

레이저 용접시 용접결함의 실시간 모니터링법 개발에 관한 연구

김 종 도*

*한국해양대학교 기관시스템공학부

Fundamental Study on the Weld Defects and Its Real-time Monitoring Method

Jong-Do Kim*

*Division of Marine Engineering System, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

Abstract

This study was undertaken to obtain the fundamental knowledges on the weld defects and its realtime monitoring method. The paper describes the results of high speed photography, acoustic emission (AE) detection and plasma light emission (LE) measurements during CO₂ laser welding of STS 304 stainless steel and A5083 aluminum alloy in different welding condition. The characteristic frequencies of plasma and keyhole fluctuations at different welding speed and shield gases were measured and compared with the results of Fourier analyses of temporal AE and LE spectra, and they had considerably good agreement with keyhole and plasma fluctuation. Namely, the low frequency peaks of AE and LE shifted to higher frequency range with the welding speed increase, and for the argon shield gas it was higher than that in helium and nitrogen gases. The low frequencies dominating in fluctuation spectra of LE probably reflect keyhole opening instability. It is possible to monitor the weld bead defects by analyzing the acoustic and/or plasma light emission signals.

(Received May 22, 2001)

Key Words : CO₂ laser welding, Weld defects, Light emission(LE), Acoustic emission(AE), Monitoring method

1. 서 론

레이저 용접을 비롯한 가공기술은 고정도(高精度)·고품질·고능률 가공기술로서 주목되고 있으며 산·학·연을 중심으로 한 연구^{1~5)}의 진척도는 무척 빠른 행보를 보이고 있다. 그러나, 현재의 가공기술은 레이저의 본질적인 잠재적 능력을 충분히 발휘하고 있다고는 볼 수 없으며, 여기에는 가공기술에 대한 적응제어는 물론이고 실시간 모니터링도 소수의 적용례^{5~10)}를 제외하고 채용되어 있지 않고 있다는 점 등이 그것을 뒷받침하고 있다.

에너지 밀도가 높은 레이저 가공에서는 용융부의 키홀(keyhole)거동과 재료의 증발현상이 가공현상의 주도적 역할을 하고 있으나, 현재까지의 연구 동향은 가공현상에 대한 이론적 모델 또는 재료적인 성향에 다소 치우쳐 있음으로 해서 재료적 특성에 근거한 물리적 현상의 해석에는 소홀히 하였다. 특히, 용접현상의 이론

적 모델은 수많은 경계조건 하에서 수학적 이론에 근거하여 이루어짐으로써, 시시각각으로 변화하는 용융금속 및 키홀의 거동과 합금원소의 증발거동 등을 반영하지 못하고 실제의 상황과는 다른 결과를 낳고 있다^{11,12)}.

또한, 실시간 모니터링에 관한 연구에서는 주로 플라즈마의 광을 이용하고 있으나, 광에 대한 분광학적 개념과 합금원소의 증발 거동에 관한 견식 부족 및 미정립된 이론으로 인하여 광신호의 스펙트럼 하나하나에 담긴 물리적 의미를 간과하고 있으며, 금속재료적 분석 결과와의 대응이 미비하여 단순한 신호처리에 의한 경험적 실험결과를 주로 도출하고 있는 것이 현실이라 할 수 있다.

그러므로, 본 연구에서는 레이저 용접현상의 재료학적 측면에서의 실험결과를 기초로 하여¹³⁾ 키홀 용접현상을 이해하고, 용접현상의 실시간 모니터링에 관한 지견을 얻기 위하여 용접시 방출되는 음향(acoustic emission : AE)과 발광(light emission : LE)신호를 동시에 계측하였다. 용접조건에 따른 각 신호의 시

간변화 및 주파수 특성을 비교·분석하여 그들의 상호 관련성(이하 '상관(相關)'이라 함)을 명확히 함과 동시에 용융부 내부에 형성되는 키홀 내의 플라즈마 물성 등에 대해서도 추정하였다. 또한, 용접결합 발생시의 실시간 모니터링에 적용하여 그 가능성과 신뢰성을 평가하였다. 그리고, 용접현상에 대한 고속도 비디오 관찰을 병행하여 신호강도의 해석결과와 비교·확인하였다.

2. 실험장치 및 측정방법

2.1 사용재료와 실험방법

레이저 용접현상의 측정에 사용한 주된 재료는, 판두께 6mm의 시편 Al-Mg계 합금A5083(4.58% Mg-0.70% Mn-0.22%Fe-0.14% Si-0.12%Cr)과 두께 5mm 및 10mm의 스테인리스강 STS304 (18.18% Cr, 9.15%Ni)이다.

레이저 용접열원은 파장(λ)이 10.6 μ m, 최대출력 5.5kW의 연속발전(CW)과 펄스발전(PW)이 가능한 저차(低次) 멀티모드형 빔모드를 가진 CO₂ 레이저이다. 집광광학계는 초점거리 $f=254$ mm의 포물면경(拋物面鏡)을 사용하고 집광시의 빔 직경은 500 μ m, 센터 가스 노즐 직경은 8mm ϕ 를 사용하였다. 용접시 재료의 표면은 레이저 조사직전에 스테인리스제 와이어브러쉬에 의해 산화막을 제거한 후 아세톤으로 탈지(脫脂)하였다. 용접법은 주로 비드 용접(bead welding)으로 하여 용접현상에 영향을 미칠 수 있는 파용접재의 형상차이를 최소화하였다. 또한 용접시의 용융부의 실드 분위기에는 He, N₂ 및 Ar가스를 이용하고, 용접속도는 25~300mm/s로 변화시켜 용접현상을 해석하였다.

