한국기계가공학회지, 제9권, 제5호, pp.14～19 (2010. 10)
Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 9 No. 5, pp.14～19 (2010. 10)

레이저 가공에서 동축/탈축 보조가스의 충돌특성에 관한 수치해석적 연구

윤시경* 성홍계** 이 열#

Computational Study of Impingement Characteristics of Assist Gas from Coaxial/Off-axis Nozzles in Laser Machining

Shi-Kyung Yoon*, Hong-Gye Sung** Yeol Lee#

(Received 19 July 2010; received in revised form 30 August 2010; accepted 9 September 2010)

ABSTRACT

A computational study was carried out to analyze the characteristics of supersonic (Mach 2.0) coaxial/off-axis jet's impingements on a slanted kerf surface in laser machining. The effects of various parameters such as gas pressure, distance between nozzle exit and kerf edge surface, and application of off-axis nozzles on the impingement phenomena of the assist-gas on kerf surface were observed. The present study showed that simply increasing the assist-gas pressure for coaxial supersonic nozzle was not effective to alleviate the strength of flow separation on kerf surface. It also presented the optimized operating condition of the coaxial nozzle to have the highest skin friction values over kerf surface.

Words : CFD(전산유체역학), Supersonic Jet(초음속 제트), Laser Machining(레이저가공), Assist Gas(보조가스)

1. 서 론

레이저 절단가공에서 노즐을 통해 분출된 보조가스는 가공과정에서 생성되는 용융물질을 제거하는 중요한 역할을 수행한다. 이에 따라 그동안 보조가스의 기능에 직접적인 영향을 미치는 인자에 관한 다양한 연구가 진행되어 왔다.[1-6] 그러나 고온, 고압 및 복잡한 화학반응을 동반하는 레이저가공에서 나타나는 보조가스의 유동구조를 실험적으로 관찰하기에는 한계가 있으며, 최근 들어 컴퓨터를 이용한 보조가스 유동구조에 대한 수치해석적 연구가 다양하게 시도되고 있다.[4-6]

과거 레이저가공에서 일반적으로 사용되는 노즐은 대부분 음속노즐이며, 아울러 보조가스 노즐의 축과 레이저빔의 축이 일치하는 동축(coaxial)으로 운용되는 것이 일반적인데, Quintero 등[7]은 실제 레이저 가공면의 단면촬영을 통하여, 노즐의 위치 변경을 통하여 절단면의 용융물 제거효과를 높일 수 있다고 보고한 바 있다(탈축(off-axis)노즐, Fig. 1 참조). 그러나 그들의 논문에서는 탈축노즐에서 나타나는 절단면 충돌유동 구조에 관한 구체적인 자료를 제시하지는 못하였다.

일반적으로 노즐에서 분출되는 보조가스가 초음

* 한국항공대학교(원) 항공우주 및 기계공학과
** 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부
# 교신저자 : 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부
E-mail : ylee@kau.ac.kr

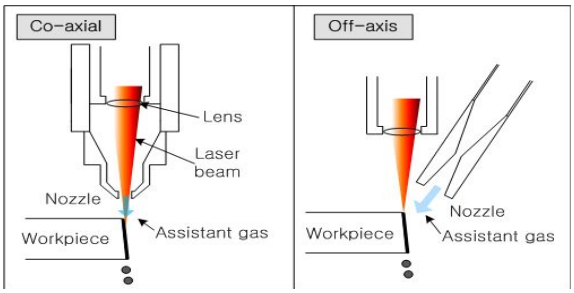


Fig. 1 (a) coaxial nozzle, (b) off-axis nozzle

속으로 완전팽창 되는 경우 낮은 제트확산도 및 높은 압력전달 효과를 기대할 수 있는데, 기존 아음속 동축노즐에 관한 연구에 비하여, 초음속 노즐 및 노즐위치 변경에 따른 보조가스의 충돌구조를 밝히는 연구는 여전히 많지 않은 상태이다.

