

## 디지털마이크로미러 소자를 이용한 마이크로광조형 기술개발

광주과학기술원 기전공학과 주재영\*, 김성훈, 정성호

### Microstereolithography using a digital micromirror device as a dynamic pattern generator

J. Y. Joo\* (Dept. of Mecha., GIST), S. H. Kim (Dept. of Mecha., GIST), S. H. Jeong (Dept. of Mecha., GIST)

#### ABSTRACT

In order to increase productivity in conventional stereolithography, Microstereolithography using a digital micromirror device (DMD™) as a dynamic pattern generator is proposed. The deviation from a level of clear optical images to a level of a photopolymer surface is a key for the fabrication of an accurate 3D structure, so this deviation is minimized by controlling the viscosity of FA1260T with organic solvents. After finding the appropriate process values (exposure time of optical images, layer thickness of each layer), the feasibility of microstructures such as a microgear and a microsphere is then demonstrated. Microstereolithography with DMD™ might eventually replace conventional laser induced microstereolithography market such as in the manufacturing of jewels and medical parts

**Key Words** : microstereolithography(마이크로광조형), rapid prototyping(쾌속조형), digital micromirror device(디지털마이크로미러소자)

#### 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]. 마이크로광조형에 의한 마이크로 구조물 제조의 경우 우수한 치수 정밀도를 유지하면서 수 마이크로미터 표면조도로 비교적 매끄러운 표면을 가지는 미세구조물 제조가 가능하다는 장점이 있다. 이러한 마이크로광조형으로 제조된 미세부품들의 예로는 마이크로미터 크기의 미세기어(Microgear), 미세터빈(Microturbine), 미세구조상(Microstatue) 등과 같은 다양한 형태의 삼차원 구조물이 있다. [2-6]

마이크로광조형법은 원하는 형상의 구조물을 높

이 방향으로 여러 층 분할하고 각 층의 단면형상 정보를 액체상태의 광폴리머에 조사하는 방식에 따라 스캐닝방식과 마스크방식으로 나뉜다. 스캐닝방식은 각 층의 단면형상을 이송계의 이동정보로 변환하여 레이저빔 경로에 따라 광경화반응을 유도한다. 마스크방식은 단면의 형상을 동적 마스크패턴화하고 이를 광폴리머 표면에 조사하여 광경화반응을 유도한다. 이렇게 경화된 각 단면형상을 적층함으로써 원하는 3차원구조물을 얻는다.

본 연구에서 제안한 디지털마이크로미러소자(Digital Micromirror Device)를 이용한 마이크로광조형 방식은 마스크를 이용한 방식이다. 이 방식은 제조하고자 하는 구조물의 단면형상을 동적 마스크패턴화하는 기술과 그 패턴을 광학계를 이용하여 액체상태의 폴리머 표면에 정확히 재생하는 이미징 기술 등이 요구되므로 스캐닝방식에 비해 기술적으로 다소 어려움이 있지만, 여러 구조물들의 각 단면형상을 한

번에 마스크패턴화하여 가공하므로 가공속도가 빠르다는 장점이 있다. 또한, 스캐닝방식에서 요구되는 레이저빔의 경로 설정이 필요 없어 복잡한 형상의 가공에서도 공정이 용이하고, 스캐닝방식에서 발생하는 이송계(X, Y축)의 오차가 없어 이송계에 의한 단면의 형상오차를 없앨 수 있다.

따라서 본 연구에서는 디지털마이크로미러 소자(이하 DMD™)를 이용해 스캐닝방식보다 가공속도를 향상시키고 복잡한 단면의 가공을 용이하게 하여 가공생산성을 높이는 마이크로광조형시스템의 제작 및 공정개발에 목표를 두고 연구를 수행하였다. 구체적으로는 CAD파일 및 단면형상 데이터를 DMD™에 생성하는 기술과 DMD™에 형성된 단면패턴을 광폴리머 표면에서 선명한 이미지로 투영되게 하는 광학계 구성, 광폴리머의 점성제어를 통한 정밀하고 안정된 경화조건을 확보하였다. 최종적으로 확보된 최적의 경화조건하에서 미세 3차원 구조물을 제작하므로써 동적패턴형성기에 의한 마이크로광조형기술을 정립하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 광학계 및 이송계

본 연구를 위해 사용된 DMD™는 자외선 영역에서 사용이 가능한 0.7 XGA DDR DMD™ 12이며 미국 Texas Instrument사에서 제작한 것이다. 이는  $13.68\mu\text{m} \times 13.68\mu\text{m}$ 의 작은 마이크로미러들이  $1024 \times 768$ 개의 배열을 이루고 있어 전체적으로  $14.008 \times 10.506\text{mm}$ 의 크기를 가진다. 또한 Discovery 1100 Controller Board와 그 작동 프로그램인 Discovery 1100을 각각 DMD™를 제어하기 위한 하드웨어와 소프트웨어로 사용하였다. Fig. 1에서 보이는 바와 같이 DMD™의 각각의 미소거울은 On이 되었을 때 미소거울의 대각선을 기준으로 상방향으로  $12^\circ$  기운다. 반대로 Off가 되었을 때는 미소거울의 대각선에 대해 하방향으로  $12^\circ$  기운다. 따라서 원하는 미소거울을 선택적으로 On/Off하면, 입사광이 DMD™를 거쳐 원하는 형상의 마스크 이미지를 생성한다. 각각의 미소거울은 100Hz의 속도로 디지털마스크패턴을 생성할 수 있으며, 각 패턴 사이의 시간지연도 가능하다.

