한국의류산업학회지
제25권 제4호, 2023
<연구논문>

pISSN 1229-2060
eISSN 2287-5743
Fashion & Text. Res. J.
Vol. 25, No. 4, pp.497-507(2023)
https://doi.org/10.5805/SFTI.2023.25.4.497

3D 프린팅 보호대 개발을 위한 재료와 구조에 따른 열전달 평가

이옥경[1] · 김소영[2] · 이예진[3] · 이희란[4]†

[1]충남대학교 생활과학연구소
[2]금오공과대학교 신소재연구소
[3]충남대학교 의류학과
[4]금오공과대학교 소재디자인공학과

Heat Transfer Depending on 3D Printing Material and Shape for Protector Development

Okkyung Lee[1], Soyoung Kim[2], Yejin Lee[3], and Heeran Lee[4]†

[1]Research Institute of Human Ecology, Chungnam National University; Daejeon, Korea
[2]Advanced Material Research Center, Kumoh National Institute of Technology; Gumi, Korea
[3]Dept. of Clothing and Textiles, Chungnam National University; Daejeon, Korea
[4]Dept. of Material Design Engineering, Kumoh National Institute of Technology; Gumi, Korea

Abstract: This study measured the effect 3D printing products comprised of different materials and shapes on heat transfer in clothing to derive fundamental data on thermal comfort among clothing comfort. The variables were three types of material (EVA foam, TPU-10%, TPU-10%+EVA), two types of shape (without holes, with holes), and two types of covers(without cover, with cover). All samples (12 types) prepared by combining these variables were placed on the hot plate set at 36°C, and the surface temperature was measured at three points for 10 minutes. The surface temperature change was dependent on the material, shape, and cover of the sample. The sample printed with TPU exhibited higher temperature transfer compared to the EVA foam sample after 10 mins. In addition, the temperature transfer was better when there were holes, and rate decreased when the sample was covered with fabric. We confirmed that material selection of the pad and thermal conductivity of the cover are extremely important in solving thermal stress to the human body caused by functional clothing with protectors. Additionally, as the protector, it is recommended to design the outer shell with a passage, such as a hole, to allow the rapid transfer of heat to the external environment.

Key words: 3D printing (3D 프린팅), heat transfer (열전달), material and shape (재료와 구조)

1. 서 론

코로나 팬데믹 이후 다양한 야외 레저활동을 하는 사람들이 지속적으로 증가하고 있는 추세이다(Lee & Lee, 2022). 작년 1~7월에는 수상 레저용품이 전년 대비 73.8% 증가하는 등(Kim, 2022a) 액티브한 여름철 레저활동을 즐겨 하는 사람들이 급증하였다. 이와 함께 해양레저 이용객 역시 급증하면서 다양한 여름철 레저 스포츠의 안전성이 더 중요시되고 있다(Kim, 2022b). 또한, 2020년 도쿄 올림픽에서 새롭게 채택된 서핑과 스케이트보딩, 스포츠클라이밍 등도 젊은 층 사이에서 인기를 끌면서 여름철 레저 스포츠로 생활체육 동호인들의 관심이 늘어나고 있다(Jang, 2021). 그러나 이러한 활동들은 자칫 어깨, 허리, 손가락 등 근골격계 질환 발생으로 이어질 수 있으므로 주의가 필요하며, 근골격계 질환을 예방, 치료하고자 부위별 다양한 보호대 착용이 요구된다. 그러나 액티브한 활동을 좋아하는 젊은이들은 보호대 착용에 따른 동작의 불편함과 운동 시 덥다는 이유 등으로 보호대를 착용하지 않는 경우가 많은 것으로 나타나, 이에 대한 개선이 매우 필요한 것으로 조사되었다(Lee & Hong, 2019). 보호대 착용에 따른 불만족 요소 중 덥고 땀이 참, 동작의 불편함 등은 의복 쾌적성과 밀접한 관련이 있다.

의복 쾌적성은 개인이 느끼는 복합적 감정으로 의복을 착용하고 신체활동을 할 때 동작에 적합하며 기분이 좋은 종합적인 상태를 말한다(Kweon et al., 2003). 이러한 의복 쾌적성은 동적쾌적성, 온열쾌적성, 착탈의쾌적성 등으로 나누어 고려될 필요가 있는데 이 중 온열쾌적성은 인체의 쾌적성을 좌우하는 가장 중요한 인자로 의복내 온습도를 통해 평가될 수 있다(Harada, 2001). 특히 이러한 의복내 온습도를 좌우하는 온열쾌

†Corresponding author: Lee, Heeran
Tel. +82-54-478-7717
E-mail: heeran@kumoh.ac.kr
©2023 Fashion and Textile Research Journal (FTRJ). This is an open access journal. Articles are distributed under the terms of the Creative 52 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.

적성은 의복재료의 특성과 구조, 레이어링 되는 조합 형태에 따라 달라지기 때문에 소재 자체의 열전달과 투습도가 향상되었어도 의복상태로 착용되었을 때 그 기능이 발휘되기는 어렵다(Lee & Park, 2023). 따라서 새로운 재료가 사용되거나 섬유가 레이어링되어 착용되는 경우 의복내 기후를 예측할 수 있는 평가 방법이 필요하다. 온열쾌적성과 관련된 연구를 살펴보면 섬유에 쾌적성을 향상시키기 위한 가공을 하거나 직/편물 구조에 변화를 주어 우수한 수분전달 특성을 부여한 후 이에 대한 물리적 특성(투습성, 흡수성 등)을 평가하는 연구가 많이 이루어져 왔다(Kim & Kim, 2017; Shim, 2016). 그리고 최근에는 이중구조로 이루어진 기능성 소재가 개발되면서 이에 대한 수분 전달 특성이 평가되기도 하였다(Babar et al., 2018; Ju et al., 2017). 또한 쾌적성 연구는 의복 측면에서도 많이 이루어지고 있는데 대부분 다양한 소재로 이루어진 기능성 의복들의 주관적 쾌적성을 평가하거나 새롭게 개발한 의복들의 의복내 온습도를 통해 쾌적성을 검증하는 연구가 많이 이루어지고 있다. Kim et al.(2018)은 축열/체열반사기능을 가진 시제품 레저의복 중 3종을 선정하여 이에 대한 온열쾌적성을 평가하고자 피부온, 의복기후, 발한량, 주관적 감각 등을 측정하였고, Kim et al.(2020)은 저온환경에서 온열쾌적성을 유지할 수 있는 온도범위를 알아보고자 정지 시와 운동 시 스스로 발열패드를 온/오프하게 하여 최적피부와 의복내 온도범위를 연구하기도 하였다. Eom and Lee(2020)는 개발한 보행보조 재활 로봇의 쾌적성을 평가하기 위해 착용 후 앉거나 걷는 동작 시 평균피부온도와 의복표면온도, 주관적 온열감 평가를 통해 의복의 쾌적성을 평가하였다.

