

광조형법에 있어서 조형정도향상을 위한 연구 The Study of Improvement for Shape Accuracy in Stereolithography

강 원 주*(부산대 대학원), 김 준 안(LG전자), 백 인 환(부산대 공대)
Won-joo Kang*(Pusan Graduate School, Pusan Univ.), Jun-an Kim(LG Ele. Co.)
and In-hwan Paik(Pusan Univ.)

ABSTRACT

In the stereolithography process, the accuracy of cured shape depends on laser power, scanning speed, scanning pattern, resin characteristics etc. When three-dimensional objects are built, higher laser power gives higher building efficiency. Normally we could control scanning speed and scanning pattern, which affect curing thickness and generate volume of curl in & after building. Oligomer, Monomer and Initiator are major components. Kinds and volume of them decide characteristic of resin. In this paper, we deal with major facts and their characteristics for precision shape building.

Key Words : Irradiation(조사), Scanning(주사), Stereolithography(광조형), Incline surfaces(경사면) Mock-up(목업), Curing depth(경화깊이), Rapid Prototyping Machine(광조형장치), Scanning speed(주사속도)

1. 서론

광조형은 주로 실체를 위한 모형제작 작업과 시제품 제작에 관련된 부분에 주로 사용되는데, 최근 들어 요구하는 형상이 더욱 얇고 정밀해지므로 광조형에서 요구하는 형상도 더욱 고정도의 것을 필요로 한다. 그러므로 광조형법에 있어서 조형정도의 향상은 실제로 광조형법이 기계가공을 대체할 수 있는냐 하는 측면에서 가장 중요한 인자중 하나이다.

그러므로 향후 산업계에서 보다 널리 사용되기 위해서는 제작시간을 줄이면서 변형을 방지하며, 형상정도를 향상시킬 수 있는 방법이 과제로 되고 있다. 여기에 관해서는 Paul. F. Jacobs¹⁾가 Fig. 1과 같이 광조형시 발생하는 변형에 대해 연구하였다. 그리고 동경대학의 中川 등이 광조형의 경화프로세스에 있어서 수축은 경화물내부에 불균일한 노광량분포로 발생한다는 가정하에서 선상의 경화물을 대상으로 FEM 시뮬레이션을 시도하였으며²⁾, 경화과정중에 액체수지가 어떻게 유동하는가에 대해서 에폭시수지에 BN가루를 섞어서 비디오로 촬영하여 밝혀내었다. 이 연구에서는 단일경화선 및 경화시 그 주변상황에

대해서 연구하였다³⁾. 그리고 도시바의 足立등은 광조형에 있어서 정도를 저하시키는 요인을 알아보기 위하여 실험장치를 구성하여 수축현상을 실시간으로 측정하였다. 이 실험에서는 주사패턴을 한방향 지그재그와 십자방향의 2가지를 사용하여 비교하였다⁴⁾.

본 연구에서는 변형을 방지하며, 형상정도를 향상시킬 수 있는 방법으로 경사각에 따른 제품의 표면 거칠기와 주사간격이 주사두께에 미치는 영향과 주사속도가 경화깊이 및 경화폭에 미치는 영향에 대해 논하고자 한다.

2. 광경화성 수지의 경화관계식

고정도의 형상을 얻기 위해서는 자외과광을 가지는 레이저빔을 수지에 주사했을 때 수지의 반응과 경화폭 및 경화깊이와의 관계에 대해 규명하는 것이 필요하며, 이것에 대해 살펴보면 다음과 같다.[Fig.1] 중심부의 광강도 I_0 , 초점반경 μ , 주사속도 V , 수지의 흡수계수 α , 경화시키는 노광량을 E_T 라고 할 때, 액표면에 있어서 경화폭 W 는 입사에너지 $E = E_T$, 조사되는 빛의 중심축방향으로 수지면으로

