Fire Sci. Eng., Vol. 30, No. 1, pp. 138-148, 2016 [Research Paper]

소방방화복을 착용했을 때의 소방진압 업무 적합도 평가 프로토콜의 개발

김시연* · 이주영*,**†

*서울대학교 의류학과, **서울대학교 생활과학연구소

Development of Firefighting Performance Test Drills while Wearing Personal Protective Equipment

Siyeon Kim* · Joo-Young Lee*,**†

*Department of Textiles, Merchandising and Fashion Design, Seoul National University
**Research Institute of Human Ecology, Seoul National University

(Received December 24, 2015; Revised January 27, 2016; Accepted January 27, 2016)

요 약

본 연구에서는 화재 현장에서의 소방진압 업무 적합도를 평가하기 위한 소방관 모의작업 프로토콜을 개발하였고 기존의 체력검정법과 평가 방식을 비교하였다. 본 연구에서 개발한 프로토콜은 모든 소방용 개인보호구를 착용한 채 복사열원 앞에서 3분 동안 걷는 동작을 포함한 총 여덟 가지 동작으로 구성되었으며 5분의 휴식을 사이에 두고 3회 반복되었다. 연구 결과로, 약 30분의 테스트 동안 소방관의 직장온과 심박수는 각각 38.5 °C, 185 bpm까지 상승하였다. 또한 총 소요시간과 연령보정치를 적용하지 않은 기초체력검정 결과는 유의하게 부적 상관관계를 보였다($r = -0.728$, $p < 0.05$). 그러나 진압 경력이 긴 소방관일수록 총 소요시간은 길었던 반면, 총 소요시간과 생리적 부담 수준이 함께 고려된 평가 방식에서는 기초체력검정 결과보다 더 높은 점수를 얻었다. 이러한 결과는 단순하게 소요시간만을 이용한 평가는 생리적 서열부담을 무시할 수 있으며, 소방관 모의작업 프로토콜 이용 시 생리적 부담 수준을 함께 고려할 때에 소방진압 업무 적합도에 대한 보다 심층적인 평가가 가능함을 보여준다.

ABSTRACT

A firefighting simulation was developed in order to assess the physical work capacity of firefighters. The simulation consisted of eight common firefighting tasks, including walking with radiant heat for 3 min while wearing full personal protective equipment (PPE). Nine professional firefighters performed the test a total of three times with a 5 min rest interval between each session. The entire series of tests took approximately 30 min to complete (381 ± 30 s). Rectal temperatures were found to increase from 37.4 ± 0.3 °C to 38.5 ± 0.4 °C, while heart rates were found to increase from 92 ± 18 bpm to 185 ± 13 bpm during testing. Time to completion of the test drills and non-modified physical fitness values showed a significantly negative correlation ($r = -0.728$, $p < 0.05$). Firefighters who had longer periods of firefighting service had longer duration time and also recorded higher scores using an integrated scoring system of time to completion (TTC) and physiological strain index (PhSI). The results indicated that the determination of TTC alone can be a misrepresentation of capability, as it neglects to account for accumulated heat strain. The simulated firefighting test provided a useful insight into physical fitness level, but also the comprehensive work capacity of the firefighters when assessed based on TTC and PhSI.

Keywords : Simulated firefighting work, Physiological heat strain, Fitness standard, Firefighting performance test, Personal protective equipment

1. 서 론

소방관은 다양한 위험요소가 산재한 고온의 환경에서 20~30 kg에 달하는 개인보호구를 착용한 채 신체적 강도가 높은 업무를 수행해야 하는 매우 높은 체력적인 수준을 요구하는 직업이다[1]. 이 때 개인보호구는 의복무게의 증량, 동작성(mobility)의 저해[2], 그리고 피부면을 통한 체열의 발산을 방해함으로써 인체의 생리학적 부담을 가중시킨다[3]. 소방용 개인보호구를 착용했을 때 산소소비량($\dot{V}O_2$)은 0.8~1.2 $l \cdot min^{-1}$ 증가하며, 모든 장비를 착용한 상태에서 소방관의 실제 작업을 수행했을 때 최대심박수(HR_{max})는 183~184 bpm으로[4-6], 이는 개인의 최대심박수

† Corresponding Author, E-Mail: leex3140@snu.ac.kr
TEL: +82-2-880-8746, FAX: +82-2-875-8359

ISSN: 1738-7167
DOI: http://dx.doi.org/10.7731/KIFSE.2016.30.1.138

의 95~99%에 상응하는 값이다. 이는 방화복을 착용한 상태에서의 소방업무의 수행이 높은 심혈관계 부담을 야기함을 의미한다. 실제 소방관의 작업환경의 높은 환경온도와 복사온도를 통한 서열부담을 증가를 고려해 본다면, 실제 소방관의 작업 중 심혈관계 부담은 그 이상이 될 것이므로 소방작업이 소방관으로 하여금 생리적으로 위험한 상황에 놓이게 할 가능성이 매우 높다. 따라서 소방관의 신체적 능력이 소방업무를 수행하기에 적합한지를 판단하기 위한 보다 적합하고 타당한 체력검정 테스트(physical fitness test)가 시행되어야 한다.

지금까지 해외의 많은 연구자들은 소방관의 체력을 테스트하기 위한 다양한 평가방법을 제안해 왔다. 소방관에게 기본적으로 요구되는 근력과 근지구력, 심폐지구력과 허리부상의 위험을 낮추기 위한 허리의 유연성 등의 신체능력을 평가하기 위해 악력, 배근력, 오래 달리기, 제자리 멀리 뛰기, 그리고 앉아 허리 앞으로 굽히기 등의 테스트가 있으며 현재 우리나라에서도 이와 같은 소방관의 체력검정을 매년 실시하고 있다. 하지만, 실제 화재 현장에서 소방관에게는 이러한 기초 체력 평가에서 측정하는 체력을 넘어선 보다 복합적인 능력이 요구된다[7]. 우선, 소방관은 약 20~30 kg에 달하는 소방용 개인보호구를 항상 착용해야 하는데, 이는 소방관의 산소소비량을 증가시키며[2,5,6], 근피로도와 서열부담을 가중시킨다[8-11]. Skoldstrom[12]은 45 °C에서 3.5 km · h^{-1}로 걷기 운동을 지속했을 때, 운동복을 입은 사람의 직장온 증가량은 0.23 °C이었던 반면, 소방방화복을 착용했을 때는 2.24 °C이었다고 보고했다. Boyd et al.[13]은 소방관의 실제 화재진압 동작 10종으로 구성된 프로토콜을 51명의 소방관을 대상으로 총 6회 실시했는데, 네 번째 시행부터 수행능력의 향상이 보고되었으며, 일련의 동작을 수행하는 데 페이스 조절 능력(pacing strategy)이 기여했다고 언급했다. 이는 업무의 숙련도와 능숙도가 실제 소방업무의 수행에 영향을 미친다는 것을 암시한다.

이와 같은 이유로, 소방관의 화재진압 업무 적합도 혹은 진압 시 건강의 위험성을 평가하기 위해서 실제와 유사한 환경조건과 동작을 모사하는 것이 필요하다고 제안되었다[4]. Davis et al.[4]은 소방관의 직무관련 동작들 가운데 대표적인 다섯 가지 동작(사다리 펼치기, 호스 옮기기, 호스 당기기, 무거운 짐 옮기기, 해머를 이용한 강제진입)을 소방업무 능력 평가에 사용하였으며, Deakin et al.[14]은 실제 소방업무를 고려하여 총 10가지 동작으로 이루어진 소방관 모의작업 체력 평가 프로토콜(Canadian forces firefighter physical fitness maintenance evaluation)을 개발하였는데, 이 때 호스를 끌기, 사다리를 올라가기, 사다리를 옮기기, 해머를 이용하여 강제 진입하기, 희생자 끌기, 사다리 철수하기 등의 동작을 포함하였다. 또한 이 때 평가에 사용되는 호스와 사다리 등 장비의 무게와 매 동작의 이동 거리를 특정지음으로써 개발된 프로토콜의 활용 시 동일한 방법으로 진행될 수 있도록 하였다. 다양한 연구들에서 소방관의 직무관련 동작을 반영한 체력 평가 프로토콜에서는 실제 화재진압 환경을 더욱 반영하기 위해서 실제 화재를 발생시켜 진행하기도 하며[15], 고온의 환경온도로 유지되는 실험실에서 수행하거나[16], 짧은 휴식을 사이에 둔 여러 번의 반복 작업, 혹은 실험 및 평가 환경의 적합성을 고려하여 세부적인 평가 방법에 변화를 준다.

