



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

광경화성 폴리머 소재기반의
표면조도 향상을 위한 3D 프린팅
공정연구

濟州大學校 大學院

메카트로닉스工學專攻

金 永 樹

2017 年 2 月



광경화성 폴리머 소재기반의 표면조도 향상을 위한 3D 프린팅 공정연구

指導教授 崔 勁 賢

金 永 樹

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2017 年 2 月

金永樹의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長

委 員

委 員

임종환
최경현
도양희



濟州大學校 大學院

2017 年 2 月



A Study on 3D Printing process for
improving surface roughness based on
Photo-curable polymer material

Young-Su Kim

(Supervised by professor Kyung-Hyun Choi)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement
for the degree of Master of Engineering

2017 . 2 .

This thesis has been examined and approved.

Jong Hwan Lim

Thesis director, Jong-Hwan Lim, Prof. of Mechatronics. Eng.

Yang/hoi Doh

Thesis director, Yang-Hoi Doh, Prof. of Electronic. Eng.

Kyung-Hyun Choi

Thesis director, Kyung-Hyun Choi, Prof. of Mechatronics. Eng.

February 2017

Date

Department of Mechatronics Engineering

GRADUATE SCHOOL

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

LIST OF FIGURES	
LIST OF TABLES	
ABSTRACT	
I. 서 론	1
1. 연구배경	1
2. 연구동향 및 필요성	4
II. 광경화성 폴리머 소재기반의 3D 프린팅 공정원리	6
1. 광경화성 폴리머 에폭시 소재 특성	6
2. 면적오차법	7
3. 광경화성 폴리머 소재 토출 메커니즘 분석	8
III. 광경화성 폴리머 소재기반의 3D 프린팅 시스템 개발	10
1. UV 경화기 일체형 노즐헤드 시스템 개발	12
1) ‘루어락’ 피팅 노즐 개발	12
2) UV 레이저 경화기 시스템 개발	13
2. 고정밀 전자식 공압펌프 시스템 개발	14
3. G코드 변환 소프트웨어 프로그램 개발	15
IV. 패턴두께에 따른 광조형물의 표면 거칠기 제어 공정연구	20
1. 패턴두께에 따른 광조형물 제작 실험	20
1) 토출 유량에 따른 메니스커스 특성 검사	20

2) 출력공압과 프린팅 속도에 따른 패턴두께 실험 및 결과	22
3) 패턴두께별 공정조건 선정 및 광조형물 제작	24
2. 패턴두께에 따른 광조형물 표면 거칠기 분석	26
1) 패턴두께에 따른 광조형물 표면 거칠기 측정 및 결과	26
2) 광조형물의 표면 정밀도 비교 및 분석	31
 VI. 결 론	 37
 참 고 문 헌	 39

List of Figuers

Fig. 1 3D printing laminate precess	1
Fig. 2 Characterization of photo-curable epoxy material	6
Fig. 3 Theoretical numerical analysis of area error method	8
Fig. 4 Micro-Nozzle discharge mechanism summary(a: Relationship between shear rate and shear stress according to material properties, b: Discharge mechanism of Micro-Nozzle)	9
Fig. 5 3D printing system configuration diagram based photo-curable polymer material	10
Fig. 6 Photo-curable 3D printing system configuration and prototyping	11
Fig. 7 Pressure loss due to nozzle structure	12
Fig. 8 Pressure loss of nozzle	13
Fig. 9 UV curing module integrated nozzle head and UV-LED arrangement structure	14
Fig. 10 Configuration diagram of Electronic pneumatic pump system	15
Fig. 11 Main screen of G code conversion software	16
Fig. 12 Slide viewer and G code simulator	16
Fig. 13 Path creation setup system	17
Fig. 14 Path setting function for printing production time control	18
Fig. 15 System communication setting function	19
Fig. 16 3D modeling shape size setting function	19
Fig. 17 Analysis of relationship between discharge flow rate and printing speed	20
Fig. 18 Characteristics of meniscus according to discharge flow rate and printing speed	21
Fig. 19 Printing pattern characteristics according to meniscus mode	21
Fig. 20 Experimental results of pattern thickness according to output air pressure and printing speed	23

Fig. 21 Pattern thickness experiment sample	24
Fig. 22 Photo-curable sculpture making of pattern thickness	25
Fig. 23 Surface measurement result of Photo-curable sculpture 1~4 using 3D Nanometer	26
Fig. 24 Average surface roughness and standard deviation graph of Photo-curable sculpture according to pattern thickness	28
Fig. 25 Surface shape measurement results of photo-curable sculpture sample 1,2	29
Fig. 26 Surface shape measurement results of photo-curable sculpture sample 3,4	30
Fig. 27 The sculpture made by FDM 3D printer	32
Fig. 28 Surface measurement result of the sculpture made by FDM 3D printer	32
Fig. 29 Comparative analysis of surface roughness between photo-curable sculpture and FDM sculpture	34
Fig. 30 Measurement result of conductive circuit pattern production on the surface of Photo-curable sculpture	35
Fig. 31 Result of the conductive circuit pattern production on the surface of the sculpture made by FDM 3D printer	35
Fig. 32 Measurement result of conductive circuit pattern conductivity on the surface photo-curable sculpture and FDM sculpture	36

List of Table

Table. 1 3D printer technology classification due to materials	3
Table. 2 Process conditions for pattern thickness experiment	22
Table. 3 Photo-curable sculpture process conditions according to pattern thickness	25
Table. 4 Four times surface roughness measurement on one side of Photo-curable sculpture sample 1~4	27
Table. 5 Manufacturing conditions of the sculpture made by FDM 3D printer	31
Table. 6 Photo-curable sculpture of sample 1~4 according to pattern thickness and surface roughness value of the sculpture made by FDM 3D printer	33

ABSTRACT

Recently, 3D printing technology has been applied to various fields. In the manufacturing market of automobile and electronic products is in order to rapidly develop and launch new products. MID, embedded, etc., such conductive circuit pattern research on 3D printing sculpture surface making is actively underway. But, there is a problem that the surface of the sculpture made by 3D printing has a stepped shape and an area error due to a step formed between each layer and the layer, resulting in a rough surface of the sculpture. Therefore, it is necessary to study the surface roughness of the sculpture because the conductive circuit patterns on the surface of the sculptured material permeate between the layers and the layer can not be formed uniformly. In this paper, a 3D printing system based on photo-curable polymer material was developed and process studies were carried out to improve the surface roughness of photo-curable sculpture. The surface roughness of the photo-curable sculpture is determined by the area error, and the area error can be controlled by the pattern thickness. Experiments were conducted on the pattern thickness using the output pneumatic pressure and the printing speed as process variables controlling the pattern thickness. Photo-curable sculpture was made by selecting the process conditions according to the pattern thickness. The surface roughness of the photo-curable sculpture fabricated by the pattern thickness was measured using a 3D nano profiling system, and the change of the surface roughness of the photo-curable sculpture was confirmed according to the pattern thickness. In order to confirm the surface accuracy of the photo-curable sculpture, the sculpture was fabricated under the same process conditions by using FDM 3D printer which is widely known and compared with the surface roughness of the photo-curable sculpture. In addition, the surface precision photo-curable sculpture was confirmed by conducting conductive circuit pattern fabrication experiments on the surface of the photo-curable sculpture.

I. 서 론

1. 연구배경

최근 다양한 소재를 이용하여 CAD(Computer Aided Design) 설계도에 따라 만들어진 STL(STereoLithography)파일 형식의 3차원 모델링 형상을 한 슬라이스씩 분할하여 소재를 적층 제조법(Additive Manufacturing)으로 3차원 형상의 조형물을 제작하는 3D 프린팅 기술이 화제가 되고 있다.[1] 3D 프린팅 기술은 Fig. 1과 같이 기존의 기계가공 · 레이저 등을 절삭가공(Subtractive Manufacturing)을 이용하여 생산품 제작 후에 서로 다른 생산품들을 조립하는 방식과 반대되는 개념으로 적층 제조법을 사용함으로써 기존의 방식으로 복잡한 구조를 갖는 생산품을 제작할 수 없는 3차원 형상을 제작할 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한, 재료의 소모가 적으며 공급라인(Supply chain)을 간소화하여 화석연료의 사용을 줄일 수 있고, 제조 기간 및 운송비 등을 절약할 수 있다.[2][3]

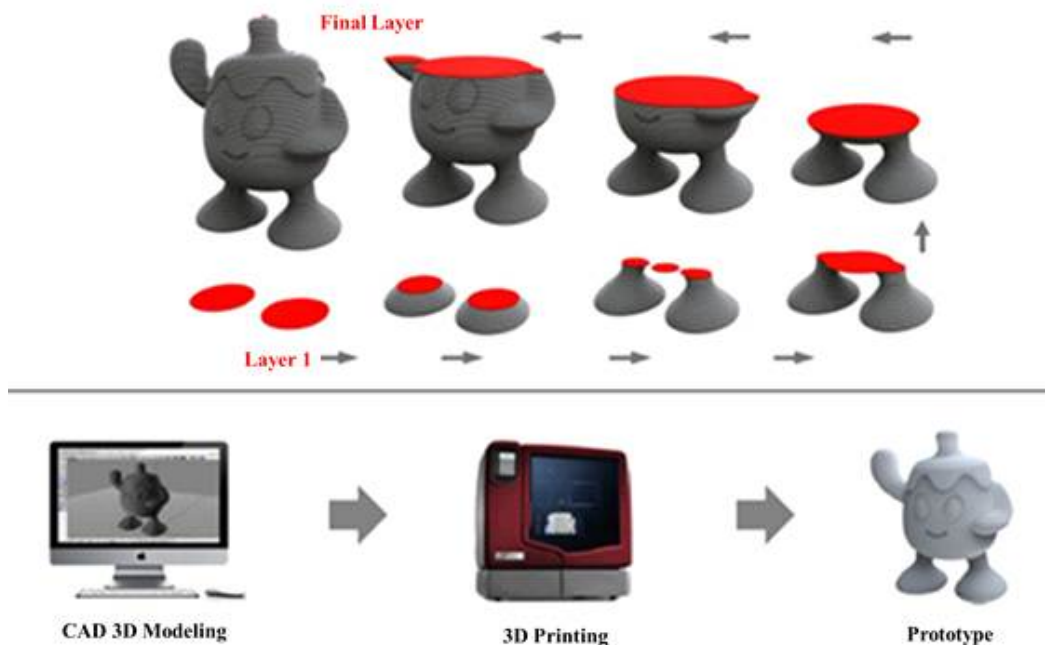


Fig. 1 3D printing laminate process

3D 프린팅 기술로는 액상수지, 파우더 분말, 필라멘트 등 다양한 소재에 따라 Table 1과 같이 구분할 수 있다. 액상수지 기반의 방식들은 일반적으로 SLA(Stereolithography), DLP(Digital Light Processing), MJM(Multi Jetting Modeling), Polyjet 방식이 있으며, 액체 광경화성 수지를 이용해 적층하며, UV 레이저로 경화시키는 기술이다. 파우더 분말 기반의 방식으로는 SLS(Selective Laser Sintering), SLM(Selective Laser Melting), 3DP(Three Dimensional Printing) 방식이 사용되고 있으며, 파우더를 이용하여 선택적으로 고출력 Fiber 레이저에 노출시켜 용융시키거나, 소결하여 반복하여 적층하는 기술이다. 필라멘트를 이용한 3D 프린팅 기술로는 가장 대표적으로 널리 알려진 필라멘트 형태의 열가소성 물질을 노즐 안에서 녹여 압출시키는 FDM(Fused Deposition Modeling) 방식이 있으며, 그 외에 LOM(Laminated Object Manufacturing), EBM(Electron Beam Melting), DMD(Direct Metal Deposition), EBF(Electron Beam FreeForm Fabrication) 등이 있다.[4][5] 이러한 3D 프린팅 기술을 이용하여 다양한 분야에 적용되고 있는 가운데 최근에는 자동차, 전자제품 등의 제조시장은 신제품을 신속하게 개발 및 출시를 하기 위하여 3D 프린팅 기술이 많이 사용되고 있다. 일반적으로 제조시장의 부품 생산 공정은 사출성형으로 제작된 플라스틱 부품의 표면에 배선을 연결하는 방식으로 시간, 비용, 인력이 많이 요구되는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 MID(Molded Interconnect Device)나 임베디드(Embedded)분야에 3D 프린팅 기술을 적용하여 활발히 진행 중이며, 이 기술은 3D 프린팅으로 제작한 조형물의 표면에 전도성 회로 패턴을 제작하는 단일 공정기술이다. 3D 프린팅으로 제작한 조형물의 표면에 전도성 회로 패턴을 제작하기 위해서는 조형물의 표면이 매끄러워야 전도성 회로 패턴이 붕괴되지 않고 일정한 패턴을 형성할 수 있다.[6]~[9] 하지만, 3D 프린팅으로 제작한 조형물의 표면은 각 층과 층 사이에서 생기는 단차에 의해 계단형상과 면적오차가 발생하여 조형물의 표면이 거칠어지는 문제점이 있다. 이로 인해 조형물의 표면의 전도성 회로 패턴들이 층과 층 사이에 스며들어 일정한 패턴이 형성하기 불가능한 문제점이 있다.[10][11]

Table 1 3D printer technology classification due to materials

적층방식	기술명	정의
Extrusion (압출방식)	FDM	<ul style="list-style-type: none"> 필라멘트 형태의 열가소성 물질을 노즐 안에서 녹여 얇은 필름형태로 출력하는 방식으로 적층
Jetting (분사방식)	MJM	<ul style="list-style-type: none"> 프린터 헤드에서 광경화성 수지와 WAX를 동시분사 후, UV Light로 고형화하는 방식으로 적층
	Polyjet	<ul style="list-style-type: none"> 광경화와 잉크젯 방식의 혼합
	3DP	<ul style="list-style-type: none"> 노즐에서 액체 상태의 컬러 잉크와 경화물질을 분말원료에 분사하는 방식으로 적층
액체 (Light Polymerised)	SLA	<ul style="list-style-type: none"> 액체 광경화성 수지가 담긴 수조 안에 저전력 및 고밀도의 UV 레이저를 투사하여 경화시키는 방식으로 적층
	DLP	<ul style="list-style-type: none"> 액체 상태의 광경화성 수지에 조형하고자 하는 모양의 빛을 투사하여 적층
고체 (Granular Sintering)	SLS	<ul style="list-style-type: none"> 베드에 도포된 파우더에 선택적으로 레이저를 조사 및 소결하고, 파우더를 도포하는 공정을 반복하여 적층
	SLM	<ul style="list-style-type: none"> 도포된 금속 파우더에 선택적으로 고출력 레이저를 조사하여 용융시키는 방식으로 적층
	EBM	<ul style="list-style-type: none"> 고진공 상태에서 전자빔을 활용하여 금속 파우더를 용해하는 방식으로 적층
Directed Energy Deposition	DMD	<ul style="list-style-type: none"> 지지대 역할 금속 표면에 고출력 레이저 빔을 조사하여 일시적으로 용융풀을 생성하고, 여기에 금속 분말을 공급하여 클래딩 층을 형성
Wire(인발)	EBF	<ul style="list-style-type: none"> 와이어 형태의 금속 원료에 전자빔을 조사시켜 경화시키는 방식으로 적층
Sheet Lamination	LOM	<ul style="list-style-type: none"> 모델의 단면 형상대로 절단된 접착성 종이, 플라스틱, 금속 라미네이트 층 등을 접착제로 접합하여 조형

