



재실자 착의량 정보에 따른 열쾌적 기반 제어의 탄소배출량 분석

Carbon Emission Analysis of Building Thermal Control based on Occupants Clothing Insulation

최은지* · 윤지영** · 최영재*** · 서민채**** · 문진우*****

Eun Ji Choi* · Ji Young Yun** · Young Jae Choi*** · Min Chae Seo**** · Jin Woo Moon*****

* Ph.D., Dept. of Architecture and Building Science, Chung-Ang Univ., South Korea (ejchl77@cau.ac.kr)

** Coauthor, Master's Course Student, Dept. of Architecture and Building Science, Chung-Ang Univ., South Korea (yjy5350@cau.ac.kr)

*** Coauthor, Ph.D., Dept. of Architecture and Building Science, Chung-Ang Univ., South Korea (chldudwo13@cau.ac.kr)

**** Coauthor, Master's Course Student, Dept. of Architecture and Building Science, Chung-Ang Univ., South Korea (minchae@cau.ac.kr)

***** Corresponding author, Professor, Dept. of Architecture and Building Science, Chung-Ang Univ., South Korea (gtlbert73@cau.ac.kr)

ABSTRACT

Purpose: With the increasing importance of indoor thermal environments, comfort-based system control methods have been developed to create comfortable thermal conditions. However, the achievement of thermal comfort often conflicts with energy efficiency, highlighting the need for strategies that simultaneously improve comfort and reduce carbon emissions in buildings. A critical step in this process is understood to be the impact of key occupant information, particularly clothing insulation (CLO), on carbon emissions during the operation of building systems. Thus, the aim of this study is to explore the effect of CLO on the carbon emissions of these systems by being examined. **Method:** The impact of varying levels of CLO on energy consumption and the resultant carbon emissions was assessed using a PMV-based control approach in this research. Annual carbon emissions were evaluated through simulations, while empirical validation was conducted with actual subjects under PMV-based control in a Test-bed setting. **Result:** It was found that CLO significantly influences the energy usage and carbon emissions of the system. A doubling of the CLO value was observed to lead to a decrease of approximately 36% in annual carbon emissions during heating periods and an increase of around 20% during cooling periods. These results highlight the substantial effect of CLO on carbon emission fluctuations and emphasize the importance of accurate CLO data being acknowledged. Furthermore, it is anticipated that these results can be utilized for establishing optimal control strategies for achieving both thermal comfort and carbon reduction simultaneously during the building operation phase.

KEYWORD

탄소중립
열환경 제어
열쾌적
예상평균 온열감

Carbon Neutrality
Thermal Environment Control
Thermal Comfort
Predicted Mean Vote

ACCEPTANCE INFO

Received Feb. 22, 2024

Final revision received Apr. 8, 2024

Accepted Apr. 12, 2024

© 2024. KIEAE all rights reserved.

1. 서론

기후변화 대응 및 지속 가능한 발전을 위해 온실가스 감축에 대한 중요성은 전 세계적으로 증가하고 있다. 국내 온실가스 배출 순위는 세계 9위이며, 연간 배출량은 2018년 기준 약 6억톤에 이른다[1]. 기후위기에 대응하기 위한 국제사회의 노력에 동참하기 위해, 대한민국은 2020년 '2050 탄소중립'을 선언하고 탄소중립, 경제성장, 삶의 질 향상의 동시달성을 목표로 탄소중립 추진전략을 수립하였다[2].

국제에너지기구(International Energy Agency, IEA)에 따르면, 건물 및 건설 분야의 경우 2019년 기준 전 세계 온실가스 배출의 상당 부분인 약 38%를 차지하였다[3]. 이에 따라, 건물 부문에서는 재생에너지 보급, 그린리모델링, 제로에너지건축물 의무화, 에너지고효율 제품 사용 등 탄소저감을 위한 다양한 노력이 수행되고 있다[4-6]. 특히, 건물 운영단계의 온실가스 배출은 전체 배출량의 28%에 달하며, 가장 큰 비중을 차지하고 있다[7].

건물 운영단계의 에너지는 주로 실내환경의 쾌적성을 유지하기 위한 목적으로 소비된다. 특히, 열환경은 재실자의 생산성, 건강, 삶

의 질에 직접적인 영향을 미치는 중요한 요소로 열환경의 쾌적성에 대한 중요성은 지속적으로 증가되어왔다[8-10]. 재실자가 느끼는 열쾌적은 주변 환경뿐만 아니라 활동, 의복 등 재실자의 동적 정보에 의해 결정된다[11]. 쾌적한 열환경을 유지하기 위해 건물 냉난방 시스템은 열쾌적에 영향을 미치는 변수를 복합적으로 고려하여 제어되어야 하지만, 변수 측정의 복잡성, 경제성 등의 이유로 실내온도만 고려하는 제어 방법을 보편적으로 적용해왔다.

이러한 한계를 개선하기 위해, 재실자가 느끼는 열쾌적을 제어변수로 활용하는 방법이 요구되었으며, 열쾌적을 평가하기 위한 다양한 모델이 제시되었다. 열쾌적 평가 모델 중 예상평균온열감(predicted mean vote, PMV)은 환경변수인 실내온도, 실내습도, 기류속도, 평균복사온도와 개인변수인 활동량(metabolic rate, MET) 및 착의량(clothing insulation, CLO)을 종합하여 -3 (추움)~ $+3$ (더움) 사이의 7가지 정수를 온열감 척도로 사용하여 열쾌적을 평가한다[11]. PMV는 대표적인 열쾌적 평가 방법으로 ISO 7730, ASHRAE standard 55, CEN 15251과 같은 국제 표준에 적용되고 있다[12-14]. 하지만 초기에는 활동량 및 착의량의 정확하고 신속한 측정 방법의 부재로 두 변수는 임의의 고정값으로 사용되거나, 외기온도를 통해 수학적 방정식으로 유추된 값이 적용되었다[15-17].

이는 실제 PMV 값을 정확히 산출하는 방법이 아니므로, 냉난방 시스템 제어에 범용적으로 사용되기 어려운 한계를 보였다.

최근에는 재실자의 실제 활동량 및 착의량 값을 측정 또는 산출하는 방법이 계속해서 개발되고 있다[15, 18-25]. 초기에는 부착식 센서 기반의 심박수, 호흡량, 피부온도 등의 신체 정보를 사용하여 값을 유추하는 방법론이 제안되었다[18, 23-25]. 하지만 이러한 방법은 모든 재실자가 직접적으로 센서를 부착하고 있어야 한다는 적용성 측면의 한계를 보였으며, 이를 개선하기 위해 간접적이며 객관적인 측정이 가능하고 실제 환경 적용성을 높인 새로운 방법이 요구되었다. 인공지능(artificial intelligence, AI) 기술이 발전됨에 따라, 재실자의 직접적인 개입 없이 실내 이미지를 통해 활동량과 착의량을 산출하는 정확도 높은 방법이 제시되었다[26-28]. 실내 이미지를 학습하고 이미지 속 재실자의 포즈나 의복 종류를 구분하는 지능형 비전 모델은 실시간으로 개인변수 값을 산출할 수 있어 PMV 산출 정확성과 신속성을 높였다.

