

ART 수지의 DLP 3D Printing 가공 시 실험변수의 영향

신근식*, 권현규**,#, 강용구***

*금오공과대학교 대학원 기계설계공학과, **금오공과대학교 기계시스템공학과, ***금오공과대학교 기계설계공학과

The Influence of Experiment Variables on DLP 3D Printing using ART Resin

Geun-Sik Shin*, Hyun-Kyu Kweon**,#, Yong-Goo Kang***

*Department of Mechanical Design Eng., Graduate School, KIT UNIV. **Department of Mechanical System Eng., KIT UNIV., ***Department of Mechanical Design Eng., KIT UNIV.

(Received 10 August 2017; received in revised form 1 October 2017; accepted 8 November 2017)

ABSTRACT

Recently, the patent rights for 3D printing technology have expired, while 3D printers with RP (Rapid Prototyping or Additive Manufacturing) and 3D printing technologies are receiving attention. In particular, the development of 3D printers is rapid in Korea, thanks to the increasing sales and popularity of FDM (Fused Deposition Modeling or Fused Filament Fabrication) 3D printers. However, the quality and productivity of the FDM 3D Printer are not good, so customers prefer the DLP (Digital Light Processing) method to avoid these shortcomings. The DLP method has high quality and productivity. However, because of the stereolithography equipment, it has few studies compared to optimal values for elements then FDM 3D printing study. In this study, to find the optimal conditions for 3D printing with the DLP method, the aim is to obtain the optimal values (strength, final time, quality) by changing the light exposure time, layer thickness, and z-axis speed.

Key Words : 3D Printer(3차원 프린터), ART Resin(아크릴 수지), DOE(실험계획법), Factorial Design(요인 배치법), Digital Light Processing(DLP)

1. 서 론

현대에 들어 제품 시장은 고객의 요구(Customer Needs)를 충족시키기 위해 제품 개발 및 설계를 중점으로 성장하고 있으며, 투자비용은 적게 들고 생

산 단가를 낮춰 이윤을 추구하고자 하는 목적으로 초도품(Prototype) 제작을 위한 신제품 개발에 3D Printing 기법인 래속 조형(Rapid Prototyping)을 많이 사용하고 있다. 특히 최근 개발되고 있는 3D 프린터는 금속 파우더, 플라스틱 등 다양한 재료를 이용하여 입체 모형을 만들어 낼 수 있다는 점에서 주목받고 있다.^[1]

초도품 제작뿐만 아니라 인체, 일상생활에서도 3D 프린터를 사용하면서 사용범위가 점차 확대되

Corresponding Author : hyunkyu125@gmail.com
Tel: 010-9856-8129

고 있는 실정이다. 특히 우주공학측면에서 볼 때 달 표면에 구조물을 건설하기 위해 3D Printing 기법을 활용하는 방안도 연구 중에 있다.^[2]

따라서 근 미래적으로 볼 때 3D 프린터의 활용도는 높아질 것으로 보이며 특히 3D Printing 제품의 생산성 및 품질 면에서 많은 연구들이 진행되어 왔다. 3D 프린터로 제작된 부품들은 적층으로 만들어지는 이방성 구조특성으로 인해 NC 가공이나 압출성형 등으로 제작되는 기성품에 비해 강도면이나 형상 성형에서 떨어지는 경향이 있다.^[3]

이처럼 3D Printing 기법으로 제작되는 제품의 기계적 특성은 다양한 인자들에 의해 영향을 받는데 Choi 등의 FDM(Fused Deposition Modeling) 방식의 PLA의 물성치에 대한 연구^[4]가 대표적 연구결과이며, 그 외로 필라멘트(Filament)화 시킨 플라스틱을 녹여 적층하는 FDM 방식에 대한 출력물의 물성치에 관한 연구가 대다수로 액상형 레진(Resin)을 통해 광 경화를 이용한 출력물에 관한 연구가 필요하다. 또한, Park 등의 Polyjet 방식의 적층별 물성평가 연구^[5] 및 Kim의 Polyjet 방식을 이용한 베벨기어의 제작특성에 관한 실험적 연구^[6]는 FDM 방식과 DLP(Digital Light Processing) 방식의 혼합물인 Polyjet 방식으로 UV를 이용한다는 점에서는 비슷하나 FDM 방식처럼 노즐을 통해 쏘아준 뒤 경화시킨다는 점에서 액상 자체에서 경화시키는 DLP 방식, SLA 방식에 대한 제품별 출력물의 물성치가 필요한 시점이다.