2. 연구동향 및 필요성

최근 3D 프린팅으로 제작한 조형물의 표면 거칠기 개선하기 위해 다양한 연구가 활발히 진행 중이며, 광경화성 수지소재를 이용한 3D 프린팅 기술과 필라멘트 소재를 이용한 FDM 기술이 주로 적용이 되고 있다. 전재억 등은 FDM 3D 프린팅 기술을 이용하여 조형물의 표면 경사각 변화에 따른 표면 거칠기 변화를 측정하였고, 면적오차법을 이용하여 면적오차와 표면 거칠기의 상호관계 분석에 대한 연구를 하였다.[12][13] 하만경 등은 FDM 3D 프린팅을 이용하여 두 개의 노즐을 사용해 주사량 및 주사간격 변화에 따라 조형물을 제작하고, 조형물의 모델은 직육면체, 구형체(Sphere), 각 면의 경사가 다른 다각면체를 선정하였다. FDM 3D 프린팅으로 제작한 조형물의 평면과 곡면부위의 표면 거칠기 변화를 측정하였고, 측정한 데이터를 기초연구로 삼아 조형물의 표면 거칠기의 향상을 위해 데이터 구축과 그 방향을 제시하였다.[14][15][16] 안대건 등은 FDM 3D 프린팅 기술을 이용하여 조형물의 표면 거칠기 해석을 위해 특정 표면 경사각도에서 표면 거칠기 분포의 비정형성에 대한 원인을 분석하였다. 이를 위하여 표면경사각도 변화에 따른 연속적인 표면 거칠기 분포를 얻기 위한 시험편을 설계 및 제작하고 시험편을 이용하여 표면 거칠기 분포들의 데이터를 확보하여 비정형성의 근거를 분석하여 제시하였다.[17] 김민경 등은 FDM 조형물의 표면 거칠기에 영향을 미치는 FDM 3D 프린팅 시스템의 성형 인자 값을 변경하여 조형물의 표면 거칠기를 개선시키는 연구를 진행하였다. 이를 위해 다양한 FDM 3D 프린팅 성형 인자를 변경할 수 있는 FDM 기반의 다중재료 복잡장치를 제작하였고, 조형물의 표면 거칠기에 영향을 미치는 성형 인자 값을 결정하는 필라멘트의 선폭, 두께, 그리고 단면형상 변화를 파악하여 선 형태로 압착된 필라멘트 소재의 선폭을 특정 범위 내에서 예측할 수 있는 다항식을 유도하였다. 이러한 연구를 통해 도출된 표면 거칠기를 향상시킬 수 있는 성형 인자 값을 이용하여 표면 거칠기가 개선된 FDM 조형물을 제작하였다.[18]

김성환 등은 광경화성 수지 소재를 이용하여 광경화성 수지의 특성 중 하나인 온도제어를 통하여 단위 경화선의 수축률을 최소로 하여 광조형물의 표면 정밀도를 향상시키는 적정온도를 확인하고자 하였고, 이를 위해 온도변화에 따른 경

화특성의 변화에 대한 측정을 통해 최적의 온도에 대한 연구를 진행하였다.[19] 안대건 등은 광조형물의 후가공 시간을 감소시키거나 또는 제거하기 위하여 최소의 표면 거칠기를 갖는 성형방향을 자동으로 선정하는 시스템을 개발하기 위한 연구를 진행하였다. 이를 위해 유전알고리즘(Genetic Algorithm)을 이용하였으며, 실시간 응답이 가능한 성형방향 선정을 위하여 단순화된 연산모델을 개발하고 비선형적 재료와 각 장비에 따른 특수한 환경에 따라 정확한 표면 거칠기 예측할 수 있는 내삽법(內插法)을 이용하였다.[20][21] 김영흠 등은 광경화성 수지와 빔-프로젝터를 이용한 PSLA 3D 프린터를 개발하였고, 광조형물의 정밀도를 성형하기 위하여 광원을 조절해 수조에 맺히는 상의 크기를 조절하는 기구를 구성하였다. 이 시스템을 이용하여 최적 공정조건을 도출하였고, 공정조건은 상의 크기를 결정하는 빔-프로젝터와 투영면 사이의 거리, 초점 렌즈의 위치, 단면당 경화시간을 이용하여 광조형물의 최대 정밀도를 가질 수 있는 조형물을 제작하였다.[22] 이러한 다양한 방식의 3D 프린터로 제작한 조형물의 표면 거칠기 개선에 관한 연구가 진행되고 있지만, 현재에도 표면 거칠기 개선에 대한 많은 연구가 필요하다.

본 논문에서는 광경화성 폴리머 소재기반의 3D 프린터 시스템을 개발하고, 이 시스템을 이용하여 광조형물의 표면 거칠기에 대한 공정연구를 진행하였다. 광경화성 폴리머 소재는 메움현상의 특성을 가지고 있어 광조형물의 표면 거칠기를 저감할 수 있는 장점이 있다. 광조형물의 표면에 층과 층 사이에서 생기는 면적 오차는 조형물의 표면 거칠기에 큰 영향을 미치며, 패턴두께에 의해 결정된다.[23][24] 광경화성 폴리머 소재기반의 3D 프린팅 시스템을 이용하여 출력공압과 프린팅 속도에 따른 패턴두께 변화 실험을 통하여 최소패턴두께에서 최대패턴두께별 광조형물 제작 공정조건을 선정하였다. 선정된 공정조건으로 패턴두께별로 광조형물을 제작하고 3차원 나노 형상 측정 시스템을 이용하여 광조형물의 표면 거칠기 측정을 통해 표면 거칠기 저감을 확인하였다. 또한, 광조형물의 표면 거칠기 분석을 위해 FDM 3D 프린팅 방식으로 동일한 공정조건에서 조형물을 제작하고 3차원 나노 형상 측정 시스템을 이용하여 조형물의 표면 거칠기를 측정하였고, 광조형물의 표면 거칠기 데이터와 비교분석을 하였다.

II. 광경화성 폴리머 소재기반의 3D 프린팅 공정원리

1. 광경화성 폴리머 에폭시 소재 특성

광경화성 폴리머 소재기반의 3D 프린팅 시스템에 사용되고 있는 폴리머 에폭시 소재(Model : SE-8272, Fotopolymer Pte. Ltd)는 척소성(Thixotropic)특성으로 인해 프린팅 시 일정한 패턴을 형성할 수 있으며, UV 광원에 노출되면 소재가 단단해진다. Fig 2.와 같이 비 척소성(Non-Thixotropic)은 분자들이 분산하는 성질로 인해 젖음성이 높아져 패턴 된 소재가 퍼지는 현상이 나타나 일정한 패턴을 형성할 수 없다. 이에 비해 척소성을 가지는 소재들은 분자들이 응집하려는 특성을 가지고 있어 젖음성이 낮아 패턴 된 소재가 퍼지지 않는 장점을 가지고 있어 조형물을 적층할 때 유리한 이점을 가진다. 또한, 광경화성 폴리머 에폭시 소재는 액상수지의 메움현상 특성이 있어 조형물의 표면 거칠기를 향상시킬 수 있다.

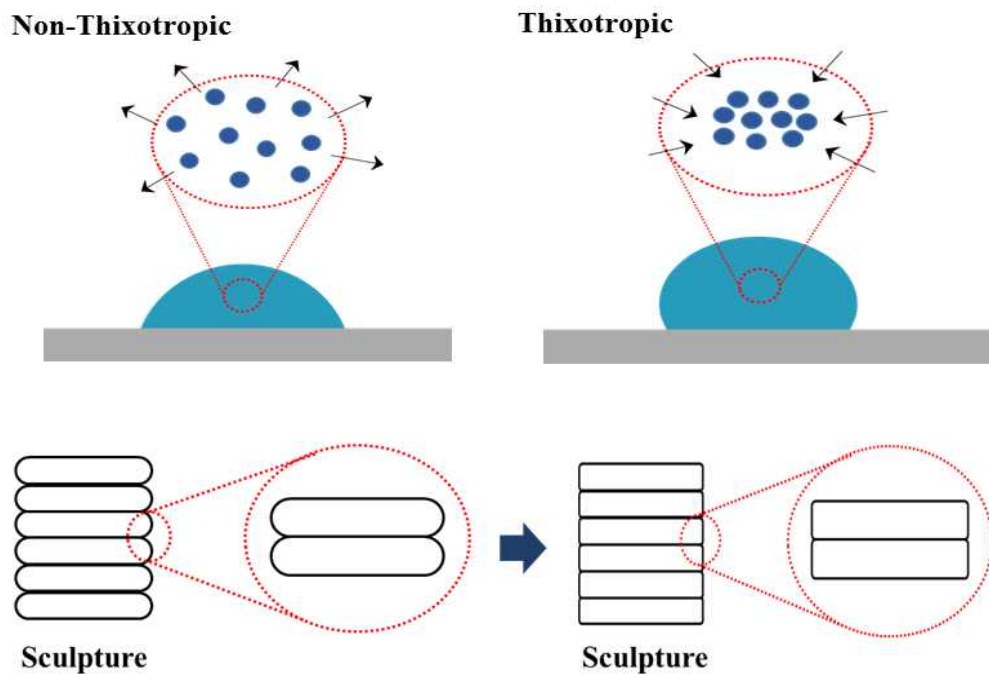


Fig. 2 Characterization of photo-curable epoxy material

2. 면적오차법

면적오차(Area error)는 광조형물을 수직한 단면으로 절단하였을 때 나타나는 윤곽의 면적오차를 뜻하며, 광조형물을 구성하는 슬라이스 단층의 층과 층 사이에 단차로부터 발생하며, 면적오차를 줄이면 광조형물의 표면 거칠기를 향상 시킬 수 있다. Fig. 3은 면적오차에 대한 수치해석을 도식화한 메커니즘이며, 면적오차는 회색음영으로 나타내었고, H(면적오차의 높이), θ (경사각), T(패턴두께), 층의 개수(n), A_e (한 층의 면적오차), A_t (전체 면적오차)로 나타내었다. 면적오차에 관한 식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

H(면적오차의 높이)를 식(1)로 나타낼 수 있다.

$$H = \tan\theta \cdot T \quad (1)$$

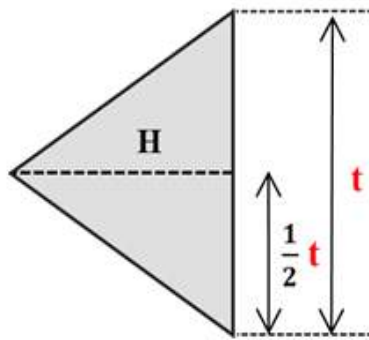
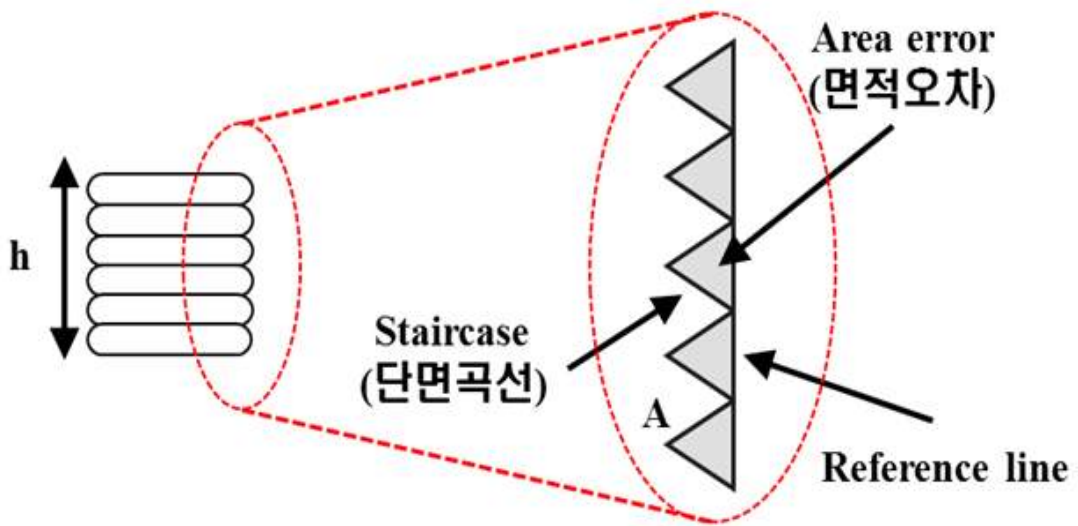
H를 이용하여 A_e (한 층의 면적오차)는 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$A_e = \frac{1}{2}T \cdot H = \frac{1}{4}T^2 \tan^2\theta \quad (2)$$

A_e (한 층의 면적오차)에 따라 층의 개수(n)를 이용하여 A_t (전체 면적오차)는 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_t = \frac{1}{4}T^2 \tan^2\theta \cdot n \quad (3)$$

식(3)을 보면 패턴두께가 면적오차에 중요한 공정변수이며, 패턴두께가 감소할수록 면적오차가 작아지고 이에 따라 광조형물의 표면 거칠기를 향상 시킬 수 있다. 따라서, 미세한 패턴두께를 구현하여야 광조형물의 표면 거칠기를 향상 시킬 수 있다.[31][32]



Detail A

Fig. 3 Theoretical numerical analysis of area error method

2. 광경화성 폴리머 소재기반의 3D 프린팅 토출 메커니즘 분석

광경화성 폴리머 소재기반의 3D 프린팅 시스템을 개발하기 위해 폴리머 소재기반의 토출 메커니즘 분석을 하였다. Fig. 4의 (a)는 소재특성에 따른 전단속도 (Shear rate)와 전단응력(Shear stress)에 대한 관계를 나타낸 그래프이다. ①과 같이 전단속도와 전단응력이 일정한 기울기를 가지는 유체를 뉴턴유체라 하며

점도가 '0' 달하는 수준이다. 또한, ② ~ ⑤와 같이 일정하지 않는 기울기를 보이는 경우를 비 뉴턴 유체라 하며 높은 점도의 특성을 가지고 있다. 광경화성 폴리머 소재는 높은 점도를 가지는 비 뉴턴 유체이며, 전단속도와 전단응력에 밀접한 영향을 미친다. Fig. 4의 (b)는 마이크로 노즐의 토출 메커니즘에 대한 모식도이다. R_i 는 노즐의 입구반경이고, R_d 는 노즐의 출구반경, Q 는 노즐로부터 토출되는 소재 유량의 양을 뜻한다. 식 (1)은 소재 공급유량(Q), 프린팅 속도(V), 노즐의 출구반경(R_d)에 의해 패던두께(T) 제어가 가능하며, 이에 따라 광조형물의 표면 거칠기를 향상 시킬 수 있다.[25][26][27]

$$\alpha \times \pi R^2 \times V \times Q \quad \text{식(1)}$$

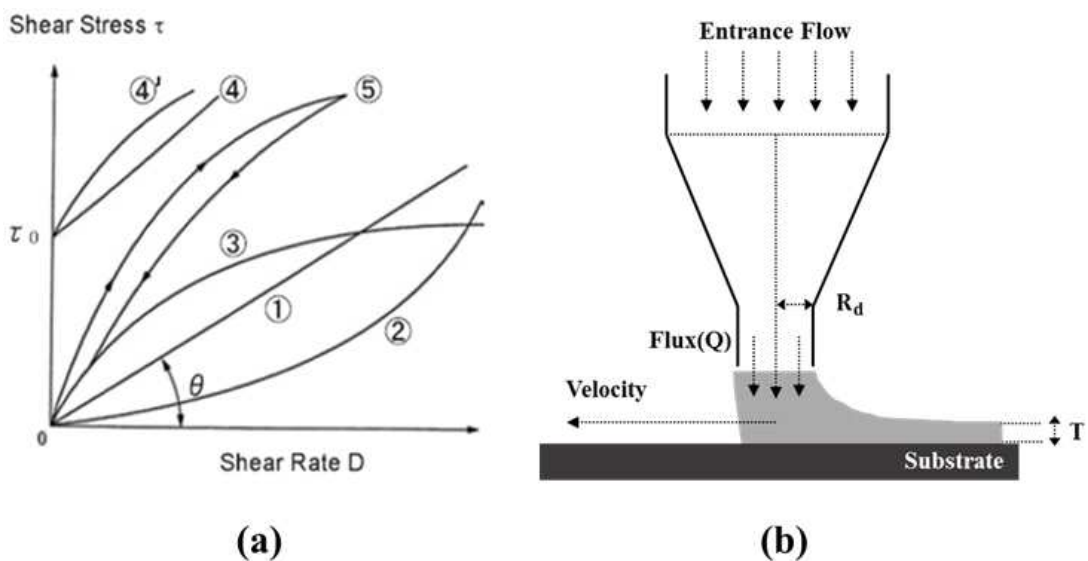


Fig. 4 Micro-Nozzle discharge mechanism summary(a: Relationship between shear rate and shear stress according to material properties, b: Discharge mechanism of Micro-Nozzle)

III. 광경화성 폴리머 소재기반의 3D 프린팅 시스템 개발

광경화성 폴리머 소재기반의 3D 프린팅 시스템은 공압 디스펜서 방식을 이용하여 노즐을 통해 광경화성 폴리머 소재를 프린팅 하면서 광조형물을 제작하는 기술이다. 광경화성 폴리머 소재기반의 3D 프린팅 시스템은 Fig. 5와 같이 소재의 토출 유량을 정밀하게 제어 가능한 고정밀 전자식 공압펌프와 소재를 토출시키는 루어락 피팅 노즐이 구성되어 있다. 그리고 토출된 소재가 일정한 패턴을 형성할 수 있도록 UV 경화기가 구비되어 있고, 그 외 멘델방식을 이용한 X-Y-Z축 자동 스테이지와 적층 과정을 확인할 수 있는 IP 카메라를 배치하였다. 광경화성 3D 프린팅 공정원리로는 고정밀 전자식 공압펌프를 이용하여 노즐 헤드내부에 있는 광경화성 폴리머 소재를 토출시키며, X-Y-Z축 자동 스테이지가 이동하면서 소재를 적층할 수 있도록 패턴을 형성한다. 토출된 소재는 UV 경화기에서 방사하는 UV 광원에 의해 노출되어 광중합반응을 통해 경화시키며, 이러한 반복적인 공정을 통해서 적층하고 광조형물을 제작한다.

