

3D 프린팅을 활용한 재료조합에 따른 온습도 변화 분석

이희란¹⁾ · 김소영²⁾ · 이예진³⁾ · 이옥경^{4)†}

¹⁾금오공과대학교 소재디자인공학과

²⁾금오공과대학교 신소재연구소

³⁾충남대학교 의류학과

⁴⁾충남대학교 생활과학연구소

Analysis of Changes in Temperature and Humidity by Material Combination Using 3D Printing

Heeran Lee¹⁾, Soyoung Kim²⁾, Yejin Lee³⁾, and Okkyung Lee^{4)†}

¹⁾Dept. of Material Design Engineering, Kumoh National Institute of Technology; Gumi, 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⁾Research Institute of Human Ecology, Chungnam National University; Daejeon, Korea

Abstract: Recently, various clothing items are being developed using 3D printing technology, but comfort has become an issue while wearing them for a long time. Therefore, this study researched on how the temperature and humidity of the devices developed by 3D printing change depending on the material combination. Five types of material combinations (EVA foam, TPU density 10%, TPU density 30%, EVA foam+TPU density 10%, and EVA foam+TPU density 30%) were selected as variables, and the experiment was conducted for two different cases with and without a cover. All the ten types of samples were placed on the hot plate set at 36°C, and the surface temperature and humidity were measured at three different points for 10 minutes. As a result, the case with only TPU showed the greatest temperature change while the case with 100% EVA foam showed the least temperature change. The humidity of the surface layer gradually decreased with time for 100% EVA foam. For the case with TPU materials, the moisture was transferred to the surface layer at first, thereby increasing the humidity but then dropped significantly. Meanwhile, the cases with the cover on showed similar tendencies of change in both temperature and humidity where the overall temperature and humidity delivery were slow.

Key words: 3D printing (3D 프린팅), Ethylene-vinyl acetate foam (EVA폼), Thermoplastic Polyurethane (TPU), surface temperature (표면온도), surface humidity (표면습도), thermal comfort (열쾌적성)

1. 서 론

3D 모델링과 프린팅 기술을 적용하여 새로운 제품을 개발하려는 시도는 여러 분야에서 지속적으로 이루어지고 있다. 의복 및 패션 분야의 초기응용 단계에서는 3D 프린팅의 재료와 출력물 크기가 제한적이어서 주얼리 제품이나 모자, 신발 같은 패션제품, 의복 전시작품 등에 주로 활용되었는데(Chun, 2017), 점차 이러한 한계점이 개선되면서 다양한 제품으로 확대되고

있다. 특히, 스포츠웨어 보호대의 접목이 급증하면서 3D 형태 개발 및 출력물이 의복으로 활용하기에 적합한지를 파악하는 연구도 이루어지고 있다. 대표적으로 3D 인체 형상과 3D 모델링을 활용하여 보호대를 개발하고 3D 보호대 출력물에 관한 성능 평가를 하는 등의 연구가 매우 활발하게 이루어지고 있으며, 3D 출력물을 편성물이나 직물의 형태로 제작하기 위한 방법론과 이에 대한 인장강도, 굽힘 강도 등 역학적 특성 및 세탁성 평가 등과 관련된 연구도 이루어지고 있다(Kim & Kim, 2018; Lee, 2018).

이를 구체적으로 살펴보면 Milošević and Bogović(2018)은 여성 인체를 모델링하여 하키선수용 가슴 보호대를 개발하였고, Lee et al.(2015)은 야구 동작에 최적화된 포수의 다리 보호대를 모델링하고 3D 프린팅하여 의복에 적용하였다. 또한, Park and Lee(2019)는 3D 프린팅 기술로 낙상 보호대 패드를 개발하였고, Park et al.(2019)은 3D 프린팅 자전거용 살 보호

†Corresponding author; Lee, Okkyung

Tel. +82-42-821-7804

E-mail: grape-ok@hanmail.net

© 2022 Fashion and Textile Research Journal (FTRJ). 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.

대를 제작하였다. 최근, Hong and Lee(2020)는 3D 인체 형상을 적용하여 스노보드 엉덩이 보호대를 모델링하고 프린팅하여 의복에 적용하는 연구를 진행하였다. 한편, 낙하 충격 보호패드를 3D 메쉬 곡면 구조로 출력하여 보호 성능을 충격시험으로 평가하거나(Park & Lee, 2019), 반복 압축에 우수한 벌집 구조 형태의 3D 프린팅 출력물의 밀도가 달라졌을 때의 압축에너지 흡수력과 회복력 차이를 평가하기도 하였다(Bates et al., 2016). 3D 프린팅 격자 구조에 따른 에너지 흡수율을 시뮬레이션하기 위해 모델링과 해석을 수행하는 연구(Shen et al., 2016)와 3D 프린팅을 이용하여 편성물을 제작하거나 레이스/보일 복합직물을 제조하고 이에 대한 역학적 특성을 평가하는 연구도 이루어지고 있다(Han & Kim, 2018; Lee, 2018). 또한 Jung and Lee(2021)는 3D 프린팅된 제품을 신발 외피로 활용하기 위해 TPU(Thermoplastic Polyurethane)소재를 면, 폴리에스터, 아라미드 니트, 네오프렌과 결합하고 푸아송비, 표면 거칠기, 강도, 인장 특성 등을 측정하여 외피로의 적합성을 연구하기도 하였다. 또한, 3D 프린팅 소재로 많이 사용되고 있는 PLA(Polylactic acid)와 TPU소재에 대한 특성을 분석하고(Mi et al., 2013), 열가공 온도에 따른 TPU소재의 물성 변화를 측정하거나(Jang et al., 2017), 고분자를 섬유에 직접 프린팅하여 뒤틀림, 접착력 등을 평가하는 연구가 이루어지기도 하였다(Pei et al., 2015). 그러나 대부분의 선행연구가 형태나 재료 등 한 가지 측면에만 초점이 맞추어져 있는데 복합적으로 3D 프린팅 출력물이 의복에 부착되어 인체에 장시간 착용되었을 때 발생하는 온열쾌적성과 관련된 연구는 부족한 실정이다.

의복의 쾌적성은 개인이 감지하는 복합적인 느낌으로 의복 착용 시 신체활동에 적합하고 기분이 좋은 상태를 말하는데(Kweon et al., 2003), 이러한 쾌적성은 의복의 용도와 종류, 외부환경, 신체활동 등에 따라 달라지기 때문에 의복 개발 시 의복내 기후를 측정하는 것은 매우 중요한 평가 요인 중 하나이다. 특히, 온열쾌적성은 종합적 쾌적감과 관련이 크기 때문에 운동 시 착용되는 스포츠웨어를 개발할 시에는 계절과 상관없이 온열쾌적성을 고려하고 평가하는 연구가 함께 이루어져야만 한다. 물론 Lee et al.(2019)과 Eom et al.(2019)은 TPU소재로 3D 프린팅된 보조 장치의 구멍 크기나 프린팅 두께에 따라 온도전달이 어떻게 이루어지는지를 연구하고 구조해석 결과와 비교하기도 하였으나, TPU소재의 밀도와 형태를 변인으로 관찰하였을 뿐 보호대에 주로 많이 사용되고 있는 폼(foam)과 비교하거나 TPU와 폼이 조합된 형태를 비교하는 연구는 이루어지지 않았다.

