

디지털마이크로미러소자를 동적마스크 패턴생성기로 응용한 마이크로광조형

주재영*, 김성훈*, 변홍석**, 이관행*, 정성호#

Microstereolithography using a Digital Micromirror Device as the Dynamic Pattern Generator

Jae Young Joo*, Sung Hoon Kim*, Hong Seok Byun**, Kwan Heng Lee* and Sung Ho Jeong#

ABSTRACT

In order to increase the productivity of conventional microstereolithography, a new method using a digital micromirror device (DMDTM) as the dynamic pattern generator is proposed. The deviation from the level of clear optical images to the level of 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 variables, the feasibility of microstructure fabrication such as a microgear and a microsphere is demonstrated. Microstereolithography with DMDTM showed the potential to replace the existing focused beam microstereolithography.

Key Words : Microstereolithography(마이크로광조형), stereolithography(쾌속조형), digital micromirror device (디지털마이크로미러소자)

1. 서론

마이크로광조형법(microstereolithography)은 비교적 큰 크기의 구조물조형에 사용되는 쾌속 광조형기술(rapid prototyping)을 바탕으로 개발된 응용기술로서 3 차원 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 가능하다. 이러한 마이크로광조형으로 제조된 미세부품들의 예로는 마이크로미터 크기의 미세기어(Microgear), 미세터빈(Microturbine), 미세구조상(Microstatue)등과 같은 다양한 형태의 삼차원구조물이 있다.²⁻⁶

마이크로광조형법은 원하는 형상의 구조물을 높이 방향으로 여러 층 분할하고 각 층의 단면형상 정보를 액체상태의 광폴리머에 조사하는 방식에 따라 스캐닝방식과 마스크방식으로 나뉜다. 스캐닝방식은 각 층의 단면형상을 이송계의 이동정

* 접수일: 2006년 1월 24일; 게재승인일: 2006년 6월 7일

* 광주과학기술원 기전공학과

** (현주소) 국방과학기술원

교신저자: 광주과학기술원 기전공학과

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

보로 변환하여 레이저빔 경로에 따라 광경화반응을 유도한다. 마스크방식은 단면의 형상을 동적 마스크패턴화하고 이를 광폴리머 표면에 조사하여 광경화반응을 유도한다. 이렇게 경화된 각 단면형상을 적층함으로써 원하는 3 차원 구조물을 얻는다.

마스크를 이용한 마이크로광조형법은 제조하고자 하는 구조물의 단면형상을 동적마스크패턴화하는 기술과 그 패턴을 광학계를 이용하여 액체상태의 광폴리머 표면에 정확히 재생하는 이미징 기술 등이 요구되므로 스캐닝방식에 비해 기술적으로 다소 어려움이 있지만, 구조물의 단면형상을 한번에 마스크패턴화하여 가공하므로 가공속도가 빠르다는 장점이 있다. 또한, 스캐닝 방식에서 요구되는 레이저빔의 경로 설정이 필요 없어 복잡한 형상의 가공에서도 공정이 용이하고, 스캐닝 방식에서 발생하는 이송계(X, Y 축)의 오차가 없어 이송계에 의한 단면의 형상오차를 없앨 수 있다. 현재까지 개발된 대부분의 프로젝션 방식의 마이크로광조형법은 liquid-crystal display (LCD)를 동적 마스크패턴으로 활용하고 있다. 그러나 동적 마스크패턴 생성기로서의 LCD 는 낮은 투과효율과 대부분의 광폴리머 경화영역인 근자외선 영역의 광원 사용이 곤란하다는 단점이 있다. 이러한 스캐닝 방식과 LCD 마스크패턴의 단점을 극복하기 위하여 본 연구에서는 디지털마이크로 미러소자(Digital Micromirror Device, 이하 DMD™) 를 이용한 마이크로광조형 방식을 제안하였다.

