

SLS 공정을 이용한 산업용 SFF 시스템의 개발 및 소결실험

조흥석[†]·조현택*·백영종*·김동수**

Development and Sintering test of Industrial SFF system using SLS process

Hong-Seok Jo, Hyun-Taek Cho, Yung-Jong Baek and Dong-Soo Kim

Key Words: SLS(Selective Laser Sintering: 선택적 레이저 소결), SFF(Solid Freeform Fabrication: 임의형상제작), laser scan path(레이저 주사 경로), shrinkage rate(수축율), Polymer (폴리머),

Abstract

Selective Laser Sintering (SLS) is currently recognized as a leading process in the new field of solid freeform fabrication (SFF). It is used to fabricate in a short time any 3 dimensional shapes by layer-by-layer sintering of polymer, ceramic or metal powder. To develop this SFF system, it needs effective laser scanning path, temperature and z-axis control for lamination. Therefore, in this study, through the application of control algorithm for sintering process have performed, temperature evaluation for sintering process has performed and the manufacturing sample using SLS process.

1. 서 론

신제품 개발 과정에서 이루어지는 Prototype의 빠른 제작 및 수정은 제품 개발기간 단축 및 제품의 시장경쟁력과 밀접한 관계를 가지고 있다.

임의형상제작(Solid Freeform Fabrication) 시스템은 3차원 CAD 데이터를 얇게 절단하여 2차원 단면 데이터로 변환한 후 여러 가지 방법을 적용하여 순차적으로 적층해감으로써 CAD 데이터와 같은 3차원 입체 형상을 제작하는 장치이며, 제작 공정에 따라 SLA (StereoLithographic Apparatus), SLS(Selective Laser Sintering), FDM(Fused Deposition Modeling), 3DP(Three Dimensional

Printing), LOM (Laminated Object Manufacturing) 등으로 나뉘며, 시제품의 설계 검증 및 기능성 시험, 소량생산 등에 사용되고 있다.

산업용 SFF 시스템으로 널리 사용되고 있는 SLS 공정은 미세분말(폴리머, 세라믹, 금속분말 등)을 레이저 광을 조사하여 단면형상을 소결시킨 뒤 한층 씩 적층하여 3차원 형상을 제작하는 공정으로, 소결공정에서 소결되지 않은 분말이 형상체의 지지대 역할을 함으로써 별도의 지지대가 불필요 한 것이 장점이다.

SLS 시스템은 분말 적층을 위한 빌드룸과 피드룸의 위치제어 및 물러의 속도제어, 분말의 소결을 위한 질소분위기 조성 및 온도제어, 레이저의 궤적 생성 및 제어 등 다양한 요소기술로 이루어져 있다.

본 연구에서는 상품화를 위한 SLS 공정을 이용한 산업용 SFF 시스템을 제작하고, 폴리아미드 파우더를 이용한 SLS 공정에 따른 소결실험을 통하여 시스템 제어 알고리즘 및 시스템 성능을

† (주)에스케이이엠티

E-mail : ctrlnew@naver.com

TEL : (055)299-8628 FAX : (055)299-8639

* (주)에스케이이엠티

** 한국기계연구원 정보장비연구센터

검증하여 SLS 공정 기술을 기반으로 하는 산업용 SFF 시스템의 상품화 개발을 위한 요소설계를 행하였으며, 이를 검증하고 개선하고자 하였다.

2. 산업용 SFF 시스템 개발

산업용 임의형상제작 시스템은 Fig. 1과 같이 소결을 위한 파우더의 공급 및 이송을 담당하는 기구부, 파우더의 예열을 위한 히터부, 워크룸 내의 질소가스 공급을 위한 질소공급부, 레이저 광조를 위한 레이저부 및 SFFS의 모든 장치를 제어하기 위한 제어부 등으로 구성 된다.

2.1 기구부

기구부는 Fig. 2와 같이 소결이 이루어지는 빌드룸(build room)과 파우더를 공급하는 2개의 피드룸(feed room) 및 피드룸에서 빌드룸으로 파우더를 이송하는 롤러부로 구성 하였다.

