

마이크로광조형법을 이용한 미세삼차원구조물의 제조공정 중 형상정밀도 및 경화특성에 관한 연구

정대준*, 김성훈*, 정성호#

Shape accuracy and curing characteristics of photopolymer during fabrication of three-dimensional microstructures using microstereolithography

Dae Jun Jung*, Sung Hoon Kim*, Sung Ho Jeong#

ABSTRACT

The curing characteristics of a liquid photopolymer during microstereolithography and the shape accuracy of thereby fabricated microstructures were investigated experimentally. A He-Cd laser with a wavelength of 442nm and a photopolymer consisted of a commercial resin from SK chemical and a photoinitiator were used for the experiment. By varying the laser beam power and scanning speed of the focused laser beam, minimum curing thickness of 50 μ m was obtained. The distortion of solidified structure due to adhesion force was measured and the optimum fabrication conditions were determined. Also, the feasibility of direct fabrication of three-dimensional microstructures by Super IH process was examined.

Key Words : Microstereolithography (마이크로광조형법), Shape accuracy (형상정밀도), Curl distortion (휨변형),

1. 서론

실리콘 소재를 기초로한 반도체가공기술은 마이크로 부품이나 소자의 제조에 많이 활용되고 있으나 큰 세장비(aspect ratio)를 갖는 구조물이나 3차원 형상을 제조하는 데는 어려움이 있으며 가공 가능한 소재도 거의 반도체 재료에 국한되는 단점이 있다. 큰 세장비를 갖는 미세구조물 제조공정으로는 LIGA¹나 비등방성 식각² 등이 있으나 이러한 공정으로도 곡선구조물이나 임의의 3차원 형상을 제조하는 것은 거의 불가능하다. 마이크로광조형법(microstereolithography)은 위와 같은 공정들이 갖는 문제점을 극복하고 임의형상의 미세 3차원구

조물을 제조할 수 있는 기술로, 액체 광경화수지에 레이저를 조사하여 원하는 형상을 미세하게 경화시키고 그러한 형상을 반복적으로 적층시키면서 3차원구조물을 만드는 방법으로 복잡한 마이크로 구조물을 가공하는데 큰 장점을 갖고 있어 최근에 국외 뿐만 아니라 국내에서도 아주 활발한 연구가 진행되고 있다.^{3,4,5,6,7}

본 연구에서는 마이크로광조형법을 이용한 미세구조물 제조 시 발생하는 수축과 접착에 의한 변형을 실험을 통해 분석하고 구조물의 형상정밀도 향상방법과 미세 3차원구조물 조형에 관한 연구를 수행하였다. 구체적으로는 레이저 출력과 이송 속도에 따른 구조물의 형상, 변형정도, 광경화

접수일: 2003년 5월 12일; 게재승인일: 2003년 11월 14일

* 광주과학기술원 대학원 기전공학과

교신저자, 광주과학기술원 기전공학과

E-mail: shjeong@kjist.ac.kr Tel. (062)970-2393

수지의 경화 특성과 우수한 형상의 미세 구조물을 얻기 위한 가공조건을 제시하였으며, 자유액면법 (Free Surface Process)을 이용하여 3차원 미세피라미드 구조물을 제조하였다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

Fig.1은 전체적인 실험장치의 구성을 나타낸다. 광원으로는 가시광선영역의 헬륨 카드뮴 레이저 (Kimmon, 파장 442nm, 최대출력 130mW, 직경 1.08mm, TEM₀₀ mode)를 사용하였다. 이 광원은 출력이 안정되고 레이저 빔의 에너지 분포가 균일하여 우수한 가공정도를 얻을 수 있다. 광경화 반응이 원하는 형상을 따라 일어나도록 하기 위해 광경화 수지를 반응용기에 담아 X-Y 이송계에 부착하였으며 Z 방향 이송을 위해 선형 이송계에 엘리베이터를 Fig.1 과 같이 부착하였다. 레이저 출력 조절을 위하여 필터(neutral density filter)를 사용하였으며 특히 석영(quartz) 표면에서 반사된 빛을 사용해서 레이저 출력을 원래 출력의 2%까지 안정적으로 감소시킬 수 있었다. 레이저 빔의 초점크기와 초점심도를 줄이기 위해 빔 확대기 (beam expander)를 사용하여 입력빔의 크기를 10mm 로 확대시킨 후 집속거리가 짧은 렌즈(f=15mm)를 사용하여 레이저 빔을 집속하였다. 레이저 빔을 이상적인 가우시안 빔이라고 가정할 경우 집속된 레이저빔의 초점크기는 계산상으로 약 0.9 μ m 이 되지만, 실험시 초점이 워낙 작아서 통상적인 칼날(knife-edge) 방식으로는 측정이 불가능하였다. 이론적 초점심도는 약 10 μ m 으로 계산되었다.

