

레이저 절단품질에 미치는 절단압력의 영향(2)

(절단압력과 절단품질간의 상관관계)

양영수* · 나석주* · 김원배* · 김태균**

Influence of Cutting Pressure on Laser Cut Quality

(Relationship between Cutting Pressure and Cut Quality)

Y.S. Yang , S.J. Na , W.B. Kim , and T.K. Kim

ABSTRACT

Laser cutting system uses a gas jet to remove the molten or varpozed material from the workpiece. The quality of the laser cut can be strongly influenced by the gas flow characteristics formed through the nozzle.

Laser cutting experiments were carried out for SS 41 and SUS 304 to investigate the relationship between cut quality and cutting pressure. The cutting speed, nozzle pressure and nozzle to workpiece distance were also considered. The cut specimens were inspected by various manners such as dross observation, surface roughness test and kerf width measurement. Based on the data of pressure measurement on workpiece and the results of cut surface inspection, the influence of the considered cutting conditions on cut quality could be evaluated.

The results of this study will be valuable in planning the optimal laser cutting process and in designing the laser cutting nozzle.

1. 서 론

고밀도 에너지를 전달하는 레이저빔은 비교적 최근에 개발된 재료 가공수단으로, 좁은 면적에

농축된 열에너지를 전달하는 특성을 갖기때문에 산소-아세틸렌 열원이나 전기아아크 열원 등과 비교할때, 가공부의 제한된 부분에만 열영향을 끼치면서 절단, 용접, 드릴링, 표면처리등 여러

* 한국과학기술원 생산공학과

** 대우중공업(주) 기술연구소

생산공정에서 효과적으로 이용될 수 있다. 특히, 레이저 절단에서는 톱 (saw) 이나 플라즈마 절단에 비하여 좁은 절단폭 (narrow kerf width), 좁은 열영향부와 적은 열변형, 빠른 절단속도, 취성재료의 절단등 여러가지 장점을 나타낸다 [1]. 그러나 가장 큰 단점으로는 가공재료의 두께의 제한으로 레이저 출력과 관계되고 또한 레이저 장치의 가격과도 관련된다.

CW-레이저 절단의 산업적응용은 1971년 영국 William Thyne Ltd. 에서 Dieboard 절단을 시작으로 석영관절단, 옷감절단, 유리섬유 절단, 항공산업에 응용되는 취성 세라믹절단, 타이다늄 합금절단, 알루미늄 합금절단, Boron-epoxy 절단등 [2] 여러 산업분야에서 여러가지 재료절단에 이용되고 있고 그 사용범위는 앞으로 계속 확대되는 추세이다 [3, 4].

CW-레이저절단에서는 고출력 레이저빔을 재료에 주사하고 산소가스를 분사시켜 산화반응을 일으켜서 레이저에 의한 열과 산화열에 의해 재료가 용융상태로 되며, 용융상태로된 재료는 분사된 산소가스의 운동량에 의해 아래로 제거되면서 절단이 진행된다. 위의 과정을 크게 2 단계로 나누어 생각할때, 첫째는 재료를 용융시키는 과정과 둘째는 용융된 재료를 제거하는 과정으로 생각할 수 있는데 재료의 용융은 레이저 출력과 산화열에 의해 지배되며 용융재료의 제거는 분사가스의 압력에 의해 지배된다. 분사가스의 압력을 낮게하면 발생열도 적으면서 용융재료도 잘 제거되지 않으며, 분사가스의 압력이 너무 높아지면 용융재료의 제거는 쉽게 되나 산화가 너무 많이 발생하여 절단면 품질을 저하시킨다. 그러므로 레이저 절단시에는 절단재료에 적절한 압력 분포를 필요로 하며 이를 위해서는 적절한 작업 조건이 선정되어야 한다.

지금까지의 레이저 절단에서 가스분사에 관한 연구현황은 Forbers [5], Thomassen and Olsen [6] 등에 의해 레이저 절단에서 압력분포의 영향이 재료가공 품질에 크게 영향을 나타낸다고 보고되었다. 그러나 이들은 절단재료 평면에서 압력을 정량적으로 측정하지 못하고 노즐에 공급압력을 변화시키면서 재료가공의 품질

결과를 조사하였다. 그후 Ward [7] 에 의해 주어진 한가지 노즐에 대해서 절단재료의 평판상단에서 압력분포를 정량적으로 측정하였다.

