슬리렌과 영상처리를 활용한 레이저 절단의 가스유동성 분석

조대원^{*,†} · 최정수^{*} · 이수진^{*} · 신동식^{*}

^{*}한국기계연구원 부산기계기술연구센터

Analysis of Gas Flow Behavior in the Laser Cutting Process using the Schlieren Method and Image Processing

Dae-Won Cho^{*,†}, Jungsoo Choi^{*}, Sujin Lee^{*} and Dongsig Shin^{*}

^{*}Busan Machinery Research Center, Korea Institute of Machinery and Materials, Busan, 46744, Korea

[†]Corresponding author : dwcho@kimm.re.kr

(Received August 7, 2020 ; Revised September 15, 2020 ; Accepted September 21, 2020)

Abstract

The quality of laser cutting varies greatly depending on several variables, such as laser beam power, focal length, and speed. The flow of gas generated during laser cutting plays an important role in pushing the molten pool to the lower surface of the material, and is a very important factor for dross formation and spatter generation during cutting. Therefore, it is necessary to investigate the flow of gas generated during laser cutting. In this study, we captured the gas flow as a function of the inlet pressure and the stand-off distance with a high-speed camera using the Schlieren method. The images before and after gas injection were used to obtain the image intensity, which was applied to analyze the cutting gas flow for three different parts. We found that the stronger the inlet pressure and the shorter the stand-off distance, the higher the image intensity value, and the higher the gas flow rate, respectively.

Key Words : Laser cutting, Schlieren method, Gas flow, Image processing

1. 서 론

레이저 가공은 정밀제어 및 고속공정이 가능하기 때문에 반도체 등 초정밀 분야에서 많이 사용되고 있으며, 고출력 레이저는 자동차, 조선, 항공우주의 용접, 클래딩, 적층 등의 분야에서 기술의 발전과 더불어 점차 그 적용영역을 확대해가고 있다. 고출력 레이저는 용접 뿐만 아니라, 구조물 절단에도 다양하게 활용되고 있다^{1,2)}. 특히 최근에는 레이저 절단이 플라즈마 및 화염 절단에 비해 kerf폭이 작고 높은 절단품질을 획득할 수 있기 때문에 원전해체에서의 레이저 절단에 대한 중요성이 높아지고 있다.

일반적으로 수mm 이하 박판 레이저 절단은 일정한 크기의 레이저 출력이 있는 경우 절단 노즐에 큰 영향을 미치지 않는다. 그래서 박판에 대한 레이저 절단은 CNC 기계를 통해서 수행 가능하며 절단 경로에 대한

최적화 등에 대한 연구위주로 수행되어 왔다^{3,4)}. 그러나 10mm 이상의 후판에 대한 절단은 동일한 레이저 출력이라도 절단 노즐형상, 노즐-시편 거리(stand-off distance), 분사압력(inlet pressure) 등에 따라 절단 품질이 상당히 다르게 나타나게 된다. 즉 절단노즐 형상 및 분사압력에 따라 분사되는 기체의 유속과 흐르는 패턴이 매우 다양하고 그에 따른 절단부 형상이 다르게 된다는 것을 의미한다⁵⁻⁷⁾. 레이저 절단에서 사용하는 분사압력은 절단 벽면 내부에 있는 용융물을 수직방향으로 불어내거나 절단 벽면에 존재하는 용융물을 전단력에 의해 하단부로 흐르도록 한다. 그러나 고압의 분사압력이 사용될 경우 마하디스크(Mach disk)와 같은 노즐출구 동적 성능을 저하시키는 유동의 흐름이 관찰될 수 있다. 따라서 절단 품질은 이러한 노즐출구에서의 절단가스의 흐름과 매우 밀접하다고 볼 수 있다^{6,7)}.

또한 노즐출구에서의 가스 흐름은 노즐의 형상에 매우 밀접한 관련이 있다. 따라서 레이저 절단 노즐출구

에서의 가스 흐름을 파악하기 위해 슐리렌 방법을 활용하여 가스를 관찰하거나 전산유체역학(CFD)을 통해 이론적으로 그 현상을 규명하기도 한다^{8,9)}. Man et. al⁸⁾은 자유제트(free jet) 상태에서 노즐형상에 대한 가스의 흐름을 수치해석을 통해 계산하고 슐리렌 방법을 활용하여 압력과 노즐 직경에 따른 가스 흐름을 파악하였다. Darwish et. al.⁹⁾은 자유제트 상태에서 다양한 정제 압력(stagnation pressure)에 대한 수치해석과 슐리렌을 활용하여 초음속(supersonic) 노즐에 대한 가스 흐름을 파악하였다. Man et. al.¹⁰⁾은 투명 아크릴을 활용하여 kerf 내부의 가스흐름을 측면에서 관찰하여 평가하였다.

