

研究論文

레이저를 이용한 박강판의 절단특성

이기호* · 김기철* · 이종훈**

Laser Cutting Characteristics of Cold Rolled Steel Sheets

K. H. Lee*, K. C. Kim* and J. H. Lee**

Key Words : Laser cutting(레이저 절단), cold rolled steel(냉연강판), oxidation reaction(산화반응), kerf(절단폭), dross(드로스)

Abstract

This study deals with the quality and the optimum range of laser cutting process. Cold rolled steel sheets for automobile application were cut by a high power CO₂ laser system with beam quality of TEM₀₀ mode. Both process parameters such as travel speed and assist gas pressure, and quality factors were considered to optimize the laser cutting. It was revealed that the thinner the sheet thickness, the less effect of oxidation energy for contributing the cutting process. High speed photographs demonstrated that molten spot on the cut surface moved in a random and vigorous manner according to its viscosity and the flowing direction of assist gas, which resulted in so called striation. Laser cutting produced a very smooth surface of average roughness(Ra) about less than 1.5 μm at the optimum range. It was also shown that the characteristics of dross formation was influenced by the flowing direction of assist gas and the fluidity of molten metal drop.

1. 서론

레이저 가공분야의 가장중요한 영역을 차지하고 있는 절단가공은 절단부 폭이 좁아 정밀가공에 유리하며, 고속절단이 가능하고 재료의 종류에 구애 받지 않는등 여타의 절단법에 비해 품질 및 생산성이 우수한 것으로 평가되고 있다^{1)~4)}. 레이저 절단품질을 좌우하는 공정변수로는 크게 빔 특성과

재료 특성으로 대별할 수 있는데, 일반적으로 빔 특성에 대한 사항은 레이저 기기가 결정되면 대부분 고정 요소로 작용하게 된다.

따라서, 생산현장에서 관심의 대상이 되는 것은 임의로 선정된 피가공재에 대하여 품질과 생산성 측면에서 절단특성을 검토하는 것이다. 본 연구에서는 재료시험용 시험편을 가공할 목적으로 선정된 여러 종류(두께)의 냉연강판을 대상으로 하여 절단조건 변화가 절단품질 특성에 미치는 영향을

* 정회원, 산업과학기술연구소 접합가공팀

** 비회원, 포항제철 품질기술부

검토하여 최적 절단조건을 도출하였다. 주요 절단 변수로는 절단속도 및 보조가스 압력이었으며, 절단품질의 평가항목으로는 절단부 폭, 절단면 조도 그리고 절단면 하부에 생성되는 dross 생성상태등을 대상으로 하였다.

또한, 본 연구에서는 절단시 분사되는 보조가스 와 재료와의 반응(산화반응)에 의해 생성되는 줄 무늬의 형성거동과 절단부 하부에 부착되는 dross 형성특성등을 고속촬영장치를 이용하여 기록 및 분석하였다.

2. 실험방법

실험에 사용된 재료는 KS SPCC급의 냉연강판을 두께별로 5종류를 사용하였는데 두께 범위는 최소 0.24 mm에서 최대 1.6 mm였다. 레이저 절단현상 및 dross 형성과정을 관찰하기 위한 고속촬영은 별도로 3 mm 두께의 열연강판도 사용하였다. 이들소재의 기계적성질 및 표면특성은 표 1과 같다.

Table 1. Surface condition and mechanical properties of steel sheets.

Steel	Thick.(mm)	Surface Condition	T.S.(kg/mm ²)	E.L.(%)
A	0.24	Cold Rolled Ra = 1.0μm	29.8	19
B	0.78		32.3	40
C	1.10		31.7	42
D	1.40		32.4	41
E	1.60		31.9	40
F	3.00	Hot Rolled	36.5	29

레이저 장치는 TRUMPF 240L 형의 절단 전용 설비로서 TEM₀₀ 모드의 1 kW급 탄산가스 레이저였으며, 절단조건은 표 2와 같다. 레이저 절단후에는 절단부 품질특성을 비교하기 위하여 절단성 자체와 함께 그림 1에 나타난 절단부 폭, 절단면 거칠기 및 dross 형성특성을 조사하였다. 절단부 폭은 stereoscope를 사용하여 넓이를 측정하였으며,

Table 2. Laser cutting parameters.

Applied Laser Power	1kW/CW-CO ₂
Beam Mode	TEM ₀₀
Focal Length	95.3 mm
Gas Pressure	2.3-6.8 bar(Oxygen)
Travel Speed	2.3-9.0 m/min
Nozzle	Straight/1.4 mm Diameter
Work-Nozzle Distance	0.8 mm

거칠기는 diamond stylus를 이용한 표면조도 측정기를 사용하였다. Dross 특성은 절단부 뒷면에 형성된 높이를 높이 측정장치를 써서 정량적인 평균값으로 측정하였다.

