

# STS304의 레이저 절단에서 보조가스 압력이 미치는 영향

이 호 준,\* 조 용 무,\*\* 유 용 재,\*\*\* 김 재 도\*\*\*\*

## Effect of Assistant Gas Pressure on Laser Cutting of STS304

H. J. Lee,\* Y. M. Cho,\*\* W. J. Yoo,\*\*\* J. D. Kim\*\*\*\*

### ABSTRACT

This paper presents the effects of assistant gas pressure on laser cutting. To investigate the effects of assistant gas pressure, pressure measuring system was constructed with good handling and precision at low price. The measured results discussed compare with that of laser cutting of STS304.

The assistant gas pressure varied with the variation of distance between nozzle and workpiece. The peak pressure existed at some distance and could be known by using the devised pressure measuring system. The higher assistant gas pressure helps to remove the dross and the exothermic energy out of the material. The quantity of dross beneath the workpiece decreases and the kerf width narrows at measured peak pressure.

**Key Words** : Laser cutting(레이저 절단), Assistant gas(보조가스), Kerf width(절단폭), Exothermic energy(발열에너지), Dross(드로스)

### 1. 서 론

레이저 가공의 한 분야로서 레이저 절단가공은 수치 제어를 이용한 자동화가 용이하므로 형상이 복잡한 절단이 용이하고 비접촉성 가공이므로 절단 공구의 손실이 없고 진동, 소음 및 칩등이 발생하지 않는 장점을 갖고 있다. 또한 고정밀의 빠른 절단이 가능하며 절단 폭이 작아 재료의 손실이 적고 열영향 구역이 매우 작

은 이유로 절단가공에서 레이저의 사용은 산업 전반에 걸쳐 급속히 증가하고 있는 실정이다.<sup>(1-3)</sup> 레이저 절단 가공의 중요변수는 레이저 광학시스템, 노즐시스템, 재료의 물성치 등으로 분류할 수 있으며, 이중 노즐시스템은 노즐의 종류와 형상, 보조가스의 압력, 보조가스의 종류, 노즐헤드의 구조, 노즐과 재료와의 거리 등이며 이에대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 레이저 절단에서 압력분포의 영향에 관한 연구는 강철류의

\* 아시아자동차 연구소  
 \*\* 대유공전 금형설계과  
 \*\*\* 인하대학교 대학원  
 \*\*\*\* 인하대학교 기계공학과

절단에서 처럼 산화열을 이용하는 경우 절단품질이 가스유동에 많은 영향을 받기 때문에 그 중요성이 증가되고 있다.<sup>(6-10)</sup>

노즐의 형상에 관한 연구에 관해 살펴보면 F. B. Thomassen은 링노즐(ring nozzle)을 사용하여 노즐의 가운데로 산소를 불어주고 그 둘레에 공기를 불어주어 산소가 절단부까지 도달하게 함으로서 절단 성능을 향상시키는 결과를 얻었고,<sup>(11)</sup> Birkett와 Herbert는 탄텨노즐(tandem nozzle)을 사용하여 절단면에 붙는 드로스를 제거하는데 좋은 결과를 얻었다.<sup>(12)</sup> W. O'Neill은 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용한 강 of 절단에서 절단면 하단의 산화 집중현상을 막기 위하여 버퍼노즐(buffer nozzle)을 사용하여 절단면 하단의 버닝(burning)현상을 막을 수 있었다.<sup>(13)</sup> 보조가스의 종류가 절단결과에 미치는 영향에 관해서는 J. Powell은 열화학적 관점으로 O<sub>2</sub>를 보조가스로 사용한 레이저 절단에서 산화가 절단에 미치는 영향에 관해 연구 하였다.<sup>(14)</sup> 레이저 절단 가공시 보조가스의 압력은 가공재료의 위치에 따라 다르며, 이에 대한 측정방법도 많이 개발되었다. K. Horio는 스트레인 게이지를 사용하여 노즐형상에 따른 절단압력을 측정하였고, B. A. Ward는 여러가지 노즐을 사용하여 초음속 제트에 의한 절단압력의 변화가 절단품질에 미치는 영향에 관해서 연구하였다.<sup>(15, 16)</sup>

