

3D 프린팅 패드를 활용한 무릎 보호대의 설계 및 평가

이희옥¹⁾ · 박정현²⁾ · 이정란^{1),3)†}

¹⁾부산대학교 의류학과

²⁾배재대학교 의류패션학과

³⁾부산대학교 생활환경연구소

Design and Evaluation of a Knee Protector using a 3D Printing Pad

Xi Yu Li¹⁾, Jung Hyun Park²⁾, and Jeong Ran Lee^{1),3)†}

¹⁾Dept. of Clothing & Textiles, Pusan National University; Busan, Korea

²⁾Dept. of Clothing & Textiles, Paichai University; Daejeon, Korea

³⁾Research Institute of Ecology, Pusan National University; Busan, Korea

Abstract: This study aims to develop knee protectors that provide high safety and fitness, while incorporating a motion-adaptable 3D-printed pad. These protectors were evaluated by individuals who experience knee discomfort or pain. The results are as follows. First, the 3Dprinted pad design of a hexagonal mesh structure, which is modeled for excellent appearance and knee movement. Each unit of the mesh has a outer layer of 2mm thick, a spacer layer of 1 mm in diameter, and is connected by a 1.5 mm bridge. The bridge was extended up to 1.2 cm. Second, the knee brace was designed in three types - cylinder, strap, and combination by Universal design. Impact protection measurements of the three knee protectors demonstrated roughly 80% reduction in impact. Third, based on usability evaluation, cylinder type protectors have the highest ratings in most areas, primarily because of their ease of use. The strap type protector received positive reviews in terms of appearance and care, and the combination type provided stable knee protection. This study demonstrated the potential industrial application of 3D printing technology by designing and evaluating protective products for the human body. The results of this study are expected to aid knee protector manufacturers in developing practical products and promoting the development of protective equipment for other body parts or purposes.

Key words: 3D printing (3D 프린팅), protective pad (보호 패드), knee protector (무릎 보호대), usability evaluation (사용성 평가)

1. 서 론

무릎은 인체에서 가장 큰 관절을 형성하는 부위로 일상생활이나 운동을 할 때 무릎의 사용은 수없이 반복된다. 또한 무릎은 체중의 압력을 많이 받아 나이가 들거나 비만할수록 상태가 나빠지기 쉬워 무릎 관절염증 질환은 주변에서 흔히 볼 수 있다. 무릎이 약해짐에 따라 신체활동량이 감소하고, 근력이 저하되므로 낙상과 같은 위험에 처할 수 있다. 낙상 후에는 신체기능을 완전히 회복하는 경우가 드물어 신체기능제한과 장애를 겪을 수 있는데(Yeom, 2020) 무릎의 경우는 관절통증으로 보

행이 제한될 수 있다. 고령화로 인하여 무릎에 관련한 질병이 증가할 뿐 아니라 최근 들어서는 젊은 층에서도 운동 등으로 인하여 무릎 통증을 호소하는 경우가 많아 무릎보호대에 대한 관심이 높아지고 있다(Oh et al., 2017). 이에 따라 큰 부상을 입기 전 여러 위험으로부터 무릎을 보호하기 위한 무릎보호제품의 수요도 증가하여 보호력이 큰 무릎보호대에 대한 연구가 필요한 실정이다.

최근 들어 3D 프린팅 기술이 확대됨에 따라 의류 분야에 있어서 3D 프린팅 기술을 활용한 보호복 보형물의 제작과 인체 스캔을 통한 모델링 및 개인 맞춤형 보호의류 제작의 연구가 이루어지고 있다. Koo and Lee(2017)는 3D 스캐너로 인체 손목을 스캐닝 하고 모델링 프로그램으로 손목보호대를 설계한 후 3D 프린터를 사용하여 손목 보호대를 제작하였다. Kim(2015)은 여자경찰들이 신체 보호를 위해 사용하는 실제 보호복에 부착된 보호대를 스캔하고 그 데이터를 바탕으로 디자인을 설계하여 우수성이 높은 3D 보호복을 개발하였다. Park et al.(2019b)은 사이클을 즐겨 타는 20대 남성을 대상으로 3차원 모델링과 프린팅으로 살 보호대를 제작하고 평가하여 최적의

본 논문은 석사학위 청구 논문의 일부임

†Corresponding author: Jeong Ran Lee

Tel. +82-51-510-2841, Fax. +82-51-583-5975

E-mail: lrj@pusan.ac.kr

©2023 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.

프로토타입을 제안하였다. 또한 노인을 위한 고관절 낙상충격 보호패드를 3D 프린팅 기술을 통해 구현하고 이에 대한 평가를 통해 충격보호패드를 개발한 연구(Park et al., 2017; Park et al., 2018; Park et al., 2019a)도 있다. 무릎보호대에 관한 연구로는 인체 곡률과 동작에 따른 피부 길이 변화를 측정하거나 인체형상을 기반으로 모델링을 실시하여 무릎보호대를 제작하고 평가한 연구(Lee et al., 2015; Lee & Lee, 2017; Jang et al., 2020; Jung et al., 2022)들이 있다. 이 연구들은 대상이 어린이거나 성인을 대상으로 한 경우에는 요가복에 사용하는 아주 얇은 형태의 보호대로 일상생활에서 발생할 수 있는 충격이나 낙상에 대비한 성인용 무릎보호대에 관한 연구는 매우 부족한 실정이다.

선행연구(Park et al., 2019a)에서 제시한 동작에 따라 치수 가변적 낙상충격 3D 프린팅 보호패드는 고관절 충격흡수 성능은 높았으나 유연성이 필요한 무릎보호대로 사용하기에는 적합성이 낮았다. 이에 본 연구에서는 이 3D 프린팅 보호패드의 크기와 두께 등을 무릎 부위에 적합하도록 모델링하여 동작 가변적 3D 프린팅 무릎보호패드를 설계하고자 한다. 또한 이 보호패드를 삽입한 무릎보호대를 디자인하고, 무릎보호대를 필요로 하는 피험자를 대상으로 사용성 평가를 실시하여 신체적합성과 동작적합성이 높은 무릎보호대를 설계하는 것이 연구의 목적이다.

