

## API강재의 파이버레이저 용접시 유기되는 플라즈마의 방사특성 (Ⅱ) -용접조건과 방사신호의 관련성-

이 창 제\* · 김 중 도\*\*† · 김 유 찬\*\*\*

\*한국해양대학교 대학원

\*\*한국해양대학교 기관공학부

\*\*\*BEST F.A

### Characteristics of Plasma Emission Signals in Fiber Laser Welding of API Steel (Ⅱ) -The Relationship between Welding Conditions and Emission Signals-

Chang-Je LEE\*, Jong-Do KIM\*\*† and Yu-Chan KIM\*\*\*

\*Graduate School, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

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

\*\*\*R&D Institute, BEST F.A, Changwon 641-290, Korea

†Corresponding author : jdkim@hhu.ac.kr

(Received May 29, 2012 ; Revised June 25, 2012 ; Accepted August 30, 2012)

#### Abstract

Laser welding by fiber laser accompanied by a lot of spatter and humping bead. This is because the deep and narrow keyhole usually form due to high beam quality. So the weld bead is formed defects, because the plasma jet with a high vapor pressure make the molten pool on keyhole wall scattered. For such a reason, unstable behavior of keyhole is difficult to monitor laser welding by using the laser induced plasma. Mostly, fiber laser welding of thick plates most be influenced by this effect. Therefore, fiber laser welding has been difficult to apply the sole. Thus, laser welding monitoring based on plasma measurements have much difficulty in measurements and analysis of signal. In this study, influence of the plasma emission signal according to welding speed and laser power in fiber laser welding analysed by using RMS and FFT analysis. We can verify that RMS value of the plasma emission signal changes with welding parameters in fiber laser welding, and aspect ratio greater than 1, the peak of FFT frequency had been moved in accordance with welding parameter.

Key Words : Fiber laser welding, Defocused distance, Laser power, Welding speed, RMS, FFT

#### 1. 서 론

최근 등장한 파이버레이저는 기존의 레이저들과는 달리 높은 빔품질과 가지고 있어 박관용접, 정밀절단 및 미세천공 등과 같은 정밀가공분야에 큰 전환점이 될 열원으로 기대되고 있다<sup>1-3)</sup>. 그러나 높은 빔품질은 기대와는 달리 기존의 가공현상과는 다른 키홀의 거동을 나타내며 고출력에서의 용접을 어렵게 하고 있다<sup>4)</sup>.

특히, 후판용접의 경우에 있어서 종횡비(aspect ratio)가 매우 큰 키홀이 형성됨과 동시에 높은 빔품질에 기인한 급격한 증발을 수반하여 스패터나 험핑비드와 같은 결함을 형성하기 쉽다. 이중 스패터의 과도한 생성은 후처리를 요하며 비드외관도 미려하지 못해 파이버레이저의 많은 장점이 살아나지 못하고 있다<sup>5)</sup>. 따라서 고출력 파이버 레이저 용접시 키홀의 안정적인 거동을 위해 일부에서는 레이저-아크 하이브리드를 이용한 결합제어방법<sup>6-8)</sup> 등이 연구되고 있으나 레이저만의 결합제어 방법은 지속적인 연구가 필요하다.

이러한 현상은 파이버 레이저용접 모니터링시 측정신호를 명확하지 않게 하여 분석을 어렵게 한다. 특히, 높은 빔품질에 기인하여 키홀에서 분출되는 플라즈마의 높은 분출압력이 키홀의 주기운동을 방해하므로 FFT분석을 어렵게 만드는 원인으로 생각된다.

따라서 본보에서는 1보<sup>9)</sup>에서 다룬 파이버 레이저 용접시의 신호측정위치를 기초로 하여 플라즈마의 방사신호를 측정함으로써 측정신호의 신뢰성을 높이고자 하였다. 또한 이렇게 측정된 신호를 용접조건별로 분석하여 파이버 레이저 용접조건에 따른 신호의 상관관계를 분석하고자 하였다.

## 2. 사용재료 및 실험방법

### 2.1 사용재료 및 용접방법

본 실험에서는 1보에서와 같이 API(American Petroleum Institute)강을 사용하여 실험을 실시하였으며, 시편은 두께 16 mm의 API강을 200×140 mm로 재단하였다.

