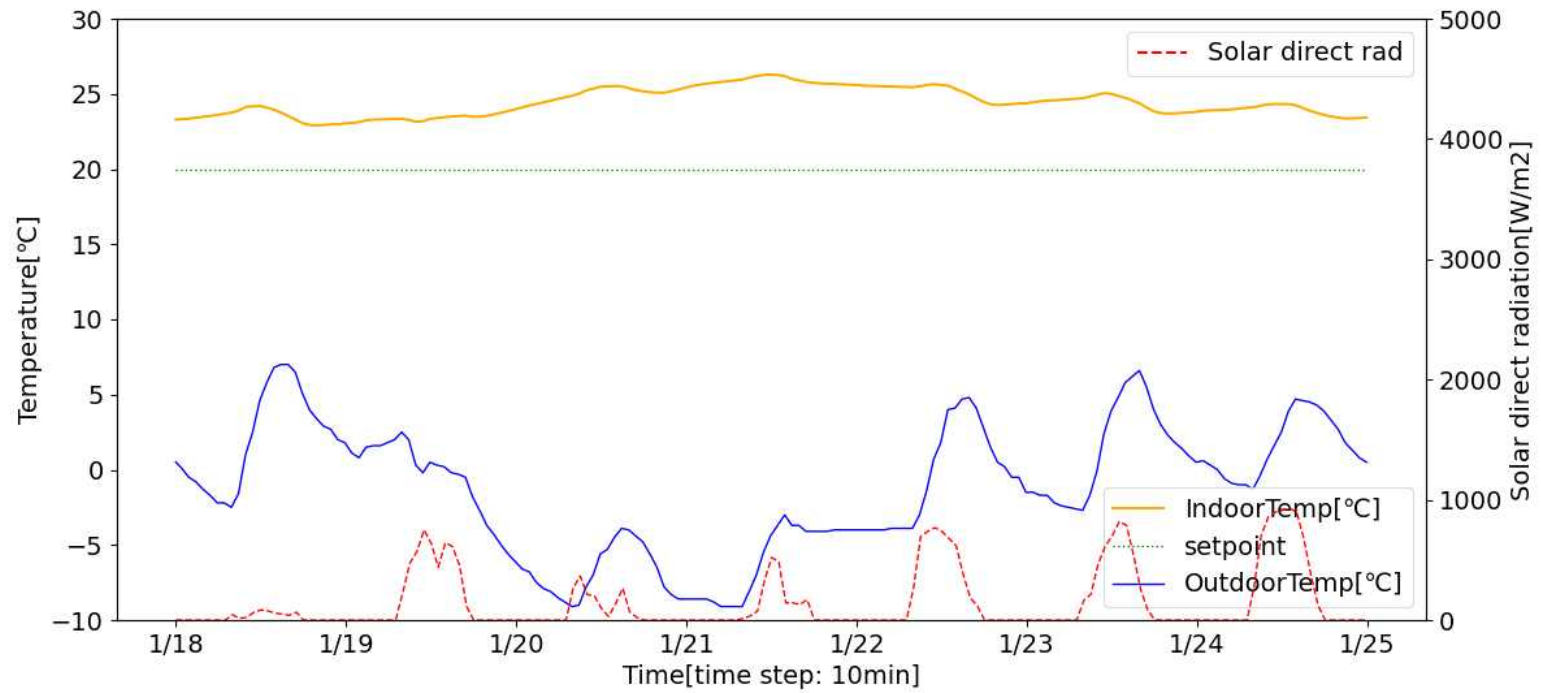
룰 기반 방법은 외기온도에 따라 난방 공급 온수 온도가 설정되어있는 방법으로 국내 지역난방에서 일반적으로 사용하는 방법이다. 국내 지역난방에서 적용하고 있는 룰 기반 방법의 난방곡선을 도출하고 시뮬레이션하여 결과를 분석하였다.

#### 가. 난방곡선 도출

선행연구 조사를 바탕으로 국내 공동주택에서 적용하는 외기보상 제어인 <표 2.2>와 <표 2.3>을 참고하였다. 외기온도가  $-10^{\circ}\text{C}$ 일 때 난방 공급 온수 온도는  $60^{\circ}\text{C}$ , 외기온도가  $0^{\circ}\text{C}$ 일 때 난방 공급 온수 온도가  $50^{\circ}\text{C}$ 가 되도록 난방곡선을 설정하였고 [그림 3.10]과 같다.

#### 나. 시뮬레이션

[그림 3.10]와 같이 난방곡선을 설정하여 시뮬레이션 기간(11/15~2/15) 동안 시뮬레이션을 진행하였다. [그림 3.11]은 시뮬레이션 결과 중 1/18~1/24의 기간동안 실내온도와 외기온도, 일사량을 나타낸 것이다. [그림 3.11]을 확인하면 외기온도에 따라 적절한 난방 공급 온수 온도가 설정되지 않아 일정한 실내온도를 유지하지 못하는 것을 확인할 수 있다. 외기온도가 약  $-5^{\circ}\text{C}$  ~  $-10^{\circ}\text{C}$ 일 때 실내온도가  $26^{\circ}\text{C}$ 까지 올라가며, 외기온도가 약  $-5^{\circ}\text{C}$  ~  $5^{\circ}\text{C}$ 일 때 실내온도가  $23^{\circ}\text{C}$  ~  $25^{\circ}\text{C}$ 를 형성하였다. 외기온도가  $-5^{\circ}\text{C}$  이하일 때 공급 온수의 온도가 외기온도가  $-5^{\circ}\text{C}$  이상일 때보다 다소 높게 공급되고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 지역난방에서 공급하는 온수 온도는 설정 온도  $20^{\circ}\text{C}$ 를 유지하기에 높은 온수 온도가 공급되고 있고 실내온도를 일정한 온도로 유지하기에 적절하지 않는 난방곡선을 적용하고 있는 것으로 확인되었다.

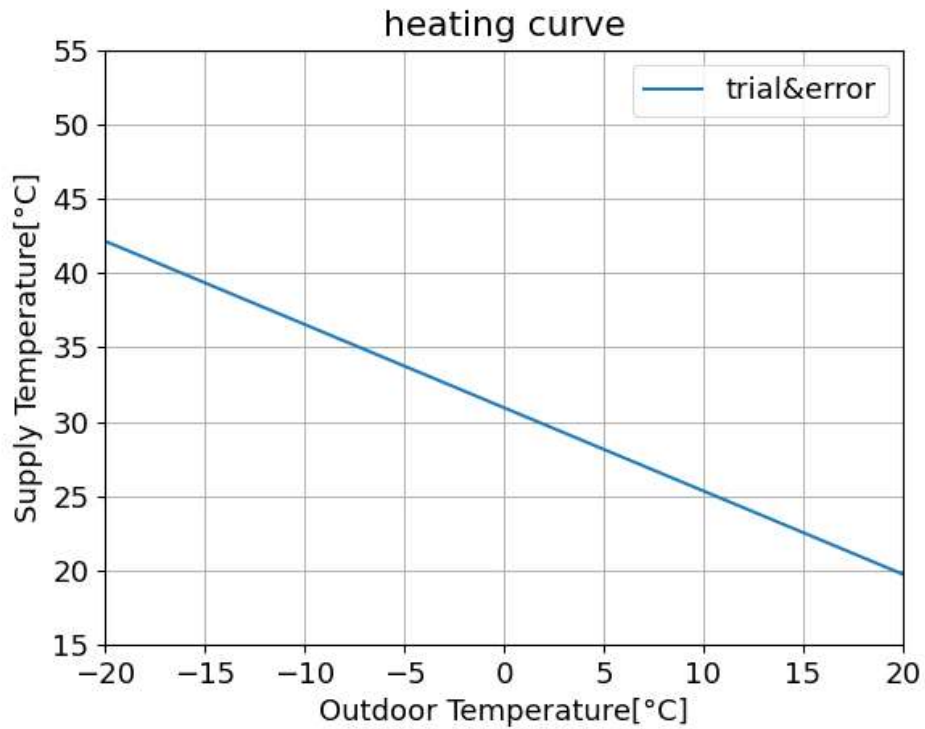


[그림 3.11] 룰 기반 방법 외기보상제어 시뮬레이션을 통한 실내온도 & 외기온도와 일사량(1/18~1/24)



### 3.4.2. 시행착오 방법

시행착오 방법은 예상되는 난방곡선을 설정하여 외기보상제어를 실행하면서 실내 온도가 설정 온도로 유지될 수 있도록 난방곡선을 수정하여 적절한 난방곡선을 찾는 방법이다. 해당 외기온도에 실내온도가 설정 온도보다 낮을 경우 난방곡선의 공급 온수 온도를 낮추고, 반대의 경우에는 난방곡선의 공급 온수 온도를 높혀 설정 실내온도에 맞는 난방곡선을 찾는다. 시행착오 방법을 이용하여 난방곡선을 찾고 시뮬레이션하여 결과를 분석하였다.



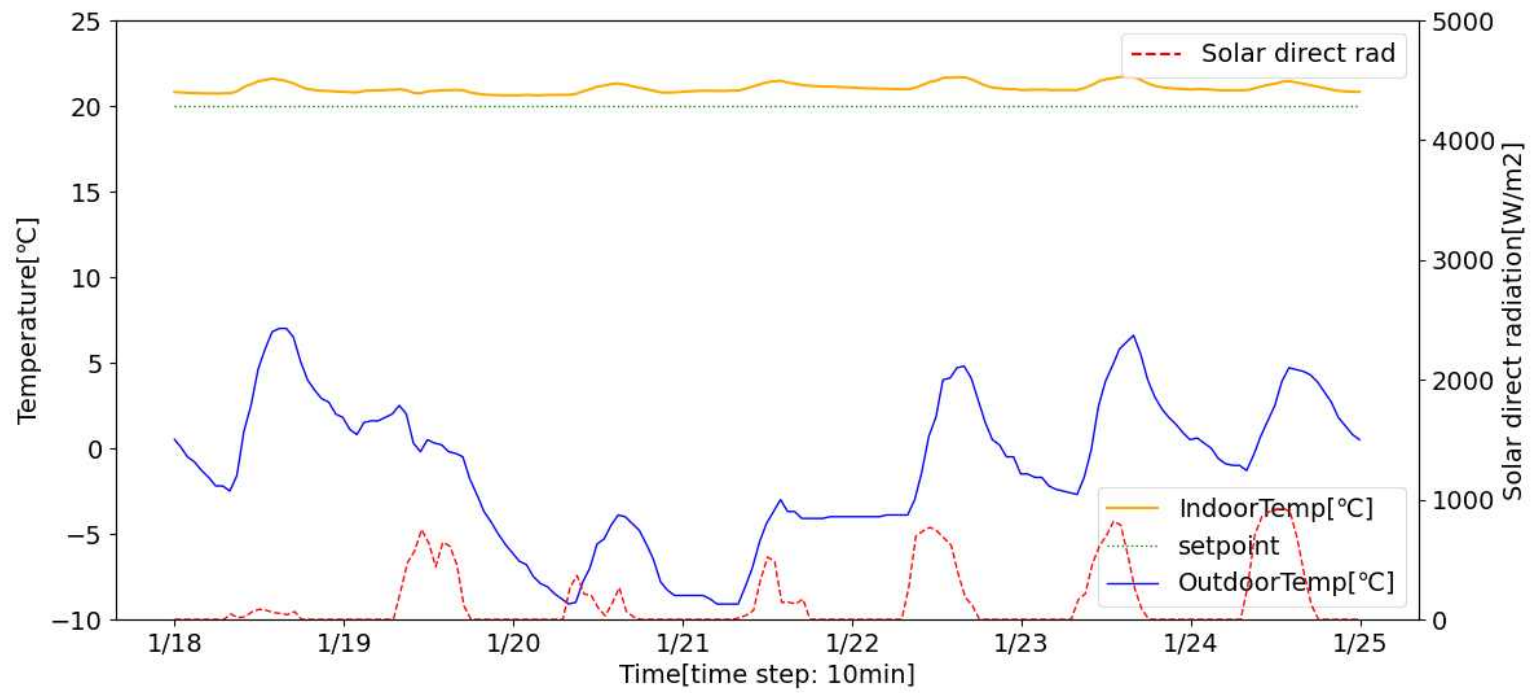
[그림 3.12] 시행착오 방법 난방곡선

### 가. 난방곡선 도출

시행착오 방법을 이용하여 난방곡선을 도출하기 위해 임의의 난방곡선을 설정하여 시뮬레이션을 진행 후, 난방곡선을 적절하게 수정하여 실내 설정 온도 20℃에 도달할 수 있도록 하였다. [그림 3.12]은 시행착오 방법을 통해 도출한 난방곡선이다. 시뮬레이션을 통한 난방곡선 도출과정에서 많은 횟수의 시뮬레이션 과정을 거친 만큼 실제 실험 혹은 난방 구역에서 시행착오 방법을 통한 난방곡선 도출은 많은 시간과 수정이 필요하여 어려움이 예상된다.

### 나. 시뮬레이션

[그림 3.12]과 같이 시행착오 방법을 통한 난방곡선을 설정하여 시뮬레이션 기간(11/15~2/15) 동안 시뮬레이션을 진행하였다. [그림 3.13]은 시뮬레이션 결과 중 1/18 ~ 1/24의 기간동안 실내온도와 외기온도, 일사량을 나타낸 것이다. 실내온도가 약 20.6℃ ~ 21.6℃ 사이를 유지하면서 이전 룰 기반 외기보상제어보다 실내온도가 설정 온도에 가깝게 유지되는 것을 확인할 수 있다. 하지만 낮 동안 외기온도가 상승하면서 실내온도도 함께 상승하면서 설정 온도와 약 1℃ 이상 차이나는 것을 확인할 수 있다. 시행착오 방법을 통해 외기보상제어 하는 것은 실내 설정 온도에 근접하게 실내온도를 제어할 수 있지만, 사람의 경험과 판단이 적절한 난방곡선을 찾는 데 많은 영향을 줄 수 있다. 또한, 최적의 난방곡선을 찾는 데 한계를 보인다.



[그림 3.13] 시행착오 방법 외기보상제어 시뮬레이션을 통한 실내온도 & 외기온도와 일사량(1/18~1/24)

### 3.5 소결

본 장에서는 시뮬레이션 모델 설정과 바닥복사 난방의 제어 변수의 방열량을 분석하여 제어방법을 찾고 시뮬레이션 결과를 분석하였다. 공동주택을 기반으로 시뮬레이션 모델을 만들기 위해 국내 열관류율 기준과 바닥복사 난방 패널의 기준을 파악하였고, 이를 적용하여 시뮬레이션 모델을 만들었다. 난방 패널의 방열량을 제어하기 위해 공급 온수 온도와 유량 조절에 따른 난방패널 방열량을 분석하여 바닥복사 난방을 제어하기 위한 제어 변수로 공급 온수 온도를 설정하였다. 공급 온수 온도를 이용한 외기보상제의 기존 두 가지 방법인 (1) 룰 기반 방법과 (2) 시행착오 방법의 난방곡선을 도출한 후 시뮬레이션 결과를 분석하였다.

본 장의 내용을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 공동주택의 바닥복사 난방을 적용하기 위해 국내 공동주택의 열관류율 기준을 국내 기준을 참고하여 시뮬레이션 모델을 설정하였다. 난방 부하에 영향을 끼치는 요인 중 침기량 및 환기량은 관련 문헌 및 국내 건축물 설비기준에 따라 침기량은 0.2ACH, 환기량은 0.5ACH로 설정하였다. 내부 발열 중 사람, 조명 발열량은 ASHRAE Handbook을 참고하여 내부 발열에 대한 불확실성을 고려하지 않고 스케줄로 설정하였다. 기상데이터는 서울지역 표준 기상데이터를 사용하였고 시뮬레이션 기간은 난방 기간을 고려하여 11/15~2/15로 설정하였다. 설정 온도는 20℃로 설정하였다.
- (2) 바닥복사 난방시스템을 설정하기 위해 바닥 난방패널의 설정과 열원을 공급하는 난방시스템을 설정하였다. 바닥 난방패널의 경우 국내 표

준바닥기준에 따라 구조 및 재료별 두께를 설정하였고, 열원을 공급하는 난방시스템은 지역난방 중 세대별 난방 온수를 공급할 수 있는 지역난방 열교환 유닛(HIU)로 설정하였다. 세대별 난방 온수를 공급할 수 있어 적절한 온수 공급을 통한 온열 쾌적과 에너지 소비를 저감할 수 있을 것이다.

- (3) 바닥복사 난방 제어인자를 설정하기 위해 제어인자인 온수 온도와 유량의 변화에 따른 바닥 난방패널의 방열량을 분석하여 제어인자를 결정하였다. MATLAB을 이용하여 유한요소법을 사용하여 수치해석하였고, EnergyPlus를 이용하여 결과를 비교 분석하였다. 설정된 공급 온수 온도의 비율(0~100%)에 따라 방열량은 선형적인 관계를 보였고, 공급 유량의 비율(0~100%)에 따라 방열량은 비선형적인 관계가 도출되었다. 따라서 방열량을 비례적으로 제어가 가능한 온수 온도를 제어인자로 설정하였다.
- (4) 공급 온수 온도를 제어인자로 사용하는 외기보상제어를 통해 시뮬레이션하였다. 국내 지역난방에서 외기온도에 따라 정해진 온수 온도를 공급하는 룰 기반 방법과 시행착오 방법으로 적절한 난방곡선을 찾아 제어하는 방법에 대해 난방곡선을 설정하고 시뮬레이션하였다. 룰 기반 방법의 외기보상제어는 세대별로 난방곡선을 적용할 수 없어 설정 온도 20℃보다 다소 높은 실내 온도(23℃~26℃)와 외기온도에 따라 실내온도가 3℃가량 차이가 났다. 시행착오 방법의 외기보상제어는 실내온도가 20.6℃~ 21.6℃ 사이를 유지하면서 룰 기반 방법보다 설정 온도에 가깝게 제어되었다. 하지만 난방운전을 통해 난방곡선을 계속해서 조정해야 하고, 최적의 난방곡선을 찾는 데 어려움이 있다.

## 제 4 장 Data-driven 방법을 활용한 제어

### 4.1 개요

본 장은 시뮬레이션 모델을 이용하여 공동주택의 바닥복사 난방 시 발생하는 데이터(공급 온수 온도, 환수 온수 온도, 실내온도)와 날씨 데이터 중 실내 온도에 영향을 미치는 변수를 선택하고 System Identification을 진행하였다. 이를 통해 Data-driven 방법을 활용하여 실내온도 제어법을 제안하였다. 외기보상 제어에서 난방곡선을 (1) 일정온수 온도 공급을 통한 단순 회귀법, (2) System Identification 중 ARX, NARX 모델을 활용한 방법을 통해 도출하였고, 난방곡선을 이용하여 시뮬레이션하였다.

