

다구찌 방법을 이용한 SLS 조형품의 치수정밀도 향상에 관한 연구

황보중*·양화준**·이석희***

A Study on Improvement on Dimensional Accuracy of SLS parts using Taguchi Method

Po-Jung Hwang, Hwa-Jun Yang and Seok-Hee Lee

Key Words: Selective Laser Sintering(선택적 소결법), Dimensional accuracy(치수정도), Taguchi Method(다구찌 방법)

Abstract

This paper proposes the test pieces of X, Y and Z axes to compensate the shape distortion of Selective Laser Sintering(SLS) parts resulting from the phase change during the sintering process. In the case of the proposed compensation test pieces of X, Y axes the accurate rates of shrinkage can be measured with the reduction of curling which is obtained from adjustment of build orientation, and the formula used to get scale factors are proposed with the shrinkage rates of them. The scale factors of X, Y and Z axes are generated by building up proposed compensation test pieces. The generated scale factors are required to satisfy the dimensional accuracy even if there are changes of the build position and the size of SLS parts in the build chamber. For this reason, it is proposed that the build positions and the size be considered to be noise factors against the compensation test pieces, and a method is also proposed that scale factors be selected to robustly maintain the dimensional accuracy of SLS parts under the actual operating conditions with the application of the Taguchi Method.

1. 서 론

분말소재에 기반한 쾌속조형(Rapid prototyping) 기술인 Selective Laser Sintering(SLS)는 CO₂ 레이저빔의 가열로 분말 입자를 소결시켜 적층 조형하는 방법으로 미국 텍사스대학에서 최초 연구되어 DTMTM사에서 상용화 되었다. 소결과정의 안정성을 확보하기 위해서 조형실내의 온도를 4개의 히터로 분말의 용융점 바로 아래까지 올리고,

산화를 방지하기 위해서 불활성 질소 분위기로 하고 있다.⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾ 이러한 조치에도 불구하고 조형실내의 열적 불균형과, 소결과정 중 조형품의 형상왜곡이 발생하는데 그 대표적인 현상은 수축(shrinkage) 와 휨(curling)현상으로 성형품의 치수정밀도에 악영향을 준다. 이러한 형상 왜곡을 최소화하기 위한 방법으로 성형조건을 조정하여 형상왜곡을 제거하는 방법(distortion elimination)과 성형 전 형상왜곡을 고려하여 왜곡보상(distortion compensation)을 해주는 방법이 있다. 왜곡보상법이 일반적으로 사용되며 DTMTM사의 Sinterstation^R 2000는 보상시편(Compensation Test Piece)의 성형시 발생하는 형상오차를 측정하여 이에 대한 치수보정계수(Scale factor)를 정해 왜곡을 보상해준

* 부산대.원

** 현대자동차

*** 부산대 기계공학부 및 기계기술연구소

다.⁽⁴⁾ DTMTM사에서 제공하고 있는 시편은 X, Y 축에 관해서만 제공되고 Z축에 관한 보상시편이 없어 Z축에 대한 보상은 경험적으로 이루어지며, 성형된 보상용 시편 자체에 휩 현상이 발생하여 정확한 수축률 측정이 불가능하다. 이로 인해 형상왜곡에 대한 정확한 보정계수를 구하기가 어렵고 이것은 조형품의 품질, 생산성 저하로 이어진다. 프로세스 특징상 소결과정 중의 상변화에 따른 형상왜곡이 다른 연속조형공정보다 크며 왜곡 현상과 제어에 관한 연구들이 수행되었다.

