

SL 광조형 공정에서 제작물 치수와 지지대 구조가 형상오차에 미치는 영향

김기대*

(논문접수일 2005. 11. 28, 심사완료일 2006. 2. 14)

Effects of Dimension of Part and Structure of Supports on the Shape Error in Stereolithography Process

Kim Gi Dae*

Abstract

During stereolithography processes, the shape errors such as curl distortion and distortion of side face are generated due to the shrinkage of liquid resins. In this study, the effects of dimension of part and structure of supports on the shape error are examined. Cubic specimens which have different thicknesses are manufactured and their deformations are measured with CMM. Thicker part generates smaller curl distortion of top face and larger of bottom face. Also thicker part generates larger distortion of side face until part thickness increases to about 20mm. Larger stiffness of supports which is obtained by shorter spacing of the supports and line type contact instead of point type contact generates smaller shape error of the part.

Key Words : Stereolithography(광조형), Shape error(형상오차), Curl distortion(곡률변형), Shrinkage(수축률), Stiffness of supports(지지대 강성)

1. 서론

1987년 3D systems사에 의해서 처음 상용화된 패속조형(RP, Rapid Prototyping) 기술은 미세두께의 단면 형상을 연속적으로 적층하여 원하는 3차원 형상을 얻는 공정이다. 패속조형은 액체 수지(resin)의 광경화성 성질을 이용하는

광조형공정(SLA, Stereo Lithography Apparatus), ABS(Acrylonitrile Butadiene Styrene copolymer) 수지의 열가소성 성질을 이용하는 용착적층공정(FDM, Fused Deposition Modeling), 레이저로 PA(poly-amid) 또는 GF(glass filled nylon) 등의 분말재료를 소결하여 제작하는 선택적 레이저 소결(SLS, Selective Laser Sintering) 방식, 분말재료에 접

* 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부 (gidkim@cu.ac.kr)
주소: 712-702 경상북도 경산시 하양읍 금락리 330

착제(binder)를 도포하여 잉크젯 방식으로 적층하는 3차원 프린팅 공정(3DP, Three Dimensional Printing) 등 다양한 방식이 개발되었다. 현재는 제조업에서의 시제품 개발뿐 아니라 나노기술 분야, 전기전자 분야, 의학 분야, 장신구 분야 등으로 응용분야를 넓혀가고 있다. 이렇게 다양한 방식으로 제작된 시제품들은 각각 인장강도, 경도, 내충격강도 및 내열성 등 기계적 성질이 다르고 표면거칠기, 투명도, 기계적 가공성 등의 성질이 다르며, 정밀도, 제작 속도 및 재료비용 등에 있어서 매우 넓은 범위에 걸쳐 다양한 특성을 가지고 있기 때문에 현재는 각각의 제작방식이 가지고 있는 특성에 맞는 분야에서 특화되어 응용되고 있다고 할 수 있다⁽¹⁾.

여러 가지 패속조형 방식 중 광조형(SL) 방식은 제작 정밀도가 뛰어나며 내부를 투명하게 제작할 수 있는 유일한 방식이고 제작 속도가 상대적으로 빠르기 때문에 널리 이용되고 있다. 하지만 광조형 공정의 특징인 액체수지의 상변화 및 온도변화에 의한 수축작용이 제품의 형상 및 치수정밀도를 저하시킨다고 알려져 있다⁽²⁻⁶⁾. 제품 전체적으로 균일하게 수축하여 치수 정밀도에 영향을 주는 인자는 사전에 수축률을 보정(calibration)해 주는 단계를 거침으로써 해결할 수 있다. 하지만 곡률변형(curl distortion) 또는 특정한 일부분의 변형과 같은 형상 정밀도에 영향을 주는 인자는 보정이 거의 불가능하다. 따라서 광조형 공정에서 형상오차에 영향을 미치는 원인을 파악하고 이의 경향을 확인하는 작업은 대단히 중요하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 다양한 치수를 가지는 직육면체 형상의 기본 시편을 광조형 공정으로 제작하고 3차원 측정기로 이들의 형상변화를 측정함으로써 시편 치수의 변화가 형상정밀도에 미치는 영향을 고찰하였다. 그리고 지지대(supports)의 구조를 다양하게 변화시켜가면서 시편을 적층함으로써 지지대 강성의 변화가 시편(제품)의 형상변화에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 수축현상에 의한 형상오차