빌드룸은 600×600×800mm의 워크 볼륨을 가지도록 설계하였으며, 빌드룸과 피드룸의 정밀한 z축 구동(수직이송)을 위해 스크류 잭, LM가이드, 스텝모터를 적용하여 제어함으로써 적층두께를 최적화 할 수 있었다. 분해능이 1회전당 500 펄스인 스텝모터와 감속비가 24:1인 스크류잭을 선정함으로써 원활한 적층두께 제어 및 큰 토크를 가질 수 있도록 하였다. 수직이송을 위해 사용한 스크류 잭의 lead는 5mm이며, 식 (1)은 스텝모터의 1펄스 당 빌드룸과 피드룸의 수직 이송 거리를 나타낸다.

$$\frac{1}{500} rev/pulse \times \frac{1}{24} \times 5 \approx 0.467um \quad (1)$$

그리고 Fig. 3은 파우더의 표면을 평탄화시키는 롤러부를 나타낸다. 출력이 200w인 서보모터로 롤러 회전을 제어하고, 출력이 400w인 서보모터, 감속비가 1/25인 감속기, P.D.가 45.84mm인 폴리 및 타이밍벨트를 사용하여 롤러부 이송 제어가 가능하도록 하였다. 식 (2)는 롤러부의 최대 이송 속도를 나타낸다.

$$3000rpm \times \frac{1}{60} min/sec \times \frac{1}{25} \times 45.84\pi \approx 288.0mm/sec \quad (2)$$

2.2 히터부

Fig. 4와 같이 복사열을 이용하여 빌드룸과 피드룸의 파우더를 예열하는 히터시스템을 선정하였고 히터부의 정확한 제어를 위해 PID 제어방법을 이용하여 1℃이내의 온도제어가 가능하도록 히터부를 제작하였으며, 온도 측정은 비접촉식 IR센서를 사용하여 빌드룸과 피드룸의 표면온도를 측정하는 방법을 적용하였다.

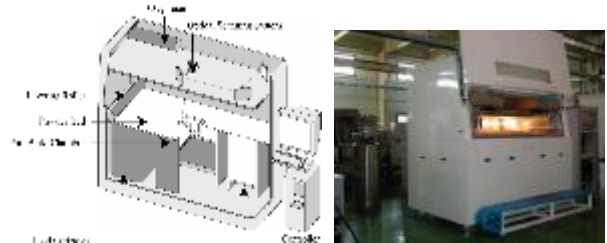


Fig. 1 Schematic diagram of industrial SFF system



Fig. 2 z-Axis mechanism



Fig. 3 Roller mechanism



Fig. 4 Radiant heater and IR sensor

Fig. 5는 실제 소결실험 중 히터의 성능을 그래프로 나타냈으며, 1°C이내에서 온도 제어가 가능함을 확인 할 수 있었다.

2.3 질소공급부

질소공급부는 액화질소를 기화시켜 질소가스를 발생시키기 위한 기화기, 소결작업부 내 질소가스 공급을 위한 주입구 및 질소가스 분위기 제어를 위한 산소센서로 구성 된다.

소결작업부 내 농도 95%이상의 질소가스 분위기를 조성함으로써 레이저 빔을 이용한 파우더 소결 시 발생할 수 있는 산화반응과 이에 따른 그을음 발생을방지 할 수 있도록 한다. 소결작업부와 레이저부의 경계에 질소가스를 이용한 차단막을 발생시켜 소결작업부 내 질소가스를 공급하면서, 롤러의 이송과 회전으로 발생한 파우더 분진에 의한 레이저부의 오염을 방지하도록 하였으며, 산소센서를 이용하여 5%이하의 산소를 검출함으로써 질소분위기 조성여부를 확인할 수 있도록 구성하였다.