소방관의 화재진압 업무 적합도 평가에서의 또 다른 이슈는 평가 방법, 즉 채점 방식이다. 위와 같이 소방관의 화재진압 업무 적합도를 평가하기 위한 소방작업 동작을 활용한 소방업무수행검사는 현재 국내에서도 소방기술경연대회에서 실시되고 있다[17]. 이 검사는 호스전개, 강제진입, 물건 올리기, 인명 구조, 계단 오르기의 다섯 가지 동작으로 구성되어 있는데, 평가는 소요시간으로만 이루어지고 있다. 소요시간이 짧을수록 더 높은 점수를 받기 때문에 소방관들은 소요시간을 최소화하기 위해, 같은 동작을 수행하면서도 더 많은 에너지를 소비하며 이는 서열부담의 조절을 방해한다. 실제 소방작업 상황에서는 서열부담과 심혈관계 부담을 고려하여 페이스 조절을 해야 한다는 것을 고려해볼 때, 이와 같은 속도 위주의 평가 방식이 화재진압 적합성을 평가하기에 적합한 지에 대한 논의가 필요하다.

본 연구는 높은 수준의 복합적인 체력을 요하는 소방관의 직무특성을 반영하는 모의작업 프로토콜을 개발하고, 화재진압 적합성을 평가하기에 보다 적합한 평가방식을 제안하는 것을 목표로 하였다. 본 연구는 소방관의 작업동작 뿐 아니라, 환경 조건과 작업 패턴 등의 작업 특성을 반영하는 소방관 모의작업 프로토콜을 개발하고, 그 평가결과를 심폐지구력 평가 결과(VO_{2max}, HR_{max}), 그리고 현재 우리나라에서 시행되는 체력검정결과와 비교해봄으로써, 현재 체력평가의 적합성을 재고하고 소방관의 모의작업을 활용한 체력평가의 가능성을 진단해보고자 한다.

2. 연구방법

2.1 피험자 특성

본 실험에는 총 아홉 명의 건강한 현직 소방관(나이 38 ± 8세, 키 174 ± 5 cm, 체중 74 ± 10 kg, 소방관 경력 9 ± 9년, 최대산소섭취량(VO_{2max}) 51 ± 8 ml · kg^{-1} · min^{-1}, 최대심박수(HR_{max}) 192 ± 8 bpm)이 실험에 참여하였다. 이들은 실험 전 실험의 내용에 대한 충분한 설명을 들었으며, 서면으로 실험 참여에 대한 동의를 얻었다. 본 실험은 서울대학교 생명윤리위원회의 승인을 얻었다(IRB No. 1510/001-017).

2.2 소방관 화재진압 적합도 평가 방법

실험참여자는 각자의 인체 사이즈에 맞는 신형 소방방화복(4, 6, 9호 중 선택)을 착용하였고, 호흡기 보호구(self-contained breathing apparatus, SCBA)를 포함한 모

든 소방용 개인보호구(장갑, 두건, 헬멧, 고무부츠)를 착용하였다. 다만, 호흡기 보호구의 안면부 마스크는 착용하지 않았으며, 호흡기 보호구에서도 분리되었다. 방화복 내부에는 긴팔 티셔츠(면 100%)와 운동복 바지(면 100%), 그리고 양말과 속옷을 착용했다. 호흡기 보호구는 공기가 100% 채워진 상태였으며, 이 때 호흡기 보호구의 무게는 8.9 kg이었다. 실험참여자가 착용한 방화복, 그리고 호흡기 보호구를 포함한 모든 소방용 개인보호구의 무게는 약 16 kg이었다.

본 실험에서는 Deakin et al.[14]이 제안한 프로토콜에 실제 국내에서 이용한 소방장비, 그리고 이용 가능한 연구시설을 고려하여 총 8단계의 동작으로 한 세트를 구성하였으며, 5분의 휴식을 사이에 두고 총 3회의 세트를 반복하는 것으로 다음과 같이 실험 프로토콜을 구성하였다(Figure 1); 1) 65 mm 호스(7 kg) 두 개를 양 손에 들고 40 m 걸어서 이동, 2) 65 mm 호스(7 kg) 두 개를 양 손에 들고 3개 층(66 계단)을 걸어서 올라감, 3) 15 kg 사다리를 들고 20 m를 이동하여 벽면에 사다리를 세움, 4) 사다리를 다시 내리고 사다리를 든 채 20 m 걸어서 이동함, 5) 65 mm 호스(7 kg) 두 개를 양 손에 들고 5개 층(110 계단)을 걸어서 내려감, 6) 4.5 kg 해머를 이용하여 고무 타이어를 힘껏 3회 타격함, 7) 복사열원을 마주보고 트레드밀에서 5.5 km · h^{-1} 속도로 3분 간 걷기, 8) 70 kg의 썰매를 양손으로 당겨서 20 m를 이동함. 본 프로토콜은 소방관의 작업 특성을 충분히 반영한 체력평가를 위한 모의작업 실험 프로토콜로 다음과 같은 네 가지 요소가 반영한 것이다: 1) 모든 개

