

광조형법에 있어서 조형정도향상을 위한 연구

김준안*, 백인환**

The Study on Improvement of Shape Accuracy in Stereolithography

Jun An Kim*, In Hwan Paik**

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), Mock-up(목업), Curing depth(경화깊이), Rapid Prototyping Machine(광조형장치), Scanning speed(주사속도), Beam expander(빛확장기)

1. 서론

생산 현장에 있어서 CAD/CAM의 발달은 설계에서 가공까지의 시간을 단축시켜 줄 뿐만 아니라 컴퓨터를 이용하여 생산공정 전체를 제어하는 것이 가능하게 되었다. 그래서 제품개발에 소요되는 시간을 단축시켜 제품 경쟁력 확보에 기여하고 있다. 그렇지만 제품개발의 전체 단계를 살펴보면 컴퓨터를 이용한 설계와 가공 이외에 아직까지 완전히 컴퓨터로 대체가 곤란한 부분도 남아 있으며, 이 부분이 제품개발기간단축에 병목이 되고 있다. 이 부분은 주로 목업제작과 시작품 제작에 관련된 부분인데 이 부분을 컴퓨터를 이용한 무인가공으로 대체할 수 있는

장치로 광조형장치가 개발되어 산업계에서 확산 추세에 있다.

광조형장치로 형상제작시 제작시간과 형상정도 사이에는 반비례의 관계가 있으며, 형상제작시 발생하는 변형의 종류는 여러가지이나 그 중에서 대표적인 것을 나타내면 Fig 1과 같다⁽¹⁾.

그러므로 향후 산업계에서 보다 널리 사용되기 위해서는 제작시간을 줄이면서 변형을 방지하며, 형상정도를 향상시킬 수 있는 방법이 과제로 되고 있다. 여기에 관해서는 Paul. F. Jacobs⁽¹⁾가 Fig. 1과 같이 광조형시 발생하는 변형에 대해 연구하였다. 그리고 동경대학의 中川 등이 광조형의 경화프로세스에 있어서 수축은 경화물내

* LG전자(주)생산기술센터

** 부산대학교 기계공학부 기계기술연구소

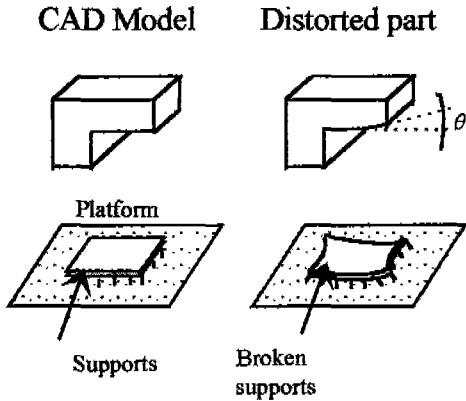


Fig. 1 Comparison of CAD models with distorted parts

부에 불균일한 노광광분포로 발생한다는 가정하에서 선상의 경화물을 대상으로 FEM 시뮬레이션을 시도하였으며⁽²⁾, 경화과정중에 액체수지가 어떻게 유동하는가에 대해서 에폭시수지에 BN가루를 섞어서 비디오로 촬영하여 밝혀내었다. 이 연구에서는 단일경화선 및 경화시 그 주변상황에 대해서 연구하였다⁽³⁾. 그리고 도시바의 모요등은 광조형에 있어서 정도를 저하시키는 요인을 알아보기 위하여 실험장치를 구성하여 수축현상을 실시간으로 측정하였다. 이 실험에서는 주사패턴을 한방향 지그재그와 십자방향의 2가지를 사용하여 비교한 것이 특징이 되었다⁽⁴⁾. 이러한 연구들을 바탕으로 본 논문에서는 변형을 방지하며, 형상정도를 향상시킬 수 있는 방법의 개발에 대해 논하고자 한다.

2. 본 론

광조형법에 있어서 조형정도의 향상은 실제로 광조형법이 기계가공을 대체할 수 있으나 하는 측면에서 가장 중요한 인자중 하나이다. 광조형법은 사용하는 레이저광원 및 광경화성수지 또는 파우더 등의 경화재료를 사용하여 적층가공하므로 어떠한 형상도 조형이 가능하다는 장점이 있지만, 항상 적층자극을 남겨 조형된 형상의 표면정도에 악영향을 미친다는 결점이 있다. 이 외에도 레이저광원의 촛점크기 제한, 경화시 수지 또는 파우더의 수축등이 발생하며, 그리고 개시제 함유량 및 주사간격에 따라 경화되는 층의 두께가 달라지므로 정밀한 형상을 제작하기 위해서는 상당한 제약이 따르고 있다. 이러한 과제를 해결하기 위해서 고려해야 할 항목이 여러 가지가 있

지만 그 중에서 중요한 항목은 다음과 같다. 그리고 본 연구에서 사용한 실험장치는 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.

