

DLP 3D Printed Textile의 유연성 향상을 위한 모델링 디자인 및 염색성 평가

심연제 · 김현진 · 김혜림*†

숙명여자대학교 의류학과, *숙명여자대학교 의류학과/숙명여자대학교 창의융합 디자인연구소

Evaluation of Modeling Design and Dyeability of DLP 3D Printed Textiles

Yeon Je Shim · Hyunjin Kim · Hye Rim Kim*†

Dept. of Clothing and Textiles, Sookmyung Women's University

*Dept. of Clothing and Textiles, Sookmyung Women's University/

Design Research Institute for Creativity and Convergence, Sookmyung Women's University

Received June 29, 2021; Revised (September 14, 2021; March 8, 2022); Accepted March 24, 2022

Abstract

3D printing has been considered a key technology, leading the fourth industrial revolution. However, 3D printed textile still has a lot of limitations to overcome before it can be adopted as a clothing material in terms of design, flexibility and dyeability. This study aims to provide modeling design for imparting the flexibility and post-dyeing process for 3D printed textiles. The modeling types were designed to test the flexibility of 3D printed textiles. The post-dyeing process was evaluated through dye absorption depending on the resin and modeling types, respectively. The results were as follows: two types of modeling (Modeling A and B) were designed with a ring structure to test the flexibility of the 3D printed textiles. The 3D printed textiles with ring-based structure Modeling A had flexibility regardless of the hardness of resin types. In the dyeability test, softening resin (S-Resin) and hardening resin (H-Resin) were found to have good dyeability with acid dye and direct dye, respectively. The condition of S-Resin with acid dye and H-Resin with direct dye was controlled by dye absorption rate.

Key words: 3D printing, DLP, Clothing materials, Dyeability, Flexibility; 3D 프린팅, 디지털 광원 처리, 의류 소재, 염색성, 유연성

I. 서 론

3D 프린팅은 4차 산업혁명을 주도할 핵심 기술 중 하나로, 항공, 우주, 바이오, 전자 산업 외에 의류 산업 등에도 활용이 기대되고 있다(Lee & Jin, 2017; Ministry of Science and ICT, 2020). 의류 산업에 적용되고 있는 3D 프린팅 출력 방식에는 파우더에 레이저를 조사하는 Selective Laser Sintering(이하 SLS), 필라멘트를 사

용하는 Fused Deposition Modeling(이하 FDM), 광경화성 수지에 빛을 투사하는 Digital Light Processing(이하 DLP) 방식 등이 있다(Kim & Kim, 2018). SLS 출력 방식은 나이키(Nike), 뉴발란스(New Balance) 등에서 제품 생산에 활용하고 있는 프린터로, 서포터를 사용하지 않고도 출력이 가능하다(Dengate, 2016; Manufactur3D, 2020). 그러나 SLS 프린터는 가격이 수억 원대에 이르는 고가의 기계이므로 쉽게 접하기 어려운 장비이다(Carlota, 2020; Lee, 2017). FDM 프린터와 DLP 프린터는 SLS 프린터와 비교하여 상대적으로 가

†Corresponding author

E-mail: khyerim@sookmyung.ac.kr

격이 저렴하다. FDM 프린터는 현재 보급형 3D 프린터의 대부분을 차지하고 있어 3D 프린터 시장의 주류를 이루고 있으며, DLP 프린터는 제작 속도가 빠르고 표면 조도가 우수하여 조형물 및 주얼리 제작 용도로 사용되고 있다(Kim, 2019; Kim & Kim, 2018; Lee & Huh, 2017). 현재 의류 및 텍스타일 분야에서는 FDM 방식으로 출력한 3D printed textile 소재의 디자인 및 물성에 관한 연구가 다수 보고되고 있다(Han & Kim, 2019; Kim & Lee, 2020; Lee & Kim, 2020; Lee, 2015). 그러나 DLP 방식은 텍스타일 분야에서는 연구의 초기 단계로, 이를 활용한 연구는 아직 많지 않다(Hornick & Bhushan, 2016; S. G. Kim et al., 2020).

DLP 프린터의 가장 큰 장점은 빠른 출력 속도와 경제성이다. 선행연구(S. G. Kim et al., 2020)에 의하면, 60 × 80 (mm) 사이즈 샘플 출력 시, FDM 프린터를 사용하면 출력 시간 204분 이상, 재료 사용량 10.5 g 소요, DLP 프린터를 사용하면 출력 시간 10분 이내, 재료 사용량은 1.5 mL 미만으로, DLP 프린터는 단시간에 소량의 합성수지를 사용하여 출력할 수 있는 것으로 보고되었다. 또한, DLP 프린터는 출력 안정성이 우수하고, 고해상도로 출력이 가능한 장점이 있다(Lee & Jin, 2017).

따라서, 본 연구는 DLP 프린터와 광경화성 아크릴계 합성수지를 사용하여 3D printed textile을 제작하고자 한다. 광경화성 아크릴계 합성수지는 광개시제와 반응성 아크릴 단량체, 아크릴계 올리고머로 구성되어 있고, 유기용제가 함유되어 있지 않아 출력 공정에서 환경 오염 물질의 발생이 적은 장점이 있다(Kim, 2019). 또한, 광경화성 아크릴계 합성수지는 구성 성분의 조성 비율에 따라 크게 연화성 수지와 경화성 수지로 구분된다. 일반적으로, 연화성 수지로 출력한 3D printed textile은 부드럽고 유연성이 우수하며, 경화성 수지로 출력한 3D printed textile은 단단하고 안정적인 형태를 가진다.

DLP 방식의 3D printed textile에 관한 선행연구는 주로 연화성 수지를 사용한 모델링 디자인 및 3D Printed textile 출력에 대한 연구가 보고되었다(S. G. Kim et al., 2020; Lee & Huh, 2017). 그러나 연화성 수지와 경화성 수지를 동일한 모델링에 적용하여 출력된 3D printed textile의 물성을 비교 분석한 연구는 보고된 바가 거의 없다.

따라서 본 연구의 첫 번째 목적은 모델링이 DLP 방

식으로 출력된 3D printed textile의 유연성에 미치는 영향을 비교 분석하고자 한다. 이를 위하여 모델링 디자인을 두 종류의 수지로 출력하여, 동일한 모델링의 경우 출력에 사용한 수지에 상관없이 유사한 수준의 유연성을 나타내는지 비교 분석한다.

또한, DLP 방식으로 출력한 3D printed textile의 색상은 수지의 색상에 영향을 받는다. SLS 프린터는 나일론 섬유를 사용해 출력하여 선염과 후염이 모두 가능하나, FDM과 DLP 프린터는 수지에 염료를 첨가하는 원액 염색 방식으로 염색하는 것이 일반적이다(Jin et al., 2019; Yoo et al., 2014). 특히 DLP 프린터의 경우, 합성수지에 염료를 첨가하여 출력하면, 출력물의 색상이 선명하지 않고, 염료의 종류에 따라 출력 조건을 항상 재설정해야 하는 단점이 있다(FacFox, 2021; Yoo et al., 2014). 따라서 본 연구의 두 번째 목적은 DLP 프린터로 출력된 3D printed textile에 후염색을 하여 염색 가능성을 확인하고, 최적 염색 조건을 설정하고자 한다. 본 연구는 DLP 프린터로 출력된 3D printed textile에 후염색을 도입한 첫 번째 연구이다.

따라서, 본 연구는 DLP 프린터로 3D printed textile 출력 시 연화성 수지와 경화성 수지, 두 종의 합성수지를 사용하여 모델링이 유연성에 미치는 영향을 분석하고 각 합성수지 및 모델링별 후염색 적용 시 최적 염색 조건을 설정하고자 한다. 이를 위하여 첫째, 합성수지의 종류 및 모델링 변화가 출력된 샘플의 유연성에 미치는 영향을 분석하고, 둘째, 후염색 공정 도입을 통한 염색 가능성 및 염색 조건을 비교 분석한다.

II. 실험 방법

1. 실험 기계 및 재료

1) 3D 프린터

3D 프린터는 Digital Light Processing(3D Real Form, RealLab, Korea) 프린터를 사용하였으며, 최대 출력 사이즈는 115(L) × 65(W) (mm)이다.

2) 3D 프린팅 재료 및 시약

DLP 프린터에는 각각 연화성(Soften Resin, 이하 S-Resin), 경화성(Harden Resin, 이하 H-Resin)의 광경화성 합성수지 2종을 사용하였다. 두 합성수지의 기본 구성은 아크릴계 광경화성 합성수지로, 연화성 수지

는 아크릴계 올리고머 10%, 경화성 수지는 셀룰로오스 5%를 함유하고 있으며 각 수지의 특성은 <Table 1>과 같다. <Table 2>는 제조사에서 제공한 S-Resin과 H-Resin의 구성 성분으로, 각 구성 성분의 조성 비율 변화에 의해, 각각 연화성과 경화성의 출력물이 출력된다. 조성 비율에 대한 세부 정보는 제조사의 비공개 특허 정보이다.

