



패션쇼를 위한 3D 프린팅 의상 디자인 개발 연구

이현승[†]

국민대학교 모듈형스마트패션플랫폼연구센터

A Study on the Development of 3D printed garments for Fashion Show

Lee, Hyunseung[†]

Convergence Research Center, Kookmin University; Seoul, Korea

Abstract: This study develops 3D-printed-garment collections for a fashion show presentation. A design concept using traditional patterns that consisted of garments regarding the limitation of the printing technology was investigated in order to develop the collection. The structures of the connecting joints of the textile parts which could be easily and sturdily interconnected were invented. Wearability as garments that could be naturally worn on the human body were sought. As a result, four 3D-printed-garments were developed. The 1st garment composed of objects based on a 'Yeon-Dang-Cho'-pattern was constructed as a geometric robe style using a FDM 3D printer and transparent TPU filaments. The 2nd and 3rd 3D-printed-garments composed of an object based on a 'Boe-Sang-Hwa'-pattern was constructed as a distorted one-piece exaggerating the silhouettes of shoulders and waist parts as well as a straight asymmetric tunic style that used the same printer and material as the 1st garment. The last garment composed of an object based on a 'Boe-Sang-Hwa'-pattern printed using a SLA 3D printer and flexible-liquid-resin was constructed attaching the objects on the fabric material by the hot-press machine. The four developed garments were presented in the opening fashion show of 'the 6th International 3D-printing Korea Expo'. This study provides a basic case for related studies to adapt 3D-printing technology in textile pattern development of garment construction.

Key words: easy assembling structure (손쉬운 결합구조), 3D-printing technology (3D 프린팅 기술), traditional pattern (전통 문양), wearable structure (착용 가능한 구조)

1. 서 론

현재 3D 프린팅 기술은 Bio-tech, IoT, AI 등과 더불어 4차 산업혁명의 주요한 한 축을 이루는 기술로 인식되고 있다. 이코노미스트지는 2012년 3D 프린팅 기술이 산업에 혁신을 가져올 핵심기술로 언급하였다. 2013년 맥킨지 보고서는 2025년까지 산업계에서 가장 폭발력이 있을 기술 12가지 중 하나로 3D 프린팅 기술의 전망성을 평가하였다. 타임지는 3D 프린팅 기술을 '2014 최고의 발명품 25'로 선정하였다. 이에 따라, 현재 다방면의 산업계는 물론 학계에서도 해당 기술의 활용방안이 연구되고 있다(Lee & Huh, 2017; Lee & Kim, 2015). 패션 디자이너 Iris Van Herpen은 3D 프린팅 기술을 활용하여 기존의 소재로는 실체화가 불가능한 건축 형상의 패션 프레젠테이션

을 선보였으며, Pringle of Scotland 브랜드는 유연한 3D 프린팅 섬유를 활용한 기성복을 선보여 주목을 받고 있다.

국내에서도 Lee and Kim(2015)과 Lee et al.(2015), Kim (2016), Lee and Huh(2017) 등의 연구와 같이, 3D 프린팅 기술을 사용하여 패브릭 재료와 유사한 정도의 유연성을 확보하기 위한 소재의 구조나 의상, 액세서리 품목을 개발하기 위한 다양한 연구가 수행되고 있다. 개발된 3D 프린팅 의상이나 액세서리 품목을 실제 사람이 착용하고 활동하는 것을 전제로 한 작품의 크기 및 형태, 재질, 출력된 구조물의 결합방법, 내구성에 관한 연구는 아직 드문 실정이다. 의상의 경우 인체에 착용됨으로써 비로소 전체적인 형태가 완성되고 사용자의 이미지를 실체화할 수 있다는 점에서, 3D 프린팅 기술을 활용하여 개발된 의상 또한 인체에 무리 없이 착용될 수 있어야 한다. 또한, 착용되었을 때 인체 활동을 방해하지 않음과 동시에 인간의 활동에 따라 의상 자체가 손상되지 않을 것이 전제되어야 한다.

이에 따라 본 연구에서는 모델이 착용하고 이동하거나 동작을 취하는 활동이 전제된 패션쇼를 위한 3D 프린팅 기술을 활용한 의상의 디자인 개발에 목적을 두었다. 인체에 걸쳐지고, 활동성에 장애가 없이 안정적으로 착용될 수 있는 전통적인 의상의 역할을 수행하기 위해, 3D 프린팅 기술에서 일반적으로

[†]Corresponding author; Lee, Hyunseung

Tel. +82-2-910-4630

E-mail: srwalpha@naver.com

© 2019 (by) the authors. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution license (<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

활용되는 고강도의 하드 타입의 소재가 아닌, 내구성은 떨어지나 유연성이 확보된 소재를 활용하여, 인체에 착용되어 활동 가능한 내구성과 안정성을 가진 심미적인 의상을 개발하고자 하였다.

본 연구에서 활용된 보급형 3D 프린터의 경우, FDM(Fused Deposition Modeling)과 SLA(Stereo Lithography Apparatus)의 출력방식에 관계없이 한 번에 출력 가능한 개체의 크기가 10cm에서 20cm까지이며, 출력에 사용 가능한 재료 또한 매우 제한적인 한계점이 있다. 이에 따라 한 번에 인체를 덮을 수 있는 크기를 출력할 수 없으므로 이를 극복하기 위한 의상을 구성하는 최소 단위 부품의 형태 및 출력 재질, 부품끼리의 결합방법 등에 관한 고려가 이루어졌다. 또한, 본 연구의 3D 프린팅 패션쇼를 위한 3D 프린팅 의상의 연구개발 기간이 한 달여로 매우 제한적이었음에 따라, 한정된 프린터의 출력 범위 내에서 출력 가능한 규격화된 소재의 형태적 조형성 및 출력된 각 소재의 연결 방법과 구조, 이질적인 소재로 개발된 소재가 결합되었을 때, 의상으로서 인체에 착용될 수 있을 의상의 형태 구성으로 연구의 범위를 한정하였다.

위와 같은 기술적, 현실적 한계점에 따라, 본 연구의 3D 프린팅 예술 의상 디자인 개발은 다음과 같은 과정 및 방법으로 수행되었다.

첫 번째, 보급형 FDM과 SLA 3D 프린터가 한 번에 출력 가능한 크기 및 출력된 각 소재의 직관적이며 손쉬운 결합방안을 충분히 고려하여, 전체 의상을 구성할 최소 단위 소재의 심미적인 문양 디자인 개발 및 3D 모델링 작업을 수행한다.

두 번째, 디자인된 최소 단위의 소재를 필라멘트 수지를 사용하는 FDM 방식과 액상레진을 사용하는 SLA 방식의 프린터를 활용하여 실험 출력하여 앞서 고려된 각 소재 간의 결합 방법 및 강도, 심미적 디자인의 적합성을 실험 및 평가하여 3D 모델링을 정교화하고, 각 소재를 활용하여 개발할 의상의 최종적인 형상을 3D 프린트된 소재에 적용된 문양에 적합한 의상 디자인을 전개한다.

