



ISSN 1229-8565 (print) ISSN 2287-5190 (on-line)  
 한국지역사회생활과학회지 34(2): 201~214, 2023  
 Korean J Community Living Sci 34(2): 201~214, 2023  
<http://doi.org/10.7856/kjcls.2023.34.2.201>

## 여름철 실내외 환경온에서 휴식과 운동 시 전신 한서감은 직장온이 아닌 손목 피부온과 관련된다

노 상 현 · Maria Stenkina · Syifa Salsabila<sup>1)</sup> · 이 소 영<sup>2)</sup> · 이 흥 순<sup>2)</sup> · 김 상 규<sup>2)</sup> · 이 주 영<sup>†3),4),5)</sup>

서울대학교 의류학과 박사과정 · 서울대학교 의류학과 석사<sup>1)</sup> · 삼성전자 종합기술원 수석연구원<sup>2)</sup> ·

서울대학교 의류학과 교수<sup>3)</sup> · 서울대학교 생활과학연구소 연구원<sup>4)</sup> ·

차세대융합기술연구원 그래핀융합기술연구센터 부센터장<sup>5)</sup>

### Thermal Sensation is Related to Wrist Temperature, Not Rectal Temperature, during Rest and Exercise in Indoor and Outdoor Environments in Summer

Sang-Hyun Roh · Maria Stenkina · Syifa Salsabila<sup>1)</sup> · Soyoung Lee<sup>2)</sup> · Hong Soon Rhee<sup>2)</sup> ·

Sang Kyu Kim<sup>2)</sup> · Joo-Young Lee<sup>†3),4),5)</sup>

Ph.D Course, Dept. of Fashion and Textiles, Seoul National University, Seoul, Korea

M.S, Dept. of Fashion and Textiles, Seoul National University, Seoul, Korea<sup>1)</sup>

Principal Researcher, Samsung Advanced Institute of Technology (SAIT), Samsung Electronics, Suwon, Korea<sup>2)</sup>

Professor, Dept. of Fashion and Textiles, Seoul National University, Seoul, Korea<sup>3)</sup>

Researcher, Research Institute of Human Ecology, Seoul National University, Seoul, Korea<sup>4)</sup>

Deputy Director, Graphene Research Center for Convergence Technology, Advanced Institute of

Convergence Technology, Suwon, Korea<sup>5)</sup>

#### ABSTRACT

This study examines the association between peripheral skin temperature and rectal temperature or thermal sensation during rest and exercise in transient cool and hot environments. Two experimental conditions with differing air temperature transients (20°C and 30°C) were compared: Condition 1 (20°C rest, 30°C rest, 30°C exercise, 30°C recovery, 20°C rest, and 25°C rest and lunch); Condition 2 (30°C rest, 20°C rest, 20°C exercise, 20°C recovery, 30°C rest, and 25°C rest and lunch). The rectal and wrist temperatures were monitored for six hours, along with heart rate and subjective responses from eight male subjects. The following results were obtained after analysis: (1) The wrist temperature was unrelated to the rectal temperature, but showed significant association with overall thermal sensation

This research was supported by the Basic Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the MIST (2022R1A4A5034046) and Samsung Advanced Institute of Technology (SAIT).

Received: 2 May, 2023 Revised: 24 May, 2023 Accepted: 31 May, 2023

†Corresponding Author: Joo-Young Lee Tel: 82-2-880-8746 E-mail: leex3140@snu.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

( $P < 0.01$ ). Higher wrist temperature indicates a warmer sensation. (2) During exercise, the rectal temperature was affected by the air temperature to which subjects were exposed prior to the exercise, rather than the air temperature during the exercise. (3) Wrist temperature during exercise was decreased under both experimental conditions, but increased during recovery, irrespective of the air temperatures. (4) Wrist skin blood flow and heart rate showed no differences between the two experimental conditions. (5) Rectal temperature was significantly related to body mass index (BMI), but not total body fat. Taken together, these results indicate that during summer, wrist skin temperature reflects the overall thermal sensation and not the core body temperature during exercise and rest in indoor and outdoor environments.

**Key words:** wearable technologies, core body temperature, wrist temperature, body mass index, thermal sensation

## I. 서론

세계적인 코로나 범유행과 함께, 최근 웨어러블 테크놀로지 기술의 발전으로 비침습적 생체신호를 통해 체온을 추정하고자 하는 연구들이 이루어지고 있다(Teunissen et al. 2011; Niedermann et al. 2014; Falcone et al. 2021). 항온동물인 인간의 체온(body temperature)은  $36.5^{\circ}\text{C}$ 로 조절되는데, 이는 심부온과 피부온의 일정 비율로 계산된다. 심부온은 체온조절 중추가 있는 뇌의 온도를 기준으로, 인체 열저장량(body heat storage)이 0인 경우, 즉 인체 산열량과 외기로의 열손실량이 균형을 이루는 경우, 심부온은  $37^{\circ}\text{C}$ , 평균피부온은  $33^{\circ}\text{C}$ 이다(Simon et al. 1992). 코로나 바이러스 감염과 같이 감염성 질환에 걸린 경우, 혹은 여름철 과도한 실외 육체 작업으로 고체온증이 발생한 경우, 진단 기준은 체온이나 피부온이 아닌 '심부온'이다(The Commission for Thermal Physiology of the International Union of Physiological Sciences 2003). 심부온이란 이론적으로 뇌의 온도를 의미하나, 일상생활 중 사람의 뇌 온도를 실측하기는 쉽지 않다. 따라서, 뇌 온도를 가장 잘 반영하는 인체 내부의 온도로 고막온, 식도온, 위내온, 또는 직장온 등이 사용되어

왔다(Taylor et al. 2014). 그러나, 고막이나 식도, 위, 직장 내부의 온도 또한 실외 작업자들이나 야외 활동을 하는 일반 사람들을 대상으로 직접 측정하는 것 또한 현실적이지 않다. 이에 이러한 부위들의 온도를 대체할 수 있는 비침습적 측정 항목들에 대한 관심이 증가하고 있으며, 웨어러블 테크놀로지의 기술과 함께 손목이나 손, 손가락, 팔, 얼굴 등의 피부에서 심부온을 비침습적으로 추정할 수 있는 알고리즘 개발이 시도되고 있다(Taylor et al. 1995; Kitamura et al. 2010).

피부층을 포함하는 인체 외각층(thermal shell)은 외부 환경에 노출되는 경우 직접적인 피드백을 보이는 인체 영역으로 정의되기 때문에, 심부온에 비해 변화 폭이 크다(Nadel et al. 1971). 환경온도에 의한 변화 폭이 큰 피부온을 기반으로 비교적 변화 폭이 작은 심부온을 정확히 예측하기는 쉽지 않은 것으로 여겨지는 반면(Pryor et al. 2012), 피부온은 고온 또는 저온 환경에 의해 인지되는 한서감 또는 온열 쾌적감 등의 주관감과 상관관계를 보이며 유의한 예측 지표로 활용될 수 있다고 알려져 왔다(Gagge et al. 1967; Takada et al. 2013). 특히, 전신 한서감과 심박수를 바탕으로 인체 열부담을 추정하기 위한 새로운 지표(Perceptual Strain Index, PeSI)도 개발되어 이

의 타당도가 인정되었으며(Tikusis et al. 2002), 운동 중 심박수와 강한 양의 상관을 보인다고 알려진 운동자각도(Ratings of Perceived Exertion, RPE)가 전신 온열 쾌적감과 강한 양의 상관을 보인다는 연구(Aoyahi et al. 1998)는 결국 한서감이나 온열 쾌적감과 같은 주관적 반응에 기반한 전신의 열부담 추정 가능성을 시사한다고 볼 수 있다.