이에 본 연구에서는 실제 의복 착용 시와 비슷한 환경을 구

축하여 보호대 소재로 많이 사용되고 있는 EVA(Ethylene-Vinyl Acetate) 폼과 TPU 재료, 둘의 조합에 따른 열쾌적 변화를 분석하고자 하였다. 이를 위해 각각의 재료별로 온습도 변화를 측정하였고, 보호 패드가 실제 의복으로 제작되면 대부분 커버를 씌우기 때문에 커버 유무에 따른 온습도 변화를 분석하여, 추후 3D 프린팅 제품을 의복에 적용할 때 유용하게 활용할 수 있는 기초 데이터를 제공하고자 하였다.

2. 연구 방법

2.1. 실험 변인 및 재료

2.1.1. 실험 변인

본 연구의 실험 변인은 재료 조합과 샘플 커버 유무이며, 이때 재료 조합 변인은 의복 내 보호대 재료로 많이 사용되고 있는 EVA foam과 3D 프린팅에서 의복 직물로 많이 적용되고 있는 TPU를 조합하여 Table 1에 나타내었다. EVA foam은 두께 1cm인 EVA foam 100%를 의미하고, TPU-10%는 두께 1cm로 모델링된 정육면체를 내부밀도 10%로 TPU 재료를 프린팅한 것이며, TPU-30%는 내부밀도 30%로 TPU 재료를 프린팅한 것을 의미한다. TPU-10%+EVA는 두께 0.5 cm로 모델링한 후 내부밀도 10%로 프린팅한 것과 두께 0.5 cm인 EVA foam을 조합한 것이며, TPU-30%+EVA는 내부밀도 30%로 프린팅 된 두께 0.5 cm재료와 두께 0.5 cm인 EVA foam을 조합한 것이다.

그리고 실험 샘플에 커버를 씌운 경우(with cover)와 커버를 씌우지 않은 경우(without cover)로 나누어서도 실험을 진행하였다. 일반적으로 커버를 씌우지 않고 재료에 따른 특성을 살펴보는 경우가 대부분이나, 3D 프린팅된 제품을 의복에 적용할 때 대부분 커버를 씌운 상태로 착용되기 때문에 커버 유무에 따른 온습도 변화 차이도 살펴보았다.

2.1.2. 3차원 모델링 및 프린팅

본 연구에 사용된 3D 프린팅 샘플은 9×9 cm의 정사각형이고, 높이는 0.5cm와 1cm 두 가지 형태로 Fig. 1(a)와 같이 모델링하였다. 정육면체 모델링은 Geomagic Design X program (3D Systems, Inc., Korea)을 사용하였고, 3D 프린터(CUBICON Single Plus 3DP-310F)와 Cubicreator Program을 활용하여 3차원 프린팅을 수행하였다. 3D 프린터는 FDM(Fused Deposition Modeling) TYPE으로 Slicing software를 이용하여 뷰 모드로 출력경로를 확인한 후 G-code로 저장하여 프린팅하였다. 3D 프린팅 출력 조건으로 토출 온도 범위는 210~240°C, 베드 온

Table 1. Experimental variables

Variable	Name		Variable name		
	Material combination	EVA foam	TPU-10%	TPU-30%	TPU-10%+EVA
With or without cover			Without cover		With cover

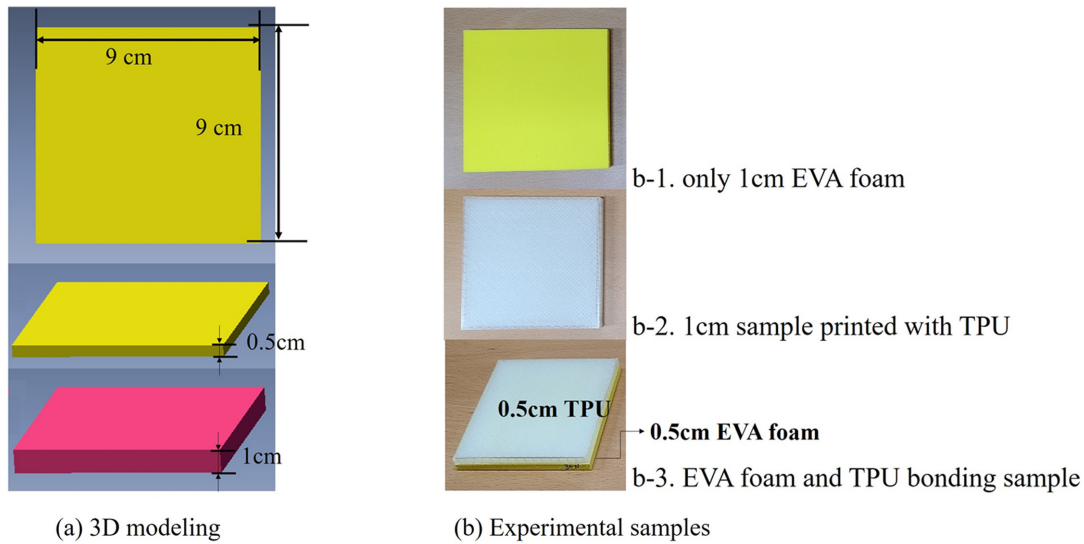


Fig. 1. 3D modeling results and produced experimental samples.

도는 65°C, 출력 속도는 30~60 mm/s로 설정하여 프린팅하였다. 또한 TPU를 의복에 넓은 면적으로 적용할 경우, 유연성을 부여하기 위해 선행연구들에서는(Eom et al., 2019; Hong & Lee, 2020; Park et al., 2019) 내부 밀도를 10~50%로 다양하게 적용한 것을 살펴볼 수 있었다. 이에, 본 연구에서는 주로 사용되고 있는 10%와 30%를 선택하여 실험 샘플을 제작하고 실험을 진행하였다. 프린팅된 결과는 Fig. 1(b-2)에서 보는 바와 같았고, 0.5 cm로 모델링되어 프린팅된 샘플은 Fig. 1(b-3)

과 같이 0.5 cm EVA foam과 순간접착제(cyanoacrylates)로 부착하여 샘플을 제작하였다.

2.1.3. 커버 특성

샘플 커버로 사용된 소재는 의복 내 장비를 부착하거나 보호대 커버로 많이 사용되는 소재로, 나일론 84.9%와 폴리우레탄 15.1%로 이루어진 경편직을 사용하였다. 두께는 0.88 mm였고, 밀도는 웨일(Wale) 방향 153.6코/5 cm, 코스(Course) 방향

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
Tensile strength	KS K 0520:2015, C.R.E., Grab method	240 N	340 N
Tensile elongation	KS K 0520:2015, C.R.E., Grab method	392.7%	326.7%
Tearing strength	KS K 0536:2019, C.R.E., Tongue method	26.4 N	30.8 N
Abrasion resistance	KS K ISO 12947-2:2016, Martindale method(Test piece: knitting, Mass and pressure: 595±7 g, 9 kPa, Final point of cut: One strand of yarn is completely cut)	Over 20,000	
Bursting strength	KS K 0351:2006	No rupture (Test area: 7.3 cm ² , Total pressure: 860 kPa, Rubber film pressure: 500 kPa)	
Organization	visual judgment method	Warp knitting	
Ratio of fibre mixtures	KS K 0210:2018	84.9% nylon, 15.1% polyurethane	
Thickness	KS K ISO 5084:1996	0.88 mm (Applied pressure: 0.1±0.001 kPa, Press area: 2000±20 mm ²)	
Mass	KS K 0514:2017	264.5 g/m ²	
Air permeability	KS K ISO 9237: 1995	390 mm/s (Test area: 20 cm ² , Pressure difference: 100Pa, Air flow direction: from the surface of the test knit to the back side, Number of test: 10)	
Water vapour permeability	KS K 0594: 2021, 6.1 Calcium chloride Method	8,604 g/(m ² ·24h)	
Thermal conductivity	KS K 0466: 2021	0.077 W/(m·K)	

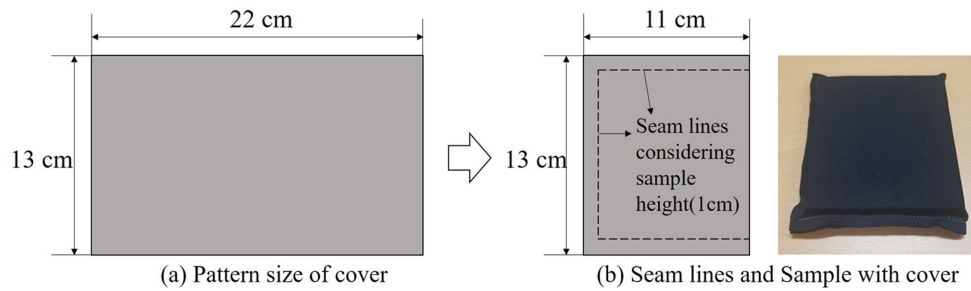


Fig. 2. Cover size of fabric and sewing sample with cover.