본 연구에서는 DMD™ 를 동적마스크패턴 생성기로 활용하여 기존의 마이크로광조형방식 보다 가공생산성을 높이고 복잡한 단면의 가공을 용이하게 하는 마이크로광조형시스템의 제작 및 공정개발에 목표를 두고 연구를 수행하였다. 구체적으로는 CAD 파일 및 단면형상 데이터를 DMD™ 에 생성하는 기술과 DMD™ 에 형성된 단면패턴을 광폴리머 표면에선명한 이미지로 투영되게 하는 광학계 구성 및 광폴리머의 점성제어를 통한 정밀하고 안정된 경화조건 확보에 대한 연구를 수행하였으며, 실험을 통해 확보된 최적의 경화조건하에서 미세 3 차원구조물을 제작함으로써 동적패턴생성기에 의한 마이크로 광조형기술을 정립하였다.

2. DMD™ 를 이용한 마이크로광조형 공정개발

2.1 동적마스크패턴 생성기

현재까지 개발된 대부분의 프로젝션 방식의 마이크로 광조형법은 LCD 를 동적 마스크 패턴으로 활용하고 있다. Table 1 에서 알 수 있듯이, LCD 는 광원이 마스크패턴을 투과하는 광투과형 동적 마스크패턴 생성기로 투과효율이 낮고 한 픽셀의 크기도 크며, 자외선빔에 액정이 손상될 우려가 있는 것과 같은 여러 가지 제약을 가지고 있다. 반면, DMD™ 는 빛이 마스크패턴의 표면에서 반사되는 광반사형 동적패턴 생성기로 LCD 에 비해 픽셀의 크기도 작고, 제어가 빠르며 광반사효율이 LCD 의 광투과효율보다 약 5 배 크다. 또한, 근자외선 영역에서 운용이 가능해, 현재까지 개발된 다양한 상용 광경화성폴리머 사용에 대한 접근성이 용이하다.⁷

Table 1 Comparison of general characteristics between LCD and DMD™ pattern generator

Property	LCD	DMD™
UV compatibility	No	Yes
Modulation efficiency	12.5% (transmission)	65% (reflection)
Pixel size	33 μm × 33 μm	13 - 16.2 μm
Switching speed	20 ms	20 μs

본 연구에서 동적마스크 패턴 생성기로 사용된 DMD™ 는 자외선 영역에서 사용이 가능한 0.7 XGA DDR DMD™ 12 이며 미국 Texas Instrument 사에서 제작한 것이다. 이는 13.68 μm × 13.68 μm 의 작은 마이크로미러들이 1024 × 768 개의 배열을 이루고 있어 전체적으로 14.008 × 10.506 mm 의 크기를 가진다. 또한 Discovery 1100 Controller Board 와 그 작동 프로그램인 Discovery 1100 을 각각 DMD™ 를 제어하기 위한 하드웨어와 소프트웨어로 사용하였다.

Fig. 1 에서 보이는 바와 같이 DMD™ 의 각각의 미소거울은 On 이 되었을 때, 미소거울의 대각선을 기준으로 상방향으로 12° 기운다. 반대로 Off 가 되었을 때는 미소거울의 대각선에 대해 하방향으로 12° 기운다. 따라서 원하는 미소거울을 선택적으로 On/Off 하면, 입사광이 DMD™ 를 거쳐 원하는 형상의 마스크 이미지를 생성한다. 각각의

미소거울은 1000 Hz의 속도로 디지털마스크패턴을 생성할 수 있으며, 각 패턴 사이의 시간지연도 가능하다.

