

극소 광 조형기술을 이용한 3 차원 구조물의 제작

이인환*(포항공대 대학원 기계공학과), 조동우(포항공대 기계공학과)

Fabrication of 3D structures using micro-stereolithography technology

I. H. Lee, D. W. Cho(Mech. Eng. Dept. POSTECH)

ABSTRACT

Micro-stereolithography is a newly proposed technology as a means that can fabricate 3D micro-structures of free form. It makes a 3D structure by dividing the shape into many slices of relevant thickness along horizontal surfaces, hardening each layer of slice with a laser, and stacking them up to a desired shape. Scale effect becomes important in this micro-fabrication process, differently from the conventional stereolithography. To realize this micro-stereolithography technology, we developed an equipment using Ar⁺ laser, xyz stages, controllers and all the optic devices. Using the equipment, a number of micro-structures were successfully fabricated including a winecup of several tens of micrometers.

Key Words : Micro stereo lithography technology(극소 광 조형기술), Laser(레이저), Optical system(광학계), x-y-z stage(x-y-z 스테이지), Photopolymer(광 경화성 수지), 3D micro structure(3 차원 극소 구조물)

1. 서론

전 세계적으로 사회가 발전하고 구성원들의 요구가 점차 다양해지고 복잡해짐에 따라 기술도 보다 더 진보적이고 혁신적인 것들이 요구되고 있다. 극소 기술(Micro System Technology, MST)도 이러한 요구에 부응하여 근래 들어 대두되기 시작한 기술로서 21 세기를 이끌어 나갈 첨단 기술로 주목 받고 있다.

현재 극소 기술을 이용한 제품들 중에는 잉크젯 프린터의 헤드, 에어 백 센서를 위한 가속도계 등 일부 실용화 된 것들도 있다. 이러한 극소형 제품을 생산하기 위하여 현재 가장 많이 이용되고 있는 기술들은 MEMS(Micro Electric Mechanical System)나 LIGA(Lithography Galvanoforming Abforming)공정 등이다. MEMS 나 LIGA 공정은 반도체 제조공정을 그 기반으로 하고 있다. 따라서 대량생산 및 신호 처리 회로와의 일체형 등의 장점을 가지고 있으나, 높은 세장비(Aspect Ratio)나 복잡한 곡선 단면형상을 갖는 제품을 제작할 수 없다. 특히 LIGA 기술의 경우는 높은 세장비의 제품을 만들 수는 있으나 이 또한 복잡한 단면형상을 갖는 제품을 만들 수 없고, 방사광 가속기의 X 선을 이용해야 하므로 제

조단가가 고가이다.

이러한 MEMS 나 LIGA 기술의 단점을 극복하기 위하여 새롭게 제안된 기술이 광 조형기술(stereolithography)을 응용한 극소 광 조형기술(micro-stereolithography)이며, 이는 극소 제품을 생산하기 위한 다음 세대의 기술로서 세계적으로 주목되고 있다. 극소 광 조형기술은 높은 세장비를 갖는 복잡한 3 차원 단면형상을 갖는 극소형 제품을 생산해 낼 수 있다. 하지만, 수 μ m 의 얇은 단면층을 계속 적층하여 제품을 생산해 내는 방법을 이용하므로, 상대적으로 높은 표면 거칠기를 가지며, 상대적인 치수정밀도 또한 높지 못하다.

극소 광 조형기술은 일본의 K. Ikuta 에 의해서 처음으로 제안되었으며⁽¹⁾, 현재까지 극소 광 조형기술과 관련하여 발표되고 있는 연구 결과들은 대부분 극소 구조물을 좀 더 정밀하고 안정적으로 제작하는 방안과 관련된 것이 대부분이며, 최근 들어서는 극소 광 조형기술을 이용한 몇 가지 제품개발 사례가 발표되고 있다.