2.2 용접현상의 측정방법

레이저 용접시 방출되는 음향신호와 유기 플라즈마로부터의 발광신호를 마이크로폰과 광다이오드에 의해 각각 검출하고, 고속도 비디오카메라를 이용하여 유기 플라즈마와 용융부내에 형성되는 키홀의 거동에 대하여 관찰하였다. 이들 4개의 상황을 전기적으로 동기시켜 레이저 용접현상을 동시계측하였으며 그때의 계측상황을 Fig. 1에 나타낸다.

음향 및 발광신호는 전치 증폭기(preamplifier)에 의해 증폭한 후 분석장치에 의해 100kHz의 데이터 처리속도로 취입하여, A/D변환한 후 고속푸리에 변환(FFT)해석을 행하였다. 음향과 발광신호의 동시계측에 있어서 음원(音源)으로부터 마이크로폰까지의 거리에 대한 음파의 전파시간을 보정하였다. AE계측용 마이크

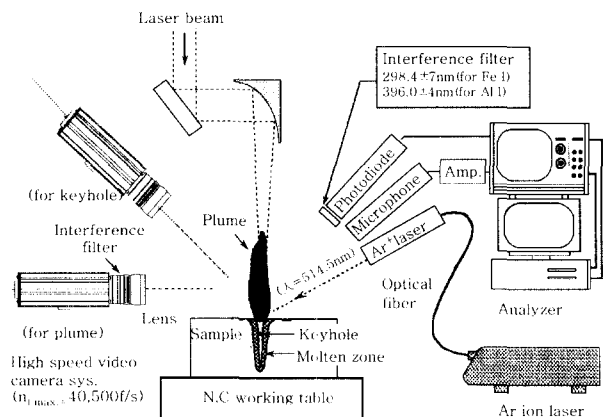


Fig. 1 Schematic set up for high speed video observation of plasma/keyhole and sensing of light/acoustic emission during CO₂ laser welding

로폰과 증폭장치의 주파수 측정범위는 4~40kHz이며, 발광신호분석에 이용한 광다이오드의 감도 파장범위는 200~1000nm(최대감도: 620nm)이다. 또한 광다이오드에는 298.4 \pm 7nm 및 396.0 \pm 4nm의 간섭필터를 채용하고 있는데, 이것은 사용재료인 스테인리스강 STS304와 Al-Mg계 합금의 주된 성분원소인 중성원자 Fe I과 Al I의 발광강도 거동을 조사하기 위하여 이용하였다¹⁴⁾.

그리고, 유기 플라즈마와 키홀거동의 관찰에 사용한 고속도카메라는 최대 촬영속도 40,500f/s이며, 용융부의 조명용 광원으로는 $P_0=24$ W의 Ar⁺레이저($\lambda=514.5$ nm)를 이용하였다. 고속촬영에 의해 얻어진 데이터는 음향 및 발광신호를 해석하는데 있어서 보조적인 자료로서 이용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 레이저 용접시 방출되는 발광·음향 스펙트럼의 특성

레이저 용접시에 방출되는 음향과 발광신호와의 상관을 조사하기 위하여 실험적 검토를 행하였다. 분석대상이 되는 발광원의 여기종(excited element) 선정은 발광분광분석법에 의하여 계측파장을 결정하고¹⁴⁾ 음향신호와 동시계측을 행하였다. 이때 음원으로부터 마이크로폰까지 음파가 도달하는 전파지연시간을 광신호 속도에 대하여 보정하였다.

Fig. 2는 알루미늄합금 A5083에 펄스(pulsed wave : PW) CO₂ 레이저를 일정주기로 조사하였을 때 방출되는 AE 및 LE 스펙트럼의 시간변화를 나타내고, 이때 펄스레이저가 조사된 후 AE 및 LE신호가 방출하기 시작하는 화살표의 시간영역을 확대하여 Fig. 3

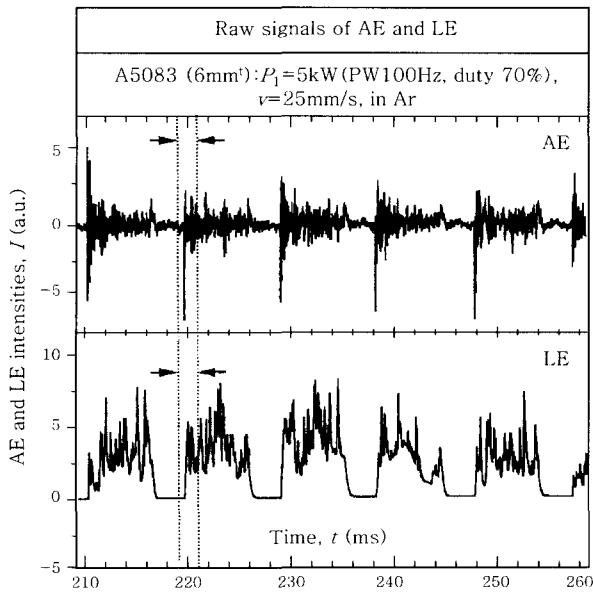


Fig. 2 Raw signal of AE and LE measured during pulsed CO₂ laser welding of A5083 alloy at 70% duty

에 나타낸다. 레이저 조사조건은 레이저출력(P_1) 5kW, 용접속도(V) 25mm/s에서 100Hz·듀티(duty)70%의 구형파 펄스를 Ar실드가스 분위기에서 조사하였다.

Fig. 2의 결과로부터, AE와 LE신호사이에는 매우 긴밀한 상관(相關)이 있음을 알 수 있다. 각 신호를 FFT분석결과로부터도 100Hz의 주파수에서 높은 피크 강도를 나타내고 있음을 확인하였으며 이것은 레이저의 펄스 주파수이기도 하다.