최근 새로운 신소재와 다양한 ICT기술이 등장하면서 이를 의복에 적용하여 기능성 의복을 개발하는 시도가 이루어지고 있다. 특히 3D 모델링 기반 프린팅 제품을 여러 보호복이나 스마트웨어에 적용하고 있는 실정이다(Wu et al., 2022). 그러나 대부분 3D 프린팅 소재의 물성평가나 3D 모델링에만 중점을 두어 연구가 진행되고 있으며, 3D 프린팅 제품 적용 시 의복내 쾌적성을 평가한 연구는 매우 부족한 실정이다. 3D 프린팅이 적용된 의복에 대한 연구를 살펴보면 대부분 부위별 보호대 개발에 대한 연구가 지속적으로 이루어지고 있는데 3D 프린팅을 통해 다리보호대, 무릎보호대, 허리보호대, 발목보호대, 스노보드 보호대, 손목보호대, 요가용 무릎보호대, 배구선수용 무릎보호대 등을 개발한 연구가 많이 이루어지고 있다(Hong & Lee, 2020; Lee et al., 2015; Milošević & Bogović, 2018; Park & Lee, 2019; Park et al., 2019). 또한 새로운 보호대 재료, 구조에 따른 충격보호성능, 인장강도, 굽힘강도 등 역학적 특성을 평가하는 연구도 많이 이루어지고 있다(Bates et al., 2016; Han & Kim, 2018; Jung & Lee, 2021; Park & Lee, 2019). 그 외 3D 프린팅 구조에 따른 온도전달에 대한 연구도 이루어 졌는데, Lee et al.(2019)은 3D 프린팅한 제품이 구멍 크기나 두께에 따라 온도가 어떻게 변화하는지를 연구하였고, Lee et al.(2022)은 3D 프린팅된 패드의 재료에 따라 온습도의 전달이 어떻게 변화하는지를 연구하였으며, 패드의 커버를 씌운 경우와 그렇지 않은 경우의 차이를 연구하였다. 그러나 Lee and Park(2023)이 언급한 바와 같이 다양한 특성을 갖는 소재의 겹침은 쾌적성에 다른 결과를 가지고 오기 때문에 3D 프린팅의 구조, 다른 재료와의 접목, 외피 유무에 따라 그 결과가 달라질 것으로 생각된다. 따라서 본 연구에서는 3D 프린팅 제품이 의복 내의 열전달에 미치는 영향을 파악하고자 3D 프린팅 보호대 개발을 위한 재료로 TPU(Thermoplastic Polyurethane) 소재와 EVA(Ethylene-vinyl acetate)폼의 조합, 패드의 구멍 유무, 패드 커버 유무에 따라 열전달이 어떻게 이루어지는지를 측정하고자 하였다.

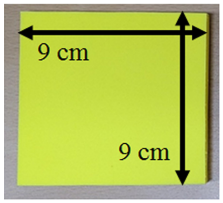
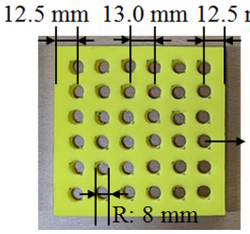
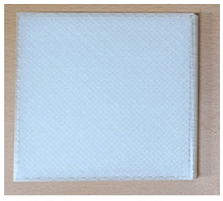
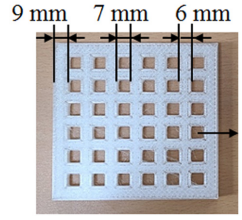
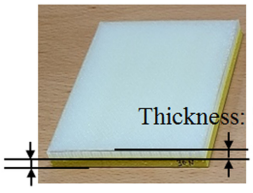
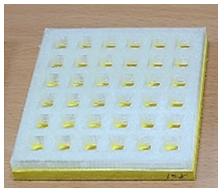
2. 연구 방법

2.1. 실험변인 및 샘플제작

2.1.1. 실험변인

본 연구는 보호대 재료 3종, 구조 2종으로 변인을 선정하여 6종의 샘플을 제작하였고, 이를 커버 유무에 따라 2단계로 나누어 1단계에서는 커버 없이 6종의 샘플을 실험하고, 2단계에서는 커버를 씌운 상태로 6종을 실험하여 총 12종을 실험하였다. 보호대 패드 재료는 EVA폼을 사용하였고 3D 프린팅에는 유연성이 있는 TPU를 사용하였다. 이때 TPU 재료 프린팅 내부밀도는 선행연구결과(Lee et al., 2022)를 반영하여 10%로 정하였다. 즉, 재료와 구조에 따른 실험 변인은 Table 1에 제시하였고 이때 재료 변인 3종은 두께 1.0 cm인 EVA폼, 두께 1.0 cm로 프린팅된 밀도 10%인 TPU(TPU-10%), 0.5 cm인 EVA폼과 0.5cm로 프린팅된 TPU-10%를 접합한 TPU-10%+EVA로 정하였다. 구조 변인 2종은 보호대 샘플에 구멍이 없는 것(without holes)과 구멍이 있는 것(with holes)으로 정하였으며, 구멍이 없는 것은 9.0 × 9.0 cm 정사각형에 두께 1.0 cm을 갖는 샘플을 제작하였다. 구멍이 있는 EVA폼은 지름 8.0 mm인 원형펀치와 망치를 이용하여 내부에 각 구멍의 면적이 약 50.0 mm^2인 36개의 구멍을 만들었고, TPU-10%은 내부에 7.0 × 7.0 mm 정사각형의 구멍 36개를 갖는 구조로 모델링하여 프린팅하였다. 이때 TPU-10% 내부 구멍은 3D 프린팅 시 구멍이 막히지 않고 매끄럽게 프린팅되도록 정사각형 모양으로 구멍을 설계하였으나, EVA폼의 경우 사각형으로 구멍을 뚫을 시 많은 오차가 발생하여 면적이 가장 유사한 원형 편치를 찾아 구멍을 뚫었다. TPU-10%+EVA는 36개의 원형과 정사각형 구멍을 갖는 5.0 mm 두께의 패드를 접착하여 샘플을 제작하였고, 이때 두 패드를 접착했을 때 원형(약 50.0 mm^2)과 정사각형(49.0 mm^2) 모양의 구멍이 중첩되면서 소실되는 구멍 면적이 생겨 최종 구멍 면적은 약 45.0 mm^2이 되었다. 그리고 제작된 실험 샘플(without cover)을 우선적으로 실험하였고 그 후 커버를 씌운 상태(with cover)에서 실험을 진행하였다. 이는 선행연구(Lee et al., 2022)에서도 알 수 있듯이 커버를 씌우지 않은 경우와 씌운 경우 온도변화에 차이가 나타났으므로 커버 유무를 또다른 변인으로 선정하였다.

Table 1. Experimental variables(variable 1: 3 materials, variable 2: 2 shapes)

Material \ Shape	Without holes	With holes
EVA foam	 Thickness: 10 mm	 Each circle hole area: 50 mm^2(=3.14X4² mm)
TPU-10%	 Thickness: 10 mm	 Each square hole area: 49 mm^2(=7x7 mm)
TPU-10%+EVA	 Thickness: 5 mm	

2.1.2. 3차원 모델링 및 프린팅

3D 프린팅된 샘플은 Fig 1. 오른쪽에서 보는 바와 같이 총 4종으로 9.0 × 9.0 cm의 정사각형 모양에 높이는 0.5 cm와 1.0 cm인 구멍이 없는 구조와 7.0 × 7.0 mm 정사각형의 구멍을 36개 가지며 높이가 0.5 cm와 1.0 cm인 구조를 모델링 하였다. 모델링은 Geomagic Design X program(3D Systems, Inc., Korea)을 사용하였으며, 프린팅은 3D 프린터(CUBICON Single Plus 3DP-310F)와 Cubicreator Program을 사용하였다. 이때 사용된 3D 프린터는 FDM(Fused Deposition Modeling) 방식을 사용하였고 이때 출력 조건은 토출 온도 범위 210~240℃, 베드온도 65°C, 출력속도 30~60mm/s였다.

