

활동량 산출 모델 적용 실내환경 제어의 열환경 및 에너지 성능평가*

Thermal Environment and Energy Performance Evaluation of Indoor Environment Control Using Metabolic Rate Estimation Model

윤지영** · 최은지*** · 이혜원**** · 문진우*****

Ji-Young Yun** · Eun-Ji Choi*** · Hae-Won Lee**** · Jin-Woo Moon*****

Abstract

As people spend 80~90% of their time indoors, the importance of indoor environments on health, well-being, and productivity is increasingly emphasized, with the thermal environment being particularly significant. Metabolic rate, which varies with occupant activities, significantly impacts thermal comfort. To measure and apply this information in building control, computer vision technologies have been developed, including methods that estimate metabolic rate by recognizing human joint coordinates and objects. However, previous studies have been limited to experiments conducted during the heating season. This study used simulations to evaluate the thermal and energy effects of indoor environment control during both heating and cooling seasons by integrating pose classification with object detection. Indoor environment control using an object detection-integrated model improved thermal comfort by adjusting indoor temperature according to metabolic rate while showing an increase or decrease in energy consumption. Compared to a pose-based model without object detection, it reduced PMV by 0.02~0.69, bringing it closer to 0, and decreased energy consumption by 7.7~55.8%, depending on metabolic rate. These results confirm that integrating accurate metabolic rate estimation into indoor environmental control can enhance thermal comfort while minimizing unnecessary energy consumption.

Keywords: Occupant Centric Control, Metabolic Rate, Thermal Comfort, Energy Consumption, Energyplus

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

현대에는 하루 80~90% 이상의 많은 시간을 실내에서 보내는 사람이 증가하고 있다(Frontczak and Wargocki, 2011). 이로 인해 재실자의 건강, 웰빙 등

삶의 질에 영향을 미치는 실내환경에 대한 중요성이 강조되고 있다(양영권·박진철, 2019). 이 중 열환경은 재실자의 건강 및 생산성에 종합적으로 영향을 미쳐 중요하게 다뤄지고 있으며, 쾌적한 실내 열환경을 유지하기 위한 많은 노력이 이루어지고 있다(Zhang et al., 2024; Jouhara and Yang, 2018).

*이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2023-00217322 and 2024-00354306).

**중앙대학교 건축학과 박사과정(주저자: yjy5350@cau.ac.kr)

***중앙대학교 건축학과 연구교수, 건축학박사

****중앙대학교 건축학과 석사과정

*****중앙대학교 건축학과 교수, 공학박사(교신저자: gilerbert73@cau.ac.kr)

기존의 냉난방 시스템은 고정된 온도로 제어되어 다양한 재실자의 정보를 실시간으로 고려하지 않는다. 이는 불쾌한 열환경을 제공할 뿐만 아니라 건물 에너지 효율에도 한계를 보였다. 이러한 한계를 토대로 재실자의 정보를 반영한 실내환경 제어의 중요성이 강조되고 있으며, 이를 위해 다양한 연구가 진행되고 있다(Ogundiran et al., 2024). 최근에는 재실자의 유무, 인원수, 착의량(clothing insulation, CLO), 활동량(metabolic rate, MET) 등의 재실자 정보를 반영한 재실자 중심 제어(occupant-centric control, OCC)가 주목받고 있다(Peng et al., 2019; 최영재 외, 2022).

OCC는 재실자의 편안함을 고려하여 건물 실내환경을 최적화함과 동시에 건물 운영 및 유지관리의 생산성과 효율성을 증가시킬 수 있는 핵심 전략으로 간주된다. 기존의 OCC는 주로 재실자의 유무, 수, 행동을 직접 또는 간접적으로 추정하여 실내온도 조절에 반영함으로써 쾌적함과 에너지 효율 향상을 동시에 달성하는 것을 목표로 하였다(Naylor et al., 2018; Yang et al., 2022).