2.1 층두께와 표면거칠기

광조형의 고유한 특성상 형상을 만들기 위하여 일정한 두께를 가지는 얇은 층을 적층시켰을 때 적층에 의해 단차가 발생하는 광조형상에 대하여 이론적 표면거칠기의 계산을 위해 단차를 직각으로 가정하여 처리한 스미스 등의 계산 예도 있지만⁽⁵⁾, 보다 일반적으로 단위 경화형상의 윤곽을 직선으로 근사시켜 처리하면 경화형상의 표면은 다음식으로 표현이 가능하다[Fig 2].

$$H = \frac{L}{\sin \theta * \tan(\theta - \varphi) + \cos \theta} \quad (1)$$

여기에서 φ 는 단위 경화형상의 윤곽의 기울기, θ 는 수평면에 대한 모형의 면 경사각, L은 한층두께이며 H는 최대거칠기이다.

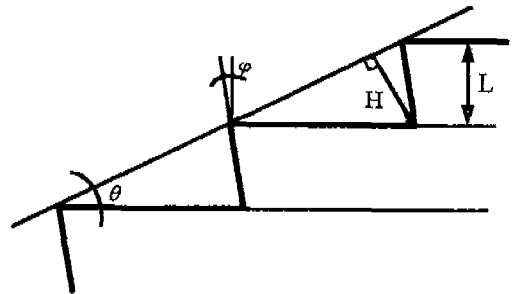


Fig. 2 Theoretical surface roughness in stereolithography

단위 경화형상의 윤곽은 실제로는 Gaussian 곡선형태를 이루고 있으므로 한층두께(L)의 값을 적게 할수록 경화에 사용되는 형상의 윤곽은 경화면인 수평면에 대해 수직하게 수렴된다. 그러므로 위 식에 의해, 한층두께 L을 얇게 성형하여 최대거칠기 H를 작게하고, 경사각 θ 가 작게되면 φ 값이 작게 되므로 조형형상의 표면거칠기는 작게된다. 따라서 광조형을 이용하여 형상을 만들 때 표

면거칠기를 낮추기 위해서는

1) 레이저 출력을 향상시켜 경화되는 형상의 Gaussian 곡선형태를 조정하여 각 층의 단위경화형상의 윤곽의 기울기값을 작게하고,

2) 한 층의 두께를 얇게하여 조형하고[Fig 3],

3) 수평면에 대한 경화형상의 경사각을 최소화시켜서 형상을 만들면, 만들어지는 형상의 표면상태가 좋아짐을 위 식으로부터 유추할 수 있다.

