

PFAS Free 멤브레인이 적용된 아웃도어 투습방수 재킷의 투습도, 수증기 증발저항 및 인체 착용 시 생리·심리 반응

노상현¹⁾· 이호준¹⁾· Maria Stenkina²⁾· 염수현²⁾· 김도형³⁾· 이주영^{1),2),4)†}

¹⁾서울대학교 생활과학연구소, 서울, 한국

²⁾서울대학교 생활과학대학 의류학과, 서울, 한국

³⁾K2 코리아, 서울, 한국

⁴⁾차세대융합기술연구원 그래핀융합기술연구센터, 수원, 한국

Physiological and Psychological Responses, Water Vapor Permeability, Water Vapor Resistance of Waterproof and Breathable Jackets with PFAS-free Membrane

Sang-Hyun Roh¹⁾, Ho-Joon Lee¹⁾, Maria Stenkina²⁾, Suhyeon Yeom²⁾, Do-Hyung Kim³⁾,
and Joo-Young Lee^{1),2),4)†}

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

²⁾Department of Fashion and Textiles, Seoul National University, Seoul, Korea

³⁾K2 KOREA, Seoul, Korea

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

Abstract: Pre- and polyfluoroalkyl substances (PFAS), commonly used for water repellency in outdoor clothing, do not naturally degrade and can accumulate in the human body through environmental pathways. PFAS-free water-repellent technologies are now commercially available in outdoor apparel. This study examined the physical and physiological characteristics of PFAS and PFAS-free outdoor jackets using a thermal manikin and human wear trials. First, using a thermal manikin (Newton, 20-zones), we evaluated the physical properties of seven commercially available waterproof and breathable jackets. Four jackets incorporated PFAS membranes (Saloman, Florence, Kolon, and K2_Old), while three used PFAS-free membranes (Patagonia, Arcteryx, and K2_New). Next, four of these jackets (one PFAS and three PFAS-free) were selected for human wear trials. Eight male subjects wore each jacket in trials consisting of 10-min rest, 30-min exercise, and 20-min recovery. Despite differences in jacket mass (276 to 717 g), no marked differences were found in thermal insulation (I_{cl} : 0.300–0.388 clo) and water vapor resistance ($R_{e,T}$: 0.048–0.057 kPa·m²/W) among the seven jackets. The human wear trials also showed no significant differences in body temperature, heart rate, and subjective perceptions among the four jacket conditions. In summary, there were no notable differences in the physical or physiological characteristics of commercially available PFAS and PFAS-free outdoor jackets. These findings suggest that PFAS-free jackets may not negatively affect wearing comfort when comparing to outdoor jackets with PFAS membrane. In addition, effective ventilation design remains essential for both PFAS and PFAS-free outdoor jackets, as high humidity can accumulate inside jackets during exercise.

Key words: goretex(고어텍스), breathable waterproof fabric(투습방수포), clothing microclimate humidity(의복내습도), fabric sound(직물 소리), sweating(발한)

1. 서 론

최근 개인의 여가생활을 중요시하는 라이프 스타일의 변화에 따라 전통적인 등산 중심의 아웃도어 활동은 달리기, 자전

거, 캠핑, 낚시, 클라이밍 등 야외 활동 전반으로 확장되고 있다. 아웃도어 의류는 야외 활동 중 갑작스런 폭우나 강풍에 의한 체온 손실을 줄이기 위해 방수 또는 발수 성능과 함께 활동 중 발생하는 피부 발한을 외기로 배출할 수 있는 투습성이 요구되며, 국내 방수 재킷 소재로 고어텍스가 50% 이상 사용된다(Lee et al., 2013). 아웃도어 소재로 널리 알려진 고어텍스는 ePTFE(expanded polytetrafluoroethylene)를 기반으로 만들어진 다공성 멤브레인으로 투습·방수성을 가진다. 이러한 특성으로 인해 기존 방수 소재를 사용한 작업복에 비해 착용자의 열 스트레스를 완화하는 장점을 지닌다(Kenney et al., 1993). Hwang et al.(2006)은 고어텍스 소재로 제작된 농약방제복과

†Corresponding author: Joo-Young Lee

Tel. +82-2-880-8746

E-mail: leex3140@snu.ac.kr

©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.

시판 나일론 소재 방제복을 대상으로 인체 착용 쾌적성을 비교하였고, 그 결과 나일론 소재로 제작된 시판 방제복에 비해 고어텍스 소재를 적용한 방제복 착용 시 착용자의 열부담이 완화됨을 보고하였다. White and Hodous(1988)는 소방복을 착용하고 운동을 수행하는 동안 네오프렌 안감이 적용된 소방복에 비해 고어텍스 안감이 적용된 소방복을 착용한 경우 유의하게 낮은 평균 피부온을 확인하였다. 개인보호복의 소재가 인체에 미치는 영향은 노출된 환경은 수준에 따라 다르는데, 고어텍스, 폴리프로필렌, 또는 타이벡 소재로 제작된 석면 제거 작업용 보호복 착용 시 열적 중성역(기온 25°C) 수준에서 보호복 3종 간 생리적 부담 차이가 확인되지 않았으나, 고온 환경(기온 36°C)에서는 고어텍스나 폴리프로필렌 보호복에 비해 타이벡 소재의 보호복 착용 조건에서 유의하게 높은 생리적 열부담이 관찰되었다(Holmér et al., 1992). 이는 보호복 소재에 따른 인체 열부담의 차이가 열중성 환경보다 고온 환경에서 보다 명확하게 나타날 수 있음을 보여준다.

아웃도어 의류의 투습·방수성을 위해 사용되는 과불화화합물(per- and polyfluoroalkyl substances, PFAS)은 알킬 사슬의 수소가 불소로 치환되어, 하나 이상의 불소화된 메틸(fluorinated methyl, -CF₃) 또는 메틸렌(methylene, -CF₂)이 포함된 합성 불소화합물을 의미한다. 이러한 화합물은 낮은 표면 에너지로 소수성(hydrophobic)을 지니기 때문에 아웃도어 재킷의 발수 코팅제로 사용되고 있다(Gremmel et al., 2016; Kotthoff et al., 2015). 동시에, 화학 구조상 열과 화학물질에 강하면서 자연적으로 쉽게 분해되지 않아 아웃도어 의류 폐기 시 토양, 대기, 해양 등 광범위한 곳에 잔류할 수 있다. 특히, perfluorooctane sulfonic acid (PFOS)나 perfluorooctanoic acid (PFOA)는 동물과 인체에 축적되어 체내 호르몬을 교란시키거나 면역계 억제, 발암 가능성 증가 등 생물체에 치명적인 영향을 미친다고 알려져 있다(Seo et al., 2024). 유럽화학물질청(ECHA)에서는 PFAS 사용 제한을 위한 규제 법안을 마련하고 있으며, 미국환경보호국(EPA)에서도 관련 규제 법안을 제안하고 개별 주 차원에서 PFAS 사용 금지와 관련된 법안을 시행하고 있다. 이러한 국제 규제 추세에 따라, PFAS-free이면서 발수 성능을 지닌 의류용 소재 개발이 활발히 진행되고 있으며(Kwon et al., 2021), 이미 PFAS-free 발수 성능이 적용된 아웃도어 의류 제품들도 상용화되어 시판되고 있다.

최근 의류 제품의 성능 평가는 소재 수준의 물성 평가에서 한 단계 더 나아가, 완제품에 대한 인체 착용 평가까지 종합적으로 이루어지고 있다. 섬유나 직물의 물성 평가 결과를 토대로 의류 완제품의 성능을 추정할 수는 있으나, 이 성능이 사람의 몸에 맞게 입체적으로 제작된 의류에 충분히 반영되지는 않는다. 예를 들어, 새롭게 개발된 투습방수포 A의 투습도가 기존 투습방수포 B보다 높을 경우 소재 A로 제작된 아웃도어 의류의 열 쾌적 수준이 소재 B로 제작된 아웃도어 의류보다 더 높을 것이라 예상할 수 있으나, 실제 완제품 착용 시 두 조건 간 유의한 차이가 발견되지 않거나 오히려 반대의 결과가 발견

될 수 있다. 이는 소재 상태의 물성 평가가 인체와 의복 간 미세 기후를 통한 인체-환경 열교환을 충분히 반영하기 어렵고, 특히 피부 발한에 의한 증발 열손실이나 피부의 혈액 순환을 통한 복사 및 대류에 의한 열손실을 반영하지 못하기 때문이다. 나아가 소재 상태의 물성 평가는 착용 시 인체 구속감을 반영하지 못하는데, 보호복의 증량, 겹쳐 입는 방식, 착용자의 체형과 같은 요인들이 실제 활동 시 주요 관절의 움직임에 제한하며, 이는 결국 인체 에너지 대사량의 증가를 초래한다. 따라서, 착용자의 생리·심리적 반응을 통합적으로 분석하여 의류 제품의 착용성을 객관적으로 분석하기 위해서는, 완제품을 직접 입고 평가하는 인체 착용 평가가 필요하다(Lee and Choi, 2004). 국제적 추세에 따라 PFAS-free 소재를 적용한 아웃도어 의류 판매가 증가하고 있으나, 기존 PFAS가 적용된 아웃도어 의류와의 비교 평가는 주로 소재의 물성 평가에 한정되어 있으며, 인체 착용을 통해 완제품의 성능을 비교한 평가 연구는 극히 드물다.

