



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

2013년 2월
박사학위논문

2013년 2월
박사학위논문

레이저 강판 용접을 위한 실시간 모니터링 시스템에 관한 연구

레이저

강판

시스템에
용접을

위한
관한

실시간
연구

모니터링

김도형

조선대학교 대학원

광응용공학과

김도형

레이저 강판 용접을 위한 실시간 모니터링 시스템에 관한 연구

A Study on Real-time Monitoring System for Laser Steel Sheets Welding

2013년 2월 25일

조선대학교 대학원

광응용공학과

김도형

레이저 강판 용접을 위한 실시간 모니터링 시스템에 관한 연구

지도교수 유 영 태

이 논문을 공학 박사학위신청 논문으로 제출함

2012년 10월

조선대학교 대학원

광응용공학과

김 도 형

김도형의 박사학위논문을 인준함

위원장 조 선 대 학 교 교 수 심 재 기 (인)

위 원 한국생산기술연구원 수석연구원 이 호 재 (인)

위 원 조 선 대 학 교 교 수 이 동 기 (인)

위 원 조 선 대 학 교 교 수 정 상 화 (인)

위 원 조 선 대 학 교 교 수 유 영 태 (인)

2012년 12월

조선대학교 대학원

목 차

제 1 장 서 론	1
1.1 연구배경	1
1.2 연구동향	6
1.3 연구목적	17
제 2 장 이론적 배경	20
2.1 레이저 용접 원리	20
2.2 레이저빔의 흡수와 반사	24
2.3 키홀의 메커니즘	30
2.4 플라즈마의 거동	34
2.5 레이저 용접 결함	37
2.5.1 용접균열	38
2.5.2 내부균열	40
2.5.3 비드형상불량	42
2.6 레이저 용접 모니터링	44
2.7 모니터링 분석 이론 및 방법	51
2.7.1 신호처리	51
2.7.2 디지털 필터	53
2.7.3 단시간 푸리에 변환	56
2.7.4 웨이블릿 변환	59
제 3 장 실험 장치 및 방법	62
3.1 실험장치 및 기기	62
3.1.1 연속파형 Nd:YAG 레이저	62

3.1.2 광센서를 이용한 모니터링 시스템	64
3.2 실험재료 및 시편제작	72
3.3 실험방법	74
3.4 실험분석 방법	78
제 4 장 실험결과 및 고찰	80
4.1 레이저 출력에 따른 방사신호 특성	80
4.2 신호분석법에 의한 용입 특성 분석	92
4.3 용접속도에 따른 방사신호 특성	99
4.4 S45C 강판과 니켈코팅 강판의 방사신호 및 용접 특성	102
4.5 용접결함에 따른 신호특성	116
제 5 장 결 론	130
참 고 문 헌	133

LIST OF FIGURES

Fig. 1-1	General features of a deep penetration weld	5
Fig. 1-2	Online welding sensor integrated on precitec welding head	14
Fig. 1-3	Schematic diagram of the laser welding monitoring system	19
Fig. 2-1	Schematic cross section of the full penetration keyhole laser welding process of a thin sheet	21
Fig. 2-2	Diagram of the laser material interaction phenomena of two typical welding modes	21
Fig. 2-3	Various effects of laser material interaction	23
Fig. 2-4	Separation of incident laser beam	24
Fig. 2-5	Absorption coefficient	27
Fig. 2-6	Change according to the type of the electron density(N_e) and the laser absorption length	28
Fig. 2-7	Bead cross-section of the laser welding	28
Fig. 2-8	Relative geometry of the work piece, laser and keyhole during laser keyhole welding, and the transfer processes involved.	31
Fig. 2-9	Keyhole oscillation mode	31
Fig. 2-10	Schematic diagram of the keyhole mode laser welding process (a) Simplified sketch, (b) Illustration of bending of the keyhole in the direction of workpiece travel	32
Fig. 2-11	Scheme of a keyhole (a) and melt pool geometry upon deep melting (b)	33
Fig. 2-12	Cross section of a laser weld with different kinds of defects that could appear	37

LIST OF FIGURES(Continued)

Fig. 2-13 Hot crack	39
Fig. 2-14 Cold crack	40
Fig. 2-15 Internal defects	40
Fig. 2-16 Poor bead shape	42
Fig. 2-17 Typical setups for acoustic emission sensing using an acoustic transducer, acoustic emission nozzle, and acoustic mirror	45
Fig. 2-18 Typical setups for weld monitoring using audible sound	46
Fig. 2-19 Typical setups for infrared and ultraviolet	47
Fig. 2-20 Emission spectrum of plasma Nd:YAG laser irradiation (a) S45C, (b) Nickel coated S45C	50
Fig. 2-21 Algorithms of the signal processing	52
Fig. 2-22 Step-by step waveform of UV photodiode	55
Fig. 2-23 (a) Scaling function of Haar wavelet , (b) Haar wavelet function	61
Fig. 2-24 Waveform of Haar wavelet de-noised signal	61

LIST OF FIGURES(Continued)

Fig. 3-1 High laser power device obtained by mounting several cavities in line (Continuous wave Nd:YAG laser)	62
Fig. 3-2 Laser oscillator and optic head of welding processing	63
Fig. 3-3 Schematic diagram of laser welding monitoring system	64
Fig. 3-4 Photo of the optical head and photodiode module	65
Fig. 3-5 Specification of IR, UV, and VIS Photodiode	66
Fig. 3-6 Optical ray tracing simulation	67
Fig. 3-7 Diagram of the optical head module	67
Fig. 3-8 Recommend circuit diagram	68
Fig. 3-9 Diagram of photodiode amplification circuit	69
Fig. 3-10 Diagram of electronic module amplification circuit	69
Fig. 3-11 Integrated monitoring system	70
Fig. 3-12 Photo of high speed multifunction data acquisition	71
Fig. 3-13 Laser welding monitoring analysis interface program in computer	71
Fig. 3-14 Measurement set up of signals in Nd:YAG laser welding	74
Fig. 3-15 Experimental set-up of Laser welding monitoring Systems	75
Fig. 3-16 Schematic diagram of bop welding	76
Fig. 3-17 Layout of the bop welding plate	77

LIST OF FIGURES(Continued)

Fig. 4-1	UV signal of the measured signals at 1200~2000W of laser power	82
Fig. 4-2	IR signal of the measured signals at 1200~2000W of laser power	83
Fig. 4-3	UV and IR signal for laser powers	84
Fig. 4-4	UV wavelet signal of processing at 1200~2000W of laser power	85
Fig. 4-5	IR wavelet signal of processing at 1200~2000W of laser power	86
Fig. 4-6	UV and IR wavelet signal for laser powers	87
Fig. 4-7	Histogram of UV_signal in laser power (a)1200W, (b)1400W, (c)1600W, (d)1800W, (e)1900W, (f)2000W	89
Fig. 4-8	Average DC voltage of signals in laser welding	90
Fig. 4-9	FFT analysis for UV signal in laser welding	91
Fig. 4-10	Raw signals and filter signals in laser welding (Laser power: 1200W, welding speed: 1m/min)	93
Fig. 4-11	Bead appearance after laser welding (Laser power: 1200W, welding speed: 1m/min)	93
Fig. 4-12	Raw signals and filter signals in laser welding (Laser power: 1600W, welding speed: 1m/min)	95
Fig. 4-13	Raw signals and filter signals in laser welding (Laser power: 2000W, welding speed: 1m/min)	95
Fig. 4-14	Variation of the bead shape according to laser powers	97
Fig. 4-15	Photo X-ray of the laser welding side bead	98
Fig. 4-16	Effect of aspect ratio on welding speeds	100

LIST OF FIGURES(Continued)

Fig. 4-17 Comparison with UV and IR signal according to welding speeds	101
Fig. 4-18(a) UV signal(Ni coated S45C) for laser Power	102
Fig. 4-18(b) IR signal(Ni coated S45C) for laser Power	103
Fig. 4-19 Histogram of UV_signal in laser Power(Ni coated S45C): (a)1200W, (b)1400W, (c)1600W, (d)1800W, (e)1900W, (f)2000W	104
Fig. 4-20 Average DC voltage of signal in laser welding(Ni coated S45C)	105
Fig. 4-21 Comparison of nickel coated and S45C plate UV signal	106
Fig. 4-22 Comparison of nickel coated and S45C plate IR signal	106
Fig. 4-23 Variation of the bead shape according to laser powers (Ni coated S45C)	108
Fig. 4-24 Photo X-ray of the laser welding side bead(Ni coated S45C)	110
Fig. 4-25 Variations of cross section with laser powers (Nickel uncoated S45C)	112
Fig. 4-26 Variations of cross section with laser powers (Nickel coated S45C)	113
Fig. 4-27 Variations of cross section with welding speeds (Nickel Uncoated S45C)	113
Fig. 4-28 Variations of cross section with welding speeds (Nickel coated S45C)	114
Fig. 4-29 Photographs of melting zone after bop welding at laser power 1900W (Nickel Coated S45C)	115
Fig. 4-30 Photographs of melting zone after bop welding at laser power 1400W (Nickel Coated S45C)	115

LIST OF FIGURES(Continued)

Fig. 4-31 Reference normal signal and the two thresholds are reported	117
Fig. 4-32 Reference signal due to porosity	117
Fig. 4-33 Humping of the weld pool	118
Fig. 4-34 Drop-out of the weld pool	119
Fig. 4-35 Lack of fusion or a little low heat input	119
Fig. 4-36 Reference signal of focus off	120
Fig. 4-37 Reference signal of spatter	121
Fig. 4-38 Comparison of UV signal for laser powers	123
Fig. 4-39 Comparison of IR signal for laser powers	123
Fig. 4-40 Layout of the welding plate	124
Fig. 4-41 Bead shape of the laser welding	125
Fig. 4-42 UV and IR raw signal	125
Fig. 4-43 UV and IR filter signal	126
Fig. 4-44(a) UV Haar wavelet signal for laser welding	127
Fig. 4-44(b) IR Haar wavelet signal for laser welding	127
Fig. 4-45(a) UV spectrogram of wavelet signal for laser welding	128
Fig. 4-45(b) IR spectrogram of wavelet signal for laser welding	129

LIST OF TABLES

Table 1-1 Overview of publications on process monitoring using photodiode based sensors.	7
Table 1-2 Overview of publications on process monitoring using camera systems	8
Table 1-3 Characteristics of major techniques for real-time weld monitoring	10
Table 1-4 Reference guide to commercially available systems	12
Table 1-5 Recent publications with online monitoring of laser processing	15
Table 1-6 Recent publications with high speed imaging of laser welding	16
Table 3-1 Chemical compositions of specimens (%)	73
Table 3-2 Physical properties of the material	73
Table 3-3 Thermophysical Properties of different metals	73
Table 3-4 Parameters of bop welding	76

LIST OF PHOTOGRAPHS

Photo 3-1 Hot mounting press	78
Photo 3-2 Automatic grinder/polisher	78
Photo 3-3 Metallurgical microscope	79
Photo 3-4 Micro X-Ray CT	79

ABSTRACT

A Study on Real-time Monitoring System for Laser Steel Sheets Welding

Kim, Do-Hyoung

Advisor: Prof. Yoo, Young-Tae Ph.D.

Dept. of Applied Photonic Engineering

Graduate School of Chosun University

As non-stationary signal such as welding signal has a widespread observation band, digital low-pass filter (LPF) needs to be set at the frequency that is higher by 10 than the basic frequency of welding signal so as to receive the welding signal without attenuation. Since a momentary vibration signal has a wide frequency band, use of the BPF is not enough to remove only noise from external environment effectively.

As a way to resolve such problem, de-noising method with use of fast wavelet transform (FWT) is more effective. In this study, when S45C steel plate was used for bead-on-plate (BOP) welding with change in power of laser beam, the welding signal emitted from key hole was applied to the LPF, and the FWT was performed for only frequency band of the welding signal. This method enables decomposition level to be reduced more significantly than the case where only the FWT is performed, which leads to convenience of realizing a real-time welding monitoring.

As the BOP was performed for welding, behavior of plasma, spatter or plume was monitored to determine the reference signal. Then, random combination was made for

comparison with the reference signal, which aimed at verifying reliability of the welding monitoring system that this study intended to develop.

Laser is the continuous wave (CW) Nd:YAG laser that has the mean effective power of 2kW. Welding lens with the focal length of 200mm for welding was used to fixate beam in 0.6mm on the surface of specimen before experiment was conducted. Shielding gas used in the experiment was argon (Ar) that offset the effect of plasma magnetic field while flow rate and incidence angle of injection nozzle were set at 15 l/min and 45° respectively. The laser welding monitoring system was installed at the angle of 45° and the height of 50mm on the surface of specimen to obtain signal.

The specimen was manufactured in the size of 100mm×60mm×3.2t before the process variable or laser power was changed from 1,200W to 2,000W. Then, analysis was made for the plasma emission signal that was obtained as BOP welding was performed at the speed of 1m/min.

the monitoring system developed in this study. The system consists of optical head, electronic module and data acquisition (DAQ) board. The optical head module for signal acquisition has an all-in-one type that enables photodiode to be inserted to obtain bands of ultraviolet light (150~550nm), infrared light (700~1800nm) and visible light (200~1100nm). Window was attached to the front end of the optical head module in order to protect the optical system from spatter that occurred in the process of laser welding. And bi-convex lens with the focal length of 50mm was used to increase focusing efficiency.

For acquisition of signal by wavelength, multi-layered dielectric coating was performed as cold mirror was used to reflect 95% of visible light and penetrate 90% or higher of infrared wavelength. Hot mirror was used for 90% or higher of transmittance in the range of visible light and 95% or higher of reflectance of infrared light wavelength. In addition, neutral density (ND) filter was inserted to adjust quantity of light. Signals obtained from sensors for each wavelength band in the process of

laser welding have enormous effects depending on internal and external environment. For this reason, optical module was earthed to remove noise. Noise filter was used to remove noise from power supply at 60Hz that occurred in the process of amplification of plasma signal.

As for the specimen where defect was created randomly, holes were generated in the steel plate that had the thickness of 3.2mm. The holes were processed to have the diameter of 1mm and the depth of 1mm, 1.5mm, 2mm, and 3.2mm respectively. Defect was created before BOP welding was performed. In this case, process variables for welding were laser power of 1,900W, welding speed of 1m/min and welding length of 50mm respectively.

it was possible to distinguish the difference in voltage that occurred due to defect in the sections of error signal. As the depth of hole increased in the direction of welding, molten metal failed to fill space, and bead surface was formed in the inside of the specimen, rather than on the surface or the back side.

As wavelet transform of raw signal was performed, signal could be separated according to each scale. In this case, noise component included in each scale became relatively smaller than the size of raw signal due to the nature of wavelet transform. After noise value in the wavelet domain was estimated to remove the value that was smaller than the proper threshold, synthesis was conducted again, which could remove the noise component effectively.

Laser welding is non-stationary, but it is required to use the method to find out a regular complex wave with a view to investigating the optimal signal. Therefore, in this study, complex wave occurred in the process of laser welding was visualized to suggest spectrogram that had the characteristics of waveform and spectrum as analysis tool.

the spectrogram with time in the x axis, frequency in the y axis and amplitude (intensity) in the z axis. The figure does not show a clear distinction of the x, y and z axes. In the figure, there exist only the x axis and the y axis without the unit of the x

axis. It is required to revise the figure. The results demonstrated that it was possible to distinguish and analyze signal according to change in depth and to confirm that frequency component decreased as the depth increased.

For analysis of a temporary and non-stationary signal, external defect was created randomly to apply laser beam to the specimen before plasma emission was analyzed. According to the results, commonly-used filter function removed external noise but failed to restore the information on defect. In the wavelet domain suggested in this paper, use of noise removal method could remove the noise component effectively and display the information on defect.

제 1 장 서 론

1.1 연구배경

최근 산업현장에서는 정밀한 제품의 제조과정에서 생산성을 향상시키고, 제품의 고효율과 고정밀도가 요구됨에 따라 에너지, 반도체, 정밀기계, 자동차, 우주·항공기부품 등 다양한 분야에서 레이저 용접 기술의 중요성이 한층 더 높아지고 있다. 특히 레이저 용접은 재료의 특성, 입열양, 용접방법 등 변수가 많기 때문에 안정된 용접시스템 개발하면 생산성 향상과 환경 친화적 기술을 만족시킬 수 있는 첨단용접기술로 매우 중요한 기술이다.

일반적으로 레이저 가공은 레이저 빔과 재료의 상호작용에서 발생하는 열을 이용하는 방법으로 레이저의 높은 에너지 밀도($10^6 \sim 10^{11} \text{W/m}^2$)와 고도의 지향성을 이용하는 가공 기술이다. 때문에 기존의 전통적인 가공기술과 달리 레이저 빔과 재료의 상호작용을 야금학적, 물리적인 특성을 고려하여 최적의 공정조건을 개발해야 한다. 과학기술이 발전하면서 고출력 레이저가 개발되고 그 응용범위가 확대됨에 따라 레이저빔의 파장, 레이저빔의 출력, 발전형태 및 모드뿐만 아니라 보호가스 종류와 유량에 따라 용접 품질이 달라지기 때문에 용접하면서 실시간에 용접상태를 검증할 수 있는 연구와 관련된 기술개발이 필수적이다.

이와 같은 요구에 따라 본 연구에서는 산업용 기계구조용 강인 S45C강을 레이저로 용접할 때 레이저빔과의 상호작용에 대한 물리적·야금학적인 특성을 실시간 모니터링 하는 방법을 고찰하고자 한다.

S45C강은 인장강도, 연신율 및 인성이 큰 재질로 건축, 교량, 압력 용기, 차량, 선박, 기관, 보조 기계 등의 비교적 중요한 기계구조부품에 사용된다. 근래에 들어 이차전지 산업의 경우 에너지 절감을 위한 배터리 팩(Battery Pack)의 극주와 극판에도 S45C가 사용되고 있다. 이와 더불어 기존 리튬전지의 경우 극판과 극주의 접합방식을 리벳방식에서 용접방식으로 개선하고 있으며, 모듈 구성시 셀(cell)의 외부에서 전지를 조합하는 방식에서 과감히 탈피하여 단자와 단자 간을 직접적으로 연결하여 불필요한

부품 수를 줄여 전지의 중량을 줄이는 기술 수요가 증가하고 있다. 리튬이온 전지의 재질 중 S45C 계열에 Nickel 도금한 재질이 사용되고 있으며, 밀폐화에 대한 신뢰성과 용접 깊이에 의한 용접 강도 및 전기저항의 최소로 하는 용접기술로 레이저용접이 대안으로 제시되고 있다.

산업현장에서 배터리 팩을 포함하여 중요한 기계구조부품으로 S45C가 광범위하게 사용되고 있지만 용접할 때 몇 가지 단점을 가지고 있다. 일반적으로 중탄소강은 저탄소강에 비해 탄소함유량이 많아 용접했을 때 용접단면에 기공발생 등 열화에 따라 각종 기계적, 금속학적 특성이 저하된다.

레이저 용접은 레이저빔의 출력, 레이저빔의 이송속도, 레이저빔의 파장 등 공정변수에 민감하며, 전자기파인 레이저빔이 자유전자가 많은 금속과의 상호작용이 중요한 변수로 작용하기 때문에 레이저빔에 의한 금속재료의 반사율, 흡수율 특성 및 표면가공 상태에 따라 용접성이 다르게 나타난다. 이와 같이 레이저로 용접할 때 공정변수에 따라 용접상태가 달라질 수 있어 실시간에 용접제품의 품질을 판단할 수 있는 실시간 검사 시스템이 필요하다. 그러므로 실시간 용접품질을 검사할 수 있는 모니터링 시스템은 레이저 용접 자동화를 위한 중요한 요소 기술로 용접 현상을 실시간 관측하기 위한 모니터링 기술 개발에 대한 요구가 최근 크게 증가되고 있다.

높은 에너지 밀도를 가진 레이저빔을 이용하는 레이저 용접은 용접부에서 발생하는 고온의 플라즈마(Plasma)와 키홀(Keyhole) 등 물리적으로 복잡한 현상이 발생한다. 레이저 용접에 있어서 다수의 크기가 작은 기공들은 수소가스에 의해 형성되며 크기가 큰 기공(porosity)은 내부 유동에 의해 생성된다고 구분하고 있다. 기공이 발생하면 용접단면에서 유효접합 면적의 감소로 기계적 성질을 크게 감소시키므로 기공 발생의 억제는 레이저 용접의 품질향상에 매우 밀접한 관계가 있다.

뿐만 아니라 레이저로 용접하면 용접공정 조건에 따라 고온균열, 냉간균열, 기공, 언더필 등 다양한 결함이 나타나기 때문에 결함을 예측할 수 있는 실시간 감시 알고리즘이나 시스템을 개발하는데 많은 어려움을 겪고 있다. 예를 들면 탄소강은 탄소함유량에 따라 용접부에 다양한 균열, 다량의 스파터, 기공 등의 결함이 발생할 확률이 높다. 특히 레이저 용접은 레이저빔과 재료간의 상호작용이 매우 빠른 시간에 이루어지기 때문에 결함을 검출할 수 있는 방법은 그리 많지 않다.

일반적으로 용접과정 중 결함을 예측하는 방법으로 플라즈마 파장(Wavelength), 스패터(Spatter) 거동, 노이즈(Noise) 등을 분석하여 용접상태를 모니터링 한다. 레이저 용접의 경우 용융풀(Metal Pool)의 유동과 함께 플라즈마 모니터링을 위한 광 간섭의 외란뿐만 아니라 키홀의 요동이 매우 급격하게 진행되기 때문 용접부의 결함을 관찰하기가 쉽지 않다.

근래 들어 용접부 결함을 예측하기 위해 용융풀(Metal Pool)에서 발생하는 복사 파장과 키홀 그리고 플라즈마 방사량을 실시간으로 측정해 분석하는 방법에 관한 연구가 이루어지고 있다. 그 이유는 키홀 작용, 플라즈마의 발생정도와 용접 중 비산되는 스패터의 발생빈도에 따라 용접성에 중요한 역할을 하기 때문이다. 그러므로 실시간 모니터링을 하기 위해서는 플라즈마에서 방출되는 빛과 스패터(Spatter)의 양을 검출하는 것이 매우 중요하다.

Fig. 1-1 에 나타낸 것처럼 레이저 용접시 발생한 UV(Ultraviolet) 영역의 광신호는 키홀의 생성 및 용입 정도를 측정하는데 사용되는데 이는 키홀의 반응에 의한 플라즈마의 변화에 대한 정보를 갖고 있기 때문이다. 그리고 IR(Infrared) 영역의 광신호는 재료의 용융 및 응고 과정에서 스패터(Spatter)가 발생하기 때문에 용융풀의 온도와 크기를 알 수 있으므로 비드폭이나 용융깊이 등을 예측할 수 있다.

그리고 또 다른 방법으로는 용접부 결함을 예측하기 위해 용융풀에서 발생하는 복사 파장과 키홀에서 발생하는 플라즈마 방사량을 실시간으로 측정 및 분석하는 방법에 관한 연구가 이루어지고 있다. 예를 들어 Masao Watanabe[1] 등은 각종 공정간 모니터링 방법의 특징과 레이저 용접의 응용에 관한 연구에서 레이저 용접의 광학방출(Optical emission), 음향방출(Acoustic emission), 플라즈마 발생 전위(Plasma generation Potential)의 모니터링 법에서 신호의 평균, 진폭, 및 형상을 해석하기 위하여 그들 사이의 상호관계와 용접 특성을 연구하였다. Y-L. Mae[2] 등은 레이저 용접 중 실시간 FFT(Fast Fourier transform) 해석에 관한 연구에서 FFT 파워 스펙트럼의 방출은 레이저 출력, 용접속도 및 초점 변수와 관계가 있다고 설명하였다. 또한, Teresa Sibillano[3] 등은 용접 모니터링에서 플라즈마와 스패터(Spatter) 광 신호를 획득하여 비주기적인 과도현상을 해석하기 위해서 필터함수(Filter Function), 웨이블릿 변환(Wavelet Transform) 등을 이용하여 용융풀의 크기와 스패터의 양을 검출하는 알고리즘 연구를 수행하였다.

선행연구들을 종합적으로 분석했을 때 레이저 용접 모니터링 시스템의 핵심 구성요소인 포토다이오드(Photodiode)는 플라즈마 광 신호를 감지하여 아날로그 디지털 컨버터를 통해 용접 데이터 즉 원(Raw)신호를 검출한다. 하지만 측정된 용접 신호는 많은 잡음이 포함되어 있으므로 외부환경 잡음을 ADC(Analog-to-Digital Converter)로 변환된 신호에 추가적인 필터링을 통해 제거해야만 한다. 이때 일반적으로 사용되는 잡음제거용 필터는 디지털 LPF(Low-Pass Filter)이다.[4]

그러나 용접 신호와 같이 비주기성(Non-Stationary) 신호의 경우 관측대역이 넓게 퍼져있기 때문에 디지털 LPF(Low Pass Filter)는 용접신호의 기본주파수보다 10 정도 높게 잡아야 용접신호를 감쇠 없이 받아들일 수 있다. 이러한 잡음을 제거하기 위해서는 전처리 과정이 반드시 필요하다.

일반적인으로 하드웨어적인 필터링으로 1차적인 전처리를 하고 2차적으로 디지털적인 필터링 방법인 FIR(Finite Impulse Response), IIR(Infinite Impulse Response) 필터 등 여러 가지 디지털 필터가 사용된다. 또한 외부환경 잡음과 레이저 용접시 발생하는 스파터 또는 플라즈마의 신호를 분리시키기 위하여 외부 잡음신호의 주파수 범위를 미리 측정하여 알아낸 후 BPF(Band Pass Filter)로 키흐의 거동에 관한 신호만 검출할 수 있다.

모니터링 분석에서는 비주기적인 과도현상을 해석하기 위해서 웨이블릿 변환이 대두되고 있다. 푸리에 변환(Fourier transform)은 신호분석에 널리 이용되지만 주파수 영역으로 변환시 시간영역에 대한 정보가 손실되고, 신호가 비주기적인 특성을 갖는 신호에는 적합하지 않다. 이러한 문제점으로 인해 신호와 주파수의 2차원함수를 이용해 신호를 분석하는 STFT(Short-Time Fourier Transform)이 제시되었다.

그러나 STFT는 제한된 범위의 정확도만을 제공하며 그러한 정확도는 윈도우의 크기에 의해서 결정된다. 시간과 주파수 정보를 절충한 STFT가 유용할 수도 있지만 일단 시간 윈도우의 크기를 적당히 선정하게 되면 그 윈도우(Windows)의 크기를 가변시키는 방법을 요구하게 된다.

웨이블릿 변환은 STFT의 단점을 보완하여 영역의 크기가 가변되는 윈도우 방법을 나타낸다. 웨이블릿 변환은 저주파수 정보를 더욱 정확하게 원하는 곳에서는 긴 시구간을 사용하고, 고주파수 정보를 원하는 곳에서는 짧은 시구간을 사용함으로써 정확한

분석이 가능하다. 시간과 주파수 영역에 대하여 다중분해 특성을 가지므로 기본파 성분
 분에 대한 정보를 유지하면서 과도요소의 정확한 위치 검출이 가능하며, 이러한 특성
 은 용접 신호의 과도현상에 매우 유용하게 적용할 수 있다.

배터리 팩을 구성하는 재료로 사용하는 S45C강을 시편으로 하여 레이저 용접 공정
 변수에 따라 용접특성이 달라지기 때문에 레이저 용접 공정변수에 따라 달라지는 플라
 즈마와 스패터의 거동을 모니터링 하여 용접결과를 예측하는데 활용되고 있다.

레이저 용접과정 중 발생하는 플라즈마와 스패터의 신호를 측정 한 후, 신호(Raw
 signal)를 필터함수, 주파수 변환 등을 이용하여 신호의 신뢰성을 확보하기 위해 연구가
 필요하다. 이를 통해 레이저 공정변수의 변화에 따른 용접비드의 폭, 침투깊이, 기공
 등을 검출할 수 있도록 실시간 레이저 용접 모니터링 기술이 요구 되어 지고 있다.

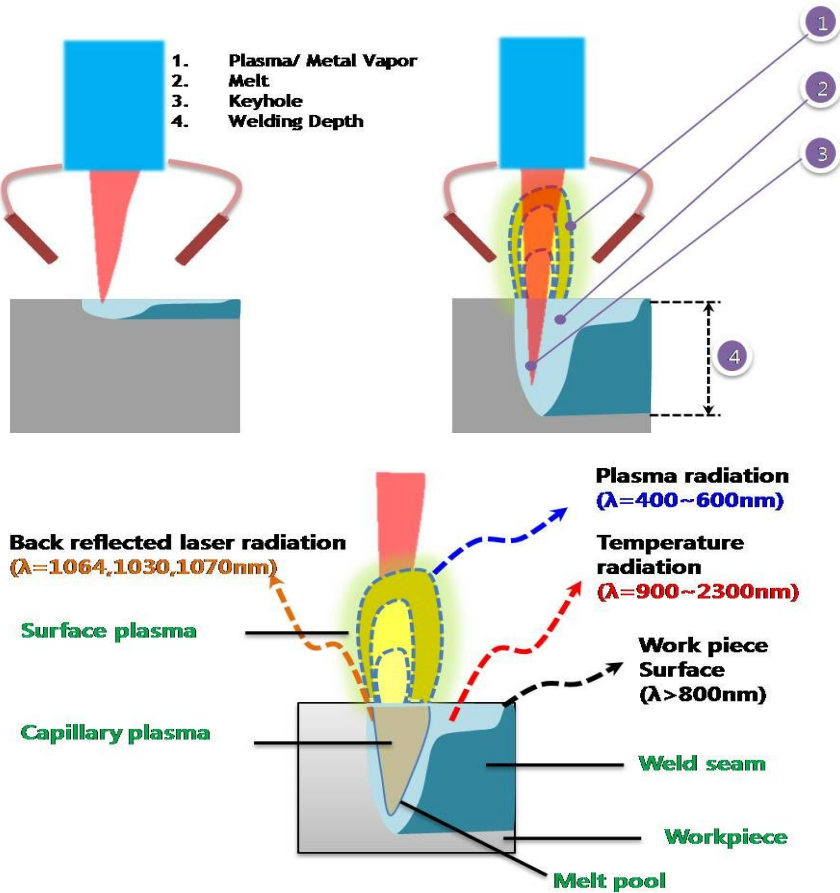


Fig. 1-1 General features of a deep penetration weld

1.2 연구동향

일반적으로 사용되는 센서 구성은 광학 필터와 포토다이오드로 구성되어 있고, 특정 스펙트럼 대역에 빠른 신호를 표시한다. 대부분의 센서 종류와 분석 스펙트럼 대역은 IR 파장과 UV 파장 스펙트럼 영역이다. IR 파장은 용융풀에서 배출되고 UV 파장은 플라즈마 및 플룸(Plume) 방사광에 관련되어 있다. 이러한 신호의 진폭은 일반적인 프로세스 모니터링 및 제어에 적용된다. 그러나 신호의 주파수 내용은 용접 프로세스(Process)의 상태에 대한 정보가 포함되어 있다.

Table 1.1에는 포괄적인 개요는 저자에 따라 일반적인 구성과 레이저 용접의 결합을 보여주고, 포토다이오드 기반의 센서로 모니터링 할 수 있는 시스템들을 연구하였다.

포토다이오드 센서와 용입 깊이 모니터링은 여러 저자에 의해 연구 되어져 왔다. Sanders등 (1997)은 동축 배치와 IR센서를 사용하였다.[14] 그들은 얇은 (<1.5 mm) 판재의 부분 용입시 레이저 용접 중에 센서의 신호 강도와 용접 깊이 사이에 선형 관계를 발견하였다. 비슷한 결과는 Beersiek 등(1997)은 동축 측정하여 적외선 방사와 음향 방출을 측정할 수가 있었다.[15] 이 두 모니터링 방식을 결합하여 용접과정 중 용입 깊이 모니터링의 정확성이 향상되었다.

Lankalapalli (1997)은 레이저빔 파워, 용접 속도와 용접 폭을 입력 값으로 한 용접깊이를 평가할 수 있는 장비 및 프로그램을 개발하였다. 또한, 열전쌍으로 가공물의 바닥 표면의 온도를 측정하여 용접 깊이를 예상하는 연구도 하였다.[16]

또 다른 모니터링 방법은 카메라(Camera) 이미징 기술(Imaging Processing)을 적용하는 것이다. 카메라 이미지가 방출된 이미지를 획득하여 2차원 공간 분포에 대한 정보가 포함되어 있다. 카메라 시스템의 단점들은 포토다이오드 기반의 시스템보다 프로세스가 느리고 고가의 비용이 든다. 그러나, CCD(Charge Coupled Device) 카메라(Camera)와 CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor) 카메라로 획득 할 수 있는 프레임 속도가 급격히 증가하고 있다.

Table 1.2에는 포괄적인 개요로 모니터링을 위한 카메라 기반 응용 프로그램을 연구하여 결과를 발표한 내용을 정리한 것이다.

Table 1.1 Overview of publications on process monitoring using photodiode based sensors.

Author(s)	광센서(Photodiode)
	모니터링 품질 공정
Hatwig et al. (1990), Jurca et al.(1994)	오프축에서 민감한 적외선 센서를 이용한 용접풀의 스패터를 모니터링 하며, 레이저 용접에서의 기공의 양과 상호 관계를 연구[5][6]
Chen et al. (1991)	키홀 오류나 오버히팅 및 자외선과 적외선을 모두 스펙트럼 범위 안에서 계측하여 용입부족 현상 연구 [7]
Müller et al. (1996)	축선상에서 측정된 레이저 방사빔은 침투 깊이와 기공형성과 상호 관계를 나타냄[8]
Gu and Duley (1997)	자외선/가시 분광 영역의 측정은 푸리에 분석하여 시간적 주파수 내용에 대한 분석과, 작은 주파수 대역은 완전용입보다 부분용입에서 나타남[9]
Tönshoff et al. (1998a)	오버랩 용접에서의 가입 부족은 플레이트 사이의 간극에 때문에 발생한 현상이며 축선상 위치한 광센서에 의해 모니터링 연구함[10]
Tsukihara et al. (1998)	레이저 용접시 발생한 방사된 빔을 다른 7개의 방향에서 오프축 위치에서 측정하고, 신호는 침투깊이와 상호관계를 나타냄[11]
Ikeda et al. (1999)	오프축와 300~680nm의 파장에서 완전용입 용접의 신호를 획득하여 분석함[12]
Gu and Duley (2000)	자외선과 적외선 스펙트럼 영역의 측정은 맞대기 용접시 Gap에 따른 신호를 분석하여 모니터링 하는데 사용함[13]

Table 1.2 Overview of publications on process monitoring using camera systems.

Author(s)	카메라 영상 계측
	모니터링 품질
Peters et al. (1998)	Nd:YAG 레이저에서 방사한 빔을 CCD 카메라로 측정(공간적 분포)는 침투 깊이 결함 검출을 위해 사용되었고, 유사한 측정은 Müller 등 의해 실시됨. (1998)[17]
Lhospitalier et al. (1998)	적외선 카메라로 용접풀의 온도분포 영상을 측정하며. 열적변형 관계를 연구함[18]
Abels et al. (1999), Kratzsch et al. (2000)	플라즈마 방사 빔은 고속 카메라를 사용하여 축선상에서 측정하고, 2차원 공간 분포는 용접 깊이, 완전 침투, 결함 등의 모니터링을 계측함[19][20]
Beersiek (1999) Beersiek (2001)	축선상에서 COMS 카메라로 용접풀을 측정하였고, 방사된 빔은 침투깊이, 초점위치 오류와 오버랩 용접에서의 클램핑 결함을 공간적 분포로 분석 및 또 다른 오류에 대한 분석함[21][22]
Holbert et al. (2000)	듀얼 CCD 카메라로 축선상에서 계측하여 키흔과 전도용접의 차이점을 연구함[23]
Martin et al. (2001)	키흔의 거동에 대한 모델로부터 방출된 키흔의 형태를 추정하기 위해 CCD 카메라를 이용하여 비교 분석함[24]

음향 방출, 음성 사운드, 적외선, 자외선, EMAT(Electromagnetic acoustic transducer) 및 PVDF(Polyvinylidene fluoride) 계측기술의 장점은 Table 1.3에 나열되어 있다. 단일 센서로 용접상태를 모니터링 하면 특정 산업분야에서는 요구되는 정확도로 용접 상태를 감시 할 수 없다. 멀티센서 시스템으로 결합하면 각기 다른 센서의 장점을 하나의 시스템으로 통합하여 상호보완적으로 시스템을 구축할 수 있다.

센서 융합 기술로 두 종류가 광범위하게 연구되고 있고 레이저 용접 모니터링에 적용하는 방법에 대한 연구가 활발하게 이루어져 왔다. 이러한 듀얼 파장 적외선 및 자외선 신호 및 음성 소리와 자외선 신호를 감지하여 실시간 용접 모니터링 하는 것이 주요 기술의 특징이다.

적외선과 자외선 신호는 용접에서 방사선의 두 가지 기본 센서로 구성되고 있다. 높은 온도로 가열 되어진 용융풀, 키흔 등은 적외선 신호를 방출하는 경향이 있고 플라즈마에서는 자외선 신호를 방출하는 경향이 있다. 레이저 용접에서 용융풀의 생성과 플라즈마 발생이 용접단면의 모양을 예측가능 하게 하기 때문에 적외선과 자외선을 모두 신호로 이용하여 용접 모니터링의 정확성을 증가 시켰다.

Chen[25]등은 멀티센서를 적용한 적외선 및 자외선 감지를 위한 시스템을 통합하여 레이저 용접 모니터링을 실시하였고, 다양한 용접상태를 적외선과 자외선 진폭 패턴 그림으로 확인되었다. Haran[26] 등은 IR 및 용접 침투와 UV 신호의 상관관계를 연구 하였다. 임계값은 2-4 kHz로하고 시스템에서 주파수 피크의 검출을 위해 설정한 용접 침투가 지나치게 과도할 때 모니터링 할 수 있었다.

Table 1.3 Characteristics of major techniques for real-time weld monitoring.

Sensor	Equipment required	Enables detection of	Advantages	Limitation
Acoustic emission (AE)	Piezoelectric transducer with preamplifier and couplant	<ul style="list-style-type: none"> ○ Interior macroscopic flaws: - Cracks, Porosity, Inclusions Phase ○ transformations: - martensite, Weld penetration, Spatter 	Low cost suited for on-line monitoring and control	Requires contact with the workpiece
Audible sound	Microphone with amplifier	<ul style="list-style-type: none"> ○ Gross weld defects: - good or bad weld, Weld penetration, weld gap ○ Weld surface defects: - cracking 	Low cost Noncontact	Requires skill in choosing placement of microphone signal may be affected by noisy environments
Infrared (IR)	Commercial infrared camera system or infrared sensitive photodiode with preamplifier and focusing optics	<ul style="list-style-type: none"> ○ Weld bead width and penetration ○ Weld cooling rates Seam tracking ○ Detection of surface defects ○ Detection of contaminants ○ Detection of excessive spatter 	On-line monitoring and control	Requires skill in choosing placement of IR detector Optics are necessary for the small region of interest in laser welding high cost
Ultraviolet (UV)	Ultraviolet sensitive photodiode with preamplifier and focusing optics	<ul style="list-style-type: none"> ○ Plasma keyhole ○ mode ○ Weld penetration 	Able to detect keyhole formation by monitoring plasma	Requires skill in choosing placement of UV detector Optics are necessary for the small region of interest in laser welding high cost
Electromagnetic acoustic transducer (EMAT)	Two EMAT sensors, a transmitter and receiver, with amplifiers	<ul style="list-style-type: none"> ○ Incomplete fusion ○ Weld penetration ○ Porosity 	Very sensitive Allows probing of normally inaccessible areas Noncontact	Requires high degree of skill in interpreting ultrasonic signals High cost when compared to more traditional forms of ultrasonic testing May encounter problems for small or complex shapes
Polyvinylidene fluoride (PVDF)	PVDF film with amplifier and remote sensing equipment such as a wave guide	<ul style="list-style-type: none"> ○ Interior macroscopic flaws: - cracks, porosity, inclusions 	Very sensitive Low cost	Requires remote sensing due to low tolerance to high temperatures

신뢰성이 높은 용접 시스템의 개발에 주요 항목은 정확한 프로세스 모니터링 시스템이다. 현재 상업 시장에서 단일 센서를 사용한 시스템이 사용되고 있고, 모니터링을 위한 센서 융합기술도 사용되어지고 있다. 이러한 내용은 상업적으로 이용 가능한 시스템에 대한 참조 가이드를 Table. 1.4에 요약되어 있다.