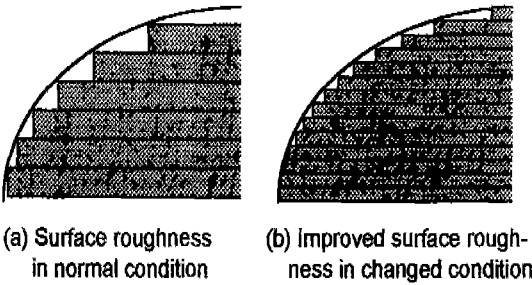


Fig. 3 Effects of stair-stepping as a function of layer thickness

2.2 광경화성 수지

광조형에서 입체가 형성될 때의 경화현상에 대해서 살펴보면 다음과 같다. 수지에 특정한 파장을 가지는 빛에 닿아서 액체로부터 고화할 때 빛에너지 출력과 이때 경화되는 영역 및 깊이는 상호 밀접한 관련이 있다⁽⁵⁾. 그리고 감광성수지의 경화에서는 광학적 요인과 수지적 요인이 관련되어 있는데 레이저광의 파장, 에너지 파워밀도분포 등이 광학적 요인으로서 경화물에 영향을 미치고 있으며, 수지적 요인으로서 수지의 흡수계수와 개시제 효율, 반응 속도 등에 의해 경화형상이 영향을 받는다. 또 이 반응의 과정에서 발생한 열과 경화물의 중합수축량과 경화물이 가지는 탄성의 차이에 의해 경화물의 변형이 발생한다⁽⁶⁾. 한편 모형을 조형할 때의 프로세스를 생각하면, 자외파장의 레이저광을 감광성수지의 액면에 조사 및 주사하므로써 형상의 단위경화물이 생성된다. 이 경화물을 일차원경화물이라고 부르면, 어느 한 층의 경화형상에 따라 고화되는 경화층은 이차원경화물이 되고, 각 층이 적층되어 삼차원경화물이 되면서 형상을 구성한다. 이차원경화물은 직선형태의 단위경화물끼리가 서로 겹쳐져 간섭되고 있다. 또 최종형상으로 되는 삼차원 경화물도, 이차원 경화물이 상하의 층으로 서로 겹쳐져 간섭, 접합하는 것으로 형성된다. 따라서 레이저 조사, 적층에 의해 일차원 경

화물로부터 삼차원 경화물로 되는 입체형성의 과정에서, 미소체적에서 발생되고 있는 물성변화가 최종형상의 변형과 형상정도에 영향을 미친다고 생각할 수 있다. 그러므로 이것을 해결하기 위해 아크릴레이트계, 비닐계, 에폭시계 등의 여러 종류의 수지에 대해 많은 연구가 진행되고 있지만 아직 이 문제가 완전히 해결되지 못하고 있는 것이 현실이다. 그렇지만 보다 고정도의 형상을 얻기 위해서는 자외파장을 가지는 레이저빛을 수지에 주사했을 때 수지의 반응과 경화폭 및 경화깊이와의 관계에 대해 규명하는 것이 필요하며, 이것에 대해 살펴보면 다음과 같다.

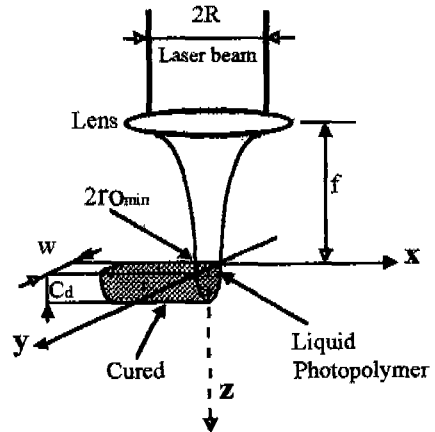


Fig.4 Theoretical model of cure

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 수지면으로부터의 거리 $Z = 0$ 에 있어서 경화깊이(C_d)는 다음식과 같다⁽⁷⁾ [Fig 4].

$$C_d = \alpha \log_e \{ [\pi^{1/2} I_0 \mu / (VE_T)] \} \quad (2)$$

여기에서 경화깊이는 조사하는 레이저광의 강도와 주사 속도에 의해 결정된다.

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

$$W = 2\mu [\log_e \{ \pi^{1/2} \mu I_0 / (VE_T) \}]^{1/2} = 2\mu \cdot (C_d / \alpha)^{1/2} \quad (3)$$

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

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

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

$$E_T = \frac{\mu \cdot I_0 \cdot \sqrt{\pi}}{V \cdot e(W/2\mu)^2} \quad (5)$$

으로 되며, 이 식에서 경화시키는 노광량과 광강도사이에는 서로 비례하지만 주사속도와와의 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.

2.3 수지 수축현상

일반적으로 광경화성수지는 축중합에 의해 경화가 되면서 체적이 감소한다. 분자간에 결합하여 하나가 될 때에는 각각 점유하는 공간이 감소하게 된다. 이때 광경화성수지 전체를 한 번에 경화시키면 전체가 수축한다. 그러나, 광조형법의 경우에는 체적수축이 아니라 레이저빔이 지나가는 부분에서만 경화와 수축이 발생하는 단일 경화선의 수축의 연속이라고 생각할 수 있다. 즉, 수축이 연속적으로 발생하는 일차원의 단일 경화선이 모여서 이차원의 면을 생성하므로 레이저광이 지나가는 방향과 궤적, 그리고 주사간격에 따라서 수축현상에 차이가 발생하며, 이에 따라 경화시 내부에 발생하는 응력이 항상 일정할 수 없다.

