한국정밀공학회지 제21권 제12호 (2004년 12월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 21, No. 12, December 2004.

쾌속조형장치의 길이오차를 이용한 형상정밀도 개선에 관한 연구

김태호#, 박재덕*, 김민주**, 이승수**, 이준희***, 전언찬****

A Study on the Improvement of Form Accuracy Using the Length Strain of Rapid Prototype

Tae Ho Kim#, Jae Duk Park*, Min Ju Kim** , Seung-Soo Lee**, Jun Hee Lee*** and Eon-Chan Jeon****

ABSTRACT

This study is aimed to diminish the errors which created during transforming from 3D shape created with CAD program to STL file formation. The length strain which created on X-Y axises at STL file transforming is diminished by using the relation between common shape error and shrinkage rate. As the result of study, we have confirmed the length strain in accordance with facetres value. Also, the shape error is compensated with shrinkage rate by error of length strain. so, we could diminish to shape error by several tens micrometer.

Key Words : Rapid Prototyping(쾌속조형장치), Shrinkage rate(수축률), Length error(길이오차)
STL File(STL파일)

1. 서론

쾌속조형장치(Rapid Prototyping system : RP)는 절삭에 의한 형상제작이 아니라 박막을 적층시켜 형상을 만들어내는 방식으로 최초로 광중합방식을 이용하여 3D system사에서 SLA(Stereolithography Apparatus)방식이 개발되었다. 그리고 광조형법은 TL생산기술(Tool-Less manufacturing technology) 의 일종으로 절삭에 의하여 생산하는 것이 아니고 일정한 파장을 가지는 자외선 레이저에 의하여 광경화성수지를 한층씩 경화시켜 3차원 형상으로 쌓아가는 성형기술이다.[1]

쾌속조형장치는 기하학적 형상을 입력하기 위하여 3차원의 닫혀있는 서피스모델을 삼각형 facet으로 근사화 시킨 STL 파일포맷을 사용하고 있다. 이 파일포멧은 RP업계에서 실질적인 표준이 되어 왔

접수일: 2004년 4월 12일 ; 게재승인일 2004년 10월 7일
\# 동아대학교 기계공학과 박사과정
E-mail : kth0110@donga.ac.kr Tel. (051) 200-6992
* 동아대학교 기계공학과 박사과정
** 동아대학교 기계공학과 시간강사
*** 동아대학교 신소재 화학공학부
**** 동아대학교 기계공학과

다.[2] 현재 대부분의 상용 CAD 프로그램인 AutoCAD, CATIA, Pro/Engineer, I-DEAS, MDT등 여러 종류의 3차원 CAD 설계프로그램들은 모두 STL 파일로 변환시 중복된 자료가 있어서 그 크기가 크고 위상에 대한 정보가 없기 때문에 솔리드 여부를 알 수 없는 단점이 있다. 그리고 작은 각을 가진 예각삼각형으로 인해 연산과정 중에 오류가 발생하고, 특정한 형상의 경우 일정한 범위에서 치수오차를 발생시킨다. 이는 가공형상의 정밀도에 영향을 미칠 수 있다.

쾌속조형장치에서 얻어지는 3차원 형상의 정밀도에 영향을 미치는 인자로는 레이저의 주사속도 및 세기, 층의 두께, 그리고 수축률 등으로 나눌 수 있는데 이중에서도 수지의 경화수축이 정밀도에 크게 영향을 미친다.

STL 파일의 오류 수정과 수축률을 최소화하기 위한 연구가 국내외에서 활발히 진행되어 왔다. Chae 등[1]은 위상정보가 없는 STL에 위상정보를 부여하여 기하학적 처리를 하기 위한 삼각형기반 형상모델의 데이터 구조를 제안하였고, Park 등[3]은 Delaunay 삼각형 분할을 적용하는 삼각각 패치를 재구성하는 방법을 제안하였다. Jeon 등[4]은 윈도우 프로그래밍 기법을 이용하여 구멍의 오류 형태를 분류하여 수정하였으며, Son 등[5]은 교차 다각형법에 의한 원 근사 방법을 적용하여 원의 형상오차를 줄여서 쾌속조형장치의 형상오차를 줄이는 연구를 수행하였다.

Chartoff 등[6]은 수축과 뒤틀림을 적절한 레이저 스캐닝 속도에 의하여 줄이는 연구를 수행하였으며, Jaynti 등[7]은 공정변수를 다구찌 실험계획법을 이용하여 공정변수의 상대적 기여도를 정량적으로 구하였다. 그러나 STL파일의 변환시 생기는 길이의 오차를 이용하여 수축률을 보정하고 이를 이용하여 형상정밀도를 보정하는 연구가 많이 수행되지 않았다.