이에 본 연구에서는 동축 및 탈축 형태로 초음속 노즐을 통하여 분출되는 보조가스의 충돌특성을 수치해석적 방법을 통하여 관찰 비교하였다. 동축 및 탈축노즐에 대하여 각각 보조가스의 전압, 노즐과 가공면의 사이거리, 그리고 노즐의 각도변화 등 다양한 변수변화가 절단 경사면(kerf)에서 나타나는 충격파 생성 및 반사구조에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 특히 레이저가공 후 절단면의 품질(슬래그 형성)에 직접적인 영향을 주는 절단면에서의 보조가스 유동의 박리유무와 절단면에서의 용융물 제거효과와 관련된 절단면에서의 전단응력 크기에 초점을 맞추었으며, 이러한 결과를 통하여 레이저가공에서 최적화된 동축과 탈축노즐의 조건 및 주요 설계인자를 파악하고자 하였다.

2. 수 치 해 법

2-1. 지배방정식 및 수치기법

본 연구를 위하여 화학반응을 포함할 수 있는 비정상, 2차원 압축성 Navier-Stokes 코드[8]가 사용되었다. 수치계산에서 사용되는 지배방정식 계를 종결하기 위해, 본 연구에서는 2방정식 모델인 $k-\varepsilon$ 모델을 적용하였다. 벽면 근처에서 정확한 계산결과를 보이지 못하는 표준 $k-\varepsilon$ 모델의 단점을 해결하기 위하여, 본 연구에서는 Yang과 Shih[9]가 제안한 $k-\varepsilon$ 모델(time-scale based)을 이용하였다. 이 모델은 벽면에서 에너지 소산율 방정식의 특이성을 피할 수 있고, 벽 근처 댐핑을 위해 y^+ 대신 레이놀즈수를 이용하기 때문에 압축성 난류유동, 특히 경계층과 충격파의 상호작용 및 박리유동에 높은 계산 정확도를 보이고 있다.

본 연구에서는 광범위한 마하수와 세장비가 다양한 격자크기에 대하여 안정적 수치해를 얻기 위하여 예조건(precondition) 기법을 사용하였다. 예조건 기법은 비정상 Navier-Stokes 방정식에서 유동변수 벡터의 시간 미분항에 인공적인 예조건 행렬을 곱하여 시간전진기법을 이용하여 해를 구하는 방법이다. 또한 낮은 마하수에서 나타나는 압력항의 특이성을 피하기 위해 압력항을 기준압력과 섭동압력으로 분리하였다.

아울러 본 연구에서는 분할된 영역마다 전체 프로세서에 할당하여 전체 계산속도를 빠르게 하는 다중블록/다중영역 분할 기법을 적용하였으며, 병렬계산 처리를 위해서 MPI(Massage Passing Interface)를 이용, 계산영역 사이의 경계정보 교환이 이루어지도록 하였다.[8]

2-2. 계산조건 및 변수 정의

본 연구에서는 레이저 가공에서 사용되는 보조가스의 압력(P_0), 노즐과 가공물 표면의 사이거리(H), 그리고 탈축노즐의 경우 노즐의 각도(α) 등이

