〔연구논문〕

ISSN 1225-1151 (Print)
ISSN 2234-0793 (Online)
Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles
Vol. 47, No. 2 (2023) p.311~322
https://doi.org/10.5850/JKSCT.2023.47.2.311

여군 전투복 내 관절 부위 보호 패드 개발을 위한 설계 변인 조합에 따른 물성 평가

이옥경 · 이희란* · 김소영** · 이예진***†

충남대학교 생활과학연구소, *금오공과대학교 소재디자인공학과,
**금오공과대학교 신소재연구소, ***충남대학교 의류학과

Evaluation of Physical Properties of Material Combination for Fabricating Protection Pads for Women's Army Combat Uniforms

Okkyung Lee · Heeran Lee* · Soyoung Kim · Yejin Lee***†**

Research Institute of Human Ecology, Chungnam National University
*Dept. of Materials Design Engineering, Kumoh National Institute of Technology
**Advanced Material Research Center, Kumoh National Institute of Technology
***Dept. of Clothing and Textiles, Chungnam National University

Received October 18, 2022; Revised (December 1, 2022; December 28, 2022); Accepted January 17, 2023

Abstract

In this study, the properties of various material combinations were evaluated and an ideal material for fabricating protection pads for women's army combat uniforms was determined. Eight specimens were used for the evaluation: two types of materials, namely thermoplastic polyurethane for 3D printing, T and ethylene-vinyl acetate, E; two infill densities, namely 10%, 10 and 30%, 30; two types of pad designs, i.e., without holes, A and with holes, B; 2×2×2=8 and control E. The tensile strength, flexural strength, impact absorption, and weight of these specimens were evaluated. Results revealed that E was the most flexible material; however, its tensile strength and impact absorption were very low. Protection pads made from T (T-10A, T-10B, T-30A, and T-30B) had excellent tensile strength and impact absorption; however, they had low performance in ease of movement. Alternatively, protection pad with holes and an infill density of 30% produced using a combination of T and E had a high initial tensile modulus and exhibited excellent impact absorption. Moreover, it was flexible and light, which satisfies the standards and conditions required by protection pads. However, if T-E-10A and T-E-30B exhibited low impact absorption, as required, they can be regarded as appropriate materials for protection pads.

Key words: Women's army combat uniform, 3D printing protection pad, Impact absorption performance, Tensile Strength, Flexural Strength; 여군 전투복, 3D 프린팅 보호 패드, 충격흡수 성능, 인장강도, 굴곡강도

I. 서 론

최근 수년간 국내는 인구 감소로 인해 향후 청년 인구 절벽에 따른 병역자원의 급격한 감소가 예상되고 있으며, 복무기간의 단축, 대체복무제 도입 등으로 인해 다양한 국방 현안에 대한 논의가 지속적으로 진행되었다. 이에 국방부는「국방개혁에 관한 법률」과「국방개혁 2.0」에 기반하여 여군 확대를 추진해 왔고, 여

†Corresponding author
E-mail: yejin@cnu.ac.kr

ⓒ 2023, The Korean Society of Clothing and Textiles. All rights reserved.

군 인력 규모는 매우 빠른 속도로 증가하고 있는 추세이다(Kim et al., 2016; Lee, 2022). 즉, 국방부는 2000년대 초기까지 약 1% 정도였던 여군 비율을 2020년에는 7.4%(1만 3891명)로 늘렸으며, 2022년 내에 전체 간부 정원의 8.8%인 1만 7천여 명까지 확대한다고 발표하였다(Ko, 2021; Lee, 2022). 또한, 각개 전투원의 전투력 및 생존 능력을 강화하기 위해 전투원의 생명을 보호하고 부상을 예방할 수 있는 보호용 개인 장비류 및 군복류 개발에 힘을 쏟고 있는 실정이다(S. Y. Kim, 2021). 이와 같이 여군 비율의 확대 및 역할 증대와 군의 총체적 전투력의 유지·발전을 극대화하기 위해 여군복 및 개인 장구류에 대한 관심이 더욱 커지고 있으며, 개선에 대한 필요성이 지속적으로 제기되고 있다.

이중, 전투복은 모든 군장병에게 필수적으로 보급되고, 전투와 군사 관련 교육 및 훈련 시 장교와 사병이 공통으로 착용하며, 다양한 피복류 중 가장 많이 착용하는 아이템이다. 그러므로 전투복은 군복 개선을 위한 의복 체제를 마련하기 위해 우선적으로 개선되어야 하는 대상이었고, 지금까지 다양한 군 피복류 중 전투복에 관한 연구가 타 군 피복류에 비해 활발히 진행되어왔다. 대표적으로 전투복의 착용 실태 분석을 통해 개선 요구사항을 파악한 연구(Kim et al., 2016; Lee et al., 1999), 전투복의 동작 적합성 분석 후 기능적 형태를 모색한 연구(Choi et al., 2003; Kim et al., 1990), 전투복의 생리적 특성을 분석하여 의복내 미세기후 개선을 위한 연구(Chang et al., 1999; Kim & Cho, 2014), 전투복 소재에 관한 연구(Kim, 2019; Kim & Cho, 2014; Park, 2014)가 있으며, 여군 방한복에 대한 연구도 이루어졌다(Han & Han, 2019a; Han & Han, 2019b). 이러한 연구를 통해 전투복 상·하의 착용 방법을 개선하거나, 봉제선과 피부 마찰로 인한 피부 손상을 줄이기 위한 액와 부위와 대퇴내측부위의 솔기선 이동, 하의 맞음새 향상을 위한 허리와 밑단둘레 조절 장치 부착, 마찰 등에 의한 물리적 손상을 최소화하기 위한 무릎 부위 절개 및 여유량 부여, 손목의 척골 방향의 내전 각도 45°를 포함할 수 있는 상의 겉붙임 주머니의 각도 조절 등 다양한 인체공학적 디자인 및 통기성, 흡습성 등 쾌적성 향상을 위한 신소재 개발이 이루어져왔다. 그럼에도 불구하고 여군용 군복 개발을 위한 착용실태 조사 결과(Kim et al., 2016; Lee & Lee, 2022), 여전히 여군은 본인에게 적합한 치수가 없어서 개인 맞춤 수선을 이용하는 경우가 많은 것으로 조사되었고, 활동 용이성, 착탈 용이성, 맞음새 및 치수 적합성 등에 대한 만족도가 낮아 전반적인 개선이 필요한 것으로 나타났다. 특히, 사격 훈련, 수류탄 훈련, 유격 훈련, 각개전투와 같은 군사 훈련을 할 때, 포복, 엎드려 쏴 자세를 취하거나 철조망 통과 시 절단극복, 드러누워 통과 자세 등을 취할 때 인체가 지면과 직접적으로 마찰이 생기면서 전투복이 찢어지는 물리적 손상과 피부 손상이 발생하여 불편함을 겪는 것으로 나타났다. 뿐만 아니라, 선 자세에서 포복 자세나 누운 자세로 이어질 때, 팔꿈치와 엉덩이, 무릎 부위에 직접적으로 강한 충격이 가해져 부상으로 이어지기도 하는 등 어려움을 겪는 것으로 파악되었다. 이러한 문제는 기존에도 존재했고 이를 해결하기 위해 관절 부위에 덧댐 처리를 하는 방안을 모색(Choi et al., 2003; Kim et al., 1990; Lee at al., 1999)하기도 하였으나, 지속적으로 심도 있는 연구가 수행되지는 않는 실정이다. 따라서 현 전투원은 관절 부위가 부상의 위험에 쉽게 노출된 상태에서 강도 있는 군사 훈련에 참여하고 있어, 보다 적극적인 방안 중 하나인 보호 패드 개발이 필요하다. 이때, 보호 패드는 강도와 함께 인체 굴곡에 대응하는 유연성과 충격흡수력의 최적 조건이 갖추어져야 하고, 인체 형상에 따라 제작이 용이해야 한다. 그러나 기존의 거푸집 형태의 금형 방법은 가격이 높고, 사출성형 과정의 제어가 어려운 단점이 있다. 이에 쉽게 3D 형상 제작이 용이한 3D 프린팅 기술을 적용해 새로운 제품을 개발하려는 시도가 여러 분야에서 활성화되고 있다(Kim et al., 2016; Jeong, 2016; Jung, 2014; Song & Geum, 2016). 그 예로 인체 부위를 보호하는 패드 제작 시 3D 프린팅이 활용되어 자전거용 샅보호대, 포수의 다리보호대, 스노보드용 엉덩이보호대, 낙상 보호대 패드 등이 연구되었다(Hong & Lee, 2020; Lee at al., 2015; Park & Lee, 2019; Park, Lee, & Lee, 2018; Park et al., 2019). 그러나 전투 훈련 시 여군을 보호하기 위한 특정 목적에 초점을 맞춘 제품에 3D 프린팅 기술을 적용한 연구는 전무한 실정이다.