그러나 이러한 연구에서 활용한 슐리렌 방법은 비록 카메라를 활용하더라도 영상처리를 활용한 정량적인 평가를 수행하지는 않았다. 본 연구에서는 분사압력과 노즐-시편의 거리에 따른 슐리렌 방법을 통하여 얻은 결과를 정량적으로 분석하기 위해 영상처리를 활용하였고 이를 통해 전반적인 성능 분석을 수행하였다.

2. 실험 구성 및 계획

2.1 실험 장비 구성

슐리렌은 기체의 밀도와 그에 따른 굴절률이 변화되는 원리를 활용한 것으로 기체의 유동가시화에 많이 사용하는 방법이다. 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 슐리렌 장비를 구성하였으며 할로겐 램프로 발진한 빛은 첫 번째 오목거울에서 반사하여 수평으로 조사되어 레이저 절단 노즐 주변을 지나고 두 번째 오목거울에 도달한다. 이 반사된 빛은 집중하여 최종적으로 초고속 카메라에 전달하게 된다. 본 실험에서 활용한 knife edge는 절반의 빛의 영역을 차단하여 보다 평행광(collimated light)으로부터 얻은 선명한 명암을 획득하게 된다. 슐리렌에서 사용한 오목거울의 직경은 200mm, 초점거리는 2030mm의 pyrex 재질로 알루미늄 코팅이 되어

Fig. 1 Schematic of schlieren method

있고 해당 거울의 반사율은 90% 이상이다. 또한 초고속 카메라는 Photron社의 FASTCAM SA4제품을 사용하였다. 촬영시 별도의 ND filter나 band pass filter는 없으며 셔터 속도는 1/2000초, FPS(Frame per second)는 1000으로 안정적인 영역에 도달한 이미지를 본 슐리렌 연구에 활용하였다.

또한 본 실험에서는 레이저 파워를 off 상태에서 절단 노즐에서 방출되는 질소가스만 분사하여 슐리렌 영상을 얻었으며, Fig. 2(b)와 같이 노즐에서 분사된 가스는 특정 압력 이상에서 초음속 유동을 보이며, Bang and Han⁵⁾이 언급한 충격파(shock wave)가 발생함을 알 수 있다. 이러한 충격파는 제트 경계(jet boundary), 반사 충격파(reflected shock wave)등 초음속 유동에서 발생하는 특성을 보이게 되며, Fig. 2(b)에서와 같이 분사 방향으로 영상의 명암이 주기적으로 바뀌게 됨을 확인할 수 있다. 특히 Fig. 2(a)와 Fig. 2(b)의 비교를 통해 분사 전후 획득한 이미지는 기체 흐름을 표현하는데 확연한 차이를 보이고 있다. 슐리렌 특성상 유량이 많은 부분은 비교적 해당 가스의 국부적인 밀도나 속도가 크기 때문에 보다 어둡게 표현이 된다. 본 연구에서 추출한 영상은 8bit의 이미지로 밝기 범위는 0~255 사이에 존재하며 두 이미지의 각 pixel 밝기의 차이는 가스 분사 이후에 발생하는 그림자 효과(shadow effect)에 의한 것이라고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 가스분사 전후의 두 영상에 대한 영상처리를 통해 정량적인 근거를 마련하였다.

