

마이크로광조형법으로 제조된 미세구조물의 경화특성 및 형상정밀도에 관한 연구

Study on the shape accuracy and curing characteristics of micro structures fabricated using microstereolithography

광주과학기술원 기전공학과 정대준, 김성훈, 정성호

I. 서론

실리콘을 소재로한 반도체가공기술은 미소시스템에 사용되는 미세구조물 제조에 주로 활용되고 있으나 큰 세장비(aspect ratio)를 갖는 구조물이나 3차원 형상을 제조하는데는 어려움이 있으며 가공이 가능한 소재도 대부분 반도체 재료에 국한되는 단점이 있다. 큰 세장비를 갖는 미세구조물 제조공정으로 LIGA[1]나 비등방성 식각[2] 등이 있지만 이러한 공정으로도 곡선구조물이나 임의의 3차원형상을 제조하는 것은 매우 어렵다. 마이크로광조형법(microstereolithography)은 위와 같은 공정들이 갖는 문제점을 해소하는 동시에 임의형상의 미세 3차원구조물을 제조할 수 있는 기술로, 액체 광경화수지에 레이저를 조사하여 2차원 형상을 미세하게 경화시키고 이러한 형상을 반복적으로 쌓아가면서 최종적으로 원하는 3차원구조물을 만들게 된다. 이 기술은 복잡한 마이크로 구조물을 가공하는데 큰 장점이 있어 최근에 아주 활발한 연구가 진행되고 있다.[3,4,5]

본 연구에서는 마이크로광조형법을 이용한 미세구조물 제조 시 발생하는 수축과 접착에 의한 구조물의 변형정도를 레이저 출력과 이송 속도에 따라 조사하였으며, 또한 광경화 수지의 경화 특성과 구조물의 형상정밀도 향상방법 그리고 미세 3차원구조물 조형에 관한 연구를 수행하였다.

II. 실험방법

Fig.1은 마이크로광조형 실험장치의 개략도를 나타낸다. 실험을 위한 레이저로 가시광 영역의 헬륨 카드뮴 레이저(Kimmon, 파장 442nm, 최대출력 130mW, 직경 1.08mm, TEM₀₀ mode)를 사용하였다. 이 광원은 출력이 안정되고 레이저 빔의 에너지 분포가 균일하며, 자외선 광원과는 달리 광경화수지 내부까지 빔이 투과되어 액속주사법에 적합하다. 광경화 반응이 원하는 형상을 따라 일어나도록 하기위해 광경화수지를 담은 반응용기를 X-Y이송계에 부착하였고, Z방향 이송을 위해 선형 이송계에 엘리베이터를 Fig.1과 같이 장착하였다. 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 10mm로 확대시킨 후 집속거리가 짧은 렌즈(f=15mm)를 사용하여 레이저 빔을 집속

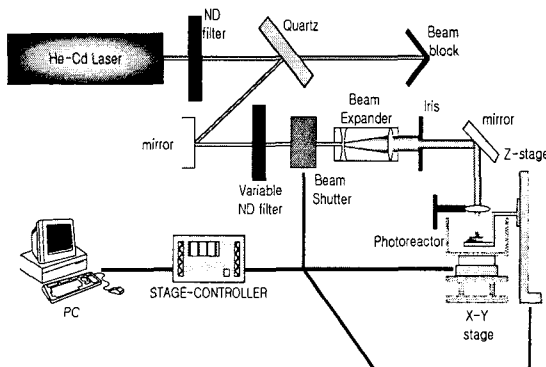


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system

Table. 1 Characteristics of FA1260T

Manufacture	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

하였다. 광경화수지로는 SK Chemical 사의 FA1260T 를 사용하였는데, 이 수지는 자외선 영역의 빛에 사용되는 일반적인 상용수지(FA1260)와 가시광선 영역의 파장에서 경화를 유도하는 광개시제를 혼합하여 만들어진 수지로서 물리적인 특성은 Table. 1 과 같다.

