

레이저빔 크기변화에 따른 광조형수지의 경화특성

이은덕*, 심재형*, 백인환**

Cure Properties in Photopolymer for Stereolithography according to Variance of Laser Beam Size

Eun-Dok Lee*, Jae-Hyung Sim* and In-Hwan Paik**

ABSTRACT

Stereolithography is the technique using a laser beam to cure a liquid resin, a photopolymer, with three dimensional computer-aided design (CAD) data. The build parameters of stereolithography such as beam size, scan velocity, hatch spacing, layer thickness and etc. are determined by the accuracy of prototype, the build time and the cured properties of the resin. In particular, beam size is important processing parameter for the other parameters. Therefore, this study observed the cured property to beam size. For this purpose, according to hatch spacing and beam size, the cure width and depth were measured on single cured line. Also, the cure width and depth were measured at single cured layer. As a result of experiments, cure depth which varied from 0.23mm to 0.34mm was directly proportioned to beam radius, on the other hand, cure width which varied from 0.42mm to 1.07mm was inversely proportioned to beam radius. Surface roughness varied from 1.12 to 2.23 μ m for the ratio of hatch spacing to beam radius.

Key Words : Stereolithography(광조형기술), Build parameter(작업변수), Cured property(경화특성), Beam size(빔 크기), Cure width(경화폭), Cure depth(경화깊이), Surface roughness(표면거칠기)

1. 서론

제품의 신속한 제작을 위해 등장한 캐속조형 기술(rapid prototyping)은 기계, 항공, 의학, 예술 등 다양한 분야에서 이용되고 있다⁽¹⁻⁴⁾. 그 중에서도 광조형기술(stereolithography)은 가장 널리 사용되는 방식으로 우수한 치수정밀도와 표면거칠기를 제공한다.

광조형기술은 3 차원 CAD 데이터를 이용하여 액체상태의 광조형수지에 레이저 빔을 선택적으로 조사하여 제품을 조형하는 방식이다. 따라서 조형

된 제품의 정밀도와 특성은 수지의 경화에 관련된 여러 요인에 의해 영향을 받는다.

일반적으로 광조형기술을 통해 조형되는 제품에 대해 요구되는 성능은 우수한 치수 및 표면정밀도, 신속한 조형 등이다. 이러한 목적을 만족하기 위해서는 조형에 필요한 여러 작업변수를 적절히 선정해야 한다. 이들 작업변수 중에는 레이저빔 크기, 주사속도, 주사간격, 적층두께 등이 있고 각 변수들은 서로 밀접한 관계를 가지고 있으므로 신중히 결정해야 한다.

특히 레이저빔의 크기는 레이저의 빔 강도, 경

· 2002년 7월 11일 접수

* 부산대학교 대학원

** 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소

화폭, 경화깊이에 직접적인 영향을 미치는 작업변수이므로 여러 작업변수 중 특히 제품의 정밀도를 좌우하는데 매우 중요한 인자이다. 또한 빔의 크기에 따른 경화폭과 경화깊이에 대한 정보가 있어야 이에 따른 주사간격과 적층두께를 결정할 수 있으므로 가장 먼저 결정되어야 하는 값이다.

그러나 빔의 크기는 다른 작업변수에 비해 상대적으로 조절하기가 어려워 기존연구의 대부분은 비교적 조절이 용이한 주사속도, 주사간격, 적층두께 등과 같은 작업변수를 변화시켜 제품을 조형하고 조형된 제품의 정밀도와 장치의 성능을 평가하는 것이었다⁽⁵⁻⁹⁾. 또한 상용되고 있는 광조형 장치에서도 빔 크기는 고정되어 있고 주사속도와 적층두께 등과 같이 비교적 간단한 작업변수만을 조절할 수 있도록 제작되어 있다.

이에 본 연구에서는 광조형장치의 성능에 상당한 영향을 미치는 빔의 크기를 변화시켜 제품을 조형함으로써 빔의 크기에 따른 광조형수지의 경화특성을 알아본다. 이를 위해 개발된 광조형장치를 이용하여 빔 크기와 주사속도를 변경해 가면서 단일 경화선에서의 경화폭, 경화깊이를 측정한다. 또한, 빔 크기, 주사간격, 주사속도를 변경해 가면서 단일 경화층에서의 경화깊이, 표면거칠기를 측정한다. 또한, 측정된 결과를 토대로 빔 크기, 주사속도, 주사간격이 제품의 표면거칠기와 조형시간에 미치는 영향을 규명하여 광조형장치의 성능 향상 방법을 제시하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 빔 크기

광조형수지는 투명하고 점성이 있는 액상의 광경화성수지로서 이것에 레이저 빔을 조사하면 조사된 부분이 중합반응을 일으키며 경화된다. 이러한 광경화 반응을 이용하여 제품을 조형하는 것이 광조형기술의 기본원리이다. 그러므로 조형되는 제품의 정밀도 향상을 위해서는 경화시키고자 하는 부분에만 레이저 빔을 정확하게 조사하는 것이 중요하다.

