

# SLA 를 이용한 쾌속조형시 성형오차와 보정

박상량\*, 박동삼\*\*

## Forming Error and Compensation in RP Using SLA

Sang Rhang Park\*, Dong Sam Park\*\*

### ABSTRACT

SLA (Stereolithography Apparatus) is a process used to rapidly produce polymer components directly from a computer representation of the part. Though SLA is being recognized as an innovative technology, it still cannot be used to fully practical application since it lacks of dimensional accuracy compared to conventional process. If the shrinkage were perfectly uniform and no distortion took place, excellent part accuracy could still be achieved through an appropriate scaling factor when generating the build file. However, in certain geometries involving intersecting thick and thin sections, nonuniform resin shrinkage becomes the engine of part distortion. In order to improve the part accuracy of SLA, this paper evaluates how largely each parameter of SLA contributes to the part accuracy and estimates the optimal set of parameter which minimizes the dimension error of the test part, "Slab (100mm×100mm×2mm)" and "scale bar" part. Three control parameters such as critical exposure, penetration depth and fill cure depth are used.

**Key Words :** SLA(광조형장치), Rapid prototyping(쾌속조형), Forming error(성형오차), Error compensation (오차보정), Shrinkage rate(수축률), Curl distortion(휨)

### 1. 서론

SL(Stereolithography)은 쾌속조형방법의 일종으로 한 층씩 적층하는 층별 성형법에 의하여 짧은 시간 내에 CAD 데이터로부터 3 차원 형상의 시제품을 만들어 내는 방법이다. 이는 기존의 절삭방법에 비해 매우 짧은 시간으로 제품을 만들 수 있으며 아무리 복잡한 형상도 성형이 가능하다는 장점과 제품개발 초기 단계에서 설계상의 오류나 실제로 대량생산에 적합하지 못한 요인을 조기에 발견하는 시제품의 제작에 적합하다.

쾌속시작체계(RP & Manufacturing System) 중에서도 SLA(Stereolithography Apparatus)는 많은 기술적 발전을 보이고 있는데 SLA를 이용하여 조형한 3차원 불체는 시제품으로서의 마스터 모델 뿐만 아니라 주조품의 주형 제작 등에도 널리 활용되고 있다. 그러나 여전히 한정된 응용부분에만 적용되고 있는데 이는 광조형공정에서 사용될 수 있는 재료가 광경화성 재료에 한정되어 있고, 제품의 형상이 충분한 정확도를 갖지 못하기 때문이다. 물론, 과거에 비해 형상 정확도가 좋아지긴 했으나 정밀한 제품에 적용하기는 아직도 무리가 있다

\*\*\* 2001년 10월 8일 접수  
\* ㈉ 진영정기 생산기술연구소  
\*\* 인천대학교 기계공학과

최근 들어 요구되는 형상이 더욱 얇고 정밀해지므로 광조형공정에서 요구되는 형상도 더욱 고정밀도의 것을 필요로 하고 있는데 광조형공정에 있어서 조형정밀도의 향상은 실제로 광조형공정이 기계가공을 대체할 수 있느냐 하는 측면에서 가장 중요한 인자 중 하나이다. 즉, 향후 산업계에서 보다 널리 사용되기 위해서는 제작시간을 줄이면서도 변형을 방지하고 형상정밀도를 향상시킬 수 있는 방법이 절대적으로 요구되고 있다.

따라서, 광조형시 공정중에 발생하는 형상오차를 줄이는 연구가 필요하며 지금까지 발표된 연구들은 크게 3가지로 분류될 수 있다.

첫째, 수지의 개발에 관한 연구로 기존의 아크릴 수지에서 에폭시 수지로의 전환은 더 좋은 형상정밀도를 가진다는 것이 밝혀졌다.<sup>(1)(2)</sup>

둘째, 하드웨어와 소프트웨어의 형상에 관한 연구로 형상정밀도 향상을 고상능 서보 제어기와 레이저 스캐닝 시스템의 개발에 따라 레이저의 빔의 보다 정확한 수준 확보로 정밀한 제품을 만들 수 있도록 하였다.<sup>(3)</sup>

마지막으로 최적의 공정변수 선정에 의한 형상정확도의 향상에 관한 연구로, Pahati와 Dickens<sup>(4)</sup>는 주어진 해치간격(hatch spacing)에 대해 최적의 층 두께가 존재한다는 것을 밝혔고, Chertoff 등<sup>(5)</sup>은 수축과 뒤틀림은 적절한 레이저 스캐닝 속도에 의하여 줄여질 수 있다는 것을 보였으며, Jaynti 등<sup>(6)</sup>은 공정변수로 층(layer) 두께, 해치 과경화(hatch overcure), 필큐어 깊이(fill cure depth)를 선정하여 다구찌 실험계획법을 이용하여 세 공정변수의 상대적인 기여도를 정량적으로 구하였다.

