

자외선 경화형 디지털 프린팅을 이용한 3D 프린팅 TPU 소재의 색채 특성

이선희[†] · 박소연 · 정임주* · 이정순**

동아대학교 패션디자인학과, *동아대학교 의상섬유학과, **충남대학교 의류학과

Color Characteristics of 3D-Printed TPU Material Applied with Ultra-Violet Curable Digital Printing Process

Sunhee Lee[†] · Soyeon Park · Imjoo Jung* · Jungsoon Lee**

Dept. of Fashion Design, Dong-A University

*Dept. of Fashion and Textiles, Dong-A University

**Dept. of Clothing & Textiles, Chungnam National University

Received September 1, 2021; Revised (September 24, 2021; October 12, 2021); Accepted October 14, 2021

Abstract

This study aims to confirm the possibility of Ultra-Violet (UV)-printed 3D printing materials using thermal polyurethane (TPU) with CMYK colors by applying an eco-friendly UV digital printing process. A UV-printed 3D printing TPU material was prepared with cycles of UV printing and CMYK colors. Dyeability of the 3D TPU samples with cycles of UV printing and CMYK were analyzed for thickness, weight, surface roughness, reflectance, colorimetry, and K/S values. The thickness and weight of 3D-printed TPU samples with cycles of UV printing are increased with overprints from 1 to 5. The surface roughness of 3D-printed TPU samples with increasing UV prints were decreased, meaning that the surface of TPU samples becomes gradually smoother. The reflectance spectra of CMYK UV-printed TPU samples showed the surface reflectance within each characteristic wavelength of CMYK. The 3D-printed TPU samples, subjected to UV printing twice or more, showed low surface reflectance. After examining the $L^*a^*b^*$ of the 3D-printed TPU samples by the cycles of UV printing, the study found that the more UV got printed more than 2 times, the closer the color to each CMYK.

Key words: UV curable printing, FDM 3D printed TPU material, Cycles of UV printing, Surface roughness, Color measurement; UV 경화형 프린팅, FDM 3D 프린팅 TPU 소재, UV 프린팅 반복 횟수, 표면거칠기, 색상 측정

I. 서 론

최근 패션소재의 친환경 자동화 공정과 관련하여

[†]Corresponding author

E-mail: shlee014@dau.ac.kr

본 연구는 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 임(No.NRF-2019R1A2C2084041).

자외선 경화형 디지털 프린팅(Ultra-Violet Curable Digital Printing, 이하 UV 프린팅) 방법이 관심을 받고 있다. UV 프린팅 기법은 자외선 LED 램프를 사용하여 UV 경화형 잉크를 경화 및 건조하여 다양한 소재에 원하는 색상으로 적용이 가능한 친환경 프린팅 공정이다. 특히 상온 연속 건식 가공기이므로 물을 사용하지 않고, 일정 수분율로 건조할 필요가 없으므로 에너지 절약효과가 매우 크다. 자외선 경화형 디지털 프린팅

기술이 적용된 소재는 합성섬유의 표면처리, 염색성 개질, UV 발수코팅, 안료 날염 코팅 등 다양한 패션소재 친환경 제조공정으로 국내외에서 산업적으로 적용되고 있다(Jang & Koo, 2008).

UV 프린팅의 기술적 구성요소로는 올리고머, 모노머, 광개시제로 구성된 자외선 경화제, 아크, 마이크로파 타입, 엑시머, LED 등의 램프, 80~240 W/cm의 램프 강도, 조사 파장 등으로 구분할 수 있다. UV 프린팅 공정이 패션소재에 적용한 경우에는 패션소재의 종류, 자외선 경화제, 램프, 및 UV 프린팅 공정요소를 중심으로 연구가 진행되고 있다. 일반적으로 UV 경화용 코팅물질은 고유연성 우레탄을 사용하며, 직물에 분산염료 혼입 자외선 경화형 인계 단량체를 이용한 연구(Jeong & Jang, 2008)를 비롯하여, 생분해성 PLA 직물 UV 프린팅 공정을 적용하여 기존의 염색법과 비교한 연구(Karim et al., 2015), 스마트 텍스타일 제조에 UV-LED 경화 공정을 적용한 연구(Seipel et al., 2018), 인조가죽에 친수형 폴리우레탄 아크릴레이트 바인더를 사용하여 UV 프린팅 공정을 적용하여 염색성과 광택성을 보고한 연구(Baysal et al., 2019), 폴리프로필렌 니트 직물을 UV 프린팅 공정 인자별로 제조하여 염색성을 평가한 연구(Li et al., 2020) 등이 보고되고 있다. 특히 Li et al.(2020)에서는 Polypropylene 소재가 염색성이 낮은 것을 보완하기 위해, UV 프린팅 공정 중 염색 횟수, 프린팅 거리 및 색상이 두께 및 무게에 영향을 끼쳐 물리적 특성에 영향을 끼치며 컬러링 횟수가 증가할수록 색 외관 특성에 영향을 미치는 것으로 보고한 바 있다.

한편, 본 연구팀은 TPU(Thermoplastic polyurethane)를 이용한 3D 프린팅 패션소재에 관한 연구를 지속적으로 수행중이다(Kabir et al., 2020a, 2020b; Kim et al., 2021; Kim & Lee, 2020; Lee, 2018). 특히 FDM(Fused deposition modelling) 3D 프린팅 기술을 적용하여 3D 프린팅 레이스/보일 복합직물을 제조하여, 기본 특성을 측정한다. 일반적인 보일 직물에 비해 3D 프린팅/보일 복합소재의 누메리, 후쿠라미감이 증가하는 역학적 특성을 나타내었다. 내세탁성 및 드라이클리닝 견뢰도 시험 결과 모두 4~5급으로 판정하는 소재를 얻었다. 즉 3D 프린팅 레이스 복합소재의 여성의류로의 제품 가능성을 확인한 바 있다. 그러나, 패션소재로서의 시장성을 확대하는 데에는 패션트렌드를 적용한 소재의 염색성은 필수라고 할 수 있다. 일반적으로