그러므로 본 연구에서는 보호 성능을 만족시키면서 동시에 동작편이성과 착용쾌적성이 우수한 보호 패드 개발을 위한 기초 데이터를 확보하고자 하였다. 즉, 전투복에 접목할 수 있도록 보호 패드의 설계 변인을 조합한 후 물성 평가를 통해 최적 조건을 제안하고자 하였다. 이렇게 확보한 기초 데이터는 여군의 관절 부위별 3D 형태와 군사 훈련 동작과 결합하여 보호 패드로 제품화할 때 활용하고자 한다.

II. 연구 방법

1. 실험용 보호 패드 구성

실험을 위한 보호 패드 종류는 <Table 1>에서 보는 바와 같이 총 9종이었다. 먼저, 보호 패드 제작 시 인체 형상을 반영하여 3D 형태가 될 수 있도록 3D 프린팅 소재를 기본으로 하였는데, 현재 TPU(Thermoplastic polyurethane)가 내구성, 변형 및 회복이 우수한 장점으로 대부분 사용되고 있어 이를 선정하였다(Jung & Lee., 2022). 그러나 시중에 판매되고 있는 보호용 제품을 조사한 결과(Lee et al., 2022) 주로 EVA(Ethylene-vinyl acetate) foam이 삽입된 것이 많아 이 소재도 실험용 보호 패드 제작 시 사용하였다. 다음으로 TPU는 3D 프린팅 시 일반적으로 유연성을 부여하기 위해 내부 밀도를 10~50%로 다양하게 적용하고 있어(Hong & Lee, 2020; Lee et al., 2022; Park et al., 2019), 본 연구에서는 10%와 30%를 변인으로 하였다. 마지막으로 보호 패드 장시간 착용으로 인한 열적쾌적성 문제를 해결하기 위해 내부에 정사각형 모양의 구멍 유무(구멍 없는 디자인-A, 5 ㎜×5 ㎜ 사각형 구멍이 3 ㎜ 간격으로 있는 디자인-B)도 변인으로 하였다. 다만, 실험용 보호 패드의 두께는 의복용 보호 패드 두께 변화를 관찰한 결과, 10 ㎜ 이내일 때 기능과 외관을 동시에 충족하기에 적합하다고 언급되어(Part et al., 2018) 10 ㎜로 통제하였다. 따라서 TPU만으로 구성된 실험용 보호 패드는 10 ㎜로 3D 프린팅 출력하였고, EVA foam과 조합하는 것은 TPU를 5 ㎜로 3D 프린팅 출력 후 5 ㎜ EVA foam과 순간접착제(cyanoacrylates)로 부착하여 제작하였다. EVA foam은 시중에서 구매하였고, EVA foam 10 ㎜의 물성도 비교하기 위해 실험용 보호 패드에 추가하였다.

한편, TPU 출력은 Geomagic Design X program(3D Systems, Inc., Korea)을 사용하여 물성 평가 조건에 맞추어 3D 모델링한 후 FDM(Fused Deposition Modeling) TYPE의 3D 프린터(CUBICON Single Plus 3DP-310F)와 Cubicreator 프로그램을 활용하여 수행하였다. 출력 시 필요한 지지대와 바닥 보조물은 Slicing 소프트웨어를 이용하여 자동 생성하였고, 뷰 모드로 출력 경로를 확인한 후 문제가 생기는 부분은 수정하여 프린팅 하였다. 3D 프린팅 출력 조건으로 토출 온도 범위는 210~240℃, 바닥 온도는 65℃, 출력 속도는 30~60 ㎜/s, 조형 냉각 속도는 보통으로 설정하였으며, 보호대의 외벽 두께는 8 ㎜로 지정하였다.

2. 실험용 보호 패드 평가 항목

실험용 보호 패드가 보호성, 동작편의성, 착용쾌적성 측면에서 전투복에 적용할 가능성이 있는가를 살펴보기 위해 인장강도, 굴곡강도, 충격흡수 성능, 무게를 평가하였다.

