

철강재료 용접에서 보조가스가 레이저플라즈마와 용입특성에 미치는 영향

김기철* · 신현준**

*포항산업과학연구원

**포항가속기연구소

Effect of Assist Gas on Laser Induced Plasma and Bead Formation in Welding of Structural Steel by CW Nd:YAG Laser

Ki Chol Kim* and Hyun Jun Shin**

*Research Institute of Industrial Science & Technology, Pohang 790-600, Korea

**Pohang Accelerator Laboratory, Pohang 790-784, Korea

Abstract

In this study high power Nd:YAG laser welding of structural steel was investigated. For the test steel blocks of 50×50×200mm were cut and machined, and bead-on-plate weld was made on the machined surface. Argon, nitrogen, helium, dry air or mixed gases were used to find the effect of shielding conditions on the bead formation.

Results demonstrated that there were Fe I rich region and Fe II rich region in the laser induced plasma column based on the spectral analysis with S-2000 field spectrometer. The Fe I region was located at the root of the column near keyhole opening. On the other hand, Fe II region was found at the middle of the plasma column. In the Nd:YAG laser welding, Fe I region emitted continuum which had peak value at wave length of around 710nm, and Fe II region had the peak at 580nm. In the welding of steel by CO₂ laser, however, no continuum was observed. There showed two groups of strong spikes in the CO₂ laser welding; the first group was displayed at the wave band of 450-560nm. This spike group emitted stronger intensity of light and sharper peaks than those group at 680-800nm.

(Received February 14, 2002)

Key Words: Laser welding, CW Nd:YAG laser, Laser induced plasma, Assist gas, Spectral analysis

1. 서 론

이미 알려진 바와 같이 레이저 용접은 고출력 발전기의 등장 이후 열원의 활용 가능성과 다양한 적용성으로 인하여 국내에서도 자동차, 철강 및 전자공업에서 매우 중요하게 취급되고 있다^{1,2)}. 고출력 레이저를 이용한 철강재료의 용접에서 용접 품질의 안정성과 신뢰성을 확보하기 위한 연구는 다양하게 이루어지고 있으나 아직까지 실용적으로 만족스러운 방법과 장치는 시기상조인 것 같다. 그러한 요인 중에는 레이저 용접부 형성이 주변 요소의 영향을 많이 받기 때문일 것이다.

특히 레이저 유기 플라즈마(이하 LIP)의 생성거동은 레이저 출력, 집속광의 입사각도, 보조가스의 종류와

취입조건 또는 용접될 소재에 의하여 영향을 받을 수도 있어서 빠르고 간편하게 해석하는 것이 쉽지 않다. 따라서 LIP로부터 방출되는 빛, 전기장, 음향 또는 복사열 등을 용접성과 결부시키려는 시도들이 많이 보고되고 있다³⁻¹⁵⁾. 레이저 용접 LIP를 가장 정확하게 진단할 수 있는 방법은 분광학적인 해석¹²⁻¹⁸⁾이지만 계측장비의 규모와 가격의 경제성이 부족하거나 채취된 결과의 분석이 복잡하여 실시간 처리가 어려운 문제점을 가지고 있다. 뿐만 아니라 지금까지 많은 연구는 CO₂ 레이저 장치의 일반화에 따라 대부분 CO₂ 레이저 용접 LIP를 대상으로 하고 있으나 용접 자동화와 관련하여 급속히 적용이 증가하고 있는 Nd:YAG 레이저용접의 계측은 그 예가 매우 적다.

본 연구는 이러한 산업환경을 감안하여 철강재료의

고출력 CW Nd:YAG 레이저 용접에서 LIP의 거동을 저가형 협소대역 분광분석기를 이용하여 계측함으로써 현장 활용성을 높이는 시도와 함께 보조가스의 취입 조건이 용접부 형성에 미치는 영향을 검토하는 것을 목표로 시행된 것이다.

2. 실험

2.1 시험재

시험재는 Table 1에 보인바와 같이 0.12wt%의 탄소를 함유하는 구조용 철강재료였으며 50×50×200mm의 크기로 가공한 블록을 이용하였다. 이것은 본 실험의 목적이 철강재료 레이저용접에서 LIP의 거동과 용접조건에 따른 용접부 형성 특성을 조사하는 것에 목적이 있었기 때문이었다.