로 FDM 3D 프린팅 출력물의 후가공은 대부분 사포질 등의 단순한 표면처리, 예비도색용 서페이서(surfacer)나 아세톤 등으로 표면을 매끄럽게 하는 가공, 도료, 채색도구 및 코팅제를 이용한 가공 공정이 있다. 이는 대부분 수제 가공으로 진행되고 있고, 사용하는 후가공 재료는 생산자의 피부 오염을 막기 위해 장갑이나 화학물질로부터 보호하기 위한 마스크 등을 착용해야 하는 문제가 있다. 이에 친환경 디지털 염색 공정을 3D 프린팅 패션소재에 적용한 연구를 살펴본 바, 액상형 소재를 이용한 3D 프린터를 이용한 공정 및 염색성 평가에 대한 연구(Yuan et al., 2018)나 FDM 3D 프린팅용 PLA(Polylactic acid) 필라멘트 중 초록색, 백색, 검정색으로 선염된 필라멘트를 선택하여 프린팅 출력 공정 중 온도와 후가공이 각 소재의 염색성 평가를 진행한 바 있다(Soars et al., 2018). 그러나, FDM 3D 프린팅 출력물 친환경 디지털 공정의 후가공이 요구에 비해 에너지 저감형의 친환경 공법인 UV 프린팅 가공 공정에 대한 연구는 다소 부족한 실정이다.

본 연구는 TPU를 이용한 3D 프린팅 소재를 패션소재로 활용하기 위하여 친환경 UV 디지털 프린팅 공정을 후가공 공정에 도입 가능성을 타진하는 것을 목적으로 한다. 이에 FDM 3D 프린팅 출력물의 표면에 CMYK(Cyan, Magenta, Yellow, Black) 색상을 UV 프린터를 이용하여 코팅하였다. UV 코팅 조건 중 1회부터 5회까지의 반복 횟수별로 UV 코팅 3D 프린팅 소재를 제조하였다. 얻어진 샘플은 두께 및 무게변화율, 표면거칠기 특성, 표면반사율, 색도좌표 및 K/S 분석을 진행하였으며, 이를 통해 UV 염색코팅 횟수별 표면특성과 염색성에 대한 기초자료를 제공하고자 한다.

II. 실 험

1. 재료

본 연구에서 사용한 직경 1.75 mm 및 경도 87A를 갖는 3D 프린팅용 열가소성폴리우레탄(Thermoplastic polyurethane, 이하 TPU, eFlex, Shenzhen Esun Industrial Co., Ltd., China)을 사용하였다. 3D 프린터는 노즐 0.4 mm의 FDM 3D 프린터(Cubicon Single Plus, Cubicon Inc., Korea)를 사용하였다. UV 프린팅 공정에서는 UV 잉크젯 프린터(UJF-3042MK II, Mimaki, Japan)를 사용하였고, UV 경화형 잉크(LUS-120, Mimaki, Ja-

pan)는 백색(White, 이하 W, LUS12-W-BA, Mimaki, Japan)과 시안(Cyan, 이하 C, LUS12-C-BA, Mimaki, Japan), 마젠타(Magenta, 이하 M, LUS12-M-BA, Mimaki, Japan), 옐로우(Yellow, 이하 Y, LUS12-Y-BA, Mimaki, Japan), 검정색(Black, 이하 K, LUS12-K-BA, Mimaki, Japan) 등 5가지 색상과 UV 경화형 프라이머(PR200-Z-BA, Mimaki, Japan)를 사용하였다.

2. 3D 프린팅 TPU 소재 샘플 제조

3D 프린팅 TPU 소재 샘플은 가로, 세로 및 두께를 50 mm × 50 mm × 1 mm 크기로, 3D 모델링 프로그램 (123D Design, Autodesk Inc., USA)을 사용하여 모델링한 후 3D 모델링 파일인 *.stl 로 변환하였다. 이후 3D 프린터에서 출력을 위해 슬라이싱 프로그램(Cubi-creator 4, TPC Inc., Korea)에서 노즐 온도 230°C, 베드 온도 0°C, 프린팅 속도 60 mm/sec 및 채우기 100%로 설정하고 *.g-code 파일로 변환하여 TPU 샘플을 출력하였다. 출력한 TPU 샘플(TPU-Raw)은 염색을 위해 백색 잉크로 UV 프린팅 전처리하여(TPU-W) 사용하

였다. 실험에 사용한 3D 프린팅 TPU 소재의 특성을 <Table 1>에 나타내었다.

3. UV 프린팅

3D 프린팅 TPU 소재에 UV 프린팅을 하기 위해 UV 잉크젯 프린터, UV 경화형 잉크로, 백색, 시안, 마젠타, 옐로우, 검정 등 5가지 색상 및 UV 자외선 경화형 프라이머를 사용하였다. 포토샵 프로그램(Photoshop, Adobe, USA)에서 WCMYK 5가지 색상을 해상도 360 dpi의 *.eps 파일로 만들었다. <Table 2>는 각 색상의 CMYK 및 $L^*a^*b^*$ 값을 나타낸 것이다. 이를 립 소프트웨어 (Rasterlink 6 Plus ver 2.9, Mimaki, Japen)를 사용하여 프라이머-백색-색상 순으로 프린팅 순서를 지정하고 1, 2, 3, 4, 및 5회 UV 컬러링하여 샘플을 제조하였다. UV 프린팅 조건은 프린트 속도 1.62 m²/h, 프린트 헤드와 출력물 사이의 거리는 1.5 mm로 고정하며, 프린트 해상도는 600 × 900 VD(variable dot)로 설정하였다. <Table 3>은 3D 프린팅 TPU 소재의 공정별 샘플 코드를 나타낸 것이다.

