

研 究 論 文

大韓熔接學會誌
 第7卷第4號 1989年 12月
 Journal of the Korean
 Welding Society
 Vol.7, No.4, Dec., 1989

저탄소강의 고출력 CO₂ 레이저 빔 용접

김 재 도*

High Power CO₂ Laser Beam Welding for Low Carbon Steels

J.D. Kim*

Key Words: Laser Beam Welding(레이저 용접), Low Carbon Steel(저탄소강), Position of Focus(초점 위치), Shielding Gas(보호 가스), Travel Speed(용접 속도), Beam Mode(빔 모드)

Abstract

Laser beam welding parameters have experimentally investigated, using a continuous wave 3 kW CO₂ laser with the various travel speeds, beam mode and laser beam power in low carbon steels. An optimum position of focus and the effect of shielding gas on penetration depth with varying the flow rate of He and Ar were investigated. Laser power with range of 1.0 to 2.5 kW and travel speed with range of 0.5 to 5.1 m/min have been combined to investigate the effect of laser power and travel speed on penetration depth and bead width.

It is found that the optimum position of focus in 3kW class laser is 0.5 to 1.5mm below the surface of the material. The flow rate of shielding gas affects the penetration depth and He is more effective than Ar. The penetration depth in laser welds of low carbon steels is between two and four times of the bead width. Laser beam welding of butt joints in 2mm thick carbon steel has been carried out to establish a weldability lobe. The lobe indicating acceptable welding conditions is introduced.

* 정회원, 인하대학교 공과대학

1. 서 론

레이저는 1960년에 최초의 루비 레이저가 발명된 이후, 고체, 액체 및 가스를 매체로 한 여러가지 레이저 발진 장치가 마이크로 와트에서 수 킬로와트 출력의 레이저가 개발되어 왔다. 1966년에 저출력 CO₂ 레이저를 전자 부품 용접에 응용하기 시작하였고, 1971년에는 고출력 CO₂ 레이저가 개발되어, 최근에 소규모 공장에서 부터 자동차 생산공장, 항공기 제조 회사에 이르기까지 고출력 레이저를 사용한 재료가공 기술이 발달되어 왔다. 또한 최근에는 로봇트를 이용하거나, flexible 빔 안내 장치를 이용하여 3차원 형상의 부품을 절단, 용접등 복잡한 형상의 제품에 이르기까지 산업현장에 응용되고 있다¹⁾.

레이저 용접은 레이저 광을 열원으로 하는 고밀도 에너지 용접이며, 열 용입량이 작아서 재료의 뒤튐림이 매우 작다. 전자 빔 용접에서 필요한 진공실이 필요없으며, 용접 비이드 폭과 열영향부가 매우 좁으며, 용접하기 어려운 재료의 용접도 가능하다. 그러나, 재료 표면에 맞추어진 초점 크기가 수 백 마이크로이기 때문에 접합할 재료를 정확히 서로 맞추어 주어야 하고, 현재로서는 레이저 구입 및 유지비가 많이 드는 단점이 있다^{2),3)}.

레이저 용접은 세 가지 큰 가공 변수 블록으로 구별할 수 있는데, 레이저 발진 장치, 광학 장치, 용접 재료이다. 먼저 레이저 발진 장치는 제작 회사에 의해서 이미 고정된 변수를 가지게 되는데, 레이저 최대 출력, 빔 모드, 빔 크기 등의 빔에 관련된 것을 말한다. 둘째 변수 블록은 레이저 빔을 발진 장치로부터 가공할 재료까지 보내기 위한 광학 시스템이다. 이것은 초점 길이, 초점 심도, 빔 발산 등이다. 셋째 변수 블록은 가공 재료의 특성에 의해서 결정 되는데, 표면 반사율, 에너지 흡수 계수, 열 전도도, 열 확산도 등에 관련된 것이다.

본 연구에서는 3kW CO₂ 레이저를 사용하여 저탄소강의 레이저 용접시 최적의 레이저 빔 초점 위치, 보호 가스가 용입 깊이에 미치는 영향, 레이저 출력과 용접 속도가 용입 깊이 및 비이드 폭에 미치는 영향을 조사 하였다.

2. 실험 재료 및 실험 방법

2.1. 레이저 발진 장치

본 연구는 CBL Optronics에서 제작한 3kW CO₂ 레이저를 사용하였다. 레이저 발진 장치는 He, N₂과 CO₂ 가스를 사용하고, 고속 축류 타입이었다. 레이저 발진 장치에서 NC 테이블까지는 약 10m 떨어져 있으며, 초점을 맞추기 전의 레이저 빔 직경은 약 25mm 이었다.

레이저 빔 에너지를 한 점에 모으는데 사용하는 렌즈는 양면이 코팅된 ZnSe이며, 초점거리는 127mm이었다. 레이저 용접에 사용하는 노즐은 보통 구리를 사용하며, 쉽게 교체할 수 있고 높이를 조절할 수 있었다. 본 실험에서는 TEM₀₀과 TEM₀₁* 빔을 사용하였다. TEM₀₀ 빔은 에너지 분포가 가우시안이며, TEM₀₁* 빔은 도너츠 형태의 에너지 분포를 갖고 있는데 Fig.1에 예시하였다.