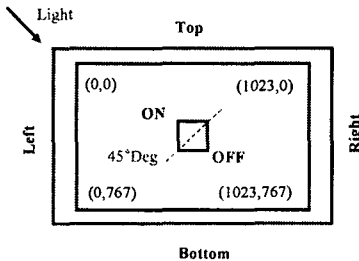


Fig. 1 On-off characteristics of each micromirror on the DMD™

2.2 시스템의 구성

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 ~ 600 nm)의 광을 송출하는 UV Lamp에서 광학필터(400 ~ 500 nm)를 설치하여 440 nm 대의 광을 주광원으로 사용하였다. 또한 광원에서 나오는 발산각이 큰 빛의 퍼짐을 줄이고 DMD™에 고른 조도로 광을 입사시키기 위해 Beam Collimator와 Beam Expander를 사용하였다. 이를 통하여 DMD™ 미러표면에서의 광세기분포가 거의 일정하게 만들었다. 광원으로부터 DMD™에 입사되는 빛 중, 원하는 단면형상의 마스크패턴에 입사된 빛만이 선택적으로 반사되어 단면의 정보가 광학적 이미지로 변환된다. 이러한 이미지를 약 1/10로 축소시키고, 수차에 의한 변형을 최소화하여 광폴리머 표면에 선명하게 전달하였다. 이를 위해 현미경용 대물렌즈를 사용하였고 또한, 발산하는 이미지를 현미경용 대물렌즈(NA=0.3)에 효과적으로 전달하기 위하여 2" Plano-Convex Lens를 사용하였다.

본 실험에서는 1 μm 정도의 정밀도로 위치를 제어하고, 높이방향으로 각 단면을 정밀한 위치에 경화시키고 이를 적층시키기 위해 정밀 x-y-z 이송계를 사용하였다. 정밀 이송계의 이송제어 장치로 Turbo UMAC(Delta Tau Co.)을 사용하였다. 이송계의 경우에 레이저 간섭계를 통하여 검증된 것으로 정확도는 2 mm 이송에 대해 평균 ± 0.1%, 최대 ±

0.23%의 오차율을 보였으며, 속도 정확도는 1.5 mm 이송시 30 μm/s의 선속도에 대해 ± 0.23%의 오차율을 가졌다. 또한, 이미지의 개폐를 제어할 수 있도록 전자기 셔터를 사용하였다.

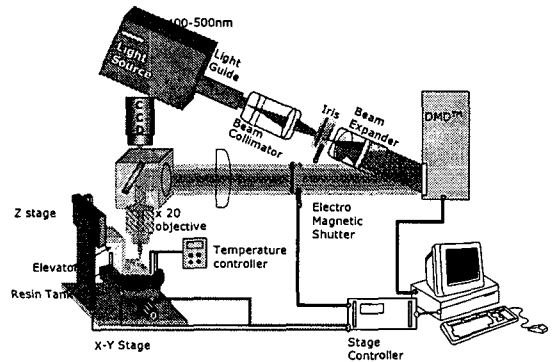


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental system

2.3 광폴리머 FA1260T의 특성

본 연구에 사용된 광폴리머는 SK UCB Chemical사의 상용 광폴리머 FA1260T이다. 이 광폴리머는 자유라디칼 중합을 일으키는 Urethane Acrylate 계열이며, 410 ~ 450 nm 대역의 파장에 대한 광흡수율이 가장 높다. 자유수면법을 이용한 마이크로광조형시 광폴리머의 동점성을 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 303.5 mPa·s로 나타났으며 30 - 31°C 구간 내에서 약 2% 정도 동점성이 떨어지는 것으로 나타났다. 그러나 광폴리머의 점성은 온도를 높여 감소되었어도 여전히 상온에서 물의 300 배에 해당하는 높은 점성이어서 높이방향으로 좋은 형상 정밀도를 갖는 피라미드구조물 제조 실험은 곤란하였다.

다음으로는 유기용매를 사용하여 동점성을 낮추고자 시도하였다. 실험을 위해 광폴리머에 사용 가능한 유기용매를 종류별로 조사하고 각각에 대해 경화실험실시 후 가장 경화특성이 우수한 용매

인 p-Xylene 를 선정하여, p-Xylene 를 FA1260T 에 무게비로 20%, 25%, 30%, 35% 혼합했을 때, 30.5℃ 에서 이 혼합물의 동점성을 측정하였다.

