

研究論文
------

## 냉연 스테인리스강판의 레이저 절단 특성

이 기 호\* · 김 기 철\*

### Process Optimization for the Laser Cutting of Cold Rolled STS Sheet

K. H. Lee\* and K. C. Kim\*

**Key words** : laser cutting (레이저 절단) stainless steel (스테인레스강) sheet steel (강판)  
chromium oxide (크롬산화물) pulsed wave (펄스파) cut quality (절단부 품질)

#### Abstract

This study was aimed to characterize the laser cutting process for the cold rolled stainless steel sheet. The principal process parameters of the cutting process were applied to both the continuous wave form and the pulsed wave form for the laser output mode. The laser-oxygen cutting process and the laser-nitrogen cutting process were also considered to characterize the quality and efficiency of the cutting process. The laser-oxygen cutting process revealed the better productivity than the laser-nitrogen cutting process, since the laser energy and the exothermic oxidation energy exerted on the laser-oxygen cutting process simultaneously during the entire cutting process. However, the straightness of the cutting section, which was considered as the most important factors, was inferior to that of the laser-nitrogen cutting process due to the formation of chromium oxide on the cutting surface. Frequency and duration of the pulsed wave form act as the main factors for the better quality. When the frequency increased from 100 Hz to 200 Hz and the duty increased from 20% to 40%, the quality factors such as the height of dross and the surface roughness were improved remarkably. The increase in the frequency from 200 Hz to 300 Hz, on the other hand, revealed the less effective in the cutting quality.

\* 정회원, 포항산업과학연구원 집합가공연구팀

## 1. 서 론

레이저를 이용한 재료가공의 80% 이상은 절단 가공으로, 가장 실용화가 활발한 분야이며<sup>1-5)</sup>, 최근의 기술진보와 함께 고정도의 품질과 높은 생산성을 좌우하는 중요한 기술로 취급되고 있다. 레이저 절단의 특징으로는 고밀도 열 원을 이용한 고속 절단이기 때문에 생산성이 매우 높고, 수 100 $\mu$ m 크기의 집속된 빔 크기로 가공하기 때문에 정밀절단이 가능하는 등 절단품질 전반에 걸쳐 여타의 절단법에 비해 품질특성이 우수한 것으로 알려져 있다. 그러나 이러한 품질특성을 만족하기 위하여는 가공상의 중요한 공정변수들이 적정하게 선정되지 않으면 안된다. 이러한 가공인자는 레이저 가공기가 결정되면 고정되는 요소들도 있는 반면 작업자의 입장에서 결정해야 하는 것도 많다. 작업자가 선정하여야 할 공정변수로는 레이저 빔의 형태(연속파 또는 펄스), 절단 속도, 사용가스의 종류 및 압력(유량)등이 있으며, 이외에도 출력의 크기, 초점 위치 및 재료측면의 요소(성분, 두께) 등이 검토대상이다.

본 연구에서는 스테인레스강을 대상으로 하여 이상과 같은 레이저 절단요소들이 절단특성에 미치는 영향을 검토함과 함께 최적 레이저 절단조건을 도출하였으며, 레이저 절단시 수반되는 산화현상 및 그 영향에 대하여도 검토를 행하였다.

## 2. 실험방법

본 실험에서 사용된 실험조건은 표 1에 제시된 바와 같다. 레이저 절단기는 TEM<sub>01</sub>\* 모드의 CO<sub>2</sub> 레이저 이며, 연속파 일 때는 1kW의 출력을, 펄스파 일 때는 200 - 600W의 출력을 사용하였다. 이때의 펄스 주파수는 최대 300Hz 까지 변화시켰다. 실험에 사용된 강재의 화학조성은 표 2와 같으며 두께 1.0mm의 오스테나이트계의 스테인레스강이다. 실험에 사용된 절단가스는 산소 및 질소였으며, 특히 펄스 주파수의 영향을 집중적으로 검토하여 최적 절단조건을 도출하였다.

절단후에는 절단품질을 평가하기 위하여 절단가능 여부와 함께 외형적 품질요소<sup>6-8)</sup>인 절단부 폭,

Table 1. Welding test conditions

Beam quality	CO <sub>2</sub> Laser/TEM <sub>01</sub> *
Power	CW : 1kW
Pulse	
Frequency	100-300Hz
Duty	20-60%
Position of focus	surface
Gas flow rate	O <sub>2</sub> : 80-140 l/min N <sub>2</sub> : 100-140 l/min
Travel Speed	0.5-9m/min
Nozzle dia./type	2mm/straight

Table 2. Chemical compositions of base metal (wt %)

C	Si	Mn	P	Cr	Ni	Mo	Ti	Cu
0.052	0.57	1.08	0.023	18.10	8.61	0.009	0.014	0.21

절단표면 거칠기 및 dross 생성특성을 조사하였다. 절단부 폭은 stereoscope를 사용하여 측정하였으며, 절단표면 거칠기는 diamond stylus를 이용한 표면조도 측정기를 사용하였다. Dross 형성특성은 절단부 뒷면에 형성된 dross의 높이를 높이측정기를 써서 측정하였으며, 측정값은 150mm의 절단길이를 기준으로 20mm, 75mm 및 130mm 지점을 측정한후 산술적인 평균값으로 계산하였다. 절단면 표면은 EDX 분석장치를 써서 산화물 생성상태등을 분석하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 절단부 폭의 특성

