

# LCD 와 UV-LED 를 사용한 고성능, 저비용의 3D Printer 개발

## Development of High-Performance, Low-Cost 3D Printer Using LCD and UV-LED

조광호<sup>1</sup>, 장현석<sup>2</sup>, 하영명<sup>2</sup>, 이석희<sup>1,✉</sup>

Kwang Ho Jo<sup>1</sup>, Hyeon Suk Jang<sup>2</sup>, Young Myoung Ha<sup>2</sup>, and Seok Hee Lee<sup>1,✉</sup>

1 부산대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Pusan National University)

2 쉐씨에이텍 (CA Tech Co., Ltd.)

✉ Corresponding author: sehlee@pusan.ac.kr, Tel: +82-51-510-2327

Manuscript received: 2015.3.30. / Revised: 2015.7.23. / Accepted: 2015.8.6.

*3D Printing has a great advantage for its capabilities in manufacturing complicated structures in a reasonable manufacturing time, and thus is widely used in various fields. Due to the high cost of the equipment and material, a fairly acceptable equipment, the Projection Stereolithography Apparatus (PSLA), has been developed, using the projection pattern approach for the purpose of quick manufacturing. We evaluated its surface quality, as compared with that of other systems. The result is the development of a high-performance, low-cost 3D Printer and its operating software, using LCD and UV LED. Working materials for an optimal manufacturing are suggested in the research, along with some suggestions of basic approaches for enhancing the accuracy and quality of the manufactured structures.*

KEYWORDS: 3D printer (3D 프린터), Projection stereolithography apparatus (PSLA) (전사방식 광조형장치), Constrained-Surface method (규제액면방식), Liquid crystal display (LCD) (액정표시장치), UV-LED (자외선 LED)

### 1. 서론

3D Printer 기술은 Computer Aided Design(CAD)를 사용하여 만들어진 도면을 절삭가공 없이 층층이 쌓아서 제작하여 복잡한 구조물을 빠른 시간 안에 제작할 수 있는 기술이다.<sup>1</sup> 최근 이 기술은 시제품 제작을 넘어서 의료, 자동차, 선박, 신발 등의 산업에 활발하게 활용되고 있다. 이러한 시장에 발맞춰 3D Printer의 수요가 급증하면서 고성능, 저비용의 장비 개발에 치중되고 있다.<sup>2,3</sup>

3D Printer의 대표적인 기술에는 광경화성 재료를 사용하여 광 또는 레이저를 주사하여 재료를

경화시킨 후 구조물을 제작하는 Stereolithography Apparatus(SLA), 플라스틱 또는 금속 분말 재료를 사용하여 레이저를 주사하여 재료를 소결 한 후 구조물을 제작하는 Selective Laser Sintering(SLS), 열가소성 플라스틱 재료를 녹인 후 토출시켜 구조물을 제작하는 Fused Deposition Modeling(FDM), 그리고 광경화성 재료를 프린터 헤드의 미세 노즐을 통해 분사한 후 광을 주사하여 재료를 경화시켜 구조물을 제작하는 PolyJet 등이 있다.<sup>4,7</sup> 이 중 SLA는 크게 두 가지 방식으로 나뉘어진다. 첫 번째 주사방식은 레이저와 같이 광의 크기가 일정한 광원을 이용하여 경로를 따라 재료를 경화 시켜

제작하는 방식이다. 이는 정밀도가 높은 장점을 가지고 있지만, 제작 시간이 비교적 오래 걸리는 단점을 가지고 있다. 두 번째 전사 방식은 Digital Micro Mirror(DMD) 또는 Liquid Crystal Display(LCD)를 이용하여 광 이미지를 생성한 후 재료에 조사하여 제작하는 방식이다. 이는 제작 시간이 빠르다는 장점을 가지고 있지만, 정밀도는 주사방식에 비해 떨어지는 단점을 가지고 있다.<sup>8</sup>

이러한 3D Printer 기술은 미래 혁신기술로 인정받고 있으나, 오픈 소스 기반의 저가형 프린터와 해외 기업이 세계 시장의 대부분을 점유하고 있는 상황에서 국내 기술이 종속되는 것을 막기 위해 고성능 장비를 저비용으로 제작할 수 있는 기술력 확보가 필요하다.