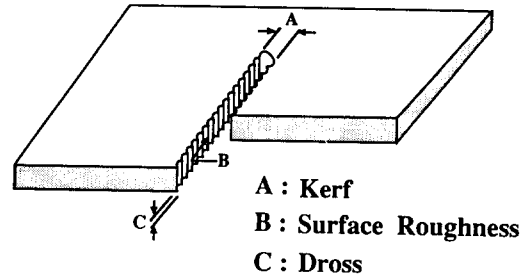


Fig. 1 Quality factors of laser cutting considered in this study.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 절단부 폭(kerf) 변화

레이저 절단에서 절단부 폭이 좁은 조건을 얻는 것은 매우 중요한 의미를 가진다. 그림 2는 시험재 A(두께 0.24 mm)를 절단한 실험결과로서 산소압력 5.2 bar 상태에서 절단속도 변화에 따른 절단부 폭형상의 대표적 예를 나타낸 것이다. 실험결과에 의하면 같은 가스압력 조건에서도 속도에 따라 차이를 보이고 있었는데, 특히 저속구간에서는 절단부 폭이 다른조건에서 보다 넓고 절단면도 불규칙함을 관찰할 수 있었다.

절단속도가 느리다는 것은 입열에너지의 증가를 의미하며, 이럴 경우 절단부위는 필요 이상의 에너지에 의해 burning 현상과 함께 절단부의 폭도 넓어지게 되는데 속도가 증가할수록 그 폭은 좁아지면서 양호한 조건에 들게된다. 그러나, 속도가 어떤 값 이상으로 빠르면 단위 체적당 에너지 공급의 총량이 적어져서 피절단재를 관통시키지 못하는 gouging 현상이 나타나며 절단이 불가능하게 되기도 한다. 상기 조건 변화에 따른 결과를 도표화하여 정리한 것이 그림 3이다. 그림에서 알 수 있듯이 속도가 늦은 6 m/min에서는 kerf 폭이 0.38 mm-0.41 mm인데 반하여 속도가 증가하면서 그 폭은 급격히 저하하고 있다.

보조가스로 사용된 산소압력과의 관계를 보면

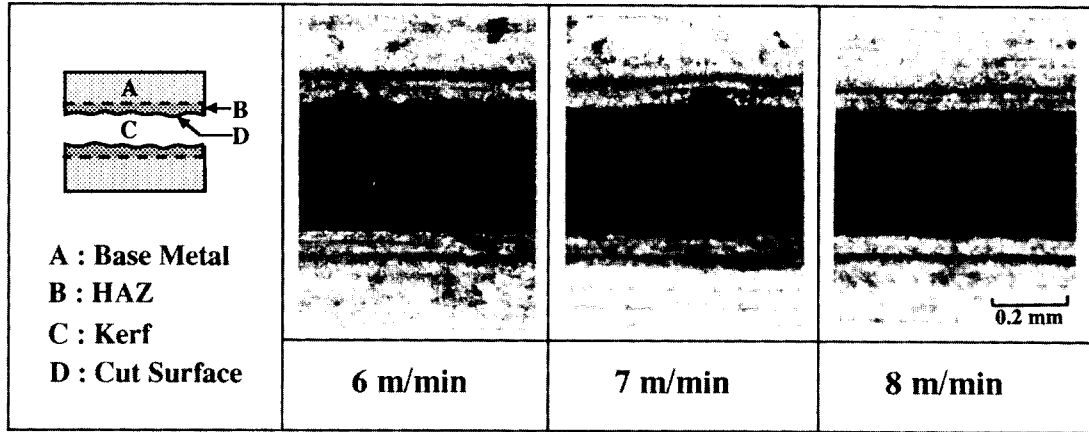


Fig. 2 Macroscopic view of the kerf and cut surface profile.

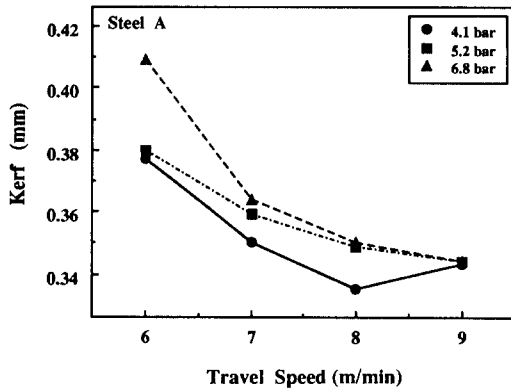


Fig. 3 Relation between travel speed and oxygen pressure.(Steel A)

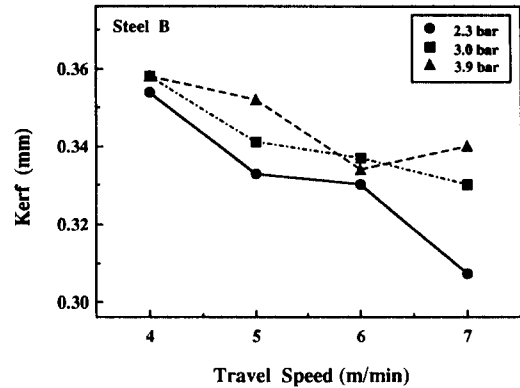


Fig. 4 Relation between travel speed and oxygen pressure.(Steel B)

저속에서는 차이가 보여지나 속도가 증가하면서는 줄어들고 있다. 이러한 결과는 적정 절단조건 선정에서 가스압력 또한 절단속도와 함께 중요하게 고려되어야 함을 제시하고 있다. 속도측면을 고려하면 본 강재는 8 m/min 이상의 절단속도가 요구되고 있다.

