

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2011.35.2.153

ISSN 1226-4881

유동가시화 기법을 이용한 레이저가공의 보조가스 충돌특성에 관한 연구

손상혁* · 이 열*† · 민성규*

* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

Study of Characteristics of Assist Gas in Laser Machining Using Flow Visualization Techniques

Sanghyuk Son*, Yeol Lee*† and Seongkyu Min*

* Dept. of Mechanical and Aerospace Engineering, Korea Aerospace Univ.

(Received June 29, 2010 ; Revised November 22, 2010 ; Accepted November 23, 2010)

Key Words: Supersonic(초음속), Jet Impingements(제트충돌), Laser Machining(레이저가공), Assist Gas(보조가스)

초록: 레이저가공에서 가공부위의 용융물질을 제거하는 보조가스의 역할을 살펴보기 위하여, 절단경사면에 충돌하는 초음속 동축/탈축노즐 유동의 특성이 실험적으로 관찰되었다. 보조가스의 압력, 노즐과 절단면과의 사이거리, 절단폭, 그리고 탈축노즐의 위치 등 다양한 관계변수의 변화에 대하여, 수백 개의 고해상도의 쉐러린 영상이 획득되었다. 그 결과, 단순한 보조가스의 증가가 절단면 하부에서 발생하는 유동박리를 제거하는데 효율적이지 않음이 관찰되었고, 절단폭의 증가와 탈축노즐의 운용으로 절단면에서의 박리현상을 경감시킬 수 있음이 확인되었다. 또한 음속노즐에 비하여 초음속노즐의 경우는 노즐출구와 가공면 사이의 사이거리가 절단면에서의 박리현상에 큰 영향을 미치지 않음이 관찰되었다.

Abstract: The characteristics of supersonic coaxial/off-axis jet impingements on a slanted kerf surface were experimentally studied, to investigate the role of the assist gas that removes molten materials from cut zone formed by laser machining. In this parametric study, hundreds of high-resolution schlieren images were obtained for various gas pressures, distances between nozzle exit and kerf surface, kerf widths, and alignments of off-axis nozzle. It was noticed that simply increasing the assist gas pressure was not effective in eliminating the flow separation that occurs downstream of the kerf surface. However, it was also observed that by increasing the kerf width and utilizing off-axis nozzles, the separation of the assist gas on the kerf surface can be weakened. The effect of the distance between the nozzle exit and the kerf surface on the characteristics of separation occurring on the kerf surface was found to be lower in the case of supersonic nozzles than that in the case of sonic nozzles.

- 기호설명 -

- d : 가공물의 절단폭
- D : 노즐직경
- H : 노즐출구에서 가공면까지 수직 사이거리
- P_t : 보조가스 전압
- α : 탈축노즐의 각도

1. 서론

레이저를 이용한 절단가공은 비접촉 가공기술로 빠른 가공속도 및 적은 열변형, 그리고 컴퓨

터 제어를 통한 가공 편이성 등 많은 장점이 있어 다양한 재료가공에 응용되고 있다. 레이저 가공에서 노즐을 통하여 분출되는 보조가스는 가공 절단면의 용융물질 제거, 가공면 냉각기능 및 광학장치 보호 등, 레이저 가공에서 매우 중요한 역할을 담당하고 있으며, 실제 보조가스 운영에 총 레이저 가공 운영비의 10%가 넘는 비용이 소요되는 것으로 보고되고 있다.⁽¹⁻³⁾

절단과정에서 나타나는 보조가스의 충돌유동 특성은 절단면의 최종 가공정밀도와 직접적인 관계에 있어 다양한 기초연구가 진행되어 왔다. 노즐의 형태,⁽³⁾ 보조가스의 유동압력,⁽⁴⁾ 노즐과 가공면의 사이거리,^(5,6) 절단폭과 노즐직경비⁽⁶⁻⁸⁾ 등 보조가스의 기능과 관련된 주요 변수의 영향이 선행연구를 통하여 제시된 바 있으며, 최근 들어

† Corresponding Author, ylee@kau.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

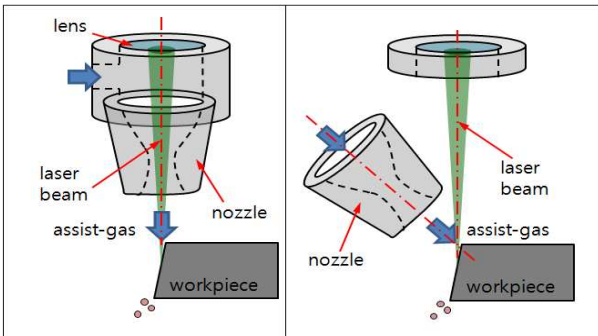


Fig. 1 (Left) coaxial, (Right) off-axis

보조가스 유동에 관한 수치해석적 연구^(7,9-11)가 3차원 계산으로까지 확장되고 있다.

