Polymer(Korea), Vol. 42, No. 6, pp. 1040-1045 (2018)
https://doi.org/10.7317/pk.2018.42.6.1040
ISSN 0379-153X(Print)
ISSN 2234-8077(Online)

전사방식 광조형 3차원 프린팅의 조형조건에 따른 이방성 고찰

장남훈 · 송성은* · 박 근†
서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과, *㈜캐리마 개발팀 및 성균관대학교 화학공학부
(2018년 7월 3일 접수, 2018년 8월 19일 수정, 2018년 8월 20일 채택)

Investigation on Anisotropy according to Printing Conditions for Projection Type Photo-polymerization 3D Printing

Nam-Hoon Chang, Sung-Eun Song*, and Keun Park†
Dept. of Mechanical System Design Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology, Seoul 01811, Korea
**Development Team, CARIMA Co. Ltd., Seoul 07542, Korea, and*
School of Chemical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea
(Received July 3, 2018; Revised August 19, 2018; Accepted August 20, 2018)

초록: 최근 3차원 프린팅 기술에 대한 많은 관심이 고조되고 있으며, 기존의 빠른 시제품 제작 용도에서 기능성 제품의 직접 제작으로 활용 범위를 넓히고 있다. 그러나 제품의 직접 제조에 활용되기 위해서는 적층 공정에 기반한 3차원 프린팅의 단점(낮은 형상정밀도, 긴 제작시간, 적층 방향으로의 기계적 물성 저하)을 극복해야 한다. 이중 적층 방향으로의 물성 저하는 제품의 이방성을 야기시키고, 결과적으로 3차원 프린팅으로 제작된 제품의 구조적 안전성을 적절히 예상하기 어렵게 만든다. 본 연구에서는 마스크 전사방식 광조형 프린터(DLP)로 각각 수평방향과 수직방향으로 제작한 조형물의 인장시험을 통해 기계적 물성을 고찰하고 조형조건에 따른 이방성의 차이를 비교하였다. 또한 실험결과의 분석을 통해 적절한 강도와 강성을 보장하면서도 등방성을 유지할 수 있는 조형조건을 획득하였다.

Abstract: Recently, 3D printing has obtained increasing attention, and extended its application from the traditional rapid prototyping to direct fabrication of functional parts. To be used as the direct fabrication process, however, 3D printing should overcome drawbacks due to its lamination process: low dimensional accuracy, long fabrication time and degeneration of mechanical properties along the lamination direction. This degeneration along the lamination direction results in anisotropic mechanical properties, which prevents appropriate prediction of structural safety of the 3D-printed parts. This study investigated mechanical properties of 3D-printed parts using a mask-projection type (digital light processing; DLP) 3D printer by comparing tensile test results for the specimens that were printed along horizontal and vertical directions. By analyzing experimental results, appropriate printing conditions could be obtained to satisfy high mechanical strength and stiffness as well as to maintain mechanical properties within isotropic range.

Keywords: 3D printing, additive manufacturing, digital light processing (DLP), photo-polymerization, anisotropy.

서 론

최근 3차원 프린팅 기술이 급격하게 발전됨에 따라 기존의 시작품을 신속하게 제조하는 기능(rapid prototyping; RP)을 넘어서서 제품을 직접 제조하는 적층제조(additive manufacturing; AM) 기술로 영역을 넓히고 있다.[1] 3차원 프린팅은 2차원 단면을 적층하여 3차원 입체형상을 제작하는 기술로, 기존의 공법으로는 불가능했던 복잡한 기능성 형상의 제작이 가능한 장점이 있는 반면 적층방향의 기계적 물성이 저하되는 단점이 있으며, 이러한 적층방향의 물성 저하는 분말재료를 사용한 금속 프린팅 공정보다는 고분자 수지를 사용한 프린팅 공정에서 더 두드러지는 것으로 알려져 있다.[2]

고분자 재료를 사용한 3차원 프린팅 공정은 크게 열가소성 수지를 사용한 공정과 광경화성 수지를 사용한 공정으로 구분된다. 열가소성 수지를 사용한 대표적인 공정은 압출적층형(material extrusion; ME) 혹은 FDM(fused deposition modeling; FDM) 방식으로 알려져 있으며, 필라멘트 형태의 열가소성 고분자를 미세 노즐을 통해 압출하여 적층하는 방식이다.[3] 반면, 광경화성 수지를 사용한 공정은 액상의 광경화 수지에 자외선을 선택적으로 조사하여 원하는 영역을 경화시켜 적층하는 형태로 프린팅이 수행되며, 광조형 혹은 광중합형(photo-

†To whom correspondence should be addressed.
kpark@seoultech.ac.kr, ORCID 0000-0003-3823-0672

polymerization; PP) 방식으로 명명된다.[4] 광조형 방식은 일반적으로 적층두께가 20~50 μm 수준으로 적층두께가 100 μm 이상인 압출적층형 프린팅 방식에 비해 조형물의 형상정밀도 및 표면조도가 우수한 장점이 있는 반면, 사용 재료가 광경화성 수지로 제한됨에 따라 다양한 엔지니어링 플라스틱의 사용이 가능한 압출적층형 방식에 비해 제품의 기능성이 제한되는 단점이 있다.

