

레이저 절단품질에 미치는 절단압력의 영향(1) (절단가스의 압력분포)

양영수* · 나석주* · 구형모** · 김태균***

Influence of Cutting Pressure on Laser Cut Quality (Pressure Distribution of Cutting Gas)

Y. S. Yang, S. J. Na, H. M. Koo and T. K. Kim

ABSTRACT

To investigate the influence of the cutting pressure on the laser cutting quality, an experimental facility was constructed which can measure the cutting pressure distribution for various cutting conditions. Flow visualization was performed using the Schlieren photography and the pressure acting on the workpiece surface was measured, corresponding to the important process variables such as the kind of assist gas, nozzle pressure, distance between the nozzle exit and the workpiece surface, and the presence of the secondary nozzle. The cutting pressure acting on the workpiece was largely influenced by the nozzle pressure and nozzle-workpiece distance. The secondary nozzle which is used to raise the effective working pressure had its obvious role only when the angle between it and the main nozzle was small and when the distance between the nozzle exit and the workpiece surface was large.

* 한국과학기술원 생산공학과

** 한국과학기술원 기계공학과 (항공공학 전공)

*** 대우중공업(주) 기술연구소

1. 서 론

레이저 빔을 사용해서 금속재료를 절단하기 위해서는 절단하는 과정에서 발생하는 용융금속을 절단재료로 부터 제거해야할 필요가 있다. 이러한 목적으로 레이저 빔이 주사되는 재료의 부위에 노즐을 통하여 제트를 분사하여 줌으로써 가스제트가 용융금속에 운동량(momentum)을 전달하여 이들을 방출시킨다. 이때 용융금속의 제거는 주로 절단압력에 의해 지배됨으로 최적 절단조건을 찾기 위해서는 절단면에서 정량적인 압력분포 값이 요구된다. 절단면에서의 가스 유동상태는 절단가스의 노즐압력(P_0)를 조절하면 제트의 성격을 아음속(subsonic) 또는 초음속(supersonic) 등으로 결정할 수가 있다.

아음속 제트의 경우는 노즐압력이 임계압력(critical pressure)보다 비교적 낮을 때 발생하는데, 이 제트의 유동자체가 등엔트로피(isentropic) 특성을 갖는다고 간주될 수 있으므로 절단압력이 노즐압력과 비슷한 값을 나타내며, 재료와 노즐간의 거리가 커질수록 점차 완만한 속도로 감소한다. 그러나 가스제트의 방향이 노즐제작 과정 중에 발생하는 결함이나 오차에 의해 크게 변화하므로, 아음속 제트를 사용하게 될 때 재료의 표면에서 높고 일정한 절단압력을 얻기 위해서는 노즐과 재료의 거리를 가능한 작게 유지하여야 한다.¹⁾

절단가스의 노즐압력을 초음속 임계값 보다 크게 하면 초음속 제트를 얻을 수가 있다. 이 초음속제트 유동은 그 성격이 매우 복잡하고 노즐출구의 형상과 노즐압력 등에 의해서 민감하게 결정된다. 이 유동을 단순히 완전가스의 비열전달(adiabatic), 비회전성(irrotational) 유동이라고 가정하면서 해석하면 아음속 유동에서 초음속 유동으로 천이하는 노즐압력과 후방압력의 비, 즉 임계압력비를 다음과 같이 구할 수가 있다.²⁾

$$\frac{P_n}{P_\infty} \geq \left\{ 1 + \frac{1}{n} \right\}^{\left(1 + \frac{n}{2} \right)} = \left\{ \frac{2}{1 + \gamma} \right\}^{\left(\frac{\gamma}{1 - \gamma} \right)}$$

여기서,

n : degree of freedom of gas molecule

γ : C_p/C_v

P_n : nozzle pressure

P_∞ : ambient pressure

이러한 초음속 제트의 유동장은 매우 복잡하며, 충격파(shock wave)가 존재하여 이를 전후로 온도, 밀도, 그리고 정압이 갑자기 증가하고, 속도와 정체압력이 급격히 감소하는 비가역적 유동으로 아음속유동과 같은 등엔트로피 유동이라고 할 수가 없다. 이러한 유동의 형태는 노즐에 가해지는 압력, 노즐의 직경, 그리고 노즐목(nozzle throat)의 형상과 노즐첨단(nozzle tip) 등에 의해서 서로 다르게 결정되며, 입사파(incident shock wave)와 반사파(reflected shock wave) 등으로 구성되어 있는 프란틀과의 충격파 원주 내의 기체에서는 주위 압력보다 높은 압력을 얻을 수가 있다.³⁻⁶⁾

