

웨어러블 센서 기반 생체 데이터를 활용한 재실자 간 열감각 편차 분석

김지원¹ · 김내경¹ · 광영훈² · 문선혜²

¹서울시립대학교 건축공학과, ²서울시립대학교 건축학부

Thermal Sensation Variability Using Wearable Sensor-based Physiological Data

Jiwon Kim¹, Naekyung Kim¹, Younghoon Kwak² and Sunhye Mun²

¹Department of Architectural Engineering, University of Seoul, Seoul, Korea

²School of Architecture and Architectural Engineering, University of Seoul, Seoul, Korea

Abstract: Thermal comfort is a subjective response shaped by physical, physiological, and psychological factors, yet conventional air-conditioning systems do not account for inter-individual variability, resulting in energy inefficiency and reduced occupant satisfaction. This study investigates variability in thermal sensation using physiological data collected from non-invasive wearable sensors. Field experiments were conducted during the heating season in a university classroom in South Korea, involving 15 participants under repeated conditions. Environmental, subjective, and physiological data were collected at 1-minute intervals. Mixed-effects modeling was employed to examine the relationship between thermal sensation and physiological responses. The results show substantial inter-individual differences in thermal sensation under identical indoor conditions. Thermal response patterns were classified into four types based on variation characteristics, and differences were primarily associated with skin temperature. Skin temperature also exhibited distinct temporal patterns across response types. These findings suggest the need to consider time-lagged relationships among thermal environment, thermal sensation, and physiological responses. The results provide a basis for interpreting the relationship between individual thermal sensation and physiological data.

Key words: Thermal Sensation Variability, Thermal Response, Physiological Data, Wearable Sensors, Mixed-effects Model

1. 서 론

열 쾌적성(Thermal comfort)은 열 환경에 대한 만족감을 의미한다. 이는 열 환경 조건이 열적 기대치와 일치하고 생리적인 부담이 없이 심부체온이 유지될 때 달성될 수 있다(Fanger, 1970; Parsons, 2000). 인간은 열 환경 변화에

따라 혈류 조절, 발열, 발한과 같은 생리적 조절을 통해 심부온도를 일정 범위로 유지한다(Hall, 2016). 조절 과정에서 과도한 생리적 부담이 발생할 경우 재실자는 덥거나 추운 감각과 함께 불쾌감을 경험하게 되며, 열적 스트레스가 지속될 경우 자율신경계의 활성화로 인한 스트레스 호르몬 분비 증가(Follenius, Brandenberger, Oyono, & Candas, 1982), 인지 및 면역 기능 저하 등의 건강 문제로 이어지게 된다(Zhu et al., 2025; Awad, Suberry, Abu-Akel, & Ayalon, 2025).

건물에서는 공기조화시스템을 활용해 실내 환경을 일정

교신저자 : 문선혜 (우 02504) 서울특별시 동대문구 서울시립대로 163 건설공학과관 419호 서울시립대학교 건축학부
전화번호 : +82-2-6490-2769
E-mail : msh@uos.ac.kr

범위 내로 유지하여 쾌적한 환경을 제공한다. 그러나 공기 조화시스템이 운영 시 열 쾌적성이 저하되는 문제가 발생하는데, 주요한 원인은 재실자의 열적 피드백이 반영되지 않은 채 시스템이 고정된 설정 온도로 운영되거나, 공간 내에서 재실자의 열적 선호도가 상이한 경우 모든 재실자의 열적 요구를 반영하지 못한다는 것으로 보고된다(Humphreys, & Nicol, 2002; Wang, Cheng, Lu, & Lin, 2025). 열적 요구 차이는 공간의 과일 또는 과냉과 같은 에너지 낭비 문제와도 연계되어 있어 개선이 필요한 영역이다.

열 환경 평가 지표인 PMV(Predicted Mean Vote), SET(Standard Effective Temperature), UTCI(Universal Thermal Climate Index)등은 열 스트레스에 따른 인간의 열 쾌적성을 파악하기 위해 물리적, 생리적 변수들을 기반으로 계산되어 유용하게 활용되어왔다. 그러나 이러한 지표들은 특정한 환경의 전반적인 열 환경을 평가하는 값으로 재실자마다 상이한 신진대사량에 따른 발열량, 건강 상태 등을 반영하기 어렵다는 한계가 존재한다(Cheung, Schiavon, Parkinson, Li, & Brager, 2019). 개인의 상태를 반영하기 위하여 생체 데이터를 활용해 열 감각을 예측하는 연구가 수행되었으며, 기존 연구에서 피부온도, 심박변이도, 피부전도도, 심박수 데이터 활용 시 예측 정확도가 높아질 수 있음이 보고되었다(Kliangkhlao, Haruehansapong, Yeranee, Tip-savak, & Sahoh, 2024; Haruehansapong, Kliangkhlao, Yeranee, & Sahoh, 2023). 이러한 생체 변수들은 체온 조절 메커니즘과 연관된 인체의 반응을 반영하는 지표로, 피부온도는 심부온도 유지를 위한 말초 혈류 조절로 인한 반응(Zhao et al., 2024), 맥박수는 열 스트레스에 따른 심혈관 반응(Ruas, Maia, Roscani, Bitencourt, & Amorim, 2020), 피부전도도는 땀샘 활성화 및 각성을 반영한다(Hugdahl,

1995). 그러나 생체 데이터를 활용해 열 감각을 예측한 연구들에서는 기계학습 기반의 예측 방식으로 인하여 열 감각과 생체 반응 간의 관계를 해석하는 것이 제한적이거나 생체 데이터 수집 시 침습적 방식의 유선 기반 장비를 활용하여 일상생활에 적용이 어렵다는 문제가 존재한다.

본 연구는 동일한 열 환경 조건을 경험하는 실험 참여자를 대상으로 웨어러블 기반 생체 데이터와 열감각 설문을 동시에 수집하여 개인 간 열 감각 차이를 분석하고자 한다. 본 연구는 열 환경이 점진적으로 변화하는 실내 공간에서 재실자를 대상으로 비침습적 웨어러블 센서를 활용해 피부 온도, 맥박수, 피부전도도, 활동량 데이터를 수집하고, 동시에 열감각 설문을 수집하여 개인 간 열 감각 차이와 생체 반응 간의 관계를 통계적으로 분석하고자 한다. 본 연구는 실제 실내 환경에서 개인 간 열 감각 차이의 존재를 웨어러블 센서를 활용한 생체 데이터를 기반으로 실험적으로 관찰하고 정량적으로 해석하였다는 점에서 기존 연구와 차별된다. 이러한 결과는 열 감각과 생체 데이터 간 관계를 해석하기 위한 기초 자료로 활용될 수 있다.