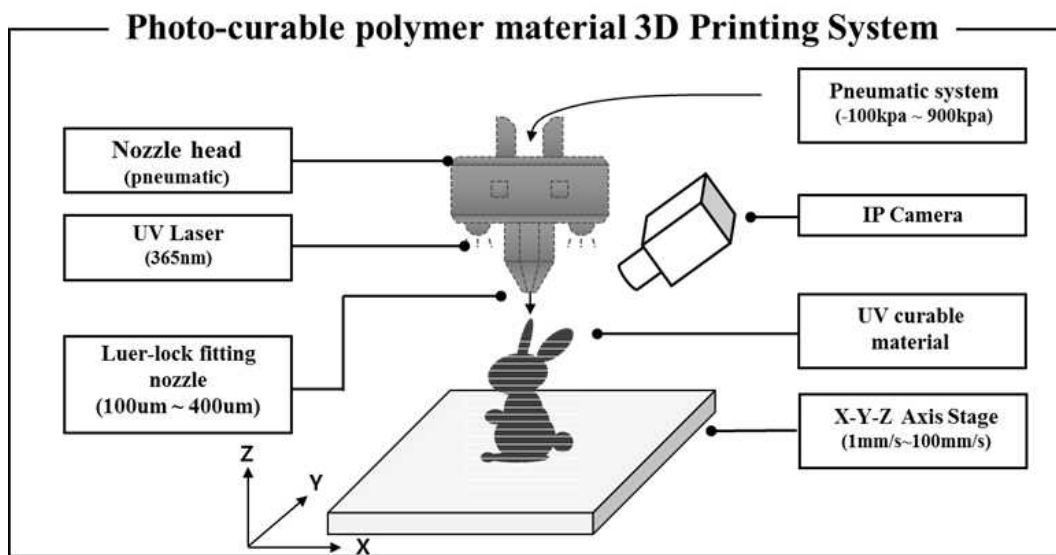


Fig. 5 3D printing system configuration diagram based photo-curable polymer material

광경화성 폴리머 소재기반의 3D 프린팅 시스템은 3차원 모델링 파일 (STL file)을 이용하여 최대 150mm³ 크기의 광조형물 제작이 가능하며, Fig. 6와 같이 시스템 구성과 시제품 제작을 하였다. 출력방식은 3차원 모델링 파일의 슬라이스 (Slice) 해석된 단면을 X-Y축을 이용하여 2D 패턴으로 프린팅하며, 프린팅 베드는 Z축을 이용하여 2D 패턴을 순차적으로 적층하여 3차원 형상의 광조형물을 제작할 수 있다. 또한 X-Y-Z축 자동 스테이지는 스테핑 모터(Stepping Motor)를 사용하였으며, X-Y축의 이송 정밀도는 50 μ m이며, 이송속도는 최고 100mm/s으로 이송하도록 구성하였다. 그리고 광경화성 폴리머 소재는 UV 경화기를 이용하여 프린팅 즉시 경화가 가능하며, 적층되는 광조형물이 허물어지지 않고 3차원 형상을 유지할 수 있다. UV 경화기는 차단 필터가 구비된 윈도우를 배치하여 프린터 외부로 노출되는 것을 차단하였고 사용자의 안전 확보와 더불어 육안으로 프린팅 과정을 직접 확인할 수 있도록 제작하였다. 노즐 팁은 ‘루어락 피팅’(Luer-lok fitting) 방식으로 탈·부착이 가능하며, 소재의 특성 및 프린팅 패턴두께를 제어하기 위해 다양한 내경사이즈로 구성하였다. 노즐 팁의 직경과 프린팅 패턴두께는 소재의 공급유량에 따라 결정 될 수 있으며, 유량을 정밀하게 제어하기 위해 고정밀 전자식 공압펌프를 제작하여 배치하였다.

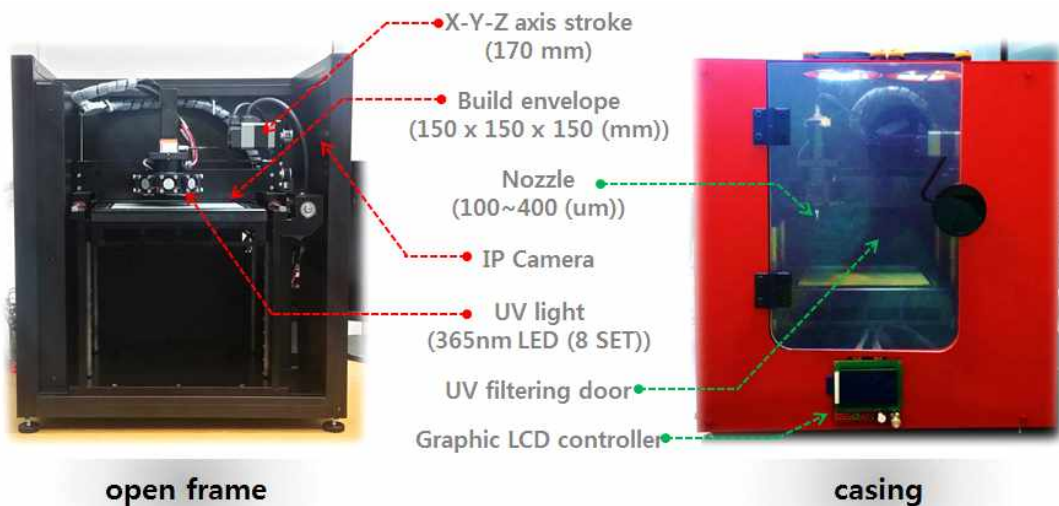


Fig. 6 Photo-curable 3D printing system configuration and prototyping

2. UV 경화기 일체형 노즐헤드 시스템 개발

1) '루어락' 피팅 노즐 개발

'루어락' 피팅 노즐(Luer-lock fitting)은 폴리머 소재를 토출하며, 패턴의 두께를 정밀하게 제어하기 위해 다양한 토출구 직경($100\mu\text{m} \sim 400\mu\text{m}$)으로 구성되어 있다. 또한, 노즐 팁을 적용하여 탈부착이 용이하도록 설계되어 있다. Fig. 7는 마이크로 노즐 헤드에 장착되는 테이퍼(Taper) 구조의 노즐 팁이며, 내/외부 형상을 나타낸 그림이다. 노즐 팁의 테이퍼 구조는 모세관 구조의 노즐보다 유체 유동저항이 낮아 중·고점도($3,000\text{cP} \sim 100,000\text{cP}$)의 미세한 유량을 제어할 수 있으며, 압력손실의 저감으로 노즐의 막힘 현상을 방지할 수 있다. Fig. 8는 노즐 팁 직경에 따른 소재 유체유동의 압력손실에 대한 수치해석이다. 노즐 토출구의 직경(D) · 길이(L) · 소재점도(η)에 따라 노즐 토출구의 압력 손실을 제어할 수 있으며, 토출구 직경이 작아지고, 길이가 길어질수록 압력손실(Pressure drop; ΔP)이 증가하고 미세한 유량 제어가 가능하며, 이에 따라 미세패턴두께를 구현할 수 있다.

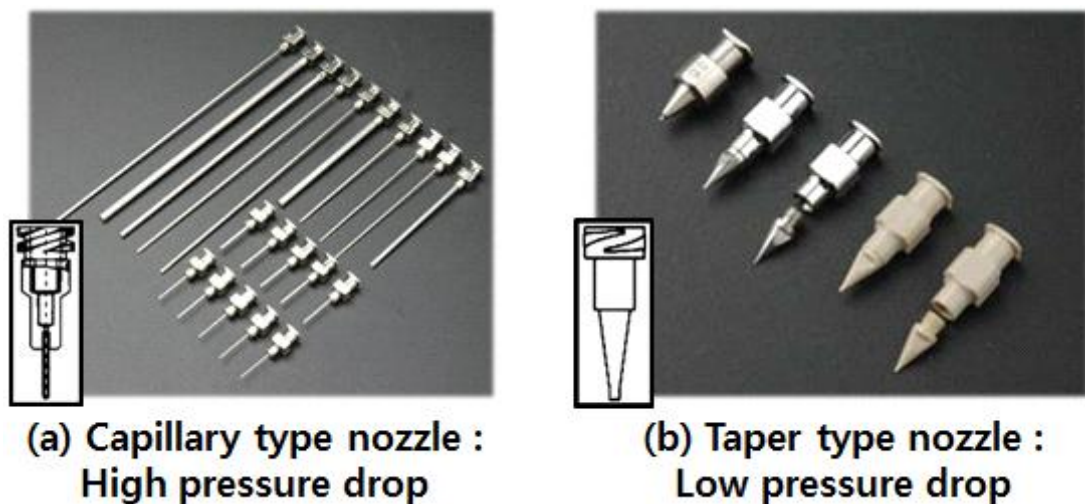
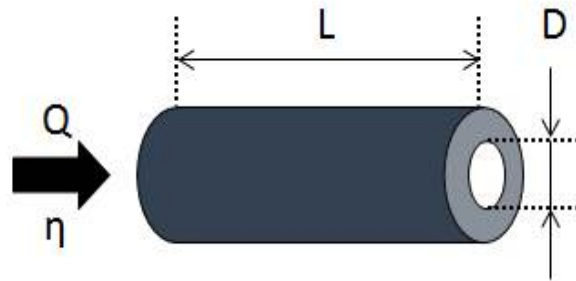


Fig. 7 Pressure loss due to nozzle structure

- ✓ Pressure loss Δp
- ✓ Nozzle length L
- ✓ Volume flow Q
- ✓ Dynamic viscosity η
- ✓ Inner diameter D



$$\left[\frac{\Delta p}{mbar} \right] = \left[\frac{128}{6000 \cdot \pi} \right] \cdot \frac{\left[\frac{L}{mm} \right] \cdot \left[\frac{Q}{ml/min} \right] \cdot \left[\frac{\eta}{mPas} \right]}{\left[\frac{D}{mm} \right]^4}$$

Fig. 8 Pressure loss of nozzle

2) UV 레이저 경화기 시스템 개발

UV 레이저 경화기는 광경화성 폴리머 소재를 프린팅 과정과 동시에 경화하여 프린팅 된 패턴이 퍼지지 않고 3차원 형상으로 적층 할 수 있도록 소재를 단단하게 고체화하는 역할을 한다. Fig. 9은 UV 경화기 모듈 배치와 구성을 보여주고 있으며, 8개의 UV LED가 입사각 45°각도로 배치되어 노즐 팁의 토출구에 집광시켜 일정한 패턴을 형성할 수 있도록 설계/제작하였다. UV LED는 365nm 파장을 방사하고 제어 정밀도는 1mW/cm²이며, 최대 1001mW/cm² 까지 광원의 세기를 미세하게 조절하여 일정한 패턴 형성 시, 메니스커스(Meniscus)를 유지할 수 있다. UV LED 광원의 세기는 전류제어용 정전압 회로를 이용하여 조절이 가능하고, 이는 즉 소재의 경화속도를 결정하는 요인으로써 프린팅 작업속도와 소재 토출 유량에 따라서 가변적으로 설정할 수 있어 광조형물의 표면 정밀도를 결정할 수 있다. 또한, 점프-업 경로(Jump-up path)에서 UV 광원의 노출을 차단할 수 있도록 G코드 소프트웨어 프로그램과 연동하여 실시간 스위칭(Switching) 제어가 가능하도록 설계/제작하였다.

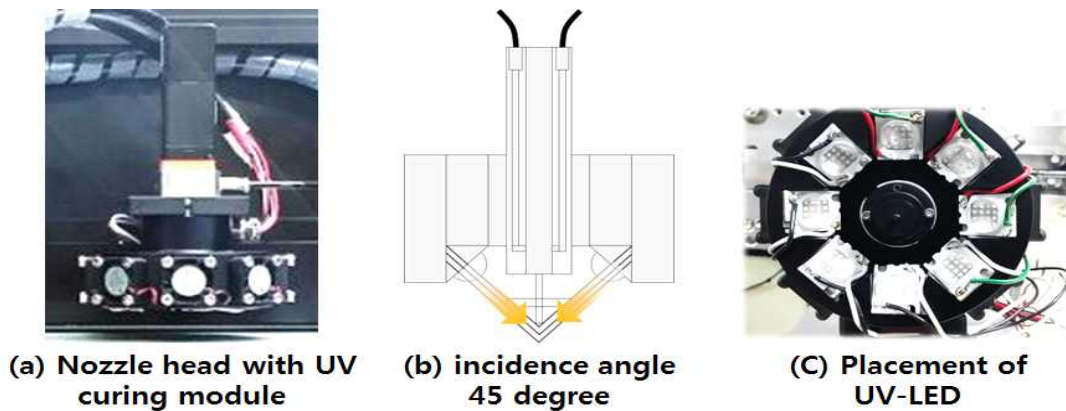


Fig. 9 UV curing module integrated nozzle head and UV-LED arrangement structure

2. 고정밀 전자식 공압펌프 시스템 개발

고정밀 전자식 공압펌프는 노즐 헤드의 내압을 제어하고 프린터의 경로지시 프로그램과 연동하여 토출명령(정압/정지/스위칭)을 수행과 동시에 노즐을 통해 소재를 토출시키는 역할을 한다. 또한, 소재가 토출되는 공급유량을 제어하여 프린팅 패턴의 두께를 결정할 수 있으며, 이에 따라 광조형물의 표면 거칠기에 큰 영향을 미친다. Fig. 10은 고정밀 전자식 공압펌프의 구성도를 보여주고 있다. 소재를 토출시키기 위한 양압(+)과 토출을 정지하고 누액을 방지하기 위한 음압(-) 제어를 구비하였고, 토출 신호를 ON/OFF로 스위칭 제어하기 위한 솔레노이드 밸브를 구성하였다. 공압제어는 아날로그식 압력센서를 배치하여 공압의 세기를 실시간으로 피드백이 가능하며, -100kPa에서 최대 900kPa까지 출력할 수 있고 0.1kPa의 분해능으로 정밀하게 제어를 할 수 있다. 또한, 전자식 레귤레이터 및 에어필터의 구성으로 공압 내에 분진과 수분을 차단하고 소재와 노즐 내부에 유입되는 불순물을 차단할 수 있게 제작하였다. 그 외에 X-Y-Z축 자동 스테이지와 그래픽 LCD 컨트롤 모듈을 구성하였다. X-Y-Z축 자동 스테이지는 Z축이 상하로 이동하고, X-Y축이 4방향(전-후, 좌-우)으로 이동하는 멘델방식으로 구성하였다. Z축에는 프린팅 베드(Printing Bed)가 장착되어 있고, X-Y축에는 노즐헤드를 장착하여 구비하였다. 그래픽 LCD 컨트롤 모듈은 프린터에 내장된 MCU 유닛과 작업자의 인터페이스 역할을 하며, PC의 도움 없이도 SD 카드 리더기를

이용하여 모델링 파일 전송을 통해 3D 프린팅 작업이 가능하게 구성하였다.

