

감염병 대응 개인보호복의 동작성 및 열적 쾌적성: 보호 수준 및 여성 착용자 체격의 영향

김도희¹⁾ · 전영민²⁾ · 이호준³⁾ · 강경리³⁾ · 이초은³⁾ · 이주영^{1),3),4)†}

¹⁾서울대학교 생활과학연구소

²⁾KOTITI 시험연구원

³⁾서울대학교 의류학과

⁴⁾차세대융합기술연구원 그래핀융합기술연구센터

Mobility and Thermal Comfort Assessment of Personal Protective Equipment for Female Healthcare Workers: Impact of Protective Levels and Body Mass Index

Do-Hee Kim¹⁾, Youngmin Jun²⁾, Ho-Joon Lee³⁾, Gyeongri Kang³⁾, Cho-Eun Lee³⁾, and Joo-Young Lee^{1),3),4)†}

¹⁾Research Institute for Human Ecology, Seoul National University, Seoul, Korea

²⁾KOTITI Testing & Research Institute; Gwacheon, Korea

³⁾Department of Fashion and Textiles, Seoul National University, Seoul, Korea

⁴⁾Graphene Research Center for Convergence Technology, Advanced Institute of Convergence Technology; Suwon, Korea

Abstract: This study aimed to assess the mobility and thermal comfort of personal protective equipment (PPE) among female healthcare workers, taking into account wearers' physique and PPE protection levels. A total of 16 participants (age: 26.3 ± 8.3 y, height: 161.5 ± 7.3 cm, body weight: 57.1 ± 11.0 kg, BMI: 21.9 ± 3.6), representing diverse body types, underwent four PPE conditions: L (Low_Plastic gown ensemble), M (Medium_Tyvek 400), H (High_Tyvek 800J with Powered Air Purifying Respirator [PAPR]), and E (Extremely high_Tychem 2000 with PAPR, Bib apron, and Chemical-resistant gloves). The mobility protocol consisted of 10 different tasks in addition to donning and doffing. The 10 tasks were repeated twice at an air temperature of $24.3 \pm 0.1^\circ\text{C}$, $59 \pm 4\%$ RH. Findings revealed a disproportionate relationship between PPE protection and wearer discomfort. Significant differences in clothing microclimate and total sweat rate were observed between the lowest (L) and highest (E) protection levels ($p < 0.01$), while distinctions among medium levels were inconclusive. Subjective evaluations favored conditions H and L over M and E ($p < 0.05$), indicating reduced heat, and humidity, increased comfort, and lower exertion. Instances of mobility discomfort, specially in the small body type group, underscored the need for a suitable PPE size system for Korean adult female medical workers. Furthermore, enhancements in gloves, shoe cover, and PAPR hood designs are essential for improving ease of movement and preventing hindrance.

Key words: female healthcare workers (여성 감염병 대응 의료진), personal protective equipment (PPE, 개인보호구), comfort (쾌적), fit (맞음새), mobility (동작성)

1. 서 론

의료 환경에서 개인보호장비(Personal Protective Equipment, PPE)는 주로 감염으로부터 의료진을 보호하고 병원체의 전파를

일선에서 통제하는 중추적 역할을 한다(Sawada et al., 2017). 2003년 사스를 시작으로 2009년 신종플루, 2014년 에볼라, 2015년 메르스, 2019년 코로나19 바이러스 등 계속된 감염증의 유행으로 의료진이 장시간 동안 PPE를 필수적으로 착용하게 되면서 PPE 착용으로 인한 서열부담(heat strain) 및 동작성 저하 문제가 사회적 쟁점으로 부각되었다(Sharma et al., 2022). 외부 감염 요인 차단을 위해 의료진이 착용하는 PPE의 종류는 마스크, 커버롤, 가운, 앞치마, 페이스 실드, 장갑, 슈커버 등 다양하다(Bongers et al., 2022). 대부분의 PPE는 그 목적상 환기가 거의 불가능하게 설계되어 대류 및 증발 열손실을 방해, 심부 온도 상승을 야기하고 간접적으로 땀 발생률을 높인다(Davey et al., 2021; Liu et al., 2020). 감염병 대유행에

†Corresponding author: Joo-Young Lee

Tel. +82-2-880-8746

E-mail: leex3140@snu.ac.kr

©2024 The Korean Fashion and Textile Research Journal(KFTRJ). This is an open access journal. Articles are distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

다른 의료진들의 대응 업무 증가와 PPE의 불침투성 특성이 결합되면서 의료진들이 실제 경험하는 열부담이 증가하였고, 영국, 이탈리아, 싱가포르, 인도, 중국 등 여러 국가에서 실시한 감염병 의료진 대상 조사에서 응답자 대다수는 열적 불편감, 과도한 발한 등 열 관련 증상을 호소하고 그로 인한 업무 능력 저하를 보고했다(Davey et al., 2021; Liu et al., 2020). 한편, 몸에 잘 맞지 않는 PPE 착용으로 인해 의료진이 느끼는 동작 불편감과 피부 손상 및 통증 또한 감염병 대응 의료진의 안전 및 업무 효율뿐 아니라 정신 건강에까지 영향을 미치는 것으로 보고된바 있다(Janson et al., 2022; “Personal protective equipment”, 2017). 잘 맞지 않는 PPE로 인한 문제는 소방관이나 건설현장 및 제조업 작업자 등 여러 작업 현장에서 지속적으로 논의되어온 이슈지만, 특히 의료 분야에서 중요하게 다루는 이유는 이것이 교차 감염 통제 및 의료 인력의 안전에 직접적으로 영향을 미치기 때문이다(Damery et al., 2009).

2019년부터 지속된 코로나19 사태로 인해 전술한 감염병 대응 PPE의 문제점 개선을 위한 광범위한 연구들이 진행되었다(Bongers et al., 2022; Davey et al., 2021; Liu et al., 2020). 그러나 연구의 대부분이 의료진의 기억에 기초한 자기응답식 설문 또는 심층 인터뷰를 이용한 사회 심리학적 접근 연구로, 실제 의료진용 PPE를 착용하고 관련 작업을 수행할 때의 물리적, 생리적, 심리적 변화를 실증적으로 확인한 증거 기반 연구는 매우 드물다. 최근 일부 연구에서 감염병 대응 의료진용 PPE 착용이 착용자에게 미치는 열적, 정신심리적 인체 부담을 실험을 통해 확인하거나, 감염병 대응 의료진의 대표 작업 동작을 모사한 작업 프로토콜을 개발, 다양한 보호 수준을 갖는 보호복의 동작성 및 인체 생리적 부담을 평가한 실험 연구가 진행되기도 하였으나 그 대상이 주로 표준 체형의 젊은 남성으로 국한되어 있었다(Kwon et al., 2022; Lee et al., 2021).

하지만, 우리나라 보건의료복지 분야 전반, 특히 감염 위험 중위험이 높은 고위험 분야 종사자 중 여성의 비율은 80% 정도로 매우 높다(Lee & Kim, 2020). 이러한 특성은 미국, 영국, 네덜란드, 인도, 중국 등 동서양 대부분의 나라에서 공통적으로 나타난다(Baker et al., 2020; Bongers et al., 2022; Janson et al., 2022). 남성과 여성의 체격 및 체형은 다르며, 같은 직업군 내에서도 인체계측학적 성차가 존재한다(Hsiao et al., 2014). 그런데 듀퐁이나 3M과 같은 글로벌 회사에 의해 주도적으로 개발되어 온 대부분의 의료용 보호복은 유럽과 미국 남성의 평균 체격을 중심으로 설계되었기 때문에(TUC, 2017) 여성 작업자 대부분이 자신의 몸에 잘 맞는 PPE를 찾지 못한다는 연구 결과(Janson et al., 2022; TUC, 2017)는 당연할 수 있다. 여성 의료진이 남성 체형에 맞게 제작된 PPE 착용 시, 인체 부위별로 너무 크거나 너무 길어 잘 맞지 않게 되고, 이로 인해 직접 및 교차 감염이라는 추가 위험에 노출되거나, 동작을 방해받아 업무 효율이 저하될 수 있다. 또 감염 차단을 위해 너무 크거나 너무 긴 부위를 테이프나 클립 등으로 자신의 몸에 밀착되게 꼭 조이거나 접어 착용하는 것은 찰과상이나

두통을 야기하는 등 부정적 결과의 원인이 되며, 탈의 시 교차 감염의 위험 역시 증가한다. 그리고 이러한 문제는 감염 위험에 대한 심리적 불안까지 증폭시킬 수 있다는 점에서 더욱 심각하다 볼 수 있다(Ong et al., 2020).

한편, 전술한 인체계측학적 성차는 개인보호구의 맞춤새뿐 아니라 체온조절 능력에도 영향을 미친다. 일반적으로 여성은 남성에 비해 키와 체중, 체표면적이 작으면서 피하지방은 두꺼운데, 여성의 이러한 형태적 특성은 더운 환경에서의 체온조절에 불리하게 작용할 수 있다(Cramer & Jay, 2016; Havenith et al., 1998). 또한 최대산소섭취량(VO_{2max}) 수준도 평균적으로 여성이 남성보다 낮는데, PPE 착용 의료진들이 흔히 경험하는 작업 부담과 서열 부담이 동반된 상황에서 여성의 낮은 VO_{2max} 는 체온조절에 불리한 요인이 된다. 여름철 의료진들의 심장은 작업 지속을 위해 근육으로, 동시에 체열 발산을 위해 피부로 동시에 산소를 운반해야 하므로 같은 환경에서 동일한 작업을 하더라도 일반적으로 최대산소섭취량 수준이 낮은 여성이 체온조절에 실패하기 쉽다. 이러한 특성은 작업 강도가 강할수록 더 뚜렷하게 나타난다(Heinicke et al., 2001; Kenney, 1985; Lamarche et al., 2018). 더욱이 여성은 남성에 비해 발한의 개시가 늦고 총발한량도 적기 때문에 서열 스트레스 하 체온조절에 불리하며, 서열 스트레스가 심할수록 이러한 성차는 커진다고 보고되었다(Fox et al., 1969; Hardy & Du Bois, 1940; Horstman & Christensen, 1982; Inoue et al., 2005; Keatisuwan et al., 1996). 한편, 이러한 결과가 순수한 성차 때문이 아닌 남녀의 인체계측학적 차이 및 체력 차이 등에 기인한다는 비판이 계속되면서 외생 변인을 통제한 여러 실험 연구가 진행되었고, 몇몇 연구에서는 체격 또는 체력 수준이 동등할 경우 증발 방열에 있어 성차는 없다고 보고하였다(Gagnon & Kenny, 2011; Shapiro et al., 1980).

