

API강재의 화이버레이저 용접시 유기하는 플라즈마의 방사특성 (I) - 측정조건에 따른 광신호의 변화 -

김종도*[†] · 이창제** · 이목영***

*한국해양대학교 기관시스템공학부

**한국해양대학교 대학원

***RIST 원천소재연구본부

Characteristics of Plasma Emission Signals in Fiber Laser Welding for API Steel (I) - Variation of Signals by Measuring Conditions -

Jong-Do KIM*[†], Chang-Je LEE** and Mok-Young LEE***

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

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

***New Materials Research Department, RIST, Pohang 790-330, Korea

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

(Received April 28, 2010 ; Revised August 26, 2010 ; Accepted September 14, 2010)

Abstract

Fiber laser is a heat source which is introduced recently, and so has a little researched data compare with conventional laser processing. Moreover basic data for welding monitoring are also insufficient. Therefore, in this study, the change of signal with measuring position and angle of plasma emission signals were analysed as a basic experiment for real time monitoring in fiber laser welding. As a result, the signals measured from the side, front and rear had the biggest intensity at 60°, and frequency peak to reflect the behavior of keyhole and swing of plasma by shield gas was detected at 45 ~ 60°. However, both intensity of signal and the result of FFT for monitoring were satisfied at the angle of 45° from the side.

Key Words : Fiber laser, Laser welding, Plasma, Emission signal, Photodiode, RMS, FFT

1. 서 론

레이저 용접은 높은 파워밀도를 가진 레이저빔을 집광하여 재료를 용융·접합하는 가공이다. 이러한 가공은 높은 파워밀도에 기인한 금속의 급격한 증발과 플라즈마를 발생시킨다. 이때 발생하는 유기 플라즈마와 용접부에서는 다양한 신호들이 방사된다.

우선 유기 플라즈마로부터 방사되는 신호들을 살펴보면, 크게 광신호와 음향신호 그리고 금속증기의 플라즈마화에 따른 전위차 및 열 에너지가 있다. 이중 광신호는 자외선부터 적외선까지 다양하게 방사되며, 가공하고 있는 재료의 종류에 따라 주로 방사되는 파장이 결

정된다. 또한 용접부에서는 재료에 미처 흡수되지 못하고 반사되는 레이저광과 용융금속에서 방사되는 적외선 신호가 있다.

이러한 방사신호는 레이저빔과 재료와의 상호작용에 크게 영향을 받으며, 아크용접과는 달리 직접적인 용접 신호의 피드백이 어려운 레이저용접에서는 간접적인 신호로써 매우 유용하게 사용될 수 있다¹⁾.

다양한 방사신호들 중 플라즈마의 방사신호가 레이저 용접 모니터링에 가장 먼저 활용되었는데, Steen 및 Li 등의 경우에는 플라즈마의 발생 및 미발생시의 변화라던가 키펀의 관통 및 비관통에 따른 신호의 영향을 기초로 플라즈마에서 방사되는 자외선과 키펀 용융부에서 방사되는 적외선을 각각 측정 및 비교·분석함으로써

써 모니터링의 신뢰성을 높이고자 하였으며^{2,3)}, Beyer, Sokolowski 및 Gatzweiler 등은 키홀에 조사된 Ar⁺ 레이저의 반사광을 관찰하여 플라즈마의 거동이 키홀의 거동을 반영한다는 사실을 플라즈마의 분광분석 결과와 비교하였다^{4,5)}. 동시에 포토다이오드(photodiode)와 마이크로폰(micro phone)을 통한 광신호와 음향신호의 비교도 수행하였다⁶⁾.

특히, 레이저용접시 광신호의 측정은 포토다이오드를 이용한 연구가 상당히 이루어져 있으나, 신호의 분석 방법이나 결합의 대응 등은 서로 상이한 결과들을 보고하고 있다⁷⁻¹⁰⁾.

