

반팔 내의-전투복-화생방보호의 시스템에서 환기가 열적 스트레스에 미치는 영향

이옥경 · 엠파이* · 정희수** · 조경민** · 이예진***†

충남대학교 생활과학연구소, *제주대학교 패션의류학과,
국방과학연구소 Chem-Bio 기술센터 보호제독팀, *충남대학교 의류학과

Effect of Ventilation on Heat Stress in the System of Short-Sleeve T-Shirt-Combat Uniform-Chemical, Biological, and Radioactive Protective Clothing

Okkyung Lee · Rani Eom* · Heesoo Jung** · Kyeong Min Cho** · Yejin Lee***†

Research Institute of Human Ecology, Chungnam National University

*Dept. of Fashion & Textiles, Jeju National University

**Team Protection and Decontamination, Chem-Bio Technology Center, Agency for Defense Development

***Dept. of Clothing and Textiles, Chungnam National University

Received May 11, 2022; Revised June 23, 2022; Accepted July 21, 2022

Abstract

This study establishes basic data for the development of a new Chemical, Biological, and Radioactive (CBR) protective clothing by selecting the ventilation position to optimize thermal comfort on the basis of the opening and closing of each part. Participants were eight men in their 20s who had previously worn CBR protective clothing. After vigorous exercise and perspiration, the microclimate of the clothing and skin temperature was measured. Results revealed that when the ventilation zipper was opened after exercising, the skin and clothing microclimate temperatures, which had increased during the exercise, decreased in the chest and shoulder blade regions. The clothing microclimate humidity decreased in the chest area. The change was greatest in the chest region; the skin temperature decreased by 0.2°C, the clothing microclimate temperature by 2.7°C, and the clothing microclimate humidity by 3.2%RH through ventilation. Thus, the opening that allows the exchange of accumulated heat and moisture while wearing the CBR protective clothing is efficient.

Key words: CBR (Chemical, Biological, and Radioactive) protective clothing, Ventilation, Heat stress, Clothing microclimate; 화생방보호의, 환기, 열적 스트레스, 의복 미세기후

I. 서 론

현대 사회는 지속적인 과학기술의 발전으로 구성원에게 생활의 편리함과 윤택함을 제공해 주지만, 동시

†Corresponding author

E-mail: yejin@cnu.ac.kr

에 더 많은 위험 요소에 노출될 수 있는 여지도 준다. 구성원인 인간이 다양한 위험 환경과 접하게 되면, 1차적으로 위험 요소에 대응하여 신체를 보호해주는 특수 작업복을 착용해야만 한다. 이러한 특수 작업복으로는 소방복, 농약 방제복, 화학 방호복, 의료용 방호복, 방진복, 군복, 산업 안전복 등이 있으며, 이는 각각

의 환경에 적합하도록 디자인되어야만 작업 능률을 향상시키고, 작업자의 건강도 지킬 수 있다(Chung et al., 2006). 특히, 재난과 위험이 대형·복합화 되고 있는 현 시점에서 보다 안전하고 쾌적한 착용감을 갖는 작업복 개발은 매우 중요하다. 그러나 초기에는 이와 관련된 연구가 대부분 보호라는 측면에 초점이 맞추어져 유해물질 차단 성능이 향상된 소재 개발 및 평가가 주를 이루었다(Choi et al., 1987; Han et al., 1998; Sohn & Choi, 2001). 그런데 유해물질 차단에만 집중하다보니 차단 성능은 우수하나, 착용자의 쾌적성에는 문제가 발생하였다. 즉, 특수 작업복을 착용하게 되면 체내 열생산 증가 및 체열 발산의 저하로 체내에 과도한 열 축적이 초래되고, 이는 심혈관계 질환으로 이어져 심각한 문제를 야기함을 알게 되었다(Bang, 2018). 게다가 여러 겹으로 구성된 전신 보호복에 후드, 보호장갑, 보호장화 등의 장비까지 착용하는 경우, 그 위험은 더욱 커지게 된다(Jung et al., 2020). 예를 들어, 전투복을 착용하고 실외 군사 훈련을 하는 군인 중 연간 2,000건이 넘는 열적 스트레스 질환 관련 환자가 있음이 알려졌다(Armed Forces Health Surveillance Center, 2012), 소방관 769명을 대상으로 조사한 결과, 응답자의 약 50%가 열적 스트레스와 관련된 장애를 경험한 것으로 나타났다(Tochihara et al, 2005). 또한, 다른 특수 작업복에 관한 많은 연구에서도 동작 편의성과 더불어 열적 스트레스에 관한 문제점이 매우 심각한 것으로 밝혀졌다(Bang, 2018; Choi et al, 2002; Kim et al., 2021; Kim & Bae, 2013; Lee et al., 2022).

따라서, 최근에는 실내·외 작업자의 열적 스트레스 관련 질환 저하 및 예방, 그리고 열적 스트레스 부담을 경감시키기 위해 능동적이고 적극적인 열저감 효과가 있는 제품 개발이 시도되고 있다. 구체적으로 살펴보면, Bang(2015)은 소방용 보호장구를 착용하고, 15분 동안 작업 시 열음조끼를 이용한 능동적 냉각방법이 체온과 피로수준의 저감에 효과가 있음을 밝혀냈고, Eom and Lee(2019)는 더운 환경에서 팬의 부착 위치가 다른 조끼 착용 시 인체 착용 효과를 분석하여, 팬이 뒤허리 부위에 위치하는 것이 온열감을 감소시키고 쾌적감 증진에 효과적이라고 하였다. 또한, Kim et al. (2019)은 소방관의 열적 스트레스 부담을 낮추기 위해 새롭게 개발된 노멕스 냉각셔츠를 기존 소방용 방화복 내부에 착용하고 모의 소방작업 활동 시 기동성을 저해하지 않을 뿐만 아니라, 근피로도 등이 감소되어