2. 연구방법

2.1. 3D 프린팅 보호패드 설계

무릎보호대에 삽입하는 3D 프린팅 보호패드는 낙상충격보호 성능이 확인된 선행연구(Park et al., 2018)의 입체 메쉬(mesh)형 구조를 기초로 하였다. 육각형의 입체단위는 한 변의 길이는 1.5 cm, 두께는 1 cm이다. 입체육각 메쉬형 패드는 표면층과 중간층 즉 스페이서(spacer) 층으로 이루어진 육각형 조각들이 브릿지(bridge)로 연결되어 벌집모양을 나타내고 있는데 표면층은 큰 육각형 안에 일정한 간격으로 마름모를 배치하여 격자의 형태를 보이며 중간의 스페이서 층은 V자로 된 기둥으로 이루어져 있어 동작에 따라 유연하게 움직일 수 있다. 본 연구에서는 표면층과 스페이서 층의 두께와 굵기를 얇게 하여 무릎

보호대에 적합하도록 모델링하였다. 3D 모델링 프로그램은 Fusion 360을 사용하였으며 패드 출력을 위한 3D 프린터는 큐비콘 업체의 CUBICON Single 모델을 사용하였다. 패드를 모델링한 데이터는 표준형식인 .STL로 저장하였으며 3D 프린터가 접수할 수 있도록 G-code파일을 생성하였다(Fig. 1). 출력에 사용한 필라멘트소재는 충격흡수에 강하고 유연성이 뛰어난 열가소성 폴리우레탄(TPU)을 사용하였다.

2.2. 3D 프린팅 보호패드를 삽입한 무릎보호대 디자인

다양한 무릎보호대 개발 실태를 알아보기 위하여 한국특허정보원 KIPRIS에서 ‘무릎보호대(“Knee Protector”, n. d.)’, ‘무릎보조기(“Knee Assistance Device”, n. d)를 키워드로 검색하여 1027건의 자료를 검색하였다. 그 중 본 연구와 관련성이 높은 보호패드가 삽입된 무릎보호대를 중심으로 디자인 형태를 분석한 결과 총 3 유형으로 나눌 수 있었다. 첫째는 한 번에 무릎에 끼워 착용하는 원통형, 둘째는 무릎을 감싸고 스트랩으로 고정하는 스트랩형, 세 번째는 일자형과 스트랩 형이 합쳐진 복합형이었다. 이런 분류는 손목보호대를 착용 방식에 따라 밴드형, 랩형, 복합형으로 분류한 Koo and Lee(2017)의 연구와 유사하였다.

본 연구에서는 이 결과를 바탕으로 남녀노소가 누구나 착용할 수 있도록 외관상 너무 두드러지지 않고 두께가 얇으며 가벼우면서 휴대하기 좋은 크기, 착의 과정이 복잡하지 않고 간단하며 쉽게 고정이 가능한 것을 고려하여 세 가지 형태의 무릎 보호대를 디자인하였다.

보호패드를 삽입할 무릎보호대 제작에는 시중에 판매되는 소재 중 무릎보호대 소재로 가장 적합하다고 판단되는 네오프렌

Table 1. Materials of knee protectors

Fabric 1	0.35cm	Loop Neoprene Nylon
Fabric 2	0.24cm	Nylon Neoprene Nylon
Fabric 3	0.19cm	Nylon Neoprene Nylon

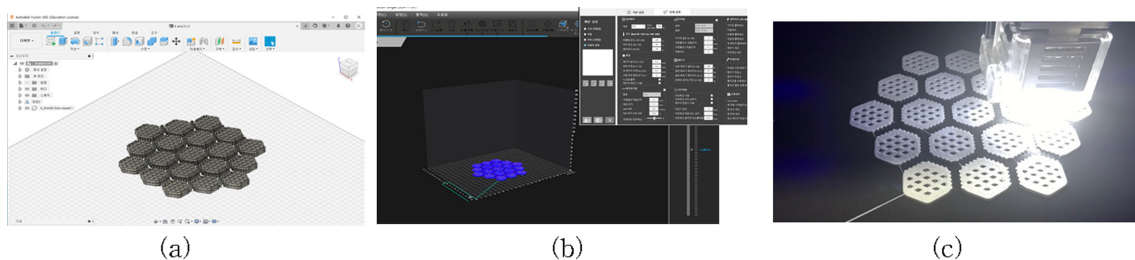


Fig. 1. 3D Pad fabrication process for knee protector; (a) Modeling process of the 3D printing pad, (b) Slicing for G-code generation, (c) 3D printing pad output process.

Table 2. Material properties of knee protectors

Properties	Test methods	Fabric 1	Fabric 2	Fabric 3	
Fiber content (%)	KS K 0210:2018	Face	Nylon(86.1) Polyurethane(13.9)	Nylon(100)	Nylon(100)
		Middle	CR - Chloroprene Rubber	CR - Chloroprene Rubber	CR - Chloroprene Rubber
		Back	Nylon(100)	Nylon(100)	Nylon(100)
Thickness (mm)	KS K ISO 5084:1996	3.5	2.4	1.9	
Weight (g/m ²)	KS K 0514:2017	738.3	369.1	449.9	
Tearing strength(N)	KS K 0534	Warp	133.9	85.2	88.6
		Weft	161.5	86.8	99.0
Abrasion resistance	KS K 0540	At a pressure of 40 kpa, there was no hole generation when rubbing with the abrasive paper 300 times.			
Color fastness to accelerated washing	KS K ISO 105-C06	Color change	4-5	4-5	4-5
		Stain of attachments (Polyamide)	3-4	4-5	4-5
		Stain of attachments (Cotton)	4-5	4-5	4-5

접합포 3종류 소재를 선정하여 사용하였다. Fabric 1은 네오프렌 한 쪽에는 나일론, 다른 쪽에는 루프(loop)가 접착된 원단이며, Fabric 2와 Fabric 3은 양 면 모두 네오프렌에 나일론이 접착되어 있지만 두께가 다른 원단이다(Table 1). 3종류 원단의 KS규격에 따른 소재 물성은 Table 2와 같다.