256.0코/5 cm이었다. 그 외 사용된 커버의 인장강도, 인장신도, 인열강도, 파열강도, 질량, 공기투과도, 투습도, 열전도율 등 소재에 대한 구체적 특성은 Table 2에 제시하였다.

커버는 직사각형 형태로 22 × 13 cm 사이즈로 재단하고 샘플을 올려놓고 반으로 접은 후, 열린 삼면을 봉제하였고, 시접의 영향을 최소화하기 위해 Fig. 2에서 보는 바와 같이 시접이 외부로 나오도록 하였다.

2.2. 측정 장비 및 데이터 분석

샘플 표면의 온습도 측정에 사용된 장비는 피부온습도 측정기(Thermistor, LT-8AB, Gram, Co., Japan)로 센서의 측정 가능 온도 범위는 0~70°C이며, 측정 습도 범위는 20~80%RH이었다. 그리고 인체 피부를 대신하여 샘플에 지속적인 온도를 제공하기 위해 샘플을 핫 플레이트(hot plate) 위에 올려둔 상태로 실험을 진행하였다. 이때 핫 플레이트는 HP180D(미성과학기기(주), Korea)를 사용하였다. 실험환경은 온도 20 ± 2°C, 습도 40 ± 5%RH에서 진행되었으며, 실험은 커버가 없는 경우(1단계)와 커버가 있는 경우(2단계)로 나누어 진행하였다. 이때, 실험에 사용된 커버를 씌우지 않은 샘플 5종과 커버를 씌운 샘플 5종은 실험이 진행되기 전 48시간 동안 실험 환경과 동일한 환경에 보관하였다. 실험 1단계는 샘플 5종을 36°C로 세팅된 핫 플레이트 위에 무작위순으로 올려놓고 공기 중에 닿아있

는 표면온습도를 3점에서 10분간 2초 간격으로 측정하였다. 2단계는 실제 제품처럼 커버가 씌어있는 샘플 5종의 표면온습도를 측정하였으며, 실험방법은 1단계와 동일하게 진행하였다.

측정된 데이터는 1분 간격으로 표면온습도를 분석하였으며, 1분에서 2분 후, 1분에서 4분 후, 1분에서 6분 후, 1분에서 8분 후, 1분에서 10분 후 변화된 온습도 변화량을 계산하여 변인별 온습도 변화량에 차이가 있는지를 분석하였다. 이때 차이를 알아보기 위해 SPSS 24.0 statistics program을 사용하여 기술통계, *t*-검증, 일원배치분산분석, Duncann 사후분석으로 분석하였고 모든 분석은 유의수준 $p < .05$ 에서 실시하였다.

3. 결과 및 논의

3.1. 커버 유무에 따른 온습도 변화

본 연구에서는 3D 프린팅이나 EVA foam을 의복에 적용할 경우, 커버의 유무에 따라 온습도에 차이가 있는지를 알아보기 위해 시간 변화에 따른 온습도의 변화량을 비교하였으며, 그 결과는 Table 3에 제시하였다.

온도의 경우 커버를 씌우지 않은 경우가 커버를 씌운 경우보다 통계적으로 유의미하게 높게 나타났다($p < .05$, $p < .01$, $p < .001$). 커버를 씌우지 않은 경우, 4분 후 온도가 처음 온도에 비해 1.7°C 높아진 반면, 커버를 씌운 경우에는 1.1°C 높아

Table 3. Comparison of changes in temperature and humidity with or without cover

		Without cover		With cover		<i>t</i>	<i>p</i>
		Mean	SD	Mean	SD		
Temperature (°C)	△4min	1.7	0.4	1.1	0.3	4.517	.000***
	△6min	2.4	0.6	1.7	0.4	3.714	.001**
	△8min	2.8	0.6	2.2	0.5	2.591	.015*
	△10min	3.0	0.7	2.6	0.6	2.304	.029*
Humidity (%RH)	△4min	1.1	1.8	1.7	1.5	-0.875	.389
	△6min	0.0	1.9	1.0	1.8	-1.407	.170
	△8min	-1.0	1.8	0.0	2.2	-1.377	.179
	△10min	-1.5	1.6	-1.0	2.4	-0.723	.476

△4 min : temp. change after 1 to 4 minutes
 △6 min : temp. change after 1 to 6 minutes
 △8 min : temp. change after 1 to 8 minutes
 △10 min : temp. change after 1 to 10 minutes
 * $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$

지는 것을 알 수 있었다. 또한 10분 후에는 온도가 처음 온도에 비해 3.0°C 높아진 반면, 커버를 씌운 경우는 2.6°C 높아지는 것을 알 수 있었다. 즉, 시간이 지남에 따라 발열판(36.0°C)의 온도가 재료표면 위로 전달이 되기는 하였으나, 커버가 씌어진 경우는 전달 속도가 느려 온도변화가 작음을 알 수 있었다.

반면 습도의 경우에는 커버 유무에 따라 통계적인 차이를 보이지 않았으나, 전체적인 습도변화를 살펴본 결과, 4분 후 습도가 1.1%RH와 1.7%RH 증가하였고, 그 후 시간이 지남에 따라 습도변화량이 감소함을 알 수 있었다. 특히 커버를 씌우지 않은 경우에는 10분 후 습도가 처음보다 1.5%RH 감소하였고, 커버를 씌운 경우에는 1.0%RH 감소하게 됨을 알 수 있었다. 따라서 커버 유무가 온도와 습도변화에 영향을 준 것으로 생각되며, 커버 유무에 따른 온습도 변화를 보다 구체적으로 살펴보기 위해 커버를 씌우지 않은 상태와 커버를 씌운 상태로 분리하여 각각의 재료조합별 온도와 습도변화를 살펴보았다.

3.2. 재료조합에 따른 온도변화

3.2.1. 커버를 씌우지 않은 상태의 재료조합별 온도변화

재료조합별 시간에 따른 온도변화를 커버가 없는 경우와 커버가 있는 경우로 나누어 살펴보았다. 그 결과 커버가 없을 시 온도와 온도변화량은 Fig. 3과 Table 4와 같았고, 커버가 있을 시 온도와 온도변화량은 Fig. 4와 Table 5와 같았다. 구체적으로 살펴보면, 커버를 씌우지 않은 상태로 재료조합에 따른 온도변화를 분석한 결과(Fig. 3), EVA 폼으로만 이루어진 재료는 처음 4분 정도까지 증가하다 그 후 온도변화가 매우 적은 것을 관찰할 수 있었다. 또한 TPU로만 이루어진 TPU-10%과 TPU-30%은 처음 4~5분 동안 온도가 급격히 증가하였고, 그 후에도 온도가 점차적으로 증가하여 최종 10분 후에 각각 3.4°C(23.9°C에서 27.3°C), 3.8°C(23.6°C에서 27.4°C) 증가하였다. EVA 폼과 TPU가 조합된 TPU-10%+EVA와 TPU-30%+

EVA 재료도 10분 후 각각 3.2°C, 2.7°C씩 증가하였는데, TPU로만 이루어진 재료의 경우 처음 4~5분 동안의 온도변화가 큰 반면, EVA폼과 TPU가 조합된 경우에는 점차적으로 온도변화가 이루어진 것으로 나타났다.