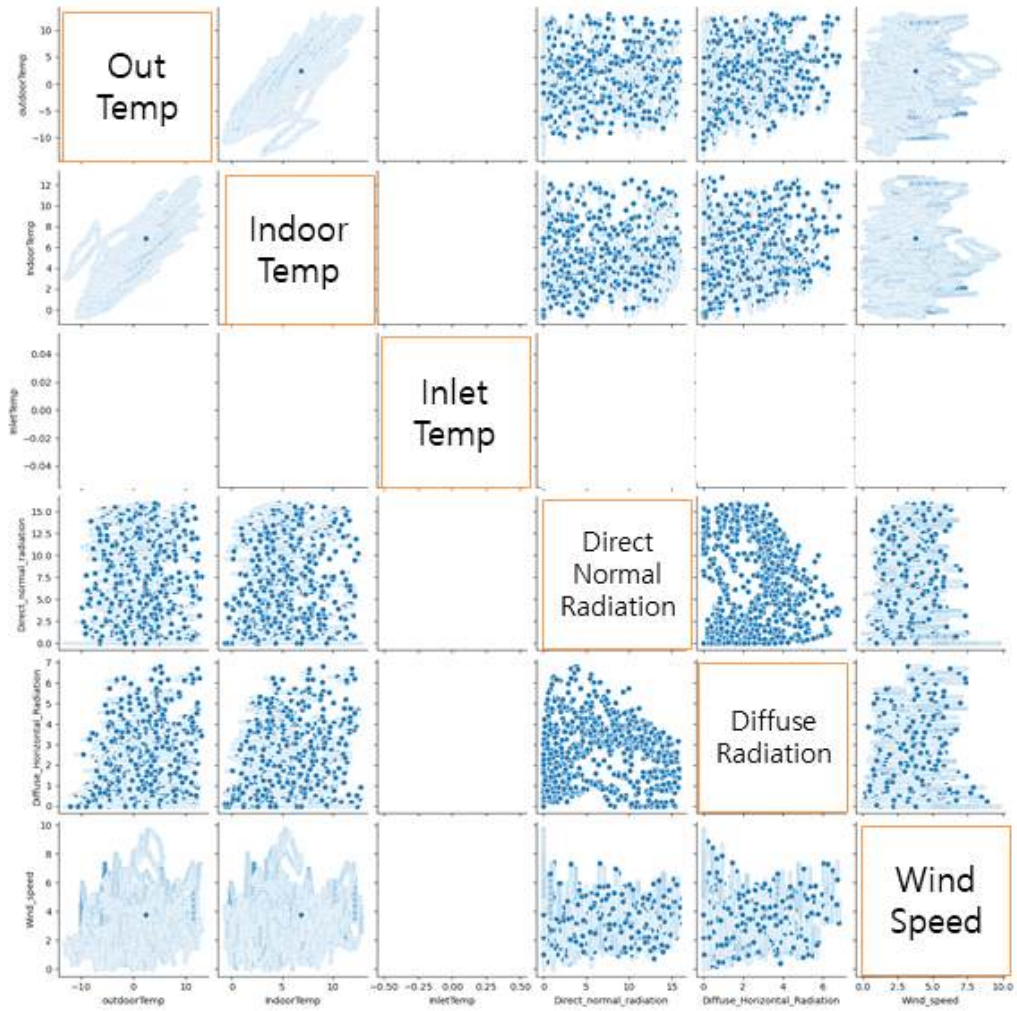
### 4.2 특성 선택(Feature selection)

특성 선택은 시스템 모델을 구성하는 과정에서 모델의 단순화를 통해 해석을 쉽게할 수있고, 빠르게 시스템을 찾을 수 있다. 따라서 실내온도에 영향을 미치는 냉방부하의 사전지식과 함께 시뮬레이션 데이터를 통해 변수 선택을 진행하였다. 대상 모델의 난방이 이루어지지 않은 상태에서 시뮬레이션 기간(11/15~2/15)동안 시뮬레이션을 통해 실내온도에 영향을 주는 요인을 분석하기 위해 시뮬레이션 데이터(실내온도)와 날씨 데이터(일사, 바람)의 산포도(Scatter plot)와 변수 중요도를 도출하였다. 따라서 바닥 복사난방의 실내온도를 제어하기 위한 영향 인자를 선택하였다.

#### 4.2.1. 산포도(Scatter plot)

[그림 4.1]은 대상 모델의 비난방 상태에서 시뮬레이션 기간(11/15 ~ 2/15)동안 외기온도, 실내온도, 직달일사량, 산란일사량, 풍속에 대한 산포도

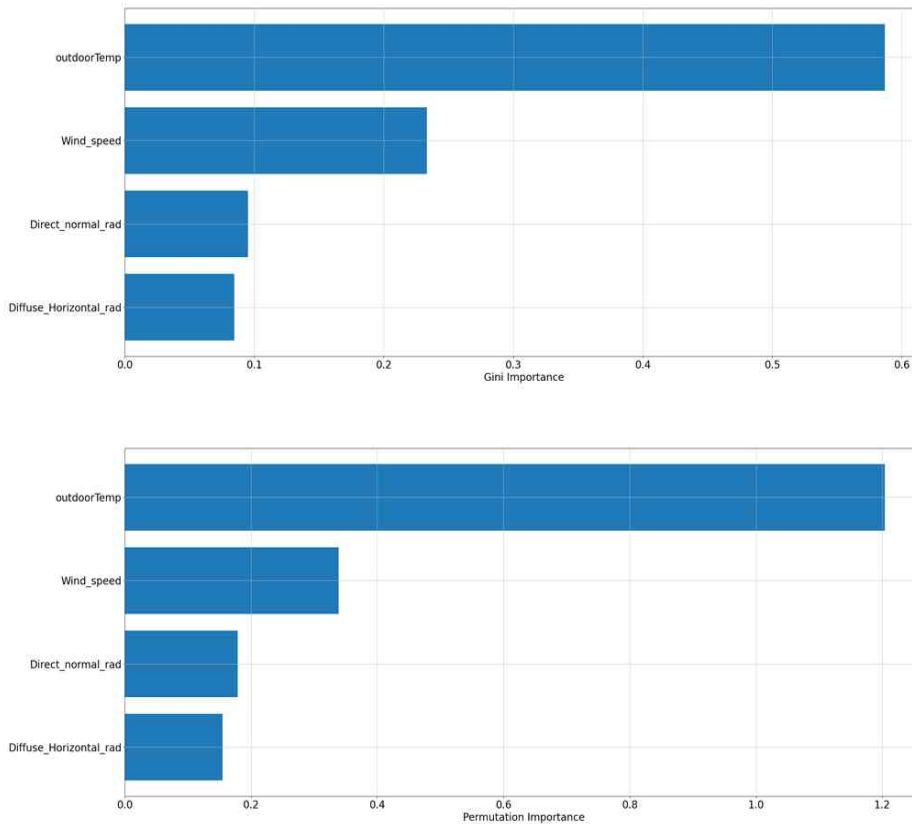
이다. 시각적으로 다른 변수들과 실내온도 사이에 유의미한 관계를 파악하기는 힘들지만 실내온도와 외기온도 사이에 선형적인 관계를 확인할 수 있다.



[그림 4.1] 대상 모델 비난방 상태 시뮬레이션 데이터 산포도

#### 4.2.2. 특성 중요도(Feature importance)

특성 중요도를 나타내기 위해 지니 중요도(Gini Importance)와 순열 중요도(Permutation Importance)를 통해 실내온도에 영향을 미치는 각 변수의 중요도를 파악하였다. 지니 중요도는 지니 불순도(Gini impurity)를 통해 중요한 변수일수록 불순도가 크게 감소한다는 것을 이용한다. 순열 중요도는 변수에 무작위로 노이즈를 주고 예측하였을 때 성능 평가지표(정확도, R-제곱 등)가 감소하였는지 측정한다. [그림 4.2]와 같이 지니 중요도와 순열중요도의 결과에서 실내온도는 외기온도에 가장 큰 영향을 받는 것을 확인하였다.



[그림 4.2] 지니중요도 & 순열중요도



### 4.3 System Identification

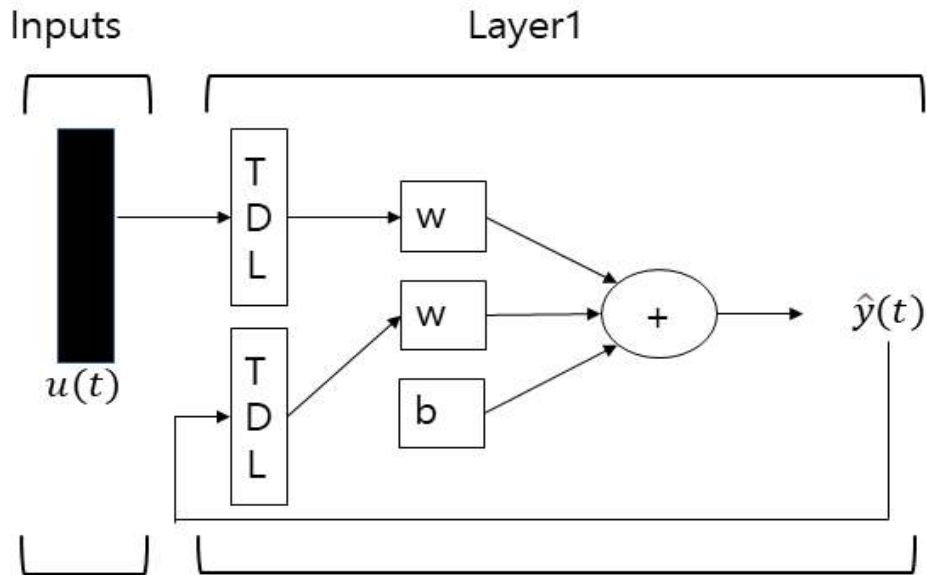
산포도 및 특성중요도를 통해 설정한 입력 변수와 출력 변수에 따라 System Identification을 진행하였다. 시스템 모델은 선형모델 중 간단하고 많이 사용되는 ARX와 비선형 함수로 신경망(Neural Network)을 적용하여 NARX 모델을 사용하였다. System Identification 과정에서 입력 시간 지연, 온도 예측, prediction horizon을 도출하였다.

#### 4.3.1. System Identification 변수 설정

위 산포도와 특성중요도를 통해 시뮬레이션 모델에서 비 난방 상황에서 실내온도에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 외기온도라는 것을 도출하였다. 또한 사전지식(Prior Knowledge)으로 겨울철 난방 시 낮 동안 일사에 의한 영향으로 실내온도의 상승은 난방 제어에 영향을 미친다. 따라서 System Identification을 위한 입력 변수는 실내온도, 실외온도, 일사량, 난방 공급 온도 온도이고 출력 변수는 실내온도로 설정하여 시뮬레이션에서 발생한 데이터를 정규화하여 3장에서 제시한 방법으로 Data-set을 구성하였다.

#### 4.3.2. ARX

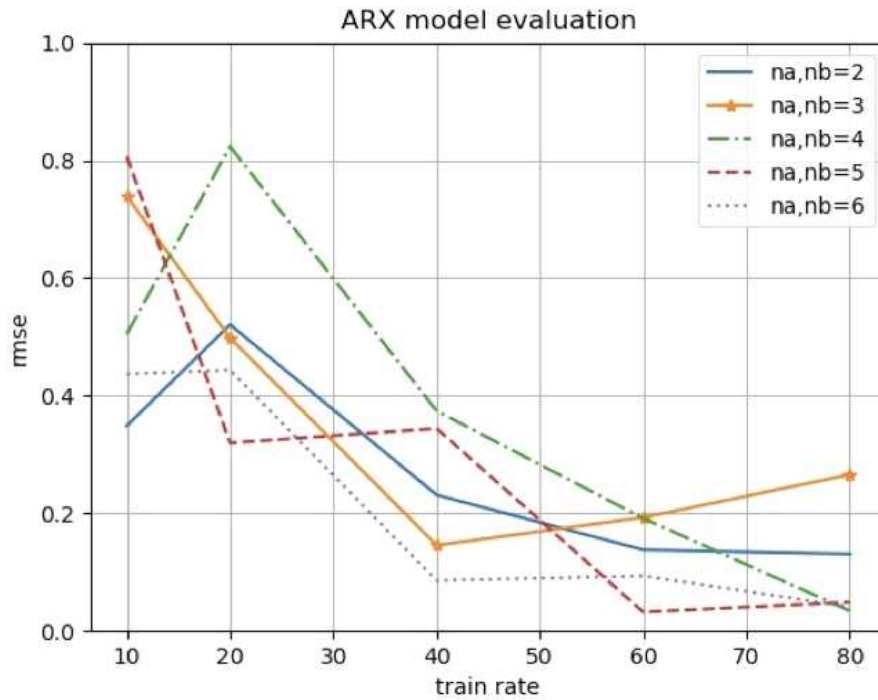
ARX 네트워크 구조는 [그림 4.3]와 같으며 출력값은 이전 출력값, 입력값에 의해 도출된다. ARX 모델을 사용하여 최적의 모델을 찾기 위해 Data-set을 이용하여 batch size는 32, epoch는 150으로 진행하였다. Test-set은 전체 Data-set의 20%로 검증하였고, 모델의 평가는 RMSE(Root Mean Square Error)와 R-제곱으로 진행하였다. ARX 모델 도출과정에서 Train-set의 비율, 입출력의 수( $n_a$ ,  $n_b$ ), 입력에 대한 출력값의 시간지연( $n_k$ )을 결정하였다. 형성된 모델을 통해 출력값 예측 성능과 예측 시간을 분석하였다.



[그림 4.3] ARX 네트워크 구조

가. Train-set과 입출력의 수( $n_a, n_b$ )

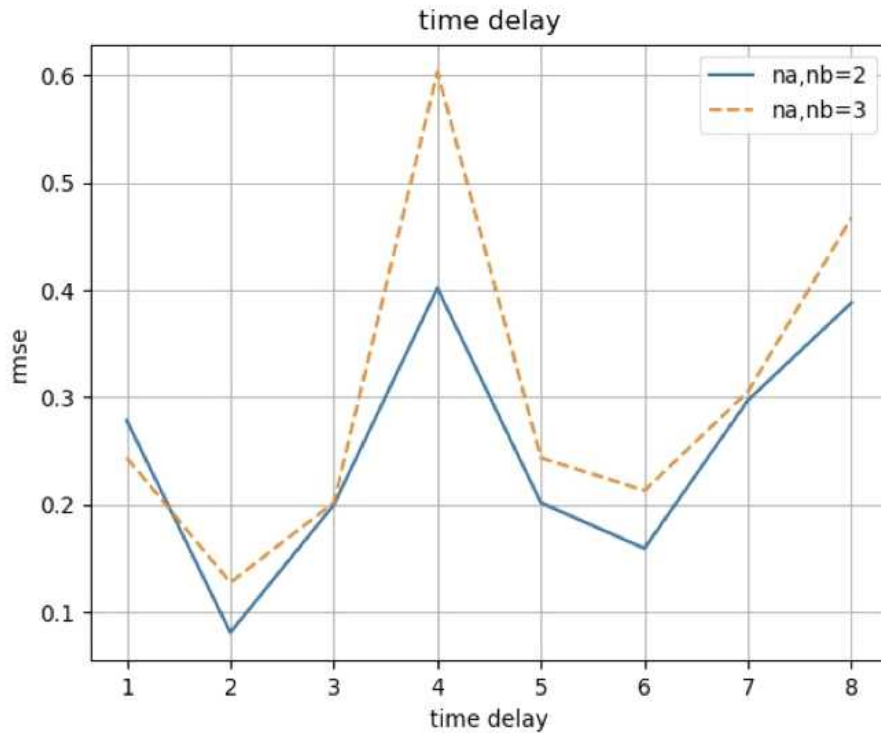
전체 Data-set에서 Train-set의 비율이 적으면 적절한 모델을 찾지 못해 과소적합(underfitting)이 일어나고 Train-set 비율이 높을 경우 과대적합(overfitting)이 일어날 수 있다. [그림 4.4]은 전체 Data-set에서 Train-set의 비율에 따른 Test-set의 ARX 모델 RMSE 평가값을 나타낸 것이다. 출력의 수( $n_a$ )와 입력의 수( $n_b$ )가 2~6일 때 Train set 비율이 커지면서 전반적으로 학습이 잘 이루어지는 것을 확인할 수 있다.  $n_a, n_b$ 의 수가 3일 때 Train-set의 비중이 40%를 넘어가면서 모델의 평가값(RMSE)이 높아지고,  $n_a, n_b$ 의 수가 5일 때 Train-set의 비중이 60%를 넘어가면서 평가값이 높아져 과대적합이 나타나는 경향을 보였다. 또한, 출력의 수( $n_a$ )와 입력의 수( $n_b$ )가 커질수록 모델 성능이 향상된 것을 확인할 수 있다. 이에 따라 모델 형성에 Train set 60%, 입출력의 수( $n_a, n_b$ )는 6으로 설정하여 진행하였다.



[그림 4.4] Train-set 비중에 따른 ARX 모델 RMSE 성능평가

#### 나. 입력 시간 지연( $n_k$ )

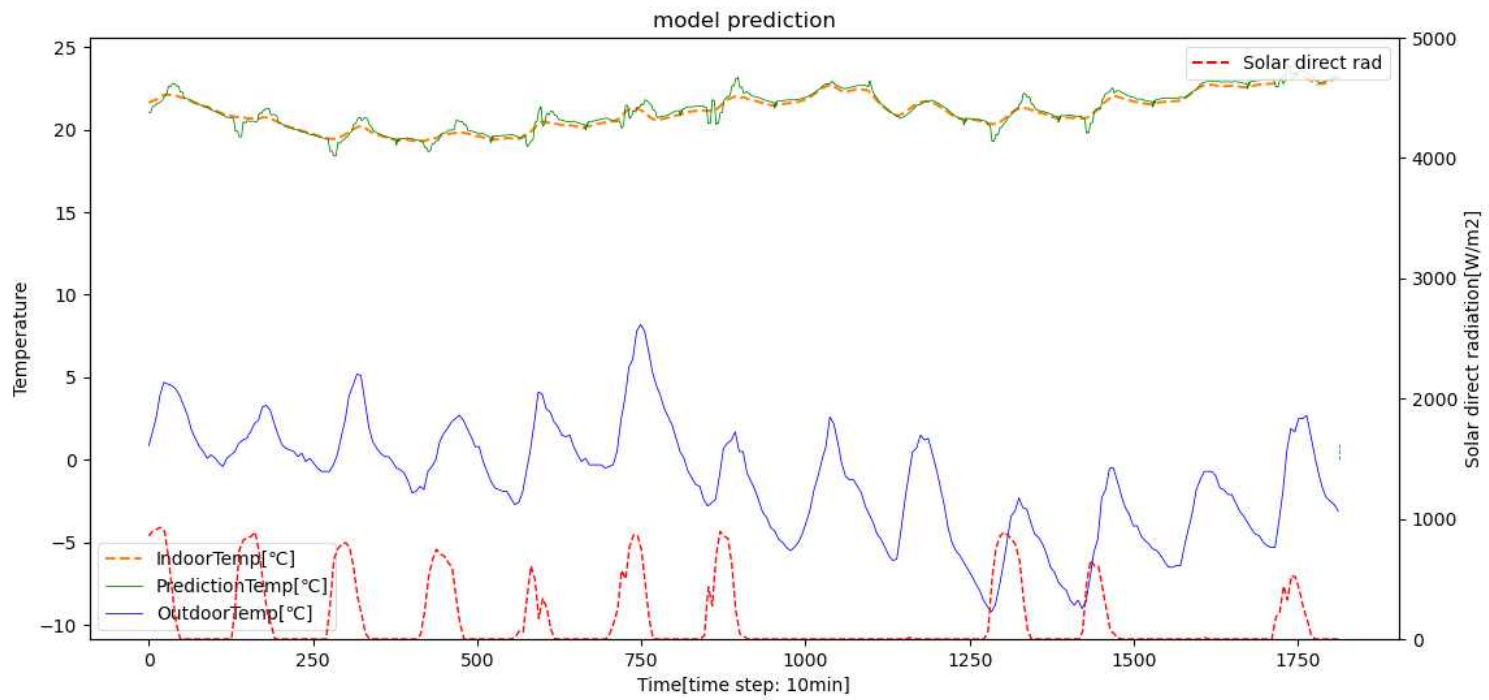
입력에 대한 출력의 시간 지연(time delay)을 확인하기 위해 입출력의 수가 2, 3일 때 입력의 시간 지연( $n_k$ )의 수에 따른 모델의 정확도를 RMSE를 측정하였다. 앞서 정의한 time step은 10분 이기에 시간 지연 측정은 10분 간격으로 진행되었다. [그림 4.5]는 입력의 시간 지연에 대한 출력 결과값 정확도를 RMSE를 통해 나타낸 것이다. 시간 지연( $n_k$ )의 수가 2와 6일 때 RMSE값이 작아지는 것을 확인할 수 있다. 이에 따라 입력에 대한 시간 지연은 20분, 60분으로 판단하였다.



