

LCD 와 가시광선 LED 를 사용한 전사방식의 Scanbeam-SLA 개발

Development of Projection Scanbeam-SLA using Liquid Crystal Display and Visible Light Emitting Diode

윤수현¹, 박인백¹, 김민섭¹, 조광호¹, 이석희^{1,✉}
Su Hyun Yoon¹, In Baek Park¹, Min Sub Kim¹, Kwang Ho Jo¹, and Seok Hee Lee^{1,✉}

¹ 부산대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Pusan National Univ.)
✉ Corresponding author: sehlee@pusan.ac.kr, Tel: +82-51-510-2327

Manuscript received: 2012.12.3 / Accepted: 2012.12.10

In Projection Stereolithography Apparatus (PSLA), Digital Micromirror Device (DMD) and Liquid Crystal Display (LCD) are used as a beam pattern generator. The DMD shows high resolution, but it is mostly applied in micro stereolithography due to high cost and fabricable area. In LCD, the size of pattern beam is freely controlled due to various panel sizes. The LCD, however, has some limitations such as short life time by the high power light source, non-uniform light intensity of pattern beam and low transmittance of UV-light. To solve these problems in LCD-based PSLA, a Scanbeam-SLA with LCD of 19 inches and visible LED-array is developed. In this system, the light module works like a scanner for uniform illumination. The system configuration, working principle and fabrication examples are addressed in this study.

Key Words: Stereolithography Apparatus (SLA), Liquid Crystal Device (LCD), Visible Light Emitting Diode (LED) Array

1. 서론

쾌속 조형 기술은 Computer Aided Design(CAD)을 사용하여 툴링이나 치구(fixturing) 없이 직가공으로 신속하게 복잡한 구조물을 제작 할 수 있는 기술이다.¹ 근래에 쾌속 조형 기술은 시제품 가공 전에 부품의 설계오차 및 조립 시 오류 등의 문제를 해결하기 위한 검증 방법으로 사용되었다.²

쾌속 조형 기술의 대표적인 기법으로 광 또는 레이저의 주사로 광 경화수지를 경화시켜 적층해 완전한 3 차원 구조물을 제작하는 Stereolithography Apparatus(SLA), 레이저로 금속이나 플라스틱의 파티클 소재를 선택적으로 용해시켜 제작하는 Selective Laser Sintering(SLS), 열가소성 소재를 미세 노즐에서 녹여 토출시켜 제작하는 Fused Deposition Modeling(FDM), 접착제가 장착된 헤드를 선택적

로 파우더에 고착시켜 제작하는 3D Printing(3DP) 등이 있다.³⁻⁶ 이러한 다양한 기법은 재료의 발달과 함께 의료, 예술, 바이오 구조물 제작 등의 분야로 응용되어 활발한 연구가 진행 중이다.

2011 년 중반부터 쾌속조형장비 시장이 근래의 고가 쾌속조형장비에서 다양한 기법의 저가형 쾌속조형장비 개발에 급격히 치중되고 있다.⁷ 그 중 사용장비로 3D System 사의 V FlashTM, Z-CORP 사의 Z PrinterTM 시리즈, Objet 사의 EdenTM 등 많은 개발이 이뤄지고 있지만 국내 실정은 미흡하다. 하지만 저가장비로의 개발은 작은 작업면적(workspace)과 후가공의 번잡함, 낮은 정밀성, 사후관리 등 아직 비효율적이다. 이러한 개발실정에 발맞춰 본 연구에서는 큰 작업면적과 간단한 인터페이스, 높은 정밀성, 간편한 유지 보수가 가능한 저가형 쾌속 조형장비 개발을 목적으로 한다.

본 연구에서는 전사방식 쾌속조형장치를 토대로 두고 새로운 광원방식으로 가시광선 LED와 스캐너와 유사한 스캔빔 기법을 채택했다. 이러한 이유로 Scanbeam-SLA로 명했으며, 동적 패턴 생성기로 LCD-Panel을 적용함으로써 기존장비에 비해 저렴한 장비 구성을 채택했다. 결과로 개발된 Scanbeam-SLA에 적합한 수지개발과 다양한 구조물 제작을 위한 연구를 실시한다.

2. Scanbeam-SLA

2.1 시스템 개요

Scanbeam-SLA는 Fig. 1과 같이 적층파트, 패턴 생성파트, 광원파트 그리고 제어파트로 총 4개의 파트로 구성된다.

적층파트는 일정한 적층 두께로의 적층을 위해 2개의 서보 모터와 볼 스크류 방식의 Z축 스테이

지, 플랫폼과 지지대로 구성된다.

패턴생성파트는 제작하고자 하는 3차원 모델의 STL 파일을 일정한 적층 두께로 슬라이싱한 단면 이미지의 패턴닝을 위한 LCD가 장착되고 수지저장소인 vat이 장착된다. 여기서 Scanbeam-SLA는 수지제어기법으로 액면규제기법을 사용하였다.⁸ 또한 적층 시 이전 경화 구조물과 순조로운 이형을 위해 vat의 아래 부분과 LCD의 윗면에 Fluorinated ethylene propylene(FEP) 시트를 부착했다.

