

## SLS 공정에서 최적 공정 조건 도출을 위한 실험적 연구

배성우\*, 유성연<sup>+</sup>, 김동수<sup>++</sup>

(논문접수일 2011. 11. 21, 수정일 2012. 02. 02, 심사완료일 2012. 02. 07)

### An Experimental Study for Drawing of Optimal Process Condition in the SLS Process

Sung-Woo Bae\*, Seong-Yeon Yoo<sup>+</sup>, Dong-Soo Kim<sup>++</sup>

#### Abstract

Selective Laser Sintering(SLS) system consists of various element technologies. Main components of the system include a position control system, a speed control system of the roller, and nitrogen atmosphere furtherance for the powdered sintering. Other systems which make the core of the SLS system are build room and the feed room for powder epitaxial, a temperature control system, and a scan path generator for the laser. The powder material for laser sintering is necessary to produce prototypes in Solid Freeform Fabrication(SFF) based on SLS process. This powder material is sintered in powder room using CO<sub>2</sub> laser after spreading evenly using roller to reproduce mold via SFF. This study addresses an SFF system by using the SLS process which applies single laser system to enable manufacturing of 3D shape. And to evaluate applicability of the single laser system, experiments were conducted with optimal fabricating process.

**Key Words** : Solid Freeform Fabrication(임의형상제작), Selective Laser Sintering(선택적 레이저 소결), Scan path(스캔 패스)

### 1. 서론

제품의 개발 주기를 단축시키기 위한 여러 동시공학적 방법이 적용되고 있는데, 이 중 임의형상제작(Solid Freeform Fabrication: SFF) 방법은 전 세계의 기업 및 연구소에서 시작품 제작용으로 널리 활용되고 있다. 임의형상제작 방법은 CAD/CAM, 레이저, 프린팅, 재료, 제어기술 등이 복합된 첨단 가공 기술로서 기존의 절삭가공 방법과는 달리 3D CAD 데이터, CT 또는 MRI 스캔 데이터, 3차원 디지털링 데이터로부터 얇은 두께로 절단해 단면형상을 얻은 후, 각 단면들을 한층씩 적층함으로써 원하는 형상을 제작하는 방식이다<sup>(1)</sup>. 따라서 복잡한 외관 또는 제품의 내관 형상까지도 손쉽게 자동으로

제작할 수 있어 자동차, 항공부품, 기계부품, 전자제품 등의 제조업은 물론이며 신발, 귀금속, 의공학, 광학, 조형예술, 건축, GIS, 유물복원, 소규모 디자인 하우스, 교육 및 연구기관 등 모든 산업분야에서 광범위하게 이용되고 있다.

이러한 SFF 기술은 신속한 실물 형상 확인으로 설계자 및 작업자 간의 의사소통을 효과적으로 증진할 수 있으며, 조립 및 간섭 등을 사전에 확인하여 제작공정의 오류를 초기에 수정할 수 있어 설계변경을 최소화 할 수 있다. 그러므로 제품개발 기간이 단축되고, 개발비용이 절감될 뿐만 아니라 소량의 경우, 금형가공 없이 시제품모델을 마스터로 한 주조 등이 가능하다<sup>(2)</sup>.

또한 최근에는 없어진 생체 골격을 복원하고, 손상되었거나 질병에 걸린 생체조직을 치료하기 위하여 대체 생체 골격을 재건하

\* 충남대학교 기계·기계설계·메카트로닉스공학과 (baesw77@gmail.com)

주소: 305-764 대전광역시 유성구 대학로 99

+ 충남대학교 기계설계공학과

++ 한밭대학교 글로벌융합학부

는데 필요한 3차원 지지체(scaffold)를 SFF 기술을 이용하여 제작하는 골격 재건 기술에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다<sup>(3)</sup>. 이러한 SFF의 대표적인 공정으로는 StereoLithography Apparatus (SLA), Selective Laser Sintering(SLS), Fused Deposition Modeling (FDM), Laminated Object Manufacturing(LOM), Three Dimensional Printing(3DP) 등이 있으며<sup>(1-2)</sup>, 본 연구에서 다루고자 하는 SLS 공정은 파우더 분말에 CO<sub>2</sub> 레이저를 선택적으로 조사하여 소결(sintering)시키는 방법이며, 다양한 파우더 재료의 사용과 후처리 공정으로 강도를 높일 수 있어 기능성 파트 제작이 가능한 특징이 있다<sup>(4-6)</sup>. 이러한 SLS 공정은 미세분말(폴리머, 세라믹, 금속분말 등)을 레이저를 조사하여 단면형상을 소결시킨 뒤 다시 그 위에 일정한 두께의 미세분말을 적층하는 과정을 반복하여 3차원 형상을 제작하는 공정으로, 소결공정에서 소결되지 않은 분말이 형상의 지지대 역할을 함으로써 별도의 지지대가 불필요한 것이 장점이다. 하지만 여전히 장비의 가격이 높고, 미세형상을 가공하는데 있어서 정밀도가 낮으며, 레이저의 조사 속도에 따라 제작 속도가 결정되므로 고속화, 고정밀화를 위한 추가적인 연구가 반드시 필요하다<sup>(7)</sup>.

본 논문에서는 이러한 SLS 공정을 이용한 SFF 시스템의 기초 연구를 통해, 제작된 SLS 공정 시스템의 안정화 및 이를 이용한 공정연구 수행을 통하여 최적의 공정 조건을 도출하고자 하였다.