이처럼 서열 스트레스에 노출된 인체의 열부담 혹은 심부온 추정을 위해, 피부온과 심박수와 같은 비침습적 항목 뿐만 아니라 전신의 한서감이나 쾌적감과 같은 정신심리학적 변수들을 사용하는 연구들도 지속적으로 보고되어 왔다. Kim & Lee (2016)는 고온 환경(29.5~35.5°C) 조건에서 소방복을 착용한 소방관의 운동 중 심부온을 추정하기 위해 인체 12부위의 피부온과 직장온 간의 상관성을 분석하였고, 그 결과 이마와 가슴 부위 피부온이 직장온의 변화를 가장 잘 반영하고 있음을 확인하였다. 또한, Niedermann et al.(2014)은 저온(10°C)과 고온(30°C) 환경에서 일상복 수준의 의복 착용 시 피부온과 피부열류량이 직장온 추정에 사용될 수 있음을 시사하였다. Xu et al. (2013)에 따르면, 세 가지 환경(25°C/50%RH, 35°C/70%RH, 42°C/20%RH)에서 전투복(1.56 clo) 착용자의 가슴 및 등 부위 피부온과 피부열류량은 직장온 예측에 유의하였으나, 이마온과 이마에서의 열류량은 땀으로 인해 직장온 예측에 적합하지 않을 수 있음을 보고하였다. 일상 운동복과 소방용 개인보호복을 착용하고 일정 강도의 활동을 수행하는 환경에서 피부온과 심박수를 기반으로 한 직장온 예측모델이 개발되기도 하였다(Eggenberger et al. 2018).

현재 생체정보 모니터링을 위한 웨어러블 기술이 가장 보편적으로 적용된 상용 제품군은 스마트워치이다. 손목형 시계 착용만으로 맥박이나 피부

혈류량, 손목의 온도, 손목 움직임 등에 대한 정보를 얻을 수 있기에 생체정보 모니터링을 위하여 스마트워치를 활용하는 것은 매우 실용적이라 볼 수 있다. 그러나, 손목 피부의 혈류량이나 손목 피부온은 피부의 혈관 확장과 수축 뿐만 아니라, 발한에 의한 증발열 손실, 기류 등에 영향을 받기 때문에 심부온 추정에 타당한 부위인지를 확인할 필요가 있다(Roberts et al. 1977; Baker 2019). 나아가 많은 선행연구들이 고온 환경에서 소방복이나 전투복과 같은 개인보호복을 착용한 환경에서 인체에 축적된 열부담을 추정하고자 수행되어 온 반면, 여름철 일상적인 스포츠 레저 활동을 가정한 연구들은 활발히 이루어지지 않았다. 여름철 냉방이 잘 이루어지고 있는 실내에서 더운 실외로 이동하는 경우, 혹은 그 반대인 경우와 같이 여름철 스마트워치를 착용하는 도시인들이 실외 스포츠를 즐기는 동안 경험할 수 있는 일상적 도시 환경 조건에서, 스마트워치를 통해 얻어질 수 있는 비침습적 정보들을 통해 심부온의 변화를 추정할 수 있는지를 살펴본 국내외 연구는 거의 없는 실정이다.

이에 본 연구에서는 우리나라 여름철 실내 냉방 환경에서 더운 실외로 이동하여 활동을 지속하는 경우, 반대로 더운 실외에서 실내로 이동하여 활동을 이어 가는 경우, 직장온과 전신의 한서감, 손목 피부온 간의 관련을 분석하여, 손목 피부온 정보를 바탕으로 심부온, 즉, 인체 열저장량 수준을 추정할 수 있는지 평가하였다. 본 연구의 가설은 다음과 같다. 첫째, 손목 피부온은 직장온과 유의한 상관성이 존재할 것이다. 둘째, 손목 피부온은 전신 한서감과 유의한 상관성이 존재할 것이다. 추가적으로 체질량요소 및 체지방율과 같은 체형 요소들이 여름철 실내의 온열 환경에 노출되어 휴식과 운동을 수행하는 경우 직장온 증감과 유의한 관련이 있는

**Table 1.** Anthropometric characteristics of subjects enrolled in the present study

Subject #	Age (y)	Height (cm)	Body weight (kg)	Body surface area, BSA (m <sup>2</sup> )	Total body fat (%)	Body mass index (BMI)	Body shape*
1	24	178.5	57.7	1.76	17.3	18.1	Lean
2	20	171.0	55.3	1.68	15.8	19.0	Slightly lean
3	27	168.0	65.5	1.78	14.7	23.2	Normal
4	25	173.4	71.4	1.89	11.0	23.7	Normal
5	27	171.5	71.4	1.87	21.5	24.3	Normal
6	23	170.0	72.9	1.88	27.3	25.2	Normal
7	26	171.2	77.0	1.93	24.1	26.3	Slightly overweight
8	25	184.6	113.8	2.41	29.7	33.4	Overweight
Mean	24.6	173.5	73.1	1.90	20.2	24.1	
SD	2.3	5.4	18.1	0.22	6.5	4.7	

\*Body shape was classified based on BMI: Lean (BMI < 19.0), Slightly lean (19 ≤ BMI < 21.0), Normal (21.0 ≤ BMI < 26.0), Slightly overweight (26.0 ≤ BMI < 30.0), Overweight (30.0 ≤ BMI).

지도 분석하였다. 손목에서 얻을 수 있는 비침습적 생체 정보를 통해 직장온이나 전신의 한서감 정보를 추정할 수 있다면, 여름철 열에 취약한 계층의 고체온증이나 열관련 질환 예방에 효과적으로 활용될 수 있을 것이다.

## II. 연구방법

### 1. 피험자

본 실험에는 건강한 20대 한국인 남성 8인(나이 24.6 ± 2.3세, 키 173.5 ± 5.4 cm, 체중 73.1 ± 18.1 kg, 체질량지수[BMI] 24.1 ± 4.7 kg/m<sup>2</sup>)이 피험자로 참여하였다(Table 1). 본 연구에서는 피험자들의 체질량지수를 고려하여 마른 체형부터 과체중까지 골고루 모집하였다. 피험자들의 체표면적(BSA)은 Lee et al.(2008)의 식으로 계산하였다. 모든 피험자는 실험 참여 전 24시간 동안 음주 및 과격한 운동을 제한하였으며, 실험 시작 2시간 전부터 카페인 섭취 및 식사가 금지되었다. 일주기 리듬의 영향을 최소화하기 위해, 모든 실험은 동일한 시간대에 진행되었다(오전 9:00 ~ 오후 15:00). 모든 피험자는 실험에 참여하기 전 실험 내용에 대한 자세한 설명을 듣고 이해한 후 동

의서에 자발적으로 서명하였다. 본 실험은 서울대학교 연구윤리위원회의 승인을 받았다(IRB #SNU No.2211/004-004).

