

< 논문 >

SFFS 에서 듀얼 레이저를 이용한 부품 제작 및 평가

최재원* · 최경현† · 김동수** · 도양희*** · 이석희****

(2005년 10월 25일 접수, 2006년 2월 1일 심사완료)

Fabrication of Part and Its Evaluation Using Dual Laser in Solid Freeform Fabrication System

Jae-Won Choi, Kyung-Hyun Choi, Dong-Soo Kim, Yang-Hoe Doh and Seok-Hee Lee

Key Words : Solid Freeform Fabrication System(임의형상 제작 시스템, SFFS), Dual Laser(듀얼 레이저), Scan Path(주사 경로)

Abstract

A solid freeform fabrication (SFF) system using selective laser sintering (SLS) is currently recognized as a leading process and the SLS extends the applications to machinery and automobiles due to various employing materials. In order to fabricate a large part with SFF system, dual laser approach has been introduced. Since the building room is divided into two regions, each scan path for dual laser system is generated based on the single laser scan path. Scan paths for each laser have to be synchronized and consider mechanical strength against fracture at the interfaced region. This paper will address generation of single laser scan path which deals with special cases for unnecessary scan points and generation of dual laser scan path according to various divided regions to enhance mechanical strength. To evaluate the developed scan path method, the specimen will be fabricated and evaluated.

1. 서 론

대형 형상 가공을 위한 임의 형상 제작 시스템(SFFS)을 개발하기 위하여 레이저가 중앙에 위치한 싱글 레이저 주사 시스템으로는 가장 자리 부분의 정밀도를 보장할 수 없어 가공 영역에 한계를 가지게 된다. 이를 보완하기 위하여 가공 면적을 분할하여 각각을 독립적으로 가공할 수 있는 듀얼 레이저 주사 시스템이 제안되었다. 이러한 듀얼 레이저 시스템을 구동하기 위해서는 가공하

고자 하는 단면 형상에 대해서 각각의 레이저가 담당해야 할 부분으로 분할되어야 하며, 각각 독립된 주사 경로 생성이 필요하다.

싱글 레이저 주사 시스템에서는 가공하고자 하는 단면 정보를 이용하여 X, Y 축에 대해서 지그재그 헤칭(zigzag hatching) 방식을 이용하여 슬라이싱 단면의 윤곽 선분(contour segment)과의 교점을 구해 주사 경로를 생성시킨다. 이 때, 주사 간격(scan spacing), 주사 속도, 레이저 파워 등은 최종 가공품의 치수 정밀도에 직접적인 영향을 미치는 부분으로 실험을 통하여 최적의 값을 선정하도록 하여야 한다. 또한 슬라이싱 단면 윤곽을 이루고 있는 윤곽점(contour point)이 주사점(scan point)으로 계산 되어질 경우에 대해서 주사 방향에 따라 계산된 점들을 선택적으로 저장함으로써 레이저 가공의 순서가 잘못되는 것을 방지하여 가공 에러를 미연에 제거할 수 있다.

이렇게 잘못된 주사 경로의 수정을 통한 최적의

† 책임저자, 회원, 제주대학교 메카트로닉스공학과
E-mail : khchoi@cheju.ac.kr

TEL : (064)754-3713 FAX : (064)756-3884

* 회원, 부산대학교 대학원 지능기계공학과

** 한국기계연구원 정보장비연구센터

*** 제주대학교 전기전자공학부

**** 회원, 부산대학교 기계공학부

싱글 레이저 주사 경로가 생성되면 이를 바탕으로 듀얼 레이저 주사 경로를 생성할 수 있다. 슬라이싱 된 단면을 분할하여 각각의 독립적인 주사 경로를 생성할 경우, 두 개의 레이저 빔이 만나는 부위가 서로 일치하지 않게 되어 최종 제품의 강도 및 형상 정밀도에 영향을 미치게 된다.

이를 보완하기 위하여 싱글 레이저 주사 경로를 분할하여 듀얼 레이저 주사 경로를 생성시킴으로써 두 개의 빔이 만나는 접합부위가 일치하게 되어, 표면 조도 및 기계적 강도를 향상시킬 수 있고, 주사 파라미터(주사 속도, 주사 미러 딜레이 등)를 조절함으로써 접합부위의 치수 정밀도를 향상시킬 수 있다.⁽¹⁻⁴⁾ 따라서 본 논문에서는 듀얼 레이저 주사 경로 생성을 위해서, 모든 에러 상황을 고려한 싱글 레이저 주사 경로를 생성시키고 이를 적절한 중첩 영역을 가지게끔 분할하여 각각의 주사 경로를 생성시키는 방법을 제시한다. 또한 두 개의 레이저 빔이 만나는 부위에서의 기계적 강도를 향상시키기 위해서, 중첩 영역의 크기에 따른 시험 시편을 제작하여 강도 시험을 수행한다.