2.1.3. 커버 특성

샘플 커버는 의복내 보호대 커버로 많이 사용되고 있는 편성물을 사용하였다. 사용된 편성물은 경편 구조로 나일론(84.9%)과 폴리우레탄(15.1%) 혼방소재를 사용하였다. 소재에 대한 구체적 특성은 Table 2에서 보는 바와 같이 밀도는 153.6 코/5 cm(Wale방향)와 256.0코/5 cm(Course 방향)였고, 두께는 0.88 mm, 질량은 264.5 g/m^2, 열전도도는 0.077W/(m·K)였다.

2.2. 측정 방법 및 데이터 분석

2.2.1. 실험프로토콜

본 연구의 실험은 총 2단계로 진행되었다. 1단계는 재료(3종)와 구조(2종) 조합 변인에 따른 열전달 특성을 파악하기 위해 커버를 씌우지 않은 상태에서 6종의 재료를 36.0°C Hot plate(HP180D, 미성과학기기(주), Korea) 위에 올려 놓았고, 외부와 닿아있는 샘플 표면 위의 온도를 10분 동안 3점에서 측정하였다. Hot plate는 피부온을 대체하여 일정한 온도를 제공

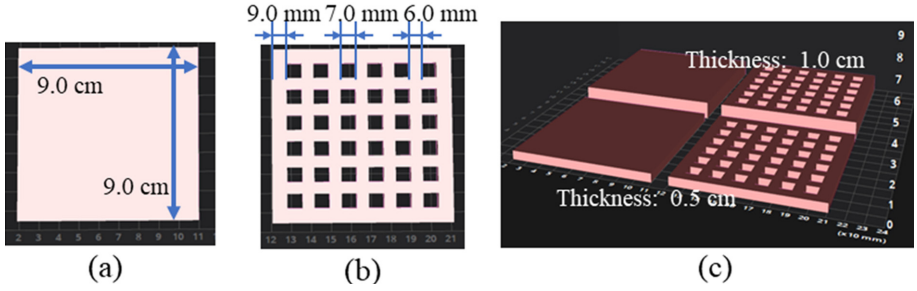


Fig. 1. 3D modeling results and produced experimental sample; (a)without holes, (b)with holes, (c)thickness of samples.

Table 2. Characteristics of the knit used as the cover of the sample

Characteristics	Measurement methods	Wales	Courses
Density(Determination of number)	KS K 0512:2017	153.6 stitch/5 cm	256.0 stitch/5 cm
Thickness	KS K ISO 5084:1996	0.88 mm (Applied pressure: 0.1 ± 0.001 kPa, Press area: 2000 ± 20 mm^2)	
Ratio of fibre mixtures	KS K 0210:2018	nylon(84.9%) + polyurethane(15.1%)	
Mass	KS K 0514:2017	264.5 g/m^2	
Organization	visual judgment method	Warp knitting	
Thermal conductivity	KS K 0466: 2021	0.077W/(m·K)	

하기 위해 사용되었다. 2단계는 보호대 커버로 많이 사용되는 니트 조직으로 된 나일론과 폴리우레탄 혼방소재로 커버를 씌운 후 6종의 재료를 Hot plate위에 올려놓은 후 이때 표면 온도를 3점에서 10분 동안 측정하였다. 단계별 샘플 각 6종에 대한 총 12번의 실험순서는 무작위로 진행하였고, 실험환경은 온도 20 ± 2°C, 습도 20 ± 5%RH이었다. 모든 샘플은 실험 전 24시간 동안 일정한 실험환경(온도 20 ± 2°C, 습도 20 ± 5%RH) 안에 보관한 후 실험을 진행하였다.

2.2.2. 측정장비 및 측정방법

보호대 패드 샘플의 표면온도 측정장비는 피부온도 측정기(Thermistor, LT-8A, Gram, Co., Japan)로 측정하였고 사용된 센서 측정 온도 범위는 0~70°C이었다. 실험조건이 최대한 인체와 유사하게 되도록 인체 피부를 대신하여 36.0°C로 세팅된 Hot Plate위에 샘플을 올려둔 상태로 실험을 진행하였다(Fig. 2. ①). 실험은 Fig 2. ②에서 보는 바와 같이 커버가 없는 경우(Step 1)와 커버가 있는 경우(Step 2)로 나누어 진행하였고 각 샘플의 표면 온도는 3점 동일한 위치에서 10분간 2초 간격으로 측정하였다.

2.2.3. 데이터 분석방법

1초 간격으로 측정된 데이터는 1분 간격으로 3점에서 측정된 표면온도 평균을 분석하였으며, 1분에서 2분후, 1분에서 4분후, 1분에서 6분후, 1분에서 8분후, 1분에서 10분후 변화된 온도 변화량을 계산하여 변인별 온도 변화량에 차이가 있는지를 분석하였다. 이때 변인별 차이를 알아보기 위해 SPSS 24.0 statistics program을 사용하여 기술통계, *t*-검증, 이원배치분산분석(Two-way ANOVA), Duncan 사후분석, Bonferroni 사후분석으로 분석하였다.

3. 연구 결과

인체로부터 열이 외부로 전달되는 속도와 정도는 재료의 구조 뿐만 아니라 물성과도 큰 관련이 있다. 특히 보호대가 부착된 의복의 열쾌적성은 보호대 패드를 씌우는 소재의 물성에 따라 큰 차이가 있을 것이다. 따라서 본 연구에서는 패드 재질의 열전달 특성을 우선적으로 파악하고 신축성있는 소재로 씌워진 상태일 때의 열전달 특성을 모두 측정하였다. 커버 유무에 따른 온도변화의 차이를 살펴보기 위해 커버가 없는 경우 온도변화, 커버가 있는 경우 온도변화를 분리하여 살펴보았다.

3.1. 커버 없이 재료와 구조에 따른 온도변화

보호대 패드의 재료(3종)와 구조(2종)에 따라 온도변화가 다른지를 확인하기 위해 커버를 씌우지 않은 상태와 커버를 씌운

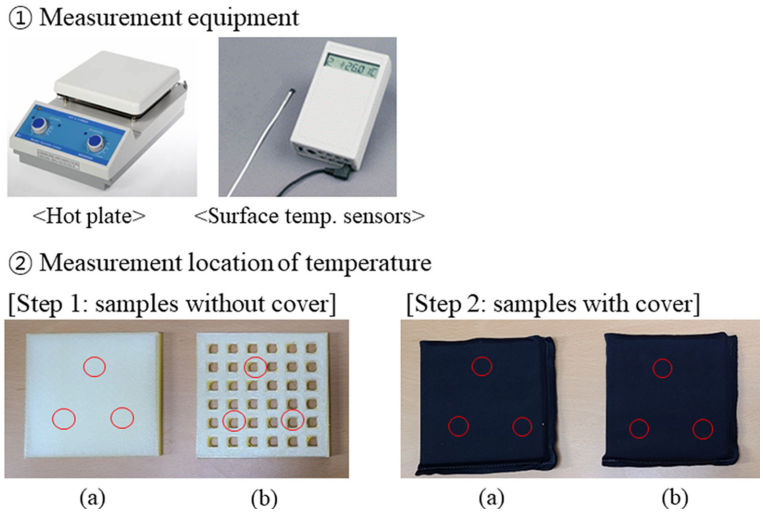


Fig. 2. Measurement equipment and measurement location; (a)without holes, (b)with holes.