한편 두께가 두꺼워진 시험재 B(0.78 mm)의 절단부 폭 측정결과는 그림 4에 나타난 바와 같다. 전반적으로 앞서의 소재에 비해 폭이 0.36 mm 이하로 좁았으며, 적용된 가스압력도 낮게 형성되었다. 즉, 두께가 두꺼워짐에도 불구하고 적은량의 산소로 품질특성이 우수한 절단부를 얻을 수 있는 것으로 나타났는데, 이는 근본적으로 두께증가의 영향 때문으로 사료된다. 즉, 재료 두께가 두꺼워지면서 레이저 뿐만 아니라 산소와 재료와의 산화반응에

너지도 증가하게 되므로 용융절단 비율이 높았던 것으로 추측되는 앞서의 결과보다 효율면에서 우수하였던 것으로 사료된다^{5,6)}. 역으로 표현하면 소재 A의 경우는 두께가 얇기 때문에 산화반응 에너지를 충분히 활용할 수 없었던 것으로 사료된다.

그러나 이러한 해석은 본 실험에서와 같이 두께가 매우 얇은 경우에는 적용되나 일반적인 현상이라고 보기는 어렵다. 두께가 14 mm(시험재 D)로 증가된 경우에는 그림 5처럼 전체적인 경향은 앞서의 두 강재와 비슷하나 두께증가의 영향으로 적용 속도범위가 낮게 형성되어 있고, 특히 저속영역에서는 절단부 폭이 매우 넓게 형성되어 있다. 이러한 결과는 두께가 어떤값을 넘게됨에 따른 재료내부에서의 가스흐름이 하부로 갈수록 난류(turbulent flow)화 하는 영향 때문으로 사료되고 그

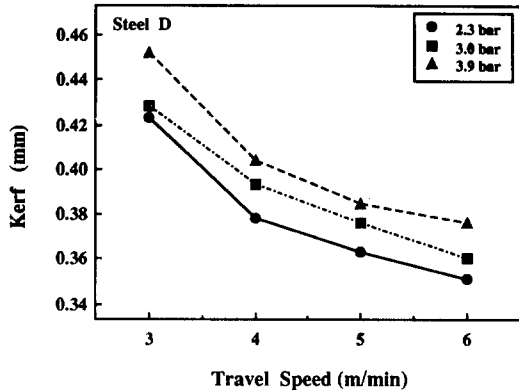


Fig. 5 Relation between travel speed and oxygen pressure.(Steel D)

경향은 두께가 더 두꺼워 질수록 심화될 것이 예상된다.

이상의 결과를 살펴보면 피절단재의 두께가 얇을수록 산화반응 에너지의 이용효과는 적었다. 즉, 산소가스 공급에 의한 산화반응 에너지는 재료두께가 어느 정도 있을 경우에 효과가 나타났다. 또한, 가스압력이 높으면 산화반응의 증대로 인해 절단성이 향상될 것으로 예상되나, 필요 이상으로 압력이 높게 되면 재료표면에서는 절단 폭이 넓어지며, 가스의 흐름이 절단면 하부에 이르게 되면 난류를 형성하기 때문에 표면거칠기의 증가와 함께 dross의 생성 가능성도 클 것으로 사료된다.

3.2 절단면의 줄무늬 형성 및 조도특성

그림 6은 비교적 두께를 가지는 시험재 D(1.4 mm)를 대상으로 하여 절단시 가스압력 변화에 따른 절단면 특성변화를 보인 것이다. 전체적으로 가스압력이 증가할수록 절단면이 거칠어지고 있는데 이는 압력증가에 따른 산소와 재료와의 산화반응이 활발하게 진행되고⁵⁾, 용융물의 유동도 압력증대에 따라 난류화 하기 때문이다. 이렇게 형성된 절단면의 줄무늬는 절단면 상, 하부에서 차이를 보이고 있는데, 절단두께의 약 1/5쯤에 형성된 상부의 경우를 고찰하여 보면, 최초 레이저 빔이 재료와 접하게 되어 레이저 에너지에 의해 재료가 용융된 영역임을 알 수 있다.

이때 보조가스로 공급되는 산소는 용융물을 하부로 불어내는 작용과 함께 용융물과 산화반응을 일으켜서 레이저 빔을 중심으로 하여 방사형으로 확산 및 절단을 진행시키게 된다. 산화반응의 확산이 진행되는 동안 절단방향으로 레이저 빔이 이동하면서 새로운 산화반응이 형성되며, 이러한 과정이 반복되면서 줄무늬가 형성되는 것으로 알려져 있다⁶⁾. 이에 비해서 하부에 형성되는 줄무늬는 하부로 내려가면서 일정한 각도로 진행방향의 후방으로 굽어져 있다. 레이저 빔 전면의 용융물은 토크스 모멘트의 구동력에 의해 하부로 작용됨과