광원파트는 가시광선 LED 배열로 LCD의 전체 면적을 일정한 광 에너지로 스캐닝(scanning)하기 위한 새로운 광 조사기법인 스캔빔(scanbeam)으로 적용하였다. 스캔빔은 LED 노광을 집중시키기 위해 Plano convex cylindrical lens를 장착하고 LED에서의 발열 해소를 위해 방열판과 고성능 냉각팬, 스캔빔의 이송을 위한 펄 벨트와 DC 모터 등이 장착된다.

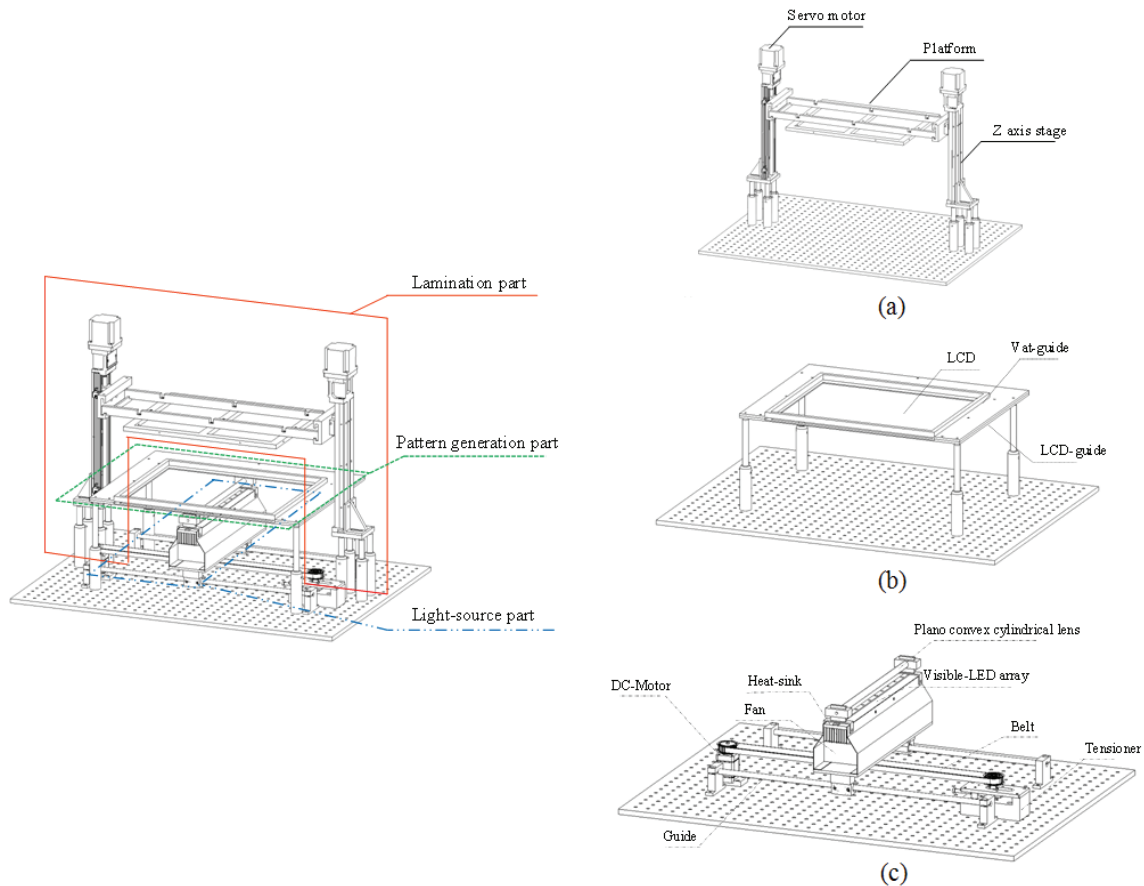


Fig. 1 Schematic of Scanbeam-SLA (a) Lamination part (b) Pattern generation part (c) Light-source part

제어파트는 적층파트와 패턴생성파트, 광원부의 제어를 위해 마이크로 컨트롤러와 전용프로그램이 내장된 PC 로 구성된다.

2.2 가공프로세스

Scanbeam-SLA 의 가공공정은 Fig. 2 와 같이 전처리 공정(pre-process)과 제작 공정(fabrication-process) 그리고 후가공 공정(post-process)의 세가지 공정으로 나뉜다.

전처리 공정은 이전의 PSLA 의 전처리와 공정과 동일하게 3 차원 모델링 후 STL 파일로 변환한다. 변환된 STL 파일을 설정된 적층두께로 슬라이싱하고 해당 층의 단면 이미지를 추출해 1 bit 의 비트맵 이미지(bitmap image)로 생성시킨다.

제작 공정은 전처리 공정에서 생성된 단면 이미지를 적층 순서에 따라 LCD 에 패턴닝한다. 하나의 단면 이미지가 LCD 에 입력되어 패턴닝되면 Z 축이 상승되어 플랫폼 사이에 수지가 유입되면서 도포된다. 균일한 도포를 위한 대기 시간이 지나면 스캔빔이 제어프로그램에서 설정된 이송속도로 X 축방향으로 이송한다. LCD 에 입력된 단면 이미지의 패턴 광으로 한 층의 경화를 실시한다. 이러한 과정을 다음 층의 경화를 위해서 반복되며 더 이상의 단면 이미지가 존재하지 않을 경우 완료된다.

