

API강재의 파이버레이저 용접시 유기하는 플라즈마의 방사특성 (IV) - 키홀의 주기운동과 FFT분석의 상관성 -

김종도^{*,†} · 이창제^{**} · 서정^{***}

^{*}한국해양대학교 기관공학부

^{**}한국해양대학교 대학원

^{***}한국기계연구원 부산레이저기술지원센터

Characteristics of Plasma Emission Signals in Fiber Laser Welding of API Steel (IV) - Correlation of Keyhole's Periodic Motion and FFT Analysis Results -

Jong-Do KIM^{*,†}, Chang-Je LEE^{**} and Jeong Suh^{***}

^{*}Division of Marine Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

^{**}Graduate School, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

^{***}Busan Laser Application Support Center, KIMM, Busan 618-220, Korea

[†]Corresponding author : jdkim@hhu.ac.kr

(Received June 11, 2013 ; Revised July 12, 2013 ; Accepted August 12, 2013)

Abstract

The effects of laser welding beam quality is very large. However, not an analysing case was found for the difference on the plasma emission signal during laser welding according to the beam quality. Therefore, in this study, we compared and evaluated penetration and signal change according to the beam quality at the a similar wavelength band by using a fiber laser and Nd:YAG laser. In addition, we took high speed videography in order to make sure that FFT analysis reflects the actual motion period of keyhole and found the period of video analysis and FFT mostly matched. As a result, it is expected to secure higher reliability than evaluating signal intensity when applying FFT to monitoring.

Key Words : Fiber laser, Nd:YAG laser, Plasma, Beam quality, Keyhole, FFT

1. 서 론

파이버 레이저는 기존에 출시된 레이저들과 비교하여 매우 우수한 빔품질을 가지고 있지만^{1,2)}, 이 때문에 이미 연구된 기존의 레이저 용접의 결과를 그대로 적용하기에는 큰 어려움이 따른다³⁾. 특히, 모니터링을 위한 신호의 분석에 있어서도 파이버 레이저가 보여주는 신호의 특성은 매우 다르다^{4,5)}. 따라서 본 연구에서는 API 강재를 중심으로 대출력 파이버 레이저 용접시의 공정감시를 위한 인프로세스 모니터링의 기반기술 확보를 위한 기초연구의 일환으로 빔품질과 방사신호간의 관련성을 분석하고, 파이버 레이저 용접시 키홀의 주기

운동과 FFT 분석결과간의 신뢰성을 검증하고자 하였다.

따라서 본 연구에서는 가장 널리 사용되고 있는 램프 여기방식의 Nd:YAG 레이저와의 비교를 통하여 두 레이저간의 차이를 정성적으로 파악하고자 하였다. 여기에 사용된 Nd:YAG 레이저와 파이버 레이저의 파장은 1,064 nm와 1,070 nm로 파장간의 차이가 거의 없기 때문에 빔품질에 따른 특성을 파악하기에는 좋은 비교 대상이라고 생각한다.

또한 지금까지의 레이저 용접 모니터링 연구는 대부분 플라즈마 방사광신호의 신호강도 평가를 중심으로 이루어졌다⁶⁻⁹⁾. 물론 FFT분석을 이용한 연구가 진행되었으나¹⁰⁾ 파이버 레이저에 대한 FFT분석 연구는 보고가 매우 드문 편이다. 그러므로 여기서는 고속비 비디

오촬영을 통해 파이버 레이저용접시 키홀입구의 주기운동을 분석하고, FFT 결과와 비교하여 신호처리결과가 실제의 키홀운동과 관련성이 매우 깊음을 확인하였다.

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 사용재료 및 용접방법

본 연구에서는 1~3^{4,5)}보에서 사용한 API-X80강을 200 × 140 × 16 mm로 재단하여 실험을 하였다. 또한 파이버 레이저의 빔품질에 따른 플라즈마 신호의 영향을 비교·평가하기 위해 10 kW의 연속 이터븀 파이버 레이저(CW Ytterbium-Fiber laser)와 4 kW의 연속 Nd:YAG 레이저를 사용하여 빔품질에 따른 용입특성 및 플라즈마 신호를 비교하였다. Table 1에 사용 레이저의 각 사양을 나타낸다.