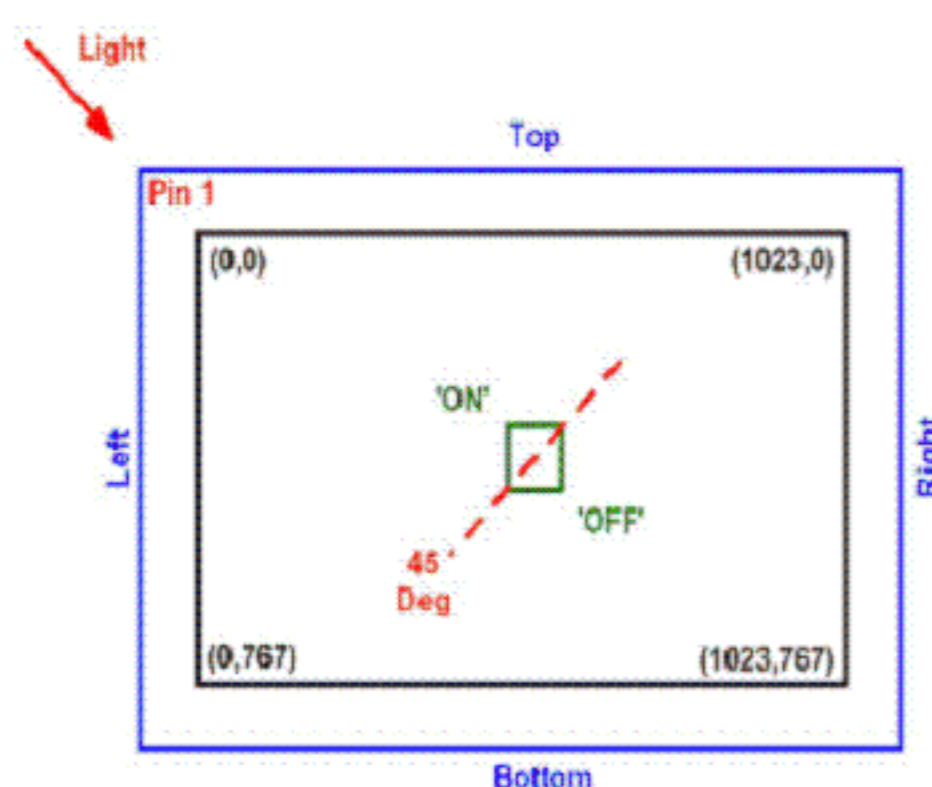


Fig. 1 Dynamic characteristic of the DMD™

Fig. 2는 본 연구에 사용된 실험 장치의 개략도이다. 실험 장치는 크게 광원 및 광학계 부분과 제어부 및 피제어부로 구성되어 있으며 구체적으로는 다음과 같다. 광원으로는 자외선/가시광선영역(250 ~ 600nm)의 광을 송출하는 EXFO LITE에서 광학필터(400 ~ 500nm)를 설치하여 440nm대의 광을 주 광원으로 사용하였다. 또한 광원에서 나오는 빛의 발산각이  $72^\circ$ 인데 이 빛의 퍼짐을 줄이고 DMD™에 고른 조도로 광을 입사시키기 위해 Dual Lens Focussing Adaptor와 Beam Expander를 사용하였다. 이를 통하여 DMD™ 표면에서의 광세기분포가 거의 일정한 평행광을 만들었다.

광원으로부터 DMD™에 입사되는 빛 중, 원하는 단면형상의 마스크패턴에 입사된 빛만이 선택적으로 반사되어 단면의 정보가 광학적 이미지로 변환된다. 이러한 이미지를 수차에 의한 변형 없이 축소시켜 광폴리머 표면에 선명하게 전달하기 위해 본 실험에서는 현미경용 대물렌즈를 사용하였다. 또한, 발산하는 이미지를 현미경용 대물렌즈에 효과적으로 전달하기 위하여 2" 크기의 Plano-Convex Lens를 사용하였다.

본 실험에서는 원하는 위치에 단면을 경화시키고 높이방향으로 각 단면을 적층시키기 위해 x-y-z 이송계를 사용하였다. 정밀 이송계의 이송제어장치로 Turbo UMAC(Delta Tau co.)을 사용하였다. 이송계의 경우에 레이저 간섭계를 통하여 검증된 것으로 정확도는 2mm 이송에 대해 평균  $\pm 0.1\%$ , 최대  $\pm 0.23\%$ 의 오차율을 보였으며, 속도 정확도는 1.5mm 이송 시  $30\mu\text{m/s}$ 의 선속도에 대해  $\pm 0.23\%$ 의 오차율을 가졌다. 또한, 이미지의 개폐를 제어할 수 있도록 전자기 셔터를 사용하였다.