2.4 CO₂ 레이저부

레이저부는 Fig. 6과 같이 레이저 엔진(laser engine), 빔 익스팬더(beam expander), 반사거울(reflection mirror) 및 스캐너(scanner) 등으로 구성하였다. 스캐너는 600×600 mm (W×D) 크기의 대형 제품을 제작할 수 있는 3축 다이내믹 초점 렌즈(3-axis dynamic Scanner)를 이용하여 제작하였다. 갈바노미러(Galvano-mirror)와 대물렌즈, 오목렌즈로 구성된 다이내믹 초점 렌즈는 레이저 빔을 조사할 때 발생하는 스팟의 찌그러짐 현상을 방지할 수 있도록 렌즈의 초점 거리를 가변할 수 있는 특징을 가지고 있다.

레이저 엔진은 SLS 공정에 많이 사용하는 폴리머 계통의 파우더 소결에 적합한 CO₂ 레이저(최대출력 50w, 파장 10.6um)로 선정하였다. 또한 빔 익스팬더의 배율을 조정하여 소결에 필요한 레이저 빔의 스팟 크기(spot size)인 0.5mm를 얻을 수 있었다. Fig. 7은 적층한 파우더 표면에서 레이저의 파워를 측정한 결과이며, 광학기기 및 스캐너를 통과하면서 레이저의 파워가 많이 손실됨을 알수 있다.

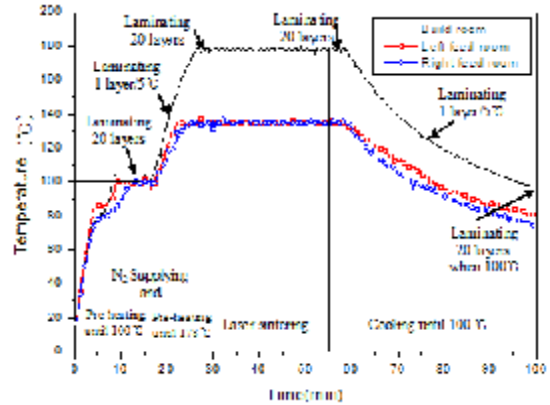


Fig. 5 Performance evaluation of radiant heater



Fig. 6 Laser Head Driver Modules

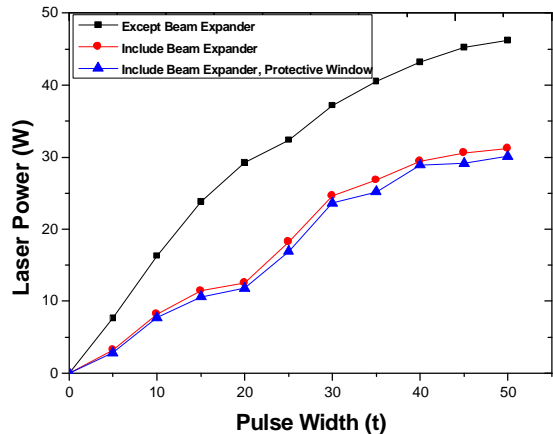


Fig. 7 Performance evaluation of CO₂ laser

3. 소결실험

Fig. 8에 제품 제작을 위한 SLS 공정의 전체 흐름을 나타내었다. 먼저 질소 주입을 통해 95% 이상의 질소 분위기를 조성한 후 빌드룸과 피드룸의 파우더 온도를 각각 제어한다. 그 후 파우더의 적층과 CO₂ 레이저 빔의 조사를 반복하여

다층의 임의 형상을 제조하게 된다. 이러한 과정에서 소결 공정이 이루어지는 워크룸의 온도는 파우더의 레이저 소결 시 중요한 변수로 작용한다.

Table. 1은 소결실험에 사용할 파우더의 물성을 나타내었다.

