

디지털 커스터마이징 자동화 기술 동향

송은영[†]

한세대학교 섬유패션디자인학과

Digital Customized Automation Technology Trends

Eun-young Song[†]

Dept. of Textile & Fashion Design, Hansei University; Gunpo, Korea

Abstract: With digital technology innovation, increased data access and mobile network use by consumers, products and services are changing toward pursuing differentiated values for personalization, and personalized markets are rapidly emerging in the fashion industry. This study aims to identify trends in digital customized automation technology by deriving types of digital customizing and analyzing cases by type, and to present directions for the development of digital customizing processes and the use of technology in the future. As a research method, a literature study for a theoretical background, a case study for classification and analysis of types was conducted. The results of the study are as follows. The types of digital customizing can be classified into three types: 'cooperative customization', 'selective composition and combination', 'transparent suggestion', and automation technologies shown in each type include 3D printing, 3D virtual clothing, robot mannequin, human automatic measurement program, AR-based fitting service, big data, and AI-based curation function. With the development of digital automation technology, the fashion industry environment is also changing from existing manufacturing-oriented to consumer-oriented, and the production process is rapidly changing with IT and artificial intelligence-based automation technology. The results of this study hope that digital customized automation technology will meet various needs of personalization and customization and present the future direction of digital fashion technology, where fashion brands will expand based on the spread of digital technology.

Key words: customizing (맞춤화), digital transformation (디지털 전환), automation technology (자동화 기술), personalized (개인화), curation (추천)

1. 서 론

4차 산업혁명은 첨단 과학과 정보통신기술의 집약적인 발전을 통한 디지털화, 다양한 분야의 기술 융합, 소비자들의 데이터 액세스(data access)와 모바일 네트워크(mobile network) 사용 증가에 따른 소비자 참여 및 행동 패턴의 중요성으로 수요와 공급을 결합한 형태의 '주문형(on demand)' 플랫폼을 강조하고 있다(Schwab, 2020). 이는 다양한 디지털 기술의 발전으로 만들어진 제품과 서비스가 대중을 위한 보편적 가치 중심에서 개인을 위한 차별화된 가치를 추구하는 방향으로 변화되고 있음을 의미한다.

§Eunyoung Song is now at Sookmyung Women's University((재)숙명여자대학교)

†Corresponding author; Eun-young Song

Tel. +82-31-450-9876, Fax. +82-31-450-5222

E-mail: lgfsey96@hansei.ac.kr

© 2021 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.

패션산업에서도 개인 맞춤(personalized product) 시장은 급부상 중이며 이에 따라 생산 방식에도 근본적인 변화가 시작되었다. 개인 맞춤 시장은 디지털 트윈(digital twin)과 같은 제조혁신 기술과 롱테일(longtail) 고객이 확대하면서 성장하고 있다. B2C(Business to Customer) 분야에서 컨베이어 벨트(conveyor belt) 중심의 생산이 감소하고 맞춤제작을 위한 셀 생산 방식(cell production)이 확대될 것이다(Kim, 2020c). '맞춤화'와 '개인화'에 따라 패션 테크 스타트업들은 디지털 기술 전환으로 생산 라인을 개선할 뿐만 아니라, 소비자 유행에 민첩하게 반응해야 할 필요가 있다. 새로운 소비문화의 중심인 MZ세대는 디지털 환경에 능숙하고 나만의 스타일에 가치를 두며 디지털 채널 경험을 선호하는 경향을 나타내고 있다. 개개인의 개성과 다양한 가치를 추구하는 소비 경향으로 변화함에 따라 커스터마이징(customizing) 서비스가 증가하고 있다. 패션산업 환경도 기존의 제조중심에서 소비자 중심으로 변화하고 있는데, IT, 인공지능 기반의 자동화 기술로 생산 프로세스가 급속히 변화하고 있다.

커스터마이징과 디지털 기술에 관한 선행연구를 살펴보면, 3D 프린팅과 디자인 연구(Jeong, 2016; Kim, 2015; Popov, D., 2019), 3D 가상착의 프로그램 및 사용 실태 연구(Kim &

Kim, 2019; Shin, 2020), AR/VR 기술과 패션산업 연구(Lee & Ku, 2020; Lim & Oh, 2017), 빅데이터와 인공지능 기반의 패션산업 연구(Jung & Kim, 2019; Kim & Lee, 2018; Lee & Ku, 2020; Yun, 2017), 디지털 커스터마이징 유형 연구(Kim, 2020b), 인공지능과 개인 맞춤 연구(An et al., 2019 2019) 등이 있다. 이러한 선행연구에서 3D 프린팅은 아이템별 제품과 디자인, 3D 가상착의는 프로그램 운영 및 기술의 적용 완성도, AR/VR 기술은 마케팅 사례 관련 연구이다. 인공지능과 개인 맞춤 연구와 디지털 커스터마이징 유형에 관한 사례 연구들은 디자인 관점으로 연구되고 있다.

본 연구에서는 세분화된 디지털 커스터마이징 유형별로의 류생산과 관련한 자동화 기술을 분류하여 고찰하고 디지털 커스터마이징을 위한 의류생산 프로세스의 개선, 의류 제조서비스의 방향성을 제안하고자 한다

2. 이론적 배경

2.1. 디지털 기술혁신

4차 산업혁명의 기반 기술인 AICBM(AI, IoT, Cloud, Big data, Mobile) 등의 디지털 기술혁신은 패션산업을 미래의 성장 산업으로 전환 시키고 있다. 2018년 한국패션산업연구원은 미래의 융합, 초지능, 초연결의 시대에 패션산업이 고도로 지능화하고 ICT(Information and Communications Technology) 융합형 스마트 의류제품 개발의 디자인 기술혁신에서 빅데이터, 인공지능 등의 디지털 기술혁신으로 확장하고 지속 가능한 패션의 미래가치를 창출하고 있다고 하였다(Table 1). 과거의 디자인 기술혁신이 ICT 융합형, 고기능성, 센서 적용형의 웨어러블 스마트 의류제품 개발에 집중했다면 미래의 기술혁신은 스마트 팩토리, 3D 프린팅을 활용한 커스터마이징, 빅데이터, AI 기반의 개인화 상품 추천 및 스마트 쇼핑, AR/VR을 활용한 스마트 스토어 등으로 의류제품 자동 생산시스템 및 서비스를 위한 기술혁신의 방향으로 전개될 것이다(Hong, 2018).

