

## 초음속 사각노즐을 이용하는 레이저 가공 보조가스의 특성에 관한 실험적 연구

손상혁\* · 전동연\*\* · 이 열\*\*†

\* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부, \*\* (주)엠앤에스시스템

### Experimental Study of Characteristics of Assist Gas in Laser Machining Using Supersonic Rectangular Nozzle

Sang-Hyuk Son\*, Dong-Yeon Jun\*\* and Yeol Lee\*\*†

\* School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University, \*\* M&S System Corporation

(Received June 20, 2011 ; Revised December 6, 2011 ; Accepted December 16, 2011)

**Key Words:** Laser Machining(레이저가공), Assist Gas(보조가스), Supersonic(초음속), Rectangular Nozzle(사각노즐)

**초록:** 레이저 절단가공에서 사용되는 보조가스의 충돌특성을 개선하기 위한 실험적 연구가 진행되었다. 보조가스의 압력, 노즐의 위치 및 각도 등 다양한 관계변수의 변화에 대하여, 초음속 사각노즐에서 분출되는 보조가스의 절단면 충돌특성이 기존의 원형노즐 경우와 비교 관찰되었다. 이를 위하여 쉘리언 유동가시화 및 절단면 하단에서의 피토압 측정이 진행되었다. 본 연구에서 응용된 사각노즐은 절단면 모서리에서 발생하는 마하디스크의 강도를 줄이고, 이를 통하여 기존의 원형노즐에 비하여 절단면을 따라 흐르는 보조가스의 박리현상을 약화시키고 보조가스 후방의 피토압력을 증가시킬 수 있음이 확인되었다.

**Abstract:** An experimental study to improve the impingement characteristics of the assist gas in laser cutting was carried out. For various assist-gas pressures, and locations and installation angles of the nozzle, the characteristics of the impingement of the jet from a supersonic rectangular nozzle were compared to those previously observed for typical circular nozzles. Schlieren flow visualizations and Pitot pressure measurements downstream of the kerf surface were utilized for this purpose. The present rectangular supersonic nozzle decreased the strength of the Mach disc occurring at the corner of the kerf surface, and thus, could weaken the separation of the assist gas on the kerf surface and increase the Pitot pressures downstream compared to conventional circular nozzles.

- 기호설명 -

- d : 가공물의 절단폭
- D : 노즐 직경
- H : 노즐출구에서 가공물까지 수직 사이거리
- P<sub>t</sub> : 보조가스 전압
- P<sub>pilot</sub> : 피토압력
- X : 절단면에 수직인 거리
- α : 탈출노즐의 각도

### 1. 서론

레이저 가공에서 노즐을 통하여 분출되는 보조 가스는 절단부위에 용융된 불순물 제거, 절단면 냉각기능, 레이저 광학장치 보호 등 매우 중요한 역할을 하고 있다. 따라서 보조가스의 유동특성은 절단면의 최종 가공정밀도에 큰 영향을 준다.<sup>(1,2)</sup> 이에 따라 그동안 관련 기초연구가 많이 진행되어 왔으며,<sup>(3-8)</sup> 이를 통하여 보조가스 압력, 노즐과 가공물 사이의 거리, 노즐출구 마하수 등 보조가스의 절단면 충돌특성에 영향을 미치는 주요 인자에 대한 이해가 어느 정도 이루어진 바 있다. 그러나 대부분의 과거 연구는 대상 노즐의

† Corresponding Author, ylee@kau.ac.kr

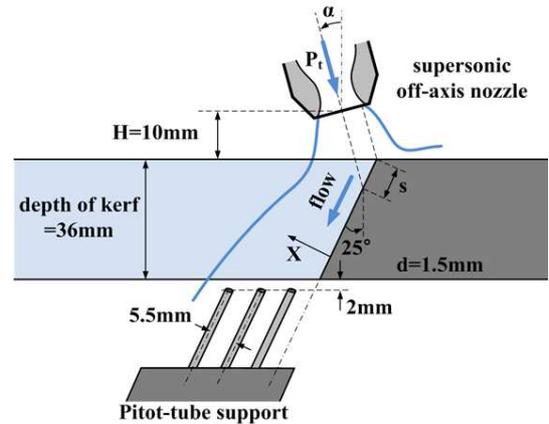
**Table 1** Separation of assist gas on kerf surface for various combinations of D and d<sup>(10)</sup>

D (mm)	d (mm)	D-d (mm)	P <sub>t</sub> (kPa)				
			400	600	700	980	1200
3.0	2.5	0.5	×	×	×	×	×
	1.5	1.5	×	×	×	×	×
6.0	2.5	3.5	×	×	×	×	×
	1.5	4.5	×	×	×	×	○
9.4	2.5	6.9	×	×	○	○	○
	1.5	7.9	×	○	○	○	○

마하수 범위 및 연구결과의 정량적인 데이터 확보 측면에서 한계가 있었다. 레이저 가공 보조가스의 절단면 충돌특성에 관한 보다 정량적인 관찰을 위하여 Kaga 등<sup>(9)</sup>은 절단면 하부에 설치된 피토관 압력측정을 통하여 보조가스가 절단면을 따라 하부로 전달되는 압력특성을 관찰한 바 있으나, 대상노즐이 일반적인 음속노즐에 한정되어 있었다.