레이저 발생장치에서 출력되는 빔은 비교적 직경이 크기 때문에 위치 분해능을 높이는데 한계가 있고 수지를 경화시키기에는 빔 강도가 낮은 단점이 있다. 이를 해결하기 위해 광조형장치에서는 초점렌즈를 이용하여 빔을 집광한다. 이는 빔

의 크기를 줄여 장치의 위치 분해능을 높이고, 에너지의 집중을 통해 빔 강도를 높일 수 있다. 일반적으로 초점렌즈를 통과한 빔은 크기가 작을수록 빔 강도가 높아지고 빔 크기가 커질수록 빔 강도는 낮아진다.

Fig. 1은 레이저 발생장치에서 나온 빔이 초점렌즈를 통과하여 초점이 맺히는 것을 나타내었다. 그림에서 레이저 빔은 초점렌즈로 집광시켜도 초점은 한 점으로 모이지 않고 일정한 크기의 빔 웨이스트(beam waist)를 형성하고 있음을 알 수 있다.

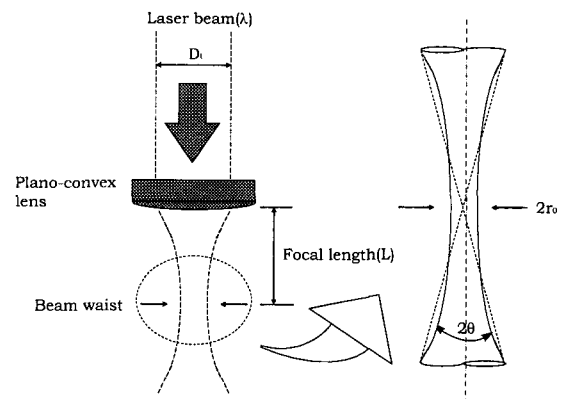


Fig. 1 Focus of laser beam

초점렌즈를 통과한 레이저 빔의 초점반경(focal radius)은 다음과 같다^(10,11).

$$r_0 = \frac{2\lambda M^2 L}{\pi D_L} \quad (1)$$

여기서, λ 는 레이저의 파장, M^2 은 레이저의 모드변수(mode purity parameter), L 은 초점렌즈의 초점거리, D_L 은 입사되는 레이저빔의 직경이다.

일반적으로 레이저의 파장, 모드변수, 입사 레이저빔의 직경은 사용되는 레이저의 종류에 따라 값이 일정하고, 초점거리는 사용되는 렌즈에 따라 정해진다. 따라서 초점거리가 다른 렌즈를 사용하면 빔의 크기를 조절할 수 있다.

2.2 경화폭과 경화깊이

광조형수지는 레이저 빔의 노광량이 수지의 임계 노광량보다 작을 경우에는 액체상태로 존재

하고 클 경우에는 중합반응을 일으키며 경화된다⁽¹²⁻¹⁵⁾. Fig. 2는 레이저 빔을 수지에 일정한 속도로 주사한 경우 나타나는 단일 경화선(a cured line)의 형태를 보여주고 있다. 그림에서 단일 경화선은 중앙부에서 최대값을 가지는 가우스 형태인데 이는 레이저빔의 에너지 분포와 동일한 형태이다.

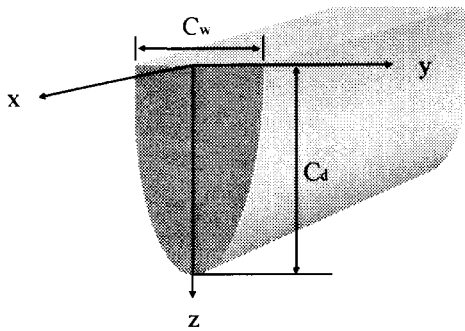


Fig. 2 Schematic representation of a cured line

위의 그림에서 경화폭(C_w)과 경화깊이(C_d)는 제품의 조형에 있어서 매우 중요한 의미를 가진다.

첫째로 경화폭은 레이저 빔의 강도 P_t , 레이저 초점반경 r_0 , 주사속도 V , 임계노광량을 E_c 라 할 때 다음과 같이 구할 수 있다. 이 식에서 경화폭은 레이저 빔 강도에 비례하고 주사속도와 임계노광량에 반비례함을 알 수 있다.

$$C_w = 2r_0 \sqrt{\ln \frac{\sqrt{2}P_t}{\pi r_0 V E_c}} \quad (2)$$

경화폭은 주사간격을 결정하는데 직접 관련되어 있고 제품의 표면거칠기에 영향을 준다. 실제로 제품을 조형할 때 주사간격의 최대값은 경화폭보다는 작아야 한다.

둘째로 경화깊이는 수지의 침투깊이를 D_p 라 할 때 다음과 같다. 경화깊이도 경화폭과 마찬가지로 레이저 빔 강도에 비례하고 초점반경, 주사속도, 임계노광량에 반비례하는 경향을 가지고 있다.

$$C_d = D_p \ln \frac{\sqrt{2}P_t}{\pi r_0 V E_c} \quad (3)$$

경화깊이는 적층두께를 결정하는데 직접 관련되어 있고 제품의 표면거칠기에 영향을 준다. 실제로 제품을 조형할 때 경화폭의 경우와 같이 적층두께의 최대값은 경화깊이보다 작아야 한다.