본 연구에서는 절단재료 평면의 상단에서의 압력분포 및 절단공정 변수와 절단부 품질간의 상관관계를 규명하여 레이저 절단을 위해 최적의 가스분사 장치의 설계를 위한 기본 방향을 제시하고자 한다.

2. 실험재료 및 실험방법

2.1 실험재료

본 연구에서는 절단압력 분포의 측정에 사용된 수축노즐을 이용한 레이저 절단시의 절단 품질에 관한 연구를 위해서 현장에서 많이 사용되고 있으며 절단특성이 다른 2가지 재료를 선정하였는데, 각 재료의 특성을 다음에서 기술하였다.

(1) SS41 (저탄소강)

절단실험에 대한 예비기초 실험재료로서 SS41를 선정하였는데, 이것은 현장에서 흔하게 사용되며 값이 저렴하고 시중에서 구입이 용이한 장점이 있다. 레이저 절단시에 보조가스로 산소를 사용하면 산화에 의해 발생한 열량이 70%, 레이저에 의한 열량이 30% 정도로 [2] 산화가 잘 일어나므로 절단품질이 보조가스에 의해 크게 영향을 받는다.

(2) SUS 304 (스테인레스강)

스테인레스강은 뛰어난 기계적 성질과 내부식성으로 인하여 그 사용범위가 매우 넓다. 특히 발전소에서의 열교환기, 화학공업에서의 화학용기, 그리고 저온 진공장치등에 널리 이용되고 있다. 이러한 스테인레스강은 레이저빔에 의해 용융상태로 되었을때 점성이 높기 때문에 절단가스에 의해 제거가 쉽게 되지않아 절단후 dross가 많이 발생한다. 또한, 산소절단시 생성되는 크롬산화물은 매우 높은 융점을 갖는 안정된 상이기 때문에 절단이 어렵고 절단면의 질도 나쁘기 때문에 양호한 절단을 위해서는 높은 레이저 열량의 입력을 필요로 한다.

2.2 실험장치 및 조건

본 연구에 이용된 레이저 발생장치는 600 W 급 CW CO₂ 레이저로서 이장치의 사양은 Table 1에 표시되어 있고 장치의 개략적인 형태는 Fig. 1에 나타나있다.

Table 1. Specification of the CO₂ laser system

Output power	600 W (CW)
Laser medium	CO ₂ - N ₂ - He
Wavelength	10.6 μm
Beam diameter	12 mm
Lens	ZnSe
Lens focal length	5 in
Cutting gas	O ₂
Model	Daw Woo VFA-600

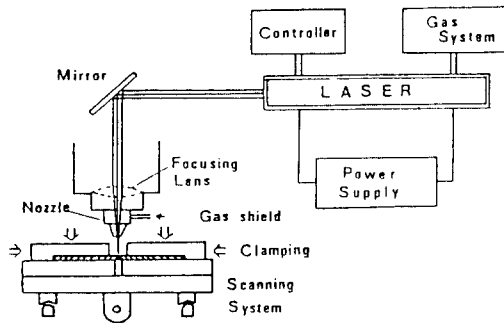


Fig. 1 Schematic diagram of lasing machine

레이저빔 절단에 영향을 미치는 공정변수는 레이저 출력, 초점거리 (focal distance), 시편의 재질과 두께, 가스의 종류와 압력, 절단속도, 노즐과 재료와의 거리, 노즐형상 등인데 본 연구에서는 가스압력, 절단속도, 노즐과 재료와의 거리만을 변수로 채택하였으며 나머지 변수는 모두 다음과 같이 일정한 값으로 고정하였다.

