

광조형물의 패턴두께에 따른 표면 거칠기 저감을 위한 공정연구 A Study on the reduction of surface roughness by analyzing the thickness of photocurable sculpture

김영수* · 양형찬*** · 김고범* · 당현우** · 도양회** · 최경현*†

Young-Su Kim*, Hyoung-Chan Yang***, Go-Beom Kim*, Hyun-Woo
Dang**, Yang-Hoi Doh** and Kyung-Hyun Choi**†

(Received 22 June 2016, Revision received 25 July 2016, Accepted 25 July 2016)

Abstract: In this paper, we developed a 3D printing system using a photo-curing resin in order to reduce the surface roughness of a sculpture produced with the 3D printer. Using the pattern of the resulting variable thickness, that gave rise to a stepped shape, and the area error of the photo-curable sculpture, a study was carried out for the process to reduce the surface roughness. At a given value of stage velocity (40~70 mm/s) and output air pneumatic pressure (20~60 kPa), the minimum pattern thickness of the pattern was achieved 65 μm and the maximum pattern thickness of up to 175 μm . To increase the pattern resolution to about 40 μm , the process conditions should be optimized. 3D surface Nano profiler was used to find the surface roughness of the sculpture that was measured to be minimum 4.7 μm and maximum 8.7 μm . The maximum surface roughness was reduced about 1.2 μm for the maximum thickness of the pattern. In addition, a FDM was used to fabricate the same sculpture and its surface roughness measurements were also taken for comparison with the one fabricated using photo-curing. Same process conditions were used for both fabrication setups in order to perform the comparison efficiently. The surface roughness of the photo-curable sculpture is 5.5 μm lower than the sculpture fabricated using FDM. A certain circuit patterns was formed on the laminated surface of the photo-curable sculpture while there was no stable pattern on the laminated surface of the FDM based sculpture the other hand.

Key Words : Photo-curable sculpture, Surface Roughness reduction, FDM(Fused deposition modeling), Pattern thickness, Accuracy

*† 최경현(교신저자) : 제주대학교 메카트로닉스공학과

E-mail : khchoi@jejunu.ac.kr, Tel : 064-754-3713

* 김영수 : 제주대학교 메카트로닉스공학과

* 김고범 : 제주대학교 메카트로닉스공학과

** 당현우 : 제주대학교 전자공학과

** 도양회 : 제주대학교 전자공학과

***양형찬 : 한국에너지종합기술(주)

*† K. H. Choi(corresponding author) : Department of
Mechatronics Engineering, Jeju National University.

E-mail : amm@jejunu.ac.kr, Tel : 064-754-3713

*Young-Su Kim : Department of Mechatronics Engineering, Jeju
National University.

*Go Beom Kim : Department of Mechatronics Engineering, Jeju
National University.

**Hyun Woo Dang : Department of Electronic Engineering, Jeju
National University.

**Yang-Hoi Doh : Department of Electronic Engineering, Jeju
National University.

***Hyoung Chan Yang : Korea Leading Energy Management

1. 서 론

3D 프린팅 기술은 아래에서부터 한 층씩 수직 방향으로 적층하여 최종적인 조형물을 얻는 기술이다. 3D 프린팅 기술의 대표적인 기술로는 광 또는 레이저로 소재를 경화시켜 적층해 완전한 3차원 구조물을 제작하는 SLA (Stereolithography Apparatus), SLS(Selective laser Sintering), 열가소성 소재를 이용한 FDM(Fused Deposition Modeling), 시트 적층 공정을 이용한 LOM(Laminated object manufacturing) 등이 있다. 또한 3D 프린터는 복잡한 3차원 형상도 제작이 가능하고 기존 NC기술과 비교하여 제품생산에서 소요되는 시간과 비용을 50~90%까지 절감할 수 있는 장점을 가지고 있어 다양한 분야에 적용이 되고 있다.¹⁾ 최근에는 조형물의 표면에 회로패턴을 제작하는 MID(Molded interconnect device)나 임베디드 분야에도 활발히 연구가 진행되고 있으며, 회로패턴을 제작하기 위해서는 표면 거칠기를 요구하고 있다.

