

SLS 공정효율 향상을 위한 DSP 제어기반의 레이저 주사경로 생성

指導教授 都 良 會

金 亨 燦

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2008 年 2 月

金亨燦의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 _____ 印

委 員 _____ 印

委 員 _____ 印

濟州大學校 大學院

2008 年 2 月

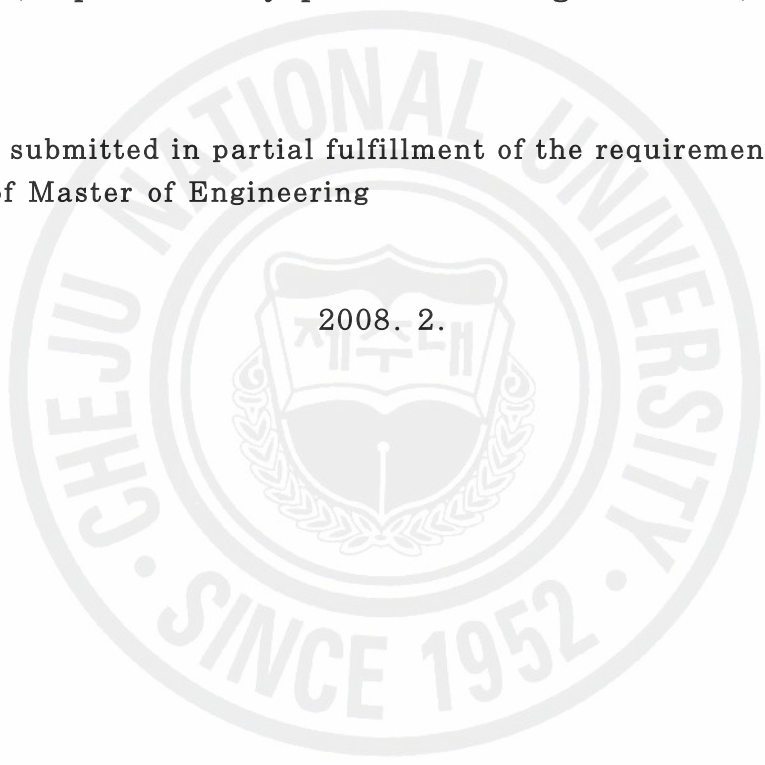
Laser Scan Path Generation of DSP control
base for SLS Progress efficiency
Improvement

Hyung-Chan Kim

(Supervised by professor Yang-Hoi Doh)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the
degree of Master of Engineering

2008. 2.

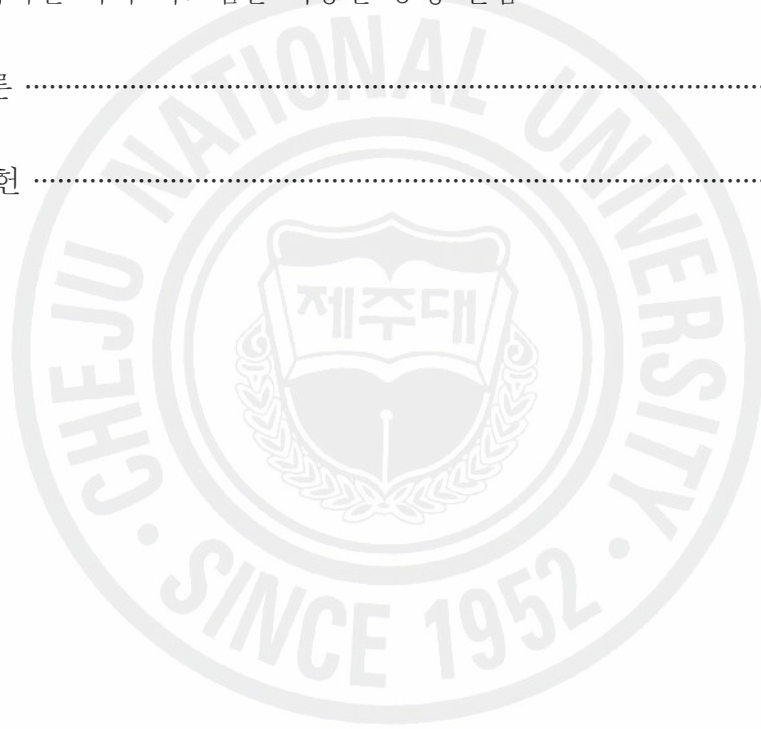
A large, faint watermark of the Cheju National University seal is centered on the page. The seal is circular and contains the text 'CHEJU NATIONAL UNIVERSITY' around the top and 'SINCE 1952' around the bottom. In the center of the seal is a shield with a book and a quill, with the Korean characters '제주대' (Jeju University) written across it.

DEPARTMENT OF ELECTRONICS ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

Summary	1
I. 서론	2
II. 주사경로 생성 알고리즘	4
1. SLS 공정장비의 특징	4
2. 주사경로 생성 알고리즘 개발	6
3. 임의 방향의 주사점 생성	10
4. 주사경로 제어	12
5. 주사경로의 보정	13
6. 주사경로 생성 알고리즘의 구현 방안	16
III. 공정효율 향상을 위한 주사경로 생성	22
1. 영역분할 주사경로 알고리즘 개발	22
1) 영역분할 주사경로 효율	22
2) 영역분할 주사경로 알고리즘 개발	23
2. 오류 검증 알고리즘 개발	25
3. 주사시간을 고려한 영역분할 주사경로 생성 알고리즘	26
4. 디지털 미러 시스템(Digital mirror system)	28
1) 디지털 미러 시스템의 개요	28
2) 디지털 미러 시스템의 적용	29
3) 디지털 미러 시스템의 공정조건	30
IV. 시뮬레이션, 공정 및 평가	33
1. 공정 및 평가 장비	33
1) SLS 임의형상제작 시스템	33
2) 공정 변수	35
2. 주사경로 생성 및 제어 알고리즘을 적용한 소프트웨어 개발	36
1) 공정 프로그램의 개요	36

2) 공정 프로그램의 특징	38
3. 시뮬레이터의 개발	39
1) Layer Viewer의 개발	39
2) 공정시간 시뮬레이터의 개발	40
3) 기본 공정의 시간 시뮬레이션	41
4) 디지털 미러 시스템의 주사시간 시뮬레이션	42
4. 공정 실험	44
1) 영역분할, 시간을 고려한 영역분할 주사경로 생성 알고리즘 공정 실험	44
2) 디지털 미러 시스템을 적용한 공정 실험	46
V. 결론	49
참고 문헌	51



Summary

Rapid Prototyping(RP) technology has been applied in many industrial areas such as modeling shape verification, prototype, application of a metal and a ceramic part, concurrent engineering, medical devices, and micro machines. These application areas has been expanded with producing and suppling RP machines to have newly developed technologies. The laser scanning system sinters the powder by laser path control, which is one of major components for development of SLS(Selective Laser Sintering) machine. It is comprised of a laser source, optics, a scanning mirror, and etc.

Since affecting the precision of whole machine and fabricating speed, this system needs to be designed with stability and superior fabrication precision and speed.

The laser part also needs to be set up with minimum influence of environment and keeps optimal beam diameter and stable state. Optics such as reflecting mirrors and beam expander needs to be set up properly and aligned high precisely to control accurate beam path. The scanning mirror to control laser scanning path needs to be operated with high, uniform and precise speed. And above mentioned hardware component require each control software including path generation algorithm.

I. 서론

복잡한 3차원 데이터로부터 시제품을 빠른 시간 내에 만들어내는 기술을 쾌속조형(Rapid Prototyping)이라고 부른다. 쾌속조형 기술은 절삭 가공방식과는 달리 2차원의 얇은 층을 적층시켜 3차원 형상을 복제하여 제작하는 기술로 제조업 분야 전반에 걸쳐서 설계 검증, 시제품 제작 등에 사용되어 개발주기 단축과 동시과학 실현 측면에 있어서 매우 중요한 역할을 차지하고 있고, 점차 그 활용 분야를 넓혀가고 있다 (Chua, 2003).

이러한 쾌속조형 기술은 광경화성 수지를 이용하는 SLA(Stereo Lithography Apparatus) 기술, 노즐을 통한 플라스틱 용착을 이용한 FDM(Fused Deposition Modeling) 기술, 프린터 헤드를 이용하는 3DP(3-Dimensional Printing) 기술, 레이저를 이용하여 파우더를 소결하는 SLS(Selective Laser Sintering) 기술 등이 있다. SLA와 FDM은 각각 자외선 수지에 의한 경화와 열가소성 수지 재료를 압착하는 기술이기 때문에 강도면에서 우수하지만 공정 시간이 길어지고, 3DP기술의 경우 분말 접착제와 같은 바인더를 프린팅하는 기술로 소규모 모델의 경우에는 정밀도에서 우수한 장점이 있지만 가공모델의 크기가 제한된다. 이 중 SLS 기술은 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. 특히 이러한 공정은 다른 RP 공정과는 달리 지지대(support)의 제작 없이 형상 가공이 가능하고, 제작 속도와 형상 구현 능력, 제품의 강도 면에서 타 공정에 비해 우수한 시제품을 만들 수 있기 때문에 자동차 산업, 산업용 장비, 시제품 제작, 의학 분야, 정밀부품 제작 등 다양한 분야에 널리 응용되고 있다 (Chua, 2003).

SLS 공정 특징을 반영한 레이저 주사경로는 한 레이어(layer)에서 레이저가 주사되어 이동하는 경로를 말하는데, 레이저부의 구동 및 스캐닝 미러부의 스캐닝 속도와 위치를 계산하여 제어하는 역할을 함으로 주사경로는 SLS 공정시간에 가장 큰 영향을 미치게 된다 (Kim, 2003). 이러한 공정시간은 SLS 특성상 매우 중

요한 역할을 한다. 이것은 SLS 공정에서 전체적인 가공시간의 단축이 열에너지를 사용하는 SLS 공정 특성 상 매우 중요하기 때문인데, 시간에 따르는 열에너지 분포에 의해 소결율이 변하고 소결율의 변화는 수축, 왜곡 등의 발생과 레이저 딜레이와 주사 딜레이에 의한 휨 현상을 발생시키기 때문이다. 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 주사경로의 생성 방법과 열평형을 위한 주사경로 생성 방법의 개발은 SLS 공정에서 매우 중요한 문제이다 (Kim, 2003). 본 논문은 이러한 기존 공정의 문제점을 점프 시간을 단축시켜 해결한 영역분할 주사경로 생성 알고리즘과 시간을 고려한 영역분할 주사경로 생성 알고리즘을 통하여 해결하고, 이러한 영역분할 주사경로 생성 알고리즘을 바탕으로 각 영역별로 다른 공정조건을 제시하는 디지털 미리 시스템을 제안한다. 또한 이러한 주사경로 생성 알고리즘에 최적화 된 공정 조건 및 과정을 제안하고, 시뮬레이션과 SLS 공정을 통하여 효율적인 주사경로 생성을 위한 알고리즘 및 공정을 검증하고 평가한다. 검증과정을 통하여 각 알고리즘의 특징을 기술하여 전체 가공시간과 정밀도 및 주사효율 향상을 위한 방안에 대하여 기술한다.

본 논문의 구성은 II장에서 기본 주사경로 생성 방법과 생성 알고리즘의 구현 방안에 대하여 설명하고 생성된 주사경로의 제어와 보정 방법을 기술한다. III장에서는 본 논문에서 제안하는 공정효율 향상을 위한 주사경로 생성 방안을 기술하는데, 영역분할 주사경로 생성 알고리즘과 시간을 고려한 영역분할 주사경로 생성 알고리즘, 주사경로의 오류검증 방안을 설명하고 나누어진 영역 별로 다른 주사공정을 적용하는 디지털 미리 시스템을 제안한다. 그리고 마지막 IV장에서는 제안한 알고리즘 및 공정을 적용한 소프트웨어 개발 방안을 설명하고 이러한 소프트웨어를 통하여 시뮬레이션과 실제 공정 과정으로 제안된 알고리즘과 공정을 평가하여 V장에서 결론을 맺는다.

II. 주사경로 생성 알고리즘

본 절에서는 SLS 장비의 구성과 SLS 공정을 위한 레이저 주사경로 생성 알고리즘에 대하여 논하고, 모델링을 통하여 주사경로 생성과정을 분석한다.

1. SLS 공정장비의 특징

SLS 시스템은 레이저를 이용한 공정으로 Fig. 1은 SLS 공정을 나타내는 계략도이다. SLS 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 (Kim, 2003).

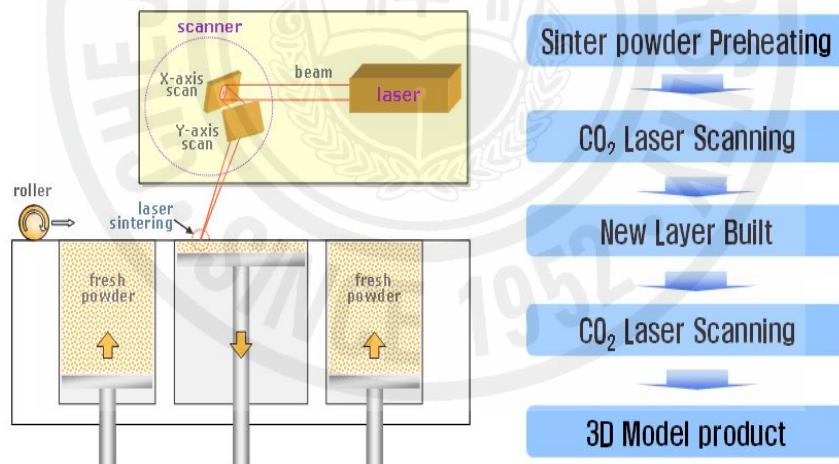


Figure 1. SLS progressing

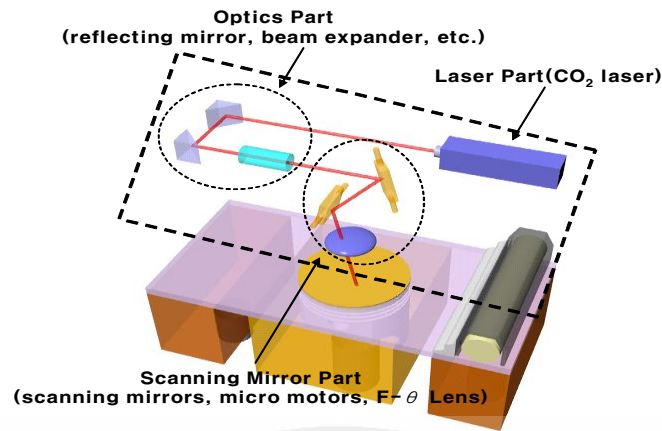


Figure 2. Construction of SLS

Fig. 2는 이러한 SLS 공정 장비의 구성을 나타내고 그림과 같이 레이저부(laser part), 옵틱부(optics part), 스캐닝 미러부(scanning mirror part)로 구성된다. 레이저부는 SLS 장비의 특성상 소결제가 코팅된 파우더를 이용하므로 CO₂ 레이저와 같이 파장이 비교적 긴 적외선 레이저를 이용한다. 이는 높은 열에너지로 인하여 파우더가 소결되고, 서로 결합하여 하나의 층이 생성되기 때문이다. 또한 레이저의 파워 및 레이저 빔의 직경에 따라서 소결되는 입자의 크기가 변화하여 가공된 형상의 정밀도 및 가공속도에도 영향을 미치게 된다. 따라서 적절한 레이저의 선택과 동시에 전체적인 장비의 정밀도에 따라서 파워 및 빔의 직경을 최적화할 필요가 있다 (Kenwei, 1998).