Table 1. Specification of 3D printing TPU samples in this study


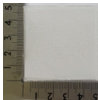
	Weight (g)	Thickness (mm)	Ra (μm)	L^*	a^*	b^*	Sample image
TPU-Raw	2.14	1.01	26.20	78.83	-0.81	2.72	
TPU-W	2.21	1.04	25.61	86.82	-1.72	1.78	

Table 2. CMYK and $L^*a^*b^*$ color value of UV printing





Color	CMYK				$L^*a^*b^*$		
	C	M	Y	K	L^*	a^*	b^*
Cyan 	100	0	0	0	58	-41	-54
Magenta 	0	100	0	0	49	82	-4
Yellow 	0	0	100	0	94	-8	105
Black 	0	0	0	100	10	5	4

Table 3. Sample code of 3D printed TPU material with various UV printing conditions

Sample code	Print	Cycles of UV printing
TPU-WC1	Cyan (C)	1
TPU-WC1		2
TPU-WC1		3
TPU-WC1		4
TPU-WC1		5
TPU-WM1	Magenta (M)	1
TPU-WM2		2
TPU-WM3		3
TPU-WM4		4
TPU-WM5		5
TPU-WY1	Yellow (Y)	1
TPU-WY2		2
TPU-WY3		3
TPU-WY4		4
TPU-WY5		5
TPU-WK1	Black (K)	1
TPU-WK2		2
TPU-WK3		3
TPU-WK4		4
TPU-WK5		5

4. 특성 분석

1) 두께 및 무게 변화율

UV 프린팅 반복 횟수별 3D 프린팅 TPU 소재의 두께 및 무게 변화를 확인하기 위해 두께측정기(CD-20 CPX, Mitutoyo Corp., Japan)와 분석용 저울(PAG114, OHAUS, USA)을 사용하여 두께(mm)와 무게(g)를 측정하였다. 각 실험에서 얻어진 데이터는 Sigma plot 10.1 (Systat softwear Inc., UK)을 사용하여, UV 프린팅 반복 횟수를 독립변수로 하여 선형회귀분석을 통해 두께 및 무게 증가 예측 회귀식과 R²를 확인하였다. 이후 아래의 <Eq. 1>-<Eq. 2>로 무게변화율 및 두께변화율을 계산하여 비교하였다.

$$T = (T_u - T_0) / T_0 \times 100 \quad \dots\dots \text{Eq. 1.}$$

T(%): thickness increment of UV printing samples
 T_u (mm): thickness of samples after UV printing
 T₀ (mm): thickness of samples before UV printing

$$W = (W_u - W_0) / W_0 \times 100 \quad \dots\dots \text{Eq. 2.}$$

W(%): weight increment of UV printing samples
 W_u (mm): weight of samples after UV printing
 W₀ (mm): weight of sampes before UV printing

2) 표면거칠기 특성

UV 프린팅 반복 횟수별 3D 프린팅 TPU 소재의 표면거칠기 특성 분석은 접촉식 표면 조도측정기(178-560-12K, Mitutoyo, Japan)를 사용하였다. 이 때 컷오프값(λc)은 0.8 mm이고, 측정 속도는 0.5 mm/s의 조건으로 측정하였고, 평균 표면거칠기(Ra)를 마이크로미터(μm) 단위로 측정하였다. Ra(Surface roughness increment of UV printing samples)는 각 샘플당 5개의 구간을 측정 후 평균값을 구하였으며, 데이터는 Sigma plot 10.1(Systat softwear Inc., UK)을 사용하여, UV 프린팅 반복 횟수를 독립변수로 하여 선형회귀분석을 통해 표면거칠기 감소 예측 회귀식과 R²를 확인하였다. 또한 UV 프린팅 조건에 대한 변화를 확인하기 위해 <Eq. 3>으로 표면거칠기 변화율을 구하였다.

$$Ra = (Ra_u - Ra_o) / Ra_o \times 100 \quad \dots\dots \text{Eq. 3.}$$

Ra(%): surface roughness increment of UV printing samples

Ra_u (mm): surface roughness of samples after UV printing

Ra_o (mm): surface roughness of samples before UV printing

3) 색 측정

UV 프린팅 반복 횟수별 3D 프린팅 TPU 소재의 흡광도를 분석하기 위해 UV 분광분석기(UV-2600 240V EN, SHIMADZU, Japan)를 사용하였다. 400 nm부터 700 nm까지의 파장 범위 내에서 300 nm/min의 속도로 가시부 스펙트럼을 얻었고, 각 CMYK 색상별 스펙트럼의 표면반사율을 확인하였다.

UV 프린팅 반복 횟수별 3D 프린팅 TPU 소재의 염색성을 확인하기 위해, L*a*b* 값을 측정기(X-rite, CI6xNB, USA)를 사용하여 측정하였다. 광원 유형/각도는 D65/10°로 설정하였으며, 3개 시료를 반복 측정하여 평균값을 계산하여 나타내었다. K/S 값은 각 시료의 표면반사율을 측정한 후, Kubelka-Munk 식 <Eq. 4>에 의하여 구하였다.

$$K/S = (1-R)^2 / 2R \quad \dots\dots \text{Eq. 4.}$$

K: absorption coefficient
S: scattering coefficient
R: reflectance coefficient (0<*R*<1)

UV 프린팅 반복 횟수별 3D 프린팅 TPU 소재의 색상의 차이를 정량적으로 확인하기 위해, CMYK 색상의 이론적 $L^*a^*b^*$ 값을 기준으로 ΔE^* 값을 구하였다. ΔE^* 는 아래의 <Eq. 5>를 사용하여 계산하였다.

$$\Delta E^* = \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2} \quad \dots\dots \text{Eq. 5.}$$

L_1^*, a_1^*, b_1^* : $L^*a^*b^*$ values of CMYK
 L_2^*, a_2^*, b_2^* : $L^*a^*b^*$ values of UV printing samples

III. 결과 및 고찰

1. UV 프린팅 반복 횟수별 3D 프린팅 TPU 소재의 두께 및 무게 변화율

<Fig. 1(a)>와 <Fig. 2(a)>는 UV 프린팅 반복 횟수별 3D 프린팅 TPU 소재의 두께 및 무게 변화율을 나타낸 것이다. CMYK 색상 경화제 잉크와는 관계없이, 모든 샘플은 UV 프린팅 횟수가 증가할수록 두께변화율