그러나 인류학적으로 볼 때 평균적인 여성의 체격 및 체력은 평균적인 남성에 비해 작고 낮을 뿐만 아니라 땀샘의 부피 역시 남성보다 작기 때문에(Coon & Low, 2023), 체격이나 체력의 성차도 본질적인 성차로 간주할 수 있다. 또한 더워 노출 시 여성은 남성과 달리 발한보다 피부 혈관 확장에 더 의존하는 방열 특성을 가진다(Fox et al., 1969). 이러한 성차를 고려할 때, 전신 보호복 내부의 높은 의복내 온습도 조건 하에서 장시간 고강도의 작업을 해야 하는 여성 의료진은 남성보다 체온조절에 불리할 것으로 판단된다. 실제 감염병 대응 여성 의료진 중 현기증, 두통 등 열 관련 증상 및 작업 능력 저하를 경험하는 비율은 90% 이상으로 남성 의료진의 열 관련 증상 경험률보다 높은 것으로 보고되었다(Bongers et al., 2022; Davey et al., 2021; George et al., 2022). 이에 본 연구는 다양한 체격을 가지는 여성 피험자를 대상으로 다양한 보호 수준의 감염병 대응 의료진용 PPE를 착용하고 모의 작업 동작을 수행하는 동안 여성 피험자의 체격에 따른 동작성 및 쾌적성을 평가하는 것을 목표로 하였다. 본 연구의 가설은 다음과 같다. 첫째, 보호복의 보호 수준이 증가할수록 불쾌 수준도 증가할 것

이다. 둘째, 착용자의 체질량지수(체격)가 클수록 동작에서의 불편감이 증가할 것이다.

2. 연구방법

2.1. 피험자

건강한 성인 여성 16명(26.3 ± 8.3세, 키 161.5 ± 7.3 cm, 몸무게 57.1 ± 11.0 kg, BMI 21.9 ± 3.6, 체지방률 27.0 ± 6.5%)이 실험에 참여하였다. 실험에 다양한 체격의 피험자를 포함시키기 위하여 ‘사이즈 코리아 6차 인체 조사’ 및 ‘국민 체력 100’에서 제공하는 20~30대 여성의 백분위 데이터(Korean Agency for Technology and Standards, 2010; Korean Sports Promotion

Foundation, 2018)를 기준으로 키와 BMI를 각각 세 개 수준으로 나누어 총 아홉 개의 체격 집단으로 유형화했다(키 3수준 × BMI 3수준 = 9개 체격 집단)(Table 1). 그리고 각 체격 집단에 해당하는 피험자를 모집한 후 실험에 대한 충분한 설명을 제공, 자발적으로 동의한 경우에만 실험에 참여했다. 본 연구는 서울대학교 연구윤리위원회 지침을 준수하였다(IRB No. 2204/004-004).

2.2. 실험 조건 및 실험복

모의 작업 수행 시의 쾌적성 평가는 기온 24.3 ± 0.1°C, 습도 59 ± 4%RH로 유지되는 실내 공간(11.5 m × 8 m)에서 진행하였다. 실험복 조건은 국내 감염병 의료진 대상 설문조사 결과 및

Table 1. Classification of groups based on subjects' height and body mass index (BMI)




BMI	Height	Short	Medium	Tall	Sum (n)
		< 160 cm	160 ~ 165 cm	165 cm <	
Thin < 20	Short-Thin		Medium-Thin	Tall-Thin	6
		(n = 2)	(n = 2)	(n = 2)	
	Short-Normal		Medium-Normal	Tall-Normal	
	(n = 1)	(n = 2)	(n = 2)		
Short-Overweight		Medium-Overweight	Tall-Overweight	5	
	(n = 2)	(n = 2)	(n = 1)		
Sum (n)	5	6	5		16

Table 2. Composition of personal protective equipment (PPE) for each experimental condition

PPE item	Experimental PPE condition			
	L(Low)	M(Medium)	H(High)	E(Extremely high)
Basic garments: Bra + panties + scrub top and pants + socks + shoes	○	○	○	○
CPE* Gown (open back)	○			
Level D coverall (Tyvek 400)		○		
Level C coverall (Tyvek 800J)			○	
Level C coverall (Tychem 2000)				○
Bib apron (Tychem 2000)				○
Respirator protection				
Surgical mask (disposable)	○			
KF94 mask (disposable)		○		
PAPR (3M Versaflo TR300)			○	○
Head & face protection				
Face shield with coverall hood		○		
PAPR** hood (3M S-series)			○	○
Hand protection				
Surgical gloves (disposable)	○	○	○	○
Chemical-resistant gloves (AlphaTec Solvex 37-175)				○
Foot protection				
Shoe cover (Tyvek 400)		○	○	○
Total weight (g) (based on size M, excluding weight of shoes)	606	751	2,822	3,135

*CPE: Chlorinated Polyethylene; **PAPR: Powered Air Purifying Respirator (1,894g)

질병청과 CDC 가이드라인 등을 참고하여 수행된 선행연구들 (Park, 2020)을 바탕으로 국내 의료진들이 가장 빈번히 착용하는 조합의 네 가지 보호 성능 수준별 PPE로 구성했다(Table. 2). 첫 번째 보호 수준으로 비닐 가운을 착용한 조건 L (Low, PPE 세트 총중량 0.61 kg), 두 번째, Level D 수준의 커버롤을 착용한 조건 M (Medium, 0.75 kg), 세 번째, Level C 수준의 커버롤과 Powered-air purifying respirator (PAPR)를 함께 착용한 조건 H (High, 2.82 kg), 네 번째 보호 수준은 조건 H 세트에 타이캠 에이프론 및 화학 장갑을 추가 착용한 조건으로 E (Extremely high, 3.14 kg)로 명명하였다. PAPR를 착용하는 조건 H와 조건 E에서는 PAPR를 최대 출력(air flow 8.0 ft³ · min⁻¹)으로 작동시킨 상태에서 모의 작업을 수행했다. 네 가지 보호복 조건 모두에 공통적으로 포함된 기본 아이템은 스크럽복 상하의(반 팔 상의, 긴 바지)와 브라, 팬티, 양말, 신발(EVA clogs), 니트릴 소재의 일회용 수술 장갑이었으며, 조건 E의 경우 장갑 두 장(기본 니트릴 장갑 위에 화학 장갑)을 동시에 착용하였다. 스크럽복과 커버롤은 시판되는 모든 사이즈인 M, L, XL, XXL 4종을 구비한 후 피험자의 키와 몸무게에 가장 적합한 사이즈로 제공, 실제 M, L, XL 3종만 사용되

었다. 그 외 비닐 가운, 슈커버 등은 Free size로 모든 피험자가 같은 사이즈를 제공받았다. 참여 순서에 의한 영향을 최소화하기 위해 피험자는 네 개의 실험복 조건에 임의의 순서(Latin square)로 참여하였다.

2.3. 모의 작업 프로토콜

국내 감염병 대응 의료진 조사 결과를 바탕으로 개발, 실험을 통해 그 타당도가 검증된 Kwon et al.(2022)의 모의 작업 동작성 평가 프로토콜을 수정·보완하여 사용했다. 수정된 동작성 평가 프로토콜은 감염병 대응 의료진들이 수행하는 업무를 시뮬레이션한 총 10개 동작과 PPE 착의와 탈의를 포함한 총 12개 동작으로 구성되었다(Fig. 1): ① PPE 착의 후, 의자에 앉은 자세로 10분 휴식, ② 30 kg 카트를 밀고 28 m 직선 걷기(왕복 14 m × 2 반복), ③ 수액백을 거치대에 걸기, ④ 유전자 검사(PCR)용 키트를 이용하여 3회 swabbing 하기, ⑤ 심폐소생술(CPR) 훈련용 성인 남자 마네킹을 사용하여 CPR 30회 실시하기, ⑥ 병상에 누워 있는 사람(45 kg 여성)을 보조자와 함께 바로 옆에 위치한 동일한 디자인의 병상으로 옮긴 후 다

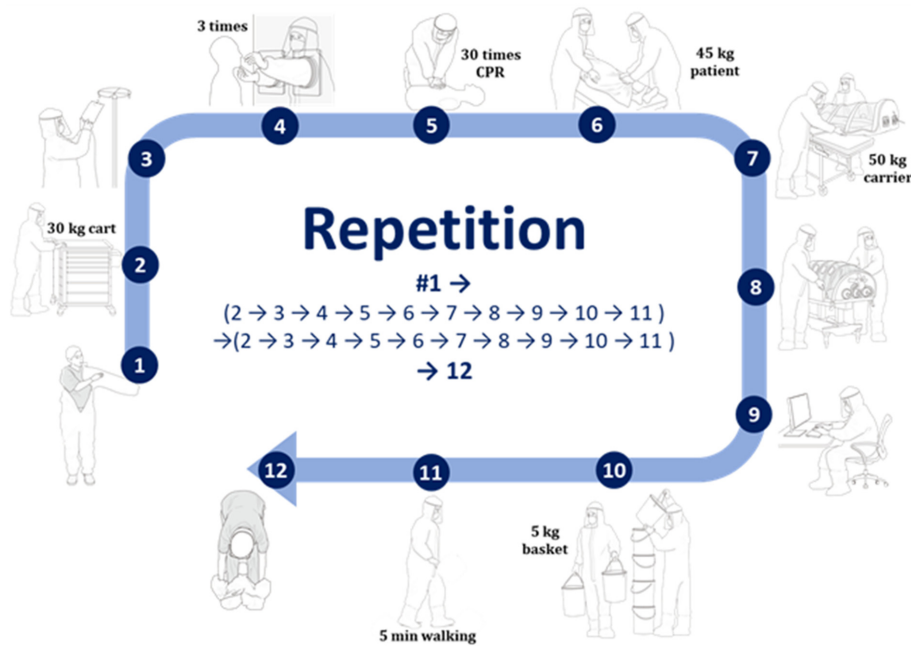


Fig. 1. Mobility test protocol of 12 simulated COVID-19 healthcare worker tasks.