2. 연구 방법

2.1. 열감각 데이터 수집

2.1.1 대상 공간

본 실험은 생체 데이터에 기반하여 개별 재실자의 열 감각 편차를 비교하기 위하여 데이터를 수집하였다. 2026년 1월부터 2월까지 국내 대학교 강의실에서 15명을 대상으로 열 감각 실험을 수행하였다. 실험 공간의 크기는 5 m × 10.5 m × 3 m(가로 × 세로 × 높이)이다. 천장에는 Electric Heat Pump(EHP) AM083BN4DBH1(Samsung Electronics,

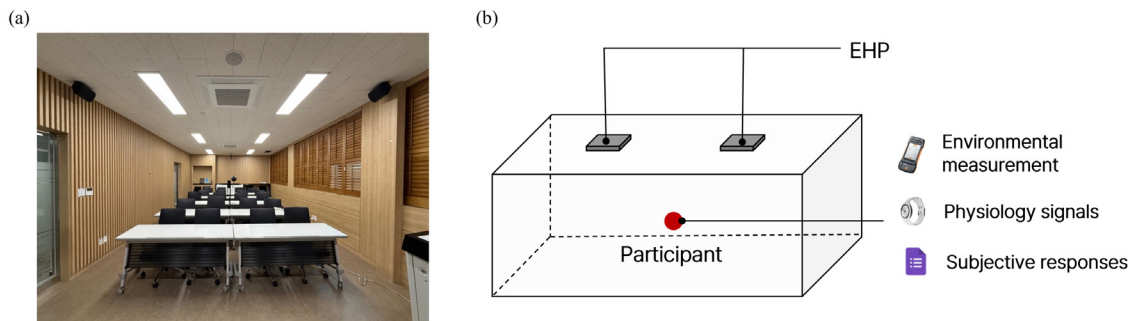


Figure 1. Experimental setup (a) Indoor experimental environment, (b) Schematic of the setup, including the EHP system, participant, and data collection.

South Korea) 두 대가 연동되어 설치되어 있어 실내 온도 제어가 가능하다. 실험 공간과 측정 위치는 Figure 1에 나타내었다. (a)는 실험 공간을 (b)는 EHP의 위치, 실험 참여자 위치, 측정기기의 위치를 나타낸다. 실험 참여자는 실험 공간의 중앙 좌석에 착석한 상태로 참여하였으며, 환경 정보와 생체 정보, 설문 정보 또한 같은 지점에서 측정되었다.

2.1.2 실험 조건

본 연구는 개별 재실자 간의 열 감각 편차를 확인하기 위하여 일상적인 실내 열 환경 범위에서 온도를 변화시키는 방식으로 열 환경을 구현하였다. 본 실험은 초기 안정화, 보행(10분), 실내 열 경험(40분)으로 구성되어 있다. 참여자는 실험 전 실내 지정된 좌석에 착석하여 사전 설문에 응답하고 및 왼쪽 손목에 웨어러블 센서를 착용하였다. 이러한 준비 과정은 초기 대사 상태를 안정화하기 위해 10분 이상 수행되었으며, 선행연구에서는 10분 이내에 실험 참여자의 대사율이 안정화될 수 있음을 보고한 바 있다(Zhang, Zhou, Zheng, Oladokun, & Fang, 2020; Jiang, Xie, & Niu, 2024). 초기 대사 상태가 안정화된 이후, 참여자들은 10분간 복도에서 가벼운 걷기를 수행하고 실내 지정된 좌석에 재착석하였다. 이는 강의실과 같은 공간에서 재실자가 보행 이후 좌석에 착석하는 일반적인 이용 상황을 반영하기 위한 것으로, 동적 조건에서 열 반응을 평가한 선행연구에 기반한다(Zhai et al., 2019).

실내 실험은 총 40분 동안 수행되었으며, 실내 온도가 20°C에서 30°C로 점진적으로 상승하도록 제어하였다. 실험 시간은 사전 실험을 통해 실험 공간의 온도를 약 10°C 상승시키는 데 약 30분이 소요됨을 확인한 결과를 바탕으로, 온도 상승 후의 열 반응을 고려하여 40분으로 설정하였다. 또한, 열 환경의 변화는 무작위로 변화 시킬 경우 참여자 별 동일한 환경을 재현하기 어렵기 때문에, 온도의 변화 방향과 속도를 통제하기 위해 점진적으로 상승하는 열 환경을 구현하였다.

실험 참여자들은 사전 설문에서 기본정보(이름, 나이, 성별, 신장, 체중), 건강 상태, 착의량에 대한 설문에 응답하

였다. 기본정보에 대한 통계는 Table 1에 기술하였다. 실험 참여자는 총 15명이며, 평균 나이는 약 23.7세이다. 성별은 남성 7명, 여성 8명으로 표본 내에서 균등한 분포를 나타낸다. 평균 신장은 167.8 cm이며 평균 체중은 65.9 kg이다. 평균 BMI는 23.3이다. 모든 실험 참여자들은 발열 또는 열 관련 질환이 없다고 응답하였으며, 실험 목적과 절차에 대한 설명을 들은 뒤 참여에 동의하였다. 얇은 상태에서의 활동은 가벼운 작업(1.0-1.2 MET)에 해당하는 읽기, 타이핑 등의 움직임으로 제한되었다. 모든 참여자는 겨울철 실내 복장에 해당하는 상의와 하의를 착용하였으며, 일부 참여자는 얇은 내의를 착용하였다. 실험 중 착의상태는 동일하게 유지하였다. 본 연구는 서울시립대학교 기관생명윤리위원회의 승인을 받아 수행되었다.

2.1.3 데이터 집합

실험을 통해 생성된 데이터 집합은 다음과 같다. (1) 환경 데이터: 실험 공간 외부에 UX100-011A HOBO temp/RH data logger(Onset Computer Corporation, USA)를 설치하여 외기온도를 측정하였다. 실내 온도는 Testo400 (Testo, Germany)를 활용해 측정하였다. (2) 생체 데이터: EmbracePlus(Empatica, USA)를 활용하여 피부온도, 맥박수, 활동량, 피부전도도를 수집하였다. 측정 기기는 손목 착용형 웨어러블 센서로, 비침습적 연속 측정이 가능하고 일상 환경에서의 적용성이 높다는 장점이 있다. (3) 열감각 데이터: Testo400 기기를 활용하여 PMV를 산출하였다. PMV는 ISO 7730에서 제시하는 수식을 기반으로 계산되었으며 수식은 Equation 1에 제시하였다. 기기로 공기 온도(t_a), 평균복사온도(t_r), 기류속도(v)를 측정하고, 수증기 분압(P_a)을 산출하며 활동량(M), 착의량(I_{cl})을 지정하여 의복 면적 계수(f_{cl}), 대류 열 전달 계수(h_c), 의복 표면 온도(t_{cl})가 고려되어 계산값인 PMV가 산출된다. 주관적 열 감각은 7점 척도의 Thermal Sensation Vote(TSV, 현재 열 감각)와 3점 척도의 Thermal Preference(TP, 열 선호도)를 활용하였으며, 이는 Google Forms 기반의 전자설문 방식으로 수집하였다.

