

# 산업용 SFF 시스템에서 Laser Beam Spot size 측정 메커니즘 개발

배성우<sup>†</sup>·김동수\*·최경현\*\*

## Development of Measurement mechanism of Laser Beam Spot size for Industrial SFF system

Sung-Woo Bae, Dong-Soo Kim and Kyung-Hyun Choi

**Key Words:** SFF(Solid Freeform Fabrication :임의형상제작), SLS(Selective Laser Sintering : 선택적 레이저 소결), Variable Beam Expander(가변형 빔 익스펜더), Laser Beam Spot Size(레이저 빔 크기)

### Abstract

Accuracy and processing time are very important factors when the desired shape is fabricated with Selective Laser Sintering (SLS), one of Solid Freeform Fabrication (SFF) systems. In a conventional SLS process, laser spot size is fixed during laser exposing on the sliced figure. Therefore, it is difficult to accurately and rapidly fabricate the desired shape. In this paper, to deal with those problems an SFF system having ability of changing spot size is developed. The system provides high accuracy and optimal processing time. Specifically, a variable beam expander is employed to adjust spot size for different figures on a sliced shape. Finally, Design and performance estimation of the SFF system employing a variable beam expander are achieved and the mechanism will be addressed to measure the real spot size generated from the variable beam expander.

### 1. 서 론

3차원 임의형상제작시스템은 제조 공정에 따라 SLA(Stereo Lithographic), SLS(Selective Laser Sintering), 3DP(Three Dimensional Printing), LOM(Laminate Object Manufacturing) 등으로 나뉘며, 그 중 SLS는 정밀도가 우수하고 공정중에 지지대를 사용하지 않는 특징을 가지고 있다.<sup>[1]</sup> SLS 시스템은 분말 적층을 위한 빌드룸과 피드

룸의 위치제어 및 롤러의 속도제어, 분말의 소결을 위한 질소분위기 조성 및 온도제어, 레이저의 궤적 생성 및 제어 등 다양한 요소기술로 이루어져 있다.

최근 SLS를 이용한 3차원 임의형상 제작 시스템(SFF)에서 빠른 제작 및 수정은 제품 개발 기간 단축에 따른 제품의 시장 경쟁력과 밀접한 관계를 가지고 있다.<sup>[2][3]</sup> 하지만 기존의 SLS 공정을 이용한 SFF 시스템에서는 슬라이싱된 단면 형상에 대해 레이저를 조사할 때 레이저 빔 스팟 사이즈가 일정한 관계로 원하는 형상을 정밀하고 신속하게 가공하기 어려운 단점을 가지고 있다.

따라서 기존의 연구에 대해 본 연구에서는 원하는 형상에 대해 좀 더 정밀하고 신속하게 가공하기 위한 하나의 방법을 제시하고자 한다. 특히 laser beam spot의 크기를 원하는 크기로 변경하여 미세한 부분의 형상에 대해서는 작은 beam

---

† 한국기계연구원 정보장비연구센터

E-mail : baesw@kimm.re.kr

TEL : (042)868-7165 FAX : (042)868-7176

\* 한국기계연구원 정보장비연구센터

\*\* 제주대학교 메카트로닉스공학과

spot을 이용하고, 넓은 해칭면(hatching)에 대해서는 굵은 beam을 사용하는 방법을 적용하고자 한다. 특히 이러한 beam의 사용 폭을 원활히 변경시켜 주기 위해 기존의 고정식 빔 익스팬더(Beam Expander) 대신에 가변형 빔 익스팬더(Variable Beam Expander)를 적용하여 spot size 변경을 도모했으며, SLS 공정에서 Beam spot size를 측정할 수 있는 측정 메커니즘에 대해 언급하고자 한다.<sup>[6]</sup>