Jurca Optoelektronik GmbH 사는 멀티센서를 활용한 적외선 및 자외선 감지를 사용하여 산업용 애플리케이션 분야를 개발하고 있고, Jurca[27]은 실시간으로 레이저 용접을 모니터링할 수 있는 UV/IR 탐지 시스템을 발표했다.

LWM 900 장비는 UV 플라즈마 센서 (0.2-0.4 mm), 적외선 센서 (0.75-1.3 mm), 그리고 선택 사항 인 온도 센서가 포함되어 있다. 적외선 센서는 주로 용융풀에서 일어나는 현상인 스파터 감지에 사용되고, UV 센서는 키크 형성에 대한 정보를 모니터링 한다.

Griebsch[28][29] 등은 필립스 회사와 BMW의 용접 품질을 모니터링 하는데 사용된 Jurca 시스템을 연구하였다. 필립스 회사의 시스템은 온도, 플라즈마 발광을 모니터링 하는데 사용 하였고, 레이저 파워에 반영했다. 필립스의 완전 통합 시스템은 모니터링 데이터의 100 % 신뢰성을 갖추고 있고, BMW에서는 LWM 900 장비를 Autobodies 레이저 용접 모니터링 하는데 사용되었다. 단지 UV 및 온도 센서를 사용하여 용접의 신뢰성을 높였다.

이와 유사한 시스템은 TRIAM에 의해 개발되었다. 이 시스템은 용접 품질을 모니터링하기 위해 적외선 및 자외선 센서를 이용하여 신호를 획득하여 퍼지 논리와 신경망 프로세서에 적용하여 품질을 판별 하였다.

Table 1.4 Reference guide to commercially available systems.

Commercial system	Sensor type	Enables detection of	Advantages	Limitation
Laser Applications Inc.[30]	Infrared photodiode	Weld penetration	Noncontact	The top and bottom configuration of the IR sensors cannot monitor thick materials
Agema Infrared Systems, Thermovision 400 series.[31]	Infrared camera	Weld bond monitoring	Noncontact Cameral system allows for remote sensing	High cost
Land Infrared, Landmark System 4.[32]	Infrared photodiode	Weld temperature	Long range focusable optics (500 mm) Laser sighting and fiber optics are available	System was designed to only detect temperature Emissivity must be predetermined and kept constant
Raytek, Thermoalert 2C.[33]	Infrared photodiode	Weld temperature	Long range focusable optics (500 mm), Laser sighting and fiber optics are available	System can only detect temperature. Emissivity must be predetermined and kept constant
Fraunhofer Institute for Laser Technology Dual IR Sensor.[34]	Two infrared photodiodes	Weld defects: undercut, weld toe Weld penetration Mismatches for tailor welded blanks	Noncontact	Requires high degree of skill in interpreting ultrasonic signals High cost when compared to more traditional forms of ultrasonic testing May encounter problems for small or complex shapes
Jurca, LWM 900.[35][36]	Infrared photodiode, ultraviolet photodiode optional temperature sensor	Excessive spatter Porosity Weld penetration	Noncontact Uses fuzzy logic routines for self-learning	Even with fuzzy logic control, the system may have problems detecting specific weld
Thyssen Laser-Technik GMBH, PMS 10.[37]	Ultraviolet photodiode	Weld quality: Good or bad weld Porosity Weld penetration	The system can determine when the weld state becomes unstable, warning the operator Fiberoptics allows for remote sensing	High cost
continued				

Commercial system	Sensor type	Enables detection of	Advantages	Limitation
Babcock & Wilcox Innerspec Technologies, Temate 2000.[38]	EMAT	Weld quality	Noncontact	-
Lawrence Livermore National Laboratory.[39]	Ultrasonic, Video camera, X-ray imaging	Seam tracking Weld penetration Porosity	Multi-sensor fusion system that takes advantage of the multiple sensors	System had difficulty seam tracking
Synergistic Detector Designs.[40]	X-ray imaging	Porosity	Can detect porosity and internal cavities with good results	High cost May be more effective in casting operations instead of welding
Hughes Research Laboratories, Compensated Laser Ultrasonic Evaluation (CLUE)[41][42]	Ultrasonic detectors	Weld joint integrity, hardness, and thickness Weld width Weld penetration	Noncontact	System did not work adequately
Air Gage Company, Expertest.[43][44]	Resonant frequency with microphones (ultrasonic)	Weld or unwelded state Good or bad weld	Noncontact	High cost Poor system performance with too many false positives
Mectron (company no longer does business with ultrasonics)[45]	Ultrasonic detectors	Weld or unwelded state	Nondestructive	System had problems with alignment, fluid leakage, and interpretation of signals System runs offline
Rorher (company no longer does business with ultrasonics)[46]	Ultrasonic detectors	Weld or unwelded state Good or bad weld	Nondestructive	System needs high maintenance Difficulties with couplant leakage System runs off line
Utilase/Detroit Center Tools[47]	Ultrasonic detectors	Weld or unwelded state Weld penetration	Nondestructive	System needs high maintenance Workpiece must be submerged in coupling fluid
TRIAM Automotive Corporation[48]	Ultraviolet/ Infrared/ Visual detectors	Good or bad weld	Nondestructive	System is relatively new product

현재 레이저 용접에 대한 몇 가지 온라인 모니터링 시스템은 상업적으로 사용한다.[49-51]. 용접 헤드로 일반적인 통합은 Fig 1-2에서 볼 수 있다. 빛이 다른 파장을 모니터링 할 수 있는 포토다이오드를 사용하거나 이미징 장치 (CCD / CMOS-카메라)로 모니터링 한다.



Fig. 1-2 Online welding sensor integrated on Precitec welding head

다른 나라의 여러 연구 그룹은 레이저 용접 모니터링에 적극적으로 연구되어 왔다. 그 중 일부는 Table. 1.5에 나열되어 있다. 최근 몇 년 동안 새로운 CMOS 카메라 기술은 용접 프로세스의 실시간 영상 모니터링 기술을 발전 시켰다.[52-54]

향후 레이저 용접 모니터링에 응용분야 중 레이저 용접 과정에서 물리학의 해석 및 분석[54-57]과 함께보다 강력한 하드웨어[58]로 주파수 분석[59] 및 Spectroscopic [60]을 구현하는 것이 가능하게 되었다.

Table 1.5 Recent publications with online monitoring of laser processing.

Ref	First author	Country	Laser	Material	Detector
[61]	Bardin	United Kingdom	YAG	Titanium	Photodiode
[62]	Sibillano	Italy	CO2	Stainless steel	Spectrometer
[63]	Jäger	Germany	YAG	Steel	CMOS-camera
[64]	auregui	Netherlands	YAG	Zn-Coated	Photodiode
[65]	Li	China	CO2	Steel	Camera
[66]	Bagger	Denmark	CO2	Steel	Photodiode
[67]	Kawahito	Japan	YAG	Titanium	Photodiode
[68]	Yang	USA	YAG	coated steel	Acoustic
[69]	Doubenskaia	France	YAG	Iron powder	Pyrometer
[70]	Heralic	Sweden	YAG	Titanium	Camera
[71]	Stritt	Germany	YAG	Aluminium	Photodiode

1930년에 초당 1,000 프레임(FPS)이 도달하고, 회전 프리즘 기술을 도입하여 40,000 프레임은 나중에 달성 한 비율이다. 전자와 인광을 발하는 화면에 이미지를 저장하는 전기 편향에 광자의 전환으로 100,000,000 fps 이상의 프레임 속도는 1960년대에 도달 했다.

오늘날 디지털 CCD와 CMOS 카메라는 레이저 용접 모니터링 시스템을 이용한 장치 로 활용하기 시작했다. 그리고 고속 카메라의 가격이 감소로, 점점 더 많은 연구자와 연구소에서 사용하기 시작했다.[72]

레이저 용접의 고속 이미징과 관련된 최근의 연구를 Table 1.6에 나열되어 있다.

Table 1.6 Recent publications with high speed imaging of laser welding.

REF	First author	Country	Frame rate(FPS)
[73]	Katayama	Japan	5,000
[74]	Ribic	USA	Na
[75]	Stritt	Germany	10,000
[76]	Pan	Netherlands	30,000
[77]	Le Guen	France	10,000
[78]	Emmelmann	Germany	10,000
[79]	Blackburn	United Kingdom	Na
[80]	Jin	China	1000
[81]	Fennander	Finland	2,240

한편, 국내의 레이저 용접 모니터링 연구는 2000년대부터 초기 연구가 시작 되었다. 해외보다 인프라 및 실험환경이 좋지 못하며, 연구 및 상업적 측면에서 미흡하다.

Yoon 은 레이저 용접부를 UV와 IR 센서를 이용하여 신호를 획득하여 DSP 보드로 처리할 수 있는 시스템을 연구 하였다.[82] Park 등은 CO2 레이저 용접시 광센서를 이용하여 용접조건에 따른 신호의 변화를 신경망(퍼지)이론으로 알고리즘을 구성하여 모니터링을 하였다.[83]

그 외의 많은 연구가 수행되었으나 레이저 용접 모니터링의 신뢰성을 높이기 위한 연구는 부족한 실정이다. 따라서 국내에서도 인프라를 구축하고 모니터링을 위한 관련 분야의 육성이 절실히 필요한 실정이다.

지금까지의 연구동향을 분석해 보면 광센서와 카메라를 이용한 시스템 분야에 집중 되어 있고 지속적으로 개발연구가 진행되고 있다. 이와 같은 연구 동향에 따라 본 연구에서는 광센서를 이용한 모니터링 시스템을 구성하여, 분석방법에 대한 알고리즘을 연구 하고자 한다.

1.3 연구목적

레이저 용접과정 중 용접 상태를 실시간에 감시하는 것은 용접의 품질 향상을 위해 매우 중요하다. 레이저로 용접을 할 때 재료의 특성뿐만 아니라 레이저빔의 물리적 특성 때문에 재료와 상호작용하면서 용접이 이루어지는 상태를 실시간에 예측하는 것은 쉬운 일이 아니다. 레이저 용접 현상에 대한 많은 이론적 연구와 용접공정의 분석을 위하여 실시간 X-ray 카메라, 플라즈마 전하(Plasma charge), 음향(Acoustics emission) 등을 이용한 연구가 수행되었으나 너무 장치가 고가이고 복잡하여 산업현장에서의 용접공정 감시에는 적용할 수 없는 현실이다. 그러나 최근 레이저 용접이 산업적으로 폭넓게 활용되면서 수 kW 급의 고출력 산업용 레이저가 자동차, 항공 및 원자력산업에서 요구하는 정밀 용접에 본격적으로 활용되고 있고, 용접공정의 자동화를 위하여 용접과정에서 실시간에 용접결과를 감시할 수 있는 장치의 요구가 증가하고 있다.

레이저 용접은 주로 키흔 용접으로 이루어지며 레이저 에너지가 시편에 전달되는 과정에서 중요한 매개체 역할을 하고 용접과정에서 발생하는 플라즈마와 스패터는 용접에서 용접품질을 예측하는데 활용된다.

용접하면서 발생하는 플라즈마의 파장과 강도를 검출하는 센서로 사용한 포토다이오드는 입사하는 광의 강도에 따라 전류가 변화되며, 변화하는 전류를 전압신호로 변환, 증폭하여 광의 강도를 알 수 있다. 이러한 신호를 이용하는 모니터링 시스템을 개발하여 용접상태를 실시간에 판단할 수 있도록 하고자 한다. 레이저 용접은 공정조건에 따라 부분입열과 완전입열에 대한 용접상태를 모니터링 할 수 있다. 용접하면서 발생할 수 있는 입열부족, 시편사이 간극(Gap), 부착된 이물질, 용접 접합라인의 이탈 등을 모니터링 할 수 있도록 신호를 필터링한 후 평균하여 기준신호를 정한다. 이를 바탕으로 기준신호로부터 벗어난 표준편차를 바탕으로 수학적 알고리즘을 활용하여 획득된 용접 특성을 분석하여 레이저용접시스템의 활용자가 손쉽게 활용할 수 있는 모니터링 시스템을 개발하고자 한다.

레이저 용접시 발생하는 플라즈마의 발광 파장대역을 파악하여 신호 획득함에 있어서 정확한 광학설계와 광센서 모듈이 기구부에 장착되어 기구부에서 발생하는 잡음의

영향을 최소화한 회로설계를 제시하고자 한다.

측정하고자 하는 탄소성분을 함유하는 재질은 레이저 용접시 대기 중의 산소와 결합함으로써 CO₂기체를 형성하게 되고 이것이 소결을 방해하게 되어 내부에 기공을 형성하여 기계적 성질을 크게 감소시키므로 기공의 발생을 예측하는 모니터링 기법을 제시하고자 한다.

본 연구에서 레이저용접 모니터링 시스템을 개발하는 데 실용적으로 적용한 대상은 배터리 팩을 구성하는 재료로 사용하는 S45C시편을 용접할 때 발생하는 현상을 모니터링 하면서 시스템의 신뢰성을 제시하고자 한다. 레이저 용접 공정변수에 따라 달라지는 플라즈마와 스패터의 거동을 모니터링 하여 용접결과를 예측하는데 활용하고, 탄소강 계열을 용접 했을 때 기공 및 결합 등을 보완하기 위해 S45C강판에 니켈 도금한 재질을 사용하여 키흔 및 용융풀에서 방출되는 신호를 비교 분석하였다.

레이저빔의 출력 및 이송속도를 변화 시키면서 시편을 BOP(Bead On Plate)용접 하면, 용융풀에서 용융금속이 다양한 원인으로 복잡하게 유동하게 되는데 중력, 온도변화에 따른 표면장력 구배에 의한 용융풀 표면에서의 Marangoni 유동, 금속증기에 의한 마찰, 금속기화에 의한 반동력 등이 작용하여 키흔 및 용융풀에서 방출되는 신호가 달라지기 때문에 데이터를 정량적으로 분석하기 위해 히스토그램(Histogram)의 특징 전압 검출하였다.

용접 신호를 LPF(Low-Pass Filter)와 외부 환경 잡음과 레이저 용접시 발생하는 스패터 또는 플라즈마의 신호를 분리시키기 위하여 외부 잡음신호의 주파수 범위를 미리 측정하여 알아낸 후 BPF(Band-Pass Filter)로 키흔의 거동에 관한 신호만 검출하여 레이저 용접 공정변수에 따른 결합 검출과 기공발생 빈도를 분석하였다.

그러나 순간적인 진동 신호는 넓은 주파수 대역을 가지기 때문에 BPF로는 외부환경 잡음만 효과적으로 제거시킬 수 없다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 FWT(Fast Wavelet Transform)를 사용한 Denoise방법을 사용하여 모니터링 시스템의 신뢰성을 확인하고자 한다.

본 논문의 제1장에서는 본 연구의 배경과 동향, 그리고 연구 목적과 범위에 대하여 기술하였고, 제2장은 연구에 기반이 되는 이론적 배경 및 용접품질을 판단하는 알고리즘을 기술하였다. 제3장은 용접속도, 레이저 출력 등의 용접 공정변수 변화에 따른 플

라즈마와 스패터를 측정하는 모니터링 시스템 장치에 대한 설명과 실험방법과 조건을 제시 하였다. 제4장은 실험한 시편의 특성 및 용접품질을 판단하는 신호들을 체계적으로 분석하고 이를 바탕으로 실제 생산라인에 적용할 수 있도록 연구하였다.

제5장은 본 연구에서 얻어진 결과를 활용하여 Fig. 1-3에 나타낸 것처럼 레이저 용접으로 공정조건을 제어하고 생산성향상에 기여할 뿐만 아니라 신뢰성 확보를 위한 실시간 모니터링 방법과 알고리즘 및 검출장치를 개발하여 양산체계에 적용하기 위한 "실시간 용접 품질 검사장치"를 개발 하고자 한다.

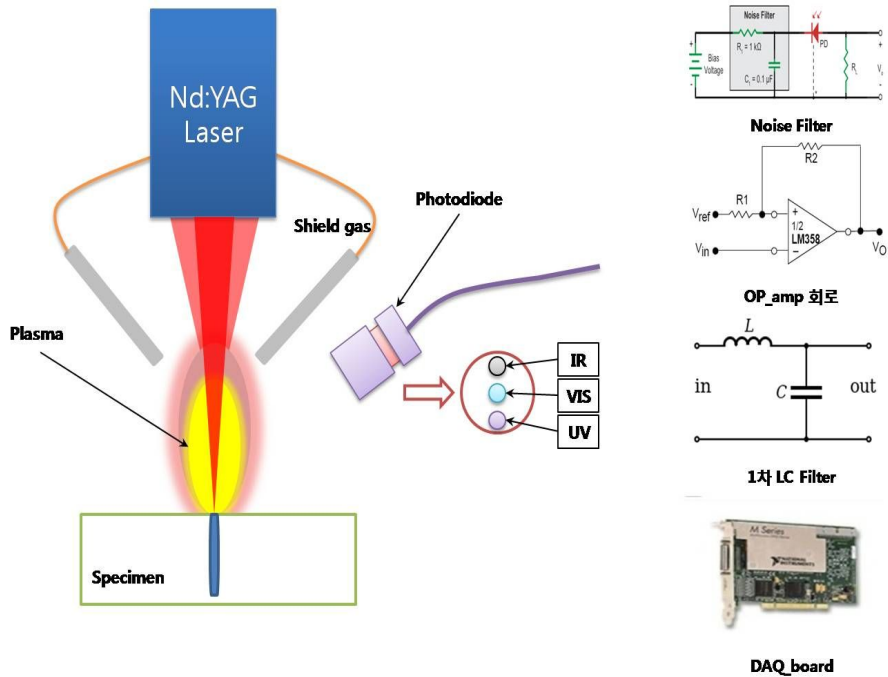


Fig. 1-3 Schematic diagram of the laser welding monitoring system

제 2 장 이론적 배경

2.1 레이저 용접 원리

레이저로 용접할 때 일반적으로 초기 레이저 파워밀도 10^4 W/cm^2 에서 키홀이 수반되는 열전도 용접이 진행되고, 10^6 W/cm^2 이상의 파워밀도에서 깊은용입(deep penetration)의 키홀 용접이 진행되는 현상을 Fig. 2-1에 나타냈다. 이러한 현상은 임계값 이상의 레이저빔이 재료의 표면에 조사되면 광자가 금속표면 자유전자의 금속격자를 깨트림과 동시에 여기된 자유전자는 결정격자에 충돌된다. 이때 그 에너지는 열로 전환해서 금속의 온도를 상승되고, 연속적인 조사에 의해 다중반사와 흡수현상이 발생하게 된다.

레이저빔 중심부 구역에서는 금속의 증발이 일어나고, 그 외곽지역에서는 용융이 일어나 중심부 구역의 큰 증기압은 용융금속을 레이저빔의 조사되는 중심부 구역으로부터 옆으로 밀어내므로 레이저빔은 더욱 내부로 들어갈 수 있게 되며, 중심구멍의 깊이를 더욱 크게 한다. 이때 금속증기가 분출하는 반동력에 의해서 용융금속면에 함몰과 용융풀이 채워지는 현상이 반복되어 일종의 용접비드가 생성되게 된다. 이와 같은 반동력을 증기 반조력이라 하며, 깊은 함몰을 키홀(Keyhole)이라 부른다.

Fig. 2-2 에서처럼 레이저 용접은 키홀을 통하여 직접 가열되므로, 비드의 단면은 열전도형(a)과 비교하여 폭이 좁고 깊게(b)에 도시한 것처럼 용융풀이 형성 된다. 또한 증발한 금속증기가 고온의 플라즈마로 되면 레이저빔은 플라즈마에 흡수되어 재료에 도달하는 빔에너지가 감소하게 되어, 보호가스를 분사시켜 플라즈마를 제거해야 한다. 레이저빔을 금속재료에 조사하면 초기에는 반사손실은 크지만, 일단 키홀이 형성되면 레이저빔은 키홀 내를 다중반사하기 때문에 거의 반사손실이 일어나지 않는다.[84][85]

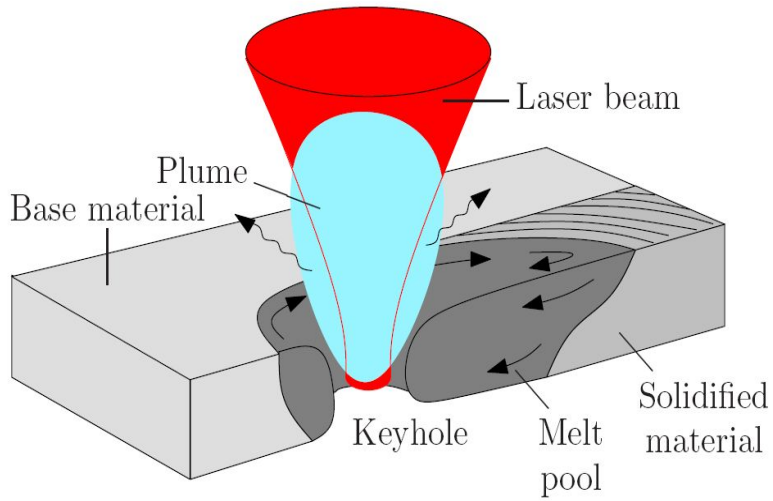


Fig. 2-1 Schematic cross section of the full penetration keyhole laser welding process of a thin sheet.

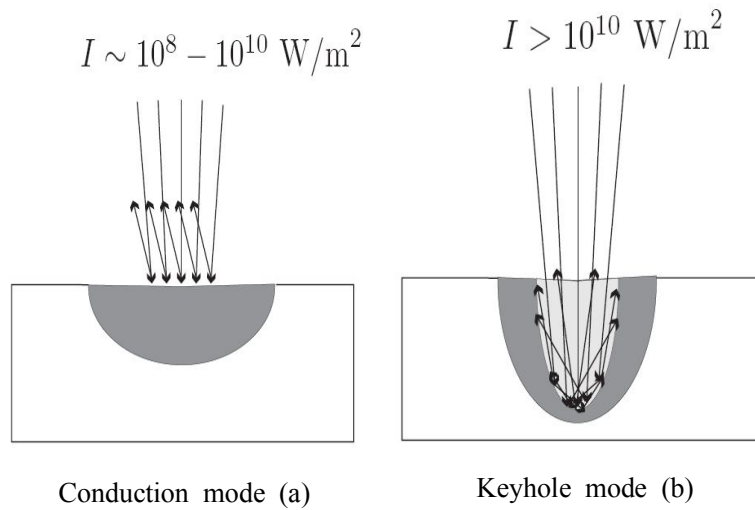


Fig. 2-2 Diagram of the laser material interaction phenomena of two typical welding modes

레이저빔이 금속표면상에 조사되는 경우 레이저빔 에너지의 강도에 따라 Fig. 2-3에서 보는 것과 같이 금속의 가열, 용융, 증발, 및 플라즈마 발생이 있게 된다.

사용하는 레이저빔의 파장과 금속의 종류에 따라 차이가 있으나 대체로 레이저빔 밀도가 $\sim 10^5 \text{ W/cm}^2$ 정도 이하에서는 레이저빔의 대부분은 표면에서 반사되나 일부분이 흡수되어 (a)와 같이 금속표면 밑 수백~수천 Å 정도의 구역에서 열에너지로 바뀐다. 이 열에너지는 금속의 용융시키는 에너지에는 미치지 못하며 정상적인 열전도기구에 의하여 금속내부로 침투하게 된다. 이렇게 하여 금속표면을 가열하게 되며 이러한 가열기구가 재료의 고상변태에 의한 표면강화 열처리에 이용된다.

레이저빔 출력밀도 10^6 W/cm^2 정도 이상에서 부터는 금속표면의 온도가 용융점 이상으로 증가되며 (b)와 같이 용융 금속의 경계면이 내부로 전파된다. 이러한 경우가 레이저빔에 의한 표면합금화와 용접등의 과정에 해당하게 된다.

레이저빔 출력밀도가 10^7 W/cm^2 정도 이상에서 부터는 금속표면이 용융점을 지나 비등점 이상이 되며 (c)와 같이 금속의 증발이 일어나게 된다. 이러한 경우에는 용융 구역은 상대적으로 적어지며 증발에 의한 금속의 제거가 일어나게 된다. 레이저빔을 금속표면에 조사 했을 때 나타나는 이러한 메커니즘이 재료의 절단과 천공 등의 과정에 해당된다. (D)와 같이 레이저빔 출력밀도 10^9 W/cm^2 이상으로 증가되면 증발되는 금속원자 및 방출되는 입자들이 인입되는 레이저빔 에너지를 흡수하여 플라즈마를 형성하게 된다.

레이저빔을 금속재료에 조사하면 초기에는 반사손실은 크지만, 일단 키홀이 형성되면 레이저빔은 키홀 내를 다중반사하기 때문에 거의 반사손실이 일어나지 않아 급속하게 금속표면에서의 온도가 상승하면서 에너지밀도가 높아지기 때문이다.

일반적으로 연속파형(Continuous Wave) 레이저 용접에서는 열원의 움직임에 따라 Fig. 2-1에 모식도로 제시한 것처럼 키홀이 이동하므로, 키홀 후방의 용융금속이 응고하여 비드가 형성된다. 용융풀의 유동현상은 고 점성유체유동 현상으로 해석할 수 있으며, 키홀 발생시 증기제트(Vapour jet)와 플라즈마 진동, 용융풀 내의 모세관파동(Capillary waves)과 함께 기포, 기공, 다상유동(Multiphase flow) 즉, 액상과 기체가 혼합된 형태로 존재하게 되어 용융풀 유동이 복잡해진다.

키홀내에 유동풀에서 정수압이나 표면장력은 키홀을 함몰시키려 하지만, 내부의 증

기압이 키흐를 유지하며 레이저빔이 통과하면 주위의 용융물이 키흐의 공간을 충전하면서 용접이 이루어진다.[84][85]

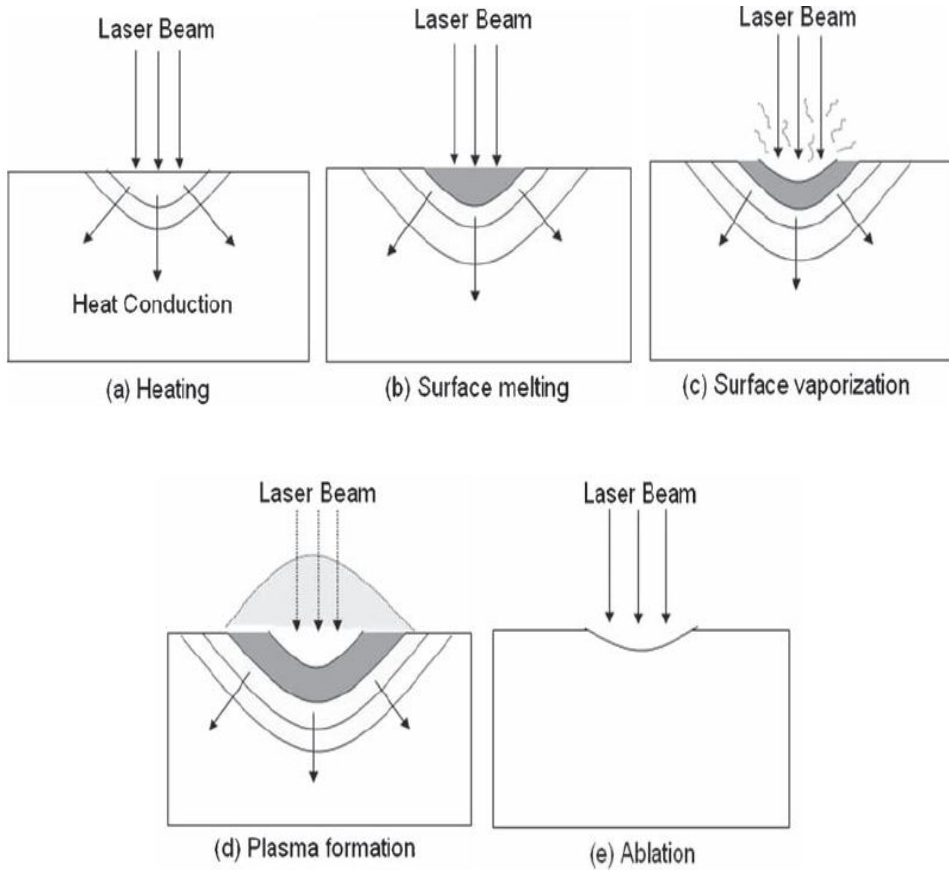


Fig. 2-3 Various effects of laser material interaction

2.2 레이저빔의 흡수와 반사

재료표면에 레이저빔이 조사되면 빔에너지는 Fig. 2-4 에서와 같이 흡수, 반사 및 투과로 나누어지며, 일반적으로 금속의 경우 레이저빔은 투과하지 않는다. 따라서 표면에서 반사되는 에너지를 제외한 모든 에너지는 재료내부에 흡수되며, 이중 흡수에너지가 레이저가공에 실질적으로 사용된다. 레이저빔 에너지가 흡수되는 침투깊이(penetration depth)를 “Skin Depth”라 한다. 식(2.1)일반적으로 침투깊이는 흡수계수의 역수로 정의되며 빔의 파장 반비례하고 재료 소광계수에 반비례 한다.[84][85]

$$d = \frac{\lambda}{4\pi k} \quad (2.1)$$

식(2.1)에서 d 는 침투깊이, λ 는 레이저빔의 파장, k 는 소광계수이다.

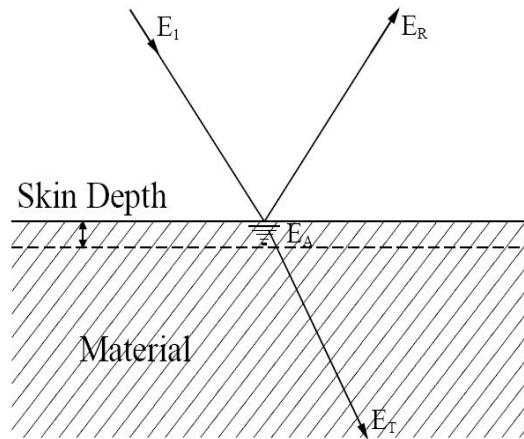


Fig. 2-4 Separation of incident laser beam

- E_I : Incident laser beam
- E_R : Reflected laser beam
- E_A : Absorbed laser beam
- E_T : Transmitted laser beam

침투깊이는 빔 강도가 최대강도의 약 14%(약 e^{-2})가 되는 깊이이며, 대부분의 에너지는 이 깊이에서 흡수된다. 금속의 경우 침투깊이는 대개 수백에서 수천 Å 정도이므로 표면열원이라 할 수 있다. 레이저빔에 의해 흡수된 에너지 분포는 표면으로부터 깊이에 따라 지수 함수적으로 감소한다.[84][85] 식(2.2)레이저빔의 반사도는 전기전도도 σ 와 파장 λ , 빛의 속도 C 의 함수로서 다음과 같은 Hagen-Rubens 식으로 나타낼 수 있다.

$$R = 1 - \frac{2}{\sqrt{\sigma \frac{\lambda}{C}}} \quad (2.2)$$

식(2.2)에서 반사도는 전기전도도가 크고 파장이 클수록 감소함을 알 수 있으며, 재료의 반사능은 일반적으로 전기전도도가 큰 금속일수록 큰 반사능을 나타내어 빔의 흡수가 작아짐을 알 수 있다.

레이저 복사에너지가 재료 표면에 조사될 때, 일부분은 재료로 흡수되고 일부분은 공기중으로 반사된다. 흡수된 레이저 복사에너지는 금속재료의 표면을 가열하기 시작한다. 이 과정에서 시간간격과 복사에너지 강도에 의존적인 여러가지 공정변수들의 영역이 있다. 어떠한 조건에서는 가공재료 표면위에 생성되는 증발된 재료로 인하여 발생된 플라즈마의 레이저 에너지 흡수로 인한 효과가 중요할 수도 있다.

고출력 빔의 흡수에 의한 재료 가열 효과는 매우 빨리 일어난다. 그 결과, 재료표면의 온도는 매우 빨리 용융점으로 상승한다. 레이저 유도 용융 (Laser-induced melting : LIM)은 레이저용접에서 매우 중요한 현상이다. LIM은 재료표면 증발이 발생하지 않는 조건에서 최대 용융이 발생하도록 하는 것이 바람직하다. 증발이 발생하지 않는 용융은 레이저 공정변수의 매우 좁은 범위 내에서 발생한다. 만일 레이저 강도가 매우 크다면 깊은 깊이로 재료가 용융되기 전에 재료표면이 증발하기 시작한다. 이것은 레이저 용접에 적합한 최대 레이저 강도가 존재한다는 것을 의미한다.

레이저용접에서는 증발이 키홀 형성에 중요한 역할을 하지만, 금속증기는 플라즈마화 하기 쉽고, 그 가운데를 레이저빔이 통과하면 흡수·산란 등을 일으키기 때문에 용

접에서의 영향을 무시할 수 없다. 따라서, 레이저용접시의 플라즈마에 의한 빔에너지의 흡수와 산란현상이 레이저용접의 건전성에 대한 모니터링으로 이용할 수 있어 이에 대하여 설명한다.

(1) 흡수

레이저빔의 파워밀도가 대단히 높으면, 보호가스는 절연파괴에 의해 전리되어, 플라즈마가 발생한다. 절연파괴의 한계파워밀도는 건조한 공기중에서는 10^9W/cm^2 이상으로 높지만, 먼지나 금속증기가 포함되어 있으면 절연파괴의 한계는 10^8W/cm^2 으로 저하하여 플라즈마가 발생하기 쉬운 상태가 된다. 이와 같은 흡수기구를 억제동복사라 부른다. 금속에 고속의 전자를 충돌시키면 X선이 발생하는데, 이는 전자에 급브레이크를 걸어서 전자파(X선)을 발생시키는 제동복사로서 알려져 있다. 억제동복사는 이 역으로, 전자파(레이저)가 전자를 가속하여 흡수되는 셈이다. 흡수강도는 흡수계수 β 로서 나타내지고, Fig. 2-5에 나타난 것과 같이 그 역수는 레이저강도가 36%(=1/e)로 감쇠하는 거리(흡수길이)로 정의된다.[84][85]

$$W = W_0 \exp(-\beta x) \tag{2.3}$$

단, W_0 는 입사 레이저출력, W 는 거리 x 만큼 진행한 곳에서의 레이저출력이다. 흡수계수 β 는 전자밀도의 함수이며, 적외선 레이저에서는 다음 식(2.4)으로 주어진다.[84][85]

$$\beta = 0.0177 \times 10^{-29} \frac{Ne^2}{\nu^2 \sqrt{T^3}} \tag{2.4}$$

여기서, ν 는 레이저의 주파수 [Hz], Ne 는 전자밀도 [cm^{-3}], T 는 온도 [K]이다. 이와 같이 흡수계수는 레이저 파장 의존성은 크며, 파장의 2승에 비례한다.

Fig. 2-6은 전자밀도 Ne 와 흡수길이 $1/\beta$ 의 함수를 나타낸다. CO_2 레이저에서는 전자밀도가 10^{17}cm^{-3} 이상이 되면, 용접에 영향을 주게 된다. 전자밀도 Ne 가 같은 값의 플라즈마에 대해서는, CO_2 레이저와 비교하여 YAG레이저는 1/100이나 흡수계수가 작다. 그

러므로 통상의 YAG레이저용접에서는 플라즈마의 흡수가 작지만, CO₂레이저용접에서는 흡수를 무시할 수 없다.

고온의 플라즈마는 재료에 도달하는 레이저빔을 차단하여 용입깊이를 감소시킴과 동시에, 그 보유열로 재료를 간접적으로 가열하기 때문에 표면의 폭이 넓어져서 소위 와인컵 모양의 비드가 된다. Fig. 2-7에 전형적인 와인컵 형상의 비드단면을 나타낸다.

플라즈마가 레이저빔을 흡수하면 가열되어 전자밀도도 증대하고 흡수율은 매우 크게 된다. 이와 같이 고온의 플라즈마는 주위의 열전도손실과 균형을 이룰 때까지 온도가 상승한다. 또한 초점부근에서 고온의 플라즈마가 발생하면, 광축을 따라서 집광렌즈 축을 향하여 전파하는 성질이 있다. 그 전파속도가 음속보다도 빠른 플라즈마를 LSD(Laser Supported Detonation), 아음속의 것을 LSC(Laser Supported Combustion)라 부른다.[85]

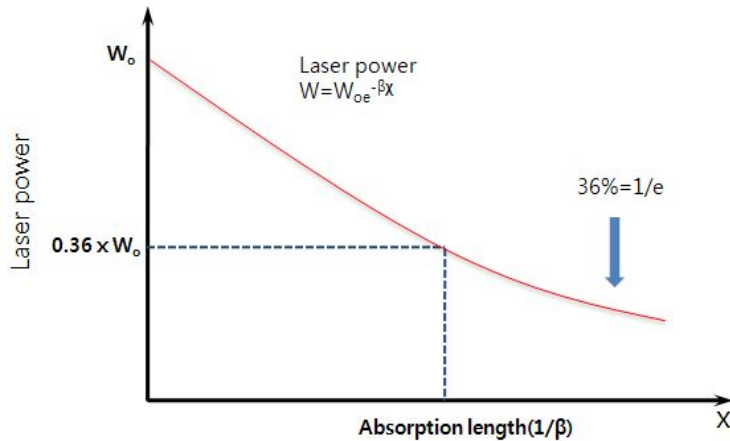


Fig. 2-5 Absorption coefficient

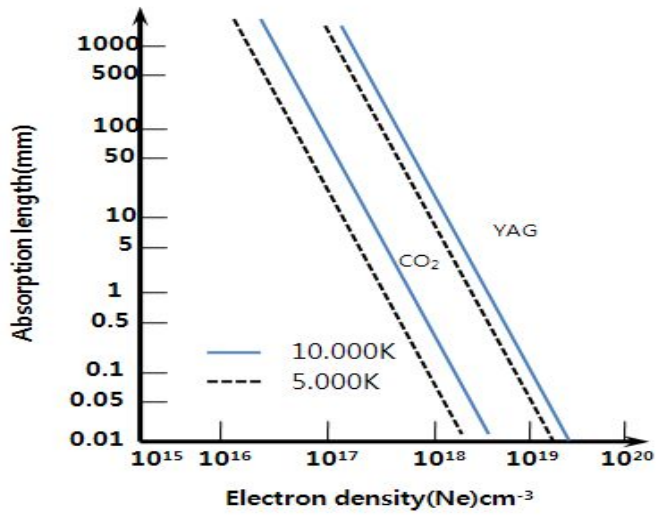


Fig. 2-6 Change according to the type of the electron density(Ne) and the laser absorption length

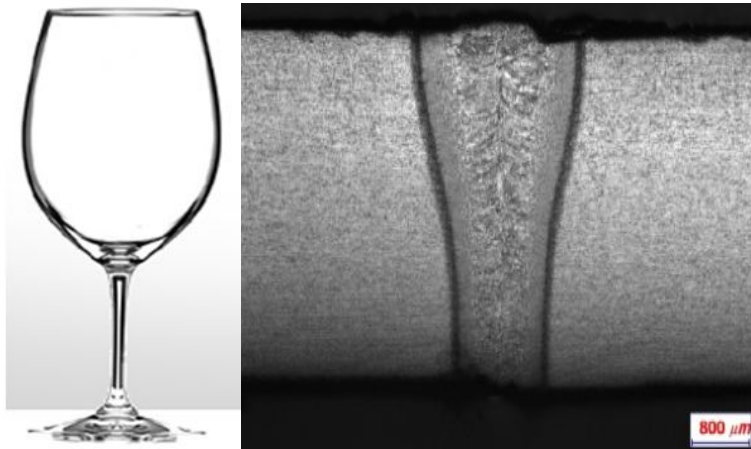


Fig. 2-7 Bead cross-section of the laser welding

(2) 산란

부유금속증기가 응집하면 비교적 큰 입자가 되어 레이저빔을 산란할 수 있다. 입자 크기가 레이저파장과 비교하여 상당히 작을 때는 레일리산란(Rayleigh scattering), 동일할 때에는 미산란(Mie scattering)이라 부른다.

