

전사방식 마이크로 광 조형에서 복합 재료의 미세구조물 제작을 위한 수지 교환 시스템 개발

Development of Material Switching System for Microstructure with Multiple Material in Projection Microstereolithography

조광호¹, 박인백², 하영명², 김민섭¹, 이석희^{2,✉}

Kwang Ho Jo¹, In Baek Park², Young Myoung Ha², Min Sub Kim¹ and Seok Hee Lee^{2,✉}

¹ 부산대학교 기계공학부 제어자동화시스템 전공 (Intelligent Control and Automation Division, Pusan National Univ.)

² 부산대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Pusan National Univ.)

✉ Corresponding author: sehlee@pusan.ac.kr, Tel: 051-510-2327

Manuscript received: 2011.4.13 / Revised: 2011.6.21 / Accepted: 2011.6.28

For enlarging the applications of microstereolithography, the use of diverse materials is required. In this study, the material switching system (MSS) for projection microstereolithography apparatus is proposed. The MSS consists of three part; resin level control, resin dispensing control, and vat level control. Curing characteristic of materials used in fabrication has been identified. Through repeated fabrication of test models, the critical fabrication error is investigated and a possible solution to this error is suggested. The developed system can be applied to improve the strength of microstructure and extended to fabricate an array of microstructures with multiple materials.

Key Words: Projection Microstereolithography (전사방식 광 조형 시스템), Material Changeable System (수지교환시스템), Microstructure (미세구조물)

1. 서론

SLA 를 기초로 둔 미세 광 조형기법 (Microstereolithography: μ SL)의 미세구조물 제작방법은 특정 패턴 광 또는 일정한 빔으로 광 경화수지를 경화하고 반복 적층으로 완전한 3 차원 구조물을 제작한다.¹ 이러한 경화 시스템에서 광 경화수지는 SL 의 상용 수지를 사용할 경우 높은 점성으로 인해 미세구조물의 제작이 어렵고 광원에 따른 경화반응이 다르기 때문에 다양한 모노머 (Monomer)를 합성하고, 특정 파장에 반응하는 광개시제(Photoinitiator)를 첨가해 사용했다.² 하지만 μ SL 에서 독자적인 광 경화성 수지에 대한 대부분의 이전 연구들은 수지의 강성이나 경화특성에 대

한 개발보다 미세구조물 형상의 가공정도를 위한 개선방안이 중시되었다.

근래에 이르러 μ SL 의 모태인 SL 의 응용분야가 확대되면서 바이오 분야, 기능성 미세 구조물 등의 다양한 분야에 μ SL 이 적용되기 시작해 수지의 개발과 중요성이 대두되기 시작했다. 그 중 바이오 디바이스의 소재개발은 생체 재생을 위한 미세구조물의 가공 소재로 사용하기 위한 연구, 기능성 디바이스의 소재는 미세구조물의 강성을 높이기 위한 파티클, 유기물이 포함된 고 강성 소재 등이 진행되었다.³⁻⁶ 이와 더불어 적층 시 발생하는 계단현상(Stepping effect)으로 인해 저하되는 표면 거칠기의 향상을 위한 디더링(Dithering) 기법,⁷ 전사방식의 μ SL 에서 스캐닝(Scanning) 기법을 구현

할 수 있는 스틸 모션(Still-motion)기법⁸ 등 제작기법들의 대한 연구가 진행되었다. 그러나 이 기법들은 일반적인 μ SL 기법에서 한 종류의 광 경화수지로 미세구조물을 제작하는 한계에서 벗어나지 못한다. 현재 여러 가지 재료를 사용하여 제작하는 AM(Additive Manufacturing) 기술에는 재료가 고체인 FDM(Fused Deposition Modeling)^{9,10} 과 재료가 분말인 SLS(Selective Laser Sintering)^{11,12}가 있다. 이들은 재료의 특성상 여러 가지 재료를 사용할 수 있는 장점을 가지고 있지만, SL 보다 정밀도가 떨어진다는 단점을 가지고 있다. 만일 μ SL 에서 다양한 복합수지로 미세구조물을 제작할 경우 기능성 미세구조물의 강성이 보장될 수 있으며, 바이오 구조물일 경우 분해성을 조절할 수 있는 장점을 지닐 수 있다.