#1: Donning all PPE; #2: Moving a 30-kg cart (28 m distance); #3: Hanging an infusion bag on a stand; #4: Swabbing 3 times using a swabbing kit; #5: Doing CPR (cardio-pulmonary resuscitation) using an adult CPR training manikin; #6: Moving a patient from a bed to another bed (twice) with an assistant; #7: Moving a negative pressure carrier (50 kg) down from a hospital bed, and then putting the carrier on a bed again, with an assistant; #8: Moving the adjustable hospital bed with a negative pressure carrier (24 m distance), with an assistant; #9: Typing 5 sentences in Korean (77 words) on a chair; #10: Moving 5 baskets (5 kg for each) and stacking all the baskets in a row; #11: Walking 5 minutes; #12: Doffing all PPE.

시 원위치시키기, ⑦ 병원용 이동 병상 위에 놓인 약 50 kg의 모의 음압 텐트를 보조자와 함께 바닥에 내려놓은 뒤 다시 이동 병상 위에 올려놓기, ⑧ 모의 음압 텐트가 올려진 병원용 이동 병상을 보조자와 함께 24 m 이동하기(한 번이 6m인 정사각형 공간을 한 바퀴 돌아 원위치로 오기), ⑨ 의자에 앉은 자세로 5개의 한글 문장(총 77 단어) 타이핑하기, ⑩ 5 kg 양동이를 들고 24 m 걸어 돌아온 후 하나씩 위로 쌓아 놓는 한 라운드를 3번 반복(첫 번째 라운드 양손으로 양동이 두 개 이동, 두 번째 라운드 양손으로 두 개 이동, 세 번째 라운드 한 손으로 1개 이동하여 총 5 양동이, 72 m 걷기), ⑪ 5분 동안 바닥의 사각 표시선을 따라 메트로놈 박자(약 $4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 속도)에 맞춰 걷기, ⑫ 개인보호구 탈의. 전체 프로토콜은 총 두 세트의 활동으로 구성되는데, 첫 번째 세트는 탈의를 제외한 1번에서 11번까지 각 동작을 순서대로 수행하고, 두 번째 세트는 착의를 제외한 2번에서 12번까지 각 동작을 순서대로 수행하도록 구성했다. 첫 번째와 두 번째 세트는 휴식 없이 바로 이어지도록 하였다. 각 작업 속도는 피험자가 자율적으로 조절했고 착의와 탈의 방법은 사전에 그 순서를 미리 숙지하도록 하였다.

2.4. 실험과정

피험자는 실험실 도착 직후 탈수 방지를 위해 준비된 330 ml

의 물을 마셨고, 음수 후 실험용 속옷과 실험용 가운으로 갈아입은 후 몸무게를 측정하였다. 인체에 귀내온 센서, 가슴과 등 부위에 의복내 온습도 센서, 가슴 중앙에 심박수 측정용 벨트를 부착한 후 스크럽복 상하의를 착용했다. 신호와 함께 실험이 시작되면, ① 당일 배정된 PPE를 피험자 스스로 착용했고, 실험자는 매 착의에 소요된 시간을 초시계로 측정했다. ② 피험자는 착의 직후 범주형으로 구성된 정신-심리 척도에 대해 응답하고 등받이가 없는 의자에 앉은 자세로 10분 안정을 취했다. ③ 10분 안정 종료 시점에 피험자는 다시 정신-심리 척도에 대해 다시 응답한 후 평균적으로 약 25분 소요되는 모의 작업 평가 프로토콜을 수행했다. ④ 작업 완료 직후 피험자는 동일한 정신-심리 척도에 대해 응답하고 실험자는 작업에 소요된 시간을 기록했다. ⑤ 피험자는 착용한 PPE를 스스로 벗었고, 실험자는 탈의에 소요된 시간을 기록했다. ⑥ 피험자는 실험 전 처음 체중을 측정하였을 때 착의한 대로 다시 갈아입고 체중을 측정했다. ⑦ 매 실험 종료 직후 피험자는 각 동작별, PPE 보호복 아이템별 불편함에 대한 구조화된 심층 인터뷰에 참여했다.

2.5. 측정항목

모의 작업 프로토콜을 완료하는데 소요된 시간 및 보호복 착의와 탈의에 소요된 시간을 측정하였고, 귀내온과 의복내 온도

및 습도(가슴과 넓적다리), 심박수, 총발한량, 정신·심리적 반응 [한서감, 온열 쾌적감, 습윤감, 인지적 힘들기(Rating of Perceived Exertion, RPE), 호흡 부담감(Shortness of Breath)]을 측정했다. 귀내온은 5초 간격으로 자동 기록하였고(LT-8A, Gram Corporation, Japan), 의복내 온도 및 습도 역시 가슴과 넓적다리 부위 의복 최내층에서 5초 간격으로 기록했다(TR-72wb, T&D, Japan). 심박수는 가슴 벨트와 손목 시계 형태의 기기를 이용하여 1초 간격으로 기록했다(H10, Polar Electro, Finland). 총발한량은 실험 전과 후의 몸무게를 3회 반복 측정하여 그 차이로 추정했다(F150S, Sartorius, Germany, resolution 1g). 정신 심리적 척도에 대한 응답은 보호복 착용 직후, 안정 종료 시점(작업 시작 직전), 작업 종료 직후에 질문하여 총 3회 수집하였다. 한서감은 9점 척도[-4 매우 춥다, -3 춥다, -2 서늘(시원)하다, -1 약간 서늘(시원)하다, 0 보통이다, 1 약간 따뜻하다, 2 따뜻하다, 3 덥다, 4 매우 덥다], 온열 쾌적감은 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]를 이용했으며 0.5 단위로도 응답할 수 있도록 세분화하였다. RPE와 호흡 부담감은 각각 15등급(6~20점), 11등급 척도를 이용했다[RPE: 6 전혀 부담이 없다, 7 매우 매우 가벼운 수준이다, 9 매우 가벼운 수준이다, 11 가벼운 수준이다; 13 다소 힘들다, 15 힘들다, 17 매우 힘들다, 19 매우 매우 힘들다, 20 참을 수 없을 정도로 힘들다; 호흡 부담감: 0 전혀 부담이 없다, 0.5 매우 매우 가볍다, 1 매우 가볍다, 2 가볍다, 3 적당하다, 4 약간 부담된다, 5 부담된다, 7 매우 부담된다, 9 매우 매우 부담된다, 10 참을 수 없을 정도로 부담된다] (Borg, 1982). 착의 시간, 작업 수행 시간, 탈의 시간은 초시계를 이용하여 기록하였다.

2.6. 데이터 분석

실험 결과는 평균과 표준편차(Mean ± SD) 또는 빈도와 백



Fig. 2. Experimental photos during the practical performance test in the present study.

분율로 제시하였으며, SPSS version 23 (SPSS, Inc., Chicago, IL)을 사용하여 분석했다. 귀내온 및 의복내 온습도는 작업 시작 직전 10분 안정기 동안 수집된 데이터 및 작업 수행 중 수집된 데이터 각각의 평균 및 최솟값, 최댓값을 사용하여 분석했다. Shapiro-Wilk Test를 이용해 정규성을 검정하였다. 정규성을 띄는 변수들에 대해 PPE 조건 간의 차이는 반복측정 분산분석(RM ANOVA)으로 분석한 후 Bonferroni correction 사후검정을 실시했다. 범주형 척도를 이용한 비모수 항목들(또는 비정규성 데이터)에 대하여는 Friedman 검정을 실시한 후, 조건별 차이는 Wilcoxon signed-rank test로 분석했다. 아홉 개 체격 집단으로 유형화하여 모집한 피험자들의 체격별 특성을 분석할 때에는 먼저, BMI 수준에 따라 3개 집단: BMI 수준이 낮은 집단, 중간 집단, 높은 집단으로 분류했다. 그리고 Kruskal-Wallis 검정 후, Mann-Whitney 분석으로 집단 별 차이를 규명하였다. 변수 간 상관관계는 Spearman's rho로 분석했다. 각 분석은 $p < 0.05$ 수준에서 유의성을 검정하였다. 매 조건 및 피험자별 작업 수행에 소요된 시간이 다르므로 시간에 따른 변화 추이는 제시하지 않았다. 심층 면접 결과는 수기로 기록하여 분석했다.

3. 연구 결과

3.1. 작업 시간

네 종류의 PPE를 착용하고 모의 작업을 완료하는데 소요된 시간은 Low (L), Medium (M), High (H), Extremely high

Table 3. Operation time for the four PPE conditions (unit: min, mean \pm SD)

PPE ensemble	DONNING time	COMPLETION time	DOFFING time
Low (L)	2.9 \pm 0.8 ^a	24.9 \pm 3.2 ^a	1.0 \pm 0.5 ^a
Medium (M)	4.7 \pm 0.5 ^b	25.9 \pm 1.9 ^a	1.8 \pm 0.5 ^b
High (H)	5.7 \pm 0.8 ^c	24.7 \pm 1.5 ^a	2.5 \pm 0.7 ^c
Extremely high (E)	8.1 \pm 1.1 ^d	31.9 \pm 2.4 ^b	3.1 \pm 0.5 ^d
<i>p</i> - value	< 0.001	< 0.001	< 0.001

(E) 조건별 각각 24.9 \pm 3.2분, 25.9 \pm 1.2분, 25.7 \pm 1.5분, 31.9 \pm 2.4분으로, 보호 수준이 가장 높은 조건 E에서 다른 세 조건에 비해 작업 시간이 유의하게 길었다($p < 0.001$). 조건 E의 경우 장갑 두 장을 겹쳐 착용함으로써 인한 작업 수행 속도 지연 현상이 관찰되었다. 착의 시간 및 탈의 시간도 조건 L < M < H < E 순서로 오래 걸려($p < 0.001$), 보호 수준이 높은 PPE를 착용한 경우 착탈의에 걸리는 시간이 더 길었다(Table 3). 특히 조건 H와 E의 경우 PAPR 착탈의에 시간이 많이 소요되었다. 작업 시간에 있어 체격 집단에 따른 특별한 경향성은 발견되지 않았다.

