

레이저 빛의 경사노광 시 광 경화성 수지의 경화형상 예측

Prediction of Photopolymer Solidification for Inclined Laser Beam Exposure

김영현¹, 임종선¹, 유규상², 이인환^{3,✉}, 고태조⁴
Young Hyun Kim¹, Jong Seon Lim¹, Gyu Sang Yu², In Hwan Lee^{3,✉} and Tae Jo Ko⁴

1 충북대학교 정밀기계공학과 (Department of Precision Mechanical Engineering, Chungbuk National Univ.)

2 충북대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Chungbuk National Univ.)

3 충북대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Chungbuk National Univ.)

4 영남대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Yeungnam Univ.)

✉ Corresponding author: anxanx@chungbuk.ac.kr, Tel: 043-261-3161

Manuscript received: 2009.10.19 / Accepted: 2010.4.23

It has been reported that the photopolymer solidification in the stereolithography process is mainly depend on the laser exposure conditions such as laser power and scanning speed. However, these researches were focused on the vertical laser exposure onto the surface of the photopolymer. In this research, we developed a mathematical model for the photopolymer solidification under the inclined laser beam exposure. Using the developed mathematical model, the photopolymer solidifications were simulated varying inclined laser exposure conditions. Developed mathematical model was in good agreement with the experimental result. This research can be applied to improve the surface roughness in the stereolithography process.

Key Words: Stereolithography (광조형), Inclined Exposure (경사 노광), Refractive Index (굴절률), Mathematical Modeling (수학적 모델링), Surface Roughness (표면 거칠기)

기호설명

DP = Penetration depth of the photopolymer at given wavelength

EC = Critical exposure of the photopolymer at given wavelength

H0 = Maximum irradiance of the laser beam

PL = Power of the laser beam

θ = Incidence angle of the laser beam

VS = Scanning speed of the laser beam

w0 = Gaussian half width of laser beam

x and y = Distances from the beam axis on a surface where z is constant

y0 = Vertical length from the beam axis to the random point

z = Depth from the surface of the photopolymer

z0 = Distance of line parallel to the beam axis from the resin surface to the random point

1. 서론

쾌속 생산에서 널리 사용되고 있는 광조형 (stereolithography)은 광 경화성 수지에 레이저 빛을 주사하여 한 층씩 경화시키며 적층해 3 차원 형상의 제품을 제작하는 기술이다. 이때 사용되는 광 경화성 수지는 주사되는 빛 에너지에 의해 액상에서 고상으로 경화되는 성질을 갖고 있다. 따라서 광조형에서는 주사되는 레이저 빛의 파워, 주사속도 등의 요인들이 중요하다.¹

한편, 기존의 광 경화성 수지의 경화현상에 관

한 연구들은 대부분 레이저 빛을 광 경화성 수지 표면에 수직으로 입사시키는 방식에 대한 것들이다.^{2,4} 따라서 레이저 빛이 경사지게 입사되는 경우에는 이를 바로 적용하기 어렵다.

이에 본 연구에서는 레이저 빛이 경사지게 광 경화성 수지에 입사되는 조건에 따른 광 경화성 수지의 경화현상을 이론 및 실험으로 해석하였다.

2. 광경화성 수지의 경화현상에 관한 수학적 모델

2.1 경사 노광 조건에서 광 경화성 수지 내의 방사조도분포 해석

Fig. 1 과 같이 $x-y$ 평면에 있는 광 경화성 수지의 표면에 가우스분포를 갖는 레이저 빛이 수직으로 입사한다고 할 때, 광 경화성 수지 표면에 레이저의 방사조도 분포는 식(1)과 같다.