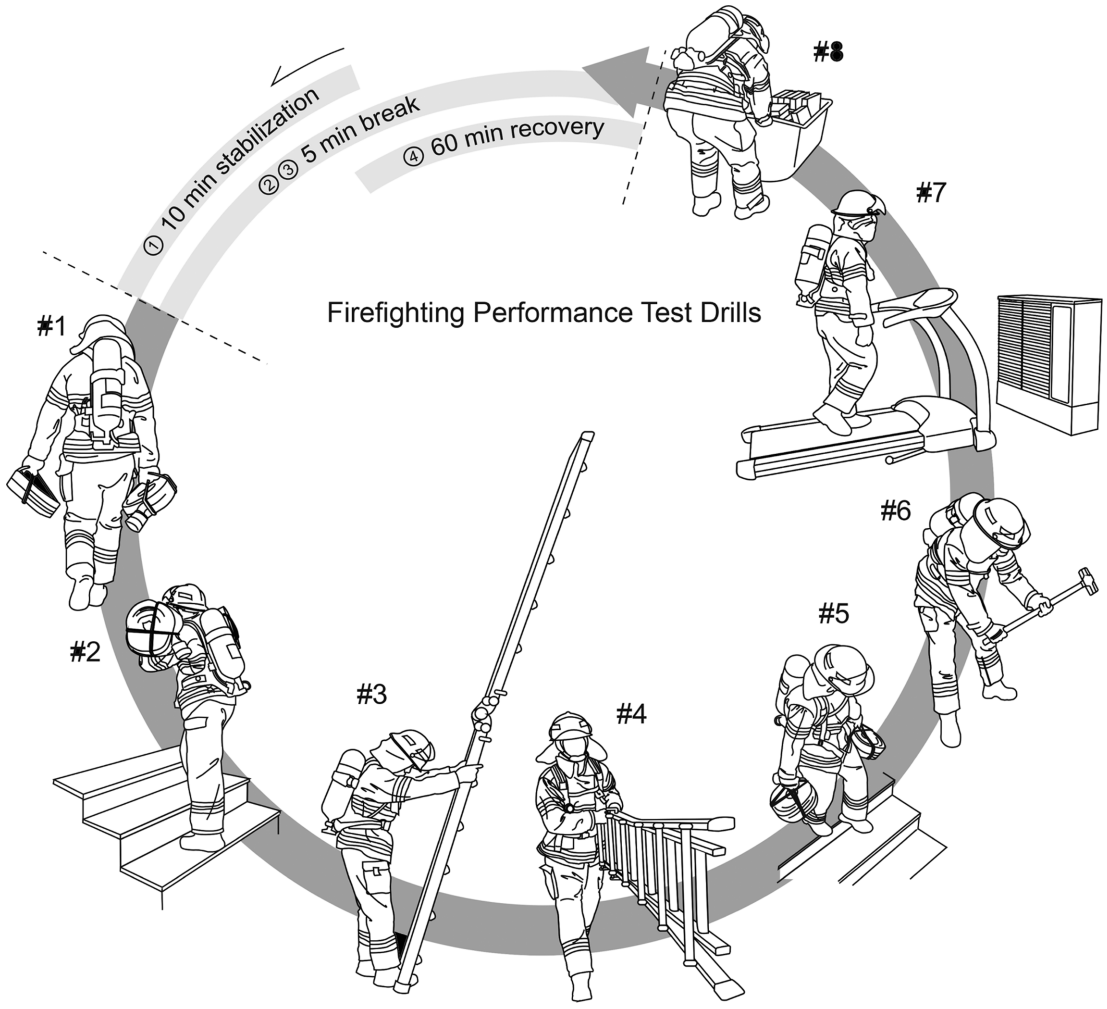

Figure 1. Experimental protocol. Note: #1 Carrying hose: 40 m walking with two 65 mm rolled-up hoses (7 kg each) in both hands; #2 Going up the stairs: going up six flights of stairs (66 steps) with two 65 mm (7 kg each) in both hands; #3 Carrying and setting up a ladder: 20 m walking with a ladder (15 kg) and setting a ladder to the wall; #4 Withdrawing and carrying a ladder: taken down a ladder (15 kg) and 20 m walking with the ladder; #5 Going down the stairs: going down ten flights of stairs (110 steps) with two 65 mm (7 kg each) in both hands; #6 Simulated forcible entry: striking a rubber tire heavily using a 4.5 kg hammer three times; #7 Walking with facing radiant heat: walking on the treadmill in 5.5 km · h^{-1} while facing on radiant heat; #8 Pulling a victim: pulling a 70 kg sledge 20 m. One circuit which consists of eight tasks was repeated three times with a 5 min break after each drill. Firefighters took off a helmet, a hood, and gloves with a zipper of bunker jacket lowered.

Table 1. Experimental Environment

Phase		Ambient temperature (°C)	Ambient relative Humidity (%RH)	Air velocity ($m \cdot s^{-1}$)	Radiant temperature (°C)
Preparation		24.7 ± 0.5	51.9 ± 11.0	< 0.05	-
Circuit	1	23.8 ± 1.3	31.1 ± 1.3	< 0.05	-
	2	23.2 ± 0.7	30.9 ± 1.1	0.2 ± 0.1	-
	3	23.4 ± 0.3	28.6 ± 4.9	0.4 ± 0.1	27.9 ± 5.5
	4	23.4 ± 0.3	28.6 ± 4.9	0.4 ± 0.1	27.9 ± 5.5
	5	23.2 ± 0.7	30.9 ± 1.1	0.2 ± 0.1	-
	6	24.7 ± 0.5	51.9 ± 11.0	< 0.05	-
	7	36.1 ± 0.1	16.8 ± 4.4	< 0.05	-
	8	24.7 ± 0.5	51.9 ± 11.0	< 0.05	-
Rest, Recovery		24.7 ± 0.5	51.9 ± 11.0	< 0.05	-

Data were expressed as Mean ± SD.

인보호구의 착용, 2) 실제 소방업무 관련 동작 포함, 3) 환경적 서열 스트레스, 4) 작업과 휴식의 반복적인 수행.

첫 번째 세트를 시작하기 전에는 초기 안정 시 생리적, 주관적 상태를 측정하기 위해 10분의 안정기를 가졌으며, 세 번째 세트의 여덟 번째 동작이 완료되면, 곧바로 장갑과 헬멧, 두건, 호흡기 보호구를 제거하였으며, 방화복 상의의 지퍼를 열어둔 채로 60분 간 휴식기를 가졌다. 실험참여자들은 모든 동작을 수행할 때 빠르되, 뛰지 않는 속도를 유지하도록 요청하였으며, 실험을 수행하기 전에, 프로토콜에 대한 충분한 설명을 한 후, 예행연습을 실시함으로써 첫 번째 세트에서 프로토콜에 대한 숙지 부족으로 인해 소요시간이 길어지지 않도록 하였다.

실험참여자는 휴식과 회복기에 원하는 양만큼 자유롭게 음수를 했으며, 한 번의 실험을 제외한 모든 실험은 오전 10시~오후 2 시에 진행되었다. 실험은 다양한 동작을 포함하고 있었던 이유로 인해, 실내, 건물의 복도, 실외 등 다양한 환경에서 동시에 진행되었으며, 각 동작 별 환경 조건은 Table 1과 같았다. 실험 도중 서열 부담을 포함한 과도한 신체적 부담으로 인한 안전사고가 발생하지 않도록 하기 위해 본 실험에서는 실험 도중 직장온이 39.2 °C에 도달하거나, 실험을 그만두고 싶다는 의사를 실험참여자가 밝히는 경우 곧바로 실험을 중단하였다. 총 아홉 명의 실험참여자 가운데 두 번째 순환에서 실험을 중단한 한 소방관을 제외한 여덟 명의 소방관이 모두 끝까지 실험을 완료하였다.

2.3 VO_{2max}, HR_{max} 측정

VO_{2max}과 HR_{max}는 측정은 소방관 화재진압 적합도 평가와 다른 날 시행되었거나, 혹은 동일한 날 2시간 이상의 간격을 두고 측정되었다. 실험참여자들은 운동화와 운동복을 착용했으며, 트레드밀에서 천천히 걷기($4\ km \cdot h^{-1}$)로 시작하여 1분마다 $1\ km \cdot h^{-1}$씩 더 빠르게 뛰었으며, 실험참여자들이 더 이상 운동을 지속할 수 없고, 산소소비량의 증가가 정체된 구간에서의 산소소비량과 심박수를 VO_{2max} 그리고 HR_{max}로 하였다[18,19].

2.4 소방관 체력검정

소방관 체력검정은 본 실험에 참여한 아홉 명의 소방공무원들의 2015년 4월에 소방재난본부에서 실시했던 체력검정 결과를 이용하였다. 검정 종목은 총 6종으로 악력, 배근력, 앉아 윗몸 앞으로 굽히기, 왕복 오래달리기, 윗몸 일으키기, 제자리 멀리뛰기로 구성되며, 각 종목별 측정기록을 1~10점으로 평가한 후 6 종목 측정점수와 연령대별 보정치(35세 이하: 2점, 36~40세: 7점, 41~45세: 9점, 46~50세: 12점, 51~55세: 15점, 56세 이상: 19점)를 모두 합산하여 산정한다. 본 연구에서는 실험참여자로 참여한 소방관들의 실제 체력검정 결과에서 연령대별 보정치를 합산한 것(modified physical fitness test)과 합산하지 않은 것(non-modified fitness test)을 분석에 모두 이용하였다.

2.5 측정항목 및 장비

인체의 서열부담을 측정하는 지표인 심부온은 직장온으로 측정하였는데, 직장온은 직장온 센서를 항문 괄약근 뒤 16 cm 깊이로 삽입하여 매 5초 마다 측정하였다. 피부온은 인체 7부위(이마, 가슴, 윗팔, 넓적다리, 종아리, 발등, 발가락)에서 5초 간격으로 측정하였다. 직장온과 피부온은 데이터 로거(LT-8A, Japan)를 통해 기록, 저장되었다. 심혈관계 부담을 평가하기 위한 심박수는 가슴벨트와 손목시계로 구성된 Polar 사의 심박수 측정기(RS400, Polar, Finland)를 이용하여 5초 간격으로 측정하였다. 각 동작 별 소요 시간을 실시간으로 기록하였으며, 이를 바탕으로 각 동작 별 심부온, 직장온, 심박수를 분석하였고 동작 별 소요 시간과 총 소요 시간을 계산하였다. 단, 총 소요 시간을 계산할 때 동작 간 변환 시간은 제외하였다. 개인의 유산

소 운동 능력 평가의 지표인 최대 산소섭취량(VO_{2max})은 에너지 대사량계(Quarkb^2, COSMED, Italy)를 이용하여 측정하였다. 매 실험 전, 표준 가스 혼합계(4%CO_2, 16%O_2, balance nitrogen)를 이용한 공기와 가스 캘리브레이션과, 3 L의 실린더를 사용한 부피 캘리브레이션을 진행하였다.

