

산업용 임의형상제작(Solid Freeform Fabrication)시스템의 공정변수 최적화

곽성조* · 이두용†

(2007년 11월 22일 접수, 2008년 5월 8일 수정, 2008년 5월 15일 심사완료)

Process Optimization of Industrial Solid Freeform Fabrication System

Sung Jo Kwak and Doo Yong Lee

Key Words : Solid Freeform Fabrication System(임의형상제작시스템), Selective Laser Sintering(선택적 레이저 소결), Process Control(공정 제어)

Abstract

This paper presents experimental optimization of process parameters for a newly developed SFF(Solid Freeform Fabrication) system. Two critical process parameters, layering thickness and curing period, which have a large effect on the quality of the product, are optimized through experiments. Specimens are produced using layering thicknesses of 60, 80, 100, 120, 140, and 160 μm and curing periods of 0, 10, 20, and 30 minutes under the same processing conditions, i.e., build-room temperature, feed-room temperature, roller speed, laser power, scan speed, and scan spacing. The specimens are tested to compare and analyze performance indices such as thickness accuracy, flatness, stress-strain characteristics, and porosity. The experimental result indicates that layering thickness of 80~100 μm and curing period of 20~30 minutes are recommended for the developed industrial SFF system.

1. 서론

임의형상제작(SFF, Solid Freeform Fabrication)시스템은 산업 현장의 제품 개발 과정에서 제품의 3차원 캐드(CAD) 정보로부터, 플라스틱, 광경화성수지 등의 재료를 이용하여 빠른 시간 내에 제품을 직접 만들 수 있는 새로운 개념의 공정 시스템으로, 그 대표적인 공정에는 SLA(Stereolithography), LOM(Laminated Object Manufacturing), SLS(Selective Laser Sintering) 등이 있는데, 특히 SLS 방법은 정확도가 높은 장점이 있다.⁽¹⁾ SLS 방법을 이용한 임의형상제작시스템은 폴리머(polymer) 분말을 일정한 두께로 적층하고 레이저로 소결하면서 제품의 형태를 얻는다. 분말을 얇은 한 층씩 적층하면서

제품을 만들기 때문에 제품의 품질은 분말의 적층 상태, 온도 상태, 챔버(Chamber)내 질소 농도, 레이저 상태 등의 공정 조건들에 큰 영향을 받는다. 따라서, 분말 적층을 위한 롤러 이송 속도, 롤러 회전 속도, 빌드룸(Build-room)의 표면 온도, 빌드룸의 내부 온도, 피드룸(Feed-room)의 표면 온도, 레이저 파워, 레이저 스캔 속도, 그리고 분말 적층 두께 등의 세부 공정 변수들의 최적 값을 구하기 위한 연구가 이루어지고 있다.^(2~5)

산업용 임의형상시스템의 주요 공정은 질소 주입, 챔버 내부의 예열, 온도 제어, 분말 적층, 레이저 주사, 그리고 후처리 등으로 이루어진다. 소결 시 분말의 적층과 레이저 주사는 반복적으로 이루어지고, 이때 질소 농도와 온도는 일정한 상태를 유지한다. 특히, 본 논문에서 다루는 산업용 임의형상제작시스템은 기존의 상용 장비보다 큰 빌드룸을 갖고 있어서,^(6,7) 더 많은 작업 시간이 요구되고 질소 주입, 분말 적층, 온도 유지에 정밀한 제

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학전공
E-mail : lee.dooyong@kaist.ac.kr
TEL : (042)869-3229 FAX : (042)869-3210

* 한국과학기술원 기계공학전공

어가 요구된다. 또한 시스템의 안정된 작동, 최적의 성능을 구현, 제품의 품질을 향상시키기 위해서는 실험을 통한 장비의 특성 파악과 주요 공정 변수들의 최적화가 이루어져야 한다.⁽⁸⁾

본 논문에서는 먼저 산업용 임의형상제작시스템의 효과적인 SLS 공정을 위한 시스템의 구성과 제어 구조를 설명하고, 제작 공정 중 제품의 품질에 큰 영향을 미치는 주요 공정 변수들인 분말 적층 두께와 큐어링 시간의 최적 값을 구하기 위한 방법과 결과에 대해 논한다.

2. 산업용 임의형상제작시스템

Fig. 1 은 개발된 산업용 임의형상제작시스템을 보여준다.⁽⁹⁾ 본 장비의 제어 시스템은 크게 질소 제어, 분말 적층 제어, 온도 제어, 레이저 제어의 네 하위 제어기로 나누어진다. 각각의 제어는 Fig. 2 와 같이 전체 공정 상황에 따라 제어 명령을 만들어 줄 수 있는 PC 기반 제어기를 통해 이루어진다.

2.1 질소 주입

폴리머 분말이 레이저로 소결되는 과정에서 산소에 의한 산화를 방지하기 위하여 챔버 내부를 질소 95%, 산소 5%의 환경으로 만들어 주어야 한다. 질소의 비율을 측정하기 위해 챔버 내부에 산소 센서를 두고, 측정되는 산소 농도로부터 질소 비율을 추정한 후 질소 주입 여부를 판단하는 방식이 적용되었다. 산소 센서는 농도에 비례하여 출력되는 4~20 mA의 전류 신호를 전압 신호로 변환한 뒤 PC 기반 제어기로 보내준다.

