

## 여름철 작업자들의 고체온증 예방을 위한 액체냉각복 개발 및 효과적인 냉각온도와 인체 냉각부위 탐색

정재연<sup>1)</sup> · 강주호<sup>2)</sup> · 설선홍<sup>1)</sup> · 이주영<sup>1,3)†</sup>

<sup>1)</sup>서울대학교 의류학과

<sup>2)</sup>서울대학교 체육교육과

<sup>3)</sup>서울대학교 생활과학연구소

## Developing Liquid Cooling Garments to Alleviate Heat Strain of Workers in Summer and Exploring Effective Cooling Temperature and Body Regions

Jae-Yeon Jung<sup>1)</sup>, Juho Kang<sup>2)</sup>, Seonhong Seol<sup>1)</sup>, and Joo-Young Lee<sup>1,3)†</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Textiles, Merchandising, and Fashion Design, Seoul National University; Seoul, Korea

<sup>2)</sup>Dept. of Physical Education, Seoul National University; Seoul, Korea

<sup>3)</sup>Research Institute for Human Ecology, Seoul National University; Seoul, Korea

**Abstract:** The purpose of the present study was to explore the most effective body region and cooling temperature to alleviate heat strain of workers in hot environments. We developed liquid cooling hood, vest, sleeves and socks and applied the water temperatures of 10, 15, 20, and 25°C through the liquid cooling garments in a hot and humid environment (33°C air temperature and 70% RH air humidity). A healthy young male participated in a total of 16 experimental trials (four cooling garments × four cooling temperatures) with the following protocol: 10-min rest, 40-min exercise on a treadmill and 10-min recovery. The results showed that rectal temperature, mean skin temperature, and ratings of perceived exertion during exercise; heart rate and diastolic blood pressure during recovery; and total sweat rate were lower for the vest condition than other garment conditions ( $p < .05$ ). However, there was no differences in mean skin temperature among the four cooling garments when we compared the values converted by covering area(%BSA). When we classified the results by cooling temperature, there were no consistent differences in thermoregulatory and cardiovascular responses among the four temperatures, but 25°C water temperature was evaluated as being the most ineffective cooling temperature in terms of subjective responses. In conclusion, the results indicated that wearing cooling vest with < 20°C cooling temperature can alleviate heat strain of workers in hot and humid environments. If the peripheral body regions are cooled with liquid cooling garments, larger cooling area with lower cooling temperature than 10°C would be effective to reduce heat strain of workers. Further studies with a valid number of subjects are required.

**Key words:** liquid cooling garment (액체냉각복), body regional difference (신체부위 별 차이), cooling temperature (냉각 온도), heat stress (서열 스트레스), heat strain (서열 부담)

### 1. 서 론

전 지구적인 기후 상승으로 인해 우리나라도 여름철 폭염의 강도와 빈도는 점점 증가하는 추세로 2018년 여름 강원도 홍천에서 41°C라는 기상 관측 이래 최고 기온이 기록되었다(Korea Meteorological Administration, 2018). 연간 폭염 일수

의 경우 2011년 7.5일에서 2017년 14.4일, 2018년 31.4일로 급격히 증가하였으며, 동시에 여름철 서열질환자 수도 증가하여 2011년 443명에서 2017년 1,574명, 2018년 4,526명으로 가파른 증가를 보이고 있다(Korea Centers for Disease Control and Prevention, 2018). 이러한 폭염 속에서 보호복을 착용해야 하는 작업자들의 서열 장애 위험은 더욱 증폭될 수 있다(Holmer, 1995). 특히 무겁고 부피가 크며 여러 겹으로 구성된 전신 보호복에 안전화나 후드, 보호장갑, 보호장화 등과 같은 장비까지 착용하는 경우 고 체온증의 위험이 더 크다고 볼 수 있다. 전투복을 착용하고 실외 군사 훈련을 하는 군인들 중 2,000건이 넘는 서열 질환 관련 입원이 보고되며(Army Medical Surveillance Activity, 2012), 2015년 국내 발생했던 중동호흡기 증후군(Middle East Respiratory Syndrome; MERS) 대응

†Corresponding author; Joo-Young, Lee

Tel. +82-2-880-8746

E-mail: leex3140@snu.ac.kr

© 2020 (by) the authors. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution license (<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

의료진 중 감염자는 더위로 인해 전신 보호복을 급히 벗는 도중 감염한 사례들이었다(Yoon, 2015). 특히, 작업의 특성상 환경의 열원을 줄일 수 없는 용광로나 용접 작업장, 유리 공장, 식품 가공 공장 등에서 일하는 작업자들의 여름철 서열 장해는 작업능률 저하로까지 이어질 수 있다.

이상과 같은 실내외 작업자들의 서열질환 저하 및 예방을 위한 안전작업 대책으로 다음 세 가지 대응책이 제안되어 왔다: 공학적 조절, 위생·관리적 조절, 개인보호구 조절(Korean Industrial Hygiene Association, 2014). 공학적 조절은 작업장의 열원을 줄이거나, 공조시설을 이용해 대류나 증발을 증가시키고, 복사열을 줄이는 방법이다. 위생·관리적 조절은 교대 작업, 작업-휴식 시간 조절, 작업량 감소, 음료 공급, 동료 시스템, 체력 증진, 사전 건강 검진, 열적응 훈련 등을 통한 조절을 의미한다. 개인보호구 조절은 보호복의 총중량 감소, 냉매나 팬을 삽입한 보호복 개발을 포함한다. 중간 휴식 중 보호복을 벗는 것과 같은 수동적인 냉각은 심부온을 낮춰 서열부담을 경감하는데 효과적이지 않으며(Kim et al., 2011), 에어컨을 사용하거나, 찬 음료 음수, 냉각조끼 착용과 같은 능동적인 냉각은 수동적 냉각 방식보다 서열 부담 냉각에 보다 효율적인 것으로 여겨진다(O'Hara et al., 2008).

여름철 고온 환경에 노출된 작업자들의 서열부담 경감을 위한 능동적인 냉각 방법과 그 효과는 다수 보고되어 있다. 인체 냉각은 작업 전, 작업 중, 작업 종료 후 혹은 작업 중 중간 휴식 시 냉각으로 나뉘어 그 효과가 탐구되어 왔다. 작업 전 냉각의 경우, 특정 냉각 조끼를 작업 전 일정 시간 미리 착용하게 하여 근육을 미리 냉각시킨 경우, 작업 시 심부온 및 심박수 상승이 더 적어 작업 수행 능력이 증가되었다는 연구(Arngrímsson et al., 2004) 등이 있으며, 작업 중 냉각 연구로는 음수와 냉각이 동시에 가능하도록 음수냉각조끼를 개발하여 소방복 안에 착용한 후 이의 효과를 검증한 연구(Kim et al., 2020) 등이 있고, 연속 작업의 중간 휴식 중 냉각의 경우, 체열 발산에 효율적인 상지(손과 팔) 부위를 쉬는 시간에 얼음물에 침지하여 근사 훈련과 같은 고강도 작업 능률이 향상되었다는 연구(DeGroot et al., 2013), 실내 고온 작업장에서 일하는 전신 보호복 작업자의 서열부담 경감을 위해 외기로부터의 차가운 공기를 보호복에 연결시켜 이의 효과를 탐구한 연구(Holmer, 2006), 미식축구 선수들의 경기 중 고체온증을 줄이기 위해 경기 중간 휴식기 소형 팬을 미식축구 복으로 연결시켜 인체 냉각을 시도한 연구(Hooker, 1991) 등이 보고된다.

그러나 통상 무게가 최대 4 kg에 달하는 냉각 조끼의 착용은 작업복 무게 증가로 인한 에너지 대사량 증가가 동반되며(Noe, 2015), 시간에 따른 냉매의 해동으로 냉각 효율 저하와 통기성 저하가 발생할 수 있다. 찬물 침지는 작업 중이 아닌 휴식기에만 활용 가능한 방법으로, 과도한 찬 물에 팔다리를 침지하는 경우 급속한 혈관수축이 발생하여 피부로부터의 방열이 오히려 줄어들 수 있다는 단점이 있다(Choi et al., 2013). 이처럼 실제 고온 환경에서 작업 중인 작업자의 인체에 중량 부담을 주

지 않으면서 최적의 서열부담 경감 냉각법을 적용하기 위해선 무엇보다 가장 먼저 서열 환경 노출 시 인체 어느 부위를 몇 도로 냉각하는 것이 가장 효과적일지를 찾을 필요가 있다. 인체 냉각에 대한 많은 선행연구들이 있으나, 다양한 인체 부위와 다양한 냉각온도의 조합에 대해 동시 비교한 후 최적 조합을 이끌어낸 연구는 거의 없다. 서열부담에 가장 효과적인 인체 부위 및 효과적인 냉각 온도에 대한 기초 자료가 얻어진다면 실제 다양한 종류의 냉각복 개발에 효과적으로 적용될 수 있을 것이다.

