

미세 3차원 구조물 제조를 위한 디지털 마이크로미러소자 응용 마이크로 광조형

주재영 · 김성훈 · 정성호
광주과학기술원 기전공학과

Digital Micromirror Device Based Microstereolithography for the Fabrication of 3D Microstructures

J. Y. Joo, S. H. Kim and S. H. Jeong
Department of Mechatronics, Gwangju Institute of Science and Technology

Abstract

In order to increase the productivity of conventional microstereolithography (MSL), digital micromirror device(DMDTM) based MSL is proposed and the feasibility of 3D microcomponents fabrication is demonstrated in two ways; free surface and constrained surface techniques. The clearness of optical images at the exposure plane was confirmed for the fabrication of an accurate 3D structure by controlling the dynamic viscosity of FA1260T and the shape accuracy of a structure fabricated with epoxy-based resin (Somos[®] 10120) was analyzed to determine the optimum curing conditions. After finding the appropriate process variables, the feasibility of multiple microstructures is then demonstrated. Due to the high productivity, MSL using DMDTM showed the potential to replace the existing focused laser beam MSL.

Key words : Digital micromirror device, microstereolithography, free surface technique, stereolithography, p-xylene

1. 서 론

마이크로 광조형법(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 제조할 수 있는 장점을 동시에 가진다¹⁾. 마이크로 광조형에 의한 마이크로 구조물 제조의 경우 우수한 치수 정밀도를 유지하면서 수 마이크로미터 표면조도로 비교적 매끄러운 표면을 가지는 미세구조물 제조가 가능하다는 장점이 있다. 이러한 마이크로 광조형으로 제조된 미세부품들의 예로는 마이크로미터 크기의 미세기어(Microgear), 미세터빈(Microturbine), 미세구조상(Microstatue) 등과 같은 다양한 형태의 삼차원 구구조물이 있다.²⁻⁶⁾

마이크로 광조형법은 원하는 형상의 구조물을 높이 방향으로 여러 층 분할하고 각 층의 단면형상 정보를 이용하여 광경화반응을 유도하는 방식에 따라 스캐닝방식과 마스크방식으로 나뉜다. 본 연구에서 제안한 디지털마이크로미러소자(Digital Micromirror Device, 이하 DMDTM)를 이용한 마이크로 광조형 방식은 마스크를 이용한 방식이다. 이는 최근까지 동적 마스크 패턴생성기로 활용된 liquid-crystal display(LCD)보다 한 픽셀의 크기도 작고, 제어가 빠르며 반사효율도 높다. 또한, 근자외선 영역에서 운용이 가능해, 다양한 상용 광경화성폴리머 사용에 대한 접근성이 용이하다⁷⁾. 또한, 이 방식은 여러 구조물들의 각 단면형상을 한번에 마스크패턴화하여 가공하므로 가공속도가 빠르다는 장점이 있고, 스캐닝방식에서 요구되는 레이저빔의 경로 설정이 필요 없어 복잡한 형상의 가공에서도 공정이 용이하다.

이에 따라 본 연구에서는, LCD를 동적마스크패턴 생성기로 활용한 마이크로 광조형

법의 제약을 극복하고, 스캐닝방식의 낮은 가공생산성을 증대시키고, 복잡한 형상을 더 낮은 형상오차로 가공하기 위해 DMDTM를 이용한 마이크로 광조형법을 제안하였다. 구체적으로는 CAD파일 및 단면형상 데이터를 DMDTM에 생성하여 동적 마스크 패턴(Dynamic Pattern Generator)을 생성하는 기술을 확립하고 이 패턴을 광폴리머 표면에서 선명한 이미지로 투영되게 하는 광학계를 구성하여, DMDTM를 이용한 마이크로 광조형시스템을 구축하였다. 또한, 광폴리머의 점성제어를 통해 정밀하고 안정된 경화조건을 확보하였으며, 최종적으로 최적의 경화조건하에서 미세 3차원 구조물을 제조함으로써 동적마스크 패턴형성기에 의한 마이크로 광조형기술을 정립하고자하였다.