레이저 절단에서 높은 정밀도를 얻으려면 노즐시스템에 관련된 절단변수가 절단품질에 미치는 영향에 대한 분석을 통한 절단 매카니즘의 규명없이 불가능하다. 본 연구는 레이저 노즐시스템에서 보조가스 압력이 재료에 미치는 영향에 관한 규명을 하기 위하여 노즐에서 분사되는 절단가스의 압력분포를 측정할 수 있는 저가이면서도 신뢰성이 높은 절단압력 측정 시스템을 구성하여 재료의 상단과 하단에서 측정하였으며, STS304에 대한 레이저 절단을 수행하여 절단압력의 변화가 절단 품질에 미치는 영향에 대해 분석하였다. STS304에 대한 레이저 절단실험은 보조가스의 압력과 재료와 노즐사이의 거리를 변화시키면서 수행하였고, 절단 후 보조가스의 압력, 노즐의 형태, 재료의 두께 및 노즐과 재료와의 거리 변화가 절단에 미치는 영향을 분석하기 위하여 절단폭의 크기, 절단면의 경도, 드로스의 양 및 재 용착부를 측정하여 최적의 절단품질을 얻기 위한 레이저 절단 조건을 제시하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2-1 보조가스의 압력 측정장치

노즐에서 분사되는 보조가스가 재료에 충돌할 때의 충돌압력, 즉 절단 압력을 측정하기 위해 Fig. 1과 같은 실험장치를 제작 구성하였다. 실험장치는 공기압축기(air compressor), 솔레노이드 밸브(solenoid valve), 압력조절 밸브(pressure control valve), 노즐, 노즐 이송장치, 압전센서(piezo sensor) 그리고 파형분석기(FFT:fast fourier transformer)로 구성되어 있다.

절단면 하단에서의 압력을 측정하기 위해서 직경이 1.0mm인 구멍이 뚫린 재료두께와 같은 판을 통과한 유동을 측정하는 장치를 Fig. 2와 같이 구성하였다.

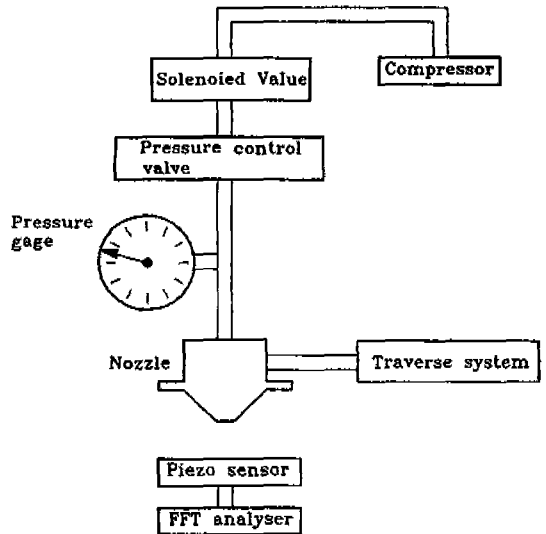


Fig. 1 Schematic diagram of pressure measuring system

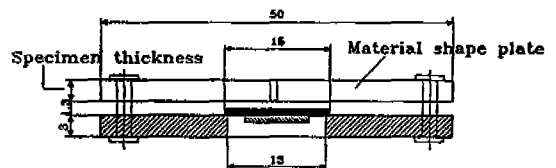


Fig. 2 Equipment for measuring of prssure distribution beneath workpiece.

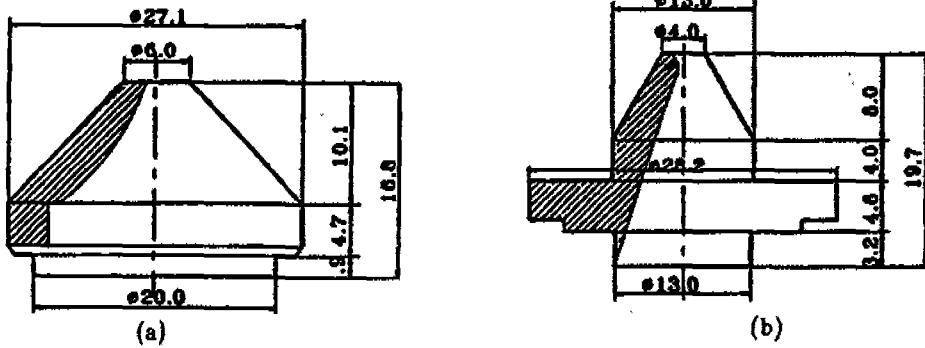


Fig. 3 Dimension and shape of nozzle, (a) Convergent type (b) Convergent-divergent type.

