

패션비즈니스 제22권 2호

ISSN 1229-3350(Print)  
ISSN 2288-1867(Online)

J. fash. bus. Vol. 22,  
No. 2:1-13, May. 2018  
[https://doi.org/  
10.12940/jfb.2018.22.2.1](https://doi.org/10.12940/jfb.2018.22.2.1)

Corresponding author

Seongdal Kim  
Tel : +82-2-450-3732  
Fax : +82-2-444-1058  
E-mail : dahlkim@naver.com

## 텍스타일 스트럭처 원리와 연계된 3D 프린팅 개발 유형 분석

김효진\* · 김성달†

\*건국대학교 의류학과 텍스타일디자인전공, 건국대학교 리빙디자인학과

## Analysis of the Type of 3D Printing Development Linked with the Textile Structure Principle

Hyojin Kim\* · Seongdal Kim†

\*Dept. of Textile Design, Konkuk University, Korea  
Dept. of Living Design, Konkuk University, Korea

### Keywords

3D printed textiles,  
3D printed fashion,  
textile structures,  
mesostructure  
3D 프린팅 텍스타일,  
3D 프린팅 패션,  
텍스타일 스트럭처,  
메조스트럭처

### Abstract

3D printing technology, which is expected to play a leading role within the Fourth Industrial Revolution, is becoming distinguished not only in the space, automotive, medical and engineering industries, but also in the area of design. The fashion and textile structures created by 3D printing technology were classified into three types - basic structure, unified structure, and a new physical structure. When traditional weaving, knitting, and stitching was reinterpreted through 3D printing, there were apparent limitations in reproducing the characteristics of fabric structures due to differences in the materials and structures of traditional textiles. New physical structures are being developed to break away from merely reproducing traditional textile structures, and to bring out the characteristics of 3D printing technology. As examples of new physical structures, there are the kinematics structure which utilizes the hinge method, mesostructure cellular material, and the N12 disk structure. Such techniques potentially open a new paradigm of fashion and textile structures. Some innovative aspects of 3D printing technology may result in changes in the methods of collaboration, manufacturing, and distribution. Designers are receiving help from specialists of various backgrounds to merge 3D printing technology to create original works. Also, 3D printing not only makes personalized custom designs available, but shortens the distribution channels, foretelling a change within the fashion and textile industry.

## I. 서론

4차 산업혁명의 선도적 역할을 할 것으로 기대되는 3D 프린팅 기술은 우주 산업, 자동차, 의료, 공학 등 다양한 분야에서 널리 이용되며 발전 가능성을 높이고 있다. 디자인 분야 또한 그에 따른 디자인 방향 및 범위가 변화하고 있는 추세이며 패션·텍스타일 디자인에서도 신기술을 접목한 제품 개발 및 소재 개발 연구가 활발히 진행되어 오고 있다.

2010년부터 매해 컬렉션에 적어도 한 벌 이상의 3D 프린팅 된 의상을 선보이고 있는 아이리스 반 헤르펜(Iris Van Herpen)을 필두로 2014년 너버스 시스템(Nervous System)은 경첩 원리를 응용해 접합이 필요 없는 최초의 3D 프린팅 드레스를 개발하였다. 또한 같은 해 안드레아스 바스티안(Andreas Bastian)은 메조스트럭처(Mesostructure)를 개발하여 3D 프린팅용 소재를 마치 바이어스 재단된 천처럼 구부러지고 늘어나게 하는 패턴을 보여주어, 텍스타일의 스트럭처뿐만 아니라 소재 면에서도 획기적인 발전을 이루며 새로운 분야의 가능성과 방향성을 제시하고 있다. 이처럼 3D 프린팅은 3차원으로 유닛들이 맞물려 연결되는 스트럭처로 전에 없던 새로운 방식의 텍스타일 제작을 가능케 하며 그에 따른 신축성, 투명도, 두께, 주름 등을 컨트롤할 수 있어 실험적인 텍스타일 스트럭처가 개발될 것으로 전망한다. 브래들리 로든버그(Bradley Rothenberg)는 미래에는 3D 프린팅 기술이 텍스타일의 새로운 자카드 직기(Jacquard Loom)의 역할을 할 것이라고 예측했다(Research: 3D Printed Textiles, 2014).

그러나 텍스타일은 소재와 스트럭처에 따라 착용감, 유연성, 무게감, 내구성 등이 달라짐으로 인해 현재 패션·텍스타일 제품에 적용하기 위해 3D 프린팅으로 제작된 텍스타일은 실제 패브릭의 느낌을 대체하기에는 소재와 기술력이 다른 분야에 비해 개발 초기단계에 있다. 따라서 소재의 한계를 극복하고 3D 프린팅 기술을 이용하여 기존의 텍스타일 소재를 대체할 미학적, 기능적 측면의 효과를 극대화 할 수 있는 방법 중 하나로 기술에 맞는 적절한 신소재 개발 및 연결 스트럭처를 모색할 필요성이 대두되는 부분이다.

따라서 본 연구는 패션·텍스타일 분야에서 텍스타일 스트럭처 원리와 연계하여 3D 프린팅 기술로 제작된 다양한 개발 유형을 사례 조사를 통해 분석하여 향후 다양한 스트럭처를 적용한 소재 개발을 위해 기반을 마련하는데 연구의 목적이 있다. 또한 3D 프린팅이 가진 기술적, 재료적 한계점을 알아보고 개선 방안을 모색하는데 그 의의가 있다.

연구의 방법은 우선 패션·텍스타일 관련 서적과 인터넷

자료, 선행연구를 참고하여 3D 프린팅의 최신 동향과 3D 프린팅 기술을 이용한 텍스타일의 스트럭처 및 소재 등 기술 현황을 살펴본다. 또한 스트럭처를 크게 세 가지로 분류하여 사례를 분석한다. 첫째, 텍스타일의 기본 스트럭처인 니트(Knit)와 위브(Weave)의 스트럭처를 3D 프린팅 기법으로 재해석한 연구들을 분석하고, 둘째, 패션과 3D 프린팅이 접목된 초기에 선보인 단일화 스트럭처에 대해 살펴본다. 셋째, 메조스트럭처(Mesostructure) 및 키네매틱스(Kinematics), N12 등 새로운 물리적 스트럭처로 분류하여 분석한다. 연구의 범위로는 2010년부터 런웨이에서 선보이며 패션과 3D 프린팅이라는 신기술을 접목시킨 선두주자로서 아이리스 반 헤르펜(Iris van Herpen)의 작업부터 최근까지 패션·텍스타일 분야에 3D 프린팅 기술을 접목시킨 다양한 브랜드 및 디자이너들의 이미지와 정보, 기술 등을 수집하여 3D 프린팅에서 보이는 특징을 제조방식, 소재, 스트럭처, 작업 방식으로 분류하고 이를 통한 패션·텍스타일 산업의 특징을 분석한다.