## 2. 디지털 미러 시스템이란?

SLS 공정에서 동일한 재료를 소결 할 때 laser beam power, scan space, scan speed, layer thickness, sintering temperature 등 다양한 변수가 작용한다. 이러한 모든 조건들을 동등하게 해줬을 때 컬링율(curling rate)의 발생 빈도, 형상 정밀도 등은 소결품의 질을 가늠하는 중요한 요소이다.<sup>[4][5]</sup> 특히 낮은 scan speed에 대해 laser beam spot size가 클수록 레이저 빔의 열에너지에 의해 하나의 단면이 받는 열에너지 증가로 인해 over sintering이 일어나 형상 정밀도가 떨어질 확률이 높아진다. 이러한 이유들은 복잡한 형상에 대해 소결을 하였을 때 좀 더 명백해진다. 이러한 문제점을 보완하고 개선하기 위해 하나의 단면에 대해 laser beam spot size와 그에 따른 scan speed를 조절함으로써 소결품의 질을 향상시키기 위한 것이 디지털 미러 시스템이다.

기존의 연구에서 구축하였던 3축 다이내믹 포커싱 스캐너 시스템(3-axis dynamic focusing scanner system)은 레이저 엔진, 스캐너, 고정식 빔 익스팬더, 반사거울 등으로 구성되었다. 대물렌즈, 오목렌즈 갈바미러(galvano-mirror)로 구성된 다이내믹 포커싱 렌즈는 대면적에 레이저 빔을 조사할 때 발생하는 스팟 크기의 찌그러짐 현상을 방지하기 위하여 렌즈의 초점 거리를 가변할 수 있는 특징을 가지고 있다. 또한 레이저 헤드에서 조사되는 레이저 빔의 크기를 일정하게 (0.5mm) 유지할 수 있도록 구축하였다. 그러나 기존의 시스템에서 레이저를 조사할 때 중앙부분을 조사하는 레이저 빔의 경우는 문제가 없으나, 단면의 외곽부분을 조사하는 레이저 빔의 경우 단면을 벗어나는 영역까지 조사하게 되는 경우가 발생하여 3차원 형상이외의 부가적인 부분까지 가공하게 되는 경우가 발생하며 또한 미세부분을

가공할 때 레이저 빔 스팟의 크기가 커서 미세 형상을 가공할 때 조사된 레이저 빔이 가지고 있는 열에너지와 빌드룸 온도에 의해 소결이 되지 않아야 하는 부분에 열이 전달되어 소결이 되는 경우가 발생한다. 이러한 이유로 기존의 시스템은 미세한 부분에 대한 형상을 가공하기 어려운 단점을 가지고 있다. 또한 형상 정밀도가 떨어지는 단점을 극복하기 위해 가공물의 외곽을 다시 가공해야 하는 단점을 가지고 있다. Fig. 1은 기존의 연구에서 제작한 팬(pan) 형상을 나타내고 있으며 특히 미세한 부분에 대한 가공 능력이 떨어지는 것을 볼 수 있다.

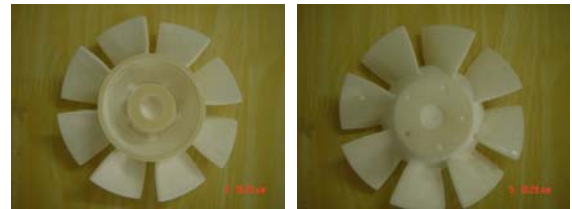


Fig. 1 Fabrication of previously study

하지만 새로 구축한 Digital Mirror System은 기존의 연구에서 구축하였던 레이저 시스템(fixed beam expander)에서 laser beam spot size를 가변할 수 있는 시스템으로 전환한 것이다. 특히 기존 시스템에서 동일한 beam spot size를 얻기 위해 사용된 zoom beam expander 대신에 내장된 두 개의 모터에 의해 배율을 조정함으로써 laser beam spot size를 가변할 수 있는 variable beam expander를 장착하였다. 하나의 모터는 배율을 조정하기 위해 렌즈를 이동시키고, 다른 하나는 이동된 렌즈와의 초점을 맞춰주어 평행빔을 만들어 주는 모터이다. Variable beam expander는 소스 빔을 2x에서 8x까지 자동으로 가변할 수 있으며, 단면의 중앙부분(Hatching part)은 큰 spot size를 이용하여 소결하고, 외곽부분 (boundary part)은 중간 spot size를 이용하여 소결하며, 단면의 미세한 부분은 작은 spot size를 이용하여 소결함으로써 최종적으로 3차원 형상에 대한 정밀도 및 가공속도를 향상시키고자 하는 것이다. Table. 1은 Digital Mirror System에 적용된 variable beam expander의 사양을 나타내었으며, Table. 2에

Digital Mirror System에 구축하고자 하는 Laser Beam spot size와 그에 따른 scan speed를 나타내었다.

