creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

의류학석사 학위논문

겨울철 전기차 탑승자용 국부 복사 히터 개발을 위한 인체 가온 부위 조합 최적화

2023년 8월

서울대학교 대학원

의류학과

문 주 현

겨울철 전기차 탑승자용 국부 복사 히터 개발을 위한 인체 가온 부위 조합 최적화

지도 교수 이 주 영

이 논문을 의류학석사 학위논문으로 제출함
2023년 4월

서울대학교 대학원
의류학과
문 주 현

문주현의 의류학석사 학위논문을 인준함
2023년 6월

위 원 장 _____ 홍 병 희 _____ (인)

부위원장 _____ 김 중 경 _____ (인)

위 원 _____ 이 주 영 _____ (인)

초 록

자동차 산업에서는 전기차로의 전환과 함께 전용 난방 플랫폼인 '국부 복사 난방'이 주목받고 있다. 전기차용 적외선 복사 히터는 넓적다리, 무릎 부위와 발등 위치에 설치될 것으로 예상되어, 본 연구는 겨울철 실외에서의 자동차 탑승과정 및 실내 환경을 조성하고, 세 가지 부위를 여덟 가지 조합 하에서 가온할 때 인체 생리 반응 및 주관적 감각 기반의 탑승자 열 쾌적성 만족을 이루고, 소비 전력량을 최소화할 수 있는 최적 가온 부위 조합 도출을 목적으로 하였다. 나아가 인체 생리 반응과 주관적 감각 간의 상관 관계를 도출하여 탑승자 열 쾌적성 평가 시 주관적 반응을 기반으로 생리 반응 예측에 대한 가능성을 시사하고자 하였다.

건강한 20대 한국인 남성 총 10인이 본 실험에 참여하였다. 매 실험 동안 직장온, 피부온, 의복내 온습도, 체중, 피부수분도, 혈압, 심박변이도를 측정하였고 주관적 감각 항목으로는 한서감, 온열쾌적감, 건조감과 전율이 느껴진 인체 부위, 졸음 정도를 범주형 척도로 응답하게 하였으며 5°C 환경에서 복사 히터 표면온도를 130°C로 유지하기 위한 소비전력량을 조건별로 측정하였다. 평균 피부온은 복사 히터 가온 시와 종료 후 모두 여덟 조건 중 ThighKnee와 All 조건에서 가장 높았다($P < 0.001$). 여덟 조건 간 피부수분도의 유의한 차이는 관찰되지 않았으며 하체 부위 위주의 복사 히터 가온에 의해 이마와 손의 피부 수분도가 낮아지지 않음을 확인하였다. 전신 한서감은 복사 히터 가온 시 여덟 조건 중 ThighKnee와 All 조건에서 유의하게 높았으며($P < 0.001$), 전신 온열쾌적감은 복사

히터 가온 시 ThighKnee 조건에서 가장 높았다($P < 0.01$). 전신 건조감은 복사 히터 가온 종료 직전과 종료 직후에 All 조건에서만 유의하게 높았다($P < 0.05$). 복사 히터 가온 시에도 다수의 피험자는 손등과 손바닥에서 전율을 느꼈으며, 히터 종료 후 윗팔과 넓적다리 전면 부위에서 가장 많은 전율을 느꼈음을 확인하였다. 졸음 정도에 대한 조건 간 유의한 차이는 발견되지 않아, 복사 히터 가온이 졸음을 유발하지 않음을 관찰하였다. 더하여 복사 히터 가온 세 부위의 피부온과 전신 한서감, 전신 온열쾌적감 간 유의한 양의 상관이 발견되었으며(all Ps < 0.001), 가온 부위에서의 주관감과 직장온, 평균피부온 간의 상관 역시 관찰되었다.

종합하면, 인체 생리 반응, 주관적 감각, 소비 전력량을 고려한 최적 가온 조합은 넓적다리와 무릎을 가온한 ThighKnee 조건이라는 것을 살펴볼 수 있었다. 해당 조건에서 탑승자는 생리적, 주관적으로 열 쾌적성을 만족할 수 있었으며, 국부 복사 난방으로 인한 건조함을 느끼지 않으면서도 All 조건에 비해 소비 전력량을 35% 감소시킬 수 있었다. 더하여 겨울철 차량 내 환경에서 탑승자가 주관적으로 느끼는 따뜻함과 추움 정도, 쾌적하고 불쾌한 정도를 피부온과 심박변이도를 통해 추정할 수 있음을 확인하였다. 본 결과는 전기차용 적외선 복사 히터 설치를 비롯하여 미래 모빌리티 통합 열관리 시스템 및 웨어러블 디바이스 개발의 기초 자료로서 활용될 수 있을 것이다.

주요어 : 국부 복사 난방, 적외선 복사 히터, 열 쾌적성, 인체 생리 반응, 주관적 감각
학 번 : 2021-20117

목 차

제 1 장 서 론 1
제 1 절 연구의 배경 1
제 2 절 연구의 목적 5

제 2 장 방 법 6
제 1 절 피험자 6
제 2 절 실험 환경 및 장치 구성 8
1. 복사 히터 8
2. 차량 모형 10
제 3 절 실험 조건 12
제 4 절 실험 과정 및 측정 항목 13
1. 실험 의복 13
2. 실험 프로토콜 13
3. 측정 항목 15
1) 인체 생리 반응 15
2) 주관적 감각 19
제 5 절 데이터 분석 21

제 3 장 결 과 22
제 1 절 인체 생리 반응 22
1. 직장온 22
2. 피부온 23
3. 의복내 온습도 29
4. 불감증설 30
5. 피부수분도 31
6. 혈압 31
7. 심박변이도 32
제 2 절 주관적 감각 35
1. 한서감 35
2. 온열쾌적감 39
3. 건조감 43
4. 전율이 느껴진 부위 47
5. 졸음척도 49
제 3 절 상관 관계 50
1. 인체 생리 반응 및 주관적 감각 간의 상관 50
2. 주관적 감각 간의 상관 55
제 4 절 소비전력량 대비 주관감 56

제 4 장 논 의 58
제 1 절 국부 복사 히터의 최적 가온 조합 도출 58
제 2 절 인체 생리 반응 및 주관적 감각의 상관 관계 69

제 3 절 제한점 73

제 5 장 결 론 75

참고문헌 76

Abstract 82

표 목차

[표 2-1] Anthropometric and physical characteristics of the subjects in the present study 7
[표 2-2] Experimental conditions 12
[표 2-3] Experimental clothings 14
[표 3-1] Changes of mean skin temperature among the 8 conditions 28
[표 3-2] Insensible perpiration among the 8 conditions 30
[표 3-3] Skin hydration at forehead and hand among the 8 conditions 33
[표 3-4] Blood pressure among the 8 conditions 34
[표 3-5] Whole body thermal sensation among the 8 conditions 38
[표 3-6] Whole body thermal comfort among the 8 conditions 42
[표 3-7] Whole body dryness sensation among the 8 conditions 46
[표 3-8] Correlation coefficients between physiological responses (rectal temperature or mean skin temperature) and subjective responses (whole body thermal sensation or thermal comfort). 50
[표 3-9] Correlation coefficients between skin temperature and subjective responses of heating body region: The Thighs, knees, and feet. 51
[표 3-10] Correlation coefficients between physiological responses (rectal temperature or mean skin temperature) and subjective responses of heating body region: The Thighs, knees, and feet 52
[표 3-11] Correlation coefficients between whole body subjective responses and skin temperature of heating body region: The Thighs, knees, and feet 53
[표 3-12] Correlation coefficients between heart rate variability and subjective responses 54
[표 3-13] Correlation coefficients between whole body subjective responses and subjective responses of heating body region: The thighs, knees, and feet 55

그림 목차

[그림 2.1] 300 cm^2 and 600 cm^2 carbon nanotube films of radiant heater (a), radiant heaters for laboratory experiments (b), and thermographic images (c).... 9
[그림 2.2] Mock-up vehicles for laboratory experiments (a) and radiant heater attachment: The thighs (b), knees (c), and feet (d)..... 11
[그림 2.3] Experimental protocol and measurement intervals..... 17
[그림 2.4] Experiment images: 25°C Rest (a), -5°C Walking (b), and 5°C Driving (c)..... 17
[그림 2.5] Sensor attatchment and experimental equipments..... 18
[그림 2.6] Subjective responses scale: Thermal sensation, thermal comfort, dryness sensation (a), shivering (b), and sleepiness scale (c) 20
[그림 3.1] Time courses of rectal temperature among the 8 conditions 22
[그림 3.2] Time courses of mean skin temperature among the 8 conditions .. 25
[그림 3.3] Time courses of head and upper body skin temperature among the 8 conditions: The Forehead (a), chest (b), abdomen (c), upper back (d), forearm (e), and hand temperature (f)..... 26
[그림 3.4] Time courses of lower body skin temperature among the 8 conditions: The Thighs (a), knees (b), calfs (c), and feet temperature (d)..... 27
[그림 3.5] Time courses of clothing microclimate among the 8 conditions: clothing temperature (a) and clothing humidity (b) 29
[그림 3.6] Time courses of heart rate variability: SDRR (a), RMSSD (b), pRR50 (c), and LF/HF (d) among the 8 condition..... 32
[그림 3.7] Time courses of thermal sensation among the 8 conditions (Mean ± SD): Whole body (a), thighs (b), knees (c), and feet (d) 37
[그림 3.8] Time courses of thermal comfort among the 8 conditions (Mean ± SD): Whole body (a), thighs (b), knees (c), and feet (d) 41
[그림 3.9] Time courses of dryness sensation among the 8 conditions (Mean ± SD): Whole body (a), thighs (b), knees (c), and feet (d) 45

[그림 3.10] Frequency of shivering among the 8 conditions: 5°C Driving Heater On (a) and 5°C Driving Heater Off (b) 48
[그림 3.11] Time courses of sleepiness scale among the 8 conditions (Mean ± SD) 49
[그림 3.12] Energy consumption of eight conditions compared to whole body subjective responses at 29 min radiant heating: Thermal sensation (a) and thermal comfort (b) 57

제 1 장 서 론

제 1 절 연구의 배경

2023년 현재 자동차 산업에서는 차량 구동 방식의 변화와 자율 주행 및 목적 기반 차량의 개발 등 친환경과 다양성을 기반으로 새로운 모빌리티 시대의 패러다임을 이뤄내고 있다. 특히, 저탄소 기술 확보를 위하여 내연기관 차량에서 전기차로의 전환은 가속화되고 있으며 이러한 변화는 새로운 차량 내부 통합 열 관리 방식과 더불어 개별 탑승자의 열 쾌적성 관리에 대한 연구를 함께 요구한다(Kim et al., 2021; Kwon et al., 2023). 기존의 차량 열 관리 측면에서, 내연기관 차량의 전통적인 차량 공조 냉난방 방식인 HVAC(Heating, Ventilation, Air conditioning) 시스템을 전기차에 동일하게 적용하였을 때 나타나는 대표적인 문제점으로 겨울철 난방 사용 시 전력 소비량 과다로 인한 주행거리 감소 및 배터리 수명 단축이 거론되고 있다(Chan et al., 2001). 더하여 HVAC 난방 방식은 탑승 초기 난방에 취약하고 뜨거운 공기가 위로 올라가려는 성질 때문에 하체 보온에 미흡하며, 차량 내부를 건조하게 만드는 단점이 존재한다(Oh et al., 2017). 따라서, 이러한 문제점들의 해결책이자 전기차 전용 실내 난방 플랫폼으로 적외선 복사 히터 기반의 '국부 복사 난방'이 제안되고 있다.

국부 복사 난방이란 인체 국소 부위에서 근접한 위치에 적외선 형태의 복사열을 가하여 낮은 에너지로도 탑승자의 열적 쾌적성을 충족시킬 수 있는 난방 방식이다. 선행연구와 국내 자동차 기업의 보고(Lee et al.,

2019; Lee et al., 2021; Hyundai Motor Group. 2022)에 따르면, 적외선 복사 히터의 적용은 대시보드, 글로브박스, 센터콘솔과 도어 트림 등으로 논의됨을 확인할 수 있다. 이를 통해 기존 HVAC 난방과 열선 시트를 통한 전도 및 대류 방식으로 난방이 어려웠던 인체 하체부의 넓적다리, 무릎 부위와 발의 근접 위치에 적외선 복사 히터가 설치될 것으로 예상된다.

그러나 전기차용 국부 복사 히터의 개발 및 상용화에 앞서 실제 차량 탑승자의 열 쾌적성 만족이 이루어질 수 있는지에 대한 논의가 이루어져야 한다. Simion et al. (2016)에 따르면, 자동차 실내 환경은 비대칭적 온열 환경을 지니며 측정 가능한 환경 요인 네 가지(온도, 상대습도, 기류, 평균 복사 온도)와 탑승자 개별 요인 두 가지(의복의 보온력, 활동 수준)가 자동차 탑승자의 온열 쾌적감을 결정하는 요인이라고 설명했다. 차량 탑승자의 열 쾌적성을 평가하는 기준은 ISO 14503 (2006)에 제시되어 있는데, 그 중 Part.3에서는 인간 대상 실증 평가 방법에 대해 다루고 있다. ISO 14503-3에 따르면, 탑승자 열 쾌적성 평가 항목으로서 한서감, 온열쾌적감 등의 주관감 척도를 활용한 주관적 방법(Subjective methods)과 심부온, 피부온과 같은 생리적 항목 및 심박변이도 등의 정신생리심리학적 반응을 측정하는 객관적 방법(Objective methods), 그리고 행동적 방법(Behavioral methods)을 제시하였다. Kim et al. (2021)의 연구에서는 탑승자의 온열 쾌적감을 결정하는 여섯 가지 요인과 더불어 이를 추정할 수 있는 생체 신호 항목으로 피부온, 심박변이도, 뇌파 등을 언급하였다. 그러나 국부 복사 난방의 여러 선행연구(Lee et al.,

2019; Prasad et al., 2019; Lee et al., 2021)에서는 열 쾌적성 시뮬레이션 연구가 주를 이루고 있다. Oi et al. (2011)의 연구에서는 1 clo의 의복 조합 착용 후 실내 온도가 10°C 혹은 20°C으로 설정된 차량에서 외기온보다 0°C, 10°C, 20°C가 높은 적외선 복사 히터와 열선 시트 사용 유무 조합에 따른 인체 열 쾌적성 평가를 수행하였는데, 10°C 이상의 차량 내에서 발 및 종아리 하부를 가온하는 복사 히터와 열선 시트를 함께 사용 시 탑승자의 전신 한서감과 온열쾌적감이 개선되었음을 보고하였다. 그러나 해당 연구는 한 가지 가온 부위 설정과 측정 항목이 한서감과 온열쾌적감 등의 주관감으로만 제한되었다는 한계점이 존재한다.

한편 웨어러블 산업에서도 겨울철 개인 발열 의류(Personal heating garments)인 액티브 히팅 방한복(Active heating garments)을 비롯한 웨어러블 히팅 디바이스 개발이 대두되고 있다. 이에 활용되는 직물형 발열체 혹은 웨어러블 복사 히터로의 적용 시 소비 전력량 효율을 위해 효과적인 인체 가온 부위 및 조합을 제시하는 연구가 이루어지고 있다. Cho & Cho (2015)에서는 발열 기능 스마트 웨어 설계를 위해 상체 네 부위에 온열 패드 부착 시 생리 반응 및 주관적 감각을 비교하였고, Kim et al. (2020)에서는 팔과 등 부위 발열체 부착 조합 시 가온 부위에 따른 피부온 및 의복내온도를 비교하였다. 이외에도 인체 사지 말단 부위인 손과 발의 가온이 저온 환경에서 효과적이라는 선행연구(Siple, 1945; Wang et al., 2019; Deng et al., 2020)가 다수 존재한다. 다시 말해, 가온 부위 최적 조합에 대한 연구는 인체 상체부와 사지 말단 부위에서의 탐색 위주가 다수였으며, 효과적인 하체 가온 부위 및 조합에 대한 연구는 부족한

실정이다. 더하여 복사열 전달은 선행연구에서 적용한 전도열 전달과 다르게 의복 및 신발 착용에 의한 열 전달 경감 효과가 크기 때문에, 이를 고려한 인체 평가 연구가 진행되어야 한다.

제 2 절 연구의 목적

따라서, 본 연구는 겨울철 실외에서의 자동차 탑승과정 및 자동차 실내 환경을 조성하고, 전기차 탑승자용 복사 히터의 설치 가능성이 높은 인체 가온 부위인 넓적다리, 무릎 부위와 발등을 여러 조건 하에서 가온할 때, 인체 생리 반응 및 주관적 감각 기반의 탑승자 열 쾌적성과 전기차의 전력 소비량 측면을 모두 고려한 최적화된 인체 가온 부위 조합 도출을 목적으로 한다. 더하여 인체 생리 반응과 주관적 감각을 기반으로 상관 관계를 도출하여 탑승자 열 쾌적성 평가 시 주관적 감각을 기반으로 생리 반응 예측에 대한 가능성을 시사하고자 한다.

본 연구의 결과는 전기차를 비롯한 미래 모빌리티 산업에서의 복사 히터 사용 가이드라인 제안을 비롯하여 차량 내 탑승자 중심 열 관리 개발, 그리고 복사열 기반의 액티브 히팅 방한복 혹은 웨어러블 히팅 디바이스 개발을 위한 기초자료로서 활용될 수 있을 것이다.

제 2 장 방 법

제 1 절 피험자

본 연구에는 총 10인의 건강한 20-30대 한국인 남성이 참여하였다. 본 연구에 참여한 피험자의 평균 연령, 신장, 체중, 체질량 지수, 체지방률, 골격근량과 체표면적 정보는 Table 2.1에 제시하였다. 체표면적은 한국인 체표면적 추정식(Lee et al., 2008)을 사용하여 계산하였다. 체질량지수, 체지방률, 골격근량과 다리 근육량은 생체 전기 저항 분석법을 통해 추정하였다(InBody970, InBody, South Korea). 모집 과정에서 사전 스크리닝을 통해 피부 질환과 한랭 질환 진단 이력이 없는 피험자를 대상으로 선정하였다. 모든 피험자는 실험 참여 전 24시간 동안 음주 및 과격한 운동을 피하도록 교육되었고, 실험 세 시간 전부터 식사 및 카페인 섭취가 금지되었다. 계절의 변화와 일주기 리듬의 영향을 최소화하기 위해 모든 피험자는 2023년 3월 한달간 오전 8시부터 오후 2시 사이의 동일한 시간대에 실험에 참여하였다. 모든 피험자는 실험에 참여하기 전 실험 내용에 대한 자세한 설명을 듣고 이해한 후 동의서에 자발적으로 서명하였다. 본 실험은 서울대학교 연구윤리위원회의 승인을 받았다(IRB #SNU No.2210/004-021).

Table 2.1 Anthropometric and physical characteristics of the subjects in the present study

Variables	Total (N=10)
Sex	Male
Age (year)	24.4 ± 3.9 (20-30)
Height (cm)	175.6 ± 4.5 (169.8-182.4)
Body weight (kg)	69.5 ± 8.2 (59.5-81.9)
Body mass index (kg/m^2)	22.6 ± 3.0 (18.9-27.2)
Total body fat (%)	19.9 ± 5.6 (12.7-28.3)
Skeletal muscle mass (kg)	31.3 ± 2.3 (27.8-34.8)
Right leg muscle mass (kg)	9.1 ± 0.6 (8.1-10.5)
Left leg muscle mass (kg)	9.0 ± 0.6 (8.0-10.3)
Body surface area (m^2)	1.88 ± 0.10 (1.74-2.04)

All data reported as mean ± SD (Min-Max).

제 2 절 실험 환경 및 장치 구성

2.1 복사 히터

본 연구에는 전기에너지를 복사열 형태로 방출하는 복사 히터가 사용되었으며 차량용 복사 히터 전문 업체(TERAON, South Korea)에 직접 의뢰하여 제작되었다. 복사 히터는 크게 탄소나노섬유 면상 발열체(Fig. 2.1a), 단열층과 고정기재로 구성되었으며 이를 검정색 트리코트 조직의 폴리에스터 직물로 감싼 구조로 이루어져 있다. 복사 히터 크기는 30 cm x 10 cm 로 이루어진 300 cm^2 면적과 40 cm x 15 cm 로 이루어진 600 cm^2 면적 두 가지로 제작되었다(Fig.2.1b). 300 cm^2 복사 히터는 넓적다리 가온에 왼쪽 및 오른쪽 각각 사용되었으며, 600 cm^2 복사 히터는 무릎 부위와 발등 가온에 한 개씩 사용되었다. 세 가지 가온 부위는 모두 동일하게 600 cm^2 면적의 가온을 받도록 설정하였으며 이는 피험자 평균 체표면적 대비 3.2 ± 0.1 %에 해당된다. 모든 복사 히터의 최종 출력 표면 온도는 선행연구(Oh et al., 2017)와 국내 전기차 개발 기업과의 논의를 통해 5°C 환경에서 열화상 카메라(T650SC, FILR, USA) 기준의 130°C로 설정되었으며 복사 히터 개별로 파워서플라이(TS6015, Toyotech, South Korea)를 연결하여 전력을 공급하는 방식으로 열을 부가하여 표면온도를 유지하였다(Fig.2.1c).

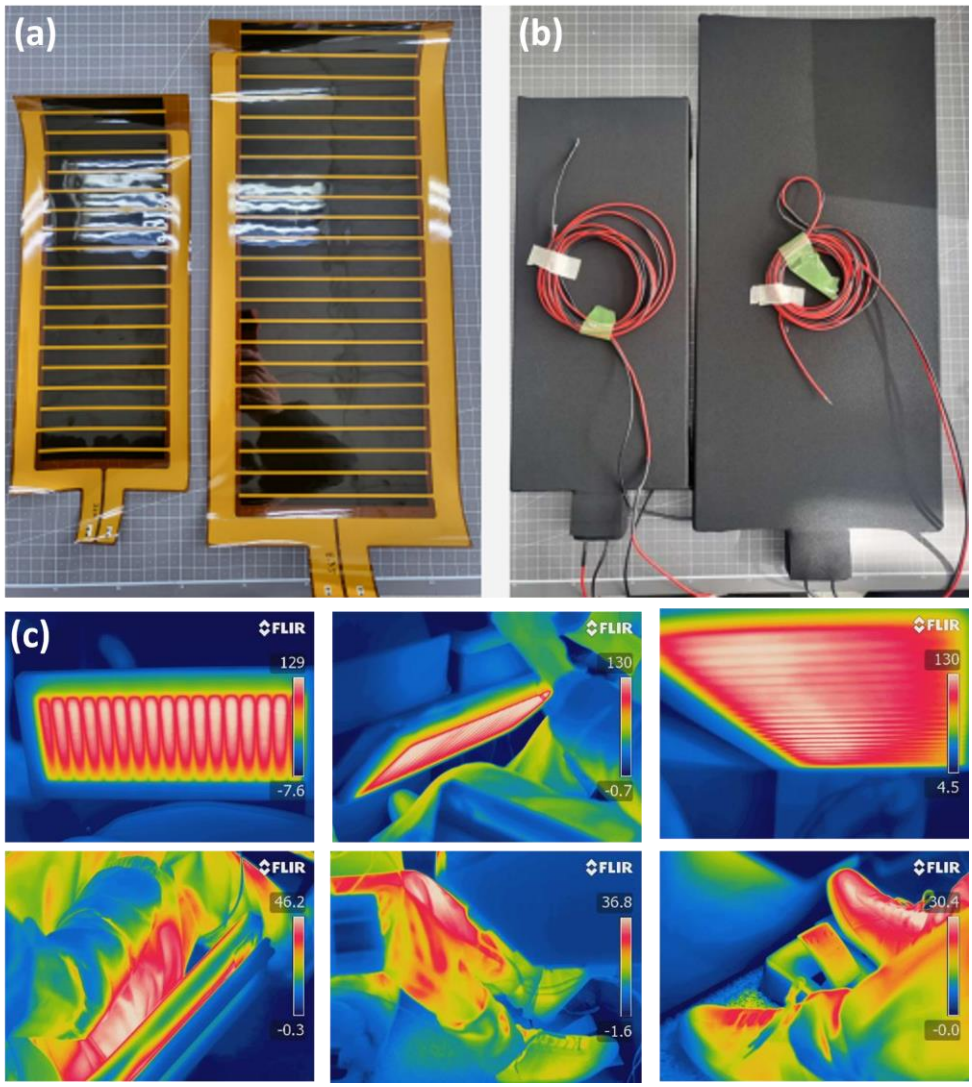

Figure 2.1 300 cm^2 and 600 cm^2 carbon nanotube films of radiant heater (a), radiant heaters for laboratory experiments (b), and thermographic images (c).