Table 3. Temperature change depending on the material and shape without cover(Two-way ANOVA)

	Variable	Type III Sum of Squares	df	F	*p*-value
△2min	Material	1.30	2	4.47	.04*
	Shape	.28	1	1.95	.19
	Material × Shape	.26	2	.88	.44
△4min	Material	4.11	2	21.99	.00***
	Shape	.44	1	4.76	.05
	Material × Shape	.13	2	.67	.53
△6min	Material	6.34	2	26.25	.00***
	Shape	.80	1	6.61	.02*
	Material × Shape	.07	2	.29	.75
△8min	Material	9.17	2	56.21	.00***
	Shape	.72	1	8.88	.01*
	Material × Shape	.25	2	1.53	.26
△10min	Material	11.16	2	46.98	.00
	Shape	.85	1	7.15	.02
	Material × Shape	1.01	2	4.25	.04*

△2 min : Temp. change after 1 to 2 min.
△4 min : Temp. change after 1 to 4 min.
△6 min : Temp. change after 1 to 6 min.
△8 min : Temp. change after 1 to 8 min.
△10 min : Temp. change after 1 to 10 min.
*$p < .05$, ***$p < .001$

상태로 나누어 통계분석을 시행하였다. 우선 커버를 씌우지 않은 상태에서 재료와 구조에 따른 온도변화 차이를 살펴보기 위해 2분 후, 4분 후, 6분 후, 8분 후, 10분 후의 온도변화량을 이원배치 분산분석(Two-way ANOVA)하였으며 그 결과는 Table 3과 같았다. 이때 재료 3종은 EVA폼, TPU-10%, TPU-10%+EVA였으며, 구조 2종은 구멍이 없는 것과 7.0 × 7.0 mm 정사각형 구멍이 36개 있는 것이었다.

재료와 구조 변인에 따른 온도변화 차이를 이원배치 분산분석(Two-way ANOVA)을 통해 살펴본 결과 2분 후, 4분 후, 6분 후, 8분 후에서는 재료와 구조 변인에 따른 교호작용이 나타나지 않았으나 10분 후 온도변화에서는 교호작용이 나타났다($p < .05$). 반면 교호작용이 나타나지 않은 2분 후, 4분 후, 6분 후, 8분 후 온도변화는 재료나 구조 변인에 따라 온도변화에 차이가 있는지를 살펴본 결과 재료 변인에 따라 통계적 차이를 보였으며($p < .05$, $p < .001$), 6분 후, 8분 후 온도변화에서는 구조 변인에 따라서도 통계적 차이를 보였다($p < .05$). 즉, 어떤 재료에 따라 2분 후, 4분 후, 6분 후, 8분 후 온도변화에 차이가 나타났는지 Duncan 사후검정(Post-hoc)을 통해 분석하

Table 4. Duncan Post-hoc Result of temperature change depending on the material without cover (unit:°C)

		EVA foam	TPU-10%	TPU-10%+EVA	F
△2min	Mean	.76[b]	.77[b]	.19[a]	4.47***
	SD	.16	.16	.16	
△4min	Mean	1.79[b]	2.38[c]	1.21[a]	21.99***
	SD	.12	.12	.13	
△6min	Mean	2.07[a]	3.34[b]	2.09[a]	26.25***
	SD	.14	.13	.21	
△8min	Mean	2.12[a]	3.83[c]	2.65[b]	56.21***
	SD	.12	.19	.14	

△2 min : Temp. change after 1 to 2 min.
△4 min : Temp. change after 1 to 4 min.
△6 min : Temp. change after 1 to 6 min.
△8 min : Temp. change after 1 to 8 min.
**$p < .01$, ***$p < .001$
Duncann test: a < b < c

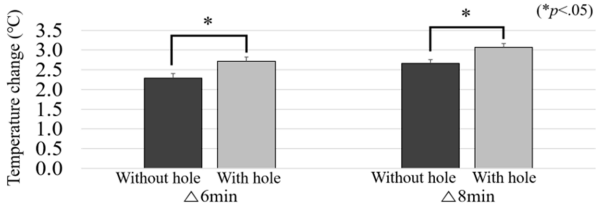


Fig. 3. Temperature change depending on the shape without cover after 6 and 8 min. (unit: °C).

였고(Table 4), 구조(구멍 유무)에 따라 6분 후, 8분 후 온도변화에 차이가 있는지를 Bonferroni 사후검정을 통해 분석하였다(Fig. 3). 또한, 재료와 구조 간 교호작용을 보인 6종(재료 3종 × 구조 2종)의 10분 후 온도변화 차이는 Duncan 사후검정을 통해 분석하였다(Table 5).

재료변인에 따른 온도변화를 살펴본 결과(Table 4), 2분 후 TPU-10%+EVA는 온도변화가 거의 없었으나 시간이 지남에 따라 점차 증가됨을 알 수 있었다. 반면 EVA폼으로 된 재료는 처음 2분 후에는 0.76°C, 4분 후에는 1.79°C로 바로 온도가 증가하였으나 그 이후 6분 후, 8분 후에는 2.07°C, 2.12°C로 온도변화가 거의 없었다. 반면 TPU-10%는 다른 재료에 비해 항상 온도변화가 크게 나타났는데, 2분 후에는 0.77°C로 EVA폼과 함께 온도변화가 컸고($p < .001$), 4분 후, 6분 후, 8분 후에는 각각 2.38°C, 3.34°C, 3.83°C로 다른 재료에 비해 항상 통계적으로 온도변화가 크게 나타났다($p < .001$). 즉, TPU-10%는 8분 후까지 열전달이 가장 잘 이루어졌고 EVA폼은 초반 4분 정도까지만 열전달이 이루어지다가 그 이후에는 온도변화가 거의 없었다. 반면 TPU-10%+EVA는 중간 정도 속도로 열전달이 이루어짐을 알 수 있었다. 이러한 결과는 열전도율과 관련이 있을 것으로 생각되는데, 선행연구를 통해 EVA폼의 열전도율은 0.030~0.046W/(m·K)임을 알 수 있었다(Jeong et al., 2009). 또한 TPU 재료의 열전도율(KS K 0466)은 선행연구결과(Fei et al., 2020; Wondu et al., 2021; Zhou et al., 2021)에서 0.21~0.22 W/(m·K)로 나타났다. EVA폼의 경우 열전도율이 낮아 온도변화가 가장 적었고, TPU재료는 열전도율이 높아 온도변화가 가장 큰게 나타난 것으로 생각된다. 또한 TPU-10%+EVA는 TPU와 EVA폼의 조합으로 이루어졌기 때문에 온도변화가 그 중간 정도로 나타난 것으로 보인다.

구조변인에 따른 온도변화 차이는 6분 후와 8분 후에 나타났는데(Fig. 3), 구멍이 없는 구조보다 구멍이 있는 구조의 온도변화가 큰 것을 확인하였다. 6분 후 온도변화를 살펴보면 구멍이 있는 구조의 표면온도(2.71°C)가 구멍이 없는 구조(2.29°C)보다 더 증가하였고($p < .05$), 8분 후에는 구멍이 있는 구조의 표면온도가 3.06°C로 구멍이 없는 구조(2.66°C)보다 더 온도변화가 큰 것을 알 수 있었다($p < .05$).