[그림 4.5] ARX 모델의 입력 시간지연에 따른 결과값

#### 다. 실내온도 예측

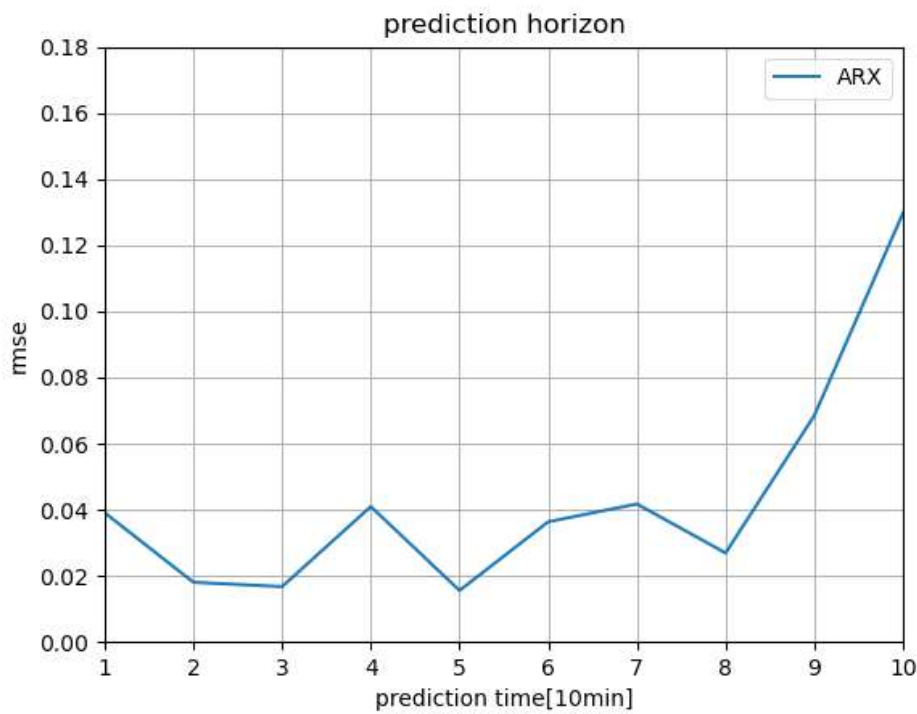
System Identification 과정을 통해 형성한 ARX 시스템 모델을 Test-set 에서 모델의 출력값인 실내온도를 예측하고 실제 출력값과 비교하여 예측 정확성을 분석하였다. [그림 4.6]는 Test-set을 이용하여 모델의 출력값인 실내온도 예측값, 실제 참 출력값과 함께 외기온도, 일사량을 나타낸 것이다. 출력값은 60분 후의 실내온도를 출력하여 예측하였다. 모델 성능은 RMSE 값이 0.0385, R-제곱 값은 0.95으로 나왔다.



[그림 4.6] ARX 모델의 60분 후 예측 실내온도와 실제 실내온도 및 외기온도, 일사량

라. 예측 시간(Prediction horizon)

형성된 ARX 모델의 예측 시간에 따른 출력값의 정확도를 분석하였다. [그림 4.7]은 예측 시간에 따른 ARX 모델의 RMSE 성능평가를 나타낸 것이다. 시뮬레이션의 time step이 10분으로 모델 출력의 실내온도 값을 10분 간격으로 예측하였다. ARX 모델의 10~80분까지 일정한 범위의 예측 성능을 유지하였다. 80분 이후의 실내온도 예측 성능평가 RMSE 값이 커지며 성능이 떨어지는 것을 볼 수 있다. 건물의 축열에 의해 실내온도에 영향을 미치는 입력 시간 지연의 영향이 10~80분 이후까지 미치는 것으로 판단된다. 이에 따라 ARX 모델을 통해 실내온도의 적절한 예측 시간은 10~80분 이후가 가장 좋은 성능을 보이며 예측 시간으로 적용할 수 있다고 판단하였다.



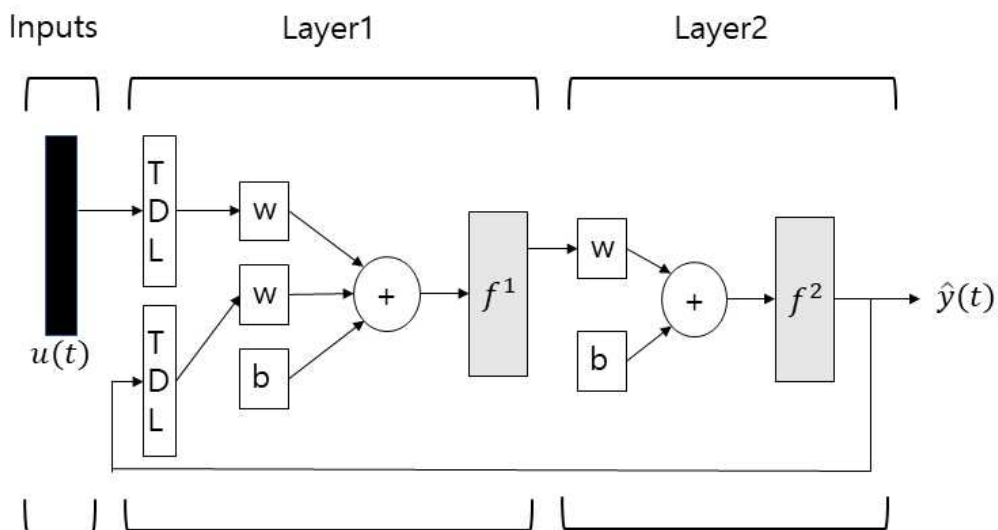
[그림 4.7] 예측 시간에 따른 ARX 모델 RMSE 성능평가

### 4.3.3. NARX

NARX 모델은 기존 ARX 모델에서 비선형 함수를 포함하여 비선형 시스템을 구현할 수 있다. 비선형 함수로 신경망(Neural Network)에서 활성화 함수를 사용하여 System Identification을 진행하였다. batch size와 epoch는 batch size=32, epoch=150으로, Test-set과 모델 평가 방법도 ARX 모델과 동일하게 Test-set 20%, 평가 방법은 RMSE로 진행하였다. NARX 모델 도출과정에서 NARX 네트워크 구조, Train-set과 입출력의 수( $n_a$ ,  $n_b$ ), 은닉층 뉴런의 개수를 결정하였다.

#### 가. NARX 네트워크 구조

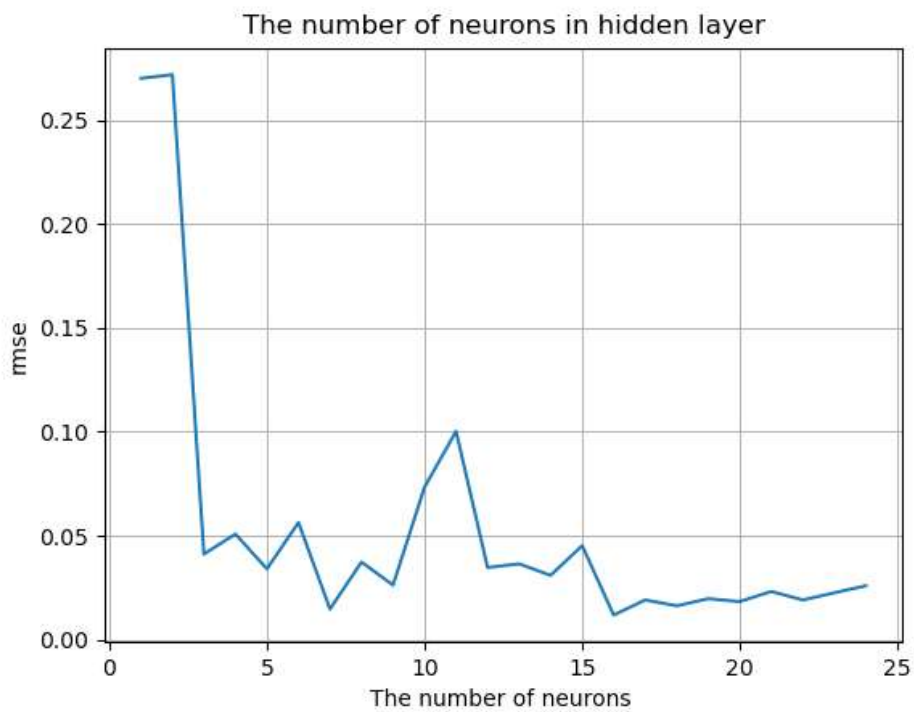
NARX 네트워크 구조는 [그림 4.8]과 같으며 출력의 다음 출력값은 이전 출력값들과 입력 신호의 이전 값들에 의해 도출된다. 은닉층인 Layer1에서 활성화 함수로 Relu6를 사용하였다.



[그림 4.8] NARX 네트워크 구조

### 나. 은닉층 뉴런의 개수

은닉층에서 뉴런의 개수를 설정하기 위해 뉴런의 개수에 따른 모델의 성능을 평가하였다. [그림 4.9]은 은닉층 Layer1의 뉴런의 개수에 따른 모델 결과를 RMSE 값을 나타낸 것이다. 뉴런의 개수가 16개까지 성능이 향상되는 경향을 보이며 16개 이후 성능이 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 뉴런의 개수가 16개일 때 가장 좋은 모델 성능을 보여 뉴런의 개수를 16개로 설정하여 진행하였다.

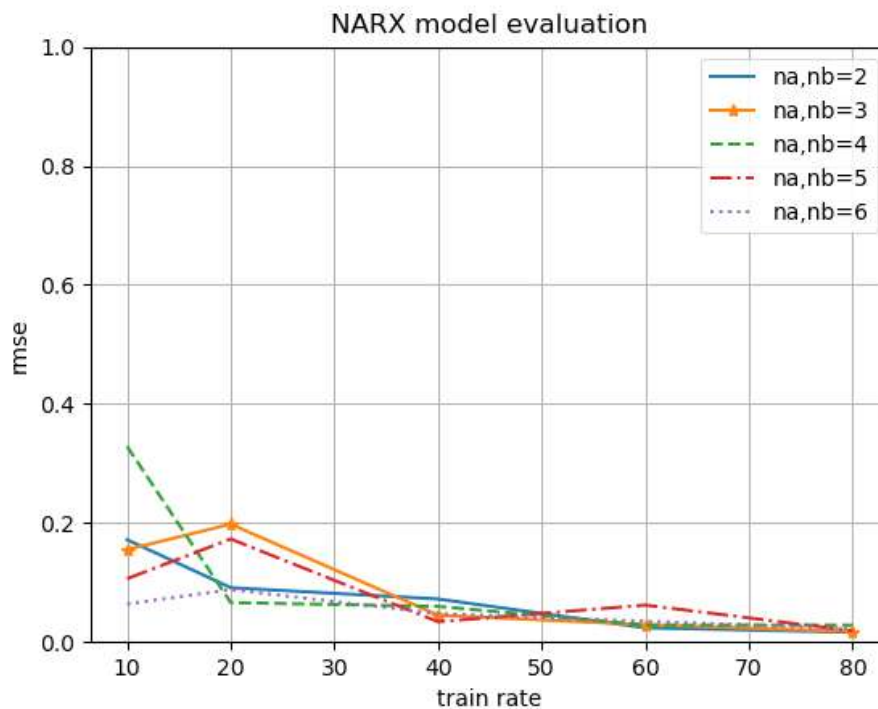


[그림 4.9] NARX 뉴런의 개수에 따른 RMSE를 이용한 모델 성능 평가



다. Train-set과 입출력의 수( $n_a, n_b$ )

NARX 모델 System Identification을 위해 Train-set과 입출력의 수( $n_a, n_b$ )에 따른 모델 성능 평가를 RMSE를 이용하여 진행하였다. [그림 4.10]은 전체 Data-set에서 Train-set의 비율에 따른 Test-set의 NARX 모델 RMSE 평가값을 나타낸 것이다. 입출력의 수( $n_a, n_b$ )가 3, Train-set이 10%를 제외하고 입출력의 수가 2~6일 때 Train-set의 비중에 따른 모델 학습이 전체적으로 잘 이루어지는 것을 확인할 수 있다. ARX 모델과 같이 전체 Data-set에서 Train-set 60%, 입출력의 수( $n_a, n_b$ )는 6으로 NARX 모델을 이용한 System Identification을 진행하였다.



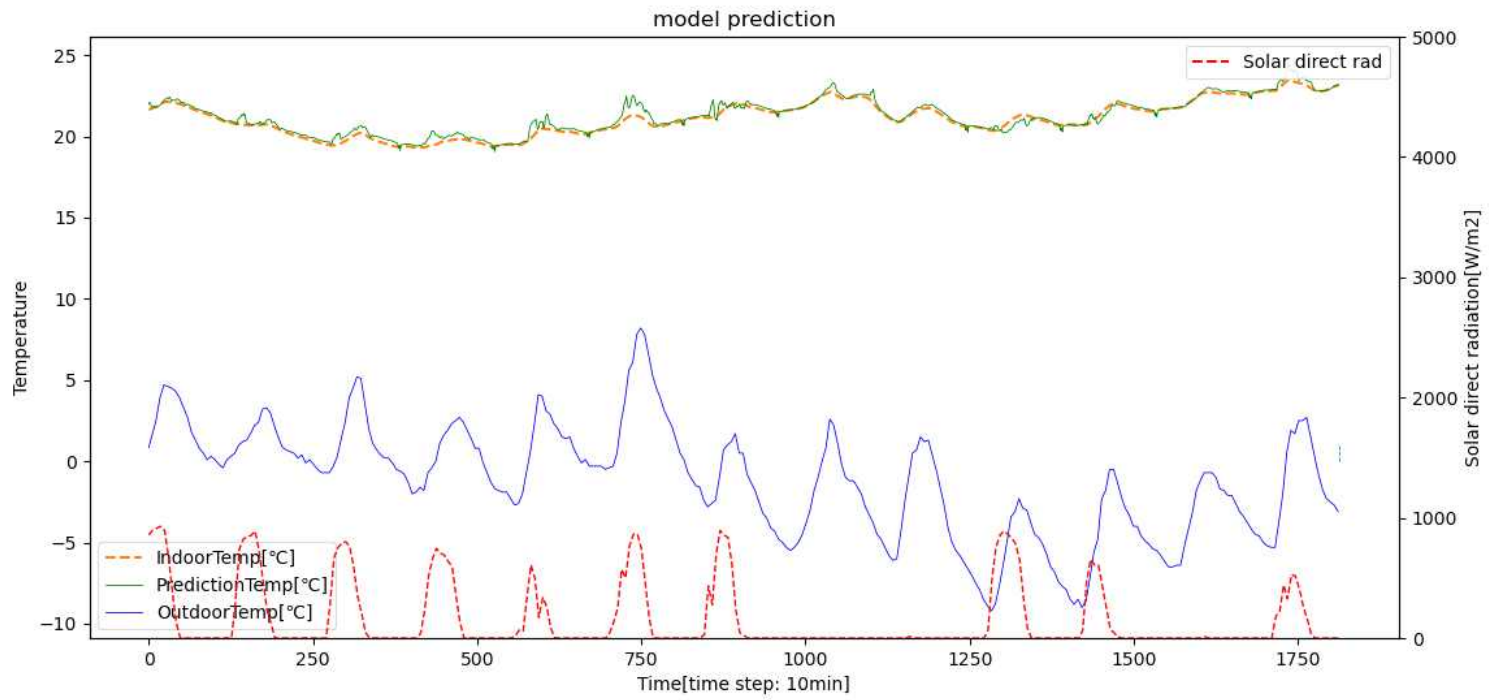
[그림 4.10] Train-set 비중에 따른 NARX 모델 RMSE 성능 평가

#### 라. 실내온도 예측

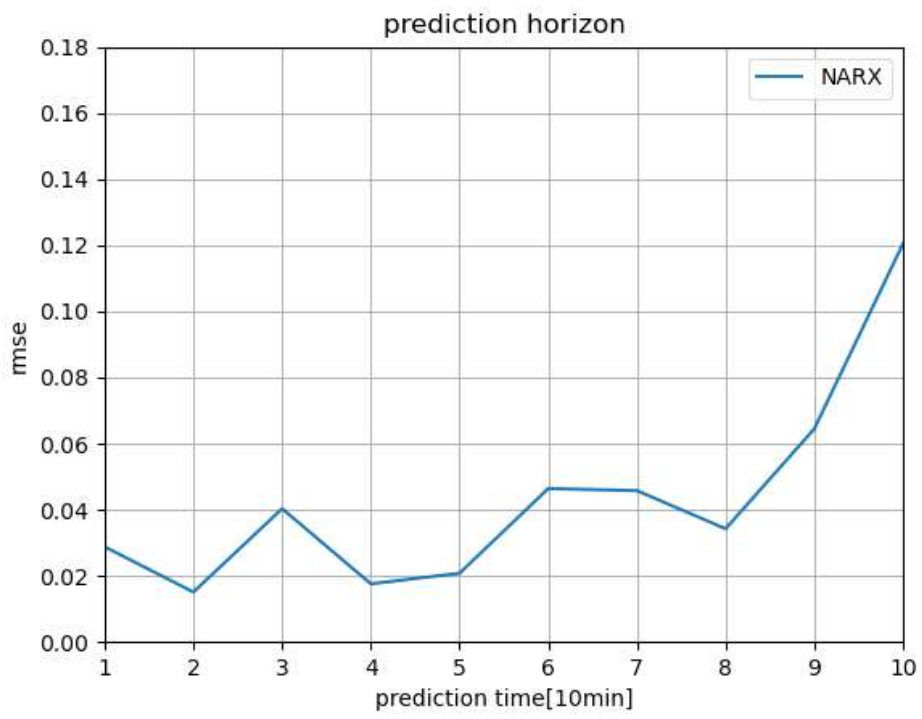
System Identification 과정을 통해 형성한 NARX 시스템 모델을 Test-set 을 이용하여 모델의 출력값인 실내온도를 예측하고 실제 출력값과 비교하여 예측 정확성을 분석하였다. [그림 4.11]는 Test-set을 이용하여 모델의 출력 값인 실내온도 예측값, 실제 참 출력값과 함께 외기온도, 일사량을 나타낸 것이다. 출력값은 60분 후의 실내온도를 출력하여 예측하였다. NARX 모델 성능은 RMSE 값이 0.0222, R-제곱 값은 0.96으로 나왔다. ARX 모델의 RMSE 값이 0.0385, R-제곱 값은 0.95으로 NARX 모델에서 실내온도 예측 성능이 ARX 모델보다 개선된 결과를 보였다.

#### 마. 예측 시간(Prediction horizon)

형성된 NARX 모델의 예측 시간에 따른 출력값의 정확도를 분석하였다. [그림 4.12]은 예측 시간에 따른 NARX 모델의 RMSE 성능평가를 나타낸 것이다. 시뮬레이션의 time step은 ARX 모델과 동일하게 10분으로 모델 출력의 실내온도 값을 10분 간격으로 예측하였다. NARX 모델의 10~80분까지 일정한 범위의 예측 성능을 유지하였다. 80분 이후의 실내온도 예측 성능평가 RMSE 값이 커지며 성능이 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 80분까지 예측 성능이 유지되는 이유는 ARX 모델과 마찬가지로 건물의 축열에 의해 실내온도에 영향을 미치는 입력 시간 지연의 영향으로 판단된다. 이에 따라 NARX 모델을 통해 실내온도의 적절한 예측 시간은 10~80분 이후로 판단하였다.