2.2 차량 모형

실제 겨울철 차량 탑승 환경을 구현하기 위하여 차량 모형을 전문 업체(IZM Design, South Korea)에 의뢰 및 제작을 거쳐 인공기후실 내에 배치하였다. 해당 모형은 국내 자동차 기업의 전동화 SUV 모델 운전석 좌석을 모사하여 제작되었다. 복사 히터는 설치 가능성이 높은 차량 위치와 가온 부위를 고려하여 넓적다리 양쪽, 무릎 부위, 그리고 발등을 가온 할 수 있도록 부착하였다. 가온 부위와 인체 간의 거리는 평균 신장 및 체중을 지닌 20대 남성 기준으로 차량 시트 착석 시 양손은 핸들을 잡고 오른발은 엑셀, 왼발은 브레이크 옆에 두는 자세를 취했을 시 넓적다리는 8 – 10 cm, 무릎 8 – 10 cm, 그리고 발등은 10 – 12 cm 사이가 될 수 있도록 설치하였다. 차량 시트는 피험자가 착석 후 개인 인체계측특성에 적합하게 가장 편안한 자세로 유지될 수 있도록 앞뒤로 이동 가능하도록 하였다. 실험용 차량 모형과 복사 히터 부착 위치는 Fig. 2.2에 제시되었다.

Figure 2.2 Mock-up vehicles for laboratory experiments (a) and radiant heater location: The thighs (b), knees (c), and feet (d).

제 3 절 실험 조건

본 연구의 실험 조건은 복사 히터 가온 부위 세 가지인 넓적다리, 무릎 부위, 그리고 발등의 조합으로 설정되었다. 총 여덟 가지의 실험 조건은 가온 부위의 영문 명칭에 따라 명명하였으며 이는 무가온 조건(Control), 한 부위 가온 세 조건(Thigh, Knee, Foot), 두 부위 가온 세 조건(ThighKnee, ThighFoot, KneeFoot), 전체 부위 가온 조건(All)으로 설정되었다. 여덟 가지 실험 조건은 무작위 교차 배치를 통해 10명의 피험자는 모두 다른 순서로 실험에 참여하였다. 실험 조건과 조건별 가온 부위 및 5°C 환경에서 복사 히터 표면온도 130°C 유지를 위한 소비 전력량은 Table 2.2에 제시하였다.

Table 2.2 Experimental conditions

Heating Regions (N)	Condition	Heating body region			Energy Consumption (W)	Energy Consumption (%)
		Thighs	Knees	Feet		
None	Control	X	X	X	0	0
1 body region	Thigh	O	X	X	64	30
	Knee	X	O	X	74	35
	Foot	X	X	O	74	35
2 body regions	ThighKnee	O	O	X	138	65
	ThighFoot	O	X	O	138	65
	KneeFoot	X	O	O	148	70
3 body regions	All	O	O	O	212	100

제 4 절 실험 과정 및 측정 항목

4.1 실험 의복

모든 피험자는 한국자동차연구원과 현대자동차 전기차 개발팀과의 논의를 통해 겨울철 한국 남성의 일상 실내 의복 조합을 착용하였다. 착용 의복 구성은 반팔 티셔츠, 긴팔 셔츠, 긴 바지, 속옷, 양말, 경량 패딩, 운동화이며 실험 프로토콜(Fig. 2.3)에 따라 추가적으로 겨울용 다운 패딩 재킷을 착용하였다. 모든 실험 의복은 피험자 개인 인체계측특성에 맞는 사이즈로 개별 부여되었으며, 착용 의복 및 무게의 정보는 Table 2.3에 제시하였다.

4.2 실험 프로토콜

본 실험은 겨울철 차량 탑승 과정을 모사한 프로토콜로 크게 네 가지의 타임라인으로 구성되었다(Fig. 2.3; Fig. 2.4). (1) “25°C Rest” : 피험자는 25°C, 50%RH(쾌적한 중성환경)의 실내에 10분간 앉아있으며 온열적 중성 상태에서 안정을 취한다. (2) “−5°C Walking” : 영하 5°C의 인공기후실에서 15분간 트레드밀 4 km/h의 속도로 걸으며 겨울철 실외에 주차된 차량을 찾으러 가는 상황을 모사한다. 총 15분 중 초기 10분은 영하 5°C로 유지하며, 10분째에 인공기후실 온도를 5°C로 상승시킨다. (3) “5°C Driving Heater On” : 15분 걷기가 종료되면, 피험자는 5°C의 인공기후실에서 차량 모형 내 시트에 착석하여 양 손은 핸들 잡기, 오른발은 엑셀 위, 왼발은 브레이크 옆에 두어 고정된 자세를 유지하고 조건 별 30분간 복사 히터 가온을 진행한다. 이때, 피험자 착석 전 매 실험에 사용되는 복사 히터의 표면 온도를 130°C로 설정해 둔다. (4) “5°C Driving Heater Off” : 30

분 가온 후, 마지막 절차로 5°C의 인공 기후실에서 복사 히터 가온을 종료한 후 동일한 자세를 취하며 무가온 상태로 30분간 시트에 착석한다. 총 85분의 실험 동안 인체생리반응 측정을 위해 직장온, 피부온, 의복내 온습도, 체중, 피부수분도, 혈압, 심박변이도를 일정 간격으로 기록하였다. 주관적 감각 측정 항목으로는 전신 및 부위별 한서감, 온열쾌적감, 건조감, 전율이 느껴진 부위와 졸음 정도의 범주형 척도에 대해 피험자가 직접 응답하였다.

Table 2.3 Experimental clothing

Phase	25°C Rest 5°C Driving	−5°C Walking
Ensembles		
	Undershorts short sleeves t-shirts, long sleeves shirts, pants, lightweight padded jacket, socks, sneakers	Undershorts short sleeves t-shirts, long sleeves shirts, pants, lightweight padded jacket, Down padded jacket, socks, sneakers
Total Weight (g)	1308 ± 10 g	2575 ± 24 g

4.3 측정 항목

4.3.1 인체 생리 반응

직장온 및 피부온은 전용 서미스터 및 데이터 로거(LT-8A, Gram Ltd, Japan)를 이용하여 5초 간격으로 측정되었다. 피부온 센서는 인체 14 부위에 부착되었으며, 얼굴을 대표한 이마 부위를 비롯하여 상체의 가슴, 복부, 윗등, 아래팔, 손등 그리고 하체의 좌우 넓적다리 측면, 좌우 무릎, 좌우 종아리, 좌우 발등에서 측정되었다. 이마는 정중앙에 부착되었으며 상체 부위는 인체 왼쪽, 하체 부위는 양쪽에서 측정되었다(Fig. 2.5). 의복내 온습도는 가슴 중앙 부위에 온습도 센서(TR-72wb, T&D. Japan)를 부착하여 5초 간격으로 측정되었다. 피부수분도는 25 °C 휴식기 3분째, 5 °C 히터 가온 3분째와 23분째, 5 °C 히터 가온 종료 23분째에 접촉식 프로브(Corneometer CM825, Courage + Khazaka electronic GmbH, Germany)를 통하여 측정하였다. 혈압은 오른쪽 상완에서 자동 혈압계(HEM-7200, Omron Healthcare Co., Ltd., Japan)를 사용하여 25°C 휴식기 5분째, 5°C 히터 가온 5분째와 25분째, 5°C 히터 가온 종료 25분째에 측정하였다. 심박변이도는 10인의 피험자 중 4인의 데이터를 측정하였으며 25 °C Rest 10분과 5 °C Driving 60분간 연속 측정되었다. 심박변이도 측정을 위해 심전도 패치(2223H, 3M, South Korea)를 증폭사지유도 방식으로 부착하였고 심전도 센서(Bio Amp, ADInstruments, Australia)를 연결한 후 데이터 로거(PowerLab 2/26, ADInstruments, Australia)를 통해 소프트웨어 (LabChart, ADInstruments, Australia)에 데이터가 자동 입력되었다. 측정된 심박변이도의 분석 지표로는 시간 영역 분석(SDRR,

RMSSD, pRR50)과 주파수 영역 분석(LF/HF ratio)이 이루어졌다. 심박변이도는 심장 박동수의 변화 정도와 심장 박동 간격을 반영하는 지표로서, 자율신경계 기전에 따른 정신생리심리적 스트레스의 객관적 지표로 활용된다(Lim, 2021). 심장이 박동할 때 심장 근육에서 발생하는 전기적 자극에 따라 파동이 발생하는데, 이 파동의 최대치 간의 간격을 R-R 간격이라고 하며, 해당 간격이 클수록 온열 환경 변화에 대한 적응도가 높다는 것을 의미한다. 시간 영역 분석인 SDRR은 R-R 간격의 표준 편차, RMSSD는 연속 차이의 평균 제곱근, pRR50은 50 ms 이상 차이가 나는 인접한 R-R 간격의 백분율을 의미하며, 세 가지 지표는 스트레스 상황에서 감소하는 경향을 보인다. 주파수 영역 분석 지표의 LF/HF ratio 중 LF(Low Frequence, 0.04 ~ 0.15 Hz)는 저주파 영역으로서 교감신경과 부교감신경의 활동을 동시에 반영하는 지표이며 HF(High Frequence, 0.15 ~ 0.4 Hz)는 부교감 신경계의 활동에 대한 지표이다. 즉, LF/HF는 자율신경의 전체적인 균형 정도를 정량적으로 평가할 수 있는 지표이며 교감신경활성도에 비례하고 부교감신경 활성도에 반비례한다(Rickards et al., 2010). LF/HF는 1에 가까울수록 안정화되었다고 정의되고 있으며 스트레스 상황에서 증가하는 경향을 보이게 된다(Lee et al., 2019).

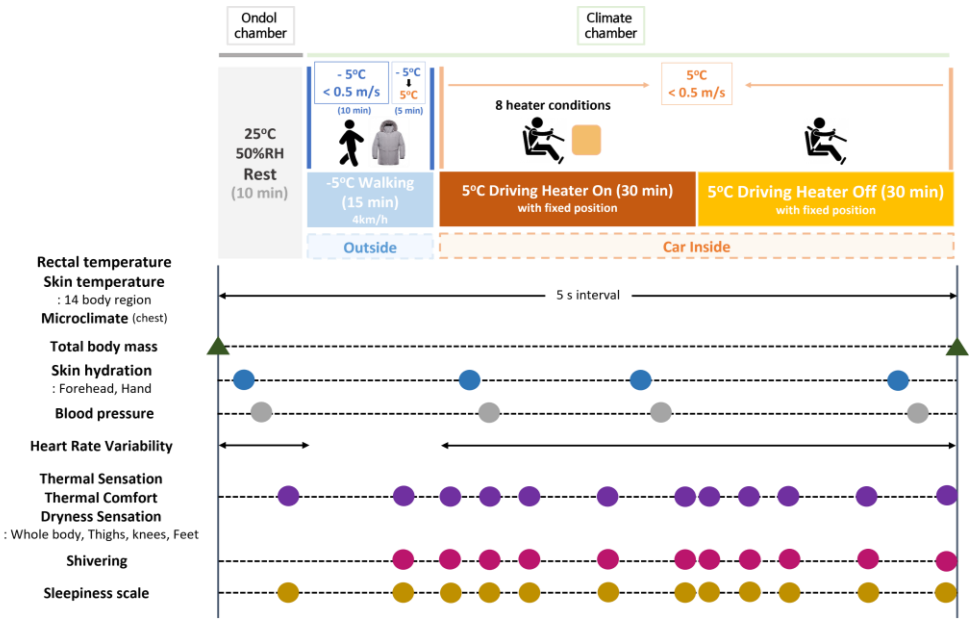

Figure 2.3 Experimental protocol and measurement intervals.

Figure 2.4 Experiment images: 25°C Rest (a), -5°C Walking (b), and 5°C Driving (c).

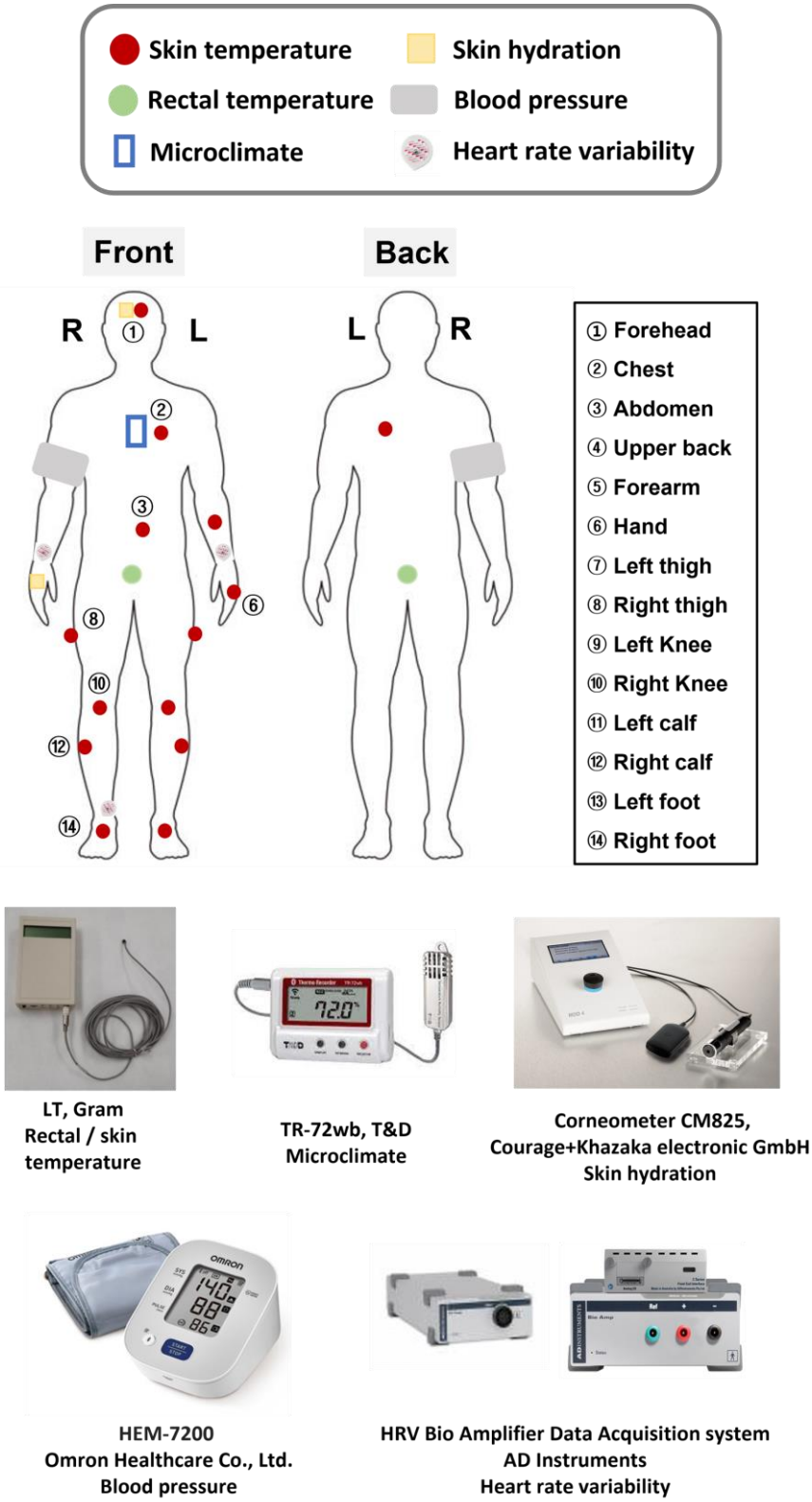

Figure 2.5 Sensor attachment and experimental equipment.

4.3.2 주관적 감각

한서감, 온열쾌적감, 건조감은 전신과 가온 부위로 선정된 넓적다리, 무릎 부위, 발등에 대해 응답되도록 하였다(ISO 10551, 1995). 한서감은 9점 척도 [−4 매우 춥다, −3 춥다, −2 서늘(시원)하다, −1 약간 서늘 (시원)하다, 0 보통이다, 1 약간 따뜻하다, 2 따뜻하다(약간 덥다), 3 덥다, 4 매우 덥다], 온열쾌적감은 7점 척도[−3 매우 불쾌하다, −2 불쾌하다, −1 약간 불쾌하다, 0 보통이다, 1 약간 쾌적하다, 2 쾌적하다, 3 매우 쾌적하다], 건조감은 7점 척도[−3 매우 건조하다, −2 건조하다, −1 약간 건조하다, 0 보통이다, 1 약간 습하다, 2 습하다, 3 매우 습하다]를 사용하였다(Fig. 2.6a).

전율이 느껴진 부위는 인체 21부위 인체 지도 중 온열 환경으로 인해 전율을 느낀 인체 부위에 대해 응답하도록 하였으며(Fig. 2.6b), 졸음 정도는 캐롤린스카 졸음척도를 통해 응답되도록 하였으며, 10점 척도 [1 정신이 극도로 명료함, 2 정신이 매우 명료함, 3 정신이 명료함, 4 정신이 약간 명료함, 5 정신이 명료하지도 졸리지도 않음, 6 몇몇 졸음의 신호가 느껴짐, 7 졸리지만 깨어 있기 위해 노력하지 않아도 됨, 8 졸리며 깨어 있기 위해 노력이 필요함, 9 매우 졸리고, 깨어 있기 위해 매우 노력 중이며, 졸음과 사투 중임, 10 극도로 졸리며, 깨어 있을 수 없음]를 사용하였다(Fig. 2.6c).

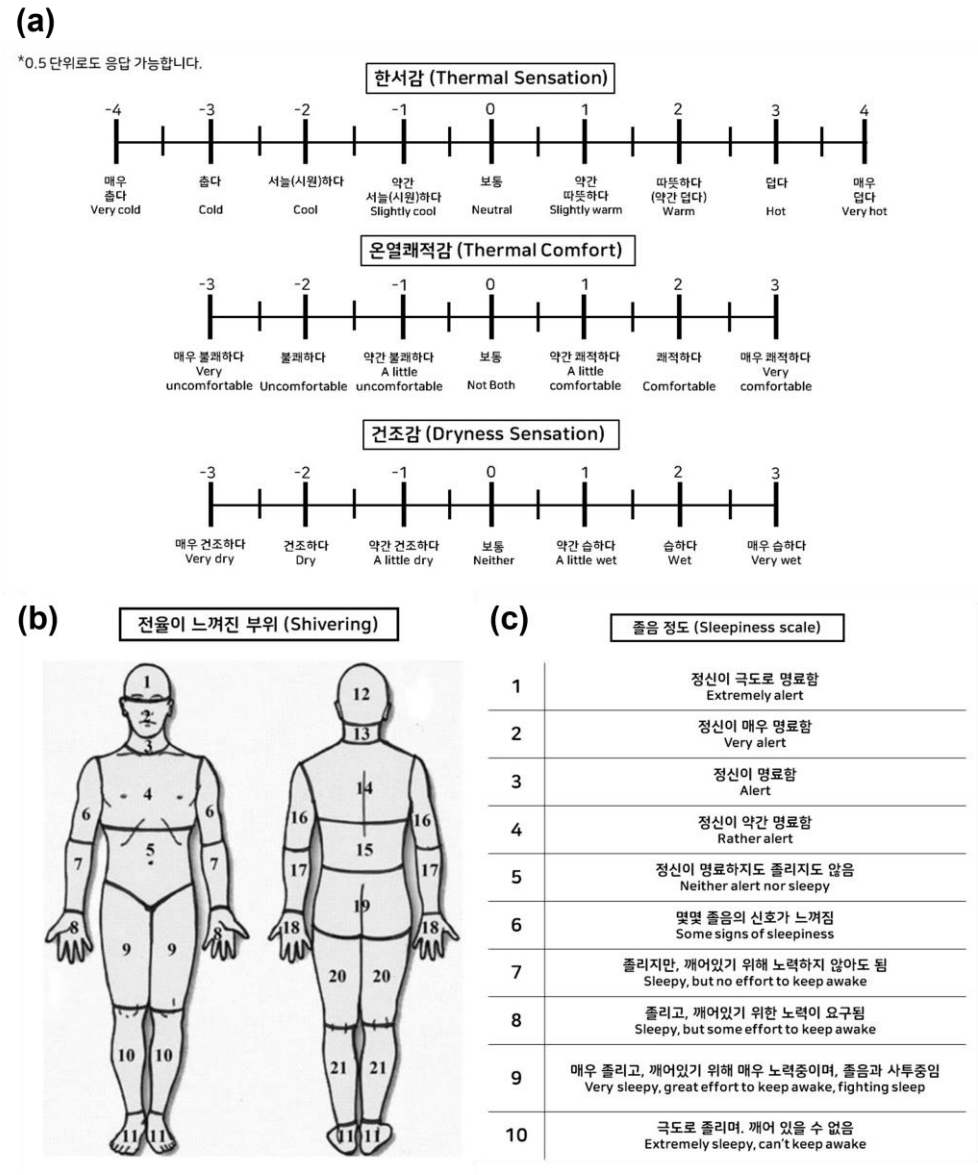

Figure 2.6 Subjective responses measurements: Thermal sensation, thermal comfort, dryness sensation (a), shivering (b), and sleepiness scale (c).

제 5 절 데이터 분석

인체 하체부인 넓적다리, 무릎, 종아리, 발등의 피부온은 왼쪽과 오른쪽에서 각각 측정하여 평균값을 해당 부위의 피부온으로 사용하였으며 평균 피부온은 Hardy & Dubois (1938)의 7점법을 수정한 아래 식을 이용하여 계산되었다.