또한 Fig. 3에서 살펴보면 재료조합에 따라 재료 자체가 가지고 있는 초반의 온도가 다름을 알 수 있었다. 따라서 재료 자체의 온도 영향을 배제하기 위해 시간에 따른 온도변화량을 계산하였으며, 그 값으로 재료별 일원배치분산분석을 실시하여 재료별 온도 변화량을 살펴보았다. 그 결과 Table 4와 같이 2분 후, 4분 후, 6분 후, 8분 후, 10분 후 온도변화량 분석 시 재료에 따라 통계적으로 유의미한 차이가 나타났다($p < .01$, $p < .001$).

구체적으로 살펴보면, 2분 후에는 TPU-10%가 0.92°C로 가장 온도변화가 크게 나타났으며($p < .001$), 4분 후에는 TPU-10%와 TPU-30%가 각각 2.26°C, 1.92°C로 온도변화가 가장 크게 나타났다($p < .001$). 또한 6분 후, 8분 후에는 TPU-10%와 TPU-30%의 온도변화가 가장 크게 나타난 반면, EVA 폼의 온도변화가 가장 작게 나타났다($p < .001$, $p < .01$). 10분 후에는 TPU-30%가 3.76°C로 온도변화 가장 크게 나타났고, EVA 폼은 1.94°C로 온도변화가 가장 작게 나타났다($p < .01$). 즉, TPU로만 이루어진 경우 온도전달이 가장 잘 되는 것으로 파악되었고, 그 다음은 TPU와 EVA foam이 조합된 것이 온도전달이 잘되었으며, EVA 폼만으로 이루어진 것이 온도전달이 가장 잘 안 되는 것으로 나타났다. 특히 이러한 경향성은 시간이 지남에 따라 더욱 뚜렷하게 나타나는 것을 알 수 있었다. 선행연구 조사 결과, TPU 재료의 열전도율(KS K 0466)은 0.21~0.22W/(m·K)이었으며(Fei et al., 2020; Zhou et al., 2021; Wondu et al., 2021), EVA 폼의 열전도율은 0.030~0.046W/(m·K)로 나타났다(Jeong et al., 2009). 따라서 열전도율이 높은 TPU의 온도변화가 가장 크게 나타났고, 열전도율이 가장 낮은

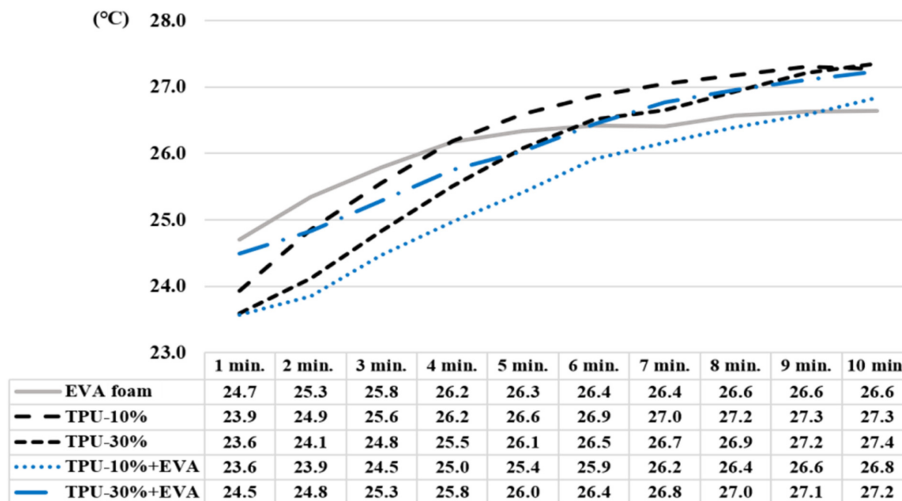


Fig. 3. Temperature over time depending on the material without cover.

Table 4. One-way ANOVA Result of temperature change depending on the material without cover

(unit: °C)

		EVA foam	TPU-10%	TPU-30%	TPU-10%+EVA	TPU-30%+EVA	F
△2min	Mean	0.64 ^b	0.92 ^a	0.52 ^{bc}	0.28 ^d	0.34 ^{cd}	16.725 ^{***}
	SD	0.08	0.09	0.15	0.04	0.15	
△4min	Mean	1.47 ^b	2.26 ^a	1.92 ^a	1.41 ^b	1.26 ^b	14.903 ^{***}
	SD	0.02	0.15	0.10	0.15	0.34	
△6min	Mean	1.71 ^c	2.94 ^a	2.91 ^a	2.35 ^b	1.95 ^{bc}	13.412 ^{***}
	SD	0.18	0.19	0.09	0.26	0.45	
△8min	Mean	1.87 ^c	3.26 ^a	3.34 ^a	2.83 ^{ab}	2.46 ^{bc}	10.014 ^{**}
	SD	0.12	0.19	0.26	0.38	0.54	
△10min	Mean	1.94 ^c	3.35 ^{ab}	3.76 ^a	3.28 ^{ab}	2.74 ^b	9.925 ^{**}
	SD	0.26	0.32	0.30	0.34	0.61	

△A min: temp. change after 1 to A minutes

p* < .01, *p* < .001

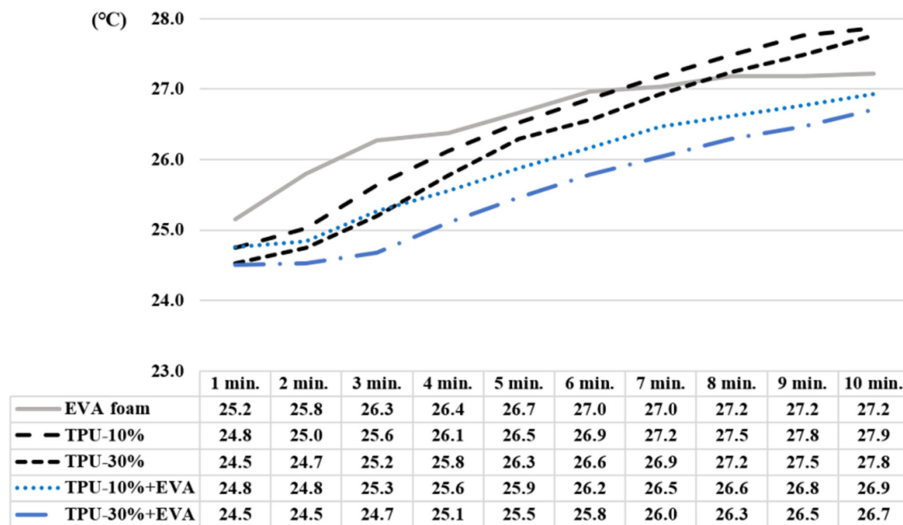


Fig. 4. Temperature over time depending on the material without cover.

EVA 폼의 온도변화가 가장 작게 나타나는 것을 알 수 있었다. 또한 TPU와 EVA 폼 조합의 경우 중간 정도의 온도변화를 보였으므로 이러한 샘플들의 온도변화는 재료의 열전도율과 밀접한 관련이 있는 것으로 사료된다.