Table 1. The direction of the fashion business

Past business direction: innovation in design technology	Future business direction: digital technology innovation
ICT convergence wearable smart clothing and product development	ICT convergence wearable smart clothing and product development
Development of climate control smart clothing and products using electronic textiles	Mass customization with smart factory
Development of smart workwear such as smart military uniform/ smart protective clothing	Big data, AI-based personalized product recommendations and purchasing agents
Development of safety protective clothing such as bulletproof/proof/ lumberproof/ rider protective clothing	AI convergence smart shopping
Development of highly functional clothing products such as sanitary clothing/ care patient clothing/sports wear	Smart stores and unmanned stores utilizing AR/VR
Development of fiber products with sensors, such as military tents/ electrical beds/car sheets	Customizing with 3D printing
Leverage big data for consumer analysis and fashion information	Fashion tech conferences and exhibitions

Revised from KRIFI Korea Research Institute for Fashion Industry https://blog.naver.com/fashionbiz_/221299337468

2.2. 생산시스템의 변화

고객의 유형에 따라 생산시스템은 B2B와 B2C로 나눌 수 있다. 개인 맞춤의 주문이 증가하면서 B2B와 B2C 분야의 생산 방식도 순차 적으로 변화하고 있다. 특히 B2C 분야에서 대량분업 생산에서 필수적이었던 컨베이어 벨트 생산 방식이 아닌 생산 공정의 처음부터 끝까지 숙련된 작업자가 조립하는 자기 완결형 셀 생산 방식이 증가할 것이다. 미래의 셀 생산 방식은 협동 로봇(collaborate robot), 무인 운반차(Autonomous Ground Vehicle: AGV) 등의 도움으로 기계와 인간의 효율적인 협업체제로 노동의 가치가 상승하고 노동 생산성이 극대화 될 것이다. 개인 맞춤 생산이라는 트렌드에 대응하기 위해 생산 라인의 가 변화 및 공장 간 이동이 쉬운 모듈러 무빙 팩토리가 부상할 것이다(Kim, 2018b). 패션-섬유산업에서 노동집약적 고비용의 봉제 공정도 첨단기술의 발전이 가속화되면서 자동화되고 있으며 인공지능을 활용해 운영 데이터를 분석하여 효율성을 높이고 직원들의 역량을 높일 수 있다. 개인 맞춤 생산 방식의 근본적인 변화에 대응하기 위해서는 생산과 관련된 데이터를 혁신적인 스타트업(start-up)과 공유하고 새로운 관점에서 데이터를 분석하고 해석하여 생산성을 최대로 끌어올리는 협력체계가 필요하다(Kim, 2020c).

2.3. 디지털 커스터마이징의 유형

커스터마이징이란 ‘주문 제작하다’의 의미로 고객의 요구에 맞는 제품을 만들어주는 맞춤제작 서비스를 말하며, 최근 IT 산업의 발전으로 다양한 솔루션과 서비스를 제공하여 소비자의 요구에 맞는 형태로 재구성·재설계하고 판매하는 의미로 확장되었다. 디지털 커스터마이징(digital customizing)은 첨단 디지털 기술을 활용하여 소비자가 직접 디자인 단계부터 참여하여 맞춤 생산하는 ‘개인화의 온라인 맞춤’을 의미한다(Kim, 2020b).

커스터마이징의 개념은 크게 ‘맞춤화’와 ‘개인화’가 혼재되어 나타나고 있는데 소비자의 관점에서는 분명한 차이를 보인다.

맞춤화는 소비자가 개개인의 취향에 따라 제품과 서비스 환경을 스스로 변경할 수 있도록 콘텐츠를 제공하는 것을 의미하고(Nielsen, 1998), 개인화는 사용자의 직접적인 참여가 없어도 행동 패턴이나 니즈에 맞는 콘텐츠와 경험을 제공할 수 있도록 기획자, 디자이너, 또는 개발자가 시스템을 설계하는 것을 의미한다(Schade, 2016).

소비자 중심의 개인 맞춤 생산은 빅데이터, 인공지능, 자동 생산 등의 첨단기술과 융합하여 합리적인 비용으로 빠르게 소량 생산이 가능해지고 높은 가치의 소비를 실현하고 있다(Kim, 2020b). 제조업 분야에 물리적(physical) 세계와 똑같은 디지털 세계를 생성하는 디지털 트윈 기술이 적용되면서 고객의 주문을 최적으로 예측하고 설비의 생산성이 극대화됨으로써 높은 원가와 높은 가격 구조 때문에 생산자와 소비자로부터 소외되었던 개인 맞춤 시장이 확대될 전망이다(Choi, 2018; Kim, 2018b). 다양한 제품에 대한 소량의 수요가 합산될 때 거대의 수요를 형성하는 롱테일 법칙으로 주류상품과 소수의 히트상품 중심에서 거대한 틈새시장으로 이동하고 있다(Kim, 2020c).

커스터마이징 유형의 선행연구를 살펴보면 Gilmore and Pine(1997)는 디자인, 구성, 조립, 배송의 단계별 제품 변화와 맞춤화의 정도에 따라 매스 커스터마이제이션의 유형을 소비자가 제품 디자인 단계에 관여하는 ‘협동적 맞춤화’, 공급자의 제시 옵션 안에서 선택과 조합을 하는 ‘외관적 맞춤화’, 제품 구매 후 변형하거나 수정하는 ‘적응적 맞춤화’, 소비자 관찰 데이터를 기반으로 소비자의 선호도를 예측해 제공하는 ‘투명적 맞춤화’의 4가지로 제시하였다. Lampel and Minzberg(1996)은 디자인, 구성, 조립, 배분 단계의 맞춤화와 표준화의 비중으로 ‘주문 맞춤화’, ‘완전 맞춤화’, ‘부분 표준화’, ‘맞춤 표준화’, ‘완전 표준화’의 5가지로 정리하고 있다. Duray and Milligan(1999)는 고객이 맞춤화 과정에 관여하는 시점으로 유형을 분리하여 디자인에 참여, 구성, 조정, 조립하는 4가지의 소비자로 분류하고, 초기 단계에 고객들이 개입할수록 상품들의 맞춤화 정도가 높아진다고 하였다(Choi & Kim, 2018). Lee(2018)는

해외 커스텀 쇼핑몰에 나타난 셀프 디자인 서비스를 ‘자기 창작형 맞춤’, ‘수정형 맞춤’, ‘단순 조합형 맞춤’의 3단계로 정리하였고, Han(2016)은 생산자의 판매방식과 소비자의 참여 방식에 따라 ‘조립구조형’, ‘리디자인형’, ‘제품완성형’의 조합적 구성 유형으로 분류하고 있다. Kim(2020b)은 디자인, 구성과 조립, 배분의 3단계에 따른 제품 변화의 정도와 소비자 개입의 정도에 따라 ‘협동적 디자인’, ‘맥락적 제공’, ‘선택적 구성’의 3가지 디지털 커스터마이징 유형을 제시하였다(Table 2).

