

研究論文

테일러드 블랭크용 박판 강재의 레이저 용접성(I)

- 용접부 형성에 미치는 공정변수의 영향 -

김기철* · 이기호** · 이목영*

Laser Weldability of Sheet Steels for Tailored Blank Manufacturing(I)

- Effect of Process Parameters on the Weld Formation -

K. C. Kim*, K. H. Lee** and M. Y. Lee*

Key Words : Laser Welding, Steel, Thin Sheet, Tailored Blank, LIP Control, Welding Parameter, Weld Formation

Abstract

This paper deals with the effect of laser welding parameters on the weld formation. Thin steels for automotive application were prepared so as to be welded with high power carbon dioxide laser system. Major process parameters were position of focus and travel speed. The effect of shielding gas was also discussed by employing the high speed photometry. Test results showed that the optimal position of focus varied in accordance with the joint configuration; bead-on-plate, butt or lap welding. It was recommended that the position of focus for the lap welding be located at slightly inner part of the material to be welded. In this case, however, it was noticeable that the weld penetration ratio, d/t_0 dropped drastically at the critical region. Results also demonstrated that both the bead width and penetration reduced as the travel speed increased. The penetration ratio showed two distinct regions; stabilized zone at the lower range of the travel speed and sudden drop zone at the higher range of travel speed. Lower limit of the penetration for acceptable weld was proved to be about 90% of the parent metal thickness based on the physical properties of the weld. Mixed gas application for both the shielding of molten metal and laser induced plasma control was recommended as far as the penetration was concerned.

* 1997년 10월 2일 접수

* 정희원, 포항산업과학연구원 접합가공연구팀

* 정희원, 전 포항산업과학연구원 접합가공연구팀

1. 서론

우리나라의 산업 제품 중에서 자동차는 세계 교역 시장의 최대 상품이 되었으며, 관련 산업에 대한 파급 효과가 크기 때문에 자동차 산업은 그 중요성이 높다. 그러나, 자동차에 대한 사회 환경과 수요가 요구 특성이 점차 복잡, 다양화하고 고품질화되는 등 제조 환경은 까다로워지고 있으며, 이에 대응하여 꾸준한 기술 개발이 이루어지고 있다. 특히, 경량 신소재의 개발, 엔진 및 구동계의 고성능화, 청정에너지, 배기가스 저감기술 등을 포함하여 차체 경량화 및 안전성 향상은 자동차 관련 기술의 핵심이 되고 있다. 한편, ULSAB(Ultra Light Steel Auto Body) 프로젝트는 이러한 목적 달성을 위한 기술 개발의 예이며, 레이저 용접을 이용한 일체형 패널(Tailored Blank: 이하 테일러드 블랭크) 제작도 이 프로젝트의 핵심 기술이다¹⁻⁵⁾. 테일러드 블랭크 용접은 기본적으로, 성형 전의 박판 강재를 고속으로 용접하여야 하기 때문에 비교적 두께가 있는 소재의 용접에서는 중요시되지 않던 요소들이 간과할 수 없는 용접 불량을 일으키기도 한다. 또, 레이저 용접은 매우 높은 에너지 밀도의 집속 광을 사용하는 용접 방법이므로 용접부의 금속학적 특성이 기존의 아크 용접과는 크게 다르고 관리하여야 할 용접 공정 변수도 다양하다⁶⁾. 따라서, 본 연구에서는 이러한 여건을 고려하여 자동차용 박판 강재를 대상으로 레이저 용접을 실시함에 있어서 용접성에 미치는 각종 용접 공정 변수의 영향을 조사하였다. 또, 각종 변수들이 용접부 품질에 미치는 영향을 정량화하고, 그 결과

를 이용하여 보다 효율적인 용접 조건 설정의 기틀을 마련하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 시험재

실험용 강재는 자동차 차체용으로 사용되는 냉연 및 고장력강(시험재 1-4)과 도금강(시험재 5)이었으며, 두께의 범위는 0.65~1.2mm였다. 또, 플라즈마의 영향을 보기 위하여는 두께 5.0mm의 소재를 이용하였다. Table 1은 본 실험에서 사용된 시험재의 화학적 성분과 인장강도 및 그들 각각의 두께를 나타내고 있다

2.2 용접방법

용접은 고출력 탄산가스 레이저 장치를 이용하여 실시하였다. 각종 용접 변수의 영향을 파악하기 위하여는 bead-on-plate(이하 BOP) 용접을 포함하여 자동차 제조에서 가장 중요하게 사용될 수 있는 맞대기 용접과 겹치기 용접 실험도 실시하였다. 맞대기 용접과 겹치기 용접에서는 용접 전 이음부 간극이 없는 밀착 상태를 원칙으로하여 시험편을 정렬하였으며, Table 2는 용접 조건을 나타낸 것이다. 용접시 집광 광학계는 초점거리 125mm의 렌즈를 사용하였고, 용접 과정에서 플라즈마 제어를 위한 별도의 보조 노즐은 사용하지 않았다. 그러나, 분위기 가스의 유량을 조절하는 방법으로서 플라즈마의 억제와 함께 최적의 용접부가 얻어지

Table 1. Chemical and physical properties of test materials

Steel	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Al	UTS* (MPa)	Thick. (mm)
1	0.038	-	0.185	0.009	0.007	0.008	0.012	0.038	360	0.8
2	0.0032	0.006	0.279	0.076	0.007	0.021	0.017	0.035	365	0.65
3	0.035	0.003	0.187	0.010	0.007	0.007	0.010	0.060	371	1.2
4	0.038	0.004	0.516	0.085	0.012	0.019	0.015	0.041	423	1.0
5	0.028	-	0.161	0.010	0.007	0.009	0.012	0.041	332	0.78
6	0.140	0.430	1.020	0.018	0.005	-	-	0.035	490	5.0

*Tensile strength

도록 하였다. 용접 과정에서 플라즈마의 거동은 고속촬영 장치를 이용하여 기록 및 분석하였고⁷⁻⁹⁾ 그 결과는 용접 품질을 평가하는데 이용하였다.