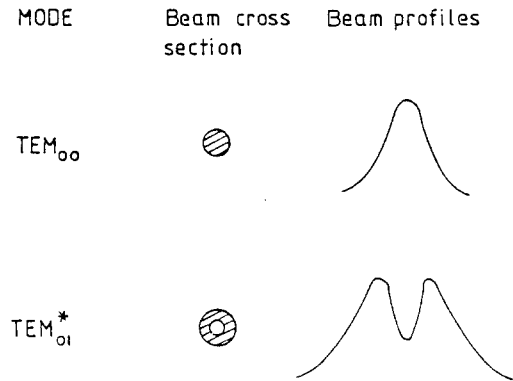


Fig. 1 Examples of TEM modes

2.2. 실험 재료

실험 재료는 압연처리한 2, 4, 6mm 두께의 저탄소강으로, 길이 500mm, 폭 100mm 이었다. 재료의 화학 성분은 Table 1에 표시하였으며, 레이저 용접 전에 아세톤으로 세척하여 표면의 이물질 제거하였다.

Table 1 The chemical compositions of the carbon steels

Thickness of plate	Chemical compositions(wt%)					
	C	Mn	Si	P	S	Al
2mm	0.08	0.28	0.01	0.008	0.007	0.039
4mm	0.122	0.56	0.058	0.007	0.006	0.062
6mm	0.127	0.71	0.003	0.011	0.006	0.076

2.3. 촛점 위치

촛점 위치에 대한 실험은 4mm 두께의 탄소강을 사용하였으며, 레이저 출력은 2.15kW, 용접 속도는 1.0, 1.5, 3.0 m/min 이었고, 아르곤 가스는 20 l/min로 공급하여 용융부를 보호하였다. 빔 모우드는 TEM₀₀와 TEM₀₁* 이었다.

노즐 끝으로부터 정확한 촛점 위치는 두터운 종이에 빔 프린트를 만드는 방법을 사용하였는데 빔 모우드가 TEM₀₀, TEM₀₁* 이기 때문에 빔 프린트는 매우 뚜렷하게 나타났었다. 본 실험에서는 그 거리를 4.5mm로 하였으며, 가공 재료와 노즐 끝과의 거리를 0.25mm씩 이동하였다.

2.4. 보호 가스

보호 가스가 용접 특성에 미치는 영향을 연구하기 위해서 헬륨과 아르곤 가스를 사용하였는데, 가스 공급은 축 방향으로 공급하였다. 레이저 출력은 2.0, 2.3kW이었고, 용접 속도는 1.0, 1.5 m/min 이며, 빔 모우드는 TEM₀₁*이었다. 헬륨의 유량과 아르곤의 유량은 각각 4.3에서 47.8 l/min과 2.5에서 20.0 l/min으로 변화시켰다. 이때 노즐과 재료 사이의 거리는 4mm, 촛점은 재료 표면 아래 1.0mm이었고, 노즐 직경은 1.5mm이었다.

2.5. 레이저 출력과 용접 속도

레이저 출력과 용접 속도가 용입 깊이와 비이드 폭에 미치는 영향을 조사하기 위해서 6mm 두께의 탄소강을 사용하였다. 레이저 출력은 1.0에서 2.5kW 범위 이었고, 용접 속도는 0.5에서 5.1 m/min 범위이었다. 아르곤 가스를 보호 가스로 사용하였는데, 유량은 20 l/min 이었고, 노즐 직경은 2.4mm를 사용하였다. 촛점 위치는 재료 표면 아래 1.0mm 이었으며, 레이저 모우드는 TEM₀₀과 TEM₀₁*를 사용하였다.

2.6. Weldability lobe

2mm 탄소강에 대한 weldability lobe를 구하기 위해서 시편을 50×30mm로 만든 후 맞대기 용접할 면을 연삭 가공하였다. 레이저 출력은 1.0, 1.5, 2.0kW이고, 용접 속도는 0.5, 1.0, 1.5, 3.0, 4.2 m/min을 조합하여 용접 가능한 범위를 구하였다. 레이저 모우드는 TEM₀₀를 사용하였으며, 간단한 구조의 클램핑을 사용하였다. 용접 결과는 용접면의 접합 여부와 언더컷 등 결함에 대해서 눈에 의한 검사와 크랙, 기공 등의 결함은 용접면을 절단하여 금속현미경과 주사식 전자현미경에 의한 검사를 하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 촛점 위치

레이저 용접에 있어서 중요한 변수 중의 하나는 레이저 빔의 촛점 위치이다. 일반적으로 재료 표면 아래인 것으로 알려져 있으나, 정확한 위치와 범위는 레이저 시스템과 용접 재료에 따라서 달라진다. Fig. 2는 TEM₀₀ 빔을 사용 하였을때 최적의 촛점 위치 범위를 보여 주고 있다. 재료 표면 아래 0.5에서 1.5mm 범위에서 최대의 용입 깊이와 용입비(용입 깊이/비이드 폭)를 얻었다. $D_f = -1.75\text{mm}$ 이하부터는 용입 깊이가 직선적으로 감소하는 것을 알 수 있는데, 이는 재료 표면에 맞추어진 촛점의 크기가 증가되어 레이저 빔 에너지 밀도가 감소되기 때문이다. 한편 D_f 가 양의 값일 때도 빔 에너지 밀도가 낮아서 용입 깊이가 작음을 알 수 있는데, 이처럼 D_f 가 최적의 촛점 위치로부터 멀리 벗어 날수록 비이드 형상은 conduction welding의 특성을 나타내고 있다. 또한 Fig에서 알 수 있듯이 용접속도에 의한 영향은 거의 없는 것을 알 수 있다.

Fig. 3은 TEM₀₁* 빔을 사용 하였을때 용입 깊이와 비이드 폭에 대한 특성을 보여 주고 있는데, 이 경우에 있어서도 최적의 촛점 위치는 TEM₀₀ 빔을 사용했을 때와 유사한 결과를 보여 주고 있으나, TEM₀₁* 빔의 직경이 TEM₀₀보다 크기 때문에 비이드 폭은 약간 더 넓고, 용입 깊이는 덜 깊다.