2.2 분말 적층

산업용 임의형상제작시스템은 분말의 수십~수천 층을 수십~수백 μm 의 한층 두께로 정밀하게 적층하는 것이 중요하다. 분말 적층은 스테핑 모터들을 이용한 수직 이송에 의해 이루어진다. 1 회전당 500 펄스를 구동할 수 있는 스테핑(Stepping) 모터에 1:20의 감속기를 부착하고 리드(Lead) 거리가 4 μm 인 볼스크류(Ball Screw)에 의해 수직 이송된다. 따라서, 스테핑 모터의 한 펄스당 0.4 μm 의 정밀 이송이 가능하다. 분말 적층 과정은 빌드룸을 분말 적층 두께만큼 아래로 이동시키고 피드룸을 충분히 상승시킨 후 롤러의 수평 이송에 의해 분말을 빌드룸에 공급하고 롤러의 회전에 의해 평탄화한다. Fig. 3 은 개발된 임의형상제작시스템의 스테핑 모터와 롤러 구동장치를 보여준다.

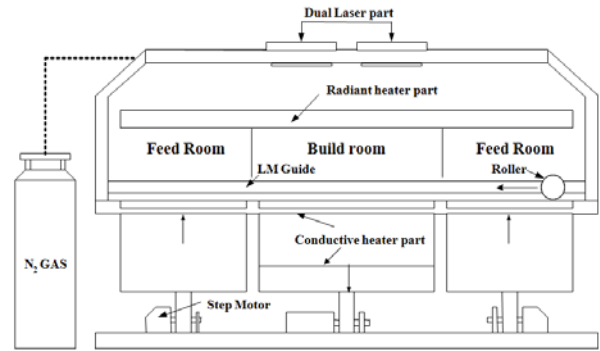


Fig. 1 Diagram of SFF system

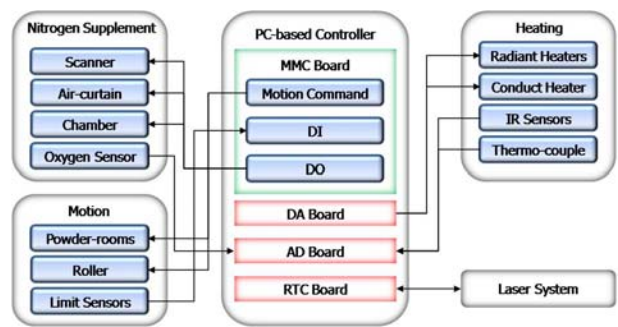


Fig. 2 Schematic to control the developed industrial SFF system

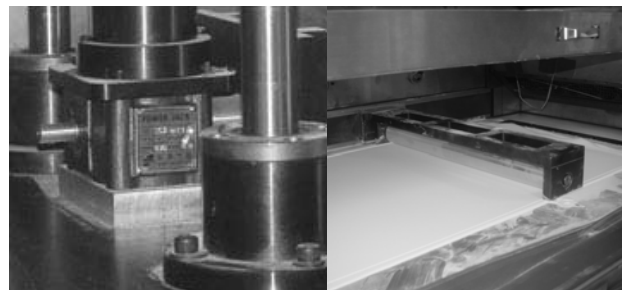


Fig. 3 Stepping motor and roller mechanism of SFF system

2.3 가열 방법

비접촉식 적외선(IR, Infra-red) 온도 센서와 열전대(Thermo-couple) 센서들이 실시간으로 온도를 측정한다. 비접촉식 적외선 온도 센서는 빌드룸과 피드룸의 분말 표면 온도를 측정하기 위한 것으로 0~500 $^{\circ}\text{C}$ 의 온도 측정이 가능하고 측정 온도에 비례하여 4~20 mA의 전류 출력을 내보낸다. 출력되는 전류는 내부 회로에서 전압 신호로 바뀌어서 PC 기반 제어기로 보내진다. 따라서 PC 기반 제어기는 A/D(Analog to Digital) 변환을 통해 입력되는 신호를 가지고 현재 온도를 계산할 수 있다. 빌드

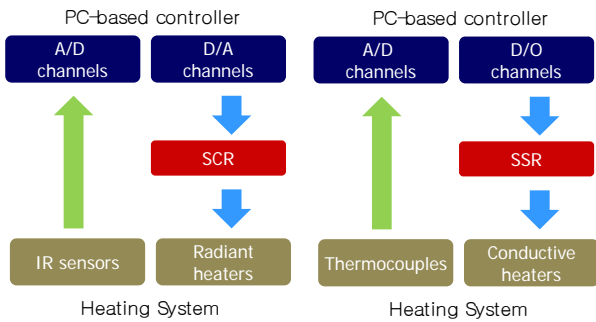


Fig. 4 Heater Control via (a) SCR (Silicon-Controlled-Rectifier), (b) SSR (Solid-States-Relay)

룸의 내부 온도를 측정하기 위해 열전대를 사용한다. 열전대는 온도에 따라 미소 전압이 출력되는데 이 신호는 온도 지시계를 거쳐 PC 기반 제어기로 보내진다.

