

전사방식 마이크로광조형을 이용한 배열 형태 미세 구조물 가공

최재원*, 하영명*, 이석희#

Fabrication of Microstructure Array using the Projection Microstereolithography System

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

ABSTRACT

Microstereolithography technology is similar to the conventional stereolithography process and enables to fabricate a complex 3D microstructure. This is divided into scanning and projection type according to aiming at precision and fabrication speed. The scanning MSL fabricates each layer using position control of laser spot on the resin surface, whereas the projection MSL fabricates one layer with one exposure using a mask. In the projection MSL, DMD used to generate dynamic pattern consists of 1024x768 micromirrors which have 13.68 μm per side. The fabrication range and resolution are determined by the field of view of the DMD and the magnification of the projection lens. If using the projection lens with high power, very fine microstructures can be fabricated. In this paper, the projection MSL system adapted to a large surface for array-type fabrication is presented. This system covers the meso range, which is defined as the intermediate range between micro and macro, with a resolution of a few μm . The fabrication of array-type microstructures has been demonstrated to verify the performance of implemented system.

Key Words : Array-type micro fabrication (배열 형태 미세 가공), Digital Micromirror Device (디지털 마이크로미러 장치, DMD), Microstereolithography (마이크로광조형, MSL)

1. 서론

기계, 전자, 정보통신 및 의료 등 여러 산업분야에서 요구되는 초정밀 부품의 가공을 위해 MEMS(Micro Electric Mechanical System), LIGA(Lithography Galvanofforming Abforming), EFAB(Electrochemical Fabrication) 등의 기술이 많이 이용되고 있으나 복잡한 형상의 3 차원 구조물 제

작에서는 한계를 보이고 있다. 마이크로광조형은 이 한계를 극복할 수 있는 대안으로 제시되는 기술로 기존의 광조형의 원리를 이용하여 복잡한 형상의 3 차원 미세 구조물을 제작할 수 있다.¹

마이크로광조형 기술은 가공 방식에 따라 주사방식(scanning method)과 전사방식(projection method)으로 나뉜다. 주사방식은 Fig. 1(a)와 같이 일반적으로 집광된 빛의 위치를 광경화성 수지 표

접수일: 2007 년 4 월 2 일; 게재승인일: 2007 년 7 월 13 일

* 부산대학교 기계기술연구소

교신저자: 부산대학교 기계공학부

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

면에서 단면의 광경로에 의해 제어하여 가공하는 방식이다. 1993 년에 Ikuta² 의 IH 공정(Integrated Harden Polymer Process)이라 불리는 주사방식 마이크로광조형 기술을 시초로 여러 연구자³⁻⁵ 들에 의해 개발되고 있다. 전사방식은 Fig. 1(b)와 같이 마스크를 이용하여 패터닝된 빛을 수지 표면에 주사하여 가공하는 방식으로 1997 년 Bertsch⁶ 가 LCD 를 동적 마스크로 사용한 전사방식의 마이크로광조형시스템을 제시하였다. 이후 LCD 의 낮은 명암비와 투과율을 극복하기 위해 DMD 를 동적 마스크로 사용하여 보다 정밀한 가공을 가능하게 하였다.⁷ 독립적으로 구동 가능한 수십만 개의 마이크로미터와 향상된 명암비 등의 장점을 가지고 있어 여러 연구자들이 DMD 를 이용하여 미세 구조물을 제작하였다.⁸⁻¹²

마이크로광조형을 위한 가공 데이터는 기존의 광조형 기법에서 사용하던 방법과 유사하다. 3 차원 모델링 데이터를 삼각형 면으로 이루어진 STL 파일로 변환하고 적층 두께로 슬라이싱한 단면 데이터를 생성한다. 주사방식에서는 이 정보로 레이저 빔의 주사경로를 생성하고 전사방식에서는 동적 마스크에 입력 정보로 보내게 될 단면 이미지를 생성하여 가공한다.

미세 구조물의 대량 생산을 위해 Ikuta³ 는 5 개의 광섬유를 일렬로 배열하여 각각의 광섬유에서 조사된 빔이 수지를 경화시키는 방법을 제시하였다. 그러나 다른 주사방식의 마이크로광조형 시스템에 비해 정밀도가 떨어지는 문제점을 가지고 있다. 전사방식은 일반적으로 주사방식에 비해 정밀도가 낮으나 분해능이 높은 동적 마스크와 고배율의 렌즈를 사용하면 정밀도가 높은 구조물을 가공할 수 있다. Sun⁹ 은 DMD 를 사용하여 직경이 0.6 μ m 인 매달린 보(suspended beam) 형상을 가공함으로써 높은 형상 정밀도를 갖는 미세 구조물의 가공이 가능함을 보였다.