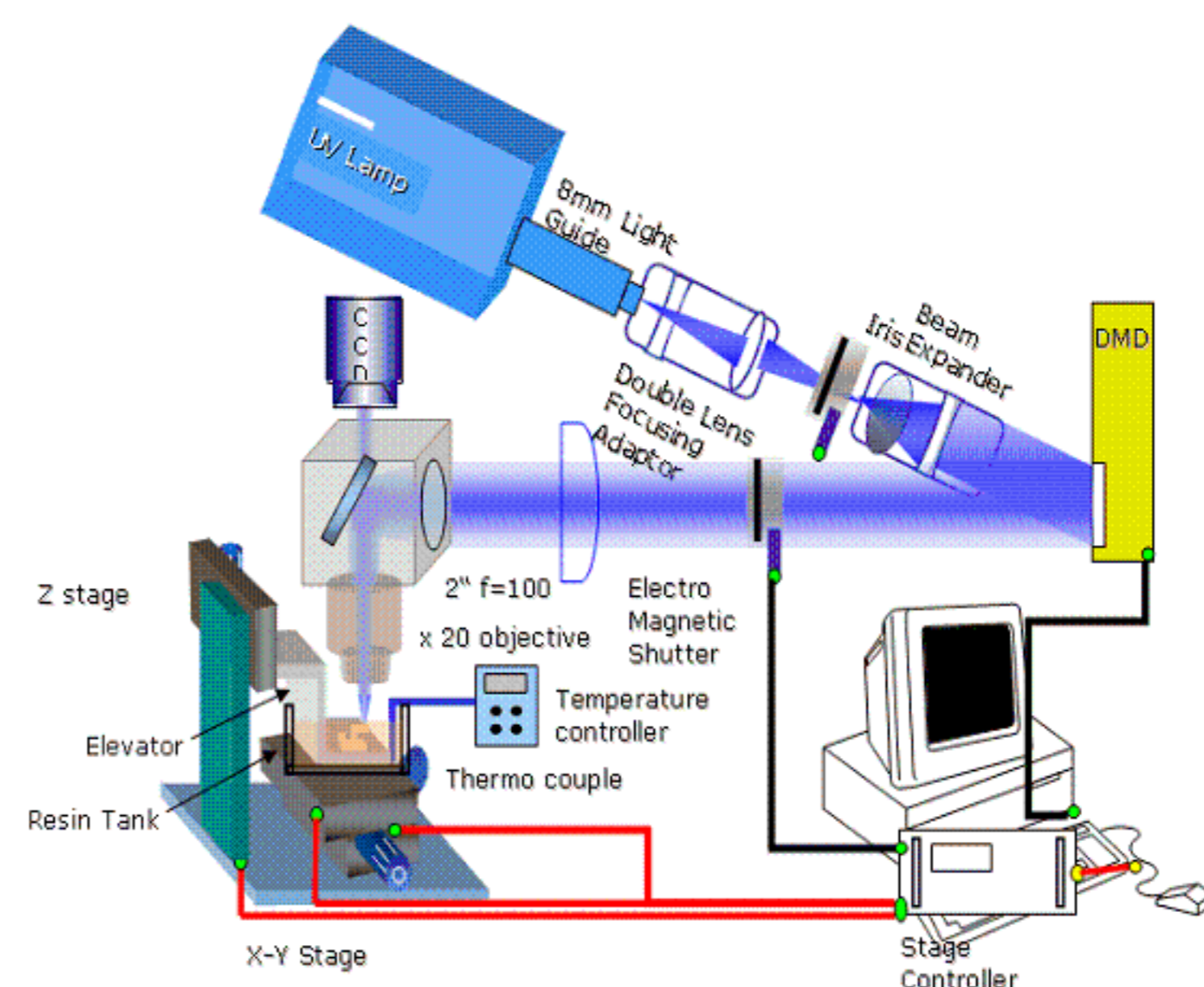


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental system



### 2.3 광폴리머 Fa1260T의 특성

본 연구에 사용된 광폴리머는 SK UCB Chemical사의 상용 광폴리머 FA1260T이다. 이 광폴리머는 자유라디칼 중합을 일으키는 Urethane Acrylate계열이며, 410 ~ 450nm 대역의 파장에 대한 광흡수율이 가장 높다. 자유수면법을 이용한 마이크로광조형시 광폴리머의 동점성이 클 경우, 층간의 두께 제어가 곤란하고 높이 방향의 정밀도가 낮아진다. 그런데 일반적으로 고분자는 1°C의 온도변화에 대하여 약 2 ~ 4%정도로 동점성이 감소된다. 따라서 FA1260T의 동점성을 감소시켜 균일한 단층이 형성되면서도 열에 의한 경화반응이 일어나지 않는 적정 온도대로 30 ~ 31°C를 선정하고 FA1260T의 동점성을 Bohlin Instruments사의 Gemini Rheometer로 측정하였다. FA1260T 광폴리머의 동점성은 30°C에서 평균적으로 303.5mPas로 나타났으며 30-31°C구간 내에서 약 2% 정도 동점성이 떨어지는 것으로 나타났다. 그러나 광폴리머의 점성은 온도를 높여 감소되었어도 여전히 상온에서 물의 300배에 해당하는 높은 점성이어서 높이방향으로 좋은 형상 정밀도를 갖는 피라미드 구조물 제조실험은 곤란하였다.

다음으로는 유기용매를 사용하여 동점성계수를 낮추고자 시도하였다. 실험을 위해 광폴리머에 사용 가능한 유기용매를 종류별로 조사하고 각각에 대해 경화실험실시 후 가장 경화특성이 우수한 용매인 p-Xylene를 선정하여, p-Xylene를 FA1260T에 무게비로 20%, 25%, 30%, 35% 혼합했을 때, 30.5°C에서 이 혼합물의 동점성을 측정하였다. Fig. 3에서도 알 수 있듯이 p-Xylene를 30.5°C의 FA1260T에 무게비로 30%혼합했을 때 혼합한 FA1260T의 동점성이 그렇지 않은 것에 비해 약 90%까지 떨어지는 것을 알 수 있었다. 따라서 유기용매의 사용이 광폴리머의 점성제어에 효과적임을 알 수 있었다.

