JESK J Ergon Soc Korea 2023; 42(2): 115-127
https://dx.doi.org/10.5143/JESK.2023.42.2.115
https://jesk.or.kr eISSN:2093-8462

Composition of Thermal Environment through the Evaluation of Thermal Comfort and Heart Rate Variability of Industrial Site Workers

Young Sub Shin[1,3], Jae Soo Hong[1], Dong An Cha[2], Jeong Bae Ko[1], Kwang Tae Jung[3]

[1]Korea Institute of Industrial Technology, Department of Digital Health Care R&D, Cheon-an, 31056
[2]Korea Institute of Industrial Technology, Department of Carbon Neutral Technology R&D, Cheon-an, 31056
[3]KOREATECH, Department of Industrial Design Engineering, Cheon-an, 31253

산업현장 작업자의 온열 쾌적성과 심박변이도 평가를 통한 온열환경 구성 방안 연구

신영섭[1,3], 홍재수[1], 차동안[2], 고정배[1], 정광태[3]

[1]한국생산기술연구원 디지털헬스케어연구부문
[2]한국생산기술연구원 탄소중립산업기술연구부문
[3]한국기술교육대학교 디자인공학과

Corresponding Author
Kwang Tae Jung
KOREATECH, Department of Industrial Design Engineering, Cheon-an, 3125
Email : ktjung@koreatech.ac.kr

Received : February 10, 2023
Revised : February 15, 2023
Accepted : April 03, 2023

Copyright@2023 by Ergonomics Society of Korea. All right reserved.

Objective: The aim of this study is to derive optimal thermal environment conditions by evaluating the psychological and physiological of workers according to the thermal environment based on PMV.

Background: Inappropriate thermal environment not only reduces worker performance and satisfaction, but can also cause cardiovascular-related diseases. Several indicators have been developed to measure the thermal environment. However, these thermal environment measurement indicators are limited in evaluating the thermal environment that humans actually feel. Therefore, it is necessary to simultaneously evaluate human psychological and physiological responses to find an appropriate thermal environment.

Method: Five thermal environments (PMV -2, -1, 0, 1, 2) were constructed using PMV, and CSV (Comfort Sensation Vote) was used for the psychological evaluation of industrial field workers, and HRV (Heart Rate Variability) was measured using ECG for physiological evaluation. ANOVA analysis was performed to confirm the difference between CSV and HRV in each thermal environment, and Spearman correlation analysis was performed to confirm the correlation between CSV and HRV variables.

Results: As a result of evaluating workers' thermal comfort and mental stress according to thermal environment, workers' CSV scores tended to decrease as they moved away from neutral environment (PMV 0) to cool environment (PMV -2) and warm environment (PMV +2), and mental stress tended to increase.

Conclusion: The results of the study suggested that workers' thermal comfort and mental stress could be changed by the thermal environment, and it is believed that PMV can reflect both thermal comfort and mental stress through high correlation.

Application: The results of this study can be used as a reference for the construction of an appropriate working environment at an industrial site.

Keywords: Industrial site worker, Comfort Sensation Vote, Predicted Mean Vote, Heart Rate Variability

1. Introduction

온도는 실내환경 품질(Indoor Environmental Quality, IEQ)의 가장 중요한 요소 중 하나로, 작업자의 열적 쾌적성, 건강 및 웰빙에 상당한 영향을 미칠 수 있다(Wang et al., 2019). 부적절한 온열환경은 눈, 코 및 목구멍 자극과 같은 건물 증후군 증상을 유발할 수 있으며, 이 밖에도 여러 업무상 질병을 일으킬 수 있다(Witterseh et al., 2004; Li et al., 2017). 고온환경은 열사병, 열허탈, 열경련, 열성발진과 같은 건강 문제를 발생시킬 수 있으며, 고온에 지속적으로 노출되는 경우 심·뇌혈관계 질환의 위험을 증가시킬 수 있다. 저온환경 또한 체온을 증가시키려는 교감신경의 과도한 활동에 의해 심혈관계 질환을 발생시킬 수 있으며, 일산화탄소(CO)의 증가로 인한 혈압 증가를 유발할 수 있다(Cui et al., 2002). 이러한 부적절한 온열환경으로 인해 발생하는 여러 가지 질환들을 예방하고 작업자 개인의 만족도를 높이기 위해 온열환경의 기준을 마련하는 연구들이 많이 수행되었고, 온열환경을 측정하는 지표들이 개발되어 왔다.

온열환경 측정 지표는 1923년 Houghton과 Yaglou에 의해 제안된 유효온도(Effective Temperature, ET)를 시작으로 신 유효온도(new Effective Temperature, ET*), 표준 신 유효온도(Standard new ET, SET) 등등이 개발되어 왔다(Houghton and Yaglou, 1923; Kim et al., 2011). 하지만 이와 같은 지표들은 온도, 습도와 같은 물리적인 변수들에 초점이 맞춰져 있었고, 인간이 실제적으로 느끼는 온열감을 평가하기에는 제한적이였다(Kim et al., 2014). 따라서 최근에는 이를 보완하기 위해 작업자가 착용한 의류의 양인 의복량과 작업의 열적 부하량인 대사량과 같은 개인적 변수들을 모두 고려한 예상온열감반응(Predicted Mean Vote, PMV)에 관련된 연구가 수행되고 있다(Kim et al., 2011; Lee et al., 2015).

1970년 Fanger에 의해 제안된 PMV는 4가지의 물리적 변수(온도, 습도, 기류 속도, 복사온도)와 2가지의 개인적 변수(의복량, 대사량)를 고려한 방정식에 의하여 -3부터 +3까지의 범위를 나타낸다(Fanger, 1970; Choi et al., 2012; Kim et al., 2011). -3에 가까워질수록 추운 환경, +3에 가까워질수록 더운 환경을 의미하며 도출된 PMV 값을 통해 적절한 온열환경을 갖추기 위한 기준으로 활용한다. PMV는 국제적으로 실용성과 신뢰성을 인정받아 ISO 7730 국제표준, ASHRAE 등 온열환경 측정 지표로 제정되어 널리 사용되고 있다(ANSI/ASHRAE 55-2020, 2013; ISO 7730, 2005).