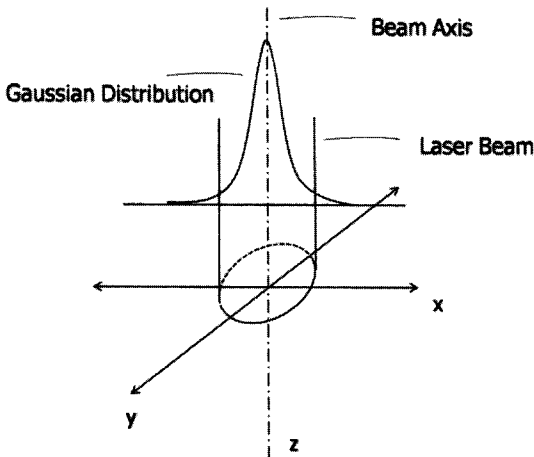


Fig. 1 Vertical exposure of the laser beam on the surface of the photopolymer

$$H(x, y) = H_0 \cdot \exp\left(-2 \frac{x^2}{w_0^2}\right) \cdot \exp\left(-2 \frac{y^2}{w_0^2}\right) \quad (1)$$

여기서 H_0 는 최대방사조도, x, y 는 광 축에 수직인 평면좌표 그리고 w_0 는 레이저 빛의 가우스 반경이다.

또한 광 경화성 수지내부에서 레이저 빛의 방사조도는 Beer-Lambert Law 에 따라 깊이 방향으로 식(2)와 같이 지수함수적으로 감소한다.

$$H(z) = H_0 \cdot \exp\left(-\frac{z}{D_p}\right) \quad (2)$$

여기서 z 는 수지표면에서부터 광축에 평행한방향으로의 깊이이고 D_p 는 광 경화성 수지의 투과깊이이다.

광경화성 수지 내 에서 깊이 방향인 z 방향의 방사조도는 식(1)과 (2)에 의해 식(3)과 같이 된다.^{5,7} 즉, 식(3)은 광 경화성 수지의 표면에 레이저 빛이 수직으로 입사 될 때, 광 경화성 수지 내부의 임의의 점에서 레이저 빛의 방사조도를 나타낸다.

$$H(x, y, z) = H_0 \cdot \exp\left(-2 \frac{x^2}{w_0^2}\right) \cdot \exp\left(-2 \frac{y^2}{w_0^2}\right) \exp\left(-\frac{z}{D_p}\right) \quad (3)$$

한편 Fig. 2 와 같이 레이저 빛이 z 축에 대해 θ 만큼 기울어져 주사될 때 광축에서 수직거리가 y_0 이고 광 경화성 수지의 표면에서부터 광축에 평행한 거리가 z_0 인 광 경화성 수지 내부의 임의의 점의 좌표는 각각 식(4) 및 (5)와 같다.

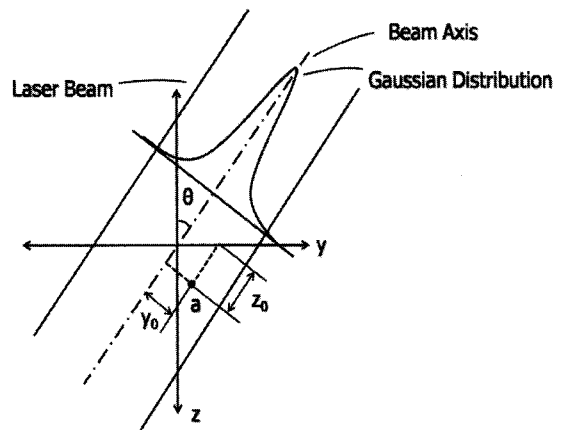


Fig. 2 Inclined exposure of the laser beam on the surface of the photopolymer

$$y_0 = y + z \tan \theta \quad (4)$$

$$z_0 = \frac{z}{\cos \theta} \quad (5)$$

한편 식(3)은 광 경화성 수지 내부의 임의의 점에 주사되는 레이저 빛의 조사량을 광축과 광

경화성 수지표면을 기준으로 하는 길이에 의한 함수로 정의 한다. 또한 레이저 빛이 θ 만큼 경사지게 주사될 때 식(4) 및 식(5)와 같이 광 경화성 수지 내부의 임의의 점을 기울어진 광축과 수지표면을 기준으로 하는 길이로 구할 수 있다.