본 연구에서는 전사방식의 미세 광 조형기법(Projection microstereolithography: P μ SL)에서 다양한 수지를 사용해 미세구조물을 제작하기 위한 수지 교환시스템(Material Switching System: MSS)을 개발한다. 결과로 MSS 에서 미세구조물의 가공 정도를 알아보기 위해 MSS 로 수지교환 시 발생하는 가공오류를 일반적인 기법으로 제작된 미세구조물과의 가공 정도를 비교한다.

2. 수지교환시스템

2.1 전사방식의 미세 광조형기법(P μ SL)

본 연구에서 사용된 P μ SL 은 Fig. 1 과 같이 역할에 따라 구동부, 광학부, 제어부 3 개 부분으로 이루어져 있다.

구동부는 100 μ m 의 해상도를 가진 볼 스크류 타입의 X, Y 축 스테이지와 1 μ m 해상도의 Z 축 공압 스테이지이다. X, Y 축 스테이지는 대면적 미세

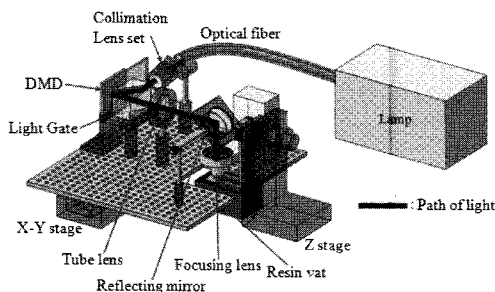


Fig. 1 Schematic of projection microstereolithography (P μ SL)^{7,8}

구조물을 제작하거나 가공설정을 위해 사용되며, Z 축 스테이지는 적층을 위한 플랫폼(Platform)으로 사용된다. 광학부는 구동부의 X, Y 축에 각종 광학이 장착되어 있다. 광원의 파워는 200W 급이며, 365nm 필터가 장착되어 있으며, 광 이송을 위한 광 화이버 그리고 광 화이버 끝단의 광 퍼짐을 줄이기 위한 집중렌즈(collimating lens)가 부수적으로 장착되어 있다. 이를 통해 전달된 광원은 특수 프리즘인 TIR 프리즘(Total Internal Reflection Prism)을 통해 패턴 광을 생성시켜 반사시킬 수 있는 광 패턴 생성(Beam pattern generator)인 DMD(Digital Micromirror Device)에 조사된다. 패턴된 광은 다시 TIR 프리즘을 통해 광을 평행하게 전달해주는 튜브(tube)렌즈에 입사되고, 입사각을 변경하기 위한 반사거울에 반사되어 배율을 가진 초점 렌즈를 통해 수지표면에 도달되도록 설계되어 있다. 제어부는 구동부의 스테이지 제어와 광학부의 광원에 대한 셔터(shutter), DMD 의 제어를 담당한다. Fig. 2 는 P μ SL 에서 미세구조물을 가공하는 절차를 보여준다.

2.2 수지교환시스템

MSS 는 Fig. 3 과 같이 수지 높이 제어부(Resin Level Control: RLC)와 수지 토출 제어부(Resin Dispensing Control: RDC) 그리고 수지용기 높이 제