## 2. 싱글레이저 시스템

Fig. 1과 같이 싱글 레이저 소결 방식을 이용한 3차원 임의형

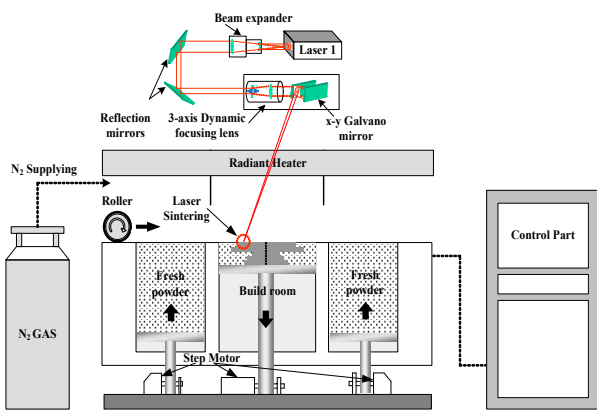


Fig. 1 Schematic representation of SFF system used single laser

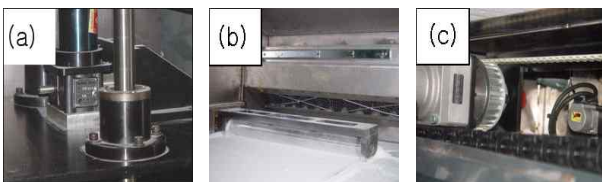


Fig. 2 Step motor, roller part, servo motor

상제작 실험을 위한 실험 장치를 구성하였다. 시스템은 싱글 레이저를 이용하여 800(W)×500(D)×600(H)mm의 임의형상을 제작할 수 있도록 빌드룸을 설계하였다. 이러한 빌드룸에 파우더를 공급하기 위한 피드룸의 크기는 400(W)×500(D)×600(H)mm으로 빌드룸의 좌우측에 2개를 설치하였다. 또한, 장비 위쪽에 레이저부를 설치하여 빌드룸으로 레이저가 조사될 수 있도록 구현하였으며, 레이저부의 크기는 2,200(W)×680(D)×347(H)mm이다.

Fig. 2에서 보는 바와 같이 기구부는 LM 가이드와 서보모터를 이용하여 톨러 메드 이용하여 Z축으로의 정확한 제어를 수행하였으며, 파우더의 적층두께를 최적화할 수 있도록 적층부를 구성하였다.

Fig. 3에 본 시스템에 적용된 히팅부를 나타내고 있다. 본 연구에서 소결 공정 실험을 위해 사용한 폴리이미드-12 파우더의 경우, 레이저의 빔 강도의 강도만으로 소결 시킬 수 없기 때문에 파우더 표면을 복사 히터를 이용하여 녹는점 근처까지 상승시키고 최종 소결에 필요한 에너지를 레이저 빔의 강도에 의해 조절할 수 있도록 본 연구에서 구성한 싱글레이저 시스템에서의 파우더 소결은 히팅부에 의해 전달된 열 에너지와 조사되는 레이저의 빔 강도에 의해 이루어지도록 구성하였다. 따라서 히팅부는 에너지 전달 효과가 크고 단 시간에 파우더 표면을 150°C 근처 온도까지 상승시킬 수 있는 복사열을 이용한 파우더 예열 시스템을 선정하였다. 본 시스템에서 히터부의 역할이 가장 중요하기 때문에 유한요소 해석을 통하여 히터의 용량을 결정하였다. 유한요소 해석결과 파우더의 표면을 예열하기 위해 빌드룸과 피드룸에 2.2kW급의 히터 각각 2개씩 총 8.8kW급 히터의 설치를 하였으며, 파우더 표면온도 측정은 IR sensor를 이용하여 측정하였다. Fig. 4에 본 시스템에 장착된 싱글레이



Fig. 3 Radiant heater for powder preheating and IR sensor

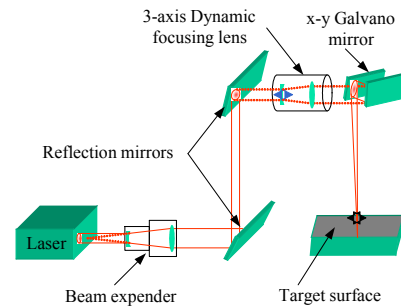


Fig. 4 Schematic representation of single laser part

저 시스템의 개략도를 보여주고 있다. 레이저부의 경우 500(W)×800(D)×500(H)mm의 임의형상을 제작할 수 있도록 레이저 헤드 유닛을 설계하였으며, CO<sub>2</sub> 레이저 발생기, 빔익스펜더, 반사미러, 다이내믹 포커싱 시스템으로 장치를 구성하였다.

제어부의 경우, 전체적인 파워 공급을 원활히 하기 위하여 자동전압 조정기(AVR)를 설치하였으며, 정전 등으로부터 시스템을 보호할 수 있도록 UPS를 설치하였다. 또한 각 센서에서 발생할 수 있는 노이즈를 방지하기 위하여 용량에 맞는 노이즈 필터를 설치하였다. 또한 레이저를 이용한 파우더의 소결 시 발생할 수 있는 미소 폭발에 따른 그을음을 억제하고 파우더 날림으로 인한 스캐너 렌즈부에서의 파우더 점착을 방지할 수 있도록 빌드룸과 스캐너 렌즈부에 질소를 공급하였다. 스캐너 렌즈부에 파우더가 점착될 경우 레이저 강도의 감소 및 레이저부의 부속품들의 파손을 유발 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 빌드룸 내 질소 분위기를 질소 95%, 산소 5%의 조건에서 파우더를 소결할 수 있도록 구성하여 파우더 점착을 방지하고자 하였으며, 산소센서를 이용하여 질소 분위기 조성 여부를 측정하였다.

### 3. 소결 공정 실험

#### 3.1 전체공정 흐름

싱글 레이저 시스템을 이용한 임의형상제작을 위한 SLS 공정의 흐름은 빌드 룸 내 질소 주입을 통해 95%의 질소 환경을 조성하고, 파우더 표면의 온도를 소결 분위기 온도인 150°C 내외로 가열한다. 레이저를 이용한 소결 작업이 이루어지는 동안 파우더 표면의 온도는 150°C를 유지하도록 히터를 제어한다. 이상의 소결 분위기 조성이 완료된 후 파우더를 공급하기 위해 피드 룸은 한 층 상승, 빌드 룸은 한 층 하강시키고, 파우더의 평탄화를 위해 롤러를 이동시킨다. 이후 레이저를 주사하여 원하는 경로에 따라 파우더를 소결시켜 제품의 한 층을 완성한다. 이 과정을 수차례 반복하여 하나의 제품을 완성한다<sup>(8)</sup>.

