

광조형 공정 시 수축에 의한 변형 오차의 실험적 고찰

김기대*, 오영탁⁺

(논문접수일 2005. 8. 30, 심사완료일 2005. 11. 7)

Experimental Investigation on the Distortion Error induced by Shrinkage in Stereolithography Process

Gi Dae Kim*, Young Tak Oh⁺

Abstract

During stereolithography processes, one of the main sources of dimensional error of prototype is the distortion effect owing to the shrinkage of resin. In this study, the effects of dimension of specimen, such as length, width, and thickness, on the curl distortion is examined. During the SL processes, the variation of curl distortion error is measured according to the number of layers. Through this study, it is verified that there is a big difference of the distortion error in both direction and magnitude between before and after the supports are removed. It is also observed that end profile of the test part and the upper side around the border are also distorted due to the shrinkage of the resin.

Key Words : Stereolithography(SL, 광조형), Shrinkage(수축률), Curl distortion(곡률변형), Supports(지지대)

1. 서론

광조형(Stereolithography, SL) 공정은 광경화성수지(photo-polymer)의 표면에 어느 한계값 이상의 에너지를 가진 레이저를 주사하여 중합반응(polymerization)을 통한 고형화(solidification)과정을 거쳐 만든 각 단면을 순차적으로 적층하여 원하는 3차원 형상(시제품)을 만드는 공정을 말한다. 광조형 공정으로 투명한 시제품을 만들 수 있고 그 정밀도가 우수하기 때문에 여러 가지 쾌속조형(rapid prototyping) 방

식 중 현재 가장 많이 사용되고 있다. 그러나 SL 공정의 특성상 액체 수지(resin)가 상변화 됨에 따라 응고수축(solidification shrinkage)이 발생하고 또한 온도 변화에 의한 열수축이 발생하기 때문에 시제품의 정밀도 오차가 발생한다.

그 동안 SL 공정 중 발생하는 정밀도 오차의 원인을 분석하고 이를 개선하기 위하여 다양한 연구가 수행되었다. SL 공정은 3D systems社(美)에 의해서 상용화 되었으며 여러 가지 공정 변수의 영향 및 대표적인 시험 방법에 관한 상세한 내용은 Jacobs⁽¹⁾에 의해 정리되었다. Fuh 등⁽²⁾은 라만

* 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부 (gidkim@cu.ac.kr)
주소: 712-702 경상북도 경산시 하양읍 금락리

+ 안산공과대학 기계계열 기계시스템전공

분광기(spectroscopy)를 이용하여 아크릴계(acrylic) 수지의 경화 특성을 분석한 뒤, 제작물 내 미경화된 수지가 수축과 변형의 원인이 됨을 밝혔고, 이은덕 등⁽³⁾은 새로운 리코팅 공정을 제안하여 블레이드의 속도와 두께가 경화층에 미치는 영향을 고찰하였다.

Karalekas 등⁽⁴⁾은 해치 간격(hatching space), 경화 깊이(cure depth), 후경화(postcuring) 처리 방법이 시제품 내의 잔류 응력에 미치는 영향을 규명하였고, Liu 등⁽⁵⁾은 습도, 온도 등 환경의 변화가 치수 및 정밀도 오차에 미치는 영향을 밝혔다. Narahara 등⁽⁶⁾은 시간과 온도에 따른 수축량을 측정함으로써 수지가 응고된 후에도 온도 변화로 인해 수축이 계속됨을 밝혔다. Dai 등⁽⁷⁾은 주사 경로가 잔류 열응력 및 변형에 미치는 영향을, Bugeda 등⁽⁸⁾은 수축률이 곡률 변형에 미치는 영향을, Huang 등⁽⁹⁾은 주사속도, 주사간격, 층 두께, 주사 경로 등 다양한 공정 변수가 제품의 수축률과 곡률 변형에 미치는 영향을 각각 FEM 해석을 통하여 규명하였다.