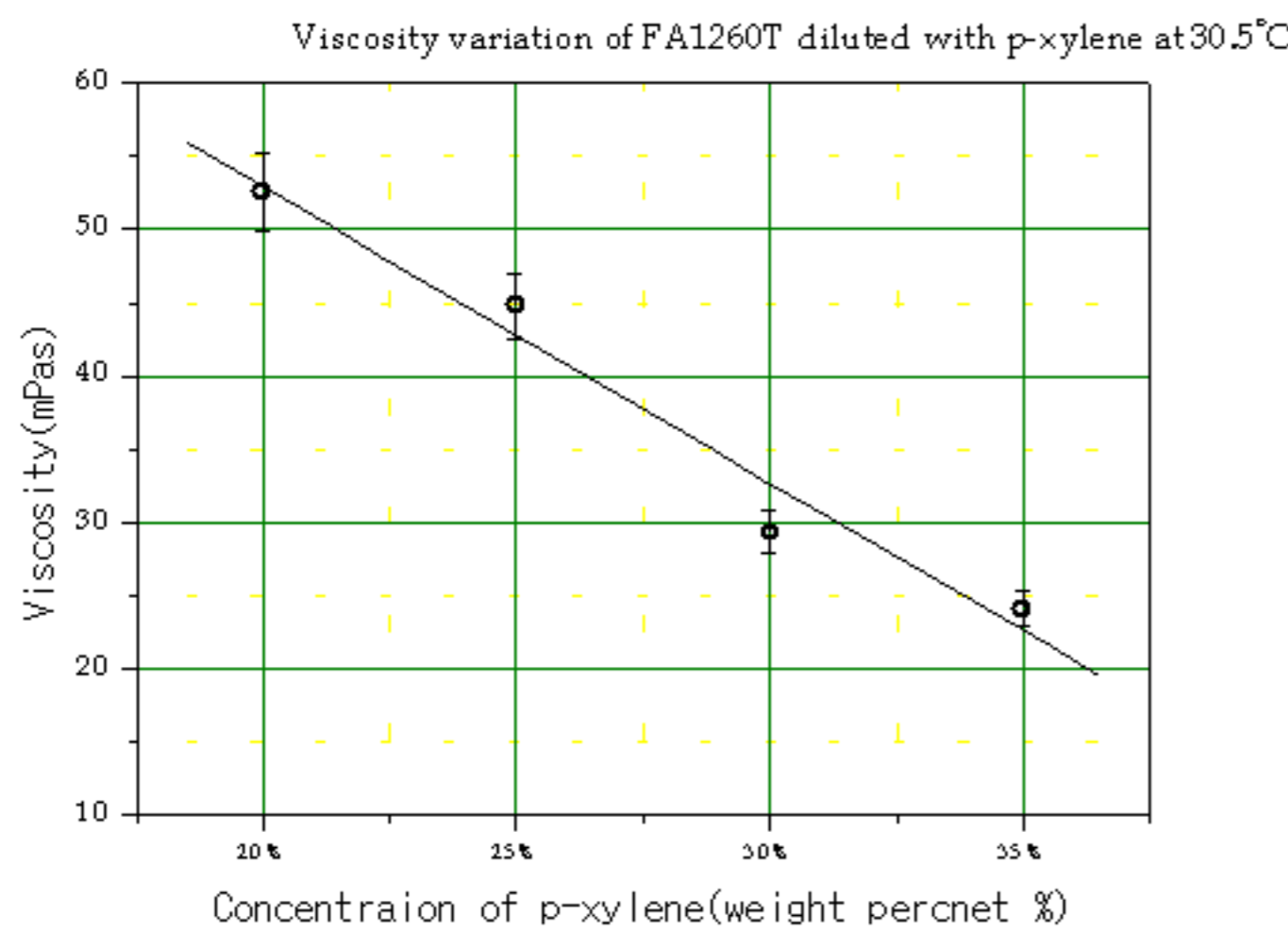


Fig. 3 Viscosity variation of FA1260T diluted with p-xylene

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 이미지면과 광폴리머표면의 불일치에 따른 FA1260T의 경화특성변화

DMD™를 이용한 마이크로광조형시 광폴리머의 표면에 가장 선명한 이미지가 투영될 때 정밀한 단면형상을 얻을 수가 있다. 그러므로 본 실험에서는 먼저 CCD로 관찰된 가장 선명한 이미지면을 기준면으로 정하고 이미지면이 기준면으로부터 차이가 생길 때 CCD로 관찰된 선명도차이를 관찰하여 적정 기준면 오차범위를 선정하고, 이 범위 내에서 실제 광폴리머의 표면을 기준면을 중심으로 상하로 이동하여 경화실험을 하였을 때 경화된 단면의 형상 및 선폭을 측정하여 깨끗한 형상 및 최소선폭을 갖는 조건을 설정하였다.

기준면에서 이미지면이  $\pm 10\mu\text{m}$ 의 범위로 차이를 가질 때 이미지가 흐려지는 것을 CCD화면을 통해 육안으로 식별할 수 있었다. 그러므로 경화실험중 이미지면과 광폴리머의 표면이 항상  $\pm 10\mu\text{m}$  내의 범위 내에서 위치해야 가장 정밀한 단면형상을 얻을 수 있다. 다음으로는 상온에서 Fig. 4와 같이 챔버에 FA1260T (p-Xylene 30%)를 넣고 커버글라스를 덮은 후 DMD™ 화면상에 폭 방향 크기가 40, 60, 80 pixel인 직사각형 마스크를 생성하고 기준면에 대해 액면의 높이가  $-30\mu\text{m}$ 에서  $+50\mu\text{m}$ 까지 변할 때 10초 노광 후 경화되는 구조물의 폭을 3차원 형상측정기 (nanofocus)로 측정하였다. Fig. 5를 통해 알 수 있듯이 기준면에 대해 광폴리머 면이 아래로 내려갈수록 선폭의 변화가 작은 반면, 위로 올라갈수록 경화된 부분의 가장자리가 선명하지 않고 선폭의 변화도 큰 것으로 나타났다. 따라서 이미지면의 오차가  $-10 \sim 0\mu\text{m}$  범위 내에서 경화가 일어나도록 하는 것이 공정상 유리한 것으로 판명되었다.