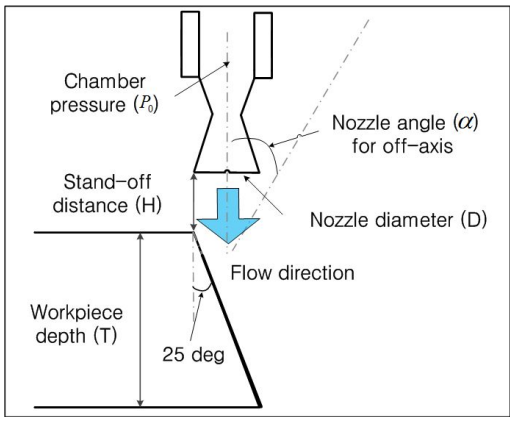
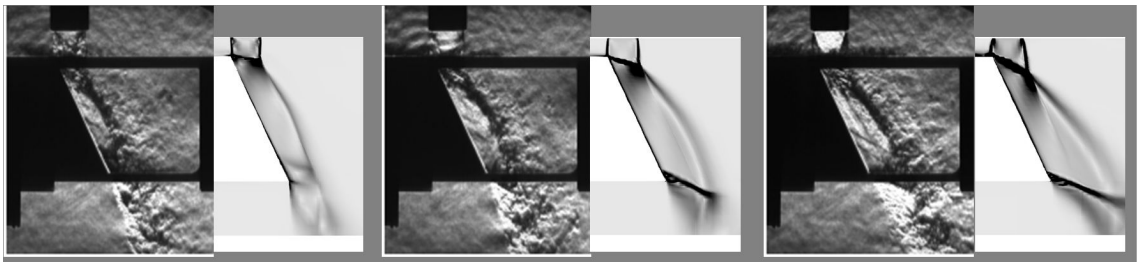


Fig. 2 Schematic diagram of gas flow field(coaxial)



(a) P_0 = 600kPa P_0 = 500kPa (b) P_0 = 750kPa P_0 = 780kPa (c) P_0 = 1050kPa P_0 = 1100kPa
Fig. 3 Validation of CFD results with experimental flow visualizations (H/D=0.7)

변화할 때 나타나는 보조가스 충돌유동 구조를 비교 관찰하였다. 본 연구의 수치계산의 물리적 공간 구성은 다음 Fig. 2에 나타난 바와 같다. 노즐은 출구직경 D=9.3mm, 설계마하수 2.0이 되도록 설정하였으며 노즐의 축소 및 확대부는 삼각뿔 형태로 하였다. 노즐의 배압은 대기압(101.3kPa)이며 이 경우 노즐의 설계압력은 780kPa이다. 절단면의 각도는 25°도(Fig. 2 참조), 절단면의 가공깊이는 T=36mm로 설정되었다. 아울러 동축노즐의 경우 노즐출구의 가장자리가 절단면 모서리와 일치하도록 하였다. 본 연구에서는 레이저가공에서 나타나는 열적거동은 고려되지 않았으며(cold flow), 아울러 2차원 계산으로 단순화하였다. 또한 절단면에서의 용융물질에 의한 막(film)유동 영향도 무시되었다.

본 연구의 계산영역은 총 6블럭으로 구성하였으며 총 격자수는 계산조건에 따라 약 15,000개에서 17,000개 사이로 조정하였다. 경계조건이 유동장에 영향을 미치지 않도록 하기 위해 노즐과 가공물 사이거리(H)값의 10~20배 되는 경계 위치까지 계산영역에 포함하였으며, 작은 노즐크기에 의한 노즐 내부 경계층의 영향을 고려하기 위하여 노즐 내부를 계산영역에 포함시켰다. 정렬격자를 사용하였고 밀도변화가 크거나 유동구조가 복잡한 영역에는 격자를 보다 조밀하게 구성하였으며, 벽면 첫 번째 격자점이 $y+ < 2.0$ 가 되도록 설정하였다. 작동유체는 공기로 이상기체를 가정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수치해석 검증

본 연구에서 사용된 수치계산 코드는 과거 연구를 통하여 그 계산의 정확성이 이미 검증된 바 있다.[8] 추가적인 수치해석 결과의 검증을 위하여 본 연구의 수치해석과 유사한 경계조건에서 획득된 실험결과와 비교되었으며, 그 내용이 다음 Fig. 3에 나타나 있다. Figure 3은 H/D=0.7일 때, 보조가스의 압력변화에 따른 보조가스의 절단면 충돌유동 구조를 나타내고 있으며, 세 가지 비교조건에서 각각 좌측은 실험에서 얻어진 쉴러린 유동가시화 결과[10]이며 우측은 수치해석에서 얻어진 밀도구배 분포를 나타내고 있다. 본 수치해석 연구는 2차원적으로 수행하였기 때문에 가공물의 절단폭이 설정되어 있는 실험결과 비교에는 한계는 있어, 가공물의 절단폭이 제일 큰(노즐출구 직경의 0.96배) 경우에 얻어진 실험결과를 사용하였다.