한편, 화이버 레이저는 높은 빔품질에 기인한 광학적 특성으로 인하여 용접시 기존의 레이저보다 어스펙트비(aspect ratio)가 더 크고 비드의 폭이 매우 좁은 키홀을 형성하여 증발금속의 급격한 분출을 유발한다. 또한 이는 유기 플라즈마의 거동을 매우 불안정하고 격렬하게 만들어 분출하는 플라즈마의 관찰을 어렵게 한다. 때문에 화이버 레이저 용접시 플라즈마의 관찰은 기존의 레이저 에서 비해서 측정장비의 세밀한 셋팅이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 API강재의 화이버 레이저 용접시 유기 플라즈마의 방사신호 측정에 앞서 측정용 포토다이오드의 측정위치 및 각도에 따른 신호의 특성을 분석하여 최적의 측정구간을 확인하고자 하였다.

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 사용재료

본 연구에서는 원유 및 천연가스 수송관로에 사용되는 API(American Petroleum Institute)강을 중심으로 실험을 실시하였다. API강 중에서 최근 장거리 배관 건설시 주로 사용되는 API X-80강을 사용하였다. Table 1에 실험에 사용한 X-80강의 화학적 조성을 나타낸다. 시편은 두께 16 mm의 API강을 200×140 mm로 재단하여 제작하였다.

2.2 용접방법

최근들어 API강은 용접부에서도 모재와 비슷한 저온 인성과 내식성을 요구되고 있으며, 재료의 기계적 성질

Table 1 Chemical composition of API X-80 steel

Property Material	C	Mn	Si	Nb +Ti	Mo +Ni	Fe
API X-80	0.067	1.89	0.23	≤ 0.09	≤ 0.75	Bal.

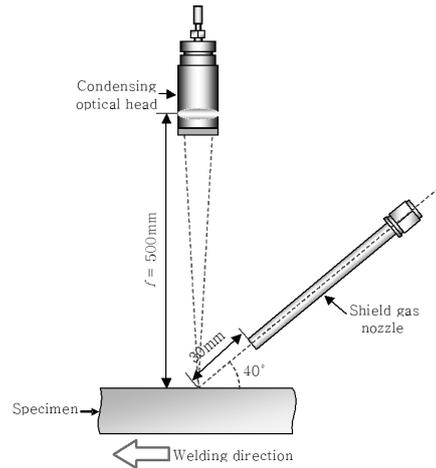


Fig. 1 Schematic illustration in fiber laser welding

이 저하되는 용접 열영향부의 처리도 매우 중요하다. 이에 본 실험에서는 용접시 입열에 따른 열영향이 적고 용접부의 폭이 좁은 레이저용접을 적용하여 용접부에서 발생하는 재료의 기계적 성질의 열화를 최소화하고자 하였다.

따라서 실험에서는 저입열 용접을 위하여 빔품질이 우수한 10 kW의 연속 이테르븀 화이버 레이저(CW Ytterbium-Fiber laser)를 사용하였다. 레이저용접은 Fig. 1과 같이 초점거리 $f = 500$ mm인 광학계를 사용하였으며, 실드가스는 용접진행방향 후방 40°에서 30 mm의 거리를 두고 분사하였다. 또한 후관용접임을 감안하여 광학계를 용접진행방향에 대해 전진각을 1.0°로 하였다.

레이저용접은 비초점거리 $f_d = -20$ mm에서 레이저출력 $P = 5$ kW 그리고 용접속도 $v = 2$ m/min으로 비드 용접을 실시하였다.

2.3 플라즈마의 측정방법

화이버레이저 용접시 발생하는 유기 플라즈마의 방사광 신호를 취득하기 위하여 200 ~ 1,100 nm (peak response : 750 nm)의 대역을 가진 포토다이오드를 각각 사용하였다.

신호의 측정은 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 포토다이오드를 5 ~ 85°까지 15°간격으로 각도를 조절하며, 용접진행방향의 측면과 후면 그리고 전면에서의 가시광선 신호를 각각 취득하여 각도와 측정위치별 신호의 특성을 분석하였다.

또한 포토다이오드에는 CWL = 530 nm, FWHM = 440 nm 인 밴드패스필터를 설치하여 가시광선만을 투과하도록 함으로써 가능한 사용된 포토다이오드의 최대 감도대역에서 가시광선만이 측정되도록 대역을 제한하였다.