세 번째, 소재의 문양패턴과 가장 심미적으로 균형을 이루며, 또한 결합시 안정성이 확보될 수 있는 디자인을 선정하여 3D 프린팅 패션쇼를 위한 의상 컬렉션을 디자인, 개발한다.

네 번째, 앞선 과정을 통해 개발된 각 의상을 제6회 국제 3D 프린팅 코리아 엑스포 개막 패션쇼에서 제시한다.

2. 3D 프린팅 기술과 패션에서의 활용 사례

1986년 3D Systems의 Charles W. Hull이 최초로 개발한 3D 프린팅 기술은 2007년 특허가 만료되며 산업이 급속도로 확장되기 시작하여, 국내에서도 IoT, Bio-Tech, 인공지능 등과 함께 4차 산업혁명의 한 축을 담당하는 기술로 인식되고 있다. 전통적인 대량생산 산업의 근간을 이루는 절삭가공방식은 기본적으로 재료가 되는 물체를 깎아서 제조하는 방식임에 비해, 3D 프린팅 기술은 3D 모델링이나 3D 스캐닝 기술을 통해 디지털화된 3D 이미지를 적층하여 출력한다. 이에 따라, 생산과정에서 불가피하게 폐기되는 원자재가 발생하는 기존의 생산 패러다임을 바꿀 수 있는 친환경적인 제조방식임으로 인식되고 있다. 또한, 이와 더불어 개인과 사회, 산업적인 다원화 경향에 따른 맞춤형 다품종 소량생산이나 커스터마이징, 개인 단위의 제품생산의 수단으로 주목받고 있다(Kim 2015; Lee & Kim, 2015).

일반적으로 3D 프린팅 기술은 출력에 사용되는 소재와 성형되는 방식에 따라 세 가지 유형으로 분류된다(Table 1).

압출성형(Extrusion) 방식은 ABS와 PLA, TPU와 같은 열가소성 소재를 실패와 같은 틀에 가는 철사처럼 감은 필라멘트를 프린터의 익스트루더 내부에서 고온으로 용해, 사출하여 하단의 베드에 적층하여 입력된 3D 이미지를 형상화하는 작동 메카니즘을 가진다(Kim, 2016; Lee & Kim, 2015). 주로 보급형 FDM 방식이 가장 대중적인 유형으로 산업은 물론 교육현장 및 일반 가정에도 널리 보급되어 활용되고 있다. 압출성형 방식은 사출에 요구되는 재료, 즉 열가소성 필라멘트가 타 광경화나 분말 방식의 재료에 비해 저렴하고 낭비가 적은 장점이 있으나, 상대적으로 출력된 결과물의 해상도가 낮으며 고온 압출되어 출력된 수지가 식으면 수축되어 3D로 설계된 모델의 수치데이터와 차이가 날 수 있는 단점이 있다(Kim, 2016; Koh, 2016; Lee & Kim, 2015).

광경화(Light polymerized) 성형 방식은 3D Systems의 Charles

Table 1. The categories of 3D-printing technologies according to the production method (Lee & Kim, 2015)

Categories	Formative method	Overview of the formative methodology
Extrusion	FFF	The lamination method to print thin filaments consisting of divers raw materials after melting filaments at extruding nozzle parts.
	FDM	
Light polymerized	SLA	The formative method to polymerize liquid resins by high-powered UV laser.
	Polyjet	The converged formative method between light polymerizing and ink-jet printing mechanism.
Granular	SLS	The formative method melting metal powders by high-powered laser to attach the powders each other.
	DMLS	The formative method to polymerize powders such as metals, ceramics, plasters and plastics by high-powered heating laser.
	CJP(3DP)	The formative method to spray raw powders such as plasters mixing color inks and harden chemicals to polymerize raw powders.

W. Hull에 의해 가장 먼저 개발되어 상용화된 유형이다. 일반적으로 프린터 하단에 위치한 재료 탱크에 채워진 광경화성 액상수지(Liquid resin)를 UV 광선으로 경화하여 상단의 베드에 적층 성형하는 메커니즘으로 작동하며 대표적으로 SLA방식이 대중적으로 보급되고 있다. Polyjet 방식은 잉크젯 프린터의 출력방식을 3D 프린팅에 접목한 것으로, 800여 개의 노즐에서 시출되는 광경화성수지를 고효율 UV 광선으로 급속경화하여 적층성형하는 방식으로, 출력물의 수치 정밀도가 높고 속도가 상대적으로 SLA에 비해 빨라 산업계에서 정밀한 부품 혹은 주얼리의 제작에 활용되고 있다(Kim, 2016; Koh, 2016; Lee & Kim, 2015). 광경화 방식은 압출성형 방식에 비해 출력된 결과물의 해상도가 높고, 사용 가능한 경화수지의 유형이 다양한 장점이 있다. 그러나 FDM에 비해 출력된 소재의 강도가 상대적으로 약하며, 압출성형과 반대로 출력된 결과물이 중력에 반하여 프린터 상단에 거꾸로 안착되기에, 이를 지지하기 위한 사다리구조의 지지대인 서포터가 필수적이고, 출력에 사용된 소재의 특성에 따라 출력완료 후에 추가로 UV 경화를 추가로 실행해야 하는 단점이 공존한다(Koh, 2016).

마지막으로 분말(Granular) 성형 방식은 프리너의 챔버 내에 채워진 수지분말에 레이저를 투사하여 가열성형하거나 경화물질을 분사하여 적층하는 유형으로, SLS가 가장 일반적으로 사용되는 방식이다. 분말 소재로는 수지와 세라믹, 석고, 금속분말 등 다양한 소재가 적용가능하며 광경화와 함께 분말 성형 방식은 출력물의 해상도가 높아 산업 및 상업용으로 활용성이 높은 장점이 있다. 그러나 한편으로 분말 방식의 프린터의 챔버 내부가 140°C에서 160°C의 고온으로 유지되어야 함에 따라 화재사고 방지를 위해 질소가스로 채워지므로, 안전한 사용을 위해서는 에어인테이크(Air-intaker) 및 벤틸레이션(Ventilation) 설비가 요구되는 단점이 있다(Kim, 2016; Koh, 2016; Lee & Kim, 2015).

위와 같이 각각의 유형에 따른 성형방식과 재료의 차이는 있으나, 3D 프린팅의 과정은 공통적으로 ‘모델링’과 ‘출력’, ‘후처리’의 3단계(Table 2)로 이루어진다(Jang, 2016; Koh, 2016).