[그림 4.11] NARX 모델의 60분 후 예측 실내온도와 실제 실내온도 및 외기온도, 일사량



[그림 4.12] 예측 시간에 따른 NARX 모델 RMSE 성능평가

#### 4.4 Data-driven 방법을 활용한 난방곡선 도출 및 시뮬레이션

Data-driven 방법을 활용하여 시뮬레이션 결과 데이터를 통해 난방곡선을 도출하고 난방곡선을 적용하여 외기보상제어 시뮬레이션을 진행하였다. 난방곡선을 도출하기 위해 시뮬레이션 데이터를 활용하여 단순 선형회귀법과 앞에서 진행한 System Identification을 통해 얻는 ARX, NARX 모델을 활용한 난방곡선 도출법 두 방법을 사용하였다. 도출한 난방곡선을 이용하여 외기보상제어를 시뮬레이션하여 결과를 도출하였다.

##### 4.4.1. 일정 난방 온수 온도 공급을 통한 단순 회귀법

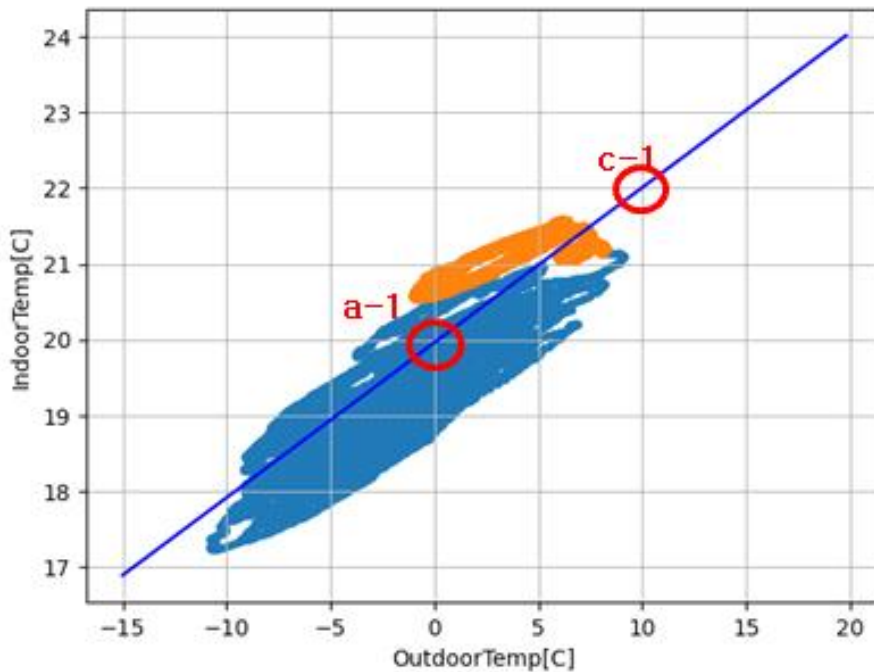
앞서 산포도를 통해 실내온도와 외기온도 사이에 선형적인 관계가 있는 것을 확인하였고, 외기보상 제어는 실내 설정 온도를 유지하기 위해 난방 공급 온수 온도와 외기온도 사이에 선형적인 관계가 있다는 것을 이용하여 제어하는 것이다. 따라서 위의 두 관계를 이용하여 기존 시행착오 방법을 통해 난방곡선을 찾는 대신 바닥복사 난방 시 수집할 수 있는 데이터(외기온도, 실내온도, 난방 공급 온수 온도 등)를 활용하여 단순 선형 회귀를 통해 자동적으로 난방곡선을 도출하고자 한다. Data-driven 방법을 통해 난방곡선을 도출하기 위해 난방 공급 온수 온도를 일정하게 유지하여 해당 온수 온도 공급 시 실내, 실외온도의 선형적인 관계를 도출하고, 설정온도에 해당하는 난방곡선을 구하였다.

난방 곡선을 구하는 방법으로 하나의 일정한 난방 공급 온수 온도를 통해 찾는 방법과 두 개의 일정한 난방 공급 온수 온도를 적용하여 난방곡선을 찾는 방법을 제안하였다. 첫 번째 방법은 난방하는 공간이 이론적으로 정상상태에서 설정온도, 외기온도, 실내온도가 모두 일치하는 것을 이용하여 구하는 방법이다. 두 번째 방법은 난방하는 공간이 이론적으로 위 관계가 성립하지

않을 시에 두 개의 난방 공급 온수 온도를 적용하여 설정온도를 맞추기위한  
 외기온도와 공급온도의 관계를 도출하여 구하는 방법이다. 이 두 가지 방법을  
 통해 난방곡선을 도출하여 외기보상 제어를 시뮬레이션하였다.

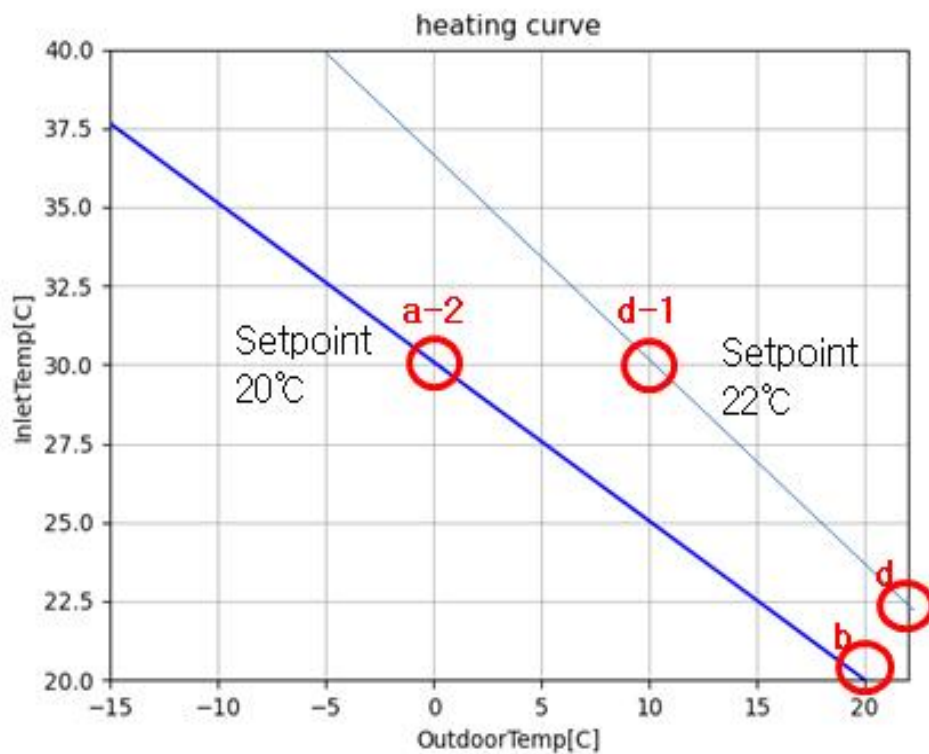
가. 하나의 난방 공급 온수 온도를 통한 난방곡선 도출

30℃의 일정한 난방 온수 온도 공급을 통해 [그림 4.13]와 같이 실내온도  
 와 외기온도 사이의 선형관계를 도출하였다. 시뮬레이션 기간(11/15~2/15)  
 중 선형관계를 도출을 위해 최소제곱법을 사용하였으며, 사용한 데이터는 주  
 황색 점 데이터로 약 3일에 해당한다. 파란색 점 데이터는 나머지 시뮬레이션  
 기간의 데이터이다. 실내 설정 온도를 20℃일 때 점 a-1과 같이 난방 공급 온  
 수 온도 30℃에 대한 외기온도는 약 0℃에 해당하는 것을 확인할 수 있다.



[그림 4.13] 30℃ 난방 온수 일정 공급을 통한 실내온도 외기온도 선형관계

[그림 4.14]는 실내 설정 온도 20℃ 일 때 난방 공급 온수 온도와 외기온도 사이의 관계를 나타낸 것이다. [그림 4.13]의 a-1의 점이 [그림 4.14]의 a-2의 점에 해당한다. 그리고 이론적으로 정상상태에서 외기온도와 난방 공급 모두 20℃ 일 때 실내온도 또한 20℃가 되기에 이에 해당하는 점은 b이다. 따라서 [그림 4.13]과 같이 점 a-2와 점 b를 연결하여 실내 설정 온도 20℃일 때 난방 곡선을 도출할 수 있다. 만약 실내 설정 온도를 22℃로 할 시 [그림 4.13]에서 실내온도 22℃에 해당하는 외기온도 c-1을 찾고 [그림 4.14]에서 해당하는 점 c-2와 외기온도와 난방 공급 온수 온도가 22℃가 되는 점 d를 연결하면 해당 설정 온도 22℃의 난방곡선이 도출된다.

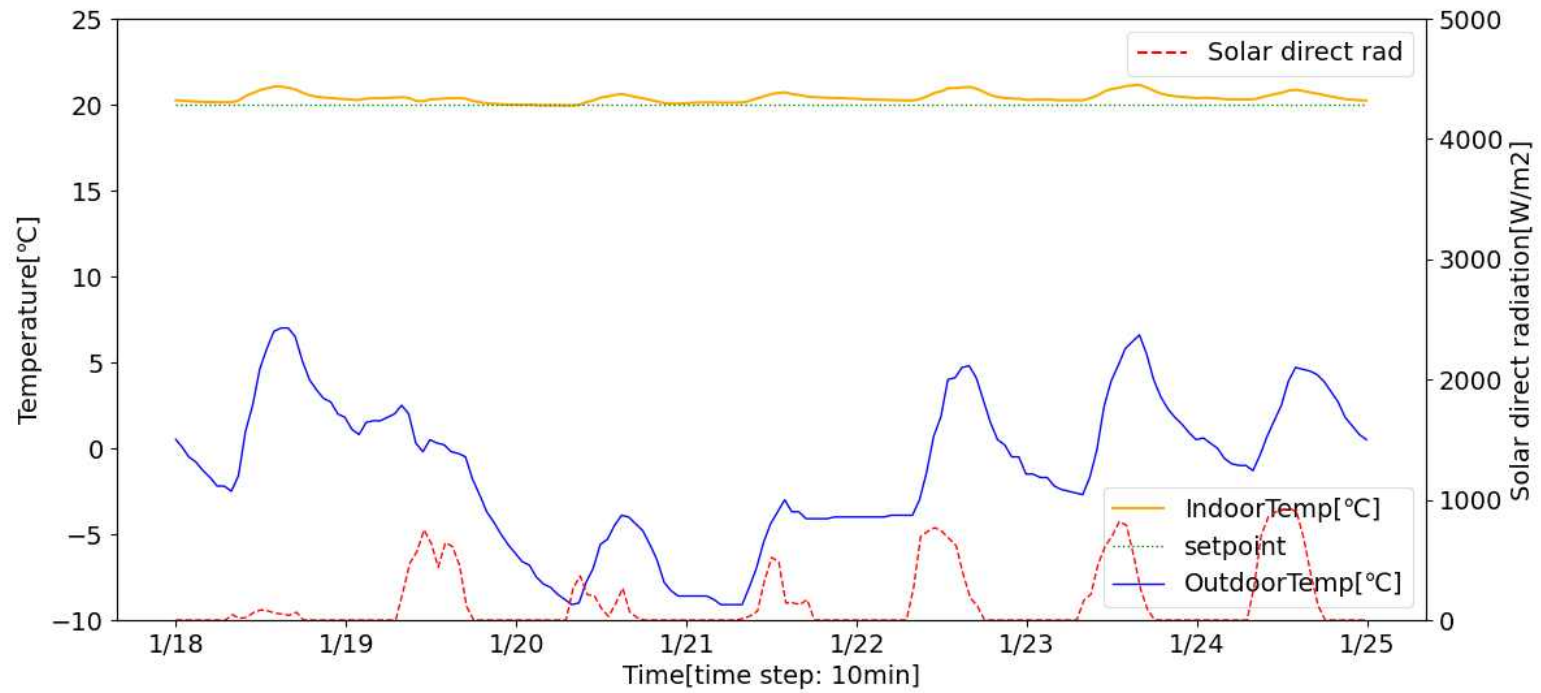


[그림 4.14] 하나의 일정 난방 공급 온수 온도를 통한 실내 설정 온도 20℃, 22℃의 난방곡선

나. 하나의 일정 난방 온수 공급을 통해 도출된 난방곡선 시뮬레이션

30℃의 난방 공급 온수를 통해 실내 설정온도 20℃의 난방 곡선 [그림 4.14]을 이용하여 시뮬레이션 기간(11/15~2/15) 동안 시뮬레이션을 진행하였다. [그림 4.15]는 시뮬레이션 기간 중 1/18~1/25에 해당하는 결과이다. [그림 4.15]의 기간 중 외기온도가 10℃와 -10℃ 사이로 변화함에도 실내온도가 비교적 일정하게 설정 실내온도로 유지되어 다소 적절한 난방곡선을 도출한 것으로 판단된다. 또한, 기존 지역난방의 룰 기반 제어방법과 시행착오 방법보다 실내 설정 온도에 근접하게 실내온도가 유지되는 것을 확인할 수 있다. 난방곡선을 찾기 위한 기존 시행착오 방법은 최적의 난방곡선을 찾는 데 한계가 있고 소요시간을 예상하기 어렵다. 반면, 본 연구에서 제안한 하나의 일정 난방 온수 공급을 통해 바닥난방 시 발생하는 데이터를 이용하여 난방곡선을 도출하는 것은 소요시간이 일정하고 기존의 방법보다 편리하다. 또한, 난방 중 수집된 데이터를 이용하여 기존 난방곡선을 자동적으로 수정할 수 있고, 일정 난방 온수 공급을 통해 제어하고자 하는 공간을 입력 변수 중 하나를 통제함으로써 외기온도와 실내온도 사이의 관계를 정확하게 찾을 수 있다. 따라서 난방곡선의 높은 정확도를 얻을 수 있다. 한편, 난방곡선을 통한 외기 보상제는 외기온도에 따라 실내온도를 제어할 수 있지만, 이외의 영향을 주는 요인을 제어할 수 없다. 다음 [그림 4.15]에서 일사량에 의해 실내온도의 상승으로 영향을 미쳐 실내 설정 온도보다 실내온도가 높아지는 것을 확인할 수 있다.

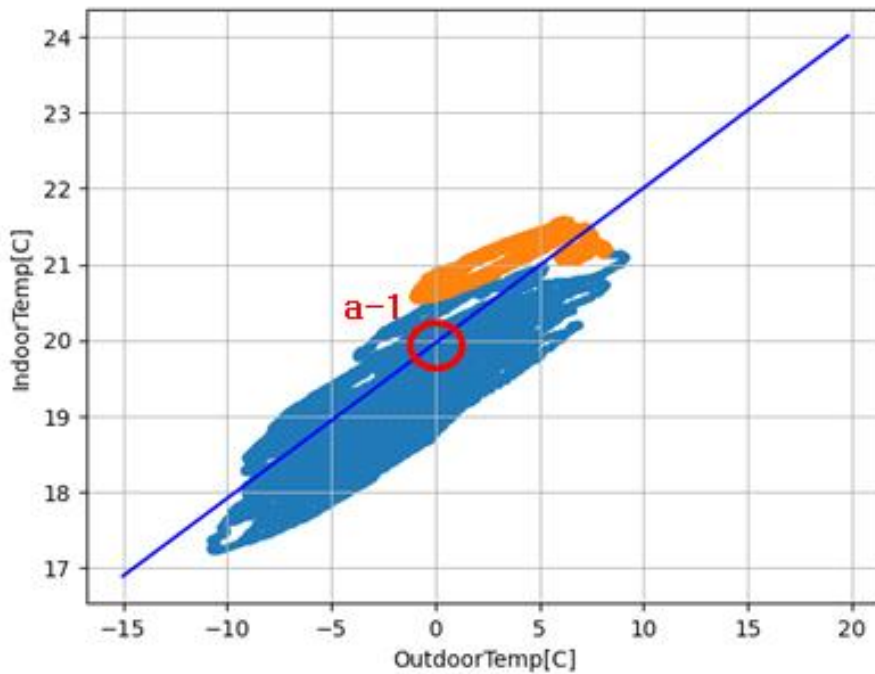




[그림 4.15] 하나의 일정 난방 온수 공급을 통해 도출된 난방곡선의 외기보상 제어 시뮬레이션(1/18~1/24)

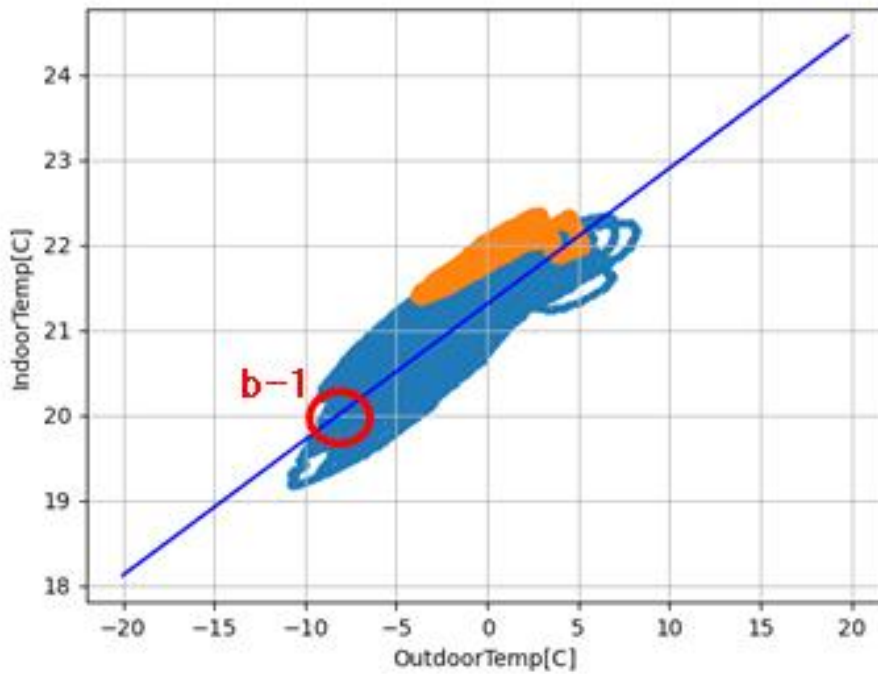
다. 두 개의 난방 공급 온수 온도를 통한 난방곡선 도출

시스템 혹은 실제 공간에서 이론과 다르게 정상상태에서 외기온도, 실내온도, 난방 온수 공급온도가 일치하지 않을 수 있다. 이와 같은 경우 두 가지 다른 일정한 난방 온수 온도 공급을 통해 실내온도와 실외온도 선형관계를 찾고 이를 통해서 난방곡선을 도출할 수 있다. 앞의 일정한 온수 온도 공급을 통해 난방곡선을 도출한 것과 동일한 방법으로 시뮬레이션(11/15~2/15) 기간 난방 공급 온수 온도 30℃, 33℃에 따른 실내온도와 외기온도 선형관계를 도출하였다. [그림 4.16]는 난방 공급 온수 온도 30℃에 대한 실내외 온도 관계이고, [그림 4.17]는 난방 공급 온수 온도 33℃에 대한 실내외 온도 관계이다.

