한국정밀공학회지 제 21 권 제 2 호 (2004 년 2 월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 21, No. 2, February 2004.

3 차원 형상의 미소제품 제작을 위한 마이크로 광 조형시스템의 개발

이인환#, 조윤형*, 조동우**, 이응숙***

Development of micro-stereolithography system for the fabrication of three-dimensional micro-structures

In Hwan Lee#, Yoon Hyung Cho*, Dong-Woo Cho** and Eungsug Lee***

ABSTRACT

Micro-stereolithography is a newly proposed technology as a means that can fabricate a 3D micro-structure of free form. It makes a 3D micro-structure by dividing the shape into many slices of relevant thickness along horizontal surfaces, hardening each layer of slice with a focused laser beam, and stacking them up to a desired shape. In this technology, differently from the conventional stereolithography, scale effect is dominant. To realize micro-stereolithography technology, we developed the micro-stereolithography apparatus which is composed of an Ar+ laser, x-y-z stages, controllers, optical devices and scan path generation software. Related processes were developed, too. Using the system, a number of micro-structures were successfully fabricated. Some of these samples are shown for prove this system. Laser scan path generation algorithm and software considering photopolymer solidification phenomena as well as given 3D model were developed. Sample fabrication of developed software shows relatively high dimensional accuracy compared to the uncompensated result.

Key Words : micro-stereolithography(마이크로 광 조형), photopolymer (광 경화성 수지), UV laser (자외선 레이저), Optical system (광학계), x-y-z stage (x-y-z 스테이지), 3D micro-structure(3 차원 마이크로 구조물), scan path(주사경로)

1. 서론

현재 마이크로 크기의 제품을 제작하기 위하여 가장 많이 이용되고 있는 기술들은 반도체 제작공정을 기반으로 하는 MEMS (Micro Electric Mechanical System)나 LIGA (LIthography Galvanoforming Abforming)공정 등이다. 이 기술을 이용하면, 노광 및 식각 등의 공정을 이용하여 2 차원 혹은 제한적인 3 차원 형상을 갖는 제품을 제작하게 된다. 따라서 대량생산 및 신호처리 회로와의 일체형 등의 장점을 가지고 있으나, 높은

접수일: 2003 년 6 월 24 일; 게재승인일: 2003 년 11 월 14 일
교신저자: 포항공과대학교 기계공학과
E-mail: anxanx@postech.ac.kr Tel: (054) 279-5889
* 현대자동차
** 포항공과대학교 기계공학과
*** 한국기계연구원

세장비(Aspect Ratio)나 복잡한 곡선 단면형상을 갖는 제품을 제작하기는 어렵다. 한편, LIGA 기술의 경우는 높은 세장비의 제품을 만들 수는 있으나 이 또한 복잡한 단면형상을 갖는 제품을 만들기 어렵고, 방사광 가속기의 X 선을 이용해야 하므로 제조단가가 고가인 경우가 많다.

이러한 MEMS 나 LIGA 기술의 한계점들을 극복하기 위하여 새롭게 제안된 기술이 쾌속 시작기술중의 하나인 광 조형기술(stereolithography)을 응용한 마이크로 광 조형기술(micro-stereolithography)이며, 이는 마이크로 크기의 제품을 제작하기 위한 다음 세대의 기술로서 주목 받고 있다.

현재까지 마이크로 광 조형 기술과 관련되어 발표되고 있는 대부분의 연구 결과들은 마이크로 형태의 3 차원 구조물을 좀 더 정밀하고 안정적으로 제작하는 방안과 관련된 것들이고, 최근 들어서 이 기술을 이용하는 몇 가지 제품개발 사례가 발표되고 있다. K. Ikuta[1,2]등은 1992 년경부터 마이크로 광 조형 기술에 관한 연구를 시작하여 이 분야에서 많은 연구 결과들을 발표하고 있다. 그는 IH(Integrated Harden Polymer Stereo Lithography)공정 및 이를 좀더 발전시킨 Super IH 공정들을 제안하였고, 이를 이용하여 3 차원 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. A. Bertsch[3,4] 등은 광원을 고정하고 액정을 이용한 패턴발생기를 이용하여 광 경화성 수지에 빛을 가 함으로서 제작시간을 단축시키는 방안을 제시하였다. 그리고, 기존의 LIGA 기술과 마이크로 광 조형기술을 조합하여 단일 구조물에서 높은 표면조도와 치수정밀도 및 복잡한 곡면형상을 동시에 구현하는 기술을 개발하기도 하였다. X. Zhang[5] 등은 세라믹을 모노머, 광 개시제 등과 혼합하고 여기에 자외선 레이저를 주사하여 세라믹으로 된 마이크로 구조물을 제작하는 기술을 개발하였다.