레이저출력 : 600 W

시편 두께 : 2 mm

초점 거리 : 0 mm (focal point)

가스 종류 : 산소가스

노즐 형상 : 수축형 노즐

(1) 가스압력과 속도변화

레이저 절단에서 용융된 재료를 제거하는데 가장 중요한 변수는 절단부에서의 압력으로 사료되므로 압력변화에 따른 절단면의 품질변화를 보기 위해 압력을 변화시키면서 실험하였다. 압력분포 실험결과에서 노즐압력이 2 kg/cm² 이하의 압력에서는 노즐과 재료와의 거리변화에 따라 압력분포가 선형적으로 감소하고 3 kg/cm² 이상에서는 압력 jump 가 발생하기 때문에 3 kg/cm² 이상에서 절단실험을 하였고 노즐압력이 5 kg/cm² 이상에서는 렌즈에 무리한 힘이 가해지게 되므로 3 - 5 kg/cm²을 실험범위로 선택하였다. 주어진 압력에서 절단가능 속도와 최적 절단속도를 결정하기 위해 속도를 변화시키면서 실험하였다.

(2) 노즐과 재료와의 거리변화

압력측정 실험결과에서 노즐과 재료와의 거리가 변함에 따라 압력 jump 가 발생하였기 때문에 이것이 재료가공에 미치는 영향을 조사하기 위하여 거리를 변화시키면서 실험하였다. 실제 실험에서 노즐과 재료와의 거리가 증가함에 따라 노즐직경을 통과 해야할 레이저빔의 직경이 커지기 때문에 일정거리 이상에서는 실험이 불가능하였다. 그래서 3, 3.5 kg/cm²에서 노즐과 재료와의 거리를 3 mm 정도까지 변화시키면서 실험 하였다.

2.3 절단면검사

여러가지 절단공정 변수를 변화시켜서 절단을 수행한후 최적 공정변수를 찾기위해서는 절단면 품질을 판정해야 한다. 이를위해서 다음과 같은 실험을 수행하였다.

(1) dross 관찰

레이저 절단후 용융금속이 절단면 하단에 붙어 있는 현상으로 이를 제거하기 위해서는 연삭과 같은 제 2의 공정을 필요로하여 생산성을 저하시킨다. 이러한 dross 를 최소로 하기 위해 공정변수를 변화시켜가며 실험한후 dross 를 관찰

하였는데, dross 의 크기를 정량적으로 표시하기는 곤란하여 사진촬영후 유관으로 관찰한후 많고 적음을 상대적으로 비교하였다.

(2) 표면조도 측정

일반적인 재료의 절단은 절단후 표면을 재가공하기 때문에 표면조도가 문제되지 않는다. 그러나 레이저 절단에서는 절단후 표면을 재가공하지 않고 사용하는것이 가능하기 때문에 표면조도를 양호하게 할 수 있는 공정변수를 찾아야 한다.

(3) 절단폭 (kerf width) 측정

레이저 절단시 절단폭이 작을수록 재료의 손실을 줄이고, 또한 복잡형상을 절단할때 가공의 정밀도를 나타낼수 있기 때문에 절단폭을 최소로 할 수 있는 공정변수를 찾아야 한다. 실험후 절단폭을 측정하는데 있어서 절단면 하단에서는 dross 때문에 절단폭의 한계를 분명히 할 수가 없기 때문에 절단면 상단에서만 optical project 를 사용하여 측정하였다.

3. 절단실험결과 및 고찰

(1) 절단부의 품질검사

레이저 절단후 절단면 수직단면의 일반적인 형태와 macroetching 에 의한 단면의 조직이 Fig. 2 에 나타나 있는데 절단수직면은 상단에서 하단으로 갈수록 약간 좁아지고 있으나 그 값이 미미하여 평형도가 양호함을 보여주고 있다. 탄소강의 절단면 표면에는 상변태로 인한 열영향부가 관찰되었고 용융금속은 완전히 제거되어 남아 있지 않았으며, 스테인레스강은 상변태가 일어나지 않기 때문에 조직변화가 없었음을 볼 수 있다. Figure 3 에는 탄소강의 절단부에서 측정된 경도분포를 나타내었는데, 열영향부의 경도가 모재의 경도에 비해서 거의 2배에 이르고 있음을 볼 수 있다. 그러나 이러한 경화층은 절단표면에 약 0.1 mm의 층에서만 제한적으로 발생하고 있었으며 그 크기는 실험에 적용된 모든 절단조건에 대해서 거의 일정하였다. Figure 4 에는 공정변수를 변화시켜가며 실험한후 절단면 상단에서 측정된 절단폭 (top kerf width) 을 도시