본 연구에서는 국내외 선행연구의 매스 커스터마이제이션의 유형 분류를 참고하여 디지털 커스터마이징의 디자인, 생산, 분배 단계별 소비자의 참여 정도와 맞춤화-개인화 정도에 따라 ‘창의적 맞춤’, ‘선택적 구성 및 조합’, ‘예측적 제안’의 3가지 유형을 제시한다.

3. 연구방법

3.1. 연구문제

본 연구에서는 디지털 커스터마이징의 유형을 도출하고 유형별 사례를 분석하고 디지털 커스터마이징 자동화 기술의 동향을 파악한다.

디지털 커스터마이징의 유형은 ‘창의적 맞춤’, ‘선택적 구성 및 조합’, ‘예측적 제안’의 3가지 유형으로 분석한다.

첫째, 창의적 맞춤은 고객이 제품의 디자인 단계부터 개인별 사이즈와 디자인을 적극적으로 대입하고 대량생산 생산시스템이 아닌 소량 또는 단 하나의 제품을 맞춤 제작하는 방식을 의미한다.

둘째, 선택적 구성 및 조합은 매스 커스터마이제이션의 보편적인 방식으로 공급자가 제시한 옵션 안에서 고객의 선택과 조합을 통해 외관적인 맞춤을 제공하는 방식을 의미한다.

셋째, 예측적 제안은 오랜 시간 소비자를 관찰하여 그들의 선호도와 기호를 예측해 제공하는 방식으로 고객이 직접적으로 디자인과 구성에 참여하지 않아도 이전까지 생성된 빅데이터를

Table 2. Customizing types

Researcher	Factors	Customizing types
Gilmore and Pine(1997)	Product change and customization	Cooperative Appearance Adaptable Transparent
Lampel and Minzberg(1996)	Customization and standardization	Order customization completely Standardization customized Standardization completely Standardized
Lee(2018)	Self-design service	Self-creative Corrective Simple combination
Han(2016)	The way producers sell and consumers participate	Assembly structure re-design Finished product
Kim(2020d)	Product change and consumer intervention	Cooperative design contextual provision selective composition

바탕으로 고객의 니즈를 예측하고 서비스와 상품을 추천하거나 제작하는 방식을 의미한다.

3.2. 연구대상 및 범위

본 연구에서는 선행연구를 통해 디지털 기술혁신과 디지털 커스터마이징에 대한 이론적 배경을 고찰하고 디지털 커스터마이징의 유형별 사례에 나타난 자동화 기술의 특징을 파악하였다. 디지털 혁신 기술의 범위가 방대하므로 패션산업에 적용된 디지털 기술로 한정하였으며, 국내의 패션기업 및 스타트업의 디지털 커스터마이징 자동화 기술을 중심으로 분석하였다.

패션 브랜드 및 패션산업 분야에서 디지털 커스터마이징 콘텐츠를 활용한 사례들을 국내외 학술논문 및 단행본, 인터넷 자료, 정기 간행물 등을 중심으로 자료를 수집하고 분석하였으며 ‘협동적 맞춤’, ‘선택적 구성 및 조합’, ‘투명 제안’의 3가지 유형별 분류에 대한 객관성을 위하여 의복 구성과 의류생산 전공의 석사급 1인과 박사급 3인, 디자이너 경력의 박사급 1인의 전문가 자문을 토대로 사례를 선정하였다.

4. 디지털 커스터마이징 유형별 자동화 기술 동향

4.1. 창의적 맞춤

디지털 환경에 익숙한 MZ 세대는 풍부한 디지털 콘텐츠와 기술을 통해 다양성을 인정하고 개성을 중요시하며 자신들의 관심사를 공유하고 콘텐츠 생성이 자유롭다. 그리고 각자의 니즈와 스타일에 맞는 콘텐츠를 구체적인 제품으로 실현하고 있는데 소규모의 패션 비즈니스와 개인 디자이너들은 이와 같은 소비자의 니즈와 데이터를 적극적으로 제품 디자인 프로세스에 개입시켜 소품종 개인 맞춤화의 온디맨드 제조 방식을 제공하고 있다. 이를 위해 브랜드만의 독자적인 디지털 기술과 고속화된 소규모 장비를 활용하여 소비자에게 소량의 최적화된 양질의 제품을 제공할 수 있게 되었는데 대표적으로 3D 프린팅은 소비자가 자신의 수요를 반영하고 생산 과정에 개입하여 ‘자신만을 위한 상품’을 제작할 수 있도록 한다.

3D 프린팅은 레이저와 파우더 재료를 사용하여 제작하고자 하는 형상을 신속하게 조형하는 신속조형기술(Rapid Prototyping, RP)에서 현재는 설계 데이터에 맞는 파우더, 액체, 금속 등의 재료를 적층 가공(Additive Manufacturing, AM) 방식으로 쌓아 올려 제품을 제조하는 방식을 의미한다(Park, 2015). Table 3은 3D 프린트 유형에 관한 설명이다. 3D 프린팅 방식에는 광

경화성 수지 적층 조형 방식(stereo lithography apparatus; SLA), 선택적 레이저 소결 방식(selective laser sintering; SLS), 퓨즈 적층 모델링 방식(fused deposition modeling; FDM), 폴리 제트 방식(poly jet), 접착제 분사 방식(binder jetting) 등이 있다(Cho & Lee, 2014; Pak, 2015; Popov, 2019). 패션 제품에서 사용되는 3D 프린팅 방식은 FDM, SLS의 두 가지 방식이 많이 사용되고 재료와 방식에 따라 의류, 신발, 액세서리, 금속 보석 등 다양한 아이টে 활용된다. 이러한 3D 프린팅 기술은 3차원의 디자인 도면을 생성하고, 다양한 재료의 소재를 적층하여, 3차원의 형상 제품을 제작하는 기술로 디자인-소재-SW-장치의 융합된 차세대 기술이다(Cho, 2020).

줄리아 데이(Julia Davy)는 대량생산의 인프라를 가지지 못한 소규모 스타트업으로 개인화 맞춤제작을 위해 3D 프린팅 기술을 활용하는 디지털 커스터마이징 디자이너 브랜드이다. 소비자 개인의 니즈와 사이즈에 따라 디자인 변경이 가능한 의상들은 파라메트릭(parametric) 디자인과 3D 프린팅임에도 불구하고 유연한 수지와 실리콘 원료의 필라멘트를 사용함으로써 유연하고 부드러운 착용감을 준다(Fig. 1). 영국의 스타트업 니탄(Knyttan)은 니트 의류 생산 과정을 3D 프린팅 기술을 활용하여 단순화하였는데 기존의 평균 90일의 제작 기간을 90시간으로 단축하고, 최소 생산 단위도 줄여서 고객이 원하는 디자인의 의류를 단 한 장만도 생산할 수 있다(Fig. 2). 서스데이 파인네스트(Thursday Finest)도 DIY(do it yourself) 또는 온디맨드 방식의 서비스를 지향한다. 소비자가 직접 원하는 니트 제품을 만들어 낼 수 있는 3D 니트 프린팅 솔루션을 제공하여 홈페이지에서 원하는 소재, 색상, 형태의 ‘오직 나만의’ 양말, 넥타이, 모자, 스카프 등을 주문할 수 있다.

