

다이내믹 패턴 형성기를 이용한 마이크로 광 조형기술에서 미세 구조물 제작 및 수지경화특성에 관한 연구

권번호*, 최재원, 하영명, 김현수, 원명호(부산대원), 이석희(부산대 기계공학부)

The Fabrication of Microstructures and Curing Characteristics in Photopolymer on the Microstereolithography using a Dynamic Pattern Generator

B. H. Kwon*, J. W. Choi, Y. M. Ha, H. S. Kim, M. H. Won(Mechanical and Intelligent Systems Eng.
Dept., PNU), S. H. Lee(Mechanical Eng. School, PNU)

ABSTRACT

Microstereolithography has evolved from the stereolithography technique, and is also based on a light-induced layer-stacking manufacturing. Integral microstereolithography is proposed for building a 3D microstructure rapidly, which allows the manufacture of a complete layer by one irradiation only. In this study, we developed the integral microstereolithography apparatus based on the use of DMD™ as dynamic pattern generator. It is composed of Xenon-Mercury lamp, optical devices, pattern generator, precision stage, controllers and the control program. Also, we estimated curing characteristics in photopolymer. The relationship between the viscosity of diluent-oligomer solutions and curing width, irradiation time and curing property has been studied.

Key Words : Microstereolithography (마이크로 광 조형기술), Digital Micromirror Device (DMD™), Photocurable resin (광경화성 수지), Cure resolution (경화정밀도)

1. 서론

높은 세장비(aspect ratio)를 가지는 복잡한 3차원 형상의 마이크로 구조물의 응용범위는 다양하다. 미 소기계 부품, 정보통신기기 부품, 바이오메디컬 영역 등에서 향후 쓰임이 증대될 것으로 예상하고 있다. 하지만 기존의 MEMS, LIGA, 비등방성 식각 기술로 이러한 임의형상의 미세 3차원 구조물을 제작하는 데는 한계가 있다. 그래서 기존의 광 조형기술(stereolithography)을 응용하여 높은 세장비를 가지는 3차원 형상의 마이크로 구조물을 제작하는 방법으로써 마이크로 광 조형 기술(microstereolithography)이 있다[1]. 기존의 광 조형기술의 기본원리와 유사하게 액체상태의 광경화성 수지에 레이저나 램프에서 나오는 자외선을 조사하여 일정한 층 두께를 가진 단면을 미세하게 경화시키고 그러한 형상을 반복적으로 적층하여 3차원 구조물을 만드는 방법이다.

이러한 마이크로 광 조형기술에는 xyz 스테이지의 vector by vector 움직임에 의한 scanning type의 마

이크로 광 조형법과 패턴 형성기(pattern generator)를 이용하여 한 층을 한번에 적층하는 projection type의 마이크로 광 조형법이 있다[2].

프로젝션법(projection method)에 의한 마이크로 광 조형법은 Integral microstereolithography라고도 하며 스캐닝법과는 달리 구조물 제작과정중 광원에서 조사되는 광의 경로를 고정시킨 채 패턴 형성기(pattern generator)를 이용하여 광의 단면모양에 패턴을 발생시켜 광경화성 수지에 입사됨으로써 한 층을 한번에 경화시키는 방식이다. 이 방법은 스캐닝법에 의한 마이크로 광 조형기술에서 나타난 단점, 즉 레이저 주사경로 생성 및 정밀 포커싱 고려에 의한 상대적으로 긴 제작시간, 빔의 포커싱 때문에 나타나는 thermal effect에 의한 원하지 않는 경화, 상대적으로 복잡한 공정 등을 극복하기 위해 제안되었다. 특히 한 층의 단면이 복잡한 패턴을 가지는 것에 상관없이 한번의 빛의 조사에 의해 한번에 단면이 적층되기 때문에 제작시간을 크게 단축시킬 수 있다[3].