Mean skin temperature (mean $T_{sk,}$ °C) = 0.07 $T_{forehead}$ + 0.12 T_{chest} + 0.12 $T_{abdomen}$ + 0.12 $T_{upperback}$ + 0.14 $T_{forearm}$ + 0.05 T_{hand} + 0.095 $T_{thigh(left)}$ + 0.095 $T_{thigh(right)}$ + 0.0325 $T_{knee(left)}$ + 0.0325 $T_{knee(right)}$ + 0.0325 $T_{calf(left)}$ + 0.0325 $T_{calf(right)}$ + 0.035 $T_{foot(left)}$ + 0.035 $T_{foot(right)}$

모든 데이터는 Mean ± SD 혹은 Mean ± SE로 제시되었다. 인체 생리 반응 중 직장온, 피부온, 의복내 온습도의 조건 및 시간에 따른 차이를 분석하기 위해 네 가지 구간[25°C Rest, −5°C Walking, 5°C Driving Heater On, 5°C Driving Heater Off]별 초기 혹은 종료 직전 3분 평균의 데이터를 사용하였다. 심박변이도는 10분 간격으로 데이터를 추출하여 사용하였다.

인체 생리 반응 항목의 조건 및 시간에 따른 차이는 Repeated Measure ANOVA를 통해 확인하였으며, 모든 주관적 감각 항목의 조건 간 차이는 Friedman test를 통해 분석하였다. 여덟 조건 간 차이는 Tukey's HSD의 사후 분석을 통해 분석하였다. 인체 생리 반응 간 혹은 인체 생리 반응과 주관적 감각 항목 간의 상관 관계 분석을 위해 Pearson's correlation을 사용하였으며, 주관적 감각 항목 간의 상관은 Spearman's rank correlation으로 분석하였다. 통계 분석은 IBM SPSS V.26을 사용하였으며, 통계적 유의성은 $P < 0.05$로 설정하였다.

제 3 장 결 과

제 1 절 인체 생리 반응

1.1 직장온

직장온은 여덟 가지 조건 간 차이와 시간에 따른 차이 모두 존재하지 않았다. 총 85분간 복사 히터 가온 유무에 상관없이 모든 조건에서의 직장온은 36.8 ± 0.3 ℃ 이상 37.2 ± 0.3 ℃ 이하의 정상 심부온 범위내로 관찰되었다(Fig. 3.1).

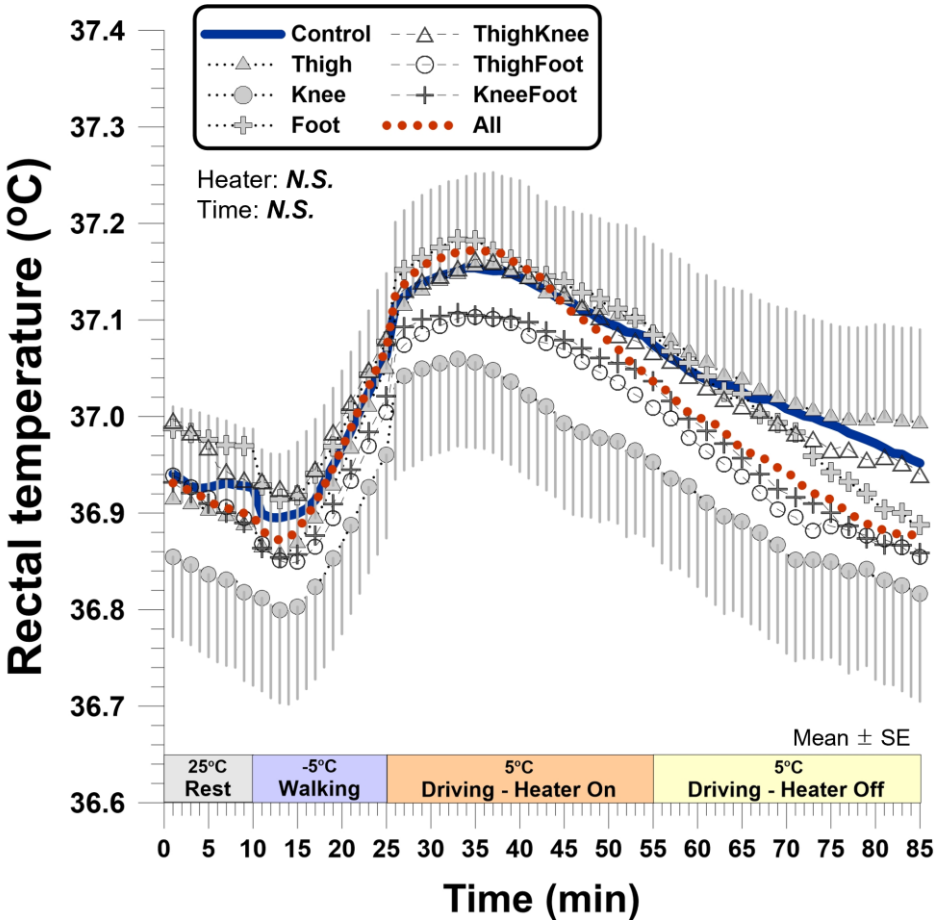

Figure 3.1 Time courses of rectal temperature among the 8 conditions.

1.2 피부온

평균피부온은 Control 조건과 Foot 조건을 제외한 모든 조건에서 복사 히터 가온 시 지속적으로 평균피부온이 상승하고 복사 히터 종료 후 하강하는 경향을 보였다. 평균피부온은 조건 간 유의한 차이가 발견되었으며($P < 0.001$) 시간에 따른 차이($P < 0.001$) 역시 유의하였다. 복사 히터 가온 초기의 평균피부온은 한 부위 가온 조건 중 Thigh 조건이 가장 높았고, 두 부위 가온 조건 중 ThighKnee 조건, ThighFoot 조건과 All 조건에서 여덟 조건 중 유사하게 가장 높았음을 확인하였다. 복사 히터 가온 종료 직전의 평균피부온 역시 한 부위 가온 조건 중 Thigh 조건이 가장 높았으며, 두 부위 가온 조건의 ThighKnee 조건과 All 조건에서 여덟 조건 중 가장 높았음을 확인하였다. 이 때 Thigh 조건에서는 31.1 ± 0.5°C, ThighFoot 조건에서는 31.3 ± 0.3°C의 평균피부온을 보였고, Knee 조건에서는 30.5 ± 0.6°C, KneeFoot 조건에서는 30.6 ± 0.5°C의 평균피부온을 나타낸 것으로 보아 발등 가온의 영향이 평균피부온 상승에 미미했음을 확인하였다. 한편 복사 히터 가온 종료 직후와 실험 종료 직전에는 ThighKnee 조건과 All 조건에서 가장 높은 평균피부온이 관찰되었다. 그러나 복사 히터 가온 시 온열적 중성환경인 25°C Rest에서의 평균피부온인 33.3 ± 0.1°C에 도달하는 조건은 발견되지 않았다(Fig. 3.2; Table 3.1).

부위별 피부온의 경우, 인체 상체부에 해당하는 이마, 가슴, 복부, 윗등, 아래팔, 그리고 손등의 피부온에서 총 85분의 실험동안 조건 간 유의한 차이는 발견되지 않았다. 그러나 인체 사지 말단 부위인 손등에서 -5°C Walking 시작 후 실험 종료 시까지 지속적으로 하강함이 관찰되어, 5°C

Driving Heater Off 종료 직전 손등 피부온은 평균 19.1 ± 0.7°C에 도달하였다(Fig. 3.3f). 인체 하부에 해당하는 넓적다리(Fig. 3.4a), 무릎(Fig. 3.4b), 종아리(Fig. 3.4c)와 발등(Fig. 3.4d) 피부온은 모두 조건 간 유의차(all *P*s < 0.001)와 시간에 따른 유의한 차이(all *P*s < 0.001)가 확인되었다. 특히 가온 부위 중 넓적다리와 무릎 피부온의 경우, 가온 부위가 포함된 모든 조건에서 복사 히터 가온 초기부터 복사 히터 종료 후 실험 종료 시까지 해당 부위의 피부온이 유의하게 높았다(all *P*s < 0.001). 그러나 발등의 경우, 복사 히터 가온 초기에는 조건 간 유의한 차이가 없었으며, Foot 조건을 제외한 발등 가온 포함 조건에서 복사 히터 종료 직전부터 실험 종료 시까지만의 발등 피부온이 유의하게 높았음을 확인하였다(all *P*s < 0.001). 가온 초기 3분 평균과 가온 종료 직전 3분 평균을 비교하였을 때 넓적다리 피부온은 5.0 ± 0.2°C 상승, 무릎 피부온은 6.8 ± 1.3°C 상승, 발등 피부온은 0.7 ± 0.3°C 하강하였으며, 가온 종료 초기 3분 평균과 가온 종료 직전 3분 평균을 비교하였을 때 넓적다리 피부온은 5.9 ± 0.3°C 하강, 무릎 피부온은 7.8 ± 0.9°C 하강, 발등은 2.8 ± 0.0°C 하강하였다. 종아리는 직접적인 가온 부위는 아니었으나, KneeFoot 조건과 All 조건에서 가장 높은 피부온을 복사 히터 가온 종료 직전과 직후에 보였음을 확인하였다.

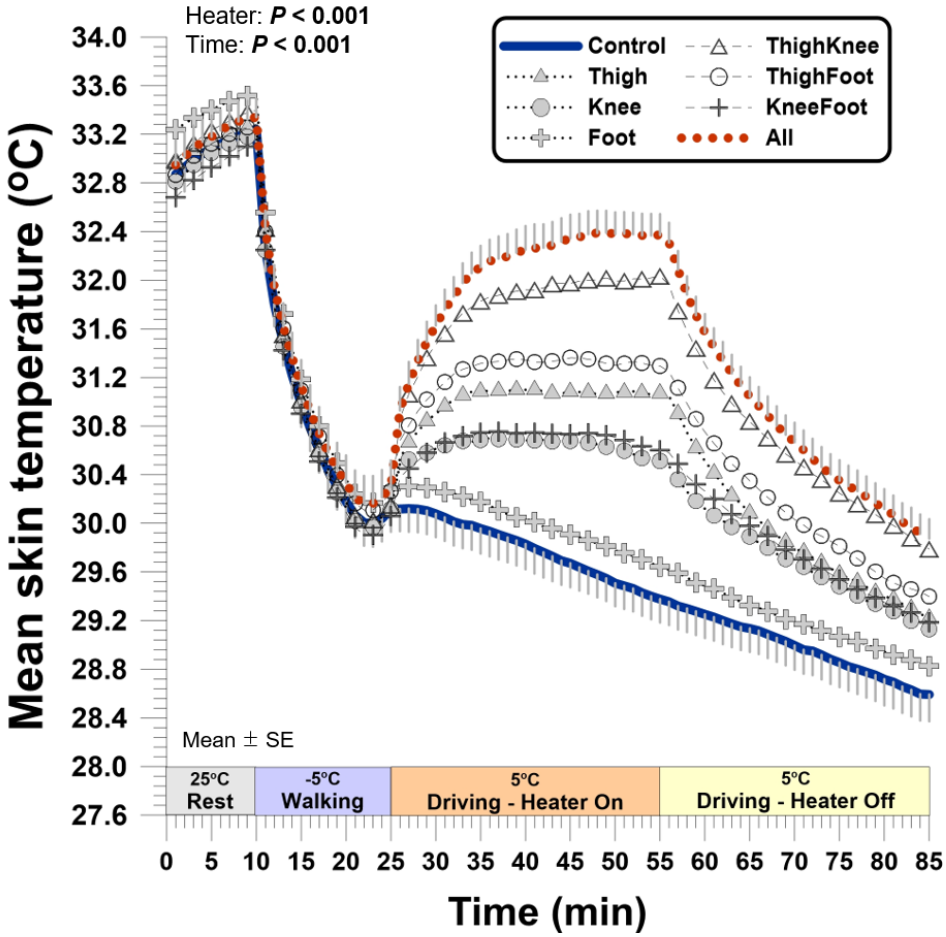

Figure 3.2 Time courses of mean skin temperature among the 8 conditions.

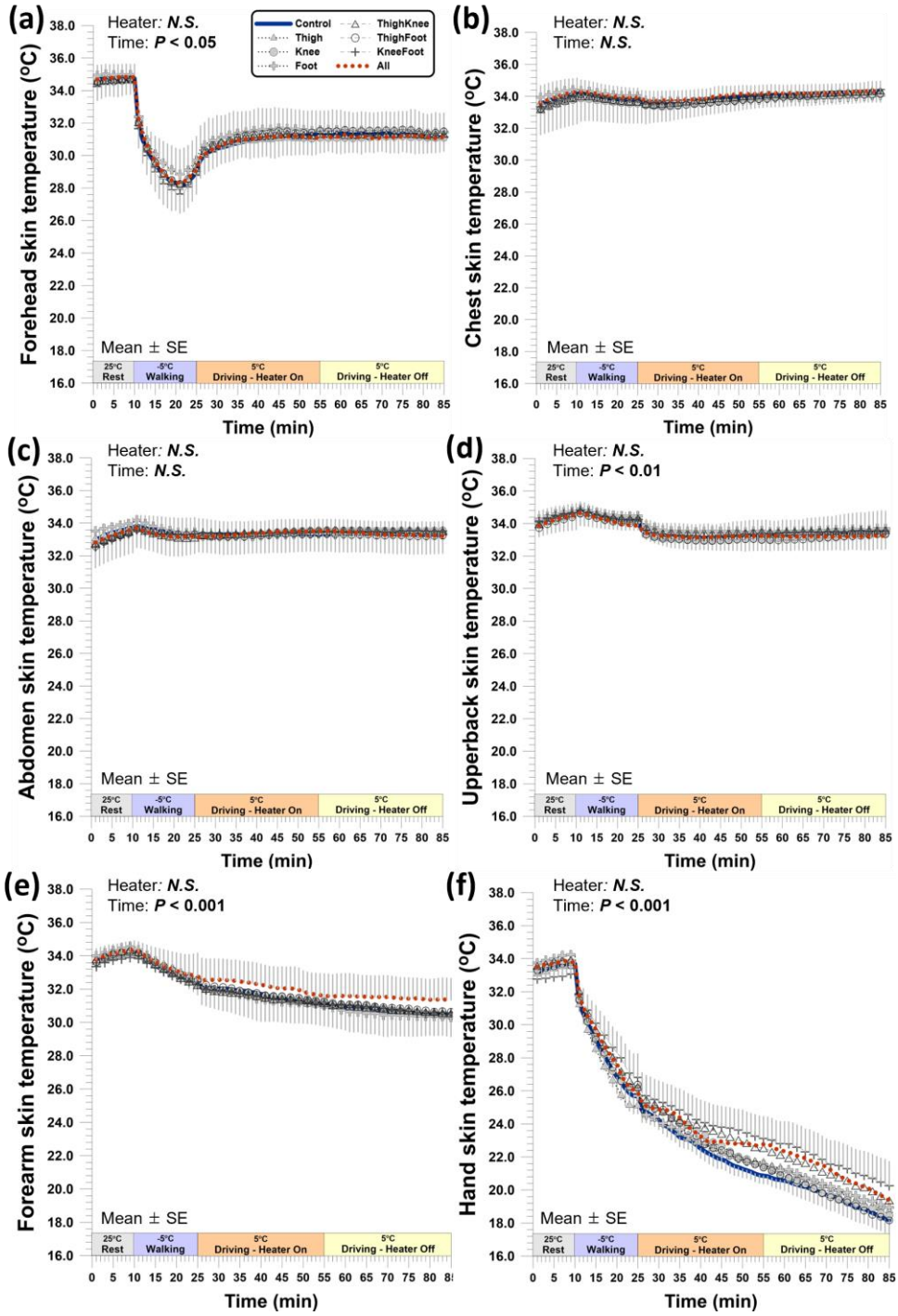

Figure 3.3 Time courses of head and upper body skin temperature among the 8 conditions: The Forehead (a), chest (b), abdomen (c), upper back (d), forearm (e), and hand temperature (f).

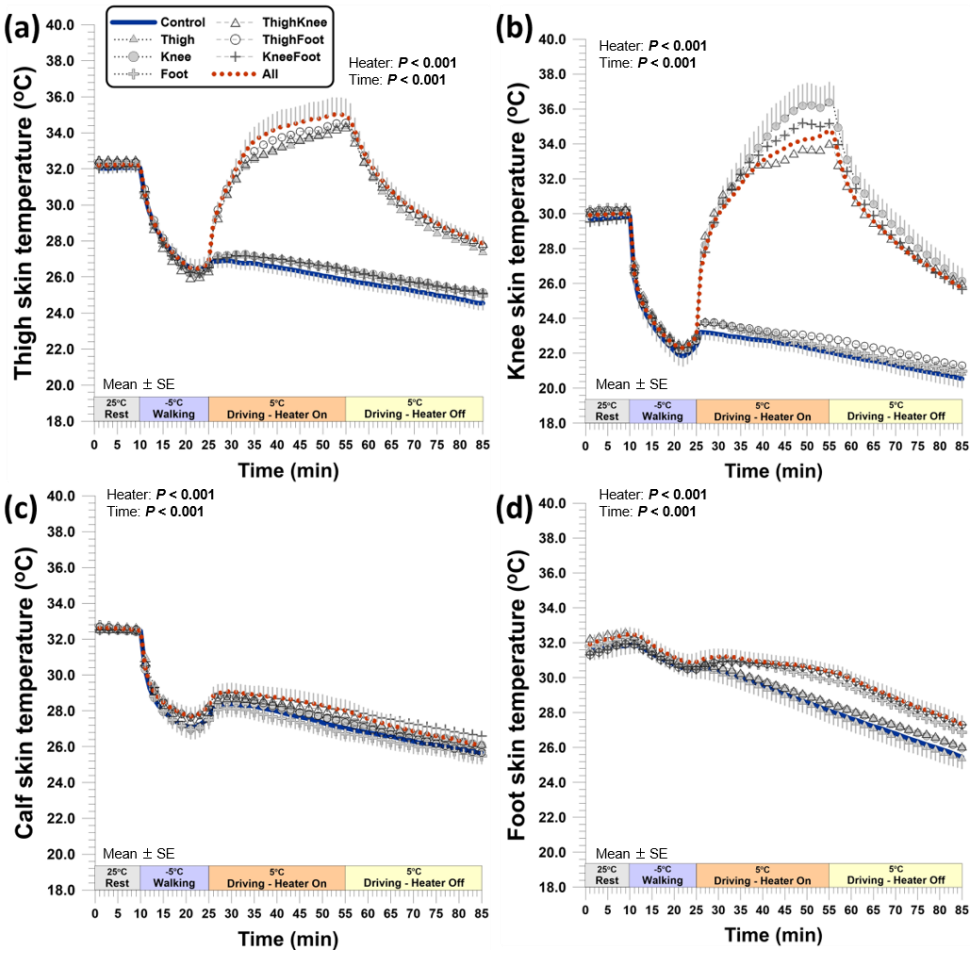

Figure 3.4 Time courses of lower body skin temperature among the 8 conditions: The Thigh (a), knee (b), calf (c), and foot temperature (d).

Table 3.1 Changes of mean skin temperature among the 8 conditions

Phase		Experimental conditions								*P* value
		Control	Thigh	Knee	Foot	ThighKnee	ThighFoot	KneeFoot	All	
25°C Rest (Last 3-min average)		33.2 ± 0.6	33.3 ± 0.5	33.2 ± 0.7	33.5 ± 0.4	33.4 ± 0.4	33.3 ± 0.4	33.1 ± 0.6	33.3 ± 0.5	***N.S.***
-5°C Walking (Last 3-min average)		30.0 ± 0.6	30.1 ± 0.5	30.0 ± 0.6	30.2 ± 0.5	30.1 ± 0.4	30.2 ± 0.6	30.0 ± 0.6	30.2 ± 0.7	***N.S.***
5°C Driving Heater On	(Initial 3-min average)	30.1 ± 0.6^{e}	30.7 ± 0.5^{abcd}	30.5 ± 0.7^{cde}	30.3 ± 0.5^{de}	31.0 ± 0.5^{ab}	30.8 ± 0.5^{abc}	30.4 ± 0.5^{bcde}	31.1 ± 0.6^{a}	***
	(Last 3-min average)	29.4 ± 0.6^{c}	31.1 ± 0.5^{ab}	30.5 ± 0.6^{c}	29.7 ± 0.5^{c}	32.0 ± 0.4^{a}	31.3 ± 0.3^{b}	30.6 ± 0.5^{bc}	32.4 ± 0.6^{a}	
5°C Driving Heater Off	(Initial 3-min average)	29.3 ± 0.6^{c}	30.9 ± 0.5^{bc}	30.4 ± 0.6^{c}	29.6 ± 0.6^{c}	31.8 ± 0.3^{a}	31.1 ± 0.3^{b}	30.5 ± 0.5^{bc}	32.1 ± 0.5^{a}	***
	(Last 3-min average)	28.6 ± 0.7^{d}	29.3 ± 0.5^{bc}	29.2 ± 0.6^{bc}	28.9 ± 0.6^{cd}	29.8 ± 0.5^{a}	29.4 ± 0.4^{ab}	29.2 ± 0.5^{ab}	29.9 ± 0.5^{a}	

All data reported as mean ± SD. ***: $P < 0.001$, ***N.S.***: No significant difference.
$^{a, b, c, d}$ or ^{e} represent significant differences among the eight conditions of the radiant heaters by the Tukey HSD's post-hoc test.

1.3 의복내 온습도

의복내온도(Fig. 3.5a)와 의복내습도(Fig. 3.5b)를 가슴 부위에서 측정한 결과, 온도와 습도 모두 조건 간 유의한 차이는 존재하지 않았으나 시간에 따른 차이가 존재하였다(all *P*s < 0.01). 온열적 중성환경인 25°C Rest에서의 의복내온도는 34.3 ± 0.1°C와 의복내습도는 57.2 ± 5.3%RH에 도달하는 조건 역시 발견되지 않았다.

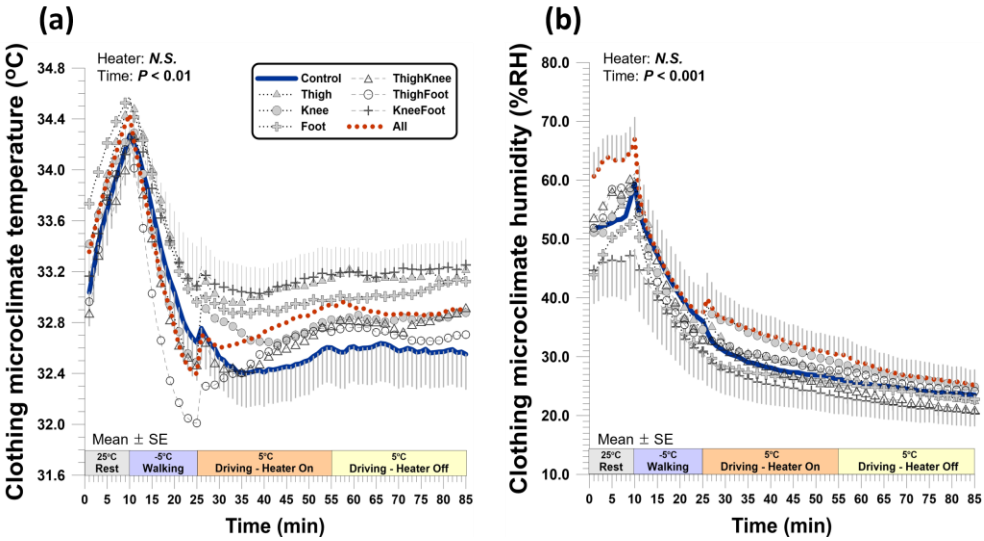

Figure 3.5 Time courses of clothing microclimate among the 8 conditions: clothing temperature (a), clothing humidity (b).

