

조선용 아연코팅강판의 CO₂ 레이저 겹치기 용접시 인프로세스 측정신호와 용접결함과의 관련성

김종도*, 이창제**, 이재범**, 서정†

*한국해양대학교 기관시스템공학부, **한국해양대학교 대학원, †한국기계연구원

The Relationship between In-process Signals and Weld Defect in CO₂ Laser Lap Welding of Zn-coated Steel for Shipbuilding

Jong-Do KIM*, Chang-Je LEE**, Jae-Bum LEE** and Jeong Suh†

*Division Marine System Engineering, Korea Maritime University

**Graduate School, Korea Maritime University

†Department of High Density Energy Bead Processing and System, KIMM

Abstract

The in-process monitoring of CO₂ welding of Zn-coated steel plates has been studied and compared with that of conventional thin plates. Relationships between weld defects and plasma emission signals were evaluated in laser lap joint of thick Zn-coated steel. According to the study, weld defects were found to increase with Zn content. As a result, measured plasma emission signals also decreased. In case of plate with 15 μ m-thick Zn-coated layer, defects caused by evaporation of Zn could, therefore, be controlled by gap of 0.1mm, resulting in stable emission signals. However, the amplitude of signals fluctuated very widely. Variation of amplitude should be limited in 3-8V by FFT smoothing.

Keywords: CO₂ laser, lap welding, Zn-coated steel, weld defect, plasma emission signal, monitoring

1. 서론

레이저 용접의 응용은 일본을 비롯한 유럽 등지의 선진국에서 꾸준히 확대되고 있지만, 많은 연구자가 기대한 만큼 빠른 스텝으로 진전되고 있지는 않다. 그 원인은 레이저 가공시의 측정신호를 용접 현상과 정확히 일치시키기 어렵다는 점 때문이다. 또한 금속재료학적 측면을 도외시한 신호가공에 의한 단편적인 해석과 극단시간의 용접에 따른 계측의 어려움 등이 있으나 관련 연구는 몇몇 연구진을 중심으로 꾸준히 이루어지고 있다.^{1,2}

그러나 레이저 용접시 발생하는 용접결함에 대한 실시간 모니터링기술은 각국의 기업별로 현장에 최적화된 시스템을 독자 개발하여 적용하고 있으며, 이 기술은 현장의 핵심기술로써 기술보안에 의해 그 규모 및 활용정도는 정확히 파악하기 힘들다. 또한, 현재 해외의 레이저 제조업체에서는 이들의 모듈화를 시도하여 시장을 선점하려는 움직임

을 보이고 있다.³⁻⁶

따라서 본 연구에서는 선박용 아연코팅강판의 레이저 겹치기 용접시 발생하는 유기 플라즈마로부터의 광신호와 음향신호를 동시계측하여 용접비드의 험핑현상과 스패터를 수반한 용접결함의 발생여부와 신호와의 관성을 분석하고자 하였다.

2. 사용재료 및 실험방법

본 연구에 사용된 레이저 용접용 재료는 Zn-riched primer가 코팅된 조선용 구조용강 AH36으로 두께는 6mm이며 그 화학적 조성을 Table 1에 나타낸다.

Table 1 Chemical composition of primer coated steel

Element Material	C	Si	Mn	P	S	Fe
AH36 (t = 6mm)	0.16	0.40	1.44	0.023	0.005	bal.

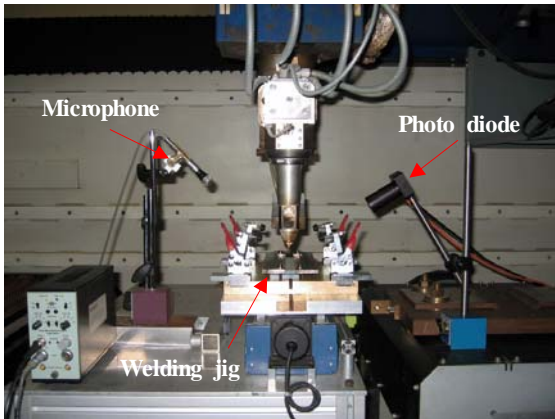


Fig. 1 Experimental setup for signal measurement in laser welding.

