

폴리스티렌 폼 패턴의 레이저 가공 특성

김재도[†] · 강경호^{*}

(2002년 9월 26일 접수, 2003년 3월 5일 심사완료)

Laser Processing Characteristic of Polystyrene Foam Pattern

Jae-Do Kim and Kyung-Ho Kang

Key Words: Rapid Prototyping(쾌속조형), Polystyrene Foam(폴리스티렌 폼), Pattern(모형), Laser Material Processing(레이저 가공)

Abstract

Polystyrene foam is easily melted and vapoured by heat, has a proper quality in the pattern manufacturing and has a low price. The objective of this study is to develop a rapid prototyping method for polystyrene foam pattern manufacturing to use the eliminative pattern casting (EPC). Applying for the rapid prototyping concept reversely, the unnecessary part of section is vapored away by heat source of laser beam. In order to examine the applicability between laser beam process and polystyrene foam material, the basic experiments such as hole, line, plane and contour process are carried out. With these results, various three-dimensional shape patterns are made and this rapid prototyping tool for polystyrene foam manufacturing.

기호설명

- a : 가공 깊이
 b : 가공 폭
 D : 레이저 빔 직경
 d : 레이저 빔 중첩길이
 H : 빔 중첩 전의 커스(cusp) 높이
 h : 빔 중첩 후의 커스 높이

1. 서론

일반적으로 쾌속 조형법은 CAD/CAM, 레이저, 재료, 제어기술 등이 복합된 첨단 가공 기술로서

기존의 절삭기술 방법과는 달리 CAD 데이터를 얇은 두께로 절단해 단면형상을 얻은 후 각 단면들을 적층, 원하는 형상을 제작하는 방법이다. 따라서 복잡한 외관 또는 제품의 내부 형상까지도 손쉽게 자동으로 제작할 수 있어 전자제품의 금형은 물론 자동차부품, 금형제작 등의 분야에도 폭넓게 이용할 수 있다는 장점이 있다.^(1~3)

본 연구에서는 이러한 쾌속 조형 기술(Rapid prototyping)을 응용하여 자동차용 프레스 금형과 같은 중대형의 주조품 제작시에 사용되고 있는 폴리스티렌 폼 모형(pattern) 제조에 관해 연구하였다. 이러한 소실모형주조법(EPC)은 폴리스티렌 폼으로 원하는 형상의 패턴을 제작한 다음 이 모형을 점결제를 첨가하지 않은 건조한 모래 중에 묻고 모형에 용탕을 직접 주탕하여 주물을 제작하는 방법이다.

현재 폴리스티렌 폼 패턴의 제작은 거의 대부분

[†] 책임저자, 회원, 인하대학교 기계공학과

E-mail : kimjaedo@inha.ac.kr

TEL : (032)860-7316 FAX : (032)860-1716

* 인하대학교 대학원 기계공학과

분 수작업에 의해 제작되고 있으며, 이로 인한 작업시간과 비용의 문제가 발생한다. 따라서 수치제어 방식의 레이저 가공 방식을 통해 이러한 문제점을 보완할 수 있다는 장점이 있다. 폴리스티렌 폼은 고온에 매우 약하므로 레이저빔에 의해 쉽게 용융, 기화 과정을 거치며 일정량의 폴리스티렌 폼은 제거된다.

일반적으로 쾌속조형에서는 조형하고자 하는 형상 CAD 데이터를 STL 파일로 변환한 후, 일정한 두께의 슬라이싱 데이터(X-Y평면 데이터)로 변환한다. 이 슬라이싱 데이터를 이용하여 기존의 쾌속조형의 방식과는 반대의 개념으로 슬라이스 데이터를 이용하여 각 단면의 원하는 형상을 제외한 나머지의 제거되어야 할 부분을 레이저빔으로 주사하여 용융·기화시켜 원하는 형상만 남기는 과정을 거치며 패턴을 제작하게 된다.^(4~6)

본 연구에서는 비교적 형상이 큰 중대형 패턴 제작에 초점을 두었으며 허용 오차가 최대 2mm 이하의 패턴에 적용 목표로 두었다. 최적의 가공 데이터를 도출하기 위하여 폴리스티렌 폼 패턴을 제작할 수 있는 레이저 가공 장치를 설계하였으며, 가공자동화를 위해 PC를 통해 빔의 경로를 제어할 수 있도록 하였다. 또한 레이저 가공의 조건 및 데이터를 도출하기 위한 실험과 폴리스티렌 폼과 관련한 여러 변수 조건들에 대한 실험을 진행하였다.