제시된 Fig. 3에서 알 수 있듯이 수치해석 결과와 실험결과는 전체적인 유동구조에서 정성적으로 잘 일치하고 있다. 절단 경사면을 따라 흐르는 보조가스의 경계 크기 및 충격파의 구조 등에서 수치결과와 실험결과가 서로 잘 일치하며 있다.

3.2 충돌유동의 마하수 및 유선 분포

Figure 4는 두 가지 사이거리에 대하여 보조가스 압력변화에 따른 충돌유동의 마하수 분포 및 유선의 구조를 나타내고 있다. 가공물 전단부 모서리에서 충격파가 발생한 후 유동은 아음속으로 감속되는 것을 볼 수 있는데, 이후 유동은 하부 마하파와 제트 경계와의 반복적인 반사구조를 통하여 절단면을 따라 다시 가속된다. 이때 유동 마하수는 증가하고 압력은 감소한다. 보조가스 전압을 증가

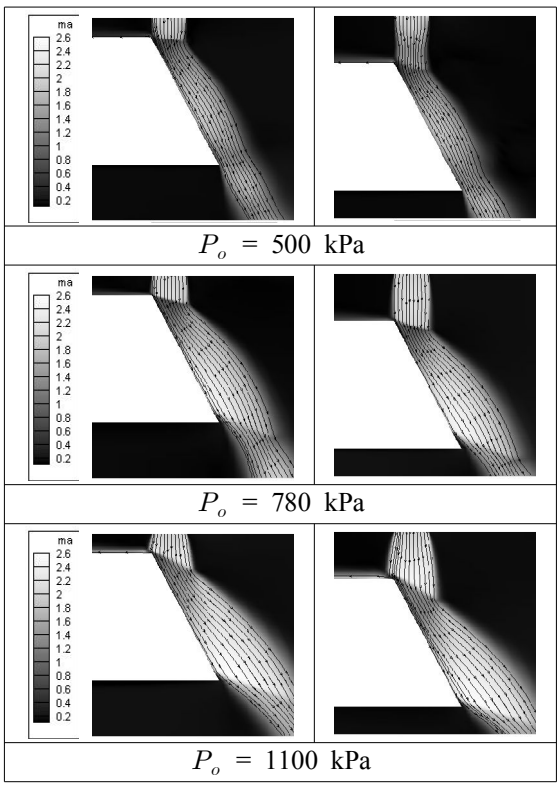


Fig. 4 Mach contours and streamlines (left column: H/D=0.7, right column: H/D=1.5)

시키면 이러한 유동의 압력감소 정도가 점차 커져 압력이 절단 경사면 최하단에서의 대기압보다 낮아지게 된다. 이때 형성되는 강한 역압력 구배의 영향으로 경사면 하단에 경사충격파와 함께 유동박리가 나타나게 된다(P_0=780kPa, 1100kPa 경우 참조).

절단면에서 나타나는 유동박리 위치는 보조가스 압력이 780kPa에서 1100kPa로 증가될 때 보다 경사면 하류로 이동하나 그 이동 폭은 매우 작게 나타나고 있다. 오히려 보조가스가 1100kPa로 증가하면 보조가스의 팽창정도는 더 커지고 아울러 가공면 하단의 경사면을 이탈하는 유동의 각도도 더 커짐을 확인할 수 있다. 따라서 보조가스 압력의 단순한 증가가 유동박리 지점을 절단 경사면 후방으로 이동시키거나 또는 완전히 경사면 밖으로 밀어내는데 효율적이지 않음을 알 수 있다. 상대적으로 낮은 보조가스 압력조건(P_0=500kPa)에서는 노즐유동이 과대팽창되는 영향으로 절단 경사면 모서리에서 작은 박리영역이 보이나, 그 이후 절단 경사면 하류에서 강한 유동박리는 관찰되지 않고 있다.