Shishkovskii⁽⁵⁾ 등은 소결과정 중의 금속-폴리머 분말(metal-polymer powder)의 열전달계수를 실험적으로 규명하여 레이저 소결과정 중의 열적인 문제를 해결하려 하였다. Zhang⁽⁶⁾ 등은 일정한 열 유동하에서 혼합분말의 서로 다른 용융점을 해석적으로 조사했다. 물리적 모델에서 용융과정 중의 밀도변화 현상을 고려했고 고상과 액상에서의 온도분포도 각각 고려했다. 분말이 가지고 있는 공극들이 소결과정을 거쳐 분말이 액상으로 바뀔 때 수축을 일으키며, 이 효과를 SLS 프로세스가 보이는 수축을 예견할 수 있는 방법으로 제시했다. Childs⁽⁷⁾ 등은 소결과정 중의 분말의 밀도가 증가하는 현상이 열적인 비선형성을 유발시키는 주요소이며, 소결시 분말의 에너지 활성화정도, 분말의 비열, 분말모판(powder bed)의 밀도, 분말층의 두께와 소결에 의한 최대밀도 등의 요인들이 형상정밀도에 영향을 줌을 밝혔다. 위의 연구들은 조형과정의 열적모델링을 통하여 이를 해석하여 왜곡을 제거하려 하였으나, 비선형적인 요소들이 많고 복잡한 형상의 경우 완벽한 왜곡제거가 힘들다. 또 추가적인 공정이 필요하며 생산성과 실용성이 떨어진다. Rock⁽⁸⁾ 등은 Freeform Powder Molding(FDM)의 형상왜곡 원인을 조사하였고 전통적인 왜곡조정 방법을 고찰하였다. 수축으로 인한 자유형상의 왜곡을 특징화 하였고 형상왜곡을 왜곡보상을 통하여 제어하였다. ONUH⁽⁹⁾ 등은 Stereolithography(SLA)에의 최적조형변수(optimal building parameter)를 다구찌방법을 이용하여 실험적으로 구하여 조형품의 품질을 향상시켰다. 또 새로운 해치(hatch) 방식을 제한하여 조형품의 표면정도를 향상시켰다.

본 논문에서는 소결과정 중의 상변화로 인한 조형품의 형상왜곡을 보상하기 위한 X, Y, Z 축의 보상시편을 제안한다. X, Y축 보상시편의 경

우 조형각도를 조정하면 휩 현상이 감소하여 정확한 수축률을 측정할 수 있으며, 이들의 수축률로 각축의 치수보정계수를 구할 수 있는 식을 제시한다. 제시된 X, Y, Z 축 보상시편의 성형을 통하여 구해지는 각축의 치수보정계수는 조형물의 성형위치, 조형물의 크기가 변화되더라도 요구된 치수정밀도를 만족시켜야 한다. 이러한 이유로 보상시편에 대하여 조형위치, 조형물의 크기를 잡음인자로 고려하고, 다구찌방법⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾을 적용해서 시스템의 실제 작동조건에 대해서도 견실하게 SLS의 치수정밀도를 유지할 수 있는 치수보정계수를 선정하는 방법을 제안한다. 한편 SLS 프로세스의 열적인 모델링 없이도, 쉽고 편리하게 형상왜곡현상을 제어할 수 있음을 보이고, DTMTM사에서 제시한 방법과 비교하여, 성형품의 치수정밀도 향상을 보인다.

2. 다구찌 방법

종래에는 제어불가능변수들이 결과물에 주는 영향의 정도를 평가하기 어려웠으나, 이를 평가할 수 있는 방법이 제시되고 있다. 또한 품질 산포의 크기를 S/N 비(Signal-to-Noise Ratio, η)로 변환하여 산포를 작게하는 변수들의 조건을 찾아가는 로버스트 실험계획법(robust design)이 주로 사용된다. 한편, 다구찌방법에서 제시하는 목표특성치는 시스템출력이 도달해야 하는 목표치가 있는 경우인 명목(Nominal-the-Best)특성치, 시스템의 출력이 작을수록 좋은 망소(Smaller-the-Better)특성치, 시스템의 출력이 클수록 좋은 망대(Larger-the-Better)특성치로 구분된다.