2.1 곡률변형

Fig. 1에서 보는 바와 같이 광조형 공정에서 하나의 층(layer)이 주사(scanning)되면 액체 수지의 상변화 과정으로 인해 일정한 수축률로 수축된다. 액체 수지의 표면에 레이저로 길이방향으로 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. 그 위에 새로운 층이 다시 L 만큼 주사되어

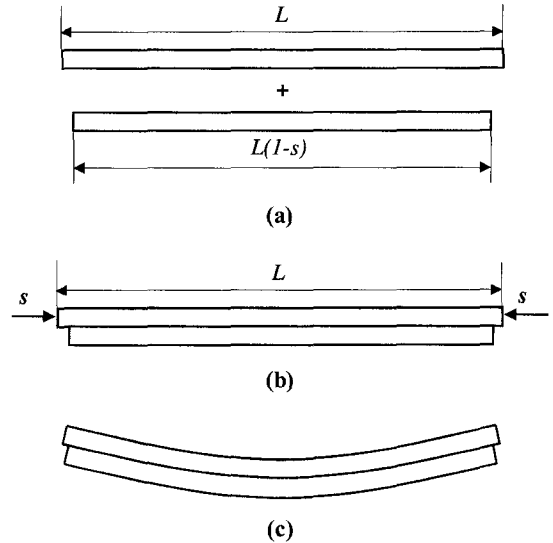


Fig. 1 Process of curl distortion

아래층과 결합되는 과정에서 수축이 이미 많이 진행된 아래층과 새로운 수축이 발생하는 위층 간에는 수축률의 차이가 발생하게 되고 이로 인해 수축률이 큰 방향으로 굽어지는 변형이 발생하는데, 이러한 변형오차를 곡률변형 혹은 뒤틀림변형(warpage)에 의한 오차라고 정의한다⁽²⁾.

2.2 수직면 변형

Fig. 2에서 보이는 바와 같이 길이 L 만큼 레이저로 첫 번째 층을 두께 l_0 로 주사하면 이와 결합되어 있는 높이 h_0 의 아래 지지대가 수지의 수축에 저항하는 작용을 하지만, 액체 수지의 수축력은 이러한 저항력보다 커서 수축이 발생한다. Fig. 3과 같이 그 위에 또 다시 길이 L 만큼 레이저로 주사하여 두 번째 층을 응고시켜 첫 번째 층과 결합시키면 이미 수축이 많이 진행된 첫 번째 층의 길이에 해당하는 중앙부분 L_1 만큼은 지지대와 두 층으로 결합된 후 수축하게 되지만, 첫 번째 층과 결합되지 않고 가장자리에 위치한 $(L-L_1)=L_2$ 에 해당하는 길이는 하나의 층으로 구속이 자유로운 상태에서 수축하게 되며 결과적으로 이 크기만큼 두 번째 층이 첫 번째 층보다 길어지게 된다. 마찬가지로 순차적으로 적층해 나갈 때 k 번째 층이 적층되었을 경우 중앙 부분은 지지대 및 k 개 층이 모두 결합된 채 수축하고 이 부분의 길이는 현재까지 누적된 수축률과 곱해져서 나타나게 된다. 두 번째 층부터 계속해서 남은 가장자리 부분의 영향으로 위층은