Table 2. Laser welding conditions

Applied laser power	2.7kW
Beam quality	Multi mode/CW
Travel speed	1,500~4,200mm/min
Focusing	ZnSe lens/125mm focal length
Position of focus	(+)4.0~(-)4.0mm
Shielding	Argon through straight nozzle

2.3 용접성의 해석

용접 후의 시험편은 표면과 단면을 실체현미경과 금속현미경을 사용하여 용접부의 품질을 조사하였고, 인장시험 결과를 이용하여 용접부의 기계적 특성을 비교하였다. 용접부 인장강도는 하중 50kN 용량의 유압식 시험기를 이용하여 인장 속도 10mm/min로 시험을 행하였다. 용접부의 단면 형상은 절단, 연마 및 부식 후 그 표면을 관찰하였는데, 상부 및 하부 비드의 폭, 용입 깊이 등을 측정하여 용접 속도와의 상관성을 평가하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 초점위치의 영향

레이저 용접에서는 집속 에너지의 위치가 용접부 형성과 용입 깊이에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다¹⁰⁾. 기존의 문헌에 따르면 초점이 재료의 표면보다 위(+방향)에 존재하면 에너지 밀도의 저하에 의하여 피가공물이 충분히 용융시키지 못하며, 반대로 적정량 이상으로 재료내부(-방향)에 존재하면 용입 비가 저하한다. 따라서, 초점위치를 정확히 선정하여 에너지 밀도를 높임으로써 단 시간에 keyhole 형성조건을 만들어 레이저의 흡수율을 높일 필요가 있다. 또, 적절한 초점위치는 재료의 종류나 두께에 따라 약간의 차이가 있는데 그 이유는 초점의 위치에 의하여 keyhole 형성 기구가

변하면서 레이저 빔과 재료와의 상호작용에 영향을 주기 때문이다. Fig. 1은 시험재 1(접치기 용접) 및 시험재 4(BOP 용접)를 이용하여 실시한 실험 결과로 초점 위치가 용입 특성에 미치는 영향을 각각의 용접법 즉, BOP, 맞대기 및 접치기 용접부에 대하여 조사한 것이다. 이 그림에 의하면 BOP 용접에서는 비드 천이현상¹⁰⁾이 에너지의 집중점을 재료의 표면과 1mm내부에 존재시키는 영역에서 발생하였다. 그 결과, 재료 내부의 1~3mm 구간에 초점을 형성시키면 용입 비 1.0 이상의 완전 용입 상태를 얻을 수 있었다. 그러나, 맞대기 용접에서는 앞서의 실험 결과 보다는 다소 높은 표면~(+1)mm의 위치에서 비드 천이현상이 관찰되고 있다. 한편, 접치기 용접에서는 오히려 (-)0.5~(-)1.0mm 위치에 천이점이 존재하여 앞의 두 경우와는 대조적인 모습을 보였다. 이러한 결과를 종합하여 볼 때, 맞대기 용접에서는 용접선 정렬을 엄격하게 밀착 상태로 관리한다고 하더라도 실제로는 약간의 간극이 존재하고 그것이 재료의 내부 방향으로 레이저 에너지가 손실되는 양의 감소가 고려되었다. 또, 완전한 keyhole의 형성은 용접부 내부의 기체 압력을 낮추므로 집속 에너지의 반대 방향으로 작용하는 플라즈마의 흐름을 상대적으로 감소시켜 비드 천이점을 높였던 것으로 생각되었다. BOP용접과 접치기 용접에서는 이러한 미량의 간극 부재로 인하여 keyhole이 형성되었다고 하더라도 용융 전방에서의 열전달 손실과 압력 증가로 용접부의 전진이 어느 정도는 억제 당할 것으

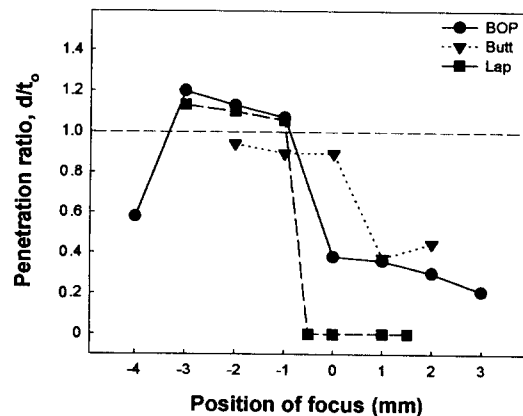


Fig. 1 Effect of joint preparation on the bead transition shift

로 추정되었으나 이러한 현상은 향후 정밀한 실험으로 구명되어야 할 부분으로 생각되었다. 이 실험 결과에서 용입 비가 1.0을 초과하는 것은 완전 용입이 되었을 경우 비드의 뒷살이 형성되며 이 부분까지를 용입된 것으로 계산하였기 때문이다. 또, 초점이 표면보다 위에 존재할 경우에 BOP 용접과 맞대기 용접에서는 어느 정도의 용접부를 형성하고 있었으나, 겹치기 용접에서는 비드 천이점을 지나면서 하부 소재의 용입이 전혀 이루어지지 않는 특징을 보였다. 이러한 이유는 피용접재 정렬의 문제로 겹치기 간극 관리의 중요성을 말하여 주는 사실로 생각되었다. Fig. 2는 용접 후 비드 형성에 미치는 초점 위치 설정 조건에 관한 실험 결과이다. 이 실험에서는 BOP 용접과 맞대기 용접의 결과를 보여주고 있는데, 그림의 위 부분은 용접 후 그 단면을 절단하여 비드의 모양을 측정한 것이다. 천이 영역에서 비드의 넓이는 표면과 이면 다 같이 급격한 하락을 보여주고 있으며 앞의 실험 결과에서 용입이 깊은 영역은 비드의 폭 또한 넓음을 알 수 있다. Fig. 2의 아래 부분에는 용접 비드의 단면 방향에서 상부와 하부가 어느 정도 대칭을 이루는가를 나타내는 변수인 비드폭 비를 보이고 있다. 그 결과에 의하면 BOP 용접의 경우는 초점 위치가 재료 내부 (-)1mm에서 (-)3mm까지 거의 변화가 없었고, 맞대기 용접에서는 재료 표면을 조사하였을 경우 약 3.3이었으나, (-)1mm와 (-)2mm에서는 각각 약 2.0 및 약 1.8로 차이를 보였다. 이러한 사실은 BOP 용접에서의 상, 하 비드 모양보다 맞대기 용접의 경우가 더 대칭적임을 말하