3D printed textile의 출력 후 세척 작업에서 에탄올(C_2H_5OH , Duksan Pure Chemical Co., Ltd., Korea)을 사용하였다.

염료는 직접 염료 C.I. Direct Blue 80, 산성 염료 C.I. Acid Blue 62를 사용하였으며, 각 염료의 특성은 <Table 3>과 같다. 산성 염료로 염색 시 아세트산(CH_3COOH , Duksan Pure Chemical Co., Ltd., Korea)을 첨가하였다.

2. 실험 방법

1) 모델링 및 출력

본 연구에서는 Rhino(Rhinoceros 3D 6.0, Robert Mc-

Table 1. Properties of DLP 3D printed material

Material	Hardness (After exposing light)	Form	Color	Manufacturer
S-Resin	Soften	Liquid	Yellow	RealLab
H-Resin	Harden			

Table 2. Components of S-Resin, H-Resin

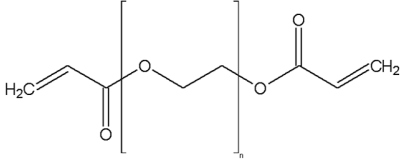
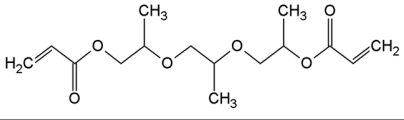
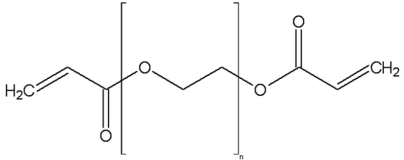
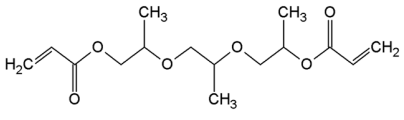
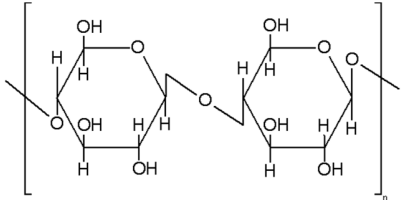
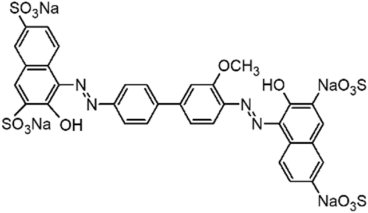
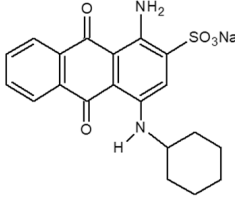
Composition	Chemical structure	Molecular weight	Molecular formula
S-Resin		134.1305	$C_5H_{10}O_4$
		300.3500	$C_{15}H_{24}O_6$
H-Resin		134.1305	$C_5H_{10}O_4$
		300.3500	$C_{15}H_{24}O_6$
		162.1406	$(C_6H_{10}O_5)_n$

Table 3. Chemical structures and properties of dyes

Name	Chemical structure	Molecular weight	Molecular formula	λ Max
C.I. Direct Blue 80		962.76	C ₃₄ H ₂₂ N ₄ Na ₄ O ₁₆ S ₄	590 nm
C.I. Acid Blue 62		422.43	C ₂₀ H ₁₉ N ₂ NaO ₅ S	600-640 nm

Neel & Associates, USA) 소프트웨어를 사용하여 원환을 활용한 디자인을 모델링하였다.

3D printed textile의 최적 출력 조건은 출력물의 형태 안정성 및 유연성을 기준으로 선정하였으며, DLP 3D 프린터의 설정 중 Layer thickness, Normal layer exposure time, Bottom exposure time 및 Off time을 조정하여 출력하였다. 출력한 3D printed textile은 에탄올을 사용하여 1차 세척한 후 증류수를 사용하여 2차 세척하고, 실온에서 24시간 건조하였다. 이후 Support structure 및 DLP 3D 프린터의 Build platform에 부착된 Bottom layer와 3D printed textile을 분리하였다. 완성된 3D printed textile은 디자인별로 각 5회씩 출력하여 무게를 측정하고 후 평균값을 제시하였으며, 영상 현미경(Xi-cam, BESTECHVISION, CO.,LTD., Korea)(50배율)으로 출력 형태를 관찰하였다.

2) 강연도

3D printed textile의 유연성을 평가하기 위하여 강연도를 측정하였다. 강연도는 캔틸레버법으로 실험하였으며, 시험편은 최대 출력 가능 사이즈인 115(L) × 65(W) (mm)로 출력한 후 가위로 절단하여 115(L) × 25(W) (mm)의 사이즈로 실험하였다. 시험편은 표준 조건(20°C, 65%)으로 세팅된 항온 항습기(S-TH31, SERIMA, Korea)에서 24시간 처리한 후, 무게를 측정하고 캔틸레버 시험기에 장착하였다. 시험편의 끝을 눈금 0에 오도록 한 뒤, 시험편의 앞쪽 끝이 41.5°의 경

사면에 닿을 때까지 밀어내고, 그 길이를 읽은 후, 드레이프 강연도(C) 및 플렉스 강연도(G)를 각각 <Eq. 1>~<Eq. 2>에 따라 계산하였다(Kabir et al., 2020).

$$C = \frac{D}{2} \quad \dots \text{Eq. 1.}$$

D is drop length of samples (cm), C is drape stiffness (cm).

$$G = C^3 \times W \quad \dots \text{Eq. 2.}$$

W is weight of sample (g/cm²), G is flex stiffness (cm · g).

3) Thermogravimetric Analysis(TGA)

3D printed textile의 열적 특성을 평가하기 위하여 열분석기(Discovery SDT 650, TA Instruments, USA)를 이용하였으며, 실험은 질소 분위기 하에서 가열 속도를 10°C/min로 하여 진행되었고, 내부 온도는 최대 600 °C까지 승온시켜 열분석을 수행하였다.

4) Fourier Transform Infrared Spectroscopy(FT-IR)

3D printed sample의 표면 분석을 위하여 FT-IR 분광기(Nicolet IS50, Thermo Fisher Scientific, USA)를 사용하였으며, 주파수 4000~450 cm⁻¹에서 4 cm⁻¹의 해상도로 스캔을 진행하였다. 스펙트럼은 OMNIC 프로그램

램(OMNIC™ Series Software, Thermo Fisher Scientific, USA)을 사용하여 비교 분석하였다.

5) X-ray Diffraction(XRD)

3D printed sample의 결정학적 특성을 분석하기 위하여 X선 회절분석기(D8 Advance(TRIO/TWIN), Bruker, USA)를 사용하였으며, 전압 40 kV, 전류 40 mA의 조건에서 Cu-K α ($\lambda=1.5406$ nm) X-ray source를 사용하여 0~40°까지의 범위를 0.1°/min의 속도로 분석하였다.

6) 염색

S-Resin 및 H-Resin으로 출력한 3D printed textile에 적합한 염료 및 염색 조건을 선정하기 위하여 직접 및 산성 염료를 사용해서 액비 1:100(w/v), 염료 농도 1% (o.w.f.), 24시간 동안 40°C에서 110 rpm의 속도로 water bath(BS-31, JEIO TECH, CO.,LTD., Korea)에서 염색 후, 흡착률을 비교하여 적합한 염료를 선정하였다.

3D printed textile의 최적 염색 조건을 선정하기 위해 액비 1:100(w/v), 염료 농도 1, 3, 5%(o.w.f.), 염색 시간 1, 3, 6, 9, 12, 24시간, 염색 온도는 S-Resin은 30~80°C, H-Resin은 30~90°C에서 110 rpm의 속도로 water bath에서 염색하였다. 산성 염료로 염색 시 염욕에 아세트산을 첨가하여 pH를 약산성(pH 5~6)으로 조절하였다. 염색된 시료는 강제 순환식 건조기(OF-22GW, JEIO TECH, CO.,LTD., Korea)에서 25°C로 24시간 건조하였다. 3D printed textile의 염색성은 흡착률로 비교하였다.

흡착률은 분광 광도기(Epoch 2, BioTek, USA)를 사용하여 각 염료별 최대 흡수 파장(직접 염료: 590 nm, 산성 염료: 600~640 nm)에서 염색 전후 염액의 흡광도를 측정 후, <Eq. 3>을 사용하여 계산하였다(Cho, 2003).

$$\text{Absorption rate (\%)} = \frac{A_1 - A}{A_1} \times 100 \quad \dots \text{Eq. 3.}$$

A_1 is UV absorbance of dyeing solution before dyeing, A is UV absorbance of dyeing solution after dyeing.