4.2. 선택적 구성 및 조합

디지털 기술이 발달하면서 소비자는 개인화와 경험을 통한 즐거움을 중요시하여 대량생산의 획일화된 제품들을 일방적으로 제공하던 패션 브랜드는 디지털 커스터마이징 서비스로 사업을 확대하고 있다. 소비자는 브랜드가 제공하는 다양한 옵션 메뉴 중에서 개인의 니즈에 맞는 선택과 조합을 통해 외관적 구성의 맞춤을 할 수 있다. 다양한 외관적 구성의 결과로 개인별로 최적화된 맞춤 디자인과 서비스를 제공할 수 있는데, 3D 가상착의와 같은 기술을 통해 소비자에게 시각적 이미지로 쉽고 빠르게 전달하고 재미와 경험의 가치를 제공하여 고객 참여를 유도할 수 있다.

3D 가상착의 시스템은 3차원 인체 스캐너, 3차원 패턴 설계,

Table 3. 3D printing types

	SLA	SLS	FDM	Poly jet	Binder jetting
Material	Ingredients for photocuring	Powder	Thermoplastic	Photopolymer resin	Powder
Hardening method	Ultraviolet rays	Laser	Room temperature	Ultraviolet rays	Glue
Accuracy	Medium	High	Low	High	Medium
Manufacturing time	Medium	Slow	Fast	Fast	Fast



Fig. 1. The parametric coral pleated dress.
<https://juliadaviy.com>

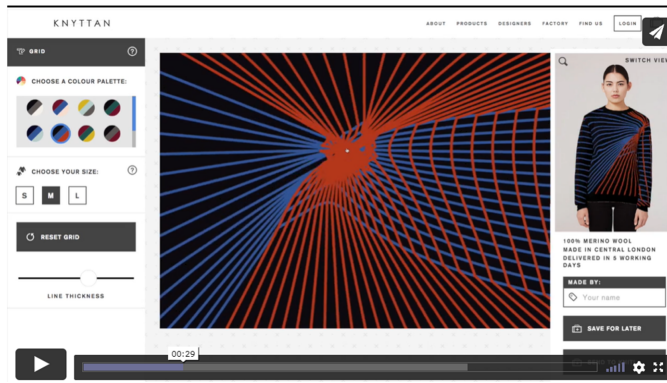


Fig. 2. Factory of the future by Knyttan.
<https://www.dezeen.com>

3차원 가상 드레이핑 등의 기술이 웹 기반 환경에서 정보통신 기술과 접목되면서 패션산업에서 디지털 기술의 적용이 확대되고 있다. 그리고 인체 계측 데이터 분석으로 개인의 특성에 맞는 주문 맞춤 생산 MTM(made-to-measure) 방식으로 커스터마이징 할 수 있다(Shin, 2020). 국내에서 개발된 DC suits, Clo 3D, 싱가포르 브라우즈웨어(Browzwear)사의 V-stitcher 8.0, 일본의 i-Designer, 미국 이에프아이(EFI)사의 Optitex 3D, 프랑스 Lectra의 3D Fit 등의 3D 가상착의 프로그램이 활용되고 있다(Kim & Kim, 2019).

영국 버버리사의 버버리 비스포크(Burberry Bespoke)는 소비자가 웹사이트에서 트렌치코트의 색상, 소재, 스타일, 디테일과 트림 등 디자인 요소를 선택하면 3D 아바타의 가상착의 프로그램을 활용해 트렌치코트 디자인을 할 수 있다(Fig. 3). 블랙야크(blackyak)는 3D 바디 스캔부터 생산까지 가능한 마이 패션 랩(My Fashion Lab)을 통하여 소비자 맞춤형 생산 시스템을 운영하고 있다. 인체 체형 스캔, 패턴 자동생성, DTP(Digital Textile Printing), 봉제 등의 시스템을 통해 소비자가 자신의 체형과 취향을 반영한 '나만의 옷'을 주문하고 완성된 의상을 1시간 이내에 받아 볼 수 있는 혁신적인 제품 생산 프로세스를 제공하고 있다(Fig. 4). 산업통상자원부의 지원으로 '위드인 24(WITHIN24) + 올스튜디오스(ALLSTUDIOS)'는 가상

피팅, 커스터마이징, 3D 바디 스캐너 등의 최신 ICT 기술과 패션을 융합하여 소비자가 직접 참여하는 디지털 콘텐츠 패션 매장을 운영하고 있는데, 개인의 체형, 디자인 성향 등의 소비자의 니즈에 적합한 개인 맞춤 의류를 제작하고 있다(Kim, 2020a)

홍콩 폴리텍 대학(Hong Kong Polytechnic University)에서 인체치수에 따라 변신하는 마네킹 아이더미(i. Dummy)를 개발하였다. 아이더미의 인체치수는 다양한 사이즈, 인종, 몸매 타입에 적용하기 위해 미국, 유럽, 중국, 일본의 데이터를 기반으로 신체계측 및 메카트로닉스(mechatronics) 전문가로 구성된 연구팀에서 개발하였다(Fig. 5). 프랑스의 스타트업인 유베카(Euveka)도 다양한 크기로 변신하는 스마트 로봇 마네킹을 전문적으로 생산하고 있다. 유베카가 제공하는 소프트웨어에 신체 사이즈를 입력하면 로봇 마네킹의 크기가 변한다. 샤넬, 루이비통 등의 글로벌 럭셔리 브랜드도 오프피피르(맞춤복) 제작에 유베카의 로봇 마네킹을 사용했다. 빅데이터 분석을 기반으로 한 인공지능 기술이 이러한 로봇 마네킹 개발을 가능하게 하였다(Ahn & Lim, 2020). 일본 패션산업은 신체계측 기술을 제공하는 B2B 사업이 시작되고 있다. 바디그램(Bodygram)은 스마트폰으로 평상복을 입고 정면과 옆면 사진만을 촬영하면 목둘레, 팔 길이, 어깨 둘레, 가슴둘레, 팔목 둘레, 엉덩이둘레