본 연구에서는 현재 저비용으로 생산되고 있는 오픈 소스 기반의 3D Printer 시장을 대체하고 고성능 기반인 SLA 기법 중 전사 방식을 채택하여 기존에 사용되던 UV-Lamp와 DMD를 대신해 UV-LED와 LCD를 사용하여 고성능, 저비용, 고효율 3D Printer를 구축하기 위해 하드웨어 및 소프트웨어 그리고 재료를 개발한다.

## 2. 시스템 구성

### 2.1 PSLA 의 시스템 개요

본 연구에서 사용된 PSLA는 액면 규제 방식으로 Fig. 1과 같이 구성된다.<sup>9</sup>

UV-LED는 경화시간만큼 동작을 하다가 꺼지게 된다. 이때 UV-LED에서 발생된 광은 LCD에도달하게 된다. LCD는 가공 영역만큼만 광을 투과시키고 나머지는 차단하게 된다. LCD를 통과하여 패턴닝이 이루어진 광은 투명 Teflon Film을 거쳐 최종적으로 광경화성 재료에 조사되게 되고, 광을 흡수한 광경화성 재료는 경화가 이루어져 고체 화가 된다. 여기서 Teflon Film은 다음 층을 제작하기 위해 플랫폼이 상승할 때, 만들어진 구조물이 바닥에 붙지 않도록 하기 위해 사용된다. 한 층이 완성이 된 후 Z axis에 의해 일정 높이 상승한다. 이때 발생된 구조물과 Teflon Film 사이의 틈에 새로운 재료가 들어가게 되고 이후 Z axis에 의해 적층 높이를 뺀 높이까지 하강한다. 이러한 과정을 반복하여 구조물이 완성되게 된다.

### 2.2 하드웨어 시스템 구성

본 연구의 하드웨어 시스템은 Fig. 2(a)와 같이

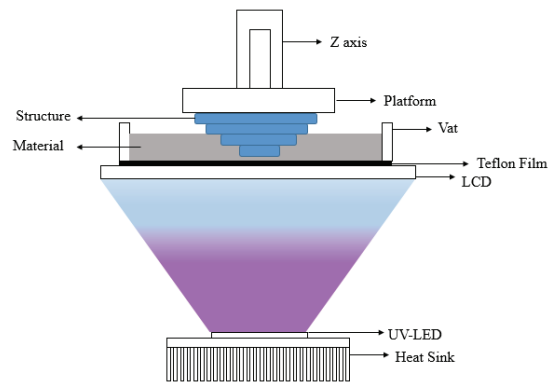
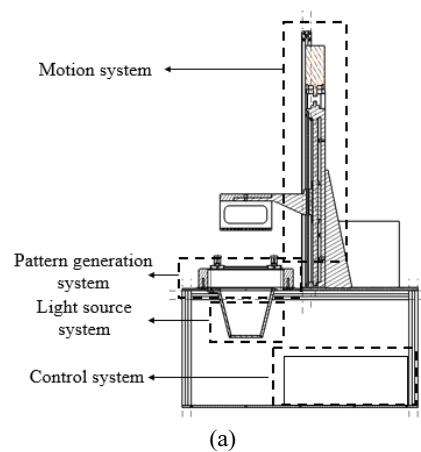
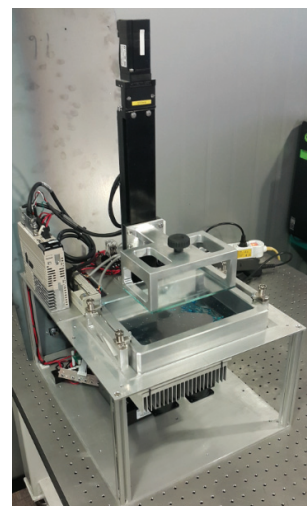


Fig. 1 Schematic design of projection SLA based on constrained-surface



(a)



(b)

Fig. 2 (a) Schematic of hardware system (b) 3D Printer using LCD and UV LED

크게 4가지로 분류된다.

첫 번째 패턴 생성 시스템은 입사된 광원을 슬라이싱 된 구조물의 이미지대로 제어 시스템에 의해 패턴닝을 하는 역할을 한다. 재료를 담을 수 있는 수조와 800\*600의 해상도를 가지는 7인치 LCD를 내장하고 있다. 이 LCD의 Dot pitch는 0.0642(W)\*0.1790(H)이다. 이 Dot pitch는 본 장비에서 만들어진 구조물의 정밀도와 밀접한 관련이 있다.

