

◆특집◆ 디지털 3차원 실물복제기

효과적인 SFF 시스템을 위한 디지털미러시스템 공정 개발

최경현*, 김형찬**, 도양희**, 김동수***

Digital Mirror System Development for Effective SFF System

Kyung Hyung Choi*, Hyung Chan Kim**, Yang Hoi Doh** and Dong Soo Kim***

Key Words : Selective Laser Sintering (선택적레이저소결), Solid Freeform Fabrication system (임의형상제작시스템), Scan path generation (주사경로 생성), Digital mirror system (디지털미러시스템), Sintering rate (소결율)

1. 서론

임의형상제작(SFF:Solid Freeform Fabrication)시스템은 복잡한 3차원 데이터로부터 시제품을 빠른 시간 내에 만들어낸 기술인 SLS(SLS: Selective Laser Sintering) 공정을 적용시킨 공정시스템으로 균일한 크기의 파우더를 각 층마다 균일하게 도포한 후 제품 단면의 형상대로 레이저 빔을 주사하여 파우더를 소결(sintering)시키고 각 층을 다시 적층시켜 3차원 형상을 제작하는 공정이다.

SFF 시스템에서 주사경로 생성 알고리즘은 가공 정밀도 및 전체 가공 시간에 가장 큰 영향을 미치는 요소로 이것은 주사경로에 따라 공정시간의 결정되는 것을 말하는데, 효율적이지 못한 주사경로의 생성으로 가공시간이 증가할 경우, 열 에너지에 의해 소결이 되는 SLS 장비의 특성 상 이미 소결이 이루어진 부분과 소결이 이루어지고 있는 부분 사이의 시간적인 지연으로 인한 열에너지 분포차가 발생하게 된다. 이러한 차이는 수축(shrinkage) 및 왜곡(warpage) 등의 발생시키고, 레이저 딜레이와 주사 딜레이에 의한 휨(cuiling) 현상이 발생하게

되어 공정에 영향을 미치게 된다. 이러한 수축, 휨, 왜곡 등은 가공품의 정밀도에 매우 큰 영향을 미칠 뿐만 아니라 전체 시스템의 효율에도 커다란 문제점으로 작용한다. 따라서 전체 가공시간을 단축시킬 수 있는 주사경로 생성 알고리즘은 임의형상 제작 시스템에서 매우 중요한 문제이다. (Miller¹), (Chua²), (Hur³), (Choi⁴)

이러한 열에너지의 분포와 소결 특성을 디지털 미러시스템 (DMS : digital mirror system)을 통하여 효율적으로 적용한다. DMS란 다른 영역에 따라 다른 스팟 사이즈로 레이저를 주사하는 방법을 말하는데 스팟 사이즈는 각 영역 별로 최적화되어 선택되고, 이러한 최적화 방법은 주사경로 생성 알고리즘에 포함되어 제공된다. 즉, DMS를 이용하여 공정시간을 감소시키고 레이저 주사 시간동안 열평형을 유지시켜 가공 정밀도 및 효율을 향상시킨다. (Choi⁴)

본 연구에서는 효율적인 SFF 시스템 공정을 위한 DMS 공정 조건과 주사효율을 향상시킬 수 있는 주사경로 생성 알고리즘 개발 방법에 대하여 기술한다.

2. SFF 시스템

2.1 SFF 시스템 공정장비의 특징

* 제주대학교 메카트로닉스공학과
** 제주대학교 전자공학과
E-mail: hallasoju@hanmail.net Tel. 064-756-3663
*** 한국기계연구원 정보장비연구센터

SFF 시스템은 레이저를 이용한 공정으로 Fig. 1 은 SFF 공정을 나타내는 개략도이다. SFF 공정은 각 층을 적층시켜 3차원 형상을 제작하는 공정으로 우선 균일한 크기의 파우더를 각 층마다 균일하게 도포한 후, 제품의 단면의 형상을 모델링하여 단면 형상대로 레이저 빔을 주사하여 파우더를 소결시키고, 각 층을 적층하는 공정을 반복하여 제품을 제작 한다.(Kim⁵)