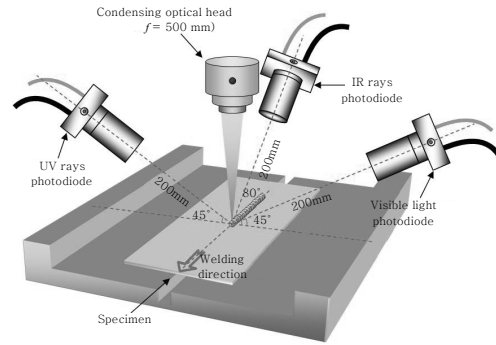
실험에 사용된 레이저는 Table 1에 나타낸 것과 같이 10 kW의 연속 이테르븀 파이버 레이저(CW Ytterbium-fiber laser)를 사용하였다. 사용 레이저의 파장은 1,070 nm이며, 가공용 파이버 끝단의 BPP (beam product parameter)는 8 mm · mrad으로 매우 높은 빔 품질을 가지고 있다. 레이저 용접은 Fig. 1과 같이 초점거리가  $f = 500$  mm인 광학계를 사용하였으며, 실드가스(shield gas)는 용접진행방향 후방 40°에서 30 mm의 거리를 두고 분사하였고, 실드가스로는 Ar을 사용하였다. 또한 광학계를 용접진행방향에 대해전진각(Angle of advance)을 1°로 하였다.

### 2.2 플라즈마의 측정방법

플라즈마 방사신호의 측정은 1보에서 얻어진 측정값을 기준으로 Fig. 1에서와 같이 자외선 및 가시광 포토

**Table 1** Specification of CW 10 kW fiber laser

Laser type	CW Ytterbium-Fiber laser
Wavelength	1,070 ± 10 nm
Nominal out power	10 kW
BPP after feed fiber	< 5 mm · mrad
BPP after processing fiber	< 8 mm · mrad
Feeding fiber core dia.	100 μm
Processing fiber core dia.	300 μm



**Fig. 1** Setup of Jig and photodiode for fiber laser welding

다이오드를 용접진행방향 측면 45°, 200 mm의 위치에 설치하여 유기 플라즈마의 방사광을 측정하였으며, 적외선 포토다이오드는 용접진행방향 후면 80°, 200 mm의 위치에 설치하여 레이저반사광 및 용융지의 적외선을 측정하였다.

또한 각 포토다이오드에는 밴드패스 필터(band pass filter)를 설치하였는데, 각 필터는 대역별로 자외선은 CWL(central wavelength) = 330 nm, FWHM (full width at the half -maximum) = 140 nm인 필터를, 가시광선은 CWL = 530 nm, FWHM = 440 nm인 필터를 사용하였다. 그리고 적외선은 CWL = 830 nm, FWHM = 260 nm인 필터를 사용하였다.

더불어 자외선 포토다이오드는 신호간의 원활한 비교를 위하여 증폭기의 이득(gain)을 40 dB까지 올렸으며, 적외선 포토다이오드에는 밴드패스 필터 선단에 2.0 ND필터를 장착하여 레이저 반사광을 감쇄시켰다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 비초점거리에 따른 용입과 신호특성

비초점거리에 따른 레이저 용접은 레이저출력  $P = 5$  kW 그리고 용접속도  $v = 4$  m/min에서 실시하였으며, 초점거리는  $f_d = +30 \sim -70$  mm까지 10 mm 간격으로 변화시켰다.

Fig. 2는 비드용접시 비초점거리에 따른 용입깊이 및 비드폭의 변화를 나타낸다. 그래프에서 보듯이 용입은 초점에서 가장 깊게 나타났으며, 비드천이(bead transition) 구간은  $f_d = -30 \sim +10$  mm까지 매우 넓게 나타났다. 이는 500 mm의 긴 초점거리를 가진 장초점 렌즈와 파이버 레이저의 높은 빔품질에 기인한 것으로 기존의 레이저<sup>10,11)</sup>들과 비교하여 비드천이구간이 상당히 넓다.