I) 인장강도

인장강도는 재료의 강도를 표시하는 가장 중요한 척도로써 전투복 접목 보호용 패드는 제작 시 외부 충격을 완화시키기 위해 일정 이상의 강도를 가져야 한

Table 1. Types of experimental protection pads

9 types of experimental pads	TPU 3D printing conditions				EVA foam attach	Sample code
	Infill density		Hole			
	10%	30%	W/O (A)	W (B)		
TPU 10 ㎜-10%-A	●		●		×	T-10A
TPU 10 ㎜-10%-B	●			●	×	T-10B
TPU 10 ㎜-30%-A		●	●		×	T-30A
TPU 10 ㎜-30%-B		●		●	×	T-30B
TPU 5 ㎜+EVA 5 ㎜-10%-A	●		●		○	T-E-10A
TPU 5 ㎜+EVA 5 ㎜-10%-B	●			●	○	T-E-10B
TPU 5 ㎜+EVA 5 ㎜-30%-A		●	●		○	T-E-30A
TPU 5 ㎜+EVA 5 ㎜-30%-B		●		●	○	T-E-30B
EVA 10 ㎜	Purchased as a control experiment pad					E

다. 따라서 인장강도 측정을 통해 인체를 안전하게 보호할 수 있는 성능을 가지고 있는지를 확인하였다. 시험방법은 ASTM D 638 규격에 의하여 진행하였다. 구체적으로 165×19×10 ㎜ 패드의 양 끝을 인장시험기의 물림쇠(Jaw)에 고정시키고, 한쪽의 물림쇠를 500 ㎜/min의 속도로 움직여 실험용 보호 패드를 늘리는데 필요한 힘을 측정하였다.

2) 굴곡강도

굴곡강도는 뻣뻣함과 부드러움의 정도를 나타내는 것으로 유연성을 평가하는데 필요한 중요한 요소이다. 즉, 보호용 패드는 전투복 안에 삽입하고자 하는 것으로 보호 성능 이외에도 착용쾌적성 및 동작편의성을 고려해야 한다. 따라서 굴곡강도 평가를 통해 인체 움직임에 따라 피부가 변형될 때, 패드 또한 부드럽게 변형이 될 수 있는가를 확인하였다. 시험방법은 ASTM D790-99 규격에 준용하여, 127×12.7×10 ㎜ 사이즈의 직사각형 패드를 두 지지대 사이에 장착하고 지지대 사이의 중심에서 1 ㎜/min의 속도로 하중을 가한 후 시편의 바깥쪽 면이 파손되거나 최대 변형이 5.0% 정도에 도달할 때까지 굽혀 이때의 힘을 측정하였다.

3) 충격흡수 성능

보호용 패드에서 가장 중요한 요소는 '외부의 충격을 얼마나 완화시켜 줄 수 있는가'이기 때문에 패드의 충격보호성능 평가를 실시하였다. 그러나 현재 의복과 관련된 충격보호성능 평가는 규격화된 방법이 없어, 의복용 보호 패드 개발을 위한 선행연구(Kang et al., 2009; Park & Lee, 2016; Park, Lee, & Lee, 2018) 방법에 의거하여 진행하였다. 시험 방법은 KOLAS_Universal Impact Testing Machine 기기를 사용하여, 직경 20 ㎜, 질량 30 ㎏ 구 모양의 충격스트라이크를 150 ㎜ 높이에서 낙하시킨 후 충격흡수에너지를 측정하였다. 이때, 패드 크기는 60×60×10 ㎜ 였다. 낙하충격실험을 통해 얻어진 충격에너지(Impact energy, Eimp)와 충격흡수에너지(Impact absorption energy, Eabs)를 이용하여 충격흡수효율(Impact absorption efficiency, eabs)을 <Eq. 1>로 계산하였다.

$$\text{Impact absorption efficiency } (e_{abs}) = \frac{Impact\ absorption(Eabs)}{Impact\ energy(Eimp)} \quad \cdots\cdots \text{Eq. 1.}$$

4) 무게

인체에 가해지는 무게감도 보호용 패드에서 중요한 요소이기 때문에 분석용 전자저울 BBI-31(BOECO, Germany)을 사용하여 인장강도, 굴곡강도, 충격흡수성능 평가를 위한 샘플 사이즈의 무게를 측정하였다.

인장강도, 굴곡강도, 충격흡수 성능, 무게 평가는 모두 5회 반복 측정 후 평균으로 분석하였다. 각 평가법에 맞도록 제작된 실험용 보호 패드는 <Table 2>에 제시하였다. 다만, TPU 3D 프린팅 시 내부 채우기 밀도에 의해서는 외관상 차이가 없어 9종 중 대표적으로 E, T-10A, T-10B, T-E-10A, T-E-10B만 나타내었다.

3. 자료 분석 방법

수집된 모든 데이터의 통계 분석은 SPSS 26.0 Statistics(IBM, New York, USA)를 사용하여 실시하였다. 보호 패드 종류에 따른 인장강도, 굴곡강도, 충격흡수성능, 무게의 차이점을 분석하기 위해 기술통계, 분산분석(ANOVA), Duncan 사후 분석을 실시하였으며, 유의수준은 p<.05에서 검증하였다.

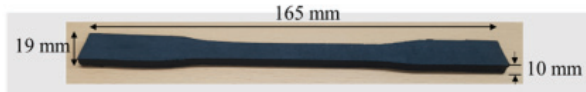
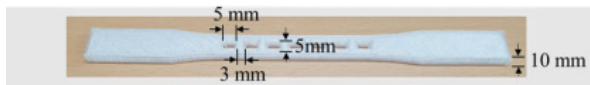
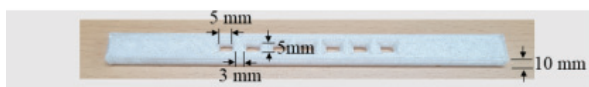
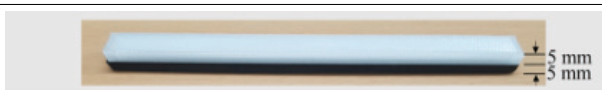
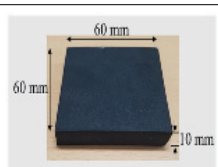
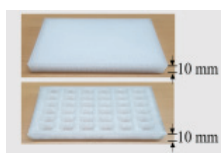
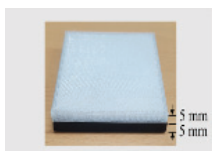
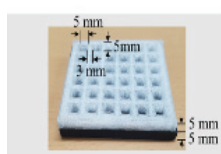
III. 연구결과

1. 실험용 보호 패드의 인장강도

총 9종의 실험용 보호 패드에 대한 인장강도와 절단응력 측정 결과를 <Fig. 1>, <Table 3>에 제시하였다. 인장강도 시험기의 이동 물림쇠(jaw)가 500 ㎜/min의 속도로 움직일 때, T-10A, T-30A, T-E-10A, T-E-30A는 약 300 ㎜ 이상 신장되는 특징을 보였으며, 이 중 T-10A, T-30A는 신장 시 약 800N 이상의 큰 강도가 부여되었고, T-E-10A, T-E-30A는 약 600N으로 TPU로만 이루어진 패드에 비해 상대적으로 낮은 강도가 필요하였다. 한편, T-E-10B, T-E-30B는 T-E-10A, T-E-30A와 강신도 곡선의 형태는 유사하나, 신장 정도가 확연하게 작은 현상을 관찰하였고, E는 가장 다른 유형의 강신도 곡선을 보여주었다. 절단응력의 경우, T-30A>T-10A>T-30B>T-E-30A>T-E-10A>T-10B>T-E-30B>T-E-10B>E 순으로 크게 나타나는 것을 알 수 있었다.