이와 같은 결과를 타 연구자들의 결과와 비교하

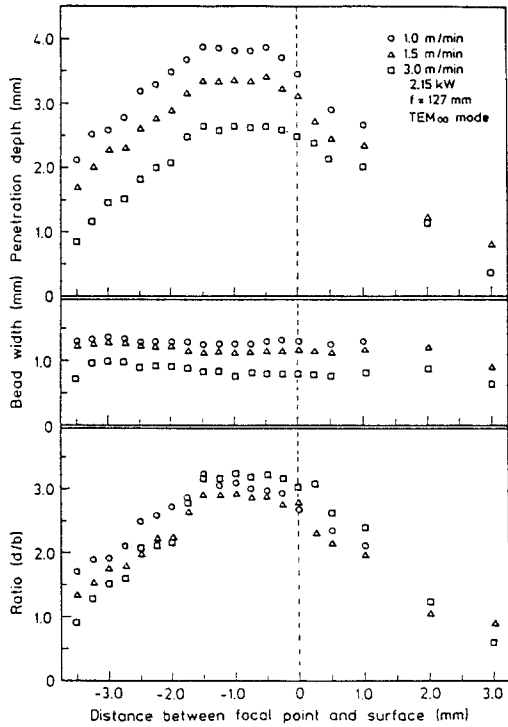


Fig. 2 Effect of focal position on penetration depth, bead width and ratio(depth to width) as a function of D_f for various travel speeds at TEM_{00} beam mode in 4mm thick carbon steel

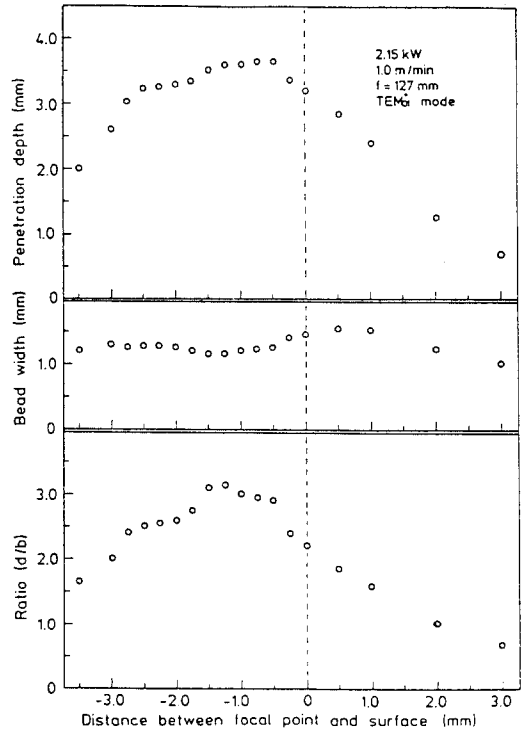


Fig. 3 Effect of focal position on penetration depth, bead width and ratio(depth to width) as a function of D_f at TEM_{01}^* beam mode in 4mm thick carbon steel

여 보면, 6kW 레이저를 사용한 Willgoss 등⁴⁾은 최적의 초점 위치가 재료 표면 아래 1mm이하이며, Alexander⁵⁾는 10kW 레이저를 사용하여 재료 표면 아래 2mm가 최적의 초점 위치라고 보고하고 있다. 이처럼 레이저 최대 출력 및 레이저 발진 방식에 따라서 최적의 초점 위치는 조금씩 달라짐을 알 수 있다.

최적의 초점 위치가 재료 표면 아래에 있는 것은 최초에 레이저 빔이 재료 표면에 도달하여 키홀(keyhole)을 형성할 때, 렌즈에 의하여 모아진 레이저 빔이 키홀 벽면에서 반사되어 다시 초점이 맞추어져서 빔 에너지가 재료 내부 쪽으로 다시 보내어지기 때문으로 생각된다. 이때 입사 레이저 빔은 90°보다 약간 작으며, 레이저 빔의 초점이 재료 바로 위일때는 입사각의 영향으로 재료 표면에서 레이저 빔이 더 많이 위로 반사되어 에너지 손실이 크기 때문이다.

Fig.4은 4mm 두께의 탄소강에 서로 다른 위치

의 초점에 따라 맞대기 용접한 비이드 형상을 보여 주고 있다. Fig (a)는 초점 위치가 재료 표면 아래 2.0mm이고, (b)는 0.5mm이다. 모두 용입이 충분히 이루어졌지만 비이드 형상은 상당히 다르게 나타나고 있는데, Fig에서와 같이 (a)는 언더컷이 심하게 발생하였고 재료 하부쪽 부분이 더 많이 용융 되어 있으며, (b)는 비이드 형상이 만족스럽게 이루어져 있다.

3.2. 보호 가스의 유량이 용입 깊이에 미치는 영향

Fig.5는 헬륨과 아르곤을 보호 가스로 사용하였을때 유량이 용입 깊이에 미치는 영향을 보여 주고 있는데, 비이드 모양에 따라 세 구역으로 구분할 수 있다. I 구역에서는 용입이 작은 비이드를 형성하고 있고, II 구역에서는 좋은 비이드를 형성하고 있다. 그러나, III 구역에서는 비이드 내부에 기공을 형성하여 거의 용접이 불가능함을 알