Fig. 3에서 펄스레이저 조사시의 AE와 LE신호와의 상관을 조사한 결과, AE신호가 LE신호보다 다소 빨리 발생하며 그 발생 초기에는 매우 높은 피크강도를 가지고 있음을 알 수 있다. AE신호가 방출하기 시작한 때부터 LE신호가 발생하기까지 약 43 μ s 지연되고 있는데, 이것은 레이저의 에너지 밀도 등 조사조건에 따라 다소의 차이가 있음을 확인하였다. 이러한 현상은 레이

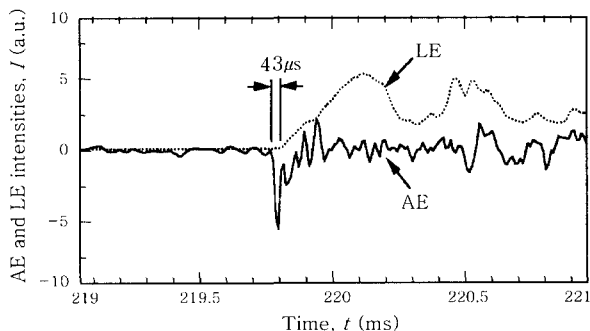


Fig. 3 Comparison of AE and LE near initiation of laser irradiation measured during pulsed CO₂ laser welding of A5083 alloy

저가 조사됨으로써 모재의 급속한 용융과 증발이 우선적으로 발생하고 키흐로부터 분출되는 합금원소의 증발 증기가 용융부 표면으로 상승하면서 빔에너지를 흡수, 고온이 되면서 플라즈마의 착화(着火)현상이 수반된다는 것을 의미한다. 또한 플라즈마 착화 후 AE와 LE의 시간변화는 키흐의 불안정한 거동에 기인한 증발증기의 분출현상에 의해 발생하는 것으로 추정된다¹⁵⁻¹⁷. 즉, AE 및 LE 스펙트럼의 시간변화는 키흐의 거동을 잘 반영하고 있음을 의미하고 있다. AE신호의 초기피크강도가 부(負)의 값을 가지는 것은 외부의 압력변동에 의해 마이크론의 진동판이 처음에 내측으로 밀리는 구조적인 현상에 기인한다.

Fig. 4에는, CW CO₂ 레이저 용접시의 AE 및 LE의 상관에 대하여 조사한 결과를 나타낸다. 급속히 상승하는 높은 피크의 발광강도는 키흐로부터 방출되는 플라즈마의 순간적인 물질이송의 큰 변화에 기인하며, 물질이송의 순간적 변화는 키흐내의 압력변화에 의해서 발생하는 것으로 생각된다.

종래의 연구¹⁵⁾에서는, LE의 정(正)의 피크강도는 AE의 부(負)의 피크강도에 대응한다고 보고되고 있으나, 고정도의 시간분해능에 의한 본 실험의 계측결과 LE의 정의 피크강도 직전에 AE에 의한 부의 피크가 방출되는 것을 명확히 하고 있다. 이것은 키흐로부터 분출되는 합금원소의 증발증기가 용융부 표면으로 상승하면서 빔에너지를 흡수하여 보다 높은 고온의 플라즈마로 되고 있음을 의미하며, 궁극적으로는 키흐내 증기 또는 플라즈마 온도가 용융부 표면으로 팽창하는 플라즈마 온도보다 낮다는 것을 시사하는 것이다.

3.2 발광·음향강도에 미치는 실드분위기 가스의 영향

여러 종류의 실드가스 분위기중에서 용접시의 용입깊이에 미치는 영향을 조사하고, 그때 수반되는 LE 및

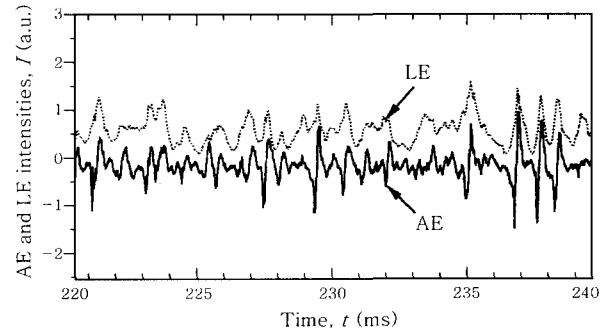


Fig. 4 Comparison of AE and LE intensity measured during CW CO₂ laser welding of A5083 alloy

AE거동과의 상관에 대하여 검토하였다. Table 1에 본 실험에 사용한 실드가스의 물리정수를 나타낸다.

Table 1 Physical constants of shield gases

	Ar	N ₂	He
Mol. wt.	39.948	28.0134	4.0026
Sp. gravity	1.38	0.9676	0.1389
Ionization potential(eV)	15.7	N ₂ -15.65 N-14.52	24.5
Thermal conductivity at 1000 °K[mW/cm °K]	0.427	0.61	3.63

He, N₂ 및 Ar의 각 실드가스중에서 CW CO₂ 레이저에 의한 비드 용접결과를 Fig. 5에 나타내고, 그때 방출되는 AE와 LE강도의 시간변화를 Fig. 6에 각각 나타낸다. 또한 Fig. 7에는 AE와 LE신호의 FFT해석 결과의 한 예를 도시하고 있다. 레이저 조사조건은 $P_1=5\text{kW}$, $f_d=0\text{mm}$ 에서 $V=100\text{mm/s}$ 의 용접속도로 각각 비교·검토하였다.