이미 소결된 부위는 온도차에 의해 변형이 발생하기 쉬우므로 전 공정이 완료될 때까지 파우더의 내부와 외부의 온도를 비슷하게 유지시키는 것이 중요하다. 개발된 장비의 경우 빌드

룸 파우더 표면 온도는 150°C, 피드 룸의 파우더 표면 온도는 135°C, 그리고 빌드 룸 내부 파우더 온도는 100°C로 하였다. 파우더 표면에 대한 예열 시 파우더 표면의 온도가 소결 온도를 넘어서면 파우더가 녹는 현상이 발생하고, 단계적인 예열 없이 순간적으로 온도를 올려 레이저를 이용한 소결을 할 경우 컬링(curling) 현상이 발생한다. 따라서 이러한 문제점을 없애고자 IR 센서로 측정된 빌드 룸 파우더 표면의 온도가 100°C에 도달하면 온도를 유지하면서 20층의 파우더를 적층하도록 하여 파우더 표면을 단계적으로 상승시켰다. 컬링은 레이저 소결시, 소결된 파우더와 소결되지 않은 파우더의 온도차에 의한 열전달 현상 때문에 소결된 파우더의 끝부분이 말려 올라가는 현상을 말한다. 이러한 컬링 현상은 제작하고자 하는 형상 파트에 대한 형상정밀도 및 강도를 저하시키는 매우 큰 원인이라 할 수 있다.

이후 150°C에 도달할 때까지 매 2°C마다 한 층씩 적층하고, 150°C 도달 후 다시 온도를 유지하면서 20층을 적층한다. 레이저에 의한 소결 공정을 마치면, 다시 150°C에서 20층을 적층하고, 100°C까지 서서히 온도를 내리면서, 매 2°C 하강할 때마다 한 층씩 적층한다. 피드 룸의 온도는 100°C의 온도를 유지하도록 제어한다. Fig. 5에 SLS 공정 프로세스를 도식화 하였다.

#### 3.2 레이저 스캔 패스

소결 공정 실험을 위한 레이저 스캔 패스 생성 및 조사에 사용되는 레이저 스캔 패스는 상용 S/W인 Rapidform에서 생성된 2차원 슬라이싱 단면을 바탕으로 스캔 패스를 생성한다. 생성된 단면으로부터 하나의 단면에 대해 주사선(scan ray)을 주사 간격(scan spacing) 만큼 옮겨가면서 윤곽 선분(boundary)과의 교점을 연속적으로 구하면서 생성한다. 하나의 슬라이싱 단면에서 X축 방향에 평행한 직선인 주사선과 윤곽선분과 만나는 점들을 모두 구한 후 이를 주사 방향에 따라 오름차순 또는 내림차순으로 정렬하는 것을 슬라이싱 된 단면의 시작 위치부터 끝 위치까지 수행함으로써 하나의 층에 대한 주사 경로를 생성할 수 있다. 이때 계산된 주사 점들은 항상 짝수 개로써, 레이저의 on/off에 의해 제어될 수 있다. 즉, 정렬이 완료된 한 층에 대한 주사점들을 차례대로 레이저를 켜고 끄면서 이동함으로써 가공 부위와 이동 부위를 인식하게 된다. 그러나 단순한

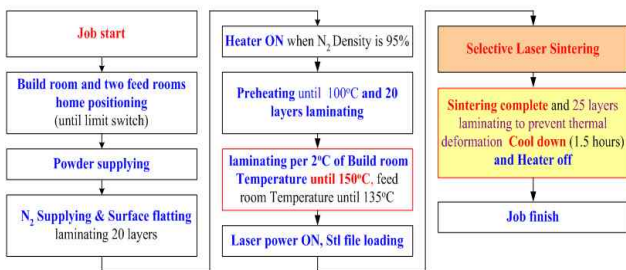


Fig. 5 SLS sintering process

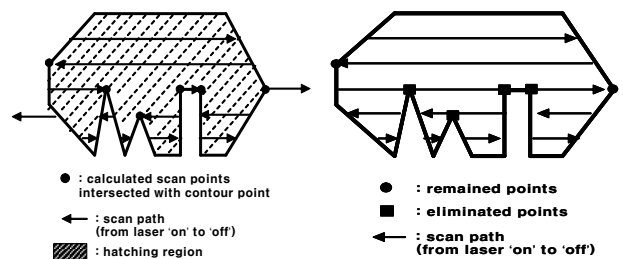


Fig. 6 Wrong and modified scan path

주사선과 윤곽선분과의 교점을 구하는 방법에서는 Fig. 6의 왼쪽과 같이 윤곽점들이 주사점으로 채택 되어질 경우에는 심각한 오류가 발생한다. 이는 선분을 이루는 두 개의 점을 제외한 위치에서 교점이 생길 때는 문제가 없으나, 윤곽점이 교점으로 구해질 때는 일부의 경우에 있어서 레이저 가공구분(marking)과 이동 부분(jumping)의 순서가 바뀌어져 잘못된 주사 경로가 생성된다. 윤곽선분이 주사점으로 계산되어질 경우에는 이웃하는 두 선분의 벡터 값이 대해 0°, 180° 이상의 값을 가지는 경우에 대해서만 주사를 할 수 있도록 하였다. Fig. 6의 오른쪽에 생성된 주사 경로에 대해 나타내었다<sup>9)</sup>.

3.3 레이저 제어에 따른 소결 공정 실험

본 연구에서는 소결 변수 실험을 위해 사용된 출발원료로 폴리아미드(평균 직경 58 $\mu$ m)를 사용하였고 Table 1에 파우더의 물성을 나타내었다.