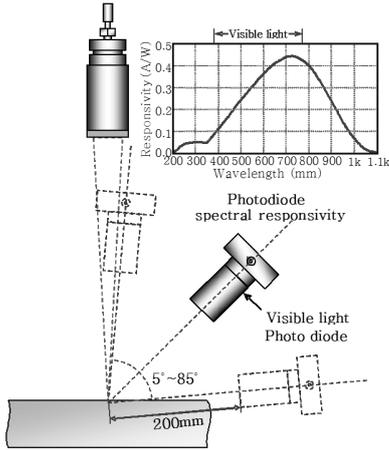


Fig. 2 Measurement of emission signals with photodiode angle in fiber laser welding

3. 실험결과 및 고찰

3.1 용접진행방향 측면에서의 신호특성

하이브리더 용접시 용접부 측면에 포토다이오드를 설치하고 각도를 5° ~ 60°까지 15°간격으로 조절하면서 플라즈마의 방사신호를 측정하였다. 이때 60°이상의 각도는 광학계의 커튼에어 노즐과의 간섭으로 측정이 불가능하였다. Fig. 3에 이때 측정된 각도별 원신호 (raw signal)를 나타낸다. 그림에서 보듯이 측정각도가 증가할수록 신호의 진폭 및 강도가 증가하는 것을 알 수 있다.

이들 신호간의 레벨(level)차를 정량적으로 확인하기 위하여 측정신호를 RMS값으로 변환하였으며, Fig. 4에 측정각도별 RMS값을 나타낸다. RMS값은 측정각도가 상승할수록 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 각도별로 살펴보면 5°와 15° 그리고 30°와 45°사이에서

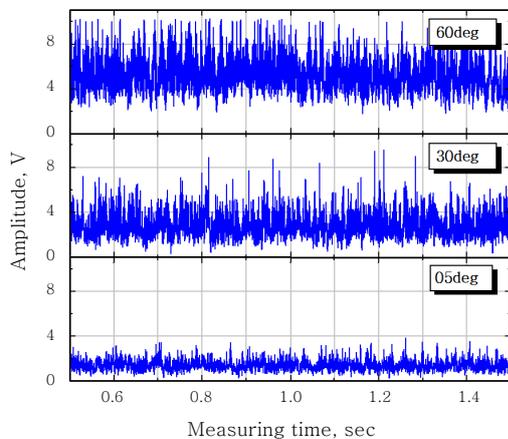


Fig. 3 Variation of raw signals with photodiode angle in measurement from the side

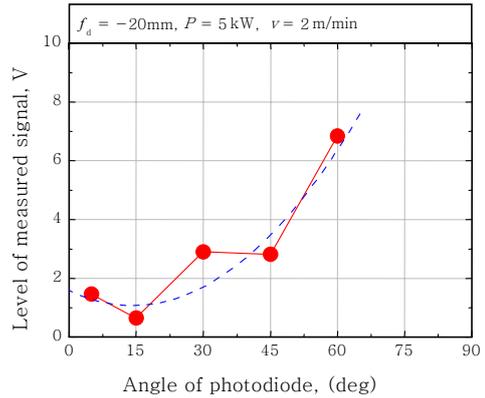


Fig. 4 Variation of RMS value with photodiode angle in measurement from the side

RMS값의 감소가 관찰되는데, 이는 포토다이오드와 관측지점간의 정렬오차에 기인한 것으로 판단되며, 전체적인 경향은 포토다이오드의 각도상승이 측정신호의 레벨을 상승시키는 것으로 나타났다.

또한 용접부 측면에서 측정된 신호의 주파수분석 결과도 각도별로 차이를 나타내고 있는데, Fig. 5에 나타난 측정각도별 FFT 결과값에서도 확인할 수 있다.

그림에서 보듯이 측정각도 15°에서는 약 100 Hz 부근에서 신호의 피크(peak)값이 감지되었으며, 45°에서도 약 100 Hz 부근에서 신호의 피크값이 나타났다. 그러나 45°에서는 신호의 주 피크값 이외에 추가로 약 400 Hz 근방에서 강력한 피크가 나타나고 있는데, 이는 실드가스에 의한 플라즈마의 흔들림이 주파수신호로 가시화된 것으로 생각된다. 측정각도 60°에서는 저주파 대역의 배경신호가 0 ~ 150 Hz까지 나타나 플라즈마의 주 피크값이 가려지고 있다.