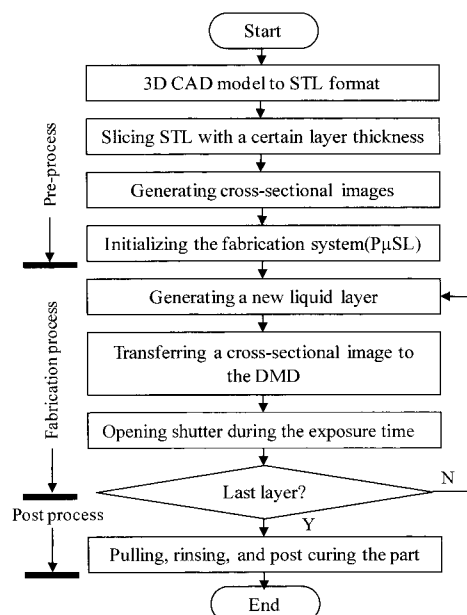


Fig. 2 Microstructure fabrication process in P μ SL

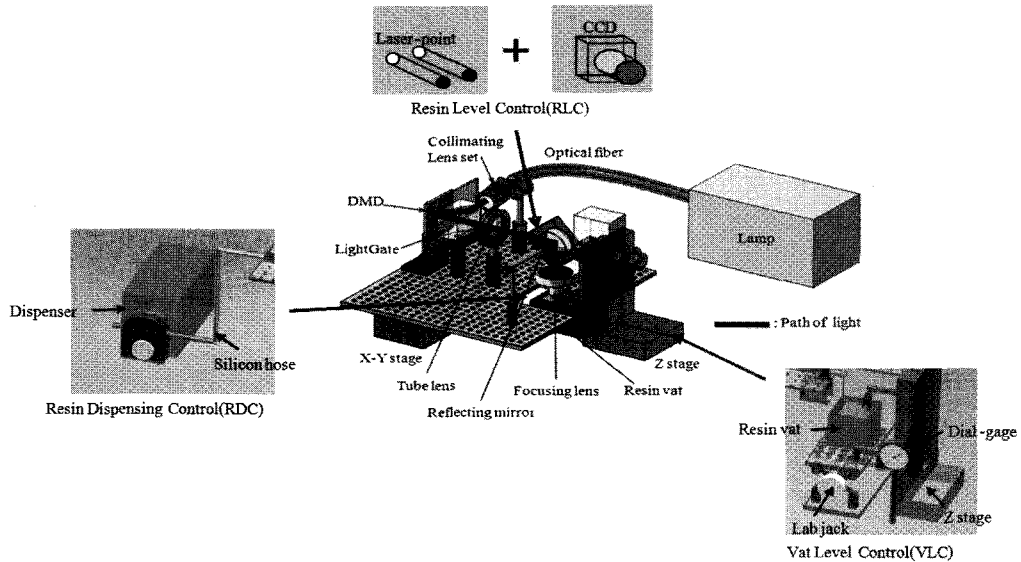


Fig. 3 Schematic of material switching system(MSS) in PμSL

어부(Vat Level Control: VLC) 3 개 부분으로 구성되어 PμSL 에 장착된다.

RLC 는 Fig. 3 과 같이 2 개의 레이저 포인트와 8 메가픽셀(megapixel)과 30frame/sec 의 동영상 촬영을 지원하는 CCD(Charge Coupled Device)카메라(Pro 9000, Logitech Co.)로 구성되었다.

RDC 는 0.7~2200ml/min 의 유량제어가 가능하고 디스펜서형의 연동펌프(Peristaltic pump)(WT600-1F, Longerpump Co.)가 장착되어 있다.

VLC 는 10μm 의 해상도와 통실포트를 지닌 디지털 다이얼게이지(Dial-gage) 그리고 미세 구동이 가능한 스텝핑 모터가 Lab jack 에 장착되어 있다.

먼저 첫 번째 수지를 통하여 1 차 구조물을 만들게 된다. 첫 번째 수지를 이용하여 제작이 완료되면 수지 높이를 측정하기 위해 RLC 가 동작하게 된다. 측정 방법은 수지표면을 2 개의 레이저로 조사하여 반사된 포인트가 초점필름에 투영되어 이를 CCD 카메라로 측정한다. 측정된 CCD 카메라 내 2 개의 픽셀좌표를 레이저 포인트의 퍼짐으로 인한 오차 값을 줄이기 위해 X 축 방향의 최대 픽셀 값과 Y 축 방향의 최대 픽셀 값의 절반 값으로 나눠 Pixel(x,y)형태로 저장한다. 2 축으로 표현한 이유는 수지표면의 흔들림까지 고려했기 때문이다. 이러한 RLC 는 RDC 와 VLC 와 상호 연계되어 구동된다. 수지 높이가 측정이 완료되면 Lab jack 의 위치를 디지털 다이얼 게이지를 통하여 측

정하여 저장한다. 그 후 Z stage 는 고정되어 있는 상태에서 Lab jack 이 Resin vat 과 함께 하강을 하게 된다. 구조물과 이탈되어진 Resin vat 은 2 차 구조물을 제작하기 위하여 정량의 수지로 교환하게 되고, 이와 동시에 1 차 구조물의 잔류 수지를 제거하기 위한 세척 작업을 실시하게 된다. 세척 작업이 완료되고 난 후 2 차 수지로 교환하여 용기를 원 위치로 복귀시키기 위해 VLC 가 작동한다. VLC 의 절차는 크게 두 가지로 나누어진다. 첫 번째는 다이얼게이지의 값이 변할 때까지 빠른 속도로 상승하고, 두 번째로 디지털 다이얼 게이지에 저장되어 있는 값을 맞추기 위하여 Sixteenth Step 단위로 스텝핑 모터를 제어하게 된다. 마지막으로 RDC 로 수지를 조금씩 보충하면서 Pixel(x,y) 값을 맞추게 된다. 여기서 수지의 흔들림 오차를 최소화하기 위하여 수지가 조금씩 보충되고 난 후, 수지가 안정될 때까지 시간적 여유를 두고 측정을 실시하였다. 이와 같은 방법을 반복하며 구조물을 제작하게 된다. Fig. 4 는 기존의 PμSL 에서 MSS 의 구동방법을 간략히 표기했다.