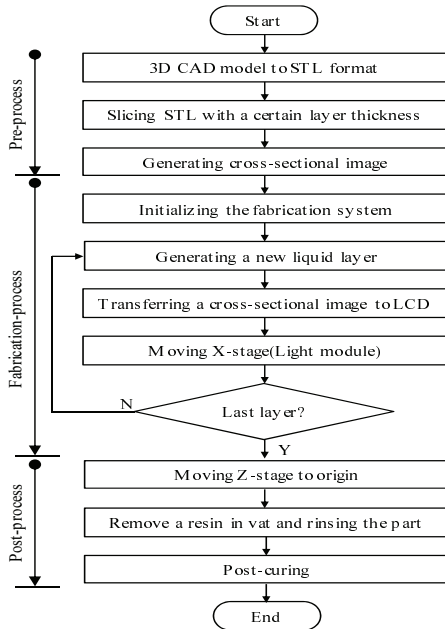


Fig. 2 Flowchart of process in Scanbeam-SLA

후가공 공정에서는 Z 축을 최대 높이로 상승시켜 제작된 구조물을 장비에서 이탈시켜 잔류 수지의 제거를 위한 린싱과 후 경화 과정을 거쳐 완전한 3 차원 구조물의 가공 공정이 완료된다.

2.3 패턴 생성기

패턴생성파트는 1280×1024 의 해상도를 가지는 19 인치 LCD 를 사용했다. LCD 를 패턴 생성기로 이용한 PSLA 의 장점은 저비용으로 간단한 시스템 구현이 가능하나 다음과 같은 문제점이 발생된다.

첫 번째로 광원이 UV 영역대를 사용하는 경우 낮은 투과율로 높은 에너지의 광원을 필요로 한다.⁹⁻¹¹ 만약 높은 UV 영역대의 광원을 사용할 경우 LCD 에 열화현상을 야기시켜 수명단축을 초래할 수 있다. 두 번째로 이전연구의 광 조사방법이 Fig. 3 과 같은 경우 LCD 를 투과한 광의 광 에너지가 일정하게 조사되기 어렵기 때문에 정밀도가 떨어진다. 이를 회피하기 위해 광원의 일부만 사용할 경우 작업면적이 작아지는 단점을 가진다.^{12,13}

이를 Scanbeam-SLA 에서는 가시광선 LED 를 사용함으로써 높은 광 투과율과 LCD 의 열화현상을 해결한다. 또한 새로운 광 조사기법인 스캔 빔의 적용으로 LCD 크기에 대응하는 큰 작업면적과 적은 광학기기로 일정한 광 조사에너지를 조사할 수 있도록 한다.

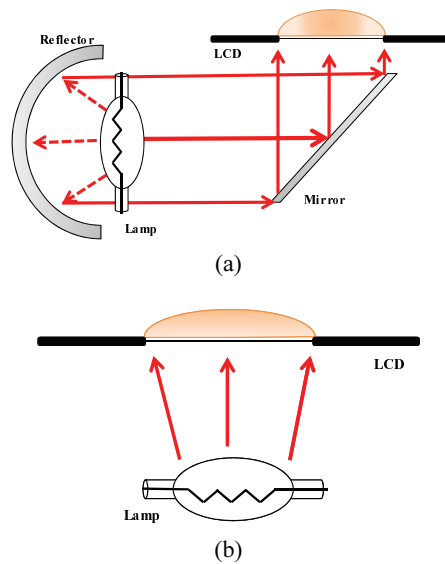


Fig. 3 Schematic of design beam source to generating patterned beam in RP using LCD (a) Reflect method⁹ (b) Directing method¹⁰

2.4 광원부 설계

광원부의 스캔빔에 사용되는 가시광선 LED 는 SST-90™(Luminus Co., USA)로 19 인치 LCD 를 스캐닝하기 위해 1 열의 배열로 특수 제작된 PCB 에 일정간격으로 장착된다. 이러한 LED 는 PWM(Pulse Width Modulation)으로 제어되며 광 조사에너지는 3.87 V, 5 A 의 기준으로 약 19.44 mJ/cm²로 조사한다. LED 의 배열 간격은 광 조사 각도로 인해 불균일한 광 에너지로 일부 과경화나 불경화를 초래할 수 있다. 이러한 배열간격에 의한 경화에 미치는 영향을 알아보기 위해 Fig. 4 와 같이 경화실험을 실시한다.