고온, 고압 및 복잡한 화학반응을 동반하는 레이저가공에서 나타나는 보조가스의 유동구조를 실험적으로 관찰하기는 매우 어렵다. 그동안 일부 압축성유동 연구에서 사용되는 유동가시화 기법이 레이저가공의 보조가스 충돌특성을 규명하는데 응용되어 왔다. Brandt과 Settles⁽¹²⁾는 보조가스 전압, 사이거리, 노즐각도 변화에 따른 보조가스의 충돌유동구조를 유동가시화 방법을 통해 관찰한 바 있으나, 제시된 연구결과가 음속노즐에 한정되어 있다. Man 등⁽⁶⁾은 Shadowgraph 유동가시화를 이용하여, 노즐과 가공면과의 사이거리, 절단폭과 노즐직경비 등 다양한 변수변화가 보조가스의 충돌유동 구조에 미치는 영향을 연구한 바 있다. 이 연구는 동축(coaxial)인 음속과 초음속 노즐에 대하여 적용되어 그 결과가 서로 비교되었으나 제시된 자료의 선명도가 다소 떨어져 구체적인 유동구조를 파악하는 데는 한계가 있었다.

일반적으로 레이저가공에서 자주 사용되는 노즐은 동축 음속노즐인데, 완전팽창 된 초음속노즐을 사용할 경우 낮은 반경방향 제트 확산도로 인한 높은 후방 압력전달 효과를 기대할 수 있다.⁽¹³⁾ 또한 탈축(off-axis)노즐(Fig. 1 참조)을 사용할 경우 절단면에 충돌되는 보조가스의 비정상강도가 작고, 아울러 절단면의 용융물 제거효과가 커서 가공면 품질이 개선될 가능성이 있다고 보고된 바 있다.^(2,14) 여기서 동일한 탈축노즐의 경우에도 운용조건의 차이에 따라 보조가스의 충돌유동 특성은 크게 차이가 날 수 있다. 특히 Quintero 등⁽¹⁴⁾은 탈축노즐의 각도 및 위치가 절단면의 품질에 영향을 줄 수 있음을 실제 레이저가공 후 단면촬영을 통하여 제시한 바 있으나,

구체적인 유동구조에 관한 자료는 제시하지 못하였다. 이렇듯 레이저가공에서 노즐의 역할에 대한 인지도에 비하여, 초음속 동축⁽¹⁵⁾ 및 탈축노즐에서의 보조제트의 충돌유동 구조를 밝히는 연구의 결과에는 어느 정도 한계가 있다.

이에 본 연구에서는 동축 및 탈축 형태로 초음속 노즐을 통하여 분출되는 보조가스의 충돌특성을 쉘러린(Schlieren) 유동가시화 기법을 통하여 관찰 비교하였다. 보조가스의 절단면 충돌유동 현상을 모사하기 위하여, 특정 경사면을 갖는 가공물을 제작하고 보조가스 압력, 가공물과 노즐의 사이거리, 가공물의 절단폭 및, 탈축노즐의 경우 노즐의 각도 및 보조가스 충돌지점 등이 변화할 때 나타나는 보조가스 충돌유동 구조를 비교 관찰하였다. 특히 레이저가공 후 절단면의 품질에 직접적인 영향을 주는 충돌유동의 박리유무⁽⁷⁾ 및 그 위치에 초점을 맞추었으며, 이러한 결과를 통하여 개선된 보조가스의 운용조건을 제시하고자 하였다.

2. 실험장치 구성 및 방법

2.1 실험장치

실험실 외부에서 저장된 고압공기(25atm, 3m³)가 전자식 압력조절장치(Tescom ER 3000SI-1)를 지나 정체실과 원형노즐(출구직경 D=9.4mm)을 통과하면서 초음속 제트(설계 마하수=2.0)가 만들어진다. Figure 2에는 노즐에서 분출된 제트가 가공 절단면(kerf)과 충돌할 때 나타나는 유동구조를 가시화하기 위한 실험장치가 나타나 있다.

쉘러린 유동가시화를 위하여 절단면 좌우 측면에 석영유리(두께 10mm)가 장착된 고정틀을 설치하였으며, 이러한 고정틀 사이로 절단면 모델을 교환하여 절단폭을 바꿀 수 있도록 설계되었다. 실제 레이저가공에서 절단 경사면은 직선이 아니며 레이저 가공특성과 관련된 곡선의 형태로 나타나나,⁽⁹⁾ 본 연구에서는 가장 보편적인 기울기 각도 25°인 직선으로 단순화 하였고, 또한 가공물의 절단깊이는 T=36mm로 정하였다. 노즐 중심축과 가공물의 각도(α , 동축노즐의 경우 $\alpha=0$)를 변화시키기 위하여 이러한 고정틀은 각도회전이 가능한 3차원 마이크로 이송장치 위에 부착되었으며, 광학장치와 함께 하나의 광학테이블에 장착되었다. 본 연구에서는 레이저가공에서 나타나는

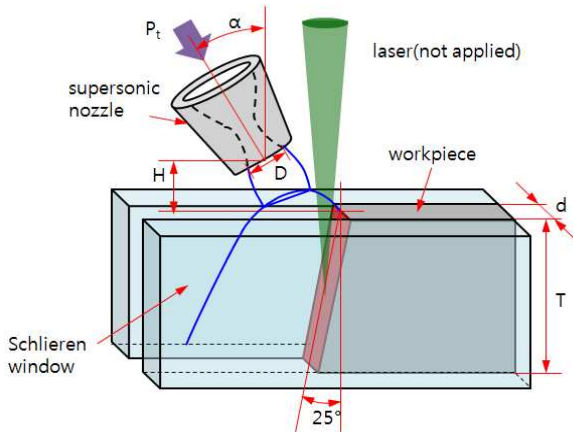


Fig. 2 Schematic diagram of experimental set up

열적거동은 고려되지 않았으며(cold flow), 아울러 절단 경사면에서 용융물질의 막(film)유동 영향도 무시되었다.