### 2. 실험과정 및 측정항목

본 연구의 실험 환경은 여름철 스마트워치를 착용하는 도시인의 일상적 실내외 휴식과 운동 상황을 고려하여 설정되었다. 실험의 시나리오는 두 가지로 저온 환경에서 고온 환경으로의 변화(조건 1)와, 고온 환경에서 저온 환경으로의 변화(조건 2)였다. 이는 여름철 냉방이 이루어지는 실내에서 더운 실외로 나가는 경우(조건 1), 혹은 반대로 더운 실외에서 냉방이 이루어지는 실내로 들어오는 경우(조건 2)에 해당한다. 여름철 냉방이 이루어지는 실내 환경으로 기온 20°C, 더운 실외 환경으로 기온 30°C를 설정하였다. 이러한 노출 기온 변화 시나리오 후, 안정 시 열적 평형이 이루어지는 시점을 확인하기 위하여 열적 중성 환경(기온 25°C)에서 충분한 휴식을 하도록 실험 프로토콜을 구성하였다. 인공기후실의 습도 조건은 기온에 의한 영향만을 관찰하기 위해 모두 15 ± 4%RH로 유지되었다. 1회 실험은 총 6시간으로(오전 9:00 ~ 오후 15:00), 트레드밀 위에서 30분의 운동 뿐만 아

나라 식사도 추가하여 음식 섭취가 심부온 및 피부온에 미치는 영향도 분석하였다(Fig. 1). 트레드밀 위에서 30분의 운동은 각 10분씩,  $4 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ,  $6 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ,  $8 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 의 점진적 증가 방식을 적용하여 기온  $30^\circ\text{C}$ 와  $20^\circ\text{C}$  노출 시 운동 강도에 따른 체온조절 반응 차이를 확인하였다(오전 11:00 ~ 11:30). 실험 참여 순서에 의한 영향을 배제하기 위하여 피험자들의 두 가지 실험에 임의 순서로 참여하였다. 모든 피험자는 30분 운동을 종료한 직후인 오전 11:30에 체중을 측정하였고, 탈수를 방지하기 위해 생수 250 ml를 마셨으며, 30분의 휴식기를 가졌다. 모든 피험자들에게는 동일한 점심 식사(약 900 kcal)와 생수 250 ml가 제공되었으며, 기온 변화 시나리오를 적용하는 최초 4시간 동안, 식사의 영향을 배제하기 위하여 열적 중성 환경에서 휴식이 충분히 이루어진 오후 14:00

~ 14:30에 점심 식사를 배정하였다.

인공기후실에서 여섯 시간 노출되는 동안 직장온, 손목 피부온, 손목 혈류량, 심박수, 에너지 대사량, 체중 변화량, 주관감이 측정되었다. 직장온은 전용 서미스터 센서에 일회용 카테테르를 씌운 후 센서에 표시된 깊이(16 cm)까지 스스로 삽입하도록 하였으며, 동일 회사의 무선 데이터 로거를 사용하여 온도를 자동 기록하였다(LT-8A, Gram Corporation, Japan). 손목 피부온은 양쪽 손목의 바깥쪽(손등 방향)에 직장온과 동일한 서미스터 센서 및 데이터 로거를 부착하여 5초 간격으로 연속 기록하였다(LT-8A, Gram Corporation, Japan). 손목 부위의 피부 혈류량은 손목 피부온과 마찬가지로 손목의 바깥쪽에서 1분 간격으로 연속 기록하였다(moorVMS-LDF1, Moor Instruments Inc., UK). 심박수는 가슴에 두르는 벨트 형식의

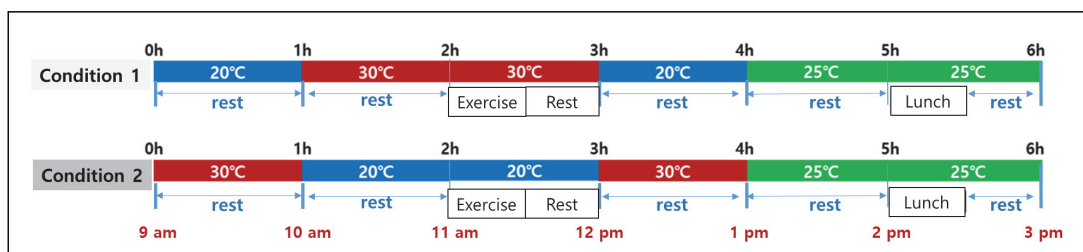


Fig. 1. Experimental protocols of the two temperature conditions for 6 h in a climate chamber.

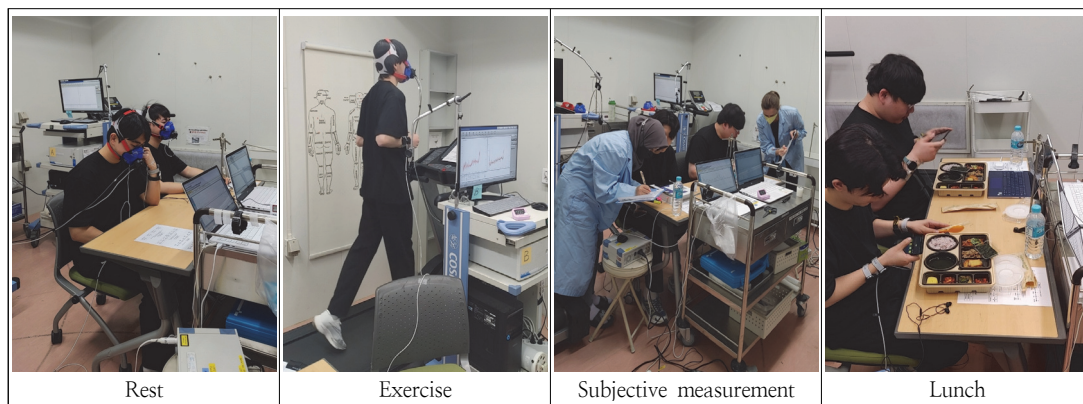


Fig. 2. Experimental photos during rest, exercise, and lunch in a climate chamber.

수신기와 손목에 차는 시계 형식의 무선 데이터 로거를 사용하여 1초 간격으로 연속 기록하였다(H10, Polar Electro, Finland). 운동 전(오전 10:20 ~ 10:50), 운동 중(오전 11:00 ~ 11:30), 운동 후 휴식기(오후 13:30 ~ 14:00) 각 30분씩 에너지 대사량이 측정되었다(Quark CPET, COSMED, ITALY). 체중은 실험 전(오전 8:50), 운동 전(오전 10:50), 운동 후(오전 11:30), 실험 후(오후 15:00)에 인체천칭을 이용하여 각 3회씩 측정하였다(F150S, Sartorius, Germany, resolution 1 g)(Fig. 2). 인공기후실의 환경온습도는 5초 간격으로 연속 기록되었다(TR-72wb, T&D, Japan).

주관감은 휴식 중에는 30분 간격으로, 운동 중에는 15분 간격으로 범주형 척도를 사용하여 측정하였다(Fig. 3). 주관감 중 전신 한서감은 9점 척도(-4:매우 춥다, -3:춥다, -2:서늘하다, -1:약간 서늘하다, 0:보통이다, +1:약간 따뜻하다, +2:따뜻하다, +3:덥다, +4:매우 덥다), 전신의 온열쾌적감은 7점 척도(-3:매우 불쾌하다, -2:불쾌하다, -1:약간 불쾌하다, 0:보통이다, +1:약간 쾌적하다, +2:쾌적하다, +3:매우 쾌적하다), 온열환경 선호도는 7점 척도(-3:많이 더 시원하길 원함, -2: 더 시원하길 원함, -1:조금 더 시원하길 원함, 0:적당함, +1:조금 더 따뜻하길 원함, +2:더 따뜻하길 원함, +3:많이 더 따뜻하길 원함)로 사용하여 측정하였다. 한서감과 온열쾌적감은 0.5점 단위로 응답 가능하도록 척도를 구성하였다. 모든 피험자는 동일한 반팔 티셔츠, 긴 트레이닝 바지, 속옷, 양말, 운동화 (운동화를 제외한 총 의복 중량 688 g)를 착용하였다(Fig. 2).