7) 물 건뢰도

물 건뢰도는 H. Kim et al.(2020)의 실험 방법을 일부 변형하여 사용하였으며, 실험 방법은 다음과 같다. 75

mL 증류수에 염색한 3D printed textile을 침지하고, 25°C, 110 rpm으로 water bath에서 30분간 교반하였다. 이후 분광 광도기(Epoch 2, BioTek, USA)를 이용하여 교반 전후 증류수의 흡광도를 측정하였다. 3D printed textile은 강제 순환식 건조기(OF-22GW, JEIO TECH, CO.,LTD., Korea)에서 20°C로 1시간 동안 건조하였다. 물 건뢰도는 교반 전후 각 염료별 최대 흡수 파장(직접 염료: 590 nm, 산성 염료: 600~640 nm)에서 흡광도를 측정하고, <Eq. 4>를 사용해 변화율을 계산하여 평가하였다.

$$\Delta U(\%) = \frac{U_A - U_B}{U_B} \times 100 \quad \dots \text{Eq. 4.}$$

ΔU is percent change in the UV absorbance, U_A is the UV absorbance of residual solution after washing, and U_B is the UV absorbance of residual solution before washing.

III. 결과 및 고찰

1. 모델링 디자인 및 최적 출력 조건 선정

본 연구에서는 3D printed textile의 유연성 향상을 고려하여, 고대 갑옷에서 유래한 체인 메일 형태의 Modeling A와 접합 부분을 유기적으로 연결한 Modeling B 두 종의 모델링을 <Table 4>-<Table 5>와 같이 제안하였다.

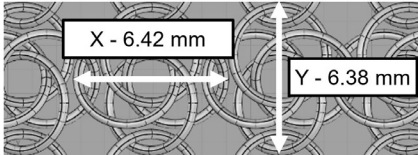
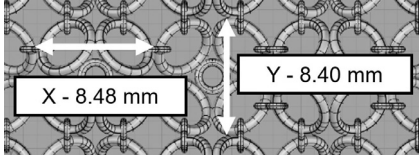
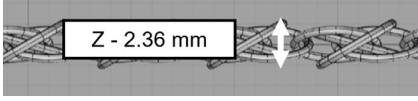
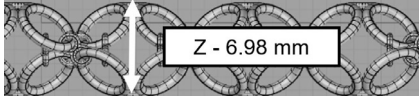


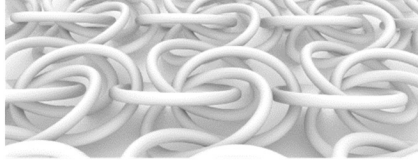
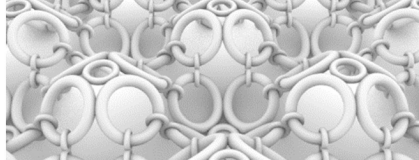
Modeling A는 체인 메일 형태로 각도를 달리한 네 개의 원환을 엮어 가로 및 세로 6.5 mm 내외의 크기로 하여 하나의 패턴으로 디자인하였다. Modeling A는 원환을 사용하여 디자인하였으므로 패턴의 연결 및 확장이 용이하며, 패턴의 크기를 줄였을 때 기존 의류 소재의 레이스와 유사한 외관을 갖는 특성이 있다.

Modeling B는 접합 부분을 유기적으로 연결한 디자인으로, 다섯 개의 원환을 연결하여 가로 및 세로 8.50 mm 내외의 크기로 하여 하나의 패턴으로 제작한 후 상하를 반전하며 패턴을 연결하였다. Modeling A에서는 고리를 사용하지 않고 원환끼리 직접 연결한 반면 Modeling B는 크기가 비교적 작은 원환(Diameter: 0.81 mm) 두 개로 고리를 만들어 크기가 큰 원환(Diameter: 3.25 mm) 사이를 연결하였다. 또한, Modeling A는 Front

Table 4. Modeling conditions of the 3D printed textile

	Pattern size in x-axis (mm)	Pattern size in y-axis (mm)	Pattern size in z-axis (mm)
Modeling A	6.42	6.38	2.36
Modeling B	8.48	8.40	6.98

Table 5. Modeling of the 3D printed textile

	Modeling A	Modeling B
Top		
Front		
Right		
Perspective		

면에서 보았을 때 비교적 평평한 느낌을 주는 반면 Modeling B는 패턴을 상하 반전하며 연결하였기 때문에 Z축의 높이가 증가하여 부피감이 있다. 이는 기존 의류 소재와 비교하였을 때 추가적인 가공 없이 부피감을 줄 수 있다는 점에서 뚜렷한 차별성을 보인다. 모델링은 <Table 4>와 같은 사이즈로 설계하였으며, 이를 바탕으로 한 모델링 결과는 <Table 5>에 제시하였다.

3D printed textile의 모델링별 출력물 사이즈와 표면적은 <Table 6>과 같으며, 출력한 3D printed textile의 실물 사진은 <Table 7>과 같다.

또한, Modeling A와 Modeling B를 S-Resin과 H-Resin을 각각 사용하여 출력할 경우, 최적 출력 조건은 <Table 8>과 같으며, 최적 출력 조건은 출력 시 모델링의 형태 안정성을 기준으로 평가하였다. 모델링 및 Resin에 관계없이 Normal layer exposure time을 10(s)으로 설정하여 출력한 경우, H-Resin을 사용한 출력물은 디자인이 제대로 구현되지 않아 출력 안정성이 떨어지는 것을 확인하였다. H-Resin은 셀룰로오스를 함유하고 있어 비교적 고점도의 물질로, 저점도의 물질인 S-Resin보다 긴 Normal layer exposure time에서 출력 안정성이 향상될 수 있다(Azambuja, 2017; Saunders,

Table 6. Characteristics of 3D printed textile

3D printed textile	Length × Width (mm)	Weight (g/cm ²)	Surface area (mm ²)*
Modeling A	115 × 65	0.042 ± 0.003	3402.432 ± 0.001
Modeling B	115 × 65	0.053 ± 0.004	2834.146 ± 0.001

*: Surface area uses automatically calculated values as 'surface area' in Rhino software (Rhinoceros 3D 6.0, Robert McNeel & Associates, USA) used in modeling designs.

Table 7. Detail of 3D printed textile by digital micro-scope (50× magnification)

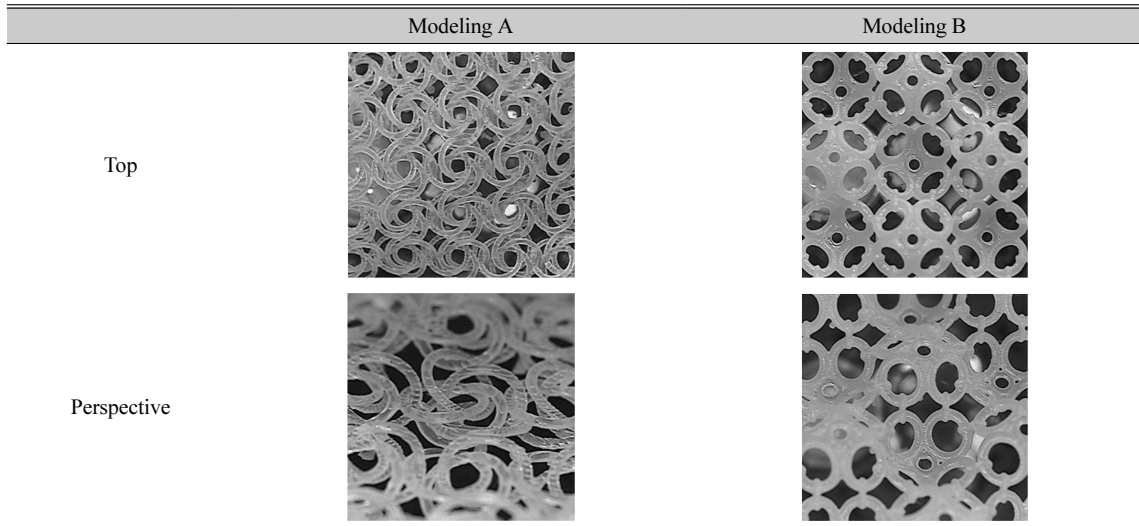


Table 8. The optimal printing conditions of 3D printed textile

	Modeling	Layer thickness (mm)	Normal layer exposure time (s)	Bottom layer exposure time (s)	Off time (s)	Printing time (min)
S-Resin	A	0.1	10	48	5	23
	B	0.1	10	48	5	34
H-Resin	A	0.1	20	48	5	37
	B	0.1	20	48	5	56

2018). 또한, Resin의 종류에 상관없이 Modeling B의 출력 시간이 Modeling A보다 길었다. Modeling A의 레이어는 87개, Modeling B의 레이어는 132개로 Modeling B의 Z축이 Modeling A보다 높아 출력 시 더 많은 레이어가 필요하며, DLP 방식의 3D 프린터는 각 레이어 출력 시 시간이 소요되므로 레이어의 개수가 많을수록 출력 시간이 길어질 수 있다.

