



건물 열쾌적 조성을 위한 다수 재실자의 PMV 산출 방법

PMV Estimation Methods for Thermal Control in Multi-Occupant Buildings

최은지* · 윤지영** · 현지연*** · 문진우****

Eun Ji Choi* · Ji Young Yun** · Ji Yeon Hyun*** · Jin Woo Moon****

* Main author, Research Professor, School of Architecture and Building Science, Chung-Ang Univ., South Korea (ejchl77@cau.ac.kr)

** Coauthor, Graduate Student, Dept. of Architecture and Building Science, Chung-Ang Univ., South Korea (yjyxyjy5350@cau.ac.kr)

*** Coauthor, Graduate Student, Dept. of Architecture and Building Science, Chung-Ang Univ., South Korea (jiyuneco@cau.ac.kr)

**** Corresponding author, Professor, School of Architecture and Building Science, Chung-Ang Univ., South Korea (gilbert73@cau.ac.kr)

ABSTRACT

Purpose: To create a comfortable indoor thermal environment, actual occupants' thermal comfort should be used as a control parameter. However, determining a representative thermal comfort value in spaces with multiple occupants has been challenging because each individual's thermal comfort may vary. Therefore, this research aims to propose methods for estimating a representative thermal comfort value to achieve more effective thermal control in multi-occupant environments. To evaluate the proposed methods, the effectiveness of the proposed group PMV methods in building thermal control is analyzed. **Method:** The statistical inference methods were proposed including median value (PMV_{MEDIAN}), exponentially weighted average (PMV_{EWA}), and mean absolute deviation (PMV_{MAD}), to estimate representative group PMV values. For evaluation, various occupant scenarios with diverse personal variables were simulated using EnergyPlus in conjunction with Python-based co-simulation, considering both heating and cooling seasons. **Result:** Simulation results showed that the PMV_{MEDIAN} method provided stable group PMV values due to its low sensitivity to indoor environmental variations during control. Conversely, the PMV_{MAD} method exhibited high sensitivity, resulting in significant fluctuations in response to changes in setpoint temperature. The PMV_{EWA} method effectively reflected individual occupants' thermal comfort characteristics, achieving the highest percentage of occupants within the range of $-1 < PMV < +1$. Consequently, the PMV_{EWA} approach showed better performance in reflecting the various thermal comfort of multi-occupant. The findings provide foundational knowledge for developing intelligent HVAC control systems that accurately reflect individual thermal comfort variations in multi-occupant building environments.

KEYWORD

온열환경
열쾌적
예상평균온열감
다수 재실자

Thermal Environment
Thermal Comfort
Predicted Mean Vote
Multi-Occupant

ACCEPTANCE INFO

Received Mar. 20, 2025

Final revision received Mar 31, 2025

Accepted Apr. 4, 2025

© 2025. KIEAE all rights reserved.

1. 서론

실내 거주자의 열쾌적 정보는 거주자의 열적 쾌적성을 향상시키는 동시에 건물 에너지의 최적 활용을 위한 핵심 데이터로서 건물의 효율적인 운영을 위해 지속적으로 활용되어 왔다[1~4]. 이에 따라 거주자의 열쾌적 평가 방법 개발의 중요성이 강조되어 왔으며, 다양한 환경과 조건에서 높은 정확도를 확보하기 위한 연구가 활발히 이루어져 왔다[1,5,6]. 열쾌적은 실내외 환경적 요인과 개인의 동적 변수 및 심리적 요인 등 다양한 조건에 의해 정해진다. 동적으로 변하는 거주자의 열쾌적을 정량적으로 산출하기 위해 다양한 열쾌적 평가 모델이 개발되었으며, 사람의 온열감에 영향을 미칠 수 있는 실내외 환경변수 및 개인변수를 고려하는 방법으로 발전되어왔다.

초기 열쾌적 모델은 측정의 정확성과 편의성을 고려하여 주로 환경변수만을 활용해 실내를 대표하는 단일 열쾌적 값을 산출하는 방식으로 개발되었으며, 주로 열평형식 또는 주관적 경험을 기반으로 하는 환경 정보를 활용하여 구축되었다[7,8]. 이후 환경변수만을 고

려하는 단순한 방식에서 나아가, 개인변수를 함께 반영하는 모델로 발전하였다. 환경변수와 개인변수를 모두 고려하는 열쾌적 평가 방법으로 신표준유효온도(Standard Effective Temperature, SET*) 및 예상평균온열감(Predicted Mean Vote, PMV) 지표가 대표적으로 사용된다[6,9]. 특히, PMV는 공조 건물에 적합한 지표로 ISO 7730, CEN 15251 및 ASHRAE standard 55 등 국제표준에서 공식적으로 활용되고 있다[7,8,10].

하지만, PMV는 비공조 건물에서 정확도 개선이 요구되었으며, 개인의 특성 편차를 반영하기 어렵다는 특징을 가진다[11~14]. 특히, 과거에 PMV를 건물 제어에 활용하는데 있어서 가장 큰 문제는 개인변수를 정확하게 측정하기 어려웠다는 점이다. 개인변수는 활동량(metabolic rate)과 착의량(clothing insulation)으로 거주자에 따라 실시간으로 변하는 동적 변수이며, 기존에는 개인변수의 실시간 측정 기술의 부재로 값을 가정하여 사용하였다[3,15]. 그러나 최근에는 열화상 이미지 및 카메라 센서 등의 첨단 센서 기술과 AI 기반 데이터 처리 기법이 발전하면서, 개인변수를 실시간으로 측정하여 정확한 열쾌적 산출이 가능하게 되었다[16~19].

이러한 기술 발전에 따라, 재실자 개인의 열쾌적 정보를 실시간으로 정확하게 취득하여 건물 냉난방 시스템의 제어변수로 활용할 수

있게 되었다. 선행 연구를 통해, 단일 재실 환경에서 실시간으로 측정된 개인변수를 기반으로 산출된 동적 PMV를 제어 변수로 활용하면, 거주자의 열적 쾌적성을 향상시키고 불필요한 에너지 소비를 효과적으로 저감할 수 있음이 확인된 바 있다[18,20~26].