2.6 분석 방법

평균피부온은 Hardy and Dubois[20]의 7점법을 이용하되, 손등에서의 피부온을 윗팔에서의 피부온으로 대체하여 계산하였다.

$$\bar{T}_{sk} = 0.07T_{head} + 0.35T_{chest} + 0.19T_{arm} + 0.19T_{thigh} + 0.13T_{calf} + 0.07T_{foot} \quad (1)$$

각 동작 별 생리적 부담을 계산하기 위해 Moran et al.[21]의 physiological strain index (PhSI)를 사용하였다. 이는 실시간으로 직장온과 심박수를 측정하여 파악할 수 있는 서열 부담과 심혈관계 부담을 종합한 것으로, 0부터 10까지의 숫자의 결과값을 가지며, 숫자가 클수록 높은 생리적 부담을 나타낸다. 계산식은 Moran et al.[21]에 의해 제안된 식을 조금 수정한 Tikuisis et al.[22]의 식을 사용했으며, 계산식은 다음과 같다;

$$PhSI = 5(T_{ret} - T_{re0}) \cdot (39.5 - T_{re0})^{-1} + 5(HR_t - 60) \cdot (HR_{max} - 60)^{-1} \quad (2)$$

여기서 T_{re0}과 T_{ret}는 각각 안정 시 직장온과 수행되는 작업 중 시간 t에서의 직장온을 나타내며, HR_t와 HR_{max}는 수행되는 작업 중 시간 t에서의 심박수와 개인의 최대 심박수를 나타낸다. Moran et al.[21]의 연구에서 HR_{max}는 180 bpm으로 되어있었으나, 높은 운동 강도와 서열 스트레스 하에서 종종 심박수가 180 bpm 이상으로 상승하는 것을 고려하여 Tikuisis et al.[22]은 180 bpm이 아닌 HR_{max}를 사용할 것을 제안했다. 또한 Moran et al.[21]의 식에서 60이라는 상수 대신 HR_0이 사용되었으나, 실험 중 안정 시 측정이 쾌적한 안정 시 조건을 반영하지 않을 경우, 개인의 안정 시 심박수가 측정되지 않는다는 것을 고려하여 Tikuisis et al.[22]이 60 bpm을 사용하기를 제안했다. 본 연구에서도 동작을 시작하기 전 10분의 안정기에, 무거운 소방장비를 짊어지고, 그로 인한 서열부담이 가해지는 상황임을 고려하여, 이와 같은 수정된 PhSI 식을 사용하였다.

통계적 분석에는 IBM SPSS statistics v.21 통계프로그램을 이용하였다. 동작별 차이와 Circuit 별 차이를 확인하기 위해 일원배치 분산분석을 각각 시행하였고 Duncan *post-hoc* test를 이용하여 일원배치 분산분석 결과 유의차가 확인되었을 때, 구체적으로 어떤 집단끼리 유의차가 발생하였는지를 확인하였다. 소방관 모의작업 프로토콜과 VO_{2max}, HR_{max}, 그리고 체력검정 결과와의 관련성을 확인하기 위해 상관분석을 시행하였으며, 나이와 화재진압 경력에 따라 위의 테스트 결과들이 유의하게 차이를 갖는지를 상관분석을 통해 확인하였다. 귀무가설은 $p < 0.05$ 수준에서 기각하였으며, 모든 데이터는 평균과 표준편차(mean ± SD)로 나타내었다.

3. 연구결과

3.1 동작별 소요 시간

동작을 완료하는데 소요된 시간이 가장 짧았던 동작은 여섯 번째 동작이었던 해머로 물체를 3회 강하게 타격하는 동작으로, 5~7초 소요되었으며, 3분 동안 트레드밀을 걷는 것으로 시간이 고정되어 있었던 일곱 번째 동작을 제외하고 가장 오랜 시간이 소요된 동작은 다섯 번째 동작이었던 계단을 내려오는 동작으로 약 68~74초가 소요되었다. 각 동작별 소요 시간과 한 세트를 완료하는 데 소요된 시간은 모두 반복된 횟수에 따른 통계적으로 유의한 차이가 없어, 동작이 수행됨에 따라 누적된 신체적 피로와 서열 부담에 따른 동작의 소요시간의 지연이 발견되지 않았다 (Table 2).

3.2 작업 종류와 시간에 따른 서열 부담

평균피부온은 안정 시 34.2 ± 0.8 °C이었으며, 첫 번째, 두 번째, 세 번째 세트를 완료한 직후의 평균피부온은 각각 35.4 ± 0.7 °C, 36.6 ± 0.8 °C, 37.0 ± 0.7 °C이었으며, 60분 간 회복을 거친 후의 평균피부온은 35.1 ± 0.5 °C으로, 60분 간 휴식을 취했음에도 불구하고 초기 안정 시 값으로 완전히 회복되지 않았다. 평균피부온은 휴식기와 모든 동작에서 세트 간 통계적 유의차가 있었으며($p < 0.001$), 세트 내 평균피부온 증가는 첫 번째 세트에서만 통계적 유의

Table 2. Time to Completion for Eight Tasks (unit: s)

Phase	1. Hose carrying	2. Going up the stairs	3. Carrying and setting up a ladder	4. Withdrawing and carrying a ladder	5. Going down the stairs	6. Simulated forcible entry	7. Walking with facing radiant heat	8. Pulling a victim	Total
1st Circuit	17 ± 1.8	35 ± 5.5	32 ± 19.0	20 ± 5.9	74 ± 12.1	5 ± 1.7	180	24 ± 4.9	386 ± 32
2nd Circuit	18 ± 3.1	37 ± 6.4	23 ± 5.0	21 ± 4.1	72 ± 9.1	5 ± 1.6	180	21 ± 5.1	377 ± 29
3rd Circuit	18 ± 2.9	39 ± 4.4	23 ± 4.9	21 ± 4.3	68 ± 26.9	7 ± 5.3	180	22 ± 7.0	378 ± 39

Note: Data were expressed as means with standard deviation of the means. No statistical difference was found between three circuits ($p > 0.05$).

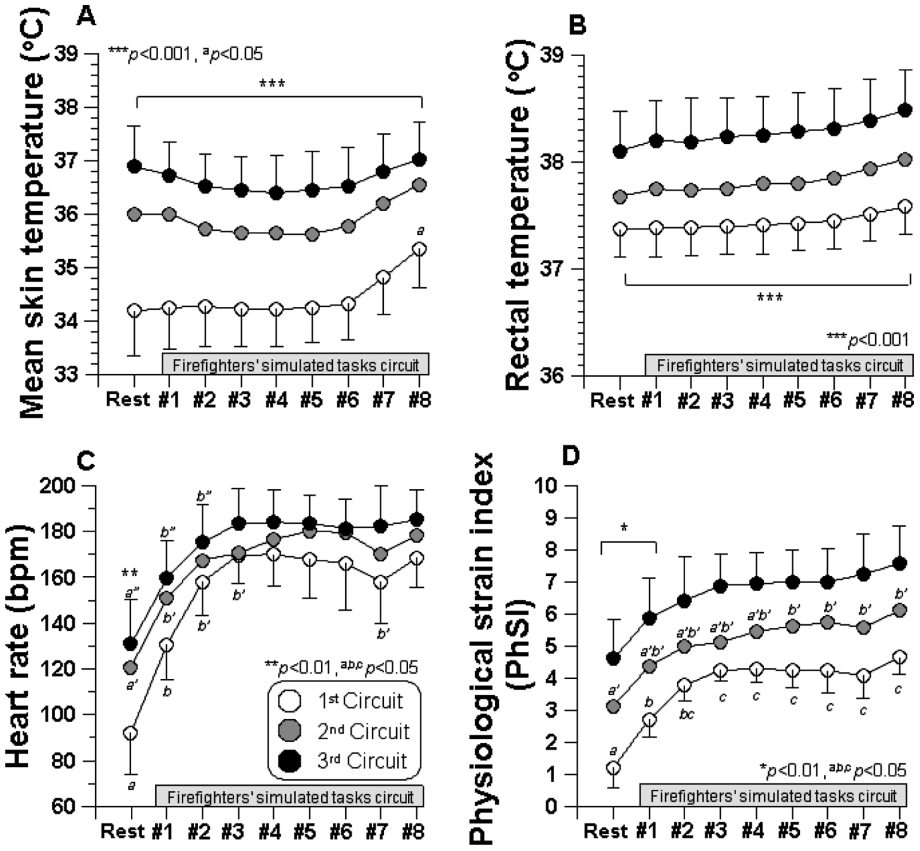

Figure 2. Time courses of changes in mean skin temperature (A), rectal temperature (B), heart rate (C) and physiological strain index (D). Note: #1. Carrying hose, #2. Going up the stairs, #3. Carrying and setting up a ladder, #4. Withdrawing and carrying a ladder, #5. Going down the stairs, #6. Simulated forcible entry, #7. Walking with facing radiant heat, #8. Pulling a victim. *, **, *** indicate significant differences between each circuit at levels of 0.05, 0.01, and 0.001, respectively, and alphabets without apostrophe (a, b, and c) represent significant differences among tasks in 1st circuit. alphabets with an apostrophe (a′, b′, and c′) and alphabets with double apostrophe (a″, b″, and c″) represent significant differences among tasks in 2nd circuit and 3rd circuit, respectively ($p < 0.05$).