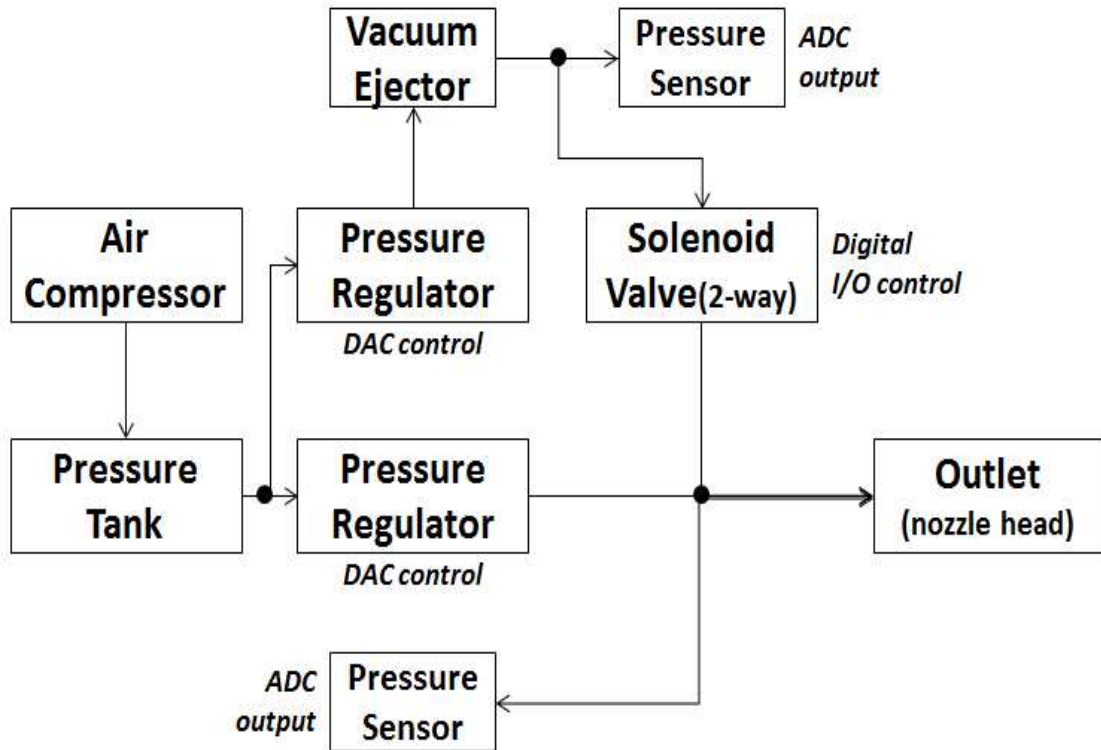


Fig. 10 Configuration diagram of Electronic pneumatic pump system

3. G코드 변환 소프트웨어 프로그램 개발

G코드 변환 소프트웨어 프로그램은 3차원 모델링 STL파일을 슬라이스 해석을 통해 각 슬라이스마다 좌표를 지정하여 G코드 파일로 변환해주는 역할을 담당한다. G코드 변환 소프트웨어 프로그램 기능으로는 Fig. 11와 같이 슬라이스 뷰어, 경로 생성 설정, 시스템 통신 데이터 모니터, 시스템 통신 설정, STL 사이즈 및 파일뷰어로 구성하였다.

- STL 3D 뷰어

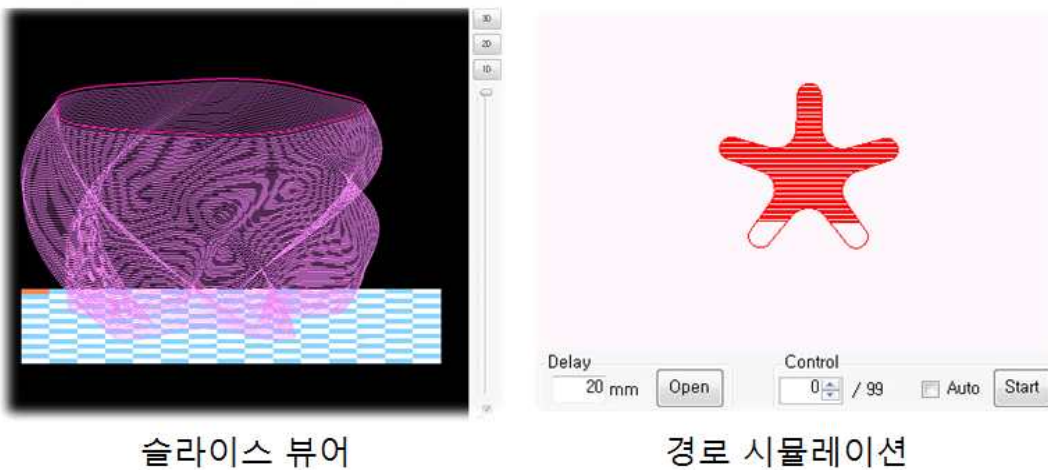
3차원 모델링 파일의 형상을 확인하기 위한 STL 3D 뷰어는 G코드로 변환할 STL 파일을 로드하고 형상을 프로그램 상에 디스플레이 역할을 한다.



Fig. 11 Main screen of G code conversion software

- 슬라이스/경로 뷰어

슬라이스/경로 뷰어는 Fig. 12과 같이 G코드로 변환할 STL 파일을 로드 후, 경로 생성에 따른 형상의 슬라이스 결과를 2D와 3D 형태로 확인이 가능하며 이에 따라 생성된 G코드 데이터의 실제 적층공정의 이상유무를 프로그램 상에서 미리 확인할 수 있게 설계하였다.



슬라이스 뷰어

경로 시뮬레이션

Fig. 12 Slide viewer and G code simulator

- 경로 생성 설정

경로 생성 설정 기능은 Fig. 13과 같이 Convert, Algorithm, Output 총 3가지 기능으로 제작하였다. Fig. 13 (a) Convert 기능은 3차원 모델링 형상 STL 파일을 G코드 파일로 변환 시 Jump(점프), Mark(프린팅 속도), Spacing(패턴의 간격), Margin(Fill 채우기 패턴과 Outline 패턴의 간격) 설정 기능 이용하여 2D 단면 슬라이스 패스 형상을 설정할 수 있다. 점프기능은 2D 단면 슬라이스 패스경로 중 한 구간의 경로에서 다른 경로로 이동할 시, 신속하게 움직이기 위해 속도 값을 설정할 수 있도록 구현하였다. 또한, 3차원 광조형물의 제작시간을 줄이기 위해 프린팅 속도 값을 설정할 수 있도록 구현하였고, 패턴의 간격 값을 이용하여 광조형물의 Fill 채우기를 정밀하게 제작할 수 있도록 구성하였다. 그리고 광조형물을 Outline 패턴 생성 후에 Fill 채우기 패턴 형성 시, Outline 패턴과 Fill 채우기 패턴의 간격을 설정하기 위해 Margin 설정 기능을 구현하였다. Fig. 13 (b) Algorithm 기능은 다양한 패스 경로를 설정하는 역할을 한다. Algorithm 기능은 Fig. 14와 같이 Default, Partition, Time, Difficult 4가지 패스경로를 설정할 수 있다. Default는 Fig. 14 (a)와 같이 광조형물의 시작점과 끝지점을 지정하여 순차적으로 패스경로를 생성하는 방식이며, Partition의 기능은 Fig. 14 (b)와 같이 영역을 분할하고 패스 재배열하여 점프구간을 최소화 하기위한 알고리즘이다. Time 설정 기능은 Fig. 14 (c)와 같이 영역 간 패스시간이 길어질 경우 접합면 경화 정도 차이가 발생할 수 있으므로 2개 이상의 영역 분할될 경우 토출시간 최대값을 제한할 수 있다. Diffcult 기능은 패스경로를 판별하여 패스 생성 사이즈 및 속도가 다른 멀티노즐 확장을 위한 알고리즘이다.[28][29][30]

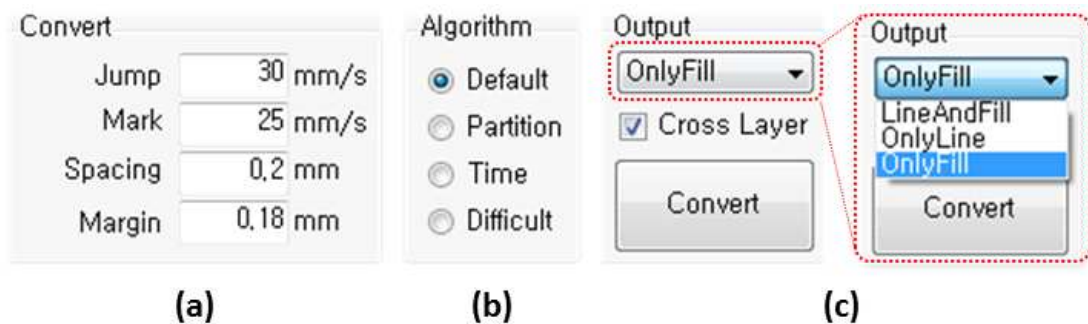


Fig. 13 Path creation setup system

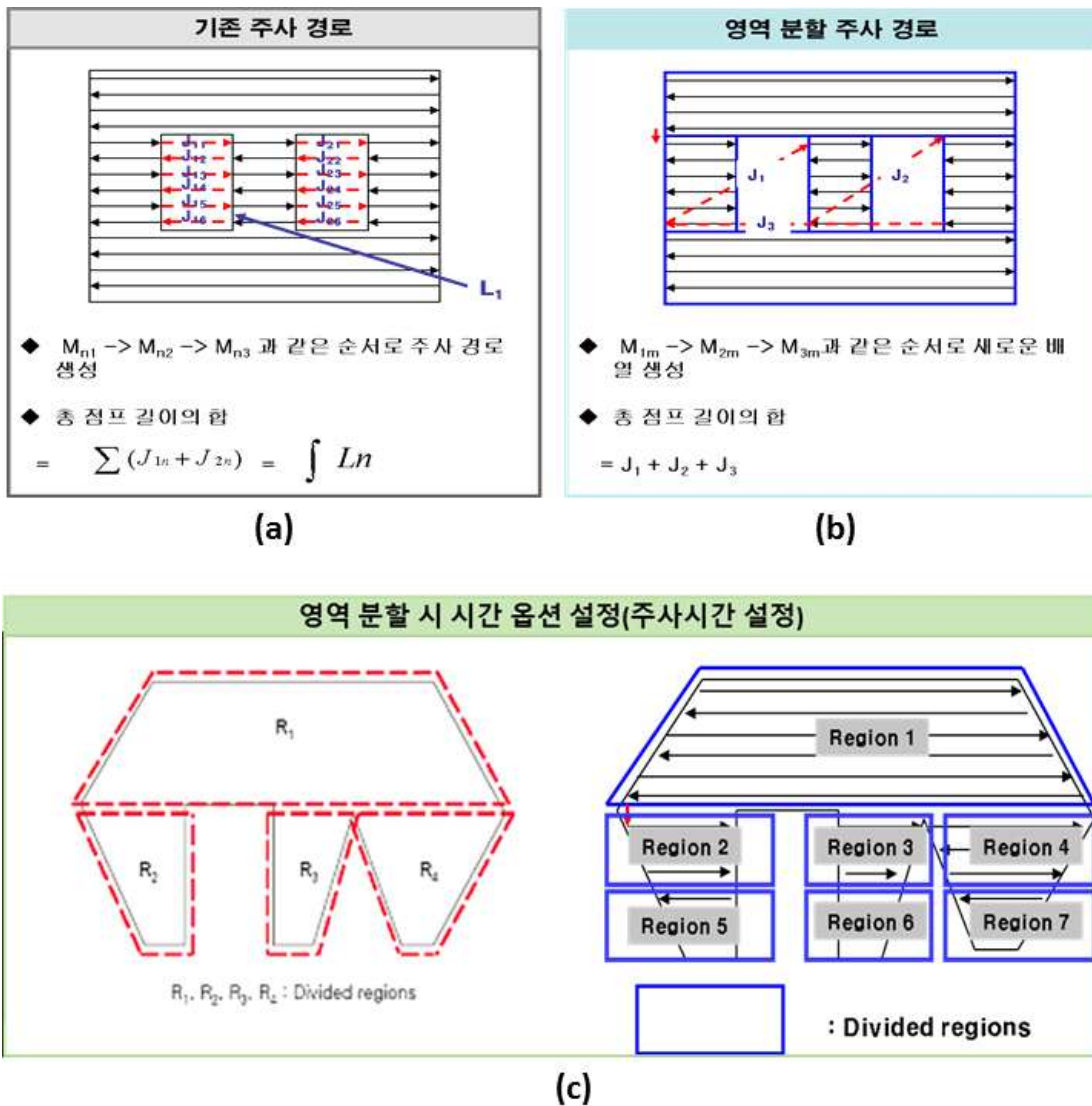


Fig. 14 Path setting function for printing production time control

- 시스템 통신 설정

시스템 통신 설정은 Fig. 15과 같이 통신 설정과 제어 커맨드를 송신할 수 있는 시스템 통신을 설정 할 수 있다. 프린팅 설정을 마치고 광조형물을 적층하기 시작하면 프린팅에 소요되는 작업시간과 진행중인 적층 레이어의 획수를 카운팅이 가능하며, 경로패스의 진행경과를 확인할 수 있다. 시스템 통신 데이터 모니터 기능에서는 프린터에 전송되는 G코드의 승인 여부를 확인할 수 있으며, 패스가 이동함에 따라 매번 좌표를 송신하고 프린터의 승인 여부를 OK와 NO로 표시하

여 확인할 수 있다. 명령신호가 NO처리 되는 경우에는 팝업창이 생성되어 운전의 지속 여부를 결정할 수 있도록 구성되어 있고, 데이터 모니터링을 통해 직전에 수행된 G코드의 좌표를 확인하고 리커버리(Recovery) 위한 작업을 용이하도록 구현하였다.

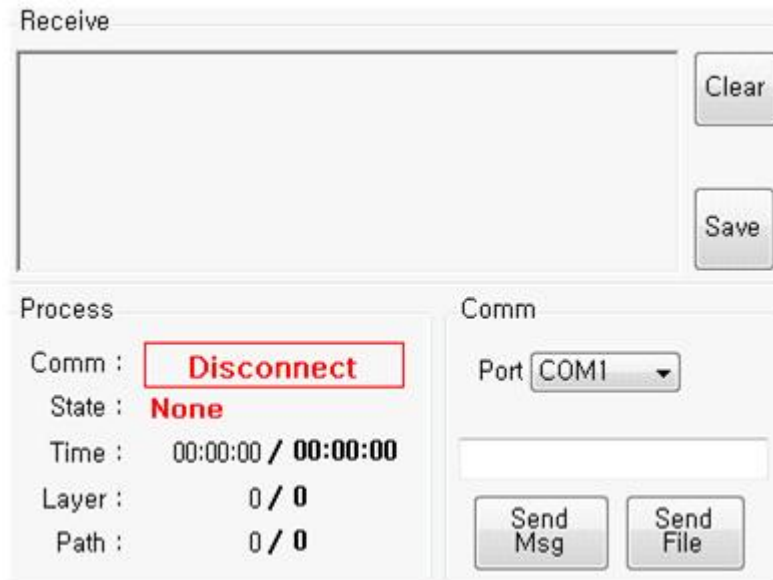


Fig. 15 System communication setting function

- STL 사이즈 설정 기능

STL 사이즈 설정 기능으로는 Fig. 16와 같이 프린터의 최대 사이즈를 확인할 수 있는 Plan Size, 3차원 모델링 형상의 크기를 볼 수 있는 Object Size, X-Y-Z를 원점을 기준으로 좌표이동이 가능한 Offset, 3차원 광조형물의 확대/축소(배수)하여 패스 형성과 슬라이스 두께를 설정할 수 있는 Trans 기능이 포함된다.



Fig. 16 3D modeling shape size setting function

IV. 패턴두께에 따른 광조형물 표면 거칠기 제어 공정연구

1. 패턴두께에 따른 광조형물 제작 실험

1) 토출 유량에 따른 메니스커스 특성 검사

3차원 광조형물을 제작하기 위해서는 2D 슬라이스 레이어 층이 적층되어야 하며, 이는 일정한 패턴이 형성되어야 적층이 가능하다. Fig. 17은 토출유량과 프린팅 속도에 따른 메니스커스 형상을 도식화 하였다. 일정한 패턴을 형성하기 위해서는 노즐의 토출구와 프린팅 베드 사이에서 생기는 메니스커스가 형성되어야 하며, 메니스커스는 프린팅 속도와 토출유량에 따라 결정된다.