국내에서도 관련된 연구가 일부 진행되어,<sup>(10)</sup> 절단면을 따라 흐르는 보조가스의 박리를 지연하거나 그 강도를 경감시킬 수 있는 조건이 제시된 바 있다. 그 연구에서 얻어진 결과에 따르면, 보조가스를 분출하는 원형단면의 노즐 출구직경이 가공물의 절단폭에 비하여 커질수록 보조가스가 절단면에서 박리되기 시작하는 보조가스 압력이 작아지는 경향이 확인된 바 있다(Table 1 참조). Table 1에서는 보조가스가 절단면에서 박리되지 않을 때를 ×로, 박리가 될 때를 ○로 표시하였다. Table 1의 결과는 노즐출구 직경(D)이 절단폭(d)에 비하여 점차 커지면서 보조가스가 절단면 상부에 충돌할 때 나타나는 급격한 유동면적 감소 및 절단면 상부에 나타나는 충격파(plate shock) 강도의 증가에 따른 영향으로 판단된다.

출구가 원형단면을 갖는 대부분의 레이저가공 노즐의 경우, 절단폭은 노출출구 직경에 비해 매우 작은 것이 일반적이다. 그러나 이 경우 레이저 가공에서 나타나는 매우 좁은 절단폭으로 인하여 원형노즐에서 분출되는 보조가스의 많은 부분은 가공면에 충돌 후 벽제트 형태로 가공면 상부표면을 따라 흐르게 된다. 이때 좁은 절단폭 통로에서의 마찰효과(chocking)와 더불어 충돌면 모서리에서 발생하는 충격파 및 주위의 벽제트는



**Fig. 1** Schematic diagram of test model

매우 강한 비정상성을 갖게 되고 이는 가공 절단면 품질을 저하시키는 주요 요인이 되고 있다.

따라서 본 연구에서는 Table 1에 제시된 결과를 근거로, 기존의 원형노즐 대신 노즐출구의 짧은 변의 길이가 가공물의 절단폭에 비하여 크지 않은 마이크로 사각노즐을 사용할 때 보조가스의 절단면 충돌특성이 어떻게 변화하는지를 관찰하여 보았다. 실러린 유동가시화를 이용하여 사각노즐 유동이 절단면을 따라 박리되는 구조를 파악하고, 절단면 하부에 설치된 피토관을 이용한 압력측정을 통하여 보조가스가 절단면을 따라 하부로 전달되는 압력특성을 정량적으로 관찰하였다. 또한 사각노즐을 통해 분출되는 보조가스의 압력 및 노즐과 가공물 사이의 거리, 그리고 노즐의 각도(탈축노즐) 등의 변화가 절단면 하부의 피토압 분포 및 절단면에서의 유동박리 구조에 미치는 영향을 살펴 보았다. 아울러 얻어진 결과는 본 연구에서 사용된 사각노즐과 동일한 출구 마하수 및 출구 단면적을 갖는 원형노즐에서 얻어진 실험결과와 서로 비교되었다.

## 2. 실험장치 구성 및 방법

### 2.1 실험장치

실험실 외부에서 저장된 고압공기(25atm, 3m<sup>3</sup>)가 전자식 압력조절장치(Tescom ER 3000SI-1)를 지나 설계 마하수가 2.0인 원형 또는 사각노즐을 통하여 초음속 제트로 분출된다. Figure 1에는 노즐에서 분출된 제트가 가공 절단면(kerf) 모델과 충돌할 때 나타나는 유동의 특성을 관찰하기 위한 실험장치 구조가 나타나 있다.

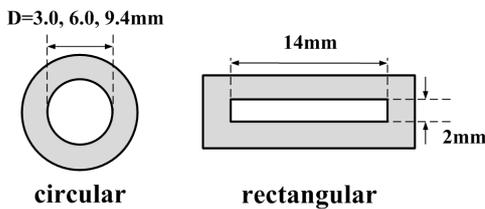


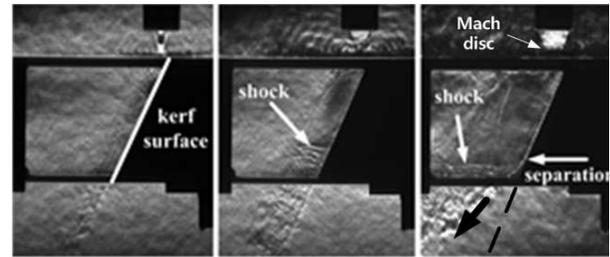
Fig. 2 Shape of circular/rectangular nozzle exits

보조가스가 충돌하는 가공 절단면의 기울기는 25°, 절단깊이는 36mm로 고정하였고, 쉐러린 유동가시화를 위하여 절단면 좌우 측면에 두께가 10mm인 석영유리가 장착된 고정틀을 설치하였다. 이러한 고정틀 사이로 절단면 모델을 교환하여 절단폭(d)을 임의로 바꿀 수 있도록 설계되었다. 노즐 중심축과 가공물 표면과 이루는 각도 (a), 노즐 중심축이 절단면 상에서 만나는 지점 (s) 및 노즐과 가공면 사이의 거리(H)를 변화시키기 위하여 절단모델과 연결된 고정틀은 마이크로 이송장치에 의하여 좌우 이동 및 회전이 가능하도록 제작되었다.