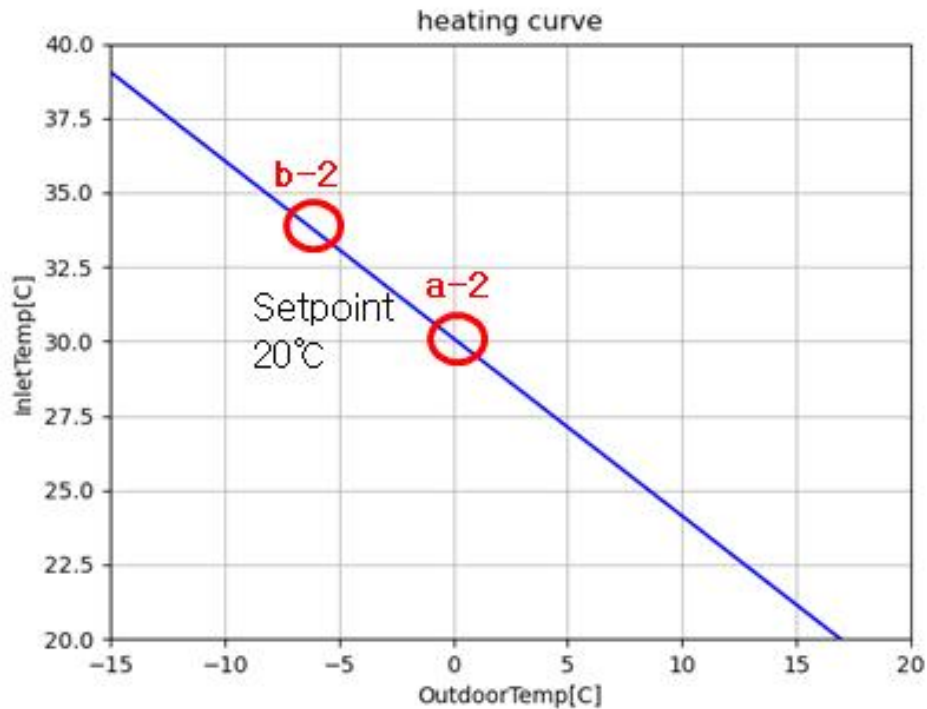


[그림 4.16] 30℃ 난방 온수 일정 공급을 통한 실내온도 외기온도 선형관계

두 회귀 분석 모두 약 3일의 데이터(주황색 데이터)를 이용하여 선형관계를 도출하였다. 파란색 데이터는 나머지 시뮬레이션 기간 실내온도와 외기온도 데이터이다. 실내 설정온도가 20℃일 때 [그림 4.16]에 따라 점 a-1과 같이 난방 공급 온수 온도 30℃에서 외기온도는 약 0℃이고, [그림 4.17]에 따라 점 b-1과 같이 난방 공급 온수 온도 33℃에서 외기온도는 약 -8℃인 것을 확인할 수 있다. [그림 4.18]은 실내온도(설정온도) 20℃일 때 외기온과 난방 공급 온수 온도 사이의 관계이다. [그림 4.16]에서 실내온도 20℃를 만족하는 a-1 점은 [그림 4.17]에서 a-2와 일치하고, [그림 4.17]에서 실내온도 20℃를 만족하는 b-1 점은 [그림 4.18]에서 b-2 점과 일치한다.



[그림 4.17] 33℃ 난방 온수 일정 공급을 통한 실내온도 외기온도 선형관계

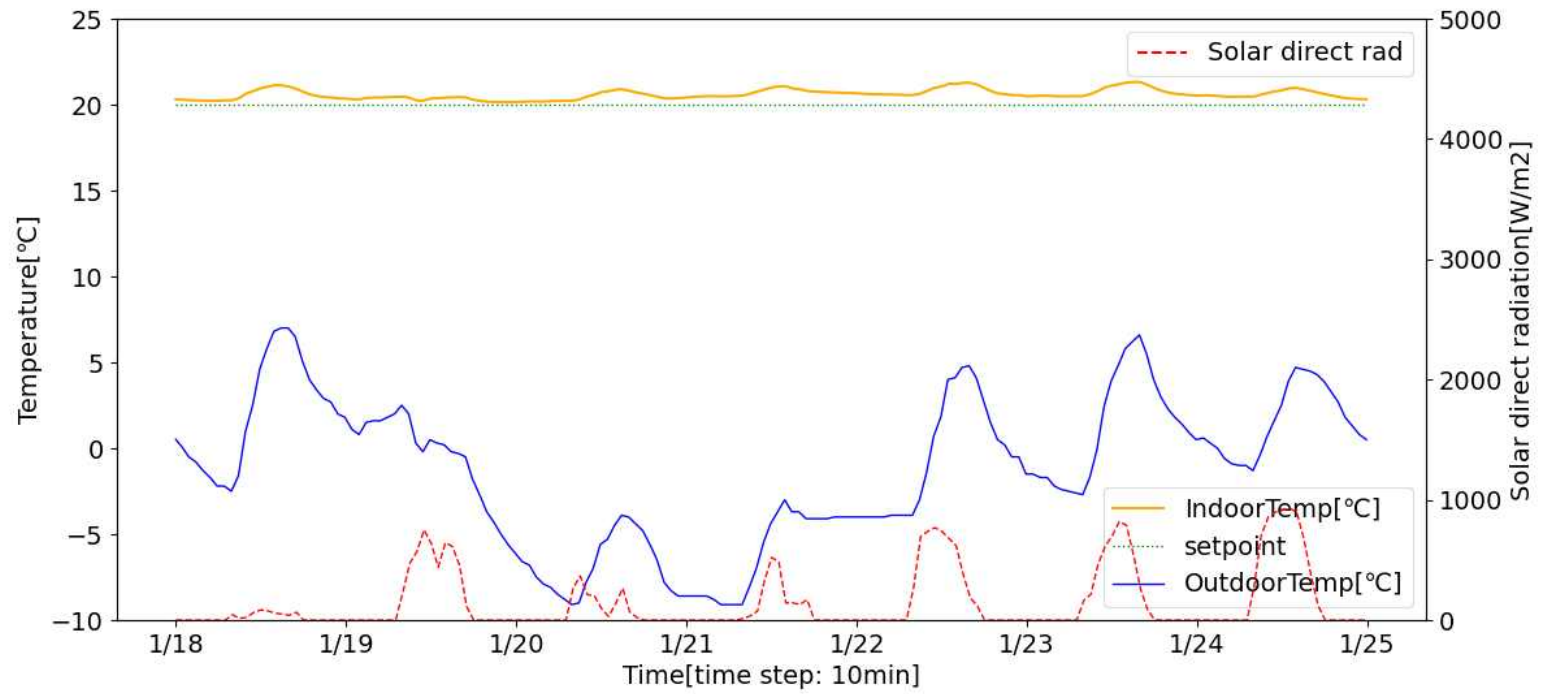


[그림 4.18] 두 개의 난방 공급 온수 온도를 통한 실내 설정 온도 20°C의 난방곡선

따라서 a-2 점과 b-2 점을 연결하면 실내 설정 온도 20°C에 대한 난방곡선이 도출된다. 실내 설정 온도를 수정할 시에 해당 온도의 두 개의 난방 공급 온수 온도와 외기온도 관계를 찾아 연결하면 원하는 실내 설정 온도의 난방곡선을 도출할 수 있다.

라. 두 개의 난방 온수 공급을 통해 도출된 난방곡선 적용 시뮬레이션  
 각각 30°C와 33°C의 일정한 난방 온수 공급을 통해 도출한 실내 설정 온도 20°C의 난방 곡선 [그림 4.18]을 이용하여 시뮬레이션 기간(11/15~2/15) 동안 시뮬레이션을 진행하였다. [그림 4.19]은 시뮬레이션 기간 중 1/18~1/25에 해당하는 결과이다. [그림 4.19]의 기간 중 외기온도가 10°C와 -10°C 사

이로 변화함에도 실내온도가 비교적 일정하게 설정 실내온도로 유지되는 것을 확인할 수 있다. 두 개의 난방 온수 공급을 통한 방법은 각각 두 개의 온수 온도(본 연구에서 30℃, 33℃)를 이용하여 실내온도와 외기온도의 관계를 도출하기에 이론적으로 정상상태에서 외기온도, 실내온도, 난방 공급 온수 온도가 일치하지 않을 시 이전의 방법보다 정확한 난방곡선을 도출할 수 있다. 반면 앞에서 하나의 난방온수 공급을 통한 방법보다 이론적으로 2배 많은 시간이 소요된다. 본 시뮬레이션 모델에서 결과는 앞에서 하나의 난방 온수 공급을 통한 방법과 비슷한 결과를 가져온 것으로 판단되어 다소 큰 차이를 보이지 않는 것으로 확인되며 이후 성능 분석을 통해 정확한 분석을 하고자 한다. [그림 4.19]에서도 일사량에 의해 실내온도의 상승으로 영향을 미쳐 실내 설정 온도보다 실내온도가 높아지는 것을 확인할 수 있다. 위와 같은 이유로 일사에 의한 영향이 고려된 외기보상제어가 필요하다고 판단된다.



[그림 4.19] 두 개의 일정 난방 온수 공급을 통해 도출된 난방곡선의 외기보상 제어 시뮬레이션(1/18~1/24)

#### 4.4.2. ARX, NARX 모델을 통한 난방곡선 도출법

System Identification을 통해 도출한 ARX, NARX 모델을 이용하여 난방곡선을 도출하고, 이를 적용하여 외기보상제어를 시뮬레이션하고자 한다. System Identification을 통해 형성된 ARX, NARX 모델에서 외기온도, 실내온도, 난방 공급 온수 온도가 일정하게 유지되는 정상상태를 가정하여 각 온도 간 관계를 통해 난방곡선을 도출하였다. 또한, ARX, NARX 모델에서 일사량을 고려한 외기보상제어를 제안하고자 한다.

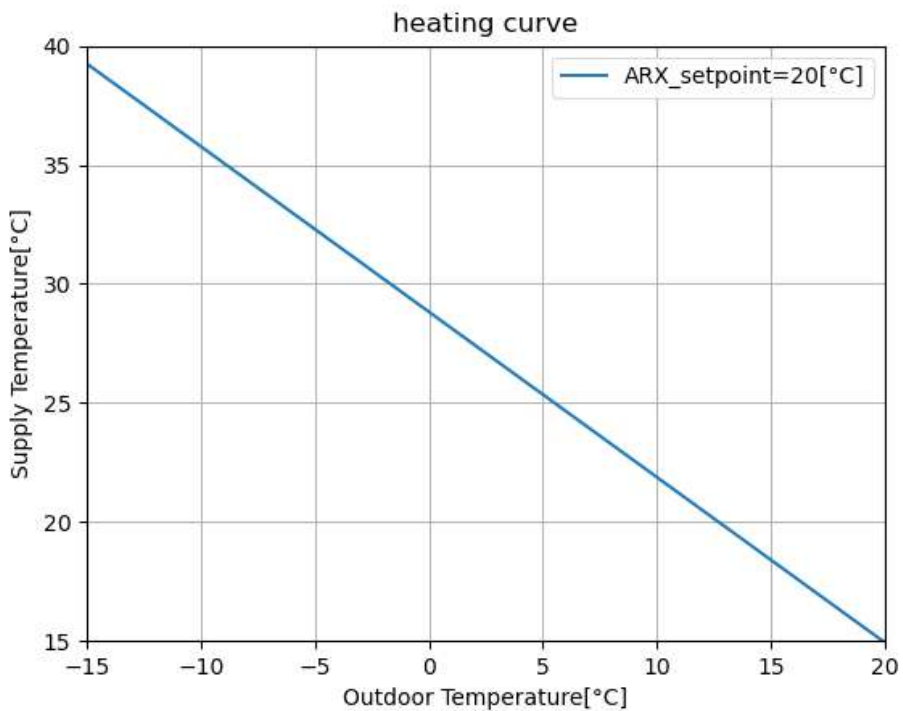
##### 가. ARX 모델의 난방곡선

실내 설정온도 20℃의 난방곡선을 도출하기 위해, ARX 모델을 이용하여 실내온도가 20℃로 유지되고 일사량이 없을 때 일정한 외기온도와 난방 공급 온수 온도를 공급하였을 때 정상상태의 관계를 도출하였다. [그림 4.20]은 ARX 모델을 이용하여 도출한 실내 설정온도 20℃의 난방곡선이다. 선형모델인 ARX 모델을 이용하여 선형적인 난방곡선이 도출된 것을 확인할 수 있다.

##### 나. ARX 모델의 난방곡선 적용 시뮬레이션

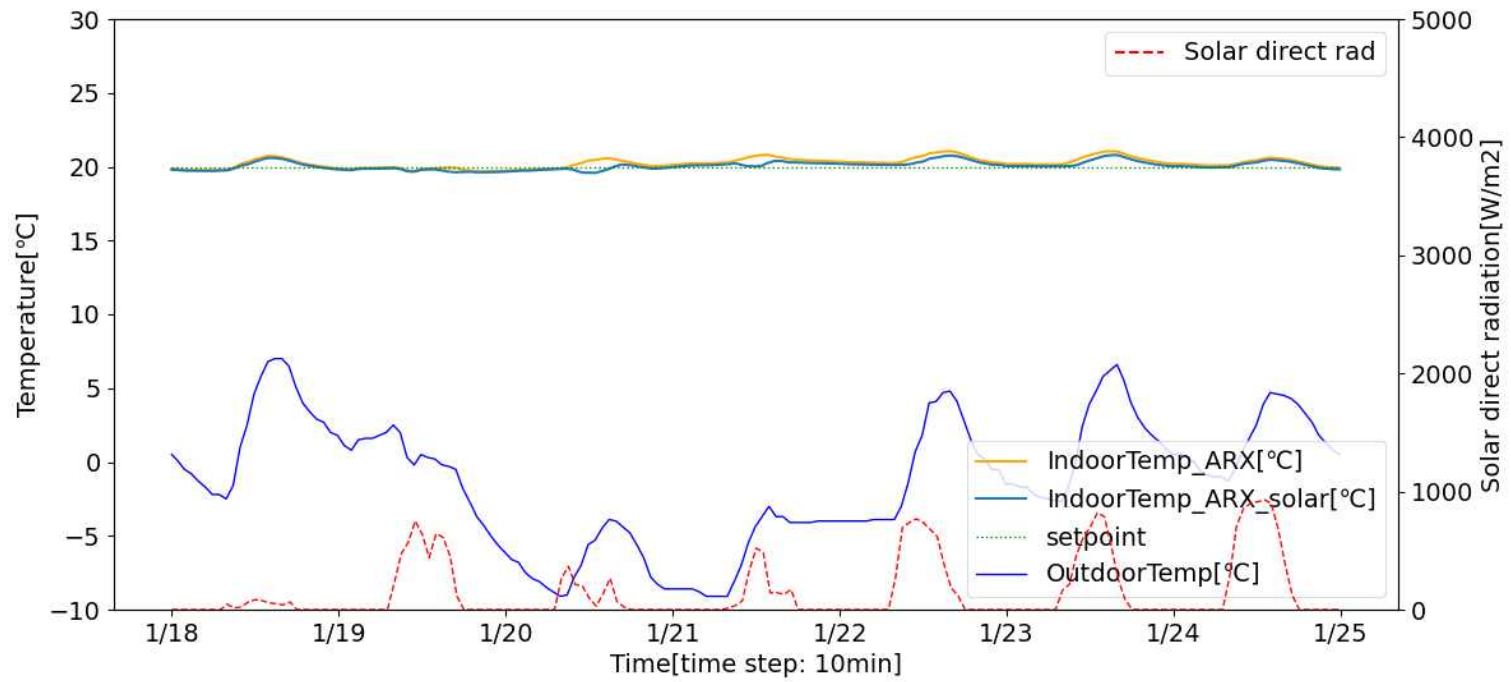
[그림 4.21]은 ARX 모델을 통해 도출된 난방곡선을 이용하여 시뮬레이션 기간 중 1/18~1/25 기간 동안 외기보상제어 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 또한, ARX 모델을 통해 실내온도에 영향을 미치는 외기온도, 실내온도, 난방 공급 온수 온도, 일사량의 파라미터를 이용하여 난방곡선에서 일사량의 영향을 상쇄하여 난방곡선을 조절하여 외기보상 제어를 진행한 시뮬레이션을 함께 나타내었다. 즉, 기존 난방곡선을 이용한 외기보상제어에서 일사량에 의한 실내온도 영향을 고려하지 못하지만 일사량에 의한 실내온도 영향을 계산하여 난방 온수 공급을 조절하였다. 일사량이 고려되지 않은 난방곡선 보다

일사량에 의한 실내온도 영향을 고려하여 기존 난방곡선에서 난방 공급 온수 온도를 조절한 결과에서 1/20~1/22 기간에서 설정 온도인 20℃ 더욱 가깝게 유지되는 것을 확인할 수 있다. 하지만 1/18~1/19 기간에서 일사량이 적음에도 불구하고 외기온에 따라 실내온도가 상승하는 결과를 보인다. 따라서 낮 동안 외기온도의 빠른 증가가 실내온도 상승에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 이에 따라 1/22~1/25 기간에서 기존 난방곡선의 외기보상제어보다 일사량을 고려한 외기보상제어에서 낮 동안 실내온도가 적게 상승하지만 외기 온도의 상승과 함께 실내온도 상승이 이루어져 설정온도 20℃에서 일정 시간 벗어나는 것을 확인할 수 있다.



[그림 4.20] ARX 모델을 통해 도출한 실내 설정온도 20℃ 난방곡선

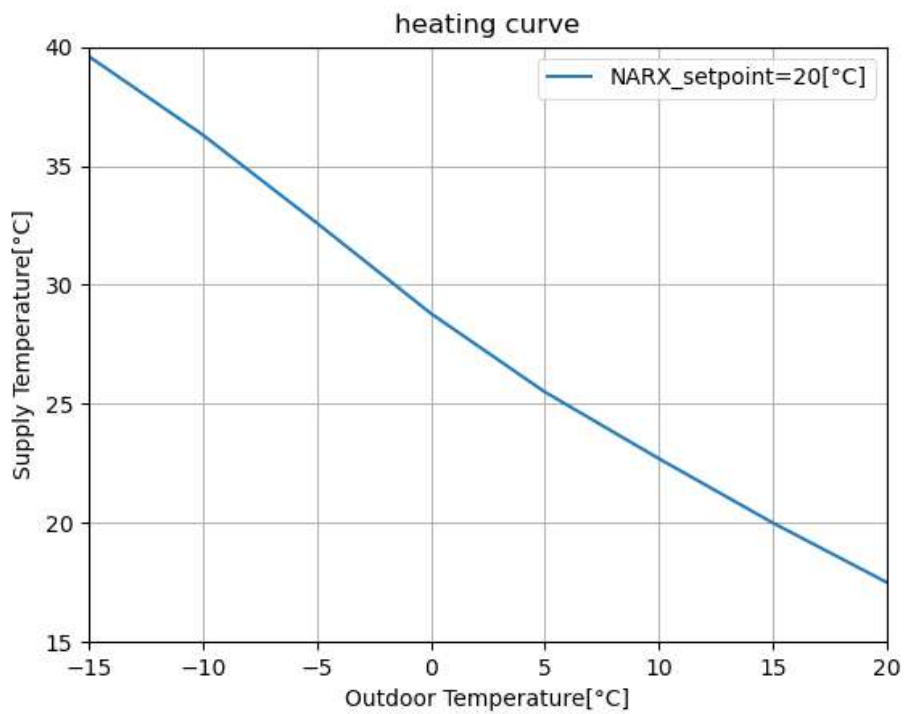




[그림 4.21] ARX 모델을 통해 도출한 난방곡선의 외기보상제어와 일사량을 고려한 외기보상제어(1/18~1/25)

#### 다. NARX 모델의 난방곡선

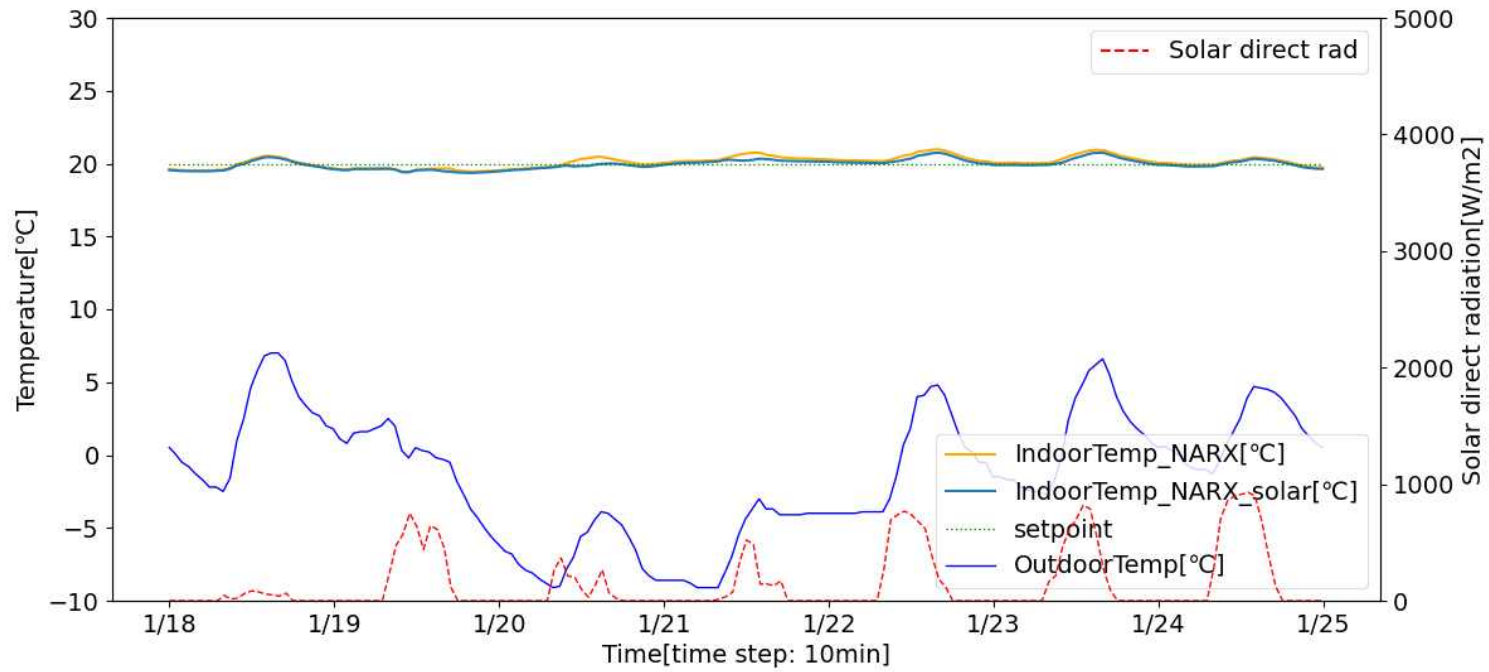
앞의 ARX 모델을 이용해 난방곡선을 도출한 것과 같은 방법으로 NARX 모델을 이용하여 정상상태에서 실내온도(설정온도) 20℃를 일 때 외기온도와 난방 공급 온수 온도 관계를 도출하여 실내 설정온도 20℃의 난방곡선을 구하였다. [그림 4.22]와 같이 난방곡선을 도출하였다. NARX 모델의 경우 은닉층에서 활성화 함수를 통해 비선형 시스템을 나타냈기에 이를 통해 도출한 난방곡선 또한 비선형을 나타내는 것을 확인할 수 있다.