기존의 연구는 주로 단일 재실 환경에서 PMV 산출의 정확성을 검증하고 열쾌적성 향상 가능성을 확인하는 데 초점을 맞추어 왔다. 그러나 다수가 함께 생활하는 공간에서는 재실자 개개인의 열쾌적성이 서로 다르게 나타난다. 특히, 규모가 큰 다중 재실 환경에서는 동일한 조건이라 하더라도 재실자 간 온열감에 최대 1.0~1.15 scale 정도의 편차가 발생할 수 있으며[14,27], 다중 재실 환경에서 그룹의 평균 열쾌적 값은 일부 재실자에게는 불쾌한 실내환경을 제공할 수 있다는 한계로 지양되어왔다[7,28,29].

특히, 단일 냉난방 시스템으로 제어가 이루어지는 공간에서는 모든 재실자의 열쾌적성을 동시에 충족시키는 것이 현실적으로 어렵다. 따라서 취득 가능한 개개인의 열쾌적 정보를 기반으로 가능한 한 많은 재실자의 쾌적성을 확보할 수 있도록, 그룹 내 개별 열쾌적 특성의 분포를 고려한 보다 효과적인 시스템 제어 접근이 필요하다. 기존 건물 제어에 활용된 PMV 지표는 개개인의 열쾌적을 산출하기 위한 용도로 사용되었으나, 건물 내 특정 그룹의 열쾌적을 대표하는데 있어 그대로 사용하는 것은 한계가 있다. 현재까지 다수를 대표할 수 있는 열쾌적 산출 방법에 관한 연구는 제한적으로 이루어졌으며, 명확한 대표 방법론 또한 확립되지 않은 상황이다. 다중 재실 환경에서는 가능한 많은 재실자의 열쾌적 확보를 위해, 다수 재실자의 열쾌적을 종합적으로 고려한 대푯값 산출이 필수적이다.

다수를 대표하는 열쾌적 산출 방법에 관한 연구는 아직 초기 단계에 머물러 있으며, 기존의 열쾌적 지표를 수정하거나 새로운 열쾌적 모델을 개발하는 방식으로 접근할 수 있다. 본 연구는 다중 재실 환경에서 보다 정확하고 실효성 있는 열환경 제어를 위해 기존의 PMV 지표를 통계적으로 수정하고, 다수 재실자를 대표하는 그룹 PMV 값을 산출할 수 있는 방법론을 제시하고자 한다. 방법론 평가를 위해, 다양한 재실자 개인변수 시나리오를 설정한 시뮬레이션 분석을 통해 제안된 방법의 건물 제어 효과를 평가하고, 개별 재실자 간 열쾌적 차이를 비교·분석하여 실제 적용 가능성을 검증한다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 본 연구에서 제안하는 그룹 PMV 산출 방법, 시뮬레이션 모델링 및 재실자 개인변수 시나리오 등의 연구 방법을 설명한다. 3장에서는 제안된 방법의 성능을 평가하기 위해 수행된 시뮬레이션 분석을 제시한다. 우선 방법론별 대푯값의 차이를 비교 분석하고, 이를 실제 건물의 주거 및 업무 환경에서 적용한 제어 결과를 비교하여 그 유효성을 평가한다. 마지막으로 4장에서 결론과 한계 및 후속 연구 필요성을 설명한다.

2. 그룹 PMV 산출 및 평가 방법

2.1. 그룹 PMV 통계적 추론 방법

본 장에서는 그룹 PMV를 산출하기 위해 다수의 PMV 데이터를 토대로 그룹 대푯값을 산출하는 통계적 접근 방법을 제시한다. 가장 대표적으로 적용되는 방법은 데이터의 평균 또는 최빈값을 사용하

는 방법이지만, 열쾌적에 있어 평균값은 모든 데이터를 반영하여 계산되기 때문에 이상치(outlier)에 민감하게 반응할 수 있어 권장되지 않는다[7]. 또한, 최빈값(mode)은 가장 빈번하게 도출되는 값을 대표로 산정하는 방법으로 다수의 열쾌적을 고려하는데 있어 종종 사용되어 왔다[20]. 그러나 PMV 값은 -3에서 +3 사이의 연속적인 수치로 표현되므로, 다수의 PMV 데이터가 연속적으로 분포할 경우 명확한 최빈값을 도출하는 데 어려움이 있다. 따라서, 본 연구에서는 평균값 및 최빈값 이외의 통계적 추론 방법 중 데이터의 영향성을 다양하게 고려할 수 있는 세 가지 방법을 제시하였으며, 각각의 명칭은 Table 1과 같이 정의하였다.

첫 번째는 PMV_{MEDIAN} 으로 전체 PMV 데이터의 중앙값(median)을 사용하였다. 중앙값은 식 (1)과 같이 산출된다. 데이터 수가 홀수이면 가운데 값이 중앙값이 되고, 데이터 수가 짝수이면 가운데 두 값의 평균이 중앙값이 된다.

$$PMV_{MEDIAN} = \begin{cases} PMV_{(\frac{n+1}{2})} & \text{if } n = \text{odd} \\ \frac{PMV_{(\frac{n}{2})} + PMV_{(\frac{n}{2}+1)}}{2} & \text{if } n = \text{even} \end{cases} \quad (\text{Eq. 1})$$

여기서, n 은 전체 데이터 개수를 의미한다. 중앙값은 단순하면서도 다수의 PMV 데이터의 중간값을 선택하는 방법으로 데이터의 이상치(outlier)에 영향을 덜 받으며, 전체 분포의 중심 경향을 잘 대표할 수 있는 특징을 갖는다.

두 번째는 PMV_{EWA} 로 전체 PMV 데이터 중 쾌적 범위를 벗어나는 값에 가중치를 부여하는 가중 평균(Weighted Average, WA) 방법이다. 가중 평균값은 강조되어야 하는 영역의 값에 민감하게 반응할 수 있다. 이 방법은 불쾌적 영역에 속하는 PMV 값에 상대적으로 큰 가중치를 부여하여, 열적으로 불편함을 느끼는 재실자의 특성을 보다 민감하게 반영할 수 있다는 장점이 있다. 식 (2)는 가중 평균 PMV를 계산하는 수식을 보여준다.

$$PMV_{EWA} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \times PMV_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$w_i = e^{|PMV|} \quad (\text{Eq. 3})$$

여기서, w_i 는 가중치 값을 나타내며, n 은 전체 데이터 개수를 의미한다. 본 연구에서는 식 (3)과 같이 지수함수를 활용하여 전체 데이터 범위에 가중치를 부여하는 지수 가중 평균(Exponentially Weighted Average, EWA) 방식을 적용하였다. 지수 가중 평균은 PMV가 0에서 멀어질수록 가중치를 기하급수적으로 증가시켜 PMV 극단 값의 영향도를 높게 적용하는 방법이다. 즉, 극단적인 불쾌 상태에 있는 재실자의 값을 더 크게 반영하도록 가중치를 부여하는 방식으로, 불

쾌함을 느끼는 사람의 상태를 우선적으로 반영할 수 있다.