Fig. 5의 결과로부터, 용접시 적용되는 실드가스의 종류에 따라서 용입깊이는 He>N₂>Ar의 순으로 알아지는 것을 확인할 수 있으며, 이것은 Table 1에 나타내듯이 각 실드가스의 열확산계수 및 전리전압의 차이에 기인하는 실드가스의 플라즈마 형성능(形成能)에 의한 것이다.

또한, Fig. 6과 Fig. 7의 결과로부터 용접시 방출되는 발광·음향신호의 거동과 해석결과에도 큰 차이가 있는데, 이것은 실드가스에 의한 영향이 발광·음향거동에도 그대로 반영되고 있음을 시사한다. 즉, He가스의 경우 저주파수 측에서 피크강도를 나타내고 있는데 반하여, N₂ 및 Ar가스를 사용함에 따라서 저 주파수 영역의 강도는 약하게 되면서 고주파측으로 피크강도가 이동하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 재료에 따라 다소의 차이가 있으나 유사한 결과를 얻을 수 있었으며, 용접현상에 대한 고속도 계측결과 유기 플라즈

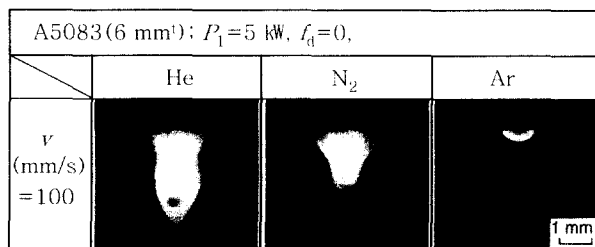


Fig. 5 Cross-sections of CO₂ laser weld beads of A5083 produced in He, N₂ and Ar shielding gases, showing effect of gases on penetration

마와 기질의 거동을 반영하고 있음을 확인하였다.

이상의 결과로부터, 이용하는 실드가스에 의해 AE

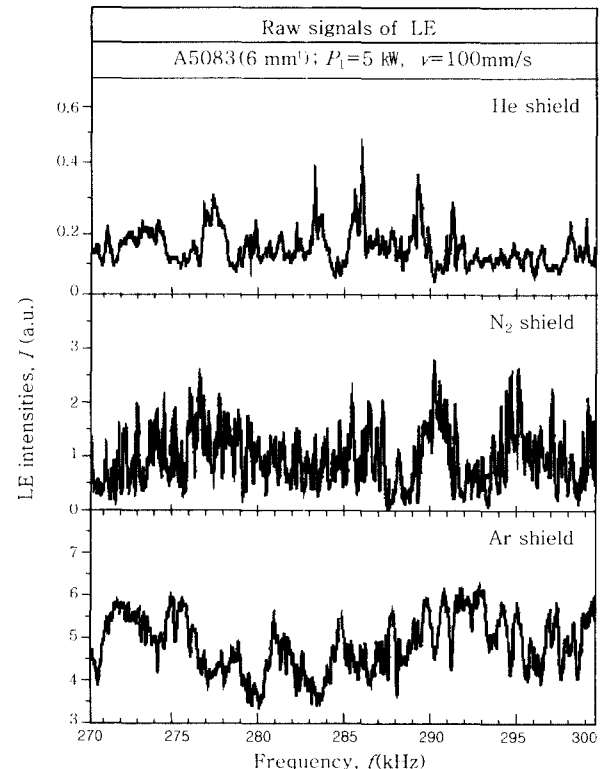
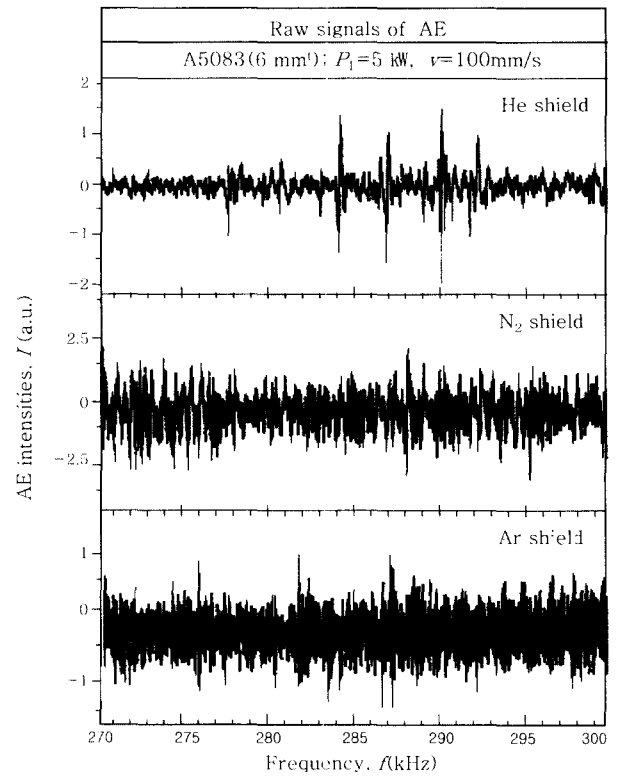


Fig. 6 Comparison of raw signals of AE and LE measured during CO₂ laser welding of A5083 alloy in He, N₂ and Ar shielding gases