또한 파이버 레이저는 초점거리 $f = 500$ mm인 광학계에서 비초점거리를 $f_a = -20$ mm로 하였으며, Nd:YAG 레이저는 $f = 200$ mm인 광학계에서 비초점거리를 $f_a = -1$ mm로 설정하여 비드용접을 실시하였다.

2.2 키홀주기의 촬영방법 및 신호측정법

본 연구는 1~3보에서 분석한 FFT 결과가 실제 키홀의 거동을 반영하는지의 여부를 확인하기 위하여, Fig. 1에서 보듯이 레이저 용접시 키홀의 입구를 고속도 비디오로 촬영하였다. 카메라는 용융지로부터 1.2 M 떨어진 거리에서 40°의 각도로 촬영하였으며, 가능한 플라즈마의 영상대역을 제거하고 키홀의 입구를 관찰하기 위해 적외선 밴드패스 필터 및 ND필터의 조합을 이용하여 초당 2,000 프레임의 속도로 고속도 비디오를 촬영하였다. 본 촬영은 키홀의 주기적 거동을 파악하는데 목적을 두었으므로, 보다 정밀한 간섭필터를 사용하여 얻어지는 해상도가 높은 이미지는 아님을 밝혀둔다.

또한 레이저 용접시 발생하는 유기 플라즈마의 방사광 신호는 자외선, 가시광선 및 적외선 대역의 포토다이오드 3개를 사용하여 측정하였다.

Table 1 Specifications of Fiber laser and Nd:YAG laser

Spec. \ Laser	Fiber laser	Nd:YAG laser
Model	YLR-10000	HL4006D
Wave length	1,070 nm	1,064 nm
Output power	10,000 W	4,000 W
Beam quality	8 mm·mrad	25 mm·mrad

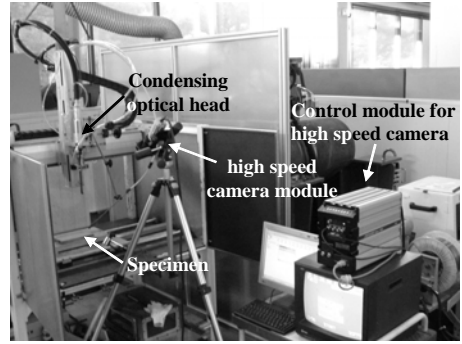


Fig. 1 Setup of high speed camera for filming of keyhole's behavior

3. 실험결과 및 고찰

3.1 빔품질에 따른 용입특성

빔품질에 따른 차이를 비교하기 위하여 파이버 레이저와 Nd:YAG 레이저 모두 키홀용접이 이루어지는 $P = 3$ kW, $v = 1 \sim 2$ m/min의 조건에서 용접을 실시하였다. 이때의 단면사진 및 비드외관을 Fig. 2에 나타낸다. 그림에서 보듯이 두 레이저 모두 키홀용접이 이루어졌음을 알 수 있다.

Fig. 3은 Nd:YAG 레이저와 파이버 레이저의 용입특성을 나타낸 것이다. 그래프의 좌측 영역은 $v = 1$ m/min 일 때, 우측은 $v = 2$ m/min일 때의 용입특성을 나타낸다. 먼저 레이저별로 용입정도를 살펴보면, 레이저에 관계없이 용입깊이는 거의 비슷하였으며, 비드폭만 파이버 레이저가 약 30%정도 더 넓게 측정되었다. 이러한 비드폭의 차이는 Nd:YAG 레이저의 비초점거리가 $f_a = -1$ mm인데 반하여, 파이버 레이저는 고출력에서의 스파터 발생을 고려하여 비초점거리를 $f_a = -20$ mm로 설정하였기 때문이라고 판단된다.