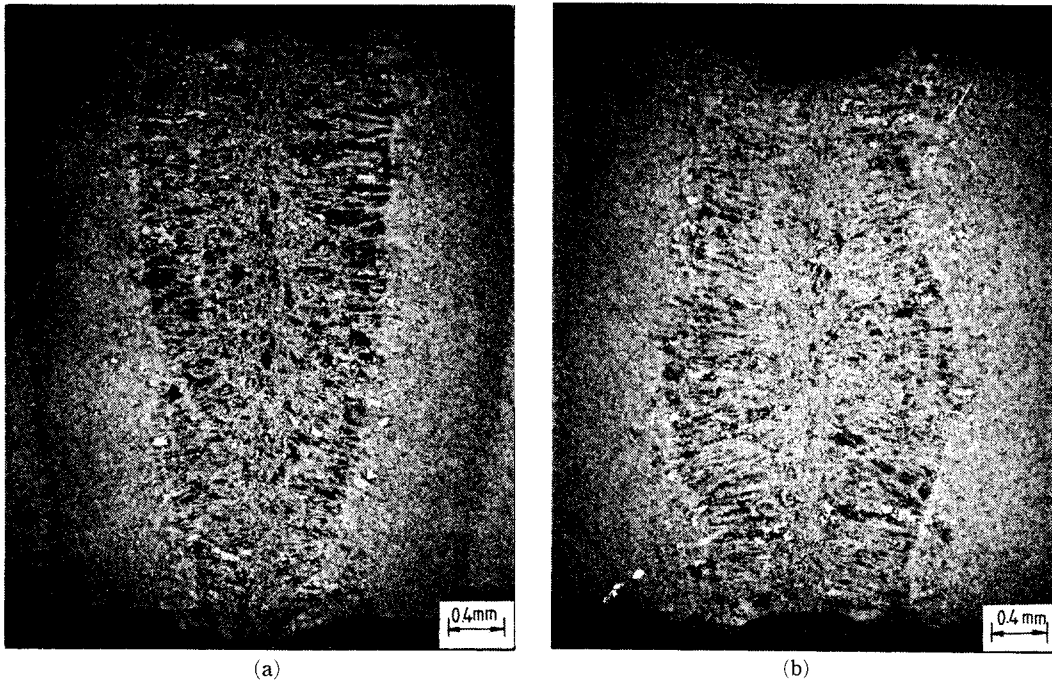


Fig. 4 Comparison of bead sections between full penetration welds produced at different focal positions, P=2.0 kW and V=0.5 m/min in 4mm thick carbon steel (2% Nital)

- (a) Focal position, 2.0mm below the material surface
- (b) Focal position, 0.5mm below the material surface

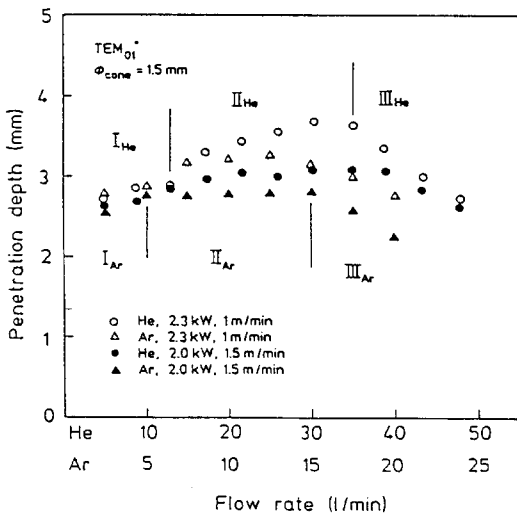


Fig. 5 Effect of shielding gas on penetration depth as a function of the flow rate of He and Ar, at TEM₀₁* beam mode and 1.5mm diameter of copper nozzle

수 있었다.

보호 가스의 역할은 몇가지의 기능을 갖고 있는데, 용접부로부터 발생되어 올라 오는 spatter나 fume으로부터 렌즈를 보호해 주고, 재료 표면 위에 발생되어 있는 플라즈마를 불어 주어서 레이저 빔 에너지 전달을 원활하게 하며, 용융 금속을 공기로부터 보호해 준다. 특히 레이저 출력이 클수록 플라즈마 발생은 더 심해지는데 이때 보호 가스의 영향은 매우 높아진다^{6),7)}.

Fig 에서 알 수 있듯이 보호 가스의 유량이 증가할수록 용입이 깊어지는 것을 알 수 있는데, 헬륨의 유량이 34.8 l/min, 아르곤의 유량이 15 l/min부터는 용입이 감소됨을 알 수 있다. 헬륨이 아르곤보다 보호가스로써 더 좋은 결과를 보여 주고 있는데, 이는 헬륨의 이온화 에너지(24.46 eV)가 아르곤(15.68 eV) 보다 높기 때문인 것으로 생각된다⁸⁾.

I 구역은 헬륨의 유량이 13.0 l/min 이하, 아

르곤의 유량이 5.0 l/min 이하인데, 비이드 폭이 약간 넓으면서 적은 깊이의 용입이 이루어졌었다. 이것은 유량이 적어서 레이저 빔 에너지를 흡수하는 플라즈마 제거가 유효하게 작용하지 못하여, 키흐를 위에 많이 생성된 플라즈마가 매우 높은 온도를 유지하기 때문에 재료 표면을 녹이는 다른 열원으로써 작용하여 넓은 비이드를 만드는 역할을 한 것으로 판단된다.

II구역은 헬륨에 있어서는 유량이 13.0에서 34.8 l/min 범위 이고, 아르곤은 유량이 5.0에서 15.0 l/min 범위로 양호한 비이드가 형성 되었는데, 이러한 범위의 유량은 플라즈마 제거에 좋은 효과를 미치기 때문이며, 유량 증가에 따라서 용입 깊이도 점차적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 특히 P=2.3kW, V=1.0 m/min인 경우가 P=2.0kW, V=1.5 m/min의 경우보다 증가하는 경향이 뚜렷하였으며, 단위 길이당 열용입량이 클수록 보호 가스의 플라즈마 제거 역할이 큼을 알 수 있었다. 키흐를 위에 작용하는 보호 가스의 압력이 레이저 용접중 생성된 금속 이온의 압력보다 약간 높은 것이 플라즈마 제거에 가장 좋은 결과를 줌을 알 수 있다.