그 외의 연구들로는 中川 등이 광조형의 경화프로세스에 있어서 수축은 경화물 내부에 불균일한 노광량 분포로 발생한다는 가정 하에 선상의 경화물을 대상으로 FEM 시뮬레이션을 시도하였으며<sup>(7)</sup>, 경화과정 중에 액체수지가 어떻게 이동하는가에 대해서 에폭시수지에 BN가루를 섞어 비디오로 촬영하여 단일경화선 및 경화시 그 주변상황에 대하여 연구하였다.<sup>(8)</sup> 도시바의 足立 등<sup>(9)</sup>은 광조형에 있어서 정밀도를 저하시키는 요인을 규명하기 위하여 수축현상을 실시간으로 측정하였는데 주사패턴을 한 방향 지그재그와 십자방향의 2가지를 사용하여 비교하였다.

본 연구에서는 형상오차에 영향을 주는 공정변수를 선정하여 이를 통하여 광조형 제품에서 발생

하는 휨(curl distortion) 및 수축률(shrinkage ratio)을 최소화하고자 한다. 이를 위하여 형상오차에 영향을 주는 조형공정의 제어변수로 수지정보를 나타내는 한계 노광량(critical exposure)과 광투과 깊이(penetration depth) 및 필큐어 깊이를 선정하였으며 세 공정변수의 상대적인 기여도를 정량적으로 구하였다. 실험용 시편은 평판(slab) 형상과 여러 종류의 스케일바(scale bar)를 사용하였다.

## 2. 광조형공정의 변수

### 2.1 주사속도

수지를 균일한 광으로 액면 위에서 수직으로 광조사할 때, 액면으로부터의 깊이를  $z$ 로 하면, 이 깊이에서 노광량  $E$ 는 다음 식으로 표현된다.

$$E(z) = E_0 \exp(-z/D_p) \quad (1)$$

여기서,  $D_p$  : 수지의 광투과 깊이

중합반응이 시작되는 노광량  $E$ 의 경계값을  $E_c$ 로 하면, 이 값이  $E$ 가 넘는 범위의 깊이에서 경화가 일어난다.  $E_c \leq E(z)$  라 두면, 경화의 범위는

$$z \leq D_p \ln(E_0/E_c) \quad (2)$$

가 되며 등호가 성립하는  $z$ 값이 경화깊이로 이를  $C_d$ 로 두면 다음과 같이 표현된다.

$$C_d = D_p \ln(E_0/E_c) \quad (3)$$

즉, 경화 깊이는 액표면에서의 노광량  $E_0$ 의 대수에 비례하여 증가한다.  $E_0$ 와  $C_d$ 의 관계를 나타내는 실험곡선은 수지의 종류에 따라서 다르며 식(3)은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$C_d = D_p \ln E_0 - D_p \ln E_c \quad (4)$$

여기서,  $E_0$ 를 대수순급으로 하면 경화깊이를 나타내는 곡선은 직선이 되고 그 기울기가  $D_p$ 이다.

식(4)의 제 2 항은 경화저해를 나타내고  $C_d$ 가 양이 될 때까지  $E_0$ 가 증가하면 경화가 시작된다. 따라서,  $E_c$ 는 수지의 감광도를 나타내는 변수의 하나이다. 경화 저해의 주요인은 산소이므로 산소

에 의한 저해가 없다면 적은  $E_C$  량에서  $C_d$  가 정수로 되어 바로 경화가 시작된다. 라디컬 중합형 수지에서도 질소분위기에 장시간 방치하여 용존 산소를 방출한 경우에는  $E_C$  가 작아진다.