이와같이 초음속제트의 유동장중에서도 높은 압력비($P_0/P_\infty > 4$)에서는 압력비가 비교적 낮은($P_0/P_\infty < 2$)경우에 발생하는 원추형의 수직충격파의 형태가 유지되지 못하고 입사경사충격파(incident oblique shock)의 모양이 곡선이 되고, 이 경사충격파가 한점에 모이지 못하고 수직충격파를 형성한다(normal shock wave). 이 경우는 처음에 발생하는 매우 강한 수직충격파(normal shock wave)에 의해서 그 후류의 유동구조가 결정되며, 다른 수직충격파가 그 후류에는 존재하지 않게된다. 위와같은 성질을 갖는 초음속 제트를 재료에 충돌시키면 제트의 성격에 따라 절단압력과 stand-off distance(노즐과 모재와의 거리)의 관계가 여러가지 형태로 나타나며, 아음속 제트에서와는 달리 어떠한 조건에서는 stand-off distance가 비교적 클 때에도 충분히 큰 압력을 얻을 수 있다. 그러나 초음속 노즐을 사용할 경우는 안정된 와환(vortex ring)이 발생하기 때문에, 노즐의 압력이 증가함에 따라 재료표면에서 얻어지는 압력이 단

순히 증가하는 아음속 제트와는 달리 그 노즐 압력에 상한이 존재한다.

이러한 절단압력의 상한은 개개 노즐의 형태, 가스유동의 상태등에 의해 복합적으로 결정되므로, 최적의 절단조건을 찾기 위해서는 절단노즐에 사용되는 노즐의 특성을 실험적으로 연구하여 노즐과 재료표면 사이의 유동장이 가지고 있는 공기 역학적 특성을 규명하여야 한다.

2. 절단압력의 측정장치 및 방법

노즐에서 분사되는 절단가스가 재료에 충돌 압력, 즉 절단압력을 측정하기 위해 Fig.1 과 같은 실험장치를 제작 구성하였다. 실험장치의 구성은 공기압축기, 제트노즐, 노즐지시대, 그리고 절단재료와 3축 이송장치로 구성되며,

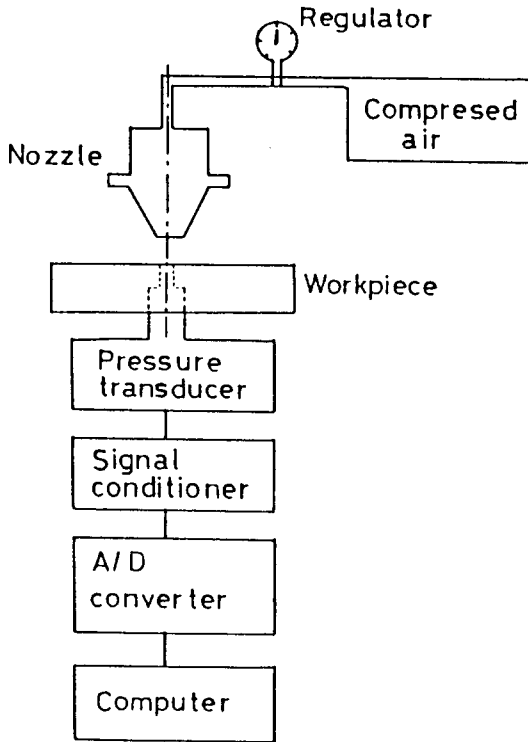


Fig.1 Schematic diagram of pressure measuring system

측정계기로는 압력변환기, 변환기신호 증폭기 및 A/D 전환기가 정착된 마이크로 컴퓨터 등을 사용하였다. 평판위 압력공 바로 위쪽의 적당한 위치에 노즐을 고정시키고, 공기압축기 조정밸브와 압력조절기 (pressure regulator) 를 조정해서 노즐압력을 제어하며 평판을 3축 방향으로 움직여 노즐과 압축공과의 여러 위치에서 여러가지 특성의 가스제트의 압력을 측정하였다.