종횡비가 큰 사각단면의 마이크로 초음속 노즐(마하수 2.0, 노즐출구 단면 2mm×14mm, 종횡비 7.0, Fig. 2 참조)이 제작되어 실험에 사용되었다. 사각노즐 출구 세로길이(2mm)를 기준한 보조가스 유동의 레이놀즈수는 완전팽창 조건(보조가스 전압 780kPa)에서 약  $6.9 \times 10^4$ 이다. 본 연구에서 사용된 것과 유사한 큰 종횡비를 갖는 초음속 사각노즐의 후방유동 특성은 참고문헌 (11)에 제시되어 있다. 사각노즐에 대하여 얻어진 본 연구의 결과는 사각노즐 출구면적과 동일한 출구크기를 갖는 원형노즐(D=6.0mm)에서 얻어진 결과와 비교되었다. 이때 사각노즐의 수력직경은 3.5mm로 원형노즐의 수력직경 6.0mm 보다는 작다.

## 2.2 실험방법

절단면 하부에서 나타나는 보조가스의 피토압 측정을 위하여 세 개의 피토관이 고정틀에 연결되었다. 마이크로 피토관(외경1.0mm, 내경0.5mm)의 중심축 간격은 피토관 사이 유동의 간섭을 줄이기 위하여 피토관 중심축 사이 간격을 넓혀 5.5mm로 정하였다. 또한 좁은 절단폭을 갖는 (d=1.5mm) 절단면 통로 하부에서 피토관에 의한 유동 막힘 가능성을 피하기 위하여, 피토관 끝단은 절단면 하부 면에서 2mm 떨어지도록 하였다



(a) D=3.0mm (b) D=6.0mm (c) D=9.4mm

Fig. 3 Schlieren images of the circular supersonic nozzle for various nozzle exit diameter

(Fig. 1 참조). 동일한 보조가스 압력조건에서 세 번에 걸친 실험을 통하여 절단면 하단의 아홉 개 위치에서 피토압 측정이 이루어졌다. 보조가스의 압력이 일정한 상태에서 피토압은 각각 독립된 압력 트랜스듀서에 의하여 5초간 측정되어 얻어진 50개의 데이터가 시간평균 되어 사용되었다(신뢰도 95%에서 표준편차  $\pm 2.9\%$ ).

또한 Z-형태 쉐러린 장치를 이용하여 보조가스 충돌유동의 유동가시화가 이루어졌다. 이를 위하여 순간펄스광원(LS-201, 1~10  $\mu$ s), CCD 카메라(CCE-B013, Mightex, Nikon 50mm f1:1.4 렌즈) 및 동조장치를 통하여 얻어진 쉐러린 영상(수평 knife edge)은 821×641 해상도로 처리되어 저장되었다.

본 연구에서는 실제 레이저가공에서 나타나는 열적현상은 포함되지 않았으며, 보조가스로 사용된 공기의 정체온도는 약 295K로 실험 중 큰 변화를 보이지 않았다. 본 연구의 경우 절단폭(d)는 1.5mm, 노즐과 가공면 사이의 거리는 10mm로 고정된 상태에서 보조가스의 전압( $P_t$ , 400kPa에서 1200kPa까지 변화), 노즐출구 직경(D, 원형노즐 경우 3.0mm, 6.0mm, 9.4mm 세 가지, 사각노즐의 경우는 세로길이 2mm 한 가지) 및 탈축각도( $\alpha$ , 10도에서 30도까지 변화)의 변화가 절단면 하부의 피토압 분포에 미치는 영향을 관찰하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 원형노즐 유동의 가시화 및 압력측정

Figure 3에서는 절단폭을 1.5mm로 고정한 상태에서 원형노즐 출구직경(D)가 변화되는 경우 절단면을 따라 나타나는 보조가스 충돌유동의 가시화 결과를 나타내고 있다. 이때 보조가스 압력은 750kPa, 사이거리는 10mm로 각각 동일하고 노즐