이와 같이 다양한 온열환경 측정 지표들이 개발되어 왔지만, Kim et al. (2014)는 물리적 환경 요소들의 특성을 내포하고 있는 온열환경을 측정하는 행위 자체가 중요하다기보다는, 업무 수행과 생활을 하게 될 인간의 관점에서 온열환경을 평가하는 것이 중요함을 강조하였다. 그 방법으로 온열환경에서 인간의 심리적, 생리학적 평가를 함께 수행한다. 심리 측정 방법론으로는 Likert 척도 기반의 온열 쾌적성(Comfort Sensation Vote, CSV)이 일반적으로 사용된다(Tanabe, 1998). CSV는 평가 결과값과 기존의 PMV 지표값과의 관련성을 살펴봄으로써 인간이 느끼는 주관적인 온열감과 온열환경의 수준을 비교하는 데 적절하다고 보고되고 있다(Kim, 2013). 생리적 측정 방법으로는 뇌전도, 피부온도, 심전도, 피부전도도 등이 있다(Nath et al., 2020; Al-Shargie et al., 2016). 선행 연구에서는 뇌전도를 활용하여 PMV 기반 온열환경에서의 정신적 작업부하량을 평가한 연구(Wang et al., 2019).

피부온도 측정을 활용하여 온열환경에서의 온열감을 평가한 연구(Dahlan and Gital, 2016), 온열환경에서 심전도와 뇌전도, 근전도를 활용하여 변수들 간의 상관관계를 분석한 연구(Pao et al., 2022) 등 다양한 생리적 측정 방법들이 사용되었다.

기존의 생리적 측정 방법들 중에서 심혈관계의 질환 및 정신적 스트레스와 밀접한 관련이 있는 것은 심박변이도이다(Castaldo et al., 2015). 심박변이도는 자율신경계의 활동을 반영하여 인간의 생리적 상태에 대한 높은 대표성을 띈다(Oh and Park, 2002). 온열환경의 변화는 자율신경계의 변화에 직접적인 영향을 미치기 때문에 심박변이도 분석을 통한 온열환경 구축이 필요하다(Choi et al., 2012). 하지만 이전 연구들에서는 대부분 작업의 성과와 완성도, 집중력 등을 위주로 분석해왔다. 이는 개인의 수행 능력에 관한 연구이며, 심혈관계 질환과 같은 업무상 질병을 예방하기 위한 목적으로는 적절치 않다. 또한 이전 연구들에서는 일반인과 사무직 대상으로 간단한 인지 테스트와 사무 업무 등 정적인 동작 위주의 과업을 설정하였고, 의복량, 대사량 등을 정확한 값이 아닌 고정 상수값을 적용하였다(Choi et al., 2020; Gao et al., 2015). 온열질환 관련 산업재해가 발생하는 업종은 건설업, 제조업 등의 작업자들이며, 다양한 온열환경에 노출 될 가능성이 높고, 대사량이 높은 작업들을 수행하는 산업현장 작업자에 대한 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 산업현장 작업자들을 대상으로 심리적 평가인 CSV와 생리적 평가인 심박변이도 평가를 통해 여러 가지의 온열환경이 작업자들의 심리적, 생리적 반응에 유의미한 영향을 미치는지 확인하고, 그 변수들 간의 상관성을 확인하고자 한다. 또한 평

가 결과들을 종합적으로 분석하여 산업현장의 적절한 온열환경을 구축하기 위한 방안을 도출하고자 한다.

2. Method

2.1 Participants

본 연구에서는 다양한 온열환경에 노출 될 수 있는 제조업종 산업현장 5년 이상 경력자 20명을 대상으로 실험을 수행하였다. 실험 참여자들의 평균 연령은 36.6 (±7.6)세이며, 신장은 172.9 (±8.9)cm, 체중은 74.1 (±9.9)kg, BMI 지수는 24.8 (±3.2)kg/m^2, 경력은 11.8 (±4.8)년으로 나타났다(Table 1). 5년 이상의 산업현장 경력을 확인하기 위해 건강보험납부확인서와 재직증명서를 확인하였다. 참여자들은 모두 자발적으로 지원하였으며, 실험 특성상 심·뇌혈관 질환 관련 병력이 없는 자, 근·골격계 질환이 없는 자로 선정하였다. 그리고 실험은 공용기관생명윤리위원회의 승인(P01-202202-01-020) 후 진행하였다.

2.2 Experimental environment

실험은 실내환경에서 진행되기 때문에 PMV의 6가지 변수(온도, 습도, 기류, 복사온도, 의복량, 대사량)들 중 실내환경과 무관한 복사온도를 제외한 5가지 변수의 값으로 산출하여 5가지 수준의 PMV (-2, -1, 0, 1, 2) 온열환경을 구축하였다. 온도는 PMV의 차등 변화를 위해 각각 18℃, 22.5℃, 27.5℃, 32℃, 36.5℃로 구성하였고, 기류는 PMM (-2)에서 선풍기 미풍 수준인 2.1m/s로 구성하였으며, 나머지 온열환경에서는 실내환경의 평균 값인 0.2m/s로 구성하였다. 습도는 인간의 생리적 변화에 영향을 주지 않는 50% (±5)로 통제하였으며, 의복량은 실제 산업현장을 모사하기 위해 실제 작업복으로 구성하였고, ISO 7730에 의해 총 의복량은 0.73clo로 설정하였다(Table 1) (Figure 1). 대사량은 ISO 8996에 의해 나사체결 및 분리 작업 시의 활동 대사량인 1.7met로 설정하였다(ISO 8996, 2004) (Table 2).