옵틱부는 레이저 헤드에서 발진된 레이저를 스캐닝 미러까지 도달하게 하는데 있어서 초점을 제어하고 정렬하는 역할을 수행한다. 옵틱부는 CO₂ 레이저 빔의 경로를 제어하는 반사경(reflector)과 빔을 확장시키는 빔 익스팬더(expander) 및 초점을 맞추는 $f-\theta$ 렌즈로 이루어져 있는데, 레이저는 한 층이 경화된 후 다음 층으로 이동할 경우와 가공경로가 아닌 단순한 위치 이동일 경우 차단되어야 하므로 빠른 응답속도를 가지며 우수한 내구성을 가진 셔터(shutter) 및 렌즈(lens), 반사경(reflector) 등을 선정할 필요가 있다 (Park, 2000).

스캐닝 미러부는 2차원 단면상에서 직접적으로 레이저의 스캐닝 경로를 제어하는 부분으로 전체적인 가공속도 및 정밀도에 가장 큰 영향을 미치는 부분이다. 따

라서 스캐닝 미러는 슬라이싱 된 2차원 단면상에서 주사경로 생성 알고리즘으로 생성된 경로에 따라서 평균 5m/s 이상의 매우 빠른 속도로 구동되어야 하고, 우수한 위치 정밀도를 가질 수 있도록 2개의 마이크로 모터를 이용한 2축 동시 제어가 필요하다. 레이저부, 오프셋부, 스캐닝 미러부는 장비 전체의 정밀도를 향상시키기 위해서 매우 정밀하게 정렬이 되어져야 하며 강한 내구성을 가져야 하고, 외부 환경에 영향을 덜 받도록 설계되어야 한다. 이러한 설계에 가장 우선적으로 고려되어야 하는 점이 레이저를 제어하는 주사경로이다 (Park, 2000).

2. 주사경로 생성 알고리즘 개발

주사경로의 생성은 3차원 모델링 형상으로부터 슬라이싱 단면을 생성시키고 이렇게 생성된 단면으로부터 주사점(scan point)을 구한다. 슬라이싱 단면에 대한 주사경로 생성 알고리즘은 Fig. 3에서와 같이 주사선(scan ray)을 주사간격만큼 옮겨가면서 윤곽 선분과의 교점을 연속으로 구하는 것이다. 주사선과 윤곽 선분과의 교점 계산 시간을 줄이기 위해서 Fig. 3에서와 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 (최재원, 2005).

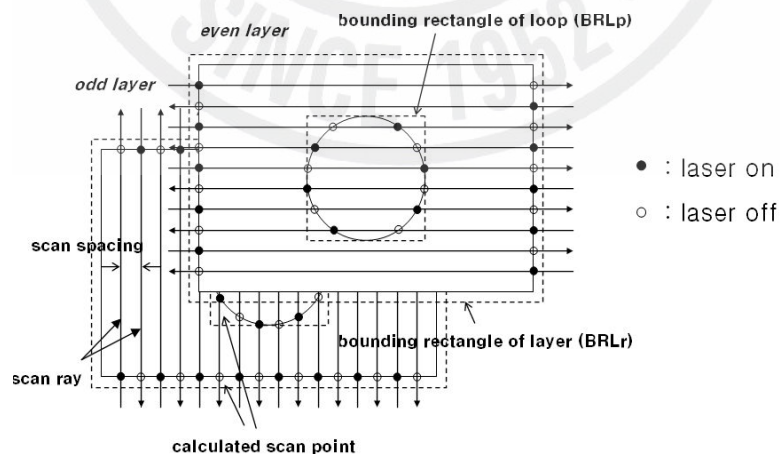


Figure. 3 Calculated scan points

우선 하나의 슬라이싱 단면에서 X축에 평행한 직선인 주사선과 윤곽 선분과 만나는 점들을 모두 구한 후 이를 주사 방향에 따라 오름차순 혹은 내림차순 순으로 정렬하는 것을 주사선의 시작 위치부터 끝 위치, 즉 BRLr(Bounding Rectangle of Layer)로 정의된 레이어 경계의 시작 위치부터 끝 위치까지 수행함으로써, 하나의 층에 대한 주사경로를 생성할 수 있다. 이 때, 계산된 주사점들은 항상 짝수 개로써, 레이저 켜짐과 꺼짐의 쌍을 항상 가지게 된다. 즉, 정렬이 완료된 한 층에 대한 주사 점들을 차례대로 레이저를 켜고 끄면서 이동함으로써 가공부위와 이동부위를 인식하게 된다. 그러나 단순한 주사선과 윤곽 선분과의 교점을 구하는 방법은 Fig. 4와 같이 윤곽점들이 주사점으로 채택되어질 때 심각한 오류가 발생한다. 이는 선분을 이루는 두 개의 점을 제외한 위치에서 교점이 생길 때에는 문제가 없으나, 윤곽점이 교점으로 구해질 때는 일부의 경우에 레이저 마크와 점프의 순서가 바뀌어져 잘못된 주사경로가 생성된다. 이를 해결하기 위하여 윤곽점이 주사점으로 계산되어질 경우에는 이웃하는 두 선분을 Fig. 5와 같이 벡터로 나타낸다. 각 벡터가 X, Y축과 이루는 각은 식 (1)과 (2)와 같이 표현되고, 식(3)은 벡터들의 경계조건으로 위와 같은 조건이 만족할 경우, 주사점으로 채택하고 그렇지 않을 경우에는 버린다.

$$\Theta_1 = \cos^{-1}\left(\frac{x_1 - x_0}{\sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2}}\right) \quad (1)$$

$$\Theta_2 = \cos^{-1}\left(\frac{x_2 - x_1}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}}\right) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} 0^\circ < \Theta_1 \leq 180^\circ \quad \text{and} \quad 0^\circ \leq \Theta_2 < 180^\circ \\ 180^\circ < \Theta_1 \leq 360^\circ \quad \text{and} \quad 180^\circ \leq \Theta_2 < 360^\circ \end{aligned} \quad (3)$$

Fig. 3에서와 같이 짝수 층은 X축 방향, 홀수 층은 Y축 방향의 주사 경로를 생성하기 때문에, 각각의 주사 방향에 따라서 θ_1 과 θ_2 를 Fig. 5와 같이 다르게 정의한다 (최재원, 2005).

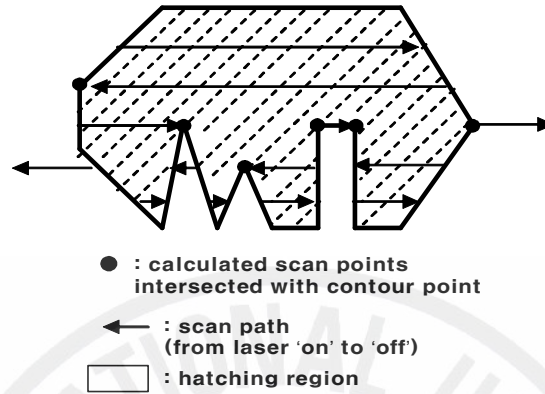


Figure 4. Wrong scan paths

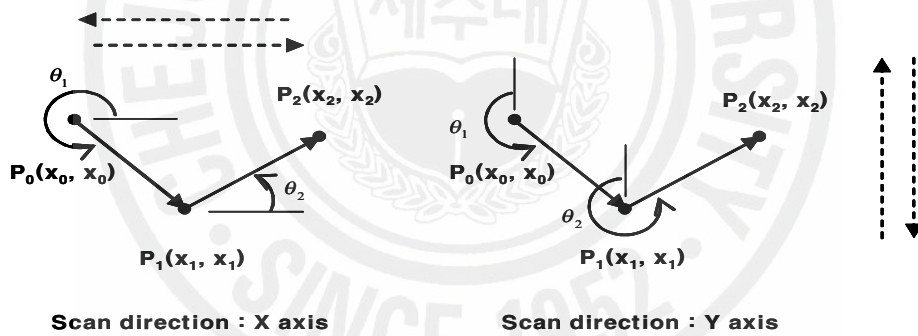


Figure 5. Vector representation between neighborhood segments

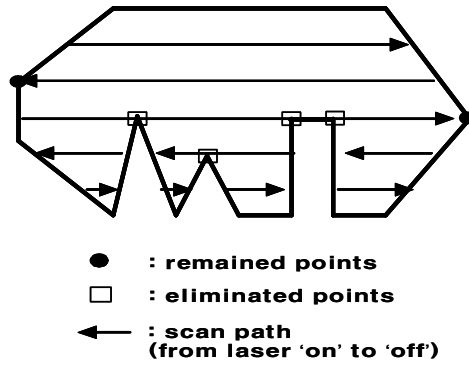


Figure 6. Modified scan path

Fig. 6은 Fig. 4와 같이 잘못된 주사 경로를 수정하기 위해서 식(1)~(3)을 적용하여 윤곽점이 주사점으로 선택되어졌을 경우, 선택적으로 이를 저장함으로써 올바른 주사 경로를 생성함을 보여주고 있다.(최재원, 2005)

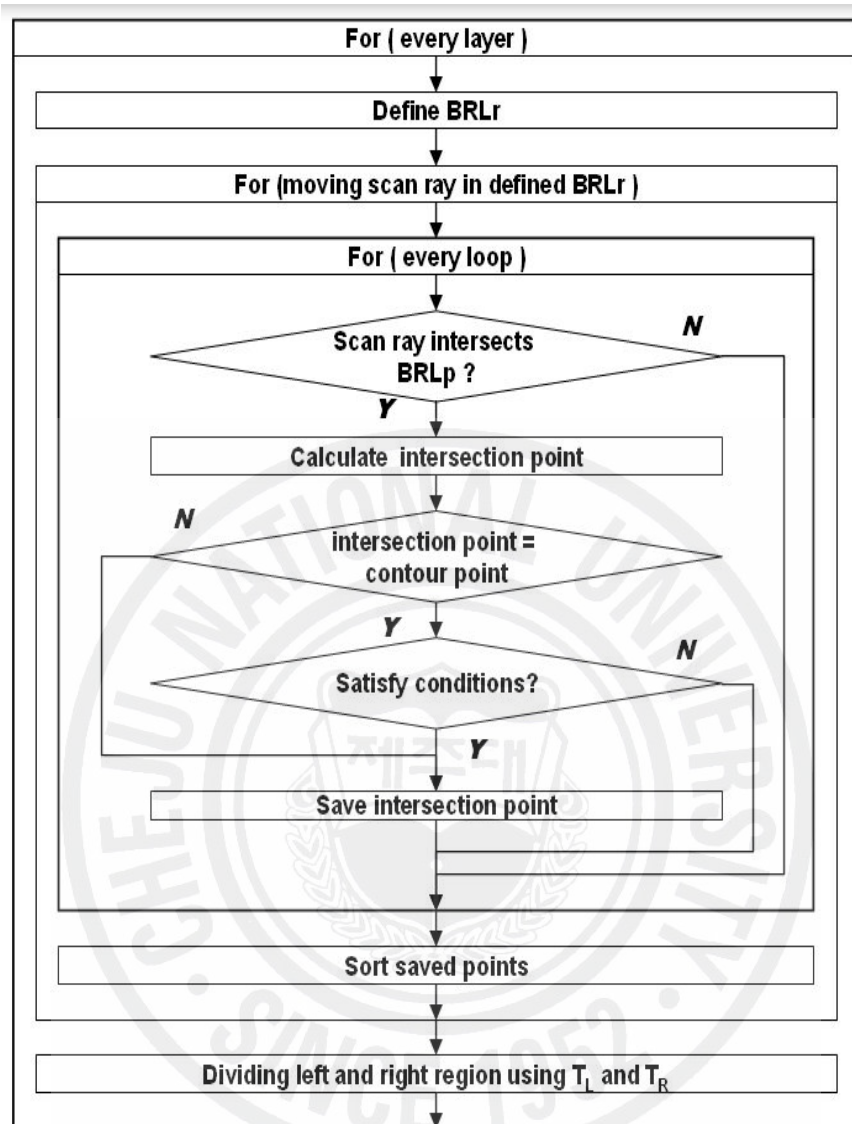


Figure 7. Flow chart of scanning path generation

layer No.	x	y	laser on/off	param. 1	param. 2
0	9.4690	42.2500	0	0	0
0	8.6578	41.7817	1	0	0
0	10.4020	42.5000	0	0	0
0	7.9748	41.0987	1	0	0
0	11.3350	42.7500	0	0	0
	⋮		⋮		⋮
	⋮		⋮		⋮

Figure 8. Generated scanning path file

Fig. 7은 슬라이싱 단면에 대한 주사경로 생성 알고리즘의 흐름도를 나타낸다. 우선 하나의 슬라이싱 단면에서 주사선(scanning ray)의 시작점과 끝점을 구한 다음 각각의 루프가 주사선과의 교점이 있는지 여부를 판별하여 교점이 있을 경우에만 주사점을 구함으로써 불필요한 계산을 줄인다. 하나의 주사선과 각 루프를 이루는 선분(segment)들이 만나는 점들을 모두 구한 후 이를 정렬(sorting) 함으로써 주사경로를 생성할 수 있다. 맨 처음 주사점으로 laser off로 이동한 다음, 다음 주사점까지 laser on으로 순서대로 laser on/off를 반복함으로써 주사되는 부분과 다음 주사를 위해서 건너뛰는 부분을 판별할 수 있다.

Fig. 8은 주사경로 생성 알고리즘으로부터 생성된 경로 파일이다. 이러한 주사경로 파일은 같은 형상에 대한 재가공이 필요한 경우, 주사경로 생성 알고리즘을 거치지 않고 바로 파일로부터 주사경로를 읽어 가공할 수 있다.

3. 임의 방향의 주사점 생성

다음은 입력된 단면으로부터 주사점들을 구하는 과정을 나타낸다. Fig. 9는 임의의 단면과 주사선들과의 관계 및 각 파라미터를 나타내고 있으며 Fig. 10은 주사점과 주사벡터를 나타내고 있다.