두 번째 모션 시스템은 플랫폼을 원점으로 이동하거나, 정해진 위치로 이동하는 역할을 한다. 정밀 1축 액츄에이터(리드 5mm)와 서보모터(100w) 및 원점 센서를 내장하고 있으며, 구조물이 부착되는 플랫폼으로 이루어져 있다. 모션 시스템은 제어 시스템에 의해 최소 1μm 단위로 위치 지령을 내릴 수 있으며, 엔코더를 사용하여 폐 루프 제어 시스템을 구축하였다.

세 번째 광원 시스템은 광경화성 재료를 경화하는 역할을 한다. 395nm의 파장을 가지는 100w급 UV-LED가 내장되어 있으며, UV-LED의 열을 배출하기 위한 방열판과 냉각팬이 설치되어 있다. 이 역시 제어 시스템에 의해 구동된다.

마지막 제어 시스템은 위에서 언급한 세 가지 시스템을 제어하는 역할을 한다. 시간을 제어하고, 모터 제어를 위한 클럭 생성과 엔코더 신호를 읽어들이고, 센서 및 릴레이 제어를 위한 소형 마이크로 컨트롤러, LCD의 패턴 이미지를 생성을 위한 A/D 보드, 서보모터 구동을 위한 모터 드라이버, UV LED의 동작 제어를 위한 릴레이 등과 하드웨어 시스템 소프트웨어가 설치된 PC를 포함하고 있다.

최종적으로 제작된 하드웨어는 Fig. 2(b)와 같다.

**2.3 소프트웨어 시스템 구성**

본 연구를 위해 크게 두 가지의 소프트웨어를 개발하였다. 첫 번째는 전처리 프로그램으로 Fig. 3과 같다. 이 프로그램은 STL 파일을 가져온 후 원하는 크기, 위치, 적층 두께 등을 설정 한 후 최종적으로 가공 이미지를 생성할 수 있다.

두 번째는 가공 프로그램으로 Fig. 4와 같다. 이 프로그램은 가공 이미지를 읽어드린 후 경화 실험 및 구조물 제작을 할 수 있다. 이형 거리, 적층 두께, 이송속도, 광 조사 시간, 대기시간 등 여러 가지 변수를 설정하여 구조물 제작에 대한 정밀도 및 가공 시간을 조절 가능하게 개발하였다.

**2.3.1 단면 이미지 알고리즘 개발**

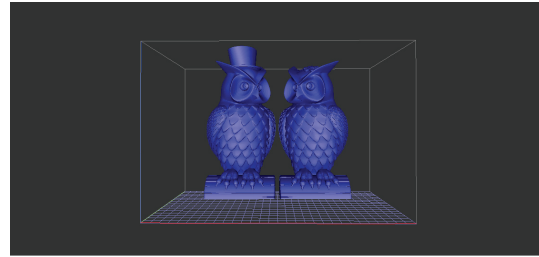


Fig. 3 Development of pre-process program

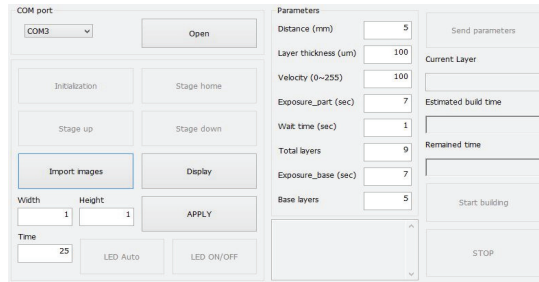


Fig. 4 Development of manufacture program

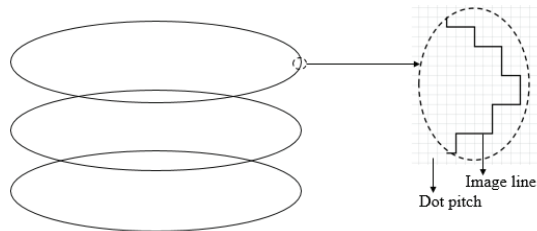


Fig. 5 Problem of cross-section image

STL 파일을 슬라이싱 한 후 단면 이미지로 생성시켰을 때, Fig. 5와 같이 곡선이 이루어지는 부분에서 계단 현상이 발생되었다. 이는 STL 파일이 가지고 있는 위치 데이터는 실수로 이루어져 있는 반면 LCD 픽셀은 정수로 계산되어 STL의 위치 데이터의 소수점 부분이 손실되어 나타나는 현상이다. 계단 현상은 LCD의 Dot pitch보다 훨씬 크게 나타났으며, 이러한 단면 이미지를 사용하여 구조물을 제작했을 때 구조물의 정밀도와 표면이 좋지 않았다.