본 연구에서는 이러한 특징을 갖는 마이크로 광 조형장치를 설계 및 제작 하였다. 또한 이렇게 개발된 마이크로 광 조형장치를 이용하여 3 차원 형상을 갖는 제품을 제작하기 위하여 관련된 공정을 개발 하였다. 이렇게 개발된 마이크로 광 조형장치 및 관련공정을 이용하여 몇 가지 형태의 3 차원 제품을 개발 하였으며, 이를 통하여 제작된 장치를 검증 하였다. 그리고, 마이크로 광 조형에서 주어진 3 차원 CAD 모델뿐만 아니라 광 경화성 수지의 경화현상이 반영되는 레이저 빔의 주사경로를 생성하는 알고리즘 및 이를 이용한 프로그램을 제작하였다.

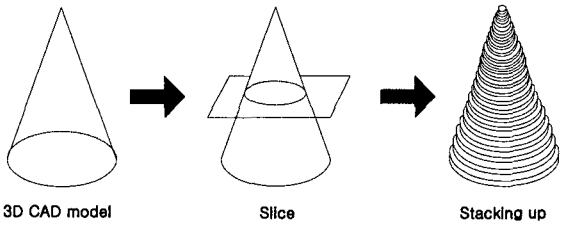


Fig. 1 Fabrication process of stereolithography by stacking up the sliced cross-sections.

2. 마이크로 광 조형기술의 특징

마이크로 광 조형기술에서 3 차원 형상의 제품이 제작되는 기본원리는 기존의 광 조형에서와 유사하다. 즉, 제작하려 하는 3 차원 형상을 일정한 두께를 갖는 얇은 층으로 나누고, 나누어진 각각의 단면형상에 따라서 자외선 레이저를 주사하여 최종적으로 3 차원 형상을 제작한다 (Fig. 1).

하지만 매크로 크기의 제품 제작을 위한 기존의 광 조형에서와는 달리 마이크로 광 조형에서는 제작되는 제품의 크기가 매우 작기 때문에 치수효과(scale effect)가 존재한다. 따라서 마이크로 광 조형에서는 기존의 광 조형에서는 무시될 수 있었던 몇 가지 사항을 필수적으로 고려하여야 한다 [1]. 즉, (1)광 경화성 수지의 점성이 무시할 수 없는 요소가 되며, 이는 제작되는 구조물의 변형 혹은 손상의 원인이 된다, (2)제작되는 구조물이 부착되는 기저판(substrate)과 구조물 간의 부착력에 대한 고려가 필요하다, (3)광 경화성 수지가 경화되는 최소 부피가 매우 작기 때문에 높은 정밀도의 x-y-z 스테이지의 제어가 필요하다. 그리고, 레이저 빔이 수 ㎛의 크기를 갖도록 하여야 하며, 이에 따르는 레이저 빔의 초점제어 및 관련 광학계의 설계가 필수적이다.

3. 마이크로 광 조형 시스템의 개발

3.1 레이저 주사방식

마이크로 광 조형은 레이저 빔이 광 경화성 수지에 주사되는 방식에 따라서 (a) 자유액면방식과 (b) 규제액면방식의 두 가지로 나뉘어 진다. 자유액면방식은 광 경화성 수지의 표면이 자유롭게 되어 있는 상태에서 레이저 빔이 그 위에 주사되는 방식이다. 반면에 규제액면방식은 광 경화성 수지와 주사되는 레이저 빔의 사이에 레이저 빔의 투과성이 높은 재질로 된 판이 있어 이것으로 광 경화성 수지의 면을 규제하는 방식이다.

각각의 형식은 나름대로 장점과 단점을 가지고 있다. 자유액면방식의 경우 상대적으로 용이하게 3 차원 마이크로 구조물을 제작 할 수 있다. 하지만 광 경화성 수지의 점성 때문에 층을 만드는데 소요되는 제작시간이 상대적으로 많이 요구된다. 반면에, 규제액면방식은 투명한 판이 층 두께를 제어할 수 있기 때문에 보다 짧은 시간이 소요된다. 하지만 이 경우, 성형되는 구조물이 투명한 판에 달라붙는 현상이 발생할 가능성이 높으며 이는 제작되는 구조물의 손상을 야기할 수 있다. 본 연구에서는 구조물의 손상을 방지하기 위하여 자유액면방식을 이용하는 레이저 주사방식을 적용하였다.

3.2 광학계 및 관련 시스템

Fig. 2 는 본 연구에서 제작된 마이크로 광 조형장치의 개략도 이다. 광원으로는 파장(λ)이 351.1nm (single line) 이고 가우스 반경(Gaussian half width)이 0.85mm 인 CW Ar+ 레이저(Spectra-Physics BeamLok 2065-4S)가 이용되었다.

레이저에서 나온 자외선 빔은 거울(mirror)과 선속 분할기(beam splitter)등으로 구성된 일련의 광학계를 통하여 원하는 방향으로 주사되게 된다. 이렇게 방향이 바뀌어진 레이저 빔은 초점거리가 50.8mm 이고 구경이 27mm 인 초점렌즈를 통하여 광 경화성 수지 위로 주사된다.

