

# 마이크로 초음속 제트 경계층이 레이저가공에서 나타나는 충돌유동에 미치는 영향에 관한 연구

유동옥\* · 이 열\*\*

## Study of Effects of the Boundary Layer of Micro-Supersonic Jets on the Flow Impingements in Laser Machining

Dong-Ok Yu\* · Yeol Lee\*\*

### ABSTRACT

Numerical study of the influence of the boundary layer of micro-supersonic jet impinging on a flat plate with a hole was performed, to investigate the role of gas jet to eject melted materials from the cut zone in the laser machining. The detailed shock structures and the information of the mass flow rate through the hole were compared to the results of the previous study, in which the effects of boundary layer inside nozzle was not accounted. It was found that the boundary layer inside the micro- nozzle introduced stronger Mach disc over the machining zone, and thus that the mass flow rate through the hole decreased.

### 초 록

레이저가공에서 나타나는 가공부위의 용융된 물질을 밀어내는 가스의 역할을 모사하기 위하여, 구멍이 있는 평판 상부에 충돌하는 마이크로 초음속 제트유동의 경계층 효과가 수치해석적으로 연구되었다. 충돌유동과 충격파의 구조 및 구멍통과 질량유량이 관찰되어 경계층 영향이 고려되지 않은 과거 연구와 비교되었다. 노즐내부 유동의 경계층 효과로 인하여 가공부위 상부에서 보다 강한 마하디스크가 생성되고, 아울러 구멍통과 질량유량도 줄어드는 것이 관찰되었다.

Key Words: Shock Wave(충격파), Jet Impingement(제트충돌), CFD(전산유체역학), Laser Machining (레이저가공)

### 1. 서 론

레이저 가공에서 제트형태로 분출되는 보조가스는 용융된 가공부위의 작은 부착물을 제거하여 가공면의 상태개선과 가공효율에 직접적인 역할을 한다. 레이저 가공면 상태개선과 가공효율 증가를 목적으로 한 과거 연구결과[1-3]에서

\* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

\*\* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부  
연락처, E-mail: ylee@kau.ac.kr

보조가스 제트의 유동특성, 특히 가공면과의 상호작용이 레이저 가공에서 매우 중요한 요소가 되고 있음을 밝힌 바 있다. 그러나 그동안 관련 분야에서의 연구는 가공재료의 열적 그리고 역학적 거동에만 초점이 맞추어져 왔으며, 노즐에서 유출되는 가스가 가공면과 충돌되어 나타나는 유동학적 특성은 자세하게 고려되지 않았다.

Chen 등[4]은 음속노즐을 이용한 경우에 노즐 유동 압력변화 등 다양한 변수 변화가 가공구멍을 통과하는 질량유량의 크기에 미치는 영향을 수치적, 실험적 연구를 수행하였고, 가공구멍을 통과하는 질량유량이 과소팽창된 제트의 충돌현상에서 관찰되는 복잡한 충격파 구조와 밀접한 관계가 있음을 제시한 바 있다. 그러나 그동안 노즐에서 유출되는 가스제트가 초음속으로 분출된 후 과소팽창되어 가공 충돌면의 구멍과 상호작용하여 나타나는 유동구조는 자세히 관찰된 바 없으며, 또한 이에 대한 물리적 이해가 많이 부족한 실정이다. 최근에 일부 초음속(Laval) 노즐을 활용한 초음속 제트유동 충돌과 레이저 가공에의 응용에 관한 연구가 진행되어[5], 소닉유동이 가공면과 충돌될 때와는 다른 유동특성 및 가공구멍 통과유량 변화를 제시한 바 있다.

일반적으로 레이저 가공에서 응용되는 제트노즐은 그 크기가 작고, 따라서 노즐출구에서의 경계층 두께가 전체 노즐출구 유동에서 차지하는 영향을 무시할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 유동속 등[5]에 의하여 수행된 초음속 제트의 충돌유동 구조가 노즐 내부의 경계층에 의하여 어떻게 변화하는지를 수치해석적으로 관찰하여 과거 연구결과와 비교분석 하였다.

