

중앙119구조본부 소방대원용 화학 보호복과 방열복의 동작적합성 평가 및 디자인 개선

Syifa Salsabila^{1,2)} · 김도희³⁾ · 이주영^{1,3,4)†}

¹⁾서울대학교 의류학과

²⁾Institut Teknologi Bandung, Indonesia

³⁾서울대학교 생활과학대학 생활과학연구소

⁴⁾차세대융합기술연구원 그래핀융합기술센터

Enhancing Design and Evaluating Mobility of Firefighting Chemical and Flame Protective Clothing for the National 119 Rescue Headquarters

Syifa Salsabila^{1,2)}, Do-Hee Kim³⁾, and Joo-Young Lee^{1,3,4)†}

¹⁾Department of Fashion and Textiles, Seoul National University; Seoul, Korea

²⁾Institut Teknologi Bandung; Bandung, Indonesia

³⁾Research Institute for Human Ecology, Seoul National University; Seoul, Korea

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

Abstract: The present study developed a test protocol for evaluating the mobility of firefighting chemical and flame personal protective equipment (PPE) for the National 119 Rescue Headquarters in Korea and suggested ergonomic design factors to improve their mobility and performance. Six types of PPE were employed, including three types for flame protective PPE (5 ~ 6 kg excluding the self-contained breathing apparatus), and three types for chemical and flame protective PPE (8 ~ 11 kg). These PPEs are used by the 119 Rescue firefighters. Three male firefighters (34.3 ± 1.2 y in age, 175 ± 8 cm in height, 81 ± 13 kg in body weight) participated in the mobility test and interview. A mobility test protocol consisting of 16 components (nine postures and seven motions including a dexterity test) along with a visibility test were developed based on pre-interviews and literature reviews. The findings indicated that the clothing microclimate humidity on the neck and chest exceeded 85%RH on average for all the six PPE conditions, with the chest area reaching as high as 98%RH. This high humidity caused fogging inside the visor and impaired visibility. The requirements for improving the PPE design in terms of mobility varied depending on whether it was the separated types or all-in-one types, particularly regarding the hood and gloves design. The findings of this study can be applied to improve the design of Level A_PPE for firefighters. The mobility test protocol and visibility test developed in this study can also be applied to other types of Level A impermeable PPE.

Key words: mobility (동작적합성), personal protective equipment (PPE, 개인보호구), visibility (가시성), pattern design (패턴 디자인), wear comfort (착용 쾌적성)

1. 서 론

소방공무원은 화재를 진압하고 화재를 포함한 재난-재해 등 위급 상황에서 구조 및 구급 활동 등의 직무를 담당하는 특정 직 공무원이다(「Framework Act on Fire Services」, 2021). 우리나라 현장 대응 소방공무원의 대부분은 각 시도 소방 본부에 소속되어 활동하지만, 전국 약 64,000명의 소방공무원 중 400

여명에 해당하는 소수 인원(전국 소방공무원의 0.6%)은 소방청 산하 중앙119구조본부에 소속된다(National Fire Agency [NFA], 2022a). 중앙119구조본부는 국가적 차원의 대형 특수 재난 및 화학 사고 대응의 중추적 역할과 임무를 수행하는 조직으로, 본부를 중심으로 네 개의 특수 구조대와 일곱 개의 화학 구조 센터로 구성된다(NFA, 2022a). 중앙119구조본부 대원들은 대형 화재 및 유해화학물질 누출 등 특수 현장에 대응하는 직무 특성상 물리적, 화학적, 생물학적 위협의 최전선에 노출되며, 고위험 상황 출동 시 전신 비침투성 화학 보호복 및 방열복 등 최상위 보호 수준인 Level A의 특수 보호복을 필수적으로 착용한다.

소방관의 안전과 직결되는 특수 보호복의 보호 성능은 신소재 및 제조기술의 진보와 더불어 그 성능이 비약적으로 발전하였다(Boorady et al., 2013; Van Wely, 2017). 외부 위험 요

†Corresponding author: Joo-Young Lee

Tel. +82-2-880-8746

E-mail: leex3140@snu.ac.kr

©2023 Fashion and Textile Research Journal (FTRJ). 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.

인으로부터 소방관을 격리하여 보호하는 것이 이러한 보호복의 일차적 목적이나, 보호 수준이 높을수록 보호복의 부피와 무게가 증가하여 결과적으로 소방관의 자세와 움직임을 제한하고 서열 부담을 야기하는 등 또다른 위험 요인으로 작용할 수 있다(Barker, 2005; Coca et al., 2008; 2010; Guidotti & Clough, 1992; Kim et al., 2014). 전신을 외부 유해 요인으로부터 완벽히 격리해야 하는 Level A(혹은 Type 1) 수준의 개인 보호복 연구는 주로 보호 성능에 집중되어 이루어져 왔고, 소방복의 쾌적성 및 동작성을 평가하고자 하는 인체 착용 평가 연구들(Kim & Lee, 2016a; Kim et al., 2019b; Lee et al., 2014)이 일부 진행되긴 하였으나 그 역시 다수의 소방관이 착용하는 일반 방화복 및 일반 보호복을 다룬 연구들이 대부분으로 고위험 상황에 대응하기 위해 착용하는 화학 보호복 및 방열복 등 특수 보호복의 동작성 및 쾌적성을 체계적으로 다룬 연구는 아직 많지 않다(Havenith & Heus, 2004; Kim & Lee, 2023; McQuerry, 2020; Park et al., 2015). 산업의 첨단화로 고위험 대형특수 화재 및 재난 발생 빈도는 증가하였고, 특수 보호복의 보호 성능은 향상되어 소방대원은 보다 위험한 현장까지 진입할 수 있게 되었다. 이러한 고위험 현장에서 착용하는 투박하고 무거운 특수 보호복은 보호를 제공함과 동시에 외부 위험에 대한 인지 및 대응 신속성의 저하를 초래하는 양날의 검(Prezant et al., 2001)이 될 수 있으므로 동작성 및 쾌적성 개선 디자인을 제안하기 위한 탐색적 연구가 필요하다.

한편, ISO 16602, EN 14325, ISO 11612, EN 1486 등을 중심으로 소방관용 보호복, 화학 보호복 및 방열복 성능 평가 기준을 제안하는 다양한 국제 표준이 1980년대 중반부터 제정되어 수차례 개정되어 왔으나 이 표준들은 주로 소재의 보호 성능을 다룬다(Van Wely, 2017). 일부 표준에서 완제품의 쾌적성 기준을 제시하고는 있으나 대부분 보호복 소재의 통기성 및 투습성 등에 대한 평가로 한정되어 있고, 소방관의 대표 동작을 반영한 동작성 평가 표준은 없는 실정이다(Barker, 2005; Kim & Lee, 2023). 국내 소방용 화학 보호복 및 방열복 관련 소방산업기술(Korea Fire Institute [KFI]) 기준 역시 국제 표준을 참조하여 여러 차례 개정되었으나 아직까지 동작성 및 쾌적성을 다루고 있지는 않다(KFI, 2023; NFA, 2022b).

그동안 국내 현장 소방대원의 의견을 수렴하는 공청회 등에서 개인 보호복의 동작성 및 쾌적성 향상에 대한 다수의 요구가 있었음에도(KFI, 2020a; KFI, 2020b; Kim & Lee, 2016b; Kim et al., 2016), 아직까지 그 평가법 및 성능 기준을 제시하지 못하는 이유는 첫째, 인간 생존을 위한 중요도 관점에서 쾌적 성능보다 보호 성능이 더 중요하기 때문, 둘째, 측정과 평가분석이 상대적으로 어렵고 새로운 방법론으로 확립되기 위해서는 방대한 인체 평가 데이터가 필요하기 때문, 셋째, 적절한 측정 도구 및 방법론이 체계화되지 않았기 때문인 것으로 생각해 볼 수 있다. 최근 특수 보호복 소재 및 제작 기술 등이 비약적으로 발전하여, 비교적 높은 수준의 보호력을 제공할 수 있게 되었기 때문에(Boorady et al., 2013; Van Wely, 2017),

소재의 보호 성능 평가보다는 완제품의 착용 평가 기술 개발에 보다 관심을 가져야 할 시점이라고 볼 수 있다. 나아가 쾌적성 및 동작성이 향상된 보호복 개발은 작업자의 보호복 착용률 향상에 기여하는 바가 크다는 점에서 큰 의의가 있다(Huck & McCullough, 1988; Kim et al., 2020).

이에 본 연구에서는 우리나라 중양119구조본부 소방대원용 화학 보호복 및 방열복의 동작성 및 쾌적성 향상 디자인 제안을 목적으로, 먼저 모의 동작 착용 평가 프로토콜을 개발한 후 그에 따른 동작성 및 쾌적성을 평가하였다. 특수복 착용 평가의 타당성 확보를 위해 본 119구조본부 보호복 착용에 익숙한 중양119구조본부 소방대원이 피험자로 참여하였다. 본 연구는 국내 119구조본부 소방관용 특수 보호복 개선을 다룬 최초 연구로, 포커스 집단 인터뷰 및 심층 면접법 등을 바탕으로 탐색적 분석(Mays & Pope, 2000)을 실시했다. 아울러 불침투성인 Level A 수준의 전신 개인 보호복 착용 시 필연적으로 수반되는 의복내 습도의 상승은 발한의 증발을 억제하여 소방대원의 서열 부담을 극대화할 수 있으므로(Gagge & Gonzalez, 2010; Kim & Lee, 2023; Walters et al., 2004), 동작성 평가 시 의복내 미세 기후 측정을 추가하여 소방관의 쾌적성을 평가하였다.