이에 본 연구에서는 국내외의 시판되고 있는 투습방수 재킷들 중 PFAS 멤브레인이 적용된 아웃도어 재킷과 PFAS-free 멤브레인이 적용된 아웃도어 재킷을 수집한 후, 소재의 물성 및 완제품의 착용 성능을 비교 분석하였다. 완제품의 성능은 서멀 마네킹과 인체 착용 평가를 통해 종합적으로 분석되었다. 본 연구의 가설은 다음과 같다. 첫째, PFAS-free 멤브레인이 적용된 시판 아웃도어 완제품의 열저항 및 수증기 증발저항은 PFAS 멤브레인이 적용된 시판 아웃도어 완제품과 유사할 것이다. 둘째, PFAS-free 멤브레인이 적용된 시판 아웃도어 완제품 착용 시 인체 열부담은 PFAS 멤브레인이 적용된 시판 아웃도어 완제품 착용 시 결과와 유의한 차이를 보이지 않을 것이다. 셋째, PFAS-free 멤브레인이 적용된 시판 아웃도어 완제품 착용 시 착용자의 정신·심리반응은 PFAS 멤브레인이 적용된 시판 아웃도어 완제품 착용 시 결과와 유의한 차이를 보이지 않을 것이다.

2. 연구방법

2.1. 실험용 의복 특성

본 연구는 국내외의 서로 다른 회사에서 출시되어 시판 중인 투습방수 재킷 중 PFAS 멤브레인이 적용된 투습방수 재킷 4종(Salomon, Florence, Kolon, K2_Old)과 PFAS-free 멤브레인이 적용된 아웃도어 3종(Patagonia, Arcteryx, K2_New)을 대상으로 하였다(Table 1). 모든 재킷은 후드가 부착된 남성용 사이즈 L을 기준으로 구입하였다(Salomon 제외, 사이즈 M). 사용된 아웃도어 재킷의 총중량은 276 g에서 717 g이었다.

2.2 서멀 마네킹 착용 평가

2.2.1. 사용 장비 및 실험 조건

수집된 시판 투습방수 재킷의 열저항 및 수증기 증발저항 실측을 위해 성인남성형 서멀 마네킹(Newton, 20 부위, Tem-

Table 1. Physical characteristics of waterproof and breathable jackets in the present study

Category	Brand	Size	Material	Membrane	Mass (g)	I _T ²⁾ (clo)	I _{cl} ³⁾ (clo)	I _{cl} (clo/kg)	R _{e,T} ⁴⁾ (m ² ·kPa/W)
PFAS ¹⁾	Salomon	M	· Shell (face and back): 100% polyamide · Body insert: 72% Polyamide/28% Elastane	Pertex shield UNI S/LAB	297	0.828	0.322	1.07	0.056
	Florence	L	89% Nylon6/ 11% Spandex	eVent 3 Bio Waterproof shell	503	0.858	0.352	0.70	0.055
	Kolon	L	· Shell/Liner Nylon 100%	Goretex C Knit	465	0.832	0.326	0.70	0.051
	K2_Old	L	· All: PE100%	Goretex PTFE	590	0.894	0.388	0.66	0.054
PFAS-free	Patagonia	L	· Body: 100% Recycled nylon · Corps: 100% Recycled polyamide	4 layer -H2No performance standard shell, PFAS/PFC Free Waterproof shell	717	0.835	0.329	0.46	0.057
	Arcteryx	L	100% Nylon with ePE & PU membrane	Goretex ePE	359	0.836	0.330	0.92	0.054
	K2_New	L	All: Nylon100%	HDPE film (PFAS/PFC Free)	276	0.806	0.300	1.09	0.048

¹⁾ Per- and polyfluoroalkyl substances, ²⁾ total thermal insulation (average value of 3 repetitions), ³⁾ thermal insulation of clothing (average value of 3 repetitions), and ⁴⁾ water vapor resistance (average value of 3 repetitions).

perature Measurement Thermometrics, USA)을 이용하였다. ISO 9920(2007)을 기준으로 인공기후실은 기온 21°C, 습도 50%RH, 기류 < 0.15 m/s로 유지하였고, 서멀 마네킹의 20부 위 표면 온도는 모두 33°C로 설정하였다. 수증기 증발저항 측정 시 인공기후실의 기온과 마네킹 표면 온도 모두 33°C로 동일하게 유지하였으며, 마네킹의 표면 발한율은 1,000 ml/h/m²으로 설정하였다. 투습방수 재킷 총 7종에서 열저항(I_T, I_{cl})과 수증기 증발 저항(R_{e,T}) 모두 측정되었으며, 각 재킷에 대해 3회 반복 측정된 후 3회 평균값을 각 재킷의 대푯값으로 정하였다. 나상 시 서멀 마네킹의 보온력은 0.078°C·m²/W(0.506 clo)였다(Table 1).

2.2.2. 열저항 및 수증기 증발저항 계산

실험용 투습방수 재킷들의 열저항은 ISO 9920(2007)에 따라 계산되었다. [Eq. 1]에서 얻어진 열저항값(R)을 보온력 단위(clo)로 환산하기 위해 [Eg. 2]를 사용하였다. 재킷의 수증기 증발저항은 ISO 9920(2007)에 따라 아래 식 3~6을 사용하여 계산하였다. 본 연구에서 서멀 마네킹을 이용하여 측정된 열저항 및 수증기 증발저항 값은 Table 1에 제시하였다.

$$R_{cl} = \frac{(T_s - T_a)}{Q/A} \tag{1}$$

R_{cl}: 열 저항 (m²·°C/W)

T_S: 마네킹의 표면온도 (°C)

T_a: 마네킹을 둘러싼 공기의 온도 (°C)

Q/A: 마네킹의 표면적 당 열유량 (W/m²)

$$I_T = 6.45 \times R_{e,T} \tag{2}$$

$$R_{e,T} = \frac{(P_s - P_a)A}{H_e - \frac{(T_s - T_a)A}{I_T}} \tag{3}$$

$$R_{e,T} = \frac{(P_s - P_a)}{Q/A - (T_s - T_a)R_{cl}} \tag{4}$$

$$P_s = 133.3 \times 10^{[8.10765 - (1750.29/(235 + T_s))]} \tag{5}$$

$$P_a = RH \times 0.01 \times 133.3 \times 10^{[8.10765 - (1750.29/(235 + T_a))]} \tag{6}$$

- R_{e,T}: 총 수증기 저항 (total evaporative resistance) (m²·kPa·W⁻¹),
- P_s: 땀을 내고 있는 마네킹 피부 표면의 수증기압 (kPa),
- P_a: 의복 착용한 마네킹 주변의 수증기압 (kPa),
- A: 땀을 내는 영역들의 면적 (m²),
- H_e: 땀을 내는 영역들에 들어간 소비 전력 (W),
- Q/A: 마네킹의 표면적 당 열유량 (W/m²),
- R_{cl}: 건조 열저항 시험에서 측정된 마네킹의 표면적 당 열유량 (W/m²),
- T_S: 마네킹의 피부 표면 온도,
- T_a: 의복 착용한 마네킹 주변의 온도,
- I_T: 의복의 보온력 (m²·K·W⁻¹),
- RH: 마네킹을 둘러싼 공기의 상대습도.