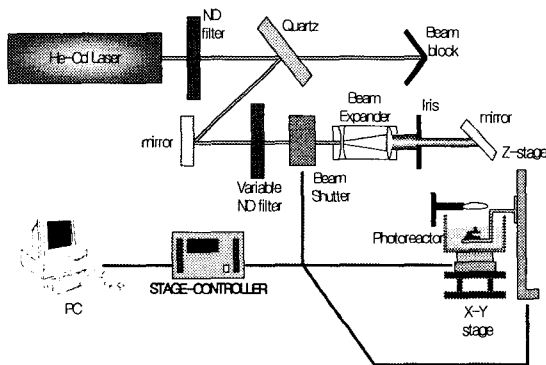


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system

광경화수지로는 SK Chemical사의 FA1260T를 사용하였다. 이 수지는 자외선 영역의 빔에 사용되는 일반적인 상용수지(FA1260)와 가시광선 영역의 파장에 경화가 가능한 광개시제를 혼합하여 만들어진 수지로서 물리적인 특성은 Table.1 과 같다.

Table 1 Characteristics of FA1260T

Producer	SK Chemical Co.
Appearance	Clear, amber liquid
Density (g/ml)	1.11
Viscosity(32 °C), mPa.s	471
Reaction wavelength	410 ~ 450nm
Refractive index	1.488

실험은 자유액면법으로 실시하였으며 수지 표면상의 한 위치에 레이저 초점이 오도록 만들고 X-Y 이송계를 이용해 레이저 빔이 원하는 2차원 형상을 따라 움직이면서 표면 부근의 수지를 경화시키도록 한다. 3차원형상 제조를 위해서는 Z 방향 이송계를 이용해 구조물을 경화깊이만큼 내려 표면이 다시 액체로 채워지게 한 후 위에서와 같이 2차원 형상을 경화시킨다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 작동커브(Working curve)

작동커브는 수지의 경화깊이를 제어할 때 사용되는 중요한 특성으로서 재료자체의 물성과 레이저 빔의 파장, 에너지 등에 영향을 받는다. Fig.2는 본 실험에 사용된 광경화수지의 레이저 출력에 따른 최소경화두께를 레이저 빔 이송속도에 따라 나타낸 그래프이다.

여기서 경화깊이는 광경화수지에 레이저 빔이 조사되었을 때 수지가 깊이방향(Z방향)으로 경화되는 정도를 의미하며 유리시편 위에 정사각형의 단일 레이어를 경화한 후 광학현미경으로 측정하였다. Fig.2의 각 데이터는 3번 이상의 실험결과를 평균한 값이다. 레이저 출력이 증가할수록 그리고 이송속도(F)가 감소할수록 경화두께가 증가함을 알 수 있다. 레이저 출력과 이송속도는 입력 에너지

지를 결정하는 중요한 변수이며 노광량은 레이저 출력에 비례, 레이저 빔 이송속도에 반비례하므로 노광량의 증가에 따라 경화두께가 증가함을 알 수 있다. 이송속도가 40 $\mu\text{m/s}$ 일때는 상대적으로 빠른 속도에 의해 노광량이 부족하므로 500 μW 이상의 레이저 출력에서 경화가 시작되며 최소 경화두께도 600 μm 로서 비교적 큰 값을 나타낸다. 레이저 빔 이송속도가 낮은 경우 100-300 μW 범위에서 경화두께가 급격히 증가하며 이것은 이 출력 범위에서 수지가 민감하게 반응한다는 것을 나타낸다. 본 실험에서는 레이저출력 $P=100\mu\text{W}$, 이송속도 $F=10\mu\text{m/s}$ 와 $P=200\mu\text{W}$, $F=20\mu\text{m/s}$ 에서 약 50 μm 의 최소 경화두께를 구현하였다.