마지막으로 PMV_{MAD} 는 PMV 데이터의 중앙값을 기준으로 각 데이터의 절대적 편차를 평균화하여 계산에 사용하는 평균 절대 편차 (Mean Absolute Deviation, MAD)를 적용하였다. MAD는 식 (4)와 같이 중앙값을 기준으로 각 데이터의 절대 편차를 평균화한 값을 의미한다. 편차의 평균을 활용하기 때문에, PMV 극단 값에 덜 민감하게 반응하면서 동시에 데이터 전체의 경향을 반영할 수 있다. 본 연구에서는 MAD를 이용하여 대표 PMV 값을 보정하는 방식을 식 (5)와 같이 적용하였다. 구체적으로, PMV의 방향성을 고려하여 평균 PMV 값의 부호(양수 또는 음수)에 따라 평균값에 MAD 값을 가감하여 그룹을 대표하는 PMV 값을 도출하였다.

$$MAD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - m(X)| \quad (\text{Eq. 4})$$

$$PMV_{MAD} = \begin{cases} PMV_{mean} + MAD, & \text{if } PMV_{mean} > 0 \\ PMV_{mean} - MAD, & \text{if } PMV_{mean} < 0 \end{cases} \quad (\text{Eq. 5})$$

여기서, $m(X)$ 는 전체 PMV 데이터세트의 중앙값, n 은 전체 데이터 수, x_i 는 데이터세트의 PMV 값을 의미한다. PMV_{MAD} 는 MAD 값을 기반으로 하여, 데이터의 전체 분산을 고르게 반영함으로써 특정 재실자의 영향을 과도하게 반영하지 않고, 군집 전체의 쾌적 분포를 고려한다는 특징을 갖는다. 이렇게 제안된 세 가지 그룹 PMV 산출 방법을 토대로 방법별 대푯값의 차이와 이를 활용한 시뮬레이션 기반 건물 제어 결과를 분석하였다.

2.2. 시뮬레이션 평가 방법

본 연구에서는 건물 내 다양한 재실 시나리오를 적용하여 그룹 PMV 방법론을 평가하기 위해, 건물 열환경 제어 및 평가가 가능한 EnergyPlus 시뮬레이션(version 22.1.0)을 사용하였다. 또한, 건물 실내환경 및 재실자 정보를 기반으로 산출된 그룹 PMV 값을 건물 제어변수로 활용하기 위해 EnergyPlus와 Python과 연동 시뮬레이션을 수행하였다. EnergyPlus와 Python의 연동을 위해 Python plug-in 기능을 활용하였으며, 구동 프로세스는 Fig. 1.에 제시되어 있다. EnergyPlus는 각 Timestep마다 zone predictor부터 zone reporting 사이클을 반복한다. 이 과정에서 Python은 필요한 변수를 수집하고 일련의 연산 과정 후 actuator 값을 EnergyPlus로 전달한다. EnergyPlus는 전달 받은 actuator 값을 토대로 건물 제어를 수행한다.

본 연구에서 적용한 제어 프로세스를 구체적으로 살펴보면, 매 timestep마다 건물 실내환경 정보(실내온도, 상대습도, 복사온도 데이터)를 EnergyPlus로부터 취득하고, 환경 데이터와 재실자의 개인 변수 시나리오를 활용하여 각 재실자에 대한 PMV 값을 도출한다. 이후 산출된 개별 PMV 값을 바탕으로 다수를 대표할 수 있는 그룹 PMV 값을 도출하고, 이를 다음 timestep의 제어변수로 활용한다. 최종적으로 도출된 그룹 PMV가 0이 되도록 설정한 목표 실내온도

Table 1. Estimation methods for group PMV

Methods	Statistical inference
1	PMV_{MEDIAN}
2	PMV_{EWA}
3	PMV_{MAD}

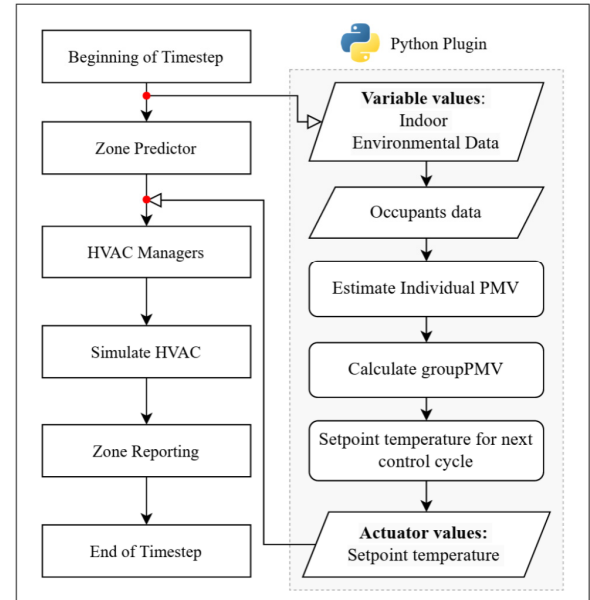


Fig. 1. Co-simulation and group PMV-based control process

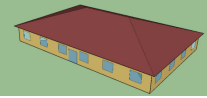
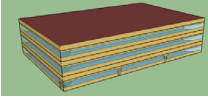
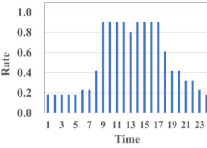
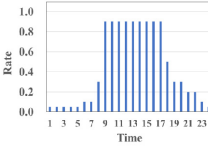
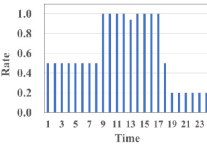
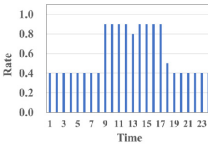
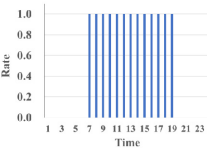
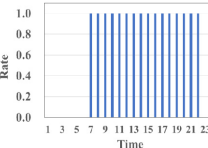
를 EnergyPlus로 전달하여, 공간의 열적 쾌적성을 유지하는 방식으로 제어를 수행한다. 이때, 본 연구에 적용한 재실자 수와 개인변수 시나리오 세부사항은 2.3장에서 설명하였다.