2.3. 인체 착용 실험을 통한 원제품의 성능평가

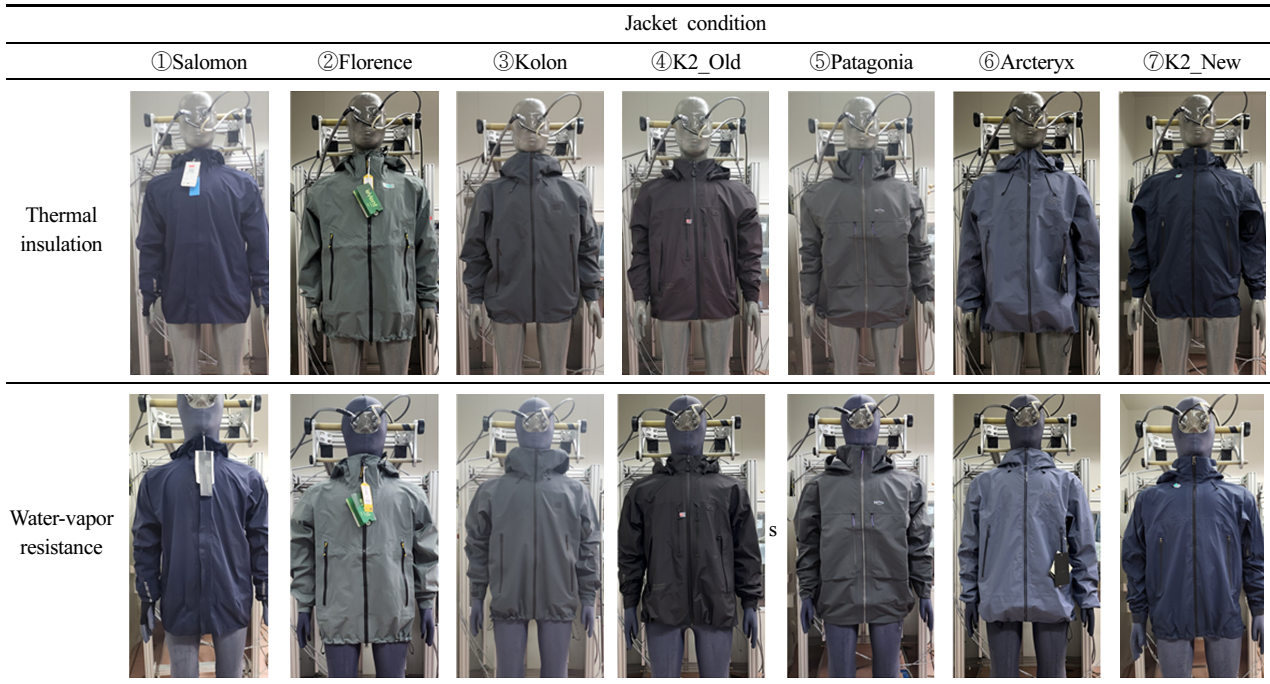
2.3.1. 피험자 특성

건강한 성인 남성 8명(27.4±3.6세, 키 173.8±4.8 cm, 몸무게 71.5±6.1 kg, BMI 23.6±1.3, 체지방률 21.6±4.4%)이 실험에 참여하였다. 상의 사이즈 100을 착용하는 유사한 체격의 피험자로 한정하였다. 피험자에게는 실험 참여 전 실험 내용에 대해 충분한 설명을 제공하였고, 자발적으로 동의한 경우에만 실험에 참여하였다(IRB No. 2503/004-004).

2.3.2. 실험 환경 및 실험 의복 조건

인체 착용 평가는 기온 21.5±0.1°C, 습도 52±1%RH로 유

Table 2. Photos while measuring thermal insulation and water-vapor resistance using a thermal manikin



지되는 인공기후실에서 진행되었다. 서멀 마네킹을 이용하여 측정된 보온력과 수증기 증발저항 값을 바탕으로 아웃도어 재킷 7종 중 PFAS 멤브레인이 적용된 투습방수 아웃도어 1종 (K2_Old)과 PFAS-free 멤브레인이 적용된 아웃도어 3종 (Patagonia, Arcteryx, K2_New)을 인체 착용 평가용 재킷으로 선정하였다. 인체 착용 평가에 사용된 아웃도어 재킷 4종 소재의 투습도는 KS K 0594(2021) 염화칼슘법을 기준으로 항온항습 챔버(기온 40°C, 습도 90%RH, 기류 < 0.08 m/s)에서 각 3회씩 반복 측정되었다(Eq. 7, Table 3).

$$P = \frac{a_2 - a_1}{S} \quad (7)$$

P : 투습도 [g/(m²·h)]

a₂-a₁ : 1h 경과 후 시험체의 질량 변화(g/h)

S : 투습 면적(m²)

재킷 4종의 전체 외관 디자인 및 개구부, 앞 여밈, 주머니 등은 유사하였다 (Table 2에서 4, 5, 6, 7번). 인체 착용 평가 시 기본 의복으로 피험자들은 동일한 팬티(면 100%), 반팔 티셔츠(면 100%), 긴바지(면 100%), 양말(면 100%), 운동화를 착용하였다. 아웃도어 재킷과 운동화를 제외한 기본 의복의 총 중량은 540 g이었다. 실험 참여 순서에 의한 영향을 최소화하기 위해 피험자는 네 개의 실험 조건에 임의 순서로 참여하였다.

2.3.3. 실험 프로토콜 및 실험과정

인체 착용 평가는 서멀 마네킹 측정 환경과 동일한 환경은 습도 조건에서 총 60분(10분 휴식, 30분 운동, 20분 회복) 동안 진행되었다(Fig. 1). 피험자는 실험실 도착 직후 탈수 방지를 위해 준비된 생수 330 ml를 먼저 마신 후, 실험용 속옷과 실험용 가운으로 환복하고 신장, 체중, 인체 체성분을 측정하였다. 이후 실험 준비실에서 귀내온 센서, 얼굴 부위 피부온도 센

Table 3. Physical characteristics of the different fabrics for the four outdoor jackets in the present study

Brand	Type of membrane	Fabrics			Water vapor permeability* (g·m ⁻² ·h ⁻¹)
		Layer	Thickness (mm)	Weight (g·m ⁻²)	
K2_Old	PFAS	Inner	0.20	123	64.8
		Outer	0.18	91	
Patagonia	PFAS_Free	Single	0.43	220	59.0
Arcteryx	PFAS_Free	Single	0.27	109	43.9
K2_New	PFAS_Free	Single	0.18	60	70.9

*KS K 0594 (2021)

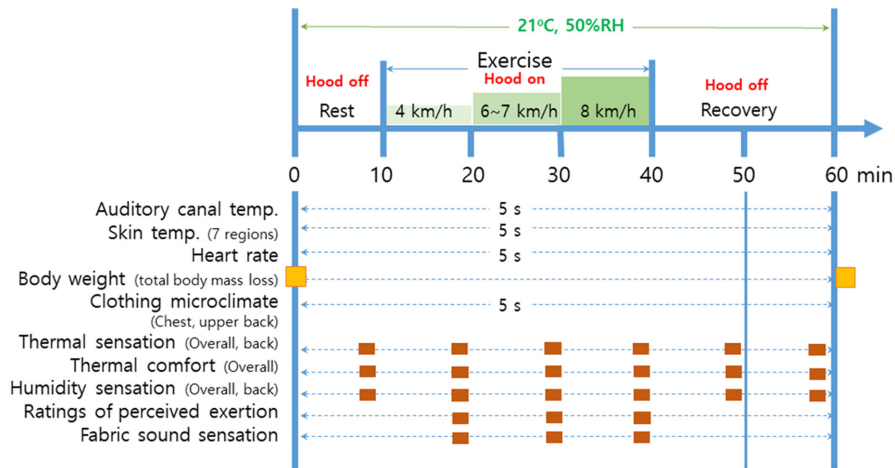


Fig. 1. Experimental protocol and measurement items in the present study.

서, 가슴과 등 부위 의복내 온습도 센서를 부착하였고, 가슴 중앙에 심박수 측정용 벨트를 부착하였다. 모든 센서들을 부착한 후 실험용 의복을 착용하였고, 인공기후실로 이동하였다. 인공기후실에 들어가 등받이가 없는 의자에 앉은 자세로 10분 휴식 후 트레드밀 위에 올라가 30분 운동을 수행하였다. 30분 운동은 경사 1°로 고정된 트레드밀 위에서 가벼운 강도로 10분 걷기(4 km/h), 중등 강도로 10분 걷기(6 km/h), 고강도로 10분 뛰기(8 km/h)로 구성되었다. 운동 종료 직후 다시 의자에 앉은 자세로 20분간 회복하였다. 트레드밀 위에서 운동을 하는 동안 실험용 재킷에 연결된 후드를 머리에 착용하였으며, 안정기와 회복기에는 후드를 내린 상태로 유지하였다.

2.3.4. 측정항목

실험 준비 중 모든 피험자는 체성분 분석기(InBody 970, InBody, Korea)를 이용하여 인체 체성분을 측정하였다. 귀내온 측정을 위해 귀내온 전용 센서를 센서에 표시된 깊이(약 2-3 cm)까지 피험자 스스로 왼쪽 귀 내부에 삽입하도록 하였으며, 컷바퀴 위에 숨과 거즈를 부착하여 외기의 영향을 최소화하였다. 귀내온은 60분 동안 5초 간격으로 자동 기록되었다(LT-8A, Gram Corporation, Japan). 피부온은 이마, 가슴, 아래팔, 손등, 넓적다리, 종아리, 발등의 일곱 부위에서 5초 간격으로 연속 기록되었다(LT-8A, Gram Corporation, Japan). 심박수는 가슴에 두르는 벨트 형식의 수신기와 손목에 차는 시계 형식의 무선 데이터 로거를 사용하여 1초 간격으로 연속 기록되었다(H10, Polar Electro, Finland). 총발한량 추정을 위해 실험 전과 실험 직후 나상 시 몸무게(팬티와 실험 가운만 착용한 상태)를 각 3회 반복 측정하였으며 평균값을 체중 대푯값으로 사용하였고, 실험 전후 체중의 차이를 총발한량으로 간주하였다(F150S, Sartorius, Germany, resolution 1 g). 실험용 아웃도어 재킷의 실험 전 건조 시 중량과 실험 직후 중량을 측정하여 재킷에 흡수된 땀량을 추정하였다(F150S, Sartorius, Germany, resolution 1 g). 총발한량과 의복에 흡수된 땀량 간의 차이를 총증발량으로

정의하였다. 의복내 온습도는 가슴과 등 중앙 부위 최내층에서 5초 간격으로 연속 기록하였다(TR-72wb, T&D, Japan).