Fig. 3은 비초점거리에 따른 비드용접시 유기 플라즈

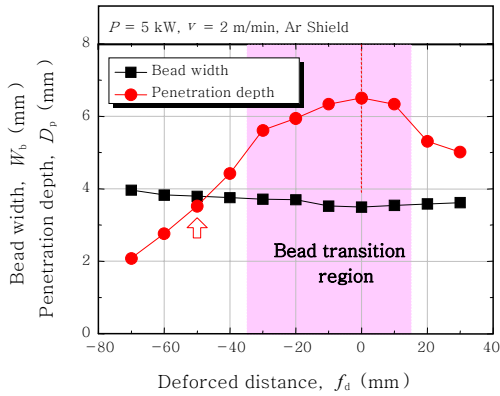
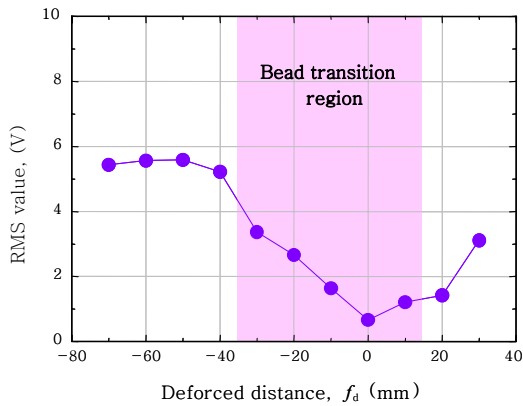
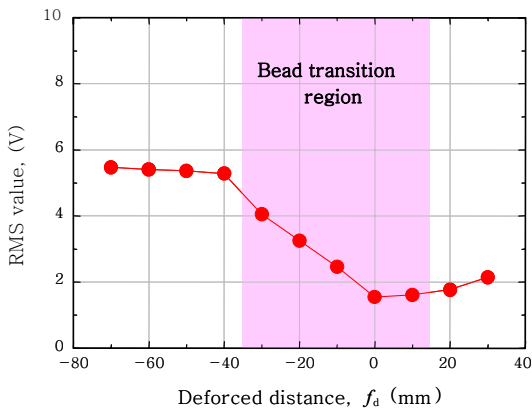


Fig. 2 Variation of penetration as a function of defocused distance



(a) UV rays



(b) Reflected laser beam

Fig. 3 Variation of RMS values with wavelength as a function of defocused distance

마에서 방사된 자외선 및 용융지에서 반사된 레이저 반사광의 RMS 값을 나타낸 것이다. 먼저 (a)의 자외선 신호를 살펴보면 비초점거리가 증가함에 따라 RMS의 레벨이 상승하였으며, 비드천이구간인  $f_d = 0 \sim -40$  mm까지는 선형적으로 증가하는 모습을 보였다. 그러나 비드천이구간 이후 열전도형 용접으로 전환되는  $f_d = -50$  mm부터는 레벨은 비초점거리가 커져도 증가하지 않았다.

(b)의 레이저 반사광 신호도 비초점거리  $f_d = +10$  mm부터  $-50$  mm까지 신호의 레벨이 매우 선형적으로 증가하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이러한 신호의 증가는 레이저빔이 재료내부로 흡수되는 정도를 시사하는데, 즉 비초점거리에 따른 용입깊이의 감소는 레이저빔의 흡수율이 높은 용융지의 면적을 축소시킴으로 레이저빔의 반사량이 증가하게 된다. 또한  $f_d = -60$  mm부터는 파워밀도가 너무 낮아져 레이저빔이 반사되더라도 그 강도가 감소하는 것으로 판단된다.

Fig. 4는 비초점거리 변화에 따른 측정신호의 파장별 FFT 결과를 나타낸 것이다. 우선 자외선 신호의 FFT 그래프를 보면 약 90 Hz 부근에서 특정 피크가 관찰되고 있다. 그러나 비초점거리에 따른 특정 피크의 주파수 대역의 이동은 관찰되지 않으며, 비드천이 구간을 벗어나는  $f_d = -40$  mm부터 특정 피크가 약 50 Hz로 이동하기 시작하여 열전도형 용접이 이루어지는  $f_d = -60$  mm에서는 다시 90 Hz 부근까지 피크가 이동하였다. 이러한 피크의 이동은 파워밀도가 급격하게 낮아지는 비초점거리에서부터 일어났는데, 이는 낮은 파워밀도의 킥용접이나 열전도형 용접과 같이 킥 개구의 움직임이 미약하거나 거의 일어나지 않을 경우에 이러한 플라즈마의 움직임이 매우 낮은 100Hz 이하의 저주파 신호로 나타나기 때문이다.