이로 인해 건물 냉난방 시스템 제어 시 실제 PMV 값을 제어 변수로 활용하여 쾌적 기반의 열환경 제어를 가능하게 했다. 이러한 기술적 발전으로 인해 실시간 PMV 기반 열환경 제어가 가능해졌으며, 실제 PMV 기반의 시스템 제어가 열쾌적에 미치는 영향을 분석한 연구가 수행되었다. 특히, Choi et al.(2022), Choi et al.(2023)는 선행연구로서 실시간 착의량 값을 적용한 PMV 기반 제어를 구현하였다[20, 27]. 이러한 연구를 통해 재실자의 착의량을 반영한 PMV 기반 제어는 기존에 보편적으로 적용되는 냉난방 제어 방법에 비해 재실자의 열쾌적성을 실질적으로 향상시킬 수 있음을 밝혔다.

재실자의 실시간 정보는 열쾌적성 향상뿐만 아니라 불필요한 시스템 가동을 줄여 건물 에너지 효율에도 영향을 미치는 주요한 정보이다. Xie et al.(2020)에 따르면 재실자 중심 제어(occupant-centric control)는 재실자의 유무, 인원, 선호도 등의 정보를 실시간으로 고려하여 건물 에너지를 평균 22% 수준으로 향상시킬 수 있다[29]. 하지만, 열쾌적에 영향을 미치는 재실자의 의복 또는 활동 등 실제 상황에 따라 시스템 에너지 소비는 증가할 수 있다. 따라서, 건축 운영 단계에서 발생하는 탄소 저감을 위해서는 쾌적성과 함께 에너지 소비 저감을 동시에 달성할 수 있는 균형 있는 제어 전략이 필요하다.

이러한 제어 전략을 도출하기 앞서 재실자의 주요 정보를 고려한 열환경 제어가 탄소배출량에 미치는 영향을 분석할 필요가 있다. 따라서, 본 연구의 목적은 쾌적 기반 시스템 제어 시 재실자 정보 중 착의량이 건물 탄소배출량 측면에 미치는 영향을 분석하는 것이다. 이를 통해 실제 재실자의 의복 정보가 미치는 환경적 영향을 파악하고 건물 운영단계에서 재실자 정보의 중요성을 파악하고자 한다. 또한, 추후 실내 열쾌적 및 에너지 효율을 동시에 향상시킬 수 있는 연구 방향성을 확립하고자 한다.

이를 위해 PMV를 열쾌적 제어변수로 사용한 HVAC 제어를 수행하였으며, 제어 결과는 시뮬레이션 및 Test-bed에서 각각 평가되었다. 먼저 시뮬레이션을 통해 착의량에 따른 연간 건물 에너지 소비량 및 탄소배출량 변화를 분석하여 영향성을 확인하였다. 그 결과를 기반으로 Test-bed 환경에서 실시간 착의량 기반의 시스템 제어 가능성을 확인하고, 실제 피험자를 대상으로 착의량별 탄소배출량 변화를 검증하였다.

2. 연구방법

2.1. 환경부하 분석 방법

환경부하는 건물제어를 수행함에 따라 발생하는 다양한 온실가스 배출량을 기반으로 평가된다. 온실가스는 종류별로 대기방출 후 잔류 기간에 따라 지구온난화에 미치는 영향이 다르다. 따라서, 본 연구에서는 이산화탄소배출량(carbon dioxide equivalent, CO₂eq)을 평가 지표로 사용하였다. CO₂eq는 다양한 온실가스 배출량을 등가의 이산화탄소량으로 환산한 탄소배출량 지표로, 온실가스 배출량을 산출한 뒤 지구온난화지수(Global Warming Potential, GWP)를 곱하여 등가의 CO₂로 환산한다. 대표적인 GWP는 국내 환경부 2022 국가온실가스인벤토리 보고서에서 제시하는 IPCC 제 2차 평가보고서의 값을 사용하였으며, Table 1.과 같다[30].

CO₂eq는 연료의 종류 및 순발열량에 따른 에너지사용량에 배출계수를 곱하여 산출한다. 건물 난방 등을 위해 연료를 연소하는 보일러, 급탕기, 열풍기 등의 시설은 Eq. 1을 사용하여 온실가스 배출량을 산정하며, 건물의 냉·난방설비, 조명, 기기 등의 전기 사용에 따른 온실가스 배출량은 Eq. 2를 따른다[31].

$$tCO_{2eq} = \sum [Fuel_{consumed} \times NCV \times f_e \times 10^{-9} \times GWP] \quad (1)$$

$$tCO_{2eq} = \sum [Power_{consumed} \times f_e \times GWP] \quad (2)$$

where,

tCO_{2eq} : 이산화탄소배출량(ton CO₂ equivalent)

$Fuel_{consumed}$: 연료사용량(fuel consumption, Nm³ or kg)

$Power_{consumed}$: 전력사용량(power consumption, MWh)

NCV : 순발열량(net calorific value, MJ/Nm³ or kg)

GHG: 온실가스(greenhouse gas)

f_e : 배출계수(emission factor, kgGHG(CO₂/CH₄/N₂O)/TJ or kgGHG(CO₂/CH₄/N₂O)/MWh)

배출계수는 에너지원, 연소설비, 공정특성 등을 반영한 온실가스 배출계수를 의미하며, 환경부의 온실가스 종합정보센터에서 고시하는 국가 고유 배출계수를 적용하였다[30]. 본 연구의 경우, 시뮬레이션 및 Test-bed 냉난방 시스템의 운영 시 천연가스 또는 전기를 사용한다. 따라서, 가스 연료 연소 배출계수 및 전력 배출계수를 각각 Table 2., Table 3.과 같이 적용하였다. 천연가스(LNG)의 경우, 공공 전기 및 열 생산 부문의 국가고유 배출계수를 적용하였으며, 전력의 경우 발전단이 아닌 소비단의 배출계수를 고려한다.

