

레이저 용융 적층 공정을 이용한 정밀 형상 제작

김재도*, 전병철**, 권택열**, 이영곤**, 신동훈**

Manufacture of Precision Model Using Laser Melting Process

Kim Jae-Do*, Jeon Byung-Cheol**, Kwon Taek-Yeol**, Lee Young-Gwan**,
Shin Dong-Hoon**

*인하대학교 기계공학과, *인하대학교 대학원

ABSTRACT

For the direct metal shape processing the powder feed device which is different from the widely used in rapid prototyping. is developed, The three dimensional object is shaped with the melting metal powder. The developed research has applied to rapid prototyping in ultraprecision for MEMS and medical science fields required of rapid manufacture of complex shape. The goal of this study make 3D model which has precision accuracy. Powder spreading apparatus has been more improved because that the control of powder spread is very important in layer manufacturing. It consists of the vibration motor, nozzle and tube which supplies various metal powder. This apparatus could control the spreading velocity that could control powder spreading thickness. Laser on/off switch was adapted because laser scanning velocity must be preserved constantly to prevent heat transformation of laser overheating. The error between sintered thickness and experimental one occurred by shrinkage in sintering melting process. The problem of heat transformation was solved by On/Off switching system.

Key Words : layer manufacturing (적층법), powder spreading apparatus (분말도포장치), on/off switch(단락스위치), error compensation(오차보정)

1. 서론

쾌속조형기술은 설계된 제품 형상의 기하학적 인 복잡성이나 반복성에 전혀 구애받지 않고 그

어떤 제품 형상도 조형이 가능하다. 물론 초기에 이 기계장치의 발명 목적은 'RP' 라는 용어가 시사하듯이 컴퓨터나 수작업에 의해 설계된

제품 형상을 신속하게 관능 감각을 통해서 관찰하고 그에 따른 형상 설계의 내용을 검증하기 위함이었다. 그러나 이 기술이 최근 그 발전의 행보를 빨리함에 따라 기존에는 상상할 수도 없었던 복잡한 제품 형상의 신속한 모형 제작을 요하는 MEMS분야, 의학분야와 같은 고정밀 제품에 쾌속조형기술을 이용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 쾌속조형기술을 이용하여 고정밀을 요하는 실제제품의 제작에 적용하기 위해서는 시작품의 정밀도 문제를 우선적으로 해결해야 한다. 이러한 정밀도 문제는 특히 MEMS나 의공학등의 고정밀 분야에서 중요하게 대두되고 있다.

SLS(Selective Laser Sintering)는 분말 소재를 레이저의 주사로 분말 온도를 순식간에 용융 온도까지 상승시켜 하층과 용융 결합시킨 후 이것을 각층에 반복하는 RP의 한 기법으로서 수작업이나 CNC로 가공되어진 원형 모델에 비하여 정밀도는 조금 떨어지나 제작 속도, 무인 가동, 비용, 제작물의 복잡성 등에서 커다란 장점을 가지고 있다.^[1-2] 또한 SLS를 이용한 RP원형 모델은 시작 금형의 제작 및 시작 단계에서의 공법 개발에 매우 중요한 역할을 수행할 수 있다. 이러한 장점에도 불구하고 SLS에서는 정밀도의 문제점이 있는데 이를 위해 열적 모델링을 이용한 해석을 통해 오차를 미리 예측하여 형상을 제작할 수도 있다. 분말을 소재로 하는 SLS의 방법에 있어서 금속분말은 비선형적인 요소들이 많아 모델링을 통한 해석 및 예측으로는 완벽한 오차보정이 힘들기 때문에 본 연구에서는 금속분말의 소결용융시 발생하는 오차를 실험적으로 규명하여 오차보정하는 것에 초점을 맞추었다.^[3-5,10]

SLS공정에 대한 쾌속조형장치에서 금속분말의 소결용융시 발생하는 오차를 실험적 방법을 통해 분석하고 STL file을 재해석하여 성형품의 정밀도를 향상하고 가공경로 변화를 통해 적층시의 결속력을 강화하고자 한다. 또한 본 연구

에서는 기존의 RP 프로세스 방식이 일정한 적층두께에 의한 형상 제작 방식 때문에 경사도에 따라 형상정밀도가 달라지는 문제점을 해결하기 위하여 적층두께를 조절할 수 있는 실험장치를 사용하였다. 레이저소결 적층방식의 형상 제작 방법을 개선하고 3차원 정밀 형상 제작을 위해 필요한 가공변수에 대해 연구하였다.