3. 광 경화 수지

3.1 광 경화 특성

본 연구에서 사용할 광 경화 수지는 1 관능 모노머와 3 관능 모노머, 광 개시제를 혼합한 3 종류

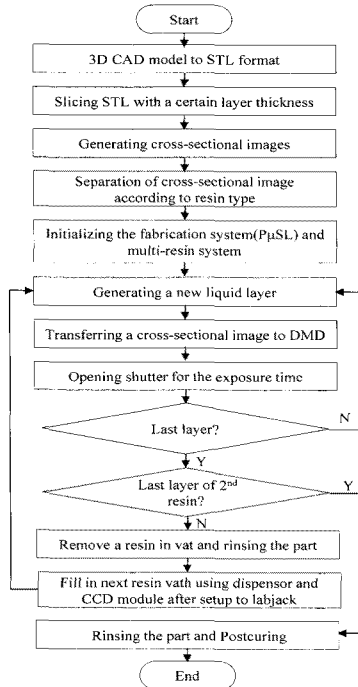


Fig. 4 Flowchart of MSS process in PμSL

의 혼합 수지이다. 여기서 1 관능 모노머 Isobornyl Acrylate(İBOA)는 반응속도가 빠르며, 내후성이 강한 장점이 있다. 이와 동일한 1 관능 모노머인 Hexanediol Dimethacrylate(HDDA)는 광 투과성이 높고, 점성이 상온에서 7cps 이하로 낮아 İBOA 와 더불어 용매로 많이 사용된다. 이와 달리 Bisphenol-A-ethoxylated(4) Diacrylate(BP40)는 분자량이 높아 점성이 높고 경화물에 연성을 부여할 수 있다. 3 관능 모노머인 Tri(propylene glycol) Diacrylate (TPGDA)와 Trimethylolpropane Triacrylate(TMPTA)는 경화반응이 비교적 안정하여 도막이 양호하며, 1 관능 모노머에 비해 강성이 높으나 점성이 높은 단점을 가진다. 첨가된 광 개시제는 황변현상이 적은 2,2-Dimethoxy-2-phenylacetophenone(DMPA)로 365nm 의 광원에 흡수율이 높아 빠른 시간에 경화가 가능하다. 본 연구에 사용된 복합 수지의 모노머와 광 개시제의 혼합비율과 수지명은 Table 1 과 같다.

Table 1 Name of resin

IHB	İBOA, HDDA, BP40 (8:1:1), DMPA 5w.t%
IHTPA	İBOA, HDDA, TPGDA (6:2:2), DMPA 5w.t%
IHTMA	İBOA, HDDA, TMPTA(6:2:2), DMPA 5w.t%

이러한 비율 조절은 점성이 높을수록 적층 시 수지의 리코팅이 어려워 정확히 적층이 이뤄지지 않기 때문에 Fig. 5 와 같이 상온에서 최대한 10cps 이하의 점성을 가질 수 있도록 조절한 것이다.

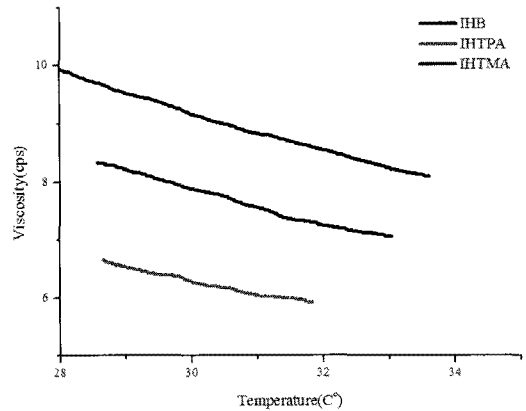


Fig. 5 Viscosity of resins

제작되어진 İHB5, İHTPA, İHTMA 의 경화특성을 조사하기 위해 광 에너지에 따른 경화두께를 측정했다. 이러한 경화두께(C_d)로 Beer-lambert 의 식 1 에 따라 광 투과 깊이(D_p)와 임계에너지(E_c)를 산출할 수 있다.