그러나 Nd:YAG 레이저와 파이버 레이저의 용입이 거의 비슷하다고 하더라도 파이버 레이저의 비초점거리

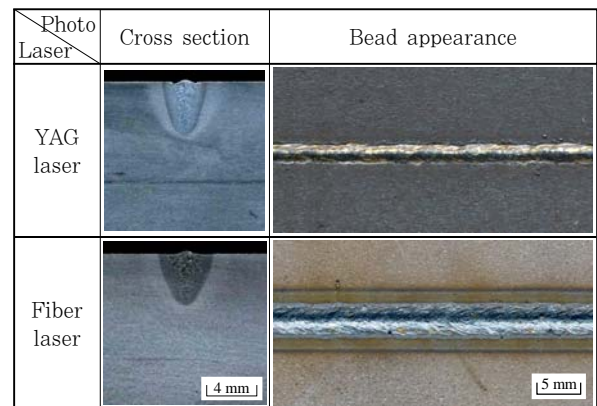


Fig. 2 Bead appearance and cross section in welding of Nd:YAG laser and fiber laser

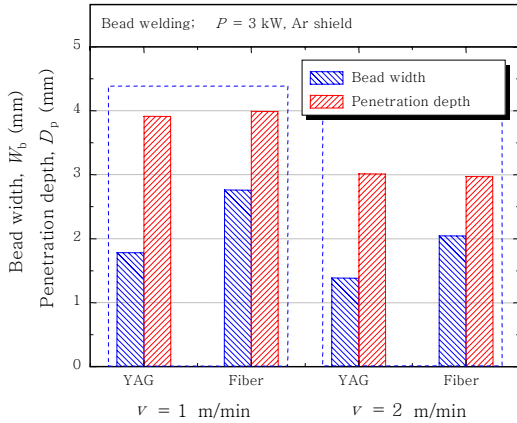
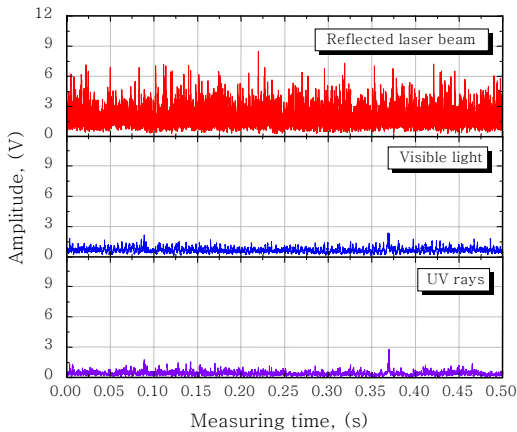


Fig. 3 Characteristics of penetration in welding of Nd:YAG laser and fiber laser

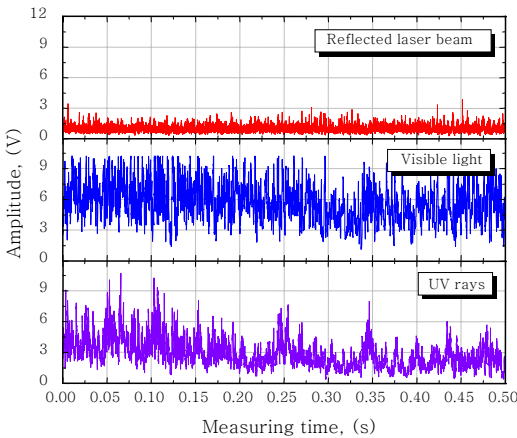
가 $f_d = -20$ mm라는 것을 감안하면 Nd: YAG 레이저 대비 파이버 레이저의 빔품질이 용입에 미치는 영향이 매우 크다는 것을 알 수 있다.

3.2 빔품질과 플라즈마 신호와의 관련성

빔품질에 따른 신호특성을 살펴보면, Fig. 4의 원신



(a) Nd:YAG laser



(b) Fiber laser

Fig. 4 Various raw signals with kinds of laser

호 변화에서 보듯이 용접속도에 관계없이 Nd:YAG 레이저와 파이버 레이저의 신호특성이 정반대로 움직이는 것을 확인할 수 있다. Nd: YAG 레이저에서는 레이저 반사광 신호가 다른 두 신호보다도 강력하게 측정되고 있으며, 파이버 레이저는 반대로 자외선과 가시광선의 신호가 강하게 나타나고 있다.