본 논문에서는 첫째, 이러한 projection type의 마

이므로 광 조형기술의 장점을 바탕으로 DMD™(Digital Micromirror Device)를 이용한 마이크로 광 조형장치 개발에 관한 연구를 다루었다. 실제로 마이크로 광 조형 장치를 설계, 개발하고 마이크로 구조물 제작 공정에 따라 가공품을 제작해 보았다. 둘째, scaling law를 고려해 수지표면에서의 표면 장력을 낮추고 적층과정 중 자유표면 형성에 소요되는 시간을 줄이기 위해 수지의 점성도 변화에 대한 실험내용 및 고찰을 다루었다. 셋째, 제작된 마이크로 광 조형 시스템을 활용하여 미세 구조물을 제작하기 위한 선행실험으로 UV 미러를 이용하여 UV 광의 노출시간(exposure time) 변화에 따른 경화폭 변화 측정 및 FT-IR 스펙트럼 분석을 하였다. 마지막으로, 에폭시 광경화성 수지와 우레탄 아크릴레이트 광경화성 수지의 경화특성 차이를 실험을 통해 고찰해 보았다.

2. 미세 구조물 제작 시스템 개발

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 3차원 마이크로 구조물을 제작하기 위해 다이내믹 패턴 형성기를 이용한 프로젝션타입의 마이크로 광 조형기술(integral microstereolithography)을 활용한 가공 시스템을 구축하였다. 다이내믹 패턴 형성기에는 수십만장의 13.68 μm 크기의 미세한 거울(mirror)을 하나의 칩(chip)으로 집적한 형태이며 투사되는 빛을 78만개의 움직임은 미세구동거울로 제어함으로써 각 픽셀(pixel)당 밝고 어두움을 표현하여 동영상 이미지를 만들어낼 수 있는 반사형 표시장치인 Digital Micromirror Device (DMD™)를 사용하였다. 구축된 마이크로 광 조형 시스템을 부분적으로 살펴보면 Optical system 부, 다이내믹 패턴 생성 system부, Precision stage & Control system부로 나뉜다.

Optical system부에는 Xenon-Mercury Lamp와 ND filter, External Shutter, Optical(Convex) lens, Focusing optic등 각종광학계가 설치되어 있다. 미세 구조물을 제작하기 위해 액체 상태의 수지에 광경화 반응을 일으키도록 광원에는 Broad-band의 UV 영역의 파장을 가지는 광을 발하는 Xenon-Mercury Lamp를 사용하였다. 램프 출력 입구부에는 출력광을 평행광으로 만들기 위한 Collimating lens가 부착되었고 특정한 Band의 파장을 가지는 자외선을 적출할 수 있는 UV filter를 탈착가능하게 하였다. UV filter를 제외했을 때 램프에서 조사되는 light의 세기를 낮추기 위해 투과율이 20%인 ND(neutral density) filter를 사용하였고, 외부에 설치된 셔터(shutter)의 개폐를 통해 램프에서 나오는 light을 차단가능하게 하였다. 그리고 평행광을 만들기 위한 Optical(Convex) lens와 수지경화 지점에서의 포커싱(focusing)을 위해 Focusing optic이

사용되었다.

다이내믹 패턴 생성 system부에는 1024x768 픽셀을 가지는 0.7 XGA DDR(Double Data Rate) DMD칩이 부착된 Controller board가 설치되어 있다. 본 연구에서는 다이내믹 패턴 형성기로 TI(Texas Instruments)사가 개발한 DMD Discovery Starter 1100 Kit UV DMD를 사용하고 있다. 또한, 패턴 형성에 따른 수지의 기본 경화특성 파악 실험을 위해 UV mirror를 DMD 대신 장착해 사용하였다.

Precision stage & Control system부에는 성형품의 가공 중 적층을 위한 z축 이송을 위해 linear brushless servomotor를 drive system으로 하는 1축 초정밀 스테이지와 서터, 스테이지 및 DMD를 제어하기 위한 윈도우즈 운영체제 기반의 PC로 구성되어 있다. 스테이지는 travel range가 50mm이고 resolution은 500nm이며 반복정밀도는 $\pm 0.1\mu\text{m}$ 이다.

