

◆특집◆ 디지털 3차원 실물복제기

산업용 SFF 시스템에서 DMS 적용에 관한 연구

배성우\*, 김동수\*, 최경현\*\*, 김창현\*\*\*

A Study on Application of DMS in the Industrial SFF System

Sung Woo Bae\*, Dong Soo Kim\*, Kyung Hyun Choi\*\* and Chang Hun Kim\*\*\*

Key Words : Solid Freeform Fabrication (SFF: 임의형상제작), Selective Laser Sintering (SLS : 선택적 레이저 소결), Digital Mirror System (DMS: 디지털미러시스템), Slicing (슬라이싱)

1. 서론

3차원 임의형상 제작 시스템은 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 피드룸의 위치 제어 및 롤러의 속도제어, 분말의 소결을 위한 질소분위기 조성 및 온도제어, 레이저의 궤적 생성 및 제어 등 다양한 요소기술로 이루어져 있다. SLS 공정을 이용한 3차원 임의형상 제작 시스템(SFF : Solid Freeform Fabrication)에서 시제품을 제작하려면 복사기의 토너 역할을 하는 레이저 소결용 분말 재료가 필요하다. 이러한 분말을 이용하여 3차원 임의형상을 복제 및 성형하기 위해서는 파우더 룸에 있는 고분자 또는 메탈 분자를 롤러를 이용하여 평탄하게 펼친 후 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용하여 소결하게 된다.<sup>2-5</sup>

최근 SLS를 이용한 3차원 임의형상 제작 시스

템 (SFF)에서 빠른 제작 및 수정은 제품 개발 기간 단축에 따른 제품의 시장 경쟁력과 밀접한 관계를 가지고 있다. 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. 또한 레이저가 외곽 부분을 조사할 때 beam spot size가 커서 외곽선을 벗어나는 부분까지 조사하는 현상이 발생하여 원하는 형상정밀도를 얻기에는 한계에 있다 할 수 있다.

따라서 이러한 기존의 연구에 대해 본 연구에서는 원하는 형상에 대해 좀더 정밀하고 신속하게 가공하기 위한 하나의 방법을 제시하고자 한다. 특히 레이저 빔 스팟의 크기를 원하는 크기로 변경하여 미세한 부분의 형상에 대해서는 작은 beam spot size를 이용하고, 넓은 해칭면에 대해서는 굵은 Beam을 사용하는 방법을 적용하고자 한다. 특히 이러한 빔의 사용 폭을 원활히 변경시켜 주기 위해 기존의 고정식 beam expander 대신 가변형 beam Expander를 적용하여 spot size의 변경을 도모했으며, SLS 공정에서 Beam spot size를 측정할 수 있는 측정 메커니즘 및 적용 가능성에 대해 언급하고자 한다.

2. Digital Mirror System 이란?

\* 한국기계연구원 나노기계연구본부

Tel. 042-868-7165, Fax. 042-868-7176

Email: baesw@kimm.re.kr

\*\* 제주대학교 메카트로닉스공학과

\*\*\* 고려대학교 컴퓨터학과

SLS 공정에서 동일한 재료를 소결할 때 laser beam power, scan space, scan speed, layer thickness, temperature 등 다양한 변수가 작용한다. 이러한 모든 조건들을 동등하게 해줬을 때 컬링울의 발생 빈도, 형상 정밀도 등은 소결품의 질을 가늠하는 중요한 요소이다. 특히, 낮은 scan speed에 대해 laser beam spot size가 클수록 형상 정밀도가 떨어지고 over sintering이 일어날 확률이 높아진다. 이러한 이유들은 복잡한 형상에 대해 소결을 하였을 때 좀더 명백해진다. 이러한 문제점을 보완하고 개선하기 위해 하나의 단면에 대해 laser beam spot size와 그에 따른 scan speed를 조절함으로써 소결품의 질을 향상시키고자 한다.

기존의 연구에서 구축하였던 3축 다이내믹 포커싱 스캐너 시스템은 레이저 엔진 (Laser Engine), 스캐너 (Scanner), 고정식 빔 익스펜더 (fixed beam expander), 반사거울 (reflection mirror) 등으로 구성되어 있다. 대물렌즈, 오목렌즈, 갈바미러 (Galvano-mirror)로 구성된 다이내믹 포커싱 렌즈는 대면적에 레이저 빔을 조사할 때 발생하는 spot size의 찌그러짐 현상을 방지하기 위하여 렌즈의 초점 거리를 가변 할 수 있는 특징을 가지고 있다. 또한 레이저 헤드에서 조사되는 레이저 빔을 소결을 위한 레이저 빔의 스팟 크기인 0.5mm를 얻기 위해 조사되는 레이저 빔의 직경을 빔 익스펜더를 이용하여 어느 위치에서든지 일정한 spot size를 얻을 수 있도록 시스템을 구축하였다. 기존의 시스템에서 레이저를 조사할 때 중앙부분을 조사하는 레이저 빔의 경우는 문제가 없으나, 단면의 외곽부분을 조사하는 레이저 빔의 경우 단면을 벗어나는 영역까지 조사하게 되어 원하는 3차원 형상이외의 부가적인 부분까지 가공하게 된다. 이러한 이유로 기존의 시스템은 미세한 부분에 대한 형상 정밀도가 떨어지는 단점을 가지고 있다. 또한 형상 정밀도가 떨어지는 단점을 극복하기 위해 가공물의 외곽을 다시 가공해야 하는 단점을 가지고 있다.