Fig. 3 에서도 알 수 있듯이 p-Xylene 를 30.5℃ 의 FA1260T 에 무게비로 30% 혼합했을 때 혼합한 FA1260T 의 동점성이 혼합되지 않은 것에 비해 약 90% 까지 떨어지는 것을 알 수 있었다. 따라서 유기용매의 사용이 광폴리머의 점성제어에 효과적인을 알 수 있었다. 한편, 광폴리머에 유기용매를 혼합한 경우 굴절률에 영향을 미칠 수도 있을 것으로 예상되나 본 연구에서는 고려되지 않았다.

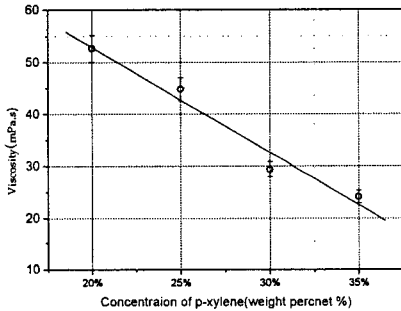


Fig. 3 Viscosity variation of the FA1260T diluted with p-xylene

2.4 동적마스크 패턴 생성원리

DMD™ 에 동적마스크 패턴을 형성하기 위해서는 원하는 패턴을 DMD™ 가 읽어 들일 수 있는 비트맵이미지로 입력하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 임의의 3 차원 CAD 모델로부터 마이크로 구조물을 제작하기 위해 다음과 같은 절차로 단면의 형상정보를 가진 비트맵이미지 파일로 생성하였다.

이를 Fig. 4 과 같이 베벨기어형상을 통해 설명하면, 먼저 3 차원 베벨기어 형상을 CAD 모델로 완성하고, 이를 Stereolithography 파일인 STL 파일로 변환한다. 이 파일을 자체 개발한 단면 슬라이싱 프로그램으로 읽어들이고, 원하는 방향으로 일정한 높이만큼 잘라내어 기어 각 단면의 형상정보를 추출한다. 이렇게 얻어진 각 2 차원 단면형상정보는 다시 원하는 크기의 흑 혹은 백색의 단색 비트맵 이미지파일로 각각 변환 되어, 수십~수백 개의 비트맵이미지파일로 저장 된다. 변환된 이미지들은 DMD™ 제어 프로그램 안에 입력되어 미리 설정된 일정한 시간 간격으로 DMD™ 상에 동적마스크 패

턴이 형성되도록 한다.

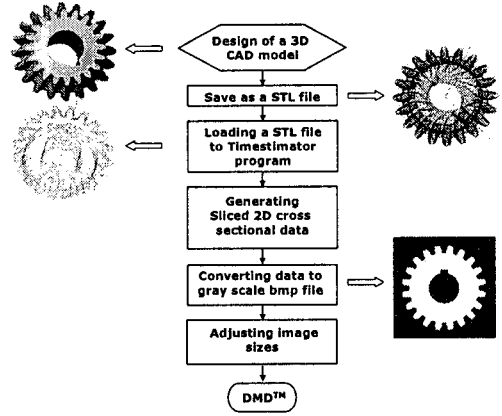


Fig. 4 Procedures for generating 2-D cross sectional bmp files from a bevel gear CAD model

3. 결과 및 고찰

3.1 이미지면과 광폴리머표면의 불일치에 따른 FA1260T 의 경화특성변화

DMD™ 를 이용한 마이크로광조형시 광폴리머의 표면에 가장 선명한 이미지가 투영될 때 정밀한 단면형상을 얻을 수가 있다. 그러므로 본 실험에서는 먼저 CCD 로 관찰된 가장 선명한 이미지면을 기준면으로 정하고 광폴리머의 표면이 기준면으로부터 벗어날 때 CCD 이미지의 선명도차이를 관찰하여 적정 오차범위를 선정하고, 이 범위 내에서 실제 광폴리머의 표면을 상하로 이동시키면서 경화실험을 수행하였다. 경화된 단면의 형상 및 선폭을 측정하여 깨끗한 형상 및 최소선폭을 갖는 조건을 설정하였다.

