

경량화된 소방용 자기공급식 공기호흡기(SCBA)의 생리적·심리적 부담 경감 효과

김시연^{1)†} · 이경은¹⁾ · 이서진¹⁾ · 강인형²⁾ · 김영필³⁾

¹⁾(재)FITI시험연구원 신뢰성연구센터

²⁾인하대학교 스포츠·레저섬유연구센터

³⁾한컴라이프케어 연구소 제품개발팀

Effects of Firefighters' Lightweight Self-Contained Breathing Apparatus on Alleviating Physiological and Psychological Burden

Siyeon Kim^{1)†}, Kyeongun Lee¹⁾, Seojin Lee¹⁾, In Hyung Kang²⁾, and Young Pil Kim³⁾

¹⁾Reliability Assessment Center, FITI Testing and Research Institute, Seoul, Korea

²⁾Sports Leisure Textile Research Center, Inha University, Incheon, Korea

³⁾Product Development Team, Hancom Lifecare, Yongin, Korea

Abstract : Efforts have been made to reduce the weight of firefighters' self-contained breathing apparatus (SCBA) to alleviate their physical burden. Recently, a prototype of the SCBA was developed in Korea using carbon composite materials making it 1.6 kg lighter than existing commercial products with the same capacity. However, its physiological and psychological improvement effects are unclear. This study aimed to quantitatively evaluate the physiological and subjective strain after reducing the SCBA's weight by 13% from 12.0 kg to 10.4 kg. The results showed that the physiological strain was not significantly reduced, but the subjective strain was significantly reduced. In particular, the sweating sensation and thermal comfort improved after the onset of perspiration during mid-rest phrase. In addition, while physiological benefits were not observed, the perception of weight reduction and ease of movement experienced by the wearer are valuable findings. The findings imply that to alleviate firefighters' physiological strain during their duties, improvements in SCBA should focus on the weight and shape of the apparatus.

Key words: self-contained breathing apparatus (자기공급식 공기호흡기), firefighter (소방관), physiological strain (생리적 부담), light-weight (무게 경량화), personal protective equipment (개인보호구)

1. 서 론

소방용 공기호흡기(이하 '공기호흡기')는 화재진압, 구조, 구급, 화재조사 활동 시 화재로 인하여 발생하는 각종 유독가스가 있는 장소에서 일정시간 사용할 수 있도록 제조된 압축공기식 개인호흡장비를 말하는 것으로(National Fire Agency, 2024), 화재현장에서 소방대원의 안전을 확보하고 작업능력을 유지하기 위한 필수 개인보호장비이다(Pedersen et al., 2019). 공기호흡기는 압축공기를 저장하는 압력용기와 등지계, 공급밸브, 면체,

호스 등으로 구성되어 있으며 공기호흡기의 무게와 디자인은 제조사에 따라 차이가 있지만, 현재 국내 소방대원들이 가장 많이 사용하는 공기호흡기는 45분용 제품으로서 9L의 압력용기를 포함한 해당 공기호흡기 전체 무게는 약 12.0 kg에 달한다. 이는 특수방화복과 소방헬멧 등 소방용 개인보호구와 필수 휴대장비들을 모두 포함한 무게의 약 50%에 해당한다.

공기호흡기와 같이 배낭 형태의 인체 무게 부하는, 여러 방식의 무게 부하 방식 가운데 에너지소비 측면에서 비교적 효율적인 방법인 것으로 여겨진다(Knapik & Reynolds, 2004). 그럼에도 공기호흡기의 무게는 착용자에게 여러 신체부담을 야기한다(Carlton & Orr, 2014). 보다 구체적으로는 신체의 무게중심을 유지하기 위해 몸통과 머리가 앞으로 기울어지는 자세의 변화(Kim & Park, 2015)와 이로 인한 신체 균형능력 저하(Park et al., 2010), 운동지속시간의 감소와 보행의 안정성 저하(Brown et al., 2019; Kesler et al., 2018), 에너지대사량의 증가 및 심박수의 상승(Griefahn et al., 2003), 체온상승 부담(Kesler et al., 2018)을 야기할 수 있다. Bakri et al.(2012)의 연구에서 11 kg의 소방용 공기호흡기를 착용했을 때 미착용 조

†Corresponding author: Siyeon Kim
Ph.D. Senior Researcher, Reliability Assessment Center, FITI Testing & Research Institute.
Tel. +82-2-3299-8145
E-mail: siyeonkim@fitiglobal.com
©2025 The Korean Fashion and Textile Research Journal(KFTRJ). This is an open access journal. Articles are distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

건보다 운동 중 산소소비량이 30-50% 증가했으며, 30분의 걷기 운동 후 근피로감이 유의미하게 증가했다. 국내 소방관 대상 설문조사 결과에서 공기호흡기의 개선 요구사항 중 무게의 개선이 가장 요구도가 높았다(Lee et al., 2024).

이러한 무게로 인한 신체 부담을 줄이기 위해 탄소섬유와 알루미늄 라이너를 경량화함으로써 공기호흡기의 무게를 경감시키려는 노력이 국내외에서 시도되고 있으며, 최근 국내에서도 탄소복합소재를 활용하여 기존 동일 용량 상용제품보다 1.6 kg 경량화한 공기호흡기 시제품이 개발되었다. 그러나 이 개발품 착용으로 인한 생리적, 심리적 개선 효과는 불분명하다.

