

동적 패턴 생성기를 이용한 3차원 미세 구조물의 경화특성

하영명*, 최재원(부산대 대학원 지능기계공학과), 안대건(부산대 기계기술연구소)
이석희(부산대 기계공학부), 하창식(부산대 응용화학공학부)

Curing Characteristics for 3D Micro-structures Fabrication using Dynamic Pattern Generator

Y. M. Ha*, J. W. Choi(Mechanical & Intelligent Sys. Eng. Dept., PNU), D. K. Ahn(RIMT, PNU)
S. H. Lee(School of Mecha. Eng., PNU), C. S. Ha(Division of Chem. Eng., PNU)

ABSTRACT

Microstereolithography(MSL) has evolved from the stereolithography technique, and is also based on a light-induced layer-stacking fabrication. Although integral MSL allows the manufacture of a complete layer by one irradiation only, there is a problem related with shape precision due to the light-intensity distribution of focused image. In this study, we developed the integral MSL apparatus using Digital Micromirror Device (DMDTM, Texas Instruments) as dynamic pattern generator. It is composed of Xenon-Mercury lamp, optical devices, pattern generator, precision stage, controllers and the control program. Also, we have studied curing depth and width of photocurable resin according to the change of exposure energy.

Key Words : 마이크로 광조형(Microstereolithography), 동적 패턴 생성기(Dynamic Pattern Generator), 경화특성(Curing Characteristics), 노출 에너지(Exposure Energy)

1. 서론

반도체 기술에 바탕을 둔 기존의 MEMS 기술은 공학, 의학 및 생물학 등 여러 분야에 적용되고 있지만 복잡한 형상의 3차원 구조물의 제작에는 한계를 가지고 있다. 마이크로 광조형(microstereolithography, MSL)은 하나의 대안으로 제시되는 기술로 기존 광조형(stereolithography, SL)의 원리를 이용하여 미세 구조물을 제작하는 기술이다.

마이크로 광조형 기술을 두 가지 방식으로 분류하면 레이저 주사 경로를 이용하여 단면을 가공하는 스캐닝(scanning) 방식-vector by vector MSL-과 마스크(mask)를 이용하여 단면을 한 번에 가공하는 프로젝션(projection) 방식-integral MSL-을 들 수 있다 [1-3].

동적 패턴 생성을 위해서 마스크로 Liquid Crystal Display(LCD)나 Digital Micromirror Device(DMD)를 사용한 프로젝션 방식의 마이크로광조형 연구들이 소개되었다[4-6].

프로젝션 방식은 광원으로부터 조사되는 빛

(light)의 경로를 고정하고 마스크를 이용하여 경화시킬 단면 이미지에 해당하는 빛만이 수지표면에 입사된다. 이 방식은 스캐닝 방식의 단점, 즉 레이저 주사경로 생성 및 정밀 포커싱의 고려에 의한 상대적으로 긴 가공시간, 빔의 포커싱으로 발생하는 열효과(thermal effect)에 의한 원하지 않는 경화, 복잡한 공정 등을 극복하기 위해 제안되었다. 특히 한 층의 단면이 복잡한 형상을 가지는 경우라도 한 번의 빛을 조사함으로써 경화가 가능하여 가공 시간이 빠른 장점을 가지고 있다. 그러나, 마스크에 입사되는 빛의 강도 분포가 일정하지 않으면 경화성 수지에 결상되는 단면 이미지(cross-section image)의 에너지 분포가 달라 부위별 경화 정도의 차이가 발생하여 정밀도를 떨어뜨리는 문제점을 안고 있다.

광경화성 수지는 액상(liquid phase)에서 고상(solid phase)으로 변화하기 위해서 광 에너지를 받아 중합 반응을 일으킨다. 경화되는 폭과 깊이는 중합 반응의 정도에 영향을 받기 때문에 노출 에너지(exposure energy)가 중요한 파라미터(parameter)가 된다.

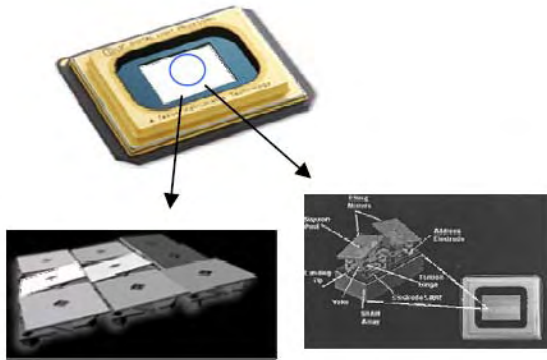


Fig. 1 DMD and Micromirrors

본 연구에서는 동적 패턴 생성을 위해서 Fig. 1에 보여진 Digital Micromirror Device를 사용하여 마이크로 광조형 장치를 개발하였고 선행 연구[7]에서 합성한 UV 경화성 수지에 대해 UV 노출 에너지와 경화 깊이 및 폭과의 관계를 실험하였으며, 최적의 노출 에너지를 이용하여 3차원 미세 구조물을 제작하였다.