다음으로 레이저 반사광의 FFT에서는 비초점거리에 관계없이 모든 위치에서 플라즈마의 거동을 나타내는 특정 피크가 관찰되고 있다. 이는 레이저 반사광이 다른 신호들과 마찬가지로 용접시 여러 가지 상호작용에 의해 영향을 받기는 하지만 레이저빔이 직접적으로 반사되는 것으로써 다른 신호들에 비해 그 영향이 상대적으로 미약하여 비초점거리에 관계없이 주파수 성분이 잘 나타난 것으로 생각된다. 그러나 비드천이의 경계점인  $f_d = -40$  mm 구간에서는 고대역에서 추가적인 피크가 나타나고 있다.

또한 기존의 레이저 용접시에는 비초점거리에 따른 주파수 대역의 이동이 관찰되나 파이버 레이저에는 주파수 대역의 이동이 거의 없다는 것이 특징이다.

### 3.2 용접조건에 따른 용입과 신호특성

Fig. 5는 레이저출력  $P = 3$  kW일 때 용접속도별 RMS 변화를 나타낸 것이다. 파장별 RMS의 레벨변화는 용접속도 증가에 따라 자외선과 가시광선의 신호강도가 감소하였으며, 레이저 반사광은 증가하는 경향을 보였다.

또한 가시광선의 레벨이 자외선의 레벨보다 용접속도에 따른 신호의 감쇄가 상대적으로 완만하였다. 이러한

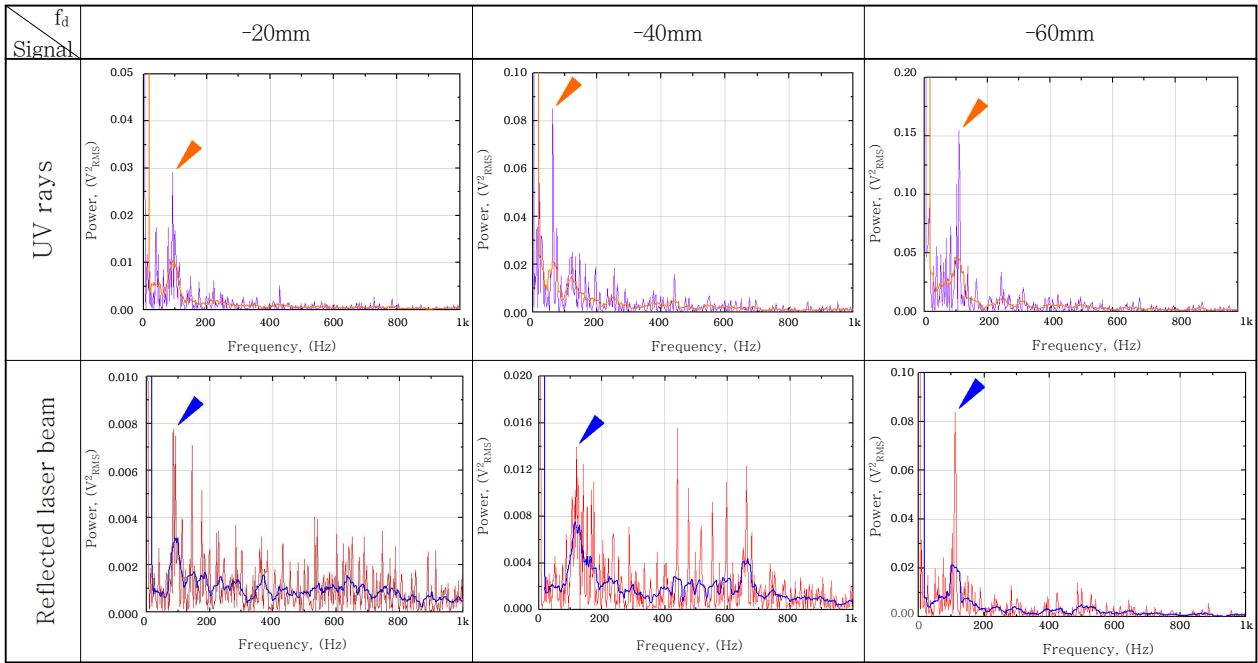


Fig. 4 FFT results of the measured signals with defocused distance

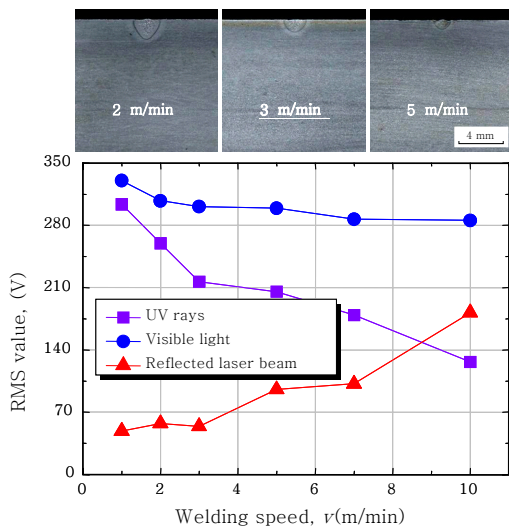


Fig. 5 Various RMS values with wavelength at 3 kW of laser power

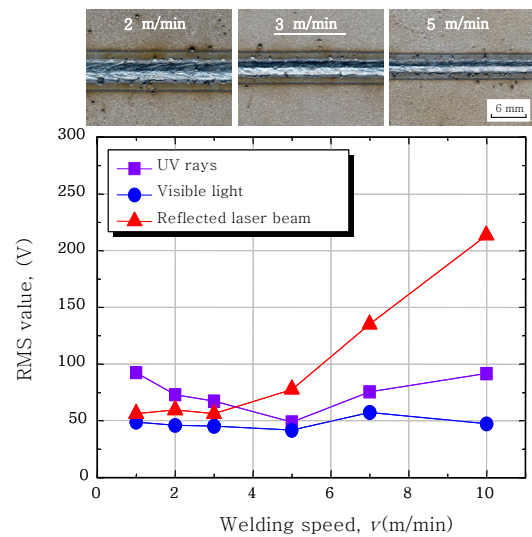


Fig. 6 Various RMS values with wavelength at 5 kW of laser power