하지만, 3D 프린터로 제작한 조형물은 각 단면 층과 층 사이에서 생기는 계단형상과 면적오차 때문에 표면 거칠기가 거칠어지는 문제점이 있다. 그로 인해 조형물의 표면 층과 층 사이에 패턴된 소재가 스며들어 패턴형성이 불가하기 때문에 조형물의 표면 거칠기를 요구되고 있는 상황에서 조형물의 표면 거칠기를 저감시키기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다.^{2),3)} 그 예로 Mukesh K. Agrwala 등은 FDM 장치로 생성한 조형물의 표면과 내부에서 발생하는 문제점과 하만경, 전제역 등은 주사각격과 표면경사각이 표면 거칠기에 미치는 영향을 연구하였다.^{4),5)}

본 논문에서는 3D 프린터로 제작한 조형물의 표면 거칠기를 저감하기 위해 광경화성 수지를 이용한 3D 프린팅 시스템을 개발하고, 조형물의 표면 거칠기에 영향을 미치는 패턴두께를 이용하여 표면 거칠기 저감에 대한 공정연구를 진행하였다. 광경화성 수지는 매움현상이 발생하게 되어 광조형물의 표면 거칠기를 감소할 수 있는 특성을 가지고 있다.⁶⁾ 광경화성 3D 프린팅 시스템을 이용하여 패턴두께별 광조형물을 제작하였고, 표

면 거칠기 비교분석을 통해 광조형물의 표면 거칠기를 저감을 확인하였다. 또한 광조형물의 표면 정밀도 확인을 위해 FDM방식의 조형물의 표면 거칠기 비교분석 및 적층면 회로 패턴제작을 통해 광조형물의 표면 정밀도를 확인하였다.

2. 광경화성 3D 프린팅 공정원리

2.1 면적오차

3D 프린터로 제작한 조형물의 표면에는 각 층과 층 사이에서 생기는 면적오차와 계단형상에 의해서 표면이 거칠어진다. 면적오차는 조형물의 수직단 단면으로 절단하였을 때 나타나는 윤곽의 면적을 뜻하고, Fig. 1과 같은 회색부위로 나타낸다. 면적오차에 영향을 미치는 변수들을 Fig. 2와 같이 경사진 표면의 조형물을 예로 나타내었다.⁷⁾

조형물의 표면에 발생한 계단형상에 의한 면적 오차는 수평한 층과 경사면 사이의 직각삼각형 abc의 면적과 같다. 이러한 면적오차는 패턴두께와 조형물의 경사각과의 관계로 표현되어질 수 있으며, 한 층에서의 면적오차는 식 (1)로 나타낼 수 있다.

$$Ae = \frac{1}{2}(ac)(bc) \quad (1)$$

그리고 $bc = \frac{ac}{\tan\theta}$ 이며, $ac = t$ 이며, θ 는 경사각이고 t = 패턴두께이다.

그러므로 각 변수를 대입하면 다음 식 (2)와 같다.

$$Ae = \frac{1}{2} \cdot \frac{ac}{\tan\theta} \cdot t = \frac{t^2}{2\tan\theta} \quad (2)$$

여기서 전체 면적오차를 구하기 위해 층의 개수(n)을 곱하면 다음 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$At = \frac{1}{2} \cdot \frac{t}{\tan\theta} \cdot t \cdot n = \frac{t^2}{2\tan\theta} \cdot n \quad (3)$$

위의 식 (3)에서 패턴두께가 전체 면적오차에 큰 영향을 미치는걸 알 수 있었다. 또한 패턴두께가 낮을수록 각 층과 층 사이에 생기는 면적오차가 작아지며 이에 따라 표면 거칠기를 저감할 수 있다는걸 확인하였다.⁸⁾

