

노멕스 허니콤 구조 직물을 적용한 소방관용 특수방화복 개발 및 이의 보호 쾌적 성능평가

정재연¹⁾ · 구본준²⁾ · 김도형¹⁾ · 권민재³⁾ · 강성욱³⁾ · 최정윤³⁾ · 이주영^{1,4)†}

¹⁾서울대학교 의류학과

²⁾서울대학교 체육교육과

³⁾한국건설생활환경시험연구원

⁴⁾서울대학교 생활과학연구소

Development of Firefighters' Personal Protective Clothing with Nomex Honeycomb Fabric and its Protective and Comfort Evaluation

Jae-Yeon Jung¹⁾, Ponjun Ku²⁾, Do Hyung Kim¹⁾, Min-Jae Kwon³⁾, Sungwook Kang³⁾, Jeong-Yoon Choi³⁾,
and Joo-Young Lee^{1,4)†}

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

²⁾Dept. of Physical Education, Seoul National University; Seoul, Korea

³⁾Fire Protection Technology Center, Korea Conformity Laboratories(KCL); Cheongju, Korea

⁴⁾Research Institute for Human Ecology, Seoul National University; Seoul, Korea

Abstract: The present study newly developed a firefighters' protective jacket and pants using a Nomex honeycomb structured layer (HPC) in cases of being exposed to flashover or flameover. This study evaluated the protective and comfort functions of an HPC compared to the current KFI firefighters' protective clothing (FPC). The results are as follows. First, thermal protective performance (TPP) of fabric layers was 2.75 times greater for HPC than FPC at 125 kW/m². Second, the predicted second and third degree burn areas were smaller for HPC than FPC when using a flame manikin. Third, thermal insulation using a thermal manikin was 0.2 clo greater for HPC than FPC. Fourth, there were no marked differences in maximal performance, mobility, and microclimate temperature/humidity between FPC and HPC through human wear trials. The thermal insulation of HPC was higher than that of FPC; however, any negative effect of HPC thermal insulation on the comfort functions for firefighters was not found. In conclusion, the newly-developed HPC provided more protection in reducing burn injuries from 125 kW/m², while no negative impact on maximal performance, mobility and thermal comfort functions of firefighters, which is appropriate for quick-evasive tactics at the flashover, flameover or back draft fires.

Key words: nomex honeycomb fabric (노멕스 허니콤 직물), firefighter (소방관), protective clothing (보호복), comfort (쾌적감), mobility (동작성)

1. 서 론

화재 특성에 따른 효과적 진압에 대한 과학적 연구는 지난 수십 년 간 꾸준히 진행되어 오고 있으며 소방용 개인보호장비에 대한 기술적 발전도 이루어지고 있으나 Ministry of the Interior and Safety(2006)에 따르면 여전히 국내 총 소방대원

대비 사망자 비율은 미국의 약 두 배, 일본의 다섯 배를 기록하고 있다. 화상으로 인한 소방관 사상자는 주로 화재진압 시 발생하는데, 2012년 미국 National Burn Repository에서 발표한 연구에 따르면 전체 소방관 화상(N=597)의 74%가 불이나 화염에 의한 화상이었다. 이에 화재진압 공간의 돌발 고위험 상황에 대한 분석 노력도 꾸준히 진행되어 오고 있다. 돌발 고위험 상황이란 플래쉬오버, 플레임오버, 백드래프트, 연기폭발 등이 발생하는 상황으로, 이의 대표 상황인 플래쉬오버 화재란 닫힌 공간에서 발생하는 구획 화재 중 성장 단계(가연성 물질에 의해 화재가 성장하는 단계)의 화염이 최성기 단계로 변이되는 현상으로 정의된다. 이 단계는 보통 300~650°C에서 시작되어 대부분 500~600°C 이상의 범위(최고 1,000°C)를 보이며(Drysdale, 2005), 화재 구획 내 창문은 급격한 온도증가로 인해 파괴된다

†Corresponding author; Joo-Young, Lee

Tel. +82-880-8746, Fax. +82-

E-mail: leex3140@snu.ac.kr

© 2019 (by) the authors. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution license (<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

(Gorbett & Hopkins, 2007). 돌발 고위험 상황의 전초 현상을 감지할 경우 소방관 인명손상 최소화를 위해 신속한 회피 명령을 표준진압 지침으로 신속한 회피 명령을 내리게 된다.

소방관용 개인보호복은 소방헬멧, 방화두건, 면체와 공기호흡기, 방화복 상하의, 안전장갑, 안전부츠로 이루어져 있는데 일반적인 특수방화복의 경우 겹감, 중간층, 안감의 세 개 층으로 구성되어 있다. 겹감은 노멕스와 같은 아라미드 소재에 기계적 강도를 고려하여 케블라 섬유가 혼방된 직물이 일반적으로 사용되고 있다. 중간층은 고어텍스나 PTFE 코팅된 필름층을 사용하여 외부로부터의 증기를 차단하며, 안감에는 노멕스 쿼트가 사용된다. 미국 NFPA 1971(2013)에 의하면 방화복의 Thermal Protective Performance(TPP)는 35등급 이상이 요구되며 Korea Fire Institute(2013)에서도 이를 채택하고 있다. TPP 35등급에서 35라는 숫자는 $2.0 \text{ cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sec}$ ($84 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$)과 17.5초의 곱을 의미하는데 이때 17.5 초는 소방관이 2도 화상을 입지 않고 탈출하는데 걸리는 시간을 의미한다. 그러나 이러한 TPP 기준에도 불구하고 돌발 고위험 상황에서의 소방관 화상 사례는 지속적으로 보고되고 있다. 그 이유 중 하나는 NFPA 1971의 TPP시험에서 화염 수준은 $84 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 이나 돌발 고위험 상황일 경우 발생하는 화염은 $\sim 125 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 로 더 높다는 점(Royal Air Force, 2014)과, TPP시험은 소방복 완제품이 아닌 소방복 직물 상태(2차원)의 평가로 인체를 둘러싼 소방복 완제품(3차원)의 방염 성능을 정확하게 평가하지 못한다는 점 등을 들 수 있다.

국내외 방화복을 이루는 세 개 층 모두 아라미드 계열 소재로 제작되고 있으나 이는 일반적인 화염(최대 $84 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$)에 맞춰져 있기 때문에 전술한 바와 같이 돌발 고위험 상황인 $\sim 125 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 노출 시 소방관 화상 예방에는 취약하다고 볼 수 있다. 돌발 고위험 상황을 대비하여 알루미늄 외피를 갖는 방열복을 착용할 수도 있으나 돌발 고위험 상황에 대한 사전 예측이 어렵고, 알루미늄 외피 착용 시 과도한 서열부담을 초래할 뿐만 아니라 소방관의 시야 및 동작을 방해하기 때문에 신속한 대피가 필수인 돌발 고위험 상황에는 적절하지 않다고 볼 수 있다. 때문에 평소 화재 진압 시 착용하면서 $1,000^\circ\text{C}$ 의 돌발 고위험 상황 발생 시 화상을 최소화하면서 신속한 회피가 가능한 방화복이 필요하다.

이와 관련하여, 방화후드의 목 부분을 두 겹으로 제작하거나, 상의 손목 토시를 신축성 있는 노멕스 두 겹으로 제작, 혹은 하의 무릎 마찰 패드의 성능 개선, 소방 헬멧 위에 덮어 착용할 수 있는 알루미늄 외피 보호 커버, 어깨와 양 팔을 추가적으로 보호하기 위한 알루미늄 외피 보호 슬리브, 휴대형 응급 셀터, 노멕스 소재의 활동복(Station uniform) 등이 개발이 시도되기도 하였다. 또한, 시합 중 자동차 폭발로 인해 돌발 화재가 발생하는 Formula One(F1, 자동차 경주) 경주용 자동차에는 드라이버가 큰 부상을 입지 않도록 허니콤 구조 직물이 적용된 레이싱 슈트(Atech racing suit)도 판매되고 있는데, 이는 허니콤 구조로 직물내 공기층이 더 안정적으로 확보되고 이렇게 확보된 공기층으로 인해 단열 성능이 증가하여 화염으로부터

터 보호성능이 증가할 것으로 여겨지기 때문이다.

