한국정밀공학회지 제 22 권 제 11 호 (2005 년 11 월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 22, No. 11, November 2005

SL 광조형 공정에서 고전적층이론을 적용한 곡률 변형 예측

김기대*, 이재곤#

Prediction of Curl Distortion using Classical Lamination Theory in Stereolithography

Gi Dae Kim* and Jae Kon Lee #

ABSTRACT

A curl distortion induced by shrinkage during stereolithography polymerization process is analyzed with the classical lamination theory. Test parts of different layer thickness and part thickness are manufactured and their deformations are measured with CMM. Curl distortion is generated by the differential shrinkage of the layers, where the total shrinkage includes the shrinkages due to solidification and the change of temperature. It is shown that the curl distortion increases exponentially with decreasing the total thickness of the part, whose smaller layer thickness induces larger curl distortion. It is verified that only a part of the total shrinkage plays a role in generating the curl distortion.

Key Words : Curl distortion (곡률 변형), Stereolithography (광조형), Classical Lamination Theory (고전적층이론), Layer thickness(층 두께), Solidification shrinkage(응고수축)

기호설명

$\{\sigma\}_k$, $\{\varepsilon\}_k$ = stress and strain vector in plane stress

$[\overline{Q}]_k$ = reduced stiffness in plane stress

u, v, w = displacements in x, y, z directions, respectively

u_0, v_0, w_0 = displacements of the middle surface in x, y, z directions, respectively.

$\{\varepsilon'\}_k$ = total strain vector

$\{\varepsilon^e\}_k$ = elastic strain vector

$\{\varepsilon^c\}_k$ = nonelastic strain vector (strain vector due to shrinkage)

$\{\varepsilon^0\}$ = strain of the middle surface

$\{\kappa\}$ = curvature vector

$\{f, m\}$ = force and moment vectors per unit length

$\{A\}, \{B\}, \{C\}$ = extensional stiffness, coupling stiffness, and bending stiffness, respectively

δ = the amount of curl distortion

ρ = radius of curvature

접수일: 2005 년 3 월 29 일; 게재승인일: 2005 년 9 월 9 일
* 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부
# 교신저자: 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부
E-mail leejk@cu.ac.kr Tel. (053) 850-2720

1. 서론

시제품의 제작 기간 단축과 동시공학(concurrent engineering)의 실현에 대한 요구를 만족시키기 위해 쾌속조형(RP, Rapid Prototyping) 기술이 대두되었다. 쾌속조형 기술이란 3 차원 모델링 데이터로부터 별도의 추가적인 작업 없이 간단한 데이터 변환으로 미세한 두께의 연속적인 2 차원 단면을 얻어낸 후, 해당하는 단면을 미세 두께로 연속적으로 적층하고 이 층들을 순차적으로 결합하여 궁극적으로 3 차원 모델링 형상과 동일 형상의 시제품을 제작하는 기술을 말한다. 1987 년 3D system 社에 의해 최초로 개발된 열경화성 액체 수지(resin)의 고화(solidification) 과정을 이용하는 광조형(SLA, Stereo-Lithography Apparatus)을 비롯하여 1991 년 Stratasys 社가 개발한 필라멘트 형태의 ABS 수지(Acrylonitrile Butadiene Styrene copolymer)의 용융 및 응고 과정을 이용하는 용착적층모델(FDM, Fused Deposition Modeling) 기술, 1992 년 DTM 社에서 개발한 플라스틱 혹은 금속 분말을 레이저로 소결시켜 제작하는 선택적 레이저 소결(SLS, Selective Laser Sintering) 기술, 1991 년 Helyisys 社에서 개발한 종이 재료를 사용하여 재료비가 저렴한 박판적층(LOM, Laminated Object Manufacturing) 기술 등 쾌속조형 기술이 도입된 지 20 년이 채 안된 현재까지 다양한 방식이 소개되었고, 지금도 새로운 방식이 지속적으로 개발되고 있다.