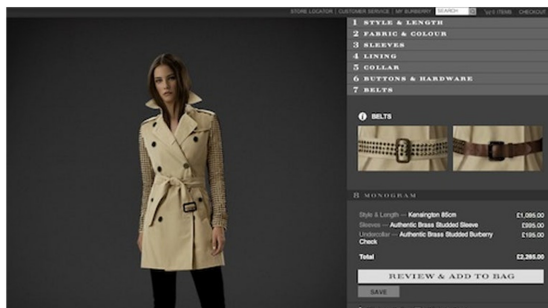


Fig. 3. Burberry Bespoke.
<https://www.businessoffashion.com>



Fig. 4. My fashion lab by Blackyak.
<http://www.fashionbiz.co.kr>



Fig. 5. I. Dummy.
<https://www.polyu.edu.hk>



Fig. 6. Bodygram.
<http://bodygram.com/en>

등의 전신 16부분의 입체적인 치수 데이터를 분석하여 신체 치수와 99%에 가까운 사이즈의 옷을 맞출 수 있다(Fig. 6). 축적된 체형의 데이터를 확보하여 고정밀 치수 측정의 정확도를 높이는 알고리즘과 AI 학습 데이터로 정확도가 높다. 이와 같은 데이터를 이용하여 개인 맞춤형 셔츠 제작을 시작하였고 향후 몸의 변화를 통해서 헬스 제품으로의 가능성을 보인다(Lim, 2019).

4.3. 예측적 제안

온·오프라인의 경계가 없는 O2O(online to offline) 형태의 패션 비즈니스는 소비자가 온·오프라인의 다양한 채널에서 상품을 검색, 구매하는 옴니채널 시대가 본격화되면서 지능적인 맞춤형 서비스를 원하는 스마트 컨슈머(smart consumer)가 등장하였으며 기존의 온라인과 오프라인을 결합하는 형태가 유통, 마케팅, 이커머스(electronic commerce) 등에서 미래형 모델로 주목받고 있다(Lim & Oh, 2017). 그리고 온라인을 통해 구축된 빅데이터를 통해 오프라인 시장을 구축하는 O4O(offline for online) 형태가 등장하며 유통 구조의 혁신적인 모델이 더욱 발전할 것이다(Kim, 2019). 온·오프라인의 창조적 통합은 소비자들에게 다양한 공감각적 체험을 제공하기 위해 증강현실 기술을 스마트 미러, 가상 피팅 시스템에 도입하고 있다(Lim, 2016).

가상 현실(virtual reality)과 증강현실(augmented reality)은

인간의 오감을 체험하는 미디어를 통칭한다. 증강현실은 가상 현실에서 파생된 기술인데 실제 환경의 현실 세계에 가상의 사물을 합성하여 보여주는 컴퓨터 그래픽 기법이다. 가상 현실은 이미지, 주변 배경, 객체 모두를 가상의 이미지로 보여주는데 증강현실은 현실 세계와 가상의 정보를 3차원 공간에 보여준다(Lim, 2016; Park, 2019; Pak & Lee, 2019).

증강현실 기반의 3D 가상 피팅 시스템에는 LF 헤지스(Hazzys)와 LG전자가 협업한 씽큐 핏(ThinQ Fit), 에프엑스기어(FXGear)사의 에프엑스미러(FXMirror), 삼성전자의 스마트 사인지(smart-signage)를 활용한 가상 피팅 솔루션 등이 있다(Fig. 7-8). 3D 카메라로 사용자의 신체를 정확히 측정한 데이터를 기반으로 한 가상의 아바타를 생성한 후 사용자는 그 아바타에 다양한 가상 의류를 입혀봄으로써 실제 착용하지 않고도 소비자의 신체 특징, 디자인 성향 등에 맞는 의류를 선택할 수 있다. 인체의 움직임에 따른 의상 착용 모습을 볼 수 있고 겹웃 처리, 주름까지 구체적으로 표현하며 옷을 착용한 360도의 모습도 확인할 수 있다. 가상 아바타의 헤어스타일, 옷의 사이즈도 바뀌며 실제 착용한 모습과 정확한 매칭이 가능하며, 선택한 옷과 잘 어울리는 액세서리 등의 코디네이션 제품 정보도 함께 제공한다. 이러한 가상 피팅 시스템은 사이즈의 오류를 방지하고 스타일의 적합성을 극대화하여 소비자가 최적의



Fig. 7. ThinQ Fit.
<https://www.edaily.co.kr>

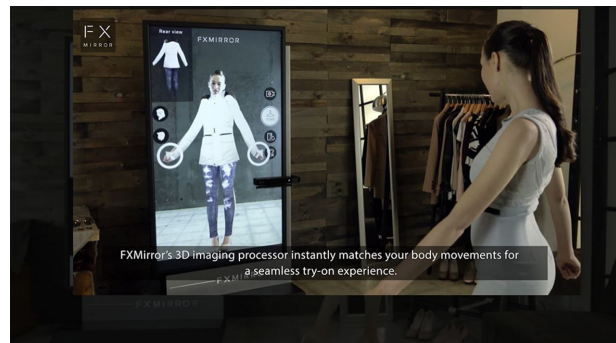


Fig. 8. XMirror
<http://www.fxmirror.net>

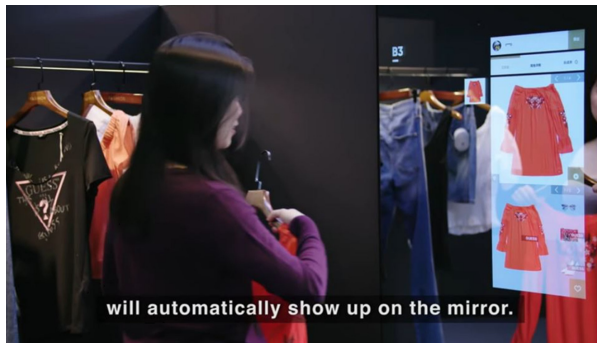


Fig. 9. Alibaba's Fashion AI.
<https://digitaltransformation.co.kr>

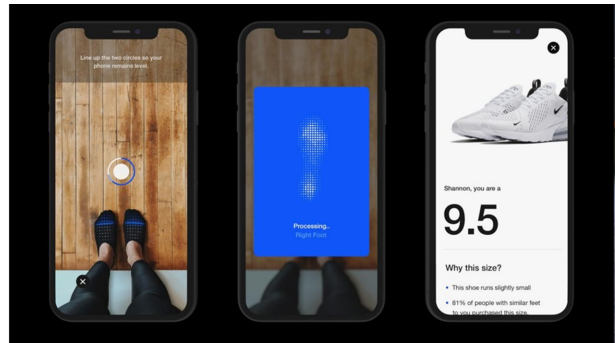


Fig. 10. Nike hyper-accurate.
<https://www.dezeen.com>

맞춤 의류를 선택하여 구매할 수 있다(Park, 2019).