냉매를 활용하는 냉각복의 경우 냉매가 녹으면서 냉각 온도가 점점 증가하므로 특정 온도들을 비교하여 최적의 냉각 온도를 도출하고자 하는 본 연구의 목적에는 부합하지 않는다. 열전도도를 사용하는 냉각방식의 경우 냉각되는 면의 반대 면으로 열이 방출되고, 또한 유지되는 온도의 표준편차가 상대적으로 크다는 점에서 본 연구에는 적합하지 않다. 이에 본 연구에서는 미국과 러시아 우주복의 체온조절복으로 사용되는 액체냉각복 방식을 활용하여 최소한의 표준편차로 특정 온도에서의 냉각이 유지되도록 하였다. 액체냉각복이란 나일론 스판덱스 소재에 튜브를 붙이거나 끼워 일정한 온도의 물이 순환할 수 있도록 제작된 옷으로, 동일한 온도의 물이 피부를 순환하면서 인체로부터의 열을 외부로 방출시킬 수 있다는 장점을 갖는다(Nunnely, 1970). 본 연구를 통해 여름철 서열부담 경감에 최적적인 인체 냉각 부위와 냉각 온도 간의 조합이 도출된다면 이를 바탕으로 다양한 냉각 방식의 냉각복 개발 시 기초자료로 활용이 가능할 것이다. 이에 본 연구는 인체 부위별 액체냉각복을 개발한 후 서열부담 경감에 가장 효과적인 인체 냉각부위 및 냉각 온도 탐색을 목적으로 하였다.

## 2. 연구 방법

본 연구는 피부 냉각을 위한 인체 부위별 액체냉각복 개발과 개발된 액체냉각복의 인체작용평가의 두 단계로 이루어졌다.

### 2.1. 인체 부위별 액체냉각복 디자인 및 개발

본 연구에서는 머리와 목, 몸통, 상지, 하지 부위를 냉각할 수 있도록 후드형, 조끼형, 슬리브형, 긴 양말형의 액체냉각복이 고안되었다. 액체냉각복은 두 겹으로 이루어졌으며 겹감으로 나일론 스판덱스 소재, 안감으로 폴리우레탄 85%, 스판덱스 15%의 메시 소재가 사용되었다. 물 순환을 위한 튜브로는 직경 6 mm의 PVC 튜브가 사용되었으며, 튜브에 순환하는 물의 온도와 튜브의 표면 온도 차이는 1~4°C 정도 차이가 났다. 메시 소재의 구멍에 튜브를 통과하여 직선형, 나선형 등의 배치가 시도되었다 최종 개발된 형태의 후드형, 조끼형, 슬리브형, 긴 양말형에 대해 각 의복별 사용된 튜브의 총길이 및 물의 유속, 피복면적(Covering area, 체표면적의 %로 표시함, %BSA)이 측정되었다.

## 2.2. 인체착용평가

### 2.2.1. 피험자

본 연구에서는 건강한 20대 남성 한 명이 피험자로 참여하였다(나이 24세, 키 175 cm, 체중 71 kg, 체질량지수 23.2 kg·m<sup>-2</sup>, 체표면적 1.897 m<sup>2</sup>, 최대산소섭취량 51.8 ml·min<sup>-1</sup>·kg<sup>-1</sup>). 체표면적은 Lee et al.(2008)의 식으로 계산되었다. 피험자는 실험 참여하기 전에 실험 내용에 대한 자세한 설명을 듣고 이해한 후 자발적 참여에 대한 동의서에 서명을 하였다.

### 2.2.2. 실험조건 및 실험 프로토콜

인체착용평가는 네 종류의 액체냉각복(후드형, 조끼형, 슬리브형, 긴 양말형)을 이용하여, 네 단계의 냉각 물 온도 10°C, 15°C, 20°C, 25°C 조건에서 수행되었다(네 종류의 냉각복 × 네 단계의 물 온도 = 총 16조건). 피험자는 총 16조건의 실험에 참여하였으며, 실험 참여 순서는 순서에 의한 효과를 배제하기 위해 임의로 정해졌다. 피험자에게는 실험 참여 세 시간 전에는 카페인 음료 및 식사가 금지되었다. 탈수 상태에서의 실험 참가를 방지하기 위해 피험자는 매 실험마다 실험실 도착과 함께 300 ml의 물을 마셨으며, 상의 탈의를 한 후 측정 센서들을 피부에 부착하고 각 인체 부위별 네 개의 조건에 해당하는 한 벌의 액체냉각복과 실험 의복(팬티, 반바지, 운동화)으로 갈아입은 후 충분한 안정을 취하였다. 기본적으로 상반신 탈의 상태에서 진행되었으며 조끼형 조건에서만 상체에 액체냉각복을 착용하였고, 긴 양말형 조건에서는 운동화를 신지 않고 맨 발에 긴 양말형의 액체냉각복만 착용한 상태로 실험이 진행되었다. 직장은 37.0 ± 0.5°C와 안정 시 심박수 범위, 노비중(1.025 이하)을 확인한 후에 피험자는 기온 33°C, 습도 70%RH로 유지되는 인공기후실로 입실하였다. 실험 프로토콜은 액체냉각복과 실험 의복을 장착한 채로 총 60분으로, 10분간 앉은 자세 휴식, 트레드밀 위에서 각 10분씩 5 km·h<sup>-1</sup>, 6 km·h<sup>-1</sup>, 7 km·h<sup>-1</sup> 속도 운동, 20분간 다시 앉은 자세의 회복기로 이루어졌다(Fig. 1). 액체냉각복을 이용한 인체냉각은 실험 60분 동안 지속적으로 이루어졌다.

### 2.2.3. 측정 항목

직장은, 귀내온, 피부온이 전용 써미스터(LT-8A, Gram Corporation, Japan)를 이용하여 1초 간격으로 연속 측정되었다. 피

부온은 총 여덟 부위(이마, 가슴, 등, 아래팔, 손등, 넓적다리, 종아리, 발등)에서 공통적으로 측정되었으며, 추가로 후드형 착용 시에는 뒷목, 조끼형 착용 시에는 복부, 슬리브형 착용 시에는 손가락(3rd), 긴 양말형 착용 시에는 발가락(2nd)의 온도를 측정하여 각 조건별로 총 아홉 부위에서 피부온이 측정되었다. 산소섭취량은 에너지 대사량 측정기(Quark, CPET, COSMED, Italy)를 이용하여 60분 동안 Breath by breath법으로 연속 측정되었으며, 심박수는 가슴 벨트형 기기(RS400, Polar Electro, Finland)를 사용하여 60분 동안 1초 간격으로 연속 측정되었다. 혈압은 휴식기, 운동기, 회복기에 왼쪽 상완에서 자동 혈압계(HEM-7200, Omron Healthcare Co., Ltd., Japan)를 사용하여 측정되었다. 실험 전후 세미 누드 상태에서의 체중 측정을 통해 총 발한량이 추정되었다(F150S, Sartorius, Germany; resolution of 1 g). 실험 참여 전 인체 수화도를 확인하기 위해 피험자 소변을 이용하여 노비중이 측정되었다(PAL-10S, ATAGO, Japan). 주관적 감각 측정항목으로는 한서감, 습윤감, 온열쾌적감, 갈증감과 인지적 힘들기(운동자각도, Ratings of perceived exertion, RPE)에 대해 실험 시작 시 부터 종료 시 까지 매 10분마다 전신, 머리, 몸통, 손과 팔, 허벅지, 발과 다리의 부분에 대해 응답되었다(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], 습윤감은 7점 척도[-3 매우 건조하다, -2 건조하다, -1 약간 건조하다, 0 보통이다, 1 약간 습하다, 2 습하다, 3 매우 습하다], 갈증감은 7점 척도 [0 전혀 목마르지 않다, 1, 2 약간 목마르다, 3, 4 목마르다, 5, 6 매우 목마르다], 인지적 힘들기는 Borg's의 RPE 척도(6~20점)를 사용하여 운동 시 10분마다 응답하게 하였다. 주관적으로 느낀 땀이 나는 부위는 Lee et al.(2011)의 연구에 따라 인체를 총 23부위로 나누어 기록하게 하였다.