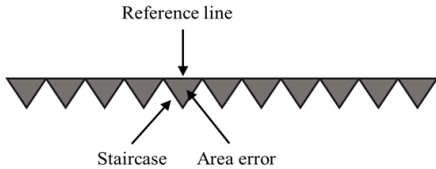


Fig. 1 Area error

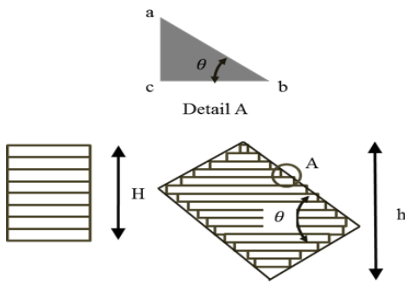


Fig. 2 Area error in a part oriented at an angle θ

2.2 광경화성 3D 프린팅 시스템

광조형물의 패턴두께에 따른 표면 거칠기 저감하기 위해 Fig. 3과 같이 시스템을 구성하였다. Fig. 3은 광경화성 수지를 이용한 3D 프린터 시스템 모식도이다. 구성요소로는 노즐(Nozzle), UV 경화기(UV laser), 전자식 공압펌프(Electronic pneumatic pump), X-Y-Z축 자동 스테이지(X-Y-Z Auto stage), 그 외에 그래픽 LCD 컨트롤러, IP 카메라로 구성되어 있다.

광경화성 3D 프린팅 방법은 전자식 공압펌프로 노즐을 통해 소재를 토출하여 X-Y-Z축 자동 스테이지가 프린팅 방향으로 이동하면서 토출된 소재가 메니스커를 유지하여 패턴을 형성한다. 노즐을 통해 토출된 소재가 패턴을 형성하면 UV 경화기를 이용하여 소재를 경화시킨다. 이와 같은 반복적인 프린팅 방식을 통해 한 층씩 적층하여 조형물을 제작하는 방식이다.

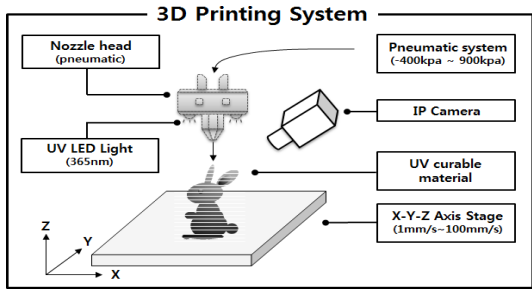


Fig. 3 Photo-curable 3D Printing System Schematic

2.2.1 루어락 피팅 노즐

노즐은 소재가 토출하여 패턴을 형성할 때 패턴선폭과 두께에 영향을 미치며, 내경의 직경에 따라 패턴선폭 및 패턴두께를 제어할 수 있다. 노즐의 여러 가지 종류 중 ‘루어락 피팅(Luer lock fittings)’ 노즐로 선정하였고, Fig. 4는 루어락 피팅 노즐 구성도이다. 루어락 피팅 노즐은 다양한 노즐 내경사이(100~400 μm)로 구성되어 있어 패턴선폭 및 패턴두께를 정밀하게 제어할 수 있다. 또한 노즐의 미세한 내경을 구비할 수 있는 금속 모세관으로 구성되어 노즐의 압력손실을 줄일 수 있고, 노즐 손상 시 작업자의 탈부착이 용이하도록 텡 허브가 설계되어 있다.

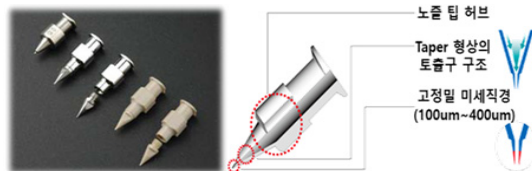


Fig. 4 Luer lock fittings Nozzle configuration

2.2.2 UV 경화기

UV 경화기는 노즐을 통해 토출된 소재가 패턴을 형성할 때 소재의 붕괴와 박리현상을 막기 위해 소재를 경화시키는 역할을 한다. 또한 소재 경화를 통해 토출구의 메니스커스를 보호하는 역할을 동시에 수행한다. Fig. 5는 UV 경화기 설계 및 제작사진이다. 소재가 토출될 때 다방향에서 UV 광원을 조사하여 일정한 패턴을 형성할 수 있도록 원형모양의 지지대로 설계하였다. 내부에는

UV 레이저를 노즐 끝에 집광시키기 위해 LED 8 개를 입사각 45°로 설계하였다. UV 광량을 제어 하여 메니스커스를 유지하면서 조형물 제작 시, 층이 붕괴되지 않도록 한다. UV 광량은 365 nm 파장을 방사하며, 제어 정밀도는 1 mW/cm²으로 최대 100 mW/cm² 출력이 가능하게 설계하였다.