Table 1. GWP values by greenhouse gas

Greenhouse Gas	GWP
CO ₂	1
CH ₄	21
N ₂ O	310

Table 2. Emission factors for gas fuel combustion

Type	Emission Factor		
	CO ₂ (kgCO ₂ /TJ)	CH ₄ (kgCH ₄ /TJ)	N ₂ O (kgN ₂ O/TJ)
LNG	56,100	0.41	1.06

Table 3. Emission factors for power consumption

Emission Factor	Value	Unit
CO ₂	0.4747	tCO ₂ /MWh
CH ₄	0.0125	kgCH ₄ /MWh
N ₂ O	0.0100	kgN ₂ O/MWh

2.2. 시뮬레이션 모델링

본 연구에서는 1차적으로 시뮬레이션을 통해 착의량 값이 건물의 탄소배출에 미치는 영향을 냉방 및 난방 에너지 측면에서 분석하였다. 시뮬레이션은 실내 열환경 제어 및 에너지 분석이 가능한 통합 건물 에너지 해석 프로그램인 EnergyPlus(version 9.4)를 사용하였다. 시뮬레이션 대상 건물은 미국 에너지부(Department of Energy, DOE)에서 제공하는 중규모 오피스 표준 건물을 활용하였다. 모델링 주요 정보는 Table 4와 같으며, 4층짜리 남향 건물로 연면적은 511.57m²이다. 기후대는 대한민국 서울의 기후대인 4A(대륙성 기후대)로 설정하였다[32]. 건물 구조제, 내부발열 등의 주요 정보는 기후대에 맞춰 ASHRAE Standard 90.1, EN ISO 6946 기준을 따른다. HVAC 시스템은 AHU 및 VAV 개별 제어 시스템이 적용되었으며, 보일러는 천연가스(LNG) 연료 기반, 냉동기는 전력 기반으로 작동한다.

시뮬레이션의 경우 운영단계에 사용되는 시스템 에너지 소비량을 기준으로 탄소배출량을 분석하였다. 오피스 건물의 재실 시간대 스케줄은 주중 07:00~19:00이며 이외의 시간(00:00~07:00, 19:00~24:00)과 주말은 비재실 시간으로 설정하였다. 본 연구에서는 착의량이 탄소 배출량에 미치는 영향을 분석하는 것을 목적으로 하기 때문에, 활동량은 고정값을 사용하였다. 재실자의 활동량은 ASHRAE Standard 55를 기준으로 오피스 환경에서 일반적으로 발생하는 활동인 Light Office work/Standing/Walking로 설정하였으며 이에 해당하는 값은 110.7W/person이다[14]. 이때, 시뮬레이션에 입력되는 착의량은 대표적인 4가지 값(0.38clo, 0.50clo, 0.74clo, 1.04clo)으로 설정하였다. 착의량 값은 국제 표준[14, 33]을 고려하여 설정하였으며, 자세한 설명은 2.4장에 명시되었다.

2.3. PMV 기반 제어 프로세스

착의량을 반영한 PMV 기반 제어는 PMV를 제어변수로 피드백 제어를 수행한다. PMV 기반 제어는 착의량 값을 고려하며, 설정된 PMV setpoint를 유지하기 위해 냉난방 시스템을 가동한다. 시뮬레이션 및 실험 단계에서 제어변수의 설정값은 냉방 및 난방 모두 동일하게 열적 중립인 상태인 PMV 0으로 동일하게 적용하였다.

특히, Test-bed 실험의 경우 실시간 제어를 위해 제어 프로세스는 Fig. 1.과 같이 구축되었다. 제어 프로세스는 데이터 수집 단계, 실시간 착의량 산출 단계, 현재 PMV 도출 단계, 제어 신호 송신 단계로 구성된다. 먼저, 데이터 수집 단계에서는 Test-bed 내에 구축된 센서를 통해 15초 간격으로 데이터가 수집된다. 수집 데이터 종류는 실내환경 데이터, 실내 이미지, 시스템 전력 사용량이 포함된다.

Table 4. Modeling information

	Modeling	Information
	Building information	Total floor area
Orientation		South
Location		Seoul, South Korea
Climate zone		4A
Number of Floor		4F
Construction	Wall	U-value: 0.35W/m ²
	Floor / Roof	U-value: 0.25W/m ²
	Window	U-value: 0.16W/m ²
	WWR	30%
Internal Load	Infiltration	0.7ac/h
	Occupancy	1.86m ² /person
	Metabolic rate	110.7W/person
	Equipment	11.77W/m ²
HVAC system	Lighting	400lux (6.9W/m ²)
	HVAC system	AHU, VAV system
	Cooling COP	3.4
	Burner Efficiency	0.81
	Ventilation	1.14L/s·m ³

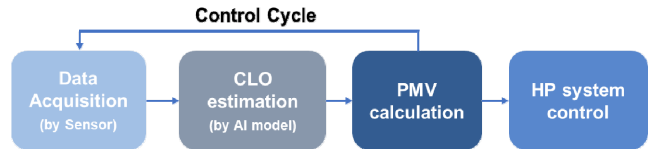


Fig. 1. Experiment process of PMV-based control

실시간 착의량 산출 단계에서는 선행연구를 통해 개발한 지능형 R-CLO model을 사용한다[20]. 개발된 모델은 실내 이미지를 사용하여 재실자의 의복 정보를 산출할 수 있는 인공지능 모델로, 이미지가 수집될 때마다 실시간으로 재실자의 착의량 값을 산출한다.

다음은 현재 PMV 도출 단계로, 제어 기간을 대표하는 PMV가 setpoint에 일치하는지 평가한다. 이때, 데이터 수집 단계에서 제어 기간 누적된 환경변수 및 착의량 정보의 대댓값을 사용하여 현재 PMV를 계산한다. 본 연구에서 Test-bed의 규모에 의해 재실자의 편안함과 온도 변화율이 빠르게 나타나는 점을 고려하여 PMV 기반 제어의 제어 기간은 10분으로 설정하였다. 마지막으로 제어 신호 송신 단계에서는 현재 PMV 값을 토대로 다음 제어 사이클의 최적 실내온도를 결정한다. 이때 결정되는 실내온도는 다음 제어 사이클에 PMV를 쾌적범위(-0.5 < PMV < +0.5)로 유지할 수 있는 적정온도를 의미한다. 실내온도가 결정되면, 적외선(infrared, IR) 센서를 통해 즉시 시스템에 설정온도를 송신하여 제어를 수행한다.

2.4. 실험 방법

실시간 PMV 기반 제어 실험을 위해 Test-bed를 구축하였다. 구축된 Test-bed의 평면도 및 실내 이미지는 Fig. 2와 같으며 주요 구성 정보는 Table 5와 같다. 실험실은 총 5.35m² 면적으로, 두 개의 방으로 구성된다. 단열층은 벽면 200mm, 바닥 300mm로 구성되었다. 실내에는 LED 조명이 1개씩 포함되며, 창문과 문이 각각 1개씩 설치되었다. 또한, 냉난방을 위해 전기식 패키지형 히트펌프(Electric Heat Pump, EHP)를 설치하였으며, EHP의 냉방 성능은 정격능력 2.80kW, COP 3.64, 정격입력 770W이며, 난방 성능은 정

격능력 3.50kW, COP 3.89, 정격입력 900W이다. 시스템은 설정은도에 맞게 on/off 제어를 수행한다.