3.2.2. 커버를 씌운 상태의 재료조합별 온도변화

5종 재료 모두 커버를 씌운 상태에서 시간 경과에 따른 온도변화를 분석한 결과는 Fig. 4와 같다. EVA 폼으로만 이루어진 재료는 처음 3분 동안 온도가 1.1°C 증가하였고 그 후 온도변화가 점차적으로 이루어져 10분 후에는 2.0°C 증가한 것을 관찰할 수 있었다. 이러한 결과는 커버를 씌우지 않은 경우에서 나타난 온도변화와 유사하였다. 반면 TPU로만 이루어진 TPU-10%과 TPU-30%는 온도변화가 2분 후부터 급격한 기울기로 증가하여 10분 동안 각각 3.1°C(24.8°C에서 27.9°C), 3.3°C(24.5°C에서 27.8°C) 증가하는 것을 알 수 있었다. TPU와 EVA 폼(foam)이 조합된 TPU-10%+EVA와 TPU-30%+EVA

의 경우에도 2~3분 후부터 온도변화가 나타났으며, 그 후 10분 동안 점차적으로 각각 2.1°C(24.8°C에서 26.9°C), 2.2°C(24.5°C에서 26.7°C) 증가함을 알 수 있었다. 즉, TPU로만 이루어진 재료의 표면온도가 가장 크게 증가하였고, 그 다음 EVA 폼과 TPU의 조합, EVA 폼으로만 이루어진 재료 순으로 표면온도가 증가하였는데 이러한 결과는 커버를 씌우지 않은 경우와 유사한 경향을 보였다. 그러나 커버를 씌우지 않은 경우에는 1-2분 후 바로 온도가 증가하는 경향을 보인 반면, 커버를 씌운 경우에는 2~3분이 지난 후에나 온도가 증가하기 시작하는 것을 관찰할 수 있었다. 또한 커버가 없는 경우에는 초반의 온도가 재료에 따라 매우 달랐으나, 커버가 있는 경우에는 EVA 폼을 제외하고는 1분 후의 온도가 비슷한 것을 알 수 있었다. 따라서 1 cm 두께의 재료별 온도가 외부로 배출되는 변화를 관찰할 경우에는 3~4분이 지난 후의 온도를 주의 깊게 관찰하는 것이 좋을 것으로 생각된다.

커버를 씌운 경우에도 재료 고유의 특성에 따라 차이가 발

Table 5. One-way ANOVA Result of temperature change depending on the material with cover

(unit: °C)

		EVA foam	TPU-10%	TPU-30%	TPU-10%+EVA	TPU-30%+EVA	F
△2min	Mean	0.65 ^a	0.27 ^b	0.21 ^{b,c}	0.08 ^{c,d}	0.02 ^d	26.977 ^{***}
	SD	0.07	0.14	0.08	0.01	0.04	
△4min	Mean	1.23 ^a	1.37 ^a	1.24 ^a	0.80 ^b	0.61 ^b	19.021 ^{***}
	SD	0.09	0.13	0.17	0.11	0.13	
△6min	Mean	1.81 ^a	2.11 ^a	2.03 ^a	1.40 ^b	1.28 ^b	12.127 ^{**}
	SD	0.12	0.19	0.26	0.15	0.17	
△8min	Mean	2.03 ^b	2.74 ^a	2.71 ^a	1.86 ^b	1.79 ^b	12.526 ^{**}
	SD	0.15	0.16	0.34	0.16	0.26	
△10min	Mean	2.07 ^b	3.12 ^a	3.23 ^a	2.17 ^b	2.22 ^b	14.519 ^{***}
	SD	0.18	0.22	0.36	0.19	0.28	

△A min: Temp. change after 1 to A minutes

** $p < .01$, *** $p < .001$

생하는 초반의 온도 영향을 배제하기 위해, 시간에 따른 온도 변화량을 계산하였고, 일원배치분산분석을 실시하여 재료별 온도변화량을 관찰하였다. 그 결과 Table 5와 같이 2분 후, 4분 후, 6분 후, 8분 후, 10분 후 온도변화량이 재료에 따라 통계적으로 차이가 나타남을 알 수 있었다($p < .01$, $p < .001$).

커버를 씌운 경우, 초반 2분 후 EVA 폼의 온도변화가 0.65°C로 가장 크게 나타났으며($p < .001$), 4분 후, 6분 후에는 EVA 폼, TPU-10%, TPU-30%가 각각 1.23°C(또는 1.81°C), 1.37°C(또는 2.11°C), 1.24°C(또는 2.03°C)로 온도변화가 가장 크게 나타났다($p < .001$). 반면 8분 후, 10분 후에는 TPU-10%와 TPU-30%의 온도변화가 각각 2.74°C(또는 3.12°C), 2.71°C(또는 3.23°C)로 가장 크게 나타났다($p < .001$, $p < .01$). 즉, TPU로만 이루어진 경우에는 커버가 없는 경우와 동일하게 온도전달이 가장 잘 되는 것으로 파악되었다. 그러나 커버가 없는 경우에는 EVA 폼만으로 이루어진 것이 온도전달이 가장 잘 안 되었으나, 커버가 있는 경우에는 TPU와 EVA 폼이 조합된 것과 EVA 폼만으로 이루어진 것 모두 온도전달이 잘 안 되는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 재료의 열전도율과 관련이 있을 것으로 생각되는데, KS K 0466 방법으로 측정된 커버의 열전도율은 0.077W/(m·K)로 EVA 폼(0.030~0.046W/(m·K))보다는 높고 TPU 재료보다(0.21~0.22W/(m·K))는 낮은 값을 나타내었다. 이렇게 TPU보다 낮은 열전도율을 갖는 커버가 샘플에 씌워지면 10분 후 TPU-10%의 온도변화량은 3.35°C에서 3.12°C로, TPU-30%의 온도변화량은 3.76°C에서 3.23°C로 나타나, 핫플레이트의 열이 샘플 표면으로 적게 전달된 것을 알 수 있었다. 반면 EVA 폼의 경우 샘플보다 열전도율이 높은 커버가 씌어지면서 10분 후 온도변화량이 1.94°C에서 2.07°C이 되었다. EVA 폼과 TPU가 결합된 경우에는 커버를 씌었을 때 10분 후 샘플 표면의 온도변화량이 3.27°C에서 2.17°C(TPU-10%+EVA)로, 2.74°C에서 2.22°C(TPU-30%+EVA)로 낮아지는 것을 알 수 있었다. 즉, 커버유무에 따라 재료별 온도변화에 차이가 나타나는 것은 커버의 열전도율과 관련이 큰 것으로 보여

진다. 따라서, 실제 의복에 사용되는 3D 프린팅이나 패드의 열 쾌적성을 예측하기 위해서는 실제 제품에 사용되는 커버가 씌어진 상태에서의 측정이 중요한 것으로 생각된다. 또한 커버의 열전도도의 영향을 많이 받을 것으로 생각되므로 커버 소재 선정 시 주의를 기울이는 것이 필요할 것으로 사료된다.

3.3. 재료조합에 따른 습도변화

3.3.1. 커버를 씌우지 않은 상태의 재료조합별 습도변화

재료조합에 따라 변화하는 습도변화를 커버가 없는 경우와 커버가 있는 경우로 나누어 10분간 살펴보았다. 커버가 없을 시, 시간 경과에 따라 변화하는 습도와 습도변화량을 분석한 결과는 Fig. 5와 Table 6과 같았다. 재료조합별로 시간에 따른 표면층의 습도를 살펴본 결과, EVA 폼은 표면층 습도가 점차적으로 낮아졌으나 TPU 소재가 포함된 것은 초반 2~3분간 표면층으로 습도가 전달되어 습도가 증가하다 감소하는 것을 관찰할 수 있었다.