따라서 식(4)와 (5)를 식(3)에 대입하여 정리하면, 레이저 빛이 광 경화성 수지에 θ 의 각도로 경사져서 입사했을 때 광 경화성 수지 내부에서의 레이저 빛의 방사조도를 식(6)과 같이 구할 수 있다.

$$H(x, y, z) = H_0 \cdot \exp\left[-2 \frac{(z \sin \theta + y \cos \theta)^2}{w_0^2}\right] \cdot \exp\left(-\frac{z}{D_p \cos \theta}\right) \cdot \exp\left(-2 \frac{x^2}{w_0^2}\right) \quad (6)$$

한편 광경화성 수지의 표면에서 가우스 분포를 갖는 레이저 빛의 방사조도분포는 식(7)과 같다.

$$H(r, 0) = H_0 \cdot \exp\left(-2 \frac{r^2}{w_0^2}\right) \quad (7)$$

그리고 식(7)을 적분하면 식(8)과 같이 레이저 빛의 파워가 된다.

$$P_L = \int_{-\infty}^{\infty} H(r, 0) dA \quad (8)$$

한편 원에서 $dA = 2\pi r dr$ 이므로 식(8)은 식(9)와 같다.

$$P_L = \int_0^{\infty} H_0 \cdot \exp\left(-2 \frac{r^2}{w_0^2}\right) 2\pi r dr \quad (9)$$

새로운 무차원 변수 μ 를 식(10)과 같이 정의할 때 식(9)는 식(11)과 같이 표현된다.

$$\mu = \frac{-2r^2}{w_0^2} \quad (10)$$

$$P_L = \frac{\pi}{2} w_0^2 H_0 \int_0^{\infty} \exp(-\mu) d\mu \quad (11)$$

식(11)을 정리하면 식(12)와 같이 레이저 빛의 파워를 광 경화성 수지의 표면에서 최대방사조도와 가우스반경에 관한 식으로 정리할 수 있다.⁵⁻⁷

$$P_L = \frac{\pi w_0^2}{2} H_0 \quad (12)$$

따라서 식(12)를 식(6)에 대입하면, 레이저 빛이 $y-z$ 평면에 θ 의 각도로 광 경화성 수지에 광 경화성 수지 내부의 임의의 점에서의 방사조도는 식(13)과 같이 레이저 빛의 세기에 관한 식으로 표현할 수 있다.

$$H(x, y, z) = \frac{2}{\pi w_0} P_L \exp\left[-\frac{2(z \sin \theta + y \cos \theta)^2}{w_0^2}\right] \cdot \exp\left(-\frac{z}{D_p \cos \theta}\right) \cdot \exp\left(-2 \frac{x^2}{w_0^2}\right) \quad (13)$$

한편 레이저 빛이 x 축 방향으로 V_s 의 속도로 주사된다면 광 경화성 수지 표면의 임의의 점에서 단위면적당 에너지(E)는 광 경화성 수지 표면에서 레이저 방사조도의 시간에 대한 적분으로 나타낼 수 있다(식(14)).

$$E(x, y, 0) = \int_{-\infty}^{\infty} H[x(t), y(t), 0] dt \quad (14)$$

또한 V_s 는 식(15)와 같이 정의될 수 있으므로 식(14)와 식(15)에 의해 광 경화성 수지 표면에서의 노광량은 식(16)과 같다.

$$V_s = \frac{dx}{dt} \quad (15)$$

$$E(x, y, 0) = \frac{2P_L}{\pi w_0 V_s} \exp\left[-\frac{2(y \cos \theta)^2}{w_0^2}\right] \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-2 \frac{x^2}{w_0^2}\right) dx \quad (16)$$

새로운 무차원 변수 γ 를 식(17)과 같이 정의할 때 식(16)은 식(18)과 같이 표현된다.

$$\gamma^2 = 2 \frac{x^2}{w_0^2} \quad (17)$$

$$E(x, y, 0) = \frac{2P_L w_0^2}{\pi w_0 V_s \sqrt{2}} \exp\left[-\frac{2(y \cos \theta)^2}{w_0^2}\right] \int_0^\infty \exp(-\gamma^2) d\gamma \quad (18)$$