광중합형 프린팅 방식은 광원의 방식에 따라 레이저 주사를 통해 원하는 영역을 경화시키는 레이저 주사(laser scanning) 방식과 마스크를 통해 원하는 영역에 자외선을 선택적으로 조사하는 마스크 전사(mask projection) 방식으로 구분된다.[5] 일반적으로 레이저 주사 방식의 경우 3D systems 사에 의해 최초로 상용화된 SLA(stereolithography apparatus) 방식으로 통칭되며, 마스크 전사 방식은 다중 미세 반사경(digital micromirror device; DMD)을 사용하여 원하는 영역에 선택적으로 UV를 조사해주는 방법으로 DLP(digital light processing) 방식으로 통칭된다.[6]

고분자 재료를 사용한 3차원 프린팅 방식 출력물을 대상으로 방향별 물성을 분석하기 위한 연구가 수행되었다. 일반적으로 FDM 방식에서는 두께방향(적층방향)의 기계적 강도가 면내방향의 50% 수준으로 나타나 이방성이 큰 것으로 보고된 반면,[7-9] SLA 방식에서는 두께방향의 강도가 면내방향과 유사한 수준으로 나타났다.[10-12] 이는 SLA 방식의 경우 레이저 주사에 의해 경화가 발생되는 점을 감안할 때 면내 방향으로도 주사 경로에 따른 강도 저하가 발생하였기 때문으로 분석된다. 한편, DLP 방식의 프린터에서도 조형방향에 따라 탄성계수와 인장강도가 차이가 발생하는 것으로 나타났으며,[13] 적절한 후경화를 수행할 경우 탄성계수의 이방성이 상당부분 완화되는 것으로 보고되었다.[14]

본 연구에서는 마스크 전사방식, 즉 DLP 방식의 3차원 프린터로 제작한 조형물에 대한 기계적 물성(탄성계수, 인장강도)의 변화를 고찰하고자 한다. DLP 방식은 SLA 방식과 달리 선(line) 단위의 경화가 아닌 면(face) 단위의 경화 방식을 사용하는 관계로 조형 시간이 빠른 것으로 알려져 있는 반면, 픽셀 기반의 광조사에 의한 면내 방향의 이방성이 발생하는 것으로 예상된다. 본 연구에서는 조형조건 및 후경화 조건의 변화에 따른 방향별 물성변화에 대한 연구를 수행하여 이방성에 대한 경향을 고찰하고, 이를 통해 높은 품질을 얻을 수 있는 프린팅 조건을 제시하고자 한다.

실 험

재료. 본 연구에서는 광조형 프린팅 재료로 ㈜캐리마(한국)에서 제작한 에폭시 계열의 액상 광경화성 수지(3DK83I)를 사용하였다. 상기 소재의 밀도는 1.45 g/cm^3, 상온에서의 점도는 110-130 cps이며, 흡수되는 광 파장은 350-415 nm 범위이다. 상기 소재의 광조형을 위한 광개시제(photo-initiator)로는 BASF(독일)의 IRGACURE 819를 1% 혼합하여 사용하였다.

광조형 3차원 프린팅. 전사방식(DLP) 광조형 프린터는 ㈜캐리마(한국)의 IM96 장비를 사용하였다. IM96 프린터는 405 nm 파장의 UV LED를 광원으로 사용하며, 1920×1080 배열의 DMD 칩을 사용한다. 최대 제작이 가능한 면내 크기는 96×54 mm이며, 이에 해당되는 평면 내 한 픽셀(pixel)의 해상도는 50 μm이다. 최대 적층 높이는 130 mm이며, 적층두께(한 층의 조사가 완료된 후 다음 층의 조사를 위해 조형판이 상승하는 높이)는 50 μm로 설정하여 프린팅을 수행하였다. 프린팅 조건으로 광원의 세기와 조사 시간을 조합하여 광량(light intensity)을 조절할 수 있는데, 본 연구에서는 광원의 세기를 6.4 mW/cm^{2}로 고정한 상태에서 조사시간(exposure time)을 변화시켜 가며 프린팅을 실시하였다.

