RESEARCH ARTICLE



# 단기 열 경험에 따른 재실자 온열 쾌적감의 시각별 변화 특성 분석

류지혜<sup>1</sup> · 김상희<sup>2\*</sup> · 이권형<sup>3</sup>

<sup>1</sup>경북대학교 건설환경에너지융합기술원 연구교수, <sup>2</sup>경북대학교 건축학부 공학박사, <sup>3</sup>동의대학교 건축학과 교수

# Analysis of Time-dependent Changes in Thermal Comfort of Occupants according to Short-term Thermal Experience: To Uncomfortable Hot

Ryu, Ji-Hye<sup>1</sup> · Kim, Sang-Hee<sup>2\*</sup> · Lee, Kwon-Hyung<sup>3</sup>

#### ABSTRACT

This study aims to identify changes in thermal sensation when the indoor thermal environment suddenly changes after a short-term thermal experience. To understand the thermal adaptation process, it is examined on a time scale of minutes. This study focused on the mechanisms of thermal adaptation changes to hot thermal sensations. The experiment was conducted with two scenarios targeting 13 participants (Scenario 1. From comfortable to uncomfortable hot, Scenario 2. From uncomfortable cold to uncomfortable hot). At the same time as performing the experiment, thermal sensation vote (TSV) and comfort sensation vote (CSV) were surveyed using the right-here-right-now method. Depending on the difference in the previous thermal experience, TSV and CSV were affected from immediately after the change in the indoor thermal environment to 6 minutes. It showed a gradual change and reached a steady-state 15 minutes. Predicted mean vote (PMV), an objective evaluation index, and TSV, a subjective evaluation index, showed a difference immediately after the change in the indoor thermal environment. In order to closely control the indoor thermal environment, it is believed that the thermal experience and thermal adaptation aspects of occupants should be reflected.

주요어: 단기 열경험, 열 이력, 열 적응, 분 단위, 재실자 온열 쾌적감

**Keywords:** Short-term Thermal Experience, Thermal History, Thermal Adaptation, Miute-scale, Occupant Thermal Comfort

# 서론

인간의 열 쾌적성은 '온열 환경에 대해 만족감을 표현하는 마음'으로 정의된다(Parsons.



Journal of KIAEBS 2024 February, 18(1): 37-48 https://doi.org/10.22696/jkiaebs.20240004

pISSN: 1976-6483 eISSN: 2586-0666

Received: January 4, 2024 Revised: January 17, 2024 Accepted: January 17, 2024

© 2024 Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems.



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attrib-

ution Non-Commercial License (http://creative-commons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Research Professor, Convergence Institute of Construction, Environmental and Energy Engineering, Kyungpook National University, Daegu, Korea

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Ph.D, School of Architecture, Kyungpook National University, Daegu, Korea

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>Professor, Division of Urban, Architecture and Civil Engineering, Dong-Eui University, Busan, Korea

<sup>\*</sup>Corresponding author: Kim, Sang-Hee, Tel: +82-53-950-7653, E-mail: urban0039@naver.com

2007). 재실자 측면에서 열적 쾌적성과 관련하여 긍정적인 감각을 갖게 되는 조건을 찾는 것 이 가능하다(Maykot et al., 2018). 온열 환경의 열적 쾌적성을 평가하는 대표적인 이론은 두 가지로 정리할 수 있다. 먼저 Fanger (1970)의 Predicted Mean Vote (PMV) 모델이며, 이는 열 균형의 원리와 정상 상태 조건에서 챔버 실험을 통해 개발되었다. 물리적인 환경 조건과 개인의 착의량, 활동량을 기반으로 열적 쾌적성을 평가할 수 있다. 다음 이론은 Brager and De Dear (1998)의 적응형 열 쾌적 모델이다. 이는 물리적인 환경 조건뿐만 아니라 생리적 순 응, 적응 행동 조정, 심리적 습관화라는 세 가지 요인에 의해 열 환경에 적응할 수 있음을 나타 낸다. 열 적응은 동적 열 환경의 영향 하에서 열 쾌적성을 유지하는 중요한 방법이다. 열 적응 은 시간, 위치 및 실외 기후에 따라 변하며 이러한 요인이 누적되면 열 적응에 영향을 미치며, 중립 온도 및 쾌적 영역의 차이를 초래한다(Nicol and Humphreys, 1998; Luo et al., 2016a; Ning et al., 2016). 나아가 열 적응은 단기 열 적응부터 기후 변화와 같은 장기 열 적응으로 구 분할 수 있다. 열 적응이란 분, 시, 일, 년 등의 다양한 시간의 척도에서 영향을 미침에도 불구 하고 비교적 긴 과정(시간)의 열 적응에 관한 선행 연구가 주를 이뤘다(Liu et al., 2014; Yang et al., 2017; Du et al., 2018). 실내온열환경 제어 및 온열 쾌적감에 기반한 열 적응 시간 단위 인 단기 열적응 시간 단위(일, 시, 분)에 대해 고찰한 결과, 짧게는 4.25일에서 길게는 48일로 도출되었다(Cao et al., 2011; Yu et al., 2011; Luo et al., 2016b; Zaki et al., 2017). 분 단위의 단기 열 적응은 실내온열환경 변화하였을 시, 온열 쾌적감이 요동치다가 약 15분 이내에 정상 상태(steady-state)로 접어든다는 것을 발견하였다(Ji et al., 2017).