S-Resin으로 출력한 Modeling A, B의 산성 염료 염색 샘플은 각각 S-Modeling A, S-Modeling B로, H-Resin으로 출력한 Modeling A, B의 직접 염료 염색 샘플은 각각 H-Modeling A, H-Modeling B로 명명하였다.

2. 강연도

3D printed textile의 강연도에 모델링이 미치는 영향을 확인하기 위해 캔틸레버법으로 강연도를 측정하였다. 대조군으로는 데님 소재를 선정하였는데, 데님 소

재는 3D printed textile을 활용하여 제작할 수 있는 의류 제품인 재킷, 원피스 등 다양한 종류의 의류 생산이 가능하므로 이를 대조군으로 선정하였다(Du, 2019; Kim & Choi, 2016). 대조군으로 선정된 데님 소재는 두께 0.784 ± 0.011 (mm), 무게 0.038 ± 0.004 (g/cm²)의 소재를 사용하였다.

<Table 9>에 따르면, S-Modeling A와 H-Modeling A는 데님 소재보다 유연한 소재로 확인되었으며, S-Modeling B는 데님 소재보다는 강직하였고, H-Modeling B는 캔틸레버법으로는 강연도 측정이 되지 않는 매우 강직한 소재임을 확인하였다.

결과적으로, 수지의 종류에 관계없이, Modeling A를 사용해 출력한 샘플은 모두 유연성이 의류 소재인 데님보다 우수하였고, Modeling B를 사용해 출력한 샘플은 모두 유연성이 좋지 않은 것으로 확인되었다. 따라서, 3D printed textile의 강연도는 합성수지의 종류보다 모델링에 의해 영향을 받는 것을 확인하였다.

Table 9. Flex stiffness properties of 3D printed textiles

	Denim	S-Modeling A	S-Modeling B	H-Modeling A	H-Modeling B
Flex stiffness (cm · g)	3.21	0.03	13.30	0.13	N/A

N/A: Not applicable

3. 3D printed textile의 열적 특성 및 표면 분석

<Fig. 1>은 출력된 3D printed textile의 열적 특성을 TGA로 분석한 그래프이다. <Fig. 1>에 의하면, S-Resin, H-Resin으로 각각 출력한 3D printed textile 모두 400 °C에서 열분해가 일어났다. 일반적으로 400°C 내외에서 열분해가 일어나면 열적 특성이 우수하다고 고려된다(Jo, 2006). 또한, 출력된 3D printed textile의 TGA 그래프가 고분자의 그래프와 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났다(Barkane et al., 2020). 이는 S-Resin과 H-Resin 모두 광경화성 합성수지로, 액체 상태의 합성수지가 가시광선 파장의 에너지를 흡수하여 라디칼 중합을 통해 아크릴계 고분자로 중합되기 때문이다. 따라서, 본 논문에서 출력한 3D printed textile은 열적으로 안정적인 고분자임을 확인하였다. 이상의 결과들을 바탕으로 하여 본 연구에서 제작한 3D printed textile은 수지의 종류 및 모델링에 관계없이 열적 특성이 우수함을 확인하였으며, 염색 및 가공 등의 후처리 공정 중, 열에 의한 변성이나 손상이 되지 않는 것으로 확인되었다.

본 연구에서 제작한 3D printed textile의 화학적 구조는 FT-IR로 분석하였다. <Fig. 2>는 S-Resin 및 H-

Resin으로 출력한 3D printed sample의 FT-IR 그래프로, S-Resin으로 출력한 샘플은 1,580~1,650 cm⁻¹에서 방향족 아민의 N-H 굽힘으로 인한 전형적인 피크를 나타내고 있다(Ao et al., 2018). 또한, 665~910 cm⁻¹에서는 1급, 2급 아민의 N-H 신축 진동으로 인한 피크를 나타낸다(Theivandran, 2015). 따라서, S-Resin으로 출력한 3D printed sample의 표면에 염기성을 띠는 아민 반응기가 존재하는 것을 확인하였다(Ko & Lee, 2021). H-Resin으로 출력한 샘플은 3,342, 2,891, 1,066 cm⁻¹ 부근에서 셀룰로오스의 특징적인 피크를 나타내고 있다(Aksay, 2019; Liu et al., 2020; Lu et al., 2006; Song et al., 2017). 3,342 cm⁻¹는 O-H 신축 진동을 나타내며, 2,891 cm⁻¹는 C-H 신축 진동을 나타내고, 1,066 cm⁻¹는 C-O 신축 진동에 해당하는 피크이다(Aksay, 2019; Liu et al., 2020; Lu et al., 2006). 따라서, H-Resin은 합성수지 내에 함유된 셀룰로오스 성분으로 인해 표면에 수산기가 존재하는 것을 확인하였다. FT-IR 분석 결과, S-Resin의 표면에는 아민 반응기가, H-Resin의 표면에는 수산기가 존재하여 두 Resin의 작용기가 다른 것을 확인하였다. 결과적으로 이러한 표면의 작용기에 따라 염료의 반응성이 변화하므로, 사용하는 염료의 종류가 다를 것으로 사료되었다.

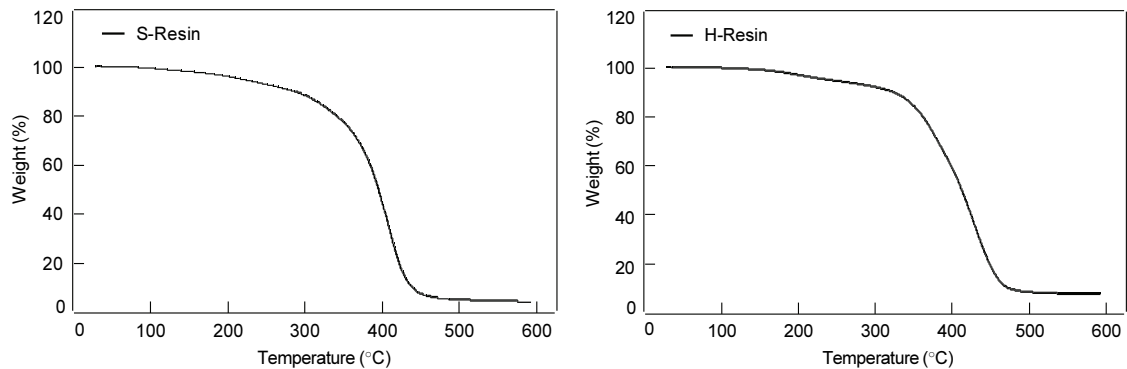


Fig. 1. TGA curve thermograms of S-Resin and H-Resin(Printing condition (S-Resin): Layer thickness (mm). 0.1; Normal layer exposure time (s). 10; Bottom layer exposure time (s). 48; Off time (s). 5; Printing time (min). 23; (H-Resin): Layer thickness (mm). 0.1; Normal layer exposure time (s). 20; Bottom layer exposure time (s). 48; Off time (s). 5; Printing time (min). 37).

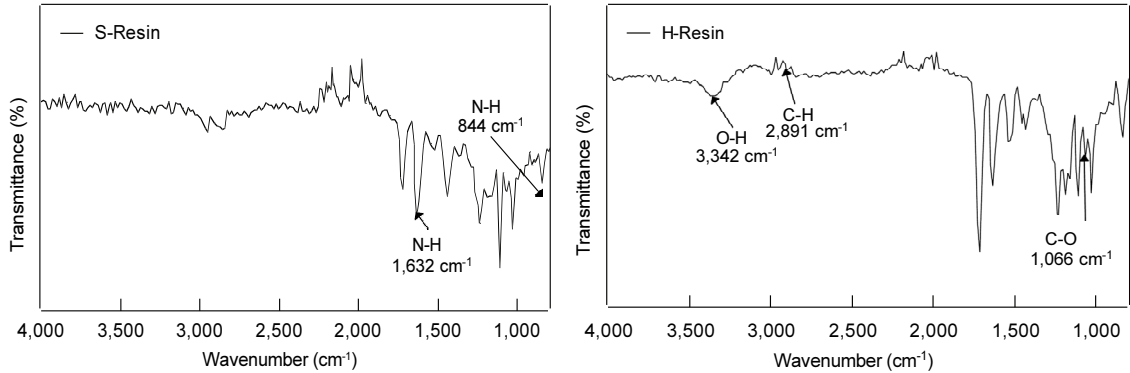


Fig. 2. FT-IR analysis of S-Resin and H-Resin (Printing condition (S-Resin): Layer thickness (mm). 0.1; Normal layer exposure time (s). 10; Bottom layer exposure time (s). 48; Off time (s). 5; Printing time (min). 23; (H-Resin): Layer thickness (mm). 0.1; Normal layer exposure time (s). 20; Bottom layer exposure time (s). 48; Off time (s). 5; Printing time (min). 37).