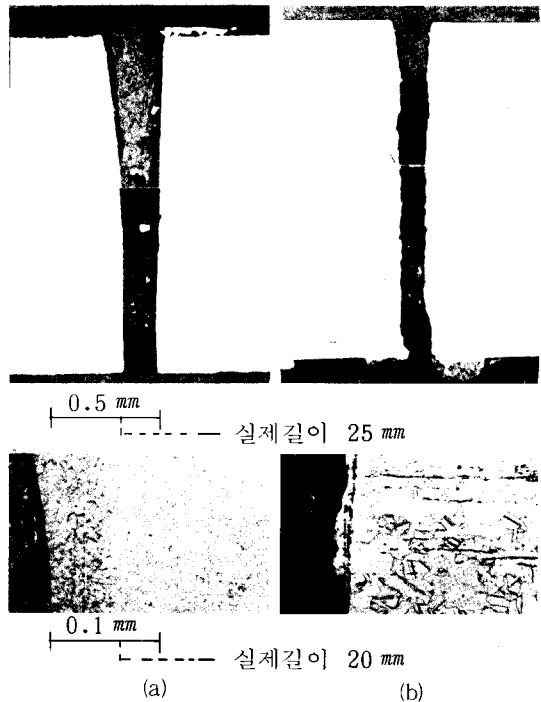


Fig. 2 Typical cut geometrie and micro-structure
(a) SS41 (b) SUS 304

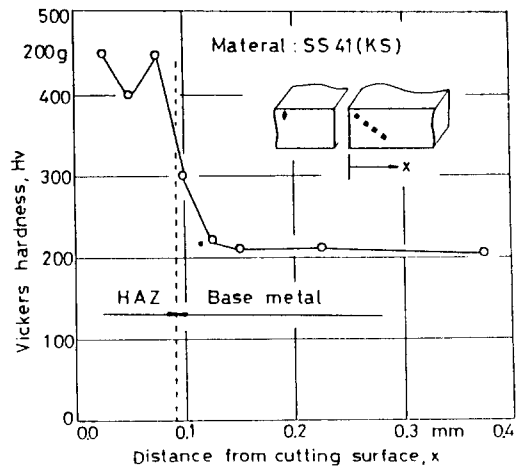


Fig. 3 Hardness distribution in cut zone of SS 41

하였는데 절단속도, 절단압력등 공정변수가 변하여도 절단폭은 0.3 - 0.4 mm 범위내에서 거

의 일정하게 나타나고 있음을 보여주고 있다. 즉 절단폭은 여러 공정변수를 변화하여도 크게 변하지 않고있어 최적공정변수를 찾는 데는 도움이 되지 못함을 알 수 있다. 또한 노즐직경이 1.5 mm인 수축형 노즐을 사용한 실험의 결과에서도 절단부 상단에서의 절단폭은 절단조건에 관계없이 거의 일정하게 측정되었다.

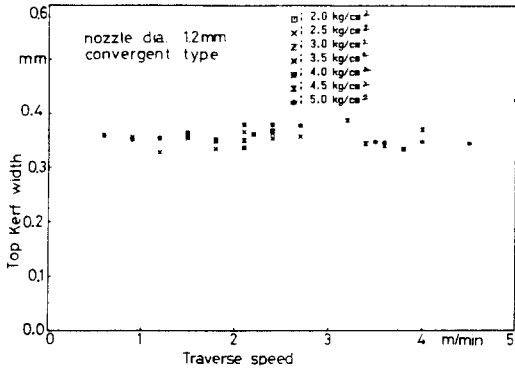


Fig. 4 Top kerf width for various cutting parameter of convergent nozzle (ϕ 1.2 mm)

Figure 5에는 노즐과 피절단물간의 거리를 변화시키거나 탄소강과 스테인레스강을 절단실험후에 절단면의 아래부위와 위부위에서 측정 한 최대거칠기를 나타내었다. 노즐과 피절단물간의 거리를 변화시키면 절단압력이 변하게 되고, 이것은 절단부의 품질과 밀접한 관계를 갖게되어 절단부 아랫면에 부착되는 dross의 상태를 결정하게 된다 (Fig.8 참조). 그러나 일단 절단이 이루어진 탄소강의 경우에는 절단면의 최대거칠기는 약 $10 \sim 30 \mu\text{m}$ 로 나타나며 그 크기는 절단압력 및 dross의 상태와는 거의 상관관계가 없음을 알 수 있다. 스테인레스강의 레이저 절단면에서의 최대거칠기는 약 $30 \sim 50 \mu\text{m}$ 로서 탄소강의 경우와 비교해 볼때 비교적 큰 값을 나타내고 있는데, 이것은 스테인레스강의 용융 금속이 나타내는 점성이 탄소강의 절단시와 비교해서 더 크기 때문인것으로 사료된다. 그러나 절단압력과 절단부의 dross 정도에 따른 최대표면 거칠기의 변화가 일정한 경향을 보이지 않는것은 탄소강의 경우와 유사하였다.