식(18)에 Gauss error function 을 도입하면 식(19)와 같이 광경화성 수지 표면에서의 노광량의 식을 얻을 수 있다.

$$E(y, 0) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{P_L}{w_0 V_s} \exp\left[-\frac{2(y \cos \theta)^2}{w_0^2}\right] \quad (19)$$

가우스 분포를 갖는 레이저 빛의 방사조도는 Beer-Lambert Law 에 의해 광축에 수직방향으로의 거리에 따라 지수함수적 관계를 갖는다. 또한 광경화성 수지의 표면에서부터 광축과 평행한 깊이 방향으로의 거리에 따라서도 지수함수적 관계가 있다. 따라서 광 경화성 수지 내부의 노광량을 식(20)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E(y, z) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{P_L}{w_0 V_s} \exp\left[-\frac{2(z \sin \theta + y \cos \theta)^2}{w_0^2}\right] \exp\left(-\frac{z}{D_p \cos \theta}\right) \quad (20)$$

한편 레이저에 의해 광 경화성 수지가 경화 될 때 액상과 고상의 경계점은 겔 상태로 존재하게 된다. 이 겔 상태의 임의의 점의 y, z 좌표를 각각 y^*, z^* 라고 하면, 이 점에서의 노광량은 임계노광량(Critical Exposure, E_c)이 된다. 따라서 식(20)은 광 경화성 수지 내부에서 수지가 경화되는 표면의 좌표에 관한 식이 되며 이를 다시 정리하면 식(21)과 같다.

$$\frac{2}{w_0^2} (z^* \sin \theta + y^* \cos \theta)^2 + \frac{1}{D_p \cos \theta} z^* = \ln\left(\sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{P_L}{w_0 V_s E_c}\right) \quad (21)$$

즉, 식(21)은 레이저 빛이 수직에서 θ 만큼 기울어져 광 경화성 수지에 주사될 때, $y-z$ 평면상의 광 경화성 수지의 경화형상을 2 차 곡선의 형태로 나타내게 된다.

2.2 광 경화성 수지의 굴절률

일반적으로 광 경화성 수지에 레이저 빛이 경사지게 주사되면 레이저 빛은 수지 표면에서 굴절되게 된다. 따라서 광조형에서 경사 노광시에는 굴절률이 고려되어야 한다. 또한 광조형 시 사용되는 광 경화성 수지는 그 종류가 다양하다. 따라서 본 연구에서는 임의의 광 경화성 수지의 굴절률을 주사방식 광조형 장비를 이용해 측정하기 위해 Fig. 3 과 같은 기하학적 구조를 고려하였다.