불편함을 유발하는 환경(비중립 온열감)에서 재실자는 편안함을 회복(중립 온열감)하려는 경향으로 반응한다(Nicol and Humphreys, 1998). 하지만 일반적인 설정 제어로 실내 열 환 경 조절 시 기후 차이를 무시하거나 인간의 열 적응, 대사량, 착의량 등의 재실자 측면의 동적 변화를 고려하지 못할 수도 있다(McGregor, 2012). 이러한 동적 측면을 고려하지 못한다면 정밀한 환경 제어 방안이라 하더라도 열 쾌적성에 관한 만족도를 일정 수준 이상 높일 수 없다 (de Dear et al., 2013). 단적으로 더운 여름이라 하더라도 실내 온열 환경이 낮은 온도로 장시 간 유지된다면 재실자는 열 쾌적성을 넘어서서 불쾌함을 느낄 수 있다(ASHRAE, 2017). 또 한 온도 변화에 따른 열 감각의 회귀 반응 속도는 차이가 있는 것으로 나타났다(Schweiker et al., 2012). 단기적인 열 경험이 뜨겁거나 차가운 열 자극과 같은 온도 차이에 따라 정상 상태 와 비교하면 응답되는 열 감각의 평가에 차이가 있는 것으로 나타났다(Ji et al., 2017). 또한 기준 온도에서 높은 온도로의 열 적응보다 낮은 온도로 구성된 열 환경에 더 빨리 적응하는 것 으로 나타났다(Ji et al., 2017). 열 적응 프로세스에 관한 고찰은 여러 영향 요인들을 고려하여 재고되어야 한다. 열 적응, 이전의 열 경험이 현재의 재실자 온열 쾌적감에 영향을 미친다는 점(Ji et al., 2017)을 인지하고 실내온열환경 제어 방안의 마련 시 영향 요인으로 고려하여야 한다. 선행연구 고찰 결과, 열 경험에 차이가 있다는 전제하에서 단기 열 적응 중 분 단위의 척 도에 중점을 둔 연구는 미비하다고 사료된다. 비교적 열 적응이 불리한 고온으로의 환경 변화 는 짧은 시간에 열적 불쾌감을 증가시킬 수 있기 때문에 이에 관한 고찰이 필요하다. 전이공 간, 복도, 화장실 등 재실 시간이 길지 않으나 방문 빈도를 가지는 공간 등을 통합하여 온열 환

경을 제어할 경우 온열감에 영향을 미치는 다양한 열적 경험이 수반된다. 이에 본 연구에서는 더운 열 감각으로의 열 적응 변화 메커니즘에 초점을 맞추었다. 본 연구는 단기간의 열 경험한 후 실내 온열 환경이 갑작스럽게 변화하는 상태에서의 열 감각 변화 수준을 규명하고 객관적 지표(PMV)와 비교 분석하고자 한다. 나아가 열 적응 과정을 파악하기 위하여 분 단위의시간 척도로 고찰한다. 두 가지 시나리오로 구분하여 진행하였으며, 다음과 같다.

- Scenario 1. From comfortable (neutrality) to uncomfortable hot (non-neutrality)
- Scenario 2. From uncomfortable cold (non-neutrality) to uncomfortable hot (non-neutrality)

실험 시나리오는 쾌적함을 느끼는 중립 온열 환경(PMV = 0)에서 덥고 불쾌함을 느끼는 비 중립 고온 환경(PMV = 2)으로의 변화, 춥다고 느끼는 비중립 저온 환경(PMV = -2)에서 덥고 불쾌함을 느끼는 비중립 고온 환경(PMV = 2)으로의 변화로 구분하였으며, 대조되는 환경 조건에서의 변화를 통해 열 경험 및 열 적응을 평가하고자 하였다. 온열 쾌적감 설문을 분 단위로 실시하여 실험 참여자의 열적 쾌적성을 동시에 평가하였다. 열 경험의 차이에 따른 열환경 변화와 열 평가 사이의 정량적인 영향 수준을 분석하고자 한다.