한편,  $W_0$ 를 주사 레이저의 빔 중앙값의  $1/e^2$ 가 되는 반지름으로 두면, 광조형에서 레이저 광을 일정속도로 주사시 액표면에서의 노광량  $E_0$ 는 식 (5)로 유도된다.

$$E_0 = (2/\pi)^2 [P_L / (W_0 V_s)] \quad (5)$$

주사속도(scan velocity)는 식(3)과 (5)의 조합에 의해 다음 식으로 표현된다.

$$V_s = (2/\pi)^2 [P_L / (W_0 E_C)] \exp(-C_d / D_p) \quad (6)$$

여기서,  $P_L$  : 레이저 광의 총 파워

주사속도는  $P_L$ 에 비례하며  $W_0$ ,  $E_C$ 에 반비례 함을 나타낸다. 그러나 실질적인 작업시간은 주사속도 뿐만이 아닌 파트의 크기, 리코우트(recoat) 변수, 성형방향 등에도 영향을 받는다.

### 3. 광조형시 변형과 보정방법

#### 3.1 경화수축에 의한 변형

중합반응에서 경화 수축은 본질적으로 피할 수 없는데 수지는 경화시에 수축하므로 이에 따른 변형이 발생하며 수평과 수직 양면 방향으로 발생한다. 레이저 빔으로 직접 고화하는 경우 경화 부분과 접촉하지 않고 액면을 레이저 주사하여 고화할 때는 경화수축이 발생하여도 곧 주위가 채워지므로 주사 방향에 치수 오차는 발생하지 않는다. 수평면 내에서는 수축이 주사 방향에 대해 대칭이 되므로 직선 주사시에 변형은 발생하지 않고 주사 선대로 충실히 고화된다. 또, 수직면에서도 뒤틀림은 무시할 수 있다.

그러나, 고화된 층에 접촉하도록 그 다음 층을 고화하면 수직방향의 뒤틀림이 발생한다. 이를 컬(curl) 변형이라고 한다. 컬 변형은 적층시 불균일한 수축 때문에 발생하는 뒤틀림으로 Fig. 1은 그 발생 모습을 나타낸다.

변형의 정도는 경화하는 형태, 층 두께, 광 파워 등에 따라 다르지만 첫째 요인은 수지의 수축

률이고 수축률이 큰 수지는 변형량도 크다. 최초로 경화할 때는 액중에 있으므로 어떤 구속도 없이 평면을 유지하며 경화되지만 다음 층의 경화가 기존 고화층에 접촉하여 일어날 때는 기존 경화층의 부동, 노광 부분의 수축 상태가 되어 전체가 변형된다.

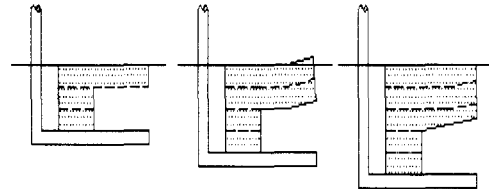


Fig. 1 The generation of curl deformation

#### 3.2 광주사에 의한 변형

광주사가 부정확하면 치수 정밀도가 떨어지는데 광주사에서는 주사 위치의 정확성과 재현성, 수지의 액면 높이의 안정도 및 동적인 주사궤적의 정확성이 문제가 된다. 즉, 실제의 주사가 주사 명령에 동적으로 따르느냐의 여부가 문제가 되는데 주사기구가 충분한 응답속도와 추종성을 갖추고 있어야 한다.

또한, 수지의 액면은 수평면인 반면 빔의 운동은 구면 운동을 한다. 따라서 최적화된 빔의 초점은 수지의 액면과 일치하지 않는데 그 결과 주사 위치에 의해 빔 지름이 변화하므로 고화 폭이나 깊이가 일정하게 되지 않는다. 주사 범위가 넓고 주사 최대각이 크면 큰 문제가 된다.

#### 3.3 오차보정 방법

광조형의 형상정밀도는 수축과 휨에 영향을 받는다. 수축은 상변화에 따라서 발생하는데 액상 수지가 green-part로 변화 시, 후경화 시 두 번 발생한다. 수축은 수축률에 의해 보상이 가능하나 휨은 보상이 불가능하다. 휨 발생은 층과 층 사이의 접합시 발생하는데 바이메탈(bi-metallic strip) 효과와 유사하며 이는 내부응력에 기인된다. 후경화 시에는 더 많은 휨이 발생하는데 휨을 예방하고 보다 정밀한 치수를 얻기 위해서는 내부응력을 줄이는 방법이 요구된다.