[그림 4.22] NARX 모델을 통해 도출한 실내 설정온도 20℃ 난방곡선

#### 라. NARX 모델의 난방곡선 적용 시뮬레이션

NARX 모델을 이용하여 도출한 난방곡선의 외기보상제어와 난방곡선을 기반으로 일사량에 의한 실내온도 영향을 고려한 난방 공급 온수 온도를 조절한 외기보상제어의 시뮬레이션을 진행하였다. [그림 4.23]은 실내 설정온도를 20℃로 하여 시뮬레이션 중 1/18~1/25 기간의 두 가지 제어에 대한 실내온도와 외기온도, 일사량을 나타낸 것이다. ARX 모델과 같이 1/21~1/22 기간에서 일사량에 의한 영향을 고려되어 실내온도가 기존 외기보상제어처럼 상승하지 않고 20℃로 유지되는 것을 확인할 수 있다. 반면, 1/18~1/19 기간과 1/22~1/25 기간에서 일사량을 고려한 외기보상제어에도 실내온도 상승하면서 외기온도에 큰 영향을 받는 것을 확인 할 수 있다. 이와 같은 요인에는 외기온도가 겨울철 상대적으로 높은 기간에 난방 공급 온수 온도가 [그림 4.22]의 난방곡선과 같이 실내 설정온도인 20℃에 근접하면서 난방 공급 온수 온도가 실내온도에 영향이 적어지고 외기온도의 변화에 실내온도가 영향을 받으면서 낮 기간에 외기온도의 상승과 함께 축열효과로 실내온도가 상승하는 것으로 판단된다.



[그림 4.23] NARX 모델을 통해 도출한 난방곡선의 외기보상제어와 일사량을 고려한 외기보상제어(1/18~1/25)

## 4.5 소결

본 장에서 시뮬레이션 모델을 이용하여 바닥복사 난방 시 발생하는 데이터를 산포도와 특성중요도를 이용하여 System Identification에 적용할 입력, 출력 변수를 선택하였다. 선택된 변수를 이용하여 ARX, NARX 모델의 System Identification을 진행하였으며 형성된 시스템 모델을 이용하여 미래의 실내온도 예측하였고 예측 시간을 분석하였다. 이후 Data-driven 방법을 활용하여 실내온도 외기보상 제어의 방법을 제안하였다. 외기보상 제어를 위한 난방곡선 도출방법으로 (1) 일정 온수 공급을 통한 단순 회귀법, (2) System Identification을 통해 형성된 ARX, NARX 모델을 활용한 도출법을 제안하였다. 위에서 도출된 난방곡선을 이용하여 외기보상제어를 진행한 시뮬레이션 결과를 분석하였다.

본 장의 내용을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 바닥복사 난방 실내온도를 제어하기 위해 영향을 미치는 변수를 도출하기 위해 산포도와 특성중요도를 이용하였다. 산포도를 통해 실내온도와 외기온도 사이에 선형적인 관계를 확인할 수 있었다. 특성중요도를 통해 실내온도에 외기온도가 가장 큰 영향을 끼치고, 바람과 일사량이 영향을 미치는 것을 확인하였다. 따라서 일사량이 낮 기간 실내온도 상승에 영향을 미치는 것을 선형적 지식으로 알고 있으므로 실내온도 제어를 위해 외기온도, 일사량, 난방 공급 온수 온도를 변수로 선택하였다.
- (2) ARX, NARX 모델을 이용하여 실내온도를 출력값으로 외기온도, 난방 공급온도, 일사량을 입력값으로 설정하여 System Identification을 진행하였

다. ARX, NARX 모델의 입출력 수와 학습률에 따라 모델 성능을 분석하여 입출력의 수( $n_a, n_b$ )는 6으로, 학습률은 60%로 설정하였다. ARX 모델을 이용하여 입력 시간지연은 2, 6 time step인 20, 60분에서 일어나는 것을 확인하였다. 형성된 ARX, NARX 모델을 통해 60분 이후의 실내온도를 예측하여 RMSE 값이 0.0385, 0.0222, R-제곱 값은 0.95, 0.96의 성능을 확인하였다. 두 모델의 시간 예측은 80분까지 성능이 유지되는 것을 확인하였다.

(3) 난방곡선을 도출하기 위해 일정 온수 공급을 통한 단순 회귀법에서 두 가지 방법을 제안하였다. 첫 번째는 하나의 일정 온수 공급을 통해 난방곡선을 도출하는 것으로, 본 연구에서 30℃ 온수 공급을 통해 실내 설정온도 20℃의 난방곡선을 도출하였다. 두 번째로 두 개의 일정 온수 30℃, 33℃를 공급하여 실내 설정온도 20℃의 난방곡선을 도출하였다. 위 두 난방곡선을 이용하여 외기보상제어 시뮬레이션을 분석하였다.

(4) ARX, NARX 모델을 통해 정상상태로 실내온도가 20℃, 외기온도와 난방 공급 온수 온도가 일정하게 유지될 때 외기온도와 난방 공급 온수 온도 관계를 도출하여 설정온도 20℃의 난방곡선을 도출하였다. 도출된 난방곡선을 이용한 외기보상제어 시뮬레이션을 하였다. 또한, ARX, NARX 모델을 통해 기존 외기보상제어에서 낮 기간 일사량에 의한 실내온도 상승을 없애고자 각 변수의 파라미터를 이용하여 일사량 발생 시 난방 공급 온수 온도를 조절하여 외기보상제어를 함께 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션 분석을 통해 일사량에 의한 실내온도 상승을 줄일 수 있었으나 외기온도 상승에 의한 영향도 존재하여 실내온도가 낮 기간에 설정온도인 20℃에서 상승하는 것을 완전히 제어하지 못하였다.

## 제 5 장 시뮬레이션 결과 분석

### 5.1 개요

본 장에서는 기존 외기보상제어를 활용한 시뮬레이션과 본 연구에서 제안한 외기보상제어의 시뮬레이션 결과를 분석하였다. 각 방법의 난방곡선을 활용한 외기보상제어의 성능을 평가하기 위해 외기보상제어 시 설정온도 유지 성능평가와 외기보상제어+개폐식 뱅뱅 제어를 하였을 때 불감대(Dead band)에서 벗어나는 정도인 오버슈팅 평가를 진행하였다. 이후 외기보상제어, 외기보상+개폐식 뱅뱅 제어를 하였을 때 에너지 소비 평가를 진행하였다.

### 5.2 성능 분석

본 연구에서 제안한 난방곡선 도출방법의 외기보상제어 성능을 평가하기 위해 기존 외기보상제어 방법과 함께 시뮬레이션 결과를 분석하였다. 성능 평가 대상 난방곡선은 <표 5.1>,[그림 5.1]과 같다. 기존 난방곡선 2가지와 제안한 4가지 난방곡선 도출법과 ARX, NARX 모델을 활용한 난방곡선 도출법에서 일사량을 고려한 외기보상제어 2가지를 함께 분석하여 총 8가지 시뮬레이션의 성능평가를 진행하였다. 외기보상제어에서 실내 설정온도를 얼마만큼 잘 유지하는지 설정온도 유지 성능평가와 외기보상+개폐식 뱅뱅제어에서 불감대를 벗어나는 정도인 오버슈팅과 언더슈팅 평가를하였다.

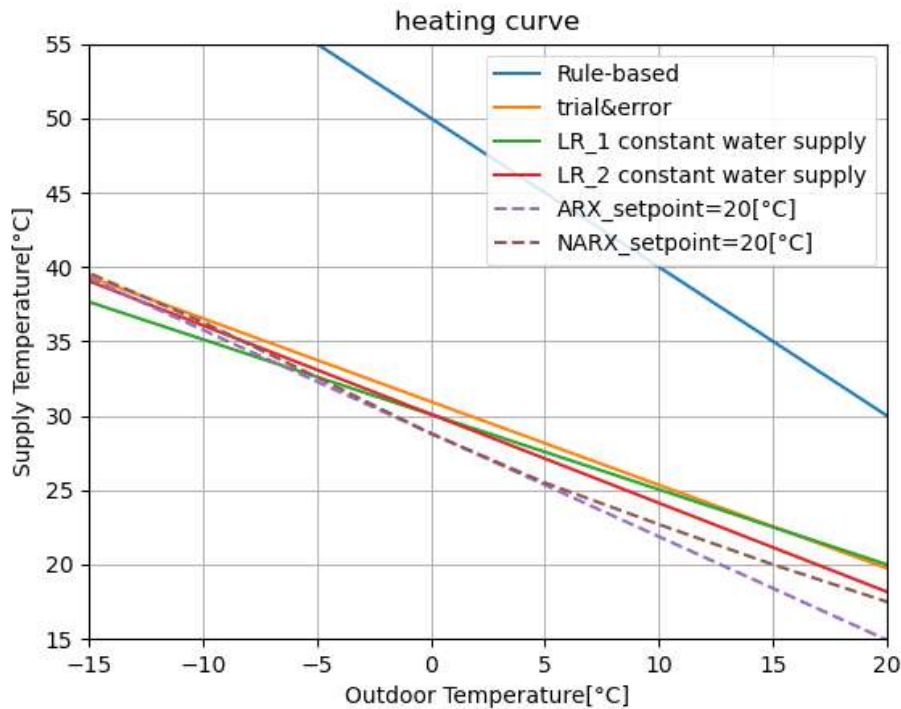
#### 5.2.1. 실내 설정온도 유지 성능평가

[그림 5.2]는 각 외기보상제어의 1/18~1/25 기간의 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 설정온도 유지 성능평가는 실내 설정온도 20℃를 얼마나 잘 유지하는지 각 외기보상제어의 결과를 평가하였다. 성능 평가 방법은 MAE (Mean Absolute Error)와 RMSE(Root Mean Squared Error)로 하였다.

<표 5.1> 시뮬레이션 결과 분석을 위한 기존 및 제안 방법으로 도출된 난방곡선

구분	방법	공급온도[℃]		일사량 고려	
		외기온[-10℃]	외기온[5℃]		
기존 난방곡선 도출법	룰 기반	60.0	45.0	-	
제안한 난방곡선 도출법	시행착오	37.4	28.7	-	
	하나의 일정 온수 공급을 통한 단순 회귀법	35.1	27.5	-	
	두 개의 일정 온수 공급을 통한 단순 회귀법	36.1	27.1	-	
	ARX 모델	36.0	25.9	-	○
	NARX 모델	36.6	25.5	-	○



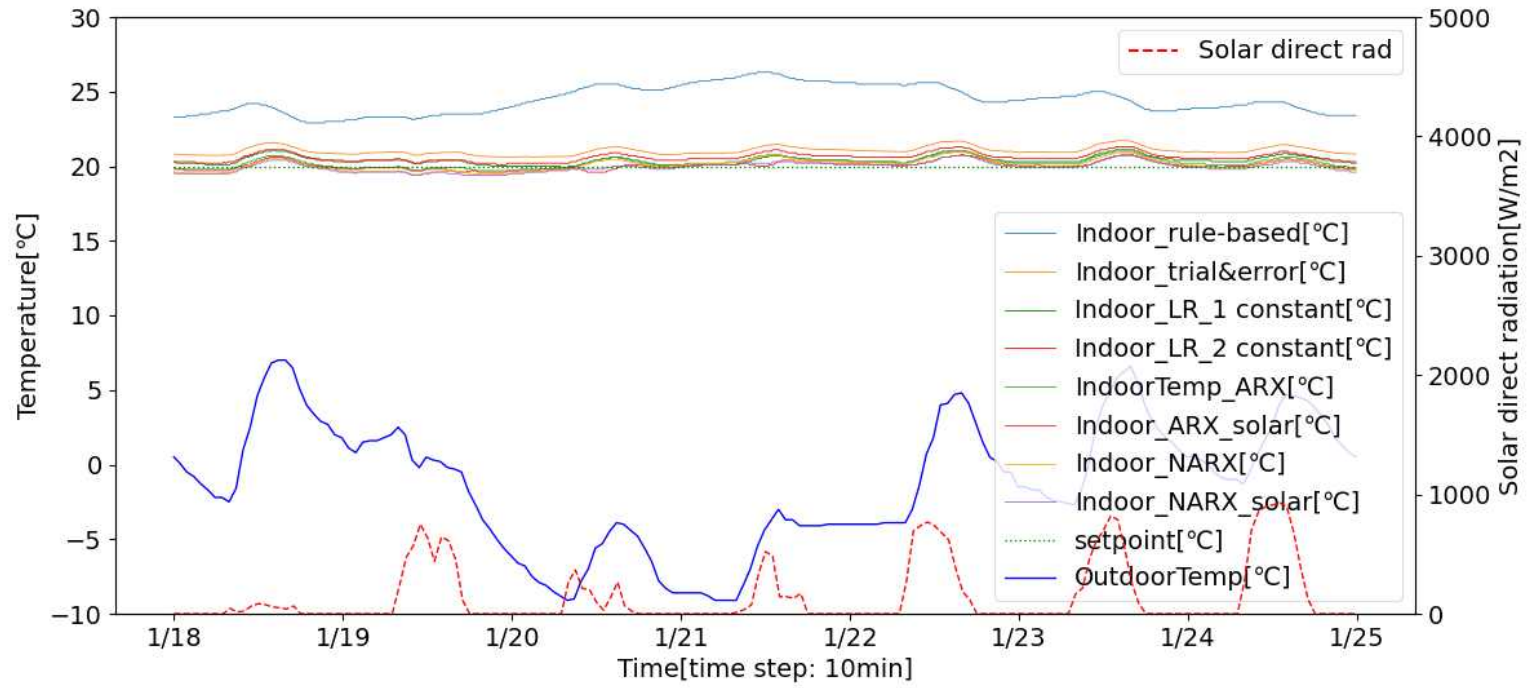


[그림 5.1] 시뮬레이션 결과 분석을 위한 기존 및 제안 방법으로 도출된 난방곡선

<표 5.2>는 1/18~1/25 기간의 각 외기보상제어의 평가 결과를 나타낸 것이다. 기존 난방곡선 도출방법인 룰 기반 방법과 시행착오 방법을 통한 외기보상제어는 MAE 값이 4.453, 1.035으로 실내온도와 설정온도 사이의 평균 차이가 1°C 이상 나는 것을 확인할 수 있다. 본 연구에서 제안한 방법 중 단순 회귀법을 이용한 난방곡선 도출방법인 하나 또는 두 개의 일정 온도 공급을 통한 외기보상제어는 MAE 값이 0.408, 0.599으로 실내온도와 설정온도 평균 차이가 0.4~0.6°C 정도 나는 것으로, 기존 방법보다 MAE 값이 작아져 성능이 향상된 것을 확인하였다. System Identification을 통해 형성한 ARX, NARX 모델을 이용하여 도출된 난방곡선의 외기보상제어는 MAE 값이 0.336, 0.327으로 실내온도와 설정온도의 평균 차이가 0.4°C 이하로 평가한

방법 중에 가장 좋은 성능을 보였다. 또한, ARX, NARX 모델을 통해 도출된 난방곡선과 함께 일사량을 통한 실내온도 상승으로 고려한 외기보상제어에서 MAE 값이 0.226, 0.267 값을 보이면서 일사량을 고려하지 않은 제어보다 성능이 향상되었다. RMSE 결과 또한 MAE 값과 비슷한 결과를 보이면서 기존 외기보상제어 방법보다 제안한 방법에서 성능이 개선된 것을 확인하였다.

본 연구에서 제안한 방법 중 ARX, NARX 모델을 통해 도출한 난방곡선을 이용한 외기보상제어에서 가장 좋은 성능을 보이고 일사량을 고려한 제어에서 성능이 향상되었다. 하지만 난방곡선을 도출하기 위한 ARX, NARX 모델을 형성하기 위해 시뮬레이션 기간 11/15~2/15 중 60% 데이터를 사용한 반면 일정 온수 온도 공급을 통한 단순 회귀의 경우 3~6일(약 3~6%)의 데이터로 난방곡선을 도출할 수 있기에, 초기 난방곡선 도출에 일정 온수 온도 공급을 통한 단순 회귀법을 사용한 뒤 난방운전을 통해 데이터를 수집하여 ARX, NARX 모델을 통한 도출법 적용이 합리적인 것으로 판단된다.