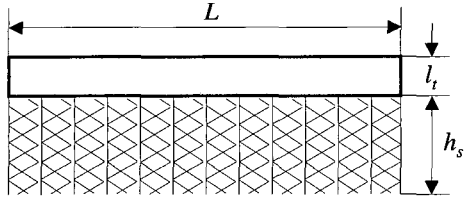


Fig. 2 First layer and supports

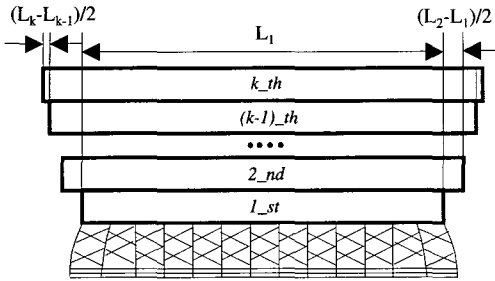


Fig. 3 Variation of length of sequential layers

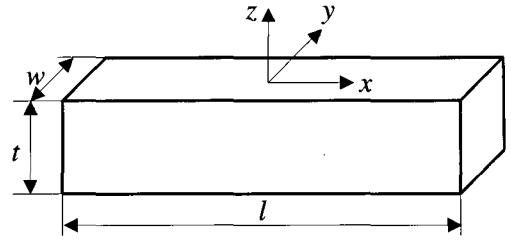
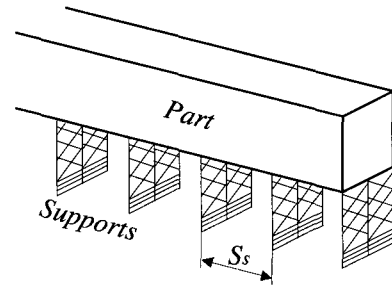
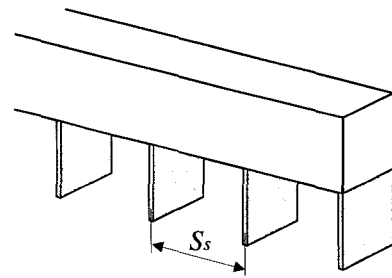


Fig. 4 Specimen used in experiments



(a) Point type contact



(b) Line type contact

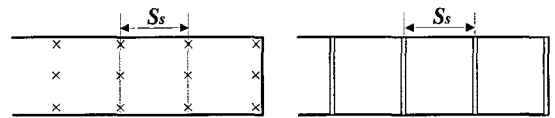
Fig. 5 Structures of supports

아래층에 비하여 길어지지만 그 증가율은 현저히 감소하게 된다. 이러한 영향으로 수직면 가장자리는 아래층으로 갈수록 길이가 짧아지는 형상오차를 가지게 된다.

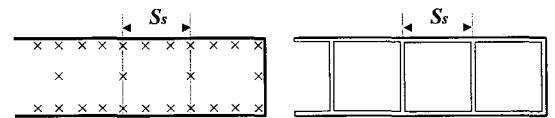
3. 실험 방법

실험에 사용된 RP 머신은 3D systems 사의 SLA5000 이며, 액체 수지는 에폭시(epoxy) 계열의 Somos11120 이다. Fig. 4와 같은 직육면체 형상의 시편을 제작함에 있어서 층 두께(layer thickness)는 0.15mm로, 길이(l) 및 너비(w)는 각각 200mm, 5mm로 고정하고 두께(t)는 5, 10, 20, 40, 80mm로 변화시켜가면서 형상변화를 관찰하였다.

Fig. 5에 나타난 바와 같이 지지대의 구조를 변화시키고, 또한 Fig. 6에 나타난 바와 같이 지지대의 분포를 변화시켜가면서 부품을 제작함으로써 지지대의 강성이부품의 형상오차에 미치는 영향을 고찰하였다. Fig. 5 (a)는 아랫면과 지지대가 점접촉을 하면서 결합되어 있는 상태이고 Fig. 5 (b)는 선접촉을 하면서 결합되어 있는 상태를 보여주고 있다. Fig. 6은 아랫면과 지지대가 접촉하고 있는 상태를 제작물 아래 방향에서 본 상태를 나타낸 것으로서, 광조형 공정에서 가장 일반적으로 사용되고 있는 지지대 구조는 Fig. 6 (b) 왼쪽 그림과 같은 구조로 지지대가 아랫면에 점접촉으로 등간격으로 분포되는 것 이외에 아랫면 가장자리를 따라 지지대가