이를 해결하기 위해 위치 데이터에 남아있는 나머지 부분을 LCD의 Dot pitch 크기 보다 작게 생성하기 위한 알고리즘을 적용하였다. 그 후 이미지의 계단 현상은 Fig. 6과 같이 LCD의 Dot pitch보다 작게 생성되어 구조물의 정밀도와 표면 거칠기가 향상되었다. 또한 용량이 큰 BMP 파일을 대

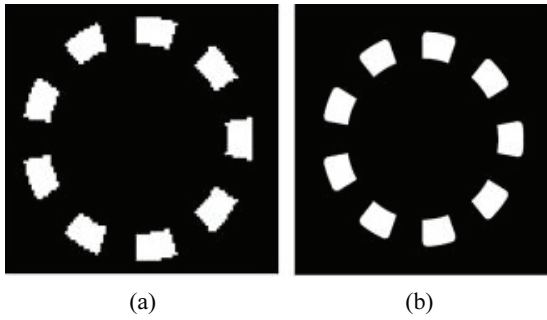


Fig. 6 (a) Cross-Section image before applying algorithm  
(b) Cross-Section image after applying algorithm

신한 GIF 파일을 적용하여 가공 데이터 용량을 줄였다.

### 2.3.2 가공시간의 계산

가공 프로그램에서 설정한 가공 파라미터 들은 구조물에 완성도에 영향을 미치기도 하지만 주로 가공 속도에 많은 영향을 미치게 된다. 3D Printer는 빠른 시간 내 정밀한 구조물을 만들 수 있는 기술이 중요한 만큼 본 연구에서 설정한 파라미터들에 대한 가공 시간을 다음과 같이 계산할 수 있다.

먼저 마이크로프로세서의 시간에 대한 클럭의 주기는 식(1)과 같이 산출할 수 있다.

$$f_{clk} = \left( \frac{1}{f_{clk\_IO}} \right) \times N \times 256 \quad (1)$$

여기서  $f_{clk\_IO}$ 는 시스템의 클럭이며, N은 분주비이다. 본 연구에서는 1초에 근사한 시간을 나타내기 위해  $f_{clk}$  값을 16.384ms로 설정하였고 식(2)에 의해  $T_{sec}$  값을 산출하였다.

$$T_{sec} = f_{clk} \times 61 \quad (2)$$

다음으로 모터에 대한 클럭의 주기는 식(3)과 같이 산출할 수 있다.

$$f_{OC0} = \frac{f_{clk\_IO}}{2 \times N \times (1 + OC0)} \quad (3)$$

여기서 OC0는 가공 파라미터 중 이동 속도이다. 식(3)에 Z-axis가 이동할 거리에 대한 클럭의 개수를 곱해주게 되면 식(4)와 같이 모터의 움직임에 대한 시간이 계산된다.

Table 1 Mixed ratio of material

Material	Mixed ratio	Photo initiator
Oligomer	6	5 wt%
Monomer	3	
Additives	1	

$$T_{up} = \frac{1}{f_{OC0}} \times n$$

$$T_{down} = f_{OC0} \times n \quad (4)$$

$$T_{motor} = T_{up} + T_{down}$$

여기서 n은 모터가 움직이는데 필요한 클럭의 개수이다.

최종적으로 가공 파라미터 중 시간에 대한 계산은 식(2)를 이용하여 계산하고 모터 움직임에 대한 시간의 계산은 식(4)를 이용하여 계산 후 합산하게 되면 한 사이클에 대한 시간이 계산된다. 이후 한 사이클에 대한 시간에 총 층수를 곱하게 되면 구조물을 가공하는 총 시간을 예측할 수 있다.

## 3. 광경화성 재료

### 3.1 재료 제작

본 연구에서 사용한 UV-LED는 395nm의 파장을 가지고 있으므로 이에 반응하는 최적의 재료를 제작하여야 한다. 또한 만들어진 구조물이 응용성을 가지기 위해서는 우수한 기계적 특성을 가지는 것도 중요하다.