실험에 사용된 레이저 절단노즐은 수축형노즐 (C-nozzle) 과 수축 직선형노즐 (C-S nozzle) 로서 그 형상 및 크기가 Fig.2에 나타나 있는데 노즐직경의 크기는 각각 1.2mm 와 1.5mm를 선정하여 두가지 종류에 대해서 실험하였다. 또한 압력측정은 다음과 같은 2가지 경우에 대해서 수행하였다.

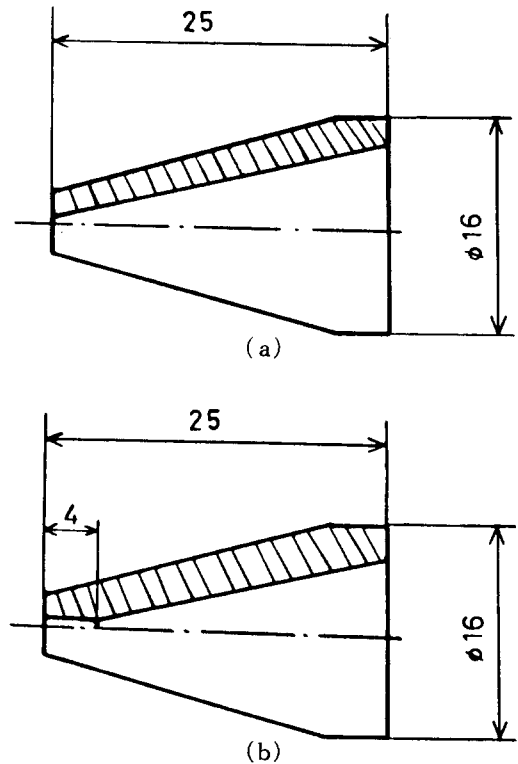


Fig.2 Dimension and shape of nozzles
(a) convergent nozzle
(b) convergent-straight nozzle

(1) 평판상단에서의 압력측정

본 측정에 사용된 평판은 Fig. 3-a 에서와 같이 두랄루민으로 제작된 평판으로서 그 중앙에 0.25mm 직경의 압력공이 뚫려 있고 다시 adapter 를 통하여 압력변환기가 부착되어 있어서 평판의 표면에 작용하는 절단압력을 측정하게 되어있다. 압력공에서 측정되는 값은 평판표면 위의 충격파를 통과하며 감소된 가스흐름의 동압과 정압의 조합으로서, 용융된 재료에 적용하는 힘을 측정하고자 하는 본 실험의 경우에는 지시된 압력치에 압축성효과의 보정 방법인 Pitot correction 을 적용할 필요가 없으며, 이 압력공에 작용하는 압력을 절단압력이라고 정의하였다.

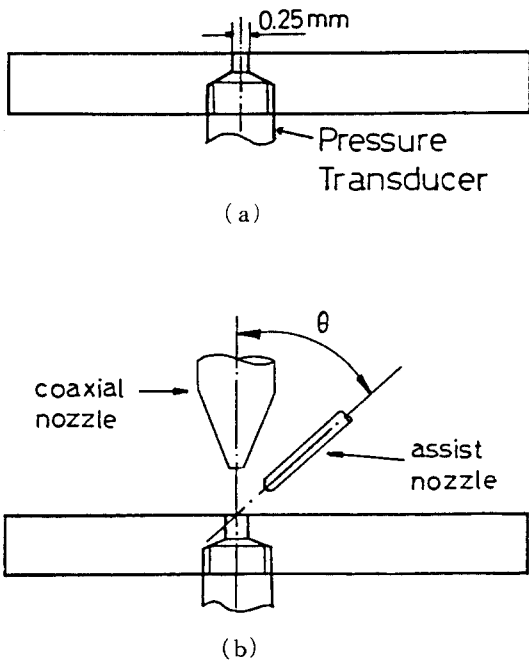


Fig.3 Equipment for measuring of pressure distribution
(a) on workpiece
(b) with coaxial and assist gas jet

(2) 보조노즐 사용시 압력측정

절단효율을 높이기 위하여 레이저빔 방향의 동축노즐을 통한 제트뿐만 아니라 이 방향(축)

과 어떤 일정한 각도를 가진 또 다른 하나의 보조노즐(assist nozzle)을 통하여 절단 가스를 분사하여 좁으로써 그 효율을 증가시킬 수 있는지의 여부도 실험하였다. Fig.3-b 에서와 같이 레이저빔 방향의 동축노즐의 옆부분에 있는 또 다른 초음속형 노즐을 부착하여 그 각도와 각 노즐의 노즐압력을 조절하여 그 결과로서 나타나는 절단압력을 측정하였다.