또한 Fig. 4를 통해 알 수 있듯이 충격파를 지난 이후 가공면 위에서의 유동박리 및 전체적인 구조는 H/D의 변화에 따라 큰 영향을 받지 않으며, 이러한 특성은 노즐유동의 팽창정도(P_0)와도 상관이 없음을 알 수 있다. 이는 초음속 노즐이 설계압력으로 운용되는 조건에서만 H/D에 크게 영향을 받지 않는다는 기존 연구[4]와 다소 차이가 나는 결과이다. 어떤 경우이던, 음속노즐 경우와 비교하여 초음속노즐 경우에는 유동의 높은 하류 압력전달 특성으로 상대적으로 큰 사이거리(H)에서도 레이저가공이 운용될 수 있는 장점을 기대할 수 있다.

3.3 절단면 압력과 전단응력 변화

다음 Fig. 5에서는 H/D=0.7인 조건에서 보조가스 전압변화에 따른 절단면에서의 압력 및 전단응력 변화(x=0: 절단면 모서리)가 같이 나타나 있다. Figure 4에서 설명된 바와 같이, 낮은 압력 조건(P_0=500kPa)에서는 절단 경사면을 따라 압력이 감소하다가 후방에서 다시 압력이 증가하여 경사면 출구 근처에서는 대기압보다 큰 압력이 나타나고 이때 유동박리는 관찰되지 않고 있다. 이후 보조가스 압력이 점차 증가하면서 절단면 후방에서 충격파와 경계층 상호작용에 의한 압력상승이 나타나는데, 이러한 특성은 H/D=1.5인 경우에도 정성적으

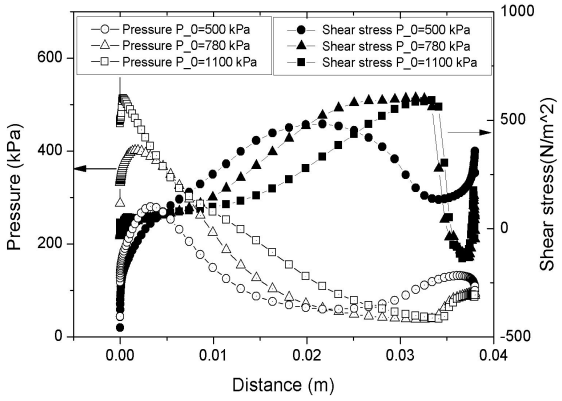


Fig. 5 Comparison of wall pressures/shear stresses (coaxial, H/D=0.7)

로 차이가 없었다(Fig. 4 참조).

Figure 5에 같이 제시된 절단면에서의 전단응력 분포를 살펴보면, 전체적으로 전단응력은 경사면 모서리에서부터 증가하다가 경사면 후방에서 유동박리 이후 감소하다 다시 증가하는 추세를 보이고 있다. 보조가스 압력이 500kPa인 경우 경사면 모서리에서 나타나는 작은 박리영역으로 음의 전단응력 값이 나타나고 경사면 중간지점에서 약 450N/m^2에 가까운 최대 전단응력 값을 보이고 있다. 보조가스 압력이 이보다 클 경우는 유동의 박리가 일어나기 바로 전 약 600N/m^2의 최대 전단응력 값을 보이고 있다. 유동박리가 나타나는 경우에 보조가스 압력차이에 의한 전단응력 최대값의 변화는 매우 작다. 또한 압력분포와 마찬가지로 노즐과 가공물의 사이거리를 H/D=1.5로 증가시켰을 경우 가공면 전단응력의 분포는 H/D=0.7인 경우와 정성적으로 큰 차이가 나타나지 않음이 확인되었다.