2. 실험장치 및 방법

레이저 소결용융 적층 시스템은 직접 제작하였으며 120 W의 CO₂레이저를 사용하였다. 이 레이저는 TEM₀₀ 모드의 원형빔이고 작업크기는 최대에서 400×400×200 (mm)이다. X-Y 테이블은 백래쉬가 0.01 mm이며 정밀도 0.01 mm의 가이드를 사용하였다. 또한 정밀형상 제작을 위하여 가이드 이송에 의한 진동으로 발생하는 오차를 줄이기 위해 형상물의 받침대를 본체로부터 완전히 분리하여 진동을 방지하였다.

기존의 분말을 사용하는 쾌속조형장치의 적층시스템은 롤러와 엘리베이터 장치를 이용하여 0.1mm씩 정확한 제어에 의하여 쌓도록 되어 있다. 하지만 이러한 장치는 작은 형상을 제작하는 경우에 불필요한 부분에까지 도포할 뿐만 아니라 정확히 두께를 제어하는 것이 쉽지가 않고 정밀 형상을 제작하기 위한 두께 조절이 힘들다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 Fig. 1과 Fig. 2와 같은 분말공급장치를 개발하였다. 이 장치의 원리는 금속분말을 tube를 통해 노즐에 공급하고 노즐에 편심이 된 소형 모터를 부착함으로써 진동에 의해 일정량의 분말을 노즐의 직경과 같은 간격으로 도포시키면서 가이드의 이송속도를 조절하여 적층두께를 정확히 조절할 수가 있고 실제 제작되는 부위에만 분말을 공급하기 때문에 분말의 낭비를 줄일 수가 있다. 또한 보호가스(Ar)를 분말 이송관과 함께 제작, 결속시켜 분말 도포와 같은 방향이 되도록 분사하였다.^[6-9]

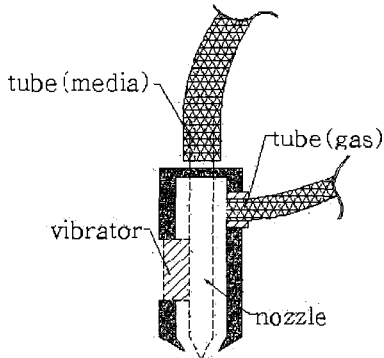


Fig.1 Diagram of powder spreading apparatus

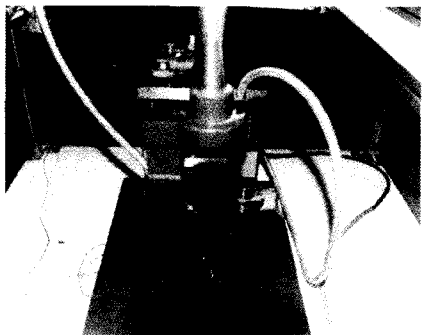


Fig. 2 Photograph of powder spreading system

3. 실험방법

3.1 분말 도포 장치 실험

본 연구에서 사용하고 있는 재료는 비교적 용융점이 낮고, 국내에서 쉽게 구할 수 있는 알루미늄 분말을 이용하여 실험을 하였다. 알루미늄 분말입자의 크기는 약 180 μ m(200mesh) 정도이다. 이 분말을 도포하는 가이드 이송속도의 변화와 조정나사를 통해 노즐의 직경 분말이 노즐을 통해 일정하게 나오도록 하였다. 일정한 적층두께로 층을 깔고 레이저 출력을 120W로 선정하고 다음 주사속도를 변화시키면서 소결된 이후의 두께와 도포시의 두께를 비교하고 최대로 적층될 수 있는 적층두께를 측정하였다.