정신·심리적 반응으로 전신과 등 부위에서의 한서감을 9점 척도(-4:매우 춥다, -3:춥다, -2:서늘하다, -1:약간 서늘하다, 0:보통이다, +1:약간 따뜻하다, +2:따뜻하다, +3:덥다, +4:매우 덥다)를 사용하여 응답하게 하였으며, 전신 온열쾌적감은 7점 척도(-3:매우 불쾌하다, -2:불쾌하다, -1:약간 불쾌하다, 0:보통이다, +1:약간 쾌적하다, +2:쾌적하다, +3:매우 쾌적하다)를 사용하였다. 전신과 등 부위 습윤감은 7점 척도(-3:매우 건조하다, -2:건조하다, -1:약간 건조하다, 0:보통이다, +1:약간 습하다, +2:습하다, +3:매우 습하다)로 응답하게 하였으며, 운동자각도(Ratings of Perceived Exertion, RPE)는 Borg 척도[6 전혀 힘들지 않다, 7~8 극도로 가볍다, 9 매우 쉽다, 11 쉽다, 12~13 약간 힘들다, 15 힘들다, 17 매우 힘들다, 19 극도로 힘들다, 20 참을 수 없을 정도로 힘들다]를 사용하여 운동 중 10분 간격으로 측정하였다. 운동 중 투습방수 재킷의 소재들이 부딪혀 발생하는 소리에 대한 감각으로, 5점 척도(0:전혀 소리가 나지 않는다, +1:약간 소리가 난다, +2:소리가 난다, +3:소리가 매우 난다, +4: 소리가 너무 크게 난다)를 사용하여 10분 간격으로 측정하였다. 운동자각도를 제외한 모든 정신·심리적 측정 척도는 0.5점 단위로 응답 가능하도록 구성하였다.

2.3.5. 데이터 분석

실험 결과는 평균과 표준편차(Mean ± SD)로 제시하였으며, SPSS 23 (SPSS, Inc., Chicago, IL)을 사용하여 분석했다. 귀내온 및 피부온, 심박수, 의복내 온습도는 운동 시작 직전 10분 안정기 동안 평균값, 각 운동기 마지막 2분 동안의 평균값, 회복기 중간 3분(47~50분) 및 마지막 3분(57~60분) 동안의 평균값을 각 구간별 대푯값으로 간주하였다. Shapiro-Wilk Test를 이용해 정규성을 검정하였다. 정규성을 띄는 변수들에 대해 네 가지 실험 조건 간의 차이는 반복측정 분산분석(RM ANOVA)으로 분석한 후 Bonferroni correction 사후검정을 실시했다.

Table 4. Summary on auditory canal temperatures, clothing microclimate, and heart rate

Variable	Phase	Experimental clothing condition								P-value
		Patagonia		Arcteryx		K2_Old		K2_New		
		Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	
T_{auditory}	Rest	36.5	0.3	36.4	0.4	36.3	0.4	36.4	0.4	N.S.
	Exercise	36.7	0.3	36.6	0.2	36.3	0.6	36.6	0.2	N.S.
	Recovery	36.4	0.4	36.4	0.4	36.3	0.7	36.6	0.2	N.S.
Mean T_{sk}	Rest	33.0	0.5	33.0	0.7	32.8	0.6	32.8	0.7	N.S.
	Exercise	32.9	0.6	32.8	0.7	32.9	0.6	32.4	0.8	N.S.
	Recovery	33.3	0.7	33.3	0.6	33.4	0.7	33.1	0.6	N.S.
$T_{\text{cl_chest}}$	Rest	33.4	0.7	32.8	0.9	32.7	1.1	33.0	0.7	N.S.
	Exercise	32.8	1.4	32.3	0.9	33.0	0.8	32.4	1.3	N.S.
	Recovery	33.3	1.0	32.9	1.3	33.3	1.1	33.0	1.2	N.S.
$T_{\text{cl_Back}}$	Rest	32.8	1.0	32.5	0.8	32.1	1.6	32.2	1.2	N.S.
	Exercise	32.2	0.8	31.9	0.8	31.7	0.9	31.5	1.3	N.S.
	Recovery	33.0	0.8	32.4	0.9	32.5	1.0	32.2	1.0	N.S.
$H_{\text{cl_chest}}$	Rest	46	17	43	14	45	18	43	17	N.S.
	Exercise	85	7	85	5	85	5	84	4	N.S.
	Recovery	86	4	87	5	85	7	83	6	N.S.
$H_{\text{cl_Back}}$	Rest	59	17	56	22	54	19	49	16	N.S.
	Exercise	91	2	90	3	90	4	90	4	N.S.
	Recovery	82 ^{ab}	5	85 ^a	3	78 ^{ab}	3	74 ^b	12	0.022
Heart rate	Rest	88	10	93	17	83	10	87	10	N.S.
	Exercise	159	12	159	17	154	19	157	14	N.S.
	Recovery	98	8	100	15	96	14	98	10	N.S.

* T_{cl} and H_{cl} represent clothing microclimate temperature and humidity, respectively. All temperature variables are in °C, humidity in %, and heart rate in bpm.

범주형 척도를 이용한 비모수 항목들(또는 비정규성 데이터)에 대하여는 Friedman 검정을 실시한 후, 조건별 차이는 Wilcoxon signed-rank test로 분석했다. 변수 간 상관관계는 Pearson's r 또는 Spearman's rho로 분석했다. 각 분석은 $P < 0.05$ 수준에서 유의성을 검정하였다.

3. 연구 결과

3.1. 소재 및 완제품의 물성

본 연구에서 수집된 아웃도어 재킷 7종의 중량은 276~717 g

으로 넓은 범위를 보였다. 서멀 마네킹으로 측정된 보온력(열저항, I_{cl})은 0.300~0.388 clo, 수증기 증발저항은 (R_{et}) 0.048~0.057 kPa·m²/W로 일곱 종의 완제품 간 큰 차이는 없었다 (Table 1). 완제품의 중량과 보온력, 중량과 수증기 증발저항 간에도 유의한 상관은 발견되지 않았으며, 보온력과 수증기 증발저항 간에도 유의한 상관은 발견되지 않았다. 인체 착용 평가에 사용된 아웃도어 재킷 4종 소재의 투습도는 43.9~70.9 g·m⁻²·h⁻¹로 완제품의 수증기 증발저항이 가장 낮은 K2_New 재킷 소재의 투습도가 가장 높았으나(Table 3), 완제품의 수증기 증발저항과 소재의 투습도 간 유의한 상관은 존재하지 않았다.

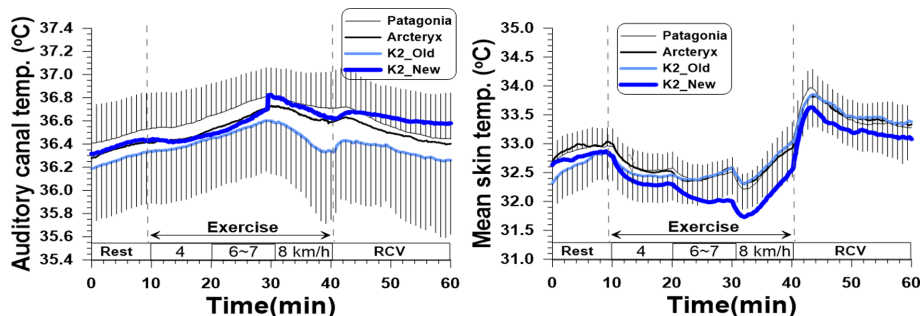


Fig. 2. Time courses of auditory canal temperature (left) and mean skin temperature (right) for the four experimental conditions during the 60-min trial.

3.2. 귀내온과 평균피부온

귀내온은 안정기, 운동기, 회복기 모두 네 가지 의복 조건 간 유의한 차이 없이 안정기 평균 36.3~36.5°C, 운동기 평균 36.3~36.7°C, 회복기 평균 36.3~36.6°C 범위를 보였다(Table 4, Fig. 2). 평균피부온도는 귀내온과 마찬가지로 안정기, 운동기, 회복기 모두 네 가지 의복 조건 간 유의한 차이를 보이지 않았다(Table 4). 운동을 시작하면서 네 조건 모두 평균피부온도

는 점점 하강하다가, 세 번째 단계 운동 시작 시 급격한 감소 후 점차 상승하였다. 회복기 시작과 함께 평균피부온도는 큰 폭의 증가를 보여 안정기에 비해 평균 0.3~0.6°C 이상 높은 값을 보여 주었다(Fig. 2).