기준면에서 광폴리머 표면에 결상된 이미지면이 ± 10 μm 의 범위로 차이를 가질 때 이미지가 흐려지는 것을 CCD 화면을 통해 식별할 수 있었다. 그러므로 경화실험 중 이미지면과 광폴리머의 표면이 항상 ± 10 μm 내의 범위 내에서 위치해야 정밀한 단면형상을 얻을 수 있다. 다음으로는 상온에서 DMD™ 화면상에 폭 방향 크기가 40, 60, 80 pixel 인 직사각형 마스크를 생성하고 기준면에 대해 액면의 높이가 -30 μm 에서 +50 μm 까지 변할 때 10 초 노광 후 경화되는 구조물의 폭을 nanofocus 사의 3 차원 형상측정기(nanofocus μsurf®)

로 측정하였다. Fig. 5를 통해 알 수 있듯이, 기준면에 대해 광폴리머 표면이 아래로 내려갈수록 선폭의 변화가 작은 반면, 위로 올라갈수록 경화된 부분의 가장자리가 선명하지 않고 선폭의 변화도 큰 것으로 나타났다. 따라서 이미지면의 오차가 -10~0 μm 범위 내에서 경화가 일어나도록 하는 것이 공정상 유리한 것으로 판명되었다.

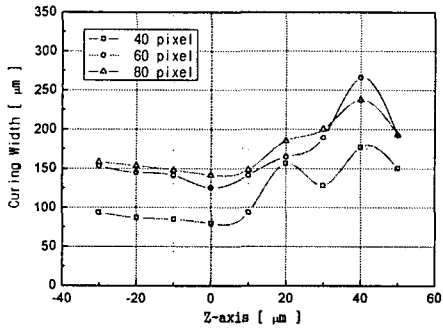


Fig. 5 Curing width change with respect to the elevation of resin surface

3.2 미세 3차원 구조물 제조

본 연구에서는 p-Xylene 30%, 온도 $30 \pm 1^\circ\text{C}$, 출력 6.8 mW/cm^2 를 최적공정조건으로 설정하고 마이크로기어와 구 형상을 제조하였다.

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 단면층간 간격을 줄여 더 매끄러운 표면을 얻고 경화 깊이를 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.

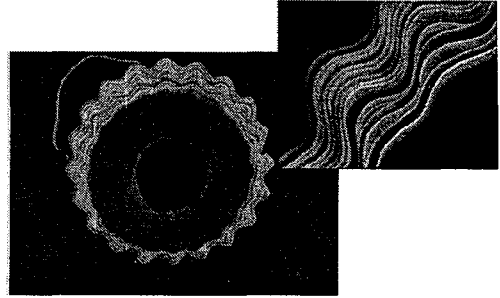


Fig. 6 SEM image of a microgear fabricated using the proposed method (exposure time of a single layer: 10s, layer thickness: $10 \mu\text{m}$, exposure intensity: 6.8 mW/cm^2)

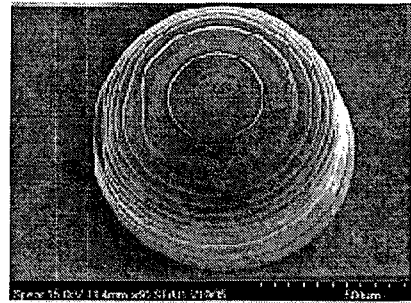


Fig. 7 SEM image of a microsphere fabricated using the proposed method (exposure time of a single layer: 10s, layer thickness: $7 \mu\text{m}$, exposure intensity: 6.8 mW/cm^2)

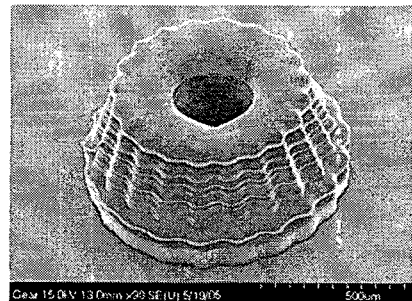


Fig. 8 SEM image of a microgear fabricated using the proposed method (exposure time of a single layer: 6s, layer thickness: $5 \mu\text{m}$, exposure intensity: 6.8 mW/cm^2)

