

광조형에서 경사노광에 따른 광 경화성 수지의 경화현상 Photopolymer Solidification for Inclined Laser Exposure Conditions

*김영현¹, 임종선¹, 유규상², #이인환³

*Y. H. Kim¹, J. S. Lim¹, G. S. Yu², #I. H. Lee³(anxanx@chungbuk.ac.kr)

¹충북대학교 정밀기계공학과, ²충북대학교 기계공학과, ³충북대학교 기계공학부

Key words : Inclined exposure, Stereolithography, Photopolymer solidification

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 경화현상을 결정한다.¹⁾

기존의 광 경화성 수지의 경화현상에 관한 연구들은 대부분 레이저 빛을 광 경화성 수지 표면에 수직으로 입사시키는 방식에 대한 것들이다.^{2)~3)} 따라서 레이저 빛이 경사지게 입사되는 경우에는 이를 바로 적용하기 어렵다. 이에 본 연구에서는 광 경화성 수지에 레이저 빛이 경사지게 입사되는 조건에 따른 광 경화성 수지의 경화현상을 이론 및 실험으로 해석하였다.

2. 광 경화성 수지의 경화현상에 관한 수학적 모델

Fig. 1(a)와 같이 TEM₀₀모드 레이저 빛이 광 경화성 수지에 수직으로 입사될 때 광경화성 수지 내에서 방사조도는 식(1)과 같이 표현된다.⁴⁾

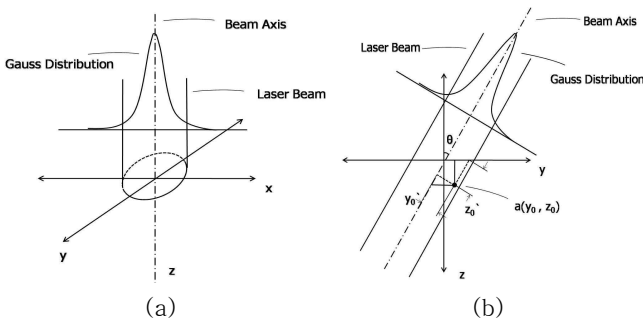


Fig. 1 Laser beam exposure condition;
(a) Vertical exposure, (b) Inclined exposure with θ

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

여기서 H_0 는 최대방사조도, 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. 식(1)은 광경화성 수지 내부의 임의의 점의 방사조도분포를 광축으로부터의 거리 x, y 와 광경화성 수지 표면에서 광축방향의 깊이 z 로 나타낸다.

한편 Fig. 1(b)와 같이 레이저 빛이 $y-z$ 평면에 대해 θ 만큼 기울어져 주사되게 되면 식(1)을 광경화성 수지의 경화모델에 바로 적용하기 어렵다. 레이저 빛이 $y-z$ 평면에 대해 θ 만큼 기울어져 주사되게 될 때, 이를 고려하면 광축과의 거리가 y_0' , 광경화성 수지의 표면에서 광축에 평행한 거리 z_0' 인 광경화성 수지 내부의 임의의 점 a 를 $y-z$ 좌표로 표현하여 빛이 경사져서 입사했을 때 광 경화성 수지 내부에서의 레이저 빛의 방사조도는 식(2)와 같다.

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

한편 레이저 빛이 x 축 방향으로 V_s 의 속도로 주사될 때, 레이저 빛의 파워를 식(3)과 같이 광 경화성 수지의 표면에서 최대방사조도와 가우스반경에 관해 정리하여 식(2)에 대입하면 광 경화성 수지 표면에서의 임의의 점에서 단위면적당 에너지(Exposure, E)는 식(4)와 같다.

$$P_L = \frac{\pi w_0^2}{2} H_0 \quad (3)$$

$$E(y, 0) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{P_L}{w_0 V_s} \exp\left[-\frac{2(y \cos\theta)^2}{w_0^2}\right] \quad (4)$$

또한 광 경화성 수지 표면의 방사조도와 내부의 방사조도가 지수 함수적 관계이므로 광 경화성 수지 내부의 노광량을 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$E(y, z) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{P_L}{w_0 V_s} \exp\left[-\frac{2(z \sin\theta + y \cos\theta)^2}{w_0^2}\right] \exp\left(-\frac{z}{D_p \cos\theta}\right) \quad (5)$$