K. Ikuta 등은 1992 년경부터 이 기술에 관한 연구를 시작하여 이 분야에서 많은 연구 결과들을 발표하고 있다. 그는 IH(Integrated Harden Polymer Stereo Lithography)공정⁽¹⁾ 및 이를 좀더 발전시킨

Super IH 공정⁽²⁾들을 제안하였고, 이를 이용하여 3차원 형태의 굴절 파이프, 코일 스프링, 정맥벨브 그리고 마이크로 칩 등을 제작하였다. 또한 광섬유를 이용한 대량생산 방안 및 이를 금형으로 한 다른 재질의 극소 구조물 제작방안을 제시하기도 하였다.

또한 A. Bertsch 등은 광원을 고정하고 액정을 이용한 패턴발생기를 이용하여 광 경화성 수지에 빛을 가 함으로서 제작시간을 단축시키는 방안을 제시하였다⁽³⁾. 또한 기존의 LIGA 기술과 극소 광 조형기술을 조합하여 단일 구조물에서 높은 표면조도와 치수정밀도 및 복잡한 곡면형상을 동시에 구현하는 기술을 개발하기도 하였다⁽⁴⁾. 그리고 X. Zhang 등은 광 경화성 수지 대신 세라믹을 모노머, 광 개시제 등과 혼합하고 여기에 자외선 레이저를 주사하여 세라믹으로 된 극소 구조물을 제작하는 기술을 개발하였다⁽⁵⁾.

본 연구에서는 이러한 특징을 갖는 극소 광 조형기술 개발을 위한 단계의 하나로서, 극소 광 조형장치를 개발 하였다. 그리고 이를 이용하여 몇 가지 성형품을 제작 하였다.

2. 극소 광 조형장치의 개발

2.1 극소 광 조형장치의 특징

극소 광 조형기술은 기본원리가 기존의 광 조형기술과 유사하다. 즉, 자외선이 조사되면 광 경화성 수지가 굳어지는 원리를 이용, CAD로 만들어진 제품의 형상데이터를 일정한 층두께를 가진 단면으로 나누고, 이 층들을 계속 적층하여 3차원 형상의 제품을 제작하게 되는 것이다(그림 1).

하지만 마이크로 단위의 제품에는 "scale effect"가 존재하며, 이는 매크로 크기의 제품을 제작하는 기존의 광 조형기술에서는 무시할 수 있었던 수지의 점성, x-y-z 스테이지(stage)의 정밀도등과 같은 문제점들의 원인이 된다. 따라서 극소 광 조형기술의 구현을 위한 장치의 개발을 위해서는, 자외선 빛에 의한 광 경화성 수지의 반응현상, 정밀한 x-y-z 스테이지의 제어 그리고 수 μm 크기를 갖는 자외선 빛의 초점제어등에 대한 연구 및 기술개발이 필

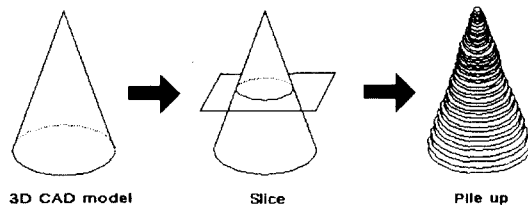


Fig. 1 Fabrication process of stereolithography by stacking up the sliced cross-sections.

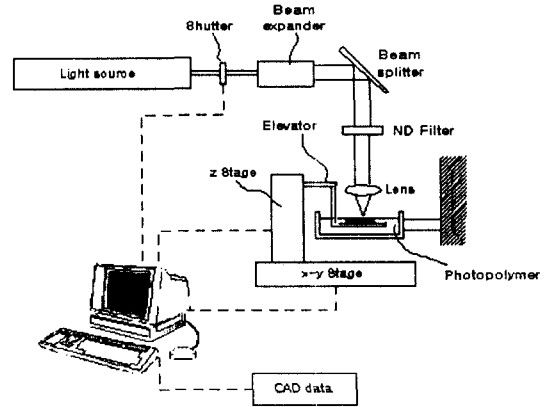


Fig. 2 Schematic diagram of developed micro stereo lithography apparatus.

수적이다. 또한 레이저 빛에 반응하는 광 경화성 수지의 특성 및 이에 따른 제작공정의 개발도 필요하다.