챔버내 빌드룸과 피드룸의 상부에 부착된 세 개의 복사(Radiant) 히터들은 각각 독립적으로 분말 표면의 온도를 제어한다. Fig. 4(a)와 같이 PC 기반 제어기와 히터들 사이에 SCR(Silicon-Controlled-Rectifier)를 두어 히터의 출력을 조절한다. 주 제어기로부터 공정 진행 상황에 따라 D/A 변환을 통하여 적절한 전압을 출력한 후 전류로 변환하여 SCR로 입력되고, 4~20 mA의 전류 입력에 따라 히터 출력의 크기를 조절한다. 빌드룸 옆면과 바닥면에 있는 전도(Conductive) 히터들은 레이저 소결을 통해 형상화된 제품의 변형을 방지하기 위한 것으로 Fig. 4(b)와 같이 SSR(Solid-States-Relay)을 이용하여 히터들을 On/Off 제어한다. SSR은 전압 신호에 따라 회로를 개폐할 수 있는 장치로서 PC 기반 제어기의 DO(Digital Output) 신호를 이용하여 제어한다.

2.4 제작 공정

산업용 임의형상제작시스템의 제작 공정은 Fig. 5와 같이 크게 3가지로 구분된다. 전처리 공정(Pre-process)은 최초 챔버 내에 질소를 주입하여 95% 전후의 질소 환경을 만들어 주고, 분말 표면 및 내부 온도를 소결 전 목표 온도까지 상승시킨다. 주 공정(Main-process)에서는 한층의 분말을 공급하기 위해 피드룸을 충분히 상승시키고 분말 적층 두께만큼 빌드룸은 한층 하강시킨 후 롤러를 통해 평탄화시킨다. 적층된 분말 위에 레이저를 주어진 경로에 따라 주사하여 분말을 소결시키면 제품의 한층이 완성된다. 마지막 층에 대한 레이저 소결이 완료될 때까지 이 과정이 반복된다. 후처리 공정(Post-process)은 큐어링(Curing)과 쿨링

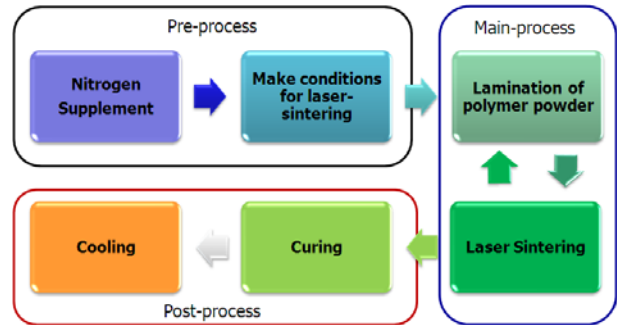


Fig. 5 Process flow of the SFF system

(Cooling) 과정으로 구성된다. 큐어링은 이미 소결된 제품을 고온에서 일정 기간 동안 노출시키는 것이고, 쿨링은 챔버 내에서 상온까지 서서히 냉각시키는 것이다.

3. 시편 제작과 시험 방법

산업용 임의형상제작시스템의 구축된 제어 시스템과 공정을 가지고 제작되는 제품의 품질을 향상시키기 위해서는 주요 공정 변수들의 최적화가 반드시 필요하다. 본 장에서는 주요 공정 변수인 분말 적층 두께와 큐어링 기간이 제품의 품질에 미치는 영향을 알아보기 위한 시편 제작과 시험 방법에 대해 설명한다.

3.1 시편 제작

산업용 임의형상제작시스템은 최적의 적층 두께가 적용되는 것이 요구된다. 기존 상용화 장비들에서 100~150 μm 의 적층 두께가 적용되고 있으나,⁽⁶⁾ 본 연구에서는 60, 80, 100, 120, 140, 그리고 160 μm 의 적층 두께 별로 시편을 제작한다. 제품의 품질에 대한 평가는 치수정밀도와 재료 시험을 통해 얻어진 제품의 물성치의 비교를 통해 이루어진다. 큐어링 기간은 레이저 소결에 의해 형상화된 제품의 치수정밀도를 유지하면서 강도를 향상시키기 위해 제안된다. 0, 10, 20 그리고 30분의 큐어링 기간에 따라 시편을 제작하고 역시 치수정밀도와 각 시편들의 물성치 분석을 통해 제품의 변형이 일어나지 않으면서 강도를 높일 수 있는 최적의 큐어링 기간을 구한다.