### 실험개요

#### 실험 프로토콜

본 실험은 대구광역시 D구에 위치한 신축 공동주택 내에서 실험을 진행하였다. 고온 환경 을 모사할 수 있는 하절기에 진행하였으며 2023년 9월 9일 오전 9시부터 14일 오후 5시까지 실험을 하였다. 실험 공간은 입주 전 공실이었기 때문에 방해 요인이 없었으며, 방 3개, 거실 및 주방, 화장실 2개로 구분되어 있었다. 실내에 천장형 시스템 에어컨을 제외하고 가구 및 가전 은 전혀 없었다. 거실 공간을 사전 설명 및 설문을 위한 대기실로 사용하였으며, 방 3개 중 유사 한 면적(약 12 m²)의 방 2개를 실험 조건을 구현하는 실험 공간으로 사용하였다. 본 실험은 두 가지 시나리오를 설정하였다. 쾌적한 중온 환경에서 불쾌한 더움을 느끼는 비중립 고온 환경 으로의 변화인 시나리오 1, 불쾌한 추움을 느끼는 비중립 저온 환경에서 불쾌한 더움을 느끼는 비중립 고온 환경으로의 변화인 시나리오 2의 수행을 위하여 실험 조건은 3가지 온열 환경으 로 구성되었다. 온열 환경은 PMV를 기준으로 하였으며 중립 온열 환경은 PMV '0', 비중립 저온 환경은 PMV '-2', 비중립 고온 환경은 PMV '2'에 상응하도록 설계하였다. 실험 전 냉방 기기 설정 온도 26°C로 제어되고 있는 대기실에 입장한 실험참여자는 사회인구학적 특성(나 이, 성별 등)과 신체 특성(키, 몸무게, BMI 지수 등)의 내용으로 구성된 사전 설문지를 작성하 고 행동을 최소화한 상태로 휴식을 취하였다. 이후 실험을 시작하였다. 직전 열 경험을 위하여 실험참여자는 저온, 중온의 온열 환경으로 구성된 각각의 실험 공간에 입실하여 15분간 재실 하였다. 다음, 다른 열적 반응을 최소화하기 위하여 고온의 온열 환경으로 구성된 실험 공간으 로 즉시 이동하여 15분간 재실하도록 하였다. 매 실험은 실험참여자 단독으로 수행되었으며, 1명당 전체 실험 시간은 약 50분이 소요되었다. 실험 프로토콜 도식은 Figure 1과 같다.

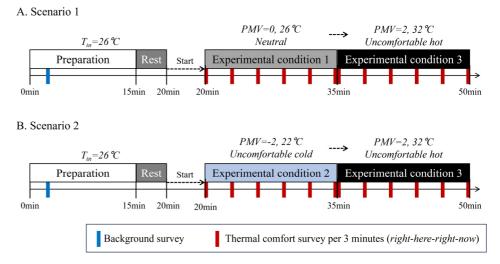


Figure 1. Experimental protocol

실험 공간 내 각각 데이터로거 2대(실 중앙 및 실험참여자 위치에 일정 간격 배치)를 설치하여 10초 간격으로 건구온도, 상대습도 데이터를 수집하였다. PMV 기기를 실험 공간 중앙에 배치하여 실험 조건을 실시간 모니터링 하며 1분 간격으로 실내온열환경 관련 PMV, PPD, 건구 온도, 상대 습도, 풍속, 복사온도 등의 데이터를 수집하였다. 이를 통해 실험 공간이 요구되는 PMV 조건을 만족시킬 수 있는지와 15분 동안 조건이 유지되는지를 확인하였다. 측정기기 개요는 Table 1, 실내온열환경 측정값은 Table 2와 같다.

Table 1. The Measurement Parameters and Types of Instruments used in Field Measurements

Description	Parameter	Range	Accuracy	Resolution
Thermal	Air temperature $(T_{in}, {}^{\circ}C)$	$\text{-}40 \sim 150^{\circ}\text{C}$	±0.2°C	0.1°C
Environment Meter (TESTO400)	Relative humidity (RH $_{\!in}\!,$ %)	$0 \sim 100\%$ RH $\pm (1.8\%$ RH + 3%)		0.1%RH
	Air velocity (V <sub>a</sub> , m/s)	$0.4\sim30\ m/s$	$\pm (0.02 \text{ m/s} + 2\%)$	0.1 m/s
	Radiant temperature (T, $^{\circ}$ C)	$0\sim 120^{\circ}C$	$\text{-}40 \sim 1000^{\circ}\text{C}$	-
Data logger (HOBO-MX 1102A)	Air temperature $(T_{in}, {}^{\circ}C)$	$0\sim 50^{\circ}C$	$\pm 0.024$ °C (at $0\sim 50$ °C)	0.01°C
	Relative humidity (RH $_{\!in}\!,$ %)	$1\sim 90\%RH$	$\pm 2\%$ RH (at 20%~80% RH)	0.01%RH
	CO <sub>2</sub> level	0~5000 ppm CO <sub>2</sub>	±(50ppm CO2±5% of mv)	1 ppm