본 연구에서 제작한 3D printed textile의 결정도는 XRD로 분석하였다. <Fig. 3>은 S-Resin 및 H-Resin으로 출력한 3D printed textile의 XRD 패턴으로, 수지의 종류에 상관없이 약 19°에서 넓은 분산 피크가 관찰되었으며, 이는 선행연구의 아크릴계 수지의 그래프와 유사한 경향을 나타내었다(Chen et al., 2022; Ji et al., 2017). 일반적으로 순수한 아크릴계 수지의 특징적인 피크는 약 19°에서 나타나며, 이 피크는 아크릴계 수지의 반결정질 특성을 나타낸다(Zulkifli et al., 2017). 이러한 반결정질적 수지는 비정질적 수지에 비해 빠르게 용해되어, 우수한 저장 안정성을 가진다(Claesson et al., 2004).

<Table 10>은 S-Resin 및 H-Resin으로 출력한 3D printed sample의 결정도를 나타낸 것이다. 일반적으로 천연섬유 중 면은 65~70%의 결정도를 갖는 것을 고려할 때(Sobuj, 2017), 본 연구에서 출력한 3D printed textile은 결정도가 면섬유에 비하여 큰 것으로 확인되며, 일반적으로 높은 결정도를 가진 섬유는 강도, 내열성 등이 우수하다(Song et al., 2012).

4. 3D printed textile의 염색성 평가

FT-IR로 3D printed textile의 화학적 구조를 분석한 결과, 수지의 종류에 따라 반응기가 다른 것으로 확인

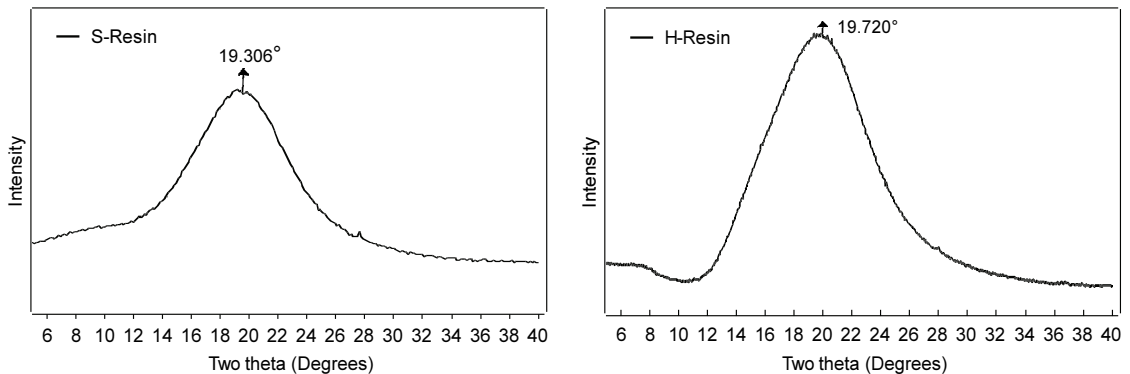


Fig. 3. X-ray diffraction analysis result of S-Resin and H-Resin (Printing condition (S-Resin): Layer thickness (mm). 0.1; Normal layer exposure time (s). 10; Bottom layer exposure time (s). 48; Off time (s). 5; Printing time (min). 23; (H-Resin): Layer thickness (mm). 0.1; Normal layer exposure time (s). 20; Bottom layer exposure time (s). 48; Off time (s). 5; Printing time (min). 37).

Table 10. Crystallinity degrees of S-Resin and H-Resin

	Crystallinity (%)
S-Resin	72.4
H-Resin	83.5

되었다. 따라서, 각 수지별로 적합한 염료 선정이 필요하였다. <Fig. 4>는 S-Resin, H-Resin으로 출력한 3D printed textile의 염색 시 적합한 염료를 선정하기 위하여 직접 및 산성 염료로 각각 염색한 후, 흡착률을 측정 한 결과이다. 실험 결과, S-Resin은 산성 염료로 염색하였을 때 높은 흡착률을 갖는 것으로 나타났다. FT-IR 분석 결과, S-Resin으로 출력한 3D printed textile의 표면에 아민 작용기(N-H)가 형성되는 것으로 나타났다. 이러한 아민 작용기가 산성 염료와 이온 결합하여(Choi

& Ryu, 1995), S-Resin으로 출력한 3D printed textile의 염색성이 향상되는 것으로 사료된다.

반면, H-Resin은 직접 염료로 염색하였을 때 흡착률이 증가하였다. H-Resin은 셀룰로오스를 함유한 경화성 수지로, FT-IR 분석 결과, H-Resin으로 출력한 3D printed textile의 표면에 수산기가 존재하는 것을 확인하였다(Fig. 2). 이러한 수산기가 직접 염료와 수소 결합하여(Yoo et al., 2014), H-Resin으로 출력한 3D printed textile의 염색성이 향상되는 것으로 추정된다. 따라서, S-Resin에는 산성 염료를, H-Resin에는 직접 염료를 사용하여 염색하는 것이 적합함을 확인하였다.

<Fig. 4>의 흡착률 비교 실험 결과에 따라, S-Resin은 산성 염료, H-Resin은 직접 염료를 사용하여 각 합성 수지별 최적 염색 조건을 선정하였다.

<Fig. 5>는 3D printed textile 염색 시 염액 농도에 따른 흡착률 측정 결과이다. S-Modeling A, S-Modeling B, H-Modeling A 및 H-Modeling B 모두 1%(o.w.f.)에서 최대 흡착률을 갖는 것으로 확인되었다. 그러나, 염액 농도가 증가할수록 흡착률은 오히려 감소하는 경향이 나타났다. 일반적으로 섬유 소재를 염색할 경우, 염료의 농도가 증가할수록 흡착률은 향상되지만(Bai, 2004; Park et al., 2005; Song et al., 2004), 본 연구에서 제작한 3D printed textile은 염액 농도의 증가가 흡착률 향상에 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다. 따라서, 최적 염액 농도는 1%(o.w.f.)로 설정하였다.

<Fig. 6>은 3D printed textile의 염색 온도에 따른 흡착률 변화를 나타낸 결과이다. S-Modeling A는 70°C, S-Modeling B는 60°C, H-Modeling A 및 H-Modeling B

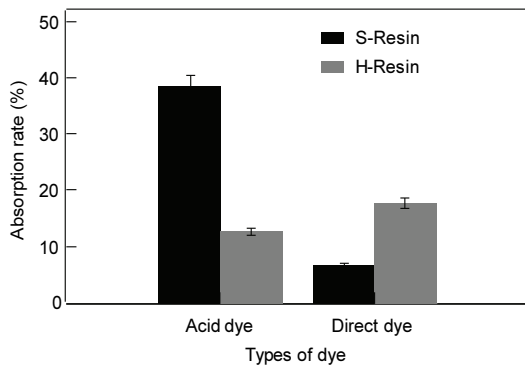


Fig. 4. Effect of dye on absorption rate (%) of S-Resin and H-Resin (Dyeing condition: 1%(o.w.f.), 40°C, 24h).

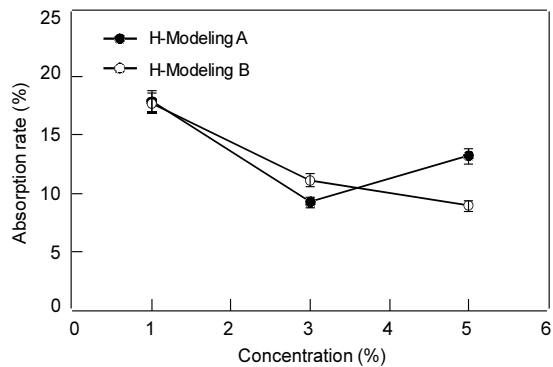
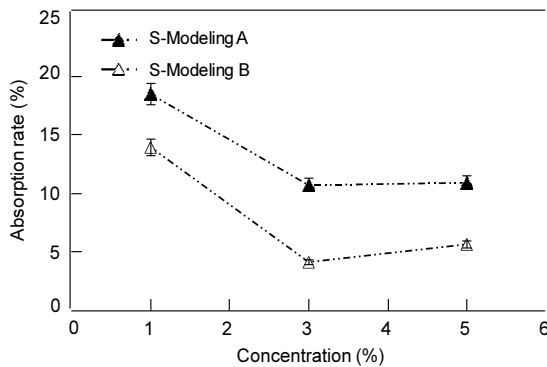


Fig. 5. Effect of dyeing solution's concentration on absorption rate (%) of S-Resin and H-Resin (Dyeing condition (S-Resin): 40°C, 1h, acid dye; (H-Resin): 40°C, 24h, direct dye).