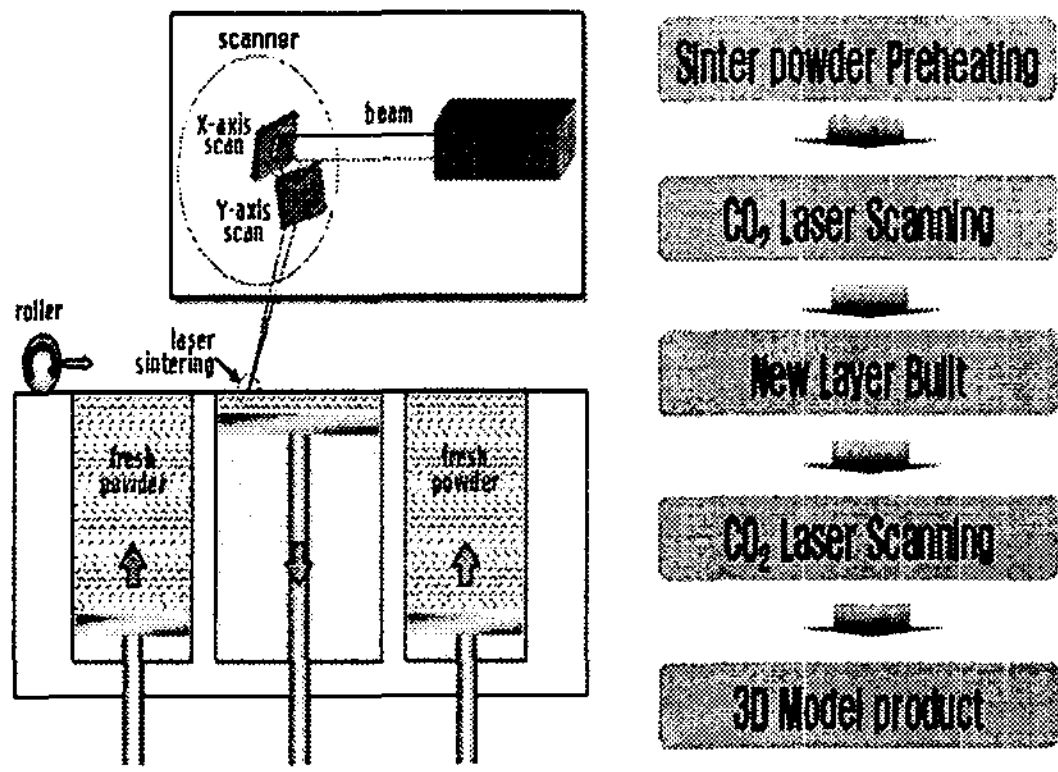


Fig. 1 SFF system progressing

2.2 주사경로 생성 알고리즘 개발

SFF 시스템에서 주사경로는 가장 우선적으로 고려되어야 하는 레이저 제어 알고리즘이다. 주사 경로의 생성은 가공품의 정밀도, 전체 가공시간 및 효율성에 매우 큰 영향을 미치는 부분으로 주사경로의 오차는 SFF 시스템에 치명적인 결함으로 작용할 수 있다. 그러므로 보다 정확한 주사경로 생성 및 추종 알고리즘의 개발은 SFF 시스템에서 반드시 선행 연구되어야 할 내용이다.

주사경로의 생성은 3차원 모델링 형상으로부터 슬라이싱 단면을 생성시키고 이렇게 생성된 단면으로부터 주사점(scan point)을 구한다. 슬라이싱 단면에 대한 주사경로 생성 알고리즘은 주사선(scan ray)을 주사간격만큼 옮겨가면서 윤곽 선분과의 교점을 연속으로 구하는 것이다. 주사선과 윤곽 선분과의 교점 계산 시간을 줄이기 위해서 Fig. 2에서와 같이 하나의 레이어(layer) 안에 존재하는 모든 루프에 대하여 사각형을 경계로 하는 BRLp(Bounding Rectangle of Loop)를 설정하여 주사선이 이 경계와 만나지 않을 경우에는 루프를 건너뛰어 다음 루프에서 계산하게 된다.(Kim⁵)

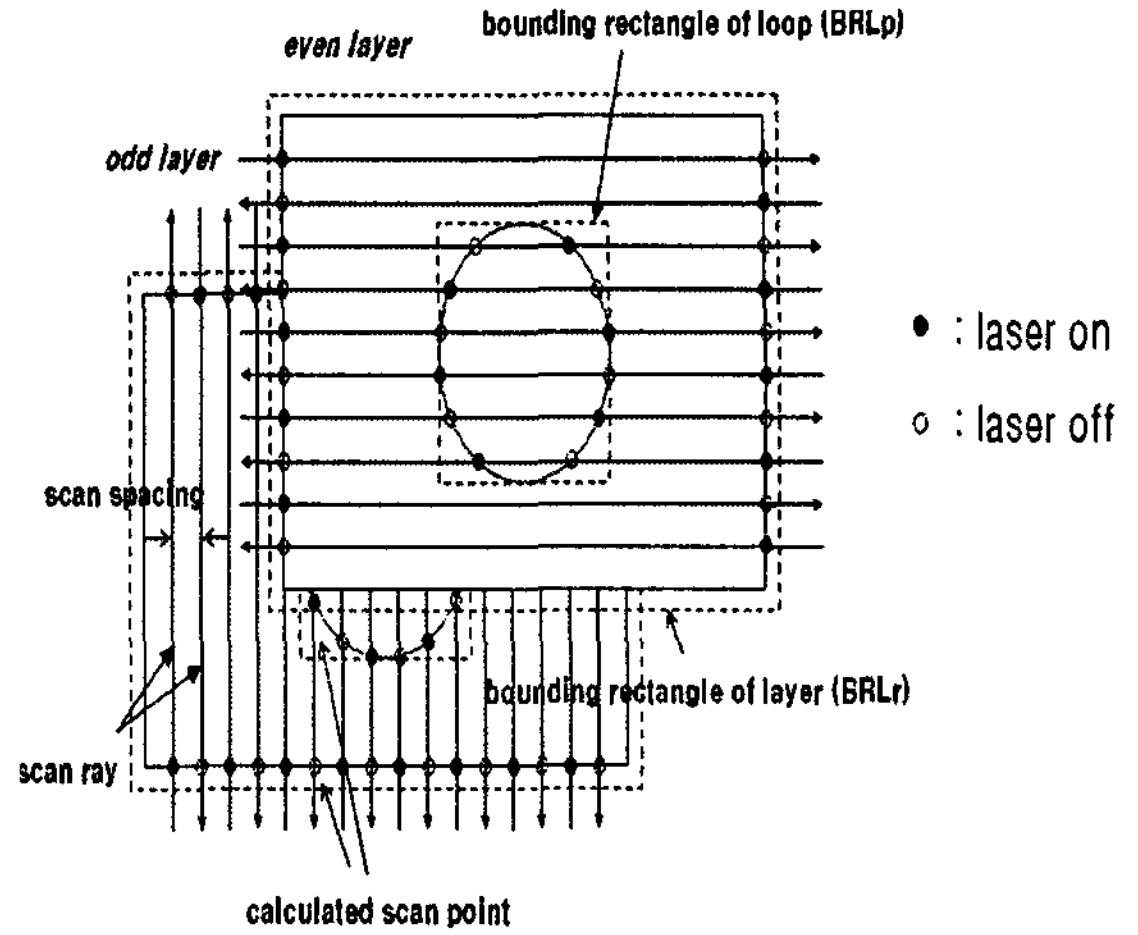


Fig. 2 Calculated scan points

3. DMS 개발

3.1 DMS 공정장비 특징

DMS는 영역분할 주사경로 생성 알고리즘을 바탕으로 서로 다른 크기와 복잡도를 갖는 영역을 구분하고, 각 영역에 다른 빔 스팟 사이즈와 스캔 스페이싱을 적용하여 공정을 하는 시스템을 말한다. Fig. 3은 이러한 DMS의 개략도를 나타낸다.