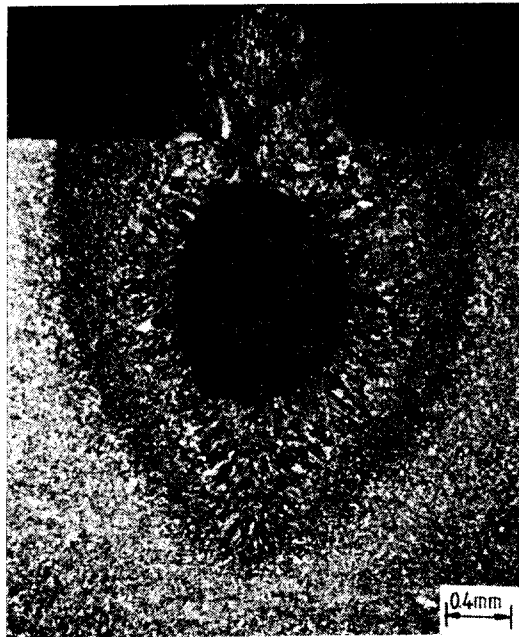


Fig. 6 Characteristic of laser weld bead under the flow rates of He, 43.5 l/min

III구역은 헬륨의 유량이 34.8 l/min 이상이고 아르곤의 유량이 15.0 l/min 이상인데, humping 비이드가 발생하는 범위이다. 유량 증가와 더불어서 용입 깊이가 급격히 감소되고, 커다란 기공이 용접부 중앙에 발생하거나 크랙이 형성 되었는데, 이것은 보호 가스의 압력이 금속 이온 압력보다 높기 때문에 용융 금속이 키흐를 주변에 넘쳐 흐르거나, 용융 금속의 냉각 도중 심한 교란을 주기 때문이다. 이때 Fig.6은 헬륨 유량이 43.5 l/min 일때 생성된 연속적인 기공을 보여 주고 있다.

3.3. 용입 깊이와 비이드 폭에 미치는 레이저 출력과 용접 속도의 영향

Fig.7은 재료 표면 아래 1.0mm에 초점을 맞추고 TEM₀₀ 빔을 사용하여 구한 것인데, 레이저 출력과 용접 속도가 용입 깊이와 비이드 폭에 미치는 영향을 보여 주고 있다. 이때 레이저 빔의 반경은 120μm이었다. 레이저 용접에 있어서 용입 깊이는 레이저 빔 에너지 밀도에 달려 있다.

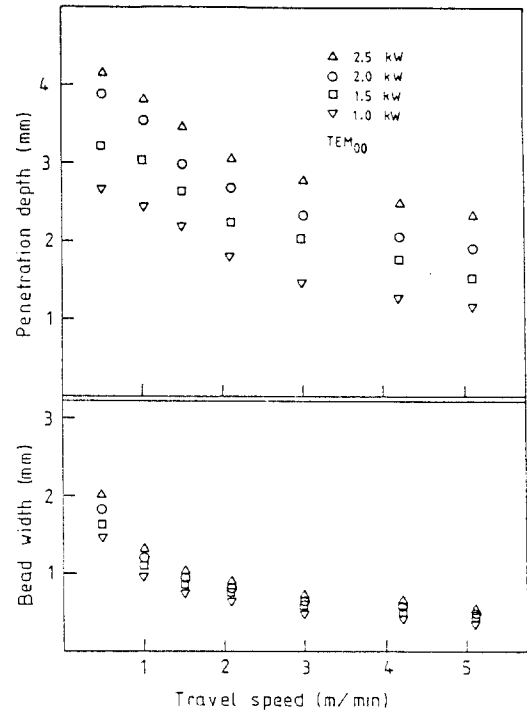


Fig. 7 Penetration depth and bead width as a function of travel speed at various laser powers with TEM₀₀ beam mode in 6mm carbon steel(D_r=-1.0mm)

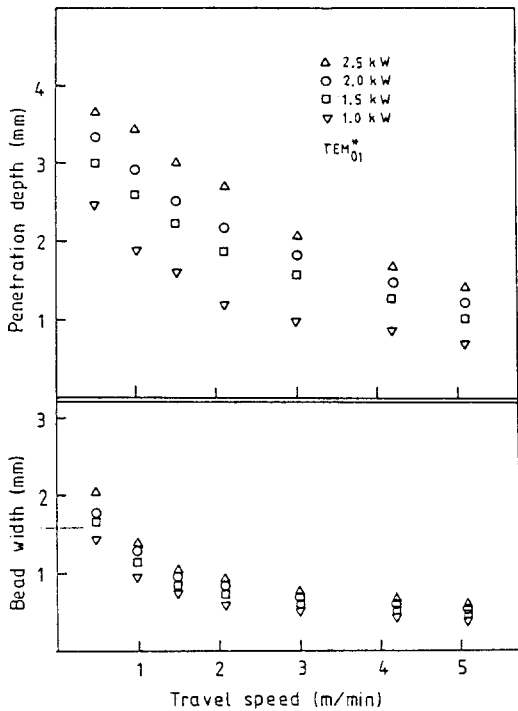


Fig. 8 Penetration depth and bead width as a function of travel speed at various laser powers with TEM₀₁* beam mode in 6mm thick carbon steel(D_r=-1.0mm)