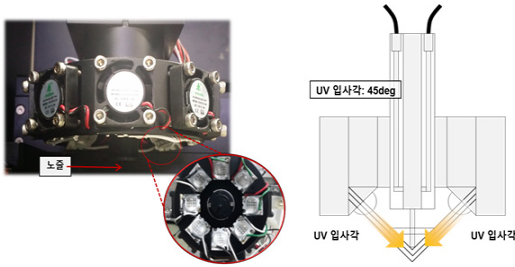


Fig. 5 UV laser modeling and manufacture

2.2.3 전자식 공압펌프

전자식 공압펌프는 노즐을 통해 소재를 토출시키며, 소재의 토출량을 제어하는 역할을 한다. 소재의 토출량에 따라 패턴선폭 및 패턴두께가 결정되며, 조형물의 표면 거칠기에 큰 영향을 미친다. Fig. 6은 전자식 공압펌프 구성도이다. 소재 토출의 ON/OFF를 제어하기 위해 솔레노이드 밸브를 구성하여 정압/차압 선택적 제어가 가능하며, 최종 출력공압 상태를 측정하기 위해 압력센서를 구비하였다. 그리고 레귤레이터, 에어필터를 구성함으로써 토출량을 정밀하게 제어할 수 있도록 제작하였다. 제어범위로는 -100 ~ 900 kPa이며, 토출량을 정밀하게 제어할 수 있도록 제어 분해능 0.1 kPa이 되도록 설계 · 제작하였다.

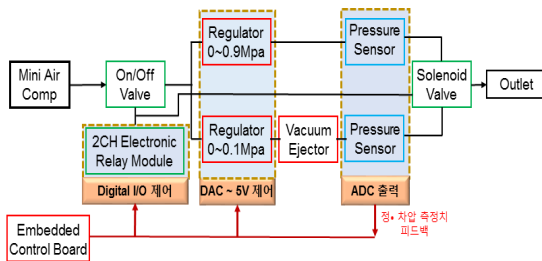


Fig. 6 Electronic pneumatic pump diagram

2.2.4 X-Y-Z축 자동 스테이지

X-Y-Z축 자동 스테이지는 프린팅 방향으로 멘델방식(전-후, 좌-우)과 Z축이 상-하로 이동하면서 조형물을 제작할 수 있는 역할을 한다. X-Y축에는 노즐헤드가 장착되어 있고, Z축에는 베드를 장착하여 구비하였다. X-Y-Z축 모터는 스텝핑 모터(Stepping motor)를 사용하였고, 스텝핑 모터의 이송속도는 1~100 mm/s까지 선택적으로 적용이 가능하여 조형물 제작시간을 제어할 수 있고, 소재의 토출량에 따른 패턴두께를 제어하기 위해 정밀 제어도는 50 μm로 구성하였다.

3. 패턴두께에 따른 표면 거칠기 저감

3.1 실험방법

면적오차법에 이론에 따라 패턴두께는 광조형물의 표면 거칠기에 큰 영향을 미친다. 패턴두께가 얇아야 면적오차가 작아지고 광조형물의 표면 거칠기가 감소된다.

우선, 광조형물을 제작하기 위해서는 패턴두께별 공정조건이 필요하다. 공정조건으로는 스테이지 속도(Stage velocity), 출력공압(Out pneumatic), UV광원 세기(UV laser power), 노즐 끝과 기판의 사이(Stand-off), 노즐 사이즈(Nozzle size)이다. 패턴두께를 결정하는 스테이지 속도, 출력공압을 변수로 선정하고 UV 광원 세기, 노즐 끝과 기판의 사이, 노즐 사이즈는 고정변수로 선정하여 패턴두께 측정 실험을 진행하였다. Table 1은 패턴두께 측정실험을 위한 공정조건 값이다.

패턴두께 실험을 통해 최소패턴두께에서 최대 패턴두께까지 구간의 공정조건을 확보하여 광조형물 제작 및 표면 거칠기 비교분석을 통해 패턴두께에 따른 표면 거칠기 저감을 하였다. 그리고 광조형물의 표면 정밀도 확인을 위해 동일한 공정조건에서 FDM 방식으로 출력한 조형물의 표면 거칠기 측정 및 적층면의 회로 패턴제작실험을 진행하였다.