산소를 이용하여 스테인레스강을 절단하게 되면 높은 점도를 가지는 Cr 산화물이 생성되는데 불구하고 일반 탄소강과 마찬가지로 산화반응열을 이용할 수 있기 때문에 절단 가능속도를 높일수 있다.<sup>9)</sup> 그림 1은 산소 사용조건에서 절단속도 및 가스량 변화에 따른 절단부 폭 변화를 3차원적으로 표현한 것이다. 전체적으로 절단 폭이 넓은 경우에는 0.45mm 이상을, 좁은 경우에는 0.3mm 이하를 나타내는 등 조건변화에 따라 큰 차이를 보이고

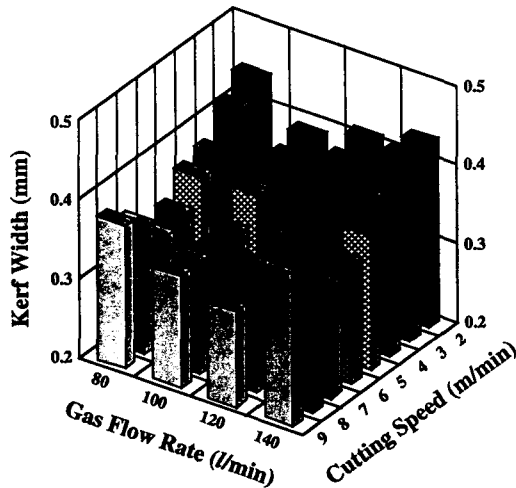


Fig. 1 Effects of oxygen flow rate and cutting speed on the kerf width

있다. 먼저, 절단속도의 영향을 보면 산소 유량별로 큰 차이없이 속도가 증가하면서 절단 폭은 좁아져서 5-7m/min 정도에서 최소를 보이다가 8-9m/min의 고속구간에서는 다시 넓어지는 경향을 보이고 있다. 저속구간에서 절단 폭이 넓어지는 이유는 입열 에너지에 비해 속도가 너무 느려서 발생하는 소위 burning 현상이 일어나기 때문이며, 속도가 너무 빠르면 재료와의 반응시간이 충분하지 못하기 때문에 gouging 현상을 유발한 것에 원인이 있는 것으로 생각되었다. 본 실험결과에 의하면 5-7m/min가 적정속도 범위로 판단된다.

유량의 영향을 살펴보면 실험조건인 80-140 l/min 범위에서 유량이 적은 80 l/min의 경우에는 충분한 불어내기 현상을 기대할 수 없던것 같으며, 140 l/min로 많은 경우에는 산화반응열의 과다에 의해 절단 폭이 커졌던 것으로 사료된다. 앞에서 살펴보았던 적정속도 범위 5-7m/min 구간에서도 이러한 경향은 동일하였으며, 이때의 최소 절단 폭은 100-120 l/min 구간에서 형성되고 있다.

절단가스로서 질소를 사용한 경우의 절단부 폭 변화는 그림 2와 같다. 전 체적인 경향은 산소의 경우와 같이 속도가 증가하면서 절단 폭이 좁아 지다가 다시 증가하는 경향을 나타내고 있다. 그러나, 이 실험에 적용된 속도는 0.5-3.5m/min으로 산소절단에 비해서 매우 느리게 설정되어 있다. 이

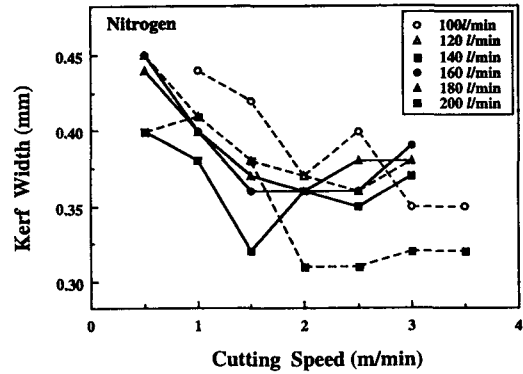


Fig. 2 Effects of nitrogen flow rate and cutting speed on the kerf width

러한 근본적인 이유는 질소가스를 이용할 경우 산화반응열을 이용할 수 없는 순수한 용융 절단 기구에 의하여 레이저 절단이 이루어지기 때문이다. 실험결과에 의하면 유량별로 차이는 있으나 음영으로 구간표시를 한 2m/min 근처에서 최저값을 보이고 있어서 이 영역이 적정 절단조건임을 알 수 있다. 문헌<sup>10,11)</sup>에 의하면 산소를 이용할 경우에는 질소 등 비산화성 가스를 이용하는 경우에 비하여 3-5배의 절단속도 증가효과를 보이고 있는데, 본 실험의 경우에도 앞에서 살펴보았듯이 비슷한 결과를 나타내고 있었다. 이러한 사실은 품질특성을 크게 고려하지 않을 경우 효율성면에서 비산화성 가스의 사용이 절대적으로 불리함을 나타내고 있으며, 절단 폭 또한 크게 좁아지지 않는 것으로 나타났다.

