

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2009.33.2.93

# 마이크로 초음속제트의 충돌유동과 레이저 가공 응용에 관한 연구

민성규\* · 유동옥\*\* · 이 열† · 정조순\*\*\*

(2008년 9월 2일 접수, 2008년 12월 12일 수정, 2009년 1월 7일 심사완료)

## Study of Micro-Supersonic Impinging Jets and Its Application to the Laser Machining

Seong-Kyu Min, Dong-Ok Yu, Yeol Lee and Jo-Soon Cheong

**Key Words:** Micro Jets(마이크로 제트), Supersonic(초음속), Jet Impingements(제트충돌), Laser Machining(레이저가공), Assist Gas(보조가스)

### Abstract

Characteristics of micro-sonic/supersonic axi-symmetric jet impinging on a flat plate with a pre-drilled hole were both experimentally and numerically studied, to observe the role of assist-gas jet to eject melted materials from the cut zone in the laser machining. For various Mach numbers of the nozzle and the total pressures of the assist gas, detailed impinging jet flow structures over the plate and the variations of mass flux through the pre-drilled hole were observed. It was found that the present experimental and numerical results show a good agreement, which proves the accountability of the present work. From the present study, it was also observed that the mass flow rate through the hole was closely related with the total pressure loss caused by the Mach disc on the work piece, and that supersonic nozzle could perform more efficient roles as blowing the assist-gas jet in the laser machining, as compared to sonic nozzles.

### 기호설명

M : 마하수

$\dot{m}_h$  : 가공구멍 통과유량

$\dot{m}_{max}$  : 최대통과유량

$\dot{m}_{min}$  : 최소통과유량

$\dot{m}_n$  : 노즐을 통해 분출된 유량

$P_{loss}$  : 가공구멍 입구까지 손실된 유동전압

$P_t$  : 보조가스 전압

r : 반경방향(가공면의 측방향)

x : 축 방향

### 1. 서론

레이저 가공은 레이저와 보조가스를 이용하는 비접촉 가공기술로 절단면의 상태가 양호하고 컴퓨터 제어를 통한 복잡한 형상가공 편이성 등 많은 장점을 가지고 있다. 레이저 가공은 고출력의 레이저를 가공면에 집중시켜 가공부위를 용융점이상으로 가열하고 노즐을 통해 분출된 보조가스로 용융된 불순물을 제거하는 동시에 가열된 가공면을 냉각하는 과정으로 이루어진다(Fig. 1). 이때 보조가스의 유동특성은 가공성과 직접적인

† 책임저자, 회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부, E-mail : ylee@kau.ac.kr

TEL : (02)300-0113 FAX : (02)3158-2191

\* 한국항공대학교 대학원 항공우주 및 기계공학과

\*\* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

\*\* 충남대학교 기계공학과

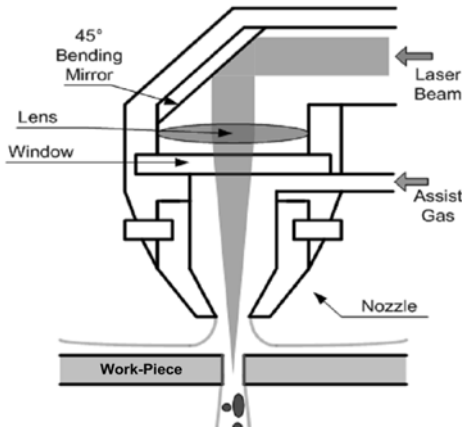


Fig. 1 Schematic diagram of Laser Machining

관계에 있어 이와 관련한 많은 기초연구가 진행되어 왔다.<sup>(1-11)</sup> 이러한 과거 연구결과에 의하면, 보조가스와 가공성능과의 관계변수 중 노즐형태의 변화,<sup>(1,2,9)</sup> 보조가스의 전압,<sup>(7)</sup> 노즐과 가공면의 사이거리<sup>(11)</sup> 등이 가장 중요한 변수로 보고되고 있다. Chen 등<sup>(7)</sup>은 음속노즐에서 보조가스 전압과 사이거리 변화에 따른 보조가스 충돌특성과 절단면 상태변화 등을 실험 및 수치해석을 통해 비교 분석하여, 단순한 보조가스의 전압증가와 짧은 사이거리가 가공성능의 향상으로 항상 이어지지 않음을 제시한 바 있다. 그러나 Chen 등의 연구는 초음속노즐까지 확장되지는 않았다.

현재 산업현장에서 사용되는 레이저 가공의 노즐은 음속노즐이 대부분이며 과소팽창 되는 조건으로 노즐과 가공면의 사이거리가 약 1mm 정도로 설정되어 운용되고 있다. 이러한 짧은 사이거리에서는 보조가스의 압력전달(pressure delivery) 효율이 증가하여 가공의 성능향상을 기대할 수 있으나, 노즐 내부의 레이저 출력장치가 손상되는 위험성 또한 증가된다. 보조가스가 초음속으로 완전팽창 된 경우에 보다 낮은 제트확산도 및 높은 압력전달 효과를 기대할 수 있기 때문에, 레이저 가공에서 음속노즐 대신 초음속(Laval)노즐을 활용하는 연구가 절실히 요구되고 있다.