## 2. 수치해석 방법

본 연구에서는 레이저가공에서 나타나는 유동현상을 모사하기 위하여, 제트 충돌판에 특정크기의 직경을 갖는 가공구멍을 설정한 후, 충돌제트의 특성 및 가공구멍을 통과하는 질량유량의 변화를 관찰하였다. 본 연구의 수치계산 모델 및 수치기법에 대한 보다 구체적인 설명은 참고문

헌 [5]에 나타나 있으며, 따라서 여기서는 관련 내용을 간략히 기술하기로 한다. 충돌제트와 가공평판은 그 구조를 축대칭으로 하고, 가공 중 발생하는 화학반응 및 모든 열전달효과를 무시하였다. 제트노즐 출구마하수는 2.0, 제트유동의 전온은 300 K, 대기의 정압과 정온은 각각 100 kPa, 300 K, 그리고 가공평판의 두께( $t$ )는 1.5 mm로 설정하였다.

이때 노즐출구에서의 경계층 효과를 계산에 포함시키기 위하여 실제 레이저 가공에서 응용되는 노즐 내부의 경계층 유동이 수치계산 영역에 포함되었다. 그 결과 노즐 출구에서의 유동 경계층의 두께는 약 0.2 mm로 확인되었으며, 이는 유사하게 제작된 노즐의 출구에서 마이크로 피토관을 이용한 압력측정으로 관찰된 약 0.3 mm의 경계층 두께와 큰 차이가 나지 않고 있다. 계산에 응용된 노즐과 가공평판 사이의 거리( $H$ )는 2.0 mm와 4.5 mm인 두 가지 경우로 한정하였다. 이때 노즐의 출구직경( $D$ )과 절단구멍의 직경( $d$ )은 각각 1.35 mm, 0.71 mm로 고정시켰으며 ( $d/D=0.53$ ), 아울러 과소팽창 되는 제트유동을 관찰하기 위하여 유동전압은 1200 kPa과 1410 kPa(이때 배압은 모두 101 kPa) 두 가지로 유지시켰다. 다음 Fig. 1에는 본 연구에 사용된 계산영역과 사용된 변수의 정의가 나타나 있다.

계산격자는 정렬격자로서 격자의 총 개수는 최대 약 45,000개이다. 작동유체는 공기로 하여 이상기체로 가정하였으며,  $k-\epsilon$  난류모델을 사용하여 정상상태 결과의 수렴이 잔차가  $10e-5$ 에 이르기까지 진행되었다.