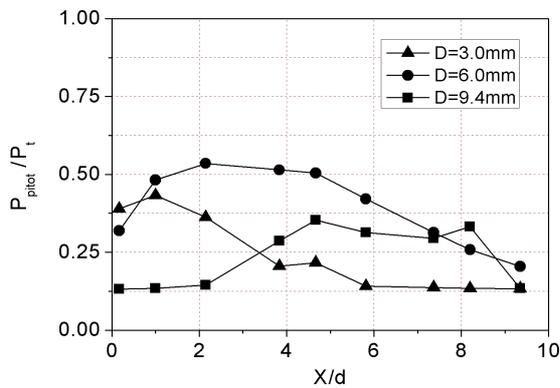
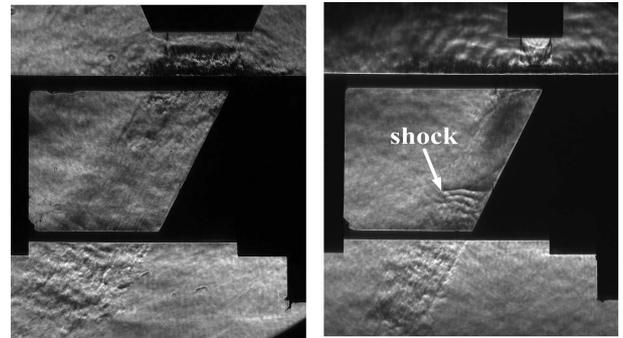


Fig. 4 Variation of Pitot pressure for different circular nozzle exit diameter (H=10mm, d=1.5mm, P<sub>t</sub>=750kPa)

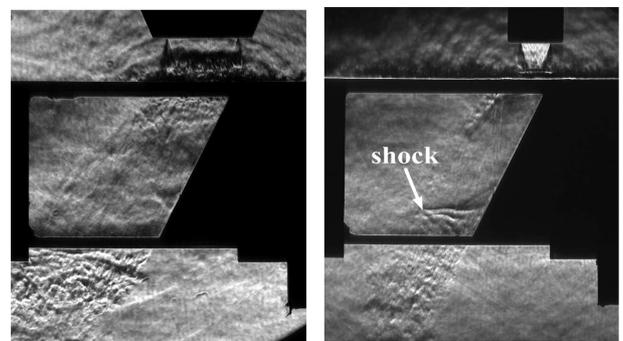
출구의 가장자리는 절단면의 상부 모서리에 맞추어져 있다.

Figure 3(a)에 나타난 D=3.0mm의 경우 보조가스는 경사진 절단면을 따라 크게 벌어지지 않은 채 흐르고, 이때 절단 경사면에서 충격파나 유동박리 구조는 관찰되지 않고 있다. 그러나 Fig. 3(b), 3(c)에 나타난 경우처럼 노즐 출구직경이 점차 커지면서 절단면 하단부에서 약한 충격파가 생기는 것을 관찰할 수 있다. 노즐 출구직경이 9.4mm로 증가하면서 절단면 상부 모서리 위에는 강한 마하디스크(또는 plate shock)가 형성되고, 또한 절단면 하단에서 충격파와 함께 유동박리가 나타나고 있다. 절단면 통로에서 나타나는 보조가스 유동의 마하파의 반사구조 및 충격파 생성 구조에 대한 자세한 설명은 참고문헌 (6) 및 (12)에 자세히 제시되어 있다.

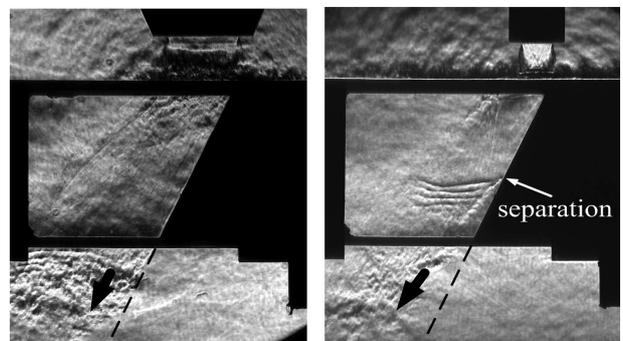
일반적으로 노즐출구 직경은 절단폭에 비하여 크기 때문에, 보조가스 유동은 절단면 상부에 충돌된 후 좁은 절단면 통로로 유입될 때 유동단면적의 감소 및 유동초킹 효과가 나타난다. 노즐출구 직경이 절단폭에 비하여 점차 커지면서 절단면 상부 모서리에 강한 마하디스크가 형성되고 (Fig. 3(c) 참조), 이후 보조가스가 가속되면서 나타나는 팽창파의 반사로 인하여 다시 절단면 하단에서 경사충격파가 형성된다. 이에 따라 절단면 내부유동은 보다 쉽게 박리될 수 있으며, 유사한 결과가 3차원 수치해석적 연구<sup>(13)</sup>를 통하여 확인된 바 있다. 노즐출구의 짧은 변의 길이가 절단폭의 크기와 비슷한 사각노즐 운용은 이러한 충돌 보조가스의 마하디스크 강도를 감소시킬 것으로 판단되고, 이것이 본 연구의 사각노즐 운용