본 논문에서는 배열 형태의 미세 구조물을 제작할 수 있는 전사방식의 마이크로광조형 시스템을 개발하였다. 일반적으로 전사방식의 시스템은 단면 형상에 해당하는 빛이 수지표면에 조사되어 가공되므로 X, Y 축 방향으로의 이동은 불필요하다. 하지만 배열 형태로 가공을 하기 위해 X-Y 축 스테이지를 추가하였고, 스테이지 이동시 위치 정밀도를 실험을 통해 검증하여 가공물의 형상 왜곡을 피하였다. 또한 다양한 미세 구조물에 대한 배열

형태 가공 예를 제시하여 대량 생산의 가능성을 보인다.

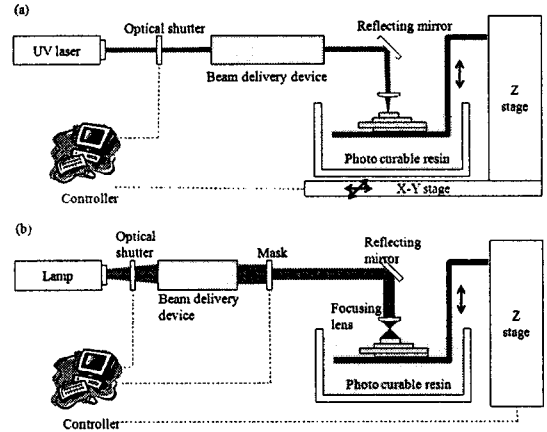


Fig. 1 Schematic diagram of (a) scanning (b) projection microstereolithography

2. 전사방식 마이크로광조형 장치

2.1 시스템 구성

미세형상의 배열 형태 가공을 위해 제시한 마이크로광조형 시스템의 구성은 Fig. 2 와 같다. 광원, 동적 패턴 생성을 위한 DMD, 수지부, 적층을 위한 Z 축 스테이지, 평행광 생성을 위한 튜브 렌즈(tube lens)는 이전 연구¹¹ 에서 제안한 전사방식 마이크로광조형 시스템 요소들을 사용하였다. 배열 형태의 가공을 위해 X-Y 축 스테이지, 간결한 광 경로 생성을 위해 LightGateTM 가 추가되었다. 배열 형태 가공은 수지부 또는 광이 X-Y 축 방향으로 이동함으로써 구현될 수 있다. 수지부가 이동될 경우 수지 유동으로 이미 가공된 부분이 훼손될 우려가 있어 본 연구에서는 광을 이동시키는 방법을 사용하였다.

기존 연구에서는 동적 마스크인 DMD 에 광이 적절하게 입사되도록 반사경을 사용하였다. 하지만 전체 광 경로가 길어져 장치가 커지기 때문에 배열 가공에는 적합하지 않았다. 광 경로를 간결하게 하기 위해 반사경을 대신해 일종의 프리즘인 LightGateTM 를 사용하였다. 이는 Unaxis 사에서 제작된 것으로 Fig. 3 에 도시된 바와 같이 입사각에 따라 광을 반사 및 통과시킨다. 또한 수지표면에 결상될 광을 이동시키기 위해 Fig. 4 와 같은 X-Y

축 스테이지를 사용하였다. 이는 선형 볼 스크류 타입의 스테이지로 100nm의 분해능, 150mm x 150mm의 이동범위를 가지며 스테이지 위에 올려질 10kg의 광학 요소들을 지지할 수 있도록 제작되었다. 수지 표면에 이미지의 결상을 위해 개구수 (NA, Numerical Aperture)가 0.3, 초점 거리가 3.06 μm인 UV용 대물렌즈를 사용하였다. 분해능이 1 μm인 Nikon사의 초점 장치(focusing unit)를 이용