Table 1 Chemical compositions of base metal(wt%)

C	Si	Mn	P	S
0.120	0.019	0.98	0.017	0.016

2.2 실험방법

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 계측장치의 구성을 나타내는 것이다. 용접은 Nd:YAG 레이저 용접장치와 CO₂ 레이저 용접장치를 사용하였고 진술한 소재의 표면에 비드 온 플레이트(이후 BOP) 용접을 용접선 길이 150mm로 행하는 과정에서 LIP 거동을 계측하였다. 대표적인 실험조건 범위는 Table 2에 나타내었으며 분광분석 실험은 용접이 충분히 안정된 위치(용접개시점에서 약 50mm 이후)에서 실시하였다.

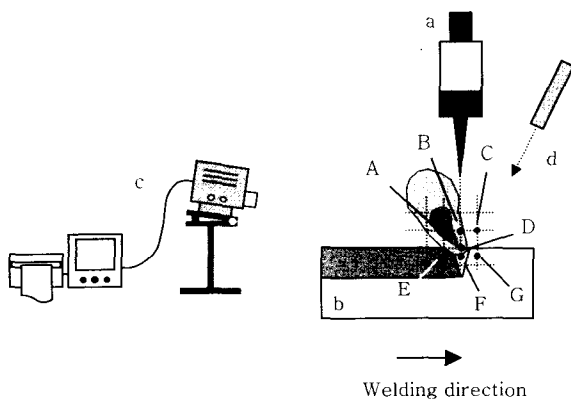


Fig. 1 Test setup for LIP spectrum analysis.
 a: welding head, b: specimen, c: monitoring unit, d: assist gas
 A: (-1, 1), B: (1, 0), C: (1, 1), D: (0, 0), E: (-1, -0.5), F: (0, -0.5), G: (1, -0.5)

Table 2 Welding and LIP monitoring conditions

Laser power(kW)	1, 2
Travel speed(mm/s)	17, 22
Position of focus	specimen surface
Assist gas	Ar, N ₂ , dry air, He, CO ₂ , mixed gas
Gas pressure(kPa)	typically 196
LIP analysis range(nm)	200-850
Spatial resolution(μm)	600 at the focal point

분광분석은 0.6mm의 공간분해능을 갖는 집속광학계와 1.3nm의 파장분해능을 갖는 보급형 분광기를 적용하여 레이저 용접공정을 계측하였다. 측정위치는 고속 촬영 결과와 분광장치를 이용한 여러 차례의 광 강도 측정을 통하여 결정하였는데 Fig. 1에 제시되어 있는 바와 같이 키폭 상부(좌표: 0, 0)를 중심으로 상하좌우 각각 0.5mm 또는 1mm의 위치에 계측기의 초점을 설정함으로써 각각의 위치에 따른 LIP 특성을 알아 볼 수 있도록 하였다. 그림으로는 표현할 수가 없었으나 실제로는 분광 장치가 현재 위치에서 그림의 앞 방향으로 90도 회전된 위치, 즉 용접 진행 방향의 수직위치에서 계측을 행하였다. 또 용접부 단면 시험편은 용접된 블록의 LIP계측 범위 안에서 약20mm 간격을 두고 3개 채취하였으며 그 각각을 연마 및 부식하여 용입특성 조사용으로 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 LIP 거동에 미치는 계측 위치의 영향

Fig. 2는 레이저 출력 1kW, 용접속도 17mm/s 및 V질소를 보조가스로 사용하면서 용접할 때 Fig. 1의 측정위치에서 계측된 LIP의 특성을 나타낸 것이다. 이 그림에서는 구별을 쉽게 하기 위하여 측정위치에 따라 결과를 나누어 놓았다. 즉, Fig. 2(a)는 레이저 광축의 상하에 존재하는 플라즈마(B, D, F)이며 (b)는 플라즈마 기둥의 후방(A, E)을, 그리고 (c)는 용접 진행방향의 전방 좌표(C, G)에서 계측한 결과들이다. 이 실험에서 알 수 있듯이 측정위치 A, D에서는 매우 강한 플라즈마 신호가 얻어졌으나 F는 비교적 낮은 강도를 나타내었고 B, C, E 및 G는 계측이 어려운 정도의 강도를 보인다.