실험은 자유액면법과 Koji Ikuta[6]가 창안한 액속주사법으로 실시하였으며, 자유액면법은 수지 표면상의 한 위치에 레이저 초점이 오도록 만들고 X-Y 이송계를 이용해 레이저 빔이 원하는 2차원 형상을 따라 움직이면서 표면 부근의 수지를 경화시킨다. 3차원형상 제조를 위해서는 Z 방향 이송계를 이용해 구조물을 경화깊이만큼 내려 표면이 다시 액체로 채워지게 한 후 위에서와 같이 2차원 형상을 경화시킨다 반면에, 액속주사법은 광경화반응을 수지 표면에서 일으키는 것이 아니라 수지 속 임의의 위치에 레이저를 집속하여 레이저 빔의 초점 영역에서만 경화가 일어나게 하며 X-Y-Z 이송계를 이용하여 3차원 구조를 제조한다.

III. 결과 및 고찰

3.1 작동커브(Working curve)

작동커브는 수지의 경화깊이 제어 시 사용되는 중요한 특성으로 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 실험값들을 평균한 값이다. 레이저 출력이 증가할수록 그리고 이송속도(F)가 감소할수록 경화두께가 증가함을 확인할 수 있다. 레이저 출력과 이송속도는 입력 에너지를 결정하는 중요한 변수이며 노광량은 레이저 출력에 비례, 레이저 빔 이송속도에 반비례 하므로 노광량의 증가에 따라 경화두께가 증가함을 알 수 있다. 이송속도가 40 $\mu\text{m/s}$ 일 때는 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 레이저출력P=100 μW , 이송속도 F=10 $\mu\text{m/s}$ 와 P=200 μW , F=20 $\mu\text{m/s}$ 에서 약 50 μm 의 최소 경화두께를 구현하였다.

미세구조물은 매우 작은 노광에너지에서 경화되므로 구조물의 강성이 약하여 형상이 외력에 민감하게 영향을 받는다. 특히, 광조형 후 경화된 수지의 수축으로 발생하는 수축력(shrinkage)과 서로 떨어져 있는 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)

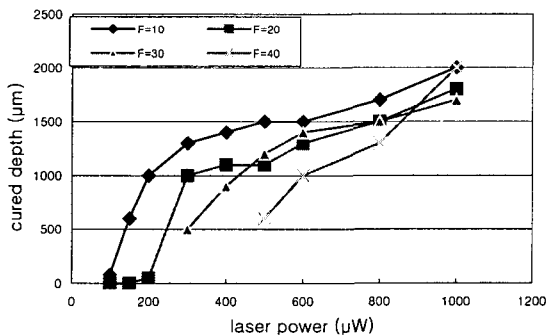


Fig. 2 Variation of the cured depth with respect to laser power (F: scanning speed $\mu\text{m/s}$)

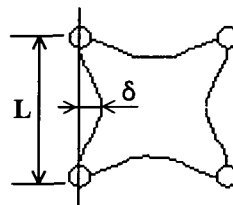


Fig. 3 Curl distortion defined for a square structure

발생 정도를 식 (3.1)와 같이 정의하였으며, δ 와 L 은 Fig.3에 나타내었다.

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

3.2 자유액면법에 의한 형상정밀도 고찰

Fig.4(a)는 노광 에너지가 휨 변형에 미치는 영향에 대한 실험결과이다. 레이저 간격을 25 μ m로 고정하고 레이저 출력을 1-3mW로 0.5mW씩, 이송속도를 100-300 μ m/s로 50 μ m/s씩 증가시키면서 Fig.5와 같이 제조하였다. Fig.4(a)에서 레이저 출력이 증가할수록 휨 변형량이 감소함을 볼 수 있다. Fig.4(b)는 이송속도에 따른 휨 변형량을 나타낸 것이며 이송속도가 증가할수록 휨 변형량이 증가함을 볼 수 있다. 여기서 구조물 강성은 노광에너지에 따라 결정되고 레이저 출력이 클수록, 이송속도가 작을수록 노광에너지는 증가하게 되고 따라서 구조물의 강성이 증가하여 결과적으로 휨 변형량은 줄어드는 것으로 판단된다.

Fig.6은 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 휨변형이 증가함을 볼 수 있고 우측하단의 구조물은 노광에너지가 충분하지 않아 구조물이 제 형태를 갖추고 있지 않다. Fig.6에서 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 미세 3 차원구조물 조형

레이저 출력과 빔 이송속도 이외에 미세구조 간의 간격, 레이저 빔 이송경로 및 노광순서 등에 대한 연구를 수행하였으며, 이러한 연구를 통해 광조형법을 이용한 마이크로구조물 제조 시 형상정밀도 향상을 위한 방법을 아래와 같이 정리하였다. 첫째, 해상도 한계 내에서 최대의 노광에너지를 사용해야 한다. 둘째로 구조물 간격을 최대한 줄인다. 셋째, 노광순서를 적절히 조절하여 레이저 빔 조사패턴을 최적화 시킨다. 넷째, 광경화반응이 빠른 수지를 사용한다. 다섯째, 경화수축율이 적은 수지를 사용한다.