Table 1과 2는 시편 제작을 위해 동일하게 사용된 공정 변수들이다. Table 1의 롤러 이송 속도와 롤러 회전 속도는 분말 적층시 표면에 스크래치(Scratch)가 생기지 않고 표면 거칠기가 양호한 상태를 유지할 수 있고, Table 2의 레이저 공정 변수들은 우수한 소결 성능을 나타낸 값이다.⁽⁹⁾

Table 2 Control-parameters of SFF system

| | |
|-------------------------|----------|
| Roller horizontal speed | 100 mm/s |
| Roller rotational speed | 100 rpm |
| Build-room temperature | 178 °C |
| Feed-room temperature | 135 °C |

Table 2 Laser-parameters of SFF system

| | | |
|-------------|------------|------------|
| Laser power | Scan space | Scan speed |
| 18 watt | 0.3 mm | 6 m/s |

Table 3 Width and thickness of specimens

| Layering thickness | Specimen width (mm) | Specimen thickness (mm) |
|--------------------|---------------------|-------------------------|
| Model | 17.0 | 4.0 |
| 60 μm | 17.0 | 4.10 |
| 80 μm | 16.9 | 4.03 |
| 100 μm | 17.0 | 4.0 |
| 120 μm | 16.7 | 4.10 |
| 140 μm | 16.7 | 4.11 |
| 160 μm | 16.7 | 4.41 |

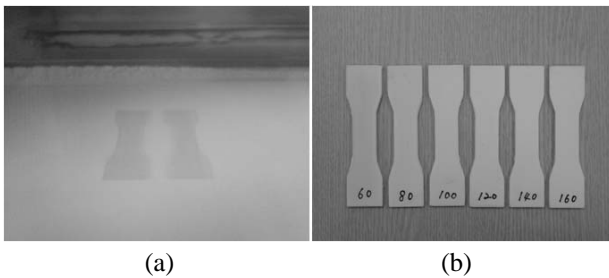


Fig. 6 Specimens (a) producing, (b) produced

시편들은 앞서 제시한 주요 공정 변수 조건을 바꾸어 가면서 제작된다. Fig. 6(a)는 챔버 내에서 제작중인 시편들을 보여주고, Fig. 6(b)는 주어진 주요 공정 변수의 조건에 따라 제작된 시편들이다.

3.2 시험 방법

치수정밀도는 3 차원 캐드 모델의 치수와 실제 만들어진 치수를 비교한 것이다. 제작을 위한 시편 모델의 치수는 폭이 17 mm, 두께가 4.0 mm이다. 공정 변수의 조건에 따라 제작된 시편에서 컬링(Curling)이 발생하였는지를 확인하기 위해 평탄도를 측정한다. 시편의 중심을 영점으로 하여 길이 방향으로 10 mm 간격씩 9 개 지점과 폭 방향으로 0.7 mm 간격씩 3 개 지점의 모두 27 개의 위치를 측정한다. 측정된 값은 모델 또는 영점과의 오차를 구한 후 한계치(Threshold value)를 적용하여 치수 정밀도의 만족도 및 컬링의 유무를 판단한다. 여기서 적용한 유효한계치는 300 μm이다.

인장시험은 Instron 사의 만능재료시험기(Universal testing machine) 5583 을 이용하여 적층 두께 별로 3~4 개의 시편들을 시험한다. 이때 크로스헤드(Crosshead)의 속도는 0.5 mm/min 이다. 만능재료시험기로부터 얻어진 인장시험 결과는 하중-변위(Load-displacement) 값으로 얻어진다. 인장 시험 중 넥킹(Necking) 현상이 발생하지 않았고 파괴 후 시편의 단면적이 인장시험 이전과 비교하여 거의 변화가 없기 때문에 얻어진 하중-변위의

결과 값들을 가지고 공칭응력-공칭변형률(Stress-strain)을 계산한다.⁽¹⁰⁾ 시편에 내재된 공극률은 식 (1)로부터 구할 수 있다. 여기서, E 는 측정된 재료의 유효탄성계수이고, E_1 은 공극의 탄성계수, E_2 는 공극이 존재하지 않는 이 재료의 유효탄성계수이다.⁽¹¹⁾ 공극의 탄성 계수는 0 이므로 식 (2)를 통해 제작된 각 시편에 내재된 공극률을 계산할 수 있다.

$$E = (\alpha)E_1 + (1-\alpha)E_2 \tag{1}$$

$$\alpha = 1 - \frac{E}{E_2} \tag{2}$$

4. 시험 결과

4.1 최적 적층 두께

4.1.1 치수정밀도

Table 3 은 적층 두께에 따라 제작된 시편들의 폭과 두께이다. 폭은 모든 시편들에 있어서 모델의 치수와 거의 동일하다. 하지만 제작된 시편의 두께를 모델과 비교할 때, 160 μm 시편에서 약 0.4 mm의 차이가 있다. 이는 300 μm의 유효한계치를 벗어난 값으로 160 μm의 적층 두께는 원하는 치수정밀도를 벗어난 것으로 간주한다. Fig. 7 은 80 μm의 적층 두께로 제작된 시편에 대해 측정된 평탄도를 도식화한 것이다. 시편의 윗면과 아래면 모두 제안한 300 μm의 한계치 이내의 오차를 가지고 있다. 80 μm 이외의 다른 적층 두께로 제작된 시편들에서도 원하는 평탄도 범위 내에 수렴한다. 따라서 제작된 시편들은 모두 컬링이 발생하지 않았음을 알 수 있다.