초음속노즐이 레이저 가공에 응용되는 경우에 관한 최근의 연구로, Rand<sup>(12)</sup>는 수치계산을 통하여, 보조가스의 특정압력 범위에서 초음속노즐을 사용할 때 절삭속도가 음속노즐의 경우보다 더 우수한 결과를 제시한 바 있다. 그러나 최근에 가공면 후방의 용융된 불순물의 제거 측면에서 초음속노즐의 단점을 지적한 연구결과<sup>(13)</sup>가 보고

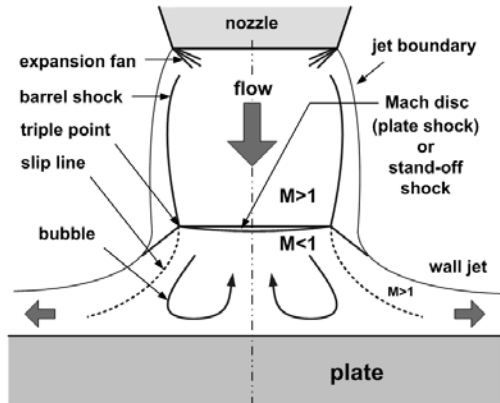


Fig. 2 Supersonic Jet Impingement

된 바 있다. 보조가스가 가공면에 충돌할 때 나타나는 충격파 및 팽창파를 동반한 유동특성은 그 구조가 매우 복잡하고(Fig. 2 참조) 관련변수가 많아 이에 관한 기초적이고 물리적인 이해가 여전히 많이 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 레이저 가공에서 동축(coaxial)의 형태로 음속노즐과 초음속노즐을 통하여 분출되는 보조가스의 충돌특성을 수치해석적, 그리고 실험적 방법을 통하여 관찰 비교하였다. 레이저 가공에서 나타나는 유동현상을 모사하기 위하여, 충돌판에 특정크기의 직경을 갖는 가공구멍을 설정한 후, 보조가스 전압의 변화에 따른 충돌제트유동의 특성, 절단면에서의 전단응력의 변화, 유동전압 손실비와 질량유량비, 그리고 가공구멍을 통과하는 질량유량의 변화를 관찰되었는데, 이는 용융된 불순물을 "밀어내는" 보조가스의 역할은 가공구멍을 통과하는 질량유량과 직접적인 상관관계가 있기 때문이다. 아울러 이러한 결과를 통하여 레이저 가공의 최적효율을 위한 보조가스의 유동조건을 제시하고자 하였다.

## 2. 수치해석 및 실험 방법

### 2.1 수치계산 모델 및 수치기법

레이저 가공은 열전달<sup>(14)</sup> 및 화학반응 현상이 개입되며, 가공재료를 절단하는 과정을 모사하기 위하여 3차원 계산<sup>(15)</sup>이 필요하나, 본 연구에서는 충돌제트의 유동특성 관찰이라는 측면에서 노즐의 중심축이 가공판의 가공구멍과 일치된 축대칭문제(coaxial)로 단순화 하였으며, 열전달 및 화학반응의 영향을 무시하였다(cold flow). 이때 작은

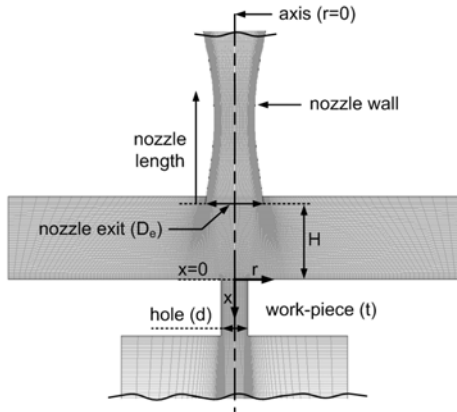


Fig. 3 Computational grid (M=2.24)

노즐 내부 경계층에 의한 영향이 고려하기 위하여, 노즐 내부 경계층 유동을 계산범위에 포함시켰다(노즐 길이 25mm). 아울러 노즐 출구직경(음속노즐;  $D_e=1.35\text{mm}$ ,  $M=2.24$  노즐;  $D_e=1.55\text{mm}$ )은 가공구멍의 직경( $d=0.711\text{mm}$ )보다 크게 설정되었고, 노즐출구에서 가공판까지 사이거리(H)는 2mm, 가공판의 두께(t)는 1.5mm로 설정되었다.

수치계산을 위하여 축대칭 공간의 coupled implicit 방법과 2차 풍상법(second-order upwind scheme)의 Navier-Stokes 상용코드를 사용하였으며, 계산격자는 정렬격자로 밀도변화가 크거나 유동구조가 복잡한 영역은 격자를 보다 조밀하게 구성하였고(grid adaptation), 벽면의 첫 번째 격자점이  $y^+ < 1$ 이 되도록 하였다. 격자의 총 개수는 최대 약 50,000개로 설정되었으며, Fig. 3에 본 연구에서 사용된 계산격자의 일부가 나타나 있다.