Table 2. Experimental Environment Conditions (Mean±S.D)

Condition	Operative temperature (°C)	Air velocity (m/s)	Relative humidity (%)	PMV	PPD (%)	Thermal sensation
1	26±0.9	0.1	50±2	0	5	Neutral
2	$22.3 \pm 0.9$	0.1	48±5	-2	76.6	Cool
3	32.4±0.5	0.1	47±4	2	76.7	Warm

본 연구에서 실험 참여자의 온열 쾌적감 특성을 분석하기 위해 실내온열환경을 측정하는 동시에 리커트 7점 척도의 설문을 진행하였다. Thermal sensation vote (TSV)는 매우 추움에서 매우 더움까지 온열감에 관한 설문 항목으로 구성되어 있다. Comfort sensation vote (CSV)는 매우 쾌적감에서 매우 불쾌함까지 쾌적감에 관해 설문한다. 실험 공간 입실과 동시에 15분 동안 3분 간격으로 총 6회 설문에 응답하였다. 설문 문항은 Table 3과 같다. 실험 참여자는 모집 공고를 통하여 모집하였으며 20,30대 신체 건강한 남성을 대상으로 하였다. 평균 30.8세의 남성 13명이 실험에 참여하였으며, 2가지 시나리오에 모두 참여하기 위하여 실험 기간 내각 2일씩 참여하였다. 실험 참여자 특성은 Table 4와 같다.

Table 3. Questionnaire Items

	Index		
Thermal sensation	-3 = Cold, $-2 = Cool$ , $-1 = Slightly cool$ , $0 = Neutral$ ,		
vote (TSV)	1 = Slightly warm, $2 = $ Warm, $3 = $ Hot		
Comport sensation	-3 = Very uncomfortable, $-2$ = Uncomfortable, $-1$ = Slightly uncomfortable, $0$ =		
vote (CSV)	Neutral, 1 = Slightly comfortable, 2 = Comfortable, 3 = Very comfortable		

**Table 4.** Mean demographics of Subjects (Mean±S.D)

Scenario	Description	Sample size	Age (year)	Height (m)	BMI	Clothing insulation (clo)	Metabolic rate (met)
1	Neutrality (PMV=0) $\rightarrow$	13					
	Non-neutrality (PMV=2)	(Male)	30.8±5.5	1.76±0.04	24.9±2.8	0.42±0.03	1.0±0.2
2	Non-neutrality (PMV=-2) $\rightarrow$	13					
	Non-neutrality (PMV=2)	(Male)					

# 결과 및 토의

#### 직전 열 경험에 따른 온열감(TSV) 변화 분석

직전 열 경험에 따른 온열감(TSV) 데이터 세트의 t-검정 결과, 시나리오에 따라 유의미한 차이가 있는 것으로 나타났다(p<0.05). 쾌적한 중립 온열 환경인 'PMV = 0'의 열 경험을 가진 실험 참여자가 덥고 불쾌한 비중립 고온 환경인 'PMV = 2'의 상황에서 응답한 온열감 (TSV)의 변화 양상은 Figure 2와 같다. 고온 환경 입실 후 약간 따뜻함(1)에서 더움(3)까지로 응답하였으며, 시간 경과에 따라 차이를 보였다. 온열 환경 변화 직후에는 약간 따뜻함(1)이라 응답한 실험 참여자가 가장 많았으나 입실 6분 후부터는 따뜻함(2) 지표에 응답률이 상승하였다. 입실 9분 경과 시점부터 더움(3) 지표에 응답하였으며, 입실 15분 경과한 시점에서는 따뜻함(2)와 더움(3)의 지표에 응답이 집중되었다. 더운 환경에 노출된 입실 직후부터 실험 참여자는 온감을 느끼는 것으로 응답하였으며 시간이 경과함에 따라 TSV가 더움(3)의 지표로 우상향하는 양상을 확인할 수 있었다.