## II. 3D 프린팅의 현황과 특성

### 1. 3D 프린팅 최신동향

최근 3D 프린팅은 공학, 과학, 예술 및 디자인 사이의 간격을 좁히고 있다. 3D 프린팅은 전문가 및 디자이너가 아니라도 CAD 도면을 통해 원하는 제품의 생산 및 제조가 가능하다는 이점 때문에 1인 제조업 시대 및 산업분야 전반에 걸쳐 혁신적인 아이템으로 급부상하고 있다. 따라서 디자인 분야에서도 디자이너가 제품의 제조 및 유통 과정 없이 CAD 파일의 업로드만으로도 소비자들을 만족시킬 수 있게 되었다.

이런 흐름에 따라 패션 텍스타일 분야에서도 새로운 패러다임에 맞춰 다양한 결과물이 나오고 있다. 패션 디자이너로는 최초로 아이리스 반 헤르펜(Iris Van Herpen)이 2010년부터 자신의 컬렉션에 3D 프린팅 기술을 접목시킨 의상을 런웨이에서 선보이며 새로운 텍스타일 디자인의 가능성 및 발전을 예고했다. 하나의 유닛으로 개발되어 마치 조각 작품 같은 헤르펜의 초기 작업은 실용적인 측면보다는 다소 예술적이며 실험적인 측면이 강조된 의상들이 제작되었다. 뒤이어 2014년 이스라엘에 위치한 쉐카 공학 디자인 대학교(Shenkar university of design and engineering)의 석사 졸업 전시회에서 3D 프린팅을 이용한 컬렉션을 선보인 다니트 펠렉(Danit Peleg)은 현재까지 실생활에 적합한 실용적인

텍스타일 디자인과의 융합을 연구하고 있다. 2017년 다니트는 세계 최초로 자신의 온라인 웹사이트에서 3D 프린팅된 기성복인 보머 자켓(Bomber Jacket)을 판매 출시하였다. 또한 '집에서 혹은 지정된 매장에서 누구나 파일과 프린팅된 옷을 살 수 있는 세상'에 대한 목표를 밝혔다. 신진 디자이너들 뿐만 아니라 세계적인 브랜드인 샤넬(Chanel)의 2015년 F/W 컬렉션에는 칼 라거펠트(Karl Lagerfeld)가 SLS(Selective Laser Sintering) 3D 프린팅 기술을 이용하여 미래적으로 재해석된 클래식한 샤넬 수트를 선보였다. 이렇듯 패션-텍스타일 분야에서 3D 프린팅 기술이 활용하며 다양한 결과물들과 함께 새로운 패러다임을 예고하고 있지만 패션-텍스타일 디자인에서 필수 조건인 인체에 적합한 착용감, 유연성, 통풍성 등 실용적인 측면과 촉감 및 인체친화적인 소재 등의 개발은 아직 미흡한 실정이다. Kim and Kang(2015)은 무엇보다 소재의 개발과 디자인에 따른 적절한 조형방식의 선택이 중요하며, 현재 패션분야에서 3D 프린팅을 활용하는 디자이너와 엔지니어들은 착용감이 좋고 마모성이 우수하며 유연성이 있어 의류소재로 쓰일 수 있는 소재의 필요성을 절실히 느끼고 있다고 하였다. 또한 대중적 프린트 방식인 FDM 방식은 완성도와 섬세함이 부족하고, 시간이 많이 소요된다는 단점이 있는 반면 대형 출력을 위한 산업용 프린터는 비용 면에서 단점이 발생한다는 한계점을 지니고 있다.

3D 프린팅이 패션 텍스타일 분야의 큰 혁신을 예고하고 있지만, 아직은 3D 프린터의 기술적인 완성도 및 상품의 제조와 판매, 소재의 한계성, 3D 프린팅 상품의 대중화 등 실생활에 적합한 텍스타일 디자인을 위해 풀어야 할 과제가 많이 남아있다. 이러한 과제들을 풀어내는 과정으로서 작업 방식(협업), 제조 및 유통경로, 친환경 디자인의 측면 등 디자인 산업의 특성 변화에 대해 살펴보고자 한다.

## 2. 제조 및 유통경로의 변화

산업혁명 때부터 시작된 제조업의 역사는 소품종 대량생산 체제에서 점점 다품종 소량생산 체제로 전환되었고, 현재의 다품종 대량생산 체제를 거쳐 미래에는 개인(고객형) 맞춤형 주문의 비중이 점점 커지는 산업형태를 지향할 것으로 예측하며 3D 프린팅의 제조 및 유통 방식이 미래의 제조방식에 큰 영향력을 끼칠 것으로 전망한다.

3D 프린팅의 발달은 제조, 물류, 소비자, 생산자의 경계를 모호하게 한다. 머지않은 미래에 각 가정마다 3D 프린터가 보급되면 도소매로 제품을 구매하는 것이 아닌 제품의 CAD 파일을 구매하여 직접 가정에서 프린팅하는 형태로 제조 및 유통경로가 변화할 것으로 예상하고 있다(Figure 1). Petrick and Simpson(as cited in H. Kim, 2015b)은 3D 프린팅의 발달로 인해 수천 년간 이어온 교환경제 체제의 시장경제 기본구조를 소비자, 생산자의 구별이 없는 체계로 변화할 것이라고 예측했다. 또한 디자인 교육을 받지 않은 소비자도 상상력이나 아이디어만 있으면 CAD 도면을 제작하여 오픈 플랫폼을 통해 판매할 수 있는 미래에 대해 Chris Anderson(2012/2013)은 그의 저서 <메이커스(Makers)>에서 1980년대 PC가 온라인에서 '소통 민주화'를 만든 것처럼, 3D 프린터는 '제조 민주화'라고 불렀다. J. Kim(2015)에 따르면 이제 누구나 설계와 디자인, 서비스를 활용해 개인맞춤형 생산 및 거래가 확산돼 혁신에 기여하며, 디지털 콘텐츠를 중심으로 한 제품 설계, 시제품 제작, 제조 및 생산, 유통 등이 통합되는 디지털 시대가 개막될 것이라고 전망했다. 또한 전 세계의 사람들을 연결해주는 장소에서 사람들이 각자 자신의 디자인과 프린트들을 공유하며 교류하게 될 온라인 글로벌 시장의 규모와 중요도가 더욱 커질 것이다. 이런 산업적 변화는 대량 생산을 위한 공급망 관리

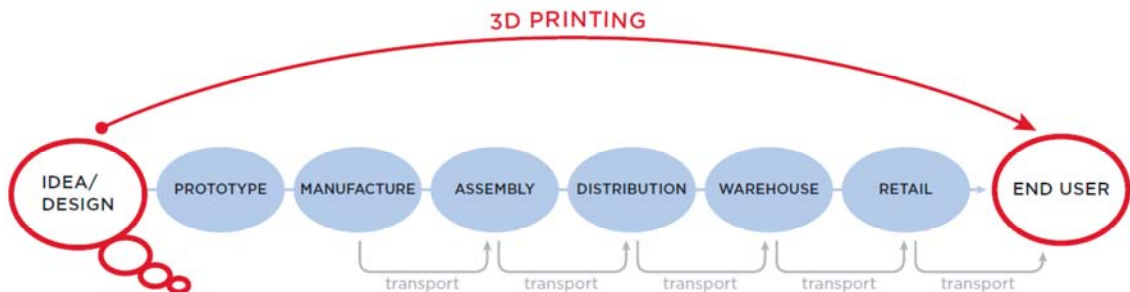


Figure 1. Changes in Distribution Channels through 3D Printing (spark.autodesk.com)

가 관건인 '제품' 중심에서 '사용자', '소비자' 중심으로 옮겨지며, 생산 방식 또한 선 생산 후 거래에서 거래 후 생산으로 변화하며 새로운 유통 모델이 자리잡게 된다. 또한 온라인 쇼핑만큼 쉽고 편리하게 CAD 도면을 다운받고 의상을 프린트하는 것이 가능해지고 배송 과정이 필요없게 되어, 전자 상거래 시장이 더욱 활성화되는 결과를 가져올 것이다.