Test-bed는 각종 데이터 측정 및 제어를 위한 통합센서를 구축하였다. PMV 측정을 위해, Fig. 2.와 같이 실내 온·습도, 기류속도, 평균복사온도를 측정할 수 있는 종합센서를 벽 중앙 1.2m 높이에 설치하였다. 재실자의 의복 정보를 취득하기 위해 카메라 센서를 좌우로 설치하여 동일한 시간대 두 각도의 이미지를 수집한다. 또한, 전력 측정기를 통해 제어 수행 중 시스템의 전력 사용량을 측정할 수 있으며, 10분 간격으로 시스템 자동 제어를 수행하기 위해, EHP 시스템 아래 IR 송신 센서를 설치하였다. 설치된 모든 센서는 유무선 통신이 가능한 Arduino 및 Raspberry Pi 기반으로 구축되어 실시간 데이터 수집이 가능하다. 본 연구에서는 15초 간격으로 환경 및 이미지 데이터를 취득하였다.

실험 중 피험자는 특정 의복을 착용하고 Test-bed에서 앉은 자세를 유지한다. 피험자가 재실하면 2.3장의 PMV 기반 제어 프로세스를 따라 지능형 모델을 통해 착의량을 자동적으로 산출하고, 냉난방 제어를 수행한다. 실시간으로 환경변수 및 실내 이미지를 취득하고, 착의량과 PMV 값을 산출하여 데이터를 제어 기간인 10분 동안 누적한다. 10분마다 대표 PMV 값을 토대로 다음 제어 기간을 쾌적하게 만드는 최적 실내 온도를 설정하여 시스템 제어를 수행한다.

착의량 조건은 시뮬레이션의 조건과 동일하게 0.38clo, 0.50clo, 0.74clo, 1.04clo 값으로 설정하였으며, 착의량 조건 당 40분씩 실험을 진행하였다. 실험 중 피험자는 각 착의량에 맞는 의복 조합을 착용하였으며, 착의량별 의복 조합은 Table 6.과 같다. Table 6.의 설정 의복은 ISO 9920[33] 및 ASHRAE Standard 55[14] 표준을 고려하여 여름 및 겨울철에 모두 나타날 수 있는 일반적인 의복 조합으로 구성하였다. 또한, 피험자는 기본적으로 속옷, 양말, 운동화를 착용하였다.

실험에 참여한 피험자는 총 23명이며 남성 12명, 여성 11명이 모집되었고, 평균 연령은 남성 25세, 여성 23.9세이다. 모집 시 온열감에 영향을 미칠 수 있는 BMI는 정상범위(18~23kg/m²)로 한정하였으며, 피험자의 평균 BMI는 21.7kg/m²이다. 실험은 여름철(9~10월) 및 겨울철(1~3월 초)에 진행하였다. 실험 중 피험자는 실내에서 앉아있는 자세를 유지하며 활동량을 1.0met 수준으로 동일하게 진행하였다. 실험 중 시스템은 피험자의 착의량 정보를 산출하여 실시간 PMV 기반의 제어를 수행하였다.

3. PMV 기반 제어 결과 분석

3.1. 시뮬레이션 결과 분석

시뮬레이션 결과는 PMV 기반 제어 및 열쾌적을 고려하지 않는 단순 실내온도 기반 제어(Base) 결과를 함께 제시하였다. 제어 결과는 연간 건물 에너지 소비량 및 탄소발생량 측면에서 분석하였다. 이때, PMV 기반 제어의 경우 착의량은 2.2장에서 언급한 바와 같이 총 4가지(0.38clo, 0.50clo, 0.74clo, 1.04clo) 값으로 설정하였다.

시뮬레이션 결과, PMV 기반 제어는 모든 착의량 조건에서 재실자가 거주하는 주중 07:00~19:00의 PMV는 0에 가깝게 제어하였

Table 5. Test-bed information

Configuration		Information
Interior volume		5.35m ² ×2.2m≒11.77m ³
Floor area		5.35m ² (2,675×2,000mm)
Wall structure		wall insulation layer 200mm
Floor structure		200mm slab 20mm insulation material 40mm lightweight aerated concrete 40mm mortar
Lighting		LED × 1EA
HVAC system	Type	Electric Heat Pump (EHP)
	Capacity	Cooling: 2.80kW, Heating: 3.50kW
	COP	Cooling: 3.64, Heating: 3.89
	Power consumption	Cooling: 770W, Heating: 900W

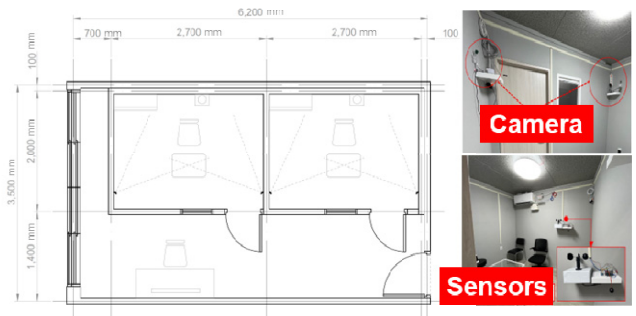


Fig. 2. Test-bed diagram

Table 6. CLO cases for control experiments

CLO	Types	Images
0.38 clo	T shirt, walking shorts	
0.50 clo	short sleeve shirt, walking shorts	
0.74 clo	long sleeve shirt, trousers	
1.04 clo	long sleeve shirt, trousers, suit jacket	

음을 확인하였다. 제어 결과 예시로 겨울과 여름철 일부 기간에 대한 PMV 값을 Fig. 3.에 나타냈다. Fig. 3.은 재실자가 거주하는 주중 업무 시간대의 PMV 수치를 보여주며, PMV 측면에서 재실자에게 쾌적한 환경을 조성하도록 제어가 적절하게 수행되었음을 확인할 수 있다.

건물 제어 방법에 따른 연간 에너지 사용량은 Fig. 4.와 같다. Fig. 4.는 실내온도 기반 제어(Base) 및 대표 착의량 4가지를 적용한 PMV 기반 제어의 연간 총 에너지 소비량을 나타낸다. 업무시절 건물을 대상으로 설정하였기 때문에 실내 기기의 에너지 소비량이 가장 크게 나타났고, 실내 기기, 조명 및 급수 에너지는 모든 조건에서