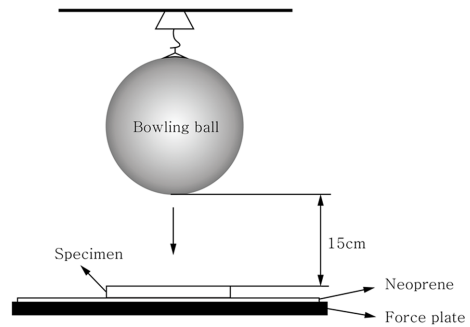
2.3. 무릎보호대의 평가

2.3.1. 무릎보호대의 충격보호 성능평가

3종류의 무릎보호대의 충격보호성능을 알아보기 위하여 기존 연구(Park et al., 2018)에서 사용된 충격보호성능 평가방법을 적용하여 검증을 실시하였다(Fig. 2). 거치대에 6파운드의 볼링공을 지면에서 15cm 높이에 고정시킨 후 볼링공이 움직이지 않도록 고정한 후 자유낙하 시켜 수직방향으로 발생하는 힘의 크기를 측정하였으며, 30회 반복 실험하였다. 실험에 사용된 시편은 제작된 무릎보호대와 동일하도록 걸감과 안감 중간에 패드를 고정시켰으며 힘 판의 손상을 방지하기 위해 0.6 cm 두께의 네오프렌을 깔고 실험을 진행하였다.

2.3.2. 무릎보호대의 사용성 평가

제7차 한국인 인체치수조사(Korean Agency for Technology and Standards, 2015)의 무릎둘레 치수를 기준으로 평균과 표준편차 범위 내에 있으며 일상생활에서 무릎 손상이나 무릎 통증을 경험하여 무릎보호대에 관심이 높은 여성 6명 남성 4명 총 10명 피험자를 선정하였다. 피험자의 평균 연령은 53세이었으며, 무릎둘레는 35~36.8 cm이었다. 피험자들은 실험목적과 실험방법을 충분히 이해한 상태에서 모두 자발적으로 참여 의사를 밝혔다. 실험 방법은 피험자에게 3종류의 무릎보호대(원통형, 스트랩형, 복합형)를 각각 10분씩 착용시키고 10분 동안 걷기, 계단 오르기, 무릎 굽히기 등 활동을 수행하도록 한다. 모

**Fig. 2.** Impact performance test of protector.

든 보호대를 착용하고 활동을 완료한 후 보호대의 유형별로 설문지를 작성하도록 하였다.

설문지는 유니버설 디자인을 달성하는데 필요한 7가지 원칙과 관련한 문항에 기능성 의복의 평가요소인 착용감, 신체적합성, 동작적합성과 관련한 문항을 추가하여 구성하였다.

유니버설 디자인은 모든 사용자가 제품을 쉽고 편리하게 사용할 수 있도록 디자인하는 것이다. 이를 위해, 유니버설 디자인은 7가지 원칙과 경제성, 심미성, 환경문제 등의 관점을 고려하여 제품의 사용성을 평가하는 PPP(Product Performance Program) 평가를 사용한다(Rhee, 2010; Shin et al., 2015). 본 연구에서는 Koo and Lee(2017)의 평가항목들을 참고하여 PPP 평가항목을 구성하되 개발된 무릎보호대의 착의 평가에 적절하지 않다고 생각되는 항목을 제외하였다. PPP 평가항목은 공평한 사용에 대한 배려 2항목, 간단하고 직관적인 사용 2항목, 사용상의 유연성확보 2항목, 사고와 오조작의 방지 2항목, 육체적 부담의 최소화 3항목, 적당한 크기와 공간의 확보 2항목, 품질과 심미성의 추구 2항목으로 구성하였다.

의복은 외관의 아름다움과 동작의 편안함을 위해 인체의 3

차원 형태에 적합해야 하므로 의복의 형태적합성과 동작적합성으로 평가되어야 한다(Kim & Nam, 2012). 따라서 PPP 평가 문항 외에도 착용감, 신체적합성, 동작적합성에 대한 문항을 추가하였다. 이를 위해 국내외에서 널리 사용되고 있는 QUEST 2.0(Lee et al., 2013)의 문항을 참고하였으며 유니버설 디자인과 중복되는 항목과 본 연구의 사용성 평가에 적절하지 않다고 생각되는 항목을 제외하고, 기능성 의복에 관련된 선행 연구(Kim, 2015; Seo, 2016; Shin, 2020)를 참고하여 착용감 4항목, 신체적합성 4항목, 동작적합성 4항목으로 구성하였다. 의복의 신체적합성은 사이즈와 형태, 그리고 의복의 맞음새를 의미하고, 동작적합성은 의복을 입었을 때 편안한 움직임을 뜻한다(Kim & Lee, 2007; Kweon & Sohn, 2010; Lee & Choi, 2014). 본 연구에서는 무릎을 최대한 굽혔을 때 의복이 맞는 정도를 평가하여 신체적합성을, 그리고 일상생활에서 편안한 움직임을 평가하여 동작적합성을 측정하였다.

평가는 5점 척도로 매우 그렇다(5점), 전혀 그렇지 않다(1점)로 하였으며 점수가 높을수록 좋은 결과를 의미한다. 자료분석에는 착의 평가 각 문항의 평균, 표준편차 값을 산출하기 위하여 SPSS통계 프로그램을 사용하였다. 피험자수가 10명이므로 정규분포를 가정할 수 없어 비모수 검정인 Kruskal-Wallis test를 실시하여 3 종류 무릎보호대의 평가점수에 통계학적으로 유의한 차이가 있는지 확인하였다.