허니콤(Honeycomb)은 얇은 판 소재로 만들어진 육각형의 셀 구조가 샌드위치 패널과 같이 이어진 형태로 한 셀의 크기는 보통 5~10 mm 폭을 갖는다. 이는 재료를 적게 사용하여 최대한의 공간을 확보하기에 상대적으로 가볍고 균형 있게 힘을 배분하는 안정적인 구조로 알려져 있다. 특히 아라미드 소재로 구성된 허니콤 구조는 각 셀 안에 안정된 공기층으로 인해 높은 단열력을 가짐과 동시에 매우 우수한 방염성능을 가지게 된다. 산업적으로는 고속열차 앞부분에 허니콤 구조로 된 충격흡수장치를 비롯해 제트기, 인공위성 등의 기체 구조, 건축물 내벽, 노트북의 내부 구조에 허니콤 구조를 사용하고 있다(Park, 2019). 그러나 허니콤 구조 소재를 의복에 적용한 경우는 흔치 않으며, 특히 아라미드 허니콤 구조 직물을 소방복에 적용하여 이의 보호 및 쾌적 성능을 비교 분석한 연구는 거의 없는 실정이다.

이에 본 연구에서는 돌발고위험 화재로부터 소방관을 보호하기 위해 아라미드 계열인 노멕스 소재의 허니콤 구조를 현 소방복에 적용하여 새로운 소방복을 제작하였으며 이의 보호 및 쾌적 성능을 다양한 관점에서 평가하였다. 특히, 돌발 고위험 상황의 전초 현상을 인지할 경우 화재 진압을 바로 중단하고 신속하게 회피하도록 하는 것이 현재 표준지침이기 때문에 본 연구에서는 새롭게 개발된 허니콤 구조 방화복 착용에 의해 소방관의 동작성이나 최대운동능력의 저하도 함께 평가하였다.

2. 연구 방법

본 연구는 다음 네 단계로 이루어졌다. 첫째, 노멕스 허니콤 구조 직물을 이용한 소방복 제작 단계, 둘째, 허니콤 소방복 완제품의 물리적 특성 평가 단계, 셋째, 허니콤 소방복의 인체 착용 시 최대작업 수행능력 평가, 넷째 허니콤 소방복의 인체 착용 시 동작성 평가로 나뉘어 수행되었다. 동작성 평가에는 간단한 설문조사도 추가적으로 포함되었다. 위 네 단계 평가 모두 현재 국내 소방관들이 착용 중인 KFI 인증 소방복과의 비교가 수반되었다.

2.1. 허니콤 구조 직물을 이용한 소방복 제작

본 연구에서는 노멕스 허니콤 구조 직물을 3개의 직물층으로 구성된 소방복 상하의(특수방화복 재킷과 팬츠) 중간층과 안감 사이에 삽입하여 신형 소방복을 제작하였다. 사용된 노멕스 허니콤 직물의 물리적 특성으로는 소재 노멕스 100%, 두께 3 mm, 단위 밀도 32 kg/m^3 이었다. 제작된 소방복의 사이즈(size 6)는 기존 소방복의 사이즈(size 5)와 비교했을 때 대략 1~5 cm 정도 큰 것으로 측정되었으며(Table 1), 외관은 현재 국내 KFI 인증 소방복과 동일하도록 제작되었다(Fig. 2).

2.2. 허니콤 구조 직물 소방복 소재 및 완제품의 물리적 특성 평가

보호성능 평가 첫 단계로 벤치스케일 단계에서 노멕스 허니



Fig. 1. Honeycomb structured aramid (a) and honeycomb structured aramid layered in firefighters' protective clothing in the present study (b).

Table 1. Specification of the current KFI firefighters' protective clothing and Honeycomb layered firefighters' protective clothing in the present study

Classification		Current KFI firefighters' protective clothing (FPC)	Honeycomb firefighters' protective clothing (HPC)
	Size	5	6
	Standard height (cm)	171~175	176~180
	Shoulder width (cm)	52	54
	Sleeve length (cm)	61	62
Turnout jacket	Sleeves' bottom width (cm)	37	38
	Bust girth (cm)	125	130
	Center back length (cm)	77	79
	Bottom width (cm)	125	130
	Outseam (cm)	102	106
	Waist measure (cm)	99	104
Turnout pants	Hip circumference (cm)	126	130
	Inseam (cm)	70	73
	Leg opening (cm)	56	59

폼 소재의 열차단 성능을 평가하였다. 기존 소방복의 레이어링 조건(겉감 -5 mm 공기층 - 중간층 -5 mm 공기층 - 안감)과 허니콤 구조 직물 조건 (겉감 -5 mm 두께 노멕스 허니콤 구조 직물 - 중간층 -5 mm 공기층 - 안감)을 한국건설생활환경시험연구원(KCL)에서 개발한 극한 고위험화염 노출 장치의 고열류량 조건(126 kW/m²)에 12초 노출 시킨 후 투과된 열류량(kW/m²)을 측정하였다. 보호성능의 두 번째 단계로 기존 소방복과 노멕스 허니콤 구조직물 소방복의 전신 화염마네킹 노출 평가를 수행하였다. 화염 노출 실험은 ISO 13506(2017)을 따라 84 kW/m²에 12초 간 노출시켰다.

제작된 허니콤 구조 직물 소방복과 기존 소방복을 구성하는 겉감과 중간층, 안감의 소재 및 두께는 Table 2에 나타내었다. 소방복 각 층의 두께는 KS K ISO 5084(2017)를 기준으로 측정하였다. 기존 소방복과 허니콤 소방복 상하의 열저항은 전신 서멀 마네킹(Newton, Measurement Technology NORTHWEST, USA, 1.7 m² of BSA)을 이용하여 실측하였다(Fig. 3). 소방용 방화복 상하의 내부에 기동복이나 기타 의복 아이템 없이 방화복 상의와 하의만 입은 채로 소방복의 열저항을 측정하였다. 서멀 마네킹은 정지 상태에서 각 의복조건별 총 3회 실측되었으며, 3회 측정값의 평균값을 대표값으로 사용하였다. 열저항

Table 2. Physical characteristics of the current and honeycomb layered firefighters' protective clothing

		Current firefighters' protective clothing (FPC)	Honeycomb firefighters' protective clothing (HPC)
Turnout jacket	Outer layer	Fabric Aramid Thickness 0.4±0.0mm	Fabric Aramid Thickness 0.5±0.0mm
	Middle layer	Fabric Aramid/PTFE film Thickness 0.3±0.0mm	Fabric Aramid/PTFE film Thickness 0.4±0.0mm
	Lining	Fabric Aramid Thickness 2.4±0.0mm	Fabric Honeycomb structured aramid Thickness 4.9±0.0mm
Turnout pan	Outer layer	Fabric Aramid Thickness 0.4±0.1mm	Fabric Aramid Thickness 0.5±0.2mm
	Middle layer	Fabric Aramid/PTFE film Thickness 0.3±0.0mm	Fabric Aramid/PTFE film Thickness 0.42±0.1mm
	Lining	Fabric Aramid Thickness 2.0±0.1mm	Fabric Honeycomb structured aramid Thickness 4.7±0.3mm



Fig. 2. Honeycomb layered firefighters' protective clothing developed in the present study: front/back of turnout jacket(a, b), and front/back of turnout pants(c, d).

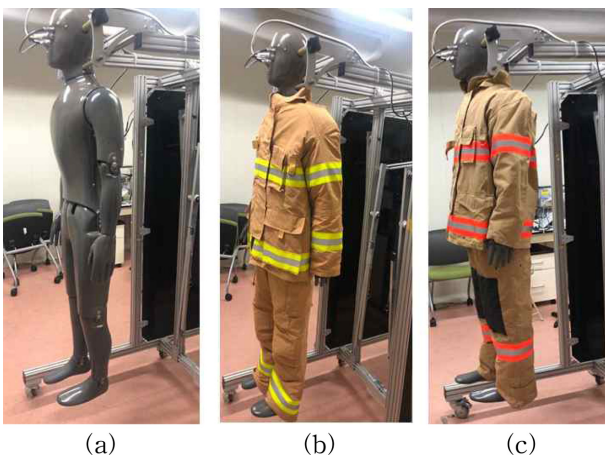


Fig. 3. Thermal mannikin(Newton) used in the present study: nude(a), honeycomb firefighters' protective clothing(HPC)(b), and the current KFI firefighter's protective clothing(FPC)(c).