본 연구에서는 Table 1과 같이 주재료인 올리고머(Urethane Acrylate)에 점성을 낮추기 위한 희석제로 모노머(Trimethylolpropane triacrylate)를 혼합한 후 첨가제로 경화된 구조물이 플랫폼에 안정되게 부착되기 위한 부착 증진제, 플랫폼의 상 하강 시 생기는 기포를 최소화하기 위한 소포제 그리고 광경화 현상을 막기 위한 광안정제를 첨가하였다. 이후 395nm의 파장에 반응률이 높은 Irgacure 819(Ciba)를 광 개시 재료 선택하여 제작하였다. 이렇게 제작된 재료는 UV-LED에 의해 광 개시제가 반응하여 생성된 라디칼 반응(Radical reaction)을 통하여 올리고머와 모노머의 다단계 반응을 통해 경화되게 된다.<sup>10,11</sup>

재료를 제작한 후 경화 시간에 따른 경화 깊이를 산출하기 위한 실험을 진행하였다. 실험 시편은 20mm\*20mm으로 가공 프로그램을 이용하여 크기에 맞는 정사각형을 LCD에 의해 패터닝 한 후

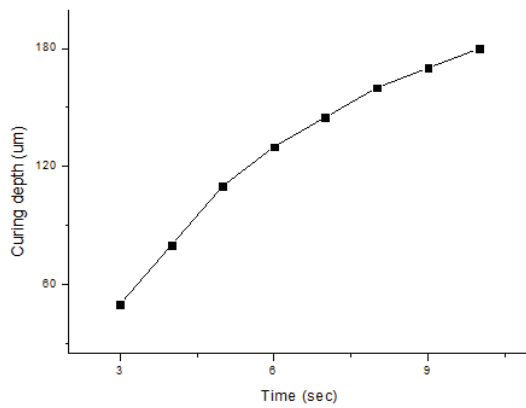


Fig. 7 Curing depth according to curing time

시간 별로 UV LED를 발광하여 시편의 두께를 측정하였다.

구조물을 제작하기 위해서는 이전 층과의 부착성을 위해 적층 두께 보다 더 큰 경화 깊이가 필요하다. Fig. 7에서 보이듯이 100µm씩 적층을 하기 위해서는 최소 5초 이상의 광 조사 시간이 필요한 것을 알 수 있다.

### 3.2 재료의 기계적 특성

본 연구에서 사용된 재료의 기계적 특성을 알아보기 위해 실험 시편을 시편 규격에 맞춰 3차원 절개 한 후 본 장비에서 두께 방향으로 적층하여 Fig. 8과 같이 제작하였다. 그 후 상용장비에서 주로 측정하는 인장강도, 굴곡강도, 충격강도를 한국 고분자 시험 연구소에서 실시하였다. 인장강도와 굴곡강도는 Universal Testing Machine(UTM) 장비를 이용하였으며, 각각 ASTM D638과 ASTM D790 시편 규격에 맞춰 제작하였다. 또한 충격강도는 IZOD 충격시험 장비를 이용하였으며, ASTM D256 시편 규격에 맞춰 제작하였다.

Table 2에서 보이는 시험 결과에서 나타내듯이 개발된 광경화성 재료는 SLA에서 우수한 기계적 특성을 나타낸다.

## 4. 구조물 제작

### 4.1 Rook 모형 제작

본 구조물은 비교적 구조가 복잡하고 내부의 피비우스와 같은 작은 형상 제작이 가능한지 알아보기 위해 제작하였다. 제작 조건은 Table 3과 같다.

Fig. 9에서 볼 수 있듯이 외부의 형태도 잘 이

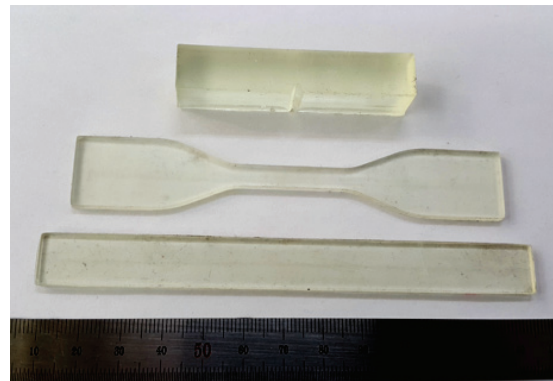


Fig. 8 Experiment specimen for mechanical properties

Table 2 Mechanical properties of material

Test item	Unit	Result
Tensile strength	N/mm <sup>2</sup>	45
Flexural strength	N/mm <sup>2</sup>	63
Impact strength	J/m	80