레이저용접 중에 부유하는 증기의 크기는 수십 nm로 작기 때문에, 통상은 레일리산란이 지배적이라고 생각해도 좋다. 산란 레이저빔의 강도 W_{scat} 은 파장 의존성이 대단히 크고, 다음 식(2.5)과 같이 파장의 4승에 역비례 한다.[85]

$$\frac{W_{scat}}{W_0} \propto \frac{2\pi^2 V^2}{R^2 \lambda^4} \quad (2.5)$$

식(2.5)에서 W 는 레이저 강도, R 은 입자의 거리, λ 는 레이저 파장, V 는 입자의 체적을 나타낸다.

CO₂레이저는 파장이 길기 때문에 입자산란은 문제로 되지 않지만, YAG레이저는 산란강도가 1만배 크기 때문에, 산란에 의한 손실을 고려해야 할 필요가 있다.

(3) 보호가스의 영향

플라즈마의 성질은 분위기 가스의 종류나 가스 유속에 의해서도 영향을 받는다. Ar 가스는 He에 비해서 열전도율이 작기 때문에 플라즈마는 고온으로 가열되기 쉽고, 보다 흡수성이 높은 플라즈마가 형성된다. 분위기 가스가 동일해도 가스의 유속이 빠르면 냉각되기 때문에 플라즈마의 온도는 저하한다. 레이저 절단이 그 대표적인 예로 플라즈마가 형성되지 않는다. 또한, 플라즈마 중에 전자 밀도의 구배가 있다면 레이저 빔이 그 가운데를 통과하면 감쇠하거나 굴절하여 가공결과에 악영향을 미칠 수 있다.

2.3 키홀(Keyhole)의 메커니즘

높은 파워밀도를 가진 레이저 빔 또는 열원이 금속표면에 조사되면 그 부분은 기화가 일어나며 급격한 기화에 의해서 증발압력이 발생하여 증발금속이 충분한 구멍이 뚫린 상태로 되는 현상을 키홀(Keyhole)이라 한다.

키홀은 $10^5 \sim 10^6$ W/cm² 이상의 레이저 빔이 금속표면에 조사되면 조사된 부분은 용융되고 지속적으로 용융의 중심부에서 증발 현상이 발생하여 금속증기가 생성 되어 키홀이 형성된다. 키홀내의 증기압과 구멍 주위에 있는 용융금속의 표면장력으로 수축압이 균형을 이루고 있을 때는 키홀 현상은 지속된다.

연속적인 레이저 빔의 경우 키홀 벽면에서 흡수와 반사를 반복하여 보다 깊은 부분까지 내려가 용융, 증발이 발생하게 된다. 레이저 용접과 같이 이동하면서 작업을 하는 경우 키홀은 정지상태와 달리 용접진행 방향의 키홀 벽면에서 용융이 일어나며 반대면에서는 순차적인 응고가 발생된다.

키홀은 반지름이 작으며 속이 빈 긴 원통형으로 내 벽은 용융금속으로 이루어져 있고 기화가 진행함에 따라 증발금속증기의 반발력으로 깊이 방향으로 더욱더 깊어진다. 이러한 키홀의 형성에 의해 레이저 용접의 특징인 열영향이 적으며 깊은 용접부를 얻을 수 있다.

Fig. 2-8 같이 레이저에 의해 에너지가 공급되고 있는 동안 키홀 내부의 급격한 기화에 의한 압력이 용융금속 내벽의 붕괴를 억제하여 키홀의 형태를 유지시킨다.

기화에 의한 압력은 키홀을 확장시키는 반면 내벽의 용융금속에 작용하는 중력 및 모세관 현상은 키홀을 수축 및 붕괴 시킨다. 키홀은 이들 인자에 의해 준 평형상태에서 수축과 팽창을 반복하는 형태로 존재 한다.

레이저 빔에 의해 시편 표면의 온도가 끓는점 이상으로 상승하게 되면 플라즈마가 발생하게 되고 시간이 증가할수록 반발 압력이 커지게 된다. 이것이 용융풀의 표면장력 보다 커지게 되면 중앙에서 주변으로 유동이 발생하면서 키홀이 발생하게 되고 빔의 흡수율이 증가하면서 키홀이 커지게 된다.

발생된 키홀이 지속적으로 유지된다면 키홀은 용융풀과 마찬가지로 진동을 하게 된

다. 이는 표면장력과 반발 압력이 서로 균형을 이루려고 하기 때문이다.

반발 압력은 키홀벽을 바깥방향으로 밀어내려 하고 표면장력은 그 반대의 역할을 하려고 하기 때문이다. 따라서 키홀의 진동은 상하 방향의 용융풀의 진동과 달리 Fig. 2-9 같은 모드의 진동을 하게 된다.[86][87]

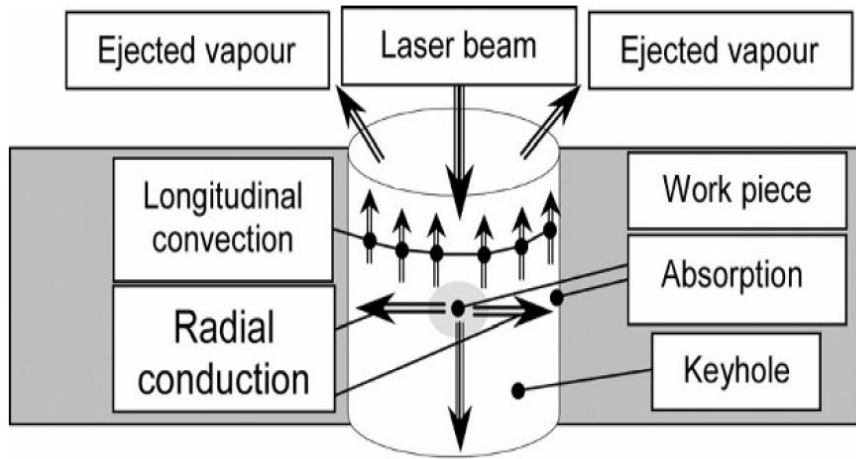


Fig. 2-8 Relative geometry of the work piece, laser and keyhole during laser keyhole welding, and the transfer processes involved.

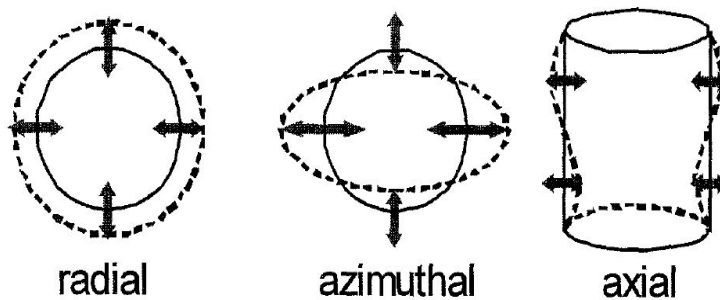


Fig. 2-9 Keyhole oscillation mode

용융풀이 함몰되기 시작하는 부분이 키홀 입구 부분이라고 할 수 있고 중앙의 어두운 부분이 키홀 바닥, 둥근 떠 모양의 중앙부분의 테두리 부분이 키홀벽 이라고 할 수 있다.

용융풀의 온도는 가운데 부분인 키홀 바닥이 가장 높고 키홀 바닥은 고온으로 인하여 저 밀도의 이온화된 가스 또는 플라즈마 상태이기 때문에 반사도(Emissivity)가 낮아서 어둡게 보이게 된다. 반면에 키홀 벽 부분은 부분적으로 액체/기체 상태여서 키홀 바닥보다는 온도가 낮지만 부분적으로 반사도(Emissivity)가 크고 불규칙한 키홀 벽이 형상으로 빛이 반사되는 정도가 많게 된다.

CW(continuous wave)레이저용접에서는 열원의 움직임에 따라 키홀이 이동하므로, Fig. 2-10에 나타난 것과 같이 키홀 후방의 용융금속이 응고하여 비드가 형성된다. 이 상황은 수중에 막대기를 뽑아서 이동시키는 것과 유사하다.

Fig. 2-11에 보여진 것처럼 정수압이나 표면장력은 키홀을 함몰시키려 하지만, 내부의 증기압이 키홀을 유지하며 막대기가 통과한 공간을 주위의 물이 충전한다. 만약 키홀이 안정적으로 유지할 수 없게 되면, 용융금속이 키홀을 덮어 기포가 빠져나가지 못하기 때문에 포로시티(porosity)라 불리는 기공과 같은 결함이 생성된다. 또한, 비드의 끝단에서는 키홀을 채울 용융금속이 부족하여 크레이터(crater)가 남는다. 따라서 이를 처리하는 크레이터처리가 필요하게 된다.

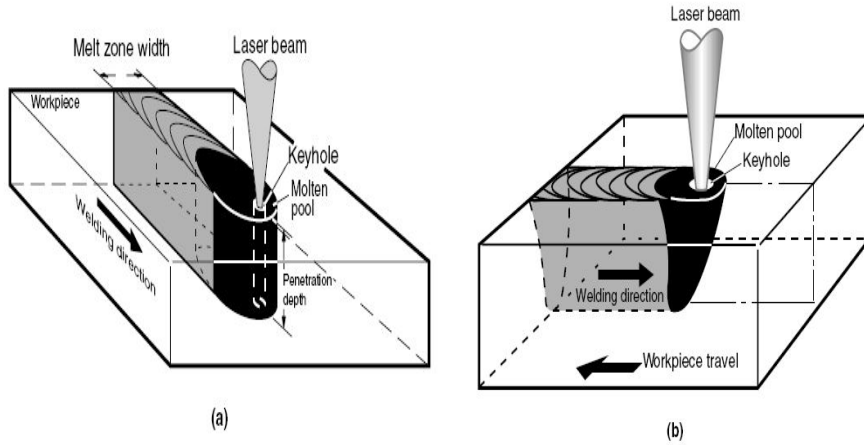


Fig. 2-10 Schematic of the keyhole mode laser welding process.

(a) Simplified sketch.

(b) Illustration of bending of the keyhole in the direction of workpiece travel.

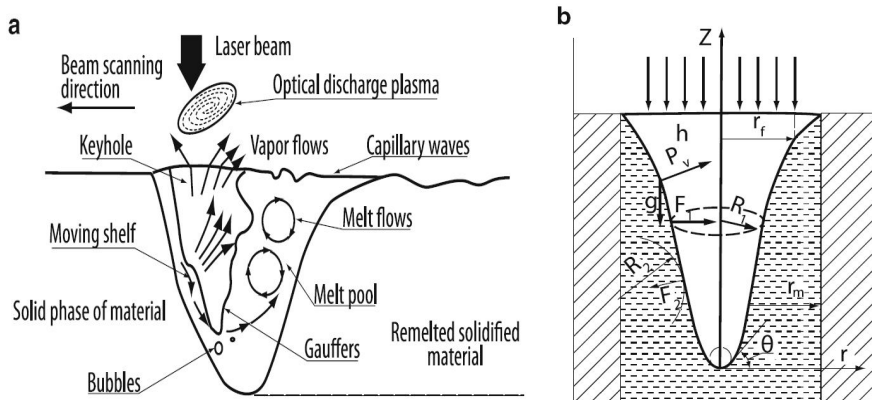


Fig. 2-11 Scheme of a keyhole (a)

and melt pool geometry upon deep melting (b)

2.4 플라즈마(Plasma)의 거동

플라즈마는 기체 입자, 즉 기체분자나 원자에 에너지가 가해지면 최외각 전자가 궤도를 이탈함으로써 자유전자가 되어 양전하를 띄게 되며 분자 혹은 원자와 음전하를 갖는 전자가 생성된다. 이러한 양전하의 이온과 전자들이 다수가 모여 전체적으로 전기적인 중성을 갖으며 이렇게 구성된 입자들의 상호작용에 의해서 독특한 빛을 방출하며 입자들의 활발한 운동 때문에 높은 반응성을 갖게 되는데 이러한 상태를 흔히 이온화한 기체 또는 플라즈마(Plasma) 라고 부른다.

플라즈마가 형성되고 있는 상태는 반발, 이온화, 여기와 반발로 3가지 상태가 복합적으로 일어나고 있다. 전자는 약한 운동에너지를 갖고 있으며 이 에너지로는 원자 혹은 분자에 충돌해도 아무런 변화가 없게 된다.

가속된 자유전자는 원자와 충돌하여 최외각 전자를 튕겨 보냄으로써 이온을 만들고 또 하나의 자유전자를 만들게 된다. 자유전자나 또는 이온이 다른 원자의 이온화에는 충분하지 않지만 충돌된 원자에 에너지를 공급하여 최외각 전자를 여기 시키게 된다. 이 여기된 전자는 다시 안정한 궤도로 돌아오면서 고유의 에너지 간격에 해당하는 빛 에너지를 발산하게 된다.

위의 여러 가지 현상을 보면 플라즈마가 생성되기 위해서 충돌하는 입자는 임계치 이상의 가속이 필요하며 또 실제로 플라즈마가 유지되기 위해서는 적당한 충돌 횟수가 보장되어야만 한다. 따라서 압력(압력이 높으면 충돌할 수 있는 입자의 수도 많음을 의미한다.)과 외부에서 인가하는 전압(전자를 가속시키는 일을 한다)이 중요한 공정변수가 된다. 하지만 너무 높은 압력은 충돌사이에 평균적으로 이동하는 거리(mean free path)를 짧게 하므로 충분한 에너지를 가지도록 가속되지 못하므로 이온화를 방해하는 결과를 초래한다.

키홀은 금속증기와 주변 기체로 이루어져 있으며, 레이저가 키홀 내부에서 흡수, 반사 하면서 그 안에 갇히게 되므로 흑체 역할을 한다. 키홀을 형성하면 레이저 에너지가 키홀 벽에 직접적으로 흡수되기도 하지만 증기에 의해 흡수된 것이 벽에 전달되기도 한다. 발생한 금속증기들은 계속되는 가열과 입자 사이의 충돌로 이온화되면서 플

라즈마 상태로 변하며, 주변에 있는 다른 기체들도 에너지를 흡수하여 플라즈마 상태가 된다.

플라즈마 형성은 금속이 증발된 후에 가공재료의 표면에 있는 자유전자에 의한다. 증발된 금속원자들 내에 있는 전자들은 인입되는 레이저빔 에너지를 흡수하여 즉 역제동복사 현상에 의하여 가속되며 그 운동 에너지가 금속원자들을 이온화 시키는데 충분히 크게 된다. 이렇게 하여 증발된 금속원자들의 이온화를 초래하여 전자들의 수를 증가 시킨다.

플라즈마 주파수는 다음과 같은 식(2.6)으로 표현된다.

$$\omega = \left(\frac{e^2 N_e}{\epsilon m_e} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.6)$$

여기에서 N_e 는 전자이 수 m_e 는 전자의 무게이다. 전자밀도가 커서 플라즈마 주파수가 레이저빔의 주파수보다 크면 레이저빔은 플라즈마에 의하여 반사되므로 플라즈마에 의하여 차창효과가 발생한다.

본 연구에서 사용한 Nd:YAG 레이저 빔의 파장이 $1.06\mu\text{m}$ 이기 때문에 주파수는 다음 식(2.7)과 같다.

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (2.7)$$

여기에서 c 는 빛의 속도이고 λ 는 레이저빔의 파장이다.

금속표면상에 플라즈마가 발생되면 그 밀도가 크지 않을 경우에는 레이저 빔을 투과시켜 금속표면에 도달하게 된다. 레이저의 강도가 증가하여 플라즈마 밀도가 증가되면 레이저 용접에 영향을 줄 때 까지는 발생된 플라즈마에 의한 인입 레이저 빔의 감쇠가 증가 된다.

플라즈마의 밀도가 더욱 커지면 이 플라즈마가 레이저 빔을 흡수하여 고온 플라즈마로부터 다른 주파수의 전자파를 발생시켜 금속표면으로 방출시킴으로 간접적인 가열을 하게 된다. 그러면 플라즈마는 표면으로부터 떠나 레이저 빔 방향으로 빠른 전파속도

로 팽창한다. 광학적으로 밀도가 큰 플라즈마는 시편 표면을 차창시켜 금속증발이 정지되면서 용접상태가 불량해진다.

표면에서 금속증발이 더 이상 발생하지 않으면 레이저빔에 의한 플라즈마가 풀륨이 소멸되고 플라즈마에 의한 레이저 빔의 감쇠 효과도 감쇠되어 플라즈마에 의한 가열로 감쇠한다. 그러면 플라즈마/풀륨은 다시 투명하게 되고 다시 새로운 과정이 시작되어 반복된다.

키홀 내부의 플라즈마는 계속되는 에너지의 흡수로 인하여 온도 상승하게 되고 용융 금속이 기화 되면서 내부압력이 증가 하게 된다. 따라서 키홀 내부의 플라즈마는 외부로 분출되고 이것이 시편위의 플라즈마를 형성하게 된다. 이 분출 플라즈마는 레이저의 입사를 방해하므로 입사 에너지가 감소하여 키홀 내부 압력은 떨어지고 시편 위의 플라즈마는 줄어들게 된다. 이와 같은 플라즈마의 반복 생성 과정을 통하여 레이저 용접을 수행하게 된다.

2.5 레이저 용접 결함

레이저를 이용한 강의 용접시 용접금속에 발생하는 주된 문제로는 크게 Fig. 2-12에 보여진 것처럼 응력 부식 균열과 고온균열 및 기공 등을 들 수가 있다. 응력 부식균열은 낮은 열전도도 및 높은 열팽창계수에 기인하여 발생하며 고온균열은 용접금속에서 응고시에 발생하는 응고균열, 연성이 저하하는 부위에 발생하는 연성저하 균열이 있다.

이러한 결함은 주로 응고시 오스테나이트 조직의 정출에서 비롯되는 합금원소나 불순물 원소의 결정립계에 편석 등에 기인하여 나타나는 용접 결함이다. 또한 기공의 발생은 용융금속의 응고 중 용융 금속내에 용해되었던 기체가 응고 단계에서 방출되지 못하고 응고 금속내에 갇혀 생성되며 이러한 기공의 발생은 모재의 물리적 성질 특히 항복점, 연신율, 인장강도, 피로강도 등에 영향을 미치게 된다.

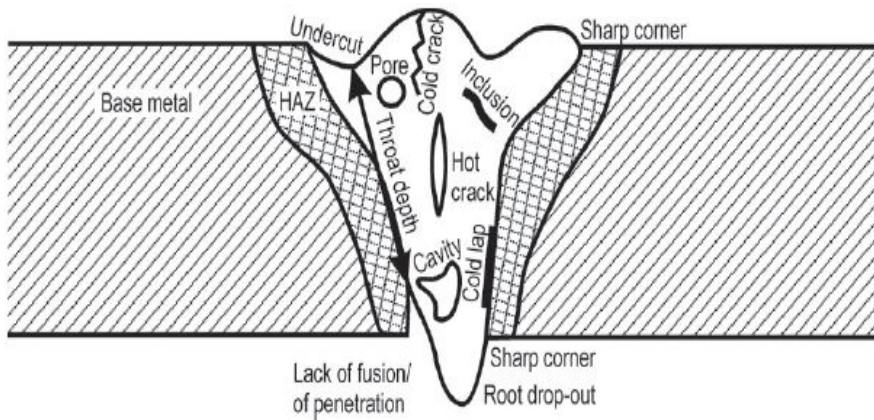


Fig. 2-12 Cross section of a laser weld with different kinds of defects that could appear

2.5.1 용접 균열

발생위치별로 용접금속 균열, 열영향부 및 모재균열이 있으며 비드방향에 따라 종균열과 횡균열로 구분된다. 발생온도에 따라 고온균열, 저온균열, Lamellar Tearing, 재열균열이 있으며, 크기로서 Macro crack과 Micro crack으로 나눈다. 조직 측면에서는 입내균열, 입계균열이 있다.

(1) 고온균열

용접과정 중 발생하는 결함으로서 주로 용접 금속에서 발생하며, 열영향부(Heat Affected Zone: HAZ) 또는 부분 용융영역에서 발생하기도 한다. Fig. 2-13의 고온균열에서는 용접 중 또는 용접 직후의 고온에서 용접부에 자기 수축 및 외부 구속 등에 의한 스트레인(Strain)과 균열에 민감한 조직이 존재하면 발생한다. 용접부의 고온 균열에 영향을 미치는 또 다른 중요한 인자는 용접 비드의 형상이다. 용접 비드의 형상은 응고 종료 시 용접부에 작용하는 구속도에 영향을 미친다.

대입열의 큰 비드보다는 소 입열의 작은 비드가 균열 방지에 효과적이다. 이것은 입열량이 증가할수록 용착 금속의 결정립을 조대화 시켜서 결정 입자의 편석을 일으키기 쉽기 때문이다. 이와 함께 용융지의 형상도 균열에 영향을 미친다. 통상 용접속도가 빠른 경우에 형성되는 테어드롭 (Tear drop) 형상의 풀(pool)에서는 용접 중심선을 따라 편석이 일어나기 쉽고, 형상적으로 이 중심선을 따라 응력이 집중되기 때문에 균열 발생 가능성이 높다. 응력이 중심선을 따라 집중되는 이유는 이 중심선이 응고, 수축과 외부적인 구속에 의하여 발생하는 용접부의 응력에 수직하기 때문이다.

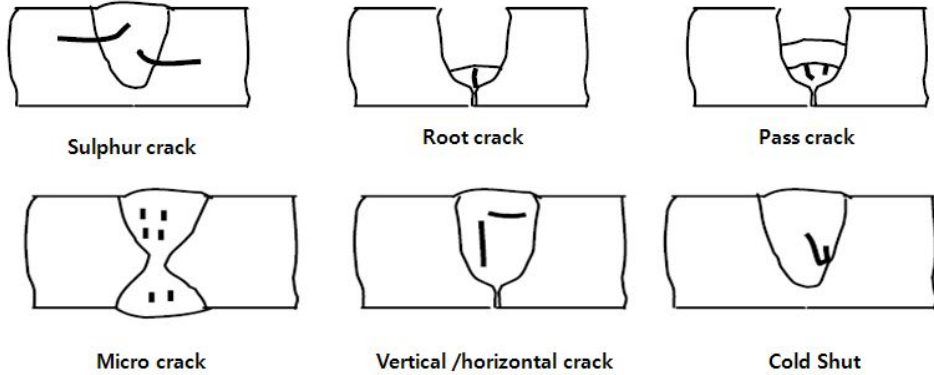


Fig. 2-13 Hot crack(비드균열)

(2) 저온(냉간) 지연균열

Fig. 2-14에 나타난 저온균열은 강의 용접부가 실온 부근 (200~300℃ 이하)에 냉각한 후에 발생하여 시간의 경과와 함께 전파하며, 수소유기 균열로도 표현된다. 용접부의 수소, 구속응력 및 조직의 경화 등이 복합적으로 작용하여 HAZ 및 용접금속에서 발생된다. 균열발생 위치는 HAZ부위 및 용접 금속부이며 Crack파면의 조직적 특성에 차이가 있다.

균열이 HAZ에 발생한 경우는 상립의 입계파면과 입내 수소의 벽개파면을 나타내며, 균열이 용접금속에서 발생한 경우는 주상정의 입계파면과 입내 수소의 벽개파면이 혼재하는 형태이다. 최종 파단부는 Dimple파면 형태를 보인다.

저온 지연균열은 용접시 용접금속에 용해된 수소량에 민감하며 실온부근의 온도에 냉각한 후에 발생 진전된다. 구속된 용접부에 있어서 루트부 등의 응력 집중부에서 발생하기 쉽다. 균열 발생부는 용접 열영향에 의한 경화부이며 용접금속에서도 발생된다. 응력과 확산성 수소에 기인하여 발생하는 강의 지연 파괴의 일종이며 균열 발생부의 응력, 수소, 금속 조직이 관여한다.

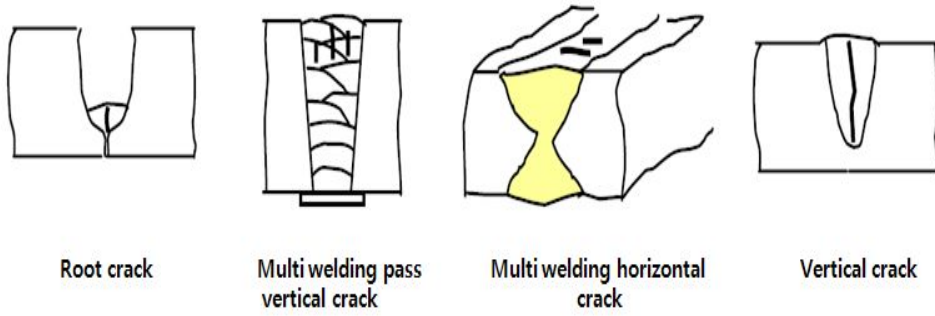


Fig. 2-14 Cold crack(비드균열)

2.5.2 내부결함

가스성분에 의한 Blowhole, Wormhole 및 용접표면에 달한 Pit 등의 기공, 슬래그 등 비금속 개재물의 혼입, 파면에서 보이는 은점, 선상조직 형태로 결함이 Fig. 2-15와 같이 나타난다.

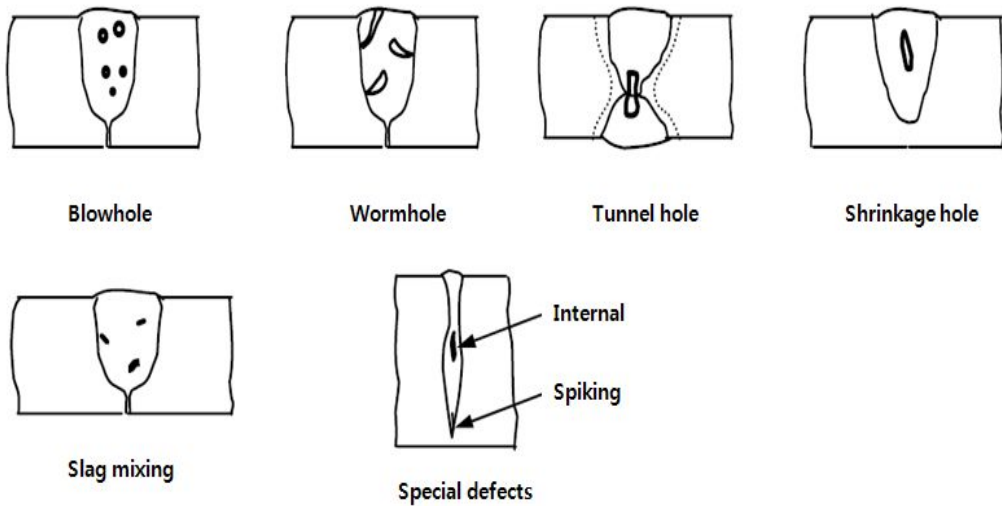


Fig. 2-15 Internal defects

(1) 블로우 홀, 기공, 피트

금속의 용접중에 CO₂, N₂, H₂ 등의 가스가 용융금속중에서 기포로 되어 잔류한 것을 블로우 홀(Blow hole) 혹은 포로서티(Porosity)라고 한다.

발생원인은 피가공물 표면의 세정이 불충분하여 불순물이 부착해 있거나, 금속증기가 고압인 경우 용융금속의 요동작용 등이 있다. 또한 동일한 이유로 발생한 기포가 비드표면의 근방에 나타난 것을 피트(pit)라 부르는 경우도 있다.

(2) 기공(Porosity)

기공은 일종의 공기 방울로서 정상적으로는 부력에 의해 용접금속에서 빠져나가게 된다. 하지만 부력에 의해 공기 방울이 용접금속에서 빠져나가는 시간보다 빠르게 용접금속이 응고되면 공기 방울이 미처 빠져나가지 못하고 용접금속 내부에 남게 되어 기공이 된다.

기공의 성분은 표면 오염물질(기름, grease, 비누, 잉크, 윤활유, 마킹용 물질 등)이 기화된 것이 보통이나 때때로 Ar, He과 같은 보호가스가 포함되기도 한다. 또한 모재의 성분 중 S, Zn, Cd, Bi 등과 같은 저융점 원소도 기공 형성에 기인한다.

탄소강의 경우 다양한 금속원소로 구성되어 있는데 탄소에 비하여 용융온도가 낮은 성분이 기화하면서 발생한 기포가 용융풀 표면으로 탈출되지 못하고 포획되어 기포가 발생하는 경우가 많다. 이밖에 기공 형성의 주요 원인은 수소이며, 부가적으로 제작 중에 발생하는 먼지나 접착제, 테이프, 마킹 크레용 등도 원인이 된다.

(3) 슬래그 혼입 (Slag Inclusions)

Fig. 2-16의 슬래그는 산화된 금속 가스나 비금속 물질로서 아크 용접 시 자주 발생하며 주로 용접부를 따라 종 방향으로 용착금속이 침전하는 가장자리에 위치한다. 슬래그의 혼입은 그 크기가 일정하지 않고 불규칙한 모양을 갖는 것이 보통이다. 경우에 따라서는 불규칙한 테두리를 갖는 점 모양으로 나타나기도 한다.

이러한 슬래그 혼입의 원인은 이전 층의 잔류 슬래그가 그대로 다음의 용착금속 속에 남거나, 또는 용접 조작이 부적당할 때에 생긴다.

2.5.3 비드형상불량

Overlap, Undercut, Humping bead, 용착금속의 과부족에 의한 융합불량 등이 비드형상의 불량으로 Fig. 2-16와 같이 나타난다.

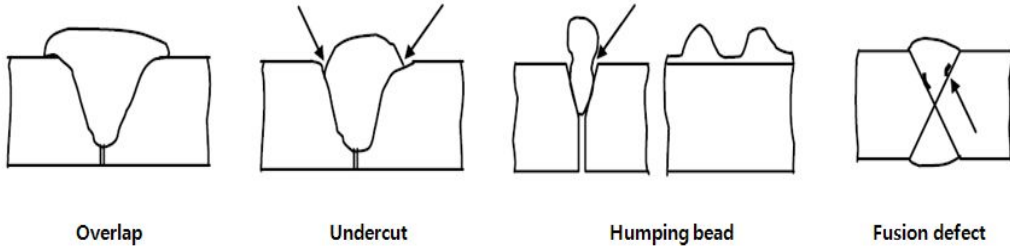


Fig. 2-16 Poor bead shape

(1) 오버랩(Overlap)

용접금속의 가장 자리가 모재와 융합되지 않고 겹친 상태이다. 맞대기 용접보다도 필렛 용접 시에 일어나기 쉬우며, 응력의 집중, 부식의 촉진 등의 원인이 된다. 오버랩은 용접봉의 운봉법, 용접전류, 용접속도 등을 적절하게 선정하면 방지할 수 있다.

(2) 언더 커트(Under Cut)

용접선 가장자리의 모재가 깨어서 홈과 같이 골이 생긴 상태이며, 그 원인은 나쁜 용접 기량 (용접봉을 쥐는 각도나 운봉 속도의 부적당) 이나 부적당한 변수(용접전류의 과다 등)의 사용으로 발생한다. 이러한 언더컷은 응력 상승, 균열 발생 등을 일으키며, 접합면의 단면적을 줄임으로서 강도를 감소시킨다.

(3) 언더 필(Under fill)

개선 갭이 큰 용접이음매를 용접하면, 용융금속이 공간을 꽉 채우지 못하고 비드표면이 피가공물의 표면이나 뒷면보다 안쪽에 생기게 된다.

알루미늄이나 그 합금을 관통용접 하는 경우에도 용융금속이 내려가 표면측에 언더 필이 생기기 쉽다.

(4) 험핑(Humping)

용융 금속의 흐름이 나쁜 재료를 아주 빠른 속도로 용접하게 되면, 용접비드의 표면이 거칠어지는 험핑 현상이 발생한다. 양호한 용접비드의 표면과 비교할 때 움푹 파인 것 같다.

(5) 스패터(Spatter)

용융시 용융금속으로부터 고속으로 비산하는 금속의 입자를 스패터라고 한다. 발생 원인으로서는 첫 번째 지나치게 높은 에너지 밀도에 의해 금속증기의 반력의 발생 하며, 두 번째는 재료 내부에 개재하는 불순물 혹은 표면에 부착해 있는 유기제, 아연도금 등의 연소가스가 급팽창(폭발)하여 발생하는 경우 등이 있다.

이 금속입자가 커지면 모재표면에 용착 하거나 혹은 가공렌즈, 파라볼릭 미러에 부착하여 문제를 야기 시킨다.

2.6 레이저 용접 모니터링

레이저 용접 때 시편의 이동에 따라 발생된 키폭 및 플라즈마는 레이저 용접에서 레이저 에너지가 시편에 전달되는 과정에 있어서 용접의 중요한 매개 역할을 하는 것으로 레이저 용접 온라인 모니터링하기 위해서는 키폭의 거동을 관찰하는 것이 중요하다.[88]

용접품질 감시를 위한 모니터링의 목적은 용접현상의 이해와 결함예측, 신뢰성 향상, 품질 평가 수단 등으로 생각 할 수 있다. 또한 레이저 빔과 재료와의 상호작용에서 발생하는 신호는 크게 두 단계를 거치면서 현상을 이해하고 파악할 수 있는데 모니터링의 검출수단과 방법의 선정과 검출된 신호들을 신뢰할 수 있는 해석으로 나눌 수 있다.

검출수단과 방법을 선정하기 위해서는 먼저 목적이 선정되어야 하는데 그 분류로 다음과 같이 구성되어 있다.

(1) 음향방출(Acoustic Emission transducer)

음향 방출 모니터링 시스템의 개략도를 Fig. 2-17에 나타낸 것이다.

압전소자를 강판에 부착시키고 강판은 용접부 위에 설치한다. 강판은 증기압력을 감지하고 레이저 용접 중 발생하는 고온의 플라즈마로부터 센서를 보호하는 기능을 가지고 있다.

강판과 용접부 사이의 거리는 최대의 음향방출 신호를 얻고 용접작용의 간섭을 최소화하는데 적합하다.

(2) 음향 노즐에 대한 음향방출(Acoustic emission transducer for acoustic nozzle)

레이저 용접중에서 중요한 공중 음향신호는 가공물이 빔 초점의 근처에 있을 때 발생한다. 그 신호는 키폭에서 발생하는 충격파(Shock waves)로 유기된 압력에서 주로 발생하는 것이며 압전소자는 그림과 같은 노즐에서 열적으로 절연된 빔 송출관에 설치되고 빔 송출관은 실딩에 의한 프로세스에 직접반사열을 차단한다.

여기에 사용되는 압전소자는 50kHz~1MHz의 광대역 통과 필터로써 음향신호는 각종

증폭기와 신호를 원활하게 처리하며 신호는 컴퓨터 및 디지털 리코더에 기록된다.

(3) 음향 거울에 대한 음향 방출 (Acoustic emission transducer for acoustic mirror)

고출력 방사가 반사경에 부딪힐 때 표면전자는 광자와 상호작용을 하고 이들 전자는 전하를 발생시키는 광자에 영향을 준다. 이것은 반사경의 이면에 설치한 압전소자에 의해서 검출할 수가 있다.

신호는 전체의 강도에 의한 것이 아니라 반사경에 미치는 방사 유동의 변화로 발생한다. 반사경이 최후 빔 안내 반사경과 같이 프로세스 가까이에 설치되면 프로세스에서 반사음은 반사경에 부딪히고 반경에 신호를 크게 감소하는 것을 나타내므로 반사음을 추론할 수가 있다. 이것은 키흔의 형성을 발달시키는 흡수율과 일치한다.

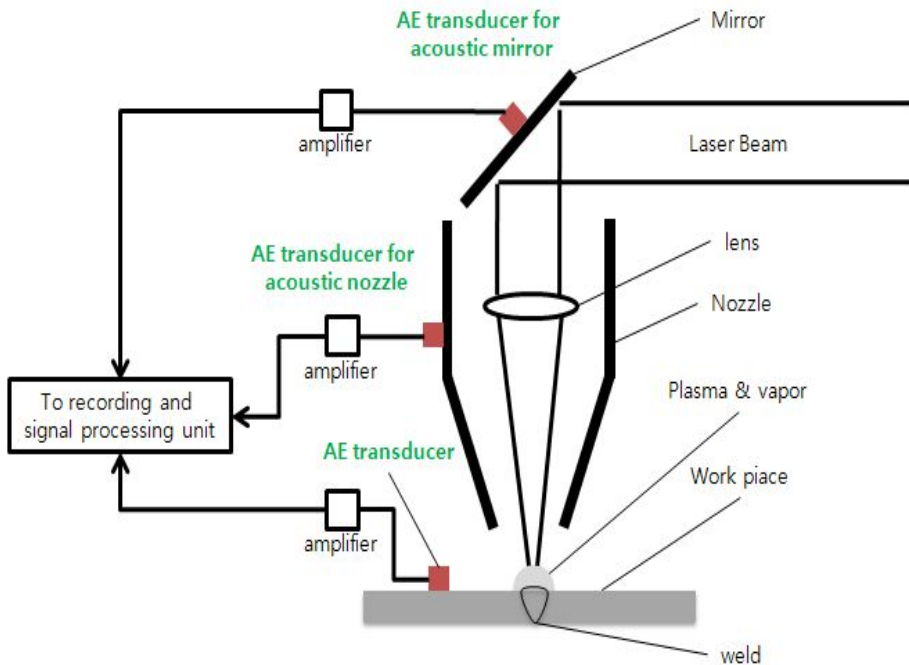


Fig. 2-17 Typical setups for acoustic emission sensing using an acoustic transducer, acoustic emission nozzle, and acoustic mirror

(4) 마이크론(Microphone)

키홀의 근처에서 증기압 변동에 의한 음향방출 형태의 음파를 마이크론을 이용하여 감지한다. Fig. 2-18 것처럼 마이크론으로 감지하면 마이크론 자체의 주파수 특성으로 인하여 저역통과 필터를 사용하지 않아도 되는 장점이 있다.

일반적으로 마이크론을 사용하므로 경제적이고, 설치가 용이하다. 단점으로는 주파수 대역이 가청 주파수 대역에 한정되므로 그 이외의 주파수 성분들은 감지할 수 없고 압전소자에 비하여 주위에 잡음에 민감하다.