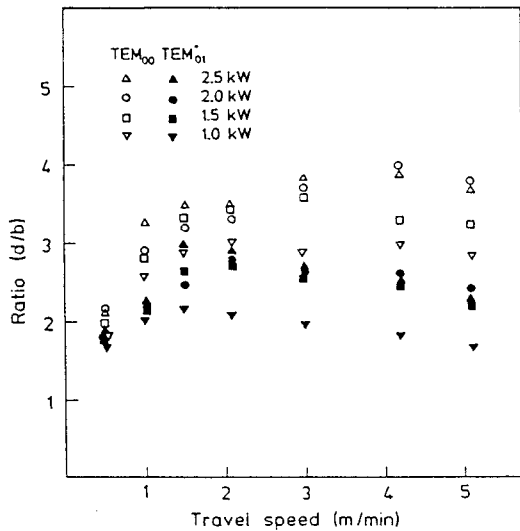


Fig. 9 Comparison between TEM₀₀ and TEM₀₁* beam modes on ratio of penetration depth to bead width as a function of travel speed at various laser powers in 6mm thick carbon steel(D_r=-1.0mm)

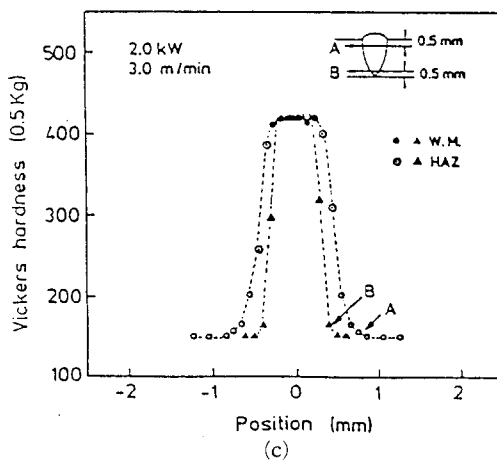
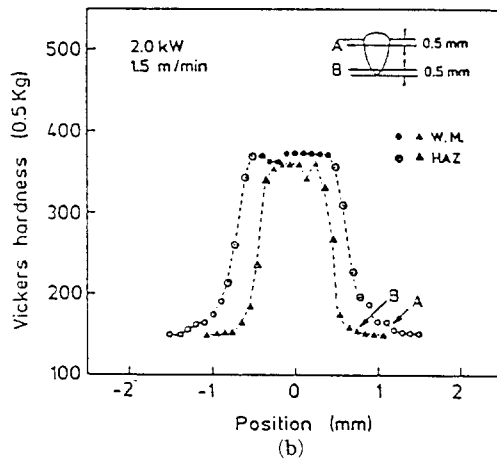
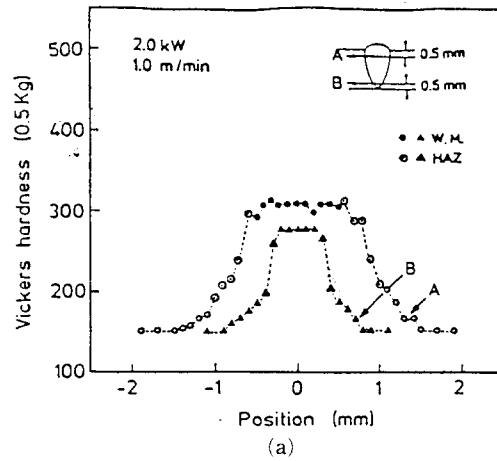


Fig. 10 Microhardness distributions of bead-on-plate welds at P=2.15kW in 4mm thick carbon steel
(a) V=1.0 m/min, (b) V=1.5 m/min, (c) V=3.0 m/min.