모델링 과정과 프린팅 과정에서는 3D 그래픽 툴로 설계된 3D 모델데이터 파일을 출력을 위한 stl 포맷의 파일로 변환하고, 이를 다시 3D 프린터의 제조사에서 공급하는 슬라이싱 툴을 활용하여 재 변환한 후 프린터로 출력한다. 후처리 과정에서는 압출과 광경화, 분말의 각 성형방식의 특성에 따른 마무리, 즉 저해상도의 출력품질 값을 가지는 압출성형 방식의 경우에는 출력물의 표면품질 향상을 위한 퍼티도포 및 사포질, 컬러

링 작업이, 광경화와 분말 성형 방식의 경우에는 잔여물 세척과 압출성형방식에 비해 간소화된 표면정리나 컬러링 작업을 거쳐 최종 결과물이 완성된다(Jang, 2016).

상기와 같은 제작 공정에 따라 3D 프린팅 기술은 기존의 절삭연마 가공방식에 비해 생산 시 원재료의 소실율이 적고, PC의 가상공간에서 설계된 구조 및 조형적 특성이 그대로 입체적으로 출력된다는 점에서 상대적으로 복잡 정교한 형상이 구현 가능함과 동시에 고가의 금형제작이 필요 없음에 따라 획기적인 생산단가 절감이 가능한 장점이 있다. 이에 따라 3D 프린팅 기술은 기존의 대량생산 제조업의 관점에서 벗어나, 생산자로 하여금 다원화된 사회 및 산업 경향에 따른 다품종소량생산 혹은 각기 다른 소비자의 니즈에 부합하는 커스터마이징 생산을 가능하게 할 수 있으며, 더 나아가 소비자가 3D 모델링과 제품 설계에 관한 소양을 가지고 있을 경우 개인의 취향과 니즈에 따른 제품을 생산하는 소비자가 곧 생산자가 되는 프로슈머(Prosumer) 개념에 따른 1인 생산기업을 활성화함으로써 궁극적으로 제조 산업의 부흥을 촉진할 수 있을 것으로 전망되고 있다(Kim, 2015).

위와 같은 복잡 · 정교한 디자인의 실체화 가능성 및 생산성 측면의 이점에 따라, 2000년대 들어 패션분야에서 또한 3D 프린팅을 활용하여 디자이너의 표현적 측면 및 소재개발, 생산방식의 영역을 확장하려는 시도가 적극적으로 이루어져왔다.

네덜란드의 패션디자이너 Iris Van Herpen을 대표로, 기술수용에 관해 진취적인 성향을 가지는 패션디자이너들은 3D 프린팅을 활용하여, 기존의 아트웨어에서는 불가능했던 패션 표현의 영역을 개척하였다(Oh et al., 2016), (Fig. 1).

버지니아 공과대학의 Negar Kalantar와 Alireza Borhani는 3D 모델링된 니트와 유사한 원단 패턴에 기하학적인 타공 및 연결 구조를 적용하여, 출력된 3D 프린팅 섬유가 유연성을 가지고 인체에 걸쳐질 수 있는 3D 프린팅 소재를 제시하였고(Fig. 2), 영국의 기성복 브랜드 Pringle of Scotland는 유연한 소재를 활용하여 출력한 3D 프린팅 섬유 및 퍼와 유사한 소재, 장식적인 디테일 등이 적용된 컬렉션(Fig. 3)을 제시하여 기성복 산업에서 3D 프린팅을 활용하여 개발된 소재의 실질적인 적용 가능성을 보여주었다(Oh et al., 2016).

디자인 스튜디오 Nervous System은 기하학적인 삼각형의 오브제들이 각각 가동 가능한 연결구조로 연결되어, 인체에 걸쳐질 경우 인체의 곡선에 따라 딱딱한 소재로 출력된 의상이 유연하게 걸쳐질 수 있으며, 각 삼각형의 구조물들이 각각 연결된 채로 프린터에서 출력될 수 있는 소재개발과 더불어 생산방

Table 2. Outlines of tasks in 3D-printing process (Jang, 2016; Koh, 2016)

Process	Task of the process
1 st modeling	Using 3D graphic tools, 3D models are designed and the format of the modeling files are converted to STL format.
2 nd printing	After STL files are converted to printing file formats by slicing programs provided by priter makers, 3D models are printed.
3 rd finishing	Sanding and coloring tasks are performed to improve the rough surface of printed models due to the low resolution(FDM, FFF). Cleaning to remove supporters, remained resin or powder, additional hardening, surfacing or coloring tasks are performed(SLA, SLS).



Fig. 1. Iris Van Herpen, Crystallization, Collection. www.irisvanherpen.com

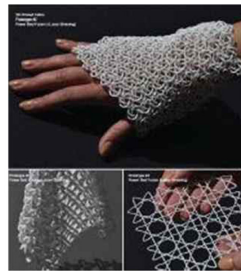


Fig. 2. 3D-printed flexible textile structures. icat.vt.edu



Fig. 3. 3D-printed ready-to-wear collection of Pringle of Scotland. 3dprintingindustry.com

식 측면의 고려가 반영된 Kinetic dress(Fig. 4)를 제시하였다 (Kim, 2015).

스포츠 패션 브랜드 Nike와 Adidas, Reebok은 의상에 비해 상대적으로 정형화된 사이즈와 구조, 소재를 활용하는 스포츠 슈즈의 소재 및 생산 과정에 3D 프린팅 기술을 적극적으로 도입하여 디자인과 소재는 물론, 생산과정의 혁신 가능성을 모색하고 있다. Nike는 제품 디자인과 소재, 생산에 3D 프린터를 적극 활용하여, 기존의 절삭가공 및 주형 방식으로는 개발할 수 없는 경량화 및 마찰력 확보를 위한 정교한 타공 패턴 및 스파이크 구조의 밑창이 적용된 미식축구화 Nike Vapor Laser Talon(Fig. 5)을 출시하였으며(Oh et al., 2016), Reebok과 Adidas는 이에 더 나아가 3D 프린팅 기술과 로봇 팔, 이를 자동적으로 제어하는 알고리즘을 일체화하여 스포츠 슈즈를 생산하는 무인 스마트 팩토리를 완성하였다(Fig. 6, 7). 해당 팩토리는 액상 TPU를 사출하는 FDM 프린터가 신발의 밑창과 연결 구조를 성형하면 이를 로봇 팔이 다음 생산라인으로 이동시켜

밑창과 갑피를 결합하는 심플한 생산공정으로 구성됨으로써, 패션산업에 있어 무인 자동화 생산공정 시스템의 구현 및 발전 방향성을 제시한 성공적인 사례로 인식되고 있다(“Nike debuts”, 2013; Young, 2017).

패션분야에서 3D 프린팅 기술은 단순히 제품생산만이 아닌, 3D 프린팅을 도입함으로써 가능한 디자이너의 미적 감수성의 표현 및 소재연구, 더 나아가 기존의 패션산업에서 생산의 패러다임인 사람의 수공제작에서 탈피하여 무인화, 자동화 생산 시스템을 구축하기 위한 사용성 등, 다양한 측면에서 활용도가 모색되고 있다.

3. 패션쇼를 위한 3D 프린팅 의상 디자인 개발

본 연구의 3D 프린팅 의상 디자인 개발은 다음과 같은 과정으로 수행되었다(Table 3).