Table 1. Participant Characteristics

Number of participants	Age (yr)	Sex (M/F)	Height (cm)	Weight (kg)	BMI
15	23.7 ± 2.3	7/8	167.8 ± 6.9	65.9 ± 11.6	23.3 ± 3.3

Values are presented as mean ± standard deviation.

Table 2. Measured and Survey variables

Category	Variable	Unit	Equipment
Environment	Outdoor Temperature	°C	UX100-011A HOBO temp/RH data logger
	Indoor Temperature	°C	Testo400
	Skin Temperature	°C	
Physiology	Pulse Rate	bpm	EmbracePlus
	Metabolic rate (MET)	-	
	Electrodermal activity (EDA)	μS	
Thermal Sensation	Predicted Mean Vote (PMV)	(-3 to +3)	Testo400 Calculated (based on ISO 7730)
	Thermal Sensation Vote (TSV)	7-point scale (-3 to +3)	Google Forms
	Thermal Preference (TP)	3-point scale (-1 to +1)	

모든 데이터는 1분 간격으로 수집되었으며, 이는 열 환경 변화에 따른 생체 반응의 변화를 최소 시간 단위에서 포착하면서도 반복 설문에 따른 응답 피로도와 데이터 신뢰도를 고려하여 설정되었다. 이는 동적 열 환경에서 열 반응을 포착하기 위해 설정된 선행 연구의 분 단위 측정 방식과도 일치한다(Zhai et al., 2019). Table 2에 수집 데이터에 대한 상세한 설명을 기술하였다.

$$PMV = [0.303 \times \exp(-0.036 \times M) + 0.028] \times \begin{cases} (M - W) \\ -3.05 \times 10^{-3} \times [5733 - 6.99 * (M - W) - p_a] \\ -0.42 [(M - W) - 58.15] \\ -1.7 \times 10^{-5} \times M \times (5867 - p_a) \\ -0.0014 \times M \times (34 - t_a) \\ -3.96 \times 10^{-8} \times f_d \times [(t_d + 273)^4 - (t_r + 273)^4] \\ -f_d \times h_c \times (t_d - t_a) \end{cases} \quad (1)$$

2.2. 재실자의 열감각 및 생체 반응 차이 분석

2.2.1 PMV와 재실자 간 TSV 차이 검토

열 환경 변화 시 열 감각의 차이를 확인하기 위해 주관적 열 감각인 TSV의 비교를 수행하였다. 각 실험참여자자는 동일한 실험 조건에서 열 환경 변화를 경험하고 1분 간격으로 TSV에 응답하므로, 40분 동안 변화하는 열 감각을 확인할 수 있다. 열 감각 설문은 7점 척도로 구성되어 열 감각이 변화함에 따라 덥고 추운 정도에 따라서 다른 응답을 제출하게 된다. 실험 참여자 별 TSV 비교 시에는 실험 조건이 일치하였는지, 기존에 활용되어온 열 쾌적 산정 지표인 PMV

와는 차이가 있는지를 함께 검토하였다.

이후 재실자 간 열 감각에 대한 차이는 TSV 응답 결과의 변동 폭과 변동 빈도를 기준으로 분류되었다. 변동 폭은 실험 기간 동안 TSV의 최대값과 최소값의 차이이며, 변동 빈도는 TSV가 1점 척도 이상 변화한 횟수로 정의하였다. 이러한 기준을 바탕으로 재실자의 열 반응 유형이 구분되었으며, 주관적인 설문 결과로부터 도출된 열감각 유형 별 차이가 생체 반응의 차이와도 연관이 있는지 통계적으로 분석하였다.

2.2.2 열 감각 유형 별 생체 반응 차이 통계 분석

열 감각 유형에 따른 생체 반응 차이의 평가를 위해 SPSS 29를 활용하여 통계 분석을 수행하였다. 통계 방법은 혼합모형(Mixed-effects model)이 사용되었으며, 이는 시간 효과와 참여자 간 차이를 동시에 고려할 수 있다. 즉, 각 실험 참여자로부터 40분 동안 열 환경 변화에 따른 열 감각과 생체신호를 1분 간격으로 반복 측정하였으므로 관측값이 비독립적이라는 특성을 고려하며 참여자 간 차이를 확인하기에 적합한 분석 방법론이 채택되었다.

혼합 모형의 고정 효과(fixed effects)로는 열 감각 유형(Thermal Type), 시간(Time), 열감각 유형과 시간의 상호작용(Thermal Type × Time)이며, 랜덤 효과(Random effect)는 실험 참여자로 설정하였다. 이는 열감각 유형에 따른 생체신호의 수준 차이, 시간 경과에 따른 생체신호의 변화, 시간 경과에 따른 유형별 변화 양상의 차이를 확인하는 데에 적합하다. 통계적 유의수준은 $p < 0.05$ 로 설정하였다.

3. 연구 결과

3.1. PMV와 TSV(열감각 설문 값)의 편차 비교 결과

실내 공간에서 PMV와 TSV를 비교한 결과는 Figure 2에 나타내었다. 반복 실험에서 실내 온도와 PMV는 점진적

으로 상승하는 유사한 경향을 보였으나, TSV는 참여자별로 상이한 반응 패턴을 나타내었다. 본 실험은 기후 챔버가 아닌 일상 환경에서 수행되어 반복 실험 간 온도 조건이 완전히 동일하게 유지되지는 않았으며, 이러한 조건을 고려하여 실험 시 실내 온도 변화를 함께 제시하였다.