2. 관련 연구

Chen⁽⁵⁾은 가공품의 휨(curling), 수축(shrinkage), 팽창(growth) 등을 줄이기 위해서 지능적인 주사 경로 생성 방법을 제안하였다. 그는 동일한 층이라 할지라도 다른 영역에서 레이저 파워, 주사 간격, 주사 속도 등을 개별적으로 최적화시킴으로써 이를 해결하려 하였다. 또한 최하위 층에서 발생하는 바닥 성장(bottom growth)를 보상하기 위해서 Bonus-Z 모델을 개발하였다.

Park⁽⁶⁾은 STL 파일의 슬라이싱 단면으로부터 생성된 주사 경로가 최종 가공품의 품질을 떨어뜨리는 단점을 보완하기 위해서 상용 소프트웨어에서 모델링된 형상을 곧바로 슬라이싱하여 주사 경로를 생성함으로써 가공품의 품질을 향상시켰다. 특히 복잡한 형상의 경우 가공품의 품질을 현격히 개선시켰다.

Yang⁽⁷⁾은 프랙탈 주사 경로(fractal scanning path)를 생성하여 일반적인 선형 경로보다 열분포(thermal distribution)의 편차를 줄임으로써 각 층간, 같은 층의 인접 부위간의 열응력(thermal stress)을 완화시켜 최종적으로 발생하는 휨, 수축 현상을 줄였다.

Yang⁽⁸⁾은 윤곽으로부터 임의의 오프셋(offset value)으로 경로를 생성하여 효율적인 주사를 하는 방법을 연구하였다. 이는 윤곽 데이터로부터 안쪽

바깥쪽을 구분하여 오프셋만큼 스캐닝 경로가 내부로 확장하면서 경로를 생성하는 방법으로 선형으로 주사하는 방법보다 더 빠른 속도를 가지며 더 고른 표면을 가지게 하였다.

3. 듀얼 레이저 주사 경로 생성

3.1 듀얼 레이저 시스템

본 연구를 적용한 SFF 장비는 Fig. 1 과 같이 두 개의 레이저가 장착된 시스템으로 1000mm×500mm (X×Y)의 빌딩룸(building room) 단면 크기를 가진 것으로써, 각각의 레이저가 담당할 영역은 500mm×500mm 이며, 스캐너의 중심 이동을 통하여 적절한 중첩 영역을 가질 수 있다.

3.2 최적 싱글 레이저 주사 경로 생성

상용 CAD 소프트웨어에서 3 차원 모델링 된 형상에서 삼각형 facet 로 이루어진 STL 파일로 변환 후, 적층할 두께만큼 슬라이싱하여 각 층에 대한 주사점들을 계산함으로써 주사 경로를 생성시킬 수 있다.⁽¹⁻⁴⁾

슬라이싱 단면에 대한 주사 경로 생성 알고리즘은 Fig. 2 에서와 같이 주사선(scan ray)을 주사 간격만큼 옮겨가면서 윤곽 선분과의 교점을 연속적으로 구하는 것이다. 주사선과 윤곽 선분과의 교점 계산 시간을 줄이기 위해서 Fig. 2 에서와 같이 하나의 레이어 안에 존재하는 모든 루프에 대해서 사각형 경계로 하는 BRLp(Bounding Rectangle of Loop)를 설정하여 주사선이 이 경계와 만나지 않을 경우에는 루프를 건너뛰어 다음 루프에서 계산하게 된다.

우선 하나의 슬라이싱 단면에서 X 축에 평행한 직선인 주사선과 윤곽 선분과 만나는 점들을 모두 구한 후 이를 주사 방향에 따라 오름차순 혹은 내림차순으로 정렬하는 것을 주사선의 시작위치부터