시험편은 15 μ m와 30 μ m의 primer가 코팅된 강판과 코팅막을 제거한 비코팅 강판의 3종류를 사용하였다. 레이저 용접은 겹치기 용접시 코팅막의 두께 및 갭간극에 따라 플라즈마 방사광 및 음향 신호를 측정하였다.

실험에 사용된 레이저 용접열원은 최대출력 6kW의 RF 여기방식 고속 축류형(fast axial flow) CO₂ 레이저를 사용하였으며, Beam mode는 TEM₀₁*, 빔의 확산각은 1.5mrad 미만이다. 또한 집광광학계의 초점길이(f_d)는 270mm이며 동축 실드가스 노즐(coaxial shield gas nozzle)을 사용하여 15 ℓ /min의 He으로 용접부를 실드하였다.

더불어 아연코팅강판의 레이저 용접시 발생하는 유기 플라즈마의 발광 및 이에 따른 방사음향의 계측을 위해, 포토다이오드(photo diode)와 마이크론(microphone)을 사용하였다. 본 연구에 사용된 포토다이오드의 측정 파장폭은 200 - 1,100nm이고, 마이크론의 신호감도(S_0)는 -37.9dB re 1V/Pa로 약 95%의 신뢰도를 나타내는 센서를 각각 사용하였다.

실험시 포토다이오드는 레이저 집광 광학계와 시편과의 간섭을 고려하여 30°로 하였으며, 마이크론은 45°의 각도로 방사음향을 계측하였다. 이때 각 센서와 용접부와의 거리는 200mm로 설정하였다. 또한 포토다이오드는 용접시 비산하는 스패터로부터 센서를 보호하기 위해 센서의 선단에 보호글래스를 두었다. Fig. 1에 방사신호의 계측을 위한 실험사진 및 모식도를 나타낸다.

이때 안정된 용접상태의 신호를 계측하기 위해 용접 후 시편으로부터 20mm지난 지점에 계측시작 트리거(trigger)를 두었다. 또한 수집되는 신호의 샘플레이트(sampling rate)는 200kHz로 설정하였으며 광과

음향 그리고 트리거의 세 신호를 동시 계측하였다.

3. 실험결과 고찰

3.1 코팅조건에 따른 겹치기 용접

겹치기 용접의 경우 코팅두께나 겹침부의 영향이 현저하게 나타남으로써 용접현상에 많은 차이를 보였다. 특히, 겹침부에 존재하는 primer는 기공의 발생경향에 지대한 영향을 미치고 있음을 확인 하였다.

실험은 집광광학계의 비초점거리(f_d)를 -2mm로 일정하게 하였으며, 출력 P 는 최대출력인 6kW에서 용접속도(v) 1m/min으로 He 실드가스 분위기(15 ℓ /min)에서 용접을 실시하였다. 또한 용입특성에 미치는 겹침부 사이의 Zn의 영향을 검토하기 위해 별도의 겹치기 간극을 두지 않았다.

Lap welding: $f_d = -2\text{mm}$, $P = 6\text{kW}$, $v = 1\text{m/min}$, $G_c(\text{mm}) = 0$, He(15 ℓ /min)			
Weld bead $t_{pr}(\mu\text{m})$	Trans. section of bead	Longi. section of bead	Bead appearance
0			
15			
30			

Fig. 2 Various penetration as a function of thickness of Zn coating in lap welding.

Fig. 2에 Zn의 코팅두께(t_{pr}) 별로 형성된 용접비드의 횡단면, 종단면 및 전면비드(front bead)의 형상을 보이고 있다. 실험의 결과로부터, $t_{pr}(\mu\text{m})$ 가 0인 비코팅강판의 경우에는 용접부 단면이나 비드에서 별다른 결함을 찾아볼 수 없었으나, 코팅두께가 증가함에 따라 용접부의 결함이 두드러지고 있는 것을 알 수 있다. 특히 코팅막이 있는 15 μ m와 30 μ m에서는 코팅량 증가에 따른 용접부 내부의 기공이나 험핑비드의 발생이 현저하게 증가하는

것을 알 수 있는데, 이는 코팅량 증가에 따른 Zn의 증발량 증가에 기인한 것이다.