특히 최근에는 예상평균온열감(predicted mean vote, PMV)를 기반으로 한 재실자 열쾌적 제어가 다수 연구되고 있다(성남철·윤동원, 2010; Huo et al., 2023). PMV는 사람이 특정 환경 조건에서 느끼는 평균적인 쾌적을 예측하는 데 사용되는 지표이다. PMV는 건축 및 실내환경 분야에서 널리 사용되며, 실내온도(T_a), 상대습도(RH), 평균복사온도(T_r), 기류속도(V_a)의 환경 변수와 착의량, 활동량의 개인 변수를 고려하여 특정 환경 조건의 편안함을 수치화한다(ASHRAE Standard 55, 2020). PMV는 다수를 대표하는 쾌적 정보를 제공하므로 현재 전 세계적으로 실내환경 설계 및 운영과 쾌적 제어 연구에 활용되고 있다. 정확한 PMV를 적용한 실내 열환경 제어 시, 재실자의 열쾌적을 향상시킬 수 있다(Kosonen and Tan, 2004; Huo et al., 2023).

이 중 활동량(metabolic rate)은 개인의 대사활동에 의해 화학 에너지가 열 및 기계 에너지로 변환되는 양을 말한다(ISO 8996, 2004). 재실자의 활동에 따라 변화하는 활동량은 열쾌적에 큰 영향을 끼치기 때문에, 이를 측정하고 건물 제어에 반영하기 위한 많은 노력이 있었다(Luo et al., 2018; Yang et al., 2020).

여러 장치 및 기기를 활용한 활동량 측정 방법들이 개발되었지만, 재실자의 직접적인 개입을 요구하기 때문에 실내환경 제어에 반영하기 어려웠다. 실제 건물 제어에 반영하기 위해서는 간접적이며 객관적인 측정 방법이 제시되어야 한다. 따라서, 최근에는 현장 적용 가능성 및 정확성을 고려해 인공지능 기술 중 하나인 컴퓨터 비전(computer vision) 방법을 활용해 이미지 또는 영상에서 활동량을 산출하여 기계학습, 사물인터넷 등과 함께 사용되는 추세이다(Na et al., 2019; Gu et al., 2021).

Choi et al.(2024)은 영상이나 이미지를 통해 사람의 신체 관절 위치를 추정하는 human pose estimation 기술 중 하나인 OpenPose 라이브러리와 심층신경망(deep neural network)을 활용한 활동량 산출 방법을 제안하였다. 실내 이미지에서 재실자의 관절을 인식하고 그 좌표를 기반으로 앉기, 서기, 걷기의 3가지 활동을 산출할 수 있다. 위 논문에서 개발한 활동량 산출 모델은 ‘포즈 기반 활동량 산출 모델’로 정의한다.

Yun et al.(2025)은 앞서 Choi et al.(2024)에서 개발된 기술을 바탕으로, 재실자가 사용하는 사물까지 동시에 인식하여 활동량을 산출할 수 있는 방법을 개발하였다. 이를 통해 앉기, 걷기, 서기 3가지 활동뿐만 아니라 타자치기, 요리하기, 청소하기의 활동을 산출할 수 있음을 보였으며, 포즈기반 활동량 산출 모델과 해당 모델의 활동량 값은 ASHRAE Standard 55(2020)를 기반으로 한다. 위 논문에서 개발한 활동량 산출 모델은 ‘사물인식 통합 활동량 산출 모델’

로 정의한다.

두 논문 모두 개발한 활동량 산출 기술을 실내환경 제어에 적용하고 실험 기반 성능평가를 진행하여 실내 열환경 개선 및 불필요한 건물 에너지 감소의 효과를 보였다. Choi et al.(2024)와 Yun et al.(2025)는 난방 기간만의 실험 성능평가를 진행하여, 열환경 개선 및 불필요한 건물 에너지 감소의 효과를 확인하였다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 논문은 활동량 산출 모델을 적용한 실내환경 제어의 냉·난방 기간 전반에 걸친 열환경 및 에너지 성능을 분석하고 평가하는 것을 목표로 한다. 특히, 포즈 기반 활동량 산출 모델과 사물인식 통합 활동량 산출모델의 성능을 비교 분석하며, 이를 위해 시뮬레이션을 진행하였다. 성능평가는 열환경 및 에너지 소비량을 중심으로 분석하였으며, 그 내용적 범위는 냉·난방 기간동안의 실내 열쾌적과 에너지 소비량을 포함한다.