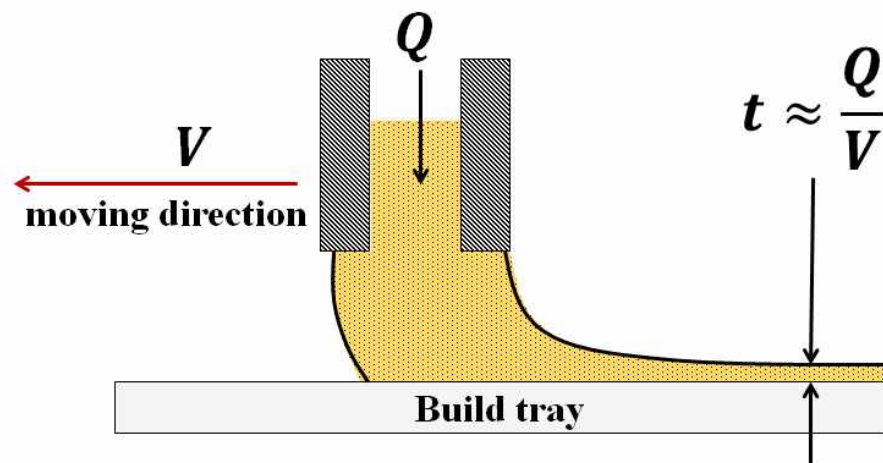


Fig. 17 Analysis of relationship between discharge flow rate and printing speed

프린팅 속도에 비해 토출유량이 과도하게 증가하면 Fig. 18 (a)와 같이 패턴이 퍼지며 불규칙한 패턴 폭을 형성하고, 반대로 토출유량이 감소하면 Fig. 18 (c)와 같이 패턴이 끊어지는 현상이 발생한다. Fig. 18 (a)와 (c)에서 보여주듯이 토출유량이 과다하거나 부족하게 토출되면 노즐 팁에 기판으로 전이되지 못한 소재

의 잔량이 누적되고, UV 경화기에 노출되면서 노즐 끝 부분에서부터 경화가 일어나 노즐이 막히는 현상을 알 수 있었다. 토출유량과 프린팅 속도의 적절한 관계가 이루어지면 Fig. 18 (b)와 같이 안정한 메니스커스를 유지하며, 일정한 패턴 폭을 형성할 수 있다. Fig. 19은 토출유량과 프린팅 속도에 따른 패턴 형상을 마이크로스코프를 이용하여 측정한 결과이다. Fig. 19 (a)와 (c)같이 토출유량과 프린팅 속도의 관계가 적절하게 이루어지지 못하게 되면 패턴이 퍼지거나 끊어지는 현상을 확인 하였다. 토출유량과 프린팅 속도는 서로 상충관계의 변수로써 최적화를 통해 메니스커스의 안정조건을 유지할 수 있으며, Fig. 19 (b)와 같이 일정한 패턴 폭을 형성할 수 있다.

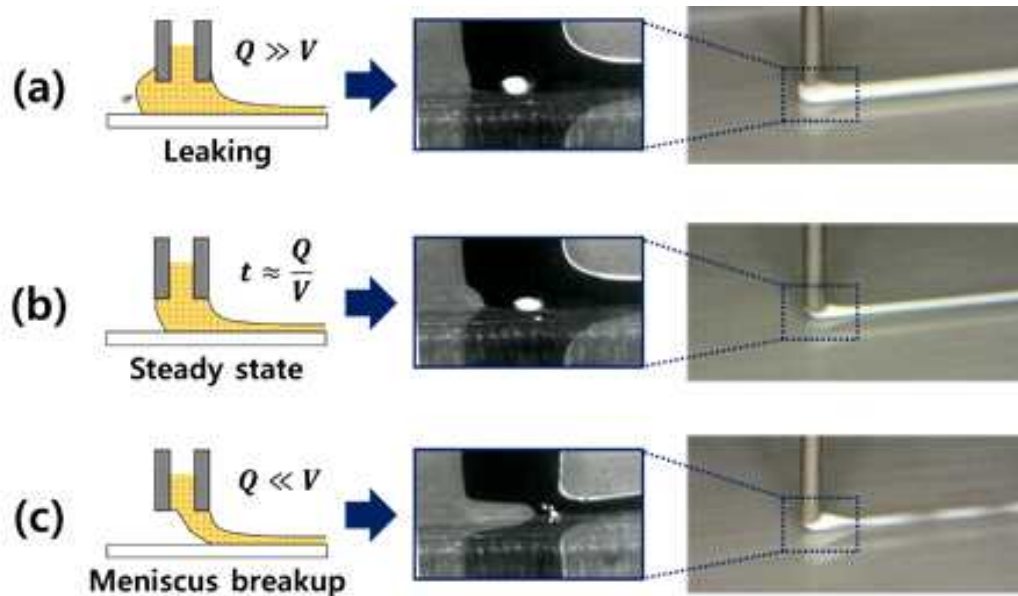


Fig. 18 Characteristics of meniscus according to discharge flow rate and printing speed

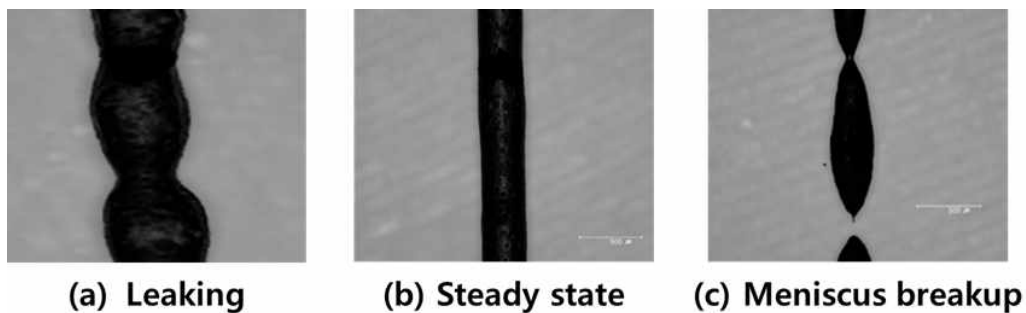


Fig. 19 Printing pattern characteristics according to meniscus mode

2) 출력공압과 프린팅 속도에 따른 패턴두께 실험 및 결과

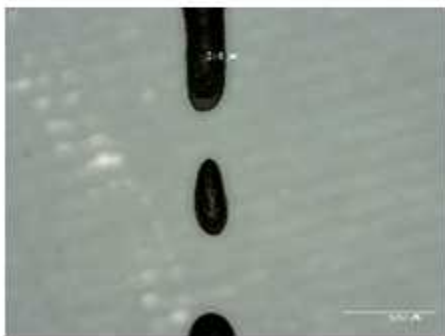
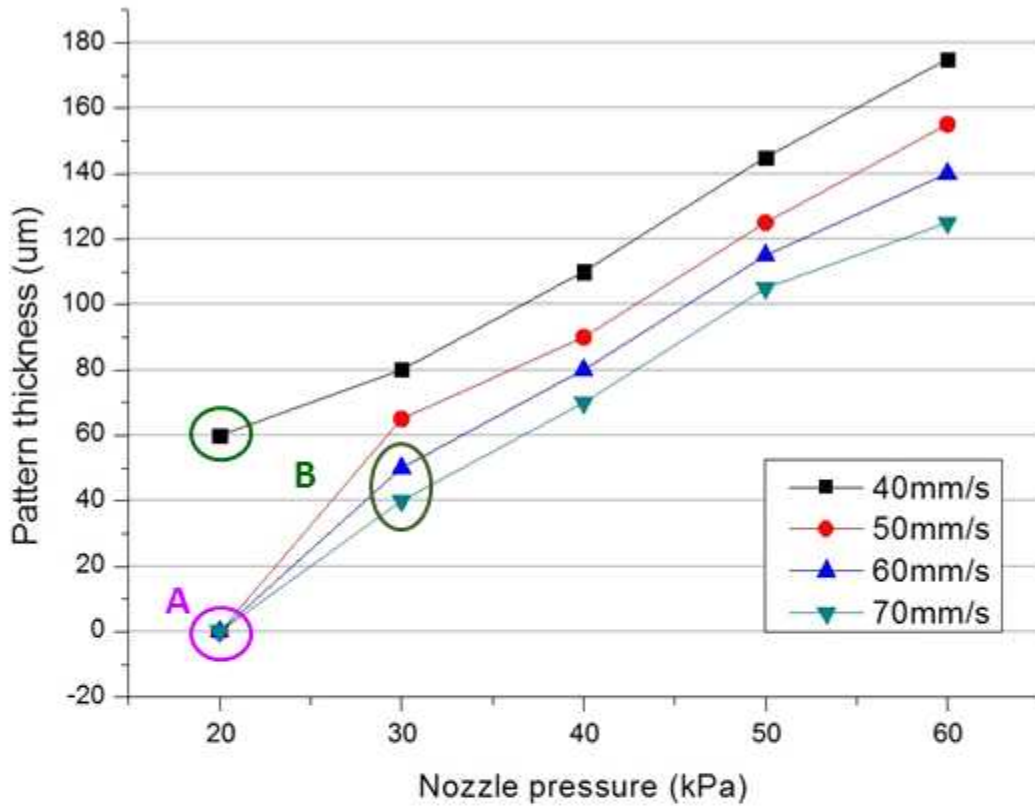
면적오차는 광조형물의 표면 거칠기에 큰 영향을 미치며, 패턴두께에 따라 제어가 가능하다. 즉, 패턴두께가 감소할수록 광조형물의 표면 거칠기를 저감할 수 있다. 패턴두께를 제어하기 위해 출력공압과 프린팅 속도에 따른 패턴두께 경향을 알아보았다. 패턴두께 실험을 진행하기 위해 Table 2와 같이 프린팅 속도(X-Y Stage Velocity), 출력공압(Output Pneumatic), 노즐 사이즈(Nozzle Size), UV 광원의 세기(UV Intensity), 노즐 끝과 기관의 거리(Stand-Off Distance) 공정조건 중 노즐 사이즈($400\mu\text{m}$), UV 광원의 세기(30 mW/cm^2), 노즐 끝과 기관의 거리($200\mu\text{m}$)를 고정변수로 설정하고 패턴두께에 큰 영향을 미치는 출력공압($20\text{kPa} \sim 60\text{kPa}$)과 프린팅 속도($40\text{mm/s} \sim 70\text{mm/s}$)를 변수로 설정하여 패턴두께에 대한 실험을 진행하였다.

Table 2 Process conditions for pattern thickness experiment

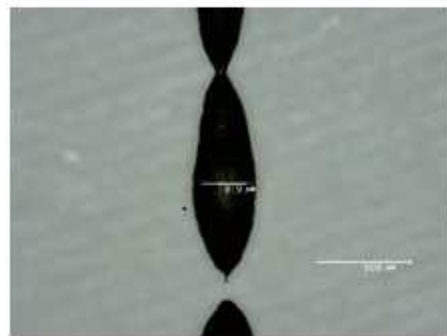
Nozzle size	$400\mu\text{m}$
UV intensity	30 mW/cm^2
Stand-off distance	$200\mu\text{m}$
Nozzle pneumatic	$20 \sim 60\text{ kPa}$
X-Y Stage velocity	$40 \sim 70\text{ mm/s}$

Fig. 20는 출력공압과 프린팅 속도에 대한 패턴두께 측정 결과 그래프이다. 동일한 프린팅 속도에서 출력공압이 증가할수록 소재의 토출유량이 증가하여 패턴두께가 증가하였다. 반면에 동일한 출력공압에서 프린팅 속도가 증가할수록 패턴두께가 감소하는 현상을 확인 하였으며, 최소패턴두께 $60\mu\text{m}$ 와 최대패턴두께 $175\mu\text{m}$ 의 결과를 얻었다. Fig. 20의 A와 B지점에서의 패턴 형상을 마이크로스코프를 이용하여 측정한 결과이며, Fig. 21은 패턴두께 실험 샘플 측정 사진이다. A지점에서의 패턴 형상은 출력공압과 프린팅 속도의 관계가 균형을 이루지 못해 패턴

이 끊어지는 현상이 발생하였고, B지점에서는 패턴이 형성이 되지만 불규칙한 패턴의 형상이 발생하였다.



(a) A 지점에서의 패턴 형상



(b) B 지점에서의 패턴 형상

Fig. 20 Experimental results of pattern thickness according to output air pressure and printing speed

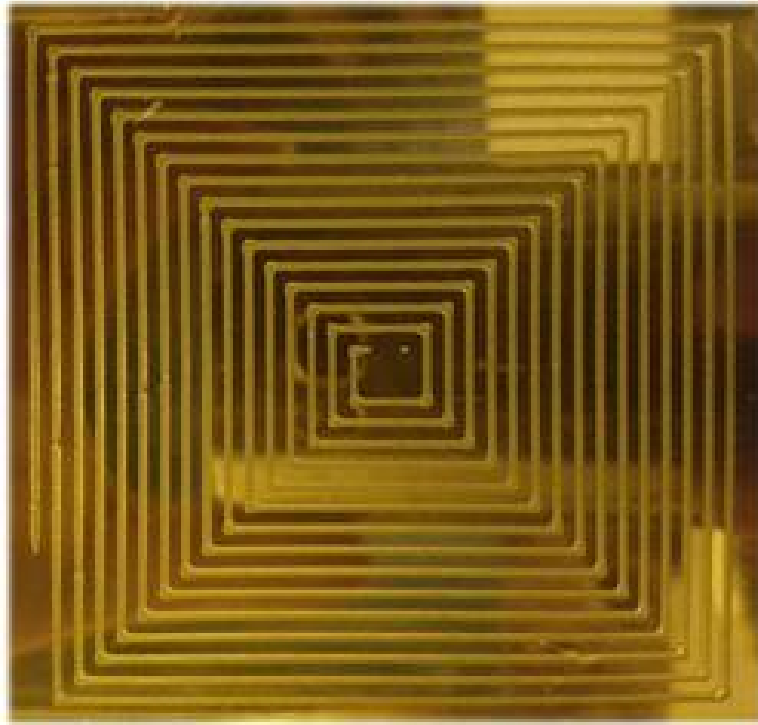


Fig. 21 Pattern thickness experiment sample

3) 패턴두께별 공정조건 선정 및 광조형물 제작

패턴두께 실험을 통하여 얻어진 패턴두께별 공정조건 중 메니스커스를 유지하고 일정한 패턴을 형성하는 공정조건과 한 층의 레이어 두께가 필요하다. 한 층의 슬라이스 높이는 한 층씩 적층할 때 상승하는 Z축의 높이를 뜻하며, 일련의 실험을 통하여 한 층의 레이어 두께 값을 얻었다. 한 층의 레이어 두께는 패턴두께보다 약 $80\mu\text{m}$ 정도 높아야 메니스커스 형상을 유지하며 적층할 수 있다. 일정한 패턴을 형성하는 패턴두께별 공정조건 중에 최소패턴두께 $65\mu\text{m}$ 에서 최대패턴두께 $175\mu\text{m}$ 까지 약 $40\mu\text{m}$ 씩 증가하는 구간($65\mu\text{m}$, $105\mu\text{m}$, $140\mu\text{m}$, $175\mu\text{m}$)에서의 공정조건을 선정하였고, Fig. 22과 같은 20 m 정사면체를 제작하였다. 동일한 패턴 두께일 경우, 광조형물 제작시간을 줄이기 위해 프린팅 속도가 빠른 공정조건을 우선순위로 하여 Table 3과 같은 공정조건을 확립하였다.