작업 효율성 또한 향상시킬 수 있다고 하였다. Kim et al.(2021)은 보텍스 튜브를 적용한 에어냉각조끼를 개발하여 비닐하우스 재배 농업인을 위한 열적 스트레스 저감 작업복을 제안하였다. 그 밖에도 농약 방제복, 의료용 방호복, 우주복 등의 특수 작업복에 냉각수, 냉각공기, 환기 팬 등을 적용하여 그 효과를 살펴본 연구(Holmér, 2006; Jung et al., 2020; Nishihara et al., 2002; Yi et al., 2017)도 있으나, 군사 목적의 유해화학물질에 대해 보호성능을 갖춘 화생방보호의에 관한 적극적인 열적 스트레스 경감 시스템 적용 연구는 상대적으로 미비한 실정이었다. 화생방 전투 상황에서 개인을 보호하기 위한 핵심 무기체계인 화생방보호의는 타 보호복보다 완벽한 차단이 요구될 뿐만 아니라, 착용 후 다양한 훈련을 실시해야 하기 때문에 병사는 열적 스트레스로 인해 심한 고통을 느끼고(Lee et al., 2022), 이는 전투력 저하로 이어져 심각한 문제가 되고 있다. 이에 화생방보호의 착용에 따른 열적 스트레스 경감을 위해 소재 개발 중심의 연구(Kang et al., 2012; Lee, 2017; Maddah, 2020)가 진행되어 왔으나, 앞서 언급했듯이 소재를 통한 해결 방안은 그 효과가 높은 편이 아니기 때문에 능동적인 해결 방법을 적용한 연구가 필요하다.

그러므로 본 연구에서는 육군을 대상으로 반팔 내의-전투복-화생방보호의가 겹으로 착용되었을 때 의복 환경학 측면의 기초자료를 구축하고자 하였다. 즉, 반팔 내의-전투복-화생방보호의 착용 상황에서 동작 후 회복 시 환기 부위의 개폐 여부에 따른 피부표면온도, 의복내 기후, 주관적 감각을 측정하여 추후 쾌적성 증대를 위한 화생방보호의의 시스템 개발 시 활용하고자 하였다.

II. 연구방법

1. 피험자 및 실험 의복

본 연구에서는 실험을 실시하기 위해 IRB 승인(2021 03-SB-039-01)을 받았으며, 연구 참여에 동의한 피험자를 대상으로 실험을 실시하였다. 피험자는 최근 6개월 이내 화생방보호의 착용 후 전투 훈련을 실시한 경험이 있는 사람으로 선정하였다. 또한, 제7차 한국인 인체 치수조사(Korea Agency for Technology and Standards [KATS], 2015)의 20대 남성 평균 치수에 해당하는 8명을 대상으로 하였으며, 1인당 1일 2회 실험에 참여하였고, 평균 신체 치수는 <Table 1>과 같았다. 실험

Table 1. Body dimension of male subjects in their 20s (Subjects vs. KATS, 2015)

N = 8

	Mean (S.D.)				
	Height (cm)	Weight (kg)	Chest cir. (cm)	Waist cir. (cm)	Hip cir. (cm)
KATS (2015)	173.9 (±5.7)	72.4 (±12.1)	96.2 (±7.6)	81.3 (±9.5)	96.1 (±7.1)
Subject	175.1 (±6.3)	67.6 (± 7.0)	90.6 (±2.0)	77.1 (±3.6)	92.9 (±3.8)

cir.: circumference

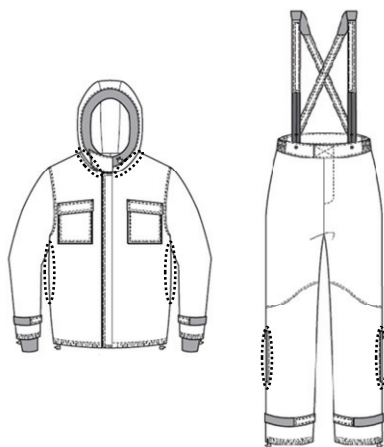
복은 반팔 내의, 전투복, 화생방보호의였고, 반팔 내의와 전투복은 현재 육군에서 착용하는 제품이였다. 다만, 화생방보호의는 효율적인 환기 위치 확인을 위하여 <Fig. 1>에서 보는 바와 같이 새롭게 설계하였는데, 현용 화생방보호의의 착용 실태 분석을 통해 개선 요구사항을 도출한 후(Lee et al., 2022) 유해물질 차단 성능, 치수 적합성, 동작 적합성, 착·탈의 편의성, 착용감 등을 고려하여 새롭게 제작되었다. 이때, 환기 위치는 인체 땀 발생 빈도가 높으면서(Smith & Havenith, 2011), 선행연구의 환기에 효과적인 위치(Kim & Cho, 2014; Yeon & Kim, 2005; Zhao et al., 2022) 중 육군 훈련 동작에 방해가 되지 않도록(Lee et al., 2022) 목옆, 상의 겨드랑이, 하의 대퇴 부위로 선정하였다. 또한, 환기 부위는 모두 개방 시 효과가 크다고 언급되어(Chu, 2000; Yoo & Kim, 2001), 실험 시 동시에 열고 닫았다. 소재는 현재 ADD(Agency for Defense Development)에서

개발 중인 것을 제공받아 사용하였으며, 3겹 구조로 겹감은 발수발유 코팅한 폴리에스터/면, 안감은 나일론 트리코트, 흡착 소재는 활성탄소섬유였다. 다만, 화생방보호의는 방독면까지 착용해야하나, 본 실험에서는 방독면 대신 화생방보호의의 후드 입구를 안면과 밀착시키고, KF94 마스크를 착용하였다.

2. 실험 순서

실험은 <Fig. 2>와 같은 순서로 진행되었다. 피험자는 준비실(26±1°C, 50±10%RH, 0.1 m/sec)에서 실험에 대한 전반적인 설명과 주의사항을 확인하였다. 그 다음 피부와 전투복 위에 온·습도 센서를 부착하고, 화생방보호의를 착용한 후 5분 동안 안정을 취하였으며, 이후 인공기후실(25±1°C, 45±1%RH, 0.2 m/sec)로 이동하였다. 인공기후실에 입실한 후 의자에 앉아 편안한 자세로 다시 5분간 안정을 취하고, 1차 주관적 평가를 실시하였다. 1차 주관적 평가가 끝난 후 트레드밀(Treadmill)에서 7 km/h 속도로 15분간 운동을 한 후 환기 부위를 모두 열거나 닫은 상태로 의자에 앉아 5분간 회복기를 가졌다. 이때, 온도와 습도(25±1°C, 45±1% RH)는 동일하였으나, 풍속은 환기를 위해 3 m/s가 되도록 조정하였다. 그리고 2차 주관적 평가를 실시하였다.