위의 식(2)(3)에서 알 수 있듯이 경화폭과 경화깊이는 빔 크기, 빔 강도, 주사속도와 같은 작업변수와 임계노광량, 침투깊이에 영향을 받는다. 여기서 임계노광량, 침투깊이는 사용되는 레이저, 수지 종류에 의해, 빔 강도는 초점렌즈를 통해 집광된 빔 크기에 의해 결정되는 종속변수이므로 실제 조형에서 작업자가 임의로 가변시킬 수 있는 변수가 아니다. 따라서, 실제 조형에서 경화폭과 경화깊이를 결정할 수 있는 인자는 빔 크기와 주사속도이다.

2.3 작업변수의 결정

주사속도, 주사간격, 적층두께는 조형되는 제품의 표면거칠기와 조형시간에 상당한 영향을 미치는 중요한 인자로서 신중히 결정하여야 한다.

일반적으로 주사속도를 증가시키면 조형시간은 단축되지만 지나치게 주사속도가 클 경우에는 노광량의 부족으로 인해 미경화부분이 발생하여 형상이 불완전하게 경화되고 이는 오차를 발생시키거나 표면정밀도를 저하시킨다. 따라서 사용되는 수지의 종류와 빔 강도, 경화폭과 경화깊이 등을 적절히 고려하여 주사속도를 설정하여야 한다.

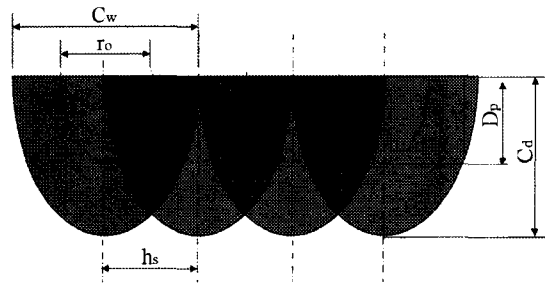


Fig. 3 Schematic representation of a cured layer

위의 Fig. 3 에서와 같이 주사간격(h_s)은 주사속도, 빔 크기(r_0), 단일 경화선의 경화폭(C_w)을 기준으로 제품의 표면거칠기가 양호하도록 설정하여야 한다. 주사간격이 좁으면 그림에서와 같이 경화부분이 중첩되어 조형부에 과경화부분이 발생하게

되어 표면거칠기가 나빠지고 조형시간이 많이 소모된다. 반면에 주사간격이 단일경화선의 경화폭(C_w)보다 넓어지면, 조형시간은 단축되지만 수지에 노광되지 않은 부분이 발생하여 조형이 제대로 되지 않아 표면거칠기가 저하되는 문제가 발생한다.

적층두께는 주사속도, 주사간격, 빔 크기 등에 따라 경화된 수지의 경화깊이를 기준으로 요구되는 제품의 표면거칠기를 고려하여 설정한다. 적층두께의 경우도 그림에서와 같이 단일 경화선의 경화깊이(C_d)보다 경화선이 중첩되어 경화깊이가 커지므로 이를 고려해야 적절한 성능을 얻을 수 있다. 또 적층두께가 크면 제품의 조형시간은 단축되나 표면거칠기가 나빠지고, 적층두께가 작으면 조형할 층의 개수가 많아져 조형시간은 증가하지만 표면거칠기는 좋아진다.

이와 같이 제품의 정밀도와 조형시간에 영향을 미치는 작업변수인 주사속도, 주사간격, 적층두께는 서로 밀접한 관계가 있으며 노광량에 따라 이들 변수를 결정해야 함을 알 수 있다.

3. 실험장치 구성

3.1 구동부

레이저빔의 크기변화에 따른 광조형수지의 경화특성을 살펴보기 위해 실험실에서 개발한 광조형장치를 이용하여 실험을 수행하였다.

Fig. 4 는 개발된 광조형장치의 개략도를 보여준다. 그림에서 보이는 바와 같이 주사방식은 XY 테이블을 이송하여 주사위치를 결정하는 NC 테이블방식을 사용하고 있다. 이 방식은 주사미러(scanning mirror)방식에 비해 위치정밀도가 우수하고 구동부의 위치에 관계없이 항상 일정한 크기의 초점이 수지면에 맺히는 장점이 있어 빔 크기에 의한 경화특성 기초실험에 적합한 방식이다.

실험장치의 XY 테이블은 AC 서보모터로 위치 및 속도제어가 수행된다. 광조형장치의 XY 테이블이 갖추어야 할 조건을 몇 가지 들면, 고속주사가 가능하고 기구부에 충격과 흔들림을 최소화하여야 하며 위치정밀도와 반복성이 우수해야 한다는 것 등이다. 하지만 주사속도가 너무 빠른 경우에는 장치의 구조상 관성에 의한 충격과 흔들림이 필연적으로 발생하는 문제가 발생하므로 정확한 실험을 위해서는 주사속도를 제한할 필요가 있다.