여러 가지 쾌속조형 방식 중 광조형 기술 방식으로 제작한 시제품의 치수 정밀도가 가장 뛰어나다고 알려져 있으며, 최초로 개발된 방식이면서 내부를 관찰할 수 있는 투명한 시제품을 제작할 수 있는 유일한 방식이기에 현재 전세계적으로 가장 널리 이용되고 있다. 그러나 액체 상태의 수지가 고체로 상변화 됨에 따라 응고수축(solidification shrinkage)이 발생하고 온도의 변화에 따라 열수축(thermal shrinkage)이 발생하며, 이에 따른 곡률 변형(curl distortion)이 발생하는 단점을 지니고 있다.[1] 시제품의 치수 수축량은 미리 수축률을 추정하는 예비 실험을 거쳐 보정해 줌으로써 해결할 수 있지만, 단면 적층시 단면간 수축률의 차이로 발생하는 곡률 변형에 의한 형상 오차에 대한 보정은 대단히 어려운 일이다.

액체 수지의 광경화 중합반응(photo polymerization) 시 발생하는 수축 현상과 곡률 변형 현상을 규명하기 위하여 많은 연구가 수행되었다. Narahara 등 [2] 은 레이저 주사 및 응고 후의 수축은 경화된 수지의 온도 변화에 의한 것임을 밝혔고, Park 등 [3] 은 평판 제작 실험을 통해 여러 가지 광조형 공정변수가 조형 정밀도에 미치는 영향을 밝혔다. 몇 단계의 공정을 필요로 하는 광조형 공정 특성상 제작물의 변형 측정값에 대한 반복오차(repeatability error)가 크기 때문에 실제 제작 시험을 통한 증명보다는 유한요소해석(FEM) 또는 모델링에 의한 해석적 연구가 많이 수행되었다.[4-6]

고전적층이론(Classsical lamination theory)이란 주로 복합재료의 특성을 규명하기 위한 이론으로 이방성의 얇은 층을 조합한 적층 복합재의 강성과 강도 예측을 위해 주로 사용되었다.[7] Ahn 등 [8] 은 용착적층모델(FDM) 방식으로 제작한 쾌속조형 재료의 강도를 예측하는데 이러한 고전적층모델을 적용한 바 있다. 본 연구에서는 고전적층이론을 광조형 공정의 중합반응에 적용하여 각 적층 단면에 순차적으로 발생하는 응고수축 및 열수축이 곡률 변형에 미치는 영향을 밝혔고 그 변형량을 예측하였다. 또한 층 두께(layer thickness) 및 층 수(number of layer)의 증가에 따른 제작물의 두께 치수를 변화시켜가면서 시편을 제작하고 각 시편에 발생하는 곡률 변형을 측정하여 해석 결과와 비교해봄으로써 중합 반응시 발생하는 전체 수축률 중 곡률 변형을 유발시키는 수축률의 정도를 추정하였다.

2. 고전적층이론을 이용한 곡률반경 예측

Fig. 1 에 나타난 바와 같이 적층 복합판재에서 각각의 층(lamina)은 평면 응력(plane stress)상태로 가정하고 두께 방향의 응력은 무시할 수 있다. k 번째 층에 대한 응력과 변형률 관계는 다음과 같다.

$$\{\sigma\}_k = [\overline{Q}]_k \{\varepsilon\}_k \tag{1}$$

여기서, $[\overline{Q}]$는 환산 강성행렬(reduced stiffiness)이다.

고전적층이론에 따르면, Fig. 1 과 같이 적층판의 기하학적 중심면(middle surface)으로부터 적층방향(z 방향)으로 z 만큼의 거리에 있는 지점에서의 x, y 및 z 방향 변위는 식 (2)와 같이 표현된다.

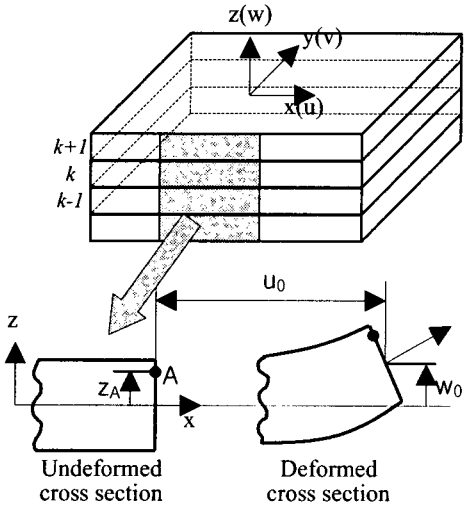


Fig. 1 Geometry of deformation in xz plane

$$u = u_0 - z\frac{\partial w_0}{\partial x},\quad v = v_0 - z\frac{\partial w_0}{\partial y},\quad w = w_0(x,y) \qquad (2)$$

여기서, u_0, v_0, 및 w_0는 중심면의 x, y, z 방향 변위를 나타낸다.