커버를 씌우지 않은 상태에서 시간별 온도변화를 살펴본 결과 10분 후에는 재료와 구조 변인에서 교호작용이 나타나 6종(재료 3종×구조 2종)의 온도변화량에 대한 차이를 Duncan 사후검정(Post-hoc)으로 살펴보았다(Table 5). 그 결과, 구멍 유무와 상관없이 EVA폼으로 이루어진 재료의 온도변화가 2.08°C (EVA foam without holes), 2.25℃(EVA foam with holes)로 가장 낮았다. 그 다음 TPU-10%과 EVA폼의 조합으로 이루어진 재료(TPU-10%+EVA without holes, TPU-10%+EVA with holes)와 구멍없는 TPU-10%(without holes)가 온도변화가 낮았고, 구멍이 있는 TPU-10%(with holes)의 온도변화가 4.64°C로 가장 크게 나타났다($p < .001$).

3.2. 커버를 씌운 상태의 재료와 구조에 따른 온도변화

커버를 씌운 보호대 패드의 표면 온도변화가 재료(3종)와 구조(2종)에 따라 다른지를 확인하기 위해 2분 후, 4분 후, 6분 후, 8분 후, 10분 후의 온도변화량을 계산하였고 이원배치분산분석(Two-way ANOVA)을 실시하여 변인에 따른 통계적 차이를 분석하였다(Table 6).

그 결과, 2분 후에는 재료와 구조 변인에 따른 교호작용, 재료 변인, 구조 변인에 따른 표면 온도변화량에 차이가 나타나지 않았다. 그러나 4분 후, 6분 후, 8분 후, 10분 후 온도변화량에서는 재료와 구조 변인에 따른 교호작용이 나타났다. 4분 후에는 5% 유의수준에서 재료와 구조에 따른 온도변화량에 통계적 차이를 보였으나 6분 후 온도변화량에서는 1% 유의수준에서 통계적 차이를 보였고 8분 후와 10분 후에는 0.1% 유의수준에서 온도변화량에 통계적 차이를 보였다. 따라서 재료와 구조 간 교호작용을 보인 6종(재료 3종 × 구조 2종)의 온도변화 차이를 구체적으로 비교하기 위해 Duncan 사후검정을 실시하였고 그 결과는 Table 7에서 보는바와 같았다.

재료(3종)와 구조(2종) 변인에 따른 온도변화량 차이를 살펴본 결과, 4분 후에는 구멍이 있는 TPU-10%(1.27°C)와 구멍이 없는 EVA폼(1.39°C)의 온도변화가 가장 크게 나타났고($p<.05$), 6분 후에도 구멍이 있는 TPU-10%(2.00°C)와 구멍이 없는 EVA폼(1.85°C)의 온도변화가 가장 크게 나타났으며 구멍이 있는 EVA폼(0.73°C)의 온도변화가 가장 낮게 나타났다($p < .001$). 8분 후, 10분 후에도 구멍이 있는 EVA폼의 온도변화가 가장

Table 5. Temperature change depending on the material and shape without cover after 10 min (unit: °C)

	EVA foam without holes	EVA foam with holes	TPU-10% without holes	TPU-10% with holes	TPU-10%+EVA without holes	TPU-10%+EVAwith holes	F
Mean	2.08^{a}	2.25^{a}	3.54^{b}	4.64^{c}	2.97^{b}	3.00^{b}	21.92^{***}
SD	.35	.33	.33	.40	.41	.21	

Duncann test: a < b < c
***$p < .001$

Table 6. Temperature change depending on the material and shape with cover

	Variable	Type III Sum of Squares	*df*	*F*	*p*-value
△2min	Material	.82	2	1.34	.30
	Shape	.04	1	.14	.72
	Material × Shape	.20	2	.33	.73
△4min	Material	1.69	2	4.80	.03
	Shape	.34	1	1.93	.19
	Material × Shape	1.48	2	4.20	.04*
△6min	Material	1.84	2	7.17	.01
	Shape	.30	1	2.31	.15
	Material × Shape	1.83	2	7.13	.01**
△8min	Material	3.96	2	19.90	.00
	Shape	.85	1	8.58	.01
	Material × Shape	2.67	2	13.43	.00***
△10min	Material	5.84	2	29.09	.00
	Shape	.57	1	5.70	.03
	Material × Shape	2.17	2	10.80	.00***

△2 min : Temp. change after 1 to 2 min.
△4 min : Temp. change after 1 to 4 min.
△6 min : Temp. change after 1 to 6 min.
△8 min : Temp. change after 1 to 8 min.
△10 min : Temp. change after 1 to 10 min.
*p < .05, **p < .01, ***p < .001

Table 7. Temperature change depending on the material and shape with cover (unit:°C)

		EVA foam without holes	EVA foam with holes	TPU-10% without holes	TPU-10% with holes	TPU-10%+ EVA without holes	TPU-10%+ EVA with holes	F
△4min	Mean	1.39^{b}	$.39^{a}$	$.87^{a,b}$	1.27^{b}	$.46^{a}$	$.24^{a}$	3.988*
	SD	.09	.03	.62	.29	.45	.61	
△6min	Mean	1.85^{c}	$.73^{a}$	$1.62^{b,c}$	2.00^{c}	$1.06^{a,b}$	$1.03^{a,b}$	6.182***
	SD	.08	.06	.48	.23	.36	.59	
△8min	Mean	2.16^{c}	$.66^{a}$	2.29^{c}	2.60^{c}	1.55^{b}	1.43^{b}	15.050***
	SD	.08	.02	.47	.22	.34	.46	
△10min	Mean	$2.23^{b,c}$	$.90^{a}$	$2.77^{c,d}$	3.01^{d}	1.85^{b}	1.87^{b}	17.099***
	SD	.12	.07	.45	.30	.34	.43	

△4 min : Temp. change after 1 to 4 min.
△6 min : Temp. change after 1 to 6 min.
△8 min : Temp. change after 1 to 8 min.
△10 min : Temp. change after 1 to 10 min.
Duncann test: a < b < c < d
*p < .05, ***p < .001

낮게 나타났지만 8분 후 온도변화가 가장 높게 나타난 것은 구멍이 있는 TPU-10%(2.60°C), 구멍이 없는 TPU-10%(2.29°C), 구멍이 없는 EVA폼(2.16°C) 이었다(p < .001). 10분 후에는 다른 변인들과 비교했을 때 구멍이 있는 TPU-10%이 3.01°C로 가장 높은 온도변화를 보였다(p < .001).

3.3. 커버 유무에 따른 온도변화

커버 유무에 따라 온도변화에 어느 정도 차이가 있는지를 알아보기 위해 커버를 씌우지 않은 경우(6종)와 커버를 씌운 경우(6종)의 각 평균들의 데이터로 *t*-검증을 시행하였으며 그 결과는 Table 8에서 보는 바와 같았다.