광조형장치에서 제품에 영향을 주는 주요인은 레이저 빔의 정확한 위치와 스캐닝 속도다. 성형 단계나 후경화단계시 파트의 수축이나 휨 현상은

수지의 특성이며 수지의 특성과 광조형장치는 서로 의존적이다.

한편, 광조형장치에서 기계적 특성과 수지특성을 보정하기 위해 일반적으로 ACCUMAX사에서 제공되는 두 종류의 시편을 사용한다. Windowpane part는 5개의 형상을 조형하여 측정을 하는데 총 측정 포인트의 개수는 50개 이다. 측정을 통하여 광조형장치의 수지정보  $E_c$ ,  $D_p$  값을 얻는다. Windowpane part를 조형, 수지정보를 얻은 후에는 달라진  $E_c$ ,  $D_p$  값에 따라서 수축률도 달라지는데 이러한 수축률은 Christmas-tree part를 통해 얻어진다. 이는 두개의 파트로 이루어지며, 파트의 중심은 각각 X 축과 Y 축에 정렬된다. 측정 포인트는 총 160개 이며 X 축과 Y 축 수축률과 레이저 빔 보정값을 얻는다. 그러나 이 시편들은 수지의 휨에 대한 정보를 제공하지 못하며 Z 축에 관한 보상시편이 없어 Z 축에 대한 보상은 경험적으로 이루어지고 있다.

#### 4. 실험장치 및 실험방법

##### 4.1 실험장치

본 연구에서는 3D System에서 제작한 광조형장치 SLA250를 사용하여 조형을 하였으며 수지는 CIBATOOL사의 SL5220를 사용하였다. 시편은 조형 후 후경화기를 통해서 완전히 경화 시켰으며 휨량에 대한 측정은 CNC 화상측정 시스템 방식의 QUICK VISION을 사용하였고, 수축률에 대한 측정은 3차원 측정기(HAWK 1086CB)를 사용하였다.

형상모델링은 Pro/Engineer사의 상용 CAD/CAM 소프트웨어인 Pro/E를 이용했으며 제품준비단계로 SLA250의 기본 소프트웨어인 light-year을 이용하여 레이저 주사경로를 생성하였다. 실험장치의 구성개요는 Fig. 2와 같다.

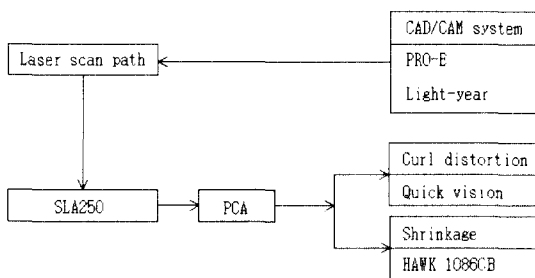


Fig. 2 Schematic diagram of experimental set-up

##### 4.2 실험방법

###### 4.2.1 휨

휨을 정량적으로 측정하기 위하여 기준시편을 선정하였다. 기준시편은 평판(100mm×100mm×2mm) 형상이며 Fig. 3에 시편의 28개 측정점과 이에 따른 진직도 측정방향을 나타내었다. 조형단계와 후경화 단계를 통해 최종적으로 얻어진 형상의 진직도를 휨량의 기준으로 하였다. 진직도는 시편의 사각 모서리를 따라 측정된 4개의 값과 대각선 방향으로 2개의 값으로 총 6개의 값을 구하고 그 중에서 가장 큰 값을 진직도의 기준으로 하였다.

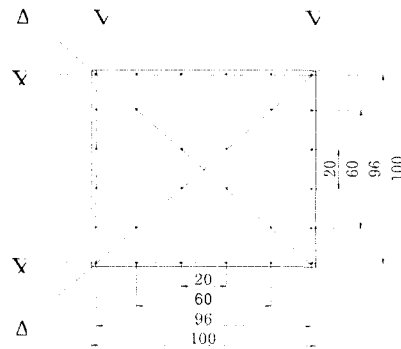


Fig. 3 Slab piece for curl distortion and direction of straightness measurement

한편, 실험에 사용된 조형공정 제어인자는 Table 1과 같이 선정하였는데 '\*' 표시는 ACCUMAX사에서 제시한 추천값을 나타낸다. 선행실험으로 ACCUMAX사의 Windowpane part에서 얻어진  $E_c$ ,  $D_p$ 를 기준으로 제어인자의 하한값은 광조형장치에서 사용되고 있는 최소치이며, 상한값은 광조형장치에서 사용되고 있는 최대치이다. 조형조건과 후경화 조건은 Table 2 및 Table 3과 같다. 후경화 시 시편의 방향은 Z 축 성형면을 상향으로 1시간 실시하였고 후경화 후 1주일의 시간이 지난 후 측정을 하였다.