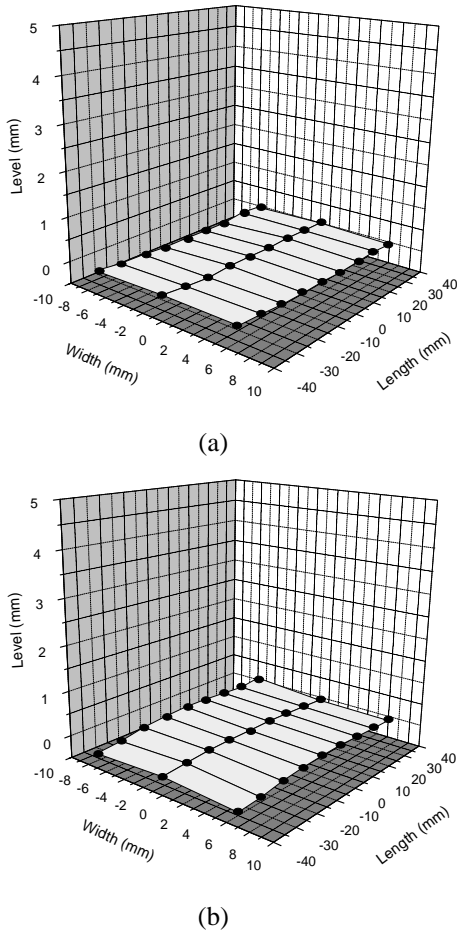


Fig. 7 Flatness of 80 μm specimen (a) Upper side, (b) Lower side

4.1.2 물성 측정

Table 4 는 각 적층 두께 별로 구한 최대하중이다. 60, 80, 그리고 100 μm 의 시편에서 거의 비슷한 최대 하중이 나타난다. 이에 비해 120, 140, 그리고 160 μm 의 시편들의 최대하중은 상대적으로 낮다. 특히 120 μm 이하의 시편들에서 점점 그 차이가 크게 나타나는데 그 이유는 적층 두께가 커지면서 층과 층 사이가 제대로 소결되지 못하여 내부 응집력이 떨어졌기 때문이다. Fig. 8 은 각 적층 두께에 따라 4 회씩 인장시험을 거쳐 구한 응력-변형률 곡선들 가운데 중간 값을 가지는 응력-변형률 곡선을 모아서 도시한 것이다. 60, 80, 그리고 100 μm 시편에서는 거의 동일한 응력-변형률 특성을 보이고 있고, 파괴강도는 60 μm 의 시편은 약 7.8 N/mm^2 , 80 μm 는 7.5 N/mm^2 , 100 μm 는 8.4 N/mm^2 이다. 또한, 120 μm 의 시편은 약 5.4 N/mm^2 , 140 μm 는 3.2 N/mm^2 , 160 μm 는 2.6 N/mm^2 로 상대적으로 낮은 파괴강도를 보인다

다. 이와 같이 120 μm 이상의 시편에서 인장강도와

Table 4 Maximum load of specimens

| Layering thickness | Maximum load (KN) |
|--------------------|-------------------|
| 60 μm | 0.53 |
| 80 μm | 0.46 |
| 100 μm | 0.49 |
| 120 μm | 0.36 |
| 140 μm | 0.30 |
| 160 μm | 0.24 |

Table 6 Elastic modulus of specimens

| Layering thickness | 100 μm | 120 μm | 140 μm | 160 μm |
|-----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Elastic modulus (MPa) | 216 | 145 | 100 | 83 |

Table 6 Porosity of specimens

| Layering thickness | 100 μm | 120 μm | 140 μm | 160 μm |
|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Porosity (%) | 86 | 90 | 93 | 94 |

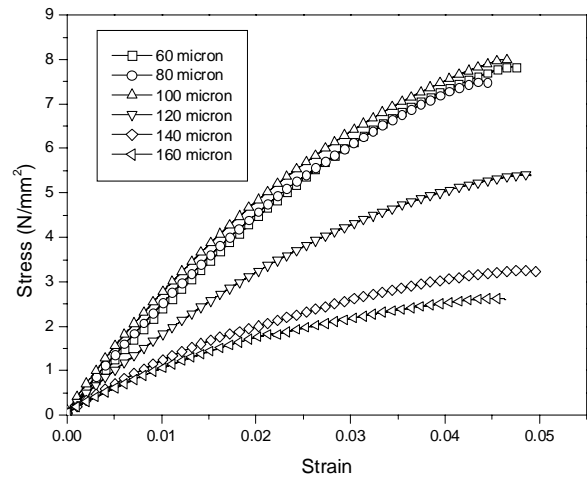
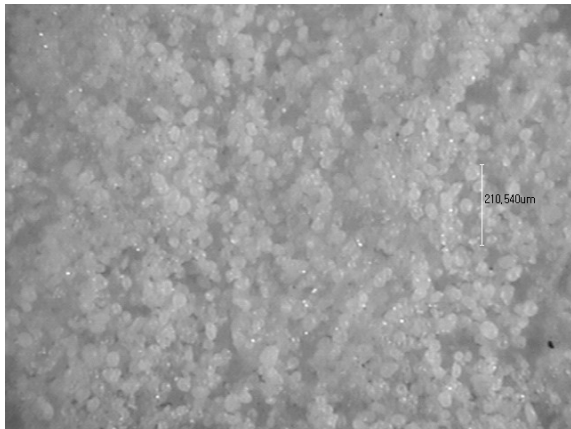