이러한 신호의 차이는 Fig. 5의 RMS 그래프에서 보다 잘 나타나고 있는데, 그래프에 나타난 것과 같이 파이버 레이저의 자외선 및 가시광선의 신호가 Nd:YAG 레이저의 신호보다도 거의 10배정도 크게 측정되고 있다. 또한 레이저 반사광은 파이버 레이저가 오히려 약 40%정도 작게 나타나고 있다. 이는 Fig. 3에서 살펴본 바와 같이 비초점거리 차이에 의한 비드폭의 차이가 주요 원인으로, 동일한 용입깊이에서 비드폭이 더 넓은 파이버 레이저의 키홀입구가 더 크기 때문에 레이저빔에 노출되는 용융금속의 면적이 더 넓어 여기서 발생하는 금속증기와 플라즈마의 생성량도 증가하기 때문이며, 또한 용융금속은 흑체와 유사하게 작용하므로 레이저빔 흡수면적이 넓은 파이버 레이저 용접부의 레이저빔 반사율이 낮게 측정된 것으로 사료된다.

물론, 이러한 현상은 $f_d = -20$ mm라는 큰 비초점거리에 기인한 넓은 비드폭도 무시할 수는 없으나, 높은 빔품질이 아니라면 이 정도의 비초점거리에서 키홀용접을 하기는 쉽지 않다는 것을 재차 확인할 수 있었다.

더불어 Fig. 6의 FFT 결과를 보면, Nd:YAG 레이저의 경우 약 260 Hz 부근에서 피크가 발견되고 있다. 그 반면 파이버 레이저는 약 180 Hz 부근에서 피크가 관찰된다. 이로부터 Nd:YAG 레이저 키홀의 움직임이 파이버 레이저 키홀의 움직임보다 약 100 Hz 정도 빠른 것을 알 수 있으며, 이것은 현재까지 보고된 키홀의 주기와 비슷한 움직임을 보이고 있다.