### 3.2 Dross 생성특성

절단품의 2차 가공여부를 좌우하는 요소로서 절단부의 dross 생성여부, 제거의 용이성 및 그 크기 등이 중요하게 취급되고 있다. 그림 3은 적정유량으로 생각된 범위로 산소취입량을 고정하고 다음 절단속도를 변화시킨 경우의 절단재 표면 및 뒷면 상태를 나타낸 것이다. 먼저 왼쪽의 표면사진을 보면 2m/min의 경우를 제외하면 육안상으로 큰 차이가 보이지 않을 정도로 절단품질이 안정되어 있는 듯하나 오른쪽의 뒷면 상태를 비교하면 속도변화에 따른 차이가 분명해진다. 즉, 5-7m/min 영역을 벗어난 저속 및 고속구간에서는 절단부에 dross 부

Speed (m/min)	Front Surface	Back Surface
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		

Fig. 3. Macroscopic view showing dross formation on the front and the back surfaces after cutting

차이 눈에 띄게 많으며 그 분포와 크기등에서도 차이를 나타내고 있다. 이러한 사실은 앞에서 언급한 절단 폭만으로는 절단품질을 평가하기가 어려우며 dross 생성상태등이 동시에 거론되어야 함을 제시하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 절단조건 변화에 따른 dross의 크기(높이) 변화를 조사하였으며 그 결과는 그림 4와 같다. 낮은 절단속도 및 낮은 가스취입량의 경우 최대 1mm 까지 dross의 크기가 성장하고 있는데 이러한 이유는 낮은 절단속도에 의한 단위길이당의 입열 에너지 증가가 원인이 되어 용융금속의 총량이 지나치게 많음에도 불구하고 취입가스의 압력이 부족하여 충분한 불어내기 효과를 나타내지 못하였기 때문으로 생각된다. 이 그림에 따르면 전체적으로 속도가 증가할수록, 유량이 증가할수록 dross의 크기는 작아지는 경향을 보이고 있으며, 속도의 영향이 가스 유량의 영향보다 상대적으로 큰것을 알 수 있다. 한편, 조건에 따라서는 dross가 거의 형성되지 않는 영역(0.1mm 이하의 크기를 나타내는 영역으로 정의하였음)이 존재하였으며, 이는 속도의 경우 대략 5-7m/min, 유량의 경우 100-120 l/min 범위로서 앞

서 검토한 절단 폭 특성 실험과 같은 결과를 보이고 있다. 특히, 이 영역내에는 최적 절단조건인 "dross free" 영역이 존재하였으며, 이는 속도 7m/min, 유량 120 l/min 범위였다.

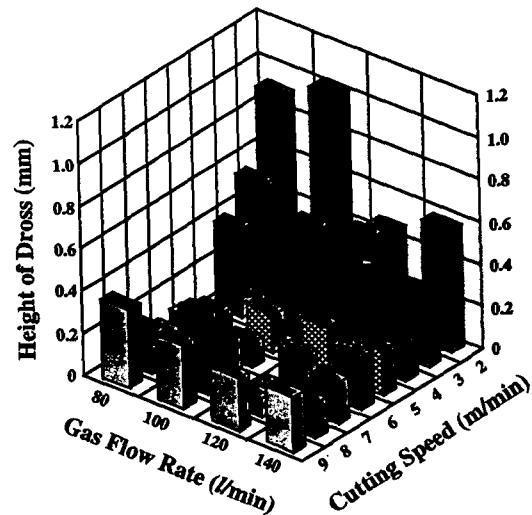


Fig. 4 Effects of gas flow rate and cutting speed on the height of dross

질소를 사용한 경우에는 그림 5에서 보는바와 같이 특별한 경향이 없어 보이나 2m/min 이상의 고속구간을 중심으로 살펴보면 유량이 120 l/min에서 160 l/min 및 200 l/min등으로 고압화 되면서 dross 높이는 줄어드는 경향을 보이고 있다. 그러

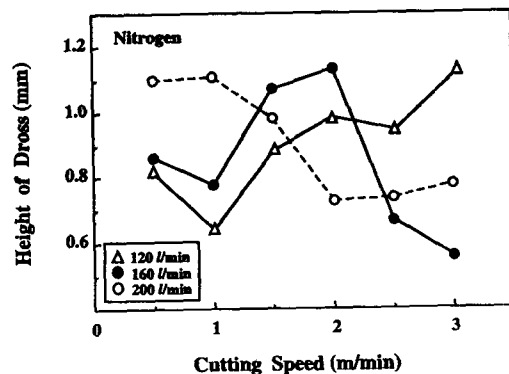


Fig. 5 Effects of gas flow rate and cutting speed on the height of dross

나, 질소를 사용한 경우에는 산소의 경우 처럼 "dross free" 영역 이나 dross 형성이 적은 영역은 확인되지 않았다.

### 3.3 절단면의 표면거칠기

레이저 절단에서 절단면에 형성되는 물결모양의 무늬 (striation)는 레이저빔과 재료와의 반응(산화 반응 포함) 및 절단속도나 가스량등 절단조건이 복합적으로 작용하여 생성되는 것으로 알려져 있으며<sup>12-14)</sup>, 이러한 요소들이 절단면의 거칠기를 지배하게 된다. 절단면의 거칠기는 절단품질을 평가하는 중요요소의 하나로서 평가되고 있는데, 그러한 이유는 무엇보다도 표면거칠기의 상태에 따라 후속공정없이 제품으로 직접 사용할 수도 있고 또 그렇지 않을수도 있기 때문이다. 그림 6은 산소 및 질소를 적정 유량범위 조건에서 붙여준 경우의 절단면 거칠기 변화를 나타낸 것이다. 먼저, 산소의 경우 절단속도가 증가하면서 표면거칠기는 증가하고 있는데, 이것은 속도증가에 따른 반응시간의 부