3.4 탈축노즐

노즐의 위치변경이 절단면 충돌특성에 미치는 영향을 살펴보기 위하여, 다음 Fig. 6에서는 H/D=1.5에서 노즐이 완전팽창 되는 조건(P_0=780kPa)인 경우, 노즐 각도(α)를 각각 15°와 30°(α, Fig. 2 참조)로 회전시켰을 때 나타나는 유동구조가 나타나 있다. 이때 동축노즐과 마찬가지로 노즐출구 가장자리는 절단면 모서리에 맞추어져 있다. Figure 6에 나타난 탈축노즐의 전체적인 유동의 특성은 동축노즐의 경우와 크게 다르지 않으나, 노즐의 각도가 30°로 커짐에 따라 가공물 상면을 따라 벽제트의 형태로 흘러가는 유동이 강하게 나타나고 있다.

제시된 탈축노즐의 두 가지 조건에서 절단 경사면에서 유동박리는 여전히 존재하며 박리지점은 동축노즐의 경우에 비하여 절단면 상부 쪽으로 치우쳐 위치하고 있고, 유동박리도 보다 강하게 형성되는 것으로 보여진다. 이러한 결과는 비슷한 조건에서 수행된 실험결과[10]와는 일부 일치하지 않는 점이 있으며, 이에 대한 추가분석 연구가 현재 진행중에 있다.

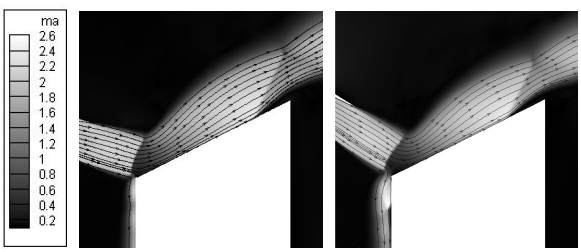


Fig. 6 Mach contours and streamlines for off-axis (H/D=1.5, left: α= 15°, right: α= 30°)

다음 Fig. 7에서는 동일한 탈축노즐 조건(H/D=1.5, P_0=780kPa)에서 얻어진 절단면에서의 압력과 전단응력이 같이 비교되어 나타나 있다. 탈축노즐 각도가 커짐에 따라 절단면에서 나타나는 전단응력의 최대값이 커지는 것은 과거의 관찰결과와 유사하나, 탈축노즐에서는 동축노즐의 경우에 비하여 전단응력의 최대값이 다소 작게 나타나고 있음이 확인되었다.

다음 Table 1에서는 동축 및 탈축노즐의 다양한 조건에서 얻어진 절단면 전단응력을 절단면에 대하여 길이 적분한 결과를 서로 비교하고 있다. 표 1에서 동축노즐 조건으로 H/D=1.3인 경우는(*로 표시) 노즐을 수평 이동하여 노즐 중심축이 절단면 모서리에 맞추어진 경우이다. 절단면 길이에 대하여 적분된 전단응력 값은 탈축노즐인 경우가 동축노즐에 비하여 작게 나타나고 있다. 아울러, 크지는 않지만, 전단응력 값은 사이거리의 영향을 어느 정도 받고 있는 것으로 판단된다. 본 연구에서 수행된 범위 안에서 최적화된 절단면 전단응력은 동축노즐의 가장자리가 절단면 모서리에 일치되고 노

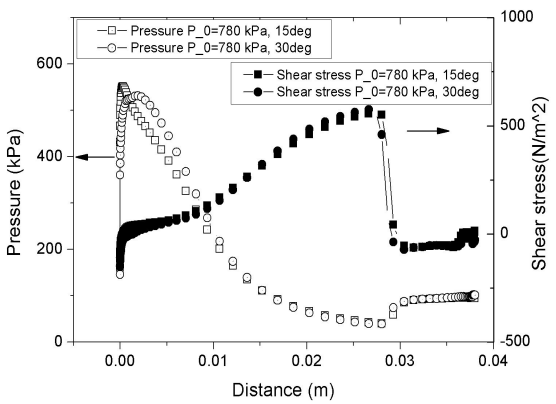


Fig. 7 Comparison of wall pressures/shear stresses (off-axis, H/D=1.5)