피부표면온도와 의복내 온·습도는 인공기후실 입실 시부터 지속적으로 데이터를 획득하였고, 화생방보호의 겹면온도는 운동 후와 운동 후 5분간의 회복기가 끝난 다음에 열화상이미지로 얻었다. 실험이 끝나면, 피험자는 착용했던 모든 실험 의복을 탈의한 후 편안한 생활복을 착용하고, 1시간 이상 충분한 안정을 취하였다. 그 후 여벌로 준비된 반팔 내의, 전투복, 화생방보호의를 착용하고, 동일한 실험을 다시 한번 진행하였으며, 환기 개폐 여부는 앞서 실시한 실험과 반대로 진행하였다.



---- Opening location

Fig. 1. Technical flat of experimental CBR (Chemical, Biological, and Radioactive) protective clothing.

온·습도 측정 위치와 동일하였다. 같은 부위에서 피부표면에서부터 최외층 화생방호의까지의 온도 측정은 온도 변화 추이 관찰에 사용되었다. 뿐만 아니라, 전투복과 화생방보호의 사이의 의복 ‘미세기후젖음 (microclimate wettedness)’은 <Eq. 1.>로 계산하였다. 주관적 감각 측정 항목은 온열감, 습윤감, 무게감, 전반적인 쾌적감이었으며, 총 2회(운동 시작 전, 운동 후 회복 시)에 걸쳐 실시되었다. 모든 항목은 7점 척도를 사용하였고, 온열감은 1점 매우 춥다, 4점 보통이다, 7점 매우 덥다, 습윤감은 1점 매우 건조하다, 4점 보통이다, 7점 매우 습하다, 무게감은 1점 매우 가볍다, 4점 보통이다, 7점 매우 무겁다, 전반적인 쾌적감은 1점 매우 불쾌하다, 4점 보통이다, 7점 매우 쾌적하다로 평가하였다.

$$W_m = (P_m - P_a) / (P_{ms} - P_a) \quad \dots \text{Eq. 1.}$$

- W_m: 미세기후젖음(Microclimate wettedness)
- P_m: 미세기후 실제 수증기압(Vapor pressure in microclimate, mmHg)
- P_a: 공기중의 실제 수증기압(Vapor pressure in air, mmHg)
- P_{ms}: 미세기후 포화 수증기압(Saturated vapor pressure in microclimate, mmHg)

4. 자료 분석 방법

수집된 모든 데이터의 통계 분석은 SPSS 26.0 Statistics(IBM, USA) 프로그램을 이용하여 환기 부위 개폐 유무에 따른 피부표면온도, 의복내 미세기후, 주관적 온열감, 습윤감, 무게감, 전반적인 쾌적감의 평균 및 표준편차를 구하였다. 환기 부위 개폐 유무에 따른 주관적 감각은 *t*-검정으로 분석하였고, 유의수준은 *p*<.05였다.

III. 연구결과

1. 피부표면온도 변화

피부표면온도는 피험자가 인공기후실에 입실한 후부터 실험이 마무리될 때까지 지속적으로 측정하였고, 이에 대한 인체 부위별(가슴, 견갑, 허벅지) 데이터는 <Fig. 4>에 나타내었다. 이 중에서 환기 부위 개폐 여부에 따른 차이를 보다 용이하게 해석하기 위해 분석은 부위별 각각 시작온도를 일치시켜 운동 시작, 운동 끝, 운동 후 회복 지점에서만 실시하였다(Fig. 5).

<Fig. 5>에서 보는 바와 같이 센서가 부착된 모든 부위에서 운동 시작부터 운동이 끝날 때까지 피부표면 온도는 상승하는 경향이 있었고, 상승 정도는 약 2.0°C

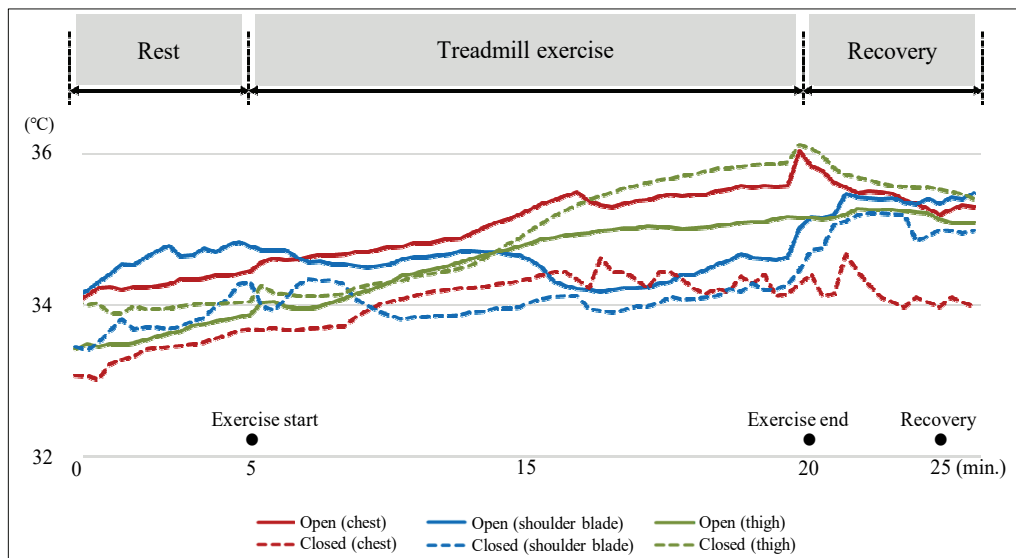


Fig. 4. Overall skin temperature change according to open/closed of ventilation zipper.