얇은 층이 여러 개 적층된 적층판이 외부 하중을 받아 변형되었을 때, k 번째 층에서의 총 변형률, $\{\varepsilon'\}_k$ 은 적층판의 중심면의 변형률 $\{\varepsilon^0\}$과 곡률 $\{\kappa\}$로써 표현된다.

$$\{\varepsilon'\}_k = \{\varepsilon^0\} + z\{\kappa\} \qquad (3)$$

식 (3)에 표현된 변형률은 총 변형률로써 이는 탄성 및 비탄성 변형률을 동시에 포함하고 있다. 광조형 공정에서는 경화수축에 의한 비탄성 변형률이 발생하므로 탄성변형률, $\{\varepsilon^e\}_k$ 만을 계산하기 위하여 각 층의 경화수축에 의한 수축률, $\{\varepsilon^c\}_k$ 을 제거한다.

$$\{\varepsilon^e\}_k = \{\varepsilon^0\} + z\{\kappa\} - \{\varepsilon^c\}_k \qquad (4)$$

여기서, $\{\varepsilon^c\}_k$ 는 x 및 y 방향으로의 길이 변화만을 나타내고 전단변형은 없다. 첫 번째 층을 레이저로 주사하였을 경우에는 두 번째 층이 주사되기 전에 액체 수지 중에서 경화수축을 완료한 것으로 가정하였다. 식 (4) 에서 구한 탄성변형률을 식 (1)에 대입하면 아래와 같이 각 적층판에서의 응력과 변형률 관계식을 구할 수 있다.

$$\{\sigma\}_k = [\overline{Q}]_k \{\varepsilon^e\}_k \qquad (5)$$

한편, 적층판 전체에 작용하는 단위 길이 당 힘(f)과 모멘트(m)는 각 적층판에 작용하는 응력을 두께 전체에 걸쳐 적분함으로써 계산할 수 있다.

$$\{f, m\} = \sum_{k=1}^{n} \int_{h_{k-1}}^{h_k} \{\sigma\}(dz,\ zdz) \qquad (6)$$

여기서, $h_k - h_{k-1}$ 은 광조형 공정 시 층 두께를 나타낸다. 식의 전개를 위해 새로운 행렬 ($\{A\},\{B\},\{C\}$)을 다음과 같이 정의한다.

$$\{A,B,C\} = \sum_{k=1}^{n} \int_{h_{k-1}}^{h_k} [\overline{Q}]_k (dz,\ zdz,\ z^2dz) \qquad (7)$$

식 (5)와 식 (7)을 식 (6)에 대입하고 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} f \\ \cdots \\ m \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & \vdots & B \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ B & \vdots & C \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon^0 \\ \cdots \\ \kappa \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} A\varepsilon^c \\ \cdots \\ B\varepsilon^c \end{bmatrix} \qquad (8)$$

광조형 공정 시 제작물(적층판)에 작용하는 외부의 힘과 모멘트는 없으므로, 식 (8)로부터 중심면의 변형률과 곡률은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon^0 \\ \cdots \\ \kappa \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & \vdots & B \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ B & \vdots & C \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} A\varepsilon^c \\ \cdots \\ B\varepsilon^c \end{bmatrix} \qquad (9)$$

식 (9) 에서 적층판의 전체적인 곡률(κ)이 계산되면, Fig. 2 로부터 식 (10) 이 유도되고 최종적으로 식 (11) 에서와 같이 광조형 공정으로 적층 제작한 제작물의 곡률 변형(δ)을 예측할 수 있게 된다.

$$\rho(1-\cos\theta) = \frac{1-\cos\theta}{\kappa} = \delta \qquad (10)$$

$$\delta = \frac{1}{\kappa}\left(1 - \cos\left(\frac{\kappa l}{2}\right)\right) \qquad (11)$$

