

# 마이크로 광 조형에서 레이저 주사조건에 따른 광 경화성 수지의 경화현상

이인환<sup>#</sup>, 조동우<sup>\*</sup>, 이응숙<sup>\*\*</sup>

## Photopolymer Solidification Phenomena Considering Laser Exposure Conditions in Micro-stereolithography Technology

In Hwan Lee<sup>#</sup>, Dong-Woo Cho<sup>\*</sup>, Eungsug Lee<sup>\*\*</sup>

### ABSTRACT

Micro-stereolithography technology has made it possible to fabricate a freeform 3D microstructure. This technology is based on conventional stereolithography, in which a UV laser beam irradiates the open surface of a UV-curable liquid photopolymer, causing it to solidify. In micro-stereolithography, a laser beam of a few  $\mu\text{m}$  diameter is used to solidify a very small area of the photopolymer. This is one of the key technological elements, and can be achieved by using a focusing lens. Thus, the solidification phenomena of the liquid photopolymer must be carefully investigated. In this study, the photopolymer solidification phenomena in response to variations in the scanning pitch of a focused laser beam was investigated experimentally. The effect of layer thickness on the solidification width and depth was also examined. These studies were conducted under the conditions of relatively lower laser power and relatively higher scanning speed. Moreover, the photopolymer solidification phenomena for the relatively higher laser power and lower scanning speed was investigated, too. In this case, comparing to the case of lower laser power and higher scanning speed, the photopolymer absorbed large amount of irradiation energy of the laser beam. These results were compared with those obtained from a photopolymer solidification model. From these results, a new laser-scanning scheme was proposed according to the shape of the 3D model. Samples by each method were fabricated successfully.

**Key Words** : micro-stereolithography(마이크로 광 조형), photopolymer (광 경화성 수지), laser scanning speed (레이저 이송속도), laser power (레이저 파워), irradiation energy (주사 에너지)

### 1. 서론

마이크로 광 조형기술은 자유로운 형태의 3 차원 마이크로 구조물을 제작하는 기술이다. 이 기

술은 기존의 광 조형기술을 기반으로 하고 있으며, 이는 자외선 레이저 빔이 광 경화성 수지의 표면에 주사 되어 광 경화성 수지가 굳어지는 원리를 이용한다. 하지만 마이크로 광 조형기술에서는

<sup>☐</sup> 접수일: 2003 년 6 월 24 일; 게재승인일: 2004 년 1 월 9 일

<sup>#</sup> 교신저자: 포항공과대학교 기계공학과

E-mail: anxanx@postech.ac.kr, Tel: (054) 279-2863

<sup>\*</sup> 포항공과대학교 기계공학과

<sup>\*\*</sup> 한국기계연구원

주사되는 레이저 빔의 지름이 수  $\mu\text{m}$  의 매우 작은 크기를 가지며 이는 매우 작은 부피의 광 경화성 수지를 굳어지게 한다. 이는 마이크로 광 조형기술의 중요한 요소중의 하나이며, 이를 위하여 초점렌즈가 이용된다. 따라서 매우 작은 초점반경을 갖는 레이저 빔에 의한 광 경화성 수지의 경화현상에 대한 연구는 마이크로 광 조형기술의 개발에 매우 중요하다.

마이크로 광 조형기술에서, 광 경화성 수지의 경화현상에 대한 연구는 경화되는 광 경화성 수지의 폭이 주사되는 레이저 빔의 초점크기와 유사한 크기의 경우에서 단일선 주사에 대한 연구가 대부분이다. Maruo<sup>1,2</sup> 등은 two-photon 마이크로 광 조형기술에서, 단일선 주사에 대한 광 경화성 수지의 경화 폭 및 깊이에 대한 실험결과를 보여 주었다. Zissi<sup>3</sup> 및 Scheffer<sup>4</sup> 등은 반응하지 않은 광 흡수제(unreactive photoabsorber)가 광 경화성 수지의 경화에 미치는 영향을 이론적으로 설명 하였다. 또한 이들은 광 개시제의 농도, 주사되는 빛의 양 그리고 빛의 주사시간에 의한 광 경화성 수지의 경화현상에 대한 연구를 수행 하였다. Zhang<sup>5</sup> 등은 세라믹을 이용한 마이크로 광 조형기술을 개발 하였으며, 단일 경화선 및 7 개의 경화선을 중첩한 결과에 대한 경화 폭 및 깊이를 측정 하였다. 한편, Nakamoto<sup>6</sup> 등은 초점 된 단일선 레이저 주사에 대한 광 경화성 수지의 경화에 대한 수학적 모델을 제시 하였으며, 이를 실험결과와 비교 하였다.

한편, 실제 마이크로 광 조형에서는 원하는 3 차원 형상을 제작하기 위하여 많은 단면형상을 층층이 쌓아 올려야 하며, 또한 이러한 단면형상을 제작하기 위해서 많은 레이저 주사선이 필요하다. 이때 경화되는 광 경화성 수지의 경화깊이 및 폭은 주로 레이저 빔의 주사조건에 영향을 받게 된다. 따라서 마이크로 광 조형기술의 개발에서 레이저 빔의 다중선 주사에 의한 광 경화성 수지의 경화 폭 및 깊이에 대한 연구는 필수적이다. Lee<sup>7</sup> 등은 기존의 광 조형에서 초점된 레이저 빔의 지름을 변화시켜 가면서 다중선 주사 시 광 경화성 수지의 경화특성을 살펴보았다. 하지만, 마이크로 광 조형에서 이용되는 수  $\mu\text{m}$  의 초점을 갖는 레이저 빔을 이용하여 다양한 레이저 주사조건에 따른 광 경화성 수지의 경화현상에 대한 결과는 보고된 바가 거의 없다.