3. 연구결과

3.1. 무릎보호대의 3D 패드 모델링 및 출력

모델링은 여러 차례의 수정을 거쳐 윗면과 밑면 표면층의 두께를 각각 0.2 cm로 하였다. 중간층(spacer layer)의 기둥두께는 무릎 뼈가 두드러지는 무릎 중심부는 0.2 cm로 함으로써 작은 메쉬 구조의 총 두께는 0.6 cm로 보호력을 높였다. 무릎 뼈 외곽에는 중간층 두께를 0.1 cm로 함으로써 무릎 중심에서 밖으로 갈수록 보호대의 두께가 조금 얇아져 외관을 개선하고 신체적합성을 높이고자 하였다. 벌집 형태의 작은 육각형을 연결시키는 브릿지 두께는 0.15 cm로 지정하였다. 3D 프린팅 보호패

드 출력 시 브릿지에 의해 두 육각형간의 간격은 0.6 cm를 유지하나 무릎을 펴거나 굽힘과 같은 외력에 의해 브릿지가 수축 또는 신장함으로써 0.4~1.2 cm까지 변화할 수 있다(Fig. 3). Fig 4는 완성된 3D 프린팅 보호패드의 모습으로 지름이 12.3 cm인 정육면체이다. Jang et al.(2020)에 따르면 무릎을 135° 구부렸을 때 무릎 중심 부위의 체표는 정립 시에 비해 30% 정도인 약 5.3 cm 늘어났다. 본 연구에서 완성된 작은 육각형 사이의 브릿지는 외력 작용 시 1.2 cm까지 늘어나므로 패드를 삽입하는 방향에 따라 4~5개의 브릿지가 작용하면 보호패드는 4.8~6.0 cm 늘어나므로 무릎 동작에 따른 체표변화를 커버하는데 무리가 없었다.

3.2. 무릎보호대 디자인 및 제작

착용방법을 달리한 3종의 무릎보호대 디자인을 위하여 연구자가 착용자의 의견 수렴을 통해 여러 차례 수정과정을 거쳐 최종 무릎보호대를 제작하였다. 3종(원통형, 스트랩형, 복합형)의 무릎보호대는 공통적으로 가볍고 휴대하기 편리한 크기로 설계하였으며, 착용 대상의 무릎둘레와 체표변화를 고려하여 디자인하였다(Table 3). 원통형은 루프가 없는 소재(Fabric 2)를 사용하였으며 한 번의 조작으로 착용이 가능한 단순한 디자인이다. 무릎보호대 앞면 길이는 무릎을 완전히 굽혔을 때 체표를 커버되되 착용자가 불편을 느끼지 않고 3D 프린팅 보호패드를 삽입할 수 있도록 17.5 cm로 하였다. 무릎보호패드로 인해 상단과 하단이 들뜨는 것을 방지하고 무릎의 입체감을 고려하여 패드가 삽입되는 무릎 부분은 가로로 4조각 분절하여 무

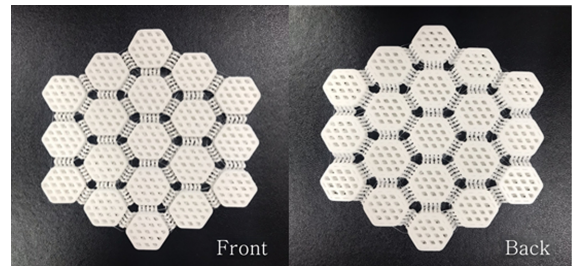


Fig. 4. 3D printing pad output.

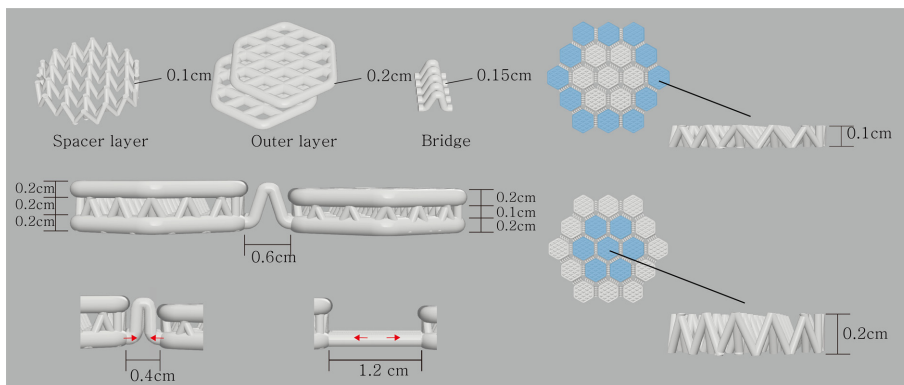
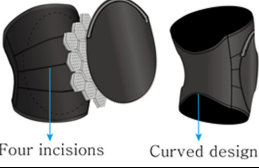
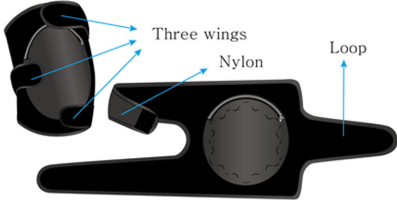
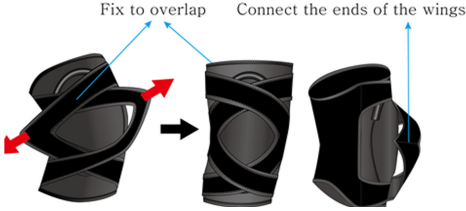


Fig. 3. 3D pad detail structure.

Table 3. The design features of knee protectors

Type	Design	Features
Cylinder		<ul style="list-style-type: none"> • The front part is segmented at the knee line to wrap naturally around the knee. • The back part is designed with concave curves up and down to prevent discomfort from wrinkles when the knees are bent.
Strap		<ul style="list-style-type: none"> • It is designed with three wings to securely wrap around the knee.
Combination		<ul style="list-style-type: none"> • The wings are designed to cross over each other on both sides, which prevents the bottom of the knee protector from lifting up. • It has a strong anchoring force and adheres well to the knee.