Table 1 Control parameters for curl distortion experiment (\* reference value of ACCUMAX)

$E_c$ (mJ/cm <sup>2</sup> )	9.8,11.8,12.8,*13.8,14.8,15.8, 17.8, 21.8, 25.8
$D_p$ (mils)	5.6,6,6.5,*7.01,7.5,8,9
$D_f$ (mm)	UF0.2/DF0.25, UF0.25/DF0.3 UF0.3/DF0.35, UF0.35/DF0.4

Table 2 Build condition

Temperature (°c)	26~27
Beam power (mw)	32~33
Beam ratio	0.97~1.02
Sweep period (sec)	5

Table 3 Postcuring condition

Solvent (minute)	Alcohol (1)
Clear tool	Brush
Postcuring time (hour)	1

4.2.2 수축률

Z축의 성형오차를 규명하기 위하여 2종류의 시편을 준비하였다. Fig. 4(a)는 일정한 단면적에 높이만 변화시킨 4종류의 시편형상을 나타낸 것이며 Fig. 4(b)는 단면적과 높이가 각기 변하는 시편을 보인 것이다. Fig. 4(a)의 시편을 통해 Z 축 수축률을 규명하고, Fig. 4(b)를 통해 높이와 체적변화에 따른 수축률을 조사하였다.

본 실험에 앞서 선행실험으로 힘량을 측정하고 최소값을 보인 제어인자를 선택하여 그 값을 취하고 ACCUMAX사의 Christmas-tree part를 조형하였다. 그 결과값으로 3축 스케일의 기준으로 삼았다. 시편제작을 위한 제어인자들은 Table 4와 같이 선정하였다.

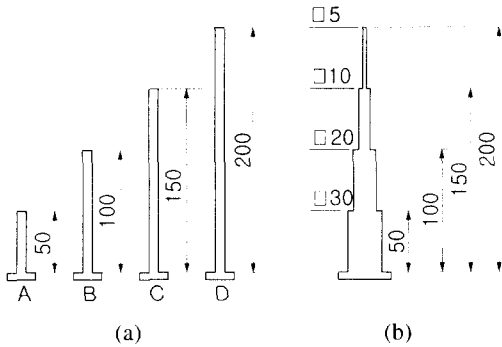


Fig. 4 Specimens for shrinkage rate

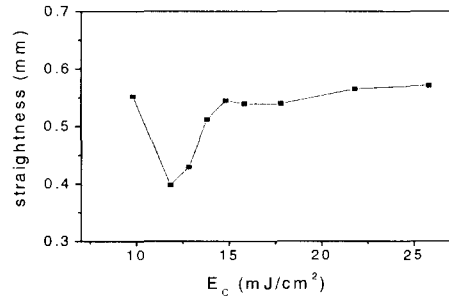
Table 4 Control parameter for specimen forming

$E_c$ (mJ/cm <sup>2</sup> )	11.8
$D_p$ (mils)	7.01
$D_f$ (mm)	UF0.25/DF0.3
Shrink factor (%) (X,Y,Z)	(0.061,0.169,0)