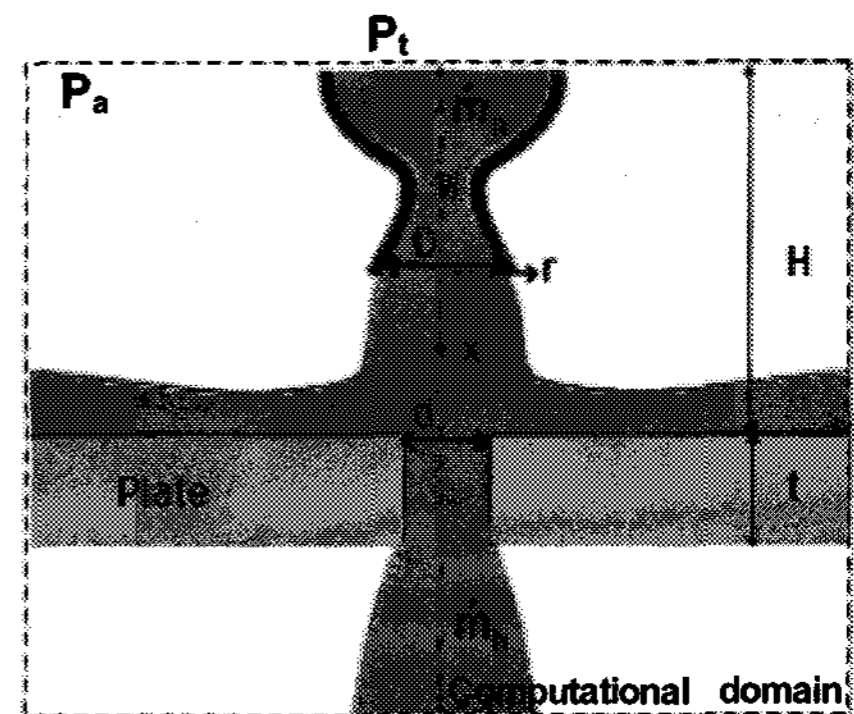


Fig 1. Computational domain

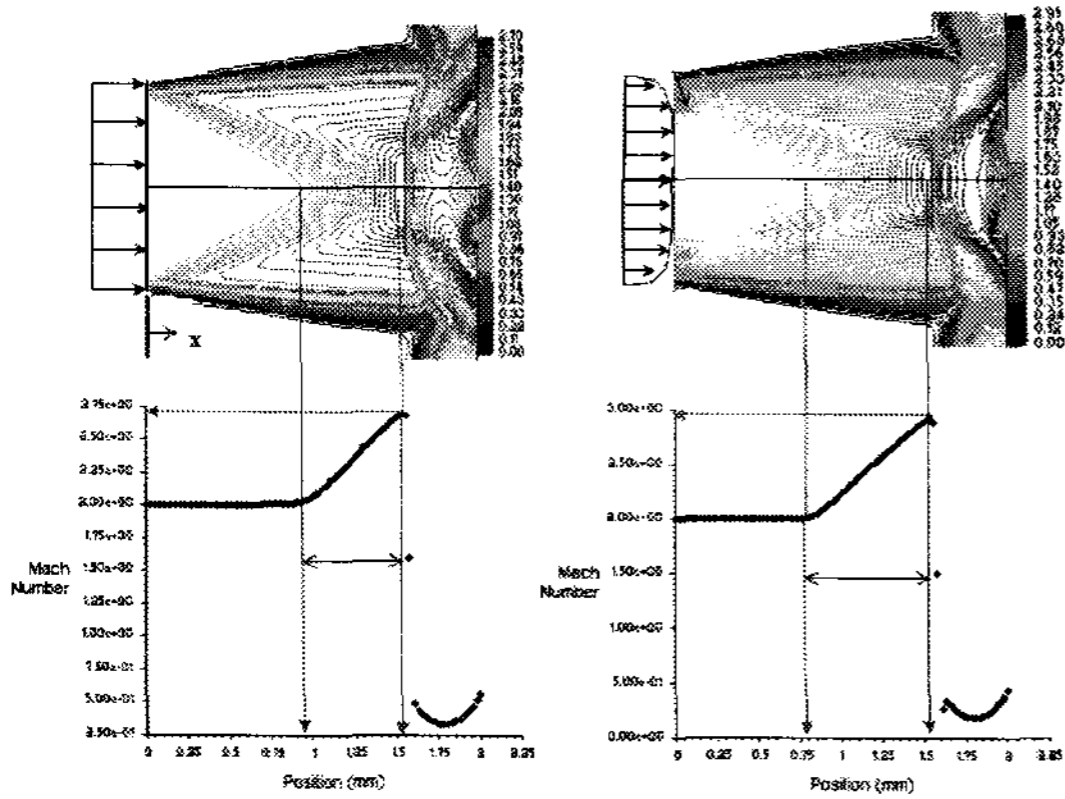


Fig. 2 Comparison of the impinging shock structures with/without the boundary layer (Mach 2.0, Pt = 1.2 MPa., H = 2 mm).

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 노즐과 평판 사이거리 = 20 mm 경우

다음 Fig. 2는 유동전압이 1.2 MPa이고 노즐 출구와 평판 사이거리 H가 2.0 mm인 경우에 얻어진 수치해석 결과가 노즐 출구에서의 경계층 효과를 무시한 경우(Fig. 2의 왼쪽)와 0.3 mm의 경계층 효과가 있는 경우(Fig. 2의 오른쪽)에 대하여 서로 비교하고 있다. Figure 2의 상부에서는 유동장의 마하수 분포가 나타나 있고, 하부에서는 유동 중심축을 따른 마하수 변화가 제시되어 있다.