2.2 광학계 및 제어 시스템

그림 2는 본 연구에서 개발된 극소 광 조형장치의 개략도이다. 광원으로는 CW(continuous wave) Ar+레이저를 이용하였다. 이 레이저는 파장 351.1nm에서 약 460mW의 최대 출력을 갖는다. 레이저에서 나온 자외선 빛은 렌즈(lens)로 입사되어 광 경화성 수지(photopolymer) 위에 초점이 맺히게 된다. 이때 원하는 작은 초점반경을 갖는 동시에 상대적으로 긴 초점거리를 갖는 렌즈를 이용하기 위하여 빔 익스팬더(beam expander)를 이용하여 빛의 지름을 확대 하였다. 렌즈에 입사하는 빛의 반경에 따른 초점반경의 변화는 식 1과 같다.

$$w_{0\min} = \frac{f\lambda}{\pi R} \quad (1)$$

여기서 w_0 = 렌즈에 의한 레이저 빛의 초점반경, f = 빛의 파장, R = 렌즈에 입사 되는 레이저 빛의 반경이다.

한편 광 경화성 수지의 경화 특성 및 제작하는 제품의 크기 및 형상에 따라서 레이저의 파워를 적절히 조절해 주어야 한다. 본 연구에서 제작하려는 형상은 수십 - 수백 μm 단위의 매우 작은 크기를 가지므로 상대적으로 큰 출력인 레이저 파워를 바로 적용할 수가 없다. 따라서 ND 필터(neutral density filter)를 이용하여 레이저의 파워를 적절히 조절 하였다. 그리고 레이저 빛의 방향을 원하는 방향으로 조정하기 위하여 빔 스피리터(beam splitter)를 이용 하였다. 이 빔 스피리터 또한 레이저 빛의 에너지를 일정한 비율로 투과/반사 시키기

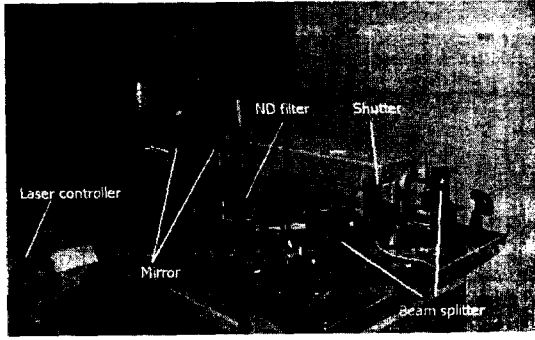


Fig. 3 Photograph of developed micro-stereolithography apparatus.

때문에 레이저 빛의 출력을 줄이는 역할도 하고 있다.

자외선 레이저 빛을 광 경화성 수지에 주사하여 원하는 형상을 만들기 위해서는 경화된 수지를 고정 시키는 장치가 필요하다. 이를 위하여 x-y-z 스테이지에 부착되어 광 경화성 수지가 담긴 용기 내에서 x-y-z 방향으로 이동하는 엘리베이터(elevator)를 제작 하였다. 이 엘리베이터에는 경화된 수지가 부각 될 수 있도록 슬라이드 글라스(slide glass)로 된 고정 판이 부착되어 있다. 따라서 성형 후 이 슬라이드 글라스 판을 빼내고 성형품에 묻은 성형되지 않은 광 경화성 수지를 알코올로 세척하여 원하는 형상을 얻을 수 있다.

또한, 원하는 단면형상을 성형하기 위해서는 x-y-z 스테이지 및 셔터(shutter)를 적절히 제어하여야 한다. 즉, 매 층에서 단면형상의 제작을 위해서는 x-y 스테이지가 단면형상에 따라서 구동 되어야 하며, 또한 1mm 내에서 서로 연결되지 않는 형상이 있을 경우 하나의 형상에서 다른 형상으로 스테이지가 이동 할 때에는 레이저 빛을 차단 하도록 셔터를 동작시켜야 한다. 그리고 한 층을 만들고 다른 층으로 이동 시키기 위해서는 z 축 스테이지를 동작 시켜야 하며, 이 때에도 역시 셔터를 닫아 레이저 빛을 차단하여야 한다. 이를 위한 x-y-z 스테이지 및 셔터의 동작은 컴퓨터 프로그램을 작성하고 이를 통해 제어 하였다. 그림 3은 제작된 극소 광 조형장치의 사진이다.