3.2 형상정밀도 고찰

미세구조물은 매우 작은 노광에너지에서 경화되므로 구조물의 강성이 약하여 형상이 외력에 민감하게 영향을 받는다. 특히, 광조형 후 경화된 수지의 수축으로 발생하는 수축력(shrinkage)과 서로 떨어져있는 경화 구조물간에 발생하는 접착력(adhesion force)이 형상정밀도에 큰 영향을 끼치며 이중에서도 접착력의 경우 이미 만들어진 구조물과 생성중인 구조물간의 변형을 야기하는 지배적인 요소이므로 본 연구에서는 형상정밀도에 미치는 접착력의 영향을 중점적으로 조사하였다. 접착력을 고려한 형상 정밀도를 평가하기위해 피라미드 구조물을 조형하였는데 이는 직선구조의 끝은 정도, 레이어의 중첩성, 전체 구조물의 수축정도 등을 평가하는데 유용하기 때문이다. 접착력에 의한 구조물의 휨 변형(Curl) 발생 정도를 식 (3.1)와

$$C_r (\%) = \frac{\delta}{L/2} \times 100 \quad (3.1)$$

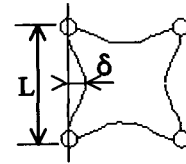


Fig. 3 Curl distortion defined for a square structure

같이 정의하였으며, δ 와 L 은 Fig.3에 나타내었다.

Fig.4는 노광 에너지가 휨 변형에 미치는 영향에 대한 실험결과를 보여준다. 레이어 간격을 25 μm 로 고정하고 레이저 출력을 1-3mW로 0.5mW씩, 이송속도를 100-300 $\mu\text{m/s}$ 로 50 $\mu\text{m/s}$ 씩 증가시키면서 Fig.5와 같이 제조하였다. Fig.4에서 레이저 출력이 증가할수록 휨 변형량이 감소함을 볼 수 있다. Fig6은 이송속도에 따른 휨 변형량을 나타낸 것이며 이송속도가 증가할수록 휨 변형량이 증가함을 볼 수 있다. 이것은 앞에서 언급한 바와 같이 휨 변형량은 구조물 강성의 함수이며 강성이 클수록 변형량은 작아진다. 여기서 구조물 강성은

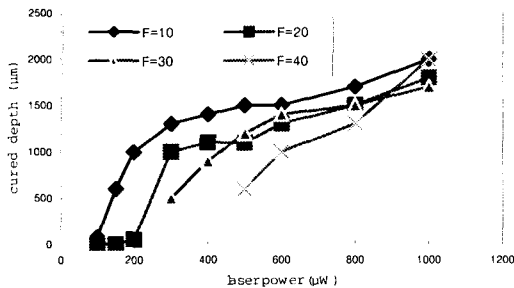


Fig. 2 Variation of the cured depth with respect to laser power (F: scanning speed $\mu\text{m/s}$)

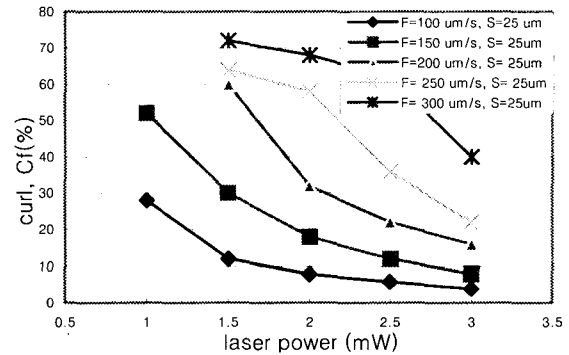


Fig. 4 Curl of the side of micro pyramids with respect to laser power (S: distance between layers)