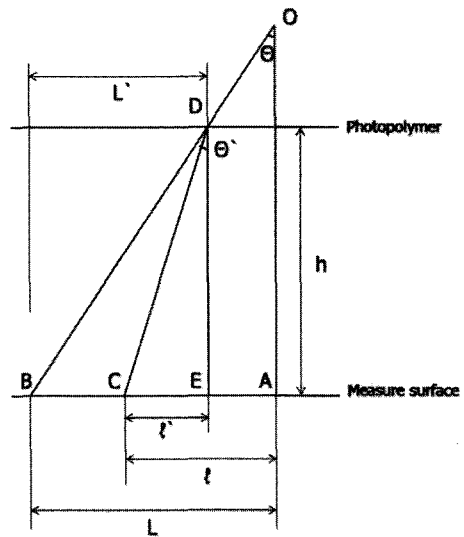


Fig. 3 Schematic drawing for refractive index measurement

점 O 의 광원에서 레이저 빛이 점 A 와 점 B 에 각각 주사될 때, 측정면위의 점 A 와 점 B 사이의 길이는 L 이 된다. 광 경화성 수지의 표면에서 측정면까지의 거리가 h 라고 할 때, 점 B 를 향해 주사된 레이저 빛은 굴절되어 점 C 에 도달하게 된다. 이때 점 A 와 점 C 의 길이를 l 이라고 하자. 레이저 빛이 광 경화성 수지 표면에 도달하는 지점을 점 D 라할 때, 점 D 에서 측정면에 수직으로 그어진 선분과 측정면이 교차하는 점을 E 이라고 한다. $\triangle OBA \equiv \triangle OBE$ 이므로 $\angle BDE$ 는 θ 가 된다. 따라서 $\overline{BE} = h \tan \theta$ 이다. \overline{BE} 를 L' 이라 할 때 \overline{CE} 는 $L' - (L - l)$ 로 구할 수 있으며 이를 l' 이라고 한다. 따라서 식(22)가 성립한다.

$$\frac{l'}{\tan \theta} = \frac{L'}{\tan \theta} \quad (22)$$

식(22)에 따라 입사각 θ 와 길이 L, ℓ 높이 h 로부터 광 경화성 수지의 굴절각 θ' 을 구할 수 있다. 그리고 스넬의 법칙에 의해 광 경화성 수지의 굴절률 n 을 구할 수 있다.

따라서 식(21)과 같이 광조형에서 경사 노광 조건을 고려할 때 레이저 빛의 입사각 θ 대신 광 경화성 수지의 굴절률에 따른 수정된 입사각 θ' 을 적용하여야 한다.

3. MATLAB 을 이용한 시뮬레이션

이상의 결과를 이용하여 레이저 빛의 경사노광에 대한 광 경화성 수지의 경화현상에 대한 해석을 수행하였다 즉, 식(21)을 $0=f(y,z)$ 의 형태로 변환하고 MATLAB의 meshgrid 함수를 이용해 y, z 의 값을 -5000 부터 5000 까지 1씩 증가시키면서 0을 만족하는 점(y^*, z^*)들의 좌표를 구하였다. 해석에 사용된 입력값은 Table 1 과 같다.

Table 1 Simulation parameters

Parameter	Value
$P_i(\mu W)$	100
$w_0(\mu m)$	250
$V_s(mm/min)$	1.8
$E_c(mJ/cm^2)$	11.5
$D_p(mm)$	0.14

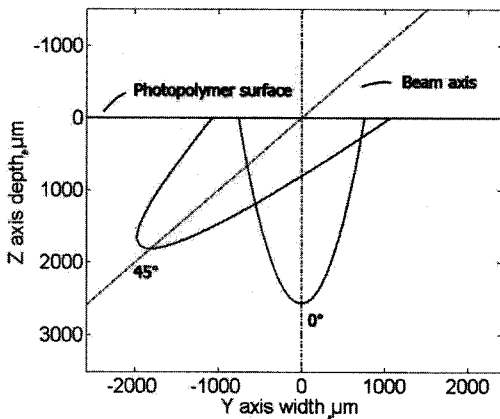


Fig. 4 Photopolymer solidification simulation results for incidence angle $\theta=0^\circ$ and 45°

Fig. 4 는 레이저 빛이 각각 0° 및 45° 의 입사각으로 주사되었을 때, $y-z$ 평면상에 투영되는 광

경화성 수지의 경화형상을 보여준다. Fig. 4 에서 알 수 있듯이 광 경화성 수지에 주사되는 레이저 빛이 경사지게 노광되면 이에 따라 광 경화성 수지의 경화형상도 달라지게 된다.