### 3. 친환경적 특성

지구 온난화, 이상 기후 및 자원의 부족 등의 문제로 환경 오염에 대한 심각성의 인식에 따라 친환경 디자인(eco-friendly design)이 하나의 디자인 패러다임으로 자리잡았다. 다방면의 디자인 분야에서 지구를 위한 디자인이 진행되고 있으며, 3D 프린팅 또한 이러한 추세에 맞출 수 있는 여러 가지 장점을 지니고 있다.

첫째, 3D 프린팅은 자원 낭비의 절감을 통해 기존 패션 제작시보다 친환경적인 성격을 지니고 있다. H. Kim(2015b)에 따르면 패션 산업은 생산 과정에서 환경에 지대한 영향을 미치는데, 패션 제조업은 농업 다음으로 2번째로 물을 많이 사용하는 산업이고, 생산 과정에서 어는 의상 기준으로, 완성된 의상의 15% 정도 원단이 버려지거나 낭비된다. 반 헤르펜은 패션이 재료적인 측면에서 너무나 많은 낭비가 발생하는 반면 3D 프린팅은 편평한 재료로 작업을 시작하는 것이 아닌 가루를 직접 층층이 쌓아 올리는 방식이기 때문에 재료의 낭비 없이 결과물을 만들어 낸다는 점에서 환경친화적(Bolton, 2016)이라고 밝히며 전통적인 패턴 메이킹(Pattern making)과 재봉틀로 작업하는 것과 비교하며 작업방식이 훨씬 간편하고 친환경적인 부분을 강조하였다. 또한 앤드류 볼튼(Andrew Bolton)은 전통적인 패션 산업에서 '개인의 몸에 맞게 만든 맞춤복'의 정의를 갖는 꾸

띄르 의복(Couture Clothes)는 비싸며, 대중적이지 않고, 소유하기 어려운 반면 3D 프린팅은 개인의 치수에 정확히 맞게 만들 수 있기 때문에 비용의 절감 뿐만 아니라 환경 친화적인 이점이 있다고 설명하였다(Tarmy, 2016).

둘째, MIT(Massachusetts Institute of Technology)의 연구원들이 진행한 Cillia 프로젝트(Morby, 2016)의 결과로 개발된 인공모(artificial hair)는 지름이 50microns 정도로 가늘게 프린트되어 패션에서 인조 모피(Faux Fur)로 쓰일 수 있는 발전 가능성을 보여준다(Figure 2). 뿐만 아니라, 뉴저지 출신의 스타트업 회사인 모던 미도우(Modern Meadow)는 인조 가죽인 Zoa를 개발하였다(Figure 3-4). 이 소재는 제조 공정의 일부로 가죽을 사용하는 다양한 산업 분야에 적용할 수 있는 광범위한 응용 분야를 보유하여, 신기술이 동물의 모피나 가죽을 대체할 수 있는 대안으로서의 환경 친화적인 특성을 잘 보여준다. ("Grown of Zoa", 2017)

셋째, 위에서 밝힌 바와 같이, 층을 겹겹이 쌓는 적층 가공 방식을 사용하기 때문에, 기존의 절삭 가공 방식에서 사용했던 재료와 시간 및 에너지, 비용의 낭비를 줄일 수 있다. 특히 시제품 개발 분야에서 큰 영향력을 발휘하고 있으며 스포츠카 업체 람보르기니는 시제품 제작에 3D 프린터를 사용해 제작 시간과 비용을 각각 6분의 1과 8분의 1로 줄였다. (Oh, 2014)

이처럼 제품화 단계에서 금형을 제작하는 등 중간 과정이 필요 없고, 설계도에 따라 자동 프린팅 방법으로 제조하여 제조 설비가 많이 줄어들고 즉각적인 수정 작업이 가능해짐으로 인해 기업의 이윤을 높일 뿐만 아니라 원료와 에너지를 대폭 절감하여 생산성을 높이는 결과를 가져온다. 또한 노동 집약적 생산 과정으로 인해 발생하는 스웨트 샵(Sweat Shop)의 문제와 운송과 산업 폐기물로 인한 환경오염이 감



Figure 2. 3D Printed Fur  
(www.dezeen.com)



Figure 3. T-shirt with 3D Printed Leather Zoa  
(zoa.is)



Figure 4. 3D Printed Leather Zoa  
(zoa.is)

소된다는 장점으로 인해 앞으로 3D 프린터 산업은 친환경 산업으로 권장되어 빠른 속도로 성장할 것으로 전망된다.

**4. 협업을 통한 시너지 증대**

협업은 다른 브랜드 및 디자이너와 협력하여 기존의 스타일과는 다른 새롭고 독창적인 제품을 창조하고 업종의 경계를 뛰어넘어 서로의 장점을 극대화시키는 작업을 뜻한다. 보통 협업은 지명도가 높은 브랜드 및 디자이너의 협력 작업으로 새로운 소비자를 공략하는 기법으로 마케팅에서 주로 쓰이고 있지만, 3D 프린팅 분야에서는 각 분야의 전문가가 만나 서로의 전문 기술을 나누어 협력하는 작업을 의미한다. 헤르펜이 한 매체와의 인터뷰에서 디자이너가 건축이나 3D 모델링 분야에 대해서 조금의 지식을 가지고 있더라도 전문가에 비하면 부족하기 때문에 디자이너가 굳이 그 기술을 처음부터 배우는 것은 시간 낭비(Fairs, 2014)라고 한 것은 그가 다른 분야의 전문가들과 공동 작업을 하며 얻는 시너지 효과를 설명해준다. 디자이너들이 다른 분야의 전문가들과 협업한 컬렉션들을 정리한 결과는 Table 1과 같다.