3. 절단압력의 측정결과 및 고찰

(1) 가스종류의 영향

노즐에서 제트가 분사되어 모재와 수축 - 직선형 노즐간의 거리에 따른 유효 절단압력의 대표적인 관계가 Fig.4 에 나타나 있다. 이의 결과로부터 초음속 제트의 경우에는 노즐과 모재사이의 거리가 충분히 클 때에도 모재에 작용하는 절단압력은 비교적 먼 거리에 까지 반복성을 가지고 노즐압력에 가까운 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이것은 절단과정에 있어서 절단기체가 초음속 유동을 하기 때문으로서 절단가스의 중요한 특징중의 하나가 된다. 특히 Fig.4 에는 절단기체(cutting gas)로서 산소를 사용한 경우와 공기를 사용했을

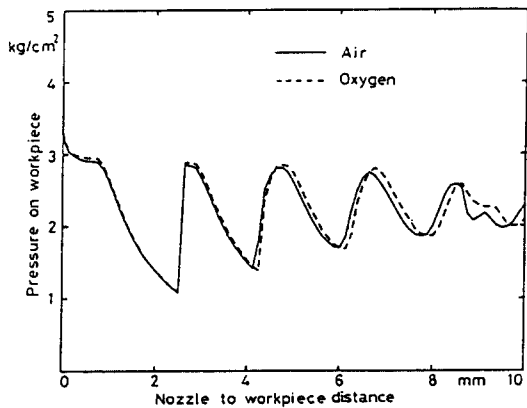


Fig.4 Pressure on workpiece vs C-S nozzle($\phi 1.2\text{mm}$) to workpiece distance for air and oxygen (nozzle pressure : 3kg/cm^2)

때의 결과를 보여주고 있는데, 결과적으로 비슷한 임계압력 ($P_0/P_\infty \sim 1.89$, diatomic gas) 을 갖는 기체인 경우는 초음속노즐 후방의 흐름이 서로 비슷한 형태를 갖기 때문에 노즐-모재간의 거리와 절단압력이 갖는 관계 역시 거의 같은 성질을 나타내고 있음을 볼 수 있다. 그러므로 본 연구에서의 압력측정 실험에서는 압축공기를 사용했다. Fig.5에는 수축형과 수축-직선형 노즐에 압축공기를 통과시킬 때 발생하는 공기유동에 대한 Schlieren photographs를 나타내었다. 어느 경우에서나 충격파의 형상이 뚜렷하게 나타나고 있으며 노즐형태에 따른 차이도 거의 관찰되지 않고 있다.

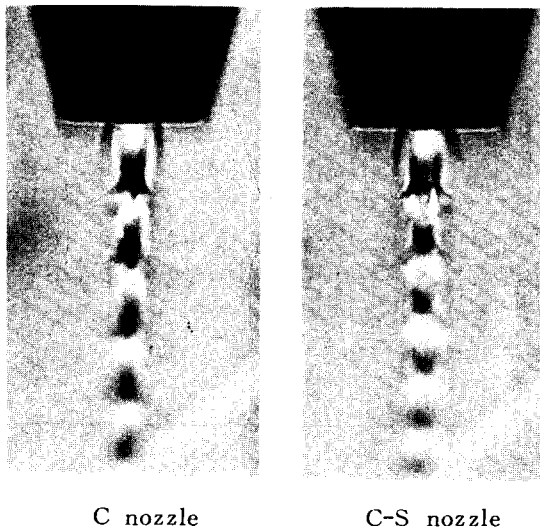


Fig.5 Schlieren photographs of stationary pressure wave in C and C-S nozzle (nozzle pressure : 5 kg/cm^2 , $\phi 1.2 \text{ mm}$)

(2) 노즐압력 변화에 따른 절단압력 분포
동일한 노즐을 사용하여 노즐압력이 변화함에 따라, 노즐-모재 사이의 거리와 모재에 작용하는 절단압력이 갖는 관계가 수축-직선형 노즐에 대해서 Fig.6에 나타나 있다.