2. 실험 장치 및 공정

2.1 실험 재료 및 장치 구성

2.1.1 실험 재료

실험에 사용되는 폴리스티렌 폼은 현재 소실모형주조 공정에 사용되는 재료와 같은 밀도 30Kg/m³의 고밀도 폴리스티렌 폼을 사용하였다. 레이저 빔을 폴리스티렌 폼에 조사하면 재료의 표면은 고열에 의하여 불균일 표면 용융 현상이나 표면 경화 현상이 발생하게 된다. 이러한 현상이 현저해지면 가공에서 가공면의 품질이나 가공 정밀도면에서 좋지 않은 영향을 미치게 된다. 비교적 밀도가 높은 폴리스티렌 폼은 면이 매우 균일한 특성을 가지며 저밀도 재료에 비해 이러한 영향을 적게 받는다.

Table 1 Specification of CO₂ laser

wavelength (μm)	10.6
power (W)	30
beam mode	TEM ₀₀
beam size (mm)	3.5

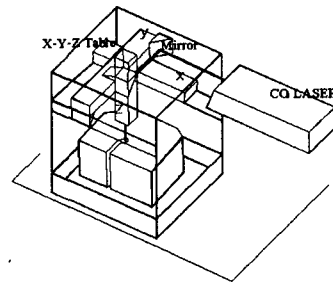


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

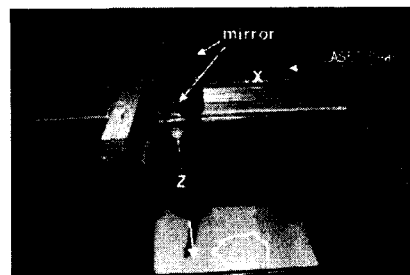


Fig. 2 Photograph of XYZ table and optic device

2.1.2 실험 장치

본 실험에 사용된 실험 장치 구성은 Fig. 1과 같다. 본 장치는 CO₂ 레이저와 레이저 빔의 가공 경로 데이터를 입력받아 빔의 위치 및 이송 속도를 결정하는 XYZ 테이블(Fig. 2), 빔을 폴리스티렌 폼에 주사시키기 위한 광학부, XYZ 테이블 동작제어와 레이저의 출력을 단속하기 위한 PC로 구성된다. 레이저의 사양은 Table 1과 같다.

2.2 가공 공정

전체적인 레이저 가공 공정은 Fig. 3처럼 5가지 공정으로 나누어 볼 수 있다.

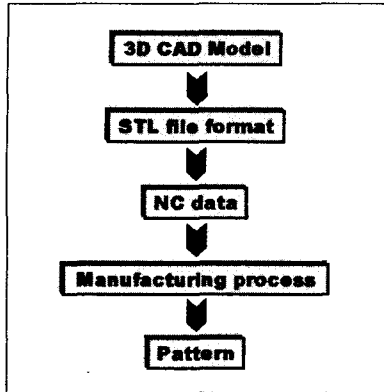


Fig. 3 Manufacturing process

본 시스템으로 패턴을 만들기 위하여 CAD 소프트웨어로 3차원 패턴을 솔리드 모델링 한 후 STL 파일로 변환한다. 이 데이터를 본 시스템을 구동하기 위한 소프트웨어에 입력하여 가공을 진행하게 된다. STL 파일로부터 3차원 CAD 모델의 X-Y 평면의 형상 정보를 추출할 수 있다. Z방향의 슬라이스 평면의 정보를 통해 레이저 빔의 가공 경로 및 레이저 단속을 결정한다(NC data). 실제가공은 대체로 기존의 쾌속조형의 방식과 같은 원리로 진행한다. 가공 시간을 줄이기 위해서 먼저 최외곽면에 대해 절단 공정을 진행한 후 위에서 서부터 한층 한층씩 제거하여 나가는 과정을 거치며 가공이 완료된다.