2. 연구 방법

2.1. 피험자

중양119구조본부 소속 현직 남성 소방관 3인(나이 34.3±1.2세, 신장 174.7±8.0 cm, 체중 81.3±12.7 kg, 경력 5±4 년)이 본 동작성 평가 및 심층 면접에 참여하였다. 피험자별 유사한 사이즈의 개인 보호복을 사용하기 위해 평소 상의 L 또는 XL 사이즈를 착용하는 소방관들로 한정하였다. 모든 피험자들은 실험을 참여하기 전에 실험에 대하여 충분한 설명을 듣고 자발적으로 동의한 후에 참여하였다. 본 연구는 서울대학교 생명윤리위원회의 승인을 받았다(IRB No. 2209/004-014).







2.2. 특수구조부대 소방관용 개인보호구 특성

소방산업기술원의 자문을 바탕으로 특수부대용 개인 보호구를 방열복과 화학 보호복으로 나누었으며, 각 3종씩 총 6종의 개인 보호구를 선정하였다(Table 1). 개인 보호구의 사이즈는 모두 사이즈 L로 통일하였으며, 개인 보호구 내부에는 모두 동일한 기동복 긴 팔 상하의와 개인용 호흡 보호구(Self-contained breathing apparatus, SCBA; 3.6 kg, 중형; 산청, 한국)를 착용하였다.

2.3. 모의 동작성 평가 프로토콜 개발

본 연구에서는 소방산업기술원의 자문 및 중양119구조본부 소방대원들과의 사전 인터뷰를 바탕으로 자세에 의한 동작성 및 시야 평가를 모두 포함한 모의 작업 동작성 평가 프로토콜을 개발하였으며 시야 평가를 제외한 모든 동작 평가는 총 16 단계로 이루어졌다(Table 2). 이중 최초 일곱 가지 단계는 똑바

Table 1. Fire heat reflective and chemical protective clothing for the National 119 Rescue Headquarters in the present study

	High proximity suits (Fire heat reflective PPE)			Chemical protective suit		
	FR1	FR2	FR3	CP1	CP2	CP3
Photo						
Company	Jinyang	Hancom	Dupont	Dupont	Hancom	Ansell
Model	JY-FF01(1)	SCA 1211N (1212N)	Tychem® 10000FR (RF600TS Vxx0001yy)	Tychem® 10000 (TK586TLY xx0001yy)	SCA 1800KY LevelA	AlphaTec® FLASH
Mass	5.98 kg	5.40 kg	5.08 kg	7.62 kg	11.24 kg	7.68 kg
Note	Separated hood, jacket, pants, gloves, and boots		All in one, Encapsulated Level A, Front entry, Certified to NFPA 1991	All in one, Encapsulated Level A, Front entry, Inner gloves	All in one, Encapsulated Level A, Front entry, Inner gloves	All in one, Encapsulated Level A, Front entry, Inner gloves

로 선 자세에서 이루어지며, 각 단계별 내용은 다음과 같다:

- ① 똑바로 서서 양팔을 양 옆으로 쭉 벌린 후 팔꿈치를 위로 구부린다(5초 유지).
- ② 똑바로 서서 양팔을 위로 쭉 올린 후 팔꿈치를 구부린다(5초 유지).
- ③ 똑바로 서서 양팔을 양 옆구리에 바로 둔 자세에서 몸을 왼쪽으로 굽히고(5초 유지), 다시 정자세로 돌아온다. 몸을 앞으로 구부리고(5초 유지), 다시 정자세로 돌아온다. 몸을 오른쪽으로 구부리고(5초 유지), 다시 정자세로 돌아온다.
- ④ 똑바로 서서 양 팔을 몸 앞으로 쭉 뻗은 후 엄지손가락을 서로 짝지 끼고, 뻗은 두 팔과 함께 상체를 왼쪽으로 비틀고(5초 유지), 다시 오른쪽으로 비튼다(5초 유지).
- ⑤ 똑바로 서서 양팔을 몸의 양쪽으로 수평으로 쭉 편다. 이 자세에서 몸통을 왼쪽으로 돌렸다가(5초 유지), 다시 원래 자세로 돌아온다. 오른쪽으로 돌렸다가(5초 유지), 다시 원래 자세로 돌아온다.
- ⑥ 똑바로 서서 양팔을 가슴 앞쪽에서 교차가 되게(오른팔을 왼팔 위에) 서로 반대 방향으로 수평으로 쭉 펴도록 한다(5초 유지).
- ⑦ 똑바로 선 자세에서 허리를 앞으로 90도 굽히고 양손을 바닥에 닿게 뻗은 후(5초 유지), 다시 허리를 편다.
- ⑧ 왼쪽 무릎으로 무릎을 꿇고(오른쪽 다리는 직각)(5초 유지), 이어 양쪽 무릎으로 무릎을 꿇은 후(5초 유지), 이제 오른쪽 무릎으로 무릎을 꿇고(왼쪽 다리는 직각)(5초 유지), 이후 바로 일어선다.

- ⑨ 스쿼트 자세로 수그린 후(5초 유지), 오른쪽으로 최대한 무게 중심을 옮겼다가(5초 유지), 다시 왼쪽으로 무게 중심을 옮긴다(5초 유지). 이후 바로 일어선다.
- ⑩ 1분 간 평지를 보통 속도로 걷는다.
- ⑪ 양 손바닥과 양 무릎으로 6m 거리를 기어간다.
- ⑫ 양 손바닥과 양 무릎으로 6m 거리를 다시 뒤로 기어온다.
- ⑬ 양 손잡이가 뚫린 한 개의 표준 나무 운반 박스(약 10kg; 가로 50×세로 60×높이 74cm)를 들어 다섯 발자국을 옮긴 후 바닥에 놓고 바로 정 자세로 선다. 바닥에 놓인 박스를 다시 들어 다섯 발자국을 옮긴 후 제 자리에 놓는다. 다시 정자세로 선다.
- ⑭ 두 개의 소방 호스를 바닥에 풀고, 두 개의 커플링을 연결하고 다시 분리한 후, 하나의 소방 호스를 다시 말아 놓는다.
- ⑮ 조여진 나사(9mm 직경) 한 개를 스크류 드라이버(25cm)를 사용하여 제거한다.
- ⑯ 벽에 놓인 사다리의 다섯 번째 계단까지 올라갔다가 5초 멈춘 후 다시 내려온다.

2.4. 실험 환경 및 모의 동작성 평가 방법

실험은 중앙119구조본부 관할 실내 체육관(경기도 위치)에서 이루어졌으며, 착용 평가가 이루어진 동안 측정된 실내 기온과 습도는 18.8±0.3°C, 57±1%RH였다. 본 연구처럼 모집단이 비교적 균질하고 연구의 목표가 좁은 범위에서 특정된 경우 최소 피험자를 대상으로도 포화(saturation)를 달성할 수 있으므로, 소수의 참여자(유사 체격 남성 소방관 3인)를 대상으로 착용 평

가를 진행한 후 심층 면접을 실시하였다.

피험자들의 탈수를 방지하기 위해 착의 전 휴식 중 500 ml의 물을 미리 마시게 하였다. 음수 후 본인의 속옷과 기동복, 양말을 착용한 상태에서 가슴과 뒷목 부위 피부에 의복내 온도

및 습도 센서를 부착한 후 데이터 로거는 기동복 바지 주머니에 넣어놓았다. 이어 개인용 호흡보호구를 맨 후 해당 보호복을 착용하였다. 실험이 시작되면 해당 조건의 개인보호구는 피험자 스스로 착용하게 하였으나, 도움이 요청되는 경우 실험

Table 2. Mobility test protocol of 16 simulated postures and motions

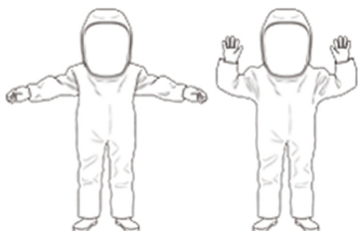
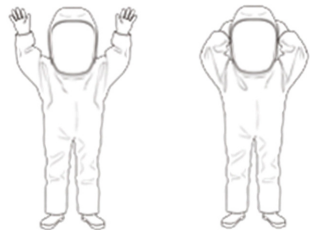

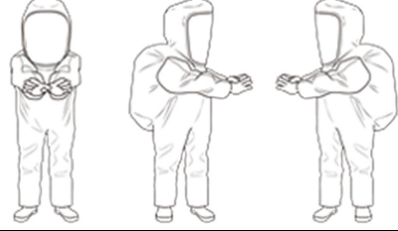
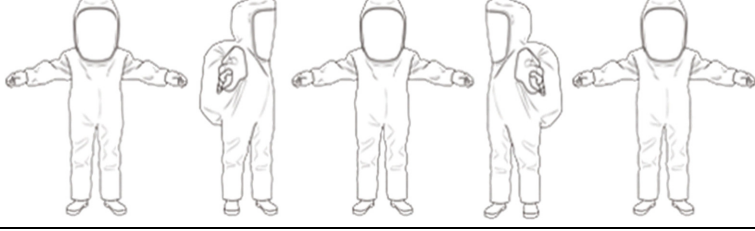

#	Description	Illustration
1	Upright posture: Straighten the arms to the sides and bend the elbows upward (5 s).	
2	Upright posture: Raise both arms above the head and bend the elbows back (5 s).	
3	Upright posture: Put the arms straight on both sides, bend the body to the left (5 s), and return to your normal posture. Bend the body forward (5 s) and go back to the normal position. Bend the body to the right (5 s) and return to the normal position.	
4	Upright posture: Stretch the arms straight in front of the body, then pinch the thumbs together, twist the upper body to the left with your outstretched arms (5 s), and twist to the right again (5 s).	
5	Upright posture: Straighten both arms horizontally on both sides of the body. In this position, turn the torso to the left (5 s) and return to the original position. Turn to the right (5 s) and return to the original position.	
6	Upright posture: Make sure that both arms cross in front of the chest (right arm on the left arm) and straighten horizontally in opposite directions (5 s).	