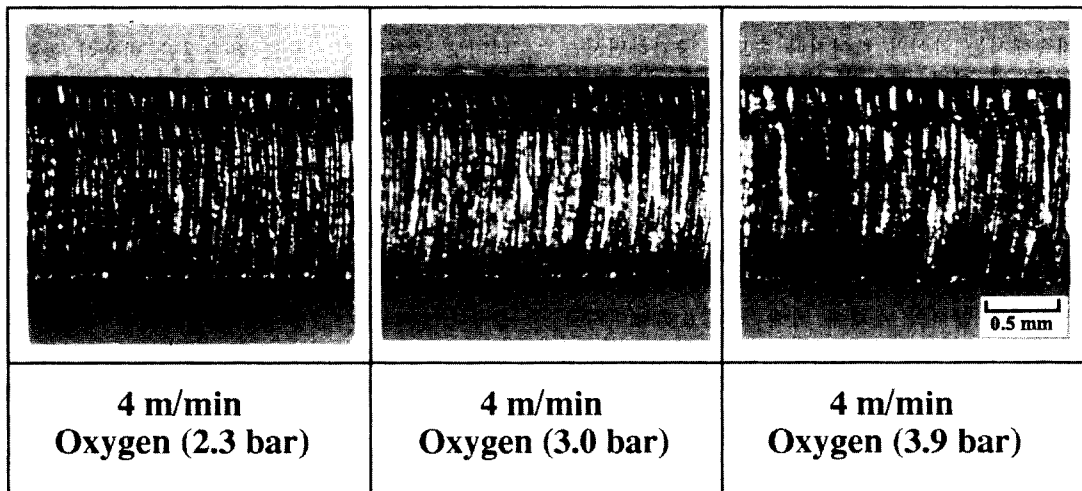


Fig. 6 Shapes of laser cut surface.(Steel D)

동시에 액체상태인 용융물이 높은 레이저의 흡수체로 작용하게 된다. 계속해서 붙어주는 보조가스에 의해 초기에 형성된 용융물은 좌우로 움직이게 되는데 이곳으로 에너지가 편향 집중되어 반응하므로서 줄무늬가 형성된 영역으로 들어가면 빔과 재료와의 접촉각(진행방향으로의 경사각)에 의해 절단반응을 지연시키면서 전술한 현상에 의해 좌우 굴곡을 생성하게 된다. 산소의 역할은 절단면 상부에서는 산화반응을 지배하게 되며, 하부에서는 산화반응과 토출 모멘트를 생성하는 역할을 하게 된다.

본 연구에서는 앞에서 언급한 줄무늬의 형성 현상을 고속촬영장치를 이용하여 관찰하였다. 그림 7은 3mm 두께의 열간압연강판(시험재 F)을 대상으로 레이저 절단할 때 전방 상부방향에서 1,000 FPS의 속도로 고속촬영한 결과를 보인 것이다. 이때 촬영각도는 시편표면을 기준으로 20° 위 정면이었으며, 시험재를 45°방향으로 절단하였다. 사진 (a)에서 화살표 부분의 밝은영역이 레이저 빔에 의해 형성된 용융물인데 시간이 경과함에 따라 (b)처럼 이 부분이 왼쪽에서 오른쪽으로 이동되어 있음을

보이고 있다.

또, (c)의 경우는 밝은 부분이 거의 소멸되었는데 이러한 현상은 주기적으로 나타나며 약 4-5ms의 주기성을 보이고 있었다. 이후 (d)에서와 같이 밝은부분은 이번에는 오른쪽에서 형성되어 왼쪽으로 진행되고 있었는데, 관측결과에 의하면 그 방향은 매우 불규칙한 양상을 보였다. 이러한 결과는 기존의 발표와 같이 줄무늬 형성은 산화현상이 일률적으로 빔 중심에서 외부방향으로 균일하게 진행된다는 해석과는 다소 차이를 보이고 있다. 만약에 이러한 해석이 정확하다면 striation은 좌우 대칭으로 정확한 주기성을 갖는 형태가 되어야 하나 사진에서 볼 수 있듯이 크기나 방향성면에서 균일하지 못함을 볼 수 있다.

즉, 본 실험결과에 의하면 줄무늬의 형성은 레이저 빔에 의한 재료의 온도상승과 이 부분에서의 산소가스에 의한 산화현상 일어나고 있는 것으로 추측되나 균일한 반응이 진행되지는 않고, 용융물의 유동상태나 점도변화에 따라 불규칙하게 움직이고 있었으며, 이 결과로 인한 줄무늬의 형성도 균일하지는 않았다. 이러한 근거의 하나로서 그림