작동유체는 공기로 이상기체를 가정하였으며,  $k-\epsilon$  난류모델을 사용하였다. 벽면에서는 비미끄러짐(no slip)과 단열조건, 그리고 non-equilibrium wall function을 사용하였다. 정상상태 결과의 수렴은 잔차가  $10^{-5}$ 에 이르기까지 진행되었다. 아울러 특정 보조가스 전압에 대하여 음속노즐의 수치계산에 사용된 격자수를 20% 증가 또는 20% 감소시켜 독립된 계산을 수행해 본 결과, 충격파를 통한 압력손실, 가공구멍 통과유량, 그리고 전단응력분포 등의 결과 값의 차이가  $10^{-6}$ 이하로 나타났고, 이로서 본 연구의 수치해석결과는 계산격자수와 무관하다는 사실이 확인되었다.

### 2.2 실험장치 구성 및 방법

수치해석 결과의 검증을 위하여, 동일한 조건(cold flow)에서의 실험적 연구가 진행되었다. 마

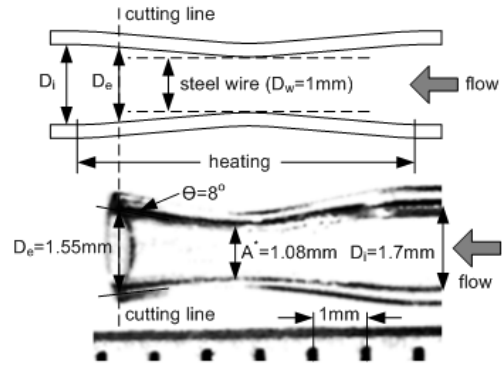


Fig. 4 Fabrication of the nozzle and contour of the C-D Nozzle (M=2.24)

이크로 음속 및 초음속( $M=2.24$ )노즐과 특정크기의 가공구멍( $d=0.711\text{mm}$ )을 갖는 충돌판이 제작된 후 가공구멍을 통과하는 유량이 측정되어 수치해석 결과와 비교되었다.

크기가 작은 Laval 노즐을 제작하기 위하여 Scroggs 등<sup>(16)</sup>이 제시한 방법에 따라 파이렉스 원형 유리관(내경 1.7mm, 외경 3mm) 중앙부를 미니 토치램프로 가열하면서 유리관 양쪽에 장력을 가하여 늘인 후, 인장된 유리관의 노즐출구를 적절히 절단하여 원하는 면적비를 갖는 마이크로 초음속노즐이 제작되었다(Fig. 4 상부참조). 이러한 방법으로 제작된 Laval 노즐의 확대영상이 Fig. 4의 하부에 제시되어 있다. 현재 이러한 방법을 통하여 출구내경이 1.55mm이고 출구 마하수가 2.24인 초음속 마이크로 노즐(확산각 약  $8^\circ$ )과 출구내경이 1.35mm인 음속노즐(수축각 약  $8^\circ$ )도 제작되어 실험에 각각 사용되었다.

정체실에서 노즐을 통하여 분출되는 압축공기가 충돌판 가공구멍을 통과할 때의 통과유량을 정밀유량계(OMEGA FMA-1610A, 0.8% 측정오차)를 사용하여 측정하였으며, 측정된 체적유량은 유량계에서 측정된 압력 및 온도를 이용하여 질량유량으로 환산되었다. 다음 Fig. 5는 본 연구에서 사용된 실험장치의 개요도를 나타내고 있으며, 모든 장치는 하나의 광학테이블에 놓여 조정 및 측정이 용이하게 되어 있고, 제트의 충돌판은 마이크로 이송장치를 통하여 그 위치를 정확하게 조정할 수 있도록 하였다. 실험의 진행은 보조가스 전압변화에 따라 충돌판의 가공구멍을 통과하는 통과유량을 25회 이상 반복 측정하여 평균값을 산출하였으며, 이때 반복된 측정값의 표준편차는 5% 이하로 작게 나타남이 확인되었다.

