

Digital Micromirror Device 를 이용한 3 차원 마이크로구조물 제작

최재원*, 하영명*, 이석희#, 최경현**

Fabrication of 3-Dimensional Microstructures using Digital Micromirror Device

Jae Won Choi*, Young Myoung Ha*, Seok Hee Lee# and Kyung Hyun Choi**

ABSTRACT

MEMS and LIGA technologies have been used for fabricating microstructures, but their shape is not 3D because of difficulty for preparation of many masks. To fabricate 3D microstructures, microstereolithography technology based on Digital Micromirror Device(DMD™) was introduced. It has no need of masks and is capable of fabricating high aspect ratio microstructures. In this technology, STL file is the standard format as the same of conventional rapid prototyping system, and 3D parts are fabricated by layer-by-layer according to 2D section sliced from STL file. The UV light source is illuminated to DMD which makes bitmap images of 2D section, and they are transferred and focused on resin surface. In this paper, we addressed optical design of microstereolithography system in consideration of light path according to DMD operation and image-forming on the resin surface using optical design program. To verify the performance of implemented microstereolithography system, 3D microstructures with complexity and high aspect ratio were fabricated.

Key Words : Microstereolithography(마이크로광조형), Digital Micromirror Device(디지털 마이크로미러 장치, DMD), Microstructure(마이크로구조물), UV curing(자외선 경화)

1. 서론

최근에 마이크로 기계 부품, 정보 및 통신 기기, 의료 기기 등과 같은 초정밀 부품에 대한 수요가 날로 증가 하고 있으며, 기존의 MEMS, LIGA 와 같은 기술들이 오랜 기간 동안 이러한 요구를 충족 해오고 있다. 그러나 이러한 기술들은 고세장비를 가진 복잡한 3 차원 부품 혹은 기기들을 제작하는

데는 기술적인 한계를 가지고 있다. 마이크로광조형 기술은 MEMS, LIGA 기술과 비교해서 가공할 수 있는 재료가 한정적임에도 불구하고 이러한 한계를 극복하기 위해서 연구 개발되어지고 있다.

마이크로광조형 기술은 기존의 광조형기술과 비교하여 가공 방식, 재료, 표준 파일 포맷 등에서 거의 유사하다. 모델링 형상으로부터 3 각형 면으로 이루어진 STL 파일로 변환하여, 적층 두께만큼

접수일: 2006 년 3 월 24 일; 게재승인일: 2006 년 9 월 29 일

* 부산대학교 대학원 지능기계공학과

교신저자: 부산대학교 기계공학부 및 기계기술연구소

E-mail schlee@pusan.ac.kr Tel. (051) 510-2327

** 제주대학교 메카트로닉스공학과

슬라이딩하여 여러 개의 단면 데이터를 생성한다. 이렇게 생성된 단면데이터를 바탕으로 가공 경로가 생성되며, 새로운 층을 가공하기 위하여 기가공된 층을 계속적으로 적층함으로써 최종적으로 원하는 형상을 만들게 된다.

마이크로광조형 기술은 가공 방식에 따라서 크게 주사 방식(scanning method)과 전사 방식(projection method)으로 구분이 된다. Fig. 1 과 같은 주사 방식에서는 슬라이딩 단면을 따라서 레이저 빔의 위치가 이동함으로써 한층이 경화가 되며, 이를 반복적으로 적층시킴으로써 원하는 형상을 만들게 된다. 1993 년에 IH 공정(Integrated Harden Polymer Process)라고 불리는 마이크로광조형 기술이 처음 개발되었으며, 이 기술은 현재까지도 더 작고 정밀한 마이크로구조물을 가공하기 위하여 계속적으로 개발되고 있다.¹⁻⁵ 이 시스템에서 가공된 형상은 수평 및 수직 방향으로 수 μm 정도의 정밀도를 가진다. Maruo⁶ 는 빔의 초점을 이광자 흡수(two-photon absorption)를 이용하여 더욱 작게 만들어 수백 nm의 정밀도를 가진 수 μm 크기의 형상을 제작하였다. 이러한 주사 방식의 마이크로광조형 시스템은 전세계적으로 여러 연구자들에 의해서 개발되었으며, 다양한 마이크로구조물을 제작하였으며, 이들의 경화특성에 대해서 연구를 수행하였다.⁷⁻¹⁴

Fig. 2 와 같은 전사 방식의 마이크로광조형 장치는 주사 방식과 같이 적층을 통하여 최종 형상이 얻어지지만, 각 층의 가공 방식에 있어서 차이점이 있다. 즉, 마스크를 통과하며 형성된 광 패턴을 이용하여 한 층을 한꺼번에 가공함으로써, 더욱 빠른 시간에 마이크로구조물을 제작할 수 있으며, 특히 동적 마스크(dynamic mask)를 이용하여 마스크의 제작없이 다양한 모양의 패턴을 생성시킬 수 있는 장점이 있다. 이러한 동적 마스크에는 LCD(Liquid Crystal Display)와 DMD(Digital Micromirror Device)가 있다. 1990 년대 중반에 Bertsch¹⁵ 가 LCD 를 이용하여 처음으로 전사 방식의 마이크로광조형 시스템을 개발하였다. 전기 신호를 이용하여 슬라이딩 단면 형상에 대한 비트맵 정보가 LCD 에 표시가 되어 선택적으로 빛이 투과가 된다. 이러한 전사 방식 마이크로광조형 시스템은 지속적으로 개발이 되어 현재 수평 및 수직 방향에 대하여 수 μm 의 정밀도를 가진 다양한 마이크로구조물이 제작되고 있다.¹⁶⁻¹⁸ Bertsch¹⁹ 에 의해