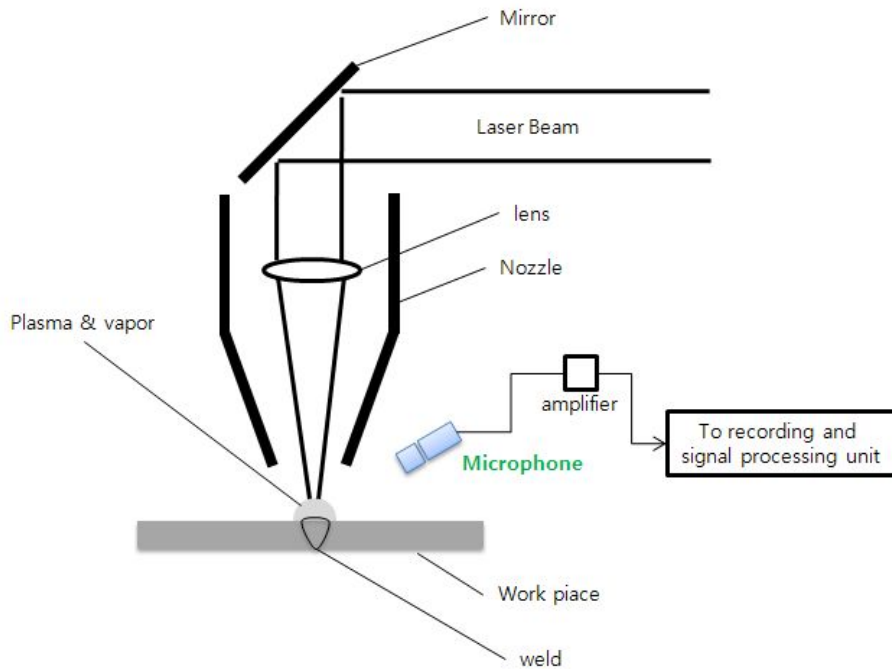


Fig. 2-18 Typical setups for weld monitoring using audible sound

(5) 적외선 센서(Infrared sensing)

Fig. 2-19에 적외선 센서는 레이저 용접중에 용융풀에서 방사하며 용융풀의 방사율은 플라즈마 방사율보다 훨씬 높고, 용융풀의 시각인자는 플라즈마의 것에 비해 10배 이상이다.

적외선 신호는 용융풀의 성분에 의해서 지배하고 용융풀의 온도와 크기를 산출할 수 있다.

(6) 자외선 센서(Ultraviolet sensing)

레이저 용접 중 광을 관찰하는 방법으로 키홀에서 분출되는 금속증기는 레이저 에너지를 흡수하여 플라즈마 상태에서 방사광을 방출한다.

Fig. 2-19처럼 방출되는 플라즈마의 방사광을 감지하기 위하여 자외선 영역의 포토다이오드를 사용한다.

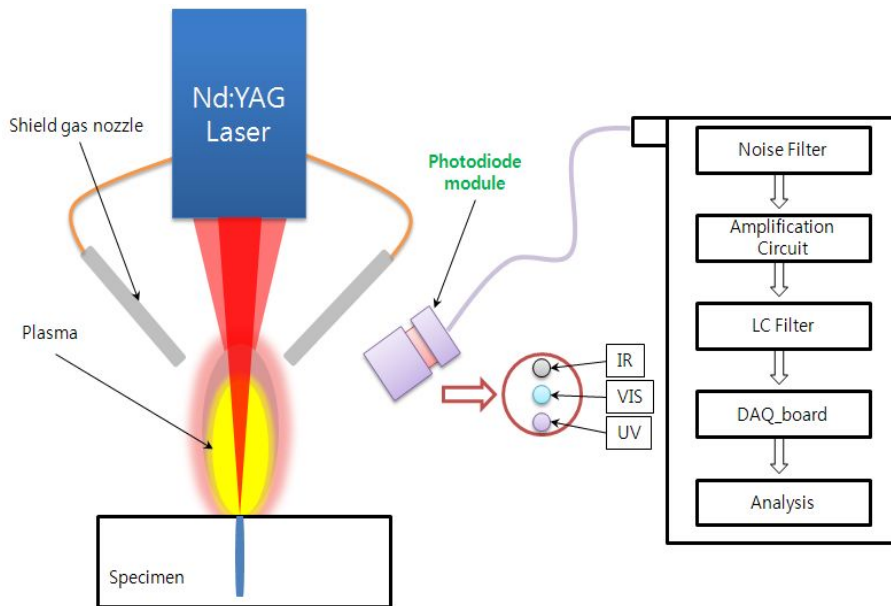


Fig. 2-19 Typical setups for infrared and ultraviolet

(7) CCD (Charge Coupled Device)카메라

영상은 평면 또는 공간에 배열된 광선, 또는 매체에 의해 정보를 시각적으로 획득하도록 구성되어 있다.

CCD 카메라를 사용하여 용접과정을 모니터링 하면 높은 2차원 분해능을 가진 짧은 노출시간으로 용융금속, 플라즈마, 키흔에 대한 정보를 신속하고 비교적 쉽게 얻을 수 있다.

(8) 적외선 온도측정

모든 물체는 일정 온도이상 이 되면 보다 안정한 에너지 준위를 유지하기 위하여 빛을 방출한다. 이때 물체에서 방사하는 에너지는 파장과 온도의 함수이며, 다음 식 (2.8) 과 같이 Planck의 방사 법칙을 따르게 된다.[86]

$$W_{\lambda} = C_1 \epsilon_{\lambda} [\lambda^5 (\exp(\frac{C_2}{\lambda T}) - 1)]^{-1} \tag{2.8}$$

W_{λ} : spectral radiant intensity [W/(cm² · μm)]

C_1 : 34,413 [W · μm⁴/cm²]

C_2 : 14,388 [μm · K]

ϵ_{λ} : emissivity

λ : wavelength [μm]

T : temperature [K]

흑체의 경우 식 (2.8)에 의하여 빛을 방사($\epsilon_{\lambda} = 1$) 하지만 대부분의재료는 이보다 방사율이 낮다. 철강 재료의 경우 대기중에서 200 ~ 300℃ 이상이 되면 표면에 산화물이 형성된다. 이 산화층은 방사율을 감소시키며 대략 0.8 가량인 것으로 알려졌다. 물체의 온도가 증가함에 따라 방사광의 강도는 급격히 증가하며, 방사광의분포곡선은 정규분포와 유사한 형태가 된다. 이 분포곡선에서 방사광의 침투치는 물체의 온도에 반비례한다. 즉, 물체의 온도가 증가함에 따라 짧은 파장범위의 빛이 주로 방사되었다.

포토다이오드는 조사된 빛에 의하여 고유저항이 변화하거나 열기전력이 발생하는 반도체를 이용한 광량 측정 센서이다. 이 센서를 이용하면 물체로부터 방사되는 광량의 세기 측정이 가능하며, 이 광량의 세기로부터 물체의 온도를 측정 할 수 있다. 용접부의 적외선 온도측정은 포토다이오드를 이용하여 용접부에서 방사되는 빛의 세기를 측정하여 온도로 환산하는 방법이다.

이 방법은 상온이상의 비교적 넓은 범위의 온도를 비접촉으로 측정이 가능하여 가열, 용해, 열처리 및 설비진단 등에 널리 이용되고 있다.

(9) 스펙트럼

레이저 용접에서 발생하는 플라즈마는 재료와 레이저간의 상호작용으로 발생한다. 레이저 용접에서 기홀의 형성과 플라즈마의 생성은 용접 품질에 큰 영향을 주게 된다. 그러므로 적절한 광센서의 사용으로 이를 계측하면 용접부에 대한 많은 정보를 얻을 수 있다.[89]

분광분석에 사용된 분광기(spectrometer)의 측광 영역은 280nm에서 1117nm이고 분해능은 0.4nm이다. 분광기의 감도를 나타낼 수 있는 블레이즈(blaze) 파장은 400nm이다. 플라즈마의 광방사(light emission)에 대한 분광 분석 결과이다. 그 파장대역은 Fig. 2-20에서 보는 바와 같이 370nm에서 710nm이었다. 레이저 용접에서는 레이저빔에 의한 소재의 증발 혹은 해리에 의하여 레이저 유기 플라즈마가 발생한다. Fig. 2-20에 철강의 레이저 용접시 발생하는 플라즈마의 분광특성을 나타내었다.

용접부 온도측정에서는 이러한 플라즈마는 심각한 외란 요인으로 작용하므로 이를 차단하여야 한다. 레이저 유기 플라즈마는 광학필터를 이용하여 차단하고 플라즈마의 주 파장범위인 700nm이하의 파장에서는 감응이 작은 센서를 사용해야 한다. 따라서 용접부 온도측정에는 Ge, InGaAs, PbS 등이 적합하다.

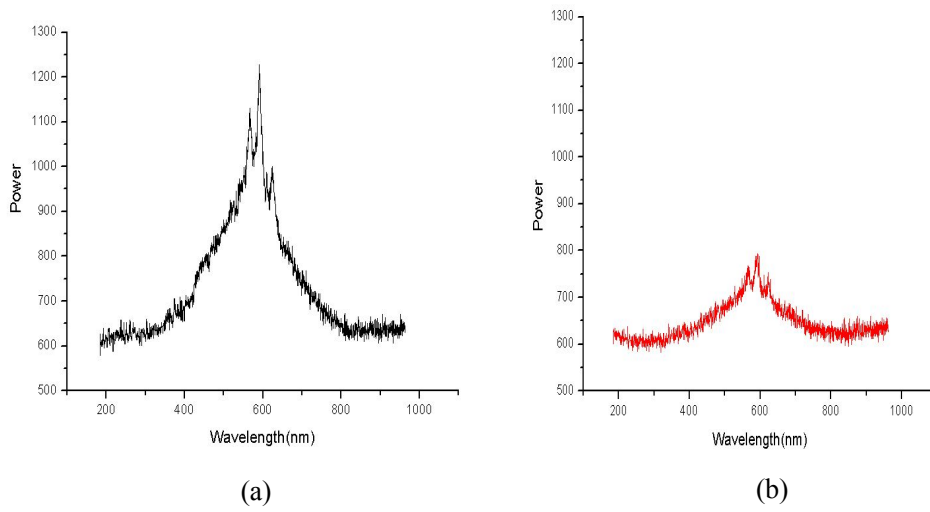


Fig. 2-20 Emission spectrum of plasma Nd:YAG laser irradiation
(a) S45C, (b) Nickel coated S45C

2.7 모니터링 분석 이론 및 방법

2.7.1 신호처리

일반적으로 계측에서는 측정 정밀도를 높이는 것이다. 주위 환경에 관계없이 확실하게 계측할 수 있을 것이 요구된다. 증폭은 센서에 검출신호 레벨을 크게 하고, 필터는 측정하고자 하는 물리량의 변화가 특정 주파수일 때, 그 특정 주파수 혹은 주파수 범위의 신호만을 뽑아내는 기능을 한다. 주어진 주파수 범위에서 시스템 요구사항인 유효 입력 대 출력 데이터를 산출하는 측정시스템을 구현하는 것이다. 4가지의 신호경로 구성요소는 이득/신호 컨디셔닝셀, 안티앨리어싱 필터, 아날로그 대 디지털 컨버터(ADC), 신호처리 이다.

아날로그 기능 중에서, 신호오염(Signal Contamination)은 신호가 ADC를 통과하면서 발생할 가능성이 가장 높다. ADC에 앞서, 필터를 사용하기 위한 일차적 의도는 ADC 샘플링 주파수의 절반가량 이상을 제거하는 데에 있지만, 필터는 또한 링킹, 전파지연, 대역 내 진폭왜곡과 같은 이상 현상을 발생시킬 수도 있다. 신호의 분석을 저해시키는 비선형 부하들은 전압, 전류의 고조파 발생, Surge발생, 순간 전압변동 등의 순시적 미소 외란들을 발생시키기도 하며 이러한 외란들이 반복적으로 발생하게 된다.

본 논문에서는, 레이저 용접 모니터링 분석에 있어서 비주기적인 과도현상을 해석하기 위해서이다. Fig. 2-21에서 획득된 신호는 알고리즘에 따라 신호처리 과정을 제시하며, 분석한 결과를 정량적으로 모니터링하고 품질을 판단하고자 한다.

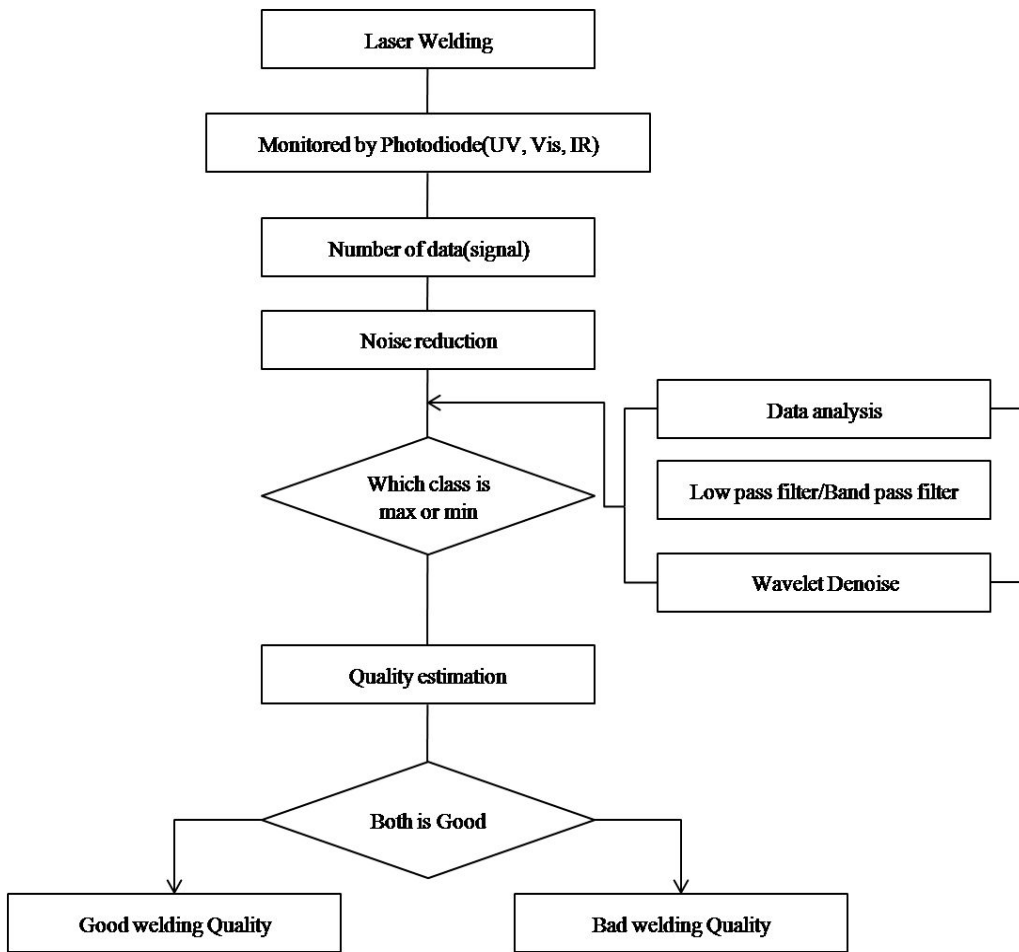


Fig. 2-21 Algorithms of the signal processing

2.7.2 디지털 필터(Digital Filter)

플라즈마 신호를 증폭함에 있어서 나타나는 60Hz 전원 잡음제거를 위하여 노이즈 필터(Noise Filter)를 사용하였다. 증폭된 신호는 1차 아날로그 LC(Inductor Capacitor) 필터회로로 처리하여 신호 변환 장치인 ADC(Analog-to-Digital Converter)보드를 사용하였다.

높은 정밀도를 가지는 ADC를 사용해야 ADC가 추가적으로 발생시키는 양자화 잡음을 최소화하면서 미약한 용접 신호를 디지털 신호로 변환 시킬 수 있다. 또한 높은 표본화 속도로 표본화해야 Anti-Aliasing용으로 사용하는 아날로그 LPF(Low Pass Filter)의 차수를 감소시킬 수 있기에 고차의 아날로그 LPF가 추가적으로 발생시키는 잡음을 최소화 시킬 수 있다. 16비트의 분해능을 가지는 ADC를 10kHz의 표본화 속도로 구동시켰다. 이러한 변환된 신호는 필터링을 통해 제거해야만 한다.[90]

2차적으로 디지털적인 필터링 방법인 FIR(Finite Impulse Response), IIR(Infinite Impulse Response) 필터 등 여러 가지 디지털 필터가 사용된다. 그러나 대역폭이 아주 좁은 신호의 경우 FIR필터는 상당히 높은 차수를 필요로 하고 이로 인해 위상 변화가 생기기 때문에 IIR 디지털 필터를 사용하였다.

IIR 필터는 식(2.9)같이 정의할 수 있다.[91]

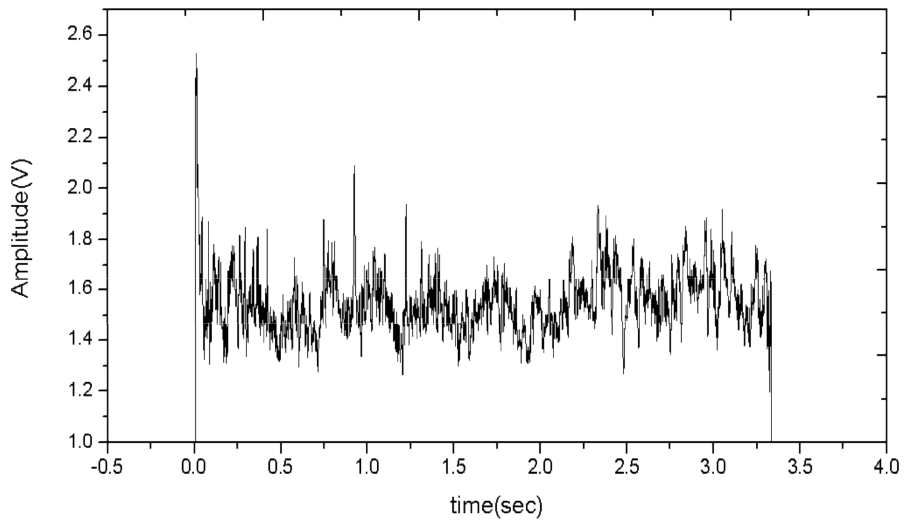
$$y[n] = \sum_{k=0}^M b_k x[n-k] + \sum_{i=1}^N a_i y[n-i] \quad (2.9)$$

IIR 필터에서는 b_k 와 a_k 의 두 가지 계수가 필요하게 된다. b_k 를 전진계수라고 부르고, a_k 를 역 계수라고 한다. 여기에서 $x[n]$ 은 신호 입력 값이며, $y[n]$ 은 시스템의 출력 값이다. IIR 필터는 이전 출력 값인 $y[n-1]$ 를 함께 사용하며 최초 계산 시에는 필터의 이전 결과 값이 없기 때문에 $y[n-1]=0$ 으로 정의한다. IIR필터는 수식이 복잡하고 계산 및 디자인이 어렵다는 단점은 있지만 Magnitude특성이 좋은 필터를 디자인할 수가 있다는 장점을 가진다. 필터 통과 대역에서 리플이 적고 필터 정지대역에서 주파수 성분을 깨끗이 감쇠시키는 필터 때문에 사용한다.

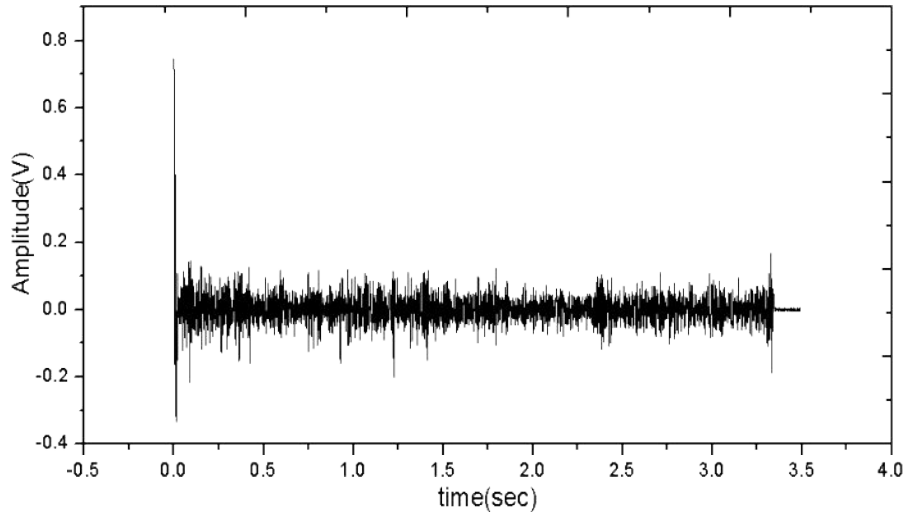
DC성분은 저주파잡음이 존재한다. 이 DC잡음은 2차 IIR(Infinite Impulse Response) LPF를 통해 효과적으로 제거될 수 있다. 이 LPF는 표본화 속도가 높을수록 높은 정밀도의 계수가 필요하기 때문에 10kHz로 표본화된 신호에서 DC를 제거하는 것이 효율적이다.[92]

용접신호에 영향을 주지 않는 범위에서 이 저주파 잡음을 제거하기 위하여 차단주파수가 180Hz인 2차 IIR LPF를 사용하였다.

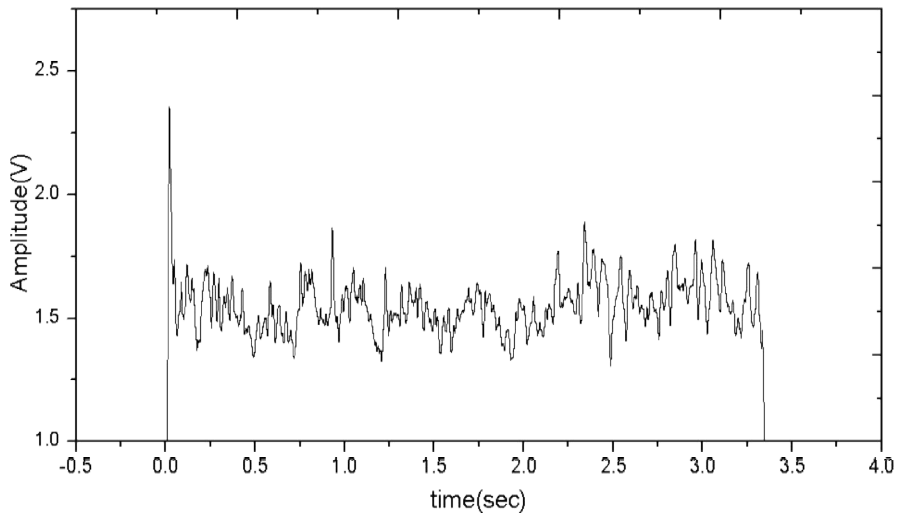
Fig. 2-22는 단계별 신호에 대한 파형을 나타낸 값이다. Fig. 2-22(a)는 10kHz의 표본화 속도로 획득된 원신호이며, Fig. 2-22(b) 10Hz 차단주파수를 가지는 HPF를 통과 시킨 후 파형이다. Fig. 2-22(b)파형은 LPF로 DC잡음을 제거한 신호 파형이다. Fig. 2-22에서 알 수 있듯이 간단히 LPF와 HPF로 잡음을 제거하면 판별할 수 있는 용접신호가 나타남을 확인할 수 있었다.



(a) UV_raw signal



(b) HPF signal



(c) LPF signal

Fig. 2-22 Step-by step waveform of UV photodiode

2.7.3 단시간 푸리에 변환(Short-Time Fourier Transform: STFT)

현재 레이저 용접은 주로 스펙트럼 함수를 이용하여 주기적인 신호를 스펙트로그램을 통하여 평가하고 있다. 스펙트럼 함수로 푸리에 변환을 사용한다.[93]

푸리에 변환은 시간 영역의 함수를 주파수 영역의 함수로 표현하는 것으로 식(2.10)과 같이 정의된다.

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (2.10)$$

$x(t)$: time domain signal
 $X(f)$: Fourier Transform

스펙트럼 $X(f)$ 는 연속신호 $x(t)$ 를 변환한 것으로 식(2.10)의 적분은 무한시간에 대하여 측정된다. 그러나 실제로 컴퓨터를 이용하면 연속 신호의 스펙트럼을 계산할 때는 시간 전체의 신호를 측정하는 것이 불가능하므로 전체 신호를 불연속적으로 측정하여 유한개의 측정치를 구한다. 이때 측정 비율이 빠르고 측정구간이 짧을수록 연속신호에 유사해진다.

불연속적으로 측정한 일련의 측정치를 이산 시간 신호(Discrete time sequence)라 하며 이산 푸리에 변환(Discrete Fourier transform)을 이용하여 불연속 스펙트럼(Discrete spectrum)으로 표현된다. 그러므로 이산 푸리에 변환 식은 다음 식(2.11)과 같이 변형된다.

$$X_k = \sum_{i=0}^{n-1} x_i e^{-j\frac{2\pi ik}{n}} \quad \text{for } k = 0, 1, 2, 3, \dots, n-1 \quad (2.11)$$

x : the input sequence, X : DFT
 n : the number of sample

현재 사용되는 많은 측정 장치의 스펙트로그램(Spectrogram)은 푸리에 변환을 이용하여 주기성을 파악하고 있다. 하지만 이 방법은 단주기 비주기성을 파악하기에는 그리 유용하지 못하다.

그러므로 단주기 비 주기성을 좀 더 정확히 파악하기 위해서는 푸리에 변환 대신 단 시간 푸리에 변환을 이용해야 한다. 단시간 푸리에 변환이란 주어진 신호를 좁은 영역의 단편으로 나눈 후 푸리에 변환을 이용하여 각 단편 내에 존재하는 주파수를 확인하는 신호처리 방식으로 시간에 따른 스펙트럼 변화를 알 수 있어 시변 신호(time-varying signal) 연구에 가장 널리 사용되는 방식이다.[94]

강력한 분석 도구인 단시간 푸리에 변환은 측정 장치에서 검출된 디지털 신호를 작은 단편(Segment)으로 나누기 위해 윈도우(Window) 함수를 사용해야 하는데 윈도우에 따른 신호의 변형이 발생하므로 윈도우 선택에 주의가 요구된다. 식(2.12)에서 먼저 선택한 중심이 t 인 윈도우 함수 $x(t)$ 을 디지털 신호의 첫 부분에 위치시킨 후 디지털 신호와 곱한다.

$$x_t(n) = x(n)w(n-t) \quad (2.12)$$

$$x_t(n) \begin{cases} x(n) & \text{for } n \approx at \\ 0 & \text{for } n \text{ far away } t \end{cases}$$

그러면 t 주변의 신호는 강조되고 t 에서 멀리 떨어진 신호는 감추어진다.

그런 후 푸리에 변환을 한다. 그러면 윈도우를 통과한 디지털 신호는 시간 t 주위의 신호를 강조하기 때문에 푸리에 변환은 t 주위의 주파수 분산을 반영하게 된다. 그런 다음 윈도우 함수를 윈도우 크기의 1/2 만큼 이동시킨 후 다시 디지털 신호와 윈도우 함수를 곱하고 푸리에 변환을 수행한다. 윈도우 함수가 디지털 신호의 끝에 이를 때까지 이 절차를 반복한다.

단시간 푸리에 변환은 위의 절차에 따라 진행되며 실제 불연속적인 신호를 계산하기 위해서는 다음 식과 같이 정의 되는 불연속 단시간 푸리에 변환(Discrete Short-Time Fourier Transform)을 식(2.13)처럼 따르게 된다.

$$X[n,k] = \sum_{m=0}^{L-1} x[n+m]w[m]e^{-j\frac{2\pi km}{N}} \quad (2.13)$$

$w[m]$: the sampling window, $0 \leq m \leq L-1$
 $x[n]$: the signal, $0 \leq k \leq N-1$
 L : the maximum window length

이때 $X[n,k]$ 는 샘플수가 n 개이고 주파수가 k 개인 신호 $x[n]$ 의 시간 주파수 분포이다.

신호의 주파수가 시간에 따라 어떻게 변하는지 시각적으로 보여주기 위해서는 신호의 첫 번째 단편(segment)를 푸리에 변환 한 후 행렬의 첫 번째 행(column)에 놓고 두 번째 단편(segment)의 푸리에 변환 결과를 두 번째 행(column)에 위치시키는 절차를 신호의 끝까지 반복하여 2차원 행렬을 구성한다. 그런 후 가로축을 주파수 향으로 세로축을 시간향으로 설정하고 각점에서의 진폭(Amplitude)를 주파수 강도로 표현한다.

단시간 푸리에 변환의 시간주파수 분해능(time frequency resolution)은 어느 정도 제한된다. 왜냐하면 윈도우가 일정한 크기를 갖고 있다면 신호의 일부분만 갖게 되므로 시간 해상도는 높아지나 주파수 해상도는 낮아지기 때문이다.

반면 윈도우가 무한히 크면 전체 신호를 갖게 되므로 주파수 해상도는 높아지나 시간에 대한 정보는 알 수 없게 된다. 즉 시간 해상도가 높아지면 주파수 해상도는 낮아지고 시간 해상도가 낮아지면 주파수 해상도가 높아지게 되므로 실제 적용에서는 시간과 주파수에 대한 정보를 모두 알 수 있도록 윈도우의 크기를 조절해야 한다.

스펙트로그램은 소리나, 파동을 시각화하여 파악하기 위한 도구로 웨이브폼(Waveform)과 스펙트럼의 특징이 조합되어 있다. 파형에서는 시간축의 변화에 따른 진폭축의 변화를 볼 수 있다. 스펙트럼에서는 주파수 축의 변화에 따른 진폭축의 변화를 볼 수 있으며, 스펙트로그램에서는 시간축과 주파수 축의 변화에 따른 진폭의 차이를 농도 표시 색상으로 차이를 나타낸다.

스펙트로그램은 시간영역에서 STFT(short time Fourier transform)을 통해 신호의 주파수(F_s) 변환을 보여준다. 신호의 sampling 주파수에 의해서 스펙트로그램의 주파수 영역은 $F_s/2$ 로 제한이 된다. 주파수 대역에서의 신호는 강도에 따라서 색깔 변화 차이로 표시한다. 일반적으로 분석하는 신호는 시간에 따라 그 질도 변하고, 그 크기도 변화하는

매우 복잡한 것이다. 다시 말해 신호는 시간에 따라 그 구성 성분의 종류와 양이 변화한다.

스펙트로그램은 시간의 개념 없이 신호의 파형을 구성하고 있는 내용물의 질과 양을 보여주는 스펙트럼과 달리 시간의 축을 덧붙여 주파수와 진폭의 시간에 따른 변화를 보여주는 삼차원 적인 그림이라 할 수 있다.

따라서 스펙트럼은 x 와 y 의 두 축으로 구성되어 있는 반면, 스펙트로그램은 x, y, z의 세 축을 가지고 있다. 따라서 스펙트로그램은 x 축을 시간, y 축을 주파수, z 축을 진폭(강도)로 표시한다.

2.7.4 웨이블릿 변환(Wavelet transform)

결함을 가지고 있는 신호들의 특성은 시간 및 주파수의 국부성을 가지므로 통계적 특성을 모르거나 시간적으로 예측하기 힘든 신호가 발생한다. 그래서 용접 모니터링 분석에서는 비주기적인 과도현상을 해석하기 위해서 웨이블릿 변환을 사용되어지고 있다.[95]

웨이블릿 분석은 신호를 다양한 천이(Translation)와 스케일링(scaling)을 갖는 모 웨이블릿(Mother wavelet)으로 분해하는 것이다. 그러므로 주파수 대역에 따라 서로 다른 분해능을 가지는 윈도우 함수를 제공하며 모함수(mother wavelet)를 Φ 라 하면 웨이블릿 변환 함수 f는 식(2.14) 과 같다.

$$f * \Phi_s(x) = \frac{1}{s} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Phi\left(\frac{x-t}{s}\right) dt \quad (2.14)$$

s : 스케일링 변수

t : 천이변수

Φ : 모함수(mother wavelet)

여기서 $s = 2^j$ (j는정수)라 하면 웨이블릿 변환은 식(2.15), (2.16)과 같이 계산할 수 있다.

$$S_{2^j}f(n) = \sum_{k \in Z} h_k S_{2^{j-1}}f(n - 2^{j-1}k) \quad (2.15)$$

$$W_{2^j}f(n) = \sum_{k \in Z} g_k S_{2^{j-1}}f(n - 2^{j-1}k) \quad (2.16)$$

g_k 는 웨이블릿 계수와 관련된 고대역(high pass)필터 계수이고, h_k 는 스케일 함수 계수와 관련된 저대역(Low pass)필터 계수이다. 각 필터를 지나 그 길이가 반으로 감소한 신호를 다음 스케일 레벨에서 반복하여 변환시킨다.

이러한 장점으로 신호를 분해할 수 있고 분해된 신호를 다중 해상도 분석(Multi resolution Analysis)할 수 있다. 또한 간단한 연산을 통해 데이터의 축소가 가능하고 데이터를 쉽게 복구할 수도 있다.

특정대역의 신호만 통과시키는 BPF는 시간축에서 갑자기 변화하는, 즉 넓은 대역을 차지하는 Non-stationary한 신호의 크기를 감쇠시킨다. 하지만 웨이블릿 필터 방식은 신호의 갑작스런 변화 성분을 낮은 스케일범위의 계수로 변환해두기 때문에 갑작스럽게 변화하는 특성을 가진 신호를 감쇠시키지 않는다.

웨이블릿 모함수는 Haar, Daubechies, Biorthogonal, Coiflets, Symlets, Morlet, Mexicam Hat, Meyer 등 많은 유형들이 있다.[96]

본 실험에서 적용한 모함수는 Haar 웨이블릿이며, 식(2.17), (2.18)는 Haar 웨이블릿 함수를 나타냈다. 그리고 Fig. 2.23는 Haar 웨이블릿의 스케일 함수와 웨이블릿 함수를 나타냈다.

$$\psi(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq 1/2 \\ -1, & 1/2 \leq t \leq 1 \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (2.17)$$

$$\phi(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < 1 \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (2.18)$$

Fig. 2-24 웨이블릿 변환의 결과로 Haar 웨이블릿 함수는 정규직교하는 성질을 가지고 있기 때문에 함수들의 선형조합으로 원래 데이터를 표현할 수 있다. Haar 웨이블릿

은 분석이 용이하고 계수들의 계산이 간단하며, 평균의 변화가 발생하는 이상상황 분석에 탁월한 성능을 보인다.[97][98]

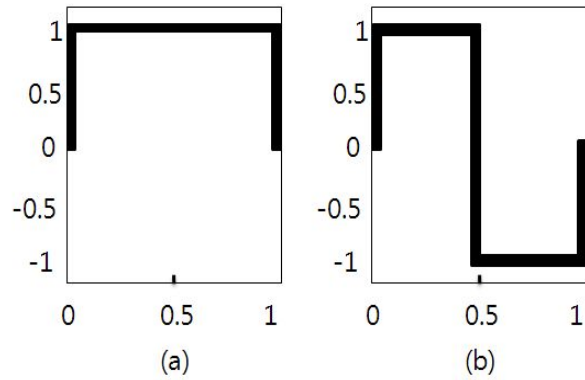


Fig. 2-23 (a) Scaling function of Haar wavelet
(b) Haar wavelet function

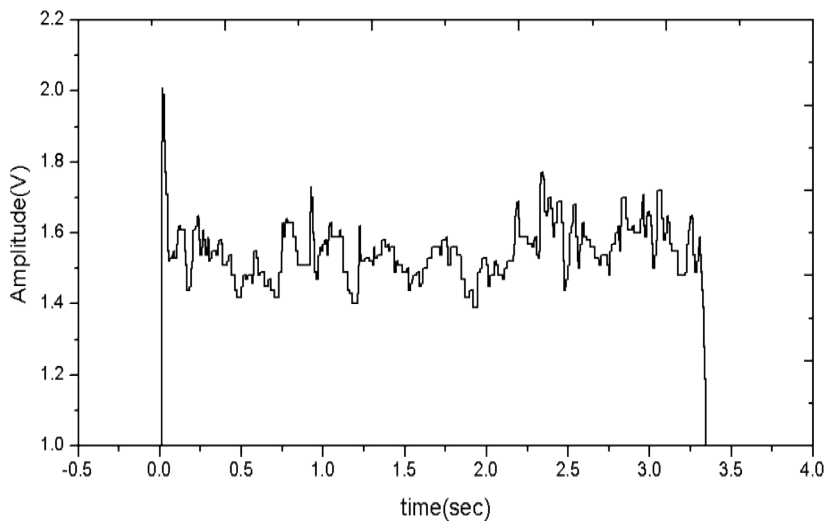


Fig. 2-24 Waveform of Haar wavelet de-noised signal

제 3 장 실험장치 및 방법

3.1 실험장치 및 기기

3.1.1 연속파형 Nd:YAG 레이저

본 실험에서 사용한 레이저는 독일 트럼프사 연속 발진형 CW Nd:YAG 레이저로 파장은 $1.06\mu\text{m}$ 평균출력 2kW를 발진할 수 있는 HAAS 레이저 발진기를 장착한 시스템으로 매우 컴팩트한 구조를 가지고 있다. 레이저 빔은 광섬유를 통하여 전송되며 레이저 로드 직경은 10mm이고 길이는 150mm이다. HAAS 레이저 로드는 플래쉬 램프에 의해 펌핑 되며, 열 발생은 탈이온 된 냉각수에 의해 냉각되어진다.

냉각시스템에서 전달되는 진동과 열 발생에 의한 레이저 정지를 방지하기 위하여 레이저 냉각기 시스템은 레이저와 CNC 머신과 독립적인 공간에 설치하였다. 2kW 레이저는 다단 증폭에 의해 출력이 얻어지며 4개의 공진기로 구성되어 있다. 4단 증폭 공진기의 구조는 Fig. 3-1과 같다.



Fig. 3-1 High laser power is obtained by mounting several cavities in line(Continuous wave Nd:YAG laser)

발진기에 생성된 레이저빔은 직경이 $600\mu\text{m}$ 인 광섬유(Optical fiber)에 의해 전달된다. 광섬유로 전달되는 레이저빔의 초점직경은 0.6mm 이다. 레이저 용접헤드의 광학계는 초점거리 $f = 200\text{mm}$ 이고, 렌즈의 직경 $D = 60\text{mm}$ 인 $F\#$ (f/D)가 3.33인 렌즈를 사용하였다. 레이저빔 발산 각은 $25\text{mm} \cdot \text{mrad}$ 이고, 광케이블에 연결되어 가공하는 공작대는 LASMA 1054이며, 작업대는 지면으로부터 진동을 방지하기 위해 화강암 정반으로 되었다.

레이저 가공 헤드는 겐트리 타입 Rotary축 가공장치로서 LASMA 1054 내부에 장착되어 있으며, x, y, z축의 이송거리는 1000mm , 500mm , 400mm 이다. x축, y축에 대한 위치 정밀도는 $5\mu\text{m}$, z축에 대한 위치 정밀도는 $1\mu\text{m}$, 반복정밀도는 $8\mu\text{m}$ 이다. 레이저 용접 시 표면과 대기 중의 오염 물질 사이의 상호작용을 방지하기 위해서 Ar가스를 45° 각도, 1bar 의 가스압력으로 분사시켰다. 본 연구에 사용된 실험장치는 Fig. 3-2 과 같다.