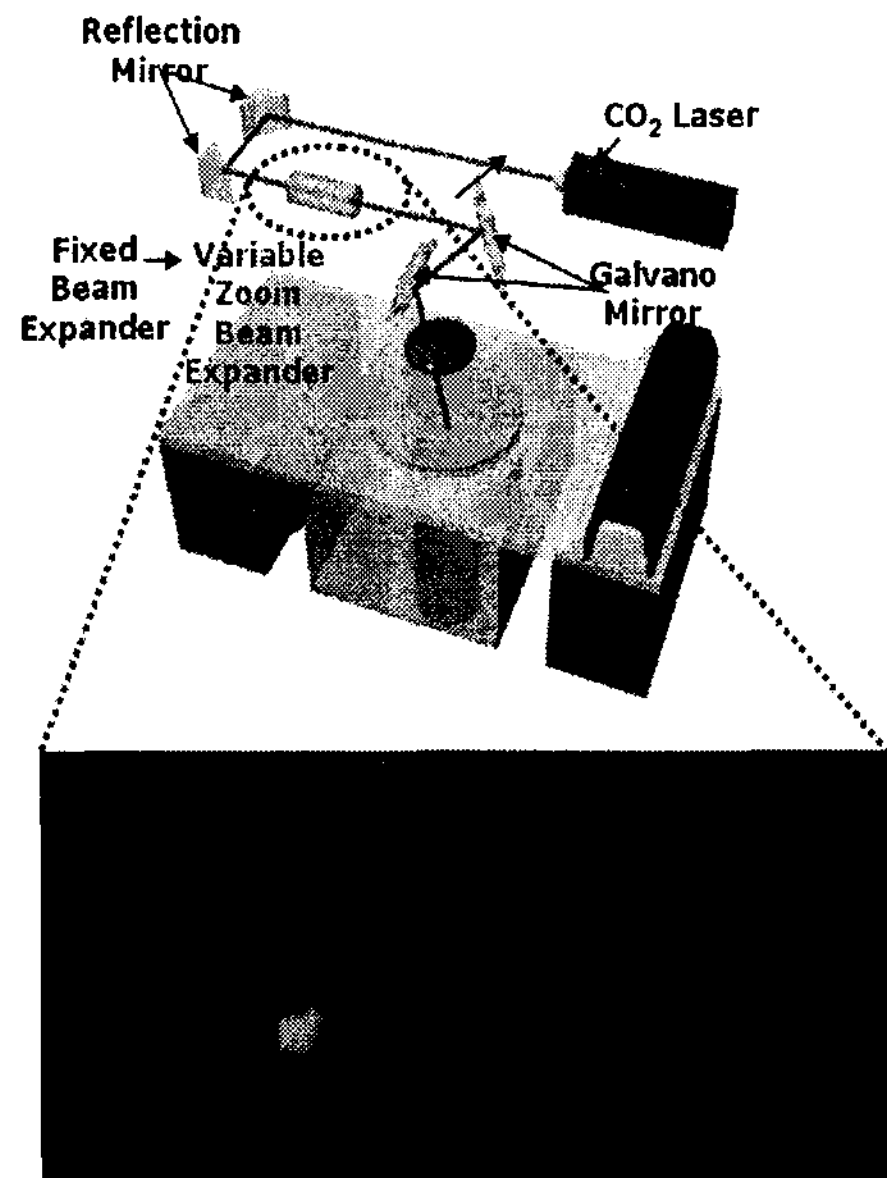


Fig. 3 Digital Mirror System(DMS)

Fig. 6은 이러한 영역분할 주사경로 생성 알고리즘의 순서도를 나타낸다. 우선 한쪽 편 최 외곽선에서 주사선의 직선상에 있는 다른 한편의 최 외곽선까지의 마크 숫자를 구분하고 이 숫자에 따라서 영역을 생성하게 된다. 생성된 영역에 이웃하는 순서에 의하여 주사선을 재배열하여 순서를 바꾸어 저장하고, 나머지 점프는 모두 삭제한다. 또한 너무 작은 영역까지 분할되는 것을 막기 위해서 영역의 면적의 최소값을 제한한다.

3.3 DMS 공정 적용

디지털 미러 시스템의 적용은 영역분할 주사경로 생성 알고리즘에서 각 영역을 크게 3단계로 구분한다. 우선 크기를 비교하여 가장 작은 부분을 구분하고, 다음으로 영역의 복잡도를 구분하여 주사선의 변화가 큰 영역 순으로 분류하고, 이렇게 분류한 영역을 3단계로 구분한다. 3단계로 나누어진 영역은 영역별로 다른 스팟 사이즈와 스캔 스페이싱 그리고 각기 다른 주사속도로 주사하게 되는데, 이러한 과정을 통하여 공정시간의 단축과 영역간 소결율을 평형하게 하여 정밀도와 공정효율을 증가 시킨다. Fig. 7은 디지털 미러 시스템 공정의 순서도를 나타낸다.(Choi⁶)