서 LCD 의 단점인 낮은 명암비(contrast) 및 투과율(transmittance)을 개선하기 위하여 DMD 가 처음으로 이용되었다. DMD 는 수십만 개의 마이크로미러가 각각 독립적으로 구동이 되어 원하는 형상에 대한 광만 선택적으로 반사시킬 수 있는 특징이 있으며, 높은 명암비로 인하여 가공품의 정밀도가 개선되었다. 전세계적으로 DMD 를 이용한 유사한 장치가 개발이 되어 수 μm 의 정밀도를 가진 마이크로 구조물이 제작되고 있다.²⁰⁻²⁴ 지금까지 보고된 논문에서는 주로 마이크로구조물의 가공에 초점을 두었으며, 마이크로광조형 장치의 광학적 설계 및 검증에는 미흡한 면이 있다. 특히, 동적 마스크의 하나인 DMD 를 이용하는 방식에서는 DMD 로 입사하는 조명부와 DMD 로부터 형성된 패턴된 광의 결상부로 이루어져 있으며, 이는 수차, 회절 등의 광학적 결함에 대하여 다루어져야 하며, 또한 실제 가공을 통하여 검증이 이루어져야 한다.

본 논문에서는 DMD 의 구동과 수지 표면의 이미지 형성에 따른 광의 경로를 고려한 마이크로광조형 장치를 개발한다. 광학적인 설계에 있어서 DMD 표면에 비교적 균일한 광원이 입사되게 하며, DMD 에서 수직으로 반사가 되게 하기 위한 조명 부분(illumination part)과 재료 표면에 패턴된 이미지를 광학적 결함을 고려하여 집광시키기 위한 결상 부분(image-forming part)으로 이루어진다. 이러한 조명부 및 결상부에 대한 설계를 검증하기 위하여, 빔 분석기(beam analysis)를 이용하여 균일한 광 강도(light intensity)가 조사되는지를 측정하며, 2 차원 패턴을 가공하여 구성 요소들의 정렬 상태 및 결상 정도를 분석한다. 최종적으로 복잡하고 높은 세장비를 가진 다양한 3 차원 구조물을 제작함으로써, 개발된 마이크로광조형 시스템의 성능을 검증한다.

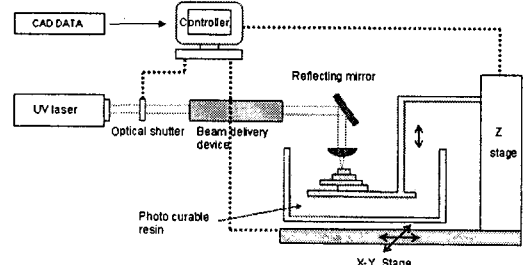


Fig. 1 Schematic of scanning microstereolithography

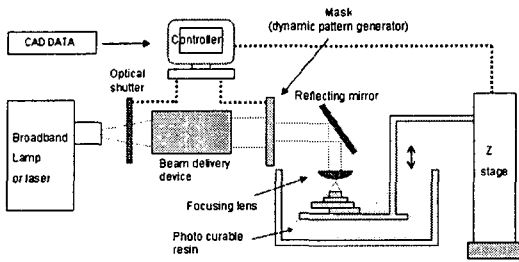


Fig. 2 Schematic of projection microstereolithography

2. 동적 이미지 전사 마이크로광조형 시스템

2.1 구성 요소

본 연구에서 제안된 마이크로광조형 시스템은 Fig. 3 과 같으며, 이는 조명부, 동적 패턴 생성기, 결상부와 재료를 포함한 Z 축 스테이지로 구성된다. 조명부는 광원(light source), 특정 파장대의 광을 걸러주는 필터(filter), 광의 단속 역할을 하는 셔터(shutter), 가우시안 분포의 광에너지를 균일한 광에너지로 만들기 위한 콜리메이팅 렌즈(collimating lens)와 DMD 에 적절한 각도로 조명되게 하기 위한 반사경(reflecting mirror)으로 이루어져 있다. 광원은 200W 용량을 가진 수은 램프(Mercury lamp)를 이용하였으며, 이 광은 365nm 의 파장대로 필터를 통해 걸러지게 된다. 또한 셔터는 재료에 대한 임계경화에너지 이상을 노출시키기 위하여 계산된 시간 동안 열리게 되며, 다음 층을 가공하기 위한 준비시간 동안 닫히게 된다. 광원으로부터 나온 광은 광축의 반경 방향에 대하여 그 단면의 크기가 점점 증가하는 형태를 가지기 때문에 콜리메이팅 렌즈를 이용하여 평행광을 만들어준다. 최종적으로 평행광이 된 광은 반사경을 이용하여 DMD 표면에 입사하게 된다. 이 때, DMD 의 각 미러의 구동 방향을 고려하여 반사경의 위치 및 각도를 조절하여 준다. Fig. 3 에서 동적 패턴 형성기인 DMD(부품번호: 1076-714c, 제조사 : Texas Instruments, Inc.)는 전사 방식의 마이크로광조형 시스템에서는 마스크의 제작없이 다양한 형태의 패턴을 만들 수가 있어 핵심적인 부분이다. Fig. 1 의 일반적인 주사 방식의 마이크로광조형 시스템에서 주사 시간에 해당하는 가공 시간이 불필요하게 되어 가공 시간을 현저하게 줄일 수 있다. Fig. 4 는 DMD 와 각각의 미러가 독립적으로 구동되는 것을 나타낸다.