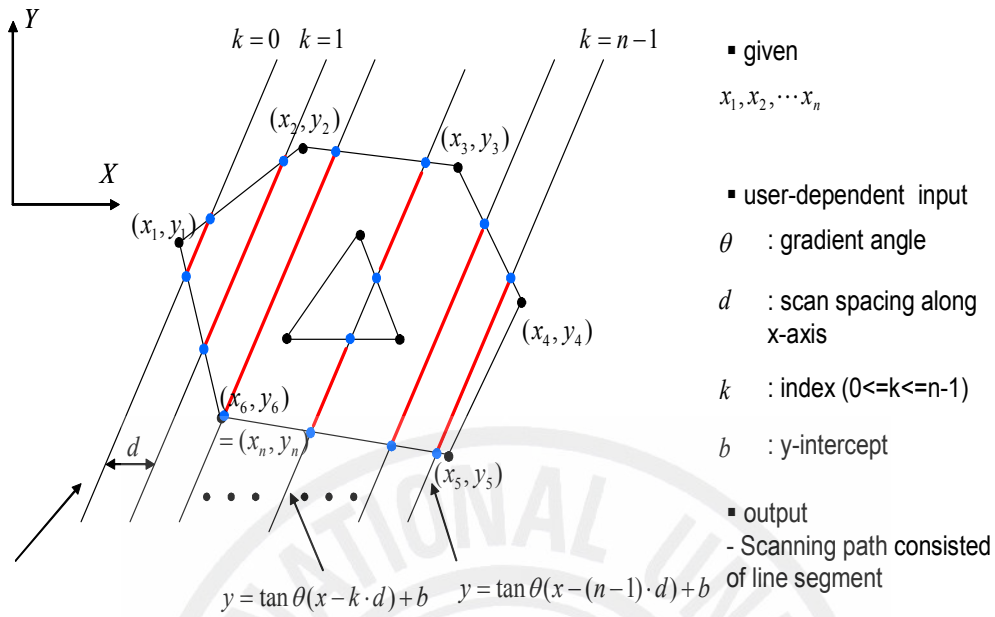


Figure 9. Calculation of Scanning Points in Arbitrary Section

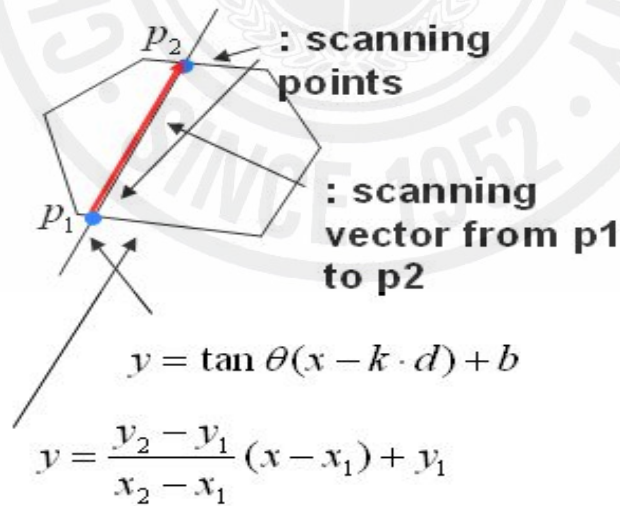


Figure 10. Scanning points and scanning vector

Fig. 9와 Fig. 10로부터 주사선과 각 세그먼트간의 교차점은 1차 방정식으로 계산된다.

$$y = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}(x - x_1) + y_1 \quad (4)$$

$$y = \tan \Theta(x - k \cdot d) + b \quad (5)$$

식 (4)은 입력된 단면의 세그먼트의 식을 나타내고 식 (5)은 주사선을 나타낸다.

$$\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}x - \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}x_1 + y_1 = \tan \Theta \cdot x - \tan \Theta \cdot k \cdot d + b \quad (6)$$

$$x = \frac{(y_2 - y_1) \cdot x_1 - (y_1 + \tan \Theta \cdot k \cdot d - b) \cdot (x_2 - x_1)}{(y_2 - y_1) - \tan \Theta \cdot (x_2 - x_1)},$$

$$= \frac{\Delta y \cdot x_1 - (y_1 + \tan \Theta \cdot k \cdot d - b) \cdot \Delta x}{\Delta y - \Delta x \cdot \tan \Theta}$$

$$\Delta y = y_2 - y_1, \quad \Delta x = x_2 - x_1 \quad (7)$$

그리고 식(6)을 거쳐 최종적으로 식 (7)을 구하고, 이것으로 입력된 단면을 임의 방향의 주사경로로 생성시킬 수 있다 (최재원, 2005).

4. 주사경로 제어

Fig. 11은 생성된 주사경로로 미러를 구동시키는 과정을 보여주고 있다. 스캐닝 미러를 초기화한 후, 레이저 주사경로를 입력받으면 스캐닝 미러는 원점(home position)으로 위치를 옮긴 후 베드 제어기(bed controller)가 새로운 파우더 층을 도포하는 동안 대기한다. 파우더 층이 도포되면 스캐닝 미러는 입력받은 주사경로에 의하여 레이저 주사 명령(mark)과 다음 주사 지점으로 이동하는 명령(jump)을 반복하며 파우더를 소결시키게 되고, 각 층의 소결이 완료되었을 경우 스캐닝 미러는 다시 원점(home position)으로 옮겨지고 새로운 파우더 층을 도포하는 과정을 모든 레이어에 대해서 반복하게 된다.

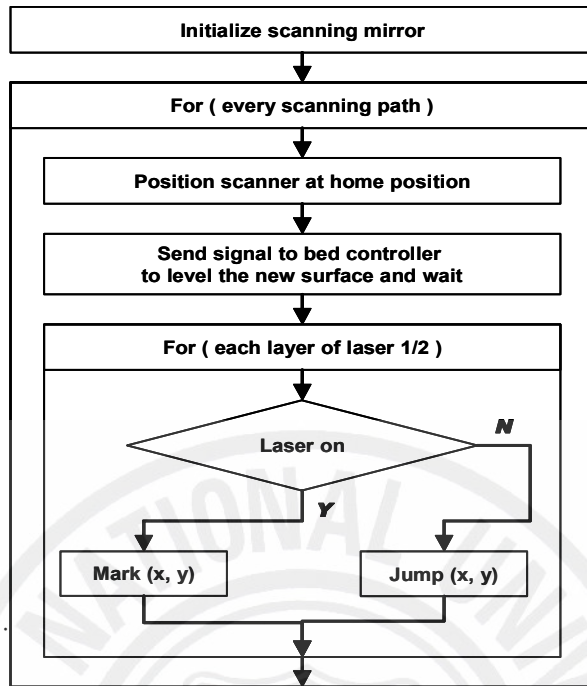


Figure 11. Flow chart for laser scan control

5. 주사경로의 보정

스캐닝 미러는 Fig. 12와 같이 미러의 중심으로부터 동일한 거리, 즉 구면 위로 3차원 이미지를 생성시키게 되는데 실제 레이저가 주사되는 좌표는 2차원 단면이므로 구면과 단면간의 보정이 필요하다.

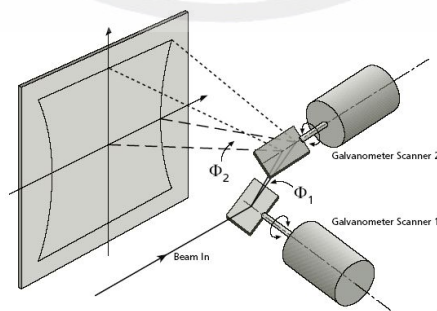


Figure 12. Image field correction

Fig. 13은 스캐닝 미러의 맵핑을 나타낸다. 스캐닝 미러는 그림에서처럼 맵핑을 하여 레이저 포인트를 조절하게 된다. 그림에서 m_a 는 실제 보상되는 영역을 나타내고, 전체 영역을 216×216 개의 픽셀로 나눈다. 스캐닝 미러는 현재 설계 사항에 맞는 보상 파일을 제공하여 이와 같은 범위를 보상한다. 즉, 1픽셀을 제어할 수 있는 값을 제공하고 이것을 이용하여 레이저 변수를 보상한다. 이러한 레이저 변수는 레이저가 주사되는 속도와 위치에 따라서 가공 품질에 큰 영향을 미치게 되므로 주사 제어를 위한 주사속도 및 레이저 변수 즉, 딜레이 시간의 조정은 매우 중요하다.

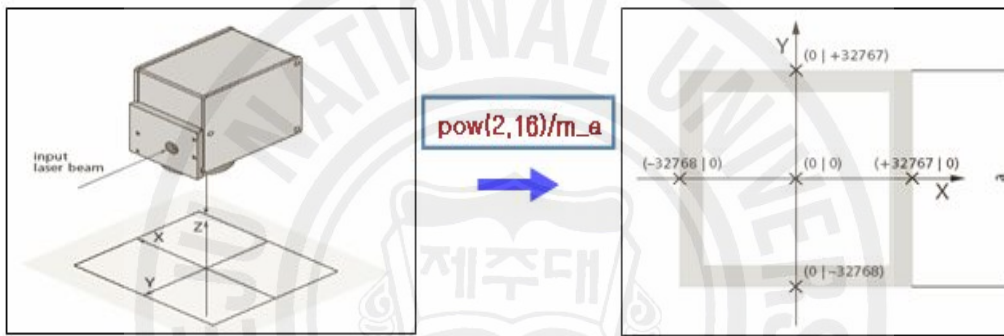


Figure 13. Mapping of scanning mirror

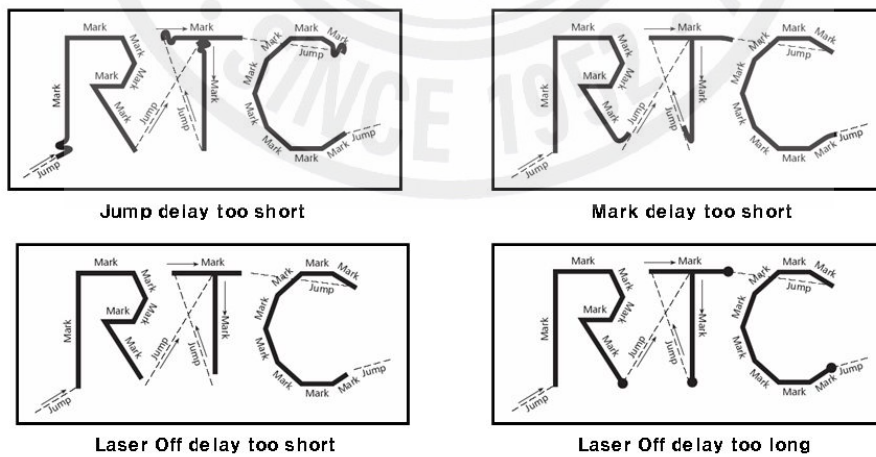


Figure 14. Process problem by scan delay

$$K(\text{bits}/\text{mm}) = V \times t \quad (8)$$

$$K = \frac{2^{16}}{\text{CalibrationFactor}} = 130(\text{bits}/\text{mm}) \quad (9)$$

Fig. 14는 딜레이에 의한 공정의 문제점을 나타낸다. 이와 같은 문제점은 스캐닝 미러가 마이크로 스텝으로 이동하기 때문인데 1마이크로 스텝은 Calibration factor m_a 에 의해서 보상되므로 1마이크로 스텝을 딜레이로 보상하여야 한다. Fig. 15는 스캐닝 미러의 마이크로 스텝 이동을 나타낸다. 수식 (8)의 K는 1마이크로 스텝을 나타내고, V는 마킹 스피드, t는 딜레이를 나타낸다. 즉 m_a 가 504(mm)일 경우, K는 식(9)에 의하여 130bit/mm이다. 또한 마크 속도가 400bit/ms 인 경우를 예로 들면, 레이저 딜레이는 325 μ s가 된다. 즉, 1마이크로 스텝을 보상할 경우 필요한 딜레이는 325 μ s임을 알 수 있다. 이러한 보상의 경우는 매우 짧은 시간에 이루어지므로 다른 공정조건이 보상시간에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 딜레이에 보상은 시스템의 많은 실험 결과를 적용한 경험적인 수치를 반영하여야 한다.

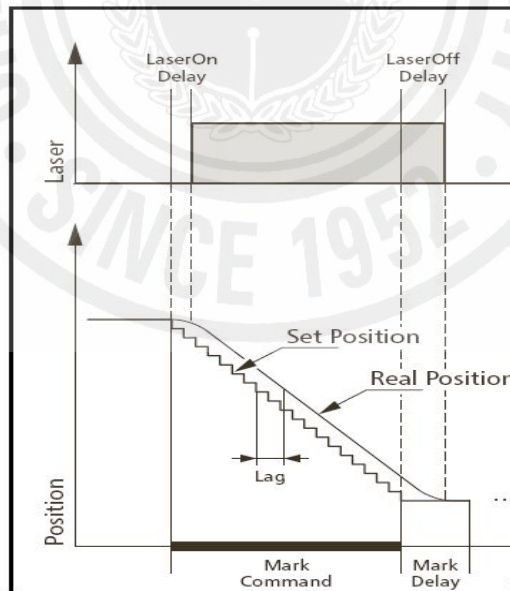


Figure 15. Microstep transfer by scanning mirror

6. 주사경로 생성 알고리즘의 구현 방안

주사경로 생성 알고리즘은 앞 절에서 설명한 내용을 바탕으로 C++기반에서 구현한다. 주사경로 생성 과정은 Fig. 16과 같다. 우선 3D 형상을 모델링하고, 이것을 STL 파일(*.stl) 포맷으로 저장한다. 상용 프로그램인 RapidForm에서 STL 파일을 이용하여 2차원 슬라이싱 파일을 생성한다. 슬라이싱 파일은 cslf 파일(*.cslf) 포맷으로 제작되고, 이러한 cslf 파일을 가지고 레이어 파라미터와 주사경로 생성 알고리즘을 통하여 주사경로 제어 파일인 path 파일(*.pth)로 생성하게 된다. 다음과 같은 과정을 통해서 cslf 파일을 path 파일로 변환한다. 우선 SLICES라는 클래스를 생성하고, 전체 레이어 개수만큼 각 레이어 클래스를 선언한다. Fig. 17은 선언된 SLICES 클래스의 예를 나타낸다 (Park, 2000).

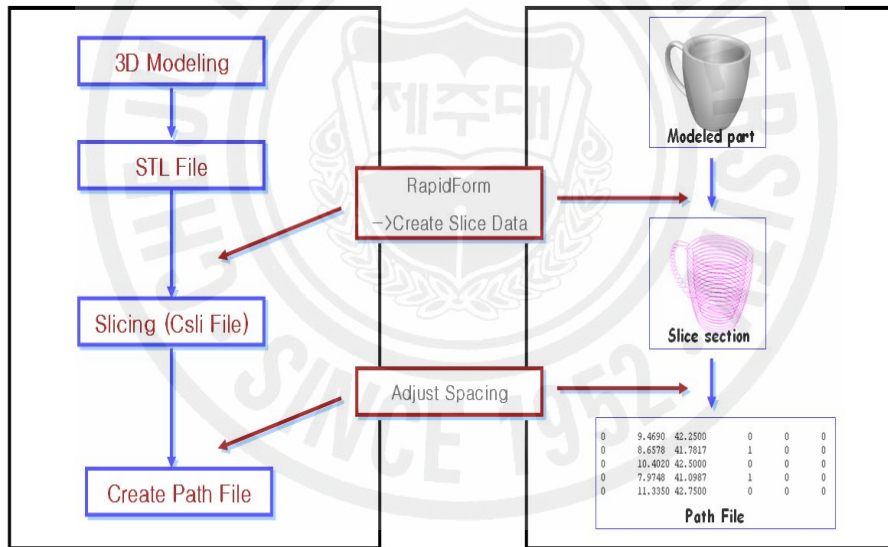


Figure 16. Scan path generation

```

class SLICES
{
private :
    long NumOfLoops;
    long +NumOfSegments;
    float ++Segments_X, ++Segments_Y;
    float +Scan_Points_X, +Scan_Points_Y;
    float +Max_X, +Min_X, +Max_Y, +Min_Y;
    long NumOfScanPoints;

public :
    ~SLICES();
    SetNumOfLoops(long Num);
    SetNumOfSegments(long index, long Num);
    SetLoopArray();
    char* SaveSegmentXY(char +buff);
    CalOfScanPoints(float t, float d);
    CalOfScanPoints_XY(float t, float d);
    float Max(float, float);
    float Min(float, float);
    FileOutput_PTH(long, float);
    FileOutput_IGS(long, long +, long +, float);
};

```

Figure 17. SLICES class

```

class point {
public:
    float x, y; char c;
public :
    SetPoint(float, float);
};

class line {
public:
    point p1, p2;
public:
    SetLine(point, point);
};

point::SetPoint(float pbx, float pty) {
    x = pbx; y = pty;
}

line::SetLine(point pt1, point pt2) {
    p1 = pt1;
    p2 = pt2;
}

int intersect(line l1, line l2) {
    return((ccw(l1.p1, l1.p2, l2.p1)
        + ccw(l1.p1, l1.p2, l2.p2)) <= 0)
        && ((ccw(l2.p1, l2.p2, l1.p1)
        + ccw(l2.p1, l2.p2, l1.p2)) <= 0);
}

int ccw(point p0, point p1, point p2){
    float dx1, dx2, dy1, dy2;
    dx1 = p1.x - p0.x; dy1 = p1.y - p0.y;
    dx2 = p2.x - p0.x; dy2 = p2.y - p0.y;

    if(dx1 * dy2 > dy1 * dx2) return +1;
    if(dx1 * dy2 < dy1 * dx2) return -1;
    if((dx1 * dx2 < 0) || (dy1 * dy2 < 0)) return -1;
    if((dx1 * dx1 + dy1 * dy1) < (dx2 * dx2 + dy2 * dy2)) return +1;
    return 0;
}

```

Figure 18. Assistance class define

SLICES 클래스는 각 레이어의 세그먼트 개수를 나타내는 NumOfSegments, 입력된 세그먼트의 점을 2차원 배열로 저장하는 Segments_X, Segments_Y, 레이어의 주사 경로상의 점인을 저장하는 Scan_Points_X, Scan_Points_Y, 각 레이어에서 바운딩 박스의 좌표를 나타내는 Max_X, Min_X, Max_Y, Min_Y, 스캔 포인트의 개수를 나타내는 NumOfScanPoints, Loop의 개수를 저장하는 NumOfLoops를 변수로 가지고, 루프와 세그먼트의 동적인 할당을 담당하는 SetNumOfLoops(), SetNumOfSegments(), 레이어의 루프를 설정하는 SetLoopArray(), 세그먼트 값을 저장하는 SaveSegmentsXY(), 스캔 포인트를 계산하는 CalOfScanPoints(), CalOfScanPoints_XY(), 최대값과 최소값을 나타내는 Max()와 Min(), path 파일과 오류검증 파일을 출력하는 FileOutput_PTH(), FileOutput_IGS() 함수로 구성된다.