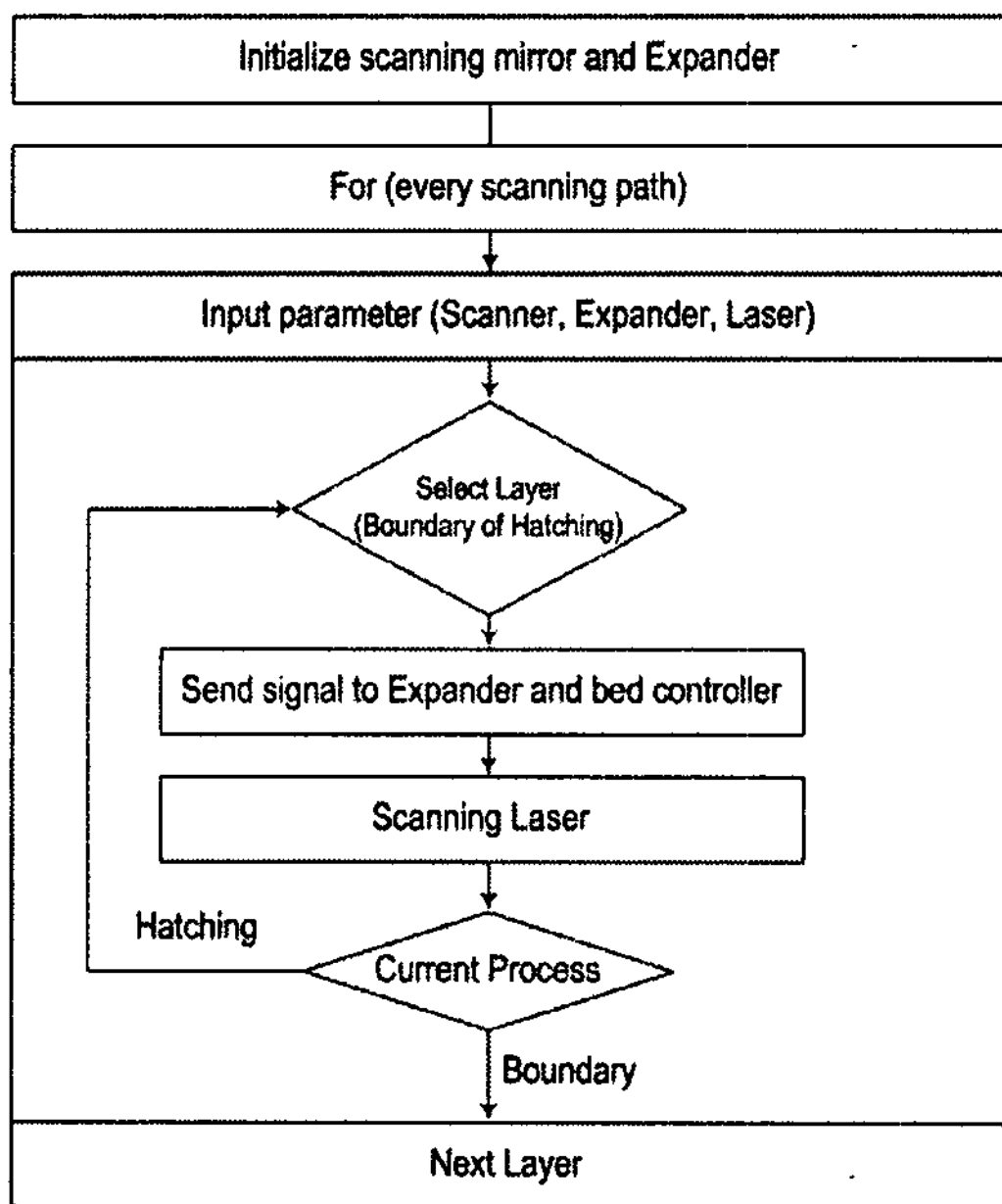


Fig. 7 Digital Mirror System Diagram

3.4 DMS 공정 적용 및 효율

레이저가 주사되어 파우더가 소결되는 동안, 소결된 영역은 주변보다 매우 높은 온도에 있게 된다. 여기서 소결된 부분은 주변보다 높은 온도를 갖기 때문에 모든 방향으로 열을 방출하게 되고, 주변의 온도가 평형을 이루어 질 때까지 계속된다. 식 (1)은 주변으로 복사되는 에너지 q에 대하여 나타내고 있는데, hc는 대류에 의한 열 전달계수(heat transfer coefficient for convection) 이고, hr은 방사열의 투과에 의한 열 전달계수(heat transfer coefficient from radiation transmission), 그리고 Ts 와 Ta 는 각 챔버(chamber)의 온도와 소결된 베드의 온도를 나타낸다. 이와 같은 열 복사(radiation)는 챔버의 온도와 소결된 부분의 온도가 같을 때까지 계속된다. (Park⁷)

$$q = A_s (h_c + h_r)(T_s - T_a) \quad (1)$$

식 (1)과 같은 열 복사 에너지는 챔버의 온도와 소결된 부분의 온도가 같아질 때까지 주변으로 방출되기 때문에 열에 의하여 레이저가 주사되지 않은 부분의 소결율까지 영향을 미치게 된다. 소결율은 식 (2)와 같이 시간에 따른 함수로 에너지가 주어진 상태에서 시간이 길어지면 소결율도 증가하게 된다.(Park⁷), (Yang⁸)

$$\ln \left[\frac{h}{h_0} \left(\frac{h_0 - h_\infty}{h - h_\infty} \right) \right] = k't \quad (2)$$

이것은 위에서 기술한 주사경로 생성 알고리즘에서 주사시간이 길어질 경우, 공정품의 강도가 약해지거나 열 분포에 의한 변형이 일어날 가능성이 있다는 것을 말해준다. DMS를 적용했을 경우 일반적인 주사경로 생성 알고리즘보다 공정시간이 짧아지고, 각 영역의 소결 특징에 알맞게 스팟 사이즈와 스캔 스페이싱을 조절하여 영역간의 열분포를 동일하게 하여 주사 정밀도와 주사효율을 증대시킨다.

4. DMS 공정 소프트웨어 및 시뮬레이션

4.1 DMS 공정 조건

Fig. 8과 Table 1은 디지털 미러 시스템 적용 시, 시편의 강도 측정을 통하여 시스템의 공정조건을 결정하는 실험결과와 조건이다. Fig. 9는 Table 1과 같은 실험조건으로 시편의 강도 테스트 결과를 나타낸다. 이러한 결과는 스팟 사이즈가 감소하면, 시편의 강도가 감소하는 것을 알 수 있고, 공정 시, 공정영역 소결율이 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 시제품 제작 시, 최소 강도가 0.5kN이상이 되어야 함으로 최소 실험결과와 같이 스캔 스페이싱은 300 μ m 이상을 사용할 수 있음을 알 수 있다.