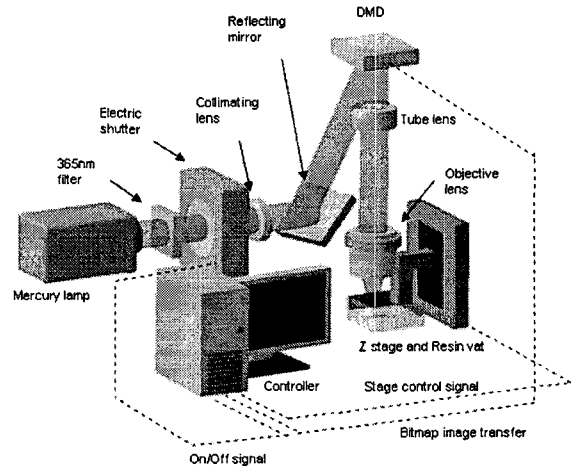


Fig. 3 Schematic of suggested microstereolithography system

DMD 는 가로 1024 개, 세로 768 개의 XVGA 급의 마이크로 미러로 구성되어 있으며, 각 미러의 피치는 $13.68\mu\text{m}$ 이다. 마이크로미러 어레이(array)의 전체 크기는 가로 14.008mm, 세로 10.506mm 로 이루어져 있다. 이렇게 수십만 개의 마이크로 크기의 거울로 이루어져 있는 DMD 는 각각의 미러가 Fig. 5 와 같이 전기 신호에 의해서 $\pm 12^\circ$ 틸트됨으로써 선택적으로 광을 반사하게 된다. 즉, 가공하고자 하는 단면을 비트맵(bitmap) 이미지로 만들어 DMD 에 전송하면 검은 부분일 경우 $+12^\circ$, 흰 부분일 경우 -12° 로 독립적으로 각 미러를 틸트함으로써 입사된 광을 비트맵 이미지에 맞는 패턴으로 만들 수 있다.

DMD 로부터 반사되는 광을 점광원이라고 가정을 하고 대물렌즈로 입사하기 이전에 평행광으로 만들어주기 위하여 튜브 렌즈(tube lens)를 통과하게 된다. 튜브 렌즈는 최종 가공될 구조물의 배율에 따라서 적절한 초점 거리를 가진 렌즈로 선정되어진다. 이렇게 패턴된 이미지의 평행광은 대물렌즈를 통과하여 최종적으로 수지 표면에 결상된다. 여기에서 사용된 대물렌즈는 수차(aberration) 및 회절(diffraction)의 영향을 적게 하여 해상도를 높이기 위하여 개구수(N.A. : Numerical Aperture) 0.45, 초점 거리 10mm 의 UV 용 대물렌즈를 이용하였다.

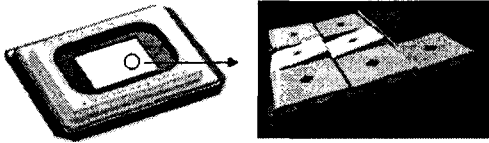


Fig. 4 Digital Micromirror Device

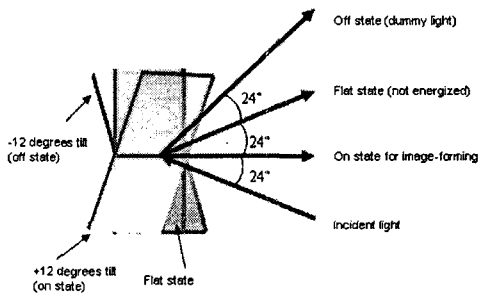


Fig. 5 Reflected light path according to mirror tilt

이렇게 결상이 되어 가공이 된 층은 다음 층을 가공하기 위하여 새로운 수지가 덮여져야 한다. 이를 위하여 Z 축 스테이지가 필요하며, 빠른 수지의 도포를 위하여 적층 두께보다 훨씬 큰 양으로 하강한 후, 다시 적층 두께만큼 상승하게 한다. 본 연구에 사용된 스테이지에 대한 사양은 Table 1 에 나타나있다.

이러한 모든 구성요소들은 광경로와 결상을 고려하여 위치가 계산되어지며 정렬되어져야 한다. 다음절에 이를 위한 광학 설계를 설명하기로 한다.

Table 1 Specification of Z stage

Model	Aerotech ALS130-050
Travel Range	50mm
Resolution	0.1 μ m
Repeatability	\pm 0.1 μ m
Position Accuracy	\pm 0.3 μ m
Maximum Speed	300mm/s

2.2 마이크로구조물의 가공 절차

마이크로광조형 장치에서 마이크로구조물의 가공은 기존의 SLA 장치와 유사한 흐름을 가진다. 우선 가공하고자 하는 형상을 3 차원으로 모델링 한 후, 삼각형 면으로 이루어진 STL 파일로 변환 한다. 이렇게 변환된 STL 파일로부터 적층하고자 하는 두께만큼 슬라이싱하여 폐곡선으로 이루어진 단면 데이터를 생성한다. 본 연구에서는 가공 경로로써 단면 데이터에 해당하는 비트맵 이미지를 생성한다. 이때, 수지 표면에서는 실제 상인 DMD 의 이미지와 상하좌우가 대칭인 형상이 결상되므로, 이를 고려하여 비트맵 이미지를 생성한다. 이렇게 각 단면에 대한 비트맵 이미지가 모두 생성 이 되면 실제 가공이 이루어진다. Z 축 스테이지는 이미 가공된 층 위에 새로운 수지층이 형성되게 하기 위해서 하강 및 상승하여 적층 두께만큼의 높이를 형성한다. 새로운 수지층의 형성이 완료되면 DMD 에는 현재의 층에 해당되는 비트맵 단면 이미지가 전송이 되며, 셔터가 경화 에너지에 해

