한국정밀공학회지 제 30 권 8 호 pp. 878-884 August 2013 / 878
J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 30, No. 8, pp. 878-884 http://dx.doi.org/10.7736/KSPE.2013.30.8.878
ISSN 1225-9071(Print), ISSN 2287-8769(Online)

LCD 와 가시광선 LED 기반의 광조형 시스템을 위한 수지의 경화 특성

Curing Characteristics for Projection Stereolithography based on LCD and Visible LED

김가영 [1], 하영명 [1], 박인백 [2], 김민섭 [1], 조광호 [1], 이석희 [1,✉]
Ga Young Kim[1], Young Myoung Ha[1], In Baek Park[2], Min Sub Kim[1], Kwang Ho Jo[1], and Seok Hee Lee[1,✉]

1 부산대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Pusan National Univ.)
2 씨에이텍 (CA Tech Co.Ltd., Busan, Korea)
✉ Corresponding author: sehlee@pusan.ac.kr Tel: +82-51-510-2327

Manuscript received: 2013.5.3 / Revised: 2013.6.16 / Accepted: 2013.7.8

Stereolithography can be classified into two main categories according to the cross-sectional shape: scanning type and projection type. Projection stereolithography has significant advantages when making a layer using a single patterned beam, and results in improved speed and accuracy. To implement relatively low-cost projection stereolithography, we developed a system using a commercially available resin, which cures on exposure to visible light. The optimum photoinitiator was investigated, as well as the mixing ratio. The viscosity, shrinkage, curing depth and tensile strength were evaluated through several experiments on fabricated three-dimensional structures, and thus an optimal resin selection system was developed.

Key Words: Visible light resin (가시광선 수지), Projection Stereolithography (전사방식 광조형), Liquid Crystal Device (LCD), Visible Light Emitting Diode (가시광선 LED)

1. 서론

최근 수요자의 기호에 따라 제품 모델이 다양화됨에 따라 제품 개발기간과 비용을 절감하기 위해 쾌속조형 기술이 각광받고 있다. 일반적인 구조물 제작기법은 3차원 모델의 단면 데이터를 생성하고 플라스틱, 종이, 광경화성 수지, 금속 등의 재료를 사용해 적층 시켜 제작한다.[1,2] 이중 대표적인 기법으로 광에 의해 광경화수지를 경화하고 적층시켜 제작하는 광조형(SL: Stereolithography)기법이 있다.

광조형기술은 광 조사방식에 따라 주사(Scanning) 방식과 전사(Projection) 방식으로 나눠진다. 주사 방식은 레이저의 광원을 툴 패스(Tool-path)에 따라 단면을 경화시켜 적층하는 방식이다. 반면에 전사 방식은 LCD (Liquid Crystal Display) 또는 DMD (Digital Micro-mirror Device) 등으로 조사된 광을 패턴 시켜 한 층을 한번에 가공한다. 전사방식은 주사방식에 비해 빠른 가공속도와 유지보수 등의 장점으로 최근 많이 각광받고 있다. 하지만 고정밀의 구조물을 제작하기 위해서는 고효율의 광원과 다양한 광학장치 등으로 시스템 설계가 복잡해짐으로써 구매 비용이 높은 단점이 있다. 그러나 점차 저정밀도의 간단한 시스템으로 저렴한 구매 비용을 부각시켜 다양한 분야의 구매자들에게 다가가고 있다. 이러한 현실에서 고정밀도의 고가의 장비는 다양한 구매자들에게 큰 호응을 얻지 못하고 있는 실정이다.