일반적으로 의복을 착용한 상황에서 필요한 강도는 절단 될 때까지의 응력보다는 초기값이 중요하다. 따라서 분석 범위를 좁혀서 100 ㎜ 신장 시 인장강도의

Table 2. Evaluation items and method of developing protection pads

Item	Method	Code	Example of experimental protection pads
Tensile strength	ASTM D638	E	
		T-10A	
		T-10B	
		T-E-10A	
		T-E-10B	
Flexural strength	ASTM D790-99	E	
		T-10A	
		T-10B	
		T-E-10A	
		T-E-10B	
Impact absorption	A sphere with a diameter of 20 ㎜ and a mass of 30 ㎏ falls from a height of 15 ㎝ * No standard specifications	E	 T-10A / T-10B 
		T-E-10A	 T-E-10B 

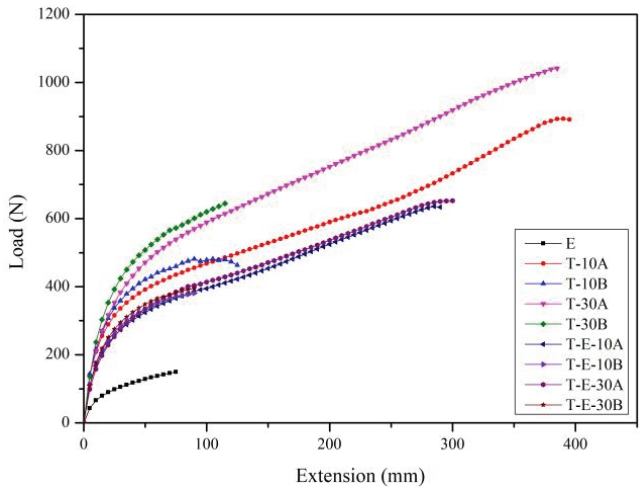


Fig. 1. Tensile strength test for protection pads.

Table 3. Breaking stress of protection pads

(unit: ㎫)

Experimental protection pads	Breaking stress
T-10A	6.91
T-10B	3.73
T-30A	8.56
T-30B	5.02
T-E-10A	4.46
T-E-10B	2.70
T-E-30A	4.78
T-E-30B	2.81
E	1.09

주요 변화 특징을 살펴보면, 전체 인장강도 곡선과 같이 TPU로만 구성된 패드 그룹(T-10A, T-30A, T-10B, T-30B)의 강도가 가장 컸고, TPU와 EVA foam을 결합한 패드 그룹(T-E-10A, T-E-30A, T-E-10B, T-E-30B)은 그 값이 약간 작아짐을 알 수 있었다. 그리고 시중에서 가장 많이 판매되고 있는 EVA foam만으로 구성된 패드(E)는 인장강도가 현저하게 작아 보호 측면의 역할을 하기에는 부족함이 있을 수 있다고 판단되었다. 한편, TPU만으로 구성된 패드 그룹은 출력 시 채우기 밀도가 높으면 강도가 컸고(T-30A>T-10A, T-30B>T-10B), 같은 채우기 밀도일 때는 오히려 구멍이 있는 것이 강도가 큰 특징을 보였다(T-30B>T-30A, T-10B>T-10A). 그러나 TPU와 EVA foam을 결합한 패드 그룹(T-E-10A, T-E-30A, T-E-10B, T-E-30B)의 경우, 채우기 밀도와 내부 디자인에 상관없이 비슷한 인장강도를 갖는 것으로 파악되었다. 마지막으로 강신도 곡선의 원점에서 접선의 기울기인 초기탄성계수를 살펴보면, EVA foam만으로 구성된 패드(E)를 제외하고, 대부분 유사한 기울기임을 알 수 있었다. 즉, TPU에 EVA foam을 결합하여도 작은 변형의 신장에 대한 저항도는 TPU만으로 구성된 패드와 유사하므로 강하면서도 상대적으로 부드럽고 유연하다고 할 수 있다. 뿐만 아니라, 내부에 구멍이 있어도 강도가 크게 낮아지지 않는 특징이 있어 착용쾌적성 측면에서 용이 할 수 있을 것으로 생각된다.

2. 실험용 보호 패드의 굴곡강도

패드의 유연성을 비교하기 위해 굴곡강도를 측정한 결과는 <Fig. 2>와 같다. 총 9종의 보호용 패드의 주요 특징을 살펴보면, 인장강도와는 다르게 EVA foam만으로 구성된 패드, TPU와 EVA foam을 결합한 패드, TPU로만 구성된 패드 순으로 그룹화되어 유연성에 뚜렷한 차이가 나타남을 확인할 수 있었다. 구체적으로 EVA foam만으로 구성된 패드의 유연성이 가장 우수한 것으로 나타났고, T-30A의 유연성이 가장 낮은 것으로 나타났다. 한편, TPU만으로 구성된 패드 그룹에서는 내부 채우기 밀도가 작을 때 유연하였고(T-10B,

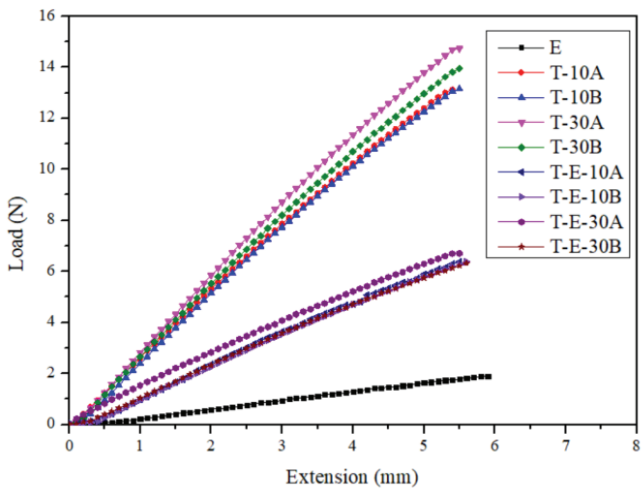


Fig. 2. Flexural strength test for protection pads.