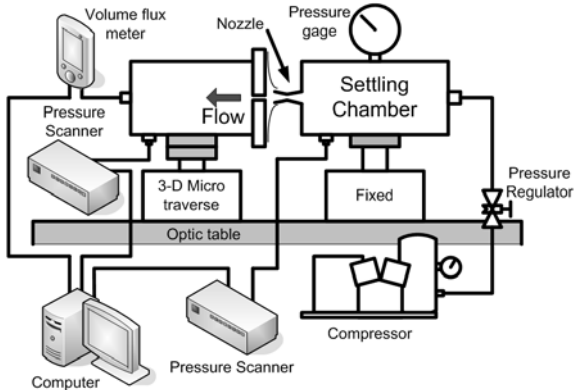


Fig. 5 Experimental setup

3. 결과 및 고찰

3.1 수치해석 및 실험 결과의 비교 검증

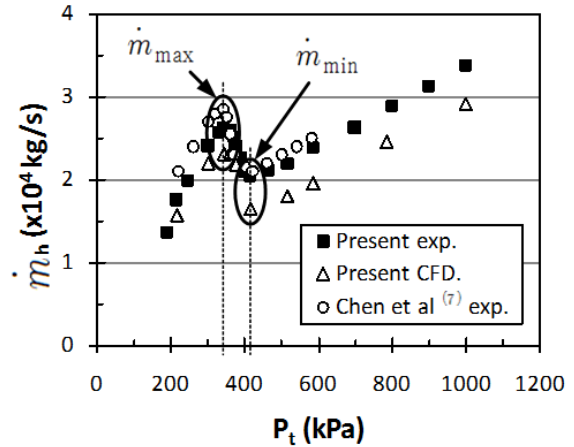
본 연구의 관찰 결과를 검증하기 위하여, 음속 노즐과 초음속노즐에서의 보조가스 전압에 따른 총돌관 가공구멍의 통과유량 변화를 동일한 경계 조건에서 수행된 실험 및 수치해석 결과를 서로 비교하였으며, 이를 다음 Fig. 6에 나타내었다. Figure 6(a)의 음속노즐 경우에서, 실험 및 수치해석에서 얻어진 전압변화에 따른 통과유량의 크기는 약 10% 이내에서 서로 잘 일치하고 있고, Fig. 6(b)의 초음속노즐의 경우에도 최대 약 5% 정도로 서로 잘 맞고 있음이 확인되고 있다.

음속노즐의 경우[Fig. 6(a)], 제트유동이 파소팽창 되기 시작하는 초기에는 전압 증가에 따라 가공구멍을 통과하는 유량이 증가하다가, 전압이 360kPa에서 415kPa인 구간에서는 반대의 경향을 보이고, 이후 다시 전압증가에 따라 통과유량이 증가하는 “N”자 형태의 변화가 관찰되고 있다. Figure 6(b)에 나타난 초음속노즐의 경우에도 통과유량이 전압증가에 따라 비슷한 “N”자 형태로 변화하는 경향성이 관찰되는데, 초음속노즐의 경우 제트유동이 완전팽창 되는 조건인  $P_t=1140kPa$  근처에서 통과유량이 오히려 최저점에 가까운 현상이 확인되고 있다. Figure 6에서, 통과유량이 “N”자 형태로 변화하는 구간에서 나타나는 최대 통과유량을  $\dot{m}_{max}$  로, 최소통과유량을  $\dot{m}_{min}$  로 표시하였다.

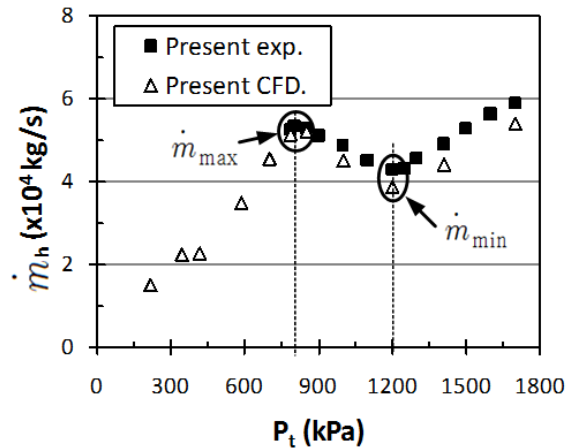
3.2 음속노즐에서의 결과 분석

3.2.1 총돌유동 구조 및 통과유량 분석

Figure 7은 음속노즐에서 나타나는 총돌유동 구



(a) Sonic Nozzle (M=1)



(b) Supersonic Nozzle (M=2.24)

Fig. 6 Comparison of the mass fluxes

조를 등압력(iso-pressure, 단위=Pa) 선도로 나타내고 있다. 이때 전압은 노즐 외부압력( $P_a=101kPa$ )에 대하여 무차원화 되어 표시되었다. 노즐전압은 일반적으로 레이저 광학장치에서 두꺼운 렌즈를 쓸 때의 최대압력 범위인 1700kPa까지로 한정하였다. Figure 7에서, 보조가스의 전압이 증가하면서 제트의 팽창정도가 커지고 유동 마하수는 증가되고 있다. 이로 인하여 제트경계에서 반사되는 팽창파의 마하각이 감소하게 되고, 반사구조의 중첩으로 생기는 배럴충격파(barrel shock)는 제트경계 쪽으로 점차 벌어지게 되는 현상을 관찰할 수 있다. 전압이 360kPa( $P_t/P_a=3.6$ )에 이르기 전까지는 가공구멍 상단에 강한 충격파가 형성되지 않다가, 그 이후에는 충격파 구조로 인하여 가공구멍 통과유량이 감소하기 시작한다. 전압이 더욱 증가하면( $P_t/P_a=4.15$ ) 가공구멍 상단에 마하디스크(standoff shock)가 형성되고 가공구멍 상단의 마하디스크가 배럴충격파와 만나는 삼중점이