보호대 패드에 커버를 씌우지 않은 경우와 커버를 씌웠을 때 발열판(Hot plate) 바닥에서 전달된 표면층의 온도변화를 비교한 결과, 커버를 씌우지 않았을 때 열전달이 잘 이루어져 통계적으로 유의미하게 온도변화가 높은 것을 알 수 있었다(p < .01, p < .001). 시간에 따라 구체적으로 살펴보면 커버를 씌우지 않

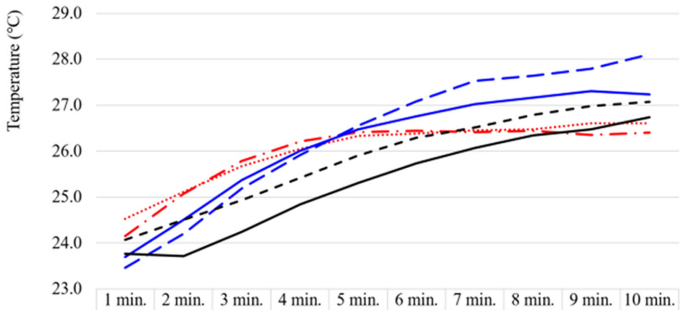
Table 8. Comparison of changes in temperature without or with cover

		Without cover		With cover		t
		Mean	SD	Mean	SD	
Temperature change (°C)	△2min	.57	.46	−.08	.53	3.931***
	△4min	1.79	.58	.77	.57	5.269***
	△6min	2.50	.71	1.38	.57	5.203***
	△8min	2.86	.81	1.78	.71	4.261***
	△10min	3.08	.92	2.11	.76	3.467**

△2 min : Temp. change after 1 to 2 min.
△4 min : Temp. change after 1 to 4 min.
△6 min : Temp. change after 1 to 6 min.
△8 min : Temp. change after 1 to 8 min.
△10 min : Temp. change after 1 to 10 min.
**p < .01, ***p < .001

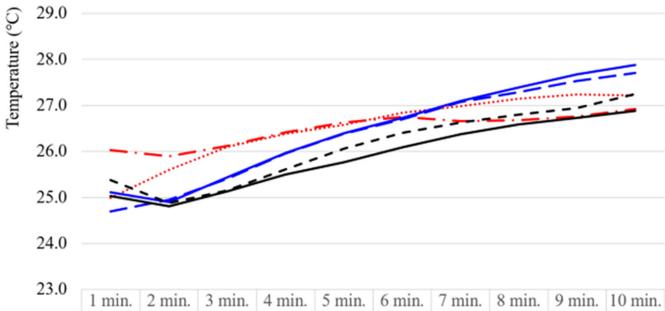
았을 때 2분 후 온도가 0.57°C, 4분 후에는 1.79°C, 6분 후에는 2.50°C, 8분 후에는 2.86°C, 10분 후에는 3.08°C 높아졌지만, 커버를 씌웠을 때는 2분 후 온도변화가 –0.08°C로 거의 변화하지 않았고 4분 후에는 0.77°C, 6분 후 1.38°C, 8분 후 1.78°C, 10분 후 2.11°C로 온도변화가 커버 없는 경우보다 서서히 증가하는 것을 확인하였다. 즉, 본 연구에 보호대 패드 커버로 사용된 나일론(84.9%)과 폴리우레탄(15.1%) 혼방소재는 열전달이 빨리 되도록 도와주기보다는 천천히 열전달이 이루어지게 하는 것을 알 수 있었다.

따라서 보호대 패드 재료와 구조에 따른 열전달을 좀 더 정확히 분석하기 위해 커버 유무에 따라 측정된 온도데이터를 분리하여 분석하였다. 우선 커버가 없는 경우 발열판의 온도(36.0°C)가 패드 표면으로 전달된 온도변화 평균을 살펴보면 Fig. 4와 같았다. 처음 온도 측정 시작 후 1분 후의 온도를 살펴보면 EVA폼이 24.2°C와 24.5°C로 높은 반면 TPU-10%는 23.5°C와 23.7°C로 낮게 나타났고 TPU-10%+EVA의 경우 23.8°C, 24.1°C로 중간 정도의 온도였다. 이는 소재 자체가 가지고 있는 온도 때문으로 생각된다. 재료와 구조에 따른 10분 동안의 온도변화를 살펴보면 EVA폼으로 이루어진 패드의 경우 5분 후까지는 점차적으로 온도가 증가하였으나 그 이후에는 온도변화가 거의 일어나지 않았고, 구조(구멍유무)에 따라서는 거의 차이를 보이지 않았다. 반면 TPU-10%는 가장 온도변



	1 min.	2 min.	3 min.	4 min.	5 min.	6 min.	7 min.	8 min.	9 min.	10 min.
EVA foam without holes	24.5	25.1	25.7	26.0	26.3	26.4	26.5	26.5	26.6	26.6
EVA foam with holes	24.2	25.1	25.8	26.2	26.4	26.4	26.4	26.4	26.3	26.4
TPU-10% without holes	23.7	24.5	25.4	26.0	26.5	26.8	27.0	27.2	27.3	27.2
TPU-10% with holes	23.5	24.2	25.2	25.9	26.6	27.1	27.5	27.6	27.8	28.1
TPU-10%+EVA without holes	23.8	23.7	24.2	24.8	25.3	25.7	26.1	26.3	26.5	26.7
TPU-10%+EVA with holes	24.1	24.5	24.9	25.4	25.9	26.3	26.5	26.8	27.0	27.1

Fig. 4. Temperature change according to material and shape without cover.



	1 min.	2 min.	3 min.	4 min.	5 min.	6 min.	7 min.	8 min.	9 min.	10 min.
EVA foam without holes	25.0	25.6	26.1	26.4	26.6	26.8	27.0	27.1	27.2	27.2
EVA foam with holes	26.0	25.9	26.1	26.4	26.6	26.7	26.7	26.7	26.8	26.9
TPU-10% without holes	25.1	24.9	25.4	26.0	26.4	26.7	27.1	27.4	27.7	27.9
TPU-10% with holes	24.7	24.9	25.4	26.0	26.4	26.7	27.1	27.3	27.5	27.7
TPU-10%+EVA without holes	25.0	24.8	25.1	25.5	25.8	26.1	26.4	26.6	26.7	26.9
TPU-10%+EVA with holes	25.4	24.9	25.2	25.6	26.1	26.4	26.6	26.8	26.9	27.2

Fig. 5. Temperature change according to material and shape with cover.

화가 컸으며, 10분이 지날 때까지도 지속적으로 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한 TPU-10% 소재는 구조(구멍유무)에 따라 온도변화에 차이가 나타났는데 처음 5분 후까지는 큰 변화를 보이지 않았으나 그 이후 구멍이 있는 TPU-10%의 온도변화가 급격히 증가하는 것을 볼 수 있었다. TPU-10%+EVA는 지속적으로 증가하였으나 그 온도변화 폭은 TPU-10%보다는 적었다. 또한, 조합된 패드 역시 구멍이 있는 경우가 없는 경우보다 패드 표면 온도가 더 높게 나타났다. 즉, TPU-10%, TPU-10%+EVA, EVA폼 순서로 열전달이 잘 이루어졌으며, 구멍이 있는 경우가 없는 경우보다 열전달이 더 잘 이루어지는 것을 확인하였다.

보호대 패드 위에 커버를 씌운 후 표면 온도변화 평균을 살펴본 결과(Fig. 5), EVA폼으로 이루어진 패드는 커버를 씌우지 않은 것과 같게 1분 후 표면 온도가 가장 높았고 시간이 지남에 따라 온도변화가 크지 않았다. 또한, TPU-10%나 TPU-10%+EVA 모두 초반에는 온도변화가 없고 재료에 따른 차이도 나타나지 않았으나 시간이 지남에 따라 TPU-10%의 표면온도가 더 높게 나타났다. 반면 구멍 유무에 따라서는 온도변화에 큰 차이를 보이지 않았다.