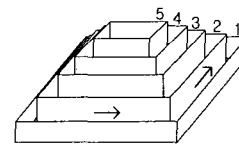


Fig. 5 Laser beam paths for the fabrication of a pyramid

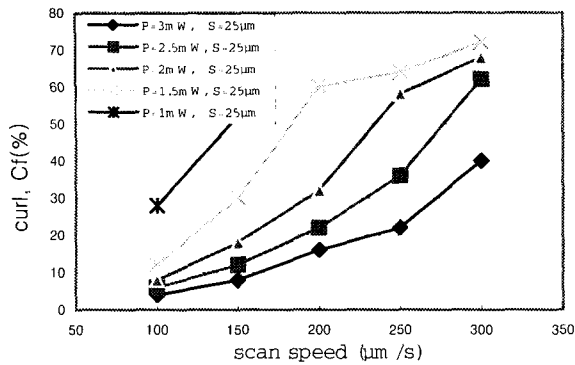


Fig. 6 Curl of the side of micro pyramids with respect to scan speed

노광에너지에 따라 결정되고 레이저 출력이 클수록, 이송속도가 작을수록 노광에너지는 증가하게 되고 따라서 구조물의 강성이 증가하여 결과적으로 휨 변형량은 줄어드는 것으로 판단된다.

Fig.7은 노광에너지에 따른 휨 변형량을 나타내는 가공 예로서 오른쪽으로 갈수록 이송속도가 증가하며 아랫쪽으로 갈수록 레이저 출력이 감소한다. 따라서 좌측 상단의 구조물은 높은 노광에너지에 의해 뚜렷한 사각구조물 형태를 유지하며 우측과 아랫쪽으로 갈수록 노광에너지가 감소하여 휨 변형이 증가함을 볼 수 있고 우측하단의 구조물은 노광에너지가 충분하지 않아 구조물이 제 형태를 갖추고 있지 않다. Fig.7에서 각 피라미드 구조물은 사각형을 반복적으로 경화시켜 만들어졌으며, 이때 사각형의 꼭지점 부분에서는 이송계의 가감속으로 인하여 노광시간이 늘어나 강도가 높은 구조물로 경화되므로 사각형의 변 부분이 휨 변형을 일으키게 된다.

3.3 최적조건에 의한 미세 3차원구조물 조형

레이저 출력과 빔 이송속도 이외에 미세구조간의 간격, 레이저 빔 이송경로 및 노광순서 등에 대한 연구를 수행하였으며, 이러한 연구를 통해 광조형법을 이용한 마이크로구조물 제조시 형상정밀도 향상을 위한 방법을 아래와 같이 정리하였다. 첫째, 해상도 한계 내에서 최대의 노광에너지를 사용해야 한다. 둘째, 구조물 간격을 최대한 줄인다. 셋째, 노광순서를 적절히 조절하여 레이저 빔 조사패턴을 최적화 시킨다. 넷째, 광경화반응이 빠른