본 연구에서는 길이, 폭, 그리고 두께가 다른 직육면체 모양의 시편을 제작하여 SL 공정의 수축 현상에 의해 발생하는 다양한 변형 오차들을 관찰하고 각각의 치수 및 형상이 변형 오차에 미치는 영향을 규명하였다. SL 공정이 진행됨에 따라 곡률 변형이 변화하는 형태를 관찰하였고, 단면 내부 주사속도와 가장자리 주사속도 차이로 인한 수축률의 차이가 윗면의 모서리 형상을 변형시킨다는 것을 규명하였으며, 양 가장자리의 수직면 형상이 기울어지는 현상을 관찰하였다. 본 연구에서 관찰된 모든 변형 오차에 대한 원인은 단면간 혹은 위치간 수축률의 차이에 의한 것임을 규명하였다

2. 실험 방법

실험에 사용된 쾌속조형 장비는 투명수지의 열경화 현상을 이용하는 3D systems 社の 광조형 장비인 SLA-5000이며, 수지의 종류는 Somos 11120 를 사용하였다. Table 1 에 주사 속도, 층 두께 등 공정 변수와 사용된 수지 재료의 특성, 그리고 사용된 3차원 측정기(CMM)의 정밀도 등을 나타내었다. 각 방향 전체 수축률은 3D systems 社에서 제안하고 있는 크리스마스트리 방법(Christmas Tree method)⁽¹⁾을 이용하였으며, 예비 실험을 통하여 계산하였다.

Fig. 1은 수지의 수축에 의한 변형 오차를 측정하기 위한 시편의 형상이다. 시편의 길이(l)를 20mm에서 300mm까지, 폭(w)을 5mm에서 20mm까지, 두께(t)를 0.1mm에서 10mm까지 다양하게 변화시켜가면서 제작하였고 각각의 치수 및

Table 1 Experimental conditions

	Model	SLA5000(3D systems)
RP Machine	Laser Power	111mW
	Hatch speed	223.3in/sec
	Border speed	19.5in/sec
	Layer thickness	0.1mm, 0.15mm
Resin	Material	Somos 11120
	Thermal expansion coefficient	170~189×10 ⁻⁶ /°C (Solid) 90~96×10 ⁻⁶ /°C(Liquid)
	Young's modulus	2,650~2,880MPa
	(Total) Shrinkage	0.28% (X) 0.27% (Y)
CMM	Model	Endeavor 9.12.7 HA (Giddings & Lewis)
	Accuracy	(U3)2.5+3.0L/1000

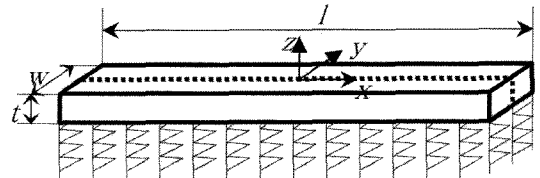


Fig. 1 Shape of experimental specimen

형상 변화가 전체 형상 변형 및 정밀도 오차에 미치는 영향을 고찰하였다.

다양한 형상의 시편은 Fig. 2 에 보이는 바와 같이 하나의 플랫폼(platform) 위에서 한 번의 제작으로 완료하였으며, 층 두께(layer thickness, l_t)를 0.1mm 와 0.15mm, 두 가지 방법으로 하여 총 2회에 걸쳐 제작하였다.

시편의 변형을 측정하기 위하여 Fig. 1에 보이는 바와 같이 CMM 을 이용하여 폭 방향(y 방향)의 중간 지점을 따라 길이 방향(x 방향)으로 10mm 간격으로 측정하여 곡률 변형(curl distortion, δ)을 계산하였다. 그 다음 양 가장자리의 수직면이 기울어진 정도를 측정하기 위하여 높이 방향(z 방향)으로 2mm 간격으로 측정하여 층 높이의 변화에 따른 길이의 변화를 측정하였다.

SL공정이 진행됨에 따라 각 공정 별 변형 오차의 변화를 관찰하기 위하여 동일 시편을 다음과 같이 총 4차에 걸쳐

측정하였다. 먼저 Fig. 2에 보이는 바와 같이 시편 제작을 완료한 후 간단한 알코올 세척과 건조 과정을 거치고 플랫폼 위에서 지지대(supports)와 결합된 채 전체 변형 형상을 1차로 측정하였다. 그런 다음 지지대를 제거하고 내부 응력 풀림에 의한 변형이 충분히 완료되었다고 판단되는 2시간 후에 2차로 측정하였고, 이후 1시간 동안 UV 램프로 후경화(postcure) 과정을 거친 후 3차로 측정하였다. 마지막으로 모든 공정을 완료한 후 10일이 경과한 뒤 4차로 측정을 실시하여 각 공정이 진행됨에 따라 변형 오차의 추이를 관찰하였다.

