

광조형에서 테이저 빛의 주사각도에 따른 표면거칠기 개선 Improvement of Surface Roughness for Inclined Laser Beam Exposure in Stereolithography

*김영현¹, #이인환², 고예조³

*Y. H. Kim¹, #I. H. Lee²(anxanx@chungbuk.ac.kr), T. J. Ko³

¹충북대학교 정밀기계공학과, ²충북대학교 기계공학부, ³영남대학교 기계공학과

Key words : Inclined exposure, Stereolithography, Surface Roughness

1. 서론

쾌속 생산 분야에서 널리 사용되고 있는 광조형 (Stereolithography)은 광 경화성 수지에 레이저 빛을 광원으로 하여 한 층씩 단면을 경화시키며 적층해 3차원 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 등 여러 가지 요인들이 광 경화성 수지의 경화형상을 결정한다.¹⁾

한편, 광조형은 한 층씩 단면을 경화시켜 적층하는 과정에서 발생하는 표면단차에 의해 표면거칠기가 커지는 현상이 필연적으로 발생한다. 기존의 광조형에서 표면거칠기 개선에 관한 연구들은 대부분 레이저 빛을 광 경화성 수지 표면에 수직으로 입사시키는 방식에 대한 것들이며 이를 후가공을 통해 극복하는 방법들이다.²⁾⁻⁵⁾ 이러한 후가공을 이용한 표면거칠기 개선법은 가공에 소요되는 시간이 늘어나고 조형물의 의도한 형상을 왜곡시킬 수 있다. 이에 본 연구에서는 광 경화성 수지에 레이저 빛이 경사지게 입사되는 조건에 따른 광조형 적층구조물의 표면거칠기를 이론 및 실험으로 해석하였다.

2. 광경화성 수지의 경화형상에 관한 수학적 모델

Fig. 1(a)와 같이 x-y평면에 있는 광 경화성 수지의 표면에 가우스분포를 갖는 레이저 빛이 수직으로 입사한다고 할 때, 광 경화성 수지 내부의 임의의 점에서 단위면적당 에너지(Exposure, E)는 식(1)과 같다.⁶⁾

한편 본 연구팀에 의해 기존에 발표된 바와 같이 레이저 빛이 y-z평면에 대해 θ 만큼 기울어져 주사되게 되면 광경화성 수지 내부의 임의의 점에서 단위면적당 에너지는 식(2)와 같이 표현된다(Fig. 1(b)). 또한, 광 경화성 수지 내부에서 수지가 경화되는 점의 좌표에 관한 식으로 정리하면 식(3)과 같다. 즉, 식(3)은 레이저 빛이 y-z평면에서의 θ 만큼 기울어져 광 경화성 수지에 주사될 때, y-z평면상의 광 경화성 수지의 경화형상을 2차 곡선의 형태로 나타내게 된다.⁷⁾

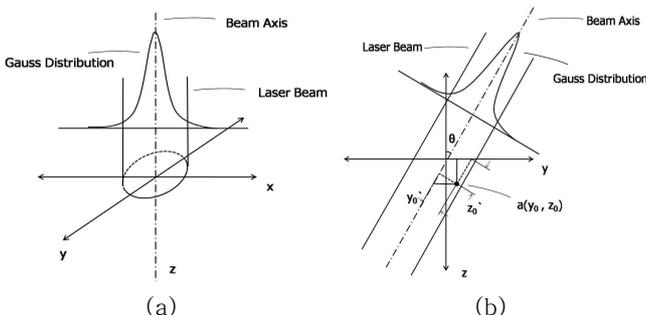


Fig. 1 Laser beam exposure condition;

(a)Vertical exposure, (b) Inclined exposure with θ

$$E(y, z) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{P_L}{w_0 V_S} \exp\left[-2 \frac{y^2}{w_0^2}\right] \exp\left(-\frac{z}{D_p \cos\theta}\right) \quad (1)$$

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

$$\frac{2}{w_0^2} (z^* \sin\theta + y^* \cos\theta)^2 + \frac{1}{D_p \cos\theta} z^* = \ln\left(\sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{P_L}{w_0 V_S E_C}\right) \quad (3)$$

여기서 P_L 은 레이저 파워, w_0 은 최대방사조도가 $1/e^2$ 으로 줄어드는 빔의 반경으로 가우스 반경이라 한다. D_p 는 투과깊이로 수지 표면의 방사조도가 $1/e$ 로 줄어드는 깊이이다. E_C 는 광 경화성 수지가 액상에서 고상으로 변화되기 시작하는 단위면적당 에너지의 임계치이다. V_S 는 x축방향으로의 주사속도, θ 는 레이저 빛의 입사각도이다.