### 2.2.4. 데이터 분석

평균 피부온은 Hardy and Dubois(1938)의 다음 식에 기초하여 계산되었다: Mean T<sub>sk</sub> = 0.07T<sub>Forehead</sub> + 0.35T<sub>(Chest + Back)/2</sub> + 0.14T<sub>Forearm</sub> + 0.05T<sub>Hand</sub> + 0.19T<sub>Thigh</sub> + 0.13T<sub>Calf</sub> + 0.07T<sub>Foot</sub>. 액체

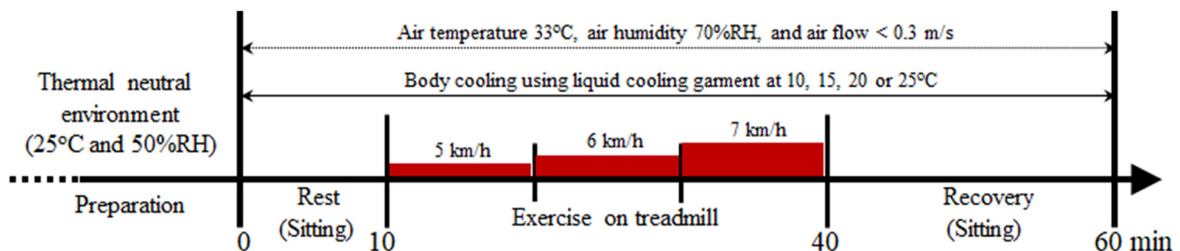






Fig. 1. An experiment protocol in the present study.

**Table 1.** Characteristics of the four liquid-perfused garments that were developed in the present study

	Hood	Vest	Sleeves	Long socks
Picture of liquid cooling garment (Photos_inside out)				
Clothing weight	329 g	796 g	354 g (pairs)	605 g (pairs)
Tube length	90 cm	230 cm	80 cm	150 cm
Water flow rate	517 ml·min <sup>-1</sup>	363 ml·min <sup>-1</sup>	1,323 ml·min <sup>-1</sup>	1,374 ml·min <sup>-1</sup>
Covering area	8.6%BSA	21.1%BSA	8.4%BSA	13.9%BSA

순환 튜브가 닿는 피부면과 닿지 않는 피부면 간 온도 편차가 증가할 수 있기 때문에, 냉각 부위의 경우 피부온 대표성을 높이기 위해 한 부위씩 추가하여 평균피부온도 추정식에 반영하였다. 즉, 후드형 조건에서는 기본 여덟 부위에 뒷목이 추가되어 뒷목과 이마온도의 평균이 얼굴부위 대표 온도로 사용되었고, 조끼형 조건에서는 복부를 추가하여 가슴, 등, 복부 온도의 평균값이 몸통의 대푯값으로, 슬리브형에서는 손가락을 추가하여 손가락과 손등이 손의 대푯값으로, 긴 양말형에서는 발가락을 추가하여 발등과 발가락의 평균을 발의 대푯값으로 사용하였다. 피험자 1인의 값에 대해 각 조건별 혹은 단계별 평균값으로 비교되었다. 총 16회의 실험 결과에 대해, 네 가지 액체냉각복 별, 네 가지 냉각온도로 분류하여 각 조건별 평균과 표준편차를 제시하였고, 네 조건 간 통계적 차이는 SPSS 23.0의 반복측정 분산분석(RM ANOVA)에 의해 검증하였다. 모든 결과는 평균과 표준편차(Mean ± SD)로 표현되었고, 통계적 유의성은  $p < .05$ 로 정하였다.

### 3. 결과 및 논의

#### 3.1. 개발된 액체냉각복의 특성

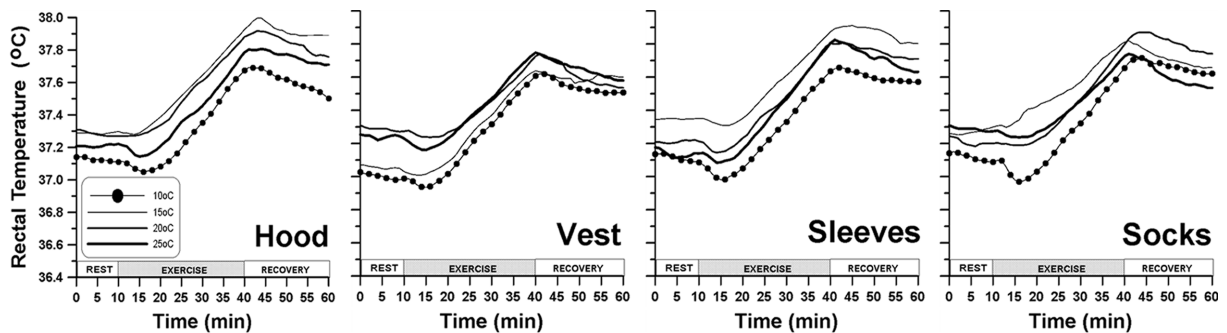
본 연구에서 개발된 네 종류의 액체냉각복의 특성은 Table 1

과 같다. 액체 순환을 위한 튜브는 직선형이 아닌 나선형으로 배치되었는데 이는 착용 시 인체 동작을 방해하지 않을 뿐만 아니라 직선형에 비해 유속을 높이는 효과가 있었다. 슬리브형과 긴 양말형 액체냉각복의 유속이 후드형의 약 2.5배, 조끼형의 약 3.6배 이상 빨랐는데 이는 왼쪽과 오른쪽의 컬레로 구성되면서 인렛(Inlet)과 아웃렛(Outlet)이 병렬로 연결되었기 때문이다. 전신 체표면적 당 피복면적(%BSA)은 후드형과 슬리브형이 각 8.6% 및 8.4%로 유사하였고 이어 긴 양말형(13.9%), 조끼형(21.1%) 순이었다. 즉, 피복된 면적으로 비교했을 때 조끼형에 의해 냉각된 면적이 후드형이나 슬리브형에 비해 2.5배 더 넓었으나, 유속은 반대로 조끼형보다 슬리브형 착용 시 더 많았다. 조끼형의 경우 사용된 튜브의 길이는 이 피복면적을 고려하여 산정되었는데, 후드형과 슬리브형이 각 90 cm와 80 cm로 유사했으며, 긴 양말형은 슬리브형의 약 2배, 조끼형은 슬리브형의 약 3배에 해당하였다.

#### 3.2. 인체착용평가

##### 3.2.1. 심부온

직장온도의 시간에 따른 변화를 액체냉각복 별로 나누어 정리한 결과는 Fig. 2와 같다. 초기 10분 안정 시와 운동 후 회복기, 운동 중 최대값에서 냉각의류별, 냉각온도별 유의한 차이



**Fig. 2.** Time courses of rectal temperatures for the four experimental conditions.

**Table 2.** Rectal temperatures ( $T_{re}$ ) and auditory canal temperatures ( $T_{ac}$ ) that were classified by four cooling garment and four cooling temperature conditions

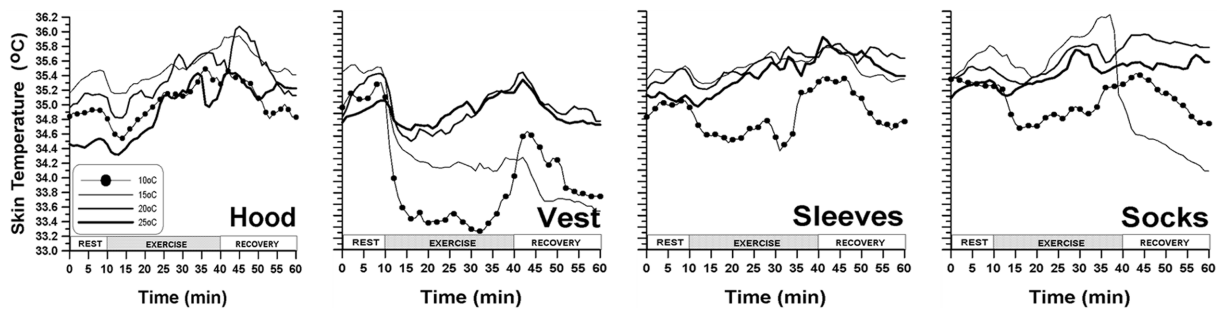
	Cooling garment				<i>P</i>	Cooling temperature				<i>P</i>
	Hood	Vest	Sleeves	Socks		10°C	15°C	20°C	25°C	
$T_{re}$ (°C)										
Mean_Rest	37.2 ± 0.1	37.1 ± 0.1	37.2 ± 0.1	37.2 ± 0.1	N.S	37.2 ± 0.01	37.2 ± 0.1	37.2 ± 0.1	37.2 ± 0.1	N.S
Mean_Exercise	37.4 ± 0.1	37.3 ± 0.1	37.4 ± 0.1	37.4 ± 0.1	<i>p</i> < .05	37.3 ± 0.1	37.5 ± 0.1	37.4 ± 0.1	37.3 ± 0.1	<i>p</i> < .05
Mean_Recovery	37.8 ± 0.1	37.6 ± 0.0	37.7 ± 0.1	37.7 ± 0.1	N.S	37.7 ± 0.1	37.8 ± 0.1	37.7 ± 0.1	37.7 ± 0.1	N.S
Maximum $T_{re}$	37.9 ± 0.1	37.7 ± 0.1	37.8 ± 0.1	37.8 ± 0.1	N.S	37.8 ± 0.1	37.8 ± 0.2	37.8 ± 0.1	37.7 ± 0.1	N.S
$T_{ac}$ (°C)										
Mean_Rest	36.8 ± 0.1	36.7 ± 0.1	36.8 ± 0.1	36.8 ± 0.1	N.S	36.7 ± 0.1	36.8 ± 0.1	36.8 ± 0.1	36.7 ± 0.2	N.S
Mean_Exercise	36.9 ± 0.1	36.8 ± 0.1	36.9 ± 0.1	36.9 ± 0.1	N.S	36.8 ± 0.1	37.0 ± 0.1	36.8 ± 0.0	36.8 ± 0.1	<i>p</i> < .01
Mean_Recovery	36.1 ± 0.2	37.0 ± 0.1	37.0 ± 0.2	37.1 ± 0.1	<i>p</i> < .05	37.0 ± 0.1	37.2 ± 0.1	36.9 ± 0.1	37.0 ± 0.1	<i>p</i> < .05
Maximum $T_{ac}$	37.2 ± 0.2	37.1 ± 0.1	37.2 ± 0.2	37.2 ± 0.1	N.S	37.2 ± 0.0	37.3 ± 0.1	37.1 ± 0.1	37.2 ± 0.2	<i>p</i> < .05