Table 2. Continued.

#	Description	Illustration
7	Upright posture: Bend the upper body down to 90° and stretch the both arms down to the floor (5 s). Then, return to the original position.	
8	Kneel with the left knee (right leg is a right angle) (5 s), then kneel with both knees (5 seconds), then kneel with the right knee (left leg is a right angle) (5 s), and then immediately Stand up.	
9	After being prone to the squat position (5 s) move the center of gravity to the right as much as possible (5 s), then move the center of gravity back to the left (5 s). Immediately afterward, and stand up.	
10	Walk on flat ground at normal speed for 1 min.	
11	Crawl a distance of 6 m with both palms and knees.	
12	Crawl back 6 m distance with both palms and knees.	
13	Pick up one standard wooden carrying box with open handles (approx. 10 kg; 50 × 60 × 74 cm high), move five steps, place it on the floor, and put it in a straight position (5 s). Lift the box on the floor again, take five steps, and put it back in place. Back in a standing position.	
14	Unscrew, the two fire hoses on the floor, connect and separate the two couplings, and roll up one fire hose again.	
15	Remove one tightened screw (9 mm diameter) using a screwdriver (25 cm).	
16	Go up to the fifth step of the ladder placed on the wall, pause for 5 seconds, and then descend again.	

자들이 보조하였다. 착의를 완료한 상태에서 등받이가 없는 의자에 앉은 자세로 10분 휴식을 취한 후 총 16단계의 모의 작업 평가 프로토콜을 수행하였고, 각 동작 단계별 작업 속도는 피험자가 자율적으로 조절하도록 하였다. 모의 동작을 종료한 후 바로 이어 가시성 실험에 참여하였다. 가시성 평가를 위해 피험자는 똑바로 선 자세에서 정면을 바라보다 몸을 왼쪽으로 90도 돌리고, 이 상태에서 고개만 다시 정면으로 돌려 6m 거리에 붙여진 한글 네 글자를 읽도록 하였다. 글씨는 무의미한 한글 4자 조합으로 A4 사이즈에 가로 방향으로 제시되었으며, 서로 다른 총 3종의 한글 조합을 사용하였다(예: 하네오을, 늘리개임, 신화낭권 등). 이후 다시 몸을 오른쪽으로 90도 돌리고 이 상태에서 고개만 다시 정면으로 돌려 6m 거리에 붙여진 다른 조합의 한글 네 글자를 읽도록 하였으며, 이 경우에도 서로 다른 조합의 한글이 3회 제시되었다. 각 글자의 크기는 가로 14cm, 세로 7cm로 흰색 바탕 종이에 검정색 글씨로 인쇄되었다. 바이저 내부 습기로 인해 글씨를 식별할 수 없는 경우 피험자 스스로 바이저 내부 수증기를 닦을 수 있게 하였다.

가시성 평가를 마친 후 피험자들은 착용 보호복을 탈의하였으며, 탈의 시 도움이 요청되는 경우 실험자들이 보조하였고, 탈의 후 의자에 앉아 휴식을 취하는 동안 정형화된 심층 면접 용지를 사용하여 해당 보호복에 대한 자유 의견을 수집하였다. 모든 피험자는 한 조건을 마친 후 한 시간 이상의 충분한 휴식 시간을 가졌다. 총 6종의 참여 순서는 구획 무선화 역균형화 방법을 이용하여 배치하였다(피험자 A: FR1-FR2 -FR3-CP1-CP2-CP3; 피험자 B: CP2-CP3-FR1-FR3-FR2-CP1; 피험자 C: FR3-CP1-CP2-CP3-FR1-FR2).

2.5. 측정 항목

모의 동작성 평가 프로토콜을 수행하는 동안 가슴과 뒷목 부위 최내층 의복내 온도와 습도, 실내 환경온습도를 5초 간격으로 연속 측정하였고(TR-72wb, T&D, Japan), 매 실험 완료 시간을 기록하였다. 의복내 온도와 습도를 측정하는 센서는 일체형으로, 납작한 직육면체 상자 안에 위치하도록 제작되어 해당 부위 피부면과 최내층 의복 사이에 형성된 미세 기후의 온도 및 습도를 실시간 감지할 수 있다. 각 실험을 종료한 후 해당 보호복 아이템별 불편함에 대한 인터뷰를 실시하였다. 인터뷰 공통 질문은 다음과 같다

- ① 옷의 내부 혹은 외부에 날카롭거나 딱딱한 모서리, 거친 표면 등이 있는가?
- ② 타인의 도움 없이 입고 벗는 것이 어려운가?
- ③ 몸에 너무 딱 맞는 부분이 있는가? (예: 옷에 눌러 피부 혈액순환이 방해되는 부분)
- ④ 상의 겨드랑과 하의 살 부분의 위치가 불편한가?
- ⑤ 숨쉬는 것을 방해하는 부분이 있는가?
- ⑥ 지퍼나 파스너 테이프 등을 여미는 동작 수행이 어려운가?
- ⑦ 여미진 지퍼나 파스너 테이프 등을 여는 동작 수행이 어려운가?
- ⑧ 지퍼나 파스너 테이프 등으로 열고 닫는 부분이 튼튼하지 않다고 생각되는가?
- ⑨ 아래 16가지 동작들을 수행하는 동안 각 보호복의 각 구성 요소들 간 연결 부분이 벌어지는가? (예: 장갑과 상의 소매부리 부분이 벌어져 손목 부위 노출 방열 재킷 뒤 허리 부분이 짧아 허리 부분 노출)
- ⑩ 보호복 소매와 다리 부분은 몸의 동작을 방해할 정도로



Fig. 1. Experimental photos during the mobility test with firefighters in the present study.

너무 긴가?

- ⑪ 후드는 16가지 동작을 수행하는 동안 잘 고정되지 않고 이리저리 움직이는가?
- ⑫ 동일 제조업체에서 만든 각 구성요소들을 함께 착용했을 경우 서로 부적합한 경우가 있는가? (예: 소매 길이가 짧아 장갑을 착용해도 특정 움직임에서 내부가 노출되지 않는지, 소매부리 입구 너비와 장갑 손목 입구 너비가 적합한지, 방화 두건과 방열 상의 칼라 간 사이즈가 적절한지, 바지 끝단이 좁아 방열화 착용이 불편한지 등)
- ⑬ 16가지 모의 동작 중 완수하지 못한 동작이 있는가?

2.6. 결과 분석

모든 심층 면접 결과는 녹취 혹은 수기로 기록되었다. 가슴과 뒷목 부위 최내층 의복내 온도 및 습도는 평균과 표준편차로 제시되었다. 의복내 온도 및 습도 결과 분석을 위해 보호복 착용 후 10분 안정 시의 값을 초기값(Initial)으로 명명하였으며, 모든 경우 동작 종료 시점의 값을 종료값(Final)으로 명명하였다. 각 시행 및 피험자별 동작 완료 시간이 다르므로 시간에 따른 변화 추이는 제시하지 않았다.

3. 연구 결과

3.1. 완료 시간

여섯 가지 보호복의 모의 동작 프로토콜을 완료하는데 걸린 시간은 FR1, FR2, FR3, CP1, CP2, CP3조건별, 29.7±20.6분, 21.7±2.3분, 31.0±16.8분, 17.3±3.8분, 30.0±21.0분, 15.7

±2.1분이었으며, 총 18회 시험 (3인 × 6조건) 중 가장 빠른 기록은 14분, 가장 긴 기록은 54분이었다(총 18회 평균 24분).

3.2. 뒷목과 가슴 부위 의복내 온도

뒷목 부위와 가슴 부위 의복내 온도 초기 온도는 22~27°C, 의복내 온도의 최대값은 평균 28~32°C였다(Fig. 2). 모의 동작 평가를 시행하기 전 의자에 앉아 안정 상태를 유지했음에도 전신 보호복의 특성상 피험자의 최내층 의복내 온도가 상승하는 경향이 발견되었다.

3.3. 뒷목과 가슴 부위 의복내 습도

뒷목과 가슴 부위 의복내 습도 모두 최대 85%RH 이상까지 상승하였고, 특히 가슴 부위의 경우 FR2와 CP2 조건에서 3인 평균 98%RH까지 상승하였다(Fig. 3). 보호복 조건별로 초기 의복내 습도의 편차가 존재함에도 불구하고, 착용 평가 평균 시간인 24분 내에 거의 모든 조건에서 85%RH 이상 수준에 도달하였다. 의복내 온도와 마찬가지로 모의 동작 평가를 시행하기 전 의자에 앉아 안정 상태를 유지했음에도 불구하고 전신 보호복의 특성상 피험자의 최내층 의복내 습도가 상승하는 경향이 발견되었다.