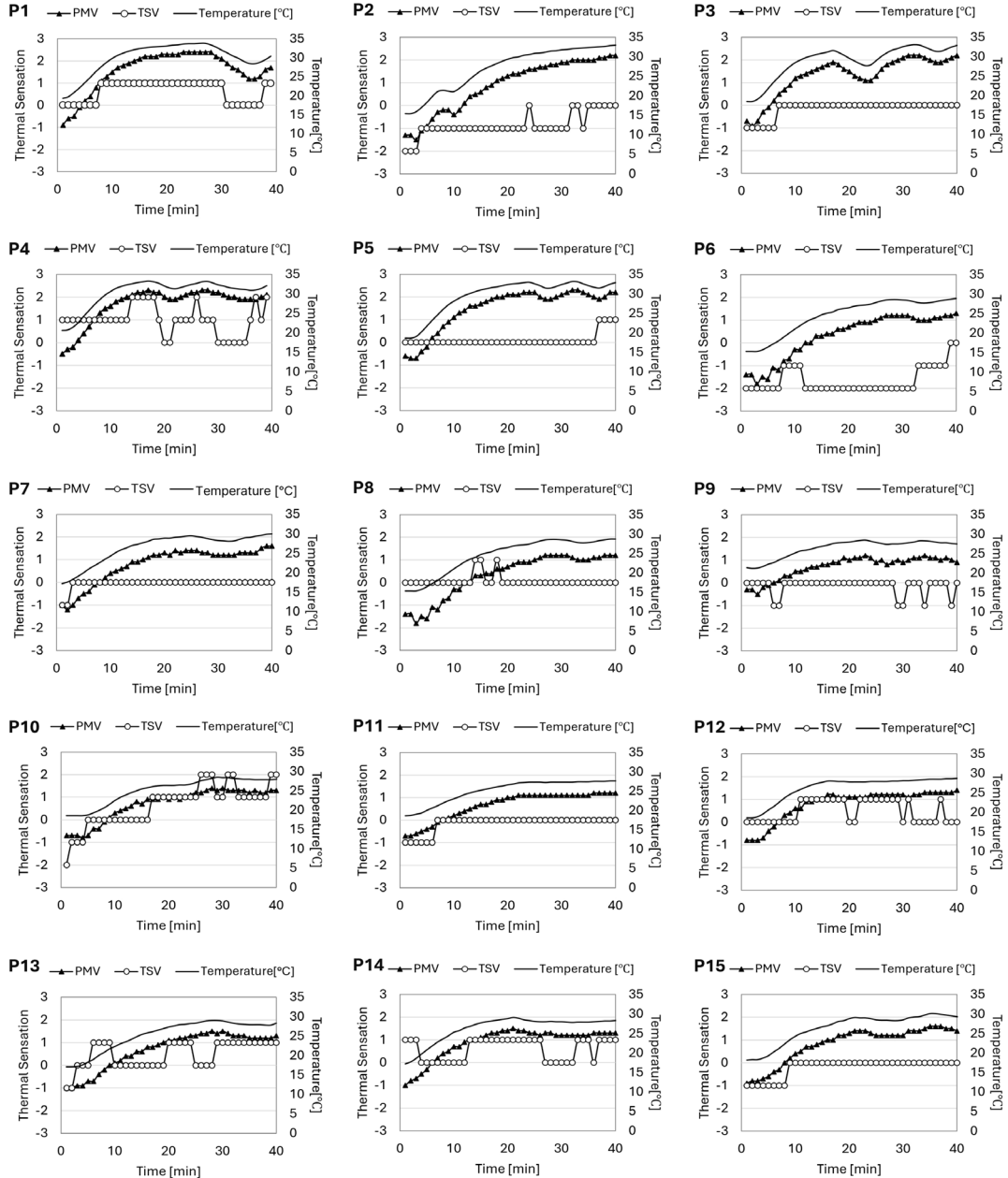


Figure 2. Comparison of Individual PMV and TSV.

PMV는 온도 변화 거동과 유사한 양상을 보이는 반면, 개인의 열 감각을 나타내는 TSV는 거동이 상이한 양상을 보이는 것으로 나타났다. 실험에서 PMV와 TSV의 편차는 최소 0(차이 없음)에서 최대 3.2로 나타났으며, 평균적으로 1.04의 차이를 보이는 것으로 확인되었다. P5의 경우 TSV 설문 결과에서는 온도가 점진적으로 상승하더라도 35분 동안은 0(보통이다)에 응답하고 이후 5분 동안 1(약간 덥다)에 응답하였으나 PMV 계산값은 -1(약간 춥다)에서 2(덥다)로 값이 변화함을 확인할 수 있다.

실험 참여자별 열 환경 변화에 따른 열 감각 응답을 분석한 결과, 열 감각 반응은 개인별로 상이한 패턴을 보였다. 일부 참여자(P10)의 경우 온도 상승에 따라 열 감각이 유사한 경향으로 변화하며 PMV와도 일관된 패턴을 나타냈다. 반면, 일부 참여자(P3, P5, P7, P11, P15)는 실험 전반에 걸쳐 열 감각 변화가 거의 나타나지 않아 상대적으로 열 환경 변화에 대한 열 감각이 거의 일정한 것으로 나타났다. 또 다른 유형의 참가자는(P2, P4, P6) TSV의 응답 범위에서 2점 척도 이상의 변화를 보여 비교적 열 환경 변화에 민감한 열

감각 반응을 나타냈으며, 예를 들어 P6의 경우 -2(춥다)에서 0(보통이다)의 범위에서 열 감각이 변화하였다. 마지막으로 일부 참여자는(P1, P8, P9, P12, P13, P14)은 열 감각의 변화 범위는 제한적이거나, 해당 범위 내에서의 빈번한 변동이 있는 경향을 보였다.

3.2. 점진적 온도 상승 시 생체 반응 분석 결과

열 환경 변화 시 열 감각 설문 결과와 생체 반응에 대한 전체적인 경향을 파악하기 위하여 15명의 실험 참여자의 TSV와 생체 데이터를 평균값으로 변환하여 분석하였다. 반복 실험에서 TSV의 평균값은 평균적으로 -0.5에서 0.5로 상승하여 약간 추운 열 감각에서 약간 더운 열 감각으로 변화하였다. Figure 3는 피부온도와 TSV간의 관계를 나타낸다. 빨간색 실선은 시간 변화에 따른 15명의 실험 참여자의 손목 피부온도의 평균값을 나타내며, 원형 표식은 15명의 실험 참여자의 TSV의 평균값을 나타낸다. 연한 회색은 개별 참가자의 피부온도 변화를 나타낸다. 피부온도는 평균 27.7°C에서 31°C로 점진적으로 상승하여, TSV의 평균

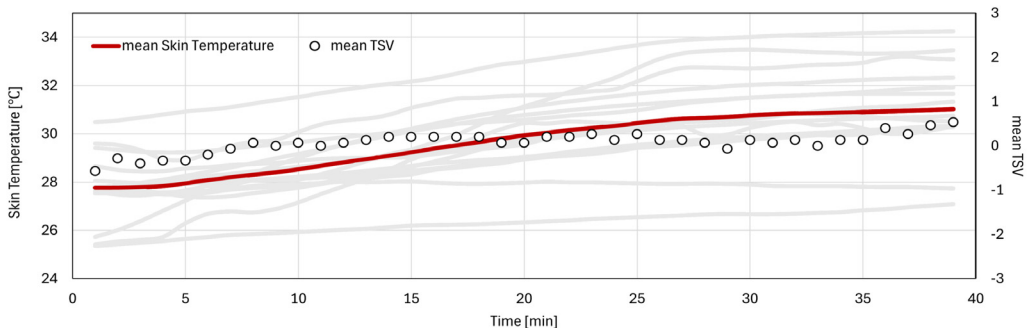


Figure 3. Temporal variation of skin temperature and TSV Gray lines represent individual participants (n = 15).