과 무게변화율이 증가하는 것으로 확인되었다. <Fig. 1(a)>를 보면 두께변화율은 각 UV 프린팅 5회에서 TPU-WC는 2.69±0.23%, TPU-WM에서는 4.67±0.25%, TPU-WY에서는 4.03±0.21% 및 TPU-WK는 6.84±0.06%로 나타나 TPU-WK의 두께증가율이 가장 크고, TPU-WM, TPU-WY, TPU-WC의 순서로 증가하였다. <Fig. 1(b)>는 프린트 횟수에 대한 두께 증가 예측 회귀식을 나타낸 것으로 프린트 횟수별로 일정한 두께증가율을 나타내어 두께변화의 약 84%를 설명했다. <Fig. 2(a)>를 보면 무게변화율은 각 UV 컬러링 5회에서 TPU-WC는 약 4%, TPU-WM에서는 약 7%, TPU-WY에서는 약 6% 및 TPU-WK는 약 10%로 TPU-WK의 무게증가율이 가장 크고, TPU-WM, TPU-WY, TPU-WC의 순서로 증가하여 두께증가율의 결과와 동일하게 나타났다. 그러나 두께증가율과는 달리 무게증가율은 2회까지는 크게 증가하지 않다가 3회 이상에서 급격히 무게가 증가하는 것으로 나타났다. <Fig. 2(b)>는 프린트 횟수에 대한 무게 증가 예측 회귀식을 나타낸 것으로 두께변화의 약 59%를 설명했다. 프린팅 횟수가 무게변화보다는 두께변화에 대한 설명력에서 큰 값을 가지는 것과 TPU-WK의 두께와 무게 증가율이 가장 크고, TPU-WM, TPU-WY, TPU-WC의 순서로 증가한 것은 Polypropylene 소재를 UV 프린팅 공정으로 염색한 선행연구(Li et al., 2020)와도 일치하는 결과이다. 잉크젯 프린터의 작동 원리는 인쇄할 재료에 작은 잉크방울을 적용하는 것으로(“Inkjet printing”, 2021) 인쇄

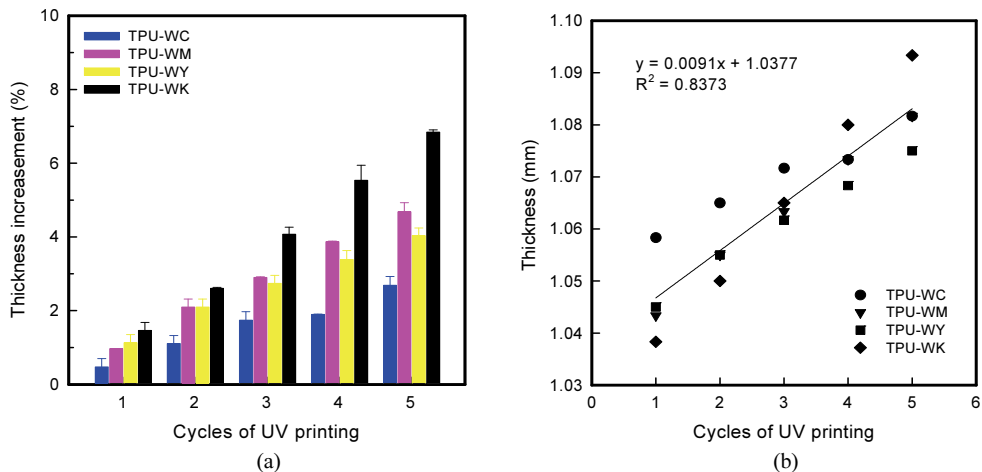


Fig. 1. Change of thickness of UV printing 3D printed TPU samples on various cycles of UV printing; (a) thickness increase, (b) linear relationships of thickness.

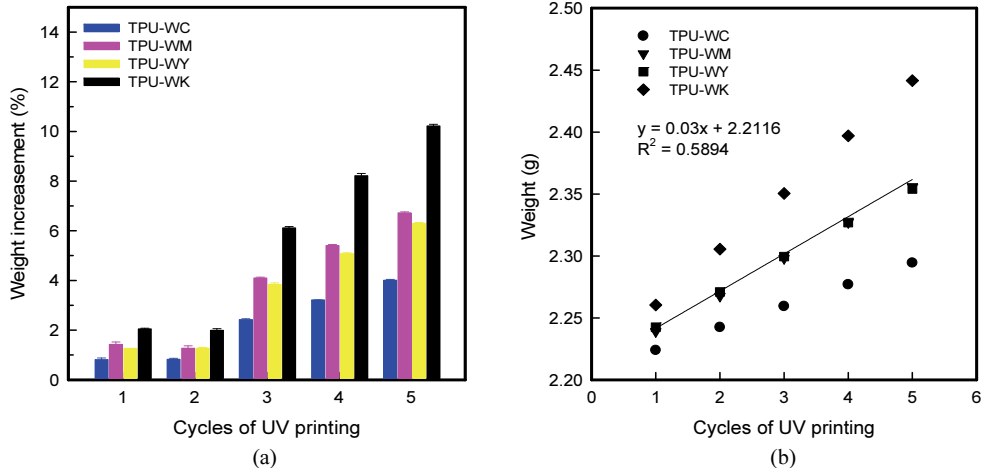


Fig. 2. Change of weight of UV printing 3D printed TPU samples on various cycles of UV printing; (a) weight increase, (b) linear relationships of weight.

빛수가 증가할수록 TPU 표면의 동일한 영역에 더 많은 잉크 방울이 증착되어 두께와 무게가 증가하게 되는 것이다. 다양한 색상을 프린팅하기 위해서는 다양한 양과 비율의 잉크 도트가 재료의 표면에 증착되어 색으로 발현된다(Martin et al., 2008). 따라서 TPU-W의 표면에 잉크 도트를 추가로 부착하여 명도를 낮추어 색상을 발현시키게 되므로 명도가 낮은 색상일수록 더 어두운 색상을 나타내기 위하여 잉크 도트의 양도 다르게 부여하게 되므로 색상에 따라 무게와 두께의 변화도 다르게 나타난다.