이에 실험에서는 주사속도를 125mm/sec 이내로 제한하였다.

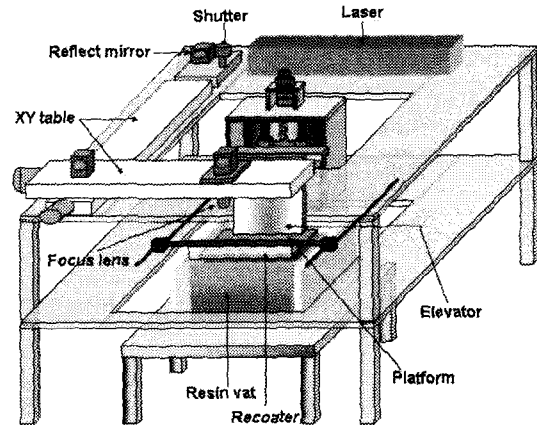


Fig. 4 Steeolithography machine

3.2 광학부

레이저 발생장치에서 출력된 빔이 원하는 위치에 일정한 크기의 초점을 유지하면서 정확히 조사되기 위해서는 반사미러(reflect mirror)와 초점렌즈(focus lens)를 조합한 광학부가 필요하다. 이에 본 연구에 사용된 광조형장치에서는 그림에서 보는 바와 같이 3 개의 반사미러, 1 개의 초점렌즈와 셔터를 이용하여 광학부를 구성하였다.

먼저 레이저 발생장치에서 출력된 빔은 세 개의 반사미러에 의해 XY 평면 상의 원하는 위치로 유도된다. 다음으로 유도된 빛은 초점렌즈에 의해 조형하고자 하는 수지면에 일정한 크기의 초점으로 맺히게 된다. 셔터는 빔의 단속을 제어하여 원하는 형상으로 수지를 경화시키는데 이용된다.

광조형장치에 사용된 레이저 발생장치는 325nm 의 파장을 갖는 He-Cd 레이저이며 세부적인 규격은 Table 1 에 나타내었다.

앞 장의 이론적 배경에서도 언급한 바와 같이 레이저 빔의 크기를 조절하기 위해서 초점거리가 서로 다른 2 개의 초점렌즈를 각각 설치하여 각각의 조건에 대해 실험을 수행하였다. Table 2 는 사용된 초점렌즈의 초점거리와 이 렌즈에 의해 수지면에 조사된 빔의 초점반경을 나타낸 것이다.

Table 1 Specification of laser system

Laser type	He-Cd
Wavelength	325nm
Output power - specified - typical	10mW 20mW
Beam radius	0.60mm
Mode purity parameter(M ²)	3.3

Table 2 의 빔 반경 0.17mm 와 0.32mm 는 Table 1 의 레이저 규격에 관한 값과 두 초점렌즈의 초점거리 300mm, 550mm 를 식(1)에 대입하여 구한 값이다. 또한 초점반경이 0.60mm 인 경우는 초점렌즈를 사용하지 않고 레이저 발생장치에서 출력된 빔을 그대로 수지면에 맺히도록 한 경우이다.

Table 2 Relation of focal length and beam radius

Focal length(mm)	Beam radius(mm)
300	0.17
550	0.32
-	0.60

4. 실험 및 결과

4.1 실험방법 및 변수결정

빔 크기의 변화에 따른 광조형수지의 경화특성을 살펴보기 위해 초점반경이 0.17mm, 0.32mm, 0.60mm 인 경우에 대해 각각의 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 수지는 SK 사의 FA-1262A 이다.

먼저, 실험변수는 2.2 절에서 설명한 바와 같이 종속변수인 빔 강도, 임계 노광량, 침투깊이는 제외하였고, 작업자가 임의로 조절할 수 있는 빔 크기, 주사속도, 주사간격으로 선정하였다. 선정된 세 변수는 제품의 정밀도와 조형시간에 영향을 미치므로 이 변수를 이용하여 시편의 경화깊이와 표면거칠기를 측정하였다.

단일 경화층의 실험을 위해 각 실험조건에 대하여 200mm 의 경화선을 50 개씩 조형하였다. 조형된 각 경화선에서 임의로 1 개 지점을 선정하고 경화폭과 경화깊이를 측정하였다. 측정은 1 μ m의 분해능을 가지는 Nikon 사의 형상투영기를 사용하였다.

단일 경화층의 경우에는 아래의 Fig. 5 와 같은 시편을 제작하여 실험하였다. 시편은 크기가 30x30x10mm 이고 좌우에 지지대(bridge)가 있으며 지지대 위에 한 층을 조형하였다.