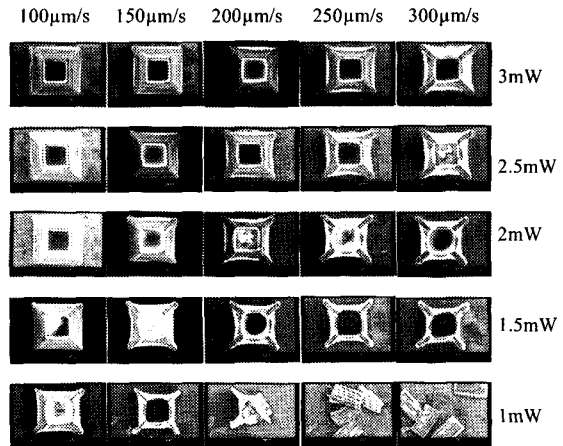


Fig. 7 Fabrication examples of a pyramid structure at different conditions

수지를 사용한다. 다섯째, 경화수축율이 적은 수지를 사용한다

본 연구에 사용된 광경화수지에 대해 미세 3차원구조물 제작을 위한 최적 공정변수를 레이저 출력 P=2.5mW, 이송속도 F=100μm/s, 간격 S=25μm로 각각 도출하였다. Fig.8(a), (b), (c)는 위의 최적조건 아래 제작된 3가지 크기의 마이크로 피라미드 구조물을 나타내며 각각 선명한 구조물 형상과 휨 변형이 없이 깨끗한 계단형태의 피라미드구조물을 보여준다. Fig.8(d)의 경우는 큰 세장비를 갖는 300×300×2000μm³의 크기의 3×3 array 사각구조물이며 Z 축으로 적층된 모습을 사각구조물 옆면

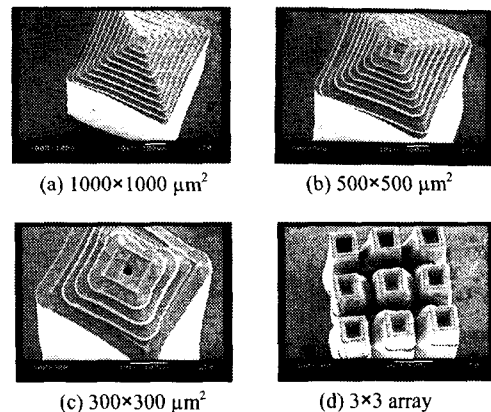


Fig. 8 Micro pyramid structures fabricated under the optimum conditions

을 통해 자세히 볼 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 마이크로광조형법에 있어 구조물의 형상정밀도 향상과 미세 3 차원구조물 조형에 관한 연구를 수행하였다. 형상정밀도향상을 위하여 구조물의 형상정밀도에 영향을 주는 요인들을 살펴보았으며 그 중 실제 마이크로 구조물을 경화하는데 있어 가장 지배적 요인인 레이어간의 접착력과 경화수축에 따른 휨 변형량을 자유액면법에 의해 평가하고 형상정밀도를 향상시키기 위한 최적의 공정변수를 결정하였다. 마이크로광조형법을 통해 복잡한 3 차원 형상을 비교적 간단한 방법으로 제조할 수 있음을 실험을 통해 제시하였으며 마이크로소자 및 마이크로부품의 제조에 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

1. Katsumi Yamaguchi, "Micro-Machining using Photo-polymerization and Metal Jet Deposition," Micromechatronics and Human Science IEEE 1997. Proceedings of the 1997 International Symposium on, pp. 33 -40, 1997.
2. A. I. Stoller, "The Etching of Deep Vertical-Walled Patterns in Silicon," RCA Rev., vol. 31, pp. 271-75, 1970.
3. S. Maruo, S. Kawata, "Two-Photon-Absorbed Near-Infrared Photo-polymerization for Three-Dimensional Microfabrication," Journal of MEMS, Volume 7 Issue: 4, pp. 411-415, Dec 1998.
4. Shoji Maruo, Koji Ikuta, "Light-Driven MEMS made by high-speed two-photon MicroStereoLithography," Micro Electro Mechanical Systems, 2001. MEMS 2001. The 14th IEEE International Conference on, pp.594-597, 2001.
5. Bertsch, A., Heimgartner, S., Cousseau, P., Renaud, P, "3-D Micromixer-Downscaling large scale industrial static mixer," Micro Electro Mechanical Systems, 2001. MEMS 2001. The 14th IEEE International Conference on, pp.507-510, 2001.
6. I. H. Lee, D. W. Cho, "Fabrication of 3D structures using mciro-stereolithography," Conference on

KSPE, 01F258, pp. 1080-1083, 2001.

7. E. D. Lee, J. A. Kim, I. H. Paek, "Study of Cure Properties in Photopolymer for Stereolithography using Various Laser Beam Size," Journal of KSPE, 1225-9071, pp. 1089-1092, 2001.