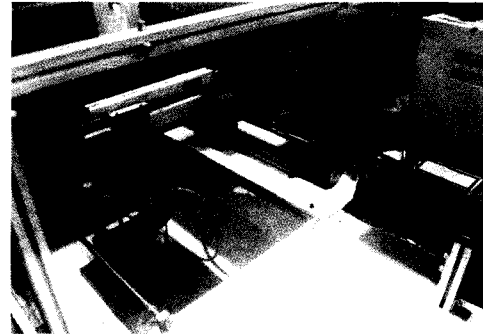


Fig. 3 Photograph of laser sintering system

3.2 양끝 부분에서의 과용융 실험

X-Y 테이블 가이드는 STL파일로부터 변환된 NC코드에 의해 레이저의 열원을 작업대에 보낸다. 스텝모터를 사용하기 때문에 항상 시작과 끝에서 등속으로 움직일 수가 없다. 즉, 초기 속도가 주어진 상태에서 가속도에 의해 최고속도에 이르렀을 때부터 등속으로 움직이게 된다. 이러한 문제점 때문에 지그재그 방식으로 레이저를 주사하여 형상을 적층하는 RP 시스템에서는 시작점과 끝점에서의 속도 변화에 의해 레이저의 에너지가 형상의 양끝 면에 지나치게 공급되어 소결된 금속분말이 과용융이 일어나 열변형 현상이 생기고, 이것은 형상의 정밀도 유지에 중요한 영향을 미친다. 이러한 열변형을 줄이기 위하여 실제로 가이드의 속도가 변하는 구간과 과용융이 일어나는 구간을 비교하여 레이저 On/Off 스위치에 의해 등속구간에서 레이저가 주사되도록 하여 형상을 제작한다.^[11-13]

3.3 각 형상의 X-Y 길이에 따른 수축률 측정

Fig. 4와 같이 각 길이별로 형상을 제작한다. X방향으로는 20 mm로 일정하게 제작하고 Y방향으로 1 mm부터 20 mm까지 차례로 제작한다. 이렇게 제작한 시편은 휨(curving)현상이 발생하여 정확한 수축률 측정이 어려워 Fig. 5와 Fig. 6과 같이 X-Y 방향으로 격자를 이용해 각각 측정하여 수축률을 알아보고 오차보정을 통해 STL file을 재해석한다.

재해석한 데이터로써 형상을 다시 제작하여 오차 보정 이전의 시편과 비교하여 보고 최종적으로 3차원 형상을 제작한다.