하지만 새로 구축한 Digital Mirror System은 기존의 연구에서 대면적 소결에 적합하도록 구축하였던 레이저 시스템에서 laser beam spot size를 가변 할 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 가변 할 수 있는 variable beam expander를 장

착하였다. 하나의 모터는 배율을 조정하기 위한 렌즈를 이동시키고, 다른 하나는 평행빔을 만들어 주는 모터이다. Variable beam expander는 소스 빔을 2x에서 8x까지 자동으로 가변 할 수 있으며, 단면의 중앙부분(Hatching part)은 큰 spot size를 이용하여 소결하고, 외곽부분 (boundary part)은 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 나타내었다.

Table 1 Specification of Variable beam expander

| Item  | Expansion Range | Input Aperture | Output Aperture |
|-------|-----------------|----------------|-----------------|
| Spec. | 2~8             | 10mm           | 30mm            |

### 3. Digital Mirror System 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 이동 명령(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. 1에 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. 2는 Digital Mirror System의 작동원리에 대한 Flowchart를 나타내었고, Fig. 3에 Digital Mirror System을 구성하는 laser part를 나타내었다.

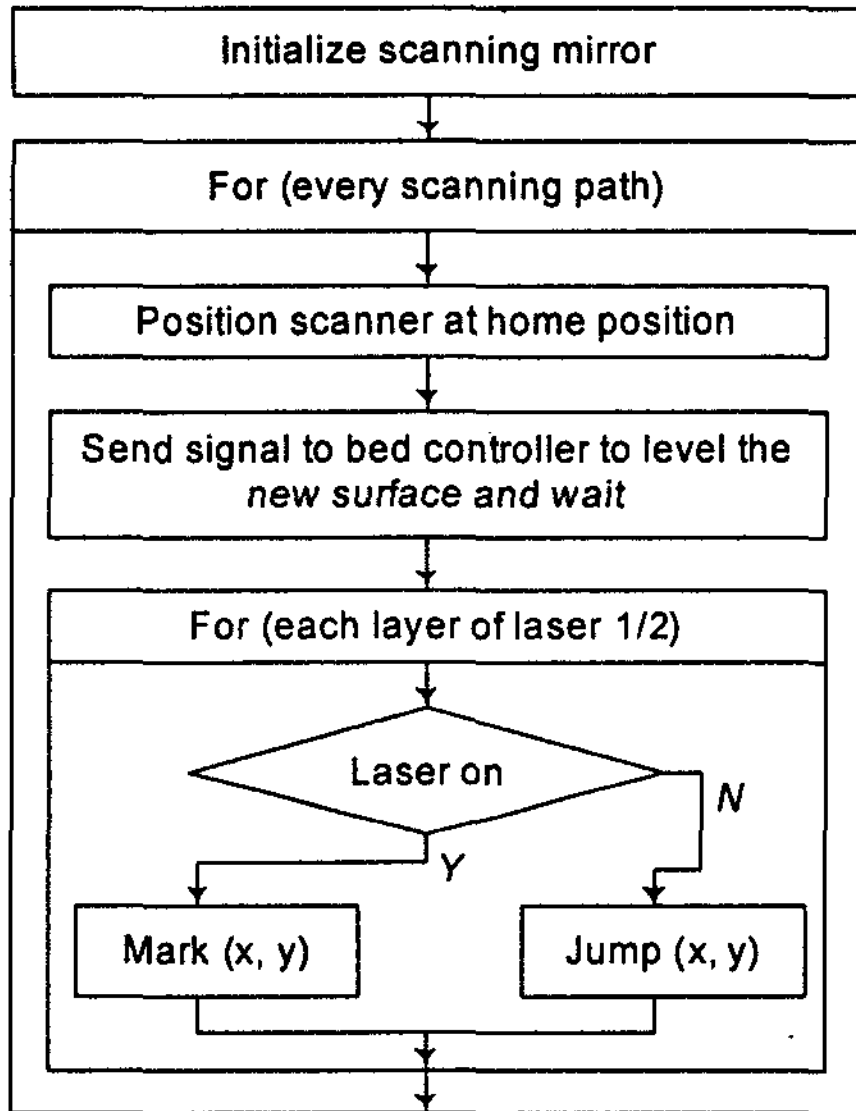


Fig. 1 Flowchart for Laser Scans control (Previous study)