3.2. 귀내온

작업 수행 시작 전 안정 시 귀내온은 조건 L, M, H, E 각각 36.3 \pm 0.2°C, 36.3 \pm 0.3°C, 35.9 \pm 0.3°C, 35.8 \pm 0.5°C로 H = E < L = M 순이었다. PAPR 착용으로 머리 부분에 공기 순환이 이루어진 조건 H와 E의 경우 조건 L과 M에 비해 평균 및 최고, 최저 귀내온이 낮았고($p < 0.001$), 최고온과 최저온의 차이 역시 더 컸다($p = 0.002$, Fig. 3A). 모의 작업 수행 중 귀내온 역시 안정 시와 유사한 경향을 보여 H = E < L = M 순으로 높았고, 평균 및 최고, 최저 귀내온에서 유의한 차이가 발견되었다($p < 0.001$, Fig. 3B). 귀내온에 있어 체격 집단에 따른 특별한 경향성은 발견되지 않았다.

3.3. 가슴과 넓적다리 부위 의복내 온도

가슴 부위 의복내 온도의 초기 안정 시 평균은 조건 L, M, H, E 각각 33.3 \pm 1.0°C, 33.4 \pm 1.4°C, 33.6 \pm 1.2°C, 33.8 \pm 1.1°C로 네 조건 간 유의한 차이가 없었다. 최저온, 최고온, 최저온과 최고온의 차이 역시 네 조건 간 유의차가 발견되지 않았다(Fig. 4A). 그러나 작업 수행 시 가슴 부위 의복내 온도는 안정 시와는 달리 조건 L \leq M = H \leq E 순으로 높았다($P < 0.001$). 의복내 온도 평균은 32.5 \pm 1.5°C, 33.4 \pm 1.1°C, 33.6 \pm 1.4°C, 34.4 \pm 1.1°C로 L = M \leq H \leq E 순으로 높아($P < 0.001$, Fig. 4B), 보호 수준이 가장 높은 조건 E 조건에서 보호 수준이 가장 낮은 조건 L 조건에 비해 평균 1.9°C 높은

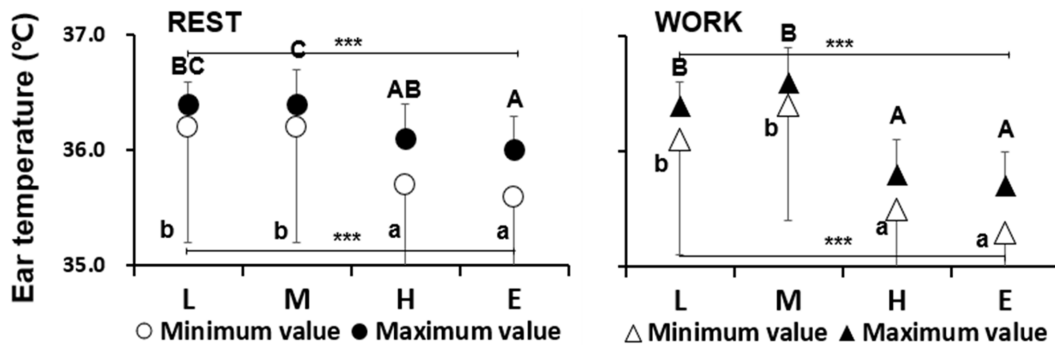


Fig. 3. Minimum and maximum values of ear canal temperature during the initial rest (REST) and the work (WORK) phase. L, M, H, and E represent the four PPE conditions of low, medium, high, and extremely high protective levels, respectively ($*p < 0.05$, $**p < 0.01$, and $***p < 0.001$).

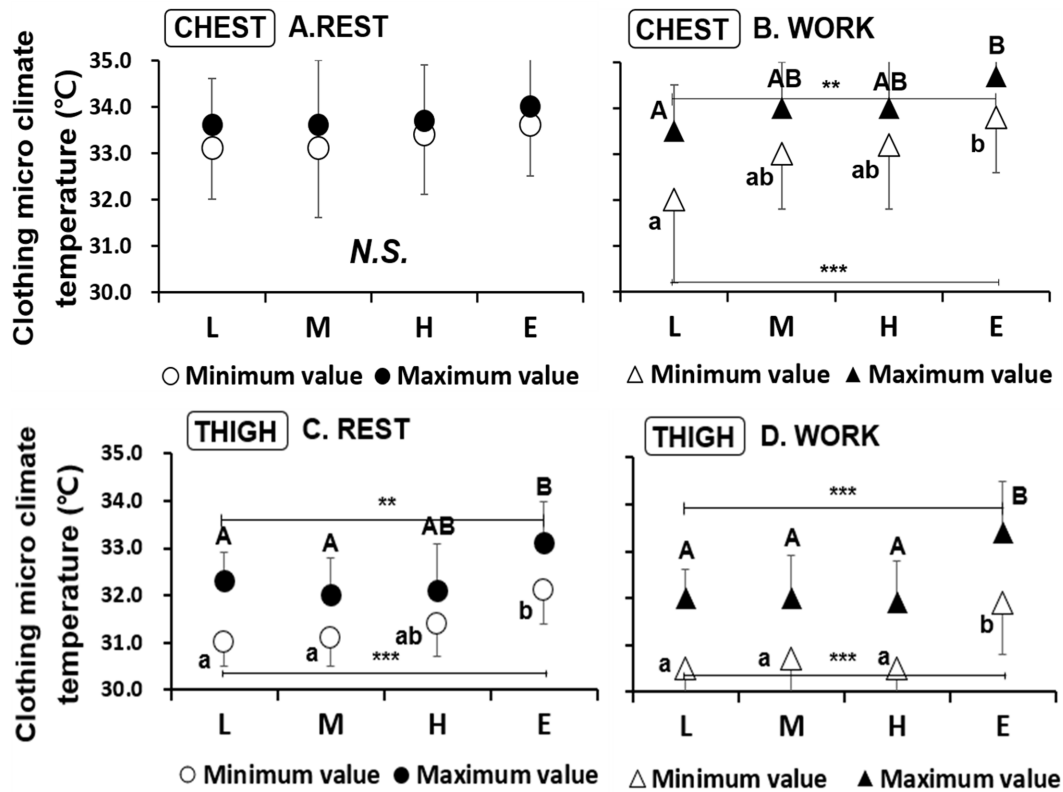


Fig. 4. Minimum and maximum values of clothing microclimate temperature on the chest (A, B) and thigh (C, D) during the initial rest and the work phase. L, M, H, and E represent the four PPE conditions of low, medium, high, and extremely high protective levels, respectively (* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, and *** $p < 0.001$).

가슴 의복내 온도를 보였다. 조건 M과 H 간 뚜렷한 차이는 발견되지 않았다.

넓적다리 부위 의복내 온도는 안정 시 평균, 최저온, 최고온 모두에서 $L=M \leq H \leq E$ 순으로 조건 L과 M보다 조건 E에서 유의하게 높았으나, 조건 L, M, H 간 차이는 뚜렷하지 않았다($p < 0.001$, Fig. 4C). 작업 수행 시 넓적다리 의복내 온도 평균, 최저온, 최고온 모두 조건 $L=M=H < E$ 순으로 높았다($p < 0.001$). 넓적다리의 의복내 온도는 조건 L, M, H, E 각각 $31.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$, $31.2 \pm 0.8^\circ\text{C}$, $31.0 \pm 0.9^\circ\text{C}$, $32.6 \pm 1.0^\circ\text{C}$ 로 조건 E에서 가장 높았고, 조건 L, M, H 간 차이는 발견되지 않았다(Fig. 4D). 가슴 및 넓적다리 부위 의복내 온도에 있어 체격 집단에 따른 특별한 경향성은 발견되지 않았다.

3.4. 가슴과 넓적다리 부위 의복내 습도

가슴 부위 의복내 습도의 초기 안정 시 평균은 조건 L, M, H, E 각각 $71 \pm 18\%$, $74 \pm 18\%$, $77 \pm 17\%$, $81 \pm 16\%$ 로 네 조건 간 유의차 없이 70 ~ 80%의 높은 수준을 유지했다. 최저 및 최고 습도 각각 및 최저 습도와 최고 습도의 차이 역시 조건 간 유의차가 발견되지 않았다(Fig. 5A). 작업 수행 시 가슴 부위 의복내 습도 평균은 조건 $L=M=H < E$ 순으로 각각 $68 \pm 15\%$, $76 \pm 18\%$, $77 \pm 17\%$, $87 \pm 9\%$ 였다($p < 0.001$, Fig.

5B). 넓적다리 부위 의복내 습도는 안정 시 평균, 최저 온도, 최고 온도 모두에서 조건 $L=M=H < E$ 순으로, E 조건에서 평균 76%로 다른 세 조건보다 높은 의복내 습도가 관찰되었다. 조건 L, M, H에 간 차이는 뚜렷하지 않았다($p < 0.001$, Fig. 5C). 작업 수행 시에도 넓적다리 의복내 습도의 최저값, 최고값 모두 $L=M=H < E$ 순으로 높았다($p < 0.001$). 조건 L, M, H, E에서 의복내 습도는 각각 $56 \pm 13\%$, $57 \pm 11\%$, $56 \pm 10\%$, $83 \pm 9\%$ 로 안정 시와 마찬가지로 E 조건에서 가장 높았고 L, M, H 보호복 간 차이는 발견되지 않았다(Fig. 5D). 체격 집단별로 볼 때 BMI가 큰 집단일수록 의복내 습도가 높은 경향을 보였다. 특히 작업 수행 시 가슴 부위 의복내 습도는 BMI가 작은 집단(Thin)보다 큰 집단(Overweight)에서 유의하게 높았다($p = 0.029$, Table 4).