공기호흡기의 경량화로 인한 생리적 부담 경감 효과를 명확하게 이해하고 예측하기 어려운 첫 번째 이유로는 많은 선행연구들이 공기호흡기 압력용기의 무게와 부피, 형태 등 다양한 요인이 복합된 조건에서 실험을 진행하여, 무게만의 영향을 확인하기 어렵기 때문이다(Coca et al., 2011; Griefahn et al., 2003; Kesler et al., 2018; Nazari et al., 2021). Griefahn et al. (2003) 연구에서는 모의작업 프로토콜을 이용하여 무게가 15.0 kg, 13.7 kg, 11.7 kg인 공기호흡기의 생리적 부담을 비교하였는데, 이 중 가장 가벼웠던 11.7 kg 공기호흡기는 3.3 kg 경량화에도 불구하고(단, 압력용기의 부피가 6.0 L에서 6.8 L로 증가) 15.0 kg 공기호흡기와 비교하여 생리적 부담 경감효과가 유의미하게 확인되지 않았다. 반면, 압력용기의 부피는 유지한 채 길이가 짧아지고 너비가 255 mm 넓어진 형태의 경량화 공기호흡기 조건(-1.3 kg)에서는 작업 완료 시간이 단축되었고 심박수는 감소하였다. 연구자들은 이러한 결과를 통해 공기호흡기의 무게보다 형태가 생리적 부담에 미치는 영향이 더 클 것으로 추정을 하였다. 그러나 다른 연구(Park et al., 2010)에서 동일한 무게를 갖는 짧고 통통한 압력용기를 착용하였을 때 보행 역학적 이점을 확인하지 못하였고, Kesler et al.(2018) 연구에서도 사용시간과 무게, 형태가 다른 4종의 공기호흡기를 비교했을 때, 심박수, 에너지대사량, 호흡수 등 여러 생리적 반응에서 직장온을 제외하고 유의한 차이를 확인하지 못하였다. 직장온 최대값은 짧고 통통한 형태의 압력용기(45분 용량)를 사용했을 때, 60분 용량 압력용기 착용 시보다 더 낮게 측정되었는데, 두 조건의 공기호흡기 무게 차이가 단지 0.2 kg에 불과했으므로, 압력용기 무게보다는 형태의 생리적 이점이 다시 한 번 확인되었다.

선행연구를 종합하자면, 압력용기의 무게에 의한 생리적 부담 경감 효과보다는 형태의 차이에 의한 효과가 훨씬 두드러지는 것으로 보이지만, 무게에 따른 효과를 제한하기에는 여전히 무게별 생리적 부담을 정량적으로 평가한 연구가 부족하다. 실험 설계 시 압력용기의 형태와 부피를 제한함으로써 공기호흡기의 무게 차이로 인한 신체부담을 명확화할 수 있을 것으로 보인다.

공기호흡기의 경량화로 인한 생리적 부담 경감 효과를 명확하게 이해하고 예측하기 어려운 두 번째 이유는 프로토콜 측면에서, 소방용 개인보호구의 인체영향을 확인하기 위해 많은 선

행연구들이 모의작업 프로토콜 또는 시나리오 기반 평가를 활용하였기 때문이다(Griefahn et al., 2002; Kesler et al., 2018; Kim et al., 2014). 이러한 프로토콜은 실제 소방활동의 대표 동작들을 도입함으로써, 다양한 동작과 움직임에 대한 신체적 부담 수준을 평가할 수 있고, 실제 소방작업 중의 생리적 부담을 평가할 수 있다는 장점을 가지지만, 실험 중 환경조건을 엄격하게 통제하기 어렵고, 복수의 복합적인 동작으로 구성되어 있지만 각 동작의 범위와 속도에 대한 제한을 두지 않기 때문에, 생리적 측정값의 해석에 있어, 수행완료시간과 몸의 움직임의 크기와 속도의 영향을 배제할 수 없다는 한계를 가진다.

이에 본 연구에서는 공기호흡기의 경량화에 의한 생리적 영향을 필드테스트 또는 제한된 환경에서 모의작업 프로토콜로 검증하기 전 단계로서, 제한된 실험실 환경에서 제한된 운동을 수행하는 프로토콜로서 실험을 진행함으로써, 공기호흡기의 무게에 의한 생리적 효과를 우선 확인해보고자 하였다. 이와 함께 주관적 서열부담과 제한된 프로토콜을 수행하는 동안의 중량감, 동적쾌적성을 평가하게 함으로써 공기호흡기의 경량화에 따른 생리적, 주관적 신체부담 영향을 명확하게 검증하고자 하였다.

본 연구에서는 생리적 부담을 비교하기 위한 지표로서 Moran et al. (1998)의 PSI(Physiological Strain Index)를 활용하였다. 이 지표는 직장온과 심박수 측정값을 활용하여 계산하여 0~10 점의 수치로 생리적 부담을 나타내며 서열부담과 심혈관계 부담을 복합적으로 확인할 수 있는 지표로 유용하게 활용되고 있다.