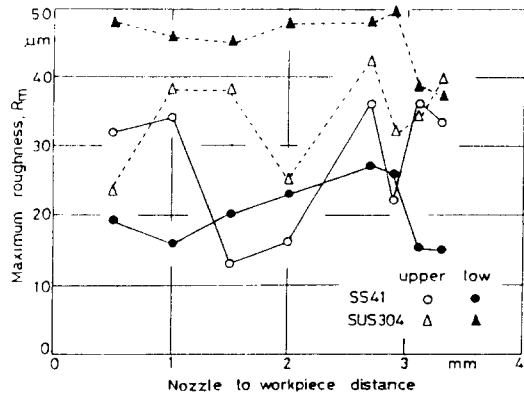


Fig. 5 Maximum roughness vs nozzle to workpiece distance for convergent nozzle (ϕ 1.5 mm, nozzle pressure : 3 kg/cm^2)

Figure 6에는 노즐압력 및 노즐과 피절단물간의 거리를 적절히 변화시켜서 절단압력을 $2.1 \sim 2.3 \text{ kg/cm}^2$ 으로 거의 일정하게 유지시키면서 여러가지 절단속도에 대해서 절단을 수행한 절단면의 최대거칠기를 나타내었다. SS41 강을 레이저 절단한 경우에는 절단속도가 증가함에 따라 최대표면거칠기는 감소하고 있으며 각 절단조건에 따른 표면거칠기의 변화도 거의 사라지고 있음을 볼 수 있다. 절단속도가 비교적 낮을때는 표면거칠기도 상대적으로 높으며 절단조건에 따른 차이도 비교적 크게 나타나나, 전체적으로 볼때는 절단압력이 같은 조건하에서는 모재와 노즐간의 거리와 속도가 변하여도 절단면의 표면 조도의 차이가 크게 나타나지 않고 있음을 볼 수 있다. 스테인레스강 레이저 절단면의 최대표면 거칠기는 앞에서와 마찬가지로 탄소강의 경우보다 조금 높은 값을 나타내었는데, 동일압력하에서 노즐과 절단재료 사이의 거리와 절단속도를 변화시켜도 최대표면거칠기는 거의 일정하게 유지됨을 알 수 있었다. 따라서 절단면의 거칠기는 노즐-절단재료의 거리, 절단속도, 혹은 절단압력에 의한 영향이 거의 없다고 볼수 있으므로 절단부의 품질을 판정하는 기준으로서는 적합치 못함을 알 수 있다.

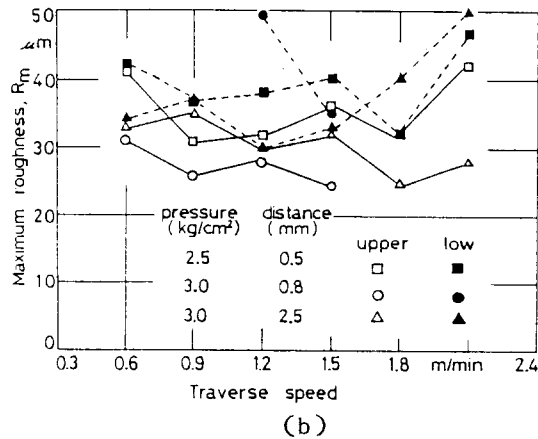
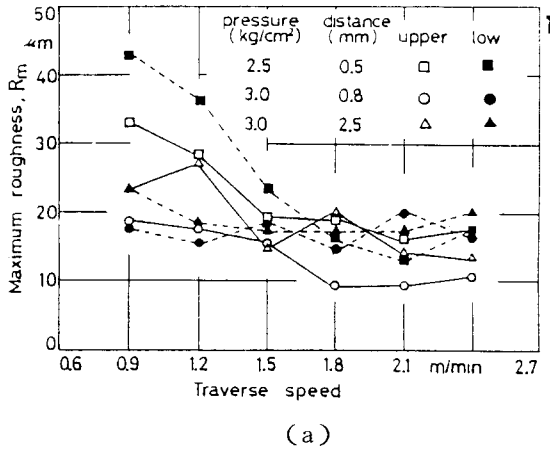