Table 1 Comparison of integrated wall shear stresses

Cases			Integrated wall shear stress(N/m)
Coaxial	H/D=0.7	P_0=500kPa	10.4
		P_0=780kPa	11.6
		P_0=1100kPa	9.2
	H/D=1.5	P_0=500kPa	10.2
		P_0=780kPa	10.4
		P_0=1100kPa	9.1
	H/D=1.3*	P_0=780kPa	9.2
Off-axis	H/D=1.5	P_0=780kPa, α=15°	6.9
		P_0=780kPa, α=30°	7.6
	H/D=1.1	P_0=780kPa, α=15°	8.1

즐이 완전팽창 하는 경우인 것으로 나타났다.

4. 결론

레이저 절단가공에서 보조가스 압력, 사이거리, 그리고 노즐각도가 각각 변화하는 경우에 대한 보조가스의 절단면 충돌특성을 수치해석적으로 계산하여 다음과 같은 결론을 얻어내었다.

1. 초음속 노즐의 경우 전체적인 절단면 충돌유동 구조는 사이거리의 영향을 크게 받지 않는다.
2. 초음속 보조가스의 전압력이 증가하면서 절단면 하부에서 나타나는 유동박리 위치는 보조가스 압력증가에 큰 영향을 받지 않는다.
3. 탈축노즐 경우 절단면에서의 전단응력은 동축노즐 경우에 비하여 작게 나타난다.
4. 본 연구에서 시도된 범위 안에서 최적화된 절단면 전단응력은 동축노즐의 가장자리가 절단면 모서리에 일치되고 노즐이 완전팽창 하는 경우에 나타난다.

후기

"이 논문은 2009년 교육인적자원부의 재원으로 지원을 받아 수행된 연구(기초연구사업)의 일부임 "(2009-0077338)

참고문헌

1. Fieret, J., Terry, M. J., Ward, B. A., "Overview of flow dynamics in gas-assisted laser cutting," *SPIE High Power Lasers*, Vol. 801, pp. 243-250. 1987
2. 방세윤, 한유희,"레이저 절단에서의 노즐 및 가스제트의 영향," 대한용접학회지, 제12권, 제2호, pp. 1-10. 1994
3. Man, H. C. *et al.*, "Analysis of the dynamic characteristics of has flow inside a laser cut kerf under high cut-assit gas pressure," *J. Phys. D: Appl. Phys.,* Vol. 32, pp. 1467-1477. 2000
4. Fieret, J., Rand, C., "Cutting thin steel sheet," Industral Laser Solutions, Feb., wwwe.industrial-laser.com, 2007
5. Duan, J., Man, H. C., Yue, T. M., "Modelling the laser fusion cutting process: Effect of various process parameters on cut kerf quality," *J. Physics D: Appl. Phys.* 34, pp. 2143-2150. 2001
6. Kovalev, O. B., Yudin, P. V., Zaitsev, A. V., "Modeling of flow seperation of assist gas as applied to laser cutting of thick sheet metal," *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 33, pp. 3730-3745, 2009
7. Quintero, F. *et al*, "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, 2003
8. Heo, J. Y. *et al*, " Fluidic Thrust Vector Control of Supersonic Jet Using Co-flow Injection ", 45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, AIAA 2009-5174, 2009
9. Yang, Z., Shih, T. H., "New Time Scale Based Model for Near Wall Turbulence," *AIAA Journal,* Vol. 31, pp. 1191~1197, 1993
10. 손상혁, 민성규, 이 열, "레이저 절단에서 나타나는 보조가스의 절단면 충돌유동 가시화," 한국기계가공학회 2010년도 춘계학술대회논문집, 2010