

## 레이저빔 직경변화에 대한 광경화성 수지의 경화특성 고찰

이은덕\*(부산대 대학원), 김준안(경남정보대 기계시스템학부), 백인환(부산대 기계공학부)

### Study of Cure Properties in Photopolymer for Stereolithography using Various Laser Beam Size

Eun-Dok Lee\*(Graduate School, PNU), Jun-An Kim(Mech. Eng. Dept., KCIT),  
In-Hwan Paik(Mech. Eng. Dept., PNU)

#### ABSTRACT

In the stereolithography process, build parameters are laser power, scan velocity, scan width, beam diameter, layer thickness and so on. These values are determined according to product accuracy and build time. Build time can be reduced by improving of scan velocity, laser power, layer thickness, hatching space and so on. But variation of these parameters influence part accuracy, surface roughness, strength.

This paper observed cure properties in various beam diameter. In order to examine these, relationships of scan velocity and cure depth, scan velocity and cure width according to various beam diameter in one scan line are measured. And cure thickness is measured according to beam diameter and scan velocity in scan surface of one layer. For reduction of build time, beam diameter and scan velocity is proposed in stereolithography process.

**Key Words :** Stereolithography(광조형), Build parameter(조형변수), Build time(조형시간), Beam diameter(빔 직경), Cure property(경화특성), Cure depth(경화깊이), Cure width(경화폭), Scan velocity(주사속도)

#### 1. 서론

치열한 경쟁을 하고 있는 산업사회에서 수없이 다양한 제품이 생산되고 있다. 다품종 소량생산을 추구하는 산업구조로 인해 제품의 수명은 단축되어지고 있으며 새로운 제품의 신속한 생산이 요구되고 있다. 이러한 산업사회의 욕구를 충족하기 위해 등장한 폐속조형법(Rapid prototyping)은 짧은 역사에 비해 매우 다양한 분야에서 사용되고 있다.

현재 다양한 방식의 폐속조형법이 개발되어 사용 중에 있다. 그 중에서도 광조형법(Stereolithography)은 가장 정밀한 제품의 생산이 가능하다는 장점으로 인해 널리 사용되고 있는 방식이다. 광조형법은 광경화성 수지(Photopolymer)에 레이저광을 선택적으로 조사하여 제품을 조형하는 방식으로 조형조건에 따라 조형품의 정밀도가 달라지는 문제가 있다.

광조형장치의 조형변수는 빔의 크기, 주사속도, 주사간격, 적층두께 이외에 매우 다양하지만 실제로 사용자가 사용할 수 있는 변수는 매우 제한적이다. 각각의 조형변수는 일정한 상관관계가 있기 때문에 하나의 조형변수가 달라지면 제품의 치수정밀도, 표

면거칠기, 강도 등에 영향을 미친다. 따라서, 일정수준 이상의 치수정밀도나 표면거칠기를 얻기 위해서는 조형변수에 대한 광경화성 수지의 경화특성을 규명할 필요가 있다. 이를 위해 조형변수와 경화특성 간의 관계를 규명하기 위한 다양한 연구가 수행되고 있다.

주사속도, 주사간격, 적층두께와 같은 조형변수의 값을 크게 하면 조형시간을 단축할 수 있지만, 주사속도와 주사간격이 너무 크게 증가하면 노광이 충분하지 않아 조형이 제대로 이루어지지 않으며, 적층두께가 증가하면 조형품의 표면거칠기가 나빠지는 경향이 있다. 반대로 이들 조형변수의 값을 작게 하면 조형시간이 증가하고 과경화로 인해 제품에 변형이 발생할 수 있다. 그러므로, 조형변수는 조형할 제품의 크기, 표면거칠기 등에 따라 결정할 필요가 있다.

광조형장치의 조형변수 중 레이저빔의 크기 (beam size)도 포함되어 있는데 빔의 크기에 따라 광경화성 수지의 경화폭과 경화깊이가 달라진다. 레이저빔의 출력과워가 빔의 크기에 관계없이 일정하다고 할 때, 빔 크기가 크면 경화폭과 경화두께는 증

가하고 레이저빔의 크기가 작으면 이들 값이 감소하는 경향이 있다. 그러므로, 빔 직경을 크게하면 조형시간을 단축할 수 있다. 하지만, 실제의 경우 일정한 출력을 가지는 레이저에서 나오는 빔은 크기의 변화에 따라 빔에 집중되어 있는 레이저의 파워도 달라진다.