SLICES 클래스를 보조하기 위해서 Fig. 18과 같이 포인트 배열을 나타내는 point 클래스와 라인 배열을 나타내는 line 클래스를 생성하고, 전역함수로 두 라인의 교차 여부를 판별하는 intersect(), 세 점을 차례로 연결하였을 경우 방향을 판별하는 ccw() 함수를 추가로 생성하였다.

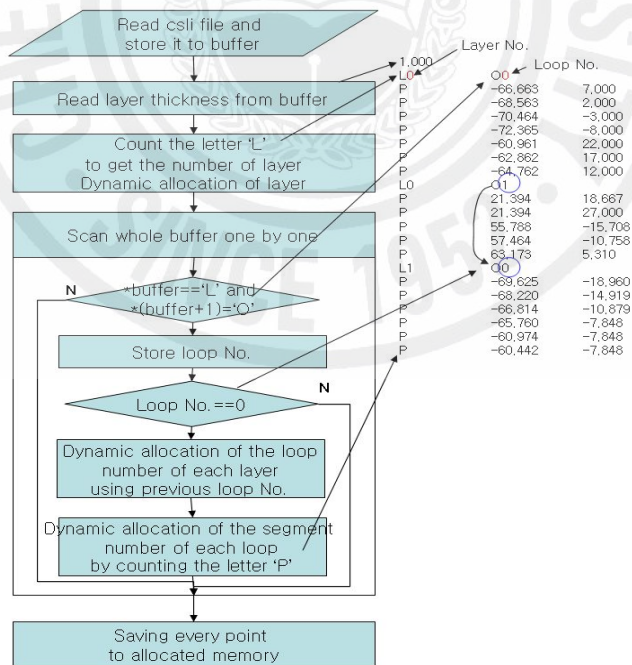


Figure 19. Dynamic allocation to save all points

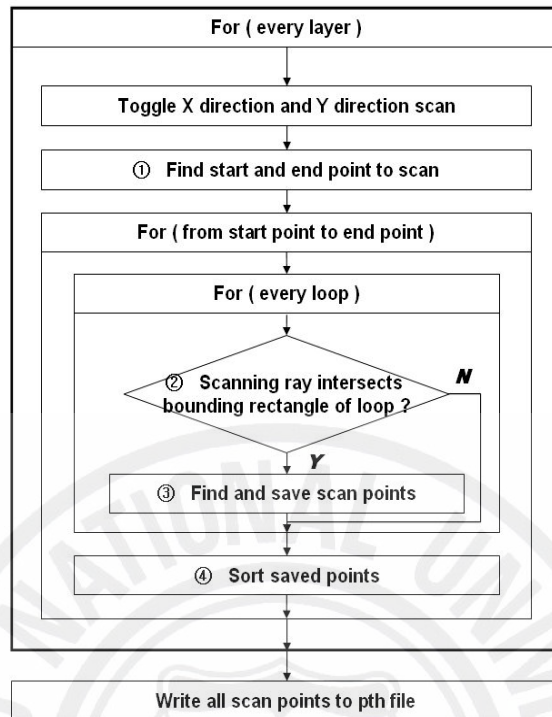


Figure 20. Path generation flow chart

Fig. 19는 Fig. 17과 Fig. 18을 바탕으로 모든 주사경로를 동적으로 저장하는 알고리즘을 나타내고 있다. 우선 슬라이싱 파일 포맷인 csli 파일을 읽고 버퍼에 채운 후, 버퍼에서 레이어와 다음 레이어의 간격을 읽어온다. 레이어 번호에 따라서 레이어 정보를 생성하고, 동일한 레이어와 루프 내의 Point 정보를 분류하면서 정렬하는 작업을 csli 파일이 끝날 때까지 반복하면 모든 csli 파일의 정보가 버퍼에 정렬되어 저장된다.

Fig. 20은 Fig. 19에서 정렬된 버퍼의 정보를 통하여 path 파일을 생성하는 과정을 나타낸다. path 파일을 생성하기 위해서 Fig. 21과 같이 모든 레이어에 대해서 x, y 방향으로 반복 스캔하고 시작점과 끝점을 찾는데, 레이어가 X 방향의 스캔일 경우 Y의 최소값과 최대값이 각 시작점과 끝점이 되고, Y 방향의 스캔일 경우 X의 최소값과 최대값이 각 시작점과 끝점이 된다. 그리고 Fig. 22와 같은 교차여부를 판별하는 과정은 계산시간을 단축시키는 효과를 얻게 한다.

Fig. 23은 주사선이 각 세그먼트의 외곽선을 이루는 네 개의 선분과 교차하는지의 여부를 판단하여 교차할 경우에만 교점을 추출하며 모든 레이어에 대해서 반복하는 것을 구현한 예이고, 이 과정을 거쳐서 얻은 교점을 오름차순 또는 내림차순의 순서로 정렬하면 모든 점에 대한 pth 파일을 얻을 수 있게 된다.

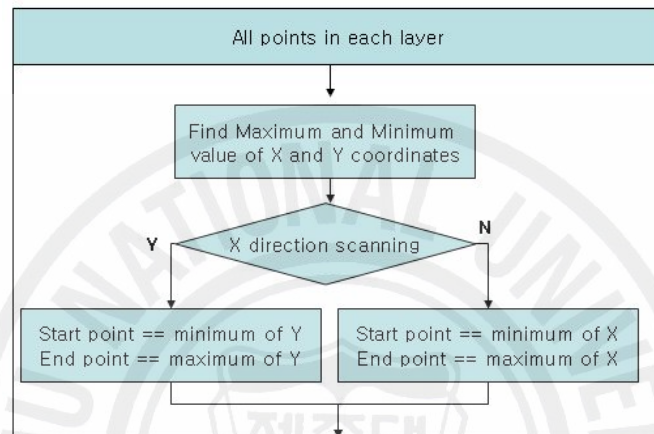


Figure 21. Find start and end point scan

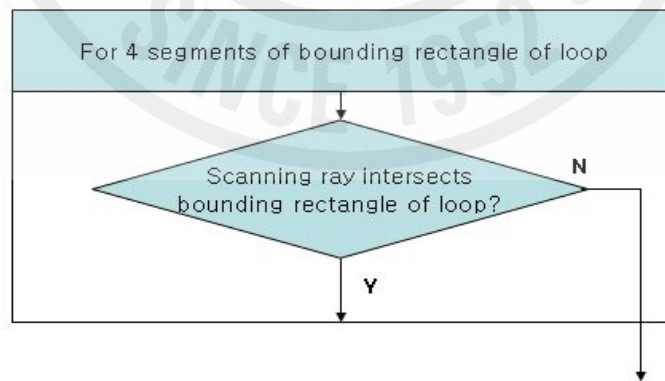


Figure 22. Scanning ray intersects distinction

```

for(int i=0;i<NumOfLoops;i++)
{
lpBR = 0;

p0.SetPoint(_____)
p1.SetPoint(_____)
p2.SetPoint(Min_X[i], Max_Y[i]);
p3.SetPoint(Min_X[i], Min_Y[i]);

l0.SetLine(p0, p1);
l1.SetLine(p2, p3);
lpBR = intersect(l0, l1);

p2 = p3;
p3.SetPoint(Max_X[i], Min_Y[i]);
l1.SetLine(p2, p3);
lpBR += intersect(l0, l1);

p2 = p3;
p3.SetPoint(Max_X[i], Max_Y[i]);
l1.SetLine(p2, p3);
lpBR += intersect(l0, l1);

p2 = p3;
p3.SetPoint(Min_X[i], Max_Y[i]);
l1.SetLine(p2, p3);
lpBR += intersect(l0, l1);

if(lpBR == 0) continue;
}

```

Figure 23. Distinction example

Ⅲ. 공정효율 향상을 위한 주사경로 생성

주사경로는 레이저를 실제 주사하여 단면 형상을 이루는 마크와 하나의 주사점에서 다음 주사점으로 이동하는 점프로 구성되는데, 가공시간을 단축시키는 주사경로의 생성은 기존의 주사경로 생성 방법에서 불필요한 레이저의 점프구간을 제거함으로써 가능하다. 이와 같은 점프구간의 감소는 점프구간을 최소화하는 영역별 재배열을 통한 영역분할 주사경로의 생성으로 가능하다. 영역분할 주사경로의 생성은 주사 단면을 여러 개의 영역으로 분리하여 주사경로를 재배열하기 때문에 디지털 미러 시스템을 위한 영역분할 주사경로 생성을 가능하게 하고, 불필요한 점프구간을 제거하여 이동구간을 최소화시켜 전체 가공시간의 단축과 가공 정밀도 및 효율을 향상 시킬 수 있다 (김형찬, 2006).

본 절에서는 앞 절에서 진행된 주사경로 생성 알고리즘을 바탕으로 기존의 주사경로를 재배열하여 전체 가공 시간과 정밀도 및 주사효율을 향상 시킬 수 있는 영역분할 주사경로 생성에 대하여 기술한다.

1. 영역분할 주사경로 알고리즘 개발

1) 영역분할 주사경로 효율

2차원 슬라이싱 단면 정보로부터 생성된 주사경로는 동일한 영역의 주사경로 생성 시, 레이저 주사시간은 가공을 위한 레이저 마크와 다음 가공경로로의 이동을 위한 레이저 점프의 비율과 이러한 주사경로에 따르는 지연시간(delay time)이 어느 정도인가에 따라 결정된다. 즉, 불필요한 레이저 점프구간을 줄이는 것은 전체 가공효율을 향상 시키고 시간적인 지연에 의하여 생기는 변형이 줄어들어 전체 가공효율은 향상 된다. Fig. 24와 같은 기존의 단순한 지그재그 형태의 주사경로는 불필요한 주사경로의 이동이 많아 불필요한 점프구간을 많이 발생하게 되므로 지그재그 방식의 주사경로를 재배열하여 최소한의 레이저의 이동구간이 발생하도록 하는 알고리즘을 개발함으로써, 주사효율을 향상 시킨다 (김형찬, 2006).

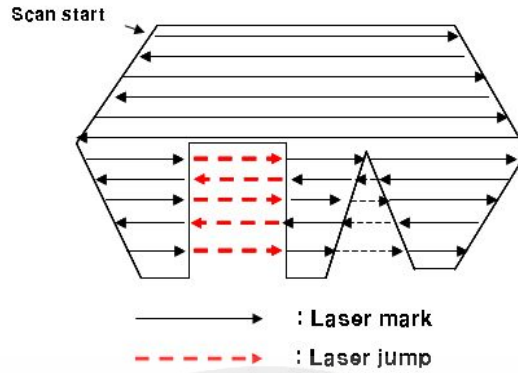


Figure 24. Simple scan path

2) 영역분할 주사경로 알고리즘 개발

Fig. 25는 불필요한 점프영역을 제거하기 위한 영역분할 방법을 나타낸다. Region1, Region2, Region3, Region4로 분할된 영역을 중심으로 각 주사영역에 주사경로를 재배열하고 Region1→Region2→Region3→Region4의 순서로 이웃하는 주사영역 순서로 재 저장함으로써 새로운 주사경로를 생성 할 수 있다. Fig. 25에서와 같이 이렇게 생성된 주사경로는 점프구간이 현저하게 줄었음을 알 수 있다. 이러한 주사경로의 생성은 직선상에 있는 주사선의 숫자에 의해서 단순히 결정 될 수 있다 (최경현, 2006).

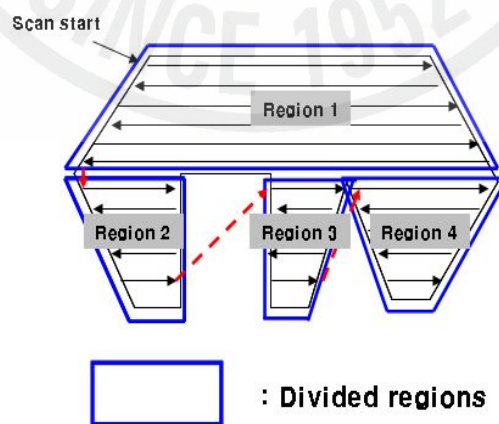
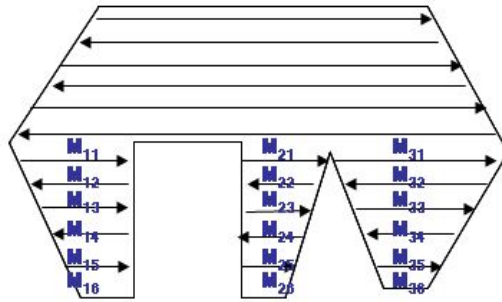


Figure 25. Reconstructed scan path



$M_{1m} \rightarrow M_{2m} \rightarrow M_{3m}$ 순서로 새로운 배열 생성

Figure 26. Reconstructed scan path

Fig. 26은 마크의 숫자에 따른 영역분할 알고리즘을 나타낸다. Fig 26과 같이 영역 분할 주사 경로의 생성은 직선상에 있는 주사선의 숫자에 의해서 새로운 순서로 배열을 생성함으로써 결정된다 (김형찬, 2006).

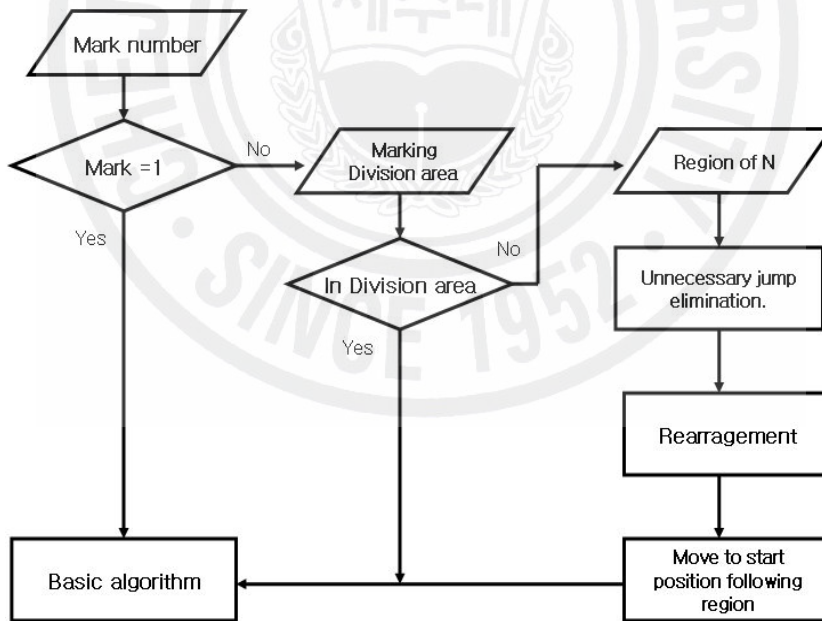


Figure 27. Area division flow chart

Fig. 27은 이러한 영역 분할 주사경로 생성 알고리즘의 순서도를 나타낸다. 우선 한편의 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.