Table 1 Process parameters

Nozzle-size	400 μm
Out-pneumatic	20 ~60 kPa
Stand-off	200 μm
UV power	30 mw/cm ²
Stage velocity	40 ~ 70 mm/s

3.2 실험결과 및 고찰

3.2.1 패턴두께 실험

광조형물 제작에는 패턴두께별 공정조건이 필요하여 패턴두께를 결정하는 스테이지 속도와 출력공압에 따른 패턴두께에 대한 실험을 진행하였다. Fig. 7은 스테이지 속도 40~70 mm/s와 출력공압 20~60 kPa에 따른 패턴두께에 대한 그래프이다. 동일한 스테이지 속도에서 출력공압이 높아질수록 소재의 토출량이 증가하여 패턴두께는 증가하는 현상을 알 수 있었다. 반면에, 동일한 출력공압에서 스테이지 속도가 증가 할수록 패턴두께는 감소하는 현상을 볼 수 있었고 스테이지 속도가 증가하고 출력공압이 감소할수록 얇은 패턴두께를 얻을수 있었다. 그리고 일정한 패턴이 유지되지 않고 중간에 끊어지거나 물결 모양과 같은 패턴형상이 발생하였다. 이는 스테이지 속도와 소재 토출량이 적절한 균형을 이루지 못해 메니스커스가 붕괴되기 때문이다. 따라서 패턴두께 실험을 통하여 패턴두께별 공정조건을 얻었고, 일정한 패턴형상을 프린팅 하기 위해서는 메니스커스의 유지가 필요하다.

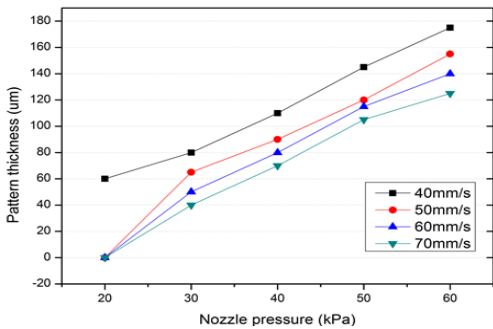


Fig. 7 Pattern thickness according to the stage speed and pneumatic

3.2.2 토출량에 따른 메니스커스 특성

패턴두께에 대한 실험을 통하여 소재 토출량과 스테이지 속도의 관계가 적절한 균형을 이루지 못하면 노즐의 메니스커스가 붕괴되어 일정한 패턴형성이 불가하다는걸 알 수 있었다. Fig. 8은 토출량에 따른 메니스커스 특성에 관한 관계식이고 Fig. 9는 메니스커스 붕괴 시 마이크로스코프 (Olympus BX51M)로 측정된 결과이다. 소재 토출량이 스테이지 속도에 비해 과다토출되거나 소재 토출량이 부족하게 되면 토출되는 소재가 완전히 소비되지 않고 노즐 끝 부분에 묻어 남아있게 된다. 노즐 끝 부분에 묻어있는 소재들이 UV경화기에 의해 경화가 되면서 노즐 내부까지 경화가 일어나고 노즐이 막히게 되면서 토출이 멈추는 현상을 확인 하였다. 따라서 토출량과 스테이지 속도가 적절한 균형을 이루어야 메니스커스의 유지가 되면서 일정한 패턴을 형성할 수 있다.