이에 본 연구에서는 레이저빔의 크기에 따라 경화되는 수지의 특성을 알아 본다. 이를 위해 빔의 크기와 주사속도를 다르게 하여 단일주사선과 단일경화층을 조형하여 경화폭과 경화깊이를 측정한다. 또한 조형시간의 단축을 위해 빔직경과 주사속도의 관계를 살펴보고자 한다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 빔의 크기

집광렌즈는 조형 시 레이저빔의 크기를 줄여 보다 작은 초점이 수지에 맺히도록 하는 역할을 한다. 레이저빔은 볼록렌즈로 집광시켜도 Fig 1에서와 같이 초점이 한곳에 모이는 것이 아니고 쌍곡선 형태의 빔허리(beam waist)를 가진다. 이 쌍곡선의 접근선이 교차하는 점이 초점에 해당된다.

레이저를 집광시켰을 때의 초점반경( $W_0$ )은 다음과 같다<sup>(1)</sup>

$$W_0 = \frac{2\lambda M^2 L}{\pi D_L} \quad (2-1)$$

여기서,  $\lambda$ 는 레이저의 파장,  $M^2$ 은 레이저의 순수모드변수(mode purity parameter),  $L$ 은 집광렌즈의 초점거리,  $D_L$ 은 입사되는 레이저의 직경이다.

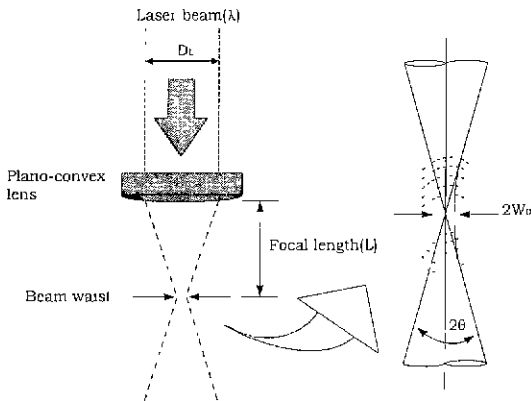


Fig. 1 Focus of laser beam

### 2.2 주사속도와 경화깊이와의 관계

광경화성 수지는 노광량이 임계값( $E_c$ )보다 작을 경우에는 액체상태로 존재하고, 임계값보다 클 경우에는 중합반응을 일으키며 고화된다. Fig 2는 포물선 형태의 단면을 가지는 단일 경화선의 형태를 보여주고 있다.

Working curve equation에 의해 경화깊이는 다음과 같이 구할 수 있다<sup>(2)</sup>.

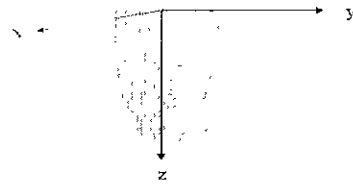


Fig. 2 Schematic view of a cured line

$$C_d = D_p \ln(E_{max}/E_c) \quad (2-2)$$

여기서,  $C_d$ 는 경화깊이,  $D_p$ 는 침투깊이,  $E_{max}$ 는 최대노광량,  $E_c$ 는 임계노광량이다.

레이저의 파워  $P_L$ , 레이저빔의 반경  $W_0$ , 임계노광량  $E_c$ , 경화깊이  $C_d$ , 침투깊이를  $D_p$ 라 할 때 주사속도( $V_s$ )는 다음과 같이 구할 수 있다

$$V_s = (2/\pi)^{1/2} [P_L/W_0 E_c] \exp(-C_d/D_p) \quad (2-2)$$

식(2-2)에서 보는바와 같이 주사속도는 레이저 파워에 비례하고, 빔의 반경, 임계 노광량에 반비례함을 알 수 있다. 또한, 조형하고자하는 조형물의 적층높이에 따라 주사속도를 결정하여 사용할 수 있다. 하지만 레이저빔은 집광렌즈의 초점거리의 변화에 따라 초점크기가 달라지고, 초점크기의 변화는 에너지밀도의 변화를 초래하게 되어 결국 수지면에 도달하는 레이저의 파워는 달라지게 된다. 이 외에도 주사간격에 따라 조형물의 경화두께가 영향을 받지만 이를 식에서는 고려하지 않았다. 따라서, 실제의 경우 제안된 식은 적용하기 곤란하므로 빔 크기의 변화가 조형물의 적층두께에 미치는 영향을 실험적으로 규명할 필요가 있다.