본 연구는 액상형 수지(Resin)인 ART(Acryl Resin)와 UV로 경화시키는 3D Printing 기법인 DLP 방식의 3D 프린터를 이용해 제품 생산에 영향을 미치는 인자를 검토하여 강도, 시간 및 품질에 대해 실험계획법(DOE, Design Of Experiments)을 통해 최적의 조건을 얻고자 한다.

2. 3D 프린터와 실험계획법

2.1 3D 프린터의 한계

현재 사용되는 3D프린터는 플라스틱을 고온에서 녹여 한 층씩 쌓아 올라가는 적층 방식인 FDM 방식^[7]으로 구하기 쉽고 프린터 자체가 사용재료가

Table 1 3D Print Comparison

Type	Cost (\$)	Used Materials	Material Cost (1Kg, \$)
FDM	300 ~ 2000	Solid Plastic	10 ~ 80
DLP	2000 ~ 8000	Liquid Resin	100 ~ 200

값이 비싸지 않아 일반인들이 쉽게 구할 수 있다. 또한 소프트웨어 프로그램 또한 오픈소스로 배포되어 개인이 제작하여 판매 가능하기에 3D 프린터 시장에서 대다수를 차지하고 있다. 다만 물리적 방식으로 적층하다 보니 정확성 및 정밀도가 떨어지고 생산 시간이 오래 걸려 생산성이 떨어진다. 게다가 기존의 압출로 성형된 플라스틱 제품에 비해 강도가 약하기 때문에 적층된 모델링에 대한 기계적 특성에 대한 연구가 진행되어 왔다.

본 논문에서 사용할 DLP 방식의 경우 가격 및 품질 면에서 기존의 FDM 방식에 비교해 제품의 크기는 작으나 생산성 및 품질이 우수함을 알 수 있다. Table 1에서는 FDM 방식과 DLP 방식의 3D 프린터의 제품가격, 사용재료 및 재료비에 관하여 비교하였다.

2.2 DLP 방식 3D 프린터

DLP 방식은 마스크 투영 이미지 경화방식이라 할 수 있는데 액체 상태의 광 경화성 수지(Photo Polymer Resin)에 DMD (Digital Micro mirror Device) Chip을 이용한 DLP Beam Projector를 사용하거나 LCD(Liquid Crystal Display) Projector를 사용하여 조형하고자 하는 모양인 디지털 마스크 영역만큼 고 해상도의 자외선을 투사시켜 광중합반응을 유도함으로써 수지를 경화시켜 적층한다.

DLP 3D 프린터의 대표적인 장점은 출력물의 정밀도 및 생산 속도이다. 빔 프로젝터에서 쏘는 빛의 조형이 면 단위로 형성되기 때문에 마이크로 단위의 적층으로 인한 세밀한 표면조도를 가지며 FDM 3D 프린터의 점단위로 적층했던 방식에서 벗어나 면단위로 적층되기 때문에 정밀도 및 생산속도가 월등히 높다.

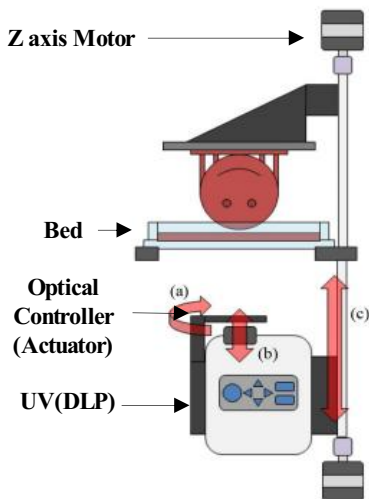


Fig. 1 DLP Printer Principle^[8]

점단위로 적층시키는 방법 중 DLP 3D 프린터와 유사한 SLA(Stereo Lithography Apparatus)^[8] 방식은 광 경화성 수지에 집적 레이저 빔을 표면에 쏘아주면서 한 층씩 경화시키는 방식으로 DLP 방식과 비교하였을 때, 정밀도 측면에서는 SLA가 우수하나 레이저의 한 점으로만 경화시키기 때문에 면단위로 경화시키는 DLP 3D 프린터에 비해 출력속도가 느리다. 대신 조형물이 거꾸로 매달려 조형되기 때문에 중력 및 접착력에 의해 실패율이 높아 조형물의 크기가 한정되었다는 점에서 DLP 방식의 단점이 확연하게 드러난다. Fig. 1은 본 연구에서 사용한 DLP 방식의 3D 프린트의 기본구조이다.