Fig. 8 Stress-strain curves of specimens produced with different layering thickness

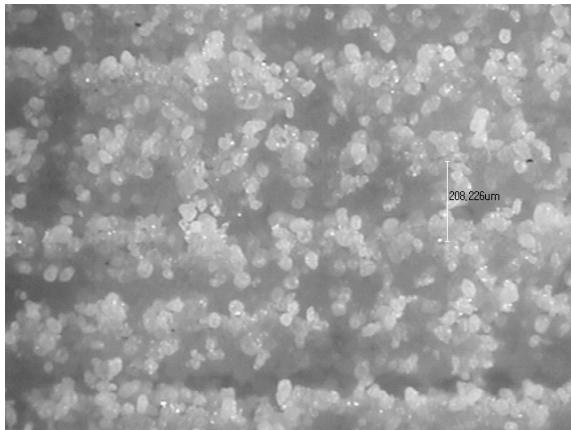
파괴강도가 현저히 떨어지는 이유는 최대하중에서 설명한 바와 같이 각 층들 사이의 소결이 제대로 이루어지지 못하여 내부에 공극이 많이 생기고 적층 두께가 커질수록 두 층 사이에서 박리현상이 발생하기 쉽기 때문이다. 따라서 응력-변형률 곡선을 구하기 위한 단면적이 시편이 가지는 실제 단면적보다 크기 때문에 응력-변형률 곡선이 상대적으로 낮게 구해진다.

Table 5 는 120, 140, 그리고 160 μm 의 적층 두께에 대해 탄성계수를 구한 결과이다. 0.2%의 항복강도를 사용하였고, 그 항복강도를 탄성변형률로 나누어서 탄성계수를 구하였다. Table 6 은 식 (2)를

이용하여 120 μm 이상의 시편의 공극률을 구한 것



(a)



(b)

Fig. 9 Cross-section of (a) 60 μm specimen, (b) 160 μm specimen of layering thickness

이다. 이때 재료 유효탄성계수 E_2 로 1500 MPa 을 대입한다.⁽¹²⁾ 100, 120, 140, 그리고 160 μm 순으로 공극률이 커지는 것을 확인할 수 있다.

4.1.3 단면 촬영

실제 각 층들 사이의 박리현상을 확인하기 위해 캠스코프(Camscope)를 이용하여 적층면의 단면 방향으로 촬영한 사진으로부터 적층면들 사이의 상태를 분석하였다. 이때 캠스코프의 확대 비율은 1:100 이다. Fig. 9(a)는 캠스코프를 이용하여 60 μm 의 시편을 단면 방향으로 촬영한 것으로 약 10 층 정도의 소결된 단면을 보여준다. 모든 분말들이 거의 소결되어 층과 층 사이가 구분되지 않음을 알 수 있다. Fig. 9(b)는 160 μm 시편의 단면 사진이다. 소결된 층들 사이에 특히 많은 공극이 존재하고 두 층의 중심 사이의 거리가 약 200 μm 정도로 적층 두께인 160 μm 보다 크다는 것을 알 수 있다.

실제로 160 μm 적층 두께로 제작된 시편에서 층과

Table 7 Width and thickness of specimens

| Layering thickness | Specimen width (mm) | Specimen thickness (mm) |
|--------------------|---------------------|-------------------------|
| Model | 17.0 | 4.0 |
| 0 min. | 17.1 | 4.1 |
| 10 min. | 17.2 | 4.2 |
| 20 min. | 17.2 | 4.2 |
| 30 min. | 17.2 | 4.2 |

층 사이가 쉽게 분리되는 박리 현상이 나타난다.