부터의 거리 $Z = 0$ 에 있어서 경화깊이(C_d)는 다음 식과 같다⁵⁾

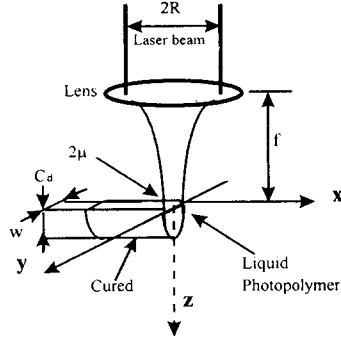


Fig. 1 Theoretical model of cure

$$C_d = \alpha \log_e \left[\left\{ \pi^{1/2} I_o \mu / (VE_T) \right\} \right] \quad (1)$$

여기에서 경화깊이는 조사하는 레이저광의 강도와 주사속도에 의해 결정된다.

그리고 액표면에 있어서 경화폭 W 는 $E = E_T$, $Z = 0$ 에 있어서 다음과 같다.

$$W = 2\mu \left[\log_e \left\{ \pi^{1/2} \mu I_o / (VE_T) \right\} \right] \\ = 2\mu \cdot (C_d / \alpha)^{1/2} \quad (2)$$

여기에서 위의 식을 정리하면 경화깊이와 경화폭 사이의 관계는 경화깊이가 경화폭의 제곱에 비례하며, 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$C_d = (\alpha / 4\mu^2) \cdot W^2 \quad (3)$$

이 식을 다시 경화시키는 노광량(E_T)을 나타내는 식으로 변환시키면

$$E_T = \frac{\mu \cdot I_o \cdot \sqrt{\pi}}{V \cdot e (W / 2\mu)^2} \quad (4)$$

으로 되며, 이 식에서 경화시키는 노광량과 광강도 사이에는 서로 비례하지만 주사속도와는 관계는 서로 반비례된다는 것을 알 수 있다. 그러므로 노광량을 크게 하기 위해서는 강한 에너지를 가지는 레이저를 사용하든지 아니면 주사속도를 천천히 하여 사용하면 같은 효과를 얻을 수 있다.

3. 실험 및 결과 고찰

3.1 실험장치 및 방법

본 실험에 사용한 장치는 LG전자의 LGE-P500 시스템이고, 사용한 레이저 광원은 Omnichrome사의 He-Cd 레이저, 출력 25mW, 발진파장 325nm이며, 주사광학계는 Trilogy사의 X-Y 테이블 그리고 광경화성수지는 선경 UCB의 FA-1260A, 에폭시-아크릴레이트계 수지를 사용하여 실험하였다.

제품의 경사각에 따른 표면 거칠기 실험은 형상치수가 가로,세로 각 60mm, 높이는 60mm 와 30mm 인 2개의 형상을 만들어 한층 두께가 0.2mm이며, 내부주사간격을 0.2mm인 한방향 지그재그주사법을 사용하여 형상측면이 수평바닥면과 이루는 기울기가 변함에 따라 경화거칠기에 대해 실험하였다.

주사간격이 경화두께에 미치는 영향에 관한 실험은 주사속도를 200mm/sec와 300mm/sec로 하고, 주사간격을 0.1mm, 0.2mm, 0.3mm로 하여 한층만을 조형하였을 때의 경화두께를 단일경화선의 경화깊이와 비교, 설명하였다.

주사속도가 경화깊이와 경화폭에 미치는 영향에 관한 실험은 주사속도를 80mm/sec에서 320mm/sec 까지 가변시키면서 그때의 경화깊이와 경화폭에 대해 측정하였다.

3.2 제품의 경사각에 따른 표면 거칠기

광조형의 고유한 특성상 형상을 만들기 위하여 일정한 두께를 가지는 얇은 층을 적층시켰을 때 적층에 의해 단차가 발생하는 광조형형상에 대하여 이론적 표면거칠기의 계산을 위해 단차를 직각으로 가정하여 처리하면 경화형상의 표면은 다음식으로 표현이 가능하다⁶⁾

$$H = \frac{L}{\sin \theta \times \tan(\theta - \phi) + \cos \theta} \quad (5)$$

여기에서 ϕ 는 단위 경화형상의 윤곽의 기울기, θ 는 수평면에 대한 모형의 면 경사각, L 은 한층두께이며 H 는 최대거칠기이다.