초점평면에서 레이저 빔이 매우 작은 가우스 반경이 만들어지기 위해서는 식 (1)에서 알 수 있듯이 렌즈에 입사되는 레이저 빔의 가우스 반경 (R)이 충분히 크거나 초점렌즈의 초점거리(f)가 충분히 작아야 한다. 하지만, 만약 초점렌즈의 초점거리가 짧게 되면 렌즈로부터 광 경화성 수지 표면까지 정확한 초점거리를 맞추기가 실제로는 매우 어렵다. 따라서 긴 초점거리를 갖는 초점렌즈를 사용하고 동시에 초점평면에서 매우 작은 레

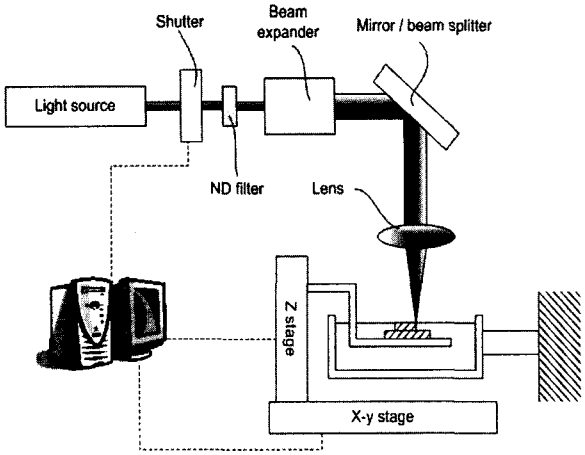


Fig. 2 Schematic drawing of the developed micro-stereolithography apparatus.

이저 빔의 반경을 만들기 위해 3 배율 빔 익스팬더(beam expander)를 이용하여 렌즈에 입사되는 레이저 빔의 가우스 반경을 증가시켰다. 식 (1)을 이용해 계산된 초점평면에서의 레이저 빔의 가우스 반경($W_{0\min}$)은 약 6.7 ㎛ 이다.

$$W_{0\min} = \frac{f\lambda}{\pi R} \tag{1}$$

마이크로 광 조형에서 성형되는 구조물의 크기는 수 십 ㎛ ~ 수 mm 정도의 크기를 가지며 따라서 사용되는 레이저의 파워를 낮추어 줄 필요가 있다. 여기서는 이를 위하여 몇 개의 ND 필터(neutral density filter)를 이용하였다. 빔 스프리터(beam splitter) 또한 레이저 빔을 감소시키는 역할을 하고 있다. 사용된 빔 스프리터의 투과/반사비는 50/50 이다.

마이크로 광 조형에서는 단면을 층층이 성형하여 쌓아 올리는 방법이 이용된다. 이때 앞서 성형된 아래의 층들은 그 위에 다음 층들이 성형될 수 있도록 광 경화성 수지 안에서 움직이는 기저판에 잘 고정되어 있어야 한다. 또한 성형이 모두 끝난 후에는 성형된 구조물이 용이하게 분리될 수 있어야 한다. 이를 위하여 x-y-z 스테이지에 고정되어 광 경화성 수지 내에서 기저판을 부착할 수 있도록 해 주는 엘리베이터(elevator)를 설계 하였다. 엘리베이터에 부착된 기저판 위에는 제작되는 구조물이 성형되게 되고, 성형공정이 끝

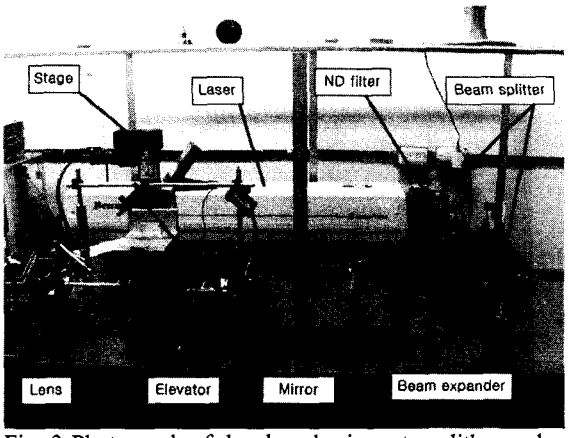


Fig. 3 Photograph of developed micro-stereolithography apparatus.

난 후에는 기저판을 엘리베이터에서 분리하여 세척 등의 공정이 용이하게 할 수 있도록 하였다.

x-y-z 스테이지와 셔터(shutter)는 원하는 단면형상을 제작하기 위하여 적절히 제어되어야 한다. 즉, 광 경화성 수지의 표면과 평행한 x-y 방향의 움직임은 주어진 단면형상에 따른 레이저 주사경로를 따라서 움직이도록 제어되어야 한다. 또한, 만약 한 단면에 여러 개의 분리된 단면형상(island)들이 존재 할 경우, 하나의 단면형상을 성형 한 후 다른 단면형상으로 이동 시에 셔터가 레이저 빔을 차단 할 수 있어야 한다. 그리고, 한 층이 성형 된 후 다음 층의 성형을 위하여 z-축 스테이지가 이동할 때에도 셔터에 의하여 레이저 빔이 차단되어야 한다. 셔터와 x-y-z 스테이지는 PC 에 연결된 제어시스템으로 제어되며, 이때, G-코드와 유사한 형태의 제어코드를 작성하여 PC 에 입력하고 이를 통하여 PC 가 제어를 수행하게 된다.