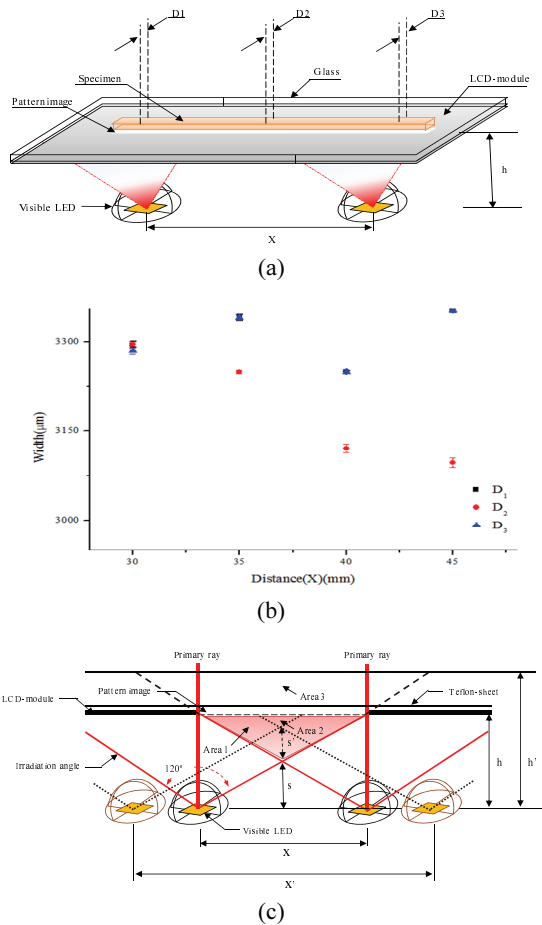


Fig. 4 Curing shape according to distance of LEDs in light-Module. (a) Fabrication of specimens (b) Measurement of specimens (c) Error of curing shape from superposition according to exposure angle of LED

Fig. 4(a)는 LCD 에 길이 153 pixel, 폭 11 pixel 의 임의의 이미지를 입력하고 LCD 와 LED 의 떨어진 높이인 h 를 30 mm 로 설정한다. LED 의 배열간격인 x 는 30~45 mm 까지 5 mm 의 간격마다 일정한 경화시간을 두고 경화를 실시한다. 경화폭의 측정은 실험 시편의 일정한 위치인 D1, D2, D3 에서 동일하게 측정한다.

그 결과 Fig. 4(b)와 같이 x 가 30 mm 일 때 D1, D2, D3 의 오차가 약 20 μm 이내로 측정 되었으나 35 mm 의 경우 D2 에 비해 D1, D3 가 약 70 μm 이상, 40 mm 의 경우 약 150 μm, 45 mm 의 경우 약 250 μm 이상 커짐을 알 수 있었다. 이러한 이유는 광 중첩으로 인해 D1, D2, D3 에 조사되는 광 에너지의 차이로 발생된다. Fig. 4(c)의 x 에서 LED 간 조사각도로 광 중첩의 최소 높이인 s 로 인해 광 중첩된 면적인 Area 1 에서 D2 에 조사되는 광 에너지가 D1, D3 보다 높을 경우 과경화가 발생된다. 하지만 x 의 간격이 x' 로 커짐으로 인해 s' 가 s 에 비해 높아질 경우 Area 2 의 D2 가 D1, D3 에 비해 작거나 불경화될 수 있다. 만일 x 에서 LCD 와 LED 의 높이인 h 만 h' 까지 상승되었을 경우 Area 1 보다 Area 3 의 크기만큼 광 중첩 범위가 크게 발생된다. 하지만 Area 3 는 Area 1 에 비해 D2 에 미치는 광 중첩 효과가 적기 때문에 D2 의 경화오류가 더욱 크게 발생할 수 있다. 그러므로 적절한 광 중첩거리를 지닌 h 의 크기를 정하기 위해서 경화폭 실험에서 오차 폭이 가장 적은 x 를 30 mm 두고 s 값에서의 8.66 mm 의 배수로 h 를 정해 다시 경화폭 실험을 실시한다. 그 결과 x 에서의 광중첩 범위는 Area 1, x' 일 때 Area 2, x 에서 h' 로 변할 때 Area 3 으로 s 와 h 가 같거나 h 가 2s 일 때 경화폭이 D1, D3 > D2 였으며, 3s 일 때 D1, D3 > D2, 4s 와 5s 일 때 D1, D3 ≥ D2, 6s 와 7s 일 때 D1, D3 = D2 그리고 9s 이상일 경우 광 에너지 손실이 발생하여 D2 가 거의 경화되지 않았다.

이러한 결과로 x 가 30 mm 일 때 D1, D2, D3 가 가장 일정한 h 는 6s 인 약 52 mm 로 산출되었다. 하지만 이러한 단순한 실험의 결과로 다양한 단면이 미지에서의 경화오류들을 완전히 해결하기 힘들다. 그러므로 불 균일한 경화폭의 원천적인 원인인 LED 의 광 조사 각도를 줄이기 위해 Fig. 4 의 실험으로 계산된 x, h 를 고려해 LED 상부에 광 포커스를 위한 Plano-convex cylindrical lens 를 장착한다.

Fig. 5(a)은 LED 조사각도를 일부만 사용하기 위해서 가로 20 mm, 세로 10 mm 의 광 가림 막을

장착하고 그 상부에 전체 길이 300 mm, 폭(w) 20 mm, 곡률(r) = 20.7 mm, 포커싱 거리(f) = 40 mm 의 Plano-convex cylindrical lens 를 특수 제작해 LCD 와 의 거리 값(h)=52 mm 를 구현한다.