2. UV 프린팅 반복 횟수별 3D 프린팅 TPU 소재의 표면거칠기 특성

일반적으로 표면거칠기는 값이 클수록 표면이 거친 것을 나타내고, 그 값이 작을수록 표면이 매끄러워지는 것을 나타내는 것이다.

<Fig. 3(a)>는 UV 프린팅 반복 횟수별 3D 프린팅 TPU 소재의 표면거칠기 변화율을 나타낸 것이다. TPU-Raw는 약 26 μm 이며, 백색으로 코팅한 후 약 25.6 μm 정도로 약간 작은 값을 나타내었다. TPU-WC의 경우 1회

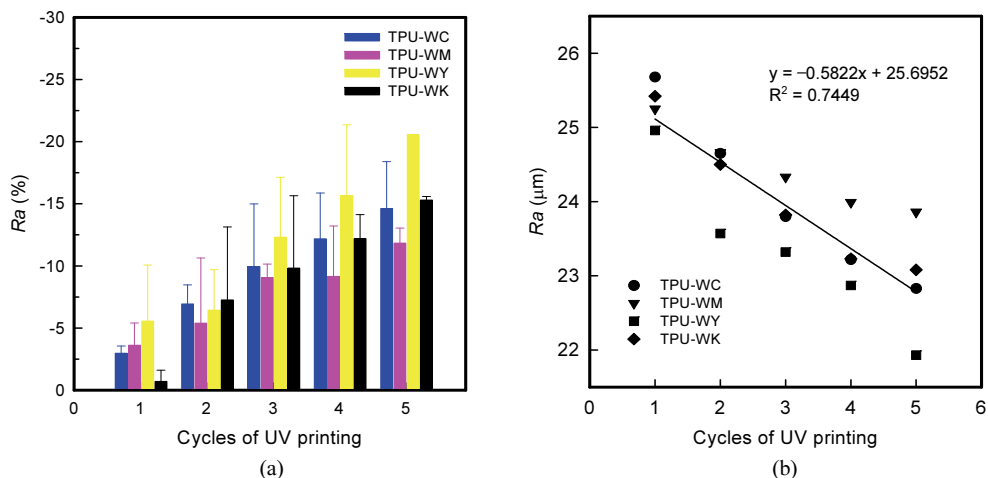


Fig. 3. Change of surface roughness of UV printing 3D printed TPU samples with various cycles of UV printing; (a) Surface roughness increasement, (b) linear relationships of Ra.

UV 프린팅을 하면 약 25.7 μm 로 나타났으며, 5회까지 반복 횟수가 증가할수록 약 22.8 μm 정도로 나타났다. TPU-WM의 경우 반복 횟수가 증가할수록 25.3 μm 에서 약 23.9 μm 범위의 값을 나타내었다. TPU-WY나 TPU-WK의 경우, 25.0~21.9 μm 및 25.4 μm 23.1 μm 등의 범위의 값을 나타내었다. 이에 3D 프린팅 TPU 소재의 UV 프린팅 공정 횟수가 증가할수록, 표면거칠기는 감소하는 것으로 나타났으며, 이는 UV 프린팅 공정이 적용된 3D 프린팅 TPU 소재의 표면이 점차 매끄러워지는 것을 의미한다. 거칠기 변화율은 TPU-WM < TPU-WK < TPU-WC < TPU-WY 순으로 변화율이 컸다. 두께 및 무게 변화율이 컸던 마젠타와 검정 색상으로 UV 프린팅된 표면이 시안과 옐로우의 색상보다 매끄럽지 못한 것으로 나타났다. 이는 UV 경화제에 포함된 안료의 분산도의 차이에 의해 나타나는 것으로 유추되며, 후속연구를 통해 확인할 필요가 있다.

<Fig. 3(b)>는 프린트 횟수에 대한 표면거칠기의 예측 회귀식을 나타낸 것으로 표면거칠기 변화의 약 75%를 설명했다. TPU 소재에 UV 프린팅의 반복 횟수가 증가할수록 표면거칠기 값이 감소하는 것으로 나타나 표면이 점차 매끄러워지는 것을 확인하였다. FDM 방식의 출력 원리가 재료를 레이어별로 적층시켜 출력하는 방식으로 표면이 매끄럽지 못한 특징을 가지고 있었으나, UV 프린팅으로 반복할수록 염색 및 표면 코팅이 된 것으로 보인다.

3. UV 프린팅 반복 횟수별 3D 프린팅 TPU 소재의 가시부 스펙트럼

일반적으로 CMYK 색상은 가시부 스펙트럼 측정을 통해 각각의 표면반사율을 나타내는 특성 피크를 확인할 수 있다. 검정 색소는 전 파장에서 특성 피크를 나타내고, 옐로우 색소는 470 nm 이상의 파장 범위 내, 마젠타 색소는 440 nm 및 620 nm의 범위에서, 시안 색소는 440 nm부터 500 nm에서 표면반사율을 나타내는 피크를 확인할 수 있다(Berns et al., 2000).

<Fig. 4>는 UV 프린팅 반복 횟수별 3D 프린팅 TPU 소재의 가시부 스펙트럼을 나타낸 것이다. TPU-Raw와 TPU-W 소재의 표면반사율 스펙트럼은 전 영역에서 스펙트럼을 확인할 수 있고, 백색 전처리한 TPU 소재의 반사율이 크게 타나났다. <Fig. 4(a)>는 시안 색소를 1회부터 5회까지 UV 프린팅한 TPU 소재의 경우를

나타낸 것이다. 1회 이상 반복하여 프린팅한 TPU-WC 시료는 모두 시안 색소를 나타내는 400 nm부터 500 nm에서 파장 영역에서 가시부 스펙트럼을 확인할 수 있다. UV 프린팅 반복 횟수가 1회인 경우 표면반사율이 크게 나타났고, 2회 이상 UV 프린팅하는 경우 표면반사율이 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 마젠타와 옐로우 색소로 반복 횟수별로 UV 프린팅한 경우에 동일하게 나타났다(Fig. 4(b))-(Fig. 4(c)). 검정 색소로 1회부터 5회까지 UV 프린팅한 TPU 소재에 코팅한 경우<Fig. 4(d)>, 가시광선부 전 파장 범위에서 스펙트럼을 나타내었고, 2회 이상 UV 프린팅을 반복할수록 표면반사율은 낮아지는 것을 확인할 수 있다. CMYK 색상은 2회 이상 반복하여 UV 코팅한 3D 프린팅 TPU 소재는 각 색소의 특정 파장 내의 스펙트럼 피크가 나타나고, 표면반사율이 낮아지는 결과를 나타내었으며, 이는 발색성이 높다는 것을 의미한다.