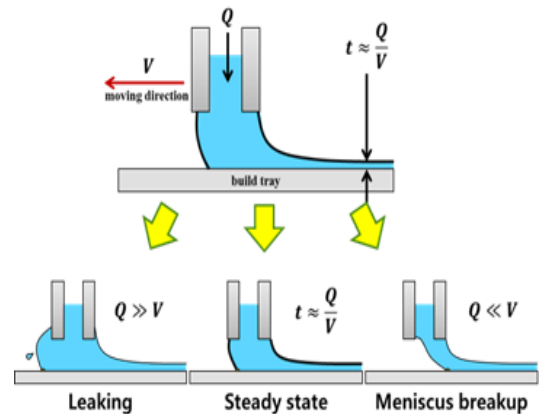


Fig. 8 Meniscus characteristic according flux and stage velocity

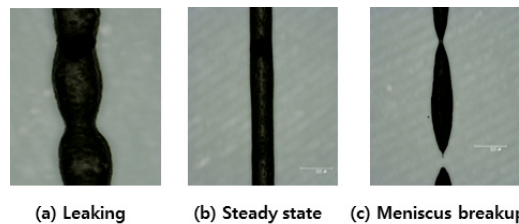


Fig. 9 Pattern picture of the menicus form

3.2.3 패턴두께에 따른 조형물 제작

패턴두께 실험을 통해 얻어진 패턴두께별 공정조건 중 메니스커스를 유지하고 일정한 패턴을 형성하는 공정조건과 한 층의 두께가 필요하다. 한 층의 두께는 한 층씩 적층할 때 상승하는 Z축 높이이며, 패턴두께보다 높아야 메니스커스 형상을 유지하며 적층할 수 있다. 일정한 패턴을 형성하는 공정조건 중 최소패턴두께 65 μm 와 최대패턴두께 175 μm 까지 약 40 μm 씩 증가하는 구간의 공정조건을 확보하여 조형물을 제작하였다. 동일한 패턴두께일 경우, 조형물의 제작시간을 줄이기 위해 스테이지 속도가 빠른 공정조건을 우선순위로 하였다. 그리고 확보된 패턴두께별 공정조건에 따라 한 층의 두께 값을 얻기 위해 일련의 실험을 진행하였고, Table 2와 같은 광조형물 제작 공정조건을 확립하여 Fig. 10(a)와 같은 20 mm³의 정사면체 조형물을 제작하였다.

또한 광조형물의 표면 정밀도 확인을 위해 FDM방식으로 동일공정조건에서 조형물 제작하였다. 동일한 공정조건으로는 패턴두께에 영향을 미치는 스테이지 속도, 한 층의 두께, 노즐 사이즈, 노즐 끝과 기관의 거리를 선정하였다. Table 3은 FDM방식으로 조형물을 제작하기 위한 공정조건이며 Fig. 10(b)와 같은 조형물을 제작하였다. 광조형물의 패턴두께와 비교하기 위해 패턴두께 실험을 진행하였다. 그 결과, Table 2와 Table 3의 최소패턴두께에서 광조형물의 패턴두께 65 μm , FDM방식으로 제작한 조형물의 패턴두께 220 μm 로 광조형물의 패턴두께가 155 μm 더 낮아 광조형물의 표면 정밀도를 예상할 수 있었다.

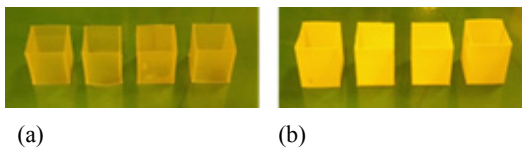


Fig. 10 (a) Photocurable sculpture (b) FDM sculpture

Table 2 Process parameters for making sculpture photocurable

Process parameters	case 1	case 2	case 3	case 4
Nozzle-size(μm)	400	400	400	400
Layer thickness (μm)	150	200	250	300
Stand-off (μm)	200	200	200	200
Stage velocity (mm/s)	50	70	60	40
UV power (mw/cm ²)	30	30	30	30
Out-pneumatic (kPa)	30	50	60	60
Pattern thickness (μm)	65	105	140	175

Table 3 Process parameters for making sculpture FDM

Process parameters	case 1	case 2	case 3	case 4
Nozzle-size(μm)	400	400	400	400
Layer thickness (μm)	150	200	250	300
Stand-off (μm)	200	200	200	200
Stage velocity (mm/s)	50	70	60	40
Pattern thickness (μm)	220	260	290	330