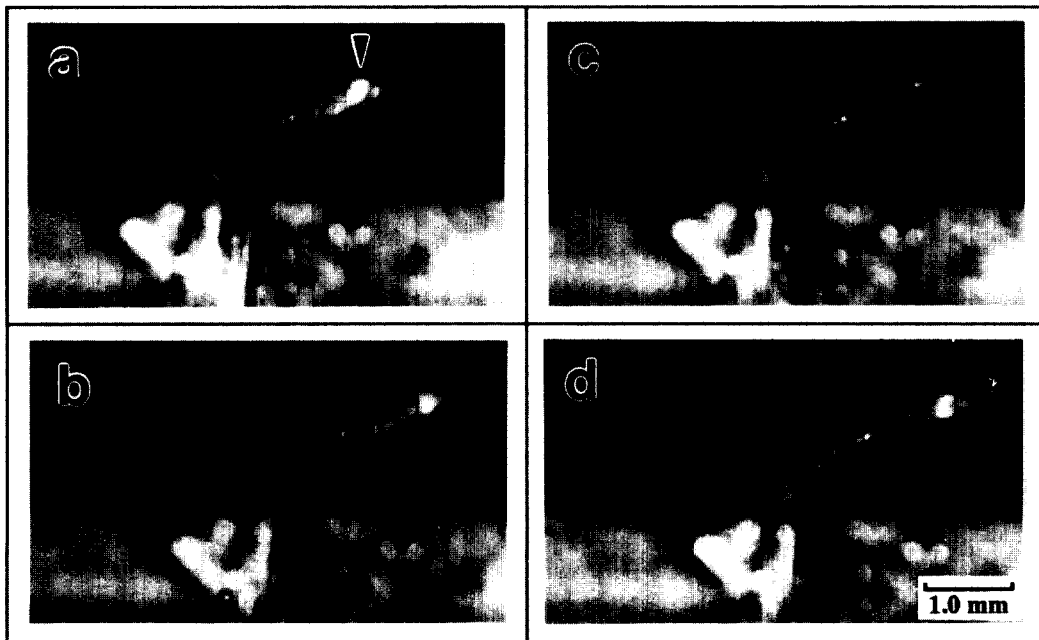


Fig. 7 Striation forming behavior during laser cutting process.
(Steel F, Power : 2.7kW, Speed : 0.7 mm/min)

6에서 알 수 있는 것처럼 줄무늬의 윗부분이 불균일하게 형성된 것으로 사료된다.

절단면의 조도는 절단품질을 평가하는 중요 요소 중의 하나이다. 절단면 조도가 양호하게 되면 절단 후 후속공정없이 제품으로 직접 사용할 수 있기 때문이다. 이미 살펴본 바와 같이 레이저 빔을 이용한 산소절단은 줄무늬가 형성되는 특징을 갖고 있는데 이 줄무늬의 주기는 절단속도 및 가스의 공급과도 밀접한 관계가 있으며^{9,10)}, 이러한 요소들이 절단면의 조도를 지배하게 된다.

그림 8은 steel D의 절단면 확대 사진으로 레이저 빔과 산화작용에 의한 줄무늬의 형성과 굴곡현상을 분명히 관찰 할 수 있다. 그러나 사진에서 불수있듯이 절단면의 조도를 정량적으로 표현하기는 어려우며 특히 측정위치에 따라 값이 크게 달라질 것이 예상된다. 따라서, 본 실험에서는 절단부 중앙을 기준으로 조도를 측정하여 비교검토하는 것으로 하였다. 그림 9는 시험재 C에 대한 조도 측정 결과로서 적정범위로 판단되는 속도구간에서 압력을 변화시킨 경우의 조도특성을 평균조도(Ra)로 표현한 것이다. 압력이 증가할수록 조도값은 증가하는 경향이나 조도값은 전구간에 걸쳐 3.0 μm 이하의 비교적 낮은 값을 나타내고 있었다.

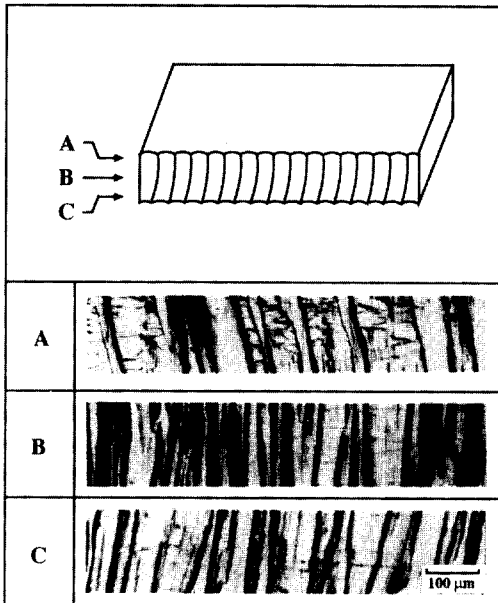


Fig. 8 Magnified photograph of a laser cut surface. (Steel D)

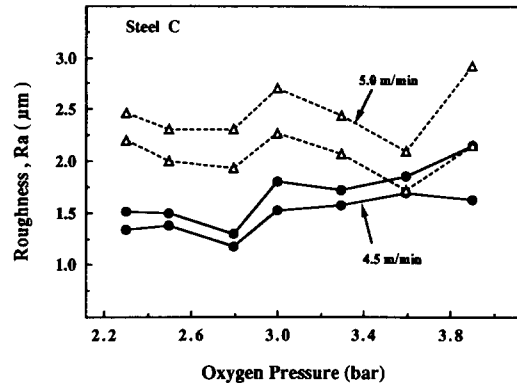


Fig. 9 Roughness distribution of laser cut surface.

3.3 Dross의 생성특성

레이저 절단품질중에서 절단 폭이 좁거나 표면 조도가 낮다는 사실만으로는 아직 최적의 절단조건이라고 할 수 없다. 절단품의 2차 가공여부를 좌우하는 요소로서 절단부의 dross 생성여부 및 그 크기등이 동시에 고려되어야 한다. 그림 10은 시험재 A를 대상으로 절단면 하부에 생성된 dross 생성상태를 앞서의 절단부 폭 형성특성과 함께 표현한 그림이다.