3. 실험

3.1 구멍(hole) 가공

레이저 빔을 폴리스티렌 폼에 조사하면 폴리스티렌 폼은 레이저 빔의 출력에 따라 일정 직경으로 제거된다. 이 때 가공되어지는 직경은 레이저 빔의 열 영향에 의해 빔 직경(spot size)보다 크게 가공되어 지므로 각 출력 영역에서의 가공 직경과 레이저 빔 직경과의 오차를 측정하는 것이 매우 중요하다.

레이저 빔의 출력과 보호가스의 분사 압력에 따라 홀 가공을 실시한 결과는 Fig. 4와 같다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 레이저 출력이 증가할수록 제거되는 직경이 증가하고 있으며 Ar 가스의 분사압력이 증가하면 직경이 감소함을 알 수 있다. 이는 가스의 분사로 인한 가공부위의 냉각효

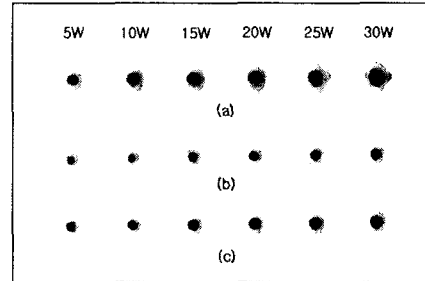


Fig. 4 Photograph of hole process at various laser power (a) no shielding gas (b) Ar 1.0kgf/cm² (c) Ar 0.5kgf/cm²

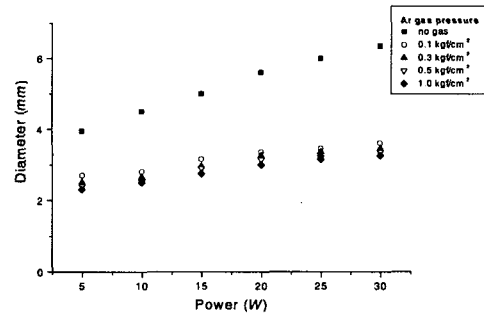


Fig. 5 Hole diameter at various laser power and gas pressure

과에 따른 결과임을 알 수 있다. 또 보호가스 분사가 없을 경우와 있을 경우의 직경의 차가 매우 큰 것으로 보아 분사로 인한 입력에너지의 손실이 큰 것으로 판단된다. 또한 Fig. 4에서의 그림에서 볼 수 있듯이 보호가스를 쓰지 않은 Fig. 4 (a)와 나머지 (b), (c)의 가공 품질을 비교하여 보면 (b), (c)의 가공 품질이 우수함을 보이고 있다. 이는 실제 가공에서 보호가스를 사용함으로써 가공물의 가공정밀도를 향상시킬 수 있음을 판단할 수 있다.

3.2 직선 가공

레이저 빔을 직선으로 폴리스티렌 폼에 주사하여 가공되어지는 깊이와 폭을 측정하는 것은 실제 가공에 있어서 중요한 가공 데이터가 된다. 따라서 100 × 70 × 50 (mm) 의 폴리스티렌 폼에 빔의 스캔 속도와 출력을 변화시키며 가공 깊이, 폭 및 가공 단면 형상 등을 측정하여 가공에 적절한 가공 조건을 도출하였다.

Table 2에 실험의 각 조건들을 나타내었다. Fig. 6에는 그 단면의 모습을 나타내었다. Fig. 6의 단면 형상을 관찰하여 보면 Fig. 6(a)와 (b)의 출력에서는 그 단면형상이 'V' 형의 모습을 보이고 있으나, (c)와 (d)에서는 'U' 형의 모습을 나타내고 있다. 'V'형은 이후의 반복가공에서 높은 커슥 높이를 형성하여 표면 거칠기가 좋지 않게 될 원인이 되므로 가공에 적절하지 않은 것으로 판단된다.

Fig. 7과 Fig. 8에는 스캔 속도와 출력에 따른 가공 깊이(a)와 폭(b)의 변화를 나타내었다. 측정 위치는 Fig. 6(a)에 나타낸 것과 같다. Fig. 8의 폭은 홀가공에서의 직경과 같은 의미이므로 Fig. 5의 결과의 모습과 비슷한 경향을 나타내고 있으며 대체적으로 선형적으로 변화하고 있음을 알 수 있다. 그러나 깊이의 경우 스캔속도에 민감하게 변화함을 알 수 있다.

