액속주사법을 이용한 마이크로 광조형시 광폴리머에 대한 중합억제제의 영향분석 및 삼차원 미세구조물 제조

광주과학기술원 기전공학과 김성훈, 주재영*, 정성호

Cure depth control using photopolymerization inhibitor in microstereolithography and fabrication of three dimensional microstructures

S. H. Kim(Dept. of Mech., GIST), J. J. Joo(Dept. of Mech., GIST), S. H. Jeong(Dept. of Mech., GIST)

ABSTRACT

Controlling the cure depth of the Fa1260T photopolymer enhances the quality of a microstructure and minimizes its size in microstereolithography. In this work, variation of cure depth of the Fa1260T photopolymer is investigated while the concentration of a photopolymerization inhibitor as a radical quencher was varied. The energy source inducing photopolymerization was a He-Cd laser and a motorized stage controled the laser beam path accurately. The effects of process variables such as laser beam power and scan speed on the cure depth were examined. Optimum conditions for the minimum cure depth were determined as laser power of 230μW and scan speed of 40-50μm/s at the concentration of the radical quencher of 5%. The minimum cure depth at the optimal condition was 14μm. The feasibility of the fabrication of microstructures such as a microcup, microfunnel, and microgrid of 100μm size is demonstrated using Super IH process.

Key Words : Microstereolithography(마이크로광조형), Rapid prototyping(쾌속조형), Radical quencher(중합억제제)

1. 서론

마이크로광조형법(microstereolithography)은 비교적 큰 크기의 구조물조형에 사용되는 쾌속조형기술(rapid prototyping)을 바탕으로 개발된 응용기술로서 3차원 CAD 모델의 기하학적 자료를 빠른 시간 내에 물리적 모형으로 재현해 내는 특성과 함께 마이크로 단위의 구조물을 제작할 수 있는 장점을 동시에 가진다[1]. 마이크로광조형으로 제조된 미세 부품들의 예로는 마이크로미터 크기의 미세기어(Microgear), 미세터빈(Microturbine), 미세구조상(Microstatue) 등과 같은 다양한 형태의 삼차원 구조물이 있으며[2-5], 우수한 치수정밀도로 비교적 매끄러운 표면(수 마이크로미터 거칠기)의 미소구조물 가공이 가능하다.

마이크로광조형법은 액체상태의 광폴리머에 레이저빔이 조사된 부분만 광경화반응을 유도함으로써 원하는 위치에 국소적으로 가공이 일어나게 하는 것이다. 광경화반응을 유도하는 방법은 레이저빔이 조사된 광폴리머의 표면에서 반응이 일어나게 하는 스캐닝 방식 혹은 동적 마스크 패턴을 투사하는 방식과 폴리머 내부의 미소한 체적내에서 국소적으로 광경화가 일어나게 하는 방식의 액속주사법(Super IH process)이 있다[6]. 표면경화의 경우 자외선빔을 사용하여 표면에 원하는 단면형상의 경화층을 생성한 후 경화층을 표면아래로 수 마이크로미터 내린 후 다시 원하는 단면형상을 경화하는 방식으로 이차원의 단면형상을 적층하여 최종적으로 삼차원형상을 완성한다. 액속주사 방식에서는 레이저빔이 광폴리머의 내부까지 침투할 수 있도록 가시광영역의 빛을 사용하며 렌즈에 의해 집속된 빔의 초점부 즉 에너지강도가 가장 큰 미소영역에서만 광경화반응이 일어나도록 한다. 이때 삼차원 구조

물의 제조를 위해서는 레이저초점을 제조하고자 하는 구조물의 형상을 따라 이송함으로써 레이저초점이 통과한 궤적을 따라 경화가 일어나서 최종형상이 완성된다. 이와 같은 액속주사방식의 마이크로 광조형에서는 레이저초점을 중심으로 경화가 일어나는 폴리머의 미소체적크기가 정밀도를 결정하며 경화체적이 작을수록 정밀한 가공이 가능하다. 광폴리머의 최소경화체적은 조사되는 레이저에너지와 함께 광폴리머 자체의 재료특성에 크게 영향을 받는다.