3.2.4 조형물 표면 거칠기 비교분석

광조형물의 표면 거칠기 저감 및 표면 정밀도 확인을 위해 두 가지 방식의 프린터로 제작한 조형물들의 표면을 3차원 나노형상측정 시스템을 사용하여 측정을 하였고 Table 4와 같은 실험결과를 얻었다. Table 4은 두 가지 프린터 방식으로 출력한 조형물들의 표면 거칠기 측정 값이다. 광조형물의 최소패턴두께 65 μm 에서 표면 거칠기 값 4.7 μm , 최대패턴두께 175 μm 에서 표면 거칠기 값 8.7 μm 로 패턴두께가 약 40 μm 씩 감소하는 구간에서 표면 거칠기 값이 약 1.2 μm 씩 저감하였다. 이는 패턴두께가 감소할수록 층과 층사이 단찬에 의해 생기는 면적오차가 작아지기 때문에 조형물의 표면 거칠기가 감소하기 때문이다. 또한 Table 4의 결과 값을 보면 최소패턴두께에서 광조형물

의 표면 거칠기는 4.7 μm , FDM 방식으로 출력한 조형물의 표면 거칠기는 10.2 μm 로 광조형물의 표면 거칠기 값이 5.5 μm 만큼 더 낮은 수치를 나타내었다. Fig. 11(a),(b)는 3차원 나노 형상 측정 시스템으로 조형물들의 적층면을 측정된 결과이다. 광조형물 적층면의 해상도가 FDM 방식으로 출력한 조형물에 비해 매끄러운 적층면을 보였다. 이는, 광조형물의 패턴두께가 FDM 방식으로 제작한 조형물의 패턴두께보다 얇아 면적오차가 작아지기 때문이다. 따라서 패턴두께가 감소할수록 광조형물의 표면 거칠기는 저감하고, 적층면의 해상도가 증가한다.

Table 4 Measure of Surface Roughness

Printer Technology	Pattern thickness (μm)	Surface roughness (μm)
Photocurable sculpture	65	4.7
	105	5.9
	140	7.1
	175	8.7
FDM sculpture	190	9.4
	245	13.3
	305	17.4
	350	21.6

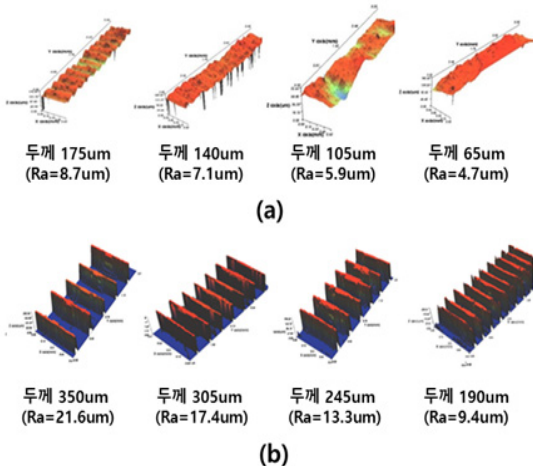


Fig. 11 (a) Photocurable sculpture Surface roughness (b) FDM sculpture Surface roughnes

3.2.5 조형물 적층면 회로 패턴 제작

광조형물의 표면 정밀도 확인을 위해 두 가지 프린터 방식으로 제작한 조형물의 적층면에 회로 패턴제작 실험을 진행하였다. Fig. 12(a)는 광조형물의 적층면에 회로 패턴을 제작하고 마이크로스코프로 측정된 결과이다. 회로 패턴의 소재가 층과 층사이에 스며들지 않고 일정한 패턴 형상을 볼 수 있었다. 이는 패턴두께가 얇아 층과 층사이의 면적오차가 작아져 매끄러운 적층면을 형성 때문이다. Fig. 12(b)는 FDM 방식으로 제작한 조형물의 적층면에 회로 패턴을 제작하고 실제 패턴을 측정된 결과이다. 패턴두께가 두꺼워서 층과 층 사이의 면적오차가 커져 거친 적층면 형성 때문에 회로 패턴의 소재가 스며드는 현상이 발생하여 패턴 형성이 불가하였다. 따라서 광조형물의 표면에 회로 패턴을 제작함으로써 표면 정밀도에 대한 확인을 하였다.