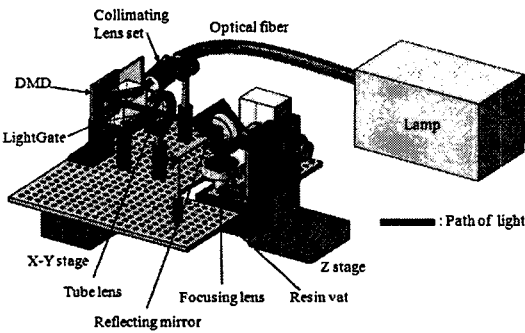


Fig. 2 Microstereolithography system for array-type microstructures fabrication

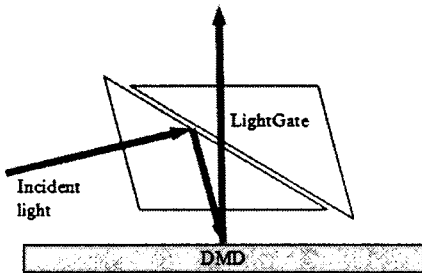


Fig. 3 Path of light through LightGate

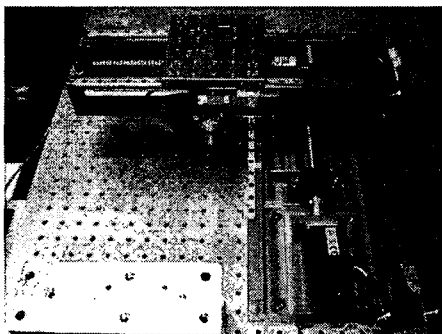


Fig. 4 Picture of X-Y stage

하여 정밀한 이미지가 결상되도록 하였다. 시스템에 사용되는 모든 광학 요소들은 광 경로와 결상 위치를 고려하였고 ZEMAX를 이용하여 시뮬레이션 후 최적의 위치를 계산하여 정렬되었다.

2.2 가공 절차

전사방식 마이크로광조형을 이용한 미세 구조물의 배열 가공 절차는 아래 Fig. 5에 나타내었다.

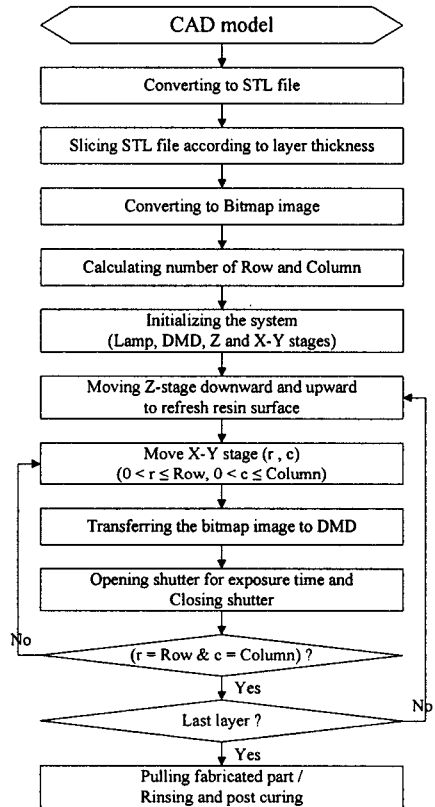


Fig. 5 Overall process of array-type microstructure fabrication

우선 3 차원 CAD 모델을 삼각형 면으로 구성된 STL 파일로 변환한 후 적층 두께로 슬라이싱한다. 이 단면 데이터는 주사방식과 달리 동적 마스크인 DMD 입력 정보로 제공되기 위해 흑백의 이미지 파일로 변환된다. 수지 표면에서 결상되는 이미지는 DMD에 표시되는 이미지가 상하좌우로 대칭 변환된 형상이므로 입력 이미지를 미리 변환시켜 DMD에 제공한다. 가공물의 수량에 따라 사

용자가 행과 열의 수를 입력하면 각 층에 동일한 단면 형상이 배열 형태로 가공된다. 하나의 단면이 가공된 후 셔터를 닫아 광을 차단하고 X-Y 축 스테이지가 다음 위치로 이동한 후 다시 셔터를 열어 단면을 가공한다. 한 층에 대한 가공이 완료되면 X-Y 축 스테이지는 원점으로 복귀하고 Z 축 스테이지가 하강 후 다시 상승하여 적층 두께에 해당하는 새로운 층이 이미 가공된 층을 덮도록 한다. 수지표면을 수평으로 맞추기 위해 약 10 초간의 대기 시간 후 해당 층의 단면 이미지를 DMD에 전송하고, 셔터를 열어 광을 수지 표면에 조사하여 경화시킨다. 모든 층에 대해 위의 과정을 수행하면 배열 형태의 미세구조물을 얻을 수 있다. X, Y 축 방향으로 스테이지가 이동할 때 다른 단면 이미지를 DMD에 전송하면 다양한 형상의 미세구조물들을 배열 형태로 한꺼번에 가공할 수 있다.