또한, 재료별 초기 습도가 모두 다르기 때문에 시간 변화에 따른 습도변화량을 구한 후 일원배치분산분석을 실시하였다(Table 6). 그 결과 소재 종류에 따라 습도변화량에 차이가 나타나는 것을 알 수 있었다($p < .01$).

초반 2분 후에는 밀도 30%로 된 TPU소재(TPU-30%)의 습도가 2.12%RH 증가한 반면 EVA foam의 습도는 처음과 거의 같게 나타났다($p < .01$). 또한 4분 후 TPU-30%의 습도는 2.79%RH 증가하였고, TPU-10%와 EVA 폼이 혼합된 소재는 습도가 2.61%RH 증가하는 등 대체적으로 4분 정도 경과 후 소재 표면습도가 가장 높게 나타났다. 그 후 시간이 지남에 따라 표면습도는 감소하기 시작하였으며, 나중에는 처음 습도보다 낮아짐을 알 수 있었다. 또한 Duncan 사후검증을 통해 결과를 살펴본 결과 6분이 지난 후부터 TPU-30%, TPU-10%+EVA, TPU-30%+EVA는 표면습도가 증가하거나 처음과 차이가 거의 없었던 반면, EVA 폼(foam)과 TPU-10%는 표면습도가 감소하는 것을 확인할 수 있었다($p < .01$). 이를 통해 재료별

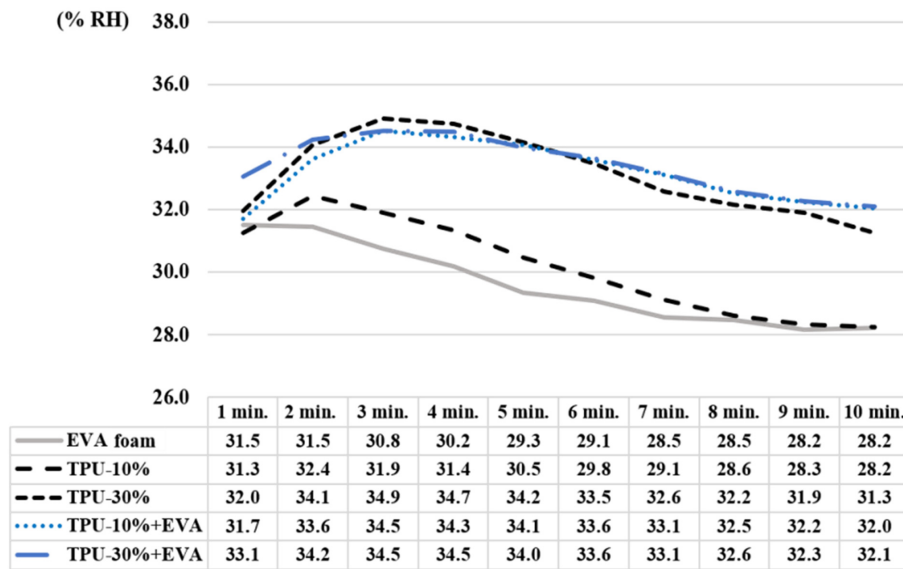


Fig. 5. Humidity over time depending on the material without cover.

Table 6. One-way ANOVA Result of humidity depending on the material without cover (unit: %RH)

		EVA foam	TPU-10%	TPU-30%	TPU-10%+EVA	TPU-30%+EVA	F
△2min	Mean	-0.04 ^c	1.17 ^b	2.12 ^a	1.89 ^{a,b}	1.17 ^b	9.915 ^{**}
	SD	0.26	0.29	0.48	0.81	0.19	
△4min	Mean	-1.30 ^c	0.10 ^{b,c}	2.79 ^a	2.61 ^a	1.43 ^{a,b}	9.865 ^{**}
	SD	0.37	0.78	1.12	1.57	0.36	
△6min	Mean	-2.41 ^b	-1.44 ^b	1.51 ^a	1.89 ^a	0.58 ^a	12.034 ^{**}
	SD	0.47	0.49	1.03	1.66	0.32	
△8min	Mean	-3.04 ^b	-2.63 ^b	0.21 ^a	0.81 ^a	-0.50 ^a	11.764 ^{**}
	SD	0.54	0.41	0.55	1.71	0.32	
△10min	Mean	-3.28 ^b	-3.01 ^b	-0.70 ^a	0.33 ^a	-0.97 ^a	9.487 ^{**}
	SD	0.67	0.14	0.46	1.68	0.56	

△A min: Humidity change after 1 to A minutes
 ***p* < .01

함유하고 있는 습도의 정도가 다르기는 하지만 TPU가 포함된 재료의 경우 36°C의 가운데으로도 샘플표면으로 수분이 이동하는 것을 관찰할 수 있었다. 반면 EVA 폼의 경우에는 샘플표면으로의 수분이동 현상을 볼 수 없었고 표면의 습도가 점차 낮아지는 것으로 보아 표면에 함유하고 있는 수분만이 증발된 것으로 생각된다. 따라서 열쾌적성이 요구되는 땀이 많이 나는 스포츠의복을 개발할 경우 수분전달이 잘 되지 않는 EVA 폼보다는 TPU나 TPU와 EVA 폼이 결합된 형태를 사용하는 것이 착용쾌적성을 높이는 데 도움이 될 것이라 생각된다. 이러한 결과는 재료의 투습도와 관련이 있을 것으로 생각되는데 선행연구 조사 결과 TPU의 투습도(Kim et al., 2006)는 10,139~10,428 g/(m²·24h)으로 높은 편이었으며, EVA 폼의 투습도(Lou et al., 2010; Kapur et al., 2013)는 27.6~33.0 g/(m²·24h)으로 매우 낮게 나타났다. 따라서 의복에 사용되는 패드의 재료를 선정할 경우 재료의 투습도 역시 고려해야 하는 매우 중요한 요소

임을 알 수 있었다.

3.3.2. 커버를 씌운 상태의 재료조합별 습도변화

커버를 씌운 상태에서의 습도와 습도변화량을 분석한 결과는 Fig. 6과 Table 7에 나타내었다. 재료조합에 따른 표면층의 습도를 살펴본 결과, EVA 폼은 2~3분 후부터 표면층 습도가 점차적으로 낮아지는 것을 관찰할 수 있었다. 반면 TPU소재로만 이루어진 경우에는 3~4분 후까지 표면층 습도가 증가하다가 급격히 감소한 반면, TPU소재와 EVA 폼이 조합된 경우에는 5분 정도까지 점차적으로 증가하다가 완만한 기울기로 감소하는 것을 알 수 있었다.

커버를 씌운 경우에도 소재별 초기 습도가 모두 다르기 때문에 시간 변화에 따른 습도변화량을 구한 후 일원배치분산분석을 실시하였고(Table 7), 그 결과 소재 종류에 따라 습도변화량에 차이가 나타나는 것을 알 수 있었다(*p* < .01, *p* < .001).