Fig. 7에 소결 공정 실험에 사용된 시편 모델링을 나타내었으며, Table 2에 레이저 제어에 따른 소결 공정 조건들을 나타내었다. SLS 공정의 경우 소결 변수가 다양하기 때문에 각 변수들의 조합에 따라 소결조건이 변하는 것을 알 수 있었다. 실험

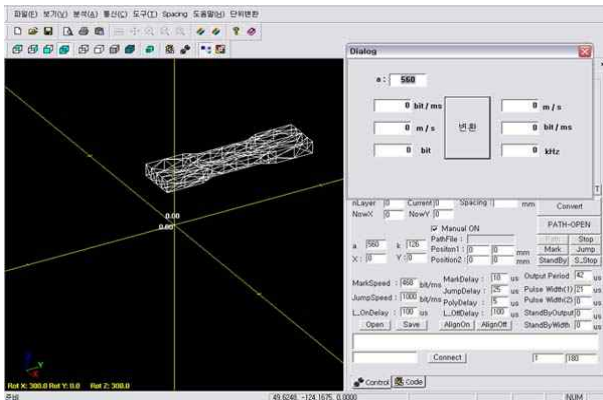


Fig. 7 Specimen of sintering test

Table 1 Property of polyamide powder

Polyamide	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Particle size( $\mu$ m)	Melting point(°C)
	0.59	58	184

Table 2 Result of sintering test

	Result 1	Result 2	Result 3
Temperature(°C)	155	160	165
Scan speed(m/s)	6	6	6
Scan spacing(mm)	0.4	0.4	0.4
Laser power(Watts)	17	16	15
Layer thickness(mm)	100	100	100

결과 레이저 파워, 스캔 스페이스, 스캔 스피드의 관계는 스캔 스페이스가 증가하면 레이저 파워는 증가하고 스캔 스피드는 감소하는 경향에 따라 소결 조건이 형성되는 것을 알 수 있었다. 실제 실험에서는 레이저 파워는 낮추고 가능하면 스캔 스페이스를 넓게 하고 스캔 스피드를 빠르게 가져가는 것이 작업 시간을 단축시킬 수 있는 방법이기 때문에 시편들의 Test를 통해 최종적으로 가장 경제성이 있는 3가지 조건을 도출하여 Table 3에 정리하였으며, Fig. 8에 제작된 시편의 형상을 보여 주고 있다.

3.4 적층 두께에 따른 소결 공정 실험

싱글레이저를 이용한 임의형상제작시스템에 사용되는 분말은 평균 50 $\mu$ m의 직경을 가진다. 본 연구를 위해 60, 80, 100, 120, 140, 그리고 160 $\mu$ m의 적층 두께로 시험편들을 Table 2의 3번 조건에 따라 제작하였다. 적용된 롤러 이송 및 회전 속도는 분말 적층 시 표면에 스크래치(scratch)가 생기지 않고 표면 거

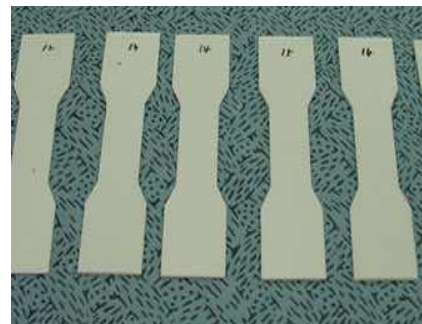


Fig. 8 Sintered specimens



Fig. 9 Fabrication of specimens

Table 3 Width and thickness with layer thickness

Layer thickness	Specimen Width	Specimen Thickness
60 $\mu$ m	17mm	4.10mm
80 $\mu$ m	16.9mm	4.03mm
100 $\mu$ m	17mm	4.0mm
120 $\mu$ m	16.7mm	4.10mm
140 $\mu$ m	16.7mm	4.11mm
160 $\mu$ m	16.7mm	4.41mm



철기가 양호한 상태를 유지하도록 각각 100mm/s, 100rpm으로 하였으며, 빌드룸의 온도를 분말의 녹는점 근처로 유지하여 레이저 조사 시 잘 소결될 수 있게 하였다. 또한 이미 소결된 제품에 변형이 생기지 않도록 빌드룸 내부의 온도를 100°C로 일정하게 유지하였다. Fig. 9은 장비 내에서 시험편이 제작되는 과정 및 적층 두께 별로 제작된 시험편들을 보여주고 있다.

제작된 시험편들의 소결 성능을 측정하기 위해 치수 정밀도, 평탄도, 인장강도, 그리고 단면 측정의 시험들을 수행하였다.

치수 정밀도는 3D CAD모델의 치수와 실제 만들어진 치수를 비교하였으며, 시험편 모델의 치수는 폭이 17mm, 두께가 4.0mm이다. 소결을 통해 제작된 시험편은 버니어 캘리퍼스로 실측하였다.

평탄도는 각 시험편에 컬링(curling)이 발생 하였는지를 확인하기 위한 것으로 1/100mm까지 측정이 가능한 다이얼 게이지를 이용하여 측정하였다. 시험편 형상의 중심을 영점으로 하여 길이 방향으로 10mm 간격씩 9개 지점과 폭 방향으로 0.7mm 간격씩 3개 지점을 측정하여 모두 27개의 위치를 실측하였다. 측정된 값과 영점과의 오차를 구한 후 한계치(threshold)를 이용하여 컬링의 유무를 판단하였다. 여기서 사용한 한계치는  $\pm 0.2\text{mm}$ 이다.

인장시험에서는 Instron사의 만능재료시험기 5583을 이용하

여 적층 두께 별로 4개씩의 시험편들을 시험하였다. 이때 크로스헤드(crosshead)의 속도는 0.5mm/min 이다.

또한 단면측정에서는 캠스코프(camscope)를 이용하여 적층면의 단면을 촬영하고 얻어진 사진들을 이용하여 적층면의 상태를 분석하였다. 이때 캠스코프의 확대 비율은 1:100이다.