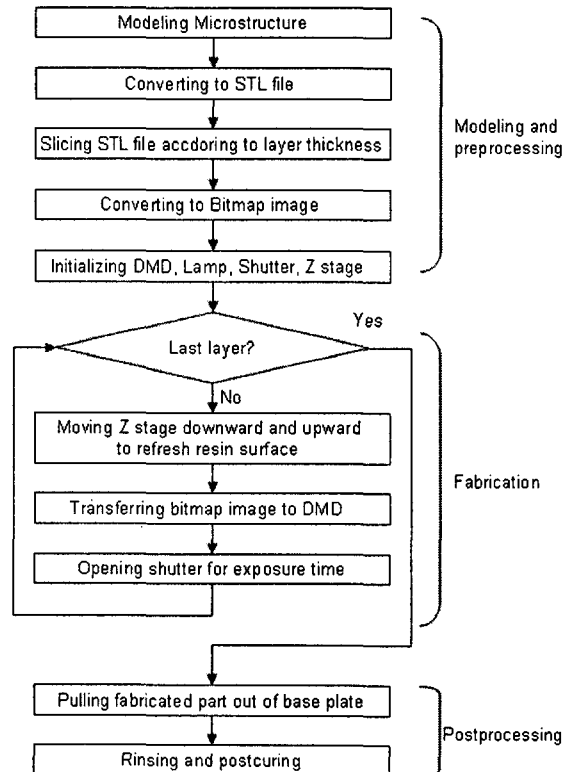


Fig. 6 Overall processes in microstereolithography

당하는 시간 동안 열리게 되어 가공이 이루어진다. 이러한 과정을 슬라이싱 된 층에 대해서 수행함으로써 최종 형상이 얻어진다. Fig. 6 은 지금까지 설명한 전체 흐름도를 나타낸다.

3. 마이크로광조형 시스템을 위한 광학 설계

3.1 조명부(Illumination part)

조명부는 광원, 필터, 셔터, 볼록렌즈, 반사경과 DMD 로 이루어져있다. 조명부에서는 DMD 에 입사하는 광을 평행광으로 만들고 DMD 로부터 반사되는 광 패턴의 주광선(principle ray)이 튜브렌즈와 대물렌즈의 광축과 일치하게 정렬하여 수지 표면에 수직으로 입사하게 하여야 한다. 이를 위해 조명부를 이루고 있는 구성 요소들에 대해서 각각의 위치를 주광선과 광축이 일치하게 정렬하는 것이 필요하다. DMD 의 각 미러들은 앞에서 언급하였듯이, $\pm 12^\circ$ 로 틸트됨으로써 입사광을 선택적으로 반사시킨다. 따라서 이를 고려하여 반사경 이전의 광학 부품들의 광축과 주광선이 일치하게 해주며, 평행광을 만들기 위해서 Fig. 7 과 같이 볼록렌즈의

위치를 광원 앞에서 생기는 첫 번째 초점 위치에 볼록 렌즈의 초점 거리($f_c=70\text{mm}$)가 일치하게 위치 시킴으로써 평행광을 만들 수 있다. 또한 반사경의 위치는 DMD 와 반사경과의 높이(z_{rd}) 및 DMD 미러 틸트에 따른 입사광과 반사광 사이의 각도(θ_i), 틸트 축과 Y 축이 이루는 각도(θ_a)를 고려하여 정해야 한다.

Fig. 7로부터 DMD 를 중심으로 반사경의 위치를 구할 수 있다. 튜브 렌즈의 위치(z_{dt}) 및 대물 렌즈의 위치(z_{do})는 다음절에서 구하기로 한다. DMD 의 중심에서 반사경까지의 거리 x_{rd} , y_{rd} 는 반사경에서 DMD 까지 광이 이동한 거리와 DMD 에 입사하는 광의 각도, 즉 z_{rd} , θ_i , θ_a 를 이용하여 식 (1), (2)와 같이 구할 수 있다.

$$x_{rd} = z_{rd} \cdot \tan \theta_i \cdot \cos \theta_a \quad (1)$$

$$y_{rd} = z_{rd} \cdot \tan \theta_i \cdot \sin \theta_a \quad (2)$$

본 연구에서는 반사경과 다른 광학기들간의 간섭을 피하기 위하여 z_{rd} 값을 200mm 로 설정하였으며, DMD 의 미러 틸트 각도가 12° 이므로 입사광과 반사광 사이의 각도는 24° 가 된다. 또한 정상각형의 각각의 미러는 각 미러의 대각선을 중심으로 틸트되기 때문에 Y 축과 틸트 축 사이의 각도는 45° 가 된다. 이를 식 (1), (2)에 대입하여 미러의 위치(x_{rd} , y_{rd})를 구하면 각각 62.96mm, 62.96mm 가 된다.

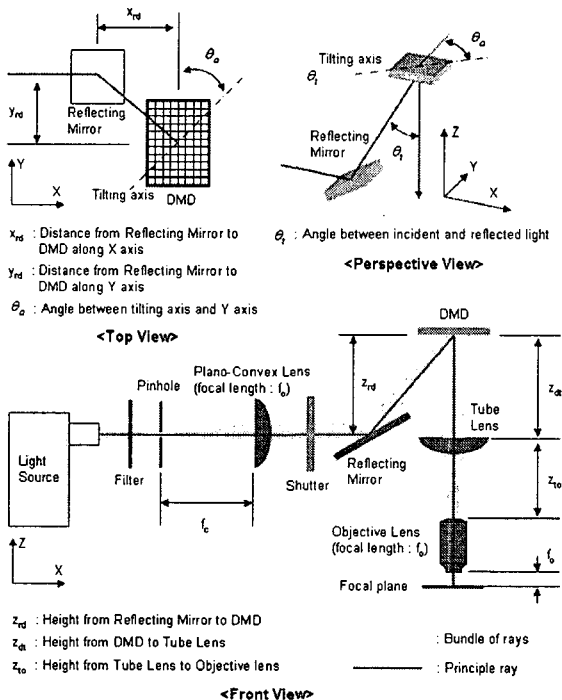


Fig. 7 Component positions according to light path

3.2 결상부(Image-forming part)