4. UV 프린팅 반복 횟수별 염색성

일반적으로 CIE Lab에서, L^* 값은 밝기를 나타내는 것으로, 0이면 흑색을, 100이면 백색을 의미한다. a^* 는 음수(-)이면 녹색에, 양수(+)면 적색 쪽으로 치우치는 것을 의미하며, b^* 는 음수(-)이면 청색, 양수(+)면 황색을 나타낸다.

<Table 4>는 UV 프린팅 반복 횟수별 3D 프린팅 TPU 소재의 CMYK 색상별 $L^*a^*b^*$, K/S, ΔE^* 값 및 샘플 이미지를 나타낸 것이다. 일반적으로 2회 염색에서 옐로우를 제외한 색에서 명도가 크게 낮아지는 것을 관찰할 수 있다. TPU-WC 소재의 경우, 시안 염료로 UV 프린팅을 반복할수록 b^* 는 -37 정도로 나타나며, 청색에 가까워지고 있음을 나타낸다. TPU-WM의 경우, 마젠타 염료로 UV 프린팅을 반복할수록 a^* 면이 55 정도로 적색에 가까워지고 있음을 확인할 수 있다. TPU-WY의 경우, 옐로우 염료로 UV 프린팅을 반복할수록 b^* 는 80에 가까워지면서 황색이 증가하고 있다. 마지막으로 TPU-WK의 경우, 검정 염료로 UV 프린팅을 반복할수록 L^* 이 약 25 정도를 나타내며, 흑색에 가까워지고 있음을 확인할 수 있다. 이는 ΔE^* 값에서도 확인할 수 있듯이, 3D 프린팅 TPU 소재에 CMYK 색상으로 UV 프린팅을 반복하여 코팅할수록 설계 시 CMYK 색상에 가까워지고 있음을 확인하였다.

<Fig. 5>는 UV 프린팅 반복 횟수별 3D 프린팅 TPU

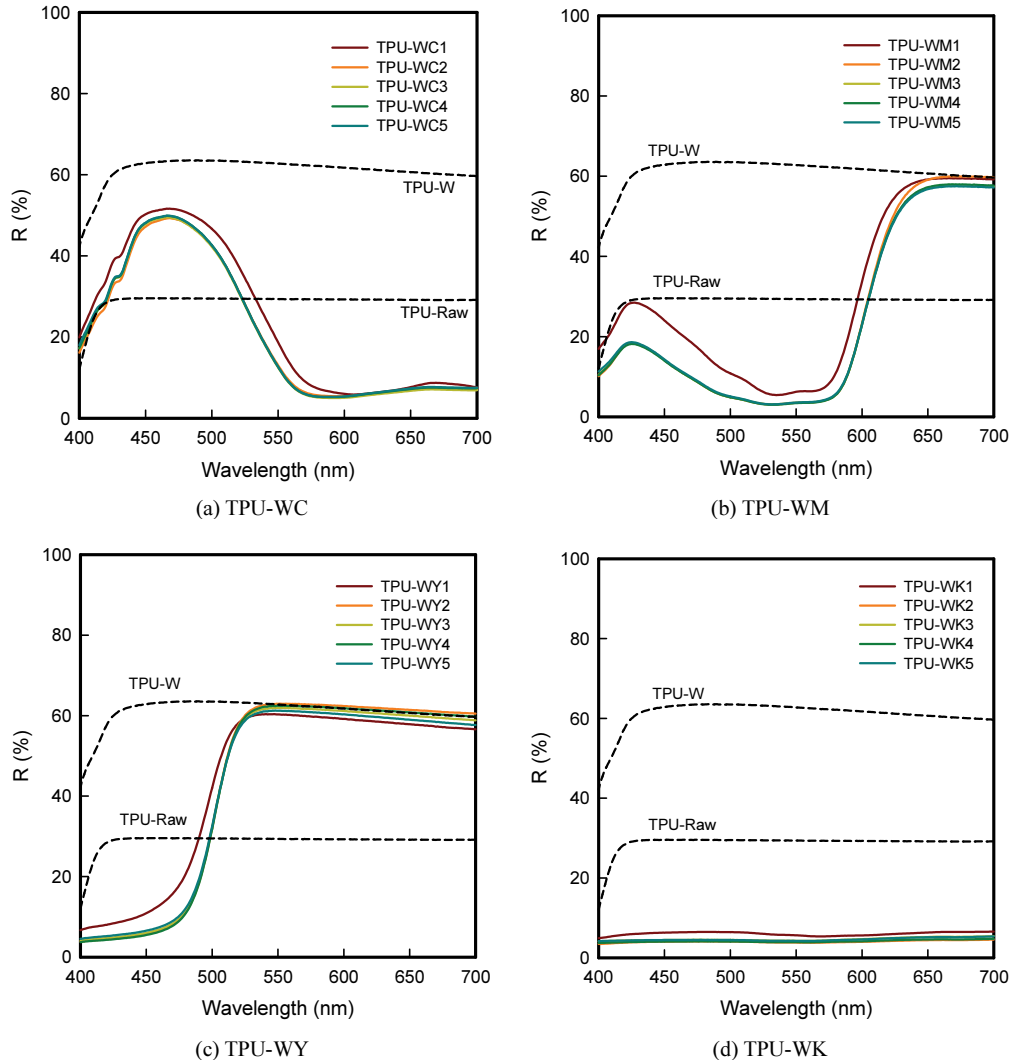














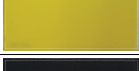
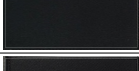

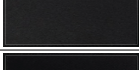

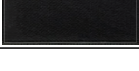


Fig. 4. The spectra reflectance curves of UV printing 3D printed TPU samples with various cycles of UV printing.