2.3 실험계획법

실험계획법(DOE)은 해결하고자 하는 문제를 대상으로 실험을 행하고, 데이터를 어떻게 취급하며 또한 실험을 통해 얻어진 데이터를 통계적 방법으로 분석하는 것을 계획하는 데에 있다. 주로 사용되는 데이터 해석으로 분산분석법, 상관회귀분석, 다변량 해석법, 다구짜 실험계획법 등이 있다. 특히, 실험 데이터에 수반되는 오차를 가지고 정확한 분석을 행하거나 다수의 요인을 실험하면서 최소의 실험 횟수로 효율을 높이거나 경제성 있는 실험 방법이 필요한 경우 실험계획법을 통해 보다 효율적

이고 정확한 결론을 얻을 수 있다. 실험계획의 목적은 크게 4가지로 구분할 수 있는데 이 중 반응치에 영향을 미치는 인자의 최적조건을 찾기 위한 최적 반응 조건을 결정하는 데에 목적을 둔다. 본 연구는 실험계획법 중에서도 최적 조건을 결정하기 위한 문제로 실험 목적을 달성할 수 있는 최소 인자와 수준수를 선정된 뒤 시간 및 공간적으로 Random화하는 요인배치법을 이용해 데이터를 분석하고자 한다.^[9-10]

2.4 요인배치법

요인배치법(Factorial Design)은 실험계획법 중 하나로 실험인자의 모든 수준 조합에 대해 실험을 진행 하는 방법으로 2^k 요인 배치와 일반 완전 요인 배치, 부분 요인배치가 있다. 2^k 요인 배치는 인자가 2개일 때 가능하며 부분 요인배치의 경우 완전 요인 배치에 비해 정보 손실이 생기게 되므로 3개의 인자를 가지는 3인자 완전 요인 배치법에 의해 문제를 해결하고자 한다. DLP 프린터에서 Printing 될 때 생산성 및 품질이 중요하다. 이에 속도에 직결되는 요인으로 각 층별 광 노출시간과 z축으로 움직이는 속도, 적층 두께가 대표적이데, 세 인자를 결정하였을 때 이에 따른 결과 값으로 제품 출력 시 걸린 시간, 강도 및 품질을 구하고자 한다.

3. 실험방법 및 데이터 분석

3.1 시험편과 실험장치

본 연구에서는 인장시험을 통해 각 조건에 따라 제작된 ART 수지의 시험편의 기계적 특성을 구하고자 한다. 시험편 제작을 위해 인장강도 측정시험편 규격 ASTM D638의 플라스틱 재료의 시험조건을 적용하였다. 규격에 따른 시험편 도면은 Fig. 2에 나타내었다.

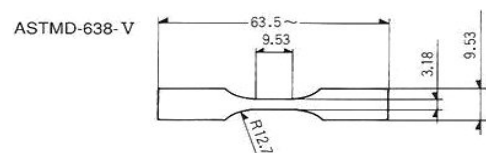


Fig. 2 ASTM D638 Type 5

Table 2 Physical and mechanical properties of PMMA

Division	Figure
Light Transmission	92.5%
Tensile strength	87.15MPa
Tensile elongation	8.116%
Flexural Strength	94.16MPa
IZOD Impact Strength	1.4511KJ/m ²

본 실험에서 사용한 DLP 프린터는 (주)이에이스의 직지 DLP 프린터로써 vivitek사의 D556라는 3000 ANSI 밝기를 가진 UV가 탑재된 프린터이며, DLP 프린터에서 조사된 자외선 영역의 빛(UV)이 수조 내 담겨진 MOODEUNG사의 ART(Acryl Resin) 수지가 층별로 제작되어진다. 본 연구는 일반 아크릴 시트인 PMMA(Poly Methyl Methacrylate)와 물성치를 비교하고자 한다. Table 2는 PMMA의 물성치를 나타내고 있다.

3.2 실험방법

3D 프린터로 제작된 제품에 영향을 주는 실험 변수를 슬라이스 프로그램을 통해 광 노출 시간, 적층 두께, z축 이송속도를 우선 적용하고, 인장시험을 통해 실험변수 별 인장강도를 측정하여 3인자에 대한 최대 인장강도를 구한다. Fig. 3은 인장강도를 측정하기 위해 사용된 인장시험기 INSTRON Model 8800이다.