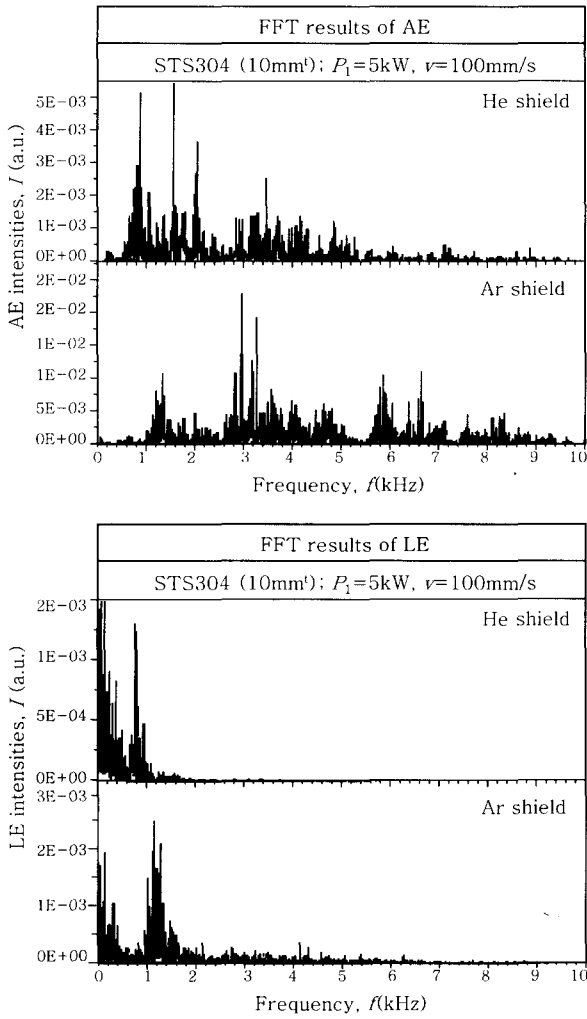


Fig. 7 Comparison of FFT results of AE and LE signals measured during CO₂ laser welding of STS304 in He and Ar shielding gases

및 LE신호가 저주파수에서 고주파로 이동한다는 것은 용융부의 깊이가 얇아짐에 따라 키흐의 주기적 변동시간이 짧게 변화되고 있음을 알 수 있다.

3.3 발광·음향 강도에 미치는 용접속도의 영향

레이저의 용접속도 변화에 따른 용입깊이를 조사하고, 이때 방출되는 AE 및 LE신호와와의 상관관계를 검토하기 위해 주파수 해석을 행하였다.

우선, He 및 Ar실드가스 분위기에서 비드용접시의 용입깊이에 미치는 용접속도의 영향을 조사하고 그 단면형상의 관찰예를 Fig. 8에 나타내고, 용입깊이의 측정결과를 Fig. 9에 나타낸다. 사용재료는 STS304 (10mm³)이며, 레이저 조사조건은 P₁=5kW, f₀=0mm에서 용접속도를 25~300mm/s까지 변화시켰다. 용입깊이는 용접속도가 증가함에 따라 얇아지고 있으며, Ar

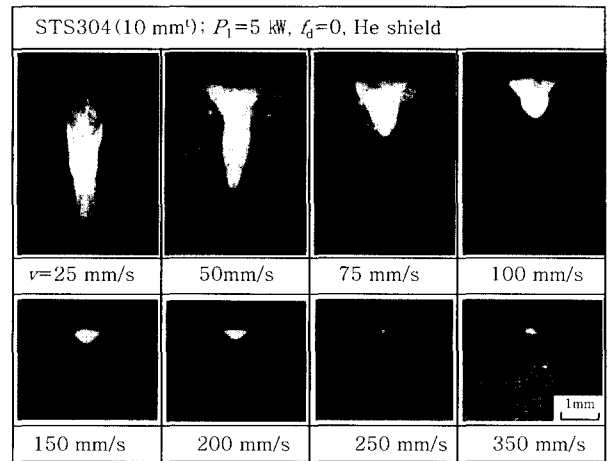


Fig. 8 Cross-sections of CO₂ laser weld beads of STS304 produced at various welding speeds in He shielding gas

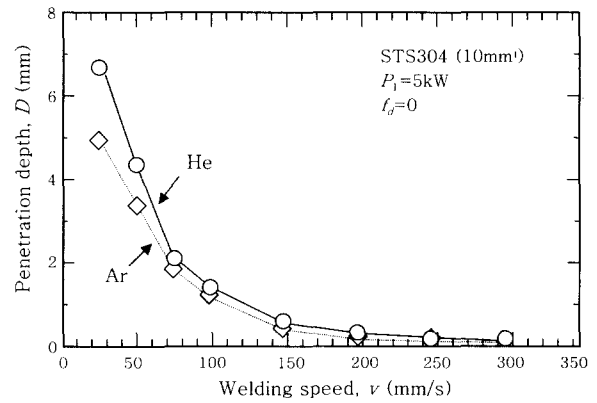


Fig. 9 Penetration depths of CO₂ laser weld beads of STS304 made in He and Ar shielding gases

보다는 He실드조건에서 보다 깊은 용입이 이루어지고 있다.

Fig. 10에는 He실드분위기에서 용접속도 25~300 mm/s에서 얻어진 AE 및 LE신호의 주파수 분석결과를 나타낸다. AE와 LE의 상관성이 확인되는 주파수 영역을 그림중에 화살표로 표시하였다. 25mm/s의 저속도 용접에서는 AE와 LE의 상관에 대한 뚜렷한 차이가 관찰되지 않고 있으나, 속도가 증가함에 따라 그 상관성이 확인되고 있다. 즉, 용접속도를 증가함에 따라 AE 및 LE의 주파수 성분은 고주파수 영역으로 이동하고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 그때의 고속도카메라로 측정한 유기플라즈마 및 키흐거동의 관찰결과와 동일한 경향을 나타내고 있음을 확인하였다.