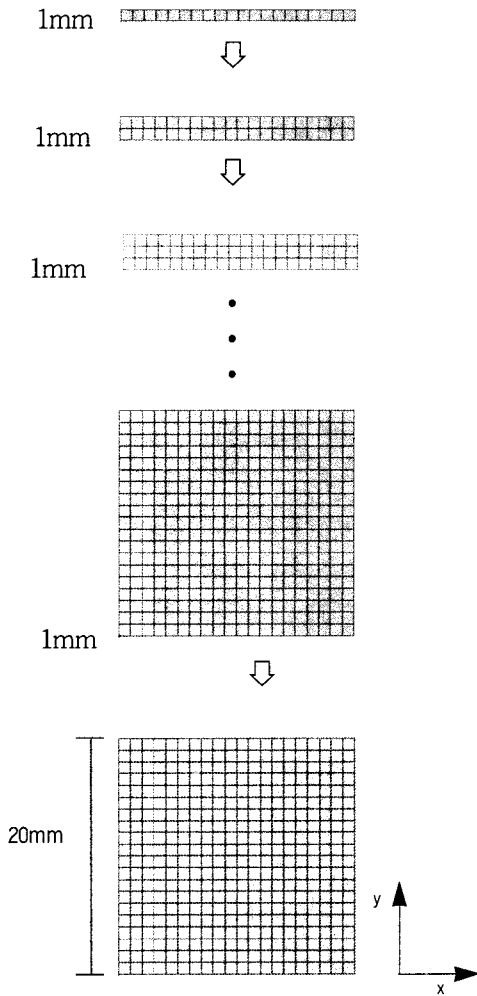


Fig. 4 Test models for accuracy compensation

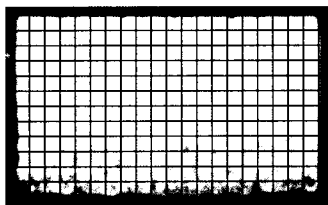
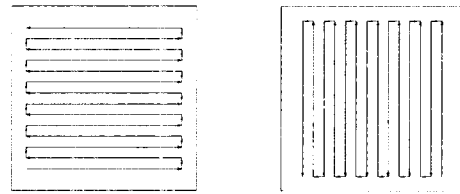


Fig. 5 Test specimen for accuracy compensation

3.4 가공경로 변화에 따른 적층 실험

한층 적층시마다 Fig. 6을 반복한다. 우선 Fig. 6(A) 경로로 한층을 적층하고 그 다음 Fig. 6(B) 경로로 한층을 적층하며 계속해서 이 과정을 반복하여 적층이 끝난 후 하나의 경로로만 적층한 것과 결속력을 비교하였다.



(A) X path of laser scanning (B) Y path of laser scanning

Fig. 6 Laser scanning method

3.5 적층두께와 경사도에 따른 정밀도

적층식 쾌속조형방법은 근본적으로 경사진 면에서 적층두께에 따라 경사정밀도가 달라지는 특성이 있다. 적층두께가 얇을수록 경사정밀도는 향상되지만 가공작업시간이 오래 걸리고 그 점을 보완하기 위해 적층두께를 두껍게 한다면 경사정밀도가 나빠지게 되며 층이 지게 된다.^[14-17] Fig. 7과 같은 경사진 형상을 제작하여 일정한 적층두께와 적층두께를 다르게 했을 때와 비교하였다. 즉, 적층두께의 조절에 의하여 일정한 정밀도를 가지는 3차원 형상을 얻을 수 있도록 하였다.

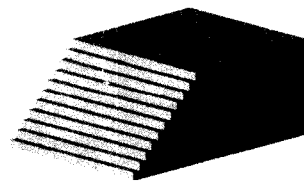


Fig. 7 Inclined test part

4. 결과 및 고찰

4.1 가공조건 변화에 따른 적층 실험

Fig. 8은 레이저의 주사속도를 30mm/s로 하고 분말도포장치의 노즐 직경을 0.8mm와 1mm로 하였을 때 분말의 도포 속도에 따른 도포 두께의 결과

를 나타내었다. 측정은 50번 정도 도포하여 1번 도포한 두께를 구한 것이다. 직경 1mm의 노즐일 때의 도포두께가 0.8mm의 도포두께보다 2배정도 더 두꺼움을 알 수가 있고 시간에 대한 분말 공급량을 일정하게 하였을 때, 분말을 고르게 공급하기 위한 가이드의 이송속도에 따라 정확한 적층두께를 얻을 수가 있었다.

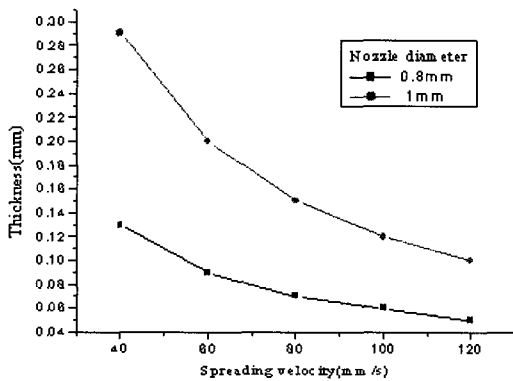


Fig. 8 Result for powder spreading thickness

Table 1은 노즐 직경 1mm의 도포 두께에서 레이저를 30mm/s의 주사속도로 금속분말을 소결시켰을 때, 소결된 형상의 1층에 대한 두께를 측정 한 것이다. 도포 속도가 100~200mm/s까지는 소결된 분말의 두께가 0.01mm 정도로 도포 두께보다 두꺼워 짐을 알 수가 있다. 그리고, 100mm/s보다 느려지게 되면 그 두께가 크게 늘어나게 되는데, 도포 두께가 두꺼워지면서 레이저가 소결시킬 수 있는 두께가 되지 못하기 때문에 층간 결합이 약해지면서 사이가 조금씩 벌어지게 된다. 레이저의 주사속도를 40mm/s로 하였을 때는 도포속도가 100mm/s에서 층 사이가 벌어지기 시작하였고 20mm/s로 하였을 때는 레이저의 열원의 지나친 공급으로 소결하려는 분말 주변까지 소결시키게 되어 정확한 형상을 얻을 수가 없었다.

