



전통시장 점포 환절기 실내 열환경 개선을 위한 네트워크 제어 방법론

Network based Control Methodology for Improving the Indoor Thermal Environment of Sales Shops in Traditional Markets during the Change of Seasons

안종훈*

Jonghoon Ahn*

* Associate Professor, School of Architecture and Design Convergence, Hankyong National Univ., South Korea (architectism@hknu.ac.kr)

ABSTRACT

Purpose: Various methods for revitalizing traditional markets have been studied in several fields such as economy, sociology, and engineering. There is a need for an advanced control model that optimizes indoor thermal conditions to improve the usability and that mitigates an increase in energy use. The aim of this research is to develop an energy effective control method without compromising the quality of indoor thermal comfort. **Method:** By use of a designed working hour plan, a proposed model with an adaptive process controls the amount of heating and cooling air supply. The control results after the process are input into an artificial neural network learning algorithm. Then the performance of this learning model is investigated in comparison to the control results of a conventional thermostat model. **Results:** The proposed model effectively maintains the consistency of thermal comfort levels by about 61%, and reduces the energy use for heating and cooling by about 3%, respectively. The performance of this model can help to improve the usability and the economy of independent shops, which can play an important role to revitalize traditional markets in urban areas.

KEYWORD

상업시설
에너지소비
열쾌적도
적응제어
인공신경망

Commercial Building
Energy Use
Thermal Comfort
Adaptive Control
Artificial Neural Network

ACCEPTANCE INFO

Received Nov. 15, 2024
Final revision received Nov. 28, 2024
Accepted Dec. 4, 2024

© 2024. KIEAE all rights reserved.

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

건축물의 효과적인 실내 환경 제어를 위해, 에너지 소비 성능과 실내 거주자의 열쾌적도 양 측면에서 다양한 방법론이 연구되고 있다. 건축물의 용도에 따라 사용자의 작업시간 및 이용자의 방문시간이 다양할 수 있으므로 고정된 방법의 사용보다는 사전에 이용자의 행동 패턴을 프로그램하여 사용하거나 상황에 맞는 적응 제어에 관한 모델이 개발되고 있다. 기술적으로도 상업시설의 HVAC 시스템의 효과적인 제어는 건축적 용도의 세분화와 외부 기후 조건의 비예측적인 변화 등에 대응하는 개선된 제어 알고리즘을 필요로 한다. 특히, 일부 상업 건축물의 경우, 작업자나 방문자를 위한 실내 환경 품질 유지나 에너지 소비 절감 보다 경제활동의 효율성이 중요할 수 있다. 전통시장(Traditional Market)의 소규모 점포(Sales Shop)처럼, 에너지 사용의 효율을 높이거나 실내 환경의 품질을 높이는 것보다 경제적 활동이 중요시될 수 있는 건축물에서는 보다 효과적인 방법론의 개발이 필요할 수 있다. 과도한 비용이 요구되거나 작업 특성이 반영되지 않는 정밀 제어를 보완할, 이론적 구조과 실제 상황의 균형을 맞춘 제어 시스템의 연구가 필요한 시점으로 판단된다.

1.2. 연구의 방법 및 범위

전통시장에서 일반적으로 확인되는 평면 유형을 사용하여 열취득과 열손실간 시뮬레이션 분석을 수행한다. 시장 상업 활동의 특성에 따라, 방문자의 밀도가 높은 시간대와 그렇지 않은 시간대를 네트워크 기법으로 연결하여, 에너지 소비 성능을 확인한다. 그러한 과정에서 산출되는 실내 거주자의 열쾌적도 역시 일정 수준 이상으로 확보하여, 사용자의 쾌적성을 향상시킬 수 있는 실내 열환경 제어 모델을 개발하여 이론적인 성능을 테스트하고자 한다. 두 번째장에서는 HVAC 시스템의 연구 동향과 실내 열쾌적도를 효과적으로 유지하기 위한 모델을 분석한다. 세 번째장에서는 모델링 시나리오를 통해 실내 환경 및 에너지 사용 제어에 관한 방법론을 구성하며, 산출된 실험 결과를 분석, 모델의 특성과 에너지 소비 및 열쾌적도 향상성 유지 성능을 확인한다. 마지막 장에서는 이러한 결과의 분석 및 모델의 장단점을 논의하여 후속연구에 대한 전망을 기술한다.

2. 이론적 고찰

2.1. HVAC control

건축물의 공조(HVAC: Heating, Ventilating, Air Conditioning) 시스템은 건축물의 실내외에서 사용자의 휴식, 작업, 상업 활동을 가능하게 하는 가장 기본적인 물리적 구성 요소 중의 하나이다. 유체역학을 기본으로 공기 흐름을 분석하여 효과적인 냉난방 급기 및