Table 3 Photo-curable sculpture making process conditions according to pattern thickness

Process parameters	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4
Nozzle Size(μm)	400	400	400	400
Layer thickness(μm)	300	250	200	150
Stand-off(μm)	200	200	200	200
Printing velocity(mm/s)	40	60	70	50
UV Power	30	30	30	30
Out-pneumatic(kPa)	60	60	50	30
Pattern thickness(μm)	175	140	105	65

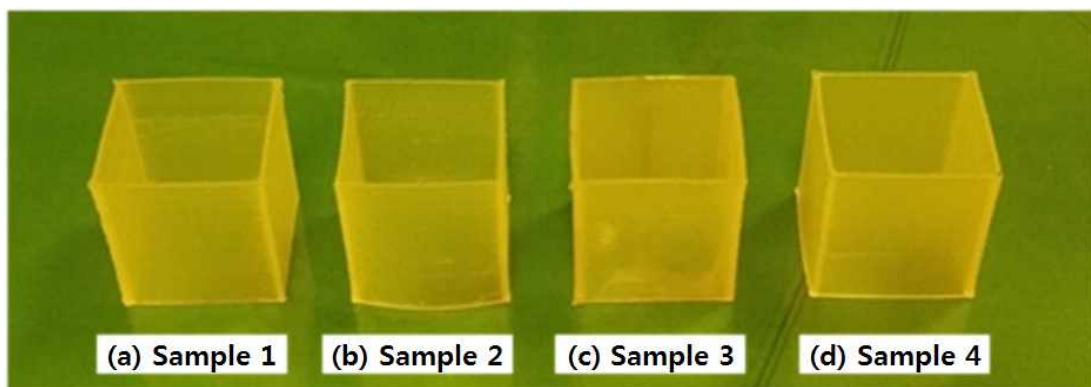


Fig. 22 Photo-curable sculpture making of pattern thickness

2. 패턴두께에 따른 광조형물 표면 거칠기 분석

1) 패턴두께에 따른 광조형물 표면 거칠기 측정 및 결과

패턴두께에 따른 광조형물의 표면 거칠기 분석을 위해 패턴두께별 공정조건을 이용하여 광조형물 제작하였고, 3차원 나노 형상 측정 시스템(model : WT-250, Nanosystemz. co. ltd.)을 사용하여 광조형물의 한 면에서 가로 1mm, 세로3mm의 면적을 측정하였다. Fig. 23은 3차원 나노 측정기를 이용하여 광조형물들의 표면을 측정한 결과 사진이며, Sample 1(패턴두께175 μ m) ~ Sample 4(패턴두께65 μ m) 패턴두께가 감소할수록 광조형물의 표면 해상도가 높아지는걸 알 수 있었다.

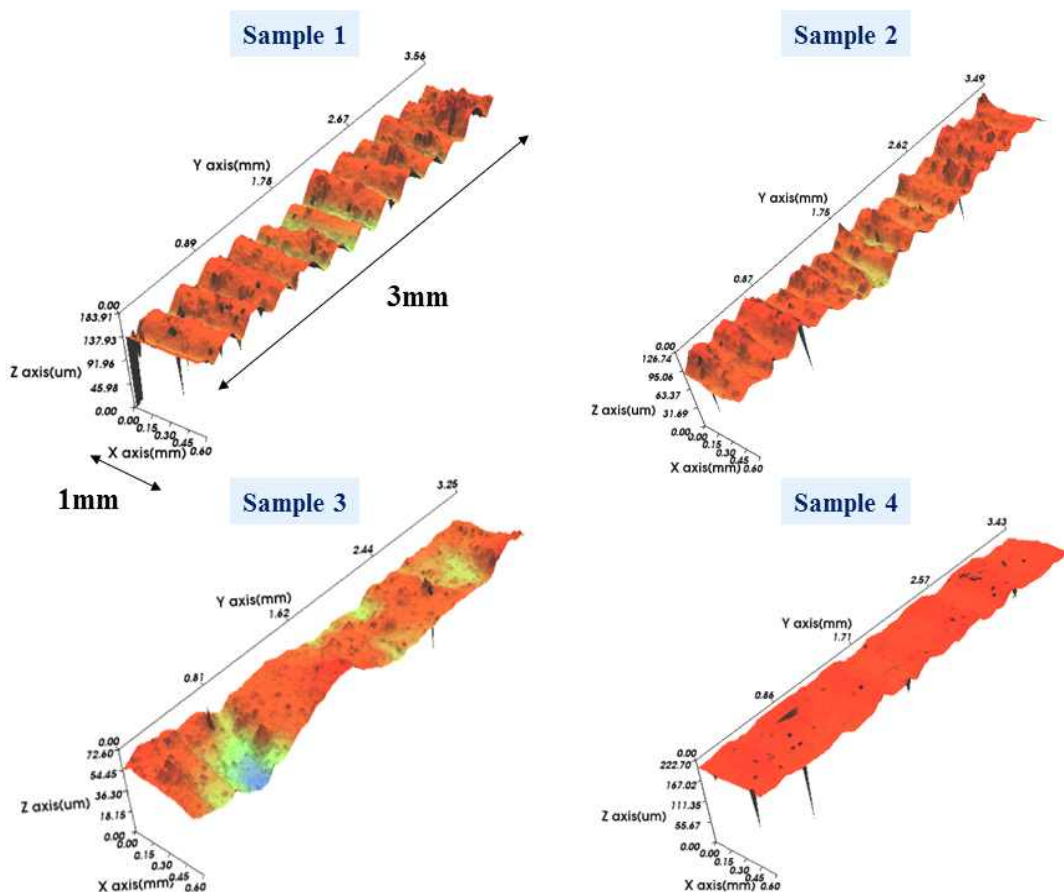


Fig. 23 Surface measurement result of Photo-curable sculpture 1~4 using 3D Nanometer

광조형물의 평균 표면 거칠기와 표준편차 확인을 위해 가로 1mm, 세로 3mm 측정된 면적에서 X축 방향으로 0.2mm 간격을 두고 4회씩 광조형물의 표면 거칠기를 측정하였다. Table 4는 광조형물 Sample 1 ~ 4의 한 면에서 4회씩 광조형물의 표면 거칠기 측정 데이터를 얻었으며, Fig. 24와 같이 광조형물 평균 표면 거칠기 값과 표준편차를 나타내었다. 패턴두께에 감소할수록 평균 표면 거칠기 값이 증가하였고, 광조형물 Sample 1 ~ 4의 표준편차 0.09 ~ 0.15로 일정한 표면 거칠기 값을 얻었다.

Table 4 Four times surface roughness measurement on one side of Photo-curable sculpture sample 1~4

횟수 \ Sample	Sample 1 (패턴두께 175 μm)	Sample 2 (패턴두께 140 μm)	Sample 3 (패턴두께 105 μm)	Sample 4 (패턴두께 65 μm)
1st	8.50 μm	7.05 μm	5.88 μm	4.59 μm
2nd	8.82 μm	7.08 μm	6.08 μm	4.69 μm
3rd	8.79 μm	7.19 μm	5.80 μm	4.51 μm
4th	8.61 μm	7.26 μm	6.04 μm	4.79 μm
평균 표면 거칠기	8.74 μm	7.1 μm	5.9 μm	4.63 μm
표준편차	0.15	0.097	0.13	0.12

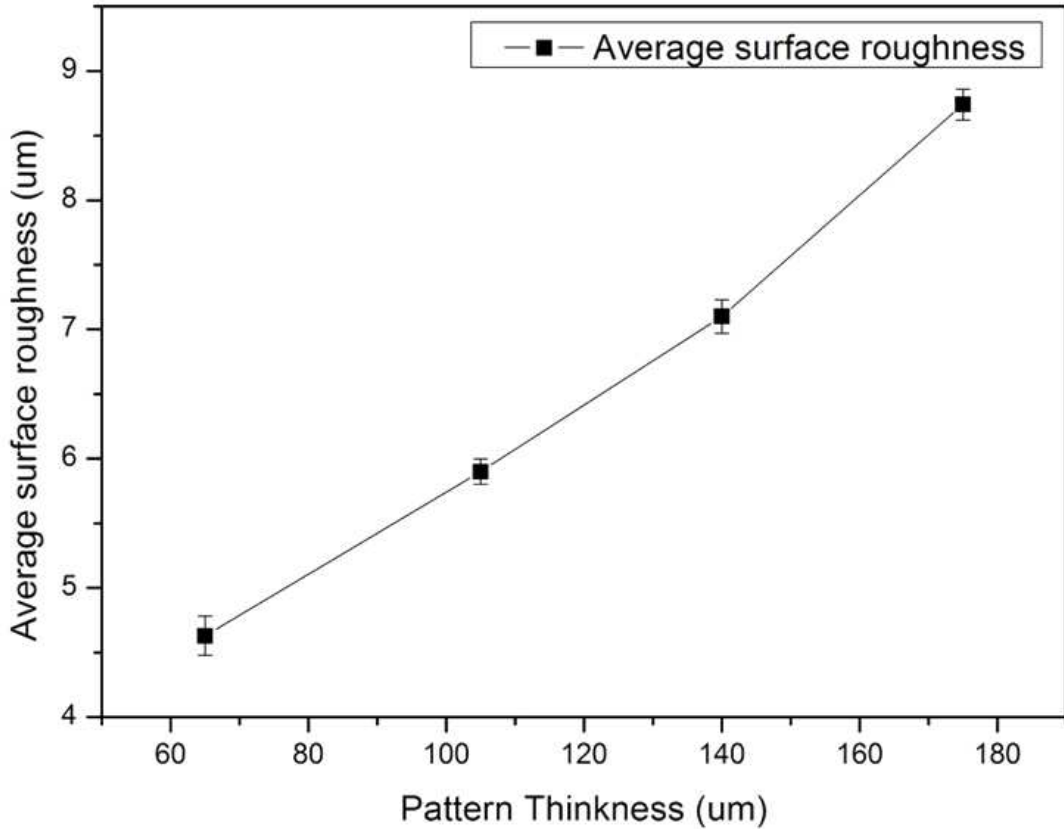
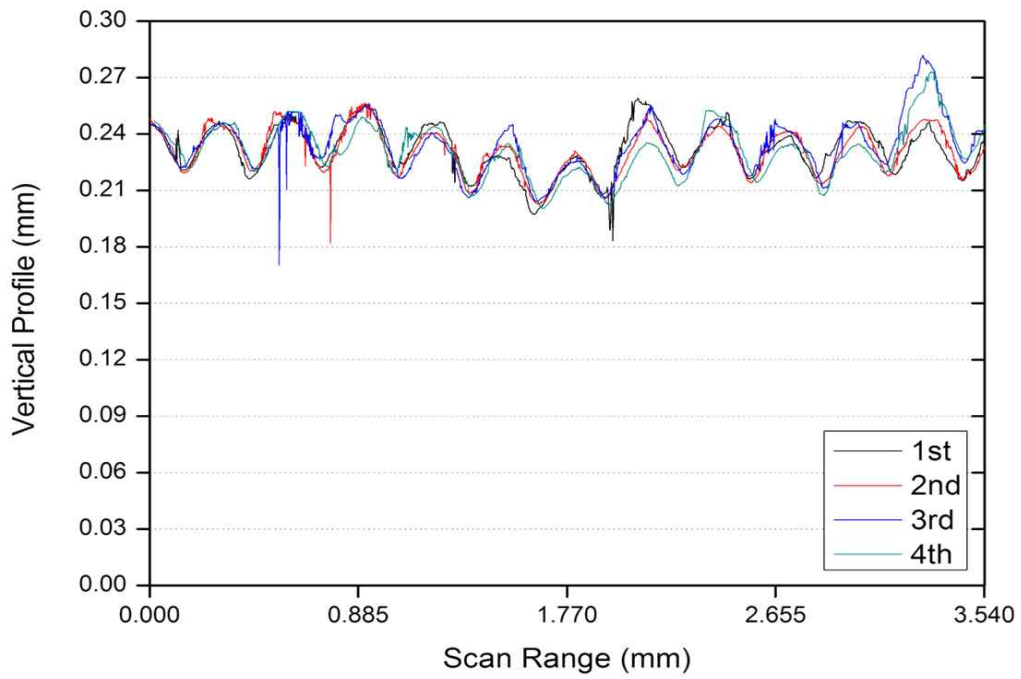


Fig. 24 Average surface roughness and standard deviation graph of Photo-curable sculpture according to pattern thickness

3차원 나노 형상 측정 시스템을 이용하여 한 면에서 X축 간격으로 0.2mm씩 4회 측정된 광조형물의 표면 거칠기 값 데이터를 이용하여 Fig. 25와 Fig. 26과 같이 Sample 1(패턴두께 175um) ~ Sample 4(패턴두께 65um)의 광조형물 표면 형상을 나타내었고, 패턴두께가 감소할수록 광조형물의 표면 형상이 매끄러워 지는 현상을 알 수 있었다. 또한, 각 Sample에서 4회 측정된 광조형물 표면 형상을 비교 하였을 때, 일정한 광조형물 표면 형상이 나타났다. 따라서, 패턴두께가 감소할수록 면적오차가 작아지고 이에 따라 광조형물의 표면 거칠기를 향상 시켰다.

Sample 1



Sample 2

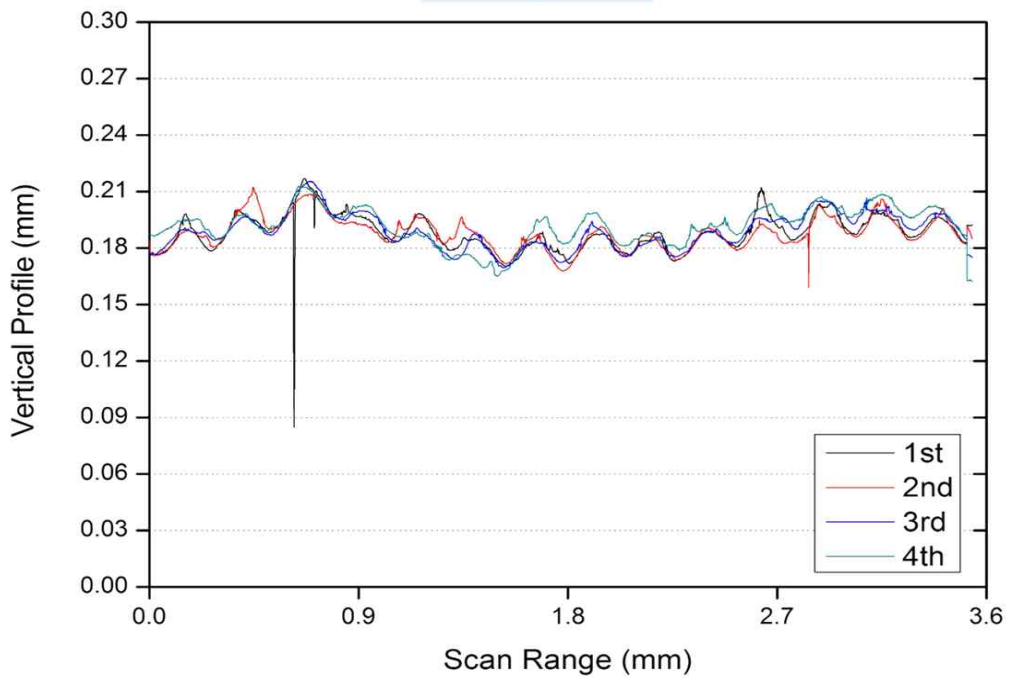
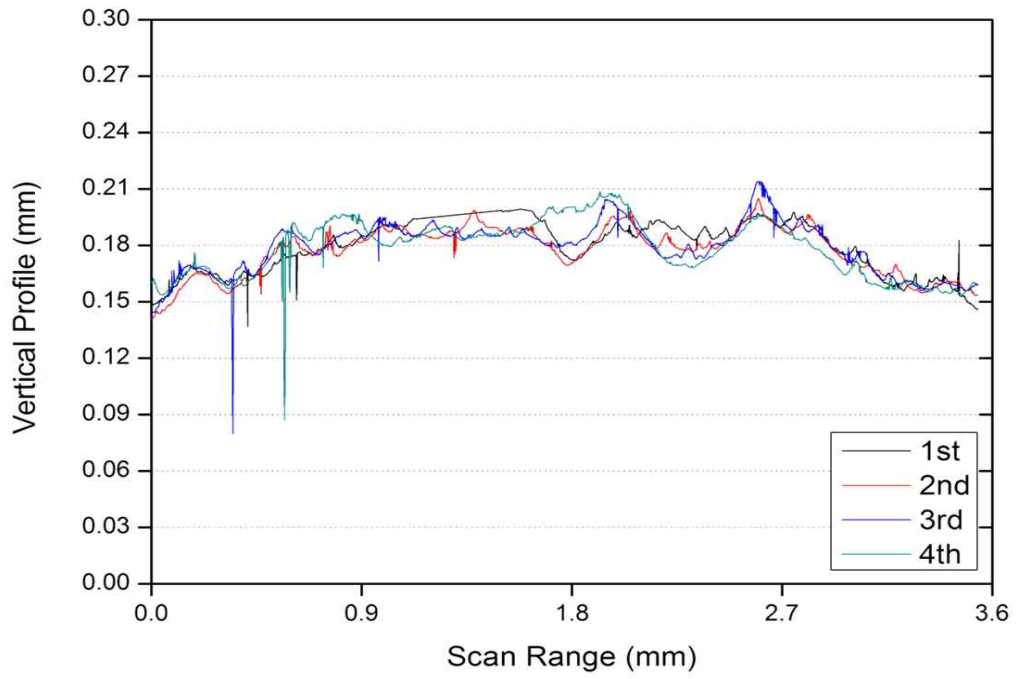