결상부에서는 DMD 미러로부터 반사된 광을 수지 표면에 집광시키기 위하여 평행광을 만들기 위한 튜브 렌즈와 집광을 위한 대물렌즈로 구성된다. DMD 로부터 반사되는 광은 점광원의 집합으로 가정하고, 하나의 점광원으로부터 평행광을 만들고 집광하여 이미지를 형성하는 것에 대하여 광학 설계 프로그램인 ZEMAX 를 이용하여 결상 시뮬레이션을 통하여 최적화를 수행하며 회절 효과에 대한 분석을 한다. 점광원으로부터 렌즈를 통한 결상은 항상 수차에 의해서 왜곡이 발생하며, 회절의 영향으로 해상도에 한계를 가지게 된다. 본 논문에서는 UV 영역의 광이 투과되며 초점 거리(f_o)가 10mm 인 대물 렌즈를 이용하였으며, 이는 모든 수차를 제거하며, 근축광 정리(paraxial

formulas)를 따른다고 가정을 하고 회절에 의한 영향만을 검토한다. 본 논문에서 사용된 튜브렌즈는 초점 거리 120mm 를 가진 아크로맷 더블릿 (achromat doublet)을 이용하였다. Fig. 8 은 DMD 에서의 세 위치 (0,0), (0,7), (5,7)에 점광원이 있다고 가정을 하고 각 점광원에 대한 결상 이미지에 대해서 최적화된 튜브렌즈의 배치를 보여주며, Fig. 9 는 각 점광원에 의한 결상 이미지가 회절 한계 이내에 있다는 것을 보여주고 있다. DMD 의 크기는 가로 약 14.0mm, 세로 약 10.5mm 의 크기를 가지기 때문에 DMD 중심에서부터 (5,7)의 위치는 DMD 의 가장자리부분이라고 할 수 있으며, 따라서 DMD 전 부분에 대해서 회절 한계 이내에서 결상이 됨을 알 수 있다. ZEMAX 를 이용한 최적화된 튜브렌즈의 위치(z_{dt})는 115.2mm 이고, 대물렌즈의 위치(z_{to})는 191mm 이다. 따라서 설계된 결상 시스템의 배율은 렌즈 공식 z_{dt}/f_o 에 의해서 11.5 배가 된다.

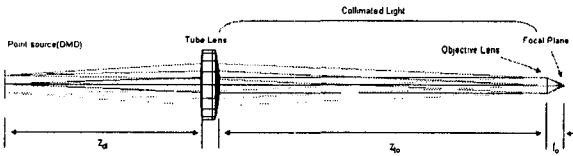


Fig. 8 Optimized layout using ZEMAX

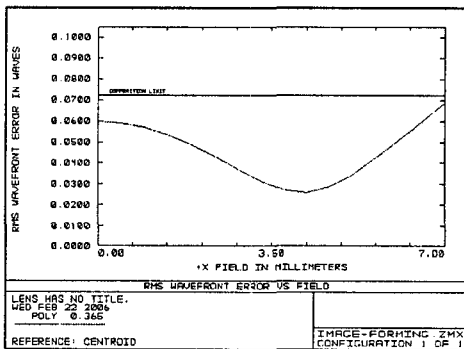


Fig. 9 RMS wavefront error

3.3 빔 분석기를 통한 설계 검증

조명부의 설계를 검증하기 위하여 DMD 에 임의의 패턴을 형성하고 결상 렌즈를 설치한 후 빔 분석기(BEAMSTAT FX66, Ophir Optonics, Inc.)에 의해 결상된 이미지를 분석한다. 이를 위하여 DMD 에는 직경 8mm 인 원형의 패턴을 형성시키고 식 (3), (4)의 렌즈 공식을 이용하여 Fig. 10 과 같이

배율(m) 1/2 인 렌즈계를 구성하여 빔 분석기에 직경 4mm 의 이미지를 형성한다. 결상 렌즈는 초점 거리가 70mm 이며, 렌즈 공식에 의해서 렌즈로부터 패턴 거리(s) 210mm 에 DMD 를 설치하고, 이미지 거리(s') 105mm 인 거리에 빔 분석기를 설치한 후 측정한다.

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'} \quad (3)$$

$$m = \frac{s'}{s} = \frac{h'}{h} \quad (4)$$

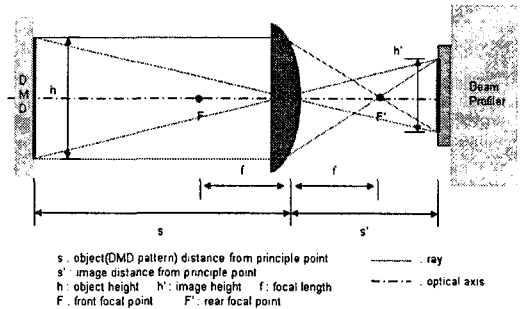


Fig. 10 Lens system for measuring beam profile

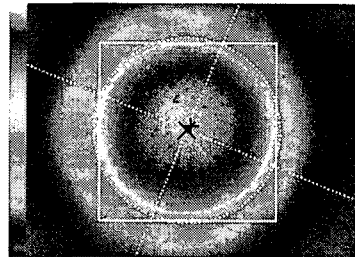


Fig. 11 2D profile

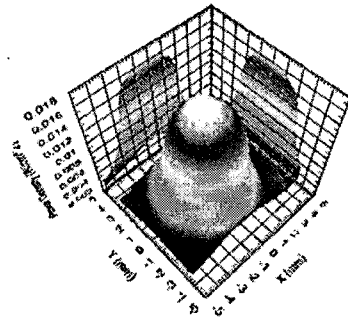


Fig. 12 3D profile

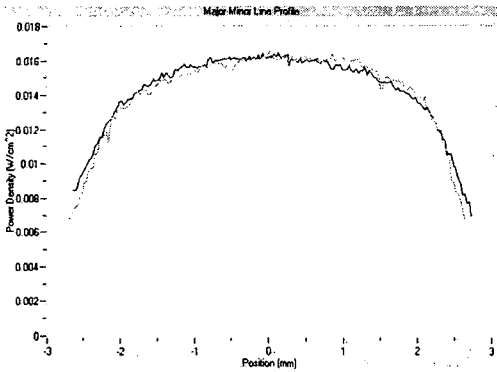


Fig. 13 Cross section profile of center line

Fig. 11 은 Fig. 10 의 광학계로부터 결상된 이미지에 대한 2D 프로파일을 나타내며, Fig. 12 는 3D 프로파일을 나타낸다. Fig. 13 은 2D 프로파일에서 중심을 지나는 서로 직교하는 두 직선에 해당하는 단면 프로파일을 나타내고 있다. Fig. 13 에서 실제 측정된 이미지의 크기가 4mm 보다 더 큰 이유는 렌즈 수차, 회절과 같은 광학적 결함과 빔 분석기의 측정 위치의 오류로 인하여 발생한 것으로 유추된다. Table 2 는 빔 분석기를 통하여 얻은 측정값을 나타내며, 평균 광강도 14.7mW/cm^2 에 대하여 표준편차가 1.12mW/cm^2 로써 비교적 균일한 광강도를 가짐을 알 수 있다. 또한 빔의 진원도가 0.992 로써 정렬이 잘 되었음을 알 수 있다.