환기 시스템을 설계하며, 건물 외피의 저항 성능 향상을 통한 열 손실을 최소화하고, 쾌적한 실내 환경을 유지하는 데에 필요한 기술이 적용되고 있다. 또한, 이러한 이론적 결과나 실제 건물을 운영한 데이터를 분석하여 건물의 열적 성능을 평가하고, 그 장단점을 분석하여 기존 HVAC 시스템 제어에 사용된 알고리즘을 보완 및 수정하는 각 프로세스에서 다양한 연구가 진행되고 있다. HVAC 시스템에 더욱 복잡한 알고리즘을 구현할 수 있게 되고, 다양한 종류의 센서가 개발되어 실내 환경을 더욱 정확하게 감지하고, 실시간으로 데이터를 수집할 수 있게 되었으며, 네트워크 기술의 발전으로 여러 개의 HVAC 시스템을 통합 관리할 수 있게 되면서 이러한 연구의 접근은 더욱 활발하게 되었다[1-3]. 에너지 가격 상승과 환경 문제에 대한 인식이 높아지면서, HVAC 시스템의 에너지 효율 향상에 대한 요구가 증가한 것도 큰 역할을 했다고 할 수 있다. 그 중에서도 PID (Proportional Integral Derivative) 제어는 내부구조 및 결과 산출 과정에서 수학적으로 직관적인 이해를 가능하게 하는, 컴퓨팅 하드웨어가 고도로 발달되지 않은 시점에서는 매우 유용한 수단이었다. 또한 명료한 결정론적 신호 처리 및 전달 방식으로 인해, 공학적 해결방법이 필요한 상황에서 많이 활용되어 왔다. 이로 인해 모델 기반 제어 방법이나 실제 상황에서 빈번히 일어나는 미세한 제어 오차 등을 효과적으로 해결할 수 있게 되었다[4, 5]. 그러나 건축물의 규모가 대형화되고 복합 용도의 건축물이 많아지면서, 보다 정교하고 세밀한 제어가 필요한 상황이 많이 발생하게 되었다. 이러한 상황에서 Fuzzy Inference 시스템의 개발이 가속화되었다. 실제 실내 환경에서의 열제어는 거주자의 주관적 판단이 주요 변인으로 작용할 수 밖에 없으며, 소수점 단위 미세 제어의 건축적 효과가 크지 않은 상황도 발생하기 때문에, 명확한 결정을 내리기 어려운 모호한 상황에서 큰 효과를 발휘하였다[6, 7]. 이러한 PID 및 Fuzzy Inference 제어 방법은 충분히 큰 데이터가 확보되지 않은 비예측적이고 비논리적인 상황에 효과적인 결정론적 대응 방법으로 간주되곤 하였다.

2000년 이후로 중앙처리장치, 그래픽처리장치, 메모리 속도의 비약적인 발전에 힘입어, 이전에는 처리하기 힘들었던 대용량의 데이터의 사용이 가능하게 되었다. 그 중, 인공신경망(ANN: Artificial Neural Network) 알고리즘은 컴퓨팅 하드웨어 발전의 가장 큰 수혜를 입은 방법론으로, HVAC 시스템 내에서 다양하게 발생하는 수학적, 공학적으로 해결하기 힘들던 복잡성 문제 및 다변수 인과관계를 효과적으로 설명하는 것이 가능하게 되었다[8, 9]. 건축물의 형태를 구성하는 외벽, 천장, 지붕 등에서의 열교환을 계산하여 내부의 열원에서의 열취득 상관관계를 밝히는 것은 제어 방법의 가장 기본적인 프로세스이다. 따라서 건축공학에서 일반적으로 사용되는 열원, 난로, 벽난로, 보일러 등은 HVAC 시스템이 구성되던 초기부터 제어의 주요 목표였다. 열원을 효과적으로 공급하기 위해 연료 공급과 난방기 공급을 위한 댐퍼(혹은 밸브) 조절은 제어 알고리즘의 핵심적인 역할을 해왔었다[10, 11]. 시스템이 고도화되고 발전함에 따라 주요 구성 항목 또는 보조적인 위치에서도 제어 알고리즘이 연구되기 시작했고, 그러한 연구 결과로 급기를 위한 Fan의 제어와 실내 습도의 조절을 위한 Humidifier의 제어에도 성과를 거둘 수 있게 되었다[12, 13]. 이러한 제어 연구는 매우

짧은 시간에도 작동될 수 있도록 시뮬레이션 측정 간격을 좁혀 진행되므로, 많은 연구에서 수초에서 수분 단위 수준의 높은 정밀도를 실현하였다. 설정온도에 의해 시스템이 가동되거나 가동을 멈추는 상황에서 오버슈팅을 효과적으로 줄여 에너지 성능을 향상시키는 제어 방법도 매우 효과적인 것으로 확인되며, 제어를 위한 난방 급기량을 일정 수준 고르게 공급하여 에너지 소비를 줄이는 방법 등 다양한 각도에서 성능을 개선시켜 왔다[14, 15]. 또한, 대용량의 기존의 실제 데이터 혹은 시뮬레이션 데이터를 학습시켜 알고리즘 자체의 정밀도와 효율을 높이는 방법도 많이 사용되는데, 데이터의 규모 및 신뢰도 확보를 위해, 상업시설이 주로 활용되고 있다[16-18].

2.2. Thermal comfort

실내 난방 급기 영역에서 에너지 소비를 절약하기 위해서는, 여름철 난방 급기의 온도를 높이거나, 겨울철 난방 급기의 온도를 낮추거나, 실내 환경을 정량적으로 측정하여 제어 신호를 바꾸는 신호량을 줄이거나 하는 방향으로 제어가 수행되는 것이 일반적이다. 그런데 이러한 상황에서는 실내 거주자가 느끼는 온열지표상의 저하가 일어날 수 있으므로, 이를 측정하기 위해 실내 환경 제어 분야에서 다양한 지표를 개발하고 활용하여 왔다. 이론적 혹은 실제 온도를 측정하여 온도별 다이어그램을 매핑하거나 Psychrometrics 상의 Comfort Zone을 활용하는 것은 건축 실내 환경적인 측면이나 도시 환경 측면에서 보편적으로 활용되는 직관적인 방법이다[19, 20]. 그러한 실내 열환경 제어에서 온도 중심의 제어 방법을 활용하는 연구와 에너지 관리 시스템 상 실제 난방 및 습도 조절에 소비되는 에너지 이외에 실내 공기질 확보를 위한 환기에 소비되는 에너지도 결합한 제어 방법을 탐구하는 연구도 다수 존재한다[21, 22].