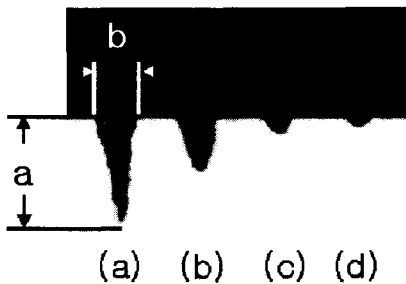


Fig. 6 Photograph of line scan at scan speed of 10mm/s (a) 25W (b) 20W (c) 15W (d) 10W

Table 2 Parameters for line scan experiment

laser power (w)	5, 10, 15, 20, 25, 30
scan speed (mm/s)	10, 20, 30, 40, 50
shielding gas pressure (kgf/cm ²)	0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0

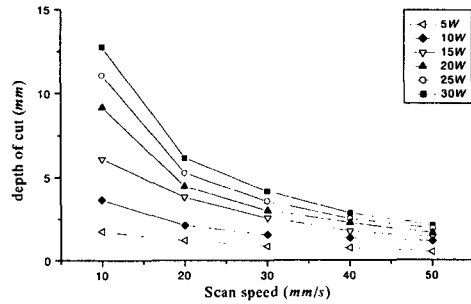


Fig. 7 Depth of cut at various scan speed and laser power (Ar 0.6kgf/cm²)

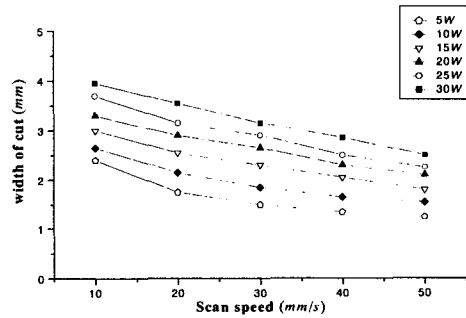


Fig. 8 Width of cut at various scan speed and laser power (Ar 0.6kgf/cm²)

3.3 평면 가공

본 실험에서는 Fig. 9와 같이 레이저빔을 일정 간격으로 주사하여 100 × 100 (mm)의 정사각형 모양으로 10회 반복하여 가공 평면의 상태를 관찰하였다. 이러한 실험은 일정한 레이저 출력과 스캔속도로 주사하여 일정 높이의 형상을 만들어 나가는 연속조형의 기본 가공 방식으로서 정확한 가공면의 품질 형성을 위한 적절한 가공 조건 설정이 중요하다.

Fig. 10에 실험 결과 중 일부를 나타내었다. Fig. 10(a)의 조건에서는 비교적 가공면의 깊이가 전체적으로 일정하고 면의 품질이 우수함을 보이고 있으나 Fig. 10(b)에서는 가공되어진 형상이 거칠고 일정치 못한 형상을 보임을 알 수 있다. 과용융된 폴리스티렌 폼이 미처 기화되지 못하고 다시 냉각 응고되어 높은 정도의 작은 응고물이 형성되어 있음을 알 수 있다. 레이저 출력이 높

을수록, 빔의 이송속도가 낮아질수록 과용융 현상과 열영향에 의한 경화 현상이 증가하는 현상을 보였다.

일정한 속도와 출력으로 가공하면 Fig. 11과 같이 일정한 깊이와 폭으로 반원 모양의 형상으로 가공된다. 가공 후 가공면에는 레이저빔이 지나간 흔적이 남게 되는데 이러한 흔적은 레이저빔의 이동 간격을 적절히 조절하여 표면 조도를 줄일 수 있다. Fig. 11(a)에서는 정확히 빔의 직경(D) 만큼의 간격으로 가공하였을 때이고 이 때 H 만큼의 흔적이 남게된다. 이를 줄이기 위해 Fig. 11(b)에서처럼 일정한 중첩 길이 d를 주어 가공하게 되면 중첩부에서는 재료가 흡수하는 에너지가 증가하므로 h 이하로 그 커슥이 감소하게된다. Fig. 12에는 중첩도에 따른 표면거칠기를 나타내고 있다. 중첩도가 0.4D 이후의 결과를 보면 반복 실험에 의한 결과의 분포 범위가 0.3D에 비하여 넓게 분포하고 있으며, 이는 가공 정밀도 유지에 있어서 0.3D와 비교하여 불리함을 알 수 있다. 중첩을 많이 할수록 거칠기는 좋아지고 있으나, 완전히 냉각되지 못한 인접한 가공된 부분(중첩부)에서의 과에너지 입력에 의해 가공면이 불규칙하게 변형하는 현상이 발생하므로, 따라서 비교적 표면 거칠기가 낮고 이러한 현상이 발생하지 않는 중첩길이 d=0.3D 정도의 범위에서 가공하는 것이 유리한 것으로 판단할 수 있다.