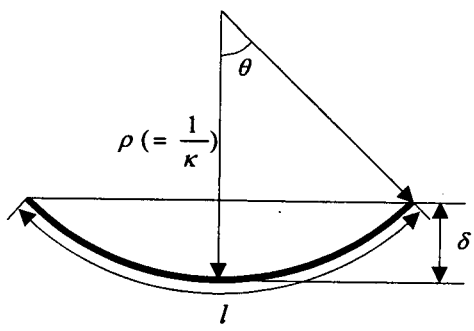


Fig. 2 Relationship between curvature and curl distortion

3. 실험 방법

실험에 사용된 쾌속조형 장비는 3D systems 社의 광조형 장비인 SLA-5000 이며, 공정변수 및 사용된 수지의 속성을 Table 1 에 나타내었다. 수축률(shrink factor)을 보정하기 위하여 크리스마스 트리 방법(Christmas tree method)[1] 을 실시하였다. 3D systems 社가 자체적으로 개발한 이 방법은 우선, Fig. 3 과 같이 두께와 너비와 길이의 비가 1:2:10 인 다양한 치수의 직사각형 슬랩(slab)을 보정없이 제작한 후 각 치수를 측정하고, 선형회귀법을 통해 측정된 다양한 치수의 수축 정도를 대표할 수 있는 각 방향 수축률 보정 계수(SCF, shrink conpensation factor)를 구하는 방법이다. 시험 결과 x, y 각 방향의 수축률은 각각 0.28%, 0.27% (SCF(x)=1.0028, SCF(y)=1.0027)로 계산되었다.

Table 1 Experimental conditions

Machine	Type	SLA5000 (3D systems)
	Laser Power	111mW
	Scan (Hatch) speed	223.3 in/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)
	(Total) Shrinkage	0.28% (X) 0.27% (Y)

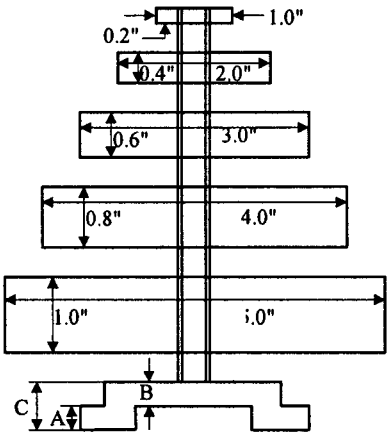


Fig. 3 CHRISTMAS-TREE™ diagnostic test part

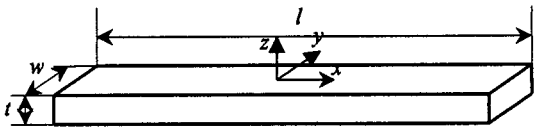
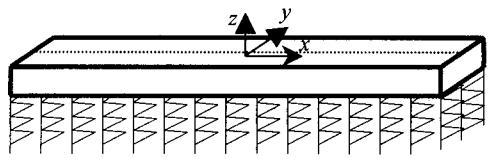
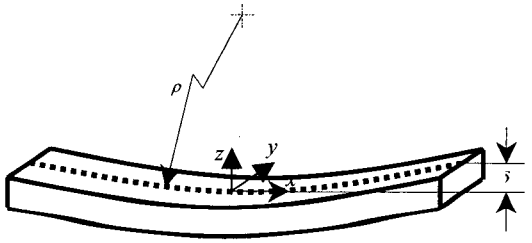


Fig. 4 Shape of experimental test part



(a) Before supports are eliminated



(b) After supports are eliminated

Fig. 5 Distortion of test part

Fig. 4 는 곡률 변형을 측정하기 위한 시편의 형상이다. 시편의 길이(l)는 300mm, 폭(w)은 10mm 로 고정하였으며, 두께(t)를 0.1mm 에서 10mm 까지 변화시켜가면서 두께 치수의 변화가 전체 곡률 변형에 미치는 영향을 고찰하였다. 또한 층 두께를 0.1mm 와 0.15mm 로 나누어 각각 시편을 제작하여 층 두께가 곡률 변형에 미치는 영향을 고찰하였다.