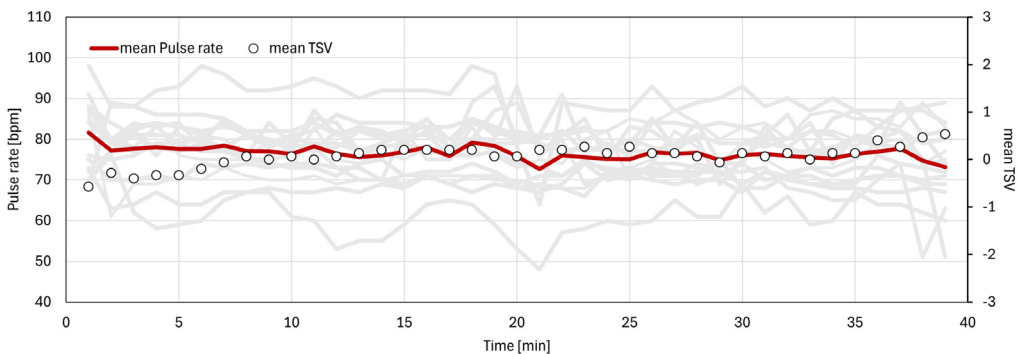


Figure 4. Temporal variation of Pulse rate and TSV Gray lines represent individual participants (n = 15).

값 거동과 유사한 패턴을 나타내었다. 가장 변동이 적은 참여자는 0.2°C 의 피부온도 상승을 보였으며, 가장 높은 변동을 보인 참여자는 5.85°C 의 변동을 나타냈다. 재실자별로는 온도 상승 폭이 상이한 양상을 나타내었다.

Figure 4는 맥박수와 TSV간의 관계를 나타낸다. 일상 환경에서 정상적인 맥박수의 범위는 60에서 110bpm이다. 평균적인 맥박수는 해당 범위 내에서 완만한 변화를 보였다. 일부 재실자는 비교적 큰 변동 폭을 나타낸 반면, 일부는 안정적인 값을 유지하는 경향을 보였다. 평균적인 맥박수는 완만한 변화를 보였으나 개별 실험 참여자 단위에서는 동일한 환경 구간에서도 서로 다른 변동성을 보이는 것으로 나타났다.

Figure 5는 피부전도도와 TSV간의 관계를 나타낸다. 대부분의 참여자의 피부전도도가 0.02 이하의 낮은 범위에서 유지되는 경향을 보였다. 평균값 또한 전반적으로 낮은 수준에서 유지되는 값을 나타내었다. 일부 실험 참여자(3인)는 상대적으로 높은 값을 나타내며, 범위가 넓게 변동하는 양상이 확인되었다.

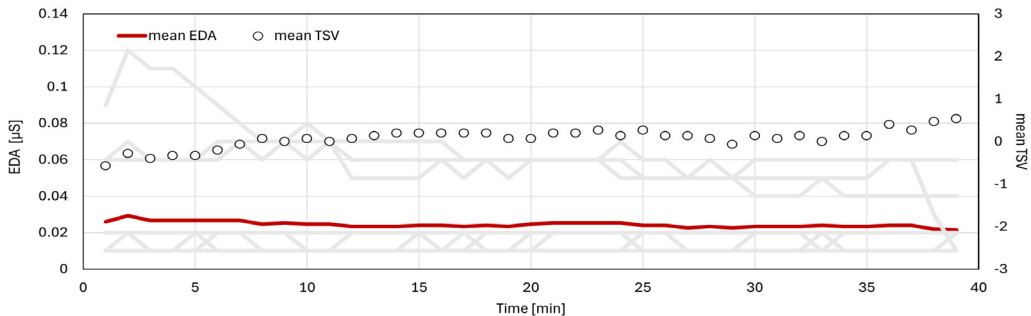


Figure 5. Temporal variation of EDA and TSV Gray lines represent individual participants (n = 15).

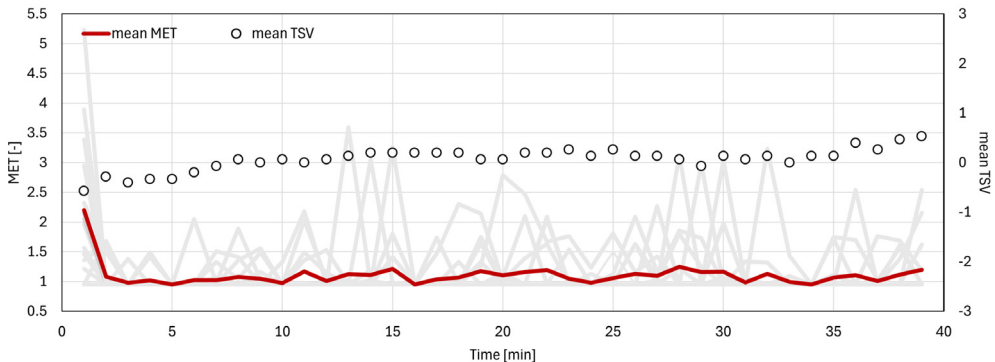


Figure 6. Temporal variation of MET and TSV Gray lines represent individual participants (n = 15).

Figure 6은 활동량과 TSV간의 관계를 나타낸다. 실험 시 타이핑, 읽기 정도의 활동으로 제한이 되었기 때문에 전반적으로 낮은 활동 상태가 유지되었다. 실험 초기 구간에는 일부 재실자에게서 상대적으로 높은 활동량이 관찰되었으나, 시간 경과 후 낮은 수준의 활동량으로 유지되는 것을 확인하였다.