한편 레이저에 의해 광 경화성 수지가 경화 될 때 액상과 고상의 경계점은 겔 상태로 존재하게 된다. 이 겔 상태의 임의의 점의 y, z 좌표를 y^*, z^* 라고 하면, 이 점에서의 노광량은 임계노광량(Critical Exposure, E_c)이 된다. 따라서 이를 식(5)에 대입하면 광 경화성 수지 내부에서 수지가 경화되는 점의 좌표에 관한 식이 되며 이를 다시 정리하면 식(6)과 같다. 즉, 식(6)은 레이저 빛이 $y-z$ 평면에서의 θ 만큼 기울어져 광 경화성 수지에 주사될 때, $y-z$ 평면상의 광 경화성 수지의 경화현상을 2차 곡선의 형태로 나타내게 된다.

$$\frac{2}{w_0^2} (z^* \sin\theta + y^* \cos\theta)^2 + \frac{1}{D_p \cos\theta} z^* = \ln\left(\sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{P_L}{w_0 V_s E_c}\right) \quad (6)$$

3. MATLAB을 이용한 시뮬레이션

이상의 결과로 MATLAB을 이용하여 레이저 빛의 경사노광에 대한 광 경화성 수지의 경화현상에 대한 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 입력값은 Table 1과 같다.

Table 1 Simulation parameters

P_L (μW)	100
w_0 (μm)	250
V_s (mm/min)	1.8
E_c (mJ/cm ²)	11.5
D_p (mm)	0.14

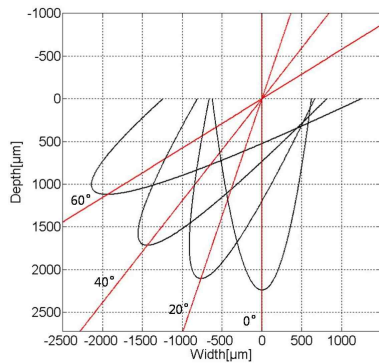


Fig. 2 Simulation result ($\theta=0^\circ \sim 60^\circ$)

Fig. 2는 광 경화성 수지에 입사되는 레이저 빛의 입사각을 $0^\circ \sim 60^\circ$ 로 변화시킬 때 광경화성 수지의 경화형상을 보여준다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 광경화성 수지에 입사되는 레이저 빛의 입사각이 변화하면 광 경화성 수지의 경화형상도 이에 따라 변화하게 된다. 특히 입사각이 일정 각(Fig. 2의 경우 18°) 이상으로 커지게 되면 광경화성 수지 표면 부근은 경화되지 않고 광경화성 수지 내부에서만 경화되는 것을 알 수 있다. 따라서 이를 이용하면 경사진 표면을 갖는 형상을 성형 할 때 기존의 레이저 빛이 수직방향으로만 조사되는 광조형보다 좋은 표면거칠기를 갖는 형상의 제작이 가능하다.⁵⁾

4. 경사노광실험 및 평가

Fig. 3는 레이저 빛의 경사각에 따른 광경화성 수지의 경화형상 제작을 위한 실험장치의 개략도이다.

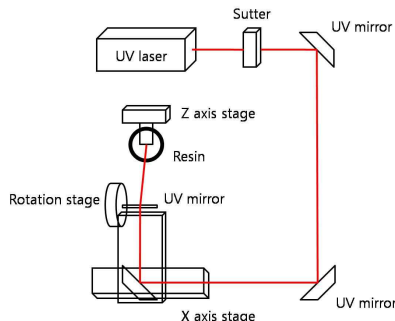


Fig. 3 Experiment apparatus schematics for inclined exposure

실험에 사용된 광원은 가우스반경 $250\mu\text{m}$, 파장 375nm 의 반도체 레이저를 사용하였다. 광경화성 수지는 DSM Somos사의 WaterShed11110을 사용하였다. 실험은 $P_L=96\mu\text{W}$, $V_S=1.8\text{mm/min}$ 의 조건으로 경사각을 $0^\circ, 45^\circ$ 로 변형시키면서 수행하였다.