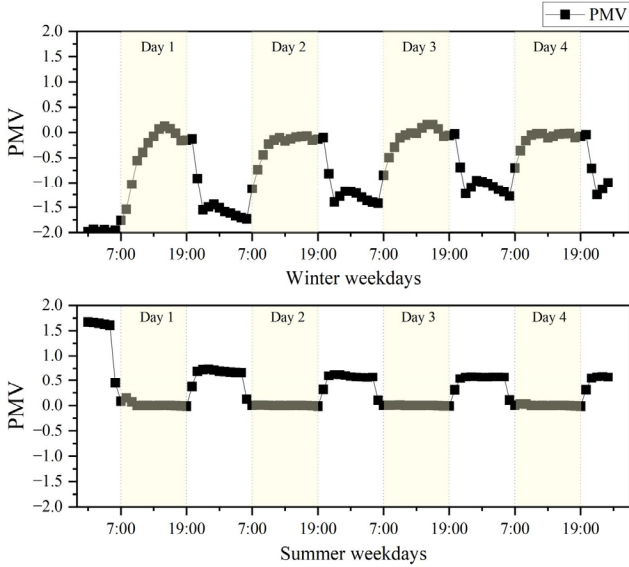


Fig. 3. Examples of PMV result in occupied times

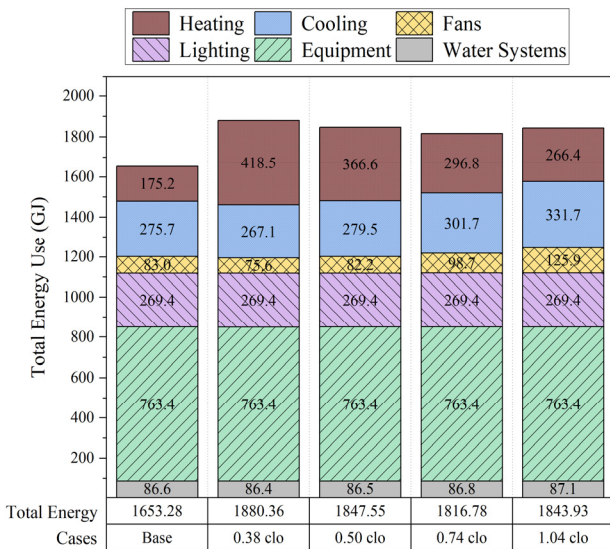


Fig. 4. Annual energy consumption by control methods

일관되게 도출되었다. 착의량 변화에 따른 쾌적한 실내 열환경 조성을 위한 난방, 냉방, 팬 에너지는 조건에 따라 증감하였다.

실내온도 기반 제어(Base)의 경우 난방기간 22°C, 냉방기간 25°C의 균일한 설정온도 냉난방 시스템을 제어한다. 이 방법은 쾌적을 위해 요구되는 실내온도 보다 낮거나 높은 온도로 제어를 수행한다. 이로 인해 냉·난방에너지 소비 비율이 낮게 나타난다.

PMV 기반 제어의 경우 착의량이 증가함에 따라 난방에너지 소비량이 감소하였다. 착의량이 0.38clo에서 1.04clo로 증가할 때, 실내 설정온도가 떨어지고 난방 시스템 가동 시간이 감소하기 때문에 연간 152.09GJ(약 36%)의 에너지가 감소된 것을 알 수 있다. 냉방 에너지와 팬 에너지의 경우 착의량 값이 감소할수록 에너지가 저감되었다. 냉방 에너지의 경우, 1.04clo에서 0.38clo로 착의량이 감소함에 따라 331.7GJ에서 267.1GJ로 약 19.5% 에너지가 저감되었다. 팬 에너지는 AHU에 설치된 팬의 풍량 조절에 소비된 에너지를 의미한다.

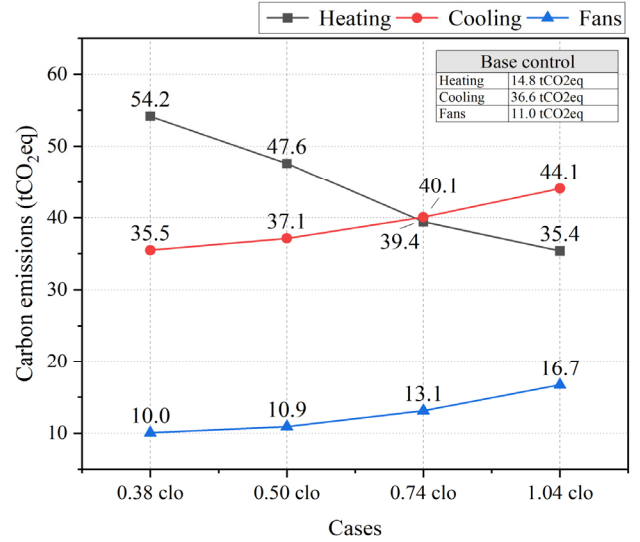


Fig. 5. Annual carbon emissions of PMV-based control

PMV 기반 제어의 난방에너지는 모든 착의량 조건에서 실내온도 기반 제어에 비해 에너지가 많이 소비되었다. 그 이유로, 난방 시 착의량 조건에 맞춰 실내온도가 22°C 보다 높게 설정되었으며, 이로 인한 VAV 시스템의 재열코일 에너지가 추가로 소비되어 나타나는 현상으로 확인된다. 또한, 냉방 시에는 팬을 통해 풍량을 조절하며, 팬 에너지는 냉방의 영향을 더 크게 받는 것을 알 수 있다. 팬 에너지의 경우 착의량 감소에 따른 에너지 저감 효과가 냉방 에너지에 비해 상대적으로 크게 나타났다. 팬 에너지는 1.04clo에서 0.38clo로 착의량이 감소할 때, 125.9GJ에서 75.6GJ로 약 40% 에너지가 감소하였다.

시뮬레이션 결과로 도출된 연간 에너지 소비량을 기반으로 난방, 냉방, 팬 사용에 따른 탄소배출량을 분석하였다. 탄소배출량은 에너지소비량의 추세와 유사하게 나타나지만, 시스템에 따라 사용되는 연료의 종류가 달라 차이가 나타난다. 시뮬레이션에서 난방은 천연가스(LPG)를 연료로 사용하였으며, 냉방 및 팬은 전기를 사용하였다. 각 시스템의 사용 연료 종류를 고려하여 탄소배출량(tCO₂eq)을 산출한 결과는 Fig. 5와 같다. 실내온도 기반의 제어 시 산출되는 난방, 냉방, 팬 탄소배출량은 각각 14.8tCO₂eq, 36.6tCO₂eq, 11.0tCO₂eq이다. 반면, PMV 기반 제어는 착의량에 따른 탄소배출량 차이가 보이며, 난방 35.4~54.2tCO₂eq, 냉방 35.5~44.1tCO₂eq, 팬 10.0~16.7tCO₂eq의 범위로 도출되었다. 난방의 경우 PMV 기반 제어는 실내온도 기반 제어에 비해 열쾌적성을 향상시키기 위해 탄소배출량이 모두 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 난방으로 인한 탄소배출량은 착의량이 가장 낮은 0.38clo에서 54.2tCO₂eq를 보였으며, 착의량이 가장 높은 1.04clo에서 35.4tCO₂eq를 나타냈다. 이는 착의량이 약 2.7배 높아질 경우, 탄소배출량은 약 35% 낮아질 수 있음을 보여준다. 이러한 결과는 Fig. 4의 난방에너지 저감 비율과 유사한 수치로 확인되며 겨울철 착의량이 높은 환경에서 탄소 저감이 가능함을 보여준다. 냉방과 팬의 탄소배출량은 착의량이 낮아질수록 감소하는 추세를 나타냈으며, 냉방의 경우 착의량에 따라 연간 최대 8.4tCO₂eq, 약 19.5%의 배출량 차이를 보였다.