그 중 실내 쾌적도를 산출하기 위해 가장 보편적으로 활용되는 지표는 PMV (Predicted Mean Vote)라고 할 수 있다. PMV가 가진 장점 중의 하나는 실내 환경을 구성하는 물리적 지표와 내부에 거주하는 사람의 지표를 동시에 활용하여, 같은 환경에서 서로 다르게 느끼는 온열감을 정량적으로 산출할 수 있다는 점이다. 이는 정상 상태 조건에서 주변 환경이 가하는 신체 열 부하로 표시되며, 신체 열부하는 손 내부 열 발생량과 주변 환경에 대한 신체 열 손실의 차이로 주어진다[23, 24]. 이러한 산출 방식은 아주 작은 수치의 변화로도 큰 온열감 변화 양상을 확인할 수 있는데, 이는 매우 정밀한 제어로 온열감 향상의 효율을 높일 수 있음을 의미한다. 이론적인 시뮬레이션 모델에서 15초, 1분, 5분 간격의 매우 정밀한 실내 난방 급기 제어 시스템을 개발하여, 실내 쾌적도 향상성에서 95%를 상회하는 효율이 확인되었음에도 약 3.7%의 에너지 성능 향상도 동시에 달성됨을 확인할 수 있다[25, 26]. 이는 내부 구조의 세밀한 조절과 보원을 통해 열에너지 공급 및 공급 전후의 편차를 줄임으로 오버슈팅을 억제하여 불필요한 에너지 사용을 줄이며, PMV 분포 곡선을 ANN 알고리즘에 의해 부드러운 형태로 유지한 점이 그러한 향상된 결과를 가져왔다고 분석할 수 있다.

3. 연구의 방법

3.1. Building Concept

최근의 전통시장은 저층의 대규모 건축물에 중앙의 보행로를 중심으로 양측에 소규모 점포가 배치되는 구조가 일반적이다. 또한, 중앙의 보행로에 가판대를 설치하여 물품을 전시, 판매하는 형식으로 운영이 되므로 각 점포의 보행로 측에 접한 벽체, 창문, 출입구는 상시 개방 혹은 가변이 용이한 구조로 설치되며, 이는 전통시장 점포의 상업활동 편의상 대개 개방형 구조로 운영되는 것이 일반적이다 [27]. 따라서 실내 열환경 제어에서 쾌적도를 일정하게 유지하기 어려우며, 이는 일반적인 상업시설 보다 에너지 소비가 증가될 수 있음을 예측할 수 있다.

전통시장에서 일반적으로 확인되는 형태의 건축물을 모델링하여 상업적으로 보편적으로 사용되는 향온기 모델로 실내 열환경을 제어할 경우, 2일간 평균 에너지 소비량과 PMV 값의 CvRMSE를 산출하여 대조군을 구축한다. 동일한 조건하에 적응 모델을 적용하여 매 1분간의 열에너지 소비 및 PMV 제어 데이터를 산출, 이를 ANN 알고리즘에 학습시킨 모델의 에너지 성능과 열쾌적도 항상성 유지 성능을 확인하여, 향온기를 사용한 대조군의 시뮬레이션 결과와 비교한다. 국내 전통시장은 저층의 대규모 건축물에 소규모 점포가 배치된 구조가 일반적으로, 미국에서의 Strip Mall과 유사한 형태를 보인다. 다만, 중앙에 보행로를 두고 양 측면에 점포를 배치, 보행로 천장을 막아 보행 편의성 및 날씨 변화에 부분적으로 대응할 수 있는 구조로 형성하는 것이 최근의 추세이다. 이 연구에서는 기본 점포의 모듈을 8.1×8.1×2.5(m)로 구성하여, 3개의 모듈을 1개의 Strip Mall로 구성하고, 그 밖의 개구부와 벽체 특성을 Table 1.과 같이 설정했다. 각 Strip Mall은 05:00부터 21:00까지 운영되는 것으로 가정하며, Fig. 1.의 하이라이트 된 부분과 같이, 서로 마주보는 점포 (Retail, Food Sales)의 영업시간대를 다르게 가정하여 방문객에 따

Table 1. Building geometry

Parameter	Unit	Value
Type of Building	N/A	Strip Mall
Width×Depth×Ceiling Height	m	24.3×8.1×2.5
Wall Area	m ²	150.6
Wall Thermal Resistance	hour·°C/J	1.60×10 ⁶
Fenestration Area	m ²	11.4
Fenestration Thermal Resistance	hour·°C/J	5.94×10 ⁷

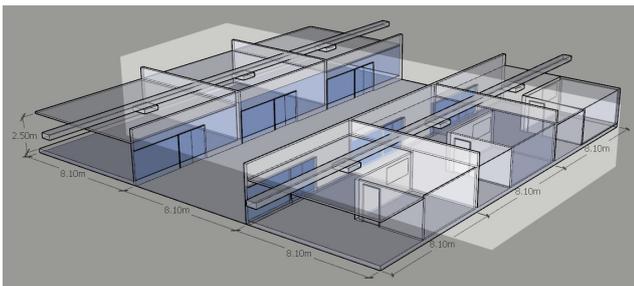


Fig. 1. Conceptual thermal model

른 사용자 밀도(Occupant Density)를 계획한 시나리오를 사용한다. 이를 통해, 3개의 개별 점포를 1개의 Strip Mall 모듈로 구성하되, 마주보는 Strip Mall 간 영업 시간대 별 거주자 점유율에 따라 열에너지 제어 네트워크가 구성된다. 상기된 건축 정보로 모델을 구성하기 위해, U.S. Department of Energy에서 제공하는 EnergyPlus 앱 내 ASHRAE 모델을 템플릿으로 사용했다. 미국 내 Retail의 에너지 소비 강도 조사에 따르면, 교육시설이나 서비스 시설과 유사한 에너지 소비 패턴을 보여주며, 이는 총 14개의 시설 용도 구분에서 에너지 소비 강도가 낮은 건축물에 속하는 것을 확인할 수 있다. 반면 Food Sales의 경우, Food Service와 Health Care에 이어 3번째로 높은 에너지 소비 강도 수준이 확인된다[28-30].