따라서 본 연구에서는 CAD 프로그램을 이용하여 STL 파일 변환시 형상간격함수와의 상관관계를 확인하고, 형상간격함수에 따라 발생하는 길이의 오차를 확인하고자 한다. 그리고 각축의 길이변화량을 이용하여 수축률을 보정, 가공한 후 형상정밀도를 개선하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 실험에서는 3D systems사에서 제작한 광조형장치인 VIPER si2를 사용하였으며 Fig. 1에 나타내었다. 그리고 실험장비인 VIPER si2는 레이저 크기와 적층 높이에 따라 두 가지 타입(HR type, NR type)으로 적층조형이 가능하다

쾌속조형장치에 사용된 재료인 경화성수지는 일반적으로 특정 파장의 빛을 받게 되면 액체에서 고체로 경화되는 특성을 가지며, 빠른 속도의 레이저를 받으면 빛에 노출된 부분만 굳어지고 노출되지 않은 부분은 액체로 남아 재사용이 가능하다. 그리고 노출시간, 빛의 주사속도 및 재료의 특성 등에 따라 경화되는 깊이 조절이 가능할 뿐 아니라 층과 층 사이에 우수한 접착력이 있어 3차원 형상을 만들기 용이한 장점을 가지고 있다. 본 실험에 사용된 수지는 에폭시 수지로 큰 광에너지를 필요로 하며 아크릴 수지보다 수축 계속 시간이 짧은 특징을 가지고 있다.

Table 1에 본 연구에 사용된 재료인 경화성수지(Accura SI 40)의 경화 후 물성치를 나타내었다.

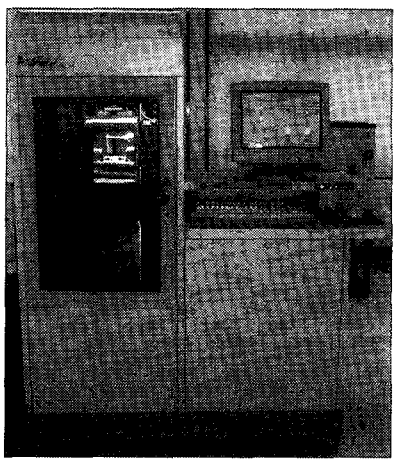

Fig. 1 Photography of RP system (VIPER si2)

Table 1 Mechanical properties of used material (Post cured part)

Tensile strength	69 - 73 MPa
Young modulus	3186 MPa
Elongation at break	4.7 - 6.4 %
Impact strength	37 J/m
Shore hardness	86

설계프로그램에서 모델링한 데이터를 이용하여 쾌속조형장치(RP system)에서 가공한 시작품의 진원도를 프로브(Probe)에 의해 측정하는 시스템을 Fig. 2에 나타내었다.

본 실험에 사용된 진원도 측정기는 Mitsutoyo사의 진원도 측정기(Circular tester)로 에어 베어링에 의해 지지되는 원형 테이블이 회전하면서 진원도를 측정하였다. 데이터의 검출은 2차원 프로브법을 사용하고, 진원도 데이터의 처리는 LSC(Least square center)법을 사용하여 컴퓨터 시스템에 의해 출력하였다. 그리고 진원도 측정기의 사양을 Table 2에 나타내었다.

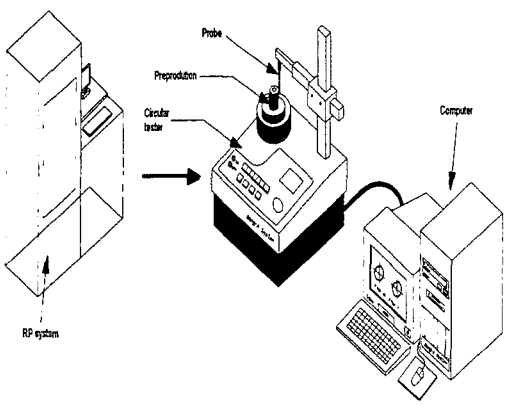

Fig. 2 Schematic diagram of circular test

Table 2 Specifications of circular tester

Items	Value
Maximum diameter	280 mm
Maximum load	20 kgf
Measuring range	± 1,000 μm
Spindle revolution	6 rpm
Air pressure	390 kPa(4 kgf/㎠)

2.2 실험방법

본 연구는 STL파일 변환시 생기는 치수오차와 수축률을 이용하여 다음과 같은 방법으로 오차보정을 하였다.