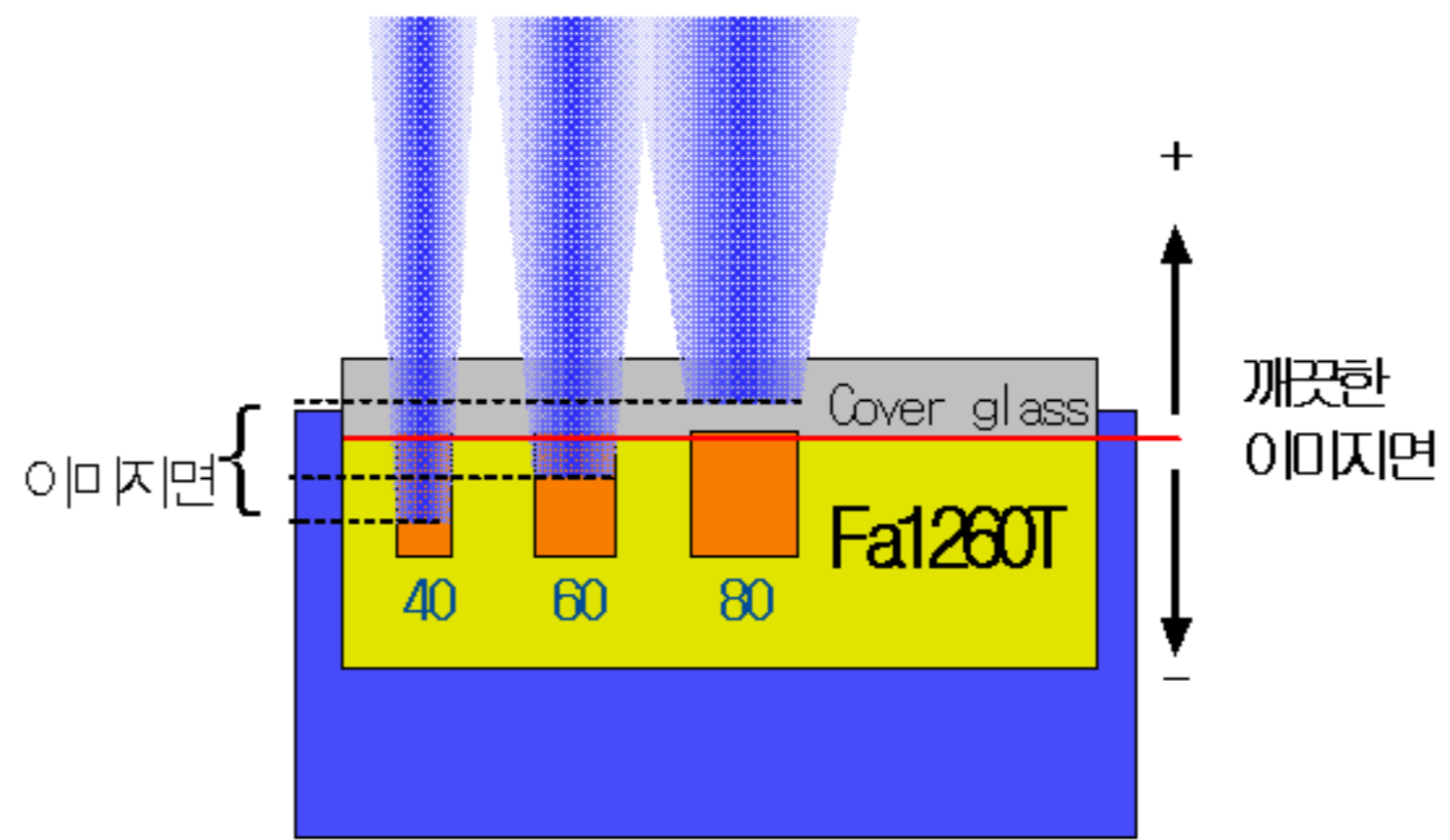


Fig. 4 Experimental setup for image deviation measurement



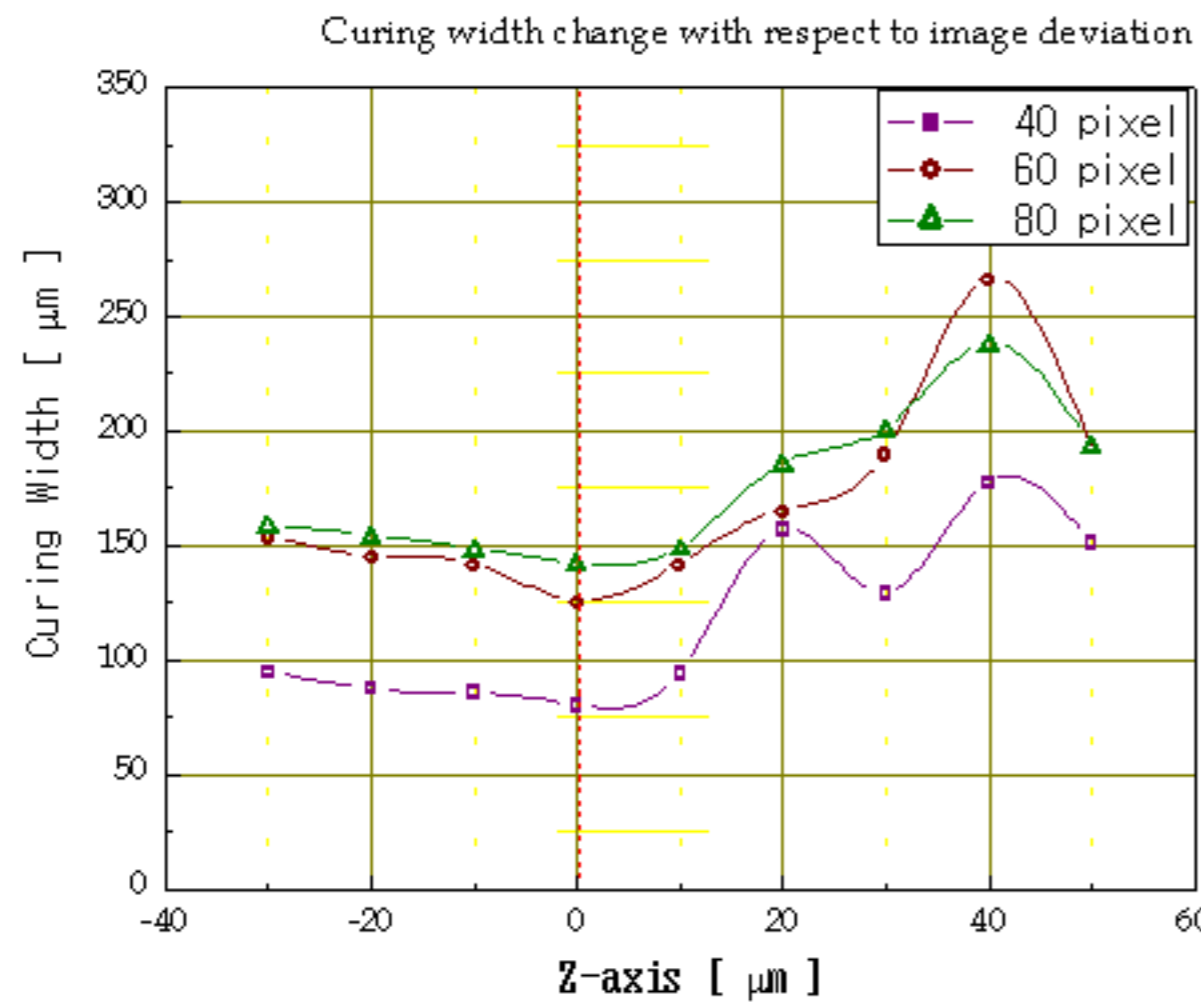


Fig. 5 Curing width change with respect to image deviation

### 3.2 미세 3차원 구조물 제조

본 연구에서는 p-Xylene 30%, 온도  $30 \pm 1^\circ\text{C}$ 를 최적공정조건으로 설정하고 마이크로기어와 구 형상을 제작하였다.

Fig. 6은 층간간격  $10 \mu\text{m}$ , 총 100개의 단면으로 30분 동안 제조된 마이크로기어이며 구조물의 직경은 약  $900 \mu\text{m}$ 이다. 그림의 우측 상단에 나와 있는 사진은 기어의 측면을 확대한 것으로 전체적으로 경화층간에 약간의 단차가 있으나 균일한 두께로 경화가 이루어졌음을 보여준다. 