사회·경제 전반에 걸쳐 사물인터넷, 인공지능, 빅데이터, 모바일 등의 첨단 정보통신 기술이 융합되고 모든 산업은 데이터 경쟁이 심화 되고 있다. 인공지능과 빅데이터를 통한 알고리즘 분석은 개인의 상황과 맥락, 취향, 생활 패턴 등 개인과 관련된 다양한 정보를 수집해 반영하는 초 개인화(hyper-personalization) 시대에 고객의 니즈를 예측하여 정확한 맞춤 상품과 서비스를 제공하는 핵심 기술이다(Kim, 2020b). 패션산업에서도 다양한 분야와 기술의 융합을 통해 디지털 커스터마이징 서비스와 제품을 추천하고 있다. 인공지능은 방대한 데이터를 분석하고 소비자의 모든 행동을 기억하여 개개인의 취향과 니즈가 정확히 반영된 제품을 추천하고 개인적인 서비스를 완벽하게 제공하는데 핵심적인 역할을 한다.

인공지능이란 피쳐(feature)를 데이터 속에서 생성하고 현상을 모델화하는 컴퓨터 기술이다. 인공지능은 컴퓨터가 축적된 데이터를 인공신경망을 기반으로 사람이 스스로 학습하는 것과 같은 딥러닝 기술의 적용으로 급격히 진화하였다. 딥러닝 기술의 인공지능은 복잡하고 다양한 정보 속에서 사용자 관심 분야의 정보를 스스로 학습하고 분류해 줌으로써 사용자의 신속한 의사 결정을 도울 수 있다. 현재 인공지능은 웹 환경에서만 아니라 옴니채널, 모바일, 챗봇 등의 다양한 기술 지원으로 개인 맞춤 패션의 추천 서비스가 가능하다(Ahn et al., 2019).

구글(Google)은 아이비레벨(Ivyrevel)과 협업하여 코디드 꾸뛰르(Coded Couture)라는 패션 앱을 개발하였다. 구글은 9개의 API(Application Programming Interface) 기술을 기반으로 사용자의 시간, 위치, 장소, 활동 및 날씨 정보 등의 신호를 감지하고 이를 최적화하여 조합함으로써 라이프 스타일을 파악하고 소비자 개개인에게 맞는 패션을 제안할 수 있다. 스티치픽스(Stitch Fix)는 패션 스타일링에 인공지능을 바탕으로 분석한 정보를 활용하여 패션 큐레이션의 역할을 한다. 인공지능이 소비자 정보를 기반으로 소비자 개개인에게 어울리는 스타일링을 하고 전문 스타일리스트가 고객 정보를 중심으로 최종 선택한 다섯 개의 스타일링 상품을 추천한다(Kim & Lee, 2018). 알리바바(Alibaba)의 'Fashion AI' 컨셉트 매장에서는 인공지능

데이터 분석을 기반으로 한 의류 추천 서비스를 체험할 수 있다(Fig. 9). 타오바오(Taobao)의 고객 정보와 연동하여 자이로 센서(Gyro-sensors), 무인전자식별(RFID), 블루투스(BLE)를 갖춘 스마트 잠금장치가 소비자 선택한 의류와 액세서리는 매직 미러를 통해 가상 피팅을 할 수 있다. 학습된 인공지능은 소비자의 체형과 스타일, 트렌드 정보 등을 적용하여 상품과 액세서리 등의 코디네이션 아이템을 스마트 거울을 통해 추천해 큐레이션 기능을 한다(Kim, 2018a). 나이키는 컴퓨터 비전, 인공지능, 추천 알고리즘, 데이터 과학 등의 디지털 기술을 활용한 스캐닝 솔루션을 개발하였다(Fig. 10). 나이키의 전용 앱을 활성화하여 발을 측정하면 발 사이즈에 적합한 신발이 제시된다. 나이키의 프로 파일에 측정된 사이즈 정보가 저장되므로 신발을 구매할 때마다 매번 정보를 입력할 필요가 없으며 오프라인 매장에서도 정보로 활용된다. QR 코드를 나이키 앱에서 스캔하여 적합한 사이즈의 다양한 모델을 찾을 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 디지털 커스터마이징의 유형별 사례에 나타난 자동화 기술의 특징을 파악하였다. 이론적 고찰을 통해 ICT 융합형 스마트 의류제품 개발에서 빅데이터, 인공지능 등의 디지털 기술혁신으로의 변화, '맞춤화'와 '개인화'의 커스터마이징 개념, 개인 맞춤의 주문 증가에 따른 고객 유형별 생산시스템의 변화를 살펴보았다.

디지털 커스터마이징의 유형은 선행연구를 참고하여 '창의적 맞춤', '선택적 구성 및 조합', '예측적 제안'의 3가지 유형으로 분류하였다.

첫째, '창의적 맞춤' 유형은 고객이 직접 디자인에 참여하여 소품중 개인 맞춤화의 온디맨드 제조 방식을 제공하는데 3D 프린팅 기술을 활용하였다. 3D 프린팅은 재료와 방식에 따라 의류, 신발, 액세서리, 금속 보석 등 다양한 아이템에 활용되고, 디자인·소재·SW·장치가 융합된 차세대 기술이다. 줄리아 대비, 대트 펠레그 등의 개인 디자이너 브랜드와 니탄, 서스데이 파이니스트와 같은 스타트업을 중심으로 3D 프린팅 기술을 활용

한 개인 맞춤 서비스를 제공하고 있었다.

둘째, ‘선택적 구성 및 조합’ 유형은 개개인의 니즈에 맞는 선택과 조합을 통해 외관적 구성의 맞춤을 제공하는데 3D 가상착의 기술을 활용하였다. 버버리 비스포크, 블랙야크 마이 패션 랩, 워드인 24+ 올스튜디오스는 3D 아바타의 가상착의 프로그램을 활용해 소비자 맞춤형 생산시스템을 운영하고 있었다. 인체 계측의 빅데이터 분석을 기반으로 한 인공지능 기술은 아 이더미, 유베카의 로봇 마네킹 개발을 가능하게 하였고 바디그램과 같은 신체계측 기술을 제공하는 B2B 사업이 확대되고 있다.