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

식 1 을 통해 산출된 İHB, İHTPA, İHTMA 의 임계 에너지는 2.28, 3.65, 3.11(mJ/cm^2), 광 투과 깊이 (D_p)는 452.1, 254.77, 270.14 μm 으로 İHB 경우 낮은 광 조사에서 높은 경화두께로 경화가 가능함을 알 수 있다. 이에 반해 İHTPA 와 İHTMA 의 경우 높은 광 조사에너지에 비해 경화두께가 낮은 특성을 보인다. 이러한 경화 실험 결과로 MSS 로 복합재료의 미세구조물을 제작할 때 각각의 수지마다 광 조사에너지 및 적층 두께 및 조사시간 등의 가공 조건을 고려할 수 있다.

3.2 MSS 의 적층 실험

MSS 에서 제작된 수지로 미세구조물을 적층시킬 때 적층 오류의 여부를 실험하기 위해 Fig. 6 과 같이 3 단계별로 면적이 다른 적층 구조물을 제작했다.

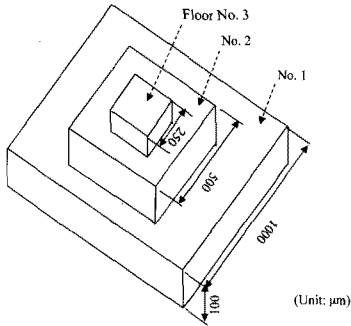


Fig. 6 Test model for the measurement of precision

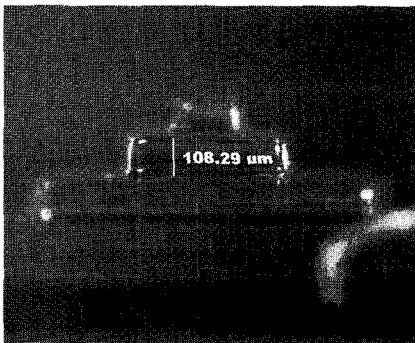


Fig. 7 Error due to fluctuation of resin surface

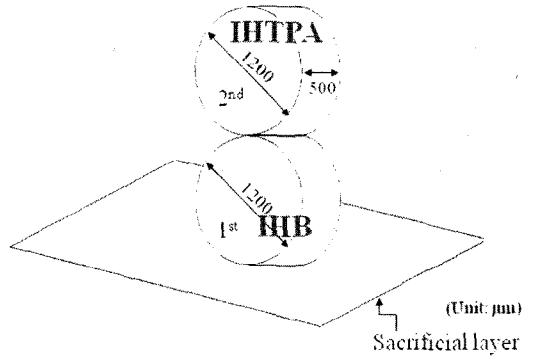
IHB, IHTPA, IHTMA 로 모델을 총 10 회 제작해 측정 한 결과 2 ~ 10% 미만의 오차가 발생하였다. 이는 MSS 에서 수지 높이 제어부와 수지 토출 제어부의 오차때문으로 예상되어 전체 시스템에 외부 막을 설치하였다. 외부 막은 수지 높이 제어부에서 외부 충격으로 인한 수지 유동을 최소화하기 위함이며, 이로 인해 정확한 수지 토출을 유도했으나 예상과 달리 작은 외부 충격이나 대기흐름에 따라 수지표면이 쉽게 동요되어 외부 막의 효과는 미비했다. Fig. 7 은 수지표면의 동요에 의한 가공 오차를 보여주고 있다.

4. 미세 구조물 제작

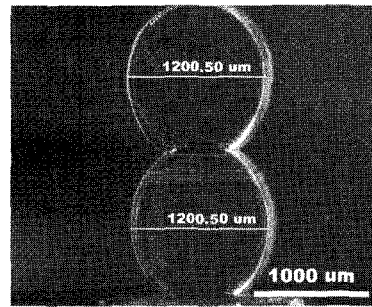
4.1 오버행(overhang)을 지닌 미세구조물

MSS 로 Fig. 8 의 오버행의 미세구조물을 제작 하고 층간의 오차를 측정했다. 그 결과 오차가 52.45μm 로 측정되었으나 이 부분에 해당되는 해당 단면이 2 개이므로 약 22μm 정도의 오차가 발생했다. Fig. 8 의 3d 구조물의 형상에서 두 원이 만나는 지점이 오버행(Overhang)을 가지기 때문에 일