족 때문에 절단부에서의 용융물 거동이 원활하지 못한것이 원인으로 생각된다. 이에 비하여 질소를 보조가스로 사용한 경우에는 절단속도 변화에 따른 표면거칠기의 변화는 크지 않으나 전반적으로 8 $\mu$ m 정도의 값을 나타내고 있어서 산소의 경우(적정범위에서 약 6 $\mu$ m) 보다 높아있다. 이상의 연구결과를 종합하여 보면 스테인레스강의 레이저 절단시 실험범위 내에서 질소가스를 사용하는 경우가 산소를 사용하는 것에 비해 절단속도를 비롯한 생산성 측면 그리고, dross생성, 절단면 거칠기등 절단 품질측면에서 일단은 불리한것으로 평가된다.

### 3.4 절단면의 품질

스테인레스강에는 구조용탄소강에 비하여 Cr, Ni등의 원소가 대단히 많이 함유되어 있기 때문에 물리적 성질이 탄소강과 많은 차이를 보일 뿐 아니라, 레이저 절단특성도 다르게 나타나고 있다. 즉, 스테인레스강은 탄소강에 비하여 열전도율이 높고, 절단중 생성되는 Cr 산화물은 고온에서 점도가 높기 때문에 유동성이 낮을 뿐 만 아니라, 용점이 1,800 $^{\circ}$ C 이상으로 매우 높아서<sup>15)</sup> 절단면 어느 위치에 부착된 상태로 존재할 경우 절단면 품질을 크게 저하시킨다. 스테인레스강 절단시 Cr 산화물의 생성을 방지하기 위하여는 불활성가스의 사용이 유리한 것으로 보고되어 왔으나, 앞서 검토한 바와 같이 산소절단에 비해 생산성등 그 효율이 낮은 단점이 확인되고 있다.

그림 7은 출력 1kW에서 120 l/min의 산소가스를 사용하여 절단한 경우의 일례를 보인 SEM 사진으로 절단부 단면을 약간의 각도를 유지하면서 확대한 것이다. 사진에서 알 수 있듯이 절단면은 크게 응고 부착물 영역(A)와 용융후 응고된 영역(B) 및 열영향을 받지 않은 모재(C)로 구분된다. 레이저 절단에서 응고 부착물의 생성기구는 다음과 같은 과정을 거치는 것으로 설명될 수 있다. 절단과정에서 우측 상단부(사진 a)는 레이저 빔과 산소가 동일축상에서 아래방향으로 동시에 투입된 영역이다. 이때 피절단재료인 스테인레스강판은 레이저 빔에 의한 열, 산소에 의한 압력과 산화반응 및 그 에너지를 받아 용융되면서 계속 아래방향으로 흐르게 된다. 이 과정에서 스테인레스강 내부의 Cr은 산소와 결합하여 Cr 산화물을 형성하게 되는데

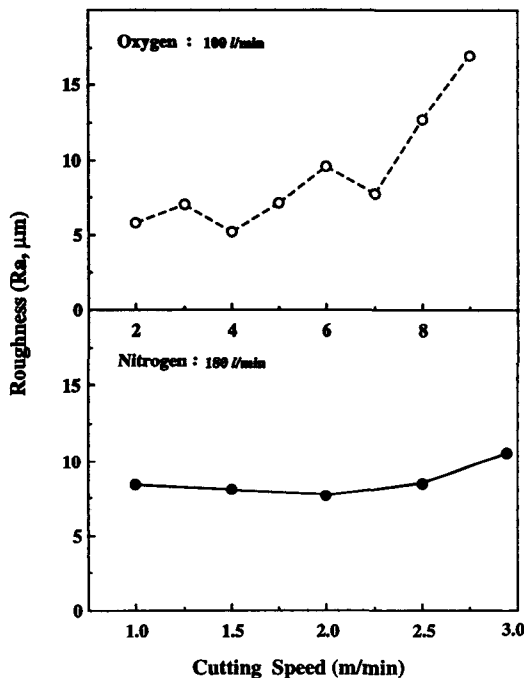


Fig. 6 Correlation between roughness of cut surface and cutting speed

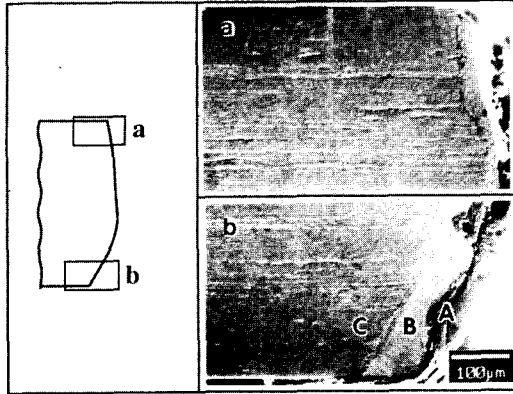
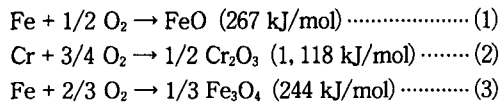


Fig. 7 SEM image of laser-oxygen cut section

이 물질은 전술한바와 같이 용점이 높고 점도가 나쁘기 때문에 용융물의 유동에 나쁜 영향을 미치게 된다. 이러한 Cr 산화물의 영향에 의하여 절단표면은 매우 불규칙하게 되고 그 결과 불어내기 가스의 흐름은 난류성향을 보이게 된다. 그러나, 레이저 빔은 상대적으로 균일하게 조사 되기 때문에 절단표면의 온도는 불균일한 분포를 갖게 된다. 따라서, 절단면에 부분적으로 형성된凹 부분의 저온영역 (A 부분)에서는 Cr 산화물이 고상으로 존재하기 쉽고 산소의 확산을 억제하여 내부 용융금속층은 산화반응이 억제되어 표면층만 산화가 제한되는 결과를 보인다.