### 2-2 실험방법

레이저 절단에 미치는 노즐에 관련된 변수는 노즐의 종류, 보조가스의 압력, 보조가스의 종류, 노즐의 형상, 노즐과 재료와의 거리 등이다. 본 연구에서는 노즐의 종류, 보조가스의 압력 그리고 노즐과 재료사이의 거리를 변수로 채택하여 실험을 수행하였다.

Fig. 3은 실험에 사용된 노즐의 치수를 나타낸 것으로, 산업 현장에서 많이 사용되는 직경이 0.8mm인 수렴노즐(convergent nozzle)과 수렴-발산노즐(convergent-divergent nozzle)로 노즐목의 직경 1.0mm이고 노즐 출구의 직경이 2.0mm인 노즐을 선정하였다. 노즐과 재료사이의 거리를 이송장치로 0.0mm에서 10.0mm까지 0.25mm씩 증가 시키면서 각 위치마다 시편 상단과 하단에서의 절단압력을 측정하였다. 이때 압력조절 밸브를 조정하여 노즐에서 분사되는 초기의 가스압력을 1, 2, 3, 4kgf/cm<sup>2</sup>로 변화시키면서 수행하였다.

레이저 절단실험에서 실험변수는 노즐의 종류, 재료의 두께, 가스압력 그리고 노즐과 재료사이의 거리로 선정하였다. 그 외의 조건들은 출력 1kW, 절단속도 1.5m/min로 고정하였으며 보조가스로는 O<sub>2</sub>를 사용하여 두께가 각각 2.0, 3.0mm이고 폭이 100mm인 시편을 각 조건에 따라서 90mm씩 절단하였다. 절단 후 절단 단면에서 재료 내부로 0.2mm들어간 위치에서 상부 및 하부의 절단폭을 측정하였고, 용융물질이 절단부에서 재 용착을 살펴보기 위해서 시편을 폴리싱 후 급속 광학 현미경을 사용하여 관찰하였다. 경도시험은 미소 경도시험기를 사용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3-1 보조가스 압력 측정

Piezo 센서를 사용한 압력시스템을 이용하여 시편 상단과 하단에서 보조가스의 압력을 측정하였다. Fig. 4는 직경이 0.8mm인 수렴노즐을 이용하여 보조가스를 분사하였을 때 노즐과 재료와의 거리 변화에 따른 재료 상단에서의 압력분포를 나타낸 것이다. 일반적으로 예측할 수 있는 것처럼 노즐과 시편간의 거리가 멀어 짐에 따라 압력이 점차 감소하는 것을 볼 수 있었다.

Fig. 5와 Fig. 6은 각 노즐에 대하여 보조가스를 분사하였을 때 재료의 하단에서의 압력분포를 나타낸 것이다. 시편 하단에서의 압력분포는 재료의 두께에 해당하는 각각 2.0mm와 3.0mm인 판을 통과한 보조가스

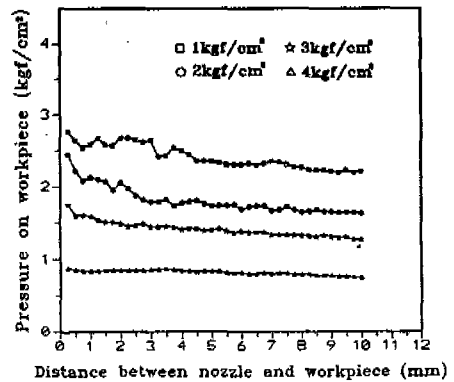


Fig. 4 Variation of cutting pressure on workpiece with distance between nozzle and workpiece for nozzle pressure(Conv. nozzle φ 0.8mm)

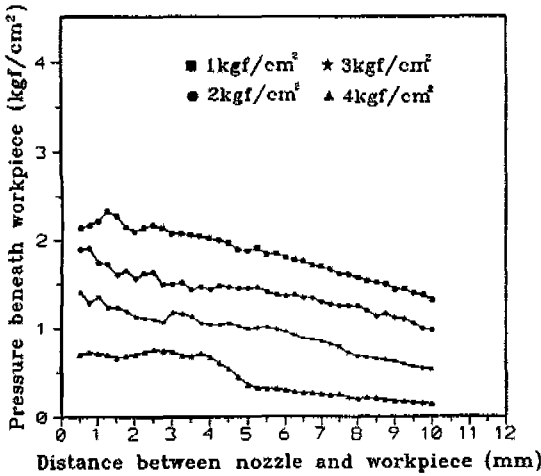


Fig. 5 Variation of cutting pressure beneath workpiece with distance between nozzle and workpiece for nozzle pressure(Conv. nozzle  $\phi$  0.8mm, thickness 2mm)