2. 실험방법

2.1 동적마스크 패턴 생성원리

본 연구에서 동적마스크 패턴 생성기로 사용된 DMDTM는 자외선 영역에서 사용이 가능한 0.7 XGA DDR DMDTM 12이며 미국 Texas Instrument사에서 제작한 것이다. 이는 13.68 μ m \times 13.68 μ m의 마이크로미러들이 1024 \times 768개의 배열을 이루고 있어 전체적으로 14.008 \times 10.506mm의 크기를 가진다.

임의의 3차원 CAD 모델로부터 DMDTM에 원하는 패턴을 형성하기 위해서는 그 패턴이 DMDTM가 읽어 들일 수 있는 비트맵이미지로 입력하여야 한다. 이를 위하여 다음 예와 같은 절차로 단면의 형상정보를 비트맵이미지 파일로 변환 생성하였다. 이를 Fig. 1과 같이 베벨기어형상을 통해 설명하면, 먼저 3차원 베벨기어 형상을 CAD모델로 완성하고, 이를 Stereolithography 파일인 STL파일로 변환한다. 이 파일을 자체 개발한 단면 슬라이싱 프로그램으로 읽어 들여, 원하

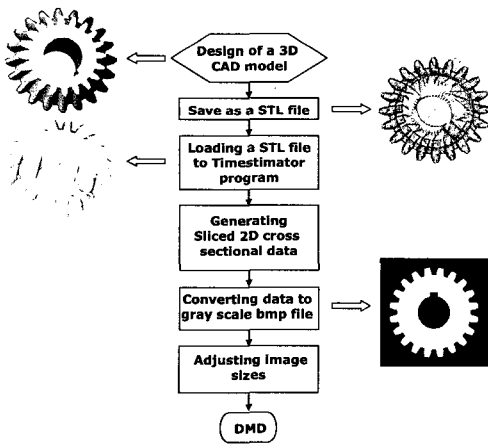


Fig. 1 Procedures for generating 2-D cross sectional bmp files from a bevel gear CAD model

는 방향으로 일정한 높이만큼 잘라내어 기어 각 단면의 형상정보를 추출한다. 이렇게 얻어진 각 2차원 단면형상정보는 다시 원하는 크기의 흑 혹은 백색의 단색 비트맵 이미지파일로 각각 변환되어져, 수십~수백개의 비트맵 이미지파일로 저장된다. 변환된 이미지들은 DMD™ 제어 프로그램 안에 입력되어 미리 설정된 일정한 시간 간격으로 DMD™ 상에 동적마스크 패턴이 형성되도록 한다.

2.2 자유수면법의 시스템 구성

Fig. 2는 자유수면법(Free Surface Method)

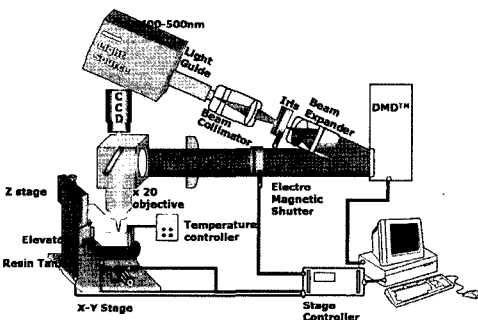


Fig. 2 Schematic diagram of the free surface method

실험 장치의 개략도이다. 실험 장치는 크게 광원 및 광학계 부분과 동적마스크패턴 생성부 및 모션제어부로 구성되어 있다. 광원으로는 자외선램프(250~600nm)에 광학필터(400~500nm)를 설치하여 440nm대의 광을 주 광원으로 사용하였다. 광원으로부터 DMD™에 입사되는 빛 중, 원하는 단면형상의 마스크패턴에 입사된 빛만이 선택적으로 반사되어 단면의 정보가 광학적 이미지로 변환된다. 광원으로부터 나와 DMD™ 입사되는 빛의 고른 광에너지밀도를 유도하고, 수차에 의한 이미지 변형을 최소화하여 광폴리머 표면에 선명하게 전달하기 위한 광학계를 구성하였다.