### 3. 디지털 미러 시스템 작동 원리

현재 구축된 SLS 공정을 이용한 산업용 SFF 시스템은 주사 경로를 입력 받은 다음 주사 mirror를 초기화 시키고 가공 명령(mark)과 다음 가공지점으로 이동시키기 위한 이동명령(jump)으로 mirror를 구동시킨다. 하나의 층의 소결이 완료되었을 경우에는 베드 제어기(bed controller)로 새로운 파우더 도포를 위한 신호를 보내고 도포 완료 신호가 입력될 때까지 대기한다. 이 때 mirror를 home에 위치시키고 정렬 한 후 다음 층을 가공하게 된다. 이러한 과정을 모든 layer에 대해서 반복함으로써 전체 형상에 대한 가공이 완료된다. Fig. 2에 그 Flowchart를 나타내었다.

이에 비해 Digital Mirror System은 주사 경로를 입력 받은 다음 주사 미러와 Expander를 초기화 시키고 슬라이싱된 단면에 대한 scanner, Expander, Laser 정보를 입력하게 된다. 입력된 데이터를 바탕으로 Hatching 면과 Boundary를 차례로 소결한 후 이 후 공정은 기존 연구와 마찬가지로 베드 제어기(bed controller)로 새로운 파우더 도포를 위한 신호를 보내고 도포 완료 신호가 입력될 때까지 대기하게 된다. 이 때 mirror를 home에 위치시키고 정렬 한 후 다음 층을 가공하게 된다. Fig. 3은 Digital Mirror System의 작동원리에 대한 Flowchart를 나타내었다.

Table. 1 Specification of variable bema expander

Item	Expansion range	Input Aperture	Out Aperture	Expansion change time
spec.	2~8X	10mm	30mm	~10 sec.

Table. 2 Laser beam spot size and scan speed

	spot size(mm)	scan speed(m/s)
Borders	0.5	5
Specialty	0.3	2.5
Hatching	0.7	10

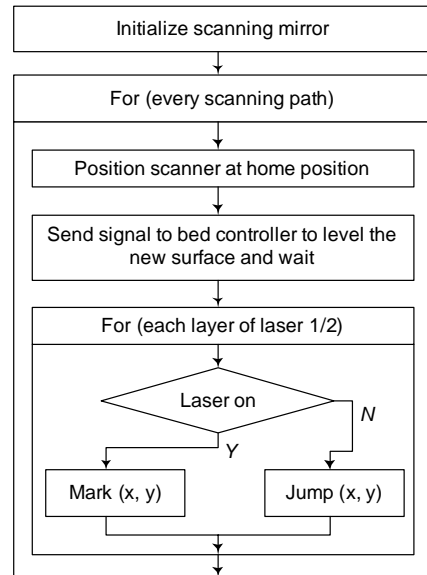


Fig. 2 Flowchart for laser scans control(previously study)

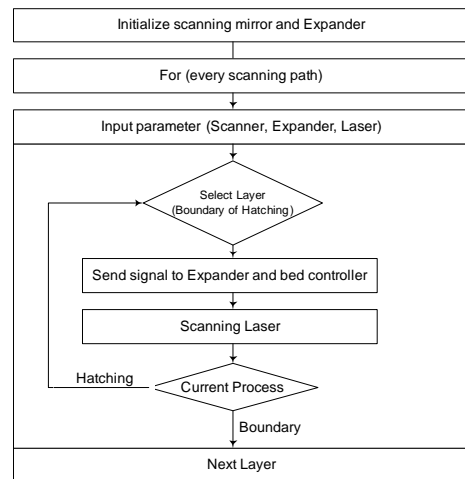


Fig. 3 Flowchart for laser scans control(current study)

### 4. Spot size 측정 메커니즘

Digital Mirror System을 구축하기 위해 선행되어야 할 중요한 요소는 laser spot size를 실제로 측정해 보는 것이다. 그러기 위해서 본 연구에서는 이론적인 데이터와의 비교를 통해 최종적으로 원하는 laser spot size를 얻고자 하였다.