3.3. 부위별 피부온도

일곱 부위 피부온도 모두 안정기, 운동기, 회복기에서 네 가

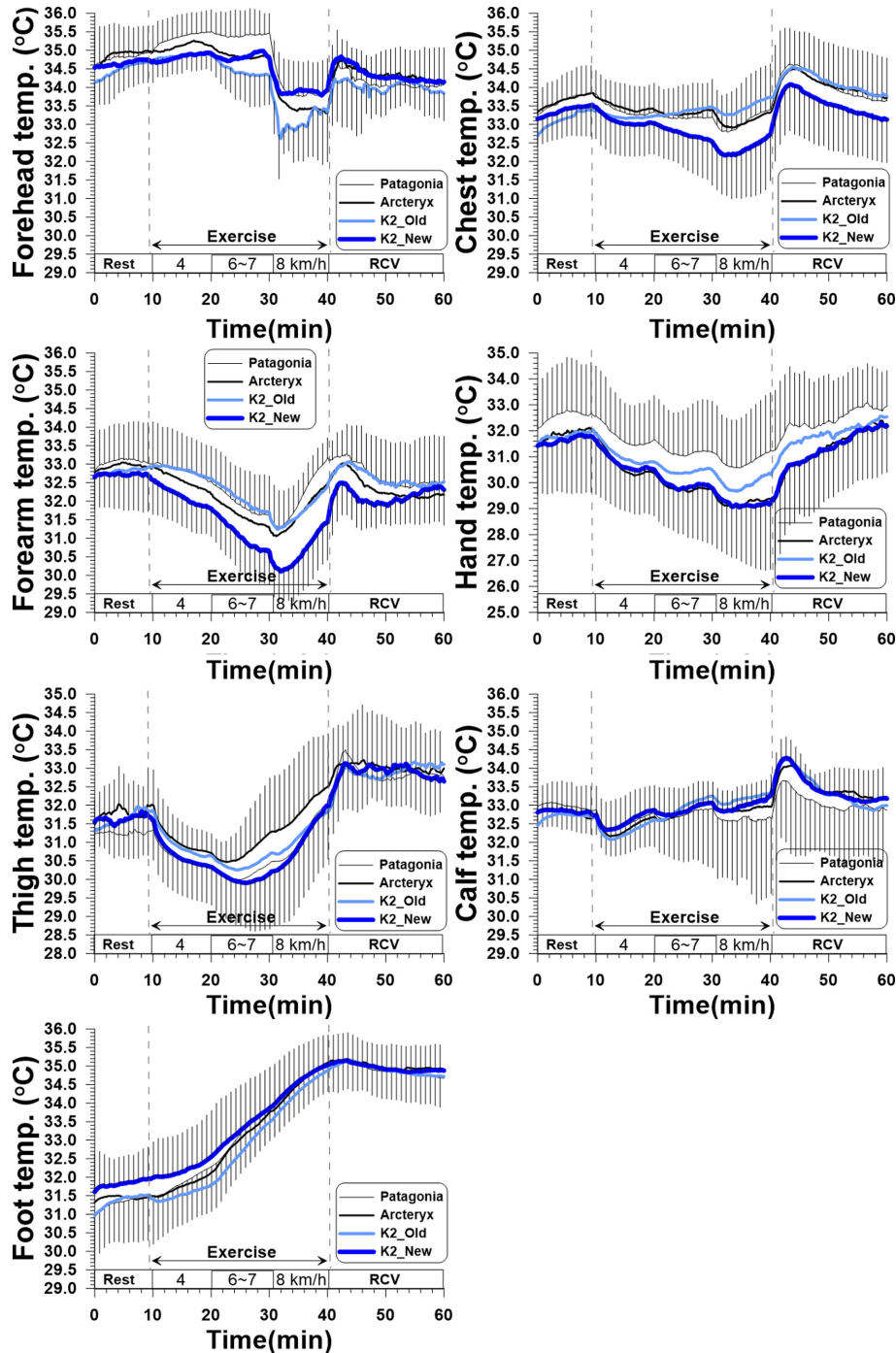


Fig. 3. Time courses of local skin temperatures for the four experimental conditions during the 60-min trial.

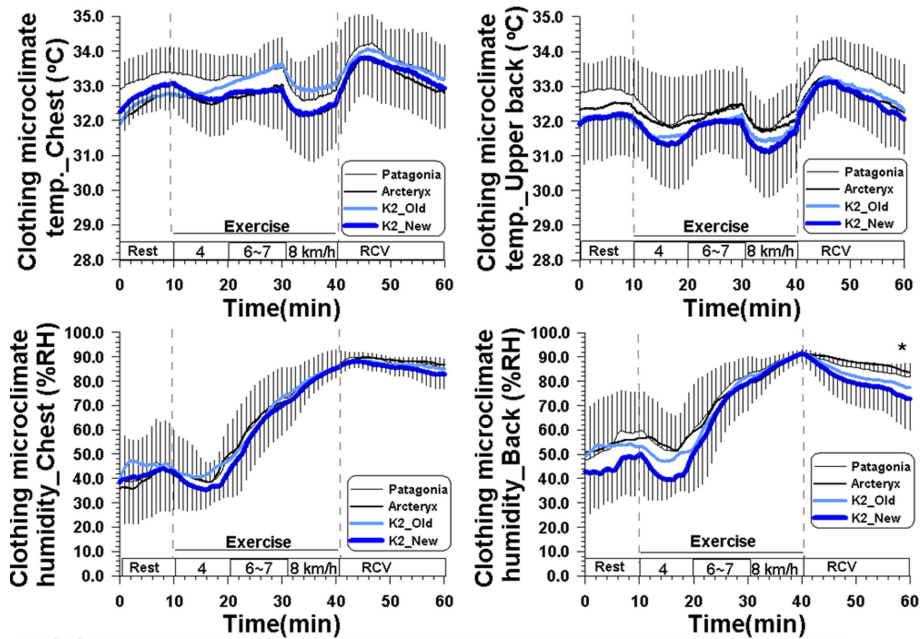


Fig. 4. Time courses of clothing climate temperature and humidity for the four experimental conditions during the 60-min trial (* $P < 0.05$).

지 의복 조건 간 유의한 차이를 보이지 않았다(Fig. 3). 특히, 이마 온도의 경우 세 번째 운동기에 네 조건 모두에서 급격한 하강이 관찰되었다. 가슴 온도는 안정기, 운동기, 회복기 모두 네 가지 의복 조건 간 유의한 차이 없이 운동 시작과 함께 점점 하강하는 경향을 보이다가 회복기 증가하였다(Fig. 3). 아래 팔 온도도 네 조건 간 유의한 차이를 보이지 않았으며, 측정된 피부온도 중 운동과 함께 가장 큰 폭의 온도 감소가 관찰되었다. 특히, K2_New 조건의 경우 평균 1.5°C의 감소를 보였다. 손등 온도도 네 조건 간 유의차 없이 운동과 함께 감소를 보인다 회복기에 상승하는 경향이 관찰되었다. 넓적다리 온도도 네 조건 간 유의한 차이 없이 다른 부위 피부온도와 유사한 경향을 보인 반면, 종아리 온도는 첫 번째 운동기에 약간의 온도 감소를 보인 직후 두 번째와 세 번째 운동기에는 큰 감소 없이 피부온도를 유지하다 회복기에 급격한 증가를 보였다(Fig. 3). 발등 온도는 다른 피부온도와 달리 운동 시작과 함께 점진적인 증가를 보여 주었으며 운동 종료 시에는 평균 34.7~35.0°C로 안정기에 비해 평균 3.0~3.5°C 증가를 보여주었다(Fig. 3).

3.4. 의복내 온습도

가슴 부위와 등 부위 의복내 온도 모두 안정기, 운동기, 회복기 모두 네 조건 간 유의한 차이를 보이지 않았으나, 안정기 의복내 온도의 경우 네 조건 중 Patagonia 조건에서 가장 높은 값을 보였다(Table 4, Fig. 4). 가슴 부위 의복내 습도도 안정기, 운동기, 회복기 모두 네 조건 간 유의한 차이를 보이지 않았다. 등 부위 의복내 습도의 경우 안정기, 운동기에는 네 조건 간 유의한 차이를 보이지 않았으나, 회복기에는 유의한 차

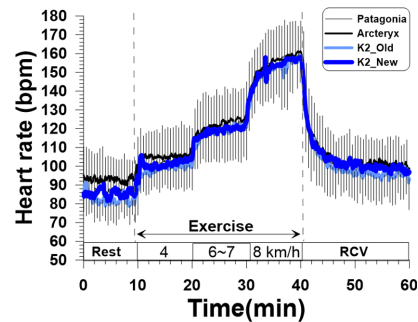


Fig. 5. Time courses of heart rate for the four experimental conditions during the 60-min trial.

이를 보여 Arcteryx 조건에 85 ± 3%RH로 가장 높고, K2 New 조건에서 74 ± 12%RH로 가장 낮은 값이 관찰되었다 ($P < 0.05$, Table 4, Fig. 4).

3.5. 심박수 및 총발한량

심박수는 안정기, 운동기, 회복기 모두 네 조건 간 유의한 차이를 보이지 않았으며, 운동 강도에 따라 일정 수준으로 증가하였다(Table 4, Fig. 5). 세 번째 운동기에도 네 조건 간 유의차 없이 평균 154~159 bpm의 심박수가 관찰되었다(Table 4). 총발한량은 네 조건 간 유의한 차이 없이 Patagonia, Arcteryx, K2_Old, K2_New 조건 각각 179 ± 35 g/trial, 183 ± 43 g/trial, 207 ± 49 g/trial, 205 ± 48 g/trial 이었다. 실험 전후 의복의 중량 측정을 통해 분석된, 총증발량은 각 조건에서 145 ± 27 g/trial, 152 ± 35 g/trial, 170 ± 38 g/trial, 178 ± 41 g/trial로 네 조건 간 유의한 차이는 발견되지 않았다.