시편 제작을 완료하고 나면 알코올로 간단히 세척한 후 상온(20°C)에서 건조시키고 이 후 플랫폼(platform)에서 지지대(supports)를 분리하였다. 지지대 분리 후 내부 응력이 풀리면서 Fig. 5 에 보인 바와 같이 곡률 변형이 발생하기 시작하였으며 지지대 분리 후 약 1 시간이 경과한 후에 육안으로는 더 이상의 변형이 관찰되지 않았다. 변형이 안정화되었다고 판단되는 2 시간이 지난 뒤 3 차원 측정기(CMM) 을 이용하여 시편 윗면의 폭방향(y 방향) 중앙선(5mm 지점)을 따라 길이 방향으로 10mm 간격으로 측정하였다.

4. 결과 및 토의

Fig. 6 은 층 두께를 0.1mm 로 한 상태에서 층 수를 1, 2, 3 개로 증가시켜 부품의 두께 치수를 증가시키면서 광조형물 시편 제작을 완료한 후, 시편의 곡률 변형 정도를 촬영한 사진이다.

시편의 두께가 0.1mm 인 경우 하나의 층을 경화시키는 것 만으로 제작이 완료되고 이 때에는 액체 수지 내에서 지지대로부터 받는 약한 구속을 제외하고는 거의 자유로운 상태에서 수축을 완료하기 때문에 특정한 방향으로 발생하는 곡률 변형이 발생하지 않았다. 그러나 시편의 두께가 0.2mm, 즉 층 수가 2 개가 될 경우에는 약 80mm 의 곡률 변형이 발생하였는데, 이것은 이미 경화수축이 많이 진행된 아래층과 새로운 경화 수축이 발생하는 위층과의 수축률 차이가 발생하였기 때문에 마치 팽창률이 다른 두 개의 금속을 적층한 바이메탈 (bimetal) 원리와 비슷하게 곡률 변형이 발생한 것이다. 이러한 결과는 기존의 SL 공정에서 외팔보 (cantilever) 형상 실험에서 해석적으로 밝혀진 사실이다.[1] 시편의 두께가 0.3mm 일 경우에는 약 50mm 의 곡률 변형이 발생하였는데, 층 수가 증가하여 새로운 경화수축을 발생시키는 층의 개수가 더욱 증가할 경우에는 각 층의 경화 수축률은 일정하기 때문에 전체적인 길이 방향 수축률은 층 수에 관계없이 일정한 값을 가지게 되나, 층 수의 증가로 인해 곡률 변형을 억제시키는 횡방향 강성 (flexural rigidity)이 증가하게 되어 결과적으로 층 수가 증가할수록 곡률 변형은 감소하게 된다.

앞 장에서 전개한 고전적층이론을 적용하여 적층되는 층 수를 증가시켜가면서 시편의 두께 치수를 증가시킬 때 발생하는 길이 방향으로의 곡률 반경의 변화를 층 두께 0.1mm, 0.15mm 각각에 대해서 해석하였고, 그 결과를 Fig. 7 에 나타내었다. 해석 결과 시편의 두께 치수가 증가할수록 곡률 반경의 크기는 지수적으로 증가(곡률 변형의 크기는 지수적으로 감소)하는 것으로 나타났으며, 두께 치수가 같다고 할지라도 층 두께를 작게 하여 층 수를 증가시켜 제작할수록 곡률 반경의 크기는 증가(곡률 변형의 크기는 감소)하는 것으로 나타났다. 3D systems 社의 Hull[1] 은 레이저가 주사되어 액체 수지가 겔(gel) 상태에 도달했을 때 이전 층과 접착(adhere)되고, 이러한 겔 상태를 지나 수축이 발생하면 위층이 아래층에 비하여 더 많은 수