3.1 인장시험시편 제작 및 인장시험

Table. 2의 Test 1과 같이 빌드룸 온도를 160℃, 165℃, 170℃로 변경하면서 소결실험을 진행하였으며, Fig. 9와 같이 인장시험시편을 제작할 수 있었다. 또한 인장시험 결과가 Fig. 10과 같으며, 160℃에 비해 165℃, 170℃에서 최대과단응력이 높게 나타났다. 이는 소결 온도가 높아짐에 따른 결합강도의 증가가 원인이라 할 수 있으며, 이를 바탕으로 하여 치수정밀도 측정을 위한 스케일 바를 제작하였다.

3.2 스케일바 제작 및 치수정밀도 측정

스케일 바를 제작하여 치수정밀도를 측정하기 위해 Table. 2의 Test2와 같은 조건으로 실험을 진행하였다. 이 실험에 앞서 동일한 조건으로 선행한 실험을 통해 재료의 열수축에 따른 치수 변형을 확인할 수 있었다. 이는 전혀 예상치 못한 결과였으며, 열수축에 따른 치수 변형율을 감소시키기 위해 파우더가 열에 노출되는 시간을 최대한 줄이면서 원하는 형상을 만들고자 Scan speed를 높게 하여 제작한 스케일 바를 Fig. 11에 나타내었으며, 치수정밀도 측정 결과를 Table. 3에 나타내었다. 치수정밀도 측정 결과 개발하고자 하는 치수 정밀도 300um 이내로 제작이 되었음을 확인할 수 있었다. 또한 표면거칠기 측정 결과 상층부 14.34 μ m, 하층부 13.44 μ m로 개발하고자 하는 목표치인 30 μ m를 만족함을 알 수 있었다.

3.3 임의형상 제작

임의형상 제작을 위해 Pan model를 제작하여 보았다. 보다 많이 공정 시간을 단축하기 위해 파우더 적층두께를 80 μ m로 하였고, 대신 레이저 파워를 28w로 낮추어 조건을 맞추어 공정실험을 진행하였다. 실험 결과 Fig. 12와 같은 형상을 제작할 수 있었다.

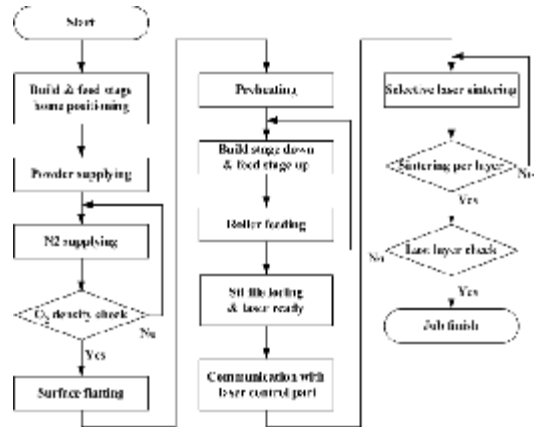


Fig. 8 Block diagram of SFF process

Table. 1 Specification character of polyamide powder

	Density (g/cm ³)	particle size average (μ m)	Melting point (°C)
PA powder	0.59	58	184

Table. 2 Test of sintering process variables

	TEST 1	TEST 2	TEST 3
Temperature (°C)	160~170	150	150
Layer thickness (μ m)	100	100	80
Scan speed (m/s)	6	7	7
Laser power (Watt)	18	35	28
Scan space (mm)	0.3	0.3	0.3



Fig. 9. Fabricated specimens from variable test

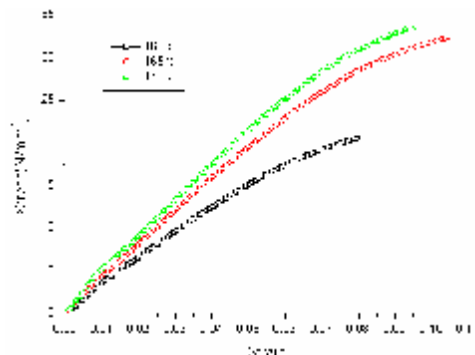
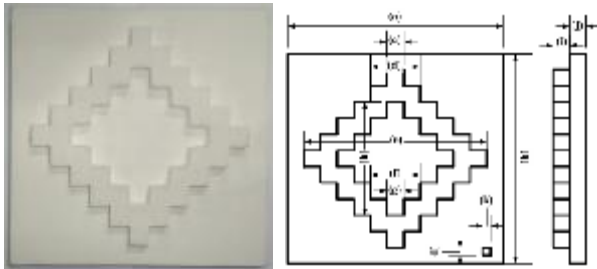