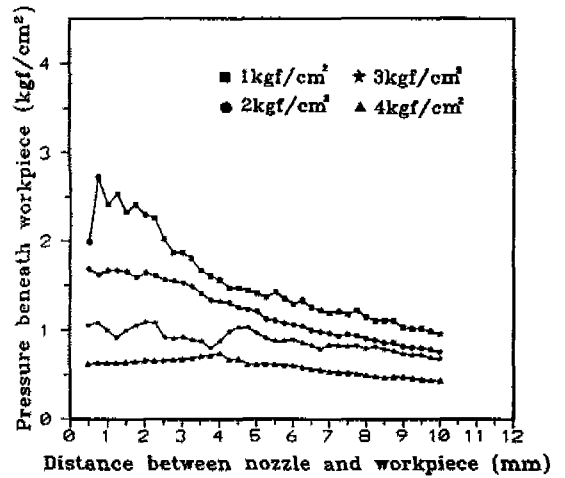


Fig. 7 Variation of cutting pressure beneath workpiece with distance between nozzle and workpiece for nozzle pressure(Conv.-dive. nozzle  $\phi$  0.8mm, thickness 2mm)

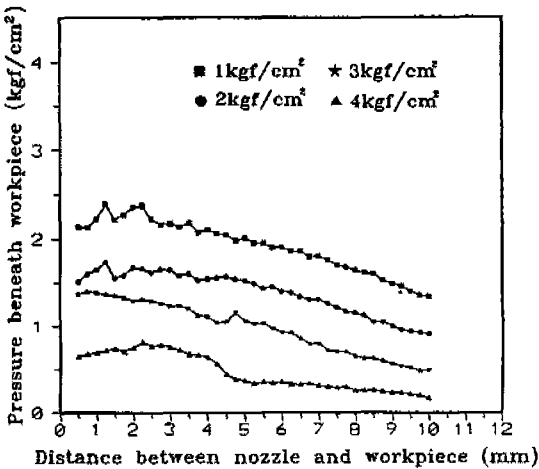


Fig. 6 Variation of cutting pressure beneath workpiece with distance between nozzle and workpiece for nozzle pressure(Conv. nozzle  $\phi$  0.8mm, thickness 3mm)

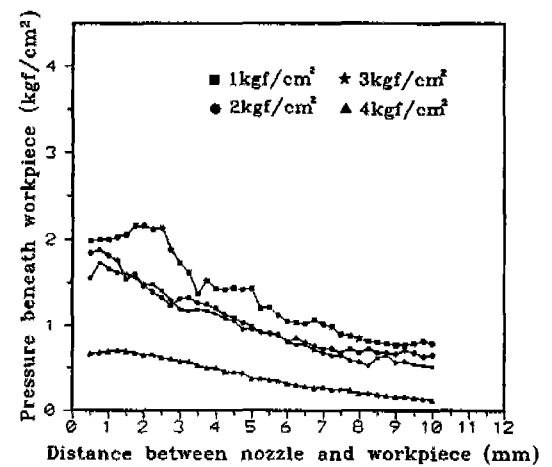


Fig. 8 Variation of cutting pressure beneath workpiece with distance between nozzle and workpiece for nozzle pressure(Conv.-dive. nozzle  $\phi$  0.8mm, thickness 3mm)

의 유동을 측정된 것이다. 재료상단에서의 압력의 분포 형태와 비슷하게 나타나는데 이는 재료에 작용하는 보조가스의 압력이 흡을 통하여 비슷한 압력분포를 가지고 하단에 전달되는 것을 유추할 수 있다. 노즐과 재료 사이의 거리가 커짐에 따라 압력의 감소가 나타나고 압력이 클수록 더욱 뚜렷하게 나타난다.

Fig. 7과 Fig. 8은 수렴-발산 노즐을 사용했을 때의 시편 하단에서의 압력분포를 나타낸 것이다. 노즐과 재료사이의 거리가 커짐에 따라 압력의 감소가 나타나고 압력이 클수록 감소의 폭이 크게 나타났다.

