

# 파이버 레이저의 스테인리스강 용접시 인프로세스 모니터링을 위한 유기 플라즈마와 방사신호간의 상관성 연구(Ⅱ) - 후판 용접시 측정신호의 특성 변화 -

이 창 제\* · 김 종 도\*\*,\*†

\*베스트에프에이(주) 기술연구소

\*\*한국해양대학교 해사대학 기관공학부

## A Study on Correlation between the Induced Plasma and Emission Signals for In-process Monitoring in Stainless Steel Welding of Fiber Laser (Ⅱ) - Properties Changes of the Measured Signals in a Thick Plate Welding -

Chang-Je Lee\* and Jong-Do Kim\*\*,\*†

\*R&D Institute, BEST F.A Co., Ltd., ChangWon 642-290, Korea

\*\*Division of Marine Engineering, Korea maritime and Ocean University, Busan 606-791, Korea

†Corresponding author : jdkim@kmou.ac.kr

(Received November 20, 2014 ; Revised December 8, 2014 ; Accepted December 26, 2014)

### Abstract

On this study, we researched the in-process monitoring during fiber laser welding as well as on the first paper. On the previous/formal study, we analyzed the change of emission signal on thin plate welding. On this study, however, we analyzed RMS and FFT with emission signals in laser welding on lap joint and butt joint of 8mm-thick 316L stainless steel. As the result, the movement of specific frequency peak was observed according to welding speed changes. Furthermore, frequency peak as a result of FFT on the thick plate welding are much clearer than on the thin plate welding. Therefore, it is expected that the welding parameter changes can be predicted in case of applying FFT to in-process monitoring.

Key Words : Fiber laser, In-process monitoring, Plasma, Emission signal, Lap joint, Butt joint, STS 316L, RMS, FFT

### 1. 서 론

레이저 용접시 높은 빔품질은 박판용접시 리모트 용접(remote welding)의 고기능화와 같은 새로운 기술을 가능하게 하였다<sup>1,2)</sup>. 그러나 후판용접에서는 높은 빔품질에 의해 형성된 키홀(key hole) 내부의 금속증기가 좁은 키홀개구를 통해 급격히 분출되면서 결함을 형성함으로 키홀을 제어하기가 쉽지 않았다<sup>3,4)</sup>. 그럼에도 불구하고 많은 장점을 가지고 있는 파이버 레이저(fiber laser)를 후판재에 적용하기 위하여 하이브리드 용접(hybrid welding)으로 적용을 하는 사례도 증가

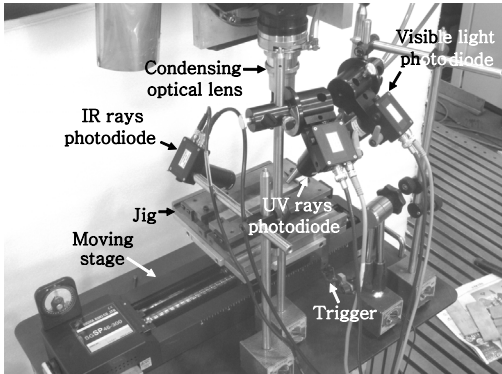
하고 있다<sup>5-8)</sup>.

그러나 아직까지는 박판위주의 연구가 대부분이며, 모니터링 분야의 연구도 그 수가 많지 않다. 그러나 앞서 기술한 바와 같이 파이버 레이저의 특성상 박판과 후판간의 제어인자는 차이가 있으며, 그에 따른 모니터링 신호의 차이도 존재할 수 있다.

이 중에서도 후판의 파이버 레이저 용접시 FFT (fast Fourier transform)분석을 이용한 신호특성에 관한 선행연구<sup>9,10)</sup>가 있었으나 단순히 주파수만을 확인하는데 그쳐 용접조건 변화에 따른 주파수 신호의 변화를 확인할 필요가 있다.