경화깊이 측정 및 상대 경화깊이 정의. 광경화성 고분자 소재에 자외선이 조사될 경우 수지 표면으로부터의 경화 깊이(cure depth, C_d)는 식 (1)로부터 계산된다.[15]

$$C_\mathrm{d} = D_\mathrm{p}\ln\left(\frac{E_0}{E_\mathrm{c}}\right) \tag{1}$$

여기서, D_p는 조사된 에너지가 1/e배가 되는 깊이, E_0는 단위면적당 조사된 광량(intensity), E_c는 광경화를 위한 단위면적당 임계 광량을 의미한다. 본 연구에서는 식 (1)에서 D_p와 E_c를 결정하기 위해 광량(E_0)을 변화시켜 가며 프린팅을 수행한 후 경화된 경화층의 두께(C_d)를 측정하였다. 이때 수조에 담긴 액상 광경화성 수지의 깊이를 충분히 유지한 상태에서 한 층의 경화를 실시하였고, 두께측정기(일본 Mitutoyo사 547-526, 분해능 1 μm)를 사용하여 경화된 조형물의 두께를 측정하였다.

상기 경화 깊이는 통상적으로 프린팅시 설정하는 적층 두께(printing thickness, Δz)의 2배 이상으로 설정하도록 권장되는데, 본 연구에서는 적층두께별 경화깊이의 상대적인 비율, 즉 상대 경화깊이(relative cure depth, λ)를 다음과 같이 정의하여 조사시간에 따른 변화를 관찰하였다.

$$\lambda = C_\mathrm{d}/\Delta z \tag{2}$$

후경화. 출력이 완료된 시편을 조형판에서 분리한 후 세척 과정을 거친 후 완전환 경화를 위해 ㈜캐리마(한국)의 CL-50 장비를 사용하여 후경화를 실시하였다. CL-50 장비는 파장 405 nm, 출력 50 W의 자외선 램프를 사용하는 후경화기로, 적정 시간을 설정하여 광조형 프린팅 출력물을 추가적으로 경화시킬 수 있다. 본 연구에서는 후경화 시간을 15분 간격으로 변화시켜가며 실시하였고, 후경화를 실시하지 않은 시편의 인장시험 결과와 함께 비교하였다.

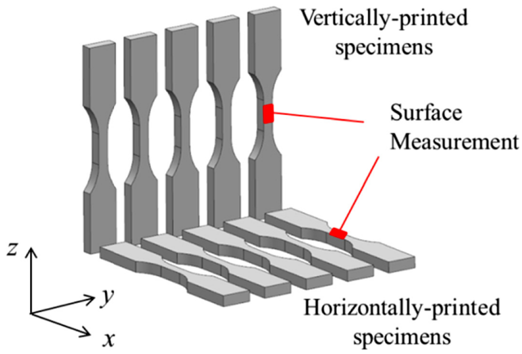

Figure 1. Printing directions and surface measurement regions of tensile specimens.

조형방향별 인장시험. 인장시편은 ASTM D638 Type V(길이 63.5, 폭 3.18, 두께 3.2 mm) 기준에 따라 제작하였다. 조형방향별 탄성계수 및 인장강도를 비교하기 위해 Figure 1에 도시한 바와 같이 수평(horizontal)과 수직(vertical) 방향으로 시험편을 제작하였으며, 제작된 시편으로 조건별로 5회의 인장시험을 실시하였다. 인장시험은 ㈜나노텍의 만능재료시험기(NA-2M, 한국)를 사용하여 수행하였으며, 시험속도는 1 mm/s로 설정하였다.

조형된 시편의 미세 분석. 조형된 시편의 표면 미세구조 분석을 위해 광학현미경(Mi-9000, Jason Electro-Tech, 한국)을 사용하였으며, 프린팅 시편의 방향별 표면조도 분석을 위해 표면조도기(Rugosurf 90G, TESA Technology, Switzerland)를 사용하였다. Figure 1에 수평방향과 수직방향 출력 시편에 대한 표면 측정 영역을 도시하였으며, 표면조도 측정시 측정 영역에서 인장시편의 길이 방향으로 측정하였다.

결과 및 토론

경화깊이 측정 및 특성곡선 도출. Figure 2에 3DK83I 수지의 경화깊이 특성곡선을 도시하였다. 시험은 5회에 걸쳐 수행되었고, 획득된 데이터로부터 식 (1)을 사용한 회귀분석을 수행한 결과 D_p는 149.47 μm, E_c는 1.391 mJ/cm^{2}로 계산되었다. 회귀곡선의 상관계수(R^2)는 99.59%로 회귀곡선의 적합도가 높게 나타남을 확인할 수 있었다. 상기 회귀곡선을 사용하여 프린팅 과정에서 빛의 조사시간 설정에 따른 경화깊이 및 상대 경화깊이를 Table 1과 같이 계산하였다.

Table 1의 결과를 보면 상대 경화깊이(λ)는 조사시간에 따라 1.82~5.97의 값을 보임을 알 수 있는데, 이는 해당 조사시간에 따라 설정된 적층 두께(50 μm)의 λ배만큼 경화가 이루어진 것을 의미한다. 즉, 조사시간 0.6초의 경우 경화 깊이가 설정된 적층 두께의 3배에 해당함을 알 수 있다.