는 없었으나, 30분 운동 동안의 평균 직장온도를 비교해 보면 조끼형을 입은 조건에서 가장 낮은 값을 보였고, 10°C 조건에서 유의하게 낮은 경향을 보였다(*p* < .05, Table 2). 귀내온도는 휴식이나 운동 중 차이는 없었으나, 운동 후 회복기 후드형을 착용한 조건에서 다른 조건들에 비해 유의하게 낮은 값이 관찰되었고, 냉각온도별로 비교한 경우 20°C 조건에서 가장 낮은 경향을 보였다(Table 2).

3.2.2. 평균 피부온

시간에 따른 피부온의 변화를 살펴보면 조끼형을 착용한 조건에서 운동 시작과 함께 초기 저하하는 경향이 발견된다(Fig.

3). 운동 중과 회복기 모두 조끼형을 착용한 경우 가장 낮았으며, 회복기 평균피부온도 저하도도 다른 조건들에 비해 가장 컸다(Table 3). 특히 회복기 감소량을 냉각의류별로 비교해 보면, 조끼형을 착용한 경우 평균 1.9°C 저하로 가장 높은 냉각 효과를 보였으나(Fig. 4a), 이를 냉각복의 단위 체표 면적당으로 환산하여 비교해보면 후드형 0.00 ± 0.10, 조끼형 -0.08 ± 0.10, 슬리브형 -0.05 ± 0.00, 긴 양말형 -0.03 ± 0.00°C로 네 조건 간 차이는 유의하지 않았다(Fig. 4b) 냉각온도에 따른 차이를 보면, 휴식이나 운동 중, 회복기, 최대값 등에서 일관성 있는 차이는 관찰되지 않았다(Table 3).



**Fig. 3.** Time courses of mean skin temperatures for the four experimental conditions.

**Table 3.** Mean skin temperature that was classified by four cooling garment and four cooling temperature conditions

	Cooling garment				<i>P</i>	Cooling temperature				<i>P</i>
	Hood	Vest	Sleeves	Socks		10°C	15°C	20°C	25°C	
Mean_Rest	35.0 ± 0.4	34.8 ± 0.3	34.8 ± 0.3	35.1 ± 0.2	N.S	34.8 ± 0.2	35.2 ± 0.1	35.0 ± 0.1	34.6 ± 0.2	<i>p</i> < .001
Mean_Exercise	35.2 ± 0.3	33.8 ± 0.8	34.9 ± 0.5	35.1 ± 0.4	<i>p</i> < .001	34.1 ± 1.0	34.9 ± 0.9	35.0 ± 0.5	34.8 ± 0.3	<i>p</i> < .05
Mean_Recovery	34.5 ± 0.7	34.4 ± 1.2	35.3 ± 0.5	35.1 ± 0.4	<i>p</i> < .01	35.4 ± 0.3	33.9 ± 0.8	35.2 ± 0.4	34.9 ± 0.8	<i>p</i> < .01
Maximum $T_{sk}$	35.8 ± 0.3	35.1 ± 0.1	35.5 ± 0.3	35.7 ± 0.5	<i>p</i> < .05	35.2 ± 0.2	35.8 ± 0.4	35.7 ± 0.4	35.5 ± 0.3	<i>p</i> < .05
$\Delta T_{sk}$ during exercise	0.6 ± 0.31	-0.9 ± 1.25	0.6 ± 0.67	2.0 ± 0.17	<i>p</i> < .001	0.3 ± 1.7	0.0 ± 1.7	0.7 ± 0.9	1.3 ± 0.8	N.S
$\Delta T_{sk}$ during recovery	-0.0 ± 1.18	-1.9 ± 1.18	-0.5 ± 0.38	-0.5 ± 0.34	<i>p</i> < .05	-1.2 ± 1.16	-0.8 ± 1.52	-0.9 ± 0.62	0.0 ± 0.76	N.S

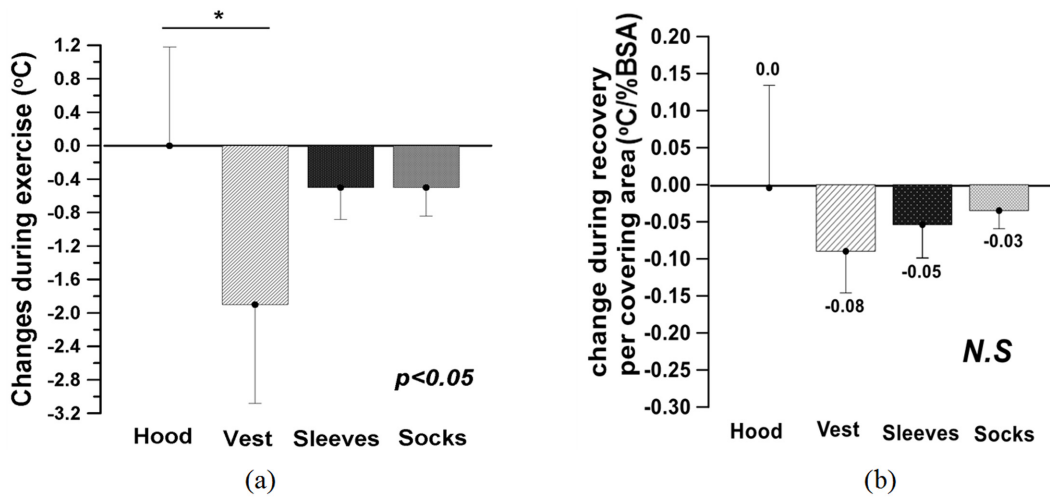


Fig. 4. Changes during exercise (a) and changes per covering area (b) in mean skin temperature during recovery.

3.2.3. 심박수, 산소소비량, 혈압

심박수는 안정과 운동 시 유의한 차이는 없었으나, 회복기 액체냉각복 조건별로 비교한 경우 조끼형을 착용한 조건에서 유의하게 낮은 값을 보여준 반면, 냉각온도별 비교 시 유의한 차이는 발견되지 않았다(Table 4). 산소섭취량의 경우, 운동 시 후드형 착용 조건에서 유의하게 높은 값을 보여준 반면, 냉각온도별 비교 시 유의한 차이는 발견되지 않았다.

수축기 혈압의 경우, 안정 시, 운동 시, 회복기 모두 조건별 차이는 관찰되지 않았으나, 이완기 혈압은 회복기에 차이를 보여, 액체냉각복 조건별로 비교한 경우 조끼형 착용 조건에서 유의하게 낮았으며(p < .05) 냉각온도별로 비교한 경우에는 15°C 조건에서 가장 낮았다(p < .05, Fig. 5). 총 발한량은 냉각의류별로 비교한 경우 조끼형 조건에서 가장 낮은 값을 보인 반면(p < .05), 냉각온도별로 비교하면 유의한 차이가 관찰되지 않았다(Fig. 6).