이와 같이 파이버 레이저는 기존의 Nd:YAG 레이저

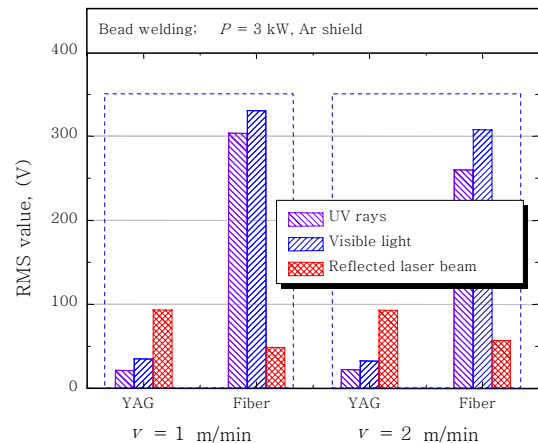


Fig. 5 Various RMS values with kind of laser

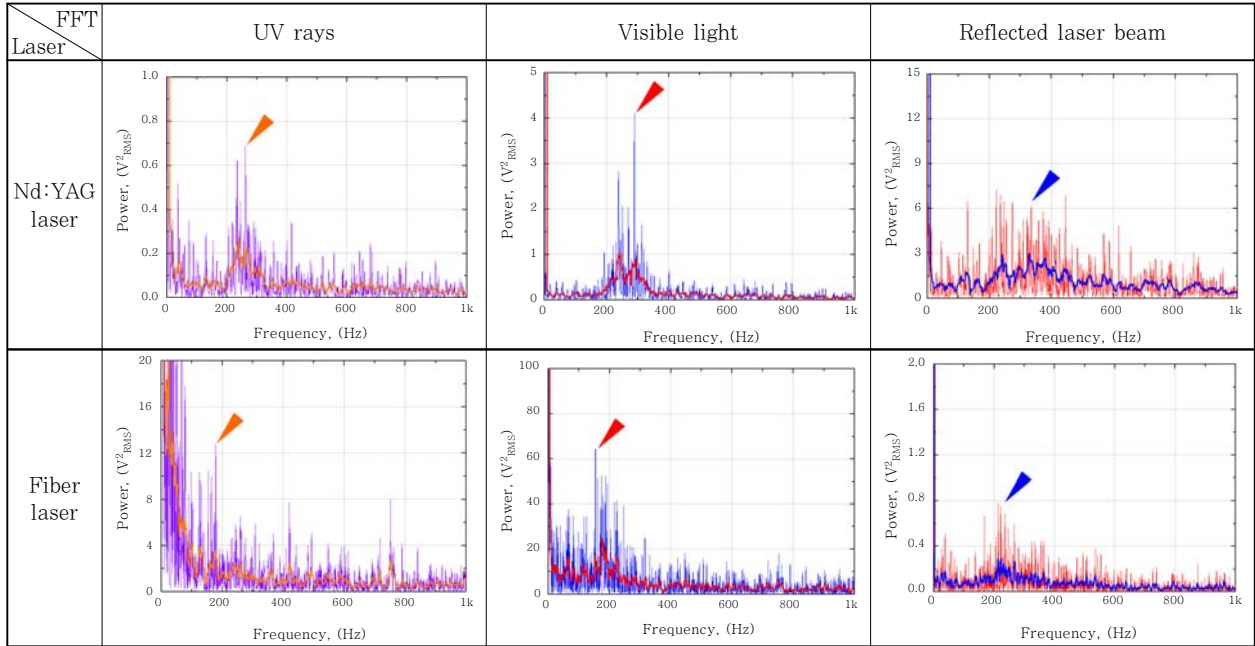


Fig. 6 FFT results of measured signals with welding speeds by lasers

보다 키흔의 진동주기가 길어진 것을 확인할 수 있는데, 이러한 이유로는 Nd:YAG 레이저 보다 넓은 비드 폭, 즉 직경이 넓은 키흔의 생성과 더불어 높은 파워밀도에 의해 생성된 고압의 금속증기가 키흔 입구의 개폐를 방해하기 때문이라고 생각된다. 또한 파이버 레이저의 비초점거리가 $f_d = 0$ mm에 근접할수록 초점에서 더 높은 파워밀도가 형성되어 이러한 금속증기의 급격한 증발현상을 더욱더 활성화시켜 오히려 용접결함으로 작용할 것이므로 파이버 레이저 용접에 있어서 파워밀도의 조절은 매우 중요한 용접변수라고 생각된다.

3.3 키흔의 거동과 FFT 결과와의 비교

고속도촬영은 키흔이 형성되는 조건에서 출력별로 실시하였으며, 이때의 출력별 스틸사진을 Fig. 7에 나타낸다. 먼저 P = 2 kW의 경우에는 2.0 ms부터 주기가 시작되어 6.5 ms, 11.5 ms 그리고 12.5 ms와 17.0 ms에서 키흔의 변화가 관찰된다. 이 주기들의 평균시간은 약 4 ms 정도로 이를 주파수로 환산하면 250 Hz 정도로, 앞선 FFT 결과인 230 Hz와 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다.

다음으로 P = 7 kW에서는 주기적 변화가 18.5 ms로써 주파수로 환산시 54 Hz에 해당하므로 56 Hz인 FFT 결과와 큰 오차 없이 일치하였다. 이를 통해 FFT 분석을 통한 키흔의 움직임이 실측한 결과와 거의 일치하는 것을 확인하였으며, 모니터링의 한 요소로 실제 적용도 가능할 것으로 판단된다.

또한 고속도 사진에서 보듯이, 고출력인 7 kW에서는 키흔의 개폐가 매우 확실하게 일어나는 반면, 저출력인 2 kW에는 그 움직임이 크지 않다는 것을 알 수 있다. 이는 키흔이 중력보다는 금속의 증발압력에 영향을 더 받기 쉽기 때문이며, 앞절에서 언급한 파이버 레이저의 특징을 잘 반영한 결과라고 생각된다.