Piezo 센서를 사용한 압력측정시스템으로 보조가스 압력을 측정된 결과 일반적으로 시편 하단에서의 압력

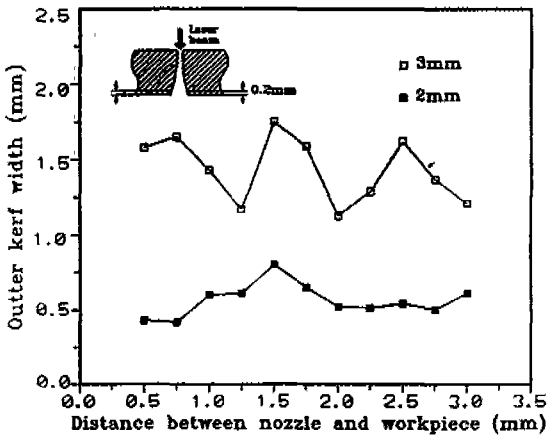


Fig. 9 Variation of outer kerf width distance nozzle and workpiece(Conv. nozzle  $\phi$  0.8mm, gas pressure 3kgf/cm<sup>2</sup>)

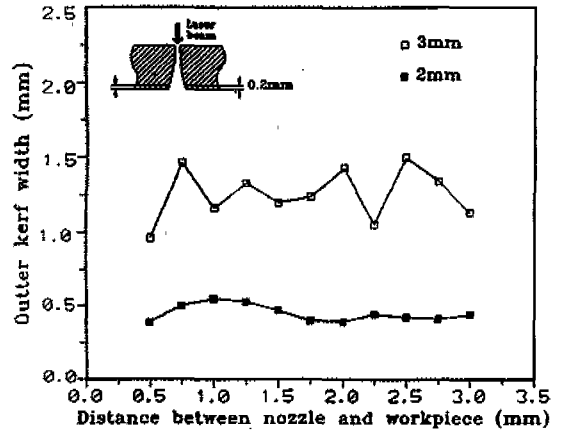


Fig. 10 Variation of outer kerf width with distance nozzle and workpiece(Conv. nozzle  $\phi$  1.0mm, gas pressure 3kgf/cm<sup>2</sup>)

은 노즐에서의 압력이 높을수록, 판의 두께가 두꺼울수록 압력의 강하폭이 크게 나타났고 재료상단에서의 압력의 형태와 비슷하게 나타났다. 절단가스를 O<sub>2</sub>로 사용했을 때 가스압이 2kgf/cm<sup>2</sup>이상일 때 마하 충격판이 발생하여 압력의 변화가 있음을 알 수 있었다. 또한 측정시스템으로 노즐을 통한 가스제트의 절단압력을 측정하는데 적용될 수 있다.

### 3-2 보조가스 압력 분포에 따른 절단폭의 변화

절단압력은 레이저 절단 초기에 발생하는 산화열과 용융물질을 재료의 두께 방향으로 전달시키기 때문에 절단폭에 미치는 영향이 매우 크다. 본 연구에서 측정된 스테인레스의 절단폭 크기는 상단과 하단에서 두께 방향으로 0.2mm 들어간 위치에서 측정하였다. Fig. 9는 직경이 0.8mm인 수렴 노즐을 사용해서 3kgf/cm<sup>2</sup>의 압력으로 절단 했을 때 절단폭의 변화를 나타낸 것이다. 절단폭의 변화는 보조가스의 압력 변화와 비교해 보면 불규칙하게 나타나지만 절단될 공작물이 두꺼워 지면 하부에서의 절단폭이 커짐을 알 수 있다. 이러한 이유는 하부에서 산화발열량이 크기 때문으로 생각된다. Fig. 10은 직경이 1.0mm인 수렴 노즐을 사용했을 때 절단폭의 변화를 나타낸 것이다. 직경이 0.8mm인 수렴 노즐을 사용했을 때보다 절단폭이 상대적으로 작게 나타난다. 이것은 절단압력의 차이에서 비롯된 것으로 사료된다.