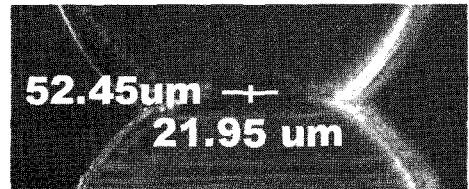
반기법에서 IHB 로만 제작한 Fig. 9 의 43.90μm 와 차이가 적음을 알 수 있다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 8 Fabrication of microstructure with the MSS

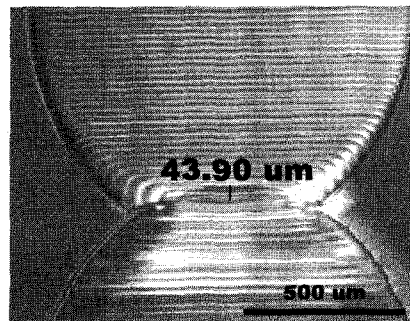


Fig. 9 Fabrication of microstructure with single material (IHB)

Table 2 Fabrication parameters

	Resin	Exposure energy (mJ/cm ²)	Layer thickness (μm)
Fig. 7	1 st :IHB	1 st : 9.84	1 st :10
	2 nd : IHTPA	2 nd : 13.12	2 nd : 10
Fig. 8	IBH	9.84	10

4.2 배열형 미세구조물

배열형 미세구조물 제작은 하나의 미세구조물을 다수로 제작해 구조적인 효과나 효능을 높이는 데 사용된다. 이러한 구조물 중 배열형 미세렌즈는 일정한 광 분포 에너지의 전달을 위해 사용되며, 바이오 디바이스 중 배열형 미세 주사기는 경피 약물 전달의 효능을 높이기 위한 방안으로 유용하다. 또한 생체 조직에서의 재생을 위한 스케폴드의 경우 바이오 수지에 따라 배열을 달리 두었을 경우 생체 분해성을 조절할 수 있는 장점을 지닌다.

Fig. 10 은 미세 주사기와 유사한 솔리드형의 미세 침을 배열형태로 모델링 하고 침마다 각기 다른 수지를 사용해 Table 3 의 가공조건을 사용해 제작했다. 제작방법은 IHTPA 로 희생층 제작 후 수지 높이 제어부에서 희생층에 의한 수지 높이를 저장했다. 이후 IHTPA 의 미세 침을 먼저 가공하고 IHTPA 를 제거 후 이전에 측정된 희생층 높이 만큼 IHB 를 토출시켜 IHB 의 미세 침을 가공했다.

Table 3 Fabrication parameters of micro needle array

Resin	Exposure energy (mJ/cm ²)	Layer thickness (μm)
1 st :IHB	1 st : 16.4	10
2 nd : IHTPA	2 nd : 13.12	

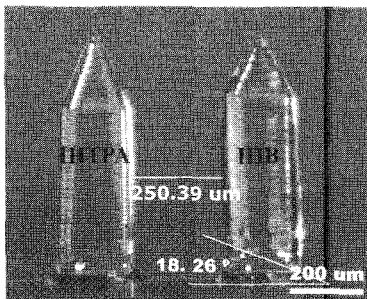
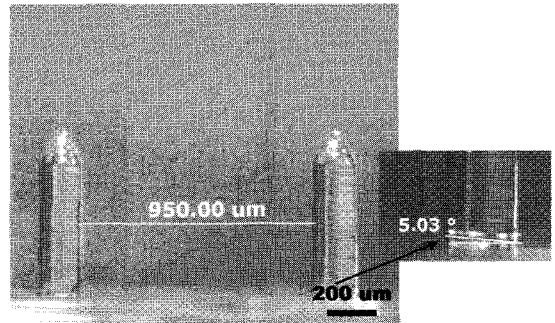
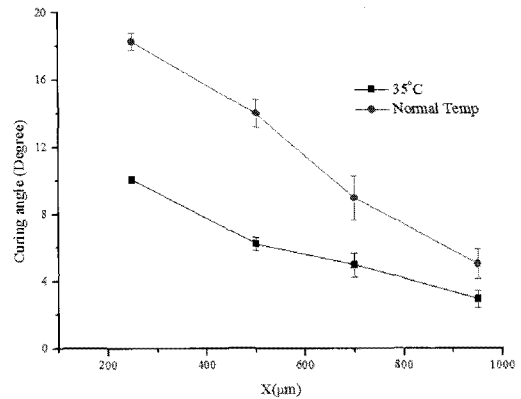