T-10A> T-30B, T-30A), 채우기 밀도가 동일한 경우에는 구멍이 있는 디자인이 보다 유연하였다(T-10B>T-10A 또는 T-30B>T-30A). 다만, 채우기 밀도가 10%인 경우인 T-10B와 T-10A는 거의 차이가 나지 않음을 알 수 있었다. TPU와 EVA foam을 결합한 패드의 경우에는 T-E-30A가 유연성이 가장 낮았으며, 나머지 3 종류(T-E-30B, T-E-10A, T-E-10B)는 거의 유사한 유연성을 가지는 것으로 평가되었다.

3. 실험용 보호 패드의 충격흡수 성능과 무게

보호용 패드 9종에 대한 충격흡수 성능 평가는 44.72 J의 충격에너지(E_{imp})를 가했을 때, 패드가 흡수한 최대에너지(E_{abs})를 이용해 충격흡수율(e_{abs})을 측정하였고, 그 결과는 <Table 4>에 제시하였다. 충격흡수 성능은 T-30A>T-E-30A>T-10A>T-30B>T-E-10A> T-E-30B>T-10B>T-E-10B>E 순으로 우수한 것으로 나타났다. 이때, 충격흡수율(e_{abs})이 높을수록 충격보호 성능이 높은 것을 의미하므로, 최대 충격흡수율 0.99 (99%) 값을 나타낸 T-30A 패드가 충격보호 성능이 가장 우수한 것으로 나타났고, EVA foam만으로 이루어진 패드(E)는 평균 0.21(21%)의 충격흡수율을 나타내 충격보호 성능이 가장 낮은 것으로 평가되었다.

보다 구체적으로 살펴보면, T-30A와 T-E-30A의 충격흡수 성능이 각각 0.99(99%)와 0.89(89%)로 매우 우수하게 나타났으며, 이를 통해 3D 프린팅 시 채우기 밀도가 높고, 구멍이 없는 경우가 충격흡수 성능이 우수하고, TPU에 EVA foam을 접목하여도 충격흡수 성능이 크게 낮아지지 않는 것을 확인하였다. 이는 낙상용 패드 디자인 시 아래쪽 면을 모두 막은 폐쇄형이 위와 아래쪽 면을 뚫은 개방형보다 충격보호 성능이 우수한 것으로 나타난 선행연구(Park et al., 2016)와 일치한 결과이다. 한편, Park et al.(2022)의 연구에서는 낙상방지용 팬츠에 적용 가능한 고관절과 무릎용 충격보호패드 설계를 위해 육각입체메쉬 구조를 연결하는 브릿지 구조를 다양하게 디자인한 후 TPU 소재로 3D

Table 4. Evaluation of impact absorption efficiency result for protection pads

(Repeated five times)

Item	E	T -10A	T -10B	T -30A	T -30B	T-E-10A	T-E-10B	T-E-30A	T-E-30B
	Mean (SD)								
Impact absorption efficiency	0.21 (.044)	0.73 (.051)	0.40 (.049)	0.99 (.052)	0.63 (.045)	0.62 (.047)	0.40 (.048)	0.89 (.039)	0.50 (.041)

프린팅하여 충격력을 평가하였다. 그 결과, 충격력이 약 75~78%로 감소되는 것으로 나타났는데, 본 연구에서 TPU에 EVA foam을 접목한 T-E-30A의 경우에는 충격력이 89%로 감소되어 패드용으로 충분한 충격흡수 성능을 갖춤을 알 수 있었다. 다만, 충격량은 질량×속도이고, 이때, 속도는 위치에너지가 운동에너지로 변화하여 만들어지며, 충돌 시 충격량에 영향을 주게 되므로 얼마만큼의 높이에서 어느 부위로 몸무게의 몇 % 충격을 흡수할 것인가를 예측하여 패드 조건을 선택할 수 있을 것이다.

다음으로 보호 패드의 무게를 측정하여 그 결과는 <Fig. 3>에 나타내었다. TPU만으로 구성된 패드, TPU와 EVA foam을 결합한 패드, EVA foam만으로 구성된 패드 순으로 그룹화되어 무게에 차이가 나타남을 알 수 있었다. 구체적으로 살펴보면, TPU만으로 구성된 패드 내에서는 모든 평가 시 내부 채우기 밀도가 작을 때 가벼웠다(T-30B, T-30A>T-10B, T-10A). 반면, 채우기 밀도가 동일한 경우, 인장강도, 굴곡강도 평가 조건 시 구멍이 있을 때 약간 더 무거웠고(T-10B>T-10A 또는 T-30B>T-30A), 충격흡수 평가 조건 시에만 구멍이 없을 때 더 무거웠다(T-10A>T-10B 또는 T-30A>T-30B). 한편, TPU와 EVA foam을 결합한 패드의 경우에는 채우기 밀도가 클수록 무거웠고(T-E-30A, T-E-30B> T-E-10A, T-E-10B), 채우기 밀도가 동일하면, 모든 측정 조건에서 구멍이 있을 때 무거웠다(T-E-10B>T-E-10A 또는 T-E-30B>T-E-30A). 일반적으로 구멍이 있으면 가벼울 것으로 예상되지만, 3D 프린팅 시 구멍을 만들기 위해서는 구멍 주변에 가벽을 세워야 하는데, 이때, 가벽은 다른 부위에 비해 세밀하고 촘촘하게 채워지기 때문에 무게를 증가시킬 수 있다. 그러나 구멍이 충분히 많아지면 가벽이 촘촘하더라도 뚫린 부분이 차지하는 비율이 매우 높아 무게가 작아지는 것으로 사료된다. 기존 연구에서 동일한 소재일 경우, 3D 프린팅 시 두께, 채우기 패턴, 밀도, 형태 등의 조건은 출력물의 유연성, 강도, 무게 등에 영향을 미친다는 것을 밝혔는데(Jung & Lee, 2022; Lee et al., 2017; Park, Jung, & Lee, 2018; Park, Lee, & Lee, 2018), 본 연구에서도 이를 확인할 수 있었다. 그리고 실질적으로 보호 패드를 관절 부위에 적용할 때, 대략적인 면적을 10×10 ㎠로 가정하면, TPU와 EVA foam을 결합한 패드와 TPU만으로 구성된 패드는 한 개의 무게가 각각 34~45 g, 52~86 g 정도가 될 것으로 예상할 수 있다. 기존 연구(J. M. Kim, 2021)에서 군복 및 장구류 착용 시 무게감은 전투력과 밀접한 영향이 있는 것으로 언급되었듯이 TPU와 EVA foam의 조합은 50 g 내외로 보호 패드를 제작하면 무게적인 측면에서도 효과적일 것으로 생각된다.