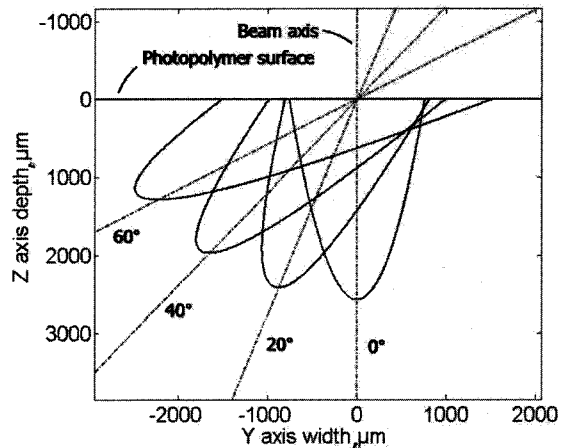


Fig. 5 Photopolymer solidification simulation results for incidence angle $\theta=0^\circ \sim 60^\circ$ with step size 20°

Fig. 5 는 광경화성 수지에 입사되는 레이저 빛의 입사각을 $0^\circ \sim 60^\circ$ 로 변화될 때 광 경화성 수지의 경화형상들을 보여준다. Fig. 5 에서 알 수 있듯이 광경화성 수지에 입사되는 레이저 빛의 입사각이 변화하면 광 경화성 수지의 경화형상도 이에 따라 변화하게 된다. 특히 입사각이 일정한 각도 이상으로 커지게 되면 이에 따른 광 경화성 수지의 경화형상도 광축에 따라 급격히 변화된다. 따라서 광조형에서 경사면의 성형시 레이저 빛의 입사각을 적절히 주사하면 기존의 레이저 빛이 수직 방향으로만 주사되는 광조형보다 좋은 표면거칠기를 갖는 형상의 제작이 가능하다.

4. 경사 노광 실험 및 평가

Fig. 6 은 레이저 빛의 경사각에 따른 광경화성 수지의 경화형상을 실험하기 위한 실험장치의 개략도이다. 광원인 자외선 레이저에서 나온 빛은 회전 스테이지에 부착된 자외선 반사경에 입사된다. 경사각은 자외선 반사경이 부착된 회전 스테이지로 제어된다. 실험에 사용된 레이저는 가우스 반경이 $250 \mu m$ 이고, 파장이 $375nm$ 인 반도체 레이저이다(CUBE, CUBE 375-8C).

광 경화성 수지는 DSM Somos 사의 WaterShed11110 을 사용하였다. 광 경화성 수지의 굴절률은 측정 결과 1.17 이다.

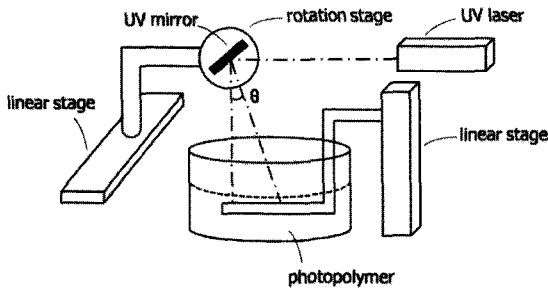


Fig. 6 Schematic drawing of experiment apparatus for inclined laser beam exposure

실험은 레이저 파워 96 μW 및 주사속도 1.8mm/min 으로 주사각도를 다양하게 변경하며 수행되었다. Fig. 7 은 주사각도가 0° 및 45° 일 때 실험을 수행한 결과를 비교하여 보여준다. Fig. 7(a)에서 알 수 있듯이 0°로 입사된 레이저에 의한 수지의 경화현상은 시뮬레이션 결과와 유사하다. 또한 Fig. 7(b)와 같이 입사되는 레이저 빛이 45°의 경사각을 가질 경우 경화되는 광경화성 수지의 형상도 시뮬레이션 결과와 유사하다. 따라서 본 연구를 통하여 개발된 수학적 모델은 광조형에서 레이저 빛의 경사노광 시 광 경화성 수지의 경화형상을 예측하는데 이용될 수 있다. 또한 레이저의 입사각에 따른 경화현상을 제어하면 광조형의 적층에서 발생할 수 있는 표면단차에 의한 표면 거칠기를 개선할 수 있을 것으로 기대된다.^{8,9}