여 주는 것으로 테일러드 블랭크 제조와 같이 용접 후 많은 양의 성형을 받는 용접부에서는 중요한 의미를 가지는 것이다. 또, 앞에서도 언급하였듯이 맞대기 용접 공정이 BOP 용접 공정보다 용접 과정에서 모재로 빠져나가는 열 손실량이 낮고 용융부 안에서의 압력도 낮기 때문에, BOP 용접부에서는 삼각형을 보이던 비드의 모양이 맞대기 용접에서는 직사각형에 가까운 사다리꼴을 보이는 것이다. 본 실험 조건에서는 두 경우 다같이 비드 천이 영역보다는 적어도 1mm 정도 재료의 내부에 집속된 레이저 에너지를 위치시키는 것이 용접 후 성형을 염두에 둔 비드 형상 관리에서 유리함을 알 수 있다. 이러한 현상은 기하 광학계의 특성상 재료의 표면을 기준으로 상, 하 같은 거리에 초점이 존재하면 집속 에너지의 강도는 동일하다고 생각할 수 있으나, 재료 내부에 집속점이 존재할 경우에는 집속 에너지와 재료와의 상호 반응에 의하여 형성된 keyhole 내부에서의 다중반사 효과로 입사 에너지의 효율을 높일 수 있기 때문이다. 그러나, 초점이 표면 위에 있을 경우에는 최초에는 같은 입열 에너지가 표면에 주어져 keyhole을 형성한다고 하더라도 집속 에너지가 재료 내부를 향하여 진행할수록 초점으로 부터 멀리 떨어지기 때문에 에너지 밀도의 저하와 함께 지속적인 다중반사 효과를 기대하기 어렵게 된다. Fig. 3과 Fig. 4는 초점 위치 설정이 비드 형성에 미치는 영향을 확인 하기 위한 용접부 단면 사진이다. 이 사진에서는 비드 천이 한계 영역에서 용접부가 어느 정도 민감하게 이루어지는가를 알아보기 위하여 BOP 용접부(Fig. 3)에서는 초점 위치 (-)1mm(a)와 0mm(b)를, 그리고 맞대기 용접(Fig. 4)에서는 0mm(a)와 (+)1mm(b)의 결과를 나타내고 있다. 이 실험 결과에 의하면, 두 경우 다같이 용입이 이루어지는 영역에서는 완전한 용접부를 보이다가 한계 영역에서는 용접부를 거의 만들지 않고 있다. 이와같이 초점 위치 설정의 한계 영역에서는 1mm 정도의 오류에 의하여도 용접부 형성에 매우 큰 차이를 보이기 때문에 테일러드 블랭크 용접과 같이 박판 강재에 레이저 용접법을 적용할 경우에는 주의하여야 함을 알 수 있다. 사진에서 완전 용입을 이루었던 용접부를 자세히 관찰하면 다음과 같은 사실을 발견할 수가 있다. 즉, BOP 용접에서는 비드의 단면 모양이 맞대기 용접 비드의 경우에 비하여 더 삼각

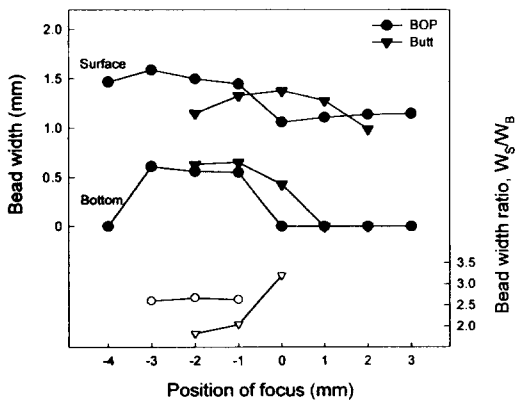


Fig. 2 Effect of focal position on the weld formation

형에 가까운 형태를 보인다. 또, 상부와 하부 비드의 덧살 모양도 BOP의 경우는 맞대기에 비하여 뚜렷하고 높다. 맞대기 용접에서는 용접선의 간극을 최대한 좁힌다고 하더라도 실질적으로 완전 밀착이 어렵기 때문에 발생하는 현상으로 판단이 된

다. 이와같은 현상은 용접 후 성형 가공을 받는 시험재의 경우 유리한 부분이 있으나, 실제의 용접에서는 긴 용접선을 따라서 용접이 이루어져야하고, 박판 소재이기 때문에 발생할 수 있는 약간의 변형 또는 용접선 정렬의 부정확성이 용접 후 d/t_0 특성을 크게 해칠 수 있으므로 주의하여야 한다.

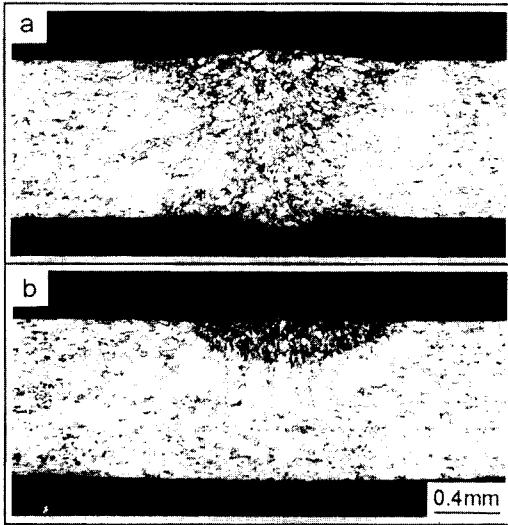


Fig. 3 Effect of focal position on the weld formation (BOP)

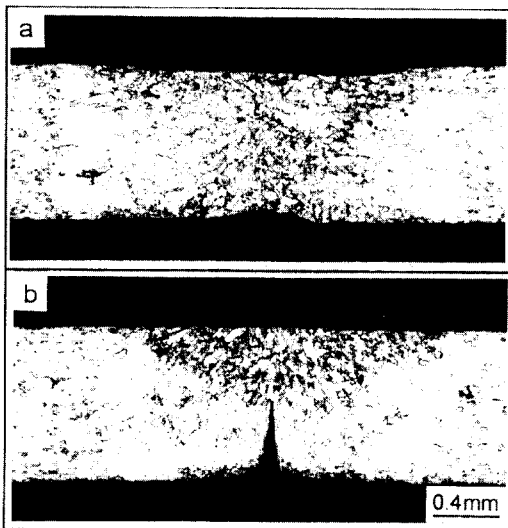


Fig. 4 Effect of focal position on the weld formation (butt)