4. 여군 전투복과 결합하기 적절한 보호 패드는 어떤 것인가

인체는 동작 시 피부가 신장 또는 축소되고, 형상이 변화하는 특징이 있다. 피부 변형률의 경우, 성별에 상관없이 무릎 관절 부위는 최대 굴곡 시 무릎가운뎃점을 지나는 수직선에서 무릎 위쪽이 46~76%, 아래쪽이 73~116% 신장하고, 대퇴골 외측상과를 지나는 수직선상에서는 무릎 위쪽이 약 6% 수축, 아래쪽이 3~16% 신장하며, 무릎가운뎃점 둘레는 약 7%, 무릎 위쪽이 약 11%, 아래쪽이 약 7% 신장하는 것으로 알려져 있

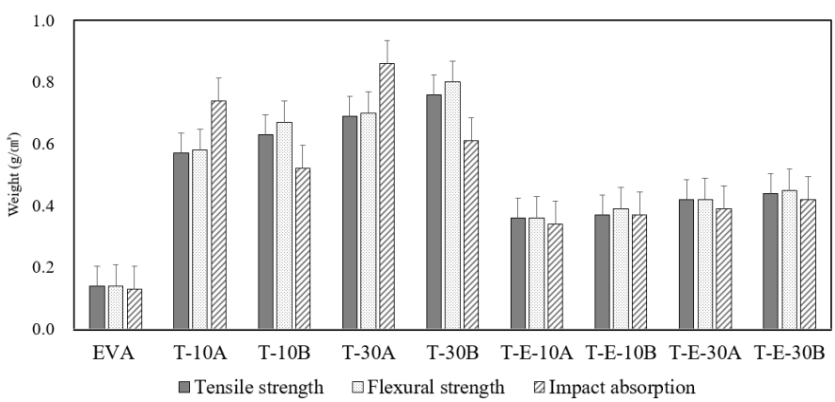


Fig. 3. Weight of the protection pads for each experiment.

다. 또한, 엉덩이의 경우 60° 무릎 관절 굴곡 시 가로, 세로 방향으로 피부 변형을 측정한 결과 약 ±10% 정도의 변화가 있다고 보고되었고(Choi & Hong, 2015; Kim et al., 2015; Lee, 2013), 팔꿈치 관절 피부 최대신장률은 43.8±4% 변화를 보이는 것으로 나타났다(Jung et al., 2017). 뿐만 아니라, 인체 동작 시 관절 부위는 대부분 볼록한 형상으로 변화하게 된다. 이를 보다 구체적으로 살펴보기 위해 CLO program(CLO Virtual Fashion Inc., Korea)에서 제공되는 아바타 중 여자 켈리(Kelly)를 선택하고, 제 8차 한국인 인체치수조사(Korea Agency for Technology and Standards [KATS], 2021)의 20~40대 여성 평균 치수 데이터를 반영하여 사이즈를 변경하였으며, 관절점 보기 기능을 통해 관절 각도를 조절하여 파일 내보내기를 하였다. 이 파일을 Geomagic Design X program(3D Systems, Inc., Korea)에서 관절 부위별 볼록한 정도인 세 점이 지나는 곡률반경을 측정해 보았다. 그 결과, <Fig. 4>에서 보는 바와 같이 관절 부위의 가로와 세로 곡률반경에서, 팔꿈치 관절은 38.78~40.56 ㎜, 무릎 관절은 45.06~63.89 ㎜, 엉덩이 관절은 120.89~110.79 ㎜로 부위별 차이가 있는 것으로 나타났으며, 팔꿈치와 무릎 관절은 매우 볼록해지게 되는 것을 알 수 있었다. 따라서 보호 패드 설계 시, 이러한 인체의 변화 양상을 반영해야 한다. 즉, 보호 패드를 넣은 전투복을 여군이 착용할 때 외부에서 가해지는 충격을 흡수하여 보호하는 것이 일차적으로 중요하지만, 동시에 사격, 수류탄, 유격, 군사 훈련 시 다양한 인체의 움직임에 대응할 수 있는 유연함이 부여되어야만 할 것이다. 최근, 다양한 액티브 스포츠 활동의 증가와 개인형 이동 수단 공급의 증가로 인해 낙상사고 등의 안전사고 발생 빈도가 늘어나면서 보호대 착용 의무 등의 대책이 필요함이 강조되고 있으나, 동작편이성, 착용쾌적성 등의 측면에서 만족도가 낮아 보호대를 착용하지 않는 경우가 많은 것으로 조사되었다(Lee & Hong, 2019). 따라서 군복에 적용할 보호 패드는 충격흡수 성능 뿐만 아니라, 전투력과 직결되는 인체 형상과 동작에 반응하는 동작편이성과 착용쾌적성도 반드시 고려해야 실용성이 높아질 수 있다.

IV. 결　　론

본 연구에서는 여군을 위한 전투 훈련 시 부상 위험이 높은 관절 부위 보호 패드를 개발하기 위해 소재, 3D 프린팅 시 채우기 밀도, 내부 디자인 변인을 조합하여 총 9종의 패드를 제작한 후 인장강도, 굴곡강도, 충격흡수 성능, 무게 평가를 실시하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 현재 판매되고 있는 보호 패드에 가장 많이 사용되고 있는 EVA foam의 경우, 굴곡강도 값이 가장 작아 유연하고 동작편의성이 우수하나, 인장강도와 충격흡수 성능이 매우 낮아 전투 훈련 시 여군을 안전하게 보호하기에는 부족한 것으로 확인되었다.

2. TPU 소재만으로 제작된 1.0 ㎝ 패드는 EVA foam, TPU와 EVA foam을 결합한 패드에 비해 인장강도와 충격흡수 성능이 매우 우수한 반면, 굴곡강도 값이 커서 동작편이성 측면에서는 좋지 않은 것으로 나타났다.