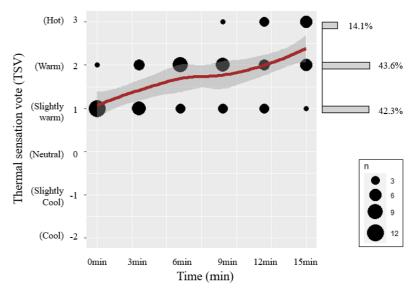


Figure 2. Thermal sensation vote (TSV) by scenario 1

비중립 저온 환경(PMV = -2)에서 비중립 고열 환경(PMV = 2)으로의 변화하였을 경우 온열감 변화 양상은 Figure 3과 같다. 저온의 열 경험을 가진 실험 참여자가 비중립 고온 환경 입실 후 TSV 항목은 시원함(-2)에서 더움(3)까지 나타나 중립 열 경험에 비해 넓은 범위에서 응답하였다. 시나리오에 따라 실내 온도가 12°C만큼 상승 변화하였음에도 불구하고 입실 직후에는 저온 환경에서 경험하였던 냉감이 유지되어 시원함(-2) 지표에서 소수의 응답이 나타났다. 입실 후 12분까지 고온의 온열 환경임에도 불구하고 덥지도 춥지도 않다는 중립 지표(0)에 응답이 나타났다. 입실 12분 이후부터는 따뜻함(2)와 더움(3)의 지표에 응답률이 증가한 것을 확인할 수 있었다. 전체 응답률은 냉감을 나타내는 지표 1.3%, 중립 6.4%, 온감을 나타내는 지표 92.3%로 나타났다. 직전 열 경험에 따라 비교하여 보면 고온 환경 입실 직후 3분 이

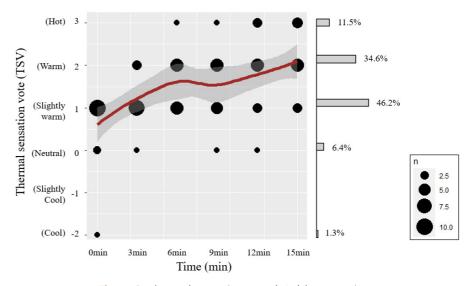


Figure 3. Thermal sensation vote (TSV) by scenario 2

내에 차이가 있는 것을 볼 수 있다(p<0.05). 이는 직전 열 경험이 저온 환경이었을 경우 고온 환경에서 입실하였음에도 불구하고 시원한 열적 체감이 남아있는 상태가 설문 응답에 반영되었다(Ji et al., 2017). 변화 양상을 추세선으로 살펴보면 입실 직후부터 6분까지 급격한 변화를 경험하고 완만한 양상을 보이는 것을 볼 수 있다. 'PMV=2'를 기준으로 조성된 고온 환경에 입실 후 짧은 적응 시간 내에는 직전 열 경험이 중립감이나 냉감이냐에 따라 TSV에 영향을 줄 수 있다는 것을 확인하였다.

#### 직전 열 경험에 따른 쾌적감(CSV) 변화 분석

쾌적함을 느끼는 중립 온열 환경(PMV=0)에서 덥고 불쾌함을 느끼는 비중립 고온 환경 (PMV=2)으로의 변화에서 실험 참여자의 시각별 CSV 응답 양상은 Figure 4와 같다. 고온 환경 입실 직후에는 약간 쾌적함(1)에서 불쾌함(-2) 내에서 응답 분포를 보였다. 시간이 경과함에 따라 불쾌함을 나타내는 지표로 응답 양상이 변화한 것을 볼 수 있다. 쾌적함 2.6%, 중립 12.8%, 불쾌함 84.6%로 나타났다.

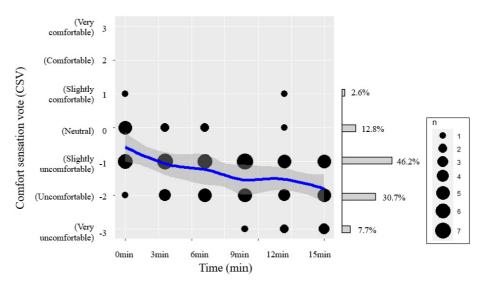


Figure 4. Comfort sensation vote (CSV) by scenario 1

춥다고 느끼는 비중립 저온 환경(PMV=-2)에서 덥고 불쾌함을 느끼는 비중립 고온 환경 (PMV=2)으로의 변화에 따른 CSV 조사 결과는 Figure 5와 같다. 고온 환경 입실 직후 매우 쾌적함(3)에서 약간 불쾌함(-1)의 응답 분포를 보였으며, 쾌적함 1.3%, 중립 19.2%, 불쾌함 79.5%로 나타났다. 절대적인 온열환경의 차이가 클수록 체감하는 쾌적감 편차도 비례하여 불쾌감 상승률도 높아야 하는데 유사한 양상으로 변화하는 것이 흥미로운 결과로 나타났다. 오히려 저온에서 고온으로 변화할 때 불쾌감이 일시적으로 회복되는 시간 내에서 쾌적감이 반등하는 것을 볼 수 있다. 따라서 전체적인 불쾌함도 저온 환경에 대한 열 경험을 경우에 유리한 것으로 나타났다. 상대적인 저온 환경에 대한 단기적인 열 경험을 가진 경우, 실제적으

로 고온 환경의 변화가 발생하더라도 온감에 대한 인식을 둔화시킨다는 선행연구 결과와 유사한 것을 이해할 수 있다(Ji et al., 2017).