Fig. 6 Maximum roughness vs various cutting speeds for uniform cutting pressure of about 2.2 kg/cm² (convergent nozzle, φ 1.2 mm)
 (a) SS41 (b) SUS 304

(2) 절단재료와 노즐사이의 거리변화의 영향

일정 노즐압력에서 절단재료와 노즐사이의 거리변화에 따라 압력분포가 주기성을 갖기 때문에 이때의 압력분포가 절단품질에 미치는 영향을 조사하기 위해서 선정된 여러가지 절단 압력에서의 실험위치가 Fig.7에 표시되었다. 사용된 수축노즐 끝의 직경은 1.5 mm이었는데 각 실험 위치에서 나타나는 절단부의 아랫면 상태가 Fig.8에 탄소강과 스테인레스강에 대하여 나타나 있다. 일정 노즐압력 (3 kg/cm²)에서 노즐과 절단재료와의 거리가 증가함에 따라 절단압

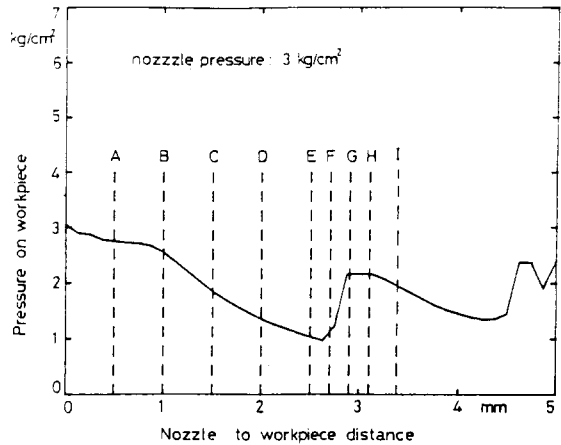


Fig. 7 Selected nozzle to workpiece distance for cutting experiments with convergent nozzle (φ 1.5 mm)

력이 감소하여 2.5 mm 정도에서 최저상태가 된다. 이때의 압력은 1 kg/cm² 정도로서 탄소강과 스테인레스강의 절단이 불가능함을 알 수 있다. 그러나 노즐과 모재간의 거리가 증가함에 따라 압력은 다시 회복되고 절단품질도 향상되어 노즐끝과 가까운 거리에 있을때와 같은 양호한 절단이 이루어지고 있으나 또다시 압력이 감소하기 시작함에 따라 절단품질도 저하되기 시작하고 있다. 그림에서 G점의 압력은 매우 높게 표시되어 있으나 절단부의 dross 상태는 부분적으로 상당히 불량하게 나타나 있는데, 이것은 노즐-피절단물간의 거리가 G점보다 조금만 더 가까워져도 절단압력이 급격히 떨어지는 현상때문이라고 유추된다. 즉 실제 절단시 피절단물이 완벽한 평면성을 유지하지 못하여 노즐과 피절단물간의 거리에 약간의 변동이 있었을것이라고 사료된다. 더 이상의 거리 증가는 노즐에 빔이 부딪치기 때문에 실험이 불가능하였으며 직경 1.2 mm의 수축노즐에 대한 실험에서도 압력분포에 따라 절단품질이 크게 변화함을 볼 수 있었다. 그러므로 동축노즐을 사용하여 초음속제트를 분사할때는 절단재료와 노즐 사이의 간격을 충분히 떨어진 위치에서도 양호한 절단품질을 얻을수있기 때문에 절단재료와 노즐사이의 거리가 좁을때 발생하는 노즐과 모재의 충돌등 여러가지 문제를 해결할