기존의 쾌속조형장비를 저가형으로 개발하기 위한 사전 연구로 SLA (Stereo Lithography Apparatus)

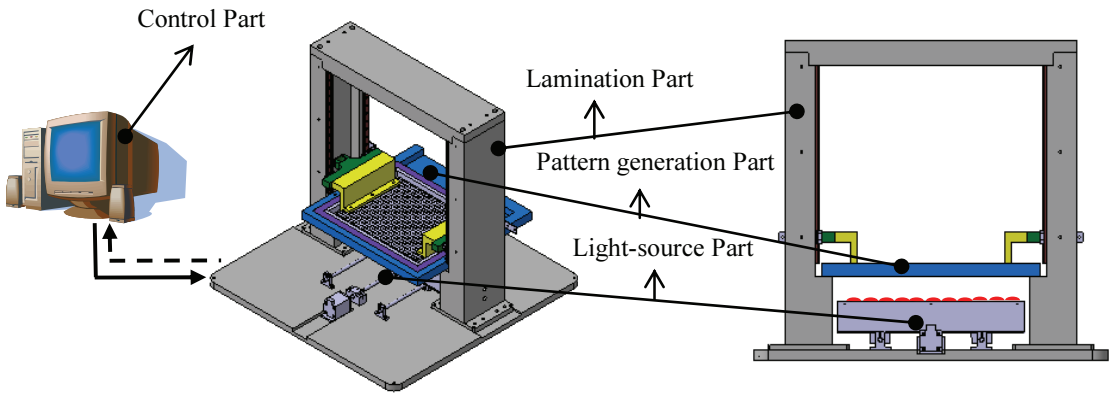


Fig. 1 Schematic of Scanbeam-SLA system

기반의 고가부품을 저가부품으로 대체하고 큰 작업영역과 간단한 시스템을 갖춘 ScanBeam-SLA을 구현했다.[5] ScanBeam-SLA는 정밀한 광 패턴을 생성시킬 수 있는 고가의 DMD를 광 패턴 영역이 큰 LCD로 대체했다. DMD에서 LCD의 대체는 광 패턴 영역이 커짐에 따라 큰 작업공간의 확보가 용이하며 간단한 시스템으로 구현 가능한 장점을 가진다. 광원은 기존의 자외선 영역대의 램프를 대신해 높은 수명의 가시광선 LED를 사용했다.[5] 가시광선의 LED는 인체에 무해하고 높은 광 에너지를 가지며 LCD에서 높은 광 투과율과 열화에 강한 장점을 지닌다.[6,7] 하지만 ScanBeam-SLA의 연구는 시스템 개발을 주목적으로 진행함에 따라 경화특성에 따른 광경화 수지 개발이 다소 미흡했다.

본 연구에서는 사전 연구의 ScanBeam-SLA에서 가시광선용 광개시제(Photoinitiator)와 단량체(Monomer) 등을 혼합하여 비율에 따른 수지의 경화특성 향상을 목적으로 둔다. 실험결과로 최적의 가공성을 가진 수지를 사용해 복잡한 구조물 제작하고 경화 정밀성을 검증한다.

2. Scanbeam-SLA

2.1 시스템 구성

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 사전 연구된 전사방식의 ScanBeam-SLA를 기반으로 진행된다.

ScanBeam-SLA는 역할에 따라 총 4개의 파트로 적층부(Lamination part), 광원부(Light-source part), 패턴 생성부(Patterrn generation part), 제어부(control prat)로 나뉜다.

적층부는 z축으로 일정두께의 적층을 위한 2개의 서보 모터와 볼 스크류가 장착되고 규제액면방식의 플랫폼과 지지대를 장착했다.

광원부는 LCD의 전체면적을 조사하기 위한 가시광선 LED 배열과 LED의 노광을 줄이기 위해 특수렌즈인 집광렌즈(Plano convex cylindrical lens)를 장착하고 방열판과 고성능 냉각팬을 장착했다. 이렇게 제작된 특수 광원은 LCD하부에서 x축으로 수평 이송시키기 위한 이송장치인 펜 벨트와 DC 모터 등을 장착했다.

패턴 생성부는 3차원 STL 파일의 모델을 슬라이싱 한 단면 이미지로 패터닝 시키기 위해 LCD가 장착되고 LCD를 고정하는 고정부가 수지 저장소를 담당한다. 여기서 LCD 표면과 수지 사이에 FEP (Fluorinated ethylenepropylene)을 부착해 수지이탈과 경화 시 발열과 적층 시 이형문제로의 LCD 파손에 영향을 주지 않도록 했다.