본 실험에서는 1μm정도의 정밀도로 위치를 제어하고, 높이방향으로 각 단면을 정밀한 위치에 경화시키기고 이를 적층시키기 위해 정밀 x-y-z 이송계과 이송제어장치로 Turbo UMAC(Delta Tau Co.)을 사용하였다. 또한, 이미지의 개폐를 제어할 수 있도록 전자기 셔터를 사용하였다.

2.3 광폴리머 FA1260T의 동점성제어를 통한 공정 개선

본 연구에 사용된 광폴리머 FA1260T(SK UCB Chemical Co.)는 410 ~ 450nm 대역에 광흡수율이 높은 Urethane Acrylate 계열의 상용 광폴리머이다.

자유수면법을 이용한 마이크로 광조형시 광폴리머의 동점성이 클 경우, 층간의 두께 제어가 곤란하고 높이 방향의 정밀도가 낮아진다. 그런데 FA1260T의 동점성을 Bohlin Instruments사의 Gemini Rheometer로 측정된 결과, 30℃에서 평균적으로 303.5 mPa·s로 물의 300배에 해당하는 높은 점성이어서 높이방향으로 좋은 형상 정밀도를 갖는 피라미드구조물 제조실험은 곤란하였다.

광폴리머의 점성을 제어하기 위하여 FA1260T에 사용 가능한 유기용매들에 대해 경화실

험 실시 후 가장 경화특성이 우수한 용매인 p-Xylene를 선정하였다. p-Xylene를 30.5°C의 FA1260T에 무게비로 30% 혼합하여, 동점성을 28.9 mPa·s까지 떨어뜨려 광폴리머의 점성을 제어하였다.

DMD™를 이용한 마이크로 광조형시 광폴리머의 표면에 가장 선명한 이미지가 투영될 때 정밀한 단면형상을 얻을 수가 있다. 그러므로 본 실험에서는 먼저 CCD로 관찰된 가장 선명한 이미지면을 기준면으로 정하고 광폴리머의 표면이 기준면으로부터 벗어날 때 CCD이미지의 선명도차이를 관찰하여 광폴리머의 표면과 광학적 이미지 사이의 적정 오차범위 $\pm 10\mu\text{m}$ 를 선정하였다.

다음으로는 이미지면과 광폴리머의 표면이 항상 $\pm 10\mu\text{m}$ 내의 범위 내에서 일치함을 검증하여 적정 노광면을 선정하기 위해 아래와 같은 실험을 수행하였다. 상온에서 챔버에 FA1260T (p-Xylene 30%)를 넣고 커버글라스를 덮은 후 DMD™ 화면상가로 150pixel, 폭 방향으로 각각 40, 60, 80 pixel (1 pixel=13.68 μm)인 직사각형 마스크를 생성하고 기준면에 대해 액면의 높이가 -30 μm 에서 +50 μm 까지 변할 때 10초 노광 후 경화되는 구조물들의 폭을 nanofocus사의 3차원 형상측정기(nanofocus $\mu\text{surf}^{\text{®}}$)로 측정하였다. 이때 광폴리머표면이 기준면에서 오차가 있을 경우, 이미지가 흐려지면서 선폭이 증가하여 실제 경화 선폭이 넓어지므로 경화된 구조물이 최소선폭을 갖는 조건을 찾아 가장 선명한 노광면으로 선정할 수 있을 것이다.