앞서 언급한 바와 같이, 레이저 빔의 초점반경

과 유사한 영역의 광 경화성 수지를 경화 시킬 경우, 광 경화성 수지의 경화깊이 및 경화폭은 레이저 빔의 주사 조건인 레이저 빔의 이송속도 및 레이저 빔의 파워에 의하여 변화된다. 한편, 레이저 빔의 이송속도가 매우 느리고, 레이저 빔의 파워가 매우 높을 경우에는 광 경화성 수지에 주사되는 레이저 빔의 에너지가 매우 크게 되며, 이 경우에는 레이저 빔의 초점반경에 비하여 광 경화성 수지의 경화 폭 및 경화깊이가 매우 크게 된다. 이는 마이크로 광 조형기술에서는 크게 고려되지 않고 있었다.

본 연구에서는, 초점 된 레이저 빔에 의한 광 경화성 수지의 경화현상에 레이저 빔의 주사조건이 미치는 영향을 실험적으로 살펴 보았다. 이때, 레이저 빔의 주사속도가 상대적으로 빠르고, 레이저의 파워가 낮아 광 경화성 수지가 받는 에너지가 적은 경우 및 레이저의 주사속도가 상대적으로 느리고, 레이저의 파워가 높아 광 경화성 수지가 받는 에너지가 큰 경우의 각각에 대하여 레이저에 의한 주사조건 즉, 레이저의 파워, 이송속도 등이 이 광 경화성 수지의 경화현상에 미치는 영향을 실험적으로 검토 하였다. 또한 이 결과를 이론값과 비교 해 보았다.

## 2. 실험장치 및 광 경화성 수지의 경화모델

### 2.1 실험장치

Fig. 1 은 마이크로 광 조형에서, 레이저의 주사 조건에 따른 광 경화성 수지의 경화현상을 실험하기 위한 실험장치이다. 알곤 이온( $\text{Ar}^+$ ) 레이저가 광원으로 이용 되었으며, 이는 파장 351.1 nm 그리고 가우스 반경 0.85mm 의 레이저 빔을 방출한다. 레이저의 파워를 줄이기 위하여 ND (neutral density) 필터가 이용 되었다. 빔 스피리터 (beam splitter) 및 반사경 (mirror) 들을 이용하여 레이저 빔의 방향을 원하는 곳으로 조정하며, 초점거리 50.8 mm 의 초점렌즈를 이용하여 레이저 빔이 광 경화성 수지 표면에 초점이 맺히게 하여 주었다. 본 장치에서는 경화되는 수지를 고정시키기 위한 부착판 (substrate) 이 3 축 스테이지 (stage) 에 부착되어, 광 경화성 수지가 담긴 용기 내에서 3 축 방향으로 움직이게 된다.

마이크로 광 조형에서, 자외선 레이저 빔은 수  $\mu\text{m}$  의 가우스 반경을 갖도록 하여야 한다. 이를

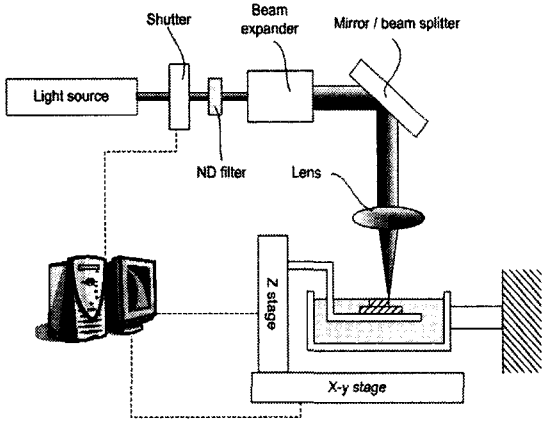


Fig. 1 Schematic drawing of the developed micro-stereolithography apparatus.

위하여 초점렌즈가 이용되며, 초점에서의 가우스 반경은 식 (1)에 의하여 구할 수 있다. 본 연구에서는 가우스 반경을 작게 하기 위하여 초점렌즈에 입사되는 레이저 빔의 반경을 빔 익스팬더 (beam expander)를 이용하여 확대 하였다

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

여기서,  $W_{0\min}$  은 초점에서의 가우스 반경,  $f$  는 렌즈의 초점거리,  $\lambda$  는 레이저 빔의 파장 그리고  $R$  은 렌즈로 입사되는 레이저 빔의 가우스 반경이다.

## 2.2 광 경화성 수지 경화모델

앞서 언급한 바와 같이, 본 연구에서는 자외선 레이저를 광원으로 이용 하였다. 레이저 빔이 가우스 분포를 갖고, 광 경화성 수지 표면에 초점이 만들어진 경우, 레이저 빔의 광축에 따라서 레이저 빔의 반경이 변화하게 된다. Beer-Lambert Law에 따르면, 빛이 매개체를 통과 할 때, 에너지의 일부분이 매개체에 의하여 흡수되게 되며, 따라서 광축에 따라서 레이저 빔의 복사조도 (irradiance)가 감소하게 된다. 한편, 일반적으로 액체상태의 광 경화성 수지는 자외선을 흡수하여 굳어지게 된다. 광 경화성 수지 내의 광 개시제 (photo initiator)가 자외선의 광자 (photon)에 의하여 활성화 되면, 광 경화성 수지의 단원체 (monomer)들이 결합하여 중합체 (polymer)가 되게 된다.