2.2 영상처리 알고리즘

Fig. 2(a)와 Fig. 2(b)의 영상 밝기 차이는 Fig. 3과 같이 표현할 수 있다. 이러한 원리를 활용하여 시편 및 노즐이 고정됨을 있다고 가정하고 Fig. 4(a),(b)와

Fig. 2 Images from Schlieren method before and after gas injection for free gas flow

같이 두께 50mm 시편에서 시편 간극 1mm의 gap을 부과하고 노즐에서 가스가 방출되는 경우 Fig. 4(a),(b)의 명암차이를 Fig. 4(c)처럼 표현할 수 있다. 여기서 Fig. 4(c)의 밝은 값은 Fig. 4(b)의 그림자로 표현된 어두운 영역으로 볼 수 있다. 이러한 과정을 토대로 시편 상단, 하단 및 시편 간극에서의 유동 특성을 파악하

Fig. 3 Contrast of image intensity for free gas flow

(a) before gas injection

(b) after gas injection

(c) contrast

(d) flow chart

Fig. 4 Image process to obtain the gas flow characteristics (8bit images) with a material (50mm thickness)

는데 근거자료로 활용 가능하다. 본 연구에서는 Matlab image processing toolbox를 활용하여 영상처리를 수행하였으며, 구체적인 알고리즘에 대한 순서도는 Fig. 4(d)에 표현하였다.

2.3 실험 계획

본 연구에서는 분사압, 노즐-시편 거리, 시편의 간극 (gap)에 따라 총 24회의 실험을 수행하였으며, 분사압은 5bar, 10bar, 15bar, 20bar, 노즐-시편과의 거리는 1mm, 2mm, 3mm, 시편의 간극은 1mm로 두었으며 모두 full factorial로 계획하여 총 12회 실험을 수행 하였다. 본 연구에서 활용할 데이터는 Fig. 4(c)의 contrast 이미지에서의 image intensity를 추출하여 표현하였으며, Fig. 5는 본 연구에서 결과를 분석하는데 필요한 영상 영역을 표기한 그림이다. 크게 세 영역으로 분할되어 시편 간극에서의 유량(A영역), 시편 상

Table 1 Experimental table

case	Factor	
	Inlet pressure (bar)	Stand-off distance (mm)
1	5	1
2	10	1
3	15	1
4	20	1
5	5	2
6	10	2
7	15	2
8	20	2
9	5	3
10	10	3
11	15	3
12	20	3

Fig. 5 Image intensity distribution in y-locations (case 3)

단에서 절단에 활용되지 않는 유량(B영역), 시편 간극을 통과하여 시편 하단에서의 유량(C영역)으로 구분할 수 있다. A영역에서 추출하는 값은 노즐에서 분출된 가스가 시편 간극의 중심(Fig. 5 화살표 위치)에서 y방향의 image intensity 분포 값이다. B영역과 C영역에서 추출하는 값은 각각 Fig. 5 상단 좌우 및 하단의 dotted - box내에서 2차원 공간의 image intensity의 합이다.

3. 실험 결과

3.1 시편 간극 영역 (A영역 - Part A)

우선 초음속 영역에서의 유속 특성을 살펴보면 Fig. 3에서 보듯이 자유 가스 유동(free gas flow)인 경우 노즐에서 가스가 분사된 이후 주기적으로 음영이 바뀌게 됨을 확인할 수 있다. 이는 초음속 영역에서 주기적으로 마하 디스크가 발생하기 때문이다. Fig. 6은 Fig. 5의 y방향에 따른 image intensity로서 각각의 영역에서 다른 특성을 보인다.

(i)구간은 image intensity가 하강하다 상승하는 구간으로 이는 초음속 영역에서 마하 디스크 발생에 따른 disk 전후의 음영차이로 인해 해당 구간에서 밝기 값의 변동(fluctuation)이 생성되었기 때문이다. (ii) 구간은 마하 디스크이후의 아음속($Ma < 1$)영역으로 (i)구간보다 급격한 변화가 없는 상대적으로 안정적인 구간이다. 해당 구간에서의 image intensity는 시편-노즐 거리와 분사압력에 따라서 매우 다양한 값을 나타내게 된다. 또한 (ii)구간에서의 시편 간극의 두 면이 경계(boundary)역할로 작용하여 유속의 흐름에 저항하는 마찰을 일으켜 상대적으로 image intensity가 낮은 값을 유지하게 된다. (iii)구간은 분사 가스가 시편의 간극을 빠져나온 구간으로 시편 간극의 마찰에 따른 방해요소가 없어서 순간적으로 유량이 증가하는 구간으로

Fig. 6 Image intensity distribution in y-locations (case 3)

(ii)구간보다 image intensity가 급격히 상승하게 된다. 전반적으로 이러한 흐름은 모든 case에서 유사하게 발견되었으며, 조건에 따라 정량적인 차이가 존재하였다.