본 연구에서는 프로젝션 타입의 마이크로 광 조형기술을 통해 미세 구조물을 제작하기 위해 패턴 형성기로 Digital Micromirror Device (DMD™)를 사용하고 있다. 그런데 본 연구에서 사용하고 있는 UV DMD는 규격에서 허용 작동조건을 가지기 때문에 광 강도(light intensity)를 변화시키면서 실험을 할 경우 DMD의 허용 작동범위를 초과할 때 고가의 장비인 DMD에 손상을 발생시킬 수 있다. 그래서 UV mirror를 사용해서 DMD의 반사면 사이즈와 같은 14x11mm만큼 자외선을 반사하게 하여 초기 선행 실험에 사용하였다.

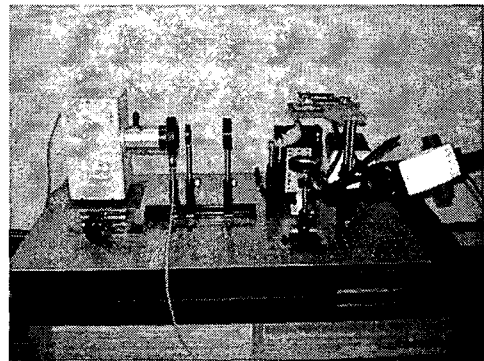


Fig. 1 Photograph of the integral microstereolithography apparatus using a dynamic pattern generator

3. 실험결과 및 고찰

3.1 수지의 점성도 변화에 대한 실험

자유액면방식(free surface technique)의 마이크로

광 조형법에서는 광경화성 수지의 점도가 높을 경우 자유표면 형성에 소요되는 시간 때문에 형상 제작 시간이 상대적으로 길게 된다는 단점이 있다. 그래서 본 절에서는 scaling law를 고려해 수지표면에서의 표면장력을 낮추고 적층과정 중 자유표면 형성에 소요되는 시간을 줄이기 위해 수지의 점성도 변화에 대한 실험내용 및 고찰을 다루었다.

본 연구에서 사용된 UV 광경화성 수지인 3dsystems사의 SI 40의 조성 성분은 반응성 올리고머(oligomer), 반응성 단량체(monomer), 광개시제(photoinitiator), 첨가제 등으로 구성되어 있으며, 경화되기 전의 액체 수지의 점도(viscosity)는 485 cps이다. 올리고머(oligomer)가 Cycloaliphatic epoxy resin인 SI 40의 점성도를 낮추기 위해 희석모노머(diluent)인 Isobornyl acrylate (IBXA)를 사용하였다. SI 40 수지와 희석 모노머 혼합은 식 (1)을 이용해 weight% 비로 배합하였고, 혼합할 때는 Overhead Stirrer 기기를 이용하여 상온에서 혼합용액을 빛과 공기가 차단된 비이커에 넣고 150 rpm에서 샘플당 3 시간동안 용해시켜 혼합하였다. 그리고 용해시킨 다음 2시간동안 안정화 시킨 후 각 샘플의 점도(viscosity)를 측정하였다.

$$x \text{ Weight\%} = \frac{\text{Resin (g)}}{\text{Resin (g)} + \text{Diluent (g)}} \times 100 \quad (1)$$

Table 1 Formulations of Resin and Reactive Diluents

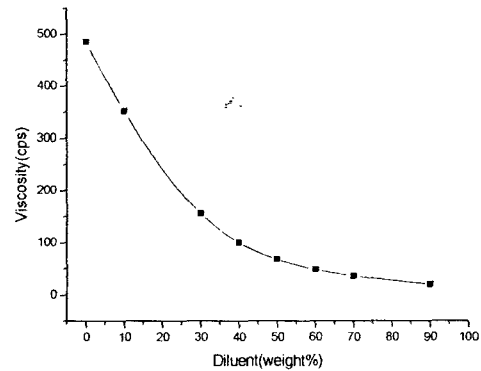
| Sample names | Weight(g) | | Weight% | Sample names | Weight(g) | | Weight% |
|--------------|-----------|---------|---------|--|-----------|---------|---------|
| | Resin | Diluent | | | Resin | Diluent | |
| EP00 | 200 | 0 | 100 | AC00 | 120 | 0 | 100 |
| EP10 | 180 | 20 | 90 | AC30 | 84 | 36 | 70 |
| EP30 | 140 | 60 | 70 | AC50 | 60 | 60 | 50 |
| EP40 | 120 | 80 | 60 | AC70 | 36 | 84 | 30 |
| EP50 | 100 | 100 | 50 | ex) EP30 : Epoxy resin(70 weight%) + Diluent(30 weight%) (AC : Acrylate resin) | | | |
| EP60 | 80 | 120 | 40 | | | | |
| EP70 | 60 | 140 | 30 | | | | |
| EP90 | 20 | 180 | 10 | | | | |