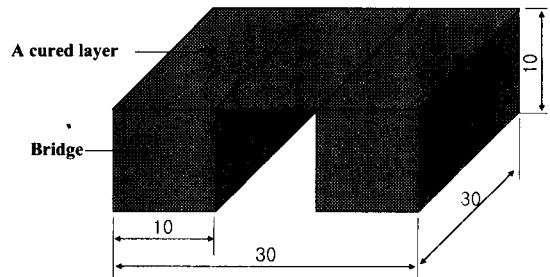


Fig. 5 Test part

시편은 각 실험조건에 대해서 10 개씩 제작하였으며 제작된 시편의 양 지지대 사이에 있는 단일층에서 임의로 5 개소를 추출하여 주사방향과 직교하는 방향으로 표면거칠기를 측정하였다. 사용된 표면조도계는 Mitutoyo 사의 SJ-202 이며 측정데이터는 중심선 평균거칠기(Ra)로 표시된다. 또 경화깊이를 측정하기 위하여 시편의 중심부를 주사방향과 직교하는 방향으로 절단하고 절단면을 5mm 간격으로 5 개소를 측정하였다. 측정은 단일 경화선과 동일한 형상투영기를 사용하였다.

모든 실험조건에서 후경화 현상에 의해 발생하는 오차의 영향을 최소화 하기 위하여, 자체 제작한 후경화장치에서 2 시간 동안 후경화 작업을 통하여 완전히 경화를 시킨 후 측정을 행한다. 실험에 사용된 후경화장치는 육면체의 형상들의 각면에 20W 의 자외선 램프를 각각 1 개씩 접착하여 모든 면에서 고루 경화가 되도록 제작되었다.

4.2 단일 경화선에 대한 경화특성

빔 크기와 주사속도에 따른 경화폭과 경화깊이의 경향을 알아보기 위하여 4.1 절에서 설명한 방식으로 단일 경화선에 대한 실험을 행한다.

다음의 Table 3 은 빔 크기와 주사속도가 달라질 때 경화폭의 평균과 표준편차를 나타낸 것이고 Fig. 6 은 평균값을 도시한 그래프이다.

첫째로 주사속도구간 전체에서 빔의 반경이 작아질수록 경화폭이 작아지는 것을 알 수 있다. 이는 식(2)에서와 같이 경화폭은 다른 인자에 비

해 빔 반경에 영향을 크게 받기 때문이다.

Table 3 Mean and standard deviation($\times 10^{-3}$) for Fig. 6

Vel		20	40	60	105	125
0.17	mean	0.48	0.44	0.42	0.36	0.34
	σ	1.30	1.31	1.63	1.65	1.71
0.32	mean	0.84	0.80	0.71	0.57	0.53
	σ	1.43	1.44	1.72	1.83	1.93
0.60	mean	1.52	1.32	1.07	-	-
	σ	1.43	1.51	1.79	-	-

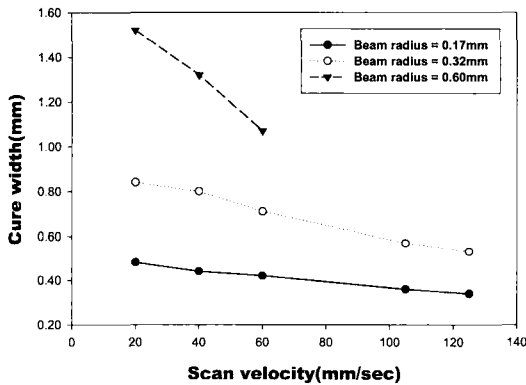


Fig. 6 Cure width vs. scan velocity for various beam size

둘째로 동일한 빔 크기에 대해 주사속도가 증가할수록 경화폭이 작아지는 경향을 보이며 빔 반경이 0.60mm 인 경우는 주사속도 60mm/sec 이상의 영역에서 경화가 진행되지 않았다. 이 현상도 식(2)에서도 확인할 수 있는데 경화폭은 주사속도에 반비례하는 경향을 가지기 때문이다. 즉 주사속도가 빨라지면 상대적으로 단위면적당 노광량이 작아지게 되어 경화폭이 감소하게 된다.

또한 빔 반경이 0.60mm 인 경우는 레이저 발생장치에서 출력되는 빔을 그대로 수지면에 주사하여 경화하는 경우로서 초점렌즈를 이용한 경우에 비해 주사속도 60mm/sec 이상의 영역에서는 수지의 단위면적당 입계 노광량보다 낮은 에너지가 수지에 조사되어 경화가 진행되지 않았다.

셋째로 빔 반경에 따라 경화폭의 기울기가 달라진다. 즉 빔 반경이 0.60mm 인 경우의 속도변화에 따른 경화폭의 기울기가 가장 크고 빔 반경이

0.17mm 인 경우의 기울기가 가장 완만하다.

이는 빔 크기가 작을수록 단위면적당 노광량이 증가했기 때문에 주사속도에 대한 경화폭의 기울기가 완만하다. 반면에 빔 크기가 클 경우에는 단위면적당 노광량이 급격히 감소되어 기울기가 상대적으로 커진다.

마지막으로 이론적 배경에서 언급한 바와 같이 단일 경화선의 경화폭은 주사간격을 결정하는 중요한 인자가 된다. 즉 결과에서 빔 반경이 0.17mm, 주사속도가 125mm/sec 인 경우 경화폭은 0.34mm 이므로 주사간격은 최대 0.34mm 를 초과해서는 안된다. 따라서 위의 경화폭에 대한 결과는 주사간격의 최대값을 결정하는 기준으로 유용한 데이터가 된다.