앞서 Choi et al.(2024)와 Yun et al.(2025)에서 산출할 수 있는 활동 6가지(앉기, 서기, 걷기, 타자치기, 요리하기, 청소하기) 모두 진행된다 가정할 수 있는 주거용 건물을 모사하였다. 시뮬레이션 프로그램은 PMV 기반 제어의 구현이 가능하며, 실내 열쾌적 및 건물에너지 소비량 분석이 가능한 EnergyPlus를 활용하였다. EnergyPlus는 미국 에너지부(department of energy, 이하 DOE)에서 개발한 건물 에너지 시뮬레이션 프로그램으로 건축물의 에너지 효율성을 평가하고 분석하는데 사용된다.

2. 건물 모델링

2.1장에서는 시뮬레이션을 진행하기 위한 기준 건물(base model)에 대하여 서술한다. 2.2장에서는 활동량 산출 방법에 따른 열환경 및 에너지 측면의 효

과 및 비교를 분석하기 위해 설정한 제어 방식과 시뮬레이션 Case를 설명한다. 2.3장에서는 시뮬레이션을 진행할 때 기본으로 설정한 스케줄에 대하여 설명하였다.

2.1 기준 건물

Choi et al.(2024)와 Yun et al.(2025)에서 개발한 활동량 산출 모델에서 산출 가능한 활동 모두가 진행된다고 가정할 수 있는 주거용 건물을 모사하였다. 실내 열환경 및 건물 에너지 효율성 검증이 가능하도록 DOE에서 설계한 주거용 prototype building을 기준 건물로 활용하였다. 기준 건물의 이미지는 Fig. 1, 기본 정보는 Table 1에 나타났다. 기준 건물은 3명으로 구성된 한 가족이 거주하는 단독 주택이며, 기후대는 한국과 유사한 4A의 미국 뉴욕 기상 파일을 사용하였다. Heating, Cooling system은 heat pump, Foundation type은 slab 타입으로 설정하였다. 건물 연면적 311.23m² 중 공조 면적은 220.82m²이고, 창면적비는 14.12%이며 분석 대상 공간은 벽 또는 파티션이 없는 단일 공간으로 구성되어있다.

2.2 제어방법 및 Case 설정

활동량 산출 모델에 따라 A,B 제어로 분류하였다 (Table 2). “A 제어(control A)”는 Choi et al.(2024)에서 실내환경 제어에 적용된 모델로 인체의 관절 좌표 즉, 포즈를 기반으로 활동량을 산출하는 모델 (이하 포즈 기반 활동량 산출 모델)을 적용한 실내환

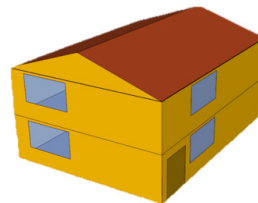


Fig. 1. Modeling Result of the Base Model

Table 1. Base Model Information

Category		Information
Prototype		Single-family detached house
Climate Zone		4A (Mixed-humid)
Heating, Cooling System Type		Heat pump
COP	Heating	3.69
	Cooling	4.07
Foundation Type		Slab
Total Floor Area		311.23 m ²
Conditioned Area		220.82 m ² (living)
Unconditioned Area		110.41 m ² (attic)
Construction	Wall	0.271 W/m ²
	Window	1.704 W/m ²
AFN Infiltration		0.245 [ach]
Occupants		3
Interior Lighting (Living)		1.531 W/m ²
Electric Load (Living)		7.041 W/m ²

경 제어이다. “B 제어(control B)”는 Yun et al.(2025)에서 개발된 제어 방법으로, 포즈를 기반으로 한 활동 분류뿐만이 아니라, 재실자가 사용하는 사물을 인식하여 종합적으로 활동량을 산출하는 모델(이하 사물인식 통합 활동량 산출 모델)을 적용한 실내환경 제어를 의미한다.

A, B 제어 모두 PMV를 제어 변수로 하며, 환경 변수(T_a , RH , T_r , V_a)와 개인 변수(CLO, MET)를 고려한 제어이다. 실내에서 각 변수값을 취득하여 setpoint에 맞는 실내온도(T_a)를 찾아 제어 온도로 보낸다. CLO 값은 주거환경에서의 일반적인 실내 옷차림을 참고하여 긴소매 잠옷 상·하의, 속옷, 양말, 신발 조합의 0.63clo 고정값을 사용하였다.