본 연구에서는 위에서 설명한 광조형방법 중에서 액속주사방식을 이용한 마이크로광조형기술에서 최소경화체적을 줄이기 위해 광폴리머에 중합억제제를 혼합하여 경화깊이를 감소시키고 이를 이용하여 미소구조물을 제조하였다. 구체적으로는 Fa1260T 광폴리머에 중합억제제를 첨가했을 때의 경화특성을 분석하고, 궁극적인 목표인 미세 삼차원 구조물을 제조하는데 있어서 한계점으로 드러났던 기존의 광경화수지의 경화깊이를 감소시키는데 주력하였다. 미세 삼차원 구조물의 제조를 위해서 레이저 출력과 이송속도 그리고 중합 억제제의 농도와 같은 공정 변수들이 경화깊이에 미치는 영향 등을 조사하였고, 정교한 미세 삼차원 구조물을 제조하기 위한 조건을 설정하였다.

2. 실험방법

2.1 광학계 및 이송계

Fig. 1은 본 연구에 사용된 실험 장치의 개략도를 보여주고 있다. 실험장치는 크게 광원 및 광학요소 부분과 제어부 및 피제어부로 구성되어 있으며 구체적으로는 다음과 같다. 광원으로는 광폴리머 내부까지 투과하여 구조물을 경화하는 액속주사법을 실행하는데 꼭 필요한 가시광영역의 헬륨 카드뮴 레이저 (He-Cd laser: Kimmon, 파장442nm, 최대출력 130mW, 빔직경 1.08mm, TEMoo mode)를 사용하였다. 마이크로 크기의 구조물을 경화시키기 위해서는 레이저 빔을 매우 작게 집속하여야 한다. 빔의 집속시 초점렌즈에 입력되는 빔의 크기가 클수록 렌즈의 직경한도 내에서 집속된 빔의 크기를 줄일 수 있다. 따라서 수차(Numerical Aperture)값이 큰 현미경용 대물렌즈를 초점렌즈로 사용하여 레이저 빔이 큰 각을 갖고 집속될 수 있도록 하였다. 또한 빔의 초점 크기를 작게 함과 동시에 광학부품들의 손상을 막기 위해 빔 확대기(Beam Expander)를 사용하였다. 레이저 출력 제어는 ND(Neutral Density) 필터를 사용하였다.

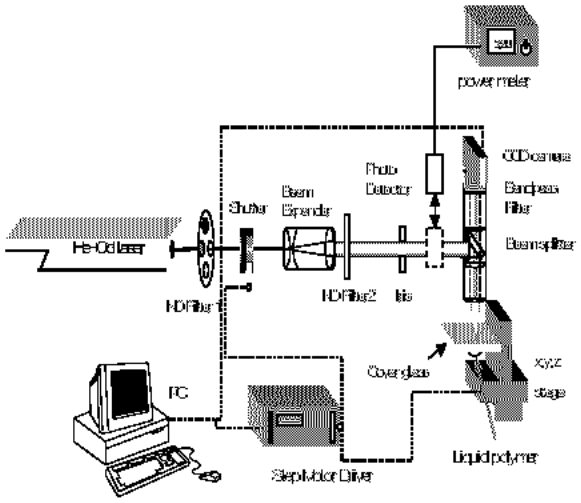


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system

본 실험에서는 집속된 빔의 위치제어를 위해 x-y-z 이송계를 사용하였다. 면적 평면방향은 x-y축의 이송을 통해 제어하고, 높이 방향은 x-y평면상에 수직인 z축을 이송하여 제어할 수 있도록 함으로써 임의의 삼차원 형상제조가 가능하도록 하였다. 정밀 이송계의 이송제어장치로 Turbo PMAC2(Delta Tau co.)를 사용하였다. 이송계의 경우에 레이저 간섭계를 통하여 검증된 것으로 정확도는 2mm 이송에 대해 평균 ±0.1%, 최대 ±0.23%의 오차율을 보였으며, 속도 정확도는 1.5mm 이송 시 30μm/s의 선속도에 대해 ±0.23%의 오차율을 가졌다. 삼차원 형상을 만들기 위해서 먼저 CAD Software 등을 통하여 삼차원 모델링을 하여야 하며, 이기서 만들어진 각 구조물의 CAD 데이터로부터 빔의 경로를 의미하는 수치제어 정보를 생성하면 PAMC을 통하여 복잡하고 정교한 구조물도 쉽게 제조할 수 있다. 또한, 빔의 개폐를 제어할 수 있도록 전자기식 셔터(Shutter)를 사용하였고, 역시 PMAC을 사용하여 제어될 수 있도록 하였다.