3.4. 가시성 평가

보호복의 동작성 평가를 종료한 직후 이루어진 가시성 평가 결과는 피험자 간 큰 편차로 인해 보호복 종류 간 특정 경향은 발견되지 않았으나, 여섯 개의 제시문에 대해 FR3 조건에서 가장 높은 정답률(89%)이 관찰되었으며, CP2와CP3에서 가

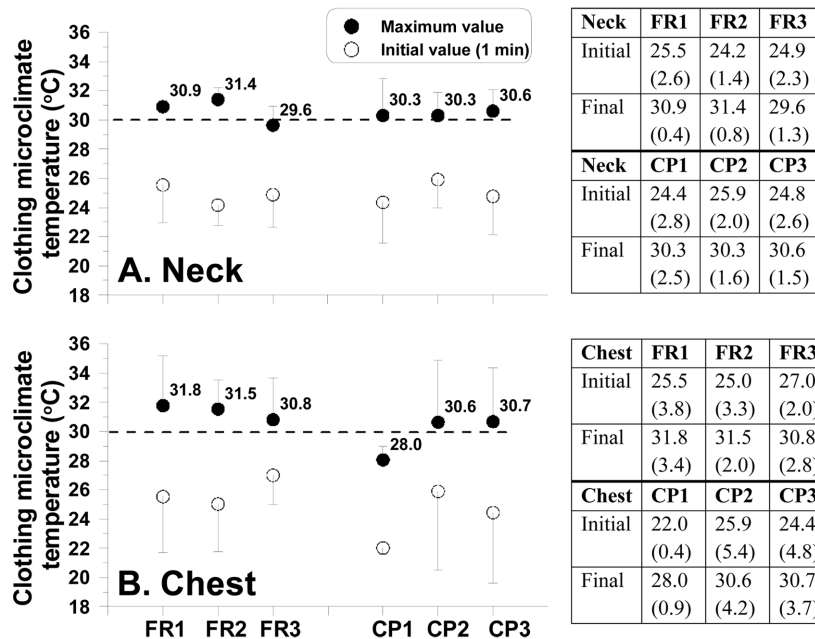


Fig. 2. Initial and final values of clothing microclimate temperature on the back neck (A) and chest (B) during the mobility tests. Values in the small tables represent Mean (SD). (Unit: °C.)

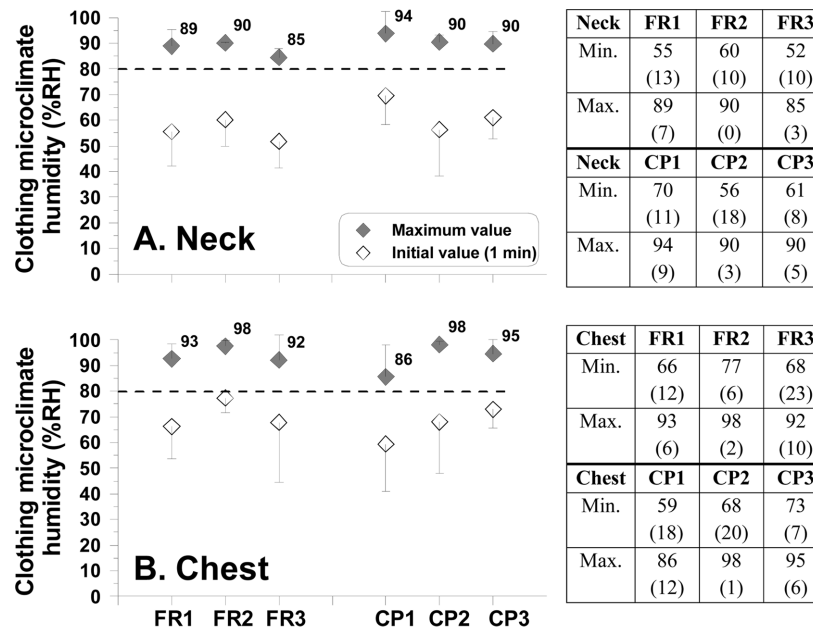


Fig. 3. Initial and maximum values of clothing microclimate humidity on the back neck (A) and chest (B) during the mobility tests. Values in the small tables represent Mean (SD). FR and CP indicate flame reflective and chemical protective clothing, respectively. (Unit: %RH)

Table 4. Frequency of right answers among the six questions in the visibility test

	High proximity suits (Fire heat reflective PPE)			Chemical protective suit		
	FR1	FR2	FR3	CP1	CP2	CP3
Subject A (20/20 vision)	6	5	6	6	0	0
Subject B (20/25 vision)	4	5	4	5	6	4
Subject C (20/25 vision)	4	2	6	3	4	6
Mean (SD)	4.7 (1.2)	4.0 (1.7)	5.3 (1.2)	4.7 (1.5)	3.3 (3.1)	3.3 (3.1)
Correct answer rate (%)	78%	67%	89%	78%	56%	56%

장 낮은 정답률(56%)이 관찰되었다(Table 4). 가시성 평가 중 바이저 내부 습기를 피험자들이 직접 닦아가면서 진행된 경우가 다수 발견되었는데, 보호복 내부에서 손의 움직임이 불편한 경우 바이저 내부를 닦을 수 없어 가시성이 떨어지는 현상도 발견되었다.

3.5. 인터뷰 및 디자인 개선사항

심층 면접 결과를 여섯 종류 보호복별로 정리하여 영문과 국문으로 함께 제시하였다(Table 5). 6종의 보호복 중 방열복 FR1과 FR2는 상의, 하의, 후드, 장갑, 부츠 등이 서로 분리된 형으로, 일체형인 FR3, CP1, CP2, CP3과 구조적으로 구분된

Table 5. Summary of the interview from the three firefighters just after completing the mobility and visibility tests

PPE	Comments at Interview (in Korean)	Comments at Interview (in English)
FR1 : Separated type	<ul style="list-style-type: none"> • [후드와 헬멧] 바닥을 기는 동작에서 후드가 안정이 안 되고 흔들린다/ 후드 안의 끈이 너무 짧아 고정 시 목이 조여 호흡이 어렵다/후드의 양 옆 어깨 조임 고리를 양 어깨에 고정하니 목이 줄리는 느낌이다/ 후드 내 헬멧이 무거워서 고개가 계속 앞으로 숙여지고 목에 힘이 많이 들어갔다/ 헬멧 안에 머리를 싸는 부분이 불편하고 아팠다 • [장갑] 장갑이 크고 두꺼워 소방호스 작업 및 수공구 작업 시 불편하다/손가락들을 움직이는데 불편했다/물건을 잡을 수 없었다 • [SCBA] 공기호흡기로 인해 보호복 상체 부분이 너무 꽉 끼어 상의 앞 지퍼를 혼자 못 올렸다 	<ul style="list-style-type: none"> • [Hood & helmet] The hood is unstable and shakes when crawling on the ground/ The straps inside the hood are too short, making it difficult to breathe/ The shoulder straps on both sides of the hood are strangling/ The helmet inside the hood is heavy, causing my head to constantly lean forward and straining my neck/ The part of the helmet that wraps around my head is uncomfortable and painful. • [Gloves] The gloves were large and thick, making it uncomfortable to work with fire hoses and hand tools/ It was uncomfortable to move my fingers/ I could not grasp objects. • [SCBA] The air respirator made my top too tight and I could not zip up the front of my top by myself.

Table 5. Continued.