3.4 오프셋(offset) 및 보호가스

Fig. 13과 같이 가공의 오차 측정을 위해 레이저빔을 이동시키면서 가공 실험을 하였다. 이 실험에서 고려하여야 하는 중요한 것으로 빔경로와 실제 설계 형상 사이의 오차의 보정이다. 외곽면을 가공하기 위해서는 실제의 설계된 설계값과 레이저빔의 가공되어지는 직경과 열영향을 고려하여 실제의 크기보다 빔 반경만큼 크게 가공 경로를 주어야 한다. 이는 패턴 제작에 있어서 가공 정밀도를 결정하는 중요한 인자이다. 오프셋(cutting offset)량은 레이저 빔의 출력이나 빔 직경 등에 따라 결정되어야 한다. 전체적인 가공시간이나 가공 표면의 품질이 가장 우수한 레이저 출력 15W, 스캔 속도 30mm/s 에서의 오프셋은 Fig. 8을 참조하여

$$\text{Offset} = 0.5D + 1$$

로 설정할 수 있다.^(6,7) 여기서 D 는 레이저 빔

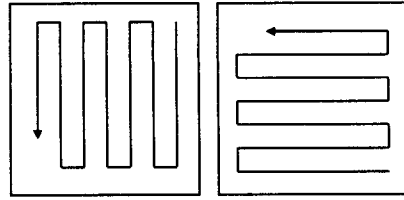


Fig. 9 Laser beam path in plane experiment

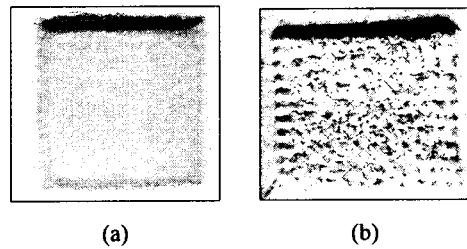


Fig. 10 Photograph of plane experiment at (a) 15W (b) 30W with 30 mm/s scan speed