단위 경화형상의 윤곽은 실제로는 Gaussian 곡선 형태를 이루고 있으므로 한층두께(L)의 값을 적게 할수록 경화에 사용되는 형상의 윤곽은 경화면인 수평면에 대해 수직하게 수렴된다. 그러므로 위 식에 의해, 한층두께 L 을 얇게 성형하여 최대거칠기 H 를 작게하고, 경사각 θ 가 작게되면 ϕ 값이 작게 되므로 조형형상의 표면거칠기는 작게된다.[Fig.2]

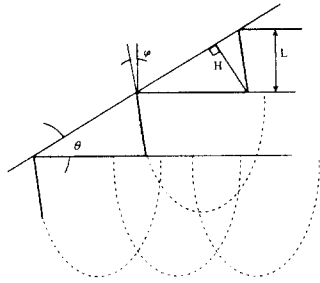
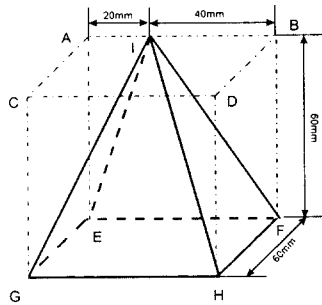
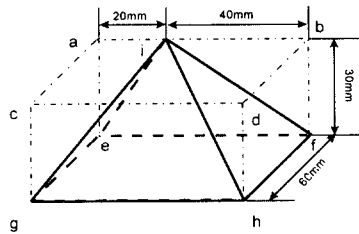


Fig. 2 Theoretical surface roughness in stereolithography



<Incline surfaces>

- Surface IGH : 45°
- Surface IHF : 56.3°
- Surface IEG : 71.6°
- Surface IEF : 90°



<Incline surfaces>

- Surface igh : 18.4°
- Surface ihf : 36.9°
- Surface ieg : 56.3°
- Surface ief : 90°

Fig. 3 Test sample shape of incline surface

경화층거칠기에 대해 파악하기 위하여 Fig. 3과 같은 형상을 만들어 수평면에 대한 기울기별로 그

의 경화거칠기에 대하여 실험하였다. 2개 형상의 측면이 수평바닥면과 이루는 각도 및 거칠기를 측정 한 결과는 다음 Table 1과 같다.

Table 1 The determination of cured incline surface

(a) Sample size : 60(W) x 60(D) x 60(H) (mm)

Estimate degree	45°	56.3°	71.6°	90°
Ave. roughness(μm)	36.81	22.20	14.31	22.93

(b) Sample size : 60(W) x 60(D) x 30(H) (mm)

Estimate degree	18.4°	36.9°	56.3°	90°
Ave. roughness (μm)	14.70	32.38	23.56	24.11

Table 1에 따르면 경화된 경사면은 기울기가 45° 일 때 거칠기가 가장 심한 것으로 나타났으며, 0° 또는 90° 에 가까울수록 거칠기가 줄어드는 것으로 나타났다. 이론적으로 기울기가 90° 인 경우에는 평균 거칠기가 0에 가까워야하지만 실제로 20μm 이상으로 나타났는데, 그 주된 원인은 경계부에서 불룩하게 발생하는 경화현상의 원인으로 판단된다.

3.3 주사간격이 경화두께에 미치는 영향

형상을 제작할 때에는 형상정보를 얼마의 두께를 가지는 층으로 분할하느냐에 따라 한층의 두께가 결정되고, 이 값에 따라 Z축 로봇이 제어되므로 조형된 형상은 항상 이 두께를 유지하는 것처럼 보이지만, 실제 조형되는 층 두께는 이 값보다 두꺼우므로 조형된 형상은 실제 치수보다 조금 크게 된다.