2. 오류 검증 알고리즘 개발

영역분할 주사 경로를 생성하기 위해서는 한 직선상에 마크 수의 오차는 알고리즘에 치명적인 영향을 줄 수 있으므로 마크 수가 정확하게 구분되어야한다. 더 정확한 마크 수의 구분과 사전에 주사 경로 파일의 에러를 수정하기 위하여 기존의 패스 파일을 생성한 후 이것을 검증하기 위한 중립 파일을 생성한다. Fig. 28과 Fig. 29는 기존 주사경로를 검증하는 순서도와 방법을 나타낸다 (김형찬, 2006).

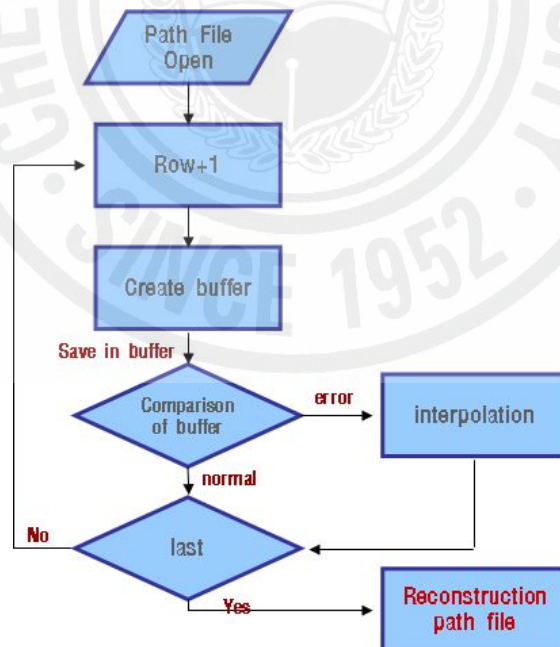


Figure 28. verification of flow chart

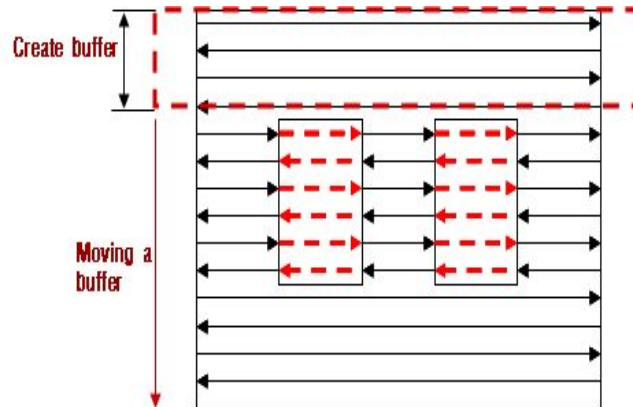


Figure 29. Verification of scan path algorithm

Fig. 28, Fig. 29와 같은 주사경로 검증 방법은 우선 최소값 이상의 버퍼를 만들어 버퍼 안에 데이터를 넣고 각각의 줄을 비교하여 규칙성과 에러를 체크한다. 여기서 에러와 규칙성의 이상을 발견하게 되면 각 경우에 따라 추가, 삭제, 재배치를 통하여 에러가 있는 주사선을 수정하게 되고 검증된 중립 주사경로를 생성하게 된다. 검증된 중립 주사경로는 temp~.pth 라는 파일로 생성되고 이 파일을 통하여 영역분할 주사경로가 생성된다. 이러한 주사경로의 검증은 기본 주사경로의 에러를 수정하여 정밀한 주사경로 제어와 영역분할 알고리즘 적용 시 신뢰성이 높은 주사경로를 생성할 수 있다.

3. 주사시간을 고려한 영역분할 주사경로 생성 알고리즘

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 이루어질 때까지 계속된다. 식 (10)은 주변으로 복사되는 에너지 q 에 대하여 나타내고 있는데, h_c 는 대류에 의한 열전달계수(heat transfer coefficient for convection) 이고, h_r 은 방사열의 투과에 의한 열전달계수(heat transfer coefficient from radiation transmission), 그리고 T_s 와 T_a 는 각 챔버(chamber)의 온도와 소결된 베드의 온도를 나타낸다. 이와 같은

열복사(radiation)는 챔버의 온도와 소결된 부분의 온도가 같을 때까지 계속된다.

$$q = A_s (h_c + h_r)(T_s - T_a) \quad (10)$$

식 (10)과 같은 열복사 에너지는 챔버의 온도와 소결된 부분의 온도가 같아질 때까지 주변으로 방출되기 때문에 열에 의하여 레이저가 조사되지 않은 부분의 소결율까지 영향을 미치게 된다. 소결율은 식 (11)과 같이 시간에 따른 함수로 에너지가 주어진 상태에서 시간이 길어지면 소결율도 증가하게 된다 (Park, 1993).

$$\ln \left[\frac{h}{h_0} \left(\frac{h_0 - h_\infty}{h - h_\infty} \right) \right] = k't \quad (11)$$

이것은 앞 절에서 기술한 단순한 영역분할 주사경로 생성 방법에서 분할된 한 영역의 주사시간이 길어질 경우 영역 사이 접합면의 강도가 약해지거나 열의 분포에 의한 변형이 일어날 가능성이 있다는 것을 말해주고 있다. 즉, Fig. 30과 같은 단순한 영역분할 주사경로에서 Region2에서 Region3으로 주사경로가 주사 될 경우, Region2의 주사시간이 길어질수록 열복사에 의한 소결율의 증가로 Region1과 Region3사이의 접합면에서 왜곡 등의 변형이 일어나고 강도 및 정밀도가 나빠질 수 있다. 그래서 Fig. 31과 같이 주사시간이 일정한 시간이 이상 될 경우, 다음 주사영역으로 이동하는 주사시간을 고려한 영역분할 주사경로 생성이 필요하다. 시간을 고려한 영역분할은 Fig. 31과 같이 2개 이상의 영역으로 분할될 경우 한 영역의 주사시간의 최대값을 제한하는 방법이다. 하지만 영역을 너무 작게 분리하게 된다면 그만큼의 점프 시간이 증가하게 된다. 한 영역의 주사시간을 제한하는 방법은 전체 주사시간이 영역분할 알고리즘보다 길어지지만, 영역간의 접합면의 강도 및 정밀도를 향상 시킬 수 있는 방법이다 (Kim, 2007).

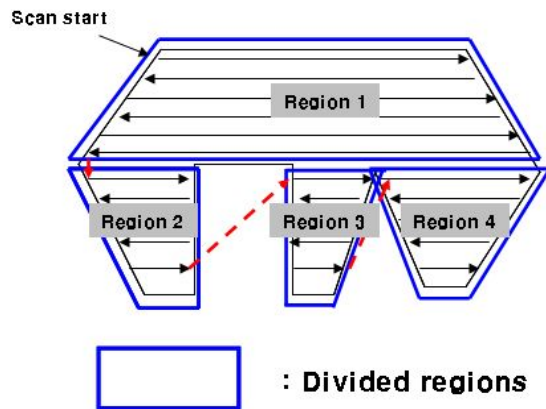


Figure 30. Reconstructed scan path

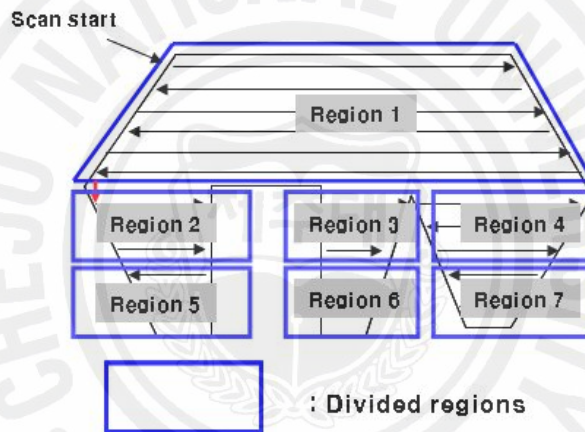


Figure 31. Path generation that took time into consideration

4. 디지털 미러 시스템(Digital mirror system)

1) 디지털 미러 시스템의 개요

디지털 미러 시스템(DMS; digital mirror system)은 영역분할 주사경로 생성 알고리즘을 바탕으로 서로 다른 크기와 복잡도를 갖는 영역을 구분하고, 각 영역에 다른 빔 스팟 크기와 스캔 스페이싱을 적용하여 공정을 하는 시스템을 말한다. Fig. 32는 이러한 디지털 미러 시스템의 개략도를 나타낸다.

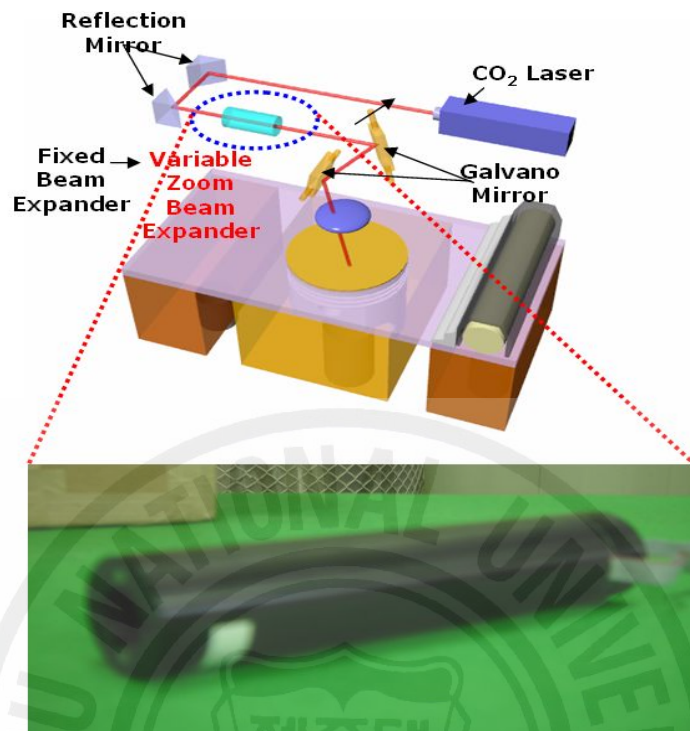


Figure 32. Digital mirror system(DMS)

이러한 디지털 미러 시스템에서 스팟 사이즈의 변경은 가변 익스팬더를 사용하고, 각기 다른 특성을 갖는 영역에 다른 스팟 사이즈로 적용하여 공정을 진행한다. 디지털 미러 시스템은 공정시간 동안 주사영역의 소결율을 동일하게 하여 주사영역의 동일한 소결율에 의해 왜곡과 변형의 최소화와 주사영역 별로 주사속도, 스캔 스페이싱 등의 공정변수를 최적화하여 공정시간을 감소시킨다. 즉, 공정효율을 공정시간동안 주사영역의 소결율을 동일하게 유지시키는 것이 중요한 문제이다. 이러한 점은 열평형 문제에서 검증할 수 있다.

2) 디지털 미러 시스템의 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 스폿 사이즈와 스캔 스페이싱 그리고 각기 다른 주사속도로 주사하게 되는데, 이러한 과정을 통하여 공정시간의 단축과 영역 간 소결율을 평형하게 하여 정밀도와 공정 효율을 증가 시킨다. Fig. 33은 디지털 미러 시스템 공정의 순서도를 나타낸다.

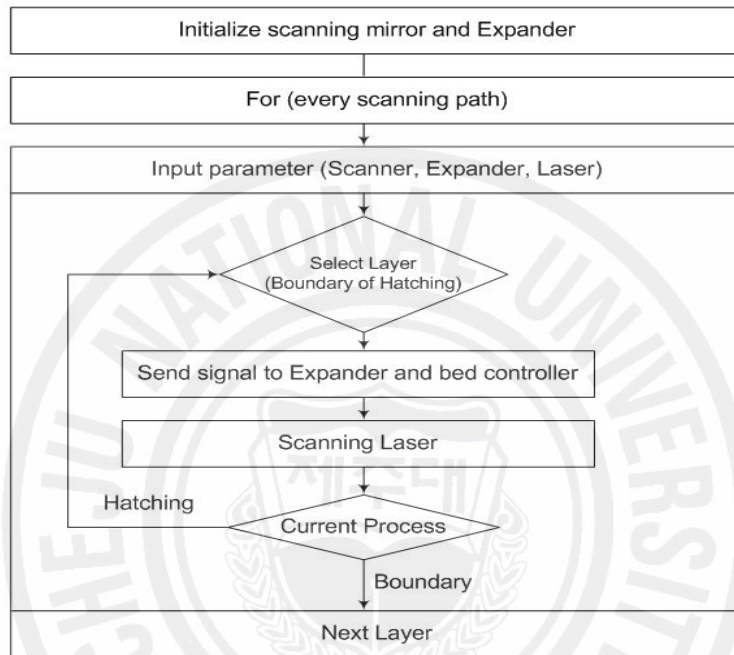


Figure 33. Digital mirror system flow chart

3) 디지털 미러 시스템의 공정조건

Fig. 34와 Table 1은 디지털 미러 시스템 적용 시, 시편의 강도 측정을 통하여 시스템의 공정조건을 결정하는 실험결과와 조건이다. Fig. 35는 Table 1과 같은 실험조건으로 시편의 강도 테스트 결과를 나타낸다. 이러한 결과는 스폿 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 m이상을 사용할 수 있음을 알 수 있다.

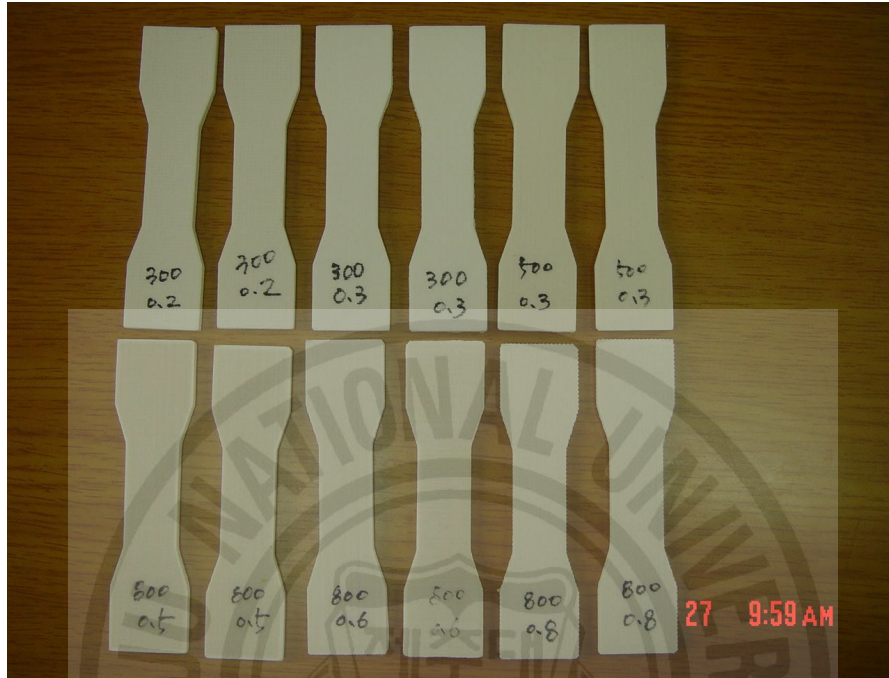


Figure 34. Fabricate specimens

Table 1. Experiments condition

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

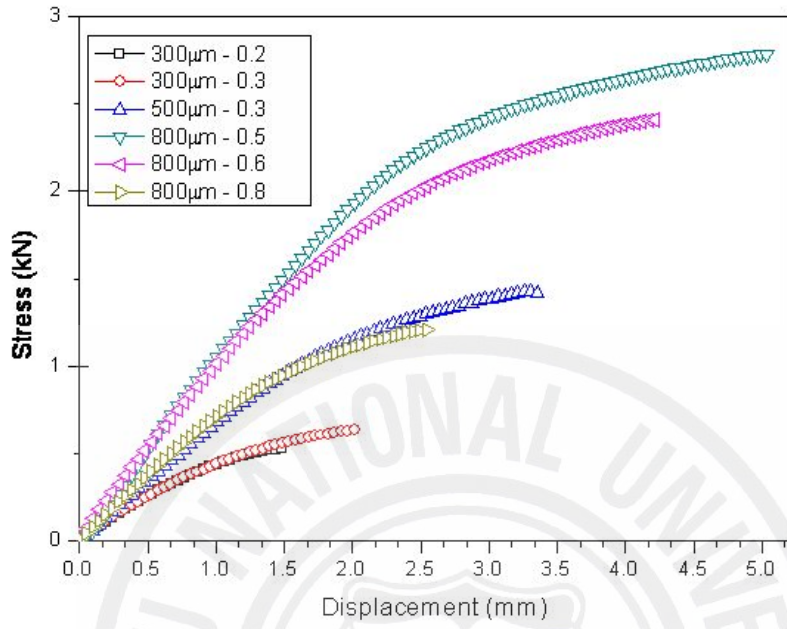


Figure 35. Tensile test

IV. 시뮬레이션, 공정 및 평가

본 절에서는 앞 절에선 언급된 알고리즘과 공정조건을 적용한 Visual C++ 기반의 제어 소프트웨어를 개발하고, 시뮬레이션과 실제 공정을 진행하여 각 알고리즘을 평가한다.