3.2. Thermal Rule

건축물의 형태와 규모를 결정할 후, 그에 대응하는 냉난방 부하와 급기의 매스량과 온도 제어를 계산하기 위한 열역학 원리는 열손실과 열취득의 합이 시간당 전체 내부에너지와 같음을 활용한, 다음 기본 형태의 함수를 사용한다[31].

$$\frac{dT_{room}}{dt} = \frac{1}{m_{room}C_v} * \left(\left(\frac{T_{room} - T_{out}}{\frac{1}{h_{out}A} + \frac{D}{kA} + \frac{1}{h_{in}A}} \right) + (\dot{m}_{ht}C_p(T_{heater} - T_{room})) \right) \quad (Eq. 1)$$

여기서, T 는 온도, h 는 열전달율, k 는 열관류율, A 는 외피의 면적, D 는 외피의 두께, m 은 매스(Mass)량, C_v 는 등적비열, C_p 는 등압비열, \dot{m} 은 유량(Mass Flow Rate), T_{heater} 는 난방기로부터 실내로 유입되는 급기온도이다.

상기된 식에 기반한 재열부하와 실내부하를 기준으로 실내 공기의 온도를 계산하고, 이를 기준으로 열쾌적도를 산출하게 되는데, 이 연구에서는 열쾌적도의 정량적인 수치를 PMV index를 사용한다. 이 식은 P. O. Fanger가 개발하고, EN ISO 7730에서 표준화한 방법으로 기본식은 다음과 같다[32].

$$PMV = 3.155(0.303e^{-0.114M} + 0.028)L \quad (Eq. 2)$$

$$L = q_{met,heat} - f_d h_c (T_d - T_a) - f_{cl} h_r (T_d - T_r) - 156(W_{sk,req} - W_a) - 0.42(q_{met,heat} - 18.43) - 0.00077M(93.2 - T_a) - 2.78M(0.0365 - W_a) \quad (Eq. 3)$$

여기서, M 은 신진대사율, L 은 열부하, T_{cl} 은 의복 착용 평균 표면온도, f_{cl} 은 DuBois 표면적(A_{cl}/AD) 비율, R_{cl} 은 의복 유효 열저항값, T_a 는 실내건구온도, T_r 는 평균복사온도, h_c 는 대류열전달계수, h_r 는 복

Table 2. Scenario in use

Time	Occupant Density		
	Strip Mall A (Retail)	Strip Mall B (Food Sales)	
Day 1	00:00~05:00	0	0
	05:00~11:00	Ready	Heavy
	11:00~14:00	Medium	Light
	14:00~16:00	Medium	Medium
	16:00~21:00	Light	Light
	21:00~24:00	0	0
Day 2	00:00~05:00	0	0
	05:00~13:00	Ready	Light
	13:00~17:00	Heavy	Medium
	17:00~21:00	Heavy	Medium
21:00~24:00	0	0	

Table 3. Adaptive process

Occupant Density	ΔPMV	Mass for Heating	Mass for Cooling
Off	-	-	-
Light	+	-2.5%	+2.5%
	-	+2.5%	-2.5%
Medium	+	-5.0%	+5.0%
	-	+5.0%	-5.0%
Heavy	+	-10.0%	+10.0%
	-	+10.0%	-10.0%

사열전달계수, W_a 는 습도, W_{sk} 는 피부 온도에서의 포화습도이다.

3.3. Simulation control

이 연구에서는 일반적으로 사용되는 향온기를 기준 모델로 한다. 향온기의 설정온도는 22°C이며, 실제 향온기가 작동하거나 작동을 멈추는 Dead-band 구간은 $\pm 1^\circ\text{C}$ 로 설정되었다. 예를 들어, 시스템 가동이 시작된 후 실내 온도가 23°C가 넘어가면 난방 급기가 멈춘다. 이후 실내 온도가 22°C로 변한다고 해서 바로 난방기 가동이 시작되는 것이 아니고 21°C가 되면 가동이 시작된다. 적응 모델은 상기된 향온기 제어를 기본으로 하여 동작하며, 세부 사항은 Table 2., Table 3.에서 기술된다.

예를 들어, Day 1의 새벽 03:00 시점에서는 Occupant Density가 양쪽 모두 0이므로 냉난방기의 가동이 멈춤 상태가 된다. 이후 06:00 시점에서는 Occupant Density가 Strip Mall A는 Ready, Strip Mall B는 Heavy로 모델에 입력된다. 이 때, 실내 설정온도에 맞추어 난방(Heating)기가 작동을 하는데, 해당 실내 온도 상태에서 산출된 PMV와 이전 시뮬레이션 구간에서 산출된 PMV의 변화량이 +0.1인 경우, Occupant Density가 Ready 상태인 Strip Mall A에서는 조정값이 없이 작동하고, Occupant Density가 Heavy인 Strip Mall B에서는 Table 3.에서 확인되는 바와 같이 +10% 만큼 난방기 급기(Mass Flow Rate)을 늘리는 방식으로 작동된다. 이러한 열역학적 방법과 적응 모델이 적용되어 개발된 시뮬레이션 모델은 Fig. 2.와 같다. 모델의 세부 구성 항목은 시뮬레이션 결과 산출된 실내온도와 PMV 값, 전회 시행된 시뮬레이션의 결과값 기준으로 해당 시행의 변화율을 산출하여 반영하는 모듈 Signal Merge, 실내 설정온도를 조절하는 향온기 모듈 Setpoint, ANN의 학습을 통해 구축된 제어 모듈 NetCon, 초기 설정값에 제어값을 반영하는 모듈 Initial Temp, 제어값을 바탕으로 냉난방 급기를 공급하는 모듈 Cooler/Heater,