다음의 Table 4 는 빔 크기와 주사속도가 달라질 때 경화깊이의 평균과 표준편차를 나타낸 것이고 Fig. 7 은 평균값을 도시한 그래프이다.

Table 4 Mean and standard deviation($\times 10^{-3}$) for Fig. 7

Vel		20	40	60	105	125
0.17	mean	0.43	0.38	0.34	0.22	0.20
	σ	1.29	1.34	1.62	1.65	1.69
0.32	mean	0.39	0.33	0.28	0.19	0.18
	σ	1.36	1.47	1.72	1.79	1.88
0.60	mean	0.36	0.29	0.23	-	-
	σ	1.45	1.49	1.79	-	-

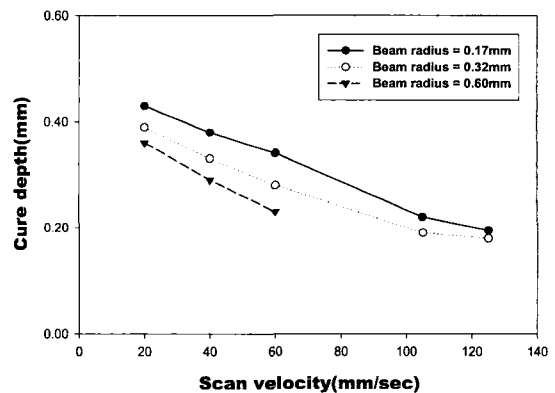


Fig. 7 Cure depth vs. scan velocity for various beam size

먼저 앞의 경화폭과는 반대로 주사속도구간

전체에서 빔의 반경이 작아질수록 경화깊이가 커지는 경향을 볼 수 있다. 이 현상은 식(3)에서도 확인할 수 있는데, 이는 빔의 반지름이 작아질수록 단위면적당 노광량이 증가하게 되어 상대적으로 빔이 투과되는 깊이가 증가되고 결국 경화깊이의 증가로 나타난다.

다음으로 동일한 빔 크기에 대하여 주사속도와 경화깊이는 반비례하는 경향을 보이며 빔 반경이 0.6mm 인 경우에는 주사속도 60mm/sec 이상의 속도영역에서 경화가 진행되지 않았다. 이는 앞서 설명한 경화폭의 경우와 같이 단위면적당 노광량이 상대적으로 작아져서 나타나는 현상이다.

4.3 단일 경화층에 대한 경화특성

단일 경화층은 단일 경화선의 경우와는 달리 빔 크기, 주사속도 이외에 주사간격(hatch spacing)에 따라 제품의 경화깊이와 표면거칠기가 달라지므로 세 변수에 대하여 실험을 행하였다.

Table 5 Mean and standard deviation($\times 10^{-3}$) for Fig. 8

Vel		40	60	105	125
0.5	mean	0.86	0.80	0.66	0.63
	σ	1.02	1.09	1.43	1.47
1.0	mean	0.68	0.60	0.49	0.47
	σ	1.16	1.21	1.44	1.47
1.5	mean	0.64	0.57	0.42	0.40
	σ	1.18	1.34	1.45	1.48
2.0	mean	0.61	0.50	0.34	0.32
	σ	1.38	1.47	1.57	1.61

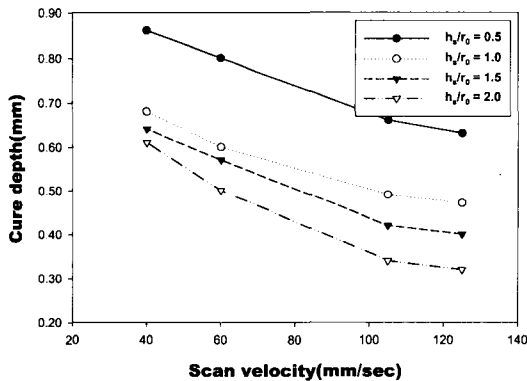


Fig. 8 Cure depth vs. scan velocity for hatch spacing (beam radius = 0.17mm)

Table 6 Mean and standard deviation($\times 10^{-3}$) for Fig. 9

Vel		40	60	105	125
0.5	mean	0.78	0.72	0.56	0.54
	σ	1.14	1.29	1.47	1.49
1.0	mean	0.65	0.57	0.44	0.43
	σ	1.27	1.36	1.51	1.54
1.5	mean	0.57	0.49	0.37	0.36
	σ	1.26	1.42	1.51	1.55
2.0	mean	0.53	0.44	0.34	0.32
	σ	1.46	1.52	1.63	1.73

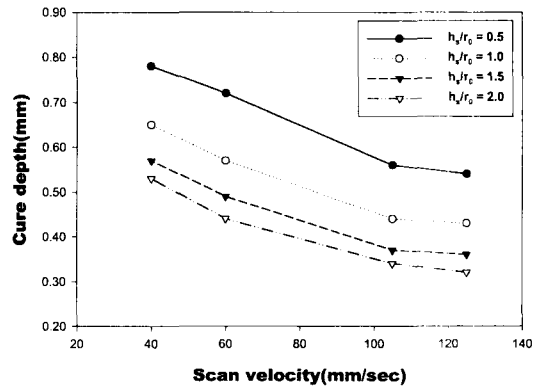


Fig. 9 Cure depth vs. scan velocity for hatch spacing (beam radius = 0.32mm)

Table 5, 6 은 주사간격(h_s)에 대한 빔 반경(r_b)의 비와 주사속도가 달라질 때, 경화깊이의 평균과 표준편차를 나타낸 것이고 Fig. 8, 9 는 평균값을 도시한 그래프이다.