3.5. 심박수 및 발한량

심박수에서 네 가지 PPE 조건 간 유의한 차이가 발견되지 않았고, 체형 집단에 따른 특별한 경향성도 발견되지 않았다. 심박수의 안정 시 평균은 76~77 bpm, 작업 시 평균은 93~94 bpm이었다. 총발한량은 조건 $L=M=H < E$ 순으로 유의한 차이를 보여($p = 0.002$), 각각 108 ± 71 , 109 ± 63 , 128 ± 50 , $166 \pm 72 \text{ g} \cdot \text{trial}^{-1}$ 이었다. 체격 집단별로는 BMI가 작은 집단보

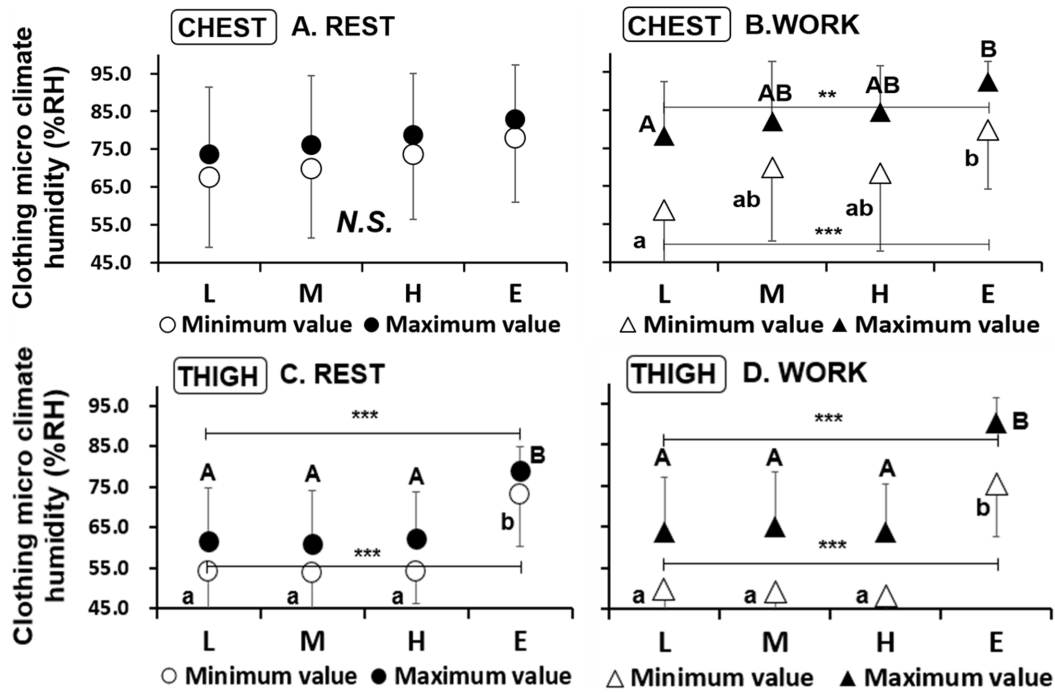


Fig. 5. Minimum and maximum values of clothing microclimate humidity on the chest (A, B) and thigh (C, D) during the initial rest and the work phase. L, M, H, and E represent the four PPE conditions of low, medium, high, and extremely high protective levels, respectively (* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, and *** $p < 0.001$).

Table 4. Clothing microclimate humidity and total sweat rate for the three BMI groups

Body part	Phase	BMI Group			p - value
		Thin (n = 6)	Normal (n = 5)	Overweight (n = 5)	
Chest	Rest	66 ± 16	82 ± 8	82 ± 11	0.098
	Work	67 ± 14 ^a	82 ± 6 ^{ab}	84 ± 9 ^b	0.029
Thigh	Rest	59 ± 8	64 ± 11	67 ± 12	0.423
	Work	58 ± 5	65 ± 8	69 ± 11	0.102
Total sweat rate (g · trial ⁻¹)		84.9 ± 39.3 ^a	137.4 ± 63.3 ^b	169.9 ± 69.7 ^b	< 0.001
Total Sweat rate per hour and BSA (g · h ⁻¹ · m ⁻²)		47.0 ± 20.4 ^a	67.4 ± 29.8 ^b	80.4 ± 24.9 ^b	< 0.001

다 중간이거나 큰 집단이 총발한량이 유의하게 높았다($p < 0.001$, Table 4). 이러한 체격 집단별 차이는 총 발한량뿐 아니라 단위 시간 및 단위 체표면적당 발한량에서도 유사하게 나타났다 ($p < 0.001$). 그리고 단위 발한량과 체표면적과의 Spearman's rho = 0.47로 정적 상관관계를 가지는 것으로 나타났다 ($p < 0.01$).

3.6. 주관적 감각

전신 한서감과 습윤감의 경우 네 가지 PPE 조건 간 유의한 차이가 있어, 작업 완료 시점에서 H=L < M=E 순으로 더 덥고 더 습하다고 응답했다(All $ps < 0.05$, Fig. 6A, 6B). 비교적 높은 보호 수준인 조건 H의 경우 가장 낮은 보호 수준인 조건 L과 유사한 수준으로 응답했다. 반면 가장 높은 보호 수준인 조건 E의 경우 조건 M과 유사한 수준으로 덥고(2.8 ± 0.6) 습하다고(2.0 ± 0.5) 응답했다. 전신 한서감과 습윤감에 있어 전술

한 PPE 조건 별 차이는 작업 시작 전 안정 시부터 유사한 추세를 보였다. 온열 쾌적감은 L, M, H, E 조건별 각각 -0.4 ± 0.9, -1.3 ± 0.9, -0.7 ± 1.2, -1.8 ± 0.6로, E < M < H = L 순으로 더 쾌적하다고 응답하여(All $ps < 0.05$, Fig. 6C)로 한서감, 습윤감에서와 마찬가지로 조건 H 착용 시 조건 L과 유사한 수준의 온열 쾌적감을 나타냈다. 인지적 힘들기(RPE)에서도 한서감, 습윤감, 온열 쾌적감에서와 유사한 경향이 관찰되었다(All $ps < 0.05$, Fig. 6D). 한편, 호흡 부담감은 L, M, H, E 조건별 각각 2.6 ± 1.6, 4.6 ± 1.8, 1.8 ± 1.5, 2.6 ± 1.5로 H < E = L < M 순으로 호흡에 부담을 더 많이 느끼는 것으로 응답했다(All $ps < 0.05$, Fig. 6E). 보호 수준은 높지만 PAPR를 착용하는 조건 H와 E의 경우 호흡 부담감이 비교적 적은 편으로 나타났다.

전신 한서감과 습윤감의 경우, 체격 집단별 유의한 차이가 있어 BMI가 작거나 보통인 집단보다 체격이 큰 집단에서 더

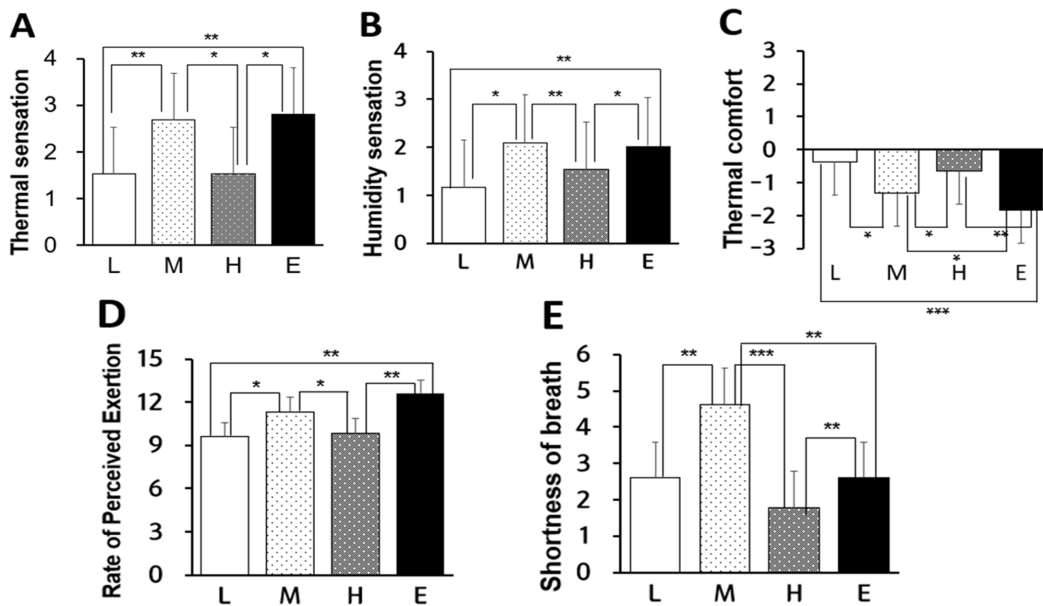


Fig. 6. Subjective perceptions at the end of tasks for the four PPE conditions. L, M, H, and E represent the four PPE conditions of low, medium, high, and extremely high protective levels, respectively (* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, and *** $p < 0.001$).

덥고 더 습하게 느꼈다($p < 0.05$). 온열 쾌적감 및 인지적 힘들기(RPE), 호흡 부담감 항목에서는 체격 집단별 차이가 발견되지 않았다.