Fig. 7은 주어진 시편-노즐 간격에서 가스 분사압력에 따른 y방향의 image intensity를 표현한 그래프로 가스 분사압력이 5bar에서 20bar로 증가할수록 image intensity가 증가함을 알 수 있다. 이러한 효과는 시편-노즐 간격이 작을수록 그 영향은 더욱 증가하게

(a) 1mm stand-off distance

(b) 2mm stand-off distance

(c) 3mm stand-off distance

Fig. 7 Image intensity distribution for different inlet pressure in part A

Fig. 8 Average of image intensity for section (ii) in part A

됨을 알 수 있다. 특히 (ii)구간은 분사압력이 클수록 내부에 흐르는 유량이 증가하게 되며, 시편-노즐 간격이 작을수록 분사압력에 따른 image intensity 차이가 커지게 된다.

Fig. 8은 (ii)구간에서의 image intensity 평균값을 표현한 것으로 가스 분사압이 5bar인 경우 시편-노즐에 따른 평균 image intensity 값의 차이가 1.7인데 반해 20bar의 경우 해당 값의 차이가 16.1정도로 큰 차이를 보이게 된다. 다시 말하면 분사압력이 작은

경우 시편-노즐 간극에 따른 (ii)구간의 평균 image intensity 값의 차이가 작지만, 분사압력이 클수록 (ii)구간의 평균 image intensity의 차이가 확연히 증가하게 된다는 것이다.

Fig. 9는 주어진 분사압력에서 시편-노즐 간극에 따른 image intensity를 표현한 것으로 앞서 밝힌 바와 같이 Fig. 9(a)처럼 분사압력이 작은 경우 시편-간극에 따른 차이가 작는데 반해 분사압력이 15bar 이상인 경우 (ii)구간에서 시편-간극에 따른 image intensity 차이가 상대적으로 크다는 것을 알 수 있다.

3.2 시편 하단 영역 (B영역 - Part B)

B영역은 분사된 가스가 시편의 간극을 통과하여 외부로 분출되는 구간으로 Fig. 6의 (iii)구간에 해당되는 영역이다. 본 연구에서는 B영역에서 시편 간극을 통과한 유량이 실험 조건에 따라 어느 정도 차이를 나타내는지 비교하기 위하여 B영역 각 pixel에서의 image intensity 합을 구하였으며 Fig. 10과 같이 표현하였다. 전반적인 경향은 Fig. 8과 매우 유사하다. 즉 저압인 5bar에서는 시편 하단부 유량이 시편-노즐 간극에 큰 영향을 받지 않지만 분사압력이 증가할수록 그 차이

(a) Inlet pressure: 5bar

(b) Inlet pressure: 10bar

(c) Inlet pressure: 15bar

(d) Inlet pressure: 20bar

Fig. 9 Image intensity distribution for different stand off distance in part A

Fig. 10 Sum of Image intensity in part B

Fig. 12 Sum of Image intensity in part C

Fig. 11 A linear relation between the average image intensity for section (ii) in part A and the sum of image intensity in part B

가 커짐을 알 수 있다.

이러한 특성을 종합해보면 A영역의 (ii)구간에서의 평균 image intensity와 B영역에서의 image intensity의 유사성은 Fig. 11에서 표현한 바와 같이 R-square > 0.91로 선형적으로 비례함을 알 수 있다. 이러한 경향을 통해서 절단에 미치는 기체의 유량은 B영역에서 추출한 image intensity의 합을 통해 유추 가능할 것으로 사료된다.

3.3 시편 상단 영역 (C영역 - Part C)

C영역은 분사된 가스가 시편의 간극을 통과하지 못하고 상단에서 방출되는 가스에 대한 영역으로 Fig. 12는 분사가스 압력 및 시편-노즐거리에 따른 C영역에서의 image intensity 합이다. 그림을 통해 알 수 있듯이 방출되는 image intensity는 가스 분사압력이 높을수록, 시편-노즐 거리가 길수록 외부 방출이 많다는 것을 의미한다. 이러한 결과는 Fig. 8, Fig. 10에서 A

와 B영역의 유량과 연관되어 있다. 즉, 시편-노즐거리가 짧은 경우 가스 유량이 시편 간극사이로 상대적으로 많이 통과하여 시편 하단부에 빠져나간다는 것을 의미하며, 시편-노즐 간극이 큰 경우 이와 반대로 절단에 활용되지 못하는 가스 유량이 많다는 것을 의미하게 된다.