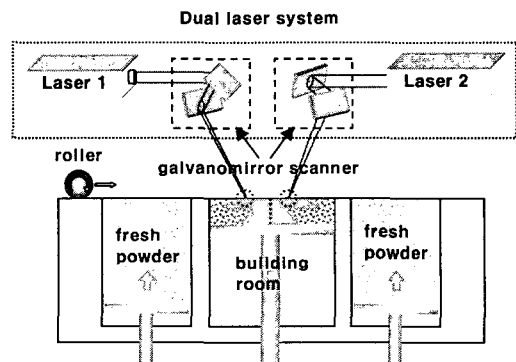


Fig. 1 Dual laser system in SFFS

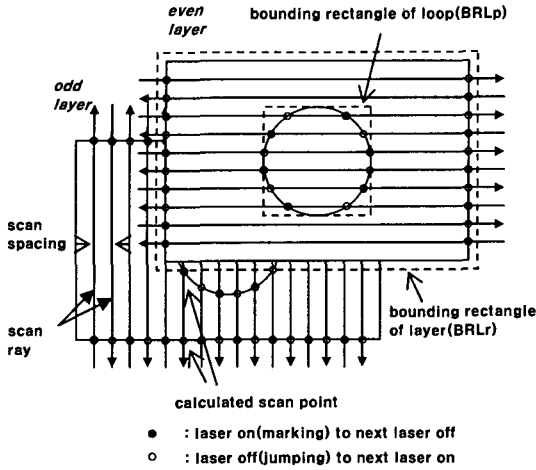


Fig. 2 Calculated scan points

끝 위치, 즉 BRLr(Bounding Rectangle of Layer)로 정의된 레이어 경계의 시작위치부터 끝위치까지 수행함으로써, 하나의 층에 대한 주사 경로를 생성할 수 있다. 이 때, 계산된 주사 점들은 항상 짝수개라서, 레이저 켜짐(on)과 꺼짐(off)의 쌍을 항상 가지게 된다. 즉, 정렬이 완료된 한 층에 대한 주사점들을 차례대로 레이저를 켜고 끄면서 이동함으로써 가공 부위와 이동 부위를 인식하게 된다.

그러나, 단순한 주사선과 윤곽 선분과의 교점을 구하는 방법에서는, Fig. 3 과 같이 윤곽점들이 주사점으로 채택되어질 때, 레이저의 켜짐과 꺼짐 신호의 오류로 인하여 Fig. 3 의 주사 경로를 나타내는 화살표와 같이 가공되어야 할 부분이 주사되지 않거나, 윤곽 밖의 부분에 주사가 이루어지는 경우가 발생한다. 이는 선분을 이루는 두 개의 점인 윤곽점을 제외한 위치에서 주사점이 구해질 때는 문제가 없으나, 윤곽점이 교점으로 구해질 때는 일부의 경우에 있어서 레이저 가공 부분(Marking)과 이동 부분(jumping)의 순서가 바뀌어져 잘못된 주사 경로가 생성된다.

이를 해결하기 위하여 Fig. 4 에서와 같이 윤곽점 P_1 이 주사점으로 계산되어질 경우 이웃하는 두 윤곽점 P_0, P_2 를 이용하여 $\overline{P_0P_1}$, $\overline{P_1P_2}$ 벡터로 나타낸 다음, 식 (1), (2)와 같이 주사선과 두 벡터가 이루는 각을 나타낼 수 있다. Fig. 3 에서 윤곽점이 주사점으로 계산되어질 경우, 식 (1), (2)로부터 구해진 주사선과 각 벡터와의 각도로부터 식 (3)의 조건을 만족할 경우는 주사점으로 채택하고 그렇지 않을 경우는 버림으로써 오류를 없앨 수 있다. Fig. 2 에서와 같이 짝수층은 X 축 방향, 홀수

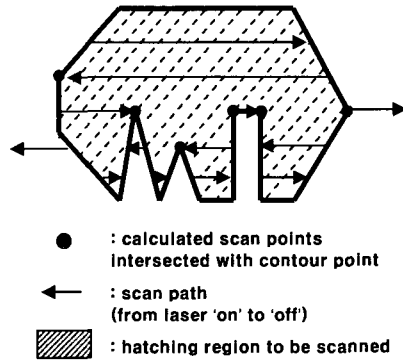


Fig. 3 Wrong scan path

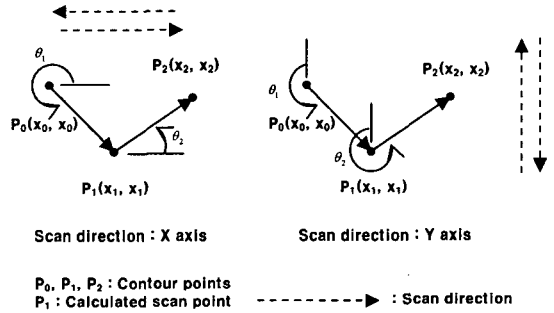


Fig. 4 Vector representation between neighborhood segments

층은 Y 축 방향의 주사 경로를 생성하기 때문에, 각각의 주사 방향에 따라서 θ_1 과 θ_2 를 Fig. 4 와 같이 다르게 정의한다.