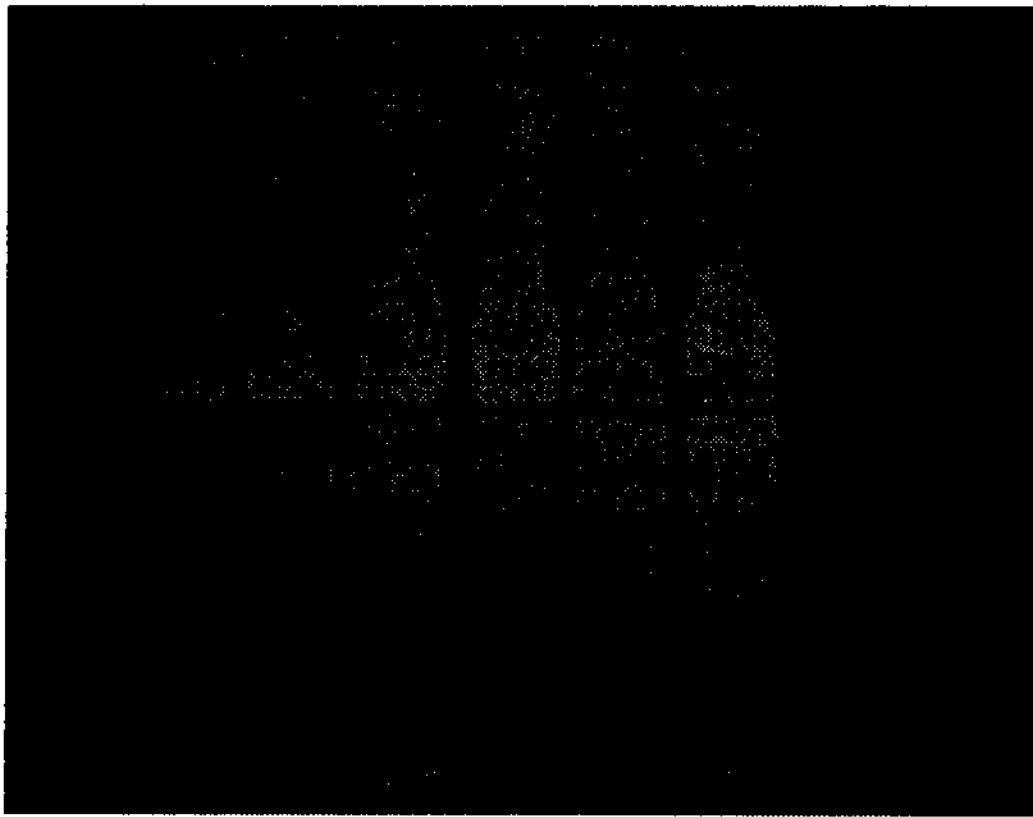


Fig. 8 Fabricate specimens

Table 1 Experiments condition

spot size(μ m)/Magnification	Scan Speed (m/s)	Layer thickness (μ m)	Laser power (W)	Scan Space(mm)
300/×8	7	100	18	0.2
				0.3
500/×5	5			0.3
				0.5
800/×3	2			0.6
				0.8

4.2 공정 프로그램 개요

Fig. 10은 디지털 미러 시스템을 적용한 모델의 주사제어 프로그램을 나타낸다. 이러한 주사제어 프로그램은 구현된 알고리즘 별로 시간 시뮬레이션을 통하여 전체 공정시간을 사용자에게 제시하고, 공정을 제어하여 선택 모델을 제작한다. 이것은 크

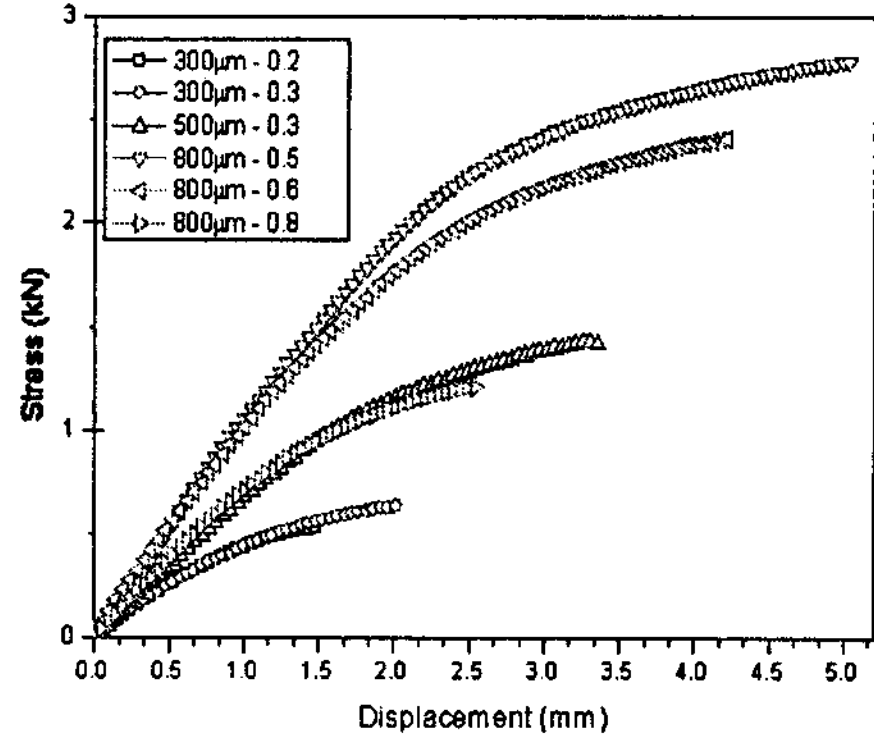


Fig. 9 Tensile test

게 STL 파일을 불러들여 3차원으로 보여주는 부분과 생성된 경로를 시뮬레이션 하여 보여주는 부분, 그리고 레이저 주사를 제어할 수 있는 파라미터를 입력 하는 부분으로 나뉜다. STL Viewer는 작업 중인 STL 파일을 OpenGL을 통하여 출력하고, Slices Viewer는 현재 주사 중인 Layer를 출력한다. 그리고 Control Dialog는 각종 공정 파라미터를 입력하고, 주사경로 생성 알고리즘 선택과 주사경로 제어명령을 내린다.