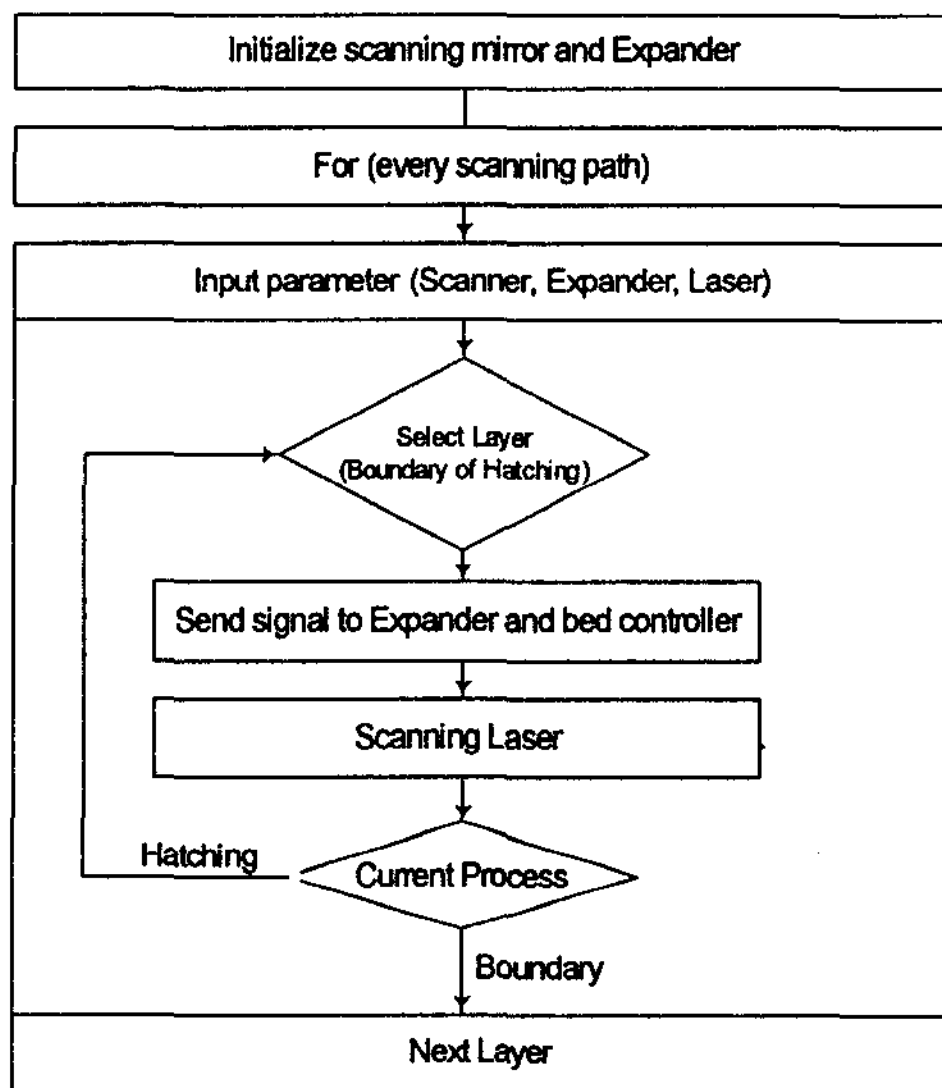


Fig. 2 Flowchart for Laser Scans control (Currently study)

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.