Table 3은 시험편들의 측정된 폭과 두께이다. 폭은 모든 시험편에 있어서 모델의 치수와 거의 동일하였다. 그러나 시험편의 두께는 3D CAD 모델과 비교할 때, 160 $\mu\text{m}$  시험편에서는 약 0.4mm의 차이가 있었다. 160 $\mu\text{m}$ 의 적층 두께에서는 레이저의 침투 깊이가 충분하지 않아서, 적층된 층들의 사이가 완전히 소결되지 않았기 때문으로 판단된다.

다이얼게이지를 이용한 시험편의 측정오차는  $\pm 0.02\text{mm}$  정도이다. Fig. 10은 80 $\mu\text{m}$ 의 적층 두께로 제작된 시험편에 대해 측정된 값과 영점과의 오차를 보여준다. 시험편의 윗면과 아래면 모두 한계치 이내의 평탄도를 유지하고 있다. 80 $\mu\text{m}$  이외의 다른 적층 두께로 제작된 시험편들에서도 원하는 평탄도 범위 내로 수렴하였다. 따라서 적층 두께에 따라 제작된 모든 시험편에 있어서 컬링이 일어나지 않았다고 할 수 있다.

Fig. 11는 각 적층 두께별로 구한 인장시험 결과를 모아서 도식화한 것이고, Table 4는 각 시험편의 최대 인장하중을 나타낸다. 시험 결과 60, 80, 그리고 100 $\mu\text{m}$ 의 시험편에서 거의

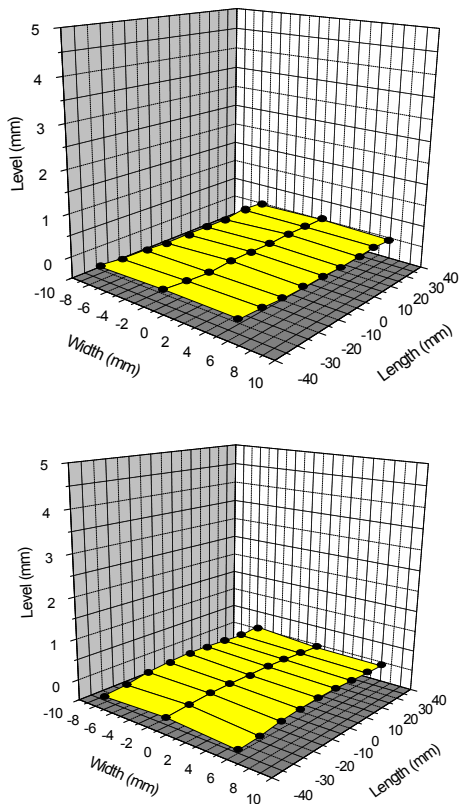


Fig. 10 Flatness of specimens at layer thickness 80 $\mu\text{m}$

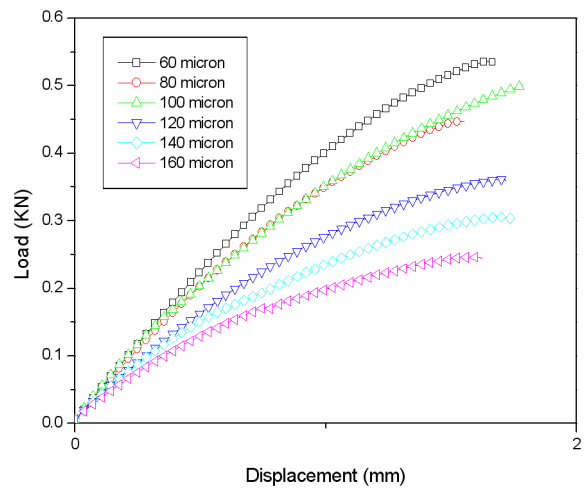


Fig. 11 Load-displacement curve with layer thickness

Table 4 Maximum tensile load with layer thickness

Layer thickness	Maximum Load(KN)
60 $\mu\text{m}$	0.53
80 $\mu\text{m}$	0.46
100 $\mu\text{m}$	0.49
120 $\mu\text{m}$	0.36
140 $\mu\text{m}$	0.30
160 $\mu\text{m}$	0.24

비슷한 최대 하중이 나타났다. 이에 비해 120, 140, 그리고 160  $\mu\text{m}$ 의 시험편들의 최대 인장하중은 상대적으로 낮았다. 특히 120 $\mu\text{m}$  이하의 시험편들에서 점점 그 차이가 크게 나타나는데, 그 이유는 적층 두께가 커지면서 층과 층 사이가 제대로 소결되지 못하여 내부 응집력이 떨어졌기 때문인 것으로 추정된다.

인장시험 중 네킹(necking) 현상이 발생하지 않았고 파괴 후 시험편의 단면적이 인장시험 이전과 비교하여 거의 변화가 없었기 때문에 하중-변위의 결과 값들을 이용하여 공칭응력-공칭변형률(stress-strain)을 계산할 수 있다. 공칭응력은 식 (1)로부터 구해진다.

$$S = \frac{F}{A_0} \quad (1)$$

여기서,  $F$ 는 하중이고  $A_0$ 는 시험편의 초기 단면적이다. 또한 공칭변형률은 식 (2)로부터 구해진다.

$$e = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (2)$$

여기서,  $e$ 는 공칭변형률이고  $L_0$ 는 초기의 표점거리,  $L$ 은 변형 후의 표점거리이다. Fig. 12은 각 적층 두께에 따라 4회씩 인장 시험을 거쳐 구한 응력-변형률 곡선들 가운데 중간 값을 가지는 응력-변형률 곡선을 보여준다. 시험 결과 60, 80, 그리고 100  $\mu\text{m}$  시험편에서는 거의 동일한 응력-변형률 특성을 보였다. 파괴강도는 60 $\mu\text{m}$ 의 시험편은 약 7.8N/mm<sup>2</sup>, 80 $\mu\text{m}$ 는 7.5N/mm<sup>2</sup>, 100 $\mu\text{m}$ 는 8.4N/mm<sup>2</sup>로 측정되었다. 또한, 120 $\mu\text{m}$ 의 시험편은 약 5.4 N/mm<sup>2</sup>, 140 $\mu\text{m}$ 는 3.2N/mm<sup>2</sup>, 160 $\mu\text{m}$ 는 2.6N/mm<sup>2</sup>로 상대적으로 낮은 파괴강도를 보임을 확인할 수 있다. 이와 같이 120 $\mu\text{m}$  이상의 시험편에서 인장강도 및 항복강도가 현저히 떨어지는 이유는, 최대하중에서 설명한 바와 같이, 각 층들 사이