이와 같은 현상은 포토다이오드의 측정특성에 기인한 것으로 Fig. 6에서 나타난 측정각도에 따른 포토다이오드의 수광 모식도로 이해할 수 있다. 모식도를 각도별로 비교해보면 15°에서 45°로 측정각도가 증가하면 플라즈마의 수광면적이 증가함을 알 수 있으며, 60°에서 최대로 된다. 그러나 85°에서는 플라즈마의 방사광이 모두 포토다이오드로 수광되나, 상부에서 바라보기 때문에 방사광의 면적은 오히려 감소하게 된다. 이는 포토다이오드가 플라즈마의 방사신호를 면적의 평균값으로 취득 하기 때문이다.

따라서 측면측정의 경우, 측정각도 15° 이하에서는 포토다이오드의 수광면적이 적어 적정한 주파수 분석이 어려웠으며, 60°에서는 넓은 수광면적이 오히려 배경신호의 증가를 가져와 주신호가 배경신호에 가려졌다. 그러므로 단순히 신호강도의 측면에서는 60°가 가장 우수한 결과를 나타냈으나 주파수 분석과의 연계성을 고려

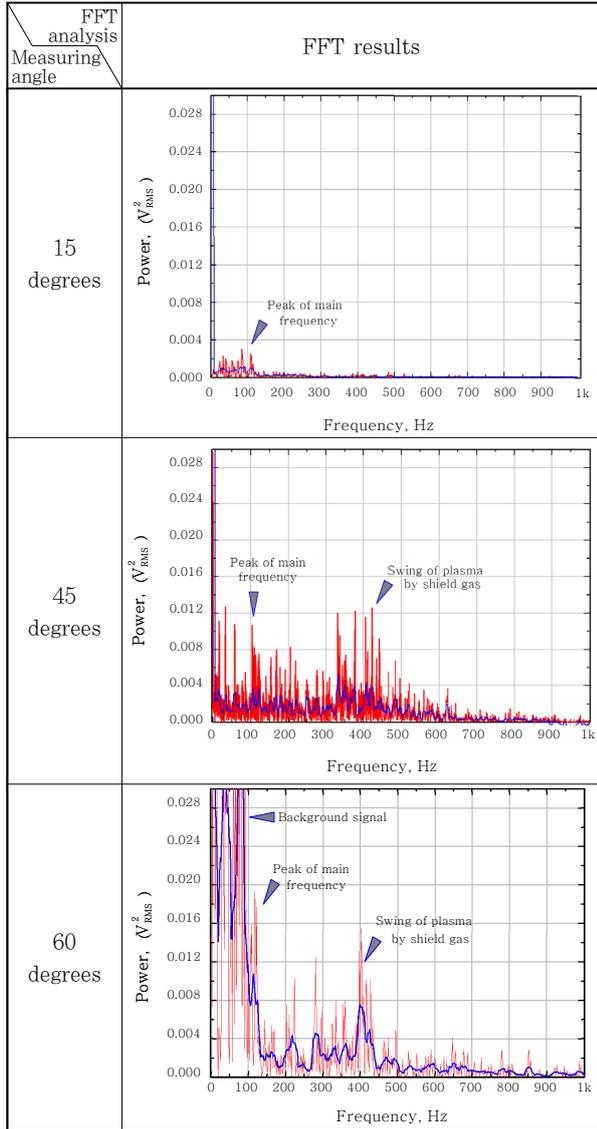


Fig. 5 FFT results of raw signals with photodiode angle in measurement from the side

한다면 30 ~ 45°사이가 가장 적정할 것으로 판단된다.

3.2 용접진행방향 정면에서의 신호특성

정면에서의 플라즈마 측정은 용접시 발생하는 스패터와 실드가스에 의한 플라즈마의 편향으로 인해 측면보다 높은 각도인 30°에서 85°까지 15°간격으로 측정을 실시 하였다.

Fig. 7은 정면 측정시 포토다이오드의 각도별 RMS 값을 나타낸다. 그래프에서 보듯이 신호의 레벨은 측정이 시작된 30°부터 상승하기 시작하여 60°에서 최대값을 보인 이후 각도가 증할수록 레벨이 감소하였다.

이는 앞서 설명한 Fig. 6에서와 같이 측정위치의 발광부 수광면적에 따른 차이에 기인한 것으로 측정각도가 높은 정면측정에서는 각도의 변화에 따른 레벨의 증가보다는 측정면적 변화에 따른 레벨의 감소가 나타나고 있다.