Fig. 3은 겹치기 용접시의 광 및 음향의 계측신호와 대응비드를 나타낸다. 우선 신호의 진폭변화를 살펴보면 코팅량 증가에 따라 광신호와 음향신호의 진폭이 감소하고 있으며, 신호의 레벨(level)도 동시에 하락하는 것으로 나타났다. 이는 코팅량 증가에 따른 Zn의 급격한 증발이 키홀을 불안정하게 하여 키홀로부터 분출되는 플라즈마가 안정화되지 못하고 스패터의 비산을 유도하므로 플라즈마 방사신호가 감소되기 때문이다. $t_{pr}(\mu\text{m}) = 15$ 와 30 에서 보듯이 신호와 대응비드의 결합부가 매우 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있는데, 겹침부 사이에서 급격하게 증발한 스패터나 험핑은 순간적으로 플라즈마의 발생을 방해하며, 이때의 플라즈마 강도변화가 광이나 음향신호에도 그대로 반영되고 있다.

또한 결합발생 조건에서 계측된 광신호는 그래프의 바닥에서부터 신호가 플러트되는데, 이는 불안정한 키홀에 의해 지속적인 플라즈마의 생성이 어렵기 때문에 연속광이 측정되지 않는다는 것을 알 수 있다.

이러한 신호의 변화는 Fig. 4와 같이 FFT를 통해서 보다 명확하게 나타나는데, 결합이 없는 비코팅 강판에서는 키홀의 안정적인 주기운동으로 광신호에서는 약 800Hz 부근에서 피크(peak)를 감지할 수 있으며, 음향신호도 약 1kHz 근방에서 강한 피크가 나타났다. 그러나 $t_p = 15\mu\text{m}$ 에서는 키홀의 주기운동이 불안정해져 800Hz 부근에서 나타났던 광신호의 피크도 관찰되지 않았으며 음향신호의 피크도 매우 약해진 모습을 볼 수 있다. t_p 가 $30\mu\text{m}$ 로 증가하면 키홀의 움직임은 더욱더 불안정해져 대부분의 비드가 험핑비드를 형성하므로 키홀의 주기운동은 거의 일어나지 않아 200Hz 미만의 저주기 광신호도 매우 미약해졌으며, 음향신호의 피크도 잡음신호와 분간하기 어려웠다.

3.2 갭간극에 따른 신호의 변화

앞서 살펴본 바와 같이 아연코팅조건은 겹치기 용접시 용접금속 내 기공이나 스패터 발생에 지대한 영향을 미치고 있음을 확인하였다. 또한 겹치기 용접시 기공과 스패터 발생의 주된 지배인자는 겹침부에 코팅된 Zn의 증발에 의한 것임을 확인 하였다. 더불어 이러한 거동은 광 및 음향신호에서 지대한 영향을 주어 계측된 신호에 그대로 반영되고 있음을 알 수 있었다.