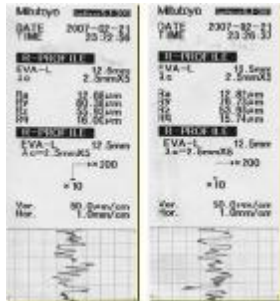
Fig. 10. Stress-strain curve

Table. 3 Measurement of Scale bar

	a	b	c	d	e
설계치	160	160	12	36	132
측정치	152.8	153.4	11.52	34.4	126.33
예측치	152.8	153.4	11.46	34.38	126.06
오차	0	0	0.06	0.02	0.24
	f	g	h	i	j
설계치	36	12	84	10	12
측정치	34.5	11.6	79.8	10.3	11.6
예측치	34.88	11.46	80.47	-	-
오차	0.12	0.14	0.67	0.3	0.4



(a) Scale bar model (b) Scale inspection model



(c) Roughness result for scale bar
Fig 11. Sintering test of scale bar

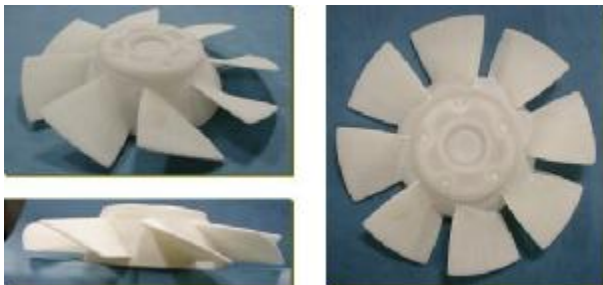


Fig 12. Fabrication of Pan model

4. 결론

본 연구는 SLS 공정을 적용한 산업용 임의형

상제작 시스템 요소기술의 개발결과를 바탕으로 상품화 모델을 개발하고, 제작하기 위한 것으로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 산업용 임의형상제작 시스템의 각 파트에 대한 해석과 실험을 통하여 시스템의 요소기술을 개발하고 실제 시스템을 구축하였다.
2. 개발된 산업용 SFF 시스템을 이용하여 임의형상을 제작하였으며, 공정조건을 확립하였다.

현재 상품화를 위한 설계사양에 맞는 요소설계 작성을 완료하였으며, 이 자료를 바탕으로 설계도면을 작성 후, 산업용 SFF 시스템을 제작 할 예정이다. 시스템이 제작 되면 상용 재료 및 신규 개발 재료를 적용하여 소결 실험을 통해 비교 분석을 하고, 이 실험으로 신규 개발 시스템에서의 공정기술을 축적하고 시스템 성능을 평가하고자 한다. 또한 다양한 시제품을 제작하면서 시스템의 성능 향상을 위한 세부 기술을 개발하고, 요소설계 자료를 검증하여 시스템 안정성 향상을 도모하고자 한다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 “디지털 3차원 실물복제기 개발”의 과제로서 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) James, C.N., May 1993, “Selective Laser Sintering: A Definition of the process and an Empirical Sintering Model”, PhD Thesis, *The University of Texas at Austin*.
- (2) John, D.W. and Carl, R.D., 1998, “Advances in Modeling the Effects of Selected Parameters on the SLS process”, *Rapid Prototyping Journal*, Vol.4, pp.90-100.
- (3) Benda, J., 1994, “Temperature Controlled Selective Laser Sintering”, *Proceeding of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, University of Texas at Austin, TX, Vol.5, pp.277-284.
- (4) Festa, R., Manca, O. and Naso, V., 1998, “A Comparison between Models of Thermal Fields in Laser and Electron Beam Surface Processing”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.31, pp.99-106.