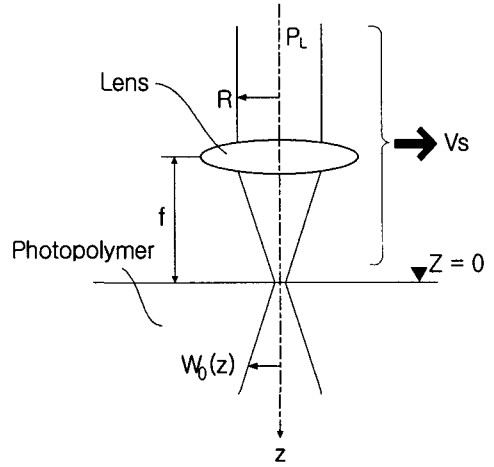


Fig. 2 Scanning of the focused laser beam by a focusing lens on the surface of a photopolymer.

원하는 단면을 만들기 위해서는 초점된 레이저 빔이 주어진 경로를 따라 움직여야 한다. 이때, 광 경화성 수지가 레이저 빔을 흡수하여 굳어지는 것은 레이저의 파워 및 주사속도에 따라서 변화하게 된다. Fig. 2와 같이 파장이  $\lambda$  이고, 파워가  $P_L$  인 레이저 빔이 초점거리  $f$ 의 초점렌즈를 통과하여 광 경화성 수지에 수직으로 주사 된다고 하자. 그리고, 레이저 빔은 광 경화성 수지의 표면( $z=0$ )에 초점이 맺혀진다고 하면, 레이저 빔의 주사속도가  $V_s$  일 때, 레이저 빔의 주사방향에서 광 경화성 수지의 경화형상은 식 (2)와 같이 표현되게 된다<sup>6,8</sup>.

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

여기서,  $D_p$  는 광 경화성 수지의 투과깊이 (penetration depth)로서 레이저 빔의 복사조도가 표면에서의 값의  $1/e$ 가 되는 깊이 이고,  $E_C$  는 광 경화성 수지의 임계에너지(critical exposure)로서 광 경화성 수지가 액체에서 고체로 변화하는데 필요한 에너지를 의미한다.  $D_p$  와  $E_C$  는 광 경화성 수지의 물성 값으로서, 실험을 통하여 구할 수 있다.  $W_0(z)$  는 초점렌즈를 통과한 레이저 빔의 가우스 반경으로서, 레이저 빔의 광축에 따라서 변화하게 된다. 식 (2)에서 알 수 있는 바와 같이, 레이저 빔에 의한 광 경화성 수지의 경화형상은

호리병 모양이 되며, 광축에 대하여 대칭이다. 또한 광 경화성 수지의 물성( $D_p$  및  $E_C$ ) 및 레이저 빔의 주사조건( $\lambda$ ,  $P_L$ ,  $V_s$ , 및  $f$ )에 따라서 광 경화성 수지의 경화형상이 변화함을 알 수 있다.

### 3. 낮은 주사에너지에 의한 광 경화성 수지의 경화

마이크로 광 조형에서, 광 경화성 수지의 물성, 레이저의 파장 등은 성형 도중에 변화시키기 어렵기 때문에, 광 경화성 수지의 경화형상은 흡수되는 에너지에 의하여 많은 영향을 받게 된다. 일반적으로 마이크로 광 조형에서는 상대적으로 낮은 주사에너지에 의하여 매우 작은 부피의 광 경화성 수지가 굳어지게 되며 이때, 굳어지는 광 경화성 수지의 크기는 레이저 빔의 초점과 유사한 크기를 갖는다. 한편, 광 경화성 수지가 상대적으로 높은 주사에너지를 받게 되면, 경화되는 광 경화성 수지의 형상은 보다 크고 깊게 된다. 여기에서는 낮은 레이저 빔의 주사에너지에 의하여 광 경화성 수지가 굳어질 때, 광 경화성 수지의 경화형상에 대하여 살펴 보았다. Table 1은 본 실험에 적용된 실험조건이다. 실험에 사용된 광 경화성 수지는 SL 5410(3D Systems 사)으로서 투과깊이(penetration depth) 및 임계노출(critical exposure)은 각각 0.1292 mm 및 10.1 mJ/cm<sup>2</sup>이다. 한편, 레이저 주사경로의 양 끝단에서 주사속도의 변화를 가급적 줄이기 위하여 스테이지의 가감속 구간에서의 시간을 0.5msec로 설정하여 실험을 수행하였다.