Fig. 5 는 Fig. 3 과 같이 잘못된 주사 경로를 수정하기 위해서 식 (1)~(3)을 적용하여 윤곽점이 주사점으로 계산되어졌을 때 선택적으로 이를 저장함으로써 올바른 주사 경로를 생성함을 보여주고 있다.

$$\theta_1 = \cos^{-1}\left(\frac{x_1 - x_0}{\sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2}}\right) \quad (1)$$

$$\theta_2 = \cos^{-1}\left(\frac{x_2 - x_1}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}}\right) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} 0^\circ < \theta_1 \leq 180^\circ \text{ and } 0^\circ \leq \theta_2 < 180^\circ \\ 180^\circ < \theta_1 \leq 360^\circ \text{ and } 180^\circ \leq \theta_2 < 360^\circ \end{aligned} \quad (3)$$

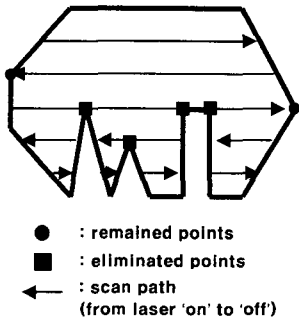


Fig. 5 Modified scan path

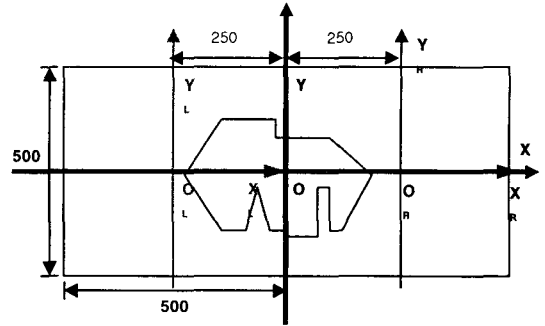


Fig. 7 Transformation of coordinate system for dual laser scan path

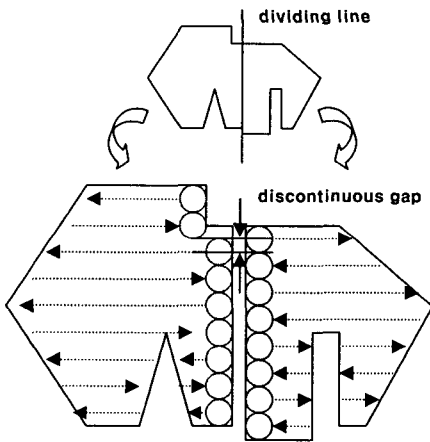


Fig. 6 Discontinuous dual laser beam position

3.3 좌표 변환을 통한 듀얼 레이저 주사 경로 생성

모든 오류 상황을 처리한 최적화된 싱글 레이저 주사 경로가 완성되면 좌표계 변환을 통하여 듀얼 레이저 주사 경로를 생성한다. 슬라이싱 단면을 분할하여 각각을 독립적으로 주사 경로를 생성할 경우 주사선의 시작 위치가 달라지기 때문에 Fig. 6 과 같이 접합부위에서의 빔이 어긋날 수 있으며, 이는 강도 및 표면의 질을 떨어뜨릴 수 있는 요인이 된다. 따라서 싱글 레이저 주사 경로를 분할하고 Fig. 7 과 같이 양분된 좌표계로 좌표변환을 취함으로써 듀얼 레이저 주사 경로를 생성할 수 있다. 식 (4)는 싱글 좌표계에서 듀얼 좌표계로의 변환을 나타낸다. 여기에서, O, O_L, O_R 은 각각 싱글 레이저 좌표계의 원점, 레이저 1 좌표계의 원점, 레이저 2 좌표계의 원점을 나타내며, T_L 과 T_R 은 레이저 1, 2 의 주사 경로 생성을 위한 좌표계 변환을 나타낸다.