가시광선의 거동은 출력이 1 kW에서 3 kW로 증가함에 따라 높게 나타나는데, 이는 출력 증가에 따라 키홀을 형성할 수 있는 용접속도의 범위가 증가하여도 키홀에서 증발하는 금속증기를 플라즈마화할 때 투입되는 에너지가 자외선을 방사시킬 만큼 높지 않기 때문이라고 생각된다.

Fig. 6은 레이저출력 P = 5 kW일 때 용접속도별 RMS의 변화를 나타낸 것이다. 5 kW부터는 자외선과 가시광선의 신호강도 변화가 P = 1 ~ 3 kW보다 크지 않는데, 이러한 현상은 깊은 용입의 키홀이 저출력에서

보다 높은 흡수율로 레이저빔을 흡수한 후 재료를 용융시키는데 사용된 양이 상대적으로 많기 때문이라고 생각된다. 또한 레이저 반사광도 중횡비가 2 정도 유지되는 v = 3 m/min까지 흡수율이 감소하지 않고 일정하게 유지되는 모습을 보여주었다. 그러나 키홀의 깊이가 알아지기 시작하는 v = 5 m/min부터는 키홀 내부의 용융금속량이 감소하면서 반사광의 강도가 증가하기 시작하였다.

그리고 전체적으로 자외선의 레벨은 저출력일 때와는 반대로 가시광선보다 위에 있는데, 이것은 고출력에서

사용재료의 주된 원소인 Fe의 중성원자 및 이온선의 자외선대 발광강도가 높는데 기인하는 것으로 판단된다.

Fig. 7은 P = 10 kW에서의 파장별 RMS 값을 나타낸 그래프이다. 그래프에서 보듯이 앞선 결과들과 마찬가지로 자외선의 RMS 레벨은 가시광선보다도 높게 나타났다. 또한 자외선 신호의 레벨 변동이 보다 확연하게 관찰되는데, 이는 Fig. 8에 나타낸 용접속도별 스패터의 발생량에서 보듯이 1 ~ 2 mm 정도의 스패터뿐만 아니라 2 mm 이상의 스패터도 비산되고 있어 금속증기를 공급하는 용융금속이 감소하여 플라즈마의 생성이 억제됨으로써 자외선 신호의 강도가 저출력에서보다 크게 변동한 것으로 판단된다.