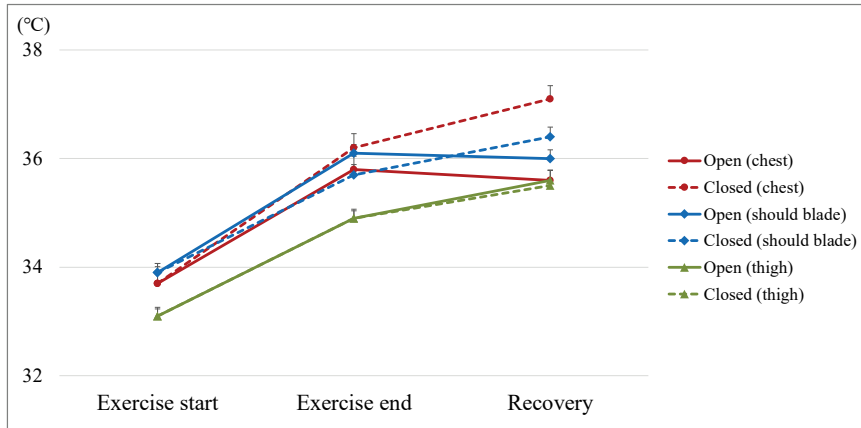


Fig. 5. Skin temperature change according to open/closed of ventilation zipper.

이었다. 일반적으로 사람이 산소를 소비하는 운동을 수행하면 그 80%가 열로 변환이 되고, 이때, 발생한 열은 피부면의 혈류량 증가나 땀의 증발로 열을 잃기 때문에 온도 상승을 낮추어 준다(Yoshimitsu & Narihiko, 2010/2013). 따라서 운동 후 환기 지퍼를 모두 열고, 회복기를 갖게 되면 발한이 촉진되어 상승되었던 피부 표면온도가 낮아졌다. 보다 구체적으로 살펴보면, 가슴 부위의 온도는 35.8°C에서 35.6°C로 0.2°C 하강하였고, 견갑 부위의 온도는 36.1°C에서 36.0°C로 0.1°C 낮아졌다. 반면, 운동이 끝난 후 환기 지퍼를 닫고, 회복기를 가지면 가슴, 견갑, 허벅지 모든 부위의 온도가 계속해서 상승하였다. 가슴은 36.2°C에서 37.1°C로 0.9°C 상승하였고, 견갑은 35.7°C에서 36.4°C로 0.7°C, 허벅지는 34.9°C에서 35.5°C로 0.6°C 상승하였다. 이러한 결과를 통해 환기 지퍼를 열면 상승되었던 피부 표면온도가 떨어져, 환기가 열적 스트레스 감소에 효과적임을 알 수 있었다. 특히, 상의 겨드랑이와 목옆 부위는 열적 스트레스 감소에 직접적으로 영향을 주는 것을 확인하였다. 그러나 허벅지의 경우 환기가 피부 표면온도의 하강에 큰 역할을 하지 못한 것으로 나타났다. 이는 피험자가 운동이 끝난 후 의자에 앉아서 회복을 하면 외부의 공기가 내부로 들어가더라도 허벅지 부위까지 전달되지 않았기 때문에 나온 결과로 예측된다. 즉, 대류 현상은 5.0 mm 이상의 공기층이 있어야 효과적인데(Zhang et al., 2022), 무릎과 오금의 구부러진 형상으로 의복내 공기층 확보하기 어려웠기 때문에 회복 시 ‘다리를 펴시오’라는 가이드를 제공하던지, 혹은 환기 위치의 변경이 필요하다고 판단된다.

Bang(2015)은 얼음조끼를 착용하고 훈련을 한 후 회복기에 접어들면 상승했던 고막온도가 0.8°C 하강하는 것으로 나타나, 얼음조끼가 심부온도를 효과적으로 낮추는데 효과가 있다고 하였고, Jung et al.(2020)은 냉각액체조끼 착용 시 평균 피부표면온도가 1.9°C 정도 저하된다고 하였다. 이를 통해 얼음이나, 냉각액체에 의한 전도는 피부표면온도 감소에 직접적 역할을 하나, 본 연구의 대류는 땀의 증발을 돕는 역할로 피부표면온도 하강에는 상대적으로 미비함을 확인하였다. 그러나 얼음이나 냉각액체는 이 상태를 유지하기 위해 별도의 장치가 필요하고, 액화로 인한 무게감, 짧은 냉각 유지 시간 등의 단점이 있기 때문에 작업 시간, 환경, 동작에 따라 대류가 필요한 적절한 상황도 있다고 생각된다.

2. 전투복내 의복온도 변화

전투복내 의복온도 변화는 <Fig. 6>에서 보는 바와 같이 운동 시작부터 운동이 끝날 때까지 피부표면온도와 마찬가지로 약 2.0°C 정도 지속적으로 상승하였다. 그런데 운동이 끝난 후 환기 지퍼를 열고 회복기를 가지면 가슴과 견갑 부위의 의복온도가 각각 33.6°C에서 30.9°C, 35.3°C에서 35.2°C로 2.7°C, 0.1°C 하강하였다. 다만, 허벅지 부위에서는 지퍼 개폐 유무에 상관없이 의복온도가 상승하는 것을 확인하였다. Kim et al.(2019)은 소방용 방화복 내 새롭게 개발한 노멕스 냉각셔츠를 착용하고 작업을 하면 가슴 부위 의복내 온도가 평균 2.0°C 이상 낮아진다고 보고하였는데, 본

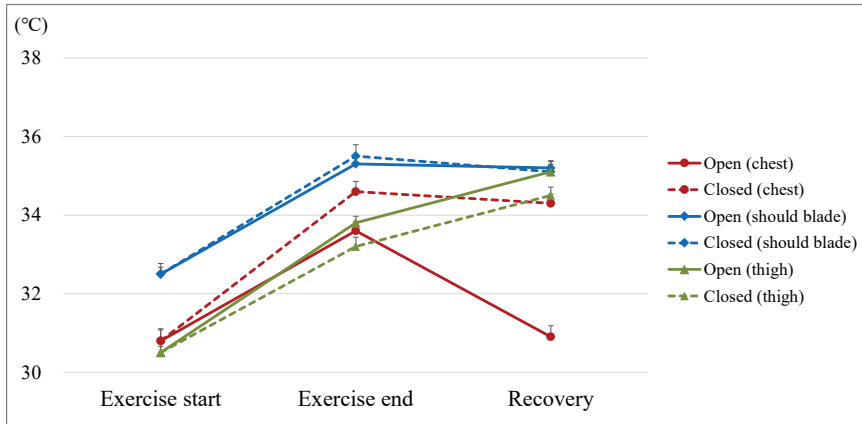
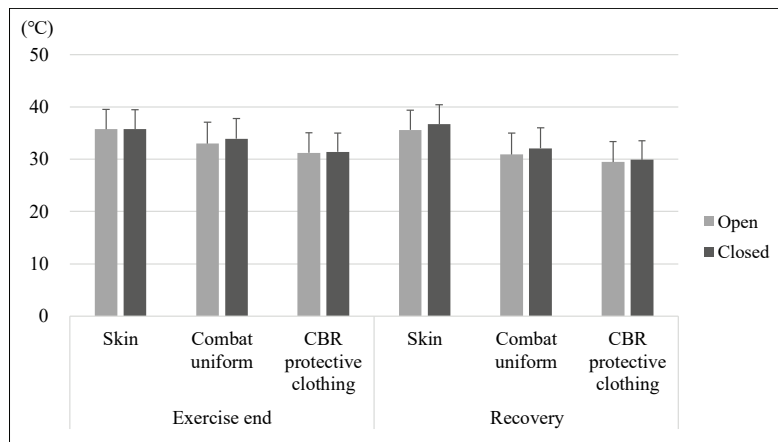