2.2 실험방법

두 개의 쉘러린 거울(직경 125mm, 초점거리 =1000 mm)과 두 개의 광학거울을 사용한 변형된 Z-형태 쉘러린 장치를 이용하여 보조가스 충돌유동의 유동가시화가 이루어졌다. 이를 위하여 순간펄스광원(LS-201, 1~10 μ s) 및 수평 knife edge가 사용되었으며 얻어진 쉘러린 영상은 CCD 카메라(CCE-B013, Mightex, Nikon 50mm f1:1.4 렌즈) 및 동조장치를 통하여 컴퓨터에 821 X 641 해상도로 처리되어 저장되었다.

다양한 조건에서의 보조가스 충돌유동 현상을 모사하기 위하여, 고정된 노즐직경($D=9.4\text{mm}$)과 가공물의 절단깊이($T=36\text{mm}$), 그리고 가공 절단면의 기울기(25°)에 대하여 보조가스 압력(P_t), 가공물의 절단폭(d), 노즐과 가공물의 사이거리(H), 그리고 탈축노즐 유동을 관찰하기 위한 노즐 기울기 각도(α) 등을 각 실험변수로 설정하였다(Fig. 2 참조). 이때 보조가스의 정체온도는 약 300K로 실험 중 큰 변화가 없었다. 다음 Table 1에 제시된 바와 같이, 동축노즐의 경우 7 가지의 보조가스 압력, 6 가지의 절단폭, 그리고 4 가지의 사이거리에 대한 총 168 개의 유동조건에 대하여 쉘러린 유동가시화가 이루어졌으며, 탈축노즐의 경우는 세 가지 노즐각도($\alpha=15^\circ, 30^\circ, 40^\circ$) 변화에 따른 추가적인 결과가 획득되었다. 동축노즐의 경우는 노즐출구 한쪽 가장자리가 절단면 상부모서리에 일치한 상태로 실험이 진행되었으며,

Table 1 Test matrix of experimental parameters

Parameters	Variation
P_t (kpa)	400, 600, 750, 980, 1050, 1200, 1400
d (mm)	1.5, 2.5, 3.5, 4.5, 6.5, 9.0
H (mm)	3.5, 7.3, 10, 14.4
α ($^\circ$)	0(coaxial), 15, 30, 40(off-axis)

탈축노즐의 경우는 Fig. 2에 나타난 노즐의 각도 (α) 변화 이외에 기울어진 노즐 중심축이 절단 경사면과 만나는 위치를 바꾸어가며 실험을 진행하였다. 아울러 각 조건마다 세 개 이상의 영상을 확보하여 실험결과의 반복성을 확인하였다.

실험을 통하여 얻어진 가시화 영상에서 충돌유동의 충격과 구조 및 유동박리 현상이 정성적으로 파악되었으며, 특히 얻어진 가시화 영상에서 유동 박리지점 및 강한 박리가 일어나는 보조가스의 압력을 정량적으로 계측하여 해석에 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 보조가스 전압변화

다음 Fig. 3에서는 보조가스 압력이 400kPa에서 1400kPa까지 변화할 때 나타나는 동축노즐의 보조가스 충돌유동 구조를 나타내고 있다. 이때 사이거리는 $H=3.5\text{mm}(H/D=0.37)$ 이고 절단면의 폭은 $d=1.5\text{mm}(d/D=0.16)$ 이다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 노즐출구에서 유출된 초음속유동은 절단면 상부모서리 바로 위에서 나타나는 강한 충격과 구조를 통하여 일차 감속된 후, 다시 팽창과 구조를 통하여 절단면을 따라 하부로 가면서 가속된다. 이때 유동 마하수는 증가하고 압력은 감소하게 된다. 좁은 절단채널 통로내부의 보조가스 유동 경계에서 반사된 팽창파는 다시 경사충격파가 되면서 절단면 하부에 부딪힌다. 유동이 가속되면서 유동방향을 따라 낮아지는 압력이 가공면 최하단에서의 대기압보다 낮아지게 되면 이로 인한 강한 역압력 구배가 형성되고, 결국 이곳에서 경계층과 충격파의 상호작용으로 인한 유동박리가 나타나게 되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 3(a)와 같이 보조가스 압력이 상대적으로 낮은 경우(400kPa), 가공면 하단 약 60% 정도 지