다음으로는 각 경화층간 단차를 줄이기 위해 동일한 조건하에서 층간간격  $7 \mu\text{m}$ 로 마이크로 구 형상을 제작하였다. 그런데 Fig. 7에서 보는 것과 같이 노광시간이 길어 깊이방향으로의 경화가  $7 \mu\text{m}$ 보다 깊게 일어나 원하는 구의 바닥면 형상을 제작할 수 없음을 관찰하였다. 따라서 각 단면 층간 간격을 줄여 더 매끄러운 표면을 얻고 경화깊이를 줄이기 위해서 6초의 노광시간에 층간간격을  $5 \mu\text{m}$ 로 하여 Fig. 8과 같은 마이크로기어를 제작하였다. Fig 6, 7과 비교하였을 때 전체적으로 표면형상이 더 부드럽고 우수하게 제조되었음을 알 수 있다.

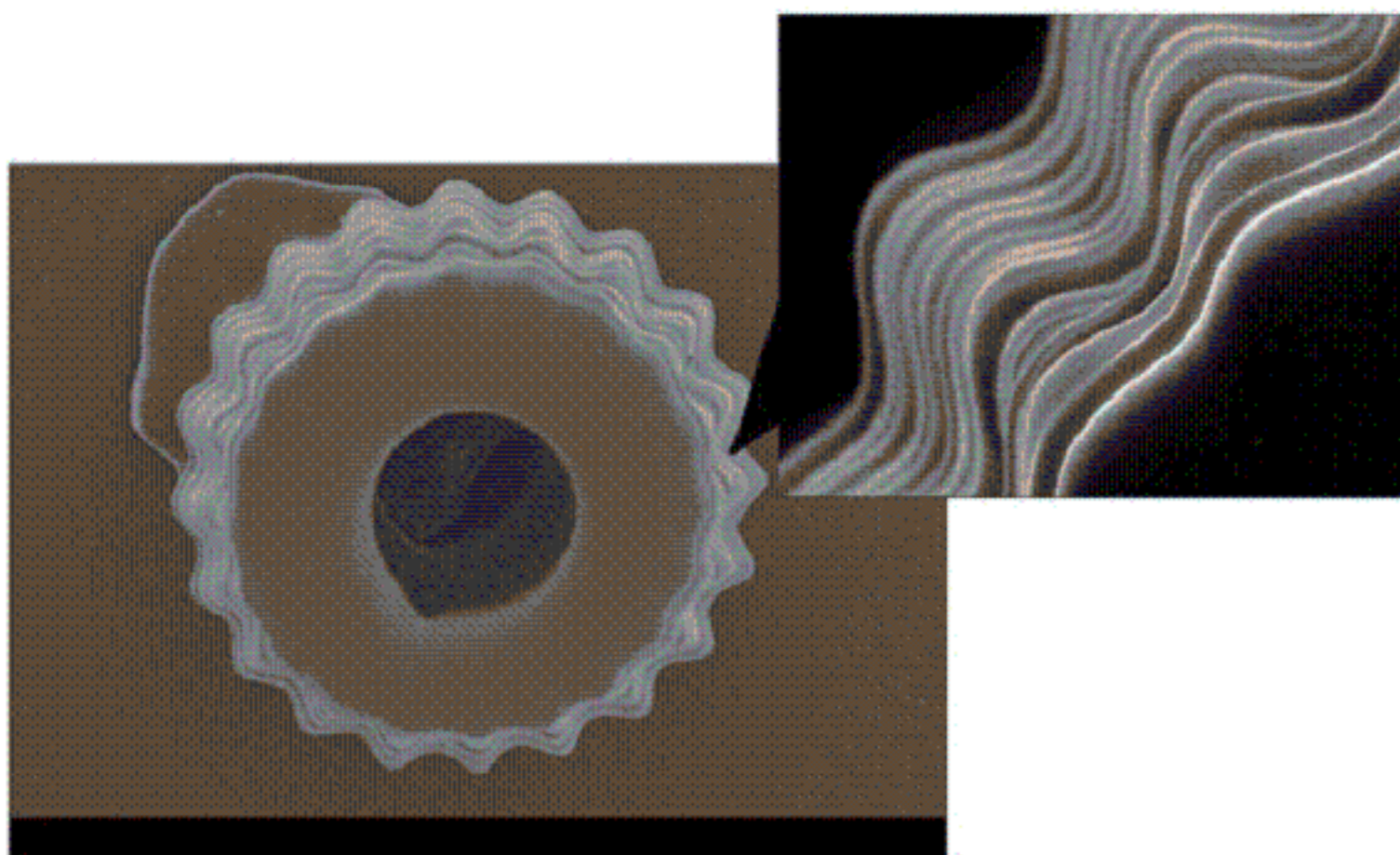


Fig. 6 SEM image of a microgear fabricated using the proposed method (exposure time 10s, layer thickness  $10 \mu\text{m}$ )