산소는 Cr이나 Fe와 친화력이 크며 절단공정에서 이들은 모두 발열반응을 나타내는데 그 결과를 식으로 표시하면 다음과 같다.



위의 식들을 비교해 볼때 Cr이 Fe보다 산화반응열을 훨씬 많이 방출하고 있음을 알 수 있다. 따라서 Cr 성분이 많은 스테인레스강이 탄소강에 비하여 절단시에 많은 반응열의 영향을 받아 절단속도를 증가시킨다거나 하는 효과를 나타내어야 하는데, 실제로는 그 효과가 뚜렷하지 않음을 앞서의 실험에서 알 수 있었다. 그러한 이유중에서 가장 타당성 있는 설명은 표면에 존재하는 Cr 산화물층 (그림 7의 A)이 산소의 침투를 방해하여 내부에 있

는 Cr 이 더이상 활발하게 산화반응을 일으키지 못하게 하기 때문으로 생각된다.

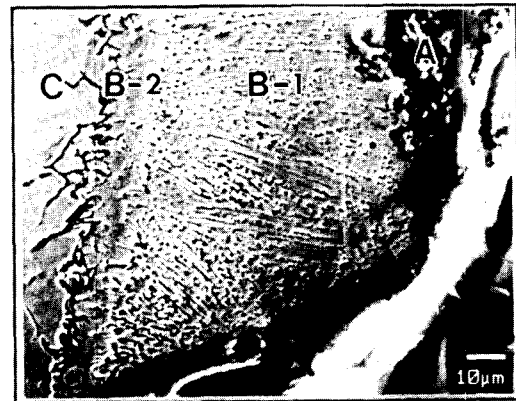


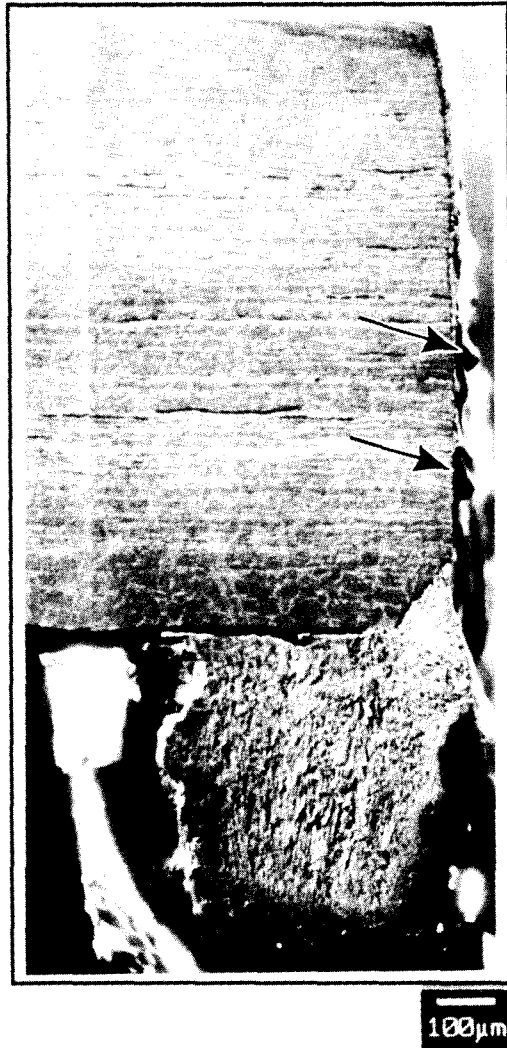
Fig. 8 Magnified SEM image of laser-oxygen cut section shown in fig. 7(b)

그림 8은 절단표면에 형성된 산화물층 구조를 자세히 알아보기 위하여 그림 7의 b 부분을 더욱 확대한 것이다. 사진에서 C는 전혀 용융 및 산화반응을 일으키지 않은 모재부분이고, B는 일부 용융은 되었으나 산화반응이 없는 영역 (B-2)과 용융 및 부분적으로 산화현상을 수반한 것으로 생각되는 영역 (molten oxide layer) B-1 으로 세분화 된다. 한편 A는 연소반응으로 Cr 산화물을 대량 함유한 것으로 생각되는 이른바 oxide rich layer를 나타낸 것이다. 이들 영역에서는 EDX 분석결과 Cr 량 변화를 정성적으로 알 수 있었는데 그 결과를 정리하면 표 3과 같다. 즉, 영역 C에서는 19.3%의 Cr이 검출되었고 B-2에서는 18.3%를 나타내므로서 모재와 사실상의 차이가 거의 없어서 산화반응에 의한 Fe 성분의 손실이나 Cr의 농화가 확인되지 않고 B-1 영역의 경우는 17.2%로 다소의 Cr 손실이 나타나고 있다. A 영역에서는 35.4%의 Cr이 검출되어 이 영역의 대부분이 Cr 산화물로 형성되어 있

Table 3. EDX analysis results in weight percent

	Cr	Ni	Si
A	35.4	-	1.6
B-1	17.2	8.2	-
B-2	18.3	7.5	-
C	19.3	7.7	-

음을 예상할 수 있었다.