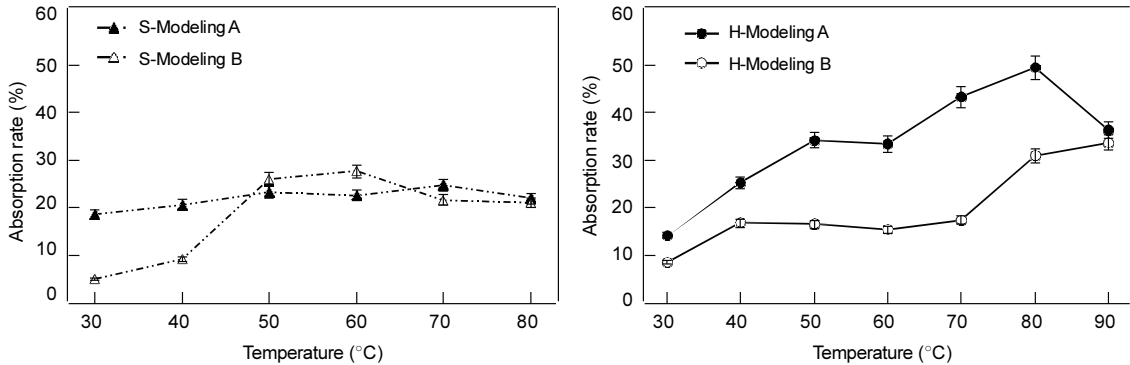


Fig. 6. Effect of temperature on absorption rate (%) of S-Resin and H-Resin (Dyeing condition (S-Resin): 1%(o.w.f.), 1h, acid dye; (H-Resin): 1%(o.w.f.), 24h, direct dye).

는 80°C의 온도에서 최대 흡착률을 갖는 것으로 확인되었다. 최대 흡착률이 나타난 온도 이상으로 온도가 증가하였을 때는, 오히려 흡착률이 저하되거나 또는 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다. <Fig. 7>은 3D printed textile의 염색 시간에 따른 흡착률 변화를 나타낸 그래프이다. 모든 3D printed textile은 12시간 염색 시, 최대 흡착률을 갖는 것으로 나타났으며, 12시간 이후에는 유의한 차이가 나타나지 않았다. 따라서, 환경 및 경제성을 고려하여 최적 염색 시간은 12시간으로 설정하였다.

<Table 6>에 나타난 것과 같이, Modeling A의 표면적은 $3402.432 \pm 0.001 \text{ mm}^2$, Modeling B의 표면적은 $2834.146 \pm 0.001 \text{ mm}^2$ 로 모델링에 따라 표면적에 차이가 있는 것이 확인되었으며, <Fig. 5>-<Fig. 7>의 결과

에 의하면, Modeling A의 흡착률이 Modeling B의 흡착률보다 대부분 높은 값을 나타내었다. 이는 소재의 표면적이 증가함에 따라, 작용기가 증가하여 흡착률이 증가한다는 선행연구와 유사한 경향을 보인다(Lesbani et al., 2020). 결과적으로, 모델링에 따른 표면적의 변화가 흡착률에 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

따라서 각 샘플별 최적 염색 조건은 다음과 같이 선정하였다. S-Modeling A 및 S-Modeling B는 염색 시간 12시간, 산성 염료 농도 1%(o.w.f.), 각각의 염색 온도는 70°C, 60°C로 설정하였다. H-Modeling A 및 H-Modeling B는 염색 온도 80°C, 염색 시간 12시간, 직접 염료 농도 1%(o.w.f.)로 설정하였다.

<Table 11>은 최적 조건으로 염색한 3D printed textile을 영상 현미경(50배율)으로 관찰한 결과이다. S-

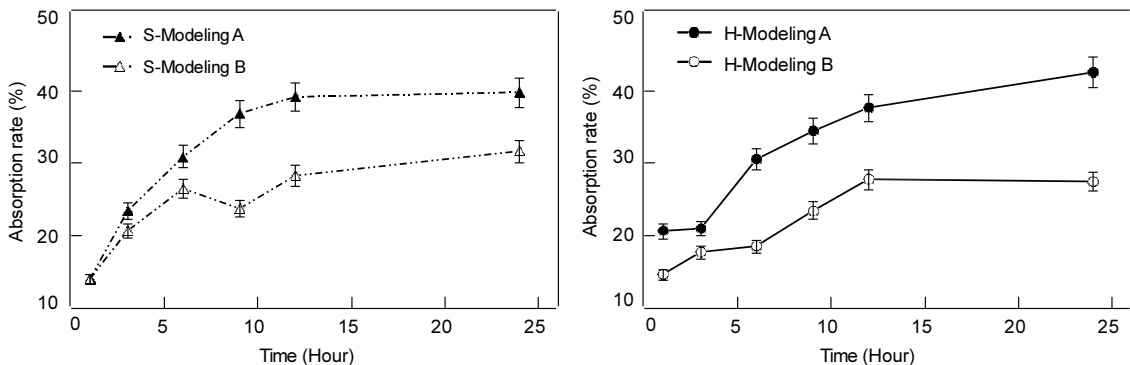
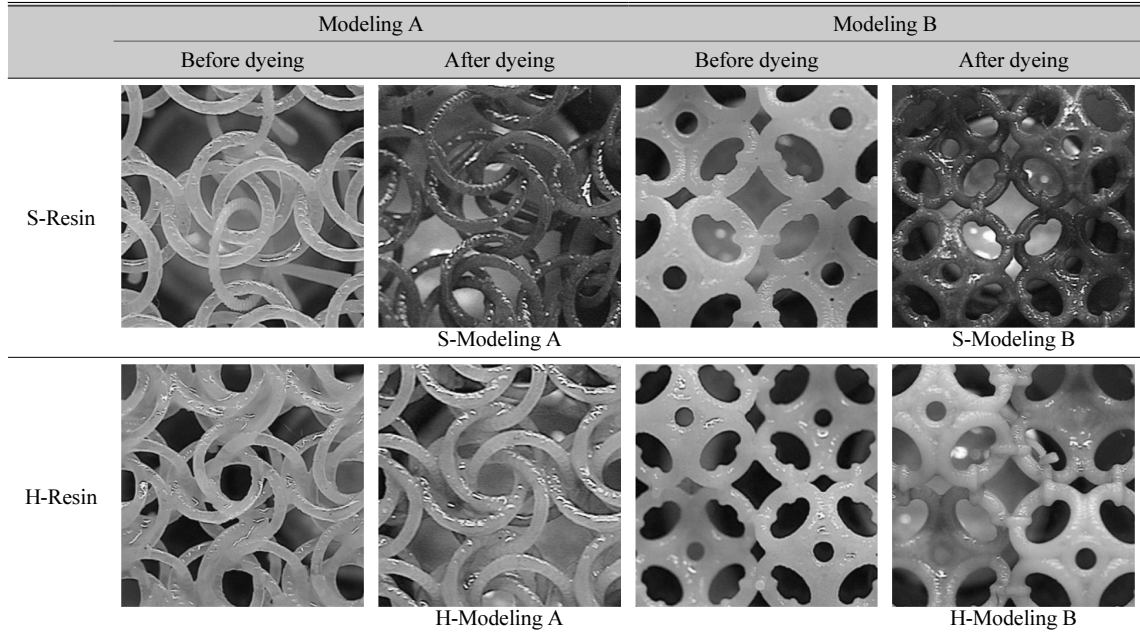


Fig. 7. Effect of time on absorption rate (%) of S-Resin and H-Resin (Dyeing condition (S-Modeling A): 1%(o.w.f.), 70°C, acid dye; (S-Modeling B): 1%(o.w.f.), 60°C, acid dye; (H-Modeling A, B): 1%(o.w.f.), 80°C, direct dye).