Fig. 4. Nervous System's Kinematic Dress. n-e-r-v-o-u-s.com

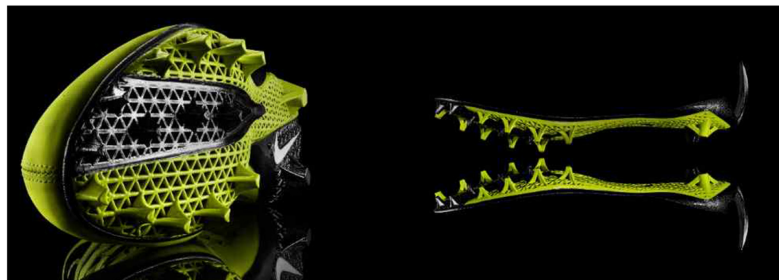


Fig. 5. 3D-printed sole of Nike Vapor Laser Talon. news.nike.com

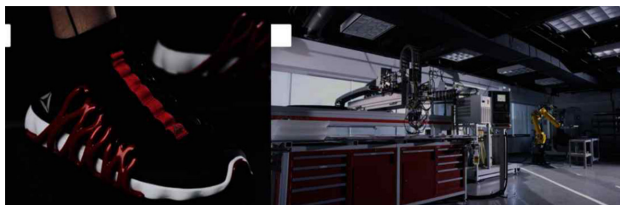
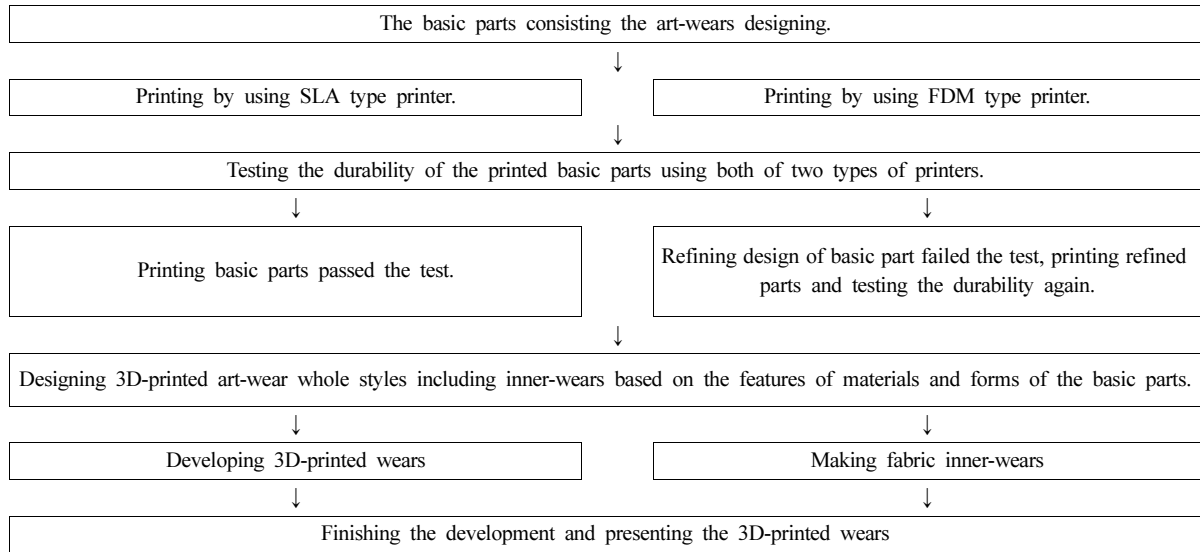


Fig. 6. Reebok's 3D-printed sports shoes and smart factory. additivemanufacturingtoday.com



Fig. 7. Adidas' 3D-printed sports shoes and speed factory. 3dprint.com

Table 3. The whole process of this study's 3D-printed wear development

3.1. 의상소재 디자인 개발

인체의 활동성에 장애가 없으면서, 착용자에 움직임에 따라 형태나 재질이 손상되지 않고, 일반 의상과 같이 부담 없이 착용 가능한 중량과 형태, 착용방법, 재질이 적용된 심미적인 3D 프린팅 개발에 있어, 먼저 의상의 가장 기본 단위부품이 되는 최소 단위 소재의 디자인 콘셉트 설정을 위한 리서치가 수행되었다.

3D 프린팅 기술의 경우, 4차 산업혁명의 한 축을 담당한다는 인식에 의해, 해당 기술을 활용한 디자인 작품은 미래주의적인 색채를 보이는 경우가 많다. 그러나 본 연구에서는 3D 프린팅이 이미 20세기 중반에 개발된 기술이라는 점에 착안하여 미래적인 이미지가 아닌, 과거의 레트로적인 뉘앙스를 시각적으로 전달하고자 하였다. 또한, 이와 함께 3D 프린팅이 더 이상 해외의 유명 디자이너나 기업만의 전유물이 아닌, 한국의 산업계는 물론 개인이 손쉽게 접근 가능한 기술이라는 개념 또한 시각적으로 전달하고자, ‘한국의 오래된 레트로적인, 전통적 시각요소의 반영’을 디자인 콘셉트로 설정하였다. 이에 따라 3D 프린팅 기술을 활용하여 디자인 콘셉트를 구체화하기 위한 디자인 모티브 선정 작업이 후속되었으며, 모티브의 선정은 기술적 한계성을 고려하여 아래의 두 가지 조건 하에 이루어졌다.

첫째, 고가의 폴리젯(Poly-jet) 프린터가 아닌, 보급형 3D 프린터의 경우 색상의 조합이 불가능하며 제조사가 제공하는 소재의 색상 또한 한정적임에 따라, 색에 관계없이 면과 선의 조형성만으로 전통적인 이미지를 표현할 수 있는 모티브를 선정한다. 둘째, 최대 20cm의 x, y, z축의 출력 공간 내에서 이미지를 분할하지 않고 한 번에 출력이 가능한 조형적 특성을 가지는 모티브를 선정한다.

위의 조건을 고려하여 한국의 전통적인 조형 요소를 탐색하

여 건축양식, 문양, 문자 등 다양한 전통 요소 중, 연속성이 없는 폐쇄된 형태 및 단색의 적용만으로도 음·양각 기법의 응용에 따라 조형성을 구형할 수 있을 ‘문양’의 활용이 결정되었다. 이에 따라 연구자 및 해당 패션쇼 기획진 간의 소재디자인에 적용될 전통문양을 선정하기 위한 토론 및 평가가 수행되었으며, 각기 다른 조형적 특성을 가지며 한복 및 사찰, 고궁, 고분 등에서 찾아보기 쉬운 연당초문과 보상화문, 태평화문이 소재 디자인을 위한 모티브로 선정되었다. 연당초문의 경우, 함께 선정된 타 문양들에 비해 비정형적으로 자연스럽게 연장되는 이미지를 형성하기에 적합할 수 있다는 긍정적인 평가를 받음에 따라 선정되었다. 보상화문과 태평화문은 연당초문에 비해 상대적으로 정형적인 폐쇄성과 섬세하고 복잡한 면과 선의 조형성을 보임에 따라 연당초문과 달리 구조적이거나 디테일을 강조하기 위한 소재개발에 적합할 수 있고, 각각의 문양이 모서리가 강조되는 8각의 꼭지점을 보이거나, 모서리가 두드러지지 않는 부드러운 곡선 구조를 보이는 등 차별적인 조형성을 보인다는 긍정 평가를 받음에 따라 소재 개발에 활용이 결정되었다(Fig. 8).