(a) P<sub>t</sub>=750kPa



(b) P<sub>t</sub>=980kPa

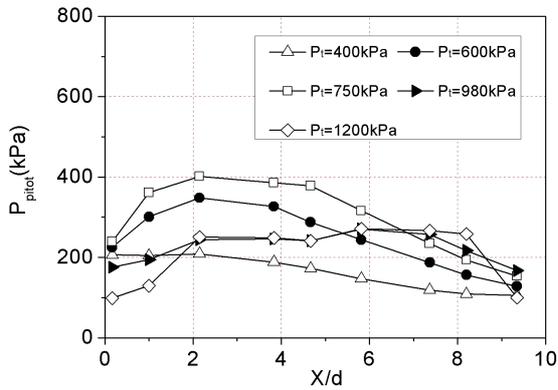


(c) P<sub>t</sub>=1200kPa

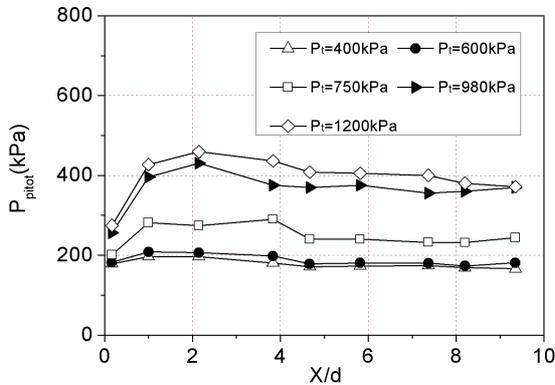
Fig. 5 Comparisons the circular and rectangular supersonic nozzles for various gas pressures (H=10mm, d=1.5mm)

의 배경이기도 하다.

Fig. 3과 동일한 조건에서 절단면 하부에서 얻어진 피토압 측정결과가 다음 Fig. 4에 제시되어 있다. D=3.0mm, 6.0mm 경우에는 절단면에 가까운 측정위치(작은 X/d)에서 큰 값을 보이다가 측정위치가 절단면에서 멀어지면서 피토압이 떨어지는 경향을 관찰할 수 있다. 그러나 절단면 하단에서 충격파 및 유동박리가 나타나는 D=9.4mm인 경우에는 절단면 가까이에서 대기압에 가까운



(a) Circular nozzle



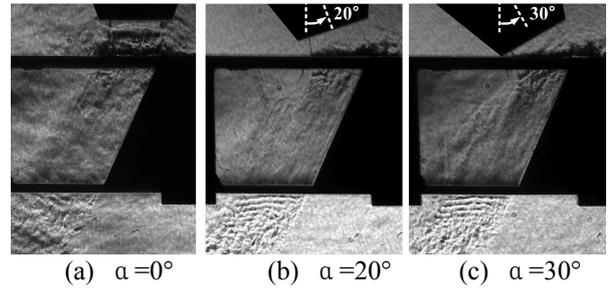
(b) Rectangular nozzle

**Fig. 6** Comparison of Pitot pressure between circular and rectangular nozzles (coaxial,  $H=10\text{mm}$ ,  $d=1.5\text{mm}$ )

낮은 피토압이 측정되고 있다. 이는 충격파 및 유동박리로 인한 절단면 하부유동 방향변화(Fig. 3(c)의 검정색 화살표 참조)에 의한 것으로 판단된다. 이러한 노즐출구 직경크기 변화에 대한 피토압 분포의 경향성은 보조가스 압력이 750kPa보다 크거나 작은 경우에서도 Fig. 4의 결과와 유사함이 관찰되었다. 즉, 노즐출구 직경이 커지면서 절단면 하단에 유동박리가 쉽게 일어나고 보조가스의 용융물 제거효과는 감소하는 것으로 판단된다.

### 3.2 원형노즐과 사각노즐의 비교

Figure 5에서는 노즐출구의 형상변화가 보조가스 충돌특성에 미치는 영향을 파악하기 위하여, 원형노즐과 사각노즐의 유동 충돌특성을 비교하였다. 이때 사이거리는 10mm, 절단폭은 1.5mm로서 동일하며, 원형노즐의 출구직경은 6.0mm이다. Figure 5의 좌측 열은 사각노즐의 경우를, 우



**Fig. 7** Schlieren images of the rectangular nozzle for various angles ( $P_i=750\text{kPa}$ ,  $H=10\text{mm}$ )

측 열은 원형노즐의 경우를 나타내며, 모든 경우 노즐출구 가장자리 연장선은 절단면의 모서리에 맞추어져 있다.

Figure 5에서 나타난 바와 같이 좌측 열의 사각노즐에서 분출된 보조가스는 절단면 위로 넓게 퍼져 흐르고 있음을 알 수 있으며, 이러한 사각노즐의 특성은 절단면에서 형성되는 용융물의 제거에 좋은 효과가 있을 것으로 판단된다. 또한 보조가스 압력이 증가하면서 원형노즐의 경우에는 절단면 하부에 충격파와 함께 박리유동 구조가 관찰되는 반면, 사각노즐 경우에는 동일한 조건에서도 유동의 박리현상이 나타나지 않음을 알 수 있다.

동일한 조건에서 측정된 절단면 하부의 피토압 분포가 두 노즐에 대하여 다음 Fig. 6에서 서로 비교되어 있다. 이때 피토압의 크기 비교를 위하여 피토압은 무차원화 되어 표시되지 않았다. Figure 6(a)에 나타난 원형노즐의 경우, 낮은 보조가스 전압조건에서 피토압 측정위치가 절단면에서 멀어질수록( $X/d$  증가) 피토압 크기가 서서히 증가하여  $X/d=2.0$  근처에서 최대값을 갖고 이후  $X/d$ 가 증가하면서 떨어지는 경향을 볼 수 있다. 또한 보조가스가 완전팽창에 가까운 전압조건 ( $P_i=750\text{kPa}$ )에서 가장 높은 피토압이 나타나고,  $P_i=1200\text{kPa}$ 의 고압에서는 보조가스 박리로 인한 절단면 근처에서 저압부를 관찰할 수 있다.