제어부는 적층부와 패턴생성부, 광원부의 제어를 위해 마이크로 컨트롤러와 전용프로그램이 내장된 PC로 구성된다.[5]

2.2 경화 실험 장치

ScanBeam-SLA에 사용될 수지 개선을 위해 Fig. 2과 같이 경화 실험이 가능한 경화 실험 기기를 제작했다.

경화 실험기기는 19인치의 LCD 패널, 정밀 스테이지, 디지털 타이머, 케이스를 장착했다. 정밀 스테이지의 역할은 LCD와 LED 간의 거리 조정을 위해 정확한 광 에너지의 유지를 목적으로 장착된다. 타이머와 케이스는 광경화를 위한 조사 에너지 부여와 가시광선 및 먼지 유입방지를 위해 장착된다.

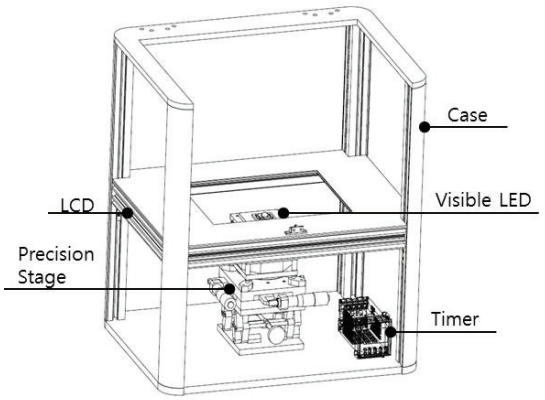


Fig. 2 Schematic of photopolymerization test system

3. 실험결과 및 고찰

3.1 광경화수지 제작

광경화수지는 일반적으로 특정 파장의 광 조사에 의해 광개시제가 반응해 생성된 라디칼(radical)로써 단량체나 올리고머(oligomer)가 연속 반응을 통해 경화된다.[9,10]

ScanBeam-SLA에서 450nm의 가시광선 LED를 사용함으로써 그에 적합한 광개시제와 단량체를 Table 1과 같이 선정했다.

광개시제는 가시광선 LED의 450nm 파장에 광경화가 가능한 Chivacure534SS(Chitec Co., Taiwan)를 사용했다.[8]

단량체는 총 6개로 경화특성에 따라 TMPTA (Trimethglolpropane Triacrylate), DPHA (Dipentaerythritol hexaacrylate), IBOA (Isodecyl Acrylate), LA (Lauryl Acrylate), IDA (Isodecyl Acrylate), 2-Phenoxy Ethyl Acrylate (PHEA)를 미원스페셜티케미컬에 공급받아 사용했다. TMPTA는 3관능 단량체로 높은 경화속도와 표면경도가 양호하며 DPHA는 6관능 단량체로 경화 시 적은 수축율을 지닌다. 하지만 둘 다 높은 점성으로 수지 리코팅이 용이하지 않다. 이를 위해 단량체이면서 비 휘발성 희석제로 사용되는 1관능 단량체인 IBOA, LA, IDA, PHEA 를 선정했다.

우선 기본수지를 선정하기 위해 낮은 수축율과 경화반응이 높은 TMPTA와 DPHA를 선정했다. 하지만 ScanBeam-SLA 에서 3차원 구조물의 적층 시 수지 점성이 낮을수록 적층속도 및 정밀도에 유리하다. 또한 TMPTA와 DPHA의 기능성 경화특성을 지니고 있어 상대적으로 낮은 점성의 TMPTA만 사용하기엔 무리가 따른다. 이러한 이유로 기본수지의 점성을 임의로 400첸 이하로 정하고 TMPTA와 DPHA를 1:1~9:1(wt.%)까지 배합해 점성을 확인했다. 그 결과 배합비가 7:3(wt.%)일 경우 350cp로 적당했으며, 두 단량체의 기능을 공유할 수 있어 기본수지 배합비로 결정했다.