본 연구의 가설을 다음과 같이 설정하였다. 첫 번째, 공기호흡기가 1.6 kg 경량화되었을 때, PSI로 계산된 생리적 부담은 더 적을 것이다. 두 번째, 공기호흡기가 1.6 kg 경량화되었을 때 주관적 서열부담 개선 효과가 있을 것이다. 세 번째, 공기호흡기가 1.6 kg 경량화되었을 때, 실제로 착용자는 중량감이 개선되었음을 인지할 것이다. 네 번째, 공기호흡기가 1.6 kg 경량화되었을 때, 프로토콜을 수행함에 있어 동적쾌적성(comfort of mobility)이 개선되었음을 느낄 것이다.

2. 연구방법

2.1. 연구대상자

본 연구에는 소방관이 아닌 건강한 한국인 20대 남성 8명이 참여하였다(나이: 22.6±3.0 세, 키: 177.6±1.0 cm, 체중 73.9±6.3 kg, 체질량지수: 23.4±1.9 kg/m²). 모든 연구대상자는 실험 참여 전 연구의 목적과 실험의 과정, 가능한 모든 위험에 대해 설명을 듣고 자발적인 서면 동의를 완료한 뒤에 실험에 참여하였다. 본 연구는 보건복지부지정 공공기관생명윤리위원회 승인을 받은 후 수행되었다(P01-202404-01-042).

2.2. 실험의복과 실험조건

공기호흡기 경량화 효과를 검증하기 위해 경량화된 공기호흡기(10.4 kg, 9 L 압력용기, 45분용)와 동일 회사의 같은 부피



Fig. 1. Experimental clothing ensembles with each SCBA (A: CON, B: LW).

와 형태를 갖는 공기호흡기 압력용기(12.0 kg, 9 L 압력용기, 45분용)를 사용하였으며, 경량화 공기호흡기 착용조건을 LW, 기존 공기호흡기 착용조건은 CON으로 하였다(Fig. 1). 연구대상자는 두 조건의 실험에 참여하였으므로 실험 순서에 의한 영향을 배제하기 위해 각 조건의 순서는 무작위로 배치하였고 각 실험은 최소 48시간의 간격을 두고 진행하였다. 연구대상자는 공기호흡기 외에 소방대원이 구조 및 지압 작업에서 착용하는 소방용 개인보호구(특수방화복 상하의, 소방부츠, 방화장갑, 소방헬멧 등)를 모두 착용하였으며, 특수방화복 내부에는 기동복 상하의와 양말을 착용하였다(Fig. 1). 공기호흡기를 제외한 의복의 무게는 총 10.095 kg이었다.

2.3. 실험 프로토콜과 절차

실험 프로토콜은 총 70분의 간헐적 운동 프로토콜로 구성되었다. 모든 연구대상자는 실험실에 도착 후 실험 수행 중 탈수를 예방하고 적절한 수화상태를 유지하기 위해 300 ml의 물을 마셨다. 이후 실험의복으로 환복하고, 센서들을 피부에 부착하였으며, 실험조건에 맞는 공기호흡기를 착용한 후 항온항습챔버에 입실하였다. 챔버는 28°C, 40%RH, 기류는 0.25 m/s 이하로 유지되었다. 챔버 내에서 연구대상자는 의자에 앉은 자세로 10분간 휴식을 가진 후, 15분간 5.5 km/h 속도로 트레드밀 걷기 운동을 수행하였으며, 이후 10분간 중간 휴식을 가진 후, 다시 15분간 동일 속도로 걷기 운동을 진행하였고, 운동이 종료되면 의자에 앉아 20분간 회복기를 가진 뒤 실험을 종료하였다. 본 연구의 운동 강도와 환경 조건은 소방용 개인보호구 착용의 후 운동 프로토콜을 진행했던 선행연구(Kim et al., 2014; Lee et al., 2014)를 참고하여 실험과정에서 직장온도가 적정 수준으로 상승할 수 있도록 설정하였다.

2.4. 측정 항목 및 계산 방법

공기호흡기의 경량화로 인한 신체 부담 경감 효과를 확인하기 위해, 본 연구에서는 다양한 생리적, 주관적 반응을 측정하였다. PSI를 계산하기 위해 직장온도와 심박수를 5초 간격으로 연속적으로 측정하였으며, 직장온은 항문괄약근으로부터 12 cm

깊이로 센서를 삽입하여 측정하였고(LT-8A, Gram Corporation, Japan). 심박수는 센서가 부착된 가슴벨트를 착용한 상태에서 데이터 리시버를 통해 손목에서 기록하였다(H12, Polar, Finland).

PSI는 식 (1)을 이용하여 계산하였다.

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

이 때, T_{re0} 과 T_{ret} 는 각각 안정 시 직장온과 수행되는 작업 중 시간 t 에서의 직장온을 나타내며, HR_t 와 HR_{max} 는 수행되는 작업 중 시간 t 에서의 심박수와 개인의 최대 심박수를 나타낸다. HR_{max} 는 180 bpm으로 대체하여 계산하였다(Moran et al., 1998). 다만 Moran et al.(1998)의 식에서 60이라는 상수 대신 안정 시 심박수를 의미하는 HR_0 를 사용하였으나, 실험 중 측정된 안정 시 심박수가 쾌적한 환경에서 측정된 안정시 심박수와 동일하지 않을 수 있음을 고려하여 Tikuisis et al.(2002)이 60 bpm을 사용하기를 제안하였으며, 본 연구에서는 모든 소방용 개인보호구를 착용한 상태임을 고려하여 위와 같이 수정된 PSI 계산식을 사용하였다.