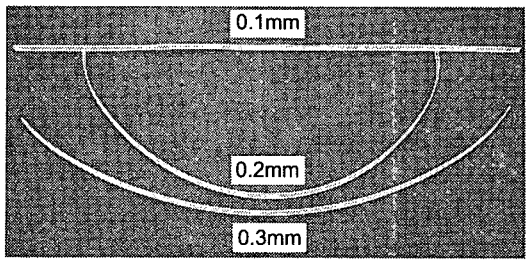
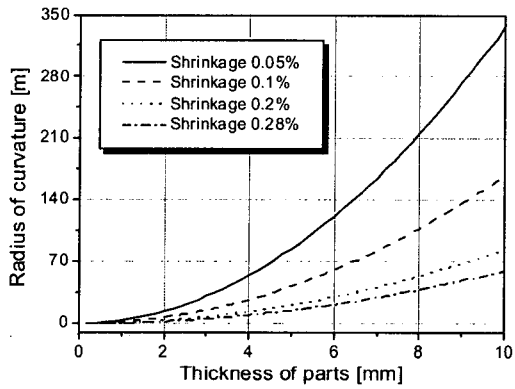
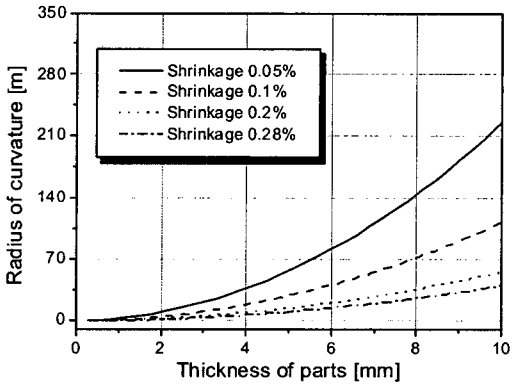


Fig. 6 Curl distortion of test parts according to part thickness (Layer thickness=0.1mm)



(a) Layer thickness = 0.1mm

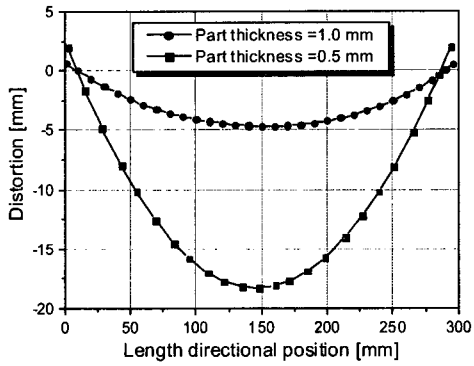


(b) Layer thickness = 0.15mm

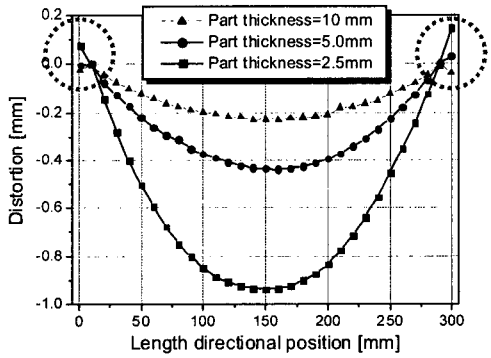
Fig. 7 Simulation results of the relationship between radius of curvature and thickness of the parts

축이 발생하기 때문에 위로 곡률 변형이 발생하게 된다고 가정하였다. 그는 이 가정을 근거로 곡률 변형에 대한 기초적인 모델을 세운 후, 곡률 변형의 크기는 시편 길이의 제곱에 비례하고, 층 두께에 반비례하고 수축률에 비례한다고 밝혔다. 그가 여기에서 말하는 수축률이란 응고수축과 열수축을 모두 포함하는 전체 수축률을 말한다. 본 연구 결과는 Hull 이 제시한 모델의 해석 결과와 부분적으로 일치하지만, 층 두께와 곡률 변형량과의 관계에 대해서는 서로 상이한 결과라고 하겠다.