일정 배합비로 기본 수지의 혼합 후 광 개시제인 Chivacure534SS를 기본 수지의 2(wt.%)로 혼합하고 암실에서 자석 교반기(Magnetic Stirrer)로 3시간 동안 혼합하였다.[5] 이러한 기본수지를 T7D3로 명하고 이와 경화특성을 비교하기 위한 비교수지로 Table 1의기능성 희석제를 Table 2와 같이 혼합해 합성했다.

Table 1 Properties of monomers

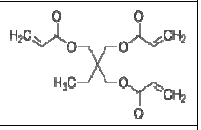
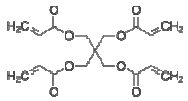
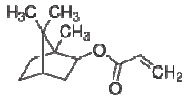
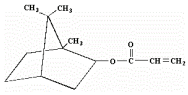
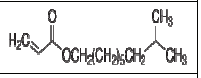
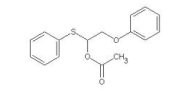
Monomer name	Viscosity (cps at 25°C)	Chemical Structures
Trimethylolpropane Triacrylate (TMPTA)	80~120	
Dipentaerythritol Hexaacrylate (DPHA)	4000~7000	
Isobornyl Acrylate (IBOA)	5~15	
Lauryl Acrylate (LA)	4~8	
Isodecyl Acrylate (IDA)	2~8	
2-Phenoxy Ethyl Acrylate (PHEA)	5~15	

Table 2 Mixing ratio of resin

	T7D3 I10	T7D3 L10	T7D3 D10	T7D3 P10
TMPTA	7	7	7	7
DPHA	3	3	3	3
PI(*wt.%*)	2	2	2	2
IBOA(*wt.%*)	10	-	-	-
LA(*wt.%*)	-	10	-	-
IDA(*wt.%*)	-	-	10	-
PHEA(*wt.%*)	-	-	-	10

Table 3 Viscosity at 25 °C

(unit: *cps*)

T7D3	T7D3 I10	T7D3 L10	T7D3 D10	T7D3 P10
51.1	215.2	142.79	122.14	174.05

3.2 점성실험

광경화 수지의 점성은 높을수록 적층 시 수지 도포가 불안정 하고 잔류수지의 제거가 용이하지 않다. 또한 제작된 구조물에 수지점착으로 인한 변형 등이 발생할 수 있어 낮을수록 유리하다.

수지 점성으로 인한 문제를 알아보기 위해 기본수지와 비교수지의 점성 실험과 적층 후 잔류수지의 제거를 비교했다.

점성실험 결과 Table 3과 같이 비교수지가 기본수지에 비해 약 200cps로 100첸 이상 줄어듦을 확인했다. 잔류 수지 제거의 문제를 확인하기 위해 경화 실험 기기에서 임의의 형상으로 적층 시켜 잔류수지를 IPA (Isopropyl alcohol)로 제거했다.

그 결과 두 수지의 경화력은 매우 좋은 반면에 기본 수지의 경우 높은 점성의 잔류 수지 점착으로 비교수지에 비해 세척이 용이하지 않음을 확인했다.

3.2 인장시험

다관능 단량체를 합성한 기본수지와 희석제 역할의 1관능 단량체를 첨가한 비교군 수지의 경화강성을 실험하기 위해 인장시험을 실시했다. 인장시편은 ASTM D638에 따라 Fig 3와 같은 시편 몰드를 제작했다.

몰드 내 수지의 경화를 위해 가시광선 LED로부터 30cm 거리에서 완전경화 후 IPA로 세척했다. 이후 50Kg의 최대 부하와 전용 측정 프로그램을 가진 만능시험기 (BMSTP-50P)에서 인장실험을 실시했다.

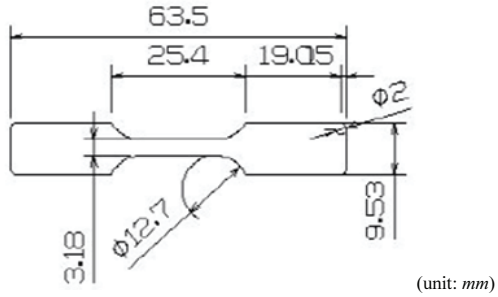
Fig. 4와 Table 4는 인장실험의 결과로 응력-변형률선도와 하중에 따른 변형양을 표기했다

그 결과 기본수지와 비교수지들의 강성과는 큰 영향을 없음을 확인했다. 이러한 결과로 희석역할의 기능성 단량체와 기본수지의 적절한 혼합비로 강성과 수지점성을 조율할 수 있음을 나타낸다.