전체 시스템은 외부에서의 진동을 방지하고, 광학계의 정렬을 위하여 광학테이블 위에 설치되었다. Fig. 3 은 제작된 마이크로 광 조형장치의 사진이다.

4. 실험을 통한 공정개발 및 시스템 검증

제작된 마이크로 광 조형장치를 이용하여 몇 가지 간단한 형태의 제품을 제작하여 봄으로서, 개발된 장치의 검증 및 3 차원 마이크로 제품 제작을 위한 공정을 개발하였다. 실험에 사용된 광

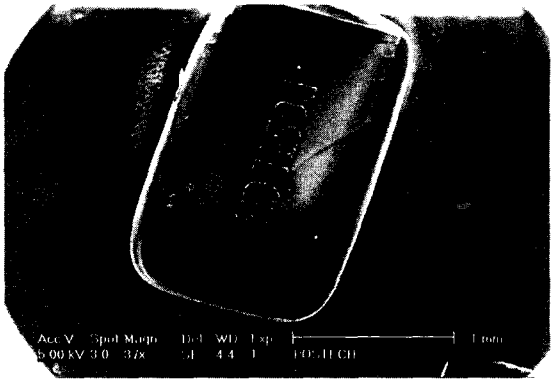


Fig. 4 SEM photograph of 'POSTECH' text.

경화성 수지는 3D Systems 사의 SL-5410 으로서, 파장 351.1 nm 의 자외선에 대하여 투과깊이 (penetration depth) 0.1292 mm 그리고 임계노출 (critical exposure) 10.1 mJ/cm^2 을 갖는다 [6].

Fig. 4 는 'POSTECH' 글자의 전자현미경 사진이다. 성형된 글자는 2 층으로 되어있으며, 첫 번째 층은 매우 작은 선폭으로 된 글자를 성형하기 위한 바닥 층, 그리고 두 번째 층은 글자이다. 성형된 글자의 전체 폭은 1000 ㎛, 높이는 400 ㎛ 그리고 글자를 구성하는 선폭은 약 40 ㎛ 이다. 제작된 구조물은 슬라이드 글라스를 기저판으로 이용하여 성형되었으며 제작시간은 약 40 분이 소요되었다. 이는 반도체 공정을 이용하는 MEMS 기술을 이용하여 유사한 형태를 제작 할 때 소요되는 시간보다 매우 작음을 알 수 있다.

슬라이드 글라스 기저판 위에 글자를 바로 성형하면, 아세톤 및 IPA(isopropyl alcohol) 등을 이용한 세척공정에서 글자의 일부분이 슬라이드 글라스에서 분리되는 현상이 발생한다. 따라서, 첫 번째 층에 글자크기보다 조금 큰 사각형의 바닥 층을 만들고 그 위에 글자를 성형하였다. 이렇게 하면, 첫 번째 바닥 층은 세척 공정에서 슬라이드 글라스에서 분리되지 않으며, 그 위에 성형된 글자들도 바닥 층에서 분리되지 않는다. 한편, 슬라이드 글라스 위에 성형 된 구조물들이 아세톤 등을 이용한 세척공정에서 성형된 구조물이 슬라이드 글라스에서 분리되는 현상은, 완성된 구조물을 슬라이드 글라스에서 분리할 필요가 있을 때 적용할 수 있다.

Fig. 5 는 26 개의 층으로 된 지름 2mm 그리고 전체 높이 2.6mm 인 와인 잔 형태이며, 이와 같은

Fig. 5 Mini-wine glass.

Fig. 6 SEM photograph of fabricated micro-wine glass.

형태의 구조물 제작을 통하여 복잡한 형상의 3 차원 구조물을 개발된 마이크로 광 조형장치를 이용하여 제작할 수 있음을 확인하였다. 한편, Fig. 6 의 와인 잔 의 성형에서는 제품의 외곽형상에 따라서 층 높이를 다르게 성형하는 방법을 적용하였다. 이러한 방법은 성형되려는 제품의 형상에서 보다 매끄러운 면이 요구되는 부분에서는 층 높이를 작게 하여 성형하여 상대적으로 매끄러운 면을 만들고, 상대적으로 거친 면이 허용되는 부분에서는 층 높이를 높게 하여 제작시간을 단축시킬 수 있는 장점이 있다. 이는 마이크로 광 조형에서 성형하려는 제품의 3 차원 형상을 보다 세밀하게 성형할 수 있도록 해 줄 수 있다.