(a)



(b)

Fig. 6 Distributions of supports

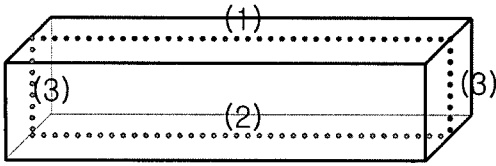


Fig. 7 Measurement points by CMM

분포되는 구조이다. 제작물의 수축에 저항하는 지지대의 강성의 변화에 따른 형상오차의 변화를 관찰하기 위하여 지지대 간격(s_s , supports spacing)을 7, 5, 3mm로 변화시키고 적층하였으며, Fig. 6과 같이 지지대의 분포를 변화시켜가면서 적층되는 제품의 형상오차의 변화를 관찰하였다.

시편의 형상오차 측정은 3차원측정기(CMM, Coordinate Measuring Machine)를 이용하였다. 적층이 완료된 후 세척과 건조과정을 거쳐 1시간 동안 후경화(postcuring)를 하여 완전히 경화시킨 후 측정하였다. 측정 위치 및 방향은 Fig. 7에 보이는 바와 같이 (1) 윗면의 곡률 변형을 측정하기 위해 길이방향으로 중앙부분을 따라 측정하였고, (2) 지지대와 접촉하고 있는 맨 아랫면의 곡률 변화를 측정하기 위하여 아랫면 중앙선을 따라 측정하였다. 그리고 (3) 적층 높이에 따른 형상 변화를 측정하기 위하여 길이방향 양끝 면에서 높이방향으로 중앙선을 따라 측정하였다.

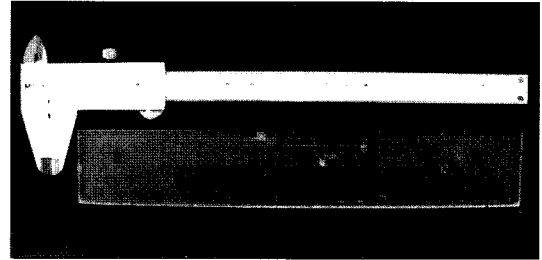
4. 실험 결과 및 토의

4.1 곡률변형

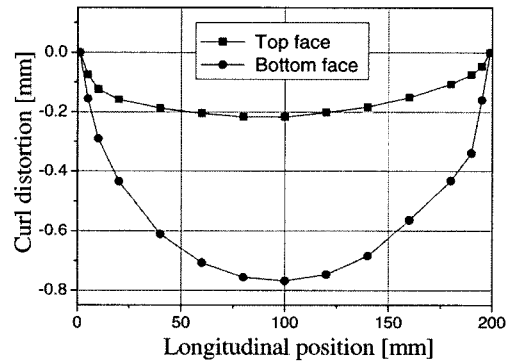
Fig. 8 (a)는 길이 200mm, 너비 5mm, 두께 40mm의 직육면체 형상의 시편을 제작한 후 완성된 시편의 변형된 형상을 나타낸 사진이다. Fig. 8 (b)는 이 시편을 CMM을 이용하여 Fig. 7에 나타난 (1)과 (2) 방향으로 측정함으로써 시편의 윗면과 아랫면의 곡률변형을 측정한 결과이다. 수지의 수축에 의해 윗면에서는 약 0.22mm, 아랫면에서는 약 0.77mm의 곡률변형이 발생하였음을 알 수 있다.