측정위치 E, F 및 G는 플라즈마 기둥을 직접 겨냥하여 계측된 것이 아니라 키폭을 포함하여 시험재 표면의 반사광을 측정 대상으로 한 것이었다. 이것은 용접 현장 측정에서 공간적으로 센서기구의 장착을 용이하게 할 수 있는 방안을 찾아보기 위한 시도였으나 별도의

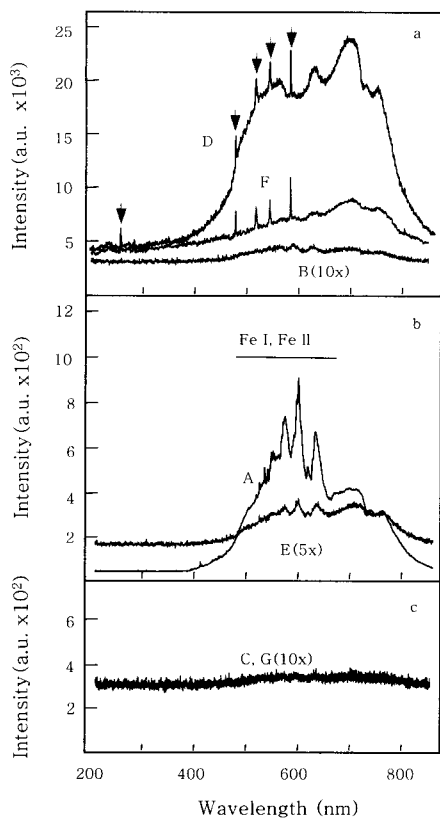


Fig. 2 LIP spectra depending on the spatial coordinate (power: 1kW, travel speed: 17mm/s, gas: N₂)

고속촬영 결과 시각적으로는 재료표면에서 LIP의 반사광 강도가 상당량 나타나는 곳일지라도 계측 신호의 강도는 미약하여 실용성이 낮음을 알 수 있다.

또한, Fig. 2(a)의 D와 F에서는 예리한 피크들이 여러 개 나타나 있으며 그 위에는 화살표들을 첨가하였

는데 이것은 분광 데이터¹⁹⁾에서 확인한 분광선 중에서 중성 발광선인 Fe I에 의한 분광선 위치를 보인 것이다. F의 실험결과는 곡선의 형태로 보아 Fe I 피크들이 연속선을 형성할 정도의 강도를 갖지는 않았음을 알 수 있다. D에서 파장 710nm 근처의 강한 연속선은 Fe I 분광선들로 구성되어 있는 것으로 판단되는데 이것은 모재의 용융 및 기화에 의한 고온 분자의 영향이 주요 원인으로 추측된다. 그러나 그림(b)의 A에서는 450~650nm(중심파장 580nm) 영역에서 비교적 강도가 높은 연속선을 관찰할 수 있으며 이것은 이온화도 +1의 강력한 Fe II 성분에 의한 것으로 판단된다¹⁹⁾.

이상의 결과를 정리하면 측정위치 A에서는 Fe I도 포함되어 있기는 하지만 Fe II가 주성분인 분광선으로 구성되어 있으나 그 이외의 공간에서는 Fe II 플라즈마의 발생이 미약하거나 Fe I이 주성분인 분광선으로 나타나고 있다. 즉 A영역에는 상대적으로 주변 보다 고온의 플라즈마로 구성되어 있는 영역이라고 할 수 있으며 Fig. 1에서는 이곳을 편의상 진한 음영으로 구분하였다. 또 이곳은 후술하는 보조가스 종류의 영향을 가장 적게 받았으며 계측점도 다른 부위보다 넓고 안정적인 영역이었다. 따라서 용접성 평가를 위한 LIP 계측위치는 신호강도를 기초로 할 때 A와 D가 유리하지만 계측면적과 안정성에서 A영역이 더 효율적이며 측정 파장대도 중심파장 580nm에서 상하 50nm 범위를 택하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