주관적 서열부담 반응으로 한서감(thermal sensation), 온열쾌적감(thermal comfort), 습윤감(sweating sensation)에 대한 응답을 전체 70분의 프로토콜 동안 동작이 바뀌거나 다음 동작을 시작하기 직전의 시점에서 수집하였다(총 6회). 각 시점은 안정기(8분), 첫 번째 운동 종료 직전(23분), 중간휴식기(33분), 두 번째 운동 종료 직전(48분), 그리고 회복기(52분)였으며, 한서감의 경우 9점 척도, 온열쾌적감과 습윤감의 경우 7점 척도를 활용하였다(Kim et al., 2014).

마지막으로 사용성 평가항목으로서 증량감과 동적쾌적성에 대하여 실험 프로토콜을 수행하면서 전반적으로 경험한 공기호흡기의 무게감과 몸의 움직임이 제한되지 않고 편안했던 정도를 0점(‘참을 수 없을 만큼 무겁다’ 또는 ‘더 이상 착용하기 어려울 정도로 불편하다’)과 100점(‘착용한 느낌이 없을 정도로 매우 가볍다’ 또는 ‘착용한 느낌이 없을 정도로 매우 편하다’) 사이에 점수를 선택하도록 하였다.

2.5. 데이터 분석

모든 데이터는 평균과 표준편차로 나타내었으며, 생리적 측정항목과 PSI의 두 조건간 차이를 확인하기 위해 paired t-test를 이용하였다. 단, 피험자 1명에 대해 유효한 심박수 데이터를 수집하지 못했으며, 이로 인해 심박수와 PSI는 7명의 데이터에 대한 결과를 보고하였다. 주관적 서열부담과 증량감, 동적 쾌적성에 대한 비교 시에는 비모수 분석인 Wilcoxon signed-rank test를 이용하였다. 모든 통계적 분석에는 SPSS 18.0이 활용되었으며, 생리적 측정항목과 PSI의 통계적 유의성은 $P < 0.05$ 수준에서, 주관감은 $P < 0.1$ 수준에서 검증되었다.

3. 연구결과

3.1. 생리적 부담

공기호흡기 착용조건에 따른 직장온과 심박수, PSI에 대한 유의미한 차이는 없었다. 70분의 프로토콜 동안 CON 조건의 직장온 증가량은 $1.23 \pm 0.21^\circ\text{C}$, LW 조건의 직장온 증가량은 $1.18 \pm 0.27^\circ\text{C}$ 이었으며, 종료 시 직장온은 두 조건 모두 평균 38.38°C 로 동일했다. 심박수는 CON 조건에서 초기 90 ± 12

bpm에서 두 번째 운동 시 169 ± 13 bpm까지 증가하였다가 회복 시 95 ± 6 bpm까지 하강하였으며, LW 조건에서는 초기 83 ± 8 bpm, 운동 시 최대 164 ± 22 bpm, 그리고 회복 시에는 93 ± 13 bpm을 나타내었으며, 각 시간별 심박수와 심박수 증가량에 두 조건간 유의차는 없었다.

PSI 역시 두 조건에서 유의미한 차이가 없었으나, 두 조건의 평균값의 가장 큰 편차는 첫 번째 운동이 개시된 직후인 13분 시점에서 발생하였으며, 이 때 CON 조건은 3.2 ± 0.7 , LW 조건은 2.7 ± 0.5 의 PSI를 보였다(Fig. 2). PSI 최대값은 두 번째 운동이 종료되기 직전이었으며, 이 때 CON 조건은 6.3 ± 0.9 , LW 조건은 6.0 ± 1.1 의 PSI를 나타냈다.

3.2. 주관적 서열부담

한서감에서 두 조건간 차이는 없었으나, 온열쾌적감과 습윤감에서는 두 조건간 유의차가 있었다(Fig. 3). 특히, 온열쾌적감은 회복기에 두 조건간 차이가 두드러졌으며, CON 조건에서는 -2.3 ± 1.0 , LW 조건에서는 -1.9 ± 1.0 으로 LW조건에서 덜 불쾌하였다($P = 0.083$). 주관적 서열부담 항목 중 가장 현저한 차이가 발생한 항목은 습윤감이었다. 그 중에서도 중간 휴식 후

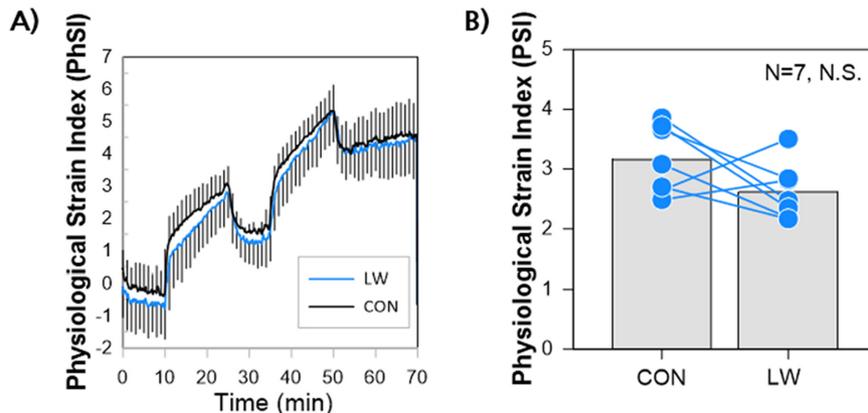


Fig. 2. Physiological strain index (PSI) during entire protocol and the mean and individual values during the first exercise phase (13 min). Black and blue line indicate CON and LW, respectively. In Figure B, the gray box indicates mean values and blue paired dots indicate individual values in each condition.