또한 가시광선의 RMS 레벨은 레이저 출력이 5 ~ 10 kW까지 증가하는 동안 50 ~ 70 V사이로 거의 일정하게 나타나고 있다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 P

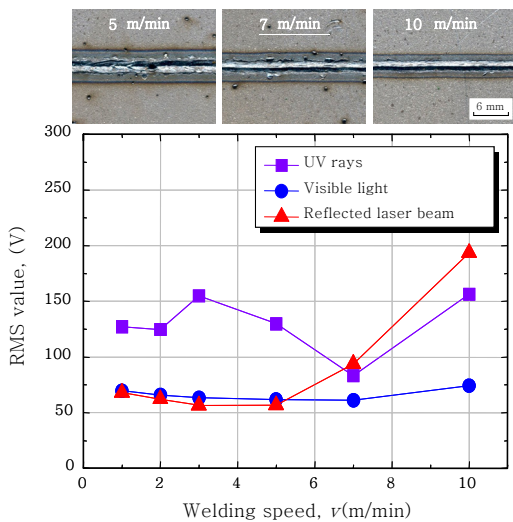


Fig. 7 Various RMS values with wavelength at 10 kW of laser power

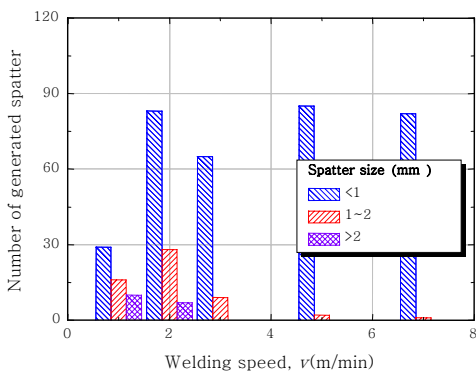


Fig. 8 Adhesion amount of spatter on bead surface with 10 kW laser power

= 5 kW 이상의 고출력에서는 용접속도가 낮을수록 스패터의 발생량이 증가하고 있음을 Fig. 8에서 확인하였는데, 이러한 스패터의 비산으로 출력대비 플라즈마의 생성량이 충분하지 못하여 발생한 현상으로 생각된다. 따라서 가시광선은 고출력에서보다는 저출력에서, 저속에서보다는 고속에서, 즉 스패터에 의한 플라즈마의 생성이 방해받지 않는 조건에서 측정신호로 사용하는 것이 더 효율적이라고 생각된다.

그리고 키희용접에서는 레이저빔의 흡수율이 높아서 레이저 반사광이 약하게 관측되며, 열전도형 용접과 같이 용융금속의 양이 적고 깊은 용입에 의한 키희내부로의 다중반사를 통한 빔의 흡수가 잘 일어나지 않는 조건에는 다량의 반사광 신호가 측정된다. 이를 통해 레이저 반사광은 저출력, 고속용접에서의 측정신호로 적합하다는 것을 알 수 있다.

더불어 자외선 신호의 경우에는 모든 조건에서 신호가 잘 측정되었으며, 키희가 형성되는 조건에는 그 특징이 더욱더 잘 나타났다. 따라서 신호의 측정은 레이저 용접조건에 따라서 적절한 파장대역을 선정할 필요가 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 레이저출력 P = 5 kW에서의 용접속도 변화에 따른 파장대별 측정신호의 FFT 결과를 나타낸 것으로 그래프에서 보듯이 용접속도 증가에 따라 특정 피크의 주파수대역이 점점 고주파 대역으로 이동하는 것이 관찰되는데, 속도별 주파수 대역을 살펴보면 v = 1 m/min에서는 약 100 Hz정도의 부근에서 피크가 관찰되었으며, v = 2 m/min은 약 140 Hz, v = 3 m/min은 약 230 Hz, 그리고 v = 5 m/min에서는 약 460 Hz 부근에서 피크가 감지되었다. 이러한 주파수의 변화는 종횡비가 1 이상인 키희용접에서 이러한 주기신호의 이동이 잘 관찰되었다.

그리고 종횡비가 1 이하로 감소하는 v = 7 m/min부터는 피크가 나타나는 주파수가 감소하기 시작하여 v = 10 m/min에서는 약 100 Hz까지 떨어졌다. 또한 저주파대역의 배경신호도 강하게 나타나고 있다. 그러나 이러한 배경신호의 생성은 P = 1 ~ 3 kW의 저출력에서 나타나는 열전도형 용접에 의한 현상과는 달리 고속 용접에 따른 키희운동의 주기적 거동이 매우 빠르거나, 움직임이 매우 미약하게 나타나 배경신호와의 분리가 명확하지 않기 때문이다.

이상으로 파이버레이저 용접시 플라즈마 방사신호의 신호강도 및 FFT는 용접조건 변화에 따라, 특히 키희 용접 및 경계조건에서 깊은 연관이 있음을 확인하였다.