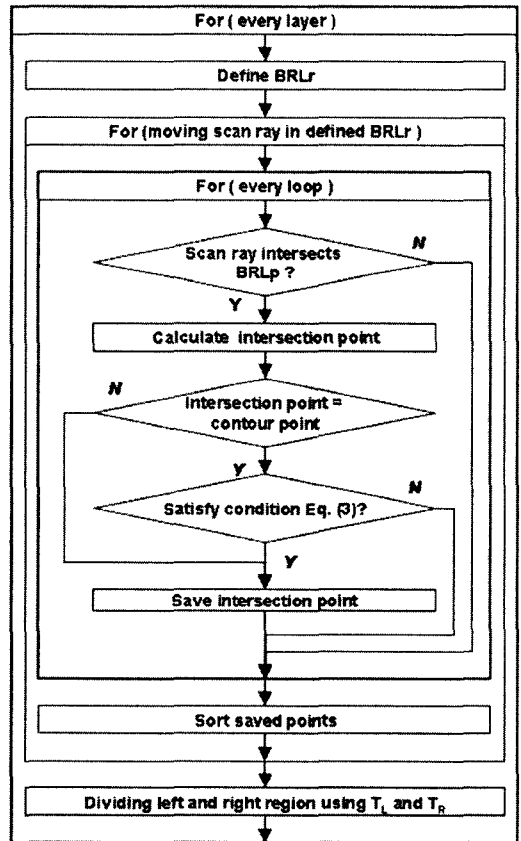


Fig. 8 Flowchart for generation of dual laser scan path

Fig. 8 은 지금까지 언급한 듀얼 레이저 주사 경로 생성에 대한 흐름도를 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 T_L : (x,y) &\rightarrow (x+250,y) \\
 T_R : (x,y) &\rightarrow (x-250,y)
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

3.4 주사 제어

싱글 레이저 주사 경로 생성 알고리즘 및 좌표 변환을 통하여 듀얼 레이저 주사 경로가 생성이 완료되면, 스캐너를 제어하기 위한 주사 경로 파일이 생성되며, 이는 동일한 형상을 재가공하고자 할 경우, 주사 경로 파일만으로 가공을 수행할 수 있게 하여 제작 시간을 단축시킬 수 있다. Fig. 9는 생성된 주사 경로 파일을 나타내며, 이로부터 각각의 스캐너는 독립적으로 구동되며, 가공을 수행하게 된다. 주사 경로 파일로부터 각각의 스캐너에게 laser 1 과 laser 2 를 구분하여 신호를 전달하며, laser on/off 를 식별하여 가공을 위한 'Mark', 이동을 위한 'Jump' 명령을 수행하게 된다. 이는 스캐너 버퍼에 한 층에 대한 이동 및 가공 명령을 모두 보낸 후 좌우측 스캐너가 동시에 작업이 이루어지며, 분할된 영역의 가공이 모두 끝난 후 새로운 재료가 공급되는 것을 반복 수행함으로써 적층이 이루어지게 된다. Fig. 10 은 듀얼 레이저 주사 제어 알고리즘을 나타낸다.

Layer number	X	Y	Laser on/off	Laser 1/2	Param.
0	215.5000	95.5000	0	0	0
0	175.0000	95.5000	1	0	0
0	175.0000	96.0000	0	0	0
0	216.0000	96.0000	1	0	0
0	216.5000	96.5000	0	0	0
:	:	:	:	:	:
:	:	:	:	:	:

Fig. 9 Scan path file

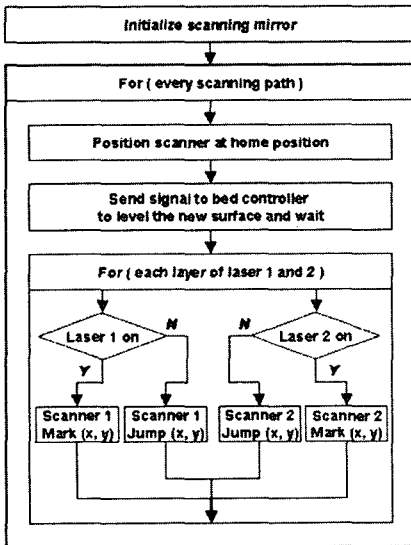


Fig. 10 Flowchart for controlling scanner

4. 주사 경로 검증 및 적용예

4.1 싱글 레이저 주사 경로

지금까지 언급한 주사 경로 생성 알고리즘을 적용하여 기계부품으로부터 주사 경로를 생성한다. Fig. 11 은 삼각형 Facet 으로 이루어진 STL 파일을 나타낸다. Fig. 11 의 기계 부품 형상으로부터 상용 소프트웨어를 이용하여 Fig. 12 와 같이 슬라이싱 데이터를 추출하고, 이로부터 Fig. 13 과 같은 싱글 레이저 주사 경로를 생성할 수 있다. Table 1 은 STL 파일 및 슬라이싱 데이터의 정보를 나타낸다.

Table 1 STL file and layer information

Model size (mm×mm×mm)	Layer thickness(mm)	The number of layer
446.0×309.2×58.8	0.1	588

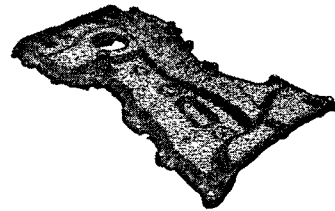


Fig. 11 STL file view of mechanical part

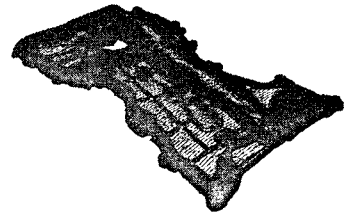


Fig. 12 Sliced sections



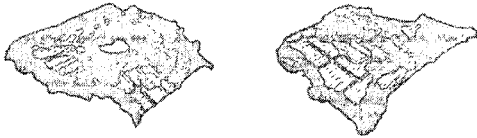
Fig. 13 Generated single laser scan points

4.2 듀얼 레이저 주사 경로

Fig. 14 는 Fig. 12 에서 생성된 싱글 레이저 주사 경로를 Y 축 분할선을 중심으로 좌표 변환을 통하여 생성된 각각의 레이저에 해당하는 듀얼 레이저 주사 경로를 나타낸다.