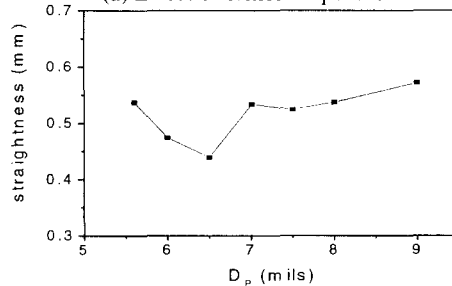
5. 실험결과 및 고찰

5.1 진직도

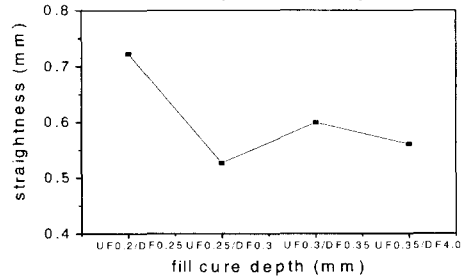
Fig. 5는 각 제어인자의 변화에 따른 Fig. 3의 시편에 대한 진직도 변화를 나타낸 그림이다.  $E_c$  변화에 따른 진직도의 변화를 보면  $E_c$ 가 11.8mJ/cm<sup>2</sup> 일 때 진직도가 가장 양호하게 나타났다. 일반적으로  $E_c$ 가 증가하면 노광량이 축적되어 내부응력이 증가하게 되는데 이는 후경화 과정에서 휨의 형태로 나타난다. 그림에서  $E_c$ 가 증가할수록 초기에는 진직도가 증가하나 이 후에는  $E_c$ 값에 크게 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있다.  $E_c$ 의 최소값에서 진직도가 나쁜 것은 노광량의 과소로 인하여 조형 시 경화가 거의 일어나지 않으나 경화과정에서 큰 변형이 발생한 것으로 판단된다.



(a) Effect of critical exposure



(b) Effect of penetration depth



(c) Effect of fill cure depth

Fig. 5 Effect of  $E_c$ ,  $D_p$ , and  $D_f$  on straightness

또한,  $D_p$ 와  $D_f$ 가 증가할수록 진직도가 좋아지다가  $D_p$  6.5mils,  $D_f$  UF0.25/DF0.3에서 최적의 진직도가 나타났으며 이 후 진직도가 나빠지고 있다.

이와 같이 세어인자의 변화에 따라 휘의 최소점이 나타나는데 이는 경화에 필요한 광량과 광량에 따른 경화깊이가 최적으로 나타나는 데 기인한다고 판단된다.

한편, ACCUMAX 사가 제시하는 추천 제어인자들과 이들 인자에 대한 진직도 및 조형시간을 Table 5에 나타내었는데 진직도는 평균 0.523mm, 조형시간은 149분이었다. Table 6은 본 실험을 통하여 최적의 진직도를 갖는 제어인자 값들인  $E_c$  11.8,  $D_p$  6.5 및  $D_f$  UF0.25/DF0.3을 ACCUMAX 사의 추천치와 조합했을 때의 진직도와 조형시간을 나타낸 것으로 첫번째 경우 진직도와 조형시간이 각각 24%와 12% 씩 향상되었다. 두번째 경우는 진직도는 좋아지나 조형시간은 미세하게 증가하는 것으로 나타났다. 조형시간은 레이저의 주사속도에 영향을 받는데 식 (6)에서  $E_c$ 가 작아질수록 주사속도가 빨라 조형시간은 줄어드는 반면에,  $D_p$ 는 작아질수록 주사속도가 느려져 조형시간은 증가하게 되는데 본 실험결과와는 이러한 경향과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

Table 5 Straightness and build time by recommended values of ACCUMAX

Parameter		Straightness(mm)		Build time(min)	
$E_c$ (mJ/cm <sup>2</sup> )	13.8	No.1	0.512	No.1	144
$D_p$ (mils)	7.01	No.2	0.533	No.2	147
$D_f$ (mm)	UF0.25/DF0.3	No.3	0.526	No.3	149
Average		0.523		146	

Table 6 Result using the optimal value

$E_c$ (mJ/cm <sup>2</sup> )	$D_p$ (mils)	$D_f$ (mm)	Straightness (mm)	Build time (min.)
11.8	7.01	UF0.25/DF0.3	0.398	128
13.8	6.5	UF0.25/DF0.3	0.439	155

Fig. 6은 이상에서 구한 최적 제어인자  $E_c$  11.8,  $D_p$  7.01,  $D_f$  UF0.25/DF0.3에서 조형시킨 시편의 변형현상을 나타낸 것으로 일반적인 변형은 시편의 중심을 기준으로 멀어질수록 변형은 심해졌으며 코너 부위가 말아진 형태를 보이고 있다.