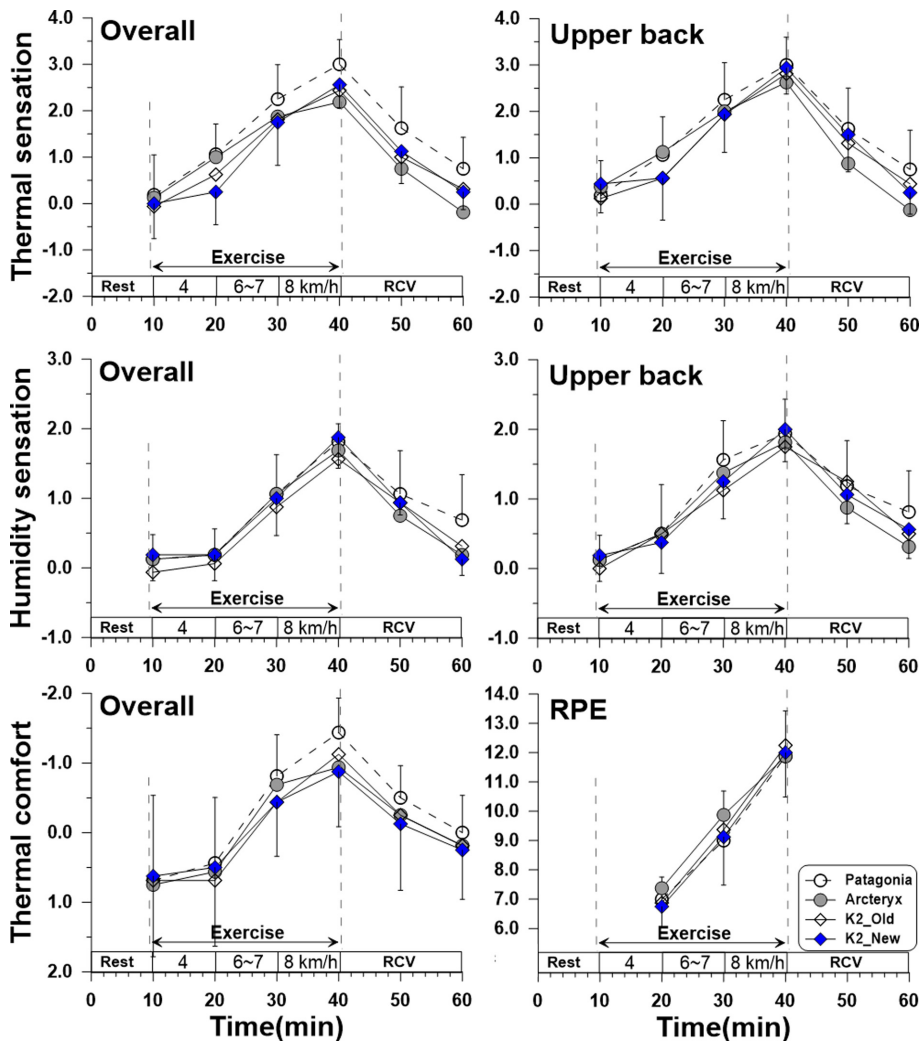


Fig. 6. Time courses of thermal sensation, thermal comfort, humidity sensation, ratings of perceived exertion (RPE) for the four types of experimental conditions during the 60-min trial.

3.6. 한서감, 온열쾌적감, 습윤감 및 직물 소리 감각

전신 한서감 및 등 부위 한서감 모두 안정기, 운동기, 회복기 모두 네 조건 간 유의한 차이 없이 운동이 진행됨에 따라 증가하는 경향을 보이다가 회복기에 다시 안정기 수준까지 하강하였다(Fig. 6). 전신 습윤감 및 등 습윤감 모두 한서감과 유사한 방식으로 운동기, 회복기 모두 네 조건 간 유의한 차이 없이 운동이 진행됨에 따라 증가하는 경향을 보이다가 회복기에 다시 안정기 수준까지 하강하였다(Fig. 6). 전신 온열 쾌적감도 한서감, 습윤감과 유사한 방식으로 운동기, 회복기 모두 네 조건 간 유의한 차이 없이 운동이 진행됨에 따라 증가하는 경향을 보이다가 회복기에 다시 안정기 수준까지 하강하였다(Fig. 6). 운동자각도(RPE)는 운동 시작 시점과 종료 시점 모두에서 네 조건 간 유의한 차이 없이 평균 7점에서 시작하여 평균 12점으로 종료 되었다(Fig. 6). 운동 시 재킷 소리에 대한 불쾌감은 운동 종료 시점에서 Patagonia, Arcteryx, K2_Old,

K2_New 조건에서 각각 1.8 ± 0.7 점, 1.3 ± 0.5 점, 1.3 ± 0.4 점, 1.2 ± 0.5 점으로 아크테릭스 조건에서 가장 높았으나 통계적 유의차는 관찰되지 않았다.

4. 논 의

본 연구에서는 국내외 시판되고 있는 투습방수 재킷들 중 PFAS 멤브레인이 적용된 아웃도어 재킷과 PFAS-free 멤브레인이 적용된 아웃도어 재킷을 수집한 후, 소재의 물성 및 완제품의 착용 성능을 비교분석하였고 그 결과 본 연구의 세 가지 가설 모두 확인되었다. 시판 아웃도어 완제품 7종의 열저항 및 수증기 증발저항은 멤브레인 종류에 상관없이 큰 차이가 발견되지 않았으며, 인체 착용 평가에 선정된 아웃도어 재킷 4종 간에도 재킷 종류 간 유의한 차이 없이 유사한 인체 생리·심리 반응이 일어났다. 국내외 시판 중인, 투습방수 성능을 지닌 성

인 남성용 아웃도어 재킷은 멤브레인의 종류(PFAS 또는 PFAS-free)와 소재의 물리적 특성(두께, 단위중량, 투습도) 차이에도 불구하고, 수증기 증발과 열교환 특성 및 인체 착용성에서 유의한 차이를 보이지 않았다.

4.1. 아웃도어 재킷의 열저항 및 수증기 증발저항과 소재 특성

의복의 보온력은 착용한 의복에 의해 발생하는 인체와 외기 환경 사이의 열 교환을 정량화하고 착용자의 열 부담을 평가하기 위해 사용된다. 의복의 소재, 중량, 형태 및 피복면적 등 여러 요인에 의해 형성되는 의복 내 정지 공기층은 보온력을 결정하는 핵심적인 요소이다(Baek et al., 2018; Bouskill et al., 2002; Ukponmwan, 1993). 본 연구에서 서멀 마네킹을 통해 측정된 아웃도어 재킷 7종의 보온력(I_{cl})은 0.300~0.388 clo 범위로 나타났다. K2_New(PFAS-free)는 가장 얇은 소재의 두께 및 의복 중량으로 가장 낮은 보온력을 지니는 반면, K2_Old(PFAS)는 구조적으로 2중 레이어로 구성되어 레이어 사이에 정지 공기층이 확보되었기에 보온력이 가장 높게 나온 것으로 추측된다. 다만, 보온력이 가장 낮은 K2_New의 중량은 276 g으로 보온력이 가장 높은 K2_Old의 중량 590 g의 절반 수준이었음에도, 보온력 차이는 0.088 clo로 민소매 티셔츠 1장(0.06~0.09 clo) 수준에 불과하였다(Choi and Lee, 2009).

이처럼 본 연구에서 선정된 시판 아웃도어 재킷 7종은 현저한 중량 차이(276~717 g)에도 불구하고, 재킷 간 보온력에서는 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 유사한 패턴 및 디자인으로 인해 피복면적과 의복내 공기층의 양이 유사한 수준이기에 나타난 결과로 추측된다. Baek et al.(2018)의 연구에 따르면, 일반 재킷류의 보온력을 결정하는 가장 중요한 요소는 피복면적이거나, 여러 겹인 아우터(패딩 재킷)의 경우 의복 중량에 따라 보온력이 증가하는데 점차 증가폭이 감소하는 로그함수적 관계를 보였다. 본 연구에서 선정한 재킷 7종의 피복면적은 유사한 수준이었기 때문에 의복 중량 차이에도 불구하고 보온력의 차이는 크지 않았다. 다만, 이 결과를 의복의 단위 중량당 보온력으로 환산해 보면 가장 가벼운 K2_New(1.09 clo/kg)가 K2_Old(0.66 clo/kg) 또는 가장 무거웠던 Patagonia(0.46 clo/kg)에 비해 단위 중량당 보온력 효율이 가장 우수하다고 평가할 수 있다.

기체 상태의 수분을 통과시키는 성능의 정량적 지표인 투습도는 의복의 착용 쾌적성과 밀접하게 연관되어 있으며, 의복 소재의 투습도(water vapor permeability)는 소재의 두께, 공극률, 구조, 섬유 수분 특성 등 다양한 요소에 의해 결정된다(Das et al., 2007; Gidik et al., 2019; Kang & Lee, 2013). 인체 착용 평가에 사용된 아웃도어 재킷 4종 소재의 물리적 특성을 분석한 결과, K2_New에 사용된 소재는 두께가 가장 얇고(0.18 mm)와 면적당 중량이 가장 가벼우며($60 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$), 높은 투습성($70.9 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)이 확인되었다. 반면, Acteryx는 K2_New 다음으로 얇은 두께(0.27 mm)와 가벼운 단위중량($109 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$)을 지녔으나 K2-New에 비해 약 60%에 불과한 투습성($43.9 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)을 보였다.