측정 시 인공기후실 환경은 기온 21°C, 습도 50%RH, 기류 0.1 m/s 이하로 유지되었으며, 서멀 마네킹의 평균피부온도는

34.0°C로 설정되었다. 측정 환경 및 측정 과정, 총 보온력(I_t), 유효 보온력(I_{cl})을 구하기 위한 식은 ISO 9920(2007)을 따랐다.

2.3. 소방복 인체 착용 시 최대작업수행능력 평가

최대작업수행능력은 최대산소섭취량 평가를 통해 이루어졌으며 실험에는 화재진압 경험이 있는 현직 남자 소방관 2인이 피험자로 참여하였다(피험자 A: 나이 54세, 키 179 cm, 체중 94 kg, 체표면적 2.14 m², 체질량지수 28.4 kg/m², 소방관 경력 24년; 피험자 B: 나이 51세, 키 167 cm, 체중 67 kg, 체표면적 1.79 m², 체질량지수 24.0 kg/m², 소방관 경력 23년). 피험자는 실험 참여 48시간 전 동안 음주와 과격한 운동을 피하도록 교육되었고, 실험 참여 3시간 전에는 카페인 음료 및 식사가 금지되었다. 실험에 참여하기 전에 피험자들은 모집 단계에서 실험 내용에 대한 자세한 설명을 듣고 이해하였으며 자발적인 동의서에 서명하였다. 본 실험 내용은 서울대학교 연구 윤리위원회의 승인을 받았다(IRB #SNU 18-07-014: No. 1803/001-002).

소방관들은 다음 세 가지 의복 조건에서 최대산소섭취량 평가에 참여하였다: 일상복(반팔 셔츠와 반바지) 착용 조건

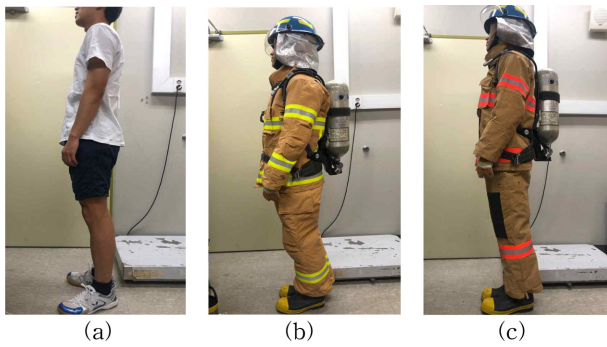


Fig. 4. Three experimental clothing conditions of the maximal oxygen uptake test in the present study; Control(a), the current Firefighters' Protective Clothing (FPC)(b), and Honeycomb firefighters' Protective Clothing(HPC)(c).

Table 3. Clothing mass of firefighters' protective equipment in the present study

Item (unit: g)	Current firefighters' protective clothing (FPC) (Size 5)	Honeycomb layered firefighters' protective clothing (HPC) (Size 6)
Turnout jacket	1,600	2,150
Turnout pants	1,500	1,850
Self-contained breathing apparatus (SCBA)		7,055
Protective helmet		1,177
Protective hood		70
Protective gloves		79
Protective boots		2,300
Station uniform (shirt & pants)		785
Socks		79
Under shorts		34
Total clothing mass	14,679	15,579

(Control), 기존 KFI 인증 소방복 착용 조건(FPC), 본 연구에서 개발된 허니콤 소방복 착용조건(HPC)(Fig. 4). 소방복 착용

조건에서 착용한 의복은 기동복 상하의, 보호 장갑, 방화 부츠, 보호 후드, 보호 헬멧(1.2 kg), 호흡기 보호구(SCBA), 팬티, 양말이었으며 각 의복 아이템별 중량은 Table 3에 나타내었다. 일상복 착용 조건에서 착의중량은 신발을 포함하여 총 1,104 g (반팔 상의 145 g, 반바지 238 g, 팬티 34 g, 양말 79 g, 운동화 608 g), 기존 소방복 조건의 경우 14,679 g, 허니콤 소방복 조건의 경우 15,579 g이었다.

최대작업수행능력을 평가하기 위해 위 세 가지 실험의복 조건에서 최대산소섭취량 테스트가 진행되었다. 인공기후실 내 설치된 트레드밀에서 기존 Bruce Protocol를 수정한 Modified Bruce Protocol을 이용하여 실험이 진행되었다(Fig. 5). 안전을 위해 트레드밀 주변에 안전 매트를 깔아두었다. 소방관들은 실험실에 도착한 후 탈수를 방지하기 위해 물을 300 ml 이상 충분히 마신 후 실험의복으로 갈아입었다. 심박수 벨트를 가슴에 장착한 후 온도 23°C, 습도 50%RH로 설정된 인공기후실에 들어가 의자에 앉은 자세로 심박수가 안정 수준이 될 때까지 충분한 휴식을 취하였다. 심박수가 75 bpm 이하로 안정된 이후 트레드밀 위에서 3 km/h 속도로 5분 간 걷도록 하였다(warm-up 단계). 준비 운동을 마친 후 다시 의자에 앉아 산소섭취량 측정용 마스크를 장착한 후 최대산소섭취량 테스트를 시작하였다. 트레드밀 속도는 4 km/h에서 시작하여 1분마다 1 km/h씩 증가시켰으며 안전을 위해 13 km/h에 도달하면 속도를 증가시키지 않고 그 속도를 유지하였다. 트레드밀 경사는 1%로 유지하였다. 테스트를 마친 후 피험자들은 의자에 바로 앉지 않고 회복을 위해 5분 간 3 km/h로 천천히 걸은 후, 의자에 앉은 자세로 15분 간의 회복기를 가졌다. 최대산소섭취량 테스트에서 측정할 항목은 산소섭취량(Quark CPET, COSMED, Italy) 과 심박수(RC3 GPSTM, Polar, Finland), 작업 완료 시간이며 주관적 항목으로 Borg의 척도를 이용하여 인지적 힘들기(RPE)를 측정하였다(Borg, 1982). 산소 섭취량은 Warm-up이 끝난 후부터 Warm-down 시작하기 전까지 Breath-by-breath를 2초 간격으로 연속 측정되었으며, 심박수는 Warm-up 시작할 때부터 실험 종료 시까지 1초 간격으로 자동 측정되었다. RPE 척도는 6점(전혀 힘들지 않다) 에서 20점(참을 수 없을 만큼 최

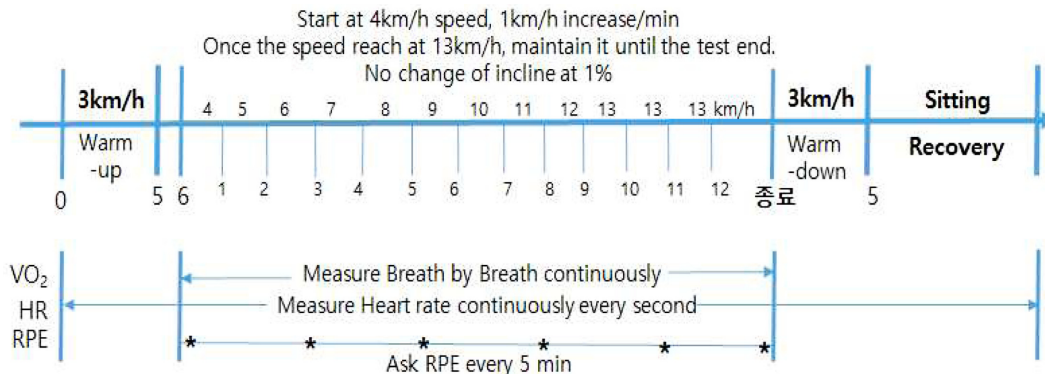


Fig. 5. Experimental protocol for the maximal oxygen uptake test in the present study.

대로 힘들다) 척도를 사용하여 5분 간격으로 피험자 스스로 응답하도록 하였다. 3조건 실험 참여 순서에 의한 영향을 배제하기 위해 세 조건의 참여 순서는 소방관 두 명에게 랜덤하게 배정되었으며, 각 실험 조건은 서로 다른 날에 실시되었다.