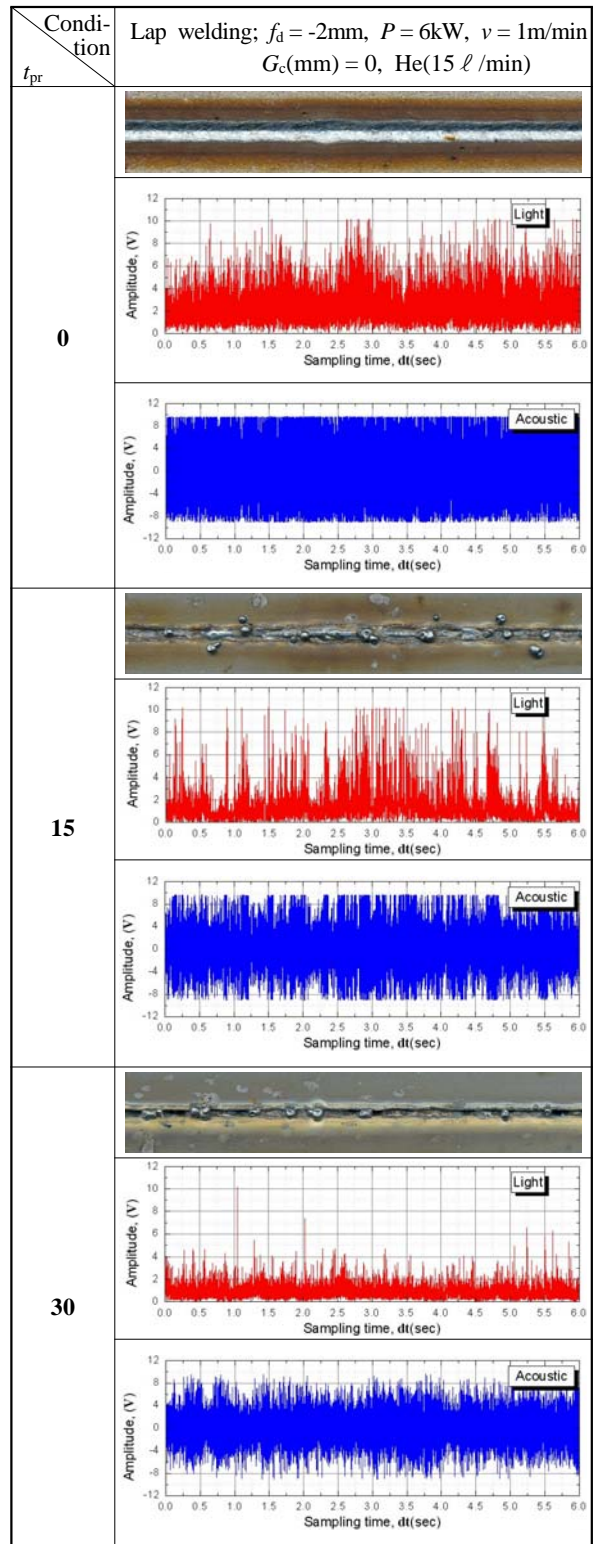


Fig. 3 Change of plasma emission signals as a function of thickness of Zn coating in lap welding.

따라서 본 절에서는 겹치기 용접시 Zn의 증발 메커니즘에 대해 주목하고, 겹침부에 형성되는 Zn의 증발압력을 배출시키기 위하여 갭(gap)간극

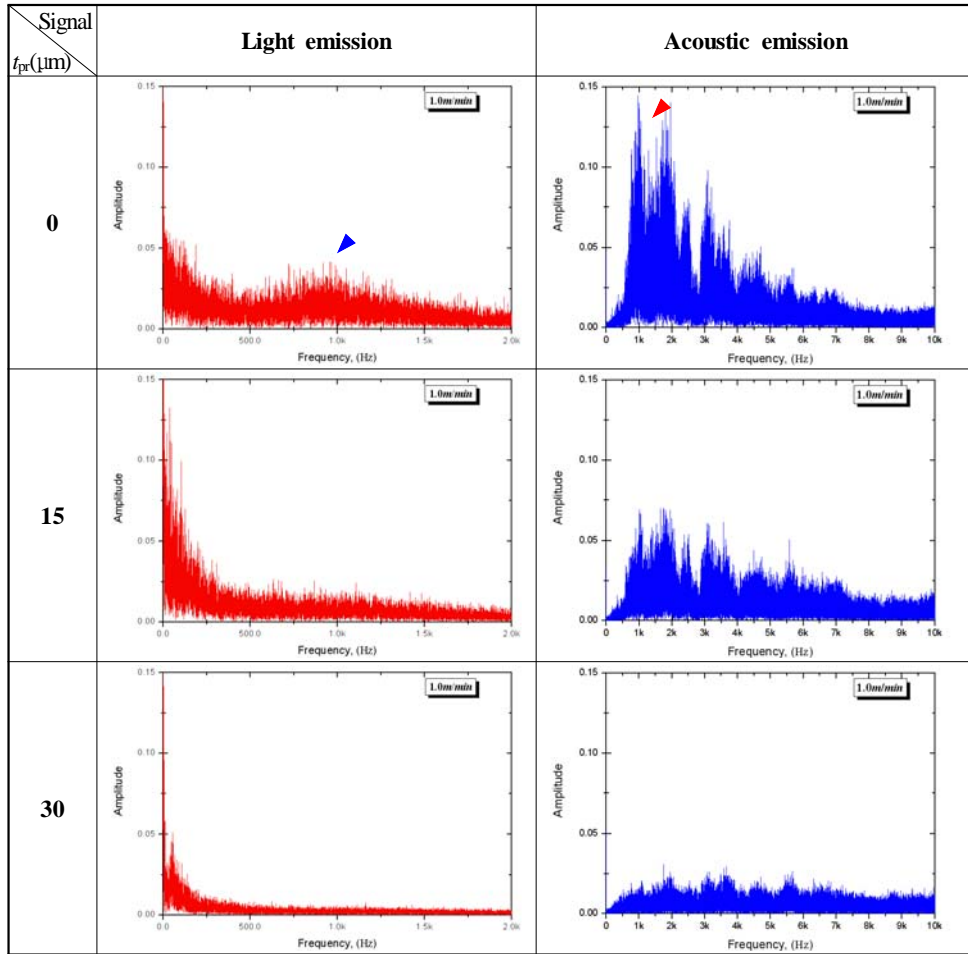


Fig. 4 FFT results of various plasma emission signals as a thickness of coated Zn.