본 논문의 목표특성치 y 는 다음과 같다.

$$y = \frac{\sum_{i=1}^m (|L_{n,i} - L_{a,i}|)}{\sum_{i=1}^m (L_n)} \quad (1)$$

여기서, L_n 은 설계품의 치수이고, L_a 은 설계품을 SLS 프로세스로 조형한 후의 치수이며, m 은 샘플링 개수의 합이다. y 는 작으면 작을수록 좋으므로, 망소특성치에 해당하며, 망대특성치에 대한 S/N비의 정의는 다음과 같다.

$$\eta = -10 \log_{10} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (2)$$

S/N비가 클수록 목표특성치는 조정불가능변수의 변화에 대한 영향이 적게 되며, 시스템의 견실성이 증가한다. 여기서 n은 조정불가능변수의 수준의 합이다. 목표특성치의 값이 작고, 변화가 작을수록 S/N비가 커지므로 이를 이용하면, 조정불가능변수가 변하더라도 조형제품의 치수오차의 변화를 최소화하는 것은 물론, 절대값 자체도 동시에 최소화할 수 있는 3축의 치수보정계수와 보상시편의 조형각도를 선정할 수 있다. 또 조정불가능변수의 변화에 대하여 목표특성치가 변화하는 정도도 S/N비로 정량화 할 수 있다.

Fig. 1은 SLS 시스템을 다구찌방법을 적용하여, 작업조건들이 바뀌더라도 각축의 치수보정계수를 조정함으로써 조형품의 치수오차를 최소로 할 수 있음을 보이고 있다.

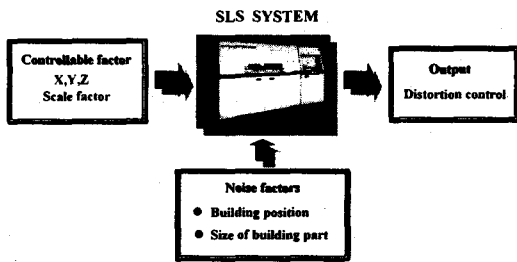


Fig. 1 The definition of SLS system in Taguchi method

3. SLS 조형품의 형상왜곡 제어

SLS 프로세스의 반복적인 형상왜곡현상은 수축에 대한 보상과 조형품의 조형각도를 조정하여 첫 번째 적층면의 단면적을 가능한 작게 하여 탈립현상을 줄임으로써 제어 할 수 있다.

Fig. 2는 본 논문에서 제시한 3축의 치수보상시편으로 성형위치에 따른 수축률을 알 수 있으며, 조형실의 형상은 실린더형이다. 각 위치의 수축률을 측정하여 다음 식으로 치수보정계수를 구한다.

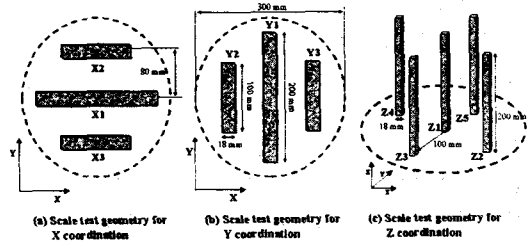


Fig. 2 Dimensional compensation test piece for X, Y, Z axes

$$X_scale\ factor = \frac{A\left(\frac{x1}{x1.0}\right) + B\left(\frac{x2}{x2.0}\right) + C\left(\frac{x3}{x3.0}\right)}{3} \quad (3)$$

$$Y_scale\ factor = \frac{D\left(\frac{y1}{y1.0}\right) + E\left(\frac{y2}{y2.0}\right) + F\left(\frac{y3}{y3.0}\right)}{3} \quad (4)$$

$$Z_scale\ factor = \frac{G\left(\frac{z1}{z1.0}\right) + H\left(\frac{z2}{z2.0}\right) + I\left(\frac{z3}{z3.0}\right) + J\left(\frac{z4}{z4.0}\right) + K\left(\frac{z5}{z5.0}\right)}{5} \quad (5)$$