### 3. 통계분석

모든 결과는 평균과 표준편차(Mean ± SD)로 제시되었다. 호흡 시 산소소비량을 이용한 에너지

대사량은 비단백성 호흡비가 0.8 ~ 0.9 수준일 때 산소 1리터당 생성 열량인 4.85 kcal (4.8 ~ 4.9 kcal)를 곱하여 환산하였다. 두 실험 조건 간 차이는 해당 변수의 특성에 따라 Paired-t test 또는 Wilcoxon test로 검증되었고, Pearson's 상관분석을 이용하여 두 변수들 간 상관계수가 계산되었다. 유의수준은  $p < 0.05$ 로 정하였다.

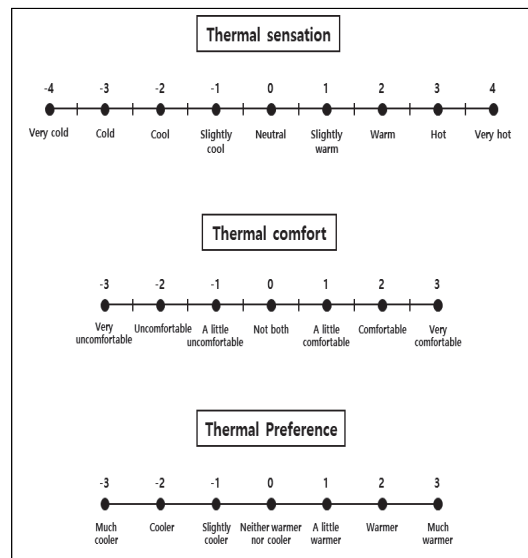


Fig. 3. Categorical scales in the present study: thermal sensation, thermal comfort, and thermal preference.

## III. 결과

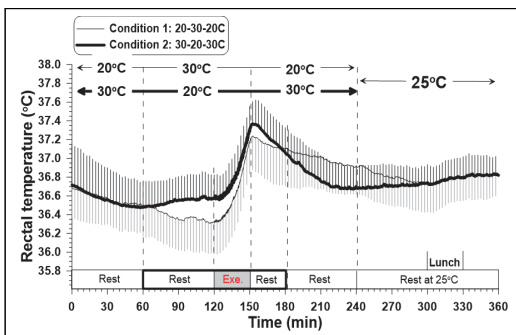
### 1. 직장온

기온 20°C와 30°C에서 안정하는 최초 60분 동안 두 조건 간 직장온에서 유의차는 없었다(Table 2, Fig. 4). 기온 20°C에서 60분 안정 후 기온 30°C로 60분 안정을 이어가는 조건 1의 경우 직장온은 약간 감소하나, 반대로 기온 30°C에서 기온 20°C로 안정을 이어가는 조건 2의 경우 직장온은 상승하여 안정 종료 전 마지막 5분(115-

**Table 2.** Changes in rectal temperature during rest, exercise, and recovery

No.	Condition 1 (20-30-20C)	Condition 2 (30-20-30C)	p value
① Rest (60-65th min)	36.5 ± 0.3	36.5 ± 0.3	N.S.
② Rest (115-120th min)	36.3 ± 0.3	36.6 ± 0.3	0.009
③ Delta Rest (② - ①)	-0.17 ± 0.06	0.08 ± 0.10	0.002
④ Exercise (145-150th min)	37.1 ± 0.3	37.2 ± 0.3	0.058
⑤ Delta Exercise (④ - ②)	0.72 ± 0.15	0.60 ± 0.17	0.110
⑥ Recovery (175-180th min)	37.1 ± 0.4	37.1 ± 0.2	N.S.
⑦ Delta recovery (⑥ - ④)	0.05 ± 0.26	-0.09 ± 0.22	0.095

120th min)의 두 조건 간 직장온은 유의한 차이가 존재하였다(Table 2,  $p < 0.01$ ). 조건 2 (기온 30°C에서 60분 안정 후, 기온 20°C에서 60분 안정, 그리고 기온 20°C에서 30분 운동)에서 운동 중 최고 직장온은, 조건 1에서보다 더 높았다. 즉, 조건 2의 경우 실제 운동이 이루어진 환경 기온이 조건 1보다 10°C 더 낮았음에도 직장온은 더 높게 상승하였다( $p = 0.058$ , Table 2). 30분 운동 종료 후 회복기 직장온 하강도는 통계적 유의차는 나타나지 않았으나, 조건 1보다 조건 2에서 더 큰 경향을 보였다( $p = 0.095$ , Table 2). 열적으로 쾌적한 환경(25°C)에서 점심식사는 직장온 증감에 유의한 영향을 미치지 않았다(Fig. 4). 기온 20 ~ 30°C 사이 변화 및 운동에 의해 증감을 보인 직장온은 25°C 환경에서 약 한 시간 노출을 통해 안정화되었다(Fig. 4).

**Fig. 4.** Time courses of rectal temperature for the two experimental conditions.

## 2. 손목 피부온

손목 피부온은 두 조건 모두 왼손과 오른손 간 유사한 반응이 관찰되었다(Fig. 5). 최초 60분 안정 시, 저온에 노출된 경우 낮은 손목 피부온을, 고온에 노출된 경우 높은 손목 피부온을 보였다. 저온에서 고온 환경으로, 혹은 고온에서 저온 환경으로 변동 시 손목 피부온은 급격히 상승 혹은 감소하여 안정기 후반(100 ~ 120 min), 운동 중(120 ~ 150 min), 운동 종료 후 회복기(150 ~ 180 min) 까지 두 조건 간 4 ~ 5°C 정도의 차이를 유지하였다(Fig. 5). 운동 시작 직후, 손목 피부온은 두 실험 조건 모두에서 급격히 저하하여 조건 2의 경우 손목 피부온이 25°C 까지 하강하는 결과를 보였으나, 운동 종료와 함께 두 실험 조건 모두에서 손목온은 급격히 증가하여 운동 전 피부온 수준을 회복하였다(Fig. 5). 열적으로 쾌적한 25°C 환경에서 식사를 진행하였고, 두 조건 모두 손목 피부온이 약간 상승하는 경향을 보여주었다(Fig. 5).

## 3. 손목 혈류량

안정 시 손목에서의 혈류량은 두 실험 조건 간 차이를 보여주지 않았다. 다만, 운동 시 손목에서의 혈류량이 증가하였으며 운동 강도 3단계인 8 km·h<sup>-1</sup>에서 급격한 증가가 발견되었다(Fig. 6).