3.3 경화특성

기본수지와 비교수지에 따라 경화반응 속도를 확인하기 위하여 경화두께를 측정하였다.

실험방법은 Fig. 2의 경화 실험 기기로 10mm의



(unit: *mm*)

Fig. 3 Model of ASTM D638 specimen

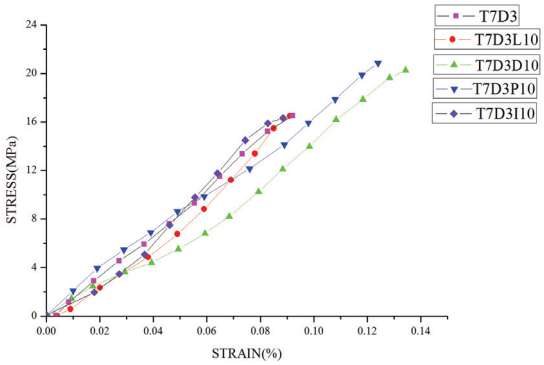


Fig. 4 Stress-Strain curve

Table 4 Result of tension test

	Stress(*MPa*)	Displacement(*mm*)
T7D3	17.43	2.471
T7D3I10	18.2	2.27
T7D3L10	16.2	2.387
T7D3D10	20.5	3.382
T7D3P10	23.4	2.711

정사각형 단면이미지를 LCD에 패턴 시킨 뒤 LED와의 간격을 정밀스테이지로 30mm두고 조사에너지에 따라 실시했다. 이때 LCD에 투과되는 광에너지는 약19.44mJ/cm^{2}로 타이머를 사용해77.76~194.4 mJ/cm^2 까지 조사했다. 이후 마이크로 스코프(DE/Z16, Leica Co.,)를 사용해 Table 5와 같이 경화두께를 측정했다.

Table 2의 경화두께 측정 결과 비교수지의 경우 희석 단량체에 따라 최대 약 20μm가 차이 났으며, 조사 에너지가 높일수록 경화두께의 증가됨을 보였다. 광경화특성 중 임계에너지(Critical energy: E_c)는 액체인 수지가 고체로 변하기 위한 최소 에너지로 수지마다의 특성이 다르다. 이러한 E_c값은 정

Table 5 Curing depth according to beam exposure energy (unit: μm)

Resin name	Beam exposure energy(mJ/cm^2)			
	194.4	155.5	116.6	77.6
T7D3	192	170	140	90
T7D3I10	180	133	96	55
T7D3L10	190	160	122	60
T7D3D10	178	153	104	65
T7D3P10	195	160	130	69

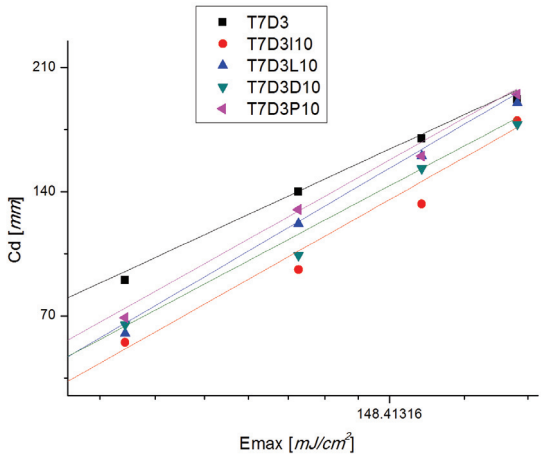


Fig. 5 Curing depth

Table 6 Threshold energy and curing depth of Beer-Lambert law

	$E_c(mJ/cm^2)$	$D_p(\mu m)$
T7D3	35.21	111.7
T7D3I10	56.59	136.4
T7D3L10	51.82	141.8
T7D3D10	50.00	128.3
T7D3P10	47.57	135.3

확한 수지경화를 위해서 반드시 광원의 세기와 조율되어야 한다.