2.4. 허니콤 구조 직물 삽입 소방복 인체 착용 시 동작성 평가

동작성 평가 실험에는 최대 작업수행능력평가에 참여한 동일 소방관 2인이 참여하였다. 전 실험과 동일한 방식으로 실험 참여 전 모집 단계에서 실험 내용에 대한 자세한 설명을 듣고 이해하였으며 자발적인 동의서에 서명하였다. 본 실험 내용은 서울대학교 연구 윤리위원회의 승인을 받았다(IRB #SNU 18-07-014: No. 1803/001-002). 소방관은 기존 소방복 조건과 허니콤 소방복 조건의 총 두 조건에 참여하였으며, 실험의복 조건 참여 순서는 서로 반대로 배정되었다(소방관 A는 기존 소

방복 조건 먼저 참여, 소방관 B는 허니콤 소방복 조건 먼저 참여). 소방 모의 작업은 Kim et al.(2019)의 연구에서 개발된 동작 프로토콜을 사용하였다(Fig. 6). Kim et al.(2019)의 연구에서 개발된 프로토콜은 국내외 선행 연구들에서 제시한 소방 동작들 중 공통된 동작들인 ‘소방 호스 끌기, 사다리 설치/오르고 내리기/해체/운반하기, 인명 구조하기, 무거운 장비 옮기기, 계단 오르내리기’등의 여덟 가지 주 동작으로 구성되어 있다.

본 연구에서 소방관들은 실험 준비실에 도착하면 300 ml의 물을 섭취하고 일정 시간 안정을 취한 후, 심박수 측정 가슴 벨트를 가슴에 두르고 손목에 심박수 수신 시계를 장착하였다(RC3, Polar Electro, Finland). 의복 내 온습도 측정을 위해 가슴 정중앙 부위에 온습도 센서(TR-72U, T&D, Japan)를 부착하였다. 실험 장소로 들어가 소방복을 착용한 채 10분 동안 앉아 안정 상태를 취한 후 실험을 시작하였다. 여덟 가지 소방

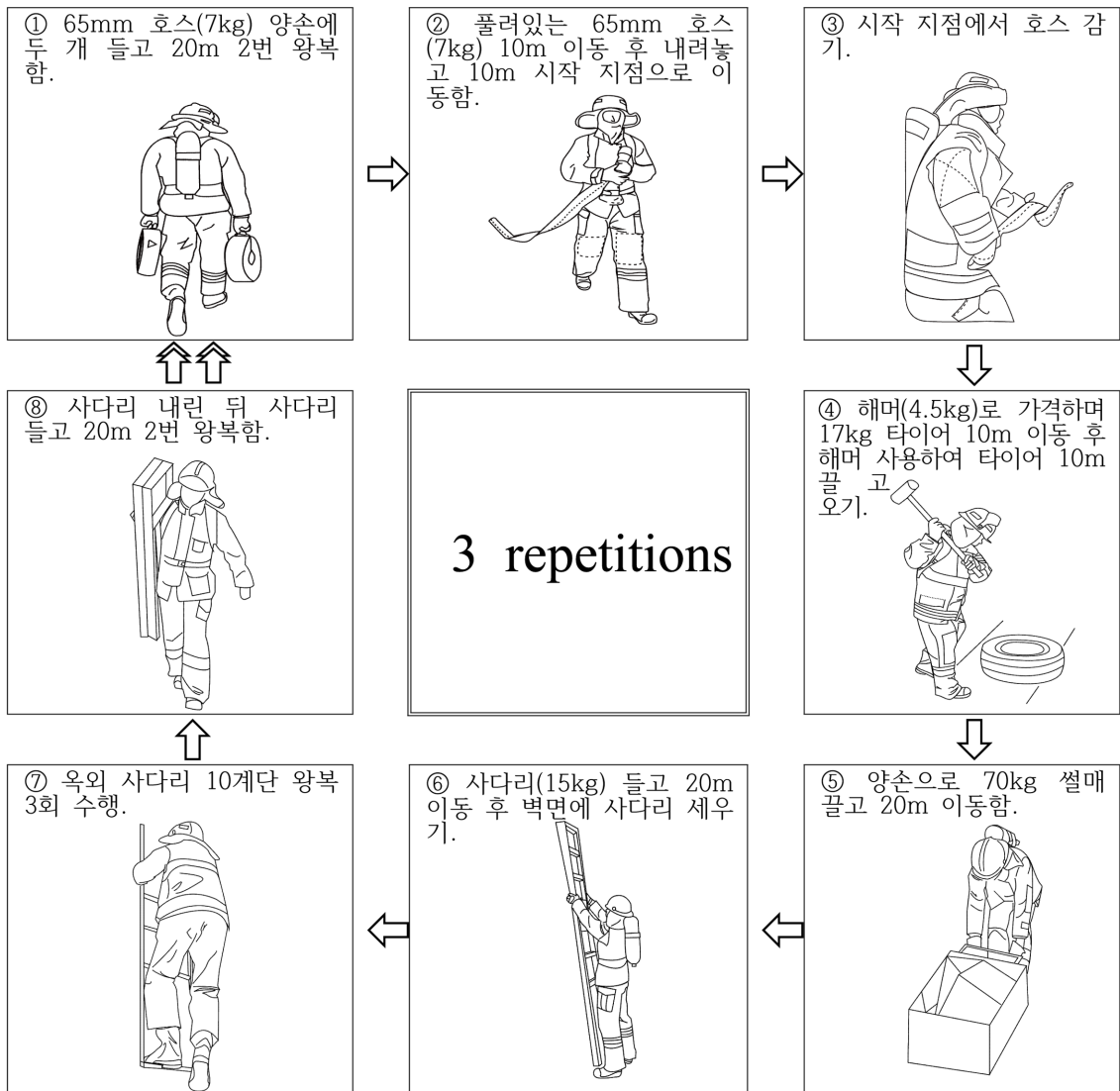


Fig. 6. Simulated firefighting tasks used in the present study (cited from Kim et al., 2019).

동작은 휴식 없이 바로 연결되었으며, 실제 소방작업지침을 바탕으로 소방관들은 뛰지 않고 최대한 빠르게 걷는 상태를 유지하도록 하였다. 여덟 가지 동작으로 이루어진 한 세트의 작업(1st circuit)이 끝나면 5분 간 의자에 앉아 휴식을 취한 후 동일한 여덟 가지 동작을 다시 수행하였으며(2nd circuit), 이를 총 3회 반복하였다. 심박수는 1초 간격으로 자동 기록되었으며, 의복 내 온습도는 5초 간격으로 자동 기록되었다.

또한 한서감, 온열쾌적감, 습윤감, 갈증감, 인지적 힘들기(RPE)는 규격화된 설문지(ISO 10551, 1995)를 이용하여 작업 시작 전, 한 세트 종료 시점에 응답하였다. 종료 시점에서의 응답은 종료 후 의자에 앉아 회복중인 상태가 아닌, 모의 작업을 마치기 직전 최대로 느낀 주관감에 대해 응답하도록 하였다. 한서감은 9점 척도[-4 매우 춥다, -3 춥다, -2 서늘(시원)하다, -1 약간 서늘(시원)하다, 0 보통이다, 1 약간 따뜻하다, 2 따뜻하다(약간 덥다), 3 덥다, 4 매우 덥다], 온열쾌적감은 7점 척도[-3 매우 불쾌하다, -2 불쾌하다, -1 약간 불쾌하다, 0 보통이다, 1 약간 쾌적하다, 2 쾌적하다, 3 매우 쾌적하다], 습윤감은 7점 척도[-3 매우 건조하다, -2 건조하다, -1 약간 건조하다, 0 보통이다, 1 약간 습하다, 2 습하다, 3 매우 습하다]. 인지적 힘들기 정도(운동 자각도)는 Borg's의 RPE 척도(6점~20점)를 사용하여 각 circuit의 종료시점에서 평가하였으며 마찬가지로 작업 마지막 순간 피로도에 대해 응답하도록 하였다. 한서감과 온열 쾌적감, 습윤감은 전신과 가슴 부위, 등 부위로 나누어 응답하였다. 3회 반복 시 각 회의 여덟 가지 동작 완료 시간 및 동작별 소요 시간을 스톱워치를 이용해 기록하였다.