1.4 불감증설

실험 시작 전후 측정한 체중의 차이로 불감증설을 추정한 결과, 여덟 가지 조건 간의 유의한 차이는 발견되지 않았다(Table 3.2). 총 여덟 조건에서 평균 137 ± 6 g/trial의 불감증설이 발생하였는데, 이는 10인 평균 체중의 0.01%에 해당한다.

Table 3.2 Insensible perspiration among the 8 conditions

Experimental conditions								
Control	Thigh	Knee	Foot	ThighKnee	ThighFoot	KneeFoot	All	P
132 (34)	146 (50)	141 (28)	141 (34)	131 (52)	141 (33)	131 (52)	131 (52)	***N.S.***

All data reported as Mean (SD).
N.S.: No significant difference

1.5 피부수분도

차량 내에서 건조함을 느낄 수 있는 부위인 이마와 손등의 피부 수분도를 측정한 결과, 두 가지 부위 모두 조건 간 유의한 차이는 없었으나 시간에 따른 차이가 발견되었다(Table 3.3; all Ps < 0.01). 피부수분도의 정도는 이마와 손등에서 다른 기준으로 정의되는데, 이마의 경우 매우 건조함 (Very dry, 30 이하), 건조함 (Dry, 30 이상 49 이하), 촉촉함 (Moisturized, 50 이상 59 이하), 매우 촉촉함 (Sufficiently moisturized, 60 이상)으로 해석되며, 손등은 매우 건조함 (Very dry, 15 이하), 건조함 (Dry, 15 이상 29 이하), 촉촉함 (Moisturized, 30 이상 39 이하), 매우 촉촉함 (Sufficiently moisturized, 40 이상)까지 각각 네 가지로 구분된다 (Courage + Khazaka electronic GmbH, Germany). 이마와 손등 모두 온열적 중성환경에서는 매우 촉촉함 단계임이 관찰되었으나, 복사 히터 가온 시작 이후 촉촉함 단계로 감소하는 경향을 보였고 복사 히터 종료 후에는 유사하게 유지되거나 약간 건조한 수준까지만 감소하였음을 확인하였다.

1.6 혈압

수축기 혈압, 이완기 혈압과 평균 동맥압 모두 조건 간 차이와 시간에 따른 차이가 존재하지 않았으며, 정상 범위 내의 혈압임을 확인하였다(Table 3.4).

1.7 심박변이도

10인의 피험자 중 4인의 심박변이도를 측정한 결과, 시간 분석 영역 지표와 주파수 분석 지표 모두에서 여덟 조건 간 유의한 차이는 발견되지 않았으며, 시간 영역 분석 지표인 SDRR(Fig. 3.6a; $P < 0.01$), RMSSD(Fig. 3.6b; $P < 0.001$), pRR50(Fig. 3.6c; $P < 0.01$)은 지속적으로 상승하였으며 시간에 따른 유의차가 확인되었다.

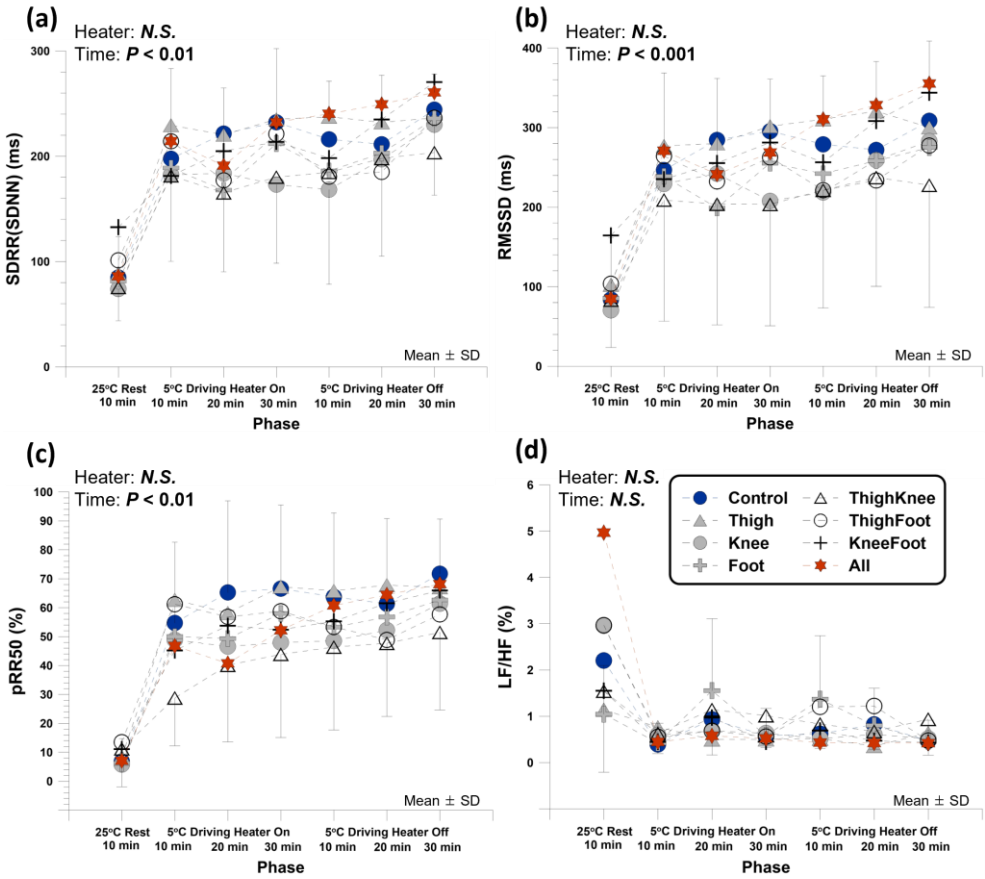

Figure 3.6 Time courses of heart rate variability among the 8 conditions: SDRR (a), RMSSD (b), pRR50 (c), and LF/HF (d).

Table 3.3 Skin hydration at forehead and hand among the 8 conditions

	Phase (Time point)		Experimental conditions								*P* value
			Control	Thigh	Knee	Foot	ThighKnee	ThighFoot	KneeFoot	All	
Forehead Skin hydration	25ºC Rest (3 min)		69 ± 13	69 ± 20	72 ± 10	69 ± 19	68 ± 14	73 ± 21	62 ± 22	69 ± 26	***N.S.***
	5ºC Driving Heater On	(3 min)	50 ± 18	49 ± 17	49 ± 7	49 ± 18	47 ± 16	47 ± 16	52 ± 14	49 ± 13	
		(23 min)	47 ± 14	48 ± 16	52 ± 11	51 ± 17	48 ± 13	47 ± 21	47 ± 14	50 ± 12	
	5ºC Driving Heater Off (23 min)		51 ± 13	46 ± 12	46 ± 10	50 ± 21	43 ± 14	48 ± 17	51 ± 19	49 ± 14	

	Phase (Time point)		Experimental conditions								*P* value
			Control	Thigh	Knee	Foot	ThighKnee	ThighFoot	KneeFoot	All	
Hand Skin hydration	25ºC Rest (3 min)		45 ± 17	43 ± 15	39 ± 17	36 ± 11	46 ± 16	43 ± 18	39 ± 12	42 ± 17	***N.S.***
	5ºC Driving Heater On	(3 min)	30 ± 11	32 ± 8	32 ± 11	30 ± 9	33 ± 15	32 ± 13	32 ± 11	32 ± 16	
		(23 min)	27 ± 10	33 ± 9	31 ± 9	32 ± 9	30 ± 10	28 ± 11	32 ± 11	32 ± 9	
	5ºC Driving Heater Off (23 min)		29 ± 12	28 ± 13	28 ± 6	32 ± 8	30 ± 10	29 ± 8	29 ± 11	31 ± 10	

N.S.: No significant difference

Table 3.4 Blood pressure among the 8 conditions

	Phase (Time point)		Experimental conditions								*P* value
			Control	Thigh	Knee	Foot	ThighKnee	ThighFoot	KneeFoot	All	
SBP	25ºC Rest (5 min)		118 ± 9	120 ± 12	119 ± 9	115 ± 16	118 ± 9	118 ± 11	120 ± 7	119 ± 9	***N.S.***
	5ºC Driving Heater On	(5 min)	120 ± 10	123 ± 7	122 ± 8	114 ± 18	119 ± 9	119 ± 8	122 ± 9	124 ± 6	
		(25min)	122 ± 10	121 ± 8	123 ± 7	117 ± 20	120 ± 6	120 ± 7	123 ± 6	120 ± 10	
	5ºC Driving Heater Off (25 min)		121 ± 9	126 ± 6	125 ± 6	120 ± 21	125 ± 7	123 ± 9	126 ± 6	125 ± 8	
DBP	25ºC Rest (5 min)		80 ± 6	83 ± 11	80 ± 8	73 ± 19	79 ± 9	78 ± 6	81 ± 9	78 ± 5	
	5ºC Driving Heater On	(5 min)	82 ± 6	82 ± 8	81 ± 8	75 ± 18	79 ± 9	81 ± 9	80 ± 10	82 ± 6	
		(25min)	81 ± 9	84 ± 7	82 ± 7	77 ± 17	80 ± 11	81 ± 10	82 ± 9	81 ± 7	
	5ºC Driving Heater Off (25 min)		83 ± 5	85 ± 7	86 ± 8	79 ± 18	84 ± 8	85 ± 9	84 ± 8	87 ± 6	
MAP	25ºC Rest (5 min)		93 ± 7	95 ± 11	93 ± 7	87 ± 18	92 ± 8	92 ± 7	94 ± 8	92 ± 6	
	5ºC Driving Heater On	(5 min)	94 ± 7	96 ± 8	95 ± 7	88 ± 18	93 ± 9	94 ± 8	94 ± 9	96 ± 5	
		(25min)	95 ± 9	96 ± 7	96 ± 7	91 ± 18	93 ± 9	94 ± 9	96 ± 8	94 ± 7	
	5ºC Driving Heater Off (25 min)		95 ± 6	99 ± 6	99 ± 6	93 ± 18	98 ± 7	98 ± 9	98 ± 7	99 ± 6	

N.S.: No significant difference
Abbreviations: SBP: Systolic blood pressure, DBP: Diastolic blood pressure, MAP: Mean arterial blood pressure

제 2 절 주관적 감각

2.1 한서감

전신 한서감의 경우, 복사 히터 가온 시 초기에는 조건 간 차이가 없었으나 가온 10분째부터 가온 종료 직후까지 유의한 차이를 보였다(Fig. 3.7a; Table 3.5, all *P*s < 0.001). 전신 한서감은 가온 10분째에는 한 부위 가온 조건 중 Knee 조건이, 두 부위 가온 조건은 ThighKnee, ThighFoot, KneeFoot 조건 모두, 그리고 All 조건에서도 가장 높음을 확인하였다. 가온 19분째에는 ThighKnee 조건에서 가장 높은 전신 한서감이 관찰되었다. 복사 히터 종료 직전인 가온 29분째에는 한 부위 가온 조건 중 Knee 조건, 두 부위 가온 조건 중 ThighKnee, KneeFoot 조건, 그리고 All 조건에서 가장 높은 전신 한서감이 확인되었다. 복사 히터 종료 직후에는 한 부위 조건 중 Thigh, Knee 조건, 두 부위 가온 조건 중 ThighKnee, KneeFoot 조건, 그리고 All 조건에서 가장 높은 전신 한서감이 관찰되었다. 즉, 복사 히터 가온 시와 종료 직후까지의 전신 한서감은 한 부위 가온 조건 중 Knee 조건, 두 부위 가온 중 ThighKnee 조건, 그리고 All 조건에서 지속적으로 가장 높았으며, 최대 전신 한서감은 ThighKnee 조건에서 발견되었다. ThighKnee 조건에서 복사 히터 가온 시작 직후 전신 한서감은 “약간 춥다” ~ “덥지도 춥지도 않음”이었던 반면, 복사 히터 가온 종료 직전의 전신 한서감은 “덥지도 춥지도 않음”과 “약간 더움” 사이로 응답되었다. 반면 Control 조건과 Foot 조건은 ThighKnee 조건과 All 조건에 비하여 유사한 정도로 유의하게 낮아, 복사 히터 가온 종료 직전 “약간 추움” ~ “추움” 사이로 응답되었다. 한편, 복사 히터 종료 직후 이후에는 조건 간 유의한 차

이 없이 모든 조건에서 시간에 따라 감소하는 추세를 보였다.

국부 한서감 중 넓적다리의 경우, 복사 히터 가온 시 초기 5분째부터 유의한 차이를 보였으며, Thigh, Knee, ThighKnee, KneeFoot, All 조건에서 가온 시 높은 국부 한서감을 보였다. 복사 히터 가온 종료 직후 넓적다리 한서감은 All 조건에서 가장 높았으며 이후 모든 조건에서 넓적다리 한서감은 조건간 유의한 차이 없이 감소하였다(Fig. 3.7b). 넓적다리 한서감은 조건간 유의한 차이를 보인 시점 중 All 조건에서 가장 지속적으로 높았음을 확인하였다.

무릎 부위 한서감은 복사 히터 가온 시작 직후부터 종료 직전까지 조건간 유의한 차이를 보였는데, 특히 KneeFoot 조건에서 모든 시점 가장 높은 무릎 부위 한서감을 보였다. 복사 히터 종료 직후에는 무릎 가온이 포함된 조건인 Knee, ThighKnee, KneeFoot, 그리고 All 조건에서 가장 높은 무릎 부위 한서감을 관찰하였다(Fig. 3.7c). 무릎 부위 한서감은 조건 간 유의한 차이를 보인 시점 중 KneeFoot 조건에서 가장 지속적으로 높았음을 확인하였다.

발등 한서감 또한 복사 히터 가온 5분째부터 가온 종료 5분째까지 조건간 유의한 차이가 나타났는데, 가온 5분째, 10분째, 19분째 발등 한서감은 KneeFoot 조건에서 가장 높았으며 가온 29분째와 복사 히터 종료 직후에는 All 조건에서 가장 높은 발등 한서감을 확인하였다. 가온 종료 후 5분째에는 KneeFoot과 All 조건에서 발등 한서감이 가장 높았다(Fig. 3.7d). 발등 한서감은 조건 간 유의한 차이를 보인 시점 중 KeeeFoot 조건에서 가장 지속적으로 높았음을 확인하였다.

더하여 넓적다리와 무릎 부위의 국부 한서감은 복사 히터 종료 후 급격히 하강한 가운데, 발등 한서감은 서서히 하강하는 경향을 보였다.

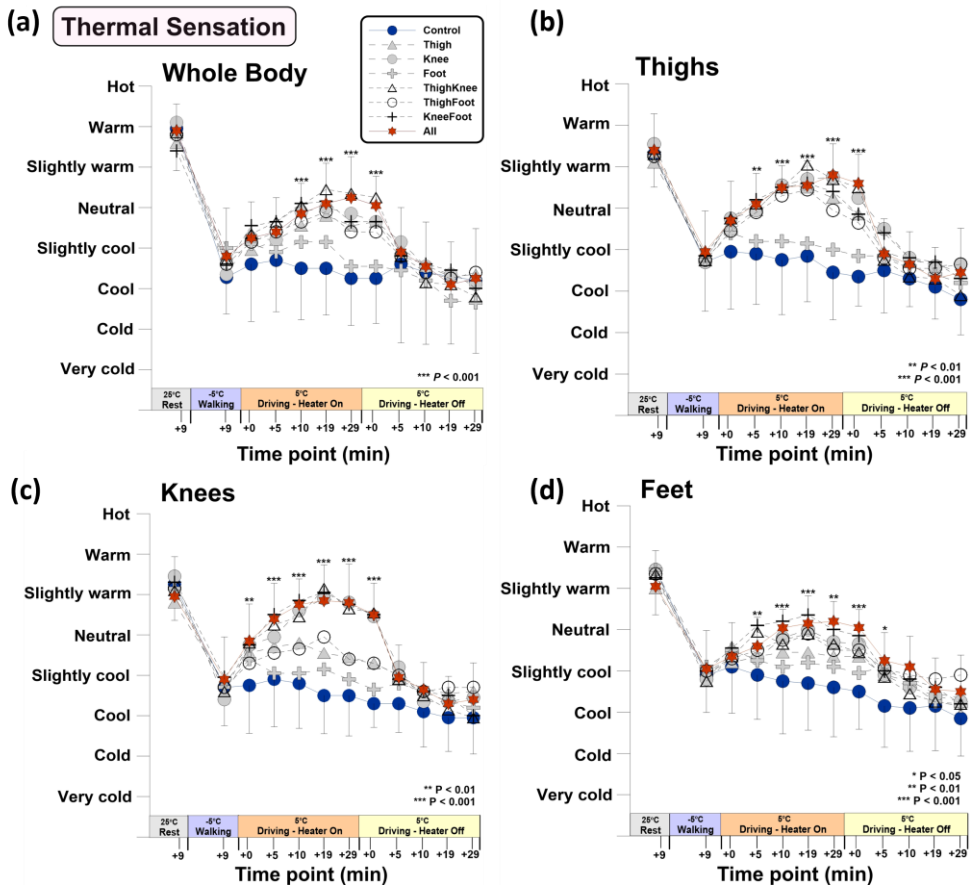

Figure 3.7 Time courses of thermal sensation among the 8 conditions (Mean ± SD): Whole body (a), thighs (b), knees (c), and feet (d).

Table 3.5 Whole body thermal sensation among the 8 conditions

Phase	Time point	Experimental conditions								*P* value
		Control	Thigh	Knee	Foot	ThighKnee	ThighFoot	KneeFoot	All	
25ºC Rest	+ 9 min	2.0 ± 1.0	1.6 ± 1.1	2.1 ± 0.8	1.8 ± 0.8	1.9 ± 0.6	1.8 ± 0.7	1.4 ± 1.3	1.9 ± 0.7	
-5ºC Walking	+ 9 min	-1.7 ± 0.9	-1.2 ± 1.1	-1.7 ± 1.2	-1.0 ± 1.5	-1.3 ± 1.1	-1.4 ± 1.2	-1.4 ± 1.1	-1.2 ± 1.2	***N.S.***
5ºC Driving Heater On	+ 0 min	-1.4 ± 1.4	-1.1 ± 0.8	-0.8 ± 1.4	-0.9 ± 1.4	-0.7 ± 1.1	-0.9 ± 1.0	-0.5 ± 1.1	-0.8 ± 0.9	
	+ 5 min	-1.3 ± 1.3	-0.8 ± 1.0	-0.8 ± 1.1	-1.1 ± 1.3	-0.4 ± 0.9	-0.6 ± 0.8	-0.4 ± 1.1	-0.6 ± 0.8	
	+ 10 min	-1.5 ± 1.3[b]	-0.5 ± 1.1[ab]	-0.1 ± 1.1[a]	-0.9 ± 1.2[ab]	0.1 ± 1.2[a]	-0.4 ± 1.0[a]	0.1 ± 1.0[a]	-0.2 ± 0.7[a]	
	+ 19 min	-1.5 ± 1.2[c]	-0.2 ± 1.1[ab]	0.0 ± 1.0[ab]	-0.9 ± 1.5[bc]	0.5 ± 1.3[a]	-0.1 ± 0.6[ab]	0.2 ± 1.3[ab]	0.1 ± 1.0[ab]	*********
	+ 29 min	-1.8 ± 1.2[c]	-0.5 ± 1.1[ab]	-0.2 ± 1.2[a]	-1.5 ± 0.8[bc]	0.4 ± 1.2[a]	-0.6 ± 0.9[ab]	-0.4 ± 1.3[a]	0.3 ± 1.0[a]	
5ºC Driving Heater Off	+ 0 min	-1.8 ± 1.1[c]	-0.4 ± 1.0[a]	-0.4 ± 1.0[a]	-1.5 ± 1.0[bc]	0.3 ± 1.2[a]	-0.6 ± 1.0[ab]	-0.4 ± 1.3[a]	0.1 ± 0.7[a]	*********
	+ 5 min	-1.4 ± 1.9	-1.0 ± 1.1	-0.9 ± 1.0	-1.6 ± 0.9	-1.2 ± 0.8	-1.2 ± 0.9	-1.2 ± 1.3	-1.1 ± 1.1	
	+ 10 min	-1.6 ± 1.8	-1.5 ± 0.9	-1.5 ± 0.8	-1.8 ± 0.9	-1.9 ± 0.9	-1.6 ± 0.7	-1.4 ± 0.8	-1.5 ± 1.1	***N.S.***
	+ 19 min	-1.7 ± 1.7	-1.7 ± 1.0	-1.7 ± 0.9	-2.3 ± 1.0	-1.9 ± 0.8	-1.8 ± 0.8	-1.6 ± 1.1	-1.9 ± 1.0	
	+ 29 min	-1.8 ± 1.8	-1.7 ± 0.8	-1.9 ± 1.1	-2.4 ± 0.9	-2.2 ± 1.1	-1.6 ± 0.9	-2.0 ± 0.7	-1.8 ± 1.2	

All data reported as mean ± SD. ********: $P < 0.001$, ***N.S.***: No significant difference.
[a, b] or [c] represent significant differences among the eight conditions of the radiant heaters by the Tukey HSD's post-hoc test.

2.2 온열쾌적감

전신 온열쾌적감의 경우, 복사 히터 가온 5분째, 19분째, 29분째와 가온 종료 직후에 조건 간 유의한 차이가 확인되었다(Fig. 3.8a; Table 3.6, all $Ps < 0.01$). 가온 5분째에는 All 조건에서 가장 높았으며, 19분째에는 Foot, ThighKnee, KneeFoot과 All 조건에서 가장 높은 전신 온열쾌적감을 확인하였다. 가온 종료 직전인 29분째에는 한 부위 가온 조건 중 Thigh, Knee, Foot 조건, 두 부위 가온 조건 중 ThighKnee, KneeFoot 조건, 그리고 All 조건에서 가장 높은 전신 온열쾌적감이 확인되었다. 복사 히터 가온 종료 직후에는 한 부위 가온 조건 중 Thigh 조건, 두 부위 가온 조건 중 ThighKnee 조건, 그리고 All 조건에서 전신 온열쾌적감이 가장 높았음을 확인하였다. 전신 온열쾌적감은 All 조건에서 가장 지속적으로 높았으며, 최대 전신 온열쾌적감은 19분째에 ThighKnee 조건에서 발견되었다. 복사 히터 가온 시작 직후 ThighKnee 조건에서의 전신 온열쾌적감은 “쾌적하지도 불쾌하지도 않음” ~ “약간 쾌적함” 사이로 응답된 한편 가온 19분에서의 전신 온열쾌적감은 “약간 쾌적함”과 “쾌적함”의 사이로 응답되었다. 복사 히터 가온 종료 직후 이후로 여덟 조건 간 유의차를 보인 구간은 없었으며, 전신 한서감은 지속적으로 감소하였다.