4.3 주사 경로 검증

싱글 레이저 및 듀얼 레이저 주사 경로는 Fig. 15, Fig. 16 과 같이 자체 개발한 프로그램에서 임의의 층에 대한 주사 경로를 확인할 수 있다. 또한 개발된 프로그램은 싱글 및 듀얼 레이저 주사 경로 뷰어와 더불어 STL 파일을 보여줄 수 있으며, 주사 제어에 필요한 파라메타를 설정하고 직접 주사를 실행할 수 있는 기능을 가지고 있다. Fig. 15 는 STL 파일과 오른쪽 상단의 200 번째 층에 대한 싱글 레이저 주사 경로를 나타낸다. Fig. 16 은 200 번째 층에 대한 듀얼 레이저 주사 경로를 나타낸다.



(a) Scan points for laser 1 (b) Scan points for laser 2
Fig. 14 Generated dual laser scan points

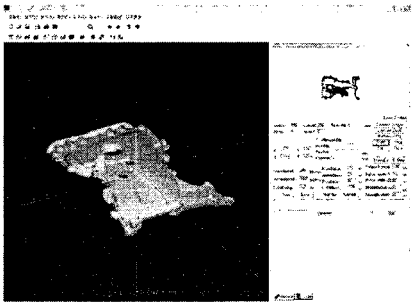


Fig. 15 Single scan path in developed program

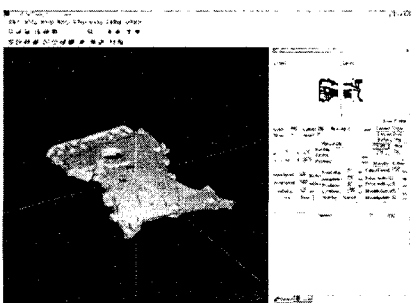


Fig. 16 Dual scan path in developed program

5. 시편 제작 실험 및 평가

5.1 실험 시편 제작

듀얼 레이저로 제작된 형상은 분할선에서 각각의 레이저 빔이 제대로 중첩이 되지 않아 기계적 강도가 약할 수 있다. 따라서 중첩 영역의 크기에 따른 인장 강도를 파악하기 위하여 Fig. 17 과 같은 시편을 모델링하여 직접 제작을 한다. 모델링된 시편의 중앙 부위 5 개의 시편은 각 위치마다 다른 주사 경로 패턴을 가지게 되며 좌우측 5 개씩의 시편은 각각의 싱글 레이저 주사 경로로 제작이 되어 기준 시편이 된다. 중앙에 위치한 5 개의 시편은 Fig. 18 과 같이 홀수 층마다 Y 축으로부터 좌우측으로 적당한 크기만큼 치우쳐진 주사 경로가 생성되며, 차례대로 0mm, 3mm, 6mm, 9mm, 12mm 의 중첩 영역의 크기를 가진다. Fig. 19 는 각기 다른 주사 경로로부터 실제 장비에서 제작된 시편을 나타내며 Table 2 는 가공 조건을 나타낸다.

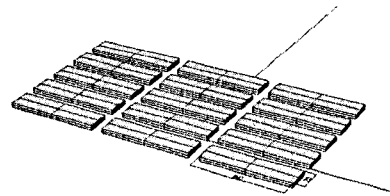


Fig. 17 Modeled specimens

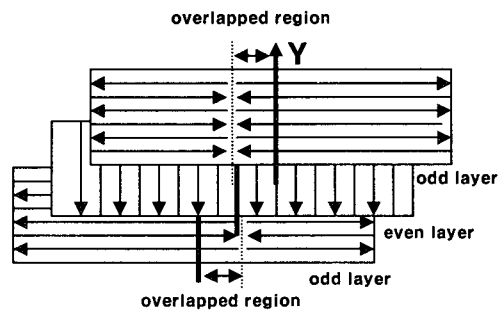


Fig. 18 Overlapped region

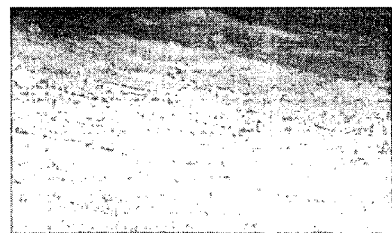


Fig. 19 Fabricated specimens by different paths

Table 2 Fabrication conditions

Scan space(mm)	Scan speed(m/s)	Laser power(W)	Building room temperature(°C)
0.4	5	15	165