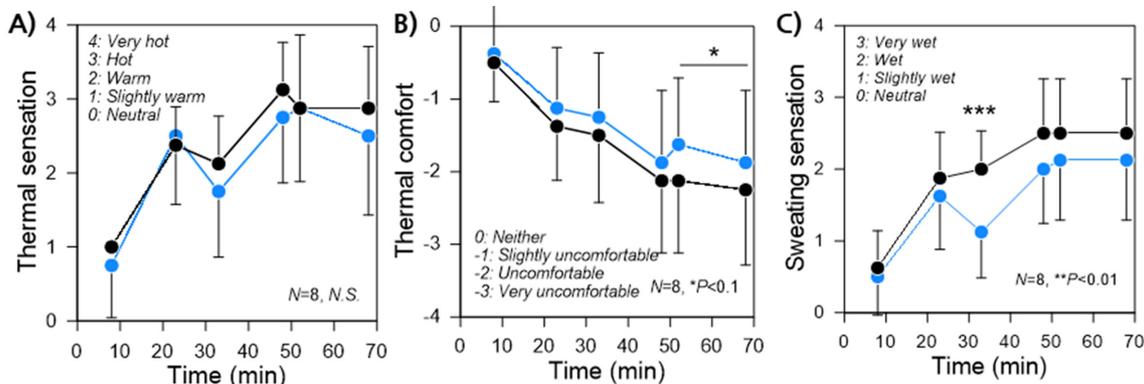


Fig. 3. Thermal sensation (A), thermal comfort (B), and sweating sensation (C) during entire protocols. Black lines and blue lines represent overall values for the CON and LW, respectively. All data show means and SD (N = 8).

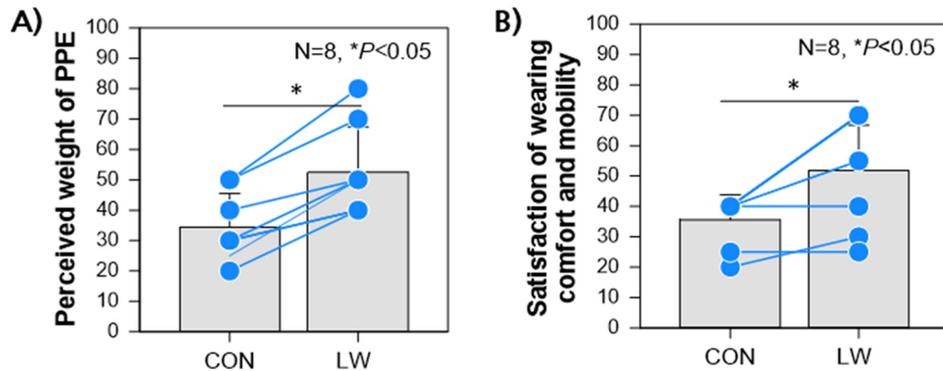


Fig. 4. Perceived weight of PPE (A) and satisfaction of wearing comfort and mobility (B) of each condition. Gray boxes indicate mean values and blue paired dots indicate individual values in each condition. All data show means and SD (N=8). Perceived weight of PPE was scored between 0 (“It’s unbearably heavy”) and 100 (“It’s so light that I can’t feel its weight”), and the satisfaction of wearing comfort and mobility was scored between 0 (“It’s so uncomfortable that I can’t wear it anymore”) and 100 (“It’s so comfortable that I won’t even feel like I am wearing it”).

두 번째 운동을 시작하기 직전(33분)에 두 조건간 습윤감의 차이가 가장 크게 나타났으며, 이 때 CON 조건에서는 이전 응답 수준과 유사하게 여전히 평균적으로 ‘쉽하다’라고 하였으나, LW 조건에서는 ‘약간 쉽하다’라고 응답했으며($P<0.001$), LW 조건에서는 두 번째 운동구간을 포함하여 종료할 때까지 CON 조건보다 덜 쉽하다는 응답의 경향이 유지되었다.

중량감과 동적쾌적성 모두 LW 조건이 CON 조건보다 우수하다고 평가받았다($P<0.05$). 먼저 중량감의 경우 CON 조건은 0~100점 가운데 34±11점이었고 LW 조건은 53±15점을 기록하여 평균적으로 LW 조건이 53% 개선되었음을 보였다. 동적쾌적성은 CON 조건에서 36±8점, LW 조건에서는 52±18점으로 46% 개선효과를 보였다(Fig. 4).