#### 3.1 레이저 주사간격에 의한 영향

레이저 빔의 주사경로는 성형하려는 구조물의 단면형상과 매우 큰 관계를 가지며, 이는 레이저의 주사간격에 영향을 준다. 기존의 광 조형(stereolithography, SLA)에서는 단면 성형 시 동일한 방향으로 레이저를 주사하는 것이 일반적이다. 본 연구를 위한 기초실험 결과 이는 마이크로 광 조형에서도 효과적임을 알았다. 이는 마이크로 광 조형에서 다른 방법으로 레이저를 주사할 경우 구조물이 성형 도중에 무너지는 현상이 발생하기 때문이다. 본 연구에서는 Fig. 3 과 같은 지그 재그 형태의 주사패턴을 이용하였다.

Fig. 3 과 같이 두 개의 지지대 위에 다리 형상을 성형할 때, 레이저 빔의 주사 폭(scanning width)

Table 1 Experimental conditions for low irradiation energy experiments.

Type of Experiment		Laser scanning pitch			Layer thickness
Experimental conditions		200	300	400	
Laser scanning conditions	Width ( $\mu\text{m}$ )	200	300	400	300
	Pitch ( $\mu\text{m}$ )	1~8	1~8	1~8	4
Layer thickness		-	-	-	10~60

Laser power = 1  $\mu\text{W}$ , scanning speed = 1 mm/s

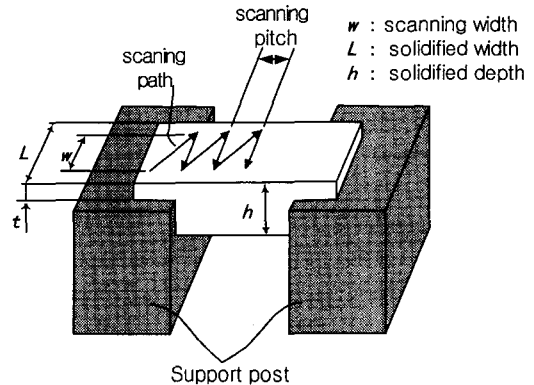
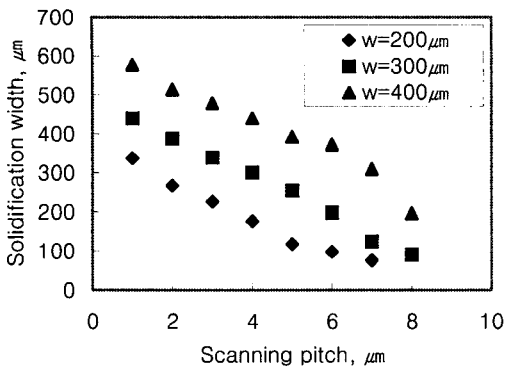


Fig.3 Experimental setup for low irradiation energy experiment.

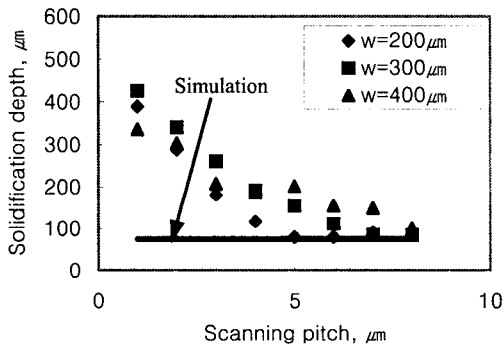
및 주사간격(scanning pitch)을 변화시켜 가면서 경화깊이 및 경화폭을 살펴 보았다

레이저 빔의 주사 폭은 200, 300 및 400  $\mu\text{m}$ 이다. 각 레이저 빔의 주사 폭에서 레이저 빔의 주사간격을 1에서 8  $\mu\text{m}$ 까지 1  $\mu\text{m}$ 씩 증가시켜 가면서 실험을 수행 하였다.

경화된 수지는 메틸알코올 및 래피드 린스(Rapid Rinse, Green Power Chemical)로 세척 하였고, 광학현미경을 이용하여 폭 및 두께를 측정 하였다. 측정에 사용된 광학현미경에는 CCD 카메라가 장착되어 있어, 광학현미경에 보이는 화면을 저장할 수 있다. 저장된 화면에서 주어진 레이저 주사 폭 및 주사간격에 대한 광 경화성 수지의 경화깊이 및 폭에 해당하는 픽셀 수를 측정한다. 한편, 픽셀 수에 대한 실제 길이는 상용으로 판매되고 있는 10  $\mu\text{m}$  마다 눈금이 있는 스케일을 이용하여 미리 구하였으며, 따라서 CCD 카메라에



(a)



(b)

Fig. 4 (a) Width and (b) depth of the solidified photopolymer according to the scanning width and pitch for the low irradiation energy.

의하여 저장된 화면상의 길이를 측정 할 수 있다.

Fig. 4의 (a) 및 (b)는 표 1의 실험조건에 의한 광 경화성 수지의 경화폭 및 경화깊이를 각각 보여준다. Fig. 4의 (a)에서 알 수 있듯이 주사 폭에 무관하게, 레이저 주사에 의한 광 경화성 수지의 경화 폭은 주사간격이 증가할수록 감소한다. 또한 각 주사 폭에서 주사간격이 어떤 값 이하로 되면 경화되는 폭은 주사 폭 보다 넓어지게 된다. 작은 주사간격에서는 주사 폭의 가장자리 부근에 있는 광 경화성 수지의 미소부피(voxel)가 반복적으로 레이저 빔 에너지를 보다 많이 받게 되며 따라서 경화 폭이 증가하게 된다. 이는 미소하게 경화된 부위에서 레이저 빔의 회절, 경화 영역에서의 형광반응(fluorescence emission) 혹은 굴절률의

변화 등에 기인한다<sup>4</sup>. 반면에 주사간격이 증가할수록 경화폭은 감소하게 된다. 이는 레이저 빔의 주사간격이 증가 할수록, 주사 폭의 가장자리 부근에 있는 광 경화성 수지의 미소부피에서 흡수되는 에너지가 감소하고, 따라서 광 경화성 수지의 중합반응에 의한 폴리머 사슬이 상대적으로 느슨해 지게 된 결과로 생각된다. 따라서 경화된 광 경화성 수지의 세척 시 상대적으로 쉽게 세척액에 의해서 깎여 나가게 된다.