3.2 레이저 출력 및 파장의 영향

Fig. 3은 전술한 실험결과 신호강도가 높았던 영역에

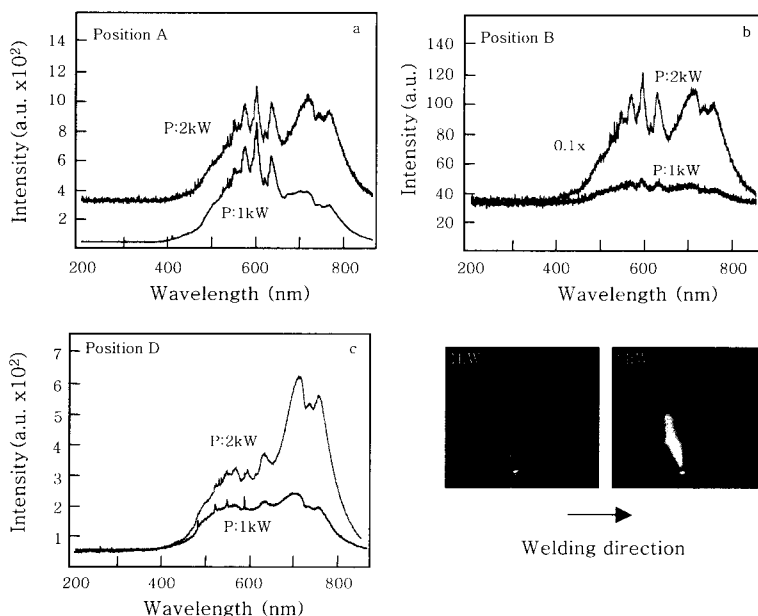


Fig. 3 Effect of applied power on LIP spectra (travel speed: 17mm/s, gas: N₂)

서 질소를 보조가스로 사용하고 레이저 출력을 1kW 및 2kW로 설정하여 용접을 실시할 때 측정된 LIP 분광선의 모습이다. 이 그림에서 관찰되는 가장 큰 특징은 580nm 영역과 710nm 영역의 신호강도가 출력 상승과 함께 크게 증가하고 있다는 것이다. 특히, 낮은 출력에서는 거의 잡음 수준이던 측정영역 B의 경우 A와 유사한 정도의 신호를 보이고 있으므로 충분히 실용성이 있음을 알 수 있다. 이러한 사실은 출력의 증가에 따라 LIP 기둥의 폭이 커져 A와 성질이 유사한 고온 플라즈마 영역이 측정범위에 포함되었기 때문으로 생각된다. 고속촬영에서 얻어진 영상을 보면 출력의 증가에 따라 플라즈마 기둥의 폭이 커지고 있으며²⁰⁾ 측면 노즐에서 취입되는 보조가스의 영향으로 LIP 기둥이 용접 방향의 후방으로 약간 기울어져 있음도 알 수 있다.

또 실험결과를 살펴보면 출력증가에 따라 580nm 영역 신호의 강도 증가보다도 710nm 영역의 신호가 눈에 띄게 강해지고 있다. 이곳은 전형적인 Fe I 플라즈마 영역으로 용접 입열량의 증가에 의하여 키흐로부터 많은 양의 고온 금속증기가 공급²¹⁾된 것이 요인으로 생각되었다.

한편 Fig. 4는 출력과장 10.6 μ m의 CO₂ 레이저를 이용하여 레이저출력 2kW, 용접속도 22mm/s 및 동축 노즐을 통하여 보조가스를 취입하면서 용접할 때 측정된 LIP의 측정 결과이다. 실험에서 측정위치는 레이저 광축을 따라 시험재 표면의 초점위치를 기준으로 상부 1mm와 하부 0.5mm 범위에서 설정하였다. 이 실험결과에서 얻을 수 있는 중요한 사실은 CO₂ 레이저 용접에서는 Nd:YAG 레이저 용접의 경우와 매우 다른

파형이 관찰된다는 것이다. 즉 그림에 나타나 있듯이 측정 위치에 따라서 신호강도의 차이는 관찰되었으나 파형의 차이는 없다. 참고로 그림에는 기존의 연구발표에서 제시된 중심과장 450nm, 540nm 및 750nm 영역의 측정결과가 제시되어 있다^{13,14)}.

신호의 강도를 살펴보면 시험재 표면인 좌표(0, 0)에서 가장 강한 LIP 신호가 발생되었으며 좌표(0, 1)에서 신호강도는 가장 낮았다. 이러한 결과는 동축노즐을 사용하면 측면노즐을 사용한 Fig. 3의 결과에 비하여 플라즈마에 가해지는 힘의 방향과 세기가 광축에 대하여 일정하고 그 결과 LIP의 쓸림도 발생하지 않음을 고속촬영 결과에서 확인할 수 있었다.