저속도(50mm/s)의 용접에서 AE 및 LE의 상관성이 확인되지 않는 것은, 저속도 용접의 경우 용융부에 형성되는 키흐와 플라즈마의 거동이 용접진행방향에 대해서 좌우 및 전후로 크게 변화하고 있음을 고속도 비데

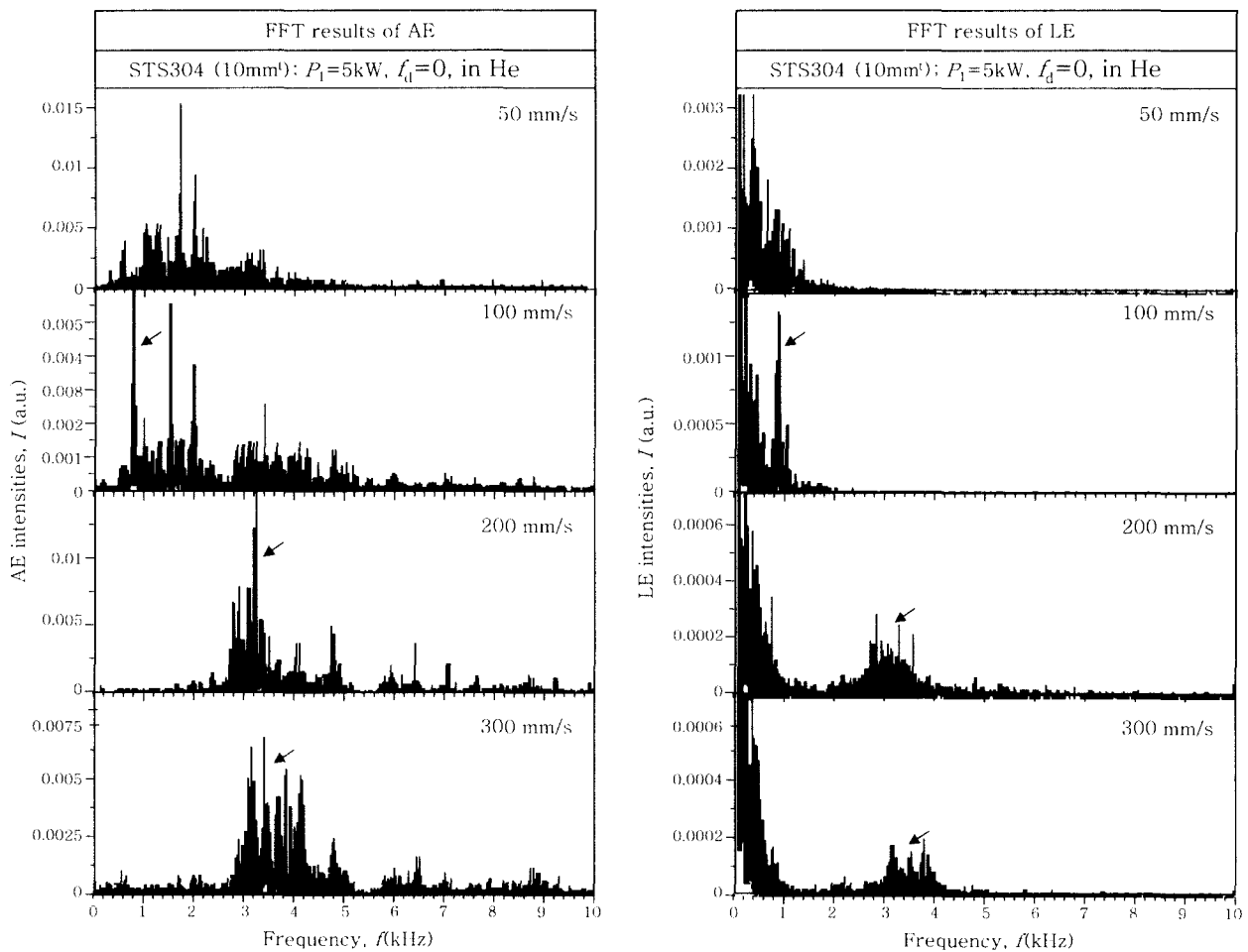


Fig. 10 Comparison of FFT results of AE and LE signals measured during CO₂ laser welding of STS304 at various welding speed in He shielding gas

오의 이미지 관찰로부터 확인 할 수 있었는데, 이러한 상호 불규칙적인 거동에 의해 AE와 LE의 상관을 나타내는 주파수는 서로 상쇄되거나 약하게 되어 뚜렷한 피크강도를 나타내지 못하는 것으로 판단된다.

이상의 결과로부터, 용접속도를 변화시킬 때 방출되는 AE와 LE신호에는 상관이 확인되었으며, 이러한 상관성을 갖는 AE와 LE의 주파수는 용접속도가 증가할수록 고주파수측으로 이동하게 되는데, 이것은 용접부의 용융깊이 감소 즉, 용융부에 형성되는 키크 및 유기 플라즈마의 고유진동수 증가를 반영하고 있는 것으로 생각된다.

3.4 용접 결함 발생시의 발광·음향강도의 거동

본 실험에서는, 불안정한 용접비드가 발생하는 용접 조건을 선정하여 용접비드 단면을 관찰함과 동시에 용접시 방출되는 AE와 LE신호의 상관을 조사하여 비드 결함 발생시의 실시간 검출가능성에 대하여 평가하였다.