Fig. 11은 수렴-발산 노즐을 사용했을 때 절단폭의

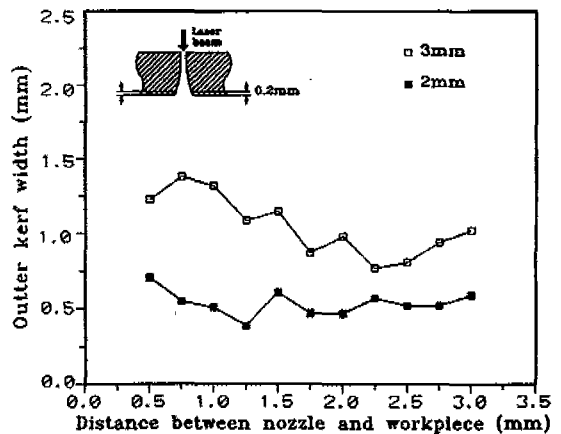


Fig. 11 Variation of outer kerf width with distance nozzle and workpiece(Conv.-div. nozzle  $\phi$  0.8mm, gas pressure 3kgf/cm<sup>2</sup>)

변화를 나타낸 것으로 수렴노즐 1.0mm의 경우와 유사한 경향을 나타내고 있다. 가공물의 재료 두께방향으로의 절단압력 강하가 존재함을 존재함을 알 수 있었다. 이것은 재료 상하단에서 보조가스의 압력이 높을수록 산화물을 적절히 배출되므로 산화발열이 재료 쪽으로 전달되는 것을 방지할 수 있기 때문인 것으로 사려된다.

### 3-3 보조가스 압력 분포에 따른 드로스의 변화

CO<sub>2</sub> 레이저로 스테인레스와 같은 재료를 절단할 때

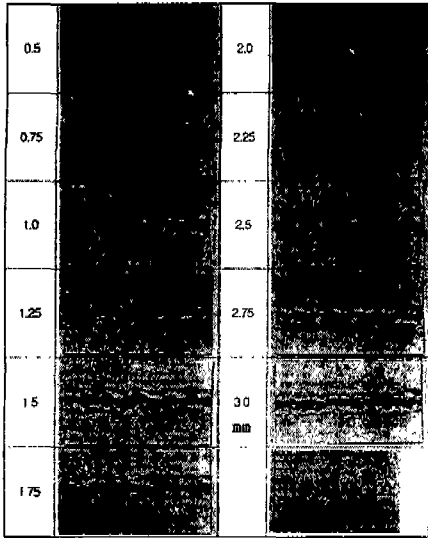


Fig. 12 Cut shape change on bottom side with distance between nozzle and workpiece(Conv. nozzle  $\phi$  0.8mm, gas pressure  $4\text{kgf/cm}^2$ , thickness 3mm)

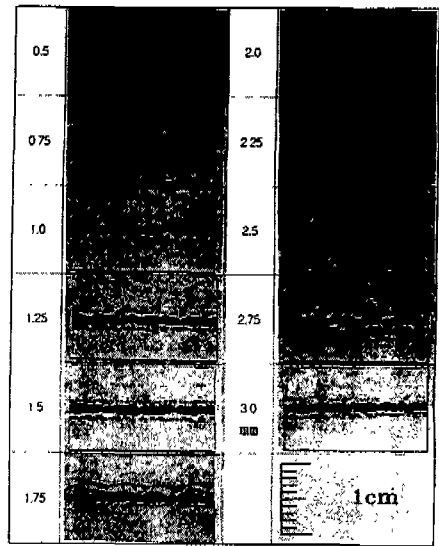


Fig. 13 Cut shape change on bottom side with distance between nozzle and workpiece(Conv. nozzle  $\phi$  1.0mm, gas pressure  $3\text{kgf/cm}^2$ , thickness 3mm)

절단면 하단과 절단 단면 쪽에 드로스가 응착한다. 이를 피하기 위한 적절한 가공 변수의 선택이 중요하다. Fig. 12는 직경이 0.8mm인 수렴 노즐을 사용하여,  $4\text{kgf/cm}^2$ 의 압력으로 두께가 3.0mm인 판을 절단 했을 때 절단면 하단에 응착한 드로스를 노즐과 재료 사이의 거리에 따라 나타낸 사진이다. 노즐과 재료사이의 거리가 1.25, 3.0mm에서 드로스의 양이 절단압력이 비교적 높아 빠른 속도로 용융물질이 배출되기 때문에 사료된다. Fig. 13과 Fig. 14는 직경이 1.0mm인 수렴 노즐로 각각 3,  $4\text{kgf/cm}^2$ 의 압력으로 절단한 경우이다.  $4\text{kgf/cm}^2$ 의 노즐 압력으로 절단 했을 때가  $3\text{kgf/cm}^2$ 의 절단압력으로 절단 했을 경우보다 드로스의 양이 상대적으로 적음을 알 수 있었다.