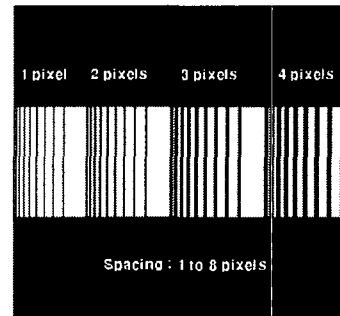
Table 2 Measuring data using beam profiler

Total power(mW)	3.08
Average intensity(mW/cm ²)	14.7
Standard deviation(mW/cm ²)	1.12
Ellipticity	0.992

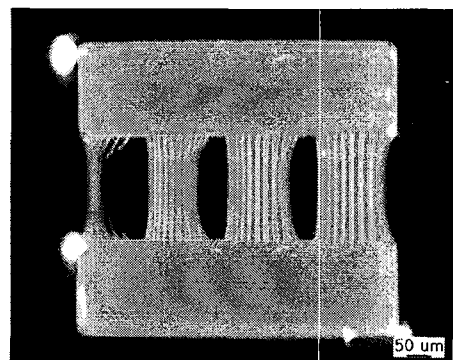
3.4 2 차원 패턴 가공을 통한 해상도 및 설계 검증

개발된 마이크로광조형 장치에서 가공 가능한 해상도를 얻기 위하여 Fig. 14 와 같이 패턴을 가공하였다. Fig. 14(a)는 2D 패턴 이미지를 나타낸다. 이는 1 pixel 에서 4 pixel 의 선폭을 가진 라인으로 이루어져 있으며, 모두 왼쪽에서 오른쪽으로 위치하면서, 라인들 간의 간격이 1 pixel 씩 증가함을

보여준다. Fig. 14(b)는 가공된 2D 패턴을 나타내며, 1 pixel 에서 4 pixel 의 선폭을 가진 라인들이 모두 가공됨을 알 수 있다. 그러나, 가공 후 IPA 를 이용한 세척 도중 일부 형상의 왜곡이 발생하였으며, 특히 1 pixel 의 라인에 대해서는 일부가 씻겨 떨어져 나갔다. 본 실험으로부터 이웃하는 두 라인을 구분할 수 있는 최소 간격은 3 pixel 로써 이는 실제 크기 $5\mu\text{m}$ 정도이며, 이는 가공 해상도가 될 것이다.



(a) 2D pattern image



(b) Fabricated pattern

Fig. 14 2D pattern for fabrication resolution

또한 조명부 및 결상부에 대한 정렬 및 집광에 대한 영향을 분석하기 위하여 2 차원 패턴을 가공한다. Fig. 15 는 그리드(grid) 형상에 대해서 현미경(LEICA DFC 280)에서 찍은 사진이며, Fig. 16 은 본 연구실의 영문명에 대한 측정 사진이다. 그리드 형상의 경우 약 $10\mu\text{m}$ 의 선폭을 가지며, 영문명에 대해서는 약 $20\mu\text{m}$ 의 선폭을 가진다. 이를 통해 수 μm 의 해상도를 가지는 이미지를 결상

시킬 수 있음을 알 수 있다.

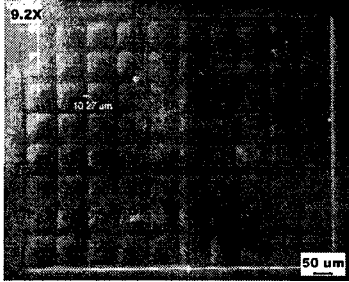


Fig. 15 Photo of grid

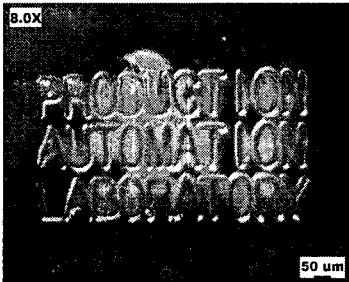


Fig. 16 Photo of character

4.3 차원 마이크로구조물 제작

4.1 재료 및 수지 표면 제어

본 연구에서 사용된 재료는 SOMOS 11120(DSM, Inc.)으로써, 광경화성 수지 중 비교적 낮은 점도인 약 260cps 를 가지고 있다. 적층을 하기 위한 방법 중 본 연구에서는 수지의 자중 및 Z축 스테이지의 이동을 통한 방법을 이용하였으며, 따라서 점도가 낮을수록 수지의 자유 표면 형성에 따른 시간을 줄일 수 있다. 수지의 자유 표면을 빨리 형성하기 위하여 Z축 스테이지의 제어는 Fig. 17과 같이 적층 두께보다 더 많이 하강하여 빠른 시간에 기 가공된 층이 수지에 덮여지게 한 다음, 적층 두께만큼의 위치로 천천히 상승하는 방법을 이용한다. Z축 스테이지의 이송 속도는 전체 가공 속도에 영향을 미치는 부분으로써, 경험적으로 2mm 수직 하강 시 100mm/min, 1.5mm 상승 시 30mm/min, 0.5mm 상승 시 5mm/min으로 하였으며, Z축 스테이지가 정지한 후 정상 상태의 수지를 형성하기 위하여 3 초의 대기 시간을 주었다. 노출 시간을 1 초라고 하였을 경우, 한 층의 가공이

끝나고 다음 층 가공을 위하여 수지의 새로운 자유 표면이 형성될 때까지의 시간은 약 15 초 가량 소요가 된다.