차가 확인되었다(Figure 2A, $p < 0.05$).

직장온은 안정 시 37.4 ± 0.3 °C이었으며, 첫 번째, 두 번째, 세 번째 세트를 완료한 직후의 직장온은 각각 37.6 ± 0.3 °C, 38.0 ± 0.4 °C, 38.5 ± 0.4 °C이었다. 60분 간의 회복 후 직장온은 38.0 ± 0.3 °C로, 60분 간 휴식을 취했음에도 불구하고 초기 안정 시 값으로 완전히 회복되지 않았다. 직장온은 휴식기와 모든 동작에서 세트 간 통계적 유의차가 확인되었다(Figure 2B, $p < 0.001$).

심박수는 안정 시 92 ± 18 bpm이었으나, 첫 번째, 두 번째, 세 번째 세트를 완료한 직후의 심박수는 각각 169 ± 13 bpm, 178 ± 15 bpm, 185 ± 13 bpm이었다. 60분의 회복 후 심박수는 92 ± 12 bpm이었다. 심박수의 세트 간 통계적 유의한 차이는 휴식기에서만 확인되었다($p < 0.01$), 동작이 개시되면, 심박수는 급격히 증가하였으며, 첫 번째 세트에서는 두 번째 동작부터, 두 번째 세트에서는 네 번째 동작부터, 세 번째 세트에서는 세 번째 동작부터 비교적 일정하게 높은 수준으로 유지되었다(Figure 2C).

PhSI는 안정 시 1.2 ± 0.6이었으나, 첫 번째, 두 번째, 세 번째 세트를 완료한 직후의 PhSI는 각각 4.6 ± 0.5, 6.1 ± 1.0, 7.6 ± 1.2이었다. 60분 간의 회복 후 PhSI는 2.6 ± 0.8 이었다(Figure 2D).

3.3 신체능력 평가 결과들의 비교

Table 3은 정기 체력검정 결과와 유산소 능력 측정 결과, 그리고 본 실험에서 평가한 소방관 모의작업 체력평가 결과의 순위를 보여준다. 순위는 테스트에 따라 상이했으며, 세 명의 실험참여자(#S1, #S4, 그리고 #S7)는 소방관 모의작업 체력평가의 총 순위가 연령보정치를 합산하지 않은 체력검정결과 순위보다 높았다.

각 평가 결과들의 상호 관련성을 파악하기 위해 순위 결과가 아닌, 각 테스트 별 점수를 이용하여 상관분석을 실시한 결과, 연령보정치를 준 체력검정 결과와 주지 않은 체력검정 결과 ($r = 0.881$, $p < 0.01$), 그리고 연령보정치를 주지 않은 체력검정 결과와 VO_{2max} ($r = -0.728$, $p < 0.05$), 그리고 소방관 모의작업 체력평가 결과 중 소요시간과 총 순위($r = 0.797$, $p < 0.05$) 사이에 유의한 정적 상관관계가

Table 3. Comparisons in the Ranking of Physical Fitness Test, Aerobic Exercise Capacity Test, and Simulated Firefighting Task Protocol Test

Subject[a] (age in yr)	Physical fitness test[b]		Cardiorespiratory endurance		Simulated firefighting task protocol		
	Non-modified	Modified	VO_{2max}	HR_{max}	PhSI	TTC[c]	Total ranking[d]
#S1 (33)	6	8	5	2	2	3	1
#S2 (38)	1	1	4	6	7	1	3
#S3 (31)	5	7	3	7	5	6	5
#S4 (49)	9	9	8	4	4	9	8
#S5 (28)	4	6	2	3	8	5	7
#S6 (32)	2	3	1	8	1	4	2
#S7 (47)	8	4	7	5	3	8	6
#S8 (46)	3	2	9	9	6	2	4
#S9 (39)	6	5	6	1	9	7	9

Note: [a]Subjects marked in grey were scored better in the simulated firefighting task protocol than in the non-modified physical fitness test. [b]Physical fitness test includes grasping power test, back strength, sit-up, sit-and-reach test, standing broad jump, long-distance running. Modified rank reflects revision value of ages. [c]Time to completion. [d]Total score was calculated by the sum of rank of PhSI and TTC. In case of an even score, the person who had higher ranking in TTC was ranked higher.

Table 4. Correlations between Variables

		PFT_NM	PFT_M	VO_{2max}	HR_{max}	PhSI	TTC	Total ranking
Physical fitness test (PFT)	Non-modified (NM)	1.000						
	Modified (M)	0.881**	1.000					
Cardiorespiratory endurance	VO_{2max}	0.547	0.117	1.000				
	HR_{max}	–0.435	–0.521	–0.060	1.000			
Simulated firefighting task	PhSI	0.050	0.083	–0.043	0.521	1.000		
	TTC	–0.728*	–0.640	–0.307	0.427	0.105	1.000	
	Total ranking	–0.564	–0.416	–0.392	0.489	0.591	0.797*	1.000

Note: * and ** display statistically significant correlation coefficients at levels of 0.05, and 0.01, respectively.

있었다. 이러한 결과는 현재 기초 신체능력 검정 결과가 높은 소방관이 모의작업 평가 프로토콜에서 더 빠른 시간 내에 동작을 수행한다는 것을 보여준다($p < 0.05$). 그뿐 아니라, 소방관 모의작업 평가 프로토콜에서 서열부담의 정도가 반영된 PhSI, 그리고 동작의 소요시간과 서열부담을 함께 고려한 평가결과는 현재의 기초 신체능력 검정 결과와 다르며, 이는 간단한 운동복을 착용하고 기초 체력을 평가가 화재진압에 적합한 신체능력을 반영한다고 보기 어려움을 시사한다.

3.4 나이와 경력에 따른 신체능력 평가 결과들의 비교

VO_{2max}는 소방관의 연령과 매우 강한 상관관계($r = -0.934$, $p < 0.001$)를 보인 반면에, HR_{max}는 나이에 따른 유의한 상관관계가 없었다(Figure 3A, 3B). 소방관의 기초 체력검정 결과는 나이 보정치를 적용한 것과 적용하지 않은 것 모두 나이에 따른 상관분석 결과 통계적으로 유의한 결과는 도출되지 않았지만, 나이 보정치를 적용하지 않았을 때 음의 상관의 경향을 보였던 반면($r = -0.507$, $p = 0.164$), 나이 보정치를 적용한 후에는 음의 상관의 경향도, 양의 상관의 경향도 보이지 않았다($r = -0.047$, $p = 0.904$). 소방관 모의작업 체력평가 결과 역시 나이에 따른 유의한 상관관계를 보이지 않았다(Figure 3D). 그러나, 여덟 단계동작을 수행하는 데 소요된 평균 소요시간의 경우 나이와는 유의한 상관관계가 없었으나(Figure 3E), 화재진압 경력이 증가할수록 급격히 증가하다가, 증가추세가 급격히 정체되는 로그함수 추세를 보였다(Figure 3F).