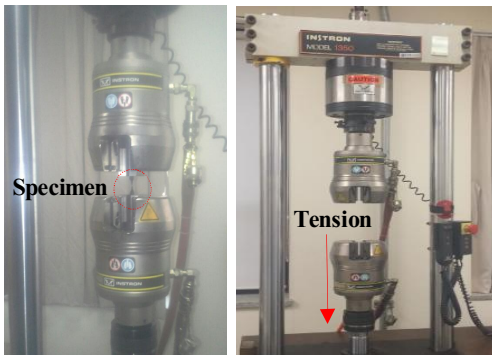


Fig. 3 INSTRON Model8800

Table 3 Condition of 3 Factors

Division	Figure
Light Exposure Time(s)	1, 2, 3
Layer Thickness(μm)	100, 80, 60
Z axis Speed(ms)	8500, 8000, 7500

Table 4 Variables accordint to the final time

Unknown	Contents	Equation
t_a	First layer exposure total time	ax_1
t_b	Later layer exposure total time	$b(x-x_1)$
t_c	Bottom stop total time	cx
t_d	Actuator move total time	$d(x+x_1)$
t_z	Lift up & down total time	zx

Table 3은 제작한 시편의 주요 인자로써 이를 바탕으로 3인자에 따른 결과를 비교하고자 한다.

3.3 결과분석

총 걸린 시간은 출력에 영향을 주는 변수들에 의해 결정 되는데 z축 이동시간, 첫 레이어 노출 시간, 나중 레이어 노출시간, 영점 좌표 인식 시간, 조리개 개폐 시간 및 상단에서 정지한 시간을 합한 값이다. 여기서 모델의 크기(h)는 적층 개수(x)와 적층 두께(y)의 곱으로 주어진다면 최종 시간에 영향을 미치는 변수들을 Table 4와 같이 정리 할 수 있다.

위 데이터를 3인자인 적층두께(y), 레이어 노출 시간(b), z축 이송시간(z)을 미지수로 정리하면

$$t_{\text{total}} = t_a + t_b + t_c + t_d + t_z \quad (1)$$

$$t(x) = ax_1 + b(x-x_1) + cx + d(x+x_1) + zx \quad (2)$$

이고, 첫 레이어 적층 개수 $x_1=3$ 과 Input 값으로 고정될 $a=4$, 실제 하단부에 머무는 시간 c와 Actuator가 움직이는 시간 d를 실측을 통해 평균 값으로 구한 값인 $c=3.5$, $d=0.48$ 과 적층 개수 $x=h/y$ 로 놓았을 때 최종적으로 적층 두께(y)에 대한 식은 다음과 같이 정리된다.

$$t(x) = 12 + b(x-3) + 3.5x + 0.48(x+3) + zx \quad (3)$$

$$t(y) = (b+z+3.98)h/y - 3b + 13.44 \quad (4)$$

4. 실험결과 및 고찰

4.1 강도

Table 3에서 설명한 3인자에서 2개의 실험 데이터를 정리하였을 때 총 8개의 인장강도 값이 나오는데 반복 횟수를 2회로 잡아 날짜를 기준으로 2블록으로 나뉘었을 때 총 16번의 인장 시험을 해야 한다. Fig. 4는 적층으로 인한 이방성 Model의 모식도 및 인장시험을 위한 ART 시편이다.

최종적으로 각 인자 별 결과 치인 인장강도는 다음의 Fig. 5와 Fig. 6과 같이 정리된다. 이 결과로부터 광 노출 시간에 따라 인장강도 값이 달라지며 노출 시간이 클수록 강도가 커짐을 알 수 있다.