Table 1 Comparison of thickness after laser sintering

Spreading velocity(mm/s)	Spreading thickness(mm)	Spreading thickness(mm)
60	0.20	0.24
80	0.15	0.19
100	0.12	0.13
120	0.10	0.11
150	0.09	0.10
200	0.08	0.09

Table 2는 초기속도 2.5mm/s, 최고속도를 30mm/s로 하고 속도를 변화시켰을 때 속도가 변하는 구간 폭과 실제 과용융 현상이 발생된 구간 폭을 비교한 것이다. 0.1~0.4mm/s에서는 속도가 변하는 구간의 길이 만큼 분말의 과용융 현상이 일어났고 0.5mm/s 이후에서는 과용융 구간 길이가 1.8~1.9mm 로 일정하였다.

Table 2 Comparison between over melted width and velocity changed width

Acceleration (mm/ms ²)	Over melted width(mm)	Velocity changed width(mm)
± 0.1	4.9	4.5
± 0.2	2.3	2.2
± 0.3	2	1.5
± 0.4	1.9	1.1
± 0.5	1.8	0.9
± 0.6	1.8	0.7
± 0.7	1.8	0.6

소결 용융 현상은 열을 가하여 분말입자 사이의 접촉면에서 표면적을 감소시켜 물질 이동의 확산현상을 일으킨다. 높은 레이저 출력에 의해 접촉면의 목 부분에서의 확산속도가 매우 빠르기 때문에 레이저 주사속도가 조금이라도 느려지게 되면 적당한 강도 및 표면을 가지는 소결이 이루어지지 못한다. 분말입자가 구형대로 급성장하여 과용융 현상이 일어난다. 분말에 집중되는 레이저 열의 영향은 미치는 부분이 일정하기 때문에 가속구간의 길이가 짧아져도 주위 분말이 일정하게 과용융되었다.

Fig. 9는 0.1mm씩 10층을 쌓아 15mm×15mm×1mm의 형상을 제작한 결과이다. Fig. 9(a)는

양끝에서의 속도의 변화에 의해 생긴 과용융된 부분을 나타내고, 그러한 현상 때문에 열변형이 심하게 나타나 형상면에 균열이 생기는 것을 알 수 있었다.

Fig. 9(b)는 등속구간에서 레이저 On/Off 스위치로 레이저의 열원을 단속하여 만든 형상이다. 열변형이 발생하지 않아 전면적의 가공상태가 일정하였다.

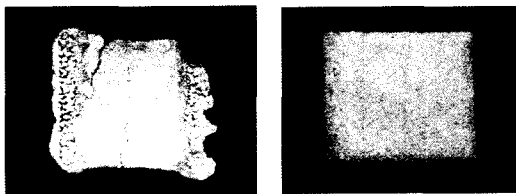
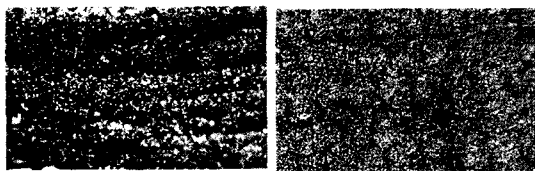