Fig. 4 (b)는 Fig. 4 (a)의 각각의 실험경우에 대한 경화깊이를 보여준다. 모든 주사 폭에서 주사간격이 감소 할수록 경화깊이는 급격히 증가한다. 해석결과에 따르면 이 실험조건( $P_L = 1 \mu W$  and  $V_S = 1 mm/sec$ )에 의한 단일선 주사에서 최대 경화깊이는 75.6  $\mu m$  이다. 그림에서 알 수 있듯이 레이저 주사간격이 증가 할수록 경화깊이는 해석결과에 일치하는 경향을 보인다. 즉, 작은 레이저 주사간격에서는 광 경화성 수지가 보다 많은 에너지를 받게 되고 따라서 경화깊이가 증가하게 된다.

### 3.2 층 두께에 의한 영향

마이크로 광 조형기술은 광 경화성 수지를 층층이 경화하여 원하는 3 차원 형상을 만드는 기술이다. 이를 위하여 초점 된 레이저 빔을 광 경화성 수지의 표면에 주사하여 경화 시키게 된다. 마이크로 광 조형에서 다층 조형 시 층 두께가 광 경화성 수지의 경화형상에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 층 두께를 10 에서 60  $\mu m$ 로 10  $\mu m$ 씩 증가하며 변화시켜 가면서 실험을 수행 하였다.

다른 조건들은 고정시키고 층 두께의 변화에 의한 영향만을 살펴보기 위해서, 레이저의 주사 폭 및 주사간격은 각각 300  $\mu m$  및 4  $\mu m$ 로 동일하게 하였다. 또한 레이저의 파워는 1  $\mu W$  그리고 레이저의 주사속도는 1 mm/s로 동일하다. Fig. 5에서 보인 것과 같이, 지지 기둥 위에 40  $\mu m$ 의 두께를 두고 첫번째 층을 성형 하였다. 그리고 이 위에 두 번째 층들을 층 두께를 변화시켜 가면서 성형 하였다. 층 두께에 의한 영향을 살펴보기 위해서 두 층 전체의 경화깊이  $D_2$ 에서 층 두께  $D_1$ 을 뺀 값을 살펴 보았다.

Fig. 6은 층 두께의 영향에 대한 실험결과를 보여준다. Fig. 6에서 보인 것과 같이, 두 번째 층의 층 두께가 변화 하여도 첫번째 층의 경화깊이 ( $D_2 - D_1$ )는 거의 변화하지 않는다. 하지만,

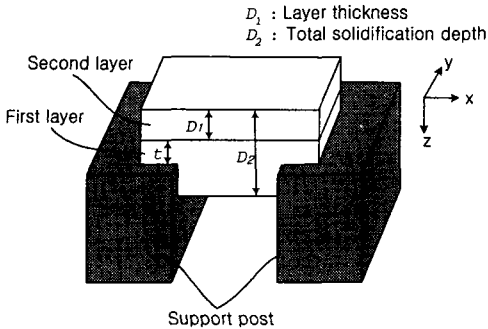


Fig. 5 Experimental setup for the multi-layer polymerization.

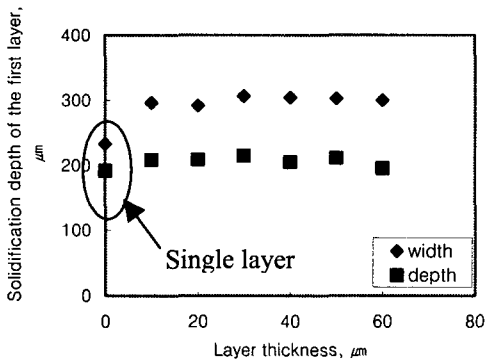


Fig. 6 Effect of the layer thickness on the solidification of the photopolymer.

단일 층을 성형 한 경우에 비하여 두 층을 경화한 경우가 동일한 주사 폭에서 경화폭이 더 넓다. 이는 단일 층으로 성형 한 경우에는 세척 과정에서 일부가 세척액에 의하여 깎여 나가기 때문이다. 마이크로 광 조형에서는, 성형 된 아래 층 위에 다음 층의 하부가 겹치도록(overlap) 층 두께를 설정하게 된다. 이 때, 상부 층을 경화 시키고 남은 레이저 파워는 하부 층으로 전달되게 된다. 하지만 하부 층으로 진행되는 레이저 파워는 매우 약해져 있다. 한편, 레이저 파워가 임계노출값 이하가 되면 광 경화성 수지의 경화가 더 이상 일어나지 않는다. 따라서 층 두께는 이전 층의 경화 깊이에 많은 영향을 주지 못하게 된다.