소재의 K/S 값을 나타낸 것이다. 시안 염료로 UV 프린팅을 반복하여 코팅하는 경우 K/S 값은 약 2.8~4.4 범위에서 나타났다. 마젠타 염료로 코팅한 경우, K/S 값은 약 3.4~5.0의 범위에서 나타났다. 옐로우 염료의 경우는 약 9.1~12.7에서, 검정 염료의 경우는 약 10.4~12.8의 범위를 나타내었다. CMYK 색상으로 UV 프린팅한 3D 프린팅 TPU 소재는 2회 반복한 경우에 발색성이 크게 나타났고, 그 이후에는 다소 발색성이 감소하는 경향을 나타내었다. K/S 값이 낮은 것은 색 농도가 낮다는 것을 의미한다. Takatani et al.(2018)의 연구

에서는 투명한 물체에 UV 프린팅을 하는 경우, 색소 층으로 프린팅하여도 기존 소재의 투명도에 의해 발색성은 다소 감소할 수 있다고 하였고, Lee et al.(2010)은 초극세 나일론 섬유를 한 바 염료의 염착량이 많으나, 겉보기 색 농도가 저하하는 결과를 나타내었는데, 이를 극세 섬유의 표면적이 증가하기 때문이라고 보고한 바 있다. 극세 섬유의 표면에서 반사광이 증가하여 염색물의 겉보기 표면농도가 떨어지기 때문이다. UV 프린터를 활용한 코팅에 필요한 재료는 아크릴, 종이 등 불투명한 소재에 백색 코팅을 한 후 색소를 발

Table 4. Color change of UV printing 3D printed TPU samples with various cycles of UV printing

Sample code	L^*	a^*	b^*	ΔE^*	Sample image
TPU-WC1	61.80	-25.24	-30.39	28.64	
TPU-WC2	52.45	-24.88	-36.02	24.78	
TPU-WC3	52.35	-24.63	-37.78	23.73	
TPU-WC4	52.32	-24.75	-37.49	23.85	
TPU-WC5	52.49	-25.00	-37.59	23.57	
TPU-WM1	49.12	51.69	-12.59	31.50	
TPU-WM2	41.43	56.59	-4.70	26.52	
TPU-WM3	41.15	56.55	-5.24	26.66	
TPU-WM4	41.28	56.26	-4.94	26.89	
TPU-WM5	41.66	55.98	-5.41	27.07	
TPU-WY1	82.32	-9.27	63.17	43.45	
TPU-WY2	81.58	-6.39	80.88	27.18	
TPU-WY3	81.46	-6.46	79.19	28.74	
TPU-WY4	81.72	-6.31	79.82	28.07	
TPU-WY5	81.29	-6.64	77.63	30.21	
TPU-WK1	29.69	-0.31	-1.12	21.03	
TPU-WK2	24.72	0.95	0.05	15.77	
TPU-WK3	24.86	1.40	0.20	15.75	
TPU-WK4	24.98	1.33	0.47	15.82	
TPU-WK5	25.68	1.67	0.01	16.52	

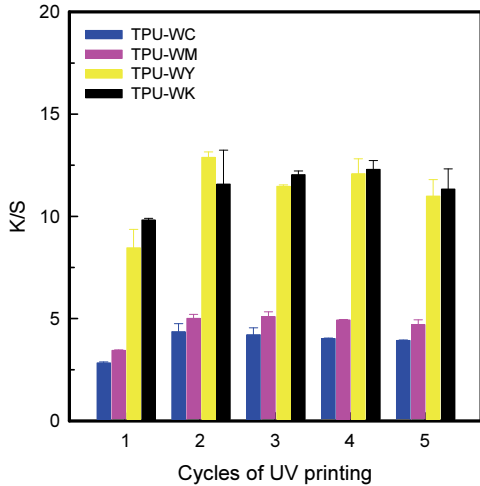


Fig. 5. K/S values of UV printing 3D printed TPU samples with various cycles of UV printing.

색시키는 방법으로 진행되나, 본 연구에서는 TPU 소재의 투명도와 FDM 프린팅 시 출력 레이어의 표면형상에 따라 빛의 굴절이나 흡수성이 달라지므로 분광 분석의 영향을 받은 것으로 보인다. 이는 표면거칠기 분석에서 확인한 것처럼 UV 프린팅 횟수별로 얻어진 TPU 소재는 색소를 반복하여 UV 코팅하였으므로 표면은 매끄럽고, 가시부 스펙트럼으로 확인한 바 색소의 부착량은 증가하는 것으로 볼 수 있다. 이에 UV 프린팅 반복 횟수별 표면의 반사광이 증가하고 소재 내의 광로장이 변화하게 되어 색 농도를 나타내는 K/S 값이 다소 낮게 나타나는 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 연구는 3D 프린팅 출력물의 후가공에 관한 연구로, 친환경 UV 디지털 프린팅 공정을 적용하여 TPU를 이용한 3D 프린팅 소재를 CMYK 색상으로 UV 코팅 가능성을 확인하는 것을 목적으로 하였다. UV 프린팅 반복 횟수별로 제조한 UV 코팅 3D 프린팅 소재를 제조하고, 얻어진 샘플의 두께, 무게 변화율, 표면거칠기 특성, 흡광도, 측색 및 K/S 분석을 통해 염색성을 분석한 결과는 다음과 같다.

1. UV 프린팅 반복 횟수별 3D 프린팅 TPU 소재는 반복 횟수가 1회부터 5회까지 많아질수록 무게와 두께가 증가하였다. 표면거칠기의 특성을 분석한 바, 3D 프린팅 TPU 소재의 UV 프린팅 공정 횟수가 증가할수록,

표면거칠기는 감소하는 것으로 나타났으며, 이는 UV 프린팅 공정이 적용된 3D 프린팅 TPU 소재의 표면이 점차 매끄러워지는 것을 의미한다.