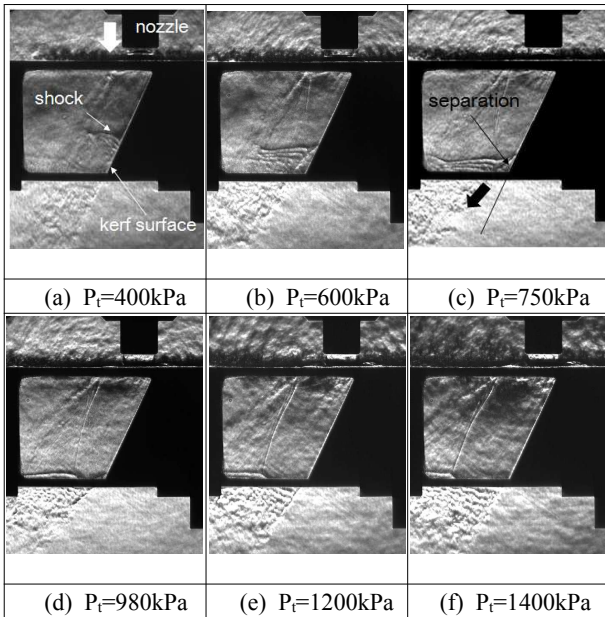


Fig. 3 Schlieren images for various assist-gas pressures ($H/D=0.37$, $d/D=0.16$)

점에서 경사충격파가 가공면 위로 형성된 경계층과 상호작용하여 λ -shock 구조를 형성하고 있음을 볼 수 있는데, 보조가스 압력이 증가하면서 이러한 충격파 형성지점이 점차 하부로 밀리고, 아울러 경사충격파는 보다 강한 수직충격파의 형태로 변화하고 있음을 알 수 있다. 충격파를 통하여 가공면의 경계층은 박리되고 바로 후방에 shock train 현상이 관찰되는데, 이러한 박리현상으로 절단면 하부에 슬래그(slag) 형성 가능성이 커지고 결과적으로 가공면의 표면조도에 직접적인 영향을 주게 된다.

보조가스의 압력이 커짐에 따라 유동 박리지점을 절단면 하부로 밀어내는 효과는 있으나, 압력이 커지면 충격파와 경계층 상호작용 강도도 같이 증가한다. 이에 따라 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 박리지점의 이동은 보조가스 압력 증가에 선형적으로 대응하지 못하며, 높은 보조가스 압력에서도(예를 들면 $P_f=980\text{kPa}$, 1200kPa), 유동박리는 절단면 최하단에 여전히 존재하고 있음을 볼 수 있다. Figure 3에서 보조가스 압력이 1400kPa 까지 증가되면 유동박리 지점은 절단면 하부 밖으로 완전히 빠져나가는 것으로 판단되나(절단면 하부 밖에서의 유동방향 참조), 이러한 고압은 일반 레이저가공 운용에서 적절하지 않을 수 있다. 이렇듯 단지 보조가스의 압력증가가 박리지점 제거에 효율적이지 않음을 본 연구의 유동가시화를 통하

여 확연히 살펴 볼 수 있다.

Figure 3에서 제시된 조건과 다른 사이거리 및 절단폭의 경우에 얻어진 유동가시화 결과는 지면 제약으로 제시되지 않았으나, 절단면을 따라 나타나는 충돌유동 구조변화는 Fig. 3의 경우와 정성적으로 큰 차이가 없었고, 전체적으로 노즐직경에 대한 절단폭의 크기가 작아질수록 보조가스 압력증가에 따른 박리지점의 하부이동 대응 강도는 약해지고 있음이 확인되었다.

3.2 사이거리 변화

보조가스 압력에 따른 노즐유동의 팽창정도에 따라 사이거리 변화에 대한 보조가스 충돌유동 구조의 대응이 다음 Fig. 4에 나타나 있다.

보조가스의 압력변화에 따른 유동의 팽창정도 차이와는 상관없이 전체적으로 사이거리 H 가 절단 경사면에서의 유동 박리지점에 미치는 영향은 미약함이 관찰되고 있다. 실제 Fig. 4에서는 $d/D=0.27$ 인 경우 결과만을 제시하고 있으나, 다른 절단폭의 크기인 경우에도 사이거리 H 의 충돌유동에 대한 적은 영향은 정성적으로 크게 차이나지 않았다.

본 연구의 이러한 결과는 일반적으로 음속노즐에서는 사이거리 H 가 보조가스 충돌 유동장에 미치는 영향이 큰 것에 반하여, 초음속 노즐의 경우에는 이렇듯 H 의 영향이 작다는 과거문헌의 결과⁽⁷⁾와 일치하고 있다. 이는 유동압력이 높은 조건에서 과소팽창 되는 음속노즐 유동에 비하여, 초음속노즐 유동에서는 보다 적은 반경방향 유동성분 때문에 하부 압력전달(pressure delivery) 효과가 보다 우수함에 기인한다. 이로 인하여 초음속노즐을 사용하는 경우, 가공물 표면에서 보다 떨어진 노즐의 위치, 즉 일반적으로 $H < 1\text{mm}$ 인 조건에서 운용되는 음속노즐의 경우에 비하여 상대적으로 큰 사이거리 조건에서 가공이 운용될 수 있으며, 이러한 이유로 레이저가공 중 나타나는 용융물질의 분산으로 인한 노즐 상류 내부에 설치된 레이저관련 광학장치 등의 파손을 방지할 수 있는 장점을 기대할 수 있다.