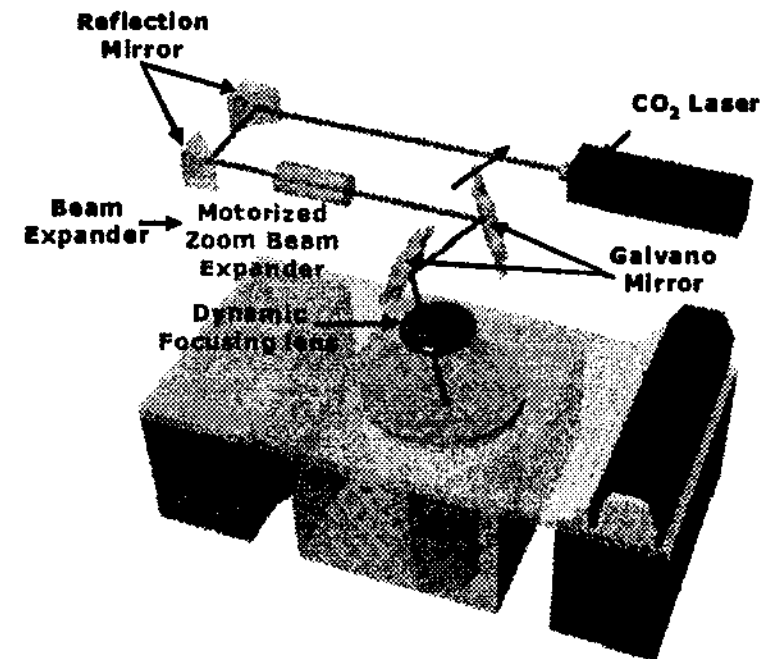


Fig. 3 Laser Part for Digital Mirror System

#### 4. Spot size 측정 메커니즘

##### 4.1 Spot size 계산

Variable beam expander는 CO<sub>2</sub> laser generator로부터 발진된 laser beam이 Reflection mirror를 거쳐 Variable beam expander에 도달하게 되면 2~8배까지 자동으로 확대 또는 축소함으로써 최종적으로는 Galvano mirror를 통해 조사된 레이저의 beam의 spot size를 원하는 크기로 변경할 수 있는 기능을 수행한다. Beam expander는 내장된 두개의 서보모터에 의해 배율을 조절하게 되며, 그중 하나의 모터는 앞뒤로 움직이면서 조사되는 레이저의 배율을 변경해 주고 다른 하나의 모터는 변화된 레이저 빔을 일직선으로 평행하게 조정해주는 역할을 한다. 본 연구에서 적용된 Variable beam expander를 사용한 dynamic focusing lens(Vario Scan)을 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 2에 본 연구에 적용된 laser 와 scanner unit의 사양을 나타내었다.

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

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

Table 2 Specification of Laser and Scanner unit

|       | Source beam size | Wavelength | M <sup>2</sup> |
|-------|------------------|------------|----------------|
| Value | 1.8±0.2mm        | 10.6μm     | <1.2           |

여기에서, scan lab의 dynamic focusing lens 부의 optic의 경우 회사 정책상 비공개 이므로 focal length(f)는 Fig. 4와 같은 등가 렌즈를 적용하여 계산하였다. 만약, focal length를 정확히 알 수 있다면, 이를 생략하고 식 (1)을 바로 적용하여 laser beam의 spot size를 구할 수 있다. Scan lab의 data를 바탕으로 등가 lens를 적용하여 focal length를 구하면 식 (2)과 같다.

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

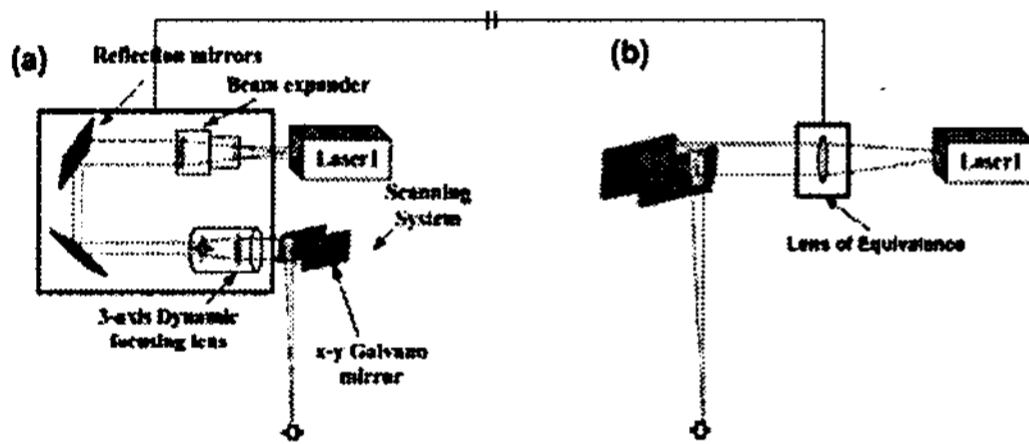


Fig. 4 Equivalence glass to save focal length

Variable beam expander를 적용하여 spot size를 계산하기 위해서, 식(1)과 식(2)에 의해 구해진 focal length를 적용하여 계산하면 Table. 3과 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 확인 할 수 있었다.