3.3 보조가스의 영향

Fig. 5(a)와 (c)는 LIP 중심부 근처, 즉 측정영역 A에서 보조가스의 종류에 따른 플라즈마의 거동을 조사한 것이며 Fig. 5(b)와 (d)는 초점부근 즉 측정영역 D에서 보조가스의 영향을 나타낸 것이다. 또 그림의 (a)와 (b)는 출력 1kW의 경우이며 (c)와 (d)는 2kW의 LIP 형태이다. 측정위치 A에서는 보조가스로 헬륨(Gas: e)을 사용한 경우를 제외하고 분광 특성의 실질적인 차이가 없으며 분광 강도의 미소한 하락이 있는 정도였으나 그 이유는 밝혀지지 않았다. 이러한 경향은 레이저 출력을 2kW로 증가시켰을 때에도 동일하게 나타났다. 이 그림에서 질소(Gas: b)를 사용한 결과만을 분리시킬 수는 없으나 전술한 Fig. 3의 결과와 비교할 때 710nm 부근의 강도 증가는 보이지 않았다. 이러한 결과는 앞의 실험에서 측정장치의 초점이 키흐 부근에 좀 더 가깝게 설정되었던 것이 원인으로 생각되었다.

한편 키흐 영역인 측정위치 D의 결과에서는 용접 입열량이 낮을 때(Fig. 5-b) 보조가스의 종류에 따른 분광선의 강도 차이가 크게 나타났으나 레이저 출력을 높여 입열량을 증가시킨 조건(Fig. 5-d)에서는 상호 구분이 불가능할 정도로 측정치가 일치하였으며 신호강도도 매우 높았다. 이러한 결과는 레이저 출력에 상관없이 안정적인 측정을 위하여 플라즈마 기둥 중앙부에서 중심과장 580nm 근처를 선택하는 것이 가장 바람직함을 보여주는 것이다. 그러나 출력이 소정의 값 이상으로 높을 때는 키흐 상단에서 710nm 대역의 센서를 사용하여도 무방할 것으로 판단된다. 또 분광분석 결과를 기초로 할 때 CW Nd:YAG 레이저 용접에서 보조가스가 용접성에 미치는 영향은 거의 없기 때문에 무시할 수준임을 알 수 있다. 그러나 동일한 실험조건에서 Fig. 5(b)와 같이 아르곤과 질소의 분광강도가 낮은 것에 대