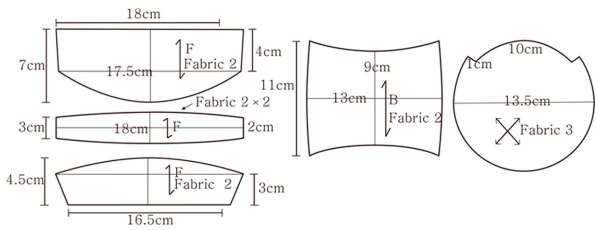


Fig. 5. Knee protector pattern of cylinder type.

를 굴곡을 자연스럽게 감싸주도록 하였다. 무릎 뒤면은 무릎을 굽혔을 때 원단이 겹쳐져 오금 부위가 불편하지 않도록 보호대의 위, 아래는 오목한 곡선으로 설계하여 길이를 짧게 하였다. 스트랩형은 테이핑 하는 방법으로 무릎을 감싸는 평면적 무릎 보호대이다. 착의 시 고정이 잘 되도록 보호대의 위, 중간, 아래 날개를 3개 넣었고 걸면은 전부 루프로 된 Fabric 1 소재를 선택하여 날개가 원하는 위치에 탈부착 할 수 있도록 하였다. 스트랩형의 전체 크기는 가로 60 cm, 세로 20 cm이며 탈

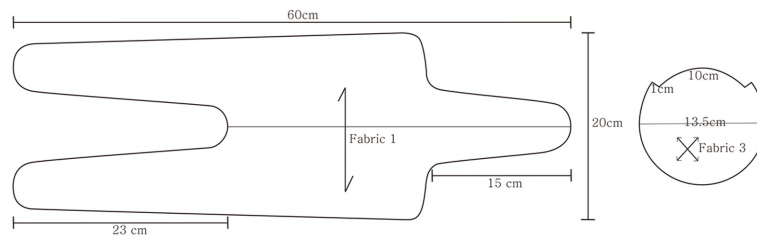


Fig. 6. Knee protector pattern of strap type.

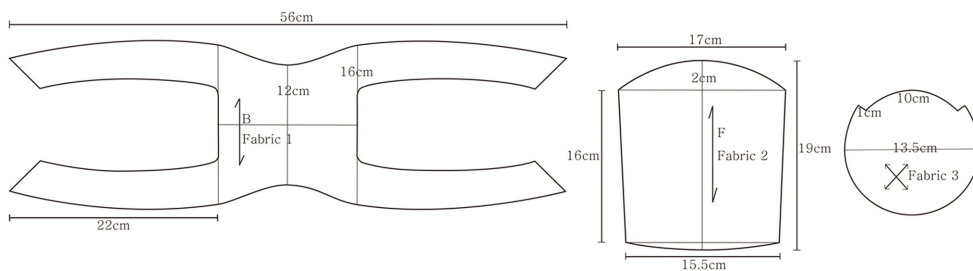











Fig. 7. Knee protector pattern of combination type.

Table 4. Image of 3D knee protectors worn

Type	Front	Back	Pad insert
Cylinder			
Strap			
Combination			

부착하는 날개는 한쪽에 2개(23 cm) 다른 한쪽에는 1개(15 cm)로 나누어지도록 설계하였다. 복합형은 원통에 스트랩이 합쳐진 형태이며 무릎을 양쪽으로 감싸면서 교차되는 방식으로 설계되어 패드 삽입으로 인해 보호대의 밑단이 들뜨는 것을 방지하고 무릎에 고정되는 힘을 강화하였다. 뒤판은 Fabric 1 소재로 하였으며 앞판은 Fabric 2를 사용하였다. 복합형의 착용방법은 먼저 발에서부터 착용한 후 날개를 앞에서 교차하여 무릎 옆면에 부착할 수 있도록 하였다. 3종의 무릎보호대 모두 세탁 편의를 위하여 패드는 탈부착 할 수 있도록 두께가 얇은 Fabric 3 원단을 포켓 형태로 만들어 지퍼를 달아 주었다. Fig. 5-7은 3종류 무릎보호대의 패턴이며, Table 4는 패드를 보호대에 삽입하고 착의한 모습이다.

3.3. 무릎보호대의 평가 결과

3.3.1. 충격 보호력 평가 결과

Park et al.(2017)의 연구에 의하면 15 cm 높이에서 시편이 없이 볼링공을 떨어뜨릴 때의 충격량은 6,500N이었으며, 본 연구의 3D 프린팅 보호패드를 사용할 때 충격보호에 대한 실험 결과는 Fig. 8와 같다.

볼링공 낙하를 통하여 실험물에 따라 30회 측정하여 평균치를 산출한 결과는 원통형 1,345N, 스트랩형 1,344N, 복합형 1,345N으로 수치 간에 크게 차이가 나지 않아 3종류 무릎보호대의 디자인에 따른 충격성능에는 차이가 없는 것을 확인할 수 있었다. 볼링공이 바로 지면에 낙하했을 때의 충격량 6,500N에 비해 3종류 무릎보호대 모두 1,500N미만으로 충격량이 약 80% 감소된 것으로 나타났다.

3.3.2. 무릎보호대의 사용성 평가 결과

무릎보호대의 종류에 따른 사용성의 차이를 살펴보고자 피험자 착의 평가를 실시하였으며 평가한 결과에 대하여 Kruskal-Wallis test를 실시한 결과는 Table 5와 같다.

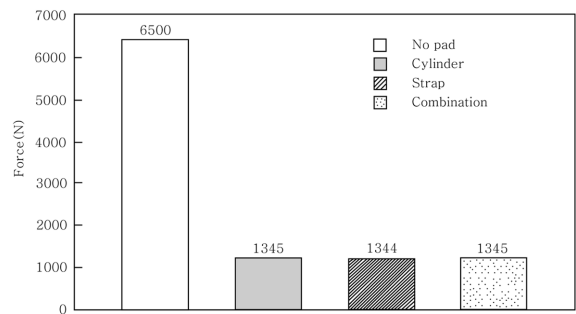


Fig. 8. Impact protection performance experiment results.