Fig. 9는 시편의 두께를 5mm에서 80mm까지 증가시켜가면서 윗면과 아랫면의 곡률변형의 크기를 측정한 결과이다. 측정 결과 두께가 20mm 이상일 경우 Fig. 8 (b)에 나타난 바와 같이 시편의 아랫면에서 아래로 볼록한 곡률변형이 뚜렷하게 발생하였으며 두께가 두꺼워질수록 수축률의 차이로 인해 발생하는 곡률변형 효과가 누적되어 아랫면 곡률변형은 더욱 크게 발생하였다. 반면 시편 두께가 두꺼워질수록 시편의 굽힘 강성이 증가하게 되고 이는 윗면에 나타나는

곡률변형의 감소를 초래하게 된다⁽⁴⁾. 전체적으로는 두께가 증가할수록 윗면의 곡률변형은 감소하는 경향을 보였으나, 시편 두께가 10mm에서 20mm로 증가할 때 윗면의 곡률변형이 오히려 증가한 것은 이 두께에서 아랫면의 곡률변형이 큰 폭으로 증가한 것과 관련이 있는 것으로 판단된다.



(a) Photograph



(b) Curl distortion

Fig. 8 Curl distortions of top and bottom faces of the specimen($l=200\text{mm}$, $w=5\text{mm}$, $t=40\text{mm}$)

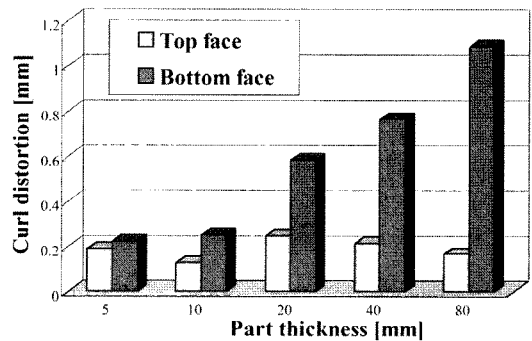


Fig. 9 Curl distortions of top and bottom faces according to the part thickness

4.2 수직면 형상

Fig. 10은 길이 200mm, 너비 5mm, 두께 5mm의 시편을 제작하고, 플랫폼(platform) 위에서 지지대와 결합되어 있는 상태를 보여주고 있다. 아랫면과 결합되어 있는 지지대는 아랫면의 수축방향(길이방향)으로 변형되어 있으며, 시편의 윗면에 비해 아랫면의 길이가 짧아진 상태를 보여주고 있다. 이는 결과적으로 양 끝에 있는 수직면의 형상오차를 야기하게 된다. 이러한 수직면의 프로파일(profile)을 CMM으로 측정된 결과를 Fig. 11 (a)에 보여주고 있으며, 이 경우 윗면과 아랫면의 길이 차이는 약 1.26mm 정도 발생하였다. Fig. 11 (b)는 시편 두께를 20mm로 증가시켰을 때 발생 수직면 형상을 측정된 결과이며, 이 경우 윗면과 아랫면의 길이 차이는 약 1.67mm 정도 발생하였다. Fig. 11에서 알 수 있는 바와 같이 대부분의 수직면 형상오차는 아랫면 근처 3~4mm 이내에서 발생하고 있다.

Fig. 12은 시편 두께를 5mm에서 80mm 까지 증가시켜가면서 윗면과 아랫면의 길이 차이, 즉 시편 양 끝 수직면의 형상오차를 측정된 결과이다. 측정 결과 시편 두께가 20mm 가 될 때까지는 두께가 증가할수록 윗면과 아랫면의 길이 차이가 증가하여 수직면의 형상오차가 증가하는 것으로 나타났으나, 두께가 이보다 더욱 증가하면 시편의 두께가 증가하더라도 수직면의 형상오차에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. Fig. 11과 Fig. 12의 결과로부터 SL 광조형 공정에서 제작물이 적층될 때, 아래층으로부터 3~4mm가 적층될 때까지 주사되는 최상층에서 발생하는 수축은 지지대와 결합되어 있는 최하층까지 영향을 미치고, 시편 두께가 증가하여 시편 강성이 증가하면 최상층의 수축이 최하층에 미치는 영향이 점차 줄어들며, 시편 두께가 20mm 이상이 되면 최상층의 수축은 최하층에 거의 영향을 미치지 않는다는 것