Fig. 10 Fabrication of micro needle array

그러나 Fig. 10 에서 보이는 바와 같이 IHB 로 제작된 미세침 하부에 약 18°의 경사각이 발생했음을 알 수 있다. 이는 IHTPA 로 미세 침 제작 후 IHB 가 희생층 위에 도포될 때 발생하는 수지표면의 왜곡으로 인한 것이다. 이를 줄이기 위해서는 배열간격을 늘이거나, 온도를 부여할 수 있다. 이의 결과를 Fig. 10 에 나타내었다. Fig. 10(a)와 (b)와 같이 배열간격이 커질수록 경사각이 작아지는 것을 확인하였고, Fig. 11(c)와 같이 온도를 부여할수록 수지의 점성이 떨어지므로 경사각이 작아지는 것을 확인하였다. 온도의 부여조건은 수지의 물성에 영향을 줄 수 있으므로 35 도까지 실험을 실시했다.



(a)



(b)

Fig. 11 Measurement of incline angle according to array gap (a) fabrication of micro needle array using cure conditions (b) normal temp and 35°C

4.3 복합 적층 형태에 따른 미세구조물

4.1 의 오버행을 가진 미세구조물의 경우 순차적으로 적층되는 형태이므로 MSS 에서 비교적 간단하

게 제작된다. 하지만 Fig. 12(a)와 같이 복합 적층 형태의 구조물에서는 새로운 수지의 가공 시작 높이를 재설정 해야 하므로 가공 시 오류가 발생한다.

먼저 IBH 로 아래 구조물을 제작을 한 후 IHTPA 로 수지를 교체하고 위 구조물을 제작한 결과를 Fig. 12(b)에 나타내었다. 이 구조물의 문제점은 앞에서 언급된 수지 표면의 왜곡으로 인한 경사각이 나타났으며, 오버행으로 인하여 두 구조물의 중앙에 있는 직사각형 모양의 빈 공간윗부분에

과경화가 일어났다. 이를 해결하기 위한 방법으로 광 에너지 또는 조사시간을 줄이거나, 광흡수제를 사용하여 경화 두께를 조절하는 방법이 있다. 본 연구에서는 IHTPA 로 제작을 할 때 수지에 온도를 부여하고, 광에너지를 줄여 실험을 진행하였다. 그에 대한 결과는 Fig. 12(c)에 나타내었다. 경사각은 줄어들었으며, 과경화의 깊이는 줄어든 것을 확인할 수 있었다.

5. 결론 및 고찰

본 연구는 전사방식의 미세 광 조형장치에서 다양한 복합 수지를 사용할 수 있는 수지 교환 시스템을 개발했다.

본 시스템에서 수지를 교환하고 난 후 일어날 수 있는 가공 오류를 테스트하고 그에 대한 정밀도를 측정하기 위해 미세 광 조형의 일반적인 기법을 이용하여 몇 가지의 미세구조물을 제작했다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 단일 미세 구조물

적층 실험을 통해 수지 교환 시스템의 반복 가공 정도를 단일 미세 구조물을 제작하면서 측정하였다. 그 중 발생되었던 시스템상의 오류들을 수정하면서 반복 가공 정도를 높이고자 하였다. 그 결과로 미세한 적층 오류가 발생하였으나, 한 가지 수지를 사용하는 일반 기법과의 차이가 적음을 확인하였다.

(2) 배열형 미세구조물

배열 형태로 각기 다른 수지를 사용하여 미세 구조물을 제작할 때 회생층 위에 발생하는 수지표면의 왜곡현상으로 인해 경사각이 발생되었다. 이에 대한 해결 방안으로 구조물 사이의 배열간격을 늘리거나, 수지에 온도를 부여하여 경사각을 줄일 수 있음을 확인하였다.