여기서 괄호들은 시편들의 수축률의 역수로 보상비를 의미한다. 식 (3)의 A, B, C 식 (4)의 D, E, F 식 (5)의 G, H, I, J, K 는 조형위치에 따라서 변화하는 수축률의 영향력을 평가할 수 있는 계수들이다. 이들과 X, Y축 시편의 조형각 U, V 를 다구찌 방법에서의 조정가능인자로, 조형품의 조형위치의 변화를 조정불가능변수로 두어 다구찌 방법에서 제시하는 직교배열표 $L_{27}(3^{13})$ 을 사용하여 실험한다. 여기서 3은 3개의 수준, 윗 첨자 13은 조정가능변수, 아래 첨자 27은 실험회수를 뜻한다. 13개의 조정가능변수에 각 변수에 3개의 수준으로 정하면 총 $3^{13} = 1,594,323$ 번의 실험을 해야 한다. 그러나 이것을 다구찌 방법에서 제시하는 직교배열표를 이용하면 27번의 실험으로 각 변수가 목표특성치에 미치는 민감도를 파악할 수 있다. 식 (1)로 목표특성치가 구해지면 조정불가능변수의 변화에 대하여 목표특성치가 변화하는 정도를 식 (2)의 S/N비로 정량화할 수 있다. S/N비를 최대화할 수 있는 조정가능변수, 즉, X, Y, Z축의 치수보정계수를 실험을 통해서 찾아낸다. 이들은 SLS 프로세스 중에 조형품의 성형위치, 크기의 변화에도 불구하고 견실하게 치수정밀도를 유지시킨다.

4. 실험 및 결과

Table 1과 같은 작동조건으로 실험하며 크게 2 단계 과정을 거친다.

Table 1 Operation conditions of the SLS process

Laser Power	8 Watt
Part Heater	177.5°C
Piston Heater	135°C
Feed Heater(R/L)	105°C
Materials	DURAFORM PA

먼저, 조정가능변수로 선정된 A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, U, V들과 조정불가능변수들의 수준 선정이다. 이를 위해 U, V의 수준을 선정 후 Fig. 2 (a), (b)를 U, V수준 별로 10회, Fig. 2 (c)는 3회 성형했다. 이들의 평균 수축률의 역수인 보상비는 Table 2와 같다.

Table 2 Compensation rate of compensation test pieces

X Coordination				
U(degree)	X1	X2	X3	
1°	1.0321	1.02754	1.02838	
2°	1.03157	1.02828	1.0268	
3°	1.0305	1.02722	1.0269	
Y Coordination				
V(degree)	Y1	Y2	Y3	
1°	1.03135	1.02902	1.02669	
2°	1.03072	1.02575	1.02585	
3°	1.03008	1.02987	1.02891	
Z Coordination				
Z1	Z2	Z3	Z4	Z5
1.01724	1.01482	1.01559	1.01574	1.01482

Table 3 Level of the controllable factor

Symbol	Level 0	Level 1	Level 2
A	0.995	1	1.005
B	0.995	1	1.005
C	0.995	1	1.005
U	1°	2°	3°
D	0.994	1	1.006
E	0.994	1	1.006
F	0.994	1	1.006
V	1°	2°	3°
G	0.997	1	1.003
H	0.997	1	1.003
I	0.997	1	1.003
J	0.997	1	1.003
K	0.997	1	1.003

조정가능변수들의 수준은 각 수준별로 수축률 차이를 고려해서 Table 3와 같이 정하였다.

다음으로 다구찌 방법에서 제시하는 직교배열 표 $L_{27}(3^{13})$ 을 사용하여 27회의 실험을 실시한다. Fig. 3 (a)를 성형 후의 식 (1)에 샘플링된 치수들을 대입하며 조형위치에 따른 목표특성치를 구한다. 그리고, 망목특성치의 S/N 비를 식 (2)로부터 구한다. Fig. 3은 조정불가능인자로 고려되어 실험에 사용될 시편의 성형위치와 형상 및 성형 후 모습이다. Table 4 은 직교배열표 $L_{27}(3^{13})$ 와 실험 결과를 나타낸다. Table 4 에서와 같이 구해진 S/N 비는 조정불가능변수가 변화될 때 목표특성치의 변화가 작을수록 커지고, 평균값이 작을수록 커진다. 따라서 각 조정가능변수에 대해서 S/N비를 최대로 하는 수준을 결정한다. 각 인자들의 최고 S/N비를 취하여 Table 3 해당하는 수준값을 취하여 식(3),(4),(5)에 대입하여 3축의 치수보정계수를 구한다.