여기에서 주사간격은 경화두께 뿐만 아니라 경화층의 표면을 평탄하게 유지하여 형상의 정도를 유지하는데 결정적인 영향을 미친다. 주사간격이 두께깊이와 경화층 표면에 어떤 영향을 미치는 지를 확인하기 위해 Fig. 4와 같은 형상을 만들어 실험하였다. 실험형상에서 양쪽의 지지부는 가장 위의 한층을 지지하는 역할을 하며, 가장 위층은 한층만 조형하며, 이 층만을 대상으로 현미경사진을 촬영하였다. 이때 형상을 만들기 위한 주사패턴은 X방향으로 지그재그 주사패턴을 사용하였으며, 단일층의 중심부를 절단하여, 그 절단면을 50배로 확대한 것을 Table 2에 나타내었다.

실험결과와 단일 경화선에서의 경화깊이를 비교하기 위해 주사속도 200mm/sec와 300mm/sec에서의 단일 경화선의 경화깊이를 측정하였다. 그 결과 주사속도 200mm/sec 일때의 경화깊이는 0.35mm, 300mm/sec 일때의 경화깊이는 0.26mm이다

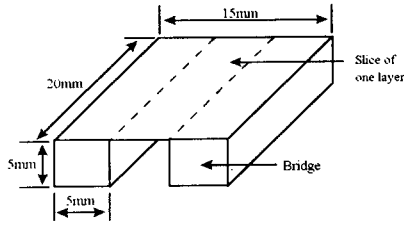
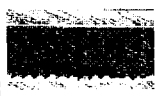
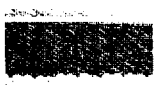

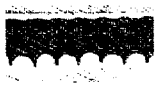
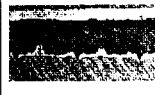
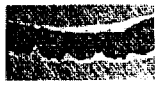


Fig. 4 Test sample shape

Table. 2 Curing thickness according to scan pitch test

주사 속도 주사 간격	200 mm/sec	300 mm/sec
0.1 mm	 최대경화두께 : 0.62mm	 최대경화두께 : 0.61mm
0.2 mm	 최대경화두께 : 0.49mm	 최대경화두께 : 0.46mm
0.3 mm	 최대경화두께 : 0.37mm	 최대경화두께 : 0.31mm

즉, 단일 경화선과 Table 2의 형상측정결과를 비교하면 경화깊이에서 많은 차이가 발생함을 알 수 있다. 이 차이가 발생하는 이유는 단일 경화선의 경화폭보다 적은 간격의 주사간격을 가지면, 주사시 중첩되는 부분은 경화에너지가 중첩되어 이 부분에서 경화깊이가 커져 고드름형상으로 경화가 발생하는 것으로 생각된다. 그러나 주사시 중첩되는 부분이 조금 적어지면 경화선과 경화선사이의 상호 구속력이 약화되어 경화층 표면이 수평하게 제 형태를 유지하지 못하게 되므로, 수평한 경화면을 얻기 위해서는 주사속도와 주사간격사이의 관계를 고려하여 결정하여야 한다.

이 표에서는 수평한 경화면을 얻기 위해서는 주사간격이 좁을수록 유리하지만 경화층이 두꺼워지며, 약간의 고드름 형상이 발생하는 것을 피할 수 없음을 알 수 있다. 그러나 층을 계속 쌓아가면 윗층에서의 에너지중첩이 아랫부분에는 영향을 미치지 못하므로 제어하는대로 일정한 두께를 얻을 수 있다. 그러므로 두꺼운 형상을 제작할 때에는 전체적인 비

율로 아랫부분이 조금 두꺼워지나, 얇은 형상을 제작할 경우에는 전체적인 두께관리가 곤란할 수 있으므로 하단부 한, 두층을 제외하여 형상을 제작하는 것도 고려해야 한다.