3. 실험 결과 및 토의

3.1 공정별 곡률 변형

Fig. 3은 길이와 폭을 각각 300mm, 5mm, 그리고 층 두께를 0.1mm로 고정하고 적층 단면의 수를 차례로 증가시켜 시편의 두께를 0.1~0.5mm로 하여 제작하고 후경화 과정을 거친 후 10일이 경과한 뒤 촬영한 사진이다. 후경화 과정을 하기 전, 층 수가 1개(두께 0.1mm)일 경우에 액체 수지는

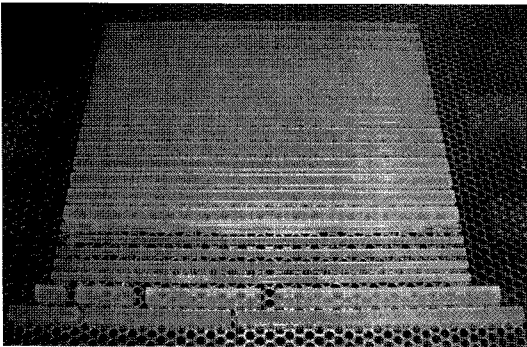


Fig. 2 Photograph of specimens in platform

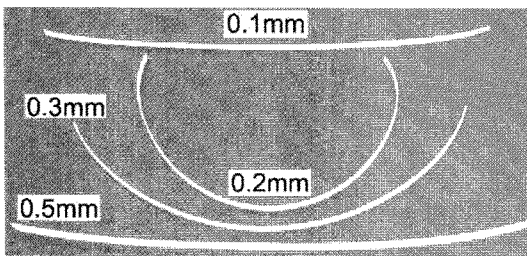


Fig. 3 Photographs of curled shape of specimens according to the part thickness(Part length(l)=300 mm, layer thickness(l_s)=0.1mm)

모든 방향에 대하여 대칭으로 수축이 발생하기 때문에 특정한 방향으로 곡률이 발생하지 않았다. 그러나 새로운 층이 하나 더 적층되어 아래층과 결합될 때에는 이미 수축이 많이 진행된 아래층과 수축을 새롭게 시작하는 위 층과의 수축률 차이가 발생하게 되고 이것이 마치 바이메탈(bimetal) 원리와 같이 작용하게 되어 적층되는 방향으로 곡률 변형이 발생하게 된다. 층수가 더욱 증가하면 굽힘 강성(flexural rigidity)이 증가하게 되어 곡률 변형량은 감소하게 된다.

후경화 과정을 거치면서 불완전하게 경화된 내부의 수지는 완전히 경화되고 전체적으로 곡률이 더욱 증가하였다. 한 가지 주목해야 할 점은 하나의 층으로만 제작한 0.1mm 두께의 시편은 후경화 전에는 변형이 전혀 발생하지 않았으나, 후경화 후에 곡률 변형이 새롭게 발생하였다는 사실이다. 이것은 후경화 과정 시 한쪽 방향으로 UV 램프에 노출이 되었고, 노출된 방향과 그렇지 않은 방향간에 수축량의 차이가 발생하여 생긴 현상으로 판단된다.

Fig. 4는 하나의 시편에 대하여 SL 각 공정 중 발생한 곡률 변형의 변화를 CMM 으로 측정된 결과이다. 플랫폼 위에서 시편이 지지대와 결합되어 있는 상태에서 길이 방향을 따라 변형량을 1차로 측정된 결과 오히려 약 150mm 지점의 중앙 부분이 양 가장자리(0, 300mm 근처)에 비하여 윗 방향으로 볼록하게 굽어져 있는 형태로 나타났다. 이러한 현상이 나타나는 이유는 다음과 같이 설명할 수 있다.