소방관 2인을 대상으로 기존 소방복과 허니콤 소방복의 성능 및 개선요구사항에 대해 모의 소방작업수행 평가 전, 후 2회 인터뷰 및 설문 조사를 수행하였다. 설문지(2문항: 소방복 착용동안 습윤감과 중량감 각 7점 척도)는 Kim and Lee(2016)와 Kim et al.(2019)의 연구에서 개발된 설문지를 바탕으로 하였다. 모의소방작업 실험이 진행된 당일 외기 환경온습도는 기존 소방복 조건인 경우 기온 10°C와 습도 53%RH였으며, 허니콤 소방복 조건 진행 시에는 기온 7°C와 습도 51%RH였다.

본 연구 결과 분석은 소재 및 완제품의 물리적 특성은 3회 반복 측정하였으며 반복측정된 값의 평균과 오차(mean±error)로 표시하였다. 소방관 2인이 참여한 인체 착용 평가의 경우 개별 값 및 소방관 2인의 평균값을 제시하였다.

3. 결 과

3.1. 소방복 3층 소재의 열방호성

고위험 환경인 126 kW/m²에서 12초 노출 결과, 기존 KFI 소방복 직물 조건의 경우 12초 시점에서 통과된 열량은 2.2 kW/m²이었던 것에 비해, 허니콤 구조직물 조건에서는 0.8 kW/m²로 2.75배 열 차단효과가 있었다. 12초 노출을 마치고 화염을 바로 차단한 후에도, 기존 KFI 소방복 소재 조건의 경우 화염 차단 6초 시점에서 최대 열류량 3.6 kW/m²을 보인

반면, 허니콤 소방복 소재 조건에서는 차단 후 18초 시점에서 최대 열류량 2.8 kW/m²을 보여, 화염이 차단된 이후 열류량의 변화 양상에도 차이를 보였다.

3.2. 소방복 완제품의 물리적 특성_전신 화염마네킹과 전신 서멀마네킹 평가

ISO 13506(2017)에 따른 전신 화염 마네킹 노출 시험 결과, 소방복의 외관은 기존복과 허니콤 소방복 조건 간 현저한 차이는 없었으나 화상이 예측되는 체표면적(머리 부분 제외)은 기존 KFI 소방복의 경우 2도 화상 34.1%, 3도 화상 15.3%였으며, 허니콤 소방복의 경우 2도 화상 22.3%, 3도 화상 12.6%로, 기존 소방복 보다 허니콤 소방복 착용 시 2도 화상은 12%, 3도 화상은 3% 더 적은 면적이 예측되었다(Fig. 7).

전신 서멀 마네킹을 이용하여 측정된 열저항은 나상 시 0.096 W·°C⁻¹·m², 기존 소방복 0.234 W·°C⁻¹·m², 허니콤 소방

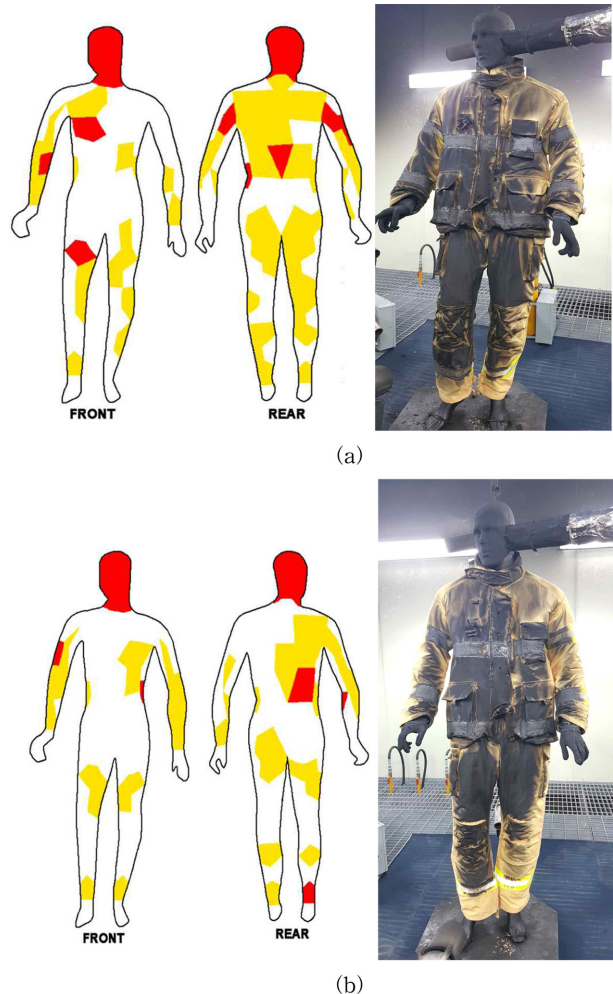


Fig. 7. Predicted burn area using a whole body flame manikin: the current firefighters' protective clothing (FPC)(a) and honeycomb firefighters' protective clothing(HPC)(b). (2 degree burn in yellow and 3 degree burn in red.

복 $0.266 \text{ W} \cdot \text{C}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 으로 이를 총 보온력(I_t) 단위로 환산할 경우 나상 시 0.619 clo, 기존 소방복은 1.509 clo, 허니콤 소방복은 1.716 clo로 계산되었다. 유효 보온력(I_{cle})은 기존 소방복 0.890 clo, 허니콤 소방복은 1.096 clo로 허니콤 소방복이 기존 소방복에 비해 유효 보온력 0.206 clo 더 높은 결과를 보여주었다.

3.3. 소방복 착용 시 소방관의 최대산소섭취량

일상복 착용 시 소방관 A와 소방관 B의 최대산소섭취량은 각각 40.6 ml/min/kg과 49.8 ml/min/kg이었으나, 기존 소방복을 착용할 경우 32.0 ml/min/kg(일상복 착용 시에 비해 21% 감소)과 45.9 ml/min/kg(일상복 착용 시에 비해 7% 감소), 허니콤 소방복을 착용할 경우 34.4 ml/min/kg(15% 감소)와 45.5 ml/

min/kg(8% 감소)로 소방복 착용에 의해 최대작업수행능력이 감소되었다. 즉 소방복 착용이 일상복 착용에 비해 최대작업수행 능력 저하를 초래했으나, 감소율에서 두 소방복 종류 간 큰 차이를 보이지는 않았다(기존 소방복 착용 시 2인 평균 14% 감소, 허니콤 소방복 착용 시 12% 감소)(Fig. 8 (a)). 최대 작업 가능 시간의 경우 일상복 착용 조건의 경우 2인 평균 22.5분이었던 것에 비해, 기존 소방복 착용 시에는 평균 13.8분, 허니콤 소방복 착용 시 13.9분으로 소방복을 착용 한 경우 일상복 착용 시에 비해 약 9분 정도 줄어들었으나, 두 소방복 조건 간 큰 차이는 발견되지 않았다.

최대산소섭취량 테스트 종료 마지막 1분 간 심박수의 평균을 살펴보면 소방관 A와 B 각각 일상복 조건 184 bpm과

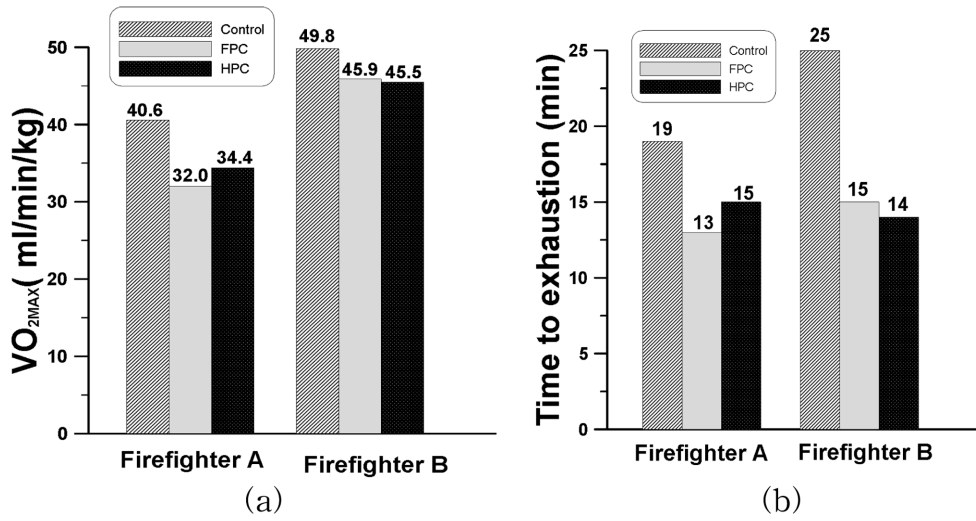


Fig. 8. Maximal oxygen uptake (VO_{2max})(a) and time to completion (b) for the three experimental clothing conditions: Control (light sport wear), FPC (the current Firefighters' Protective Clothing), and HPC (Honeycomb firefighters' Protective Clothing).