PPE	Comments at Interview (in Korean)	Comments at Interview (in English)
FR2 : Separated type	<ul style="list-style-type: none"> • [후드와 헬멧] FR1의 후드보다 편했는데, 후드의 양쪽 어깨걸이 부분이 고리 형태가 아니라 똑딱 단추형으로 되어 있어 혼자 벗을 때 편했다/바이저 내부에 습기가 많이 차서 안면부를 닦지 않으면 앞을 볼 수 없었고, 김서림으로 인해 가시성 평가에서 글씨를 분별하기 어려웠다 • [패턴/여유분] 바지의 폭이 넓어 FR1보다 하체 동작이 더 편했다/ 상의와 하의를 입고 벗는데 FR1보다 시간이 많이 걸렸다/허리를 구부리는 동작에서 허리가 외부로 노출되었다/소방호스를 다시 마는 작업에서 팔과 어깨 움직임이 불편하였다/ 암홀이 작아 팔을 올리고 내릴 때 불편했다 • [장갑] 장갑의 그림감이 좋지 않아서 손가락을 자유롭게 움직이기 힘들었다/ 장갑이 너무 두꺼워 공구 테스트 진행 시 너무 불편했다 • [SCBA] 공기호흡기로 인해 보호복 상체 부분이 너무 타이트해 지고, 특히 등 부분의 여유분이 부족해 움직임이 불편했다/탈의 시 공기호흡기가 걸려 혼자 벗을 수 없었다 	<ul style="list-style-type: none"> • [Hood & Helmet] It was more comfortable compared to FR1's hood, but the shoulder straps on both sides of the hood were not ring-shaped, making it convenient to take it off alone/ It was too humid inside, which made it difficult to see forward without wiping the face, and it was challenging to read the text during the visibility test. • [Pattern/Relaxed] The pants were wider, providing more comfort to the lower body compared to FR1/ It took longer to wear and take off the top and bottom compared to FR1/ The waist was exposed during waist-bending motion/ The arm and shoulder movement felt uncomfortable/ The armhole was small, making it uncomfortable to raise and lower the arm. • [Gloves] It was difficult to move my fingers freely due to the inadequate grip of the gloves. The gloves were too thick, causing discomfort during the tool test. • [SCBA] The air respirator made the top too tight, particularly lacking room in the back, resulting in discomfort while moving/ I could not take it off alone because the air respirator was jammed.
FR3 : All in one type	<ul style="list-style-type: none"> • [후드와 헬멧] 다른 작업복에 비해 바이저 (안면창)에 습기가 많이 끼서 매우 불투명했다/ 시야를 확보하기 힘들었다 • [패턴/여유분] 상하분리형인 FR1및 FR2보다 일체형이라서 더 편하고, 더 가벼웠다/ 무릎을 꿇는 동작과 기어 다니는 동작에서 무릎이 아팠다(무릎 부위에 패드가 들어가면 좋겠다)/옷의 전체적인 사이즈가 다른 보호복에 비해 큰 것 같다/암홀이 작아 어깨를 움직일 때 불편하였다/어깨를 들어올릴 때 머리를 부딪혔다 / 종아리 부분이 작아 불편하였다/전체적인 의복내 환경이 FR1이나 FR2보다 답답하였다 • [장갑] 작업 중 장갑이 계속 빠지고 위아래로 움직였다/ 손이 장갑 내부에 고정되지 않아 불편하였다/ 손가락을 이용하는 작업이 거의 불가능하였다/ 손이 장갑 내부에 잘 고정되도록 손목 고정 밴드가 있으면 좋겠다 • [부츠] 일체형 보호복을 벗을 때 부츠가 불편하였다 • [SCBA] 의견 없음 	<ul style="list-style-type: none"> • [Hood & Helmet] The increased moisture on the face compared to other work clothes made the hood very opaque, resulting in poor visibility. • [Pattern/Relax] The integrated design of the protective clothing, unlike FR1 and FR2 which were separate top and bottom, provided more comfort and a lighter feel./The knees hurt during kneeling and crawling , and it would have been better if the knees were padded/ The overall size of the garment appeared larger compared to other protective clothing options/ Small armholes made it uncomfortable to move my shoulders / I bumped my head when lifting my shoulders / The calf area was small and uncomfortable/The overall environment in the garment was more stuffy than the FR1 and FR2. • [Gloves] The gloves kept falling off and moving up and down while working, which was uncomfortable as it did not securely hold the hands inside. It was challenging to use my fingers properly. I would have appreciated a wrist strap to keep my hands inside the gloves. • [Boots] The boots were uncomfortable when removing the all-in-one protective suit. • [SCBA] - No opinion -
CPI : All in one type	<ul style="list-style-type: none"> • [후드와 헬멧] 가시성 시험에서 문제없이 다 잘 보였다/ 화학복 3종 중에서 시야가 제일 안 좋았는데, 내부 김서림 때문이 아니라 바이저 재질로 인해 잘 안 보이는 듯하다/ 왼쪽으로 가시성 테스트를 진행했을 때 머리 뒷개에 가려 글씨를 읽을 수 없었다 • [패턴/여유분] FR3과 같이 일체형이고 가벼워서 편했다/기어 다니는 동작에서 무릎이 아팠다/ 양쪽 팔을 양쪽으로 교차해서 뺨기 힘들었다/어깨를 들어올릴 때 머리를 부딪혔다 • [장갑] 나사를 푸는 동작에서 다른 보호복 장갑들에 비해 더 편했다/소맷부리가 계속 내려가서 잡아 올려야 했다/다른 보호복들에 비해 장갑은 제일 좋았다 • [부츠] 부츠의 높이가 거의 무릎 바로 아래까지 와서 불편했다 	<ul style="list-style-type: none"> • [Hood & Helmet] I had no problems and could see everything clearly during the visibility test/ Among the three chemical suits, I had the worst visibility. I believe the visibility material affected my ability to see clearly/ During the visibility test on the left, I could not read the letters because they were covered by the head cover. • [Pattern/Relaxed] It was comfortable and lightweight, like FR3, due to the all-in-one design/ My knees hurt during crawling movements/ Stretching both arms across both sides was difficult/ I bumped my head when lifting my shoulder. • [Gloves] The screw loose movement was more comfortable than other protective clothing gloves/The sleeve beak kept going down and had to be held up/ The gloves were best compared to other protective clothing. • [Boots] The boots were uncomfortable because they reached just below the knee in height.

Table 5. Continued.

PPE	Comments at Interview (in Korean)	Comments at Interview (in English)
CP2 : All in one type	<ul style="list-style-type: none"> • [후드와 헬멧] 안면보호부가 튀어나와 있어 양팔을 교차하기 힘들었다/시아 시험에서 안면부에 습기가 많이 차 계속 내부를 닦으면서 해야 했다/기어 다니는 동작에서 앞을 볼 수 없었다 • [패턴/여유분] 다른 보호복에 비해 무거웠다/입을 때 지퍼가 너무 뻣뻣했다/ 기어 다니는 동작에서 무릎이 아팠다/ 양쪽 팔을 양쪽으로 교차해서 뻗기 힘들었다/아래팔 부분이 조이는 느낌이 들어 불편했다/ 어깨를 들어올릴 때 머리를 부딪혔다/무릎을 꿇는 동작에서 무릎이 아팠다 • [장갑] 나사를 푸는 동작에서 다른 일체형 보호복들에 비해 제일 불편하였다/ 고무 장갑 위 덧댄 직물이 그림자를 떨어뜨렸다/소맷부리가 장갑 위까지 계속 내려가서 잡아 올려야 했다/공구 테스트 시 장갑이 너무 미끄러워 불편하였다/장갑은 화학복 3종 중에서 제일 불편했다/장갑이 너무 뻣뻣해서 엄지손가락을 꺾지 못하는 동작할 수 없었다 • [부츠] 부츠의 높이가 상대적으로 낮아 걷기 편했다 • [SCBA] 입을 때 공기호흡기가 등에 걸려 혼자 입기 힘들고, 시간도 많이 걸렸다 	<ul style="list-style-type: none"> • [Hood & Helmet] It was difficult to cross both arms due to the protruding face protection/ I had to continuously clean the inside of the hood due to moisture during the visual test / I was challenging to see when crawling. • [Pattern/Relaxed] The protective clothing was heavier compared to other options/ The zipper was too stiff when putting it on/ My knees hurt when crawling/ It was challenging to stretch both arms, and the lower arm felt tight/ I bumped my head when lifting my shoulder, causing discomfort/ My knees were in pain. • [Gloves] Loosening screws was the most uncomfortable compared to other all-in-one protective clothing / The fabric on the rubber gloves dropped grip/ The sleeves had to be pulled down to cover the gloves and held up / The gloves were too slippery during testing/ The gloves were the most uncomfortable among the three types/ The gloves were so stiff, making it difficult to snap my thumb. • [Boots] The height of the boots was relatively low, providing comfort. • [SCBA] The air respirator got stuck on my back when putting it on, making it challenging to wear alone and resulting in more time consumption.
CP3 : All in one type	<ul style="list-style-type: none"> • [후드와 헬멧] 시야 시험에서 내부 공기 순환 시스템을 작동시키지 않은 경우 김서림으로 인해 6개 문자 조합 다 안 보였다/안면부 시야가 위쪽으로 더 넓게 확보됐으면 좋겠다/ 김서림으로 왼쪽, 오른쪽 전혀 보이지 않았다 • [패턴/여유분] 다른 보호복보다 가벼워서 편했다/ 입을 때 앞 지퍼가 CP2보다 부드럽다/ 기어 다니는 동작에서 무릎이 아프지는 않았다/ 기어 다니는 동작에서 무릎이 아팠다/ 양쪽 팔을 양쪽으로 교차해서 뻗기 힘들었다/ 안면창에 김서림이 생기는 것 빼고는 보호복들 중 착용감이 가장 우수했다 • [장갑] CP1이나 CP2와 달리 소맷부리와 장갑 사이 중간에 고무링(실)이 있어 손의 위치가 고정되기 때문에 손을 움직이는 작업이 편했다/ 소매가 내려가지 않았다. 다만, 위급상황 발생 시 손을 자유롭게 뻗 수 없어 패닉이 올 수 있을 것 같다 • [SCBA] 입고 벗을 때 공기호흡기가 보호복 상체 등 부위에 걸리지 않아 혼자 입고 벗을 수 있었다 	<ul style="list-style-type: none"> • [Hood & Helmet] If the internal air circulation system was not operated during the visibility test, it resulted in fogging, making it impossible to see all 6 characters' combinations/ I suggest a wider field of vision upwards/ Due to fogging, I had no visibility to the left or right. • [Pattern/Relaxed] The protective clothing was lighter compared to other options/ The front zipper was softer than CP2 when worn/ The knee did not hurt during crawling movement/ The knees experienced pain during crawling/ It was challenging to stretch both arms across both sides/ Except for fogging on the face shield, it was the most comfortable protective clothing. • [Gloves] Unlike CP1 or CP2, there was a rubber ring (seal) in the middle between the sleeve beak and the glove, which fixed the position of the hands and facilitated hand movement/ The sleeves did not go down. However, in the event of an emergency, you cannot take your hand out freely, so it seems that panic can occur. • [SCBA] I did not experience any issues with the air respirator getting caught on my back while putting it on or taking it off, allowing me to do it independently.