이러한 결과는 기존 솔레렌 방법을 초음속 영역에 대한 유동 특성에 초점을 맞춘 것과는 달리 실제 절단 시편을 대상으로 영상처리 기법을 활용하여 정량적인 분석을 수행하였다는 점이 본 연구의 주요한 특징이라고 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 솔리렌 장비 및 영상처리를 활용하여 레이저 절단시 발생하는 가스의 특성을 정량적으로 분석하였다. 이와 관련하여 본 연구를 통해 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

1) 본 연구에서는 솔리렌 장비와 영상처리를 통해 시편-노즐 거리, 가스의 분사압력에 따른 유동 특성을 정량적으로 분석하였다.

2) 가스의 분사 전후 사진을 대상으로 영상처리 기법을 활용하여 가스 분사의 특성을 정량적으로 파악하였으며 보다 면밀한 분석을 수행하기 위해 3개의 part로 구분하였다.

3) 시편 간극 영역에서 흐르는 유량이 클수록 시편 하단 영역에서 관찰하는 유량이 크다.

4) 시편-노즐 거리가 짧을수록 시편 간극 영역에서 흐르는 유량이 커서 절단에 활용하는 가스량이 증가한다.

5) 시편-노즐 거리가 길수록 시편 간극을 통과하지 못하고 노즐 주변부로 퍼지는 가스 유량이 증가한다. 이러한 가스는 절단에 활용되지 못한다는 것을 의미한다.

6) 분사압이 증가하면 시편 간극 영역, 시편 상단 영

역, 시편 하단 영역 모두 관찰되는 유량이 증가한다. 즉, 분사압이 클수록 절단에 활용되는 가스 유량도 증가하지만, 절단에 활용되지 못하는 가스 유량도 증가함을 의미한다.

후 기

본 연구는 한국기계연구원 주요과제 ‘안전한 원전해체를 위한 레이저 제염 및 수중 레이저 절단 기술개발’ 과제 (NK226A)의 지원으로 수행하였음.

ORCID: Dae-Won Cho: <https://orcid.org/0000-0001-8668-1385>

ORCID: Sujin Lee: <https://orcid.org/0000-0002-0477-7568>

References

1. H. T. Kim and S. C. Kil, High Quality Plasma Cutting and Laser Cutting Technology, *J. Weld. Join.* 35(2) (2017) 30-34.
2. Y. Kim, K. Y. Park and K. D. Lee, Development of Remote Laser Welding-Cutting Process for Maintenance of Hydraulic Connection Module on ITER Project, *J. Korean Weld. Join. Soc.* 30(1) (2012) 51-58.
3. G. H. Han and S. J. Na, Nesting Algorithm for Optimal Layout of Cutting parts in Laser Cutting Process, *J. Korean Weld. Join. Soc.* 12(2) (1994) 11-19.
4. G. H. Han and S. J. Na, A Study on Torch Path Generation for Laser Cutting Process, *J. KSME*, 20(6) (1996) 1827-1835.
5. S. Y. Bang and Y. H. Han, Nozzle and Gas Jet Flow in Laser cutting, *J. Korean Weld. Join. Soc.* 12(2) (1994) 1-10.
6. W. M. Steen and J. Mazumder, Laser Material Processing, fourth ed. *Springer*, (2010).
7. J. Dowden, The Theory of Laser Materials Processing, *Springer*, (2009).
8. H. Man, J. Duan and T. Yue, Dynamic characteristics of gas jets from subsonic and supersonic nozzles for high pressure gas laser cutting, *Opt. Laser Technol.* 30(8) (1998) 497-509.
[https://doi.org/10.1016/S0030-3992\(98\)00083-8](https://doi.org/10.1016/S0030-3992(98)00083-8)
9. M. Darwish, L. Mrňa, L. Orazi and B. Reggiani, Numerical modeling and Schlieren visualization of the gas-assisted laser cutting under various operating stagnation pressures. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 147 (2020) 118965.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118965>
10. H. C. Man, J. Duan and T. M. Yue, Analysis of the dynamic characteristics of gas flow inside a laser cut kerf under high cut-assist gas pressure, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 32(13) (1999) 1469-1477.
<https://doi.org/10.1088/0022-3727/32/13/306>