**Fig. 9** Macroscopic view of laser-nitrogen cut section (Arrows indicate resolidified layer)

한편, 질소를 보조가스로 사용한 경우에는 오직 레이저 빔만으로 용융절단되기 때문에 절단면에서의 산화작용은 일어나지 않는다. 그림 9는 출력 1kW, 100 l/min의 질소가스를 사용하여 1m/min의 속도로 절단한 경우의 절단면 사진으로 특징적인 것은 절단의 직진성이 산소절단에 비해 우수하게 나타났으나, 절단면 하부에 매우 큰 dross가 형성

되고 있다. 이러한 이유는 Cr과 Fe의 산화반응에 의한 발열효과가 없이 단순히 레이저 에너지에 의하여 용융된 금속이 취입가스의 압력 때문에 아래 방향으로 밀려나는 과정만 거친것에 원인이 있는 것으로 사료되었다. 한편, 절단면을 상세히 살펴보면 용융되었던 금속의 재응고층(화살표)이 현저하게 보이는데 이러한 재응고층은 표면이 불균일하여 절단부의 품질특성을 크게 저하시키며, 이들이 낮은 속도로 흘러내릴 때 아래부분의 모서리에 모여 큰 dross를 형성하는 것으로 고속촬영결과 확인되었다<sup>16)</sup>. 이러한 금속응고층의 제거 방법으로는 높은압력의 불어내기 가스를 사용하는 것이 효과적이며 본 실험에서 이를 확인할 수 있었다. 일반적으로 산소를 이용하여 스테인레스강을 절단할 경우 절단표면에 형성되는 Cr 산화물의 영향 때문에 직접 용접이 곤란하다. 이에 반하여 질소를 이용할 경우에는 실험결과에서처럼 Cr 산화물의 생성이 없기 때문에 절단후 별도의 처리없이 직접 용접할 수 있는 방법의 제시가 가능한 것으로 판단된다.

### 3.5 펄스 절단특성

펄스파를 이용하는 레이저 절단은 합금강등 비교적 원소의 첨가량이 많은 소재의 절단에 적합한 것으로 알려져 있다<sup>17)</sup>. 본 연구에서는 Fe 이외의 원소 총량이 약 28% 함유하고 있는 오스테나이트계 스테인레스강판을 대상으로 하여 연속파와 함께 펄스 절단특성을 비교 검토하였다. 이실험에서 펄스 주파수 (frequency)의 변화범위는 100-300 Hz 였으며, 펄스 지속시간(duty)은 각각 20, 40 및 60% 였다. 여기에서 펄스 주파수의 의미는 단위시간당 몇개의 펄스파를 주었느냐의 개념이며, 펄스 지속시간은 레이저가 출력된 시간(비율)으로 % 크기가 클수록 출력값은 비례하여 커짐을 의미한다.

그림 10은 펄스 주파수 변화가 절단부 폭 변화에 미치는 영향을 펄스 지속시간별로 나타낸 것이다. 이때 적용된 속도는 예비실험에서 각각 적정범위에 해당하는 속도범위이며, 질소가스 140 l/min의 분사조건을 사용하였다. 실험결과를 살펴보면 실험범위내에서 평균 절단 폭은 대략 0.24mm 정도를 보이고 있는데 이는 연속파로 절단했을 때의 0.

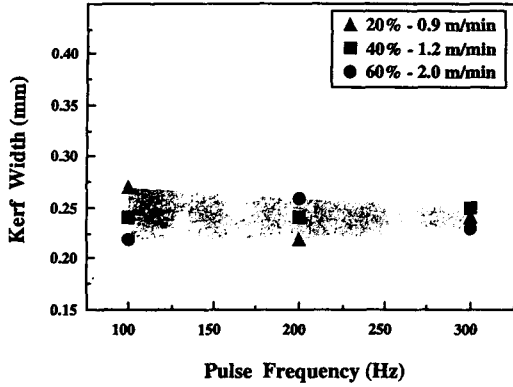


Fig. 10 Effects of pulse frequency and its duty on the kerf width

33-0.44mm(그림 1 참조) 보다 양호한 값임을 알 수 있다. 즉, 펄스를 사용하는 경우가 정밀절단에서는 유리함을 나타내고 있다. 그러나, 펄스 주파수의 증가에 따른 절단품질의 특별한 변화는 보이지 않고 있다. 그림 11은 산소 120 l/min 분사조건에서 펄스 주파수 변화에 따른 dross 높이변화를 보인 것이다. 펄스 주파수가 증가할수록 dross 크기는 급격히 저하하고 있으며, 또 펄스 지속시간이 증가할수록 낮은 펄스 주파수 영역에서는 dross의 크기가 현저하게 작아지고 있음을 알 수 있다. 그러나, 그들의 특성은 펄스 주파수 200Hz 및 펄스 지속시간 40%를 한계로 포화되는 경향을 보여주고 있다. 이러한 사실은 절단면 거칠기에서도 나타나고 있는데 그림 12는 각 절단면의 평균 거칠기(Ra)를 절단에 사용된 펄스 주파수에 대하여 나타낸 것으로서 앞서의 경우와 같이 주파수가 증가하면서 표면거칠기 특성이 개선되고 있다. 이상의 실험결과를 정리하면 펄스 절단시 주파수의 효과가 소정의 시험구간에서 크게 나타난 반면 펄스 지속시간의 영향은 낮은 펄스 주파수의 경우에 현저하였으나 주파수가 증가할수록 그 효과도 상대적으로 줄어들고 있었다. 이와같은 영향은 펄스 주파수가 많아질수록 피절단재를 레이저 에너지가 관통하는 회수 증가와 함께 잔여 열에 의한 예열효과가 동시에 작용하므로서 절단품질을 높인 것으로 생각된다. 한편, 절단가스의 취입유량은 앞서의 연속과 절단결과에서 살펴본바와 같이 산소의 경우 반드시 유량이 많은 경우가 유리하다고 볼 수 없기