Fig. 25 Surface shape measurement results of photo-curable sculpture sample

1,2

Sample 3



Sample 4

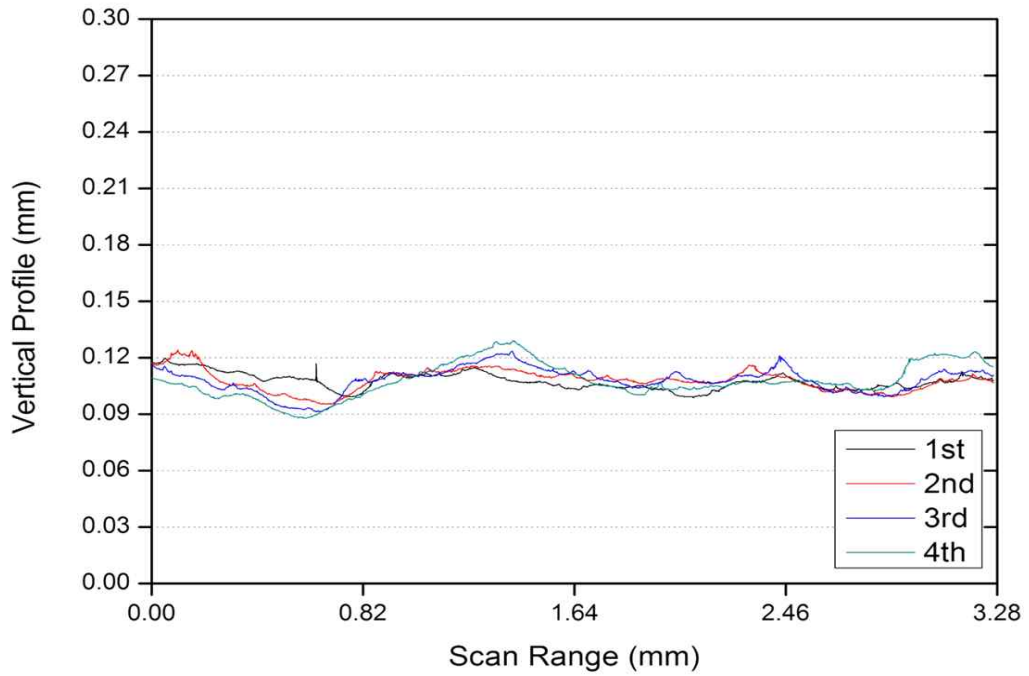


Fig. 26 Surface shape measurement results of photo-curable sculpture sample

3,4

2) 광조형물 표면 정밀도 비교 및 분석

광조형물의 표면 정밀도 확인을 위해 대표적으로 널리 알려진 FDM 3D 프린터 방식을 이용하여 동일한 공정조건에서 조형물을 제작하여 표면 거칠기를 비교 및 분석하였다. 동일 공정조건으로는 패턴두께에 큰 영향을 미치는 노즐 사이즈, 노즐 끝과 기관사이의 거리, 프린팅 속도, 레이어 두께를 변수로 설정하였다. Table 5는 FDM 3D 프린터를 이용하여 조형물 제작을 위한 공정조건이며, Fig. 27과 같은 20 mm 크기의 정사면체 FDM 3D 프린터용 조형물을 제작하였다.

Table 5 Manufacturing conditions of the sculpture made by FDM 3D printer

Process parameters	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4
Nozzle Size(μm)	400	400	400	400
Layer thickness(μm)	300	250	200	150
Stand-off(μm)	200	200	200	200
Printing velocity(mm/s)	40	60	70	50
Pattern thickness(μm)	350	305	245	190

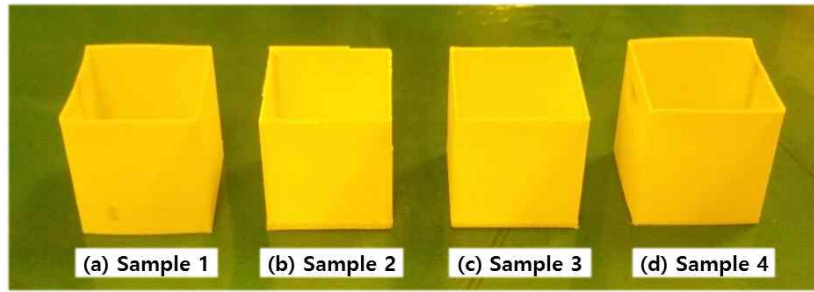


Fig. 27 The sculpture made by FDM 3D printer

패턴두께별 공정조건으로 제작한 FDM 3D 프린터용 조형물 표면을 3차원 나노 형상 측정 시스템을 사용하여 조형물의 한 면에서 가로 1mm, 세로 3mm의 면적을 측정하였다. Fig. 28은 3차원 나노 형상 측정기를 이용하여 FDM 3D 프린터용 조형물들의 표면을 측정한 결과이며, 패턴두께가 감소할수록 조형물의 표면 해상도가 향상하였다. 그리고 Fig. 23의 3차원 나노 형상 측정 시스템으로 광조형물 표면 형상 측정 결과 비교하였을 때, 광조형물의 표면 해상도 FDM 3D 프린터용 조형물보다 표면 해상도가 정밀하였다.

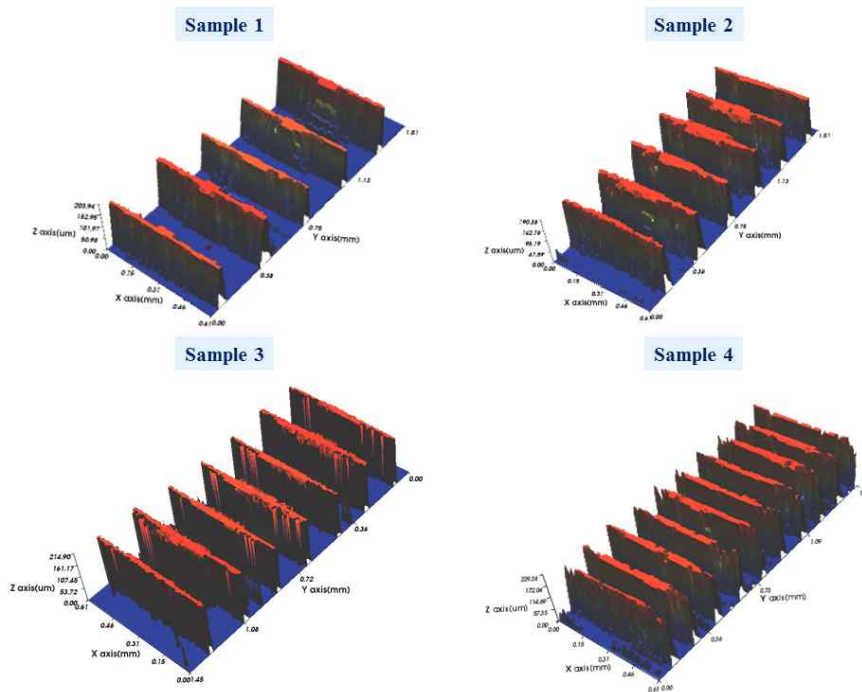


Fig. 28 Surface measurement result of the sculpture made by FDM 3D printer

Table 6은 Sample 1 ~ 4의 광조형물 표면 거칠기와 FDM 3D 프린터로 제작한 조형물 표면 거칠기를 나타낸 표이다. 두 가지 프린터 방식으로 제작한 조형물들은 패턴두께가 감소할수록 조형물의 표면 거칠기가 향상되었고, 패턴두께가 조형물의 표면 거칠기를 결정하는 공정변수이다. Table 6의 데이터를 이용하여 Fig. 29와 같이 광조형물 표면 거칠기와 FDM 3D 프린터로 제작한 조형물의 표면 거칠기를 비교 분석하였다. 각 Sample 1 ~ 4의 광조형물의 표면 거칠기가 FDM 3D 프린터로 제작한 조형물보다 표면 거칠기 값이 낮은 수치의 값을 얻었으며, 최소패턴두께에서 광조형물의 표면 거칠기는 $4.63\mu\text{m}$, FDM 3D 프린터로 제작한 조형물의 표면 거칠기는 $9.4\mu\text{m}$ 로 광조형물의 표면 거칠기가 약 $4.77\mu\text{m}$ 더 낮은 수치의 결과 값을 얻었다. 이는 광조형물의 패턴두께가 FDM 3D 프린터로 제작한 조형물의 패턴두께보다 더 얇아 면적오차가 작아지므로 광조형물 표면 정밀도가 우수하였다.

Table 6 Photo-curable sculpture of sample 1~4 according to pattern thickness and surface roughness value of the sculpture made by FDM 3D printer

Printer Technology	Sample	Pattern thickness(μm)	Surface roughness(μm)
Photocurable Sculpture	Sample 1	175	8.74
	Sample 2	140	7.1
	Sample 3	105	5.9
	Sample 4	65	4.63
FDM Sculpture	Sample 1	350	21.6
	Sample 2	305	17.4
	Sample 3	245	13.3
	Sample 4	190	9.4

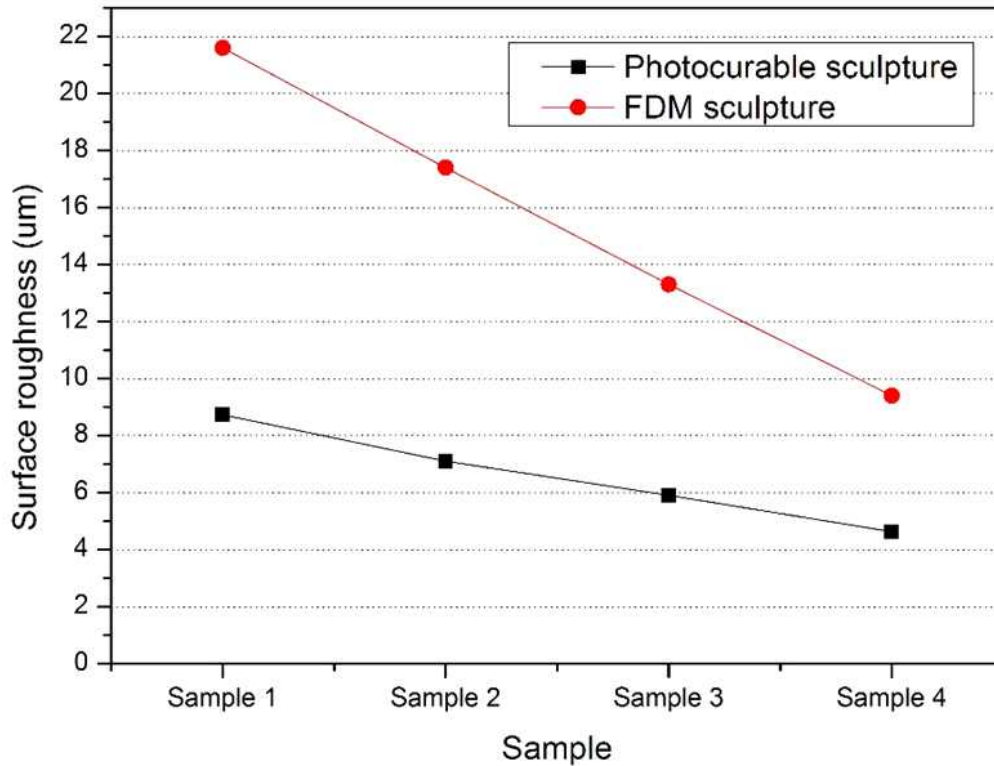


Fig. 29 Comparative analysis of surface roughness between photo-curable sculpture and FDM sculpture

패턴두께별로 제작한 광조형물과 FDM 3D 프린터로 제작한 조형물의 표면에 전도성 회로 패턴을 제작하여 광조형물의 표면 정밀도 분석을 하였다. 조형물의 표면에 일정한 전도성 회로 패턴을 제작하기 위해서는 조형물의 표면에 매끄러워야 전도성 회로 패턴이 레이어 층과 층 사이에 스며들지 않고 일정한 패턴을 형성할 수 있다. Fig. 30은 광조형물의 표면에 형성한 전도성 회로 패턴을 마이크로스코프를 이용하여 측정한 결과이며, Fig. 31은 FDM 3D 프린터로 제작한 조형물의 표면에 전도성 회로 패턴을 형성한 실제 결과이다. 광조형물의 패턴두께에 따른 Sample 1 ~ 4까지의 표면에 형성한 전도성 회로 패턴은 중간에 끊어짐 현상 없이 일정한 패턴을 형성하였다. 하지만, FDM 3D 프린터로 제작한 조형물의 표면에 형성한 전도성 회로 패턴은 레이어 층과 층 사이에 패턴이 스며들어 일정한 패턴을 형성이 불가하였다. 이는 FDM 3D 프린터로 제작한 조형물의 패턴두께가 두꺼워 레이어 층과 층 사이에 생기는 면적오차가 증가하여 조형

물의 표면이 거칠어져 일정한 전도성 회로 패턴을 형성할 수 없었다. 이를 확인하기 위해 광조형물과 FDM 3D 프린터로 제작한 조형물의 표면에 형성한 전도성 회로 패턴 전도도를 측정하였다. 광조형물의 표면에 형성한 전도성 회로 패턴은 약 20 ~ 24Ω이 측정이 되었고, FDM 3D 프린터로 제작한 조형물의 표면에 형성한 전도성 회로 패턴은 레이어 층과 층 사이에 패턴이 스며들어 전도도 측정이 불가하였다. 따라서, 패턴두께가 얇아야 면적오차를 줄이고 광조형물의 표면 정밀도를 향상 시킬 수 있으며 이에 따라 전도성 회로 패턴을 제작할 수 있다.