3. MATLAB을 이용한 시뮬레이션

이상의 결과로 MATLAB을 이용하여 레이저 빛의 경사노광에 따른 광조형의 적층구조물표면에 대한 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 입력값은 Table 1과 같다.

Table 1 Simulation parameters

| | |
|-----------------------------|------|
| P_L (μW) | 33 |
| w_0 (μm) | 700 |
| V_S (mm/min) | 3 |
| E_C (mJ/cm ²) | 33.1 |
| D_p (mm) | 0.12 |

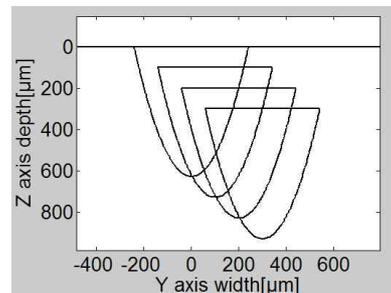


Fig. 2 Simulation result ($\theta=0^\circ$)

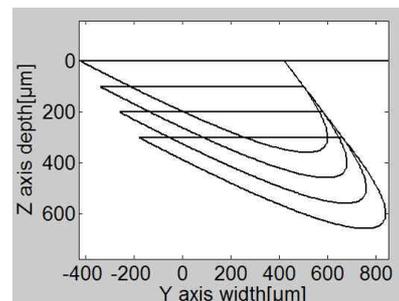


Fig. 3 Simulation result ($\theta=35^\circ$)

Fig. 2는 45°의 각을 갖는 경사면의 성형 시 광 경화성 수지에 입사되는 레이저 빛의 입사각을 0°로 하였을 때 경사면의 단면 형상을 보여준다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 레이저 빛이 광 경화성 수지에 수직으로 입사되면 조형물의 표면은 표면 단차에 의한 계단형상으로 성형된다. 또한 레이저 빛이 광 경화성 수지 표면에 수직으로 입사될 때 광 경화성 수지의 경화 형상은 2차 곡선의 형태를 갖게 된다. 따라서 45°의 각을 갖는 경사면을 제작하기 위해 레이저 빛의 입사각은 광 경화성 수지의 경화 형상을 고려하여 적절히 조절되어야 한다. Fig. 3은 45°의 각을 갖는 경사면의 성형 시 광 경화성 수지에 입사되는 레이저 빛의 입사각을 35°로 수정하였을 때 경사면의 단면 형상을 보여준다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 광 경화성 수지에 입사되는 레이저 빛의 입사각을 적절히 조절하면 기존의 레이저 빛이 수직방향으로만 주사되는 광조형보다 좋은 표면거칠기를 갖는 형상의 제작이 가능하다.

4. 경사노광 실험 및 평가

Fig. 4는 레이저 빛의 경사각에 따른 광경화성 수지의 경화형상 제작을 위한 실험장치의 개략도이다.

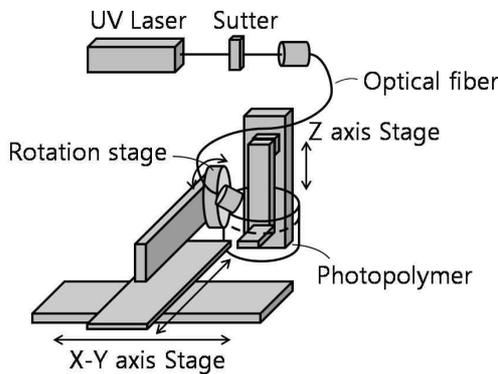
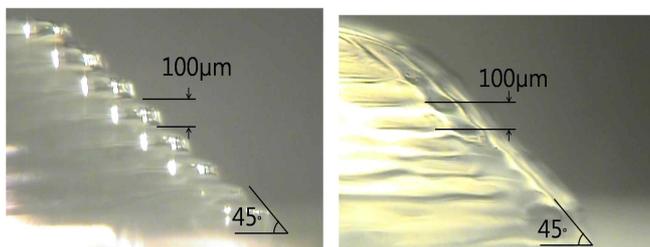