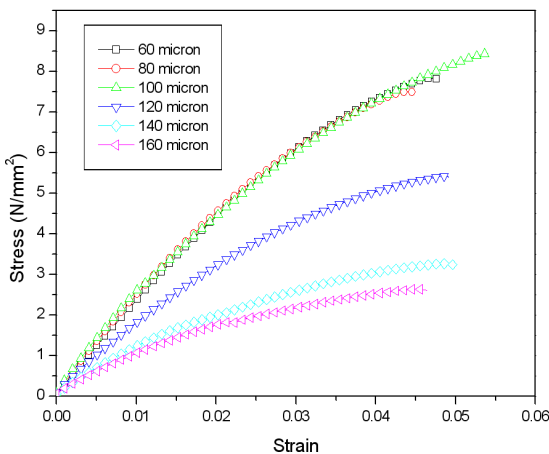


Fig. 12 Stress-strain curve with layer thickness

의 소결이 제대로 이루어지지 못하고 내부에 공극이 많이 생김으로 해서 적층 두께가 커질수록 두 층 사이에서 박리현상이 발생하기 쉽기 때문인 것으로 추정된다.

따라서 응력-변형률 곡선을 구하기 위한 단면적이 시험편이 가지는 실제 단면적보다 크기 때문에 응력-변형률 곡선이 상대적으로 낮게 구해진다. 시험편의 내재된 공극률은 식 (3)으로부터 구할 수 있다.

$$E = (\alpha) E_1 + (1 - \alpha) E_2 \quad (3)$$

여기서,  $E$ 는 측정된 재료의 유효탄성계수이고,  $E_1$ 은 공극의 탄성계수,  $E_2$ 는 공극이 존재하지 않을 때 이 재료의 탄성계수이다. 공극의 탄성계수  $E_1$ 은 0 이고,  $E_2$ 는 60 $\mu\text{m}$  적층 두께의 시험편에서는 내부 공극이 존재하지 않는다고 가정하여 응력-변형률과 Hooke's law를 이용하여 구했다. 이때 0.2 % 항복강도를 사용하였고, 항복강도를 탄성 변형률로 나누어서 탄성계수를 구하였다. 구해진 탄성계수는 약 207MPa이다. Table 5는 모든 적층 두께의 시험편에 대해 탄성계수를 구한 결과이다. 따라서 식 (4)을 통해 제작된 각 시험편에 내재된 공극률을 계산할 수 있다.

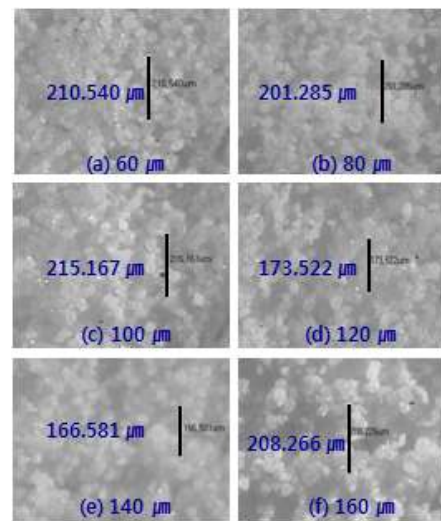


Fig. 13 Cross section of specimens

Table 5 The modulus of elasticity with layer thickness

Layer thickness	60 $\mu\text{m}$	80 $\mu\text{m}$	100 $\mu\text{m}$	120 $\mu\text{m}$	140 $\mu\text{m}$	160 $\mu\text{m}$
탄성계수(MPa)	207	217	216	145	100	83

Table 6 Percentage of voids with layer thickness

Layer thickness	60 $\mu\text{m}$	120 $\mu\text{m}$	140 $\mu\text{m}$	160 $\mu\text{m}$
공극률(%)	0	30	52	60

$$\alpha = 1 - \frac{E}{E_2} \quad (4)$$

Table 6은 60 $\mu\text{m}$ 의 적층 두께를 기준으로 120 $\mu\text{m}$  이상의 각 시험편에 대해 계산된 공극률이다. 120 $\mu\text{m}$ , 140 $\mu\text{m}$ , 그리고 160 $\mu\text{m}$  순으로 공극률이 커지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 13(a)~(f)는 캄스코프를 이용하여 각 적층 두께별로 제작된 시험편을 단면 방향으로 촬영한 사진으로 약 10층 정도의 소결된 단면을 보여준다. 60~100 $\mu\text{m}$ 의 시험편에서는 모든 분말들이 거의 소결되어 층과 층 사이가 구분되지 않음을 알 수 있다. 120~160 $\mu\text{m}$ 의 시험편에서는 두 층 사이에 공극이 있음을 확인할 수 있다. 특히 Fig. 13(f)에서 보이는 바와 같이 160 $\mu\text{m}$  시험편에서는 소결된 층들 사이에 많은 공극이 존재하고 두 층의 중심 사이의 거리가 약 200 $\mu\text{m}$  정도로 적층 두께인 160 $\mu\text{m}$  보다도 큰 것을 알 수 있다. 실제로 160 $\mu\text{m}$  적층 두께로 제작된 시험편에서 층과 층 사이가 쉽게 분리되는 박리현상이 나타났다.