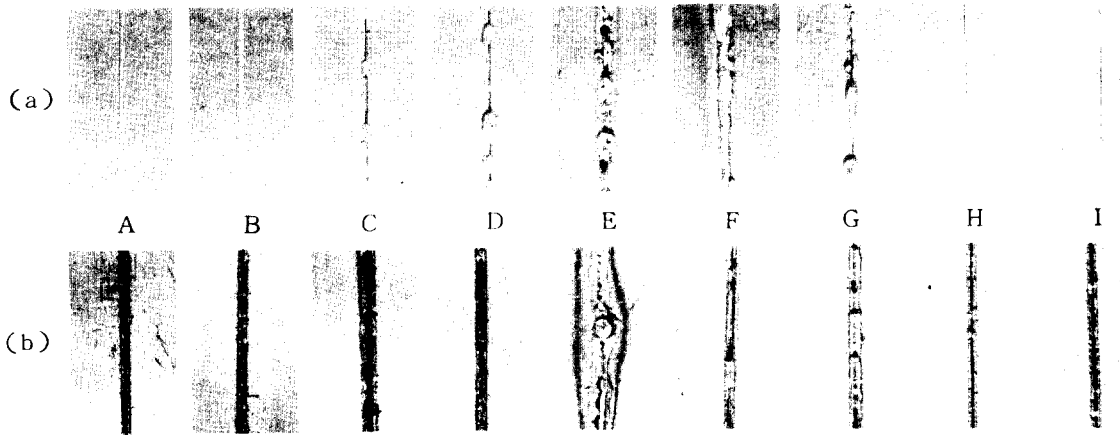


Fig. 8 Cut shape on bottom side for various nozzle to workpiece distance of Fig. 7

수 있다. 그러나 노즐을 가공할때 동일형상, 동일크기의 노즐을 만들어도 가공상의 정밀도 때문에 각 노즐마다 압력 jump가 일어나는 영역이 약간씩 다르게 되고 압력 jump가 일어난후 jump 압력을 유지하는 영역이 좁기 때문에(약0.2 mm) 실제 현장에서 사용하기는 여러가지 문제점을 내포하고 있다.

(3) 일정압력에서의 절단가능 속도

주어진 압력에서 속도를 너무 크게하면 열량의 부족으로 절단이 되지 않고 속도를 너무 적게하면 산화가 과다하게 발생하여 절단이 용이하지

않다. Figure 9에는 탄소강의 경우에 주어진 절단압력하에서 절단속도를 변화시켜가며 절단하였을때 나타나는 절단부의 아랫면에 dross 상태를 대표적인 두가지의 절단압력에 대해서 나타내었다. 각 절단압력에서 절단속도가 변함에 따라 dross의 정도가 심하게 변함을 관찰할 수 있는데, 절단속도가 너무 느릴때와 너무 빠를때의 절단상태가 불량함을 알 수 있다. 이와같이 dross의 정도를 기준으로 하여 구한 절단이 가능한 속도범위를 Fig.10에 나타내고 있는데, 압력이 1 kg/cm^2 이하와 5 kg/cm^2 이상에서는 절단이 발

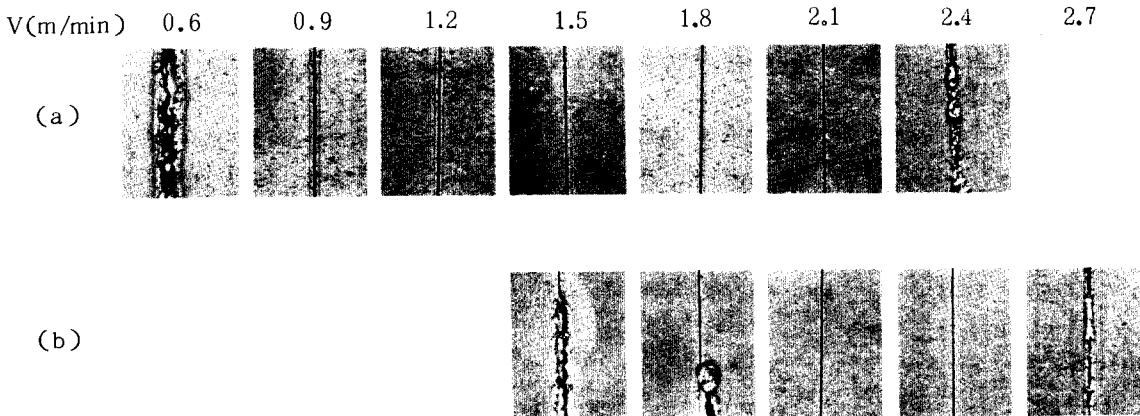


Fig. 9 Cut shape on bottom side for various cutting speeds

- (a) cutting pressure : 2.5 kg/cm^2
- (b) cutting pressure : 3.5 kg/cm^2

생하지 않았으며 절단압력이 증가함에 따라 절단 가능 속도범위는 좁아지고 있으나 절단속도는 빨라지고 있음을 알 수 있다.