이후 각 문양을 활용하여 각 문양의 기본적인 조형성을 유지하면서 3D 프린팅 및 의상을 구성하기 위해 적합한 형태 및 결합 구조가 형성되도록 각 소재를 디자인하였다. 소재의 디자인과 프린팅을 위한 모델링 및 출력을 위한 stl 파일 변환에는 Rhino Ceros 5.0을 활용하였다.

연당초문을 활용한 소재(Fig. 9)의 디자인 및 모델링은 해당 문양이 좌우로 연속될 수 있는 repeated pattern과 유사한 조형적 특성을 보임에 따라, 다양한 방향에서 소재를 서로 연결하여 의상을 구성할 수 있도록 8방향에 결합구조가 적용된 0.4mm의 베이스 패널 위에 소재의 내구성 확보를 위한 최소한

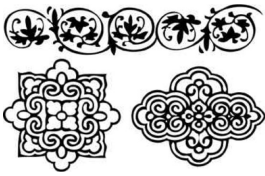


Fig. 8. The traditional patterns adapted in designs of the basic objects (August 14, 2018).

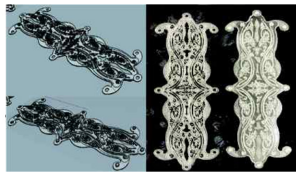


Fig. 9. The images of 3D models and printed objects by FDM based on 'Yeondangcho' pattern (August 14, 2018).

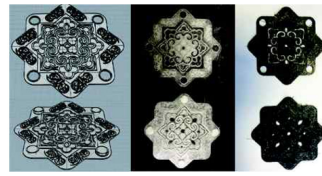


Fig. 10. The images of 3D models and printed objects by FDM(center) and SLA(right) based on 'Boesangwha' pattern (August 14, 2018).



Fig. 11. The images of 3D models and printed objects by SLA based on 'Taepyongwha' pattern (August 14, 2018).

의 패널 면적을 유지하면서 음·양각기법을 교차적으로 사용하는 방향성에서 해당문양을 표현하고자 하였다.

보상화문(Fig. 10)과 태평화문(Fig. 11)을 활용한 소재의 디자인 및 모델링은 해당 문양들이 단일형상으로 구성됨에 따라, 연당초문을 활용한 소재에 비해 정형화된 형태를 구성하도록 4방향에서 각 소재가 연결되도록 소재를 설계하였다. 보상화문을 활용한 소재의 경우, 문양의 8방향의 꼭지점이 있는 조형적 특성을 참고하여 각진 형태의 베이스 패널을 적용하였고, 태평화문을 활용한 소재는 상대적으로 곡선이 강조되는 조형적 특성을 참고하여 둥근 실루엣의 베이스 패널을 적용하였다. 두 소재 모두 연당초문에 비해 정형화된 조형성을 구축하기 위해 상대적으로 두꺼운 베이스 패널에 양각기법을 활용하여 모티브가 된 문양을 표현하고자 하였다.

모델링 작업과정에서 각 소재를 결합하기 위한 결합구조 디자인이 이루어졌으며, FDM 방식과 SLA 방식에 따라 각각 다른 결합원리가 고안되었다.

첫 번째, 수지 필라멘트를 고온 사출하여 출력하는 방식에 따라 출력물의 내구성인 높은 FDM 방식을 위한 소재에는 스냅단추와 같은 압과 수의 결합구조를 적용하여 윈스냅 동작으로 각 소재의 결합이 이루어지도록 결합구조를 디자인하였다.

두 번째, 액상레진을 광경화함에 따라 FDM에 비해 내구성은 떨어지지만 출력물의 해상도가 높고 유연성이 뛰어난 SLA 방식을 위한 소재에는 볼트와 너트와 같은 압과 수의 결합구조를 적용하여 각 소재를 연결한 후 나사를 끼워 각 소재가 결합되도록 결합구조를 디자인하였다.

3.2. 의상소재 출력 및 내구성실험

각 소재의 디자인 및 모델링 작업이 완결된 후, 해당 소재의 내구성 실험이 후속되었다. 각 소재의 출력에는 국내의 개발사인 하이비전 시스템의 큐비콘 싱글플러스 보급형 FDM 3D 프린터와 미국의 Formlab사의 Form2, 대만의 XYZ Printing사의 Novel 보급형 SLA 3D 프린터들이 활용되었다. FDM 방식의 프린터의 출력 소재로는 유연소재인 TPU 필라멘트가 사용되었고, SLA 방식의 프린터에는 유연수지인 플렉시블 액상 레진(Flexible liquid resin) 소재를 사용하여 각 소재를 출력하였다. 출력된 각 소재의 강도 실험은 2가지 방식으로 수행되었다. 각 소재를 일반적인 코트 기장과 유사한 120cm 길이가 되도록 세

로로 연결하여 마네킹에 고정된 후, 중력에 따른 소재 자체의 하중으로 인한 소재의 연결 부위의 파손 여부를 실험하였다. 또한, 출력된 각 소재가 인체에 걸쳐졌을 때 신체의 움직임에 따른 파손 가능성 여부를 확인하기 위해 결합된 소재를 실험자의 신체에 꼭 맞는 실험복의 팔꿈치와 어깨 관절 부위에 부착하여, 실험자가 반복적으로 움직여 운동 부하에 따른 소재의 파손 여부를 실험하였다.

실험 결과, FDM 방식의 TPU 소재를 사용한 소재는 두 가지 실험 모두에서 파손되지 않았으나, SLA 방식의 플렉시블 액상 레진을 사용한 소재는 두 실험 결과 모두 파손되었음이 확인되었다(Fig. 12). 또한, 관절 움직임 실험에서 Formlab사의 플렉시블 액상 레진을 사용하여 출력한 태평화문의 소재의 경우, 유연성이 상대적으로 부족하며, 보상화문에 비해 원형구조가 강조되는 태평화문의 형태 또한 상대적으로 디테일이 파손되기 쉬움이 발견되었다. 이에 따라, 3D 패션쇼를 위한 의상에는 하이비전 시스템의 FDM과 XYZ Printing의 SLA 프린터, 연당초문과 보상화문을 모티브로 디자인된 소재를 활용하는 것으로 사용 기술과 디자인의 범위를 한정하였다. 이에 따라 XYZ의 SLA 방식을 활용하는 보상화문 소재의 경우, 기존에 비해 높은 강도를 확보하기 위해, 3D 그래픽 툴에서 소재 모델의 두께를 1.5mm에서 2.5mm로 두껍게 소재의 모델링 파일을 수정하였다(Fig. 13).