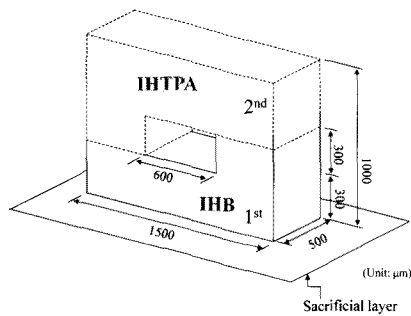
(3) 복합 적층 형태에 따른 미세구조물

본 시스템에서 복합 적층 형태를 가지는 미세 구조물을 제작하기 위해서 수지에 온도를 부여하고, 광 에너지를 줄여 가공 오류를 줄였다.

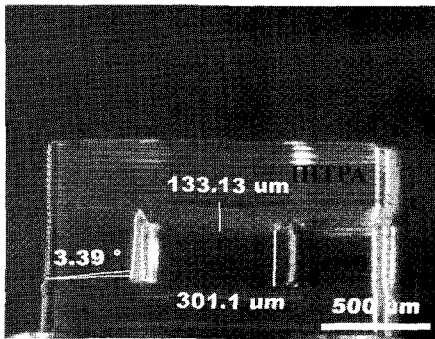
향후 MSS 의 가공 오류를 좀 더 보완하기 위한 추가적인 연구가 필요하다.

후 기

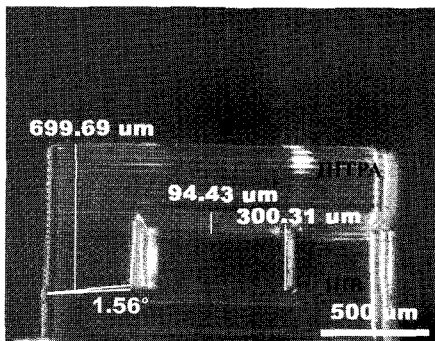
이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.



(a)



(b)



(c)

Fig. 12 Fabrication of microstructure with multi-material layers (a) 3D model (b) at conventional condition (c) at heated resin and reduced exposure energy

참고문헌

1. Varadan, V. K. Jiang, X. and Varadan, V. V., "Microstereolithography and other fabrication techniques for 3D MEMS," John Wiley & Sons, 2001.
2. Park, I. B., Lee, S. D., Kwon, T. W., Choi, J. W. and Lee, S. H., "Fabrication of elliptical micro-lens array with large surface using μ SL," J. of KSPE, Vol. 25, No. 2, pp. 123-130, 2008.
3. Mai, Y. W. and Yu, Z. Z., "Polymer nanocomposites," CRC press, 2006.
4. Timmer, M. D., Ambrose, C. G. and Mikos, A. G., "Evaluation of thermal and photo-crosslinked biodegradable poly(propylene fumarate)-based networks," Journal of Biomedical Materials Research Part A, Vol. 66, No. 4, pp. 811-818, 2003.
5. Fouassier, J. P., "Photoinitiation, photopolymerization and photolithography fundamentals and applications," Hanser Grader, 1995.
6. Odian, G. G., "Principals of polymerization," Wiley-Interscience, 2004.
7. Park, I. B., Ha, Y. M. and Lee, S. H., "Dithering method for improving the surface quality of a microstructure in projection microstereolithography," International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 52, No. 5-8, pp. 545-553, 2011.
8. Park, I. B., Ha, Y. M. and Lee, S. H., "Still-motion process for improving the accuracy of latticed microstructures in projection microstereolithography," Sensor and Actuators A: physical, Vol. 167, No. 1, pp. 117-129, 2011.
9. Khalil, S., Nam, J. and Sun, W., "Multi-nozzle deposition for Construction of 3D biopolymer Tissue Scaffolds," Rapid Prototyping Journal, Vol. 11, No. 1, pp. 9-17, 2005.
10. Jafari, M. A., Han, W., Mohammadi, F., Safari, A., Danforth, S. G. and Langrana, N., "A Novel System for Fused Deposition of Advanced Multiple Ceramics," Rapid Prototyping Journal, Vol. 6, No. 3, pp. 161-175, 2000.
11. Kumar, P., Santosa, J. K., Beck, E. and Das, S., "Direct-write Deposition of Fine Powders Through Miniature Hopper-nozzles for Multi-material Solid Freeform Fabrication," Rapid Prototyping Journal, Vol. 10, No. 1, pp. 14-23, 2004.
12. Li, X., Wang, J. and Shaw, L. L., "Laser Densification of Extruded Dental Porcelain Bodies in Multi-material Laser Densification Process," Rapid Prototyping Journal, Vol. 11, No. 1, pp. 52-58, 2005.