Fig.4에서 볼 수 있듯이 반복적으로 고압력점을 나타내는 특성이 명확한 것은 주어진

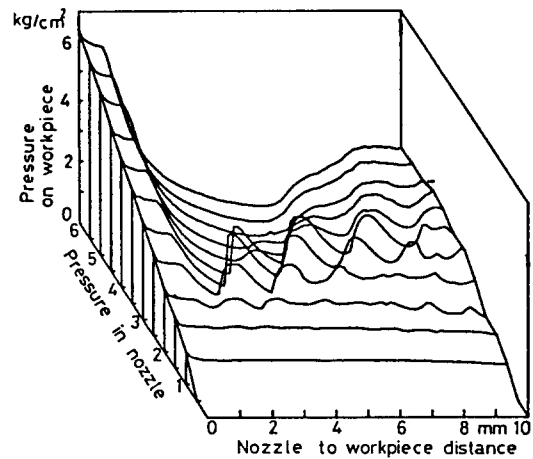


Fig.6 Pressure on workpiece vs C-S nozzle ($\phi 1.2 \text{ mm}$) to workpiece distance for various nozzle pressure

노즐에서 어느 일정한 범위의 노즐압력에서만 얻어질 수 있음을 알 수 있다. 즉 이 경우는 $2 < P_0 < 4$ (kg/cm^2)의 범위에서만 위의 반복적 특성이 얻어지고 있다. 이것은 노즐압력이 높아지면 mach shock disc가 형성되고 이에 따라 모재의 표면에 vortex ring이 형성되어서, 절단능력이 노즐압력에 비해서 상당히 낮아지기 때문이며, 따라서 노즐과 모재와의 거리가 작은 곳에서만 (small Z) 높은 절단압력을 얻을 수가 있다. 직경이 1.5 mm 인 수축-직선형 노즐에 대한 실험결과도 앞에서 설명된 현상과 거의 동일하였다. Figure 7에는 수축형 노즐과 모재와의 거리가 변함에 따라 모재의 윗면에서 측정되는 절단압력을 여러가지 노즐압력에 대해서 나타내었다. 충격파에 의해서 높은 압력이 주기적으로 나타나는 경향은 수축-직선형 노즐에서와 유사하나, 그 반복성과 압력의 증가폭이 수축-직선형 노즐에서 보다 조금 저하되고 있음을 볼 수 있는데 이것은 수축-직선형 노즐이 이상적인 초음속노즐로 알려진 축소-확대형의 de Laval 노즐에 더 가깝기 때문인 것으로 사료된다. 축소형 노즐에서도 노즐직径의 변화에 따른 압

력분포의 변화는 거의 무시될 수 있었다.
Fig.8.

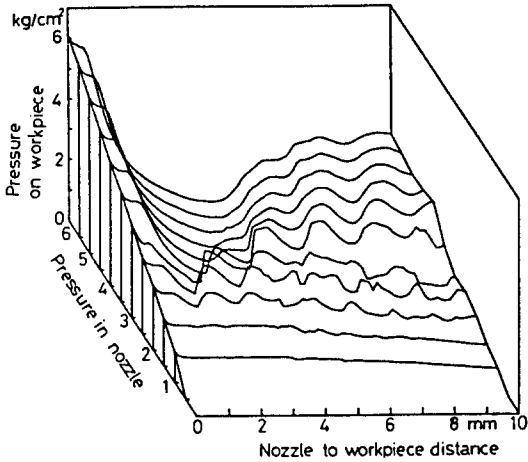


Fig.7 Pressure on workpiece vs C nozzle ($\phi 1.2mm$) to workpiece distance for various nozzle pressure

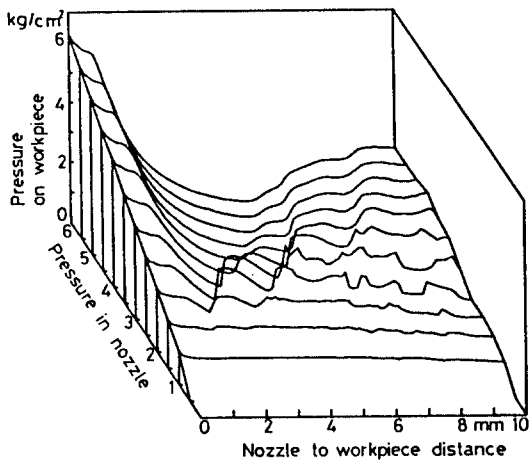


Fig.8 Pressure on workpiece vs C-S nozzle ($\phi 1.5mm$) to workpiece distance for various nozzle pressure