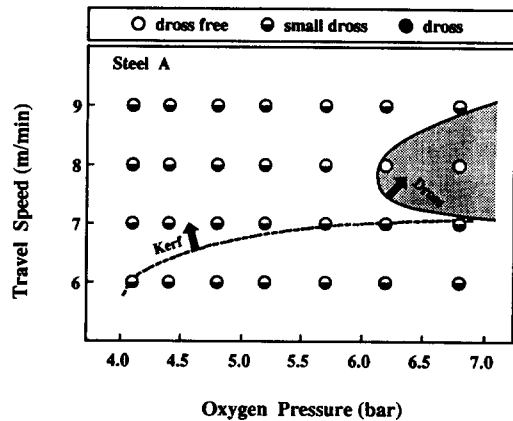


Fig. 10 Optimum cutting range of steel A.

Kerf로 표시된 화살표 위의 영역이 앞서 검토한 절단폭이 좁게되는 양호한 영역이다. 그림에서 흰 점들은 dross가 생성되지 않은 양질의 절단상태이다. 결과에 의하면 본 강재의 경우는 8 m/min의

6.2 bar 이상에서만 dross가 없는 절단품질을 나타내었으며, 대부분은 중간 영역인 소형 dross 상태를 보이고 있다. 그런데 본 강재의 경우는 이후 설명할 다른 시험재와는 달리 소형 dross 영역이라 하더라도 모재의 두께가 얇기 때문에 상대적으로 dross 자체의 크기도 매우 작았다. 그러므로 이 영역도 절단 목적에 따라서는 양호한 조건으로 판단된다. 절단폭 측정결과와 dross 상태를 함께 고려할 경우 최적 절단조건 범위는 음영으로 표시된 속도 8 m/min에서 압력 6.2 bar의 비교적 고속, 고압 범위로 설정할 수 있었다.

시험재 B(0.78 mm)의 실험결과가 그림 11과 같다. 앞서의 시험재 A와는 달리 dross 영역이 존재하고 있으며 dross가 없는 영역은 보조가스를 낮은 압력으로 취입한 구역에서 집중적으로 형성되고 있다. 그러나, 4 m/min의 경우는 모든 가스압력 범위에서 dross가 없는 영역임에도 불구하고 절단부 폭이 넓기 때문에 적정조건이 되지 못한다.

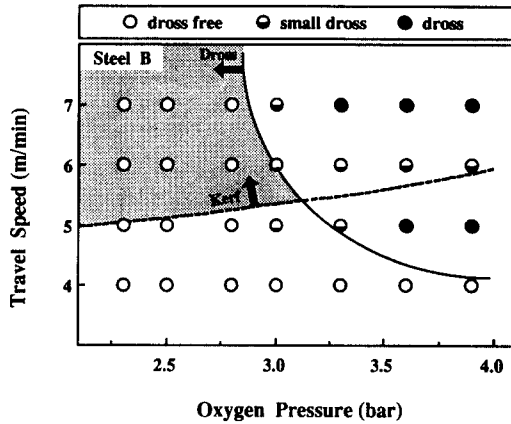


Fig. 11 Optimum cutting range of steel B.

본 강재의 최적 절단조건은 dross 상태와 절단폭을 고려하면 속도 6-7 m/min, 압력 2.5 bar 근처로 판단된다. 이 시험재의 경우는 dross 상태를 시험재 A와 비교하면 약간의 차이가 있다. 즉, 시험재 A(0.24 mm)의 경우는 두께의 영향 때문에 전 실험범위에서 완전한 dross는 형성되지 않았으나, 두께가 두꺼워 지면서는 렌즈의 초점이 재료표면에 위치하므로 집중된 레이저 에너지가 모두 표면 용융에 쓰이게 되어 하부로 갈수록 레이저 에너지의 직접적인 효과는 떨어지게 되고, 특히 고압으로 분사되는 기류의 영향이 두께가 두꺼워 질

수록 하부에서 약화되어 후판가공을 곤란하게 하는 원인으로 지적되고 있다. 이러한 영향은 레이저를 이용한 후판의 가공을 곤란하게 하는 원인으로 생각된다.

1.6 mm 두께를 가지는 시험재 E의 경우를 살펴보면(그림 12), 7 m/min의 경우 가스압력에 관계없이 전부 dross가 발생하였는데, 이는 레이저 빔에 의해 용융된 피절단재가 하부로 흘러 내려가는 과정에서 이송속도가 용융금속 유동속도보다 빠르기 때문에 완전히 제거되지 못한것에 기인하는 것으로 생각된다. 속도가 6 m/min으로 저하할 경우에는 낮은 가스압력에서 약간의 dross가 생성된 후, 고압영역에서 dross가 없는 절단이 이루어졌다.

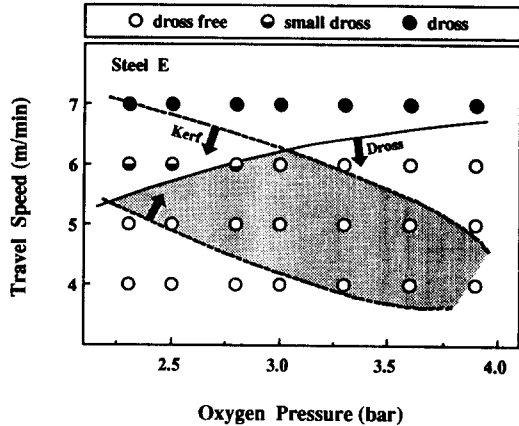


Fig. 12 Optimum cutting range of steel E.