한편, 성형된 층 위에 다음 층을 성형하기 위해서는 그 위에 광 경화성 수지가 덮이도록 하여야 한다. 따라서, 광 경화성 수지가 이전 성형된 층 위에 완전히 덮일 때까지 z 축 스테이지를 층 높이보다 더 아래 방향으로 이송시킨 후, 다시 이전에 성형된 층 위의 광 경화성 수지의 높이가 층 높이만큼 될 때까지 z 축 스테이지를 위 방향으로 이송시킨다. 이렇게 하면 광 경화성 수지가 이전 층 위에 완전히 덮인 상태가 되게 된다. 하지만 이렇게 하더라도 광 경화성 수지의 점성 때문에 이전 성형된 층 위에 덮인 광 경화성 수지가 완전히 평평하게 되지 않는다. 따라서, 광 경화성 수지가 완전히 평평하게 될 때까지 수십 초 가량 대기시간을 가진 후 다음 층 성형을 위한 레이저 주사를 하여야 한다.

Fig. 6 은 전체 높이 460 ㎛, 외곽 지름 440 ㎛ 그리고 높이 20 ㎛ 의 총 23 개 층으로 된 제작된 마이크로 와인 잔의 SEM 사진이다. 전체 제작시간은 약 3 시간이 소요되었다. Fig. 6 의 와인 잔 형상에서 윗부분이 완전한 원형을 보이지 않고 또한 약간 기울어진 형상이 되었다. 이는 세척공정에서 IPA 와 아세톤 등의 세척액이 구조물에 영향을 주었기 때문이다. 하지만, 제작된 형상은 개발된 마이크로 광 조형장치를 이용하여 3 차원 마이크로 구조물을 제작 할 수 있음을 보여주고 있다.

5. 레이저 주사경로 생성

5.1 레이저 빔의 단일선 및 다중선 주사

기존의 광 조형 기술에서는 원하는 형상을 제작하기 위하여 3 차원의 CAD 모델을 만들고, 이를 이용하여 레이저 주사경로를 생성하는 것이 일반적이다 [7,8,9]. 마이크로 광 조형에서도 매우 복잡한 임의의 형상을 가지는 구조물을 제작 할 때에는 3 차원 CAD 모델을 만들고, 이를 이용하여 레이저 주사경로를 생성하여야 할 필요가 있다.

하지만 매우 작은 크기의 제품을 성형하는 마이크로 광 조형에서는 단순히 3 차원 CAD 모델만을 이용하여 만들어진 레이저 주사경로는 요구되는 치수정밀도를 만족시키기 힘들다. 이는 매크로 크기에서 무시될 수 있을 정도의 치수정밀도가 마이크로 광 조형에서는 매우 큰 성형오차가 되기 때문이다.

한편, 가우스 반경이 R 이고 파장 λ 인 레이저 빔이, 초점거리 f 인 렌즈에 의해 광 경화성 수지 표면에 초점이 만들어지면, 이 빔에 의하여 광 경화성 수지가 경화되는 형상은 식 (2)와 같이 표현될 수 있다 [10].

$$y = \frac{2}{W_0(z)^2}\sqrt{\ln\left(\sqrt{\frac{2}{\pi}}\frac{P_L}{W_0(z)^2 V_S E_C}\right)} - \frac{z}{D_p} \qquad (2)$$

여기서, $W_0(z)$ 는 광 경화성 수지의 표면(z=0)에서부터 수지의 깊이 방향으로 초점 된 레이저 빔의 반경, V_S 는 레이저 빔의 주사속도, E_C 는 광 경화성 수지의 임계노광, D_p 는 광 경화성 수지의 투과깊이 그리고 P_L 은 레이저 빔의 파워이다.

식 (2)를 이용하면, 레이저 빔이 단일선으로 주사 될 때, 주어진 레이저 주사조건 및 광 경화성 수지의 물성에 따른 광 경화성 수지의 경화 깊이 및 경화 폭을 알아볼 수 있다. 하지만, 실제 마이크로 광 조형에서는 많은 선들이 중첩되어 주어진 단면형상이 만들어지게 되며 이렇게 만들어진 단면들이 쌓아 올려져 3 차원 형상이 제작된다. 이때, 광 경화성 수지의 경화폭 및 경화길이는 레이저 빔의 주사폭 및 주사길이와 일치하지 않는다. 이는 단면성형을 위한 다중선 주사 시, 레이저의 주사간격, 파워, 주사속도 등의 주사조건과 임계노광 및 투과깊이 등의 광 경화성 수지의 물성 값이 광 경화성수지의 경화폭, 경화길이 및 경화깊이등에 큰 영향을 주기 때문이다. 따라서 마이크로 광 조형에서, 3 차원 CAD 모델을 이용한 레이저 빔의 주사경로를 생성하기 위해서는 레이저 빔의 다중선 주사 시 광 경화성 수지의 경화현상에 대한 반영이 필수적이다.