그 결과 LCD 를 투과한 광 조사폭(W_L)이 약 3 mm 로 포커싱 되어 Fig. 5(b), (c), (d)와 같이 D1, D2, D3 의 오차가 약 10 μm 이내로 거의 일정한 경화 폭을 지님을 확인하였다. 이러한 결과는 Plano-convex cylindrical lens 를 장착하지 않는 Fig. 4 의

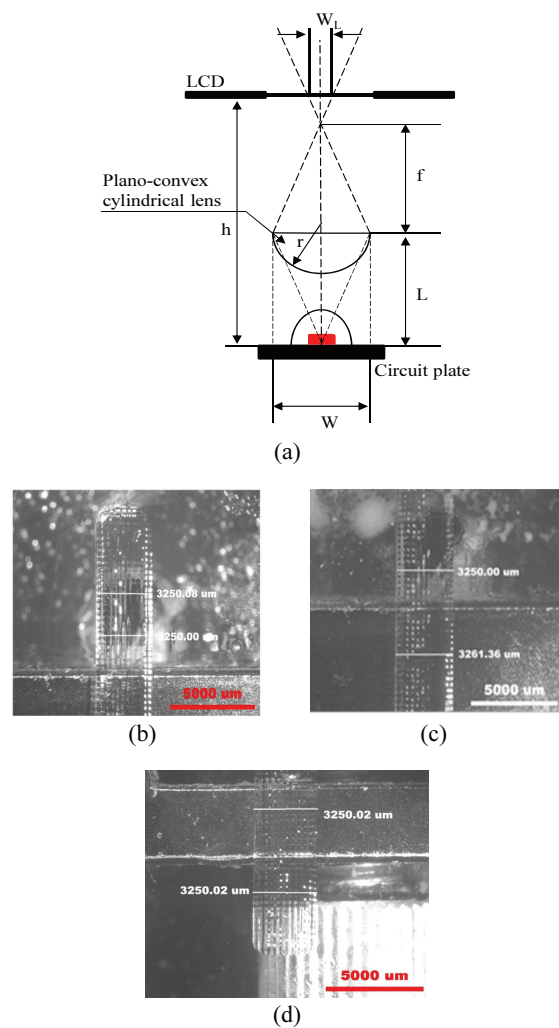


Fig. 5 Measurement of curing width in specimen according to optimized distance of x and h using Plano-convex cylindrical lens in Scanbeam
 (b) D1 = 3250.08 μm (c) D2 = 3261.36 μm
 (d) D3 = 3250.02 μm

실험결과에 비해 약 1/4 배 이하로 정밀한 경화가 가능함을 보인다.

2.5 대면적 제작을 위한 적층 시스템

적층 시스템은 19 인치의 LCD 를 사용함으로써 대면적 적층을 위해 2 개의 서보 모터와 모터 제어 를 위한 2 채널 모터 드라이브, 볼 스크류를 장 착하였다. 시스템 구동은 초기 플랫폼(platform)의 정확한 수평을 이루도록 원점에 장착된 근접센서 에 검출될 때까지 각기 서보 모터를 회전시킴으로 써 정확한 수평을 이루도록 제어한다. 수평이 이뤄진 이후 LCD 와의 정확한 적층을 위해 정해진 제작 높이로 하강한다. 적층두께의 설정은 액면규제기법 으로 층당 최소 10 μm 로 반복적층이 가능하며 최대 적층 높이는 250 mm 의 구조물이 제작될 수 있도록 설계되었다.

2.6 제어 프로그램 개발

본 연구의 제어를 위해서 Fig. 6 과 같이 MATLAB 과 MFC 을 이용하여 전용 프로그램을 제 작한다. 전용 프로그램은 시스템 제어뿐만 아니라 STL 파일의 입력으로 단면이미지 생성을 위한 전 처리 단계까지 포함된다. 시스템 제어는 RS-232 통 신으로 상위 제어기에 연결되어 각 파트를 제어하 였다. 단면이미지의 생성은 STL 파일과 적층두께 를 입력하면 자동적으로 저장해서 사용하거나 이 전 슬라이싱된 단면이미지를 직접 입력해 사용할 수 있도록 구성한다. 적층두께의 최소 설정값은 10 μm 이며, 스캔빔의 이송속도와 적층파트의 플 랫폼 상승 및 하강속도를 5 단계의 속도모드로 제공할 수 있도록 구성하였다.