2.2 광폴리머 Fa1260T의 특성

본 연구에 사용된 광폴리머는 SK UCB Chemical 사의 상용수지 Fa1260T이다. 이 수지는 자유라디칼 중합을 일으키는 Urethane Acrylate계열로써 원래 자외선 영역의 용도에 맞게 제조된 것을, 실험을 위해 442nm 파장대의 광개시제(Photoinitiator)를 혼합하여 실험에 적합하게 성분을 변화시켰다. Fa1260T의 일반적인 물리적 성질은 Table 1에 나타내었으며, 영역별 파장의 흡수스펙트럼은 Fig.2와 같다.

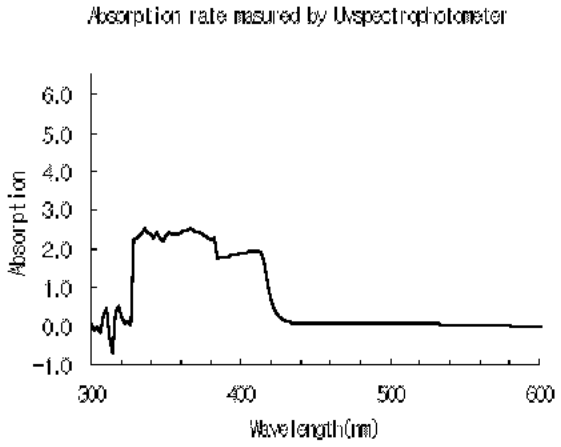


Fig. 2 Absorbance spectra of the Fa1260T resin (480nm/min)

Table 1. Characteristics of the Fa1260T resin

Appearance	Clear, amber liquid
Density (g/ml)	1.11
Viscosity (mPa.s @32°C)	471
Refractive index	1.488

Fig. 2 에서 보여주듯이 흡수도는 300~400nm 영역에 대해서 민감하며 본 연구에 사용된 레이저의 442nm 파장과 정확히 일치하지는 않음을 알 수 있다. 따라서 이런 점을 극복하기 위해서 광개시제의 농도 조절과 중합 억제제의 첨가를 통하여 본 연구에 적합한 특성을 갖도록 조절을 시도하였다.

2.3 실험과정

실험은 커버 글라스(Cover glass)에 한 방울의 액체수지를 떨어뜨리고, 레이저 빔의 이동경로를 정의한 뒤 셔터를 열고 이송제어장치를 이용하여 시편을 이동시키면서 수행하였다. 3차원 구조물은 시편이 X-Y평면을 이미 정의한 이동경로에 따라 움직이면서 구조물의 특정 단면을 경화시킨 후 다시 Z축으로 경화깊이만큼 올려서 경화를 반복하여 제조하였다. 샘플링은 커버 글라스를 현미경의 대물대에 놓고 구조물의 위치를 파악한 후 에탄올 용액을 시편 위에 부어서 굳지 않은 액체수지가 제거되도록 함으로써 수행하였다.

공정조건에 따른 미세 구조물 경화특성을 조사하기 위해 레이저 출력, 스캔 속도, 중합 억제제의 농도에 따른 경화깊이 변화를 반경 60μm의 원을 경화시킨 후 평균 높이를 측정하여 분석하였다. 또 균일한 경화가 일어나지 않는 점을 고려하여 6회 이상의 실험을 실시한 후 평균값을 선택해 오차를 줄였다. 경화된 구조물들의 경화깊이는 비교오차 분석을 통해 신뢰성을 얻은 광학현미경을 통하여 측정하였다. 실험을 통하여 얻어진 최적 조건에서 제조된 구조물들은 SEM(Scanning Electron Microscope Microscope)통해 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 중합억제제를 미혼합한 Fa1260T경화특성