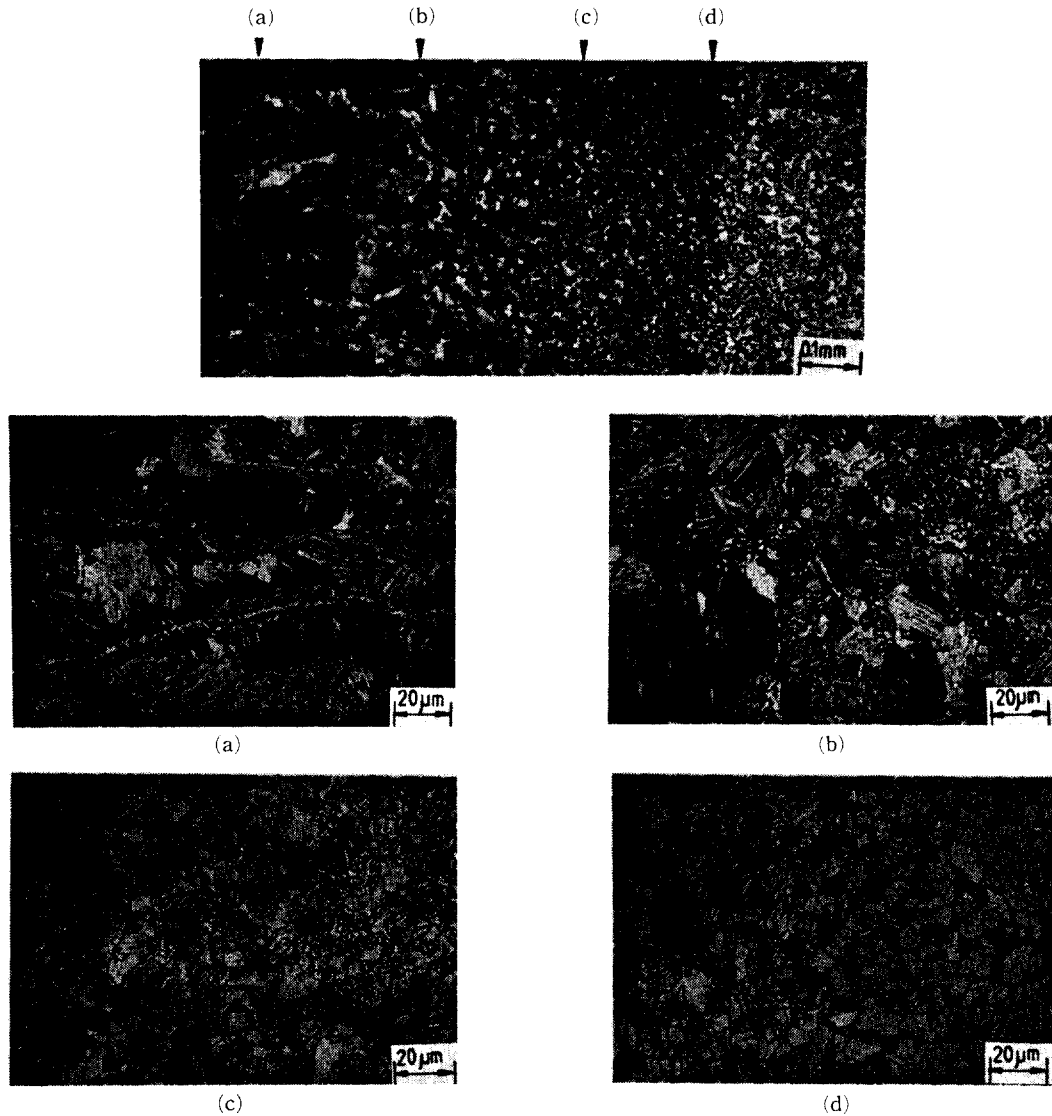


Fig. 11 Microstructures of laser weld made at P=2. 0kW and V=1.0 m/min in 6mm thick carbon steel (2% Nital) (a) Fusion zone, (b) (c) and (d) HAZ

Fig. 8은 TEM₀₁* 빔을 이용하여 레이저 출력과 용접 속도가 용입 깊이와 비이드 폭에 미치는 결과를 보여 주고 있는데 빔 크기가 TEM₀₀ 빔에 비해서 크기 때문에 용입 깊이는 전자에 비하여 적으며 비이드 폭은 더 넓다. TEM₀₁* 빔의 반경은 약 200 μ m이었다. 그러나 TEM₀₁* 빔을 사용하는 경우에 레이저 최대 출력을 증가시킬 수 있는 장점 때문에 용접하는 데에는 큰 문제가 없었다.

Fig. 9는 TEM₀₀ 빔과 TEM₀₁* 빔을 사용하였을 때 비이드 폭에 대한 용입 깊이의 비(용입비)를 나타내고 있다. TEM₀₀ 빔이 TEM₀₁* 빔보다 더 깊은 용입을 얻을 수 있는데, TEM₀₀ 빔인 경우에 용접 속도가 약 4.1 m/min에서 용입비가 최대이었고, TEM₀₁*인 경우는 1.5 m/min에서 최대가 되며 용접 속도의 증가에 따라서 점차 감소되고 있으며, 저탄소강 용접에 있어서는 2 내지 4의 용입비가 얻어짐을 알 수 있었다. 두 경우의

레이저 빔 모우드에 있어서 용접 속도가 0.5 m/min 미만에서는 용입 깊이의 증가는 이루어지지 않고 비이드 폭이 급격히 증가하여 좋은 용접 결과를 얻을 수 없었다. 또한 spatter가 많이 발생하여 노즐과 렌즈에 심한 손상을 줄 위험이 있었다.

3.4. 금속 조직과 경도

Fig. 10은 4mm 탄소강에 2.15kW의 레이저 출력과 1.0, 1.5, 3.0 m/min의 용접 속도로 용융된 금속부의 마이크로 경도이다. 용접 속도가 증가할수록 냉각 속도가 매우 빨라서 경도가 증가하고 있다⁹⁾. Bead-on plate이기 때문에 윗쪽 비이드의 경도가 더 높는데 용접 속도가 증가할수록 그 차이는 감소되고 있다. 종래의 용접법과 비교해 보면 매우 높은 경도를 얻게 되는데 특히 용융부가 열영향부보다 경도가 더 높음을 알 수 있다. 이같은 경향은 실제 맞대기 용접에서도 같은 결과가 나타나며, 다른 연구 결과와 일치한다^{4),6)}. Fig. 11은 2kW의 레이저 출력과 1.0 m/min의 속도로 용융된 6mm 탄소강의 금속 조직을 보여주고 있다. 냉각 속도가 매우 빨라서 용융부는 거의 모두 마르텐사이트 조직으로 변하고, 열영향부는 마르텐사이트 조직과 베이나이트 조직으로 변하였다. 용융부에 생성된 저탄소 마르텐사이트는 Ms 점이 높아서 autotempering이 일어나 비교적 높은 인성치를 갖게 되므로 재료 인성 저하에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 생각된다¹⁰⁾.