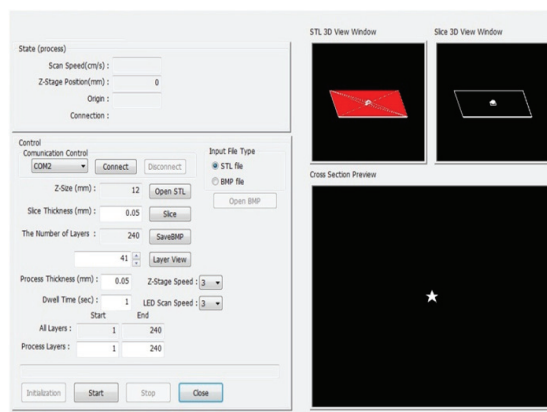


Fig. 6 Development of control program

3. 광 경화 수지

3.1 수지제작

본 연구의 가시광선 LED 는 450 nm 파장대에 최대 광 에너지를 가짐으로 이에 반응하는 광 개시제와 단량체의 배합으로 적합한 수지를 제작을 해야 한다. 이를 위해 광 개시제는 450~500 nm 의 광 파장에 반응률이 높은 Chivacure 534ss™ (Cbitec Co., China)를 선택했다. 단량체는 높은 강성

Table 1 Mixed ratio of photocurable resin

Resin name	TMPTA: DPHA	PI (wt%)
M5	1:1	2
M6	6:4	
M7	7:3	

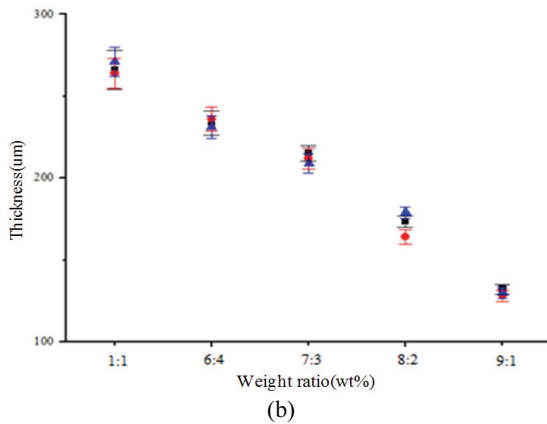
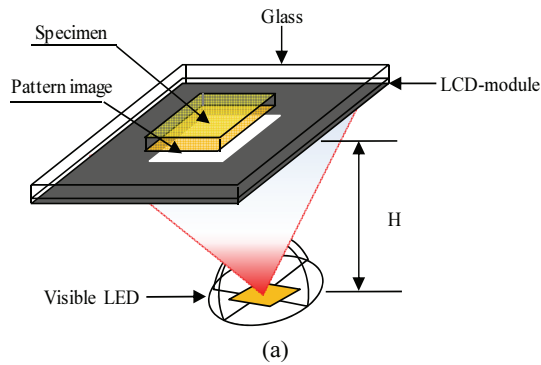


Fig. 7 Measurement of curing depth according to weight ratio of monomers (a) A method of Fabrication specimens (b) Measurement of curing thickness a specimens

을 가지는 6 관능의 Dipentaerythritol hexaacrylate (DPHA)와 낮은 점성과 빠른 경화를 위한 3 관능의 Trimethylolpropane triacrylate(TMPTA)를 기본 단량체로 하고, 부수적으로 낮은 점성과 높은 반응률을 위해 1 관능의 Isobonyl acrylate(IBOA), 2 관능의 1, 6-Hexanediol diacrylate(HDDA)를 선택했다.

3.2 경화 특성

3.1 절의 광 개시제와 단량체를 Table 1 과 같이 배합하고 배합비율에 따른 경화특성을 알아보기 위해 Fig. 7 과 같은 경화장치를 구성하였다. 동일한 실험 조건을 위해 단위면적을 가진 이미지를 제작해 LCD 에 입력한다. 단위면적을 가진 이미지가 입력된 LCD 와 LED 의 간격인 h 을 30 mm 에서 광 에너지는 약 14 mW/cm² 로 측정된다. 이러한 경화조건에서 배합비율에 따른 수지들을 일정한 시간 동안 노출 시켜 3 번의 반복실험을 통해 경화두께를 측정한다.

그 결과 (b)와 같이 배합비율에 따라 최대 약 150 μm 의 차이를 보였으며 DPHA 의 비율이 높을수록 경화두께가 증가됨을 보였다. 하지만 경화두께가 높은 M5 는 점성이 상온에서 약 500 cps 이상으로 미세 적층 시 리코팅이 어려울 수 있으므로 약 200 μm 의 경화두께와 약 290 cps 를 가진 M7 을 기본 수지로 정하였다. 비교수지는 기본 수지의 점성을 낮추기 위해서 희석제인 IBOA 와 HDDA 의 혼합 비율을 달리해 Table 2 와 같이 제작한다.

각 수지 별로 광경화에 필요한 임계에너지(E_c)를 구하기 위해 광 조사 에너지 별 경화두께(C_d)를 측정하고 Beer-Lambert 수식 (1)에 대입하였다.

$$C_d = D_p \cdot \ln(E_{max} / E_c) \quad (1)$$

Table 2 Mixed ratio of photocurable resin

Resin name	Mixed ratio	Viscosity (cps)
M7	[TMPTA: DPHA(7:3)] + PI 2wt%	290
M7I10	M7 + IBOA 10wt%	190
M6IH	[DPHA:IBOA:HDDA(6:3:1)] + PI 2wt%	143

그 결과 기본수지인 M7의 E_c 는 6.81 mJ/cm^2 , 광투과 깊이(D_p)는 $272.1 \text{ }\mu\text{m}$ 으로 산출되었다. 비교수지인 M7I10, M6IH의 E_c 는 각각 $9.56, 46.3 \text{ mJ/cm}^2$, D_p 는 각각 $254.6, 210.2 \text{ }\mu\text{m}$ 로 산출되었다. 수지 별 경화강성을 측정하기 위해 ASTM D638의 인장시편을 제작해 인장실험을 실시한 결과 Table 3과 같이 측정되었다.