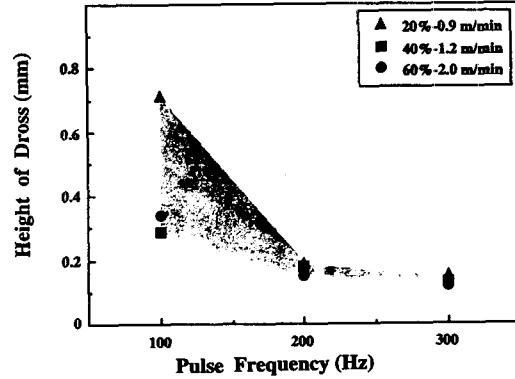


Fig. 11 Effects of pulse frequency and its duty on the height of dross

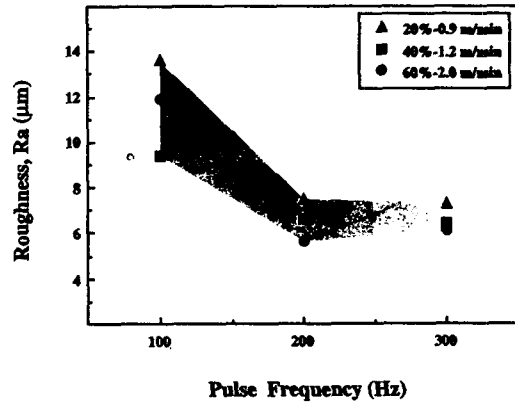


Fig. 12 Effects of pulse frequency and its duty on the roughness of cut surface

때문에 비교적 적은 유량범위인 120 l/min에서 실시하는 것이 바람직한 것으로 생각되었다.

그림 13은 소정의 절단조건하에서 최적의 품질을 얻을수 있는 레이저-펄스 절단속도 범위를 표시한 것으로, 주요 공정변수인 펄스 주파수 200Hz 및 지속시간 40% 조건에서 실험한 결과이며 절단 폭과 dross 높이 및 절단면 평균거칠기를 품질변수로 표현한 예이다. 절단부 폭의 경우 절단속도가 증가하면서 저하하였으나, 1.0m/min 이후에는 큰 변화가 없었다. 이에 비해서 dross 높이는 1.2-1.4m/min 구간에서 급격히 저하한 후 다시 상승하는 특성을 보이고 있다. 반면에 표면거칠기는 속도증가에 의해 처음에는 감소하는 경향을 보이다가 1.4m/min 의 최저값을 보인후 급격히 증가하는 형태



를 보이고 있다. 이러한 결과로 미루어 볼 때 속도가 저하된 구역에서는 에너지 입열량 과다에 따른 절단특성 악화가 초래되고 있으며, 1.8m/min 이상의 고속영역에서는 피절단재의 표면에서는 절단 폭이 좁아져서 양호한 절단이 이루어는 듯이 보임에도 불구하고 피절단재를 관통하면서는 레이저 빔과 재료와의 반응 시간이 부족하여 dross의 생성과 함께 표면거칠기 특성이 나빠지는 것으로 나타났다. 본 실험조건에서의 최적 절단속도는 1.2m/min-1.6m/min의 영역으로 설정할 수 있었는데, 이구간에서는 모든 기준치들이 가장 양호하게 형성 되므로써 현장에서 레이저 절단품질을 간단히 평가할 때는 상기의 어느한 품질기준을 적용하더라도 큰 무리가 없을 것으로 사료된다.