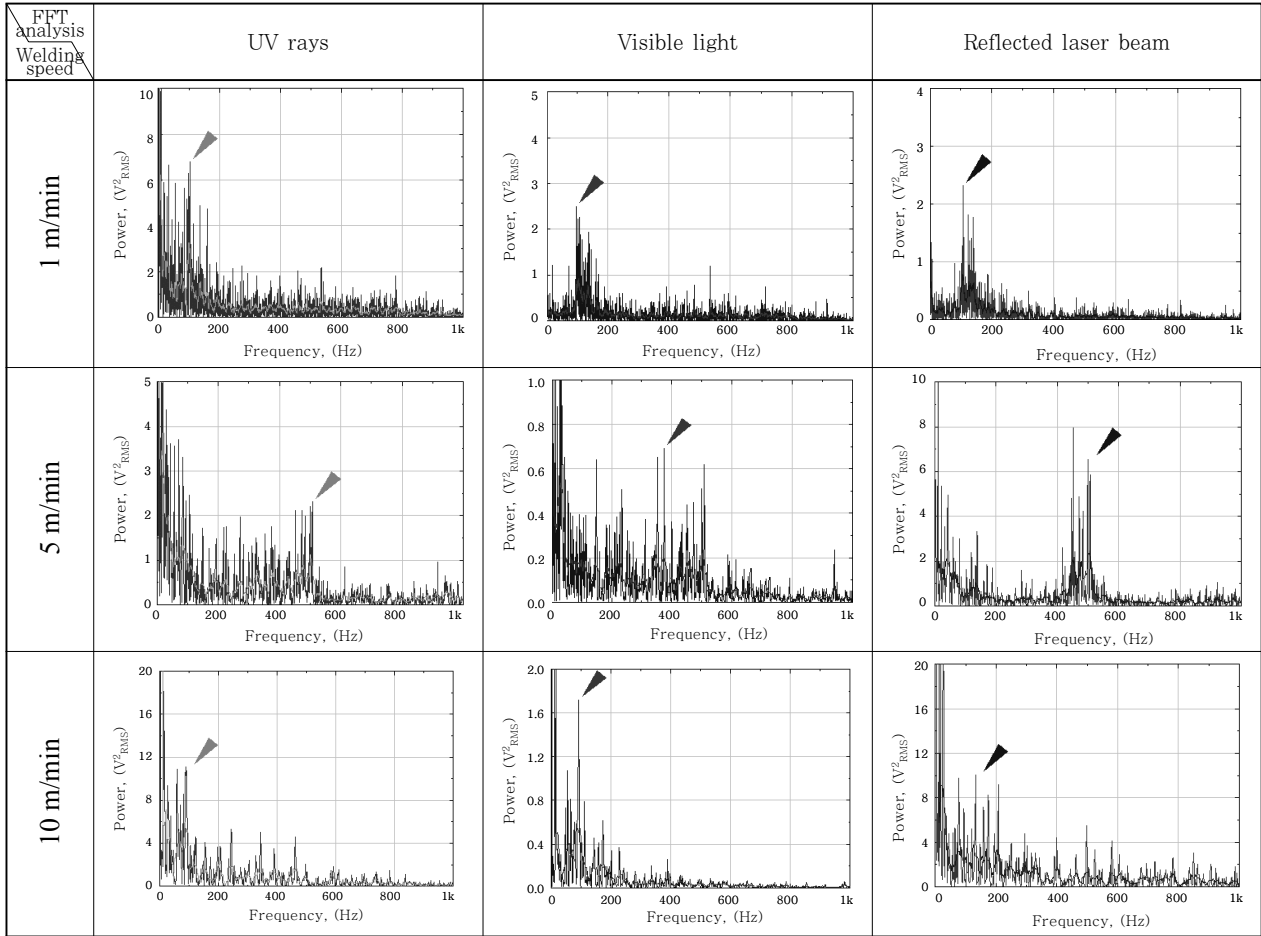


Fig. 9 FFT results of the measured signals at 5kW of laser power

4. 결 론

파이버 레이저 용접시 용접조건에 따른 신호강도 및 FFT 분석결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 파이버 레이저 용접시 자외선과 레이저 반사광 신호는 비초점거리가 증가함에 따라 비드천이구간에서는 RMS의 레벨이 선형적으로 상승하였으나, 열전도형 용접에서는 비초점거리가 커져도 증가하지 않았다. 특히 비초점거리에 따라 용입깊이가 감소하여 레이저빔의 흡수율이 높은 용융지의 면적이 축소되면서 레이저 반사량이 증가하여 나타난 현상이다.