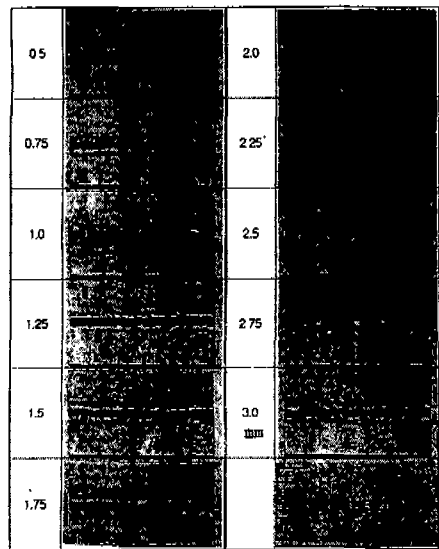


Fig. 14 Cut shape change on bottom side with distance between nozzle and workpiece(Conv. nozzle  $\phi$  1.0mm, gas pressure  $4\text{kgf/cm}^2$ , thickness 3mm)

Fig. 15는 수렴-확대 노즐을 사용했을 때 절단면 하단에 응착한 드로스의 양을 나타낸 것이다. 다른 노즐을 사용했을 때 보다 상대적으로 재료 상하단에서 보조가스의 압력이 작기 때문에 응착한 드로스의 양도 많은 것을 알 수 있었다. 보조가스의 측정압력이 높으면 용융물질과 산화물질이 신속히 재료 밖으로 배출되므로 응착하는 드로스의 양이 줄어드나 하단면에서 산화열의 집중이 생기지않아 절단면에서 스트레이션이 발생하여 단면의 거칠기는 나빠지는 단점이 있어 적정 압력의 선정이 중요하다. STS304의 경우 두께가 2mm일 때 노

즐과 재료사이의 거리가 0.75, 2.5mm에서, 두께 3mm의 경우 0.75mm, 1.25mm에서 최적의 절단 품질을 나타냄을 알 수 있었다.

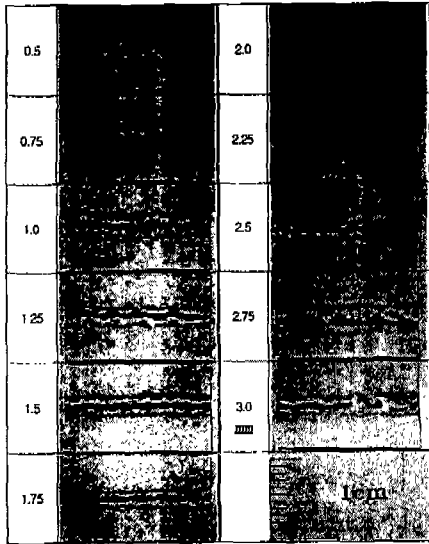


Fig. 15 Cut shape change on bottom side with distance between nozzle and workpiece(Conv. - dive. nozzle  $\phi$  1.0mm, gas pressure 4kgf/cm<sup>2</sup>, thickness 3mm)

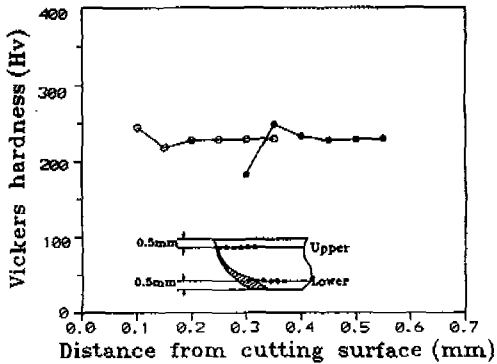


Fig. 16 Hardness distribution in cut zone of STS304

3-4 보조가스 압력 분포에 따른 재 응착부의 변화

Fig. 16은 미소경도측정기(micro vickers hardness tester)를 사용하여 절단한 재료의 경도값을 측정 한 결과 210~220Hv의 값을 얻었다. 탄소강처럼 열영 향에 의한 상변화 때문에 열영향부의 경도값이 모재에 서 보다 크게 나타나는 현상이 나타나지 않았다.