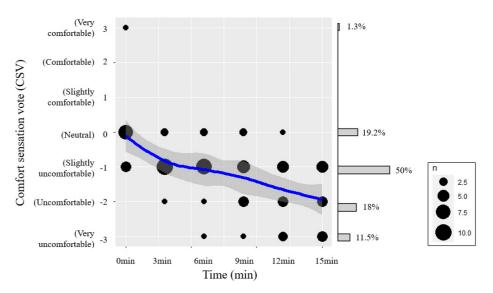


Figure 5. Comfort sensation vote (CSV) by scenario 2

#### TSV와 PMV 간 비교 분석

Figure 6은 적응 시간 경과에 따른 TSV와 PMV 간 편차 양상을 시나리오로 구분하여 도식 화하였다. 실제 응답된 온열감인 TSV와 측정된 온열감인 PMV 간에는 직전 열 경험 및 적응 수준에 따라 차이가 있을 것으로 사료된다. 이를 확인하기 위해 'TSV-PMV'로 편차를 확인 해본 결과, 시간 변화에 따른 추세 양상에서 차이가 있는 것으로 나타났다. 먼저 시나리오 1 인 중립 환경에서 고온 환경으로 변화하는 경우보다 시나리오 2인 저온 환경에서 고온 환경 으로 변화 시 PMV와 TSV간 차이가 더 큰 것으로 나타났다. PMV가 TSV보다 실험 참여자 가 온감을 느낄 것이라 측정되었으며 이는 최대 1.39만큼의 차이를 보였다. 이는 실험 참여자 의 온열감보다 예상 만족감(PMV)이 중립 열 경험의 경우 최대 0.93, 저온 열 경험의 경우 최 대 1.39만큼 PMV, TSV 척도에서 양의 방향으로 높게 응답된 것이라 이해할 수 있다. 시간의 경과에 따라 살펴보면 환경 변화 직후에 가장 큰 차이를 보였으며, 그 편차가 점차 감소하여 입실 12분 경과 후 최소 편치를 보였다. 입실 후 12분까지는 PMV가 TSV보다 과대평가되고 있었으나 12분 이후 PMV가 TSV보다 낮아지는 양상을 보였다. 직전 단기 열 경험의 차이에 따라 동일한 고온 환경에서 체감하는 TSV가 차이가 있으며 시간에 경과에 따른 열 적응과 불 쾌감 누적 등이 영향을 미친 것으로 사료된다. 이는 환경 변화 실험에서 저온에서 고온으로 변화 시 TSV보다 PMV가 더 큰 척도로 측정되는 선행연구 결과(Ji et al., 2017)와 유사했다. 온열환경 간 대비가 클수록 PMV는 TSV를 과대평가하고 있으며, 환경에 적응하는 시간을 고려하여 재실자의 온열감을 이해하여야 할 것이다.

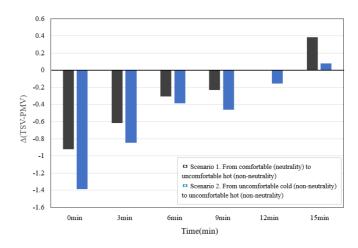


Figure 6. TSV, PMV deviation according to adaptation time

환경 변화 수준에 따른 재실자의 온열감 변화 양상을 이해하기 위하여 온도 편차에 따른 객관적인 매개 변수인 PMV와 주관적인 평가인 TSV의 편차를 Figure 7에 도식화하였다. 온열환경 변화 직후에 실험 참여자의 초기 열 적응 수준을 파악하기 위하여 입실 직후, 3분, 6분 데이터를 활용하였다. 두 시나리오 간 PMV 차의 절대값은 2, 4이며 실내 온도 차는 6°C, 12°C이다. PMV, TSV 변화값 모두 온도 차가 클수록 편차가 선형의 관계로 커지는 양상을 보였으며, PMV (a=0.333)가 TSV (a=0.122) 변화보다 2.27배 큰 기울기를 가지며 분명하게 나타났다. 현재의 온열 환경보다 낮은 온도의 열 경험을 가진 경우 온열 환경 변화 직후에는 PMV가실제 온열감에 비해 더 온감을 나타내는 것으로 사료되다.