2) 기존의 레이저 용접과는 달리 파이버 레이저 용접시에는 비초점거리에 따른 주파수 대역의 이동이 거의 없다.

3) P = 5kW 미만의 출력에서는 용접속도가 증가함에 따라 자외선 및 가시광선의 신호는 감소하였으며, 낮은 출력 때문에 플라즈마내의 Fe원자가 충분히 여기되지 못하여 자외선보다는 가시광선의 신호가 강하게 나타났다. 또한 레이저 반사광은 용접속도가 증가함에 따라 용융금속의 양이 감소하여 오히려 증가하는 경향

을 보였다.

4) P = 5kW 이상의 출력에서는 저출력일때와는 달리 키홀에서 증발하는 Fe원자를 충분히 여기시킬 수 있어서 가시광선보다는 자외선의 강도가 강하게 나타난 것으로 판단된다.

5) P = 10kW와 같은 고출력에서는 키홀로 집중되는 에너지의 양이 매우 높기 때문에 키홀벽 주위의 용융액이 높은 플라즈마 분사압력에 의해 스퍼터로 비산되므로 플라즈마가 안정적으로 형성되지 못하여 자외선 신호의 변화폭이 크게 나타났다.

6) 종횡비가 1이상인 키홀에서는 용접속도가 증가함에 따라 FFT의 주파수 피크가 고주파쪽으로 이동하였다. 또한 열전도형 용접이나 종횡비가 1이하인 키홀에서는 주파수 피크가 100Hz 이하의 저주파수로 이동하였으며, 배경신호도 증가하여 주파수 피크를 판별하기 어렵게 하였다.

감사의 글

“본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대

학 IT연구센터 육성지원 사업의 연구결과로 수행(NIPA-2012-H0301-12-2009)되었으며, 또한, 본 과제(결과물)는 국토해양부의 지원으로 수행한 해양에너지 전문 인력 양성사업의 연구결과입니다.”

### 참 고 문 헌

1. Young-Nam Ahn, Cheolhee Kim : Laser Welding of Automotive Transmission Components, Journal of KWJS, **29-6** (2011), 45-58 (in Korean)
2. K. H. Park : Fiber Laser Application to Precision Processing Industries, High Power CO<sub>2</sub> Laser Systems and Applications, Abstracts of the 2011 Autumn Annual Meeting of KWJS, 83-87 (in Korean)
3. You-Hie Han, Joo-Young Park : Fiber Laser Applications -Welding, Cutting and Drilling, Abstracts of the 2011 Spring Annual Meeting of KWJS, 105-105 (in Korean)
4. Mok-Young Lee : A Multi Kilowatts CW Fiber Laser Welding, Journal of KWJS, **26-4** (2008), 8-13 (in Korean)
5. 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
6. LIU Zhongjie, XU Guojian and KUTSUNA Muneharu : Laser-MAG hybrid welding of high strength steel using fiber laser and CO<sub>2</sub> laser, Quarterly journal of the Japan Welding Society, **25-2** (2007), 254-260
7. SHIN Minhyo, 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, Quarterly journal of the Japan Welding Society, **29-3** (2011), 174-180
8. SHIN Minhyo and NAKATA Kazuhiro : Study on Weld Bead Formation with Square-Groove Butt Joint by 10 kW Class Fiber Laser-MAG Arc Hybrid Welding, Quarterly journal of the Japan Welding Society, **29-3** (2011), 181-186
9. Jong-Do KIM, Chang-Je, Mok-Young LEE : Characteristics of Plasma Emission Signals in Fiber Laser Welding for API Steel ( I ), Journal of KWJS, **28-6** (2010), 51-57 (in Korean)
10. Jong-Do KIM and Hyun-Joon Park : The Weldability of 6mm<sup>t</sup> Primer-coated Steel for Ship-building by CO<sub>2</sub> Laser( I ), Journal of KWJS, **23-3** (2005), 76-82 (in Korean)
11. Jong-Do KIM and Chang-Je LEE : The Weldability of Laminated Stator Core for Motor by Pulsed Nd:YAG Laser [ I ], Journal of KSME, **30-7** (2006), 629-635 (in Korean)