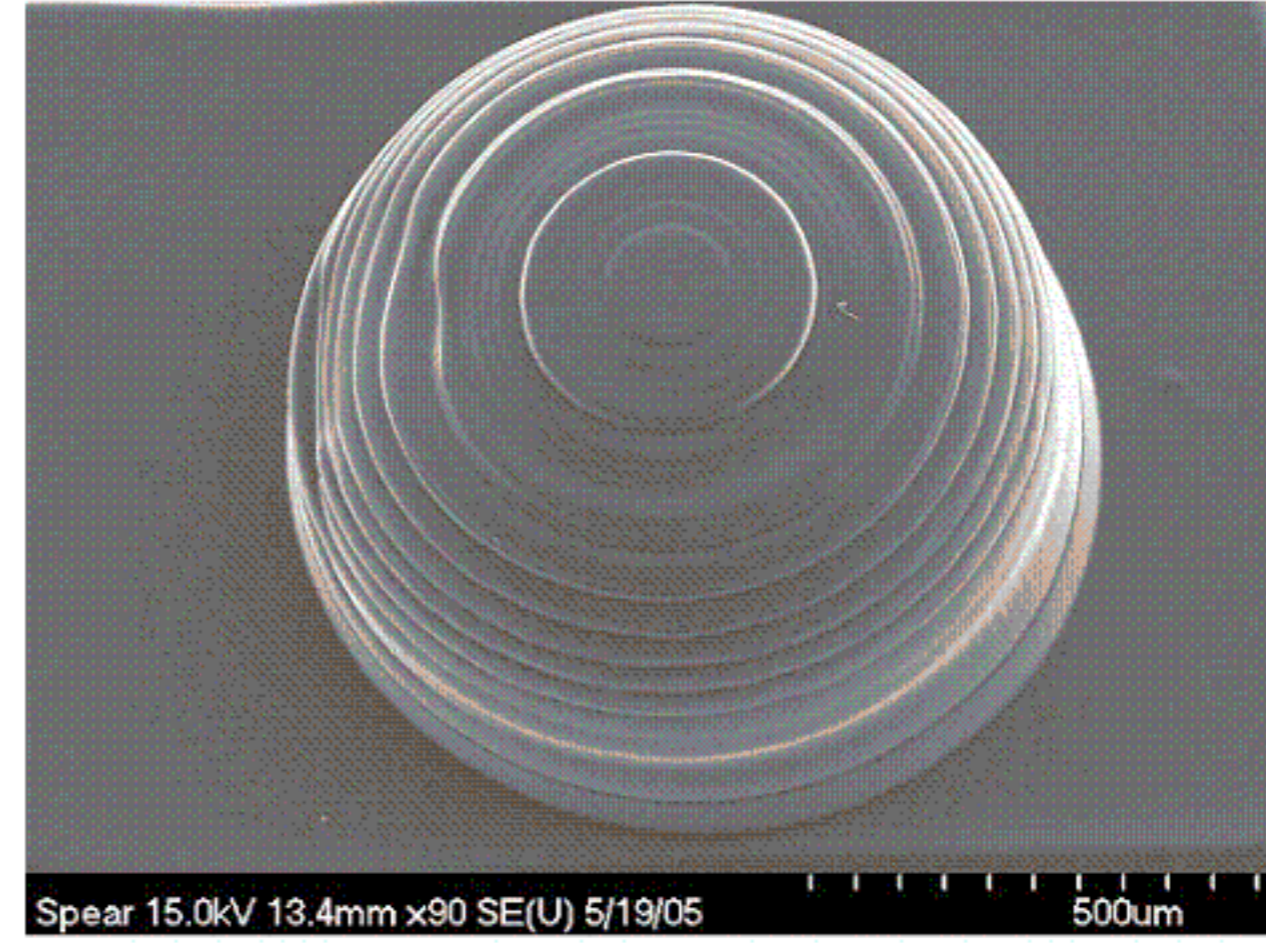


Fig. 7 SEM image of a microgear fabricated using the proposed method (exposure time 10s, layer thickness  $10 \mu\text{m}$ )