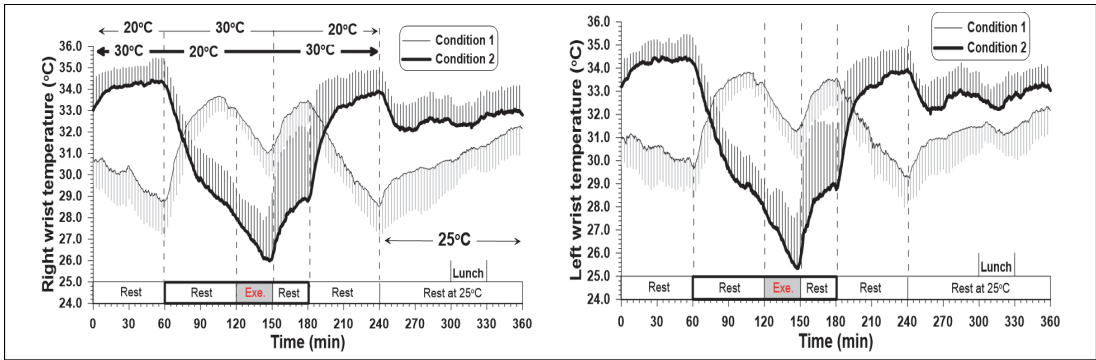


Fig. 5. Time courses of skin temperatures on the right and left wrist for the two experimental conditions.

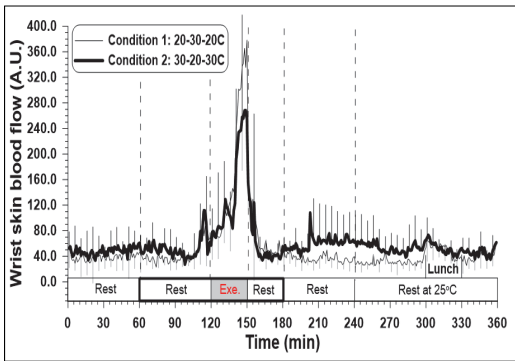


Fig. 6. Time courses of laser Doppler wrist skin blood flow for the two experimental conditions.

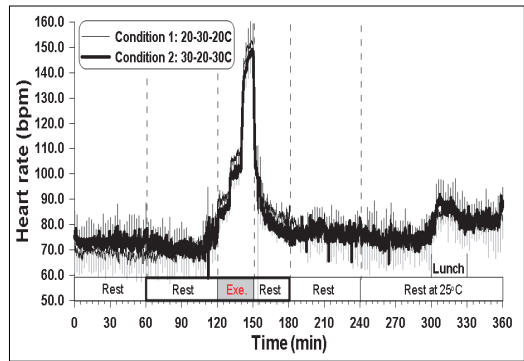


Fig. 7. Time courses of heart rate for the two experimental conditions.

#### 4. 심박수

안정 시 심박수는 두 실험 조건 간 유의한 차이 없이 평균 70 ~ 80 bpm을 유지하였다(Fig. 6). 30분 운동을 수행하는 동안 운동 강도 증가에 따라 심박수도 증가하였으며, 운동 강도 3단계에서 급격하게 증가하여 평균 150 bpm 수준을 보여주었다. 열적으로 쾌적한 환경인 기온 25°C에서 식사하는 동안 두 실험 조건 모두에서 심박수가 증가하였다(Fig. 7).

#### 5. 에너지 대사량

안정 시와 운동 시, 운동 종료 후 회복기 모두 산소섭취량은 환경 기온의 영향을 받지 않았다

(Fig. 8). 두 조건 모두 운동 에너지 소비량은  $417 \pm 118 \text{ kcal}\cdot\text{h}^{-1}$  과  $432 \pm 103 \text{ kcal}\cdot\text{h}^{-1}$ 로 유의

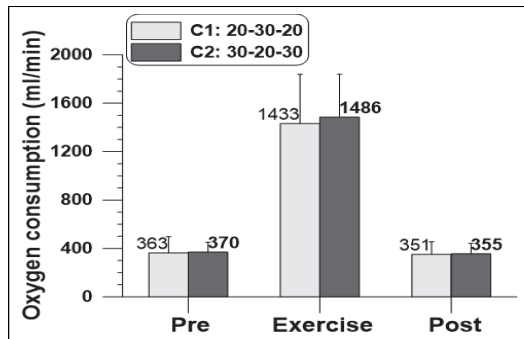


Fig. 8. Oxygen consumption during rest, exercise, and recovery for the two experimental conditions.



한 차이 없이 증등 강도 이상의 운동이 수행되었다.

6. 주관적 반응: 한서감, 온열쾌적감, 온열선호도

전신 한서감의 경우, 안정 시 기온 20°C에서는 서늘하게, 기온 30°C에서는 따뜻하게 느꼈으며, 운동을 수행하는 동안에는 노출 기온에 상관없이 점점 더 따뜻하게 느꼈다(Fig. 9A). 운동 종료 후 회복기에도 환경 기온과 상관없이 점점 서늘하게 느꼈다. 열적으로 쾌적한 환경인 25°C에 약 30분 노출 후 두 실험 조건 모두 한서감이 안정화되었다(Fig. 9A). 온열쾌적감의 경우, 안정 시 한서감에 비해 환경온도의 영향을 적게 받아, 두 실험 조건 간 큰 차이는 없었다. 운동 중에는 노출된 기온 수준에 상관없이 점점 더 불쾌하게 느꼈으며, 저온보다는 고온 환경에서 운동 시 더 불쾌하게 느꼈다. 운동 종료 후 회복기, 저온이나 고온 환경 노출 상관없이 점점 더 쾌적하게 느꼈으며, 20°C나 30°C보다 25°C 환경에서 안정화하는 경우 더 쾌적하게 느꼈다(Fig. 9B). 온열선호도는 한서감과 유사한 경향을 보였다(Fig. 9C).

7. 체형 요소와 직장온 간의 상관

두 조건 모두 직장온과 체지방량(%BF) 간 상관은 발견되지 않았으나, 체질량지수(BMI)와는 유의한 상관이 발견되어, 체질량지수가 클수록, 안정

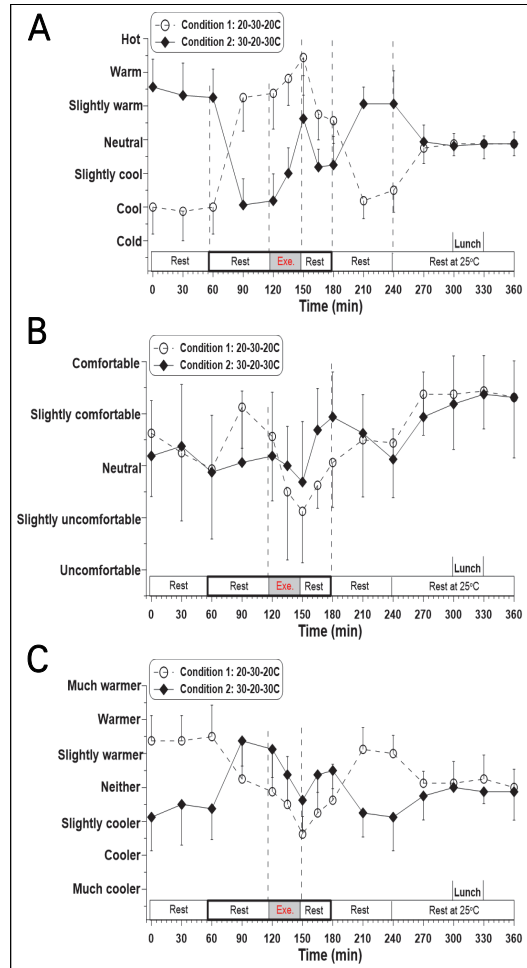


Fig. 9. Time courses of thermal sensation (A), thermal comfort (B), and thermal preference (C) for the two experimental conditions.