국부 온열쾌적감 중 넓적다리의 경우, 복사 히터 가온 시 초기 10분째부터 가온 종료 직후까지 유의한 차이를 보였다. 넓적다리 온열쾌적감은 가온 10분째에는 ThighKnee와 KneeFoot 조건에서, 가온 19분째에는 한 부위 가온 조건 중 Thigh, Knee 조건, 두 부위 가온 조건 중 ThighKnee, KneeFoot 조건과 All 조건에서 가장 높았다. 가온 종료 직전인 29분째에

는 한 부위 가온 조건 Thigh, Knee, Foot 조건 모두와 두 부위 가온 조건 중 ThighKnee, Kneefoot 조건, 그리고 All 조건에서 가장 높은 넓적다리 온열쾌적감이 확인되었다. 가온 종료 직후의 넓적다리 온열쾌적감은 한 부위 가온 조건 중 Thigh, Knee 조건, 두 부위 가온 조건 중 ThighKnee 조건, 그리고 All 조건에서 가장 높았다(Fig. 3.8b). 넓적다리에서의 온열쾌적감은 조건 간 유의한 차이를 보인 시점 중 ThighKnee 조건에서 지속적으로 가장 높았음을 확인할 수 있었다.

무릎 부위의 온열쾌적감은 복사 히터 가온 시작 5분째부터 종료 직후까지 조건 간 유의한 차이를 보였다. 무릎 부위 온열 쾌적감은 가온 5분째에 KneeFoot과 All 조건에서 가장 높았으며, 가온 10분째에는 KneeFoot 조건에서 가장 높았다. 가온 19분째에는 ThighKnee와 KneeFoot 조건에서 가장 높았으며 가온 종료 직전인 29분째에는 두 부위 가온 조건 중 ThighKnee, KneeFoot 조건과 All 조건에서 가장 높았음을 확인하였다. 복사 히터 가온 종료 직후에는 한 부위 가온 조건 중 Knee 조건, 두 부위 가온 조건 중 ThighKnee, KneeFoot 조건과 All 조건에서 가장 높은 무릎 부위 온열쾌적감이 관찰되었다(Fig. 3.8c). 무릎 온열쾌적감은 KneeFoot 조건에서 지속적으로 가장 높았음을 확인할 수 있었다.

발등 온열쾌적감은 복사 히터 가온 10분째와 가온 종료 직후에서만 조건 간 유의한 차이가 나타났다. 가온 10분째에는 KneeFoot 조건에서만 유의하게 높았으며 가온 종료 직후에는 한 부위 가온 조건 중 Thigh, Knee 조건에서, 두 부위 가온 조건 중 ThighKnee 조건에서, 그리고 All 조건에서 가장 높은 발등 온열쾌적감을 확인하였다(Fig. 3.8d).

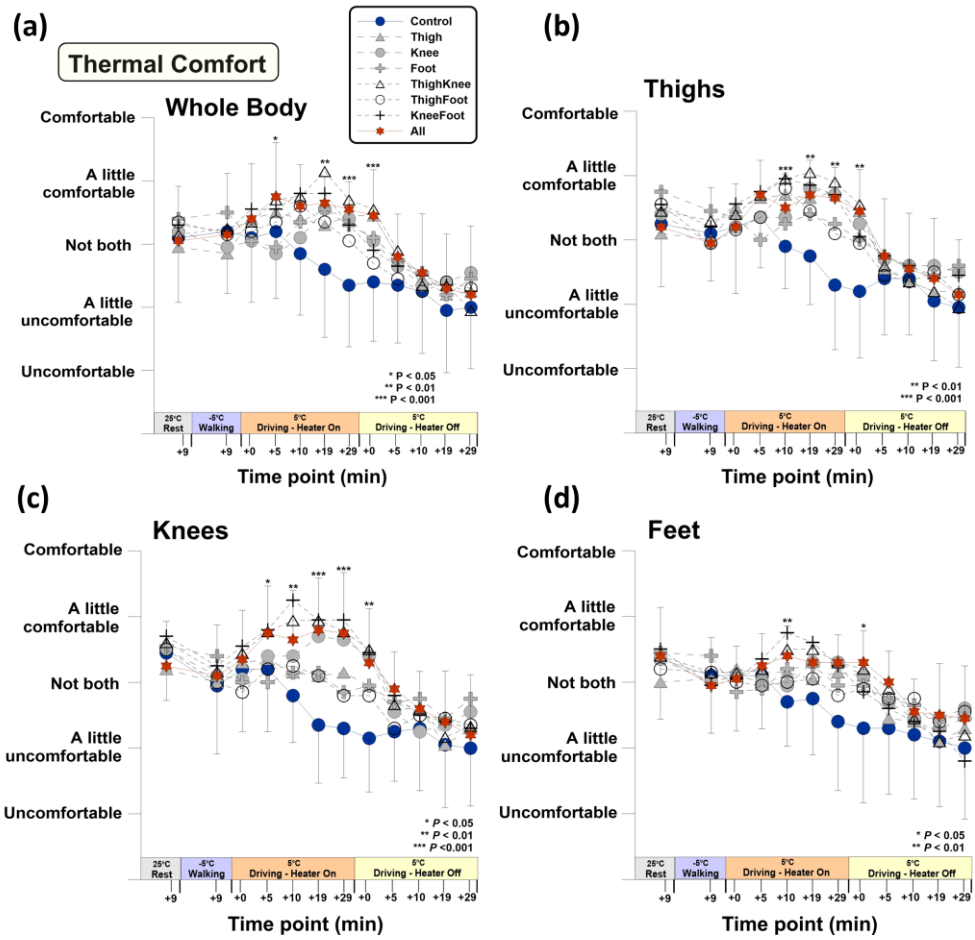

Figure 3.8 Time courses of thermal comfort among the 8 conditions (Mean ± SD): Whole body (a), thighs (b), knees (c), and feet (d).

Table 3.6 Whole body thermal comfort among the 8 conditions

Phase		Experimental conditions								*P* value
		Control	Thigh	Knee	Foot	ThighKnee	ThighFoot	KneeFoot	All	
25ºC Rest	9 min	0.1 ± 1.0	-0.1 ± 0.9	0.2 ± 1.0	0.4 ± 1.4	0.2 ± 1.1	0.4 ± 1.0	0.3 ± 1.1	0.1 ± 0.9	
-5ºC Walking	+ 9 min	0.2 ± 1.0	-0.2 ± 1.2	-0.1 ± 1.1	0.5 ± 1.3	0.3 ± 1.0	0.2 ± 1.1	0.2 ± 0.9	0.2 ± 1.0	*N.S.*
5ºC Driving Heater On	+ 0 min	0.1 ± 1.0	0.4 ± 0.8	0.1 ± 1.0	0.1 ± 1.2	0.4 ± 0.7	0.2 ± 1.1	0.6 ± 1.0	0.4 ± 0.9	
	+ 5 min	0.2 ± 1.1[ab]	0.5 ± 0.8[ab]	-0.2 ± 0.9[b]	-0.1 ± 1.4[ab]	0.7 ± 0.4[ab]	0.4 ± 1.0[ab]	0.6 ± 0.9[ab]	0.8 ± 0.9[a]	*
	+ 10 min	-0.2 ± 1.0	0.4 ± 0.8	0.1 ± 0.9	0.4 ± 1.1	0.8 ± 0.8	0.6 ± 0.9	0.8 ± 0.7	0.6 ± 0.7	*N.S.*
	+ 19 min	-0.4 ± 1.1[b]	0.3 ± 0.8[ab]	0.6 ± 0.9[a]	0.6 ± 1.5[a]	1.2 ± 0.5[a]	0.4 ± 0.7[ab]	0.8 ± 0.9[a]	0.7 ± 0.4[a]	**
	+ 29 min	-0.7 ± 1.0[b]	0.5 ± 0.7[a]	0.4 ± 0.8[a]	0.3 ± 1.1[a]	0.7 ± 0.7[a]	0.1 ± 0.7[ab]	0.3 ± 0.8[a]	0.6 ± 0.4[a]	***
5ºC Driving Heater Off.	+ 0 min	-0.6 ± 0.9[b]	0.5 ± 0.6[a]	0.1 ± 0.8[ab]	0.1 ± 1.0[ab]	0.6 ± 0.8[a]	-0.3 ± 1.0[b]	-0.1 ± 0.7[ab]	0.5 ± 0.7[a]	
	+ 5 min	-0.7 ± 0.9	-0.2 ± 0.7	-0.4 ± 0.7	-0.3 ± 1.3	-0.1 ± 0.9	-0.6 ± 0.8	-0.4 ± 0.9	-0.2 ± 0.7	
	+ 10 min	-0.8 ± 1.0	-0.6 ± 0.9	-0.7 ± 0.9	-0.5 ± 1.3	-0.7 ± 0.9	-0.8 ± 1.1	-0.5 ± 1.0	-0.5 ± 0.9	*N.S.*
	+ 19 min	-1.1 ± 1.0	-0.8 ± 0.9	-0.6 ± 0.7	-0.8 ± 1.2	-0.7 ± 1.2	-0.6 ± 0.8	-0.7 ± 1.0	-0.7 ± 0.9	
	+ 29 min	-1.0 ± 1.0	-0.8 ± 1.0	-0.5 ± 1.2	-0.6 ± 1.5	-1.1 ± 1.2	-0.7 ± 0.9	-0.8 ± 1.1	-0.8 ± 1.1	

All data reported as mean ± SD. ***: $P < 0.001$, ***N.S.***: No significant difference.
[a] or [b] represent significant differences among the eight conditions of the radiant heaters by the Tukey HSD's post-hoc test.

2.3 건조감

전신 건조감의 경우, 복사 히터 가온 종료 직전($P < 0.01$)과 가온 종료 직후($P < 0.05$)에서만 조건 간 유의한 차이가 확인되었으며, All 조건에서만 유의하게 건조감이 높았음을 확인하였다. 해당 조건에서 전신 건조감은 “건조하지도 습하지도 않음”과 “약간 건조함” 사이로 응답되었다(Fig. 3.9a; Table 3.7).

국부 건조감의 경우, 넓적다리 건조감은 복사 히터 가온 시 19분째부터 종료 직후까지 조건 간 유의한 차이를 보였다(Fig. 3.9b). 가온 19분째의 넓적다리 건조감은 한 부위 조건 중 Thigh, Knee 조건에서 높았으며 두 부위 조건 중에서는 ThighFoot, KneeFoot 조건에서 가장 높았다. 가온 29분째에서는 한 부위 조건 중 Thigh, Knee 조건에서 높았으며 두 부위 조건 중에서는 ThighKnee, KneeFoot 조건, 그리고 All 조건에서 가장 높은 넓적다리 건조감이 나타났다. 복사 히터 종료 직후에는 한 부위 조건 중 Thigh 조건, 두 부위 가온 조건 중 ThighKnee, KneeFoot 조건과 All 조건에서 가장 높은 넓적다리 건조감을 확인하였다. 넓적다리 건조감은 조건 간 유의한 차이를 보인 시점 중 Thigh와 KneeFoot 조건에서 지속적으로 높았음을 확인할 수 있었다.

무릎 부위 건조감은 복사 히터 가온 19분째부터 실험 종료 시까지 조건 간 유의한 차이가 확인되었다(Fig. 3.9c). 가온 19분째에는 한 부위 가온 조건 중 Knee, Foot 조건과 두 부위 조건 ThighKnee, ThighFoot, KneeFoot 모두 가장 높은 무릎 부위 건조감을 보였다. 가온 29분째에는 한 부위 가온 중 Thigh 조건, 두 부위 가온 조건 중 ThighKnee,

KneeFoot 조건과 All 조건에서 가장 높았다. 가온 종료 직후에는 한 부위 가온 조건 중 Knee 조건, 두 부위 가온 조건 중 ThighKnee, KneeFoot 조건과 All 조건에서 가장 높았다. 가온 종료 후 5분째에는 All 조건에서, 10분째에는 Foot 조건에서 가장 높은 무릎 부위 건조감이 확인되었다. 가온 종료 19분째와 29분째에는 All 조건에서 가장 높은 무릎 부위 건조감을 보였다. 무릎 부위 건조감은 All 조건에서 지속적으로 가장 높았음을 확인하였다.

발등 건조감은 복사 히터 가온 19분째와 가온 종료 후 10분째부터 실험 종료 시까지 조건 간 유의한 차이가 확인되었다(Fig. 3.9d). 가온 19분째에는 한 부위 가온 조건 중 Foot 조건, 두 부위 가온 조건은 ThighKnee, ThighFoot, KneeFoot 조건 모두, 그리고 All 조건에서 가장 높은 발등 건조감이 확인되었다. 가온 종료 후 10분째에는 Foot 조건과 All 조건에서, 가온 종료 후 19분째와 29분째 모두 All 조건에서 가장 높은 발등 건조감을 보였다. 발등 건조감은 All 조건에서 지속적으로 가장 높은 것을 확인할 수 있었다.

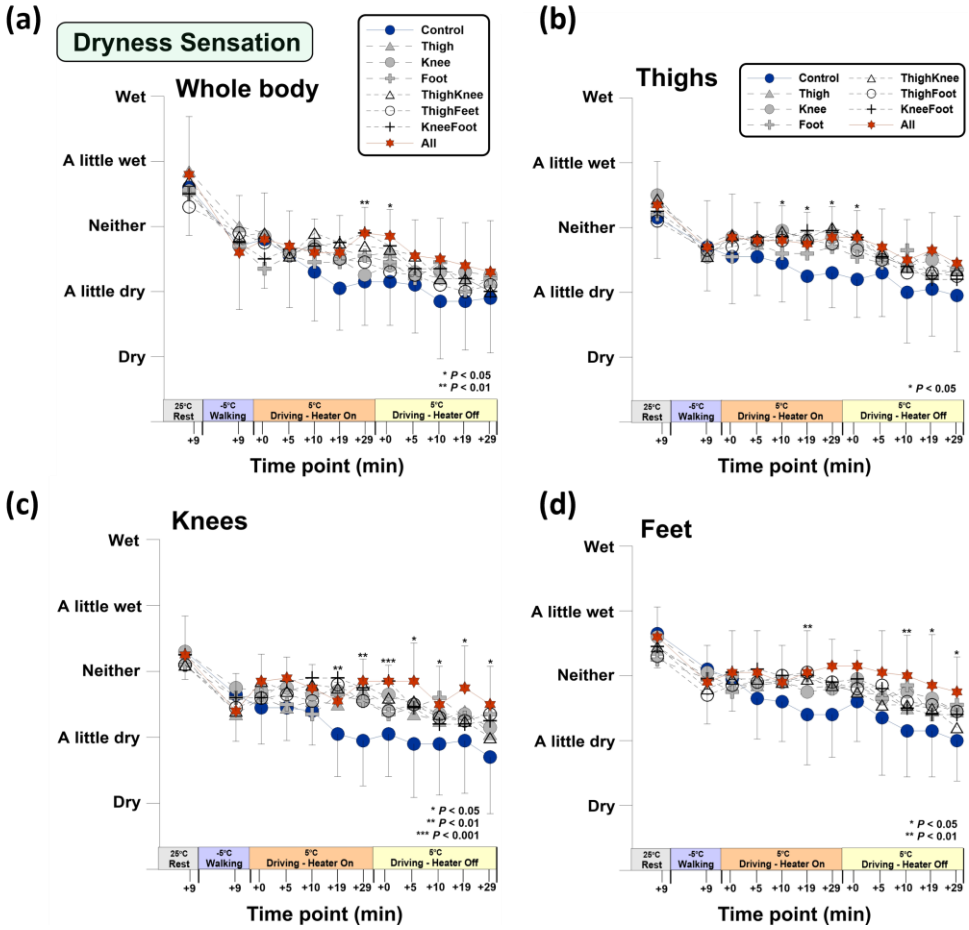

Figure 3.9 Time courses of dryness sensation among the 8 conditions (Mean ± SD): Whole body (a), thighs (b), knees (c), and feet (d).

Table 3.7 Whole body dryness sensation among the 8 conditions

Phase		Experimental conditions								*P* value
		Control	Thigh	Knee	Foot	ThighKnee	ThighFoot	KneeFoot	All	
25ºC Rest	9 min	0.6 ± 0.7	0.9 ± 0.8	0.6 ± 0.6	0.5 ± 1.0	0.7 ± 0.6	0.3 ± 0.9	0.5 ± 0.7	0.8 ± 0.9	
-5ºC Walking	+ 9 min	-0.3 ± 1.0	0.0 ± 0.8	-0.3 ± 0.8	-0.3 ± 0.9	-0.2 ± 0.5	-0.1 ± 0.9	-0.3 ± 0.8	-0.4 ± 0.9	
5ºC Driving Heater On	+ 0 min	-0.2 ± 0.8	-0.1 ± 0.6	-0.2 ± 0.9	-0.7 ± 0.8	-0.1 ± 0.6	-0.3 ± 0.8	-0.5 ± 0.7	-0.2 ± 0.7	***N.S.***
	+ 5 min	-0.5 ± 0.8	-0.5 ± 0.5	-0.4 ± 0.7	-0.5 ± 0.8	-0.5 ± 0.4	-0.4 ± 0.7	-0.4 ± 0.5	-0.3 ± 0.5	
	+ 10 min	-0.7 ± 0.8	-0.3 ± 0.6	-0.3 ± 0.8	-0.6 ± 0.9	-0.1 ± 0.5	-0.4 ± 0.7	-0.3 ± 0.6	-0.4 ± 0.5	
	+ 19 min	-1.0 ± 0.6	-0.4 ± 0.6	-0.5 ± 0.7	-0.6 ± 0.8	-0.3 ± 0.4	-0.5 ± 0.6	-0.3 ± 0.6	-0.4 ± 0.6	
	+ 29 min	-0.9 ± 0.7[b]	-0.5 ± 0.5[ab]	-0.8 ± 0.6[b]	-0.5 ± 0.6[ab]	-0.3 ± 0.8[ab]	-0.6 ± 0.7[ab]	-0.1 ± 0.4[a]	-0.1 ± 0.4[a]	***
5ºC Driving Heater Off.	+ 0 min	-0.9 ± 0.7[b]	-0.4 ± 0.6[ab]	-0.6 ± 0.7[ab]	-0.6 ± 0.6[ab]	-0.4 ± 0.6[ab]	-0.7 ± 0.7[ab]	-0.3 ± 0.5[ab]	-0.2 ± 0.4[a]	
	+ 5 min	-0.9 ± 0.7	-0.7 ± 0.5	-0.7 ± 0.7	-0.8 ± 0.8	-0.5 ± 0.8	-0.8 ± 0.7	-0.7 ± 0.7	-0.5 ± 0.6	***N.S.***
	+ 10 min	-1.2 ± 0.9	-0.8 ± 0.5	-0.7 ± 0.7	-0.6 ± 0.7	-0.8 ± 0.7	-0.9 ± 0.7	-0.7 ± 0.7	-0.5 ± 0.6	
	+ 19 min	-1.2 ± 0.7	-0.8 ± 0.6	-0.7 ± 0.7	-1.0 ± 0.8	-0.8 ± 0.8	-1.0 ± 0.8	-0.8 ± 0.7	-0.6 ± 0.7	
	+ 29 min	-1.1 ± 0.8	-0.9 ± 0.7	-0.8 ± 0.8	-0.8 ± 0.9	-1.0 ± 0.6	-0.9 ± 0.8	-1.0 ± 0.7	-0.7 ± 0.8	

All data reported as mean ± SD. ***: $P < 0.001$, ***N.S.***: No significant difference.
[a] or [b] represent significant differences among the eight conditions of the radiant heaters by the Tukey HSD's post-hoc test.

2.4 전율이 느껴진 부위

5°C 환경에서 복사 히터 가온 시와 가온 종료 후의 60분간 추위로 인해 전율이 느껴진 인체 부위에 대해 응답하도록 한 결과, 복사 히터 가온 30분간 목 앞면, 머리 뒷면, 엉덩이를 제외한 모든 부위에서 10명 중 1명 이상이 전율을 느꼈다고 응답하였다. 특히, 복사 히터 가온 중임에도 불구하고 손바닥은 KneeFoot 조건을 제외하고 1명 이상이 전율을 느꼈으며 손등은 All 조건을 제외하고 1명 이상이 전율을 느꼈다고 응답하였다. All 조건에서도 10명 중 1명의 피험자는 복사 히터 가온 중에도 이마, 가슴, 손바닥, 발등, 윗등, 허리에서 전율을 느꼈다고 응답하였다(Fig. 3.10a).

복사 히터 가온 종료 30분간 모든 조건에서 전율감을 1명 이상 느낀 부위로는 얼굴, 가슴, 윗팔 앞면, 손바닥, 넓적다리 앞면, 종아리 앞면, 발등, 윗등, 윗팔 뒷면, 손등으로 관찰되었다. 더하여 윗팔 앞면과 넓적다리 앞면은 Thigh와 ThighKnee 조건에서 5명 이상이 전율을 느꼈다고 응답하였다. 모든 조건에서 복사 히터 가온 시에 비하여 복사 히터 가온 종료 후 전율을 느꼈다고 응답한 피험자가 가장 많아졌던 부위는 윗팔 앞면, 넓적다리 앞면, 종아리 앞면, 발등, 손등으로 확인되었다(Fig. 3.10b).

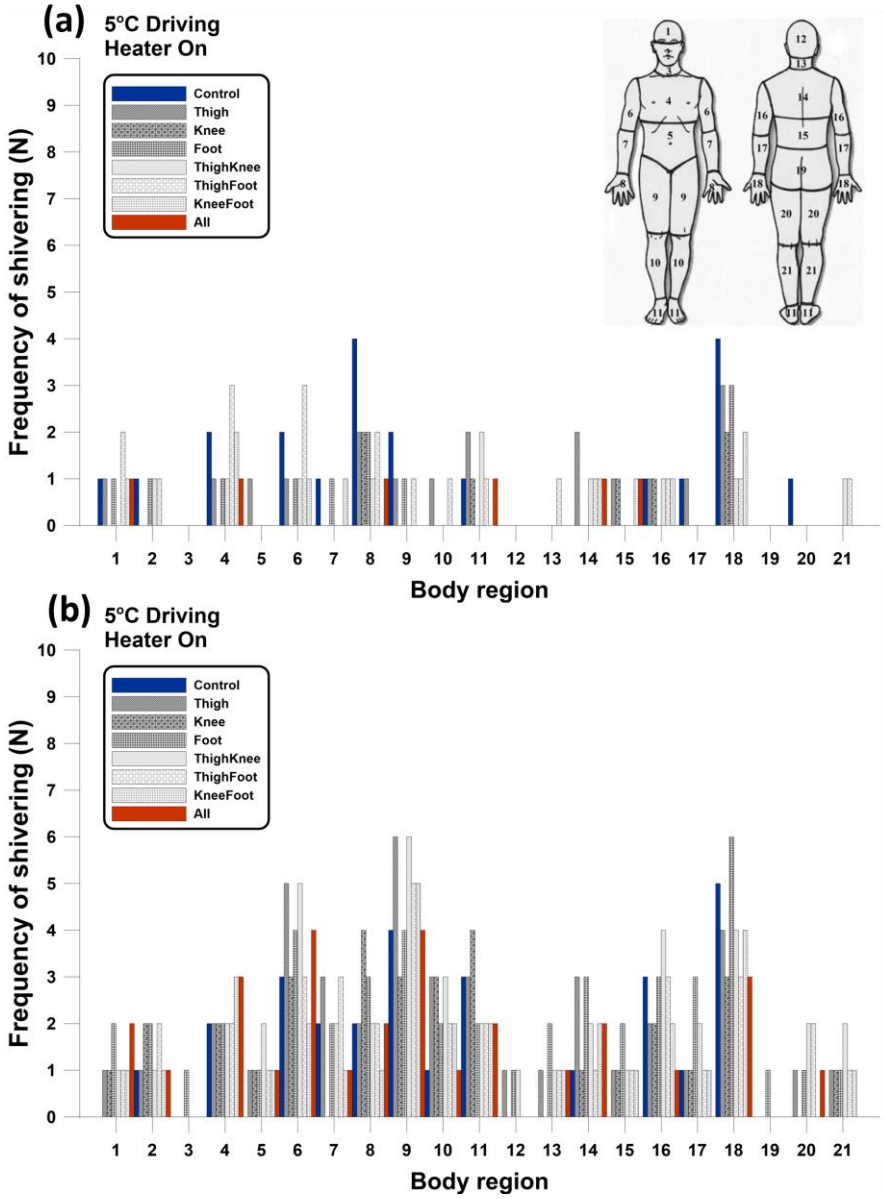

Figure 3.10 Frequency of shivering among the 8 conditions: 5°C Driving Heater On (a), 5°C Driving Heater Off (b).