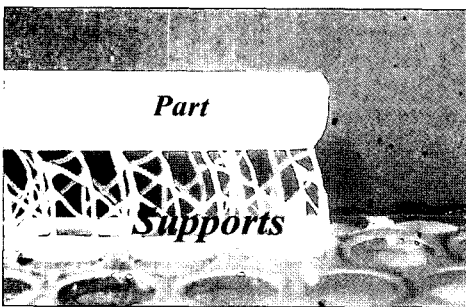
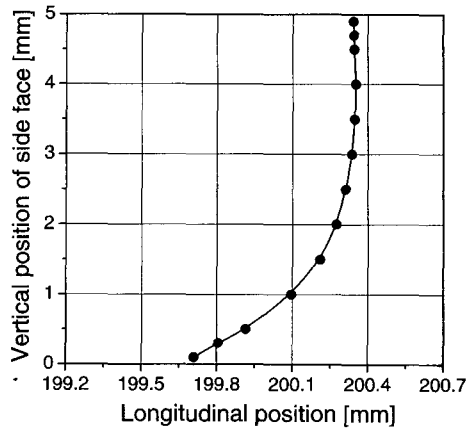
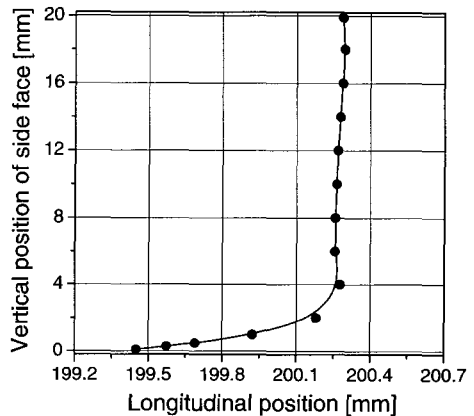


Fig. 10 Photograph of distorted part and supports around the end region($l=200\text{mm}$, $w=5\text{mm}$, $t=5\text{mm}$)



(a) $l=200\text{mm}$, $w=5\text{mm}$, $t=5\text{mm}$



(b) $l=200\text{mm}$, $w=5\text{mm}$, $t=20\text{mm}$

Fig. 11 End profiles of side face

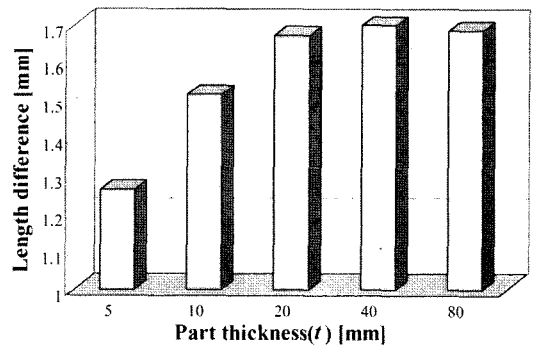


Fig. 12 The variations of length difference between top face and bottom face according to the part thickness

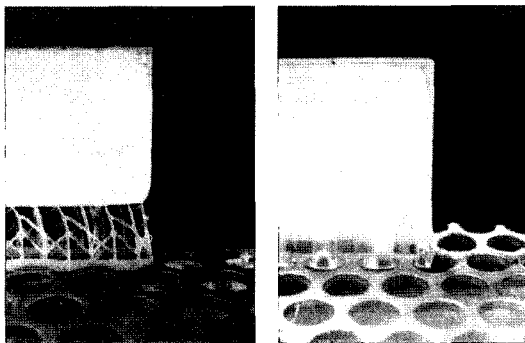
을 알 수 있다.

4.3 지지대 강성에 따른 형상오차

지지대의 형상과 분포의 변화로 인한 지지대 강성의 변화가 제작물의 형상오차에 어떠한 영향을 미치는지 관찰하기 위하여 Fig. 5와 Fig. 6에서 설명한 바와 같이 지지대의 형상 및 분포를 변화시켜가면서 시편 형상오차의 변화를 측정하였다.