2.3 수지 경화모델 및 해석 프로그램

일반적인 광 조형장치에서, 이용되는 레이저 빛은 성형 되는 대상 제품의 크기가 상대적으로 크므로 레이저 빛을 매우 작은 초점을 만들지 않고 평행광을 이용하는 것이 대부분이다. 하지만 극소 광 조형장치의 경우는 레이저 빛을 렌즈를 이용하

여 수 μm 크기를 갖는 매우 작은 초점을 만들고 이를 광 경화성 수지에 주사하여 제품을 성형하여야 한다. 따라서 이러한 극소 광 조형장치를 이용하여 극소 구조물을 제작하기 위해서는 레이저에 의한 광 경화성 수지의 경화모델을 만들고 이를 이용하여 경화현상을 예측하는 것이 필수적이다.

레이저 빛이 광 경화성 수지의 표면에 초점이 만들어 진 경우, 레이저 빛에 의한 광 경화성 수지의 경화현상은 식 (2)와 같이 표현된다

$$\frac{2}{w_0(z)^2} y^2 + \frac{z}{D_p} = \ln \left(\sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{P_L}{w_0(z)^2 V_s E_c} \right) \quad (2)$$

여기서, $w_0(z)$ = 광 경화성 수지에서의 레이저 빛의 반경, y^* = 광 경화성 수지 표면에서의 경화 폭, z^* = 경화깊이, D_p = 투과깊이, P_L = 단위면적당의 레이저 파워, V_s = 레이저 이송 속도, E_c = 임계노출이다. 이때 $w_0(z)$ 는 레이저 빛의 반경이 수지의 깊이방향 z 에 따라서 변화하기 때문에 식 (3)과 같이 쓸 수 있다.

$$w_0(z) = w_{0\min} \sqrt{1 + \frac{\lambda z}{\pi w_{0\min}^2}} \quad (3)$$

이를 이용하여 레이저에 의해 광 경화성 수지가 굳어지는 현상을 해석 할 수 있는 프로그램을 제작 하였다. 이 프로그램을 이용하여 레이저 파워, 이송속도 등의 조건에서 광 경화성 수지가 굳어지는 현상을 파악할 수 있다.

3. 극소 구조물의 제작

이상의 장치를 이용하여 몇 가지 극소 구조물을 제작하여 보았다. 성형에 사용된 광 경화성 수지는 일반적인 광 조형장치에 이용되는 미국 3D Systems 사의 SL-5410 이다. 이 광 경화성 수지는 본 연구에 이용된 레이저와 동일한 파장을 갖는 상용화된 광 조형장치에 이용되는 수지로서, 투과깊이 4.8mm, 임계노출 $10.1\text{mJ}/\text{cm}^2$ 이다.

그림 4 는 제작된 극소 광 조형장치를 이용하여 제작된 단일 층을 갖는 "POSTECH"글자 형상의 전자현미경 사진이다. 글자의 전체 가로 폭은 약 1mm, 높이는 약 400 μm 그리고 글자의 선폭은 약 40 μm 이다.

앞서 언급한 바와 같이 슬라이드 글라스 위에 성형을 하였으며, 이때 슬라이드 글라스에 성형된 매우 작은 경화된 수지가 세척 과정에서 떨어지는 현상이 발생 하였다. 따라서 이를 방지하기 위해서 그림 4 에서 보는 바와 같이 글자 크기보다 넓

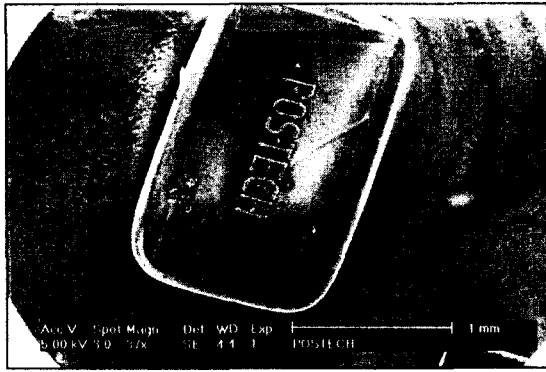


Fig. 4 SEM photograph of micro text.