셋째, ‘예측적 제안’ 유형은 O2O 형태의 패션 비즈니스로 스마트 컨슈머에게 지능적인 맞춤형 서비스를 제공하는데 증강 현실, 인공지능, 빅데이터의 기술을 활용하였다. 썬큐 피트, 에프 엑스미러 등의 증강현실 기반의 3D 가상 피팅 시스템은 사이즈 오류의 방지, 스타일 적합성의 극대화로 소비자가 최적의 맞춤 의류를 선택, 구매할 수 있었다. 인공지능은 빅데이터를 분석을 통해 소비자 행동, 개개인의 취향과 니즈가 정확히 반영된 개인화된 패션 제품의 추천 서비스가 가능하였다. 구글과 알리바바는 자사가 보유한 빅데이터를 기반으로 한 인공지능을 활용하여 패션 프로젝트를 진행하였고 스티치픽스의 패션 스타일링, 나이키의 스캐닝 솔루션은 패션 큐레이션의 역할을 하였다.

본 연구는 디지털 커스터마이징의 자동화 기술 현황을 살펴보고 비즈니스적 요인과 특징을 도출하여, 향후 디지털 커스터마이징 프로세스의 개발과 기술의 활용에 대한 방향성을 제시하는데 의의가 있다. 디지털 커스터마이징 자동화 기술은 패션 산업 이외의 여러 분야와의 기술적 융합으로 소비자의 ‘개인화’와 ‘맞춤화’에 따른 다양한 니즈를 충족시키고 새로운 수요를 창출하고 있으며 디지털 기술 확산을 기반으로 패션 브랜드가 확장되고 디지털 패션 테크 미래의 방향을 제시하고 있다. 하지만 실험적인 디자인, 낮은 접근성, 희소성, 정보의 부족 등은 디지털 커스터마이징 제품을 소비하는데 제한적 요인일 수 있다. 디지털 커스터마이징의 대중화를 위해서는 디지털 기술의 융합 및 확산, 접근이 용이한 온라인 플랫폼의 활용, 지속적인 소비자 데이터 수집과 분석이 필요하다. 그리고 소비자 경험 서비스 기술을 통합하고 디지털 제조 기반을 구축하는 등의 장기적인 재정 지원 및 지속적인 수요 창출이 요구된다.

References

Ahn, S. H., & Lim, S. J. (2020, September 7). *맞춤형 스타일링 구독, 짝퉁 판별하는 AI, 로봇 마네킹* [Customized styling subscription, AI to identify fake products, robot mannequins]. *ChosunBiz.com*, Retrieved September 5, 2021, from http://economychosun.com/client/news/view.php?boardName=C00&t_num=13609481

Alibaba's Fashion AI.(n.d) ‘Alibaba's AI-based fashion store ‘FASHION AI STORE’ is opened’. *Digitaltransformation*. Retrieved August 25, 2021, from <https://digitaltransformation.co.kr/%EC%95%8C%EB%A6%AC%EB%B0%94%EB%B0%94-%EC%9D%B8%EA%B3%B5%EC%A7%80%EB%8A%A5ai%EA%B8%B>

0%EB%B0%98-%ED%8C%A8%EC%85%98%EB%A7%A4%EC%9E%A5-fashion-ai-store-%EC%98%A4%ED%94%88/

An, H. S., Kwon, S. H., & Park, M. J. (2019). A case study on the recommendation services for customized fashion styles based on artificial intelligence. *Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles*, 43(3), 349-360. doi:10.5850/JKSCT.2019.43.3.349

Bodygram. (n. d.). Body Measurement technology at your fingertips. *Bodygram*. Retrieved July 5, 2021, from <https://bodygram.com/en>

Burberry Bespoke. (2011), ‘Burberry Bespoke, Hermès’ growth continues, digital exclusivity, Macy’s makeover, 20’. *BOF*, Retrieved September 5, 2021, from <https://www.businessoffashion.com/articles/daily-digest/f-daily-digest-burberry-bespoke-hermes-growth-continues-digital-exclusivity-macys-makeover-20-years-of-dazed-confused>

Cho, W. J., & Lee, H. J. (2014). Overview of 3D printing technology and material research trends. *Proceedings of the Korean Institute of Metals and Materials, Spring Conference, Korea*, pp. 4-12.

Cho, Y. J. (2020). Study on perception of 3D printing fashion using big data analysis. *The Korean Society of Science & Art*, 38(1), 271-283. doi:10.17548/ksaf.2020.01.30.271

Choi, S. R. (2018, December 15). *현실과 가상의 쌍둥이 ‘디지털 트윈’, 제조업에서 두각* [Real and virtual twins “Digital Twin” stands out in the manufacturing industry]. *The Korea Industry Daily*, Retrieved July 5, 2021, from <http://www.kidd.co.kr/news/206204>

Choi, W. H., & Kim, S. J. (2018). A study on value based consumption trends appeared in customizing design. *Journal of Communication Design*, 62, 197-214. doi:10.25111/jcd.2018.62.16

Duray, R., & Milligan, G. W. (1999). Improving customer satisfaction through mass customization. *Quality Progress*, 32(8), 60-66.

Factory of the future by Knyttan. (2015). Mass customisation “can be the future of fashion,” says Knyttan co-founder. *Dezeen and Mini Frontiers*. Retrieved July 5, 2021, from <https://www.dezeen.com/2015/02/18/movie-mass-customisation-future-fashion-knyttan-bespoke-knitwear-ben-alun-jones/>

Gilmore, J. H., & Pine, B. J. (1997). The four faces of mass customization. *Harvard Business Review*, 75(1), 94.

Han, W. L. (2016). A study on the development of assembly-structured customized fashion design. *Industrial Design*, 10(3), 117-126.

Hong, Y. S. (2018, June 15). *한국패션산업연구원, 패션 R&D 사업에 주력* [Korea Fashion Industry Research Institute focuses on fashion R&D business]. *Fashionbiz*. Retrieved June 25, 2021, from https://blog.naver.com/fashionbiz_/221299337468

i. Dummy. (n. d.). i.Dummy: The robot mannequin changes the face of garment industry. *Polyu* Retrieved September 5, 2021, from <https://www.polyu.edu.hk/openingminds/en/story.php?sid=5#title>

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), 245-260.