Fig. 5는 플랫폼 위에서 지지대와 시편이 결합되어 있는

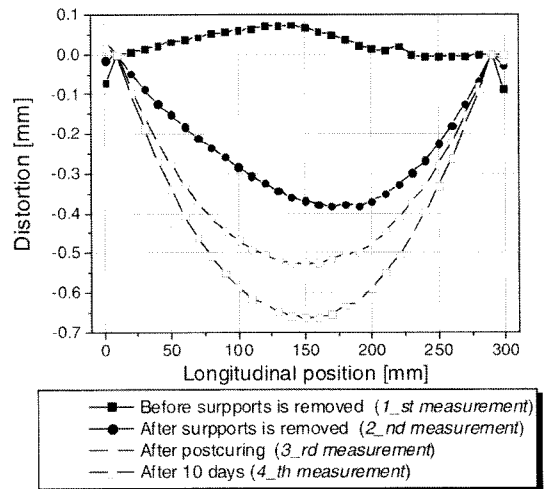


Fig. 4 The Variation of curled shape of specimen during SL processes(Part thickness(t)=5mm, part width (w)=10mm, layer thickness(l_s)=0.15mm)

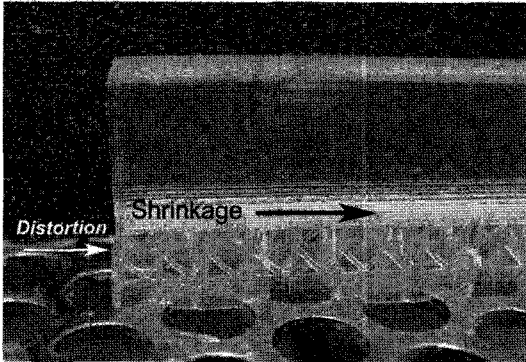


Fig. 5 Photograph of the deformed parts and supports around the border of the specimen in platform ($w=10\text{mm}$, $t=5\text{mm}$, $l=0.1\text{mm}$)

상태를 촬영한 사진이며, 시편을 지지하고 있는 지지대가 중앙 쪽으로 기울어진 형태로 변형되었음을 볼 수 있다. 지지대는 나중에 제거하기 쉽도록 매우 얇게 적층해 나가기 때문에 수직 방향으로는 제작물을 지지하기 위한 어느 정도의 강성이 필요하지만 수평 방향으로는 강성이 매우 약한 구조로 되어 있다. 첫 번째 층을 포함한 아래층이 길이 방향(x 방향)으로 수축을 계속하면서 이와 결합되어 있는 지지대는 강성이 약한 수평방향(x 방향)으로 변형된다. 따라서 양 가장자리에서는 중앙을 향하여 지지대가 기울어지고 제작물의 중앙 지점에서는 지지대가 수직인 상태를 유지하므로 플랫폼에서 지지대와 결합된 상태에서는 길이 방향의 중앙 부분이 위로 볼록한 형상을 가지게 된다.

앞에서 층간의 수축률 차이에 의해서 곡률 변형이 발생한다고 했는데, 지지대와 결합된 상태에서는 내부응력 상태로만 존재하고 있다가 지지대를 제거하는 순간 시편의 형상은 Fig. 3 및 Fig. 4에 나타난 바와 같이 곡률을 가지는 형상으로 변하게 된다. 후경화 공정 후 시편이 완전히 경화되면서 곡률에도 변화가 발생하는데 시편 형상에 따라 곡률 변형의 증감 및 그 정도가 다르게 변화하는 것으로 확인되었으며, 보다 구체적인 결론을 도출하기 위해서는 이에 대한 보다 많은 실험 및 연구가 필요하다고 판단된다.

3.2 치수/형상의 변화에 따른 곡률 변형

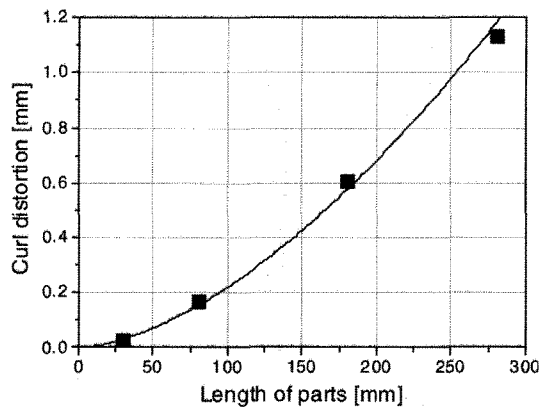
3.2.1 길이에 따른 곡률 변형

시편의 길이의 변화에 따른 곡률 변형의 변화를 살펴보기 위하여 시편의 폭과 두께를 고정하고 시편 길이를 50mm~300mm로 변화시켜가면서 곡률 변형의 변화를 측정하였다.