헤르펜은 3D 프린팅 기술을 패션과 접목시키기 위하여 그동안 다양한 분야의 전문가들과 협업을 진행해 왔는데 그 중 건축 디자이너인 다니엘 위드릭(Daniel Widrig) 및 벨기에 디지털 제조업체인 MGX by Materialise와 협업하여 실험적인 시도를 진행하였다. 첫 번째는 2010년 ‘Crystallization’ 컬렉션으로 액체가 결정체로 변형되는 과정

과 물의 예측 불가능한 성질에서 받은 영감을 레이저 커팅과 3D 프린팅 기법으로 표현하였다. 2011년 S/S ‘Escapism’ 컬렉션에 선보인 3D 프린팅 의복 시리즈에서 반 헤르펜과 위드릭의 두 번째 공동 작업은 미래적인 쿠튀르와 디지털 제조과정을 창의적으로 진전시켜 더 가볍고 신축성 있는 의상을 제작하였다. 복잡하고 특이한 형태로 몸을 감싸는 실루엣은 반 헤르펜이 접근한 3D 프린팅 기술의 중요한 발전을 보여준다. 위드릭은 “우리는 건축학적인 방식으로 신체를 다룬다. 특정 신체 부분을 연구한 후 건축적 미세 스트럭처의 디자인 과정을 신체 부분에 적용한다.”(Pallister, 2014)고 밝히며 위드릭의 건축학적인 배경이 3D 프린팅 기법을 이용한 의상 및 주얼리 작업 등 진행 중인 연구에 반영되었다는 것을 언급하였다.

2012년 A/W ‘Hybrid Holism’ 컬렉션은 필립 비즐리(Philip Beesley)의 ‘Hylozoic Ground’ 프로젝트에서 영감을 받아 풀 색깔의 레진을 이용하여 SLA(Stereo Lithography Apparatus) 방식으로 프린트된 반투명 드레스를 선보였다. 이 드레스는 파라미터에 의해 생성된 복잡한 기하학적인 스트럭처로 이루어진 디자인을 만들기 위해 건축가인 줄리아 코너(Julia Koerner)가 함께 공동 작업하였다. 두 번째 공동 작업인 2013년 ‘Voltage’ 컬렉션에서는 TPU를 사용하여 더 유연하고 부드러운 드레스를 제작하였다. 이 의상의 정교하고 복잡한 레이스 텍스처를 표현하기 위해서 폴리아미드 소재를 이용한 SLS 기술 방식으로 작업되었다.

반 헤르펜 외에도 패션, 조각, 신비주의 사이의 교차점을

**Table 1. Classification of Collaborations**

| Designer           | Iris Van Herpen   |   |   |  | ThreeASFOUR   |   |
|--------------------|---|---|---|--|---|---|
| Images of garments |  |  |  |  |  |  |
| Collection         | Crystallization   | Escapism  | Hybrid holism   | Voltage  | MER KA BA   | Biomimicry  |
| collaboration      | Daniel Widrig / MGX by Materialise  |   | Philip Beesley / Julia Koerner  | julia Koerner / MGX by Materialise   | Bradley Rothenberg / Materialise  | Travis Fitch / Stratasys  |

(www.irisvanherpen.com)  
 (www.papermag.com)  
 (www.startribune.com)

독창적으로 작업하는 패션 디자이너 그룹 쓰리에즈포(threeASFOUR) 역시 협업을 통한 3D 프린팅 의상을 제작하였다. 세계 곳곳의 종교적인 건축물에서 볼 수 있는 성스러운 기하학적인 타일 패턴에서 영감을 받은 바하이(Bahai) 드레스는 2014년 'MER KA BA' 컬렉션을 위해 건축가 브래들리 로든버그(Bradley Rothenberg)와 벨기에 회사 매터리얼라이즈(Materialise)가 함께 공동작업하였다. 로든버그는 건축물에서 보여지는 상징적인 격자 스트럭처를 기초로 한 3D 프린트 텍스타일을 개발하고 매터리얼라이즈는 그것을 현실화시키는 작업을 하였다. 2016년 A/W 'Biomimicry' 컬렉션에 속하는 두 벌의 의상 'Harmonograph'와 'Pangolin'은 뉴욕 디자이너 트라비스 핏치(Travis Fitch)와 미국 미네소타의 3D 프린터 제조회사인 스트라타지스(Stratasys)의 협업을 통해 진행되었으며, 스트라타지스에서 직접 개발한 Nano Enhanced Elastomeric Technology라는 신재료를 시범하여 극대화된 유연성과 내구성을 가진 드레스를 선보였다.

자하 하디드, 반 헤르펜 등과 협업과 진행한 3D 프린팅 제조업체 스트라타지스(Stratasys)는 쓰리에즈포처럼 유능하고 예지력을 지닌 디자이너들과 하는 협업 프로젝트는 미래의 디자이너들이나 학생들, 창의성을 지닌 사람들에게 유기적이고 복잡한 수학 스트럭처가 3D 프린팅을 통해 물리적인 현실로 되는 것을 보여주는 이상적인 방법(Swack, 2016)이라고 하며 3D 프린팅의 무한한 가능성을 현실화시키는 것의 중요성 및 잠재력에 대해 강조했다.

### III. 3D 프린팅을 활용한 텍스타일 스트럭처 개발 사례

텍스타일은 위브와 니트, 크로셰 등 전통적으로 이어져오는 기본적인 스트럭처들을 주축으로 하여 다양한 형태로 발전, 변화하고 있다. 위브는 위사와 경사라는 두 가닥의 실이 각기 위아래로 번갈아가며 겹치는 스트럭처를 이루며 니트와 크로셰는 한 가닥의 실이 루프를 만들어 반복적으로 엮이는 스트럭처로 패브릭이 생성된다. 또한 텍스타일 디자인 분야에서는 스트럭처 뿐만 아니라 끊임없이 신소재 및 기술을 연구하여 촉감 및 실용성 등을 높이기 위한 목적으로 연구해왔다. 3D 프린팅 기술로 인하여 사용가능한 소재의 범위는 더욱 넓어졌으며 그로 인해 얻을 수 있는 시각적, 실용적 효과도 커졌다. 3D 프린팅 개발 초기에는 PLA나 ABS 플라스틱 등의 소재가 흔하게 쓰였지만, 딱딱하고 깨지기 쉬운 성질로 인해 텍스타일의 주요한 성질인 신축성이 부족하다는 단점이 있었다. 그 후 유연성이 보완된 새로운 폴리우

레탄 소재인 필라플렉스(FilaFlex) 외에도 내구성과 신축성을 보완할 수 있으며, 직물에 가까운 느낌의 의상을 제작할 수 있는 다양한 신소재들이 발전 범위를 넓히고 있다.

사례분석 대상은 아이리스 반 헤르펜의 2010 S/S 컬렉션을 시작으로 하여 최근까지 패션·텍스타일 분야에 3D 프린팅 기술을 접목시킨 다양한 브랜드 및 디자이너, 또한 기존 텍스타일 스트럭처를 재해석하기 위한 실험을 진행한 과학자들이 사용한 소재 및 기술을 분석하고, 스트럭처를 기준으로 전통적 방법에 따른 기본 텍스타일 스트럭처, 단일화 스트럭처, 새로운 물리적 스트럭처로 분류하고자 한다.