Table 1. Criteria for selecting the amount of clothing

Garment	Clo
Normal trouser	0.25
Normal socks	0.02
Thick shoes	0.04
Pantie	0.03
T-shirt	0.09
Smock jacket	0.30
Total	0.73

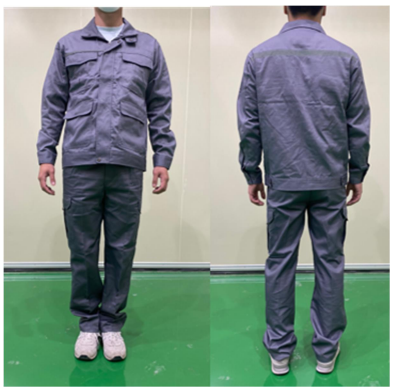

Figure 1. Experimental clothes

실험은 실험과 데이터 획득을 위한 실험실(9,600mm × 6,100mm × 7,200mm)과 온도 변경과 휴식 데이터 측정 및 온열 쾌적성을 평가하기 위한 대기실(5,500mm × 6,100mm × 7,200mm)에서 수행하였다(Figure 2). 대기실은 이론적 중립온도인 PMV (0)을 유지하였다. 온도는 인간이 온도를 느끼는 호흡선(1,200mm)을 기준으로 설정하였다. 실험실의 PMV 값은 PMV 측정기인 Testo400 (Testo, German)을 통해 실시간으로 모니터링 하였고, SmartDAC+ (Yokogawa, Japan) 냉조시스템 활용하여 실험실과 대기실의 환경 변수들을 통제 및 모니터링 하였다.

Table 2. Criteria for setting thermal environment

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
PMV	-2	-1	0	1	2
Temperature	18℃	22.5℃	27.5℃	32℃	36.5℃
Air velocity	2.1m/s	0.2m/s			
Humidity	50% (±5)				
Garments	0.73clo				
Metabolic rate	1.7met				

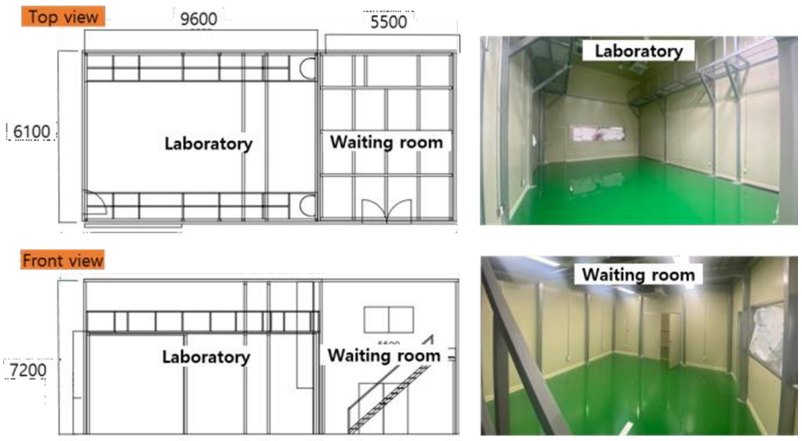

Figure 2. Laboratory and waiting room

2.3 Experimental procedure

실험 참가자들은 외기 환경에 적응된 체온을 정상 범위로 낮추기 위해 실험 시작 전 대기실에서 20분 동안 휴식을 취하였다. 이후 실험복으로 환복하고 개인정보이용동의서와 실험참여동의서를 작성하였다. 실험 장비를 착용하고 나서 대기실에서 10분간 휴식하는 동안 기본 데이터를 측정하였다. 휴식이 끝난 후에는 바로 나사체결 및 분리 작업을 10분간 반복하였으며, 작업이 끝난 후에는 온열 쾌적성을 평가하였다(Figure 3) (Figure 4). 실험은 하루에 1개의 온열환경에서 진행되었기 때문에, 각 실험 참여자 당 총 5일의 실험기간이 소요되었다.

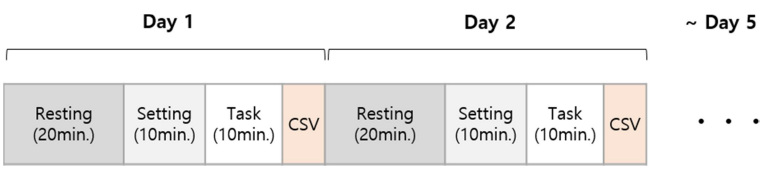

Figure 3. Experiment run time and procedure

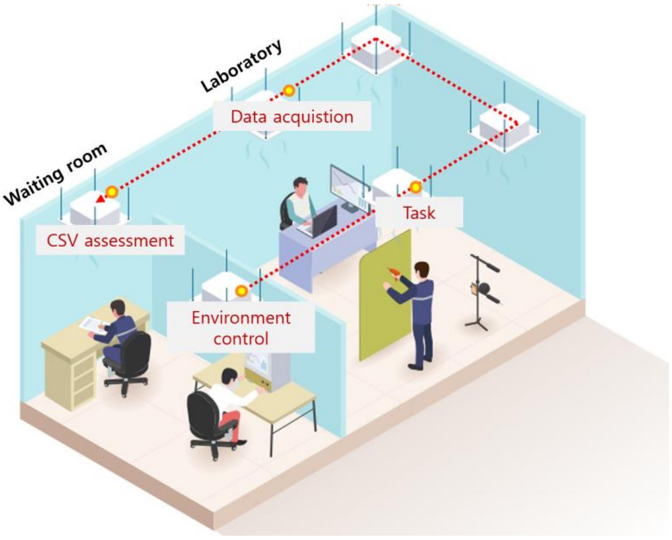

Figure 4. Experiment Full Description

2.4 Measurement

심박변이도 측정을 위한 ECG는 Biopac MP160와 ECG100C (Biopac, USA)를 사용하였다. 사용한 ECG는 3-leads의 형태로 -전극을 오른쪽 쇄골, +전극을 왼쪽 하단 늑골, ground 전극을 오른쪽 하단 늑골에 착용하여 측정하였다(Figure 5). ECG 데이터는 Acqknowledge (Biopac, USA)를 통해 획득하였다.

온열 쾌적성 평가지는 선행 연구를 참고하여 -2(불편함), -1(조금 불편함), 0(보통), 1(조금 편함), 2(편함)으로 5-points likert 척도 기반의 평가지를 제작하였고, 각 온열환경에서 작업자들이 느끼는 주관적인 온열 쾌적성을 평가하였다.