한편, 속도가 더욱 저하된 5 m/min 및 4 m/min에서는 모두 dross가 없는 영역에 위치하므로 두께가 두꺼워 질수록 절단속도의 저하가 요구됨을 알 수 있다. 즉, 피절단재와 빔의 반응 및 산소와 용융물과의 충분한 산화반응에 소요되는 시간적 여유가 필요함을 제시하고 있다. 절단부 폭과 dross 생성상태를 종합한 적정 절단조건은 속도 5 m/min에서 가스압 3.5 bar로 판단된다.

이처럼 비교적 두꺼운 소재에서는 dross의 형성을 기초로 해 볼때 절단조건的高速화는 어렵다고 생각된다. 그림 13은 시험재 F를 대상으로 500 FPS의 속도로 절단 측면을 고속관찰한 결과인데, 실험방법상 절단재의 한쪽벽이 없는 상태가 되기 때문에 보조가스 취입효과는 적으나 전반적인 경향을 파악할 목적으로 실시된 실험결과이다.

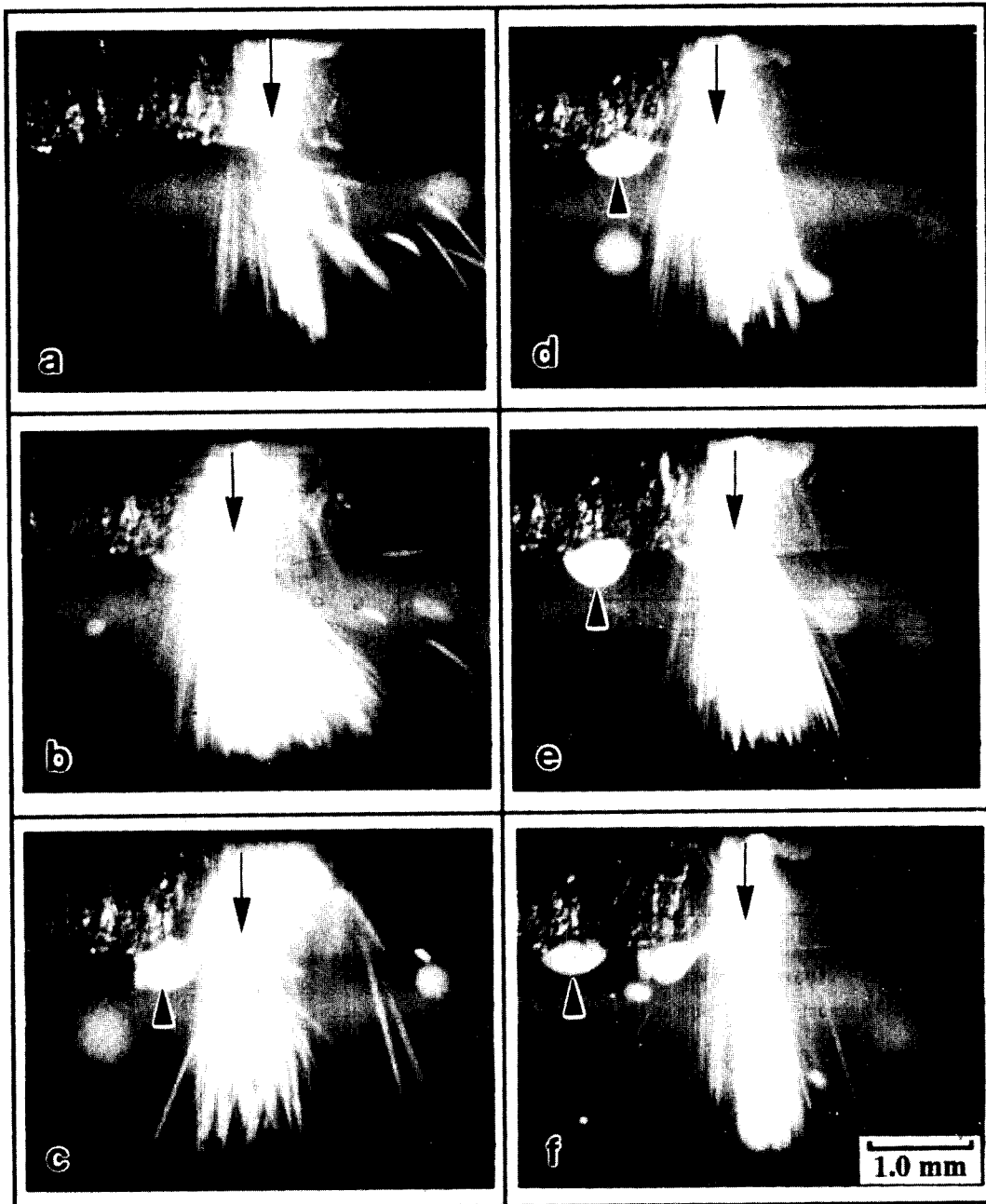


Fig. 13 Dross forming sequence(Steel F).