3.2.4. 주관적 감각 및 기타 의견

휴식 10분 동안, 운동 후 회복 10분 동안 한서감, 온열쾌적

감, 습윤감, 갈증감 등 주관감에서 각 조건들 간 유의한 차이를 보이지 않았으나, 운동 중에는 인지적 힘들기에서 유의한 차이가 관찰되었다(Table 5). 후드형에서 인지적 힘들기는 8.9 ± 1.9로 가장 높은 값을 보였다. 또한, 조끼형 착용 시 인지적 힘들기는 8.3 ± 0.3점으로 다른 조건에 비해 낮은 값을 보였으며(p < .05), 냉각 온도별로 비교하였을 때 15°C 냉각 조건에서 7.9 ± 0.2점으로 가장 낮은 점수, 25°C 냉각에서 9.3 ± 1.7점으로 가장 높은 점수를 보였다(p < .05). 한서감, 온열쾌적감, 습윤감, 갈증감, 땀에 젖은 면적의 경우 냉각의류조건 간, 냉각 온도 조건 간 유의한 차이는 발견되지 않았다. 이외, 피험자는 조끼형 조건에서 운동 중 조끼형의 액체냉각복의 중량 부담은 느껴지지 않았다고 응답하였고, 후드형 조건의 경우 머리를 둘러싼 압박감이 약간의 두통을 유발하였고, 특히 에너지 대사량 추정을 위해 지속 착용한 고무 호흡기 마스크로 인해 이러한 압박 불쾌감이 증가한 것 같다는 의견을 주었다.

3.3. 어느 부위의 냉각이 서열부담 경감에 가장 효과적인가?

피부의 온열 민감도는 인체 부위별로 다르다. 일반적으로 이

Table 4. Heart rate and oxygen consumption that were classified by four cooling garment conditions and four cooling temperature conditions

Mean ± SD	Cooling garment				P	Cooling temperature				P
	Hood	Vest	Sleeves	Socks		10°C	15°C	20°C	25°C	
Heart rate (bpm)										
Mean_Rest	75 ± 4	68 ± 3	71 ± 2	73 ± 8	N.S	71 ± 2	76 ± 8	71 ± 4	70.1 ± 3	N.S
Mean_Exercise	106 ± 5	101 ± 3	106 ± 4	104 ± 7	N.S	101 ± 2	107 ± 7	105 ± 5	104 ± 4	N.S
Mean_Recovery	86 ± 4	76 ± 1	84 ± 3	87 ± 5	p < .05	81 ± 4	86 ± 7	82 ± 5	84 ± 6	N.S
Oxygen consumption (ml·min)										
Mean_Rest	149 ± 28	137 ± 9	140 ± 12	139 ± 4	N.S	138 ± 8	152 ± 20	131 ± 11	143 ± 15	N.S
Mean_Exercise	448 ± 35	420 ± 11	401 ± 17	412 ± 10	p < .05	424 ± 19	437 ± 41	410 ± 23	410 ± 11	N.S
Mean_Recovery	138 ± 22	143 ± 15	144 ± 11	143 ± 10	N.S	137 ± 12	153 ± 15	139 ± 18	139 ± 8	N.S

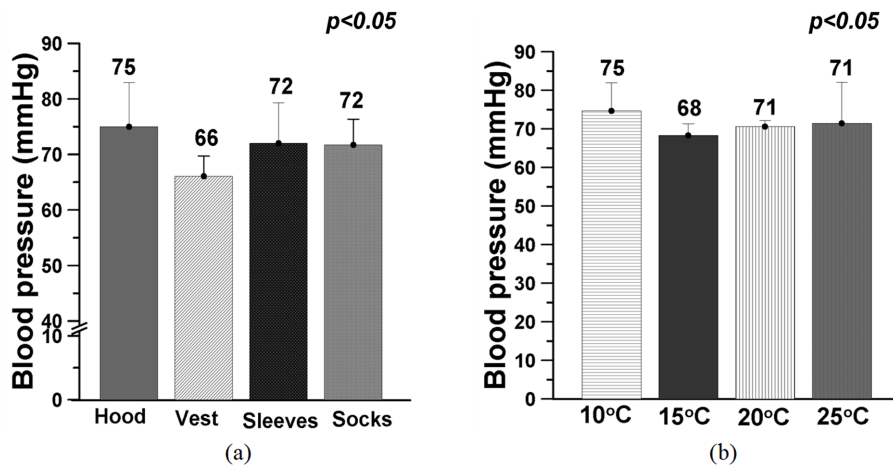


Fig. 5. Blood pressure that were classified by four cooling garment conditions (a) and four cooling temperature conditions (b) during recovery.

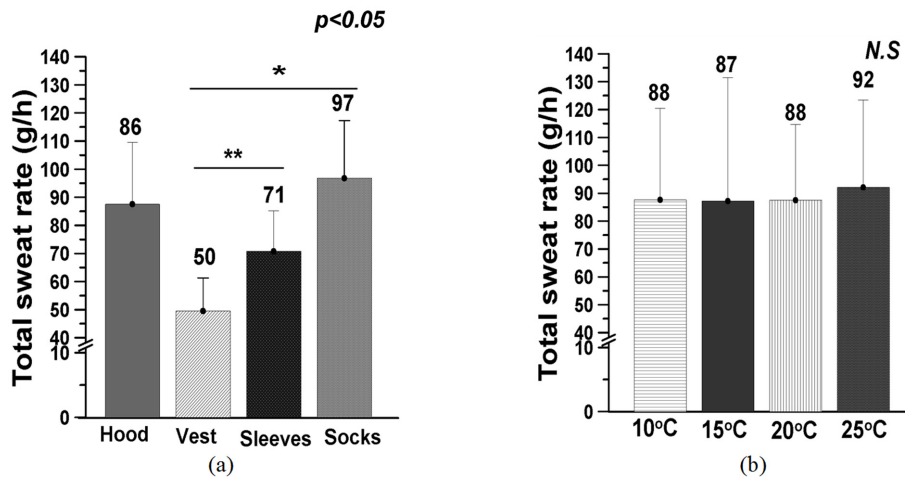


Fig. 6. Total sweat rate that were classified by four cooling garment conditions (a) and four cooling temperature conditions (b).

Table 5. Subjective sensations during exercise that were classified by four cooling garment conditions and four cooling temperature conditions

	Cooling garment				P	Cooling temperature				P
	Hood	Vest	Sleeves	Socks		10°C	15°C	20°C	25°C	
Thermal sensation	0.5 ± 0.4	0.1 ± 0.3	0.5 ± 0.2	0.3 ± 0.3	N.S	0.2 ± 0.2	0.2 ± 0.4	0.4 ± 0.2	0.6 ± 0.3	N.S
Thermal comfort	-0.2 ± 0.4	0.1 ± 0.2	-0.1 ± 0.3	-0.5 ± 0.4	N.S	-0.1 ± 0.4	0.0 ± 0.2	-0.3 ± 0.3	-0.4 ± 0.4	N.S
Humidity sensation	0.7 ± 0.5	0.3 ± 0.3	0.8 ± 0.4	0.9 ± 0.2	N.S	0.4 ± 0.4	0.7 ± 0.3	0.7 ± 0.5	0.9 ± 0.3	N.S
Thirst sensation	0.4 ± 0.6	0.2 ± 0.4	0.5 ± 0.4	0.2 ± 0.4	N.S	0.3 ± 0.5	0.3 ± 0.3	0.4 ± 0.4	0.3 ± 0.7	N.S
RPE	8.9 ± 1.9	8.3 ± 0.3	8.4 ± 0.7	8.8 ± 0.5	p < .05	8.7 ± 0.5	7.9 ± 0.2	8.5 ± 0.6	9.3 ± 1.7	p < .05
Wetted skin(%BSA)	36.3 ± 14.5	36.3 ± 10.8	28.3 ± 10.9	41.0 ± 14.1	N.S	44.8 ± 14.7	25.3 ± 7.8	35.3 ± 12.5	36.3 ± 8.3	N.S

마나 몸통 부위가 팔이나 손, 종아, 발 등 말초 부위보다 더 민감하다(Lee et al., 2010). 또한, 사람들은 추위 노출 시에는 몸통 중 복부 가운을 가장 선호하나, 더위 노출 시에는 몸통이나 사지 부위에 비해 얼굴 냉각을 가장 선호하고, 등이나 허리, 복부 등 몸통 부위 냉각 시 온열 쾌적감에 유의한 차이는 거

의 없다고 알려져 있다(Nakamura et al., 2013). 본 연구 결과 후드형이나, 슬리브형, 긴 양말형보다 조끼형 착용 시 평균피부 온도 상승 억제 및 총 발한량 증가 억제에 가장 효과적이었으나, 냉각면적별로 환산하여 냉각효과를 비교했을 때 평균피부 온도 변화도에서 네 조건 간 차이는 통계적으로 유의하지 않았

기 때문에 냉각 부위별로 냉각 효과에 유의한 차이가 있었다고 해석하기는 어렵다. 대신 조끼형의 경우 전신체표면적의 21%가 냉각되었기 때문에 긴 양말형(14%)이나 후드형(8%), 슬리브형(9%) 보다 냉각효과가 좋았던 것으로 해석할 수 있다. 즉, 본 연구에서 조끼형 착용 시 인체 냉각 효과가 가장 컸으나, 이는 등과 가슴 부위가 다른 인체 부위보다 더 효과적인 부위였기 때문이라기보다는 냉각면적이 충분히 넓었기 때문인 것으로 추정해볼 수 있다.