2.5 졸음 척도

총 85분간의 실험동안 졸음 정도에 대해 응답하도록 한 결과, 모든 조건에서 유의한 차이 없이 유사한 정도의 졸음 정도가 확인되었다. 온열적 중성 환경인 25°C Rest에서 “약간 명료함” ~ “명료하지도 졸리지도 않음”이라고 응답한 반면, 그 외의 모든 조건의 모든 시점에서는 “명료함” ~ “약간 명료함”의 사이로 응답되었다(Fig. 3.11).

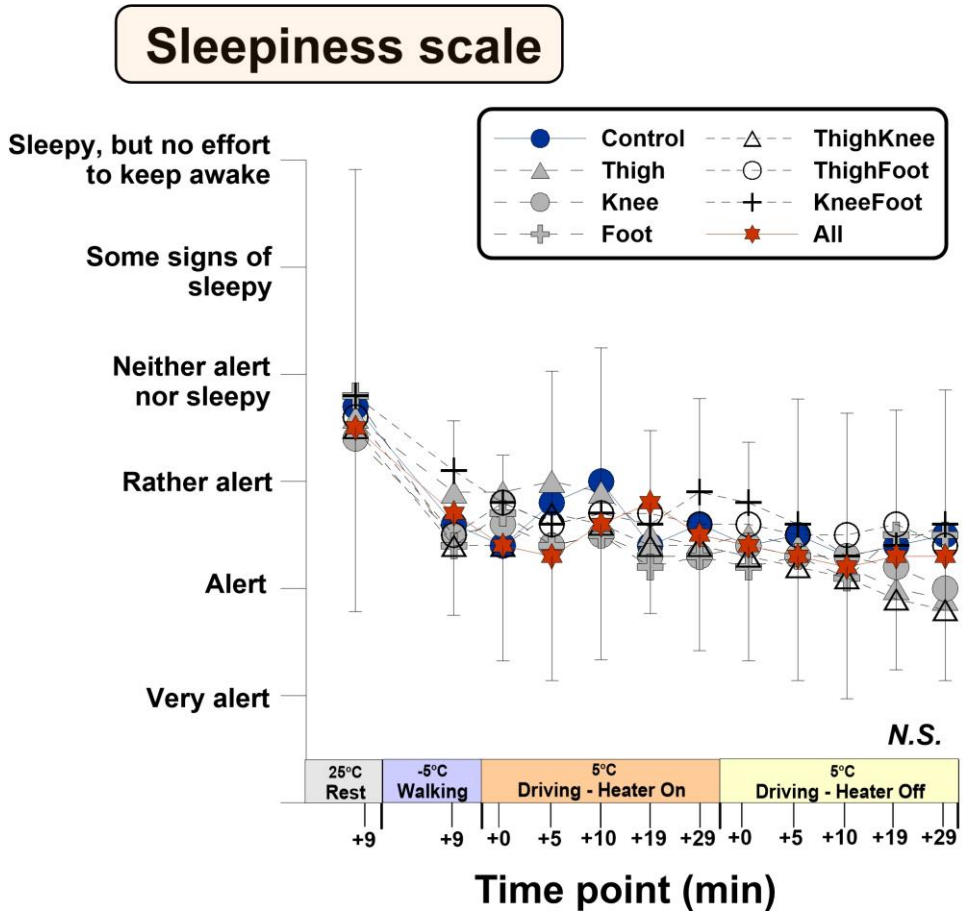

Figure 3.11 Time courses of sleepiness scale among the 8 conditions (Mean ± SD).

제 3 절 상관 분석

겨울철 실외에서의 차량 탑승 과정 및 주행을 모사하여 진행된 본 실험의 여덟 가지 조건 각각에서 피험자 10인의 평균값을 대표로 하여 총 85분의 실험동안 주관감 응답이 이루어진 12회의 시점에서의 전신 및 국부 주관감과 해당 시점에서의 인체 생리 반응간의 상관 관계를 분석하였다.

3.1 인체 생리 반응 및 주관적 감각 간의 상관

직장온은 전신 온열쾌적감과 양의 상관을 보여 직장온이 높을수록 전신에서 주관적으로 열적 쾌적성을 느낌을 확인하였다(r=0.530, $P < 0.001$). 그러나 전신 한서감 간의 유의한 상관은 발견되지 않았다(Table 3.8). 평균피부온의 경우, 전신 한서감(r=0.906, $P < 0.001$)과 전신 온열쾌적감(r=0.614, $P < 0.001$)간의 유의한 상관이 발견되어 평균피부온이 높을수록 전신에서 주관적으로 따뜻함을 느끼고 열적 쾌적성이 높아졌음을 확인하였다(Table 3.8).

Table 3.8 Correlation coefficients between physiological responses (rectal temperature or mean skin temperature) and subjective responses (whole body thermal sensation or thermal comfort).

Correlation (N=96)	r	*P*-value
T_{re} (°C) x TS (Whole body)	0.058	0.288
T_{re} (°C) x TC (Whole body)	0.530**	< 0.001
Mean T_{sk} (°C) x TS (Whole body)	0.906**	< 0.001
Mean T_{sk} (°C) x TC (Whole body)	0.614**	< 0.001

Abbreviations: T_{re}: Rectal temperature, Mean T_{sk}: Mean skin temperature, TS: Thermal sensation, TC: Thermal comfort.

복사 히터 가온 세 부위에서의 국부 한서감, 온열쾌적감과 해당 부위의 피부온 간의 상관 역시 관찰되어, 세 부위 모두 피부온이 높을수록 세 부위에서의 국부 한서감과 국부 온열쾌적감 모두 상승하였음을 확인하였다 (Table 3.9; all *P*s < 0.001). 국부 한서감의 경우, 국부 피부온과 넓적다리(r=0.637), 무릎(r=0.720), 발등(r=0.766)에서 다음과 같은 상관이 관찰되었다. 국부 온열쾌적감 또한 국부 피부온과의 상관이 넓적다리(r=0.497), 무릎(r=0.612), 그리고 발등(r=0.787)에서 관찰할 수 있었다.

Table 3.9 Correlation coefficients between skin temperature and subjective responses of heating body region: The Thighs, knees, and feet.

Correlation (N=96)	r	*P*-value
Thigh T_{sk} (°C) x TS (Thighs)	0.637**	< 0.001
Knee T_{sk} (°C) x TS (Knees)	0.720**	< 0.001
Foot T_{sk} (°C) x TS (Feet)	0.766**	< 0.001
Thigh T_{sk} (°C) x TC (Thighs)	0.497**	< 0.001
Knee T_{sk} (°C) x TC (Knees)	0.612**	< 0.001
Foot T_{sk} (°C) x TC (Feet)	0.787**	< 0.001

Abbreviations: T_{sk}: Skin temperature, TS: Thermal sensation, TC: Thermal comfort.

한편, 가온 부위의 한서감 및 온열쾌적감과 직장온, 평균피부온 간의 유의한 상관도 발견할 수 있었다. 직장온의 경우, 발등 한서감을 제외한 넓적다리 한서감(r=0.202; $P < 0.05$)과 무릎 부위 한서감(r=0.210; $P < 0.05$)과 약한 상관이 관찰되었으며 온열쾌적감은 넓적다리(r=0.478; $P < 0.001$), 무릎 부위(r=0.377; $P < 0.001$), 그리고 발등(r=0.350; $P < 0.001$)에서 모두 직장온과의 유의한 상관을 확인할 수 있었다.

평균피부온은 모든 가온 부위 한서감과 온열쾌적감 간의 유의한 상관을 보였다. 평균피부온과 가온 부위 한서감은 높은 양의 상관을 보여 넓적다리(r=0.861, $P < 0.001$), 무릎 부위(r=0.832, $P < 0.001$), 그리고 발등(r=0.899, $P < 0.001$)에서 주관적으로 따뜻하다고 느낄수록 평균피부온이 높음을 확인하였다. 이러한 상관은 가온 부위 온열쾌적감과도 유사하게 나타나, 넓적다리(r=0.640, $P < 0.001$), 무릎 부위(r=0.670, $P < 0.001$), 그리고 발등(r=0.706, $P < 0.001$)에서 주관적으로 쾌적하다고 느낄수록 평균피부온이 높았음을 관찰할 수 있었다.

Table 3.10 Correlation coefficients between physiological responses (rectal temperature or mean skin temperature) and subjective responses of heating body region: The Thighs, knees, and feet.

Correlation (N=96)		Thermal sensation (Regional)			Thermal comfort (Regional)		
		Thighs	Knees	Feet	Thighs	Knees	Feet
T_{re} (°C)	r	0.202*	0.210*	0.075	0.478**	0.377**	0.350**
	P-value	< 0.05	< 0.05	0.233	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Mean T_{sk} (°C)	r	0.861**	0.832**	0.899**	0.640**	0.670**	0.706**
	P-value	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001

Abbreviations: T_{re}: Rectal temperature, Mean T_{sk}: Mean skin temperature

복사 히터 가운 부위로 선정된 넓적다리, 무릎과 발등의 피부온과 전신 한서감과 전신 온열쾌적감 간의 양의 상관 또한 발견되었다. 전신 한서감이 높을수록, 즉 전신에서 따뜻함을 느낄수록 넓적다리(r=0.633), 무릎(r=0.568), 발등(r=0.657) 피부온도가 높았음을 확인하였다(Table 3.11; all *P*s < 0.001). 전신 온열쾌적감도 마찬가지로 전신에서 온열적으로 쾌적할수록 넓적다리(r=0.515), 무릎(r=0.428), 발등(r=0.690) 피부온 모두 높았음을 확인하였다(Table 3.11; all *P*s < 0.001).

Table 3.11 Correlation coefficients between whole body subjective responses and skin temperature of heating body region: The Thighs, knees, and feet.

Correlation (N=96)		Skin temperature (°C)		
		Thighs	Knees	Feet
Thermal sensation (Whole body)	r	0.633**	0.568**	0.657**
	P-value	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Thermal comfort (Whole body)	r	0.515**	0.428**	0.690**
	P-value	< 0.001	< 0.001	< 0.001

심박변이도를 측정한 4인의 평균값을 대표로 하여 여덟 가지 실험 조건 각각에서 25°C Rest 9분째, 5°C driving heater on 10분째, 19분째, 29분째와 5°C driving heater on 10분째, 19분째, 29분째까지 7회 시점에서의 전신 한서감과 온열쾌적감과 심박변이도 데이터를 해당 시점까지의 간격으로 추출하여 상관 분석을 실시하였다(Table 3.12). 전신 한서감은 시간 분석 영역 지표와 강한 음의 상관이 발견되었는데, SDRR(r=−0.733, P < 0.001), RMSSD(r=−0.724, P < 0.001), pRR50(r=−0.768, P < 0.001)으로 확인되었다. 더하여 주파수 영역 지표인 LF/HF와도 유의한 상관을 확인할 수 있었다(r=−0.544, P < 0.001). 다시 말해, 전신에서 주관적을 따뜻하다고 느껴질수록 정신생리심리학적 스트레스가 증가함을 학인하였다. 반면, 전신 온열쾌적감과 심박변이도 간의 유의한 상관은 모든 지표에서 관찰되지 않았다.

Table 3.12 Correlation coefficients between heart rate variability and subjective responses

Correlation (N = 56)		Heart rate variability (HRV)			
		SDRR (ms)	RMSSD (ms)	pRR50 (%)	LF/HF (%)
Thermal sensation (Whole body)	r	-0.733**	-0.724**	-0.798**	0.544**
	P-value	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Thermal comfort (Whole body)	r	-0.158	-0.164	-0.221	-0.002
	P-value	0.123	0.113	0.051	0.494

3.2 주관적 감각 간의 상관

전신에서의 주관감과 가온 부위에서의 국부 주관감의 상관 관계를 분석한 결과, 전신 한서감은 넓적다리(rho=0.970), 무릎(rho=0.955), 발등(rho=0.946) 한서감과 매우 강한 양의 상관을 보이며(all *P*s < 0.001), 모든 가온 부위에서 전신 한서감이 높을수록 국부 한서감도 높아졌음을 확인하였다(Fig. 3.16a). 또한, 전신 온열쾌적감과 넓적다리(rho=0.952), 무릎(rho=0.891), 발등(rho=0.889) 온열쾌적감 간의 매우 강한 양의 상관이 발견되었으며(all *P*s < 0.001), 모든 가온 부위에서 전신 온열 쾌적감이 상승할수록 국부 온열쾌적감도 상승하였음을 관찰하였다(Table 3.13).

Table 3.13 Correlation coefficients between whole body subjective responses and subjective responses of heating body region: The Thighs, knees, and feet.

Correlation (N=96)	rho	*P*-value
TS (Whole body) x TS (Thighs)	0.970**	< 0.001
TS (Whole body) x TS (Knees)	0.955**	< 0.001
TS (Whole body) x TS (Feet)	0.946**	< 0.001
TC (Whole body) x TC (Thighs)	0.952**	< 0.001
TC (Whole body) x TC (Knees)	0.891**	< 0.001
TC (Whole body) x TC (Feet)	0.889**	< 0.001

Abbreviations: TS: Thermal sensation, TC: Thermal comfort.

제 4 절 소비 전력량 대비 주관감

본 연구에서 설정한 여덟 조건의 소비전력량 대비 각 조건에서의 복사 히터 가온 종료 직전인 29분 째에서의 전신 주관감을 분석하였다. 먼저 전신 한서감의 경우(Fig. 3.12a), ThighKnee 조건과 All 조건에서 전신 한서감이 “0: 덥지도 춥지도 않음” 이상 “1: 약간 더움” 사이의 값을 나타내었으며, 그 중 ThighKnee 조건에서의 전신 한서감이 근소하게 더 높았음을 관찰할 수 있었다. 이 때, All 조건에 비하여 ThighKnee 조건에서 35% 낮은 소비전력량을 요구함을 확인할 수 있었다.

한편 전신 온열쾌적감의 경우(Fig. 3.12b), Control 조건을 제외한 일곱 가지 모든 조건에서 “0: 쾌적하지도 불쾌하지도 않음.”과 “1: 약간 쾌적함.” 사이로 응답되었음을 확인하였다. 전신 한서감과 마찬가지로 전신 온열쾌적감에서도 ThighKnee 조건과 All 조건이 가장 높았으나, ThighKnee 조건에서의 온열쾌적감이 All 조건에 비해 근소한 차이로 높았으며, 소비전력량 역시 35% 절감할 수 있음을 확인할 수 있었다.

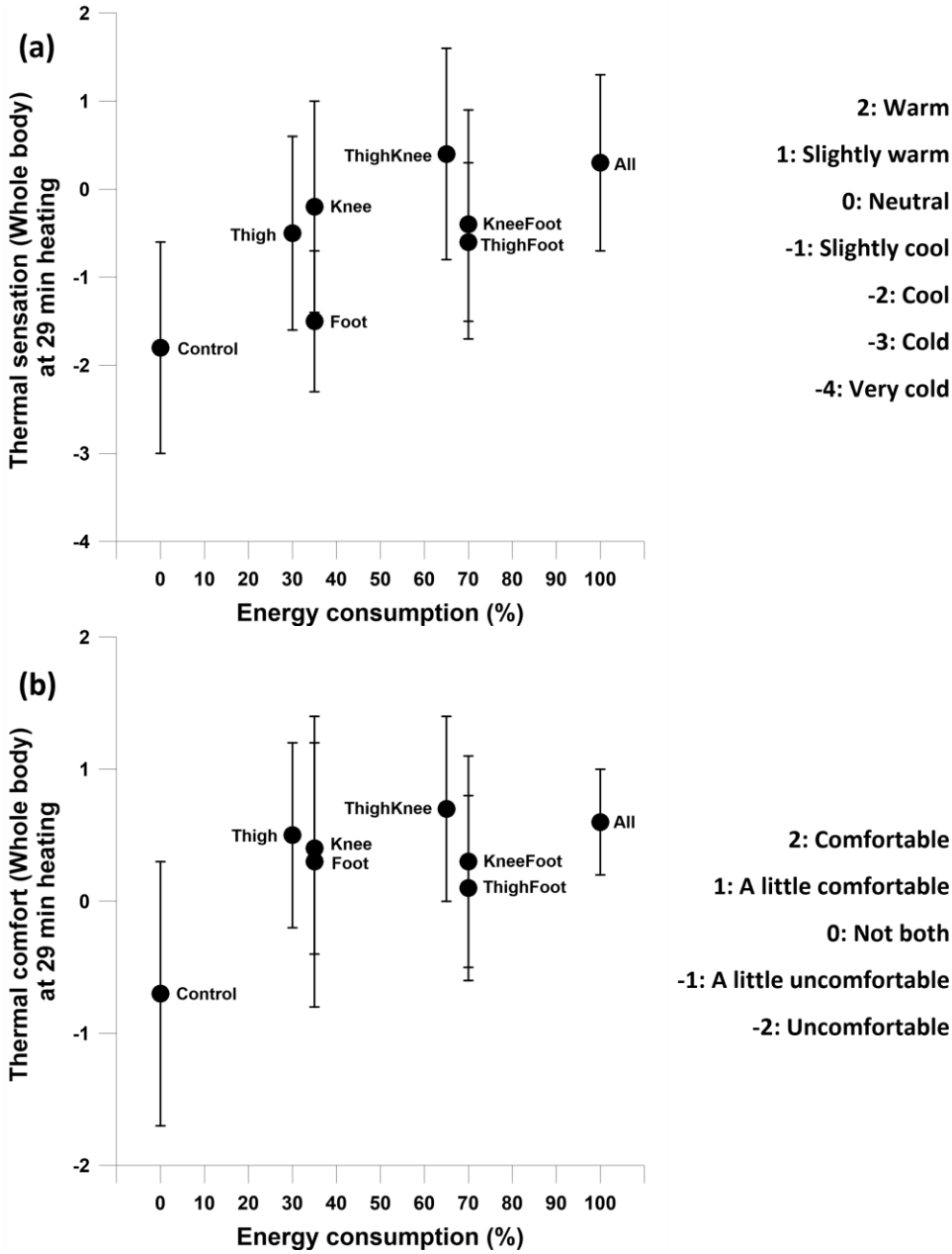

Figure 3.12 Energy consumption of eight conditions compared to whole body subjective responses at 29 min radiant heating: Thermal sensation (a) and thermal comfort (b).

제 4 장 논 의

본 연구는 차량 내 탑승자 온열쾌적감에 영향을 미치는 여섯 가지 요인을 동일하게 제어하고 겨울철 차량 탑승 과정 및 환경을 모사한 실험 환경에서 ISO 14505-3에 제시된 열 쾌적성 평가 기준을 참고하여 설치 가능성이 높은 전기차용 국부 복사 히터 가온 조합에 따른 인체 생리 반응 측정과 주관적 감각 조사를 수행하였다. 연구 결과를 바탕으로 복사 히터 최적 가온 조합 도출과 인체 생리 반응 및 주관적 감각의 상관 관계에 대한 자세한 논의는 아래와 같다.

제 1 절 국부 복사 히터의 최적 가온 조합 도출

본 연구에서 복사 히터 최적 가온 조합 도출을 위해 조건 간 유의한 차이가 발견된 항목은 다음과 같다. 먼저 피부온의 경우, 평균피부온에서 복사 히터 가온 조합에 따른 유의한 차이가 존재하였음을 확인하였다. 복사 히터 30분 가온 종료 직전의 평균피부온은 한 부위 가온 조건 중 Thigh 조건이, 두 부위 가온 조건 중 ThighKnee 조건이, 그리고 전체 가온 All 조건에서 가장 높았으며, 여덟 조건 중 ThighKnee 조건과 All 조건이 가장 높았다. 이러한 경향은 복사 히터 종료 후 30분에도 동일하게 유지되었다. 해당 결과를 통해 세 가지 가온 부위 중 넓적다리 가온이 포함된 조건에서 평균피부온이 유의하게 높았음을 확인하였다. 부위별 피부온의 경우, 동일한 표면 온도에서 동일한 가온 면적을 부하했음에도 불구하고 넓적다리와 무릎의 온도는 현저히 상승한 반면, 발등 피부온은 소폭 하강하였음을 확인하였다. 주관적 감각의 경우, 복사 히터 30분 가온 후와 종료 직후까지 전신에서 주

관적으로 느껴지는 따뜻함은 한 부위 가온 조건 중 Knee 조건, 두 부위 가온 조건 중 ThighKnee 조건, 그리고 All 조건에서 가장 높았으며, 온열적으로 쾌적하다고 느껴지는 조건은 ThighKnee와 All 조건에서 가장 높았다. 더하여 넓적다리와 무릎 부위의 국부 한서감의 경우, 복사 히터 가온 시작 시와 종료 시 넓적다리와 무릎 부위에서 급속한 상승 및 하강이 이루어졌으나 발등에서는 이러한 경향이 서서히 일어났음을 관찰하였다. 정리하자면, 여덟 조건 간 유의한 차이가 확인된 평균피부온, 부위별 피부온, 전신 및 부위별 한서감과 온열쾌적감 결과 기반으로 ThighKnee 조건과 All 조건에서 가장 높은 수준의 인체 생리 반응과 주관적 감각이 발견되었음을 확인하였다. 나아가 여덟 가지 실험 조건의 소비전력량 대비 주관감을 관찰한 결과를 함께 반영하여, 두 조건에서 유사한 열 쾌적성에 도달한다면 All 조건에 비해 35%의 소비 전력량 절감이 가능한 "ThighKnee" 조건을 복사 히터 최적 조건으로 도출할 수 있다.