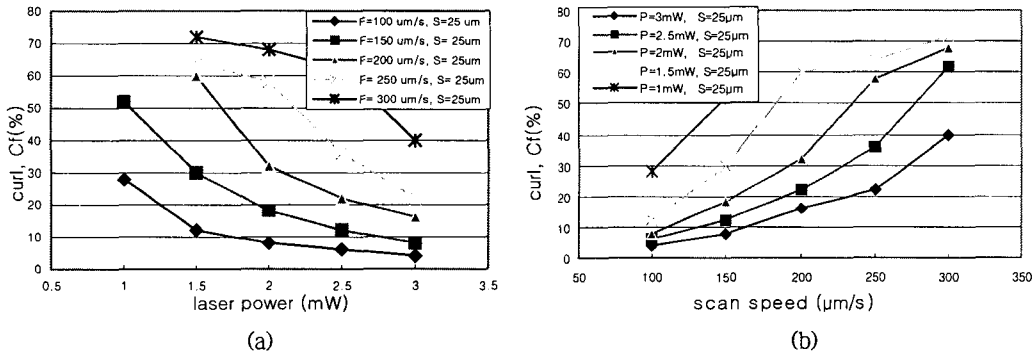


Fig. 4 (a)Curl of the side of micro pyramids with respect to laser power, (b)Curl of the side of micro pyramids with respect to scan speed

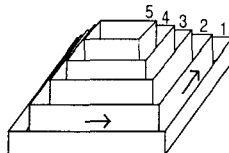


Fig. 5 Laser beam paths for the fabrication of a pyramid

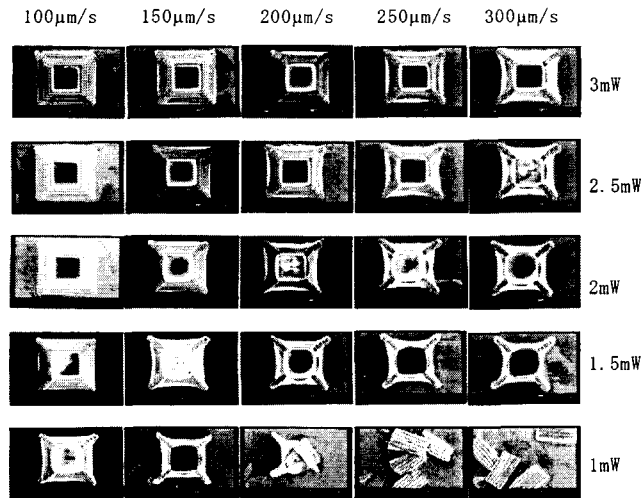


Fig. 6 Fabrication examples of pyramid structures at different conditions

본 연구에 사용된 광경화수지에 대해 미세 3차원구조물제작을 위한 최적 공정변수를 레이저 출력 $P=2.5\text{mW}$, 이송속도 $F=100\mu\text{m/s}$, 간격 $S=25\mu\text{m}$ 로 각각 도출하였다. Fig.7(a), (b), (c)는 위의 최적조건에서 제작된 3가지 크기의 마이크로 피라미드 구조물을 나타내며 각각 선명한 구조물 형상과 휨 변형이 없이 깨끗한 계단형태의 피라미드구조물을 보여준다. Fig.7(d)의 경우는 큰 세장비를 갖는 $300 \times 300 \times 2000\mu\text{m}^3$ 의 크기의 3×3 array 사각구조물이며 Z축으로 적층된 모습을 사각구조물 옆면을 통해 자세히 볼 수 있다.

3.4 액속주사법의 가능성 고찰

액속주사법에서는 자유액면법에서와 달리 레이저 빔을 액체수지 내부에 집속하여 초점영역에서만 경화가 일어나도록 유도한다. 액속주사법으로 Fig.7(b)와 같은 구조물을 제조하였을 경우 레이저초점에서만 경화가 일어나는 것이 아니라 반복적으로 노출된 그 아래부분까지 경화가 발생했다. 이는 본 연구에 사용된 FA1260T 광경화수지의 특성에 크게 좌우되는 것으로 사료된다.