#### 4. 높은 주사에너지에 의한 광 경화성 수지의 경화

앞서 언급한 바와 같이, 광 경화성 수지의 경

화폭은 레이저 파워 및 주사속도에 의하여 변화한다. 한편, 레이저 빔의 느린 이송속도 및 높은 레이저 파워에 의한 매우 높은 레이저 주사 에너지에서는 광 경화성 수지의 경화폭이 광 경화성 수지 표면에서의 레이저 빔의 가우스 반경보다 매우 크게 된다. 본 장에서는 상대적으로 매우 높은 레이저 파워 및 느린 이송속도에서의 광 경화성 수지의 경화현상에 대하여 살펴본다. Table 2 는 실험조건을 정리한 것이다. 본 실험에서는 3 장의 낮은 주사에너지의 실험결과와 비교를 위하여 동일한 광 경화성 수지 및 세척방법을 이용하였다.

실험방법은 레이저 주사경로를 제외하고는 3 장에서의 방법과 동일하다. 3 장에서는 레이저 주사 폭 방향으로 레이저 빔을 지그재그 방향으로 주사 하였으나, 본 장에서는 두 개의 지지대 사이를 단일 선으로 주사하여 상대적으로 넓은 폭의 경화폭의 다리 형상을 만든다(Fig. 7). 레이저 주사 속도는 20 mm/min 에서 170 mm/min 으로 10 mm/min 씩 증가시켜 가면서 실험을 수행 하였다. 각각의 주사속도에서 레이저 파워를 100, 200 및 300  $\mu\text{W}$ 로 변화시켰다. 성형 및 세척이 끝나면 성형된 형상의 폭 및 깊이를 CCD 카메라가 부착된 현미경을 이용하여 3 장에서와 동일한 방법으로 측정 하였다.

Table 2 Experimental conditions for high irradiation energy experiments.

Laser power ( $\mu\text{W}$ )	Scanning speed (mm/min)
100	20 ~ 170
200	20 ~ 170
300	20 ~ 170

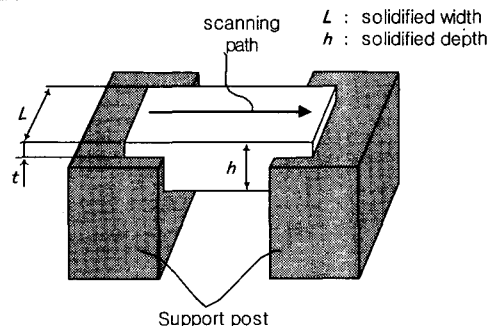


Fig. 7 Experimental setup for high irradiation energy experiment.

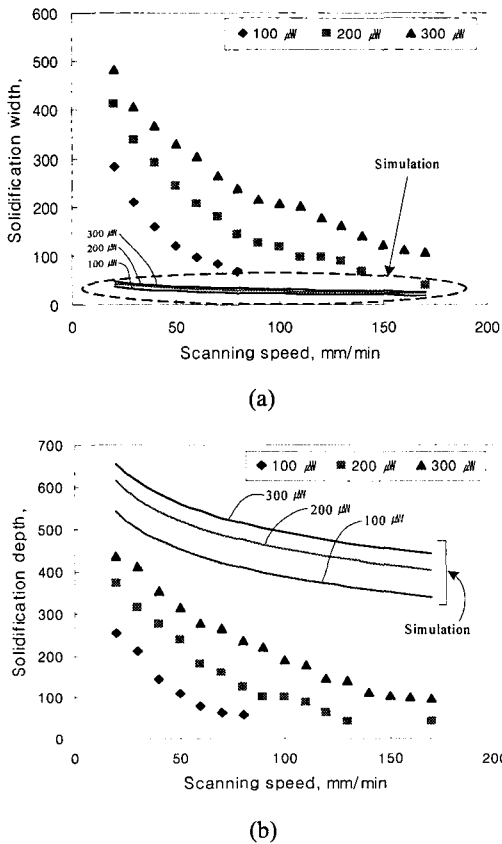


Fig. 8 (a) Width and (b) depth of the solidified photopolymer according to the laser power and scanning speed in the high irradiation energy experiment.

Fig. 8 은 높은 주사에너지로 광 경화성 수지에 레이저 빔이 주사 될 경우에 대한 실험결과 및 해석결과를 보여준다. Fig. 8(a) 에서 보인 것과 같이 동일한 레이저 파워에서 주사속도가 감소하거나 반대로 동일한 주사속도에서 레이저 파워가 증가하면 광 경화성 수지의 경화폭이 증가한다. 이는 레이저의 주사속도가 감소하거나 파워가 증가하면 광 경화성 수지가 보다 많은 에너지를 흡수하게 되기 때문이다. 반면에 경화 폭의 감소율은 레이저 파워와 무관하게 레이저 빔의 주사속도가 증가 할수록 점진적으로 감소한다. 이는 3 장에서의 낮은 레이저 주사에너지 실험결과와 동일하다. Fig. 8 (b)는 Fig. 8 (a) 의 각 경우에 대한 광 경화성 수지의 경화깊이에 대한 측정결과 이다. Fig. 8(a)

의 결과와 유사하게, 레이저의 주사속도가 감소 할수록 레이저 파워와 무관하게 경화깊이가 급격히 증가한다. Fig. 8 에서 알 수 있듯이 이러한 경향은 실험결과 뿐만 아니라 해석결과에서도 나타난다.