Figure 6(b)에 나타난 사각노즐의 경우를 원형노즐의 경우와 비교할 때, 피토압 크기는 본 연구에서 측정된  $X/d$  범위에서 거의 균일하게 나타나고 있다. 아울러 그 피토압의 크기는 보조가스의 압력에 정성적으로 비례하고 있다. 즉 사각노즐의 경우에는 고압의 보조가스( $P_i=1200\text{kPa}$  경우)에서도 유동박리가 나타나지 않으며, 오히려 가

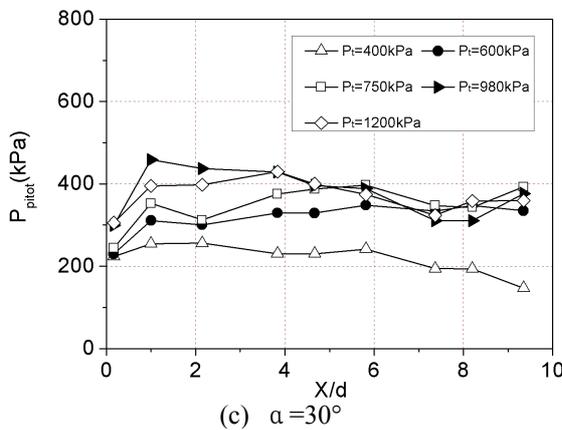
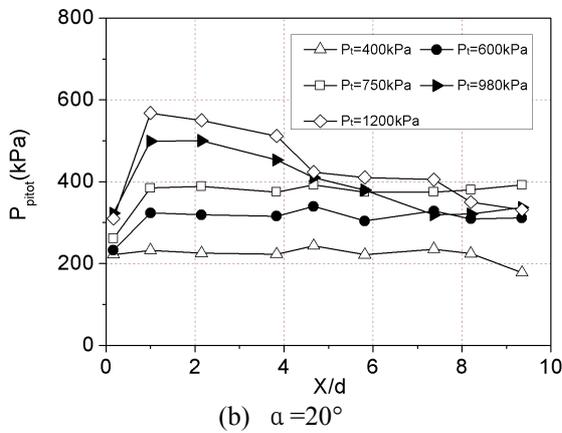
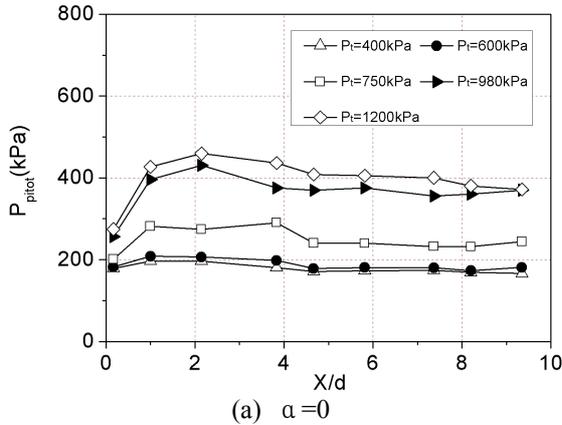
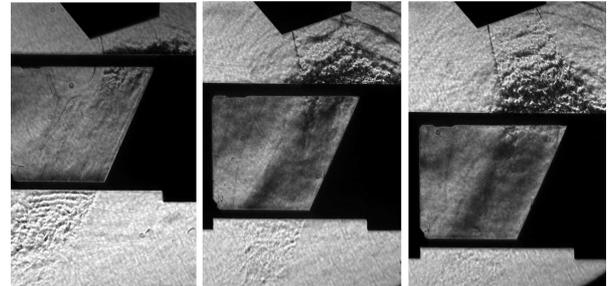


Fig. 8 Pitot pressure of the rectangular nozzle various angles (H=10mm)

장 높은 피토압 분포를 보여주고 있다. 이 경우 최대 피토압은 원형노즐 경우에 관찰된 최대값 ( $P_t=750\text{kPa}$  경우)보다 약  $50\text{kPa}$  더 큰 것을 관찰할 수 있다. 이는 사각노즐이 크고 균일한 보조가스의 하부 압력전달 효과가 있으며, 또한 고압의 보조가스 압력조건에서도 절단면에서의 유동박리가 일어나고 있지 않음을 나타낸다.