지그재그 주사법에 대해서는 먼저 주사하여 경화시킨 경화선에 비하여 바로 다음에 인접하여 경화시킨 경화선의 변형량이 적다⁽⁵⁾. 그 이유는 주사중에 발생하는 수축 및 변형이 기 경화물내에서는 이미 발생되었고, 여기에 미경화수지가 유입되어 경화순서에 따라 변형량의 차이가 발생하기 때문이다. 그러므로 조형하는 형상 내부에는 잔류응력이 존재하지만 이 응력이 전체적으로 균일하게 존재한다고 생각하기 어려우며, 또 수축도 균일하게 발생한다고 보기 어렵다.

2.4 경화두께 및 주사간격

형상을 제작할 때에는 형상정보를 얼마의 두께를 가지

는 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.

여러층을 반복해서 경화시킬 때에는 위층이 경화되면서 에너지의 일부가 아래층까지 전달되어 위층과 아래층이 하나로 붙게 되어 일정한 두께를 유지한다. 그러나 서포트와 연결되는 형상의 가장 아래부분에서는 경화에너지량, 투과율 및 주사간격에 따라서 경화되는 두께가 결정되며, 이때 경화되는 두께로 인하여 실제 형상보다 Z값이 크게 된다[Fig 4].

여기에서 주사간격은 경화두께 뿐만 아니라 경화층의 표면을 평탄하게 유지하여 형상의 정도를 유지하는데 결정적인 영향을 미친다. 주사간격이 경화두께와 경화층 표면에 어떤 영향을 미치는 지를 확인하기 위해 Fig 5와 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, 그 결과는 Table 1에 나타내었다.

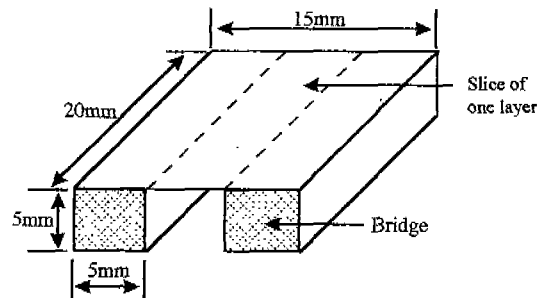




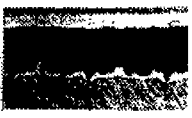



Fig. 5 Test sample shape

이 실험에서 주사속도는 200mm/sec와 300mm/sec 2가지를 사용하였고, 주사간격은 0.1mm, 0.2mm, 0.3mm 3가지를 사용하였다. 이 실험결과와 경화두께를 비교하기 위해 주사속도 200mm/sec와 300mm/sec에서의 단일 경화선의 경화두께를 측정하였다. 그 결과 주사속도 200mm/sec 일때의 경화두께는 0.35mm, 300mm/sec 일때의 경화두께는 0.26mm이다. 즉, 단일 경화선과 Fig 5의 형상측정결과를 비교하면 경화두께에

Table 1. Curing depth 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

서 많은 차이가 발생함을 알 수 있다. 이 차이가 발생하는 이유는 단일 경화선의 경화폭보다 적은 간격의 주사간격을 가지면, 주사시 중첩되는 부분은 경화에너지가 중첩되어 이 부분에서 경화두께가 두꺼워져 고드름형상으로 경화가 발생되는 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.⁽⁶⁾

본 실험에서는 Fig 5에 나타난 시험편을 표와 같은 조건에서 제작하여 가장 윗면의 단일층의 중심부를 절단하여, 그 절단면을 50배로 확대하여 조건별로 촬영한 것이다.

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

2.5 경화경사각

광조형법에 있어서 경화경사각은 조형되는 형상의 외곽면을 이루는 부분의 경사각이므로 형상을 정밀하게 제작하기 위해서는 아주 주요한 인자이다. 경화경사각을 원하는 각도로 자유롭게 조정할 수 있으면 조형한 형상의 표면상태가 아주 좋아지겠지만 NC 기계처럼 여러축을 동시에 복합적으로 사용하기 어려운 한계로 인하여 수직면에 만들어지는 초점의 형상 및 경화형상 등을 고려할 때 경화경사각을 최소화시켜 수직으로 만드는 것이 현실적으로 가장 유리하다. 그러나 경화형상 자체가 Gaussian 곡선형태이므로 완전한 수직은 불가능하며 수직에 가깝도록 경화시켜야 한다. 그러므로 수직에 가깝게 만들기 위해서는 Y방향의 경화폭은 좁게하고, Z방향의 경화깊이를 깊게하면 수직에 가깝게 경화경사각을 만들 수 있다. 경화폭을 좁게하기 위해서는 레이저광의 초점크기를 줄여야 하므로, 여기에서 초점반경의 최소값을 r_{0min} 이라 하면 이 때의 초점거리 f , 파장 λ , 초점렌즈로 입사되는 레이저빔 반경 R 사이의 관계는 다음과 같이 나타내어진다.⁽⁶⁾