Fig. 9(a) Over melted part Fig. 9(b) Laser on/off part

4.2 가공경로 변화에 따른 적층 실험

Fig. 10(a)는 Fig. 6(a)의 경로로 즉, 하나의 경로로만 적층한 형상의 옆면을 나타내고, Fig. 10(b)는 Fig. 6의 (a)와 (b)를 한 층씩 번갈아가면서 적층한 형상의 옆면을 나타낸다. Fig. 10(a)에서 층과 층사이에 틈이 발생함을 알 수 있다. 반면에 Fig. 10(b)에서는 약간의 물결 현상은 생겼으나 층과 층사이에 틈이 발생하지 않아 Fig. 10(a)보다 결속력이 강한 것으로 나타났다. 위의 결과를 볼 때 금속분말을 이용한 캐속조형법에서는 한 층씩 적층할 때마다 그 경로를 서로 수직으로 바꿔가며 제작한다면 결속력이 강한 형상을 제작할 수 있을 것이다.



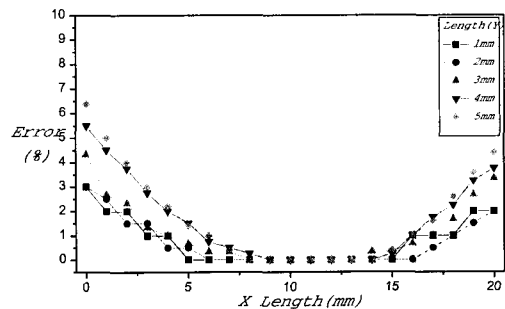
(a) only X path(x20) (b) X path and Y path(x20)

Fig. 10 The specimen made with scanning method

4.3 레이저 소결용융후 X-Y 길이에 따른 수축률

Fig. 11은 시편의 크기를 X방향으로는 20mm로 일정하게 하고 Y방향으로 1 mm부터 20

mm까지 1 mm간격의 시편을 각각 제작하여 오차를 측정된 결과를 나타낸다. 모든 시편들에서 X방향으로 0~5 mm와 15~20 mm(0~25 %, 75~100 % 구역) 사이에서, 즉 양가장자리에서 오차가 많이 발생했다. 오차는 최대 8.5 %이다. 10±5 mm 부분에서는 1/100단위로 측정된 결과, 거의 발생하지 않았다. 이것은 분말이 가지고 있는 공극들이 소결용융 과정을 거쳐 분말이 액상으로 바뀔 때 주변의 영향을 많이 받는 양가장자리 부분이 가운데 부분보다 더 수축한 것으로 사료된다. Fig. 12는 실제 시편의 양가장자리에서의 수축을 나타내는 사진이다. 시편크기별로는 1 mm부터 8 mm의 시편까지는 오차가 증가하다가 그 이후로는 시편의 크기가 커짐에 따라 오차는 감소한다. 이것은 분말이 가지고 있는 공극들이 소결용융하여 액상으로 변화한 후 냉각에 의해 고체화될 때 밀도가 증가하여 수축이 일어나는 것이 시편의 크기가 커짐에 따라 이전에 소결용융된 분말들의 응집력이 커져 수축이 줄어드는 것으로 사료된다. 또한 Fig. 12와 같이 레이저 조사 방향으로는 수축이 거의 일어나지 않았다. 이것은 레이저 조사 방향의 수직 방향으로는 첫 경로를 소결용융 한 후 옆 경로를 소결용융하므로 첫 번째 경로와 두 번째 경로 사이의 온도차가 커 소결용융시 열변형에 의해 수축이 일어나지만 레이저 조사 방향의 경우에는 한 경로이므로 온도차가 크지 않아 수축이 거의 일어나지 않은 것으로 사료된다.