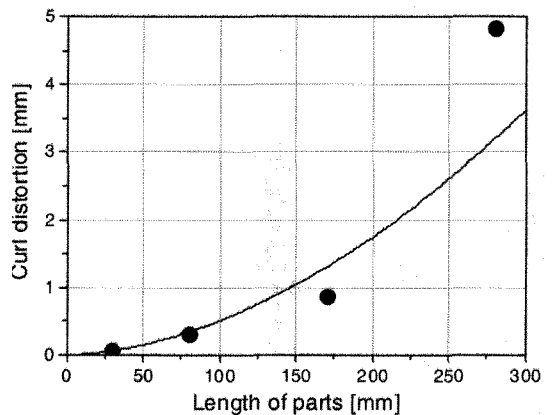
시편의 윗면을 10mm 간격으로 측정한 값 중 수직방향 수축으로 인해 오차를 주는 양 가장자리에서의 측정값은 제외하고 곡률 변형을 계산하였다. 실험 결과 Fig. 6에 보이는 바와 같이 시편의 길이가 증가함에 따라 곡률 변형량은 지수적으로 증가하는 것으로 나타났다. 단면간 수축률 차이로 인해 일정한 곡률반경을 가지는 형태로 변형되었고, 이로 인해 발생하는 곡률 변형이 지수적으로 증가한 것이다. 곡률 변형량은 시편의 길이에 지수적으로 비례한다는 사실은 Hull⁽¹⁾의 외팔보(cantilever) 시험을 통해서 이론 및 실험적으로 증명된 바 있으며, 이는 본 실험 결과와도 잘 일치한다.

3.2.2 두께에 따른 곡률 변형

Fig. 7은 시편의 두께가 0.2mm에서 10mm까지 증가함에



(a) $t=2.5\text{mm}$, $w=10\text{mm}$, $l=0.15\text{mm}$



(b) $t=1\text{mm}$, $w=10\text{mm}$, $l=0.1\text{mm}$

Fig. 6 Experimental results of curl distortion according to the length of the specimens

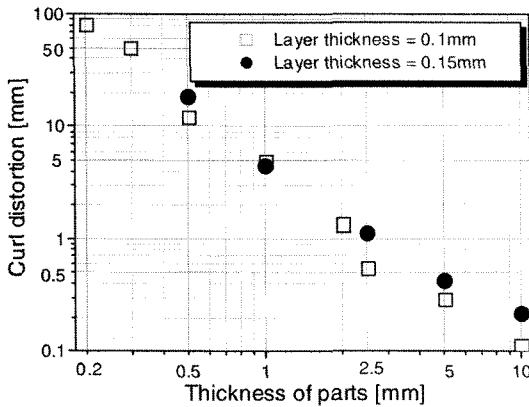


Fig. 7 Experimental results of curl distortion according to the thickness of specimens($l=300\text{mm}$, $w=5\text{mm}$)

따라 시편들의 곡률 변형량의 평균값의 변화를 보여주고 있다. 실험 결과 시편의 두께가 증가할수록 곡률 변형은 지속적으로 감소하는 것으로 나타났다. 그 이유는 식 (1)에 나타난 바와 같이 두께 치수(t)가 증가할수록 곡률 변형에 저항하는 시편의 굽힘 강성이 지속적으로 증가하기 때문이다.

$$\text{Flexural rigidity} = EI = \frac{Ewt^3}{12} \quad (1)$$

여기서 E 는 영률(Young's modulus), I 는 굽힘 관성 모멘트(bending moment of inertia), w 는 시편의 폭 치수를 말한다.