1. 공정 및 평가 장비

1) SLS 임의형상제작 시스템

SLS 공정 및 평가 장비는 Fig. 36 임의형상제작 시스템이다. 이러한 장비를 이용하여 실제 시제품을 제작하여 제품평가와 알고리즘 및 소프트웨어를 검증한다.



Figure 36. SLS Solid Freeform Fabrication System

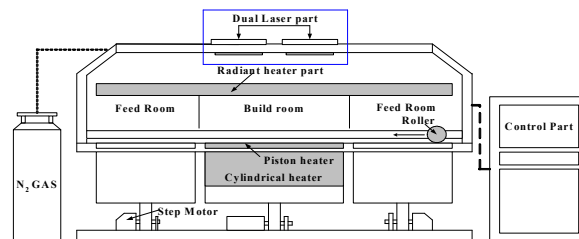


Figure 37, Schematic diagram of system

이러한 임의형상 제작 시스템은 Fig. 37과 같이 파우더의 공급 및 이송을 담당하는 적층부, 파우더의 예열을 위한 히팅부, 워크룸의 질소 분위기를 형성하기 위한 질소공급부와 레이저 유닛 및 전체 시스템을 제어하기 위한 제어부 등으로 구성된다 (안영진, 2006). 특히 주사경로 생성과 제어는 레이저부를 통하여 적용된다. 레이저부의 경우 레이저를 듀얼로 사용 시 $500 \times 800 \times 500$ (mm^3 , $W \times D \times H$) 크기의 시제품을 제작할 수 있도록 레이저부를 3축 다이나믹 초점 렌즈를 이용한다.

Fig. 38은 본 연구에 사용된 레이저부의 개략도로 레이저 엔진 (laser engine), 스캐너 (scanner), 빔 익스팬더 (beam expander), 반사거울 (reflection mirror) 등으로 구성된다. 대물렌즈, 오목렌즈, 갈바노미러 (Galvano mirror)로 구성된 다이나믹 초점 렌즈는 대면적에 레이저 빔을 조사할 때 발생하는 스팟 크기의 찌그러짐 현상을 방지하기 위하여 렌즈의 초점 거리를 가변 할 수 있는 특징을 가지고 있다. 또한 레이저 헤드에서 조사되는 레이저 빔의 직경 (I/e^2)은 $1.8\text{mm} \times 0.2\text{mm}$ 이므로, 소결을 위한 레이저 빔의 스팟 크기 (spot size)인 0.5mm 를 얻기 위해 조사되는 레이저 빔의 직경을 빔 익스팬더를 이용하여 증가 시켰다 (안영진, 2006).

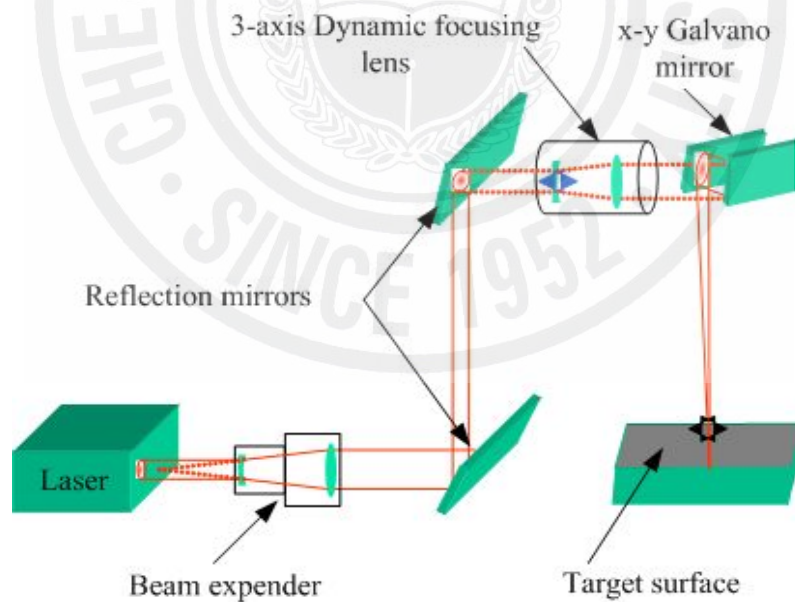


Figure 38. Schematic diagram of laser part

2) 공정 변수

CO₂ 레이저의 파장은 10.6 μ m로 레이저 소결 공정에 사용되는 폴리머 (polymer)는 대부분 C-C 또는 C-O 결합으로 이루어져 있으며, 조사된 레이저 파장이 10 μ m 근처인 경우 진동이 급격하게 증가하면서 용융된다. 이러한 과정을 통해 폴리아미드 파우더의 소결이 이루어지게 되며, SLS 공정을 위해 CAD 파일을 이용하여 스캐닝 된 데이터를 STL 파일 포맷으로 변환한 후 z 축에 대해 100 μ m 단위로 슬라이싱 하였다. 소결 변수 실험을 위해 사용된 출발원료로 Table 2와 같은 물성을 가지는 폴리아미드 파우더를 사용하였고, Fig. 39에 제품 제작을 위한 SLS 공정의 전체 흐름을 나타내었다. 먼저 질소 주입을 통해 95% 이상의 질소 분위기를 조성한 후 빌드룸과 피드룸의 파우더 표면의 온도를 각각 제어한다. 그 후 파우더의 적층과 CO₂ 레이저 빔의 조사를 반복하여 다층의 임의형상을 제조하게 된다. 폴리아미드 파우더의 소결을 위해 Table 3과 같이 빌드룸의 온도, CO₂ 레이저의 스캔 스페이싱, 스캔 속도, 레이저 빔 파워를 변수로 하여 동일한 형상을 가지는 시편에 대해 소결 변수 결정 실험을 반복 수행하였다. 소결 변수 실험 과정에서 예열된 파우더를 100 $^{\circ}$ C와 150 $^{\circ}$ C, 165 $^{\circ}$ C에서 각각 30층 가량 적층하여 비교한 결과 파우더의 온도 편차를 줄일 수 있었으며, 시편의 왜곡이 감소함을 알 수 있었다. Fig. 40은 간단한 CAD 모델을 이용하여 소결 변수 실험을 한 후 제작된 샘플들이고, 이를 바탕으로 형상을 제작하였다 (안영진, 2006).

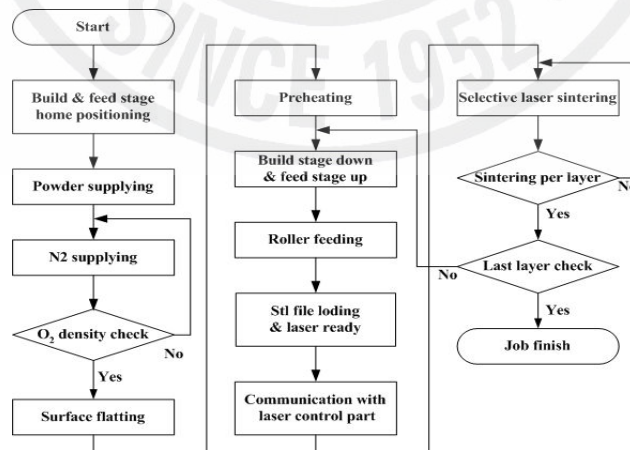


Figure 39. Block diagram of sintering process

Table 2. Specification of polyamide powder

	Density (g/cm ³)	particle size average (μm)	Melting point ($^{\circ}C$)
value	0.59	58	184

Table 3. Test condition of sintering variables

Variables	Test condition	Results
Temperature ($^{\circ}C$)	150~165	155~160
Scan speed (m/s)	1~10	3.5~10
Scan space (mm)	0.1~0.5	0.3~0.5
Laser power (Watts)	10~20	12~18
Layer thickness (mm)	100~150	100



Figure 40. Fabricated specimens from variable test

2. 주사경로 생성 및 제어 알고리즘을 적용한 소프트웨어 개발

1) 공정 프로그램의 개요

Fig. 41은 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 크게 STL 파일을 불러들여 3차원으로 보여주는 부분과 생성된 경로를 시뮬레

이선 하여 보여주는 부분, 그리고 레이저 주사를 제어할 수 있는 파라미터를 입력하는 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. 42는 레이저 주사를 컨트롤 하는 Control Dialog에 대한 설명이다. 그 구성으로 주사할 레이어를 제어하는 부분(Layer Control)과 주사 간격을 입력하여 주사경로를 만드는 부분(Convert), 현재 주사상태를 나타내는 부분(State), 레이저와 스캐너를 컨트롤하는 부분(Control), 롤러, 히터 등을 제어하는 프로그램에 메시지를 보낼 수 있는 부분(Message), 그리고 레이저의 파워, 속도, 딜레이 등의 실험치를 입력할 수 있는 부분으로 구성된다. 또한 실험을 수행하기 위하여 수동 모드로 임의의 두 점을 주사할 수 있으며 생성된 경로의 한 층을 주사 및 알고리즘 별로 생성된 파일을 읽어 들이고 저장하여 실험을 수행할 수 있도록 하였다.

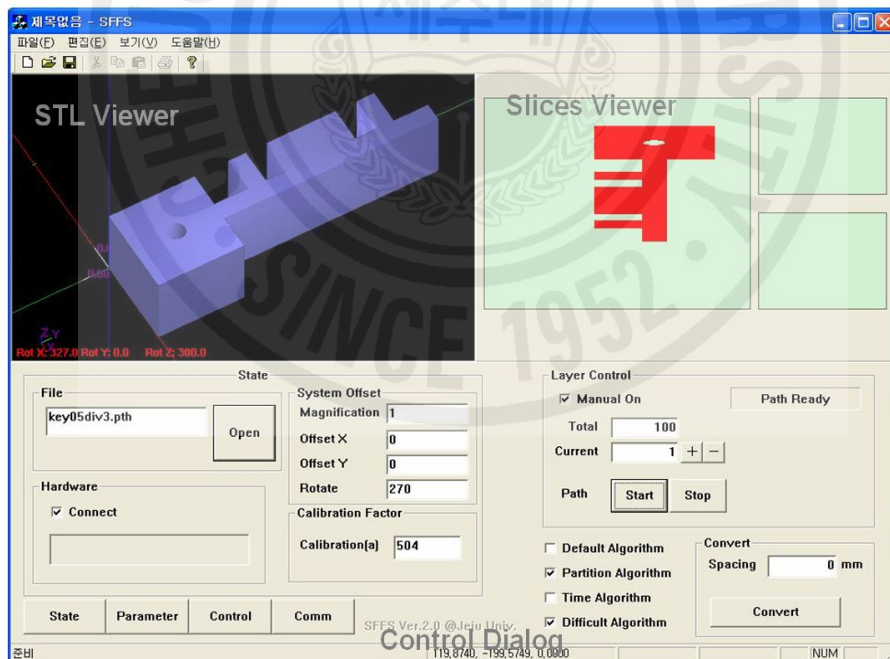


Figure 41. Developed software

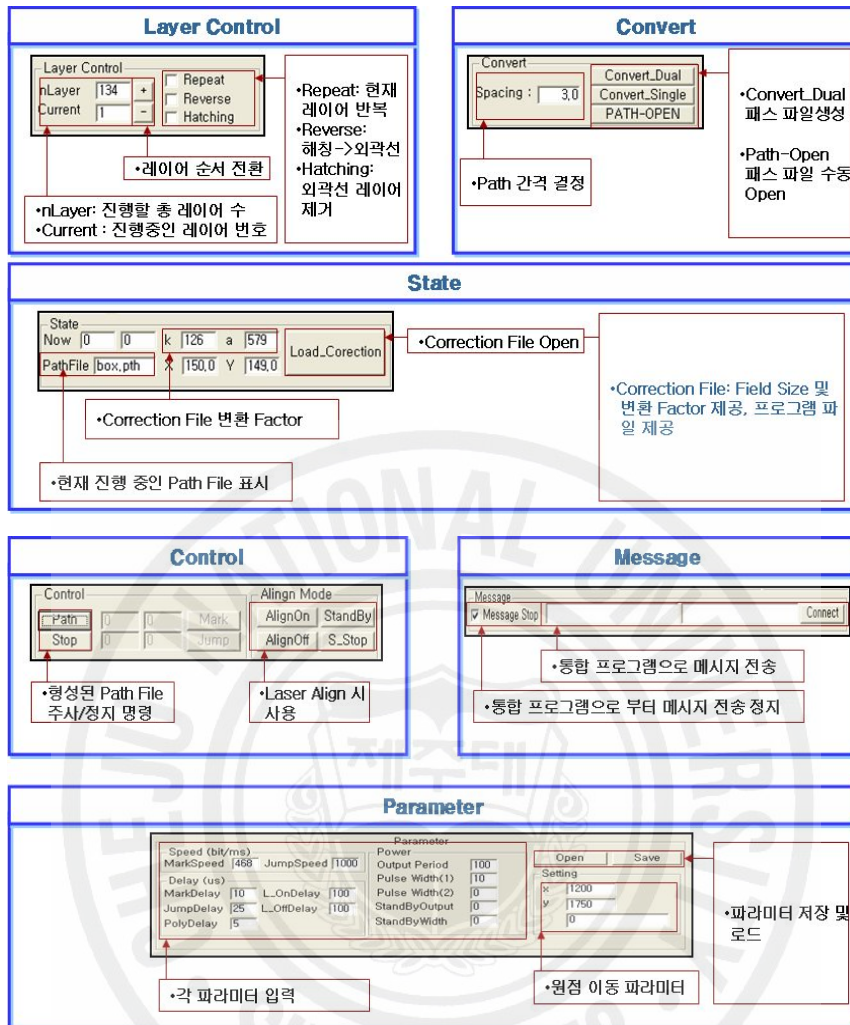


Figure 42. Parameters for Laser Scanning Control Dialog

2) 공정 프로그램의 특징

Fig. 43은 공정 프로그램의 대표적인 특징을 나타낸다. 이러한 프로그램은 사용자 편리성 스킨을 제공하고 각 기능을 유저 편리성에 맞춰 분리하였다. 또한 하드웨어 상태를 체크하여 하드웨어 문제 발생 시, 알람 기능을 제공하고, 레이어에 대한 자유로운 컨트롤이 가능하다. 또한 각 알고리즘 별 주사경로를 유저가 필요에 의해 자유롭게 선택하여 주사경로 생성이 가능하다. Fig. 44는 이러한 특징 중 하나인 하드웨어 상태 체크 알람 기능을 나타낸다.