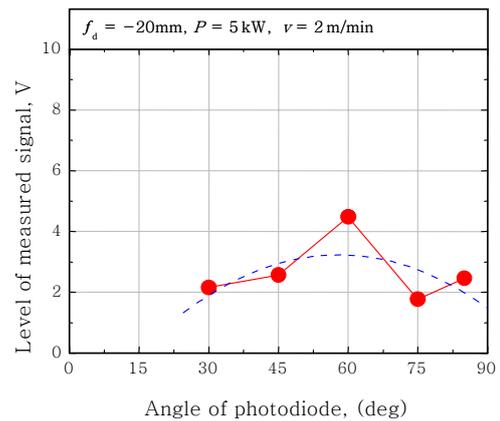


Fig. 7 Variation of RMS value with photodiode angle in measurement from the front

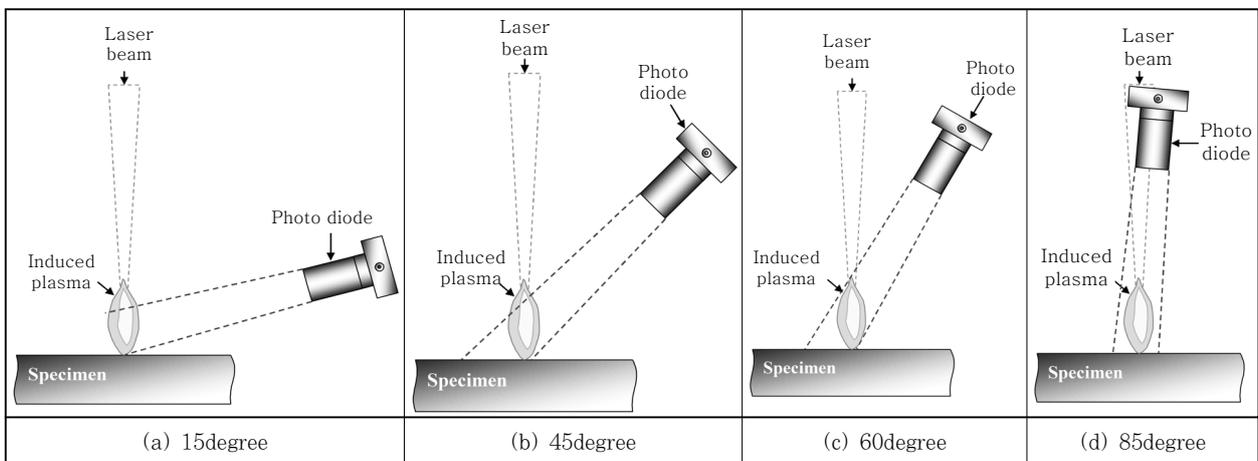


Fig. 6 Bounds of light guiding of plasma emission signals with measuring angle of photodiode

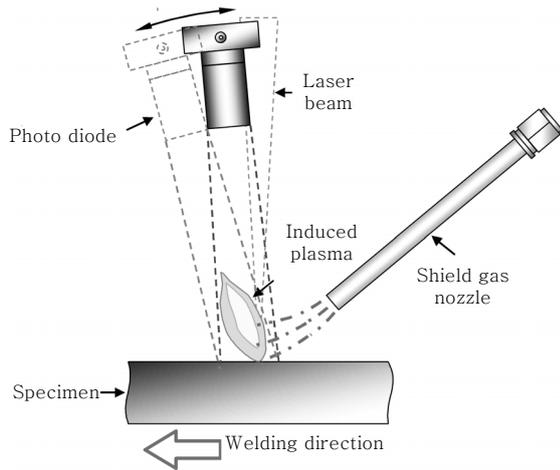


Fig. 8 Bounds of light guiding with 75° and 85° in measurement from the front

또한 85°에서는 신호의 레벨이 감소하지 않고 75°보다 조금 높게 나타나는데, 이는 Fig. 8에서 보듯이 실드가스에 의한 플라즈마의 전방향 편심의 영향으로 75° 이상부터는 플라즈마의 상면부를 넘어서서 플라즈마 기둥의 후면부까지 측정되어 전체적인 수광면적이 증가했기 때문이라고 판단된다.