한편, 외각 모서리의 진직도만을 비교하면, X축에 평행한 모서리가 Y축에 평행한 모서리보다

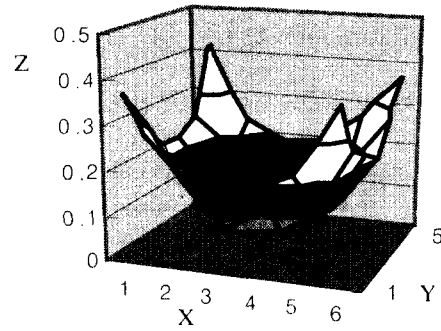


Fig. 6 Curl distortion of slab specimen(unit : mm)  
( $E_c$ : 11.8,  $D_p$ : 7.01,  $D_f$ : UF0.25/DF0.3)

진직도가 나쁘게 나타났는데 이는 ACES(Accurate, Clear, Epoxy, Solid)의 주사형태와 관련이 있다고 판단된다.

ACES의 주사는 두 번의 필큐어 과정을 거치는데 선행과정으로 X 축에 평행하게 주사하여 일정한 층을 경화 시킨 후, 그 다음 주사에서 Y 축에 평행하게 주사하여 전 층과 접합을 하게 된다. 이 첫번째 주사방향과 일치하는 X 축에 평행한 모서리에서 진직도가 크게 나오게 된다. 따라서 휨량을 줄이기 위해서는 Z 축의 조형각도를 변화시켜 최대길이방향을 Y 축으로 유도하여 조형하는 것이 바람직하다고 판단된다.

### 5.2 수축률

Fig. 7은 Fig. 4(a)의 시편에 대한 조형 후 수축률을 나타낸 것이다. 시편의 높이가 증가할수록 수축률도 증가하는 경향을 보여주고 있는데 초기에는 급격히 증가하다 이후 안정된 증가 현상이 나타나고 있다. 이 때 시편 끝 단 평면부의 평면도는 0.007~0.046mm로 측정되었다.

완벽한 선형 모델을 얻을 수 없는 것은 수축과 동시에 curl 변형이 발생하기 때문이라고 판단된다 측정면의 평면도를 고려한다면 일정면적을 기준으로 한 높이의 변화는 선형적인 관계를 만족시키며 높이가 증가할수록 수축률이 커짐을 알 수 있다.

Fig. 8은 Fig. 4(b)의 시편에 대한 조형 후 Z 축 수축률을 나타낸 것으로 시편높이에 따른 누적 수축률 A와 구간 수축률 B는 서로 비슷한 변화 경향을 보이고 있다. 구간 수축률 A는 높이가 증가하면서 커지게 되나 상단부로 갈수록 체적의 급격한 감소에 따라 수축률은 오히려 감소하게 된다.

누적 수축률 B는 구간 수축률과 마찬가지로 변화형태를 보여주고 있으나 높이가 높은 즉 시편 끝 단으로 가면 그 감소 경향은 더욱 뚜렷한데 이는 수축이 시편의 단면적이 큰 아래부분에서 집중적으로 일어남에 따른 결과라고 판단된다.

Fig. 9는 Fig. 4(a), (b)의 각 시편에 대하여 체적 변화에 따른 조형 후 수축률을 나타낸 것이다. 체적의 변화에 따라서 전체적인 수축률의 변화는 일정한 산포도의 모형을 가지고 있지 못하고 부분적인 체적의 변화에 선형모형을 보이고 있는데 체적의 구간을 A(1250~20000mm<sup>3</sup>), B(1250, 20000~70000 mm<sup>3</sup>)로 나누어 고려할 때 각각 다른 기울기를 갖는 직선적 형태의 수축률을 보이고 있다