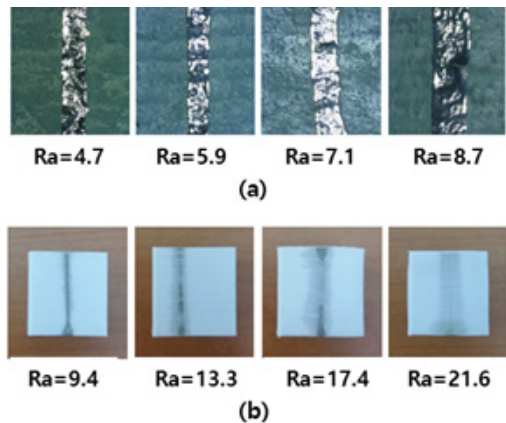


Fig. 12 (a) Conductive circuit pattern of Photocurable sculpture (b) Conductive circuit pattern of FDM sculpture

4. 결 론

최근 3D프린터로 출력한 조형물이 층과 층사이에 생기는 면적오차로 인해 표면 거칠기가 거칠어지는 현상이 발생한다. 이로 인해 표면 거칠기를 요구하는 MID나 임베디드와 같은 분야에는 적용이 어려운 상황이다.

본 논문에서는 광경화성 수지를 이용한 3D 프린팅 시스템을 개발하고, 패턴두께를 이용하여 광조형물의 표면 거칠기 저감에 대한 공정연구를 진행하였다. 패턴두께에 따른 공정조건을 확보하고, 최소패턴두께 65 μm 에서 표면 거칠기 값 4.7 μm , 최대패턴두께 175 μm 에서 표면 거칠기 값 8.7 μm 로 패턴두께가 약 40 μm 씩 감소하는 구간에서 표면 거칠기 값이 약 1.2 μm 씩 저감하였다. 또한, 광조형물의 표면 정밀도 확인을 위해 FDM 방식으로 출력한 조형물과 표면 거칠기 비교측정을 통해 광조형물의 표면 거칠기가 5.5 μm 만큼 저감된 수치를 나타내었고 광조형물의 적층면에 회로 패턴의 소재가 스며들지 않고 제작이 가능하였다. 따라서, 패턴두께가 낮아지면 면적오차가 작아져 광조형물의 표면 거칠기를 저감 할 수 있었고, 이에 따라 광조형물의 표면 정밀도가 향상되었다.

후 기

이 논문은 2015년 정부(미래창조과학부)의 재원으로 국가과학기술연구회 금속 3D 프린팅 융합연구단 사업(No. CRC-15-03-KIMM)의 지원과 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2014R1A2A1A01007699).

References

1. Jae-Won Choi and Ho-Chan Kim, 2015, "3D Printing Technologies - A Review", Journal of The Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 14, No. 3, pp. 1-8.
2. Hae Yong Yun and Ho Chan Kim, 2014, "Basic Research For The 3DCD(3D Circuit Devices)", Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 31, No. 12, pp. 1061-1066.
3. D. K. Ahn, H. C. Kim, Seok-Hee Lee, 2001, "Selection of Bulid Orientation for Reducing Surface Roughness with Stereolithography Parts", Korean Society Of Precision Engineering, No. 10, pp. 137-140.
4. M. K. Agarwala, V. R. Jamalabad, Ahmad Safari, Philip J. Whalen and Stephen C. Danforth, 1995, "Structural quality of parts processed by fused deposition", Rapid Prototyping Journal, Vol. 2, No. 4, pp. 4-19.
5. M. K. Ha, J. U. Jun and J. S. Chung, 2001, "The influence of surface roughness on injection interval and part angle at FDM," Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 10, No. 5, pp. 104-109.
6. D. K. Ahn, H. C. Kim, H. D. Jeong and Seok Hee Lee, 2004, "A Study on Improving the Surface Roughness of Stereo lithography Parts", Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 21, No. 9, pp. 196-203.
7. J. U. Jun, H. J. Kwon, S. K. Kim, J. A. Kim, J. S. Jung and M. K. Ha, 2002, "Prediction of sphere surface by the theoretical area error at FDM", Korean Society Of precision Engineering, No. 10, pp. 262-265.
8. J. U. Jun, J. S. Jung, Y. M. Hwang, S. K. Kim, J. A. Kim, J. Y. Ke and M. K. Ha, 2002, "A Study on The Surface Roughness and Area Error At FDM", KSMTE The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, No. 10, pp. 24-29.