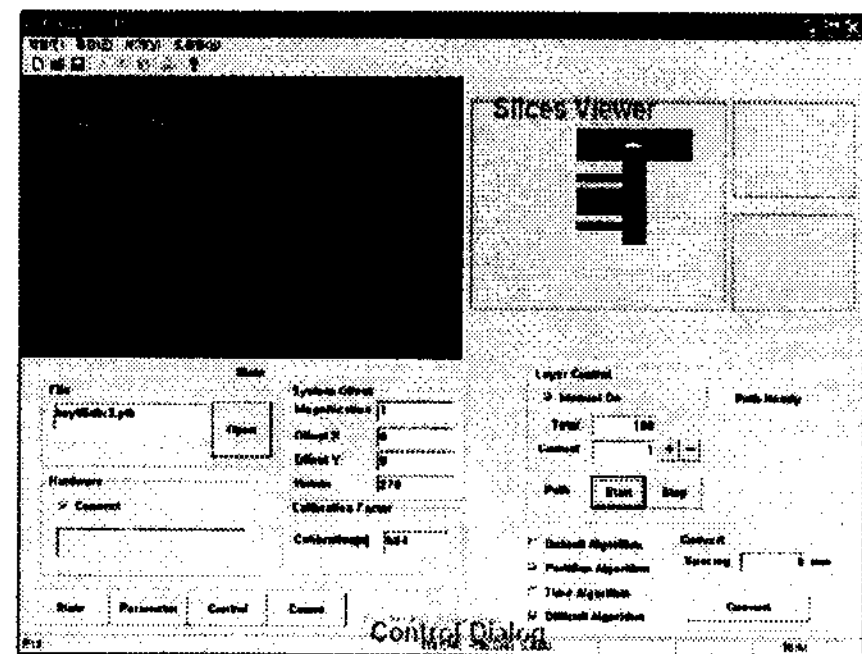


Fig.10 Developed software

4.3 DMS 공정 주사시간 시뮬레이션

개발된 알고리즘을 테스트하고 평가하기 위하여 시뮬레이터를 개발하였다. 시뮬레이터는 주사모델에 대해 실제 주사 되어지는 주사경로를 가상으로 표시하고, 총 주사시간과 점프 및 마크 시간을 레이어 별로 표시한다. 주사모델은 Fig. 10과 같은 열쇠모양의 모델을 사용한다. Table 2와 Fig. 11은

DMS를 적용한 이러한 모델의 5mm 공정에 소요되는 시간을 나타낸다.

Table 2 DMS application process data

	Basic algorithm	DMS application (Scan speed fixing)	DMS application (Scan speed variableness)
Spacing (spot size)	0.3(0.5)	0.3(0.3) 0.3(0.6) 0.6(0.8)	0.3(0.3) 0.3(0.6) 0.6(0.8)
Speed	5m/s	5m/s	6m/s 5m/s 4m/s
Total processing time	390198ms	211881ms	189063ms