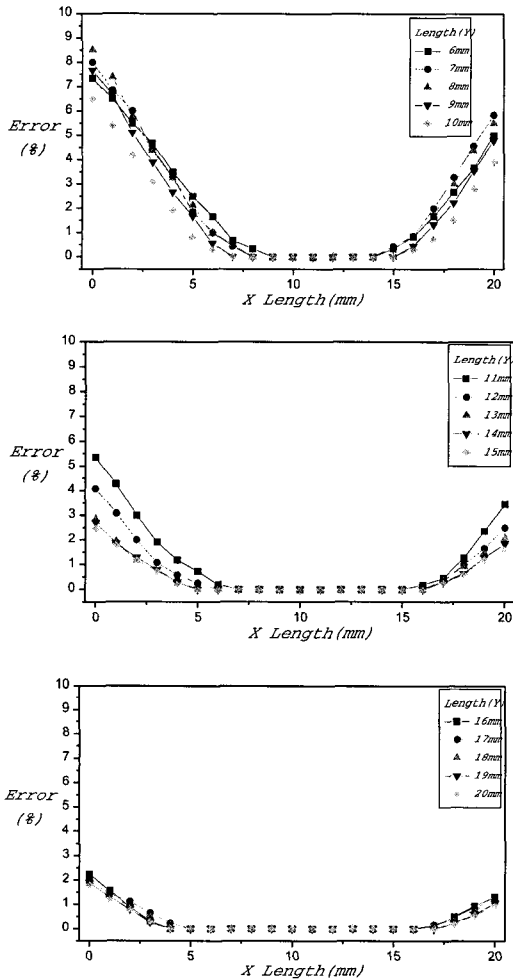


Fig. 11 Error with shrinkage rate

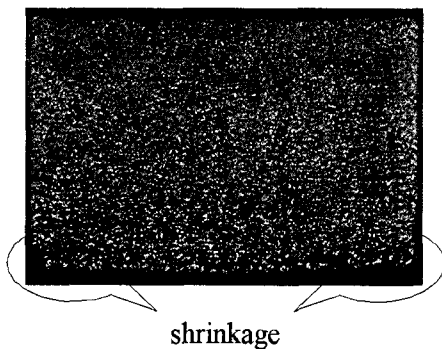


Fig. 12 Photograph of shrinkage

4.4 오차보정에 의한 형상 제작

Fig. 13는 레이저 소결용융 실험후 X-Y 길이

에 따른 오차를 측정하여 오차보정에 의한 STL file의 재해석을 통해 제작한 형상들이다. 그림에서 오차보정에 의한 STL file의 재해석을 통해 양가장자리에서, 즉 X방향의 0~25 % 구역, 75~100 % 구역에서 수축에 의한 휨현상이 거의 발생하지 않음을 알 수 있다. 양가장자리에서의 STL file 변형으로 형상의 가운데 부분에 또다른 열영향이 발생하여 불규칙한 오차가 발생하였으나 그 오차는 1 % 미만으로써 정밀도에는 크게 영향을 미치지 않을 것이다.

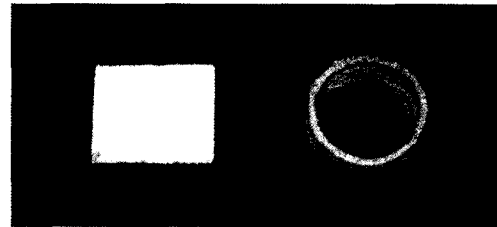


Fig. 13 Photograph of the error compensated specimen

5. 결론

본 연구에서는 SLS(Selective Laser Sintering) 방식의 패속조형법에서 열변형을 줄이기 위한 방법과 RP장치의 적층에 의한 특성을 분석하여 3차원 정밀형상을 제작할 수 있도록 가공 공정 및 변수를 실험을 통해 고찰한 후 수축(shrinkage)에 의해 발생하는 오차를 보정하여 3차원 형상을 제작하는데 있어서 정밀도를 향상시켜 고정밀분야 적용의 가능성을 확인해 보고 또한 가공 경로의 변화에 따른 적층 실험을 통해 층간의 결속력 강화를 확인하기 위해 실험한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. SLS에 적합한 분말도포장치를 개발하여 적층두께를 조절할 수 있고 일정한 두께를 가지는 형상을 제작할 수 있었다.
2. Zigzag방식의 레이저 주사가 갖는 단점인