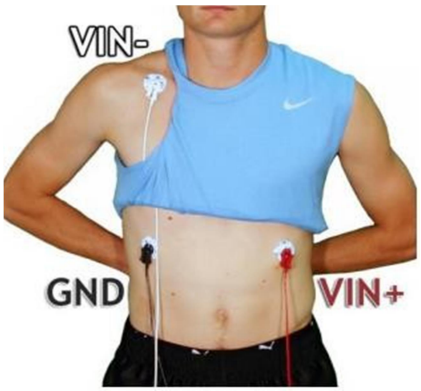

Figure 5. ECG electrode attachment location

2.5 Data analysis

ECG 원신호는 Kubios HRV algorithm (Kubios, Finland) 소프트웨어를 통해 R peak를 검출하였다. R-R interval 데이터를 통해 HRV 데이

터로 변환하였고, 주파수 영역의 변수들을 획득하기 위해 FFT (Fast Fourier Transform)을 수행하였다(Tarvainen et al., 2014). 이후 LF (Low Frequency), HF (High Frequency)의 범위를 지정하였다(Figure 6). 전처리 과정을 거친 데이터를 심박변이도 분석에 사용하기 위한 시간 영역 분석의 RMSSD (Root Mean Square of Successive Differences), SDNN (Standard Deviation of NN interval)과 주파수 영역 분석의 LF/HF ratio로 산출하였다. 온열 쾌적성 평가 결과는 각 PMV 온열환경에 해당 되는 점수를 평균값으로 계산하여 도출하였다.

통계적 유의성을 확인하기 위해 획득된 모든 데이터들을 대상으로 Shaprio-Wilk 정규성 검정을 수행하였다. PMV 온열환경에 따른 HRV 변수들과 온열 쾌적성의 차이를 확인하기 위해 일원배치분산분석(ANOVA)을 수행하였고, Tukey 사후 검정을 수행하였다. 또한 HRV 변수들과 온열 쾌적성 점수 간의 상관성을 확인하기 위해 Min-Max Normalization을 수행하여 0과 1사이의 동일 척도로 변환한 후 상관분석을 수행하였다. 모든 통계분석은 SPSS (Statistical Package for the Social Sciences software, versions 12.0, USA)를 통해 분석하였으며, 모든 통계적 유의수준을 α = 0.05로 설정하였다.

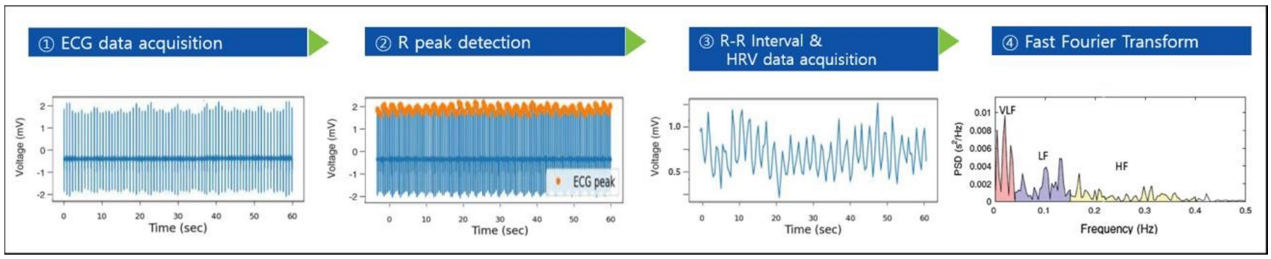

Figure 6. HRV data analysis process

3. Results

3.1 Results of CSV analysis

실험 참여자 20명의 HRV 데이터(RMSSD, SDNN, LF/HF ratio)의 정규성 검정 수행 결과, 모두 정규성을 만족하였다(p > 0.05). PMV의 변화에 따른 실험 참여자의 CSV 분석 결과, PMV (0) 환경에서 0.4±0.58로 가장 높았으며, PMV (-1) 환경에서 -0.4±0.58, PMV (+1) 환경에서 -0.85±0.57, PMV (-2) 환경에서 -1.1±0.54, PMV (+2) 환경에서 -1.4±0.58의 순서로 높게 나타났다(Table 3). 5가지 수준의 PMV에 따른 CSV의 일원배치분산분석(ANOVA) 결과 통계적으로 유의한 차이를 보였다(p < 0.05). Tukey 사후분석 결과 PMV (0) 환경이 PMV (-1) 환경, PMV (-2), PMV (+1) 환경, PMV (+2) 환경 보다 CSV 점수가 높았으며, PMV (-1) 환경이 PMV (+2) 환경 보다 CSV 점수가 높았다 (Figure 7).

Table 3. Results of an ANOVA analysis of CSV according to PMV changes

Division		CSV				
		N	Mean	SD	*F*	*p*
PMV	-2	20	-1.1	0.54	9.162	0.000
	-1	20	-0.4	0.58		
	0	20	0.4	0.58		
	+1	20	-0.85	0.57		
	+2	20	-1.4	0.58		

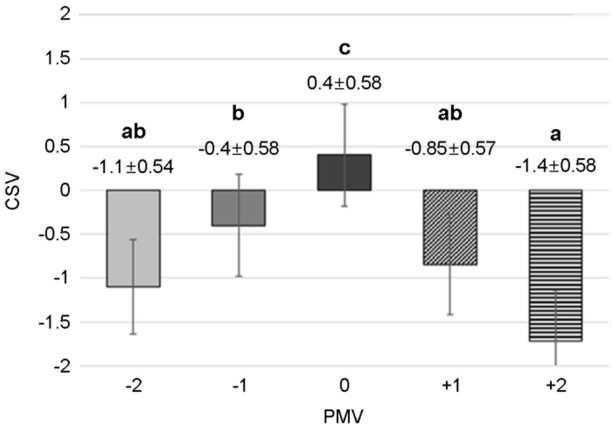

Figure 7. CSV Results according to PMV changes

3.2 Results of HRV analysis

PMV 기반 온열환경 변화에 따른 RMSSD 분석 결과, PMV (0) 환경에서 18.25±7.48로 가장 높았으며, PMV (-1) 환경에서 15.21±6.26, PMV (-2) 환경에서 13.32±4.75, PMV (+1) 환경에서 12.90±4.61, PMV (+2) 환경에서 11.89±3.42 순서로 높게 나타났다(Table 4). 5가지 수준의 PMV에 따른 RMSSD의 일원배치분산분석(ANOVA) 결과 통계적으로 유의한 차이를 보였다(p < 0.05). Tukey 사후분석 결과 PMV (0) 환경이 PMV (+1) 환경, PMV (+2) 보다 RMSSD가 높게 나타났다(Figure 8).