본 연구에서 사용한 Fa1260T 수지는 기본적으로 자외선을 대상으로 제조된 폴리머이므로 가시광에 대해서는 투과성이 매우 높다. Fa1260T에 가시광용 광개시제를 첨가하였을 경우 가시광영역에서 경화반응을 유도할 수 있으나 여전히 경화깊이가 다소 깊은 특성을 나타낸다. Fig. 3은 중합억제제를 사용하지 않은 Fa1260T의 가공곡선으로서 레이저출력 및 초점의 이송속도에 따른 최소경화깊이를 나타낸다. 중합 억제제를 사용하지 않은 폴리머의 최소 경화깊이는 50μm이며, 경화조건은 레이저 출력 100μW, 이송속도 10m/s와 200μW, 20m/s였다.

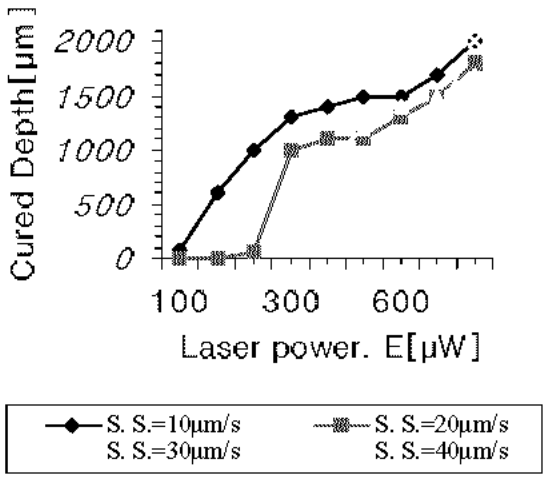


Fig. 3 Cure depth variation with respect to laser power and scan speed of the Fa1260T resin without radical quencher

중합억제제를 사용하지 않은 폴리머의 경우, 최소 경화깊이가 클 뿐 아니라 레이저출력이 증가함에 따라 매우 급격히 변하는 특성을 나타내어 액속주사 방식을 이용해 정밀도 높은 구조물을 가공하기에는 곤란하다. 따라서 본 연구에서는 액속주사법의 적용가능성을 조사하기 위해 중합억제제를 사용하여 반응을 조절함으로써 최소경화깊이를 줄이고자 시도하였다.

3.2 중합억제제를 혼합한 Fa1260T 경화특성

Fig. 4는 중합억제제의 농도를 변화시키면서 최소경화깊이를 측정한 결과이다. Fig. 3의 중합억제제를 사용하지 않은 수지에 비해 최소경화깊이가 현저히 감소된 것을 알 수 있으며 아울러 레이저 출력에 대한 경화깊이의 변화가 매우 점진적으로 일어남으로 인해 경화깊이의 제어가 훨씬 용이해졌음을 알 수 있다. 실험으로 측정된 최소경화깊이는 구조물의 강성이 샘플링 가능한 정도로 견고할 때를 기준으로 약 14μm으로 레이저 출력 200μW, 중합억제제의 농도 5%, 이송속도 20μm/s에서 확보되었다. 그렇지만 실제 견고하고 강성이 큰 구조물을 얻고, 다른 단면상의 이동경로 중첩으로 인한 추가 경화반응을 막기 위해 200μW보다 조금 높은 출력 230μW와 이송속도 40m/s~50m/s를 최적조건으로 하였다. 이 조건에서 경화깊이는 15μm였고, 샘플링 시 변형되지 않고 충분한 강도를 보이는 삼차원 구조물을 경화하는데 성공하였다.