조사시간에 따른 기계적 물성 변화. Figure 3(a)와 3(b)에 조사시간에 따른 탄성계수와 인장강도의 변화를 그래프로 도

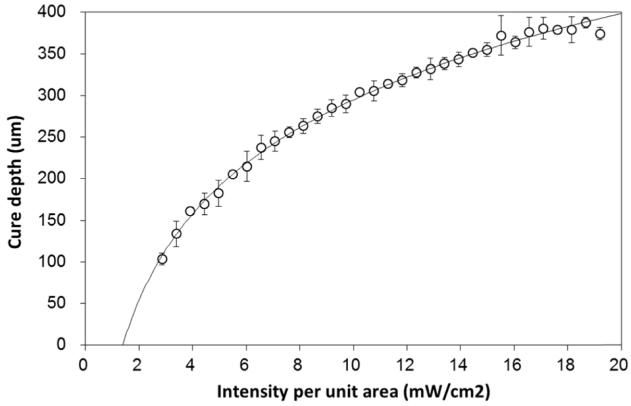

Figure 2. Cure depth with a variation in beam intensity.

Table 1. Relative Cure Depth according to the Exposure Time

Exposure time (s)	C_d (μm)	λ
0.4	91.2	1.82
0.6	151.8	3.04
0.8	194.8	3.90
1.0	228.1	4.56
1.6	298.4	5.97

시하였다. 프린팅 두께는 50 μm로 설정하였으며, 후경화 시간은 30분으로 설정하였다.

탄성계수의 경우 조사시간이 증가할수록 증가하는 경향을 보였으며, 수평방향 조형 시편의 경우 1.45~2.26 GPa, 수직방향 조형 시편의 경우 1.52~2.68 GPa의 분포를 보였다. 전반적으로 수평방향 조형 시편보다는 수직방향 조형 시편이 다소 높은 값을 보이는데, 조사시간이 1초 이하인 경우에는 오차범위 내에서 수직방향 시편의 탄성계수가 약간 높게 나타난 반면, 조사시간이 1초 이상일 경우 수직방향 탄성계수의 증가폭이 더 크게 나타남을 알 수 있다. 이러한 결과는 3D 프린팅 조형품의 적층방향 물성이 저하된다는 일반적인 연구결과와 다소 상반되는 것으로, 면내 방향으로도 물성저하가 발생됨을 의미한다.

인장강도의 경우도 유사하게 조사시간이 증가할수록 증가하는 경향을 보였으며, 수평방향 조형 시편의 경우 26.3~50.0 MPa, 수직방향 조형 시편의 경우 27.2~61.0 MPa의 분포를 보였다. 역시 수평방향 조형 시편보다는 수직방향 조형 시편이 다소 높은 인장강도를 보였으며, 조사시간이 1초 이상일 경우 수직방향 인장강도의 증가폭이 두드러지는 경향 역시 유사하게 나타났다. 이러한 현상은 조사시간을 증가시키면 식 (1)과 같이 경화깊이가 증가되고, 결과적으로 층간 결합력이 증가되기 때문으로 분석된다.

이를 보다 정량적으로 비교하기 위해 Table 1에 도시한 조사시간별 상대 경화깊이를 토대로 조형품의 기계적 물성과의

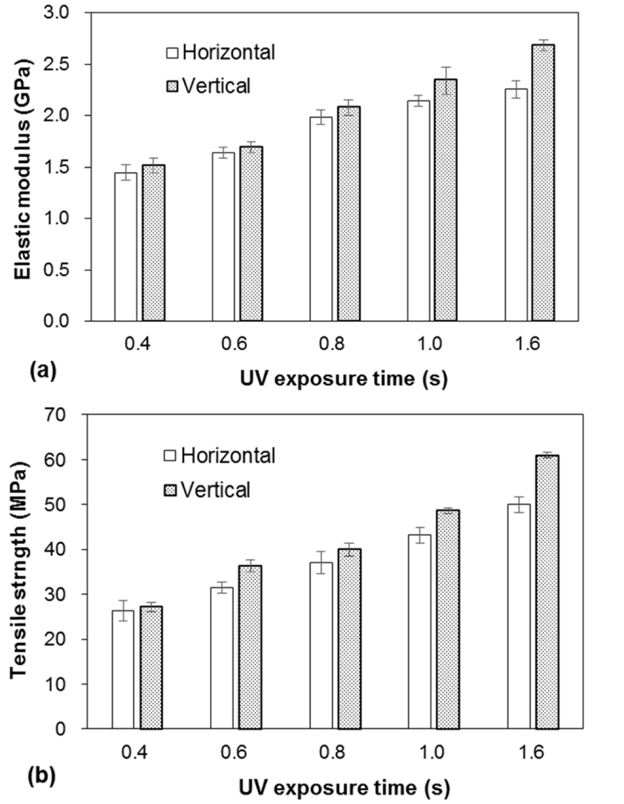

Figure 3. Comparison of the directional tensile properties according to the UV exposure time: (a) elastic modulus; (b) tensile strengths.