**Table 1** Chemical compositions of STS316L

Element Material	Cr	Ni	C	Mn	Si	P	S	Mo
STS 304L	16 ~ 18	10 ~ 14	Max. 0.03	Max. 2.5	Max. 1.0	Max. 0.04	Max. 0.03	2.0 ~ 3.0



**Fig. 1** Setup of experimental equipment to measure emission signals of the induced plasma in fiber laser welding

따라서 본 연구에서는 1보에서 연구한 파이버 레이저 박판용접시의 신호특성 결과를 활용하여 후판용접시의 신호변화를 RMS를 이용한 신호강도의 변화와 FFT 분석에 의한 주파수 특성을 용접조건에 따라 비교분석하였다.

## 2. 사용재료 및 실험방법

### 2.1 사용재료 및 용접장치

본 연구에서는 두께 8.0 mm의 STS316L을 150×50 mm로 재단한 후 겹치기 및 맞대기 용접을 실시하였으며, 이때 사용된 재료의 조성을 Table 1에 나타낸다.

실험에 사용된 레이저는 1보에서와 동일한 5 kW 연속 이테르븀(ytterbium) 파이버 레이저를 사용하였다.

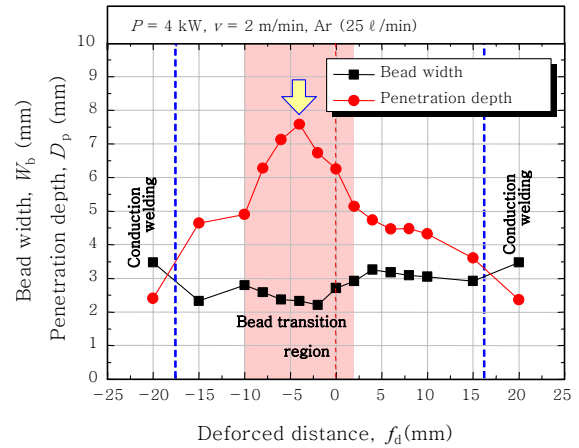
### 2.2 방사신호의 측정방법

레이저 용접시 발생하는 플라즈마 방사신호의 측정은 Fig. 1에서와 같이 자외선, 가시광선 그리고 적외선 대역의 포토다이오드를 사용하였으며, 이때의 각 센서별 배치는 1보와 동일하게 구성하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 비초점거리에 따른 신호의 특성

초점거리 변화에 따른 영향을 확인하기 위해 STS316L



**Fig. 2** Changes of the penetration with defocused distance

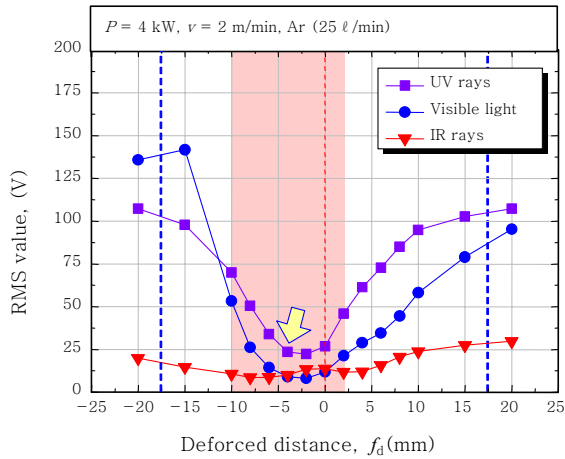
8.0 mm를 레이저 출력  $P = 4.0$  kW에서 용접속도  $v = 2$  m/min으로 용접을 실시하면서 비초점거리를  $f_d = +20$  mm에서  $f_d = -20$  mm까지 변화시켰다. 이때의 용입깊이 및 비드폭의 변화를 Fig. 2에 나타낸다. 그림에서 보듯이 어스펙트비(aspect ratio)가 큰 키홀용접은  $f_d = -10 \sim +4$  mm에서 나타났으며, 비드천이는  $f_d = -4$  mm에서 일어났다. 특히 비드천이가 일어나는 비초점거리  $-4$  mm는 초점보다 무려 약 20 %나 깊은 용입을 형성하였다.