Fig. 3-2 Laser oscillator and optic head of welding processing

3.1.2 광센서를 이용한 모니터링 시스템

Fig. 3-3 은 본 연구에서 개발한 시스템의 구성은 광학헤드(Optical head), 전자회로 모듈(Electronic module), DAQ(Data Acquisition) 보드로 구성되어 있다.

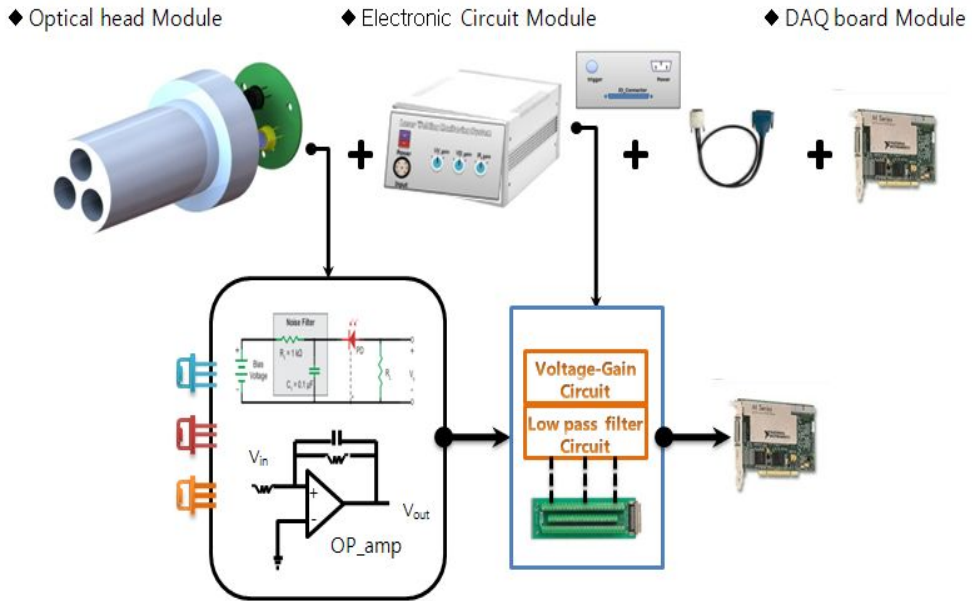


Fig. 3-3 Schematic diagram of laser welding monitoring system

신호 획득을 위한 광학헤드(Optical head) 모듈은 자외선(150~550nm), 적외선(700~1800nm), 가시광선(200~1100nm) 대역을 획득할 수 있는 포토다이오드(Photodiode)를 삽입할 수 있도록 Fig. 3-4에 나타난 것처럼 일체형으로 구성하였다.

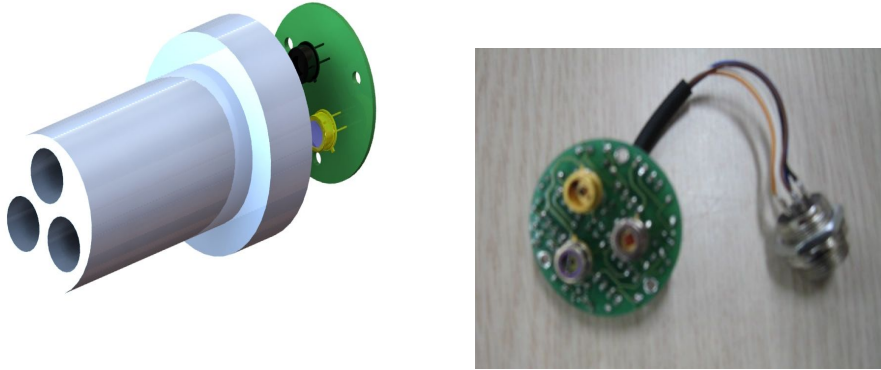


Fig. 3-4 Photo of the optical head and photodiode module

구성된 파장별 포토다이오드의 사양은 Fig. 3-5 나타냈다. 센서의 양극, 음극은 TO-5 타입의 패키지에 자리 잡고 있고, 포토다이오드의 양극은 입사 광 전력파와 파장의 함수이고, 전류를 생산하고 있다. responsivity (λ)는 예상 photo current의 양을 추정하기 위해 responsivity 그래프에서 읽을 수 있다. 이것은 회로 접지에 포토다이오드의 양극에서 부하 저항 (R_L)를 배치하여 전압으로 변환할 수 있고, 출력 전압은 다음 식(3.1)과 같이 얻을 수 있다.

$$V_o = P \times \lambda \times R_L \quad (3.1)$$

아래 Fig. 3-8 나타낸 것처럼 포토다이오드 주파수 대역을 구하기 위해 식(3.2)을 이용하여 대역폭 f_{BW} 및 상승 시간 응답 t_R , 다이오드 커패시턴스 C_j , 그리고 부하 저항 R_L 에서 결정된다.

$$f_{BW} = \frac{1}{2\pi(R_L)C_j}, \quad t_R = \frac{0.35}{f_{BW}} \quad (3.2)$$

Fig. 3-8에서 다이오드 음극에서 회로 접지에 바이어스 전압을 배치하면 다이오드 커패시턴스를 낮출 수 있다.



Specification	Value
Wavelength Range	700 - 1800 nm
Active Area	Ø1.0 mm (0.79 mm ²)
Rise/Fall Time (R _L =50 Ω, 5 V)	7.0 ns Typ, 10 ns Max
Bandwidth (R _L =50 Ω, -3 dB, 5 V)	50 MHz Typ
NEP, Typical (900 nm, 2 V _{bias})	2.5 x 10 ⁻¹⁴ W/Hz ^{1/2}
Dark Current	25 nA Typ. (100 nA Max, 5 V)
Capacitance, Typical	80 pF @ 0 V _{bias} , 40 pF @ -5 V _{bias}
Package	TO-5, 0.36" Can

(a) IR_photodiode



Specification	Value
Wavelength Range	150- 550 nm
Active Area	2.2 mm x 2.2 mm (4.8 mm ²)
Rise/Fall Time (R _L =50 Ω, 5 V)	1 ns/140 ns
Bandwidth (R _L =50 Ω, 5 V)	2.5 MHz
NEP (440 nm, 5 V)	1.0 x 10 ⁻¹⁴ W/Hz ^{1/2}
Dark Current, Max (1 V)	40 nA
Capacitance, Max (1 V)	n/a
Package	TO-5

(b) UV_photodiode



Specification	Value
Wavelength Range	200 - 1100 nm
Active Area	Ø1.02 mm (0.82 mm ²)
Rise/Fall Time (R _L =50 Ω, 20 V)	<1 ns
Bandwidth (R _L =50 Ω, -3 dB, 5 V)	350 MHz Min
NEP (900 nm, 20 V)	5.0 x 10 ⁻¹⁴ W/Hz ^{1/2}
Dark Current, Max (20 V)	2.5 nA
Capacitance, Typical	10 pF @ 0 V 2 pF @ -10 V
Package	TO-5, 0.36" can

(c) VIS_photodiode

Fig. 3-5 Specification of IR, UV and VIS photodiode

레이저 용접 중 발생하는 스패터로 인한 광학계를 보호하기 위해 광학헤드 모듈 앞단에 윈도우(Windows)를 부착하였고 Fig. 3-6는 집속효율을 높이기 위해 Optisworks 프로그램으로 광선추적(Ray tracing)을 실시하여 최적의 조건과 광 집속효율을 높이는 시

물레이션 결과에 따라 초점거리가 50mm인 Bi-convex 렌즈(Lens)를 사용하였다.

Fig. 3-7는 레이저 용접과정 중 발생하는 스펙트럼 분석을 통해 광학 부품을 설계하였다. 파장별 신호를 획득하기 위해서 다층 유전체(Dielectric) 코팅으로 95%의 가시광선을 반사하고 90%이상 적외선 파장을 투과한 Cold Mirror와 가시광선영역에서 90%의 이상의 투과율을 가지며 95%이상 적외선 파장을 반사한 Hot Mirror를 사용하였다. 또한, 신호의 광량(Quantity of light)을 조절하기 위해서 ND 필터(Neutral Density Filter)를 삽입하였다.

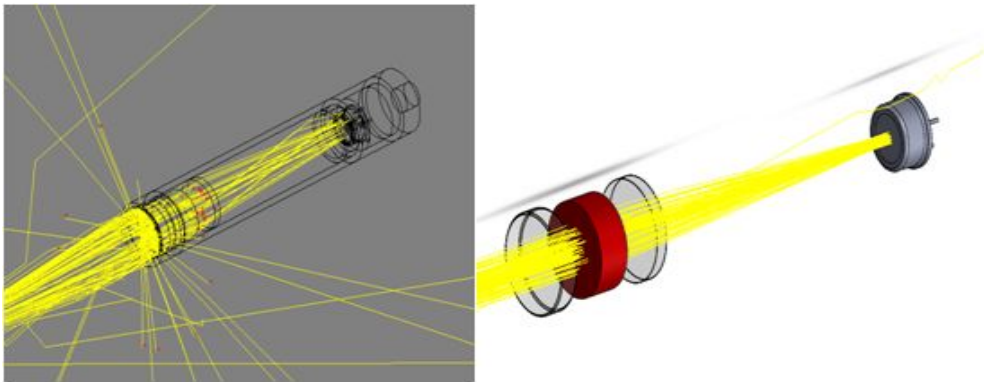


Fig. 3-6 Optical ray tracing simulation

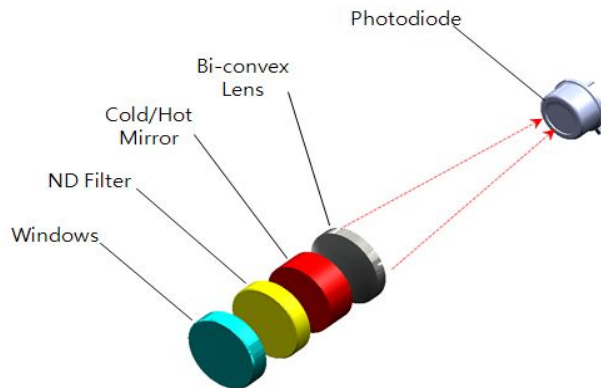


Fig. 3-7 Diagram of the optical head module

레이저 용접을 하면서 각각의 파장대역별 센서에서 획득된 신호들은 내·외부 환경에 따라 막대한 영향을 끼치므로 잡음(noise)을 제거하기 위해 광학모듈과 접지하였고, Fig. 3-8은 플라즈마 신호를 증폭함에 있어서 나타나는 60Hz 전원 잡음제거를 위하여 노이즈 필터(Noise filter)를 사용하였다. 노이즈 필터 설계는 역방향 바이어스의 응용으로 크게 반응 속도와 디바이스의 선형을 개선할 수 있다. 사용하는 영역 폭을 증가하며, 결과적으로 접합 저항 용량에 감소하게 한다. 그래서 신호가 들어오지 않는 경우에는 노이즈가 증가하는 현상을 나타낸다.

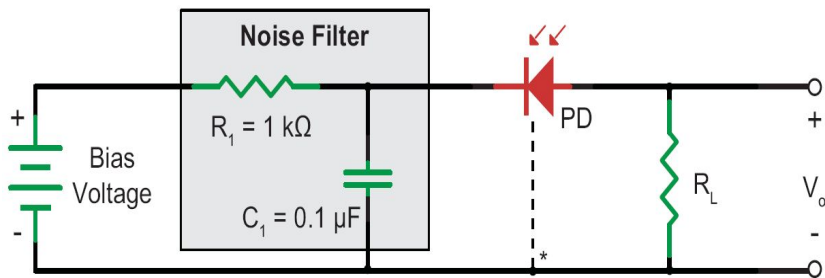


Fig. 3-8 Recommend circuit diagram

Fig. 3-9와 Fig. 3-10는 전자회로 모듈 시스템을 나타냈다. 3개의 가변저항 IR, UV, VIS 신호들을 조절할 수 있도록 하였으며, 증폭된 신호는 1차 LC 필터회로(Inductor Capacitor filter Circuit)로 처리하여 신호 변환장치인 DAQ(Data acquisition)보드(Board)를 사용하였다.

Fig. 3-11의 통합회로는 mA단위의 신호를 증폭하기 때문에 잡음들도 같이 증폭되어 신호에 큰 영향을 줄 수 있다. 따라서 이런 잡음을 제거하기 위한 필터를 구성하였으며 포토다이오드의 전류신호를 전압으로 변환 증폭하기 위한 증폭회로를 구성하였다. 필터는 여과기라는 의미로서 입력신호 중에서 특정의 주파수대역을 통과시키고 나머지 주파수대역의 신호를 감쇄시켜 제거하는 역할을 하는 회로이다. 노이즈나 불필요한 성분을 접지로 유도하거나 신호라인을 따라 침입하는 노이즈 제거에 사용되는 필터는 신호라인용 필터라고 부른다. 커패시터 단품으로도 저주파성분을 감쇄시키고, 인덕터

단품으로도 고주파 성분을 감쇄시킬 수 있다. 그러나 인덕터와 컨덴서를 조합함으로써 어떤 주파수(컷오프)에서 급격하게 감쇄특성이 있는 필터를 만들 수 있다. 이것을 LC(Inductor capacitor)필터라고 한다. 높은 각도의 센서는 시편의 표면위의 플라즈마의 광강도를 검출하고 낮은 각도의 광센서는 키홀 내부 및 시편 표면위의 플라즈마의 강도를 함께 검출하게 된다.

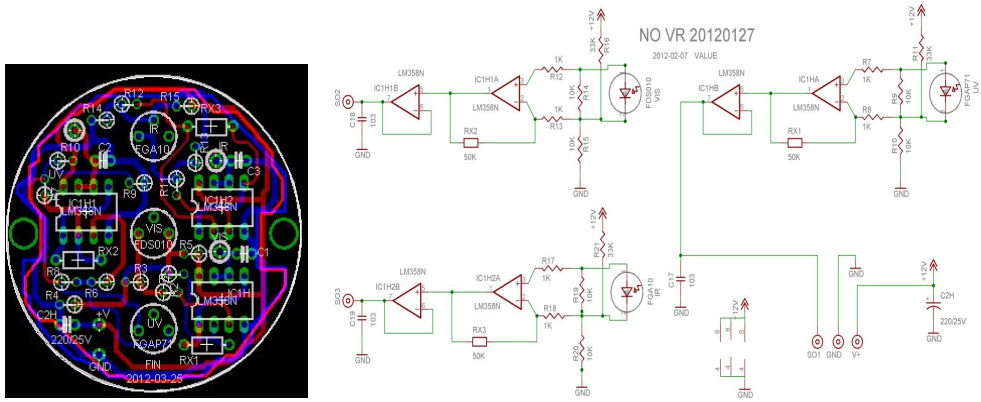


Fig. 3-9 Diagram of photodiode amplification circuit

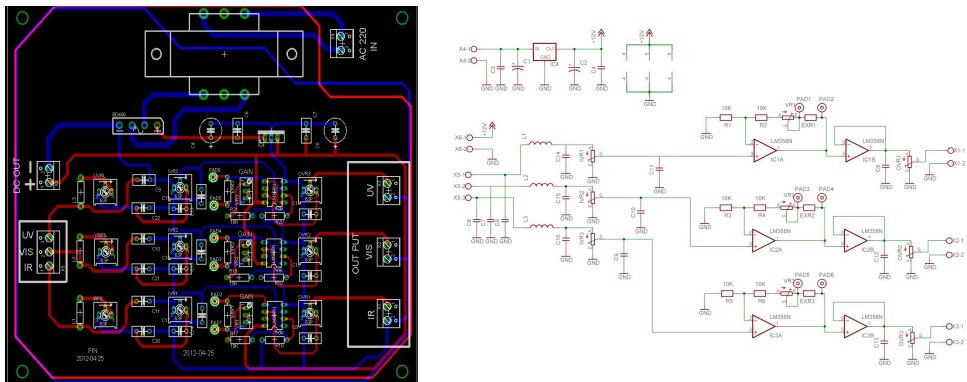


Fig. 3-10 Diagram of electronic module amplification circuit



Fig. 3-11 Integrated monitoring system

Fig. 3-12에 나타난 DAQ보드 분해능은 16 bit이고, 샘플링 속도는 초당 10,000개의 데이터를 받도록 설정하여 분석 하였다.

Fig. 3-13은 광학헤드 모듈에서 획득된 신호를 전자회로 모듈로 처리된 1차 증폭된 신호를 DAQ 보드로 받아들여 PC와 인터페이스 프로그램을 운영하여 결과를 나타내는 프로그램이다.

레이저 용접 신호를 평가하기 위해서 본 연구에서는 National Instrument사의 Labview 라는 프로그래밍 소프트웨어를 사용하였다. Labview는 문자대신 여러 개의 VI(Virtual Instrument)를 사용하여 보다 쉽게 사용자가 원하는 프로그램을 개발할 수 있는 환경을 제공하는 소프트웨어로 Front panel과 block diagram의 두 부분으로 구성되어 있다.

Front panel 에서는 Tool palette과 control palette을 이용하여 결과 표시부를 구성하고 block diagram에서는 Function palette과 Sub VI를 이용하여 프로그램을 구성하였다. 프로그램을 이용하여 2차 전처리를 위해 디지털 필터, 주파수영역(FFT)분석, 웨이블릿 변환 등 실시간으로 데이터 처리 및 저장하는 기능을 가지고 있다.



Fig. 3-12 Photo of high speed multifunction data acquisition

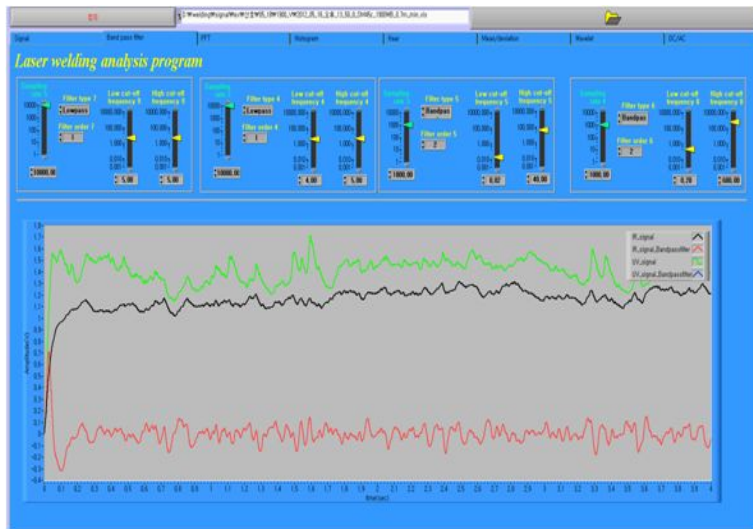


Fig. 3-13 Laser welding monitoring analysis interface program in computer

3.2 실험재료 및 시편제작

S45C(=SM45C)는 구조용 탄소강으로 주로 사용하는 분야는 크랭크샤프트, 스플라인 샤프트, 커플링, 동력전달축 등에 쓰인다. 탄소가 0.42%에서 0.48%로 되어 있는데 약간씩의 오차치가 있기는 하지만 0.45%라고 한다. 탄소로는 0.3%이하인 저탄소강, 0.3~0.5%인 중탄소강, 0.6이상인 고탄소강이 있는데 S45C는 중탄소강에 속한다.

일반적인 열간압연강판이나 냉간압연강판과 달리 인장강도 등의 강성이 우수하도록 후처리한 강재이다. 따라서 일반 강판과는 달리 박판, 즉 얇은 판으로는 잘 생산되지 않는다. 일반적으로 1.2mm 이하의 S45C는 시중에서 쉽게 구할 수 없는 것으로 알고 있으며 꼭 필요시에는 직접 면 가공을 하여 두께를 줄여서 사용하고 있다. 대량으로 필요시 특수 주문을 해 사용해야 한다.

일반 기계 구조용 탄소강은 탄소이외에 Mn, Si, P, S 등이 함유되어 있는데 강의 성질 조정은 주로 탄소량에 의해 조절된다. 일반적으로 탄소강은 탄소량이 증가됨에 따라 경도, 강도가 증가하고, 반면에 연신율, 단면 수축률은 감소된다. S40C~S58C와 같은 기계구조용 중탄소강은 냉간 가공성, 용접성은 약간 취약하지만, 고주파 담금질에 의해 표면경화 처리하면 피로강도가 높고, 또 마모에 강한 기계부품으로 사용할 수 있기 때문에 그 용도가 광범위하며 실제로 사용량도 많다.

기계구조용 중탄소강은 저탄소강에 비해 탄소함유량이 많아 용접 영향부의 열화에 따라 각종 기계적, 금속학적 특성 저하와 함께 용접부위에서 균열과 기공이 발생하고, 급랭경화현상이 나타나는 특성이 있다. 그러므로 제조라인의 다 목적화를 실현하기 위하여 S45C를 가공할 경우 소재가 가지고 있는 고유한 성질을 상실하지 않는 용접공정을 도입하여야 할 필요가 있다.

이와 같은 이유로 본 실험에는 S45C를 선택했고 시편에 대한 화학성분 및 물리적 특성을 Fe과 Ni을 비교하여 Table 3-1, 2, 3 나타냈다. 여기에서 Fe과 Ni을 비교한 이유는 S45C시편 표면을 Ni로 코팅하여 용접했을 때 특성을 분석하고자 했기 때문이다.

Table 3-1 Chemical compositions of specimens (%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
S45C	0.45	0.194	0.702	0.02	0.01	0.02	0.01	0.008

Table 3-2 Physical properties of the material

S45C	Specific gravity (g/cm ³)	Tensile strength (MPa)	Melting point (°C)	Emissivity
	7.84	≥646.8	1450	15%
	Thermal conductivity (cal/cm·sec·°C)		Expansion coefficient(×10 ⁻⁶)	Specific resistance(-cm)
	0.106		11.3	20

Table 3-3 Thermophysical properties of different metals

Thermophysical parameter	Fe	Ni
Melting point, T _m (°C)	1535	1453
Boiling point, T _b (°C)	2750	2732
Density (10 ³ kg m ⁻³)	6.9	8.0
Vapor pressure @ T _m (Pa)	22	237
Viscosity @ T _m (mPa)	5.4	7
Surface tension @ T _m (N/m)	1.87	1.7
Thermal conductivity of solid @ T _m (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	4.1	5.25
Thermal diffusivity of solid @ T _m (cm ⁻¹ s ⁻¹)	0.063	0.10
Absorptivity@ T _m (%)	36@300K	6.9@150K

3.3 실험방법

본 연구에서 보호가스는 플라즈마 영향을 상쇄시키는 아르곤(Ar)을 사용하였고, 유량과 분사노즐의 입사각은 각각 15ℓ/min 와 45°로 고정하였다. Fig. 3-14은 용접상태를 실시간 모니터링하기 위해 레이저 용접기에 시스템을 개발하여 부착한 사진을 나타내고 있다.

Fig. 3-15에 나타 낸 것처럼 레이저 용접 모니터링 시스템은 시편 표면을 기준으로 45°로 50mm 높이에 설치하여 신호를 획득하여 노이즈 필터와 증폭회로, 로우패스 필터(Low pass filter) 회로로 처리한 후, DAQ 보드로 초당 10,000개 샘플링 속도로 연산하여 프로그램으로 분석하였다.

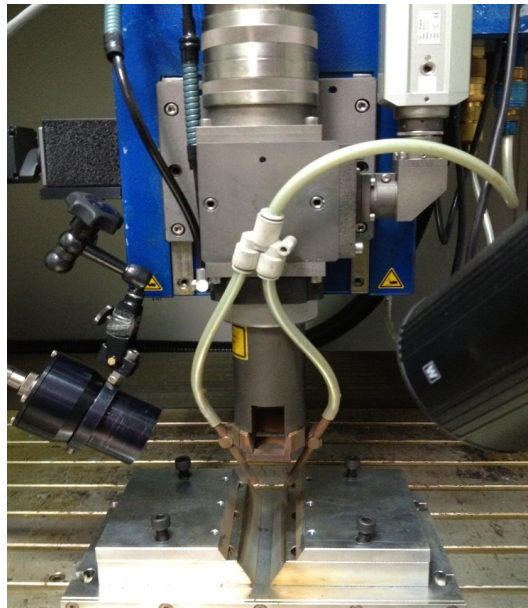


Fig. 3-14 Measurement set up of signals in Nd:YAG laser welding

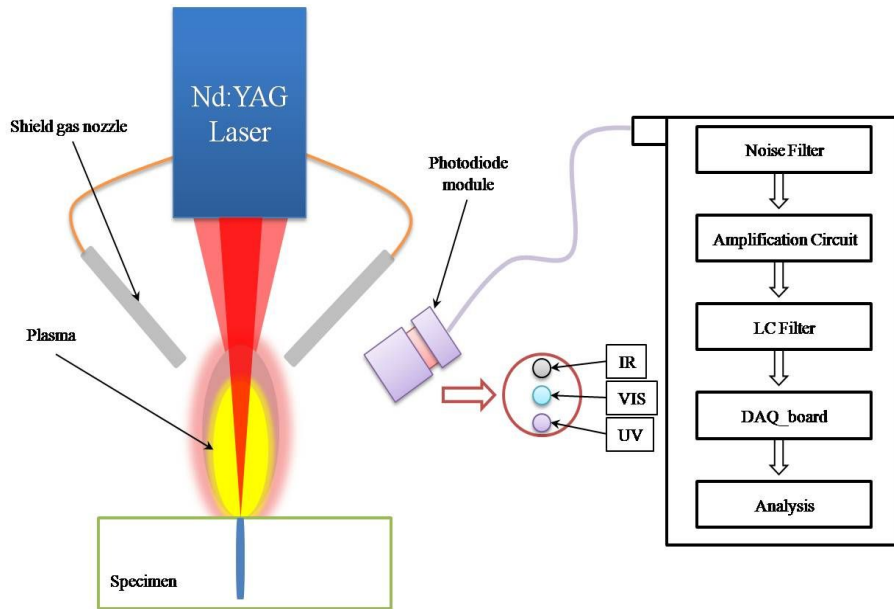


Fig. 3-15 Experimental set-up of laser welding monitoring systems

본 실험에서는 용접공정 변수는 레이저 출력, 초점위치, 용접속도를 변화시키면서 실험하였다. 레이저 용접할 때 실시간으로 용접상태를 모니터링 하는 방법으로 S45C강을 비드온플레이트(Bead-on-plate: BOP)용접하면서 관찰되는 플라즈마 방사신호를 검출하여 비교하였다.

실험에 있어서 용접공정은 Table 3-4에 나타난 것과 같이 레이저 출력은 1200~2000W까지 변화를 시켰고, 초점위치는 -2~+2, 용접속도는 1900W에서 0.5~3m/min로 변화시키면서 실험하였다. 시편의 크기는 100×60×3.2t 제작하였다. Fig. 3-16에 나타난 것처럼 니켈 도금의 유무에 따른 광신호의 특성과 상관관계를 비교하기 위해서 니켈 도금한 S45C를 용접공정별 플라즈마 방사신호 특성을 비교하기 위해서 Table 3-4와 같은 방법으로 실험하였다.

Table 3-4 Parameter of bop welding

	Bead-on-plate (BOP)
Laser power(W)	1200W, 1400W, 1600W, 1800W, 1900W, 2000W
Travel speed(v)	0.5 ~ 3.0m/min
Focal position(z)	-2, -1, 0, 1, 2(focal length : 200mm)
Shielding gas	Argon, 15 ℓ /min

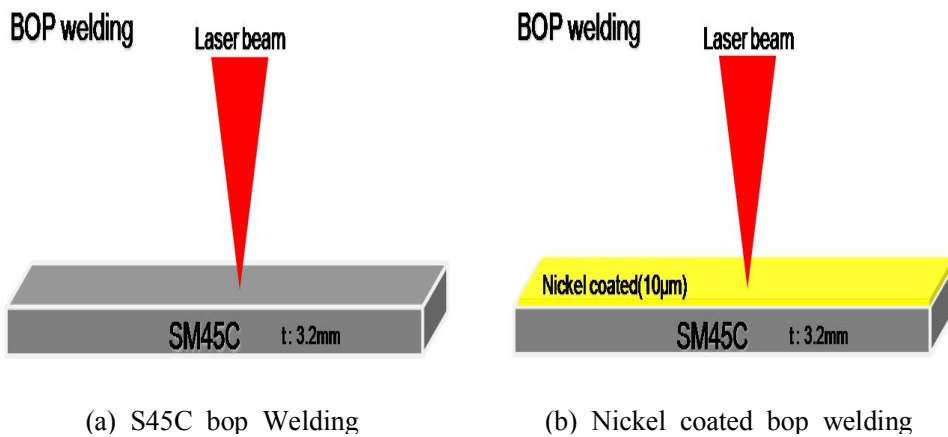


Fig. 3-16 Schematic diagram of bop welding

본 실험에서 제작한 모니터링 시스템의 신뢰성을 검증하기 위해 시편표면에 임으로 결함을 가공하여 레이저빔이 시편에 조사할 할 때 방사신호와 상관관계를 분석하여 시스템의 신뢰성을 확보하였다. Fig. 3-17에 나타난 것처럼 S45C 재질에 두께 3.2mm 강판 표면에 임으로 구멍을 가공했다. 가공한 구멍크기는 $\varnothing 1\text{mm}$ 로 하여 깊이를 각각 1mm, 1.5mm, 2mm, 3.2mm로 관통하는 시편을 제작하였으며, 용접조건은 레이저 출력 1900W에 속도 1m/min, 용접길이 50mm로 실험하였다. 임으로 결함을 가공한 시편을 BOP 용접할 때 레이저빔의 초점은 시편 표면에 위치하고 용접을 하였다.

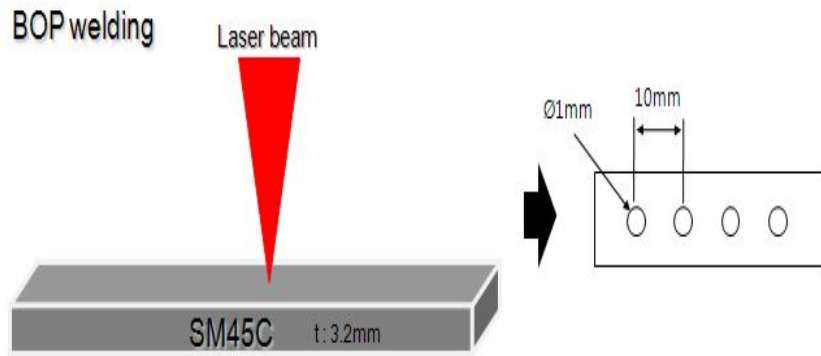


Fig. 3-17 Layout of the bop welding plate

3.4 실험 분석 방법

레이저용접 후 각 시편의 용접단면 비드 모양과 단면의 조직을 관찰하기 위해 와이어 커팅으로 용접시편을 절단하고, 채취된 시료를 **Photo 3-1**에서처럼 핫 마운팅(Hot mounting) 작업을 통해 몰딩(Molding)처리후 **Photo 3-2**에서처럼 자동연마기(표면연마: 1 μm)로 연마 및 폴리싱 작업후 5% 나이탈(Nital) 용액 (5% 질산 + 95% 메틸알콜)을 사용하여 에칭(Etching)하였다. 채취된 시료를 사포로 연마 및 폴리싱 후 5% 나이탈(Nital) 용액 (5% 질산 + 95% 메틸알콜)을 사용하여 에칭 하였다.

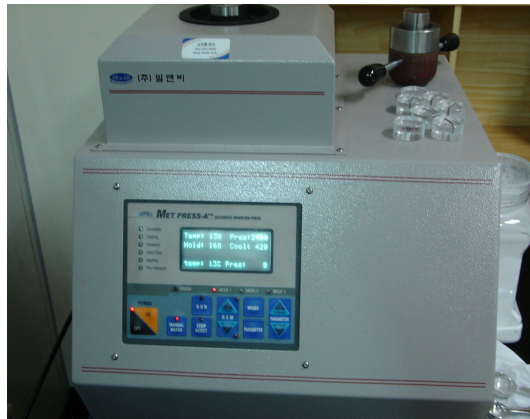


Photo 3-1 Hot mounting press



Photo 3-2 Automatic grinder/polisher

Photo 3-3에서 보는 바와 같이 광학현미경(Olympus)은 최소배율 $\times 25$ 에서 최대배율 $\times 500$ 을 사용하여 용접부 단면을 관찰하였다. 용접부 및 열영향부의 금속조직을 관찰하기 위해 전자현미경(FESEM : Field Emission Scanning Electron Microscope)분석과 EDS(Energy Dispersive X-ray Spectrometer)분석방법(Line scan, spot, area)을 실시하였다.

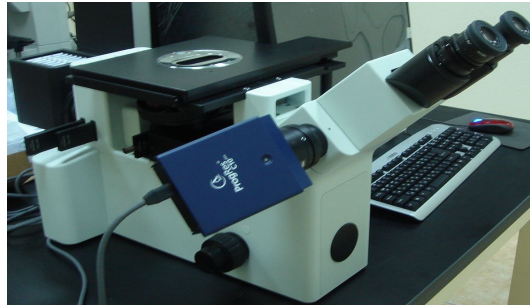


Photo 3-3 Metallurgical microscope

Photo 3-4은 레이저용접 실시간 모니터링을 위해 제작한 모니터링 시스템의 신호분석의 신뢰성을 검증하기 위해 비파괴 검사 장치인 3차원 X-ray CT를 나타내고 있다. 이 측정 장비는 산업용 Micro CT 장비(Model: QRIX-TVX- IMT 160CT)로 용접샘플에 x-ray를 조사하여 용접부의 단층촬영으로 용접부의 기공 및 결함의 존재 유무를 확인할 수 있다.



Photo 3-4 Micro X-Ray CT

제 4 장 실험결과 및 고찰

4.1 레이저 출력에 따른 방사신호 특성

레이저 출력을 변화시켜 비드온플레이트(Bead-on-plate: BOP)용접하면서 방사하는 발광신호를 중심으로 실시간에 모니터링 하였다. Fig. 4-1, 4-2는 용접속도를 1m/min로 고정한 후 레이저 출력을 1200W~2000W로 변화시키면서 BOP 용접했을 때 발생된 플라즈마 방사신호의 원(Raw)신호를 나타냈다.

Fig. 4-1에서 나타낸 것처럼 UV 초기신호는 레이저빔이 재료의 표면에 조사될 때 재료의 특성에 따라 일부는 흡수되기도 하고 일부는 반사되기도 한다. 재료에 대한 레이저 빔의 반사율과 흡수율은 레이저 빔의 파장, 가공재료의 표면상태 등에 따라 변한다. 레이저빔을 금속표면에 조사하면 고체면의 경면반사에 의해 UV의 초기신호가 크게 나타난 다음 표면의 용융풀이 형성되면서 용융풀의 유체유동의 반사 현상 때문에 난반사가 되면서 반사강도가 감소되었다. 레이저빔의 출력을 증가시키면 금속표면에서 초기의 반사강도가 출력에 비례하여 UV신호가 크게 측정되었다. 이와 같은 현상은 본 연구에서 제작한 모니터링 시스템이 레이저빔의 출력변화에 따라 민감하게 잘 반응하고 있음을 의미한다.

레이저빔이 금속표면에 조사되어 키홀이 형성되면 에너지가 급속하게 흡수되어 금속표면이 용융되기도 하고 더욱 출력이 증가하면 기화된다. 레이저빔을 시편에 조사하면 레이저빔의 중심부 에너지 밀도가 높아 금속증기압이 발생하고, 이 금속증기가 반발하는 압력으로 용융풀이 시편내부로 이동하면서 키홀이 생성되고, 레이저빔이 움직임에 따라 키홀이 이동하므로 키홀 후방의 용융금속이 응고하면서 비드가 형성되어 용접이 이루어진다. 여기서 UV신호는 플라즈마 생성 및 키홀의 거동에서 발생하는 신호이며, 짧고 불규칙적인 특성을 가진다. 반면 IR 신호는 비교적 일정주기를 가지는 신호로 재료의 용융 및 응고과정에서 발생하는 특징을 가진다. 그러므로 IR 신호는 용접 표면 구역의 크기와 용융풀 유동에 따라 달라진다.

Fig. 4-3은 1200W와 2000W 출력별 비교하여 나타냈다. 레이저 출력이 클수록 키홀 및 UV 방사신호가 커지고 높은 온도에서 용융풀의 폭은 넓게 형성되면서 IR 신호도 커진다. 레이저 출력이 커지면 재료에 흡수되는 입열량이 증가하며, 플라즈마 방사강도 증가 때문에 상대적으로 DC 전압이 높게 나타냄을 알 수가 있다.

UV 신호는 키홀의 거동에 의존하는 플라즈마 플라즈마에서 방출되고, IR 신호는 용융풀과 같이 가열된 시편에서 방출된다. 용접 과정 중 용접성을 모니터링하기 위해서는 외부잡음 발생, 키홀의 비 주기성, 용융풀의 유동 현상에 의한 스패터 발생 등으로 인하여 신호들의 특성을 파악하고 분석하는데 많은 어려움을 해결해야 한다.