A, B 제어마다 앉기(sitting), 타자치기(typing), 서기(standing), 요리하기(cooking), 걷기(walking), 청소하기(cleaning)의 6가지 활동을 각각 수행하는 총 12가지의 Case의 시뮬레이션을 수행하였다(Table

Table 2. Control Information

Control Name		Control A	Control B
Control Variable		PMV	
Measurement Variable	Environmental Variable (T_a , RH , T_r , V_a)	Environmental sensor acquisition	
	Clothing Insulation	0.63 clo (fixed value)	
	Metabolic Rate	Pose-based model	Object detection integrated model

Table 3. Case Information

MET	met*	Control name	
		Control A	Control B
Sitting	1.0	Case A-1	Case B-1
Typing	1.1	Case A-2	Case B-2
Standing	1.2	Case A-3	Case B-3
Cooking	1.6	Case A-4	Case B-4
Walking	2.0	Case A-5	Case B-5
Cleaning	2.6	Case A-6	Case B-6

*The unit representing metabolic rate, 1 met, is expressed as 58.2 W/m² per square meter of skin surface area.

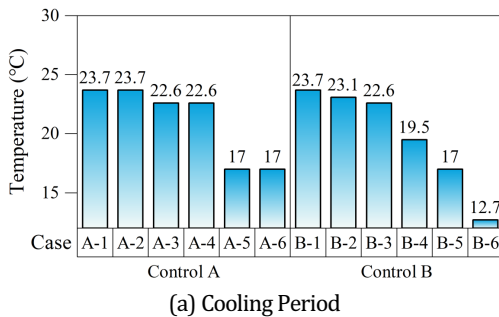
3). 이후 성능평가 및 효과의 분석은 주로 제어 및 Case 별로 진행하였다.

2.3 제어 스케줄

본 시뮬레이션은 활동량 산출 모델에 따른 열환경 및 냉·난방 에너지 소비량을 비교 분석하는 것을 목적으로 하였기에 일부 항목은 가정하여 설정하였다. 시뮬레이션에 사용된 스케줄 설정값은 Table 4에 설명하였다. 4A 지역의 난방 기간은 1~3월, 11월, 12월이며, 냉방 기간은 5~9월이다. 4월과 10월은 냉난방 전환 기간으로 정확한 분석을 위해 평가 기간에서 제외하였다. 이후 열환경 및 에너지 소비량 분석은 냉방 기간과 난방 기간으로 구분하여 진행하였다. A, B 제어의 PMV setpoint는 모두 쾌적을 뜻하는 0으로 설정하였으며, 기류속도(V_0)는 ASHRAE Standard 55(2020)를 참고하여 0.1m/s로 설정하였다. 건물에 사람이 재실하는 동안은 각 Case에 해당하는 1가지 활동을 수행한다고 가정하였다.

Table 4. Setting Information

Category	Information
Heating Period	1/1~3/31, 11/1~12/31
Cooling Period	5/1~9/30
PMV Setpoint	0
Clothing Insulation	0.63 clo
Air Velocity	0.1 m/s



3. 실내 열환경 및 에너지 소비량 분석

3.1 실내 열환경

실내 열환경 분석을 위해 냉·난방 기간을 나누어 Case별 실내온도를 확인하였다(Fig. 2). A 제어는 산출된 활동에 따라 다른 냉·난방 온도가 설정되었으나, 포즈 기반의 활동량 값을 적용하기 때문에 typing은 sitting, cooking은 standing, cleaning은 walking과 각각 같은 실내온도로 나타났다. 포즈 기반의 활동량 산출 모델은 사물을 인식하지 않기 때문에, 사람이 같은 포즈로 다른 활동을 하더라도 같은 활동량으로 인식한다(Yun et al., 2025).

반면에 B 제어는 사물인식 통합 활동량 산출 모델을 적용한 제어로서, 6가지의 활동의 활동량이 모두 다르게 산출된다. 따라서, Case B-1~B-6는 각각 다른 활동량이 제어에 적용되어 냉·난방 기간 모두 실내온도가 다르게 조정되었으며, 활동량이 높아질수록 낮은 실내온도를 나타냈다.

다음으로는 A, B 제어의 Case 별 PMV를 분석하였으며, Case 별로 시간당 1개씩 냉·난방 전환 기간을 제외한 10개월간 7,296개의 PMV 데이터 분포를 box plot으로 나타내었다(Fig. 3).