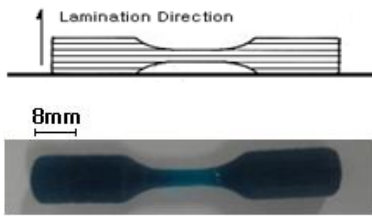


Fig. 4 Anisotropy Model(Up) & ART Specimen (Down)

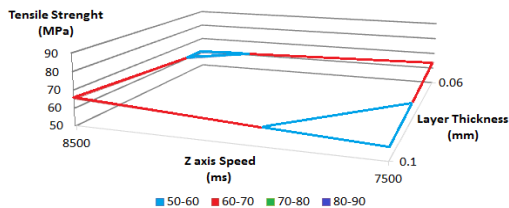


Fig. 5 Light Exposure Time 2s

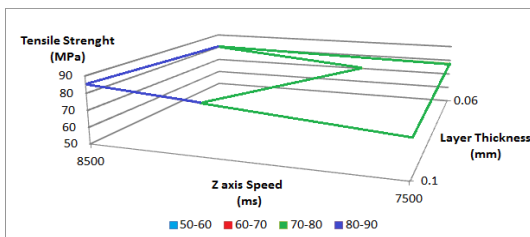


Fig. 6 Light Exposure Time 3s

4.2 속도

최종 걸린 시간은 컴퓨터 내 예상시간과 실제 걸린 시간 및 3.3절에서 정리한 이론 시간으로 나타낼 수 있으며 Table 5는 3개의 데이터를 정리한 표이다.

이를 통해 실제 걸린 시간에 대한 예상 시간 및 이론 시간의 오차는 0.88%이며 Table 5를 통해 컴퓨터에서 계산된 데이터와 이론적으로 계산된 데이터가 0.16%로 거의 일치 하는 것을 알 수 있다.

제품 생산에 필요한 최적의 데이터를 도출하기 위해 결과 치인 최종 시간을 각 인자별로 나누어 Minitab 17으로 분석하였을 때 요인배치법에 의해 다음과 같이 나타내었다.

Fig. 7은 각 요인간의 관계를 그래프를 통해 각각 나타낸 것으로 Fig. 8을 통해 알 수 있듯이 실제 걸린 시간은 두께에 따라 큰 차이를 나타냄을 알 수 있다.

Table 5 Total 3D Printing time

Layer exposure time(s)	Z axis speed (ms)	Layer thickness (μm)	Prediction time(s)	Theory time(s)	Real time(s)
2	8500	100	1390	1387.3	1399
2	8500	60	2304	2307.3	2333
2	7500	100	1295	1292.1	1340
2	7500	60	2146	2148.5	2156
3	8500	100	1482	1479.7	1486
3	8500	60	2459	2463.2	2467
3	7500	100	1387	1384.4	1392
3	7500	60	2301	2304.3	2311

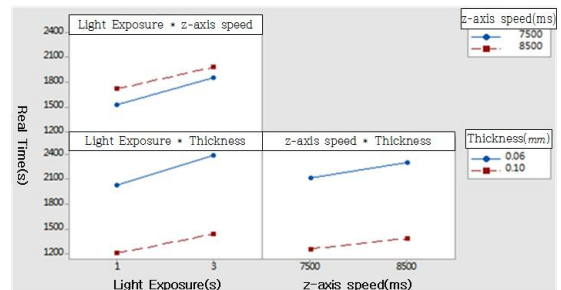


Fig. 7 Relationship between the factor

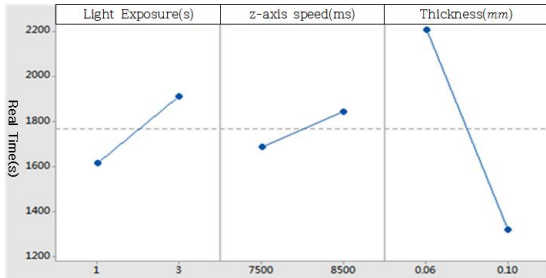


Fig. 8 Influence of factors by time

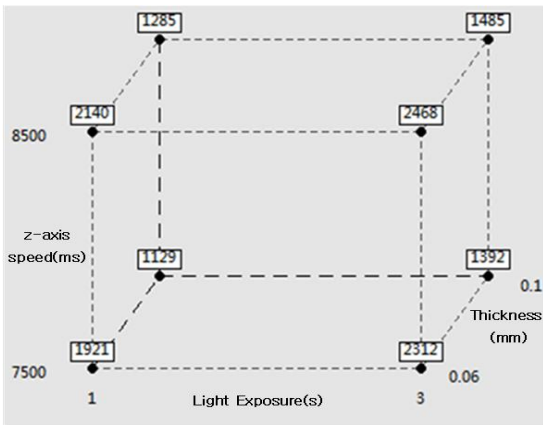


Fig. 9 Time data sheet

Fig. 9는 Time data sheet를 나타낸 것으로, 이 결과로부터 가장 빨리 적층 되는 인자들의 최적 데이터로 광 노출 1초에서 두께 0.1mm로 z축 이송 시간을 7500ms로 이동하였을 때 1129s의 적층 시간이 걸림을 확인할 수 있었다.