3.4 주사속도가 경화깊이와 경화폭에 미치는 영향

형상 조형시 X-Y 방향뿐만 아니라 Z 방향으로도 보다 고정도의 형상을 얻기 위해서는 자외과장을 가지는 레이저 빛을 수지에 주사했을 때 수지의 반응과 경화폭 및 경화깊이와의 관계에 대해 규명하는 것이 필요하다. 뿐만 아니라 주사속도를 가변시키기 위해서도 주사속도에 따른 경화깊이의 변동에 대한 경향을 파악하여야 조형에 적절한 층두께를 선정할 수 있다.[Fig. 5]

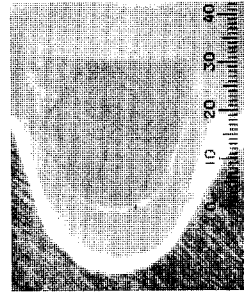


Fig. 5 Cross-profile of single line cured (x 100)

이 실험에서 주사속도를 80mm/sec에서 320mm/sec 까지 가변시켜서 그때의 경화깊이와 경화폭에 대해 측정하였다. 주사속도가 가장 저속인 80mm/sec에서 최대 경화깊이가 0.57mm로 가장 깊게 나타났으며, 최대 경화폭은 0.40mm로 가장 넓었다. 이때의 경화형상은 Gaussian 곡선형태를 이루고 있다.

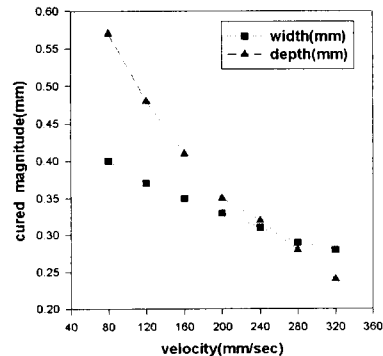


Fig. 6 The relation between cure depth and width according to scan speed

Fig. 6에 주사속도에 따른 경화깊이와 경화폭이 어떻게 변하는지를 그래프로 나타내었다. 여기에서 조사되는 레이저빛의 강도와 수지의 흡수계수가 일정할 때, 경화깊이와 경화폭은 주사속도에 반비례한다는 사실을 알 수 있다. 또한 주사속도에 대해 경화깊이가 경화폭에 비하여 민감하게 변화하는 것을 알 수 있다

4. 결 론

광조형으로 형상 제작시 형상의 정도를 결정하는 것은 치수적인 것도 있지만, 조형방법 특성상 표면에 단층형상을 피할 수 없으며, 이것이 형상의 정도에 큰 영향을 미친다. 그러므로 표면거칠기를 줄이는 방법과 어떤 각도로 조형할 때 경화면이 가장 거칠어지는지 등을 실험을 통해 밝혔다. 그리고 주사간격을 어떻게 조정하느냐에 따라 경화시 경화되는 면의 표면상태를 평탄하게 유지하여 층간에 상하 결합을 용이하게 하고, 원하는 형상을 제대로 만들 수 있는지를 밝혔다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 경화된 경사면은 기울기가 45° 일 때 거칠기가 가장 심한 것으로 나타났으며, 0° 또는 90° 에 가까울수록 거칠기가 줄어든다.
- 2) 한방향 주사시 경화되는 형상은 Gaussian곡선형태를 이루며 주사간격이 넓을수록 경화층의 표면은 좋지 않다.
- 3) 조사되는 레이저빛의 강도와 수지의 흡수계수가 일정할 때, 경화깊이와 경화폭은 주사속도에 반비례한다.
- 4) 수지면에 도달하는 레이저 빛의 직경은 일정하기 때문에 주사속도에 따라 경화폭은 많은 차이를 나타내지 않지만, 경화깊이는 노광되는 량에 직접 비례한다.

5. 참고문헌

1. Paul. F. Jacobs, Ph.D. "Rapid Prototyping & Manufacturing", 1st edition, SME, p.p 41, 1990
2. 中川 外, "光造形法にある變形の解析", 精密工學會 秋季學術大會論文集, pp.891-892, 1995
3. 中川 外, "硬化過程である液體樹脂の流動について(第1報)", 精密工學會 春季學術大會論文集, pp. 971-972, 1996
4. 足立 外, "光造形法にある收縮現象のRealtime測定 of 試驗(第2報)", 精密工學會 秋季學術大會論文集, pp.889-890, 1995

5. 丸谷洋二 外, "光造形法", 日刊工業新聞社, pp.8-9, 1990

6. 檜原弘之, "光造形法の立體形成機構に関する基礎研究", 博士學位論文, p.11, 1995