전체 10개 영역 중에서 공평한 사용, 직관적인 사용, 사용상의 용통성, 사고와 오조작 방지 영역에서는 모든 항목에서 무릎보호대 디자인에 따라 통계적으로 유의한 차이가 나타났다. 적당한 크기와 공간 영역 중 ‘휴대하거나 보관하기 적당한 크기’ 항목, 착용감 영역 중 ‘무릎을 보호하는 보호대의 패드 촉감이 부드러우냐’ 및 동작적합성 영역의 ‘무릎을 굽힐 때 편안가’의 항목에서도 사용성 평가 결과에 유의한 차이가 나타났다. 이상의 영역 및 항목들에 있어서는 모두 원통형, 스트랩형, 복합형의 순위로 나타나 원통형의 무릎보호대가 제일 타인의 시선을 의식하지 않고 안전하면서 간편하게 조작할 수 있는 것으로 평가되었다. 그 외에 육체적 부담 최소화, 외관과 관리, 착용감 영역에서는 유의한 차이는 없으나 대체로 원통형의 평균 점수가 다른 형태의 무릎보호대에 비해 높아 외관상의 편리와 속박이 강하지 않은 착용감을 더 중요하게 생각하는 것으로 보인다. 또한 신체적합성, 동작적합성 영역에서도 대체로 같은 결과가 나왔는데 신체적합성 영역에서는 원통형이 앞무릎과 오금 부분의 굴곡에 따라 분절, 오목하게 디자인하여 무릎을 굽혔을 때 들뜸이나 주름이 적고 인체에 밀착성이 높기 때문이라고 판단된다. 그러나 ‘전체적으로 보호대의 신체적합도가 적당하니까?’항목에서는 스트랩형이 4.22점으로 제일 높게 나타났는데 이것은 원통형 보호대의 들뜸, 주름량 등의 자세한 사항은 모두 우수하나 전체적으로 봤을 때 날개로 고정하는 스트랩형 보호대가 더 안정적으로 인체를 감싸기 때문이라고 판단된다. 스트랩형은 외관과 관리 영역에서 ‘제품의 색과 모양이 친근하다’, ‘세탁과 관리가 편해 보인다’ 항목에서 조금 더 높은 평가를 받았으나 유의미한 차이는 없어 외관형태와 보관관리에서는 3종류의 보호대가 큰 차별이 없이 적절하다고 볼 수 있다. 복합형은 동작적합성 영역을 제외하고는 3점에서 4점 사이로 다른 유형에 비해 점수가 낮았는데 이는 복합형의 양쪽고정으로 인해 상대적으로 다른 무릎보호대보다 피험자에게 두껍고 투박한 이미지를 주었기 때문이라고 생각된다. 신체적합성 영역의 ‘보호대의 패드 크기가 무릎을 적절하게 보호하는가?’ 항목에서 복합형 보호대는 다른 제품들에 비해 낮은 평가를 받았다. 이는 복합형의 날개가 패드 삽입부분의 상하를 지나면서 패드가 중간으로 밀려나는 경향이 있어서 무릎 부분에 잘 밀착되지 않는 것으로 나타나 복합형에 삽입된 패드가 다른 무릎보호대와 비

Table 5. Knee protectors usability evaluation results

Classification	Evaluation items	Mean(S.D.)			χ^2
		Cylinder	Strap	Combination	
Equitable use	1. I can use the knee brace without being conscious of other's eyes.	4.89(.33)	4.22(.83)	3.56(1.13)	8.73*
	2. It is a product that looks comfortable and I want to try it.	4.56(.72)	4.33(.70)	3.22(.83)	10.55**
Simple & intuitive use	3. The way to wear knee protector is easy to see.	4.89(.33)	4.11(.78)	3.33(.70)	14.69***
	4. I can intuitively understand how to use it.	4.78(.44)	4.44(.52)	3.22(1.20)	10.20**
Flexibility in use	5. It is easy to operate when I wear it.	5.00(.00)	4.22(.66)	3.00(1.11)	15.71***
	6. I can use it anytime, anywhere.	4.89(.33)	4.33(.70)	3.22(1.20)	10.97**
Tolerance for error	7. I can operate it safely and accurately.	4.89(.33)	4.67(.50)	3.67(.86)	10.94**
	8. I can simply return to the original state even if making a mistake when wearing it.	5.00(.00)	4.67(.50)	3.89(.78)	11.60**
Low physical effort	9. It is convenient to wear alone without others' help.	4.78(.44)	4.56(.52)	3.89(1.26)	4.41
	10. I can wear it without putting too much force on my body.	4.67(.50)	4.33(.86)	3.67(1.32)	4.14
	11. I can wear it without unnecessary movement.	4.44(.88)	4.11(1.16)	3.89(.78)	3.38
Size and space for approach and use	12. It is the right size and shape to carry or store.	4.67(.50)	4.22(.83)	3.11(1.05)	10.62**
	13. It is appropriate in size or shape.	4.33(.86)	4.22(.97)	3.33(1.00)	4.87
Appearance and management	14. I have a friendly impression to the color or shape of the product.	4.22(1.20)	4.44(.52)	3.44(1.01)	5.19
	15. I think washing and maintenance is simple.	4.22(1.20)	4.33(.86)	3.56(1.42)	2.07
Wearing comfort	16. It is comfortable to wear on my leg.	4.11(1.05)	4.00(.70)	3.89(1.05)	.20
	17. I don't feel any foreign body sensation when wearing it.	4.22(.97)	4.00(.86)	3.44(1.01)	1.61
	18. I don't feel heavy when wearing knee pads.	4.00(1.22)	4.11(.78)	3.56(1.01)	.84
	19. The protector's pad is soft.	4.44(.72)	4.22(.83)	3.22(1.09)	6.71*
Physical fitness	20. There is no lifting from the pad when bending the knee.	4.44(.52)	4.11(1.05)	3.67(1.11)	2.19
	21. There is no excessive wrinkles when bending the knee.	4.22(.44)	4.22(.83)	3.22(1.09)	6.22
	22. The pad size of the knee protector is appropriate.	4.44(.72)	4.22(.83)	3.44(1.01)	5.84
	23. Is the knee pad suitable for the human body?	4.11(.78)	4.22(.97)	3.33(1.11)	5.03
Movements adaptability	24. It is convenient to move when I bend the knee.	4.56(.52)	4.00(1.00)	3.22(1.20)	6.29*
	25. It is comfortable to crouch down.	4.44(.72)	4.22(.83)	3.33(1.11)	5.26
	26. It is convenient to move up and down the stairs.	4.78(.44)	4.44(.72)	4.00(1.11)	2.91
	27. The knee protector secured to the knee when going up and down the stairs.	4.56(.88)	4.44(1.01)	4.11(.92)	1.10