3.2 용접 속도의 영향

Fig. 5는 용접 속도가 비드의 형상에 미치는 영향을 조사한 것이다. 전반적인 경향은 용접 속도가 증가할수록 비드의 폭이 감소하고 있으나 상부 비드의 폭 감소를 보다 하부 비드의 폭 감소율이 더 큰 것으로 나타났다. 그러나, 실험 결과를 자세히 살펴보면, 상부 비드의 폭은 용접 속도에 따라서 크게 2영역 즉, 용접속도가 변화하여도 비교적 일정한 비드 폭을 유지하는 영역(그림에서 zone I)과 속도에 반비례하여 좁아지는 영역(그림에서 zone II)으로 구별 되었다. 본 실험 조건에서 I 영역은 용접 속도 50mm/s 이상이었으며, 그 때의 비드폭은 1.2mm 가량이었다. 이와는 대조적으로 하부 비드의 폭은 전 구간에서 용접속도 변화에 반비례하여 감소하였고 실험값의 산포도 비교적 컸다. 또, 이 실험 결과에 의하면, 레이저 출력 2.7kW의 조건에서 자동차용 박판 강재의 레이저 용접시 하부 비드가 형성될 수 있는 최대 용접속도는 58~67mm/s 범위로 판단이 되었으나, 용접 조건 설정의 민감도는 소재의 두께가 감소할수록 커져서 두

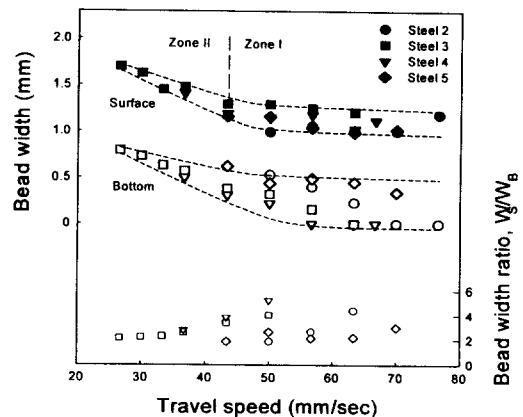


Fig. 5 Effect of travel speed on the bead formation

계 0.65mm의 강재를 참고로하여 볼 때, 용접 속도 증가에 따른 상부 비드 폭의 변화량이 매우 완만한 반면 하부 비드 폭의 변화량은 급격함을 알 수 있다. 그림에서 아래 부분에는 상, 하부 비드의 폭 비를 나타내고 있다. 상부 비드의 폭 변화보다 하부의 산포가 컸기 때문에 폭 비도 넓은 띠를 이루고 있었다. 이상과 같은 실험 결과는 도금 강재인 시험재 5의 경우에도 같은 경향을 보이고 있었다. Fig. 6은 용접 속도가 용입 깊이에 미치는 영향을 조사한 것으로 용입비도 용접 속도가 증가함에 따라 2영역으로 구별되었다. 용접 속도가 비교적 낮은 조건에서는 용접 입열량이 충분하기 때문에 용입비도 90% 이상의 값을 나타내면서 안정된 영역을 이루는 반면, 용접 속도가 높아지면 용입비는 급격히 감소하는 영역이 존재하였다¹⁰⁾. 이렇게 용입비가 떨어지는 영역의 용접 속도는 소재의 두께에 영향을 받고 있었는데, 두께 0.65(시험재 2) 및 1.0mm(시험재 4)의 예를 보면 각각 70 및 50mm/s 내외로 두께가 감소할수록 용입비 안정화 영역은 고속측으로 이동되고 있었다. 한편, Fig. 7은 용접 속도 증가에 따른 비드 형상의 변화와 용접부 정렬의 중요성을 알아보기 위한 실험 결과이다. 이 때의 용접부 정렬 조건은 용접선을 밀착시킨 상태에서 집속 에너지의 조사 위치를 용접선에 대하여 약 0.1mm 벗어나게 설정한 것이다. 용접 속도를 37mm/s에서 64mm/s으로 높였을 경우 모두 완전 용입은 이루어지고 있다. 비드의 모양만을 검토의 대상으로 하거나 용접선 전 구간에서 완전한 정렬

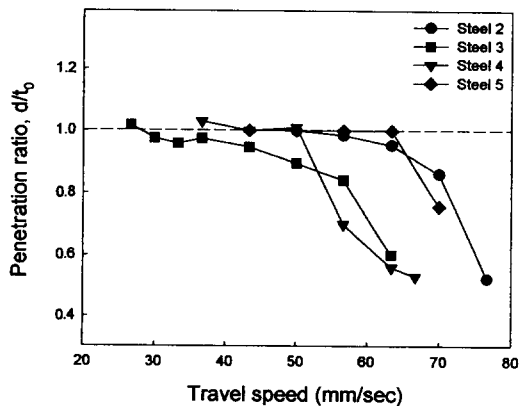


Fig. 6 Effect of travel speed on the penetration ratio

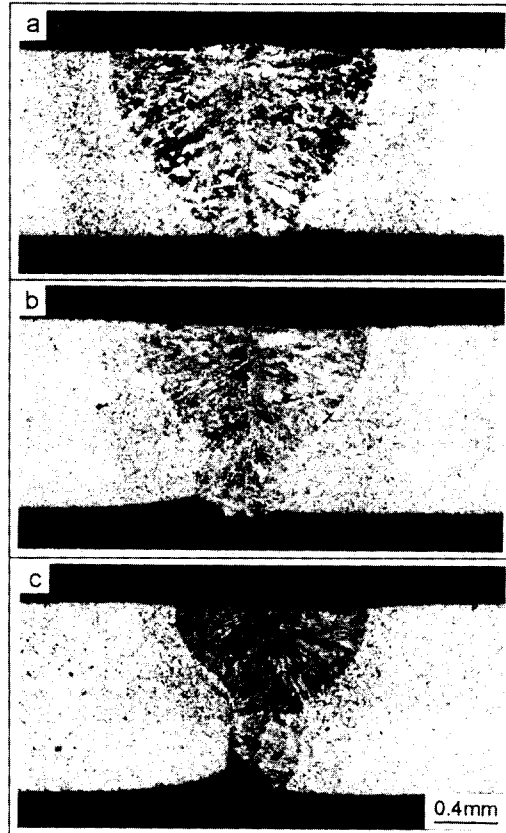


Fig. 7 Weld cross-section at the travel speed of 37mm/sec (a), 50mm/sec (b) and 64mm/sec (c)