실험 결과 치수 정밀도는 160 $\mu\text{m}$ 를 제외한 모든 적층 두께에서 그리고 평탄도는 모든 적층 두께로 제작된 시험편들에서 원하는 범위 내로 수렴하였다. 인장강도 시험에서는 60 $\mu\text{m}$ , 80 $\mu\text{m}$ , 그리고 100 $\mu\text{m}$ 의 적층 두께에서 비슷한 최대하중 및 파괴강도가 보이고 그 외의 다른 적층 두께의 결과와 비교하였을 때 최대값을 가짐을 확인할 수 있었다. 또한 시험편의 단면 촬영을 통해 120 $\mu\text{m}$  이상의 시험편에서 적층 두께가 커질수록 층과 층 사이에서 소결이 제대로 이루어지지 않음을 확인할 수 있었다. 위 결과들만으로 볼 때 60~100 $\mu\text{m}$ 의 적층 두께에서 최상의 소결 성능을 갖는 것을 알 수 있었다. 하지만 60 $\mu\text{m}$ 의 적층 두께로 제작 시 최초 수 개의 분말 적층과 소결 과정에서 컬링 현상으로 인해 공정 도중에 시험편이 롤러에 의해 밀리는 현상이 자주 발생하였는데, 그 이유는 평균 직경이 50 $\mu\text{m}$ 인 분말로 소결 시 불규칙한 분말 크기로 인해 부분적으로 60 $\mu\text{m}$  이상인 곳이 나타날 수 있고, 또한 상대적으로 얇은 두께의 시험편을 제작할 때 컬링이 쉽게 일어나는 것을 볼 때, 60 $\mu\text{m}$ 의 적층 두께는 주위 온도 등의 공정 조건 변화에 쉽게 영향을 받기 때문인 것으로 추정된다. 결론적으로 공정 중의 오류 요소가 많은 60 $\mu\text{m}$ 을 제외하고, 재료 시험으로부터 최적의 소결 성능을 나타낸 80~100 $\mu\text{m}$ 의 적층 두께가 주어진 공정 조건하에서 최적의 분말 적층 두께라 할 수 있겠다.

### 3.5 큐어링 시간에 따른 소결 공정 실험

후처리 공정에서 큐어링은 제품의 치수정밀도를 유지하면서 강도를 향상시키기 위해 제한된다. 본 장에서는 Fig. 14와 같이 0, 10, 20 그리고 30분의 큐어링 시간에 따라 시험편들을 제작하고 역시 치수정밀도와 각 시험편들의 물성치 분석을 통해 제품의 변형이 일어나지 않으면서 강도를 높일 수 있는 최적의 큐어링 시간을 선정하기 위해 Table 2의 3번과 같은 조건으로

시험편을 제작하였다.

Table 7은 후처리 공정의 큐어링 시간에 따라 제작된 시험편의 치수정밀도를 측정한 결과이다. 각 치수는 유효한계치를 만족하였지만 0와 10분의 큐어링 기간의 시험편들 중에서 일부 컬링이 발생하였다.

Fig. 15은 인장시험을 통해 얻어진 큐어링 시간에 따른 공칭 응력-공칭변형률 곡선이다. 큐어링 시간이 길어질수록 최대 인장하중 및 인장강도가 증가함을 볼 수 있다. Table 8은 공극률을 구하기 위해 얻어진 시험편들의 탄성계수 및 각 시험편의 공극률을 계산한 것이다. 큐어링 시간이 길어질수록 공극률이 줄어드는 것을 수치적으로 확인할 수 있다.

또한 인장강도는 분말 입자끼리의 접촉도와 밀접한 관계가 있다. Fig. 16은 SEM 촬영을 통해 분말 입자들끼리의 융합 정

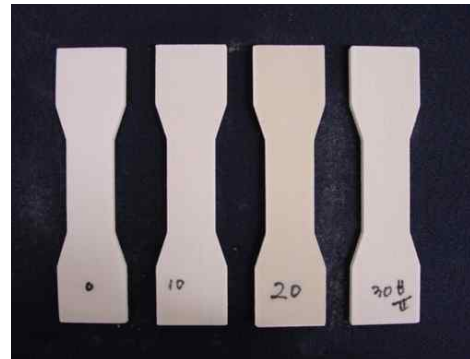


Fig. 14 Specimens with curing time

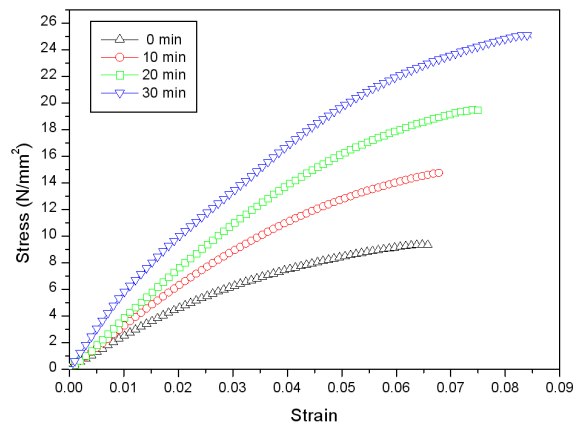


Fig. 15 Load-displacement curve with curing time

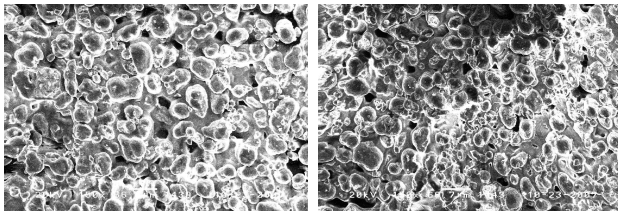
Table 7 Width and thickness with curing time

Curing time	Specimen Width	Specimen Thickness
0 min	17.1mm	4.1mm
10 min	17.2mm	4.2mm
20 min	17.2mm	4.2mm
30 min	17.2mm	4.2mm

도를 확인한 것이다. 0분의 큐어링 기간의 시험편에 비해 20분의 시험편이 더 조밀하게 융합되어 있음을 확인할 수 있다.