Fig. 13은 지지대 간격을 3mm로 하고 지지대 구조를 Fig. 6 (b)와 같이 하였을 경우 수직면의 형상 변화를 나타낸 사진이다. Fig. 13 (a)와 같이 점접촉으로 지지대를 분포시켰을 경우에는 시편의 윗면과 아랫면의 길이 차이가 발생하여 적층방향에 평행한 수직면의 형상이 기울어지는 변형이 발생하였으나, Fig. 13 (b)와 같이 지지대의 간격과 분포는 Fig. 13 (a)와 같으나 점접촉이 아닌 선접촉으로 변경하여 지지대의 강성이 높은 구조일 경우에는 수직면의 변형은 거의 발생하지 않음을 확인할 수 있다.

Fig. 14는 지지대 구조(간격과 접촉 형태)에 따른 윗면의 곡률변형(중앙부분의 최대 변형값)의 변화를 나타내고 Fig. 15는 수직면 형상오차(윗면과 아랫면의 길이 차이)의 변화를 나타낸 것이다. 지지대 간격이 좁아질수록, 점접촉 구조보다는 선접촉 구조가 될 수록, 그리고 지지대 간격이 3mm로 같을 지라도 Fig. 6 (a)와 같은 구조보다는 Fig. 6 (b)처럼 아랫면 가장자리를 모두 지지하는 구조일수록 지지대의 등가 강성(equivalent stiffness)이 증가하게 되고 따라서 수축에 대한 저항이 증가하여 액체수지의 수축에 의해 발생하는



(a) Point type contact (b) Line type contact

Fig. 13 Comparison of end profile of parts between point type and line type supports($l=200\text{mm}$, $w=5\text{mm}$, $t=20\text{mm}$)

곡률변형과 수직면 형상오차는 모두 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 제작물의 형상정밀도를 향상시키기 위해서는 강성이 큰 구조로 지지대를 분포시켜야 함을 알 수 있다. 특히 Fig. 13 (b)에 나타난 바와 같이 강성이 매우 큰 구조를 가지는 지지대로 적용한 경우 곡률변형은 상대적으로 매우 작게 발생하고 수직면 형상오차는 거의 발생하지 않음을 확인하였다. 그러나 이러한 선접촉을 가지는 형상으로 지지대를 분포시키고 제작물의 적층을 완료한 후 지지대를 제거할 경우에는, Fig. 16 (a)에서의 점접촉 지지대 구조처럼 매끄럽게 제거되지 않고, Fig. 16 (b)에서처럼 지지대 제거 시 지지대와 결합되어 있던 제작물의 모서리 부분이 파손되기 쉽기 때문에 이러한 지지대 구조를 실제적으로 적용시킬 경우에는 주의를 기울여야 하는 구조임을 알 수 있었다.

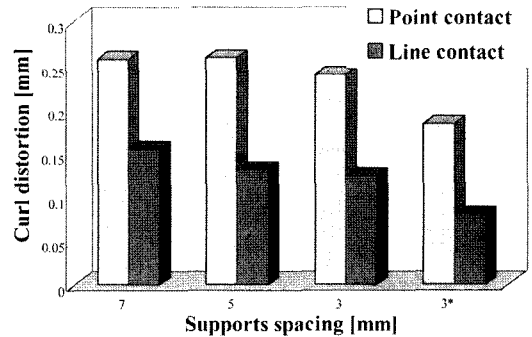


Fig. 14 Curl distortions of top face according to the supports distribution(* means the structure of Fig. 6(b))