다. 이러한 디자인 차이가 동작 시 느끼는 불편함에 영향을 주어, 특히 후드 분리형인 FR1과 FR2를 착용한 경우, 동작 시 머리에 잘 고정되지 않아 움직이는 후드 관련 불만이 다수 수집되었다. 또한 상하의 분리형인 FR1과 FR2를 착용한 경우 허리를 굽히는 동작이나 바닥을 기는 동작에서 허리 부위 노출에 대한 우려가 있었다. 반면, 후드 및 상하의 모두 일체형인 FR3, CP1, CP2, CP3의 경우, 보호복 내부 습도 증가로 인한 바이저 내부 김서림에 대한 불만이 컸다. 또한 소방관들이 고개를 좌우 또는 상하로 움직일 때 후드는 상의에 고정되어 피험자들의 고개 움직임에 따라 같이 움직이지는 않기 때문에 시야가 방해된다는 불만이 컸다. 장갑은 보호 특성상 두껍게 제작되기 때문에 수공구 작업이나 소방 호스 작업 시 기민성 부족에 대한 불만이 컸다. 보호복 내부에 공기호흡기를 착용하기

때문에 상의의 등 부위 패턴(여유분)에 대한 불만이 발생했고, 동시에 개인 보호복을 입거나 벗을 때 등 부위 공기호흡기에 걸려 혼자 입고 벗기 불편하다는 의견이 많았다. 무릎을 꿇고 바닥을 기는 동작 수행 시 모든 보호복 조건에서 무릎 통증이 호소되었다. 거의 모든 보호복 조건에서 보호복 상의 소매가 길어 수작업 시 불편하다는 의견이 얻어졌다.

4. 논 의

4.1. 중앙119구조본부 소방대원용 특수 보호복의 동작적합성 평가 프로토콜 개발

작업자들의 ‘동작(motion 또는 mobility)’ 평가는 ‘자세(posture)’ 평가와는 구분되는 것으로, 자세는 주로 인체 주요 부

위별 관절의 가동 범위나 체표면의 확장 등을 통해 평가된다. 예를 들어, 목 부위의 좌우 상하 움직임 시, 혹은 허리의 구부림 등과 같은 자세를 취하는 경우에 관절 각도 혹은 체표면 변화율, 주관적 평가 항목 등으로 자세의 불편도를 평가해왔다. 본 연구에서 개발한 동작적합성 16종 중 1-9번이 자세 평가에 해당한다. 반면, 동작 평가는 특정 자세들의 연속으로 시간, 힘, 방향이 종합적으로 고려된다는 점에서 자세 평가와 구별되며, 해당 작업을 실질적으로 반영하는 보다 타당한 방법이라 볼 수 있다. 국내에서 수행된 개인 보호복의 동작성 평가 연구들은 소방복과 함께 군복이나 생물학적 보호복 등을 대상으로 이루어져 왔다(Kwon et al. 2022; Lee et al., 2016; Lim et al., 2021). 본 연구에서 개발한 16가지 모의 동작 프로토콜은 자세와 동작을 함께 고려했다는 점에서 기존 연구들의 동작 프로토콜과 구별된다. 특히, 본 모의 동작 프로토콜에는 장갑의 기민성을 평가하는 수공구 동작도 포함되어 별도의 장갑 기민성 평가 수행이 요구되지 않는다는 장점이 있으며, 이는 보호 장갑이 일체형으로 부착된 119구조본부 소방관들의 특수 보호복 평가에 보다 적합하다.

소방복 착용 시 동작성을 평가하거나 동작성 평가 프로토콜을 개발한 국내 연구는 Kim and Lee(2016b)에서 최초 발견된다. 다양한 소방 작업을 중 여덟 가지 대표 작업을 골라 이의 3회 반복을 동작성 평가 프로토콜로 제안하였으나, 본 프로토콜의 1-9번과 같은 자세 평가나 장갑의 기민성 평가 동작은 포함되어 있지 않다. 해외 소방관들을 대상으로 수행된 연구들(Huck & McCullough, 1988; Son et al., 2014; Tochihiro et al., 2022; Quinn et al., 2021)의 경우에도, 자세 평가나 장갑의 기민성 평가는 포함되지 않아 별도의 평가가 요구된다. 일반적으로 보호 장갑의 기민성은 착탈성, 미세 기민성, 중형 기민성, 수공구 사용성, 밀착도(악력) 등으로 나누어 평가되는데, 특히 소방용 보호 장갑의 기민성은 건조 상태 장갑과 습윤 상태 장갑 조건으로 나누어 평가될 수 있다(Bae et al., 2017; Kim et al., 2016; Kim et al., 2017). 소방 장갑의 기민성을 평가한 Kim et al.(2016)의 연구를 통해 다양한 성능 시험들 중 특히 수공구 기민성 시험의 유효성이 강조되었기 때문에 본 연구에서 고안한 모의 동작 프로토콜에 수공구 기민성 동작을 추가하였고, 본 시험 평가 결과 특수 보호복 장갑의 불만 및 개선사항이 효과적으로 수집되었다.

4.2. 중앙119구조본부 소방대원용 특수 보호복의 디자인 개선 사항

소방용 보호복 디자인 개선 사항을 다룬 국내외 연구들은 꾸준히 발표되어 왔다. Park et al.(2014)은 미국 소방관을 대상으로 소방복 디자인에 대한 심층 인터뷰를 수행하였고, 그 결과 소방 헬멧과 공기호흡기 착용에 의한 동작성 저하 및 방화 장갑 손가락 부분의 부적합한 사이즈로 인한 손의 기민성 저하가 주요 문제로 수집되었다. Lee et al.(2017)은 국내 소방관들을 대상으로 돌발 화염 발생 상황에 대한 인터뷰 및 설문 조

사를 수행하였고, 해당 결과를 바탕으로 소방복 디자인 개선사항을 제안하였다. Bakri et al.(2012)는 소방용 공기호흡기의 하네스 디자인 변경만으로도 더운 환경에서 작업 중인 피험자들의 에너지 대사량을 유의하게 낮추고 주관감을 향상시킬 수 있음을 보고하였다. Chou et al.(2011)은 표면이 알루미늄이 코팅된 소방용 재킷을 착용하는 경우 일반 소방용 재킷에 비해 착용자의 서열 부담이 급격히 증가하기 때문에, 화염 근접 상황이 아닌 이상 알루미늄이 코팅이 없는 일반 소방용 재킷 착용을 권장하였다. Kim et al.(2019a)은 화재 상황을 모사한 연기로 자욱한 환경 혹은 조명이 없는 어두운 환경에서 소방복의 반사 테이프 디자인 별 가시성을 평가한 후 최적 반사 테이프 디자인을 제안한 바 있다. 그러나 본 연구와 같이 불침투성인 Level A 수준의 개인 보호복 디자인 개선 사항을 동작적합성 관점에서 보고한 연구는 매우 드물다.

본 연구 결과, 방열복의 경우 상하분리형과 일체형 디자인 형태에 따른 장단점이 존재하였다. 상하 분리형 방열복의 경우, 후드도 분리형으로 제작되는데, 특정 동작 시 좌우 혹은 상하로 움직이는 후드로 인해 소방관의 시야가 방해되기 때문에, 후드를 안정적으로 고정할 수 있는 내부 디자인 개선이 필요하다는 의견이 수집되었다. 보통 상하 분리형 방열복 후드 내부에 보호복 상의 재킷 양 어깨 혹은 겨드랑이에 걸 수 있는 고리 등이 부착되지만, 고리의 형식이 똑딱 단추형, 벨크로형, 혹은 리본형인지에 따라 동작 적합성이 달라지므로 인간공학적인 디자인 개선을 위해 구체적인 추가 연구가 필요하다. 또한 상하 분리형 보호복의 경우 바닥을 기는 동작이나 허리를 구부리는 동작 시, 재킷이 떨어져 올라가 뒤 허리 부분이 외기 화염이나 고열에 노출되지 않을까 하는 우려가 있었으므로, 재킷 패턴 제작 시 뒤 허리 길이 여유분을 충분히 두어 뒤 허리 부분이 유해 환경에 노출되지 않도록 개선할 필요가 있다.

중앙119구조본부 소방대원용 일체형 방열복 및 화학 보호복의 보호 성능은 Level A(또는 Type 1) 수준으로 외부 액체상 유해 물질 뿐만 아니라 대기 중 가스상 유해물질을 모두 차단, 외기와 완전히 밀폐된 구조를 가진다. 그런데 보호복 착용 유무와 상관없이 인간의 피부에서는 불감증설 및 발한이 지속적으로 발생하고(Kuno, 1956), 일체형 전신 보호복을 착용하게 되면 밀폐된 보호복 내부 공기층의 습도는 상승하게 된다. 소방관이 보호복 내부에 착용하는 개인용 공기호흡기(SCBA)가 보호복 내부의 공기를 순환시키는 역할도 하므로 내부 공기층 습도가 일부 조절되긴 하지만, 완전히 충전된 공기호흡기의 최대 호흡 시간은 총 30분 또는 45분(분당 40리터의 공기 제공)이라는 한계가 있다. 즉, 소방관이 긴박한 상황에서 분당 40리터 이상 과호흡을 하게 되면 공기호흡기에 충전된 공기는 일찍 소비되고, 이로 인해 바이저 내부에 김이 빠르게 서리게 된다. 보통 전신보호복의 바이저 내부 김서림 방지 코팅이 되어 있음에도 불구하고 전술한 바와 같이 순환 공기 부족과 동시에 내부 습도가 과도하게 상승하는 경우 바이저 내부 표면에 김이 서리는 현상이 발생한다.

본 동작성 평가 마지막 시점(평균 24분 지난 시점)에 수행된 가시성 평가에서도 바이저 내부에 김이 서린 경우가 다수 발생하였으며, 이로 인해 바이저 내부에 서린 김을 손으로 직접 닦으면서 가시성 평가를 수행하였다. 일체형 보호복의 소매부리 디자인 개선으로 양 손이 장갑에 잘 고정되어 다양한 동작 시 손이 장갑에서 빠지지 않고 기민성이 가장 우수하다는 평가를 받은 CP3의 경우, 바이저 내부 표면에 김이 서림 경우 이를 닦기 위해 손을 빼는 동작이 오히려 불편하다는 의견들이 얻어졌다. 보호복 내부 의복내 습도가 포화된 상황에서 바이저 내부의 김서림 방지 코팅 수준이 충분히 유지될 수 있도록 김서림 방지 코팅 기능 향상이 필요하다.