배압 101 kPa에 대하여 과소팽창된 제트는 충돌판 위에서 강한 마하디스크(standoff shock, 또는 plate shock)를 생성시키고 베럴충격파와 만나 삼중점이 형성되는 것을 볼 수 있다. Figure 2에서 볼 수 있듯이 경계층의 효과는 노즐출구 유동이 경계층이 없을 경우와 비교하여 보다 일찍 가속하게 하는데, 이는 노즐출구에서의 팽창팬(expansion fan)의 중심이 경계층의 영향으로 노즐출구 벽면에서 노즐중심 쪽으로 치우쳐 생성되는 영향으로 판단된다. 이러한 현상은 Fig. 2 하단에 제시된 유동 중심축을 따른 마하수 변화에서도 살펴 볼 수 있다. 경계층의 영향으로 제트경계 내부 초음속 영역은 일부 좁혀지고 있

으며, 따라서 후방의 standoff shock의 반경은 작아지고 있다. 그러나 충돌판 상부에 형성된 standoff shock 전방의 마하수는 커지고, 따라서 충격파의 강도는 보다 세지고 있다. 그러나 standoff shock의 직경감소로 충격파 하단의 아음속 버블구조는 보다 블록하게 나타나고, 이후 벽제트(wall jet)의 두께도 증가하고 있다. 수치계산 결과 경계층의 영향으로 충격파 하부의 유동 전압은 경계층이 없는 경우에 비하여 약 15% 정도 작게 나며, 그 결과 평판의 가공구멍으로의 통과유량도  $4.00e-4$  kg/s에서  $3.32e-4$  kg/s로 줄어들고 있음이 확인되었다.

#### 3.2 노즐과 평판 사이거리 = 45 mm 경우

다음 Fig. 3는 유동전압이 1.4 MPa이고 노즐 출구와 평판 사이거리 H가 2.0 mm인 경우에 얻어진 수치해석 결과가 노즐 출구에서의 경계층 효과를 무시한 경우(Fig. 3의 왼쪽)와 0.2 mm의 경계층 효과가 있는 경우(Fig. 3의 오른쪽)에 대하여 서로 비교하고 있다. Figure 2의 경우와 달리 H가 4 mm로 증가된 경우, 과소팽창된 제트 후방 베럴충격파와 standoff shock의 연결구조가 바뀌는 것을 볼 수 있는데, 즉 H가 증가함에 따라 노즐출구에서의 충격파는 standoff shock을 만나기 전 중심축에서 서로 만나 반사 되고, 이후 다시 가공구멍 상부에서 standoff shock이 생성되는 것을 관찰할 수 있다.