시뮬레이션 결과를 통해, PMV 기반의 쾌적 제어는 쾌적한 열환

경 조성을 위해 시스템 에너지를 소비하며, 탄소배출량은 재실자의 착의량 정보에 따라 크게 변할 수 있다는 사실을 확인하였다. 하지만, 실제 건물 현장에서는 시뮬레이션 상황과 같이 착의량이 연간 동일하게 유지되지 않는다. 따라서, 계절적 특성을 고려하여 여름철 낮은 착의량, 겨울철 높은 착의량의 상황을 정확히 반영할 경우 추가적인 에너지 저감 효과를 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

3.2. Test-bed 실험 평가 결과

시뮬레이션을 통해 확인된 결과를 토대로 실제 피험자를 대상으로 Test-bed 기반 실험을 수행하여 탄소배출량 결과를 실험적으로 검증하였다. 실험은 2.4장에서 설명한 방법으로 진행하였으며, 제어 방법은 시뮬레이션과 마찬가지로 실내온도 기반 제어와 피험자의 착의량 값을 반영한 실시간 PMV 기반 제어가 수행되었다.

실내온도 기반 제어(Base control)는 착의량에 상관없이 여름철 25°C, 겨울철 22°C로 제어되며, 결과적으로 평균 실내온도가 각각 24.7°C, 22.5°C로 일정하게 유지되었다. 반면, PMV 기반 제어는 착의량이 증가할수록 실내온도를 낮게 설정하기 때문에, 여름철 23.3~25.6°C, 겨울철 24.4~26.7°C의 범위로 온도 변화 폭이 크게 나타났다. 또한, 상대습도의 경우 제어 대상이 아니므로 제어 방법에 따른 영향이 크게 나타나지 않았으며, 평균적으로 여름철 47%, 겨울철 29%로 측정되었다.

열쾌적 측면에서, 실내온도 기반 제어(Base control)는 여름철 일부 착의량 조건을 제외하고 PMV 쾌적 범위를 벗어났다. 특히, 실내온도 기반의 제어는 겨울철 모든 착의량 조건에서 -2.3~-0.6 범위의 값을 보이며 서늘하거나 추운 환경을 조성하는 것을 확인하였다. 반면, 피험자의 착의량을 반영한 PMV 기반 제어는 Fig. 6.과 같이 평균적으로 PMV 쾌적 범위를 유지할 수 있다는 사실을 확인하였다[20].

본 장에서는 이러한 결과를 기반으로 제어 방법 별 시스템 에너지 소비에 따른 탄소배출량 분석을 수행하였다. 결과 분석은 Test-bed에 설치된 EHP 시스템의 전력 사용량을 기준으로 평가하였다. 탄소배출량의 경우, 40분간 수행된 실험의 결과로 산출되기 때문에 kgCO₂eq 단위로 산출하였으며, 1시간으로 환산하여 시간당 kgCO₂eq/h 값으로 분석을 진행하였다. Test-bed 실험의 평균 에너지 소비량 및 탄소배출량 결과는 각각 Fig. 7., Fig. 8.과 같다.

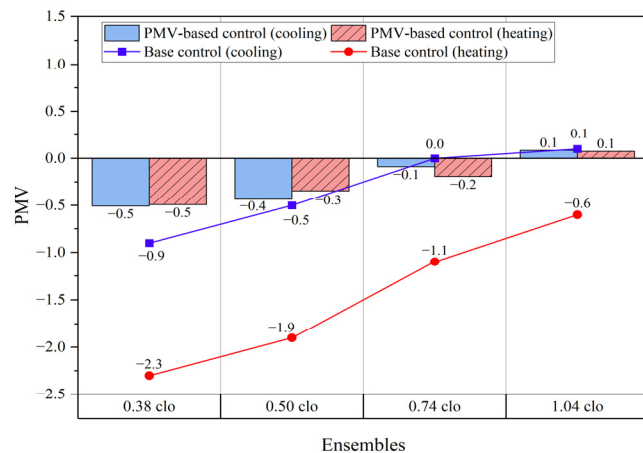


Fig. 6. Analysis results of thermal comfort in a Test-bed

먼저, Fig. 7.은 실험 기간의 평균 에너지 소비량을 나타낸다. 실시간 PMV 기반 제어의 경우 여름과 겨울철 모두 착의량이 변함에 따라 에너지 소비량도 변화하였다. 착의량이 증가할수록 냉방 에너지는 증가하고 난방에너지는 감소하는 결과를 나타냈다. 수치적으로 확인하면, 냉방 에너지는 355.1~767.4kJ의 범위로 측정되었으며, 착의량 변화에 따른 에너지 차이는 최대 2.2배 이상 발생할 수 있음을 확인하였다. 또한, 난방에너지는 572.6~1064.2kJ의 범위로 최대 약 1.85배 차이가 발생하였다. 이러한 차이는 온도 변화 신호에 빠르게 대응하는 초기 에너지 부하를 측정하는 실험적 특성이 반영된 결과로, 온도 안정기를 모두 고려하는 시뮬레이션 결과보다 에너지 소비량의 변화가 더 크게 나타난 것으로 분석된다. 실내온도 기반 제어(Base control)는 착의량 변화에 상관없이 일정한 온도로 제어를 수행하며, 냉방 평균 530.6kJ, 난방 평균 458.4kJ의 에너지를 소비하였다.

Fig. 8.은 시스템 운영에 소비된 전력 사용량을 탄소배출량으로 환산한 결과이며, 에너지 소비량과 동일한 추세를 나타냈다. 단순 실내온도 기반의 제어는 평균적으로 여름철 0.141kgCO₂eq/h, 겨울철 0.172kgCO₂eq/h의 탄소를 배출하였다. 반면, PMV 기반 제어는 두 계절 모두 착의량에 따른 탄소배출 범위가 더 넓게 나타났다. PMV