시뮬레이션 모델은 ASHRAE Standard 90.1의 건물 프로토타입을 활용하였으며[30], 재실 인원 규모에 따른 분석을 위해 소규모 및 중규모 업무시설을 대상으로 설정하였다. 건물 규모에 따른 세부 사항은 Table 2.에 제시되어 있다. 소규모 업무시설은 총 연면적 511.16m²의 단층 건물이며, 재실밀도는 18.58m²/person으로 전체 재실인원은 약 27명이다. 중규모 업무시설은 총 연면적은 4,982.19m²의 3층짜리 건물이다. 재실밀도는 소규모 업무시설과 동일하며, 한 층에 약 89명이 거주한다. 두 건물 모두 기후대는 서울 (4A, mixed-humid)로 설정하였으며, 4A 기후에 적합한 건물 외피 사양이 반영된 표준 모델을 활용하였다. HVAC 시스템은 서울 지역의 실제 기상 데이터를 기반으로 부하 조건을 설정하고, 시스템 용량이 자동으로 산정되도록 구성하였다. HVAC 시스템은 소규모 업무시설의 경우 패키지형 히트펌프이며, 중규모 업무시설은 VAV 시스템으로 구성하였다. 재실자의 재실시간은 오전 9시부터 오후 5시로 동일하며, 내부발열 요소 및 시스템 스케줄은 Table 2.에서 확인 가능하다.

2.3. 재실자 개인변수 시나리오

다수가 거주하는 공간에서 개개인의 열쾌적은 개인변수(활동 및

Table 2. Building modeling information

Summary	Modeling Information	
	Small office	Medium office
Building		
Shape		
Floors	1	3
WWR	21.2%	33.0%
Total area	511.16m ²	4,982.19m ²
HVAC system		
Cooling	Direct expansion	Direct expansion
Heating	Electric heat pump	Gas central heating and electric reheat
Fan control	Constant volume	VAV
Internal loads		
Lighting power density	10.67W/m ²	11.03W/m ²
Design occupancy density	18.58m ² /person	18.58m ² /person
Electric equipment	6.78W/m ²	8.07W/m ²
Schedules		
Occupancy	9AM to 5PM	9AM to 5PM
Lighting		
Equipment		
HVAC		

의복) 조건에 따라 상이하게 나타난다. 본 연구에서는 개별 PMV의 다양성을 반영하기 위해 재실자의 개인변수 시나리오를 Fig. 2.와 같이 설정하였다. 개인변수는 재실자의 활동량과 착의량이 특정 범위 내에서 정규 분포(가우시안 분포)를 따른다고 가정하였으며, 확률적 샘플링 방법으로 개개인의 데이터를 구성하였다. 이러한 방법은 활동 및 의복의 자연스러운 다양성을 반영할 수 있으며, 데이터의 형평성을 유지하게 한다. 본 연구에서는 Python의 SciPy 라이브러리 중 truncnorm 함수를 이용해 특정 구간의 정규분포에서 데이터를 샘플링하였으며, 샘플링의 기준이 되는 평균(mean, μ)과 표준편차(standard deviation, σ)는 활동량과 착의량 조건에 따라 결정되었다.

활동량의 경우 업무시설 환경임을 감안하여 앉아있는 활동에 해당하는 1.0met를 평균으로 설정하였으며, 표준편차는 0.25met로

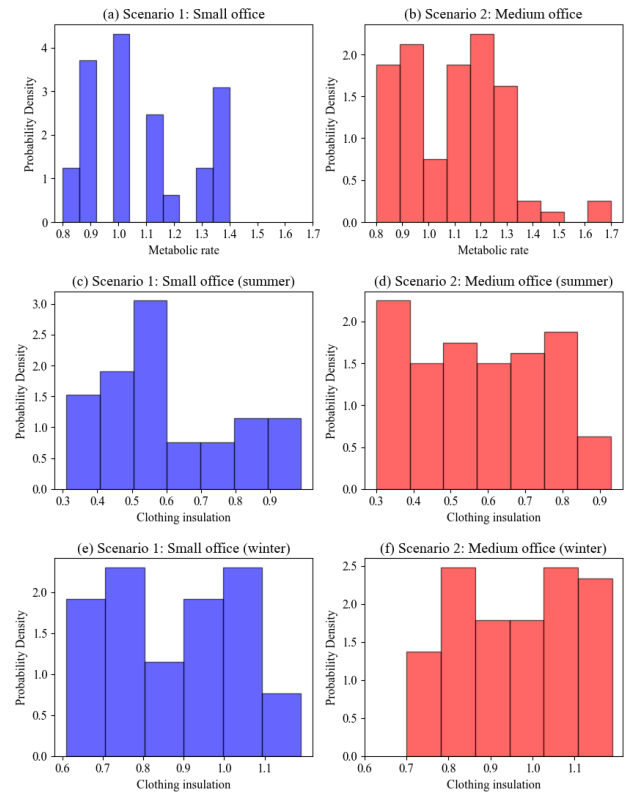


Fig. 2. Probability density distribution of personal variables by scenario

설정하였다. 착의량의 경우 냉방기간과 난방기간의 평균값에 차이가 발생하기 때문에, 계절별 데이터 취득 범위를 다르게 설정하였다. ISO 7730의 표준을 참고하여 냉방기간의 평균 착의량은 0.5clo, 난방기간은 평균 1.0clo로 설정하였으며, 표준편차는 0.25clo로 동일하게 설정하였다[7,8].

Fig. 2.는 업무시설의 규모에 따라 달라지는 인원수 별 샘플링 데이터에 대한 확률밀도 그래프를 보여준다. Fig. 2(a)~Fig. 2(b)는 활동량의 샘플링 결과를 보여주고, Fig. 2(c)~Fig. 2(f)는 착의량의 샘플링 결과를 나타낸다. 착의량의 경우 여름철(Fig. 2(c)~Fig. 2(d))과 겨울철(Fig. 2(e)~Fig. 2(f))을 구분하여 데이터를 구축하였다. 이와 같이 설정된 개인변수 데이터를 기반으로 그룹 PMV 기반 제어 시뮬레이션을 수행하였다.