#### 4.2 Spot size 측정

Variable beam expander를 현 시스템에 적용했을 때 실제 계산한 spot size data와의 비교 검증을 위해 spot size를 측정하였다. Spot size 측정은 spot

size 측정 장치를 이용하였다. 그림 5는 spot size 측정 장치의 실제 사진이며, 그림. 6(a)에 상세도를 나타내었다. Spot size 측정 장치는 spot size 측정을 위해 파우더를 담은 파우더 박스(Fig. 6(b)), 파우더 박스를 고정 및 지지해 주며 빌딩룸에 삽입되는 빌딩룸 박스(Fig. 6(c)), 소결이 끝난 후 각각의 파우더 박스를 분리해주는 분리 장치(Fig. 6(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 handing for building room box를 이용하여 결합된 box를 꺼내게 된다. 그런 다음 결합된 box를 dividing box에 내려놓으면 dividing box의 돌출된 부분이 dividing hole을 통과하면서 powder box를 분리해 내는 것이다. 이렇게 분리된 powder box는 각각의 배율에 따라 현미경을 통해 spot size를 관찰하며 실제 계산된 값과 비교 검증을 하게 된다.<sup>6</sup>

Table 3 Results of Spot size(applied beam expander)

| Magnification | Spot size |
|---------------|-----------|
| X 1           | 2500 μm   |
| X 2           | 1250 μm   |
| X 3           | 833.4 μm  |
| X 4           | 625 μm    |
| X 5           | 500 μm    |
| X 6           | 416.6 μm  |
| X 7           | 357.2 μm  |
| X 8           | 312.6 μm  |