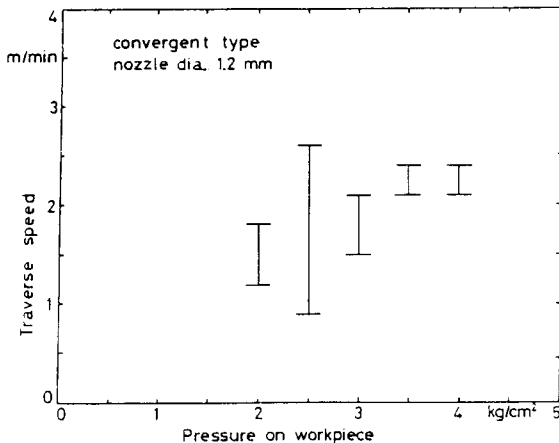


Fig. 10 Range of available cutting traverse speed for various pressure on workpiece

4. 결 론

레이저 절단시의 절단조건중 절단압력과 절단속도를 변화시켜 가며 탄소강과 스테인레스강에 대한 레이저 절단실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 레이저 절단에서 절단품질은 절단면의 압력에 의해 큰 영향을 받는다.

(2) 노즐과 절단재료 사이의 거리가 변하여도 절단압력이 일정하게 유지되면 동일한 절단 품질을 얻을 수 있다. 따라서 초음속 제트를 절단가스로 사용하게 되면 노즐과 절단재료간의 거리가 큰 경우에도 고품질의 절단부를 얻을 수 있으나 그 범위가 매우 좁기 때문에 정확한 위치제어가 요구된다.

(3) 레이저 절단에서는 주어진 절단압력에서 절단 가능속도의 범위가 존재하고 절단가능한 압력도 존재한다. 절단속도가 너무 낮거나 절단압력이 너무 높으면 산화가 심하게 발생하여 절단이 불가능 해진다.

후 기

본 연구에 이용된 레이저 발생 및 시편 이송 장치는 대우중공업(주)에서 개발한 Dae Woo VFA-600형으로 대우중공업(주)의 기술연구소에 소재하고 있다. 실험이 가능하도록 많은 도움을 주신 기술연구소의 나덕주 부장, 이진이 과장 및 조태익 씨에게 감사드린다.

< 참 고 문 헌 >

1. David Belfrte and Morris Levitt, The Industrial Laser Annual Handbook, Tulsa Oklahoma, USA, 1986, pp. 10-12
2. M. Bass, Laser Materials Processing, North-Holland Publishing Company, 1983, pp. 28-41
3. B.S.Weil, "A Laser Cutting System for Nuclear Fuel Disassembly", ICALEO '85, Laser Welding, Machining and Materials Processing, Nov. 1985, San Francisco, pp. 145-152
4. P.A.Mollan, "Laser Cutting of Thick Metallic Solids - A Reactive Gas Flow Approach", Proceedings of International Conference on LAMP '87, May 1987, Osaka, Japan pp. 245-250
5. N.Forbers, "The Role of the Gas Nozzle in Metal Cutting with CO₂ Lasers", Lasers' 75 Opto-Electronics Conf. (IPC Science and Tech.), June 1975, Munich, FRG, p. 93
6. F.B. Thomassen and F.O. Olsen, "Experimental Studies in Nozzle Design for Laser Cutting", Proceeding of the 1st International Conference on Laser in Manufacturing, Nov. 1983, Brighton, UK, pp. 169-180
7. B.A.Ward, "Supersonic Characteristics of Nozzles Used with Lasers for Cutting", ICALEO '84, Material Processing, Nov. 1984, Boston, USA, pp. 94-101