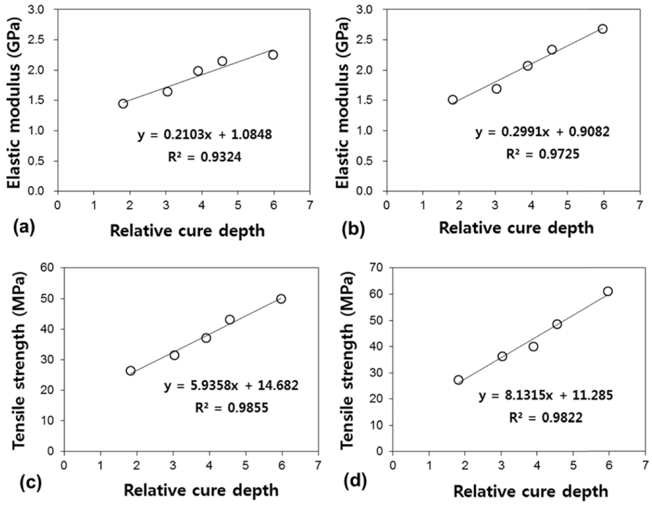

Figure 4. Regression analyses with a variation of the relative cure depth: (a) elastic modulus (horizontal); (b) elastic modulus (vertical); (c) tensile strength (horizontal); (d) tensile strength (vertical).

상관관계를 고찰하였다. Figure 4(a)와 4(b)에 각각 상대 경화지수의 변화에 따른 수평방향과 수직방향 조형 시편의 탄성계수의 변화를 도시하였다. 회귀분석을 실시한 결과 95% 내외의 적합도를 보이며 상대 경화깊이와 탄성계수간에 비례관계가 성립함을 확인하였다. 회귀 직선의 기울기를 보면 수평방향(0.2103)보다 수직방향(0.2991)이 40% 정도 크게 나타남을 알 수 있다.

Figure 4(c)와 4(d)에 각각 상대 경화깊이의 변화에 따른 수평방향과 수직방향 조형 시편의 인장강도의 변화를 도시하였다. 회귀분석을 실시한 결과 98% 이상의 적합도를 보였으며, 회귀 직선의 기울기는 역시 수평방향(5.936)보다 수직방향(8.132)이 37% 정도 크게 나타남을 알 수 있다.

상기 결과는 상대 경화깊이가 증가할수록 자외선이 두께방향으로 투과가 깊어지게 되고, 결과적으로 층간 경계면의 미경화 부분을 경화시키기 때문으로 분석된다. 따라서 수직방향(적층방향)의 강성이나 강도를 향상시키기 위해서는 조사시간을 증가시켜 경화깊이를 증가시켜야 함을 알 수 있다. 그러나 지나친 조사시간의 증가는 이방성을 증가시키는 점을 감안할 때 등방성을 유지시키면서도 기계적 물성을 향상시킬 수 있는 조건의 설정이 필요하다.

후경화 시간에 따른 인장강도 변화. Figure 5(a)와 5(b)에 후경화 시간에 따른 탄성계수와 인장강도의 변화를 그래프로 도시하였다. 적층두께는 50 μm로 설정하였으며, 층별 조사시간은 0.8초로 설정하였다. 전반적으로 후경화 시간이 증가할수록 탄성계수와 인장강도 모두 증가하는 경향을 보였다.

후경화를 수행하지 않은 경우 탄성계수는 수평방향 조형 시편은 0.970 GPa, 수직방향 조형 시편은 0.940 GPa로 측정되었다. 반면, 후경화를 수행한 경우 탄성계수가 크게 증가하였으며, 수평방형 조형 시편은 1.711~2.268 GPa, 수직방향 조형 시편은 1.713~2.387 GPa의 분포를 보였다. 후경화를 시행하지 않은 경우를 제외하면 수평방향 조형 시편과 수직방향 조형 시편이 오차범위 내에서 차이를 보여 이방성을 보이지 않았으며, 이는 후경화 과정에서 방향과 상관 없이 경화가 진행되었기 때문으로 분석된다.

인장강도는 후경화를 수행한 경우 수평방향 조형 시편은 33.9~47.5 MPa, 수직방향 조형 시편은 36.0~49.1 MPa의 분포를 보였다. 동일 조건에서의 수평방향 조형 시편과 수직방향 조형 시편의 인장강도는 역시 오차범위 내에서 차이를 보여 유의한 이방성을 보이지 않음을 알 수 있다. 한편, 후경화를 수행하지 않은 경우는 수평방향과 수직방향 모두 24 MPa 내외로 나타나 강도가 크게 저하됨을 알 수 있으며, 이러한 결과로부터 광조형 방식 프린팅에서는 후경화가 필수적임을 알 수 있다.