3.3. 의상디자인 및 개발

SLA 방식의 플렉시블 액상 레진 출력결과물을 보완하기 위한 소재 모델링이 수정된 이후, 앞선 단계에서 사용성이 확인된 각 소재를 활용한 3D 의상 및 해당 3D 의상의 디자인 콘셉트에 따른 이너 의상의 디자인이 병행되었다. 본 연구에서는 한정된 기간과 기술 여건 하에서 연구개발이 수행됨에 따라, 3D 프린팅 의상 개발의 초점이 상호연결이 가능한 구조 개발 및 한정된 색상 사용에 따라 문양의 조형성을 부각시키기 위한 소재의 형태 구성, 개발된 소재를 결합하여 인체에 착용과 활동이 용이한 내구도의 의상 형태 구성에 연구의 초점이 맞춰졌다. 이에 따라 반투명한 재질의 TPU 필라멘트와 플렉시블 액상 레진 소재가 소재 개발에 사용되고, 최소 단위의 소재를 결합하여 의상이 제작됨에 따라 각 소재가 연결되는 부위에 공간 유격이 발생하여 의상의 내부가 비치거나 사용자의 움직임에

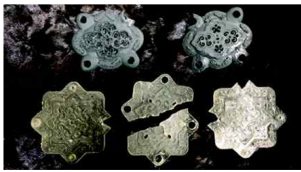


Fig. 12. The destructed conditions of the objects printed by SLA (August 14, 2018).

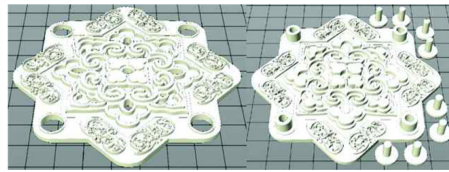


Fig. 13. The refined 'Boesangwha' objects in order to print using SLA (August 14, 2018).

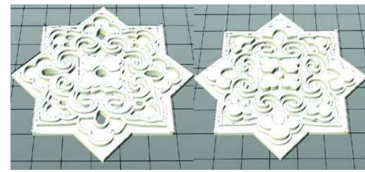


Fig. 14. The 3rd version of 'Boesangwha' objects printed by SLA for heating-pressing (August 14, 2018).

따라 유격공간의 소재의 가장자리 부분에 착용자의 피부가 손상될 수 있는 우려가 발견되었다.

이에 따라 기술적인 한계에 따른 문제를 해결하기 위해 3D 프린팅 의상 내부에 착용되어 해당 의상의 착용성 및 활동성, 전통 문양에 기초한 3D 프린팅 의상의 디자인 콘셉트를 심미적으로 보조하기 위한 이너 의상의 디자인 개발이 병행되었다.

각 3D 프린팅 의상의 경우, 앞서 개발된 연당초문과 보상화문을 활용한 각 소재들의 조형적 특성을 강조하는 방향성에서 전반적인 실루엣의 디자인이 수행되었다. 또한 3D 프린팅 의상에 적용된 정교한 문양의 조형성을 강조하고, 이너 의상과 명확한 소재적 경계 구분을 위해, 3D 프린팅 의상과 일반 원단으로 제작된 이너 의상은 서로 대비되는 색상의 적용이 계획되었다. 이너 의상의 경우, 3D 프린팅 의상 디자인의 중심에 전통 문양이 있음에 따라, 이를 시각적으로 뒷받침할 수 있도록 고전복식의 직선적이며 신체를 구속하지 않고 걸쳐지는 루즈 핏의 실루엣과 형태로 기본적인 디자인 방향성이 설정되었다 (Table 4).

먼저 보상화문에 비해 소재의 면적이 좌우로 확장된 형태적 특성을 가지는 연당초문 소재의 경우, '길이'를 강조할 수 있을 로브 형의 실루엣과 기하학적인 장식구조의 구현을 주요 디자인 방향으로 설정하였다. 이너 의상의 경우, 기하학적인 선형 장식 구조가 적용된 로브 스타일의 3D 프린팅 의상의 시각적

특성을 뒷받침할 수 있도록 비대칭 사진 여밈이 적용된 상의와 수직의 방향성을 강조하기 위해 플리츠가 적용된 직선적 실루엣의 루즈 핏의 팬츠로 디자인되었다. 해당 3D 의상을 구성하는 소재가 FDM 방식의 흰색 반투명 TPU 소재를 활용하여 제작됨에 따라, 소재에 적용된 문양과 각 소재의 균집구조가 강조될 수 있도록 이너 의상에는 검은색 실크 소재의 적용이 고려되었다(Table 4).

보상화문 소재의 경우, FDM과 SLA 방식의 차이에 따라 각기 다른 3D 프린팅 의상의 디자인 및 소재의 활용방안에 관한 고려가 이루어졌다.

FDM 방식으로 출력한 보상화문 소재를 활용하는 3D 프린팅 첫 번째 의상의 경우, 해당 소재가 연당초문에 비해 정사각형에 가까운 정형적인 형태를 가짐에 따라 소재의 탄성이 강해 상대적으로 입체적인 실루엣을 구성하기 용이한 점을 활용하여, 검은색 반투명 TPU 소재를 활용하여 어깨와 골반의 볼륨을 강조한 원피스와 유사한 형태로 디자인되었다. 해당 3D 프린팅 의상을 위한 이너 의상의 경우, 검은 색상으로 출력된 소재의 문양과 결합구조, 과장된 어깨와 골반 부분의 실루엣을 보조하고자, 흰색 실크 소재를 활용하여 과장된 실루엣과 플리츠 주름이 적용된 점프수트 형으로 디자인되었다. FDM 방식의 프린터와 흰색 반투명 TPU 소재가 활용되는 두 번째 보상화문 의상은 고대 삼국시대 금속을 사슬로 이어 붙여 제작한

Table 4. The design sketches of each styles combining 3D-printed structures and inner wears

1st art-wear adapting 'Yoendangcho' pattern(FDM)		2nd art-wear adapting 'Boesangwha' pattern(FDM)		3rd art-wear adapting 'Boesangwha' pattern(FDM)		4th art-wear adapting 'Boesangwha' pattern(SLA)	
Image 1. Design sketch of the 1st art-wear (August 19, 2018).	Image 1. Design sketch of the 1st art-wear (August 19, 2018).	Image 2. Design sketch of the 2nd art-wear (August 19, 2018).	Image 2. Design sketch of the 2nd art-wear (August 19, 2018).	Image 3. Design sketch of the 3rd art-wear (August 19, 2018).	Image 3. Design sketch of the 3rd art-wear (August 19, 2018).	Image 4. Design sketch of the 4th art-wear (August 19, 2018).	Image 4. Design sketch of the 4th art-wear (August 19, 2018).
Outer	Inner	Outer	Inner	Outer	Inner	Outer	Inner



Fig. 15. Runway presentation of the 1st style in the fashion show (September 6, 2018).