Table 3. Correlation coefficients between rectal temperature ( $T_{re}$ ) and body mass index (BMI) or total body fat (%BF)

Parameters	Condition 1		Condition 2	
	r	p value	r	p value
$T_{re}$ at rest (60-65th min) * BMI	0.677	0.065	0.573	0.138
$T_{re}$ at rest (115 - 120th min) * BMI	0.636	0.090	0.717	0.045
$T_{re}$ during exercise (145 - 150th min) * BMI	0.525	0.182	0.699	0.054
$T_{re}$ at rest (60-65th min) * %BF	0.416	0.305	0.080	0.851
$T_{re}$ at rest (115 - 120th min) * %BF	0.317	0.444	0.145	0.731
$T_{re}$ during exercise (145 - 150th min) * %BF	0.118	0.780	0.252	0.547

시, 운동 시, 운동 종료 후 회복 시 직장온이 더 높았다(Table 3). 단, 직장온의 증감과 체질량지수 간 상관은 발견되지 않았다.

8. 손목 피부온과 한서감 간의 상관

손목 피부온과 한서감 간의 상관은 두 조건 모두 유의하여, 조건 1의 경우  $r=0.770(p=0.001)$ , 조건 2의 경우  $r=0.706(p=0.003)$ 으로, 손목 피부온이 높을수록 더 따뜻하게 느끼는 경향이 발견되었다(Fig. 10).

IV. 고찰

1. 손목 피부온과 전신 한서감

본 연구의 가장 독창적인 발견은 여름철 실내외 환경을 모사한 실험 조건에서 손목 피부온과 전신 한서감 간 유의한 양의 상관성이 존재한다는 것이다. 손목의 피부온도는 환경온도가 상승 혹은 하강하는 변화와 동일한 경향으로 상승과 하강하며 환경온도를 실시간 반영하는 것으로 나타났다. 본 연구에서 피험자들은 환경온도 30°C에서 따뜻함과 20°C에서 서늘함을 느꼈으며, 25°C에서 텅지나 춥지도 않은 열적 중성역의 응답을 보였다(Fig. 9). 손목 피부온과 전신 한서감은 유의한 양의 상

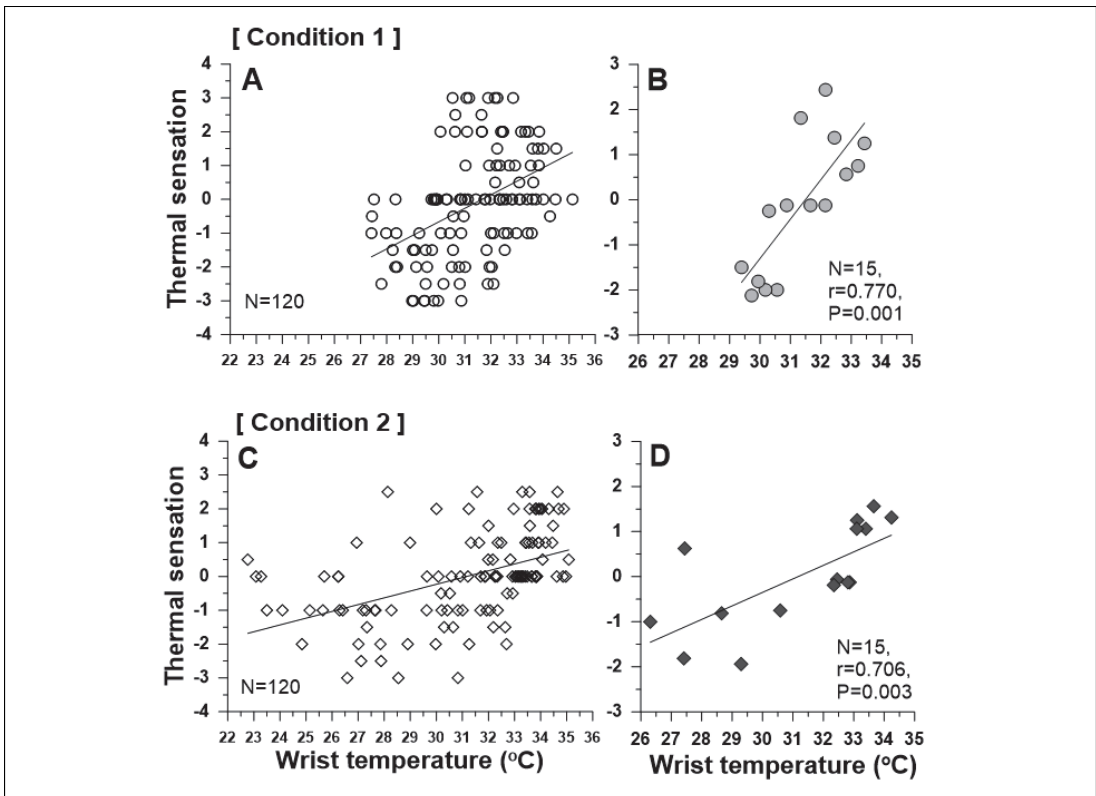


Fig. 10. Relationships between wrist skin temperature and thermal sensation. A and C display all single values from the eight subjects (8 subjects × 15 times = 120 responses), while B and D represent the association between the averaged values of the eight subjects according to the 15 measurement times.

관을 보여, 손목 피부온도를 통한 전신 한서감 추정 가능성이 확인되었다(Fig. 10). Gagge et al. (1967)은 온열적 중성역으로부터 더운 환경 또는 추운 환경으로의 기온 변화가 평균피부온도의 상승 또는 하강을 유발하며, 이에 따른 온열쾌적감과 한서감의 변화는 평균피부온도와 유의한 상관관계를 지님을 확인하였고, Takada et al.(2013)도 환경온도가 일정하거나 환경온도가 변화하는 조건에서 DuBois's 7-point 식(이마, 목통, 아래팔, 손등, 허벅지, 종아리, 발등)으로 추정된 평균피부온도를 통해 전신 한서감 추측이 가능함을 보고하였다. 이처럼 평균피부온이 전신의 한서감과 유의한 상관관을 가진다는 사실은 잘 알려져 왔다. 그러나 본 연구와 같이 특정 부위의 피부온, 특히 인체 말단 부위의 피부온이 전신 한서감과 유의한 상관성이 있음을 보고한 연구는 많지 않으며, 특히 스마트워치의 착용 부위인 손목의 피부온과 전신 한서감 간의 상관관을 밝힌 연구는 거의 없다. 본 연구에서는 인체 여러 부위들 중 손목 단일 부위의 피부온과 전신 한서감 간의 상관성을 확인하였으며, 이러한 결과는 여름철 실내외를 오가며 활동 중인 스마트워치 착용자의 전신 한서감 추정에 효과적으로 활용될 수 있음을 시사한다. 단, 손목의 피부온은 운동 시작 직후와 운동 종료 직후에서 인체 혈류 재분배로 인해 급격한 하락과 급격한 상승을 보이며(Fig. 5), 이러한 현상은 피험자 간 편차가 크기 때문에 생체반응 모니터링 적용 시 이러한 점이 반드시 고려되어야 한다.