#### 1. 기본 텍스타일 스트럭처

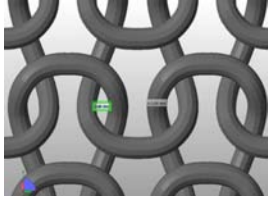

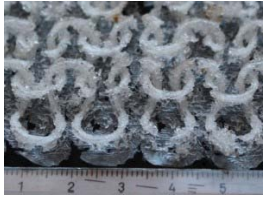

##### 1) 니트 스트럭처 (Knit structure)

R. Melnikova, A. Ehrmann, K. Finsterbusch로 이루어진 독일 과학자들이 3D 프린팅 테크놀로지와 텍스타일 위브(textile weaves)의 결합 가능성을 실험하였다. 그 중 위편 스트럭처(weft knitted structure)에 대한 실험을 보면 실제로 착용 가능한 옷과 굉장히 흡사한 스트럭처를 하고 있는 것이 특징이다(Table 2). 처음으로 실험된 것은 SLS(Selective Laser Sintering, 선택적 레이저 소결) 방식으로 스티치 간의 최소 간격은 0.4mm이며 소재의 굵기는 0.8mm로 결과물의 형태는 위편 스트럭처와 흡사하게 나왔지만 신축성 및 유연성 부족으로 인해 텍스타일 용도로 쓰이기에는 부적합하였다. 두 번째 실험은 첫 번째 실험에 비해 최소 소재 굵기가 1.88mm로 늘어났으며 벤드레이 필라멘트(BendLay filament) 소재와 FDM(Fused Deposition Modeling, 용융 적층 모델링) 방식을 이용하였는데 위편 스트럭처의 받침 스트럭처 부분을 섬세하게 표현하는 과정에서 깔끔하게 나오지 않고 응어리들이 프린트되었다. 세 번째 실험은 FDM방식과 soft PLA 소재가 쓰였는데 이 소재는 위편 스트럭처의 받침 구조물이 필요하지 않았고 우수한 결과물이 생산되었다. 완벽하지는 않지만 스트럭처는 깔끔하고 스티치끼리 거의 분리되어 있으며 가장 중요한 유연성도 포함되어 있었다. 실험을 진행한 과학자들은 이것이 3D 프린팅 기술을 통해 창조될 수 있는 텍스타일의 미래를 여는 한 스텝 정도가 될 수 있을 것이라고 전망하였다(Goehrke, 2014).

##### 2) 위브 스트럭처 (Weave structure)

펠리샤 데이비스(Felecia Davis)는 전통적인 기본 텍스타일 스트럭처를 3D 프린트된 텍스타일 스트럭처로 변환하는 디

Table 2. Experimental Results on Knitting Structure

|   |   |  |   |
|---|---|--|---|
|  |  |  |  |
| Weft knitted structure  | 1) SLS  | 2) FDM   | 3) FDM  |
|   | Nylon   | BendLay filament   | Soft PLA  |
|   | lack of flexibility leads different mechanical properties of the model            | undesirable clots were created   | flexibility of the material but roughness on the surface                            |

(3dprint.com)



Figure 5. 3D Printed Weave with Rubber Warp and Black ABS Plastic (papers.cumincad.org)

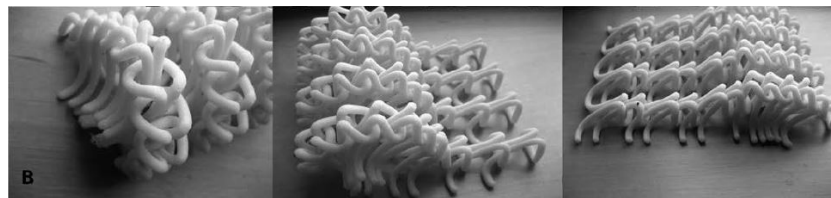


Figure 6. 3D Knitted Print in ABS Plastic, Compressed to Open State. (papers.cumincad.org)

지털 코드에 관한 연구를 진행하였다. 전통적인 텍스타일 스트럭처의 분류는 Emery(2009)의 선행연구를 참고하여 요소들이나 실 각각의 기하학적인 스트럭처와 연결 상태에 따라 구분되었다. 에머리에 따르면 실의 스트럭처에 따라 합쳐 짜인 인터워크 스트럭처 (Interworked Structure linked stitches, knitting and other knotted fabrics), 각 실 가닥이 묶임없이 아래 위로 교차하는 엇갈리게 짜인 인터레이스 스트럭처 (Interlaced Structure), 마지막으로 섬유들이 뽀뽀하게 엉겨 붙은 형태의 펠트 섬유로 구분할 수 있다. 데이

비스는 인터워크와 인터레이스 스트럭처만 3D 프린팅으로 적용하여 연구를 진행하였다(Figure 5, Figure 6).

플레인 위브 스티치의 연구결과 ASB 플라스틱과 다른 소재들이 결합 되어야 패브릭의 움직임이 가능하기 때문에 경사나 위사의 고무소재는 유연성 있는 플라스틱 소재가 쓰여야 하며 그에 따라 니트나 그물 스트럭처에서 신축성을 통한 유동성을 제공한다고 하였다. 또한 재료들이 나란히 프린트되는 현재의 패러다임만 볼 것이 아니라 3D 프린팅 텍스타일의 다채롭고 풍부한 작용을 발전시키기 위해 프린팅 노



Figure 7. 3D Printed Structures Manufactured by Modeclix  
(3dprint.com)

줄이나 프린팅 베드의 화학적 단계에서 재료들이 결합되는 것에 대한 추가적인 연구 또한 필요할 것이라고 주장하였다. 결론적으로 새롭게 적용되는 텍스타일 스트럭처는 전통적 텍스타일 스트럭처와는 상당히 다른 움직임과 스트럭처를 갖고 있을 것이라고 밝혔다(Davis, 2012).

모드클릭스(Modeclix) 또한 전통적인 텍스타일 스트럭처인 직조와 스티치, 니트 스트럭처의 해석에 초점을 맞춰 3D 프린팅과 패션 테크놀로지의 결합을 개발하는 프로젝트를 영국 허트퍼드셔 대학교(University of Hertfordshire)와 함께 진행하였다. 손 보스트록(Shaun Borstock) 교수는 이전에 3D 프린팅된 디자인들은 거의 딱딱하거나 유연성이 없는 추상적인 작품들이 대부분이었지만 모드클릭스에서 제작된 텍스타일은 유동적으로 움직임이 충분하며 착용감이 편한 옷을 만든다고 밝혔다(Millsaps, 2016). 사슬 고리들로 이루어진 스트럭처는 3D 프린팅이 되고나서 수작업으로 빼거나 확장시킬 수 있기 때문에 사이즈와 형태는 체형에 맞게 변형이 가능하다(Figure 7). 건축가인 보스트록 교수는 이 프로젝트를 위하여 유명한 3D 전문가이자 디자이너인 마크 블룸필드(Mark Bloomfield)와 함께 협업을 진행하였다.