3.7. 심층 인터뷰

모의 작업 수행 직후 피험자들이 진술한 불편 사항들은 크게 심리적, 온열적, 동작 관련 불편감 등 세 가지로 분류되었다. 첫째, 심리적 불편감의 경우 낮은 보호 수준 조건(L, M) 착용했을 때 피험자 중 각각 75%와 56%가 손목 등 노출되는 부위에 대해 실제 의료 현장에서의 감염 가능성을 우려하였다. 반면, 조건 H와 E에서 감염 가능성을 염려하는 피험자는 없었다. 비닐 가운을 착용하는 조건 L에서는 가운이 길고 필러거려 실제 의료 현장일 경우 오염물에 접촉될까봐 걱정된다는 의견이 있었다. 또다른 심리적 불편감으로 소음과 관련된 진술이 있었다. 조건 M, H, E에서는 피험자 중 약 50% 정도가 슈커버 또는 커버를 소재가 서로 부딪히며 발생하는 소음이 신경에 거슬러 불쾌하다고 응답했다. PAPR을 착용하는 조건 H와 E에서는 피험자 16인 전원이 PAPR의 소음 때문에 의사소통이 어렵다고 진술했고, 그 소음으로 어지럼증 또는 구토감을 느낀다는 피험자도 있었다. 조건 L에서 착용한 비닐 가운의 허리끈이 지나치게 길어서, 또는 슈커버가 너무 흘러내려 걸려 넘어질까봐 불안했다거나, 페이스 실드의 날카로운 모서리에 다칠까봐 불안했다는 심리적 불편감을 진술한 응답자도 일부 있었다. 이같이 잘 맞지 않는 PPE로 인한 노출 및 감염, 걸려 넘어짐 등에 대한 불안감을 호소한 응답자 중 다수는 키가 작은 집단(< 160 cm)에 속해 있었다

둘째, 덥고 습하여 불쾌하다는 온열적 불편감에 대한 진술도 다수 있었는데, 조건 L에서 피험자들은 반팔 스크럽복 상의 위에 덧입은 긴소매 비닐 가운 때문에 팔에 땀이 쉽게 차고, 비닐이 맨살에 들러붙어 불편하고 불쾌하다고 호소했다. 조건 E 경우 피험자 중 88%가 커버롤이 너무 덥고 습하거나 무겁고 뻣뻣해 불편하다고 진술했다. 조건 M에서도 덥고 습해 불쾌하다는 응답이 종종 있었으나, 조건 H 착용 시에는 커버를 관련 온열적 불편감을 진술한 피험자는 없었다. 장갑의 온열적 불편감 관련해서는 조건 L, M, H에서 각각 피험자의 94%, 56%, 62%가 손에 땀이 차서 불편하다고 응답했고, 장갑을 두 장 겹쳐 착용한 조건 E에서 피험자 전원이 손에 땀이 차서 매우 불쾌했다고 호소했다.

셋째, 동작 관련 불편감을 아이템별로 살펴보면 슈커버를 착용하는 조건 M, H, E에서 피험자의 88%, 88%, 100%가 슈커버가 흘러 내리거나 너무 커서 동작을 방해한다는 불편감을 호소했고 슈커버의 매듭을 여미거나 풀기 어렵다는 의견도 다수 있었다. 장갑의 경우 손에 잘 맞지 않아(장갑이 크거나 손가락 부분이 길어서) 타이핑 작업, 수액 레버 조작, PCR 검사 면봉 집기 등 기민성을 요하는 작업을 방해한다는 의견이 조건 L, M, H, E에서 피험자 중 각각 94%, 56%, 56%, 100% 있었다. 한편, 장갑을 두 장 겹쳐 착용한 조건 E의 경우 대부분의 피험자가 CPR, 양동이 들기, 환자 옮기기 등을 포함하는 거의 모든 작업에서 장갑 때문에 불편하다는 의견을 진술했다. 이러한 이중 장갑으로 인한 불편감의 이유 역시 장갑이 손에 잘 맞지 않아서라는 의견이 가장 많았고, 걸 장갑이 커버를 등 다른 장비와 조화를 이루지 못해 잘 끼워지지 않는다는 의견도

다수 있었다. 페이스 실드와 KF94 마스크를 착용하는 조건 M에서는 피험자의 76%가 페이스 실드로 인해 시야가 방해된다고 응답했고, 25%는 마스크 착용으로 인한 답답함을 호소하기도 했다. 앞치마를 착용하는 조건 E의 경우 피험자의 50%가 앞치마가 길어서 동작 시 걸리적거린다고 진술했다. 한편, 조건 H와 E의 경우 피험자 전원이 PAPR이 ‘무거워서 허리가 아프거나 작업이 더 힘들’ 또는 ‘딱딱한 고정 벨트 때문에 갈비뼈 등에 통증 있음’, ‘후드의 부피 때문에 작업이 불편함’ 등을 호소했다. PAPR 착용으로 호흡이 편해졌다는 진술은 조건 H와 E에서 각각 20%, 6% 나타났다. 커버롤을 착용하는 조건 M, H, E 모두에서 피험자의 절반 정도가 커버롤의 지퍼를 올릴 때 옷감이나 장갑이 끼어 불편하다고 진술했다. 커버롤 소매 밴드 및 소매에 달린 엄지 손가락을 거는 루프가 너무 크다는 의견도 일부 나타났다. 전반적으로, 키가 작은 피험자 집단(< 160 cm) 중 76%가 보호복이 커서 동작이 불편하다는 의견을 주었다. 가슴이나 엉덩이, 무릎 부위에 보호복이 부분적으로 끼어서 불편하다는 응답은 모든 체형에서 빈번하게 나타났는데, 특히 과체중 집단(BMI > 22)의 94%가 이러한 응답을 하였다. 보호복이 작아서 불편하다는 응답은 거의 없었다.

4. 논 의

4.1 보호 성능 수준과 서열부담

개인보호복 착용 시 의복내 온습도와 총발한량은 보호 수준이 가장 높은 조건 E 착용 시 다른 세 조건 대비 더 덥고 습하며 발한량이 많은 경향을 보였으나 조건 L, M, H 간에는 유의차 없이 조건 E보다 낮은 동일 집단으로 묶였다(Fig. 4와 Fig. 5). 일반적으로 보호복의 보호 성능이 높을수록 착용자의 열적 불쾌감이 커질 것이라 여겨지나, 본 실험 결과에 따르면 보호 수준 증가에 정확히 비례하여 불쾌감이 증가하지는 않는다. 본 연구에서 가장 낮은 보호 수준인 조건 L을 구성하는 품목 수는 공통 착용 기본 의복을 제외하면 3개로, 다른 조건이 5~7 품목으로 구성되는 것에 비해 간소하고, 총무게 또한 606 g으로 조건 H와 E의 약 20% 정도밖에 되지 않는다. 그럼에도 작업 중 의복내 온습도와 총발한량은 조건 L, M, H 간 유의한 차이가 없었다. 일반적으로, PPE의 표준화된 성능 정보는 대부분 보호 성능에 관한 것으로, 사용자들은 이를 참고하여 적정 보호복을 선택한다(Kim & Lee, 2023). 과보호로 인해 서열부담이 증가하지 않도록 최소 성능 기준에 부합하는 PPE를 선택하여 작업을 효율적으로 수행하게 하는 것이 중요하다(Bongers et al., 2022; Sharma et al., 2022). 그러나 본 연구 결과 보호 수준이 낮은 PPE 착용 시 서열부담이 반드시 제일 적은 것은 아니었다. 네 가지 보호 수준 중 제일 낮은 보호 수준(조건 L)과 제일 높은 보호 수준(조건 E) 간 차이는 유의했으나, 중간 수준의 보호복들 간 차이는 명확하지 않았다. 따라서, 적절한 보호 성능을 가지면서 쾌적성 저하를 최소화할 수 있는 PPE 선택을 위해서는 착용 쾌적 성능 지표를 표준화

하여 제공할 필요가 있다.

4.2 서열부담과 머리 부위 냉각

한서감 및 습윤감, 온열 쾌적감과 인지적 힘들기 등 정신심리적 평가 항목 모두, 조건 M과 E에 비해 조건 H와 L에서 덜 덥고 덜 습하며, 더 쾌적하고 덜 힘들다고 분류되어 의복내 온습도나 발한량 결과와 차이가 있었다(Fig. 6). 조건 H에서 정신심리적 부담이 상대적으로 적다는 결과는 상대적으로 낮은 귀내온과 관련이 있을 것으로 추측된다. 한편, 본 실험 환경 온습도가 약 24°C, 60%RH로 쾌적했음에도 모든 조건에서 전반적으로 의복내 온습도가 높았고, 피험자들은 대체로 덥고, 습하며, 온열적으로 불쾌하다고 응답하였다. 그러나 PAPR을 착용한 경우 후드 내 지속적으로 외부의 공기가 공급되므로 PAPR을 착용하지 않은 다른 두 조건에 비해 귀내온이 유의하게 낮게 측정되었고(Fig. 3), 주관적으로도 덜 덥고 덜 습하게 느꼈던 것으로 보인다. 즉, 덥고 습하지 않은 중성 환경 조건일 경우, 의료진들이 착용하는 PAPR은 머리 부위 공기 순환을 통한 열손실을 증가시켜 심리·생리적 서열부담 경감에 효과적일 수 있다. 인간의 머리가 총 체표면적에서 차지하는 비율은 7.5% 정도에 불과하지만(Lee & Choi, 2009), 머리에서 이루어지는 방열은 다양한 환경 조건에서 전신 방열량의 40%~50%를 차지할 정도로 매우 크다(Froese & Burton, 1957; Rasch et al., 1991). 따라서 더운 환경에서 머리 냉각을 통해 서열부담을 효과적으로 낮출 수 있다(Al-Rjoub et al., 2021). 실제 서열 스트레스 하에서 머리 및 목 부위 냉각은 해당 부위의 피부 온도를 크게 낮추고 국부 및 전신의 온열 감각을 크게 향상시킬 뿐 아니라 심부온 및 심박수를 낮추어 작업 부담 경감에 효과적임이 발표되어 왔다(Cao et al., 2021; Simmons et al., 2008; Stevens et al., 2017). 특히 부피 대비 체표면적이 큰 얼굴과 머리, 목의 냉각 장치들은 대부분 체중 부하가 적은 편이기 때문에 장비 무게로 인한 작업 효율 저하 방지 및 작업 지속 시간 증가에 효과적이다(Cao et al., 2021). 반면, 덥고 습한 환경에서 작업하는 동안 PAPR을 착용하게 되면 외부의 덥고 습한 공기가 내부로 들어와 머리 주위를 순환하기 때문에 오히려 서열부담을 가중시킬 수도 있으므로 PAPR 착용 시 주위 환경 조건을 반드시 고려해야 한다. 또한 몇몇 선행연구들(Kwon et al., 2022; Licina & Silvers, 2021)에서 보고한 바와 같이, 본 연구에 참여한 피험자들도 PAPR의 소음으로 인한 의사소통 방해, 중량 및 부피로 인한 작업 부담 증가, 압박으로 인한 통증 등의 문제를 보고했으므로 여름철 전신 보호복을 착용한 의료진들의 머리 부위 냉각을 위한 다양한 선택지들을 고민해 놓을 필요가 있다. 한편, 조건 E의 경우, 조건 H와 동일하게 PAPR을 착용했음에도 불투과성 커버롤 및 앞치마와 이중 장갑으로 인한 동작 제한 등으로 인해 정신심리적 부담이 가장 큰 조건으로 분류되었다. 즉, PAPR 착용으로 기대할 수 있는 정신심리적 서열부담 감소 효과의 크기가 상대적으로 제한적임을 알 수 있다.