측정신호의 변화는 Fig. 3에서 확인할 수 있다. 우선 Fig. 3(a)의 RMS 변화를 살펴보면 비드천이구간에서 신호의 강도가 가장 낮았으며, 비초점거리가 증가함에 따라서 신호의 강도도 증가하였다. 이는 비초점거리 증가에 따른 빔사이즈의 증가가 파워밀도를 낮추어 재료를 용융시키지 못하고 표면만을 증발시키는 에너지 소모되기 때문이라고 생각된다. 또한 1보에서는 적외선 대역의 변화가 다른 대역의 신호와 비슷하였으나, 후판에서는 높은 출력에 의해 빔의 사이즈가 커져도 일정한 범위의 재료는 용융을 시키기 때문에 적외선을 방사하는 용융지 표면의 면적이 감소하지 않아 일어난 현상이라고 판단된다. 따라서 박판에서보다는 신호의 변화가 다소 경향성을 보이고 있다.

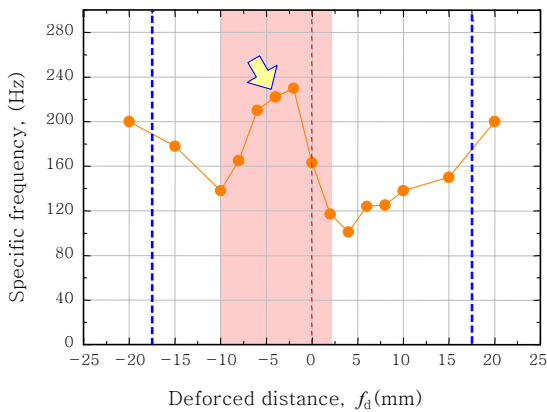
또한 Fig. 3(b)의 가시광 대역 FFT 분석결과를 보면, 어펙트비가 큰  $f_d = -10 \sim +4$  mm에서는 용입의 변화와 유사하게 주파수값이 이동하였다. 이는 1보에서와 동일한 결과로 키홀의 어스펙트비가 증가하면 키홀 개구의 움직임이 증가<sup>11)</sup>하기 때문이다.

### 3.2 겹치기 용접시의 신호특성

겹치기 용접시의 변화를 살펴보기 위해 레이저 출력  $P = 5$  kW에서 용접속도를  $v = 0.5 \sim 3.0$  m/min까지

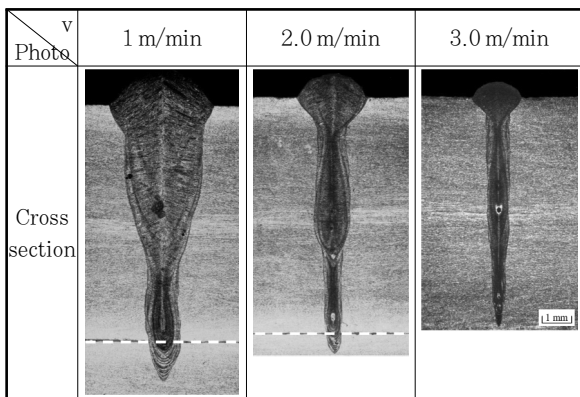


(a) RMS values with wavelength bands (RMS value represents voltage of the measured signals by photodiode)



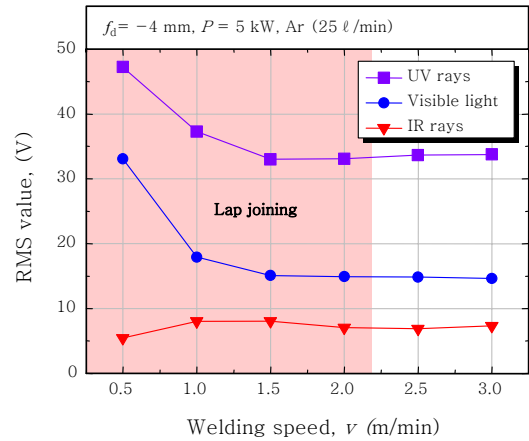
(b) Specific frequency peak by FFT analysis of visible light

**Fig. 3** Variation of RMS values and FFT results as a function of defocused distance

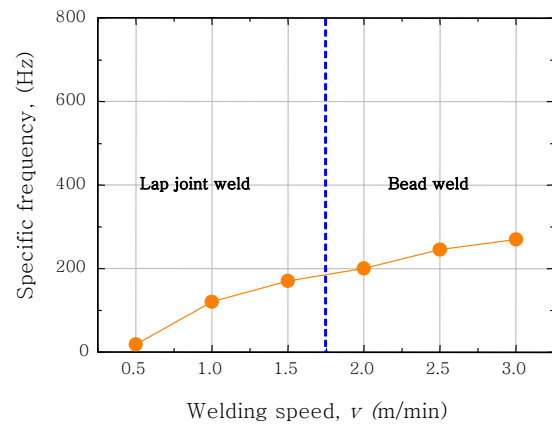


**Fig. 4** Photographs of cross section in lap welding with change of welding speed

변화시켰다. 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 단면사진을 보면  $v = 0.5 \sim 2.0 \text{ m/min}$ 까지 겹치기 용접이 이루어졌다.