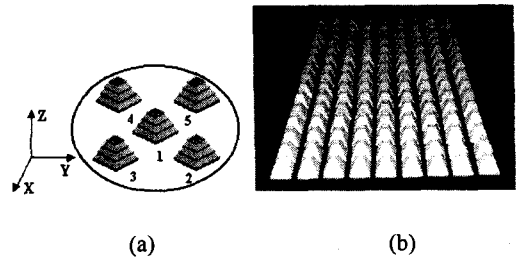


Fig. 3 Parking location of test model (a) and builded model in SLS process for experiment (b)

Table 4 Experimental result based on the orthogonal array $L_{27}(3^{13})$ for the SLS process

# of test	Controllable factors													y	η						
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	y1	y2			y3	y4	y5			
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.004730	0.004286	0.002968	0.004127	0.004413	47.205211
2	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.003143	0.003810	0.002381	0.002857	0.002632	51.462651
3	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0.002810	0.004335	0.003422	0.004635	0.004222	47.566683
4	0	1	1	0	0	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	0.005143	0.003810	0.003683	0.004032	0.004571	47.367167
5	0	1	1	1	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0.001905	0.002139	0.002667	0.001778	0.002234	53.231886
6	0	1	1	2	2	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0.002852	0.004000	0.004540	0.002762	0.002234	49.328292
7	0	2	2	0	0	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	0.003387	0.003873	0.003397	0.003492	0.003905	48.738745
8	0	2	2	1	1	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	0.002632	0.004063	0.004865	0.001873	0.001841	52.493512
9	0	2	2	2	2	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0.001619	0.004139	0.001190	0.002254	0.001111	52.071935
10	1	0	1	2	0	1	2	0	1	2	2	2	2	2	2	0.003382	0.001336	0.001651	0.003111	0.002443	52.080328
11	1	0	1	2	1	2	0	1	2	0	1	2	2	2	2	0.004934	0.001341	0.002254	0.003778	0.003683	49.126099
12	1	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	2	2	0.002762	0.002413	0.002032	0.002444	0.002281	52.326799
13	1	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0.002603	0.002195	0.001841	0.002667	0.002476	52.549338
14	1	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0.002159	0.003048	0.002571	0.002000	0.001397	52.753362
15	1	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0.002889	0.002301	0.002837	0.002652	0.002254	51.219421
16	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	0.002127	0.002032	0.002317	0.001905	0.001651	53.898329
17	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	0.002984	0.001968	0.001963	0.001937	0.001492	53.440273
18	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	0.002925	0.001341	0.001778	0.001683	0.002139	53.324271
19	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	0.002837	0.001937	0.002317	0.001490	0.002281	52.993487
20	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	0.003079	0.001490	0.002190	0.002286	0.002032	52.929283
21	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	0.002508	0.002309	0.002063	0.001333	0.001336	53.760230
22	2	1	0	2	1	0	2	1	0	2	1	0	2	1	0	0.004984	0.002032	0.002746	0.003387	0.003490	48.675434
23	2	1	0	2	1	0	2	1	0	2	1	0	2	1	0	0.002730	0.002063	0.001810	0.002281	0.002730	52.501270
24	2	1	0	2	1	0	2	1	0	2	1	0	2	1	0	0.004837	0.001746	0.002952	0.004762	0.004837	47.871489
25	2	2	1	0	2	1	0	2	1	0	2	1	0	2	1	0.001905	0.001810	0.001397	0.001810	0.001811	54.936441
26	2	2	1	0	2	1	0	2	1	0	2	1	0	2	1	0.001937	0.002317	0.001714	0.001492	0.001492	56.621613
27	2	2	1	0	2	1	0	2	1	0	2	1	0	2	1	0.002857	0.002222	0.002371	0.002381	0.002667	51.871691

Table 5는 선택된 수준들과 수준값 그리고 계산된 치수보정계수를 나타낸다.