4.1.4 고찰

치수정밀도는 160 μm 를 제외한 모든 적층 두께에서 그리고 평탄도는 모든 적층 두께로 제작된 시편들에서 원하는 오차 내로 수렴함을 알 수 있다. 인장강도에서는 60, 80, 그리고 100 μm 의 적층 두께에서 비슷한 최대하중 및 파괴강도가 보이고 그 외의 다른 적층 두께의 결과와 비교하였을 때 상대적으로 큰 응력-변형률 곡선을 가진다. 또한 시편의 단면 촬영을 통해 120 μm 이상의 시편에서 적층 두께가 커질수록 층과 층 사이에서 소결이 제대로 이루어지지 않음을 확인할 수 있다. 위 결과들만으로 볼 때 60~100 μm 의 적층 두께에서 최상의 소결 성능을 보인다. 하지만 60 μm 의 적층 두께로 제작 시 최초 수 층의 분말 적층과 소결 과정에서 켈링의 발생으로 인해 공정 도중에 시편이 롤러에 의해 밀리는 현상이 자주 발생한다. 그 이유는 평균 직경이 50 μm 인 분말의 소결 시 불규칙한 분말 크기로 인해 부분적으로 60 μm 이상인 곳이 나타날 수 있고, 또한 상대적으로 얇은 두께로 시편 제작 시 켈링이 쉽게 일어나는 것을 볼 때 60 μm 의 적층 두께는 주위 온도 등의 환경 변화에 쉽게 영향을 받을 수 있기 때문이다. 따라서 공정 중의 예러 요소가 많은 60 μm 을 제외하고, 인장시험에서 최적의 소결 성능을 나타낸 80~100 μm 의 적층 두께가 주어진 공정 조건하에서 개발된 산업용 임의형상제작시스템을 위한 최적 분말 적층 두께이다.

4.2 최적 큐어링 기간

4.2.1 치수정밀도

Table 7 은 큐어링 기간에 따라 제작된 시편의 치수정밀도를 측정한 결과이다. 각 치수는 유효한 계치를 만족한다. 하지만 0 와 10 분의 큐어링 기

간의 시편들 중에서 일부 컬링이 발생하였다.

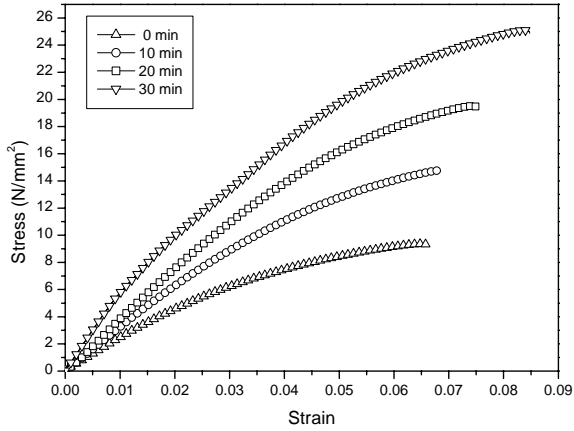


Fig. 10 Stress-strain curves of specimens produced with different curing period

Table 9 Elastic modulus of specimens

| Curing period | Elastic modulus |
|---------------|-----------------|
| 0 min. | 275 MPa |
| 10 min. | 334 MPa |
| 20 min. | 441 MPa |
| 30 min. | 599 MPa |

Table 9 Porosity of specimens

| Curing period | 0 min. | 10 min. | 20 min. | 30 min. |
|---------------|--------|---------|---------|---------|
| Porosity | 82 % | 78 % | 71 % | 60 % |

4.2.2 물성 측정

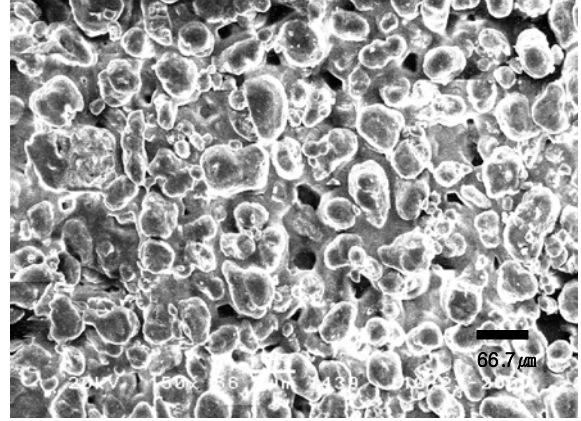
Fig. 10 은 인장시험을 통해 얻어진 큐어링 기간에 따른 공칭응력-공칭변형률 곡선이다. 큐어링 기간이 길어질수록 최대 인장하중 및 파괴강도가 증가함을 볼 수 있다. Table 8 은 공극률을 구하기 위해 얻어진 시편들의 탄성계수이고, Table 9 는 각 시편의 공극률을 계산한 것이다. 큐어링 기간이 길어질수록 공극률이 줄어드는 것을 수치적으로 확인할 수 있다.

4.2.3 내부 촬영

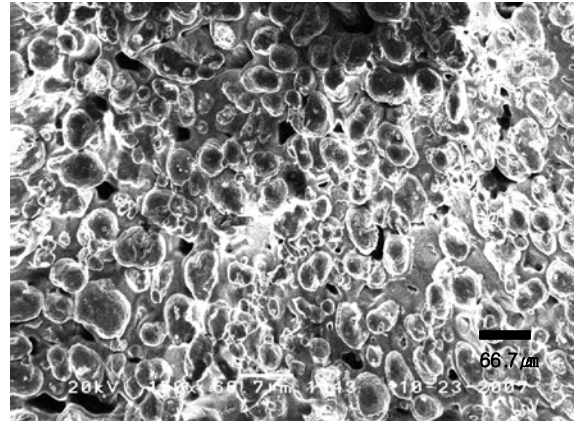
인장강도는 분말 입자끼리의 접촉도와 밀접한 관계가 있다. Fig. 11 은 전자주사현미경(SEM, Scanning Electron Microscope) 촬영을 통해 분말 입자들끼리의 융합 정도를 확인한 것이다. 이때 확대 비율은 1:150 이고 스케일 바(bar)는 66.7 μm 이다. 0 분의 큐어링 기간의 시편에 비해 20 분의 시편이 더 조밀하게 융합되어 있음을 확인할 수 있다.