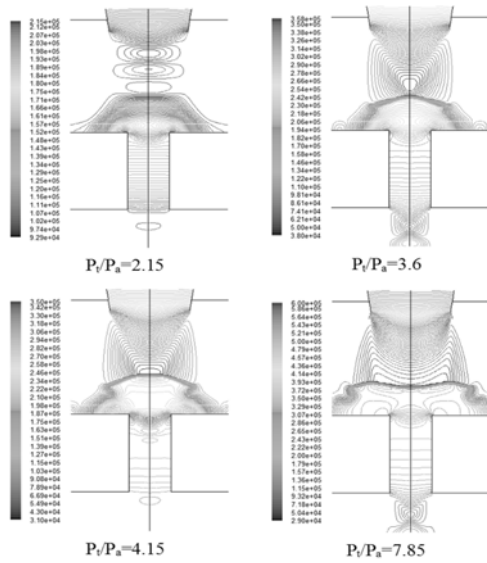


Fig. 7 Contours of the static pressure (M=1.0)

형성되는 것을 볼 수 있다. 이러한 마하디스크의 형성과 후방 slip line의 벌어짐이 가공구멍의 직경보다 커지는 시점에서 가공구멍을 통하는 최소 통과유량( $\dot{m}_{min}$ )이 나타난다. 이후 전압의 증가에 따라 마하디스크의 직경은 점차 커져 좌우로 벌어지면서 오목해지는데, 전체적인 충격파의 구조는 정성적으로 크게 차이하지 않으며, 또한 구멍 통과 질량유량은 전압증가에 선형적으로 증가하고 있다.

Figure 8에서는 보조가스 전압변화에 따른 압력손실비와 질량유량비가 나타나 있다. 이때 압력손실비는 노즐입구에서 충돌판에 도달하기까지 손실된 전압손실( $P_{loss}$ )을 유동전압( $P_t$ )에 대하여 무차원화 한 것이며, 질량유량비는 가공구멍 통과 유량( $\dot{m}_h$ )을 노즐출구에서의 질량유량( $\dot{m}_n$ )으로 무차원화 한 것이다. Figure 8에 나타난 바와 같이, 전압이 높아지면서 충격파의 생성으로 유동의 압력손실비가 급격히 커지다가, 강한 마하디스크가 형성되는  $P_t=415\text{kPa}$  이후부터는 그 증가 기울기가 완만하게 되는 것을 볼 수 있다. 질량유량비는 이와 반대되는 현상을 보이는데, 결국 유동의 압력손실과 구멍통과 질량유량이 서로 직접적인 관계가 있음을 알 수 있다.

### 3.2.2 가공구멍 내부 전단응력분포

가공구멍 주위 벽면의 전단응력이 클수록 절단 부위에 부착된 용융물이 보다 효과적으로 제거된다고 볼 수 있다. 다음 Fig. 9는 가공구멍 내부

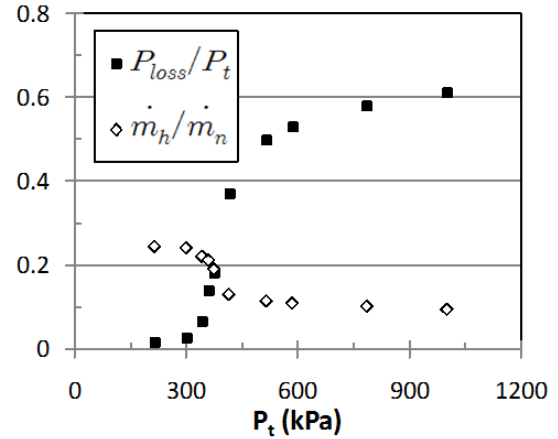


Fig. 8 Comparison of the  $P_{loss}/P_t$  and  $\dot{m}_h/\dot{m}_n$  (M=1.0)

벽면에서의 전단응력 변화(축방향, x)를, 나타내고 있다. Figure 9에 따르면 최대통과유량( $\dot{m}_{max}$ )인 약  $P_t/P_a=3.5$  근처에서 벽면전단응력이 가장 균일하게 나타나고 있음을 확인 할 수 있다. 또한 최소통과유량( $\dot{m}_{min}$ ,  $P_t/P_a=4.15$ ) 조건에서는 가공구멍 상단의 강한 수직충격파로 인한 유동속도의 급격한 감소로 가공구멍의 전반부에서 박리영역이 나타나고 이후 축 방향에 따라 전단응력이 서서히 증가하고 있음을 관찰할 수 있다. 이러한 경향성은 본 연구와 동일한 음속노즐에 대하여 수행된 Chen 등<sup>(7)</sup>의 연구결과에서도 유사하게 나타나고 있음이 확인된 바 있다.

## 3.3 초음속(M=2.24)노즐에서의 결과 분석

### 3.3.1 충돌유동 구조 및 통과유량 분석

Figure 10은 초음속노즐(M=2.24)에서 나타나는 충돌유동 구조를 등압력 선도(단위=Pa)로 나타내고 있다. 초음속노즐에 대하여 계산된 유동구조는 전체적으로 음속노즐의 경우와 비교하여 크게 다르지 않으나, 초음속 노즐이 완전팽창 되는 조건에 가까운  $P_t=1200\text{kPa}$  때부터 가공구멍 상부에서 강한 마하디스크가 관찰되고 있다. 이때 마하디스크와 충돌평판 사이의 거리는 음속노즐의 경우보다 작게 나타나고 있다. 아울러 마하디스크 후방의 slip line은 가공구멍의 직경보다 크게 좌우로 벌어져 충돌면과 만나게 되며, 구멍통과 질량유량은 이 경우에 최소값을 나타낸다[Fig. 6(b) 참조]. 이후 전압이 더욱 증가함에 따라 마하디스크의 직경은 커지고 그 형상이 오목하게 바뀌는