3.3. 재실자 열 감각 반응 유형 별 생체 반응 분석 결과

동일한 열 환경에서 개인별 열 감각의 편차가 생체 반응으로 설명될 수 있는지 검토하기 위하여, 열 감각 반응 유형별 생체 반응을 분석하였다. 열 감각 반응 유형은 3.1에서 분석된 결과에 따라 네 가지 유형(Type A-D)으로 범주화되었다. 열 감각 반응 유형과 특징은 Table 3에 기술하였다. Type A는 온도 및 PMV 변화에 따라 열 감각이 반응하는 유형, Type B는 열 감각이 거의 일정하게 유지되는 유형, Type C는 열 감각 변화 폭이 크게(≥ 2 TSV 척도) 나타나는 유형, Type D는 좁은 범위(≤ 1 TSV 척도) 내에서 열

Table 3. Thermal sensation response types (Type A-D)

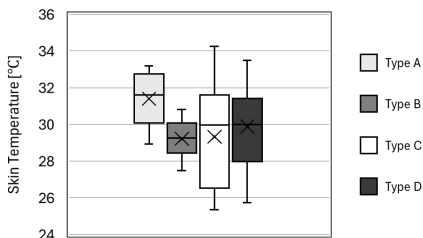
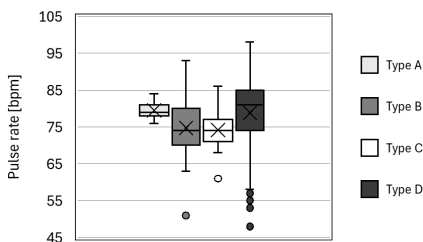
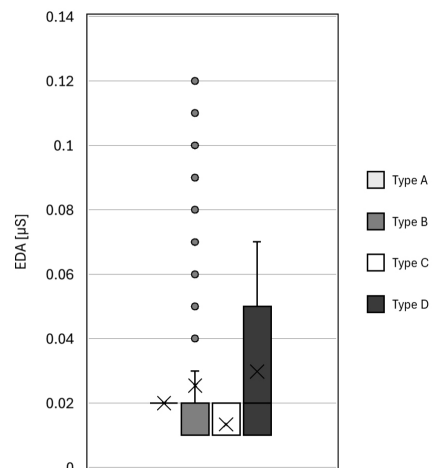
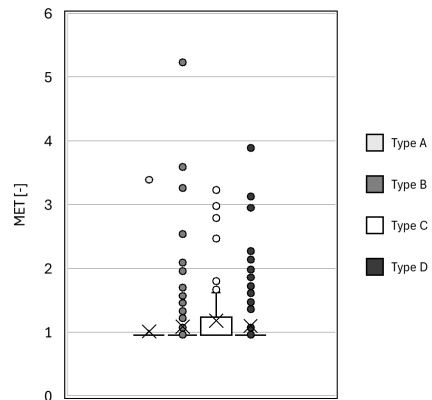
Type	Participants	Description
Type A	P10	Thermal sensation varies in accordance with temperature and PMV trends
Type B	P3, P5, P7, P11, P15	Minimal change in thermal sensation throughout the experiment
Type C	P2, P4, P6	Large variation range in thermal sensation (≥ 2 TSV scale units)
Type D	P1, P8, P9, P12, P13, P14	Frequent fluctuations within a narrow thermal sensation range (≤ 1 TSV scale unit)

감각이 빈번하게 변동하는 유형이다.

Type A는 Type C에 포함될 수 있으나, PMV의 패턴과 유사한 거동을 보인다는 특성으로 인해 별도로 구분하여 분석하였다. Type B의 유형은 실험 구간 동안 열 감각이 1 점 척도 이내로 1회 변화하는 특성을 나타내었다. Type C의 경우 열 감각이 1점 척도 이내에서 3회 이상 변화하는 특성을 나타내었다. 열 감각 변화 폭과 빈도의 기준은 본 연구 결과로 설정된 상대적 기준으로 실험 조건에 따라 달라질 수 있다.

열 감각 반응 유형별 생체 반응 변동성의 차이는 Figure 7(피부온도), Figure 8(맥박수), Figure 9(피부전도도), Figure 10(활동량)에 나타내었다. 열 감각 유형별 피부온도 분포를 비교한 결과, 유형 간 중앙값 및 분포 범위에서 차이

가 나타났다. Type A는 가장 높은 중앙값을 보이며 비교적 좁은 사분위 범위(IQR)를 나타냈다. Type B는 낮은 중앙

**Figure 7.** Differences in skin temperature variation by thermal response type.**Figure 8.** Differences in Pulse rate variation by thermal response type.**Figure 9.** Differences in EDA variation by thermal response type.**Figure 10.** Differences in MET variation by thermal response type.

값과 함께 가장 좁은 분포 범위를 보여 변동성이 제한적인 경향을 보였다. Type C는 가장 넓은 분포 범위와 사분위 범위를 나타내어 높은 변동성이 확인되었다. Type D는 중간 수준의 중앙값을 보이면서도 비교적 넓은 분포를 나타냈다.

맥박수 분포에서도 열 감각 반응 유형에 따른 차이가 관찰되었다. Type D는 가장 높은 중앙값과 넓은 분포 범위를 보였다. Type A와 Type B는 유사한 중앙값을 나타내었으며, Type A는 네 유형 중 상대적으로 가장 좁은 사분위 범위를 보였다. Type C는 가장 낮은 중앙값을 나타냈으며, 분포 범위는 네 유형 중 두 번째로 좁은 것으로 나타났다. 맥박수는 전체적으로 유형 간 사분위 범위에서 차이가 확인되었다.

피부전도도 검토 결과, Type A는 변동 없이 일정한 값을 가지고, Type C 또한 일정하게 낮은 범위에서 값이 유지된 것으로 나타났다. Type B에서는 상위 값의 이상치가 다수 관찰되며 분포의 비대칭성이 나타났다. Type D는 가장 높은 중앙값과 넓은 분포 범위를 보였으며, 변동성이 크게 나타났다. 본 실험에서 제한되는 요인이었던 활동량 분포를 비교한 결과에서는 뚜렷한 분포의 차이가 검토되지 않았다.

3.4. 통계적 유의성 검정 결과

열 감각 유형 별 생체 반응 차이에 대한 혼합효과모형 분석 결과는 Table 4과 같다. 피부온도, 맥박수, 피부전도도

에 대하여 열 감각 유형에 따른 생체신호의 수준 차이, 시간 경과에 따른 생체신호의 변화 양상의 차이, 시간 경과에 따른 유형별 변화 양상의 차이를 확인하였다. 활동량은 본 실험에서 제한되는 요인이었으며 열 환경 변화나 열 감각 유형과 관련 없이 변화하는 요인이므로, 열 감각 유형별 생체 반응 차이에 대한 통계적 분석은 수행하지 않았다.