시편은 AutoCAD를 이용하여 직경 5 mm~30 mm, 높이 10 mm의 원통직경을 5mm씩 증가시켜 모델링하고 STL 파일로 변환하였으며 왼쪽부터 순서대로 모델링한 것을 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 원의 형상이 다각형으로 근사화된 것을 볼 수 있다. 이 과정에서 각축방향으로 길이의 오차가 발생하였다. Fig. 4는 실제가공후의 모습으로 휨이나 뒤틀림을 방지하기 위하여 서포트를 제거하지 않고 후경화 후 측정을 실시하였다.

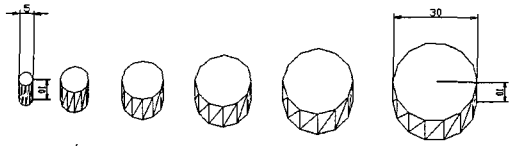

Fig. 3 Dimensional CAD Model of experiment

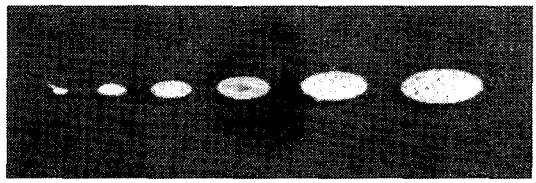

Fig. 4 Shape of RP manufacturing

Fig. 5는 실험방법을 나타낸 것으로 기본수축률을 측정하기 위해서 시편을 제작한 후 오차를 측정하고, 원기둥 형상을 3차원 CAD 프로그램을 이용하여 쾌속조형장치에서 사용할 수 있는 STL 파일

로 변환하여 측정된 오차와 기본수축률을 이용하여 시편을 제작한 후 오차를 측정하였다. 그리고 똑같은 방법으로 STL파일 변환 시 생기는 길이오차를 이용하여 수축률을 보정하고 시편을 제작한 후 가공오차를 측정하고, 기본수축률을 이용하여 만든 가공물과 오차를 비교하였다.

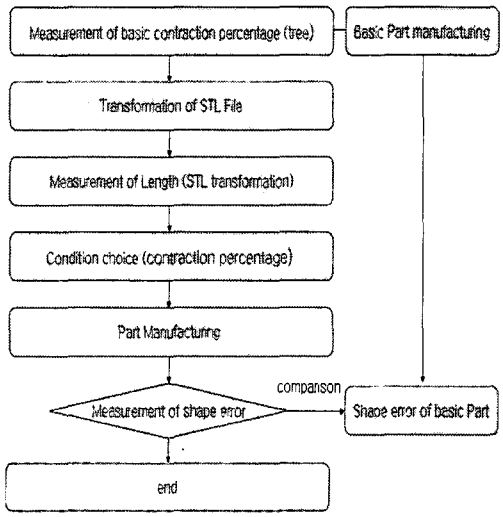

Fig. 5 Flowchart of experiment method

3. 실험결과 및 고찰

3.1 STL파일 변환시 길이오차

일반적인 3차원 CAD 프로그램에서는 STL 파일 변환기를 기본적으로 탑재하고 있다. 그리고 원형형상의 경우 원에 내접하는 다각형으로 근사화 된다. 3차원 CAD프로그램에서는 원형형상을 진원에 가깝게 모델링하기 위하여 시스템변수인 형상간격함수라는 변수를 가지고 있다. 그러나 이 함수는 STL 파일 변환시 원을 n각형으로 등분한다. 이 과정에서 X축과 Y축의 길이 오차가 발생하는데 이는 3차원 모델링 작업시 원의 방정식에 의해 X좌표와 Y좌표가 ($R\sin\theta$, $R\cos\theta$)와 같이 극좌표로 구할 수 있다. 하지만 STL파일 변환시 쾌속조형장치에서 가공할 수 있는 절대 좌표로 변환된다. 이 때 X축과 Y축의 길이오차가 발생하였다. 이를 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 6 Transformation of STL File (Length error)

Table 3은 지름이 5 mm일 때 형상간격함수에 따른 길이 오차를 나타낸 표로 형상간격함수가 1일 때 최대 X축 0.006 mm, Y축 0.003 mm의 오차가 발생하는 것을 보았다. 그리고 형상간격함수 2, 4, 6, 7, 10일 때는 길이의 오차가 발생하지 않았다. 그러나 실제 가공에서는 형상간격함수가 높더라도 2이상이 되면 형상정밀도가 나빠진다. 그리하여 형상간격함수 2일 때 가공오차와 형상간격함수가 1일 때 생긴 길이오차를 보정, 가공하여 X축과 Y축의 길이를 비교하였다.