(a) H=10mm (b) H=20mm (c) H=30mm

Fig. 9 Schlieren images of the rectangular nozzle flows for various stand off distances ( $P_t=750\text{kPa}$ )

### 3.3 탈축 사각노즐의 각도 및 사이거리 변화

보조가스 노즐이 탈축으로 운용되는 경우, 보조가스가 절단면 모서리에 충돌된 후 절단면 쪽으로 방향이 꺾이는 영향으로 절단면 모서리에서 발생하는 팽창파를 약화시킬 수 있다. 이에 따라 팽창파가 보조가스 경계에서 충격파로 반사되어 절단면에서 유동이 박리되는 것을 막을 수 있다. 따라서 본 연구의 사각노즐이 탈축으로 운용될 때 나타나는 보조가스 충돌특성을 관찰하기 위하여 유동가시화 및 피토관 압력측정이 진행되었다.

Figure 7에는 사이거리가 10mm로 고정된 상태에서 노즐의 탈축각도( $\alpha$ )가 0에서 30도까지 변화할 때 나타나는 보조가스 충돌유동의 가시화 결과가 나타나 있다. 이때 노즐 출구 가장자리 연장선은 절단면 상부 모서리에 맞추어졌다. 따라서 이때 노즐 중심축은 절단면 모서리의 약간 하부와 만나게 된다( $\alpha=20$ 도일 때  $s=10\text{mm}$ , Fig. 1 참조). 레이저가공의 특성상 레이저 빔이 절단면과 만나는 경로를 고려할 때, Fig. 7에 나타난 노즐의 위치는 그 응용성에 약간의 제한이 있을 수 있다. 그러나 Fig. 7에서 제시된 결과의 어떤 경우에도 절단면 위에서의 유동박리 현상은 관찰되고 있지 않음을 알 수 있다.

동일한 조건에서 절단면 하부에서 측정된 피토압 분포가 다음 Fig. 8에 제시되어 있다. 탈축 사각노즐 경우 피토압 분포의 일반적인 경향성은 Fig. 6(b)에 나타난 동축(coaxial) 사각노즐 경우와 큰 차이를 나타내지 않았다. 즉 피토압 크기는 본 연구에서 측정된 X/d 범위에서 거의 균일하게 나타나고 있고, 그때 피토압의 크기는 보조가스의 압력크기에 정성적으로 비례하고 있어 보조가스 압력이 1200kPa일 때 가장 높은 피토압을 나

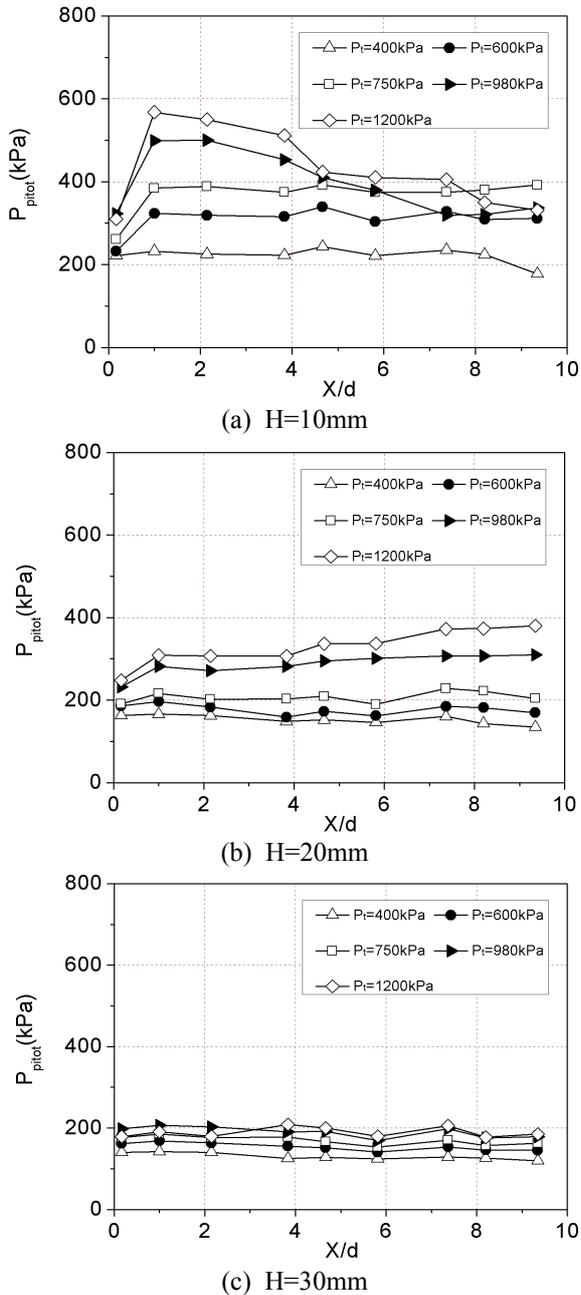


Fig. 10 Pitot pressure of the rectangular nozzle for various H ( $\alpha=20^\circ$ )

타내고 있다. 또한 Fig. 8에 제시된 세 그림에서 Fig. 8(b)에서 나타난 탈축각이  $20^\circ$ 일 때가 동축 ( $\alpha=0$ ) 및  $\alpha=30^\circ$ 인 경우보다 더 큰 피토압 분포를 나타내고 있다. 따라서 사각노즐이 운용될 때는 동축보다는 탈축각이  $20^\circ$ 인 조건에서 절단면 후방에서 큰 압력회복 및 높은 용융물 제거효과를 기대할 수 있다.