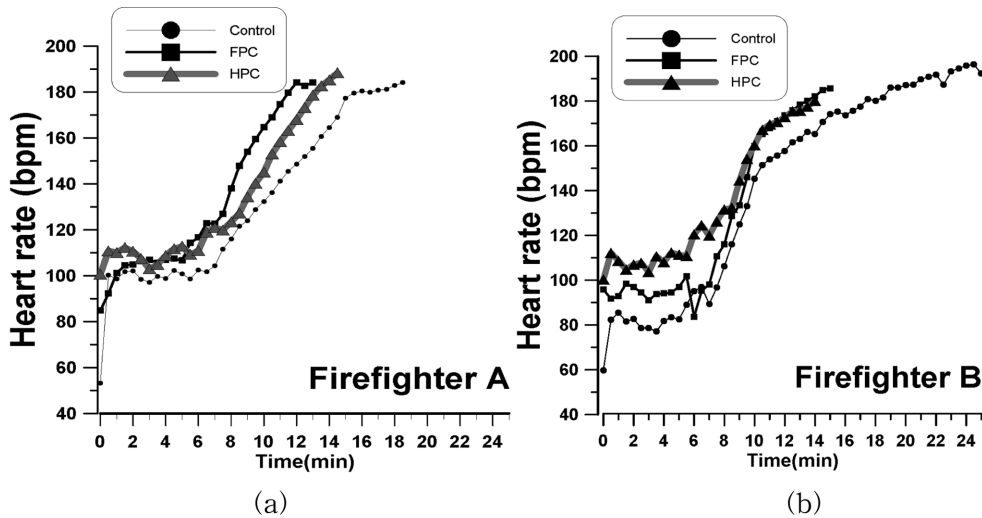


Fig. 9. Heart rates during the maximal oxygen uptake for the 3 experimental clothing conditions. Control (light sport wear), FPC (the current Firefighters' Protective Clothing), and HPC (Honeycomb firefighters' Protective Clothing).

181 bpm, 기존 소방복 조건 183 bpm과 186 bpm, 허니콤 소방복 조건 178 bpm과 186 bpm으로 세 조건 간 큰 차이는 발견되지 않았다(2인 평균 일상복 183 bpm, 기존 소방복 185 bpm, 허니콤 소방복 182 bpm)(Fig. 9). 인지적 힘들기(RPE)의 경우, 동일 시각 대비 기존 KFI 소방복 조건에서 가장 높았고, 허니콤 소방복 조건에서 가장 낮은 경향을 보였으며, 운동 종료 시점에서의 인지적 힘들기는 소방관 A와 B 각각 일상복 조건의 경우 15점과 16점(평균 15.5점), 기존 소방복 조건 14점과 12점(평균 13.0점), 허니콤 소방복 조건 13점과 14 점(평균 13.5 점)이었다.

3.4. 모의 소방작업 시 동작성

여덟 가지 동작의 1세트 모의소방동작을 3회 반복하는데 소요된 총 시간(각 반복 간 휴식 5분 제외) 소방관 A의 경우 기

존 소방복 15분, 허니콤 소방복 14분, 소방관 B의 경우 기존 소방복 13분, 허니콤 소방복 12분을 보여주었다(Fig. 10c). 각 여덟 가지 동작에 소요된 시간을 분석한 결과, 두 소방관 모두 두 소방복 조건에서 ‘사다리를 들고 20 m 왕복 후 펼치기(6번 동작)’ 동작이 45초에서 50초 사이로 가장 길었으며, 풀린 호스를 감는 동작(3번 동작)이 10초에서 15초 사이로 가장 짧았다(Fig. 10a,b).

모의 소방작업을 수행하는 동안 심박수를 살펴보면 두 소방관 모두 기본 소방복 보다 허니콤 소방복을 착용한 경우 다소 높은 심박수가 측정되었는데, 이는 첫 번째 circuit에서는 약 7 bpm, 두 번째 circuit에서는 약 8 bpm, 세 번째 circuit에서는 약 13 bpm 더 높은 값을 보였다. 세 번째 circuit의 종료 시점에서 측정된 심박수를 살펴보면 두 소방복 조건 모두에서 각각의 최대 심박수 95% 이상 수준까지 도달하였다(Fig. 11).

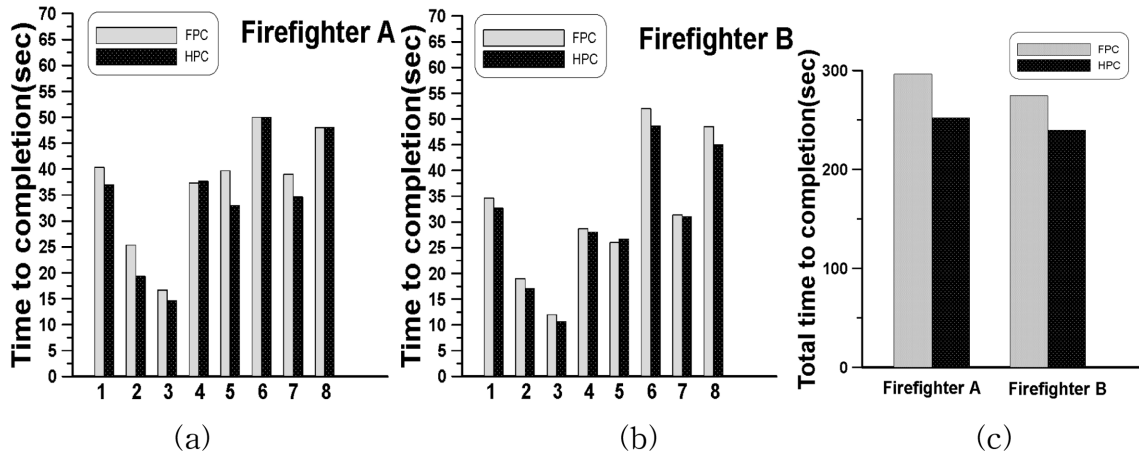


Fig. 10. Completion time of firefighter A (a) and firefighter B (b) for each task and total completion time of firefighter A and B (c). FPC and HPC represent the current and honeycomb firefighters' protective clothing, respectively.

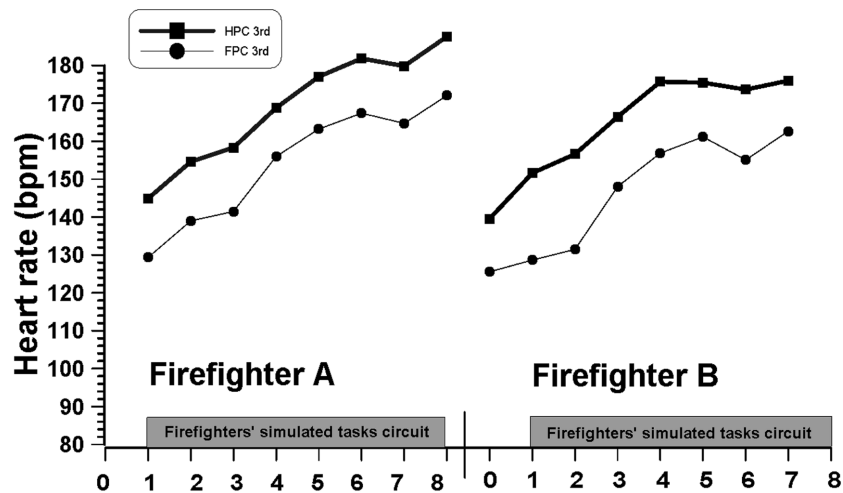


Fig. 11. Heart rates during the 8 simulated firefighting tasks for 3rd circuit. FPC and HPC represent the current and honeycomb firefighters' protective clothing, respectively.