(3) 절단평면에서의 압력분포
노즐반경 방향의 여러점들에서 Fig. 4와 같

은 관계를 측정된 결과가 Fig.9에 주어
져 있다. 노즐과 모재와의 거리가 변화함에 따라
서 절단압력이 급격하게 증가하는 현상이 초
기에는 노즐직경의 전 범위에 걸쳐서 발생하
나 노즐-모재사이의 거리가 증가할수록 압력
의 급상승이 발생하는 영역이 점차적으로 감
소하고 있음을 알 수가 있다. 이는 제트경계

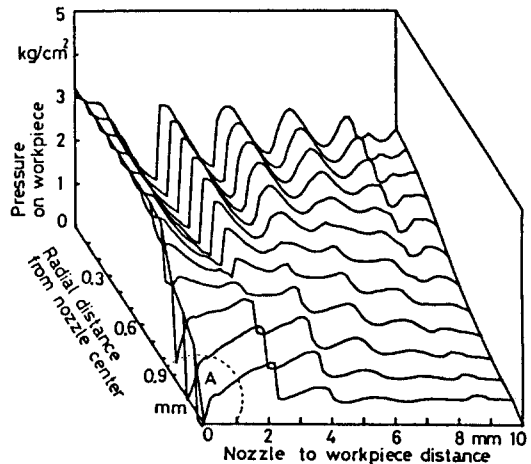


Fig.9 Radial profile of workpiece pressure distribution on constant C-S nozzle pressure ($3kg/cm^2$)

의 vortex layer가 후류로 갈수록 그 폭이
증가하여 제트의 영역을 침식하여 발생하는
것이라고 간주된다. 따라서 실제적인 응용에 있
어서 노즐-모재 사이의 거리가 클 경우에는
노즐축 (nozzle axis)을 가능한 정확하게 절
단점 (cutting point)에 일치하도록 하여야 한
다. 절단가스의 제트 흐름이 축 방향에서 모
재에 충돌한 후에 반경방향으로 바뀌어져서,
노즐 끝단과 모재와의 작은 틈을 흘러 나갈
때는 급격한 팽창을 수반하며 이에 따라 음의
압력이 발생하는데 이 현상이 Fig.9의 A부
분에 보여져 있다. 이러한 현상은 평면형의
끝단 (flat tip)을 가진 노즐을 사용할 때에
노즐과 모재 사이의 거리가 상당히 작을 경우
에 발생하며, molten metal 등이 절단점에

서 초음속 충돌제트의 높은 압력에 의해서 발산되어 나오다가 이 낮은 압력의 영역에서 잔류할 가능성이 있으므로 바람직하지 못하다.

(4) 보조노즐 사용시 압력분포

Fig.10은 동축노즐을 일정압력(1kg/cm²)으로 하고 보조노즐과 동축노즐 사이의 각을 증가시켜 가며(30°, 45°, 60°), 여러가지 보조노즐 압력에 대해서(3,4,5kg/cm²) 측정된 결과들로 각도가 증가하면(60°) 보조노즐의 영향

이 거의 나타나지 않고 단지 동축노즐이 갖고 있는 특성만이 나타남을 알 수가 있다. 그리고 각도가 작은 경우(30°, 45°)에도, 보조노즐의 영향은 노즐과 모재 사이의 거리가 작은 곳에서는 뚜렷하게 나타나지 않지만 거리가 증가하면서 그 영향이 분명해지고 동축노즐만을 사용할 때 나타나는 파형의 형상이 사라지고, 보조노즐의 압력만이 모재에 작용하는 것을 볼 수 있다. 즉 보조노즐을 사용할 때 그 영향은 보조노즐과 주노즐 사이의 각도가 비교적 작