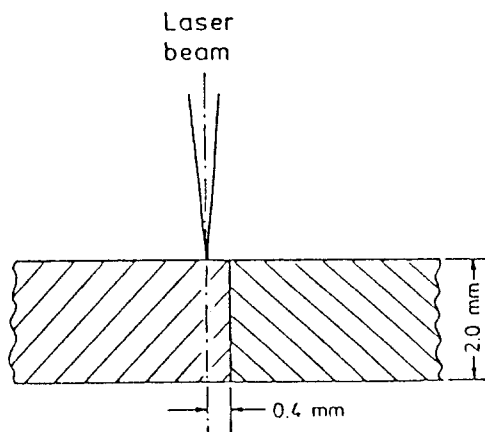


Fig. 13 Effect between the focused laser beam and the joint line offset for the given welding conditions. The 0.4mm offset is too wide for the fusion zone width made at P=2.0kW and V=2.1 m/min

3.5. Weldability lobe

Fig. 12는 2mm 저탄소강에서 용접 가능한 범위에 대한 결과를 레이저 출력과 용접 속도의 함수로써 나타낸 것이다. 0.5 m/min의 용접 속도에서는 용접부 중앙에 커다랗고 연속적인 기공이 발생하였고, Fig의 아래 부분은 용입이 충분히 이루어지지 않았다. 박판 재료의 레이저 용접은 접합부에 맞추어진 빔의 크기가 수 백 마이크로이기 때문에 정확한 용접 위치 설정이 요구된다. Fig. 13은 레이저 빔이 결합부에서 0.4mm 떨어져서

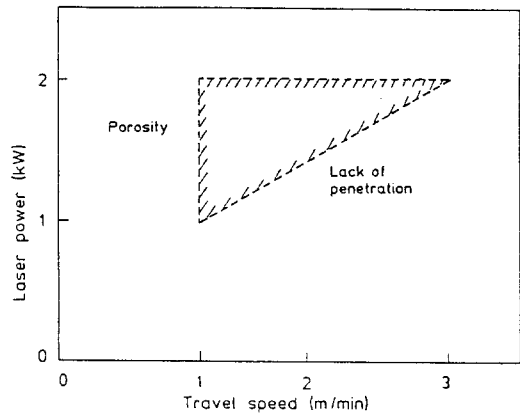
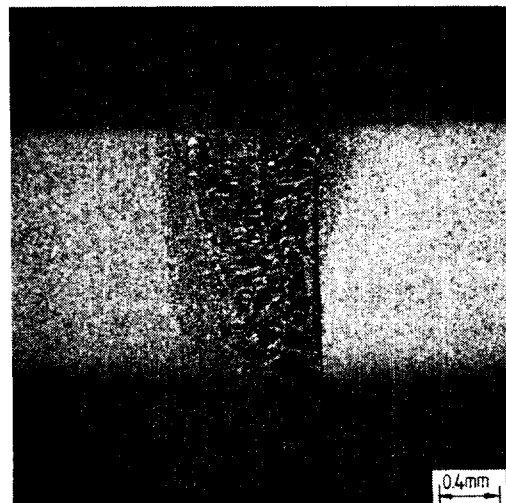


Fig. 12 Butt joint weldability envelopes indicating the laser power and travel speed combinations which produce porosity-free full penetration welds in 2mm thick carbon steel



용접하였을때, 겉보기에는 상하부 비이드가 완벽하지만 접합이 완전히 이루어지지 않은 것을 보여주고 있다.

4. 결 론

본 연구는 3kW CO₂ 레이저를 사용하여 저탄소강의 레이저 용접시의 특성을 연구조사한 것으로서 다음과 같은 결론을 얻었다.

3kW급 CO₂ 레이저에 있어서 최적의 촛점 범위는 재료 표면 아래 0.5에서 1.5mm이다. 이 범위에서 최대의 용입 깊이와 용입비를 얻을 수 있는데, 최적의 촛점 범위는 레이저 출력, 빔 모드와 용접 속도에 거의 영향이 없었다. 보호 가스의 유량에 따라서 세 가지 형태의 비이드를 얻을 수 있는데, 헬륨인 경우 13.0에서 34.8 l/min 사이와 아르곤인 경우 5.0에서 15.0 l/min 범위의 유량일 때 깊고 좋은 비이드를 얻을 수 있었으며, 헬륨이 아르곤보다 보호 가스로서 더 좋은 결과를 나타내었다. 레이저 에너지 밀도가 증가할수록 용입 깊이는 증가하였으며, TEM₀₀ 빔을 사용한 경우에는 용접 속도가 4.1 m/min에서 최대 용입비가 얻어졌고, TEM₀₁* 빔인 경우에는 1.5 m/min의 용접 속도에서 최대 용입비가 얻어졌다. 저탄소강의 레이저 용접으로 얻을 수 있는 용입비는 용접 속도와 빔 모드에 따라서 약 2내지 4로 나타났다.

참고문헌

1) D. Belforte and M. Levitt : The industry laser

- annual handbook, PennWell Pub. Co., 1986.
- 2) R. Walker : Applying multikilowatt CO₂ lasers in industry, Lasers & Applications, Vol. 4, (1984), pp. 61-69.
 - 3) R. J. Bruno et al. : Laser beam shaping for maximum uniformity and minimum loss, Lasers & Applications, Vol. 4, (1987), pp. 91-94.
 - 4) R. A. Willgoss et al. : Laser welding of steels for power plant, Optics and Laser Technology, Vol. 4, (1979), pp. 73-87.
 - 5) J. Alexander : The effect of process variables on arc augmented laser welding, Sym. Optika, (1980), pp. 205-210.
 - 6) Y. Arata et al. : Effect of assist gas on bead formation in high power laser welding, Trans. of JWRI, Vol. 12, No. 2, (1983), pp. 1-6.
 - 7) F. D. Seaman : The role of shielding gas in high power CO₂ laser welding, SME Tech. Paper, MR77-982, 1977.
 - 8) E. L. Baardsen et al. : High power welding of sheet steel with a CO₂ laser, Welding J., Vol. 52, No. 4, (1973), pp. 227-229.
 - 9) J. D. Kim and R. V. Subramanian : Heat flow in laser beam welding, 4th Int'l Conf. on Welding and Melting by Laser Beam, Vol.1, Cannes, France, Sept., (1988), pp. 175-182.
 - 10) K. Eastering : Introduction to the physical metallurgy of welding, Butterworths & Co, 1983.