A 제어는 Case A-4, A-6을 제외하고 쾌적 범위를 만족하였다. Case A-4와 Case A-6는 PMV 값이 0.5 이상으로 나타났다. 이는 Case A-4의 활동에 해당하는 cooking(1.6 met)이 standing(1.2 met)으로, Case

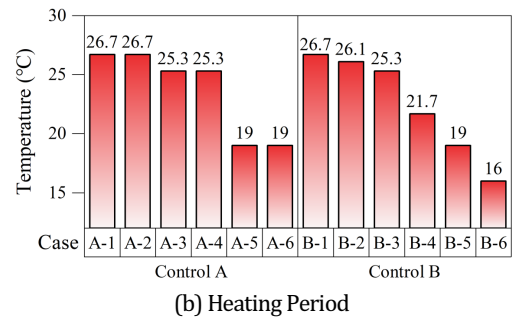


Fig. 2. Indoor Temperature during Cooling and Heating Period

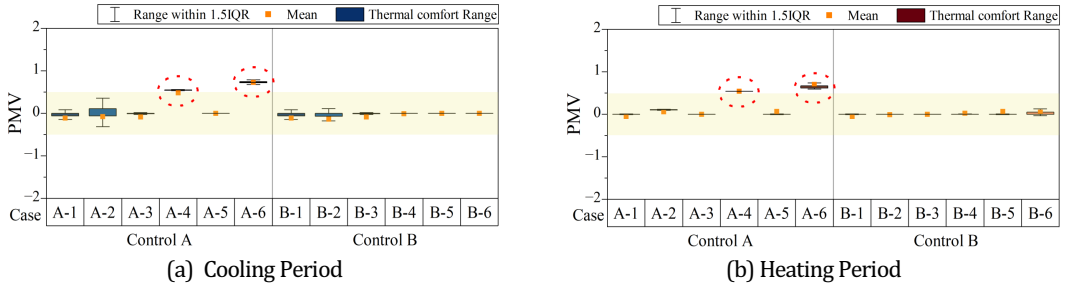


Fig. 3. PMV during Cooling and Heating Period

A-6에 해당하는 활동인 cleaning(2.6 met)이 walking(2.0 met)으로 실제 활동보다 낮은 활동량이 반영되어 실내온도가 높게 제어되었기 때문이다. Case A-2의 활동인 typing(1.1 met) 역시 실제 활동량보다 낮은 sitting(1.0 met)으로 적용되었지만, 활동량 차이가 0.1 met으로 상대적으로 차이가 크지 않아, 설정 온도 변화가 적어 쾌적 범위를 만족함을 보였다.

B 제어는 6가지 Case 모두 쾌적 범위 내에서 제어되었다. 사물인식에 따라 활동량이 다르게 산출될 수 있는 typing(Case B-2), cooking(Case B-4), cleaning(Case B-6)은 A 제어의 동일한 활동에 비해 PMV 분산이 적어졌으며, PMV가 최소 0.02, 최대 0.69만큼 감소되어 0에 가까워짐으로써 열쾌적 개선 효과를 보였다.

3.2 에너지 소비량

Case 별 연간 냉·난방 에너지 소비량을 Fig. 4에 나타냈으며, 냉방 및 난방 에너지 측면으로 나누어 분석하였다. 제어 별로 비교하여 상대적인 효과를 보고자 제어 및 Case 별 에너지 소비량의 변화 및 사용 패턴을 분석하였다. 동일한 조건에서의 비교를 위해, 재실자는 설정된 스케줄에 맞게 재실하는 동안 각 Case에 해당하는 하나의 활동을 수행한다고 가정하였다.

냉방 에너지는 제어 온도가 낮을수록 에너지 소비량이 증가한다. A 제어는 포즈 기반으로 활동을 분류

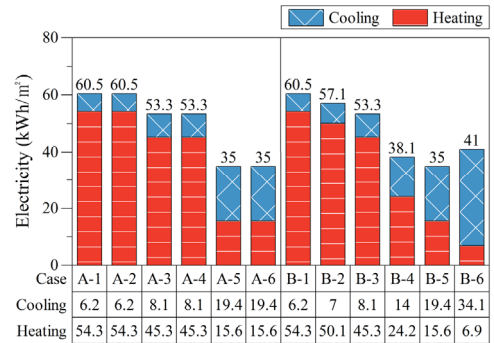


Fig. 4. Energy Consumption during Cooling And Heating Period

하여, Case A-1과 Case A-2, Case A-3과 Case A-4, Case A-5와 Case A-6은 같은 활동으로 인식되어 냉방 에너지 소비량이 동일하게 나타났다. 반면에, B 제어는 6가지 Case의 활동량이 다르게 적용되어 모두 다른 냉방 에너지 소비량을 보였으며, 활동량이 증가할수록 실내온도가 낮게 구성되어 냉방 에너지 소비량이 증가하였다.