#### 4.1 Spot size 계산

Variable beam expander는 CO<sub>2</sub> laser generator로부터 발진된 laser beam을 2~8배까지 자동으로 확대함으로써 최종적으로는 Galvano mirror를 통해

조사된 레이저의 beam의 spot size를 변경할 수 있는 기능을 수행한다. 본 연구에서 적용된 Variable beam expander를 사용한 dynamic focusing lens(Vario Scan, Scanlab)를 이용할 경우 16mm 이하의 input beam까지 적용이 가능하며, 16mm 이하의 input beam에 대해서는 scan 가능한 X-Y의 어떠한 평면에도 동일한 spot size 유지가 가능하다. 본 과제에 적용된 laser 및 scanner unit을 바탕으로 variable beam expander가 적용되었을 때 spot size를 구하면 다음과 같으며, Table. 3에 본 연구에 적용된 laser 와 scanner unit의 사양을 나타내었으며, 식(1)은 spot size를 구하기 위한 기본 식이다.

$$\omega_o = \frac{\lambda f}{\pi \omega_i} M^2 (\text{mm}) \quad (1)$$

여기에서  $\omega_o$ =output spot radius,  $\lambda$ =wavelength,  $f$ =focal length,  $\omega_i$ =input beam radius,  $M^2$ =beam quality 이다.

하지만 dynamic focusing lens 부의 optic의 경우 회사 정책상 비공개 이므로 focal length(f)를 알 수 없다. 따라서 Fig. 4와 같은 등가 렌즈를 적용하여 계산하였으며, 만약 focal length를 정확히 알 수 있다면, 이를 생략하고 식(1)을 바로 적용하여 laser beam의 spot size를 구할 수 있다. 따라서 Scanlab 사의 데이터를 바탕으로 등가 lens를 적용하여 focal length를 구하면 식(2)과 같다.

$$f = \frac{\pi \omega_o \omega_i}{\lambda M^2} = 231.5443 \text{ mm} \quad (2)$$

Variable beam expander를 적용하여 spot size를 계산하기 위해서, 식(1)과 식(2)에 의해 구해진 focal length를 적용하여 계산하면 Table. 4와 같다. 본 시스템의 경우 variable beam expander를 이용하여 spot size의 적용 범위를 300um, 500um, 700um로 적용하고자 하기 때문에 최대 x8의 expander의 설치가 적합하며, 여기서 x9의 beam expander를 사용할 경우 최대 input beam의 size가 16.2mm가 되어 dynamic focusing lens 부의 최대 지름인 16mm를 넘기 되기 때문에 현 시스템에 x8의 expander가 현 시스템에 적용 가능함을 확인할 수 있었다.<sup>6)</sup>

Table. 3 Specification of Laser and Scanner unit

	Source beam size	Wavelength	M <sup>2</sup>
value	1.8±0.2mm	10.6um	<1.2

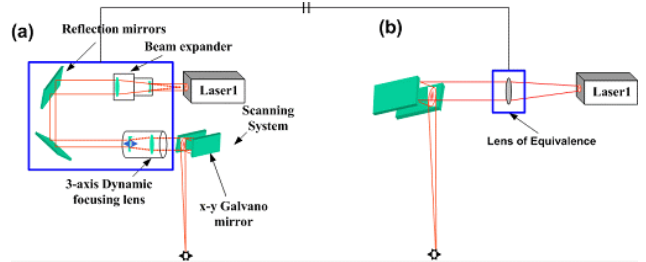


Fig. 4 Equivalence glass to save focal length

Table. 4 Spot size that apply variable beam expander

Magnification	Spot size
x1	2500 um
x2	1250 um
x3	833.4 um
x4	625 um
x5	500 um
x6	416.6 um
x7	357.2 um
x8	312.6 um

#### 4.2 Spot size 측정

Variable beam expander를 현 시스템에 적용했을 때 실제 계산한 spot size data와의 비교 검증 및 Variable beam expander의 작동 상태 및 현재 시스템과의 호환성 등을 파악하기 위해 spot size를 측정하였다. Fig. 5는 Variable beam expander를 장착한 시스템의 사진 및 제어 프로그램을 나타내고 있다.