## 2. 환경온 변화 및 운동에 따른 직장온 변화

본 연구에서 비침습적 측정항목인 손목의 피부온과 침습적 측정항목인 직장온과 유의한 관계는 발견되지 않았으나, 환경온 및 운동에 따른 특징적 변화들이 직장온에서 발견되었다. 먼저, 조건 1

(20-30-20C)과 조건 2(30-20-30C)의 초기 60분 동안 다른 기온에서 안정을 취하는 동안 직장온에서 유의한 차이는 발견되지 않았다. 즉, 운동을 통해 인체 산열량이 과도하게 상승하지 않는 한, 기온 20°C와 기온 30°C의 차이가 심부온에 유의한 영향을 미치지지는 않았다. 본래, 인체의 심부(thermal core)는 외기 환경 영향에 의한 변화의 폭이 적은 특징을 지닌 부위로 정의되기 때문에(Nadel et al. 1971; Kenny & Jay 2011), 본 결과는 예상 가능하다. 그러나 직장온 변화에서 흥미로운 점 중 하나는, 기온 20°C에서 60분 안정 후 기온 30°C로 하강하는 환경에 노출된 조건 1에서 직장온은 점점 하강하는 경향을 보인 반면, 조건 1과 반대로 기온 30°C에서 60분 휴식 후 기온 20°C로 하강하는 환경에 노출된 조건 2에서 직장온은 점점 상승하는 경향을 보였다. 즉, 기온의 변화 경향과 직장온의 변화 경향은 일치하지 않았다. 나아가, 기온 20°C에서 달리기 운동이 진행된 조건 2의 경우 직장온의 상승폭은 기온 30°C에서 운동을 진행한 조건 1보다 더 컸다. 이는 고온 환경에서 운동 시 직장온 상승폭이 더 클 것이라는 일반적인 예상과 다른데, 그 이유는 노출 초기 휴식을 취한 운동 직전 환경의 온도가 직장온에 영향을 미치기 때문이다. 즉, 운동 직전 노출된 기온 조건이 동일하다면, 고온 환경에서 운동 시 직장온의 상승폭이 저온 환경에서 운동한 경우보다 더 컸을 것이라 예상되지만, 본 연구의 경우 운동 직전 노출된 환경온이 달라 이러한 예상에 부합하지 않은 결과가 도출되었다. 본 연구 결과에 따르면, 운동 중 노출된 기온의 수준보다, 운동 직전 노출된 기온이 실제 운동 시 직장온 증가량에 더 중요한 영향을 미치는 것으로 판단해 볼 수 있다. 이러한 결과는 여름철 실외 운동 중 직장온 상승도를 최소화하기 위해서는 운동 전 인

체를 냉각하여 직장온 수준을 낮게 유지하는 것이 중요함을 시사한다.

한편, 2019 ~ 2022년 전세계 코로나 범유행으로, 고령자 및 기저질환자 등 건강취약계층 뿐만 아니라 일반 대중들도 “체온”의 추정에 대한 관심이 급증하였다. 웨어러블 테크놀로지 기술의 발달로 다양한 제품들이 개발되고 있으며, 특히 스마트워치는 간단한 사용법과 함께 비침습적으로 심박수, 피부온도, 활동량, 대사량 등 개인의 다양한 생리적 데이터를 실시간으로 확인할 수 있기에 가장 대중화된 웨어러블 기기이다(King & Sarrafzadeh 2018). 감염성 질환으로 인한 고체온증의 판단 기준으로 열화상 카메라 등을 이용한 얼굴 피부온, 손목 피부온 등이 측정되어 왔으나 본 연구 결과에 따르면 직장온은 손목 피부온과 유의한 상관이 존재하지 않을 뿐만 아니라, 직장온은 환경온의 변화를 직접적으로 반영하지도 않기 때문에, 환경온이나 손목에서의 피부온을 기반으로 심부온 추정 알고리즘을 개발하려는 전략은 수정될 필요가 있다. 특히, 손목 피부온과 같은 비침습적 항목은 환경온도, 착의량, 또는 활동 상태 등에 따른 변화가 크기 때문에 단일 지표로 심부온과의 관계를 규명하기보다, 심박수와 피부온, 열유량 등 여러 비침습적 변수들을 복합적으로 활용하여 심부온을 추정하는 것이 더 타당할 것이다(Kim & Lee 2016; Eggenberger et al. 2018; Falcone et al. 2021).

### 3. 체질량지수와 직장온

본 연구를 통해 추가적으로 밝혀진 새로운 결과로 체질량지수와 직장온 간의 상관을 들 수 있다. 본 연구에서는 마른 체형부터 비만 체형이 모두 포함되도록 체질량지수를 고려하여 피험자를 선정하였다. 피험자 수는 총 8인으로 체형의 관련성을 분석하기에 충분히 많은 수는 아니지만, 그럼에도

불구하고 직장온과 체질량지수 간의 상관이 발견된 점은 매우 큰 의미가 있다고 볼 수 있다. 본 연구 결과, 안정 시, 운동 시, 운동 종료 직후 휴식 시 등 실험 전반에서 체질량지수와 직장온 사이의 유의한 양의 상관이 발견되었다(Fig. 10). 즉, 체형이 큰 사람이 작은 사람에 비해 상대적으로 높은 직장온이 set point로 형성됨을 의미한다. 체질량지수가 클수록 체지방율이 높거나 근육량이 많다고 볼 수 있다. 지방 조직은 높은 단열효과로 심부로부터 외기로의 열손실을 방해하며, 근육량이 많을수록 운동 시 산열량이 높아 체내 축적되는 열량이 증가할 것이기 때문에, 체질량지수가 높을수록 체내 열저장량이 더 많을 것이라 추정할 수 있으며(Waalen & Buxbaum 2011), 이로 인해 본 연구 결과 체질량지수가 클수록 심부온이 더 높은 결과가 도출된 것으로 해석할 수 있다. 직장온을 직접 비교한 연구는 아니지만, 성인 남성(N=2,032)과 폐경기 이후 여성(N=1,561)을 대상으로 체질량지수와 적외선 방식으로 측정된 귀내온 간의 상관관계를 분석한 결과 양의 상관관계가 확인되었다(Bastardot et al. 2019). 비만 집단(BMI 30.0 - 39.9; 12인)과 정상 체중 집단(BMI 18.5 - 24.9; 12인)을 대상으로 24시간 동안 Telemetric pill을 이용해 심부온을 측정하는 연구(Hoffmann et al. 2012)에서는 비만 집단의 24시간 평균심부온이 정상체중집단의 심부온에 비해 유의하게 높은 결과가 관찰되었다. 그러나, 심부온과 체질량지수 간 유의한 관련이 존재하지 않는다는 보고들도 존재한다. Chudecka et al.(2014)에 따르면 여성 비만인 20인(BMI  $33 \pm 1.6$ )과 정상 체중 여성 20인(BMI  $21 \pm 1.0$ )의 귀내온을 비교한 결과 두 집단 간 유의한 차이가 발견되지 않았다. Heikens et al.(2011)는 비만 집단(BMI  $40 \pm 1$ )과 정상 체중 집단(BMI  $25 \pm 0.5$ )의 24

시간 심부온(telemetric pill로 위내온 측정)을 비교하였고, 그 결과 두 집단 간 유의한 차이를 발견하지 못했다. 이처럼 연구들 간 일치하지 않는 결과들이 보이는 이유는 측정된 심부온 종류에서의 차이뿐만 아니라, 노출된 환경온의 차이, 활동 종류 등의 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 본 연구는 20대 건강한 남성을 대상으로, 여름철 냉방이 되는 실내와 더운 실외를 모사한 환경에서 휴식과 운동을 취하는 동안 직장온을 6시간 연속 측정한 것으로, 본 실험과 유사한 조건일 경우 체질량지수와 직장온 간 유의한 상관성이 존재할 것이라 사료된다. 여름철 생체신호 모니터링에 기반한 심부온 추정 알고리즘 개발 시, 개인의 체질량지수 정보를 고려한다면 개별 추정식의 정확도를 향상시킬 수 있을 것이다.