사각 탈축노즐의 사이거리가 변화할 때 나타나

는 보조가스의 충돌유동 가시화가 다음 Fig. 9에 제시되어 있다. 이때 노즐의 탈축각은 앞서 Fig. 8(b)에서 가장 높은 피토압 분포를 보여주었던 탈축각 경우인  $20^\circ$ 로 고정되었고, 노즐출구 가장자리 연장선은 절단면의 모서리에 일치하도록 조정하였다.

중형비가 큰 사각노즐의 후방 초음속 제트 유동장 특성에 관한 과거 연구결과에 따르면,<sup>(11)</sup> 제트유동장에서 유동속도가 음속 이하로 떨어지는 지점(초음속 길이) 및 축전환 특성이 노즐출구 짧은 변의 길이( $d$ )의 약 30배 이상에서 나타난 바 있다. 따라서 본 연구에서 채택한 큰 사이거리에서도 사각노즐의 초음속유동은 절단면까지 유지되고 축전환은 나타나지 않는 것으로 판단된다. Figure 9에서 알 수 있듯이 어떤 사이거리에서도 절단면에서의 보조가스 박리현상은 관찰되지 않고 있다.

이러한 사이거리 변화에 따른 절단면 하부의 피토압 측정결과가 다음 Fig. 10에 제시되어 있다. 관찰된 피토압이 보조가스 압력에 정성적으로 비례하고 절단면의 수직방향으로(X 방향) 고르게 나타나는 것은 앞서 사이거리( $H=10\text{mm}$ )에서 얻어진 Fig. 8의 결과와 유사하다. 그러나 사이거리 증가에 따라 절단면 하부에서 측정된 최대 피토압은  $H=10\text{mm}$ 일 때 약 570kPa에서,  $H=30\text{mm}$ 일 때 약 220kPa로 급격히 떨어지는 것이 관찰되었다. 이는  $H=30\text{mm}$ 인 경우 보조가스 경계의 확산으로 많은 양의 보조가스가 벽제트의 형태로 절단면 상부표면으로 손실되는 이유로 판단된다. 따라서 사이거리가 절단면 하부의 보조가스 압력 전달에 미치는 영향이 크고, 사각노즐이 탈축으로 운용된다 하더라도 큰 사이거리에서는 그 효율이 제한될 수 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결론

중형비가 큰 초음속 사각노즐을 통하여 분출되는 보조가스의 레이저 절단 경사면 충돌특성을 쉐러된 유동가시화 및 피토관 압력측정 실험을 통하여 관찰 비교하였고 다음과 같은 결론을 얻어 내었다.

(1) 중형비가 큰 초음속 사각노즐은 동일한 마하수와 출구 단면적을 갖는 원형노즐과 비교하여, 절단면 하부까지 높고 고른 압력을 전달할

수 있으며, 또한 보조가스의 유동박리를 지연하거나 그 강도를 경감시킬 수 있다.

(2) 초음속 사각노즐의 경우, 동축 운용보다는 20° 탈축각을 갖는 탈축으로 운용될 때 절단면 하부에 보다 높은 압력전달을 기대할 수 있다.

(3) 초음속 사각노즐이 탈축으로 운용된다 하더라도, 사이거리의 급격한 증가는 보조가스 제트 경계의 확산으로 절단면 하부까지 전달되는 보조가스의 압력을 크게 떨어뜨릴 수 있다.

### 후 기

“이 논문은 2010년 중소기업청 재원(산학공동 기술개발사업)으로 지원을 받아 수행된 연구의 일부임”

### 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) Bang, S. Y. and Han, Y. H., 1994, "Nozzle and Gas Jet Flow in Laser Cutting," *Journal of KWS*, Vol. 12, No. 2, pp. 1~10.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) Duan, J., Man, H. C. and Yue, T. M., 2001, "Modelling the Laser Fusion Cutting Process: Distribution of Supersonic Gas Flow Field Inside the Cut Kerf," *J. Physics D: Appl. Phys.* Vol. 34, pp. 2135~2142.
- (7) 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.
- (8) Gross, M. S., 2006, "On Gas Dynamics Effects in the Modelling of Laser Cutting Process," *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 30, pp. 307~318.
- (9) Kaga, K. and Koth, S., 1995, "The Experimental Study in Assist Gas Flow of CO<sub>2</sub> Laser Cutting of Thick Plates of Mild Steel," *Japan Welding Society*, Vol. 56 pp.136~137.
- (10) Son, S. H., Lee, Y. and Min, S. K., 2011, "Study of Characteristics of Assist Gas in Laser Machining Using Flow Visualization Techniques," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 35, No. 2, pp. 153~160.
- (11) Jun, D. H., Moon, Y. J., Lee, Y. and Kim, J. K., 2008, "Experimental Study of Characteristics of the Supersonic Jet Flows with High Aspect Ratio," *Proceedings of the KSME 2008 Thermal/Fluid Conference*. KSME 08FE069.
- (12) 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.
- (13) 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 Modeling*, Vol. 33, pp. 3730~3745.