4.3 품질

3인자의 조건 별 제품의 품질 변화에 대한 분석을 위해 시편을 제작하여 표면의 품질에 대해 알아보고자 한다. 완전한 원형 적층이 되어야 하나 층을 이루며 구형을 그리기 때문에 두께가 최소여야 원형에 가까워진다. 이에 광학현미경을 통해 픽셀단위로 완전한 원과 실제 시편 사이에 남는 면적을 구하여 최종 면적에 대한 면적오차가 가장 적은 인자들의 최적의 조건을 구하고자 한다.

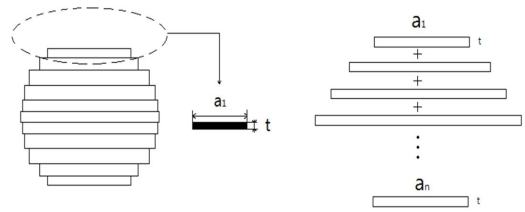


Fig. 10 Layer Measure Method

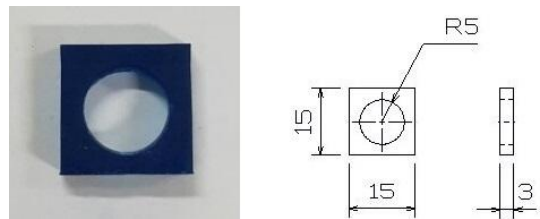


Fig. 11 Layer Measure Specimen(mm)

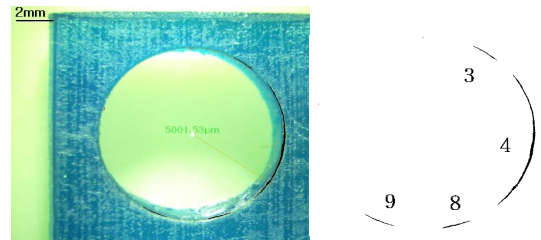


Fig. 12 Location Surveying(L) & Error Area(R)

Fig. 10은 적층의 두께 별 원이 형성되는 모양을 모식화한 것으로 적층 두께가 얇을수록 구형에 가까워짐을 알 수 있다. 이에 3D Printing을 통해 품질에 있어 주요 3인자인 두께 및 광 노출시간과 z축 이송에 관련하여 실험하였다.

완전한 원을 Printing할 수 없으므로 Fig. 11처럼 Modeling하여 Fig. 12(L)과 같이 광학현미경을 통해 진원에서의 원과 시료의 원 사이 오차를 측정하였으며, 측정 전 사진은 Photo Shop을 이용하여 흑백으로 만들어 Image J 프로그램을 사용해 측정할 면적에서 threshold 항목의 오차면적의 최소치를 선택한 뒤 Fig. 12(R)과 같이 검정색만 판별하도록 한다. 이후 analyze하여 원 간의 면적에 대한 오차를 Fig. 13과 같이 pixel단위로 구할 수 있다.

	Area	Mean	Min	Max
1	1	28	28	28
2	2	33.500	33	34
3	106	13.613	0	35
4	1324	7.325	0	31
5	1	35.000	35	35
6	1	32.000	32	32
7	1	33.000	33	33
8	110	13.191	0	32
9	150	7.373	0	22

Fig. 13 Error Area Data(Pixel)

가로×세로 해상도는 96DPI로 1인치 당 96개의 점이 분포됨을 의미한다. 즉, 25.4mm당 96pixel이며 광학현미경의 접안렌즈 배율이 10×이고 0.65× 배율로 보았을 때 본 시편보다 6.5배 더 크게 측정된다.

그러므로 1pixel=0.264583/6.5mm이며 한 픽셀 당 0.0407mm이므로 위 데이터들을 정리하였을 때 픽셀의 총 개수에 픽셀의 가로×세로를 곱한 값이 최종 오차 면적이며 다음 Table 6으로 나타낼 수 있다.