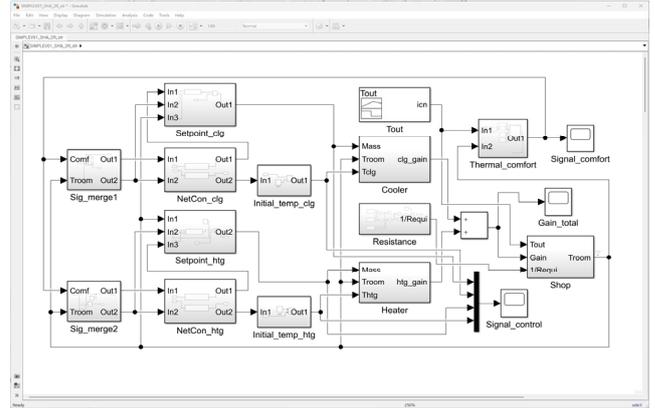


Fig. 2. Simulation block model

전통시장 점포 건축물 모듈 Shop, 설정값과 제어값에 의해 실내 열 쾌적도를 산출하는 모듈 Thermal Comfort 등 7개의 독립적인 모듈로 구성된다. ANN 학습은 Matlab 프로그램의 Neural Network 앱의 알고리즘(a scale conjugate gradient)을 사용했다[33]. 급기량과 급기온도를 제어하기 위해, 내부 구조를 각각 2개의 입력층, 10개의 은닉층, 1개의 출력층으로 구성하여, 1 Epoch 당 1,000번의 Iteration을 수행하였다 [33]. 냉난방 급기의 매스량 제어에서 확인된 통계적 유효성은 $R^2=0.99175$, 급기온도 제어 ANN의 경우, $R^2=0.99147$ 로 확인되었다. 이 ANN 제어 알고리즘이 적용된 시뮬레이션 블록 모델의 제어를 1분마다 수행하여 열에너지 소비량과 PMV값을 산출하여 기존 향온기 모델의 제어 수치와 비교한다.

4. 결과 및 논의

일반적인 향온기 모델 및 ANN 알고리즘을 사용한 모델을 통하여 제어된 실내 온도 패턴은 다음 Fig. 3., Fig. 4.와 같다. 향온기 모델에서 확인되는 특징은 설정온도 22°C를 기준으로 $\pm 1^\circ\text{C}$ 의 Dead-band 설정에 따라 온도가 등락을 거듭한다는 점이다. 실내 온도가 21°C에 도달했을 경우, 난방이 시작되고 23°C에 도달하는 시점(Dead-band 상한값)까지 유지되다 이후 작동이 멈춘다. 실외 온도가 24°C를 상회하는 상황에서는 23°C 이하로 실내 온도를 조절하기 위해 냉방기가 가동되는 프로세스를 명확하게 확인할 수 있다. 그런데, 일부 영역에서 21°C를 하회하거나 23°C를 상회하는 구간이 발생함을 확인할 수 있다. 이는 시뮬레이션 상의 데이터 측정 간격이 1분 간격으로 짧은 관계로, 작동이 시작되거나 멈추기 직전의 오버슈팅값이 상당히 발생한 것을 의미한다. 특히 Day 2의 Occupant Density 설정값이 Heavy, Medium 구간에서 오버슈팅 상한값이 23.5°C를 넘는 영역이 존재하며, 이러한 현상이 구간 내내 지속적으로 발생하고 있다. 이는 에너지 소비의 상대적인 증가와 더불어 실내 열쾌적도 향상성을 유지하는 것에 매우 불리한 결과를 산출할 것임을 유추할 수 있다. 반면, 적응 프로세스의 학습이 반영된 ANN 모델은 이러한 오버슈팅을 상당히 완화하는 방향으로 제어가 수행되고 있다. 더불어 Day 1과 Day 2 모두 Heavy 구간이 있는 지점에서 매우 부드러운 곡선으로 효과적인 제어가 이루어졌음을 확인할 수 있다. 또한, 난방이 필요한 시점에서 Occupant Density가 Heavy인 상