Table 4. Results of an ANOVA analysis of RMSSD according to PMV changes

Division		RMSSD				
		N	Mean	SD	F	p
PMV	-2	20	13.32	4.75	3.972	0.005
	-1	20	15.21	6.26		
	0	20	18.25	7.48		
	+1	20	12.90	4.61		
	+2	20	11.89	3.42		

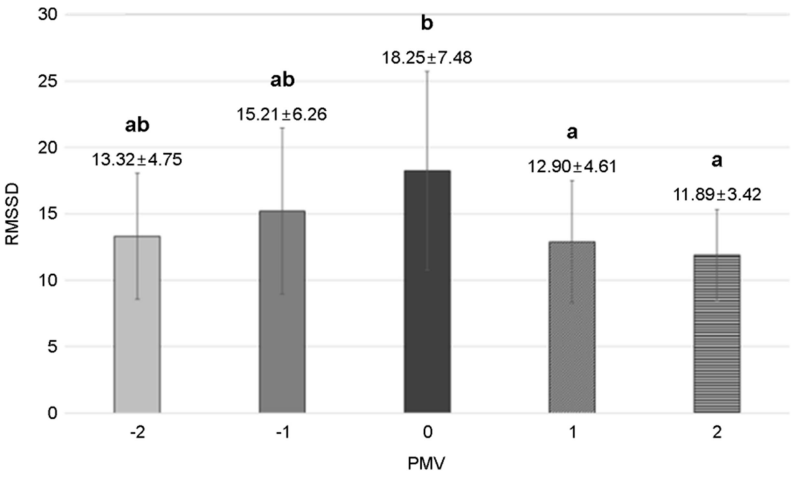

Figure 8. RMSSD Results according to PMV changes

SDNN 분석 결과, PMV (0) 환경에서 24.82±6.42로 가장 높았으며, PMV (-1) 환경에서 23.15±7.27, PMV (-2) 환경에서 22.30±6.64, PMV (+1) 환경에서 20.74±19.8, PMV (+2) 환경에서 19.80±.66 순서로 높게 나타났다(Table 5). 5가지 수준의 PMV에 따른 SDNN의 일원배치 분산분석(ANOVA) 결과 통계적으로 유의한 차이가 나타났다($p < 0.05$). Tukey 사후분석 결과 PMV (0) 환경이 PMV (+2) 환경보다 SDNN이 높게 나타났다(Figure 9).

Table 5. Results of an ANOVA analysis of SDNN according to PMV changes

Division		SDNN				
		N	Mean	SD	*F*	*p*
PMV	-2	20	22.30	6.64	2.385	0.047
	-1	20	23.15	7.27		
	0	20	24.82	6.42		
	+1	20	20.74	5.11		
	+2	20	19.80	3.66		

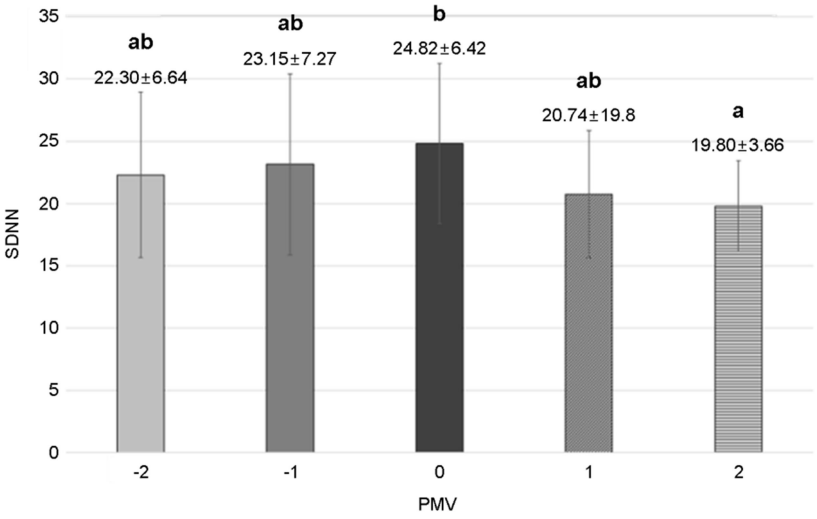

Figure 9. SDNN Results acording to PMV canges

PMV의 변화에 따른 실험참여자의 LF/HF ratio 분석 결과, PMV (1) 환경에서 1.63±0.61로 가장 높았으며, PMV (+2) 환경에서 1.62±0.6, PMV (-2) 환경에서 1.56±0.5, PMV (-1) 환경에서 1.52±0.4, PMV (0) 환경에서 1.43±0.42의 순서로 높게 나타났다(Figure 10). 5가지 수준의 PMV에 따른 LF/HF ratio의 일원배치분산분석(ANOVA) 결과 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다(Table 6).