3. TPU 0.5 ㎝와 EVA foam 0.5 ㎝를 결합한 패드는 인장강도와 충격흡수 성능이 EVA foam에 비해 매우 높은 편이었다. 그리고 TPU 소재만으로 구성된 패드와 비교해서는 상대적으로 인장강도는 작았으나, 초기탄성계수가 유사하여 충분한 강도를 지니고 있음을

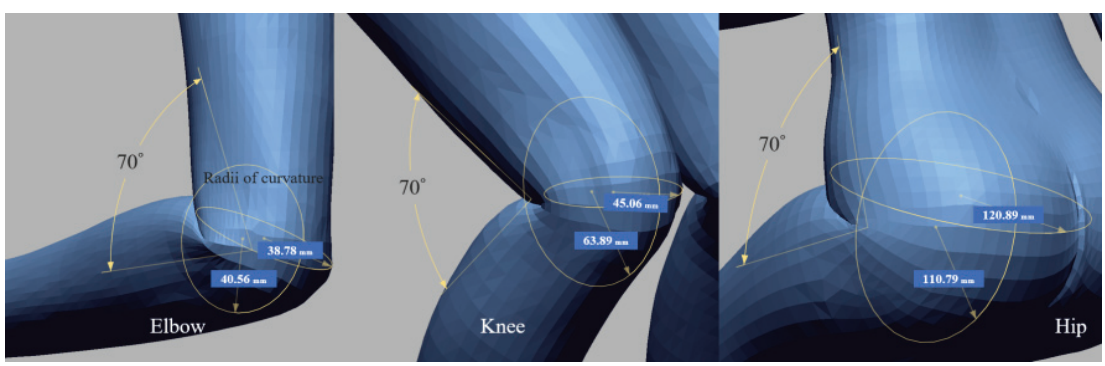


Fig. 4. Radius of curvature for each part when the joint part is flexed at 70˚.

알 수 있었고, 구멍에 의해 그 값이 작아지지 않았다. 또한, TPU 소재만으로 구성된 패드에 비해 가벼웠다. 물론, 충격흡수 성능은 TPU 소재만으로 구성된 패드보다 다소 저하되었으나, 채우기 밀도가 30%이면서 구멍이 없는 조건에서는 우수하였다.

결론적으로 인장강도와 충격흡수 성능 측면만 고려한다면 TPU 소재로 3D 프린팅 시 채우기 밀도 30%, 구멍이 없는 조건이 가장 적합한 성능일 것이다. 그러나 훈련의 대표적인 자세인 엎드려 쏴, 응용포복, 드러누워 통과 등을 수행할 때 선 자세에서 바로 관절 부위가 지면에 닿는 것이 아니라 일차적으로 충격을 완화하기 위해 선 자세에서 앉은 자세를 취한 후 엎드리거나 눕는 자세로 이어지므로 다소 인장강도와 충격흡수 성능이 낮더라도 충분한 보호가 가능할 것이다. 따라서 관절 부위 3D 형태와 군사 훈련 동작에 대응하도록 굴곡강도와 무게까지 고려한다면 TPU의 3D 프린팅 시 채우기 밀도 30%, EVA foam을 결합한 것이 최적 조건이라고 할 수 있다. 한편, 생산 단가 측면에서도 TPU는 고가이므로 저렴한 EVA foam을 결합하는 것은 전투원 모두에게 공급될 경우, 경제적으로 큰 이익이 될 것이다. 다만, 군사 훈련은 장시간 이어지므로 이때, 발생하는 땀과 열을 빠르게 외부로 방출하여 열적쾌적성을 증대시키기 위해서는 구멍이 있는 것이 좋으나, 충격흡수 성능이 다소 저하되므로 TPU의 두께를 증가시키거나, 구멍의 크기를 변경하는 등 다른 방안이 모색되어야 할 것이다.

본 연구는 충격보호 성능, 유연성, 투습성, 가벼움 등의 요소를 적정한 수준에서 조합하여 전투복 개발에 적용할 수 있는 보호 패드 디자인 설계 시 활용할 수 있는 소재, 3D 프린팅 시 채우기 밀도, 내부 구조 변인의 조합에 대한 유용한 기초 정보를 제공했다는데 의의가 있다. 그러나 본 연구에서는 변인 조합에 따른 기본적인 성능을 평가하여 적절한 조합을 도출하는 것에 중점을 두었기 때문에 실제 전투복에 적용하여 성능 평가를 실시한 결과와 상이할 수도 있으므로 보호패드를 접목한 전투복 개발 후 실제 착용 성능 평가가 필요하다. 따라서 추후 연구에서는 인체의 곡면을 반영한 3D 입체 형태의 보호용 패드를 설계 및 제작하여 전투복에 적용한 후 착용 평가를 실시한 후 그 효과를 살펴보고자 하며, 나아가 군에서 사용 가능한 실질적인 데이터 구축 및 제품화를 해보고자 한다. 뿐만 아니라, 구멍 이외의 내부 구조 디자인에 따른 열적쾌적성이 매우 밀접한 관련이 있으므로 이에 대한 고려와 전투 훈련의 대표 동작 시 부위별 관절의 접촉 면적, 형상 등을 조합하는 것도 필요할 것으로 사료된다.

1. 사사

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행됨(No. NRF-2022R1C1C2011204).

2. 연구윤리

해당사항 없음

3. 데이터 및 자료 가용성

본 연구에 사용된 데이터는 특허 진행 및 추후 후속 연구들이 지속되고 있으므로 공개가 불가함. 하지만 합당한 요청이 있어 저자소속기관이 승인하는 경우 교신저자가 제공 가능함.

4. 이해관계 상충

저자 YL은 2019년 4월부터 본 학술지의 편집위원이지만, 편집과정에 전혀 참여하지 않아 이해관계 상충 문제가 없음.

5. 연구비 지원

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행됨(No. NRF-2022R1C1C2011204).

6. 저자의 기여

모든 저자는 실험 설계 및 결과 논의를 함께 담당하였으며, SK, HL은 샘플 제작 및 진행을 담당하였고, OL과 YL은 실험 데이터 분석, 원고 작성을 주로 담당하였음. 모든 저자가 최종 원고를 읽고 승인하였음.

7. 저자 정보

이옥경 충남대학교 생활과학연구소, 전임연구원
이희란 금오공과대학교 소재디자인공학과, 조교수
김소영 금고공과대학교 신소재연구소, 전임연구원
이예진 충남대학교 의류학과, 교수

References

Chang, J. H., Jung, H. J., & Kim, E. K. (1999). A study on physiological responses and comfort sensation of military uniform. *Human Life Sciences*, *2*, 217–234.

Choi, J., & Hong, K. (2015). 3D skin length deformation of lower body during knee joint flexion for the practical application of functional sportswear. *Applied Ergonomics*, *48*, 186–201. doi:10.1016/j.apergo.2014.11.016

Choi, J-S., Choi, H-S., & Lee, K-M. (2003). A study on the func-

tional development of army's combat uniforms. *Journal of the Korean Society of Costume*, *53*(5), 141–153.