## 2. 단일화 스트럭처

텍스타일 분야에서는 신소재와 3D 프린팅 기술을 이용하여 섬유 직물로는 불가능했던 독창적인 스트럭처와 형태의 텍스타일 스트럭처가 개발되었다. 단일화 스트럭처란 여러 피스들로 이루어진 실제 의복과는 달리 하나의 유닛으로만 이루어진 것을 의미하며 실제 목업(Mock-up)으로 발전되지

못하고 디자이너의 머릿속에서 사라져버리거나 컨셉 디자인으로 2D 상에서만 존재하던 아이디어를 카드 프로그램을 통해 실제 결과물로 프린팅이 가능해진다는 이점이 있다. 이러한 작업은 의복 전체가 하나의 유닛(Unit)으로 만들어진 형태로 특정 인체 치수에 따라서 핏(Fit)을 맞추는 방식으로 제조되며 주로 패션계에서 상용화되기 전 3D 프린팅의 초기에 사용된 스트럭처이다(Table 3).

벨기에 디지털 제조업체 Materialise의 크리에이티브 디렉터인 조리스 데보(Joris Debo)는 “컴퓨터가 만드는 어떠한 모델도 3D 프린팅을 통해 만들어낼 수 있을 정도로 발전했지만 초반에 프린팅된 의상들은 갑옷처럼 딱딱해서 입을 것이 불가능했다. 그러나 최근에는 디자인이 점점 유연해지며 변화해가고 있다.”라고 하며 단일화 스트럭처가 갖는 표현성의 우수함과 의상으로서의 실용성이 미흡한 부분에 대해 설명하였다(Tarmy, 2016). 이처럼 하나의 유닛으로 개발된 의복은 갑옷같은 스트럭처로 이루어져 있어 ‘입는 조각품’처럼 실험적이고 예술적인 경향이 돋보이며 실제로 일상생활에서 사용되기에는 착용감과 무게감 등 실용적인 측면에서 여러 가지 한계점들이 존재한다.

## 3. 새로운 물리적 스트럭처

### 1) 메조스트럭처 (Mesostucture)

2014년 이스라엘의 센카 공학디자인대학의 석사 졸업전시회로 3D 프린팅 기술을 패션 디자인에 접목시킨 다니트 펠렉은 PLA와 Soft PLA 소재로 시작하였지만 딱딱하고 부러지기 쉬운 소재로 텍스타일의 주요한 성질인 유연성이 없어 실제 섬유 같은 느낌을 낼 수 없다는 한계점을 발견했다.



Table 3. Unified Structures of Iris Van Herpen

|                 |   |   |   |  |   |
|-----------------|---|---|---|--|---|
| Iris Van Herpen |  |  |  |  |  |
| Collection      | 2010 S/S 'Crystallization'  | 2011 S/S 'Escapism'   | 2011 F/W 'Capriole'   | 2012 S/S 'Micro'   | 2012 A/W 'Hybrid Holism'  |

(www.irisvanherpen.com)

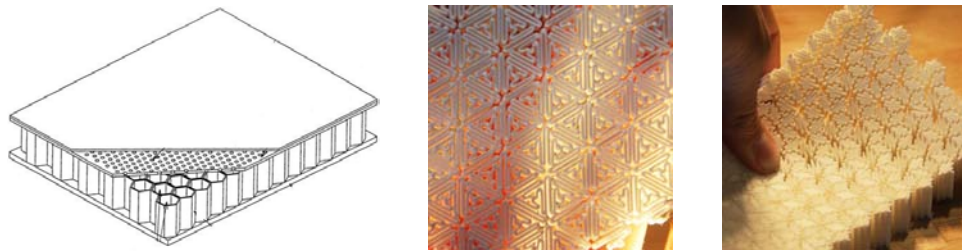


Figure 8. Structure and Principles of Mesostructure (3dprint.com)

이러한 점을 보완하기 위해 시도한 필라플렉스(Filaflex)는 새로운 종류의 필라멘트로 유연성이 부가된 폴리우레탄 소재이며 튼튼하지만 이것 또한 아주 유연하지는 않다는 단점을 지니고 있어 실제 직물의 느낌을 표현하기엔 어려움이 있었다. 2014년도 안드레아스 바스티안(Andreas Bastian)이 개발한 메조스트럭처 다공질 재료(Mesostructure Cellular Material)는 하나의 유닛으로 만들어진 스트럭처나 유연성이 없는 딱딱한 소재의 특성으로 인해 3D 프린팅 기술로 제작한 의상이 실생활에서 사용될 수 없는 한계점을 보완하고자 개발되었다(Figure 8). 이 소재는 마치 바이어스(bias) 재단된 천처럼 구부러지고 늘어나게 하는 패턴이 가능하여 3D 프린팅을 이용한 패션에 접목할 경우 신축성과 유연성이 보완될 수 있는 장점을 지닌다. 이 소재에 쓰인 기술은 신축성을 증가시키기 위해 연결된 요소들의 구성 및 스트럭처에 변화를 주며 플라스틱 소재를 이용하여 텍스타일의 주름 및 스트럭처를 정교하게 재현하는 동시에 무게감과 착용감, 신축성, 유연성, 탄성력 등을 보완할 수 있게 하였다. 메조 스

트럭처라는 새로운 기법은 기본적으로 별집형태로 시작하여 기하학적이고 복잡한 형태의 구성으로 발전되어 레이스나 크로셰 등의 스트럭처에서 심미적, 기능적인 범위가 넓어져 확장 적용 가능성을 볼 수 있다. 같은 해 다니트 펠렉은 이 기법과 필라플렉스를 소재로 한 의상을 선보였는데 그 작업은 레이스 같은 실제 직물과 흡사한 결과를 보여준다(Figure 9).

## 2) 키네매틱스(Kinematics)

너버스 시스템(Nervous System)에서 개발한 '키네매틱스(Kinematics)'디자인은 접기와 압축이 가능한 경첩의 스트럭처 원리를 토대로 하여 개발된 기법으로 조립이 필요 없다는 것이 큰 특징이다. 한 벌의 의상은 경첩 메커니즘이 적용된 수백 개, 수천 개의 조각들로 이루어지며 한 개의 조각은 뾰족한 소재이지만 키네매틱스 기법을 통하여 실제 원단처럼 신체 움직임에 유연하고 유동적으로 움직이게 된다. 또한 전통적인 직물과 다르게 공간을 통해 강도, 주름, 유연



Figure 9. Mesostructure Cellular Material Clothing of Danit Peleg 'Liberty Leading the people' (danitpeleg.com)



Figure 10. Kinematics Bodice (2014) (n-e-r-v-o-u-s.com)



Figure 11. Kinematic Petals Dress (2016) (n-e-r-v-o-u-s.com)

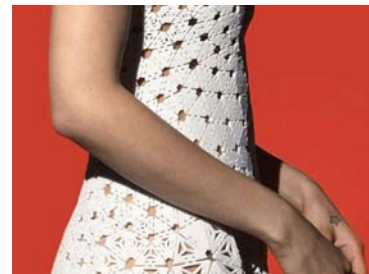


Figure 12. Kinematics Dress 7 (2015) (n-e-r-v-o-u-s.com)