포토다이오드의 정면 측정시 측정신호의 각도별 FFT 결과를 Fig. 9에 나타낸다. 그림에서 보듯이 30°에서는 측면 측정시와 마찬가지로 약 100 Hz 부근에서 주 피크값이 나타났으며, 60°에서부터는 주 주파수 이외에 실드가스에 의한 플라즈마의 흔들림에 따른 약 400 Hz 정도의 주파수가 관찰되었다. 또한 측면 측정시 만큼은 아니지만 강력한 배경신호가 저주파대역에서 강하게 나타나 주 주파수의 분리를 어렵게 하였다. 그리고 측정각도 85°에서는 플라즈마의 상면부 움직임만이 측정되기 때문에 특정한 강도를 가지는 주파수 성분을 찾기 어려웠다.

더불어 정면측정시 측정각도 30° ~ 45° 사이에서 주 주파수 성분이 분석된다고 하여도 실드가스에 의해 전면부로 다량의 스펙터 비산과 흡의 영향으로 포토다이오드의 광학계 오손이 심각하고, 60°에서는 배경신호에 의한 주 주파수 분리의 어려움이 있다. 그리고 60° ~ 85° 사이의 고각에서는 신호강도뿐만 아니라 주파수 성분의 파워(power)값 감쇄도 매우 커서 측정신호의 분석이 매우 어려웠다.

따라서 신호의 측정면에서 정면측정은 그다지 바람직하지 못한 것으로 판단된다.

3.3 용접진행방향 후면에서의 신호특성

후면에서의 플라즈마 측정은 실드가스 노즐과의 간섭

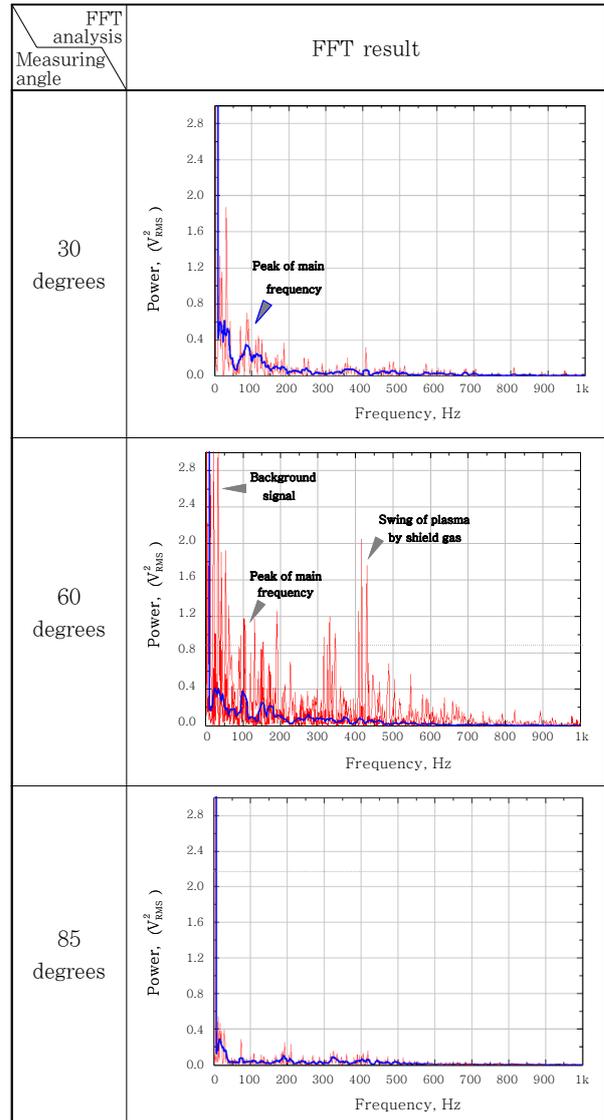


Fig. 9 FFT results of raw signals with photodiode angle in measurement from the front

으로 45°에서부터 85°까지 15°간격으로 측정을 실시하였다.

Fig. 10에 나타난 후면 측정시 포토다이오드의 각도별 RMS값을 살펴보면 신호의 레벨변화는 전면측정과 유사한 경향을 보이며, 레벨값도 더 높게 나타났다. 이러한 현상은 앞서 설명한 바와 같이 실드가스에 따른 플라즈마의 편심에 따른 수광면적의 증가가 그 원인이다. 그러나 플라즈마의 편심이 전면측정과 달리 반대방향임으로 60°이상의 각도에는 각도가 증가할수록 RMS값이 감소하여 85°에서 가장 작은 값을 보였다.