측정 순서는 control program을 이용하여 배율을 조정 후 Station 및 Laser control program을 순서대로 조건에 맞게 조정을 한 다음 레이저를 조사하여 spot size를 측정하였다. 측정시 조사되는 레이저의 열에너지에 의해 열 확산 현상을 최소화 하고자 다양한 필름 용지를 사용하여 측정을 하였으며, 측정 결과 가장 좋은 결과를 얻을 수 있었던 SH-71S(Coating Film)를 사용하였다. 측정 조건 및 결과는 Table. 5와 같다. 또한 Fig. 6은 측정된 결과를 나타내고 있다. spot size 측정은 Microscope를 이용하여 측정하였다.

측정결과 계산된 값과 측정값의 차이가 거의 없는 것을 알 수 있었으며, 현 시스템에 적용 가능함을 확인 할 수 있었다.

이러한 결과를 바탕으로 실제 powder base에서는 어떠한 결과가 나오는지 측정하고자 다음과 같은 장치를 고안하였다.

Fig. 7은 spot size 측정 장치의 실제 사진이며, Fig. 8(a)에 상세도를 나타내었다. Spot size 측정 장치는 spot size 측정을 위해 파우더를 담은 파우더 박스(Fig. 8(b)), 파우더 박스를 고정 및 지지해 주며 빌딩룸에 삽입되는 빌딩룸 박스(Fig. 8(c)), 소결이 끝난 후 각각의 파우더 박스를 분리해주는 분리 장치(Fig. 8(d))로 크게 구분된다. Spot size 측정은 powder box와 building room box를 결합 후 build room에 삽입, roller를 이용하여 파우더 평탄화 작업을 하면서 powder box에 파우더를 채우게 된다. 그런 후 원하는 배율로 variable beam expander를 조정하여 laser를 조사, 소결하게 된다. 소결이 끝난 후 handling for building room box를 이용하여 결합된 box를 꺼내게 된다. 그런 다음 결합된 box를 dividing box에 의해 각각 분리하게 된다.

Table. 5 Measurement condition

Mag.	Cal.data (um)	laser power (W)	Scan speed (m/s)	Scan space (mm)	Result (um)
x3	833.4	30	0.5	1.5	855.2
x4	625	30	0.5	1.5	641.2
x5	500	30	1.0	1.5	499
x6	416.6	30	1.5	1.5	410.9
x7	357.2	30	1.5	1.5	377.6
x8	312.6	30	1.5	1.5	333.2