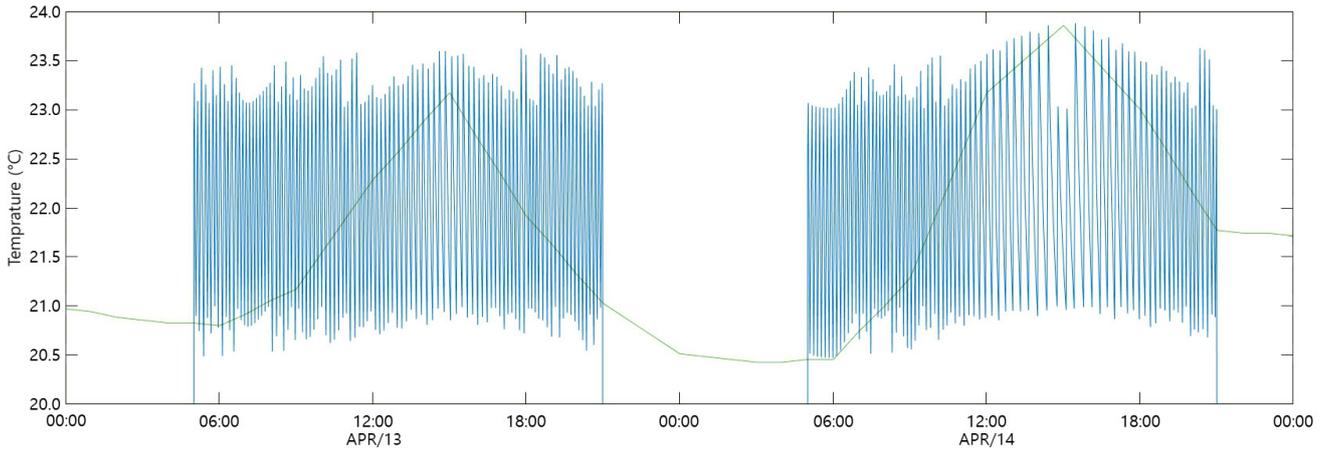


Fig. 3. Indoor temperature controlled by the thermostat model

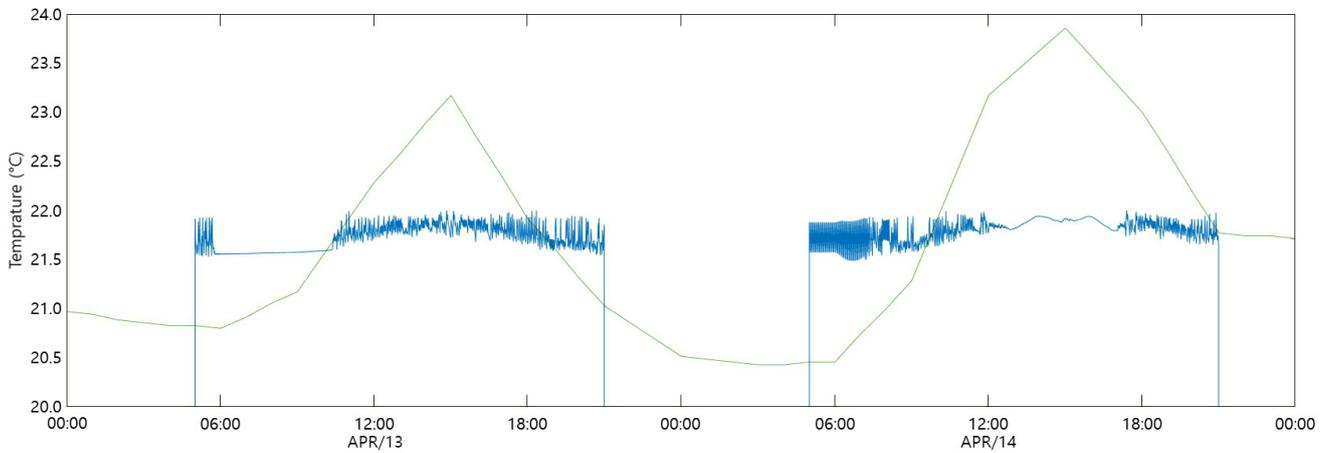


Fig. 4. Indoor temperature controlled by the ANN model

황이 발생할 경우, 실내 설정온도보다 약 0.5°C 정도 내려간 21.5°C 부근에서 제어가 평탄한 곡선으로 유지되고 있음을 확인할 수 있다. 이를 통해, 해당 구간 난방 에너지 사용이 상대적으로 줄어들 것으로 예측되며, 이는 전체 에너지 소비에 적지 않은 영향을 미칠 것으로 판단된다.

이러한 제어 패턴이 실내 열쾌적도의 항상성 유지에 긍정적인 영향을 미칠 것으로 보이나, 반면, 실내 설정온도보다 다소 낮게 제어가 되어 PMV 레벨이 (-)로 하락하여 쾌적도 자체가 저하되는 결과가 나오는지 확인이 필요할 수 있다. Day 2의 Heavy 구간에서는 Day 1 보다 상대적으로 높게 유지되고 있음을 확인할 수 있는데, 이는 외부 온도가 설정온도 이상으로 올라가는 상황에서 상대적으로 냉방 에너지 사용 억제에 도움이 될 수 있을 것으로 예측된다. 이러한 오버슈팅값의 효과적인 억제와 Heavy 구간에서의 냉난방 에너지 저감을 유도하는 제어 패턴으로 인해 전체적인 에너지 소비 성능이 개선될 것으로 예측된다. 이러한 실내 온도 제어가 어떠한 냉난방 급기 공급 제어 패턴과 연계되는지 Fig. 5., Fig. 6.에서 확인할 수 있다. ANN 모델에서도 시스템이 작동되기 시작하는 초기 영역 05:00~06:00 부근에서는 오버슈팅값이 상당히 존재함이 확인된다. 그러나, Occupant Density의 Heavy 구간에 근접할수록 효과적

으로 오버슈팅을 억제하고 있으며, 해당 구간에서 상대적으로 매우 적은 에너지를 사용하고 있음이 확인된다.

이 차이점은 Day 2 낮 구간에서도 확인할 수 있는데, 외부 온도가 올라가는 상황에서 항온기 모델이 작동 간격이 다소 길어지는 것을 제외하면 큰 차이가 없이 규칙적인 On/Off가 일어나고 있는 것에 반해, ANN 모델은 에너지 사용을 매우 효과적으로 억제하는 제어가 수행되고 있다. 이러한 결과 역시 에너지 소비와 열쾌적도 항상성 유지에 매우 긍정적인 요소로 작용할 것임을 예측할 수 있다. 그러나 ANN 알고리즘을 통해 학습시켰음에도 불구하고 오르내림이 확인되는 구간이 존재한다.

이는 학습 과정에서 사용한 데이터의 규모와 학습 알고리즘 특성에 의해 통계적 유효성이 낮은 회귀모델이 산출되었음을 의미한다. Table 4.에서 실내온도 제어 패턴에서 예측된 바와 같이, CvRMSE로부터 산출된 결과는 ANN 모델의 제어 방식이 PMV 항상성을 유지하는 것에 매우 효과적임을 확인할 수 있다. 이는 2일간 Occupant Density를 다르게 설정한 시나리오에서도 확인된다. 이러한 열쾌적도 항상성 유지를 위해 오버슈팅을 줄이고 부드러운 곡선의 패턴으로 제어했을 경우, 에너지 사용량의 증가가 예상되지만, Table 5.의 결과와 같이, 에너지 소비 역시 효과적으로 억제하고 있