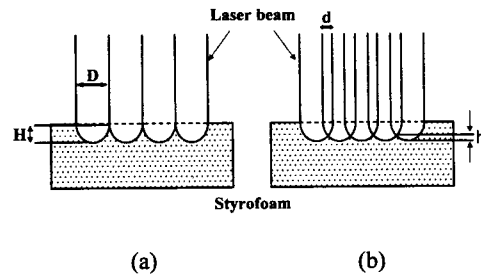


Fig. 11 Plane process (a) without overlapping (b) with overlapping

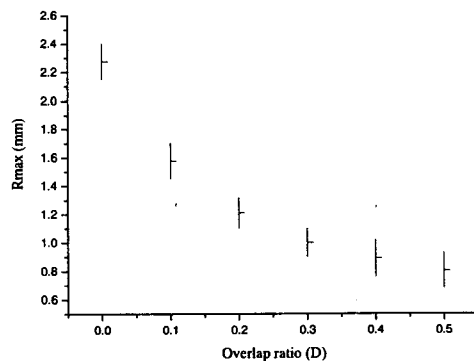


Fig. 12 Roughness and overlap at laser power 15W, scan speed 30mm/s

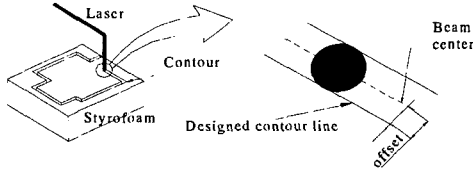


Fig. 13 Contour trimming process and compensation of laser beam path

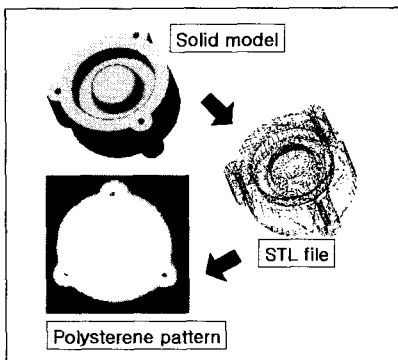


Fig. 14 Process flow to generate polystyrene pattern

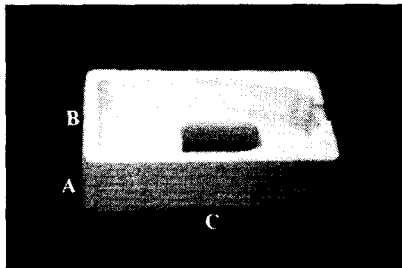


Fig. 15 Sample pattern (200 × 100 × 50 mm)

의 직경이다. 또한 오프셋의 방향은 빔이송의 방향의 백터와 수직 백터의 외적으로 구할 수 있다.^(8,9)

Fig. 15의 가공의 예에서 보면 실제 설계한 가공물의 크기는 200×100×50 mm이며, 각 모서리를 A, B, C라 할 때, 0.3D 만큼의 오프셋과 가스 분사를 설정하고 실험한 결과를 Fig. 16에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 오프셋 설정을 통하여 3-5mm 정도의 치수 오차를 줄일 수 있었으며, 가스 분사에 의해서도 오차를 줄일 수 있었다. Fig. 17에는 평면가공의 중첩 회수에 따른

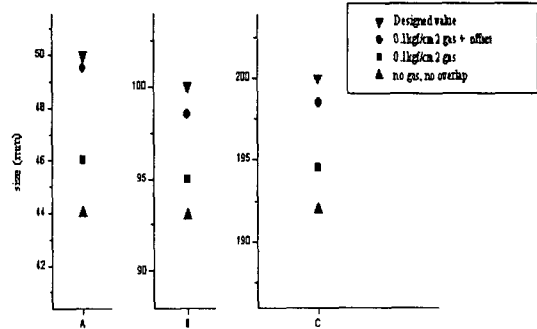


Fig. 16 Effect of offset and gas at the edge A, B, C

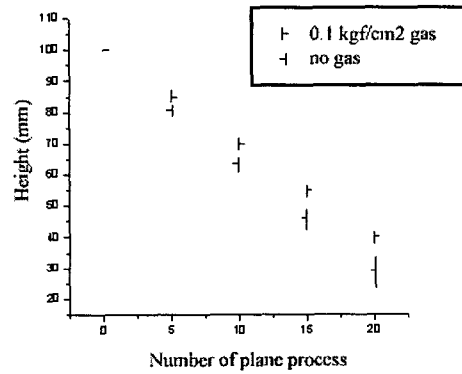


Fig. 17 Shielding gas effects

보호가스 영향과 치수 정밀도에 미치는 영향을 나타내었다. 두께 50mm 스티로폼에 사각 평면형상으로 반복 가공하였을 때 가공 깊이 변화를 보여주고 있다. 보호가스를 사용하였을 때는 비교적 일정한 깊이 변화를 가지고 가공되어지고 있으나, 가스를 사용하지 않았을 경우에는 가공 깊이가 점차 증가하며 가공 면의 상태가 불규칙하게 되는 것을 알 수 있다.

3.5 형상 제작

위 실험 결과 취득된 결과들을 이용하여 3차원 형상의 시작품을 제작하였다. Fig. 14와 같이 3차원 형상을 솔리드 모델링하여 STL 파일을 생성한 후, 각 층에 대한 NC data를 생성하여 3차원 형상을 제작하였다. 또한 Fig. 15과 같은 모형을 만들어 비교적 큰 형상의 모형에 대한 적용가능성을 알 수 있었다. 대형 제품의 제작에 있어서도 몇 부분으로 나누어 접착함으로써 효율적인

제작이 가능한 것으로 사료된다.

4. 결론

패속조형을 이용한 폴리스티렌 폼의 패턴가공에 있어서 레이저 빔과 폴리스티렌 폼의 가공특성을 파악하기 위한 실험을 진행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 폴리스티렌 폼의 레이저 가공에 있어서 레이저 빔의 이송속도와 출력 조절 및 빔의 단속이 중요한 인자임을 판단할 수 있었다.