을 돕으로써 용융금속에 미치는 영향을 최소화하고자 하였다.

Fig. 5는 15 μm 아연코팅강판에 대하여 최대출력 (P) = 6kW, 용접속도(v) = 1m/min, 비초점거리($f\hat{a}$)를 -2mm로 하고, 갭간극(Gc)을 0.1mm와 0.25mm로 변화시켰을 때의 용접특성을 나타낸다. $Gc = 0.1\text{mm}$ 에서는 갭간극이 없을 때와 비교하여 급격히 증발된 Zn증기가 갭 사이로 원활히 배출되면서 키홀의 거동이 안정적으로 나타나 건전한 비드가 형성된 것을 알 수 있으며, 광신호와 음향신호의 진폭변화도 안정되어 있고 주기변화도 크지 않게 측정되었다.

그러나 Gc 를 0.25mm로 증가시키면 갭간극이 없을 때보다 험핑비드의 형성이 매우 크게 나타나는데, 이러한 현상은 갭간극의 증가에 따라서 키홀을 지탱하는 용액의 일부가 폭발적으로 증발하는 Zn에 의해 겹침부위를 따라 소실되기 때문이며, 그 소실된 만큼의 비드표면에 험핑비드가 형성되

고, 이러한 거동이 플라즈마에 영향을 주어 결합이 있는 A, B, C 및 D 부분의 신호강도가 매우 낮게 나타나고 있으며, 진폭의 변화도 스패터가 발생한 부분에서 크게 맥동하고 험핑비드가 형성되는 부분에서는 진폭의 변화가 거의 감지되지 않았다.

그러나 원시신호(raw signal) 및 FFT 결과만으로는 레이저 용접시 모니터링을 위한 신호검출이 곤란하다. 우선 원시신호의 경우 신호의 진폭이 너무 커 임계값을 설정하기가 매우 곤란하며, 다음으로 FFT 결과도 주파수 대역의 이동이 매우 미세할 뿐만 아니라 피크의 범위를 한정 짓기가 어려운 것이 사실이다. 더불어, 음향신호의 경우 주위의 소음 및 돌발적인 환경에 취약하기 때문에 실제 공정의 적용에는 많은 어려움이 예상된다.

따라서 이러한 문제점을 해소하기 위해, 광신호의 원시신호를 FFT 평활화(smoothing)하여, 그 정도를 비교·평가한 후, 신호검출의 임계값을 설정하였다.