Table 6. Results of an ANOVA analysis of LF/HF ratio according to PMV changes

Division		LF/HF ratio				
		N	Mean	SD	*F*	*p*
PMV	-2	20	1.56	0.50	0.473	0.755
	-1	20	1.52	0.40		

Table 6. Results of an ANOVA analysis of LF/HF ratio according to PMV changes (Continued)

Division		LF/HF ratio				
		N	Mean	SD	*F*	*p*
PMV	0	20	1.43	0.42	0.473	0.755
	+1	20	1.63	0.61		
	+2	20	1.62	0.60		

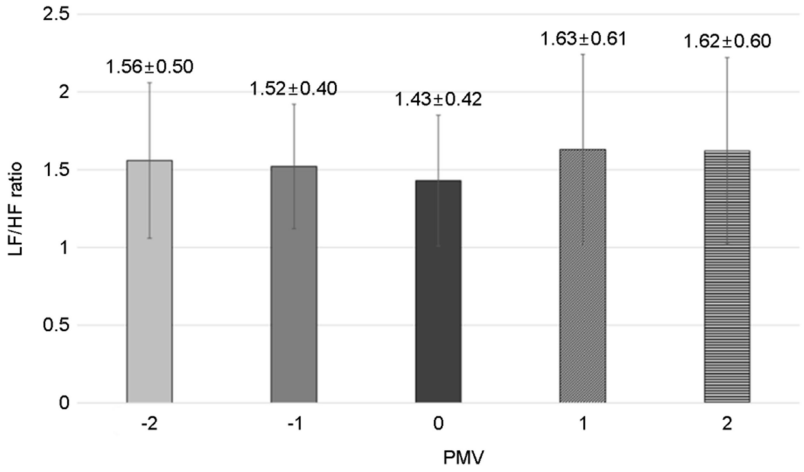

Figure 10. LF/HF ratio 5esults according to PMV changes

3.3 Results of correlation analysis between HRV and CSV

먼저 HRV 변수들간 상관성을 분석한 결과, LF/HF ratio와 RMSSD는 음의 상관관계를 나타냈다(R^2=-0.57, p < 0.05). 또한 LF/HF ratio와 SDNN도 음의 상관관계를 나타냈으며(R^2=-0.39, p < 0.05), RMSSD와 SDNN은 양의 상관관계를 나타냈다(R^2=0.64, p < 0.05).

HRV 변수들과 온열 쾌적성(CSV) 간의 상관성을 분석한 결과, LF/HF ratio와 CSV 간의 음의 상관관계가 확인되었고(R^2=-0.37, p < 0.05), RMSSD와 CSV 간의 양의 상관관계가 확인되었다(R^2=0.62, p < 0.05). 또한 SDNN과 CSV 간의 양의 상관관계도 확인되었다(R^2=0.42, p < 0.05) (Table 7).

Table 7. Correlation analysis between HRV and CSV

	LF/HF ratio	RMSSD	SDNN	CSV
LF/HF ratio	–			
RMSSD	-.57*	–		
SDNN	-.39*	.64*	–	
CSV	-.37*	.62*	.42*	–

*p < .05

4. Discussion

연구 결과에 따른 CSV 분석 결과 PMV (0)인 환경에서 PMV (-2), PMV (+2)로 갈수록 낮아지는 형태를 보였다. PMV (0)은 0.4점으로 '대체로 편안하다'와 '보통' 사이에 해당되어 비교적 높은 쾌적성을 보였고, PMV (0)을 제외한 나머지 온열환경에서는 쾌적성에 대해 부정적으로 평가하였다. 온열환경에 따른 심박변이도와 온열 쾌적성을 분석한 Jo (2016)의 연구에 따르면, 본 연구의 PMV (0) 환경에 해당되는 27.5℃에서 온열 쾌적성 점수가 '대체로 편안하다'와 '보통' 사이에 해당되어 본 연구의 결과와 유사한 결과를 보고하였다. 또한 본 연구의 PMV (0)에 해당하는 27.5℃에서 PMV (-2)와 유사한 17.5℃, PMV (+2) 유사한 36℃ 갈수록 온열 쾌적성 점수가 감소하는 유사한 형태를 띄었으며, 점수의 범위도 유사하였다. 다만 본 연구의 PMV (-1)에 해당하는 22.5℃에서는 다른 양상을 보였다. 이전 연구에서는 22.5℃에서 온열 쾌적성이 가장 높았지만, 본 연구에서는 PMV (0)에 해당하는 27.5℃에서 온열 쾌적성이 가장 높았다는 점에서 차이가 있었다. 이는 실험복인 의복량과 나사체결 및 분리 작업의 대사량에서 비롯된 차이로 판단된다.

심박변이도 분석 결과 시간 영역의 RMSSD와 SDNN은 유사한 경향을 보였는데, PMV (0)에서 가장 높게 나타났으며, PMV (-2)와 PMV (+2)에 가까워질수록 감소하는 경향이 나타났다. RMSSD는 부교감신경계의 활성도를 반영하여, 값이 클수록 이완상태를 의미하고, 작아질수록 스트레스, 공포, 불안한 상태임을 의미한다(Oh adn Park, 2020). SDNN은 값이 큰 경우 심박변동 신호가 불규칙함을 의미하며, SDNN의 감소는 스트레스에 대한 대처 능력의 상실을 뜻한다(Kim et al., 2005). 중립환경인 PMV (0) 환경에서 시원한 환경인 PMV (-2), 따듯한 환경인 PMV (+2)에 가까워질수록 RMSSD와 SDNN이 감소하여 스트레스가 증가하고 스트레스 대처 능력이 감소한 것으로 해석할 수 있다.

주파수 영역의 LF/HF ratio의 경우, PMV (0) 환경에서 가장 낮게 나타났으며, PMV (-2)와 PMV (+2)에 가까워질수록 증가하는 경향이 나타났다. LF/HF ratio는 장기 측정 시 교감신경계의 활성도를 반영하는 LF와 부교감신경계의 활성도를 반영하는 HF를 나눈 값으로, 교감신경 활성도에 비례하며, 부교감신경 활성도에 반비례하는 특성을 가지고 있다(Billman, 2013). 따라서 스트레스 반응 시 LF/HF ratio는 증가하는 경향을 보인다. 중립환경인 PMV (0) 환경에서 시원한 환경인 PMV (-2), 따듯한 환경인 PMV (+2)에 가까워질수록 LF/HF ratio가 증가하는 경향을 보였지만, 통계적으로 유의하지 않았고, PMV (+1)의 LF/HF ratio의 값이 가장 크게 나타난 것으로 보아 PMV 온열환경에 따라 LF/HF ratio가 변화가 유의하지 않은 것으로 해석할 수 있다.