빔 반경이 0.60mm 인 경우는 단일 경화선에서의 실험결과에서 확인한 바와 같이 고속의 주사속도 구간에서는 경화가 제대로 이루어지지 않아 실험에서 제외하였다.

단일 경화층의 경우도 단일 경화선에서의 실험결과에서와 동일한 경향을 보인다. 즉 같은 주사속도에서 빔 반경이 작을수록 경화깊이가 커지고 주사속도의 증가에 따라 경화깊이가 감소하는 경향을 나타내었다.

그렇지만 경화깊이의 값을 관찰하면 단일 경화선의 경우보다 단일 경화층의 경화깊이가 큰 것을 확인할 수 있다. 예를 들어 빔 반경이 0.17mm 인 경우 단일 경화선에서의 경화깊이는 주사속도 40mm/sec 에서 0.38mm, 125mm/sec 에서 0.20mm 인

데 비하여(Fig. 7 참조), 단일 경화층의 경화깊이는 $h_s/r_0=1.0$ 일때 각각 0.68mm, 0.47mm 로 커진다.

이를 Fig. 3 을 이용하여 설명하면 주사속도가 40mm/sec, 빔 반경(r_0)이 0.17mm 인 경우 단일경화선의 경화폭(C_w)은 0.44mm 이므로 주사간격(h_s) 0.17mm 보다 크다(Fig. 6 참조). 따라서 그림에서 보는 바와 같이 경화되는 부분에서 중첩부가 생겨나 단위면적당 노광량이 증가하게 되어 결국 경화깊이가 증가한다.

또한 단일 경화층의 경화깊이는 적층두께를 결정하는 중요한 인자가 된다. 즉 결과에서 $h_s/r_0=2.0$, 주사속도가 125mm/sec 인 경우 경화깊이는 0.32mm 이므로 적층두께는 최대 0.32mm 를 초과해서는 안된다. 따라서 위의 단일 경화층의 경화깊이는 적층두께의 최대값을 결정하는 기준으로 유용한 데이터가 된다.

동일한 경화깊이를 얻는데 있어서 주사속도를 높일 수 있으면 조형시간을 단축할 수 있어 광조형장치의 성능을 향상시킬 수 있다. 빔 반경이 0.17mm 인 경우를 예를 들면 적층두께를 0.60mm 으로 설정할 경우, $h_s/r_0=1.0$ 이고 주사속도가 40mm/sec 인 경우 경화깊이는 0.68mm, $h_s/r_0=0.5$ 이고 주사속도가 125mm/sec 인 경우 경화깊이는 0.63mm 이다. 두 경우 모두 설정한 적층두께를 만족하지만 $h_s/r_0=0.5$ 인 경우의 주사속도가 $h_s/r_0=1.0$ 인 경우의 주사속도보다 85mm/sec 빠른 것을 확인할 수 있다. 이는 빔 크기와 주사간격의 비를 적절히 조절하면 주사속도를 증가시켜도 동일한 크기의 경화깊이를 얻을 수 있어 조형시간을 단축할 수 있다.

Table 7 은 주사속도가 125mm/sec 일 때 주사간격(h_s)과 빔 반경(r_0)의 비를 변화시켜 조형한 경우 표면거칠기의 평균값과 표준편차를 나타낸 것이다.

표의 결과에서 빔 크기에 관계없이 h_s/r_0 의 값이 커질수록 표면거칠기가 저하된다. 하지만 표면거칠기의 최대값과 최소값의 차이가 1.14 μm 로 조형품에서 요구되는 오차범위를 만족한다.

하지만 조형시간의 측면에서 보면 빔 크기 0.17mm, $h_s/r_0 = 2.0$ 인 경우의 주사간격은 0.34mm 이고, 빔 크기 0.32mm, $h_s/r_0 = 2.0$ 인 경우의 주사간격은 0.64mm 로서 주사간격이 약 2 배의 차이가 있다. 이는 0.32mm 의 빔을 사용하는 것이 0.17mm 의 빔을 사용하는 것보다 조형시간을 2 배 정도 단축할 수 있음을 알 수 있다.

따라서, 표면거칠기와 조형시간의 측면을 모두 고려하면 실험조건 중 빔 반경 0.32mm, 주사간격의 비는 2.0 인 경우가 가장 효과적인 작업변수임을 알 수 있다.