액체 광경화 수지에 레이저를 주사하면 고체로 상변화되면서 응고수축이 발생하고, 에너지를 발산하는 중합반응에 의해 잠시 열팽창을 보이다가 다시 제작물이 냉각되면서 수축하는 것으로 알려져 있다.[2] 곡률 변형이 발생하는 원인은 레이저 주사로 새롭게 적층되는 층의 수축률이 이미 응고가 많이 진행된 아래층의 수축률보다 크기 때문에 발생한다. 수축은 수지가 액체에서 고체로 상변화할 때 비교적 짧은 시간에 발생하는 응고수축과 시편의 온도가 냉각함에 따라 시편 전체적으로 서서히 발생하는 열수축으로 구분할 수 있는데, 층간 수축률의 차이는 대부분 층간 응고수축률의 차이에서 발생한다. 따라서 상변화에 의한 응고수축률은 모두 곡률 변형에 영향을 미치지만, 온도 변화에 의한 열수축률은 모두가 곡률 변형에 영향을 미치지 않는다고 할 수 있다. 3D systems 社에서 제시하고 있는 크리스마스 트리 방법으로부터 계산한 수축률은 이러한 응고수축률과 열수축률 모두를 포함하는 값이므로 광조형 공정에서 곡률 변형을 정확하게 예측하기 위해서는 두 가지를 분리하여 적용할 필요가 있다. 그러나 광조형 공정에서 두가지 수축률을 분리하여 측정하기란 매우 어려운 일이다. 다만, 곡률 변형에 영향을 미치는 수축률은 크리스마스 트리 방법으로 측정한 전체 수축률보다는 작은 값이라는 사실은 명확하다. 본 연구에서 크리스마스 트리 방법으로 측정한 전체 수축률은 시편 길이방향(x 방향)으로 0.28% 였다. 따라서 곡률 변형에 영향을 주는 길이 방향 수축률이 0.28% 이하의 값을 가질 때 수축률 크기의 변화에 따른 곡률 변형량의 변화를 살펴보았다. 그 결과 Fig. 7 에서 보는 바와 같이 수축률과 곡률반경은 정확하게 반비례 관계로 나타났으며, 이로부터 식 (10), (11) 에 의해 수축률이 클수록 곡률 변형이 크게 발생함을 알 수 있다.



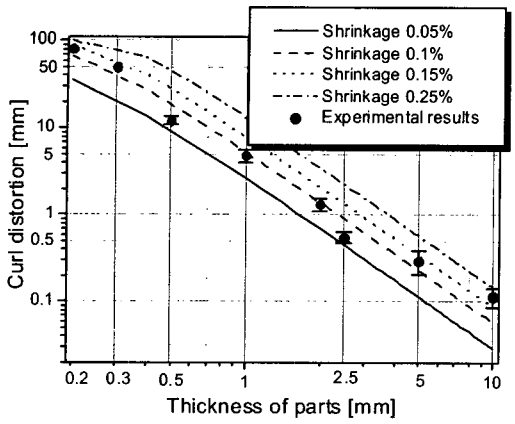
(a) Thickness of parts = 0.5mm, 1.0mm



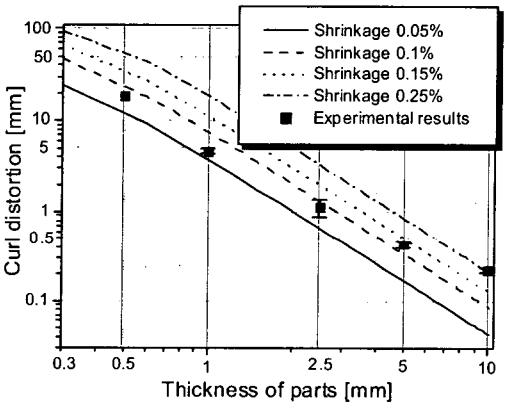
(b) Thickness of parts = 2.5mm, 5.0mm, 10.0mm

Fig. 8 CMM measurement results of deformed parts (Layer thickness=0.15mm)

Fig. 8 은 층 두께를 0.15mm 로 두고 층 수를 증가시켜 시편의 두께를 0.5mm 에서 10mm 까지 증가시켜가면서 제작한 후 변형된 형상을 CMM 으로 측정한 결과이다. 한 층의 두께가 0.15mm 이므로 시편은 엄밀하게 0.45mm 에서 10.05mm 등으로 제작되며, 이 경우 최대 0.05mm 의 제작 오차를 유발한다. 실험 결과 시편에는 일정한 곡률을 가지는 곡률 변형이 발생하였으며 두께가 얇을수록 크게 변형되었다. 시편 길이 방향 전체적으로 일정한 곡률을 가지는 것으로 나타났으나, 상대적으로 두께가 두꺼운 Fig. 8(b)의 경우 양단(0mm, 300mm) 근처(점선 원호로 표시)에서 꺾이는 형상이 나타났다. 이 또한 수축률과 관계가 있는 또



(a) Layer thickness = 0.1mm



(b) Layer thickness = 0.15mm

Fig.9 Simulation and experimental results of the relationship between the curl distortion and the thickness of parts

다른 현상이라고 판단되나 정확한 원인 규명을 위해서는 추가적인 연구가 필요하다.