2. UV 프린팅 반복 횟수별 3D 프린팅 TPU 소재의 기존 CMYK 색상의 가시부의 표면반사 스펙트럼을 확인한 결과, CMYK 색상은 각 특성 파장 내에서 표면반사율을 나타내었고, UV 프린팅을 2회 이상 반복할수록 표면반사율은 낮게 나타났다.

3. UV 프린팅 반복 횟수별 3D 프린팅 TPU 소재를 염색성을 살펴본 바, UV 프린팅을 2회 이상 반복하여 제조한 3D 프린팅 TPU 소재의 경우 CMYK 색상에 가까운 색으로 발색되는 것을 확인할 수 있고, 발색성이 좋은 것으로 나타났다. 겉보기 농도가 3회 이상으로 제조한 TPU의 K/S 값이 다소 감소하는 것은 UV 프린팅 반복 횟수별 3D 프린팅 TPU 소재의 표면이 매끄러워 반사광이 증가하기 때문이다.

UV 디지털 프린팅으로 염색 가공된 3D 프린팅 TPU 출력물의 표면특성과 염색성에 대한 공정 적용이 가능성을 확인하였다. 후속연구로는 TPU 소재의 투명도나 표면거칠기 등에 따른 염색성 평가에 대한 연구를 진행한 후 UV 디지털 프린팅으로 후가공된 TPU 소재의 세탁, 마찰, 일광견뢰도 평가를 통해 염색 내구성을 확인하고자 한다.

References

- Baysal, G., Kalav, B., & Kayaoğlu, B. K. (2019). Colour and gloss properties of pigment-printed synthetic leather using an ultraviolet-curable water-borne polyurethane acrylate binder and two photoinitiators at different ratios. *Coloration Technology*, 135(2), 133–142. doi:10.1111/cote.12386
- Berns, R. S., Billmeyer, F. W., & Saltzman, M. (2000). *Billmeyer and Saltzman's principles of color technology* (3rd ed). New York, NY: Wiley.
- Inkjet printing. (2021, August 30). *Wikipedia*. Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/Inkjet_printing
- Jeong, Y.-K., & Jang, J. (2008). Effect of disperse dyeing on UV-curable flame-retardant finish of PET fabrics. *Journal of the Korean Society of Dyers and Finishers*, 20(2), 66–74. doi: 10.5764/TCF.2008.20.2.066
- Jang, J., & Koo, G.-H. (2008). 자외선 경화형 섬유 가공 [UV curable fiber finishing]. *Fiber Technology and Industry*, 12 (3), 180–185.
- Kabir, S., Kim, H., & Lee, S. (2020a). Characterization of 3D printed auxetic sinusoidal patterns/nylon composite fabrics.

- Fibers and Polymers*, 21(6), 1372–1381. doi:10.1007/s12221-020-9507-6
- Kabir, S., Kim, H., & Lee, S. (2020b). Physical property of 3D-printed sinusoidal pattern using shape memory TPU filament. *Textile Research Journal*, 90(21-22), 2399–2410. doi:10.1177/0040517520919750
- Karim, M. N., Afroj, S., Rigout, M., Yeates, S. G., & Carr, C. (2015). Towards UV-curable inkjet printing of biodegradable poly (lactic acid) fabrics. *Journal of Materials Science*, 50(13), 4576–4585. doi:10.1007/s10853-015-9006-0
- Kim, H., Kabir, S., & Lee, S. (2021). Mechanical properties of 3D printed re-entrant pattern/neoprene composite textile by pattern tilting angle of pattern. *Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles*, 45(1), 106–122. doi:10.5850/JKST.2021.45.1.106
- 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
- Lee, H. J., Lee, H. Y., Park, E. J., Choi, Y. J., & Kim, S. D. (2010). Alkaline dissolution and dyeing properties of sea-island type ultrafine nylon fiber. *Textile Coloration and Finishing*, 22(4), 325–331. doi:10.5764/TCF.2010.22.4.325
- Lee, S. (2018). Evaluation of mechanical properties and was habitability of 3D printed lace/voil composite fabrics manufactured by FDM 3D printing technology. *Fashion & Textile Research Journal*, 20(3), 353–359. doi:10.5805/SFTI.2018.20.3.353
- Li, N.-w., Ho, C.-p., Yick, K.-l., & Zhou, J.-y. (2020). Effect of UV-curable inkjet printing parameters on physical, low-stress mechanical, and aesthetic properties of polypropylene knitted fabrics. *Fibers and Polymers*, 21(12), 2788–2798. doi:10.1007/s12221-020-1295-5
- Martin, G. D., Hoath, S. D., & Hutchings, I. M. (2008). Inkjet printing - the physics of manipulating liquid jets and drops. *Journal of Physics: Conference Series*, 105:012001. doi:10.1088/1742-6596/105/1/012001
- Seipel, S., Yu, J., Periyasamy, A. P., Viková, M., Vik, M., & Nierstrasz, V. A. (2018). Inkjet printing and UV-LED curing of photochromic dyes for functional and smart textile applications. *RSC Advances*, 8(50), 28395–28404. doi:10.1039/c8ra05856c
- Soars, J. B., Finamor, J., Silva, F. P., Roldo, L., & Cândido, L. H. (2018). Analysis of the influence of polylactic acid (PLA) colour on FDM 3D printing temperature and part finishing. *Rapid Prototype Journal*, 24(8), 1305–1316. doi:10.1108/RPJ-09-2017-0177
- Takatani, T., Fujita, K., Tanaka, K., Funatomi, T., & Mukaigawa, Y. (2018). Controlling translucency by UV printing on a translucent object. *IPSI Transactions on Computer Vision and Applications*, 10(1):7. doi:10.1186/s41074-018-0043-x
- Yuan, J., Zhu, M., Xu, B., & Chen, G. (2018). Review on processes and color quality evaluation of color 3D printing. *Rapid Prototype Journal*, 24(2), 409–415. doi:10.1108/RPJ-11-2016-0182

이 선 희

동아대학교 패션디자인학과 교수

박 소 연

동아대학교 패션디자인학과 대학생

정 임 주

동아대학교 의상섬유학과 대학원생

이 정 순

충남대학교 의류학과 교수