Fig. 6. Temperature change between the combat uniform and CBR protective clothing according to open/closed of ventilation zipper.

연구에서도 대류에 의해 2.0°C 이상 낮아지는 결과를 확인할 수 있었다. 한편, 지퍼를 닫아도 전투복 표면의 가슴과 견갑 부위에서 의복온도가 약간 하강하여 피부표면온도의 변화 양상과는 다른 것을 알 수 있었다.

다음으로 환기 지퍼 개폐에 따른 온도 변화가 가장 컸던 가슴 부위에서 피부-전투복 표면-화생방보호의 표면까지의 온도 변화 추이를 추가적으로 살펴보았다 (Fig. 7). 운동 끝 시점에서는 환기 지퍼 개폐에 상관없이 피부-전투복 표면-화생방보호의 표면의 온도가 유사하나, 운동 후 회복 시 환기 지퍼를 열게 되면 닫은 상태보다 가슴 부위의 피부표면온도, 전투복과 화생방

보호의 표면온도 모두 약간 하강하는 경향이 나타났다. 즉, 운동 후 회복하는 동안 환기 지퍼가 닫혀 있으면 피부표면온도가 높아 열적 스트레스가 큼을 알 수 있었다. 또한, 운동 후 회복 시 환기 지퍼를 열면 피부와 전투복 표면의 온도차는 4.7°C, 전투복 표면과 화생방보호의 표면 온도차는 1.4°C였고, 환기 지퍼를 닫으면 피부와 전투복 표면의 온도차는 4.6°C, 전투복 표면과 화생방보호의 표면의 온도차는 1.5°C로 나타났다. 이를 통해 환기 지퍼 개폐에 상관없이 피부와 전투복 표면의 온도차, 전투복 표면과 화생방보호의 표면 온도차가 유사하여 환경 조건이 동일한 상태에서는 피



CBR: Chemical, Biological, and Radioactive

Fig. 7. Temperature change of skin-combat uniform-CBR protective clothing.

부로부터 외부로 열이 방산되는 열전달 정도는 차이가 없으나, 운동 후 회복 시 환기 지퍼를 닫으면 피부 표면온도가 높기 때문에 신체가 느끼는 열적 스트레스는 클 것으로 생각된다.

3. 전투복내 의복습도 변화

전투복내 의복습도 또한 전투복내 의복온도와 동일하게 피험자가 인공기후실에 입실한 후부터 실험이 마무리될 때까지 지속적으로 측정하였으나<Fig. 8>

분석은 <Fig. 9>에 나타난 것과 같이, 운동 시작, 운동 끝, 운동 후 회복 지점에서만 실시하였고, 부위별(가슴, 견갑, 허벅지)로 각각 습도를 일치시킨 후 그래프를 정리하였다. 그 결과, 운동을 하면 모든 부위에서 습도가 약 10.0%RH 상승하였고, 운동 후 환기 지퍼를 열고 회복을 취하면, 가슴 부위의 의복습도만 76.1%RH에서 72.9%RH로 3.2%RH 하강하는 것을 알 수 있었다. 이는 Kim et al.(2020)의 연구에서 온실 환경 작업자의 열적 스트레스 경감을 위해 보텍스 튜브를 통해 냉각액을 적용한 농작업용 조끼를 착용 후 작업 시기

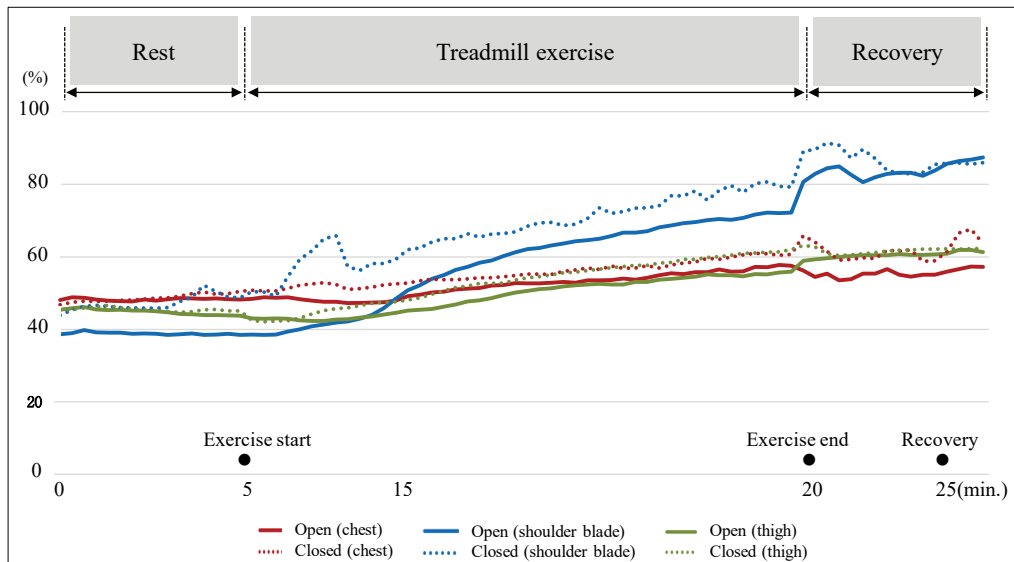


Fig. 8. Overall humidity change according to open/closed of ventilation zipper.