Jung, J. R., & Kim, M. H. (2019). A study on AI-based design process innovation in fashion industry. *Journal of Communication Design*, 67, 139-153. doi:10.25111/jcd.2019.67.11

Kim, C. E., & Lee, J. H. (2018). Trends of big data and artificial intelligence in the fashion industry. *Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles*, 42(1), 148-158. doi:10.5850/JKSCT.2018.42.1.148

- Kim, C. Y. (2020a, October 19). *트렌디한 디자이너 옷 이젠 '내맘 대로 커스텀' 위드인24 + 올스튜디오스 온라인몰 리뉴얼 오픈* [Trendy designer's clothes. Now, "Custom as I please" with In24 + All Studios Online Mall Renewal is opened]. *Sisanews*, Retrieved September 5, 2021, from <http://www.sisa-news.com/news/article.html?no=136828>
- 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, J. H., & Kim, Y. K. (2019). A study on the convergence characteristics 3D virtual fashion design program. *The Korean Society of Science & Art*, 37(4), 53-63. doi:10.17548/ksaf.2019.09.30.53.
- Kim, J. Y. (2018a, September 13). *알리바바 온오프라인의 경계 없는 패션 리테일 모델 '패션AI컨셉 스토어'* [Alibaba's online and offline fashion retail model, "Fashion AI Concept Store"]. *Economynews*. Retrieved August 25, 2021, from <http://www.m-economynews.com/news/article.html?no=23302>
- Kim, J. Y. (2019, January 30). *2019년 패션 테크놀로지 트렌드* [2019 Fashion Technology Trend]. *Economynews*. Retrieved August 25, 2021, from <http://www.m-economynews.com/news/article.html?no=24503>
- Kim, S. R. (2020b). A study on the types and features of digital customizing in contemporary fashion. *The Korean Society of Art & Design*, 23(3), 201-222.
- Kim, Y. H. (2018b, December 4). *디지털 트윈 어떻게 전개될 것인가?* [How will the digital twin develop?]. *Posco research institute all rights reserved*. Retrieved July 25, 2021, from <https://www.posri.re.kr/ko/board/content/15506>
- Kim, Y. H. (2020c, July 1). *4차 산업혁명 시대의 개인맞춤 시장과 제조 밸류체인 변화* [Changes in personalized markets and manufacturing value chains in the era of the 4th Industrial Revolution.]. *IITP* Retrieved July 25, 2021, from [https://www.itfind.or.kr/WZIN/jugidong/1953/file1196802886173208631-1953\(2020.07.01\)-25.pdf](https://www.itfind.or.kr/WZIN/jugidong/1953/file1196802886173208631-1953(2020.07.01)-25.pdf)
- Lampel, J., & Mintzberg, H. (1996). Customizing customization. *Sloan Management Review*, 38(1), 24-26.
- Lee, H. J., & Ku, Y. S. (2020). Classification and characteristics of augmented reality contents of fashion brands. *Fashion & Textile Research Journal*, 22(3), 310-322. doi:10.5805/SFTI.2020.22.3.310
- Lee, S. Y. (2018). *A study on the preference level of self-design according to consumer characteristics in fashion customizing system*. Unpublished master's thesis, Konkuk University, Seoul.
- Lim, J. A. (2016). The study on the impact of fourth industrial revolution on the fashion design industry. *The Korea Society of Art & Design*, 19(3), 267-287.
- Lim, J. Y., & Oh, A. S. (2017). Omni channel system for efficient fitting service and shipping process. *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, 21(2), 373-378. doi:10.6109/jkiice.2017.21.2.373
- Lim, K. R. (2019, August 22). *日 패션업계, 신체측정 기술 B2B 본격화* [Japan fashion industry, physical measurement technology, B2B, in earnest]. *Fashion Post*. Retrieved August 25, 2021, from https://www.fpost.co.kr/board/bbs/board.php?bo_table=newsinnews&wr_id=506
- My fashion lab by Blackyak. (2017) *블랙야크, PIS 2017서 '맞춤형 현장생산 시스템' 공개* [Black Yak will unveil "Customized On-site Production System" at PIS 2017]. *Fashionbiz*. Retrieved September 5, 2021, from <http://www.fashionbiz.co.kr/TN/?cate=2&recom=2&idx=162284>
- Nielsen, J. (1998, October 3). Personalization is over-rated. *Nielsen Norman Group*. Retrieved September 5, 2021, from <https://www.nngroup.com/articles/personalization-is-over-rated/>.
- Nike hyper-accurate. (2019). Nike app uses AR and AI to scan feet for perfect fit. *Dezeen*. Retrieved September 5, 2021, from <https://www.dezeen.com/2019/05/09/nike-fit-app-ar-ai-trainers/>
- Pak, O. M., & Lee, W. Y. (2019). Trends in digital transformation strategy of global fashion companies. *The Korean Society of Design Culture*, 25(4), 223-239
- Pak, S. H. (2015). Introducing various new process technologies and characteristics of 3D printing. *Proceedings of the Korean Society of Industrial and Engineering Chemistry, Spring Conference, Korea*, pp. 111.
- Park, B. J. (2015, April 20). Disney has developed a 3D printer with cloth. *hankyung*. Retrieved September 5, 2021, from <http://www.hankyung.com/news/app/newsview.php?aid=2015041953241>
- Park, E. S. (2019, September 26). *패션 유통 업계에 거세게 부는 AR(증강현실) 바람* [AR (Augmented Reality) wind blows hard in the fashion distribution industry]. *Digitalmoney*. Retrieved August 25, 2021, from <http://digitalmoney.kr/View.aspx?No=129249>
- Popov, D. (2019). *A study on the possibility of using 3D printing technologies for personalized fashion designs*. Unpublished master's thesis, Konkuk University, Seoul.
- Schade, A. (2016, July 10). Customization vs. Personalization in the User Experience. *Nielsen Norman Group*. Retrieved July 5, 2021, from <https://www.nngroup.com/articles/customization-personalization/>
- Schwab, K. (2020, May 6). The fourth industrial revolution - What it means, how to respond. *World Economy Forum*. <https://www.weforum.org/agenda/2016/01/the-fourth-industrial-revolution-what-it-means-and-how-to-respond/>
- Shin, H. K. (2020). A study on design of easy casual wear utilizing the convergence characteristics of 3D virtual technology for the MZ generation. *The Korean Society of Science & Art*, 38(4), 287-296. doi: 10.17548/ksaf.2020.12.30.287
- The Parametric Coral Pleated Dress. (n. d.). The LIBERATION COLLECTION [2018]. *Julia Daviy*. Retrieved September 5, 2021, from <https://juliadaviy.com/liberation-collection/>
- ThinQ Fit. (2019). *LF 헤지스, IFA서 LG 전자와 가상 피팅 기술 '싱큐 핏' 선택* [LF Hazzys, IFA, LG Electronics, and virtual fitting technology "ThinkQ Fit"]. *Edaily*. Retrieved September 5, 2021, from <https://www.edaily.co.kr/news/read?newsId=03040566622618480&mediaCodeNo=257&OutLnkChk=Y>
- Yun, E. Y. (2017). A study on the big data utilization in domestic fashion industry. *Journal of Cultural Product & Design*, 50, 191-200. doi:10.18555/kicpd.2017.50.17
- XMirror. (n. d.). Double the fun. *Fxmirror*. Retrieved September 5, 2021, from <http://www.fxmirror.net/ko/main>

(Received October 4, 2021; 1st Revised October 26, 2021; 2nd Revised November 6, 2021; Accepted November 24, 2021)