2. 시스템 구성

전체 시스템 구성은 Fig. 2에 도시하였고 광원 및 광학계, 이송부, 수지 및 수지 저장부, 제어부로 이루어졌다.

2.1 광원 및 광학계

본 연구에서는 200W의 Xenon-Mercury 램프(lamp)를 광원으로 사용하였다. 램프에서 나오는 여러 파장의 빛 중에서 자외선(UV)을 이용하기 위해 필터(filter)를 설치하여 200~400nm 파장의 광(light)을 추출하였다.

필터를 통과한 UV는 제어 프로그램에 의해 작동되는 셔터(shutter)에 의해 단속되며, 미러(mirror)에서 반사되어 DMD로 입사된다. DMD는 피치가 13.68 μ m 인 마이크로 미러 1024 \times 768개가 배열되어 있으며, 각각의 마이크로 미러는 디지털 신호에 의해 입사된 UV를 $\pm 12^\circ$ 방향으로 틸팅(tilting)한다. UV는 DMD에 생성된 단면 이미지 부분만 수지 표면과 수직으로 반사되어 감소렌즈(reduction lens)-볼록렌즈와 대물렌즈로 구성-를 지나 수지 표면에 결상이 된다. 감소렌즈는 1/7의 감소율을 갖도록 설계되었다.

2.2 이송부

미세 구조물은 수지 표면에 수직인 방향으로 적층이 이루어진다. 한 층이 가공된 후 새로운 층을 만

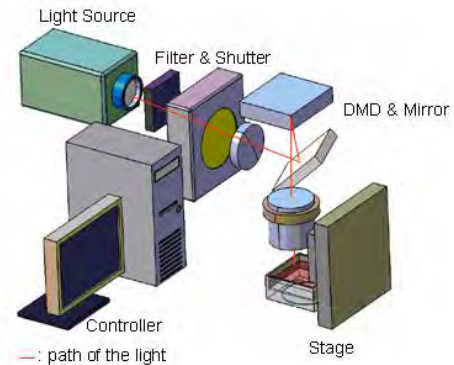


Fig. 2 Schematic diagram of integral MSL system

들기 위한 이송을 위해 50mm의 동작범위(travel range), 100nm의 분해능(resolution), ± 100 nm의 반복정밀도(repeatability)를 가지는 1축 초정밀 스테이지를 사용하였다.

2.3 광 경화성수지 및 수지 저장부, 제어부

미세 구조물의 경화특성 실험을 위해 사용된 경화성 수지는 선행 연구에서 합성된 광경화성 수지이다. 이것은 3D Systems사의 SI40과 희석 모노머인 Isobornyl acrylate (IBXA)를 50:50의 비율로 혼합한 것으로 약 100cps의 점도를 가진다..

수지 저장부는 스테인리스 스틸(stainless steel)로 제작하였으며 시스템을 이루는 각 구성품은 통합 프로그램에 의해서 유기적으로 작동을 한다.

3. 경화특성 실험 및 결과

3.1 경화 실험

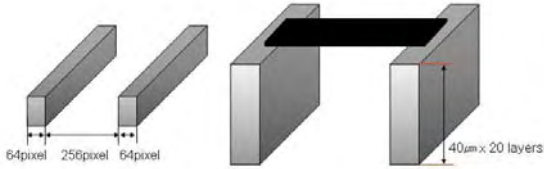
액상의 광경화성 수지가 고상으로 변하기 위해서는 에너지가 필요하다. 수지 표면에 조사되는 에너지의 양은 스캐닝 방식의 경우 레이저 빔의 주사 속도, 프로젝션 방식은 노출 에너지가 주요한 파라미터가 된다.

노출 에너지가 커지면 더 많은 중합반응이 발생하여 경화 깊이가 증가하고 노출 에너지가 임계 에너지 보다 작아지면 경화가 발생하지 않게 된다. 따라서 미세 구조물의 정밀도를 향상시키기 위해서는 최적의 노출 에너지를 구하여 원하는 적층 두께(layer thickness)와 폭(width)을 얻어야 한다.