3.3 절단폭과 노즐직경 간의 상대크기 변화

고정된 노즐 출구직경(9.4mm)에 대하여 절단폭 크기 d 를 변화시키며 유동가시화가 수행되었으며, 그 결과가 다음 Fig. 5에 나타나 있다. Figure

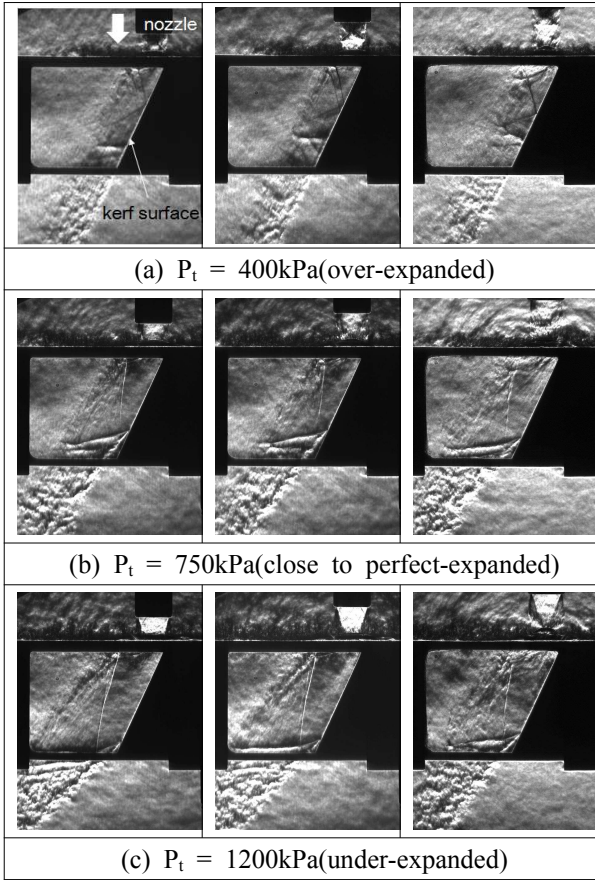


Fig. 4 Schlieren images for various standoff distances $H(d/D=0.27)$; left column $H/D=0.78$, middle column $H/D=1.06$, right column $H/D=1.53$

5에서는 노즐유동이 완전팽창에 가까운 조건 ($P_t=750kPa$)으로 운용될 때 세 가지 H/D 값에 대하여 d/D 의 변화가 충돌유동 특성에 미치는 영향이 서로 비교되었다.

Figure 5에서, 동일한 d/D 에 대하여 H/D 의 크기 변화는 절단면에서 발생하는 유동 박리구조에 큰 영향을 주지 않으며, 이는 이미 Fig. 4에서 관찰된 바와 같다. 그러나 동일한 H/D 에 대하여 d/D 의 변화는 유동박리 구조에 적지 않은 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 일반적으로 동일한 노즐 출구 직경 D 에 대하여 절단폭 d 가 작아지면 마찰초킹(frictional chocking) 및 절단 경사면에서 형성되는 보조가스의 경계층 영향이 커지며, 이는 보조가스의 절단면 상부 흐름의 질을 저하시키는 요인이 된다. 실제로 Fig. 5를 보면, d/D 가 0.16에서 0.27로 커지면서 절단면 위에서 유동 박리점 위치는 크게 변하지 않더라도, 절단면 하부 밖으로 빠져나오는 유동의 각도 관점에서 보면 그 이

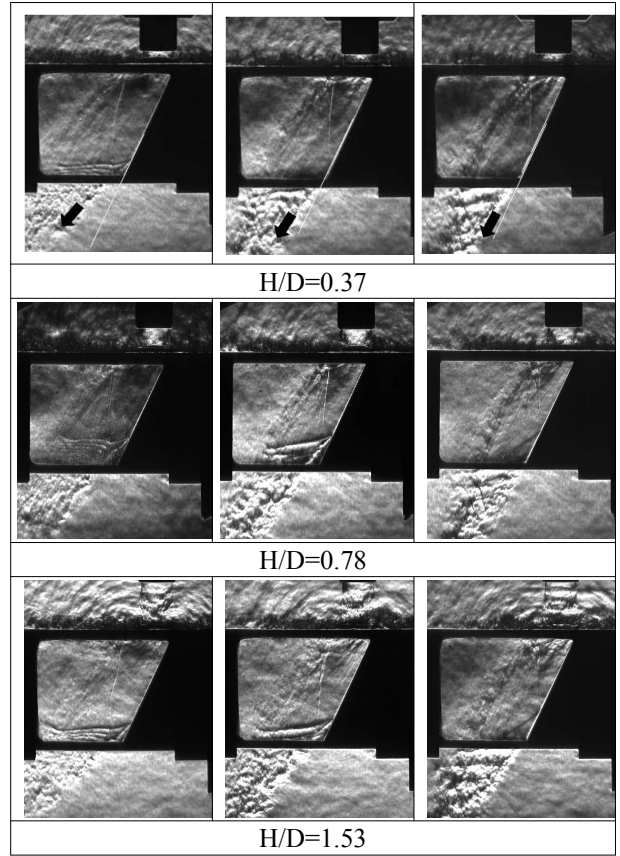


Fig. 5 Schlieren images for various $d/D(P_t=750kPa)$; left column $d/D=0.16$, middle column $d/D=0.27$, right column $d/D=0.37$

탈각도가 작아지며 아울러 박리의 강도는 작아지고 있음을 알 수 있다. 아울러 주어진 보조가스 압력 $P_t=750kPa$ 에서 $d/D=0.37$ 인 경우는 다양한 H/D 변화에 대하여 강한 유동박리가 보이지 않으며, 이러한 현상은 본 연구에서 시도된 보다 더 큰 $d/D(=0.48, 0.69, 0.96)$ 경우에도 동일하게 관찰되었다. 이는 레이저 강도(power)증가나 의도적인 레이저 빔의 defocusing 등을 이용한 작은 절단폭의 증가로 보조가스의 강한 유동박리를 어느 정도 방지할 수 있음을 나타내고 있다.