후경화 시간에 따른 조형품의 기계적 물성 변화의 정량적 고찰을 위해 Figure 6(a)와 6(b)에 각각 후경화 시간에 따른 수평방향과 수직방향 조형 시편의 탄성계수의 변화를 도시하였다. 회귀분석을 실시한 결과 90% 이상의 적합도를 보였으며, 회귀 직선의 기울기를 보면 수평방향(0.0127)보다 수직방향(0.0141)이 11% 정도 크게 나타남을 알 수 있다.

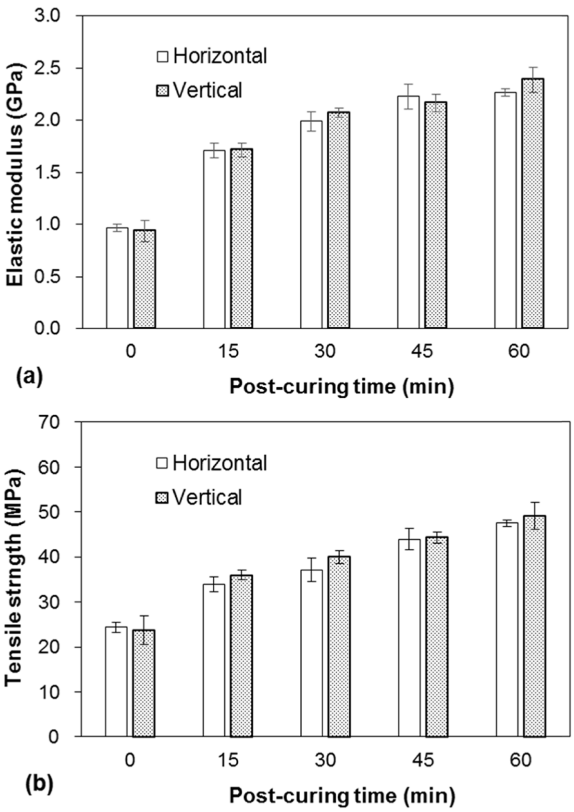

Figure 5. Comparison of tensile properties according to the post-curing time: (a) elastic modulus; (b) tensile strength.

Figure 6(c)와 6(d)에 후경화 시간에 따른 수평방향과 수직방향 조형 시편의 인장강도의 변화를 도시하였다. 회귀분석을 실시한 결과 98% 내외의 적합도를 보였으며, 회귀 직선의 기울기는 수평방향(0.3171)보다 수직방향(0.2899)이 8.6% 정도 크게 나타났다. 상기 결과를 앞의 결과와 비교할 때 후경화 시간은 경화깊이와 달리 특정 방향에 치우치지 않고 전체적으로 탄성계수와 인장강도를 증가시킴을 알 수 있다.

조형조건에 따른 이방성의 고찰. 앞의 결과를 보면 전반적으로 수평방향 조형 시편과 수직방향 조형 시편간의 이방성은 크지 않은 것으로 나타났고, 적층방향보다는 조형조건의 영향이 훨씬 큰 것으로 나타났다. 이는 수직방향(적층방향)의 기계적 물성이 수평방향보다 낮다는 3D 프린팅 조형품의 일반적인 경향과 상반되는 것으로,[16] 특히 선단위의 조형이 이루어지는 SLA 방식과 달리 면단위의 조형이 이루어지는 DLP 방식에서는 수평방향 조형품의 물성이 수직방향 조형품의 물성과 유사하거나 낮게 나타나기까지 하는 현상에 대한 추가적인 분석이 필요하다.

Figure 7(a)에 수직방향으로 조형된 시편(조사시간 0.6초, 후경화 미수행)의 표면 영상을 도시하였다. 적층방향(Z 방향)으로 층간 경계면에서 명암차가 발생함을 알 수 있으며, 이러한 층간 경계면에서의 경화도의 적층구조가 3D 프린팅 조형물의 수직방향 기계적 물성 저하의 원인으로 알려져 있다. Figure 7(b)에 조사시간을 1.6초로 증가시켰을 경우의 표면 영상을 도시하였다. Figure 7(a)와 비교할 때 경계면에서의 명암 차이가 현저히 줄어들어 경계면에서의 경화도가 증가되었음을 알 수 있다. 즉, 상대 경화깊이가 증가되어 프린팅 과정에서 특정 층(layer) 경화 시 이전에 경화된 층의 경계면도 함께 경화되는 효과가 있어 적층방향의 강도가 향상되는 것으로 알 수 있다.