- 비등속구간에서의 열변형을 레이저 On/Off 장치를 통해 등속구간화하여 형상을 제작함으로써 열변형을 줄일 수 있었다.
3. SLS 방식의 쾌속조형법에서 여러 길이의 시편을 제작하여 수축에 의한 오차를 측정 한 결과 각 시편들의 양가장자리에서 오차가 크게 발생했으며 그 비율은 평균 0~25 %, 75~100 % 구역이었다. 각 시편들 크기별로는 시편의 크기가 작아질수록 오차가 크게 발생하였으며 레이저 주사 방향으로서는 거의 오차가 발생하지 않았다.
 4. 레이저 소결용융 실험후 X-Y 길이에 따른 오차를 측정하여 오차보정에 의한 STL file의 재해석을 통해 형상을 제작하여 본래의 STL file 데이터와 거의 일치하는 형상을 얻을 수 있었다.
 5. 레이저 소결용융시 가공경로를 각 층마다 서로 수직인 방향으로 바뀌가며 적층함으로써 형상체의 결속력, 소결용융 정도, 강도 등의 면에서 우수한 형상을 얻을 수 있었다.
- 참고문헌**
1. 양동열, "쾌속 3차원 조형법의 소개와 쾌속 금형제작에의 응용," 제1회 쾌속 3차원 조형 및 금형기술혁신 심포지움, pp. 1-14, 1995
 2. Paul, F. Jacobs, "Rapidprototyping & Manufacturing," McGraw-Hill inc, pp. 1-23, 1992.
 3. Paul, F., Jacobs, "Stereolithography and other RP&M Technologies," ASME, pp. 1-25, 1996.
 4. 이은덕 외 3인, "신경망을 이용한 광조형 작업변수 결정," 쾌속시작기술연구회 1999년도 춘계학술대회 논문집, pp. 61-68, 1999.
 5. M., J., Wozny, "Data Driven Solid Freeform Fabrication," IFIP Transactions B-3 : Human Aspect in Computer Integrated Manufacturing, pp.71-82, 1992.
 6. David, miller, Carl, Deckard, and John, Williams, "Variable beam size SLS workstation and enhanced SLS model," Rapid prototyping Journal, Volume 3, Number 1, pp. 4-11, 1997.
 7. J., Mazumder, J., Choi, Nagarathnam, J., Koch, and Tool steel for 3-D Components," JOM, Volume 49, Number 5, pp. 55-60, 1997.
 8. Ian, Gibson, Dongping, Shi, "Material properties and fabrication parameters in selective laser sintering process," Rapid prototyping Journal, Volume 3, Number 4, pp. 129-136, 1997.
 9. 백대균, 고태조, 김희술, "정면밀링 작업에서 절삭력을 이용한 On-Line 표면 조도 감시에 관한 연구," 한국정밀공학회지 제14권, 제1호, pp. 185-192, 1997.
 10. 김재도, 전병철, "CO2 레이저에 의한 선택적 소결법," 한국정밀공학회지, 제15권, 제7호, pp. 18-25, 1998.
 11. 강영주, 김재도, "고출력 CO2 레이저빔에 의한 구리, 청동/알루미늄 합금 클래딩," 대한용접학회지, 제13권, 제12호, pp. 109-115, 1996.
 12. 권택열, 김재도, "레이저 소결적층법을 이용한 정밀 형상 제작," 한국정밀공학회 99년도 추계학술대회 논문집, pp. 1009-1013, 1999.
 13. 명경학, 전병철, 김재도, "Trueform과 폴리프로필렌을 이용한 선택적 레이저 소결," 쾌속시작기술연구회 춘계대회 논문집, pp. 8-15, 1998.
 14. 신민철, 손기현, 양동열, "Experimental

- Study of Direct Metal Prototyping Process,” 한국정밀공학회 95년도 춘계학술대회 논문집, pp.169-175, 1995.
15. 박근, 이상찬, “쾌속 3차원 조형법을 이용한 시작기술 및 시작금형 제작기술 개발,” 대한기계학회 논문집, pp. 1582-1589, 1996.
 16. 손현기, 양동열, “직접식 조형법의 금속분말 적층부 소결에 관한 연구,” 한국정밀공학회 97춘계학술대회 논문집, pp. 552-556, 1997.
 17. Irem Y. Tumer, David C. Thompson, Kristin L. Wood, “uantification of Part Surfacequality : Application to Selective Laser Sintering,” World Automation Conference Proceedings, Montpellier, France, May, 1996.