현재 본 연구의 d/D 변화에 대한 결과가 고정된 가공물의 절단폭 d 에 대하여 노즐크기 D 가 변화될 때의 충돌유동 특성변화와 차이가 있는지 알아보기 위하여, 고정된 가공물의 절단폭에 대하여 노즐 크기가 변화되는 경우에 대한 실험이 추가로 진행되고 있다.

3.4 탈축노즐

탈축노즐은 노즐에서 유출된 유동이 절단면 모

서리에서 꺾이는 각도를 다르게 함으로서 절단 경사면을 따라 흐르는 보조가스 유동의 팽창과 충격파의 반사구조를 완화시켜 절단면을 따라 흐르는 유동의 박리를 피할 수 있게 할 것으로 기대된다.

다음 Fig. 6에서는 노즐 중심축이 절단물 표면과 α 만큼의 각도(Fig. 2 참조)로 기울어진 탈축노즐의 경우에 나타나는 충돌유동의 변화가 동축노즐의 경우와 비교되어 제시되어 있다. 절단폭이 2.5mm ($d/D=0.27$)이고 사이거리가 $H=10$ mm ($H/D=1.06$)인 경우에 한정하여 $\alpha=15^\circ$ 인 경우의 유동가시화 결과가 세 가지 보조가스 압력에 대하여 나타나 있다. Figure 6에서 중간 횡렬에 제시된 그림에서 노즐 출구 가장자리는 절단면의 모서리에 일치하도록 조정하였고, 따라서 노즐 중심축은 절단면 모서리의 약간 하부와 만나게 된다(Fig. 6 중간횡렬 화살표 참조). 또한 탈축노즐의 위치변경⁽¹⁴⁾ 영향을 알아보기 위하여, 동일한 Fig. 6에서 마지막 횡렬의 경우 노즐 중심축은 절단 경사면 모서리로부터 절단깊이의 1/3 되는 아래 지점에 맞추어져 있다(Fig. 6 화살표 참조).

Figure 6에서 볼 수 있듯이, 제시된 모든 보조가스의 압력 및 노즐의 위치에 대하여 절단 경사면 하부에서 발생된 유동의 박리강도는 탈축노즐의 적용을 통하여 많이 완화되어 있음을 볼 수 있다. 탈축노즐의 어느 경우에도 절단 경사면에서 강한 유동박리는 나타나지 않는다. 노즐 출구 가장자리가 절단면의 모서리에 맞추어진 경우(Fig. 6 중간 횡렬), 노즐에서 유출된 보조가스의 일부가 가공물 상면을 따라 수평으로 흘러가는 부분이 있음을 무시할 수 없으며, 따라서 절단면 위를 지나가는 보조가스의 질량유량 및 모멘텀은 동축노즐에 비하여 작아질 수 있다. 이러한 단점을 피할 수 있는 것이 탈축노즐을 수평 이동하여 노즐 중심축이 경사면에 만나는 지점을 변화시키는 경우이다(Fig. 6의 마지막 횡렬). 실제 이 경우 Fig. 6의 중간 횡렬의 경우보다 절단채널 통로 내부 보조가스 유동의 경계가 더 크며 보조가스의 모멘텀이 Fig. 6의 중간횡렬보다 큰 것을 관찰할 수 있다. 또한 노즐 바로 하단에 위치한 절단 경사면 모서리에서 발생하는 충격파(detached)에 의한 압축효과도 피할 수 있음을 알 수 있다.