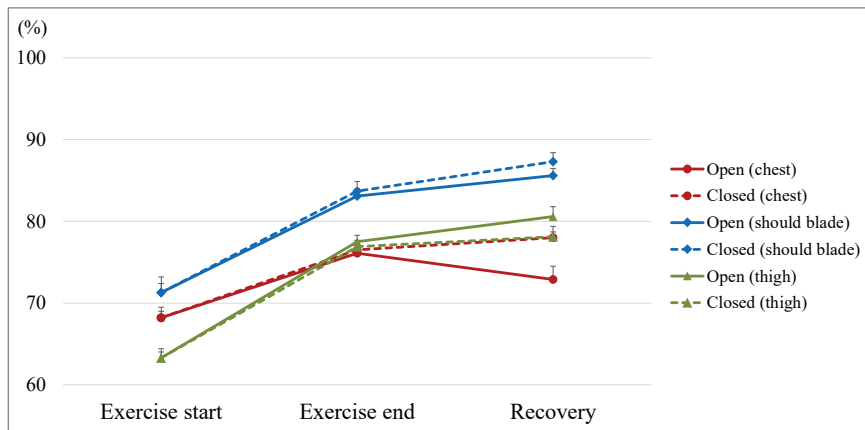


Fig. 9. Humidity change according to open/closed of ventilation zipper.

존 작업복 대비 의복내 평균 습도가 12.3%RH 감소했다는 결과에 비해 다소 낮은 감소율을 보이기는 하지만, 대류에 의해서도 습도 감소에 효과가 있음을 알 수 있었다. 반면, 운동 후 환기 지퍼를 닫은 상태에서 회복기를 가지면, 가슴, 견갑, 허벅지 3부위 모두 습도가 상승하였다. 구체적으로 살펴보면, 가슴 부위는 76.5%RH에서 78.0%RH로 1.5%RH 상승하였고, 견갑 부위는 83.7%RH에서 87.3%RH로 3.6%RH 상승하였으며, 허벅지 부위는 76.9%RH에서 78.1%RH로 1.2%RH 상승하는 것으로 파악되었다. 그리고 견갑 부위의 전투복내 의복습도는 가슴과 허벅지 부위보다 2~3배 정도 높은 것을 알 수 있었다.

한편, 전투복과 화생방보호의 사이의 의복 미세기후젖음을 계산한 결과, 지퍼를 열면 0.08, 지퍼를 닫으면 0.34 값이 도출되어 지퍼를 닫고 있으면 약 4배 정도 습해지는 것을 알 수 있었다.

4. 주관적 평가

주관적 평가는 총 2회(운동 시작 전, 운동 후 회복시) 실시하였다. 먼저, 운동 시작 전의 주관적 감각은 <Table 2>에서 보는 바와 같이 무게감은 보통 이하로 느끼고, 보통 이상의 온열감과 습윤감이 있다고 하였으나, 보통 이상으로 쾌적하다고 응답하였다. 그러나 운동이 끝나고 회복을 취하게 되면 화생방보호의의

환기 지퍼 개폐 유무에 따라 <Table 3>에 제시한 바와 같이 통계적으로 유의미한 차이가 나타나지는 않았으나, 환기 지퍼를 열면 온열감, 습윤감, 무게감은 감소하였고, 전반적인 쾌적감은 향상되었다. 즉, 온열감은 운동이 끝나고 회복시 환기 지퍼를 열면 온열감을 덜 느꼈다. 다만, 환기 지퍼 개폐에 상관없이 4점(보통) 이상의 온열감을 느껴, 보다 쾌적성을 증대시키기 위해서는 효율성을 높이는 방안이 모색되어야 할 것으로 판단된다. 습윤감도 마찬가지로 환기 지퍼를 열면 습윤감을 덜 느끼고, 무게감 역시 환기 지퍼를 열었을 때 가 닫은 상태를 유지했을 때보다 무게감을 덜 느끼는 것으로 평가되었다. 마지막으로 전반적인 쾌적감의 경우 환기 지퍼를 열면 4.3점으로 보통보다 높았으며, 닫은 상태를 유지했을 때는 4.0점으로 쾌적감이 낮아지는 것으로 나타났다. 따라서 피부표면온도와 전투복내 의복온·습도는 주관적 평가 결과와 밀접한 관계가 있음을 확인할 수 있었다.

IV. 결 론

본 연구에서는 반팔 내의-전투복-화생방보호의가 겹으로 착용된 상황에서 운동 후 회복시 화생방보호의 부위별 환기 지퍼의 동시 개폐 여부에 따른 피부표면온도와 전투복내 의복온·습도 및 주관적 감각에 미치는 영향을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

Table 2. Subjective evaluation of CBR protective clothing before exercise

N = 8

Evaluation item	Mean (S.D.)	
	Ventilation zipper open or closed	
Thermal sensation	4.5 (±1.1)	
Wet sensation	4.6 (±0.6)	
Weight sensation	3.9 (±0.6)	
Overall comfort	4.8 (±1.0)	

Table 3. Subjective evaluation of CBR protective clothing according to the ventilation zipper open/closed after exercise

N = 8

Evaluation item	Mean (S.D.)		t
	Ventilation zipper open	Ventilation zipper closed	
Thermal sensation	5.1 (±0.8)	5.6 (±1.1)	2.525
Wet sensation	5.5 (±0.9)	5.8 (±0.7)	.019
Weight sensation	3.9 (±1.0)	4.1 (±0.8)	.167
Overall comfort	4.3 (±1.3)	4.0 (±1.3)	.209

첫째, 화생방보호의 환기 지퍼 개폐에 따른 피부 표면온도 분석 결과, 운동 후 회복 시 공기의 유입이 없으면 피부표면온도가 지속적으로 약 0.6°C 이상의 상승이 발생하는 반면에 환기는 피부표면온도를 하강시켜 효율적인 열적 스트레스 해소 방안임을 확인하였다. 다만, 허벅지 부위의 효과는 미비하게 나타났는데, 이는 회복 시 무릎을 구부린 자세와 전투복 하의가 상의에 의해 겹쳐져 공기 이동을 방해한 것으로 판단된다. 한편, 온도 변화가 컸던 가슴 부위에서 피부-전투복 표면-화생방보호의 표면까지의 온도 변화 추이를 살펴본 결과, 환기 지퍼 개폐에 상관없이 온도차가 유사하여 환경이 동일한 상태에서는 피부로부터 외부로 열이 방산되는 정도는 차이가 없으나, 환기 지퍼를 열면 피부표면온도가 달았을 때보다 낮아 열적 스트레스를 덜 느낄 수 있을 것으로 생각된다.