분리형 보호복의 경우 장갑이 소매부리에 연결되어 있지 않아 상의 소매가 길어도 작업 시 장갑에서 손이 빠져 나온다는 불만은 없었으나, 장갑이 소매에 연결된 일체형 보호복의 경우 소매의 길이(예: 너무 길다)로 인한 불만이 있었다. 이는 본 연구에서 평가한 고성능 개인 보호복류는 그 수요가 매우 적고 한정적이어서 다양한 사이즈를 제공할 수 없어 범용으로 사용할 수 있게 보호복 상의의 소매 길이를 충분히 길게 제작하기 때문인 것으로 보인다. 이로 인해 특정 작업을 수행하는 동안 긴 소매가 점점 손등 부위까지 내려오고, 이로 인해 소매부리에 연결된 장갑이 같이 아래로 밀려 내려 손이 장갑에서 밀려 나오게 된다. 이에 소방관들은 밑으로 내려 간 소매부리를 잡아 당겨 올리면서 작업을 수행하게 되는데, CP3의 소매부리와 장갑은 이러한 단점을 개선하여 소매부리 내부에 특수 링 구조물이 추가되었으며 이로 인해 손이 장갑 내부에 잘 고정될 수 있다. 그러나 바이저 부분에서 이미 언급한 바와 같이, 보호복 내부 공기 호흡기 공기 소진 등으로 보호복을 신속히 벗어야 하는 상황(표준 방법: 내장된 소형 주머니 칼로 보호복을 내부에서 직접 찢어 탈출함)에서 양손을 빨리 뺄 수 없어 불안하다는 의견 역시 존재하므로, 추후 일체형 보호복의 소매부리와 장갑 디자인 개선 시 손의 기민성과 함께 응급 상황에서 신속 탈출을 모두 고려한 디자인 개선이 필요하다.

일체형의 경우 앞 여밈 지퍼는 불침투성 특수 지퍼로 제작된다. 이로 인해 지퍼의 유연성이 떨어지고, 착탈 시 과도한 힘이 요구된다. 아울러 등에 멘 공기 호흡기로 인해 상의의 등 부위 확장된 패턴 사이즈가 맞지 않는 경우 소방관 스스로 입고 벗기 어렵다. 따라서 공기 호흡기의 사이즈를 고려하여 상의의 등 부위 여유분을 조정할 수 있는 패턴 디자인을 적용해야, 가스 밀폐형 앞 지퍼를 내리거나 올릴 경우 주위 도움 없이 혼자 착탈의 가능할 것이다. 동시에 지퍼의 유연성을 향상시킬 필요도 있겠으나 외기 유해 가스로부터 보호복 내부를 완전 밀폐해야 하기 때문에 일반 보호복에 사용되는 지퍼 수준으로 유연성을 향상시키는 것은 어렵다. 따라서 보호복 상체에서 등 부위 여유분을 증가시키는 것이 보다 현실적인 디자인 개선안으로 판단되는데, 보호복 등 부위 패턴 자체에 여유분을 두어 크게 제작하는 방법 혹은 사이즈 조절형 디자인으로 개선하는 방법 등을 제안할 수 있다.

한편, 무릎을 굽히고 바닥을 기는 동작 수행 시 무릎 부위 통증 호소가 있었던 점을 반영하여 무릎에 보호 패딩을 부착하는 개선안을 제안한다. 일체형 부츠의 경우 특정 동작 시 부츠의 길이가 길어 불편하다는 응답이 있었으므로 한국인 기본 체형에 맞게 일체형 부츠의 길이를 종아리 중앙 아래로 조절할 필요가 있다. 마지막으로, 개인 보호복의 총 중량 경량화에 대한 고려가 필요하다. 본 실험에서 사용된 일체형 화학 보호복이 방열복에 비해 무거웠는데, 특히 CP2의 중량은 11.2 kg으로 여섯 종류의 보호복 중 가장 무거웠으며, 화학 보호복의 다른 모델인 CP1이나 CP3의 중량과 비교해도 3.5 kg 정도나 더 무거워 그 중량에 대한 불만 의견이 수집되었다. 보호복 내부에 함께 착용하는 공기 호흡기(마스크 및 공기 밸브, 내부 압축 공기 무게 등 포함)의 무게가 보통 10 kg 이상인 것을 감안하면 소방관들이 착용하는 보호구의 총 중량은 20 kg 이상이 되므로 중량 경감이 필요하다.

4.3. Level A 수준 일체형 보호복 착용 시 의복내 습도 조절 방안

본 실험은 실내 온도 $18.8 \pm 0.3^{\circ}\text{C}$, 습도 $57 \pm 1\% \text{RH}$ 수준의 쾌적한 실내 환경에서 수행되었음에도 불구하고, 과도하게 높은 수준의 의복내 습도가 발견되었다는 점에서 매우 흥미롭다. 즉, 여름철 고온 다습 환경이 아니어도 Level A 수준의 밀폐식 전신 소방복을 착용하고 소방 작업을 수행하는 경우 보호복 내부 습도는 최고 수준까지 상승하며 더운 환경에서 소방 작업을 하는 경우 훨씬 더 빨리 최고 수준의 의복내 습도에 도달할 수 있음을 의미한다. 인체 발汗으로 인한 보호복 내부 습도의 과도한 증가는 바이저 내부가 이미 김서림 방지 코팅이 되어 있음에도 불구하고 김서림을 초래할 수 있으므로 보호복 내 의복내 습도를 낮출 수 있는 구체적인 방안이 필요하다. 일반적으로 의복내 습도 감소는 발汗량을 감소시키거나 의복내 공기층의 환기, 혹은 제습을 통해 실현될 수 있다. 발汗량 감소는 피부 냉각을 통해 즉, 냉각 조끼와 같은 냉각 의류 착용을 통해 가능하지만, 이는 소방관들에게 부가적인 중량 부담이 될 수 있기 때문에 신중한 접근이 필요하다. 의복내 공기층의 환기는 개구부나 팬(Fan)을 통해 가능하나 이러한 디자인은 불침투성 개인 보호복에 적용될 수 없다. 공기 제습은 제올라이트와 같은 결정성 규산 광물에 의해 시도될 수 있으며 이러한 제습제의 의복 내 부착 등 실용적인 적용 방안에 대한 연구가 필요할 것이다. 소방용 호흡기 보호구의 경우 소방 작업 시 분당 40리터의 건조한 공기를 제공하고, 이중 일부는 보호복 내부 환기를 위해 사용된다. 중등 강도 이상 작업 시 인체 총 발汗량이 시간당 약 1 리터 수준임을 고려하여 보호복 내부 습도를 60~70%RH 이하로 유지시킬 수 있는 과학적이면서 실용적인 제습 방안이 후속 연구를 통해 개발될 필요가 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 전국 소방공무원 중 1% 이하인 중양119구조

본부 소방대원용 화학 보호복 및 방열복의 동작 적합성 평가를 위한 프로토콜을 국내 최초 개발하였고, 이 시험을 통해 디자인 개선 사항을 제안하였다. Level A 수준의 전신 개인 보호복 착용 작업자 비율은 매우 적지만, 국가 재난 위기 상황의 최전선에 노출된 소방관들을 보호하기 위한 특수 보호복 디자인 개선이라는 점에서 의의가 크다. 본 연구에서 개발된 모의 동작 프로토콜은 특정 자세 평가와 함께 장갑의 수공구 기민성 평가, 가시성 평가까지 포괄하므로 후드, 장갑, 부츠까지 모두 일체형으로 제작된 개인보호구의 동작적합성 평가에 매우 효과적이다. 특히, 본 연구가 수행된 실내 환경이 기온 20°C 이하의 열적 중성 환경이었음에도 불구하고 보호복 내부 습도가 평균 85%RH 이상 상승했으며, 이로 인해 바이저 내부 김서림이 증가하여 소방관들의 시야가 방해되었다. 따라서 보호복 내부 공기층의 습도를 낮출 수 있는 효과적인 제습 방안에 대한 연구가 필요하다. 본 연구에서 개발된 자세 및 수공구 기민성 일체 동작성 프로토콜은 다양한 불침투성 생화학적 보호복 평가에도 효과적으로 적용 가능할 것이다.

Acknowledgements

본 연구는 한국산업기술진흥원의 ICT 융합섬유 제조과정 전문인력양성과정의 지원으로 수행되었습니다. 본 연구를 행정적으로 지원해 준 허윤정, 정호연에게 감사드립니다.