결국 레이저가공에서 절단면의 가공품질 및 효율에 절대적인 영향을 주는 보조가스의 박리현

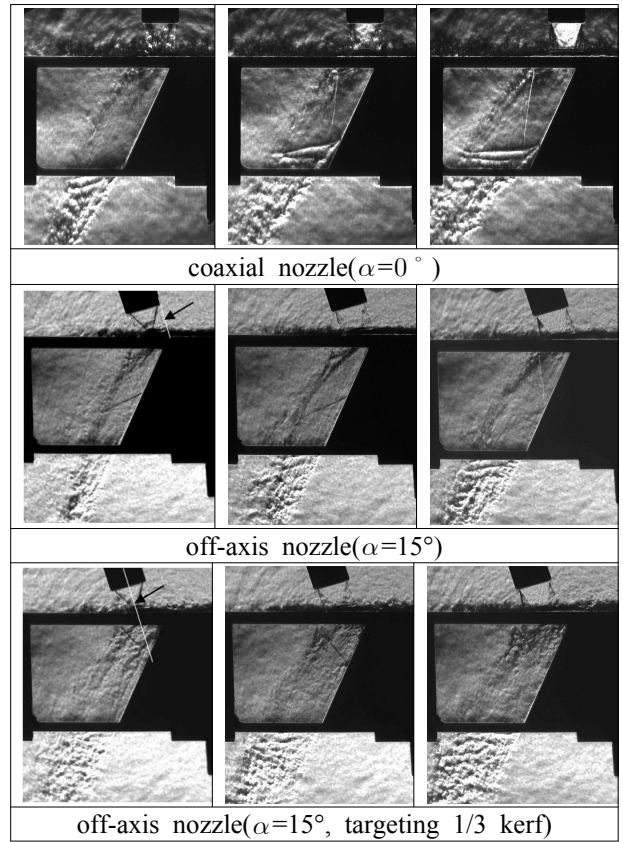


Fig. 6 Comparisons of the flow structures between coaxial and off-axis nozzle cases for various assist-gas pressures ($d/D=0.27$, $H/D=1.06$); left column $P_1=600$ kPa, middle column $P_1=750$ kPa, right column $P_1=980$ kPa)

상 완화라는 측면에서 동축노즐에 대한 탈축노즐의 우수성을 짐작해 볼 수 있다.

3.4 강한 박리가 시작되는 보조가스 압력

절단 경사면을 따라 흐르는 경계층과 충격파의 상호작용으로 인하여 나타나는 박리유동 현상을 다음 두 가지로 구분하여 보았다. 즉 충격파(incident shock)가 절단면에 부딪친 후 반사될 때 경계층의 박리현상이 두드러지지 않는 약한 박리의 경우와 충격파가 경계층과 강한 상호작용을 하여 강한 박리현상이 나타나는 경우를 구분하였고, 이를 다음 Fig. 7에 나타내었다. Figure. 7에서 좌측에 나타난 영상이 약한 박리이며, 절단 경사면 하부에 충격파의 충돌/반사구조가 보이기는 하나 실제 강한 유동박리 현상은 보이지 않고 있다. 아울러 절단면 하부 밖으로 빠져나오는 유동 역시 절단면과 나란하게 흐르고 있음이 관찰되고 있다. Figure 7에서 우측에 나타난 영상이 강한

Table 2 Gas pressures to initiate strong separation on kerf surface(unit: kPa)

Parameter		H/D			
		0.37	0.78	1.07	1.54
d/D	0.16	600	600	600	600
	0.26	750	750	750	750
	0.37	980	980	980	1400
	0.48	1050	1200	1200	none
	0.69	none	none	none	none
	0.96	none	none	none	none

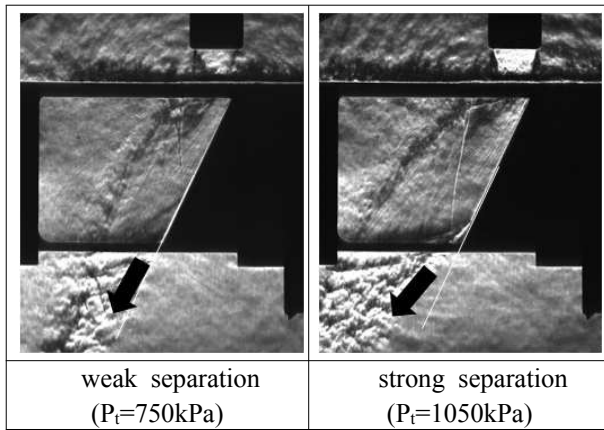


Fig. 7 Comparisons of weak separation and strong separation(d/D=0.37, H/D=0.78)

박리이며, 충격파의 충돌/반사구조를 통하여 절단면 경계층이 크게 박리되고 있으며 아울러 절단면 하부를 빠져나오는 유동 역시 절단면에서 크게 이탈하여 흐르고 있음이 관측되고 있다. 실제 가공 후 절단면 품질에 직접적인 영향을 주는 것은 Fig. 7 우측에 나타난 강한 박리이며, 이에 따라 이러한 강한 박리가 나타나기 ‘시작하는’ 보조가스의 압력(kPa)을 다양한 d/D와 H/D에 대하여 다음 Table 2에 정리하였다.

우선 Table 2에서 나타나 있듯이 강한 박리가 시작되는 보조가스의 압력은 d/D가 중간 범위인 $0.37 \leq d/D \leq 0.48$ 에서 약간의 천이현상이 관측되고 있으나, 전체적으로 사이거리 H의 영향을 거의 받지 않고 있음을 확인 할 수 있다. 또한 d/D가 커짐에 따라 강한 박리가 나타나기 시작하는 보조가스의 압력이 서서히 증가하고 있다. 아울러 천이현상이 나타나는 $0.37 \leq d/D \leq 0.48$ 에서는 오히려 사이거리가 커질수록 강한 박리가 나타나기

시작하는 보조가스 압력이 커지는 것을 알 수 있으며, 이는 상대적으로 큰 사이거리에서 레이저가공이 운용될 수 있는 장점이 될 수 있다. 또한 어떤 특정 임계크기(본 연구의 경우, $d/D=0.69$) 이상에서는 어떤 보조가스 압력이나 사이거리에서도 강한 유동박리는 발생하지 않고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 동축 및 탈축 형태로 초음속 노즐을 통하여 분출되는 보조가스의 레이저 절단 경사면 충돌특성을 살펴본 유동가시화 기법을 통하여 비교 관찰하였다. 레이저가공 후 절단면의 품질에 직접적인 영향을 주는 보조가스의 절단면박리현상을 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 보조가스의 압력이 증가함에 따라 유동의 박리지점이 절단면 하부로 이동하나, 박리지점 하부이동은 압력증가에 대하여 선형적으로 대응하지 못하며, 보조가스의 증가만으로 유동의 박리지점을 절단면 하단 밖으로 밀어내지는 못한다.