UV 노출 에너지에 대한 경화 폭과 깊이 실험을 위해서 사용된 모델은 각각 Fig. 3(a)와 3(b)에 도시하였다. 경화 폭 측정 모델은 64 pixels의 두 개의 긴 바와 그 사이 간격을 4배인 256 pixels로 하여 경화 폭과 경화 된 부위와의 간격을 측정함으로써 최적의 경화 폭에 대한 에너지를 얻을 수 있다. 경화 깊이를

모델은 약 800 μm 정도의 기둥을 세우고 다양한 에너지에 따라서 쓰레드(thread) 형상을 가공하여 그 두께를 측정함으로써 최적 노출 에너지를 얻을 수 있다.

경화 깊이는 “수지 작동 커브(resin working curve)”라고 부르는 노출 에너지 함수에 로그 선형(log-linear)의 관계를 가지며 식(1)과 같다[9].



(a) Curing width model (b) Curing depth model
Fig. 3 Schematic diagram of model for curing characteristics measurement

$$C_d = D_p \times \ln(E_{\text{max}}/E_c) \quad (1)$$

이 식에서 D_p 는 침투 깊이, E_{max} 는 최대 노출 에너지를 의미한다.

현재의 시스템은 수지의 자유표면에서 가공이 발생한다. 때문에 가공물이 놓이게 될 glass window의 위치와 수지 표면의 간격을 적층 두께와 일치하도록 제어하는 것이 필요하다. 이를 위해서 희생층을 만들어서 수지표면과의 간격을 제어하도록 하였다.

3.2 실험 결과 및 고찰

Fig. 4는 Fig. 3(a)에서 모델링 된 경화 폭 모델이 제작된 형상이다.

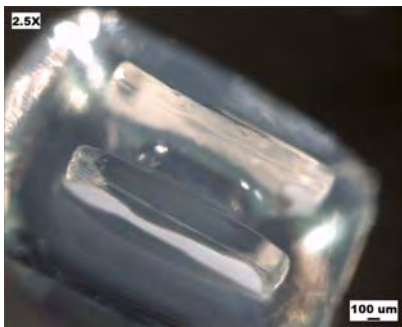


Fig. 4 Picture of fabricated curing depth model

LEICA Micro- system Ltd.사의 LEICA DFC 280을 사용하여 측정을 수행하였으며, UV 노출 에너지와 경화 깊이, 경화 폭의 관계를 Fig. 5 그래프로 나타내었다.

DMD 상의 1 pixel이 수지표면에 결상되면 이론적으로 약 1.95 μm 의 크기를 가지게 된다. 하지만 표

면에 도달하는 UV 노출 에너지에 따라 경화 폭이 변함을 확인하였고, 경화 폭과 기둥의 간격의 길이가 4배가 될 때의 경화 에너지가 46mJ/cm²으로, 이론적인 값과의 차이가 최소임을 알 수 있다.

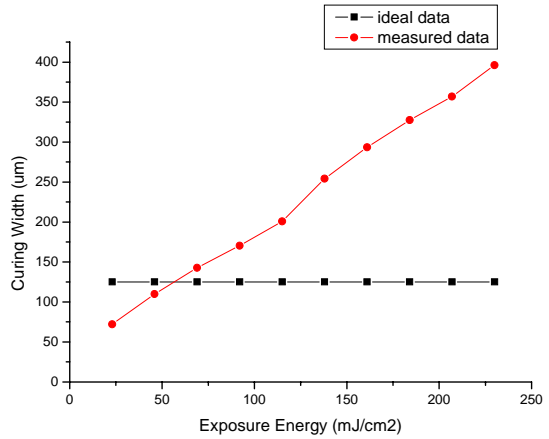


Fig. 5 Curing Width vs Exposure energy

Fig. 6은 Fig. 3(b)에서 모델링 된 경화 깊이 모델이 제작된 형상이다.



Fig. 6 Picture of fabricated curing width model

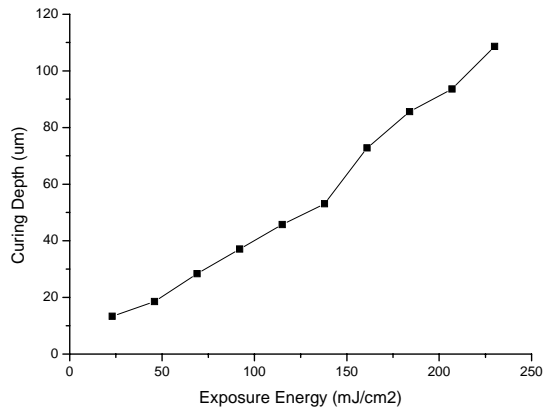
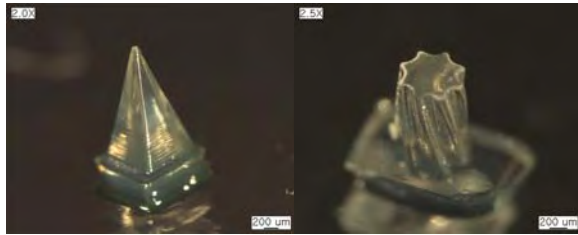