하지만 실험결과와 해석결과를 비교 해 볼 때, 광 경화성 수지의 경화폭 및 경화깊이는 차이를 보인다. 이는 실제로 경화가 일어날 때 레이저 빔 에너지의 많은 부분이 광 경화성 수지 내로 진행되지 않고 광 경화성 수지의 표면 부근에서 흡수되기 때문이다. 따라서 높은 주사에너지가 광 경화성 수지에 주사 될 때에는 해석결과와 비교 할 때 실험결과의 광 경화성 수지의 경화폭은 넓어지고 경화깊이는 낮아지게 된다.

또한, 높은 에너지가 주사 될 경우에도 레이저 빔에 의한 에너지가 증가 할수록 광 경화성 수지의 경화폭 및 경화깊이가 증가한다. 이는 3 장에서 보인 낮은 주사에너지에 의한 실험에서도 동일한 결과를 보인다. 하지만, 광 경화성 수지의 동일한 폭을 경화 시킬 때, 높은 주사에너지 방법에 의하면 경화깊이가 보다 깊어지게 된다. 또한 동일한 면적을 경화 시키고자 할 때에는 높은 주사에너지 방법에 의하면 레이저 빔의 주사거리가 매우 짧아지기 때문에 경화시간이 상당히 단축되게 된다

### 5. 두 가지 방법을 이용한 3 차원형상의 제작

낮은 주사에너지 방법과 높은 주사에너지 방법을 각각 적용한 마이크로 광 조형기술을 서로 비교하기 위하여 Fig. 9 에서 보인 것과 같이 몇 가지 간단한 형상을 제작하였다. Fig. 9 (a)는 낮은 주사에너지 방법을 이용하여 제작 된 단일 층으로 된 원형, 십자, U-모양 그리고 사각형 모양의 형상이다. 이를 위하여 레이저 파워 2 μW, 레이저 주사속도 120 mm/min 그리고 주사간격은 3 μm로 하였다. 제작 시 소요된 시간은 원형 형상의 경우 0.5 분에서 U-형상의 경우 2.3 분 사이 이다. Fig. 9 (b)는 높은 주사에너지 방법을 이용하여 제작된 형상이다. 레이저 파워 및 주사속도는 각각 200 μW 및 54 mm/min 이다. 이 경우에는 높은 레이저 파워 및 낮은 이송속도로 인하여 상대적으로 매우 넓은 선폭을 단일선 주사로 성형할 수 있었다.

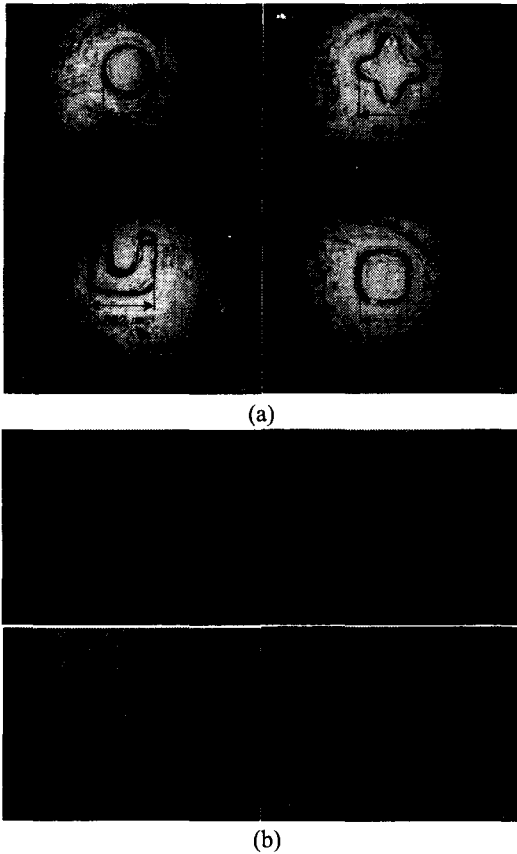


Fig. 9 Solidified shapes using (a) multi-line fabrication method and (b) single-line fabrication method.



Fig. 10 SEM photograph of a micro-link fabricated by low irradiation energy method.

제작시간은 최소 5 초 (십자모양)에서 최대 1.4 분 (사각형 모양)이 소요되었다. Fig. 9의 제작결과는 높은 주사에너지 방법을 이용하면 제작시간을 현저히 단축시킬 수 있음을 보여준다.

Fig. 4와 Fig. 8을 비교하여 볼 때, 광 경화성

수지의 동일한 폭을 경화 시킬 경우 높은 에너지 주사방법을 이용한 경우(Fig. 8)가 경화깊이가 더 깊다. 또한 이때 높은 에너지 주사방법은 동일한 폭을 단일선 주사를 통하여 성형하게 되기 때문에 제작시간이 매우 짧게 소요된다. 따라서, 성형하려 하는 형상에 따라서 두 가지 주사방법을 적절히 적용한다면 매우 유용할 것이다. 예를 들면, 경화깊이가 중요하지 않은 상대적으로 넓은 면적을 경화 할 경우에는 높은 에너지 주사방법이 제작시간을 현격히 감소시킬 수 있으므로 매우 유용할 것이다. 반면에, 복잡한 벽면형상을 가지고 있는 구조물을 성형하고자 할 때에는 낮은 주사에너지 방법이 유용할 것이다.