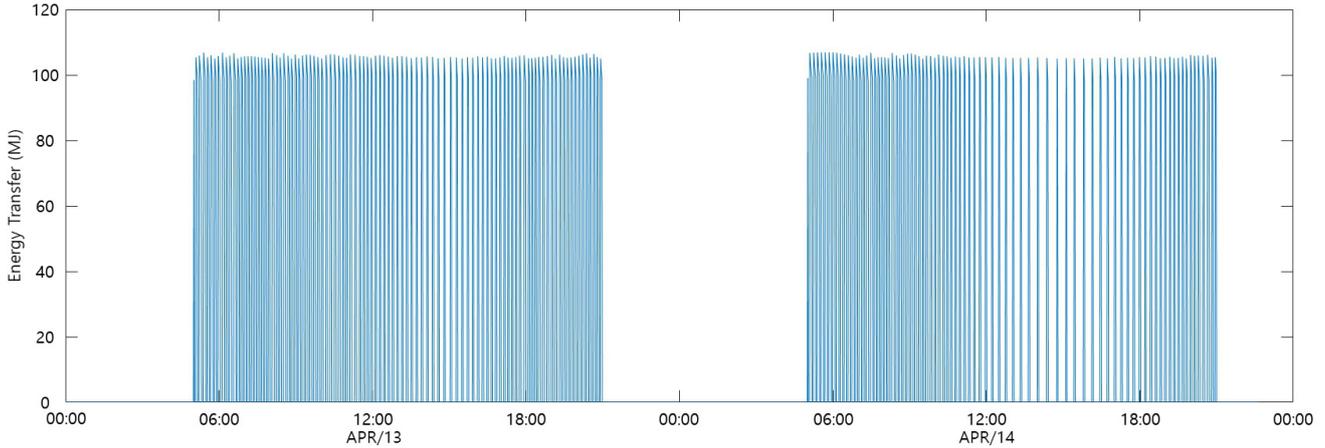


Fig. 5. Energy transfer controlled by the thermostat model

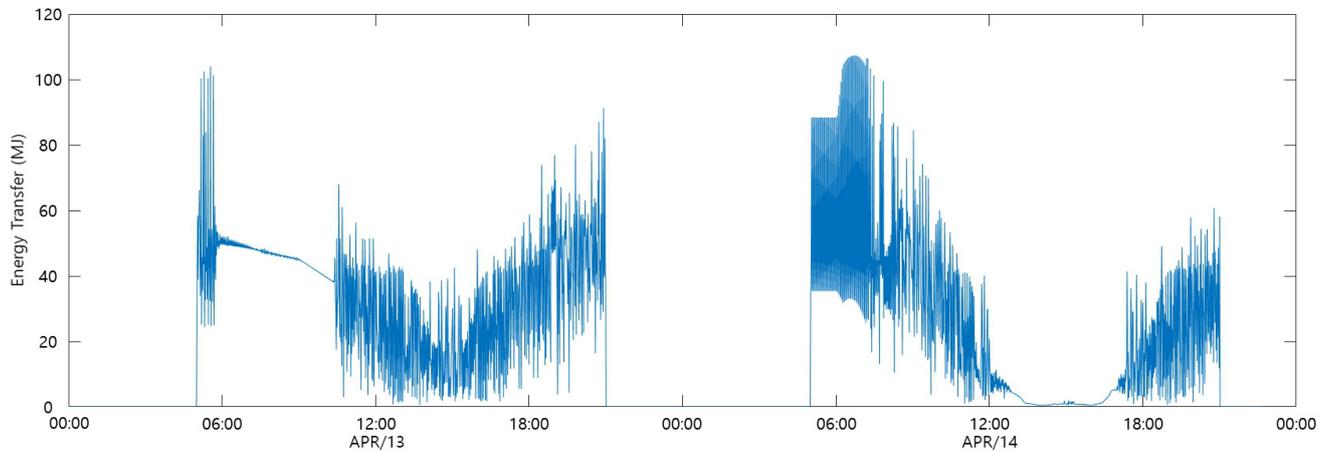


Fig. 6. Energy transfer controlled by the ANN model

Table 4. Comparison of the thermal comfort

Type of Control	CvRMSE of PMV		
	Day 1	Day 2	Average
Thermostat	0.55	0.47	0.51
ANN	0.20	0.19	0.20
Efficiency	↑ 63.64%	↑ 59.57%	↑ 60.78%

Table 5. Comparison of the energy use

Type of Control	Energy Use Intensity (kWh/m ² ·day)		
	Heating	Cooling	Total
Thermostat	0.52	0.97	1.49
ANN	0.49	0.95	1.44
Efficiency	↑ 5.77%	↑ 2.06%	↑ 3.36%

으며, 특히 난방 구간에서 상대적으로 높은 효율이 확인된다. 종합적으로, 적응 프로세스가 적용된 ANN 학습 모델은, 실내 열쾌적도를 효과적으로 유지하기 힘든 작업이 일어나거나, 비용의 절감(경제성)이 강하게 요구되는 건축물에서, 양 측 모두 효과적인 제어를 수행하고 있음을 확인할 수 있다.

4. 결론

이 연구는 전통시장 내 소규모 점포의 영업 특성에 따라, 실내 환

경의 열쾌적도와 에너지 사용 증가 억제를 동시에 달성하기 위한 방법론을 개발하는 것을 주요 목적으로 한다. 이를 위해, 전통시장 특성에 기반한 건축물 모델링과 사용자 특성에 관한 시나리오를 구성, 이를 통해 산출된 실내 온도 제어 결과를 인공지능망 알고리즘에 학습시켜 개선된 모델을 개발한다. 항온기 모델의 제어 패턴을 기준으로, 적응 프로세스를 학습시킨 개선된 모델의 제어 성능을 비교한 결과, 열쾌적도 향상성 유지 측면에서 약 61%, 에너지 소비 측면에서 약 3% 향상된 결과를 보여주었으며, 이는 건축물 이용 특성에 대응하는 효과적인 실내 환경 제어 방법론으로 활용될 수 있을 것으로 확인된다.

그러나, ANN 학습 과정에서 크기 않은 규모의 데이터를 사용한 점과 건축물 모델링 과정에서 다양한 물리적 요소들을 포함시키지 않은 점으로 인해, 회귀 모델의 통계적 유효성이 다소 저해되었을 것으로 판단된다. 또한, 데이터 산출 interval을 다양화하여 오버슈팅 발생 상황 및 조건에 대한 면밀한 확인이 필요할 수 있다. 상기된 장 단점에 대한 보완 및 강화와 더불어, 시뮬레이션 데이터와 실내 환경 센서를 사용한 실측 데이터를 모두 활용하여 모델의 통계적 유효성을 높이는 후속 연구가 진행될 예정이다.