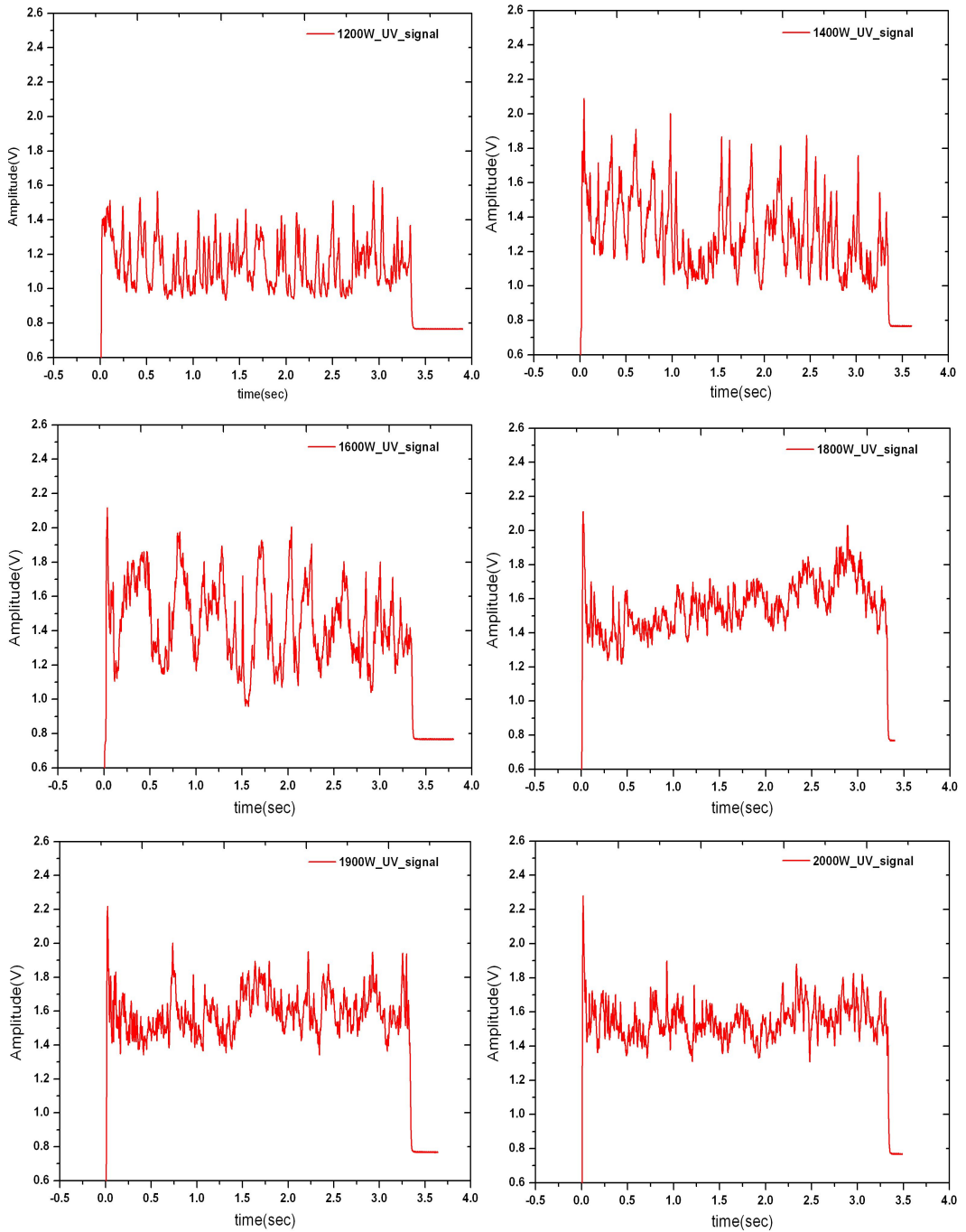


Fig. 4-1 UV signal of the measured signals at 1200~2000W of laser power

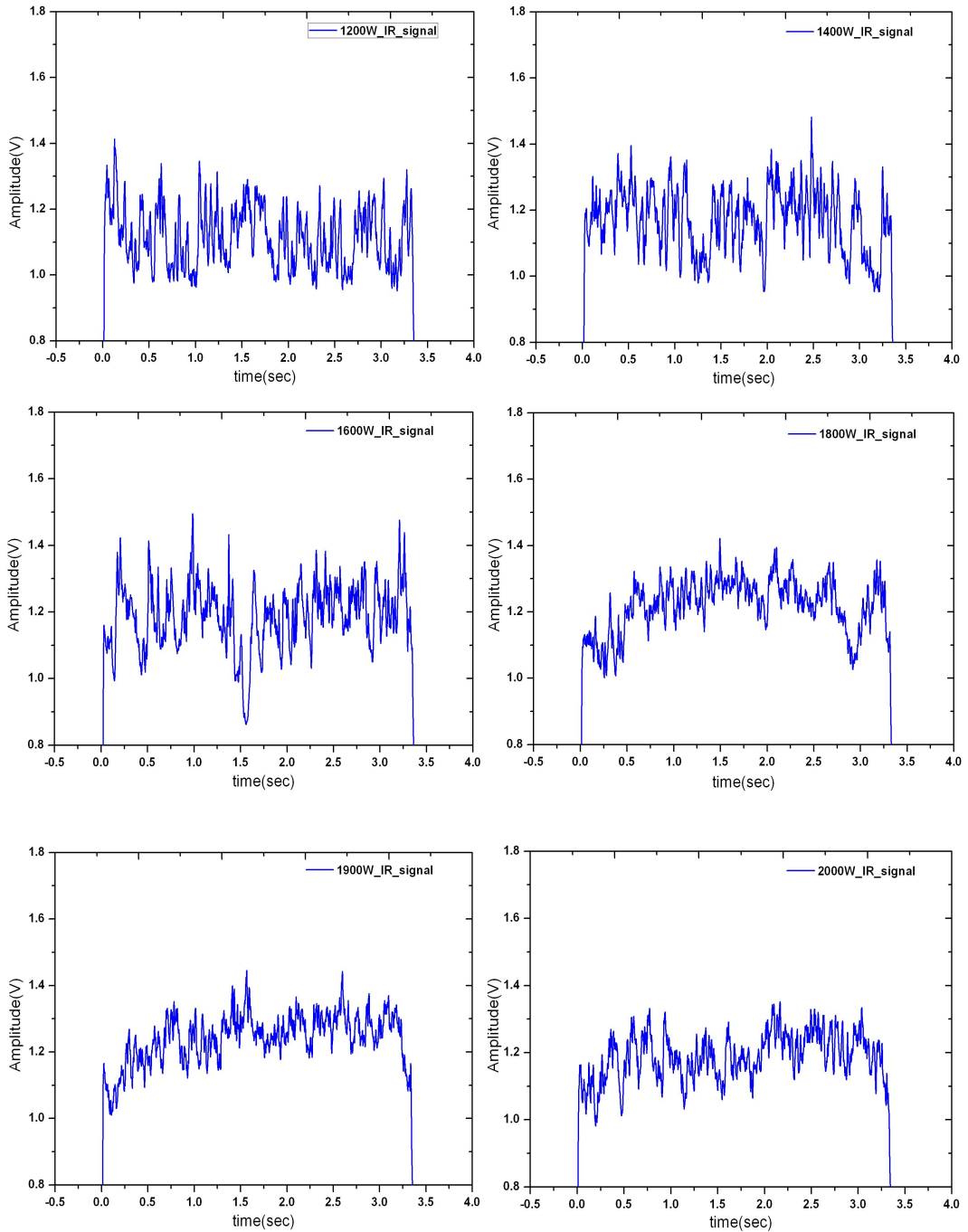


Fig. 4-2 IR signal of the measured signals at 1200~2000W of laser power

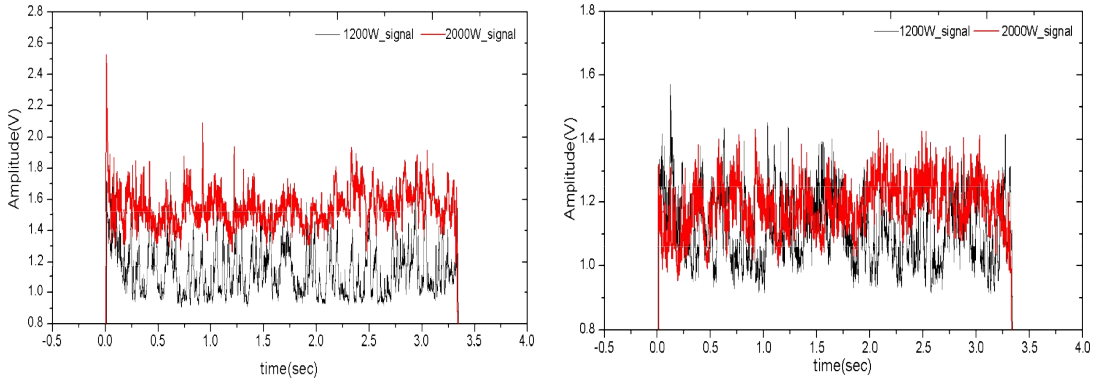


Fig. 4-3 UV and IR signal for laser powers

Fig. 4-4, 4-5 는 Fig. 4-3의 원신호를 분석하기 위해 웨이블릿 필터를 사용해 나타냈다. Fig. 4-3에 나타낸 용접 신호에는 많은 잡음이 포함되어 있다. 앞서 설명한 것처럼 이 특정대역 신호의 갑작스런 변화성분을 감쇠시키지 않기 때문에 상대적으로 원신호를 분석하기 위해 웨이블릿 필터를 적용한 결과이다.

Fig. 4-6에서 레이저 빔의 출력 크기에 따라 UV신호와 IR신호가 양호하게 반응하고 있음을 알 수 있다. UV신호는 레이저 출력의 변화에 매우 민감하게 반응하지만 IR신호는 UV신호에 비해 다소 덜 민감하게 반응한다. 그 이유는 IR 신호는 레이저빔이 시편에 조사되어 용융되고 있을 때 용융온도에 반응하지만 UV신호는 레이저빔의 출력 변화에 따른 강도변화를 나타내기 때문이다. 레이저빔의 출력이 증가할지라도 재료의 특성에 따라 용융이 시작되면 용융온도는 거의 일정하게 반응하기 때문에 IR신호가 UV 신호에 비해 덜 민감하게 반응하고 있어 신호 검출특성을 잘 나타내고 있다.

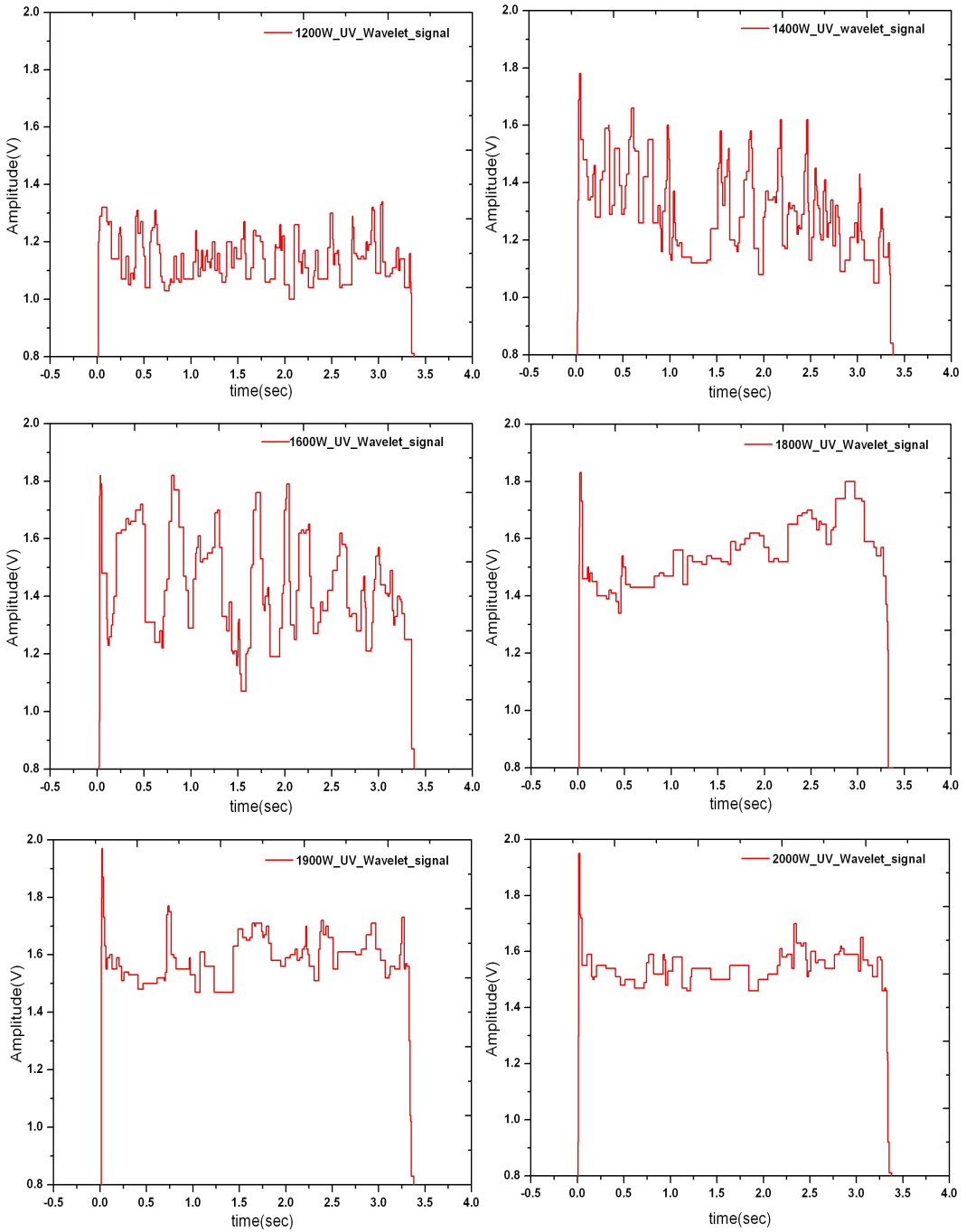


Fig. 4-4 UV wavelet signal of processing at 1200~2000W of laser power

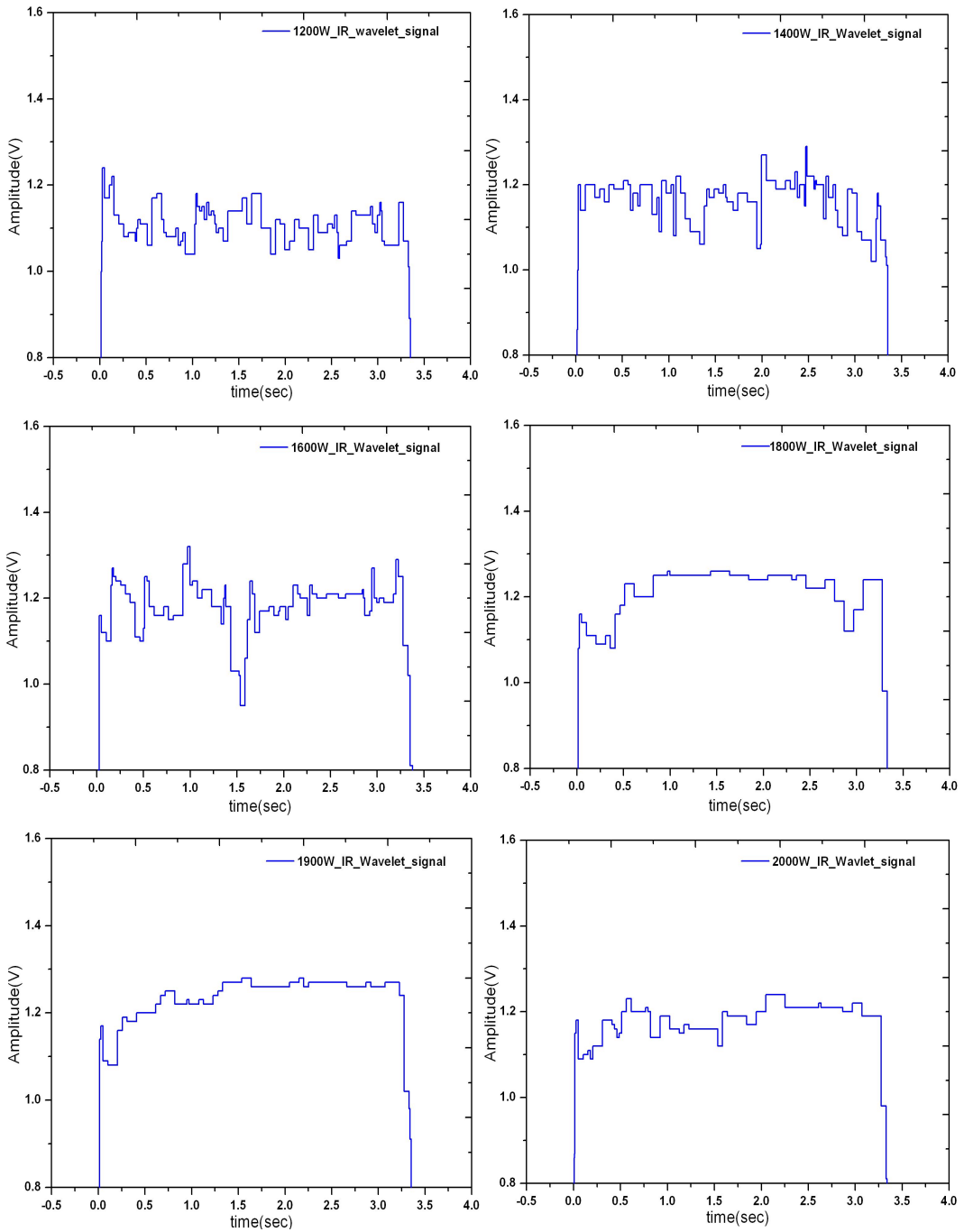


Fig. 4-5 IR wavelet signal of processing at 1200~2000W of laser power

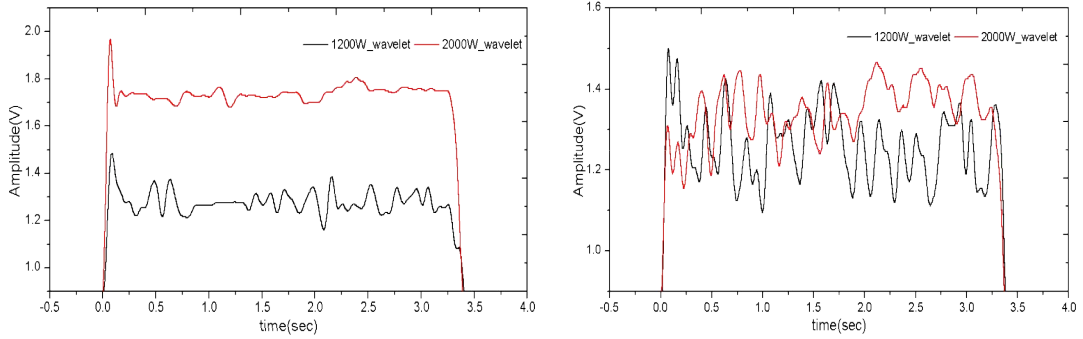


Fig. 4-6 UV and IR wavelet signal for laser powers

레이저출력이 1200W인 경우 낮은 입열량에 의해 키홀 크기가 작게 형성되기 때문에 용융풀이 겹쳐지는 오버랩 되는 것과 비드파형이 균일하지 않는 것은 신호의 진폭과 짧은 주기를 판단하여 알 수 있었다. 이와 반대로 레이저 출력이 2000W로 증가한 경우에는 시편에 인입되는 에너지가 많기 때문에 키홀 크기가 커져 용융풀의 크기가 커져 높은 전압을 나타낸다.

그러므로 레이저 출력이 낮거나 초점거리가 부적합한 경우에는 용융풀의 온도가 낮아지고 레이저빔이 깊이방향으로 전달되는 것보다 표면에서 전도되는 양이 많아 온도 분포의 폭은 넓어지는 현상이 나타나며, 레이저 출력이 커지면 온도가 증가함에 따라 방사광의 강도도 증가한다. 용융부는 깊이가 낮아짐에 따라 용융풀의 질량이 작아지기 때문에 용융풀의 탄성계수와 관계를 나타내는 키홀의 변동주기에서 진폭은 크고 주기가 짧아짐을 알 수가 있었다.

이 결과로 토대로 했을 때 계측된 신호는 용접입열이 충분한 경우 레이저빔의 에너지가 깊이방향으로 진행되면서 안정적으로 키홀과 용융풀을 형성하고 있음을 알 수 있다. 반면에 신호의 요동이 증가하는 경우에는 용접 시편의 표면 오염이나, 부분용입에서 발생하는 용접 조건에서 플라즈마와 키홀의 불안정성에 기인한 급격한 주파수성분의 신호특성을 나타내고 있다.

그래서 시편에 조사된 레이저 출력에 따라 UV와 IR신호의 해석으로 레이저 용접 중 발생하는 내·외부 결함을 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 특히 시편의 특성에 따라 레이저빔과 상호작용이 달라지므로 이 신호를 기준신호로 정하여 결함을 분석하고자

한다.

레이저 용접시 검출된 방사신호의 데이터를 정량적으로 분석하기 위해 식(4.1)을 이용하여 히스토그램(Histogram)의 특징 벡터 검출 하였다.

$$h_i = \sum_{j=0}^{n-1} y_i(x_j) \quad i = 0, 1, 2, \dots, m-1 \quad (4.1)$$

여기서, h_i 는 출력 시퀀스 히스토그램이며, n 은 시퀀스 x 의 원소 개수를 나타낸다.

Fig. 4-7는 레이저 출력 변화에 따른 UV 신호의 히스토그램으로 나타났다. 레이저 출력에 따른 신호의 강도를 나타내는 횡축(x축)은 지정된 구간에서 발생하는 빈도를 나타내고, 종축(y축)은 전압을 표시하여 강도 빈도수를 나타냈다.

레이저 출력이 1200W일 때 발생된 방사신호의 전압은 최대 1볼트(Volt)이었고, 출력이 증가함에 따라 1.5~1.6 V의 전압 빈도수가 가장 많이 나타났다. 실험결과를 나타내는 그림은 레이저 출력은 1200W에서 2000W로 증가 시켰을 때 실험결과 이다.

실험결과를 분석한 완전 용입 조건과 최적 입열량 판단 기준이 1.6V에 근사하기 때문에 1.6V기준으로 전압의 변위차가 적은 범위를 확보해야 용접 품질을 결정짓는 판단 기준이 된다.

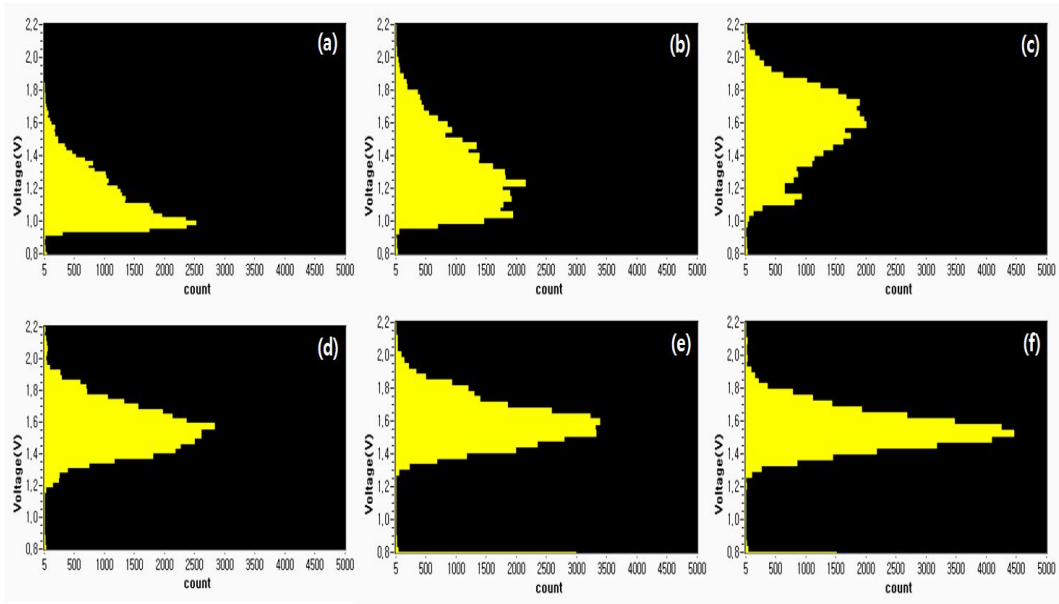


Fig. 4-7 Histogram of UV_signal in laser power;
 (a)1200W, (b)1400W, (c)1600W, (d)1800W, (e)1900W, (f)2000W

Fig. 4-8은 레이저 출력에 따른 플라즈마 방사신호를 DC 평균전압변화량으로 분석한 결과를 나타냈다. 기존의 연구에서는 UV신호를 계측·비교함으로써 완전용입과 부분용입을 판별하였고, 더불어 완전용입시 UV 신호가 감소하였다.

그러나 Fig. 4-6에 나타낸 것처럼 완전용입시 UV신호는 감소되지 않고 증가하는 것을 볼 수 있다. 그리고 레이저 출력이 증가할수록 IR 영역에서의 발광신호가 점진적으로 증가하고 있는 것을 볼 수 있다.

이는 IR 발광신호가 용융풀의 온도크기와 관련이 있기 때문에 입열량이 증가할수록 용입폭과 깊이가 커지는 것으로 판단된다. 레이저빔의 출력이 증가하면서 UV신호가 1600W까지는 급격하게 증가한 후 1600W부터는 UV신호 증가비율이 크지 않다.

레이저빔의 출력이 증가하면서 급격하게 플라즈마가 발생하면서 UV신호가 증가하기 때문을 이때부터는 건전한 용접을 위해서는 보호가스로 플라즈마의 차창효과를 감소시키기 위해 효율적으로 제거해야 함을 의미한다. 반면에서 열선을 나타내는 IR신호는 레이저빔의 출력이 증가할지라도 용융온도는 재료의 특징에 따라 결정되기 때문에 레

이저빔의 출력이 증가할지라도 용융온도가 크게 변화하지 않다가 관통용접이 이루어지면 서 근소하게 용융온도가 감소하였다.

이렇게 관찰된 신호를 DC 평균전압 변화량을 이용해 분석했을 때 약 0.4V의 전압차가 발생할 경우 완전용접이 되었음을 판단하는 기준이 된다.

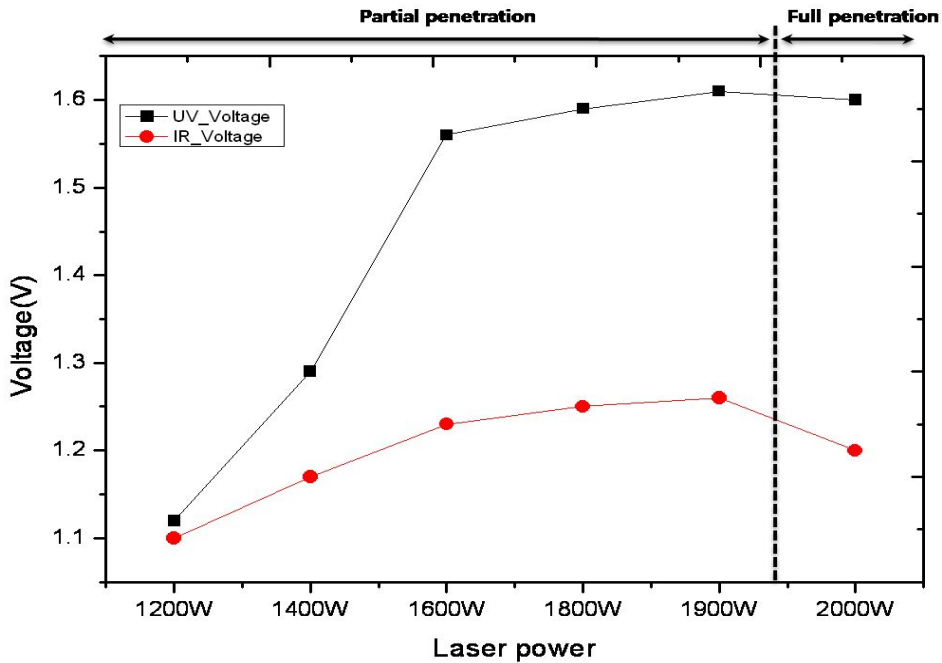


Fig. 4-8 Average DC voltage of signals in laser welding

Fig. 4-9은 레이저 용접 속도에 따른 주파수성분 변화량을 나타내었다. FFT처리에 의한 측정신호의 주파수 성분은 용접속도가 증가함에 따라 주파수도 증가한다. 용접속도가 증가하면 입열량의 감소와 비드폭이 감소함에 따라 키홀의 크기가 작아지고 용융부의 깊이가 얕아지면서 키홀의 변동주기가 짧아지는 것으로 생각된다.

또한 용접속도가 증가하면 입열량의 감소와 비드폭이 감소함에 따라 키홀 크기가 작아지면서 키홀이 요동치는 빈도수가 증가하기 때문에 주파수가 증가한 것으로 사료된다.

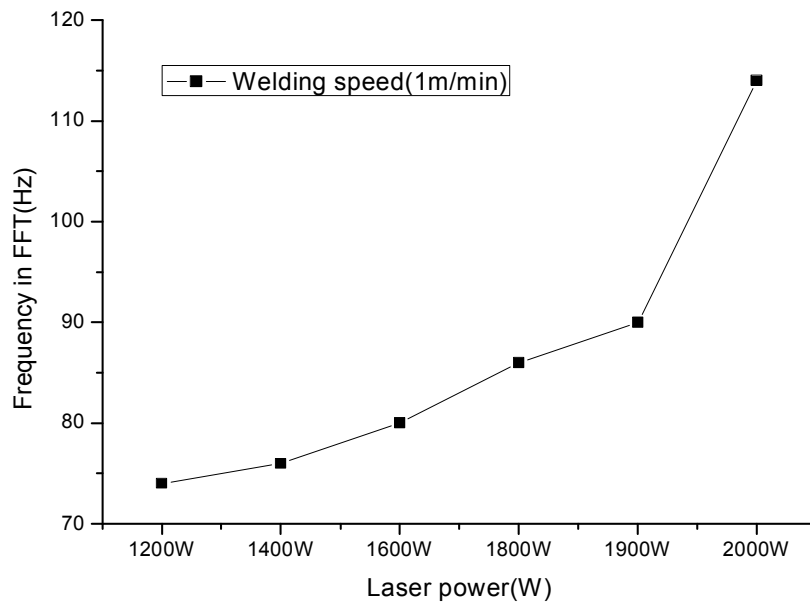


Fig. 4-9 FFT analysis for UV signal in laser welding

4.2 신호분석법에 의한 용입 특성 분석

산업현장에서는 공정 특성상 부분용입(Partial penetration)과 완전용입(Full penetration)을 사용하는 경우가 많다. 일반적으로 레이저출력이 낮거나 용접속도가 빠른 경우 부분용입이 형성된다. 탄소함유량이 많고 용접성이 좋지 않은 소재의 경우 부분용입시 기공이나 균열과 같은 결함을 유발시킬 수 있다. 그리고 소재의 형상 및 두께에 대해 용접조건이 적정한 경우 레이저빔에 의한 용접부 기홀 소재를 관통하여 진행하게 되면 기홀에서 발생된 금속증기가 분출하면서 스파터가 발생하면서 에너지가 관통되어 후면 비드가 형성된다.

용접한 결과는 후면비드와 전면비드의 상태를 근거로 하여 용접품질의 정도를 판단하게 된다. 이와 같은 특성을 활용하여 산업현장에서는 제품의 특성에 따라 부분용입과 완전 용입을 분리해서 용접해야하는 경우가 많다. 앞서 언급한 것처럼 UV신호와 IR신호는 기홀의 거동과 용융풀과의 상호연관성을 지니고 있다. 또한 용입조건에 따라 방사신호의 전압차를 발생하는 현상을 확인했기 때문에 용접중 실시간으로 검출된 원(Raw)신호를 분석하면 용접성을 판단 할 수 있는 중요한 변수로 활용할 수 있을 것으로 생각된다.

본 연구에서는 부분용입과 완전용입 즉 입열량 크기에 따른 플라즈마 방사신호를 단계별로 분석하여 신호를 선명하게 하기 위해 필터 함수를 사용했다.

센서에서 획득된 검출 신호는 버터워스(Butterworth) 필터함수에서 DC성분을 분리하기 위해 저역필터(Low pass filter)를 IR신호에 적용했다. 그리고 AC성분을 분리하기 위해 역 체비 셰프(Inverse Chebyshev)필터에서 밴드패스 필터(Band pass filter)를 적용시켜 고주파대역의 신호를 수식적으로 표현했다. 이 신호를 이용하면은 기홀의 거동을 예측할 수 있기 때문이다.

레이저빔의 출력을 1200W로 하고 레이저빔의 이송속도를 1m/min으로 하여 BOP 용접했을 때 레이저빔과 재료가 상호작용하면서 발광하는 IR신호와 UV신호 및 밴드 패스 필터를 적용했을 경우 신호를 Fig. 4-10과 Fig. 4-11에 나타냈다. 시편에 집속된 레이저빔의 에너지밀도가 10^5W/cm^2 이하로 작용하고 있기 때문에 용접 에너지가 재료에 침투되는 양보다 반사와 재료 내부로의 열전달로 인해 부분용입이 되었을 때 신호를

보여주고 있다. 이를 용접부의 파괴검사 및 육안검사로 관찰했을 때 뒤에 언급하겠지만 용접부의 증횡비(폭/깊이)는 1이하로 나타났다. Fig. 4-10는 레이저출력을 1200W로 하고 레이저빔의 이송속도를 1m/min으로 하여 BOP 용접했을 때 전면비드를 나타내고 있다.

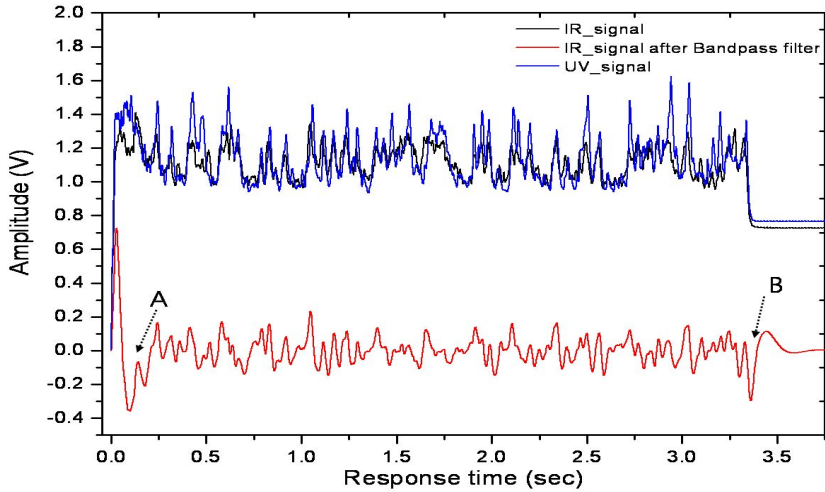


Fig. 4-10 Raw signals and filter signals in laser welding
(Laser power: 1200W, welding speed: 1m/min)



Fig. 4-11 Bead appearance after laser welding
(Laser power: 1200W, welding speed: 1m/min)

Fig. 4-12은 Fig. 4-10과 같은 조건으로 용접할 때 레이저빔의 출력이 1600W일 경우 UV와 IR신호를 나타내고 있다. 그림에서 표시한 A와 B는 용접할 때 시작점과 끝나는 점을 도시 하였다. Fig. 4-10과 Fig. 4-12의 실험결과에서 특이점은 레이저빔의 출력이 증가하면 UV신호와 IR신호가 저출력으로 부분용입이 되었을 경우와 비교해서 분리되고 있다. 이와 같은 현상은 뒤에 설명할 Fig. 4-13에 나타낸 것처럼 출력이 2000W로 더 증가하면 출력이 1600W나 1200W일 때 나타난 IR과 UV 신호의 중첩현상이 없이

완전히 분리된 실험 결과를 관찰할 수 있다.

Fig. 4-10에서 밴드패스 필터를 이용해 IR 신호를 분석했을 때 “A” 지점과 같이 IR 신호가 0.15sec 동안 (-)전압으로 낮아진 후 ± 0.1 전압으로 균일하게 표시되었다. 이는 키홀의 형성과 관련성이 깊은 것으로 판단되고, 이런 전압의 응답시간 폭이 낮은 경우 키홀의 크기가 매우 작아 관통용접보다는 부분용입 용접될 가능성이 많은 요소로 판단 기준이 된다. 그리고 “B” 지점은 키홀이 열린 후 에너지가 단절될 때 키홀 압력과 용융층의 표면장력 그리고 냉각시간에 의해 크레이터로 나타난다.

Fig. 4-12은 레이저 출력을 1600W로 하여 레이저빔을 시편에 조사 했을 때 재료와 상호작용하면서 발광하는 신호를 획득한 키홀과 용융풀의 거동을 나타냈다. 레이저빔의 출력이 1200W에서 1600W로 증가시키면 Fig. 4-10에 나타낸 것처럼 IR신호와 UV신호가 중첩되었다가 IR신호가 분리되는 것이 관찰된다. 이는 레이저출력이 증가하면서 용융풀의 체적이 증가 하면서 흡수된 에너지가 방사되는 파장인 UV신호의 강도가 증가하였기 때문이라고 생각된다.

IR신호와 UV신호가 분리되는 전압차를 기준으로 부분용입 용접의 용입깊이를 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 밴드패스 필터를 적용한 신호를 분석하면 Fig. 4-10보다 주파수의 요동 성분이 감소하고 있는데 이는 용융풀의 질량이 레이저출력의 증가와 함께 커지기 때문으로 요동하는 성분이 감소하는 것으로 사료된다.

레이저빔의 출력을 2000W로 증가 시켰을 때 용접하면서 방사되는 IR신호와 UV신호를 Fig. 4-13에 나타냈다. 레이저출력이 증가하면서 Fig. 4-10과 같이 UV신호와 IR신호가 중첩되어 나타난 것과는 다르게 UV신호와 IR신호가 분리 되었다. 이는 Fig. 4-13에서 설명한 것처럼 용융풀의 체적이 증가하면서 방사하는 에너지를 나타내는 UV신호의 강도가 상대적으로 증가하기 때문에 나타나는 현상으로 판단하고 있다. 마찬가지로 밴드패스 필터를 적용한 신호도 용융풀의 증가와 함께 요동하는 성분이 감소하고 있어 심입용접이 이루어지고 있음을 판단할 수 있다.

Fig. 4-10, Fig. 4-12, Fig. 4-13에 나타낸 것처럼 레이저빔의 출력이 증가할수록 UV신호의 강도가 증가하는 것은 에너지가 큰 UV파장의 강도가 증가하기 때문이다.

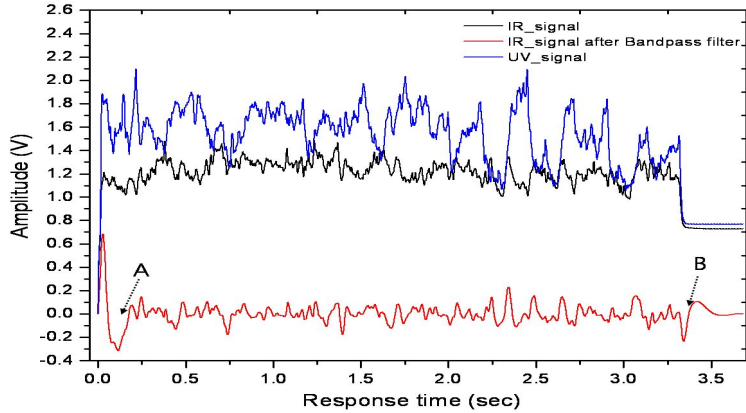


Fig. 4-12 Raw signals and filter signals in laser welding
(Laser power: 1600W, welding speed: 1m/min)

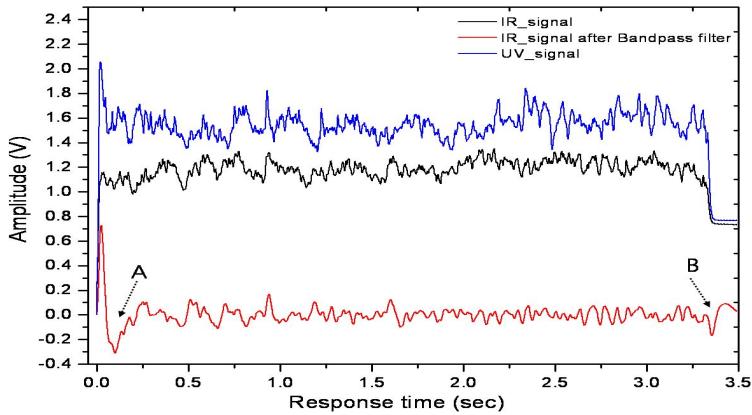


Fig. 4-13 Raw signals and filter signals in laser welding
(Laser power: 2000W, welding speed: 1m/min)

Fig. 4-14는 레이저빔의 출력을 1600W와 2000W로 하여 BOP 용접했을 때 비드용접 후 전면비드와 후면비드의 용접결과를 나타냈다. 레이저빔의 출력이 1200W일 때는 키홀의 깊이가 작아 시편 후면에 레이저빔이 조사된 흔적이 형성되지 않아 도시하지 않았다.

Fig. 4-12과 Fig. 4-13에서 언급한 것처럼 용접 키홀의 깊이가 깊어져 후면비드가 형성되면 UV신호와 IR신호가 분리된 결과와 비교하면 Fig. 4-14의 결과와 일치하고 있

다. IR신호를 밴드패스 필터 적용한 실험결과에서 A와B 부분이 움푹 들어간 이유는 용접할 때 초기 피어싱(Piercing)할 때와 용접 종료 시 일시적으로 레이저빔이 조사되는 시간이 길어 발생하는 과입열에 의한 결과이다.