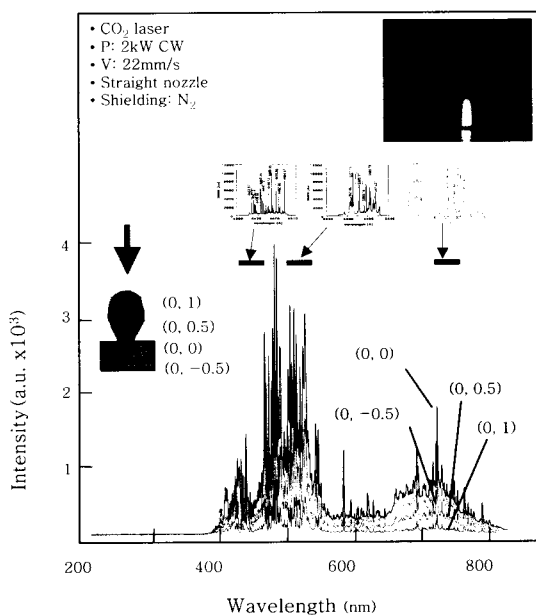


Fig. 4 LIP spectra vs spatial coordinate in the CO₂ laser welding

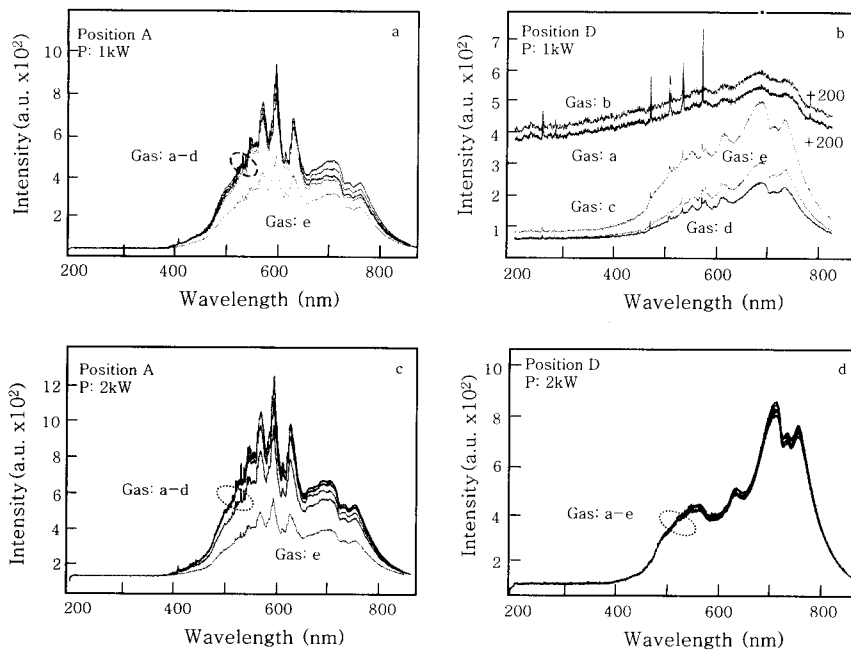


Fig. 5 Effect of assist gas on LIP spectra
Gas a: Ar, Gas b: N₂, Gas c: dry air, Gas d: CO₂, Gas e: He

하여는 향후 정밀한 해석이 필요한 것으로 사료된다.

3.4 용입특성

Fig. 6은 레이저 출력과 보조가스의 종류가 용접부 형성에 어떠한 영향을 미치는지를 알아보기 위한 실험 결과이다. 사용된 보조가스는 5종류였으며 용접부 형상은 용입깊이(Ht), 표면비드의 폭(Bs) 및 용입비(Ht/Bs)로서 정의하고 Ht와 Bs의 측정 단위는 mm이다. 실험결과에 의하면 용입비는 레이저 출력 1kW일 때 보조가스의 종류에 관계없이 0.8~1.1 정도의 값으로 거의 차이가 없다. 레이저 출력을 높인 조건에서도 이러한 경향은 유지되고 있었으며 용입 깊이만 약 1.8배정도 증가하고 있다.

CO₂ 레이저 용접의 경우와 다르게 Nd:YAG 레이저 용접에서 보조가스에 의한 차폐효과가 낮은 것은 용접시 발생한 LIP의 전자밀도가 임계값에 미달한 것이 원인으로 생각된다. 즉, 입사한 레이저 에너지는 LIP를 통과하여 시험재 표면에 흡수 및 용융을 일으키게 되지만 LIP의 전자밀도가 임계값 이상이 되면 레이저 에너지를 자체에서 흡수하거나 반사하며 그러한 임계값은 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$f = \left(\frac{4\pi n_e e^2}{m_e \epsilon_0} \right)^{1/2} \frac{1}{2\pi}$$

여기서, f 는 차단주파수, n_e 는 전자밀도, m_e 는 전

자의 질량, e 는 하전량, ϵ_0 는 유전상수를 각각 나타낸다. 즉 플라즈마의 에너지 차단주파수와 용접에 사용된 레이저 주파수의 관계에서 진동수가 CO₂ 레이저의 10배에 해당하는 Nd:YAG 레이저 용접의 경우 전자밀도도 그만큼 높을 수는 없다. 그 결과 Nd:YAG 레이저 에너지는 플라즈마 층을 쉽게 통과하여 용접부 형성에 보조가스의 종류 및 LIP의 영향이 낮은 것이다.

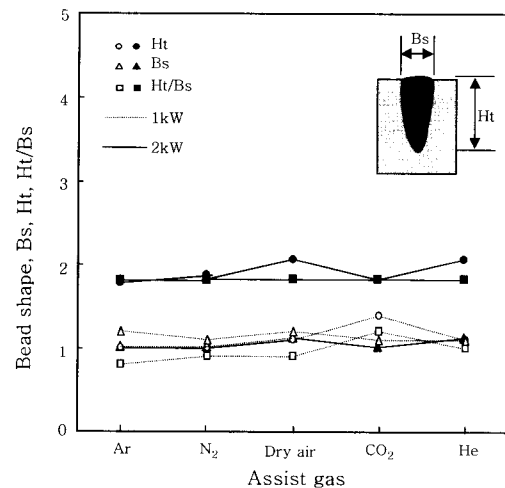


Fig. 6 Effect of assist gas on bead shape

한편, Fig. 7은 아르곤에 질소 또는 건조공기를 혼합하여 취입할 때 혼합비가 용접부 형성에 미치는 영향을 조사한 것이다. 아르곤과 질소의 혼합기체를 사용하였을 경우(상부 그림)는 용접부 형상이 100% 아르곤을 사용하였을 때와 매우 흡사하다. 그러나 건조공기를 혼