이 이루어 졌다면, 용접 속도의 증가는 예리한 삼각형 또는 이른바 와인 컵 모양의 비드를 형성하기 때문에 별다른 문제점을 야기시키지 않는다. 그러나, 본 실험과 같이 미세한 조사 위치 벗어나에도 용접 속도가 낮을 경우에는 전혀 문제시 되지 않았던 용입 불량 결함이 사진의 (c)에서 확인할 수 있는 바와같이 하부 비드 쪽에 형성되고 있다. 여기에서, 0.1mm 벗어나기라는 숫자는 실제의 용접 공정에서는 흔히 있을 수 있는 정도의 정렬 오차 범위임을 감안하여 볼 때, 테일러드 블랭크 용접에서는 용접 조건 설정에 특히 주의하지 않으면 경우에 따라서는 치명적인 결함을 일으킬 수 있음이 확인되고 있다. 이상과 같이 레이저 용접에서는 속도에 따라 비드 폭 및 용입 특성이 변화하는데

이러한 용접부 형상의 변화는 용접부 강도에도 영향을 미칠 것으로 생각되었다. Fig. 8은 용접 속도 25mm/s에서 78mm/s까지의 구간에서 맞대기 용접된 시험편을 대상으로하여 용입비와 용접부 인장 강도비와의 상관성을 조사한 것이다. 여기서 인장 강도비는 모재의 인장 강도에 대한 용접부의 강도로서 표현한 값이다. 이러한 변수를 선택한 근거는 용접부의 강도가 모재와 어느 정도 차이를 보이는가에 기초를 두고 있어서 용접부의 강도가 모재와 같다면 용접부의 특성은 만족할만 하다고 말할 수 있기 때문이다. 본 실험 조건에서는 용접 속도의 변화에 따라서 용입비의 최소값은 약 0.5였고 최대값은 약 1.1이었으나, 용접부 인장 강도비의 최소값은 약 0.87 및 최대값 약 1.02를 보여주고 있었다. 이와같은 사실은 용접부가 모재 두께의 50% 정도만 형성되더라도 모재 인장 강도의 87%에 해당하는 용접부 강도를 얻을 수 있다는 결과가 된다. 따라서, 용접 소재가 단순한 인장 응력 상태에서 사용된다면 고속 용접으로 생산성을 크게 높이면서 제품을 만드는 것이 가능해 보이지만, 테일러드 블랭크 용접 제품은 인장력과 함께 전단 하중을 심하게 받을 뿐만 아니라 사용 중에는 피로 하중에도 견디어야 하므로 池本등¹²⁾은 많은 실험을 통하여 자동차용 파빌 제작에 있어서 한계 용입비를 0.8 이상으로 설정하고 있다. 이러한 기존의 문헌과 본 실험의 결과를 참고하여 본 실험 조건에서의 용접부 인장 강도비를 산출 한다면 Fig. 8에서도 알 수 있듯이 0.95 이상의 값을 얻을 수 있었다. 즉, Fig. 8에의하면 한계 용입비 0.8 이상의 조건에서 용접부 강도비는 모두 0.95 이상의 값에 수렴하고 있어서 가능하면 완전 용입 용접이 바람직하겠으나 부득이한 경우라도 용입비 0.8을 넘는 용접부를 얻으면 실용적으로는 그다지 문제되지 않을 듯하다. 그러나, 이 경우에도 전술 하였던 용접부 정렬 불량과 같은 결함은 용접부에 기계적 노치를 만드는 결과를 가져오므로 반드시 피하여야 할 것이다.

3.3 보호가스의 영향

레이저 용접에서 보호가스는 여타의 용접에서와 같이 용융 금속의 산화를 막을 목적으로 이용되는 것 이외에도 용접 스파터로부터 집속 광학계를 보

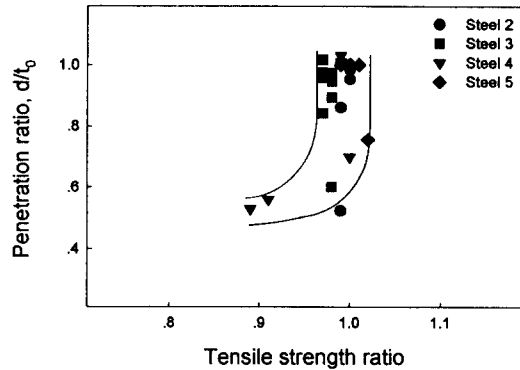


Fig. 8 Correlation between tensile strength ratio and penetration ratio

호하며, 특히 용접시 발생하는 플라즈마를 억제 또는 제거하기 위한 역할이 중요하게 다루어지고 있다^{8,9,13)}. 이러한 보호가스는 종류와 유량(압력)이 용접부 형성에 영향을 미치는데, 통상은 He, Ar 및 N₂ 등이 사용된다. 이 중에서 He은 이온화 에너지가 높으므로 플라즈마 형성 측면에서 유리한 기체로 알려져 있으나¹⁴⁻¹⁶⁾, 가격이 비싸기 때문에 저가의 Ar이 더 일반적이다. 한편, 박판이라는 특성은 질소와 같이 아크 용접에서는 금기시되는 기체를 용접에 이용하거나, 용입 효율을 높이기 위한 혼합가스의 사용에 관하여도 보고되고 있다¹⁷⁾. Fig. 9는 시험재 6을 사용하여 용입 깊이에 미치는 혼합 보호가스의 영향을 보인 실험 결과이다. 이 그림에서는 Ar을 사용하여 용접을 실시하였을 경우의 용입 깊이를 기준으로 각각의 혼합 가