둘째, 전투복내 의복온·습도 변화를 분석한 결과, 환기 지퍼를 열고 운동 후 회복하면, 전투복 표면 가슴 부위 의복온도의 하강폭이 2.7°C로 매우 컸다. 마찬가지로 습도의 경우에도 가슴 부위의 의복습도의 하강율이 3.2%RH 높았다. 그리고 견갑 부위의 전투복내 의복습도는 가슴과 허벅지 부위보다 2~3배 정도 높아 열적 스트레스가 가장 클 수 있는 부위임을 확인하였다. 또한, 전투복과 화생방보호의 사이의 미세기후젖음을 통해 환기는 약 4배 습함을 감소시키는 것으로 파악되었다.

셋째, 주관적 감각 평가 분석 결과, 환기는 온열감과 습윤감, 무게감을 덜 느끼도록 하였으며, 전반적인 쾌적감은 상승시키는 것으로 나타났다.

위의 결과들을 통해 25±1°C, 45±1%RH, 0.2 m/s 환경에서 반팔 내의-전투복-화생방보호의 착용 후 15분 정도의 운동은 피부표면온도와 전투복내 의복온도를 약 2.0°C, 의복습도를 약 10.0%RH 상승시켜 열적 스트레스를 유발하는 것을 알 수 있었다. 이와 같이 변화된 조건은 목과 겨드랑이 위치에서 바람이 제공되면 기존 연구의(Jung et al., 2020; Kim et al., 2020) 열음이나 냉각액체조끼의 효과와 유사하게 가슴과 견갑 부위 피부표면온도 및 전투복 내 의복온·습도 낮추는데 기여하는 것을 확인하였다. 특히, 전투복의 목 부위 개구부는 다른 부위에 비해 유동의 이동이 가장 원활할 수 있는 부위이기 때문에 적극적 열적 스트레스 해소 위치로 적합하다고 판단된다. 다만, 이 방법으로는 주관적 감각을 크게 변화시키지는 못했기 때문에

주입되는 바람의 온도를 낮추는 등 보다 효과적인 방안 모색이 필요할 것이다.

본 연구는 반팔 내의, 전투복, 화생방보호의가 겹쳐져 착용되는 시스템에서 운동과 휴식에 의해 변화되는 신체 및 의복내 미세기후 조건을 확인하고, 주관적 감각과 통합하여 분석하였을 뿐만 아니라, 대류의 열적 스트레스 해소 정도를 열음이나 냉각액체에 의한 효과와 비교하였다는 것에도 의의가 있다. 그러나 화생방보호의 특성상 외부의 유해물질을 완벽하게 차단해야 하기 때문에 궁극적으로는 겹면에 지퍼를 삽입할 수 없어, 밀폐 조건에서 안쪽에 환기 도구 접목 시의 변화 양상은 추가 연구를 진행하고자 한다. 또한, 피험자가 20대 남성으로 한정되어 다양한 연령대의 데이터도 수집해서 비교해보고자 한다. 더 나아가서는 현재 설정한 환경 조건보다 더욱 다양한 온·습도와 풍속을 변화시키면서 지속적인 데이터를 획득하여 유사한 조건의 특수 작업복에서 활용 가능한 데이터를 구축해 보고자 한다.

1. 사사

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2022R1C1C2011204).

본 연구는 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(Project number: 912762101).

2. 연구윤리

본 연구는 충남대학교 생명 윤리 위원회의 승인을 받았음(승인 번호 202103-SB-039-01).

3. 데이터 및 자료 가용성

본 연구에 사용된 데이터는 특허 진행 및 추후 후속 연구들이 지속되고 있으므로 공개가 불가함. 하지만 합당한 요청이 있어 저자소속기관이 승인하는 경우 교신저자가 제공 가능함.

4. 이해관계 상충

저자 YL은 2019년 4월부터 본 학술지의 편집위원이지만, 편집과정에 전혀 참여하지 않아 이해관계 상충 문제가 없음.

5. 연구비 지원

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2022R1C1C2011204).

본 연구는 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(Project number: 912762101).

6. 저자의 기여

RE는 실험 설계 및 진행을 담당하였고, HJ, KMC는 화생방보호의 소재 제공을 담당하였으며, OL, YL은 실험 데이터 분석에 기반하여 원고 작성을 담당하였음. 모든 저자가 최종 원고를 읽고 승인하였음.