(a) Laser part (b) control program  
Fig. 5 Laser part and control program

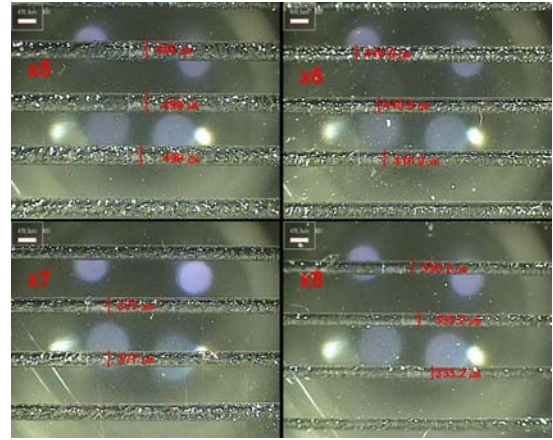


Fig. 6 Result of spot size



Fig. 7 Measurement device for spot size

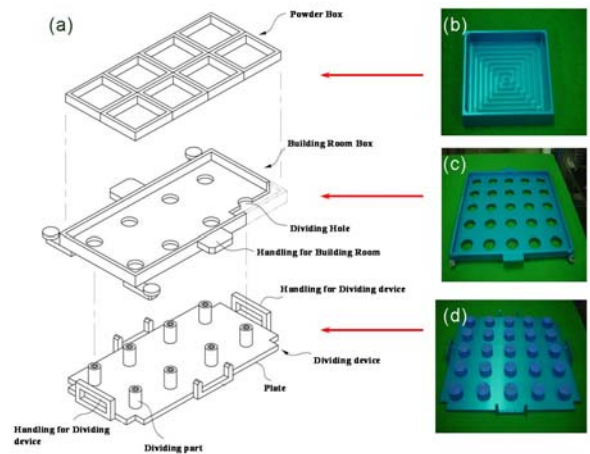


Fig. 8 A part of measurement device for spot size

## 5. spot size 적용 실험

적용하고자 하는 spot size의 검증을 하고자 실제 3차원 형상을 제작하여 보았다. 실험은 기존의 연구에서 제작하였던 팬(pan)형상을 제작하였

다. 미세 부분 파트에 대해서는 x8 배율을 사용하였으며, hatching part에 대해서는 Boundary 배율과 같은 x5 배율을 이용하여 제작하였다. Table. 6에 실험 조건을 나타내고 있으며, Fig. 9에 제작된 3차원 형상을 보여주고 있다. 실험 결과 기존 연구에 비해 미세 부분에 대해 원하는 형상을 구현할 수 있었다.

Table. 6 Experimental condition

Temperature (°C)	176
Scan speed(m/s)	2.5(specialty), 7(hatching)
Magnification	x8(specialty), x5(hatching)
Scan space(mm)	0.3
Laser power (W)	18
Layer thickness (mm)	100

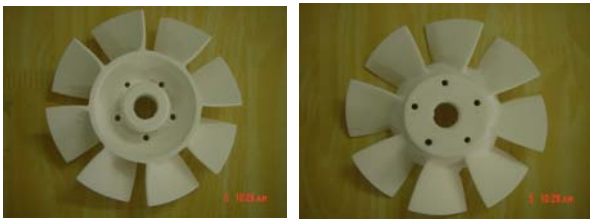


Fig. 9 Fabrication of Digital Mirror System

## 6. 결 론

본 연구에서는 SLS공정 개선의 일환으로 기존의 연구에서 사용한 고정식 beam expander 대신에 한 단면에 대해 다양한 laser beam spot size를 자동적으로 가변할 수 있는 시스템을 개발하기 위해 기존 시스템과의 비교 분석을 통하여 현재의 시스템에 적용 시키고자 이론적 연구 data를 통해 비교 검증 하였으며, SLS 공정에서 spot size를 측정할 수 있는 장치를 고안하여 제시하고 그 mechanism에 대해 언급하였다. 또한 실제 3차원 임의형상을 제작하여 spot size 변경 이유를 검증하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. SLS 공정에서 beam spot size 변경이 가능함을 확인할 수 있었다.
2. beam spot size를 실제 측정해보고 spot size 측정 장치를 제안하였다.
3. beam spot size 측정 mechanism을 제시하였다.

4. Digital Mirror System을 적용할 수 있는 새로운 소결 공정을 제안하였으며, 임의형상 제작을 통해 spot size 변경이유를 검증하였다.

본 연구를 통해 얻은 결론을 바탕으로 향후 고안된 장치를 통해 spot size를 측정하고, 그에 따른 에너지 밀도관계에 대해 연구를 수행하여 최종적으로 Digital Mirror System을 안정화 할 수 있도록 할 것이다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부의 “디지털 3차원 실물복제기 개발” 과제 지원으로 이루어졌으며, 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

## 참고문헌

- (1) Bucknall, C. B., 1997, *Toughened Plastics*, Applied Science Publishers: London.
- (2) Brown, H. R., 1989, *Macromolecules*, 22, 2859.
- (3) Giannelis, E. P., Krishnamoorti, R., Manias, E., 1999, *Adv. Polym. Sci.*, 138, 107.
- (4) 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*.
- (5) 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.
- (6) S.W. Bae, D.S Kim, C.H. Kim, J.D. Cho and B.O. Choi, 2006, "Design and Evaluation of Digital Mirror System for Industrial SFF system", *RODS 4th Workshop*, pp.65~70