Fig. 3를 통해 알 수 있듯이, 실험에서 CCD를 통해 관찰된 깨끗한 이미지가 최소 선폭을 가지고, 기준면에 대해 광폴리머면이 아래로 내려갈수록 선폭의 변화가 작은 반면, 위로 올라갈수록 경화된 부분의 가장자리가 선명하지 않고 선폭의 변화도 큰 것으로 나타났다. 이것은 실제 흐려진 이미지의 흐려짐의 정도가 광폴리머면에서 상방향으

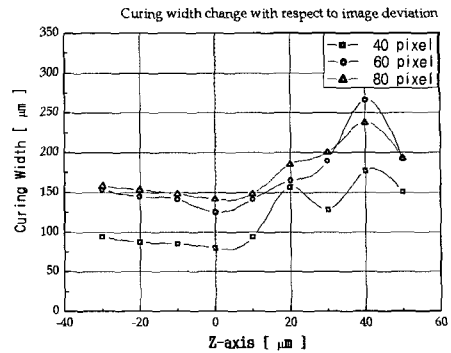


Fig. 3 Curing width change with respect to the elevation of resin surface

로 이동할수록 커지고 아래로 갈수록 적다는 것을 증명해주고 있다. 이는 CCD화면상에서도 관찰할 수 있었다. 따라서 이미지면의 오차가 -10 ~ 0 μm 범위 내에서 경화가 일어나도록 하는 것이 공정상 유리한 것으로 판명되었다.

2.4 강제수면법의 시스템 구성

자유수면법(Free Surface Method)은 광폴리머의 표면에서 광경화반응을 유도한다. 이때 광폴리머의 유동으로 인하여 경화구조물의 형상밀도가 저하된다. 반면, Fig. 4와 같이 강제수면법은 광폴리머의 바닥면에서 상방향으로 광마스크패턴이 입사되고 경화두께를 광폴리머의 바닥면과 경화층사이의 간격으로 강제로 제어함으로써 광폴리머 유동에 의한 형상정밀도 저하를 방지할 수 있다.

Fig. 5는 강제수면법 실험 장치의 개략도이다. 강제수면법의 모션제어부와 광학계는

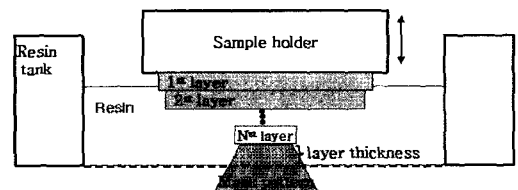


Fig. 4 Principle of the constrained surface method

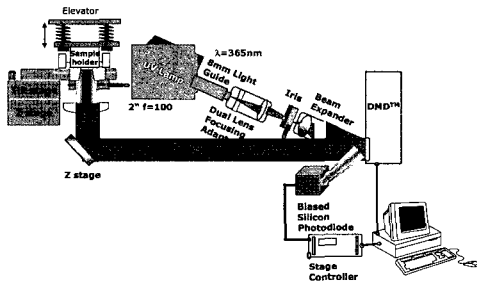


Fig. 5 Schematic diagram of the constrained surface method

자유수면법과 유사하다. 반면, 주광원은 365nm 영역을 사용하였고, 광폴리머를 담은 레진 탱크와 엘리베이터의 구조가 광폴리머의 두께를 강제적으로 제어할 수 있게 고안되었다. 이때 경화층은 레진탱크 바닥면(석영판)으로부터 쉽게 떨어져 적층된 구조물을 형성해야한다. 이를 위하여 점착력을 저하시키기 위하여 이형제 Frekote 4368을 사용하였다.

2.5 광폴리머 Somos[®] 10120의 동점성 제어를 통한 형상정밀도 개선

강제수면법에서 사용된 광폴리머는 Epoxy 계열의 DSM사의 Somos[®] 10120로 365nm에서 광흡수율이 매우 높다. Somos 10120은 Urethane Acrylate계열보다 경화깊이가 낮고, 30℃에서의 점성이 130mPa·s (FA1260 T의 0.4배)로 우수한 특성을 지닌다.