3.3 집속빔을 이용한 가공과의 비교

DMD™를 이용한 마이크로광조형기술은 기존의 집속된 레이저빔을 이용한 스캐닝방식과 마이크로 피라미드를 제조하는 경우에 대하여 가공시간, 높이방향 형상정밀도면에서 다음과 같은 우수성을 가진다. 정량적 비교를 위해 바닥면의 크기가 $1000 \times 1000 \mu\text{m}$ 인 파라미드 구조물제조시 두 공정 간의 순수 가공시간과 높이 방향 형상정밀도를 비교하였다.

먼저 He-Cd(442 nm)레이저 집속빔을 이용한 스캐닝방식의 경우 약 12 층을 적층하여 가공할 때 순수 가공시간은 8 분 24 초이다.⁸ 반면 DMD™를 이용한 경우 이미지당 노광시간 10 초로 약 12 층을 적층할 때 4 분의 순수 가공시간이 소요된다. 또한 스캐닝방식의 경우 FA1260T에 대하여 최소 경화깊이가 $25 \mu\text{m}$ 이므로 그 이하의 정밀도로 가공이 곤란한 반면 DMD™를 이용할 경우 8 분 내에 $5 \mu\text{m}$ 의 낮은 경화 깊이로 약 20 층의 적층이 가능해 가공물의 높이방향 형상 정밀도가 더 우수한 장점이 있다.

결론적으로 DMD™를 이용한 마이크로 광조형법은 스캐닝방식에 비해 향상된 높이방향 형상정밀도를 가지는 미세 3 차원구조물을 2 배 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 3 차원구조물을 제조하기 위해 광폴리머의 점성을 제어하고, 광폴리머 표면과 광학계에 의해 형성된 이미지면이 $\pm 10 \mu\text{m}$ 의 범위 내에서 일치되게 하였다. DMD™를 이용한 마이크로광조형법은 스캐닝방식에 비해 가공 시간이 짧고, 다수의 형상을 한꺼번에 경화시킬 수 있어, 마이크로광조형기술의 생산성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임

(D00108).

참고문헌

1. Corbel, S., Allanic, A. L., Schaeffer, P. and Andre, J. C., "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. Zhang, X., Jiang, X. N. and Sun, C., "Microstereolithography of polymeric and ceramic microstructures," *Sensors and Actuators*, Vol. 77, pp. 149-156, 1999.
3. Kawata, S. and Sun, H. B., "Two-photon Photopolymerization as a tool for making micro-devices," *Applied Surface Science*, Vol. 208-209, pp. 153-158, 2003.
4. Maruo, S., Ikuta, K. and Korogi, H., "Submicron manipulation tools driven by light in a liquid," *Applied Physics Letters*, Vol. 82, No. 1, pp. 133-135, 2003.
5. Shoji, S. and Sun, H. B., "Photofabrication of woodpile three-dimensional photonic crystals using four-beam laser interference," *Applied Physics Letters*, Vol. 83, No. 4, pp. 608-610, 2003.
6. Koichi, S., Akihiro, K. and Riyoko, H., "Microfabrication of Integrated FMAS using Stereo Lithography," *Proc. IEEE MEMS '94*, pp. 136-141, 1994.
7. Hornbeck, L. J., "From cathode rays to digital micromirrors: A history of electronic projection display technology," *Texas Instruments Technical Journal (special DLP issue)*, Vol. 15, No. 3, pp. 7-46, 1998.
8. Jung, D. J., Kim, S. H. and Jeong, S. H., "Shape accuracy and curing characteristics of photopolymer during fabrication of three dimensional microstructures using microstereolithography," *Journal of KSPE*, Vol. 21, pp. 46-50, 2004.