3.2.3 폭에 따른 곡률 변형

Fig. 8은 시편의 길이와 두께를 각각 300mm, 5mm로 고정하고 폭을 5mm, 10mm, 20mm로 증가시켜가면서 제작한 후 곡률 변형량의 변화를 측정된 결과이다. 길이와 두께 치수의 변화에 비하여 폭 치수의 변화가 곡률 변형량에 미치는 영향은 미미하였으나, 폭 치수가 증가할수록 변형량도 조금씩 증가하는 것으로 나타났다. 폭 치수가 길이 방향의 곡률 변형에 미치는 영향은 크게 두 가지로 해석할 수 있다. 하나는 식 (1)에 나타난 바와 같이 폭 치수(w)가 증가하면 굽힘 강성이 증가하여 곡률 변형을 감소시키는 것이고 다른 하나는 폭 치수의 증가가 폭 방향의 곡률 변형을 증가시켜 전체적인 곡률 변형을 증가시키는 것이다. 폭 치수가 증가하면 길이 방향(x 방향)의 수축량은 그대로이지만 폭 방향(y 방향)의 수축량은 증가하게 된다. 폭 치수가 증가하면 굽힘 강성이 선형적으로 증가하고 이로 인해 곡률변형은 선형적

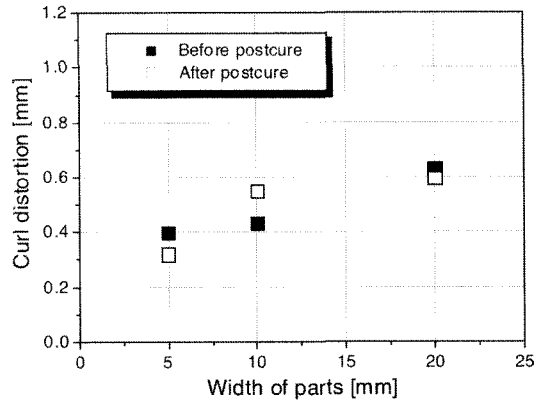


Fig. 8 Experimental results of curl distortion according to the width of specimens($l=300\text{mm}$, $t=5\text{mm}$, $l=0.15\text{mm}$)

으로 감소하지만, 폭 방향 곡률변형이 지속적으로 증가하므로 이 두가지 영향의 결과로 폭 치수가 증가할 때 곡률 변형량이 조금씩 증가한 것으로 판단된다.

3.3 양 가장자리에서의 변형

Fig. 9는 Fig. 5의 사진에 나타난 시편과 지지대의 형상을 그대로 모사한 그림이며, 전술한 바와 같이 길이방향(x 방향) 수축으로 인해 지지대가 변형되어 있다. 그림에서 보이는 바와 같이 시편의 가장자리에는 특이한 두 가지 변형 오차가 발생한다. 하나는 윗면 모서리가 아래로 향하는 변형(γ)이고, 또 하나는 양 가장자리의 수직면이 기울어져 발생하는 변형(λ)이다.

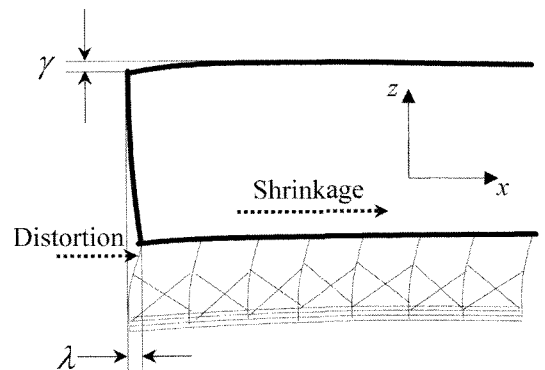


Fig. 9 Diagram of deformed part and supports around the border of specimen

3.3.1 윗면 모서리 변형

Fig. 4에서 측정된 결과를 살펴보면 양 가장자리 위치 0mm, 300mm 근처에서 γ 가 측정되었음을 확인할 수 있다. γ 의 원인은 내부 해칭속도(hatch speed)와 가장자리 주사속도(border speed) 간의 레이저 주사 속도 차이로 인해 단면 내부와 이들을 둘러싸고 있는 가장자리 간에 z 방향 수축률의 차이가 발생하기 때문인 것으로 판단된다. SL 공정의 특성상 Table 1에 나타난 바와 같이 가장자리 주사속도(19.5in/sec)는 내부 단면의 해칭 속도(223.3in/sec)에 비하여 10배 이상 느린 속도로 주사된다.