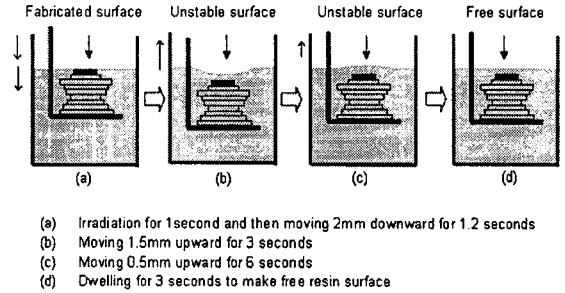


Fig. 17 Z stage movement to make free resin surface

4.2 마이크로구조물 제작 예

본 연구에서 개발된 마이크로광조형 장치를 이용하여 Fig. 18과 같은 3 차원 구조물을 제작하여, SEM을 이용하여 촬영하였다.

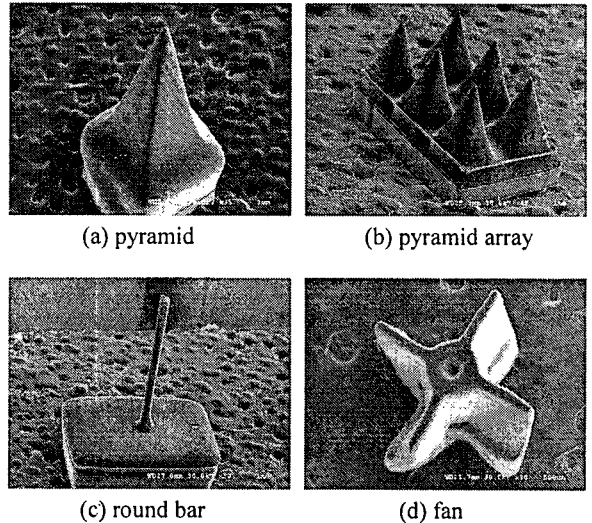


Fig. 18 Fabricated microstructures

Fig. 18 (a) 형상은 피라미드이며, 가장 아래층의 크기가 $1000\mu\text{m} \times 1000\mu\text{m}$ 이며 전체 높이가 $2000\mu\text{m}$ 이다. 층 두께를 $20\mu\text{m}$ 로 하여 100 층을 쌓았으며, 맨 위층의 가로 세로 길이는 약 $30\mu\text{m}$ 정도이다. (b) 형상은 피라미드의 배열이며, 전체 바닥면의 크기가 $1800\mu\text{m} \times 1200\mu\text{m}$ 이다. 하나의

피라미드의 크기는 가로, 세로, 높이가 $500\mu\text{m} \times 500\mu\text{m} \times 600\mu\text{m}$ 로써, $10\mu\text{m}$ 씩 60 층을 이루고 있다. (c) 형상은 세장비가 매우 큰 원형 바를 나타내고 있다. 바의 직경은 약 $120\mu\text{m}$ 이며, 높이는 $2400\mu\text{m}$ 로써, 세장비가 대략 20 정도이며, $30\mu\text{m}$ 씩 80 개의 층으로 이루어져 있다. (d) 형상은 팬을 나타내며, 중심에서 팬 날개까지의 거리가 약 $630\mu\text{m}$ 정도이며, 높이가 $1000\mu\text{m}$ 이다. 층 두께는 $10\mu\text{m}$ 이며, 100 개의 층으로 이루어져 있다. 하나의 단면에서 팬 날개의 폭은 약 $25\mu\text{m}$ 이다.

가공된 형상은 에너지 분포가 완벽하게 고르지 못하기 때문에 가장자리에서 형상의 왜곡이 일부 발생하였으며, 이를 해결하기 위해 fly eye 타입의 마이크로렌즈 어레이(microlens array)나 전반사 거울로 이루어진 광터널(light tunnel) 등을 사용하면 이 문제를 해결할 것으로 사료된다. 또한 세척의 미숙으로 인하여 형상의 일부가 왜곡되었다.

5. 결론

본 연구에서는 3 차원 마이크로 구조물을 가공하기 위한 마이크로광조형 시스템을 조명부 및 결상부로 구분하여 광학 설계를 통하여 개발하였다. 조명부에서는 균일한 광에너지가 DMD 에 입사할 수 있도록 렌즈계를 구성하였으며, DMD 의 구동을 고려하여 광경로 해석을 통해 광학기기들의 위치를 선정하였다. 조명부에서는 광학 설계 프로그램을 이용하여 튜브 렌즈 및 대물 렌즈로 이루어진 광학계의 위치를 선정하였으며, 결상시 왜곡이 가장 심할 것으로 예상되며 광축으로부터 가장 멀리 떨어져 있는 DMD 의 가장자리에서의 점광원에 대한 회절 영향을 시뮬레이션한 결과 회절한계 이하였음을 알 수 있었다. 이렇게 설계된 시스템을 검증하기 위하여 DMD 상의 패턴 이미지에 대하여 $1/2$ 크기의 결상 이미지를 가지는 광학계를 구성하여 광 분석기를 이용하여 광강도를 측정하였으며, 비교적 균일한 광강도를 가짐을 알 수 있었다. 또한 수 μm 의 선폭을 가진 2D 패턴을 제작함으로써 광학기기들의 정렬 상태 및 광학계에 대한 검증을 수행하였다.