## V. 요약 및 결론

본 연구는 여름철 냉방이 이루어지는 실내와 고온의 실외로 이동하며 운동과 휴식을 취하는 일상생활 중 손목을 통한 비침습적 생체 반응 정보를 통해 인체 측정된 열저장량 추정 가능성을 평가하였다. 손목의 피부온 및 손목의 피부혈류량이 비침습적 지표로 선정되었고, 인체 열 부담 추정 변수로 직장온 및 전신 한서감 등이 동시 관찰되었다. 손목의 혈류량은 직장온이나 전신 한서감 등의 변화를 반영하지 못하였으며, 손목의 피부온도 직장온의 변화를 반영하지 못하였으나, 손목 피부온과 전신 한서감 간에는 강한 양의 상관성이 발견되었다. 저온 환경에서 고온 환경으로 이동하여 다시 저온 환경으로 이동한 실험 조건, 혹은 그 반대의 실험 조건 모두에서 상관계수 0.7 이상을 보여 손목의 피부온이 높을수록 전신 한서감이 유의하게 더 높은 값(더 더운 상태)이 발견되었다. 이러한 결과는 손목의 피부온 모니터링을 통해 심부온을 추정할

수는 없으나, 전신 한서감은 추정할 수 있음을 의미한다. 이는 여름철 실내외를 오가며 일상생활 중인 사람의 전신 한서감 추정을 위해 스마트 웨어러블의 웨어러블 생체반응 모니터링 기기에 적용될 수 있다. 특히, 독거 고령인, 농촌 작업자, 건설 현장 작업자, 배달업자, 군인들과 같이 여름철 열관련 질환 발생률이 상대적으로 높은 계층에 웨어러블 모니터링 기술이 적용된다면, 폭염 환경에서 열관련 질환 발생률을 낮추는데 기여할 수 있을 것이다.

## References

- Aoyagi Y, McLellan TM, Shephard RJ(1998) Effects of endurance training and heat acclimation on psychological strain in exercising men wearing protective clothing. *Ergonomics* 41, 328-357
- Baker LB(2019) Physiology of sweat gland function: the roles of sweating and sweat composition in human health. *Temperature* 6(3), 211-259
- Bastardot F, Marques-Vidal P, Vollenweider P (2019) Association of body temperature with obesity. *The CoLaus Study. Int J Obes* 43(5), 1026-1033
- Chudecka M, Lubkowska A, Kempnińska-Podhorodecka A(2014) Body surface temperature distribution in relation to body composition in obese women. *J Thermal Biol* 43, 1-6
- Eggenberger P, MacRae BA, Kemp S, Bürgisser M, Rossi RM, Annaheim S(2018) Prediction of core body temperature based on skin temperature, heat flux, and heart rate under different exercise and clothing conditions in the heat in young adult males. *Frontiers Physiol* 9, 1780
- Falcone T, Cordella F, Molinaro V, Zollo L, Del Ferraro S(2021) Real-time human core temperature estimation methods and their application in the occupational field: a systematic review. *Measurement* 183, 109776
- Gagge AP, Stolwijk J, Hardy J(1967) Comfort and thermal sensations and associated physiological responses at various ambient temperatures.

- Environmental Res 1(1), 1-20
- Heikens MJ, Gorbach AM, Eden HS, Savastano DM, Chen KY, Skarulis MC, Yanovski JA (2011) Core body temperature in obesity. *The American J Clin Nutr* 93(5), 963-967
- Hoffmann ME, Rodriguez SM, Zeiss DM, Wachsberg KN, Kushner RF, Landsberg L, Linsenmeier RA(2012) 24-h Core Temperature in Obese and Lean Men and Women. *Obes* 20(8), 1585-1590
- Kenny GP, Jay O(2011) Thermometry, calorimetry, and mean body temperature during heat stress. *Comprehensive Physiol* 3(4), 1689-1719
- Kim S, Lee JY(2016) Skin sites to predict deep-body temperature while wearing firefighters' personal protective equipment during periodical changes in air temperature. *Ergonomics* 59(4), 496-503
- King CE, Sarrafzadeh M(2018) A survey of smartwatches in remote health monitoring. *J Healthcare Informatics Res* 2, 1-24
- Kitamura KI, Zhu X, Chen W, Nemoto T(2010) Development of a new method for the noninvasive measurement of deep body temperature without a heater. *Med Engineering Physics* 32(1), 1-6
- Lee JY, Choi JW, Kim H(2008) Determination of body surface area and formulas to estimate body surface area using the alginate method. *J Physiol Anthropology* 27(2), 71-82
- Nadel ER, Bullard RW, Stolwijk J(1971) Importance of skin temperature in the regulation of sweating. *J Appl Physiol* 31(1), 80-87
- Niedermann R, Wyss E, Annaheim S, Psikuta A, Davey S, Rossi RM(2014) Prediction of human core body temperature using non-invasive measurement methods. *Int J Biometeorol* 58, 7-15
- Pryor RR, Seitz JR, Morley J, Suyama J, Guyette FX, Reis SE, Hostler D(2012) Estimating core temperature with external devices after exertional heat stress in thermal protective clothing. *Prehospital Emergency Care* 16(1), 136-141
- Roberts MF, Wenger CB, Stolwijk J, Nadel ER (1977) Skin blood flow and sweating changes following exercise training and heat acclimation. *J Appl Physiol* 43(1), 133-137
- Simon HB, Swartz MN(1992) Pathophysiology of fever and fever of undetermined origin. In: Rubenstein E, Federman D, eds. *Scientific American medicine*. New York: Scientific American
- Takada S, Matsumoto S, Matsushita T(2013) Prediction of whole-body thermal sensation in the non-steady state based on skin temperature. *Building Env* 68, 123-133
- Taylor NA, Allsopp NK, Parkes DG(1995) Preferred room temperature of young vs aged males: the influence of thermal sensation, thermal comfort, and affect. *J Gerontol Series A: Biological Sci Med Sci* 50(4), M216-M221
- Taylor NA, Tipton MJ, Kenny GP(2014) Considerations for the measurement of core, skin and mean body temperatures. *J Thermal Biol* 46, 72-101
- Teunissen L, Klewer J, De Haan A, De Koning J, Daanen H(2011) Non-invasive continuous core temperature measurement by zero heat flux. *Physiol Measurement* 32(5), 559
- Tikusis P, Mcllellan TM, Selkirk G(2002) Perceptual versus physiologic heat strain during exercise-heat stress. *Med Sci Sports Exercise* 34, 1454-1461
- Waalén J, Buxbaum JN(2011) Is older colder or colder older? the association of age with body temperature in 18,630 individuals. *J Gerontol Series A: Biomed Sci Med Sci* 66(5), 487-492
- Xu X, Karis AJ, Buller MJ, Santee WR(2013) Relationship between core temperature, skin temperature, and heat flux during exercise in heat. *European J Appl Physiol* 113, 2381-2389