Table 11. Surface morphology of DLP 3D printed textiles by digital micro-scope (50× magnification) (Dyeing condition (S-Modeling A): 1%(o.w.f.), 70°C, 12h, acid dye; (S-Modeling B): 1%(o.w.f.), 60°C, 12h, acid dye; (H-Modeling A): 1%(o.w.f.), 80°C, 12h, direct dye; (H-Modeling B): 1%(o.w.f.), 80°C, 12h, direct dye)



Modeling A, S-Modeling B 및 H-Modeling A, H-Modeling B 모두 균일하게 염색된 것이 확인되며, 산성 염료로 염색된 S-Modeling A, S-Modeling B가 직접 염료로 염색된 H-Modeling A, H-Modeling B보다 선명한 파란색으로 발색되는 것을 확인하였다. 이는 FT-IR 분석으로 확인한 3D printed textile의 작용기와 염료 간 결합력 외에, 염료의 분자량이 염색성에 영향을 미치는 것으로 사료된다. El-Shishtawy et al.(2007)에 따르면, 염료의 분자량이 크면 염색물의 표면색 값이 감소하는 것으로 보고되었다. <Table 3>에 제시한 바와 같이 본 연구에서 사용된 직접 염료의 분자량(962.76)은 산성 염료의 분자량(422.43)보다 약 2배 이상 크다. 따라서, 산성 염료로 염색한 S-Modeling A, S-Modeling B

가 직접 염료로 염색한 H-Modeling A, H-Modeling B 보다 염색성이 비교적 우수한 것으로 확인되었다.

3D printed textile의 염색 견뢰도는 물 견뢰도를 측정해 평가하였다. 3D printed textile은 일반 섬유 소재와 달리 표면이 매끈하여, 표면의 오염원을 간단한 물 세척만으로도 제거할 수 있다는 장점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 물 견뢰도를 측정하여, 3D printed textile의 염색 견뢰도를 평가하였으며, 물 견뢰도 측정 전후의 흡광도 변화율은 <Table 12>에 기술하였다. 물 견뢰도 측정 결과, 모든 3D printed textile은 수세 후 흡광도에 변화가 없는 것으로 나타났으며, 이를 통해 염료가 탈락되지 않는 것을 확인하였다. 따라서, 3D printed textile은 물 견뢰도가 우수한 것으로 확인되었다.

Table 12. ΔU (%) at maximum wavelengths of 590 nm (Direct dye) and 640 nm (Acid dye)

		Rate of change (%)
Acid dye; 640 nm	S-Modeling A	0.00
	S-Modeling B	0.00
Direct dye; 590 nm	H-Modeling A	0.00
	H-Modeling B	0.00

IV. 결 론

본 연구에서는 연화성 수지(S-Resin)와 경화성 수지(H-Resin)를 사용하여 DLP 프린터로 출력한 3D printed textile의 유연성에 모델링 디자인이 미치는 영향을 분석하였다. 또한, 후염색 공정을 통한 3D printed textile의 염색 가능성을 확인하였고, 흡착률을 바탕으로 최적 염색 조건을 선정하였다.

먼저 3D printed textile에 의류 소재로서 적합한 유연성을 부여하기 위하여 원단을 사용한 체인 메일 형태로 각도를 달리한 Modeling A, 접합 부분을 유기적으로 디자인한 Modeling B를 디자인하였다. 각각의 모델링을 S-Resin과 H-Resin을 사용하여 출력 후 강연도를 측정된 결과, 수지의 종류에 관계없이 Modeling A가 Modeling B보다 유연성이 우수한 것으로 나타났다. 따라서, 수지의 경화도보다 모델링이 3D printed textile의 유연성에 주요한 영향을 미치는 것을 확인하였다.

3D printed textile의 염색 실험을 진행하기 전에, S-Resin과 H-Resin의 열적 특성 및 표면 구조를 분석하였다. TGA 분석 결과, S-Resin과 H-Resin은 400°C에서 열분해가 일어나는 열적으로 안정적인 고분자로 확인되어 3D printed textile을 고온에서 염색하여도 열에 의한 변성이나 손상이 되지 않는 것으로 확인되었다. FT-IR 분석 결과, S-Resin은 표면에 아민 반응기가 존재하며, H-Resin은 셀룰로오스로 인해 수산기가 존재하여 Resin의 종류에 따라 표면의 반응기가 달라 염색 진행 시 염료의 종류에 따라 염착이 상이할 것으로 사료되었다. XRD 분석 결과, 수지의 종류에 상관없이 약 19°에서 아크릴계 수지의 반결정질적 특성을 나타내는 피크가 존재하여 우수한 저장 안정성을 가지는 것을 확인하였다.

다음으로, 본 연구에서는 3D printed textile의 후염색 가능성을 확인하기 위해 후염색으로 염색을 진행하고, 최적 염색 조건은 염료의 흡착률로 평가하여 선정하였다. 후염색 공정에 따른 3D printed textile의 최적 염색 조건은 다음과 같다. S-Resin은 표면의 아민 반응기로 인해 산성 염료로 염색 시 염착이 우수하였으며, 최적 염색 조건은 Modeling A, B 모두 염색 시간 12시간, 염액 농도 1%(o.w.f.)였으며, 염색 온도는 각각 70°C와 60°C로 확인되었다. H-Resin의 경우 표면의 수산기로 인해 직접 염료로 염색 시 염착이 우수하였

으며 최적 염색 조건은 Modeling A, B 모두 염색 온도 80°C, 염색 시간 12시간, 염액 농도는 1%(o.w.f.)로 나타났다. 최적 염색 조건에서 염색한 3D printed textile의 물 건뢰도 측정 결과, 출력에 사용한 합성수지 종류 및 염료 종류에 관계없이 모두 건뢰도가 우수하게 나타났다.

따라서, 본 연구에서는 DLP로 출력된 3D printed textile의 유연성에 모델링이 주요한 영향 요인임을 확인하였고, 후염색 공정을 통하여 3D printed textile에 색상을 부여하는 방법을 제안하였다. 향후 3D printed textile의 유연성을 향상시킬 수 있는 다양한 모델링에 대한 후속 연구를 통해, DLP로 출력된 3D printed textile의 활용 분야를 보다 확장시킬 수 있을 것으로 기대된다.

References

- Aksay, S. (2019). Effects of Al dopant on XRD, FT-IR and UV-vis properties of MgO films. *Physica B: Condensed Matter*, 570, 280–284. doi:10.1016/j.physb.2019.06.020
- Ao, D., Zhang, J., & Liu, H. (2018). Visible-light-driven photocatalytic degradation of pollutants over Cu-doped NH₂-MIL-125(Ti). *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 364, 524–533. doi:10.1016/j.jphotochem.2018.06.044
- Azambuja, E. (2017, March 3). 3D printing with cellulose. *Electronic Specifier*. Retrieved from <https://www.electronicspecifier.com/products/3d-printing/3d-printing-with-cellulose>
- Bai, S.-K. (2004). The study of the dyeability of *Brassica Campestris* on the cotton fabric. *Journal of the Korean Society for Clothing Industry*, 6(6), 799–802.
- Barkane, A., Platnieks, O., Jurinovs, M., & Gaidukovs, S. (2020). Thermal stability of UV-cured vegetable oil epoxidized acrylate-based polymer system for 3D printing application. *Polymer Degradation and Stability*, 181:109347. doi:10.1016/j.polymdegradstab.2020.109347
- Carlota, V. (2020, March 4). 3D printed shoes: what's available on the market today? *3Dnatives*. Retrieved from <https://www.3dnatives.com/en/3d-printed-shoes-whats-available-on-the-market-today/#!>
- Chen, S., Duan, Y., Hua, W., Lin, Q., Qu, B., Wang, R., ... Zhuo, D. (2022). Synthesis of novel acrylic liquid-crystal resin and its in-situ enhancement in light-curing 3D printing performance. *Journal of Materials Research and Technology*, 17, 2158–2174. doi:10.1016/j.jmrt.2022.01.159
- Cho, A. (2003). *Fabrics dyeing using natural colorants extrac-*