References

- [1] D. Mckoy et al., Review of HVAC systems history and future applications, *Energies*, 16(17), 2023.08, 6109.
- [2] G. Huang et al., State of the art review on the HVAC occupant-centric control in different commercial buildings, *Journal of Building Engineering*, 96, 2024.11, 110445.
- [3] C. Blasco et al., Modelling and PID control of HVAC system according to energy efficiency and comfort criteria, *Proceedings of the 3rd International Conference on Sustainability in Energy and Buildings (SEB '11)*, 2011.06, pp.365-374.
- [4] A. Afram, F. Janabi-Sharifi, Theory and applications of HVAC control systems - A review of Model Predictive Control (MPC), *Building and Environment*, 72, 2014.02, pp.343-355.
- [5] T. Kull, M. Thalfeldt, J. Kurmitski, PI parameter influence on underfloor heating energy consumption and SetPoint tracking in nZEBs, *Energies*, 13(8), 2020.04, 2068.
- [6] J. Ahn, S. Cho, D.H. Chung, Analysis of energy and control efficiencies of fuzzy logic and artificial neural network technologies in the heating energy supply system responding to the changes of user demands, *Applied Energy*, 190, 2017.03, pp.222-231.
- [7] B. Paris et al., Hybrid PID-fuzzy control scheme for managing energy resources in buildings, *Applied Soft Computing*, 11(8), 2011.12, pp.5068-5080.
- [8] E. Barbadilla-Martín et al., Analysing the indoor temperature ranges for an efficient control of HVAC systems, *Energy and Buildings*, 301, 2023.12, 113681.
- [9] X. Liu, Y. Wu, H. Wu, Enhancing HVAC energy management through multi-zone occupant-centric approach: A multi-agent deep reinforcement learning solution, *Energy and Buildings*, 303, 2024.01, 113770.
- [10] Q. Wang et al., Auto-tuning of multivariable PID controllers from decentralized relay feedback, *Automatica*, 33(3), 1997.03, pp.319-330.
- [11] W. Tan et al., Tuning of PID controllers for boiler-turbine units, *ISA Transactions*, 43(4), 2004.10, pp.571-583.
- [12] R. Alcala, Fuzzy control of HVAC systems optimized by genetic algorithms, *Applied Intelligence*, 18, 2003.03, pp.155-177.
- [13] S. Yang et al., A state-space thermal model incorporating humidity and thermal comfort for model predictive control in buildings, *Energy and Buildings*, 170, 2018.07, pp.25-39.
- [14] J. Ahn, S. Cho, Anti-logic or common sense that can hinder machine's energy performance: Energy and comfort control models based on artificial intelligence responding to abnormal indoor environments, *Applied Energy*, 204, 2017.10, pp.117-130.
- [15] J. Ahn, An artificial neural network based indoor environment control system, *KIEAE Journal*, 20(5), 2020.10, pp.7-12.
- [16] B. Grillone et al., A data-driven methodology for enhanced measurement and verification of energy efficiency savings in commercial buildings, *Applied Energy*, 301, 2021.11, 117502.
- [17] F. Ciampi et al., Energy consumption prediction of industrial HVAC systems using Bayesian networks, *Energy and Buildings*, 309, 2024.04, 114039.
- [18] A. Agouzoul, E. Simeu, M. Tabaa, Advancing sustainable building practices: Intelligent methods for enhancing heating and cooling energy efficiency, *Sustainability*, 16(7), 2024.03, 2879.
- [19] X. Du et al., A study on modifying campus buildings to improve habitat comfort - A case study of Tianjin University campus, *Sustainability*, 15(19), 2023.09, 14200.
- [20] C. Turhan et al., An Integrated decision-making framework for mitigating the impact of urban heat islands on energy consumption and thermal comfort of residential buildings, *Sustainability*, 15(12), 2023.06, 9674.
- [21] A. Skala et al., Implementation of building a thermal model to improve energy efficiency of the central heating system - A case study, *Energies*, 16(19), 2023.09, 6830.
- [22] X. Liu, Z. Gou, Occupant-centric HVAC and window control: A reinforcement learning model for enhancing indoor thermal comfort and energy efficiency, *Building and Environment*, 250, 2024.02, 111197.
- [23] A. Laouadi, A new general formulation for the PMV thermal comfort index, *Buildings*, 12(10), 2022.09, 1572.
- [24] J. Ahn, S. Cho, Development of an intelligent building controller to mitigate indoor thermal dissatisfaction and peak energy demands in a district heating system, *Building and Environment*, 124, 2017.11, pp.57-68.
- [25] J. Ahn, A network-based model to improve the constancy of thermal comfort and the use of thermal energy during sudden changes in outdoor temperature, *KIEAE Journal*, 22(2), 2022.04, pp.5-11.
- [26] G. Lamberti et al., Development and comparison of adaptive data-driven models for thermal comfort assessment and control, *Total Environment Research Themes*, 8, 2023.12, 100083.
- [27] 기예슬, 김수미, 현대 사회에 대응하는 전통시장의 건축적 활성화 방안 -남대문 시장을 대상으로-, 대한건축학회 춘계학술발표대회논문집, 제44권 제1호, 2024.04, pp.776-779. // (Y. Ki, S. Kim, Architectural revitalization of traditional markets in response to contemporary society -Focused on Namdaemun Market-, The AIK Spring Annual Conference 2024, 44(1), pp.776-779.)
- [28] J. Ahn, Development of energy performance metrics for airport terminal buildings using multivariate regression modeling, Doctoral dissertation, North Carolina State University, 2016.
- [29] J. Ahn, A benchmark methodology to assess the energy performance of train station complexes, *KIEAE Journal*, 19(6), 2019.12, pp.5-12.
- [30] J. Ahn, S. Park, H. Shin, A study on the energy consumption and long-term costs according to horizontal locations of dwelling units in an apartment building, *Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design*, 35(2), 2019.02, pp.33-41.
- [31] T. Bergman et al., *Fundamentals of heat and mass transfer*, New York: Wiley, 2018.
- [32] INNOVA AirTech Instruments, *Thermal comfort*, 2002.
- [33] P. Braspenning, F. Thuijsman, A. Weijters, *Artificial neural networks*, Germany: Springer, 1995.