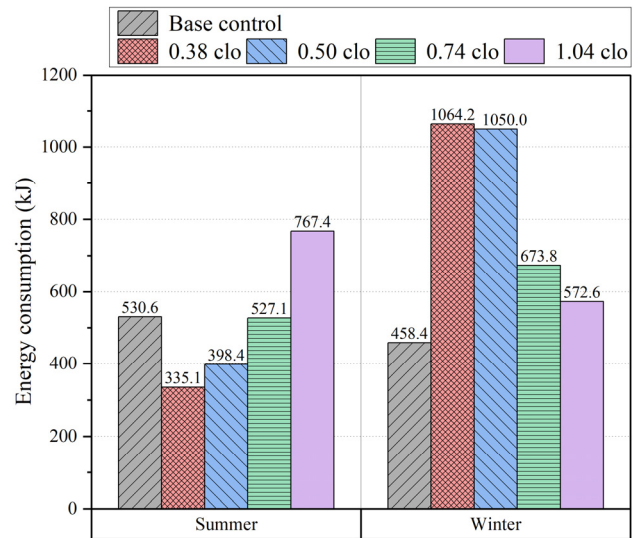


Fig. 7. Energy consumption of EHP systems by clothing insulation

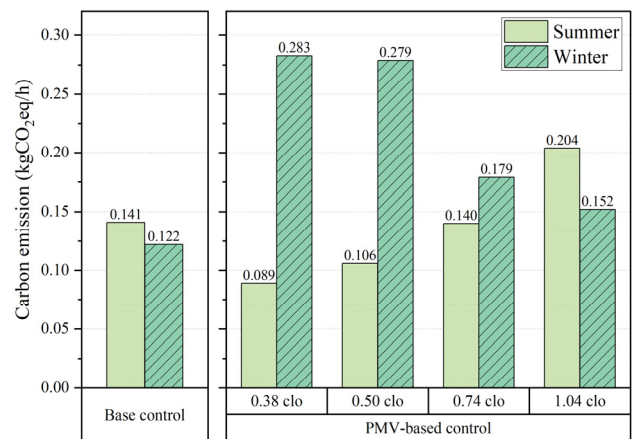


Fig. 8. Carbon emissions from EHP systems by clothing insulation

기반 제어 시 최소 착의량인 0.38clo 상태에서 여름철 탄소 배출량은 0.089kgCO₂eq/h로 나타났으나, 겨울철에는 0.283kgCO₂eq/h로 약 3배의 차이를 보였다. 반대로, 착의량이 가장 높은 1.04clo일 때 여름철 탄소 배출량은 0.204kgCO₂eq/h로 측정되었고, 겨울철에는 0.152kgCO₂eq/h로 감소했다.

기존 제어방법과 비교했을 때, 여름철은 1.04clo를 제외한 착의량 조건에서 탄소배출량이 더 낮게 나타났다. 특히, 0.38clo 조건에서 기존 방법 대비 최대 37%까지 탄소 저감이 가능함을 확인할 수 있다. 겨울철은 모든 착의량 조건에서 PMV 기반 제어의 탄소 발생량이 증가하였다. 이는 열쾌적성 향상을 위해 난방 시스템의 가동이 증가함을 나타낸다.

시뮬레이션과 실험 결과에서 관찰된 탄소 배출량의 변화는 착의량 변화에 따라 일관된 방향성을 보였으나, 변화의 정도에서는 차이를 나타낸다. 착의량이 0.38clo에서 1.04clo로 증가할 경우, 시뮬레이션 결과 난방기간 동안 탄소 배출량이 약 35% 감소한 반면, 실험 결과에서는 46% 감소로 더 큰 저감 효과를 보였다. 반대로, 냉방기간 동안 시뮬레이션 결과는 약 44%의 탄소 배출량 차이를 보인 반면, 실험에서는 탄소 배출량이 1.3배 증가하는 결과를 나타냈다. 이 결과는 건물 HVAC 시스템의 차이와 함께, 실제 환경에서 실내 온도에 영향을 미치는 다양한 외부 요인들로 인해 착의량 변화가 탄소 배출량에 더욱 큰 영향을 미칠 수 있음을 보여준다.

또한, PMV 기반 제어는 계절별 착의량 특성을 고려하여 제어한다면, 기존 방법에 비해 탄소 배출량을 저감할 가능성이 있다. 예를 들어, 여름철 0.5clo와 겨울철 1.0clo를 기준으로 한 계절별 탄소 배출량 총합은 실시간 PMV 기반 제어에서 0.258kgCO₂eq/h, 실내 온도 기반 제어(0.263kgCO₂eq/h) 보다 낮게 산출된다. 종합하자면 탄소 배출량 저감 효과는 재실자의 실제 착의량에 따라 달라지며, 이러한 사실을 통해 시스템 제어에서 정확한 의복 정보의 제공이 중요함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 쾌적 기반 제어를 통해 재실자의 착의량이 건물 운영단계의 탄소 발생량에 미치는 영향을 분석하였다. 착의량을 고려한 PMV 기반 제어를 적용하여, 냉난방 시스템의 탄소 배출량을 시뮬레이션 및 실험을 통해 확인하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 시뮬레이션을 통해 착의량 변화를 고려하여 열쾌적 제어를 수행할 경우, 연간 난방, 냉방, 팬 에너지 및 탄소배출 증감 현상이 나타나는 것을 확인하였다. 착의량 값이 0.38clo에서 1.04clo로 약 2.7배 증가할 때, 난방 시 탄소 배출량이 최대 35% 감소하고, 냉방 시 19.5% 증가하였다. 동일한 착의량 변화에도 난방 시스템의 탄소배출 증감 효과가 냉방에 비해 약 3배 더 크게 나타났다.
- 2) Test-bed 실험에서 PMV 기반 제어를 통해 모든 의복 조건에서 쾌적한 실내환경을 조성하였다. 탄소 배출량 측면에서 여름 및 겨울 모두 착의량 변화에 따라 최대 1.3배, 0.8배 이상의 차이를 나타냈다. 특히, 여름철 0.74clo, 0.5clo, 0.38clo에서 기존

방법 대비 탄소배출 저감이 가능했으며, 0.38clo 조건에서 최대 37%(0.052kgCO₂/h) 저감이 가능했다.

- 3) 시뮬레이션과 Test-bed 실험 결과를 종합해보면, 착의량 변화에 따른 에너지 사용량 및 탄소 배출량의 변화 방향성은 일관되나, 변화의 크기에서 차이가 확인되었다. 특히, 냉방기간 동안 실험에서 관찰된 착의량 변화에 따른 탄소 배출량의 최대 변화량이 시뮬레이션 결과보다 약 3배 이상 큰 폭으로 나타났다.

결과적으로 본 연구는 착의량을 고려한 쾌적 기반 제어가 건물 환경부하에 미치는 영향성을 확인하였다는 사실에 의의가 있다. 또한, PMV 기반 제어 시 착의량의 변화에 따라 냉난방에너지 사용량과 탄소 배출량에 유의미한 차이를 가져올 수 있음을 확인하였다. 즉, 재실자 착의량 정보는 건물 운영단계에서 중요하게 고려되어야 하는 정보임을 시사한다.

다만, 본 실험은 특정 냉난방 시스템에 초점을 맞추어 평가가 진행되었기 때문에 향후 다양한 시스템에 대한 종합적인 분석을 통한 데이터 구축이 필요하다. 또한, 착의량뿐만 아니라 활동량의 변화를 함께 고려하여 실제 건물 환경에서의 실시간 탄소 배출량 분석을 수행하고, 이러한 개인 변수들이 열쾌적성 및 탄소 배출에 미치는 복합적 영향을 추가로 연구할 계획이다. 이러한 결과를 바탕으로 추가적인 재실자 정보(재실유무, 재실 패턴, 인원, 활동)와 함께 열쾌적성과 탄소 배출 저감을 동시에 달성할 수 있는 최적의 시스템 제어 전략을 개발하고자 한다.