5.2 레이저 주사조건에 따른 광 경화성 수지의 경화현상

다양한 레이저 주사조건에 따른 광 경화성 수지의 경화현상과 3 차원 CAD 모델을 이용하여 레이저 주사경로를 생성하기 위한 실험을 수행 하였다. 즉, Fig. 7 과 같은 사각형 형상을 제작하고 이때 레이저 빔의 주사폭(scanning width) 및 주사길이(scanning length)에 대한 광 경화성 수지의 경화폭 (solidified width)및 경화길이(solidified length)의 관계를 실험적으로 구하였다.

레이저 빔의 주사 길이에 대한 광 경화성 수지의 경화길이의 관계를 보기 위한 실험조건은 Table 1 과 같다. 레이저의 파워 및 레이저 빔의 주사폭은 2 ㎽ 및 400 ㎛로 각각 일정하며, 레이저 빔의 주사속도는 100 ~200mm/min 으로 20 mm/min 씩 증가시키면서 실험을 수행 하였다. 본 실험조건을 식 (2)에 대입하면 레이저 빔의 주사속도가 100 ~ 200 mm/min 으로 변화함에 따라서 광 경화성 수지의 경화폭은 1.42 ~ 2.8 mm/min 로 각각 변화하게 된다. 이를 바탕으로 주사간격(scanning pitch)은 1 및 2 ㎛로 설정하였으며, 이렇게 함으로서 다중선 주사 시 경화되는 광 경화성 수지가 서로 중첩된다. 각 주사간격에 대한 주사길이는 각각 100 ~ 500 ㎛ 및 200~1000 ㎛ 이다.

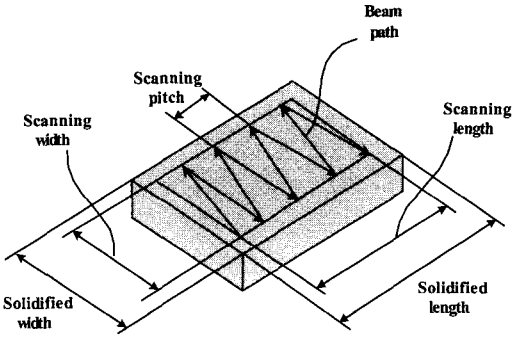


Fig. 7 Geometries of the laser beam path(scanning width and scanning length) and solidified shape (solidified width and solidified length).

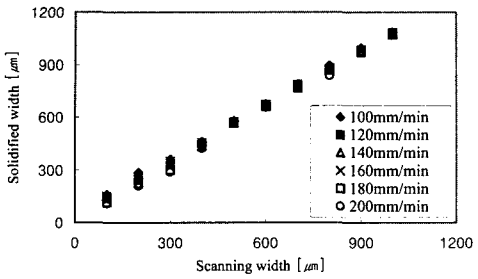
Table 1 Experimental conditions for the solidification length variation experiments.

Laser power (㎽)	Scanning speed (㎜/min)	Scanning pitch (㎛)	Scanning length (㎛)
2	100 ~ 200	1	100 ~ 500
		2	200~1000

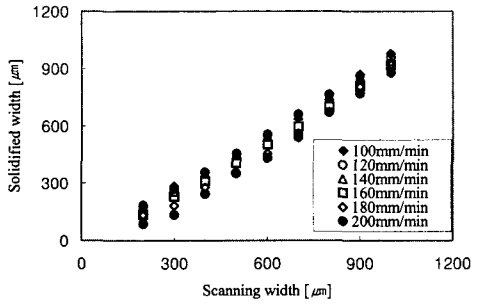
Table 2 Experimental conditions for the solidification width variation experiments..

Laser power (㎽)	Scanning speed (㎜/min)	Scanning pitch (㎛)	Scanning width (㎛)
2	100 ~ 200	1	100 ~ 1000
		2	200 ~ 1000

Table 2 는 레이저 빔의 주사폭에 따른 광 경화성 수지의 경화폭에 대한 실험조건이다. 여기서는 레이저 빔의 주사길이가 400 ㎛로 일정하며, 주사속도는 100~200 mm/min 로 20mm/min 씩 증가시켰다. 주사간격 ㎛ 및 2 ㎛에 대하여 레이저 빔의 주사길이는 각각 100~100 ㎛ 및 200~1000 ㎛ 이다.

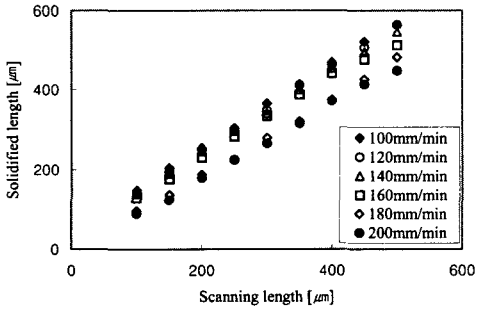


(a)

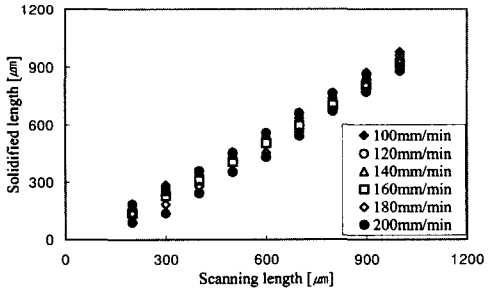


(b)

Fig. 8 Experiment results of scanning width variation; (a) scanning pitch of 1 ㎛ and (b) 2 ㎛.



