

# 파이버 레이저의 스테인리스강 용접시 인프로세스 모니터링을 위한 유기 플라즈마와 방사신호간의 상관성 연구( I ) - 박판 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 ( I ) - Properties Changes of the Measured Signals in a Thin 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

The applications by using fiber laser have increased recently. However, due to high beam quality of fiber laser, it is inappropriate to apply the existing laser welding monitoring technology to the fiber laser welding as it is. On this study, thus, we analyzed emission signal with RMS and FFT for the in-process monitoring during fiber laser welding. 12mm-thick 304L stainless steel sheet was used in fiber laser welding and the result showed as follows: The intensity changes in RMS did not clarify the distinction between full penetration and partial penetration. However, as welding speed increases, specific frequency also increases in regards of frequency analysis by using FFT.

Key Words : Fiber laser, In-process monitoring, Plasma, Emission signal, Lap joint, Butt joint, STS 304L, RMS, FFT

### 1. 서 론

2000년대에 들어서 대출력화가 이루어진 파이버 레이저(fiber laser)는 높은 빔품질을 앞세워 레이저 가공기 분야에 큰 변화를 불러 일으켰다<sup>1-3)</sup>. 현재는 파이버 레이저를 이용한 다양한 어플리케이션들이 소개 및 개발되고 있다<sup>4)</sup>.

그러나 파이버 레이저는 기존의 Nd:YAG 레이저와 파장이 유사하지만, 더 높은 빔품질로 인해 기존의 레이저와는 다른 가공현상<sup>5,6)</sup>을 보이고 있어 지금까지의 레이저 모니터링 시스템을 그대로 적용하기에는 어려움이 있다.

이러한 차이는 파이버 레이저 용접시 형성되는 매우 큰 어스펙트비(aspect ratio)를 가진 키홀(key hole)이 기존의 레이저 용접시 형성되는 키홀보다 더 높은 분출 압력으로 유기 플라즈마를 방출하기 때문이라고 생각된다. 때문에 안정적인 키홀의 유지가 어려워 고출력에서는 미려한 비드외관을 얻을 수 있는 조건이 제한적이다. 따라서 파이버 레이저 용접현상을 분석하여 이를 제어하고자 하는 연구<sup>5,6)</sup>가 이루어지고 있다.

더불어 파이버 레이저의 플라즈마 거동은 레이저 인 프로세스 모니터링(laser in-process monitoring)에도 영향을 미칠 수 있다<sup>7-9)</sup>. 그러나 이에 대한 구체적인 연구사례가 많지 않아 지속적인 연구를 통한 기술의

측적이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 스테인리스강의 파이버 레이저 용접시 발생하는 유기 플라즈마의 방사신호를 측정하여 용접조건에 따른 신호의 변화를 비교하고, 또한 주파수 분석을 통하여 파이버 레이저의 인프로세스 모니터링의 구현 가능성을 확인하고자 한다.

## 2. 사용재료 및 실험방법

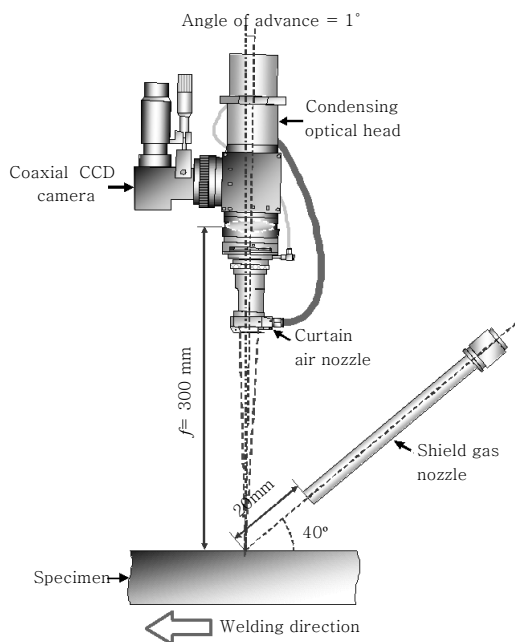
### 2.1 사용재료 및 용접장치

본 연구에서는 두께 1.2 mm의 STS304L을 150×50 mm로 재단한 후 겹치기 및 맞대기 용접을 실시하였으며, 이때 사용된 재료의 조성을 Table 1에 나타내었다.