Table 5 Selected level of the controllable factors and scale factors

Symbol	Level	Value
A	2	1.005
B	2	1.005
C	1	1
U	2	3°
D	1	1
E	1	1
F	1	1
V	0	1°
G	1	1
H	2	1.003
I	0	0.997
J	1	1
K	2	1.003
X Scale factor	Y Scale factor	Z Scale factor
1.0327	1.02902	1.01625

5. 적용의 예

Sinterstation^R 2000 제조회사인 DTMTM에서 추천하는 방법으로 선정된 X, Y축 치수보정계수와 다구찌방법을 사용하여 선정된 X, Y, Z 축의 치수보정계수를 Fig. 4와 같은 제품에 적용하여 조형실내의 성형위치와 크기를 각각 다르게 하여 성형한 조형품들의 치수오차를 비교한다. 이때 DTMTM에서 추천하는 방법에는 Z축의 치수보정계수를 선정하는 부분이 없어 다구찌방법으로 선정된 Z축 치수보정계수를 사용하였다.

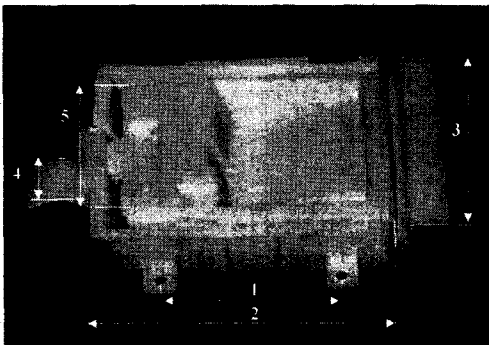


Fig. 4 Sample model and sampling dimensions

Fig. 4에는 모델의 형상과 샘플링된 치수측정부 분이 표시되어있으며, Table 6 에는 조형된 3개의 샘플모델별로의 측정된 치수들이 표시되어있다.

Table 6 The dimensional errors in each sample parts

Sample		Nominal dimension	Turning by Taguchi method	Turing by DTM
A (Large)	1	128 mm	128.3 mm	128.7 mm
	2	215 mm	215.4 mm	215.7 mm
	3	173 mm	173.3 mm	173.6 mm
	4	43 mm	42.8 mm	42.9 mm
	5	142 mm	142.3 mm	142.5 mm
B (Medium)	1	89.6 mm	89.8 mm	89.9 mm
	2	150.5 mm	150.7 mm	150.3 mm
	3	121.1 mm	121.2 mm	121.4 mm
	4	30.1 mm	30 mm	30.2 mm
	5	99.4 mm	99.6 mm	99.8 mm
C (Small)	1	64 mm	64.2 mm	64.3 mm
	2	107.5 mm	107.7 mm	107.7 mm
	3	86.5 mm	86.4 mm	86.7 mm
	4	21.5 mm	21.4 mm	21.6 mm
	5	71 mm	71.1 mm	71.3 mm

Table 6 와 같이 3개의 샘플모델별로 치수오차들을 평균값을 계산하여 비교한 결과는 샘플 A의 경우 약 45%, 샘플 B의 경우 약 40%, 샘플 C의 경우 약 36% 정도로 감소하였다. 즉, 조형품의 성형위치와 크기가 달라지더라도 기존방법에 비해 평균 40% 치수정밀도를 향상시킬 수 있다. 이것은 다구찌 방법을 적용해서 구한 치수보정계수들이 시스템의 실제 작동조건에 대해서 견실하게 치수정밀도를 유지할 수 있음을 의미한다.