Fig. 17은 노즐직경이 1.0mm, 노즐의 가스압력을 3kgf/cm<sup>2</sup>, 재료의 두께가 3mm, 그리고 노즐과 재료 사이의 거리가 0.5mm인 조건으로 레이저 절단을 한

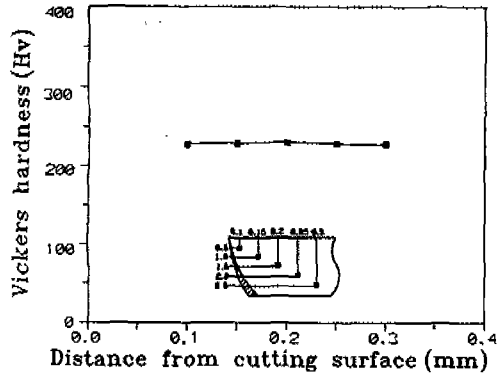


Fig. 17 Hardness distribution in cut zone of STS304 at thickness 3mm and gas pressure 3kgf/cm<sup>2</sup> with Conv. nozzle  $\phi$  1.0mm

재료의 상부와 하부에서 경도값의 변화를 나타낸 것이다. 스테인레스강은 상변태가 일어나지 않기 때문에 근본적인 조직의 변화가 일어나지 않으나 용융물질의 점성이 크기 때문에 용융물이 완전히 제거되지 않고 절단면 하단에 부분적으로 재 응착함을 볼 수 있었고, 재 응착부의 경도값은 180Hv이하로 떨어짐을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구는 레이저 절단에서 재료 상하단에서의 압력을 측정할 수 있는 시스템을 구성하여 압력을 측정하였고, STS304에 대한 레이저 절단실험으로 보조가스의 압력 및 노즐과 재료사이의 거리의 변화가 절단품질에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다.

본 연구에서 구성된 piezo 센서를 사용한 압력측정 장치로 재료의 상단과 하단에서 압력을 측정할 수 있었고, 보조가스의 측정압력이 높으면 용융물질과 산화물이 신속히 재료 밖으로 배출되므로 응착하는 드로스의 양이 줄어들고 절단면 하단에서 산화열의 집중이 생기 지 않으므로 절단폭의 크기가 작아짐을 알 수 있었다. STS304의 레이저 절단에서는 보조가스의 압력에 따라 절단품질이 다르며, 노즐과 재료와의 거리에 따른 최적의 절단 조건이 존재함을 알 수 있었다.

참고문헌

1. W. Konig, "Provisional List of Terminology for Laser Beam Cutting", CIRP Tech-

- nical Reports, Vol. 37/2, pp.675-680, 1988.
2. J. F. Ready, "Industrial Applications of Laser", Academic Press, 1978.
  3. D. M. Roessler, "New Laser Processing Developments in the Automotive Industry", Industry Laser handbook, pp.109-127, 1990.
  4. R. Walker, "Applying Multikilowatt CO2 Lasers in Industry", Lasers and Applications, Apr. pp.62-69, 1984.
  5. S. S. Charsnhan, "Lasers in Industry", van Nostrand Reinhold, 1972.
  6. 김도훈, 레이저 가공학, 경문사, 1990.
  7. J. T. Luxon and D. E. Parker, "Industrial Lasers and their Applications", Prentice-Hall, 1985.
  8. J. D. Kim, "Prediction of the Penetration Depth in Laser Beam Welding", KSME J, Vol. 4, No. 1, pp.32-39, 1990.
  9. Y. Arata, A. Maruo, I. Miyamoto, and S. Takeuchi, "Quality in Laser Gas Cutting of Srainless Steel and Its Improvement", Trans. J. W. R. I., Vol.10, Part2, pp.1-11, 1981.
  10. 김재도, "AISI 316 스테인레스강의 CO2 레이저 용접", 대한용접학회지, 제9권, 제2호, pp.29-36, 1991.
  11. F. B. Thormassen and F. O. Olsen, "Experimental Studies in Nozzle Design for Laser Cutting", Proc. 1st Int. Conf. Lasers Manufacturing, pp.169-180, 1983.
  12. F. N. Birkett, D. P. Herbert and Powell, "Prevention of Dross Attachment during Laser Cutting", Proc. 2nd Int. Conf. Lasers in Manufacturing, pp.63-66, 1985.
  13. W. O'Neill and J. T. Gabzdyl, "The Dynamic Behaviour of Gas Jets in Laser Cutting", ICALEO, pp.63-66, 1992.
  14. A. Ivason and J. Powell, "Laser Cutting of Stainless: Analysis of the Particles Ejected during Cutting", Welding in the Word, Vol.30, No.516, pp.116-125, 1992.
  15. J. Fieret, M. Terry and B. Ward, "Aerodynamic Interactions during Cutting", SPIE, pp.780-790, 1986.
  16. S. J. NA, "Effect of Shielding Gas Pressure in Laser Cutting of Sheet Matal", ASME, Vol.111, pp.314-318, 1989.