본 연구결과와 유사하게, 더운 환경에서 운동 중 냉각조끼를 착용한 경우 인체 냉각효과를 보고한 연구는 다수 발견된다. Luomala et al.(2012)은 60% 최대산소섭취량 수준에서 운동 후반 30분 동안 냉각조끼 착용에 의해 운동 시간이 21.5% 늘어났으며, Cuttel et al.(2016)은 60% 수준의 강도에서 운동을 하는 동안 목 냉각에 의해 긍정적인 효과는 없었으나 냉각조끼 착용에 의해서는 운동 시간이 16.7% 증가하였다. 이러한 냉각조끼나 목 냉각, 얼굴 냉각이 직장온과 같은 심부온에까지 유의한 영향을 미쳤다는 연구는 거의 보고되지 않으나, 최근 보고된 새로운 디자인의 냉각조끼, 즉 음수와 냉각이 동시에 이루어지도록 개발된 냉각조끼를 착용한 경우, 운동 중 직장온에 유의한 영향은 없었으나 운동 직후 회복기 직장온과 평균피부온, 심박수에서 대조군에 비해 유의하게 낮아진 결과가 보고되었다(Kim et al., 2020).

냉각조끼 착용에 있어 단점 중 하나는 냉각조끼 자체의 중량 부담에 의해 산열량이 추가적으로 증가할 수도 있다는 사실이다. 예를 들어, 평균적인 성인 남성 기준 1kg의 중량 부담당 인체 에너지 대사량 평균 1% 증가(Givoni & Goldman, 1971), 혹은 3% 증가한다고 알려져 있다(Rintamaki, 2005). 일반적으로 냉매를 사용한 냉각 조끼의 경우 총중량이 1~4kg이기 때문에(Chen et al., 1997; Choi et al., 2005; Kim et al., 2020) 추가 중량 부담이 될 수도 있으나, 본 연구에서 개발된 조끼형 액체냉각복의 무게는 796 g으로, 액체냉각복의 내부 튜브로 물이 가득 찬 경우에도 물의 총중량은 100 g 이하(튜브 내경 6 mm, 총 길이 230 cm)이므로, 본 연구에서 개발된 조끼형의 액체냉각복의 무게로 인한 중량 부담은 무시할만한 수준으로 평가할 수 있다. 동시에 실험 종료 후 인터뷰 결과 피험자는 조끼형을 착용하고 운동하는 동안 몸의 움직임에 대한 불편함은 없었다고 응답하였다.

한편, 본 연구에서 후드형 착용 시 귀내온 저하 효과는 컸던 반면 평균피부온도나 심박수, 산소섭취량, 혈압, 총 발한량, 주관감 등에서 냉각효과는 거의 없었는데, 더위 속 운동 시 얼굴이나 이마, 목 부위 냉각이 운동 수행능력 증진에 효과적이라는 선행연구들을 고려하면 본 연구 결과는 흥미롭다. Crawshaw et al.(1975)은 39°C 환경에서 휴식하는 동안 인체 부위별 냉각이 인체 발한 경감에 미치는 영향을 비교 분석하기 위해, 단위 체표면적당 표준화된 냉각 효과 계수를 계산한 결과 이마는 3.3점, 등 1.2점, 종아리 1.1점, 가슴 1.0점, 넓적다리 0.9점, 복부 0.8점으로 이마 냉각이 다른 부위들에 비해 약 3배 효과적

이었으며, 나머지 부분들의 냉각 효과는 서로 유사했다고 결론지었다. 더위 속에서 고강도 운동을 수행하는 동안 목을 냉각하는 경우 심부온이나 심박수에 유의한 영향은 없었으나(Tyler et al., 2010) 유사한 인지적 힘들기 점수에서 총 운동시간은 13.5% 증가되었다(Tyler & Sunderland, 2011), Stevens et al. (2017)은 관련 리뷰를 통해 더위 속에서 운동하는 동안 얼굴에 물을 스프레이 하거나, 팬을 이용해 바람을 맞게 하는 경우, 비록 심부온에는 유의한 영향을 미치지 못 하나, 운동 수행능력 향상에 긍정적인 효과를 유발했다고 보고하였다. 이러한 선행연구들과 달리 본 연구에서 실험 시 후드형 착용을 통해 유의한 냉각효과가 발견되지 않은 이유는, 첫째, 이마나 얼굴 냉각 대신 머리카락이 있는 머리 부위가 주로 냉각되는 형태였기 때문, 둘째, 후드형 특성상 머리 피부에 직접 닿도록 디자인되었기 때문에 머리를 둘러싼 압박 불쾌감이 발생하게 되며, 이는 동시에 에너지 대사량 추정을 위해 착용한 반면형 호흡기 마스크의 압박감과 합쳐져 피험자의 압박 불쾌감이 가중되었기 때문인 것으로 해석해 볼 수 있다. 따라서 고온 다습 환경에서 작업 중 호흡기 마스크를 착용해야 하는 작업자들의 경우(예: 소방관, 생화학 보호복 착용 작업자 등), 머리 부위 압박 냉각은 신중히 검토되어야 한다.

추가로, 본 연구에서 개발한 슬리브형과 긴 양말형의 경우, 조끼형과 후드형 중간 정도의 냉각효과를 보여주었다. 손과 발은 체중 당 차지하는 체표면적 비율이 인체 평균에 비해 4~5배(손)와~3배 정도(발) 크기 때문에 인체 모든 부위 중 외기로의 열손실 효율이 가장 좋은 부위로 알려져 있다(Taylor et al., 2014). 일상 온도(27°C)에서 휴식 중인 사람의 경우 손과 발을 통해 150 - 220 W·m<sup>-2</sup>의 열손실이 대류와 복사에 의해 이루어지며, 더운 환경에 노출된 경우 양손과 양발로부터의 발한에 의해 약 226 W 증발에 의한 열손실이 발생하며 이는 다른 인체 부위에 비해 면적당 가장 큰 열손실에 해당한다(Taylor et al., 2014). 그럼에도 본 연구에서 조끼형에 비해 더 유의한 효과가 발견되지 않았고, 냉각되는 면적에 대해 단위 체표면적당으로 비교해 보아도 슬리브형이나 긴 양말형 착용이 더 효과적이라는 증거가 발견되지 않은 이유는, 첫째, 피부에 압박되는 냉각복의 디자인 특성 상 피부 발한의 증발 효과가 어느 정도 억제되었기 때문으로 판단할 수 있으며, 둘째, 유효한 냉각 효과를 유발하기에 냉각 면적이 적었기 때문인 것으로 유추해 볼 수 있다.

#### 3.4. 냉각온도가 낮을수록 서열부담 경감에 가장 효과적인가?

일반적으로 인체는 피부온도 이하의 외부 자극에 대해 서늘하게 느낀다. 인체는 평균적으로 32.4°C 이하의 피부 접촉에 대해 온도가 낮아짐을 감지하기 시작하여 30.2°C부터 차가움을 인지한다(Lee et al., 2011). 그러나 이는 쾌적한 환경에서 안정을 취하고 있는 경우의 기준값으로 더위 속에서 운동 중인 경우 이 역치 값은 더 낮아지게 된다. 또한 고온 환경인 기온 33°C에서 액체냉각복을 착용하는 경우 튜브 내부로 유입되는

물의 온도보다 실제 피부에 닿는 튜브의 표면 온도는 약 1-4°C 정도 더 높게 되는데, 이러한 점들을 고려하여 본 연구에서는 액체냉각복의 물 유입온도를 25°C, 20°C, 15°C, 10°C로 정하여 비교하였다.