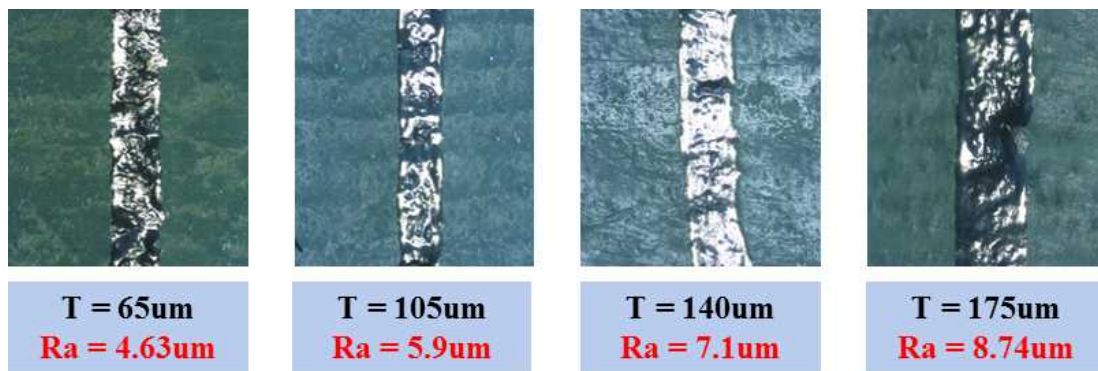


Fig. 30 Measurement result of conductive circuit pattern production on the surface of Photo-curable sculpture

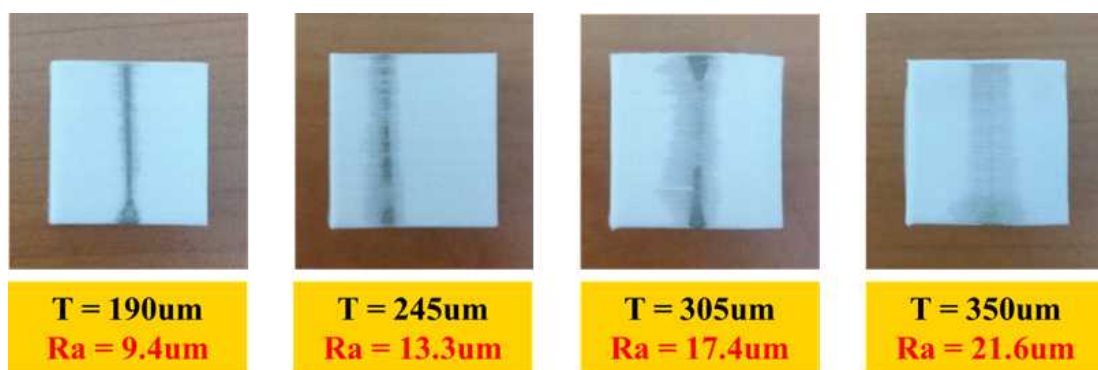


Fig. 31 Result of the conductive circuit pattern production on the surface of the sculpture made by FDM 3D printer

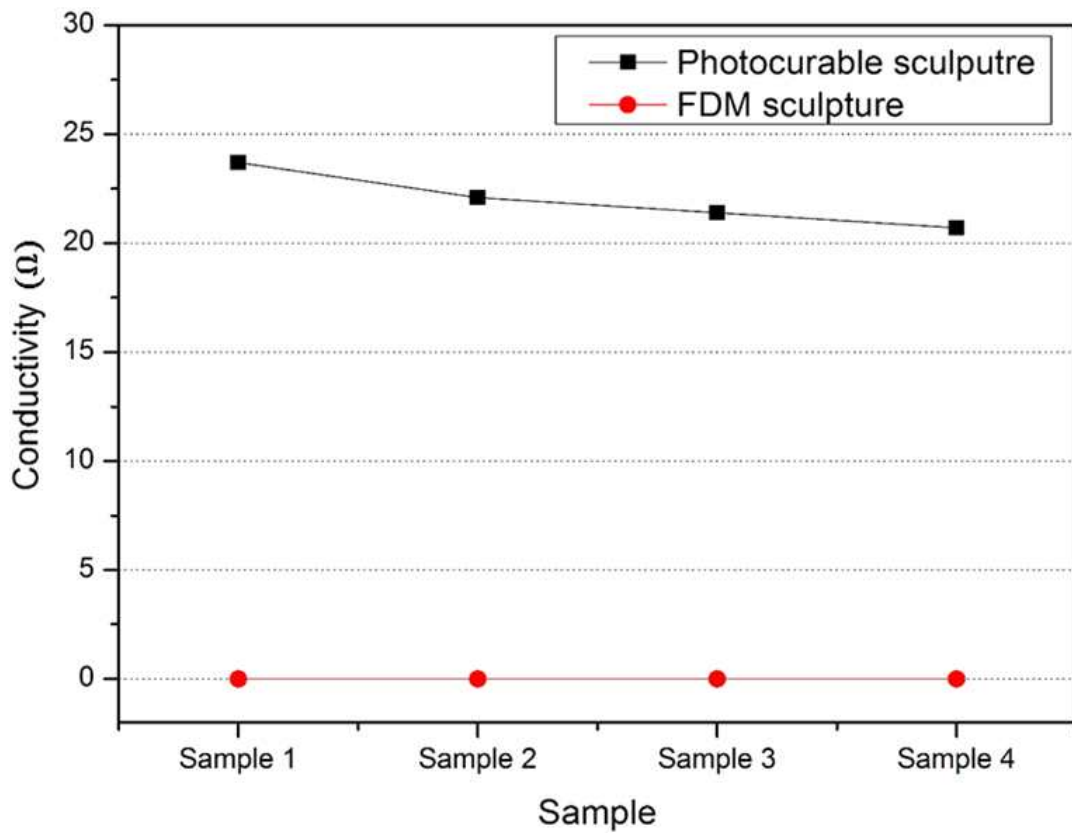


Fig. 32 Measurement result of conductive circuit pattern conductivity on the surface photo-curable sculpture and FDM sculpture

V. 결 론

최근 3D 프린팅 기술을 이용하여 다양한 분야에 적용되고 있는 가운데 최근에는 자동차, 전자제품 등의 제조시장은 신제품을 신속하게 개발 및 출시를 하기 위하여 3D 프린팅 기술이 많이 사용되고 있다. 일반적으로 제조시장의 부품생산 공정은 사출성형으로 제작된 플라스틱 부품의 표면에 배선을 연결하는 방식으로 방식으로 시간, 비용, 인력이 많이 요구되는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 MID나 임베디드와 같은 기술이 활발히 진행중이다. MID, 임베디드 기술공정은 3D 프린팅으로 제작한 조형물의 표면에 전도성 회로 패턴을 제작하는 단일 공정기술로써 제조시장의 생산 부품을 제작할 수 있는 장점을 가지고 있다. 조형물의 표면에 전도성 회로 패턴을 제작하기 위해서는 조형물의 표면이 매끄러워야 전도성 회로 패턴이 붕괴되지 않고 일정한 패턴을 형성할 수 있다. 하지만, 3D 프린팅으로 제작한 조형물의 표면은 각 층과 층 사이에서 생기는 단차에 의해 계단형상과 면적오차가 발생하여 조형물의 표면이 거칠어지는 문제점이 있다. 이로 인해 조형물의 표면의 전도성 회로 패턴들이 층과 층 사이에 스며들어 일정한 패턴이 형성하기 어려워 3D 프린팅으로 제작한 조형물의 표면 거칠기를 요구되고 있는 실정이며, 그리하여 3D 프린팅으로 제작한 조형물의 표면 거칠기 개선에 대한 많은 연구가 필요하다.

본 논문에서는 광경화성 폴리머 소재기반의 3D 프린팅 시스템을 개발하였고, 이 시스템을 이용하여 광조형물의 표면 거칠기에 대한 공정연구를 진행하였다. 출력공압과 프린팅 속도에 따른 패턴두께 실험을 통하여 최소패턴두께 $65\mu\text{m}$ 에서 최대패턴두께 $175\mu\text{m}$ 까지 약 $40\mu\text{m}$ 씩 증가하는 구간에서 공정조건을 도출하여 패턴두께별 4개의 광조형물을 제작하였다. 3차원 나노형상 측정기를 이용하여 광조형물의 한 면에서 가로 1mm, 세로 3mm의 면적을 측정하였고, X축 방향으로 0.2mm 간격을 두고 4회씩 광조형물의 표면 거칠기를 측정하였다. 패턴두께별 광조형물의 4회 표면 거칠기 값은 일정한 표면 거칠기 값을 얻었고, 이에 따라 평균 표면 거칠기 값과 표준편차를 도출하였다. 최소패턴두께 $65\mu\text{m}$ 에서 광조형물 평균 표면 거칠기 $4.63\mu\text{m}$, 최대패턴두께 $175\mu\text{m}$ 에서 $8.74\mu\text{m}$ 로 패턴두께가 감소할수

록 광조형물 평균 표면 거칠기가 약 $1.4\mu\text{m}$ 씩 저감하였고, 표준편차 $0.097 \sim 0.15$ 로 낮은 표준편차 값을 얻었다. 이는 패턴두께가 감소할수록 레이어 층과 층 사이에서 생기는 면적오차가 작아져 광조형물의 표면 거칠기를 저감할 수 있다. 광조형물의 표면 정밀도 확인을 위해 동일 공정조건에서 FDM 3D 프린터로 패턴두께 실험을 통해 최소패턴두께 $190\mu\text{m}$ 와 최대패턴두께 $350\mu\text{m}$ 결과를 얻었다. 패턴두께별 공정조건으로 조형물을 제작하고 광조형물의 표면 거칠기와 비교분석을 하였고, 조형물의 표면에 전도성 회로 패턴을 제작하였다. 최소패턴두께에서 광조형물 표면 거칠기 $4.63\mu\text{m}$, FDM 3D 프린터로 제작한 조형물의 표면 거칠기 $9.4\mu\text{m}$ 로 광조형물의 표면 거칠기 값이 더 낮은 수치를 보였다. 그리고 광조형물과 FDM 3D 프린터로 제작한 조형물의 표면에 전도성 회로 패턴을 형성하고 전도도 측정을 하였다. 광조형물 매끄러운 표면에는 일정한 전도성 회로 패턴이 형성되어 전도도 $20 \sim 24\Omega$ 의 값을 얻었고, FDM 3D 프린터로 제작한 조형물의 거친 표면에는 일정한 전도성 회로 패턴 형성되지 않아 전도도 측정이 불가하였다.

참고 문헌

- [1] Jae-Won Choi, Ho-Chan Kim, "3D Printing Technologies - A Review", The Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 14, No. 3, pp. 1-8, 2015
- [2] Amit Lopes, Misael navarrete, Francisco medina, Jeremy Palmer, Eric MacDonald, Ryan Wicker,"Expanding rapid prototyping for electronic systems integration of arbitrary form", Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings, Vol. 17, pp. 664-655, 2006
- [3] David Esplin, Danny W.Muse, Eric MacDonald, Ryan B. Wicker,"3D Printing multifunctionality : structures with electronics", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 72, pp. 963-978, 2014
- [4] Bong-Jin Lee," Patent Trend Analysis in 3D Printing", The Korean Society of Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 18, No. 1, pp. 45-59, 2015
- [5] 광기호, 박성우, "글로벌 3D 프린터 산업 기술 동향 분석", 기계기술정책, Vol. 53, No. 10, pp. 58-64, 2013
- [6] R Vignesh, R Suganthan, and K Prakasan, "Devlopment of CAD models from sketches : a case study for automotive applications", IMechE, Vol. 221, pp. 41-47, 2007

- [7] H. J. Ko, H. C. Kim, H. Y. Yun, "Study on Fabrication of 3D MID Cruise Control Switch", The Korean Society of Mechanical Engineers, pp. 1796-1797, 2013
- [8] I. H. Lee, S. H. Jang, S. T. Oh, M. K. Kim, H. C. Kim, H. Y. Cho, "3-Dimensional Circuits Device Fabrication Technology based on the 3-D Printing", The Korean Society of Mechanical Engineers, pp. 1896-1900, 2015
- [9] Byoung man Paik, Jae hoon Lee, Dong Sig Shin, Kun Sang Lee, "Development of Three Dimensions Laser Direct Patterning System", Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 21, No. 1, pp. 116-122, 2012
- [10] M. K. Ha, J. U. Jun, "Influence of injection Amount Variation on Surface Roughness at FDM", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 6, No. 2, pp. 54-59, 2002
- [11] J. U. Jun(Mech Eng. Dept, BIT), J. A. Kim(Mech Eng Dept, KIT), Y. M. Hwang, H. M. Park(Mech Eng. Dept, of Graduate school PKNNU), M. K. Ha(Mech Eng Dept, PKNNU), "Influence of Slice Interval on Surface Roughness with Area Error method at Fused Deposition Manufacture", The Korean Society of Manufacturing Process Engineers, pp. 70-73, 2003

- [12] J. U. Jun, J. S. Jung, S. K. Kim, J. A. Kim, H. J. Kwon, M. K. Ha, "A Study on the Improvement in Surface Roughness of Rapid Prototype at FDM", The Korean Society of Mechanical Engineers. pp. 195-200, 2002
- [13] Jae Uhk Jun, Jin Ho Seo, Kwang Jin Kwon, Heok Jun Kwon, Jin Seo Chung, Man Kyung Ha, "Study on Surface Roughness by Build Orientation at FDM", KSMTE The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, pp. 591-596, 2002
- [14] Man-Kyung Ha, Jae-Uhk Jun, Jin-Seo Chung," The influence of surface roughness on injection interval and part angle at FDM", KSMTE The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, pp. 104-109, 2001
- [15] Ha Man-Kyung, Jun Jae-Uhk, "Influence of Tangent Line Angle on Surface Roughness at Fused Deposition", The Korean Society of Manufacturing Process Engineers, pp. 23-28, 2002
- [16] Man-Kyung Ha, Jae-Uhk Jun, "The Influence of Surface Roughness on Slice Interval Adjustment at FDM", KSMTE The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, pp.68-74, 2002

- [17] Dae Keon Ahn, Jeong Il Song, Soon Man Kwon, Seok Hee Lee, "A study on indeterminate characteristics of surface roughness distribution of the FDM processed part", The Korean Society of Mechanical Engineers, pp. 9-12, 2008
- [18] M. K. Kim, I. H. Lee, H. Y. Cho, "Fabrication Line Width of the FDM Structure by Discharge Rate of Material", Korean Society Of Precision Engineering, pp. 514-515, 2015
- [19] Sung Hwoan Kim, Eun Dok Lee, In Hwan Paik, "Progress of the StereoLithography Product's Shape Accuracy by Temperature Control of the Resin", Korean Society Of Precision Engineering, pp. 808-811, 2000
- [20] Dae-Kun Ahn, Ho-Chan Kim, Seok-Hee Lee, "Selection of Build Orientation for Reducing Surface Roughness with Stereolithography Parts", Korean Society Of Precision Engineering, pp. 137-140, 2001
- [21] Dae Keon Ahn, Jeong Il Song, Soon Man Kwon, Seok Hee Lee, "A Computation Methodology of Support Contact Area in Stereolithography", The Korean Society of Mechanical Engineers, pp. 629-632, 2008
- [22] Yeong-Heum Kim, Kyu-Eon Kim, Chibum Lee, "Accuracy Improvement of Output in Projection Stereolithography by Optimizing Projection Resolution", Journal of the Korean Society of

Manufacturing Technology Engineers, Vol. 24, No. 6, pp. 710-717, 2015

[23] Dae Keon Ahn, Ho Chan Kim, Hae Do Jeong, Seok Hee Lee, "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, 2004

[24] Ji Soon Choi, Seung Pyo Lee, In Hwan Lee and Tae Jo Ko, "Development of a Novel Micro-stereolithography Technology using UV Lamp and Optical Fiber", Journal for the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 23, No. 12, pp. 117-121, 2006

[25] Blake P. Heller, Douglas E. Smith., David A. Jack, "Effects of extrudate swell and nozzle geometry on fiber orientation in Fused Filament Fabrication nozzle flow", Additive Manufacturing, pp. 1-13, 2016

[26] Gui Lu, Xiao-Dong Wang, Yuan-Yuan Duan, " A Critical Review of Dynamic Wetting by Complex Fluids: From Newtonian Fluids to Non-Newtonian Fluids and Nanofluids", Advances in Colloid and Interface Science, Vol. 236, pp. 43-62, 2016

[27] N. ANANTHARAMAIAH, H. VAHEDI TAFRESHI and B. POURDEYHIMI, "NUMERICAL SIMULATION OF THE FORMATION OF CONSTRICTED WATERJETS IN

HYDROENTANGLING NOZZLES Effects of Nozzle Geometry,
Trans IChemE, Part A, Vol. 84, pp. 231-238, 2006

- [28] Ho-Chan Kim, Boo-Young Kim, Seok-Hee Lee, "Layout Planning for Stereolithography Parts using 3D Collision Detection Algorithm", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 27, No. 9, pp. 1546-1554, 2003
- [29] Hong-Tae Choi, Seok-Hee Lee, "A Study on Laser Scan Path Generation for Improving the Precision of Stereolithographic Parts", Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 13, No. 12, pp. 142-150, 1996
- [30] Boo-Young Kim, Ho-Chan Kim, Suk-Hee Lee, "Part Layout Algorithm for Stereolithography system", Korean Society Of Precision Engineering, pp. 121-124, 2001
- [31] Jae Uhk Jun, Jin Seo Jung, Young Mo Hwang, Soo Kwang Kim, Jun Ahn Kim, Joong Yup Ke, Man Kyung Ha, "A Study on The Surface Roughness and Area Error at FDM", KSMTE The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, pp. 24-29, 2002
- [32] J. U. Jun, H. J. Kwon, S. K. Kim, J. A. KIM, J. S. Jung, M. K. Ha, "Prediction of sphere surface by the theoretical area error at FDM", Korean Society Of Precision Engineering, pp. 262-265, 2002