즉, 커버를 씌운 경우와 커버를 씌우지 않은 경우의 변인에 따른 온도변화량을 살펴보면 10분 후의 온도변화량이 가장 큰 것은 구멍이 있는 TPU-10%로 온도변화량에 차이는 있었지만 그 경향성은 비슷하게 나타남을 알 수 있었다. 그러나 그 전 8분 후까지는 온도변화량에서 유사한 경향성을 보이지는 않았다. 특히 커버를 씌우지 않았을 때 8분 후까지 재료나 구조(구멍유무)에 따른 뚜렷한 차이를 보인 반면 커버를 씌웠을 때는 재료와 구조가 온도변화량에 함께 영향을 미친 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 Lee et al.(2022)의 재료에 따른 온습도 변화를 측정한 결과 커버를 씌운 경우와 그렇지 않았을 때 유사한 경향성을 보였다는 선행연구와 다른 결과인데 이는 선행연구의 경우 변인이 재료에만 한정됐지만 본 연구에서는 재료와 구조 변인이 함께 고려되었기 때문으로 생각된다. 물론 커버 재료로 사용된 소재의 열전도율은 0.077 W/(m·K)이었는데 이 수치는 TPU 재료의 열전도율보다(0.21~0.22 W/(m·K))는 낮았고 EVA폼 열전도율(0.030~0.046 W/(m·K))보다는 높았기 때문에 열전달 효과가 떨어진 이유가 될 수 있을 것이다. 따라서 본 연구에서는 커버유무에 따라 온도변화량의 경향성이 달라졌는데 이를 통해 두께가 1.0cm로 두껍게 보호대 패드로 사용하면 재료의 특성보다는 보호대 패드의 구멍과 같은 구조적 특성이 열전달에 큰 영향을 미치는 요인임을 알 수 있었다.

4. 결론 및 제언

본 연구는 3D 프린팅을 이용한 보호대 개발에 활용하기 위해 착용 시 열쾌적성이 우수한 패드의 구조와 재료를 선정하고자 기초연구를 실시하였다. 패드의 재료 변인 3종은 EVA폼, TPU-10%, TPU-10%+EVA로 정하였고 구조 변인 2종은 내부에 구멍이 없는 구조와 내부에 36개의 작은 구멍(약 45.0 mm^2)이 있는 구조였다. 또한 보호대 패드에 적용하기 위해 커버가 씌어진 경우와 커버 없이 적용되는 경우로 나누어 표면 온도를 측정하였다.

커버를 씌우지 않았을 때 시간이 지남에 따른 변인별 온도변화량을 살펴본 결과 초반 4분까지는 재료에 따른 차이가 나타났고 그 후 8분까지는 재료나 구조에 따라 온도변화량에 차이를 보였다. 재료별 차이를 살펴보면 TPU-10%는 지속적으로 온도변화량이 가장 크게 나타났고, EVA폼은 초반 2분은 TPU-10%와 같이 온도 변화량이 컸다가 그 후 점차적으로 변화량이 작아졌고 6분 후부터는 온도변화가 거의 없었다. 반면 TPU-10%+EVA는 초반 온도변화량이 가장 적었으나 점차 증가하면서 8분 후에는 EVA폼 보다 온도변화량이 크게 나타났다. 구멍에 의한 온도변화 역시 초반에는 차이가 없었으나 6분 후부터 구멍 유무에 따라 온도변화량에 차이가 나타났다. 최종 10분이 지난 후에는 재료(3종)와 구조(2종)의 영향을 모두 받았는데, 총 6종의 변인 중 구멍이 있는 TPU-10% 패드의 온도변화가 4.64°C로 가장 컸고 그 다음으로 구멍이 없는 TPU-10%, 구멍 있는 TPU-10%+EVA, 구멍 없는 TPU-10%+EVA의 온도변화가 크게 나타났다. 즉, 두께 1.0cm 보호대 패드의 열전달의 경우 발열판에서 열이 가해진 후 초반 5분 정도까지는 재료의 영향을 가장 많이 받았고 그 후에는 구조의 영향을 함께 받게 되는 것을 알 수 있었다. 또한 10분정도가 지난 후에는 구조에 의한 영향력이 좀 더 커지게 됨을 알 수 있었다. 따라서 보호대를 6분 미만 착용하는 경우에는 열전도가 잘되는 재료만을 적용하면 되지만, 10분 이상 착용하는 경우에는 구멍이 있는 구조가 함께 고려되어 제작되는 것이 필요할 것이다. 또한 열전달이 서서히 이루어지는 것이 필요한 환경인 경우, 열전도도가 다른 두 가지 재료의 조합을 통해 초반에는 열전달이 서서히 이루어지다가 시간이 지남에 따라 열전달이 잘 이루어지는 TPU-10%+EVA와 조합이 적합할 수도 있을 것이다.

커버를 씌운 후 재료와 구조 변인에 따른 온도변화량을 살펴본 결과, 초반에는 변인에 따라 온도변화량에 차이가 없었으나 4분 후부터는 재료와 구조에 따른 차이를 보이기 시작해 10분 후에는 구멍이 있는 TPU-10%의 온도변화가 3.01°C로 가장 크게 나타났다. 그러나 전체적으로 커버를 씌우지 않았을 때보다 온도변화량이 적었고 재료와 구조별 변화하는 경향성이 다르게 나타났다. 이는 본 연구에 사용된 커버 소재의 열전도율이 EVA폼 열전도율보다는 높지만 TPU 재료보다는 낮기 때문으로 생각된다. 따라서 인체내 열환경을 쾌적하게 유지하기 위해서는 보호대 패드의 재료와 구조도 중요하지만 커버의 열전달률도 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 이러한 연구결과를 토대로 추후 다양한 열전도도를 갖는 소재를 겉감 소재로 선정하거나 패드 재료를 다양하게 변형하여 소재, 구조, 재료 등이 열전달에 미치는 효과에 대한 연구가 이루어진다면 상황별, 동작별 적절한 보호대 패드의 구조나 재료 등을 제안해 줄 수 있는 열 쾌적 메커니즘 개발이 가능할 것으로 생각된다.

감사의 글

이 연구는 금오공과대학교 대학 학술연구비로 지원되었음 (2021).

References

Babar, A. A., Miao, D., Ali, N., Zhao, J., Wang, X., Yu, J., & Ding, B. (2018). Breathable and colorful cellulose acetate-based nanofibrous membranes for directional moisture transport. *ACS Applied Materials & Interfaces*, *10*(26), 22866-22875. doi:10.1021/acsami.8b07393

Bates, S. R., Farrow, I. R., & Trask, R. S. (2016). 3D printed polyurethane honeycombs for repeated tailored energy absorption. *Materials & Design*, *112*, 172-183. doi:10.1016/j.matdes.2016.08.062

Eom, R. I., & Lee, Y. (2020). Comfort evaluation by wearing a gait-assistive rehabilitation robot. *Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles*, *44*(6), 1107-1119. doi:10.5850/JKSCT.2020.44.6.1107

Fei, T., Li, Y., Liu, B., & Xia, C. (2020). Flexible polyurethane/boron nitride composites with enhanced thermal conductivity. *High Performance Polymers*, *32*(3), 324-333. doi:10.1177/0954008319862044

Han, Y., & Kim, J. (2018). A study on the mechanical properties of knit fabric using 3D printing - Focused on PLA, TPU Filament. *Journal of Fashion Business*, *22*(4), 93-105. doi:10.12940/jfb.2018.22.4.93

Harada, T. (2001). Comfort and microclimate of clothing. *Journal of the Korean Society for Clothing Industry*, *3*(2), 100-104.