피부온도와 냉각복을 통한 유입 물 온도 간의 차이가 클수록 인체로부터의 외부로의 전도에 의한 열손실이 클 것이라 예상할 수 있으나, 생리적으로 이러한 예측이 전적으로 부합하지는 않는다. 그 이유는 일정 온도 이하에서의 피부 냉각 시 피부혈관은 급속히 수축하고 이로 인해 혈류량이 줄어 결국 피부로부터의 대류에 의한 열손실도 줄게 된다. 즉, 최적 피부 냉각온도 선정을 위해서는 전도와 대류에 의한 열손실을 모두 고려하여, 피부 혈관이 과도하게 수축하지 않는 범위에서, 적절한 냉감을 유지하면서, 피부와의 온도차를 최대화할 수 있는 냉각 온도 선정이 중요하다. 이러한 목적의 냉각복 디자인을 생리적 디자인(Physiological design)이라 부르며, 생리적 디자인의 관점에서 피부 열손실을 최대화할 수 있는 피부 혈관 운동 범위(Vasomotor zone)를 손가락의 경우 29.7~34.5°C라고 보고된 바 있다(Koscheyev et al., 2007). 즉, 평균 손가락 온도가 29.7°C 이하로 내려가게 되면 혈관 수축이 발생해 손가락으로부터의 열손실 효율이 줄어들게 되며, 인체 부위별 vasomotor zone에 대해 정확히 보고된 바는 거의 없다.

본 연구에서는 이러한 생리적 디자인을 고려하여 액체냉각복에 유입되는 물의 최대 온도를 25°C로 정하였다. 상식적으로 냉각온도가 낮을수록 냉각효과가 클 것이라 예측할 수 있으나, 본 연구에서는 이상에서 언급한 생리적 디자인으로 인해 다소 높은 온도에서 냉각 효과가 더 클 수도 있을 것이라 가정하였다. 그러나, 이러한 예측과 달리 25°C나 20°C 조건에서 더 긍정적인 냉각 효과가 발견된 측정항목들은 없었으며, 네 온도 조건 간 유의한 차이가 없거나, 혹은 10°C와 15°C 냉각 조건에서 비교적 더 긍정적인 결과들이 발견되었다.

선행연구들에서 피부 냉각을 위해 사용된 냉각복들의 온도를 살펴보면, Gao et al.(2011)은 24°C와 28°C의 녹는점을 갖는 상변이물질(PCM)을 이용한 냉각조끼의 서열부담 경감 효과를 비교하였다. 그 결과 24°C PCM 조끼가 28°C PCM 조끼보다 피부온 증가 억제에 더 효과적이거나 두 조끼 모두 심부온 감소에 유의한 영향을 미치지 못했다고 보고하면서 심부온에 유의한 영향을 주기 위해서는 냉각력이 보다 강력해야 할 것이라고 결론지었다. Shvartz(1970)은 기온 50°C 환경에서 2시간 운동을 수행하는 동안 착용된 유입 물 온도 7.5°C에서 후드형 조끼의 액체냉각복의 영향을 평가하였으며 그 결과 이마 온도 및 구강 온도 상승 억제에 효과가 있었다고 보고하였다. Nag et al.(1998)에 따르면 기온 35°C와 40°C 환경에서 물유입 온도 10~12°C로 유지되는 액체냉각복 착용 시 피부온도 상승이 억제되었으며, Bishop et al.(1991)은 기온 28°C 환경에서 4.8 km/h의 속도로 걷는 동안, 물 유입온도 13°C인 조끼형의 액체냉각복 착용에 의해 작업 시간이 유의하게 연장되었고, 직장온도 및 피부온도 상승이 억제되었으며, 특히 이러한 경향은 회

복기에 더 강하게 발견되었다. 본 연구결과 및 선행연구 결과들을 종합해 볼 때, 액체냉각복을 사용하여 인체를 부위별로 냉각할 경우 유입되는 물의 온도는 적어도 15°C 이하가 권장된다. 또한, 환경 온도가 높아질수록, 운동 강도가 증가할수록, 보호복의 보온력이 증가할수록 인체에 축적되는 서열부담은 더 커지기 때문에, 0~10°C 유입 물 온도를 갖는 액체냉각복의 인체 냉각 효과에 대해 체계적인 평가가 요구된다.

### 3.5. 연구의 의의 및 한계, 적용

본 연구에서는, 냉각복을 적용하지 않은 대조군과의 비교가 이루어지지 않았기 때문에 냉각 유무의 효과를 비교할 수 없다는 점이 연구의 첫 번째 한계로 지적될 수 있다. 둘째, 최적 냉각 부위를 찾기 위해 머리, 상체, 팔, 다리는 고려하였으나 하체(엉덩이와 넓적다리)는 실험조건에 포함하지 않았다. 이는 실제 작업 현장에서의 피부에 밀착되는 반바지형 냉각복의 적용 가능성이 낮을 것이라는 의견 때문이었다. 셋째, 본 연구에서는 네 곳의 냉각 부위와 네 수준의 냉각 온도 조합으로 총 16가지의 실험 조건이 선정되었기 때문에 피험자 수를 최소 인원(1인)으로 제한하였는데, 본 연구 결과를 해석할 때 이 점을 반드시 고려해야 할 것이다. 추후 통계적으로 타당한 수의 피험자를 대상으로 실험이 이루어질 필요가 있다. 다섯째, 얼굴 부위나, 손과 발 부위의 냉각이 효과적이라는 선행연구들이 다수 존재하기 때문에 말단 부위들의 냉각 면적을 본 연구에서보다 증가시키거나, 혹은 말단 냉각 방식들을 조합한 조건에서, 더 낮은 냉각온도를 적용하여 이의 인체 냉각효과를 탐구해 볼 필요가 있다. 본 연구를 통해 얻어진 결과는 실제 폭염 현장에 노출된 작업자들의 고체온증을 예방하기 위한 냉각복 개발에 유용하게 적용될 수 있을 것이다.

## 4. 결 론

본 연구는 여름철 고온다습환경에 노출된 작업자의 서열부담 경감에 가장 효과적인 인체 냉각 부위 및 냉각 온도를 찾기 위해 수행되었다. 이를 위해 후드형, 조끼형, 슬리브형, 긴양말형의 액체냉각복을 개발하였으며, 순환 물 온도 10°C, 15°C, 20°C, 25°C에서의 냉각효과를 평가하였다. 실험 결과, 조끼형을 착용한 경우 운동 중 유의하게 더 낮은 직장온도와 평균피부온도, 인지적 힘들기, 회복기 더 낮은 심박수와 혈압, 더 적은 총 발한량을 보여 가장 효과적인 냉각 부위라 평가되었으나 피복된 냉각복의 단위 체표 면적당으로 환산하여 비교하면 네 종류의 냉각복 간 유의한 차이는 사라졌다. 단, 후드형의 경우 머리카락이 있는 부위를 냉각한다는 점과 머리 압박으로 인해 불쾌감이 발생할 수도 있다는 점과 관련되어, 에너지 대사가 가장 높았고 인지적 힘들기도 가장 부정적으로 평가되었기 때문에, 고온에서 작업하는 작업자들의 머리둘레를 압박하는 방식의 냉각복은 권장하지 않는 것이 바람직할 것이다. 냉각온도별로 비교했을 때, 10°C와 15°C 냉각조건에서 체온조절

반응과 심혈관계 반응, 주관적 반응 등에서 긍정적인 결과가 발견된 반면, 25°C 조건에서 서열부담 경감 효과는 가장 적은 것으로 평가되었다. 결론적으로 고온다습환경에서 가벼운 수준의 작업을 하는 경우, 고체온증 예방 및 서열부담 경감을 위해 냉각표면온도 15°C 이하의 조끼형의 액체냉각복 착용이 권장된다. 손이나 발, 머리 등 인체 말단 부위를 냉각할 경우 냉각면적을 전체 체표면적의 20% 이상으로 유지한다면 서열부담 경감에 유의한 효과가 있을 것이라 예상된다. 추후 인체 냉각부위 및 냉각온도에 타당한 수의 피험자를 대상으로 후속 연구가 요구된다.

## 감사의 글

본 연구는 한국연구재단 중견연구(#2019R1A2C2006961)의 지원으로 수행되었음.