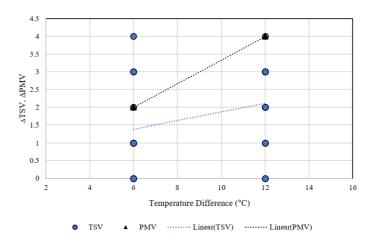


Figure 7. Changes in TSV and PMV according to temperature difference

TSV를 기반으로 Griffiths method (Griffiths, 1990)를 활용하여 시각별 중립온도 범위를 도출한 결과 Figure 8과 같다. 이는 32°C를 나타내는 고온 환경일 경우에 실험 참여자의 중립 온도를 산정함으로써 열 감각에 대해 물리적 지표의 정량적인 파악을 도울 수 있다. 시나리오

1에서 응답된 TSV와 실내 온도를 변수로 도출된 중립온도는 최소 28.35°C, 최대 31.24°C로 나타났다. 최대 중립온도는 입실 직후에 나타났으며 설정된 실내 온도보다 0.73°C 낮은 것으로 산정되었다. 점차 감소하기 시작하여 입실 15분 후 최소 중립온도가 나타났으며, 이는 입실 직후와 비교하여 2.89°C 낮아졌다. 시나리오 2의 경우, 시나리오 1과 마찬가지로 입실 직후 최대 중립온도 30.39°C를 보였으며, 최소 중립온도의 경우 3.1°C 감소하여 27.79°C로 나타났다. 도출된 중립온도를 통해 비교적 온열환경 변화 차가 적은 시나리오 1에서 실내온열환경 유지에 유리한 것으로 나타났다.

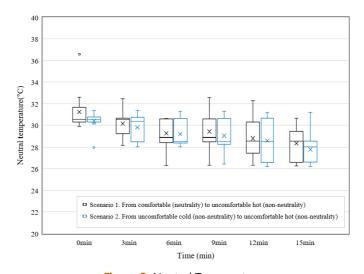


Figure 8. Neutral Temperature

건물 내 재실자는 온열 환경이 절대적으로 안정된 경우에만 머무는 것이 아니다. 이에 본 연구는 현재 온열환경 수준만을 판단하여 열적 수요를 반영하고 공조제어에 적용하기보다는 단기 열 경험이 재실자의 열 감각에 영향을 미칠 수 있다는 점을 충분히 인지하고 열적 편안함 을 개선할 수 있는 방안을 모색하여야 한다는 제안에 의의가 있다.

입실 직후의 열 감각은 일정 시간이 지나면 안정된 상태로 접어들게 되며 단기 열적응이 완료된 후실제 열 감각을 체감하는 경향이 있다. 열 적응은 생리적 순응, 적응행동, 심리적 습관화에 따라 차이를 보이며 그 시간은 온열 환경의 절대적인 차이에도 영향을 받는다. 과거의 열 경험은 무의식적인 비교를 통해 새로운 온열 환경에 대한 열 감각에 영향을 미칠 수 있다(Jiet al., 2017). 열 경험이 현재 열 감각에 미치는 영향은 온열 환경 변화에 따른 적응 초기 구간에서 일정 시간동안 나타나게 되며, 이는 응답하는 재실자의 열 감각에 반영된다. 따라서 물리적인 지표들의 측정을 종합하여 온열감을 평가하는 지표인 PMV는 실제 온열감을 신뢰도 높게 반영할 수 없으며, 본 연구의 결과를 고려하여 실내 온열환경 제어 지표 등의 활용에 반영하는 것이 바람직하다고 사료된다. 온열 환경 및 온열 쾌적감에 따른 실 수요량, 부하량을 정량적으로 산정하기 위해서 다양한 시나리오 경험의 분석이 요구된다. 향후 저온, 중온 환경으로의 변화 등 온열 환경 변화 과정에서 발생할 수 있는 열 경험, 열 적응 특성을 추가 연구하여 관련 연구 결과를 고도화하여야 할 것이다.

## 결론

본 연구는 단기 열 경험 후 실내 온열 환경이 변화하는 상태에서의 분(minutes) 단위로 온열 쾌적감(TSV, CSV) 변화 수준을 규명하고 객관적 지표(PMV)와 다각도에서 비교 분석하였다. 온열 환경의 변화는 중립 온열 환경(PMV = 0)에서 비중립 고온 환경(PMV = 2), 비중립 저온 환경(PMV = -2)에서 비중립 고온 환경(PMV = 2)으로 2가지 시나리오를 구현하였다. 시나리오를 통해 열 경험의 차이에 따른 온열 쾌적감 변화 수준을 정량적으로 평가하였다. 연구 결과는 다음과 같다.