4. 고 찰

본 연구는 공기호흡기의 무게가 12.0 kg에서 10.4 kg으로 13% 경량화되었을 때, 이로 인한 생리적, 주관적 신체부담 경감효과를 정량적으로 평가하였으며, 공기호흡기 압력용기의 형태와 부피를 동일하게 유지함으로써 무게 경량화에 의한 효과만을 도출하고자 하였다. 실험 결과, 직장온, 심박수, 그리고 이를 바탕으로 계산한 생리적 부담(PSI)에서는 두 조건간 유의차가 없었으나, 주관적 서열부담(은열쾌적감, 습윤감)에서 유의미한 차이를 확인하였으며, 중량감과 동적쾌적성에 대한 평가에서는 경량화된 공기호흡기의 감소된 무게감과 이로 인한 움직임의 용이성이 착용자로부터 인지됨을 확인하였다. 이로써 PSI와 생리적 부담에 대한 유의차를 지지했던 첫 번째 가설을 제외한 나머지 연구가설은 지지되었다.

본 연구의 제한된 환경과 동작 프로토콜은 공기호흡기의 무게에 의한 영향을 명확하게 확인하기 위한 목적에서 실험조건을 간결화하고 환경변수를 최소화함으로써 설계되었는데, 이는 기존 선행연구에서 공기호흡기의 무게뿐만 아니라 부피와 형태가 복합적으로 변경되었던 점, 그리고 모의작업 프로토콜을 주

로 활용하여 운동시간이나 동작의 가동범위, 움직임의 속도와 같은 영향이 결과에 혼재되어 나타남으로 인해, 생리적 부담 경감 효과를 이해하고, 경량화에 의한 효과를 예측하는데 활용하기 어려웠던 점을 고려한 것이었다.

본 연구는 공기호흡기의 1.6 kg 무게 경량화 그 자체로는 서열부담과 심혈관계 부담에 유의미한 영향을 주지 않는다는 것을 확인하였다. 선행연구에서 공기호흡기 무게(-1.3 kg)와 형태의 복합적 차이가 있었을 때, 심박수의 유의미한 감소가 확인되었는데(Griefahn et al., 2003), 이번 연구결과는 이러한 생리적 반응이 공기호흡기의 무게보다는 형태의 영향을 더 많이 받았을 것이라는 연구자들의 추론을 뒷받침해준다. 공기호흡기 착용으로 인한 생리적 부담 경감을 위해서는 형태의 최적화가 우선되어야 함은 선행연구를 통해 앞서 보고된 바 있다(Li et al., 2023). Griefahn et al. (2003)의 연구에서는 조건간 심박수와 작업완료시간의 차이가 확인되었는데, 그 원인이 짧은 압축 용기가 동작을 덜 방해했기 때문으로 추측되었다.

본 연구에서는 무게 1.6 kg 경량화를 통한 생리적 이점을 확인하지 못했지만, 그럼에도 불구하고 주관적 서열부담과 사용성 측면에서 유의미한 개선 효과가 확인된 점은 고무적인 결과이다. 그 중에서도 흥미로운 결과는 습윤감에 대해서 특히 중간 휴식기부터 유의미하게 차이가 발생했다는 점이다. 습윤감은 피부가 얼마나 습하게 느껴지는지를 나타내는 지표로서 서열부담으로 인한 발한 정도를 간접적으로 평가하는 도구이기도 하다. 본 연구에서 두 조건의 차이가 나타나기 시작했던 중간 휴식기는 첫 번째 운동 종료 후 체온이 다소 상승했을 것이 예상되는 시점으로, 이때 습윤감의 상승은 발한이 개시되었음을 짐작케하며, 이 때 두 조건 간 습윤감 차이는 아마도 다음과 같은 두 가지 원인에서 비롯되었을 가능성이 있다. 첫 번째, 발한량의 차이로 인한 습윤감 차이가 발생했을 가능성이 있다. LW 조건에서 중간 휴식기에 의복 내 포화수증기량이 더 적었고, 동일한 수준의 발한량이 특수방화복 내피에 흡수되었을 것임을 고려했을 때, 첫 번째 운동 구간에서 더 적은 발한량이 발생했

을 가능성이 있다. 물론 본 연구에서는 발한량을 측정하지 않았으므로, 이러한 추론은 매우 조심스럽다. Bakri et al. (2012)의 연구에서는 공기호흡기 무게가 무거울 때 총발한량이 더 컸지만, 통계적으로 유의한 차이는 없었다. 이를 고려하면 이번 연구에서 두 조건간 발한량 차이가 유의미하게 발생했을 가능성은 희박하다. 그러나 Bakri et al. (2012)에서는 실험 종료 시 측정된 습윤감에서도 유의한 차이가 없었으나 본 연구에서는 습윤감을 시간대별로 측정하였을 때 일부 통계적 유의차가 확인되었다. 향후 공기호흡기 경량화에 의한 습윤감 차이가 발한량의 차이를 동반하는지를 검토하기 위해서는 연속발한량 측정을 통한 시간대별 분석이 필요할 것으로 보인다. 두 번째 가능성은, 실제 발한량의 차이는 크게 발생하지 않았지만, 공기호흡기 무게 경량화로 인해 공기호흡기가 인체에 닿는 부분의 의복압 감소가 습윤감에 영향을 주었을 가능성이 있다. 피부에는 습도 수용기가 별도로 없기 때문에 현재까지도 습도에 대한 인지는 아직 그 정확한 매커니즘이 알려져있지 않다. 그러나 최근 제시되고 있는 피부의 열수용기(thermoreceptors)와 기계 수용기(mechanoreceptors)의 복합적인 작용으로 습도를 지각한다는 신경 생리학적 모델 가설을 고려해본다면, 두 번째 가능성이 어느 정도 타당성을 갖는다. 습도 인지 가설은 현재까지는 일부 연구에 의해 주장된 것이며, 공기호흡기의 무게에 의한 의복압 차이 역시 정교한 실험을 통해 정량적으로 측정된 사례가 부족하다(Filingeri & Ackerley, 2017; Filingeri & Havenith, 2018). 후속 연구에서는 아마도 공기호흡기의 경량화에 의한 생리적 효과로서 습윤감과 발한량의 차이를 중점적으로 검토해볼 수 있을 것이다.