Table 2에 나열한 수지에 대한 E_c를 구하기 위해 Beer-Lambert 수식을 사용했다.

식(1)에 Table 5의 경화두께와 LCD 패턴을 통과한 광 에너지인 19.44 mJ/cm^{2}를 각각 C_d, E_{max}에 대입하고 오리진(Origin)으로1차 방정식과 선형보간을 통해 E_c와 광 투과깊이인 D_p를 Table 6과 같이 산출했다.

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

Table 7 Shrinking rate of resin

Resin name	Shrinkage ratio(%)
T7D3	1.245
T7D3I10	1.263
T7D3L10	1.026
T7D3D10	0.909
T7D3P10	0.516

3.4 경화 수축률

액체상태의 수지는 광 조사로 인해 고체로 변화할 경우 경화과정에서 수축현상이 발생된다. 이는 과도한 희석 단량체의 사용이나 수축율이 높은 단량체의 사용에서 크게 발생된다. 이러한 수축을 줄이기 위해서 수축방지제를 사용하지만 원천적으로 단량체 또는 올리고머의 수축에 지배 받기 때문에 수지배합에 따라 큰 차이를 보인다. 이러한 경화수축은 구조물의 외형 변화, 균열 등이 발생하므로 정밀한 구조물 제작에 한계를 가져온다.

본 연구에서의 기존수지와 비교수지의 수축률을 측정하기 위해 경화두께 실험과 동일 조건하에서 실시했다. 높이 방향의 일정한 수지 도포량을 위해 패턴 이미지와 동일한 크기로 1mm의 가림막을 제작하고 수지를 채워 194.4 mJ/cm^{2}의 광 조사 에너지로 경화한 뒤 가로, 세로, 높이를 마이크로스코프로 측정했다. 식(2)는 수축률을 구하기 위한 식으로 전체 도포된 수지면적(A)에 경화된 면적(a)를 나눈 값으로 산출된다.

$$shrinkage(\%) = 100 - ((100 \times a)/A) \quad (2)$$

그 결과 Table 7과 같이 수축률은 기본수지와 비교수지인 T7D3I10의 가장 높으며, T7D3I10를 제외한 비교수지가 적었다. 그 중에서 PHEA가 혼합된 비교수지인 T7D3P10이 기본수지에 비해 50%이상 낮은 수축률을 보였다.

4. 3 차원 구조물 제작

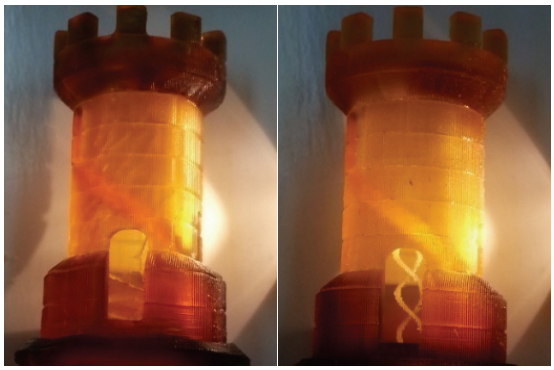
Scanbeam-SLA에서 가시광선용 수지의 향상을 위해 기본수지와 비교수지의 비교실험을 다양하게 실시했다. 비교수지 중 T7D3P10는 기본수지에 비해 점성은 1/2배, 인장강도는 약 2배 수준으로 향상됨을 확인했다. E_c 의 경우 기본수지보다 미세하게 높으나 타 비교수지보다 낮아 기본수지보다 개선된 수지라 볼 수 있다. 이러한 T7D3P10와 기본

Table 8 Conditions of fabrication process

Resin	T7D3, T7D3P10
Layer Thickness(μm)	50
Process time(min)	300
Scan speed(mm/sec)	0.825
Dwell time(sec)	5

(unit: *mm*)

(a) 3Dimension CAD model



(b) Using T7D3 (c) Using T7D3P10

Fig. 6 Fabrication of Rook structure

수지를 사용해 구조물제작에서의 정밀도를 확인하기 위해 Table 8의 동일한 가공조건으로 Scanbeam-SLA에서 Fig. 6(a)와 같은 Rook 형상의 3D모델링을 가공했다.