Figure 13. Bikini Made with N12 (www.dezeen.com)

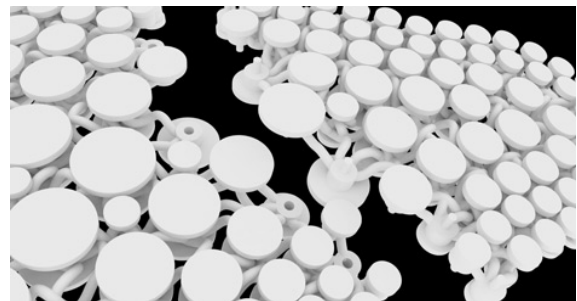


Figure 14. Structures of N12 (www.dezeen.com)

성, 투과성 및 패턴이 변화되는 특징을 지닌다. 키네매틱스의 경첩 메커니즘이 일반적인 텍스타일 스트럭처의 연결 스트럭처를 대체하여 3D 프린팅 기법을 사용한 다양한 효과를 기대할 수 있다(Figure 10-12).

### 3) N12

제나 피젤(Jenna Fizel)과 메리 황(Mary Huang)이 만든 N12 Nylon Bikini(Figure 13-14)는 둥근 원반 모양의 판이 가닥들로 이루어져 있다. 단단한 나일론 소재를 통해 신축성

이 있는 표면을 만들고자 한 이 원단은 다양한 사이즈의 디스크로 인체의 곡선에 맞게 부분적으로 조절할 수 있다. 예를 들면 작은 원형 판들로 몸의 높은 곡선부를 표현할 수 있고 인체의 편평한 부분은 큰 사이즈의 디스크가 이용된다. 이처럼 전통적인 텍스타일 스트럭처에서 영감을 받아 새롭게 디지털 코드로 변환되어 3D프린팅 된 텍스타일들은 한계점들을 보완하기 위해서 새로운 패턴들로 다양하게 변형되어 개발되고 있다.

#### IV. 결론 및 제언

3D 프린팅을 통해 산업은 변화의 과정을 거치고 있으며 다양한 분야에서 변화의 단계를 거쳐 발전해 가고 있다. 우리의 생활과 밀접한 관계를 지니고 있는 의복 또한 지금과는 다른 모습으로 제조 및 생산 과정 등이 변화되고 있기 때문에 패션·텍스타일 분야에서도 이에 맞춰 변화의 흐름을 파악하는 것이 중요하다. 다양한 분야의 전문가들과 협업을 통한 작업 방식의 변화와 소품종 대량생산에서 다품종 소량생산으로 변화해가는 시장에 맞추어 소비자의 취향 및 요구를 반영한 맞춤형 생산이 가능하며 3D 프린터의 보급화로 인해 소비자, 생산자의 구별이 없는 체계로 시장경제 구조가 변화하며 제조의 민주화가 이루어질 것이다. 또한 자원 낭비의 절감, 인조 모피와 인조 가죽의 개발 그리고 시간 및 에너지, 비용의 낭비를 줄임으로 인해 기업의 이윤과 생산성을 높이는 결과를 가져오며, 환경 오염에 대비하는 친환경적인 특성을 지닌다. 이를 통한 3D 프린팅 기술을 통해 분석한 텍스타일 스트럭처 및 특성을 통합적으로 분석한 결과는 다음과 같다.

첫째, 3D 프린팅 기법을 이용하여 텍스타일의 기본조직인 니트와 워브 스트럭처의 패브릭을 대체, 재현하기에는 아직 미흡한 실정이다. 실의 규칙적인 스트럭처로 이루어진 직물과 3D 프린팅은 생산·제조 방식에서부터 본질적으로 다르기 때문에 전통적인 텍스타일 스트럭처를 모방하기 보다는 응용된 새로운 스트럭처 개발이 우선시되어야 할 것으로 보인다. 둘째, 3D 프린팅으로 개발된 텍스타일 스트럭처는 이전에 없었던 새로운 스트럭처와 움직임 가진다. 이에 따라 3D 프린팅은 신소재와 새로운 스트럭처들을 통해 섬유 직물로는 불가능했던 독창적인 구조와 형태의 텍스타일 구조의 개발을 가능케 하였다. 셋째, 패션·텍스타일 디자인에서 필수 조건인 인체에 적합한 착용감, 유연성, 통풍성 등 실용적인 기능성 측면과 촉감 및 인체친화적인 소재 등의 개발이 필요하다.

이처럼 3D 프린팅 텍스타일은 21세기가 추구하는 디자인 특성을 만족시키며 디자인의 가능 범위를 확대시킨다. 현재로서는 텍스타일의 특성을 대체할 만한 3D 프린팅 텍스타일이 미흡하기 때문에 그 주요한 성질들이 미래 텍스타일 연구에 중요한 기회가 될 것이다. 또한 전통적인 텍스타일 제조 방식은 이미 대량 생산의 단계에 있기 때문에 그만큼 빠르고 간편한 생산 방식이 요구될 것으로 예측되며, 최종 결과물의 성질을 예견할 수 있는 메디컬 섬유 같은 기능성 텍스타일 소재의 프로토타입 생산 분야에서는 돈과 시간을

절약할 수 있다는 장점 때문에 촉망받는 산업으로 인식되고 있다.

본 연구는 패션·텍스타일 분야에서 텍스타일 스트럭처 원리와 연계하여 3D 프린팅 기술로 제작된 다양한 개발 유형을 사례 조사를 통해 분석하여 향후 다양한 스트럭처를 적용한 소재 개발을 위해 기반을 마련하고자 했다. 그러나 2차 자료 위주의 수집 및 분석을 통하여 연구가 진행되어 자료 수집의 한계점을 지니고 있다. 본 연구를 토대로 심화된 후속연구에서는, 3D 프린팅 기술을 통한 패션·텍스타일 스트럭처의 연구 개발을 진행하여 3D 프린팅 기술을 활용한 텍스타일 스트럭처가 다양하게 개발되고 향후 미래의 패션·텍스타일을 선도할 수 있게 되기를 기대한다.