2.3 가공 정밀도

전사방식 마이크로광조형에서 가공물의 정밀도는 동적 마스크의 분해능, 대물렌즈의 배율, 가공재료의 특성에 주로 의존한다. 본 연구에서 사용된 DMD는 가로, 세로가 각각 $13.68\mu\text{m}$ 인 마이크로미터가 1024×768 개로 이루어져 있어 하나의 픽셀이 10 배율의 대물렌즈를 통과하면 가로, 세로 $1.368\mu\text{m}$ 의 크기를 가지게 된다. 사용된 광경화성 수지는 IBXA(Isobornyl acrylate), HDDA(1,6-HexaneDiol DiAcrylate), BED(Bisphenol-ethoxylated(4) Diacrylate)이 각각 8:1:1의 비율로 혼합되었고 재료의 물성 향상 및 경화 깊이 제어를 위해 TEOS(TetraEthoxyOrthoSilicate) 2wt%, DMPA(2,2-Dimethoxy-2-phenylacetophenone) 5wt%, Tinuvin 0.1wt%가 첨가되었다.¹² 본 시스템에서 구현할 수 있는 해상도를 얻기 위하여 Fig. 6(a)과 같은 2 차원 선 패턴 이미지를 이용하였다. 각각의 선폭은 6 픽셀에서 1 픽셀까지 각 2 개로 구성되었다. Fig. 6(b)에 가공된 패턴을 제시하였으며 가공물들은 세척 후 현미경(LEICA DFC 280)으로 측정하였다.

측정 결과 1 픽셀의 이미지가 이론적 치수인 $1.368\mu\text{m}$ 보다 약 1.5 배인 약 $2\mu\text{m}$ 로 가공되었다. 배열 형상을 가공할 때 각 층의 단면들은 이전 층의 단면과 일치해야 형상의 왜곡 없이 적층될 수 있다. 이는 X-Y 축 스테이지의 반복정밀도(repeatability)에 영향을 받기 때문에 Fig. 6(c)와 같이 직경이 100 픽셀($136.8\mu\text{m}$)인 5 개의 원형 단면을

배열 가공으로 검증하였다. 한 층은 3x3 개의 단면으로 구성되고 $10\mu\text{m}$ 의 두께로 총 100 층을 가공하였다. 가공 결과는 Fig. 6(d)에 나타내었다. 가공된 원기둥의 직경과 높이는 각각 $210\mu\text{m}$, $1070\mu\text{m}$ 이다. 본 실험을 통해 수 μm 의 해상도를 가지는 미세 구조물을 배열 형태로 가공할 수 있음을 알 수 있다.

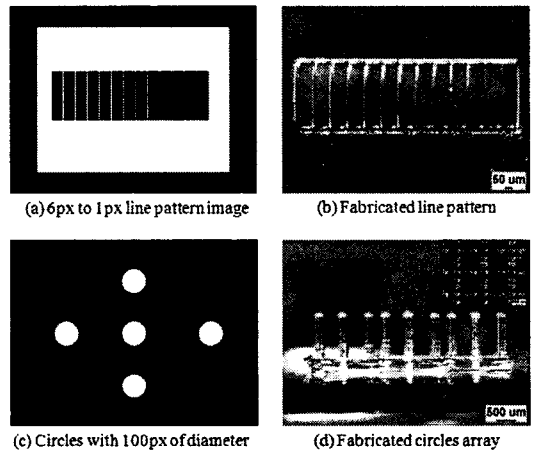


Fig. 6 2D and 3D image for fabrication resolution

3. 배열 형태 미세 구조물 가공

본 연구에서 개발된 전사방식 마이크로광조형 시스템을 이용하여 가공된 배열 형태 미세 구조물들을 Fig. 7에 나타내었다. (a), (b)는 각각 5x5 개