References

- Bae, G. T., Kim, D. H., Syn, H. Y., & Lee, J. Y. (2017). Integrated test method by the evaluation of don-doff and mobility of old and newly-developed firefighting protective gloves. *Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles*, 41(5), 950-965. doi:10.5850/JKSCST.2017.41.5.950
- Bakri, I., Lee, J. Y., Nakao, K., Wakabayashi, H., & Tochihiro, Y. (2012). Effect of fire fighters' self-contained breathing apparatus' weight and its harness design on the physiological and subjective responses. *Ergonomics*, 55(7), 782-791. doi:10.1080/00140139.2012.663506
- Barker, R. L. (2005). A Review of gaps and limitations in test methods for first responder protective clothing and equipment - A final report presented to National Personal Protection Technology Laboratory, National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), Retrieved June 20, 2023, from <https://www.cdc.gov/niosh/npptl/pdfs/ProtClothEquipReview-508.pdf>
- Boorady, L. M., Barker, J., Lee, Y. A., Lin, S. H., Cho, E., & Ashdown, S. P. (2013). Exploration of firefighter turnout gear part 1 - Identifying male firefighter user needs. *Journal of Textile and Apparel, Technology and Management*, 8(1), 1-13.
- Chou, C., Tochihiro, Y., Saat, M., & Lee, J. Y. (2011). Physiological strains of wearing aluminized and non-aluminized firefighters' protective clothing during exercise in radiant heat. *Industrial Health*, 49, 185-194. doi:10.2486/indhealth.MS1034
- Coca, A., Roberge, R., Shepherd, A., Powell, J. B., Stull, J. O., & Williams, W. J. (2008). Ergonomic comparison of a chem/bio prototype firefighter ensemble and a standard ensemble. *European Journal of Applied Physiology*, 104, 351-359. doi:10.1007/s00421-007-0644-z
- Coca, A., Williams, W. J., Roberge, R. J., & Powell, J. B. (2010). Effects of fire fighter protective ensembles on mobility and performance. *Applied Ergonomics*, 41(4), 636-641. doi:10.1016/j.apergo.2010.01.001
- 「Framework Act on Fire Services」. (2021). Article 1 Section 1.
- Gagge, A. P., & Gonzalez, R. R. (2010). Mechanisms of heat exchange - Biophysics and physiology. *Comprehensive Physiology*, 45-84. doi:10.1002/cphy.cp040104
- Guidotti, T. L., & Clough, V. M. (1992). Occupational health concerns of firefighting. *Annual Review of Public Health*, 13(1), 151-171.
- Havenith, G., & Heus, R. (2004). A test battery related to ergonomics of protective clothing. *Applied Ergonomics*, 35(1), 3-20. doi:10.1016/j.apergo.2003.11.001
- Huck, J., & McCullough, E. A. (1988). Fire fighter turnout clothing - Physiological and subjective evaluation. *ASTM International*, 439-451. doi:10.1520/STP26311S
- 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
- 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, 91-106. doi:10.2486/indhealth.2018-0205
- Kim, D. H., Jung, J. Y., & Lee, J. Y. (2019a). Evaluation of firefighter turnout gear visibility in smoke obscuration and flame damage. *Journal of The Korean Society of Living Environmental System*, 26(3), 358-373. doi:10.21086/ksles.2019.06.26.3.358
- Kim, D., Kim, D. H., & Lee, J. Y. (2017). Wear comfort of firefighters protective gloves in dry and wet conditions at 70°C air temperature with radiant heat. *Journal of The Korean Society of Living Environmental System*, 24(1), 95-106. doi:10.21086/ksles.2017.02.24.1.95
- Kim, D., Lee, I., & Lee, J. Y. (2016). Mobility evaluation of popular firefighting protective gloves in domestic and foreign countries - Don/doff test, dexterity test, and torque torque test. *Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles*, 40(5), 921-935. doi:10.5850/JKSCST.2016.40.5.921
- Kim, S., & Lee, J. Y. (2016a). Skin sites to predict deep-body temperature while wearing firefighters' personal protective equipment during periodical changes in air temperature. *Ergonomics*, 59(4), 496-503. doi:10.1080/00140139.2015.1075604
- Kim, S., & Lee, J. Y. (2016b). Development of firefighting performance test drills while wearing personal protective equipment. *Journal of Korean Institute of Fire Science and Engineering*, 30(1), 138-148. doi:10.7731/KIFSE.2016.30.1.138
- Kim, S., Jang, Y. J., Baek, Y. J., & Lee, J. Y. (2014). Influences of partial components in firefighters' personal protective equipment on subjective perception. *Fashion and Textiles*, 1:3. doi:10.1186/s40691-014-0003-8
- Kim, S., Kim, D. H., Lee, H. H., & Lee, J. Y. (2019b). Frequency of firefighters' heat-related illness and its association with removing personal protective equipment and working hours. *Industrial*

- Health*, 57(3), 370-380. doi:10.2486%2Findhealth.2018-0063
- Korea Fire Institute. (2020a). 소방관용 방열복 표준규격 개발 보고서 [Report on the development of Standard test method on Proximity fire fighting ensemble]. Gyeonggi-do: Korea Fire Institute.
- Korea Fire Institute. (2020b). 소방관용 화학보호복 표준규격 개발 보고서 [Report on the development of standard test method on chemical protective ensemble]. Gyeonggi-do: Korea Fire Institute.
- Korea Fire Institute. (2023). 소방용 화학 보호복의 KFI 인정기준 [KFI certificate regulations on fire fighting chemical protective clothing. Regulation No. 492].
- Kuno, Y. (1956). *Human Perspiration*. Springfield: Charles C. Thomas.
- Kwon, J. Y., Cho, Y. S., Lee, B. H., Kim, M. S., Jun, Y., & 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. *Fashion & Textile Research Journal*, 24(5), 655-665. doi:10.5805/SFTI.2022.24.5.655
- Lee, H. H., Kim, S., Kim, D. H., Kim, D. H., & Lee, J. Y. (2017) Requirements of improvement on personal protective equipment and experiences exposed to accidently high risk circumstance while firefighting: a questionnaire study. *Journal of The Korean Society of Living Environmental System*, 24(5), 549,561. doi:10.21086/ksles.2017.10.24.5.549
- Lee, H. H., Shin, S., Kim, Y., Park, S., Lee, J. Y. (2016) Evaluation of mobility and physiological performance while wearing the present Korean Navy summer uniform and prototype. *Journal of The Korean Society of Living Environmental System*, 23(6), 853-867. doi:10.21086/ksles.2016.12.23.6.853
- Lee, J. Y., Yamamoto, Y., Oe, R., Son, S. Y., Wakabayashi, H., & Tochihara, Y. (2014). The European, Japanese, and US protective helmet, gloves, and boots for firefighters: thermoregulatory and psychological evaluations. *Ergonomics*, 57(8), 1213-1221. doi:10.1080/00140139.2014.914578
- Lim, G. Y., Lee, H. L., Chun, Y. M., & Lee, J. Y. (2021) Personal protective equipment for healthcare workers during COVID-19 pandemic - Improvement of thermal comfort and development of a mobility test protocol. *Korean Journal of Community and Living Science*, 32(3), 363-379. doi:10.21086/ksles.2016.12.23.6.853
- Mays, N., & Pope, C. (2000). Assessing quality in qualitative research. *BMJ*, 320(7226), 50-52. doi:10.1136/bmj.320.7226.50
- McQuerry, M. (2020). Effect of structural turnout suit fit on female versus male firefighter range of motion. *Applied Ergonomics*, 82, 102974. doi:10.1016/j.apergo.2019.102974
- National Fire Agency. (2022a). *2022 National Fire Agency Statistical Yearbook*. Sejong: National Fire Agency.
- National Fire Agency. (2022b). 방열복의 성능인증 및 제품검사의 기술기준(고시 제 2022-28호) [Technical regulations of performance certification and product inspection on Proximity fire fighting ensemble (Notification of NFA No. 2022-28)].
- Park, H., Park, J., Lin, S.H., Lynn, M. B. (2014). Assessment of firefighters' needs for personal protective equipment. *Fashion and Textiles*, 1:8. doi:10.1186/s40691-014-0008-3
- Park, H., Trejo, H., Miles, M., Bauer, A., Kim, S., & Stull, J. (2015). Impact of firefighter gear on lower body range of motion. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 27, 315-334. doi:10.1108/IJCST-01-2014-0011
- Prezant, D. J., Barker, R. L., Stull, J. O., King, S. J., Rotanz, R. A., Malley, K. S., Bender, M., Guerth, C., & Kelly, K. J. (2001). The impact of protective hoods and their water content on the prevention of head burns in New York City firefighters - Laboratory tests and field results. *The Journal of Burn Care & Rehabilitation*, 22(2), 165-178. doi:10.1097/00004630-200103000-00015
- Quinn, T. D., Gutierrez, B., Saez, I., Santisteban, A., Lee, J. Y., Kim, J. H., & Coca, A. (2021). Comparison of three internationally certified firefighter protective ensembles: physiological responses, mobility, and comfort. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 86(2), 103232. doi:10.1016/j.ergon.2021.103232
- Son, S. Y., Bakri, I., Muraki, S., & Tochihara, Y. (2014). Comparison of firefighter and non-firefighters and the test methods used regarding the effects of personal protective equipment on individual mobility. *Applied Ergonomics*, 45, 1019-1027. doi:10.1016/j.apergo.2013.12.006
- Tochihara, Y., Lee, J. Y., & Son, S. Y. (2022). A review of test methods for evaluating mobility of firefighters wearing personal protective equipment. *Industrial Health*, 60, 106-120. doi:10.1016/j.apergo.2013.12.006
- Van Wely, E. (2017). Current global standards for chemical protective clothing: how to choose the right protection for the right job? *Industrial Health*, 55(6), 485-499. doi:10.2486/indhealth.2017-0124
- Walters, T. J., Ryan, K. L., & Constable, S. H. (2004). Thermoregulation by rhesus monkeys at different absolute humidities. *Journal of Comparative Physiology B*, 174, 481-487. doi:10.1007/s00360-004-0434-4

(Received July 1, 2023; 1st Revised July 26, 2023;
2nd Revised July 31, 2023; Accepted July 4, 2023)