점도는 Brookfield viscometer(Model LVDV II+)의 Cone/Plate형을 사용하여 rpm을 5에서 100까지 조정하면서 측정치의 변동이 없고 평형을 이룰 때 측정 수치를 읽었다. 측정할 때 spindler 4를 사용하였으며, 실험 환경 온도는 21C이다.

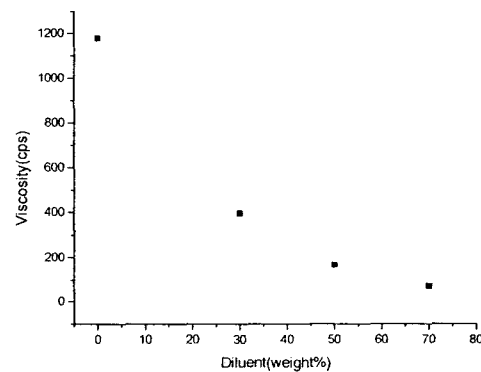
희석 모노머의 무게비에 따라 배합된 12가지 용액에 대해 측정된 점도는 Table 2와 같다.

Table 2 Experimental results of viscosity in various solutions using Brookfield Viscometer

| Sample names | Viscosity (cps) | Sample names | Viscosity (cps) |
|--------------|-----------------|--------------|-----------------|
| EP00 | 485 | AC00 | 1180 |
| EP10 | 352 | AC30 | 396 |
| EP30 | 156 | AC50 | 168 |
| EP40 | 100 | AC70 | 72 |
| EP50 | 68 | | |
| EP60 | 48 | | |
| EP70 | 36 | | |
| EP90 | 20 | | |



(a) Epoxy-based solution



(b) Acrylate-based solution

Fig. 2 Experimental results of viscosity in various solutions using Brookfield Viscometer

그리고, 제작된 마이크로 광 조형 시스템을 활용하여 미세 구조물을 제작하기 위한 선행실험으로 UV 미러를 이용하여 UV 경화성 수지의 점도 변화

에 따른 경화폭 변화를 측정하였다. 각 시편은 한 층의 두께가 $20\ \mu\text{m}$, 노출시간(1 layer) 5초이며 전체 50층의 적층공정으로 제작되었다. 적층과정 중 한층 경화 후 다음 층을 경화시키기 위해 스테이지가 이동할 때 셔터제어를 통해 UV 광을 차단하였다. 수지의 점도 변화에 따른 횡방향의 경화폭 측정 결과는 다음과 같다.

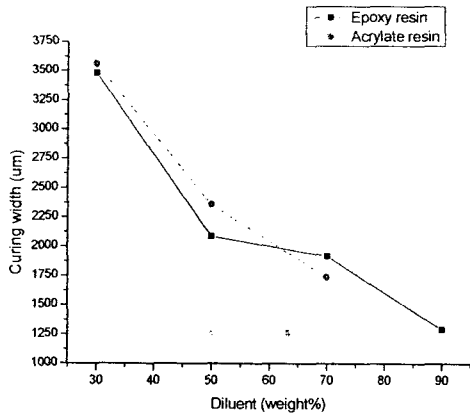


Fig. 3 Curing width vs. Diluent(weight%)