3. 그룹 PMV 산출 값 비교 분석

3.1. 그룹 PMV 산출 값 비교

본 장에서는 앞서 2.1장에서 제안된 그룹 PMV 산출 방법에 따른 대표 PMV 값의 차이를 분석하였다. 분석은 동일한 실내온도 및 상대습도 조건에서 그룹 PMV 값을 산출하여 비교하는 방식으로 수행되었으며, 그 결과는 Fig. 3.과 같다. Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)는 상대습도 50% 조건에서 실내온도에 따른 그룹 PMV 값 차이를 보여준다. Fig. 3(c)와 Fig. 3(d)는 실내온도 22°C에서 상대습도에 따른 값의 차이를 나타냈다. Fig. 3.의 왼쪽은 소규모 업무시설, 오른쪽은 중규모 업무시설의 재실자 개인변수 시나리오를 반영하였다.

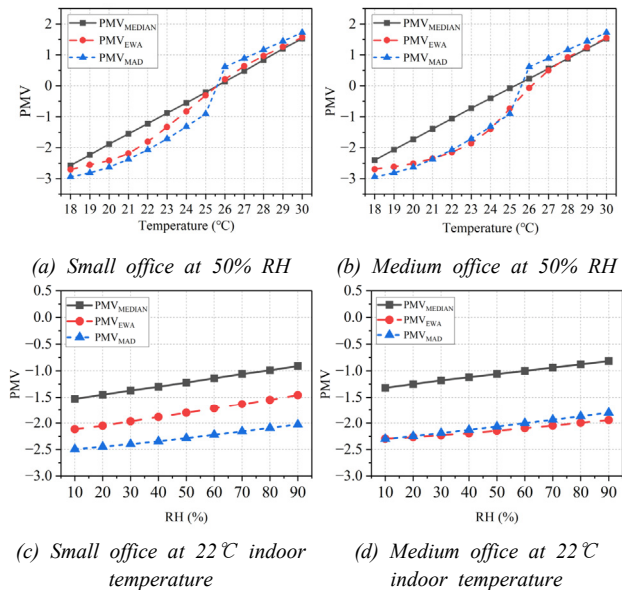


Fig. 3. Comparison of group PMV variations

개인변수가 일정한 조건에서 PMV_{MEDIAN} 은 온도 및 습도가 높아 질수록 그룹 PMV도 비교적 일정하게 증가하는 것을 알 수 있다. 반면, PMV_{EWA} 는 PMV의 값이 커질수록 가중치를 지속적으로 증가시키기 때문에, 낮은 온도에서 쾌적 범위를 벗어나 춥게 느끼는 사람들에게 가중치를 더 부여하여 재실자의 불쾌감을 더 민감하게 반영한다. 반대로 온도가 증가하여 쾌적 범위 내 재실자 비율이 높아질수록 두 방법 간 차이가 줄어들었다. 이러한 결과는 PMV_{EWA} 방법이 습도보다 온도 변화에 더 민감하게 반응함을 시사한다. PMV_{MAD} 는 평균 PMV 값이 낮을 때는 편차를 반영하여 더 낮은 그룹 PMV 값을 산출하며, 반대로 온도가 상승하여 평균 PMV 값이 증가하면 보다 높은 그룹 PMV 값을 도출하는 경향을 보였다. 특히, 약 25°C 부근에서 평균 PMV의 기준이 달라져 그래프의 추세가 바뀌는 것을 알 수 있다. PMV_{EWA} 와 PMV_{MAD} 는 모두 PMV_{MEDIAN} 과 달리 온도에 따라 재실자의 불쾌감 차이를 더 효과적으로 반영할 수 있음을 확인하였다.

3.2. 시뮬레이션 제어 결과

본 장에서는 건물 제어 시 그룹 PMV를 제어변수로 활용한 결과를 분석하고, 방법에 따른 산출 값의 차이와 실내 설정온도 변화를 확인하고자 한다. 또한, 각 방법을 적용했을 때, 실제 재실자의 열쾌적 분포를 평가하여 최대한 많은 사람이 쾌적할 수 있는 환경을 조성하는 방법을 분석하였다. 시뮬레이션에 적용된 개인 변수 조건은 2.3장에서 설명한 대로 계절별로 상이하게 설정하였으며, 이에 따라 결과 분석도 계절을 구분하여 수행하였다. 구체적으로, 계절별 최대부하일(peak day)을 포함하는 겨울철(1월)과 여름철(9월)을 대표 월로 설정하였다. 이때, 그룹 PMV가 반영된 결과를 비교·분석하기 위해, 난방 및 냉방 기간의 특정 날짜를 선정하여 재실 시간대(9시~17시)의 그룹 PMV 산출 결과를 분석하였다. 세 가지 그룹 PMV 산출 방법의 비교 결과는 소규모 업무시설과 중규모 업무시설에 대해 각각 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. 또한, 각 방법에서 도출된 그룹 PMV 값을 기반으로 시스템 설정온도가 결정되며, 냉난방