Table 3 Length error difference with respect to facetres

facetres	x	y
1	0.006 mm	0.003 mm
2	0 mm	0 mm
3	0 mm	0.004 mm
4	0 mm	0 mm
5	0.001 mm	0.001 mm
6	0 mm	0 mm
7	0 mm	0 mm
8	0.001 mm	0 mm
9	0.001 mm	0 mm
10	0 mm	0 mm

Table 4와 Fig. 7은 형상의 변화에 따른 각축의 길이오차를 나타내었으며, Fig. 7은 5 mm ~ 30 mm까지의 원형형상을 STL 파일로 변환했을 때 X축과 Y축의 오차를 그림으로 나타내고 있다. X축은 20 mm 이하에서는 차가 줄어들다가 20 mm이상에서는 형상이 커지면서 일정하게 유지하고 Y축은 20 mm 이상에서는 줄어들다가 일정해지며 20 mm이상에서는 오차가 증가하면서 일정하게 유지되는 것을 알 수 있었다.

Table 4 Langth error for variation of shape (X axis, Y axis)

	X axis	Y axis
5 mm	0.006 mm	0.003 mm
10 mm	0.003 mm	0.001 mm
15 mm	0.002 mm	0.001 mm
20 mm	0.001 mm	0.002 mm
25 mm	0.001 mm	0.002 mm
30 mm	0.001 mm	0.002 mm

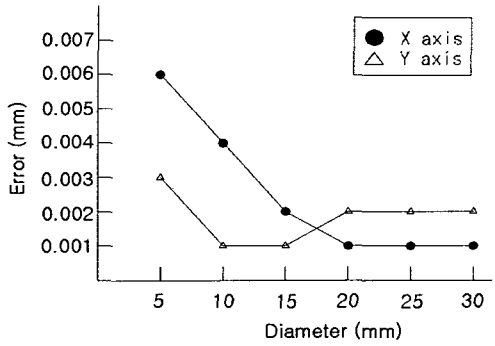

Fig. 7 Length error (at transformation of STL file)

3.2 수축률에 의한 길이오차보정

$$C_1 = \frac{L_2}{L_1} \tag{1}$$

$$C_2 = \frac{L_2 + d}{L_1} \tag{2}$$

식 (1)의 기본수축률(C_1)은 모델링치수값(L_2)을 가공후 측정값(L_1)으로 나누어 계산하고, 식(2)의 보정수축률(C_2)은 모델링 치수값(L_1)에 STL 파일변환 시 생기는 길이오차(d)를 더한값에 가공후 측정값(L_1)으로 나누어 계산한다.

식(1)로 구해진 기본수축률을 이용하여 3차원 형상을 RP로 제작하여 측정한 결과 X축으로 0.1 mm, Y축으로 최대 0.18 mm의 오차가 발생하였다. 그리고 형상의 크기가 커지면서 Y축의 가공오차가 크게 발생하였다. 이는 형상의 크기에 따라 일정한 수축률을 주어 가공하는 것이 아니라, 크기에 따라 형상의 오차를 줄이기 위하여 STL파일 변환 시 X축과 Y축에서 발생하는 길이 오차를 기본수축률에 포함시켜 보정수축률인 식 (2)를 형상가공에 적용한 후 가공상의 오차를 측정한 결과 형상오차를 0.02 mm 이하로 줄일 수 있었다.

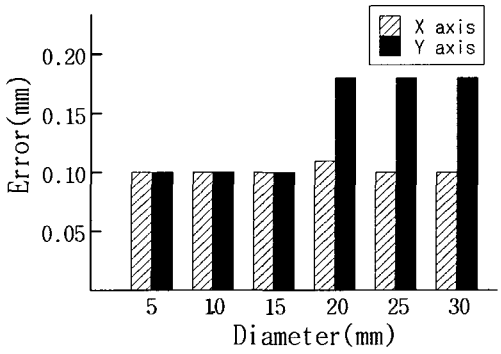

Fig. 8 Length error of shape (at Normal shrinkage rate)

Fig. 8은 기본수축률을 이용하여 형상을 가공한 후 측정결과를 나타냈었다. X축보다는 Y축의 형상 크기가 작은 것 보다 큰 것의 오차가 많이 발생함을 알 수 있었고, X축 보다 Y축에서 더 많은 길이 방향의 오차가 발생하였다.