Fig. 4 Experiment apparatus schematics for inclined exposure

실험에 사용된 광원은 가우스반경 700 μ m, 파장 375nm의 반도체 레이저를 사용하였다. 광경화성 수지는 DSM Somos사의 WaterShed11110에 Ciba사의 TINUVIP 흡수제를 0.01%를 첨가하여 사용하였다. 실험은 $P_L=33\mu W$, $V_S=3mm/min$ 의 조건으로 한층의 두께를 100 μ m로 하고 경사각을 0°, 35°로 변형시키면서 수행하였다.



(a) (b)

Fig. 5 Experiment result; (a) $\theta=0^\circ$ (b) $\theta=35^\circ$

Fig. 5는 레이저의 주사각도가 0° 및 35°일 때 45°의 경사각을 갖는 광조형 적층구조물에서 경사면의 단면을 보여준다. Fig. 5(a)에서 알 수 있듯이 0°로 입사된 레이저에 의해 성형된 광조형 적층구조물은 경사면의 단면이 계단형상이다. 또한, Fig. 5(b)와

같이 레이저 빛의 입사각을 35°로 수정하였을 때 광조형 적층구조물에서 경사면의 표면거칠기가 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 따라서 임의의 경사각을 갖는 광조형 적층구조물의 성형 시 광 경화성 수지의 경화 형상을 고려하여 레이저 빛의 주사각을 적절히 조절하면 별도의 후가공 없이 의도한 형상을 제작할 수 있음을 확인했다.

5. 결론

본 연구를 통해 레이저의 주사각에 대한 광조형 구조물의 단면 형상을 MATLAB을 이용하여 시뮬레이션하고 레이저 빛의 입사각에 따른 광조형 적층구조물의 제작 실험을 수행하였다. 실험결과 레이저 빛의 주사각도에 따른 광 경화성 수지의 경화형상을 고려하여 레이저 빛의 입사각을 적절히 조절하면 임의의 경사면을 갖는 광조형 적층구조물의 성형 시 경사면에서의 표면거칠기를 개선 할 수 있음을 확인했다.

후기

본 연구는 과학기술부의 기초 과학 연구 사업(No. R01 - 2008 - 000 - 20568 - 0)의 연구결과로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. You-Min Huang, Hsiang-Yao Lan, "Compensation of distortion in the bottom exposure of stereolithography process", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 27 p1101-1112, 2006.
2. Reeven, P. E., Cobb, R. C., "Reduction the surface deviation of stereolithography using in-process techniques", Rapid Prototyping Journal, Vol. 3, No. 1, pp. 20-31, 1997
3. Narahara, H., "A new method for improving performance and surface roughness in stereolithography", Proceedings of The 2nd Korea-Japan Die & Mold workshop, Pusan National University, Pusan, Korea, 28-30 June, 1995.
4. Cobb, R. C., Spencer, J. D., Dickens, P. M., "Better surface finishing techniques for the RPT is must", Proceedings of the 2nd Scandinavian Rapid Prototyping Conference, Danish Technological Institute, Aarhus, Denmark, 4-6 October, 1993.
5. 안대건, 김호찬, 정해도, 이석희, "광조형물의 표면조도 향상에 관한 연구", 한국정밀공학회지, 제 21권, 제 9호, pp. 196-203, 2004.
6. Jacobs, P. F., "Rapid Prototyping & Manufacturing - Fundamentals of Stereolithography," SME, 1992.
7. Young Hyun Kim, Jong Seon Lim, In Hwan Lee, Ho-Chan Kim, "Photopolymer Solidification for Inclined Laser Exposure Conditions", 2009 SFF Symposium, 2009.