(a) RMS values with wavelength bands

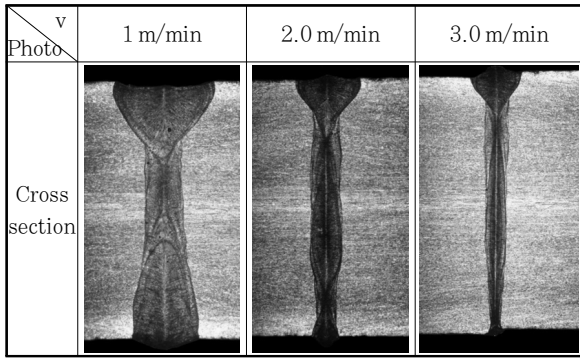


(b) Specific frequency peak by FFT analysis of visible light

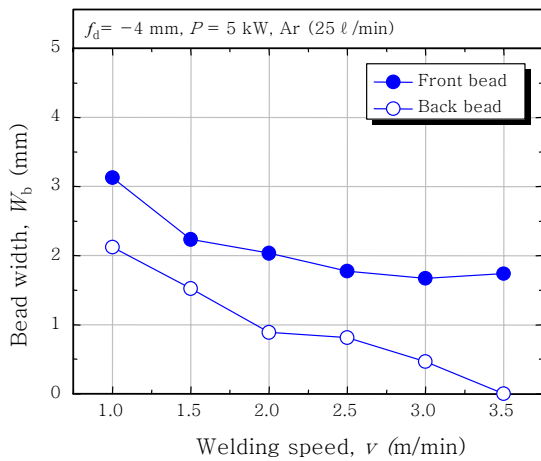
**Fig. 5** Variation of RMS values and FFT results as a function of welding speed in lap welding

이때 측정신호의 RMS 변화를 Fig. 5(a)에 나타내었다. RMS의 강도는 박판용접과는 달리 이면비드로의 플라즈마 손실이 없기 때문에 용접속도가 증가함에 따라 신호의 강도도 감소하였다. 다만 겹침부가 형성되는  $v = 2.0 \text{ m/min}$ 까지는 신호가 감소하다가 이후부터는 신호의 변화가 없다. 또한 자외선이나 가시광선과 달리 적외선은 신호의 변화가 크지 않은데, 이는 파이버 레이어의 특성상 높은 빔품질에 의해 적외선을 방출하는 키포입구의 크기변화가 작기 때문이기도 하고, 낮은 속도에서는 단위시간당 입열량이 커서 비드의 폭도 커져서 상대적으로 푼(fume)의 발생량도 매우 증가하여 적외선의 투과를 방해하기 때문에 용접속도에 따른 신호의 변화가 크지 않은 것으로 판단된다.

그러나 Fig. 5(b)의 가시광 대역 FFT 분석에서는 용접속도가 증가함에 따라 주파수도 55 Hz에서 280 Hz까지 비례적으로 증가하였다. 또한 RMS와는 달리 겹침용접이 되지 않는 영역에서도 주파수 신호가 변화하고 있어서 용접조건 변화에 따른 신호의 추적이 가능하다.