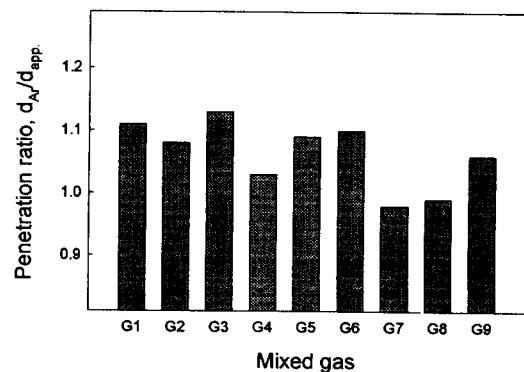


Fig. 9 Effect of shielding gas application on weld penetration

스 적용 효과를 정리하였다. 또, 혼합 가스의 조성도 Ar을 주 가스로 하여 $N_2(G_1 \sim G_2)$, $O_2(G_4 \sim G_6)$ 및 $CO_2(G_7 \sim G_9)$ 를 첨가한 후 용접을 행한 것이다. 이 실험 결과에 의하면 ($G_7 \sim G_9$) 조건 이외의 모든 혼합 가스를 사용하였을 때 평균 10% 정도의 용입 깊이 향상을 이룰 수 있었다. 그러나, ($G_7 \sim G_9$) 계열의 보호 가스는 용입 깊이도 불안정하였고 용접 시 스파터가 많이 발생하였다. 이 실험 결과는 용접 생산성과 원가측면을 고려하여 보호 가스도 선택되어야 하는 가능성을 제시하는 것으로 판단되는데, 이처럼 보호 가스에 따라 용입 특성의 차이를 보이는 근본적인 이유는 레이저와 재료와의 상호작용에 의해서 필연적으로 발생하는 플라즈마의 영향으로 볼 수 있다. Fig. 10은 순 Ar(a), Ar- N_2 계 혼합가스(b) 및 Ar- CO_2 계 혼합가스(c)를 보호가스로 하고 가스의 취입 속도를 17m/s로 설정한 조건에서 레이저 용접을 실시할 때 발생하는 플라즈마를 고속촬영 장치로 관찰한 결과의 예를 보이고 있다. 레이저 용접에서 관측되는 플라즈마는 용접의 초기에 생성되어 성장-축소의 과정을 빠른 주기성을 가지고 반복하는데⁹⁾, 사진에 보인 각각의 플라즈마는 이와같은 주기에서 가장 크게 성장된 것이다. 순 Ar을 사용하였을 경우에는 플라즈마의 모양이 재현성 있게 매 주기마다 거의 같은 형태를 반복적으로 관찰할 수가 있었다. 그러나, 혼합가스를 사용하였을 경우에는 플라즈마의 형태가 순 Ar의 경우와는 차이가 있었고, 그 움직임도 둔하며 반복의 재현성 또한 다소 저하하였다. 사진에서 알 수 있듯이 플라즈마의 크기는 순 Ar을 사용하였을 때가 가장 크고 휘도도 높았으나, N_2 계 혼합가스를 사용하였을 때는 크기, 특히 기둥의 폭이 현저하게 좁았고 휘도 또한 낮았다. 전술한 Fig. 9의 실험 결과와 함께 생각해볼 때, 플라즈마의 형태가 축소된다는 사실과 용입비의 증가는 깊은 관계가 있는 것으로 생각된다. 또, 플라즈마 크기의 축소만을 고려한다면, 이러한 현상은 혼합가스의 밀도(질량) 혹은 해리 에너지가 플라즈마 기둥의 냉각작용에 영향을 미친 것으로 사료되나 정확한 해석을 위하여는 보다 체계적인 연구가 필요한 부분으로 판단된다. 한편, Ar- N_2 계 혼합가스의 경우에는 플라즈마의 성장-축소 주기가 순 Ar보다는 짧았으며, 축소 과정에서 순 Ar을 사용하였을 때 흔히 관찰되는 분광학적 저온 영역인 적

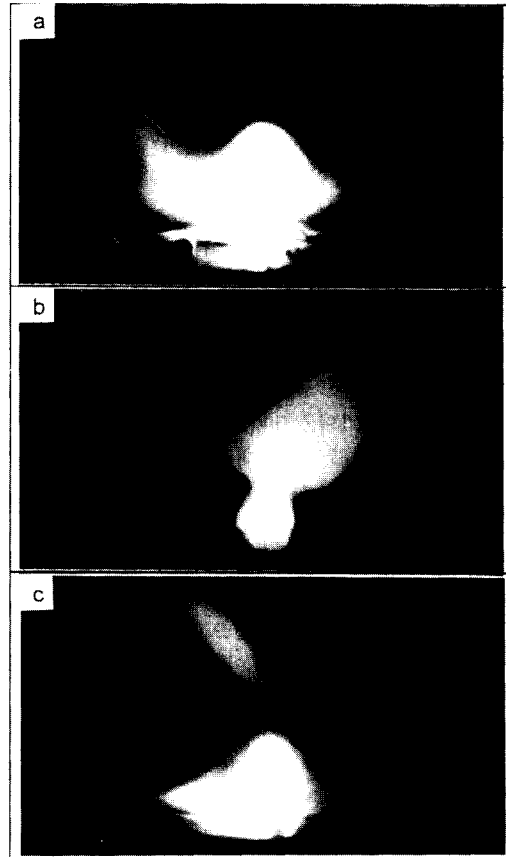


Fig. 10 Typical appearance of laser induced plasma during welding with pure argon (a), Ar- N_2 (b) and Ar- CO_2 (c) mixed gas shielding

갈색 꼬리도 발견되지 않으므로서 냉각작용이 빠르다는 사실을 뒷받침하고 있다. 이러한 현상은 Ar- CO_2 계 혼합가스로 용접을 행할 경우에도 관찰되었다. 플라즈마의 크기와 용입 깊이와의 관련성을 발표한 보고^{18,19)}에 의하면 플라즈마 기둥의 크기와 용입 깊이는 상관성이 매우 크지만 과도한 양의 제어 가스 취입은 기둥의 크기 감소에도 불구하고 용입 깊이와 결합 발생 측면에서 불리하다. Fig. 11은 용접 품질에 미치는 혼합 가스의 유용성을 검토한 실험 결과이다. 이 사진에서는 앞에서 언급되었던 3 종류의 혼합 가스를 이용하여 용접을 실시할 때 적정한 비드 품질이 얻어지는 조성(그림에서 Opt)과 적정량 이상으로 많은 조성(그림에서 Exc)의 보호가스가 표면 품질에 어떻게 영