Fig. 6에 15 μm 의 아연코팅조건에서 갭간극에 따

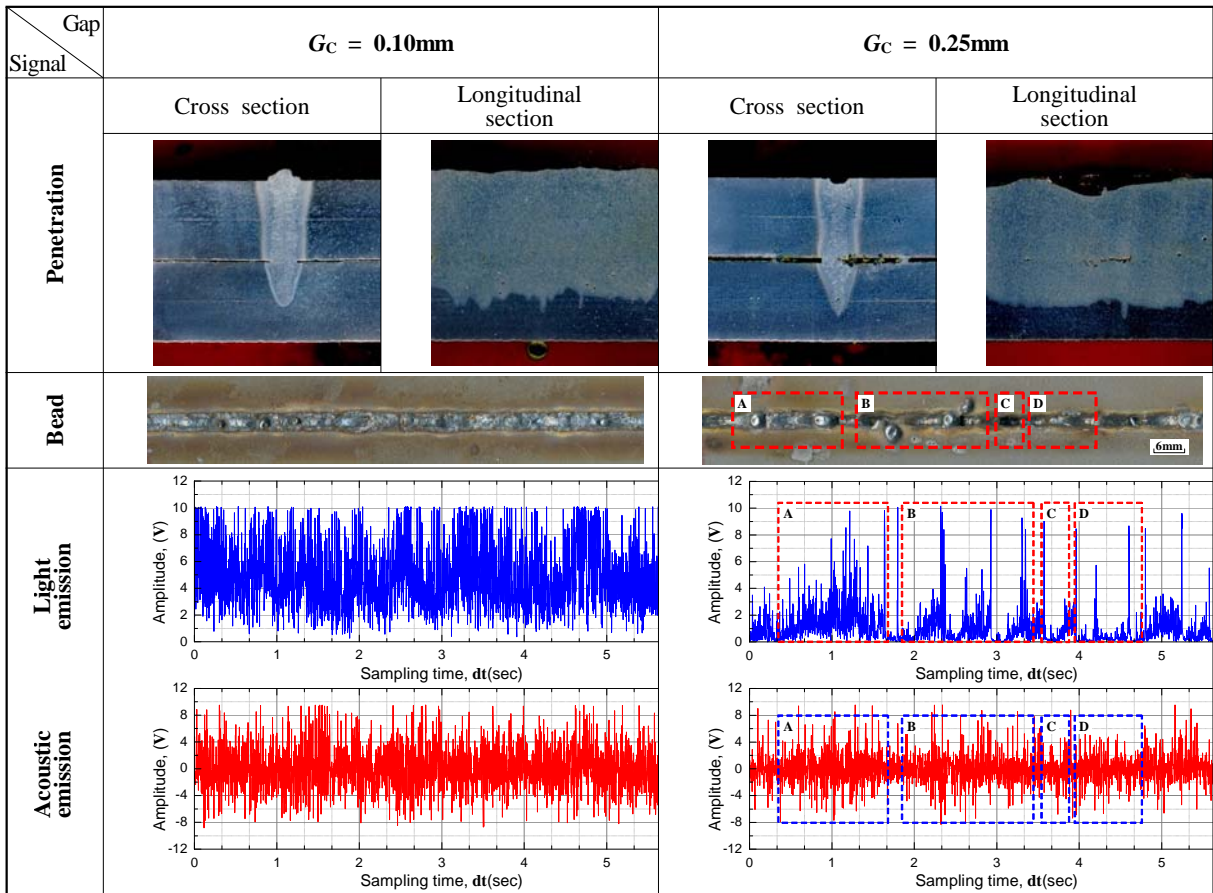


Fig. 5 Comparison of plasma emission signal and weld bead by a gap clearance of 0.1mm and 0.25mm.

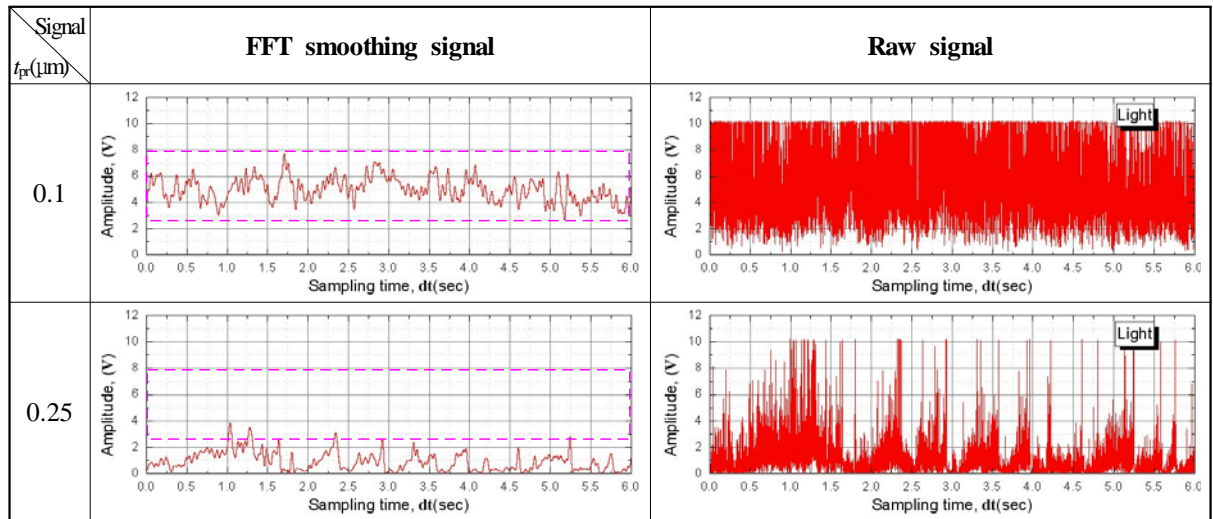


Fig. 6 FFT smoothing and raw data of light emission signals change of gap clearance in lap welding of Zn coated steel to a thickness of 15 μm .