$$r_{0min} = \frac{f \cdot \lambda}{\pi \cdot R} \quad (6)$$

이 식에서 볼 때, 초점의 크기는 초점거리에 비례하고, 입사되는 빛의 크기에 반비례하므로 초점거리가 짧은 초점렌즈를 사용하여 집광하고, 레이저빔은 파장이 짧은 대역의 것을 사용하며, 초점렌즈를 통과하기 전에 빔확장기를 이용하여 빛의 크기를 크게 하면 초점반경이 작은 초점을 얻을 수 있으므로 경화경사각을 작게 하여 보다 정확한 형상을 제작할 수 있다.

2.6 경화시 Curl 발생

Curl은 변형의 한종류로서 연속적으로 층단위로 형상을 제작할 때, 경화되는 광경화성수지의 수축영향으로 발생한다. Curl이 발생하는 형상실험에서 서포트가 없는 외팔보형상의 첫번째 층을 광경화성수지 표면에서 조형했을 때 초기에는 윗방향으로 어떠한 변형도 발생하지 않는다. 이때 역상의 수지가 경화시 수축되면서 비중이 약간 높아져 아랫방향으로 미소량의 기울어짐이 발생한다. 그러나 두번째 층부터는 아래층과 결합되므로, 위층에서 수축이 발생하면 서포트가 없는 외팔보의 끝부분에서 윗방향으로 벤딩모멘트가 발생한다. 즉, 서포트가 없는 부분에서의 몇 개의 층은 수직면위로 말려 올라가는 curl이

발생하는데, 현재층을 조형중에는 아래층에 결합되어 현재층에서 경화, 수축이 일어난다. 이때 현재 작업중인 층이 위에 존재하며 여기에서 수축이 발생하므로 당연히 윗 방향으로 변형이 발생한다. 그러나 위로 계속해서 층을 만들면 기 경화된 아래층 전체를 변형시킬 힘의 부족으로 결국 수평을 유지하게 된다. [Fig.6]

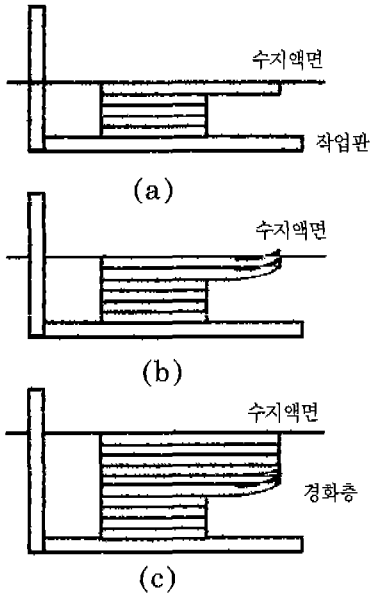


Fig. 6 The result of molding include curl deformation

서포트가 작업판과 형상 사이에서 양쪽과 붙어서 형상에서 curl이 발생하는 것을 방지하고 있지만, curl이 발생하는 힘이 클 경우에는 작업판에서 서포트가 분리되든지 아니면 형상과 서포트 사이가 분리된다. 그리고 레이저빔에 의한 열응력, 수축응력 등의 잔류응력이 형상내부에 남아 형상이 만들어진 후 크리이프 변형으로 나타난다.