그 결과 Fig. 6(b)와 같이 T7D3의 수지로 제작했을 시 형상 내부에 미세한 뫼비우스(Möbius) 띠 형태가 높은 점성과 수축으로 인해 제작되지 않았다. 반면에 (c)의 T7D3P10의 경우 뫼비우스 띠 형태의 미세 구조물이 정밀하게 제작됨을 확인했다.

이러한 실험 결과로 기본수지보다 T7D3P10가 Scanbeam-SLA에서 향상된 수지로 볼 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 기존의 쾌속조형장치에 비해 간단하고 저비용의 Scanbeam-SLA에서 가시광선용 광경화 수지개선을 제안했다. 우선 기본수지를 정해 그에 유사한 비교수지로 다양한 실험을 통해 개선했으며 이를 Scanbeam-SLA에서 정밀제작 여부를 확인했다. 이러한 결과로 다음과 같이 결론을 내릴 수 있다.

첫번째, 다 관능성 단량체를 사용하면 반응성과 기타 물성은 좋으나, 높은 점성으로 적층 시 구조물 제작의 오류가 발생된다. 이를 해결하기 위해 기능성 희석 단량체를 혼합해 해결했다.

두번째, 기능성 희석 단량체를 혼합비에 따라 최종물성에 영향을 미치므로 적절한 선택이 요구된다. 여러 혼합비를 분석한 결과 기본수지인 T7D3의 경우 점성과 인장응력, 탄성계수, 수축률이 각각 351.1cps, 17.43MPa, 7.05MPa, 1.245%인 반면 T7D3P10의 경우 174cps, 23.4MPa, 8.63MPa, 0.516%으로써 기본수지에 비해 낮은 점성과 수축률, 높은 물성을 가짐을 확인 했다.

향후 연구과제는 기본수지의 물성을 바탕으로 투명한 색의 수지와 기능성이 추가된 수지 등의 다양한 종류의 수지를 개발 하여 구조물에 적용시켜 다방면으로 활용이 되도록 연구가 이루어져야 한다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부, 한국산업기술진흥원, 동남지역사업평가원의 광역경제권 선도산업 육성사업으로 수행된 연구결과입니다.(A0022 00337)

참고문헌

1. Li, Y., Li, D., and Lu, B., “Introduction to Sterelithography and its Application,” Jounal of Applied Optic, Vol. 9, No. 3, pp. 34-36, 1999.
2. 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.
3. Pham, D. T. and Ji, C., “Design for Stereolithography,”

Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 214, No. 5, pp. 635-640, 2000.
4. Knitter, R., Bauer, W., Göhring, D., and Risthaus, P., “RP process Chains for Ceramic Microcomponents,” Rapid Prototyping Journal, Vol. 8, No. 2, pp. 76-82, 2002.
5. 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.
6. Park, I. B., Lee, D. S., Ha, Y. M., and Lee, S. H., “Development of large area rapid prototyping using scanning beam method and LCD (liquid crystal display) module,” Proc. of KSPE Autumn Conference, pp. 383-384, 2011.
7. Yoon, S. H., Park, I. B., Lee, D. S., and Lee, S. H., “A study of control for curing ability of patterned visible beam through LCD (liquid crystal display),” Proc. of KSPE Autumn Conference, pp. 371-372, 2011.
8. Chitec Technology Co. Ltd., www.chitec.com
9. Roffey, C. G., “Photogeneration of Reactive Species for UV Curing,” John Wiley & Sons. Ltd., 1997.
10. Lee, Y. M., Seo, D. H., and Kwon, S. G., “High Polymer Chemistry,” SciTech Media. Inc., 2004.