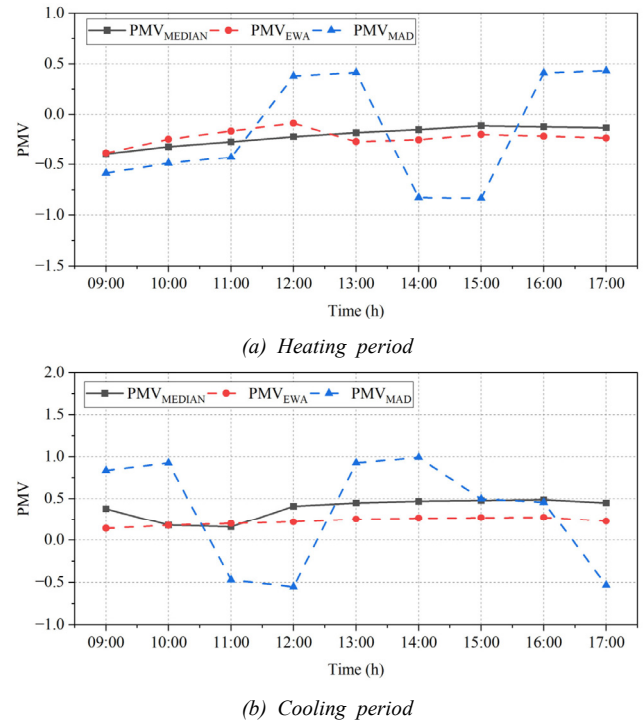


Fig. 4. Group PMV values for small office

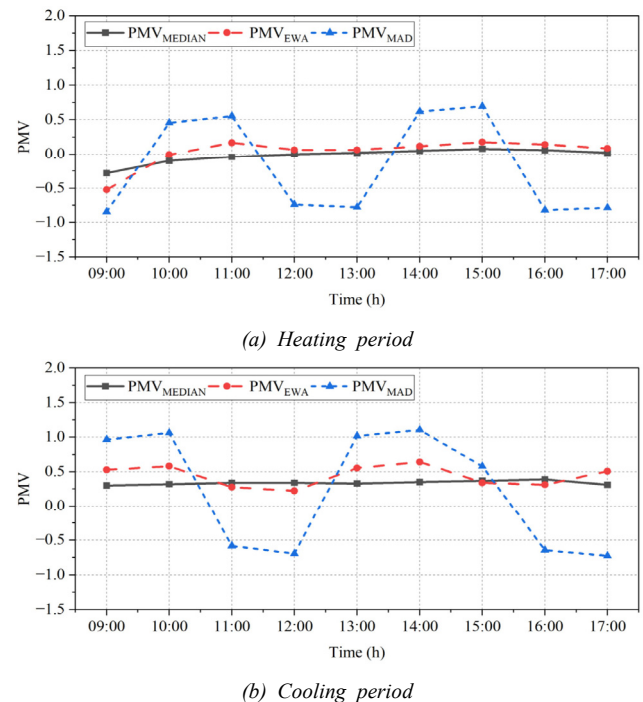


Fig. 5. Group PMV values for medium office

기간에 적용된 설정온도의 범위는 Table 3에 정리하였다.

먼저, Fig. 4와 Fig. 5의 결과를 보면, 건물 규모에 상관없이 PMV_{MEDIAN} 은 비교적 일정하게 그룹 PMV를 산출하는 반면, 산출 값의 변동성은 PMV_{MAD} 에서 가장 크게 확인되었다. 건물의 냉방 및 난방이 수행된 이후에는 실내환경의 변화가 크지 않고 비교적 일정한 온도가 조성되기 때문에, 개개인의 PMV 값도 크게 변화하지 않

Table 3. Setpoint temperature range based on group PMV

Type	Season	PMV _{MEDIAN}	PMV _{EWA}	PMV _{MAD}
Small office	Heating	25°C	25~26°C	23~26°C
	Cooling	25~26°C	25°C	24~27°C
Medium office	Heating	24°C	25~26°C	23~26°C
	Cooling	25°C	25~26°C	24~27°C

Table 4. Analysis of occupant actual thermal comfort

Type	Methods	Comfort range -0.5 < PMV < +0.5		Comfort range -1 < PMV < +1	
		Heating	Cooling	Heating	Cooling
Small office	PMV _{MEDIAN}	68.3%	54.3%	91.8%	89.3%
	PMV _{EWA}	72.8%	59.3%	95.9%	93.4%
	PMV _{MAD}	70.4%	53.1%	93.4%	89.7%
Medium office	PMV _{MEDIAN}	64.4%	41.1%	89.4%	86.3%
	PMV _{EWA}	61.5%	44.7%	93.0%	89.8%
	PMV _{MAD}	61.9%	45.7%	90.8%	85.1%

는다. 이로 인해, PMV_{MEDIAN}과 PMV_{EWA}는 시간대별 그룹 PMV 산출값의 변화가 크지 않고 안정적인 패턴을 보였다. 하지만 PMV_{MAD}는 평균 PMV 값을 기준으로 편차를 더하거나 빼는 방식으로 대푯값을 산출하기 때문에, 약간의 환경 변화가 평균 PMV에 영향을 미칠 경우, 그룹 PMV 산출 결과가 크게 변할 수 있다. 즉, 세 가지 방법 중 PMV_{MAD} 값은 실내환경 변화에 가장 민감하게 반응할 수 있음을 확인하였으며, 이러한 변동성은 결과적으로 시스템의 설정온도 결정에도 영향을 미친다.

시간대별 그룹 PMV 기반의 시스템 설정온도의 범위는 Table 3.과 같다. 비교적 일정한 그룹 PMV 값을 산출하는 PMV_{MEDIAN}의 경우, 건물 규모나 계절에 따라 설정온도의 차이는 존재하지만, 제어가 수행되는 동안 일정한 온도 범위를 유지하는 경향을 보였다. 예를 들어, 난방이 수행되는 기간에 소규모 업무시설은 25°C, 중규모 업무시설은 24°C의 일정 설정온도를 유지하였다. PMV_{EWA} 또한 PMV_{MEDIAN}에 비해 약간의 변동성을 나타내지만, 그룹 PMV 산출값이 안정적인 편으로 설정온도 25~26°C 사이에서 시스템을 가동하였다. 반면, PMV_{MAD}는 실내환경 변화에 민감하게 변하기 때문에, PMV_{MAD}의 설정온도로 시스템을 가동하여 실내온도가 변하면 이는 다시 PMV_{MAD} 값의 변동성을 증가시킨다. 결과적으로 PMV_{MAD}는 설정온도의 지속적인 변화를 초래하는 피드백 효과를 유발하게 된다. 이러한 특성으로 인해, Table 3.에서 확인할 수 있듯이 PMV_{MAD} 설정온도 범위는 난방기간에는 23~26°C, 냉방기간에는 24~27°C로 약 3°C 범위에서 세 가지 방법 중 설정온도 값이 가장 크게 변하는 결과를 보였다.