모의 소방동작 중 가슴 부위에서 측정된 의복내 온도와 습도는 평균 29~33°C, 66~77%RH를 보였는데 소방관 A의 경우 기존 소방복에 비해 허니콤 소방복 착용 시 ~5°C 더 높은 의복 내 온도를 보였으나 의복 내 습도는 반대로 기존 소방복에 비해 허니콤 소방복 착용 시 평균 12%RH 낮은 습도를 보였다. 소방관 B는 소방관 A와 반대로 허니콤 소방복 보다 기존 소방복 착용 시 더 높은 의복 내 온도를 나타내었고, 의복 내 습도도 허니콤 소방복 (68%RH)보다 기존 소방복(77%RH) 착용 시 더 높게 측정되었다.

모의 소방 작업 마친 직후 평가된 주관감 결과를 살펴보면 두 소방관 모두 한시감은 ‘~덥다’의 범위, 온열 쾌적감은 ‘~약간 불편하다’의 범위, 습윤감은 ‘~습하다’의 범위를 보였으나 기존 소방복과 허니콤 소방복 간 뚜렷한 차이를 보이지는 않았다. RPE는 두 소방복 조건 간 큰 차이는 없었으나 소방관 A(RPE 12~14점)가 소방관 B(RPE 8~14점)에 비해 다소 더 힘들어하는 경향을 보였다. 모의 소방 작업 전후 평가된 설문 의 경우 중량감은 두 피험자 모두 기존 소방복, 허니콤 소방복에서 ‘보통이다 (전)~약간 무거웠다(전)’고 응답하여 작업 후 약간 더 무겁다고 인식하였으며, 착용감의 경우 두 소방관 모두 기존 소방복과 허니콤 소방복에서 실험 전후 ‘약간 뻣뻣했다’라고 응답하였다.

4. 논 의

본 연구는 돌발 고위험 상황에 노출된 소방관의 화상을 최소화하면서 동시에 신속회피가 가능하도록 노멕스 허니콤 구조 직물을 소방복에 적용하여 새롭게 개발한 후 이의 보호 및 쾌적 성능을 기존 소방복과의 비교를 통해 평가하였다. 대부분의 관련 선행 연구들이 일반적인 화재 진압 상황을 가정하고 이루어진 반면 본 연구는 일반 화재 수준보다 높은 화염 수준인 돌발 고위험 상황을 가정하여 이에 대응 가능한 소방복을 개발하였다는 점에 의의가 있으며, 특히 소방복 시료 상태의 평가 뿐만 아니라 완제품 상태의 평가, 보호 성능뿐만 아니라 쾌적 성능의 평가, 마네킹 착용 평가뿐만 아니라 인체 착용 평가까지 수행하여 소방복 평가를 다각화하였다는 점에서도 의의가 크다고 볼 수 있다.

먼저, 허니콤 구조직물을 삽입하여 제작한 소방복의 방염 성능을 평가하기 위해 기존 소방복과 허니콤 구조 직물을 삽입한 완제품의 열방호성과 방염 성능을 평가하였고, 그 결과 3겹에 허니콤 구조를 삽입한 직물 조건이 기존 소방복의 3겹 직물 조건에 비해 2.75배 열 차단효과(TPP)가 있음을 확인하였다. 또한, 전신 화염마네킹 노출 시험에서도, 허니콤 구조직물로 제작된 소방복의 경우에 비해 2도 화상은 12%, 3도 화상은 3%(2도 이상의 화상 총 15%) 더 적은 면적의 화상이 예측되었다. 이는 Rossi et al.(2014)의 연구에서 기존 소방복 착용 시 전신 화염 마네킹 노출 실험 결과 2,3도 화상 면적이 본 실험의 결과의 화상 면적과 상당부분 일치하므로 타당한 결과라고 여겨

진다. 그러나 화상 마네킹에서 얻어진 결과 해석 시, 한 자리에 고정된 선 자세에서 화염을 맞는 화염 마네킹의 특성상 여러 자세를 취하는 중 일어나는 소방관의 화상을 현실적으로 예측할 수 있지는 않음을 고려할 필요가 있다. 이러한 결과들을 종합해 보면 허니콤으로 제작한 소방복이 기존 소방복에 비해 고위험 화염으로부터 열 차단 효과가 우수하다고 평가할 수 있으며, 돌발 고위험 상황 노출 시 소방관을 2, 3도 화상으로부터 더 보호해 줄 수 있을 것이라 예측할 수 있다.

그러나, 소방관들이 항상 돌발 고위험 상황에 노출되는 것이 아니기 때문에 상시 착용 시 쾌적성도 반드시 고려해야 할 요소일 것이다. 보호 성능 향상으로 쾌적성이 저하된다면 이는 인체 열 축적으로 이차 위험 요소가 될 수도 있다. 더욱이 전신 서멀 마네킹을 통해 측정된 열저항 결과를 보면 허니콤 소방복의 보온력이 기존 소방복에 비해 0.206 clo 더 높은 보온력 값을 보여주었기 때문에, 실제 인체 착용 시에도 이러한 보온력 차이가 소방관의 쾌적성을 저하하는지를 평가해 볼 필요가 있다. 본 연구의 모의 소방동작 평가 중 가슴 부위에서 측정된 의복 내 온습도 결과를 보면 두 의복조건 간 일관성 있는 차이 없이 의복 내 온도는 29~33°C, 의복 내 습도는 66~77%RH를 보였다. 이러한 결과는 Kim et al.(2019)의 연구에서 환경은 32.1±4.3°C에서 기존 KFI 소방복 착용 시 의복 내 온습도가 33.6±0.8°C, 80%RH가 나온 것으로 보아 높지 않은 결과라고 해석할 수 있다. 또한 쾌적하다고 느낄 때의 의복내 온습도가 32±1°C와 50±10%RH이라고 보고한 Kim(2005)의 연구에 의하면, 본 연구의 모의 소방동작 평가 중 측정한 기존 소방복과 허니콤 소방복의 의복내 온습도는 매우 덥거나 매우 불편한 수준의 의복 기후는 아닌 것으로 판단할 수 있다. 소방관 A가 허니콤 소방복을 착용하고 모의 소방작업 실험 수행 시 기존 KFI 소방복 착용 시에 비해 5°C 더 높고, 습도는 12%RH 더 낮게 측정된 반면, 소방관 B의 경우에는 허니콤 소방복에 비해 기존 KFI 소방복 착용 시에 더 높은 의복 내 온도와 습도를 보여주었다. 즉, 허니콤 소방복의 보온력이 더 높았음에도 의복 내 온습도에서 항상 더 높은 결과를 보여주지는 않았다는 점은 0.206 clo라는 보온력 차이가 소방작업을 하는 동안 인체 가슴 부위 의복기후에 현저한 영향을 줄 정도의 차이는 아니라는 점을 시사한다. 또한, Choi and Kim(2011)의 연구에 따르면 0.206 clo의 보온력이란 보통 ISO 9920에 따라 면소재의 내복(0.18 clo), 면 소재의 반바지(0.21 clo), 일반적인 반소매 셔츠(0.23 clo)에 해당하는 보온력으로, 이는 추운 환경이나 안정 상태에서 감지할 만한 보온력일 수도 있으나 화재진압 현장에서 고강도의 작업을 수행하는 경우 쾌적성에 미치는 영향은 미미할 것이라 생각해볼 수 있다. 이러한 결과를 모두 종합한 결과, 허니콤 구조직물이 삽입된 소방복의 보온력이 약 0.2clo 높았으나 소방관의 쾌적성을 저해할 정도는 아니었다고 결론내릴 수 있다.