Acknowledgement

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2019R1A2C1084145 and RS-2023-00276529).

References

- [1] Enerdata, Global energy trends - 2023 edition: World energy & climate statistics - Yearbook 2023, 2023.
- [2] 국토교통부, 2050년 탄소중립 달성을 위한 녹색건축 활성화 방안 발표[보도자료], 2021.06.02. // (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Announcement of the green building activation plan for achieving carbon neutrality by 2050[Press release], 2021.06.02.)
- [3] IEA (International Energy Agency), IEA world energy statistics and balances, 2023.
- [4] 문상덕, 건물부문의 탄소배출량 절감을 위한 ESG의 활용방안과 발전방향, 자원환경경제연구, 제31권 제4호, 2022, pp.801-824. // (S.D. Moon, A Study on the Utilization of ESG for Reducing Carbon Emissions in the Building Sector and Development Directions, Environmental and Resource Economics Review, 31(4), 2022, 801-824.)
- [5] 윤지영 외 5인, 제로에너지건축물 설계를 위한 업무시설 창면적비 변화에 따른 전주기 에너지 소비량 및 탄소배출량 분석, KIEAE Journal, 제23권 제4호, 2023.08, pp.43-50. // (J.Y. Yun et al., Analysis of energy consumption and carbon emissions over the entire lifecycle based on changes in window-to-wall ratio for zero-energy building design, KIEAE Journal, 23(4), 2023.08, pp. 43-50.)
- [6] Y. Zhang, X. Zheng, H. Zhang, G. Chen, X. Wang, Carbon emission analysis of a residential building in China through life cycle assessment, Frontiers of Environmental Science & Engineering, 10, 2016.02, pp.150-158.

- [7] 김유민, 2050년 온실가스 감축목표와 건물부문 탄소중립 정책수단, 국토, 479호, 2021.09, pp.12-19. // (Y.M. Kim, Greenhouse gas reduction targets by 2050 and carbon neutral policy tools in the building sector, Planning and Policy, 479, 2021.09, pp.12-19.)
- [8] F. Zhang, R. de Dear, P. Hancock, Effects of moderate thermal environments on cognitive performance: A multidisciplinary review, Applied Energy, 236, 2019.02, pp.760-777.
- [9] S. Altomonte, S. Schiavon, M.G. Kent, G. Brager, Indoor environmental quality and occupant satisfaction in green-certified buildings, Building Research & Information, 47(3), 2019, pp.255-274.
- [10] K.W. Tham, H.C. Willem, Room air temperature affects occupants' physiology, perceptions and mental alertness, Building and Environment, 45(1), 2010.01, pp.40-44.
- [11] P.O. Fanger, Thermal comfort, Analysis and applications in environmental engineering, Copenhagen, Denmark: Danish Technical Press, 1970.
- [12] ISO (International Organization for Standardization), ISO 7730:2005 - 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, 2005.
- [13] CEN (European Committee for Standardization), CEN EN15251 - Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting, and acoustics, CEN, 2007.
- [14] ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers), ASHRAE Standard 55 - Thermal environmental conditions for human occupancy, ASHRAE, 2020.
- [15] S. Schiavon, K.H. Lee, Dynamic predictive clothing insulation models based on outdoor air and indoor operative temperatures, Building and Environment 59, 2013.01, pp.250-260.
- [16] W. Liu et al., Indoor clothing insulation and thermal history: A clothing model based on logistic function and running mean outdoor temperature, Building and Environment, 135, 2018.05, pp.142-152.
- [17] M. De Carli et al., People's clothing behaviour according to external weather and indoor environment, Building and Environment, 42(12), 2007.12, pp.3965-3973.
- [18] 이경수, 김태연, 피부 및 의복 표면 온도를 이용한 Tanabe Thermoregulation Model 기반 착의량 평가, 대한건축학회 학술발표대회논문집, 2017, pp.545-546. // (K.S. Lee, T.Y. Kim, Evaluation of clothing insulation based on tanabe thermoregulation model by measuring skin and clothing temperature, Conference Journal of the Architectural Institute of Korea, 2017, pp. 545-546.)
- [19] D. Li, C.C. Menassa, V.R. Kamat, Personalized human comfort in indoor building environments under diverse conditioning modes, Building and Environment, 126, 2017.12, pp.304-317.
- [20] E.J. Choi et al., Seasonal effects of thermal comfort control considering real-time clothing insulation with vision-based model, Building and Environment, 235, 2023.05, 110255.
- [21] J.Y. Yun et al., Performance evaluation of an occupant metabolic rate estimation algorithm using activity classification and object detection models, Building and Environment, 252, 2024.03, 111299.
- [22] 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, 2024.03, 113976.
- [23] T. Chaudhuri et al., Machine learning driven personal comfort prediction by wearable sensing of pulse rate and skin temperature, Building and Environment, 170, 2020.03, 106615.
- [24] M.H. Hasan, F. Alsaleem, M. Rifaie, Sensitivity study for the PMV thermal comfort model and the use of wearable devices biometric data for metabolic rate estimation, Building and Environment, 110, 2016.12, pp.173-183.
- [25] A. Ghahramani et al., Towards unsupervised learning of thermal comfort using infrared thermography, Applied Energy, 211, 2018.02, pp.41-49.
- [26] H. Choi et al., Deep-vision-based metabolic rate and clothing insulation estimation for occupant-centric control, Building and Environment, 221, 2022.08, 109345.
- [27] E.J. Choi et al., Effects of thermal comfort-driven control based on real-time clothing insulation estimated using an image-processing model, Building and Environment, 223, 2022.09, 109438.
- [28] 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), 2022.01, 619.
- [29] J. Xie et al., Review on occupant-centric thermal comfort sensing, predicting, and controlling, Energy and Buildings, 226, 2020.11, 110392.
- [30] 온실가스종합정보센터, 2022 국가온실가스인벤토리 보고서, 환경부, 2022. // (Greenhouse Gas Inventory & Research Center of Korea, 2022 national greenhouse gas inventory report, Ministry of Environment, 2022.)
- [31] 국가법령정보센터, 공공부문 온실가스 목표관리 운영 등에 관한 지침, 온실가스 배출량 등의 산정방법 (제6조 제2항 관련), 2024. // (National Law Information Center, Guidelines on the operation of greenhouse gas emission target management in the public sector, methods for calculating greenhouse gas emissions (refer to Article 6, Paragraph 2), 2024.)
- [32] ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers), ASHRAE Standard 169 - Climatic data for building design standards, ASHRAE, 2013.
- [33] ISO (International Organization for Standardization), ISO 9920:2007 - Ergonomics of the thermal environment - Estimation of thermal insulation and water vapour resistance of a clothing ensemble, ISO, 2007.