* $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$

교했을 때 더 크게 느껴진 것으로 파악된다. 반면에 ‘계단을 오르내릴 때 움직임이 편리한가’와 ‘계단을 오르내리는 동작 시 무릎 보호대가 무릎에 잘 고정되어 있는가’ 항목에서는 복합형의 무릎보호대가 4점 이상의 점수를 보여 다른 보호대보다 여덟이 안정적으로 무릎을 지지하는 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 3D 프린팅 기술을 적용하여 착용이 편리하면서 보호력이 높은 무릎보호대를 설계하고자 하였다. 이를 위해 낙상보호용 동작 가변적 3D 프린팅 보호패드를 무릎에 적합하도록 모델링하고, 이를 삽입할 수 있는 3종류의 무릎보호대를 제작하였다. 무릎보호대 착용에 따른 사용성 평가는 무릎 통증을 경험하고 무릎보호대에 대한 요구가 있는 남녀를 대상으로 하였다. 연구의 결과는 다음과 같다.

첫째, 무릎보호대에 삽입한 3D 보호패드는 정육각형의 메쉬 구조가 한 단위를 이루는 정육면체로 완성된 보호패드의 크기는 지름이 12.3 cm이다. 내부 메쉬의 위, 아래 표면층은 0.2 cm, 중간층의 기둥은 0.1~0.2 cm, 브릿지는 0.15 cm로 모델링하였다. 중간층의 두께를 달리함으로써 무릎 중심 부위의 패드 두께는 0.6 cm이나 외곽을 이루는 부분의 육각형은 0.5 cm로 하여 투박하지 않고 신체적합성을 높이고자 하였다. 1개의 브릿지는 동작에 따라 최고 1.2 cm까지 신장할 수 있어 방향에 따라 4~5개의 브릿지는 무릎을 충분히 구부렸을 때의 체표변화를 커버할 수 있었다. 제작한 3종류의 무릎보호대의 충격보호력 평가 결과에서 3종류의 무릎보호대 모두 충격량이 1,500N 미만으로 약 80%의 충격을 감소시키는 것으로 나타났다.

둘째, 무릎보호대의 제작은 특허 및 실용실안 조사와 선행연구 조사를 통하여 외관상 두드러지지 않고 자연스러우며 휴대하기 좋은 크기, 조작성 간단하고 쉽게 고정이 가능한 디자인

으로 무릎보호대를 3종류(원통형, 스트랩형, 복합형)로 디자인 하였다. 무릎보호대의 주된 소재는 나일론과 네오프렌이었다. 원통형은 한 번의 조작으로 착용이 가능한 단순한 디자인으로, 가장 기본적인 통으로 된 형태다. 스트랩형은 전체가 랩으로 구성되었고 테이핑 방법으로 무릎을 감싼 형태며 복합형은 원통에 스크랩이 겹쳐진 형태로 양쪽고정이 되도록 하였다.

셋째, 유니버설 디자인 원리에 따른 3종류의 무릎보호대에 대한 사용성 평가 결과에서는 모든 영역에서 전반적으로 원통형의 평가가 가장 높게 나타났는데 가장 간편하게 조작할 수 있는 점이 중요하게 평가되었다. 복합형은 양쪽고정으로 다른 무릎보호대에 비해했을 때 두께가 두껍고 조작이 상대적으로 복잡하면서 투박한 인상을 가지고 있어 대부분의 항목에서 다른 형태에 비해 낮은 평가를 받았다. 사용성 평가를 통해, 다음과 같이 개선할 수 있다. 원통형 제품은 가장 단순한 디자인으로 조작, 외관, 착용감 등의 측면에서 우수한 결과를 보였지만, 스트랩형이나 복합형에 비해서는 고정 강도가 낮은 것으로 나타났다. 따라서 더 강력하게 밀착되는 원단의 사용이 필요하다. 또한, 스트랩형과 복합형 제품들은 전반적으로 투박한 인상을 준다는 평가가 있었기 때문에, 날개 부분과 겹치는 부분에 얇은 원단을 사용하여 개선할 필요가 있다. 복합형 제품의 경우, 중간 패드 부분이 밀리는 현상을 개선하기 위해, 날개를 고정하는 부위의 형태나 위치를 변형할 필요가 있다고 사료된다.

본 연구에서 무릎보호대 제작에 사용한 소재는 시중에 판매되는 것을 사용하였으며 내구성은 좋으나 착용감에는 큰 만족도를 보이지 못했다. 또한 연구에 사용된 3D 프린팅 패드 출력 소재는 한 종류로 소재의 다양한 특성을 알기에는 제한이 있었으며 패드의 두께도 한 종류로 두께에 따른 차이점을 알기에는 아쉬운 부분이 있었다. 따라서 앞으로 인체에 더욱 적합하도록 다양하고 새로운 소재의 사용이 시도되어야 하며, 두께에 따른 충격성 평가도 이루어져야 한다. 본 연구에서는 3D 프린팅 기술을 활용하여 인체 보호용 제품을 설계하고 사용성 평가를 수행함으로써 3D 프린팅 기술이 산업적으로 활용될 수 있는 가능성을 제시하였다. 연구 결과는 무릎보호대 제조업체들이 실용적인 제품을 개발하는데 도움이 될 것으로 기대되며, 또한 다른 부위나 용도에 대한 보호장비 개발을 촉진할 것으로 예상된다.