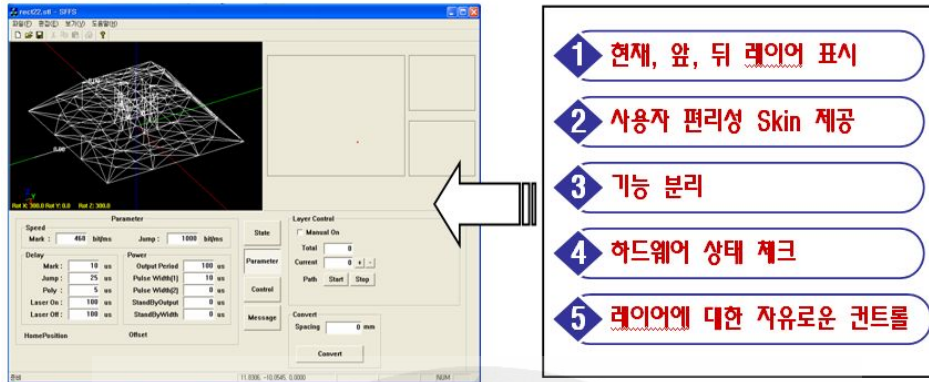


Figure 43. Software ability



Figure 44. Hardware state check

3. 시뮬레이터의 개발

1) Layer viewer의 개발

개발한 알고리즘을 테스트하기 위하여 Layer Viewer를 만들어서 각 레이어가 실제로 주사되어지는 경로를 그림으로 시뮬레이션 하였다. Fig. 45는 영역분할 주사경로를 시뮬레이션 한 것이다. Fig. 45와 같이 영역분할 알고리즘은 레이어별로 적용되는 것을 알 수 있다. 이것은 실제로 주사되어지는 경로를 소프트웨어에 맵핑하여 그려지는 것이므로 실제로 주사되는 경로를 실험 전에 사용자가 확인할 수 있도록 하였다. 또한 각 레이어를 선택하여 주사가 가능하여 사용자가 보다 편리한 공정을 진행할 수 있다.

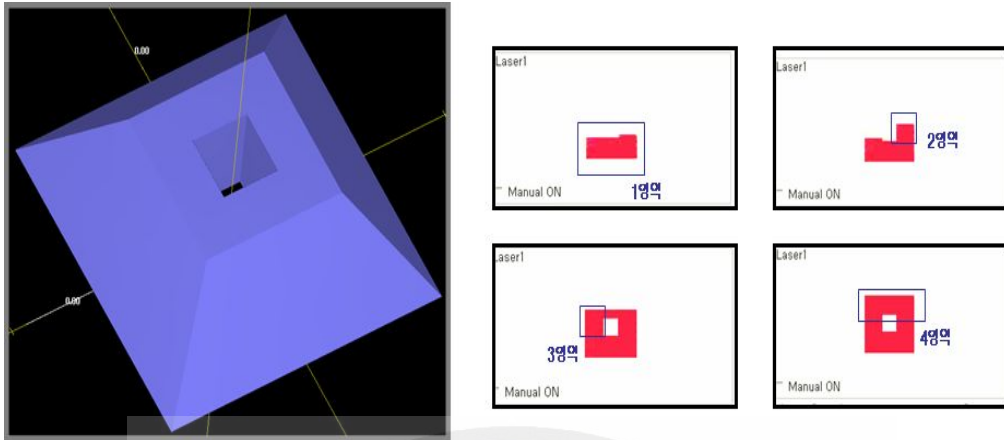


Figure 45. Simulation area division model

2) 공정시간 시뮬레이터의 개발

주사경로 생성 알고리즘에 대한 주사 시간을 비교하기 위하여 제어 프로그램에서 주사시간 계산 알고리즘을 추가하여 주사시간을 비교하였다. 이러한 시뮬레이션 결과는 텍스트 파일로 출력되며, Fig. 46과 같이 Mark Time, Jump Time, Total Time으로 나누어져 각 레이어 별로 출력되고, 총 주사 가공시간은 마지막 줄에 표시된다.

0	Mark Time: 30343.2414	JumpTime: 3110.0169	TotalTime: 33453.2583
1	Mark Time: 409.2666	JumpTime: 108.5591	TotalTime: 517.8257
2	Mark Time: 28599.3573	JumpTime: 3114.8169	TotalTime: 31714.1742
3	Mark Time: 401.0562	JumpTime: 122.4128	TotalTime: 523.4690
4	Mark Time: 27026.8484	JumpTime: 3094.7268	TotalTime: 30121.5751
5	Mark Time: 394.8464	JumpTime: 109.2748	TotalTime: 504.1212
6	Mark Time: 25496.5998	JumpTime: 3105.9871	TotalTime: 28602.5869
7	Mark Time: 386.3860	JumpTime: 43.5027	TotalTime: 429.8887
8	Mark Time: 23946.3463	JumpTime: 3116.7969	TotalTime: 27063.1432
9	Mark Time: 377.9256	JumpTime: 121.4051	TotalTime: 499.3307
10	Mark Time: 22497.7843	JumpTime: 3112.2527	TotalTime: 25610.0370

Figure 46. Time simulation file format

3) 기본 공정의 시간 시뮬레이션

위와 같은 공정시간 시뮬레이션을 통하여 Table 4와 Fig. 47과 같은 모델로 시뮬레이션 결과를 출력하고, 기존 주사경로 생성 알고리즘과 영역분할 주사경로 생성 알고리즘, 시간을 고려한 영역분할 주사경로 생성 알고리즘의 시간 효율성을 확인 하였다.

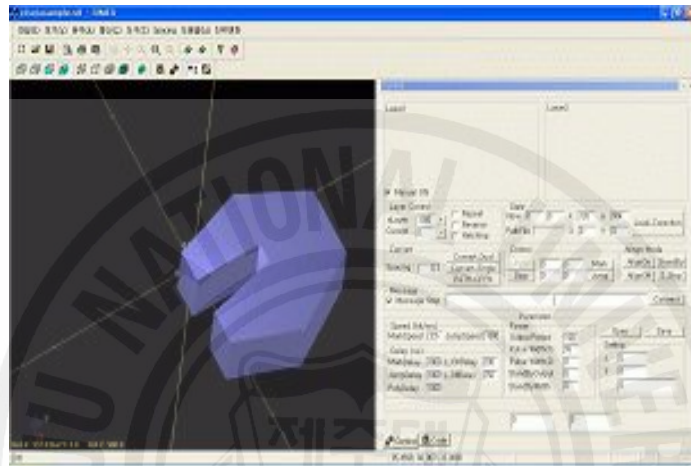


Figure 47. Simulation model

Table 4. Simulation model data

Part Size(mm)	90×90×100
Calibration factor(mm)	504
Spacing(mm)	0.4
Mark/Jump speed(bits/ms)	390
Delay time(μ s)	500

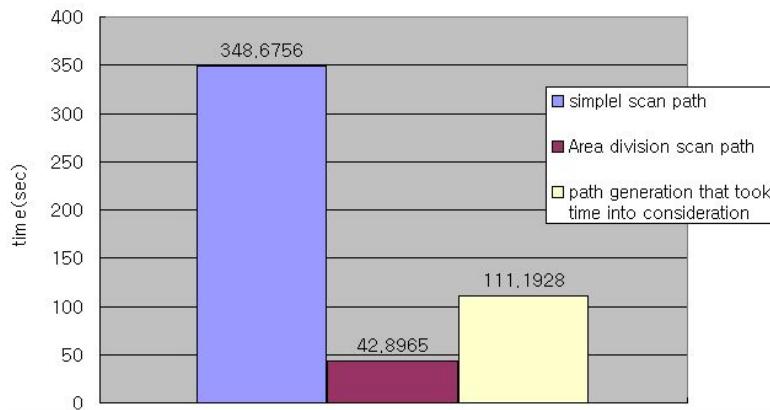


Figure 48. Total jump time simulation

Fig. 48은 총 레이어의 점프 구간의 시간을 시뮬레이션 하여 그래프로 비교한 것이다. 그림에서 보는 것과 같이 기존 주사경로를 영역분할 주사경로로 바꾸면 위와 같은 모델에서 약 307초가 단축되고, 주사시간을 고려한 알고리즘의 경우 약 138초가 단축되는 것을 알 수 있다. 이러한 시간은 모델에 따라 적층하는 층과 점프 면적이 다르므로 차이가 있지만 많은 주사시간이 절약되는 것을 확인할 수 있다.

4) 디지털 미러 시스템의 주사시간 시뮬레이션

Fig. 49는 디지털 미러 시스템을 적용한 시간 시뮬레이션 모델을 나타낸다. 주사 모델은 Fig. 49처럼 열쇠모양의 모델을 사용하였고, 디지털 미러 시스템을 적용한 시간 시뮬레이션의 경우 영역에 따라 서로 다른 공정변수를 사용한다. Table 5는 이와 같은 공정 변수를 나타낸다.

Fig. 50은 총 레이어의 점프 구간의 시간을 시뮬레이션 하여 그래프로 비교한 것이다. 이것은 기본 알고리즘과 영역 간 스캔 속도를 고정된 디지털 미러 시스템, 스캔 속도를 가변한 디지털 미러 시스템의 공정시간을 나타낸다. 이와 같이 5mm 공정 시, 기본 알고리즘 보다 약 2배 이상의 시간이 단축되는 것을 알 수 있다. 또한 1레이어 당 이득시간은 약 4sec 이다.

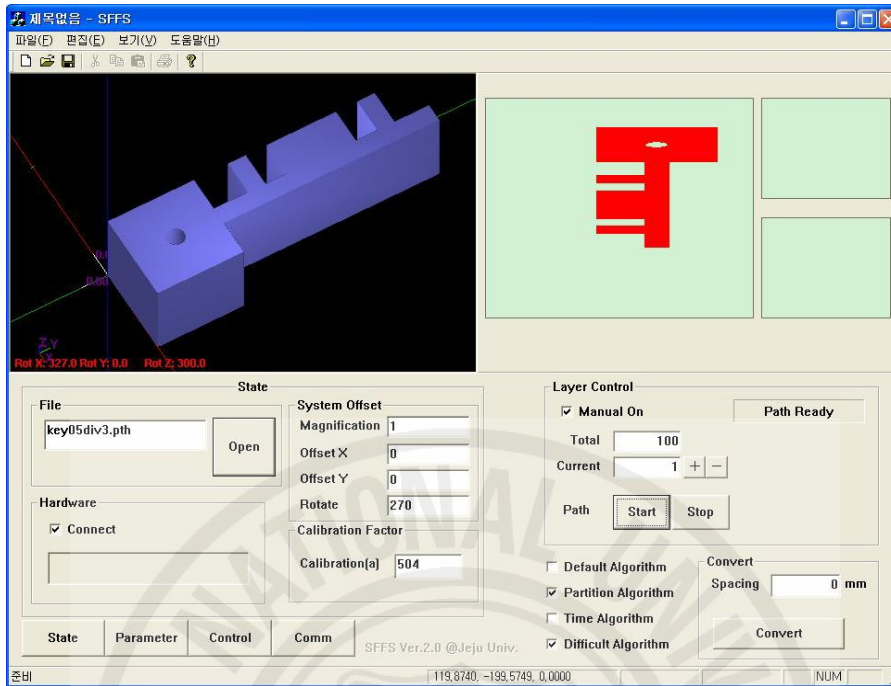


Figure 49. Model of digital mirror system

Table 6. Digital mirror system application process experiment 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
processing time	390198ms	211881ms	189063m/s

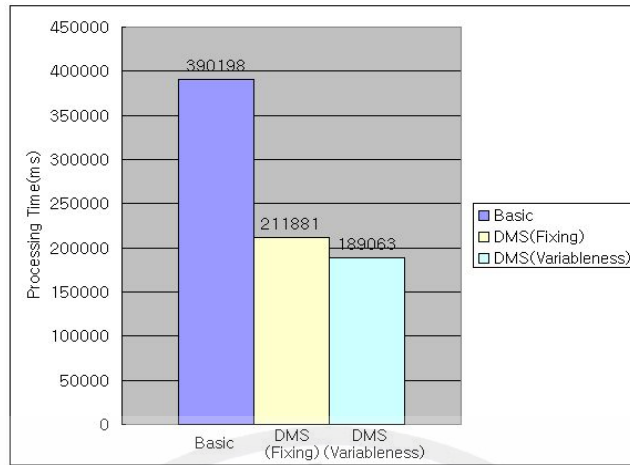


Figure 50. Total processing time simulation(DMS)

4. 공정 실험

1) 영역분할, 시간을 고려한 영역분할 주사경로 생성 알고리즘 공정 실험

Fig. 51은 위의 내용을 바탕으로 Fig. 47의 시뮬레이션 모델을 임의형상제작 시스템으로 직접 제작한 것이다. 좌측으로부터 기본 주사경로, 영역분할 주사경로, 주사시간을 고려한 영역분할 주사경로 순이다. 이와 같은 방식의 적용된 모델들을 통하여 실제 제작과정에서 생기는 왜곡 및 접합면의 강도와 주사시간의 상관성 및 주사경로의 정밀도에 대한 연구는 많은 경험을 통한 실험적인 방법의 연구가 필요하다.



Figure 51. The model manufacture

실제 실험 시 세 가지 알고리즘에 차이점은 육안을 통해서 관찰했을 때 확연히 들어나지는 않는다. 이것은 영역 사이에 시간이 많이 지나지 않았기 때문이고, 시간에 따른 소결을 변화 실험에서도 시간에 의한 소결율의 변화는 약 2분 정도의 시간이 지났을 때 크게 나타난다. 하지만 실제 실험 조건에서 매우 복잡한 형상 또는 크기가 큰 모델을 제작할 경우 많은 시간이 소비되므로 영역분할을 제한하는 시간을 고려한 영역분할 알고리즘은 의미가 있다고 하겠다.

Fig. 52는 영역분할 주사경로 알고리즘을 통해 제작된 모델을 50배율의 현미경을 통하여 접합면 및 외곽선을 관찰한 것인데, 영역의 접합면이 소결이 더 많이 되어 왜곡이 생긴 것을 관찰 할 수 있다. 또한 Fig. 53은 시간을 고려한 영역분할 주사 경로 알고리즘을 통해 제작된 모델을 보여 주고 있는데 같은 접합부를 현미경으로 관찰했을 때에도 크게 이상이 없는 것을 알 수 있다. 이것은 접합부의 시간에 의한 소결율 증가를 줄여 왜곡이 줄어들었음을 알 수 있다. 또한, 시간을 고려한 영역분할 주사경로는 영역의 최대값을 제한함으로써 영역이 넓이를 제한하게 된다. 이것은 디지털 미러 시스템 적용 시 기본이 되는 알고리즘이 된다. 왜냐하면 이러한 넓이를 제한하는 것은 시스템의 최적화된 스캔 스피드와 스캔 스페이싱을 제안하는 방법이 되기 때문이다.