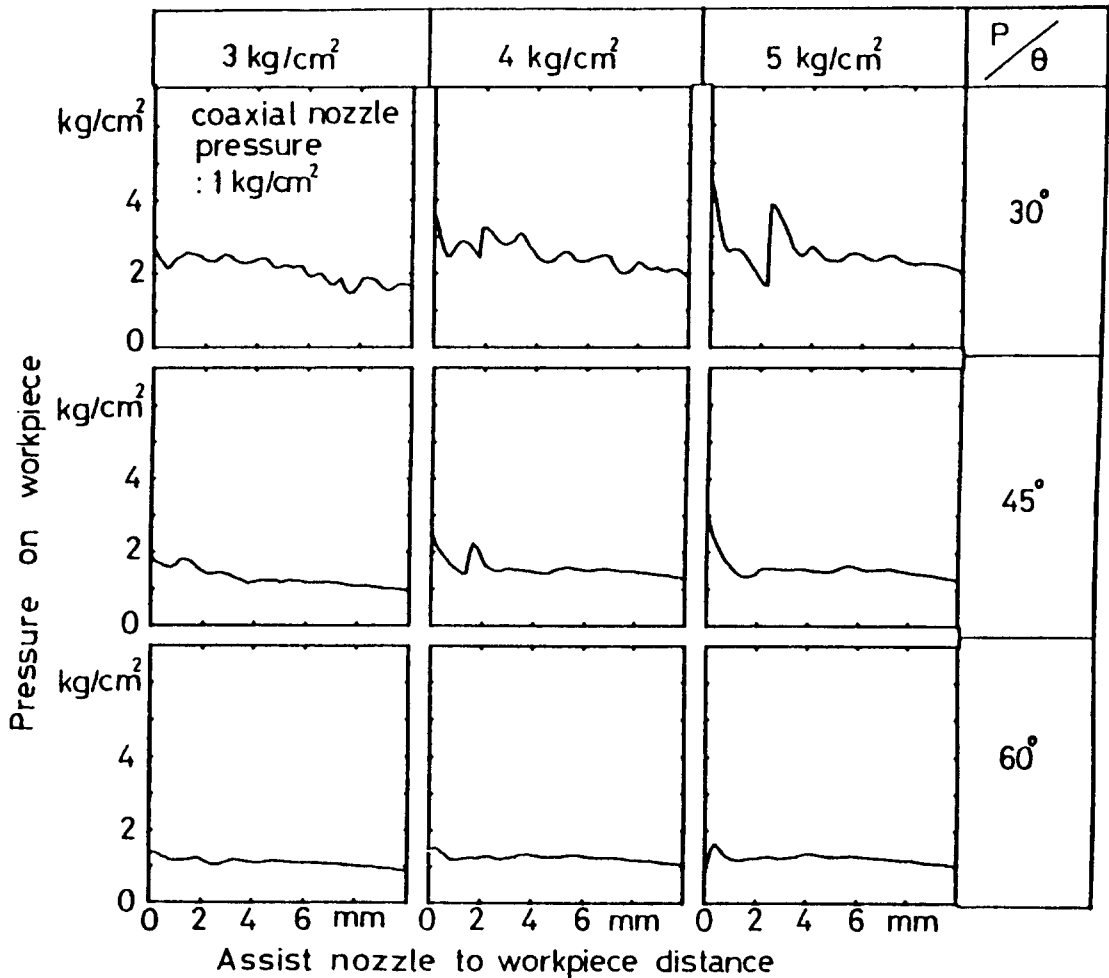
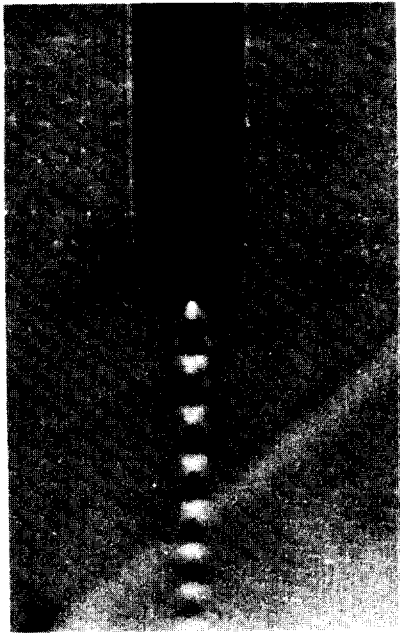