### 3. 실험장치구성

#### 3.1 광조형장치

레이저빔의 직경변화에 따른 광경화성 수지의 경화특성을 살펴보기 위해 실험실에서 제작한 광조형 장치를 사용하였다

광원으로는 325nm의 파장, 10mW의 출력을 가지는 He-Cd 레이저를 사용한다 구동부는 x-y 테이블 방식으로 구성되어 있으며 AC 서보모터에 의해 구동된다 수지액면을 일정하게 유지하도록 2중 수지조를 제작하였다

#### 3.2 광학부

레이저빔이 수지면에 일정한 초점크기로 조사되도록 x-y 구동부를 사용하였다. x-y 구동부는 주사미러방식과는 달리 구동부의 이동에 관계없이 일정한 크기의 빔 조사가 가능하다

Fig 3은 실험에 사용된 광학부의 개략도를 보여주고 있다 그림에서 알 수 있듯이 레이저에서 출력되는 빔은 반사미러(reflect mirror)를 거쳐 초점렌즈(focus lens)에 도달하게 된다 초점렌즈는 입사된 레이저빔을 일정한 크기의 빔으로 만들어 주는 역할을 한다

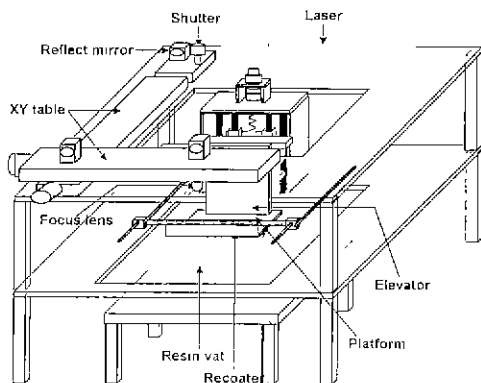


Fig. 3 Optics part of SLA

레이저에서 출력되는 빔의 지름은 1.2mm이며 집광렌즈의 초점거리는 300mm이다 빔의 크기를 조절하기 위해 집광렌즈의 위치를 이동시켜 지름이 0.34, 0.46mm인 빔을 만들었다

### 4. 실험 및 결과

빔 직경변화에 따라 광경화성 수지의 경화특성을 살펴보기 위해 빔 지름이 0.34, 0.46, 1.2mm인 경우에

대하여 아래와 같은 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 수지는 SK사의 FA-1262A로 에폭시계열이다.

#### 4.1 단일주사선에 대한 경화특성

광조형장치의 조형프로세스는 단일경화선이 모여 2차원의 단일경화층이 만들어지고 이들이 다시 모여 3차원의 조형물이 만들어진다. 그러므로, 단일경화선의 경화특성을 살펴보는 것은 매우 중요하다

Fig. 4는 다양한 빔 직경에 대하여 주사속도와 경화폭의 관계를 보여주고 있다.

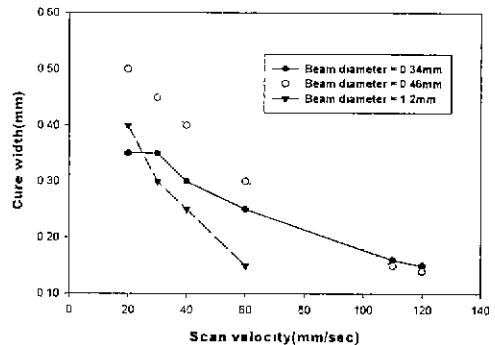


Fig 4 Cure width in various beam diameter

주사속도의 증가에 따라 경화폭이 감소하는 경향이 있다. 빔 직경이 1.2mm인 경우 속도가 60mm/sec 이상에서는 경화가 이루어지지 않는다. 이외의 빔 직경에 대해서는 빔크기와 경화폭이 비례함을 알 수 있다

빔 직경이 0.34, 0.46mm인 경우와는 달리 빔 직경이 1.2mm인 경우 경화특성이 다른 이유는 레이저에서 나오는 빔의 출력은 낮기 때문에 광의 에너지 밀도가 낮다. 따라서, 주사속도의 증가는 수지를 경화시키는데 필요한 일개노광량을 충족시키지 못해 경화가 이루어지지 않는 것이다. 반면에 초점렌즈를 통과하여 만들어진 빔은 광에너지가 집중되어 에너지 밀도가 상당히 높아지게 된다. 따라서, 초점렌즈를 통과한 빔은 초점크기에 비례하여 경화폭이 만들어짐을 알 수 있다

Fig 5는 다양한 빔 직경에 대해 주사속도와 경화깊이와의 관계를 보여주고 있다.

주사속도의 증가에 따라 경화깊이가 감소하는 경향을 가진다. 반면에 빔 직경과 경화깊이는 서로 비례함을 알 수 있다.