실험 재킷 4종 중 가장 두껍고 무거운 소재로 제작된 Patagonia와 2중 레이어 구조인 K2_Old의 투습도는 각각 $59.0 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, $64.8 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 로 확인되었다. 아웃도어 4종의 멤브레인에 주로 사용된 ePTFE와 ePE는 동일한 소수성(hydrophobic)의 성질을 지님에도 불구하고 각 소재별로 상이한 투습성을 보였으며, 이는 완제품의 성능에 반영될 것으로 추측할 수 있다. 그러나, 서멀 마네킹을 이용해 측정된 아웃도어 재킷 4종의 수증기 증발저항($R_{e,T}$)은 K2_New가 $0.048 \text{ m}^2\cdot\text{kPa}/\text{W}$ 로 가장 낮았으나 Acteryx($0.054 \text{ m}^2\cdot\text{kPa}/\text{W}$), Patagonia($0.057 \text{ m}^2\cdot\text{kPa}/\text{W}$), K2_Old($0.054 \text{ m}^2\cdot\text{kPa}/\text{W}$)와 비교하여 큰 차이를 보이지 않아 소재의 투습도 특성이 완제품에 직접적으로 반영되지 않았음을 알 수 있다. Shim(2016)에서도 투습방수소재의 투습도와 수증기 증발저항 간 상이한 값을 보였으나, 이 소재로 재킷과 바지를 제작한 후 서멀 마네킹을 이용해 완제품의 수증기 증발저항을 측정된 결과 완제품 간 차이의 폭이 크지 않았다.

이처럼 소재 상태에서 발견된 투습성의 차이가 완제품 상태의 수증기 증발저항에서 발견되지 않은 이유는 복합적일 것이나 무엇보다 의복내 공기층과 수증기 증발량에서의 차이 때문일 것이다. 서멀 마네킹에 완제품을 입힌 경우, 이차원상의 직물과 달리 마네킹의 표면과 완제품 재킷 간에 새로운 의복기후가 형성되며, 이 미세기후를 구성하는 공기의 양과 온도, 습도 수준은 마네킹 표면으로부터의 수증기 증발에 영향을 미친다. 또한 서멀 마네킹의 표면에서 발생하는 균일한 땀(시간당 $1,000 \text{ ml}/\text{m}^2$)은 직물 상태의 투습도 측정 조건과 다르다. 이러한 차이는 의복의 열 부담을 평가하기 위해서는 소재의 물성 평가와 함께 의복 완제품 수준에서의 평가도 동반되어야 함을 시사한다. 본 연구 결과, PFAS-free 멤브레인이 적용된 아웃도어 재킷은 PFAS 아웃도어 재킷과 비교하였을 때 소재의 물리적 특성에서 차이를 보였으나, 완제품의 보온력 및 수증기 증발저항에서 유사한 수준임이 확인되었다. 즉, 투습방수용 아웃도어 재킷에서 PFAS 적용 유무로 인한 착용자 열 부담 수준은 유의한 차이 없이 유사한 수준일 것으로 사료된다.

4.2. PFAS 및 PFAS-free 아웃도어 재킷의 인체 생리·심리적 부담

의복은 인체와 이를 둘러싼 환경 사이에 위치하여 추위로부터의 단열 및 외기로의 방열 등 인체 체온조절의 중요한 매개체 역할을 수행하며, 의복의 보온력과 수증기 증발저항은 착용자의 생리적 열 부담 및 심리적 감각을 결정하는 핵심적인 요소이다(Havenith, 2002). 높은 열저항(보온력)을 지닌 의복은 인체로부터 외기로의 열 방출을 억제하여 체내 열 축적량을 늘리고 이는 심부온, 피부온, 심박수 상승 등 여러 인체 생리적 부담을 가중한다(Roh et al., 2024; Taylor et al., 2021). Kang and Lee(2013)은 발한 서멀 마네킹을 이용해 투습방수소재의 열저항 및 수증기 증발저항을 측정하였고 그 결과 인체 착용 쾌적성과 높은 상관성을 지님을 확인하였다. 본 연구의 인체 착용 평가에 사용된 아웃도어 재킷 4종 간 보온력 차이는 최대

0.088 clo, 수증기 증발저항 차이는 최대 0.009 m²·kPa/W로 유사한 수준임이 확인되었으며, 해당 차이가 인체 생리·심리 반응에서 유의한 차이를 유발하지는 않음을 확인하였다. 즉, PFAS 또는 PFAS-free 멤브레인 소재 중 어떤 소재를 사용하더라도 완제품의 보온력과 수증기 증발저항이 유사한 수준이라면 실제 착용 시 인체 생리·심리 반응에 미치는 영향은 미미한 것으로 사료된다. 본 연구에서는 시판 중인 재킷들을 선정했기 때문에 PFAS 유무 뿐만 아니라 재킷의 총중량이나 디자인에서도 미세한 차이를 가진다. 그러나 그러한 차이에도 불구하고 인체 착용 평가 결과 유의한 차이가 발견되지 않았기 때문에 PFAS 멤브레인 유무가 인체 착용성에 유의미한 영향을 미치지 않는다는 결론은 유효하다. Roh et al.(2024)에서도 내피소재(구슬형 활성탄, 섬유형 활성탄)를 달리 구성한 화생방 보호의 3종의 보온력은 1.27 clo로 동일하였고, 인체 착용 평가에서 심박수, 의복내 온습도, 주관감(한서감, 온열쾌적감, 습윤감)은 화생방보호의 조건 간 유의한 차이가 발견되지 않았다고 보고하였다. 인체 착용 평가에서 피험자들은 동일한 기본 의복을 착용하였으며, 아웃도어 재킷 간 중량은 최대 440 g 차이를 보였으나, 중량에 의한 추가적인 인체 열 부담을 증가시키는 수준은 아닌 것으로 판단된다.

아웃도어 재킷 4종 간 피부온도의 유의한 차이는 발견되지 않았으나, 운동 중 피부온도의 변화 양상은 동일했다. 운동 시작 후, 평균피부온도는 점차 감소하였으며 특히 가슴, 아래팔, 손등, 허벅지 부위에서 두드러지게 발견되었다. 이러한 하강 현상은 발한에 의한 것이라기보다, 운동 시작 초기 피부혈관 수축으로부터 혈액 재분배 과정에서 발생하는 비온열요소(non-thermal factor)에 의해 발생한다(Nakayama & Ohnuki, 1977; Torii et al., 1992). 반면, 운동이 일정 시간 지속된 후 발견되는 피부온도의 하강(Fig. 3의 이마나 가슴 부위 피부온)은 피부 혈류의 재분배에 의한 것이라기보다 발한에 의한 증발열 손실 증가 때문이며, Fig. 3의 가슴이나 종아리 피부온에서 보이는 운동 종료 직후 휴식시 갑작스런 피부온 증가는 피부 혈류의 재분배 때문에 발생한다.

또한, 운동으로 인한 인체 움직임은 의복내 정지 공기층과 표면의 정지 공기층을 파괴하여 보온력을 감소시키고 주위 환경과 의복 간 환기량을 증가시킨다(Havenith, 2002). Roh et al.(2023)의 연구에서도 양 손목의 피부온도는 저온환경(20°C)과 고온환경(30°C)에서 트레드밀 운동을 수행하는 동안 모두 동일하게 감소하는 경향이 발견되었다. 운동 중 피부온도가 감소한 부위들과 달리 움직임에 의한 환기량이 거의 존재하지 않은 발등의 온도는 운동 시작부터 종료까지 꾸준히 증가하는 경향을 보였다. 피부온도의 감소 경향은 중등도 이하의 4, 6 km/h에서 제한적으로 확인되었고, 중등도 이상의 운동인 8 km/h 운동 강도에 진입 후 피부온도는 점차 상승하기 시작하였다. 운동기 시작에서부터 아웃도어 재킷 4종 모두 한서감, 습윤감, 온열 쾌적감은 점차 증가하며 착용자의 쾌적성은 감소하였다. 운동 중 가슴과 등 부위의 의복내 온도는 변화의 폭이 약 1°C

이내로 크지 않았으나, 30분 운동 시 가슴과 등 부위의 의복내 습도는 네 조건 모두 90%RH까지 도달하였다. 또한, 의복내 온도는 운동 종료 직후 급격히 증가하여 안정기나 운동기에 비해 더 높은 수준에 도달하였다. 인체와 의복 사이에 형성되는 미세기후 환경의 온도와 습도는 인간의 열 쾌적성을 결정하는 중요한 요소이다(Jun et al., 2010; Li, 2005; Taylor et al., 2021). 즉, 신체적 활동에 의한 투습방수 아웃도어 재킷 착용자의 열 쾌적성을 개선하기 위해서는 중등강도 이상의 운동 중 포화상태까지 상승하는 의복내 습도를 경감시키면서, 운동 직후 휴식 시 피부온도를 효과적으로 낮추기 위한 환기 디자인이 필요하다. 현재 대부분의 아웃도어 재킷은 거드랑 부분에 지퍼를 이용한 수직 개구부 또는 원형 벤트(vent)가 부착되어 있으나 이러한 개구부의 총길이나 개구부의 각도, 원형 벤트의 크기 및 개수 등 다양한 디자인의 환기 효과에 대해 정량적인 평가 또한 필요하다.