알루미늄합금 A5083(6mm³)의 CW CO₂ 레이저 용

접시에는, Al합금의 높은 빔에너지 반사율에 기인하여 고속의 특정 용접조건에서 불안정한 비드가 연속적으로 발생하게 된다. 그때의 용접비드 형상의 변화와 레이저 정지시의 크레이터 부분을 Fig. 11에 나타내고, 그림 중 화살표 부위의 비드단면을 Fig. 12에 각각 나타낸다. 또한 Fig. 11의 불안정 비드가 발생시 실시간 계측한 AE와 LE신호의 시간변화를 Fig. 13에 나타낸다. 레이저 조사조건은 $P_1=5\text{kW}$, $V=200\text{mm/s}$, $f_d=0$

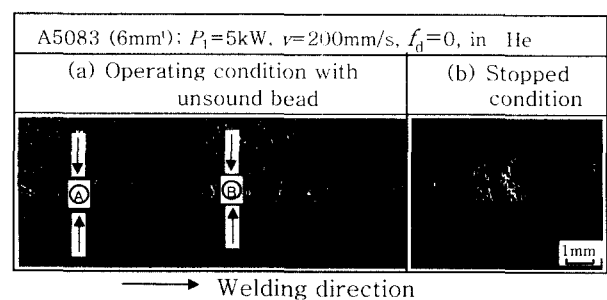


Fig. 11 Bead surface appearance of A5083 laser weld showing unsound bead formation in He shielding gas

mm에서 He실드가스 중에서 비드 용접을 행하였다.

불안정한 용접비드의 용입깊이 차이가 0.5mm정도에 지나지 않음에도 불구하고 용입깊이 변화에 따른 AE 및 LE의 강도변화는 섬세하게 그것을 잘 표현하고 있음을 알 수 있다. 또한 비드변화가 발생하는 각각의 시간영역에서 FFT분석결과 보다 얇은 용입깊이에서 고주파 성분의 피크강도가 다수 검출되고 있음을 확인하였다. 또한, Fig. 11(b)의 비드 크레터 부분은 레이저가 일시적인 정지상태에서 조사되었기 때문에 AE 및 LE 강도가 매우 크게 나타나고 있으며, FFT분석결과 저주파수의 성분이 강하게 검출되었다.

이상의 결과로부터, 불안정한 비드 발생시에 AE 및 LE 강도는 민감하게 반응하며 그 현상에 대한 고정도·고신뢰성의 실시간 모니터링이 가능하다는 것을 확인하였다. 또한 FFT해석에 의한 주파수 분석결과로부터도 AE와 LE신호강도 사이에는 강한 상호관련성이 입증되었다.

4. 결 론

키홀 용접현상을 이해하고 용접현상의 실시간 모니터링에 관한 지견을 얻기 위하여 용접시 방출되는 AE와 LE신호 특성 및 그 상관에 대하여 검토하였다. 이러한

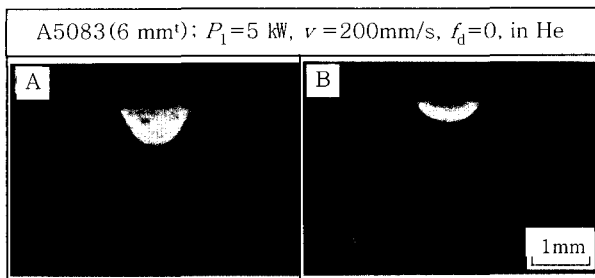


Fig. 12 Cross-sections of unsound CO₂ weld beads formed in Fig. 11(A and B position)

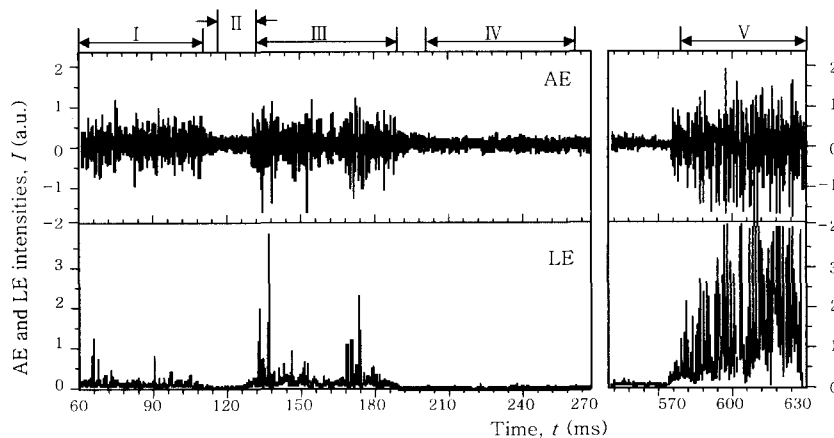


Fig. 13 Raw AE and LE signals measured during CO₂ laser welding in Fig. 11, showing drastic change in signal intensities after formation of unsound bead

분석결과를 용접 결함 발생시의 실시간 모니터링에 적용하여 그 가능성과 신뢰성을 평가하였다. 본 연구에서 얻어진 결과를 다음에 정리한다.

1) 펄스 CO₂ 레이저 용접시의 AE 및 LE의 상관을 조사한 결과, AE신호가 LE신호보다 다소 빨리 발생하고 발생초기의 강도는 매우 높은 부(負)의 피크강도를 가지고 있다. 이것은, 레이저가 조사됨으로써 모재의 급속한 용융과 증발이 우선적으로 발생하고 키홀로부터 분출되는 합금원소의 증발증기가 용융부 표면으로 상승하면서 빔에너지를 흡수, 고온이 되면서 플라즈마의 착화현상이 수반된다는 것을 의미한다. 즉, 키홀내의 증기 또는 플라즈마 온도가 용융부 표면으로 팽창하는 플라즈마 온도보다 낮다는 것을 시사한다.

2) CW 용접시의 LE강도의 시간변화에 있어서, 급격히 상승하는 높은 피크의 발광강도는 키홀로부터 방출되는 플라즈마의 순간적 물질이송의 큰 변화에 기인하고, 물질이송의 순간적 변화는 키홀내의 압력변화에 의하여 발생하는 것으로 추정된다.