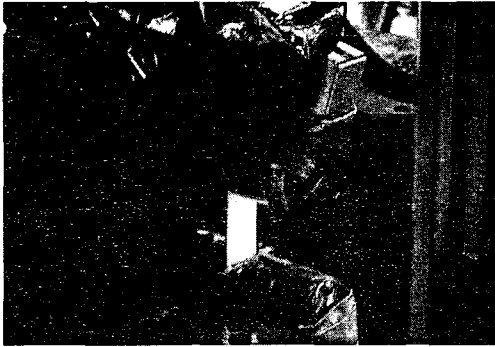


Fig. 20 Tensile test for fabricated specimens with different scan paths

5.2 중첩 영역의 크기에 따른 인장 강도 실험

Fig. 20 은 제작된 시편에 대해서 인장 강도 실험을 나타낸다. INSTRON 사의 4485 인장 시험기를 이용하였으며 싱글 레이저에서 가공된 시편 1 개와 각기 다른 듀얼 레이저 주사 경로를 가진 5 개의 시편에 대해서 인장실험을 수행하였다.

Fig. 21 은 6 개 시편에 대한 인장 실험 결과를 변위-하중 그래프로 나타낸 것이다. 듀얼 레이저를 이용해서 가공된 5 개의 시편에 대한 인장 강도는 싱글 레이저를 이용하여 얻어진 시편에 대한 것보다 좋지 않았으나, 중첩 영역의 크기를 증가 시킬수록 인장 강도가 증가함을 알 수 있다. 이는 제작된 시편이 연성보다는 취성이 강한 재료로써 크랙이 발생하는 위치가 각 층마다 다르고 이로 인하여 전체적인 강도에 증가를 가져온 것으로 여겨진다.

특히 중첩 영역이 0 인 경우는 분할된 단면에 대하여 단순히 주사 경로를 생성한 경우로써 인장 강도가 현저히 좋지 않았으며, 중첩 영역을 증가 시켜 제작된 시편의 인장 강도가 단순 영역 분할에 의해 제작된 시편의 강도에 비해 약 3 배 정도 향상됨을 알 수 있었다.

Fig. 22 는 중첩 영역의 크기에 따라서 인장 강도의 변화를 나타내는 그래프로 중첩 영역이 증가할수록 인장 강도가 증가함으로 보여주고 있다.

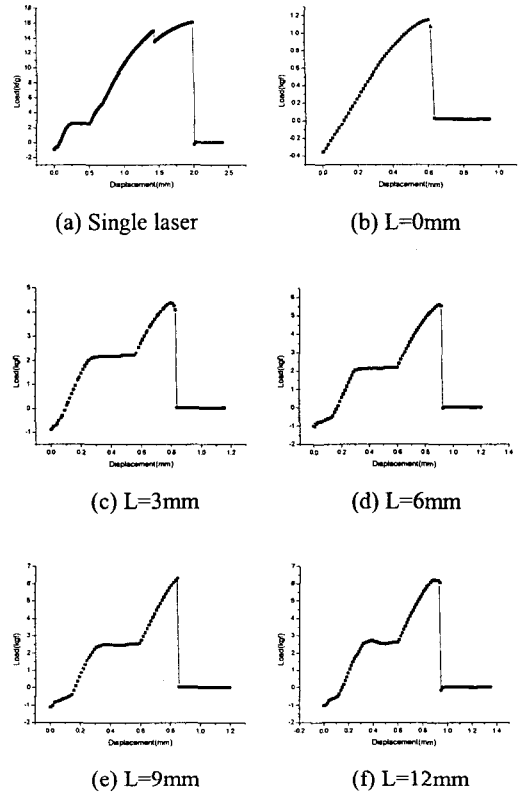


Fig. 21 Results of tensile test according to length of overlapped region(L : Length of overlapped region)

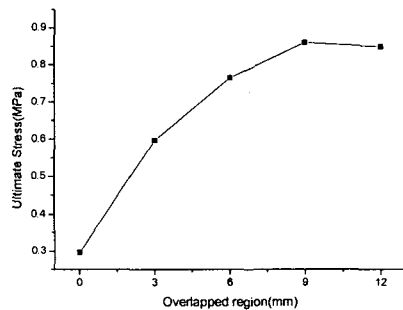


Fig. 22 Ultimate stress according to length of overlapped region

5.3 중첩 영역의 크기에 따른 접합 부위의 외관에 대한 광학 측정

Fig. 23 은 3mm, 6mm, 9mm, 12mm 의 중첩 영역을 갖는 시편에 대해서 중첩이 발생하는 중앙 부위에서의 외관 상태를 광학 현미경을 이용하여 측정 한 것이다. 인장 강도의 향상을 위하여 중첩 영역의 크기를 증가시킴으로써 접합 부위에서의 외관