각 수지마다 인장강도가 약 14~17 Mpa로 큰 차이가 없었다. 하지만 M6IH의 경우 높은 분자량을 가진 DPHA에 의해 높은 연성을 지니고 있으나 HDDA로 인해 황변현상(yellowing)이 심하고 과경화로 인한 크랙이 발생되었다. 황변현상은 구조물의 미관 또는 형상을 시각적으로 면밀히 살펴보기에 무리가 있으며, 구조물 강성에 영향을 줘 파손의 원인이 된다. 이러한 이유로 타 수지보다 임계에너지가 높고 색상의 변화와 크랙 발생률이 높은 M6IH는 비교수지에서 제외한다.

4. 3 차원 구조물 제작

4.1 적층 실험

3장에서 기본수지와 비교수지의 광 경화특성 및 경화강성을 실험한 결과 M7과 M7I10이 가장 적합한 수지로 선택되었다. 이러한 적합한 수지를 사용해 Scanbeam-SLA에서 적층실험을 실시했다. 적층실험의 시편으로 Table 4의 가공조건 중 M7을 이용해 내부 경화와 이형의 문제를 알아보기 위해 구조물을 제작하였다.

Table 3 Tensile test result according to mixed ratio

Resin name	Tensile strength (MPa)	Young's Module (MPa)
M7	15	2346
M7I10	14.58	2027
M6IH	17.03	2610

Table 4 Control process

Resin	M7, M7I10
Layer thickness (μm)	50
Scan speed (mm/sec)	0.825
Dwell time (sec)	5
Process time (min)	45

첫 번째 솔리드 형태와 내부의 원과 외각의 표면을 비교하기 위해 중공형태의 8각 기둥을 제작

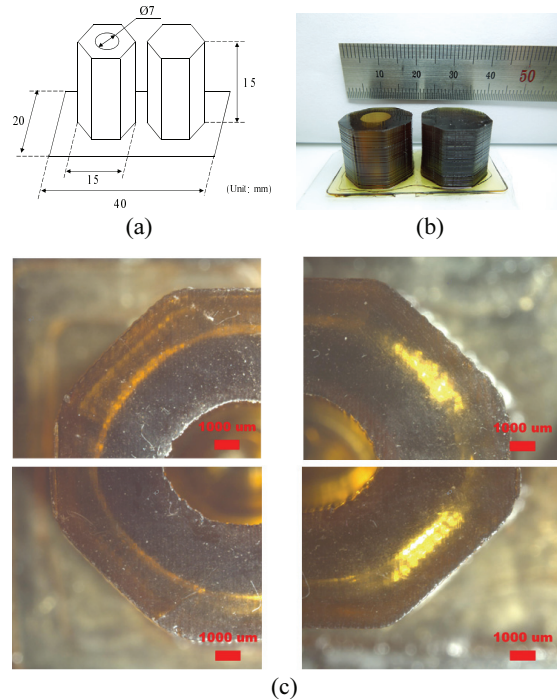


Fig. 8 Fabrication of hexagonal type structure for lamination test (a) 3D model (b) Front view (c) upper view

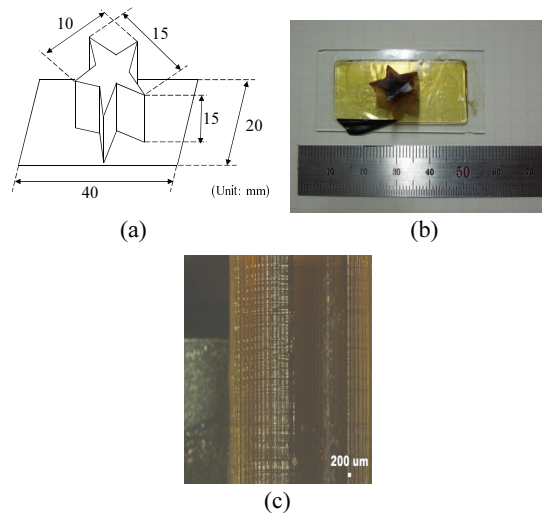


Fig. 9 Fabrication of star type structure with various edges using scanbeam-SLA (a) 3D model (b) Front view (c) upper view

하였다. 두 번째 외부 모서리의 정밀도와 이형문제를 알아보기 위해 외부 모서리가 많은 별 모양을 제작해 보았다. 그리고 M7I10 수지를 이용하여 얼굴표면에 자유곡선을 가지는 불상을 제작하였다.

Fig. 8(a)는 8 각 기둥의 전체적인 치수를 나타내며 (b)는 실제 제작된 구조물이다. (c)는 8 각 기둥에 원형 홀이 생성되어 있는 구조물로 직선 부분의 거칠기는 괜찮지만 사선 부분과 원형 홀은 표면 거칠기가 약 300 μm 정도의 차이가 발생하였다. 이러한 경우는 픽셀 사이즈와 픽셀 간의 갭으로 인해 오차 발생으로 예상된다.