수지표면에 조사되는 UV 광의 실제 횡방향 spot size는 약 $2000\ \mu\text{m}$ 이며, 희석모노머(diluent)의 무게비가 클수록 경화폭(curing width)이 작아지는 것은 희석모노머의 무게비가 커질수록 상대적으로 중합에 참여하는 반응성 올리고머(oligomer)의 양이 현저히 줄어들기 때문으로 생각된다. 또한 실험에서 희석모노머가 전혀 배합되지 않은 SI 40 수지(EP00)은 점도가 높아 표면장력 때문에 수지의 자유표면 형성이 어려웠고 시간도 상당히 오래 걸려 본 연구에서 제안한 프로젝션타입의 마이크로 광 조형법을 활용하고 있는 위 실험에서는 배제하였다.

한편, 같은 실험조건에서 Acrylate-based resin을 경화시켜 미세 구조물을 제작했을 때, 경화속도는 Epoxy-based resin에 비해 빠르나 고착력(adhesion)이 떨어져 적층과정 중 층간 이탈이 일어나고 Fig. 4와 같이 경화 후 IPA(isopropyl alcohol)로 세척시 변형이 쉽게 일어나는 것을 확인할 수 있었다.

그래서 향후 실험에서는, 본 연구에서 개발된 마이크로 광 조형 시스템을 위한 가공재료의 특성에 맞게 수지의 점도를 최소화 하면서 경화 후 특성에 큰 영향을 미치는 oligomer량을 최대한으로 하고, 광의 spot size 및 실제 실험 후 경화정도를 평가하여, 희석모노머(diluent)를 50% 배합한 Epoxy-based solution인 EP50을 사용하였다.



Fig. 4 Photograph of the fabricated part

3.2 노출시간 변화에 따른 경화특성 평가

제작된 마이크로 광 조형 시스템을 활용하여 미세 구조물을 제작하기 위한 선행실험으로 UV 미러를 이용하여 UV 광의 노출시간(exposure time) 변화에 따른 경화폭 변화를 측정하였다. 각 시편은 한 층의 두께가 $20\ \mu\text{m}$, 전체 50층의 적층공정으로 제작되었다. 수지표면 경화지점에서의 광 강도(light intensity)는 $690\ \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 이다. 적층과정 중 한층 경화 후 다음 층을 경화시키기 위해 스테이지가 이동할 때 셔터제어를 통해 UV 광을 차단하였으며, 실험 환경 온도는 18C 이다. 수지표면에 조사되는 광의 노출시간 변화에 따른 횡방향의 경화폭 측정 결과는 다음과 같다.

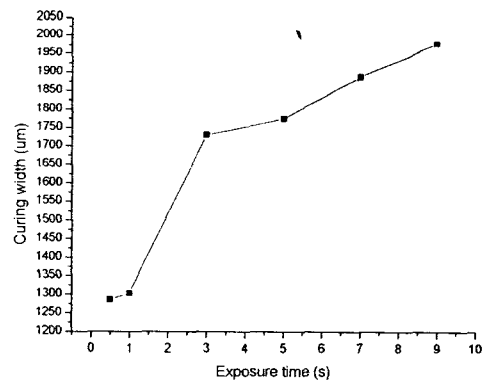
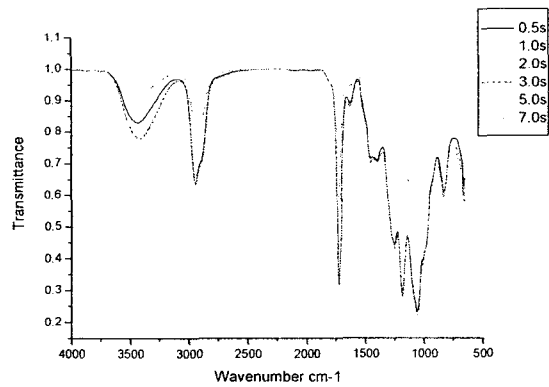