Fig. 9 는 시편 두께와 곡률 변형량과의 관계에 대한 실험 및 해석 결과를 보여주고 있으며, 수축률의 변화에 따른 해석 결과도 함께 나타내었다. 시편 개수는 각 두께 별로 1 개에서 7 개까지 제작하였으며, 그림에서 표시한 실험 결과는 각 시편에 대해 곡률 변형의 측정값 또는 여러 개 제작하였을 경우에는 측정 평균값과 표준편차를 나타내고 있다.

곡률 변형은 두께 치수와 지수적인 관계를 가지므로 해석 결과와 실험 결과를 정확하게 비교하기 위해 두께 치수(x 축) 및 곡률 변형(y 축) 을 모두 로그 스케일(log scale) 로 나타내었다. 실험 및 해석 결과 두께 치수가 얇아질수록 곡률 변형량은 지수적으로 크게 증가하였으며, 층 두께를 두껍게 하여 제작할수록 대체적으로 곡률 변형이 크게 발생하였다.

실험 결과와 해석 결과를 비교해보면 전체 수축률 중 곡률 변형에 영향을 미치는 수축률의 크기를 추정할 수 있다. 전체 시편의 실험 결과를 모두 만족시키는 수축률을 정하기는 어려우며 특히 두께 치수가 10mm 인 경우 비교적 큰 오차가 발생하나, 전체적으로 수축률을 0.1% 로 두고 해석한 결과가 가장 실험 결과와 근접한 결과를 나타내고 있음을 볼 수 있다. 따라서 크리스마스트리 방법으로 계산한 x 방향 전체 수축률 0.28% 중 약 0.1% 정도만이 시편(제작물)의 곡률 변형을 유발시키는 수축률이라고 추정할 수 있다.

5. 결론

광조형 공정으로 제작한 부품에 발생하는 곡률 변형을 예측하고 이의 원인을 규명하기 위하여 고전적층이론을 적용하여 곡률 반경 추정을 통한 곡률 변형 정도를 예측하였고, 실험을 통해 길이 방향의 곡률 변형을 측정하였다. 제작물의 두께 치수가 증가할수록 곡률 변형량은 지수적으로 감소하였고, 층 두께를 크게 하여 제작할 수록 곡률 변형량은 증가하였으며 이는 실험 결과와 잘 일치하였다. 크리스마스 트리 방법으로 측정한 각 방향 수축률은 응고수축률과 열수축률 모두를 포함하고 있으나, 전체 수축률 중 일부분 만이 층간 수축률 차이에 의한 곡률 변형을 유발시킨다. 고전적층이론을 적용하여 해석한 결과와 실험 결과를 비교해본 결과, 길이 방향 전체 수축률 0.28% 중 약 0.1% 정도의 수축률 만이 곡률 변형을 유발시키는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. Jacobs, P. F., "Rapid Prototyping & Manufacturing –

Fundamentals of StereoLithography," SME, pp. 38-48, pp. 249-284, 1992.

2. Narahara, H., Tanaka, F., Kishinami, T., Igarashi, S. and Saito, K., "Reaction heat effects on initial linear shrinkage and deformation in stereolithography," Rapid Prototyping Journal, Vol. 5, No. 3, pp. 120-128, 1999.
3. Park, S. R. and Park, D. S., "Forming Error and Compensation in RP using SLA," J. of the KSPE, Vol. 19, No. 3, pp. 152-159, 2002.
4. Dai, K. and Shaw, L., "Distortion minimization of laser-processed components through control of laser scanning patterns," Rapid Prototyping Journal, Vol. 8, No. 5, pp. 270-276, 2002.
5. Bugeda, G., Cervera, M., Lombera, G. and Onate, E., "Numerical analysis of stereolithography processes using the finite element method," Rapid Prototyping Journal, Vol. 1, No. 2, pp. 13-23, 1995.
6. Huang, Y. M. and Jiang, C. P., "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, 2003.
7. Jones, Robert M., "Mechanics of Composite Materials," Scripta Book Company, pp.45-47, pp. 148-156, 1975.
8. Ahn, S. H., Lee, C. S., Baek, C. G. and Chu, W. S., "Strength Prediction Model of Rapid Prototyping Parts – FDM," J. of the KSCM, Vol.15, No. 6, pp. 38-43, 2002.