난방 에너지는 제어 온도가 높을수록 에너지 소비량이 증가한다. A 제어는 냉방 에너지와 동일하게 Case A-1과 Case A-2, Case A-3과 Case A-4, Case A-5와 Case A-6은 같은 활동으로 인식되어 난방 에너지 소비량이 동일하게 나타났다. B 제어 역시 냉방 에너지와 동일하게 Case 마다 다른 소비량을 보였으며, 활동량이 증가함에 따라 난방 에너지가 감소하였다.

사물인식에 따른 활동량 산출 결과에 차이를 보이는 typing(Case A-2, B-2), cooking(Case A-4, B-4), cleaning(Case A-6, B-6)의 활동은 A 제어 대비 B 제어에서 냉방 에너지는 증가하였지만, 난방 에너지는 각 7.7%, 46.6%, 55.8%의 에너지 소비량이 저감됨을 보였다. 특히 Case B-1(1.0 met)에 비해 Case B-6(2.6 met)의 난방 에너지 소비량은 약 8배 감소하였다.

이와 같이 포즈 기반의 활동량 산출뿐만 아니라, 재실자의 사물을 인식하여 활동량을 정확하게 산출하여 제어에 반영한다면, 활동에 따른 적절한 실내 온도를 조성하여 재실자의 열쾌적성을 향상시키면서, 난방 에너지를 저감할 수 있음을 확인하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 재실자의 포즈와 사용하는 사물을 인식하여 활동량을 산출하고 이를 반영한 제어를 수행했을 때, 냉·난방 기간의 효과를 알아보기로 시뮬레이션을 진행하였다. 그 결과를 실내 열환경 및 냉·난방 에너지 소비량 측면으로 분석하였다. 사물인식 통합 활동량 산출 모델을 적용한 실내환경 제어는 포즈 기반 활동량 산출 모델을 적용한 실내환경 제어에 비해 재실자의 열쾌적성을 향상시키면서 불필요한 에너지를 감소시킬 수 있음을 보였다. 주요 결과를 종합한 결론은 다음과 같다.

- (1) 포즈 기반 활동량 산출 모델은 sitting과 typing, standing과 cooking, walking과 cleaning을 동일한 활동량으로 산출하는 반면에 사물인식 통합 활동량 산출 모델은 sitting, typing, standing, cooking, walking, cleaning을 각각 다른 활동량으로 산출하여 실내 제어에 반영한다.
- (2) 따라서, 포즈 기반 활동량 산출 모델을 적용한 제어는 일부 활동(cooking, cleaning)에서 PMV 쾌

적 범위를 만족하지 못했지만, 사물인식 통합 활동량 산출 모델을 반영한 제어는 6가지 활동 모두 쾌적 범위를 만족했다.

- (3) 포즈 기반 활동량 산출 모델을 적용한 제어 대비 사물인식 통합 활동량 산출 모델을 적용한 제어는 PMV 값이 최소 0.02에서 최대 0.69만큼 감소되어 0에 더 가까워짐으로서 열쾌적 개선 효과를 보였으며, 난방 에너지는 최소 7.7%(sitting)에서 최대 55.8%(cleaning)의 에너지 소비량이 저감됨을 보였다.

포즈 기반 활동량 산출 모델을 적용한 실내환경 제어 대비 사물인식 통합 활동량 산출 모델 적용 실내환경 제어를 수행했을 때, 재실자의 열환경이 개선됨을 확인하였다. 반면에, 에너지 소비량은 냉·난방 기간 및 활동의 종류에 따라 에너지 증감이 다양하게 나타났다.