6. 결론

본 연구에서는 SLS 프로세스에서 조형실의 성형위치에 따라 변화하는 수축률을 측정할 수 있는 X, Y, Z축의 보상시편들을 제시하였고, 조형품의 성형위치와 크기의 변화에도 견실하게 치수정밀도를 유지시키기 위해서 다구찌 방법을 적용

하여 치수보정계수들을 실험적으로 구하였다. 본 논문의 주요 연구 결과는 다음과 같다.

먼저, 소결과정(sintering process)의 안전성을 확보하기 위해서 각 위치에서 예비히터로 조형실내의 온도를 분말의 용점 바로 아래까지 올리는데 이들의 영향으로 원통형 조형실내에 온도구배가 생긴다. 이러한 이유로 조형실내의 성형위치에 따라 다른 수축률을 보이는데 이를 간편하게 측정할 수 있는 X, Y, Z축의 시편(test piece)을 고안하였다. 기존의 시편은 X, Y축 시편만 제시되어있어 Z축의 경우 경험적으로 보상계수를 결정해야하며 X, Y축 시편은 휨 현상이 발생하여 정확한 수축률 측정이 어려웠다. 제시된 시편의 경우 X, Y축에 대하여 조형각도를 조정하여 휨 현상을 줄여 정확한 수축률을 측정하였다. 이러한 조형각도는 다구찌 방법으로 선정하였다.

다음으로 조형실내의 성형위치와 조형품의 크기 변화에도 불구하고 치수오차의 변화와 그 절대값이 최소가 되는 3축의 치수보정계수를 다구찌 방법을 이용하여 선정하였으며, 기존방법에 비해 평균 40% 정도 치수오차를 줄일 수 있었다. 이것은 다구찌 방법을 적용해서 구한 치수보정계수들이 시스템의 실제 작동조건에 대해서 견실하게 치수정밀도를 유지 할 수 있음을 의미한다.

참고문헌

- (1) D.T. Pham and R.S. Gault, "A Comparison of rapid prototyping technologies", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol.38 No.10-11, 1998
- (2) Paul C.H. Liu, C.Y.Chiu, S.R. Cheng and Jacob Chen, "Manufacturing Education for Rapid Prototyping", *Proceedings of the 2nd Annula Internatinal Conference on Industrial Engineering Applications and Practic II*, Vol. 2, 1997
- (3) F. Prioleau, "Selective Laser Sintering - The Process and Its Materials", *Proceedings of the ANTEC '93*, Vol. 3, pp.3231-3234, 1993
- (4) DTM Corporation, *The Sinterstaion System 2000 Users Guide and Guide to Materials*, 1996
- (5) I.V. Shishkovskii and N.L. Kupriano, "Thermal Fields in Metal-Polymer Powder Compositions during Laser Treatment, High Temperature-USSR Vol.35, No.5 , 1997
- (6) Yuwcn Zhang and Amir Faghri, "Melting of a subcooled mixed powder bed with constant heat flux heating", *International Journal of Heat & Mass Transfer*, Vol.42, No.5, PP.775-788, 1999
- (7) T. H. C. Childs, M Berzins, G. R. Ryder and A Tontowi, "Selective laser sintering of an amorphous polymer-simulation and experiments", *Proceeding Instn Mech Ehgrs*, Vol.213, part B, 1999
- (8) Stephen j. Rock and Wojciech Z. Misiolek, "Distortion Control for P/M-Based Rapid Prototyping of Advanced Material Components, 1996 World Congress On Powder Metallurgy & Particulate Materials, june 16-21, Washinton.
- (9) S. O. ONUH and K. K. B. HON, "Optimizing Build Parameters for Improved Surface Finish in Stereolithography", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol.38 No.4, pp.329-345, 1998
- (10) Ginichi Taguchi, "Taguchi on Robust Technology Development", ASME Press, 1993
- (11) Peace, G. S., *Taguchi Methods: A hands-on approach to quality engineering*, Addison-Wesley, 1993