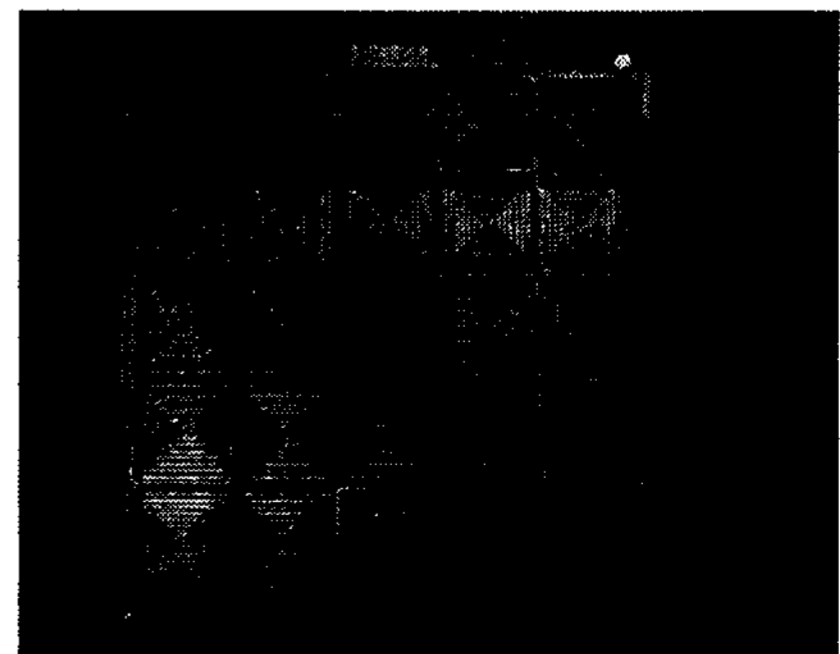


Fig. 5 Measurement device for Spot size

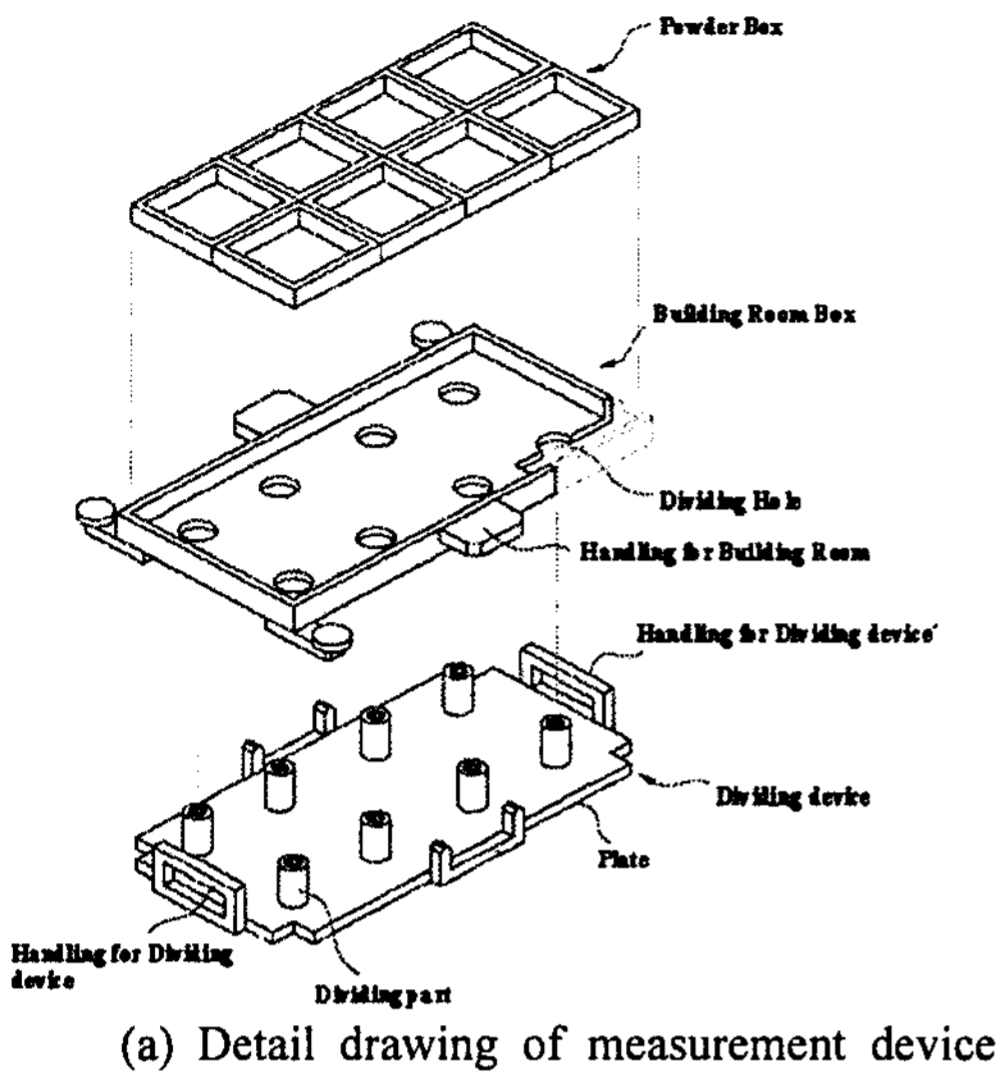


Fig. 6 A part of measurement device for spot size

상기 장치를 이용하여 Spot size 측정은 기본적으로 원하는 spot size가 검출되는지 여부와 powder base에서는 어떠한 결과가 도출 되는지 여부를 확인하였다. 이를 통해 최종적으로 DMS를 적용하기 위한 최적의 조건을 찾기 위해 크게 두 가지 방법으로 진행하였다.

전체적인 측정 방법은 먼저 Variable Beam Expander control program을 이용하여 원하는 배율로 조정된 후 Station 및 Laser control program을 순서대로 조건에 맞게 조정된 다음 레이저를 조사하여 spot size를 측정하였다.

먼저 spot size 측정을 위해 측정시 조사되는 레이저의 열에너지에 의해 열 확산 현상을 최소화하고자 다양한 필름 용지를 사용하여 측정을 하였으며, 측정 결과 가장 좋은 결과를 얻을 수 있었던 SH-71S(Coating Film)을 사용하였다. Fig. 7에 Coating Film을 사용한 spot size 측정 방법에 대해 나타내었다. 또한 powder base에서의 측정은 레이저 조사 전에 새로 고안된 spot size 측정용 장치를

기구부에 삽입하여 측정하게 되는데, Fig 8에 powder base에서의 측정 순서를 나타내었다. Fig. 9에 Coating Film과 powder base에서의 측정하여 얻어진 결과를 나타내었다.

이론적 데이터와 실제 측정된 데이터(Coating Film)를 비교한 결과를 Table 4에 나타내었다. 비교 결과  $\pm 20\mu\text{m}$ 의 오차 범위 내에 있었으며, Digital Mirror System에 적용 할 수 있음을 확인 하였다.

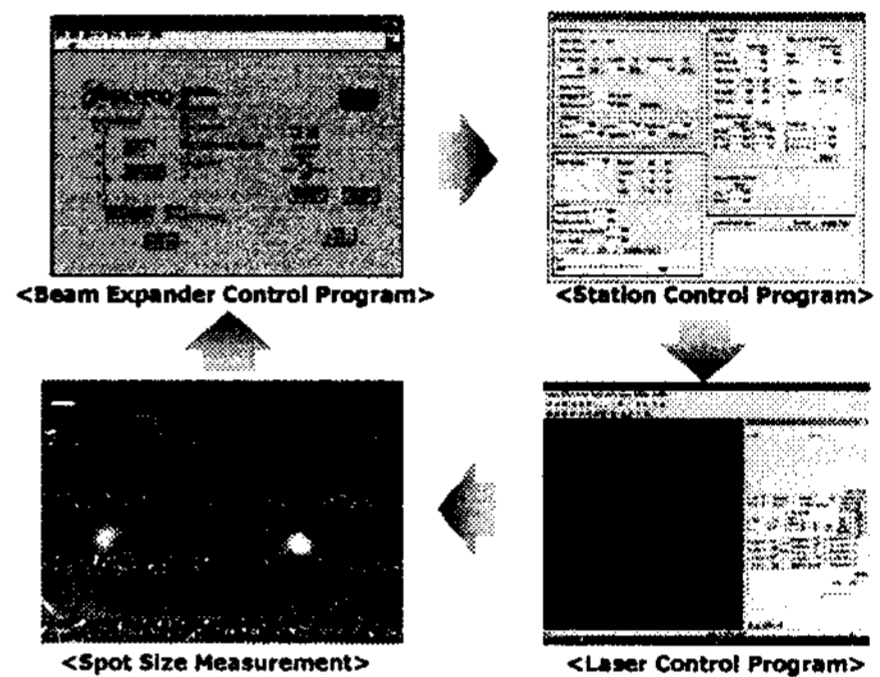


Fig. 7 Measurement Sequence(Coating Films)