직전 단기 열 경험의 차이에 따라 실내온열환경 변화 직후부터 6분까지는 TSV, CSV에 영향을 미쳤다. 이후 완만한 변화를 보이다 15분에 정상 상태에 도달하는 것으로 나타났다. 객관적 평가 지표인 PMV와 주관적 평가 지표인 TSV는 실내온열환경 변화 직후 1.39의 가장 큰 차이를 보였으며 PMV가 과대평가 하는 것으로 도출되었다. 입실 12분경 가장 근소한 차이를 보였으며 15분경에는 실제 온열감이 PMV보다 온감을 느끼는 것으로 나타났다. 또한 변화되는 온열 환경의 편차의 크기가 체감하는 온열감 편차에 절대적으로 비례하지는 않는 것을 볼 수 있었다. 전이공간 등의 재실 시간이 명백히 길지 않은 공간, 복도, 화장실 등의 시간이 길지 않으나 일정 수준 이상의 재실 빈도를 가지는 공간 등을 통합하여 온열 환경을 제어할 경우 실내공간에서 다양한 열적 경험을 할 수 있다. 이는 재실자의 열 감각에 영향을 미칠수 있으므로 본 연구의 결과는 공조 에너지 절약적인 방안 마련에 기여할 수 있을 것이라 사료된다.

# 후기

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2022R1C1C2007215).

#### References

- 1. Brager, G.S., De Dear, R.J. (1998). Thermal adaptation in the built environment: a literature review. Energy and Buildings, 27(1), 83-96.
- 2. Cao, B., Zhu, Y., Ouyang, Q., Zhou, X., Huang, L. (2011). Field study of human thermal comfort and thermal adaptability during the summer and winter in Beijing. Energy and Buildings, 43(5), 1051-1056.
- 3. de Dear, R.J., Akimoto, T., Arens, E.A., Brager, G., Candido, C., Cheong, K.W.D., Li, B., Nishihara, N., Sekhar, S.C., Tanabe, S., Toftum, J., Zhang, H., Zhu, Y. (2013). Progress in thermal comfort research over the last twenty years. Indoor Air, 23(6), 442-461.
- 4. Du, C., Li, B., Cheng, Y., Li, C., Liu, H., Yao, R. (2018). Influence of human thermal adaptation and its development on human thermal responses to warm environments. Building and Environment, 139, 134-145.

- 5. Ji, W., Cao, B., Luo, M., Zhu, Y. (2017). Influence of short-term thermal experience on thermal comfort evaluations: A climate chamber experiment. Building and Environment, 114, 246-256.
- 6. Liu, W., Huangfu, H., Xiong, J., Deng, Q. (2014). Feedback effect of human physical and psychological adaption on time period of thermal adaption in naturally ventilated building. Building and Environment, 76, 1-9.
- 7. Luo, M., Cao, B., Ouyang, Q., Zhu, Y. (2016a). Indoor human thermal adaptation: dynamic processes and weighting factors. Indoor Air, 27, 273-281.
- 8. Luo, M., Ji, W., Cao, B., Ouyang, Q., Zhu, Y. (2016b). Indoor climate and thermal physiological adaptation: Evidences from migrants with different cold indoor exposures. Building and Environment, 98, 30-38.
- 9. Maykot, J.K., Rupp, R.F., Ghisi, E. (2018). A field study about gender and thermal comfort temperatures in office buildings. Energy and Buildings, 178, 254-264.
- 10. McGregor, G.R. (2012). Human biometeorology. Progress in Physical Geography, 36(1), 93-109.
- 11. Nicol, J.F., Humphreys, M. (1998). Understanding the adaptive approach to thermal comfort. ASHRAE transactions, 104(1), 991-1004.
- 12. Ning, H., Wang, Z., Ji, Y. (2016). Thermal history and adaptation: Does a long-term indoor thermal exposure impact human thermal adaptability? Applied Energy, 183, 22-30.
- 13. Schweiker, M., Brasche, S., Bischof, W., Hawighorst, M., Voss, K., Wagner, A. (2012). Development and validation of a methodology to challenge the adaptive comfort model. Building and Environment, 49, 336-347.
- 14. Yang, D., Xiong, J., Liu, W. (2017). Adjustments of the adaptive thermal comfort model based on the running mean outdoor temperature for Chinese people: A case study in Changsha China. Building and Environment, 114, 357-365.
- 15. Yu, J., Ouyang, Q., Zhu, Y., Shen, H., Cao, G., Cui, W. (2011). A comparison of the thermal adaptability of people accustomed to air-conditioned environments and naturally ventilated environments. Indoor Air, 22, 110-118.
- 16. Zaki, S.A., Damiati, S.A., Rijal, H.B., Hagishima, A., Abd Razak, A. (2017). Adaptive thermal comfort in university classrooms in Malaysia and Japan. Building and Environment, 122, 294-306.
- 17. Griffiths, I. (1990). Thermal comfort studies in buildings with passive solar features, field studies. Report to the Commission of the European Community, 35.
- 18. Fanger, P.O. (1970). Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering. Copenhagen: Danish Technical Press.
- 19. Parsons, K. (2007). Human thermal environments: the effects of hot, moderate, and cold environments on human health, comfort and performance. USA: CRC press.
- 20. ASHRAE. (2017). Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc.