한국정밀공학회지 제 36 권 제 9 호 pp. 859-865 September 2019 / 859
J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 36, No. 9, pp. 859-865 https://doi.org/10.7736/KSPE.2019.36.9.859
ISSN 1225-9071 (Print) / 2287-8769 (Online)

평행 CO_2 레이저 빔을 이용한 EPS 폼 절단 가공의 최적 절단 조건에 대한 연구

A Study on Optimal Cutting Condition of EPS Foam Cutting Based on Collimated CO_2 Laser Beam

김학민[1], 심준혁[1], 정상열[1], 홍대희[1,#]
Hakmin Kim[1], Joonhyeok Sim[1], Sangyeol Jeong[1], and Daehie Hong[1,#]

1 고려대학교 대학원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Graduate School. Korea University)
Corresponding Author / E-mail: dhhong@korea.ac.kr, TEL: +82-2-3290-3369
ORCID: 0000-0002-2773-2629

KEYWORDS: CO_2 Laser (CO_2 레이저), Expanded polystyrene (발포 폴리스틸렌), Collimated beam (평행빔)

It is possible to produce irregular structures quickly and accurately using rapid prototyping technology. However, there are still some obstacles in fabricating large-scale structures. In order to overcome these technical hitches, equipment has been developed for manufacturing irregular structures using EPS, making it an easy process. Conventional laser cutting systems can produce undesirable slopes in the structure when cutting EPS due to the divergence of the laser beam, resulting in step differences in the overall shape. Therefore, the objective of this study was to reduce the divergence of the laser beam using a concave lens and to find the optimal cutting conditions of the EPS through cutting experiments. As a result of the study, it was confirmed that the collimated beam cutting system can reduce the cutting slopes compared to the focused beam cutting system. In addition, experimental equations for depth of cut with cutting speed and laser intensity were derived.

Manuscript received: December 6, 2018 / Revised: June 3, 2019 / Accepted: June 4, 2019

1. 서론

최근 비정형 구조물을 쉽고 빠르게 제작할 수 있는 쾌속 조형 기술의 지속적인 연구를 통해 생산 속도와 정확도가 향상되고 있는 추세이다.[1] 하지만 대형 구조물의 제작은 여전히 고가이며 제작 시간이 많이 걸리는 단점이 존재한다.

따라서 가공이 쉬운 발포 폴리스틸렌(EPS)을 이용하여 대형 구조물인 광고용 조형물, 비정형 거푸집, 자동차 디자인 모델 등을 제작할 수 있는 여러가지 형태의 EPS 폼 가공 장비들의 개발이 진행되고 있다.[2] EPS 폼 가공 장비는 주로 재료를 절단하고 적층하는 Laminated Object Manufacturing (LOM) 방식으로 연구가 진행되었다. LOM 방식의 장점은 후처리 공정이 필요 없으며 형상 단면의 외곽 부분만 잘라 필요한 부분을 적층하여 형상을 제작하기 때문에 비교적 큰 사이즈를 신속하게 제작할 수 있다.[3-5] 대표적인 연구로는 열선을 이용하여 EPS 폼을 절단하는 방식인 KAIST에서 개발한 Variable Lamination Manufacturing (VLM)[6]과 Croma 사와 Cirtes 사의 협동 개발한 Stratoconcept[7]와 Korea University에서 개발한 Freeform Formwork 3Dprinter (F3D)[8] 등이 있다. 다른 절단 방식으로는 Deft University of Technology에서 개발한 Freeform Thick Layered Object Manufacturing (FF-TLOM)이 있으며, 열칼을 이용하여 절단을 한다.[9] CAM-LEM 사에서 제작한 CAM-LEM 장비는 CO_2 레이저를 사용하여 EPS 폼을 절단한다.[10]

언급된 모든 장비들은 기술적으로 실현 가능성이 검증되었지만, 장비에 사용된 절단 방식을 개선할 필요성이 있다. 열선 장비의 경우, 장비를 오래 사용할 시에 열선은 열에 의해 늘어나며 한계점을 넘게 되면 끊어지게 되어 열선 교체 작업이 필수적이다. 또한 열선의 이동경로를 확보해주어야 하기 때문에 가공 부분을 고정하기 어려워 가공 오차가 발생할 수 있다. 특히 절단 각도가 증가할수록 장비 크기에 비해 절단 범위가 좁아지는

Copyright © The Korean Society for Precision Engineering
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

단점을 가진다. 따라서 공구의 교체 및 재료의 정밀 고정이 필요 없고 제어가 쉬운 장점을 가진 CO_2 레이저 절단 방식이 대안이 될 수 있다. 그러나 CO_2 레이저 빔은 집속된 이후 발산하기 때문에 초점 위치가 중요하다. 초점 위치가 적절하지 않으면 윗면, 아랫면의 절단 너비가 달라지게 되어 경사면이 생기게 되며, 적층 시 단차가 발생하게 된다. 또한 CO_2 레이저는 재료별로 최적 절단 조건이 존재한다.[11,12]

본 논문에서는 집속된 CO_2 레이저 빔의 발산 현상을 오목렌즈를 이용하여 감소시켜 평행빔을 출력하고 이를 이용하여 EPS 폼 절단 시 발생하는 절단 경사를 감소시켰으며 평행 레이저 빔의 출력 세기와 이동속도에 따른 EPS 폼의 절단 두께(Cutting Depth)와 절단 너비(Kerf Width)를 실험적으로 분석하여 최적의 절단 조건을 구하였다.

2. CO_2 레이저 빔의 특징

2.1 레이저 빔의 발산

레이저 재료가공에서는 대부분 차수가 작은 TEM_{00} 모드의 레이저를 사용한다. 차수가 작을수록 집속된 빔의 직경이 작으며 큰 출력 밀도를 가질 수 있기 때문에 재료 가공에 적합하다. TEM_{00} 모드의 레이저 빔은 볼록렌즈를 통과 후 굴절되어 초점거리 전후로 식(1)과 같이 발산하게 된다. Fig. 1은 발산하는 횡단면형태를 나타낸다.[13]

$$w(z) = w_0\left[1+\left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

w_0는 빔 허리 위치의 빔의 반경이며, λ는 레이저 빔의 파장, z는 빔 허리로부터의 거리이다.

2.2 레이저 빔의 에너지 분포 및 절단 깊이

레이저 빔의 에너지 분포는 조사된 레이저 빔의 중심으로부터 멀어지면서 가우시안 분포를 가진다. 이러한 분포는 식(2)와 같다.[13]

$$I(r) = I_0 \exp\left\{-\left(\frac{r}{w}\right)^2\right\} \quad (2)$$

I_0는 중심에서의 최고 출력 밀도이며, r은 빔의 중심으로부터 거리이며, w는 레이저 빔의 반경이다.

이러한 에너지 분포에 의해 절단되는 재료의 깊이는 식(3)과 같다.[14]

$$D = \frac{a}{QR\rho\sqrt{\pi}}\left(\frac{P}{V}\right) \quad (3)$$

P는 레이저 빔의 출력 세기이며, ρ는 재료의 밀도, Q는 재료의 비열, a는 재료의 에너지 흡수율, V는 레이저 빔의 이동속도, R은 조사된 레이저 빔의 반지름이다.

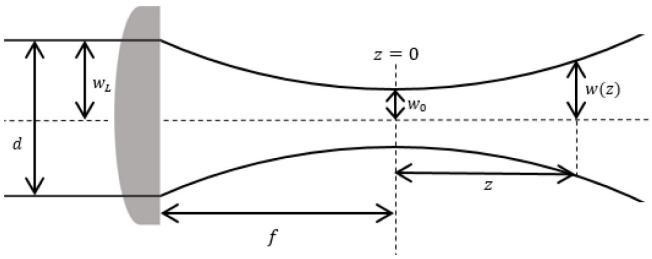


Fig. 1 Divergence shape of focused CO_2 laser

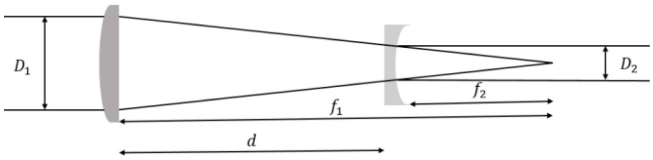


Fig. 2 Galileo's refraction telescope principle

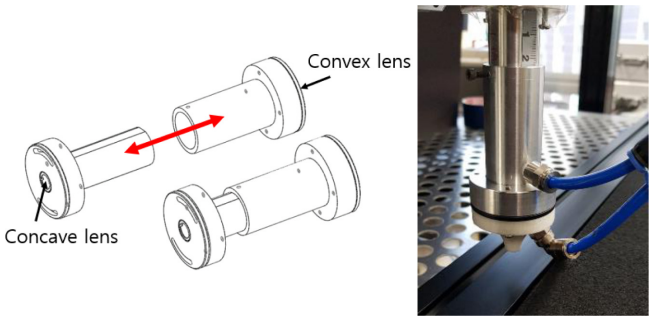


Fig. 3 Collimated laser beam generating device

3. 평행 레이저 빔 출력 장치

3.1 평행 빔 출력 장치 원리

EPS 폼 절단을 위한 평행 레이저 빔 출력 장치는 Fig. 2와 같은 원리이며 갈릴레이 빔확대기를 반대로 위치한 것과 같다. 출력되는 빔의 직경은 식(4)와 같다. 두 렌즈 사이 거리는 식(5)와 같이 볼록렌즈의 초점거리(f_1)에서 오목렌즈의 초점거리(f_2)를 뺀 값으로 결정된다. 하지만 렌즈의 변수가 존재하므로 실험을 통해 평행한 빔을 장치로부터 출력하였다. Fig. 3은 본 실험에서 사용한 평행 빔 출력 장치의 모습이다.

$$D_2 = \frac{f_2}{f_1}D_1 \quad (4)$$

$$d = f_1 - f_2 \quad (5)$$

D_1는 레이저 빔의 초기 직경이며, f_1는 볼록렌즈의 초점 거리, f_2는 오목렌즈의 초점 거리이다.

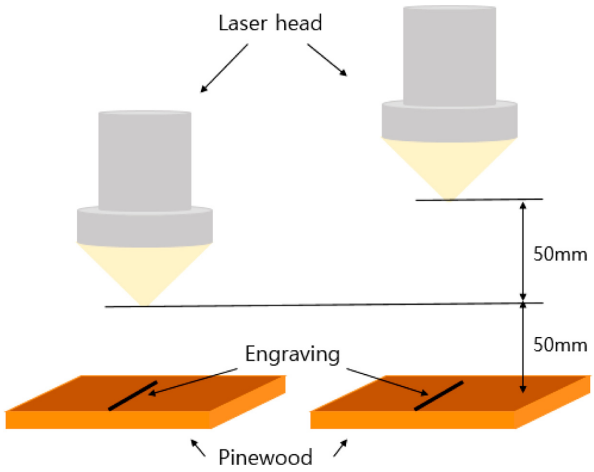


Fig. 4 Experiment method of collimated laser beam

3.2 평행 빔 출력 실험

평행 레이저 빔을 출력하기 위한 실험은 Fig. 4와 같은 방식으로 진행하였다. 첫번째로 레이저 헤드와의 거리를 50 mm로 고정하여 나무 판재에 각인 작업을 진행하여 너비를 측정하고 두번째로 100 mm로 간격을 유지하여 같은 실험을 진행하였다. 두 실험의 각인된 너비가 비슷하다면 평행한 레이저 빔이 출력된다고 가정하였다. 따라서 50 mm 이격거리의 너비는 1.305 mm이며 100 mm 이격거리의 너비는 1.351 mm일 때 실험을 진행하였다.

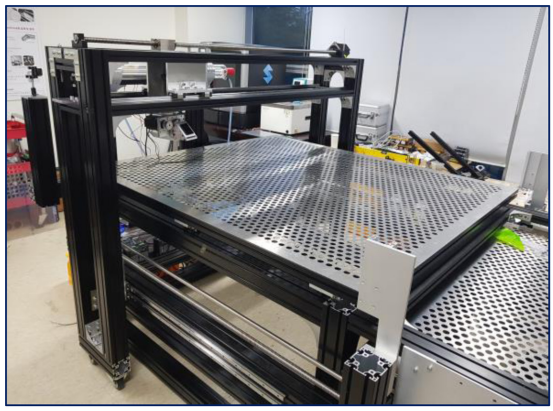
4. EPS 폼 절단 실험

4.1 실험 장치 구성

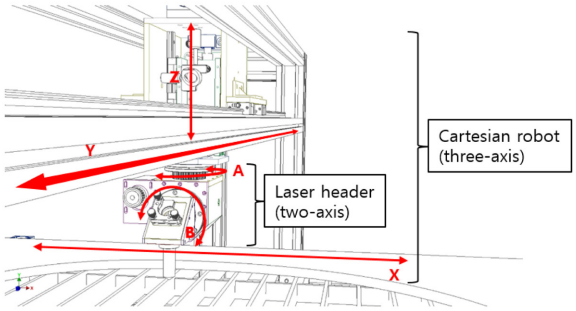
실험에 사용된 CO_2 레이저는 TEM_{00} 모드의 75 W를 사용하였다. 반사경은 Si로 코팅된 제품을 사용하였으며 렌즈는 ZnSe 재질을 사용하여 실험을 진행하였다. 실험 장비는 적층 시 단차를 줄이기 위해서 3축 직교 로봇과 2축 레이저 헤드로 구성하여 경사 절단이 가능하도록 설계하였다. 구동은 X, Y, Z, A, B축으로 X, Y, Z는 3차원 좌표 이동을 하며, A, B 두 축은 회전운동을 한다. Fig. 5는 본 실험에서 사용한 장비의 모습과 구성을 나타낸 것이다. 구동 프로그램은 MACH3를 이용하였으며, 장비의 움직임을 제어하고 레이저 발진에 대한 신호를 출력하였다. 레이저 발진 신호는 PWM 신호 모드를 사용하여 출력 세기를 조절하였다.

4.2 실험 방법

레이저 절단 과정에서 중요한 매개변수는 렌즈의 초점거리, 레이저의 파장, 출력 세기, 취입 가스, 이동속도, 절단 각도, 시편의 두께 등이 있다. 본 실험에 사용된 EPS 폼은 두께 20 mm의 비드법 1종을 사용하였으며 취입 가스는 에어 컴프레셔를 이용하여 1.5 kg/m^3 압력으로 공기를 주입하였다. 레이저의 출력



(a) 5-axis laser cutting machine



(b) 5-axis control: cartesian robot(3-axis) + laser header(2-axis)

Fig. 5 Schematics of 5-axis laser cutting machine

Table 1 Experiment conditions

Parameter	Unit	Range
Cutting degree	Degree	0, 20, 40, 60
Power of CO_2 Laser	W	7.5, 11.25, 15
Air pressure	kg/m^3	1.5
Traverse rate	mm/min	200-1000

세기는 7.5, 11.25, 15 W 세 가지에 대해서 절단 실험을 진행하였다. 최대 출력의 20% 이상의 출력일 경우, EPS 폼이 급격히 많이 녹아 절단 품질이 좋지 못하여 20% 이하로 제한하였다. 절단 속도는 200-1000 mm/min 사이에서 100 mm/min씩 속도를 올려 진행하였으며, 절단 각도는 장비의 B축에 대한 회전 각도이며 0-60 도까지 20 도씩 증가시키면서 실험을 하였다. 절단 각도가 60 도까지 증감됨에 따라 절단 두께는 20에서 40 mm까지 증가된다. Table 1은 실험 조건을 정리하여 나타낸다.

4.3 측정 및 분석 방법

총 실험은 각 조건 별로 10회씩 진행하였으며 실험 결과에 대한 측정 방법은 버니어 캘리퍼스와 3D 스캐너(SmartSCAN-HE-R8)를 이용하여 가공물을 스캔하고 절단 두께와 절단 너비(Kerf Width)를 측정하였다. 절단 너비는 EPS 폼의 위, 아래 면이 완벽하게 절단된 가공물에 한하여 측정하였다. 절단 시 발생

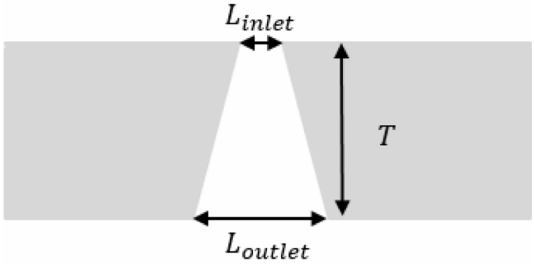
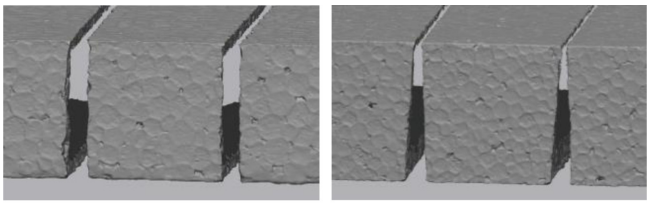


Fig. 6 Schematic for measurement position of taper percentage



(a) Collimated beam (b) Focused beam

Fig. 7 Detail of cut EPS (collimated beam and focused beam)

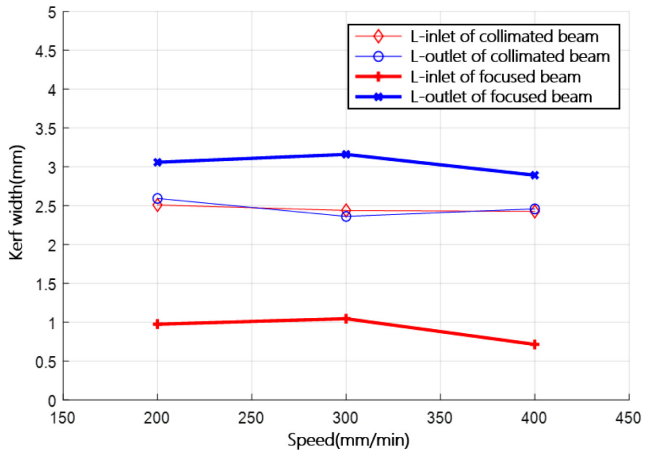


Fig. 8 Collimated beam kerf width vs focused beam kerf width

하는 절단 경사는 식(6)를 이용하여 분석하였으며, 숫자가 작을수록 위, 아래 면이 일정한 너비로 절단된 것을 의미한다.[15]

$$taper\ (\triangleright)\ \% = \frac{L_{inlet} - L_{outlet}}{T} \times 100 \qquad (6)$$

Fig. 6와 같이 L_{inlet}은 시편 윗면의 절단 너비이며, L_{outlet}은 아랫면의 절단 너비이며, T는 절단 두께이다.

5. 실험 결과 및 고찰

5.1 평행빔과 집속빔의 절단 형상 비교

Fig. 7은 평행빔과 집속빔으로 절단된 EPS 폼의 단면을 3D 스캐너로 촬영한 형상을 나타내며, Fig. 8은 절단 속도에 따른 절단 너비의 측정값을 나타낸다. 평행빔을 이용한 절단 형상은 윗면의 절단 너비가 다소 넓지만 전체적으로 절단 너비가 일정하다. 반면 집속빔을 이용한 절단 형상은 윗면과 아랫면의 절단 너비 차이로 절단 경사가 존재한다. Table 2는 Fig. 8의 측정값을 이용하여 구한 테이퍼 백분율 값을 나타내며, 평행빔의 경우 -0.4, 0.3, -0.1의 값으로 집속빔과 비교하여 개선되었다.

Table 2 Taper percentage of collimated and focused beam

Speed (mm/min)	200	300	400
Collimated beam	-0.41911	0.382973	-0.16658
Focused beam	-10.4117	-10.575	-10.8901

5.2 평행빔 절단 각도(EPS 폼 두께)와 절단 속도에 따른 절단 너비

Figs. 9(a)-9(d)는 레이저 빔의 출력 세기가 11.25 W일 때 절단 각도를 0, 20, 40, 60도로 변화시키고, 각 절단 속도 200, 300, 400, 500, 600 mm/min에 대한 절단 너비를 측정한 평균값을 나타낸다. 실험 결과 절단 속도가 증가할수록 절단 너비가 감소하는 경향을 보이지만 절단 각도에 따라서 위, 아래 절단 너비의 차이가 존재한다.

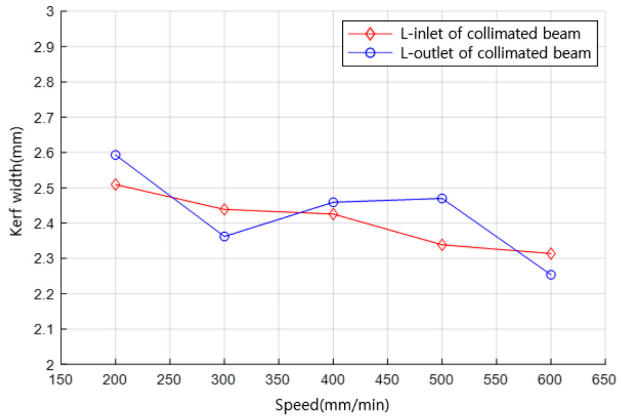
Fig. 9(a)는 절단 각도가 0도일 때 실험 결과로 위, 아래 절단 너비의 편차는 존재하지만, 절단 속도에 큰 관계 없이 평행빔에 의해 비슷한 너비로 절단되었으며, 그 차이는 약 0.1 mm 정도이다.

하지만 Figs. 9(b)-9(d)는 20, 40, 60도의 실험 결과로 위, 아래 절단 너비의 차이가 0.1 mm 이상인 곳이 존재한다. 이러한 현상이 나타나는 것은 절단 각도에 따라서 EPS 폼의 절단 두께가 증가하며, 미세하게 발산하는 레이저 빔에 의해 아랫면이 넓게 절단되는 것으로 보인다. 그러나 절단 속도가 증가함에 따라 위, 아래 절단 너비의 교차 지점이 존재한다. 따라서 절단 각도의 증가에 따라 절단 속도도 증가시켜야 평행한 절단 너비를 얻을 수 있으며 교차하는 부분의 속도가 최적조건으로 판단된다.

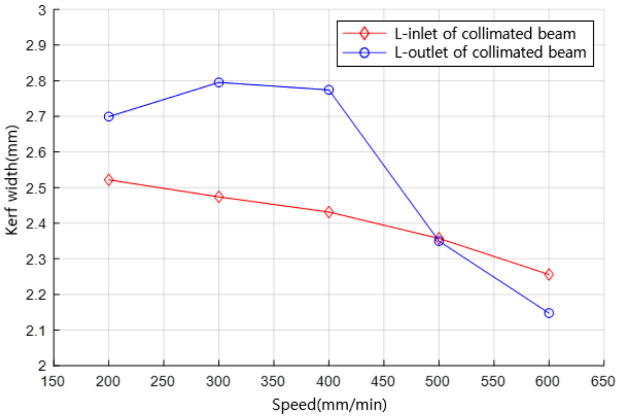
5.3 평행빔 절단 속도와 출력 세기에 따른 절단 두께

Fig. 10는 레이저 빔의 출력 세기를 7.5, 11.25, 15 W로 변화시키고, 각 세기에 대한 절단 속도가 200-1000 mm/min일 때의 절단 두께에 대한 실험값을 나타낸다. 절단 두께는 절단 각도에 대해서 크게 영향을 받지 않으며, 절단 속도에 반비례하며 출력 세기에 비례하는 경향을 보인다.

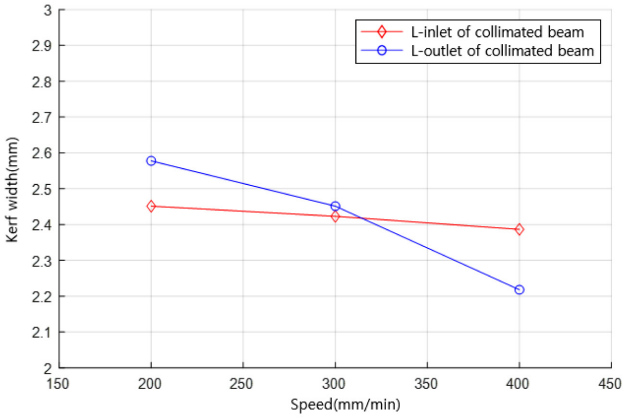
Fig. 11은 식(3)을 이용하여 계산된 이론값을 그래프로 나타내었으며, Table 3은 이론값을 위한 EPS 폼의 물성을 나타낸다. Fig. 10의 실험값과 Fig. 11의 이론값은 비슷한 경향을 보이지만 상당한 절단 두께 차이를 보인다. 이러한 원인은 재료의 열 전도, 레이저 빔의 차단 효과 등을 무시한 결과일 수 있다. 따라서 식(3)을 실험값에 맞게 상수 3개를 추가하여 식(7)과 같이 실험식을 도출하였다.[14] 실험식은 취입 가스 분사에 의한 레이저 빔의 에너지 손실을 고려하여 출력 세기에 c 상수를 추가하였고, 절단 재료 마다 다르게 설정 되는 B, w 상수를 추가하였다. B,



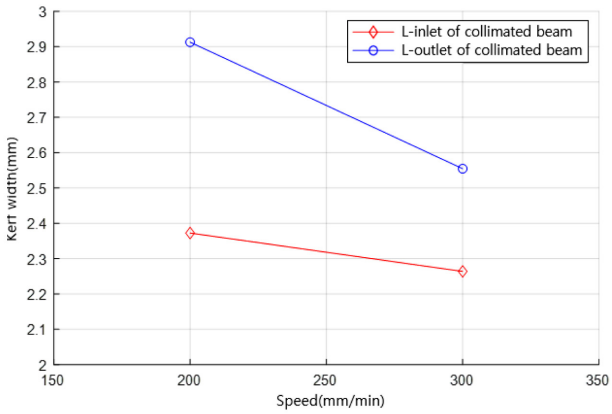
(a) Case of 0 degree cutting



(b) Case of 20 degree cutting



(c) Case of 40 degree cutting



(d) Case of 60 degree cutting

Fig. 9 Experimental results of kerf width with the cutting speed for different cutting angle

Table 3 Properties of EPS foam

Variable (unit)	Value
Q (kJ/kg °C)	1.3
R (mm)	0.65
P (W)	7.5, 11.25, 15
V (mm/min)	200-1000
ρ (g/mm^3)	3×10^{-5}
a	1

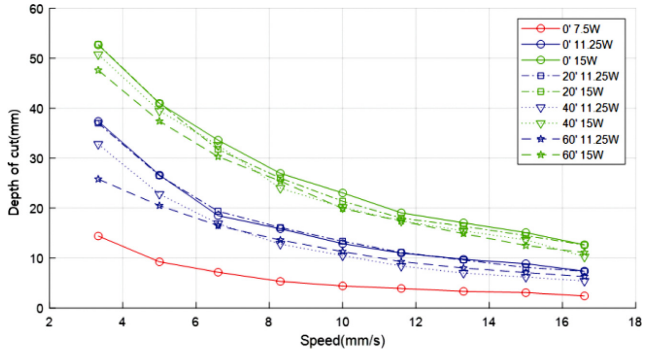


Fig. 10 Experimental result of depth of cut with the cutting speed for different laser power

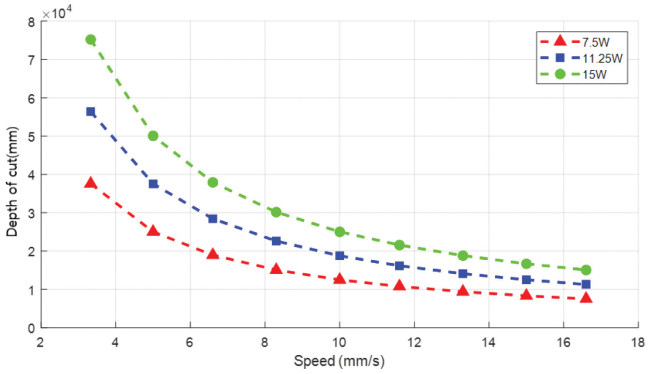


Fig. 11 Theoretical variation of depth of cut with the cutting speed for different laser power

w 절단 실험을 통해 구해진다.[14]

Fig. 12는 절단 실험을 통해 도출된 식(7)을 활용하여 구한 값을 나타내며, 실험값과 비슷한 값을 가지는 상수 값인 $B = 1100$, $w = 0.86$, $c = 5.5$일 때 값이다.

$$D = \frac{1}{B}\frac{a}{QR\rho\sqrt{\pi}}\left(\frac{P-c}{V}\right)^{w} \tag{7}$$

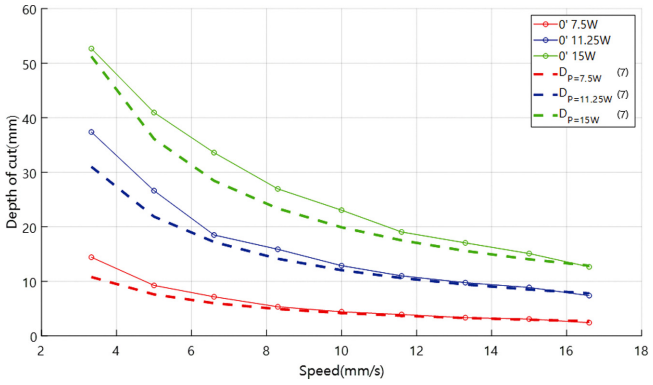


Fig. 12 Empirical variation of depth of cut with the cutting speed for different laser power

6. 결론

본 연구는 비정형 구조물을 제작하기 위한 EPS 폼 가공 장비에 대한 연구 동향을 조사하였으며, 그 중 레이저 빔의 발산현상으로 인해 발생하는 절단 경사와 적층 시 생기는 단차를 극복하고자 연구를 하였다. 갈릴레이 굴절을 적용하여 레이저 빔의 발산을 감소 시킨 평행빔을 이용하여 여러가지 조건으로 EPS 폼 절단 실험을 진행하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 평행 레이저 빔을 이용하여 진행한 절단 실험과 집속빔의 실험 결과를 통해 절단 경사의 줄어듦을 확인하였으며 평행 정도를 알려주는 테이퍼 백분율이 평행빔의 경우 1% 이하의 값을 가진다.

(2) 경사가 있는 절단을 할 경우, 미세한 레이저 빔에 의해 절단 경사 오차가 발생한다. 하지만 절단 속도가 빠를수록 위, 아래 절단 너비의 차이는 감소하는 경향을 보이며, 위, 아래 절단 너비 수치가 교차하는 구간이 존재한다. 따라서 절단 각도의 증가에 따라 절단 속도를 증가 시켜 평행한 절단면을 얻을 수 있다.

(3) 절단 속도, 출력 세기에 대한 절단 두께 실험을 통해 실험식을 도출하였으며 실험식을 통해 절단 두께에 따른 최적의 절단 속도와 출력 세기를 정의 할 수 있다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(No. 18AUDP-B121595-03).

REFERENCES

1. Tangelder, J. W. H., “Automated Fabrication of Shape Models of Free-Form Objects with a Sculpturing Robot,” https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:fc9ae077-b100-4c72-b865-773cd43271d4 (Accessed 21 AUG 2019)
2. Brooks, H. and Aitchison, D., “A Review of State-of-the-Art Large-Sized Foam Cutting Rapid Prototyping and Manufacturing Technologies,” Rapid Prototyping Journal, Vol. 16, No. 5, pp. 318-327, 2010.
3. Hope, R., Roth, R., and Jacobs, P., “Adaptive Slicing with Sloping Layer Surfaces,” Rapid Prototyping Journal, Vol. 3, No. 3, pp. 89-98, 1997.
4. Son, T. Y., “Estimate of Business Model for RP System,” Journal of the Korean Society of Mechanical Technology, Vol. 8, No. 2, pp. 18-21, 2006.
5. Flowers, J. and Moniz, M., “Rapid Prototyping in Technology Education: Rapid Prototyping, while Costly, Can Afford Students a Unique Opportunity to Bring their Ideas to Reality,” The Technology Teacher, Vol. 62, No. 3, pp. 7-12, 2002.
6. Ahn, D.-G., Lee, S.-H., and Yang, D.-Y., “Development of Transfer Type Variable Lamination Manufacturing (VLM-st) Process,” International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 42, No. 14, pp. 1577-1587, 2002.
7. CROMA, “Creating, Rapid Prototyping of 3D Parts,” http://www.croma-foamcutter.com/en/croma-software/stratoconcept-software/ (Accessed 21 AUG 2019)
8. Jeong, S., Sim, J., Kim, H., Shin, D., and Hong, D., “Application of LOM for Freeform Architecture,” Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 34, No. 12, pp. 903-909, 2017.
9. De Smit, A., Broek, J. J., and Horváth, I., “Experimental Investigation of Factors Influential for the Flexible Blade Based Prototyping Process,” Proc. of the ASME Design Engineering Technical Conference, Paper No. DETC99/DFM-8960, 1999.
10. Zheng, Y., Choi, S., Mathewson, B., and Newman, W., “Progress in Computer-Aided Manufacturing of Laminated Engineering Materials Utilizing Thick, Tangent-Cut Layers,” Proc. of the International Solid Freeform Fabrication Symposium, 1996.
11. Caiazzo, F., Curcio, F., Daurelio, G., and Minutolo, F. M. C., “Laser Cutting of Different Polymeric Plastics (PE, PP and PC) by a CO_2 Laser Beam,” Journal of Materials Processing Technology, Vol. 159, No. 3, pp. 279-285, 2005.
12. Davim, J. P., Barricas, N., Conceicao, M., and Oliveira, C., “Some Experimental Studies on CO_2 Laser Cutting Quality of Polymeric Materials,” Journal of Materials Processing Technology, Vol. 198, Nos. 1-3, pp. 99-104, 2008.
13. Kim, D. H., “Laser Processing,” Kyungmoon, pp. 174, 186-188, http://www.kyungmoon.com/shop_product/shop_pdt_view.php?search_key=%B7%B9%C0%CC%C0%FA&p_idx=2049&page=1 (Accessed 29 AUG 2019)
14. Zhou, B. H. and Mahdavian, S., “Experimental and Theoretical Analyses of Cutting Nonmetallic Materials by Low Power CO_2-Laser,” Journal of Materials Processing Technology, Vol. 146, No. 2, pp. 188-192, 2004.

15. Rao, S., Sethi, A., Das, A. K., Mandal, N., Kiran, P., et al., “Fiber Laser Cutting of CFRP Composites and Process Optimization through Response Surface Methodology,” Materials and Manufacturing Processes, Vol. 32, No. 14, pp. 1612-1621, 2017.

Hakmin Kim
M.S. in the Department of Mechanical Engineering, Korea University. His research interests include robotics and manufacturing automation.
E-mail: khm6015@korea.ac.kr

Joonhyeok Sim
M.S. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Korea University. His research interests include construction robot and manufacturing automation.
E-mail: vkfak123@korea.ac.kr

Sangyeol Jeong
M.S. in the Department of Mechanical Engineering, Korea University. His research interests include robotics and construction robot.
E-mail: jsy6050@korea.ac.kr

Daehie Hong
Professor in the school of mechanical engineering, Korea University. His research interests include manufacturing automation, precision machine design and control, and field robotics.
E-mail: dhhong@korea.ac.kr