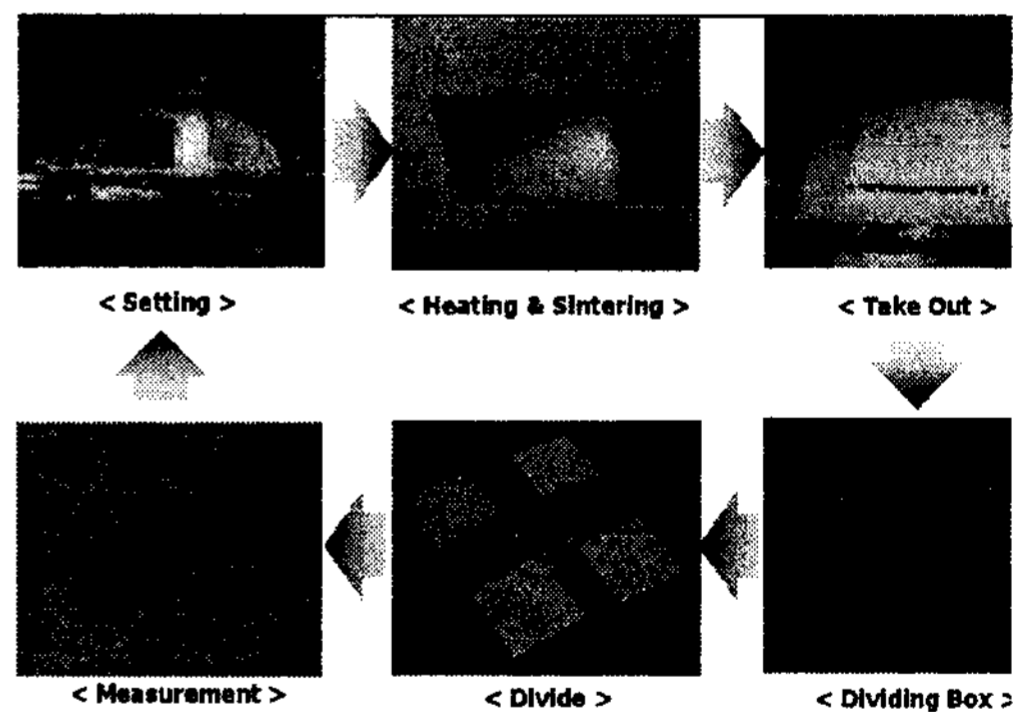
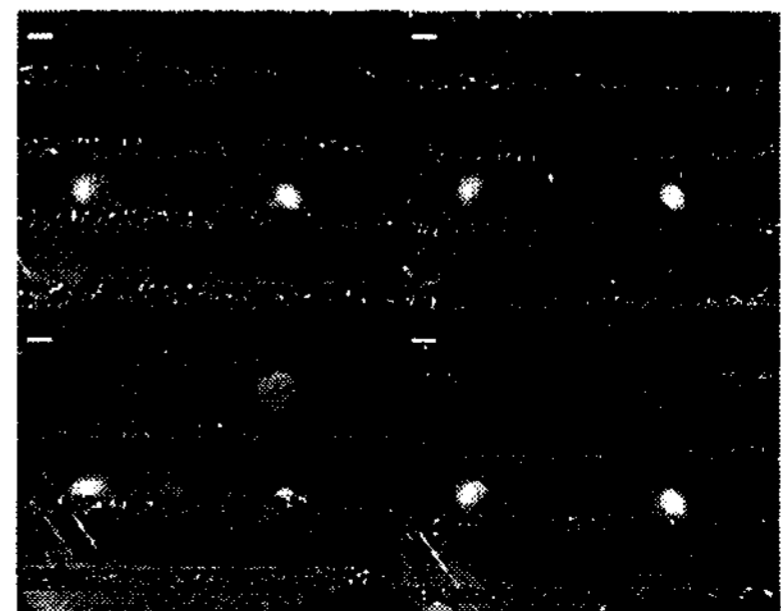
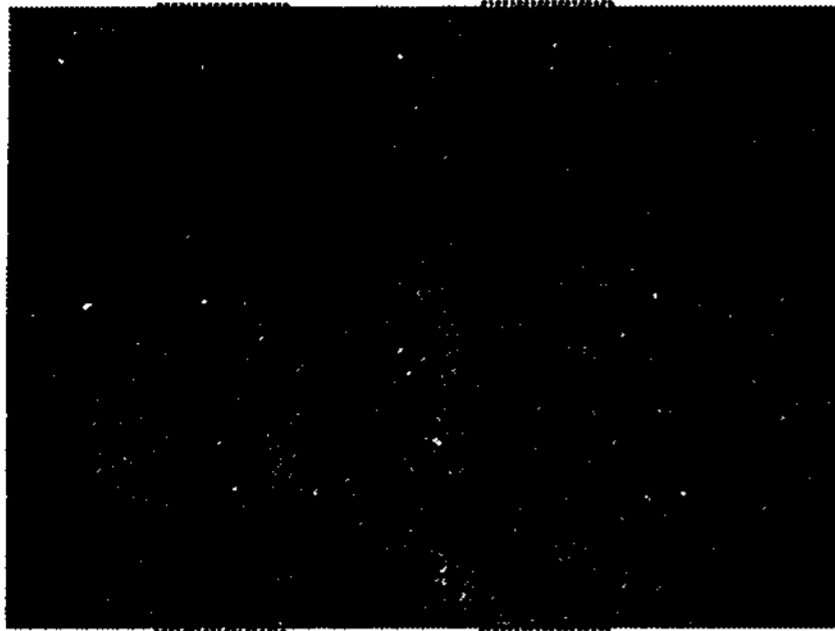