추가로 난방 및 냉방 기간 전체에 대하여 그룹 PMV 산출 방법에 따른 실제 재실자 개개인의 열쾌적성 분석 결과를 Table 4.에 나타냈다. Table 4.에는 세 가지 그룹 PMV 방법을 적용했을 때의 쾌적 비율을 보여준다. 여기서 쾌적 비율은 전체 인원 중 쾌적 범위에 속하는 사람의 비율을 %로 나타냈다. 이때, 쾌적 범위는 -0.5 < PMV < +0.5와 -1 < PMV < +1로 구분하여 분석을 수행하였다. 후자의

범위는 약간 추움(-1)에서 약간 더움(+1)까지의 PMV 값을 포함하여, 전자의 범위보다 넓은 범위에서 열쾌적을 평가한다. 이는 개인 변수 조건이 다양하게 설정됨에 따라 모든 재실자를 기준 쾌적 범위만으로 평가하기에 한계가 있기 때문이다. 따라서, 기존의 쾌적 범위와 함께 더 완화된 기준 범위를 추가적으로 평가하였다. 이를 통해, PMV 0에 최대한 가까운 범위 내에 분포하는 재실자 비율을 확인하고, 각 그룹 PMV 산출 방법의 열쾌적 측면의 효과를 확인하고자 하였다.

쾌적 범위 -0.5 < PMV < +0.5의 경우, 소규모 업무시설에서는 난방 시 68.3%~72.8%, 냉방 시 53.1% ~ 59.3%의 재실자가 쾌적 범위에 포함되었다. 난방 및 냉방 기간 모두 PMV_{EWA}가 쾌적 비율이 각각 72.8%, 59.3%로 가장 높았다. 중규모 업무시설은 방법별 쾌적 비율 차이가 더 근소하게 확인되었으며, 난방기간은 PMV_{MEDIAN}이 냉방기간은 PMV_{MAD}의 쾌적비율이 가장 높았다. 하지만, 두 건물 규모 모두 -0.5 < PMV < +0.5에서는 모든 방법의 쾌적 비율이 최대 72.8% 이하로 낮게 확인된다.

반면, -1 < PMV < +1의 쾌적범위에 대한 결과를 보면, 모든 방법이 최소 85% 이상의 쾌적 비율을 보이는 것을 알 수 있다. 특히, 건물 규모와 상관없이 PMV_{EWA}의 쾌적 비율이 냉난방 모든 기간에 약 90% 이상 가장 높은 수치를 보인다. 또한, 소규모 업무시설보다 중규모 업무시설의 쾌적비율이 다소 낮게 도출되었다. 이는 중규모 업무시설에 적용된 재실자 개인변수 분산이 더 크기 때문으로 판단되며, 재실자의 개인변수의 분산이 커질수록 쾌적 비율이 낮아질 수 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 건물 열환경 쾌적 제어를 목적으로 다수를 대표하는 열쾌적 산출을 위한 새로운 접근 방법을 제안하고, 건물 제어 효과를 분석하였다. 이를 위해 다수의 열쾌적을 산출하는 그룹 PMV 산출 방법 세 가지를 제시하고, 건물 규모 및 재실 인원을 고려한 건물 열쾌적 기반 제어를 수행하여 제어 결과를 분석하였다.

그룹 PMV 산출 방법은 통계적 추론 방법을 활용하여 PMV_{MEDIAN}, PMV_{EWA} 및 PMV_{MAD}로 구성하였다. 제안된 방법을 평가하기 위해, 재실자의 개인변수 조건을 다양하게 구성하였으며, 시뮬레이션을 통해 소규모 및 중규모 업무시설을 대상으로 열쾌적 기반 제어를 수행하였다. 그 결과, 그룹 PMV 방법에 따라 동일한 조건에서도 산출되는 대표 PMV 값에 차이가 발생할 수 있음을 확인하였다. 또한, 그룹 PMV 값을 토대로 열쾌적 기반 제어를 수행한 결과, PMV_{MEDIAN}은 제어가 수행된 이후 비교적 일정하게 그룹 PMV 값을 도출하였고, PMV_{MAD}가 실내환경 변화에 가장 민감하게 반응하였다. 각 방법에 따라 다양한 개인변수 조건을 가지는 재실자의 실제 열쾌적을 분석한 결과, -1 < PMV < +1 수준의 쾌적 범위에서 PMV_{EWA}의 쾌적 비율이 소규모 업무시설은 93.4% 이상, 중규모 업무시설은 89.8% 이상의 쾌적 비율을 나타내며 세 가지 방법 중 가장 높게 확인되었다. 또한, 재실자의 개인변수의 분산이 커질수록 쾌적 비율은 낮아질 수 있다는 사실을 확인하였다.

종합하자면, 본 연구에서는 다수 재실자의 대표 열쾌적을 산출하

기 위해 그룹 PMV 산출 방법의 적합성을 상황에 따라 분석하였으며, 업무시설 환경에서 불쾌한 재실자에게 더 큰 가중치를 부여하는 가중 평균 방법이 쾌적성 향상에 긍정적 효과를 보이는 것으로 확인하였다. 다만, 본 연구의 목적은 특정 방법을 최적의 정답으로 제시하는 것이 아니라 다양한 열쾌적 평가 방법의 접근 가능성을 탐색하는 것에 있다. 모든 재실자가 동일한 냉난방 시스템 조건 하에서 일률적으로 쾌적함을 유지하기는 현실적으로 어렵다. 병원과 같이 모든 재실자의 열쾌적이 중요한 공간, 업무시설과 같은 대형 공간, 불특정 다수가 출입하는 상업시설 등 다양한 공간의 특성을 고려한 최적의 실내 환경을 제공하는 설계 및 제어 방안이 필요하다. 이를 위해서는 적절한 열쾌적 산출을 통한 효율적 시스템 제어와 함께 적절한 zoning 및 시스템 설계가 병행되어야 하며, 본 연구의 결과가 이러한 후속 연구의 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다. 결론적으로, 본 연구는 그룹 PMV 기반 열쾌적 평가 방법론의 다양성을 제시하는 기초 연구로서 향후 지속적인 연구를 통해 건물 에너지 효율과 재실자 열쾌적 향상에 기여할 것으로 기대된다.