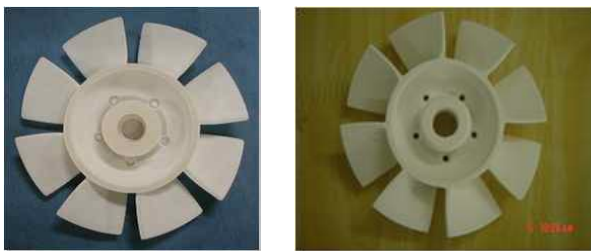
실험 결과로부터 레이저 소결 후 큐어링 기간을 두는 것으로 제품의 인장강도를 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있었다. 하지만 선행 조건으로 치수정밀도가 보장되어야 하고 컬링이 발생하지 않음이 보장되어야 한다. 0분과 10분의 큐어링 기간은 컬링을 유발할 가능성이 높기 때문에 제외시킬 수 있다고 판단된다. 위의 결과와 전체 공정시간을 함께 고려하여 20분의 큐어링 기간이 싱글 레이저 시스템을 위한 최적 큐어링 기간으로 사료된다.

또한 앞에서 얻어진 레이저 제어, 적층 두께, 큐어링 기간에 따른 실험결과를 바탕으로 복잡한 3차원 임의형상제작 실험을 수행하였다. 제작 공정 조건은 Table 2의 3번 조건 및 큐어링 기간 20분으로 실험을 수행하였다. 특히, 제작물의 미세한 형상에 대해 큐어링 기간 동안 열에 의한 변형여부를 판단하기 위해 적층 두께를 각각 80 $\mu$ m, 100 $\mu$ m의 두 가지 조건을 달리하여 수행하였다. Fig. 17에 보는 바와 같이 실험 결과 적층 두께 80 $\mu$ m에 대한 형상 제작 결과 미세한 형상에 대해 정밀도가 저하되었음을 확인 할 수 있었다. 이것은 비교 대상인 100 $\mu$ m의



(a) 0min (b) 20min

Fig. 16 Cross section with curing time



(a) 80 $\mu$ m (b) 100 $\mu$ m

Fig. 17 Fabricated fan model with layer thickness

Table 8 Tensile load and percentage of voids with curing time

Curing time	탄성계수(MPa)	공극률(%)
0min	275	82
10min	334	78
20min	441	71
30min	599	60

적층 두께에 비해 얇은 적층 두께로 인해 큐어링 기간동안 제작물이 보유하고 있는 내부 열에너지의 확산이 더 빨라 미세 형상에 대한 열전달 현상이 발생하여 소결되지 말아야 하는 부분에 영향을 준 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

SLS 공정을 이용한 싱글 레이저 시스템을 이용하여 최적 공정 조건을 도출하기 위해 레이저 제어, 적층두께, 큐어링 기간에 따라 공정연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 레이저 제어에 따른 소결 공정 조건은 SLS 공정 특성상 다양한 변수의 조합에 의해 결정되므로 제작 조건에 따른 공정 조건에 따라 레이저 제어를 수행하여야 한다.
- (2) 공정 중의 오류 요소가 많은 60 $\mu$ m을 제외하고, 최적의 소결 성능을 나타낸 80~100 $\mu$ m의 적층 두께가 주어진 공정 조건하에서 최적의 분말 적층 두께임을 알 수 있었다.
- (3) 형상에 대한 치수정밀도 및 컬링현상이 발생하지 않는다는 보장이 있다면, 큐어링 기간은 전체 공정시간을 고려했을 때 20분의 큐어링 기간이 싱글 레이저 시스템을 위한 최적 큐어링 기간으로 사료된다.
- (4) 상기 결과를 바탕으로 임의형상 제작 실험 결과 80 $\mu$ m의 적층 두께에 대해 미세 영역에서 내부에너지의 확산에 따라 열 변형 현상에 의해 정밀도가 낮아지는 현상을 발견할 수 있었다.

따라서 본 논문에서 제안한 범위 내에서 SLS 공정을 이용한 싱글 레이저 시스템을 이용한 최적 공정 조건은 파우더 표면 온도 165 $^{\circ}$ C, scan speed 6 m/s, scan spacing 0.4mm, laser power 15W, layer thickness 100 $\mu$ m, 큐어링 기간 20분임을 확인할 수 있었으며, 내부 열에너지에 따른 제작물의 열변형에 관한 추가적인 연구가 요구된다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Bennett, G., 1995, *Rapid Prototyping and Tooling Research*, Mechanical Engineering Publication, UK.
- (2) Gebhardt A., 2003, *Rapid Prototyping*, Hanser, Munich.
- (3) Wholers, T. T., 2003, *Wohlers Report 2003*, Wohlers Associates.
- (4) Jeon, B. C., 2001, *Effective 3 Dimensional CO<sub>2</sub> Laser Rapid Prototyping using Powder Deposition Process*, A Thesis for a Doctorate, Inha University, Republic of Korea.
- (5) Upcraft S. and Fletcher R., 2003, "The rapid prototyping



- technologies,” *Assembly Automation*, Vol. 23, No. 4, pp. 318~330.
- (6) Carter, P. W., 2001, “Advances in rapid prototyping and rapid manufacturing,” *Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference*, pp. 107~114.
- (7) Lee, W. H., Kim, D. S., Ahn, Y. J., Choi, B. O., and Choi, K. H., 2006, “Development of Industrial SFF System using a New Selective Dual Laser Sintering Process,” *Key Engineering Materials*, Vol. 326~328, pp. 123~126.
- (8) Kim, D. S., Bae, S. W., and Choi, K. H., 2008, “Application and Performance Evaluation for the DMS System in the SLS Process,” *International Journal of Modern Physics B*, Vol. 22, No. 9-11, pp. 1833~1838.
- (9) Choi, K. H., Kim, H. C., Doi, Y. H., and Kim, D. S., 2009, “Novel Scan Path Generation Method Based on Area Division for SFFS,” *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 23, No. 4, pp. 1102~1111.