4. 고 찰

본 연구에서는 보다 복합적인 체력이 요구되는 소방업무의 적합성을 평가하기 위한 체력평가 프로토콜을 개발하기 위한 목적으로 여덟 가지의 동작으로 구성된 모의작업 프로토콜을 개발하였으며, 이 때 서열부담(PhSI)과 심혈관계 부담, 그리고 이 두 요인을 종합한 점수를 산출하였다. 그 결과, 체력검정 결과가 높은 소방관이 모의작업 평가 프로토콜에서 더 빠른 시간 내에 동작을 수행하였으

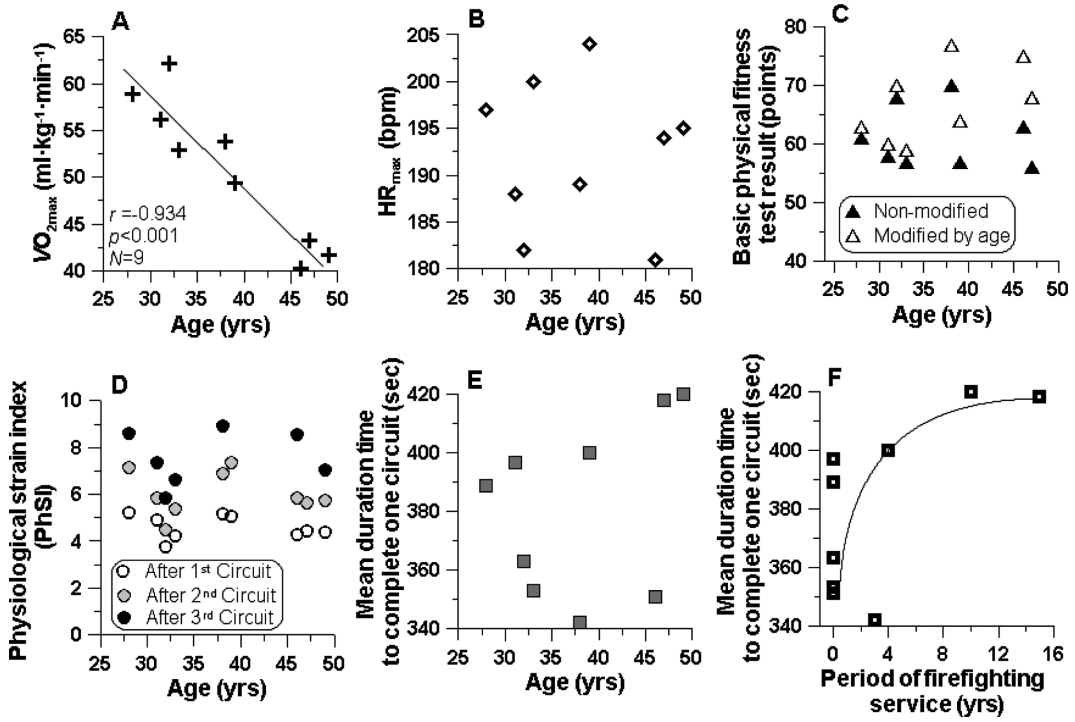

Figure 3. Relationships of physical ability with age or period of firefighting service.

나, 소방관 모의작업 평가에서 서열부담을 반영하는 PhSI, 그리고 종합점수는 체력검정 결과와 상이하였다. 이는 방화복이 아닌, 간단한 운동복을 착용한 상태에서 평가된 체력검정등급이 화재진압 업무의 적합도를 충분히 반영하는 것은 아님을 보여준다.

4.1 소방관 모의작업 프로토콜의 평가

다양한 스트레스원이 존재하는 환경에서 높은 서열부담이 필수적으로 동반되는 위험한 직업인 소방관이 소방업무를 안전하고, 원활하게 수행할 수 있는지 판단하기 위해서는 보다 실제 소방작업과 유사한 체력평가방법과 평가 프로토콜을 고려할 필요가 있다. 많은 연구자들이 소방작업에 요구되는 최소 VO_{2max}를 33.5~42.0 ml · kg^{-1} · min^{-1} 이라고 결론을 내렸으나[23,24], 소방작업은 단지 유산소 능력만을 반영하는 것이 아닌 효율성(effectiveness)을 반영한다는 특성이 있다[6]. Louhevaara[5]의 연구에서 모의작업 체력평가 실험에 참여한 소방관들을 대상으로 프로토콜의 적합성과 유용성에 대해 설문한 결과, 71%의 소방관이 업무 능력 평가를 함에 있어 모의작업 평가 프로토콜이 cycle-ergometer test보다 더욱 낫다고 평가하였다.

본 연구에서 제안한 모의작업 프로토콜은 소방작업의 특성을 반영하는 네 가지 요소를 포함하였다. 먼저, 모든 개인보호구의 착용하였으며, 실제 소방업무 관련 동작 포함하였다. 하지만 본 프로토콜에서 가장 특징적인 점은 무엇보다도 복사열원 앞에서 트레드밀 위를 3분 동안 걷는 동작이 추가된 것이라고 할 수 있다. Deakin et al.[14]의 연구에서 개발된 프로토콜은 별도의 환경에서의 서열 스트레스를 가하지 않았으며, 그 이후 일부 연구자들이 환경온도를 고온으로 설정하거나[16], 실제 화재 실험을 실시하는 방법[15]을 통해 실제 환경에서 높은 서열 스트레스를 받는 소방작업의 특성이 반영된 프로토콜을 제안하였다. 하지만 사다리를 옮기고 계단을 오르내리는 등의 큰 반경을 요하는 실험 프로토콜로 인해 실제 화재 실험과 환경온도 통제가 어려운 실험 환경일 경우가 발생할 가능성이 큰데, 이러한 경우에 본 연구에서 제안한 복사열원을 활용한 스트레스 부하를 활용할 수 있을 것으로 보인다.

본 연구에서 제안한 프로토콜의 두 번째 특징은 기존의 연구들은 동작들을 한 번씩만 수행하는 경우가 많았으나, 본 연구에서는 5분의 휴식기를 두고 모의작업 세트를 총 세 번 반복함으로써 서열 부담이 누적되는 반응을 관찰하고, 이러한 상황에서의 모의작업 수행능력을 평가할 수 있도록 한 것이다. 이는 실제 소방작업이 20~30분의 진압 작업, 그리고 호흡기 보호구의 공기를 충전하는 짧은 휴식으로 구성되어 있음을 반영한 것으로 서열 부담의 누적을 통해 더 높은 소방관들의 더 높은 서열 부담 수준을 이끌어 낼 수 있다.

연속 동작을 여러 번 반복하는 프로토콜은 Horn et al.[25]에 의해서 제안된 바 있다. Horn et al.[25]의 연구에서는 총 3시간 동안 실제 화재 상황을 최대한 모사하여 화재를 발생시킨 후 짧은 소방관 모의작업 프로토콜을 반복 시행하였는데, 그 결과 장내온(gastrointestinal temperature)이 38.7 °C까지 상승하였다. 본 연구에서는 ~30분의 비교적

짧은 시간 동안 직장온이 평균 1.12 °C 증가하여 38.5 °C에 도달하였는데, 실험 지속 시간이 짧았던 점, 그리고 본 연구에서는 실제 화재를 활용하지 않았던 것을 고려했을 때, 실용적이면서도 실제 소방 작업의 서열부담을 비교적 유사하게 반영한다고 평가할 수 있다.

본 연구 결과에서 30분 간 직장온의 증가량이 1.12 °C이었다는 것은 동작들을 1회 약 20~30분간의 작업을 짧은 휴식을 사이에 두고 화재를 완전히 진압할 때까지 여러 차례 반복하는 실제 소방관의 작업 패턴을 고려했을 때, 작업이 1시간 이상 진행될 경우 중간에 충분한 휴식을 취하지 않는다면 직장온이 열사병 위험수준인 40 °C에 도달할 가능성이 매우 높음을 추정케 한다. 또한 모의작업 프로토콜에서 세 번째 Circuit의 마지막 동작을 완료한 직후 심박수는 185 ± 13 bpm이었는데, 이는 최대심박수와 비교했을 때, 평균 95% (87~99%)에 상응하는 값이었다. 동작을 수행하는 동안의 심박수의 평균값은 169 ± 13 bpm으로 이는 89%HR_{max} (79~91%HR_{max})에 해당하는 값이었다. 심혈관계 부담 수준을 기준으로 유산소 운동 부담(aerobic strain)을 추정했을 때, 75~84, 85~94, 95~100%HR_{max}는 각각 높은 부담(50~75%VO_{2max}), 매우 높은 부담(75~89%VO_{2max}), 그리고 극도로 높은 부담(90~100%VO_{2max})을 추정하는데, 높은 부담 수준의 작업을 60분 간 지속할 수 있다고 하면, 매우 높은 수준의 작업은 20~30분, 극도로 높은 부담 수준의 작업은 1~10분 간 지속하는 것이 권해진다[26]. 따라서 본 프로토콜은 매우 높은 부담 수준으로 75~89%VO_{2max}를 요구했다고 추정된다.