5. 결 론

본 연구는 현재 국내의 시판되고 있는 PFAS 또는 PFAS-free 멤브레인이 적용된 투습방수 아웃도어 재킷 7종(PFAS 4종, PFAS-free 3종)의 열저항과 수증기 증발저항을 서멀 마네킹을 통해 정량적으로 비교분석하였다. 아웃도어 재킷 7종의 보온력과 수증기 증발저항은 PFAS 멤브레인 종류와 상관없이 유사한 수준이 관찰되었다. 인체 착용 평가를 위해 선별된 아웃도어 재킷 4종(PFAS 1종, PFAS-free 3종)의 소재는 두께, 단위 중량, 투습도 등 기본 물성에서 차이가 확인되었으나, 실제 착용 시 인체 생리·심리적 반응에서는 유의한 차이가 발견되지 않았다. 즉, 투습 발수 성능을 지닌 시판 아웃도어 재킷의 소재 특성에서 차이는 관찰되었으나, 완제품 형태의 보온력 및 수증기 증발저항이 유사할 경우 PFAS 또는 PFAS-free 멤브레인 간 차이 없이 착용자의 인체 부담 수준은 유사한 것으로 사료된다. 다만, 열중성 환경에서의 운동이었음에도 불구하고 시판 재킷 4종의 의복내 습도 모두 90%RH 수준까지 상승하였고, 운동 종료 후 휴식하는 동안 의복내 온도와 피부온도는 급격한 상승을 보였으므로, 투습 방수 아웃도어 재킷의 열 쾌적성을 개선하기 위해서는 의복내 습도를 경감시키고 운동 직후 회복 시 피부온도를 효과적으로 낮출 수 있는 환기 디자인이 요구된다. 추후 고온 다습 환경이나 유풍 환경에서 착용성 비교 분석이 필요하다.

Acknowledgements

이 논문은 산업통상자원부의 소재부품기술개발사업(#RS-2024-00423268) 및 한국연구재단의 G-램프(LAMP) 사업(No. RS-2023-00301976), 산업통상자원부의 산업혁신인재성장지원사업(#RS-2025-02263144)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Baek, Y. J., Hwang, S. K., Lee, H. H., Park, J., Kim, D. H., & Lee, J. Y. (2018). Quantification of thermal insulation by clothing items and analysis of influencing factors. *Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles*, 42(1), 172-182. <https://doi:10.5850/JKSC.2018.42.1.172>
- Bouskill, L. M., Havenith, G., Kuklane, K., Parsons, K. C., & Withey, W. R. (2002). Relationship between clothing ventilation and thermal insulation. *AIHA Journal*, 63(3), 262-268. <https://doi:10.1080/15428110208984712>
- Choi, J. W., & Lee, H. H. (2009). The relationship between weight of single garments and thermal insulation with a thermal manikin. *Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles*, 33(2), 173-186. <https://doi:10.5850/jksct.2009.33.2.173>
- Das, B., Das, A., Kothari, V. K., Fanguiero, R., & Araujo, M. D. (2007). Moisture transmission through textiles. *AUTEX Research Journal*, 7(2), 100-110. <https://doi:10.1515/aut-2007-070204>
- Gidik, H., Vololonirina, O., Ghantous, R. M., & Ankou, A. (2019). Impact of test parameters on the water vapor permeability of textiles. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 31(3), 350-361. <https://doi:10.1108/IJCST-02-2018-0018>
- Gremmel, C., Frömel, T., & Knepper, T. P. (2016). Systematic determination of perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in outdoor jackets. *Chemosphere*, 160, 173-180. <https://doi:10.1016/j.chemosphere.2016.06.043>
- Havenith, G. (2002). Interaction of clothing and thermoregulation. *Exogenous Dermatology*, 1(5), 221-230. <https://doi:10.1159/000068802>
- Holmér, I., Nilsson, H., Rissanen, S., Hirata, K., & Smolander, J. (1992). Quantification of heat balance during work in three types of asbestos-protective clothing. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 64, 243-249. <https://doi:10.1007/BF00378281>
- Hwang, K. S., Kim, K. R., Lee, K. S., & Kim, K. S. (2006). The effects of the material of pesticide-proof clothing on human comfort. *The Korean Journal of Community Living Science*, 17(4), 49-56.
- ISO 9920. (2007). Ergonomics of the thermal environment — Estimation of thermal insulation and water vapour resistance of a clothing ensemble. International Organization for Standardization.
- Jun, Y., Park, C. H., & Kang, T. J. (2010). Effect of heat and moisture transfer properties on microclimate and subjective thermal comfort of caps. *Textile Research Journal*, 80(20), 2195-2203. <https://doi:10.1177/0040517510376263>
- Kang, I., & Lee, H. S. (2013). Wear comfort evaluation on water-vapor-permeable (WVP) garments using a movable sweating thermal manikin. *Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles*, 37(8), 1095-1106. <https://doi:10.5850/JKSC.2013.37.8.1095>
- Kenney, W. L., Hyde, D. E., & Bernard, T. E. (1993). Physiological evaluation of liquid-barrier, vapor-permeable protective clothing ensembles for work in hot environments. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 54(7), 397-402. <https://doi:10.1080/15298669391354865>
- Kotthoff, M., Müller, J., Jüriling, H., Schlummer, M., & Fiedler, D. (2015). Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances in consumer products. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 14546-14559. <https://doi:10.1007/s11356-015-4202-7>
- KS K 0594. (2021). Test method for water vapour permeability of textiles. Korean Agency for Technology and Standards.
- Kwon, J., Kim, K., Ju, J., & Lee, J. Y. (2021). Performance evaluation of water-repellent combat uniforms using a static manikin and human subjects under a rainfall tower system. *Fashion and Textiles*, 8, 1-16. <https://doi:10.1186/s40691-020-00244-3>
- Lee, J. Y., & Choi, J. W. (2004). Influences of clothing types on metabolic, thermal and subjective responses in a cool environment. *Journal of Thermal Biology*, 29(4-5), 221-222. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2004.02.006>
- Lee, Y. W., Seo, M. J., Seo, I. K., & Kim, Y. I. (2013). The characteristic of a functional design for a commercial outdoor-wear jacket. *Journal of the Korean Society of Costume*, 63(7), 1-16. <https://doi:10.7233/jksc.2013.63.7.001>
- Li, Y. (2005). Perceptions of temperature, moisture and comfort in clothing during environmental transients. *Ergonomics*, 48(3), 234-248. <https://doi:10.1080/0014013042000327715>
- Nakayama, T., Ohnuki, Y., & Niwa, K. (1977). Fall in skin temperature during exercise. *The Japanese Journal of Physiology*, 27(4), 423-437. <https://doi:10.2170/jjphysiol.27.423>
- Roh, S. H., Lee, H. J., Lee, J., Park, M., & Lee, J. Y. (2024). Evaluation of wearability of army CBRN protective clothing with different materials for inner layers: comparisons between activated carbon beads and activated carbon fibers. *Journal of The Korean Society of Living Environmental System*, 31(4), 241-257. <https://doi:10.21086/ksles.2024.08.31.4.241>
- Roh, S. H., Stenkina, M., Salsabila, S., Lee, S., Rhee, H. S., Kim, S. K., & Lee, J. Y. (2023). Thermal sensation is related to wrist temperature, not rectal temperature, during rest and exercise in indoor and outdoor environments in summer. *The Korean Journal of Community Living Science*, 34(2), 201-214. <https://doi:10.7856/kjcls.2023.34.2.201>
- Seo, S., Park, Y., Na, S., Lee, J., Lee, W., & Kim, M. (2024). Global performance, trends, and challenges for assessment and management of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs): a critical review. *Journal of Environmental Analysis, Health and Toxicology*, 27(1), 1-13. <https://doi:10.36278/jeaht.27.1.1>
- Shim, H. S. (2016). The evaluation of water vapor transport and waterproofness properties of the waterproof and breathable fabrics. *The Korean Journal of Community Living Science*, 27(2), 295-304. <https://doi.org/10.7856/kjcls.2016.27.2.295>
- Taylor, N. A., Lee, J. Y., Kim, S., & Notley, S. R. (2021). Physiological interactions with personal-protective clothing, physically demanding work and global warming: An Asia-Pacific perspective. *Journal of Thermal Biology*, 97, 102858. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2021.102858>
- Torii, M., Yamasaki, M., Sasaki, T., & Nakayama, H. (1992). Fall in skin temperature of exercising man. *British Journal of Sports Medicine*, 26(1), 29-32. <https://doi.org/10.1136/bjsm.26.1.29>
- Ukponmwan, J. O. (1993). The thermal-insulation properties of fabrics. *Textile Progress*, 24(4), 1-54. <https://doi.org/10.1080/00405169308688861>
- White, M. K., & Hodous, T. K. (1988). Physiological responses to the wearing of fire fighter's turnout gear with neoprene and gore-tex® barrier liners. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 49(10), 523-530. <https://doi.org/10.1080/15298668891380169>