피부온도는 열 감각 유형에 따라 통계적으로 유의하게 나타났으며, 맥박수와 피부전도도는 통계적 차이가 유의하지 않은 것으로 분석되었다. 피부온도의 경우, 시간(Time)은 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났다($p\text{-value} < 0.001$). 이는 시간에 따라 피부온도가 유의하게 변화함을 의미한다. 열 감각 유형(Type)에 따른 피부온도 차이는 통계적으로 유의하지 않는 반면($p\text{-value} = 0.67$), 유형과 시간 간의 상호작용(Type $\times$ Time)은 통계적으로 유의하게 확인되었다 ($p\text{-value} = 0.005$). 이는 열 감각 유형 간 피부온도의 차이는 뚜렷하지 않으나, 시간에 따라 변화하는 양상은 열감각 유형에 따라 다르게 나타남을 의미한다. 맥박수와 피부전도도의 경우, 고정요인에 대한 $p\text{-value}$ 가 0.05 이상의 값을 나타내어 열 감각 유형이나 시간 변화에 따른 유의미한 차이가 보이지 않음이 확인되었다. 이러한 결과는 열 환경 변화에 대한 열 반응 유형 별 차이를 설명할 수 있는 주요 생체 지표로서 피부온도를 활용할 수 있음을 나타낸다.

Table 4. Mixed-effects model results for differences in physiological data by thermal sensation response type

Variables	Effect	df (Numerator, Denominator)	F	p-value
Skin Temperature	Intercept	1, 11.850	2322.916	< 0.001
	Thermal Type	3, 11.850	0.53	0.67
	Time	1, 574.099	262.617	< 0.001
	Thermal Type $\times$ Time	3, 574.099	4.262	0.005
Pulse rate	Intercept	1, 38.404	1249.352	< 0.001
	Thermal Type	3 38.409	0.393	0.759
	Time	1, 48.361	1.898	0.175
	Thermal Type $\times$ Time	1, 48.361	0.342	0.795
EDA	Intercept	1, 18.850	12.237	0.002
	Thermal Type	3, 18.850	0.574	0.639
	Time	1, 173.063	0.274	0.601
	Thermal Type $\times$ Time	3, 173.063	0.517	0.671

4. 논의 및 한계

본 연구 결과는 개인 간의 열 감각 차이를 실험적으로 확인하고, 특히 생리적 반응과 열 감각 차이 간의 관계를 통계적으로 분석하고자 하였다. 동일한 열 환경 조건에서 PMV와 TSV는 상이한 결과를 도출하였으며, 개인 간 열 감각에 차이가 있음이 확인되었다. 이러한 연구 결과는 기존에 ISO 7730와 ASHRAE 55에서 공식적으로 지정하여 유용히 활용되어온 PMV가 실제 열 환경에서의 TSV를 예측하는데 정확도가 낮다는 기존 연구와 일치하는 결과였다 (Tartarini & Shiavon, 2025).

열 환경 변화에 대한 재실자의 생리적 반응 중 피부온도가 열 감각 유형별 차이를 가장 잘 반영하는 지표임이 확인되었다. 피부온도는 시간에 따라 유의하게 변화할 뿐만 아니라, 열 감각 유형과의 상호작용이 유의하게 나타나, 동일한 환경 변화 조건에서도 개인의 열 감각 특성에 따라 생리적 반응의 변화 양상이 다르게 나타남을 확인하였다. 이는 피부온도가 열 환경 변화에 대한 반응으로 혈관의 확장 및 수축에 의한 말초 혈류 조절과 직접적으로 연관되어, 열 자극에 대한 누적적이고 적응적인 반응을 반영하기 때문으로 해석할 수 있다. 이는 열 감각과 피부온도 간의 생리적 관계를 분석한 선행연구와 일치한다(Zhao et al., 2024).

반면, 맥박수는 체온 조절 및 열적 스트레스에 대한 심혈관 반응을 반영할 수 있을 것으로 예상하였으나(예: 심박수의 증가로 혈류 순환이 촉진되어 열 방출), 본 실험에서 온도가 상승함에도 불구하고 전반적인 맥박수가 약간 감소하는 경향이 나타났다. 이는 열 환경 변화로 인한 영향보다 실험 상황에서의 심리적 안정화와 같은 요소가 더 큰 영향을 미친 것으로 판단된다. 다만, 외부 열에 노출된 작업자를 대상으로 심박수와 열 스트레스 간의 관계를 분석한 선행연구에서는, 심박수의 변화가 열 스트레스와 생리적인 긴장을 모니터링하고 예방하는데 기여할 수 있다고 보고함에 따라(Ruas et al., 2020), 맥박수는 열 감각을 설명하는 데 있어 잠재성이 존재하므로 다른 환경을 대상으로 추가적인 검토가 수행될 필요가 있을 것으로 생각된다. 또한, 기존 연구에서 도출된 것과 같이 열 자극과 생체 반응에 대한 시간 지연 또한 고려해야 할 것으로 판단된다. 피부전도도는 땀샘 활성화에 따라 변화하여 열 반응과 관련되어 있으며, 스트레스와 불쾌감과 같은 감성 반응과도 연관이 있다고 알려져 있다(Hugdahl, 1995). 그러나 본 연구에서는 약 3인을 제외하고는 피부전도도가 낮은 수준으로 유지되며 변화

의 폭이 넓지 않은 것을 확인하였고, 열 감각 유형 및 시간 변화에 대해서도 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다. 이러한 연구 결과의 원인은 다양할 수 있으나 본 연구가 겨울철에 수행되었다는 점을 고려하였을 때 땀샘이 활성화되기 어려운 조건이었기 때문으로 추정할 수 있으며, 이를 확인하기 위해 향후 여름철 기간을 대상으로 추가 연구를 수행한다면 피부전도도가 열 감각을 설명할 수 있는지 명확한 검증이 가능할 것이다.