심박변이도 변수들 간의 상관분석 결과, LF/HF ratio가 증가할수록, RMSSD와 SDNN은 감소하는 형태를 보였고, RMSSD가 감소할수록 SDNN 또한 감소하는 형태를 보였다. 심박변이도 변수들과 CSV 간 상관분석 결과, LF/HF ratio가 증가할수록, 또는 RMSSD와 SDNN이 감소할수록 CSV는 감소하는 형태를 보였다. 즉 LF/HF ratio와 RMSSD, SDNN은 반비례 형태를 나타냈고, CSV와 LF/HF ratio는 비례관계, CSV와 RMSSD, SDNN은 반비례관계를 보였다. 중립환경인 PMV (0)에서 시원한 환경인 PMV (-2), 따듯한 환경인 PMV (+2)에 가까워질수록 스트레스와 스트레스 대처 능력이 감소하고, 온열 쾌적성이 감소한 것으로 해석할 수 있다.

5. Conclusion

본 연구는 PMV 기반의 각기 다른 온열환경이 작업자의 온열 쾌적성과 심박변이도에 유의한 영향을 미치는지 확인하며, 산업현장에서의 최적의 온열환경을 도출하고자 하였다. PMV 모델을 통해 PMV (-2, -1, 0, 1, 2) 5가지의 온열환경을 구성하였고, 각 온열환경에서 나사체결 및 분리 과업을 수행하였다. CSV를 활용하여 작업자의 온열 쾌적성을 평가하였으며, ECG를 활용하여 심박변이도 데이터를 측정하였다. 평가 데이터들을 분석한 결과, 중립환경인 PMV (0)에서 따듯한 환경인 PMV (+2)로 변화할수록 작업자의 스트레스는 증가하는 경향을 확인하였고, 온열 쾌적성은 감소하는 경향을 확인하였다. 또한 중립환경인 PMV (0)에서 시원한 환경인 PMV (-2)로 변화할수록 작업자의 스트레스는 증가하는 경향을 보였고, 온열 쾌적성은 감소하는 경향을 확인하였다. 추가적으로 시원한 환경인 PMV (-2)와 조금 시원한 환경인 PMV (-1) 보다 조금 따듯한 환경인 PMV (+1)과 따듯한 환경인 PMV (+2)에서 작업자의 스트레스는 높게 나타났고, 온열 쾌적성은 낮게 나타났다. 따라서 본 연구 결과는 온열환경에 의해 작업자의 온열 쾌적성과 심박변이도가 변화할 수 있음을 시사하였다. 또한 심박변이도 변수들과 CSV 간의 상관분석 결과, 유의한 상관관계를 보였다. 이것은 작업자의 온열 쾌적성으로부터 심박변이도를 추정하는 것이 가능하며, 또한 심박변이도로부터 작업자의 온열 쾌적성을 추정하는 것이 가능함을 의미한다.

본 연구 결과를 통해 산업현장의 온열환경 구성 시 정신적 스트레스가 낮으며, 온열 쾌적성이 높은 PMV (0)에서 PMV (-1) 사이의 작

업환경이 적절할 것으로 사료된다. 또한 시원한 환경인 PMV (-2) 보다 따듯한 환경인 PMV (+2)에서 온열 쾌적성이 더 유의하게 낮으며, 정신적 스트레스가 유의하게 증가한 것으로 보아 동적인 동작을 수행하는 산업현장 작업자들에게는 PMV (-2)에 가까운 시원한 환경이 PMV (+2)에 가까운 따듯한 환경보다 적합할 수 있음을 시사한다.

본 연구는 PMV (-2, -1, 0, 1, 2) 5가지 수준의 온열환경을 대상으로 실험적 연구를 진행하였다. 하지만, PMV는 -3부터 3까지 여러 가지 단계로 나타날 수 있기 때문에, 추후 연구에는 PMV의 설정 범위를 다양화하여 연구를 진행하는 것이 필요하다. 또한 생리적 측정 방법으로 심전도(ECG)만을 활용하였기 때문에 피부전도도(GSR), 뇌전도(EEG) 등 다양한 생리적 측정 방법들과의 조합을 통해 연구의 신뢰성을 높이는 것이 필요하다.

본 연구는 산업현장의 적절한 작업환경 구성을 위한 참고자료로 활용될 수 있으며, PMV 기반의 온열환경 구축 방법과 온열환경에 따른 생리적 평가, 온열 쾌적성 평가를 수행하기 위한 참고자료로 활용될 수 있다.

Acknowledgement

This work was funded by grants from Korea Institute of Industrial Technology (Project No. EO220001).

References

Al-Shargie, F., Kiguchi, M., Badruddin, N., Dass, S.C., Hani, A.F.M. and Tang, T.B., Mental stress assessment using simultaneous measurement of EEG and fNIRS, *Biomedical Optics Express*, 7(10), 3882-3898, 2016.

ANSI/ASHRAE Standard 55-2020, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, ASHRAE Atlanta, 2013.

Billman, G.E., The LF/HF ratio does not accurately measure cardiac sympatho-vagal balance, *Frontiers Media SA*, 26, 2013.

Castaldo, R., Melillo, P., Bracale, U., Caserta, M., Triassi, M. and Pecchia, L., Acute mental stress assessment via short term HRV analysis in healthy adults: A systematic review with meta-analysis, Biomedical Signal Processing and Control, 18, 370-377, 2015.

Choi, E.J., Cho, H.U., Cho, J.H. and Moon, J.W., Analysis of Indoor Thermal Comfort reflecting Dynamic Clothing Insulation in diverse Climate Zone, *KIEAE Journal*, 20(5), 171-177, 2020.

Choi, J.H., Loftness, V. and Lee, D.W., Investigation of the possibility of the use of heart rate as a human factor for thermal sensation models, *Building and Environment*, 50, 165-175, 2012.

Cui, J., Wilson, T.E. and Crandall, C.G., Baroreflex modulation of muscle sympathetic nerve activity during cold pressor test in humans, *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 282(5), H1717-H1723, 2002.