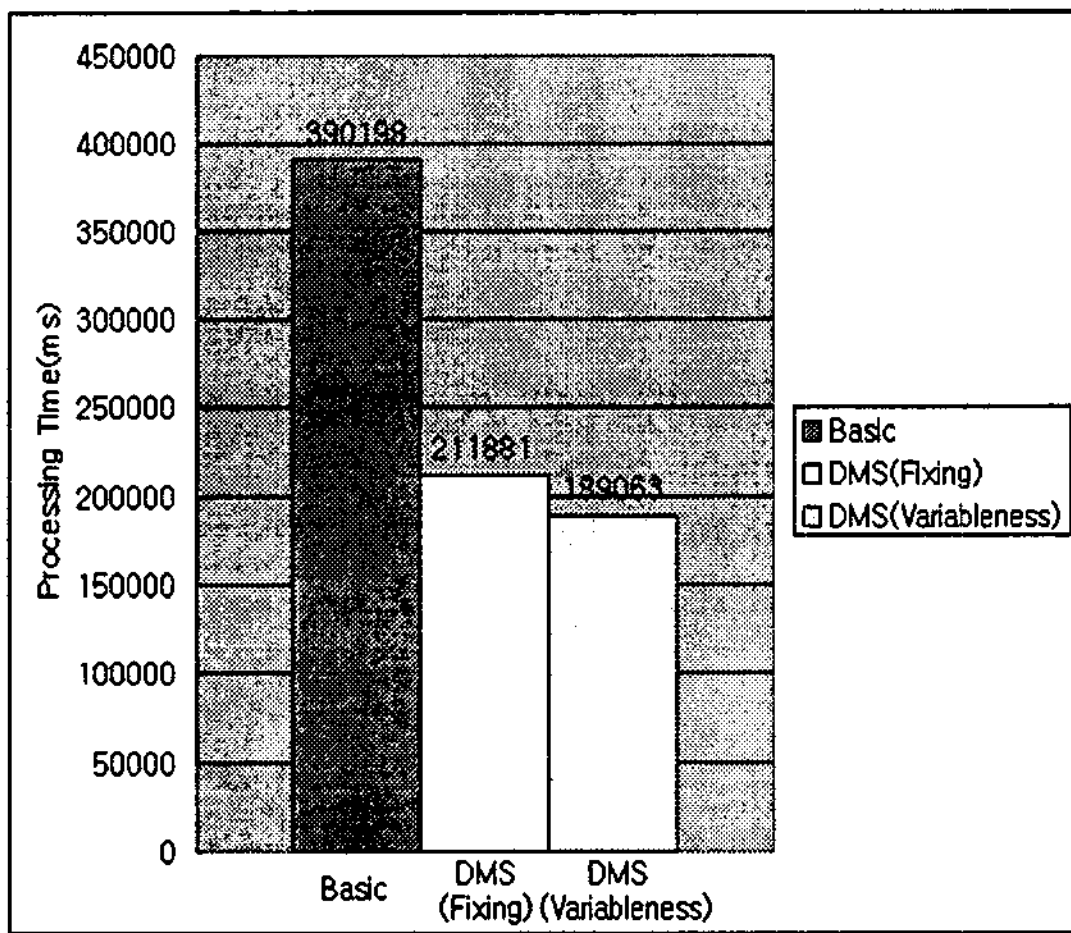


Fig. 11 Total processing time simulation

Table 2는 총 레이어의 점프 구간의 시간을 시뮬레이션한 결과이다. 이것은 기본 알고리즘과 영역 간 스캔 속도를 고정한 DMS, 스캔 속도를 가변한 DMS의 공정 시간을 나타내고, 5mm 공정 시, 기본 알고리즘 보다 약 2배 이상의 시간이 단축되는 것을 알 수 있다. 또한 한 1레이어 당 이득시간은 약 4sec이다.

5. DMS 공정 실험

5.1 DMS 공정 실험

공정실험은 위의 내용을 바탕으로 Fig. 10의 시뮬레이션 모델을 임의형상제작시스템과 주사제어 소프트웨어를 통하여 제작한다. Fig. 12는 실제 제작된 모델로 좌측으로부터 기본 주사경로, DMS 적용 고정속도, DMS 적용 가변 속도 주사경로를 나타낸다. 이와 같은 방식의 적용된 모델들을 통하여 실제 제작 과정에서 생기는 왜곡 및 접합면의 강도와 주사시간의 상관성 및 주사경로의 정밀도에 대하여 비교한다.

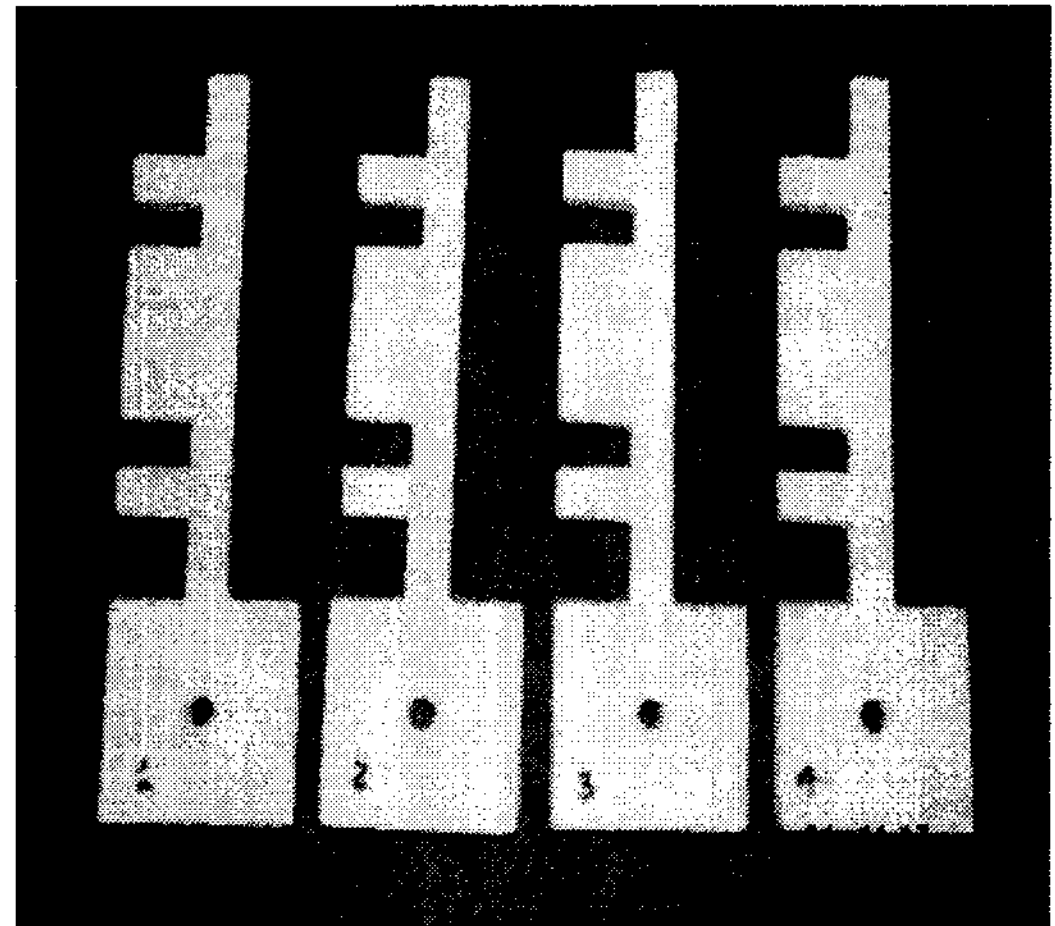


Fig. 12 The model manufacture used SFFS

Fig. 13은 DMS를 적용하였을 경우 발생하는 접합면의 문제점을 나타낸다. 접합면은 그림에서와 같이 익스팬더의 가변 시, 소결시간이 길어질수록 주위보다 더 많은 양의 에너지를 받게 되어, 왜곡이 발생한 것을 관찰할 수 있다. 이러한 문제점은 3가지 알고리즘에서 모두 발생하는 것은 아니고, DMS 시스템의 가변속도 공정조건을 적용하였을 경우 발생한다. 이것은 익스팬더가 가변시간 동안 영역 접합면에서 시간이 소요되어 소결율에 영향을 미치기 때문이다. 즉, 익스팬더의 스팟 사이즈가 정상상태가 될 때까지 소요되는 시간이 소결율에 영향을 미쳐 발생한 문제점이다. 하지만 이러한 문제점은 오히려 접합면에 소결율을 증가시키기 때문에 제품의 접합면 강도는 증가하고, 표면조도는 감소하는 특징이 나타난다. 또한 가변속도를 사용하기 때문에

고정속도 방식보다 공정시간이 감소하는 특징이 있다. 이와 같은 문제점은 소결율이 변화하는 부분에 강제로 주사경로를 추가하고 정상상태 도달시간이 빠른 익스팬더를 사용하여 해결이 가능하다. 또한 빔 스팟 사이즈 변화 시, 소결율을 고려하여 강제로 주사경로를 추가하는 방법도 있다. 이러한 문제점의 해결 방안은 접합면의 강도와 주사시간의 상관성 및 주사경로의 정밀도에 대한 많은 공정을 통한 연구가 필요하다.