강제수면법에서는 경화된 구조물의 점착성과 레진탱크의 바닥면과 경화층간의 간격이 10μm로 좁아 경화시 대기압의 1-2배에 해당하는 높은 압력발생으로 인한 구조물의 변형이 실험적으로 관찰되었다. 따라서 점착성을 떨어뜨리고 점성저하를 통한 형상정밀도를 개선하고자 모노머(Monomer)형태의 점성저하 혼합물, Tetrahydrofurfuryl acrylate (THFA), Iobornyl acrylate (IBXA),

유기용매 p-Xylene를 다양한 무게비로 혼합하여 10층의 피라미드 구조물들을 제조한 결과 p-Xylene 30%에서 가장 우수한 피라미드 경화물을 얻을 수 있었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 자유수면법을 이용한 3차원 구조물 제조

자유수면법을 이용한 3차원 구조물 제조에서는 p-Xylene 30%, 온도 30± 1℃를 최적 공정조건으로 설정하고 원뿔, 마이크로 기어 형상을 제조하였다.

Fig. 6은 층간간격 10μm, 총 100개의 단면으로 30분 동안 제조된 원뿔형상이다. 전체적으로 경화층간에 약간의 단차가 있으나 비교적 균일한 두께로 경화가 이루어졌음을 보여준다. 다음으로는 각 단면층간 간격을 줄여 더 매끄러운 표면을 얻고 경화 깊이를 줄이기 위해서 6초의 노광시간에 층간간격을 5μm로 하여 Fig. 7과 같은 100층의 마이크로기어를 제조하였다. Fig. 6과 비교하였을 때 전체적으로 표면형상이 더 부드럽고 우수하게 제조되었음을 알 수 있다.

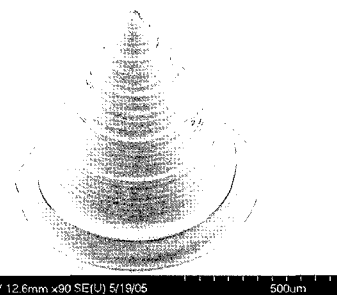


Fig. 6 SEM image of a microcone fabricated using the free surface method (exposure time of a single layer: layers 1-70(10s), 71-95(12s), 96-100(20s), layer thickness: 10μm)

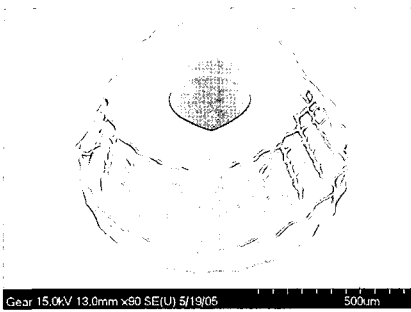


Fig. 7 SEM image of a microgear fabricated using the free surface method (exposure time of a single layer: 6s, layer thickness: 5 μ m)

3.2 강제수면법을 이용한 3차원 구조물 제조

최적공정조건으로 설정하고 원뿔, 복수구조물을 제조하였다. Fig. 8은 10 μ m의 층간간격으로 100층의 원뿔형상을 제조한 것인데, 그림의 오른쪽에서 보는 것과 같이 Fig. 6과 비교해 볼 때 강제수면법을 이용한 경우 자유수면법보다 표면의 형상정밀도는 확연히 개선되었음을 알 수 있다. 반면, 층수가 많아질수록 높이 방향의 정밀도는 저하되는 것으로 판명되었다. Fig. 9은 경화층수를 50층으로 줄이고, 생산성을 증대시키기 위하여 피라미드, 반구, 블레이드기어, 원뿔의 각 단면들을 하나의 마스크패턴에 통합하고 한번의 노광으로 이들의 단면을 동시에 경화시켰다. 이는 DMDTM를 이용한 마

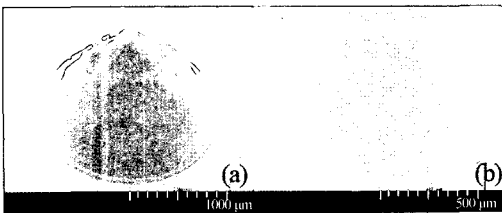


Fig. 8 SEM image of a cone fabricated using the constrained surface method (exposure time of a single layer: 10s, layer thickness 10 μ m)