(a)



(b)

Fig. 9 Experiment results of scanning length variation; (a) scanning pitch of 1 ㎛ and (b) 2 ㎛.

Fig. 8 은 레이저 빔의 주사폭이 변화할 때 레이저 주사폭에 대한 광 경화성 수지의 경화폭을 비교한 것이고, Fig. 9 는 레이저 빔의 주사길이가 변화할 때의 광 경화성 수지의 경화길이의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 8 및 Fig. 9 에서 알 수 있듯이, 레이저 빔의 주사간격 및 주사속도와 무관하게 레이저 빔의 주사폭/주사길이가 증가하면 광 경화성 수지의 경화폭/경화길이도 증가한다.

한편, 단일선 주사에 대한 광 경화성 수지의 경화형상에 관한 식 (2)에서는 동일한 레이저 파워 및 주사속도에서는 경화되는 폭 및 깊이가 동일하다. 하지만, Fig. 8 및 Fig. 9 에서 볼 수 있듯이 실제로는 레이저의 파워 및 주사속도가 동일하더라도 레이저 빔의 주사폭, 주사길이 및 주사간격에 따라서 광 경화성 수지의 경화폭 및 경화길이가 달라지게 된다. 이는 실제 마이크로 광 조형에서는 많은 단일선들이 중첩되어 단면형상을 이루게 되며 따라서 레이저 빔의 주사에너지가 광 경화성 수지의 매우 작은 부피(voxel)에서 보다 많이 흡수되게 되기 때문이다. 또한, 성형된 형상의 세척 시 세척액이 성형된 수지를 깎아내는 현상도 발생한다. 따라서, 레이저 빔의 주사폭 및 주사길이와 성형되는 광 경화성 수지의 경화폭 및 경화길이는 차이를 보이게 된다.

하지만, Fig. 8 및 Fig. 9 에서 알 수 있듯이, 레이저 빔의 주사폭/주사길이에 대한 광 경화성 수지의 경화폭/경화길이의 변화는 선형적인 관계를 가지고 있다. 이를 선형화 한 결과, R^2 값은 모두 0.94 이상의 값을 가지며, 따라서 식 (3) 및 (4)와 같이 다양한 레이저 주사조건에 따르는 레이저 주사폭 및 주사길이에 대한 광 경화성 수지의 경화폭 및 경화길이의 선형관계식을 구할 수 있다.

$$Y_{length} = \alpha_{length} y_{length} \tag{3}$$

$$Y_{width} = \alpha_{width} y_{width} \tag{4}$$

여기서 Y_{length}, Y_{width}, y_{length} 및 y_{width}는 각각 경화길이, 경화폭, 주사길이 및 주사폭을 나타내며, α_{length} 및 α_{width}는 선형관계식의 기울기이다.

5.3 알고리즘 개발 및 성형결과

이상의 결과를 적용하여 광 경화성 수지의 경화현상을 고려한 3 차원 CAD 모델로부터 마이크

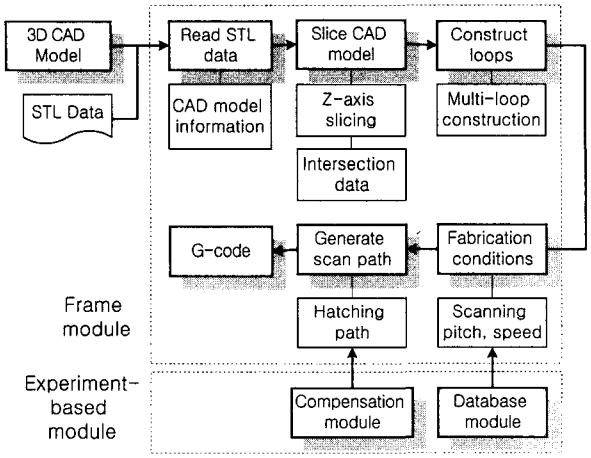
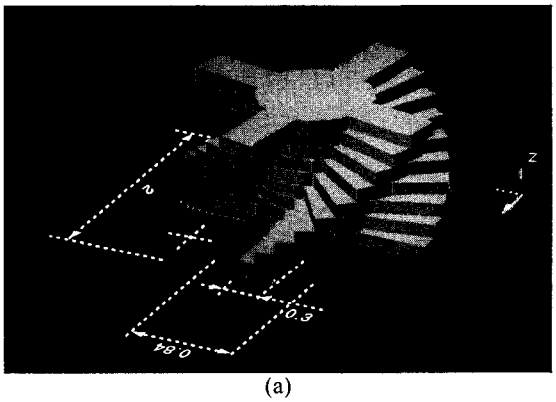
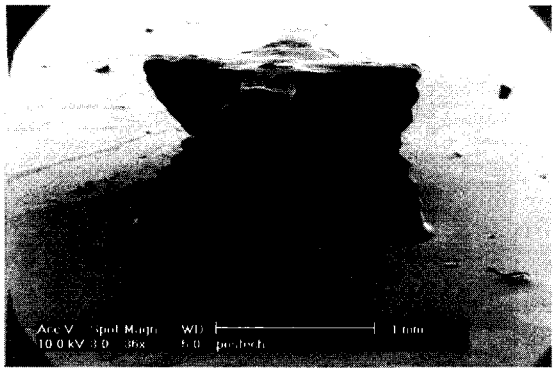