4. 결 론

파이버 레이저와 Nd:YAG 레이저를 이용하여 빔품질에 따른 용입특성 및 신호간의 차이 및 고속도 비디오촬영을 통한 파이버 레이저 용접기 키흔의 주기분석의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 파이버 레이저와 Nd:YAG 레이저를 동일출력에서 용접할 경우, 파이버 레이저의 높은 빔품질로 인해 $f_d = -20$ 에서도 동일한 용입이 얻어졌다.
- 2) 파이버 레이저와 Nd:YAG 레이저를 동일 출력으로 용접하면 파이버 레이저는 가시광선과 자외선이 강하게 측정되었으며, Nd:YAG 레이저는 레이저 반사광이 강하게 측정되었다. 이는 빔품질이 우수한 파이버 레이저가 더 많은 양의 용융금속을 녹여 금속증기 및 플라즈마를 생성하여 이때 방사된 가시광선과 자외선이 강하게 측정된 것이며, Nd:YAG의 경우에는 빔수율이 우수한 용융금속을 파이버 보다 적게 형성하여 상대적으로 레이저 반사광이 더 높게 측정되었다.
- 3) 고속도 비디오촬영을 통한 파이버 레이저의 키흔 관찰결과, 키흔의 주기운동은 레이저 출력이 높아질수