Dahlan, N.D. and Gital, Y.Y., Thermal sensations and comfort investigations in transient conditions in tropical office, *Applied Ergonomics*, 54, 169-176, 2016.

Fanger, P.O., Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering, Danish Technical Press, 1970.

Gao, J., Wang, Y. and Wargocki, P., Comparative analysis of modified PMV models and SET models to predict human thermal sensation in naturally ventilated buildings, *Building and Environment*, 92, 200-208, 2015.

Houghton, F.C. and Yaglou, C.P., Determining of the comfort zones with further verification of effective temperature within this zone, *ASHVE Transactions*, 29(9), 515-536, 1923.

ISO 'International Standard 7730, Moderate Thermal Environments - Determination of the PMV and PPD Indices and Specification of the conditions of Thermal Comfort'. Geneva, International Standards Organization, 2005.

ISO 'International Standard 8996, Ergonomics of the thermal environment - Determination of metabolic rate. Geneva, International Standards Organization, 2004.

Jo, H.H., A Study of the Bioelectrical Signals and Subjective Response in Changing from Unpleasant to Pleasant Temperatures, *The Magazine of the Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea*, 45(12), 28-32, 2016.

Kim, H.S., Kim, H.T., Kim, H.S., Kuwak, W.T. and Kim, J.H., A Study on the Effects of PMV Thermal Environment and Illumination on Visual Performance, *Korean Sociery for Emotion and Sensibility*, 17(2), 55-62, 2014.

Kim, B.S., Lim, D.H., Jeon, Y.C., Shin, J.W., Min, Y.K. and Min, B.C., The Analysis of Emotional Responses According to Index of Predicted Mean Vote (PMV) in Air Heating and Cooling Conditions, *Korean Sociery for Emotion and Sensibility Spring Conference*, 77-78, 2011.

Kim, B.S., Min, Y.K., Min, B.C. and Kim, J.H., The Changes of Psychological and Physiological Emotional Responses According to Change of the Index of Predicted Mean Vote (PMV) due to Air Conditioning Types, *Korean Sociery for Emotion and Sensibility*, 14(4), 645-652, 2011.

Kim, B.S., The Characteristics of Physical Environment Factors According to Comfortable Environment Classification Based on the Thermal Comfort Sensation, *Journal of the Ergonomic Society of Korea*, 392-395, 2013.

Kim, W., Woo, J.M. and Chae, J.H., Heart Rate Variability in Psychiatry, *Korean NeuroPsychiatric Assoclation*, 44(2), 176-184, 2005.

Lee, B.R., Kim, J.H., Kim, K.S., Kim, H.J. and Lee, K.Y., Assessment of Thermal Comfort in a General Hospital in Winter Using Predicted Mean Vote (PMV), *Korean Society of Environmental Health*, 41(6), 389-396, 2015.

Li, D., Menassa, C.C. and Kamat, V.R., A personalized HVAC control smartphone application framework for improved human health and well-being, *Computing in Civil Engineering*, 2017, 82-90, 2017.

Nath, R.K., Thapliyal, H., Caban-Holt, A. and Mohanty, S.P., Machine learning based solutions for real-time stress monitoring, *IEEE Consumer Electronics Magazine*, 9(5), 34-41, 2020.

Oh, J.Y. and Park, H.K., Analysis of Previous Research on Heart Rate Variability and Stress Responseby Environmental Stimulation, *The Korean Society of Science & Art*, 38(2), 231-241, 2020.

Pao, S.L., Wu, S.Y., Liang, J.M., Huang, I.J., Guo, L.Y., Wu, W.L., Liu, Y.G. and Nian, S.H., A Physiological-Signal-Based Thermal Sensation Model for Indoor Environment Thermal Comfort Evaluation. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(12), 7292, 2022.

Tarvainen, M.P., Niskanen, J.P., Lipponen, J.A., Ranta-Aho, P.O. and Karjalainen, P.A., Kubios HRV-heart rate variability analysis software,

Computer Methods and Programs in Biomedicine, 113(1), 210-220, 2014.

Tanabe, S., Thermal Comfort Requirements in Japan, Ph.D. Thesis, Waseda University, Tokyo, Japan, 1998.

Wang, X., Li, D., Menassa, C.C. and Kamat, V.R., Investigating the neurophysiological effect of thermal environment on individuals' performance using electroencephalogram, *Computing in Civil Engineering 2019*: Data, Sensing, and Analytics: American Society of Civil Engineers Reston, VA, 598-605, 2019.

Witterseh, T., Wyon, D.P. and Clausen, G., The effects of moderate heat stress and open-plan office noise distraction on SBS symptoms and on the performance of office work, *Indoor Air*, 14(8), 30-40, 2004.

Author listings

Young Sub Shin: tls9094@koreatech.ac.kr
Highest degree: MS, Department of Industrial Design Engineering, KOREATECH
Position title: Researcher, Department of Digital Health Care R&D, Korea Institute of Industrial Technology
Areas of interest: Ergonomics, Safety & Health

Jae Soo Hong: jshong94@kitech.re.kr
Highest degree: Ph.D. candidate, Department of Biomedical Engineering, Korea University
Position title: Principal Researcher, Department of Digital Healthcare R&D, Korea Institute of Industrial Technology
Areas of interest: Digital Healthcare Device, Silver Product

Dong An Cha: cdongan@kitech.re.kr
Highest degree: Ph.D., Department of Mechanical and Information Engineering, Seoul University
Position title: Principal Researcher, Department of Carbon Neutral Technology R&D, Korea Institute of Industrial Technology
Areas of interest: HVAC System, Heat exchange

Jeong Bae Ko: duckbaeya@kitech.re.kr
Highest degree: Ph.D. candidate, Department of Industrial Engineering, Sungkyunkwan University
Position title: Researcher, Department of Digital Healthcare R&D, Korea Institute of Industrial Technology
Areas of interest: Physical ergonomics, Data Science

Kwang Tae Jung: ktjung@koreatech.ac.kr
Highest degree: Ph.D., Department of Industrial Engineering, KAIST
Position title: Professor, Department of Industrial Design Engineering, KOREATECH
Areas of interest: Ergonomic design, UI/UX