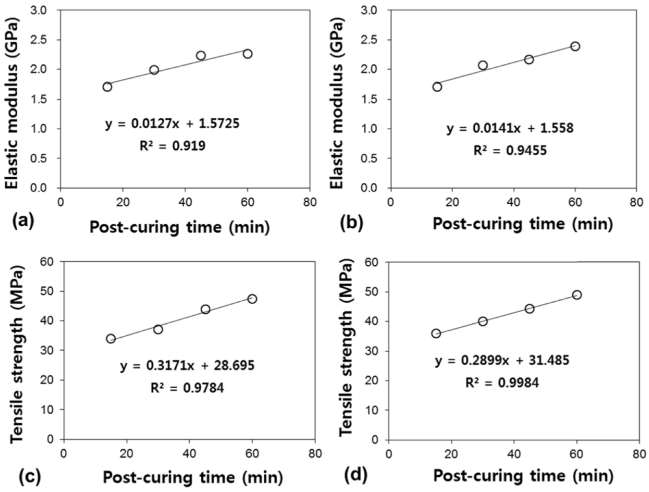

Figure 6. Regression analyses with a variation of the post-curing time: (a) elastic modulus (horizontal); (b) elastic modulus (vertical); (c) tensile strength (horizontal); (d) tensile strength (vertical).

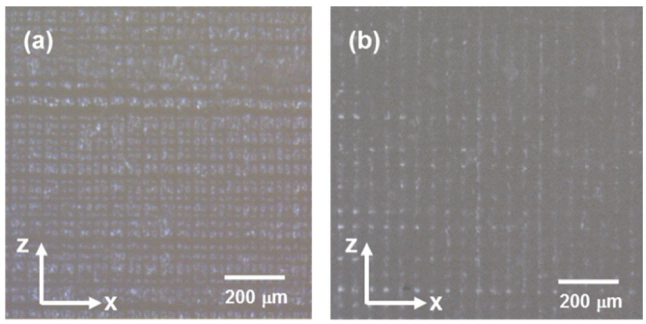

Figure 7. Microscope images of vertically-printed samples for different UV exposure time: (a) 0.6 s; (b) 1.6 s.

Figure 8(a)에 수평방향으로 조형된 시편(조사시간 0.8초, 후경화 미수행)의 표면 영상을 비교하였다. 표면 영상을 살펴보면 조사영역 픽셀의 주기(50 μm)에 따라 명암이 엇갈리는 것을 알 수 있는데, 이는 상대적으로 조사량이 높은 단일 픽셀의 중앙부는 충분히 경화된 반면, 조사량이 낮은 픽셀 가장자리 부분은 완전이 경화되지 않았음을 의미한다. 즉, 수평방향으로도 픽셀의 경계면에서 물성저하가 발생하며, 이러한 양방향 물성저하로 인해 이방성이 크게 발생하지 않은 것으로 판단된다. Figure 8(b)에 60분 후경화를 실시한 경우의 수

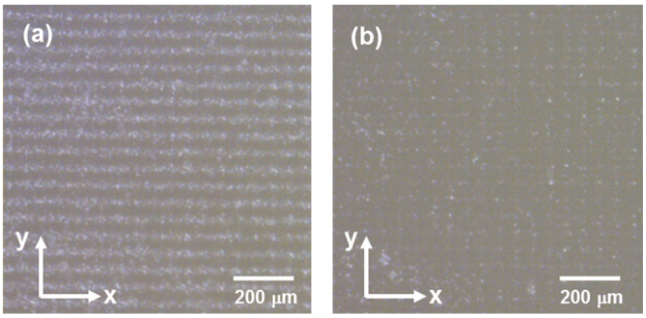

Figure 8. Microscope images of horizontally-printed samples for different post-curing time: (a) without post-curing; (b) 60 min post-curing.

평방향 출력 시편의 표면 영상을 도시하였다. 후경화가 실시되지 않은 Figure 8(a)와 비교할 때 밝게 표시되는 부분이 거의 없어 전체적으로 균일하게 경화되었음을 알 수 있다. 즉, 프린팅 과정에서는 DMD 픽셀간의 해상도 차이로 인해 충분히 경화되지 않은 픽셀간의 경계면이 후경화를 통해 경화되고, 결과적으로 기계적 물성이 향상되는 것으로 알 수 있다.

보다 정량적인 비교를 위해 각각의 경우에 대한 표면조도(R_a)를 비교하였다. 수직방향 조형 시편의 경우 Z-방향으로 표면조도를 측정하였으며, 조사시간 0.6초의 경우(Figure 7(a)) 0.749 μm였던 표면조도가 조사시간 1.6초의 경우(Figure 7(b)) 0.132 μm까지 감소함을 확인하였다. 수평방향 조형 시편의 경우 Y-방향으로 표면조도를 측정하였으며, 후경화를 수행하지 않은 경우(Figure 8(a)) 0.579 μm였던 표면조도가 조사시간 60분 후경화를 수행한 경우(Figure 5(b)) 0.269 μm까지 감소함을 확인하였다. 상기 결과로부터 충분한 UV 조사와 후경화가 이루어진 경우에 조형품의 표면조도가 감소하고 결과적으로 기계적 물성이 향상됨을 확인할 수 있다.