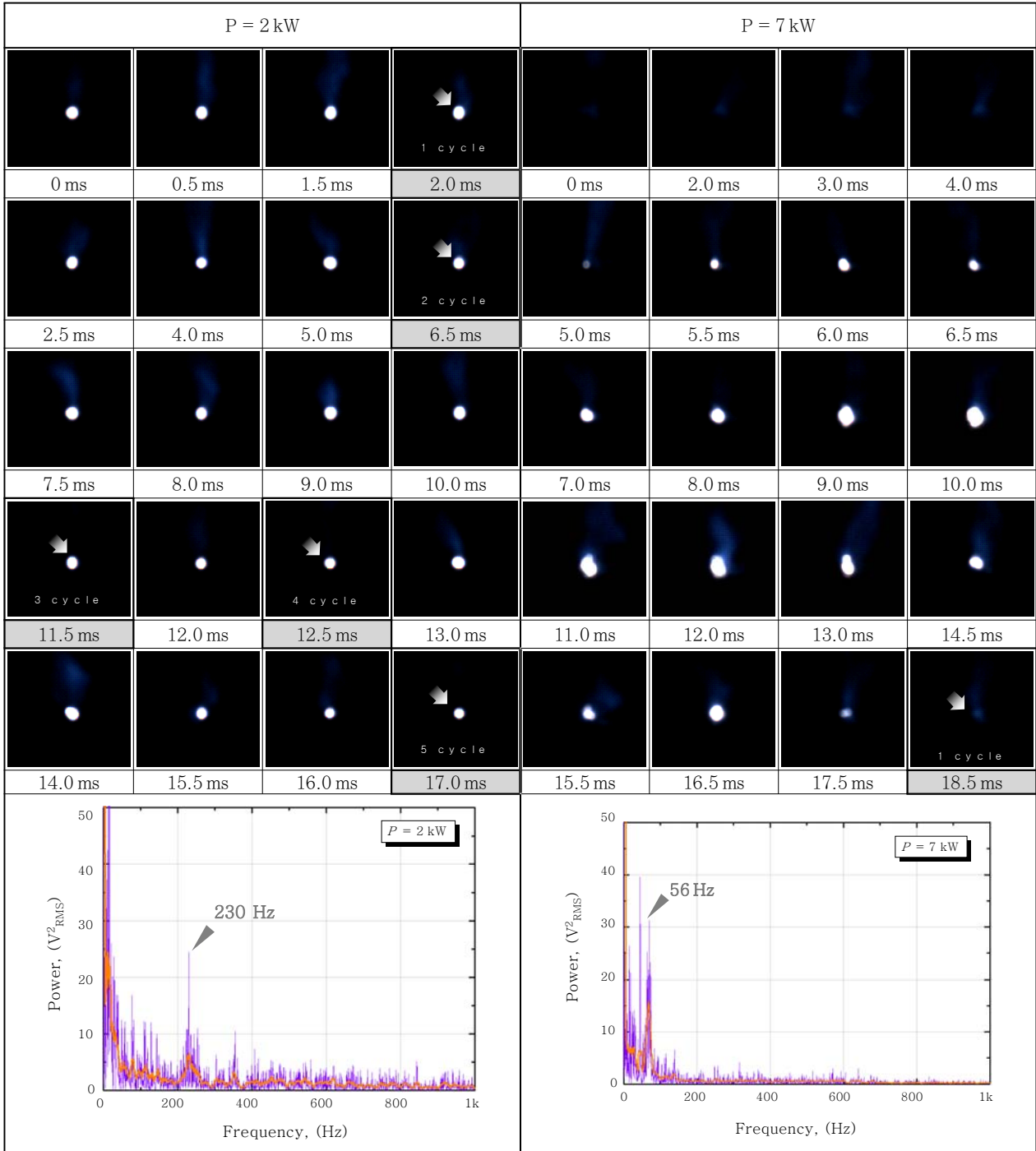


Fig. 7 High speed video images and FFT analysis results in bead welding at laser power 2kW and 7kW

록 느려졌으며, 플라즈마 방사광신호를 FFT 분석한 주파수 주기와 거의 일치하였다.

4) 이상의 결과로부터 빔품질에 따른 플라즈마 신호의 양상이 매우 상이함을 확인하였으며, 이를 통해 빔품질에 따른 측정신호의 처리방식도 차별화할 필요가 있음을 알 수 있다. 또한 키홀의 고속도촬영 분석주기와 FFT 주기가 거의 일치하는 것을 확인하였다. 따라서 레이저 모니터링 적용시 단순히 신호의 강도를 평가

하는 것보다 신뢰성을 높일 수 있을 것으로 생각한다.

감사의 글

본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 육성지원 사업의 연구결과로 수행(NIPA-2013-H0301-13-2009)되었으며, 또한 해양수산부의 지원으로 수행한 해양에너지 전문인력 양성사업의 연구 결과입니다.

Reference

1. A. Galvanauskas : High Power Fiber Lasers, Optics and Photonics News, **15-7** (2004), 42-47
2. C. Thomy, M. T. Seefeld and F. Vollertsen : High-Power Fibre Lasers - Application Potentials for Welding of Steel and Aluminium Sheet Material, Advanced Materials Research, **6-8** (2005), 171-178
3. M.Y Lee : A Multi Kilowatts CW Fiber Laser Welding, Journal of KWJS, **26-4** (2008), 8-13
4. J.D. Kim, C.J. Lee and M.Y. Lee : Characteristics of Plasma Emission Signals in Fiber Laser Welding for API Steel (I), Journal of KWJS, **28-6** (2010), 51-27 (in Korean)
5. C.J. Lee, J.D. Kim and Y.C. Kim : Characteristics of Plasma Emission Signals in Fiber Laser Welding for API Steel (II), Journal of KWJS, **30-4** (2012), 314-320 (in Korean)
6. J.D. Kim and Y.S Kim : The State of In-Process Quality Monitoring Technology in Laser Welding, Journal of KWS, **18-4** (2000), 20-27 (in Korean)
7. H.S Park and S.H Rhee : Weld Quality Monitoring System in CO₂ Laser Welding, Journal of KWS, **18-2** (2000), 43-48 (in Korean)
8. Y.H Park : Monitoring Technology in Laser Welding, Journal of KWJS, **27-1** (2009), 5-7 (in Korean)
9. N. Kawada, S. Shiraishi, M. Oikawa, Y. Otsuka, S. Iwaki, and H. Kumehara : Development of Quality Control System for Laser Spot Welding System of Stainless Steel Sheets, Journal of the Japan Society for Precision Engineering, **75-8** (2009), 973-978
10. I. Miyamoto, T. Inoue, K. Ono, and K. Adachi : Light Emission from Keyhole in High-Power CO₂ Laser Welding, The Review of Laser Engineering, **30-1** (2002), 38-43