Table 6을 통해 알 수 있듯이 3D Printing 전 예상 면적은 지름 10mm의 원 면적 78.537mm²와 비교했을 때 적층 두께가 작을수록 면적 오차가 작음을 보여준다. 하지만 적층 두께 별 예상면적과 실제면적을 비교하면 다른 인자를 제외했을 때 0.1mm에서는 1.719mm² 정도로 큰 차이가 나지 않았지만 0.05mm에서는 5.283mm² 정도로 약 10배 정도의 결과를 확인할 수 있었다.

Table 6 Quality of Specimen(circle area=78.537mm²)

Layer exposure time(s)	Z axis speed (ms)	Layer thickness (μm)	Prediction Area (mm ²)	Real Area (Pixel)	Real Area (mm ²)
2	7500	100	1.081	1690	2.800
2	8500	100	1.081	4087	6.772
2.5	7500	100	1.081	1874	3.105
3	7500	100	1.081	2525	4.183
2	7500	50	0.527	3616	5.991
3	7500	50	0.527	3507	5.810

5. 결론

본 연구에서는 DLP 방식의 3D Printing의 최적 조건을 구하기 위하여 3개의 인자인 광 노출 시간, 적층 두께, z축 이송속도를 변화시켜가면서 강도 및 최종 시간, 품질에 대한 최적의 값을 얻고자 하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 강도에 영향을 주는 인자로는 광 노출 시간으로 노출 시간이 클수록 강도가 강해졌고, 실제 아크릴의 Tensile Strength가 87.15MPa일 때 적층 실험값인 최대 85MPa로써 이방성에 의한 강도변화는 없는 것으로 확인되었다.
2. 걸린 시간에 가장 큰 영향을 미치는 인자로 적층 두께를 들 수 있으며 이는 다른 인자인 z축 이송시간과 광 노출시간을 비교하였을 때 두 인자들을 1s 증가시키는 것보다 적층 두께를 0.1mm 줄였을 때 약 4배 가량 시간을 단축시킴을 식 (4)와 Table 5를 통해 알 수 있다.
3. 품질의 경우 레이어 두께가 작을수록 오차면적이 작을 것으로 예상되었으나 두께가 작아짐에 따라 적층 시간이 증가하면서 장기간 수지를 빛에 노출시켜 경화시키기 때문에 이로 인해 필요 이상의 주변 수지까지 경화시켜 치수 오차가 Table 6처럼 약 1.8mm²만큼 커진 것으로 보인다.
4. 본 연구에서 사용된 DLP 3D 프린터의 경우, 적층 두께는 0.1mm, z축 이송시간은 7500ms, 광 노출 시간은 2.5s로 유지하였을 때가 강도 및 시간과 품질에 대해 가장 적합하며 본 연구의 실험방식을 통해 각 DLP 3D 프린터의 최적의 조건을 구할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 지원된 논문입니다.

REFERENCES

1. Choi, E. J., "A Study on the State-of-the-Art of 3D Printers," Proceedings of the Korean Society

- of Computer Information Conference, Vol. 20, No. 2, pp.385~388, 2013.
2. Cho, J. H., "An Analysis on the Effects of 3D Printers on Visual Entertainment," Journal of Korean Society of Design Culture, Vol. 21, No. 2, pp.589~599, 2015.
 3. Kim, W. S., "Open Source Hardware Design Using 3D Printer," Korea Design Knowledge Society, Vol.26, pp.113~124, 2013.
 4. Choi, W., "Measurement of Structural Properties of PLA Filament as a Supplier of 3D Printer," Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers, Vol. 57 No. 6, pp.141~152, 2015.
 5. Park, K., "Investigation into Directional Properties of Rapid Prototypes and Its Application To FE Analysis Considering Anisotropy," Journal of Korean Society for Precision Engineering, Vol.25, No.11, pp.126~133, 2008.
 6. Kim, H. J., "Experimental Study on Production Characteristics of Straight Bevel Gear using a Polyjet Method 3D Printer," Journal of The Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol.14, No.6, pp63~68, 2015.
 7. Kang, Y. G., "The Influence of Experiment Variables on 3D Printing using ABS Resin," Journal of The Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 16, No.2, pp.94~101, 2017.
 8. Kim, Y. H., "Accuracy Improvement of Output in Projection Stereolithography by Optimizing Projection Resolution," Journal of The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 24, No.6, pp710~717, 2015.
 9. Woo. T. H., Design of Experiments, Hyeong Seol publisher, pp.12~22, 2009.
 10. Lee. S. B., Minitab - DOE of example problem, ERE Tec, pp.116~192, 2014.