그림에서는 나타나지 않았지만 빔 직경이 1.2mm인 경우에도 다른 빔 직경의 경우와 같이 경화깊이는 주사속도에 반비례하는 경향을 가지고 있으며, 주사속도가 60mm/sec일 때 경화깊이는 1.0mm,

20mm/sec일 때 경화깊이는 1.5mm로서 상대적으로 상당히 큰 경화깊이를 가지고 있음을 알 수 있다

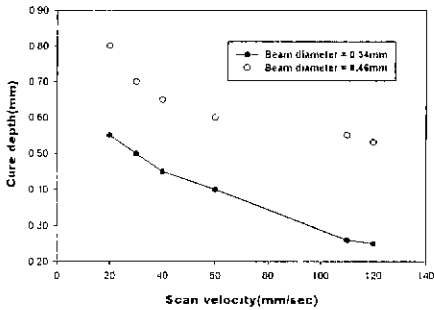


Fig. 5 Cure depth in various beam diameter

#### 4.2 단일층에 대한 경화특성

단일주사선과 단일층간의 경화특성에 대한 연관성을 알아보기 위해 Fig 6와 같은 시편을 제작하였다. 실험의 일관성을 위해 주사간격과 적층두께는 0.2mm로 동일하게 설정하였으며, 빔 직경이 0.34, 0.46, 1.2mm이고, 주사속도는 30, 60, 120mm/sec인 경우에 대해 실험을 수행하여 경화두께를 측정하였다. 측정에 사용된 경화두께는 Bridge 사이에 있는 단일층을 말한다.

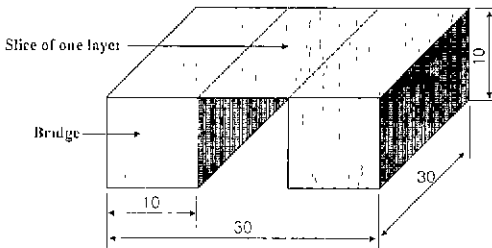


Fig 6 Test part

Fig 7은 빔 직경의 변화에 따른 경화두께를 각각의 주사속도에 대하여 나타내었다. 단일주사선의 경우와 마찬가지로 주사속도의 증가로 인해 경화두께가 감소함을 알 수 있다. 빔 직경이 1.2mm인 경우 빔은 노광에 필요한 충분한 에너지를 가지고 있지 않기 때문에 60mm/sec이상의 경우에는 원하는 형태의 조형품이 나오지 않았다. 이외의 빔 직경에서는 단일경화선의 경화깊이와 단일층의 경화두께가 거의 유사한 상황을 기지는 것을 관찰할 수 있다. 또한 단일층의 경화두께가 단일경화선의 경화깊이 보다는 약간 크다는 것을 알 수 있다. 이는 주사간격에 따라 광 에너지의 중복으로 인해 적층두께가 증가하였기 때문이다.

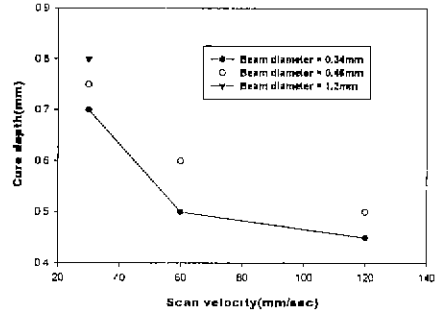


Fig. 7 Cure depth of a single layer surface

체속조형에서 조형시간의 단축은 매우 중요한 요소이다. 빔 직경이 0.34mm인 경우, 주사속도가 60mm/sec에서 경화두께는 0.4mm이고, 빔 직경이 0.46mm인 경우, 주사속도가 120mm/sec에서 경화두께는 0.5mm이다. 이는 레이저 빔 직경과 주사속도를 증가시키면 경화두께를 동일하게 유지하면서 상당한 조형시간의 단축을 가져올 수 있음을 의미한다. 따라서, 빔 직경과 주사속도를 달리하면 조형시간을 단축할 수 있다.

#### 5. 결론

본 논문은 레이저빔의 직경에 따른 광경화성 수지의 경화특성을 알아보기 위해 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- [1] 다양한 빔 직경에 대한 단일주사선과 단일층간의 주사속도와 경화폭, 경화깊이에 대한 관계를 보였다.
- [2] 레이저에서 직접 출력되는 빔은 광에너지가 부족하기 때문에 집광렌즈를 사용하여 레이저의 파워를 증가시킬 필요가 있다.
- [3] 시편을 제작하여 단일주사선과 단일층간의 경화깊이에 대한 관계를 보였다.
- [4] 빔의 직경과 주사속도의 조절을 통해 조형시간이 단축될 수 있음을 보였다.

#### 참고문헌

- 1 Paul F. Jacobs, Rapid Prototyping & Manufacturing, SME, 1st edition, SME, 1992
- 2 Paul F. Jacobs, Stereolithography and other RP&M Technologies, ASME, 1996
- 3 이은덕, "신경망기법을 이용한 광조형 작업변수의 작업변수 결정" 한국정밀공학회 추계학술대회논문집, pp 183-186, 1998