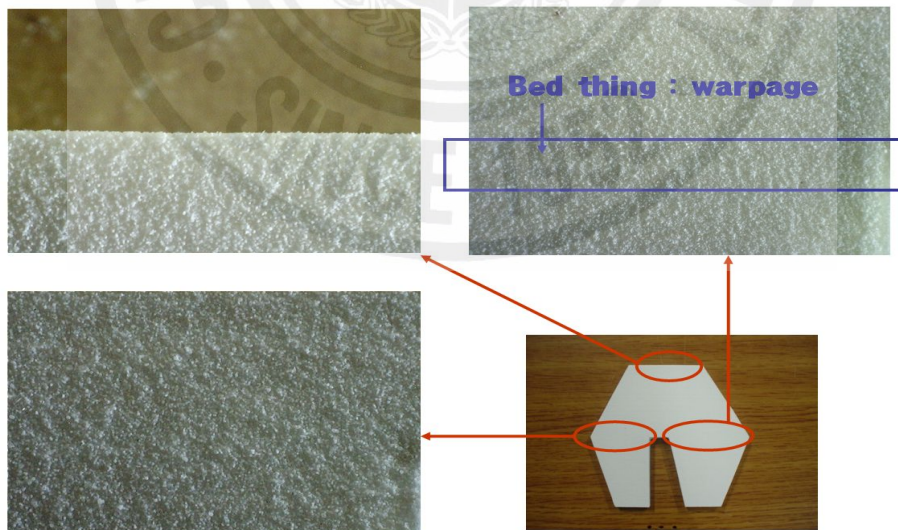


Figure 52. The model manufacture that used area division scan path

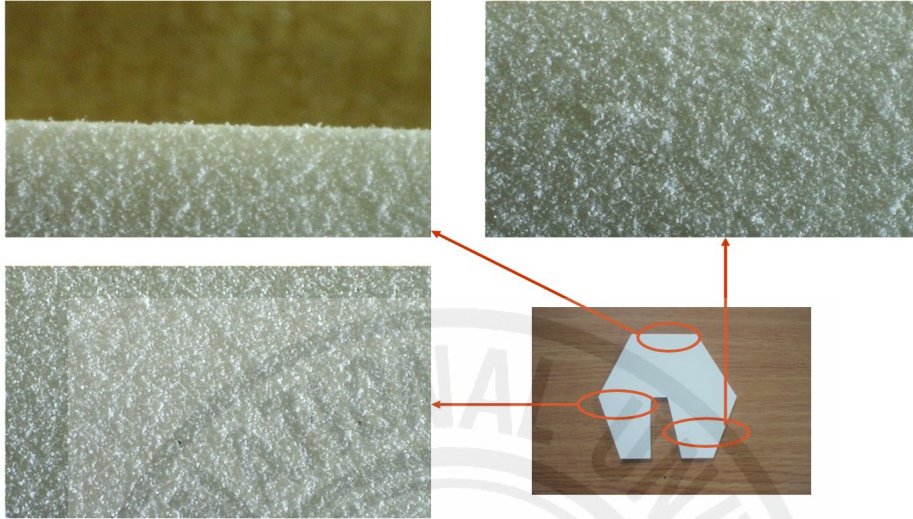


Figure 53. The model manufacture that used path generation that took time into consideration

2) 디지털 미리 시스템을 적용한 공정 실험

Fig. 54는 위의 내용을 바탕으로 Fig. 49의 모델을 임의형상제작 시스템으로 직접 제작한 것이다. 좌측으로부터 기본 주사경로, 디지털 미리 시스템 적용 고정속도, 디지털 미리 시스템 적용 가변속도 순이다. 이와 같은 방식의 적용된 모델들을 통하여 실제 제작 과정에서 생기는 왜곡 및 접합면의 강도와 주사시간의 상관성 및 주사경로의 정밀도에 대하여 비교한다. 이것은 접합면에 대한 육안적인 관찰과 강도 측정, 표면조도 측정을 통한 표면 거칠기를 통하여 비교한다.

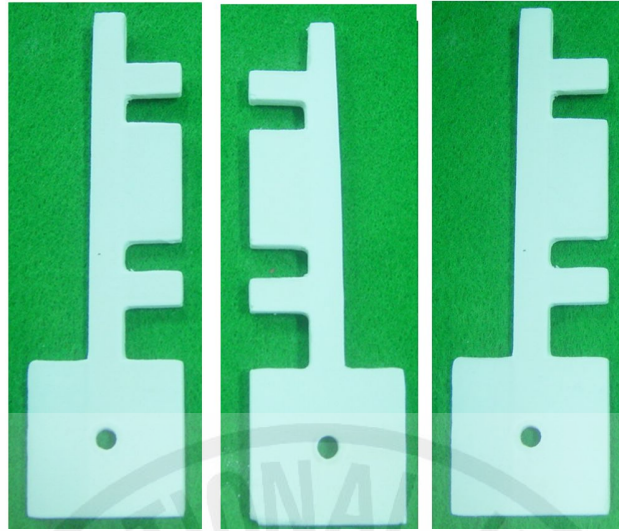


Figure 54. The model manufacture used Solid freeform fabrication system

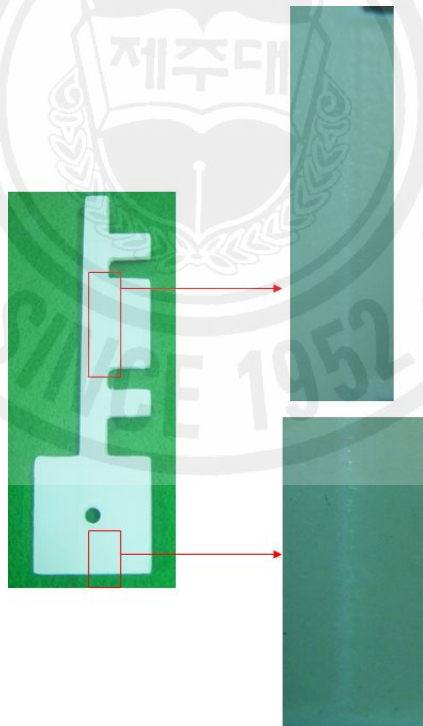


Figure 55. Digital mirror system joint problems

Fig. 55는 디지털 미러 시스템을 적용하였을 경우 발생하는 접합면의 문제점을 나타낸다. 접합면은 그림에서와 같이 익스팬더의 가변 시 소결시간이 길어져서 주위보다 더 많은 양의 에너지를 받게 되어, 약간의 왜곡이 발생한 것을 관찰할 수 있다. 이러한 문제점은 3가지 알고리즘에서 모두 발생하는 것이 아니고, 디지털 미러 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 특징을 나타낸다. 즉, 알고리즘 별로 강도, 표면조도, 공정시간의 특징이 서로 다르다. 이러한 특징은 목표 제품의 특징이 어떠한 특성을 더욱 중요시하는가에 따라서 사용자가 선택하여 그 이득을 최대화하고 시뮬레이션 상에서 정확한 특징을 사용자에게 제시하여야 하겠다. 또한 원천적으로 이러한 문제점을 제거하기 위해서는 시스템에서 보다 가변시간이 짧은 익스팬더를 사용하여 공정을 진행하여야 하겠다.

V. 결론

SLS 공정은 레이저를 통한 소결 공정을 통하여 빠른 시간 내에 효과적으로 시제품을 제작하는 기술이다. 이러한 SLS 공정을 위하여 가장 우선적으로 고려되어야 하는 문제는 효율적인 공정 적용을 위한 주사경로 생성 알고리즘의 개발과 이러한 알고리즘을 정확하고 효율적으로 추종 할 수 있는 주사경로 제어 방안이다. 본 연구에서는 이러한 SLS 공정효율 향상을 위한 레이저 주사경로 생성 알고리즘을 통하여 효과적인 레이저 주사경로를 생성하였다. 효과적인 레이저 주사경로는 단순 지그재그 주사경로로부터 영역분할 주사경로 생성 알고리즘을 개발하였고, 주사경로의 검증 알고리즘을 통하여 이러한 주사경로 생성 알고리즘의 신뢰성을 높이고, SLS 시스템의 특정 공정조건을 제시함으로써 제품의 정밀도와 공정효율을 향상 시켰다.

또한 단순 주사경로는 불필요한 점프구간이 많이 발생하기 때문에 이러한 점프구간을 최소화하기 위하여 마크 숫자를 구분해서 각 영역을 다각형으로 재구성한 다음, 차례대로 주사경로를 저장함으로써 불필요한 점프구간을 줄이므로 주사효율을 향상시켰고 영역분할 주사경로 생성 시 문제가 될 수 있는 영역 간 접합면의 강도를 높이기 위한 주사시간을 고려한 영역분할 주사경로 방식으로 주사효율을 향상시켰다. 이러한 영역분할 주사경로 생성 알고리즘을 바탕으로 영역 별로 다른 공정 조건으로 공정하는 디지털 미러 시스템에 적용함으로써 가공시간의 감소와 영역간의 열평형에 의한 가공효율을 향상 시켰다.

각 주사경로 생성 알고리즘은 시간 시뮬레이션을 통하여 가공효율과 공정 특징을 확인 하였고, 이러한 알고리즘을 갖는 모델들을 SLS 임의형상제작 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 열평형 조건을 제시하였다. 향후, 제안된 알고리즘 모델들을 분

석 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.



참 고 문 헌

- C. K. Chua, K. F. Leong and C. S. Lim, 2003, Rapid Prototyping : Principles and Applications, World Scientific Publishing, 2nd Edition.
- D. Miller, C. Deckard, and J. Williams, 1997, : Various beam size SLS workstation and enhanced SLS model, Rapid Prototyping Journal, Vol.3, No.1, pp.4-11.
- Kenwei Chen, 1998, INTELLIGENT SCANNING IN SELECTIVE LASER SINTERING, The University of Texas at Austin, Ph. D. Thesis.
- S. M. Park, 2000, Advanced Data Exchange for Solid Freeform Fabrication, The University of Texas at Austin, Ph. D. Thesis.
- J. Yang, H. Bin, X. Zhang, Z. Liu, 2003, Fractal scanning path generation and control system for selective laser sintering(SLS), International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 34, pp. 293-300.
- S. M. Hur, 2002, Generation of CAD Data for Rapid Product Development in Reverse Engineering, PusanNationalUniversityGraduateSchool,Ph.D.Thesis.
- H. C. Kim, 2003, Internet-based Intelligent CAD/CAM System for Rapid Product Development, PusanNationalUniversityGraduateSchool,Ph.D.Thesis.
- K. H. Choi, J. W. Choi, Y. H. Doh, S. J. Cho, S. H. Lee, Y. J. Ahn, and D. S. Kim, 2005, Generation of Dual Laser Scan Path for Enhancement of Mechanical Strength, Proceedings of the KSME 2005 Fall Annual Meeting, pp.1074-1079.
- S. M. Park, 1993, Advanced Data Exchange for Solid Freeform Fabrication, The University of Texasat Austin, Ph.D.Thesis.
- K. H. Choi, H. C. Kim, Y. H. Doh, and D. S. Kim, 2007, Novel scan path

generation method based on area division for SFFS, FAIM 2007, Philadelphia, USA.

- K. H. Choi, H. C. Kim, Y. H. Doh, and D. S. Kim, 2007, Optimal Scan path Generation for digital mirror system in SFFS, ICASS 2007.
- Y. J. Ahn, D. S. Kim, B. O. Choi, and K. H. Choi, 2006, Development of Sintering Process and Performance Evaluation of Industrial SFF system using Dual Laser, KSPE 2006.



본 논문과 관련된 저자의 발표 논문

1. 학술대회논문집

- 최경현, 도양희, 김형찬, 김동수, “SFFS에서 영역분할 주사경로 생성”, 한국기계공학회 춘계학술대회 논문집, 2006. 6.
- 최경현, 김형찬, 도양희, 김동수 “SFFS를 위한 영역분할 기반의 경로 생성 알고리즘 개발”, 한국정밀공학회추계학술대회 논문집, 2006. 10.
- 최경현, 김형찬, 도양희, 김동수, “Novel scan path generation method based on area division for SFFS”, FAIM 2007, 2007. 01.
- 최경현, 김형찬, 도양희, 김동수, “Optimal Scan path Generation for digital mirror system in SFFS”, ICASS 2007, 2007. 10.
- 최경현, 김형찬, 도양희, 김동수 “가변 빔익스펜더 기반의 최적 주사경로 생성 알고리즘 개발”, 한국기계공학회추계학술대회 논문집, 2007. 11.
- 최경현, 김형찬, 도양희, 김동수 “소결율을 고려한 DMS의 주사경로 생성 알고리즘 개발”, 한국정밀공학회추계학술대회 논문집, 2007. 11.

감사의 글

저에게 연구란 항상 두려움과 설레임이 교차하는 일인 것 같습니다. 때로는 실패에 대한 두려움과 책임감이 앞설 때도 있고, 목표에 도전하는 희열과 새로운 것에 대한 갈망에 의해서 연구를 진행하기도 한 것 같습니다. 하지만 힘들고 제 자신의 한계에 부딪칠 때마다 제 자신을 믿고 자신과의 경쟁에서 조금이나마 앞서 갈수 있게 힘을 주신 많은 분들께 부족한 글이지만 감사의 말을 전하고자 합니다.

막연한 호기심과 열정을 구체적인 목표와 신념으로 만들어 주시고, 처음으로 즐겁게 일할 수 있는 방법을 가르쳐 주신 존경하는 도양회 교수님께 깊은 감사의 말씀드리고 싶습니다. 항상 부족한 저를 언제나 믿어주시고, 힘들고 어려운 길을 가는 방법과 올바른 길로 갈 수 있는 지혜와 자세를 가르쳐 주신 교수님께 다시 한번 머리 숙여 감사드립니다.

그리고 저에 항상 많은 기회와 믿음을 주신 최경현 교수님, 제 자신을 믿지 못해 실패라고 생각 했을 때도 감싸주시고, 믿음으로 가르쳐주신 교수님께 더 좋은 결과를 보여 드리지 못한 것 같아 너무나 송구스럽습니다. 하지만 교수님의 가르침으로 어떠한 고난도 풀여가는 용기를 가질 수 있었습니다. 정말 감사합니다.

이번 논문 심사를 위해 귀중한 시간을 내어주신 김경연 교수님과 항상 전자공학 과와 학생들을 위해 헌신적으로 가르침을 주시는 김경식 교수님, 이광만 교수님, 고성택 교수님, 강민제 교수님, 고석준 교수님을 비롯한 많은 교수님들께 짧게나마 감사의 말씀 전합니다.

4년이라는 시간을 실험실에서 보내면서 항상 올바른 생각을 하도록 도와주신 한승학 선배님, 제 일을 자신의 일처럼 봐주신 김대현, 이창언, 허수용, 강봉규 선배님, 어려울 때마다 큰 도움이 되 주신 양경부, 양동혁 선배님, 힘들고 지칠 때 항상 밝게 웃어 주시는 강양현, 현미나 선배님과 저를 지켜봐주시는 많은 선배님들 정말 감사합니다.

그리고 연구 파트너인 김수진, 매일 육만 하지만 아끼는 후배인 정범이, 승진이, 정훈이, 봉수, 현우와 저와 함께 했던 많은 후배들 미안하고 고맙다. 이웃 연구실

인 AMM 연구원들과 그간 연구를 함께 했던 한국기계연구원, KAIST, 성광전기, 고려대 팀들에게 감사의 말씀 전합니다.

마지막으로 항상 저 때문에 고생하시는 사랑하는 부모님, 정말 사랑하고 감사합니다.

4년이라는 시간을 보낸 연구실에 아직도 많은 미련과 후회가 남습니다. 이제 다시 새로운 일을 시작하려고 하고 있습니다. 새로운 일은 저에게 두려움으로 먼저 다가오지만, 4년 동안 연구실에서 배운 지혜와 의지로 항상 옳은 길을 갈 수 있도록 노력하겠습니다. 다시 한 번 그동안 많은 도움을 주신 분들께 감사의 말씀 전합니다.