최종적으로 개발된 마이크로광조형 시스템을 이용하여 수 μm 의 정밀도를 가지면서도 비교적 복잡한 3 차원 형상을 가공하였다. 또한 세장비가 높은 마이크로구조물을 가공하였으며, 이를 토대로

고 세장비의 복잡한 마이크로구조물의 제작에 대한 가능성을 검토하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(R01-2004-000-10507-0)지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. Ikuta, K. and Hirowatari, K., "Real three dimensional micro fabrication using stereolithography and metal molding," Proceedings of the 6th IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems(MEMS'93), Fort Lauderdale, FL, USA, pp. 42-47, 1993.
2. Ikuta, K., Ogata, T., Tsuboi, M. and Kojima, S., "Development of mass productive micro stereo lithography," Proceedings of the 8th IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems(MEMS'96), Piscataway, NJ, USA, pp. 301-306, 1996.
3. Ikuta, K., Maruo, S. and Kojima, S., "New micro stereo lithography for freely movable 3D micro structure - Super IH Process with submicron resolution," Proceedings of the 11th IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems(MEMS'98), Heidelberg, Germany, pp. 290-295, 1998.
4. Ikuta, K., Maruo, S., Fujisawa, T. and Yamada, A., "Micro concentrator with opto-sense micro reactor for biochemical IC chip family - 3D composite structure and experimental verification," Proceedings of the 12th IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems(MEMS'99), Orlando, Florida, USA, pp. 376-381, 1999.
5. Ikuta, K., Hasegawa, T., Adachi, T. and Maruo, S., "Fluid drive chips containing multiple pumps and switching valves for biochemical IC family," Proceedings of the 8th IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems(MEMS 2000), pp. 739-744, 2000.
6. Maruo, S., Ikuta, K. and Korogi, H., "Force-Controllable, Optically Driven Micromachines Fabricated by Single-Step Two-Photon Microstereolithography," Journal of Microelectro mechanical Systems, Vol. 12, No. 5, pp. 533-539,

- 2003.
7. Lim, T. W., Park, S. H. and Yang, D. Y., "Contour Offset Algorithm(COA) for Precise Patterning in Two-photon Polymerization," *Microelectronic Engineering*, Vol. 77, pp. 382-388, 2005.
 8. Zhang, X., Jiang, X. N. and Sun, C., "Microstereolithography of polymeric and ceramic microstructures," *Sensors and Actuators* 77, pp. 149-156, 1999.
 9. Sun, C. and Zhang, X., "Experimental and numerical investigations on microstereolithography of ceramics," *Journal of Applied Physics*, Vol. 92, No. 8, pp. 4796-4802, 2002.
 10. Lee, I. H. and Cho, D. W., "An Investigation on Photopolymer Solidification Considering Laser Irradiation Energy in Micro-stereolithography," *Microsystem Technologies*, Vol. 10, No. 8, pp. 592-598, 2004.
 11. Varadan, V. K., Jiang, X. and Varadan, V. V., "Microstereolithography and other Fabrication Techniques for 3D MEMS," Wiley, 2001.
 12. Lee, I. H., Cho, Y. H., Cho, D. W. and Lee, E. S., "Development of micro-stereolithography system for the fabrication of three-dimensional microstructures," *Journal of KSPE*, Vol. 21, No. 2, pp. 186-194, 2004.
 13. Lee, I. H., Cho, D. W. and Lee, E. S., "Photopolymer Solidification Phenomena Considering Laser Exposure Conditions in Micro-stereolithography Technology," *Journal of KSPE*, Vol. 21, No. 3, pp. 171-179, 2004.
 14. Park, S. H., Lim, T. W. and Yang, D. Y., "Investigation into direct fabrication of nano-patterns using nano-stereolithography(NSL) process," *Journal of KSPE*, Vol. 23, No. 3, pp. 156-162, 2006.
 15. Bertsch, A., Jezequel, J. Y. and Andre, J. C., "Study of the spatial resolution of a new 3D microfabrication process: the microstereophotolithography using a dynamic mask-generator technique," *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 107, pp. 275-281, 1997.
 16. Farsari, M., Claret-Tournier, F., Huang, S., Chatwin, C. R., Budgett, D. M., Birch, P. M., Young, R. C. D. and Richardson, J. D., "A novel high-accuracy microstereolithography method employing an adaptive electro-optic mask," *Journal of Materials Processing Technology* 107, pp. 167-172, 2000.
 17. Provin, C. and Monneret, S., "Complex Ceramic-Polymer Composite Microparts Made by Microstereolithography," *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, Vol. 25, No. 1, pp. 59-63, 2002.
 18. Oda, G., Miyoshi, T., Takaya, Y., Ha, T. H. and Kimura, K., "Microfabrication of Overhanging Shape using LCD Microstereolithography," 5th International Symposium on Laser Precision Microfabrication, Proceedings of SPIE, Vol. 5662, pp. 649-654, 2004.
 19. Bertsch, A., Bernhard, P., Vogt, C. and Renaud, P., "Rapid prototyping of small size objects," *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 6, No. 4, pp. 259-266, 2000.
 20. Smith, L. B., "Micro-Cross-Sectional Lithography (μ CSLTM): Prototyping and Packaging for MEMS," Ph. D. Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, 2004.
 21. Bertsch, A., Jiguet, S. and Renaud, P., "Microfabrication of ceramic components by microstereolithography," *Journal of Micromechanics and microengineering*, Vol. 14, pp. 197-203, 2004.
 22. Limaye, A. S., "Design and Analysis of a Mask Projection Micro-stereolithography System," M.S. Thesis, Georgia Institute of Technology, 2004.
 23. Sun, C., Fang, N., Wu, D. M. and Zhang, X., "Projection micro-stereolithography using digital micro-mirror dynamic mask," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 121, No. 1, 31, pp. 113-120, 2005.
 24. Choi, J. W., Ha, M. Y., Won, M. H., Choi, K. H. and Lee, S. H., "Fabrication of 3-Dimensional Microstructures using Dynamic Image Projection," Proceeding of the 1st International Conference on Precision Engineering and Micro/Nano Technology in Asia, Shenzhen, China, pp. 472-476, 2005.