4.2 평가 시 생리적 서열 부담(PhSI)의 고려

많은 선행연구에서는 일련의 동작을 수행하는 데 소요되는 시간(초)으로 그 결과를 평가했다[6,15]. 하지만 단순한 소요시간의 비교는 소방관의 업무적합성을 평가하기 위한 목적에서 적합하지 않다. 소요시간이 짧을수록 산소소비량이 더 높은 경향이 있으며, 동일한 직무를 더 높은 운동 강도로 더 많은 에너지를 소모하며 수행하기 때문이다[6]. 이는 심부온의 추가적인 상승을 야기하며 장기적인 소방작업에서의 서열부담으로 인한 위험성을 증가시킨다.

본 연구 결과에서 소요시간은 나이에 따라서는 유의한 상관관계가 없었던 반면, 화재진압의 경력이 길수록 더 길었는데(Figure 3F). 이는 숙련도가 높은 소방관의 경우 페이스 조절 전략을 구사하는 경향이 있음을 보여준다. Elsner and Kolkort[6]는 VO_{2max}가 더 높을수록 더 높은 운동 강도로 수행한다고 보고하였지만, 높은 운동 강도로 수행하는 것이 나이보다도 직무 숙련도와 관련성이 있을 수 있음을 시사하는 결과이다. 이에 단순한 소요시간을 바탕으로 결과를 도출하는 것보다, 페이스 조절을 통한 서열부담의 관리능력을 반영하는 PhSI를 함께 점수에 반영하는 것이 본 연구에서 제안되었다.

본 실험에서 1번과 4번, 7번 실험참여자는 Non-modified physical fitness test 보다 생리적 부담과 총 소요 시간을 반영한 모의작업 평가결과의 순위가 더 높았다. 이들은 진압경력이 오래됐거나(4번과 7번), 유연성의 부족으로 인해 체력검정에서 고득점을 취득하지 못한 소방관이었다(1번). 허리의 유연성은 부상의 위험성을 평가하는 것으로 의의가 있지만, 1번 실험참여자는 소요시간도 짧았을 뿐만 아니라(3위), 빠른 동작들의 수행에도 불구하고 서열부담이 낮아(2위) 소방진압 업무 적합성으로는 종합 1위였음에도 불구하고, 체력검정에서는 유연성 단 한 항목이 8점을 기록한 것으로 인해 단지 2점이 감점되었음에도 불구하고 연령대별 보정치를 합산한 결과는 9명 중 8위에 불과했다. 이렇듯, 체력검정방법, 그리고 소방관 모의작업 프로토콜에서 총 소요 시간만을 이용해서 평가하는 방법은 소방진압 업무 적합성을 평가함에 있어서 적합하지 않은 부분이 남아있다. 체력검정 결과는 서열부담과 동작, 및 장비사용의 숙련도, 그리고 장기 작업 수행에 요구되는 페이스 조절 능력 등을 반영하지 않으며, 총 소요 시간만을 이용한 평가는 시간을 단축하면서 오히려 증가한 서열부담을 반영하지 못하기 때문이다.

4.3 중간휴식 및 회복 시 서열부담

소방작업은 20~30분의 작업과 짧은 휴식의 반복으로 구성되는데, 본 프로토콜에서는 이를 반영하여 Circuit 사이에 5분의 휴식을 두었다. 휴식기에 소방관은 장갑을 제외한 소방용 개인보호구를 제거하지 않았는데, 휴식 중 개인보호구의 착용은 작업 중 생성된 체열의 발산을 방해하여, 5분 간 어떠한 추가적인 동작을 하지 않았음에도 불구하고 직장온은 상승하는 결과를 보였다. 즉, 개인보호구를 제거하지 않은 상태에서의 5분의 휴식은 어떠한 생리적 서열부담 회복 효과가 없음을 보여주었다.

또한, 세 번의 Circuit을 마친 후 소방관은 헬멧, 방화두건, 장갑, 호흡기 보호구를 벗고 상의의 지퍼를 열어둔 채로 60분 간 약 25 °C의 환경에서 회복기를 가졌는데, 초기 안정 시 직장온이 37.4 °C였으나, 60분의 회복 이후 직장온은 38.0 °C로 마지막 동작을 완료한 직후보다 약 0.5 °C가 하락하였으나, 초기 안정 시보다는 여전히 0.6 °C 높은 수준이었다. 직장온은 체내 열저장량(heat storage)을 반영하며, 방열량이 많을수록 직장온이 빨리 하락하는데, 본 프로토콜에서 방화복을 제거하지 않은 것이 대류와 증발을 방해하여 직장온의 회복이 지연된 것으로 보인다. Kenny et al.[27]의 연구에서는 실험참여자가 반팔과 반바지를 착용했음에도 불구하고 30 °C의 환경에서 60분 동안 회복 후에도 직장온이 초기 안정 시 수준으로 회복되지 않았다. 따라서 Horn et al.[25]이 그들의 연구 결과에서 밝힌 직장온이 안정 시 값으로 회복되기 위해 요구되는 시간인 60분이 높은 환경온도와 방화복이 제거되지 않은 상태에서는 동일하게 적용될 수 없음을 보여준다.

4.4 소방관 모의작업 프로토콜의 활용

본 연구에서는 소방관의 모의작업 프로토콜은 소방관의 직무적합성을 평가하기 위한 체력평가방법으로 활용되었으나, 본 연구 프로토콜은 다양한 목적 하에서 활용이 가능하다. 먼저, 소방방화복과 보호구가 인체의 움직임을 저해하는 정도를 평가하기 위한 목적인 동작성 평가(mobility test)로도 활용이 가능하다. 또한 방화복과 개인보호구가 인체에 야기하는 서열부담을 평가하고 측정하기 위한 실험 프로토콜로도 활용할 수 있다. 본 프로토콜은 실제 화재 진압업무와 유사한 환경(서열 스트레스, 방화복 착용)과, 대표적인 소방업무 동작들을 반영하였기에, 실제 화재현장에서의 생리적 반응을 단순한 트레드밀을 걷는 동작으로 구성된 프로토콜보다 더 잘 반영한다고 볼 수 있다[17]. 따라서 본 연구결과는 단순히 개인별 직무적합성 평가를 반영할 뿐만 아니라, 소방작업을 수행함으로써 야기되는 생리적 부담의 수준을 보고할 수도 있다(Figure 2).

5. 결 론

본 연구에서는 소방업무적합성 평가에 적합한 여덟 가지 동작으로 구성된 모의작업 프로토콜을 개발하였으며, 이를 활용하여 소방관의 실제 작업 시 서열부담의 추정치를 계산하였고, 체력검정 결과와 $\dot{V}O_{2max}$, HR_{max}와 비교를 통해 소방관 모의작업 프로토콜의 소방진압 업무 적합도 평가로서의 타당성을 평가하였다. 그 결과, 89%HR_{max} 수준에서 소방작업이 1시간 이상 작업이 지속될 경우, 직장온은 ~39.7 ℃에 도달하여 열사병 위험 수준에 도달할 것이라고 추정되었으며, 방화복을 제거하지 않는 5분간의 짧은 휴식은 서열부담의 경감에 도움을 주지 않았다. 또한 연령 보정치를 주지 않은 체력검정 결과가 높은 소방관은 모의작업 프로토콜을 더 빨리 완료하여, 소요시간만을 바탕으로 평가할 경우 뛰어났으나, 소요시간이 짧다는 것은 산소소비량이 증가하는 것을 함의하여 이는 서열부담을 가중시키며 장시간 작업 시 체온조절에 불리한 작용을 하므로 소요시간이 짧은 것이 반드시 소방진압 작업에 유리한 것이 아님을 고려해볼 때, 소방진압 업무 적합도의 평가 방법으로는 소요시간을 단독으로 사용하는 것보다 서열부담을 나타낼 수 있는 지표인 PhSI를 함께 고려하여 평가하는 것이 권장되었다. 소방관은 나이에 무관하게 진압 경력이 길수록 소방관 모의작업 프로토콜의 소요시간이 더 길었는데, 이는 테스트와 그 평가 기준을 세울 때 진압 경력이 보다 타당한 기준이 될 수 있음을 시사한다. 마지막으로 소방관 모의작업 평가 프로토콜의 수행능력은 체력검정 결과와 상이하였다. 즉, 편안한 운동복을 착용한 채 수행된 기초 체력 평가 결과는 전신 개인보호구를 착용한 채 수행하는 소방작업에 적합한 신체능력을 반영한다고 보기 어렵다. 화재진압업무 적합성을 평가하기 위한 보다 적합한 테스트 방법이 요구된다.