Fig. 7 Curing Height vs Exposure energy

Fig. 7에서는 경화 깊이와 노출 에너지의 양의 관계가 로그 선형 있음을 확인할 수 있고, 경화 가능한 두께가 약 $20\text{mJ}/\text{cm}^2$ 에서 $12\mu\text{m}$ 정도임을 알 수 있다.

Fig. 8(a)는 피라미드 형상을 8(b)는 헬리컬 기어 형상을 제작한 그림이며, Table 1에 각 구조물의 크기 및 가공 파라미터를 나타내었다.



(a) Pyramid (b) Helical gear

Fig. 8 Picture of fabricated micro-structures

Model	Layer Thickness (μm)	Total layer number	Part vol. size(μm)	Smallest feature size(μm)	Exposure Energy (mJ/cm^2)
(a)	20	100	$800*800*2000$	50	64
(b)	10	100	$500*500*1000$	70	46

Table 1 Process conditions of each structure

현재 구성된 시스템은 경화에 필요한 UV에너지를 얻기 위해 $200\sim 400\text{nm}$ 영역의 광원을 사용하고 있어 균일한 에너지 분포를 가지지 못한다. 이는 제작된 미세 구조물의 정밀도를 떨어뜨리는 하나의 원인일 것이다.

4. 결론

미세 구조물 제작을 위해 DMD를 이용한 마이크로광조형 장치를 구성하였고, 노출 에너지 변화에 따른 광경화성 수지의 경화특성을 도출하였다. 경화 폭 실험에서 최소 $46\text{mJ}/\text{cm}^2$ 의 UV 에너지를 조사했을 때 좋은 결과를 보여주었으며, 경화 깊이 실험에서는 약 $20\text{mJ}/\text{cm}^2$ 의 에너지가 조사되었을 때 최소 경화 두께를 얻을 수 있었다.

균일한 에너지 분포를 보이는 광원을 이용하면 향상된 결과를 얻을 것이라 기대한다. 또한 미세 구조물 제작이 완료된 후 표면에 남아있는 액상 및 겔 (gel) 상태의 수지를 제거하는 공정도 정밀도에 영향을 줄 것이다.

후기

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

참고문헌

1. V. K. Varadan, X. Jiang, and V. V. Varadan, "Microstereolithography and other Fabrication Techniques for 3D MEMS", John Wiley & Sons Ltd, 2001.
2. A. Bertsch, P. Bernhard, and P. Renaud, "Microstereolithography: Concepts and applications", Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, Vol. 2, pp. 289-298, 2001.
3. A. Bertsch, S. Jiguet, P. Bernhard, and P. Renaud, "Microstereolithography: a Review", Proceedings of the Materials Research Society Symposium LL, Vol. 758, pp. LL1.1.1-LL.1.1.13, 2003.
4. G. Oda, T. Miyoshi, Y. Takaya, T. Ha, and K. Kimura, "Microfabrication of Overhanging Shape using LCD Microstereolithography", Proceedings of the SPIE 5th International Symposium on Laser Precision Microfabrication, Vol. 5662, pp. 649-654, 2004.
5. A. Bertsch, S. Zissi, J. Y. Jezequel, S. Corbel, and J. C. Andre, "Microstereolithography using a liquid crystal display as dynamic mask-generator", Microsystem Technologies, Vol. 3, No. 2, pp. 42-47, 1997.
6. C. Sun, N. Fang, D. M. Wu, and X. Zhang, "Projection micro-stereolithography using digital micro-mirror dynamic mask", Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 121, Issue 1, pp. 113-120, 2005.
7. J. W. Choi, Y. M. Ha, H. S. Kim, M. H. Won, K. H. Choi, S. H. Lee, "An Implementation of RP-based Micro Fabrication Apparatus for Micro Structures", Book of Abstract, HARMST 2005 (Gyeongju in Seoul), pp. 190-191.
8. P. F. Jacobs, "Rapid Prototyping and Manufacturing: Fundamentals of Stereolithography", Society of Manufacturing Engineers Publishers, Dearborn, 1992.