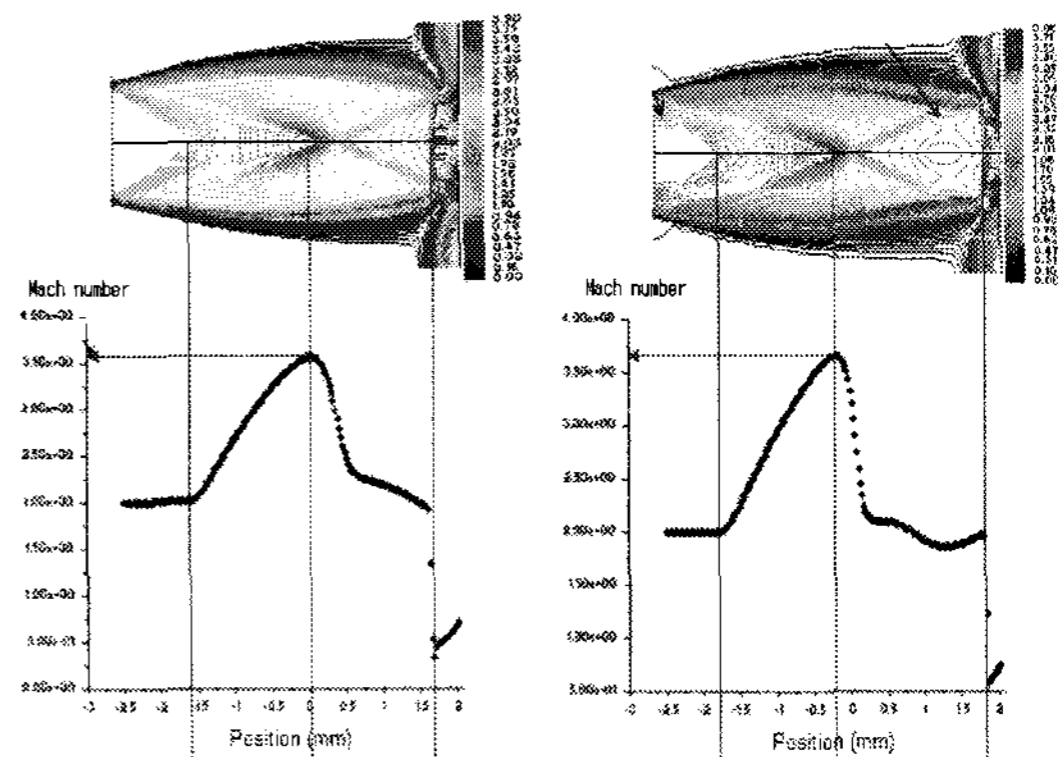


Fig. 3 Comparison of the impinging shock structures with/without the boundary layer (Mach 2.0, Pt = 1.41 MPa., H = 4 mm).

노즐출구에서의 경계층 영향으로 후방 제트유도의 팽창 및 가속이 보다 일찍 일어나고, 제트 경계 내부 초음속 영역은 일부 좁혀져 후방 마하디스크의 반경이 작아지는 것은 Fig. 2의 경우와 마찬가지로이다. Figure 3에서는 Fig. 2의 경우와는 달리, 중심축에서 반사된 약한 경사충격파가 다시 제트경계에서 반사되면서 팽창파로 가속되는 것을 볼 수 있는데(Fig. 3의 이상단 화살표 참조), 이에 따라 standoff shock의 형상이 오목해 지는 것을 관찰할 수 있다. 수치계산 결과 경계층의 영향으로 평판의 가공구멍으로의 통과유량이  $8.4e-4$  kg/s에서  $8.0e-4$  kg/s로 줄어들고 있음이 확인되었다. 이 크기는  $H = 2$  mm인 경우보다 큰 것이며, 참고문헌 [5]에서는 이에 대한 자세한 설명이 제시되어 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 레이저 가공에서 응용되는 제트노즐의 크기가 작음에 따라 무시할 수 없는 노즐출구에서의 경계층 두께가 마이크로 초음속 제트의 충돌유동 구조에 미치는 영향을 수치해석적으로 관찰하여, 과거 경계층의 영향이 무시되었던 연구결과와 비교분석 하였다. 노즐출구에서의 경계층 효과로 제트유동의 가속은 보다 빨라지며, 이에 따라 충돌판 상부에 형성된 standoff shock 전방의 마하수의 증가 및 충격파의 강도

증가가 관찰되었다. 아울러 수치계산 결과 경계층의 영향으로 평판의 가공구멍의 통과유량도 줄어드는 것이 관찰되었다.

#### 참 고 문 헌

1. A. Ivarson, et al., "The Role of Oxygen Pressure in Laser Cutting Mild Steels," *Journal of Laser Applications*. Vol. 8, 1996, pp. 191-196.
2. A. D. Brandt, G. S. Settles, "Effect of Nozzle Orientation on Gas Dynamics of Inert Gas-Laser Cutting of Mild Steel," *Journal of Laser Applications*. Vol. 9, 1997, pp. 269-277.
3. B. T. Rao, A. K. Nath, "Melt flow characteristics in gas assisted laser cutting," *Sadhana*, Vol. 27, Part 5, 2002, pp. 569-575.
4. K. Chen, Y. L. Yao, V. Modi, "Gas Jet-Workpiece Interactions in Laser Machining," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 122, 2000, pp. 429-438.
5. 유동욱, 이 열, "레이저가공에서 나타나는 초음속제트의 유동전압 변화에 따른 충돌특성 연구," 대한기계학회 2007년 추계학술대회 논문집, 2007.