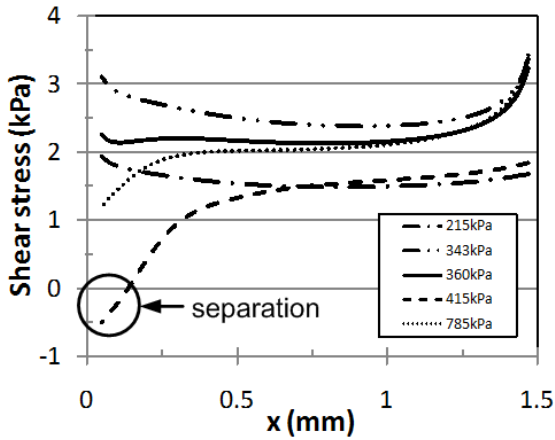


Fig. 9 Variation of the wall shear stresses

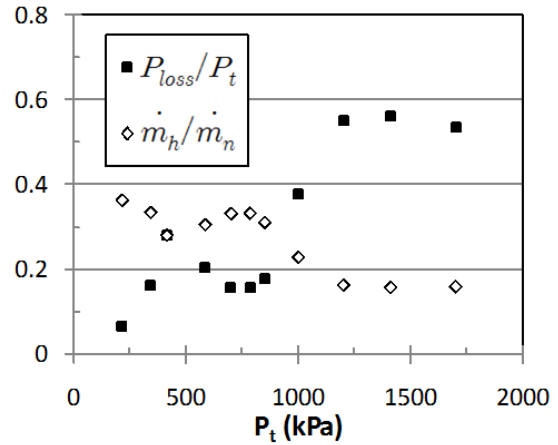


Fig. 11 Comparison of the  $P_{loss}/P_t$  and  $\dot{m}_h/\dot{m}_n$  ( $M=2.24$ )

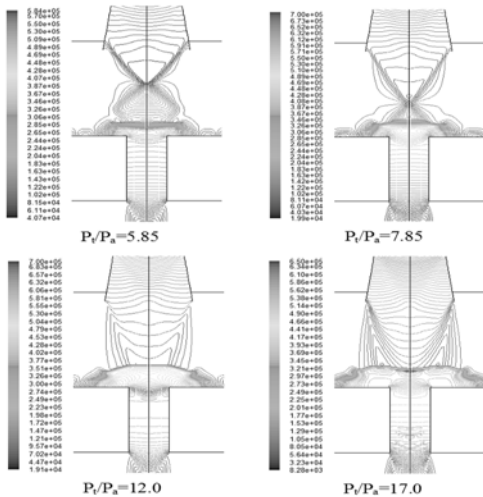


Fig. 10 Contours of the static pressure ( $M=2.24$ )

것을 볼 수 있고, 가공평판에 충돌한 후 측면으로 발달되는 벽체트의 구조도  $P_t=1200\text{kPa}$  이후부터 측면으로의 발달구조가 커지는 것을 발견할 수 있다.

Figure 11에서는 앞서 Fig. 8과 같은 방법으로 초음속노즐의 경우 보조가스 전압에 따른 압력손실비와 질량유량비가 나타나 있다. Figure 11에 따르면, 질량유량비는 전압이 785kPa 까지는 큰 변화 없이 유지되다가 그 이후부터 점차 감소하여  $P_t=1200\text{kPa}$  후부터는 큰 변화가 나타나지 않고 있다. 질량유량비와 직접적인 관계가 있는 압력손실비의 변화도 전압이 785kPa부터 급격히 증가하다가  $P_t=1200\text{kPa}$  후부터는 일정하게 나타나고 있다. 또한 압력손실비는 전체적으로 음속노즐의 경우보다 크게 나타나는데, 이는 노즐출구

의 마하수가 크고 이에 따라 충돌평판 상부에 형성되는 마하디스크의 강도가 세지기 때문이다.

3.3.2 가공구멍 내부전단응력분포

다음 Fig. 12에서는 앞서 Fig. 9와 같은 방법으로, 초음속노즐의 경우 가공구멍 내부벽면의 전단응력 변화가 나타나 있다. Figure 12에 따르면 전압이 785kPa일 때 축 방향에 따른 벽면전단응력이 가장 크고 균일하게 나타나고 있는데, 이는 초음속노즐의 최대통과유량 조건과 동일하다[Fig. 6(b) 참조]. 그러나 이후 전압이 증가하면서 전단응력은 감소하기 시작하여 가공구멍 통과유량이 최소로 나타나는  $P_t=1200\text{kPa}$ 에서는 상부 마하디스크로 인한 유동속도의 급격한 감소로 가공구멍 벽면 전반부에서 박리 및 재부착 현상이 나타나고 있음을 알 수 있다. 이러한 박리현상은 가공 후 절단면의 거칠기를 크게 하고 가공면의 질을 급격히 떨어트릴 것으로 판단되며, 가공구멍 후방에서의 전단응력도 가장 낮게 나타나고 있음을 관찰할 수 있다.