Han, H., & Han, H. (2019a). Development and evaluation of ergonomic patterns for Korean female soldier's winter jacket. *Fashion & Textiles Research Journal*, *21*(6), 776–788. doi: 10.5805/SFTI.2019.21.6.776

Han, H., & Han, H. (2019b). Satisfaction on fitness and motion suitability of Korean female military winter Jacket. *Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles*, *43*(3), 361–372. doi:10.5805/JKSCT.2019.43.3.361

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

Jeong, H-Y. (2016). The current status of 3D printing use in fashion industry and utilization strategies for fashion design departments. *Journal of the Korea Fashion & Costume Design Association*, *18*(3), 245–290.

Jung, D., Kim, S-Y., Jeon, B-Y., Kim, S-Y., & Lee, J-Y. (2017). Regional skin maximal elongation rate for appling e-textiles to tight-fit clothing. *Korean Journal Community Living Science*, 28(3), 365–375. doi:10.7856/kjcls.2017.28.3.365

Jung, I., & Lee, S. (2022). Compressive properties of 3D printed TPU samples with various infill conditions. *Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles*, 46(3), 481–493, doi:10.5850/JKSCT.2022.46.3.481

Jung, J. W. (2014). A study on the way of revitalization for design industry of 3D printing technology. *Journal of Korea Design Knowledge*, *31*, 43–52.

Kang, D-H., Seo, M-Y., Gimm, H., & Kim, T-W. (2009). Determination of shock absorption performance and shear modulus of rubbers by drop impact test. *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers*, *33*(4), 321–328. doi:10.3795/KSME-A.2009.33.4.321

Kim, J-H. (2019). A study of the changes for military uniform fabric properties according to multiple washing. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, *20*(10), 366–373. doi:10.5762/KAIS.2019.20.10.366

Kim, J. M. (2021). *Material development to improve the performance of Korean army combat uniforms* (Unpublished doctoral dissertation). Keimyung University, Daegu.

Kim, K., Kim, Y., Kim, H., Ahn, T., Lee, S., Choi, K., Hong, K., & Hwang, S. (1990). A study on the functional design process and performance evaluation of army's training wear. *Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles*, *14*(2), 104–116.

Kim, K. S., Nam, Y. J., & Kim, M. K. (2016). A design study on women`s army combat uniform to improve functionality. *Bulletin of Korean Society of Basic Design & Art*, *17*(5), 59–71.

Kim, N. Y., Wu, Y. J., & Hong, K. (2015). Design of 3D compression upper wear based on skin deformation during arm abduction. *Korean Journal of Human Ecology*, *24*(5), 687–700. doi:10.5934/kjhe.2015.24.5.687

Kim, S. Y. (2021, April 13). 전투원을 하나의 첨단무기체계로 '워리어플랫폼' 진화는 계속된다 [The evolution of the 'Warrior Platform' continues as a state-of-the-art weapon system for combatants]. *Kookbangilbo*, Retrieved November 23, 2022, from https://kookbang.dema.mil.kr/newsWeb/20210414/10/BBSMSTR_000000010023/view.do

Kim, T. G., & Cho, H. H. (2014). The influence of wearing army combat uniform on the thermal responses in heat environment. *Fashion & Textiles Research Journal*, *16*(1), 167–174. doi:10.5805/SFTI.2014.16.1.167

Kim, Y-S., Jun, Y-S.., Park, K-J., & Kim, J-H. (2016). Formative characteristics of women's shoes design utilizing 3D printing technology. *Journal of the Korean Society of Costume*, *66*(8), 14–32. doi:10.7233/jksc.2016.66.8.014

Ko, S. H. (2021, May 13). Is there any problem with expanding the K-female army?. *Futurekorea*, Retrieved May 15, 2022, from http://www.futurekorea.co.kr/news/articleView.html?idxno=145977

Lee, E. J. (2022). 여군 확대 추세 분석과 정책 방향[Analysis of female military expansion trend and policy direction] [pdf]. *KIDA Defense Issues & Analyses.* Retrieved from https://www.kida.re.kr/frt/board/frtNormalBoardDetail.do?sidx=382&idx=1950&depth=3

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, H., Eom, R-I., & Lee. Y. (2015). 3D modeling of safety leg guards considering skin deformation and shape. *Korean Journal of Human Ecology*, *24*(5), 555–569. doi:10.5934/kjhe.2015.24.4.555

Lee, H., Eom, R-I., & Lee. Y. (2017). Physical property evaluation of 3D knitted spacer fabrics for functional wear. *Textile Science and Engineering Journal of the Korean Society of Textile Engineers and Chemists*, 54(4), 292–299. doi:10.12772/TSE.2017.54.292

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 Jouranl*, *24*(1), 127–137. doi:10.7233/SFTI.2022.24.1.127

Lee, H. R. (2013). *Ergonomic design and its pattern development of outdoor pants based on skin deformation in dynamic postures* (Unpublished doctoral dissertation). Chungnam National University, Daejeon.

Lee, K-J., Cho, C., & Lee, S-J. (1999). A study on the actual conditions of ROK army BDU. *Journal of the Korean Society of Costume*, *45*, 121–131.

Lee, O., & Lee, Y. (2022). Investigation of wearing conditions for the development of military uniforms for the army female military. *Proceedings of the Fashion & Textile Research Journal*, *Spring Conference*, *Korea*, 289.

Park, J. H., & Lee, J. R. (2016). Prototype of fall impact protective pants for elderly women. *Journal of the Korean Society of Costume*, *66*(4), 45–60, doi:10.7233/jksc.2016.66.4.405

Park, J. H., & Lee, J. R. (2019). Developing fall-impact protection pad with 3D mesh curved surface structure using 3D printing technology, *Polymers*, *11*, 1–14. doi:10.3390/polym11111800

Park, J. H., Jung, H-K., & Lee, J. R. (2018). Design of fall impact protection pads using 3D printing technology and comparison of characteristics according to structure. *Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles*, *42*(4), 612–625. doi:10.5850/JKSCT.2018.42.4.612

Park, J. H., Lee, J. S., & Lee, J. R. (2018). Development and evaluation of fall impact protection pad. *Fashion & Textile Research Journal*, *20*(4), 422–428. doi:10.5805/SFTI.2018.20.4.422

Park, J., Lee, J., & Lee, J. (2022). Design of motion-adaptable 3D printed impact protection pad. *The Research Journal of the Costume Culture*, *30*(3), 403–413. doi:10.29049/rjcc.2022.30.3.403

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

Park, Y. C. (2014). Military textile materials -Multifunctional smart textile materials and high performance all weather combat suits-. *Fiber Technology and Industry*, *17*(1), 53–58.

Song, A. R., & Geum, K. S. (2016). A study on the formative characteristics of fashion design using 3D printing technology-focused on iris van herpen-. *Bulletin of Korean Society of Basic Design & Art*, *17*(2), 219–230.