Fig. 10 Laser scanning path generation algorithm considering photopolymer solidification.



(a)



(b)

Fig. 11 Sample fabrication of scan path compensation; (a) 3D CAD model, (b) SEM photograph of the fabricated structure.

로 광 조형에서 레이저 주사경로를 생성하는 알고리즘 (Fig. 10) 및 이것이 적용된 주사경로 생성 프로그램을 제작하였다. Fig. 10 의 프레임 모듈 (frame module) 에서는 3 차원 CAD 모델만을 이용하여 주어진 단면두께에 따르는 각각의 단면형상을 만들고, 각 단면에서의 주사경로를 생성하게 된다. 이 때, 주어진 레이저 주사조건에 따른 식 (3) 및 (4)의 실험결과(α_{length} 및 α_{width})들이 일련의 데이터로 데이터베이스 모듈(database module)에 저장되었다가 보정모듈 (compensation module)을 통하여 주사경로 생성 시 반영되게 된다

제작된 주사경로 생성 프로그램을 이용하여 생성된 레이저 주사경로로 Fig. 11 과 같은 형상을 제작하였다. Fig. 11 (a) 는 주어진 3 차원 CAD 모델이며, 이 형상의 전체 폭, 십자형상의 폭 및 전체 높이는 각각 2000 ㎛, 300 ㎛ 그리고 1460 ㎛ 이다. Fig. 11(b)는 제작된 구조물의 SEM 사진이다. 측정 결과 제작된 구조물은 최대 10% 이내의 치수오차를 가지며, 이는 실험에 의한 보정이 수행되지 않은 상태에서 생성된 레이저 주사경로를 이용하여 제작된 동일한 구조물의 제작결과보다 향상된 치수정밀도를 갖는다

6. 결론

마이크로 광 조형기술은 복잡한 단면형상을 갖는 자유로운 형태의 3 차원 마이크로 구조물을 제작할 수 있는 기술이다. 본 연구에서는 이러한 특징을 갖는 마이크로 광 조형기술을 개발 하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

(1) UV 레이저, 3 축 스테이지 및 관련 광학계를 이용한 자유액면방식의 마이크로 광 조형장치를 개발하였다.
(2) 제작된 마이크로 광 조형장치를 이용한 3 차원 마이크로 구조물을 제작할 수 있는 관련공정을 개발하였다.
(3) 3 차원 CAD 모델 및 광 경화성 수지의 경화현상을 고려한 레이저 주사경로 생성 알고리즘 및 프로그램을 개발하였으며, 제작된 주사경로 생성 알고리즘은 광 경화성 수지의 경화현상이 반영되지 않은 경우보다 높은 치수정밀도를 보여준다.

후 기

본 연구는 과학기술부 21 세기 프론티어 연구개발사업인 나노메카트로닉스 기술개발사업(과제번호: M102KN010001 - 02K1401- 00211)의 연구비 지원을 받아 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

1. Ikuta K., Hirowatari K., "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. Ikuta K., Maruo S. and Kojima S., "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. Bertsch A., Jezequel J. Y. and 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.
4. Bertsch A., Lorenz H. and Renaud P., "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. Zhang X., Ziang X. N. and Sun C., "Micro-stereolithography of polymeric and ceramic microstructure," Sensors and Actuators 77, pp. 149-156, 1999.
6. http://www.3dsystems.com
7. Liao Y. S. and Chiu Y. Y., "A New Slicing Procedure for Rapid Prototyping Systems," International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 18, Issue 8, pp. 575-585, 2001.
8. Ma Weiyin and He Peiren, "An Adaptive Slicing and Selective Hatching Strategy for Layered Manufacturing," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 89-90, pp. 191-197, 1999.
9. Choi Hong-Tae, Kim Jun-An, Lee Seok-Hee and Paik In-Hwan, "Development of Cross-sectional Information Conversion System from STL file for Stereolithography," Journal of Korean Society of Precision Engineering Vol. 12, No. 11, Nov. 1995.
10. Nakamoto Takeshi, Yamaguchi Katsumi, Abraha Petros A and Mishima Kunihiro, "Manufacturing of Three-dimensional Micro-parts by UV Laser Induced Polymerization," J. Micromech. Microeng. 6, pp. 240-253, 1996.