세 번째로 허니콤 구조 직물로 제작된 소방복 착용이 기존 소방복에 비해 소방관의 최대작업수행능력을 유의미하게 저하

시키는 지를 평가하였다. 선행연구 Lee et al.(2013)에 따르면 소방복 착용 시 최대작업수행능력은 일상복에 비해 평균 8% 감소하였다. 본 실험에서는 최대작업수행능력을 위해 평가한 VO_{2max} 에서 소방복 착용이 일상복 착용에 비해 평균 13% 감소라는 조금 더 큰 저하를 가지고 왔지만, 이는 Lee et al.(2013)의 연구에서 VO_{2max} 진행시 적용된 Bruce protocol이 본 연구에 비해 초기 Rest의 15분이 주어졌고, 본 연구에 참가한 소방관이 2명인 것을 감안하면 타당한 감소율이라고 볼 수 있다. 그리고 두 소방관 간의 체격(소방관 A: 94 kg, 소방관 B: 67 kg) 혹은 기본 체력으로 인해 VO_{2max} 결과 차이는 있었으나, 두 소방복 조건(기존 소방복: 39 ml/min/kg, 허니콤 소방복: 40 ml/min/kg) 간 큰 차이는 발견되지 않았다. 즉, 소방복 착용이 소방관의 최대작업수행능력을 저하시키기는 하나, 허니콤 구조 직물 소방복과 기존 소방복 간에 일관성 있는 차이는 발견되지 않았다. 최대 작업 가능한 시간의 결과 일상복 착용 조건의 경우 평균 22.5분이었던 것에 비해, 기존 소방복 착용 시에는 평균 13.8분, 허니콤 소방복 착용 시 13.9분으로 소방복 착용에 의해 약 9분 정도 줄어들었으나, 이 또한 소방복 조건 간 큰 차이는 발견되지 않았다. 또한, 허니콤으로 제작한 소방복 착용 시 소방 동작 또한 어떠한 영향을 끼치는지 알아보기 위해 모의 소방 동작성 평가를 진행하였다. 기존 소방복의 경우 평균 14분, 허니콤 소방복의 경우 평균 13분이 소요되었다. 이는 Kim et al.(2019)에 따르면 일반 소방복 착용 조건에서 13.9±1.8분으로 나온 것으로 보아, 타당한 연구결과라고 여겨진다. 따라서 허니콤으로 제작한 소방복이 기존 소방복에 비해 소방 동작을 더 방해한다고 볼 수는 없을 것이다.

마지막으로 본 실험의 최대산소섭취량 평가와 모의소방작업 평가에는 두 명의 현직 소방관이 참여하였기 때문에 두 소방복 조건 간 통계적인 유의성을 논할 수는 없다는 단점이 지적될 수 있다. 반면 본 연구는 새로운 소방복의 제작에서 시작하여 소재의 물성 평가, 완제품의 화염/서멀 마네킹 착용 평가, 인체 착용 시 최대작업수행 능력과 동작성을 평가하는 단계들을 모두 포함하도록 구성되었기 때문에 소방복의 보호와 쾌적 성능 평가 방법을 다각화했다는 점에서 큰 의미가 있다. 또한 두 명으로부터 나온 결과가 대체로 두 의복 조건 간의 일관성 있는 차이를 보여주지 않았기 때문에 허니콤 구조직물 소방복과 기존 KFI 소방복의 인체 착용 평가에서 두 조건 간 현저한 차이는 발견되지 않았다고 결론내리는 것이 타당하다. 다만, 보다 신뢰할 만한 차이를 관찰하고자 할 경우 적정 피험자수를 확보하여 추가 실험을 진행할 필요가 있다.

5. 결 론

본 연구는 돌발고위험 상황에 노출된 소방관 안전을 위해 노멕스 허니콤 구조를 삽입한 방화복을 새로 제작하였고, 기존 KFI 인증 소방복과의 비교를 통해 개발된 허니콤 소방복의 보호 및 쾌적 성능평가를 수행하였다. 평가 결과 기존 소방복에

비해 노멕스 허니콤 구조 직물이 삽입된 소방복의 소재의 열방호성이 더 우수하였으며, 완제품 착용 시 예측되는 2, 3도 화상 면적도 15% 더 적었다. 최대작업수행능력의 한 지표인 최대산소섭취량은 일상복 착용에 비해 소방복 착용 시 10% 이상의 감소를 보였으나 두 소방복 조건 간 일관성 있는 차이는 발견되지 않았다. 최대 작업 가능 시간의 경우에도 소방복 착용에 의해 평균 9분이 줄었으나 두 소방복 조건 간 차이는 발견되지 않았다. 작업 종료 시점에서의 인지적 힘들기의 경우에도 기존 소방복 조건과 허니콤 소방복 조건 간 큰 차이는 발견되지 않았다. 의복내온도와 습도의 경우 두 소방복 조건 간 일관성 있는 차이를 발견할 수 없었다. 소방복의 총 보온력은 기존 KFI 소방복에 비해 허니콤 소방복이 0.206 clo 더 높았으나 이 차이가 소방복 내 의복 내 온습도나 소방관의 한서감에 부정적인 영향을 미칠 정도는 아닌 것으로 평가되었다. 이상의 결과들을 종합하면, 노멕스 허니콤 구조 직물을 삽입하여 새롭게 제작된 허니콤 소방복이 기존 KFI 소방복에 비해 돌발 고위험 상황에 노출된 소방관의 화상을 최소화할 수 있으면서 소방관의 최대작업수행 능력과 동작성을 방해하지 않아 신속한 회피 명령 지침에 적합한 디자인 구조라 결론내릴 수 있다.

감사의 말

본 연구는 국민안전처 소방안전 및 119구조구급기술연구개발사업(MPSS-소방안전-2015-82)의 연구비 지원으로 수행되었음.

References

- Borg, G. A. (1982). Psychophysical bases of perceived exertion. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 14(5), 377-381.
- 'Casualties and injuries of firefighters'. (2006). *Power of truth*. <http://www.poweroftruth.net/column/mainView.php?kcat=2013&table=impeter&uid=547f>
- Choi, J. W., & Kim, M. J. (2011). *Clothing and health*. Seoul: Gyomoon.
- Drysdale, D. (2005). *An introduction to fire dynamics* (2nd ed.). Toronto: John Wiley & Sons.
- Gorbett, G. E., Hopkins, R., & Kennedy, P. (2007). The current knowledge & training regarding backdraft, flashover, and other rapid fire progression phenomena. *Proceedings of the National Fire Protection Association World Safety Conference*, Boston, MA.
- ISO 10551. (1995). *Ergonomics of the thermal environment-Assessment of the influence of the thermal environment using subjective judgement scales*. Geneva: International Organization for Standardization
- ISO 13506. (2017). *Protective clothing against heat and flame-test method for complete garments-prediction of burn injury using an instrumented manikin*. Geneva: International Organization for Standardization
- ISO 5084. (2017). *Textiles -Determination of thickness of textiles and textile products*. Geneva: International Organization for Standardization
- ISO 9920. (2007). *Ergonomics of the thermal environment - Estimation of thermal insulation and water vapour resistance of a clothing ensemble*. Geneva: International Organization for Standardization

- 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 Korean Living Environment System*, 26(1), 9-24. doi:10.21086/ksles.2019.02.26.1.9
- Kim, S. Y. (2005). *The relationship between clothing microclimate and cold/heat tolerance*. Unpublished doctoral dissertation, Seoul National University, Seoul.
- Kim, S. Y., & Lee, J. Y. (2016). Development of firefighting performance test drills while wearing personal protective equipment. *Fire Science*, 30(1), 138-148. doi:10.7731/KIFSE.2016.30.1.138
- Lee, J. Y., Bakri, I., Kim, J. H., Son, S. Y., & Yutaka, T. (2013). The impact of firefighter personal protective equipment and treadmill protocol on maximal oxygen uptake. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 10(7), 397-407. doi:10.1080/15459624.2013.792681
- NFPA 1971. (Eds.). (2013). *Standard of protective ensembles for structural fire fighting and proximity fire fighting*. Quincy, MA: Author.
- Park, J. (2019, March 20). Mathematical secrets in hexagonal architecture [육각형 건축물에 담긴 수학적 비밀]. *Dong-a Ilbo*. Retrieved May 15, 2019, from <http://news.donga.com/3/all/20190319/94639064/1>
- Rossi, R. M., Schmid, M., & Camenzind, M. A. (2014). Thermal energy transfer through heat protective clothing during a flame engulfment test. *Textile Research Journal*, 84(13), 1451-1460. doi:10.1177/0040517514521115
- 'Royal Air Force'. (2014, June 15). Do you wear your aircrew underwear?. *The aircrew equipment integration group at the Royal Air Force Centre of aviation medicine conducted burn injury trials at the British Textiles Technology Group*. Retrieved June 15, 2017, from https://www.raf.mod.uk/rafcms/mediafiles/24A5AAA9_5056_A318_A86185BD6842BAF3.pdf.
- Testing standards of firefighters' protective equipment. (2013). *Korea fire institute*. https://www.kfi.or.kr/home/brd/brd230/brd230_Type2_Lis.do?board_seq=40& article_seq=20304&cat_seq=62&search_con=undefined

(Received 15 April 2019; 1st Revised 8 May, 2019;
2nd Revised 22 May, 2019, Accepted 21 June, 2019)