(a) Photographs of cross section



(b) Changes of the penetration

Fig. 6 Photographs of cross section in butt welding

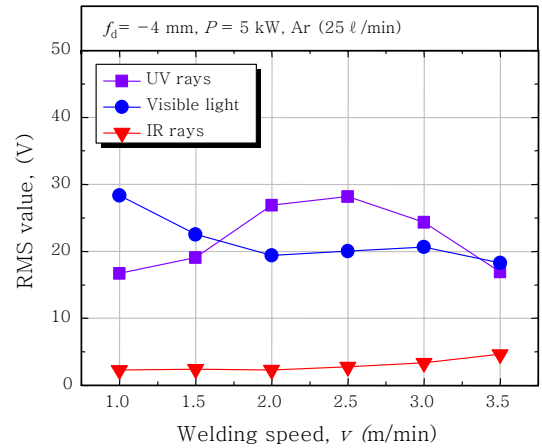
### 3.3 맞대기 용접시의 신호특성

맞대기 용접에서는 비초점거리를  $f_d = -4$  mm, 레이저 출력을  $P = 5$  kW로 설정하였다. 용접속도는 관통용접이 이루어지는  $v = 1.0 \sim 3.5$  m/min까지 실시하였다. 이때의 용입 및 비드폭의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 특히 비드폭의 변화는 Fig. 6(b)에서 보듯이 전면비드와 이면비드가 용접속도 증가에 따라 유사하게 감소하였다.

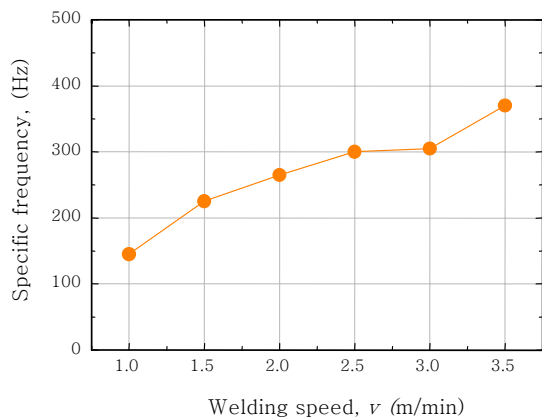
여기서 RMS값은 Fig. 7(a)에서 보듯이 자외선은 이면비드의 폭이 넓은 저속용접에서는 이면으로 플라즈마가 소실되면서 오히려 낮은 값을 나타냈으며, 용접속도가 증가함에 따라 RMS값이 증가하다가 이후 단위시간당 입열량이 감소하면서 신호도 감소하여 1보의 박판용접에서와 같이 일정한 경향을 보이지 않았다.

가시광선은 용접속도 증가에 따라 신호가 감소하고 있으나 그 변동폭이 크지 않았으며, 적외선은 겹치기 용접에서와 마찬가지로 신호의 변화가 거의 없었다.

그러나 맞대기 용접도 겹치기 용접과 동일하게 FFT 분석결과를 Fig. 7(b)에서와 같이 비례적으로 신호의 변화가 나타났다. 이러한 주파수의 변화는 Fig. 8의



(a) Changes of RMS values with wavelength



(b) Specific frequency peak by FFT analysis of visible light

Fig. 7 Variation of RMS values and FFT results as a function of welding speed in butt welding

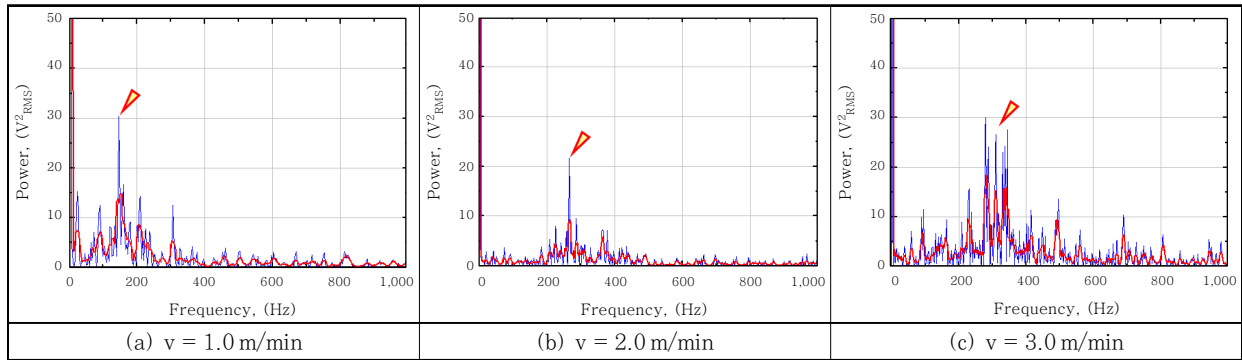
FFT 처리결과에서 보듯이 후판에서는 주파수의 피크가 선명하게 나타나고 있으며, 주파수 피크의 이동도 명확하다. 특히 후판은 박판보다 주파수의 변화가 확실하고 형상 및 비드의 변화와 관계없이 신호의 변화가 일정하여 여러 가지 분석신호 중에서 가장 신뢰성이 있을 것으로 생각된다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 파이버 레이저를 이용한 후판용접시의 비드폭 및 용입깊이 변화에 따른 플라즈마 방사신호의 영향을 분석하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 비초점거리에 따른 RMS의 변화는 용입깊이의 변화와 반대로 신호가 감소하였으며, 비초점이 증가함에 따라 증가하였다. 그러나 박판용접시의 신호변화 보다는 일정한 경향을 나타냈다. 또한 FFT 분석결과는 용입깊이 변화를 잘 대변해주었다.