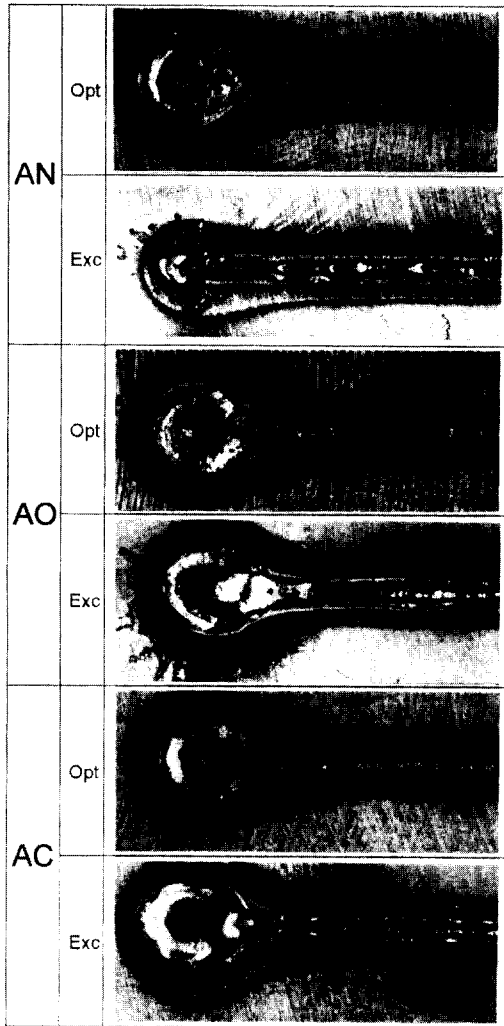


Fig. 11 Effect of mixed gas application on the bead quality

향을 주는지를 분명하게 보여주고 있다. 또, 이 사진에서는 간접적이기는 하지만 용융지에서 용융 금속의 유동 특성을 보이기 위하여 용접 초기에 짧은 시간 동안 집속광을 한자리에 머물게 하였다. 고속촬영으로 Ar-N₂계(그림에서 AN)의 용융부를 관찰하여 보면 초기에는 용융 금속의 유동이 매우 부드러웠으나, N₂의 첨가량을 증가시킴에 따라 용접시 소음과 함께 용융이 원활하게 이루어 지지 않는 현상을 보였다. 이 때는 비드의 표면이 거칠고 스패터의 발생량도 증가 하였다. Ar-O₂계 혼합가

스(그림에서 AO)는 용융 금속의 유동이 다소 굳어 보였고 약간의 스패터와 함께 비드 표면이 거칠었고 그울림도 관찰되었다. 한편, Ar-CO₂계 혼합가스(그림에서 AC)는 용접 과정이 불안정하였고 비록 적절한 혼합비라고 생각되는 영역에서도 표면 품질은 좋지 않았으며, 스패터의 발생도 많은 편이었다. 스패터의 발생이 특히 심한 경우에는 보호가스의 취입량이 낮은 조건에서도 비드 표면이 매우 불규칙 하였고, 때에 따라서는 내부의 용융 금속이 밖으로 튀어나오기 때문에 후 모양 비드를 만들기도 하였는데 Fig. 12는 그 결과 용접부 안쪽의 용융 금속 부족으로 형성된 결함의 예를 보여주는 사진이다. 용접부의 기계적 특성과 관련된 실험 결과에 의하면, Ar을 보호가스로 사용하였을 때는 용접부 균열이 발생하지 않았으나, 과도한 농도의 Ar-N₂계 보호가스는 용접부 파단을 일으켰다. 이러한 용접부 기계적특성의 저하는 보호가스가 용융부를 충분히 차폐시키지 못하여 N₂ 혹은 다른 성분이 용접 과정에서 대기중의 산소와 결합하여 산화물 또는 기체 생성에 기인한 것으로 사료된다(Fig. 13 참조). 레이저 용접과 같은 급열-급냉 공정에서는 경화 조직이 생성되기 쉬우므로 불충분한 차폐효과, 취화조직 또는 내부 결함의 형성은 보호가스 선정시 신중히 검토되어야 할 요건이라고 할 수 있다.

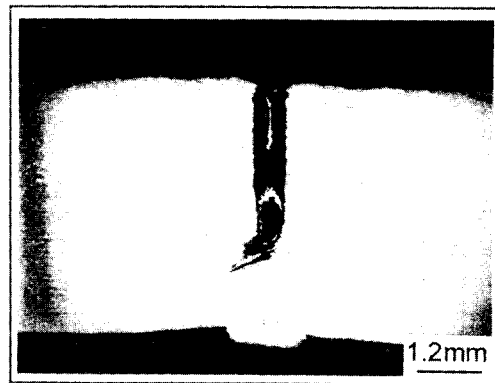


Fig. 12 An example of cavity defect after welding with AC type mixed gas



Fig. 13 An example of blow hole defects in the weld microstructure

4. 결 론

고출력 레이저 용접 장치를 이용하여 자동차용 강재의 테일러드 블랭크 제조를 위한 용접을 실시할 때 각종 용접 공정 변수들이 용접성에 미치는 영향을 조사하여 본 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 레이저 용접에서 집속 에너지의 설정 위치가 용입 특성에 영향을 미치고 있었으나, 강종에 따른 소재 성분 보다는 두께와 이음 형태에 더 영향을 받는 것으로 나타났다. 즉, BOP 용접을 위한 집속점 설정 위치보다 맞대기 용접의 경우 비드 천이점이 소재의 상부로 이동하였으며, 겹치기 용접에서는 오히려 소재의 내부 쪽에 설정하는 것이 효과적이었다. 이러한 원인은 이음 형태에 따라 용접 과정에서의 열전달 특성이 변화하거나 keyhole 선단에서의 고온가스 압력 차이에 기인하는 것으로 생각되었다.