이상의 두 가지 레이저 주사방법을 각각 이용하여 3 차원 형상을 제작하여 보았다. Fig. 10은 낮은 에너지 주사방법을 이용하여 제작된 마이크로 링크의 주사전자현미경 (SEM) 사진이다. 제작된 마이크로 링크 형상은 40  $\mu\text{m}$ 의 층 높이로 29층을 쌓아올려 제작되었으며, 약 5 시간이 소요되었다. 이는 한 층을 제작하고 다음 층을 제작하기 위하여 엘리베이터를 이송시키는 시간 외에도 복잡한 형상의 각 단면을 성형하는데 시간이 많이 소요됨을 알 수 있다. Fig. 11은 높은 에너지 주사방법을 이용하여 제작된 수직방향으로 뒤틀린 마이크로 십자형상의 주사전자현미경 사진이다. 이는 층 높이 100  $\mu\text{m}$ 의 10층으로 구성되어 있으며, 제작시간은 23분이었다. Fig. 10 및 Fig. 11의 결과에서 알 수 있듯이, 낮은 에너지 주사방법의 경우는 보다 복잡한 형상에 적합하다. 반면에, 높은 에너지 주사방법은 제작시간을 현격히 감소시킬 수 있다. 이상과 같이 제작된 형상들은 각 주사방법들의 특성을 명확히 보여준다.

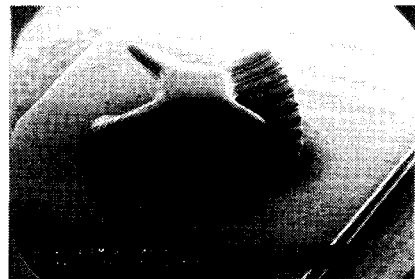


Fig. 11 SEM photograph of vertically twisted cross fabricated by high irradiation energy method.



## 6. 결론

본 연구에서는 마이크로 광 조형기술에서, 다양한 레이저 빔의 주사조건에 따른 광 경화성 수지의 경화현상에 대한 실험적인 연구를 수행 하였다. 실험결과로부터, 레이저 빔의 주사속도, 주사간격 및 레이저 파워가 광 경화성 수지의 경화 깊이 및 폭에 영향을 줌을 알 수 있다. 낮은 에너지 주사방법에서는 많은 자외선 레이저에 의하여 성형 된 매우 좁은 폭의 선들을 증첩하여 원하는 면적을 경화 시키게 된다. 이때, 동일한 레이저 주사조건이라도 레이저 빔의 주사간격에 따라서 광 경화성 수지의 경화현상이 영향을 받게 된다. 한편, 다층성형 시 층 두께는 광 경화성 수지의 경화깊이에 큰 영향을 주지 못함을 알 수 있다. 높은 에너지 주사방법을 이용하여 광 경화성 수지의 동일한 폭을 경화 시킬 경우, 상대적으로 경화 깊이가 깊어지며, 성형시간은 매우 짧아지게 된다.

마이크로 광 조형기술을 이용하여 3 차원 형상의 미소제품 제작 시, 제작하는 형상에 따라서 높은 에너지 주사방법과 낮은 에너지 주사방법을 적절히 이용하면 매우 유용할 수 있다. 즉, 경화깊이가 중요하지 않은 넓은 면적의 성형 시에는 높은 에너지 주사방법을 이용하면 성형시간을 현저히 단축시킬 수 있으며, 상대적으로 복잡한 형상의 성형 시에는 낮은 에너지 주사방법을 이용하는 것이 유리하게 된다. 제시된 두 가지 방법을 각각 이용하여 3 차원 형상을 제작하였으며, 제작된 형상들은 각 주사방법 들의 특성을 명확히 보여준다.

## 후 기

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

## 참고문헌

1. Maruo, S. and Ikuta, K., "Movable mirostructures made by two-photon three-dimensional microfabrication," Proc. of International Symposium on Micro Mechatronics and Human Science, 1999.
2. Maruo, S. and Ikuta, K., "Fabrication of freely movable microstructures by using two-photon three-dimensional microfabrication," Proceedings of SPIE, Vol. 3937, 2000.
3. Zissi, S., Bertsch, A., Jeijequel, J. Y., Corbel, S., Lougnot, D. J. and Andre, J. C., "Stereolithography and microtechniques," Microsystem Technologies 2, pp. 97-102, 1996.
4. Scheffer, P., Bertsch, A., Corbel, S., Jejequel, A. J. Y. and Andre, J. C., "Industrial photochemistry XXIV. Relations between light flux and polymerized depth in laser stereolithography," Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry 107, pp. 283-290, 1997.
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. Nakamoto, T., Yamaguchi, K., Abraha, P. A. and Mishima, K., "Manufacturing of three-dimensional micro-parts by UV-laser-induced polymerization," J. Micromech. Microeng. 6, pp.240-253, 1996.
7. Lee, Eun-Dok, Sim, Jae-Hyung and Park, In-Hwan, "Cure Properties in Photopolymer for Stereolithography according to Variance of Laser Beam Size," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 20, No. 2, 2003.
8. Jacobs, Paul F., "Rapid Prototyping & Manufacturing - Fundamentals of Stereolithography," Society of Manufacturing Engineers, 1992.