Table 3 Manufacturing condition

Layer thickness	Curing time	Total layer	Build time
100µm	8sec	730	4hr 10min

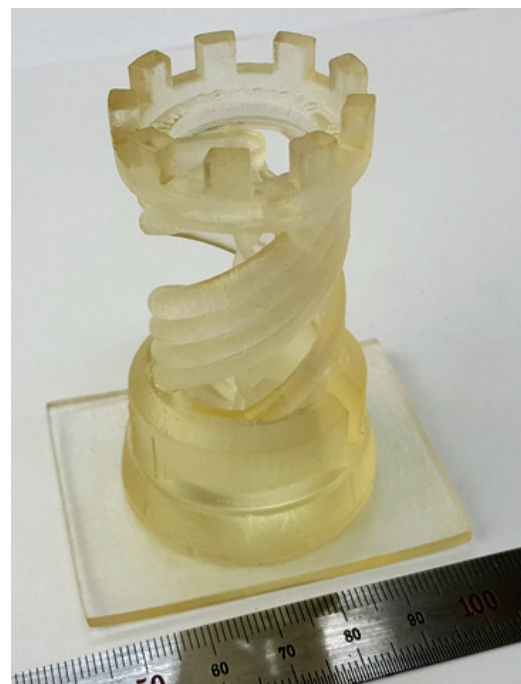


Fig. 9 Fabrication of rook

루어졌으며, 내부의 피비우스 형태의 띠도 제작이 잘 된 것을 볼 수 있다.

**4.2 에펠탑 모형 제작**

본 구조물은 구조가 복잡하고 높이가 높은 형태의 형상 제작이 가능한지 알아보기 위해 제작하였다. 제작 조건은 Table 4와 같이 과 경화를 피하기 위해 경화시간을 낮추었으며, 제작 속도를 높이기 위해 플랫폼의 이송속도를 높였다.

그 결과 Fig. 10과 같이 에펠탑의 모양을 충실히 재현하였다. 하지만 최상층의 형태는 표현력이 약간 부족한 것을 확인할 수 있다. 이를 해결하기 위해서 LCD 해상도를 높이거나 해당 층에 대한 경화시간을 조절할 수 있는 알고리즘에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

**4.3 엔진 블록 모형 제작**

본 구조물은 흑색 안료를 첨가하여 구조물에 색을 표현하고 대면적 형상이 제작 가능한지 알아보기 위해 제작하였다. 흑색 안료로 인해 광 투과 깊이가 낮게 나타나는 것을 확인하고 Table 5와 같이 경화시간을 높였으며, 대면적의 이미지가 Teflon film에 부착되어 구조물이 파손되는 것을 예방하고자 플랫폼의 이송속도를 낮췄다.

그 결과 Fig. 11과 같이 흑색의 엔진 블록이 잘 표현되었다. 하지만 구조물 제작 시간은 다소 늘어났다.

**5. 결론 및 고찰**

본 연구에서는 현재 시장에 알맞은 고성능, 저비용의 3D Printer를 개발하였다. LCD와 UV-LED를 사용하여 전사 방식 SLA를 구현한 결과 빠른 제작 속도와 높은 정밀도를 구현하였으며, 전용 소프트웨어를 구현한 결과 보다 다양한 조건에서 최적의 구조물을 제작할 수 있게 되었다. 최종적으로 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

첫 번째, DMD를 대체하여 LCD를 사용함으로써 장비의 고기능, 저비용을 실현하였다. 반면 구조물의 정밀도는 이미지 생성 알고리즘과 LCD 기반의 장비 최적화를 통해 DMD를 사용한 상용 장비와 비교하여도 크게 떨어지지 않았다. 그리고 전사 방식의 SLA를 채택하고 장비에 최적화된 재료를 개발하면서 구조물의 제작 속도를 향상시켰다.