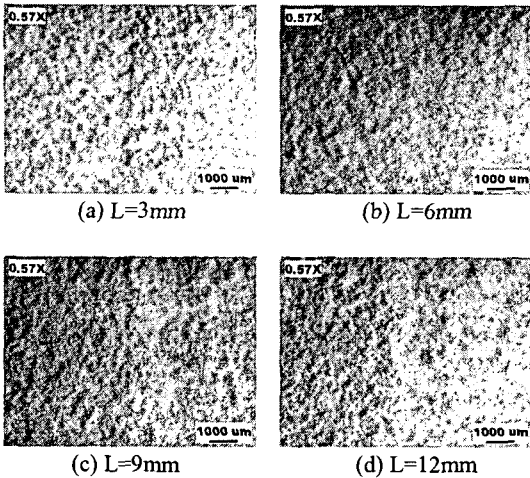


Fig. 23 Surface inspection according to overlapped region(L : Length of overlapped region)

품질을 떨어뜨릴 수 있다. Fig. 23 에서 알 수 있듯이 접합 부위에서 듀얼 레이저로 가공된 흔적이 나타나지만, 비교적 외관상 고른 접합이 이루어졌음을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 대형 형상 가공을 위해서 듀얼 레이저를 이용하는 시스템에 적용할 수 있는 주사 경로 생성에 대해서 다루었다.

듀얼 레이저 주사 경로는 각각의 레이저 빔의 위치에 대한 동기를 맞추기 위해서 싱글 레이저 주사 경로를 생성한 후 분할선을 중심으로 좌표 변환을 통하여 생성된다. 싱글 레이저 주사 경로는 듀얼 레이저 주사 경로로 변환되기 이전에 잘못된 주사 경로를 유발시킬 수 있는 상황, 특히 윤곽점이 주사점으로 계산이 되어질 때, 윤곽선에 대한 벡터 표현을 이용하여 주사선과의 각도로부터 선택적으로 주사점을 채택하였다. 기계 부품에 대한 STL 파일을 이용하여 싱글 및 듀얼 레이저 주사 경로를 생성하였으며, 자체 개발된 프로그램을 이용하여 이를 검증하였다.

또한 분할된 부위에서의 기계적 강도를 해석하고 이를 향상시키기 위해서, 각기 다른 중첩 영역을 가진 주사 경로를 생성하여 실제 장비에서 가공하였으며, 인장 시험기를 이용하여 인장 강도를 측정하였다. 중첩 영역의 크기가 증가할수록 인장 강도는 증가함을 알 수 있었다. 그리고 분할부위에서의 표면을 광학 현미경으로 측정하여 접합 상태를 확인하였으며, 외관상 비교적 고른 접합 상태를 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 중기거점사업 중 “디지털 3 차원 실물복제기 개발” 과제의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Chua, C. K., Leong K. F. and Lim C. S., 2003, “Rapid Prototyping : Principles and Applications,” *World Scientific Publishing*, 2nd Edition.
- (2) Hur, S. M., 2002, “Generation of CAD Data for Rapid Product Development in Reverse Engineering,” Ph. D. Thesis, Pusan National University.
- (3) Kim, H. C., 2003, “Internet-based Intelligent CAD/CAM System for Rapid Product Development,” Ph. D. Thesis, Pusan National University.
- (4) Yang, H. J., 2003, “Development of Master Model-Based Fabrication Methods for the Plastic Parts of Prototype Car,” Ph. D. Thesis, Pusan National University.
- (5) Kenwei Chen, 1998, “INTELLIGENT SCANNING IN SELECTIVE LASER SINTERING,” Ph. D. Thesis, The University of Texas at Austin.
- (6) Park, S. M., 2000, “Advanced Data Exchange for Solid Freeform Fabrication,” Ph. D. Thesis, The University of Texas at Austin.
- (7) Yang, J., Bin, H., Jhang, X., and Liu, Z., 2003, “Fractal Scanning Path Generation and Control System for Selective Laser Sintering(SLS),” *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 34, pp. 293~300.
- (8) Yang, Y., Loh, H. T., Fuh, J. Y. H. and Wang, Y. G., 2002, “Equidistant Path Generation for Improving Scanning Efficiency in Layered Manufacturing,” *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 8, No. 1, pp. 30~37.