4.2.4 고찰

실험 결과로부터 레이저 소결 후 큐어링 기간을



(a)



(b)

Fig. 11 Coherence of polymer particles of (a) 0 min, (b) 20 min of curing period

두는 것으로 제품의 인장강도를 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있다. 하지만 선행 조건으로 치수정밀도가 보장되어야 하고 컬링이 발생하지 않음이 보장되어야 한다. 따라서 0 분과 10 분의 큐어링 기간은 컬링을 유발할 가능성이 높기 때문에 제외된다. 앞선 결과와 전체 공정시간을 함께 고려하면 20~30 분의 큐어링 기간이 개발된 임의형상제작시스템을 위한 최적 큐어링 기간이다.

5. 결 론

본 연구에서는 개발된 산업용 임의형상제작시스템에서 제품의 품질에 큰 영향을 주는 주요 공정변수인 분말 적층 두께와 큐어링 기간의 최적화에 대해 논하였다. 60 μm 이하의 분말 적층 두께에서는 공정 도중 컬링이 자주 발생하여 제작이 실패

하기 쉽고, 120 μm 이상의 적층 두께에서는 소결된

층들 사이의 접착력이 낮아져서 각 층들이 분리되는 박리현상이 발생하였다. 그리고 10 분 이하의 큐어링 기간은 소결된 분말 입자들 사이의 결합력이 떨어지기 때문에 커팅이 쉽게 발생하고 원하는 재료의 물성치를 얻을 수 없었다. 따라서 개발된 산업용 임의형상제작시스템을 위한 최적 분말 적층 두께로 80~100 μm 와 최적 큐어링 기간으로 20~30 분을 공정 변수로 적용함으로써 원하는 치수정밀도와 재료의 물성치를 가지는 제품을 제작할 수 있다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 중기거점개발사업, “디지털 3 차원 실물복제기 개발”의 위탁과제로서 수행되었다.

참고문헌

- (1) Crawford, Richard H. and Beaman, Joseph J., 1999, “Solid Freeform Fabrication,” *IEEE Spectrum*, Vol. 36, Issue 2, pp. 34~43.
- (2) Das, S., 2003, “Physical Aspects of Process Control in Selective Laser Sintering of Metals,” *Advanced Engineering Materials*, Vol. 5, No. 10, pp. 701~711.
- (3) Kim, S. J., Kim, K. Y., Joo, Y. C., Baek, Y. J. and Park, H. S., 2004, “Development of Industrial SFFS using SLS process,” *Machinery and Material*, April, pp. 35~42.
- (4) Lee, D. Y., Kwak, S. J., Hwang, M. J., Park, N. S., Kim, S. J. and Kim, D. S., 2005, “Temperature Control of Build-room for SLS Process of Industrial SFFS (Solid Freeform Fabrication System),” *Proceedings of the KSME Spring Conference*, pp. 1484~1487.
- (5) Kim, J. D., Myung, K. H. and Jeon, B. C., 1999, “The Characteristics of Selective Laser Sintering in TrueForm and Polypropylene,” *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 23, No. 10, pp. 1693~1701.
- (6) DTM Corporation, 2001, *The SLS System: Reference Guide*, Software Ver.3.0.
- (7) Park, N. S., Hwang, M. J. and Lee, D. Y., 2004, “PC-based Controller for Industrial Solid Freeform Fabrication System,” *Proceedings of the KSME Fall Conference*, pp. 73~77.
- (8) Um, T., Joo, Y., Kong, Y., Chun, I., Kim, S. and Bang, J., 2003, “Optimization of Design Parameters of a Pneumatic System for Solid Freeform Fabrication System using Genetic Algorithm,” *Proceedings of 2003 IEEE Conference on Control Applications*, Vol. 1, pp. 120~123.
- (9) Kim, D. S., Ahn, Y. J., Kim C. H., Choi, B. O. and Choi, K. H., 2006, “Development of 3D SFF System using a New Selective Dual-Laser Sintering Process,” *Proceedings of the 2nd Pacific International Conference on Application of Lasers and Optics*, pp. 707~712.
- (10) Dieter, G. E., 1988, *Mechanical Metallurgy*, McGraw-Hill, pp. 275~283.
- (11) Daniel, I. M. and Ishai, O., *Engineering Mechanics of Composite Materials*, Oxford University Press, pp. 85~87.
- (12) DTM Corporation, 1997, *The Sinterstation^R System, Guide to Materials*, pp. 2~3.