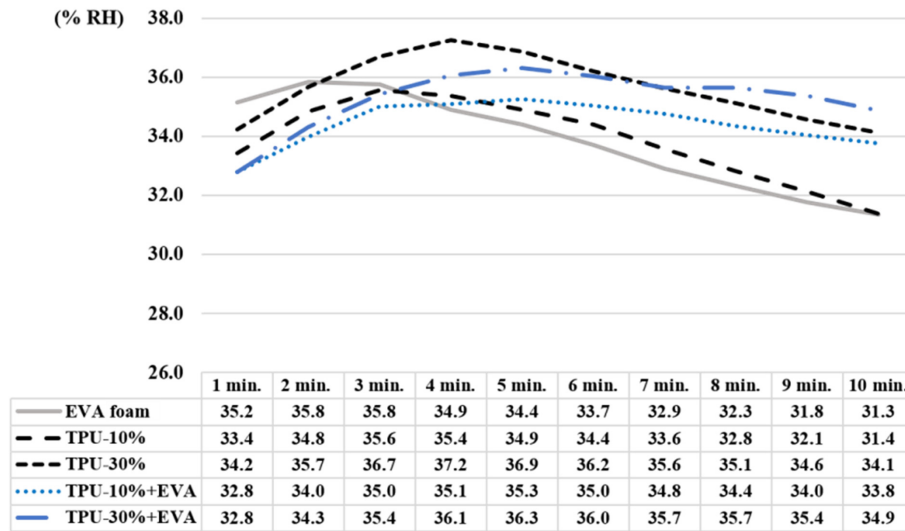


Fig. 6. Humidity over time depending on the material with cover.

Table 7. One-way ANOVA Result of humidity depending on the material with cover

(unit: %RH)

		EVA foam	TPU-10%	TPU-30%	TPU-10%+EVA	TPU-30%+EVA	F
△2min	Mean	-0.01	1.05	1.21	0.78	1.21	1.858
	SD	0.90	0.56	0.35	0.72	0.58	
△4min	Mean	-0.95 ^c	1.58 ^b	2.78 ^a	1.90 ^b	2.95 ^a	31.686 ^{***}
	SD	0.50	0.51	0.45	0.64	0.20	
△6min	Mean	-2.13 ^d	0.60 ^c	1.74 ^b	1.82 ^b	2.93 ^a	39.437 ^{***}
	SD	0.41	0.45	0.79	0.65	0.08	
△8min	Mean	-3.52 ^d	-0.98 ^c	0.67 ^b	1.15 ^b	2.56 ^a	43.463 ^{***}
	SD	0.54	0.52	0.91	0.67	0.19	
△10min	Mean	-4.50 ^d	-2.42 ^c	-0.33 ^b	0.54 ^b	1.76 ^a	41.525 ^{***}
	SD	0.72	0.58	0.96	0.66	0.14	

△A min: Humidity change after 1 to A minutes

** $p < .01$, *** $p < .001$

커버를 씌운 경우, 4분이 지난 후 재료별 습도 변화량에 통계적 차이가 나타났다. 특히 EVA 폼의 경우에는 다른 소재와는 다르게 시간이 지남에 따라 습도가 유의미한 차이를 보이며 감소하였다. 좀 더 구체적으로 Duncan 사후검증 결과를 살펴보면, 4분 후 밀도 30%로 된 TPU소재(TPU-30%)와 TPU-30%와 EVA 폼이 혼합된 소재(TPU-30%+EVA)의 습도가 2.78%RH, 2.95%RH 증가한 반면 EVA폼으로만 된 소재는 습도가 0.95%RH 감소함을 알 수 있었다($p < .001$). 6분 경과 후부터 TPU-30%+EVA로 이루어진 소재가 통계적으로 유의미하게 가장 큰 변화를 보인 반면, EVA 폼으로 된 소재는 습도가 점차 크게 감소함을 알 수 있었다($p < .01$). 특히 10분 후 EVA 폼은 4.5%RH 감소하여 다른 소재에 비해 습도 감소량이 매우 큰 것으로 나타났다. 이러한 경향성은 투습도와 관련성이 큰 것으로 생각되는데 본 연구에서 사용된 커버의 투습도는 8,604g/(m²·24h)으로 TPU의 투습도(10,139~10,428g/(m²·24h))보

다는 작고 EVA 폼의 투습도(27.6~33.0 g/(m²·24h)) 보다는 큰 결과를 보였다. 따라서 샘플에 커버를 씌움으로써 각 재료별 나타났던 차이가 4분이 경과된 시점부터 나타나기 시작하였다. 또한 커버유무에 따라 습도 변화량에 다른 경향성을 관찰할 수 있었다. 따라서 3D 프린팅된 소재나 EVA폼이 들어가는 의복을 개발하거나 착용할 경우 완성된 제품의 커버유무를 확인한 후, 각각에 대해 실험하는 것이 매우 중요할 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 3D 프린팅을 활용한 제품을 의복에 적용하여 실제 착용 시 의복내 온습도에 어떠한 영향을 미치는지를 알아보고자 기초 연구를 실시하였다. 이를 위해 3D 프린팅이 조합된 재료 5종(EVA foam, TPU 밀도 10%, TPU 밀도 30%, EVA foam+TPU 밀도 10%, EVA foam+TPU 밀도 30%)에 따라

온습도 차이가 있는지를 살펴보았으며, 의복에 적용 시 커버가 씌어진 경우가 많기 때문에 커버가 있는 경우와 커버가 없는 경우로 나누어 커버 유무에 따른 온습도의 변화를 살펴보았다. 이에 대한 연구 결과는 다음과 같다.

첫째, 커버의 유무에 따라 시간 변화에 따른 온습도의 변화량을 비교한 결과 온도의 경우 통계적으로 유의미한 차이를 보였으며, 커버를 씌우지 않은 경우가 커버를 씌운 경우보다 전체적으로 온도변화가 높아지는 것을 알 수 있었다. 즉, 시간이 지남에 따라 발열판(36.0°C)의 온도가 재료의 표면 위로 전달이 되기는 하였으나, 커버가 씌어진 경우는 전달 속도가 느려 온도변화가 작음을 알 수 있었다. 반면 습도의 경우에는 커버 유무에 따라 통계적인 차이를 보이지 않았다.

둘째, 재료조합별 시간에 따른 온도와 온도변화량을 커버가 없는 경우와 커버가 있는 경우로 나누어 살펴보았다. 커버가 없을 시 EVA 폼으로만 이루어진 재료는 처음 4분 정도까지 표면온도가 증가하다 그 이후 온도변화가 매우 적게 나타났고, TPU로만 이루어진 TPU-10%과 TPU-30%는 처음 4-5분 동안 온도가 급격히 증가하다가 그 이후에는 점차적으로 증가하였다. 반면 EVA 폼과 TPU가 조합된 경우에는 점차적으로 온도변화가 이루어진 것으로 나타났다. 즉, TPU로만 이루어진 경우 온도전달이 가장 잘 되는 것으로 파악되었고, 그 다음은 TPU와 EVA 폼이 조합된 것이 온도전달이 잘되었으며, EVA 폼만으로 이루어진 것이 온도전달이 가장 잘 안 되는 것으로 나타났다. 특히 이러한 경향성은 시간이 지남에 따라 뚜렷하게 나타나는 것을 알 수 있었다. 커버가 있는 경우에도 재료에 따라 유사한 경향성을 보였으나 커버를 씌우지 않은 경우에는 1-2분 후 바로 표면온도가 증가한 반면, 커버를 씌운 경우에는 2-3분이 지난 후에 표면온도가 증가하기 시작하는 것을 관찰할 수 있었다. 즉 커버가 있는 경우 온도전달이 더딘 것을 관찰할 수 있었다. 이러한 온도변화는 재료의 열전도도와 관련이 높은 것으로 생각되므로 활동이 많은 의복에 사용되는 폼재료나 커버를 선정할 경우 열전도율도 함께 고려하는 것이 필요할 것으로 생각된다. 또한 피부에 닿은 순간의 촉감이나 착용감 평가 시에는 커버유무에 따라 그 결과가 매우 달라질 수 있다. 따라서, 실제 제품화를 하고자 할 때, 제품에 커버가 있는 경우에는 반드시 커버가 있는 상태로 실험을 진행하고 그 결과를 살펴보는 것이 실제 제품을 착용했을 때의 인체 변화 결과를 예상하는데 도움이 될 것으로 생각된다.