Fig.10 Relationship between pressure on workpiece and nozzle to workpiece distance for various nozzle pressure and angle of assist nozzle

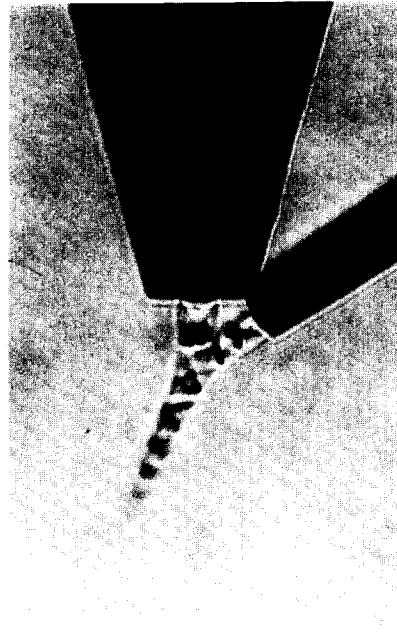
고 노즐과 모재 사이의 거리가 큰 곳에서 뚜렷하게 나타남을 알 수가 있다.

Fig.11 에서는 실험에 사용한 보조노즐의 제트와 동축노즐의 제트가 만날때의 Schlieren photographs 를 나타낸 것으로 보조노즐에서도 동축노즐에서와 같이 충격파가 발생하

고 있음을 알 수 있다. 또한 동축노즐의 압력에 따라 보조노즐에서 나오는 제트의 방향이 바뀌게 되며 특히 동축노즐의 압력을 높게하면 보조노즐의 제트가 절단면에 정확히 분사될 수 없음을 나타내고 있다.



(a) assist nozzle jet



(b) dual nozzle jet

Fig.11 Schlieren photographs of assist nozzle jet and dual nozzle jet

4. 결 론

레이저 절단부의 품질에 미치는 절단압력의 영향을 규명하기 위해서 실제 레이저 절단에서 사용되고 있는 노즐을 선정하여 절단압력을 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 동축노즐을 사용하여 2~4 kg/cm² 범위의 노즐압력에서 초음속제트를 절단재료에 분사할 때 절단재료와 노즐사이의 거리변화에 따라 절단면에서의 압력은 주기성을 갖고 감소, 증가

한다.

(2) 노즐과 모재사이의 거리가 작을 때는 절단압력이 급격하게 증가하는 현상이 노즐직경의 전 범위에 걸쳐서 발생하나 노즐-모재간의 거리가 증가할수록 압력의 급상승이 발생하는 영역이 점차적으로 좁아진다.

(3) 수축형 노즐과 수축-직선형 노즐에서 나오는 초음속 제트의 거동은 매우 유사하며 노즐직경이 1.2 mm에서 1.5 mm로 바뀌어도 절단가스의 유동에는 큰 변화가 없다.

(4) 보조노즐이 절단압력에 미치는 영향은 보

조노즐과 동축노즐 사이의 각도가 비교적 작고 노즐과 모재사이의 거리가 큰 곳에서 뚜렷하게 나타난다.

《 참고 문헌 》

1. M. Bass, *Laser Materials Processing*, North-Holland Publishing Company, 1983.
2. J.E.A. John, *Gas Dynamics*, Allyn and Bacon, Inc., 1969.
3. C.D. Donaldson and R.S. Snedeker, "A Study of Free Jet Impingement. Part 1: Mean Properties of Free and Impinging Jets", *J. of Fluid Mech.*, 1971, Vol.45, Part 2, pp.281-319.
4. C.D. Donaldson, R.S. Snedeker and D.P. Margolis, "A Study of Free Jet Impingement. Part 2: Free Jet Turbulent Structure and Impingement Heat Transfer", *J. of Fluid Mech.*, 1971, Vol.45, Part 2, pp.477-512.
5. P.J. Lamont and B.L. Hunt, "The Impingement of Underexpanded Axisymmetric Jets on Wedges", *J. of Fluid Mech.*, 1976, Vol.76, Part 2, pp.307-336.
6. P.J. Lamont and B.L. Hunt, "The Impingement of Underexpanded Axisymmetric Jets on Perpendicular and Inclined Flat Plates", *J. of Fluid Mech.*, 1980, Vol.100, Part 3, pp.471-511.