(2) 초음속노즐의 경우 사이거리 변화에 따른 유동의 박리지점 변화는 매우 미약하며, 특정한 노즐직경과 절단폭 비에 대하여 큰 사이거리에서도 절단면에서의 박리유동을 피할 수 있다. 이로써 초음속 노즐이 사용될 경우 기존의 음속노즐의 경우에 비하여 비교적 큰 사이거리에서 레이저가공이 운용될 수 있는 장점이 확인되었다.

(3) 본 연구에서 시도된 제한된 범위에서 가공폭의 노즐직경에 대한 비가 커질수록 절단면에서의 보조가스 박리가 나타나기 시작하는 보조가스의 압력이 증가하며, 본 연구의 범위에서 그 비가 0.69 이상일 때는 강한 박리현상이 나타나지 않았다.

(4) 보조가스의 압력에 큰 상관없이 절단면 하부에서 발생하는 유동의 박리강도는 탈축노즐의 적용을 통하여 완화될 수 있다.

후 기

“이 논문은 2009년 교육인적자원부의 재원(기초연구사업)으로 지원을 받아 수행된 연구의 일부임”(2009-0077338)

참고문헌

(1) Fieret, J., Terry, M. J. and Ward, B. A., 1987,

- "Overview of Flow Dynamics in Gas-Assisted Laser Cutting," *SPIE High Power Lasers*, Vol. 801, pp. 243~250.
- (2) La Rocca, A. V., Borsati, L. and Cantello, M., 1994, "Nozzle Design to Control Fluid-Dynamics Effects in Laser Cutting," *SPIE*, Vol. 2207, pp. 169~180.
- (3) Bang, S. Y. and Han, Y. H., "Nozzle and Gas Jet in Laser Cutting," *Journal of the Korean Welding & Joining Society*, Vol. 12, No. 2, pp. 1~10.
- (4) Chen, K., Yao, Y. L. and Modi, V., 2000, "Gas Jet-Workpiece Interactions in Laser Machining," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 122 pp. 429~438.
- (5) Jun, H., Guo, S., Lei, L. and Yao, Z., 2007, "Characteristic Analysis of Supersonic Impinging Jet in Laser Machining," Online Available with DOI: 10.1007/s00170-007-1251-1, *Int. J. Adv. Manuf. Tech.*
- (6) Man, H. C., Duan, J. and Yue, T. M., 1999, "Analysis of the Dynamic Characteristics of Gas Flow Inside a Laser Cut Kerf Under High Cut-Assist Gas Pressure," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 32, pp. 1467~1477.
- (7) Kovalev, O. B., Yudin, P. V. and Zaitsev, A. V., 2009, "Modeling of Flow Separation of Assist Gas as Applied to Laser Cutting of Thick Sheet Metal," *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 33, pp. 3730~3745.
- (8) Sheng, X. J. and Hu, J., 2009, "Simulation and Experimental Analysis of the Effect of Channel Width on Flow Field in Laser Cutting," 2009, *Material Science Forum*, Vol. 626-627, pp. 171~176.
- (9) Duan, J., Man, H. C. and Yue, T. M., 2001, "Modelling the Laser Fusion Cutting Process: Effect of Various Process Parameters on Cut Kerf Quality," *J. Physics D: Appl. Phys.* Vol. 34, pp. 2143~2150.
- (10) Fieret, J. and Rand, C., 2007, "Cutting Thin Steel Sheet," *Industrial Laser Solutions*, Feb., www.industrial-laser.com
- (11) Gross, M. S., 2006, "On Gas Dynamics Effects in the Modelling of Laser Cutting Process," *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 30, pp. 307~318.
- (12) Brandt, A. D. and Settles, G. S., 1997, "Effect of Nozzle Orientation on Gas Dynamics of Inert Gas-Laser Cutting of Mild Steel," *J. Laser Applications*, Vol. 9, No. 6.
- (13) Scroggs, S. D. and Settles, G. S., 1996, "An Experimental Study of Supersonic Microjets," *Experiments in Fluids*, Vol. 21, No. 6, pp.401~409.
- (14) Quintero, F. et al, 2003, "Comparative Study of the Influence of the Gas Injection System on Nd:yttrium-Aluminium-Garnet Laser Cutting of Advanced Oxide Ceramics," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 74, No. 9, pp. 4199~4205.
- (15) Min, S. K., Yu, D. O., Lee, Y. and Cheong, J. S., 2009, "Study of Micro-Supersonic Impinging Jets and Its Application to the Laser Machining," *Transactions of the KSME B*, Vol. 33, No. 2, pp. 93~100.