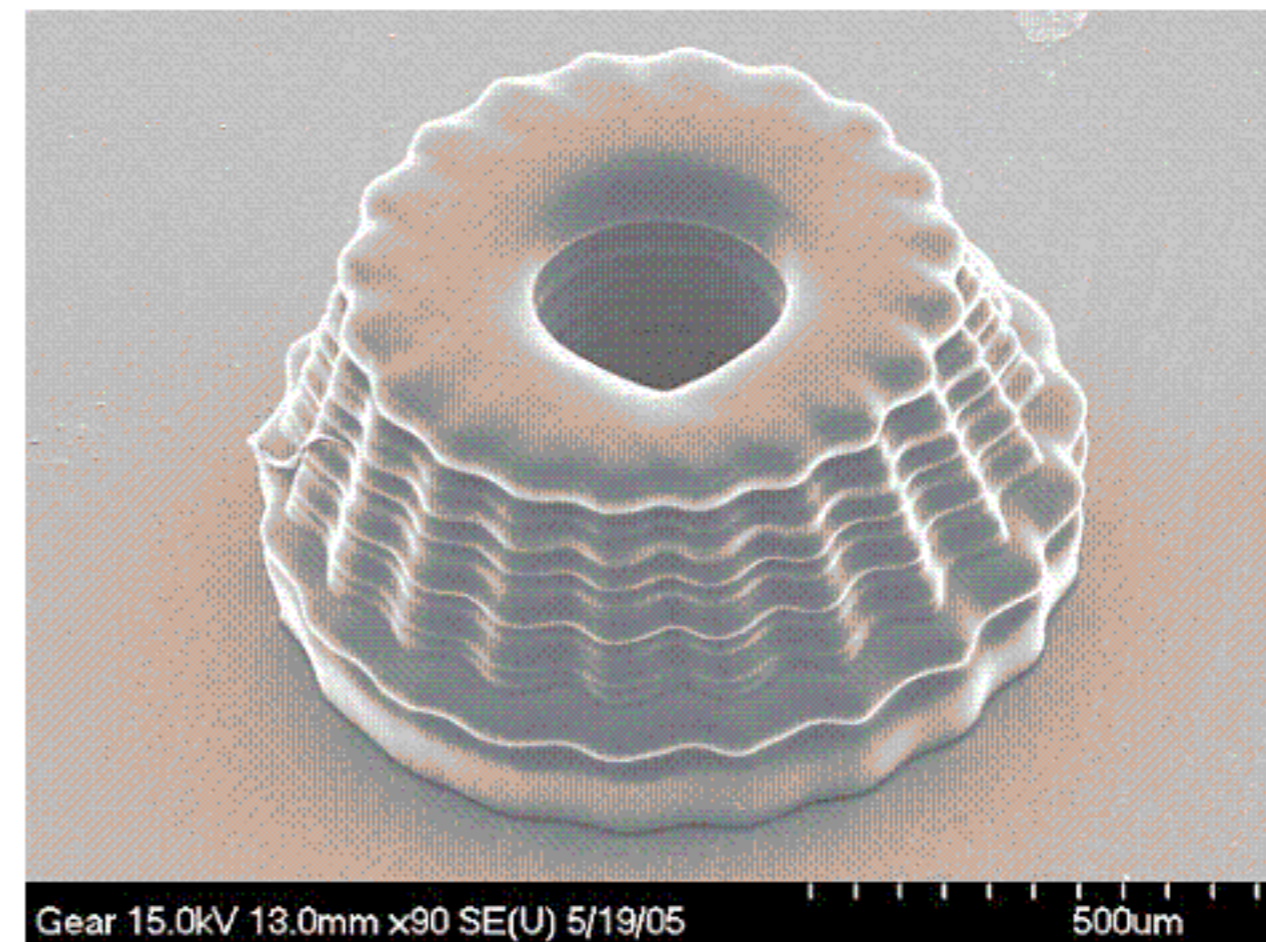


Fig. 8 SEM image of a microgear fabricated using the proposed method (exposure time 6s, layer thickness  $5 \mu\text{m}$ )

### 3.3 집속빔을 이용한 가공과의 비교

DMD™를 이용한 마이크로광조형 기술은 기존의 집속된 레이저빔을 이용한 직접묘화방식과 마이크로 피라미드를 제조하는 경우에 대하여 가공시간, 형상 정밀도면에서 비교하면 다음과 같은 우수성을 가진다.

다음은 바닥면의 크기가  $1000 \times 1000 \mu\text{m}$ 인 파라미드구조물제작을 할 때 두 공정 간의 순수 가공시간을 비교한 것이다. 먼저 He-Cd( $442\text{nm}$ )레이저 집속빔을 이용한 스캐닝방식의 경우 출력  $2.5\text{mW}$ , 이송 속도  $100 \mu\text{m/s}$ , 층간간격  $25 \mu\text{m}$ 으로 약 12층을 적층하여 가공할 때 순수 가공시간은 8분 24초이다[7]. 반면 DMD™를 이용한 경우 약  $0.1\text{mW}$ 의 출력, 층간간격  $25 \mu\text{m}$ , 이미지당 노광시간 10초로 약 12층을 적층할 때 4분의 순수 가공시간이 소요된다. 또한 스캐닝방식의 경우 FA1260T에 대하여 최소경화깊이가  $25 \mu\text{m}$ 이므로 그 이하의 정밀도로 가공이 곤란한 반면 DMD™를 이용할 경우 8분 내에  $15 \mu\text{m}$ 의 낮은 경화깊이로 약 20층의 적층이 가능해 가공물의 표면형상이 더 우수한 장점이 있다.

결론적으로 DMD™를 이용한 마이크로광조형법은



스캐닝방식에 비해 더 낮은 출력으로 더 향상된 높이방향으로의 형상정밀도를 가지는 미세 3차원구조물을 2배 빠르게 제작할 수 있다는 것이다. 따라서 원하는 구조물의 단면형상이 더 복잡하고 높이방향으로의 형상정밀도가 더 요구될 때, DMD™를 이용한 마이크로광조형시스템이 더 유리한 방법이라 하겠다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 높이방향으로의 좋은 형상 정밀도를 갖는 미세 3차원구조물을 제조하기 위해 폴리머의 점성을 제어하고, 광폴리머 표면과 광학계에 의해 형성된 이미지면이  $\pm 10\mu\text{m}$ 의 범위 내에서 일치되게 하였다. DMD™를 이용한 마이크로 광조형법은 스캐닝방식에 비해 가공시간이 짧고, 다수의 형상을 한꺼번에 경화시킬 수 있어, 마이크로광조형기술의 생산성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

#### 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* vol.9, pp.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*, vol 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)
7. 정대준, 김성훈, 정성호, "마이크로광조형법으로 제조된 미세구조물의 경화특성 및 형상정밀도에 관한 연구", 한국레이저가공학회 2003년도 춘계학술발표대회 논문집, pp. 111-115