광경화성수지를 경화시킬 때 curl의 발생에 영향을 미치는 인자는 서포트의 형상, 서포트의 간격과 강도 그리고 형상을 지지하는 형태 이외에도 레이저출력 및 초점상태 등이다. 여기에서 curl이 발생하는 비율을 외팔보의 길이(L)과 수직방향의 변형량 δ 으로 나타내면 다음과 같다.

$$C_f(\%) = (\delta/L) * 100 \quad (7)$$

이 식에서 보면 curl의 발생을 줄이기 위한 가장 쉬운 방법으로 외팔보의 길이를 길게 하면 되지만 실질적으로 curl 발생을 줄일 수 없으며, 이때 외팔보의 길이를 최소화하는 것으로, 즉 형상의 가장자리를 따라서 서포트를 새우면 계산상으로 curl 발생비율이 무한대로 높아지지만, 서포트가 형상의 가장자리를 지지하므로 조형중에 발생하는 curl을 최소화시킬 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 광조형법에 있어서 변형을 방지하며, 형상정도를 높일 수 있는 방법에 대하여 연구하였다. 즉, 조형중에 만들어지는 형상이 층단위로 정확하게 생성될 수 있는 방향으로 초점을 맞추어 연구하였다. 그러므로 주사패턴에 따라 발생하는 형상의 비틀림, 수지특성과 서포트에 영향을 받는 형상의 처짐 및 후경화시의 후변형을 줄일 수 있는 방법 등에 대해서는 다루지 않았다. 그렇지만 층두께와 표면거칠기, 수지수축현상, 경화두께, 경화경사각 및 주사간격 등은 정확한 형상을 조형하기 위해 가장 기본적으로 해결해야될 과제이므로 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 레이저출력 및 층두께를 조정하여 표면거칠기를 낮추는 것이 가능하다. 그렇지만 레이저 출력을 떨어뜨리면 조형능력이 저하되므로, 실질적으로 표면거칠기를 향상시키기 위해서는 층두께를 조정해야 한다.
- 2) 경화폭과 경화깊이는 동일한 조형조건하에서 상호 관련이 있으며, 경화깊이가 경화폭의 제곱에 비례한다는 사실을 알 수 있다. 그리고 주사시키는 노광량과 광강도 사이에는 서로 비례하지만 주사속도와는 서로 반비례한다. 그러므로 주사속도를 조절하면 노광량을 변화시키는 효과를 얻을 수 있으며, 광강도 자체는 항상 일정하므로 수축 및 변형을 방지하기 위해 주사속도를 조절하여 작업하는 것 만으로도 좋은 결과를 얻을 수 있다.
- 3) 직선형태의 단일경화선을 인접해서 계속 주사할 경우 나중에 경화되는 경화선은 처음에 경화되는 경화선에 비하여 변형이 적다. 즉, 동일한 평면상에서 먼저 조형 하는 부분에 상대적으로 많은 수축이 발생하므로, 각 층마다 처음 조형되는 위치를 변화시켜 전체적으로 균형되게 조형해야 한다.
- 4) 평탄한 경화면을 유지하기 위해서는 주사간격이 좁을 수록 유리하지만, 효율적인 측면에서 경화폭과 주사

간격의 사이 관계를 고려하여 결정하여야 한다. 이때 경화깊이가 두꺼워지는 현상은 피할 수 없다.

- 5) 본 연구에서 사용한 레이저의 파장은 일정하고, 레이저 빛 자체의 반경도 항상 일정하므로, 초점크기를 작게 하여 정밀한 형상의 조형이 가능하도록 하기 위하여 초점거리가 짧은 렌즈를 사용 하고, 빛 확장기를 사용하여 입사되는 빛의 지름을 크게 만들어 초점의 크기를 줄일 수 있었다.
- 6) 경화시 curl이 발생하는 것은 수지특성상 필연적인 사실이다. 그러나 서포트의 위치를 조정하여 외팔보의 발생을 억제하면 curl 발생을 최대한 억제할 수 있다.

참 고 문 헌

1. Paul. F. Jacobs, "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, p.p.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, p.p.969-970, 1996.
4. 足立 外, "光造形法にある收縮現象のRealtime測定の実験(第2報)", 精密工學會 秋季學術大會論文集, p.p.889-890, 1995.
5. 김준안, 홍삼열, 백인환, "광조형법에 있어서 OFFSET정보생성 알고리즘개발에 관한 연구", 한국정밀공학회, 제13권 제9호, p.p.70-76, 1996.
6. 橋原弘之, "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, pp.27-33, 1995.
7. 丸谷洋二 外, "光造形法", 日刊工業新聞社, pp.8-9, 1990.
8. 山口 外, "紫外線感光性樹脂を使った集束レーザービーム描畫法による3次元マイクロ部品の製作", 精密工學會 秋季學術大會論文集, p.p.885-886, 1995.