## References

- Army Medical Surveillance Activity. (2012). Update: heat injuries, active component, U.S. Armed Forces, 2011. *Medical Surveillance Monthly Report*, 19, 14-16.
- Arngrimsson, S. A., Pettitt, D. S., Stueck, M. G., Jorgensen, D. K., & Cureton, K. J. (2004). Cooling vest worn during active warm-up improves 5-km run performance in the heat. *Journal of Applied Physiology*, 96(5), 1867-1874. doi:10.1152/jappphysiol.00979.2003
- Bishop, P. A., Nunneley, S. A., & Constable, S. H. (1991). Comparisons of air and liquid personal cooling for intermittent heavy work in moderate temperatures. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 52(9), 393-397. doi:10.1080/15298669191364929
- Chen, Y. T., Constable, S. H., & Bomalaski, S. H. (1997). A lightweight ambient air-cooling unit for use in hazardous environments. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 58(1), 10-14. doi:10.1080/15428119791013017
- Choi, J. H., Kim, M. J., & Lee, J. Y. (2005). Efficacy of cooling vests for alleviating heat strain of farm workers in summer. *Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles*, 29(8), 1176-1187.
- Choi, J. H., Lee, J. Y., & Lee, W. K. (2013). *Body temperature*. Seoul: Gyomoon.
- Crawshaw, L. I., Nadel, E. R., Stolwijk, J. A., & Stamford, B. A. (1975). Effect of local cooling on sweating rate and cold sensation. *Pflügers Archiv*, 354, 19-27. doi:10.1007/BF00584500
- Cuttell, S. A., Kiri, V., & Tyler, C. (2016). A comparison of 2 practical cooling methods on cycling capacity in the heat. *Journal of Athletic Training*, 51(7), 525-532. doi:10.4085/1062-6050-51.8.07
- DeGroot, D. W., Gallimore, R. P., Thompson, S. M., & Kenefick, R. W. (2013). Extremity cooling for heat stress mitigation in military and occupational settings. *Journal of Thermal Biology*, 38(6), 305-310. doi:10.1016/j.jtherbio.2013.03.010
- Gao, C., Kuklane, K., & Holmér, I. (2011). Cooling vests with phase change materials: the effects of melting temperature on heat strain alleviation in an extremely hot environment. *European Journal of Applied Physiology*, 111(6), 1207-1216. doi:10.1007/s00421-010-1748-4
- Givoni, B., & Goldman, R. F. (1971). Predicting metabolic energy cost. *Journal of Applied Physiology*, 30(3), 429-433. doi:10.1152/jappl.1971.30.3.429
- Hardy, J. D., & Dubois E. F. (1938) The technic of measuring radiation and convection. *The Journal of Nutrition*, 15(5), 461-475. doi: 10.1093/jn/15.5.461
- Holmér, I. (1995). Protective clothing and heat stress. *Ergonomics*, 38(1), 166-182. doi:10.1080/00140139508925093
- Holmer, I. (2006). Protective clothing in hot environments. *Industrial Health*, 44(3), 404-413. doi:10.2486/indhealth.44.404
- Hooker, D. N. (1991). U.S. Patent No. 5,062,424. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- ISO 10551. (1995). *Ergonomics of the thermal environment-assessment of the influence of the thermal environment using subjective judgement scales*. Geneva: International Organization for Standardization
- Kim, D. H., Bae, G. T., & Lee, J. Y. (2020). A novel vest with dual functions for firefighters: Combined effects of body cooling and cold fluid ingestion on the alleviation of heat strain. *Industrial Health*, 58(2), 91-106. doi:10.2486/indhealth.2018-0205
- Kim, J. H., Coca, A., Williams, W. J., & Roberge, R. J. (2011). Effects of liquid cooling garments on recovery and performance time in individuals performing strenuous work wearing a firefighter ensemble. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 8(7), 409-416. doi:10.1080/15459624.2011.584840
- Korea Centers for Disease Control and Prevention. (2018). 2018's hot temperature patient exceeded last year's occurrence and advised to take care during the holiday season. [https://www.cdc.go.kr/board.es?mid=a20501000000&bid=0015&act=view&list\\_no=131765](https://www.cdc.go.kr/board.es?mid=a20501000000&bid=0015&act=view&list_no=131765)
- Korea Meteorological Administration. (2018). Comparing the heat of 2018 and 1994. [http://www.kma.go.kr/notify/press/kma\\_list.jsp?bid=press&mode=view&num=1193585](http://www.kma.go.kr/notify/press/kma_list.jsp?bid=press&mode=view&num=1193585)
- Korean Industrial Health Association. (2014). Assumption of risk and reduction. pp. 29-39, [https://kiha21.or.kr/monthly/2014/3/SOBGBO\\_2014\\_s311\\_29.pdf](https://kiha21.or.kr/monthly/2014/3/SOBGBO_2014_s311_29.pdf)
- Koscheyev, V. S., Coca, A., & Leon, G. R. (2007). Overview of physiological principles to support thermal balance and comfort of astronauts in open space and on planetary surfaces. *Acta Astronautica*, 60, 479-487. doi:10.1016/j.actaastro.2006.09.028
- 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. doi:10.2114/jpa2.27.71
- Lee, J. Y., Nakao, K., & Tochihiro, Y. (2011). Validity of perceived skin wettedness mapping to evaluate heat strain. *European Journal of Applied Physiology*, 111(10), 2581-2591. doi:10.1007/s00421-011-1882-7
- Lee, J. Y., Saat, M., Chou, C., Hashiguchi, N., Wijayanto, T., Wakabayashi, H., & Tochihiro, Y. (2010). Cutaneous warm and cool sensation thresholds and the inter-threshold zone in Malaysian and Japanese males. *Journal of Thermal Biology*, 5(2), 70-76. doi:10.1016/j.jtherbio.2009.11.002
- Luomala, M. J., Oksa, J., Salmi, J. A., Linnamo, V., Holmér, I., Smolander, J., & Dugue, B. (2012). Adding a cooling vest during cycling improves performance in warm and humid conditions. *Journal of Thermal Biology*, 37(1), 47-55. doi:10.1016/j.jtherbio.

- 2011.10.009
- Nag, P. K., Pradhan, C. K., Nag, A., Ashtekar, S. P., & Desai, H. (1998). Efficacy of a water-cooled garment for auxiliary body cooling in heat. *Ergonomics*, 41(2), 179-187. doi:10.1080/001401398187233
- Nakamura, M., Yoda, T., Crawshaw, L. I., Kasuga, M., Uchida, Y., Tokizawa, K., Nagashima, K., & Kanosue, K. (2013). Relative importance of different surface regions for thermal comfort in humans. *European Journal of Applied Physiology*, 113(1), 63-76. doi:10.1007/s00421-012-2406-9
- Noe, R. (2015). How much weight soldiers carry, and incredible POV footage of a massive paratrooper drop. *Core 77*. <https://www.core77.com/posts/41704/How-Much-Weight-Soldiers-Carry-and-Incredible-POV-Footage-of-a-Massive-Paratrooper-Drop>
- Nunneley, S. A. (1970). Water cooled garments: A review. *Space Life Sciences*, 2(3), 335-360. doi:10.1007/BF00929293
- O'Hara, R., Eveland, E., Fortuna, S., Reilly, P., & Pohlman, R. (2008). Current and future cooling technologies used in preventing heat illness and improving work capacity for battlefield soldiers: Review of the literature. *Military Medicine*, 173(7), 653-657. doi:10.7205/MILMED.173.7.653
- Rintamaki, H. (2005). Protective clothing and performance in cold environments. In: *The 3<sup>rd</sup> International Conference on Human Environment System*, Tokyo, Japan.
- Shvartz, E. (1970). Effect of a cooling hood on physiological responses to work in a hot environment. *Journal of Applied Physiology*, 29(1), 36-39. doi:10.1152/jappl.1970.29.1.36
- Stevens, C. J., Taylor, L., & Dascombe, B. J. (2017). Cooling During Exercise: An Overlooked Strategy for Enhancing Endurance Performance in the Heat. *Sports Medicine*, 47(5), 829-841. doi:10.1007/s40279-016-0625-7
- Taylor, N. A. S., Machado-Moreira, C. A., van den Heuvel, A. M. J., & Caldwell, J. N. (2014). Hands and feet: physiological insulators, radiators and evaporators. *European Journal of Applied Physiology*, 114, 2037-2060. doi:10.1007/s00421-014-2940-8
- Tyler, C. J., Wild, P., & Sunderland, C. (2010). Practical neck cooling and time-trial running performance in a hot environment. *European Journal of Applied Physiology*, 110(5), 1063-74. doi:10.1007/s00421-010-1567-7
- Tyler, C. J., & Sunderland, C. (2011). Cooling the neck region during exercise in the heat. *Journal of Athletic Training*, 46(1), 61-68. doi:10.4085/1062-6050-46.1.61
- Yoon, S. K. (2015, June 16). 'Even if wearing protective clothing.' Nurse MERS infection['보호복 입었는데' 간호사 메르스 감염]. *Seoul newspaper*. Retrieved June 16, 2015, from <https://www.seoul.co.kr/news/newsView.php?id=20150617500016>

(Received 9 March, 2020; 1st Revised 23 March, 2020;  
2nd Revised 6 April, 2020, 3rd Revised 9 April 2020,  
Accepted 23 April, 2020)