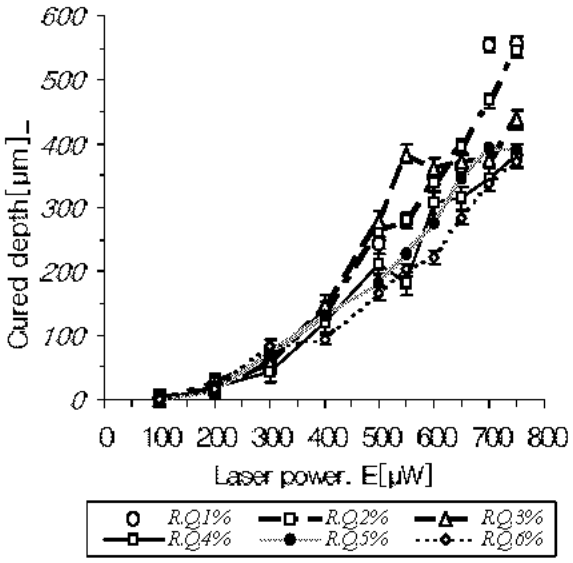


Fig. 4 Cure depth variation of the Fa1260T resin including radical quencher with respect to laser power at fixed scan speed of 20μm/s

3.3 중합억제제에 따른 Fa1260T경화특성 변화

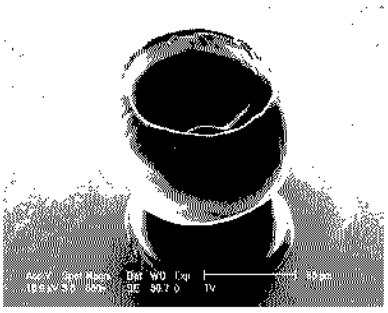
Table 1. Characteristics of the Fa1260T resin

Resin / Characteristics	Fa1260T without radical quencher	Fa1260T with radical quencher
Curing Depth(Cd)	50 ㎛	Average 14 ㎛ (5% radical quencher)
Laser Power for minimum cure depth	100㎼	230㎼
Reaction Time	Fast	Relatively slow
Stiffness	Week	Improved
Depth direction roughness of cured structure	Poor	Good
Possibility to fabricate microstructures	Difficult	Possible

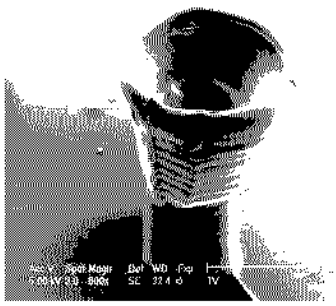
Table 2는 위의 결과를 정리하여 비교한 것이다. Table2로부터 중합 억제제를 넣은 Fa1260T의 경화특성이 일반적으로 개선되었음을 알 수 있으며, 레이저 조사 시 반응이 바로 일어나는지 여부를 통해 판단하는 반응속도는 중합 억제제를 첨가한 경우, 다소 느려졌으나, 이러한 부분은 광개시제의 농도 조절을 통해 극복될 수 있을 것으로 본다.

3.4 삼차원 구조물 제조

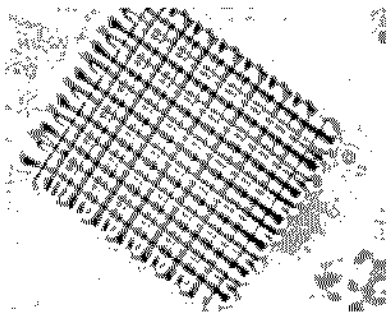
앞에서 설명한 최적경화 조건으로 3차원구조물을 제조하였다. Fig. 5(a)는 중합억제제가 5% 첨가된 수지로 위의 언급한 조건에서 경화시킨 미세컵 구조물의 SEM 사진이다. 적층된 층은 모두 43층이며 Z축으로 5μm씩 올리면서 겹치지게 경화를 시켰고, 이것으로 인해 좀더 견고한 구조물을 얻을 수 있었다. 컵의 외경(Outside Diameter)은 100μm, 높이는 80μm, 그리고 Sampling 시간을 포함하여 구조물을 얻는데 걸린 소요시간은 약 30분이었다. Fig. 5(b)는 레이저 출력 230μW, 이송속도 30~50μm/s, 중합 억제제의 농도를 6%로 증가시킨 수지를 사용하여 경화시킨 깔때기 모양의 구조물이다. 여기서 6%의 중합 억제제를 선택한 이유는



(a) Microcup: external diameter=~100μm, total number of layers=43, laser power=230μW, scan speed=40~50μm/s, radical quencher concentration=5%



(b) Microfunnel: Maximum and minimum diameters are around 100 and 50μm, respectively. Total number of layers is 22 and each layer is 5~10μm thick. Laser power=230μW, scan speed =40~50μm/s, radical quencher concentration=6%



(c) CCD image of a gird structure: line interval l=5μm, laser power=500μW, scan speed=70μm, radical quencher concentration=4.8%.