#### References

- 3D knitted print in ABS plastic, compressed to open state. (2012). Retrieved April 9, 2016, from [http://papers.cumincad.org/data/works/att/sigradi2012\\_191.content.pdf](http://papers.cumincad.org/data/works/att/sigradi2012_191.content.pdf)
- 3D printed fur. (2016). *Dezeen*. Retrieved April 9, 2016, from <https://www.dezeen.com/2016/05/16/mit-researchers-create-3d-printed-hair/>
- 3D printed leather Zoa. (2017). Retrieved June 03, 2017, from <http://zoa.is/modern-meadow-is-engineering-a-fashion-revolution/>
- 3D printed structures manufactured by Modeclix. (2016). Retrieved March 15, 2017, from <https://3dprint.com/123877/modeclix-3d-printed-dresses/>
- 3D printed weave with rubber warp and black ABS plastic. (2012). Retrieved April 9, 2016, from [http://papers.cumincad.org/data/works/att/sigradi2012\\_191.content.pdf](http://papers.cumincad.org/data/works/att/sigradi2012_191.content.pdf)
- Anderson, C. (2013). *Makers*. (T. Yoon, Trans.). Seoul: RH Korea. (Original work published 2012).
- Bikini made with N12. (2011). Retrieved November 07, 2016, from <https://www.dezeen.com/2011/06/07/n12-3d-printed-bikini-by-continuum-fashion-and-shapeways/>
- Biomimicry. (2016, February 24). *Startribune*. Retrieved March 07, 2017, from <http://www.startribune.com/3-d-printer-stratasys-struts-its-stuff-during-new-york-s-fashion-week/369354501/>

- Bolton, A. (2016). *Manus x Machina: Fashion in an age of technology*. New York, NY: Metropolitan Museum of Art.
- Capriole. (2018). Retrieved March 14, 2018, from <http://www.irisvanherpen.com/haute-couture/capriole>
- Changes in distribution channels through 3D printing. (2014). Retrieved October 15, 2016, from <https://spark.autodesk.com/blog/manufacturing-innovation-opportunities-3d-printing>
- Crystallization. (2018). Retrieved March 14, 2018, from <http://www.irisvanherpen.com/haute-couture/crystallization>
- Danit Peleg. (2017). Retrieved December 27, 2017, from <https://danitpeleg.com/liberty-leading-the-people-2/>
- Davis, F. (2012). 3D printed textiles from textile code: structural form and material operations. *Proceedings of the 16th Iberoamerican Congress of Digital Graphics* (pp. 327-331). Fortaleza: La Sociedad Iberoamericana de Gráfica Digital (SIGRADI).
- Emery, Irene. (2009). *The Primary Structures of Fabrics: An Illustrated Classification*. NY: Thames & Hudson Inc.
- Escapism. (2018). Retrieved March 14, 2018, from <http://www.irisvanherpen.com/haute-couture/escapism>
- Experimental results on knitting structure. (2014, October 29). German scientists study possibility of textiles made via 3D printing, find surprising results. *3DPrint.com*. Retrieved February 07, 2017, from <https://3dprint.com/21630/german-3d-printed-textiles/>
- Fairs, M. (2014). *Dezeen book of interviews*. London, UK: Dezeen Limited.
- Grown of Zoa. (2017). Retrieved June 03, 2017, from <http://zoa.is/modern-meadow-is-engineering-a-fashion-revolution/>
- Hybrid-holism. (2018). Retrieved March 14, 2018, from <http://www.irisvanherpen.com/haute-couture/hybrid-holism>
- Kim, H., & Kang I. (2015). Study on status of utilizing 3D printing in fashion field. *Journal of the Korea Fashion & Costume Design Association*, 17(2), 125-143
- Kim, H. (2015a). A study on the characteristic and trends of sustainable fashion through esthetica at london fashion week, *Clothing Research Journal*, 17(2), 169-170. doi:10.5805/SFTI.2015.17.2.168
- Kim, H. (2015b). 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, J. (2015, March). 3D Printonomics, 중앙집권적 생산에서 '장인의 부활'로. [From centralized production to 'resurrection of craftsmen']. *Dong-A Business Review*. Retrieved December 14, 2017 from [https://dbr.donga.com/article/view/1203/article\\_no/6946](https://dbr.donga.com/article/view/1203/article_no/6946)
- Kinematics bodice. (2014). Retrieved September 5, 2017, from <https://n-e-r-v-o-u-s.com/projects/albums/kinematics-clothing/>
- kinematics dress 7. (2015). Retrieved September 5, 2017, from <https://n-e-r-v-o-u-s.com/projects/albums/kinematics-dress-7/>
- Kinematic petals dress. (2016). Retrieved September 5, 2017, from <https://n-e-r-v-o-u-s.com/projects/tags/3dprint/albums/kinematic-petals-dress/>
- MER KA BA. (2013, September 9). *Paper Magazine*. Retrieved March 07, 2017 from <http://www.papermag.com/threeasfour-have-a-new-exhibit-at-the-jewish-museum-in-new-york-city-1427061468.html>
- Mesostructure cellular material clothing of Danit Peleg. (2017). 'Liberty Leading the people'. Retrieved December 27, 2017, from <https://danitpeleg.com/liberty-leading-the-people-2/>
- Micro. (2018). Retrieved March 14, 2018, from <http://www.irisvanherpen.com/haute-couture/micro>
- Millsaps, B. (2016, March 13). Modeclix collection of eight 3D printed dresses offers beauty in design, movement & wearability. *3DPrint.com*. Retrieved March 15, 2017, from <https://3dprint.com/123877/modeclix-3d-printed-dresses/>
- Oh, I. (2014, May 14). 제조업 민주화, 3D 프린터가 이룬다. [3D printer is democratizing the manufacturing industry]. *Ohmynews*. Retrieved December 7, 2017, from [http://www.ohmynews.com/NWS\\_Web/View/](http://www.ohmynews.com/NWS_Web/View/)

- at\_pg.aspx?CNTN\_CD=A0001991416
- Pallister, J. (2014, March 18). Software advances are "blurring boundaries between design disciplines". *Dezeen*. Retrieved October 14, 2016, from <https://www.dezeen.com/2014/03/18/daniel-widrig-3d-printing-design-software-advances/>
- Petrick, I., & Simpson, T. (2013). 3D printing disrupts Manufacturing. *Research-Technology Management*, 56(6), 12-16.
- Research: 3D printed textiles. (2014). Katemawby. Retrieved October 14, 2016, from <http://katemawby.com/archives/1834>
- Structure and principles of mesostructure. (2014, April 29). Retrieved March 07, 2017, from <https://3dprint.com/2739/bastian-mesostructured/>
- Structures of N12. (2011). Retrieved November 07, 2016, from <https://www.dezeen.com/2011/06/07/n12-3d-printed-bikini-by-continuum-fashion-and-shapeways/>
- Swack, M. (2016, February 16). New york fashion week: New movement in 3D printed fashion by ThreeASFOUR, Travis Fitch and Stratasys. *Stratasys*. Retrieved October 16, 2017, from <http://blog.stratasys.com/2016/02/16/3d-printed-dresses-new-york-fashion-week/>
- Tarmy, J. (2016, April 15). The future of fashion is 3D printing clothes at home. *bloomberg*. Retrieved November 2, 2016, from <http://www.bloomberg.com/news/articles/>
- T-shirt with 3D printed leather Zoa. (2017). Retrieved June 03, 2017, from <http://zoa.is/moma-asks-is-fashion-modern>
- Voltage. (2018). Retrieved March 14, 2018, from <http://www.irisvanherpen.com/haute-couture/voltage>

---

Received (January 15, 2018)

Revised (March 5, 2018; April 23, 2018)

Accepted (May 14, 2018)