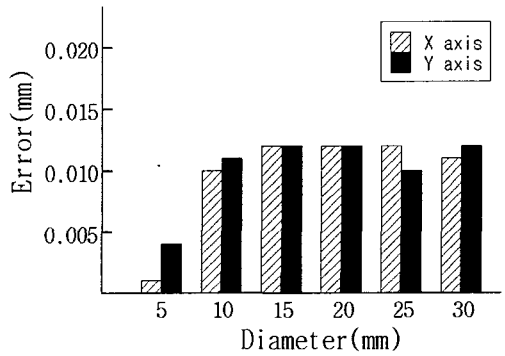

Fig. 9 Length error of shape (at compensation shrinkage rate)

Fig. 9는 보정수축률을 주어서 얻어진 형상을 측정한 결과로서 전체적으로 작은 형상일수

록 미세한 길이의 변화로도 형상에 큰 영향을 미치는 것을 볼 수 있으며, 파일변환 시 생기는 길이오차를 수축률로 보정함으로써 형상의 정밀도를 높일 수 있었다.

Z-axis의 경우 후 처리시 메칠알콜로 Part를 세척을 하게 되는데 여기서 2~3 Layer 정도는 사라지게 됩니다. 그러므로 가공 후의 수축률의 변화를 파악하는데는 문제점이 있고 STL 파일을 쾌속조형장치에 바로 작업하는 것이 아니라 주사경로를 생성할 수 있는 새로운 파일로 변환한다. 이 때 최저점의 Layer를 제거함으로써 길이방향의 오차를 수정하는게 수축률보다 훨씬 수월한 작업을 할 수 있어 Z-axis방향의 길이오차를 고려하지 않았다.

4. 결론

STL 파일 변환시 생기는 오차와 수축률의 보정을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 쾌속조형장치에 이용되는 STL 파일의 정밀도는 모델링시 사용되는 형상간격함수값의 영향을 받음을 확인하였다.
2. 원형형상에서 STL파일의 경우 파일변환 시 형상간격함수에 따라 길이의 오차가 발생하였다. 이는 원형 형상의 X,Y 좌표는 극좌표로 표시되는데 실제 형상의 가공에서는 절대좌표로 변환하기 때문에 생기는 오차라고 생각된다.
3. 기본수축률을 이용하여 얻어진 형상치수에 파일 변환 시 생기는 오차를 수축률을 이용하여 보정하고 형상을 가공함으로써 가공상의 오차를 20 ㎛이하로 줄일 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 동아대학교 신소형재 가공청정 공정개발 연구센터(과제번호 : R12-2002-058-06001-0)의 지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. Chae, H. C., "Creation of Topological Information from STL Using Triangle Based Geometric Modeling," KSPE, Vol. 14, No. 2, pp. 136-144, 1997.
2. Choi, H. T., Lee, S. H., "A Study on Error Verification of STL Format for Rapid Prototyping System," KSPE, Vol. 13, No. 10, pp. 46-55, 1996.
3. Park, J. B., Son, Y. J., Kim, S. K., Jeon, E. C., Kim, J. W., "A Study on DB Construction for Error Modification of STL Format and Efficiency by Shape Restoration," KSPE, Vol.16, No.9, pp. 143-148, 1999.
4. Myung, T. S., Chae, H. C., Kim, O. H., "Application of Delaunay Triangulation on RP," KSPE, Vol. 8, No. 3, pp. 35~41, 1996.
5. Hong, M. S., Shin, K. H., Son, S. G., "A study on RP Part Production Using Intersecting Circle Approximation Method," Vol. 9, No. 1, pp. 68-74, 2000.
6. Chartoff, R. P., Flach, L., Weissman, P., "Meterial and Process parameter that affect accuracy in stereo-lithography," The sixth international conference on rapid prototyping, 1995.
7. Park, J. B., Son, Y. J., Kim, S. K., Jeon, E. C., Kim, J. W., " A Study on DB Construction for Error Modification of STL Format and Efficiency by Shape Restoration," KSPE, Vol.16, No.9, pp. 143-148, 1999.
8. Park, Sang Rhang, Park, Dong Sam, "Forming Error and Compensation in RP Using SLA," KSPE, Vol. 19, No. 3, pp. 152-159, 2002.