본 연구의 결과는 열 쾌적 연구에서 단일 시점의 물리적 지표나 평균화된 모델을 넘어, 시간에 따른 생리적 반응의 변화와 개인별 반응 패턴을 고려하는 접근의 필요성을 시사한다. 특히, 열 감각 유형에 따른 생체 반응 차이가 시간과의 상호작용 속에서 명확히 드러났다는 점에서, 동적 데이터 기반 접근이 중요함을 보여준다. 그러나 본 연구는 몇 가지 한계를 가진다. 첫째, 실험 표본 수가 제한적이며, 열 감각 유형별 표본 수가 불충분하다는 한계를 가진다. 둘째, 본 실험은 기후 챔버가 아닌 일상 환경에서 수행되어 반복 실험 간 열 환경 조건이 완전히 동일하게 유지되지 않았다. 셋째, 열 감각 유형 분류는 TSV 변화 패턴을 기반으로 정의되었으나, 변동 범위 및 변화 횟수 기준은 실험 조건 및 데이터 특성에 따라 달라질 수 있어 절대적인 기준으로 일반화하는 데에는 한계가 있다.

이에 추후 연구에서는 본 연구에서 다루지 못한 다양한 환경 조건(예: 여름철 냉방 조건, 실내외 전한 공간)과 충분한 표본(예: 실험 참여자의 확대, 실험 참여 연령층의 다양화)을 기반으로 재실자의 특성 별 열 감각 차이를 보다 정교하게 분석할 필요가 있다.

5. 결 론

본 연구는 동일한 열 환경에서도 재실자별 열 감각에 차이가 있으며, 이러한 열 감각 차이는 생체 반응 중 피부온도의 편차로도 해석할 수 있음을 확인하였다. 또한 피부온도는 열 감각 반응 유형별로 시간 경과에 따라 변화 양상에 차이가 있는 것으로 확인하였다. 이러한 결과는 개인 간 열 감각 차이를 생체 반응으로 설명하기 위해서는 열 환경, 열 감각, 생체 반응 간 시간 지연을 고려한 동적 관계 분석이 필요함을 시사한다. 본 연구는 실제 실내 환경에서 웨어러블 기반 생체 데이터를 활용하여 개인 간 열 감각 차이를 실험적으로 관찰하고 이를 정량적으로 해석하였다는 점에서 의의가 있다. 본 연구 결과는 개인별 열 감각과 생체 데이터

간 관계를 해석하기 위한 기초 자료로 활용될 수 있다. 향후 연구에서는 본 연구의 한계를 보완하여 여름철 냉방 환경으로 실험 조건을 확장하고, 체온 조절 능력이 저하될 수 있는 고령자 등을 포함하여 연구 범위를 확대하고자 한다.

감사의 말

본 연구는 2025년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초 연구사업임(RS-2025-25435932). 본 연구는 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구과제임(RS-2025-23324202).

REFERENCES

- Awad, R., Suberry, A., Abu-Akel, A., & Ayalon, L. (2025). Heat stress effects on the immune system of older adults: A systematic literature review. *Experimental Gerontology*, 206, 112777. <https://doi.org/10.1016/j.exger.2025.112777>
- Cheung, T., Schiavon, S., Parkinson, T., Li, P., & Brager, G. (2019). Analysis of the accuracy on PMV-PPD model using the ASHRAE Global Thermal Comfort Database II. *Building and Environment*, 153, 205-217. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.01.055>
- Fanger, P. O. (1970). Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering.
- Follenius, M., Brandenberger, G., Oyono, S., & Candau, V. (1982). Cortisol as a sensitive index of heat-intolerance. *Physiology & behavior*, 29(3), 509-513. [https://doi.org/10.1016/0031-9384\(82\)90274-8](https://doi.org/10.1016/0031-9384(82)90274-8)
- Hall, J. E. (2016). *Guyton and hall textbook of medical physiology*, Jordanian Edition E-Book. Elsevier Health Sciences.
- Haruehansapong, K., Kiangkhlaio, M., Yeranee, K., & Sahoh, B. (2023). Personal thermal comfort prediction using multi-physiological sensors: The design and development of deep neural network models based on individual preferences. *Building and Environment*, 245, 110940. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110940>
- Hugdahl, K. (1995). *Psychophysiology: The mind-body perspective*. Harvard University Press.
- Humphreys, M. A., & Nicol, J. F. (2002). The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in every-day thermal environments. *Energy and buildings*, 34(6), 667-684. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00018-X](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00018-X)
- Jiang, Y., Xie, Y., & Niu, J. (2024). Short-term dynamic thermal perception and physiological response to step changes between real-life indoor and outdoor environments. *Building and Environment*, 251, 111223. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111223>
- Kiangkhlaio, M., Haruehansapong, K., Yeranee, K., Tip-savak, A., & Sahoh, B. (2024). Electrodermal activity and heart rate variability-driven personal thermal comfort prediction and explanation. *Building and Environment*, 265, 111921. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111921>
- Parsons, K. C. (2000). Environmental ergonomics: a review of principles, methods and models. *Applied ergonomics*, 31(6), 581-594. [https://doi.org/10.1016/S0003-6870\(00\)00044-2](https://doi.org/10.1016/S0003-6870(00)00044-2)
- Ruas, A. C., Maia, P. A., Roscani, R. C., Bitencourt, D. P., & Amorim, F. T. (2020). Heat stress monitoring based on heart rate measurements. *Revista Brasileira de Medicina do Trabalho*, 18(2), 232. <https://doi.org/10.47626/1679-4435-2020-449>
- Tartarini, F., & Schiavon, S. (2025). Comparative analysis of PMV Models accuracy implemented in the ISO 7730: 2005 and ASHRAE 55: 2023. *Building and Environment*, 275, 112766. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.112766>
- Wang, J., Cheng, Z., Lu, Y., & Lin, Z. (2025). Enhancing thermal comfort in shared building spaces: A group thermal preference framework and optimization strategies. *Building and Environment*, 113906. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.113906>
- Zhai, Y., Zhao, S., Yang, L., Wei, N., Xu, Q., Zhang, H., & Arens, E. (2019). Transient human thermophysiological and comfort responses indoors after simulated summer commutes. *Building and Environment*, 157, 257-267. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.04.023>
- Zhang, Y., Zhou, X., Zheng, Z., Oladokun, M. O., & Fang, Z. (2020). Experimental investigation into the effects of different metabolic rates of body movement on thermal comfort. *Building and Environment*, 168, 106489. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106489>
- Zhao, J., Wang, R., Wu, Y., Zhao, C., Qi, Y., Li, S., ... & Cao, B. (2024). From characteristics to practical applications of skin temperature in thermal comfort

- research-A comprehensive review. *Building and Environment*, 262, 111820. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111820>
- Zhu, H., Wang, Y., Gao, K., Wang, F., Zhang, F., & Hu, S. (2025). Quantitative evaluation of attention during sustained heat exposure: An fNIRS study. *Building and Environment*, 113580. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.113580>
- 투 고 일: 2026. 04. 03
수정접수일: 2026. 04. 17
게재승인일: 2026. 04. 24