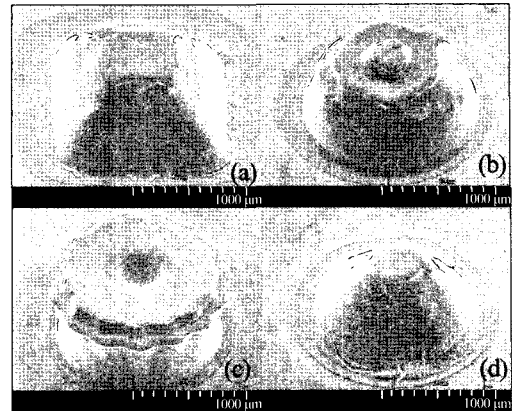


Fig. 9 SEM images of multiple structures fabricated simultaneously using the constrained surface method: a) pyramid, b) hemisphere, c) blade gear, d) cone (exposure of a single layer: 10s, layer thickness 10 μ m)

이크로 광조형법이 장점인 복수구조물 제조의 예를 증명해 주고 있다.

3.3 집속빔을 이용한 가공과의 비교

DMDTM를 이용한 마이크로 광조형기술은 기존의 집속된 레이저빔을 이용한 스캐닝 방식보다 가공생산성을 획기적으로 높일 수 있었다. 이는 선행 연구된 스캐닝 방식의 파라미드구조물(1000 \times 1000 μ m) 가공시간과 DMDTM를 이용한 마이크로 광조형의 가공시간 비교에서 잘 나타난다. 먼저 He-Cd(442nm)레이저 집속빔을 이용한 스캐닝 방식의 경우 출력 2.5 mW,이송속도 100 μ m/s, 층간간격 25 μ m으로 약 12층을 적층하여 가공할 때 순수 가공시간은 8분 24초이다⁸⁾. 반면 DMDTM를 이용한 경우 약 0.1mW의 출력, 층간간격 25 μ m, 이미지당 노광시간 10초로 약 12층을 적층할 때 4분의 순수 가공시간이 소요된다. 결론적으로 DMDTM를 이용한 마이크로 광조형법은 스캐닝 방식에 비해 더 낮은 출력으로 미세 3차원구조물을 2배 이상 빠르게 제조할 수 있다는 것이다.

또한, DMD™를 이용한 마이크로 광조형은 다양한 형상의 구조물을 한꺼번에 경화시킬 수 있어 이미지에 입력된 구조물의 개수에 비례하여 가공생산성을 높일 수 있다. 이는 다품종소량 생산에 적용 가능성이 높다하겠다.

4. 결 론

본 연구에서는, 마이크로 광조형법을 이용한 미세 3차원구조물 저조시 스캐닝방식의 낮은 가공생산성을 증대시키고, 복잡한 형상의 가공의 용이성을 높이기 위하여 DMD™를 동적마스크 패턴생성기로 이용한 마이크로 광조형법을 제안하였다. 이를 위하여 임의의 3차원 CAD 모델에서 DMD™에 동적 마스크 패턴을 생성하는 기술을 확립하였으며, 광폴리머의 점성을 제어를 통하여 경화된 구조물의 높이 방향 형상정밀도를 높였다. 그러나 가공된 구조물의 형상이 실제 형상을 완전히 재생하기 위해서는 폴리머의 점착력 강하, 경화깊이 제어 등의 더 많은 연구가 필요한 것으로 나타났다.

DMD™를 이용한 마이크로 광조형법은 스캐닝방식에 비해 가공시간이 짧고, 복잡한 형상을 한번에 경화시킬 수 있어, 마이크로 광조형기술의 생산성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (D00108).

참 고 문 헌

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, Akihiro Koga, and Riyoko Haneda, "Microfabrication of Integrated FMAS using Stereo Lithography", *Proc. IEEE MEMS '94*, pp. 136-141, 1994

7. L. J. Hornbeck, "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. Dae Jun Jung, Sung Hoon Kim, Sung Ho Jeong, "Shape accuracy and curing characteristics of photopolymer during fabrication of three dimensional micro structures using micro-stereolithography", *Journal of KSPE*, vol 21, pp 46-50, 2004