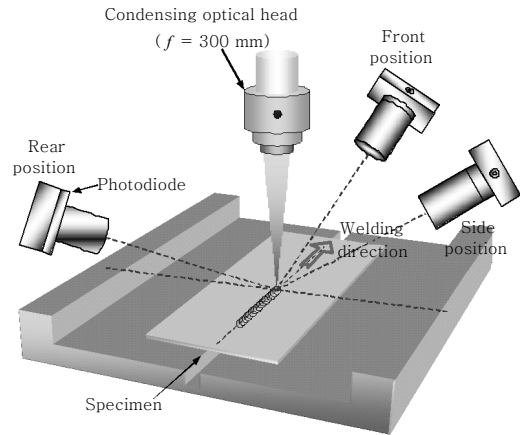
실험에 사용된 레이저는 5 kW 연속 이테르븀 파이버 레이저를 사용하였으며, 사용 레이저의 파장은 1,070 nm 이고 가공용 파이버 끝단의 BPP는 6 mm·mrad이 었다. 레이저 용접은 Fig. 1에서 보듯이 초점거리가  $f = 300$  mm인 광학계를 이용하였으며, 실드가스로는 Ar을 사용하였다.

**Table 1** Chemical compositions of STS316L

Element Material	Cr	Ni	C	Mn	Si	P	S	Mo
STS 304L	18 ~ 20	9 ~ 13	Max. 0.03	Max. 2.5	Max. 1.0	Max. 0.04	Max. 0.03	-



**Fig. 1** Schematic illustration in laser welding of STS304L



**Fig. 2** Setup of experimental equipment for measuring emission signals of induced plasma

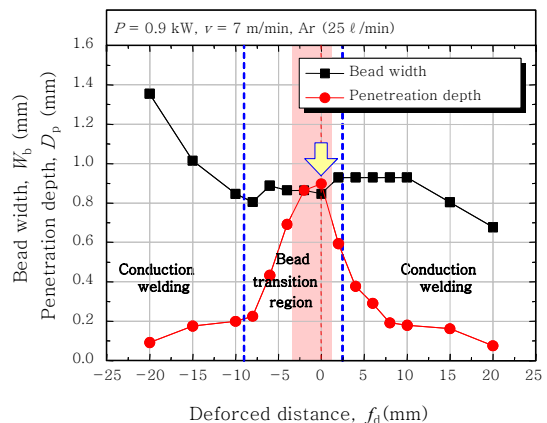
### 2.2 방사신호의 측정방법

유기 플라즈마의 방사광 신호를 취득하기 위해 포토다이오드를 사용하였으며, 사용된 포토다이오드는 자외선, 가시광선 그리고 적외선 대역을 각각 사용하였다. 센서의 배치는 Fig. 2에서와 같이 자외선 및 가시광 포토다이오드를 용접진행방향 측면 200 mm의 위치에 설치하였으며, 적외선 포토다이오드는 용접진행방향 전면 200 mm의 위치에 설치하였다.

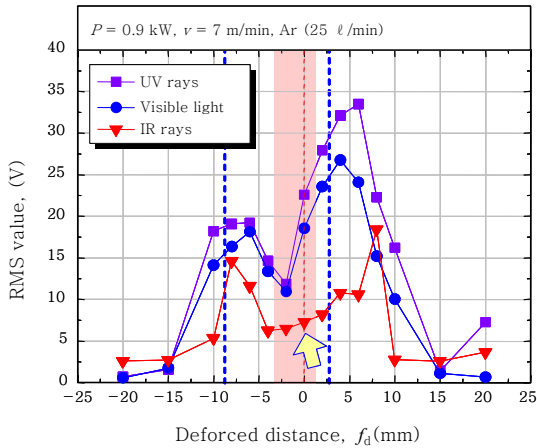
## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 비초점거리에 따른 신호의 특성

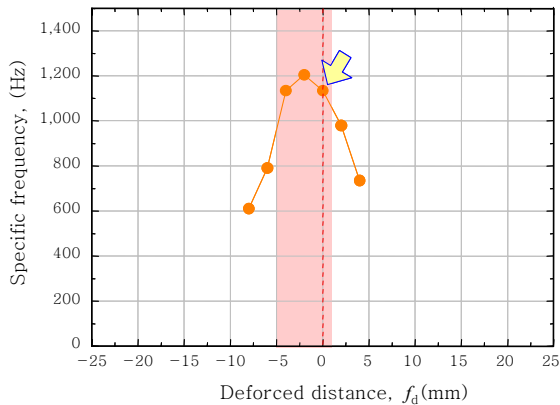
우선 비초점거리에 따른 방사신호의 평가를 위하여 레이저 출력  $P = 0.9$  kW에서 용접속도  $v = 7$  m/min으로 용접을 실시하였다. 이때 비초점거리를  $f_d = +20$  mm에서  $f_d = -20$  mm까지 변화시켰다. 이때의 용입깊이 및 비드폭의 변화를 Fig. 3에 나타냈다. 그림에서와 같