3) AE 및 LE의 주파수 성분을, 펄스와 같은 일정한 반복 조사조건인 경우 하나의 스펙트럼으로서 관찰되지만, 연속조사의 경우 특정피크가 존재하지 아니하는 어느정도의 높은 강도를 가진 스펙트럼군(群)으로서 관찰되었다. 이것은 연속용접의 경우 AE와 LE의 시간적 변화가 주기성을 가지고 있으나 어느정도의 범위에서 그 폭이 다소 유연하게 변화하고 있음을 시사한다.

4) 용접비드의 용입깊이는, 사용하는 실드가스에 따라서 He>N₂>Ar의 순으로 얇게되고 AE 및 LE의 거동도 저주파수로부터 고주파수로 이동하고 있음을 확인하였다. 이러한 경향은 A5083과 STS304 양자 모두 피크강도를 나타내는 주파수의 차이는 있으나 동일하였다. 이것은 실드가스의 열확산계수와 전리전압 등의 차이에 의해 용융부의 깊이가 얇게 바뀔에 따라서 키홀의

주기적 변동시간이 짧아지는 것을 시사한다.

5) 용접속도가 증가하게 되면 용입깊이는 얇게되고, 그 때의 AE 및 LE신호에는 상호관련성이 있음이 밝혀졌다. 또한 이들의 상관을 가진 AE 및 LE의 주파수는 용접속도가 증가할수록 저주파수로부터 고주파측으로 이동하였다. 이와같은 현상은 4항의 결과와 같이 용접부의 용입깊이 감소에 따라 용융부에 형성되는 키홀의 고유진동수의 증가를 반영하고 있는 것으로 추정된다.

6) 불안정한 비드가 발생하는 용접조건에서 AE 및 LE강도는 0.5mm정도에 지나지 않는 용입깊이의 변화를 실시간으로 섬세하게 표현할 수 있었다. 이것은 용접중 발생하는 비드 결함에 대하여 고정도·고신뢰의 모니터링이 가능하다는 것을 입증하고 있다. 또한 주파수 분석결과로부터도 AE와 LE신호강도 사이에는 강한 상관성이 있음을 확인하였다.

후 기

이 논문은 1999년도 한국학술진흥재단의 연구비(KRF-99-003-E00533 E5104)에 의하여 연구되었으며 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. T. Ishide, Y. Nagura et al. : High Power YAG Laser Welded Sleeving Technology for Steam Generator Tubes in Nuclear Power Plants, Laser Advanced Materials Processing(LAMP92), 2(1992), 957-962
2. K. Kamimuki, T. Nakabayashi, T. Inoue, M. Watanabe and A. Matsunawa : Analysis of Acoustic and Spectrum Signals During Spot Welding by CO₂ Laser, ICALEO'98, Laser Institute of America, 1998, Section C 34-42.
3. Jong-Do Kim, Young-Sik Kim : The State of In-Process Quality Monitoring Technology in Laser Welding, Journal of KWS, 18-4(2000), 433-440(in Korean)
4. H. Park, Y. Park and S. Rhee : Laser Weld Quality Monitoring System, International Journal of KWS, 1-1(2001), 7-12
5. I. Miyamoto and K. Mori : Development of In-Process Monitoring System for Laser Welding, ICALEO'95, Laser Institute of America, 80(1995), 759-767
6. E. Beyer and P. Abels : Process Monitoring in Laser Materials Processing, Laser Advanced Materials Processing(LAMP92), (1992), 433-438
7. T. Ishide et al. : High Power YAG Laser Welding and Its In-Process Monitoring Using Optical Fibers, Proc. ECLAT, (1994), 183-192.
8. L. Li, W.M. steen : Non-Contact Acoustic Emission Monitoring during Laser Processing, ICALEO'92, Laser Institute of America, (1992), 719-728
9. L. Li, W. M. steen, K. Shi and D.J. Brookfield : Sensor Development for In-Process Quality Inspection and Optimization of High Speed Laser Can Welding Process, Laser Advanced Materials Processing(LAMP92), (1992), 415-420
10. M. Watanabe, H. Okado, T. Inoue, S. Nakamura and A. Matsunawa : Features of Various In-Process Monitoring Methods and Their Applications to Laser Welding, ICALEO'95, Laser Institute of America, 80(1995), 553-562
11. V.V. Semak, J.A. Hopkins, M.H. McCay and T.D. McCay : Melt Pool Dynamics during Laser Welding, J. Physics. D : Appl. Phys., 28(1995), 2443-2450.
12. A. Kaplan : A Model of Deep Penetration Laser Welding Based on Calculation of the Keyhole Profile, J. Physics. D : Appl. Phys., 2(1994), 1805-1814.
13. A. Matsunawa, J.D. Kim and S. Katayama : Porosity Formation in Laser Welding -Welding Mechanism and Suppression Methods-, ICALEO'97, Laser Institute of America, 82(1997), G73-82.
14. A. Matsunawa, J.D. Kim, T. Takemoto and S. Katayama : Spectroscopic Studies on Laser-induced Plume of Aluminum Alloy, ICALEO'95, Laser Institute of America, 80(1995), 719-728
15. W. Gatzweiler, D. Maischner, E. Beyer : On-line Plasma Diagnostics for Process-Control in Welding with CO₂ Laser, SPIE, 1020(1998), 142-148
16. T. Klein, M. Vicanek, J. Kroos, I. Decker and G. Simon : Oscillation of the Keyhole in Penetration Laser Beam Welding, J. Physics. D : Appl. Phys., 27(1994), 2023-2030.
17. H. Gu and W.W. Duley : Resonant Acoustic Emission during Laser Welding of Metals, J. Physics. D : Appl. Phys., 29(1996), 550-555.