(2) 폴리스티렌 폼에 레이저 빔이 주사될 때 폴리스티렌 폼의 용융현상과 기화현상이 거의 동시에 일어나며, 용융된 폴리스티렌 폼이 모두 기화하여야 가공품질이 좋아지며, 보호가스의 분사가 기화될 확률을 높여 주어 가공품질의 향상에 도움을 줌을 실험적으로 확인하였다.

(3) 빔의 가공에 의해 생기는 물결무늬의 커슥에 의한 높이 방향의 형상 오차는 다음의 슬라이스 평면 가공시에도 계속 영향을 주므로 형상 정밀도에 큰 영향을 미치므로, 가공시 레이저 빔의 이송에 있어 일정한 빔 중첩을 두어 가공면의 커슥의 높이를 감소시킬 수 있었다.

참고문헌

- (1) Kim, J., D., and Jeon, B., C., 1998, "Rapid Prototyping by Selective CO₂ Laser Sintering Using Bronze Powder," *Proc. of 1st APLS'98*, Cheju, April 27~29.
- (2) Murphy, M., Lee, C. and Steen, W. M., 1993, "Studies In Rapid Prototyping By Laser Surface Cladding," *ICALEO*, pp. 882~892.
- (3) Luqman, A., Lesley, E., and Jason, P., 1997, "Rapid Prototyping & Solid Freeform Manufacturing," *Canadian Cermics Quarterly*, pp. 104~107.
- (4) Lennings, A., and Broek, J., 1997, "Prototyping large sized objects using freeform thick layers of plastic form," *Solid Free Fabrication Symposium Proceedings*, pp. 97~104.
- (5) Park, J., H., 1998, "Development and Application of CAM System For Styrofoam Pattern Manufacturing of Automobile Press Mould," *Proc. of Soc. of CAD/CAM eng.*, pp. 249~253.
- (6) Choi, H., T., Kim, J., A., and Lee, S., H., 1995, "Development of Cross-Sectional Information Conversion System From STL File For Stereolithography," *J. of KSPE*, Vol. 12, No. 11, pp. 140~147.
- (7) Lee, W., J., Lee, Y., H., and Hong, Y. S., "Shape Information Conversion Arrangement For Rapid prototyping system," *J. of KIIE*, Vol. 18, No. 1, pp. 63~80.
- (8) Ahn, D., K., and Kim, J., A., 1994, "A Study on Laser Scan Path Generation for Manufacturing 3-d imensional Body Using StereoLithography," *Proc. of KSPE Conference in Autumn*, pp. 687~692.
- (9) Fumie, A., and Kozo, O., 1996, "Fundamental Study of Laser Rapid Prototyping of Metallic Parts," *Int. J. Japan Soc. Prec. Eng.*, Vol. 30, No. 3, pp. 278~279.
- (10) David, M., Carl, D., and John, W., 1997, "Variable Beam Size SLS Workstation and Enhanced SLS Model," *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 3, No. 1, pp. 4~11.
- (11) Ahn, D., G., Lee, S., H., Yang, D., Y., Shin, B., S., and Lee, Y., I., 2000, "Investigation of Cutting Characteristics of Linear Hotwire Cutting System and Bonding Characteristics of Expandable Polystyrene Foam for Variable Lamination Manufacturing (VLM) Process," *J. of KSPE*, Vol. 17, No. 12, pp. 185~194.
- (12) Kim, J., D., Myung, K., H., and Jeon, B., C., 1999, "Selective Laser Sintering Using TrueForm and Polypropylene Powder," *J. of the KSME*, Vol. 23, No. 10, pp. 1693~1701.
- (13) Kim, J., D., and Jung, J., K., 1999, "Laser Heat Treatment using Polygon Mirror," *J. of the KSME*, Vol. 23, No. 12, pp. 2236~2242.
- (14) Kim, J., D., 1999, "Laser Heat Treatment Using Pyramid Polygon Mirror", *Proc. of 7th Int'l Seminar of IFHT*, Budapest, Hungary, pp. 165~168
- (15) Kim, J., D., 1998, "CO₂ laser Welding of Zinc-Coated Steel Sheets," *KSME International Journal*, July, Vol. 12, No. 4, pp. 606~614.