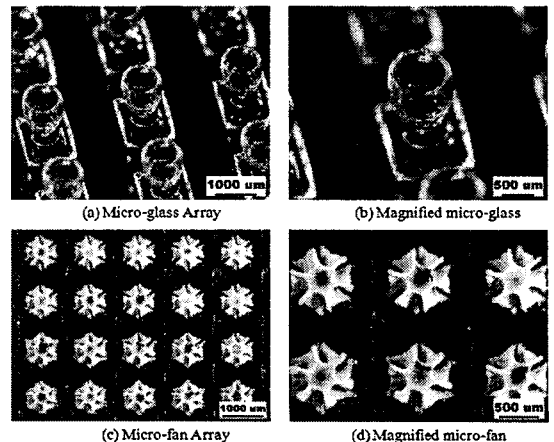


Fig. 7 Fabricated Microstructure Array

참고문헌

미세 글라스 배열과 확대한 미세 글라스 (c), (d)는 각각 10x10 개 미세 팬(fan) 배열과 확대한 미세 팬 형상을 제시하였다. Table 1 에 가공 파라미터와 가공 특성을 나타내었다. 측정 결과 가공된 미세 구조물들은 동일한 형상을 유지하고 있었다. 그러나, 경화되는 부분이 얇은 곳은 세척할 때 가공물 주위에 묻어있는 세척 용액과의 장력으로 약간의 변형이 있었다. 본 가공 예로부터 배열 형태의 미세 구조물 제작이 효과적으로 구현됨을 알 수 있다.

Table 1 Fabrication parameters and characteristics of array-type microstructures

Model Parameters	Micro-glass	Micro-fan
Num. of Layer	300	50
Slicing Thickness	5 μ m	10 μ m
Fabrication range	10mm × 10mm	11.5mm×11.5mm
Num. of row, col.	5×5	10×10
Intensity(mW/cm ²)	56.4	56.4
Fabrication time	8.3 hrs	5.5 hrs

4. 결론

본 연구에서는 X-Y 축 스테이지를 사용한 전사 방식 마이크로광조형 시스템을 개발하여 미세 구조물의 배열 형태 제작을 수행하였다. 시준 렌즈(collimating lens), 프리즘의 추가로 광 경로와 전체 시스템을 간결하게 하였다. 결상되는 부분에서 정밀도를 향상시키기 위해 1 μ m 분해능을 가지는 초점장치(focusing unit)를 사용하였다. 시스템에서 가공할 수 있는 미세 구조물의 형상 정밀도를 2D 선(line) 가공을 통하여 확인하였고, 전체 가공 범위가 10mm 이상인 배열 형태 미세 구조물을 제작함으로써 대량 생산의 가능성을 보였다. 본 연구에서 제시한 방법으로 수십 mm 크기를 가지며 수 μ m 의 정밀도를 갖는 형상의 제작뿐만 아니라 다양한 형상의 미세 구조물들을 배열 형태로 한 번에 가공할 수 있을 것이다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

1. Varadan, V. K., Jiang, X. and Varadan, V. V., "Microstereolithography and other Fabrication Techniques for 3D MEMS," Wiley, 2001.
2. Ikuta, K. and Hirowatari, K., "Real Three Dimensional Micro Fabrication Using Stereo Lithography and Metal Molding," Proceedings of IEEE MEMS'93, pp. 42-47, 1993.
3. Ikuta, K., Ogota, T., Tsubio, M. and Kojima, S. "Development of mass productive micro stereolithography," Proceedings of the 8th IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS'96), pp. 301-306, 1996.
4. Zhang, X., Jiang, X. N. and Sun, C., "Microstereolithography of polymeric and ceramic microstructures," Sensors and Actuators A, Vol. 77, pp. 149-156. 1999.
5. 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.
6. Bertsch, A., Zissi, S., Jezequel, J. Y., Corbel, S. and Andre, J. C., "Microstereophotolithography using a liquid crystal display as dynamic mask-generator," Microsystem Technologies, Vol. 3, No. 2, pp. 42-47, 1997.
7. 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.
8. Limaye, A. S., "Design and Analysis of a Mask Projection Micro-stereolithography System," M.S. Thesis, Georgia Institute of Technology, 2004.
9. 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, Issue 1, pp. 113-120, 2005.
10. Choi, J. W., Ha, Y. M., 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, pp. 472-476, 2005.

11. Choi, J. W., Ha, Y. M., Lee, S. H. and Choi, K. H.,
“Fabrication of 3-Dimensional Microstructures using
Digital Micromirror Device,” Journal of KSPE, Vol.
23, No. 11, pp. 116-125, 2006.
12. Choi, J. W., “Development of Projection-based
Microstereolithography Apparatus Adapted to Large
Surface and Microstructure Fabrication for Human
Body Application,” Ph. D. Dissertation, Pusan
National University, 2007.