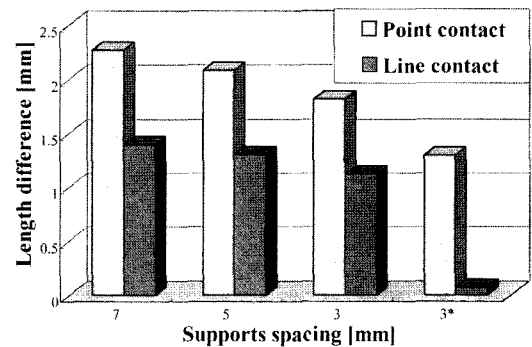
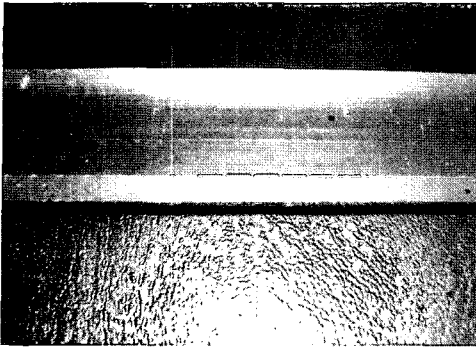
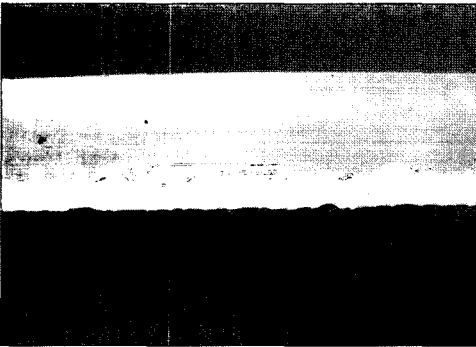


Fig. 15 The variations of length difference between top face and bottom face according to the supports distribution



(a) Point type contact



(b) Line type contact

Fig. 16 Photography of bottom surface after supports are removed

5. 결론

SL 광조형 공정으로 직육면체 형상의 시편을 치수 및 지지대 구조를 변화시키면서 제작하고 3차원 측정기로 형상 오차를 측정할 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 적층 방향에 수직한 아랫면과 윗면에서 곡률변형이 발생하였으며, 윗면은 시편이 얇을수록, 아랫면은 시편이 두꺼울수록 더욱 큰 변형이 발생하였다.
- (2) 적층이 진행됨에 따라 층간 수축률의 차이로 인해 층간 길이가 달라지고, 이 현상이 누적되어 적층 방향과 평행한 수직면은 기울어진 형상으로 나타났으며, 이러한 현상은 지지대와 결합하고 있는 아랫면으로부터 3~4mm

이내에서 집중적으로 발생하였다.

- (3) 곡률변형과 수직면 형상변형과 같은 형상 정밀도 오차는 지지대의 강성에 매우 큰 영향을 받았으며, 강성이 큰 구조로 지지대가 분포되어있을 때는 시편의 형상정밀도가 크게 향상되었다.

NOMENCLATURE

- s : Shrinkage of resin
 l : Length of test specimen
 w : Width of test specimen
 t : Thickness of test specimen
 l_t : Layer thickness
 s_s : Spacing of supports
 h_s : Height of supports

참고 문헌

- (1) Ahn, D. G. and Yang, D. Y., 2005, "Principle of Rapid Prototyping and its Trends," *Journal of KSPE*, Vol. 22, No. 10, pp. 7~16.
- (2) Jacobs, P. F., 1992, *Rapid Prototyping & Manufacturing Fundamentals of Stereolithography*, SME, pp. 38~48, pp. 249~284.
- (3) Kim, G. D. and Oh, Y. T., 2005, "Experimental Investigation on the Distortion Error induced by Shrinkage in Stereolithography Process," *Journal of KSMTE*, Vol. 14, No. 6, pp. 61~67.
- (4) Kim, G. D., Sung, J. H. and Kim, S. M., 2005, "A Study on the Build Distortion in Stereolithography Apparatus," *KSMPE Spring Conference*, pp. 138~141.
- (5) Kim, G. D., 2005, "A study on the Shape Accuracy in Stereolithography Process," *KSMPE Autumn Conference*, pp. 184~188.
- (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.