2) 완전 용입 상태에서 용접부의 모양은 BOP의 경우 상, 하부 덧살이 뚜렷이 존재하지만, 맞대기 용접에서는 상부의 덧살이 거의 형성되지 않는다. 그러한 이유는 용접 전 이음부를 밀착시킨다고 하더라도 실질적으로 어느 정도의 간극을 배제할 수 없고, 그 결과 용융 금속의 부족과 중력에 의한 처짐이 동시에 작용하였기 때문으로 생각되었다. 이러한 현상은 약간의 간극이 곧 용입비의 저하로 이어지기 때문에 테일러드 블랭크 용접과 같이 긴 용접거리를 접합할 경우에는 주의하여야 할 부분이였다.

3) 용접 속도의 증가는 용입 깊이 뿐만 아니라 비드의 폭도 감소 시키는데, 상부 비드의 폭은 일

정 영역에서 감소 후 안정되는 구간이 존재하며 비교적 산포량도 적지만 하부의 경우는 산포량이 크기 때문에 완전 용입을 위하여는 용접 조건 설정에 주의를 필요로 하였다. 이러한 민감도는 소재의 두께가 감소할수록 더욱 심하게 나타나므로 얇은 소재를 용접할 경우에는 보다 안정적인 영역에서 용접을 실시하여야 한다. 한편, 용접 속도가 용입비에 미치는 영향은 소재의 두께가 감소할수록 고속으로 이동하며 예민한 반면 두꺼운 재료의 경우 안정화 영역이 넓고 속도에 따른 용입비의 민감도는 저하한다. 용접 속도의 증가는 비드 단면의 형상을 사다리꼴에서 삼각형으로 변화시키거나 와인 컵 모양을 만드는데, 그 결과 고속 장거리 용접에서 용접선 정렬의 정밀도를 엄격히 관리하지 않으면 하부 비드의 이탈에 의한 용접부 노치 결함을 유발할 수 있다.

4) 맞대기 용접부의 적정성 판정 기준을 검토하기 위하여 용입비와 인장강도의 적용성을 조사하여 본 결과 비교적 넓은 범위의 용입비에 대하여 용접부 인장강도 변화는 크지 않았다. 테일러드 블랭크의 특성상 용접 후 인장 하중 이외에 사용 중 또는 성형에 따른 전단력을 크게 받을 수 있으므로 용접부의 인장강도만으로 용접성을 판정하는 것은 불합리하다. 따라서, 용입비-인장강도의 상관성 및 성형성과 관련된 기존의 문헌을 동시에 고려하여 본 결과 한계 용입비는 0.8이상이 되어야 하고 이 때의 용접부 인장강도는 모재 강도 대비 0.95 이상을 얻을 수 있었다.

5) 용접시 플라즈마의 영향을 억제하고 용입 효율을 높이기 위한 혼합 가스의 영향을 조사한 결과 순 Ar를 사용하였을 때 보다 혼합가스를 쓰는 것이 유리한 것으로 나타났으나 표면 품질, 스파터 발생 또는 내부 결함에 대한 검토를 동시에 행하여야 함을 알 수 있었다. 특히, Ar-N₂계 혼합가스는 기공과 용접부 강도에 대하여 불리한 부분이 있었고, Ar-CO₂계 혼합가스는 표면 품질과 스파터 발생이 현저하므로 혼합비를 적절히 선정하여야 플라즈마 제어와 용입 깊이를 효과적으로 관리할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Porsche Engineering Service: Technical report for ULSAB technical committee and consortium meeting, June (1996)
2. Van der Hoeven, K. Rubben, F. Lambert and I. De Rycke: Tailored blanks: A key technology for light weight steel auto body structures, Proc. of ISATA, 96NM156 (1996), 177-185
3. W. Prange: Tailored blanks-Production procedures and the behavior of the welded parts, ULSAB Seminar, Seoul, April (1997)
4. S. L. Ream: Comparing lasers for tailored blank welding, Industrial Laser Review, July (1997), 16-18
5. 서 정, 한유희: 자동차 산업에서의 레이저 용접, 대한용접학회지, 12-2 (1994), 49-63
6. 宮崎康信, 小原昌弘: 테-라드블랭크의 접합技術, 프레스技術, 34-8 (1996), 30-33
7. Y. Arata, N. Abe and T. Oda: Fundamental phenomena in high power CO₂ laser welding (I), Trans. JWRI, 14-1 (1984), 5-11
8. Y. Arata, N. Abe and T. Oda: Fundamental phenomena in high power CO₂ laser welding (II), Trans. JWRI, 14-2 (1985), 17-22
9. K. C. Kim and E. P. Yoon: Observation of laser induced plasma during welding of steel plate, Proc. of the Joining of Materials, JOM 7 (1996), 307-314
10. 丸尾 大: レーザ加工の展望と基礎, 高エネルギー密度溶接の現状と将来, 溶接學會 (1980), 59-68
11. R. Imhoff, K. Behler, W. Gatzweiler and E. Beyer: Laser beam welding in car body making, Proc. of 5th Int. Conf., Lasers in Manufacturing (1988), 247-258
12. 池本公一, 新美友治, 岩井孝雄: 自動車ボデーパネルのレーザー溶接, 溶接學會論文集, 10-1 (1992), 196-201
13. 丸尾 大, 宮本 勇, 川端文丸, 荒田吉明: 金属材料のレーザー溶接, 溶接學會誌, 50-4 (1981), 404-409
14. N. Sakamoto, O. Matsumoto, Y. Nagura and T. Ishida: The effect of shielding gases in laser welding, IIW DOC IX-1748-94
15. J. Mazumder: Laser welding, Laser Materials Processing, North-Holland Pub., (1983), 120-138
16. E. Beyer, K. Behler and G. Herziger: Plasma absorption effects in welding with CO₂ laser, SPIE 1020 (1988), 84-95
17. 宮本 勇, 丸尾 大: レーザ溶接における蒸發特性, 溶接學會論文集, 13-4 (1995), 544-549
18. R. Fabbro: Beam-plasma coupling in laser material processing, LAMP 92 (1992), 305-315
19. I. Miyamoto and H. Maruo: Spatial and temporal characteristics of laser induced plasma in CO₂ laser welding, LAMP 92 (1992), 311-316