그림으로 제시되어 있지는 않지만, 가공구멍 내부에서의 압력구배 변화가 각 경우에 대하여 관찰된 바 있으며,  $P_t=1200\text{kPa}$ 의 조건에서 가공구멍 내부에서 요동치는 압력변화 현상이 관찰되었다. 이는 가공구멍 내부의 용융물 제거효과의 급격한 감소 및 더 나아가 가공면의 가공도 저하를 의미한다. 이러한 압력구배 결과는 앞서 논의된 가공구멍 통과유량 및 전단응력 관찰결과와 비교될 때 일관된 결론을 제시하고 있다.

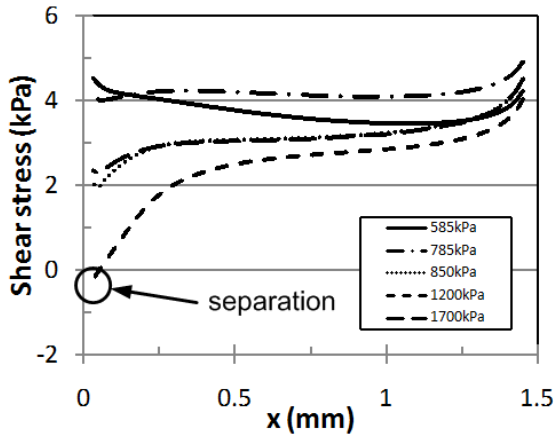


Fig. 12 Variation of the wall shear stresses

또한 앞서의 Fig. 6(b)의 초음속노즐의 경우, 전압이 1200kPa 보다 더 증가하면서 가공구멍 통과유량이 다시 증가하여 전압이 1700kPa에 이를 때 다시 통과유량이 앞서의 최대통과유량과 같아지는 것을 볼 수 있다. 그러나 Fig. 12에 제시된 가공구멍 내부 벽면에서의 전단응력 관점에서 보면 여전히 그 크기가 여전히  $P_t=785kPa$ 인 경우까지 회복되지 않아 가공성은 여전히  $P_t=785kPa$ 일 때가 최적임을 알 수 있다.

### 3.4 음속노즐과 초음속노즐 비교

동일한 전압과 전온에서 노즐을 통하여 분출되는 질량유량은 노즐의 최소단면적(노즐목)에 비례한다. 본 연구에서 응용된 두 노즐의 경우, 초음속 노즐이 음속노즐에 비하여 노즐목의 크기가 약 64% 정도로 작으므로 이에 따른 보조가스의 소모량도 동일한 전압에 대하여 역시 64% 정도로 작은 것을 알 수 있고, 이는 보조가스 분출을 위한 일률(power)이나 에너지도 그만큼 적게 소모된다는 것을 뜻한다. 이러한 관점에서 다음 Fig. 13에서는 노즐에서 유출되는 질량유량에 대하여 무차원화 된 가공구멍 통과유량비(수치해석 결과)를 연구에 응용된 두 노즐에 대하여 비교하고자 하였다. Figure 13에 따르면, 앞서 언급한 바와 같이 연구에 응용된 노즐에서 유출되는 질량유량은 압력변화에 상관없이 초음속 노즐이 음속노즐에 비하여 작게(64%) 나타나고 있으며, 관찰된 전압 범위에서 초음속 노즐의 통과유량비( $\dot{m}_h/\dot{m}_n$ )가 음속노즐의 경우에 비하여 크게 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 초음속노즐의 최대통과유량이

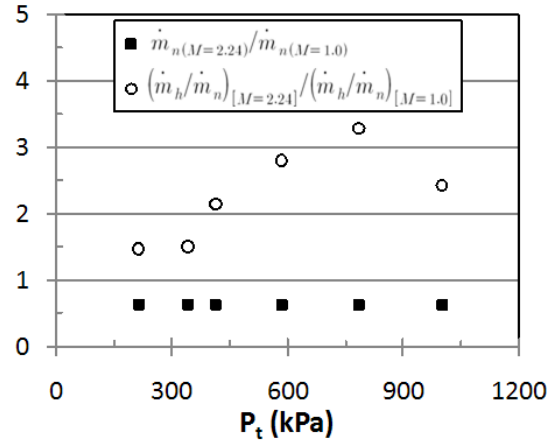


Fig. 13 Variation of the mass flux ratios

나타나는  $P_t=785kPa$ 에서는 그 비율이 3배 이상까지 관찰되고 있으며, 이러한 결과는 초음속노즐을 사용할 때 나타나는 가공구멍 주위의 벽면전단응력의 크기 또한 음속노즐의 경우에 비하여 크다는 본 연구의 결과(Fig. 9와 Fig. 12 비교)와 더불어, 레이저가공의 보조가스 역할 측면에서 초음속노즐이 음속노즐보다 우수하다는 결론을 얻을 수 있다.