사진 (a)의 밝은부분(화살표)은 레이저 빔과 보조가스가 동시에 분사되는 중심선으로 절단재 하부 방향으로 용융물이 대부분 제거되고 있음을 보

여주고 있다. 이러한 제거작용은 시간을 두고 그 크기(밝기)가 약간의 차이를 보이고 있는데, 이는 상부로 부터 흘러내리는 용융물의 일정한 양이 연

속적으로 흐르지 못하고 유동성, 냉각현상등의 영향에 의해 시간을 두고 어느 정도 크기가 형성되면 이 부분이 일시에 제거되기 때문에 판단된다. Dross는 (c)의 왼쪽 하부(삼각형 표시)에서 형성되고 있었는데, 이때는 이미 레이저 빔과 가스분사 중심선이 오른쪽으로 이동한 상태이다.

즉, 중심선에서 제거되지 못한 여분의 용융물이 후방 하부로 흘러 모여서 dross를 형성하기 시작하고 있으며, 또한 고속의 제트기류에 의해 재료 하부에서는 recirculating zone을 형성하면서 dross가 부착하는 현상도 나타나고 있다. 일단 용융상태의 dross가 형성되기 시작하면 점도와 표면장력의 영향 때문에 쉽게 제거되지 못하고 붙어있다가 (e)처럼 분사 중심선으로 부터 멀어지면서 응고하게 되며, 이러한 공정은 절단의 진행과 함께 반복되고 있었다.

4. 결 론

레이저를 이용한 절단가공 기술은 그 동안의 연구단계를 거쳐 여러분야에서 실용화되고 있는 기술로서 특히 절단품질이 우수한 것으로 평가되고 있다. 또한, 이 기술은 소량 다품종 생산이나 복잡한 형상가공등에서 위력을 발휘하고 있으며, 자동화와 연계된 장치를 이용할 경우에는 대량생산 체제가 가능하여 경제성 측면에서도 적합한 기술로 알려져 있다.

본 연구는 이러한 목적에 부합하는 가공장치 구성의 일환으로서 두께가 다른 냉연강관을 대상으로 하여 공정변수들이 절단특성에 미치는 영향을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 즉, 산소를 이용하여 냉연강관을 절단할 경우 산화 반응열 발생에 의한 입열량 증대효과가 있으나, 두께가 얇을 경우에는 이러한 산화 반응열 증대효과는 충분히 기대할 수 없는것으로 사료되었다. 고속촬영 결과에 의하면 절단부에 형성되는 줄무늬는 산화가 레이저 빔 중심으로 부터 외부방향으로 균일하게 진전하지 않고, 용융금속의 유동상태나 점도변화 등에 따라 용융물이 좌우로 매우 빠른속도로 불규칙하게 움직이고 있었으며, 이 결과 줄무늬도 균일하지 않게 나타났다.

한편, 보조가스의 압력을 검토한 결과 보조가스

압력이 증가 할수록 레이저 절단면의 조도값은 증가하는 경향이거나, 적정범위 내에서는 1.5 μm 이하의 낮은 값을 나타내는 우수한 품질 특성을 보였다. 절단시 용융물은 보조가스의 분사에 의해 대부분 제거되나 레이저 빔과 가스분사 중심선이 전방으로 이동하는 사이에 일부 제거되지 못한 용융물이 후방 아래로 흘러 모여서 dross를 형성하고 있으며, 고속 기류에 의해 재료하부에 생성된 recirculating zone을 형성하면서 dross가 부착하는 현상도 나타났다. 이러한 용융물은 일단 형성되면 점도 및 표면장력의 영향 때문에 쉽게 제거되지 않고 시간이 경과하면서 절단면 하부에 응고 부착하는 것이 관찰되었다.

참 고 문 헌

1. W.Nishikawa, N.Tomita, N.Urai : An Investigation of Metal Cutting Process by High Power CO₂ Laser, LAMP-'92, Nigata, Japan (1992), Vol. 1, pp. 571-576
2. T.Fujioka : Laser activities in Japan, LIM-3, Paris, France(1986), pp. 11-17
3. 紫野, 中市 : CO₂ 레이저切斷의應用, 溶接技術, 1983(6), pp. 44-47
4. 吾妻 : CO₂ 레이저による切斷加工の現狀, 溶接技術, 1983(6), pp. 57-60
5. *Welding Handbook*, AWS(8 Edit.), Vol.2, welding process(1991), p. 452
6. A.Richard : *Thermodynamics of Solids*, Wiley-Interscience Pub.(1972), p. 115
7. Y.Arata, H.Maruo, I.Miyamoto, S.Takeuchi : JWRI, 8(2), 1979, 15
8. M.J.Adams : Gas Jet Laser Cutting, Proceeding of the Conference on Advance of Welding Process, The British Weld. Inst., April(1970), pp. 140-168
9. F.Wang : *Laser Materials Processing*, North Holland Pub., 1983, p. 84
10. J.Powell, K.Frass, K.Shenzinger, I.A.Menzies : CO₂ laser cutting aluminium alloys, LIM-5, Stuttgart, West Germany(1986), pp. 15-24