**Fig. 3** Changes of the penetration with defocused distance



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

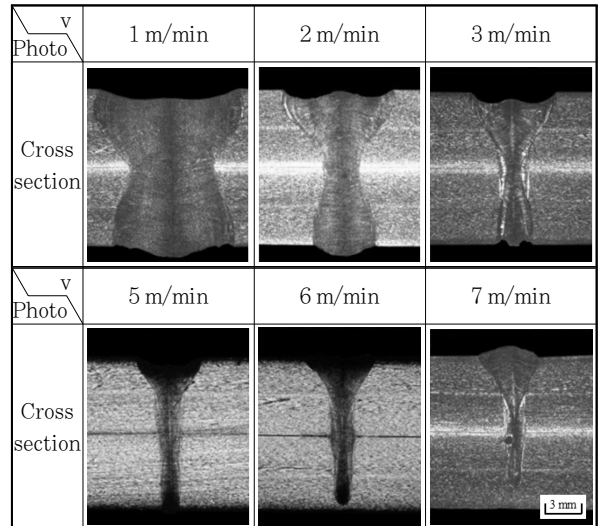


(b) Specific frequency peak by FFT analysis of visible light  
**Fig. 4** Variation of RMS values and FFT results as a function of defocused distance

이  $f_d = -2.0 \sim 0.0$  mm에서 가장 깊은 용입을 얻을 수 있으며, 마이너스 비초점에서는  $f_d = -8.0$  mm부터는 열전도형 용접으로 이행하였다. 또한 플러스 비초점에서는  $f_d = +6.0$  mm에서부터 열전도형 용접으로 전환되었다. 따라서  $f_d = -6.0 \sim +4.0$  mm에서 키홀이 형성되는 것을 확인하였다.

이때 포토다이오드로 측정된 방사신호의 전압값을 RMS 하여 신호의 강도변화를 살펴보았다. 그 결과, Fig. 4(a)에서 보듯이  $f_d = -8 \sim +4$  mm에서의 키홀용접시 용입이 깊은 영역에서 RMS의 신호강도가 급격히 하락하였으며, 이후 비초점이 증가함에 따라 신호강도가 증가하다가 열전도형 용접으로 천이되는 구간에서 다시 신호의 강도가 하락하는 경향을 보인다.

그러나 Fig. 4(b)에서 보듯이 측정신호를 FFT하여 특정 피크 주파수만을 추출해 보면, 비초점거리 변화에 따른 용입깊이 변화와 유사한 주파수의 변화를 볼 수 있다. 즉 용입이 깊을수록 주파수는 고주파쪽으로 이동



**Fig. 5** Photographs of cross section in lap welding with change of welding speed

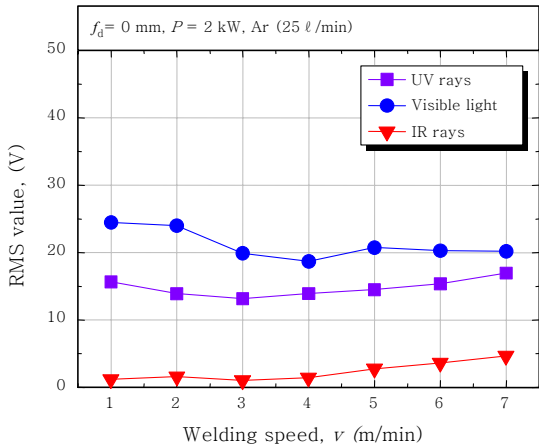
하였으며, 키홀이 형성되지 않는 열전도형 용접에서는 주파수 특성이 나타나지 않았다.