Hong, K. H., & Lee, H. (2020). Development of hip protectors for snowboarding utilizing 3D modeling and 3D printing. *Fashion and Textiles*, *7*(1), 1-19. doi:10.1186/s40691-020-00236-3

Jang, S. (2021, August 03). *여름철 레저 활동, 취미로 즐길 때 주의해야 할 질환은?* [Diseases to watch out for during summer leisure activities and hobbies?]. *Cheonji Daily News*. Retrieved April 3, 2023, from https://www.newscj.com/news/articleView.html?idxno=886479

Jeong, Y. S., Choi, H. J., Kim, K. W., Choi, G. S., Kang, J. S., & Yang, K. S. (2009). A study on the thermal conductivity of resilient materials. *Thermochimica Acta*, *490*(1-2), 47-50. doi:10.1016/j.tca.2009.02.015

Ju, J., Shi, Z., Deng, N., Liang, Y., Kang, W., & Cheng, B. (2017). Designing waterproof breathable material with moisture unidirectional transport characteristics based on a TPU/TBAC tree-like and TPU nanofiber double-layer membrane fabricated by electrospinning. *RSC advances*, *7*(51), 32155-32163. doi:10.1039/C7RA04843B

Jung, I., & Lee, S. (2021). Effect of surface roughness of fabrics on tensile properties of 3D printing auxetic re-entrant pattern/textile composites. *Textile Science and Engineering*, *58*(4), 167-176. doi:10.12772/TSE.2021.58.167

Kim, H. A., & Kim, S. J. (2017). Assessment of wicking and fast dry properties according to moisture transport measurement method of knit and woven fabrics for garment. *Science of Emotion and Sensibility*, *20*(2), 117-126. doi:10.14695/KJSOS.2017.20.2.117

Kim, S., Lee, O., & Lee, H. (2020). Women's comfort temperature range and dynamic temperature change for maintaining thermal comfort in low temperature environment. *Fashion & Textile Research Journal*, *22*(6), 853-861. doi:10.5805/SFTI.2020.22.6.853

Kim, T. G., Song, M. K., Lee, C. M., & Kwon, O. K. (2018). Thermal comfort of the sports/leisure clothing with the heat storage/reflection function-wearing evaluation under the condition of 0x00B1; 1℃ and 50±5% RH. *Fashion & Textile Research Journal*, *20*(4), 474-481. doi:10.5805/SFTI.2018.20.4.474

Kim, T. H. (2022a, September 30). *거리두기 해제 이후 수상레저 용품 수입 증가* [Increase in imports of water leisure products after distancing is lifted]. *Le Desk*. Retrieved March 20, 2023, from https://www.ledesk.co.kr/view.php?uid=3115&where_ke=a&keyw=%EA%B1%B0%EB%A6%AC%EB%91%90%EA%B8%B0%20%ED%95%B4%EC%A0%9C

Kim, C. H. (2022b, November 22). *해양레저 바로알기 1. 해양레저객이 급증하고 있다* [Getting to Know Marine Leisure 1. The number of marine leisure visitors is rapidly increasing]. *Hyeondae Haeyang*. Retrieved March 20, 2023, from http://www.hdhy.co.kr/news/articleView.html?idxno=17902

Kweon, S. A., Lee, J. M., & Choi, J. M. (2003). *의복과 인체의 환경적응* [Clothing and the human body's adaptation to the environment]. Seoul: Kyohakyungusa

Lee, H., & Hong, K. H. (2019). Survey on injuries during snowboarding and wearing satisfaction to develop snowboard protector. *Fashion & Textile Research Journal*, *21*(4), 497-508. doi:10.5805/SFTI.2019.21.4.497

Lee, D., & Lee, S. (2022, April 24). *팬데믹이 '야외 레저 전성시대' 열어, 야외 활동 인프라 확충돼야"* ["Pandemic opens the golden age of outdoor leisure, and outdoor activity infrastructure needs to be expanded"]. *Economy Chosun*. Retrieved February 14, 2023, from https://biz.chosun.com/industry/company/2022/04/24/EVJ56UTJNBDFDEJHRGW5Q2IDI4/

Lee, S., & Park, S. (2023). Effects of relative humidity and fiber properties on the moisture permeability of multilayer fabric systems. *Journal of the Korean Society for Clothing Industry*, *25*(1), 119-126. doi:10.5805/SFTI.2023.25.1.119

Lee, H., Eom, R. I., & Lee, Y. (2015). 3D modeling of safety leg guards considering skin deformation and shape. *Korean Journal of Human Ecology*, *24*(4), 555-569. doi:10.5934/kjhe.2015.24.4.555

Lee, H., Eom, R. I., & Lee, Y. (2019). Evaluation of the mechanical properties of porous thermoplastic polyurethane obtained by 3D printing for protective gear. *Advances in Materials Science and Engineering*, *2019*, 1-10. doi:10.1155/2019/5838361

Lee, H., Kim, S., Lee, Y., & Lee, O. (2022). Analysis of changes in temperature and humidity by material combination using 3D printing. *Fashion & Textile Research Journal*, *24*(1), 127-137. doi:10.5805/SFTI.2022.24.1.127

Milošević, P., & Bogović, S. (2018). 3D Technologies in individualized chest protector modelling. *Textile & Leather Review*, *1*(2), 46-55. doi:10.31881/TLR.2018.vol1.iss2.p46-55.a6

Park, J. H., & Lee, J. R. (2019). Developing fall-impact protection pad with 3D mesh curved surface structure using 3D printing technology. *Polymers*, *11*(11), 1800. doi:10.3390/polym11111800

Park, S., Lee, H., & Lee, Y. (2019). Suggestion of crotch protector prototype for cyclewear based on 3D modeling and printing.

Korean Journal of Human Ecology, *28*(2), 147-157. doi:10.5850/JKSCT.2020.44.4.739

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. doi:10.7856/kjcls.2016.27.2.295

Wondu, E., Lule, Z. C., & Kim, J. (2021). Improvement of dielectric properties and thermal conductivity of TPU with alumina-encapsulated rGO. *Polymer Testing*, *102*, 107322. doi:10.1016/j.polymertesting.2021.107322

Wu, S., Zeng, T., Liu, Z., Ma, G., Xiong, Z., Zuo, L., & Zhou, Z. (2022). 3D printing technology for smart clothing - A topic review. *Materials*, *15*(20), 7391. doi:10.3390/ma15207391

Zhou, Z. M., Wang, K., & Wang, Y. H. (2021). High performance of thermoplastic polyurethane-graphene oxide self-healing composite film. *Coatings*, *11*(2), 128. doi:10.3390/coatings11020128

(Received May 19, 2023; 1st Revised June 7, 2023; 2nd Revised June 29, 2023; 3rd Revised June 30, 2023; Accepted July 6, 2023)