반면, 직장온과 심박수를 활용하여 계산한 지표인 PSI는 비록 70분간의 프로토콜 동안 유의차가 발생하지는 않았으나, 운동 초기 시점인 13분에 두 조건 간 가장 큰 편차가 발생한 것으로 확인되었다. 통계적 유의성은 없었으나, 개인별 측정값을 확인해보면 7명 중 2명을 제외한 5명이 CON 조건에서 LW보다 더 높은 PSI를 나타내었다. 12분은 휴식을 시작하고 운동을 시작하는 시점으로, 운동 초기, 동작과 몸의 움직임에 적응을 하는 과정에서 공기호흡기의 무게가 생리적 부담에 다소 영향을 주었을 가능성이 있다.

본 연구는 공기호흡기의 경량화에 의한 생리적, 심리적 신체 부담 경감 효과를 제한된 환경에서 검증함으로써 무게에 의한 효과를 명확화하였다는 의의를 가지지만, 이러한 연구방법론은 몇 가지 한계를 가진다. 첫 번째, 제한된 운동프로토콜 시험은 실제 소방대원이 작업 중 수행하는 복합적인 시나리오에서 나타나는 생리적 부담을 예측하는데 한계를 가진다. 공기호흡기 경량화는 몸을 앞으로 숙이거나 탈출, 구조 등 복잡하고 다양한 시나리오에서 인간공학적, 보행 역학적 이점이 있을 수 있는데(Li et al., 2023; Park et al., 2010), 제한된 운동 프로토콜에서는 이러한 효과를 확인할 수 없는 단점이 있다. 후속 연구에서는 실제 소방대원의 대표 동작과 과업으로 구성된 시나리오 프로토콜을 활용한 실증 연구가 필요하다. 두 번째, 본 연

구에서 측정된 생리적 변수가 제한적이었다. 심부온의 대푯값으로 직장온을 측정했으며, 심혈관계 부담을 나타내는 지표로서 심박수를 측정하였다. 그러나, 본 연구를 통해 확인하지 못한 체온조절 효과 차이가 존재했을 가능성을 배제할 수는 없다. 본 연구는 PSI를 계산하기 위한 최소한의 생리적 측정항목만을 도입했으나, 공기호흡기 경량화로 인한 생리적 서열부담에의 효과를 종합적으로 이해하기 위해서는 발한량, 피부온 등 추가적인 생리적 변수를 측정하여 종합적으로 비교하는 것이 권장된다.

5. 결 론

본 연구는 공기호흡기의 무게가 12.0 kg에서 10.4 kg으로 13% 경량화되었을 때, 이로 인한 생리적, 주관적 신체부담 경감효과를 정량적으로 평가하고자 하였다. 연구 결과, 공기호흡기의 무게 1.6 kg 경량화로 인한 생리적 부담 경감효과는 유의미하게 나타나지 않으나, 심리적, 주관적 부담 경감효과는 발생함을 확인하였으며, 특히 운동이 진행되어 발한이 개시된 이후에 피부 표면의 습윤감과 온열쾌적감이 개선되는 효과가 있음을 확인하였다. 또한 비록 생리적 이득은 검증되지 않았으나, 착용자는 공기호흡기의 무게가 경감되었음을 인지하며 동작이 훨씬 용이해짐을 느끼는 것 역시 착용자 관점에서는 중요한 결과라고 사료된다. 그럼에도 불구하고 생리적인 이득이 확인되지 않은 것은 공기호흡기의 인체적합성을 향상시키기 위해서는 무게뿐만 아니라 형태의 변경도 함께 고려해야함을 시사한다. 후속 연구에서는 아마도 공기호흡기의 경량화에 의한 생리적 효과로서 습윤감과 발한량의 차이를 중점적으로 검토해볼 수 있을 것이다.

감사의 말

본 연구는 2023년도 소방청 재난현장 긴급대응 기술개발 연구개발사업의 지원을 받아 수행되었습니다(No. 20024288).