해당 결과는 넓적다리와 무릎 부위를 동시 가온했을 경우와 넓적다리, 무릎 부위와 발등을 모두 가온 했을 때 동일한 수준의 열 쾌적성을 보였음을 의미하며, 다시 말해 복사 히터를 통한 발등 가온의 유무는 평균피부온, 국소 피부온과 더불어 전신 및 발의 국소 부위에서 주관적으로 느껴지는 따뜻함과 열적 쾌적성에 영향이 매우 적었음을 의미한다. 실제로 본 연구의 대부분 측정 항목에서 Control 조건과 가장 유사한 결과를 보인 조건으로 발등만을 가온한 Foot 조건임을 확인할 수 있었으며, Thigh 조건과 ThighFoot 조건에서 대부분 거의 동일한 결과가 도출되었고 Knee 조건과 KneeFoot 조건 역시 유사한 결과가 관찰됨을 확인하였다. 이러한 결과는

일차적으로 넓적다리와 무릎에 비해 발등과 복사 히터의 거리가 2 – 4 cm 더 멀리 부착되었다는 점과 양말과 신발 착용으로 인한 복사열전달 감소로부터 기인한 것으로 보인다. 또한 넓적다리와 무릎 부위는 해당 부위를 전체적으로 충분히 가온하는 반면 발등의 표면적이 넓적다리와 무릎 부위에 비해 상대적으로 좁기 때문에 동일한 면적의 복사 히터로부터 열을 받더라도 발등은 그 외로 열이 분산되어 가온의 영향이 적었을 것으로 사료된다. 또한 발등은 사지 말단 부위로서 상대적으로 둔한 부위임이 논의된 선행연구들(Kim et al., 2014; Luo et al., 2020)과 함께 발등의 피부 온감 수용기의 개수, 밀도, 민감도가 낮아 주관적으로도 온도 증가에 있어 둔감한 것으로 알려져 있다. 한편 발 전체와 종아리 하부를 가온하는 복사 히터 적용 시 인체 열 쾌적성 평가를 다룬 Oi et al., (2011)의 연구에서는 피험자는 본 연구에서 설정한 의복 조합과 유사한 수준의 보온력으로 추정되는 1.0 clo의 의복 조합(반팔 티셔츠, 긴팔 셔츠, 재킷, 긴 바지, 속옷, 양말 및 신발) 착용 후 10°C로 설정된 차량 내부에서 표면온도가 30°C로 설정된 복사 히터로 30분간 단독 가온하였을 때, 동일 환경에서 복사 히터 가온이 없었던 조건보다 유의하게 높은 전신 한서감과 전신 온열쾌적감을 보였으며, 30°C 복사 히터 적용 30분 후 전신 한서감은 “약간 추움” ~ “추움” 사이로 응답되었으며 전신 온열쾌적감은 “쾌적하지도 불쾌하지도 않음” ~ “약간 불쾌함” 사이로 응답되었다. 반면, 차량 내부 온도가 20°C였던 조건에서는 복사 히터를 적용하지 않은 조건과 복사 히터 표면 온도가 30°C, 40°C였던 조건 모두에서 전신 한서감이 “덥지도 춥지도 않음” ~ “약간 더움” 사이로 응답되었으며 전신 온열쾌적감은 “쾌적하지도 불쾌하지도 않음” ~ “약간

쾌적함” 사이로 응답된 것으로 보아 환경온의 상승이 열 쾌적성에 더욱 효과적이었음을 확인할 수 있었다. 비록 선행연구에서는 본 연구보다 낮은 환경온과 훨씬 낮은 표면 온도의 복사 히터를 사용하였으나, 발등을 포함한 발 전체와 종아리 하부까지 가온했음에도 불구하고 복사 히터 효과가 미미하여 열 쾌적성 만족이 어려웠던 결과가 존재했다. 이에 본 연구 결과와 선행연구의 결과를 종합하자면, 발 부위는 근접 위치에서 열을 부하하였을 때 빠르고 높은 온열감을 줄 수 있는 복사 히터의 가장 큰 장점의 효과를 보기 다소 어려운 부적합한 부위라고 볼 수 있다. 더하여 발의 가온은 탑승 중 졸음을 유발할 수 있기 때문에(Kräuchi et al., 1999) 탑승자의 안전을 위해 과도한 난방이 지양될 필요가 있다.

한편 넓적다리의 경우, 실제 피험자들을 대상으로 실험 종료 후 진행한 설문 결과에서 세 부위 중 넓적다리 가온을 통해 가장 크게 전신에서 따뜻함을 느꼈으며, HVAC 난방처럼 건조하지 않고 열선 시트나 핸들과 같이 피부가 직접적으로 뜨거워지지 않아 쾌적하게 따뜻할 수 있었다고 10인 전원이 응답하였다. 일부 피험자는 넓적다리 가온이 느껴지는 조건에서 일부로 다리를 벌려 넓적다리를 복사 히터 쪽으로 더 가까이 대고 싶었다는 의견도 제시하였다. 무릎의 경우 세 가지 가온 부위 중 가장 높은 피부온 상승을 보였는데, 이는 10인의 피험자의 체형, 체격 혹은 피하지방 두께 등 인체계측특성 관련 요소의 차이가 무릎 부위에서 상대적으로 적어 도출된 결과로 사료된다. 더하여 전신 한서감의 경우 복사 히터 가온 중 무릎 한 부위만을 가온한 Knee 조건에서 최적 조건인 ThighKnee 조건과 유사한 수준에 도달하였다. 그러나 넓적다리와 무릎 모두 따뜻함을 느끼는 온도 수용체가

많이 분포하는 온열 민감도가 높은 부위, 혹은 저온 환경에서 보온 시 특히 효과적이라고 설명된 선행연구는 거의 없다. 종합하자면 ThighKnee 조건이 최적 조합 조건으로 도출됨은 열에 둔한 부위인 발등에 비해 넓적다리와 무릎 부위가 상대적으로 열에 민감한 부위였기에 도출된 결과일 것으로 사료된다. Matsuo et al., (2006)에 의하면 저온 환경에서 종아리 앞면의 가온이 전신 한서감 상승에 매우 효과적이었음을 보고하였다. 따라서 복사 히터 적용을 위한 부위 탐색의 후속 연구에서 넓적다리, 무릎 외에 발등이 아닌 종아리 전면을 가온 부위로 선정한다면 더 효과적인 최적 가온 조합 결과가 도출될 수 있음을 기대해 볼 수 있다.

나아가 최적 가온 조합으로 도출된 ThighKnee 조건에서의 정량적 결과에 대해서도 확인할 필요가 있다. 인체 열교환이 균형을 이루는 쾌적 상태에서의 심부온은 37°C, 평균피부온은 33°C로 추정되는데(Simion et al., 1992), 본 연구 결과에서 25°C Rest의 구간을 제외하고는 평균피부온은 33°C 이하로 관찰되었다. 특히 최적 가온 조합인 ThighKnee 조건에서 복사 히터 30분 가온 후 종료 직전임에도 불구하고 평균피부온은 32.0 ± 0.4°C에 불과했다. 즉, 인체 열교환 측면에서는 열 쾌적성 만족을 위해 보다 더 충분한 가온이 필요함을 생각해 볼 수 있다. 저온 환경에서 보온에 효과적이라고 알려져 있는 인체 사지 말단 부위인 손에서 손등 온도가 지속적으로 하강하는 현상과 복사 히터 가온 시 가온 부위 이외에 유의하게 상승했던 피부온은 KneeFoot 조건과 All 조건에서의 종아리 피부온 외에 전무했다. 이러한 결과는 복사 히터 최적 조합 조건 하에서 열 쾌적성을 만족시켰다고 단언하기 어려운 결과로 볼 수 있다. 이러한 결과는 실제 전기차에

복사 히터 최적 조합 적용 시에도 기존 활용되고 있는 HVAC 난방 혹은 열선 시트나 핸들의 사용을 최소화하여 활용하는 것이 온전한 열 쾌적성 만족을 더 빠르게 도울 것을 시사한다.

한편 주관감 결과의 경우, 전신 한서감은 −5°C Walking 시 “약간 추움” ~ “추움” 사이로 응답 되었으나 복사 히터 가온 10분째에 “덥지도 춥지도 않음”으로 응답되며 5°C 환경에서 넓적다리와 무릎 부위 가온 만으로 전신에서 주관적으로 열적 중성 상태에 도달함을 확인한 본 연구의 독창적인 결과를 관찰할 수 있었다. 전신 온열쾌적감은 ThighKnee 조건 복사 히터 가온 19분째에 최댓값을 보여 “약간 쾌적함”으로 제시되었으나, 전신 온열쾌적감은 −5°C Walking 시에 0 이상임을 확인하였다. 해당 결과를 전신 한서감과 함께 해석하자면, −5°C Walking의 환경에서 주관적으로 추위를 느꼈으나 열적 쾌적성 측면에서는 이미 쾌적하지도 불쾌하지도 않은 상태였으며 복사 히터 가온 시작 이후에도 지속적으로 상승함이 관찰되었다. 즉, −5°C Walking은 열적 불쾌감을 유발할 정도의 추위가 아니었으며 5°C 환경에서 지속적으로 온열 쾌적함이 상승한 현상은 복사 히터의 영향 외에도 −5°C에서 다운 재킷을 추가로 착용했던 의복의 영향, −5°C에서 5°C로 환경온을 상승시킨 점, 그리고 4 km/h의 속도로 15분간 걷기의 영향까지 복합적인 요인으로 인한 쾌적감의 상승으로 해석될 수 있다. 따라서 복사 히터 가온 영향만으로 느껴지는 탑승 초기의 주관적 감각, 특히 온열쾌적감 변화도를 명확히 확인하기 위해서는 불쾌감을 유발할 수 있을 정도의 한파 환경에 피험자를 노출시키는 후속 연구를 진행하는 것을 권장한다.

한편, 전기차용 복사 히터 적용 시 기대되는 장점 중 하나로 면상 발열체

로 제작되어 가온 시작 시 빠르고 균일한 승온이 가능하다는 점이 거론되고 있다. 실제로 본 연구 결과에서도 복사 히터 적용 시 피부온이 초기 빠르게 상승하고, 주관감 역시 급격히 상승하는 경향을 관찰할 수 있었다. 그러나, 복사 히터 종료 후 넓적다리와 무릎에서 복사 히터 가온으로 인한 피부온이 상승한 정도 보다 큰 피부온 하강이 관찰되었다. 그럼에도 해당 부위가 가온 되지 않은 조건보다는 유의하게 높은 피부온을 보였으나, 전신 한서감과 온열쾌적감 역시 복사 히터 종료 이후로 넓적다리와 무릎 가온이 포함된 조건에서도 가온 하지 않은 조건과 유의한 차이 없이 유사한 정도로 급격히 감소함을 확인하였다. 더하여 넓적다리 가온이 포함되었던 Thigh 조건과 ThighKnee 조건에서는 복사 히터 종료 후 5명 이상의 피험자가 넓적다리 전면에서 전율을 느꼈다고 응답하였다. 즉, 넓적다리와 무릎에서의 복사 히터 가온은 매우 효과적이나, 종료 후 그 가온의 영향이 열 쾌적성 유지에 지속적인 영향을 끼치지 못하는 것을 확인하였다. 즉, 5°C 환경의 전기차 내 최적 가온 조합의 복사 히터 사용 시 주행 중 갑작스러운 히터 종료는 주관적으로 열적 불쾌감과 추움을 빠르게 느끼게 할 수 있다. 반면 인체가 쾌적함을 느끼는 온열 환경 내에서 균일한 열 자극이 주어지는 환경보다 변화하는 열 자극이 주어질 때 열 쾌적성이 향상됨을 보고하는 선행연구들이 존재한다(Thomas et al., 2015: Thomas et al., 2017). Yoon et al., (2023)의 연구에서는 전기차 공조난방을 25°C로 설정하고 넓적다리 측면, 무릎 전면, 종아리와 발등 부위에 복사 히터가 설치된 차량에서 1.39 clo의 의복 조합을 착용한 피험자를 대상으로 전신 한서감과 온열쾌적감을 수집하였다. 이때, 40분간 공조난방과 복사 히터를 모두 작동시킨 조건과 공조난방은

지속적으로 설정하되 복사 히터를 8분 간격으로 간헐 가온을 작동시킨 조건 모두에서 전신 한서감과 온열쾌적감이 0 이상으로 응답되는 긍정적 결과를 확인하였으나 공조와 복사 히터를 모두 작동시킨 조건에서는 시간이 지날수록 따뜻함을 넘어 더움을 느끼게 되고, 이로 인해 온열 쾌적감이 감소하는 결과를 보고하였다. 즉, 본 연구에서 설정한 5°C 환경에서는 복사 히터의 지속적인 가온이 효과적이었으나, 선행연구의 온열적 중성환경에서의 복사 히터 적용은 간헐 가온이 더욱 효과적임을 확인할 수 있었으며 이는 탑승자의 열 쾌적성 만족을 위한 복사 히터 적용 가이드라인은 차량 내부 환경온에 따라 상이할 수 있음을 시사한다. 보다 다양한 온열 환경에서의 후속 연구가 뒷받침된다면 더욱 실용적인 복사 히터 사용 가이드라인을 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

인체 생리 반응과 주관적 감각 측면과 더불어 “ThighKnee” 조건에서의 열 쾌적성 만족은 소비 전력량 측면에서도 매우 긍정적인 결과임을 알 수 있다. 겨울철 전기차의 주행거리 감소 원인 중 특히 내연기관에 적용되는 공조 냉난방 시스템인 HVAC 난방의 사용이 주요 원인으로 알려져 있는데, 0°C 환경에서 공조 난방 최대 적용 시, 미사용시에 비해 주행거리가 52% 감소한다고 보고하였다(Son et al., 2012). 이러한 문제를 해결하기 위해 국내 자동차 기업의 전기차에 PTC 히터, 히트펌프와 같은 보조 장치를 적용하고 있으며, PTC 히터보다도 전력 효율이 높아 주로 사용되고 있는 히트 펌프 구동 및 실내 난방 사용 시에 2.5 kwh의 열이 사용된다고 알려져 있다(Hyundai Motor Group, 2020). 반면, 본 연구에서 도출된 ThighKnee 조건의 소비 전력량은 138 W로 측정되었다. 비록 전기차 난

방 시 소비 전력량 측정은 외기온도, 전장 부품 온도, 공조 사용 정도나 주행 상황 등 복합적인 요인의 영향을 받아 단언하기 어려우나, 최적 가온 조합의 차량용 복사 히터 적용 시 기존의 난방보다 소비 전력량 효율을 극대화할 수 있는 가능성을 해당 결과로 생각해볼 수 있다.

반면, 본 연구에서 설정한 측정 항목 중 여덟 조건 간 유의한 차이가 발견되지 않았던 항목들도 존재했다. 즉, 복사 히터 가온 유무와 상관없이 모든 조건에서 유사한 결과를 보인 항목들이 몇 가지 관찰되었다. 비록 조건 간 차이는 관찰되지 않았으나, 추후 전기차용 복사 히터 적용과 더불어 겨울철 차량 내 열 관리 시 유용하게 활용될 수 있는 결과는 다음과 같다. 먼저 심부온의 지표로 측정된 직장온의 경우, 여덟 조건 간 유의한 차이가 존재하지 않았다. 더하여 직장온은 모든 조건에서 인체의 산열량과 외기로부터의 열손실량이 균형을 이루는 경우의 심부온으로 추정되는 37°C 부근의 유사한 수준으로 유지되었다(Simion et al., 1992). 본 실험은 외기온 변화(25°C→−5°C→ 5°C)와 함께 해당 외기온에 따라 적절한 수준의 보온력에 해당하는 의복을 착용하였으며, 활동 수준은 3 MET 이하의 저강도 운동에 해당하는 4km/h로 걷기와 1.5 ~ 1.6 MET 가량의 앉아있기, 운전하기 등으로 이루어졌다. 대개 인간의 체온(body temperature)은 36.5°C로 조절되고 이는 심부온(core temperature)과 피부온(skin temperature)의 일정 비율로 계산된다. 이 때, 저온 환경에서는 피부혈관수축을 통한 피부온 하강으로 체온 조절이 이루어진다. 따라서 본 연구에서 설정한 외기온과 착용 의복 수준 하에서는 복사 히터 가온 여부에 상관없이 피부온의 조절만으로 정상 체온을 유지할 수 있으며, 해당 환경에서 적외선 복사 히터의 가온

혹은 종료가 심부온의 유의한 상승 혹은 하강을 이뤄낼 만큼의 열 부하가 아니었음을 예상해볼 수 있다. 본 연구에서 피부수분도는 겨울철 차량 내에서 주로 의복 외로 노출되어 있는 이마와 손등에서 측정되었는데, 복사 히터 적용으로 인한 해당 부위에서의 피부 수분도 감소는 관찰되지 않았다. 다만, 두 부위에서 시간에 따른 피부 수분도 감소는 확인되었으나 이는 5°C 환경에서의 지속적인 노출 때문일 것으로 사료된다. 더하여 전신 건조감 역시 모든 부위를 가온한 All 조건에서 가장 높았음을 확인하였다. 해당 결과는 복사 히터가 적용된 실차 실험 기반의 후속 연구를 통해 보다 면밀한 확인이 필요하나, 건조함으로 인해 탑승자의 불쾌감을 유발하는 HVAC 난방(Oh et al., 2017)에 비하여 복사 히터 적용이 실내를 건조하게 하지 않아 탑승자의 불쾌감을 상대적으로 감소시킬 수 있는 가능성을 시사한다. 심박변이도에서도 역시 복사 히터 가온으로 인한 스트레스 증가 혹은 감소 현상은 발견되지 않았다. 그러나, 시간 분석 영역 지표의 SDRR, RMSSD와 pRR50은 25°C 보다 5°C 환경에서 유의하게 높은 값을 보였다. 즉, 심박변이도는 복사 히터 가온에 따른 스트레스 변화는 확인할 수 없었으나, 외기온에 따른 변화가 존재하여 25°C 환경보다 5°C에서 스트레스가 감소하였음을 확인하였다. 이러한 결과는 탑승자의 스트레스가 차량 내부 외기 온도 자체로부터 현저한 영향을 받으며, 열적 쾌적성에 도달하는 따뜻함 이상의 더움은 스트레스를 유발할 수 있음을 시사한다. 더하여 본 연구에서 복사 히터의 가온 영향으로 인한 졸음 정도의 변화는 관계 있는 것으로 확인되지 않아, 복사 히터 가온 시에도 명료한 상태로 주행할 수 있음을 관찰할 수 있었다. 주행 중 난방으로 의한 불쾌감 혹은 주의력 저하는 위험한 상황을 초

래할 수 있기 때문에 해당 결과는 국부 복사 난방 적용 시 매우 긍정적인 측면으로 강조될 수 있다.

제 2 절 인체 생리 반응 및 주관적 감각의 상관 관계

본 연구의 또다른 발견으로는 겨울철 차량 탑승 모사 환경에서 몇 가지 인체 생리 반응과 주관적 감각 간의 상관 관계를 밝혀낸 것이다. 첫째로, 직장온은 전신 온열쾌적감과 상관을 보였으며 평균피부온은 전신 한서감과 전신 온열쾌적감과의 상관을 확인할 수 있었다. 평균피부온과 주관감 간의 상관은 이미 여러 선행연구(Gagge et al., 1967; Takada et al., 2013)를 통해 한서감과 온열쾌적감의 변화가 평균피부온의 상승 혹은 하강과 유의한 상관을 지녔음이 보고되어왔다. 더하여 본 연구는 다양한 외기온에 노출되고 복사 히터 가온 영향으로 인해 직접적인 피드백을 보이는 피부온의 변화폭이 컸기 때문에 변화 폭이 작은 심부온에 비하여 한서감과 온열쾌적감과 유의한 상관관계를 확인할 수 있었다. 따라서 겨울철 차량 내 탑승자의 전신 한서감과 온열쾌적감으로 평균피부온을 유추해 볼 수 있는 가능성을 확인할 수 있었다. 심부온을 대변하는 직장온 역시 전신 온열쾌적감과 유의한 상관을 보였으나, 본 연구에서 설정한 환경보다 더 다양한 환경 하에서 측정한 결과를 토대로 유의한 상관이 도출될 수 있을지에 대한 후속 연구가 필요하다.

선행연구와 달리 본 연구에서 독창적으로 발견된 상관 관계로는 직장온, 평균피부온과 가온 부위에서의 주관감 간의 유의한 상관이 도출되었다는 점과 가온 부위의 피부온과 전신 한서감, 온열쾌적감 간의 상관 관계가 관찰된 것을 꼽을 수 있다. 그 중 직장온은 넓적다리 온열쾌적감과 가장 높은 상관을 보였으며(r^2=0.228), 평균피부온은 발등 한서감과 가장 높은 상관을 나타내었다(r^2=0.808). 이러한 결과는 평균피부온과 전신 한서감 간의

상관계수가 r^2=0.821으로 도출된 것과 비교하였을 때 매우 유사한 정도의 상관을 보였음을 확인할 수 있었다. 한편 전신 한서감과 전신 온열쾌적감은 각각 r^2=0.432, r^2=0.476의 설명력으로 모두 발등 피부온과 가장 높은 상관을 나타내었다. 이를 전신 한서감, 온열쾌적감과 평균피부온 간의 상관계수인 r^2=0.821, r^2=0.377과 비교하자면 전신 한서감은 평균피부온과 더 높은 상관을 보였으나 전신 온열쾌적감은 발등 피부온과 더 높은 상관을 가짐을 확인할 수 있었다. 정리하자면, 복사 히터 가온 부위 중 발등에서 따뜻함을 느낄수록 평균 피부온이 높았으며 발등 피부온이 높을수록 열적 쾌적성이 높았음을 관찰하였다. 비록 본 연구에서 복사 히터를 통한 발등 가온은 효과가 미미하였음을 확인하였으나 이러한 경향은 발등 가온이 겨울철 전기차 탑승자의 생리 반응과 주관적 감각 측면 모두에서의 열 쾌적성 만족을 위해 반드시 강조되어야 할 부위임을 의미한다고 할 수 있다. 따라서 발등에서의 피부온과 주관감을 개선하기 위해서는 복사 히터 표면 온도 상승 혹은 기존의 대류, 전도열 전달 방식을 활용한 난방 방식 개발에 대한 새로운 연구가 요구되는 바이다.

더하여 가온 부위 세 부위에서의 한서감은 전신 한서감과, 가온 부위 온열쾌적감은 전신 온열쾌적감과의 매우 강한 상관 역시 본 연구에서 독창적으로 발견할 수 있었다. 그 중에서도 넓적다리에서의 한서감과 전신 한서감 간의 상관계수는 rho^2 = 0.941, 온열쾌적감은 rho^2 = 0.906으로 세 부위 중 90% 이상의 가장 높은 설명력을 보였다. 즉, 동일한 수준의 열을 부여한 세 부위 중에서도 넓적다리에서 따뜻함과 쾌적함을 느낄수록 전신에서 따뜻함과 쾌적함을 느끼는 상관 정도가 가장 높음을 확인하였다. 이러한 상관

은 복사 히터 최적 가온 조합 도출 시 넓적다리 가온의 긍정적인 결과들을 지지하는 결과로서, 전기차용 국부 복사 난방 개발 시 넓적다리 가온은 필수적인 가온 부위로 적용되야 함을 뒷받침한다.