5. 결론

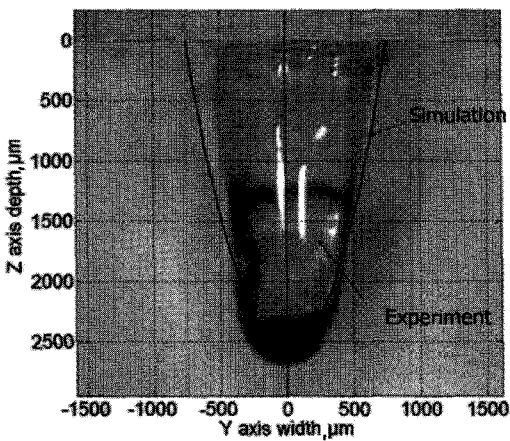
본 연구를 통해 광조형에서 레이저 빛의 경사노광 시 광 경화성 수지의 경화현상을 수학적 모델링하였다. 개발된 수학적 모델은 MATLAB 을 이용해 다양한 레이저 빛의 경사각에 대한 광 경화성 수지의 경화형상에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 광 경화성 수지의 굴절률 측정을 수행하고 광 경화성 수지의 경사노광 실험을 위한 실험 장비를 제작하였다. 실험결과는 시뮬레이션 결과와 유사한 결과를 보여주었다.

후 기

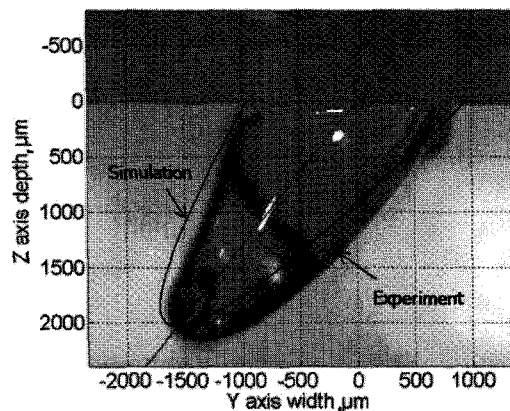
이 논문은 2009 년도 충북대학교 학술연구 지원사업의 연구비 지원으로 수행됨.

참고문헌

1. Huang, Y.-M. and Lan, H.-Y., "Compensation of distortion in the bottom exposure of stereolithography process," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 27, No. 11-12, pp. 1101-1112, 2006.
2. Ikuta, K. and Hirowatari, K., "Real Three Dimensional Micro Fabrication Using Stereo Lithography and Metal Molding," Proc. of IEEE International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, pp. 42-47, 1993.



(a)



(b)

Fig. 7 Experiment result; (a) $\theta=0^\circ$ (b) $\theta=45^\circ$

3. Ikuta, K., Ogata, T., Tsuboi, M. and Kojima, S., "Development of mass productive microstereolithography(Mass-IH process)," Proc. of IEEE International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, pp. 301-306, 1996.
4. Varadan, V. K., Jiang, X. and Varadan, V. V., "Microstereolithography and other fabrication techniques for 3D MEMS," John Wiley & Sons Ltd., pp. 92-122, 2001.
5. Jacobs, P. F., "Rapid Prototyping & Manufacturing - Fundamentals of Stereolithography," Society of Manufacturing Engineers, pp. 80-88, 1992.
6. Lee, I. H., Cho, D.-W. and Lee, E., "Photopolymer Solidification Phenomena Considering Laser Exposure Conditions in Micro-stereolithography Technology," J. of KSPE, Vol. 21, No. 3, pp. 171-179, 2004.
7. Nakamoto, T., Yamaguchi, K., Abraha, P. A. and Mishima, K., "Manufacturing of three-dimensional micro-parts by UV-laser-induced polymerization," J. Micromech. Microeng., Vol. 6, No. 2, pp. 240-253, 1996.
8. Hagihara, S., Furukawa, S., Kiyohiro, N. and Makino, H., "Laser Lithography for Making Jewelry -A Concept of Diagonal Irradiation-," Proceedings of The 8th International Conference on Rapid Prototyping, 2000.
9. Sager, B. and Rosen, D. W., "Use of parameter estimation for stereolithography surface finish improvement," 2005 SFF Symposium, pp. 315-325, 2005.