REFERENCES

- Bakri, I., Lee, J. Y., Nakao, K., Wakabayashi, H., & Tochihara, Y. (2012). Effects of firefighters' 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
- Brown, M. N., Char, R. M. M. L., Henry, S. O. Tanigawa, J., & Yasui, S. (2019). The effect of firefighter personal protective equipment on static and dynamic balance. *Ergonomics*, 62(9), 1193-1201. doi: 10.1080/00140139.2019.1623422
- Carlton, S. D., & Orr, R. M. (2014). The impact of occupational load carriage on carrier mobility: A critical review of the literature. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 20(1), 33-41. doi: 10.1080/10803548.2014.11077025
- Coca, A., Kim, J. H., Duffy, R., & Williams, W. J. (2011). Field

- evaluation of a new prototype self-contained breathing apparatus. *Ergonomics*, 54(12), 1197-1206. doi: 10.1080/00140139.2011.622797
- Filingeri, D., & Ackerley, R. (2017). The biology of skin wetness perception and its implications in manual function and for reproducing complex somatosensory signals in neuroprosthetics. *Journal of Neurophysiology*, 117(4), 1761-1775. doi: 10.1152/jn.00883.2016
- Filingeri, D., & Havenith, G. (2018). Chapter 5. Peripheral and central determinants of skin wetness sensing in humans. *Handbook of Clinical Neurology*, 156, 83-102. doi:10.1016/B978-0-444-63912-7.00005-9
- Griefahn, B., Künemund, C., Bröde, P. (2003). Evaluation of performance and load in simulated rescue tasks for a novel design SCBA: effect of weight, volume and weight distribution. *Applied Ergonomics*, 34(2), 157-165. doi: 10.1016/S0003-6870(02)00143-6
- Kesler, R. M., Ensari, I., Bollaert, R. E., Motl, R. W., Hsiao-Wecksler, E. T., Rosengren, K. S., Fernhall, B., Smith, D. L., & Horn, G. P. (2018). Physiological response to firefighting activities of various work cycles using extended duration and prototype SCBA. *Ergonomics*, 61(3), 390-403. doi: 10.1080/00140139.2017.1360519
- 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., & Park, H. (2015). 소방용 방화복 및 방화 장비에 따른 상반신 관절 각도의 동작 범위 연구 [Impact of firefighters' protective clothing and equipment on upper body range of motion]. *The Korean Fashion and Textile Research Journal*, 17(4), 635-645. doi: 10.5805/SFTI.2015.17.4.635
- Kim, M., Seo, S. H., Choi, D., & Kong, M. (2024). 설문조사 기반 만족도 분석을 통한 공기호흡기 개선 방향 제시에 관한 연구 [A study on proposed improvement directions for SCBA based on satisfaction analysis from surveys]. *Fire Science and Engineering*, 38(6), 121-131. doi: 10.7731/KIFSE.a37a0955
- Kim, S., & Lee, J. Y. (2016). 소방방화복을 착용했을 때의 소방진압 업무 적합도 평가 프로토콜의 개발 [Development of firefighting performance test drills while wearing personal protective equipment], *Fire Science and Engineering*, 30(1), 138-148. doi: 10.7731/KIFSE.2016.30.1.138
- Knapik, J., Reynolds, K., & Harman, E. (2004). Soldier load carriage: historical, physiological, biomechanical, and medical aspects. *Military Medicine*, 169(1), 45-45. doi: 10.7205/milmed.169.1.45
- Lee, J.-Y., Kim, S., Jang, Y.-J., Baek, Y.-J., & Park, J. (2014). Component contribution of personal protective equipment to the alleviation of physiological strain in firefighters during work and recovery. *Ergonomics*, 57(7), 1068-1077. doi: 10.1080/00140139.2014.907449
- Li, J., Wang, Y., Jiang, R., & Li, J. (2023). Quantifying self-contained breathing apparatus on physiological and psychological responses during firefighting: a systematic review and meta-analysis. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 29(1), 77-89. doi: 10.1080/10803548.2021.2024020
- Moran, D. S., Shitzer, A., & Pandolf, K. B. (1998). A physiological strain index to evaluate heat stress. *American Journal of Physiological*, 275, R129-134. doi: 10.1152/ajpregu.1998.275.1.R129
- National Fire Agency. (2024). Korean Fire Equipment Standards. Sejong: Fire Equipment Standards Review Committee.
- Nazari, G., Lu, S., & MacDermid, J. C. (2021). Quantifying physiological responses during simulated tasks among Canadian firefighters: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Military, Veteran and Family Health*, 7(1), 55-75. doi: 10.3138/jmvfh-2019-0063
- Park, K., Hur, P., Rosengren, K. S., Horn, G. P., & Hsiao-Wecksler, E. T. (2010). Effect of load carriage on gait due to firefighting air bottle configuration, *Ergonomics*, 53(7), 882-891. doi: 10.1080/00140139.2010.489962
- Pedersen, J. E., Petersen, K. U., & Hansen, J. (2019). Historical changes in chemical exposures encountered by Danish firefighters. *Scandinavian Journal of Work, Environment, & Health*, 45(3), 248-255. doi: 10.5271/sjweh.3784
- Tikusis, P., McLellan, T. M., & Selkirk, G. (2002). Perceptual versus physiological heat strain during exercise-heat stress, *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 34(9), 1454-1461. doi: 10.1097/00005768-200209000-00009

(Received December 1, 2024; 1st Revised January 2, 2025; 2nd Revised January 10, 2025; Accepted January 16, 2025)