따라서, 사물인식을 통합하여 정확한 활동량을 산출하여 반영했을 때, 열쾌적성을 향상시키면서 불필요한 에너지를 감소할 수 있음을 확인하였다. 그러나 본 논문은 활동량 산출 모델과 활동 종류에 따라 효과를 분석하기 위해, 재실 스케줄 동안 한가지 활동만을 한다고 가정하였기에 해당 결과를 일반화하기에는 한계가 있다. 실제 건물에서는 다양한 활동이 발생하기 때문에 제어 주기 동안 산출된 활동량을 기반으로 최빈값, 가중산출 평균값 등을 활용하여 제어에 반영할 수 있다. 따라서, 추후에는 다양한 건물 유형과 그에 따른 활동량 스케줄을 반영하여 효과를 분석할 필요가 있다.

실시간으로 재실자의 활동량을 산출하여 실내환경에 반영하는 제어 기술은 건물의 HVAC 시스템, CCTV, IoT 및 BEMS와 통합하여 재실자의 열쾌적성을 위한 정보를 제공할 수 있다. 또한, 재실자의 열쾌적성을 향상시켜 건강, 업무 생산성 등 삶의 질이 향상할 것으로 기대된다.

최근에는 탄소중립(carbon neutrality), 지속가능 발전 목표(sustainable development goals, SDGs)와 같은 글로벌 과제가 제시되고 있다(Chen et al., 2022). 이는 건강과 복지의 증진, 온실가스 배출 감소를 통한 에너지 저감을 주요 목표로 삼고 있다. 본 연구에서 성능평가를 진행한 사물인식 통합 활동량 산출 모델 적용 제어는 재실자의 정보를 활용함으로써, 쾌적한 환경을 조성하는 동시에 불필요한 에너지 소비를 줄이는 것이 가능하다. 이러한 건축 최적화 방법들은 이러한 목표들을 지원하는 데 중요한 역할을 할 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

- 성남철·윤동원(2010), "PMV지표를 이용한 공동주택의 난방제어에 따른 온열환경 및 에너지소비량 시뮬레이션", 『LHI Journal』, 1(1): 19~25.
- 양영권·박진철(2019), "실내 미세먼지 저감을 위한 창호형 환기시스템 성능평가", 『LHI Journal』, 10(3): 1~7.
- 최영재·김태원·변재운·문진우(2022), "재실자 중심 최적 제어를 위한 재실 패턴 예측모델 개발", 『대한설비공학회 학술발표대회논문집』, 624~627.
- ASHRAE Standard 55 (2020), *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*, Atlanta, Ga, USA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers.
- Chen, L., G. Msigwa, M., A. I. Osman, S. Fawzy, D. W. Rooney, and P. S. Yap (2022), "Strategies to Achieve a Carbon Neutral Society: A Review", *Environmental Chemistry Letters*, 20(4): 2277~2310.
- Choi, E. J., J. Y. Yun, Y. J. Choi, M. C. Seo, and J. W. Moon (2024), "Impact of Thermal Control by Real-Time PMV Using Estimated Occupants Personal Factors of Metabolic Rate and Clothing Insulation", *Energy and Buildings*, 307: 113976.
- Frontczak, M., and P. Wargocki (2011), "Literature Survey on How Different Factors Influence Human Comfort in Indoor Environments", *Building and Environment*, 46(4): 922~937.
- Gu, F., M. H. Chung, M. Chignell, S. Valaee, B. Zhou, and X. Liu (2021), "A Survey on Deep Learning for Human Activity Recognition", *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 54(8): 1~34.
- Huo, W., Y. Cheng, Y. Jia, and C. Guo (2023), "Research on the Thermal Comfort of Passenger Compartment Based on the PMV/PPD", *International Journal of Thermal Sciences*, 184: 107876.
- ISO 8996 (2004), *Ergonomics of the Thermal Environment: Determination of Metabolic Rate*, Switzerland: International Organization for Standardization.
- Jouhara, H. and J. Yang (2018), "Energy Efficient HVAC Systems", *Energy and Buildings*, 179: 83~85.
- Kosonen, R., and F. Tan (2004), "Assessment of Productivity Loss in Air-Conditioned Buildings Using PMV Index", *Energy and Buildings*, 36(10): 987~993.
- Luo, M., Z. Wang, K. Ke, B. Cao, Y. Zhai, and X. Zhou (2018), "Human Metabolic Rate and Thermal Comfort in Buildings: The Problem and Challenge", *Building and Environment*, 131: 44~52.
- Na, H., J. H. Choi, H. Kim, and T. Kim (2019), "Development of a Human Metabolic Rate Prediction Model Based on the Use of Kinect-Camera Generated Visual Data-Driven Approaches", *Building and Environment*, 160: 106216.
- Naylor, S., M. Gillott, and T. Lau (2018), "A Review of Occupant-Centric Building Control Strategies to Reduce Building Energy Use", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96: 1~10.
- Ogundiran, J., E. Asadi, and M. Gameiro da Silva (2024), "A Systematic Review on the Use of AI for Energy Efficiency and Indoor Environmental Quality in Buildings", *Sustainability*, 16(9): 3627.
- Peng, Y., Z. Nagy, and A. Schlüter (2019), "Temperature-Preference Learning with Neural Networks for Occupant-Centric Building Indoor Climate Controls", *Building and Environment*, 154: 296~308.
- Yang, B., X. Li, Y. Hou, A. Meier, X. Cheng, J. H. Choi, and H. Li (2020), "Non-Invasive (Non-Contact) Measurements of Human Thermal Physiology Signals and Thermal Comfort/Discomfort Poses: A Review", *Energy and Buildings*, 224: 110261.