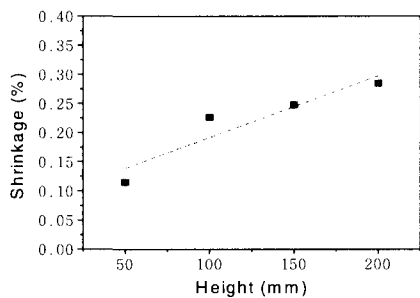


Fig. 7 Shrinkage difference with respect to height

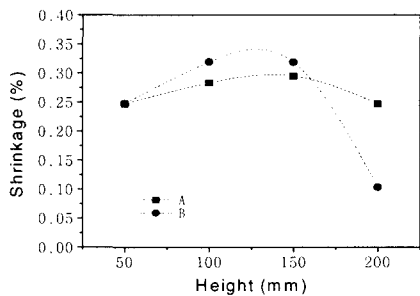


Fig. 8 Shrinkage difference with respect to area

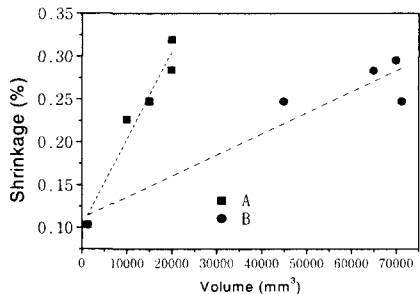


Fig. 9 Shrinkage difference with respect to volume

그런데, 체적이 20000mm<sup>3</sup>일 경우 2개의 수축률을 얻었는데 일정한 높이로 면적을 달리한 시편이 일정한 면적에 높이를 달리한 시편보다 큰 수축률 값을 보였다. 일정한 체적이라도 높이에 따라서 수축률의 변화가 있다는 것을 알 수 있었다.

이상의 결과는 수축률은 전체적으로 시편의 체적과 큰 연관성을 가지고 있다는 것을 보여주고 있는데 체적과 수축률의 상관관계에 대한 추가 연구가 필요하다는 것을 알았다.

한편, ACCUMAX사에서 제시하는 Z축 방향의 수축률은 0.115이나 본 실험결과 수축률은 시편의 높이와 단면적 및 체적의 크기에 따라 변화하고 있다는 것을 보여주고 있는데 일반적 경향은 0.115보다 크게 나타나고 있다. 이러한 결과로부터 조형물의 부분적 체적변화에 따라 적절한 Z축 수축률 값을 여러 개 사용한다면 형상정밀도를 크게 향상시킬 수 있을 것이라 판단된다.

## 6. 결론

3D System에서 제작한 광조형장치 SLA250과 CIBATOOL사의 광경화수지 SL5220에 의한 광조형공정의 오차보정 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 한계 노광량, 광투과 깊이, 필큐어 깊이 등의 공정제어인자가 조형 정밀도에 미치는 영향을 규명하였다.
2. 공정제어인자가 조형물의 진직도에 미치는 영향을 정량적으로 분석하여 힘을 최소화하는 최적의 공정제어인자를 구하였다.
3. 최적 공정제어인자에 의한 조형결과 추천제어인자를 사용한 경우보다 진직도는 최고 24%, 조형시간은 최고 12%가 향상되었다.
4. 힘의 형태는 방향성을 가지며, X축에 평행하게 주사한 방향으로 큰 힘이 발생하였다.
5. 힘의 형태로부터 힘을 줄이기 위해서는 Z축의 조형각도를 적절히 조정하여야 한다는 것을 알 수 있었다.
6. Z축의 수축률은 단면적이 일정할 경우 시편의 높이가 커질수록 증가하였다.
7. Z축의 수축률은 체적과 큰 연관성이 있으며 최적의 형상정밀도를 얻기 위해서는 구간별 체적에 대한 수축률을 부여 하여야 한다.

### 참고문헌

1. P. F. Jacobs, "Stereolithography 1933: epoxy resins, improved accuracy and investment casting." Rapid prototyping system fast track to product, pp. 15-50, 1995.
2. A. Schulhess, A. M. Hunziker, M. Hoffman, "New resins for stereolithography applications," Rapid prototyping systems fast track to product, pp. 12-42, 1995.
3. P. F. Jacobs, Stereolithography and other RP&M technologies, SME press, pp. 27-118, 1995.
4. S. Pahati, P. M. Dickens, "Stereolithography process improvement," The first national conference on rapid prototyping and tooling research, 1995.
5. R. P. Chartoff, L. Flach, P. Weissman, "Material and process parameter that affect accuracy in stereolithography," The sixth international conference on rapid prototyping, 1995.
6. S. Jayanthi, M. Keefe, E. P. Gargiulo, "Studies in stereolithography : Influence of process parameters on curl distortion in photopolymer models," Solid freeform fabrication system, pp. 21-63, 1994.
7. 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. 891-592, 1995.
8. 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.
9. 足立 外, "光造形法にあなる收縮現象の realtime 測定を試験(第 2 報)," 精密工學會論文集, pp. 889-890, 1996.
10. 3Dsystems, 3D systems user guide and ACCUMAX™ toolkit, 1995.