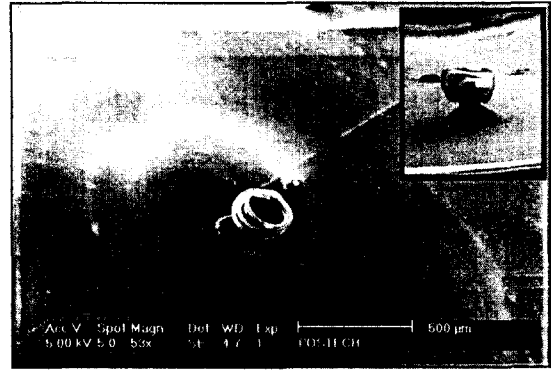


Fig. 5 SEM photograph of micro cup..

은 층을 우선 슬라이드 글라스 위에 성형하고, 그 위에 글자를 성형하는 방법을 이용 하였다.

총 제작시간은 40 분 가량이 소요되었으며, 이는 동일한 형상을 반도체 공정을 이용한 MEMS 기술로 제작 시, 마스크 제작 및 노광 공정에 따르는 시간에 비교할 때 매우 짧은 시간임을 알 수 있다. 따라서 극소 광 조형기술을 이용하면 기존의 반도체 공정을 이용한 MEMS 나 LIGA 기술에 비해서 매우 짧은 제작 시간이 소요됨을 알 수 있다.

그림 5 는 성형 된 “마이크로 컵”의 광학 현미경 사진이다. 컵의 전체 높이는 460 μm 외경은 440 μm 이다. 이 형상은 높이 20 μm의 23 개의 층으로 구성되어 있으며 제작시간은 약 3 시간 이다. 그림 5 에서 컵의 윗부분 형상이 정확한 원형으로 성형되지 않았다. 이는 광 경화성 수지의 점성이 370cps 로 크기 때문에 수지 내에서 엘리베이터가 이동할 때 점성력이 크게 작용하기 때문으로 생각된다. 또한 컵의 위 부분이 기울어진 것은 세척시 수지가 씻기면서 발생 하였으며 이 또한 수지의 점성에 기인한다. 따라서 현재 새로운 광 경화성 수지의 적용을 검토 중에 있다.

4. 결론

극소 광 조형기술은 극소제품을 제작하는 기술인 MEMS 나 LIGA 기술의 단점을 극복하기 위하여 새롭게 제안된 기술이며, 이는 자유로운 3 차원 단면형상을 갖는 극소제품을 제작할 수 있기 때문에 다음 세대의 기술로서 세계적으로 주목되고 있다.

본 연구에서는 이러한 극소 광 조형기술을 구현하기 위한 장치를 개발하였으며 이를 이용하여 간단한 형상의 3 차원 극소 제품을 제작하였다.

극소 광 조형기술을 이용하면 기존의 MEMS 나 LIGA 기술에 비하여 매우 적은 제작시간이 소요된다.

후 기

본 연구는 과학기술부 21 세기 프론티어 연구개발사업 및 산업자원부 차세대 신기술 개발사업 의 연구지원으로 수행 되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

1. K. Ikuta, K. Hirowatari, "Real three dimensional micro fabrication using stereo lithography and metal molding", Proc. of IEEE international Workshop on Micro Electro Mechanical system(MEMS '93), pp. 42-47, 1993.
2. K. Ikuta, S. Maruo and S. Kojima, "New micro stereo lithography for freely movable 3D micro structure", Proc. of IEEE international Workshop on Micro Electro Mechanical system(MEMS '98), pp. 290-295, 1993.
3. A. Bertsch, J. Y. Jezequel and J. C. Andre, "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.
4. A. Bertsch, H. Lorenz and P. Renaud, "Combining microstereolithography and thick resist UV lithography for 3D microfabrication", Proc. of IEEE international Workshop on Micro Electro Mechanical system(MEMS '98), pp. 18-23, 1998.
5. X. Zhang, X. N. Ziang and C. Sun, "Microstereolithography of polymeric and ceramic microstructure", Sensors and Actuators 77, pp. 149-156, 1999.