Fig. 9(a)의 별의 전체적인 치수를 나타내며 (b)는 실제 제작된 구조물이다. (c)는 별의 외부 모서리 부분을 확대하여 정밀도를 측정하였다. 외부 모서리 부분의 정밀도는 적층 시 이형력으로 인해 문제가 발생할 것으로 예상하였지만 문제가 없음을 확인하였다.

Fig. 10는 3 차원 스캐너를 사용해 불상을 STL 파일로 획득하고 Scanbeam-SLA 에서 제작하였다. M7 를 사용하였을 때와 달리 M7I10 를 이용하여 구조물을 제작 시 구조물의 색이 연해짐을 알 수 있었다. 이는 IBOA 의 함유로 인해 수지의 점성이 낮아지고 구조물의 색 또한 연해짐으로 추정된다.

5. 결론 및 고찰

본 연구에서는 국내 순수 기술로 저가형 기반으로 한 PSLA 방식의 Scanbeam-SLA 를 개발하였다. Scanbeam-SLA 는 19 인치 LCD 를 사용하였으며, LCD 의 특성상 UV 투과율이 저조하기 때문에 가시광선 LED 를 사용하여 스캔방식으로 이송이 가능한 스캔빔을 개발하였으며, 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

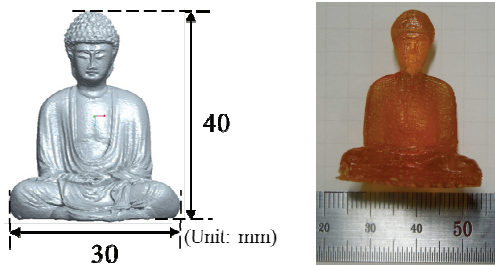


Fig. 10 Fabrication of buddha using scanbeam-SLA

첫 번째, LED 의 방사각도와 배열의 간격에 따른 광 중첩현상으로 과경화나 불경화가 발생할 수 있다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 LED 와의 간격과 LCD 와의 높이를 실험을 통해 계산하였으며, 스캔빔에 Plano-convex cylindrical lens 를 이용하여 일정한 경화폭을 나타낼 수 있었다.

두 번째, 가시광선 광경화성수지를 [(TMPTA:DPHA)]+PI 를 [(7:3)]+2w.t%로 배합하여 기본수지로 제작하였다. 수지의 점성은 약 290 cps 를 가지며 한번에 약 200 μm 의 경화두께를 경화 할 수 있다. 하지만 점성이 높아 규제액면기법에서 구조물을 제작 시 많은 제약이 따른다. 이로 인해 기본 수지 이외에 점성이 낮은 광 경화수지 개발이 필요하다.

향후 연구과제는 19 인치 LCD 를 바탕으로 24 인치 42 인치 등 다양한 LCD-Panel 을 이용한 대면적 구조물 제작과 정밀도 향상을 위한 기법연구가 이뤄져야 한다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비 (2년)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

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. Varadan, V. K., Jiang, X., and Varadan, V. V., "Microstereolithography and other fabrication Techniques for 3D MEMS," John Wiley & Sons, pp. 103-138, 2001.
3. 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.
4. Kruth, J. P., "Material Incess Manufacturing by Rapid Prototyping Techniques," Annals of the CIRP, Vol. 40, No. 2, pp. 603-614, 1991.
5. Ashley, S., "Rapid prototyping is coming of age," Mechanical Engineering, Vol. 117, pp. 62-68, 1995.
6. Hilton, P., "Making the leap to rapid tool making," Mechanical Engineering, Vol. 117, pp. 75-76, 1995.

7. Wohlers, T., "Wohlers Report 2010: Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report," Wohlers Associates, 2010.
8. Park, I. B., Choi, J. W., Ha, Y. M., and Lee, S. H., "Multiple Fabrications of Sacrificial Layers to Enhance the Dimensional Accuracy of Microstructures in Maskless Projection Microstereolithography," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 10, No. 1, pp. 91-98, 2009.
9. Park, I. B., Ha, Y. M., and Lee, S. H., "Dithering method for improving the surface quality of a microstructure in projection microstereolithography," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 52, pp. 545-553, 2011.
10. Hayashi, T., Shibata, T., Kawashima, T., Makino, E., Mineta, T., and Masuzawa, T., "Photolithography system with liquid crystal display as active gray-tone mask for 3D structuring of photoresist," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 144, pp. 381-388, 2008.
11. Bertsch, A., Zissi, S., Jézéquel, J. Y., Corbel, S., and André, J. C., "Microstereolithography using a liquid crystal display as dynamic mask generator," *Microsystem Technologies*, Vol. 3, pp. 42-47, 1997.
12. Luo, R. C. and Tzou, J. H., "Development of an LCD-Photomask-Based Desktop Manufacturing System," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 55, No. 10, pp. 3715-3723, 2008.
13. Peng, Q., Guo, Y., Liu, S., and Cui, Z., "Real-time gray-scale photolithography for fabrication of continuous microstructure," *Optics Letters*, Vol. 27, No. 19, pp. 1720-1722, 2002.