P_L 의 파워를 가진 레이저를 액체 수지 표면에 V_s 의 속도로 주사할 때, 표면에서받는 노광량(laser exposure)의 최대값($E_{max} [mJ/cm^2]$)은 식 (2)와 같으며, 이러한 레이저에 노출될 때 액체 수지가 경화되는 깊이(C_d , cure depth)는 식 (3)과 같다.

$$E_{max} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left(\frac{P_L}{W_0 V_s} \right) \quad (2)$$

$$C_d = D_p \ln \left(\frac{E_{max}}{E_c} \right) \quad (3)$$

여기서 W_0 는 $\frac{1}{e^2}$ 가우시안 반경(Gaussian half-width)로서 레이저 중앙 위치 최대값의 13.5%($\frac{1}{e^2}$)의 파워를 받을 수 있는 반지름을 말하며, D_p 는 레이저의 투과 깊이(penetration depth), 그리고 E_c 는 수지가 중합 반응을 시작하는 임계 노광량(critical exposure)을 나타낸다. 위 두 식으로부터 레이저의 주사속도가 느릴수록 경화되는 깊이는 증가됨을 알 수 있고, 따라서 주사속도가 느릴수록 깊이 방향(z 방향)으로 더 많은 수축이 발생하게 된다. 가장자리 주사속도는 내부 단면의 주사 속도보다 훨씬 느리기 때문에 윗면의 가장자리에서 z 방향으로 수축을 더 많이 하게 되고 따라서 윗면 모서리가 아래로 향하는 변형(γ)이 발생하게 된다.

3.3.2 가장자리 수직면 변형

Fig. 9에서 가장자리 수직면이 기울어져서 λ 만큼의 변형이 발생하는 이유는 다음과 같이 설명할 수 있다. 레이저를 길이 방향으로 L 만큼 주사하여 첫 번째 층을 응고시켰을 때, 이 층의 길이(L_1)는 일정한 수축률(s)으로 수축하여 $L_1 = L(1-s)$ 가 된다. Fig. 10에서 보이는 바와 같이 이 층 위에 또 다시 길이 L 만큼 레이저로 주사하여 두 번째 층을 응고시켜 첫 번째 층과 결합시키면 첫 번째 층의 길이에 해당하는 L_1 만큼

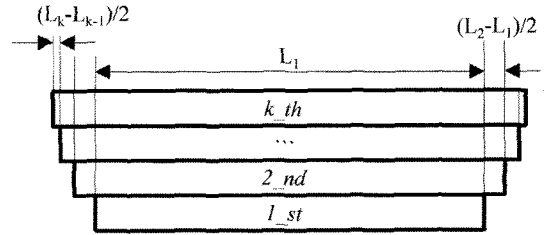


Fig. 10 Variation of length of sequential layers

은 두 층으로 결합된 후 $s/2$ 의 수축률로 수축하게 되지만, 첫 번째 층과 결합되지 않고 가장자리에 위치한 $(L-L_1) = Ls$ 에 해당하는 길이는 수축률 s 의 크기로 수축하게 되며 결과적으로 이 크기만큼 두 번째 층이 첫 번째 층보다 길어지게 된다. 마찬가지로 순차적으로 적층해 나갈 때 k 번째 층이 적층되었을 경우 k 개 층이 모두 결합된 중앙 부분의 수축률은 s/k 가 되고, 이 부분의 길이는 현재까지 누적된 수축률과 곱해져서 나타나게 된다. 두 번째 층부터 계속적으로 남은 가장자리 부분의 영향으로 윗 층은 아래층에 비하여 길어지지만 그 증가율은 현격히 감소하게 된다.

Fig. 11은 길이가 300mm, 두께가 5mm인 시편의 가장자리 수직면의 형상을 측정하기 위하여 양 가장자리에서 높이 방향(z방향)으로 0.5, 2.5, 4.5mm의 좌표를 CMM으로 측정한 결과이다. 측정 결과 예측한 바와 같이 가장자리의 수직면 형상이 정확히 수직하지 않고 기울어졌으며, 지지대와 인접한 아래층으로 갈수록 길이가 짧아져서 형상이 기울어지는 정도는 매우 증가하는 것으로 나타났다.