셋째, 재료조합별 시간에 따른 습도와 습도변화량을 커버가 없는 경우와 커버가 있는 경우로 나누어 살펴보았다. 그 결과 커버가 없는 경우 EVA 폼으로만 이루어진 소재는 시간이 지남에 따라 표면층 습도가 점차적으로 낮아졌으나 TPU소재가 포함된 것은 초반 2-3분간 표면층으로 습도가 전달되어 습도가 증가하다 감소하는 것을 관찰할 수 있었다. 반면 커버가 씌어진 경우에는 TPU소재로만 이루어진 경우 3-4분 후까지 표면층 습도가 증가하다가 급격히 감소한 반면 TPU소재와 EVA 폼이 섞인 경우에는 5분 정도까지 점차적으로 증가하다가 완

만한 기울기로 감소하는 것을 알 수 있었다. 즉, 커버를 씌우지 않은 경우 표면습도에서 급격한 감소를 보인 반면 커버를 씌운 경우에는 점차적으로 증가하였다가 감소하는 것을 알 수 있었다. 이러한 습도변화는 재료의 투습도와 관련이 있는 것으로 생각되기 때문에 땀이 발생하는 스포츠웨어의 경우 투습도가 매우 낮은 EVA 폼보다는 투습도가 우수한 TPU재료를 적용하는 것이 좋을 것으로 생각되며, 커버소재 선정 시에도 투습도가 우수한 소재를 선정하는 것이 중요하다. 그러나 습도의 경우 일정하게 습도가 제공되는 환경이 아니라 재료 자체가 가지고 있는 습도가 발열에 의해 표면으로 전달되는 시스템이었다. 그로 인해 실험 후 4분 정도까지는 재료 자체가 가지고 있는 습도들이 표면으로 전달되어 습도변화량이 가장 크게 나타난 것으로 생각된다. 또한 시간이 지남에 따라 재료 자체의 습도가 낮아지면서 표면의 습도들도 함께 낮아져 나중에는 처음 습도보다 더 낮아지는 결과가 나온 것으로 예상된다.

이러한 결과는 습도가 낮은 환경에서 36°C의 가온으로 변화되는 재료의 수분전달 시스템을 예측하는데 활용할 수 있을 것으로 생각된다. 또한, 3D 프린팅으로 만들어진 제품을 개발할 경우 점차적인 습도의 변화가 필요한 경우에는 커버를 씌워 급격한 변화를 줄여주는 것이 좋을 것으로 생각되며, 짧은 시간에 습도의 변화를 주는 것이 필요한 경우에는 커버를 씌우지 않는 것이 좋은 방법이라고 생각한다. 또한 커버가 필요한 경우에는 메쉬와 같은 소재를 사용하는 것이 쾌적성을 증대시키는 효과적인 방법이 될 수 있을 것이다. 이러한 결과는 커버를 씌운 소재에 따라 달라질 수 있으므로 추후 다양한 소재를 적용하여 소재에 따른 온습도 변화를 연구하는 것이 필요할 것으로 생각된다.

그러나 본 연구에서는 지속적인 습도 제공이 이루어지지 않는 상태에서 소재가 가지고 있는 습도의 변화만으로 그 경향성을 살펴보았기 때문에 좀 더 체계적인 의복내 열쾌적 메커니즘을 알아보기 위해서는 지속적인 습도를 제공했을 때의 온습도 변화를 측정하는 후속 연구가 추가적으로 이루어져야 할 것으로 생각된다. 실제 의복 착용 시와 비슷한 환경에서 재료와 소재의 조합에 따른 복합적인 이러한 연구 결과는 3D 프린팅이 적용된 기능성 의복을 개발할 때 활용할 수 있으며, 나아가 3D 프린팅 의복설계와 소재 선정을 위한 열쾌적 메커니즘을 개발하는 기초자료로 활용 가능할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2020R111A3073843).

References

- 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
- Chun, J. (2017). Development of wearable fashion prototypes using entry-level 3D printers. *Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles*, 41(3), 468-486. doi:10.5850/JKSCT.2017.41.3.468
- Eom, R. I., Lee, H., & Lee, Y. (2019). Evaluation of thermal properties of 3D spacer technical materials in cold environments using 3D printing technology. *Polymers*, 11(9), 1438. doi:10.3390/polym11091438
- 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
- 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. H., Oh, T. H., & Kim, S. H. (2017). Effects of heat treatment temperature on various properties of thermoplastic polyurethane composite fabrics. *Textile Science and Engineering*, 54(1), 22-27. doi:10.12772/TSE.2017.54.022
- 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
- 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
- Kapur, J., Norwood, J. L., & Cwalina, C. D. (2013, June). Determination of moisture ingress rate through photovoltaic encapsulants. In *2013 IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), USA*, pp. 3020-3023
- Kim, S. G., & Kim, H. R. (2018). The recent tendency of fashion textiles by 3D printing. *Fashion & Textile Research Journal*, 20(2), 117-127. doi:10.5805/SFTI.2018.20.2.117
- Kim, S. J., Chae, C. S., Choe, U. H., Kim, D. H., & Kim, E. J. (2006). Analysis of the properties of domestic and foreign laminated high-performance moisture-permeable and waterproof fabrics. *Proceedings of the Korean Society of Dyers and Finishers Conference, Korea*, pp. 199-202
- Kweon, S. A., Lee, J. M., & Choi, J. M. (2003). *의복과 인체의 환경 적응 [Clothing and the human body's adaptation to the environment]*. Seoul: Kyohakyungusa Publisher
- 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. doi:10.1155/2019/5838361
- Lee, S. (2018). Evaluation of mechanical properties and washability of 3D printed lace/voil composite fabrics manufactured by FDM 3D printing technology. *Fashion & Textile Research Journal*, 20(3), 353-359. doi:10.5805/SFTI.2018.20.3.353
- Lou, C. W., Lu, C. T., Lin, C. M., Lee, C. H., Chao, C. Y., & Lin, J. H. (2010). Process technology and performance evaluation of functional knee pad. *Fibers and Polymers*, 11(1), 136-141. doi:10.1007/s12221-010-0136-3
- Mi, H. Y., Salick, M. R., Jing, X., Jacques, B. R., Crone, W. C., Peng, X. F., & Turng, L. S. (2013). Characterization of thermoplastic polyurethane/poly(lactic acid)(TPU/PLA) tissue engineering scaffolds fabricated by microcellular injection molding. *Materials Science and Engineering: C*, 33(8), 4767-4776. doi:10.1016/j.msec.2013.07.037
- 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
- Pei, E., Shen, J., & Watling, J. (2015). Direct 3D printing of polymers onto textiles - Experimental studies and applications. *Rapid Prototyping Journal*. 21(5), 556-571. doi:10.1108/RPJ-09-2014-0126
- Shen, F., Yuan, S., Guo, Y., Zhao, B., Bai, J., Qwamizadeh, M., Chua, C. K., Wei, J., & Zhou, K. (2016). Energy absorption of thermoplastic polyurethane lattice structures via 3D printing - Modeling and prediction. *International Journal of Applied Mechanics*, 8(7), 1640006. doi:10.1142/S1758825116400068
- 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
- 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/coatings1102012

(Received October 14, 2021; 1st Revised October 27, 2021; 2nd Revised December 7, 2021; Accepted December 17, 2021)