홍감의 제작방식과 형상에 착안하여, 평면적인 각 소재의 선을 왜곡하지 않고 직선적으로 신체에 걸쳐지는 좌우 비대칭의 슬리브리스 베스트 형태로 디자인되었다(Table 4). 또한, 심플한 실루엣의 의상에 장식성을 더하기 위해, 광택이 있는 TPU 소재와 유사한 광택을 가지는 경량의 금속 O링을 연결하여 제작한 체인의 적용이 계획되었다. 3D 프린팅 의상을 위한 이너 의상의 경우, 금속성 체인이 장식적으로 적용된 베스트형의 3D 의상의 광택과 소재의 문양을 강조하고자 유광의 검정색 실크 소재를 활용하여 미세한 곡선이 소매와 바지의 윤곽선에 적용된 고전 복식 풍의 상의와 하의 투피스로 디자인되었다(Table 4).

마지막으로 SLA 방식으로 출력한 보상화문 소재의 경우, 스퀘어 넥의 H라인 원피스형의 디자인이 결정되었다. 이는 앞선 실험 결과를 반영하여 두께를 늘려 강도를 높였으나, 쇼 진행 시 내구성에 문제가 발생할 수 있다는 우려가 제기되어 소재를 고온압축 프레스를 활용하여 원단에 고온 압착하여 텍스타일 패턴으로서 활용함이 최종 결정되었기 때문이다(Fig. 14).

디자인 작업이 완료된 이후, 각각의 디자인 콘셉트에 따른 3D 프린팅 의상의 소재 조립과정 및 이너 의상의 제작 작업이 수행되었다. 먼저 착용이 예정된 모델들의 신체 치수에 따른 이너 의상의 평면 패턴 및 가공작업이 선행되었고, 가공된 각 이너 의상을 트레이핑 바디에 입힌 상태에서 그 위에 출력된 각 소재를 결합하는 방식으로 각 3D 프린팅 의상의 개발이 이루어졌다. 이는 일반적인 의상의 소재에 비해 유연성이 떨어지거나 탄성이 강한 3D 프린팅의 출력 소재의 재질적 특성을 감안하여, 보다 신체에 걸쳐지기 용이하도록, 입체적으로 각 의상의 실루엣과 형태를 구성하기 위한 조치이다. 위와 같은 디자인과 개발 과정을 통해 개발되어 제6회 3D 프린팅 코리아 개막 패션쇼에 출품되었으며, 그 개요는 다음과 같다.

첫 번째 쇼 의상은 흰색의 반투명 TPU 소재의 연당초문 소재를 결합하여 슬리브리스 로브 스타일의 실루엣, 고대 복식의 로브 스타일을 강조하기 위한 후면의 긴 트레인, 기하학적인 형상의 칼라와 가슴 상단과 후면의 선형장식 구조가 적용된 3D



Fig. 16. Runway presentation of the 2nd style in the fashion show (September 6, 2018).

프린팅 의상과 전통복식과 같은 비정형적, 비대칭적인 여밈선과 햄라인, 칼라가 적용된 셔츠와 플리츠가 적용된 팬츠로 구성된 투피스로 구성되었다(Fig. 15). 런웨이 프레젠테이션 결과, 3D 프린팅 의상에 적용된 원단 소재에 비해 유연성이 떨어지는 TPU 소재라도 무리 없이 일반 의상과 같이 긴 트레인이 바닥에 쓸리는 효과가 조성될 수 있으며, 입체적인 형상으로 구성된 칼라 또한 인체의 움직임에 따라 유연하게 형태가 변형되어 착용자의 움직임에 제한을 주지 않으면서도 형태가 자연스럽게 복원되는 탄성을 가지고 있음이 확인되었다.

두 번째 쇼 의상은 검정색 반투명 TPU 소재의 보상화문 소재를 결합하여 인체의 어깨와 골반의 볼륨을 과장한 실루엣의 3D 프린팅 의상과 전통적인 이미지를 강조하기 위해 전통 문양이 적용된 흰색 실크 소재를 활용하여 팬츠 부위에 폭이 넓은 플리츠 라인이 강조된 점프 수트로 완성되었다(Fig. 16). 런웨이 프레젠테이션 결과, 3D 프린팅 의상의 실루엣을 강조하기 위해 원구와 유사한 형태로 제작된 어깨 구조와 힙 부분의 실루엣을 강조하기 위해 상대적으로 허리에 밀착되도록 결합된 허리부의 구조가 인체의 움직임을 방해하지 않으면서도 착용자의 움직임에 따라 형태가 변형되거나 신체에서 떨어지지 않는 유연성과 탄성이 확보되었음이 확인되었다.

세 번째 쇼 의상에는 흰색 반투명 TPU 소재의 보상화문 소재를 결합하여 고대의 휴감과 유사한 직선적이며 비대칭적인 3D 프린팅 의상과 한복의 디테일과 실루엣을 현대적으로 해석한 상의와 하의 투피스로 구성되었다(Fig. 17). 런웨이 프레젠테이션 결과, 3D 프린팅 의상의 전반적인 실루엣이 비대칭적으로 구성되고, 금속 O링 체인 역시 장식성을 고려해 비대칭적으로 적용되었으나, 소재의 적용양이 많은 부위에 두께가 상대적으로 얇은 소재를 적용하여 무게균형을 잡음으로써, 출력된 비대칭의 3D 의상이 인체의 움직임에도 한쪽으로 쏠리지 않고 안정적으로 걸쳐져 있을 수 있음이 확인되었다.

마지막으로 네 번째 쇼 의상은 전통적인 질감과 문양의 소재를 적용한 스퀘어 넥의 H라인 원피스의 표면에 플렉시블 액상 레진 소재의 보상화문 소재를 고온 압착하여 텍스타일 패



Fig. 17. Runway presentation of the 3rd style in the fashion show (September 6, 2018).

턴으로 적용하여 개발하였다(Fig. 18). 런웨이 프레젠테이션 결과, 고온 압착 프레스를 통해 일반 원단의 표면에 텍스타일 패턴으로서 부착된 각 소체가 착용자가 의상을 입고 벗는 과정 및 착용 후 신체활동에도 파손되지 않음이 확인되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 현재 4차 산업혁명의 핵심기술 중 하나로 인식되며, 패션산업에서도 예술적 표현 및 소재개발, 대안적 생산 등 다양한 목적을 위해 활용방안이 모색되고 있는 3D 프린팅 기술을 활용하여 디자인의 표현적 측면 및 대안적 소재개발 측면의 연구가 반영된 3D 프린팅 의상개발이 이루어졌다.

보급형 FDM, SLA 방식의 3D 프린터가 성형 가능한 10cm~20cm의 한정된 출력 베드의 규격 내에서 의복을 구성할 텍스타일 소체와 출력된 구성물을 연결하여 전체 의상 형태를 구성하기 위한 출력결과물의 연결 방법 및 구조, 인체에 착용되어 활동 시 파손되지 않을 내구성 확보를 위한 디자인과 구조설계 측면의 연구가 수행되었다. 이를 통해 현재 일반에 대중적으로 보급된 보급형 3D 프린팅 기술을 의상개발에 활용함에 있어 성형 방식에 따른 고려사항이 발견되었다.