한편 유사한 프로토콜로 20대 남성이 참여했던 선행 연구에 따르면 본 연구의 조건 H와 유사한 PPE 조건(Tyvek 800J 커버롤과 PAPR 착용)에서의 한서감, 습윤감, 온열 쾌적감 등 정신심리적 서열부담이 PAPR를 착용하지 않은 조건에 비해 오히려 더 과증했는데(Kwon et al., 2022), 이는 여성을 피험자로 실시한 본 실험과 상반된 결과이다. PAPR 착용 효과에서의 성차는 매우 흥미로우며, 추후 동일한 실험 환경에 노출된 남녀 피험자를 대상으로 머리 부위의 발한량 및 혈류량 비교 분석을 통해 이러한 성차의 원인을 추가 분석할 필요가 있다. 그럼에도 본 연구 결과를 바탕으로 볼 때, 여성 의료진이 열중성 환경에 노출되어 장시간 작업을 수행하는 경우 PAPR 착용이 주관적 서열부담 경감에 효과적일 것이라 사료된다.

4.3 개인보호구 착용 시 심리적 불편감

모의 작업 종료 직후 이루어진 심층 인터뷰 결과 감염병 의료진 모의 작업을 수행한 피험자들 다수가 신체 노출 및 접촉에 대해 민감하게 반응, 심리적 불편감을 느끼는 것을 확인할 수 있었다. 피험자들은 조건 L과 M이 감염 위험이 낮은 상황에서 착용하는 PPE라는 설명을 듣고 인지하였음에도 불구하고, 실제 의료 상황에서 착용할 경우 감염 가능성에 대한 불안감을 비쳤다. 실제 충분한 보호 수준을 갖는 PPE를 제공받는 지에 대한 여부는 의료진이 감염병 유행 시기에 출근할 지를 결정할 때 핵심적인 요인으로 작용한다(Damery et al., 2009). 즉, PPE는 의료진에게 단순히 물리적 보호를 넘어서 심리적 보호의 기능까지 제공하는 것으로 생각할 수 있다(Janson et al., 2022). 일반적으로 감염병 현상은 위험 수준을 기준으로 영역을 나누고, 각 영역별로 업무를 수행하는 의료진들은 해당 영역 및 업무에 적합한 보호복을 착용하도록 권고된다(Kung et al., 2021). 그런데 위험도가 낮은 영역에서 지나치게 높은 보호 수준의 PPE를 착용하는 것은 과보호와 불필요한 서열부담을 유발할 수 있으므로 권장하기 어렵다(Kim & Lee, 2023). 따라서 착용자에게 각 PPE의 성능 및 한계, 착용에 수반되는 문제 등에 대한 정확한 정보 및 교육을 제공할 필요가 있다. 제공 정보에는 PPE의 보호 및 쾌적 성능이 포함되어야 하는데, 진술하였듯이 현행 제공되는 PPE 정보 중 쾌적 성능에 관한 정보는 매우 드물다(Kim & Lee, 2023). 실제 현장에서 의료진의 작업을 모사한 프로토콜을 통해 PPE의 쾌적 성능을 평가한 본 연구는 표준화된 쾌적 성능 평가법 중 하나로 활용될 수 있을 것이다. 한편, 손목 여미미 혈귀위 손목이 노출되거나 비닐 가운이 지나치게 길어 환자 및 침상 등에 닿는 등 디자인 및 사이즈 문제로 발생한 의도치 않은 노출 및 접촉은 개선될 필요가 있다.

또 다른 심리적 불편감으로 보호복 착용으로 유발된 소음이다. PAPR 착용 시 피험자 전원이 PAPR의 소음 때문에 의사소통이 어렵다고 호소했고, 일부는 소음 때문에 어지럽거나 구토감을 느낀다고 진술했다. 실제 PAPR에서 발생하는 소음의 수준은 85 dBA 미만으로 의료진의 청력 손실에 영향을 일으

킬 정도는 아니지만, 명백하게 청각을 약화시켜 의사소통을 방해한다(Kempfle et al., 2021). PAPR 착용은 높은 수준의 호흡기 보호와 심리적 안정감을 동시에 제공하지만 머리와 허리 부위 중량 부하 및 동작 방해 등의 단점 또한 가지고 있다(Licina & Silvers, 2021). 따라서 올바른 정보 제공 및 교육을 통해 해당 수준의 호흡기 보호가 필수적인 상황에서만 PAPR 착용을 권장해야 할 것이다.

4.4 여성 피험자의 체격과 작업 부담

잘 맞지 않는 PPE로 인한 노출 및 감염, 걸려 넘어짐 등에 대한 심리적 불편감을 호소한 응답자 중 다수가 키가 작은 집단(160 cm 미만)에 속해 있었다. PPE가 커서 동작이 불편하다는 의견 역시 키가 작은 피험자 중 76%나 있었지만 보호복의 사이즈가 작아서 불편하다는 의견은 거의 없었다. 이는, 역사적으로 PPE는 유럽과 미국 남성의 평균 체격을 중심으로 설계되었기 때문에 대부분의 여성에게 잘 맞지 않는다는 기존 연구 결과들과 맥락을 같이 한다(Janson et al., 2022; TUC, 2017). 여성 의료진들에게 보급된 잘 맞지 않는 PPE 착용은 교차 감염이라는 추가 노출 위험을 높이고, 동작을 방해해 업무 효율을 저하시킬 수 있다. 나이가 감염 위험에 대한 심리적 불안까지 증폭시킬 수 있다는 점에서(Ong et al., 2020) 반드시 개선이 필요하다. 특히 우리나라를 포함한 다수의 국가에서 감염 위험 중위값이 높은 고위험 분야 종사자 중 여성의 비율이 압도적으로 높다는 점(Baker et al., 2020; Bongers et al., 2022; Janson et al., 2022; Lee & Kim, 2020)을 고려하면, 감염병 의료진용 PPE 제품에 여성 전용 사이즈 체계에 대한 연구가 필수적이다. 서구권 남성 체격을 기준으로 제작된 PPE 착용 시 드러나는 사이즈 문제는 전반적으로 크다는 것이지만 부분적인 맞음새 역시 문제가 될 수 있다. 실제 본 연구의 심층 인터뷰 결과에서도 가슴이나 엉덩이, 무릎 등에 보호복이 부분적으로 끼어서 불편하다는 응답이 모든 체형에서 빈번하게 나타났으며, 장갑이나 슈커버 등은 오히려 손과 발에 잘 맞지 않아(크거나 길어) 동작을 방해한다는 불만은 피험자 16인 모두로부터 얻어졌다.

5. 결 론

본 연구에서는 마르고 작은 체형부터 뚱뚱하고 큰 체형을 골고루 포함하는 여성 피험자 16인을 대상으로 네 가지 보호 수준의 감염병 대응 의료진용 PPE를 착용하고 모의 작업 동작을 수행하는 동안 동작성 및 쾌적성을 평가하였다. 본 연구의 첫 번째 가설인 ‘보호복의 보호 수준이 증가할수록 불쾌 수준도 증가할 것이다’는 부분적으로만 수용되었다. 즉, 보호복의 보호 수준과 착용자가 느끼는 불쾌 수준이 정확하게 비례하지는 않았기 때문에 PPE 개발 보급 시 착용 쾌적성 평가법 적용이 필요하다. 특히, 높은 보호 수준에서 함께 착용되는 PAPR과 같은 호흡기 보호구는 착용이 주로 이루어지는 환경 조건 및

개인 선호 여부를 고려하여 보급될 필요가 있다. 두 번째 가설인 ‘착용자의 체질량지수(체격)가 클수록 동작에서의 불편감이 증가할 것이다’는 기각되었다. 오히려 여성 피험자들 중 작은 체형에 속하는 집단에서 너무 크거나 상대적으로 긴 보호복으로 인한 동작 불편감이 수집되었다. 한국인 성인 여성 의료진에게 적합한 PPE 사이즈 체계 구축, 특히 작은 체형의 여성 의료진을 위한 PPE 사이즈 체계 개발이 필요하며, 나아가 정교한 동작이 방해되지 않도록 장갑이나 슈커버, PAPR의 후드 디자인 개선 등이 함께 요구된다.