결 론

본 연구에서는 전사방식(DLP) 광조형 3차원 프린터로 제작한 조형물에 대한 기계적 물성의 변화를 고찰하였다. 특히 수평방향과 수직방향으로 조형된 시편의 인장시험을 통해 조형조건에 따른 이방성의 차이를 비교하였으며, 아래의 결론을 도출하였다.

(1) DLP 방식으로 제작된 인장시편의 경우 수직방향으로 조형된 시편의 기계적 물성이 수평방향으로 조형된 시편의 기계적 물성과 유사하여 거의 등방성에 가까운 특성을 보였다. 이는 타 프린팅 방식이 수직방향으로 층간의 경계에서 취약한 특성을 보여 강한 이방성을 보이는 것과는 대조적이며, 수평 방향에서도 픽셀간의 경계부위에서 상대적으로 경화가 덜 되기 때문으로 판단된다.

(2) 조사시간을 증가시킬수록 경화깊이가 깊어져 층간 결합력이 강해짐으로써 탄성계수와 인장강도가 증가함을 알 수 있었으며, 특히 층별 조사시간이 1초 이상일 경우(상대 경화깊이가 4 이상일 경우) 수직방향의 물성이 오히려 수평방향의 물성보다 높게 측정되었다.

(3) 후경화 시간을 증가시킬수록 탄성계수와 인장강도 모두 증가함을 알 수 있으며, 수평방향과 수직방향 모두 비슷한 수준으로 향상되어 등방성이 유지되면서 물성이 향상됨을 알 수 있었다. 이는 후경화 과정에서 특정 방향이 아닌 균일한 형태로의 경화가 진행되기 때문으로 분석된다.

(4) 상기 결과로부터 DLP 프린터(IM96)로 3DK83I 소재를 출력하는 경우 층별 조사시간을 1초 이하(상대 경화깊이 4 이하)로 프린팅을 실시하고 1시간 이상의 후경화를 실시하면 등방성을 유지하면서도 필요한 기계적 물성을 얻을 수 있는 것으로 판단된다.

감사의 글: 본 연구는 서울과학기술대학교의 교내연구비 지원으로 수행된 결과임.

참 고 문 헌

1. H. Lipson and M. Kurman, *Fabricated: The new world of 3D printing*, John Wiley & Sons, 2013.
2. J. Kotlinski, *Rapid Prototyping J.*, **20**, 499 (2014).
3. B. N. Turner and S. A. Gold, *Rapid Prototyping J.*, **21**, 25 (2015).
4. P. F. Jacobs, *Rapid prototyping & manufacturing: fundamentals of stereolithography*, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, 1992.
5. C. Sun, N. Fang, D. M. Wu, and X. Zhang, *Sens. Actuators A: Phys.*, **121**, 113 (2005).
6. D. H. Shin, Y. M. Park, and S. H. Park, *J. Kor. Soc. Manuf. Proc. Engrs.*, **17**, 47 (2018).
7. S. H. Ahn, M. Montero, D. Odell, S. Roundy, and P. K. Wright, *Rapid Prototyping J.*, **8**, 248 (2002).
8. S. J. Park, J. H. Park, K. H. Lee, and M. Y. Liu, *Polym. Korea*, **40**, 846 (2016).
9. S. J. Park, J. H. Park, M. Y. Liu, M. S. Koo, H. J. Rho, and S. H. Cho, *Polym. Korea*, **41**, 531 (2017).
10. R. Hague, S. Mansour, N. Saleh, and R. Harris, *J. Mater. Sci.*, **39**, 2457 (2004).
11. R. Quintana, J. W. Choi, K. Puebla, and R. Wicker, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **46**, 201 (2010).
12. K. Puebla, K. Arcaute, R. Quintana, and R. B. Wicker, *Rapid Prototyping J.*, **18**, 374 (2012).
13. Y. E. Lim, J. H. Park, and K. Park, *Int. J. Prec. Eng. Manuf. Green Technol.*, **5**, 499 (2018).
14. M. Monzon, Z. Ortega, A. Hernandez, R. Paz, and F. Ortega, *Materials*, **10**, 64 (2017).
15. H. W. Kang, J. H. Park, and D. W. Cho, *Sens. Actuators A: Phys.*, **178**, 223 (2012).
16. H. C. Kim, D. Y. Kim, J. E. Lee, and K. Park, *Adv. Mater. Lett.*, **8**, 1199 (2017).