### 3.2 겹치기 용접시의 신호특성

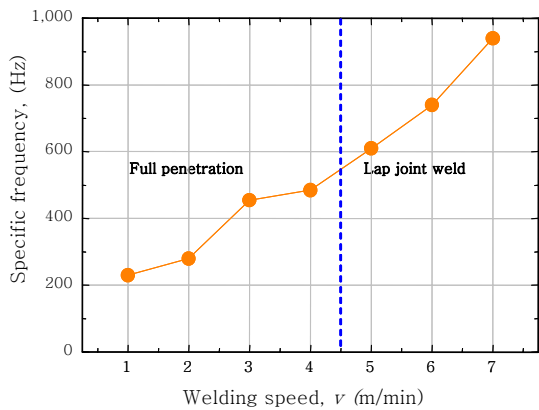
다음으로 레이저 출력  $P = 2$  kW에서 용접속도를  $v = 1 \sim 7$  m/min까지 변화시키면서 겹치기 용접을 실시하였다. 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 단면사진을 보면  $v = 1 \sim 5$  m/min까지 관통용접이 이루어졌으며, 용접속도가 증가함에 따라 전면 및 이면비드의 폭은 감소하였다.

겹치기 용접시 측정신호의 RMS 변화를 Fig. 6(a)에 나타냈다. RMS의 강도는 용접속도의 변화에 큰 변화를 보이지 않았다. 다만 관통용접의 경계조건으로 예상되는  $v = 4 \sim 5$  m/min 구간에서 미미한 신호의 변화만이 감지되었다. 이는 관통용접시 이면비드로 플라스마가 방출되어 상부로 분출되는 플라스마의 양이 감소되었기 때문이라고 생각되며, 비관통 용접시는 관통 용접시보다 플라스마 발생량이 적으나 모든 플라스마가 상부로 모두 배출되기 때문에 신호의 RMS변화가 크지 않은 것으로 생각된다. 따라서 신호의 강도변화를 모니터링에 이용할 경우 비초점거리 실험에서와 마찬가지로 용접현상의 변화를 감지하기가 쉽지 않을 것으로 판단된다.

그러나 겹치기 용접시 용접속도 변화에도 FFT 분석을 적용하면 Fig. 6(b)에서와 같이 용접속도가 증가함에 따라 특정 주파수가 약 230 Hz에서 940 Hz까지 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 FFT를 통한 주파수변화를 추적한다면 용입깊이 변화에 따른 신호의



(a) RMS values with wavelength bands



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

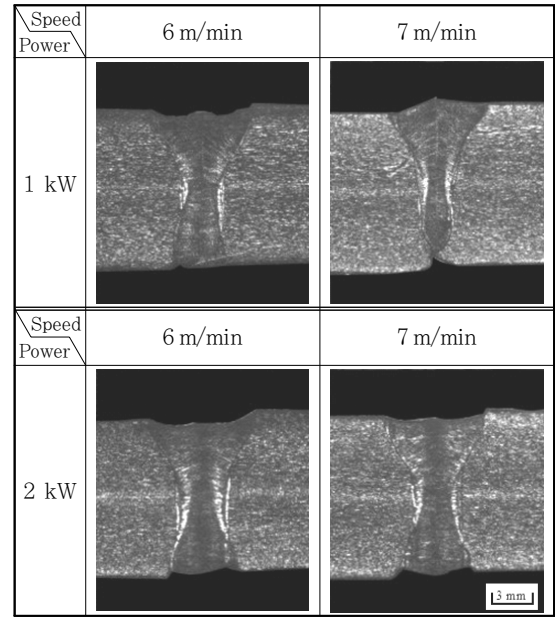
**Fig. 6** Variation of RMS values and FFT results as a function of welding speed in lap welding

변화를 예측 가능할 것으로 판단된다.

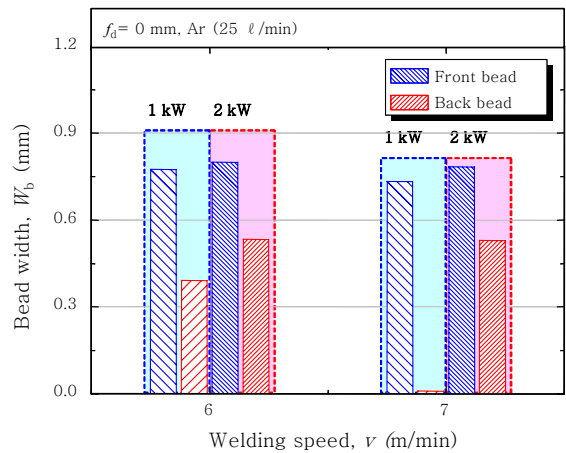
### 3.3 맞대기 용접시의 신호특성

맞대기 용접은 용락이 발생하지 않는 조건인 레이저출력  $P = 1\text{ kW}$ 와  $2\text{ kW}$ 에서 용접속도를  $v = 6 \sim 7\text{ m/min}$ 의 범위로 설정하였다. 이때의 용접부 단면 및 비드폭의 변화를 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 보듯이 비드폭은 용접속도가 증가함에 따라 감소하는 일반적인 경향을 보이며, 출력이 낮은  $1\text{ kW}$ 에서는 이면비드의 폭변화가 크게 나타났다.