Fig. 5 Examples of microstructures fabricated using Super IH process.

억제제의 양이 증가할수록 감성이 증가하고, 반응이 안정적으로 변했기 때문이다. 가장 넓은 부분의 외경은 100μm, 가장 작은 부분의 외경은 50μm이며, 높이는 110μm이다. 이 구조물의 특징은 5% 농도로 경화시킨 구조물보다 감성이 큰 것으로 나타났으며, 삼차원경화 시 역시 5%의 경우보다 더 안정적인 구조로 경화시킬 수 있었다. Fig. 5(c)는 최적 조건을 통하여 경화된 격자구조의 CCD 카메라 사진이며, 구조물 가공 후 촬영된 것이다. 이 구조물은 샘플링 용액의 표면장력의 영향을 아주 크게 받아 샘플링 과정에서 변형이 발생하여 실제로 가공이 완료된 구조물의 확보에는 실패하였다.

4. 결론

액속주사법을 이용한 마이크로 광조형시 중합억제제를 혼합한 광폴리머 Fa1206T와 그렇지 않은 것에 광경화특성 변화를 분석하여, 최적경화조건을 얻고 이를 바탕으로 자유형상의 삼차원 구조물을 제조하였다. 중합 억제제의 농도를 1%에서 6%까지 변화시켜가면서 레이저 출력 100~750μW, 이송속도 20μm/s에서 깊이 방향으로의 경화실험을 통하여 가공곡선을 얻었으며, 레이저 출력 230μW, 이송속도 40~50μm/s, 중합 억제제 농도 5%에서 약 14μm의 최소경화깊이를 얻었다. 그리고 중합 억제제의 농도가 증가할수록 Fa1260T의 경화깊이가 감소하였으며, 중합 억제제를 첨가하지 않은 폴리머에 비해 경화깊이가 1/4로 감소하였다. 크기의 감소에도 불구하고 감성이 증가하였으며, 깊이 방향으로 경화 시 끝단에 생기던 거친 물결 모양들이 거의 없어져 더 미세한 3차원 형상제조의 가능성을 증가시켰다. 따라서 중합 억제제의 양을 증가시키고 레이저 출력 및 이송속도와의 관계를 적절히 조절할 경우 본 연구에서 얻어진 구조보다 더 정교하고 더 작은 크기의 삼차원 구조물을 얻을 수 있을 것으로 생각한다.

후기

이 논문은 2003년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2003-041-D00108).

참고문헌

1. S. Corbel, A. L. Allanic, P. Schaeffer, and J. C. Andre, "Computer-Aided Manufacture of Three-Dimensional Objects by Laser

Space-Resolved Photopolymerization", Journal of Intelligent and Robotic Systems 9:301-312, (1994)
2. X. Zhang, X. N. Jiang, C. Sun, "Micro-stereolithography of polymeric and ceramic microstructures". Sensors and Actuators vol. 77, pp. 149-156(1999)
3. S. Kawata, H. B. Sun, "Two-photon photopolymerization as a tool for making micro-devices", Applied Surface Science 208-209 pp. 153-158(2003)
4. S. Maruo, K. Ikuta, and H. Korogi, "Submicron manipulation tools driven by light in a liquid", Applied physics letters, vol. 82, no. 1, pp. 133-135(2003)
5. S. Shoji and H. B. Sun, "Photofabrication of wood-pile three-dimensional photonic crystals using four-beam laser interference", Applied physics letters, vol. 83, no. 4, pp. 608-610(2003)
6. Koichi Suzumori and Akihiro Koga and Riyoko Haneda, "Microfabrication of Integrated FMAS using Stereo Lithography", Proc. IEEE MEMS '94, pp. 136-141(1994