심박변이도는 대개 운전자의 졸음 및 각성 상태를 평가하기 위한 생체 신호 모니터링 지표로서 연구되어왔으며, 본 연구 결과 시간 영역 분석 지표와 주파수 분석 지표 모두에서 한서감과의 상관 관계가 도출되었다. 반면 심박변이도와 온열 쾌적감의 상관을 밝힌 선행연구(Nkurikiyeyezu et al., 2018; Wu et al., 2021)가 다수였던 가운데, 본 연구에서 심박변이도와 온열쾌적감의 상관은 도출되지 않았다. 앞서 심박변이도에서 복사 히터 가온에 따라 탑승자의 생리, 심리적 상태의 변화는 확인되지 않았으나, 5°C 환경에서 스트레스가 적은 것을 확인했다고 언급하였다. Zhu et al., (2018)의 연구에서는 22°C에서 26°C로 증가할 때 LF/HF 값은 감소하며 1에 가까워졌고, 26°C에서 30°C로 증가할 때의 심박변이도가 다시 증가하였다고 보고했다. Min et al., (2015)의 연구에서는 38°C, 25°C, 18°C에서의 심박변이도를 측정하여 25°C를 기준으로 38°C보다는 18°C에서 자율신경계 활동이 더욱 활성화되었음을 보고하였다. 본 연구 결과와 선행연구의 결과에서 모두 정신생리심리적 스트레스는 외기온에 영향을 많이 받음을 공통적으로 발견할 수 있었다. 본 실험은 실제 차량처럼 밀폐된 공간이 아니었기 때문에 복사 히터 가온 시 차량 내부 환경온의 변화를 확인할 수 없었으나, 기존의 대류열 방식으로 차량 내부 환경온을 조절하는 난방 방식과 다르게 미래 전기차의 국부 복사 난방은 설치된 위치의 인접한 인체 부위에 열을 부하하는 방식이기 때문에 복사 히터로 인한 차량 내 환경온 변화가

나타날 수 있을지는 실차 실험 기반의 후속 연구를 통해 확인되어야 한다. 만약 그렇지 않음이 확인된다면, 복사 히터 적용을 통해 탑승자의 열 쾌적성은 만족하되 기존 난방 사용시보다 열적 불쾌감으로 기인되는 스트레스의 정도는 감소시킬 수 있는 긍정적 결과도 함께 제시할 수 있을 것이다.

제 3 절 제한점

본 연구는 복사 히터 최적 가온 조합을 도출해내는 것에 중점을 두고 겨울철 차량 탑승 과정과 환경을 유사하게 구성하였으나, 차량 내 탑승자의 온열 쾌적감을 결정하는 여섯 가지 요인을 모두 통제한 환경에서 진행하였다. 실제 차량에 적외선 복사 히터 설치 시 모델에 따라 가온 면적이 상이할 것이며, 복사 히터의 표면온도 또한 화상 등의 위험 요인을 고려하여 적용되어야 한다. 더하여 복사 히터 적용 시 전기차 1회 완충 기준 주행거리 증대 등의 중요한 정보를 제시하기 위해서는 보다 명확한 소비 전력량 효율 비교가 필요하다.

또한 본 연구에서 사용된 복사 히터는 탄소나노튜브 필름 형태의 면상 발열체와 최종 감싸기 원단으로 검정색 트리코트 조직의 폴리에스터 직물이 사용되었다. 동일한 면상 발열체 기반에서도 감싸기 원단과의 거리, 직물 특성 등에 따라 적외선 방사율이 상이하기 때문에 최종 표면온도와 히터와 인체와의 거리가 동일하더라도 실제 복사열 전달 정도가 다를 수 있다. 따라서 복사열 방사율이 높으면서도 전기차의 내장재로서 우수한 특성을 갖는 감싸기 원단의 탐색에 대한 연구 역시 함께 이루어져야 한다.

본 연구의 피험자가 건강한 20 – 30대 남성 10인이었던 점 역시 제한점이라고 할 수 있다. 인체계측특성을 비롯하여 탑승자 개인이 자각적으로 느끼는 덥고 추움의 정도와 체내 온감 수용기 분포의 차이 등의 온열 민감도 수준 역시 상이할 수 있다. 또한 겨울철 차량 탑승 시 착의 습관의 차이도 존재할 수 있다. 따라서 다양한 연령, 성별과 인체 계측 특성을 지닌 다수의 피험자를 대상으로 여러 의복 조합 하에서 본 연구의 결과를 확인해 볼 필

요가 있다.

나아가 후속 연구에서는 실차 실험을 통해 통제되지 않은 다양한 온열 환경에서 진행될 필요가 있으며, 탑승자의 열 쾌적성 만족의 정도를 높이기 위하여 본 연구를 통해 도출된 복사 히터 최적 가온 조합과 함께 기존 차량에 적용되는 열선 시트, 핸들 가온과의 조합까지 고려한 최적 가온 조합 연구가 이루진다면 전기차용 통합 열관리 시스템 구축 시 더욱 실용적인 기초자료로서 활용될 수 있을 것이다.

제 5 장 결 론

전기차용 국부 복사 난방 개발 및 최적화를 위해 설치 가능성이 높은 인체 가온 부위를 토대로 여러 가온 부위 조합에 따라 인체 평가를 진행한 결과, 넓적다리와 무릎을 가온한 ThighKnee 조건이 인체 생리 반응, 주관적 감각과 소비 전력량 모두를 고려한 최적 가온 조합으로 도출되었다. 해당 조건 하에서 탑승자는 복사열을 통해 인체 체표면적의 약 6%를 가온하였음에도 생리적, 주관적으로 모두 열 쾌적성을 만족할 수 있었으며, All 조건에 비해 소비 전력량 효율을 35% 높일 수 있음을 확인할 수 있었다. 더하여 복사 히터 최적 가온 조합에서 탑승자는 건조함을 느끼지 않고 졸음을 느끼지 않아 기존 난방 방식보다 긍정적인 주행 환경 조성할 수 있는 가능성이 관찰되었다. 이러한 결과는 전기차용 복사 히터 적용을 비롯한 액티브 히팅 방한복 및 웨어러블 히팅 디바이스 개발 시 기초 자료로서 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

복사 히터 최적 가온 조합 도출과 함께 본 연구에서 측정한 인체 생리 반응과 주관적 감각 간의 상관 관계를 관찰한 결과, 겨울철 차량 내 환경에서 탑승자가 주관적으로 느끼는 따뜻함과 추움 정도, 쾌적하고 불쾌한 정도를 바탕으로 심부온, 평균피부온, 부위별 피부온과 심박변이도를 통하여 추정할 수 있음을 확인하였다. 해당 데이터는 다양한 후속 연구를 기반으로 미래 모빌리티에서의 통합 열관리 시스템과 더불어 웨어러블 디바이스 개발에도 기여할 수 있을 것이다.

참고 문헌

미래 전기차 열 관리 기술, 어디까지 왔나. (2022. November 9). Hyundai Motor Group. Retrieved from https://www.hyundai.co.kr/story/CON0000000000036930

민세동, 신항식 (2015). 심박변이율 시간영역 분석을 통한 실내온도변화에 따른 자율신경활동 평가. 전기학회논문지, 64(8), 1246-1250.

손성호, 권해붕, 박형원, 이정화 (2012). 전기자동차 온도 및 공조부하별 일회충전 주행거리 평가. 한국자동차공학회 추계학술대회 및 전시회, 11, 2245-2249.

오동훈, 박태용, 이성제, & 김재웅 (2017). 자동차용 원적외선 복사열 히터 적용 효과에 관한 연구. 한국자동차공학회 추계학술대회 및 전시회, 1492-1499.

윤성은, 기네시티지, 수하이미무하마드레자, 이현진, & 김중경 (2023). 동적 국부복사난방 조건에서 전기자동차 탑승자의 열쾌적감 측정 및 예측. 한국자동차공학회논문집, 31(7), 479-491.

이겨레, 임재한 (2019). 난방운전조건에 따른 실내 온열 환경과 인체 심박변이(HRV)와의 관계. 대한건축학회 학술발표대회 논문집, 39(1), 284-285.

임재한 (2021). 재실자 온열쾌적평가에서 인체의 생리적 반응을 고려한 심박변이도 측정 및 분석 방법 비교 연구. 한국태양에너지학회 논문집, 41(3), 79-89.

현대·기아차가 개발한 전기차 '고효율 히트펌프 기술' 다른 브랜드도 앞다퉈 도입하는 이유는? (2020, June 11). Hyundai Motor Group. Retrieved from https://www.hyundai.co.kr/story/CONT0000000000002995

Chan, C. C., Chau, K. T., & Chau, K. T. (2001). Modern electric vehicle technology (Vol. 47). Oxford University Press on Demand.

Deng, Y., Cao, B., Liu, B., & Zhu, Y. (2020). Effects of local heating on thermal comfort of standing people in extremely cold environments. Building and Environment, 185, 107256.

Gagge AP., Stolwijk J., & Hardy J. (1967). Comfort and thermal sensations and associated physiological responses at various ambient temperatures. Environmental Research, 1(1), 1-20.

ISO (2006). Ergonomics of the thermal environment - Evaluation of the thermal environment in vehicles - Part 3: Evaluation of thermal comfort using human subjects ISO 14505-3:2006, International Organization for Standardization, Geneva.

Kim, S. Y., Park, J. H., & Lee., J. Y. (2014). Cutaneous warm and cool sensation thresholds and inter-threshold sensory zone of male fire fighters in Korea. The Journal of the Korean Society of Living Environment System, 21(6), 965-975.

Kim, Y. H., Shin, Y. C., & Cho, H. Y. (2021). Influencing factors on thermal comfort and biosignals of occupant-a review. Journal of Mechanical Science and Technology, 35(9), 4201-4224.

Kräuchi, K., Cajochen, C., Werth, E. (1999). Warm feet promote the rapid onset of sleep. Nature, 401, 36-37.

Kwon, J. Y., Kim, J.K., Lee, H., Lee, D., & Ju, D. Y. (2023) A Comprehensive Overview of Basic Research on Human Thermal Management in Future Mobility: Considerations, Challenges, and Methods. Sustainability. 15(9), 7335.

Lee, J. Y., Choi, J. W., Kim, H. (2008). Determination of body surface area and formulas to estimate body surface area using the alginate method. Journal of Physiological Anthropology, 27(2), 71-82. http://dx.doi.org/ 10.2114/jpa2.27.71.

Lee, Y., Lee, H., & Kim, J. K. (2019). Simulation of human thermal comfort considering local radiant heating for passengers in electric vehicles. Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, 27(12), 933-940.

Lee, Y., Lee, H., Kang, B. H., & Kim, J. K. (2021). Machine learning-based personal thermal comfort model for electric vehicles with local infrared radiant warmers. Journal of Mechanical Science and Technology, 35(7), 3239-3247.

Luo, M., Wang, Z., Zhang, H., Arens, E., Filingeri, D., Jin, L., & Si, B. (2020). High-density thermal sensitivity maps of the human body. Building and Environment, 167, 106435.

Matsuo, J., Murayama, T., & Tochihara, Y. (2006). Effects of different vertical air temperatures on thermal comfort and mental

performance (in Japanese with English abstract). Japanese Journal of Biometeorology, 43(2), 79–89.

Nkurikiyeyezu, K.N., Suzuki, Y., & Lopez, G.F. (2018). Heart rate variability as a predictive biomarker of thermal comfort. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing. 9, 1465–1477.

Oi, H., Yanagi, K., Tabata, K., & Tochihara, Y. (2011). Effects of heated seat and foot heater on thermal comfort and heater energy consumption in vehicle. Ergonomics, 54(8), 690–699.

Prasad, B., Lee, Y., & Kang, B. H. (2019). Development of a thermal physiological model to analyze the effect of local radiant heaters in electric vehicles. Journal of Mechanical Science and Technolgy , 33, 3577–3584.

Rickards, C. A., Ryan, K. L., & Convertino, V. A. (2010). Characterization of common measures of heart period variability in healthy human subjects: implications for patient monitoring. Journal of Clinical Monitoring and Computing, 24(1), 61–70.

Siple, P. & Passel, C. F. (1945). Measurements of dry atmospheric cooling in subfreezing temperatures, Proceedings of the American Philosophical Society. 89, 177–199.

Schwartz, R. S., Shuman, W. P., Bradbury, V. L., Cain, K. C., Fellingham, G. W., Beard, J. C. & Abrass, I. B. (1990). Body fat distribution in healthy young and older men. Journal of Gerontology,

45(6), M181- M185.

Simion, M., Socaciu, L., & Unguresan, P. (2016). Factors which influence the thermal comfort inside of vehicles. Energy Procedia, 85, 472-480.

Takada, S., Matsumoto, S., & Matsushita, T. (2013). Prediction of whole-body thermal sensation in the non-steady state based on skin temperature. Building and Environment, 68, 123-133.

Thomas, P. & Richard, d. D. (2015). Thermal pleasure in built environments: physiology of alliesthesia, Building Research & Information, 43(3), 288-301.

Thomas, P. & Richard, d. D. (2017). Thermal pleasure in built environments: spatial alliesthesia from air movement, Building Research & Information, 45(3), 320-335.

Wang, L., Chen, M., & Chen, Z. (2019). Local thermal discomfort in low temperature environments, Thermal Science. 23(4), 2211-2218.

Wu, G., Liu, H., Wu, S., Liu, G., & Liang, C. (2021). Can Heart Rate Variability (HRV) Be Used as a Biomarker of Thermal Comfort for Mine Workers? International Journal of Environmental Research and Public Health, 18(14), 7615.

Zhu, H., Wang, H., Liu, Z., Li, D., Kou, G.X., & Li, C. (2018). Experimental study on the human thermal comfort based on the heart rate variability (HRV) analysis under different

environments. The Science of the Total Environment, 616-617, 1124-1133 .

Abstract

Optimization of local body part combination for development of radiant heater for electric vehicle passengers in winter

MOON Juhyun
Department of Fashion and Textiles
The Graduate School
Seoul National University

Along with the transition to electric vehicles, 'local radiant heating', a newly developed platform to electric vehicles is being proposed. Radiant heaters are expected to heat the thighs, knees, and feet and present study conducted various combinations of heating body parts during simulation of vehicle boarding and driving process in winter. So, the purpose of present study is to derive the optimal combination of heating parts that can minimize the energy consumption of electric vehicles and the passengers' thermal comfort satisfaction based on the physiological and subjective responses. Furthermore, by deriving a correlation between the physiological response and subjective responses, we suggest the possibility of predicting the physiological response based on the subjective response when evaluating the passengers' thermal comfort. A total of 10 healthy Korean males in their 20s participated in this experiment. During every experiment, rectal temperature, skin temperature, microclimate, total body weight,

skin hydration, blood pressure, and heart rate variability were measured. Thermal sensation, thermal comfort, dryness sensation, shivering and sleepiness scale were collected by likert scale. Mean skin temperature was the highest in the ThighKnee and All conditions among the eight conditions both during and after heating of the radiant heater ($P < 0.001$). No significant differences were observed in rectal temperature, microclimate, insensible perspiration, skin hydration, blood pressure, and heart rate variability among the eight conditions. Thermal sensation was highest in the ThighKnee and All conditions among the eight conditions when the radiant heater was warmed up ($P < 0.001$), and the thermal comfort was highest in the ThighKnee condition when the radiant heater was warmed up ($P < 0.01$). The forearm and the front part of the thigh were selected to the shivering parts in the Thigh and ThighKnee conditions after the radiant heater was turned off. There were no significant differences between conditions for sleepiness scale. A significant positive correlation was found between skin temperature, thermal sensation, and thermal comfort in the all areas heated by the radiant heater (all Ps < 0.001).

To sum up, the ThighKnee condition was derived as the optimal heating combination in the present study. Under these conditions, passengers could satisfy the thermal comfort physiologically and subjectively, and can decrease energy consumption around 35% than in All condition. In addition, it was confirmed that core temperature, mean skin temperature, body regional skin temperature and heart rate variability could be estimated based on the subjective responses that the passengers felt in the vehicle environment in winter. The results of present study will be able to contribute to the innovative development of indoor environment

strategy for the future mobility and wearable industry.

Keywords: Local radiant heating, radiant heater, physiological responses, subjective responses, thermal sensation, thermal comfort
Student Number: 2021-20117

감사의 글

가장 먼저 지난 2년간 아낌없는 지원과 지도를 맡아 주시고 석사 학위를 주신 이주영 교수님께 감사의 말씀을 드리고 싶습니다. 설레는 마음으로 처음 교수님을 뵙기 위해 학교에 왔던 2021년 1월 어느 겨울날, 짧은 인사를 마치고 222동에서 나오니 아름답게 눈이 내리던 교정의 모습이 아직도 생생합니다. 2년전 그 날의 제 꿈이었던, 의복과 건강 연구실에 입학하여 석사 과정을 밟는 목표를 이루게 해 주셔서, 또 그 모든 과정이 값지고 풍요로울 수 있게끔 만들어 주셔서 정말 감사합니다. 매일 밤낮 할 것 없이 학생들을 위해 힘써 주신 교수님을 보며 더 나은 제자가 되어 교수님께 힘이 될 수 있는 학생으로 성장하려 노력했습니다. 여전히 부족하고 갈 길이 멀지만, 앞으로 저에게 어떤 일이 주어져도 해낼 수 있을 것이라는 마음가짐을 갖게 해 주셔서 너무나도 감사합니다. 마지막으로 제가 사회에 나가 하고 싶었던 일들이 저의 연구가 될 수 있도록 기회를 주시고 모든 과정 속에서 저를 믿어 주셔서 정말 감사하다는 말씀드립니다.

교수님과 더불어 든든하게 저의 길을 응원해주시고 항상 어여쁘게 봐주셨던 백윤정 박사님, 김도희 박사님과 주희영 박사님께도 정말 감사드립니다. 또 제가 학업과 연구에만 집중할 수 있게끔 힘써 주셨던 허윤정 선생님과 정호연 선생님, 그리고 오지영 선생님께도 감사의 인사를 전하고 싶습니다. 지난 2년간 가장 가까이서 동고동락했던 연구실 구성원 모두에게도 감사합니다. 집보다 오랜 시간을 보낸 331호와 332호에서의 생활동안 제가 준 도움보다 훨씬 많은 도움을 받기만 했다는 생각이 들어 미안한 마음이

먼저 드는 연구실 구성원분들에게 여러 방면에서 정말 많이 배울 수 있었습니다. 이주영 교수님, 박사님들, 선생님들, 그리고 연구실 학생들 모두 2년간 저의 새로운 가족이 되어 주셔서 많이 의지할 수 있었고 무사히 졸업까지 올 수 있었다고 생각합니다. 모두 정말 감사합니다.

이 논문은 저의 학위논문임과 동시에 비약적인 발전을 이루고 있는 미래 모빌리티 산업에서의 연구 중 하나였습니다. 이제 시작에 불과한 작은 내용이지만, 이 연구가 최적의 환경에서 이루어질 수 있도록 최선을 다해 협조해주신 테라온 김형준 연구원님, 최소영 연구원님, IZM Design 황기영 대표님, 한국자동차연구원 연구원님들께 감사드립니다. 학위 논문 심사를 맡아 주시며 더 좋은 논문이 나올 수 있도록 주옥 같은 의견을 주신 홍병희 교수님과 김중경 교수님께도 감사의 인사를 전합니다. 결코 쉽지 않은 실험 프로토콜이었음에도 불구하고 적극적으로 참여해주시고 오히려 실험 기간 동안 큰 힘이 되 주셨던 10인의 피험자분들께도 정말 감사합니다.

222동 3층에서의 또다른 새로운 인연이었던 지율언니, 민경언니, 찬희와 진욱오빠에게도 고마움을 전합니다. 각자 다른 분야를 연구하고 있지만 서로의 어려움을 공감해주고, 연구실에서 벗어나 잠시라도 머리를 식힐 수 있었던 시간을 기꺼이 내주어 너무나도 고마웠습니다. 개개인의 분야에서 최선을 다하고, 또 좋은 결과를 내고 있는 동료가 생겨 정말 기쁘고 앞으로도 잘 해낼 것이라 믿어 의심치 않습니다. 더하여 등하교길에 지쳐 있던 제 모습만 보셨음에도 늘 예뻐해주셨던 222동 수위실의 제영봉 선생님께도 정말 감사합니다. 제 현재와 미래를 응원해 주셔서 감사하고, 저 또한 선생님의 앞으로를 응원합니다.

살아오며 수도 없이 지치고 포기하고 싶었던 순간마다 항상 제 옆에서 너는 할 수 있다고, 너라서 할 수 있다고 응원해주고 힘이 되어준 소중한 친구들인 다빈, 성수, 세린, 현정, 승원, 채린, 원일, 성은, 소현, 대민, 근식, 현웅, 욱용, 정현, 주연, 효준, 그리고 태훈에게 큰 고마움을 전합니다. 넘어지고 부딪혀도 다시 일어나 계속 달려올 수 있었던 건 잠시 쉬어 갈 때 기꺼이 시간과 마음을 내어준 친구들 덕분이라고 생각합니다. 정말로, 가족 같은 친구들이 곁에 없었다면 저는 절대로 여기까지 올 수 없었습니다. 앞으로도 각자의 자리에서 최선을 다하고 서로 힘이 되어줄 수 있는 존재로 지낼 수 있도록 제가 더 잘할 테니, 우리 모두 항상 건강하고 오래오래 함께 행복합시다:)

이 세상 그 무엇과도 바꿀 수 없는 가장 소중한 내 편인 엄마와 아빠께도 감사하고 사랑한다는 말을 전하고 싶습니다. 2년간의 석사 생활은 연구자로의 성장과 함께 혼자 자란 제가 부모님과 처음으로 떨어져 지내며 어른이 되기 위한 성장의 시간이기도 하였습니다. 이러한 시간 속에서 가족이 얼마나 소중하고 감사한 존재인지 깨달을 수 있었고, 여전히 독립적이진 못하지만 올바르며 사랑을 받고 줄 수 있는 사람으로 저를 키워 주신 부모님께 너무나도 감사합니다. 늘 욕심 많고 이기적인 딸이지만 그럼에도 저의 도전을 응원해주고, 심적으로 그리고 금전적으로 아낌없이 지원해 주셔서 감사합니다. 한편으로는 제 인생에서 부모님의 존재가 너무나 크다는 것을 알게 되어 앞으로 스스로 헤쳐 나가야 할 수많은 미래가 걱정되기도 합니다. 그렇지만 엄마와 아빠의 딸이기에 잘 해낼 수 있을 것이라고 믿습니다. 사랑합니다. 제 곁에 오래오래 함께 있어주세요:)

끝으로, 지금까지 열심히 달려온 제 자신에게도 수고했다는 칭찬을 해주고 싶습니다. 앞으로 넘어야 할 산이 정말 많지만 그럼에도 앞만보고 달리기보다 옆도 뒤도 살필 수 있는 더 큰 그릇을 가질 수 있는 사람이 되었으면 좋겠습니다. 또 자신의 능력을 의심하기보다는 스스로를 더 믿고, 지금처럼 나를 아끼며, 내 옆에 나를 응원해주고 사랑하는 사람들에게 사랑을 줄 수 있는 사람으로 살아가는 내가 되기를 바랍니다.

2023년 8월

서울대학교 222동 332호 의복과 건강 연구실에서

문 주 현