이러한 차이는 Fig. 8의 RMS 변화에서도 잘 나타났다. 그래프를 살펴보면 용접속도가 증가함에 따라 이면비드의 폭이 좁아지면서 이면으로 손실되던 플라즈마가 감소하고 상부로 분출되면서 신호의 강도가 증가하였다. 즉, 용접속도 증가에 따른 단위시간당 에너지 감소보다 이면비드폭 감소에 따른 상부의 플라즈마 분출량이 더 많다는 것을 알 수 있었다.

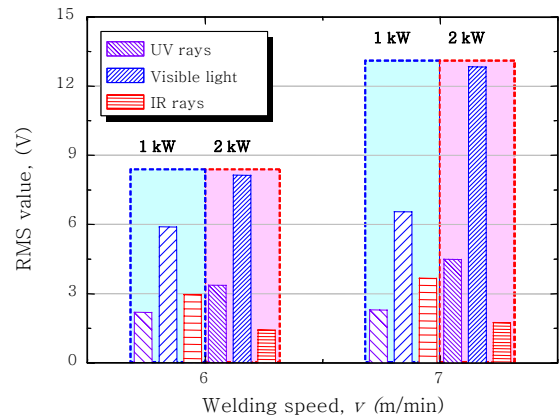


(a) Photographs of cross section

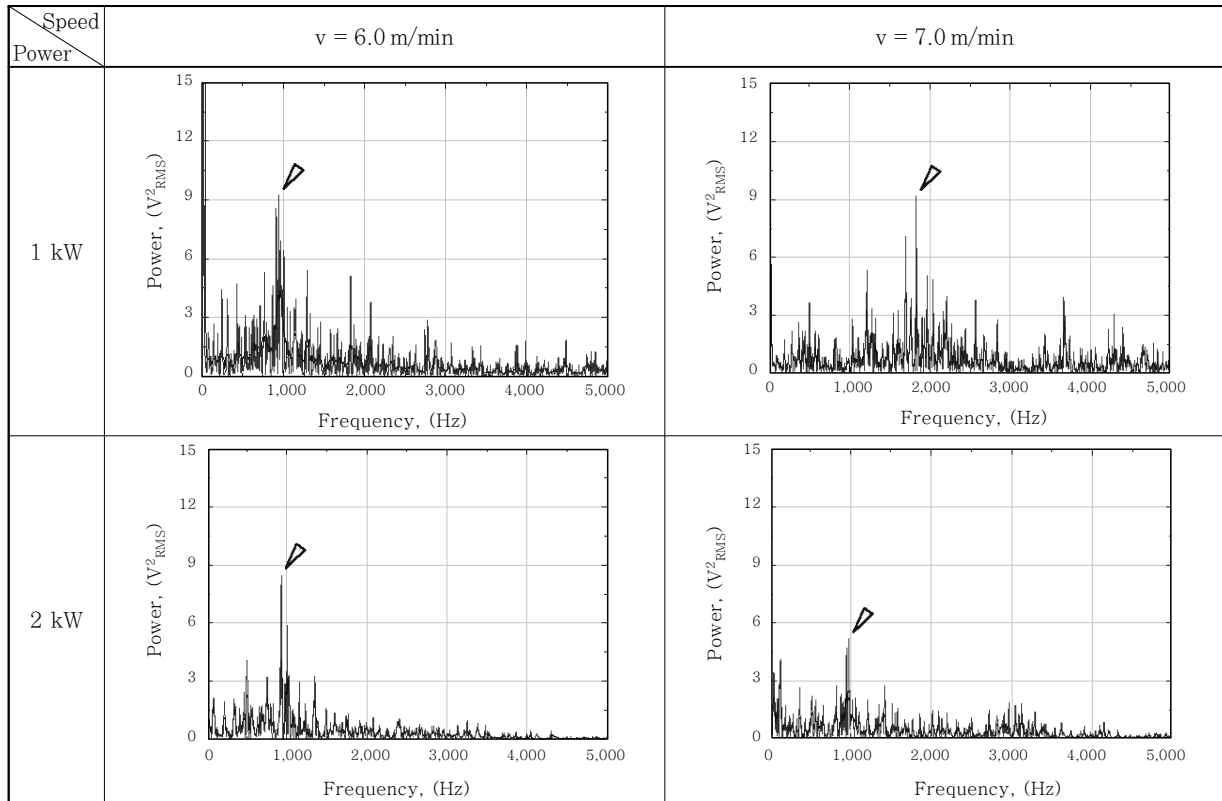


(b) Changes of the bead width

**Fig. 7** Photographs of cross section in butt welding



**Fig. 8** Difference of RMS values with wavelength bands between 6 m/min and 7 m/min in butt welding



**Fig. 9** 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  $V^2_{RMS}$  is the square of specific signal intensity on frequency axis)

또한 맞대기 용접시의 FFT 결과를 나타낸 Fig. 9를 살펴보면 겹치기 용접과 마찬가지로 용접속도가 증가함에 따라 주파수의 피크가 높은 주파수쪽으로 이동하였다. 다만 출력이 낮은 1 kW에서의 주파수 피크의 이동 변화가 더 크게 나타나고 있는데, 이는 앞서 설명한 바와 같이 이면비드의 폭이 좁을수록 플라즈마가 상부로 배출되는 비율이 증가하기 때문이며, 이에 따라 이면비드가 넓은 관통 키홀일 때보다도 키홀의 움직임도 더 활발해지기 때문이라고 생각한다.

#### 4. 결 론

파이버 레이저를 이용한 박판용접은 관통용접을 수반하는 경우가 많다. 따라서 본 연구에서는 파이버 레이저 용접시 비드폭 및 용입깊이 변화에 따른 플라즈마 방사신호의 영향을 분석하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

1)  $f_d = -20 \text{ mm}$ 에서  $+20 \text{ mm}$ 까지의 비초점거리 변화시 키홀용접이 이루어지는  $f_d = -8 \sim +4 \text{ mm}$ 에서는 용입깊이가 깊어질수록 신호의 강도변화가 약해졌으나, 그 변화가 균일하지 못해 신호변화에 따른 용접부의 경향을 파악하기 어렵다. 그러나 FFT를 이용한 주파수

분석은 키홀용접시의 용입깊이 변화를 나타내고 있다.

2) 겹치기 용접시 관통용접에 의한 이면비드로의 플라즈마 손실로 신호의 강도변화가 잘 드러나지 않았으나, FFT의 주파수 변화는 용접속도 변화와 비례관계를 보여주었다.

3) 맞대기 용접도 겹치기 용접과 동일하게 용접속도가 증가함에 따라 FFT의 주파수가 증가하였으며, 이면비드폭이 좁을수록 그 경향이 더 뚜렷하였다.