2) 겹치기 용접시 겹침 용접이 이루어지는 구간까지



**Fig. 8** Variations of specific frequency peak in FFT analysis as a function of welding speed and laser power in butt welding(Power on graph is meant intensity of FFT spectrum and MS is the square of specific signal intensity on frequency axis.)

만 RMS의 신호변화가 감지되었으나, FFT 분석결과는 비초침에서와 같이 용접속도 변화에 따라 일정한 변화를 보여주었다.

3) 맞대기 용접에서도 RMS를 통해서는 큰 경향성이 발견되지 않았으며, FFT 분석결과만이 일정한 변화를 나타냈다. 따라서 FFT 분석이 여러 가지 분석신호 중에서 용접조건 변화에 따른 영향을 가장 잘 대변하는 것으로 판단된다.

## Reference

- Berthold Kessker : Fiber Laser Welding in Car Body Shop, Journal of KWJS, **31-4** (2013), 17-22
- Oiwa Shinpei et al. : Phenomena in Remote Welding using Fiber Laser, Journal of High Temperature Society, **34-6** (2008), 1-2 (in Japanese)
- Xiang Dong Gao, Qian Wen and Seiji Katayama : Elucidation of Welding Stability Based on Keyhole Configuration during High-Power Fiber Laser Welding, Advanced materials research, **314/316-2** (2011), 941-944
- Yousuke Kawahito, Masami Mizutani and Seiji Katayama : Defect Formation Mechanism and Reduction Procedure in 10 kW High Power Fiber Laser Welding of Stainless Steel, Quarterly journal of the Japan Welding Society, **26-3** (2008), 203-209
- Youngsik Kim and Sangcheol Kil : Recent Technological Tendency of Laser/Arc Hybrid Welding, Journal of KWJS, **31-2** (2013), 4-15 (in Korean)
- H.W. Dong, M. Y. Lee and Y. S. Ahn : Micro-structure Evolution of UFG Steel Weld by Hybrid and Laser Welding, Journal of the Korea society for power system engineering, **14-3** (2010), 58-63 (in Korean)
- Gleb Turichina et al. : Simulation and Technology of Hybrid Welding of Thick Steel Parts with High Power Fiber Laser, Physics procedia, **12-A** (2011) 646-655
- Shin Minho, Murakami Takahiro and Nakata Kazuhiro : Parametric Study on One Pass Fully-Penetrated Weld Bead Formation in Horizontal Fillet Weld T-Joint by Fiber Laser-MAG Arc Hybrid Welding for Thick Steel Plate, Japan Science and Technology Information Aggregator, **29-3** (2011) 174-180 (in Japanese)
- C. J. Lee, J. D. kim and Y. C. Kim : Characteristics of Plasma Emission Signals in Fiber Laser Welding of API Steel (II), Journal of KWJS, **30-4** (2012), 314-320 (in Korean)
- C. J. Lee, J. D. kim and Y. C. Kim : Characteristics of Plasma Emission Signals in Fiber Laser Welding of API Steel (III), Journal of KWJS, **31-3** (2013), 60-65 (in Korean)
- C. J. Lee, J. D. kim and J. Suh : Characteristics of Plasma Emission Signals in Fiber Laser Welding of API Steel (IV), Journal of KWJS, **31-4** (2013), 28-33 (in Korean)