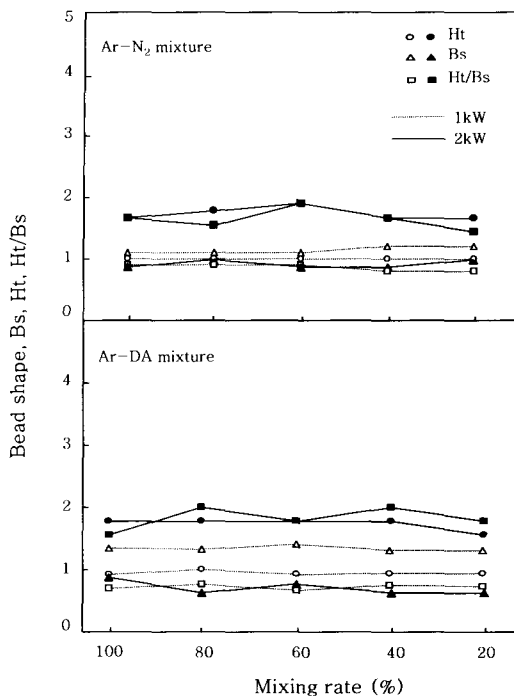


Fig. 7 Effect of gas mixing rate on bead shape

합하였던 조건(하부 그림)에서는 특히 낮은 출력에서 표면비드의 폭이 상대적으로 넓게 측정되었다. 이러한 결과는 앞의 실험에서도 차이는 있으나 비슷하게 나타났는데 그 이유는 Fig. 8에서 확인 할 수 있는 것과 같이 낮은 출력으로 용접을 실시할 경우 에너지 밀도와 온도 기울기가 동시에 저하하기 때문에 열영향부의 크기가 용융부 폭에 비하여 넓게 형성된 것과 관계가 있을 것으로 생각되었다.

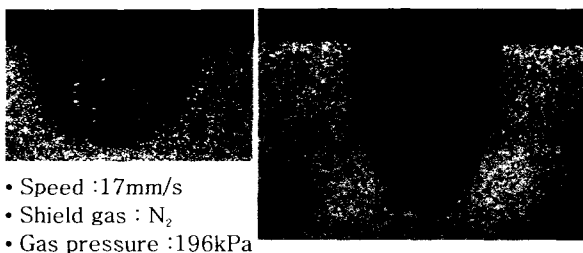


Fig. 8 Bead cross-section

4. 결 론

자동차, 철강 산업을 중심으로 고출력 Nd:YAG 레이저의 활용이 급속히 증가하고 있으며 용접부 품질 확보를 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 이러한 산업계의 환경에 적극적으로 대처하기 위하여 실시된 본 연구에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 레이저 용접 플라즈마를 0.6mm의 공간분해능과

1.3nm의 파장분해능을 갖는 분광기로 측정하여본 결과 레이저용접 공정감시를 위한 공정변수 인출 가능성이 매우 높았다. 즉, Nd:YAG 레이저 용접에서 형성된 플라즈마에는 출력에 관계없이 Fe I이 주성분인 영역과 Fe II가 주로 존재하는 영역이 있음을 알 수 있었다. 또 계측의 안정성과 용접공정 관련성을 고려할 때 계측 대상 영역은 플라즈마 기둥의 중앙부근에서 중심 파장 580nm 대역의 Fe II 신호가 주성분인 영역을 측정하거나 710nm 부근을 측정 대상으로 하는 것이 바람직하다. 그러나 후자의 경우는 낮은 출력에서 불안정한 신호를 형성하기 때문에 주의하여야 한다.