#### Reference

1. S. Katayama, Y. Kawahito, K. Kinoshita, N. Matsumoto and M. Mizutani : Weld Penetration and Phenomena in 10 KW Fiber Laser Welding, ICALEO 2007, (2007), 353-359
2. H. Nagayama, M. Mizutani, Y. Kawahito and S. Katayama : Weld Penetration and Welding Phenomena of Aluminum Alloy with High-Power Fiber Laser, ICALEO 2007 (2007), 916-924
3. S. Katayama and Y. Kawahito : Characteristic Penetration and Phenomena during Welding with High Power Fiber Laser, The welding review, **55-11** (2007), 86-92 (in Japanese)
4. Y. Kawahito, S. Oiwa, M. Mizutani and S. Katayama : Effects of Laser-Induced Plume in High-Power Fiber

- Laser Welding with Long-Focal-Distance Focusing Optics, Quarterly journal of the Japan Welding Society, **29-1** (2011), 18-23 (in Japanese)
5. Kawahito Yousuke et al. : Interaction between Laser Beam and Plasma/Plume Induced in Welding of Stainless Steel with Ultra-High Power Density Fiber Laser, Quarterly journal of the Japan Welding Society, **25-3** (2007), 461-467 (in Japanese)
  6. Kawahito Yousuke et al. : High-Speed Observation and Spectroscopic Analysis of Laser-Induced Plume in High -Power Fiber Laser Welding of Stainless Steel, Quarterly journal of the Japan Welding Society, **25-3** (2007), 455-460 (in Japanese)
  7. 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)
  8. 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)
  9. 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)