현재 연구는 개인변수를 계절별로만 구분하여 시나리오를 설정하고 평가하였으나, 향후에는 다양한 기후대별 열쾌적 분석 및 시스템 에너지 성능에 미치는 영향도 함께 분석할 필요가 있다. 또한, 특정 시나리오에 따른 개인변수 반영이 아닌 실시간 개인변수 조건을 반영해야 하며, 이는 실제 환경에서 더욱 정확한 열쾌적 평가와 쾌적한 실내환경 제어를 가능하게 할 것이다. 또한, PMV 지표 자체는 여러 한계를 가지고 있기 때문에, PMV 값을 활용하는 본 연구에서 나아가야 한다. 개개인의 다양성을 반영한 열쾌적 평가 지표의 개발과 건물 내 구역(zone) 또는 실별 냉난방 시스템 제어 변수로써 최적 열쾌적 대푯값을 산출하는 새로운 방법이 개발될 필요가 있다. 이를 위해, 다양한 정보가 통합적으로 고려될 수 있는 AI 지능형 모델을 활용할 수 있다. 또한, 실내환경 및 재실 변화 패턴과 재실자의 나이, 성별, BMI 등 개인의 열쾌적에 영향을 미치는 2차 변수를 종합적으로 반영할 필요가 있다.

Acknowledgement

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2023-00276529 and RS-2023-00217322).

References

- [1] F. Jazizadeh et al., Human-building interaction framework for personalized thermal comfort-driven systems in office buildings, *Journal of Computing in Civil Engineering*, 28(1), 2014, pp.2-16.
- [2] C. Zhong, J. Choi, Development of a data-driven approach for human-based environmental control, *Procedia Engineering*, 205, 2017, pp.1665-1671.
- [3] J. Park et al., Development of novel PMV-based HVAC control strategies using a mean radiant temperature prediction model by machine learning in Kuwaiti climate, *Building and Environment*, 206, 2021, 108357.
- [4] J. Kim, S. Schiavon, G. Brager, Personal comfort models - A new paradigm in thermal comfort for occupant-centric environmental control, *Building and Environment*, 132, 2018, pp.114-124.
- [5] J. Van Hoof, Forty years of Fanger's model of thermal comfort: Comfort for all?, *Indoor Air*, 18(3), 2008, pp.182-201.
- [6] P.O. Fanger, *Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering*, Denmark: Danish Technical Press, 1970.
- [7] ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers), *Thermal environmental conditions for human occupancy* (ASHRAE Standard 55), 2020.
- [8] ISO (International Organization for Standardization), *Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria* (ISO 7730), 2005.
- [9] A.P. Gagge, A.P. Fobelets, L.G. Berglund, A standard predictive index of human response to the thermal environment, *ASHRAE Transactions*, 92(1), 1986, pp.709-731.
- [10] CEN (European Committee for Standardization), *Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics* (CEN EN15251), 2007.
- [11] R. De Dear et al., A review of adaptive thermal comfort research since 1998, *Energy and Buildings*, 214, 2020, 109893.
- [12] P.O. Fanger, J. Toftum, Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates, *Energy and Buildings*, 34(6), 2002, pp.533-536.
- [13] 조선희 외 4인, Adaptive PMV 이론 기반 적응열쾌적 모델, 대한설비공학회 학술발표대회논문집, 2013, pp.912-913. // (S.H. Cho et al., The adaptive thermal comfort model based on adaptive PMV theory, *Conference Journal of SAREK*, 2013, pp.912-913.)
- [14] M.A. Humphreys, J.F. Nicol, The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in every-day thermal environments, *Energy and Buildings*, 34, 2002, pp.667-684.
- [15] J. Choi, V. Loftness, Investigation of human body skin temperatures as a bio-signal to indicate overall thermal sensations, *Building and Environment*, 58, 2012, pp.258-269.
- [16] J. Dziedzic, D. Yan, V. Novakovic, Measurement of dynamic clothing factor (D-CLO), *Norwegian University of Science and Technology*, 2018.
- [17] J. Liu, I.W. Foged, T.B. Moeslund, Clothing insulation rate and metabolic rate estimation for individual thermal comfort assessment in real life, *Sensors*, 22(2), 2022, 619.
- [18] H. Choi et al., Deep-vision-based metabolic rate and clothing insulation estimation for occupant-centric control, *Building and Environment*, 221, 2022, 109345.
- [19] E.J. Choi et al., Seasonal effects of thermal comfort control considering real-time clothing insulation with vision-based model, *Building and Environment*, 235, 2023, 110255.
- [20] E.J. Choi et al., Impact of thermal control by real-time PMV using estimated occupants personal factors of metabolic rate and clothing insulation, *Energy and Buildings*, 307, 2024, 113976.
- [21] 최은지 외 3인, 영상이미지 기반 착의량 산출 모델 적용에 따른 실내 PMV 제어 및 열쾌적 평가, 한국생태환경건축학회지, 22(1), 2022, pp.53-60. // (E.J. Choi et al., Evaluation of thermal comfort by PMV-based control applying dynamic clothing insulation, *KIEAE Journal*, 22(1), 2022, pp.53-60.)
- [22] J.Y. Yun et al., Development and performance evaluation of an indoor thermal environment control algorithm incorporating MET estimation model with object detection, *Building and Environment*, 267, 2025, 112217.
- [23] F. Zhang, R. de Dear, P. Hancock, Effects of moderate thermal environments on cognitive performance: A multidisciplinary review, *Applied Energy*, 236, 2019, pp.760-777.
- [24] 최은지 외 4인, 재실자 착의량 정보에 따른 열쾌적 기반 제어의 탄소배출량 분석, 한국생태환경건축학회지, 24(2), 2024, pp.79-86. // (E.J. Choi et al., Carbon emission analysis of building thermal control based on occupants clothing insulation, *KIEAE Journal*, 24(2), 2024, pp.79-86.)
- [25] D. Li, C.C. Menassa, V.R. Kamat, Personalized human comfort in indoor building environments under diverse conditioning modes, *Building and Environment*, 126, 2017, pp.304-317.
- [26] T. Chaudhuri et al., Machine learning driven personal comfort prediction by wearable sensing of pulse rate and skin temperature, *Building and Environment*, 170, 2020, 106615.

- [27] P.O. Fanger, G. Langkilde, Interindividual differences in ambient temperatures preferred by seated persons, ASHRAE Transactions, 81(2), 1975, pp.140-147.
- [28] Z. Wang et al., Individual difference in thermal comfort: A literature review, Building and Environment, 138, 2018, pp.181-193.
- [29] Q. Zhao et al., Experimental study of group thermal comfort model, 2014 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, 2014, pp.1075-1078.
- [30] ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers), Energy standard for sites and buildings except low-rise residential buildings (ASHRAE Standard 90.1), 2022.