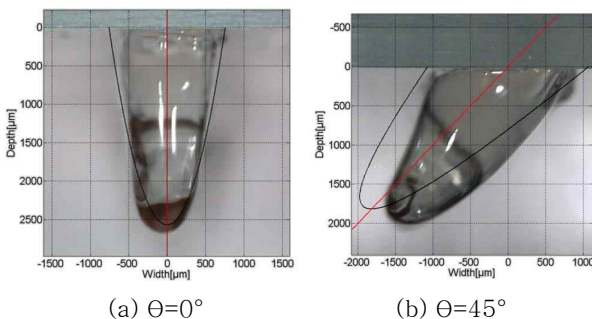


Fig. 4 Experiment result

Fig. 4(a)에서 0° 로 입사된 레이저에 의한 수지의 경화현상은 시뮬레이션 결과와 유사하다. Fig. 4(b)와 같이 레이저 빛의 기울어져 입사될 때 경화되는 광경화성 수지의 형상도 이에 따라 유사하게 된다.

한편 실험에서 사용된 광경화성 수지는 파장 355nm 의 레이저 빛에 대하여 $E_C=11.5\text{mJ/cm}^2$, $D_P=0.14\text{mm}$ 를 갖는다.⁶⁾ 하지만 실험장치에 이용된 레이저 빛은 375nm 의 파장을 가지며 이에 따라 경화형상의 차이가 보인다. 이는 추후 실험을 통해서 정확한 E_C, D_P 값을 구하여 해석에 적용하여야 한다. 또한 입사되는 레이저 빛의 광축과 실제 성형된 형상의 기울기가 일정한 차이를 보인다. 이는 해석 시 광경화성 수지에 입사되는 레이저 빛의 굴절을 고려하지 않은 것에 기인한 것으로 보인다. 따라서 이에 대한 고려가 추후 연구에서 필요하다.

5. 결론

본 연구를 통해 레이저의 조사각에 대한 광경화성 수지의 경화현상을 수학적 모델을 작성하고 MATLAB을 이용해 시뮬레이션하여 레이저 빛의 다양한 입사각에 대한 광경화성 수지의 경화형상을 살펴보았다. 또한 광경화성수지의 경사 노광 실험을 위한 실험 장비를 제작하고 레이저 빛이 기울어져 입사했을 때 광경화성 수지의 경화 실험을 수행하였다. 그 결과, 수학적 모델과 유사한 경화 현상을 얻을 수 있었다. 본 연구를 통하여 레이저의 입사각에 따른 경화현상을 제어하여 광조형의 적층에서 발생할 수 있는 표면단차에 의한 표면 거칠기를 개선할 수 있을 것으로 기대된다.

향후 빛의 굴절과 레이저 빛의 파장에 따른 E_C, D_P 를 고려한 추가 해석을 통하여 실험적 결과를 보다 정확히 모사할 수 있는 연구가 수행될 예정이다.

후기

본 연구는 지식경제부의 에너지자원 인력양성사업의 연구결과로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. In Hwan Lee, "Development of Micro-stereolithography Technology Considering Photopolymer Solidification Phenomena and Its Applications," Ph.D. thesis, POSTEC, 2003.
2. Su-Ho Lee, "Optimal selection of process parameters and In-process measurement of cross-sectional shapes of products in stereolithography process," KAIST, 1998.
3. Eun-Dok Lee, "Determination of Process Parameters in Stereolithography using Neural Network," Pusan National University, 1999.
4. Jacobs, P. F., "Rapid Prototyping & Manufacturing - Fundamentals of Stereolithography," SME, 1992.
5. Hagihara, S. Furukawa, N. Kiyohiro, H. Makino, "Laser Lithography for Making Jewelry -A Concept of Diagonal Irradiation -," Proceedings of The 8th International Conference on Rapid Prototyping, 2000.
6. DEM somos products WaterShed 11110, http://www.dsm.com/en_US/html/dsm/pd_product_data_sheets.htm.