[그림 5.2] 외기보상제어 시뮬레이션 결과(1/18~1/25)

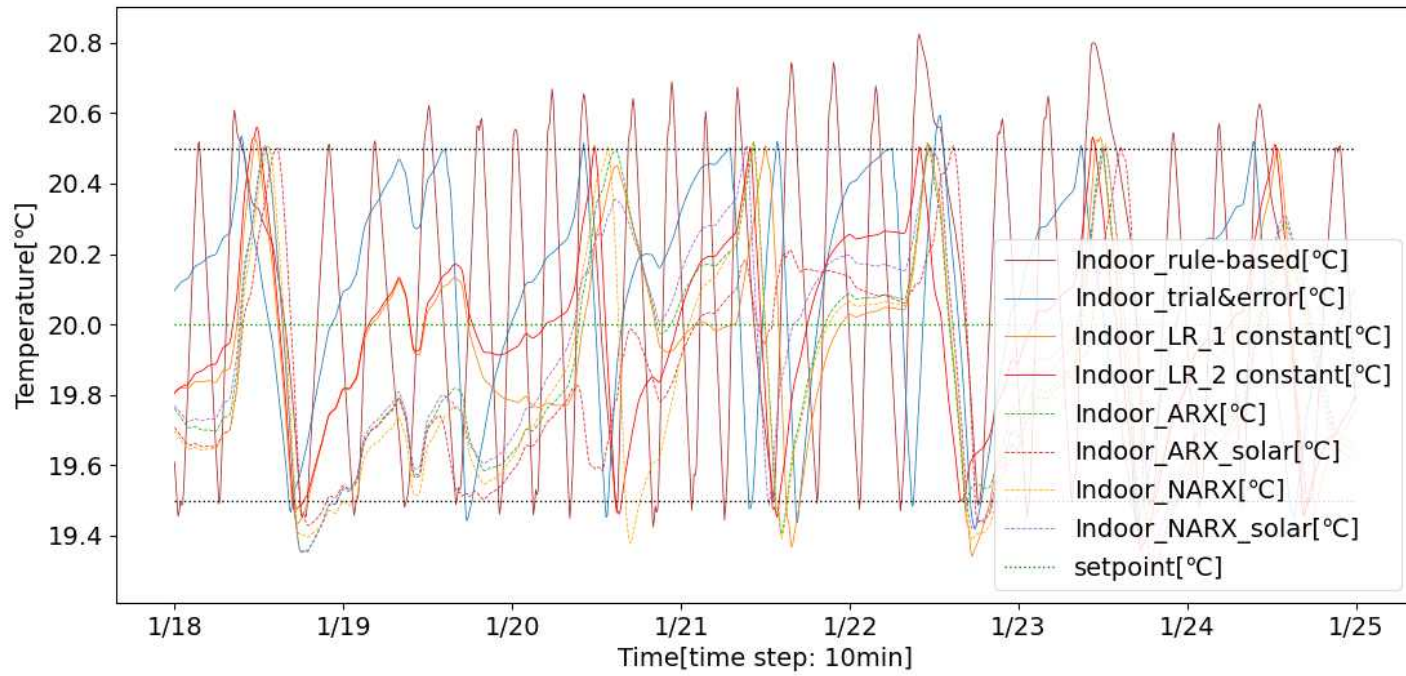
<표 5.2> 도출된 난방곡선의 외기보상 제어 설정온도 유지 성능 평가

구분	방법	MAE[°C]	RMSE[°C]
기존 난방곡선 도출법	룰 기반	4.453	4.549
	시행착오	1.035	1.018
제안한 난방곡선 도출법	하나의 일정 온수 공급을 통한 단순 회귀법	0.408	0.492
	두 개의 일정 온수 공급을 통한 단순 회귀법	0.599	0.664
	ARX 모델	0.336	0.417
	NARX 모델	0.327	0.395
	ARX 모델 + 일사량 고려제어	0.226	0.291
	NARX + 일사량 고려제어	0.267	0.329

### 5.2.2. 오버슈팅 & 언더슈팅 평가

[그림 5.3]는 1/18~1/25 기간 동안 각 외기보상+개폐식 뱅뱅 제어의 실내 온도 결과를 나타낸 것이다. 오버슈팅, 언더슈팅 분석은 외기보상제어와 함께 공동주택 난방에서 일반적으로 적용되는 개폐식 뱅뱅 제어(On/off 제어)를 함께 적용하였을 때 설정한 불감대(Dead band)에서 벗어나는 정도를 평가하였다. 불감대는 실내 설정온도 20°C 기준으로  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 로 설정하였고 평가 방법

은 평가 기간 1/18~1/25 동안 On/off 횟수와 불감대를 벗어났을 때 IAE(Integral Absolute Error) 값을 이용하였다. <표 5.3>은 1/18~1/25 기간의 각 외기보상제어+개폐식 뱅뱅 제어의 평가 결과를 나타낸 것이다. 기존 난방곡선 도출 방법 중 룰 기반 방법은 off 시간이 7570분으로 on 시간 3950분 보다 많아 비효율적으로 운전된다고 판단되고, AIE 값이 14.4℃로 실내온도가 설정온도에서 벗어나는 정도가 큰 것으로 확인된다. 시행착오 방법의 경우 on, off 시간이 9190, 2330분이고 AIE값은 1.92℃로 룰 기반 방법보다 좋은 성능을 보였다. 본 연구에서 제안한 방법 중 단순 회귀법을 이용한 난방곡선 도출방법인 하나 또는 두 개의 일정 온수 온도 공급을 통한 외기보상+개폐식 뱅뱅 제어는 off 시간이 1040분, 1440분이고 AIE 값은 4.8, 1.3으로 기존의 방법보다 향상된 성능을 보였다. System Identification을 통해 형성한 ARX, NARX 모델을 이용하여 도출된 난방곡선의 외기보상+개폐식 뱅뱅 제어는 off 시간이 990, 950분이고 AIE 값은 4.3, 3.1으로 평가되었다. ARX, NARX 모델의 일사량을 함께 고려한 제어의 경우 off의 시간이 450, 810분으로 가장 적은 off 시간을 가져 효율적인 운전이 이루어졌고 AIE 값 또한 1.8, 1.1로 불감대에서 거의 벗어나지 않는 결과를 가졌다. 이에 따라 외기보상+개폐식 뱅뱅 제어 시 본 연구에서 제안한 방법이 기존 방법보다 모두 좋은 성능을 보였다. 일정 온수 온도 공급을 통한 단순 회귀 방법보다 ARX, NARX 모델을 통한 난방 곡선 도출이 제어 시 off의 횟수가 적어 효율적으로 난방운전이 이루어지고, AIE 값은 비슷한 결과를 가졌다.



[그림 5.2] 외기보상+개폐식 뱅뱅 제어 시뮬레이션 결과(1/15~1/25)

<표 5.3> 도출된 난방곡선의 외기보상+개폐색 뱅뱅제어 On/off 횟수 및 IAE 값

구분	방법	On/off[10min]		IAE[°C]
		on	off	
기존 난방곡선 도출법	를 기반	395	757	14.4
	시행착오	919	233	1.9
제안한 난방곡선 도출법	하나의 일정 온수 공급을 통한 단순 회귀법	1048	104	4.8
	두 개의 일정 온수 공급을 통한 단순 회귀법	1008	144	1.3
	ARX 모델	1053	99	4.3
	NARX 모델	1057	95	3.1
	ARX 모델 + 일사량 고려제어	1107	45	1.8
	NARX + 일사량 고려제어	1071	81	1.1

### 5.3 에너지 소비량 분석

앞서 기존 및 제안한 방법을 통한 난방곡선 도출을 통해 설정한 기간 1/18~1/25 동안 외기보상제어와 외기보상+개폐식 뱅뱅제어에 대한 실내 설정온도 유지 성능평가를 진행하였다. 위 두 가지 제어인 외기보상제어, 외기보상+개폐식 제어의 시뮬레이션을 통해 기존과 제안한 난방곡선 도출법에 따른 난방에너지 소비량 분석을 진행하였다. 에너지 소비량은 난방 시 사용되는 열량으로 유량과 공급온도와 환수온도의 차를 이용하여 열량을 산출하였다. 외기보상제어의 경우 유량이 일정하게 공급되고 온수 온도가 변하는 정유량-변온수 제어로 설정한 기간 전체에 대하여 열량을 산출하였다. 외기보상+개폐식 뱅뱅 제어의 경우 각 제어에 따른 On/off 순간이 다를 수 있으므로 모두 on 되어 있는 상태에서 에너지 소비량을 산출하였다. 이후 각 난방곡선에 대한 에너지 소비량을 분석하였다.

#### 5.3.1. 외기보상제어 에너지 소비량 평가

각 난방곡선에 대한 외기보상제어의 에너지 소비량을 분석하기 위해 설정한 기간 1/18~1/25 동안 유량과 공급온도와 환수온도 차를 통해 열량을 산출하였다. 열량 산출식은 식(4)와 같다.

$$Q = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \quad \text{식(4)}$$

여기서,

$Q$  열량[kcal]

$C_p$  물 비열[kcal/kg·°C]

$\dot{m}$  난방 온수 유속[kg/s]

$\Delta T$  난방 온수 공급온도 환수온도 차[°C]



<표 5.4>은 각 난방곡선의 외기보상제어에 대한 일주일 기간 1/18~1/25 동안 시뮬레이션을 통해 에너지 소비량을 산출한 결과이다. 기존 난방곡선 도출법 중 국내 지역난방에서 일반적으로 사용하고 있는 룰 기반 방법의 일주일 간 단위면적당 에너지 소비량은  $3.34 \text{ Mcal/m}^2 \cdot \text{week}$ 으로 각 난방곡선의 시뮬레이션 결과 중 가장 많은 에너지를 보였다. 시행착오 방법은  $3.26 \text{ Mcal/m}^2 \cdot \text{week}$ 의 에너지를 보여 두 번째로 높은 소비량을 보였다. 제안한 난방곡선 도출법 중 하나 또는 두 개의 일정 온도 공급을 통한 단순 회귀법은 3.17,  $3.19 \text{ Mcal/m}^2 \cdot \text{week}$ 의 에너지를 보여 룰 기반 방법 대비 5.1, 4.5%의 에너지 소비량 절약이, 시행착오 방법 대비 2.8%, 2.1%의 에너지 소비량이 절약되는 것을 확인할 수 있었다. ARX, NARX 모델의 방법은 2.88,  $2.67 \text{ Mcal/m}^2 \cdot \text{week}$ 의 에너지를 보이며 룰 기반 대비 13.8, 20.1%의 에너지 소비량 절약이, 시행착오 방법 대비 11.7, 18.1%의 에너지 소비량 절약 효과를 보였다. 또한, ARX, NARX 모델의 난방곡선을 통한 외기보상제어에서 일사량을 고려한 난방 제어 시 2.85,  $2.81 \text{ Mcal/m}^2 \cdot \text{week}$ 의 에너지를 보이며 ARX 모델의 경우 다소 감소하고 NARX 모델의 경우 다소 증가하는 결과를 보였다.

국내 지역난방의 일반적 외기보상제어 방법인 룰 기반 방법에 대비해 NARX 모델을 통한 외기보상제어의 경우 20.1% 에너지 소비량 절약 효과를 보이며 동일한 난방시스템을 통한 외기보상제어에서 적절한 난방 온수를 공급하는 난방곡선을 도출하는 것이 중요하다는 것을 알 수 있다.

<표 5.4> 각 난방곡선의 외기보상제어 1/18~1/25 에너지 소비량

구분	방법	에너지 소비량[Mcal/m <sup>2</sup> ·week]
기존 난방곡선	룰 기반	3.34
	시행착오	3.26
제안한 난방곡선 도출법	하나의 일정 온수 공급을 통한 단순 회귀법	3.17
	두 개의 일정 온수 공급을 통한 단순 회귀법	3.19
	ARX 모델	2.88
	NARX 모델	2.67
	ARX 모델 + 일사량 고려제어	2.85
	NARX + 일사량 고려제어	2.81

### 5.3.2. 외기보상+개폐식 뱅뱅 제어 에너지 소비량 평가

외기보상+개폐식 뱅뱅 제어 시뮬레이션 중 일주일 1/15~1/25 기간 에너지 소비량 평가를 하였다. 외기보상과 함께 개폐식 제어가 이루어질 경우 각 난방곡선을 통한 제어에서 on/off가 되는 순간이 다르기에 같은 조건에서 에너지 소비량을 산출하기 위해 모든 난방곡선의 제어가 on일 때 에너지 소비량을 산출하였다. <표 5.5>는 각 난방곡선의 외기보상+개폐식 뱅뱅 제어의 설정 기간 에너지 소비량을 산출한 결과이다. 기존 난방곡선 도출방법 중 룰 기반 방법은 에너지 소비량이  $2.81\text{Mcal/m}^2\cdot\text{week}$ 으로 가장 큰 에너지 소비량을 보였고 시행착오 방법은  $1.552.81\text{Mcal/m}^2\cdot\text{week}$  두 번째로 큰 에너지 소비를 보였다. 본 연구에서 제안한 난방곡선 도출방법 중 하나 또는 두 개의 일정 온도 공급을 통한 단순 회귀법은 1.43,  $1.46\text{Mcal/m}^2\cdot\text{week}$ 의 에너지 소비량을 보이며 룰 기반 방법 대비 49.1, 48.0%의 에너지 소비량 절약이, 시행착오 방법 대비 7.7, 5.8%의 에너지 소비량이 저감되었다. ARX, NARX 모델의 난방곡선을 통한 제어의 경우 두 제어 모두  $1.40\text{cal/m}^2\cdot\text{week}$ 의 에너지 소비량을 보이며 룰 기반 방법 제어 대비 50.2%의 에너지 소비량 저감을 보였고, 시행착오 방법 제어 대비 9.7%의 에너지 소비 저감을 보였다. 또한, ARX, NARX 모델의 난방곡선과 일사량을 함께 고려한 제어에서 1.36,  $1.39\text{cal/m}^2\cdot\text{week}$ 의 에너지 소비량을 보이며 일사량을 고려하지 않은 제어보다 에너지 소비량이 감소하였다. 앞서 외기보상제어에서 에너지 소비량 평가와 같이 외기보상+개폐식 뱅뱅 제어에서도 기존 난방곡선 도출법을 통한 제어보다 본 연구에서 제안한 난방곡선 도출법을 통한 제어가 에너지 소비량이 적어 효율적인 제어를 할 수 있다는 것을 확인하였다.

<표 5.5> 각 난방곡선의 외기보상+개폐식 뱅뱅 제어 1/18~1/25 에너지 소비량

구분	방법	에너지 소비량[Mcal/m <sup>2</sup> ·week]
기존 난방곡선 도출법	를 기반	2.81
	시행착오	1.55
제안한 난방곡선 도출법	하나의 일정 온수 공급을 통한 단순 회귀법	1.43
	두 개의 일정 온수 공급을 통한 단순 회귀법	1.46
	ARX 모델	1.40
	NARX 모델	1.40
	ARX 모델 + 일사량 고려제어	1.36
	NARX + 일사량 고려제어	1.39

## 5.4 소결

본 장에서는 기존 난방곡선 도출법을 통한 외기보상제어와 본 연구에서 제안한 난방곡선 도출법을 통한 외기보상제어의 시뮬레이션 결과를 분석하였다. 외기보상제어와 외기보상+ 개폐식 뱅뱅 제어의 시뮬레이션 결과에 대한 성능 분석과 에너지 소비량 분석을 진행하였다. 외기보상제어를 통한 성능분석은 실내 설정온도 유지 성능평가를 진행하였고, 에너지 소비량 분석은 분석 기간동안 사용한 열량을 산출하였다. 외기보상+ 개폐식 뱅뱅 제어의 성능분석은 on/off 횟수와 불감대(Dead band)에서 벗어나는 정도를 통해 오버슈팅, 언더슈팅 평가를 하였고, 에너지 소비량 분석은 비교 대상을 동일한 조건으로 통제하여 사용한 열량을 산출하였다.

본 장의 내용을 요약하면 다음과 같다.

(1) 기존과 본 연구에서 제안한 난방곡선 도출법에 따른 외기보상제어의 성능 분석을 위해 실내 설정온도 유지 성능평가를 하였다. 성능 평가 방법은 실내 설정온도 20℃와 실내온도를 통해 MAE, RMSE 값을 이용하였다. 기존 룰 기반 방법에서 MAE 값이 4.453으로 가장 낮은 성능을 보였고, 시행착오 방법은 1.035로 평균 1℃ 차이를 보였다. 제안한 방법 중, 하나 또는 두 개의 일정 온수 온도 고급을 통한 단순 회귀법은 MAE 값이 0.408, 0.599으로 나왔다. ARX, NARX 모델을 통한 도출법은 MAE 값이 0.336, 0.327로 가장 좋은 성능을 보였고, 일사량을 고려한 제어에서 0.226, 0.267으로 성능이 향상되는 것을 확인하였다. RMSE 값도 동일한 경향의 결과를 보였다.

(2) 외기보상+ 개폐식 뱅뱅 제어의 성능 분석은 on/off 횟수와 불감대에서

벗어나는 부분의 AIE 값을 산출하여 오버슈팅과 언더슈팅을 분석하였다. 기존 룰 기반 방법은 off의 횟수가 757회로 가장 많았고, IAE 값은 14.1으로 오버슈팅 또는 언더슈팅이 다소 과대하게 일어나는 것으로 파악하였다. 시행착오 방법은 off의 횟수가 233회에 AIE 값은 1.9으로 나왔다. 제안한 방법 중 하나 또는 두 개의 일정 온도 온도를 공급을 통한 난방곡선 도출법은 off의 횟수가 104, 144회를 기록하였고 IAE 값은 4.8과 1.3으로 나왔다. ARX, NARX 방법은 off의 횟수가 99, 95로 앞의 방법보다 적은 횟수를 보였고, IAE 값은 4.3, 3.1으로 나왔다. 또한, ARX, NARX 방법에서 일사량을 고려한 제어에서 off 횟수가 45, 81회로 IAE 값은 1.8, 1.1으로 일사량을 고려하지 않은 제어보다 개선되었다. 제안한 방법이 기존 방법 대비 모두 off의 횟수가 적어 효율적인 운전을 하는 것을 확인하였다.

(3) 외기보상제어의 에너지 소비량은 기존 룰 기반 방법과 시행착오 방법에서  $3.34, 3.26\text{Mcal/m}^2\cdot\text{week}$ 이 산출되었다. 제안한 방법에서 기존 방법보다 모두 적은 에너지 소비량을 보였고, 하나 또는 두 개의 일정 온도 온도를 공급을 통한 난방곡선 도출법은 룰 기반 방법 대비 5.1, 4.5%의 에너지 저감을 가졌다. ARX, NARX 모델 방법은 룰 기반 방법 대비 13.8, 18.1%의 효과를 보였다. ARX, NARX 모델의 일사량을 고려한 제어에서 ARX 모델의 경우 에너지 소비량이 다소 감소하고 NARX 모델의 경우 다소 증가하는 결과를 보였다.

(4) 외기보상+개폐식 뱅뱅 제어에서 동일한 조건에서 에너지 소비량을 분석하기 위해 모두 동시에 on 되어있을 때 열량을 계산하였다. 기존 룰 기반 방법은  $2.81\text{Mcal/m}^2\cdot\text{week}$ 으로 가장 큰 소비량을 보였고, 시

행착오 방법은  $1.55\text{Mcal/m}^2\cdot\text{week}$ 의 소비량을 보였다. 하나 또는 두 개의 일정 온수 온도 공급을 통한 난방곡선 도출법은 1.43,  $1.46\text{Mcal/m}^2\cdot\text{week}$ 으로 룰 기반 방법 대비 49.1, 48.0%, 시행착오 방법 대비 7.7, 5.8%의 에너지 소비량이 저감되었다. ARX와 NARX 모델을 통한 난방곡선 도출법은 모두  $1.40\text{Mcal/m}^2\cdot\text{week}$ 의 에너지 소비량을 보이며, 룰 기반 방법 대비 50.2%, 시행착오 방법 제어 대비 9.7%의 에너지 소비 저감을 보였다. ARX와 NARX 모델의 일사량을 고려한 제어에서 1.36,  $1.39\text{Mcal/m}^2\cdot\text{week}$ 의 에너지 소비량을 보이며 일사량을 고려하지 않은 제어보다 에너지 소비가 저감되는 것을 확인하였다.