## 4. 결론

본 연구에서는 레이저 가공에서 음속노즐과 초음속노즐을 통하여 분출되는 보조가스의 충돌특성을 수치해석적, 그리고 실험적 방법을 통하여 관찰 비교하였다. 보조가스의 충돌판에 설정된 가공구멍 주위에서 나타나는 충격파의 구조, 가공구멍을 통과하는 질량유량 및 절단면에서의 전단응력의 변화를 비교 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 가공구멍을 통과하는 질량유량 변화 관점에서, 본 연구의 실험 및 수치해석 연구결과 그리고 과거 연구결과는 서로 잘 일치하고 있다.
- (2) 음속노즐과 초음속(마하수 2.24)노즐의 경우 모두, 보조가스 전압 증가에 따라 가공구멍 통과유량이 “N”자 형태의 변화를 나타낸다.
- (3) 음속노즐과 초음속노즐 경우 모두, 가공구멍 전방에 마하디스크가 생성되기 직전에 가공구멍 최대통과유량을 나타내며, 가공구멍 최소통과유량은 가공구멍 상단에 강한 마하디스크 및 삼중점이 형성되고 이후 마하디스크 후방의 slip line이 가공구멍의 직경보다 크게 좌우로 벌어져

충돌면과 만나게 되는 시점이다.

(4) 음속노즐과 초음속노즐 경우 모두, 가공구멍 내부벽면 전단응력은 최대통과유량 조건에서 가장 좋은 결과를 보이고, 최소통과유량 조건에서는 그 반대의 결과를 나타낸다.

(5) 본 연구에서 관찰된 범위에서, 초음속노즐 경우의 가공구멍 통과유량이 음속노즐의 경우보다 크게 나타나며, 보조가스 분출에 필요한 일률과 에너지 관점에서 초음속노즐이 음속노즐보다 더 나은 효율을 나타내었다.

## 후 기

“이 논문은 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구의 일부임”(KRF-2007-313-D00097)

## 참고문헌

- (1) Fieret, J., Terry, M.J., Ward, B.A., 1987, "Overview of Flow Dynamics in Gas-Assisted Laser Cutting," *SPIE High Power Lasers*, Vol. 801, pp. 243~250.
- (2) Masuda, W., Nakamura, T., Kobayashi, M., Saito, H., 1990, "An Experimental Study on an Underexpanded Annular Impinging Jet," *JSME International Journal*, Vol. 33, No. 4, pp. 674~679.
- (3) Lee, H. J., Kim, J. D., 1993, "Effects of Nozzle System in Laser Cutting," *Proceedings of the 1993 Autumn Conference of KSPE*, pp. 81~85.
- (4) Bang, S. Y., Han, Y. H., 1994, "Nozzle and Gas Jet Flow in Laser Cutting," *Journal of KWJS*, Vol. 12, No. 2, pp. 1~10.
- (5) Man, H. C., Duan, J., Yue, T. M., 1997, "Design and Characteristic Analysis of Supersonic Nozzles for High Gas Pressure Laser Cutting," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 63, pp. 217~222.
- (6) Man, H. C., Duan, J., Yue, T. M., 1998, "Dynamic Characteristics of Gas Jets from Subsonic and Supersonic Nozzle for High Pressure Gas Laser Cutting," *Optics & Laser Technology*, Vol. 30, pp. 497~509.
- (7) Chen, K., Yao, Y. L., Modi, V., 2000, "Gas Jet-Workpiece Interactions in Laser Machining," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 122 pp. 429~438.
- (8) Kwon-Hee Lee, Byoung-Soo Koo and Heuy-Dong Kim, 2001, "A Fundamental Study of Supersonic Coaxial Jets for Gas Cutting," *Trans. of the KSME B*, Vol. 25, No. 6, pp. 837~844.
- (9) Jackson, M. J., Robinson G. M., Gill, M. D. H., O'Neill, W., 2005, "The Effect of Nozzle Design on Laser Micro-Machining of M2 Tool Steels," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 160, pp. 198~212.
- (10) Khan, A. H., O'Neill, W., Tunna, L., Sutcliffe, C. J., 2006, "Numerical Analysis of Gas-Dynamic Instabilities During the Laser Drilling Process," *Optics & Laser in Engineering*, Vol. 44, pp. 826~841.
- (11) Jun, H., Guo, S., Lei, L., 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.*
- (12) Rand, C., 2004, "Study of Sonic and Supersonic Jet-Kerf Dynamics in Optimized Laser Cutting," Ph.D. Thesis, Univ. of Liverpool.
- (13) Duan, J., Man, H. C., Yue, T. M., 2001, "Modelling the Laser Fusion Cutting Process: Effect of Various Process Parameters on Cut Kerf Quality," *J. Physics D: Appl. Phys.* 34, pp. 2143~2150.
- (14) Fan, H. G., Tsai, H. L., Na, S. J., 2001, "Heat Transfer and Fluid Flow in a Partially or Fully Penetrated Weld Pool in Gas Tungsten Arc Welding," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, pp. 417~428.
- (15) Gross, M. S., 2006, "On Gas Dynamics Effects in the Modelling of Laser Cutting Process," *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 30, pp. 307~318.
- (16) Scroggs, S. D., Settles, G. S., 1996, "An Experimental Study of Supersonic Microjets," *Experiments in Fluids*, Vol. 21, No. 6, pp. 401~409.