첫째, 광성형 방식인 SLA에 비해 고온압출성형의 FDM 방식의 프린터가 출력한 TPU 소체의 경우, 출력해상도가 낮은 기술적 한계성이 있다. 그러나 한편으로 소재에 따라 190~230에 달하는 고온으로 고체 재료가 용해, 압출되는 성형방식에 따라 출력된 결과물의 내구성이 SLA 방식의 출력결과물에 비해 상대적으로 우수함이 확인되었다. 이에 따라 FDM 방식은 전반적인 의상의 형태 및 구조 형성에 있어 활용성이 높으며, 특히 반복적인 움직임이 발생하여 출력된 소재에 물리적인 부하가 심할 수 있는 팔꿈치와 손목, 어깨, 무릎, 허리 등의 부위에 적용하기 적합한 것으로 판단된다.

둘째, SLA 방식은 섬세한 무늬나 복잡한 구조를 출력하기에 적합한 성형방식이나, 플렉시블 액상 레진을 활용하여 의상의 텍스타일 소체를 출력할 경우, 출력물의 내구성이 FDM 방식의 프린터로 출력한 결과물에 비해 떨어짐이 확인되었다. SLA



Fig. 18. Runway presentation of the 4th style in the fashion show (September 6, 2018).

방식의 프린터로 출력한 소체가 다량으로 연결되거나 인체관절 부위에 적용되어 반복적인 움직임이 가해질 경우, 소체 자체의 하중과 운동부하를 견디지 못하고 파손되었다. 따라서 SLA 방식을 의상개발에 사용할 경우, 의상의 전반적인 형상을 구성하기 위해서는 강도가 높은 하드타입 액상 레진을 활용하여 신체에 자연스럽게 걸쳐지기 위한 텍스타일의 구조나 형태 측면의 연구가 필수적인 것으로 판단된다. 반면, 플렉시블 액상 레진을 활용할 경우, 해당 소재의 내구성의 한계점을 고려하여 의상 전체를 구성하기보다, 고해상도의 출력품질의 장점을 부각할 수 있는 섬세하고 정교한 디자인의 장식적 부자재 혹은 텍스타일 패턴을 개발하여 FDM으로 출력한 소재나 원단 소재에 적용하는 것이 적합한 것으로 사료된다.

본 연구에서는 3D 프린팅 패션쇼를 위한 실체적 준비 기간이 한달여에 불과했던 점과 한정된 예산으로 연구개발이 수행됨에 따라 보다 다양한 연결 구조 및 소재를 활용한 실험이 불가했던 점, SLA 방식의 3D 프린터의 경우 아직 플렉시블 액상 레진이 의상을 개발하기에 충분한 점성을 가지지 못해 기존의 섬유 원단에 출력한 소체를 고온 압착하여 활용할 수밖에 없었던 점이 연구의 한계점으로 작용하였다. 이에 따라 향후, 보다 정교한 모델링 및 결합방법, 다양한 재료를 활용하여 3D 출력물만으로 의상을 구성하기 위한 연구 및 의상으로서의 활용을 위해 충분한 내구성을 확보할 수 있는 SLA 방식의 플렉시블 레진 소재의 활용성에 관한 연구가 후속될 예정이다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 한국연구재단에서 부여한 과제번호 : 2015R1A5A7037615).

References

- Chavez, E. (2014). Printing weaves 3D printing into its ready to wear fashion. *3DPI*. Retrieved January 8, 2019, from <https://3dprintingindustry.com>

- com/news/pringle-weaves-3d-printing-ready-wear-fashion-24630
 ‘Crystallization’. (2010). *Iris Van Herpen*. Retrieved January 8, 2019, from <https://www.irisvanherpen.com/haute-couture/crystallization>
- Jang, J. S. (2016). Case studies of crafts using digital technology – Focusing on the 3D printing -. *Design Convergence Study*, 15(6), 271-282.
- Kim, H. E. (2015). The research into the changes of fashion industry according to the development of 3D printing technology. *Journal of the Korean Society of Fashion Design*, 15(4), 17-33. doi: 10.18652/2015.15.4.2
- Kim, H. E. (2016). A research into the development of millineries for daily use utilising voronoi diagrams – Design based on 3D printing for manufacturing -. *Journal of the Korean Society of Fashion Design*, 16(1), 33-47. doi:10.18652/2016.16.1.3
- ‘Kinetic dress 6’. (2015). *Nervous system*. Retrieved January 8, 2019, from <https://n-e-r-v-o-u-s.com/projects/albums/kinematics-dress-5>
- Koh, H. J. (2016). *미래를 바꿀 3D 프린팅* [3D Printing changing the future]. Seoul: Information Publishing Group.
- Lee, J. S., & Huh, J. S. (2017). Study of textile structure using 3D printing – Focused on the comparison of FDM and DLP -. *Korea Science & Art Forum*, 31(-), 329-340.
- Lee, J. S., Hwang, S. J., & Kim, K. A. (2015). A study on the development of fashion product based on 3D printing. *A Journal of Brand Design Association of Korea*, 13(1), 147-162. doi: 10.18852/bdak.2015.13.1.147
- Lee, W. S., & Kim, S. A. (2015). Development of high-heel design applied by FDM three-dimensional printer output. *Journal of the Korea Design Forum*, 48(-), 521-530. doi:10.21326/ksdt.2015.48.047
- ‘Nike debuts first-ever football cleat built using 3D printing technology’. (2013, February 24). *Nike news*. Retrieved January 8, 2019, from <https://news.nike.com/news/nike-debuts-first-ever-football-cleat-built-using-3d-printing-technology>
- Oh, S. Y., Suh, D. A., & Kim, H. G. (2016). Last design for men’s shoes using 3D foot scanner and 3D printer. *Journal of the Korea Contents Association*, 16(2), 186-199. doi:10.5392/JKCA.2016.16.02.186
- Reebok. (2016, September 20). The Reebok liquid factory introduces ‘3D Drawing’ to sneaker creation. *Youtube*. Retrieved January 8, 2019, from https://www.youtube.com/watch?v=64XESsTfv_4
- ‘3D Printing Flexible Textile Structures’. (2014). Virginia tech institute for creativity, arts, and technology. Retrieved January 8, 2019, from https://icat.vt.edu/icat_projects/3d-printing-flexible-textile-structures
- Young, J. (2017, January 19). Adidas launches smart factory run by 3D printers & robots in Germany. *3DPRINT.COM*. Retrieved January 8, 2019, from <https://3dprint.com/162252/adidas-smart-factory-3d-printing>

(Received 15 January, 2019; 1st Revised 26 February, 2019; 2nd Revised 3 April, 2019; Accepted 12 April, 2019)