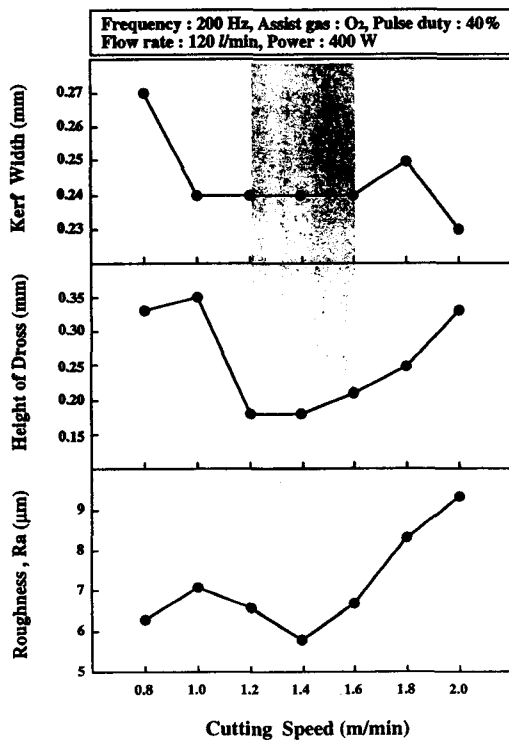


Fig. 13 Optimum laser-pulse cutting speed range

#### 4. 결 론

냉간압연된 1.0mm 두께의 오스테나이트계 스테인레스 강판을 레이저 절단함에 있어서 각종 절단 변수의 영향과 펄스특성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 산소를 보조가스로 사용하는 경우 질소를 사용하는 경우에 비하여 절단효율이 4-5배 정도로 우수하였으며, 적정 절단조건은 출력 1kW 기준으로 산소 취입량 100-120 l/min의 조건에서 적정 절단속도는 5-7m/min 였다.

산소절단의 경우 절단면 표면에 산소와 Cr의 반응에 의한 Cr 산화물이 생성되어 절단면 품질을 저해하고 있었으나 질소를 사용할 경우에는 Cr 산화물이 생성되지 않아 절단면의 직진성 확보가 용이한 반면에 상대적으로 큰 dross가 생성되므로써 이의 제거를 위한 가스분사 압력의 고압화가 요구된다.

펄스절단의 경우에는 주파수가 증가할수록 피절단재의 관통회수가 증가하면서 절단면 특성이 우수하게 나타나고 있다. 그러나 펄스 지속시간의 경우는 주파수가 낮을때는 뚜렷한 반면 200 Hz 이상의 펄스 주파수 영역에서는 그 영향이 분명하지 않았다. 또한, 펄스절단에서는 최적 절단조건 범위 내에서 절단부 폭, dross 생성상태 및 절단면 조도 등 절단 품질특성이 모두 양호하게 나타나므로써 레이저 절단품질을 간단히 평가할 때는 상기의 공정변수중 어느 한가지만을 적정 품질기준으로 사용하여도 무방하지만, 특히 표면거칠기는 가장 민감한 반응을 보여주고 있어서 이것만으로도 다른 공정요소를 대표할수 있을것으로 생각된다.

#### 참 고 문 헌

1. 坪井 昭彦 : ジョブショブに見る最近のレーザー加工, 溶接技術, Vol. 42, No. 11 (1994), pp. 80-861)
2. 吾妻 健國 : CO<sub>2</sub>レーザーによる切断加工の現状, 溶接技術, Vol. 31, No. 6(1983), pp. 57-60
3. 川燈 博通 : レーザ加工の現状と将来, 金屬プレス, Vol. 24, No. 7 (1992), pp. 7-11
4. 黒田 普一, 吉田 每彦, 岩井 信之 : レーザ切断による分光器スリットへの適用, 溶接學會全國大會講演概要 第46集( 90-4), pp. 150-151
5. 妹島 五彦, 一色 治, 後藤 浩二 : レーザ切断技

- 法の確立と電力機器への應用, 溶接學會全國大會講演概要 第45集(89-9), pp. 80-81
6. R. Nuss, R. Muller and M. Geiger : Laser cutting RRIM-polyurethane components in comparison with other cutting techniques, Proc. 5th Int. Conf. Lasers in Manufacturing (LIM-5), Stuttgart, Germany 1988(9), pp. 47-57
  7. 新井 武二, 沓名 宗春, 宮本 勇 : レーザ切斷加工, マシニスト出版(1994), p. 67
  8. I. Masumoto, M. Kutsuna, K. Ichikawa : Relation between process parameters and cut quality in laser cutting of aluminum alloys, Trans. of the J. W. S., Vol. 23, No. 2, Oct. 1992, pp. 38-45
  9. W. M. Steen, J. N. Kamalu : Laser Cutting, Laser Materials Processing, M. Bass, Ed., North-Holland Publishing Co., Amsterdam, 1983, p. 15
  10. 新井 武二, 沓名 宗春, 宮本 勇 : レーザ切斷加工, マシニスト出版(1994), p. 93
  11. 西川 和一, 山本 英辛, 吉村 徳雄 : ステンレス鋼のレーザー切斷特性とブラス マ切斷特性についての比較検討, 溶接學會全國大會講演概要 第45集(89-9), pp. 78-79
  12. S. E. Nielsen : Laser cutting with high pressure cutting gases and mixed gases, Proc. 3rd Int. Conf. Lasers in Manufacturing (LIM-3), Paris France 1986(6), pp. 25-44
  13. 彬山 貞夫, 佐野 直人 關屋 禎三 : レーザ加工 2 (レーザー切斷), 溶接技術, Vol. 32, No. 6(1984), p. 7
  14. 丸尾 大, 宮本 勇, 大家 利彦 : 薄板のレーザーガス切斷におけるレーザー出力變動と切斷面粗さの関係, 溶接學會誌, 第10卷(1992), 第1, pp. 138-144
  15. Thaddeus B. Massalski : Binary Alloy Phase Diagram, ASM, Vol. 1 (1986), p. 845
  16. 이기호, 김기철, 이종훈 : 레이저를 이용한 박강판의 절단특성, 대한용접학회지, Vol. 13, No. 4(1995), p. 375
  17. P. Schafer : Cutting by means of pulsed solid state lasers, Proc. 5th Int. Conf. Lasers in Manufacturing (LIM-5), Stuttgart, Germany 1988(9), pp. 3-14