른 원시 광신호와 그 신호의 FFT 평활화 결과를 나타낸다. 그림에서도 알 수 있듯이 건전한 비드가 형성되는 겹간극(G_c) 0.1mm는 FFT 평활화시 약 3-8V 범위의 값을 갖는다. 이 외의 겹간극은 이 범

위보다 낮은 값을 갖는 것을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 15 μm 의 아연코팅강판의 겹치기 용접시의 검출 임계조건을 3-8V범위로 한정하여 모니터링을 실시한다면 임계조건에 가중치나

별도의 조건 등을 부여하지 않아도 어렵지 않게 신뢰성 있는 결합검출이 가능할 것으로 기대된다.

4. 결 론

조선용 아연코팅강판의 CO₂ 레이저 겹치기 용접시 인프로세스 측정신호와 결합과의 관련성을 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 1) 코팅두께가 증가함에 따라 용접부에 기공과 험핑비드의 발생이 증가하는데, 이는 코팅량 증가에 따른 Zn의 증발량 증가에 기인한 것이다.
- 2) 광 및 음향신호의 진폭변화는 코팅량 증가에 따라 진폭과 레벨이 감소하는데, Zn의 급격한 증발이 키홀을 불안정하게 하여 스파터의 비산 등으로 플라즈마 방사신호가 감소되기 때문이다.
- 3) 겹침부 사이에서 급격하게 증발한 스파터나 험핑은 순간적으로 플라즈마의 발생을 방해 하며, 이때의 변화가 신호에도 반영되고 있다.
- 4) FT를 통해서 분석한 키홀의 안정적인 주기 운동은 광신호에서는 약 800Hz, 음향신호는 약 1kHz 근방에서 강한 피크가 나타났다. 그러나 코팅량이 증가함에 따라 키홀의 주기 운동이 불안정해져 광신호와 음향신호의 피크가 관찰 되지 않았다.
- 5) 갭간극(Gc) 0.1mm에서는 급격히 증발된 Zn 증기가 갭 사이로 원활히 배출되어 건전한 비드가 형성됨으로 해서 광신호와 음향신호의 진폭변화도 안정되게 측정되었으며, Gc = 0.25 mm에서는 갭간극이 증가하여 키홀내의 용액 일부가 Zn에 의해 소실되어 험핑비드를 형성 하면서 플라즈마에도 영향을 주어 신호는 스파터가 발생한 부분에서 크게 맥동하고 험핑 비드가 형성되는 부분에서는 진폭의 변화가 거의 감지 되지 않았다.
- 6) 갭간극에 따라 신호를 FFT 평활화한 결과 Gc = 0.1mm에서 약 3-8V범위의 값을 갖는 임계 검출조건을 도출하였으며, 이를 통하여 신뢰성 있는 결합검출이 가능할 것으로 기대 된다.

참고문헌

- 1) Kim, J.D. and Lee, C.J., 2009, "A Study on Characteristics of Plasma Emission Signals with Welding Conditions in CO₂ Laser," Journal of KSME(A), Vol. 33, No. 11, pp. 1256-1261.
- 2) Kim, J.D. and Kim, Y.S., 2000, "The State of In-Process Quality Monitoring Technology in Laser Welding," Journal of KWJS, Vol. 18, No. 4, pp. 433-440.
- 3) I. Miyamoto and K. Mori, "Development of In-Process Monitoring System for Laser Welding," ICALOE'95, Laser Institute of America. 80, pp. 759-767, 1995.
- 4) T. Ishide et al., "High Power YAG Laser Welding and Its In-process Monitoring Using Optical Fiber," Proc. ECKAT, pp. 183-192, 1994.
- 5) T. Ishe, Y. Nagura et al., "Hight Power YAG Laser Welded Sleeving Technology for Steam Generator Tubes in Nuclear Power Plants," Laser Advanced Materials Processing(LAMP92). 2, pp. 957-962, 1992.
- 6) 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), pp. 418-420, 1992.