Table 7 Surface roughness for hatch spacing of beam radius (scan velocity = 125mm/sec)

Beam radius (mm)	h_s/r_0	Surface roughness	
		mean(μm)	$\sigma(\times 10^{-3})$
0.17	0.5	1.12	1.25
	1.0	1.55	1.31
	1.5	2.01	1.74
	2.0	2.23	1.83
0.32	0.5	1.33	1.31
	1.0	1.63	1.34
	1.5	2.16	1.76
	2.0	2.47	1.85

5. 결론

본 논문은 광조형제품의 정밀도와 조형시간에 상당한 영향을 미치는 레이저빔의 크기에 따른 광조형수지의 경화현상을 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

[1] 단일 경화선에서 주사속도가 클수록 단위면적당 노광량이 감소하게 되어 경화폭과 경화깊이가 줄어들게 된다.

[2] 단일 경화층에서 주사속도가 크고 주사간격이 커질수록 단위면적당 노광량이 감소하게 되어 경화깊이가 줄어들게 된다.

[3] 단일 경화선 실험에서 빔 반경이 0.17mm, 주사속도가 125mm/sec 인 경우 측정된 경화폭이 0.34mm 이므로 주사간격을 0.34mm 이하로 설정해야 경화층이 생성된다. 따라서 각 실험조건에서 구해진 경화폭을 이용하여 중요 작업변수인 주사간격의 최대값을 결정할 수 있었다.

[4] 단일 경화층 실험에서 $h_s/r_0=2.0$, 주사속도가 125mm/sec 인 경우 경화깊이는 0.32mm 이므로 적층두께는 최대 0.32mm 를 초과해서는 안된다. 따라서 측정된 경화층의 경화깊이는 각 작업조건에서 적층두께의 최대값이 된다.

[5] 단일 경화층의 표면거칠기는 빔 반경

0.32mm, $h_s/r_0=2.0$ 인 경우에 $2.47 \mu\text{m}$, 빔 반경 0.17mm, $h_s/r_0=2.0$ 인 경우에 $2.23 \mu\text{m}$ 로 허용치를 만족하였다. 하지만 두 실험조건에서 조형시간은 반경이 0.32mm 인 경우가 약 0.5 배 감소되었다.

향후 연구과제로서는 실험에서 얻은 데이터를 이용하여 요구되는 제품의 정밀도에 따라 빔 크기, 주사속도, 주사간격, 적층두께를 자동으로 결정하고 제어할 수 있는 광조형장치를 개발하는 것이다.

참고문헌

- 이상호, 안동규, 양동열, "VLM-S 용 선형열선절단기의 회전각 계산," 한국정밀공학회지, 제 19 권, 제 2 호, pp. 87-94, 2002.
- 이상호, 김태화, 안동규, 양동열, 채희창, "가변적층 패속 조형 공정 개발을 위한 단위형상조각 자동생성 소프트웨어 개발 및 적용 예," 한국정밀공학회지, 제 18 권, 제 8 호, pp. 64-70, 2001.
- 이관행, 손석배, 박현풍, "패속 제품 개발을 위한 측정 시스템," 한국정밀공학회지, 제 17 권, 제 10 호, pp. 26-34, 2000.
- 신보성, 양동열, 최두선, 이응숙, 황경현, "자동충진 공정을 이용한 패속 제작 공정 개발," 한국정밀공학회지, 제 18 권, 제 7 호, pp. 174-178, 2001.
- G. Zak, "Mechanical properties of short-fibre layered composites : prediction and experiment," Rapid Prototyping Journal, Vol. 6, No. 2, pp. 107-118, 2000.
- Li,Y., Li.D. and Lu.B, "Introduction to stereolithography and its application," Journal of Applied Optic, Vol. 9, No. 3, pp. 34-36, 1999.
- J.S. Ullett, "Novel liquid crystal resins for stereolithography - processing parameters and mechanical analysis," Rapid Prototyping Journal, Vol. 6, No. 1, pp. 8-17, 2000.
- Y.Yang, "Equidistant path generation for improving scanning efficiency in layered manufacturing," Rapid Prototyping Journal, Vol. 8, No. 1, pp. 30-37, 2002.
- Alok Kataria, "Building around inserts: methods for fabricating complex devices in stereolithography," Rapid Prototyping Journal, Vol. 7, No. 5, pp. 253-262, 2001.
- 金炳泰, "laser 工學," 尙學堂, pp. 248-252, 2001.
- Paul F. Jacobs, "Rapid prototyping & Manufacturing," SME, pp. 71-76, 1993.
- D T Pham, "Design for stereolithography," Proc Instn Mech Engrs, Vol. 214, Part C, pp. 635-640, 2000.
- 中川 威雄·丸谷 洋二, "積層造形システム : 次元コピー技術の新展開," 日本工業調査會, pp. 38-57, 1998.
- Anna Kochan, "Rapid prototyping gains speed, volume and precision," Assembly Automation, Vol. 20, No. 4, pp. 295-299, 2000.
- Regina Knitter, "RP process chains for ceramic microcomponents," Rapid Prototyping Journal, Vol. 8, No. 2, pp. 76-82, 2002.