19. Yang, T., A. Bandyopadhyay, Z. O'Neill, J. Wen, and B. Dong (2022), "From Occupants to Occupants: A Review of the Occupant Information Understanding for Building HVAC Occupant-Centric Control", *In Building Simulation*, 15 (6): 913~932
20. Yun, J. Y., E. J. Choi, M. H. Chung, T. W. Kim, and J. W. Moon, (2025), "Development and Performance Evaluation of an Indoor Thermal Environment Control Algorithm Incorporating MET Estimation Model with Object Detection", *Building and Environment*, 267: 112217.
21. Zhang, Z., L. Zhang, J. Xu, X. He, B. Yuan, C. Chen, and H. Yang (2024), "A Novel Dual-Functional Flexible Dimming Film for Smart Window Applications: Energy Saving and Self-Cleaning Performance", *Chemical Engineering Journal*, 488, 150601.

요 약

현대에는 하루 80~90%의 많은 시간을 실내에서 보내는 사람이 증가하면서, 재실자의 건강, 웰빙 및 삶의 질에 영향을 미치는 실내환경에 대한 중요성이 강조되고 있다. 특히 이 중 열환경은 재실자의 건강 및 생산성에 종합적으로 영향을 미쳐 중요하게 다뤄지고 있다. 따라서, 재실자의 정보를 반영하여 실내 열쾌적성을 향상하기 위한 다양한 노력들이 이루어지고 있다. 재실자의 정보 중 재실자의 활동에 따라 변화하는 활동량은 열쾌적성에 큰 영향을 끼치기 때문에, 이를 측정하고 건물 제어에 반영하기 위한 컴퓨터 비전의 기술들이 개발되고 있다. 최근에는 사람의 관절 좌표와 사물을 인식하여 활동량을 산출하고 이를 실내환경 제어에 적용하는 연구가 진행되었으나, 이는 난방 기간에만 실험이 진행된 한계가 있다. 따라서, 본 연구는 사물인식 통합 활동량 산출 모델을 적용한 실내환경 제어의 냉·난방 전체 기간에서 열환경 및 에너지 측면의 효과를 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 사물인식 통합 활동량 산출 모델을 적용할 경우, 활동에 따라 다양한 실내온도로 제어되며, 이에 따라 에너지 소비량은 변화하지만 열쾌적성은 향상됨을 확인하였다. 특히, 사물인식이 없는 포즈 기반의 활동량 산출 모델 대비 사물인식 통합 활동량 산출 모델을 적용한 제어는 PMV가 최소 0.02, 최대 0.69만큼 감소되어 0에 가까워졌다. 에너지 소비량은 활동량에 따라 증감현상을 보였으며, 최소 7.7%, 최대 55.8%의 에너지 소비량 저감 효과를 보였다. 이와 같이 정확한 활동량을 산출하여 실내환경에 제어할 경우, 열쾌적성을 향상시키면서 불필요한 에너지를 저감할 수 있음을 확인하였다.

주제어: 재실자 중심 제어, 활동량, 열쾌적, 에너지 소비량, EnergyPlus