Fig. 13 DMS joint problems

5.2 DMS 공정 별 강도 측정

Fig. 14와 Table 3은 알고리즘 별 강도측정을 나타낸다. DMS공정의 실험결과에서 각 알고리즘은 서로 다른 특성을 보임을 알 수 있다. 이것은 서로 다른 특성을 사용자에게 적용함으로써 목적물의 원하는 특성에 맞춰 사용자가 알고리즘을 선택 가능함을 알 수 있다. Table 4는 이러한 공정 특징을 나타낸다.

Table 3 Tensil test

Algori- -thm	DMS (scan speed fixing)	DMS (scan speed variable)	Area divi- sion	De- fault
N/mm ²	12.93	5.99	3.28	10.52
MPa	251	369	201	348



Fig. 14 Tensil test (Istron 5583 tester)

Table 4 Algorithms different characteristics

Algorithm	Characteristics
DMS (scan speed fixing)	표면조도 감소 강도 약함 공정시간 단축(1레이어 당 2초)
DMS (scan speed variable)	표면조도 감소 강도 증가(DMS-scan speed fixing 비 교) 공정시간 단축(1레이어 당 4초)
Area division	표면조도 우수 강도 약함(DMS scan speed fixing 비교) 공정시간 증가(1레이어 당 4.8초)
Default	표면조도 우수 강도 우수 공정시간 증가(1레이어 당 8초)

6. 결론

DMS 공정은 레이저를 통한 소결 공정 중 빠른 시간내에 효과적으로 제품을 제작하기 위한 기술이다. 이러한 DMS 공정을 위하여 가장 우선적으로 고려되어야 하는 문제는 효율적인 공정 적용을 위한 주사경로 생성 알고리즘의 개발과 이러한 알고리즘을 정확하고 효율적으로 추종 할 수 있는 주사 경로 제어 방안이다. 본 논문에서는 이러한 공정향상을 위한 주사경로 생성 및 제어 알고리즘을 개발하였고, 공정특징과 공정조건을 제시함으로써 제품

의 정밀도와 공정 효율을 향상 시켰다.

또한 각 주사경로 생성 알고리즘은 시간 시뮬레이션을 통하여 가공효율과 공정 특징을 확인 하였고, 이러한 알고리즘을 갖는 모델들을 SFF 시스템을 통하여 제작 하여 검증하였다. 검증 방법은 시간 시뮬레이션과 실제 공정 간의 일치와 각 알고리즘 별로 제작한 시편의 강도 측정, 표면조도 거칠기 측정, 그리고 육안으로 관찰한 제품의 특징을 비교, 분석하였다. 또한, 제작된 모델들의 특징을 통하여 시간에 의한 소결율 증가가 제품에 미치는 영향을 실험을 통해 분석함으로써 소결율에 의한 열팽형 조건을 제시하였다. 향후, 제안된 알고리즘 모델들을 분석 결과와 각 알고리즘의 강도, 표면조도, 공정시간, 접합면의 문제 등의 특징을 바탕으로 제작 목적물 특징에 최적화된 알고리즘을 제시하여야 하겠다. 또한 이러한 특징에 따른 주사시간의 상관성 실험을 통한 분석과 시뮬레이션을 통하여 최적화된 실험조건을 제시하여야 하겠다. 그리고 디지털 미러 시스템의 빔 익스팬더의 가변시간을 고려하고 이것에 대한 영향을 최소화하는 방법을 고려하여 이러한 영향을 최소화할 수 있는 시스템을 구현하는 방안에 중점을 두고 연구를 진행할 것이다.

후 기

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

참고문헌

1. Miller, D., Deckard, C. and Williams, J., "Various beam size SLS workstation and enhanced SLS model," *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 3, No. 1, pp. 4-11, 1997.
2. Chua, C. K., Leong, K. F. and Lim, C. S., "Rapid Prototyping: Principles and Applications-2nd Edition," World Scientific Publishing, pp. 6-17, 2003.
3. Hur, S. M., "Generation of CAD Data for Rapid Product Development in Reverse Engineering," Pusan National University Graduate School, Ph.D. Thesis, 2002.
4. Choi, K. H., Kim, H. C., Doh, Y. H. and Kim, D. S., "Novel scan path generation method based on area division for SFFS," *FAIM 2007*, Vol. 1, pp. 166-176, 2007.
5. Kim, H. C., "Internet-based Intelligent CAD/CAM System for Rapid Product Development," Pusan National University Graduate School, Ph.D. Thesis, 2003.
6. Choi, K. H., Choi, J. W., Doh, Y. H., Cho, S. J., Lee, S. H., Ahn, Y. J. and Kim, D. S., "Generation of Dual Laser Scan Path for Enhancement of Mechanical Strength," *Proceedings of the KSME 2005 Fall Annual Meeting*, pp. 1074-1079, 2005.
7. Park, S. M., "Advanced Data Exchange for Solid Freeform Fabrication," The University of Texas at Austin, Ph.D. Thesis, 1993.
8. Yang, J., Bin, M., Zhang, X. and Liu, Z., "Fractal scanning path generation and control system for selective laser sintering(SLS)," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 34, No. 3, pp. 293-300, 2003.