후 기

본 연구는 국민안전처 소방안전및119구조·구급기술연구개발사업(“MPSS-소방안전-2015-76”)의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 본 연구에 도움을 주신 서울소방학교 한정희 팀장님, 그리고 실험에 적극적으로 협조해주신 서울관악소방서 소방관분들께 감사드립니다.

References

1. K. S. Kim, “Health Hazards in Firefighters”, Hanyang Medical Reviews, Vol. 30, No. 4, pp. 296-304 (2010).
2. A. Coca, W. J. Williams, R. J. Roberge and J. B. Powell, “Effects of Fire Fighter Protective Ensembles on Mobility and Performance”, Applied Ergonomics, Vol. 41, pp. 636-641 (2010).
3. D. Barr, W. Gregson and T. Reilly, “The Thermal Ergonomics of Firefighting Reviewed”, Applied Ergonomics, Vol. 41, pp. 161-172 (2010).
4. P. O. Davis, C. O. Dotson and D. L. S. Maria, “Relationship between Simulated Fire Fighting Tasks and Physical Performance Measures”, Medicine and Science in Sports and Exercise, Vol. 14, No. 1, pp. 55-71 (1982).
5. V. Louhevaara, J. Smolander, T. Tuomi, O. Korhonen and J. Jakkola, “Effects of an SCBA on Breathing Pattern, Gas Exchange and Heart Rate during Exercise”, Journal of Occupational Medicine, Vol. 27, pp. 213-216 (1985).
6. K. L. Elsner and F. W. Kolkhorst, “Metabolic Demands of Simulated Firefighting Tasks”, Ergonomics, Vol. 51, No. 9, pp. 1418-1425 (2008).
7. N. Gledhill and V. K. Jamnik, “Development and Validation of a Fitness Screening Protocol for Firefighter Applicants”, Vol. 17, No. 3, pp. 199-206 (1992).
8. J. Y. Lee, S. Kim, Y. J. Jang, Y. J. Baek and J. Park, “Component Contribution of Personal Protective Equipment to the Alleviation of Physiological Strain in Firefighters during Work and Recovery”, Ergonomics, Vol. 57, No. 7, pp. 1068-1077 (2014).
9. I. Bakri, J. Y. Lee, K. Nakao, H. Wakabayashi and Y. Tochihara, “Effects of Firefighters’ Self-contained Breathing Apparatus’ Weight and its Harness Design on the Physiological and Subjective Responses”, Ergonomics, Vol. 55, No. 7, pp. 782-792 (2012).
10. K. S. Malley, A. M. Goldstein, T. K. Aldrich, K. J. Kelly, M. Weiden, N. Coplan, M. L. Karwa and D. J. Prezant, “Effects of Fire Fighting Uniform (Modern, Modified Modern, and Traditional) Design Changes on Exercise Duration in New York City Firefighters”, Journal of Occupational & Environmental Medicine, Vol. 41, No. 12, pp. 1104-1115 (1999).

11. I. Holmér, K. Kuklane and C. Gao, “Test of Firefighter’s Turnout Gear in Hot and Humid Air Exposure”, International Journal of Occupational Safety and Ergonomics, Vol. 12, No. 3, pp. 297-305 (2006).
12. B. Skoldstrom, “Physiological Responses of Fire Fighters to Workload and Thermal Stress”, Ergonomics, Vol. 30, pp. 1389-1397 (1987).
13. L. Boyd, T. Rogers, D. Docherty and S. Petersen, “Variability in Performance on a Work Simulation Test of Physical Fitness for Firefighters”, Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism, Vol. 40, pp. 364-370 (2014).
14. J. M. Deakin, J. T. Smith, J. M. Stevenson, L. A. Wolfe and S. W. Lee, “Development of a Bona Fide Physical Maintenance Standard for CF and DND Fire Fighters”, Canadian Forces Personnel Support Agency (1996).
15. D. L. Smith and S. J. Petruzzello, “Selected Physiological and Psychological Responses to Live-fire Drills in Different Configurations of Firefighting Gear”, Ergonomics, Vol. 41, No. 8, pp. 1141-1154 (1998).
16. G. P. Horn, R. M. Kesler, R. W. Motl, E. R. Hsiao-Wecksler, R. E. Klaren, I. Ensari, M. N. Petrucci, B. Fernhall, et al., “Physiological Responses to Simulated Firefighter Exercise Protocols in Varying Environments”, Ergonomics, Vol. 58, No. 6, pp. 1012-1021 (2015).
17. B. G. Ko, “The Relationship between Firefigthing Performance and Physical Fitness”, Korean Journal of Sport Science, Vol. 17, No. 1, pp. 66-74 (2006).
18. E. T. Howley, D. R. Bassett and H. G. Welch, “Criteria for Maximal Oxygen Uptake: Review and Commentary”, Official Journal of the American College of Sports Medicine, Vol. 27, No. 9, pp. 1292-1301 (1995).
19. J. Y. Lee, I. Bakri, J. H. Kim, S. Y. Son and Y. Tochihara, “The Impact of Firefighter Personal Protective Equipment and Treadmill Protocol on Maximal Oxygen Uptake”, Journal of Occupational Environment and Hygiene, Vol. 10, No. 7, pp. 397-407 (2013).
20. J. D. Hardy and E. F. Dubois, “The Technic of Measuring Radiation and Convection”, Journal of Nutrition, Vol. 15, pp. 461-475 (1938).
21. D. S. Moran, A. Shitzer and K. B. Pandolf, “A Physiological Strain Index to Evaluate Heat Stress”, American Journal of Physiology, Vol. 275, pp. R129-R134 (1998).
22. P. Tikuisis, T. M. McLellan and G. Selkirk, “Perceptual versus Physiological Heat Strain during Exercise-heat Stress”, Medicine & Science in Sports & Exercise, Vol. 34, pp. 1454-1461 (2002).
23. M. S. Sothman, K. W. Saupe, D. Jasenof, J. Blaney, S. D. Fuhrman and T. Woulfe, “Advancing Age and the Cardiorespiratory Stress a Minimum Standard for aerobic Fitness”, Human Performance, Vol. 3, No. 4, pp. 217-236 (1990).
24. S. J. Barker, “Cardiorespiratory and Thermoregulatory Response of Working in Fire-fighting Protective Clothing in a Temperature Environment”, Ergonomics, Vol. 43, No. 9, pp. 1350-1358 (2000).
25. G. P. Horn, S. Blevins, B. Fernhall and D. L. Smith, “Core Temperature and Heart Rate Response to Repeated Bouts of Firefighting Activities”, Ergonomics, Vol. 56, No. 9, pp. 1465-1473 (2013).
26. V. Louhevaara, J. Smolander, O. Korhonen and T. Tuomi, “Maximal Working Times with a Self-contained Breathing Apparatus”, Ergonomics, Vol. 29, pp. 77-85 (1986).
27. G. P. Kenny, L. E. Dorman, P. Webb, M. B. Ducharme, D. Gagnon, F. D. Reardon, S. G. Hardcastle and O. Jay, “Heat Balance and Cumulative Heat Storage during Intermittent Bouts of Exercise”, Journal of the American College of Sports Medicine, Vol. 41, No. 3, pp. 588-596 (2009).