Fig. 8 Measurement Sequence(Powder Base)



(a) Result (Coating Film)





(b) Result (Powder Base)  
Fig. 9 Result of spot size measurement

Table 4 Comparison Data

| Magnification | Laser power (W) | Scan speed (mm/s) | Scan space (mm) | Cal. data (um) | Result (um) | Difference |
|---------------|-----------------|-------------------|-----------------|----------------|-------------|------------|
| x3            | 30              | 0.5               | 1.5             | 335.4          | 357.2       | +21.8      |
| x4            | 30              | 0.5               | 1.5             | 425.0          | 446.2       | +21.2      |
| x5            | 30              | 1.0               | 1.5             | 500.0          | 501.0       | +1.00      |
| x6            | 30              | 1.5               | 1.5             | 416.6          | 421.6       | +5.70      |
| x7            | 30              | 1.5               | 1.5             | 357.2          | 377.6       | +20.4      |
| x8            | 30              | 1.5               | 1.5             | 312.6          | 333.4       | +20.8      |

### 5. 결론

본 연구에서는 SLS 공정에 DMS를 적용하기 위한 연구로써, 어떠한 단면 형상에 대해서도 파우더 표면이 받는 열에너지를 항상 균일하게 유지하여 소결 성능을 향상시키기 위한 연구를 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. DMS의 개념을 정립하고 이를 적용하기 위한 기초 실험을 수행하였다.
2. Beam Spot size의 검증을 위해 Coating Film과 Powder base에서의 측정을 통해 이론적 데이터와 비교 검증 하였다.
3. 레이저 밀도에 따른 하나의 단면 당 파우더가 받는 열에너지가 균일하도록 다양한 실험을 통해 이를 검증하였다.
4. DMS 적용 효율 향상을 위한 인장 시편의 제작 및 측정을 통하여 SLS 공정에 적용 가능성을 확인 하였다.
5. DMS를 적용하기 위한 레이저 제어 주사 알고리즘을 개발하였으며, 실제 3차원 형상 제작을

통하여 알고리즘 별 비교 분석 하였다.

### 후 기

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 국제과학기술협력재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. M60602000002-06E0200-00210).

### 참고문헌

1. Steven, A., "Rapid Prototyping System," Mechanical Engineering, pp. 34-43, 1991.
2. Agarwala, M., Bourell, D. L., Wu, B. and Beaman, J. J., "An Evaluation of the Mechanical Behaviour of Bronze-Ni Composite Produced by Selective Laser Sintering," Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, pp. 193-203, 1993.
3. Kuczynski, G. C. and Zaplatynskyj, I., "Sintering of Glass," J. Am. Ceram. Soc., Vol. 39, No. 10, pp. 349-350, 1956.
4. Tiebing, C. and Yuwen, Z., "A partial shrinkage model for selective laser sintering of a two-component metal powder layer," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 49, Issues. 7-8, pp. 1489-1492, 2006.
5. Forderhase, P., McAlea, K., Michalewicz, M., Ganninger, M. and Firestone, K., "SLSTM prototypes from Nylon," Proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium, pp. 102-109, 1994.
6. Kim, D. S., Bae, S. W. and Choi, K. H., "Development of Measurement mechanism of Laser Beam Spot size for SFF system," FAIM 2007, Vol. 1, pp. 320-326, 2007.