2) Nd:YAG 레이저용접에서 분광분석 신호강도는 용접위치에 입사되는 레이저 출력이 높으면 그에 따라 증가하지만 그 값은 보조가스의 종류에는 영향을 거의 받지 않았다. 즉, 580nm 부근에서는 출력을 높이면 분광신호의 파형 변화 없이 신호강도가 상승하였다. 또 710nm 부근의 신호가 우세한 키홀 상부에서는 레이저 출력이 높아질 경우 키홀로부터 공급되는 고온 증기의 영향을 받아 플라즈마 신호의 형태와 강도가 다른 조건보다 월등히 크게 상승하여 최대값을 이룬다. 그러나 CO₂레이저용접의 경우 분광선 계측위치는 파형변화 없이 신호강도에만 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

3) 철강재료를 CW Nd:YAG 레이저로 BOP 용접할 경우에 취입된 보조가스의 종류와 조성은 용입특성에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. Young Kun Oh, Hyun Sung Park: Application of Laser Welding to Automobile Industry, **HiDEC-2001-14** (2001), 12-16 (in Korean)
2. Jong Bong Lee: Effect of Primer on Laser Cutting and Welding of Steel for Shipbuilding, **HiDEC-2001-3** (2001), 35-43 (in Korean)
3. J. D. Kim, Y. S. Kim, A. Matsunawa: Evaporating Particle Behaviors and Plasma Parameters by Spectroscopic Method in Laser Welding, **HiDEC-2000** (2000), 19-27 (in Korean)
4. Cheol Jung Kim, Sung Hoon Baik, Min Suk Kim, Chin Man Chung: Process Monitoring and Control of Laser Welding by Chromatic Filtering, **HiDEC-2001-11** (2001), 122-131 (in Korean)
5. Ki Chol Kim: Application of Laser Welding Technology for New Process Development in Steel Industries, **HiDEC-2001-13** (2001), 1-11 (in Korean)
6. D. Farson, A. Ali, Y. Sang: Relationship of Optical and Acoustic Emissions to Laser Weld Penetration, *Welding Journal*, **Vol. 77** (1998), 142-146
7. C. E. Schou, V. V. Semak, T. D. McCay: Acoustic

- Emission at the Laser Weld Site as an Indicator of Weld Quality, ICALEO (1994), 41-50
8. E. Beyer, D. Maischner, Ch. Kratzsch: A Neural Network to Analyze Plasma Fluctuations with the Aim to Determine the Degree of Full Penetration in Laser Welding, ICALEO (1994), 51-57
 9. J. Griebisch: Process Optimization of Pulsed Laser Welding, ICALEO (1994), 173-182
 10. JURCA Optoelektronik GmbH: The Laser Welding Monitor LWM 900, User Manual, V-6.1
 11. J. Kurzyna: Searching for Chaos in Fluctuations of a Plasma Induced during CW-CO₂ Laser Welding, Journal of Physics D, **Vol. 31** (1998), 680-692
 12. Z. Szymanski, J. Kurzyna, W. Kalita : The Spectroscopy of the Plasma Plume Induced during Laser Welding of Stainless Steel and Titanium, Journal of Physics D, **Vol. 30** (1997), 3153-3162
 13. Z. Szymanski, J. Kurzyna: Spectroscopic Measurements of Laser Induced Plasma during Welding with CO₂ Laser, Journal of Applied Physics, **Vol. 76** (1994), 7750-7756
 14. A. Poueyo-Verwaerde: Experimental Study of Laser-induced Plasma in Welding Conditions with Continuous CO₂ Laser, Journal of Applied Physics, **Vol. 74** (1993), 5773-5780
 15. R. Miller, T. DebRoy: Energy Absorption by Metal-vapor-dominated Plasma during Carbon Dioxide Laser Welding of Steels, Journal of Applied Physics, **Vol. 68** (1990), 2045-2050
 16. H. R. Griem: Plasma Spectroscopy, McGraw-Hill (1964)
 17. H. R. Griem: Spectral Line Broadening by Plasmas, Academic Press (1974)
 18. C. Tix, U. Gratzke, G. Simon: Absorption of the Laser Beam by the Plasma in Deep Laser Beam Welding of Metals, Journal of Applied Physics, **Vol. 78** (1995), 6448-6453
 19. A. R. Striganov, N. S. Sventitskii: Tables of Spectral Lines of Neutral and Ionized Atoms, IFI/Plenum (1968)
 20. Ki Chol Kim, Hyun Joon Shin: Effect of Assist Gas on Laser Induced Plasma and Bead Formation in CW Nd:YAG Laser Welding, Proceedings of the 2001 Spring Annual Meeting of KWS (2001), 176-177(in Korean)
 21. S. Tsukamoto: High Speed Measurement of Plasma Temperature in CO₂ Laser Welding, ICALEO (1999), 73-82