두 번째, UV-Lamp를 대체하여 UV-LED를 사용

Table 4 Manufacturing condition

Layer thickness	Curing time	Total layer	Build time
100µm	6sec	1250	5hr 50min

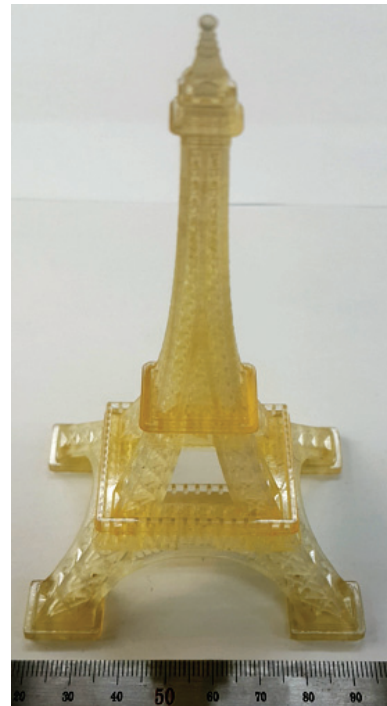


Fig. 10 Fabrication of eiffel tower

Table 5 Manufacturing condition

Layer thickness	Curing time	Total layer	Build time
100µm	11sec	550	4hr 30min

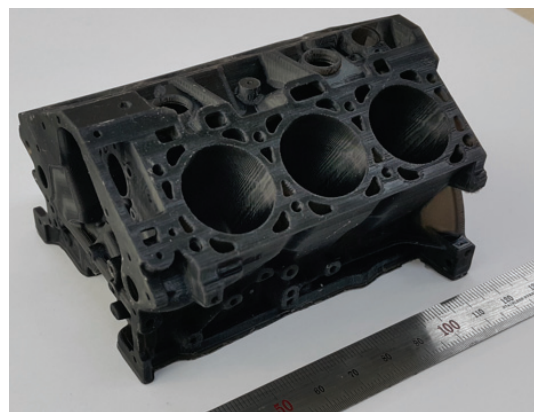


Fig. 11 Fabrication of engine block

함으로써 장비의 저비용, 고효율을 실현하였다. LED 광원은 광원에 대한 열을 최소화하여 열에 의한 재료의 변화를 최소화하였다. 또한 예열시간이 필요 없고 긴 수명을 가지고 있어 장비의 효율을 더욱더 높였다.

향후 본 연구는 보다 높은 정밀도와 결과물에 대한 이방성을 해결하기 위해 해상도가 높은 LCD를 사용하거나, 제작 방식 알고리즘 개발을 위한 추가적인 연구가 필요하다. 그리고 다양한 재료를 개발하여 구조물의 응용분야를 넓히는 연구 또한 필요하다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부, 한국산업기술진흥원, 동남광역경제권 선도산업지원단의 광역경제권 선도산업 육성사업으로 수행된 연구임.

## REFERENCES

1. Zhou, C., Chen, Y., and Waltz, R. A., "Optimized Mask Image Projection for Solid Freeform Fabrication," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 131, No. 6, Paper No. 061004, 2009.
2. Wohlers, T., "Wohlers Report 2014-3D Printing and Additive Manufacturing-State of the Industry," Wohlers Associates, 2014.
3. Yoon, S. H., Park, I. B., Kim, M. S., Jo, K. H., and Lee, S. H., "Development of Projection Scanbeam-SLA Using Liquid Crystal Display and Visible Light Emitting Diode," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 30, No. 3, pp. 340-348, 2013.
4. Azari, A. and Nikzad, S., "The Evolution of Rapid Prototyping in Dentistry: A Review," *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 15, No. 3, pp. 216-225, 2009.
5. Kruth, J.-P., "Material Incess Manufacturing by Rapid Prototyping Techniques," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 40, No. 2, pp. 603-614, 1991.
6. Ashley, S., "Rapid Prototyping is Coming of Age," *Mechanical Engineering*, Vol. 117, No. 7, p. 62, 1995.
7. Hilton, P., "Making the Leap to Rapid Tool Making," *Mechanical Engineering*, Vol. 117, No. 7, pp. 75-76, 1995.
8. Varadan, V. K., Jiang, X., and Varadan, V. V., "Microstereolithography and Other Fabrication Techniques for 3D MEMS," *John Wiley & Sons*, pp. 8-138, 2001.
9. Huang, Y.-M., Jeng, J.-Y., and Jiang, C.-P., "Increased Accuracy by Using Dynamic Finite Element Method in the Constrain-Surface Stereolithography System," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 140, No. 1, pp. 191-196, 2003.
10. Roffey, C. G., "Photogeneration of Reactive Species for UV Curing," *John Wiley&Sons. Ltd.*, 1997.
11. Lee, Y. M., Seo, D. H., and Kwon, S. G., "High Polymer Chemistry," *SciTech Media Inc.*, 2004.