Fig.8는 FA1260T 광경화수지의 특성을 보여주는 실험 결과물로 이것은 액속 임의의 위치에 단일 층을 경화시켰을 때 레이저초점 부분은 깨끗한 직선 형태를 보이지만 아래쪽은 물결모양의 불규칙한 형태를 보여 경화되는 경계가 불분명함을 알 수 있다.

Fig.7(b)와 같은 적층구조물 대신 단일 층 내에서 액속주사법의 실현 가능성을 Fig.9와 같은 링 구조물을 경화시킴으로써 조사하였다. Fig.9의 링 구조 제조에서는 먼저 충분한 노광량으로 기둥을 경화시킨뒤 적절한 노광에너지로 수지액속 임의의 위치에 레이저 빔을 집속하여 링 구조물을 경화 하였다. Fig.9(a) 경우 링 구조물을 액속 임의의 위치에 경화시켰으나 작업 이후 경화되지 않은 액상의 수지가 제거되면서 링이 바닥으로 내려앉은 모습이며 세척도중 구조물이 변형되었다. Fig.9(b)는 (a)와 동일한 실험조건에서 레이저 출력만을 약간 증가시켰으며 노광에너지 증가로 인하여 링 구조물이 아닌 원 통형 구조물이 되었다.

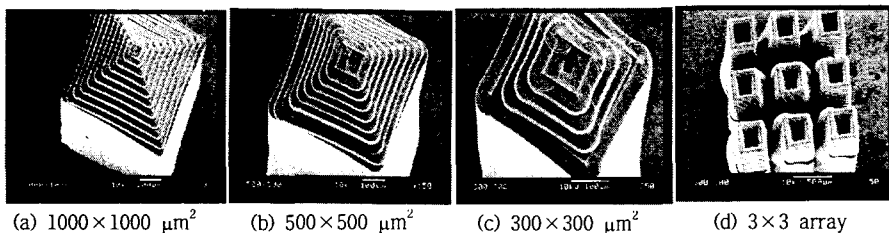


Fig. 7 Micro pyramid structures fabricated under the optimum conditions

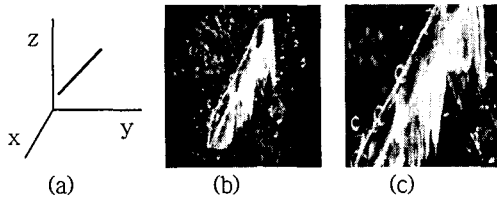


Fig. 8 Curing of a straight line in the photopolymer using Super IH process at $P=3mW$, $F=100\mu m/s$ (a) beam path, (b) cured structure, (c) magnified image of (b)

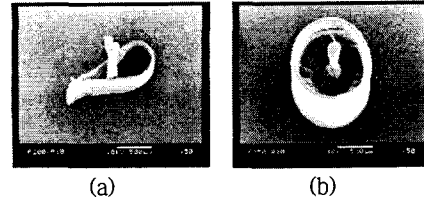


Fig. 9 Ring structures fabricated by Super IH Process

IV. 결론

본 연구에서는 마이크로광조형법에 있어 구조물의 형상정밀도향상과 미세 3 차원구조물 조형에 관한 연구를 수행하였다. 형상정밀도향상을 위하여 먼저 구조물의 형상정밀도에 영향을 주는 요인들을 살펴 보았으며 그 중 실제 마이크로 구조물을 경화하는데 있어 가장 지배적 요인인 레이어간의 접착력과 경화수축에 따른 휨 변형량을 자유액면법에 의해 평가하고 형상정밀도를 향상하기 위한 최적의 공정변수를 결정하였다. 또한 액속주사법을 사용하여 3 차원 미세구조물 조형의 가능성을 확인하였고, 실제 액속 주사법 실현을 위한 방법을 연구하였다. 한편, 액속주사법의 연구를 위해 액속주사법에 적합한 수지개발을 위한 재료의 연구도 함께 병행되어야 할 것으로 생각한다.

V. 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. Koji Ikuta, Shoji Maruo, and Syunsuke Kojima, "New micro stereo lithography for freely movable 3D micro structure-super IH process with submicron resolution," *Micro Electro Mechanical Systems*, 1998. MEMS 98. Proceedings, The Eleventh Annual International Workshop on, pp. 290 -295, 1998