7. 저자 정보

이옥경 충남대학교 생활과학연구소, 전임연구원

엄란이 제주대학교 패션의류학과, 조교수

정희수 국방과학연구소 Chem-Bio 기술센터
보호계독팀, 선임연구원

조경민 국방과학연구소 Chem-Bio 기술센터
보호계독팀, 선임연구원

이예진 충남대학교 의류학과, 교수

References

- Armed Forces Health Surveillance Center. (2012). Heat injuries, active component, U.S. Armed Forces, 2011. *Medical Surveillance Monthly Report*, 19(3), 14–16.
- Bang, C. (2018). Effects of repetitive work and worked for body while wearing firefighting protective clothing in hot conditions. *Fire Science and Engineering*, 32(4), 35–41. doi:10.7731/KIFSE.2018.32.4.035
- Bang, C.-H. (2015). A study on effects of active cooling method on human body wearing firefighting protection equipment - Focusing on using ice-vest -. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 15(1), 207–213. doi:10.9798/KOSHAM.2015.15.1.207
- Choi, J. W., Kim, H. S., & Jeong, Y. O. (1987). A study on the comfortable pesticide-proof clothes. *Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles*, 11(2), 91–100.
- Choi, J.-W., Kim, M.-J., & Lee, J.-Y. (2002). Evaluation of the farmers' workload and thermal environments during cucumber harvest in the greenhouse. *Journal of the Korean Society of Living Environmental System*, 9(3), 245–253.
- Chu, M.-S. (2000). Assessment of clothing ventilation through openings. *The Research Journal of the Costume Culture*, 8(5), 660–667.
- Chung, M.-H., Park, S.-J., Shin, J.-S., Koshiba, T., & Tamura, T. (2006). A study on wearing test of protective clothing against a toxic substance. *Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles*, 30(11), 1626–1635.
- Eom, R.-i., & Lee, Y. (2019). Analysis of the effects of vests with fan in summer environments. *Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles*, 43(6), 856–865, doi:10.5850/JKSCT.2019.43.6.856
- Han, E. G., Kim, E. A., & Oh, K. W. (1998). Development of shielding materials and protective clothing for electromagnetic waves(I)-Comparison of conductive coating and non-electrolytic plating-. *Journal of the Korean Fiber Society*, 35(8), 515–524.
- Holmér, I. (2006). Protective clothing in hot environment. *Industrial Health*, 44(3), 404–413. doi:10.2486/indhealth.44.404
- Jung, J.-Y., Kang, J., Seol, S., & Lee, J.-Y. (2020). Developing liquid cooling garments to alleviate heat strain of workers in summer and exploring effective cooling temperature and body regions. *Fashion & Textile Research Journal*, 22(2), 250–260. doi:10.5805/SFTI.2020.22.2.250
- Kang, J.-S., Seo, H.-K., Park, H.-B., Ryu, S.-G., & Park, S.-H. (2012). A study on the design concept for NBC clothing. *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, 15(2), 193–200. doi:10.9766/KIMST.2012.15.2.193
- Kim, D. H., Jung, J. Y., Kim, D.-H., & Lee, J.-Y. (2019). Effects of wearing nomex body cooling garment inside firefighting protective equipment on the efficiency of performance during simulated firefighters' tasks. *Journal of the Korean Society of Living Environment System*, 26(1), 9–24, doi:10.21086/ksles.2019.02.26.1.9
- Kim, I., Kim, K., Seo, M.-T., Park, S.-I., Cha, J.-J., Kim, H.-C., & Kim, K. (2020). Development and evaluation of a cooling vest applied with vortex tubes to reduce the thermal stress of greenhouse workers. *Journal of the Ergonomics Society of Korea*, 39(1), 43–58. doi:10.5143/JESK.2020.39.1.43
- Kim, I., Park, S., Chae, H.-S., & Kim, K. (2021). Evaluation of wearability of air-cooling vests using vortex tubes and applicability of these to farming sites - Centered on greenhouse workers. *Journal of the Ergonomics Society of Korea*, 40(6), 373–388. doi:10.5143/JESK.2021.40.6.373
- Kim, M.-Y., & Bae, H.-S. (2013). Physiological responses of wearing protective welding clothing considering the work environment of the shipbuilding industry. *Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles*, 37(2), 235–245, doi:10.5850/JKSCT.2013.37.2.235
- Kim, T. G., & Cho, H. H. (2014). The influence of wearing army combat uniform on the thermal responses in heat environment. *Fashion & Textile Research Journal*, 16(1), 167–174. doi:10.5805/SFTI.2014.15.1.167
- Korea Agency for Technology and Standards. (2015). 7차 인체 치수조사 (2015) [The 7th national anthropometric survey report (2015)]. *Size Korea*. Retrieved from <https://sizekorea.kr/human-info/meas-report?measDegree=7>
- Lee, K. Y. (2017). 탄소나노튜브 화생방보호의소재 소개 [Introduction of materials for carbon nanotube CBR protective clothing]. *Defense & Technology*, 457, 114–119.
- Lee, O., Eom, R., & Lee, Y. (2022). Investigation of current

- conditions for the development of military CBR clothing. *Korean Journal of Human Ecology*, 31(1), 99–112, doi: 10.5934/kjhe.2022.31.1.99
- Maddah, B. (2020). Investigation of various kind material utilized in NBC clothing. *Passive Defense Quarterly*, 7(1), 47–57.
- Nishihara, N., Tanabe, S.-i., Hayama, H., & Komatsu, M. (2002). A cooling vest for working comfortably in a moderately hot environment. *Journal of PHYSIOLOGICAL ANTHROPOLOGY and Applied Human Science*, 21(1), 75–82. doi:10.2114/jpa.21.75
- Smith, C. J., & Havenith, G. (2011). Body mapping of sweating patterns in male athletes in mild exercise-induced hyperthermia. *European Journal of Applied Physiology*, 111(7), 1391–1404. doi:10.1007/s00421-010-1744-8
- Sohn, B.-H., & Choi, H.-S. (2001). An evaluation of the protection efficiency of ballistic material. *Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles*, 25(9), 1661–1668.
- Tochihara, Y., Fujita, M., & Ogawa, T. (2005). Protective clothing – Related heat stress on firefighters in Japan. *Proceedings of the 11th International Conference of Environmental Ergonomics, Sweden*, 137–139.
- Yeon, S.-M., & Kim, H.-E. (2005). Effects of slit ventilation system in sportswear on physiological responses. *Journal of the Korean Society for Clothing Industry*, 7(1), 75–80.
- Yi, W., Zhao, Y., & Chan, A. P. C. (2017). Evaluating the effectiveness of cooling vest in a hot and humid environment. *Annals of Work Exposures and Health*, 61(4), 481–494. doi: 10.1093/annweh/wxx007
- Yoo, H. S., & Kim, E. A. (2001). Effect of garment-opening location on the water vapor transport-Determination with vertical-plate type skin model-. *Journal of the Korean Fiber Society*, 38(12), 693–701.
- Yoshimitsu, I., & Narihiko, K. (2013). *체온조절 시스템의 적응 체온 (개정판)* [The adaptive body temperature of the thermoregulatory system (Rev. ed.)]. (J.-W. Choi, J.-Y. Lee, & W. Lee, Trans.). Paju: Gyomoon. (Original work published 2010)
- Zhang, Y., Jia, J., & Guo, Z. (2022). Numerical investigation of heat transfer in a garment convective cooling system. *Fashion and Textiles*, 9:2, doi:10.1186/s40691-021-0027 6-3
- Zhao, M., Yang, J., Wang, F., Udayraj, & Chan, W. C. (2022). The cooling performance of forced air ventilation garments in a warm environment: the effect of clothing eyelet designs. *The Journal of The Textile Institute*. doi:10.1080/00405000.2022.2040107