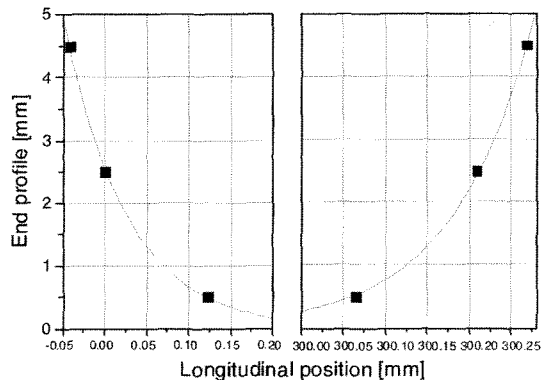


Fig. 11 CMM measurement result of end profile of specimen($l=300mm$, $t=5mm$, $l_f=0.15mm$)

4. 결론

SL 공정에서 응고수축 및 열수축에 의해 발생하는 제작물(시편)의 변형 오차를 관찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 하나의 층으로 시편을 제작하였을 경우 곡률 변형은 발생하지 않았으나, 후경화 공정 후 곡률이 발생하였으며, 층 수를 증가시킬수록 굽힘 강성이 증가하여 곡률 변형은 감소하였다.
- (2) 형상 및 치수 변화에 따른 변형 오차를 관찰한 결과 시편의 길이가 증가할수록, 그리고 두께가 감소할수록 곡률 변형량은 지수적으로 증가하였으며, 폭이 증가할수록 곡률 변형량은 조금씩 증가하였다.
- (3) 플랫폼 위에서 지지대와 결합되어 있으며 시간이 충분히 경과되지 않은 상태에서의 시편은 길이 방향으로 중앙이 볼록한 형상으로 변형되었는데, 이것은 지지대와 결합된 아래층이 길이 방향으로 수축하여 강성이 약한 지지대를 수평 방향으로 변형시키기 때문이다.
- (4) 단면 내부의 주사속도에 비하여 가장자리를 주사하는 레이저 속도가 10배 이상 느리기 때문에 가장자리의 경화깊이 및 수축량이 커져서 윗면에서 모서리 부분은 아래로 향하는 변형이 발생하였다.
- (5) 단면이 적층될 때 각 층에서 발생하는 단계별 수축률을 적용시켜 해석 및 실험한 결과 양 가장자리의 수직면은 지지대와 결합되는 아래층으로 갈수록 많이 기울어지는 형상으로 나타났다.

참고 문헌

- (1) Jacobs, P. F., 1992, *Rapid Prototyping & Manufacturing - Fundamentals of StereoLithography*, SME, pp. 38~48, 249~284.
- (2) Fuh, J. Y. H., Lu, L., Tan, C. C., Chen, Z. X., and Chew, S., 1999, "Curing characteristics of acrylic photopolymer used in stereolithography process," *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 5, No. 1, pp. 27~34.
- (3) Lee, E. D., Sim, J. H., Ahn, K. H., and Paik, I. H., 2003, "Improvement for Recoating Process of Stereolithography System," *Trans. of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 12, No. 1, pp. 16~23.
- (4) Karalekas, D. and Rapti, D., 2002, "Investigation of the processing dependence of SL solidification residual stresses," *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 8, No. 4, pp. 243~247.
- (5) Liu, X. Y. and Fiang, F., 2003, "Environmental effects on the dimensions of SL5195 resin," *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 9, No. 2, pp. 88~94.
- (6) Narahara, H., Tanaka, F., Kishinami, T., Igarashi, S. and Saito, K., 1999, "Reaction heat effects on initial linear shrinkage and deformation in stereolithography," *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 5, No. 3, pp. 120~128.
- (7) Dai, K and Shaw, L., 2002, "Distortion minimization of laser-processed components through control of laser scanning patterns," *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 8, No. 5, pp. 270~276.
- (8) Bugada, G., Cervera, M., Lombera, G., and Onate, E., 1995, "Numerical analysis of stereolithography processes using the finite element method," *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 1, No. 2, pp. 13~23.
- (9) Huang, Y. M. and Jiang, C. P., 2003, "Curl Distortion Analysis During Photopolymerisation of Stereolithography Using Dynamic Finite Element Method," *The Int. J. of Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 22, No. 2, pp. 586~595.