감사의 글

이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2018R1D1A1A09082741).

References

- Jang, J. H., Jung, H. K., Park, J. H., & Lee, J. R. (2020). An analysis on the changes of knees and hip joint surface according to elderly women's movements. *Fashion & Textile Research Journal*, 22(2), 222-232. doi:10.5805/SFTI.2020.22.2.222
- Jung, H. J., Lee, H. R., Chung, I. H. (2022). Development of the 3D knee protector for yoga. *Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles*, 46(4), 657-671. doi:10.5850/JKSC.2022.46.4.657
- Kim, J. H. (2015). *The development of protective clothing pattern for riot police woman using 3D printing*. Unpublished doctoral dissertation, Konkuk University, Seoul.
- Kim, S. B., & Lee, Y. S. (2007). The evaluation of women employees of department store about the characteristics, the movement adaptability and the fitness of their uniform. *Fashion & Textile Research Journal*, 9(5), 528-537.
- Kim, S. Y., & Nam, Y. J. (2012). A study on establishing of fit test conditions for slacks. *Fashion & Textile Research Journal*, 14(3), 454-464. doi:10.5805/KSCI.2012.14.3.454
- 'Knee protector'. (n. d.). *KIPRIS*. Retrieved April 12, 2020, from http://www.kipris.or.kr/kportal/search/total_search.do
- 'Knee assistance device'. (n. d.). *KIPRIS*. Retrieved April 12, 2020, from http://www.kipris.or.kr/kportal/search/total_search.do
- Koo, D. S., & Lee, J. R. (2017). The development of a wrist brace using 3D scanner and 3D printer. *Fashion & Textile Research Journal*, 19(3), 312-319. doi:10.5805/SFTI.2017.19.3.312
- Korean Agency for Technology and Standards. (2015). *The 7th Size Korea 3D scan & measurement technology report*. Seoul: Government Printing Office. Retrieved June 29, 2020, from <http://sizekorea.kats.go.kr>
- Kweon, S., & Sohn, B. H. (2010). A study on body satisfaction and fitness apparel based on body type by body mass index - In women 20-50's years of age. *Journal of the Korean Home Economics Association*, 48(6), 1-8. doi:10.6115/khea.2010.48.6.001
- Lee, K. S., & Choi, J. W. (2014). Development of Jeggings pattern considering body fit-focus on 20-24 year old females. *Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles*, 38(5), 675-689. doi:10.5850/JKSC.2014.38.5.675
- Lee, H. J., Kim, N. Y., Hong, K. H., & Lee, Y. J. (2015). Selection and design of functional area of compression garment for improvement in knee protection. *Korean Journal of Human Ecology*, 24(1), 97-109. doi:10.5934/kjhe.2015.24.1.97
- Lee, H., & Lee, Y. (2017). Segmental hard shell design of knee protector for children using 3D printing. *Journal of Fashion Business*, 21(4), 116-126. doi:10.12940/jfb.2017.21.4.116
- Lee, S. H., Jung, B. K., & Park, S. Y. (2013). Korean translation and psychometric properties of Quebec user evaluation of satisfaction assistive technology 2.0. *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 14(7), 3284-3292. doi:10.5762/KAIS.2013.14.7.3284
- Oh, H. A., Mun, K. R., Chun, S. K., Choi, S. J., Jeong, H. S., & Kim, J. W. (2017). Patella shape extraction from 3D point cloud data for personalized knee brace. *Proceeding of the Korean Society for Precision Engineering, Spring Conference, Korea*, pp. 291-291.
- Park, J. H., Jung, H. K., & Lee, J. R. (2017). Structure design of fall impact protection pad using 3D printing technology and comparison of characteristics according to filament material. *Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles*, 41(5), 939-949. doi:10.5850/JKSC.2017.41.5.939
- 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/JKST.2018.42.4.612
- Park, J. H., Jung, H. K., & Lee, J. R. (2019a). Development and evaluation of fall impact protection pads using additive manufacturing. *Materials*, 12(20), 3440. doi:10.3390/ma12203440
- Park, S. Y., Lee, H. R., & Lee, Y. J. (2019b). Suggestion of crotch protector prototype for cyclewear based on 3D modeling and printing. *Korean Journal of Human Ecology*, 28(2), 147-157. doi:10.5934/kjhe.2019.28.2.147
- Rhee, J. S. (2010). A Study on the public facility design guidelines mainly with universal design. *Journal of Korea Design Knowledge*, 16, 101-110. doi:10.17246/jkdk.2010..16.011
- Seo, W. S. (2016) *Changes in distal migration of knee orthoses and joint range of motion according to the cuff material*. Unpublished master's thesis, Catholic University, Seoul.
- Shin, I. (2020). *Design Research of knee Brace for usability improvement - Focused on angle control and wearing system*. Unpublished master's thesis, Inje University, Kimhae.
- Shin, S. H., Kwon, J. D., Yu, M., Yu, C. H., Kwon, T. K., & Hong, J. P. (2015). Study on the design development of a trunk stabilization training device with a universal design. *Archives of Design Research*, 28(4), 211-220. doi:10.15187/adr.2015.11.28.4.211
- Yeom, J. H. (2020). Falls among Korean older adults - A study of recovery, disablement, and death. *Korea Journal of Population Studies*, 43(2), 103-127. doi:10.31693/KJPS.2020.06.43.2.103

(Received March 22, 2023; 1st Revised March 29, 2023;
2nd Revised April 7, 2023; 3rd Revised April 14, 2023;
Accepted April 19, 2023)