- ted from American Fleabane (Unpublished master's thesis). Chonnam National University, Gwangju.
- Choi, Y. J., & Ryu, H. S. (1995). A study on the dyeability of the aminized cotton fabrics. *Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles*, 19(1), 51–56.
- Claesson, H., Scheurer, C., Malmström, E., Johansson, M., Hult, A., Paulus, W., & Schwalm, R. (2004). Semi-crystalline thermoset resins: tailoring rheological properties in melt using comb structures with crystalline grafts. *Progress in Organic Coatings*, 49(1), 13–22. doi:10.1016/j.porgcoat.2003.07.001
- Dengate, J. (2016, April 11). New Balance wins race for 3D printed running shoe. *Runner's World*. Retrieved from <https://www.runnersworld.com/news/a20792199/new-balance-wins-race-for-3d-printed-running-shoe/>
- Du, Y. (2019). *A study of fashion design development based on denim recycling* (Unpublished master's thesis). Kookmin University, Seoul.
- El-Shishtawy, R. M., Nassar, S. H., & Ahmed, N. S. E. (2007). Anionic colouration of acrylic fibre. Part II: Printing with reactive, acid and direct dyes. *Dyes and Pigments*, 74(1), 215–222. doi:10.1016/j.dyepig.2006.01.036
- FacFox. (2021, August 5). How to dye resin 3D prints? *FacFox*. Retrieved from <https://facfox.com/docs/kb/how-to-dye-resin-3d-prints>
- Han, Y., & Kim, J. (2019). Study on peel strength measurement of 3D printing composite fabric by using FDM. *Journal of Fashion Business*, 23(2), 77–88. doi:10.12940/JFB.2019.23.2.77
- Hornick, J., & Bhushan, A. (2016, October 3). More 3D printing patents are expiring soon: Here's a roundup. *3D Printing Industry*. Retrieved from <https://3dprintingindustry.com/news/more-3d-printing-patents-are-expiring-soon-heres-a-roundup-96561/>
- Ji, Z., Yan, C., Yu, B., Wang, X., & Zhou, F. (2017). Multimaterials 3D printing for free assembly manufacturing of magnetic driving soft actuator. *Advanced Materials Interfaces*, 4(22):1700629. doi:10.1002/admi.201700629
- Jin, Y., Qamar, I., Wessely, M., Adhikari, A., Bulovic, K., Pungpongson, P., & Mueller, S. (2019). Photo-chromeleon: Reprogrammable multi-color textures using photochromic dyes. *Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, USA*, 701–712. doi:10.1145/3332165.3347905
- Jo, J. H. (2006, December 4). 광통신용 고분자 신소재의 연구 개발 동향 [R&D trend of new polymer materials for optical communication]. *TECHWORLD*. Retrieved from <http://www.epnc.co.kr/news/articleView.html?idxno=6550>
- Kabir, S., Kim, H., & Lee, S. (2020). Characterization of 3D printed auxetic sinusoidal patterns/nylon composite fabrics. *Fibers and Polymers*, 21(6), 1372–1381. doi:10.1007/s12221-020-9507-6
- Kim, H., & Lee, S. (2020). Mechanical properties of 3D printed re-entrant pattern with various hardness types of TPU filament manufactured through FDM 3D printing. *Textile Science and Engineering*, 57(3), 166–176. doi:10.12772/TSE.2020.57.166
- Kim, H., Song, J. E., Silva, C., & Kim, H. R. (2020). Production of conductive bacterial cellulose-polyaniline membranes in the presence of metal salts. *Textile Research Journal*, 90(13–14), 1517–1526. doi:10.1177/0040517519893717
- Kim, S. (2019). *The textile development using DLP 3D printing system and polyurethane acrylate photopolymer* (Unpublished master's thesis). Sookmyung Women's University, Seoul.
- Kim, S., & Choi, Y.-L. (2016). 3D printing technology in fashion industry. *Fashion Information and Technology*, 13, 60–65.
- Kim, S. G., & Kim, H. R. (2018). The recent tendency of fashion textiles by 3D printing. *Fashion & Textile Research Journal*, 20(2), 117–127. doi:10.5805/sfti.2018.20.2.117
- Kim, S. G., Song, J. E., & Kim, H. R. (2020). Development of fabrics by digital light processing three-dimensional printing technology and using a polyurethane acrylate photopolymer. *Textile Research Journal*, 90(7–8), 847–856. doi:10.1177/0040517519881821
- Ko, C., & Lee, W. G. (2021). Cleaning behavior of aqueous solution containing amine or carboxylic acid in Cu-interconnection process. *Korean Chemical Engineering Research*, 59(4), 632–638. doi:10.9713/kcer.2021.59.4.632
- Lee, J. H. (2017, June 29). 4차 산업혁명 시대 3D 프린터 창업, 은퇴자들의 희망 될까 [Starting 3D printer business in the era of the 4th industrial revolution, would it be a hope for retirees?]. *BRAVO my life*. Retrieved from https://bravo.etoday.co.kr/view/atc_view.php?varAtcId=7260
- 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. doi:10.17548/ksaf.2017.12.30.329
- Lee, J. S., & Jin, S. M. (2017). Study on fashion design using DLP 3D printing. *Journal of Basic Design & Art*, 18(5), 449–460.
- Lee, S., & Kim, H. (2020). Mechanical properties of 3D printing spacer fabric structures manufactured using fused deposition modeling 3D printing technology. *Textile Science and Engineering*, 57(2), 77–84. doi:10.12772/TSE.2020.57.077
- Lee, S. H. (2015). Morphology and properties of textiles manufactured by three-dimensional printing based on fused deposition modeling. *Textile Science and Engineering*, 52(4), 272–279. doi:10.12772/TSE.2015.52.272
- Lesbani, A., Taher, T., Palapa, N. R., Mohadi, R., Rachmat, A.,

- & Mardiyanto. (2020). Preparation and utilization of Keggin-type polyoxometalate intercalated Ni-Fe layered double hydroxides for enhanced adsorptive removal of cationic dye. *SN Applied Sciences*, 2(3):470. doi:10.1007/s42452-020-2300-8
- Liu, H., Chen, Y., Shi, C., Yang, X., & Han, D. (2020). FT-IR and Raman spectroscopy data fusion with chemometrics for simultaneous determination of chemical quality indices of edible oils during thermal oxidation. *LWT - Food Science and Technology*, 119:108906. doi:10.1016/j.lwt.2019.108906
- Lu, W. H., Xu, W. J., Wu, Y. M., Zhou, X., Lu, Y. B., & Xiong, Y. Q. (2006). Synthesis of dendritic poly(urethane acrylate) used for UV-curable coatings. *Progress in Organic Coatings*, 56(2-3), 252-255. doi:10.1016/j.porgcoat.2005.10.004
- Manufactur3D. (2020, October 15). How Nike is leveraging 3D printing in the footwear industry. *Manufactur3D*. Retrieved from <https://manufactur3d.com/how-nike-is-leveraging-3d-printing-in-the-footwear-industry/>
- Ministry of Science and ICT. (2020, June). 제2차 3D프린팅 산업진흥 기본계획(2020~2022) [Basic plan for promoting 3D printing industry (2020-2022)]. *Ministry of Science and ICT*. Retrieved from <https://www.msit.go.kr/publicinfo/view.do?sCode=user&mPid=62&mId=63&publicSeqNo=246&publicListSeqNo=2&formMode=R&referKey=246,2>
- Park, Y.-J., Yun, J.-G., Jang, H.-G., & Heo, B.-G. (2005). Effect of dyeing conditions on dyeing characteristics in silk during natural dyeing using the raw juice of indigo plants. *Korean Journal of Plant Resources*, 18(3), 417-423.
- Saunders, S. (2018, June 13). 3D printing viscous materials: Advances toward 3D printed rocket fuel, pharmaceuticals, cookie dough. *3DR Holdings*. Retrieved from <https://3dprint.com/216640/purdue-3d-print-viscous-materials/>
- Sobuj, S. R. (2017, January 21). Crystalline and amorphous structure of fiber. *Textile Study Center*. Retrieved from <https://textilestudycenter.com/cry-str-fiber/>
- Song, C. E., Kim, K. S., Jang, H. G., Yoo, Y. K., Heo, B. G., & Park, Y. J. (2004). Natural dye on dry flower, the *Laqurus ovatus* using the extract isolated from marigold. *Korean Journal of Horticultural Science & Technology*, 22(1), 119-124.
- Song, J. E., Su, J., Loureiro, A., Martins, M., Cavaco-Paulo, A., Kim, H. R., & Silva, C. (2017). Ultrasound-assisted swelling of bacterial cellulose. *Engineering in Life Sciences*, 17(10), 1108-1117. doi:10.1002/elsc.201700085
- Song, W. S., Kim, I. Y., & Kim, H. R. (2012). *Textiles* (3rd ed.). Paju: Kyomunsa
- Theivandran, G., Mohamed Ibrahim, S., & Murugan, M. (2015). Fourier Transform Infrared (Ft-Ir) spectroscopic analysis of *Spirulina Fusiformis*. *Journal of Medicinal Plants Studies*, 3(4), 30-32.
- Yoo, H. J., Lee, H.-J., Han, Y., Song, K. H., Kim, J. H., & Ahn, C. (2014). *Textile dyeing and finishing*. Seoul: Hyungseul Publishing.
- Zulkifli, F., Ali, N., Yusof, M. S. M., Isa, M. I. N., Yabuki, A., & Wan Nik, W. B. (2017). Henna leaves extract as a corrosion inhibitor in acrylic resin coating. *Progress in Organic Coatings*, 105, 310-319. doi:10.1016/j.porgcoat.2017.01.017

심 연 제

숙명여자대학교 의류학과 대학원생

김 현 진

숙명여자대학교 의류학과 강사

김 혜 림

숙명여자대학교 의류학과 부교수/
숙명여자대학교 창의융합 디자인연구소 부교수