레이저빔의 이송속도를 1m/min로 고정하고 레이저빔의 출력을 1200W에서 2000W까지 증가시키면서 BOP 용접한 결과를 X-ray로 내부를 측정하여 Fig. 4-15에 나타냈다.

출력 변화에 따라 용접단면 내부에 기공이 발견되고 있다. 레이저빔이 시편표면에 조사되어 충분한 입열량으로 기홀이 발생하면 증발된 금속증기의 압력이 기홀 내에 상승하게 된다.

기홀 내에 상승한 금속증기의 압력은 시편 바닥인 금속의 고체 경계를 뚫지 못하고 위쪽 방향으로 급격하게 상승하면서 스파터와 함께 분출한다. 이때 반발력이 시편의 후면비드까지 침투하면서 용융된 부분이 발생하고, 레이저 빔이 이동하면서 기홀이 열리고 닫히는 과정이 반복되면서 용접이 이루어진다.

중탄소강은 용접 시 탄소와 대기 중의 산소가 반응하여 CO, CO₂의 가스가 형성된다. 이런 반응은 용융금속 내부에서 발생하며, 이 가스는 용융금속의 응고 후 캐비티로 남게 된다. 용접과정에서 생성된 가스의 일부는 용융금속에 용해된 상태로 머물러 있지만 용융금속이 냉각되면 가스에 대한 용해도가 급격히 줄어들면서 기포의 형태로 외부로 배출된다.

용융풀 내부의 가스는 부력에 의해 기홀 내부에서 표면으로 떠오르게 되는데 용융금속의 응고시간과 비교하여 기공의 떠오르는 시간은 기공의 크기에 영향을 받고, 응고 시간보다 배출되는 시간이 길게 되면 기홀 내부에 갇히게 되어 기공을 형성하게 된다.

BOP 용접단면을 나타낸 Fig. 4-12에서 보듯이 레이저 출력이 1600W 이하로 작을 때 부분용입 되어 용접부에 기공이 다량으로 분포하고 있다. 레이저빔의 출력이 작아 충분히 기홀이 형성되지 못하면 레이저빔이 진행하면서 기홀이 매우 빠르게 닫히면서 그림에 나타낸 것처럼 기공이 용접단면 내부에 포획되기 때문이다.

용접단면 내부에 기포가 발생하여 포획되는 현상을 야금학적으로 고찰에 의하면 용접단면에서 기공이 발생하는 이유는 시편을 구성하는 조성 성분 중 탄소의 용융점 2700℃, 망간은 1245℃ 니켈은 1455℃ 이지만 미소량을 차지하고 있는 인은 44.1℃ 황은 110.2℃ 상대적으로 낮아 기화된 금속증기 성분이 배출되지 못하고 기홀이 닫히면

서 포획되었기 때문이다.

이와 반대로 레이저 출력이 1800W 이상일 경우에는 입열량 증가로 키홀이 충분히 형성되어 용융금속의 응고가 지연되면서 발생된 기포가 용융금속 내에서 부유할 수 있는 충분한 시간이 확보되어 기포가 탈출 할 수 있기 때문이다.

입열량이 클수록 용융부의 냉각속도가 감소하여 용융부 내부에서 작은 크기의 기포가 서로 합쳐지거나 외부로 증발하면서 소멸할 수 있는 시간이 충분하기 때문에 기포가 작게 발견되었다고 생각된다.

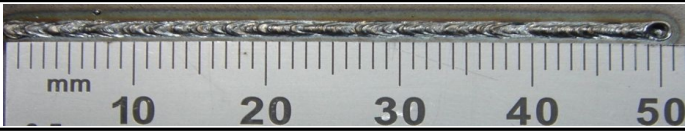




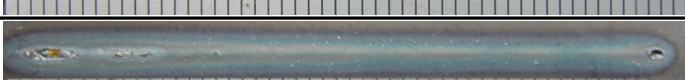
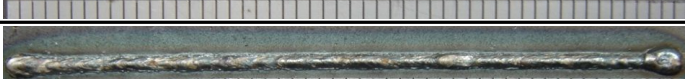
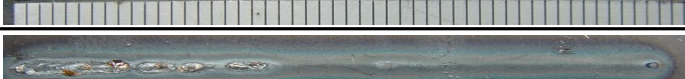


Laser power	Travel speed(v): 1m/min, Focal position: 200mm, Shielding gas: Argon, 15ℓ/min	
1200W	Front_bead	
1400W	Front_bead	
1600W	Front_bead	
	Back_bead	
1800W	Front_bead	
	Back_bead	
1900W	Front_bead	
	Back_bead	
2000W	Front_bead	
	Back_bead	

Fig. 4-14 Variation of the bead shape according to laser powers







Welding speed: 1m/min, Focal position: 0mm, Ar: 15l/min	
Laser Power	Photo X-ray
1200W	
1400W	
1600W	
1800W	
1900W	
2000W	

Fig. 4-15 Photo X-ray of the laser welding side bead

4.3 용접속도에 따른 방사신호 특성

레이저 빔이 재료표면에 흡수된 입열량을 결정하는 변수로 용입폭과 용입깊이가 중요한 변수이다. Fig. 4-16는 레이저 출력을 1900W로하고 레이저 빔의 이송속도의 변화에 대한 종횡비를 나타냈다. 종축은 용접 단면폭(W)에 대한 용입깊이(H)의 비율인 종횡비 (W/H)를 나타내고 횡축은 용접속도이다.

레이저빔의 이송속도가 증가할수록 레이저빔과 재료가 상호작용하는 시간이 짧아져 종횡비도 감소하고 있다. 특히 레이저빔의 이송속도를 1.5m/min 이상으로 증가시키면 레이저빔의 에너지가 재료내부로 침투하는 것보다 금속표면에서 반사되거나 주변으로 열전도 되어 손실되는 양이 많아지기 때문에 용입폭에 비해 용입깊이가 작아 종횡비가 급격하게 감소하였다.

Fig. 4-17는 용접속도변화에 따른 플라즈마 방사신호를 나타냈다. 레이저빔의 이송속도가 느려 레이저빔과 재료가 상호작용하는 시간이 상대적으로 길 때는 IR신호와 UV신호가 분리되었다. 레이저빔의 이송속도가 빨라 레이저빔과 재료가 상호작용하는 시간이 짧은 경우는 IR신호와 UV신호가 중첩되어 나타났다. 이와 같은 실험결과는 Fig. 4-10, Fig. 4-12, Fig. 4-13에서 설명한 내용과 일치하고 있다.

Fig. 4-17(a)는 용접속도가 1.3m/min로 용접했을 때 UV 및 IR신호를 분석했고, IR신호를 역 체비셰프(Inverse Chebyshev)필터에서 밴드패스 필터(Band pass filter)를 적용시켜 고주파대역의 신호를 분석한 결과이다. 그림에서 보듯이 UV와 IR신호의 전압 진폭은 약 0.2V 나타나고, IR 신호의 밴드패스 필터 분석을 관찰했을 때 $\pm 0.1V$ 로 전압 진폭이 매우 작고 균일 하게 측정된 것을 볼 수 있다. 이는 소재표면에 집속된 입열량이 적절하여 키홀의 개폐가 일정하게 나타나는 것 판단된다. X-ray 사진과 같이 용접부 끝단을 제외하면 기공의 검출이 나타나지 않았는데 이와 같은 실험 결과는 Fig. 4-14에서 언급하였다.

Fig. 4-17(b)는 용접속도가 2.5m/min일 때 용접 중 발생하는 플라즈마 방사신호를 관찰한 결과이다. 용접속도가 빠를 경우 재료에 흡수하는 입열이 작아져서 플라즈마 강도는 작아진다. 이는 레이저빔과 상호작용하는 시간이 상대적으로 짧아져 용융풀의 표면적이 줄어들면서 UV와 IR를 방사하는 액체 표면적은 감소하면서 나타나는 현상으로

판단된다. 그러므로 레이저 출력이 감소했을 때 플라즈마 방사신호와 유사하게 UV와 IR신호의 전압 진폭차가 크지 않았다. IR 신호의 밴드패스 필터 분석을 관찰했을 때 약 -0.1V의 전압 진폭을 가지며, 전압 주파수가 빠르게 나타났다.

Fig. 4-15에서 설명한 이유로 X-ray 사진과 같이 용접부 내부에 기공의 다량으로 검출되는 것을 볼 수 있다.

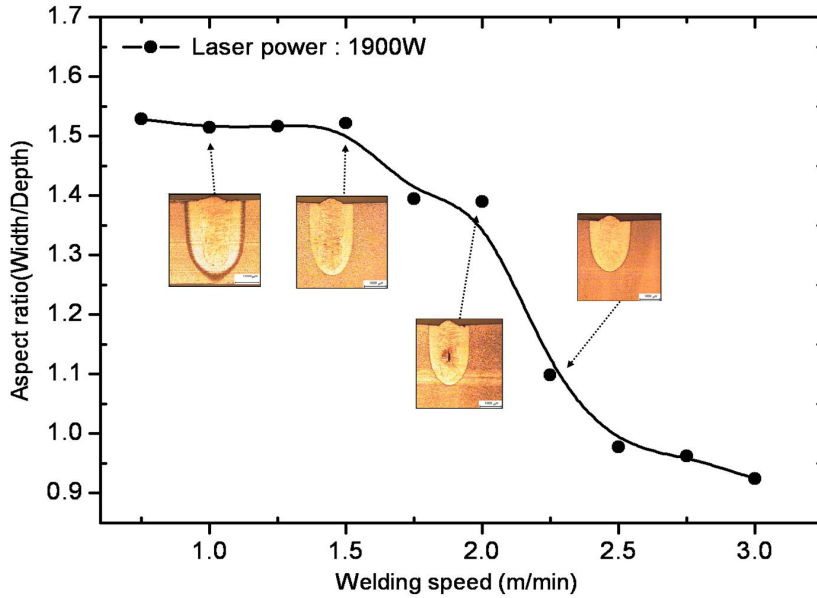
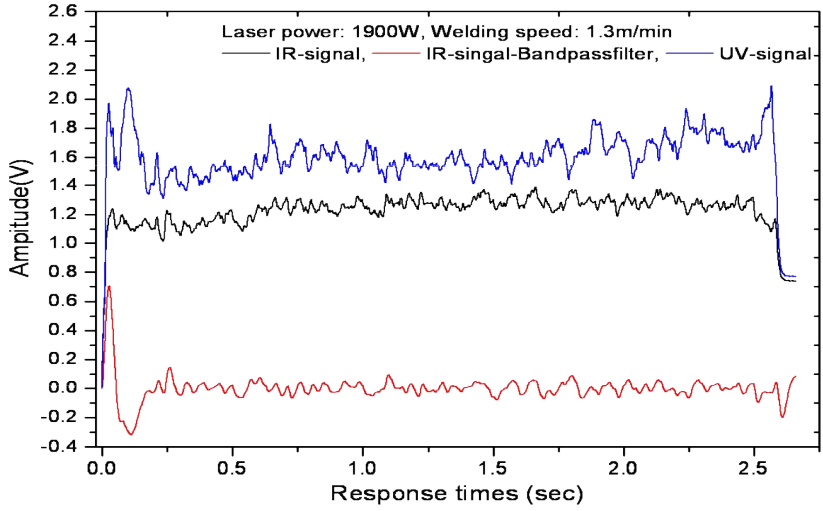
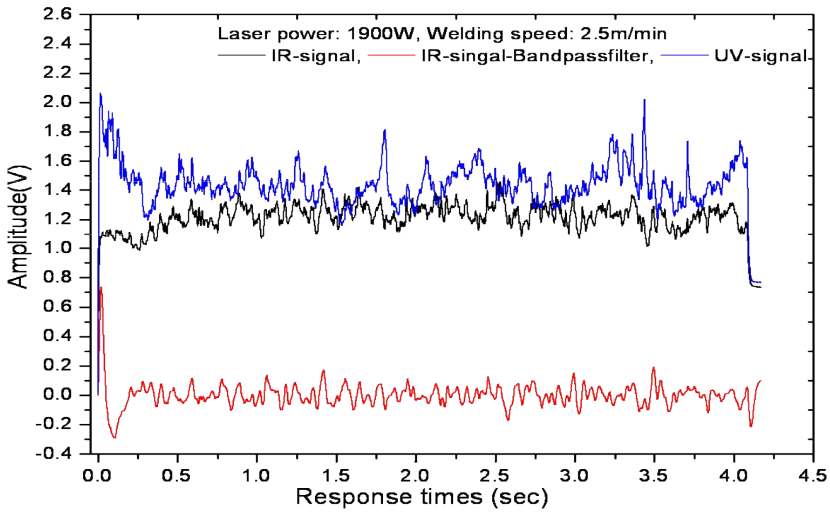


Fig. 4-16 Effect of aspect ratio on welding speeds



(a)



(b)

Fig. 4-17 Comparison with UV and IR signal according to welding speeds

4.4 S45C강판과 니켈코팅강판의 방사신호 및 용접 특성

키홀에 작용하는 힘으로 증발압력 이외에 용융금속의 표면장력에 의한 압력과 정수압 등을 들 수 있다. 벽면에 흡수되는 에너지 분포는 키홀 내부의 깊이와 형상에 따라 크게 달라지며 금속의 용융 및 증발에 영향을 미친다.

용융 금속의 기화에 의한 반발압력(Recoil pressure)은 용융금속을 키홀 외부로 배출하는 역할을 한다. 에너지 밀도가 높아질수록 기화에 의해 배출되는 열량이 증가하고, 키홀의 붕괴는 표면장력에 의한 압력에 의하여 이루어진다.

실험에 사용된 시편(Specimen)은 일반기계구조용강으로서 니켈 도금(Nickel coated)된 S45C강과 도금 되지 않은 S45C강으로 비드용접 실험 시 관찰되는 광신호를 비교 하였다. 그리고 니켈도금의 두께에 따른 용접성 및 광신호를 비교하기 위해 각각 10 μ m 로 도금하여 실험하였다.

Fig. 4-18, 4-19는 비드온 플레이트 용접으로 용접속도와 초점위치를 고정한 후 레이저 출력을 1200W와 2000W로 용접 했을 때 UV 신호와 IR 신호를 비교한 결과이다. 그림에서 보듯이 레이저 출력이 클수록 UV은 커지고 IR 방사신호의 강도가 감소했다. 이런 현상은 레이저 출력이 증가하면 재료에 작용하는 집중된 빔 에너지가 증가해 키홀을 크게 형성하고, 높은 온도의 영향으로 용융풀의 폭을 넓히기 때문이다.

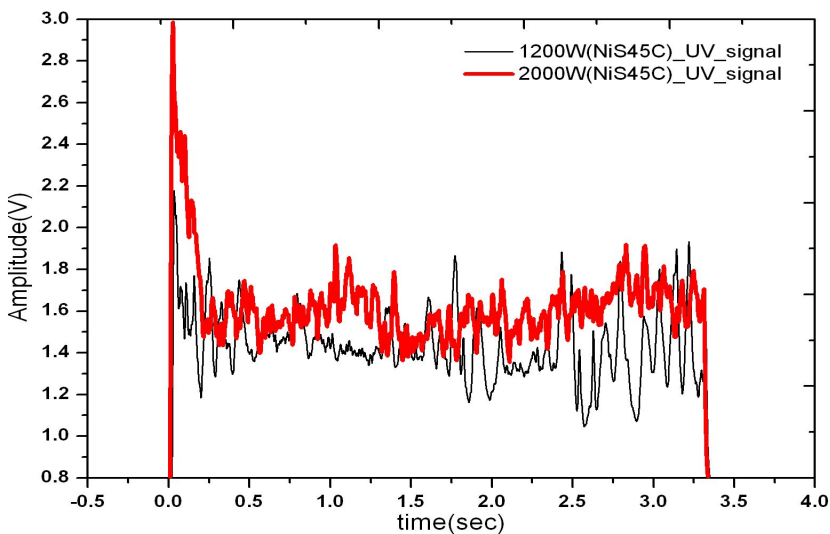


Fig. 4-18(a) UV signalfor laser power(Ni coated S45C)

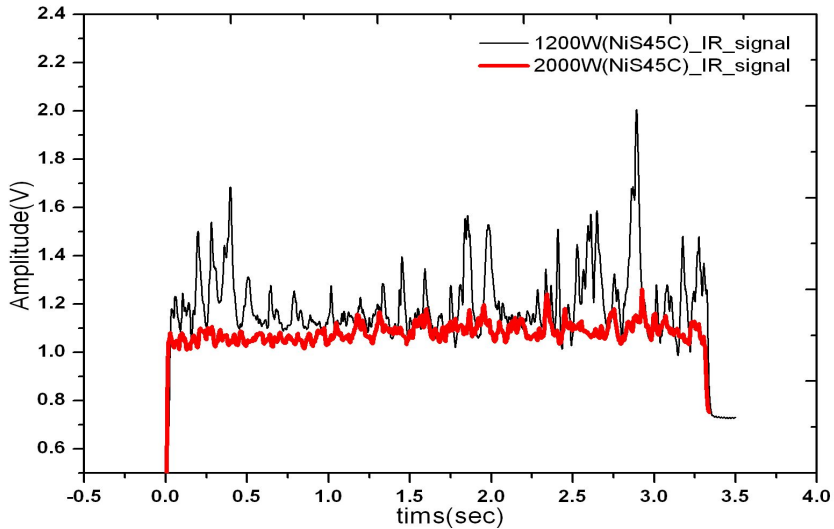


Fig. 4-18(b) IR signal for laser power(Ni coated S45C)

Fig. 4-19는 레이저 용접시 검출된 방사신호의 데이터를 정량적으로 분석하기 위해 히스토그램(Histogram)의 특징 전압을 검출 하였다.

레이저 출력이 1200W일 때 발생된 방사신호의 전압은 최대 0.75볼트(Volt)이었고, 출력이 증가함에 따라 1.60~1.65 V의 전압 빈도수가 가장 많이 나타났다. 이때 레이저 출력은 1200W에서 2000W로 증가 시켰을 때 실험결과 이다. 실험결과를 분석한 완전 용입 조건과 최적 입열량 판단 기준이 1.60~1.65V에 근사하기 때문에 1.65V기준으로 전압의 변위차가 적은 범위를 확보해야 용접 품질을 결정짓는 판단기준이 된다.

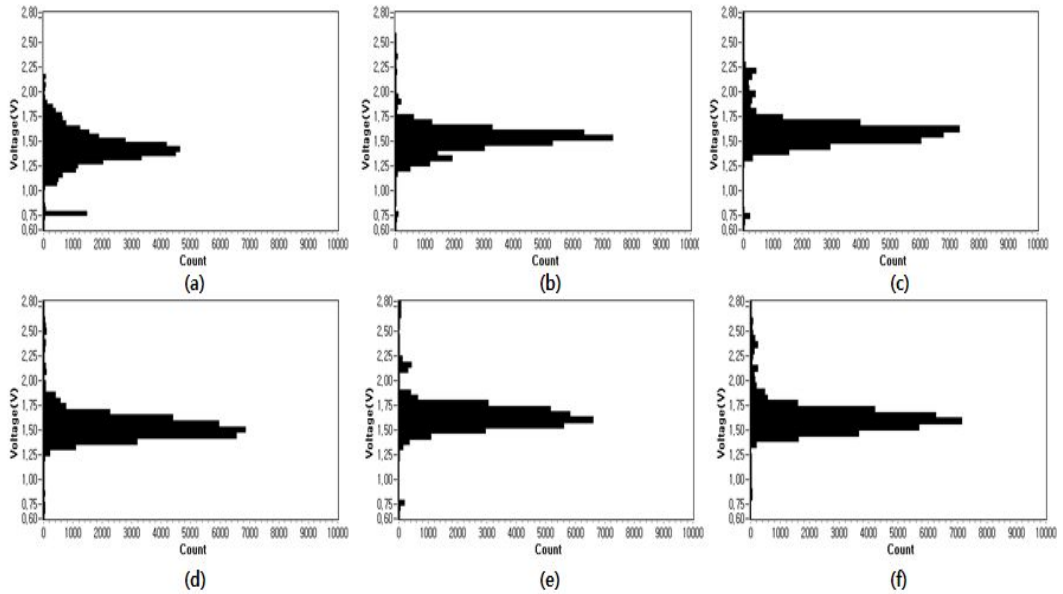


Fig. 4-19 Histogram of UV_signal in laser power(Ni coated S45C):
 (a)1200W, (b)1400W, (c)1600W, (d)1800W, (e)1900W, (f)2000W

Fig. 4-20는 레이저 출력에 따른 플라즈마 방사신호를 DC 평균전압변화량으로 분석한 결과를 나타냈다. 기존의 연구에서는 UV신호를 계측·비교함으로써 완전용입과 부분용입을 판별하였고, 더불어 완전용입시 IR 신호가 감소하였다. 그러나 Fig. 4-20에 나타난 것처럼 완전용입시 UV신호는 감소되지 않고 증가하는 것을 볼 수 있다.

이렇게 관찰된 신호를 DC 평균전압 변화량을 이용해 분석했을 때 니켈 도금된 강판은 1800W의 출력에서부터 약 0.4V의 전압차가 발생하여 완전용입이 되었음을 판단하는 기준이 된다.

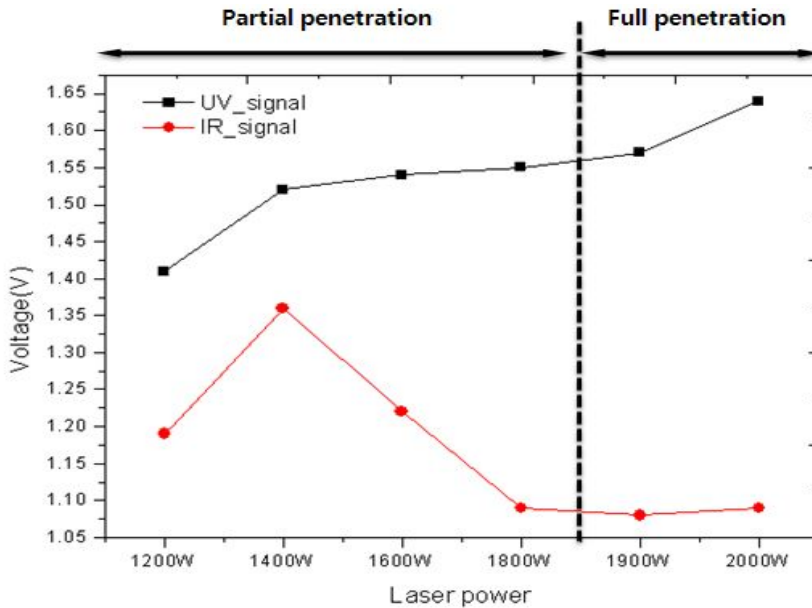


Fig. 4-20 Average DC voltage of signal in laser welding
(Ni coated S45C)

Fig. 4-21와 4-22은 S45C강판 도금의 유무에 따라 UV 신호와 IR 신호를 비교하였으며, 레이저 출력을 1600W로 동일하게 용접을 실시하였다. UV 신호에서 니켈 도금된 S45C는 레이저빔에 의해 모재 표면의 온도가 끓은점 이상으로 올라가게 되면 플라즈마가 발생하게 되고 시간이 증가할수록 증발압력이 커지게 된다.

IR 신호에서 용융풀의 표면장력보다 커지게 되면 중앙에서 주변으로 유동이 발생되고 얇은 기홀이 발생하게 되고 빔의 흡수율이 증가하면서 신호는 보다 안정적으로 발생이 되며 기홀이 커지고 깊어지게 된다. 발생된 기홀이 지속적으로 유지하면서 기홀은 용융풀과 마찬가지로 진동하게 된다.

이는 표면장력과 반발 압력이 서로 균형을 이루려고 하기 때문에 반발 압력은 기홀 벽을 바깥쪽으로 밀어내려 하고 표면장력은 그 반대의 역할을 하려고 하기 때문이다.

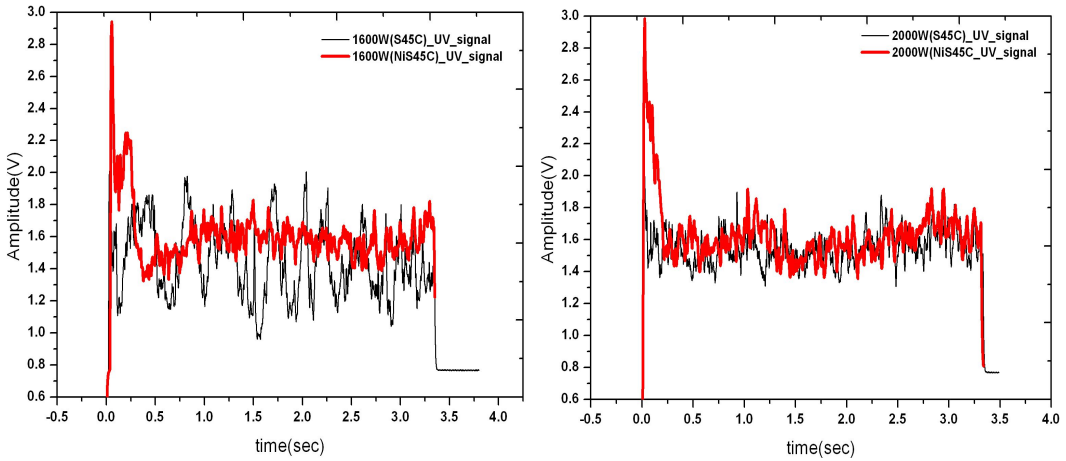


Fig. 4-21 Comparison of nickel coated and S45C plate UV signal

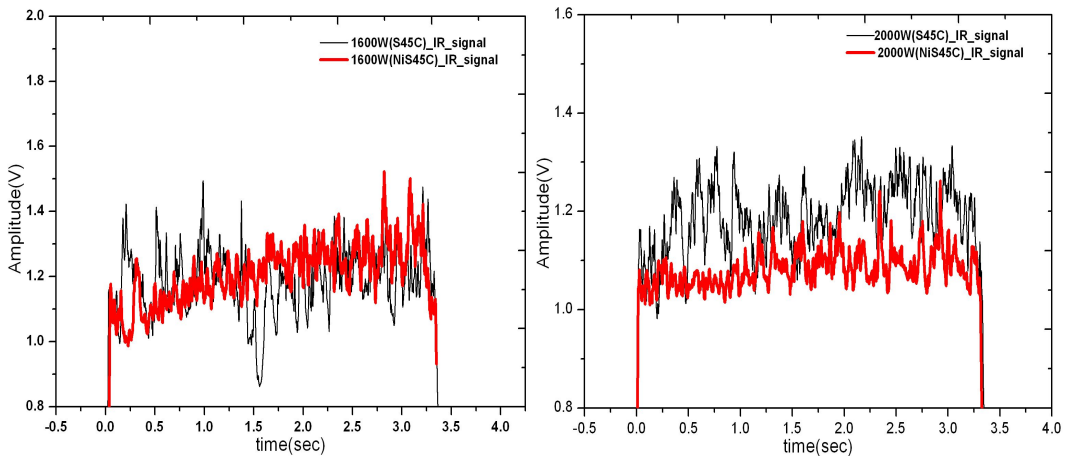


Fig. 4-22 Comparison of nickel coated and S45C plate IR signal

일반적인 레이저 용접에서는 레이저의 출력이 증가하면서 플라즈마 풀륨의 크기도 커지고 밀도도 높아진다. 또한 초점거리가 이격되어 디포커싱 되면 초점크기가 커지면서 출력밀도가 감소하여 풀륨의 높이가 낮아지고 용융 폭은 커진다.

Fig. 4-23은 니켈 도금된 시편을 레이저출력별 단면비드와 후면비드 사진을 나타냈다. 전면비드와 후면 비드는 코팅되지 않은 S45C보다 니켈 도금된 시편에서 용융되는 형상이 더 넓게 용융되었다.

이 같은 현상은 니켈을 코팅 하였을 경우 니켈을 코팅하지 않았을 때와 비교하여 레

이저빔이 니켈 코팅된 시편에 레이저빔이 조사하면 열전도율이 높아 표면에서 발생하는 플라즈마가 코팅되지 않은 시편에 비해서 더 많이 생성되어 레이저 에너지를 흡수하면서 나타나는 현상이다. 그 플라즈마가 면적이 비교적 넓은 다른 열원으로 표면에 작용하여 열전도에 의해서 재료 표면을 더욱 녹이는 작용을 한다.

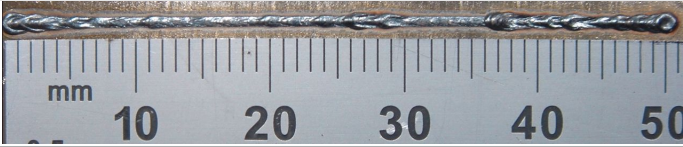

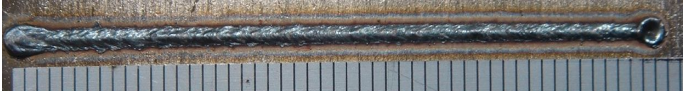

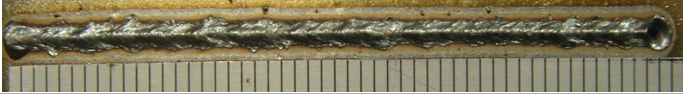

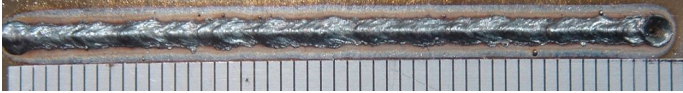
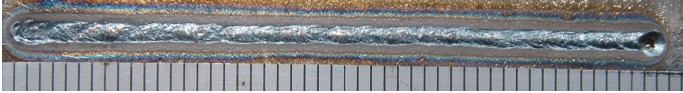


Laser power	Travel speed(v): 1m/min, Focal position: 200mm, Shielding gas: Argon,15ℓ/min	
1200	Front bead	
1400	Front bead	
1600	Front bead	
	Back_bead	
1800	Front bead	
	Back_bead	
1900W	Front bead	
	Back_bead	
2000W	Front bead	
	Back_bead	

Fig. 4-23 Variation of the bead shape according to laser powers(Ni coated S45C)

Fig. 4-24은 레이저 출력별 X-ray 단면 사진을 나타내고 있다.

X-ray 사진에 보듯이 도금된 강판은 S45C 강판에 비해 기공의 수가 적다. 이런 이유는 레이저에 의한 용접은 주로 키홀에 의해 이루어지는데 키홀의 형성은 용접재료의 급격한 기화를 동반하게 된다. 금속증기는 키홀을 유지시키는 역할을 하며 주로 키홀의 벽면 또는 바닥에서 발생한다. 용접금속 중 상대적으로 기화점이 낮은 원소가 우선적으로 기화되며 이들 원소들의 함량이 많을수록 증기압은 높아진다.

시편에 Ni을 도금하였을 경우 용융단면에 기포가 형성되지 않는 이유는 Ni의 경우 용융온도가 1452℃로 비교적 높고, 비중은 8.9로 다른 성분에 비해 무겁기 때문에 표면에서 용융된 고온성분이 하강하면서 용접단면을 비교적 오랜 기간 액체 상태를 유지하기 때문이다.

비교적 오래 동안 고온의 용융된 Ni 성분이 용접단면에서 중력에 의해 하강하면 액체의 점성이 떨어지면서 용융온도가 낮아 생성된 기포가 용접단면 표면으로 이탈되었기 때문이다. 용접단면 기포는 시편의 조성 성분 중 용융온도가 낮은 조성이 기화되어 발생하기도 하지만 용접하면서 주위의 산소가 높은 에너지밀도를 가지는 레이저빔과 작용하면서 발생한 수소가 용입 되기도 하고 표면에 부착된 용융온도가 낮은 불순물이 기화되어 용접단면에 포획되면서 발생하기도 한다.

이와 같은 불순물에 의한 기포가 부력에 의해 상승하는 속도에 비하여 레이저 빔이 이동하면서 키홀이 닫히는 속도보다 짧아지면 용접단면에 포획되어 용접단면 내에 기포가 잔존하게 된다.

이와 같은 이유로 수소는 대기 중의 습기 또는 용접금속 표면의 유분, 먼지로부터 유입되므로 용접전의 용접부 세척이 중요하다. 산소의 경우 Ni의 고액간의 용해도차가 Fe보다 크므로 레이저 용융부에 Ni의 함량이 증가함에 따라 산소에 의한 캐비티 형성이 감소할 것으로 생각된다.

Welding speed: 1m/min, Focal position: 0mm, Ar: 15l/min	
Laser Power	Photo X-ray
1200W	
1400W	
1600W	
1800W	
1900W	
2000W	

Fig. 4-24 Photo X-ray of the laser welding side bead(Ni coated S45C)

레이저 용접하여 단면을 관찰하면 중탄소강의 기본조직은 페라이트와 시멘타이트(Fe_3C)로서 이루어진 혼합조직을 갖고 있고, 이 조직의 혼합비율은 탄소량에 의해서 결정되기 때문에 탄소강의 물리적 성질은 탄소량에 따라 변화된다. 그러므로 탄소강의 레이저 용접은 대부분 용접부가 급가열·급냉각 때문에 조밀한 침상 마르텐사이트를 형성시킨다.

본 연구에서는 용접부의 미세조직특성을 니켈 도금된 S45C강과 니켈 도금되지 않은 S45C강을 레이저 출력과 속도변화에 따라 비교했다.

Fig. 4-25과 4-26는 니켈 도금되지 않은 S45C강과 니켈 도금된 S45C강을 레이저 출력에 따른 용입특성을 나타냈다. 그 결과 니켈 도금된 S45C강이 니켈 도금되지 않은 S45C강보다 용입깊이 증가되는 것을 볼 수 있고, 완전용입된 시편의 경우 후면비드(back bead)에 MnS계재물이 니켈 도금되지 않은 S45C강보다 적게 나타났다. 이는 니켈이 MnS 계재물의 혼합을 억제하는 것으로 판단된다. 그리고 레이저 출력이 작아 완전용입되지 않은 조건에선 다량의 스파터와 함께 내부기공과 균열을 나타냈다.

Fig. 4-25에서 레이저 출력이 1400W 일 때 충분히 열을 흡수하지 못해 모재의 용융된 면적이 작고, 용융물의 유동성이 저하되어 용융 풀(pool) 내부에 발생한 기포가 확산되어 표면 위로 방출하지 못하고, 용융 표면이 급속히 응고되기 때문에 내부에 포획되었다. 더불어 이런 기공 주위로 작용하는 응력변화가 나타나 입계균열을 형성하는 것을 볼 수 있다.

응고균열은 용접부에 의해 용융되었던 금속이 응고되는 과정에서 용접금속내의 최종 응고부에서 발생하기 쉽고 일반적으로 용접부 중앙에 용접방향과 평행하게 발생하는데 주로 강중에 함유되어 있는 P, S, Cu등의 불순물 원소가 최종 응고부의 입계의 편석에 기인 한다. 특히 고온균열은 고온(1000℃)에서 발생하며, 연성이 거의 없으며 입계 균열로 발전한다. 또한 S 및 P 등의 불순원소의 편석으로 인하여 저융점화합물 또는 저융점공정물을 형성한다. 키홀용접을 하는 레이저 용접의 경우 중횡비가 큰 용접단면에서 용접부의 경계면에서부터응고하면서 중앙부 용융풀이 채워지지 못하고 고온균열이 발생하였다. 용접부폭이 좁고 깊은 용접부특성 때문에 주상정이 내부로 형성하여 중심부에 편석이 심하게 일어나고 수축변형이 중앙에서 집중적으로 작용하기 때문에 고온 균열 발생이 잘 일어난다.

Fig. 4-26는 레이저 출력 변화에 따른 니켈 도금된 시험편의 용접 단면을 나타냈다. 동일한 공정조건으로 실험했을 때 니켈 도금되지 않은 시험편에 비해 입열량이 높게 나타난 것을 볼 수 있다. 그리고 내부기공은 상당히 감소하였지만 레이저 출력이 1400W 일 때 용접부 내부에 횡방향으로 균열이 발생하는 것을 알 수 있다.

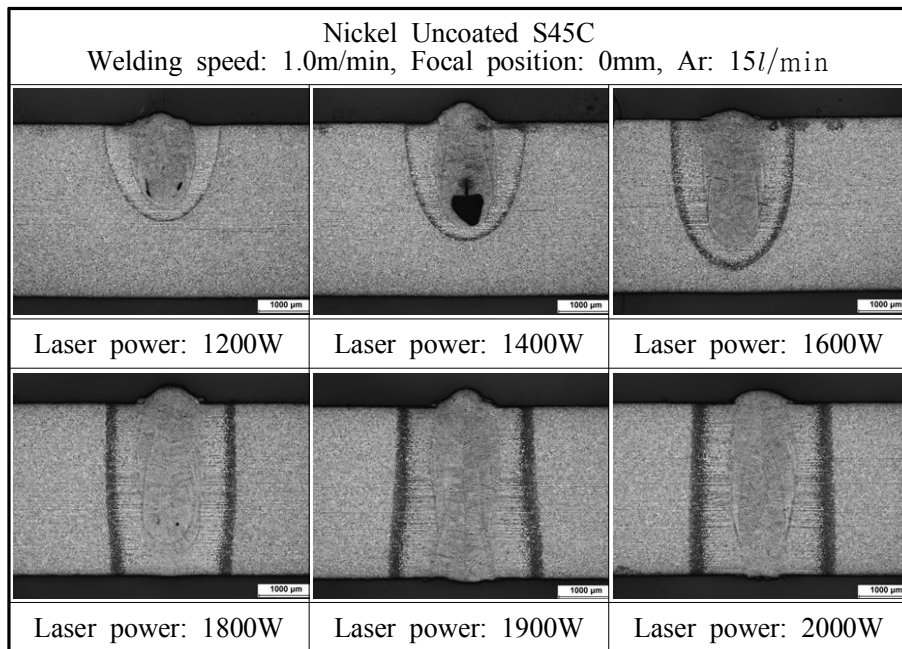


Fig. 4-25 Variations of cross section with laser powers(Nickel uncoated S45C)

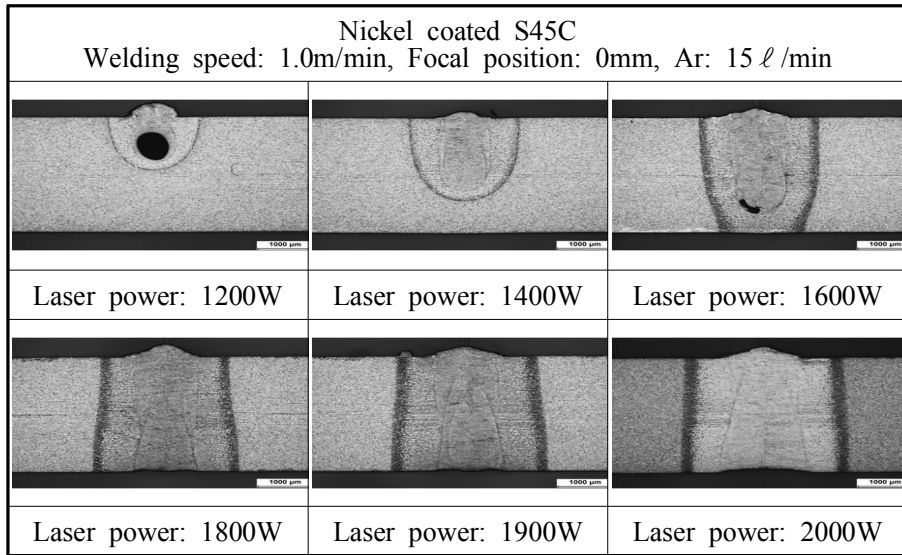


Fig. 4-26 Variations of cross section with laser powers(Nickel coated S45C)

Fig. 4-27과 Fig. 4-28는 레이저 출력을 1900W로 고정 한 후 용접속도를 변화시켜 비드온플레이트 용접한 결과를 보여주고 있다.