## 제 6 장 결 론

본 연구는 도시 에너지 저감을 위하여 공동주택에서 난방운전 시 발생하는 데이터를 기반으로 제어방법을 제안하고자, 공동주택 국내 기준을 참고하여 EnergyPlus를 활용하여 건물 에너지 시뮬레이션 모델을 구축하고 제어방법을 적용하여 시뮬레이션 결과 분석을 통한 실효성을 판단하였다. 공동주택의 바닥 복사난방을 위한 난방시스템은 4세대 지역난방 시스템을 적용하여 지역난방 열교환 유닛(HIU)을 통해 세대별 난방 온수를 공급할 수 있는 난방시스템으로 하였다. 기존 지역난방에서 적용하고 있는 외기보상제어는 세대별 동일한 난방 온수 온도 공급으로 세대별 제어가 불가능하지만, 4세대 지역난방의 열교환 유닛(HIU)을 통해 세대별 제어가 가능하기에 세대별 외기보상제어를 위한 최적의 난방곡선을 데이터 기반 방법을 적용하여 도출하였다. (1) 난방운전 시 발생하는 데이터인 외기온도, 실내온도, 난방 공급 온수 온도를 이용하여 단순 회귀분석을 통한 난방곡선 도출법과 (2) 실내온도에 영향을 주는 인자를 분석하여 외기온도, 난방 공급 온수 온도, 일사량을 입력 변수로 설정하고, 실내온도를 출력 변수로 설정하여 System Identification을 통한 난방곡선 도출법을 제안하였다. 기존 난방곡선 도출법과 본 연구에서 제안한 도출법의 실내 설정온도 유지 평가와 오버슈팅과 언더슈팅 평가를 통해 성능 분석을 하였고 사용 열량을 통해 에너지 소비량 분석을 하여 본 연구에서 제안한 방법의 타당성을 판단하였다.

본 연구의 결과는 다음과 같다.

- (1) 공동주택의 바닥 복사난방의 난방시스템으로 4세대 지역난방 시스템을 적용하여 지역난방 열교환 유닛(HIU)을 통해 세대별 난방 온수를



공급할 수 있도록 하였다. 공동주택을 기반으로 시뮬레이션 모델을 만들기 위해 국내 열관류율 기준과 바닥복사 난방패널의 기준을 파악하였고, 이를 적용하여 시뮬레이션 모델을 만들었다. 위 난방시스템은 세대 내에서 실별로 공급 온수 온도를 달리할 수 없기에 세대 내 실에서 난방 부하가 가장 큰 존을 기준으로 하였다. 시뮬레이션 모델 설정과 바닥복사 난방의 제어 변수의 방열량을 분석하여 바닥복사 난방을 제어하기 위한 제어 변수로 공급 온수 온도를 설정하였다. 공급 온수 온도를 이용한 외기보상제의 기존 두 가지 방법인 룰 기반 방법과 시행착오 방법의 난방곡선을 도출한 후 시뮬레이션 결과를 분석하였다. 룰 기반 방법의 외기보상제어는 세대별로 난방곡선을 적용할 수 없어 설정 온도 20℃보다 다소 높은 실내 온도(23℃~26℃)와 외기온도에 따라 실내온도가 3℃가량 차이가 났다. 시행착오 방법의 외기보상제어는 실내온도가 20.6℃~ 21.6℃ 사이를 유지하면서 룰 기반 방법보다 설정 온도에 가깝게 제어되었다. 하지만 난방운전을 통해 난방곡선을 계속해서 조정하여 적절한 난방곡선을 찾아야 하고, 최적의 난방곡선을 찾는 데 다소 어려움이 있다.

- (2) 시뮬레이션 모델을 이용하여 바닥복사 난방 시 발생하는 데이터를 산포도와 특성중요도를 이용하여 System Identification에 적용할 입력 변수를 외기온도, 난방 공급 온수 온도, 일사량으로 설정하였고, 출력 변수를 실내온도로 설정하였다. 선택된 변수를 이용하여 ARX, NARX 모델의 System Identification을 진행하였으며 형성된 시스템 모델을 이용하여 미래의 실내온도 예측하였고 예측 시간을 분석하였다. 60분 이후의 실내온도 예측에서 ARX 모델은 RMSE 값이 0.0385, R-제곱

이 0.95으로 나왔고, NARX 모델은 RMSE 값이 0.0222, R-제곱 값은 0.96으로 나왔다. 예측 시간은 80분까지 성능이 유지되는 것을 확인하였다. 이후 Data-driven 방법을 활용하여 외기보상 제어를 위한 난방곡선 도출방법으로 일정 온수 공급을 통한 단순 회귀법 두 가지와 System Identification을 통해 형성된 ARX, NARX 모델을 활용한 도출법을 제안하고 시뮬레이션하였다. 일정 온수 공급을 통한 단순 회귀법은 실내온도와 외기온도 사이에 선형적인 관계와 실내 설정 온도를 유지하기 위해 난방 공급 온수 온도와 외기온도 사이에 선형적인 관계가 있다는 것을 이용하여 두 가지 방법을 제안하였다. 첫 번째는 하나의 일정 온수 공급을 통해 난방곡선을 도출하는 것으로, 본 연구에서 30℃ 온수 공급을 통해 실내 설정온도 20℃의 난방곡선을 도출하였다. 두 번째로 두 개의 일정 온수 30℃, 33℃를 공급하여 실내 설정온도 20℃의 난방곡선을 도출하였다. 위 두 난방곡선을 이용하여 외기보상제어 시뮬레이션을 하였다. ARX, NARX 모델을 통해 정상상태로 실내온도가 20℃일 때 외기온도와 난방 공급 온수 온도 관계를 통해 설정온도 20℃의 난방곡선을 도출하였다. 도출된 난방곡선을 이용한 외기보상제어 시뮬레이션을 하였다. 또한, ARX, NARX 모델을 통해 기존 외기보상제어에서 낮 기간 일사량에 의한 실내온도 상승을 없애고자 각 변수의 파라미터를 이용하여 일사량 발생 시 난방 공급 온수 온도를 조절하여 외기보상제어를 함께 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션 분석을 통해 일사량에 의한 실내온도 상승을 줄일 수 있었으나 외기온도 상승에 의한 영향도 존재하여 실내온도가 낮 기간에 설정온도인 20℃에서 상승하는 것을 완전히 제어하지 못하였다.

(3) 기존 난방곡선 도출법과 본 연구에서 제안한 난방곡선 도출법을 통한 외기보상제어의 시뮬레이션 결과를 분석하였다. 외기보상제어와 외기보상+개폐식 뱅뱅 제어의 시뮬레이션 결과를 통해 성능 분석과 에너지 소비량 분석을 진행하였다. 외기보상제어를 통한 성능 분석은 실내 설정온도 유지 성능평가를 진행하였고, 에너지 소비량 분석은 분석 기간동안 사용한 열량을 산출하였다. 외기보상+개폐식 뱅뱅 제어의 성능 분석은 on/off 횟수와 불감대(Dead band)에서 벗어나는 정도를 AIE로 산출하여 오버슈팅 평가를 하였고, 에너지 소비량 분석은 비교대상을 동일한 조건으로 통제하여 모든 제어 시뮬레이션에서 on 되어 있을 때 사용한 열량을 산출하였다. 외기보상제어에서 성능평가는 룰 기반 방법에서 MAE 값이 4.453으로 가장 낮은 성능을 보였고, 시행착오 방법은 1.035로 평균 1℃ 차이를 보였다. 제안한 방법 중에서 하나 또는 두 개의 일정 온수 온도 공급을 통한 단순 회귀법은 MAE 값이 0.408, 0.599으로 나왔다. ARX, NARX 모델을 통한 도출법은 MAE 값이 0.336, 0.327로 가장 좋은 성능을 보였고, 일사량을 고려한 제어에서 MAE 값이 0.226, 0.267으로 성능이 향상되는 것을 확인하였다. RMSE 값도 동일한 경향의 결과를 보였다. 에너지 소비량은 기존 룰 기반 방법과 시행착오 방법에서 3.34, 3.26Mcal/m<sup>2</sup>·week 이 산출되었다. 하나 또는 두 개의 일정 온수 온도 공급을 통한 난방곡선 도출법은 룰 기반 방법 대비 5.1, 4.5%의 에너지 저감을 가졌다. ARX, NARX 모델 방법은 룰 기반 방법 대비 11.7, 18.1%의 효과를 보였다. ARX, NARX 모델의 일사량을 고려한 제어에서 ARX 모델의 경우 에너지 소비량이 다소 감소하고 NARX 모델의 경우 다소 증가하는 결과를 보였다. 제안한 방법에서 기존 방법보다 실내 설정온

도 유지 성능과 에너지 소비량 분석에서 모두 향상된 결과를 보였다. 외기보상+개폐식 뱅뱅제어에서 성능평가는 기존 룰 기반 방법과 시행착오 방법은 off의 횟수가 757, 233회로, IAE 값은 14.1, 1.9으로 나왔다. 제안한 방법 중 하나 또는 두 개의 일정 온수 온도 공급을 통한 난방곡선 도출법은 off의 횟수가 104, 144회를 기록하였고 IAE 값은 4.8과 1.3으로 나왔다. ARX, NARX 방법은 off의 횟수가 99, 95로 앞의 방법보다 적은 횟수를 보였고, IAE 값은 4.3, 3.1으로 나왔다. 또한, ARX, NARX 방법에서 일사량을 고려한 제어에서 off 횟수가 45, 81회로 IAE 값은 1.8, 1.1로 일사량을 고려하지 않은 제어보다 개선되었다. 룰 기반 방법에서 off 횟수와 AIE 값이 가장 크게 나와 오버슈팅 또는 언더슈팅이 가장크고 빈번하게 일어나는 것을 확인할 수 있었고, 제안한 방법이 기존 방법 대비 모두 off의 횟수가 적어 효율적인 운전을 하는 것을 확인하였다.

- (4) 본 연구에서 바닥난방 시 외기보상제어를 위한 난방곡선 도출에서 Data-driven을 통한 단순 회귀법과 System Identification을 활용한 방법을 제안하였고 기존 방법보다 성능(실내 설정 온도 유지, 오버슈팅)과 에너지 소비량에서 개선된 결과를 보여 타당성을 얻었다. 세대별 외기보상제어를 통한 에너지 소비량 감소는 공동주택 건물의 에너지 저감을 이룰 수 있을 것이다. 또한, 세계 전체 에너지 사용량 중 40%가 건물에서 소비하고 있고, 전체 건물에너지 사용량 중 주거용 건물 에너지 사용이 60%로 가장 많은 비율을 차지하고 있기에 본 연구에서 제시한 방법이 도시의 에너지 저감에도 효과적인 방법이라고 판단한다. 하지만 본 연구에서 채실자와 조명 및 기기 등 내부 발열에

의한 영향을 스케줄로 고려하여 진행하여 실제 내부 발열에 의한 영향과 차이가 있을 수 있고, 난방시스템에서 세대별 열교환기 유닛(HIU)를 통해 각 실에 공급되는 난방 공급 온수 온도를 조절할 수 없어 하나의 실을 기준으로 바닥복사 난방 공급온도를 산정하였기에 다실(multi-room)에 대한 제어방법의 보완이 필요한 것으로 보인다.

## 참 고 문 헌

1. 건축물의 설비기준 등에 관한 규칙 제11조. 시행 2021. 8. 27.
2. 고상호. 시스템 식별에 대한 소개와 기초이론 맛보기. 제어로봇시스템학회지, 18.2 (2012): 33-38.
3. 고상호. 매개변수 시스템 식별법 (2). 제어로봇시스템학회지, 18.4 (2012): 55-62.
4. 김은영, et al. "공동주택 세대용 지역난방 열교환 유닛 (HIU) 개발 방안." 한국건축환경설비학회 논문집 14.5 (2020): 464-474.
5. 김원욱. 지역난방의 변화와 열교환기 기술동향. 한국설비기술협회지, No.12, (2017): 34-41.
6. 곽현주, et al. "서울 지역난방 시스템의 4 세대 저온지역난방으로의 전환." 대한기계학회 논문집 B 권 45.12 (2021): 691-699.
7. 문승현. 지역난방열원을 이용하는 공동주택의 난방부하 감소에 따른 바닥 복사난방시스템 설계 및 제어방법. Diss. 서울대학교 대학원, 2019.
8. 서울에너지공사, 사용시설 관리자 기술교재
9. 소음방지를 위한 층간 바닥충격음 차단 구조기준. 국토교통부 고시 제2018-585호. 시행 2018. 9. 21
10. 여명석, 석호태 and 김광우, 공동주택 온수온돌 바닥복사 난방시스템의 온수온도 제어방법에 관한 연구 (A Study on the Water Temperature Control Method of Hydronic Radiant Floor Heating System in Apartment Buildings). 대한건축학회 논문집, 14.12 (1998): 203-210.
11. 여명석, 김광우, 공동주택 온수온돌 바닥복사 난방시스템의 제어방법에 관한 연구 (A Study on the Control Methods of Hydronic Radiant Floor Heating Systems in Apartment Buildings). 대한건축학회 논문집-계획계, 15.3 (1999): 119-126.

12. 이태원, et al. "지역난방 사용자시설 운전현황 분석 및 에너지절감 방안 연구." 대한설비공학회 학술발표대회논문집 (2012): 239-242.
13. 이훈. "국내 지역냉. 난방 기술의 발전." The Magazine of the Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea 40.12 (2011): 39-45.
14. 임용훈. 4세대 지역난방의 기술 및 정책 동향, No.14 (2017): 79-98
15. 정광섭, 김성민. "지역난방 공동주택에서 외기온도가 난방부하 패턴에 미치는 영향에 관한 연구." 대한건축학회 논문집-계획계 25.2 (2009): 233-240.
16. 조경주, 조동우. "주택 침실의 침기 및 기계 환기에 따른 CO<sub>2</sub> 농도 변화 분석." 한국건축친환경설비학회 논문집 15.4 (2021): 386-394.
17. 최창식, et al. "현장조사를 통한 지역난방 열원 사용 공동주택 단지의 열원 및 분배 시스템 운영현황 분석." 대한건축학회 학술발표대회 논문집 (2015): 545-546.
18. 한국지역난방공사, 열사용시설기준, 2020.4.29. 시행
19. Adelman, D. "Some control strategies for radiant floor heating." Radiant times (1988): 4-5.
20. Bourne, R. C. "Hydronic radiant heating handbook." Hydronic Radiant Heating WorkShop NoteS. Davis Energy Group. 1989.
21. Barma, M. C., et al. "A review on boilers energy use, energy savings, and emissions reductions." Renewable and Sustainable Energy Reviews 79 (2017): 970-983.
22. Connolly, David, et al. "Heat Roadmap Europe: Combining district heating with heat savings to decarbonise the EU energy system." Energy policy 65 (2014): 475-489.
23. Crawley, Drury B., et al. "Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs." Building and environment 43.4 (2008): 661-673.

24. Friedlander, M. "Premium heating with radiant slabs." *Solar Age* (1986): 66-71.
25. Gibbs, D. R. "Control of multizone hydronic radiant floor heating systems." *ASHRAE Transactions-American Society of Heating Refrigerating Airconditioning Engin* 100.1 (1994): 1003-1010.
26. Harish, V. S. K. V., and Arun Kumar. "A review on modeling and simulation of building energy systems." *Renewable and sustainable energy reviews* 56 (2016): 1272-1292.
27. Harvey, LD Danny. *A handbook on low-energy buildings and district-energy systems: fundamentals, techniques and examples.* Routledge, 2012.
28. IPCC, *Global Warming of 1.5°C*, (2018)
29. Johari, Fatemeh, et al. "Urban building energy modeling: State of the art and future prospects." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 128 (2020): 109902.
30. Leigh, Seung-Bok. *An experimental approach for evaluating control strategies of hydronic radiant floor heating systems.* Diss. University of Michigan, 1991.
31. Ljung, Lennart. "System identification." *Signal analysis and prediction.* Birkhäuser, Boston, MA, 1998. 163-173.
32. Lund, Henrik, et al. "The status of 4th generation district heating: Research and results." *Energy* 164 (2018): 147-159.
33. MacCluer, C. R. "Temperature variations of flux-modulated radiant slab systems." *ASHRAE transactions* 95.1 (1989): 1010-1014.
34. MacCluer, C. R. "The response of radiant heating systems controlled by outdoor reset with feedback." *ASHRAE Transactions* 97.2 (1991): 795-9.
35. Olsen, Peter Kaarup, et al. "Guidelines for low-temperature district



heating." EUDP-DEA. Denmark (2014).

36. Park, Duk Joon, et al. "Analysis of a building energy efficiency certification system in Korea." Sustainability 7.12 (2015): 16086-16107.
37. Sin, Yeong-Gi. "BEMS의 최신기술 개발 동향." The Magazine of the Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea 43.5 (2014): 18-25.
38. Tangirala, Arun K. Principles of System Identification : Theory and Practice.
39. Twidell, John. Renewable energy resources. Routledge, 2021.

## ABSTRACT

### Supply Water Temperature setting for Residential buildings with Radiant Floor Heating Systems by Data-driven Outdoor Reset Control

By Park, Dong Seong  
Department of Civil & Environmental Engineering  
Smart City Engineering Major  
Master's Course in the Graduate School of  
Seoul National University  
Advised by Professor Yeo, Myoung Souk  
2023. 2.

Due to the effects of climate warming, countries around the world have announced carbon-neutral plans to reduce their net carbon emissions to zero by 2050 to prevent abnormalities. In addition, plans and measures for this are becoming important. In particular, 40% of the world's total energy consumption is consumed by buildings, of which 27% is consumed by heating energy in buildings. Accordingly, building energy system modeling and simulation research are continuously being conducted to reduce carbon emission and building energy consumption. Therefore, based on the data of the Building Energy Management System (BEMS), it is combined with the

building energy simulation to derive an indoor environment comfort and efficient energy management plan of the building. Furthermore, it is moving toward Urban Building Energy Modeling (UBEM) for sustainable development of cities. In addition, the use of renewable energy for carbon neutrality is increasing, and district heating is developing into a 4th-generation district heating system, increasing the proportion of renewable energy such as geothermal and solar energy through supplying low-temperature hot water (below 60°C).

In order to reduce carbon emission and energy consumption during floor heating in Korean apartments, this study presented an optimal heating hot water temperature setting method based on data collected by generation through district heating Heat Interface Units (HIU) of 4th generation district heating system. When the proposed method was applied, the appropriateness was determined by analyzing performance and energy consumption compared to the existing control method.

Domestic standards for residential buildings were referenced to build the proposed method, and the building energy simulation model was formed using EnergyPlus, and the effectiveness was determined through simulation result analysis by applying the control method.

The results of this research are summarized as follows:

- (1) By analyzing the heat flux amount of the control variable of the simulation model setting and floor radiation heating, the supply hot water temperature was set as a control variable for

controlling floor radiation heating. The simulation results were analyzed after deriving heating curves of the rule-based method and the trial and error method, which are the two existing methods of the outdoor air compensation system using the supplied hot water temperature.

- (2) Through the simulation model, variables to be applied to System Identification were set using the data generated during floor radiation heating using degree of scattering and feature importance. The input variables were set as outdoor temperature, heating supply hot water temperature, and solar radiation, and the output variable was set as indoor temperature. System Identification of ARX and NARX models was performed using the selected variables, indoor temperature was predicted, and prediction time was analyzed. Since then, two simple regression methods through constant hot water supply and derivation methods using ARX and NARX models formed through System Identification were proposed and simulated as heating curves for outdoor reset control using the Data-driven method.
- (3) The simulation results of outdoor reset control through the existing heating curve derivation method and the heating curve derivation method proposed in this research were analyzed. Performance analysis and energy consumption analysis were

conducted through simulation results of outdoor reset control and outdoor reset + on/off bang-bang control. The method proposed in this study was judged to be effective as it showed improved results in maintaining indoor set temperature, overshooting, and energy consumption in the performance analysis.

Keywords : Radiant floor heating system, District heating, Heat Interface Units(HIU), Outdoor reset control, Data-driven model

Student Number : 2021-26239