후면 측정시 각도별 FFT 결과를 나타낸 Fig. 11을 보면 45°에서는 측면 측정에서의 결과와 마찬가지로 주 주파수와 실드가스에 의한 플라즈마의 흔들림에 따른 주 주파수가 동시에 관찰되었다. 또한 60°에서는 다른 측정면에서와 같이 강력한 배경신호에 의해 주 주파수

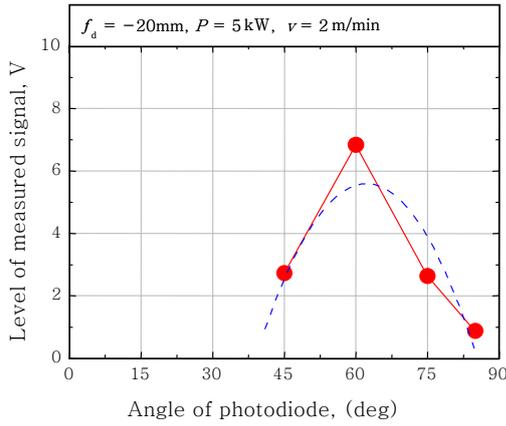


Fig. 10 Variation of RMS value with photodiode angle in measurement from the rear

가 일부 가려지기는 하나 상대적으로 주파수의 분리가 어느 정도 관찰되고 있다. 85°에서는 정면 측정시와 마찬가지로 주파수 성분이 미약하게 나타나고 있으나 주 주파수 성분도 나타났다.

후면에서의 신호측정은 전면과는 달리 실드가스의 영향으로 스펙터의 비산이 현저하게 감소하여 포토다이오드 광학계의 오손이 상대적으로 적었으나, 측면에서 측정하는 것보다는 주파수 성분의 분리가 좋지 않았다. 또한 실드가스 노즐의 영향으로 45° 이하의 저각(底角)에서는 신호의 측정이 곤란한 등의 문제점이 있다.

따라서 이상의 결과로부터 플라즈마의 신호측정을 위한 신호의 측정강도 및 FFT시 주파수 성분의 분리정도 등을 고려하여 측면 45°에서 측정하는 것이 가장 좋은 결과를 나타냈다.

4. 결 론

하이버레이저 용접시 포토다이오드의 측정위치 및 각도별 신호의 특성을 분석한 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 측면에서 레이저 방사광 측정시 포토다이오드의 각도가 증가할수록 RMS의 레벨이 상승하였으며 60°에서 가장 강도가 강하게 나타났다. 그러나 FFT결과 15°와 45°에서는 약 100 Hz 근방에서 주파수가 나타났으나, 60°에서는 0 ~ 150 Hz까지 강력한 배경신호 나타나 주 주파수를 확인 할 수 없었다. 또한 15°에서는 측정각도의 영향으로 주파수 신호의 피크가 너무 미약하였고, 45°에서는 주 주파수 이외에 400 Hz 근방에서 실드가스에 의한 플라즈마의 흔들림이 강하게 반영되어 나타났다.

2) 전면에서의 신호변화는 측면에서와 마찬가지로 각도가 증가함에 따라 60°에서 가장 강도가 강했으며, 그 후 다시 감소하다가 85°에서 약간 상승하였다. 이는 실드가스에 의한 플라즈마의 전방향 편심의 영향으로 전체적인 수광면적이 증가했기 때문이다. FFT에서는 60°에서 실드가스의 영향으로 측면에서 같이 400 Hz 근방에서 강력한 피크가 관찰되었으며, 배경신호의 영향도 나타났다. 그러나 전방은 스펙터나 용접포와 같은 비산·증발물질의 영향을 직접적으로 받기 때문에 측정 위치로서는 매우 부적합하다.

3) 후면에서도 60°일때 신호의 강도가 가장 강하였다. 또한 85°에서 신호가 가장 약하게 나타났는데, 이는 전면 측정과는 반대로 실드가스에 의한 플라즈마의 편심이 포토다이오드의 측정방향과 반대로 이루어져 수광량이 감소하기 때문이다.