감사의 글

본 연구에서 진행한 실험에 피험자로 참여해 주신 분들께 감사의 인사를 전합니다. 이 논문은 산업통상자원부 국가기술표준원 한국산업기술평가관리원 국가표준기술력향상사업(과제번호 20017330) 및 한국연구재단 과학기술정보통신부의 기초연구사업(2022R1A4A5034046)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Al-Rjoub, M., Kazmierczak, M. J., Bhattacharya, A., Rakkimuthu, S., Ramadurai, S., Stuckey, J. P., & Banerjee, R. K. (2021). Better thermoregulation of brain temperature using phase change material-mediated head cooling system. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *173*, 121204. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121204
- Baker, M. G., Peckham, T. K., & Seixas, N. S. (2020). Estimating the burden of United States workers exposed to infection or disease: a key factor in containing risk of COVID-19 infection. *PLOS ONE*, *15*(4), e0232452. doi:10.1371/journal.pone.0232452
- Bongers, C. C., de Korte, J. Q., Zwartkruis, M., Levels, K., Kingma, B. R., & Eijssvogels, T. M. (2022). Heat Strain and Use of Heat Mitigation Strategies among COVID-19 Healthcare Workers Wearing Personal Protective Equipment—A Retrospective Study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *19*(3), 1905. doi:10.3390/ijerph19031905
- Borg, G. A. (1982). Psychophysical bases of perceived exertion. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, *14*(5), 377-381. doi:10.1249/00005768-198205000-00012
- Cao, Y., Lei, T. H., Wang, F., & Yang, B. (2021). Head, facial and neck cooling as per-cooling modalities to improve exercise performance in the heat - A narrative review and practical applications. *MedRxiv*, 2021-05. doi:10.1101/2021.05.31.21258125
- Coon, E. A., & Low, P. A. (2023). *Regulation of sweating*. In *Primer on the Autonomic Nervous System* (pp. 253-256). Academic Press. doi:10.1016/B978-0-323-85492-4.00079-X
- Cramer, M. N., & Jay, O. (2016). Biophysical aspects of human thermoregulation during heat stress. *Autonomic Neuroscience*, *196*, 3-13. doi:10.1016/j.autneu.2016.03.001
- Damery, S., Wilson, S., Draper, H., Gratus, C., Greenfield, S., Ives, J., ... & Sorell, T. (2009). Will the NHS continue to function in an influenza pandemic? A survey of healthcare workers in the West Midlands, UK. *BMC Public Health*, *9*(1), 1-13. doi:10.1186/1471-2458-9-142
- Davey, S. L., Lee, B. J., Robbins, T., Randeve, H., & Thake, C. D. (2021). Heat stress and PPE during COVID-19 - Impact on healthcare workers' performance, safety and well-being in NHS settings. *Journal of Hospital Infection*, *108*, 185-188. doi:10.1016/j.jhin.2020.11.027
- Fox, R. H., Löfstedt, B. E., Woodward, P. M., Eriksson, E., & Werkstrom, B. (1969). Comparison of thermoregulatory function in men and women. *Journal of Applied Physiology*, *26*(4), 444-453. doi:10.1152/jappl.1969.26.4.444
- Froese, G., & Burton, A. C. (1957). Heat losses from the human head. *Journal of Applied Physiology*, *10*(2), 235-241. doi:10.1152/jappl.1957.10.2.235
- Gagnon, D., & Kenny, G. P. (2011). Sex modulates whole-body sudomotor thermosensitivity during exercise. *The Journal of Physiology*, *589*(24), 6205-6217. doi:10.1113/jphysiol.2011.219220
- George, J., Verma, R., & Shafqat, N. (2022). Physiological hazard assessment while welding personal protective equipment (PPE) among health care workers. *Cureus*, *14*(3), doi:10.7759/cureus.23510
- Hardy, J. D., & Du Bois, E. F. (1940). Differences between men and women in their response to heat and cold. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *26*(6), 389-398. doi:10.1073/pnas.26.6.389
- Havenith, G., Coenen, J. M., Kistemaker, L., & Kenney, W. L. (1998). Relevance of individual characteristics for human heat stress response is dependent on exercise intensity and climate type. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, *77*, 231-241. doi:10.1007/s004210050327
- Heinicke, K., Wolfarth, B., Winchenbach, P., Biermann, B., Schmid, A., Huber, G., ... & Schmidt, W. (2001). Blood volume and hemoglobin mass in elite athletes of different disciplines. *International Journal of Sports Medicine*, *22*(7), 504-512. doi:10.1055/s-2001-17613
- Horstman, D. H., & Christensen, E. (1982). Acclimatization to dry heat - Active men vs. active women. *Journal of Applied Physiology*, *52*(4), 825-831. doi:10.1152/jappl.1982.52.4.825
- Hsiao, H., Whitestone, J., Kau, T. Y., Whisler, R., Routley, J. G., & Wilbur, M. (2014). Sizing firefighters - Method and implications. *Human Factors*, *56*(5), 873-910. doi:10.1177/0018720813516359
- Inoue, Y., Tanaka, Y., Omori, K., Kuwahara, T., Ogura, Y., & Ueda, H. (2005). Sex-and menstrual cycle-related differences in sweating and cutaneous blood flow in response to passive heat exposure. *European Journal of Applied Physiology*, *94*, 323-332. doi:10.1007/s00421-004-1303-2
- Janson, D. J., Clift, B. C., & Dhokia, V. (2022). PPE fit of healthcare workers during the COVID-19 pandemic. *Applied Ergonomics*, *99*, 103610. doi:10.1016/j.apergo.2021.103610
- Keatisuwan, W., Ohnaka, T., & Tochihara, Y. (1996). Physiological responses of men and women during exercise in hot environments with equivalent WBGT. *Applied Human Science*, *15*(6), 249-258. doi:10.2114/jpa.15.249
- Kempfle, J. S., Panda, A., Hottin, M., Vinik, K., Kozin, E. D., Ito, C. J., & Remenschneider, A. K. (2021). Effect of powered air-purifying respirators on speech recognition among health care workers. *Otolaryngology-Head and Neck Surgery*, *164*(1), 87-90. doi:10.1177/0194599820945685

- Kenney, W. L. (1985). A review of comparative responses of men and women to heat stress. *Environmental Research*, 37(1), 1-11. doi:10.1016/0013-9351(85)90044-1
- Kim, D. H., & Lee, J. Y. (2023). Heat strain while wearing pesticide protective clothing in hot environments: Effects of textile physical properties and ambient humidity. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 93, 103388. doi:10.1016/j.ergon.2022.103388
- Korean Agency for Technology and Standards. (2010). The sixth human body measurement report. *Size Korea*. Retrieved August 2, 2023, from <http://sizekorea.kr/page/report/2>
- Korean Sports Promotion Foundation. (2018). National fitness 100 report. Retrived July 28, 2023, from https://www.bigdata-culture.kr/bigdata/user/data_market/detail.do?id=b3924850-aa65-11ec-8ee4-95f65f846b27
- Kung, C. T., Wu, K. H., Wang, C. C., Lin, M. C., Lee, C. H., & Lien, M. H. (2021). Effective strategies to prevent in-hospital infection in the emergency department during the novel coronavirus disease 2019 pandemic. *Journal of Microbiology, Immunology, and Infection*, 54(1), 120. doi:10.1016/j.jmii.2020.05.006
- Kwon, J. Y., Cho, Y. S., Lee, B. H., Kim, M. S., Jun, Y. M., & Lee, J. Y. (2022). Validity of a simulated practical performance test to evaluate the mobility and physiological burden of COVID-19 healthcare workers wearing personal protective equipment. *The Korean Fashion and Textile Research Journal*, 25(4), 655-665. doi:10.5805/SFTI.2022.24.5.655
- Lamarche, D. T., Notley, S. R., Louie, J. C., Poirier, M. P., & Kenny, G. P. (2018). Fitness-related differences in the rate of whole-body evaporative heat loss in exercising men are heat-load dependent. *Experimental physiology*, 103(1), 101-110. doi:10.1113/EP086637
- Lee, D. S., Lim, G. Y., Lee, H. L., Chun, Y. M. & Lee, J. Y. (2021). Thermo-psychological Responses while Wearing Personal Protective Equipment for COVID-19 Healthcare Workers: Effects of Air Temperature and Protective Level. *Journal of The Korean Society of Living Environmental System*, 28(6), 561-575. doi:10.21086/ksles.2021.12.28.6.561
- Lee, J., & Kim, M. (2020). Estimation of the number of working population at high-risk of COVID-19 infection in Korea. *Epidemiology and Health*, 42, e2020051. doi:10.4178/epih.e2020051
- Licina, A., & Silvers, A. (2021). Use of powered air-purifying respirator (PAPR) as part of protective equipment against SARS-CoV-2-a narrative review and critical appraisal of evidence. *American Journal of Infection Control*, 49(4), 492-499. doi:10.1016/j.ajic.2020.11.009
- Liu, Q., Luo, D., Haase, J. E., Guo, Q., Wang, X. Q., Liu, S., ... & Yang, B. X. (2020). The experiences of health-care providers during the COVID-19 crisis in China - A qualitative study. *The Lancet Global Health*, 8(6), e790-e798. doi:10.1016/S2214-109X(20)30204-7
- Ong, J. J., Bharatendu, C., Goh, Y., Tang, J. Z., Sooi, K. W., Tan, Y. L., ... & Sharma, V. K. (2020). Headaches associated with personal protective equipment - A cross-sectional study among frontline healthcare workers during COVID-19. *Headache: The Journal of Head and Face Pain*, 60(5), 864-877. doi:10.1111/head.13811
- Rasch, W., Samson, P., Cote, J., & Cabanac, M. (1991). Heat loss from the human head during exercise. *Journal of Applied Physiology*, 71(2), 590-595. doi:10.1152/jappl.1991.71.2.590
- Sawada, S. I., Kuklane, K., Wakatsuki, K., & Morikawa, H. (2017). New development of research on personal protective equipment (PPE) for occupational safety and health. *Industrial Health*, 55(6), 471-472. doi:10.2486/indhealth.55-471
- Shapiro, Y., Pandolf, K. B., Avellini, B. A., Pimental, N. A., & Goldman, R. F. (1980). Physiological responses of men and women to humid and dry heat. *Journal of Applied Physiology*, 49(1), 1-8. doi:10.1152/jappl.1980.49.1.1
- Sharma, M., Sharma, D., Sharma, A. K., Mohanty, A., Khapre, M., & Kalyani, C. V. (2022). Barriers faced by health-care workers in use of personal protective equipment during COVID pandemic at tertiary care hospital Uttarakhand, India: A qualitative study. *Journal of Education and Health Promotion*, 11, 74. doi:10.4103/jehp.jehp_406_21
- Simmons, S. E., Saxby, B. K., McGlone, F. P., & Jones, D. A. (2008). The effect of passive heating and head cooling on perception, cardiovascular function and cognitive performance in the heat. *European Journal of Applied Physiology*, 104, 271-280. doi:10.1007/s00421-008-0677-y
- 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, 829-841. doi:10.1007/s40279-016-0625-7
- 'Personal protective equipment and women.' (2017, December). *Trades Union Congress*. Retrieved November 20, 2023, from <https://www.tuc.org.uk/sites/default/files/PPEandwomensguide.pdf>

(Received January 15, 2024; 1st Revised January 21, 2024;
Accepted January 25, 2024)