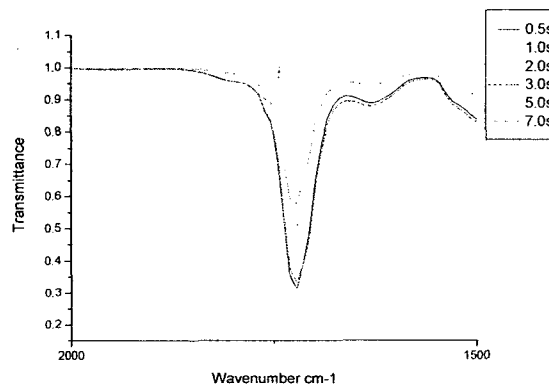
Fig. 5 Curing width vs. Irradiation time

제작되는 구조물의 적층과정 중 1 layer에 조사되는 광의 노출시간이 클수록 경화폭도 커지며, 특히 1-3초 사이에서 경화속도의 증가가 두드러진다는 것을 알 수 있다.

또한, 수지표면에 조사되는 광의 노출시간 변화에 따른 FT-IR 분석 결과는 다음과 같다.



(a)



(b)

Fig. 6 FT-IR spectra of EP50 at different UV irradiation time

그림에 나타난 각각의 특성 피크는 C-H Aliphatic (2950 cm^{-1}), C-O (1180 cm^{-1}), C-C (1050 cm^{-1}), 그리고 C=O (1726 cm^{-1}) group에 대한 것이며, UV 경화가 진행됨에 따라 각 피크가 모두 작아지는 것을 알 수 있으며, 특히 에폭시기를 형성하는 C-O (1180 cm^{-1}), C-C (1050 cm^{-1}) group의 피크가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 또한, Fig. 6(b)에서 C=O (1726 cm^{-1}) group의 피크에서 알 수 있듯이 노출시간이 5초일 때 초기 경화가 상당히 진행되었음을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 projection method를 사용하는 마이크로 광 조형기술의 장점을 바탕으로 DMD™(Digital Micromirror Device)를 이용한 마이크로 광 조형 시스템 개발에 관한 연구를 다루었다. 마

이크로 광 조형장치를 설계, 개발하고 간단한 프로토타입(prototype)을 제작해 보았다. 또한, 적층공정 중 발생하는 문제점을 해결하기 위해 수지의 점성도 변화에 대한 실험 및 고찰을 하였고, 광의 노출시간 변화에 따른 경화폭 측정 및 FT-IR 분석을 통해 향후 실험에서의 적정 노출시간을 파악할 수 있었다.

참고문헌

- Ikuta K., Hirowatari K., "Real three dimensional micro fabrication using stereo lithography and metal molding," in Proceedings of the 6th IEEE Workshop on MEMS'93, pp. 42-47, 1993.
- Vijay K. Varadan, et al, "Microstereolithography and other Fabrication Techniques for 3D MEMS," pp. 103-104, 2001.
- Bertsch A., Bernhard P., Vogt C., Renaud P., "Rapid prototyping of small size objects," Rapid Prototyping Journal, Vol. 6, pp. 259-256, 2000.
- Bertsch A., Jezequel J. Y., Andre J. C., "Study of the spatial resolution of a new 3D micro fabrication process: the microstereolithography using a dynamic mask-generator technique," J. of Photochemistry and Photobiology A:Chemistry 107, pp. 275-282, 1997.
- Zhang X. Ziang X. N., Sun C., "Micro-stereolithography of polymeric and ceramic microstructure," Sensors and Actuators 77, pp. 149-156, 1999.
- Schaeffer P., Bertsch A., Corbel S., Jezequel J.Y., Andre J.C., "Relations between light flux and polymerized depth in laser stereolithography," J. of Photochemistry and Photobiology A:Chemistry 107, pp. 283-290, 1997.
- Dae Su Kim, Woo Hyun Seo, " Ultraviolet-Curing Behavior and Mechanical Properties of a Polyester Acrylate Resin," J. of Applied Polymer Science, Vol. 92, pp. 3921-3928, 2004.
- Vogt C., Bertsch A., Renaud P., Bernhard P., "Methods and algorithms for the slicing process in microstereolithography," Rapid Prototyping Journal, Vol. 8, pp. 190-199, 2002.