4) 이상의 결과로부터 적정한 신호의 강도를 가지면서 FFT시 키홀의 거동을 반영하는 주파수 성분을 분리

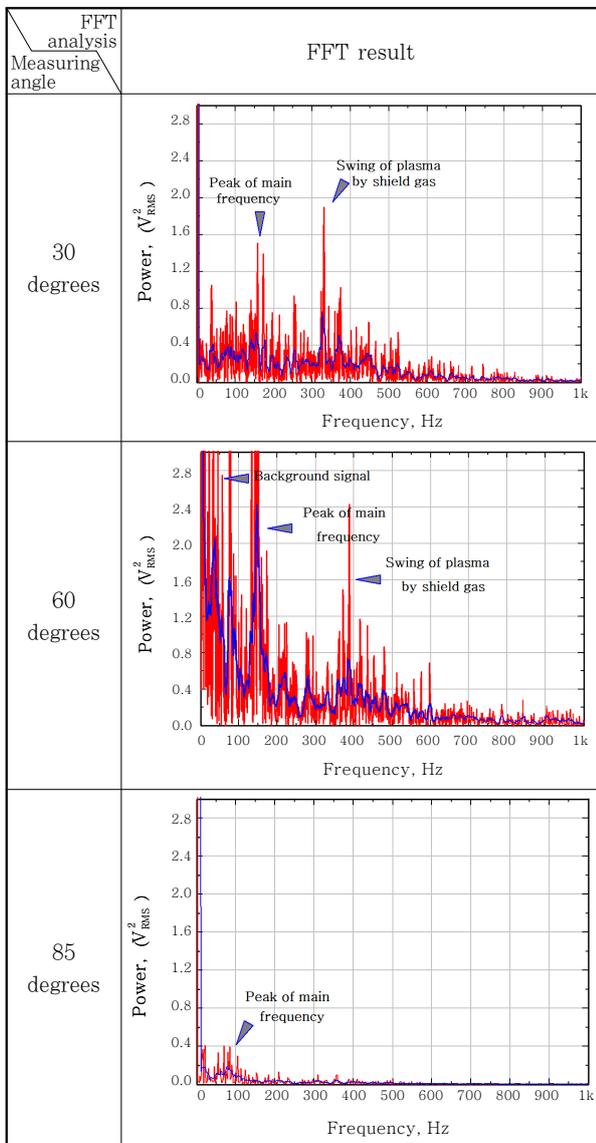


Fig. 11 FFT results of raw signals with photodiode angle in measurement from the rear

할 수 있는 조건은 측면 45°로 판단된다.

참 고 문 헌

1. J.D. Kim and Y.S Kim : The State of In-Process Quality Monitoring Technology in Laser Welding, Journal of KWJS, **18-4** (2000), 433-440 (in Korean)
2. William M. Steen : Laser Material Processing, Springer, 3rd Edition, 351-382
3. H.B.Chen, L.Li, D.J. Brookfield, K. William and W.M. Steen : Laser Process Monitoring with Dual Wavelength Optical Sensors, ICALEO'91, 113-122
4. E. Beyer, A. Gasser, W. Gatzweiler and W. Sokolowski : Plasma fluctuations in laser welding with CW-CO₂ lasers, Proc. ICALEO'87, 17-23
5. W. Sokolowski, G. Herziger and E. Beyer : Spectral Plasma Diagnostics in Welding with CO₂ Lasers, High Power CO₂ Laser Systems and Applications, SPIE, **1020** (1988), 96-102
6. W. Gatzweiler, D. Maischner and E. Beyer : On-line plasma diagnostics for process-control in welding with CO₂ lasers, High Power CO₂ Laser Systems and Applications, SPIE 1020 (1988), 142-148
7. W. Gatzwiler, D. Maischner, F. J. Faber, C. Derichs and E. Beyer : Model of Dynamic Behaviour in Laser Beam Welding, High Power Lasers and Laser Machining Technology, SPIE 1132 (1989), 157-165
8. L. Li and W.M. Steen : Non-contact Acoustic Emission Monitoring During Laser Processing, ICALEO'92, SPIE 1990, 719-728
9. 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, Proc. LAMP'92, 415-420
10. L. Li : A comparative of ultrasound emission characteristics in laser processing, Applied Surface Science, **186** (2002), 604-610