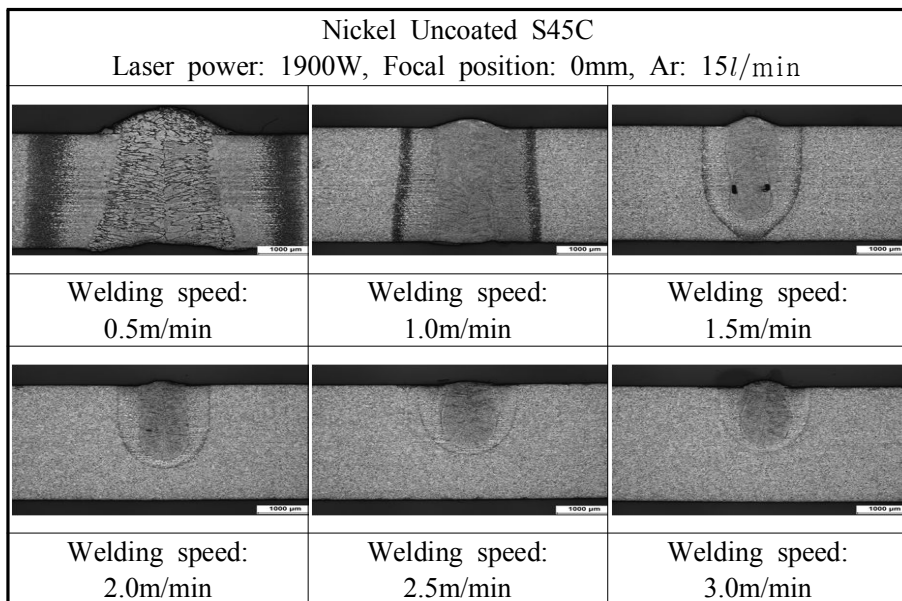


Fig. 4-27 Variations of cross section with welding speeds(Nickel Uncoated S45C)

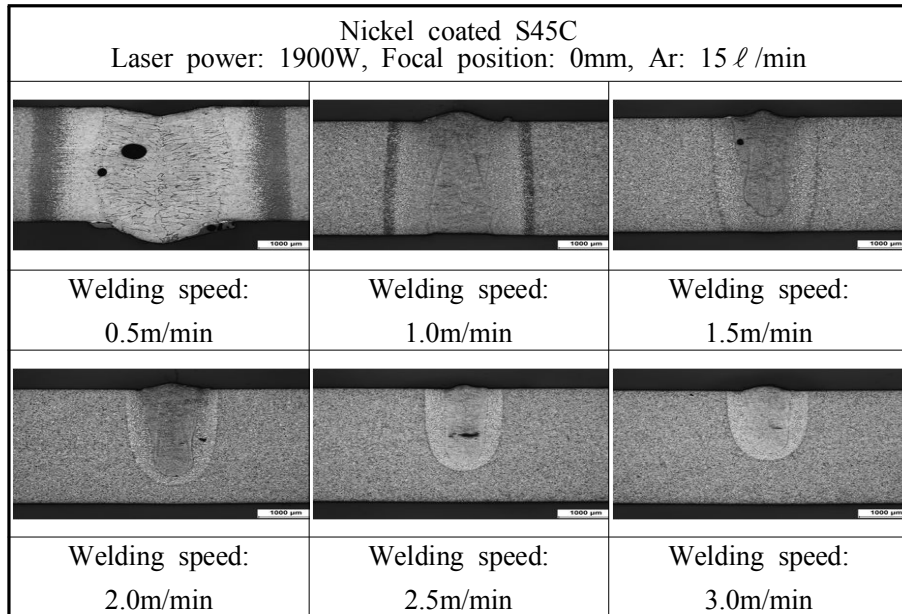


Fig. 4-28 Variations of cross section with welding speeds(Nickel coated S45C)

Fig. 4-29와 Fig. 4-30은 니켈 도금한 시편을 비드온플레이트 용접한 후 단면조직을 관찰한 결과이다. 용접선 중심부는 침상 마르텐사이트가 모재 쪽으로 방향성을 가지면서 성장하고 있다. 열영향부 즉 모재와 가까워질수록 마르텐사이트 조직이 조밀한 침상 형태로 변화된 것을 알 수 있다. 이것은 에너지 밀도가 높은 레이저 빔이 시편에 조사되어 용융된 시편에 대해 빠른 속도로 레이저 빔이 진행하면 시편이 급랭되면서 γ -격자는 작은 α -격자에 겹치게 되고 하나의 철원자로 채워진 공간격자에는 속박용체를 가진 탄소원자가 채워진다. 이 강박상태가 격자를 왜곡시킴으로써 재질이 매우 강하게 되고 침상조직인 마르텐사이트로 된 것이다. 열 영향부의 경우 용접금속은 대기에 열이 손실되는 것은 물론 금속이 용접됨으로써 전도에 의한 금속 열 추출 때문에 매우 급속한 냉각상태로 응고된 부분이다.

그림에서 A와 C부위는 용융부와 모재사이의 열영향부로서 잔류오스테나이트와 마르텐사이트의 혼합조직으로 경도값이 약 500Hv이었다. 또한 Fig. 4-29는 Fig. 4-30에 비해 입열량이 크기 때문에 모재방향으로 빠르게 냉각되므로 이 결정립계가 수지상조직과 비슷한 형태로 나타났다. 모재는 페라이트와 펄라이트조직 으로 구성되어 있다.

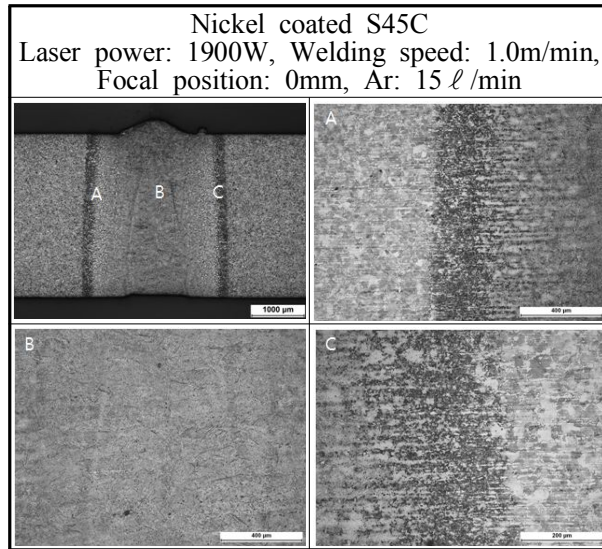


Fig. 4-29 Photographs of melting zone after BOP welding(Nickel Coated S45C)

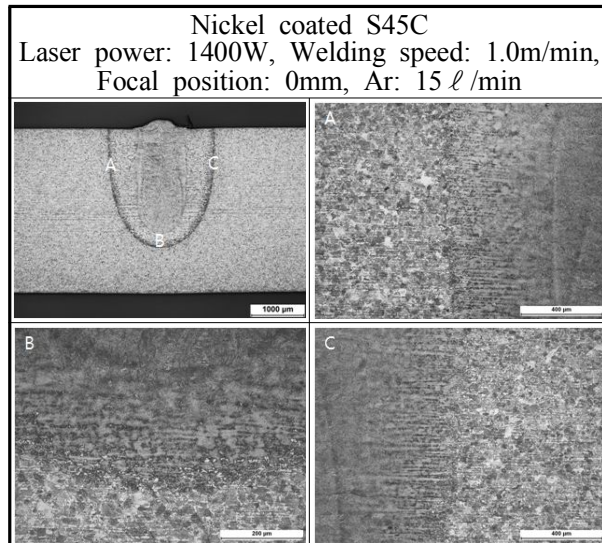


Fig. 4-30 Photographs of melting zone after BOP welding(Nickel Coated S45C)

4.5 용접결함에 따른 신호특성

레이저 용접과정을 통해 용접된 부품의 기계적 성질과 신뢰성은 용접된 부품에 남아 있는 결함에 크게 의존한다. 이러한 결함의 종류는 용입 깊이의 불균일성, 용융구역의 함몰, 기포형성, 균열발생, 크레이터 발생과 스패터 등 매우 다양하게 존재한다. 본 문헌에서 레이저 용접의 결함에 따른 신호 특성을 파악하고 특성을 고려하여 용접된 부품의 품질을 확보하기 위해서이다.

Fig. 4-31에서와 같이 레이저 출력은 1900W, 속도는 1m/min으로 정상적인 용입과 용접비드가 형성된 사진이다. 결함이 없는 용접길이 50mm의 신호 응답을 보여준다. 기존의 설정한 기준신호를 통해 신호의 샘플 수행할 때마다 전압을 설정하여 기준 전압의 사이에 설정이 되면 용접비드 및 용접 입열량은 정상으로 판정한다. 그래프에서 나타내듯이 먼저 용접과정 중 발생한 신호를 획득하여 기준신호를 파악한다. 기준 신호는 시편의 용입깊이와 관련 되어있는 플라즈마 특성 및 비드폭 또는 용융풀에 대한 정보를 포함하고 있기 때문이다.

Fig. 4-31에 나타낸 기준신호 한계선을 정하고, 중앙신호를 표시 하였다. 표시된 한계선 기준으로 신호의 진폭은 90%이상 초과 하지 않아야 된다. 초과하는 경우는 유동에 대한 흐름, 오염물질 등에 의한 스패터 발생으로 나타나는 현상이며, 기준 신호의 이하일 경우는 용입 부족 등이 발생하는 경우이다.

Fig. 4-32 용접재료에 탄소가 함유되어 있으면 용접시 탄소와 대기중의 산소가 반응하여 CO, CO₂의 가스가 형성된다. 반응은 용융금속 내부에서 발생하며 이들 가스는 용융금속의 응고 후 기공(캐비티)로 남게 된다. 이러한 경우의 모니터링 결과를 보여준다.

신호의 특징은 전후 진폭의 차가 크고 진폭에 있어서 작은 더블 피크가 생성되는 것이 특징으로 발생한다. 그 원인은 기포 형성에 있어서 용해 가스의 효과는 액체의 과열 한계보다 높은 경우에는 무시되나 과열 한계보다 낮은 경우에는 용해 가스가 기포 형성 과정에 지배적인 역할을 한다. 고압 하에서 가스가 용해된 포화 용액을 갑자기 감압시키면 비평형 상태가 되므로 용질가스 분자들에 의해 순간적으로 기포가 형성된다.

액체가 갑자기 기화된 후 기포로 변하게 되므로 급격한 기화와 기화된 액체가 기포로 성장하여 액체 내에서 진동하는 과정을 비등액체의 팽창에 의한 폭발현상이라 한다. 충격파가 기포벽으로 부터 떠난 직후의 기포벽 속도는 수축 점에서 발광이나 충격파가 가능할 정도로 충분히 크다는 것이다. 기공이나 캐비티의 생성은 레이저가 조사되는 초점에 위치한 액체는 급격하게 기화하며 증발하는 부분이 레이저 빛의 초점에서 시작한다는 것을 말해준다.

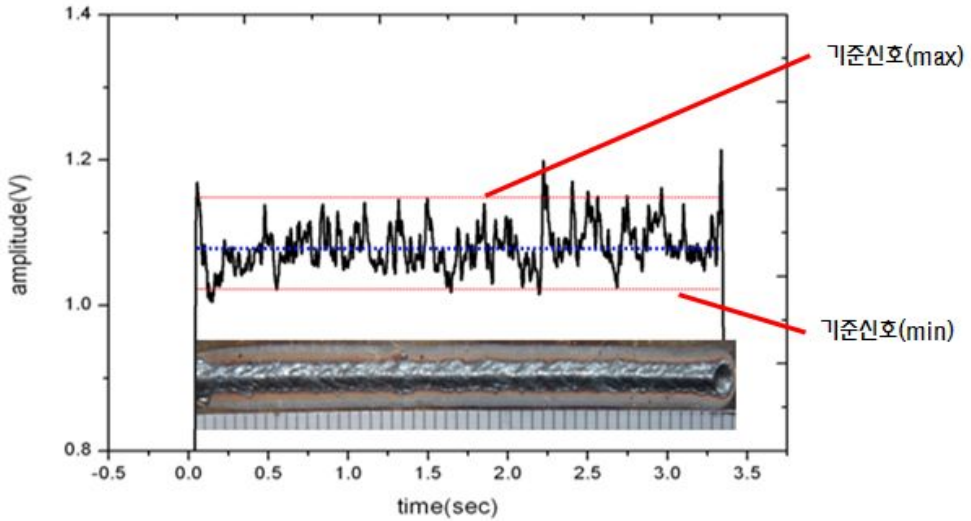


Fig. 4-31 Reference normal signal and the two thresholds are reported

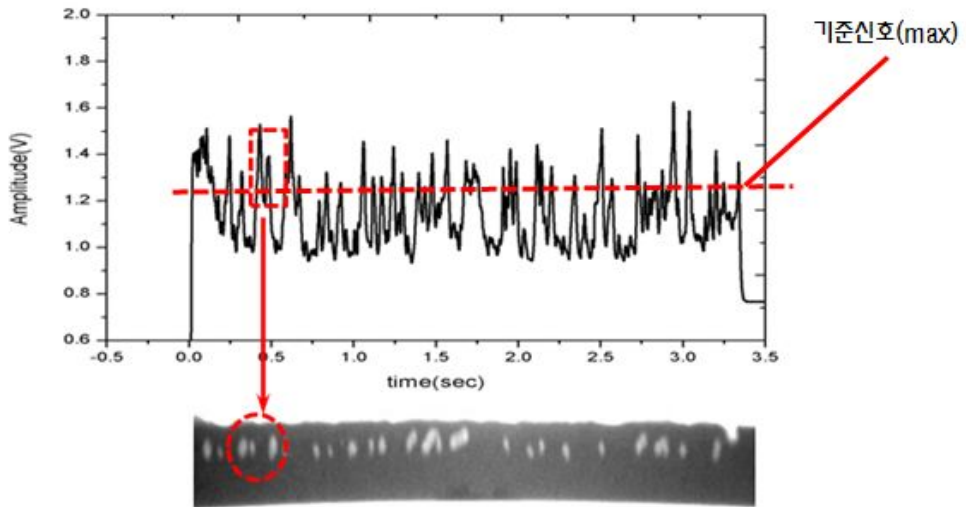


Fig. 4-32 Reference signal due to porosity

Fig. 4-33은 용융금속이 유동 과정 중에 손실이 생겨서 발생하는 함몰(undercut, humping) 현상을 나타낸다. 함몰현상은 용접부 강도를 저하 시킬 수 있고, 응력집중 구역으로 작용한다. 이러한 현상은 용접공정 변수들 중에 용접속도가 빠르거나, 보호가스 압력 높거나, 레이저 출력이 낮아 발생한 현상들 중에 하나이다. 또한, 강판의 재질에 따라 다를 수 있다. 신호의 특징은 주위 기준신호들과 비교하여 기준 신호보다 갑자기 진폭이 낮아지는 현상을 나타낸다.

그 이유는 플라즈마가 발생이 어느 정도 유지되다가 갑자기 플라즈마 형상이 깨져서 발생하는 신호이기 때문이다.

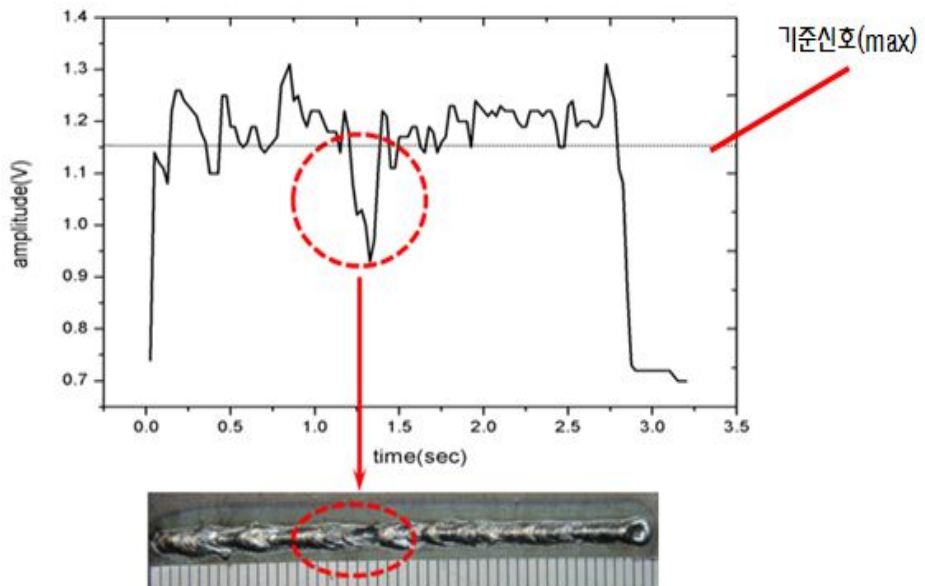


Fig. 4-33 Humping of the weld pool

Fig. 4-34에 나타낸 그래프와 사진도 유사하게 초기에 용접 과정 중 용융풀에서 오염물의 분출 등에 의하여 용융금속의 손실을 야기 시키는 작용을 한다. 이 신호 특징은 용접 시작 부분에서 발생했기 때문에 기준신호는 낮아 보이지만 다음 용접과정 중 원래의 기준 신호로 복귀하는 특성을 가졌다.

레이저 용접에서 가장 중요시 하는 키홀 특성상 초기에 이러한 현상이 발생할 경우 90% 이상이 용접 결함으로 평가한다.

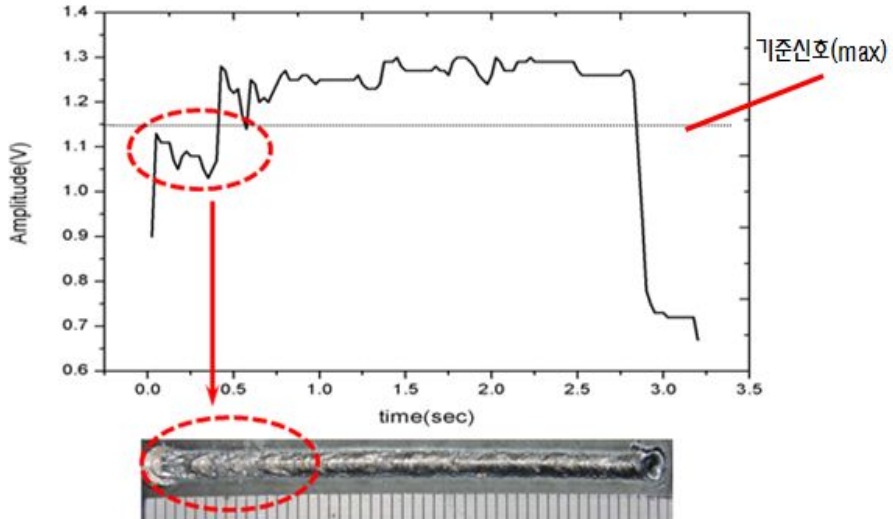


Fig. 4-34 Drop-out of the weld pool

Fig. 4-35은 용입부족으로 인해 발생한 신호를 나타낸다. 기준신호에서 가장 아래로 신호들이 형성 되어 용입 깊이가 낮아지는 현상을 말한다. 그 이유는 키홀의 작용에서 깊이가 깊어질수록 레이저빔의 흡수율이 높아져서 플라즈마 차창효과가 커져 발생하는 경우이다. 이런 신호의 특징은 주로 레이저 출력이 낮아 발생하는 경우가 대부분이다.

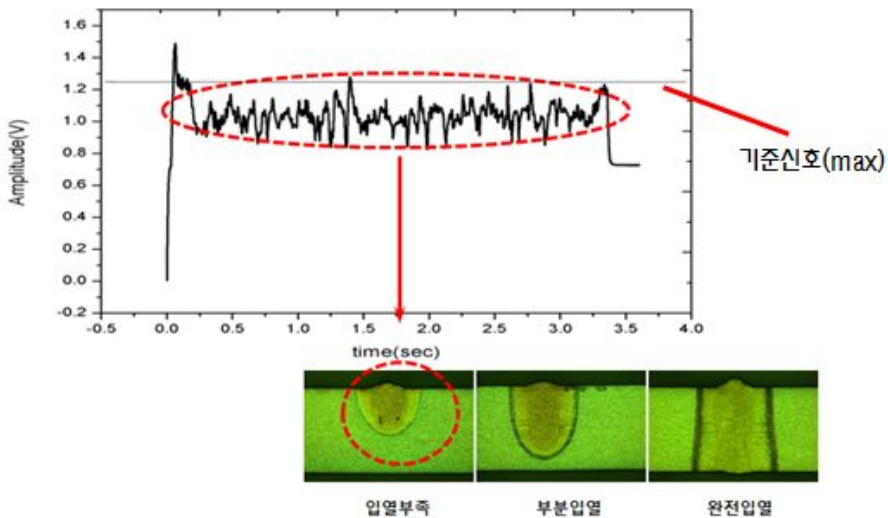


Fig. 4-35 Lack of fusion or a little low heat input

Fig. 4-36은 레이저 출력과 속도는 1900W, 1m/min으로 고정하고 초점별 신호의 특징을 나타냈다. 초점은 시편의 표면을 0(Zero)점으로 기준하여 0.5mm 이하로 순차적으로 낮게 하여 신호를 획득하였다. 초점이 내려 갈수록 기준신호와 멀어지고, 초점이 내려 갈수록 용접 비드의 폭이 점점 넓어지는 현상을 나타낸다. 1번에서 3번 신호의 특징이 잘 나타나 있다. 신호의 높이는 낮아지고, 진폭의 특성은 점점 커지는 현상을 나타낸다.

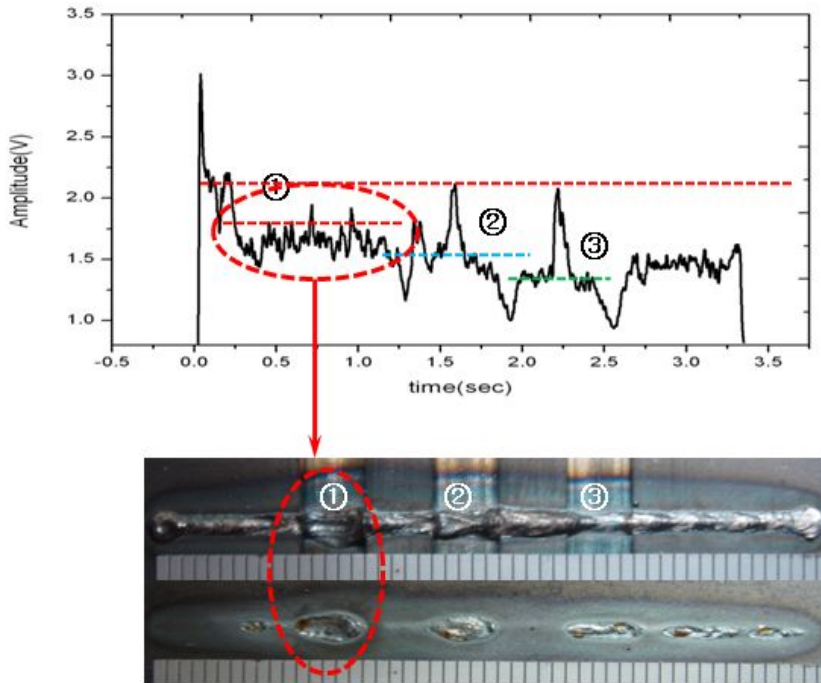


Fig. 4-36 Reference signal of focus off

Fig. 4-37은 키홀 용접에서 흔히 나타나는 현상으로 스파터 분출되는 모습을 나타냈다. 스파터와 크레이터란 화산의 분화구 모양과 같이 용융구역에서 움푹 들어가는 현상으로 상당히 많은 양이 용융금속이 증발 혹은 스파터로 분출되어 손실 된다. 신호의 특징으로는 스파터가 많이 발생하면 신호의 노이즈가 증가한다.

그래서 신호처리가 필요하게 된다. Fig. 4-37에서 표시한 원 신호를 필터링 처리를 하면 기준신호를 나타낼 수 있다. 필터링 된 신호를 기준으로 보면 진폭이 크고 여러

개의 신호들이 중복이 되어 있다. 신호가 많을수록 스패터 현상은 증가하여 용접 품질에 좋지 못한 결과를 초래한다.

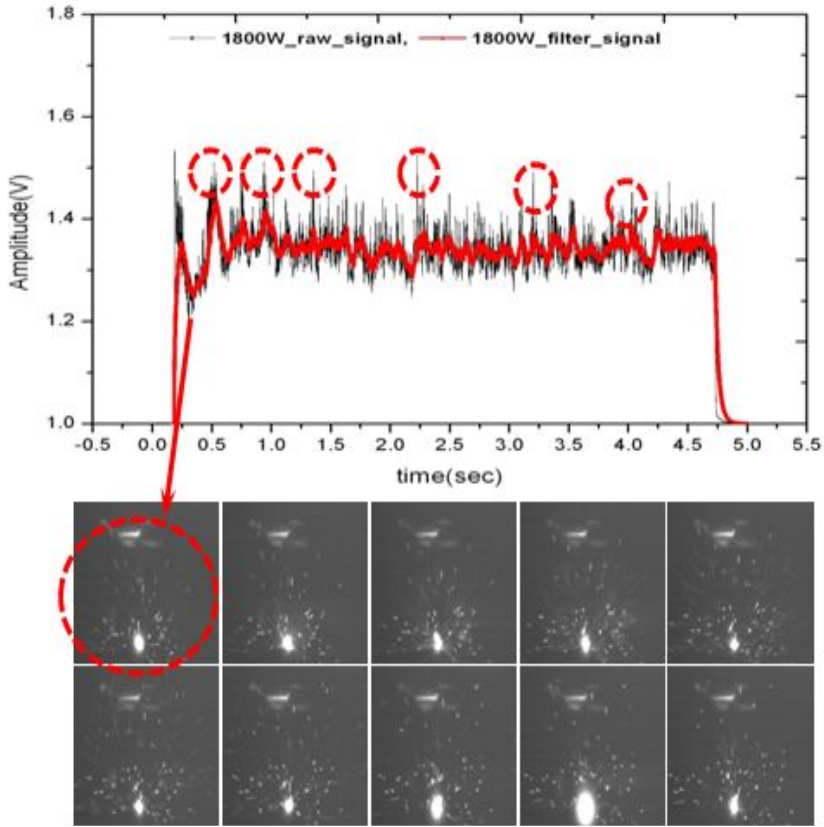


Fig. 4-37 Reference signal of spatter

Fig. 4-38, 4-39은 레이저 출력을 1200W, 1600W, 2000W, 속도는 1m/min 용접을 실시하여 UV, IR 신호를 얻은 그래프이다. Fig. 4-38의 1200W인 경우에는 입열이 부족하여 기준 신호 밑으로 형성되고 1600W인 경우에는 입열은 되었으며 키홀의 불안정한 상태인 신호가 나타났다.

불안정한 용융풀의 진동 주기는 빨라지고 진폭의 주기도 커진다. 레이저 용접시 형성되는 키홀에는 반경을 확장시키는 기화 압력과 반경을 수축시키는 표면장력과 동적 균형상태가 존하여 반경이 지속적으로 수축반복을 하게 된다. 용융금속으로 이루어

진 키홀 내벽의 급작스러운 붕괴에 의해 키홀이 원래의 형태를 유지하지 못하는 의미를 말한다. 내벽의 붕괴는 스웰링의 크기가 적당하면 유동에 의해서 키홀 밖으로 방출이 가능하며 스웰링 크기가 커서 방출이 불가능할 경우처럼 키홀 입구를 차단시켜 레이저 빔의 입사를 방해하게 된다.

그 결과 키홀 유지에 필요한 증기압을 가질 수 없게 되어 키홀은 붕괴되고 불안정하게 된다. 키홀 내의 용융금속을 유동적인 측면으로 고려 해보면 온도에 따른 표면장력 구배에 의한 marangoni 유동, 금속증기에 의한 마찰금속기화에 의한 반동력 등이 복합적으로 작용하여 발생하는 것으로 파악되며 이들은 용접재료의 물성과 깊은 관련이 있으므로 용접재료의 종류에 따라 유동이 달라짐을 알 수 있다. 전체 유동 중 대부분의 유동은 키홀 상부에서 주로 발생하며 전체 용융금속의 70%가 키홀 상부에 위치함을 감안하면 이들 유동이 전체유동을 지배함을 알 수 있다.

결과적으로 키홀은 항상 불안정하며 이는 증발 압력이 키홀 중심부의 용융금속을 외부로 배출시키지 못하므로 용융금속의 배출을 방해하는 요소로서 키홀 입구에서 발생하는 표면 장력에 의한 압력과 정수압 및 키홀 벽면에서 발생하는 전단력을 때문이고, 키홀 붕괴의 직접적인 원인은 키홀 벽면에 발생하는 돌출부이다.

Fig. 4-39은 완전 입열을 나타내는 IR 신호 그래프이다. 초기유동에 의해서 키홀 바닥이 용융금속을 외부로 밀어내고 중력과 표면장력에 의한 유동을 이겨내지 못하고 키홀은 급속히 붕괴되기 시작한다. 결국 키홀 입구로 배출되었던 용융금속은 키홀 내부를 완전히 채우게 된다.

용융금속은 중심에서는 상하로 유동이 반복 발생하면서 시간이 지남에 따라 안정화된다. 키홀의 깊이가 증가되면서 키홀의 중간 부분에서 돌출부가 생성되며 이로 인해 키홀의 부분적인 붕괴가 일어나는 유형은 완전 용입이 되는 순간 강한 증발압력에 의해 키홀 바닥에 있는 용융금속이 후면 비드쪽으로 밀려 나간다.

키홀 벽면에 작용하는 증발압력은 용융금속은 수직으로 만들게 되는데 이렇게 키홀 벽면이 수직을 이루며 키홀 바닥이 없는 경우 키홀 벽면에서 레이저 빔의 흡수가 현저히 떨어지게 되어 증발압력이 감소하며 키홀의 붕괴를 가져온다. 붕괴된 용융금속은 오픈 되었던 키홀 바닥면을 이루며 후면 비드를 형성하게 된다.

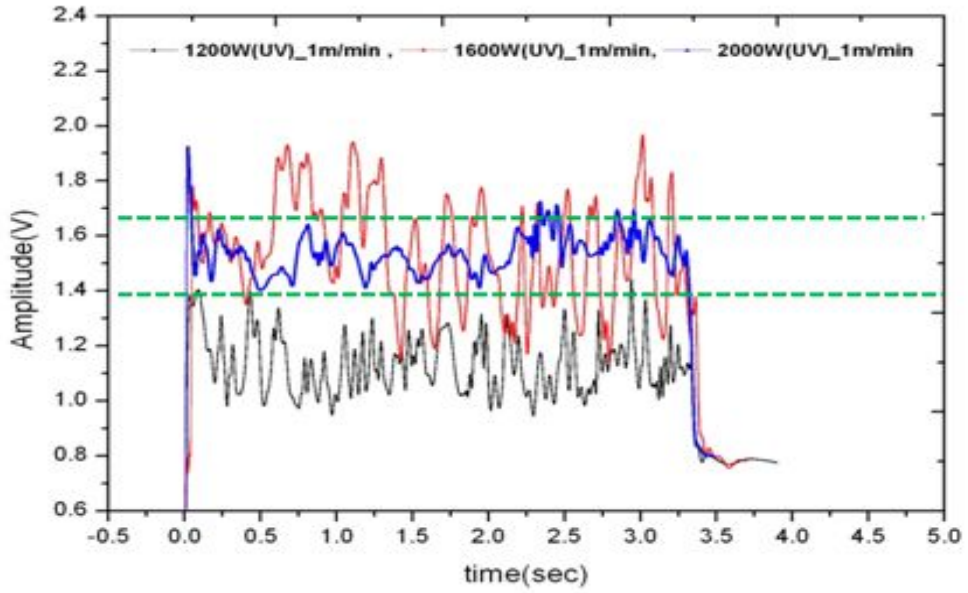


Fig. 4-38 Comparison of UV signal for laser powers

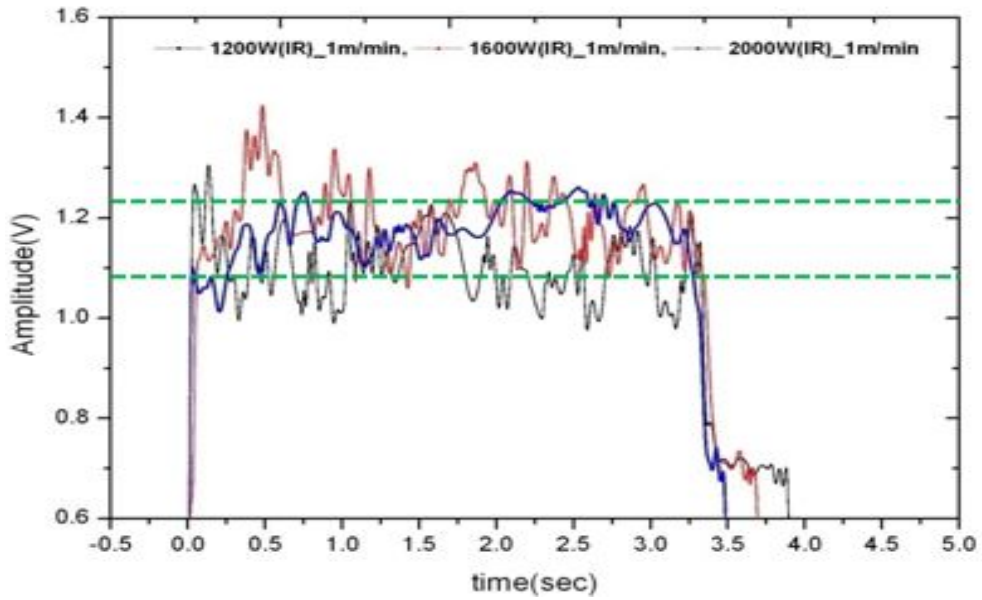


Fig. 4-39 Comparison of IR signal for laser powers

임의로 결함을 발생시켜 제작한 시편을 이용하여 모니터링 시스템이 얼마나 민감하게 반응하는지 검증하기 위해 Fig. 4-40과 같이 제작하여 BOP 용접하였다.

결함을 발생한 시편에 레이저 출력 1900W에 속도는 1m/min, 용접길이는 50mm로 하여 BOP 용접한 결과를 Fig. 4-41에 전면비드와 후면비드를 나타냈다. 임의로 발생시킨 결함 때문에 전면비드와 후면비드의 모양이 균일하게 형성되어 있지 않음을 알 수 있다. 이때 시편에 조사한 레이저빔의 초점은 시편 표면에 맞춰 용접을 하였다.

Fig. 4-42은 임의로 결함을 발생시킨 Fig. 4-40을 BOP용접하면서 검출한 실험결과를 나타내고 있다. 본 연구에서 개발한 모니터링 시스템에서 센서 신호를 16비트의 해상도와 10kHz로 데이터를 획득하고, 컴퓨터에서 실시간으로 받아들인 신호이다. 레이저빔을 금속표면에 조사했을 때 용융이 발생하지 않은 초기에 반사가 많이 발생하여 UV 신호가 피크를 형성하고 시편 온도 증가로 용융이 발생하면 낮아진다.

임의로 시편에 결함을 발생시킨 시편표면 BOP 용접하면서 레이저빔을 이동시키면서 ① 구역에 도달할 때 기준 표면과 비교하면 0.5mm 오목한 형상 때문에 레이저빔이 홀 내부에 난반사가 발생하여 파형은 하강하고, ① 영역이 지나면 반사강도가 다시 회복되어 방사강도가 높아진다. 레이저빔을 임의로 결함을 발생시킨 방향으로 이동하면서 BOP 용접을 하면 홀의 깊이가 증가할수록 UV와 IR 강도가 함께 감소하는 현상을 발견할 수 있다.

전처리를 하지 않는 Fig. 4-42의 신호에서 임의로 결함을 발생시켜 실험했을 때 결함의 유무를 확인 할 수 있는 개략적인 흐름만 파악할 수 있었다. 결함의 깊이, 용융폭폭 등의 정보에 대한 신호는 선명하게 파악하기 어려웠다. Fig. 4-43은 신호를 일반적인 필터링하여 그 결과를 나타냈다. Fig. 4-42의 신호와 비교하면 DC전압, 용융폭에서 발생하는 스패터, 외부잡음 등은 제거가 되지만 결함에 대한 정보는 복원하지 못했다.

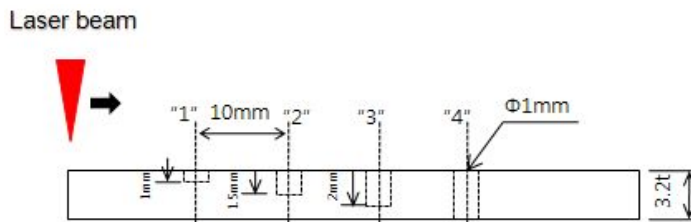


Fig. 4-40 Layout of the welding plate

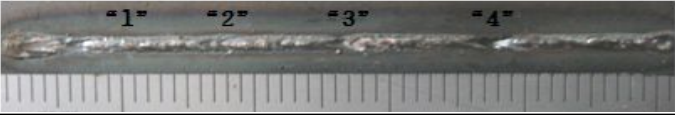
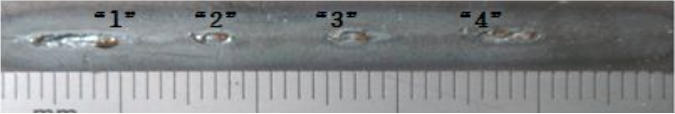
Laser power: 1900W, Speed: 1m/min, Focal position: 200mm, Shielding gas: Argon,15 l /min	
Front_bead	
Back_bead	

Fig. 4-41 Bead shape of the laser welding

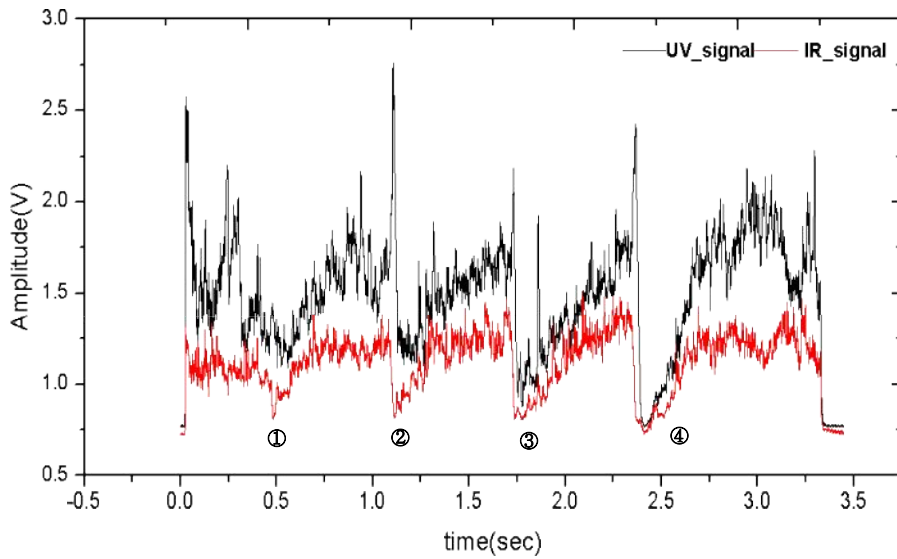


Fig. 4-42 UV and IR raw signal

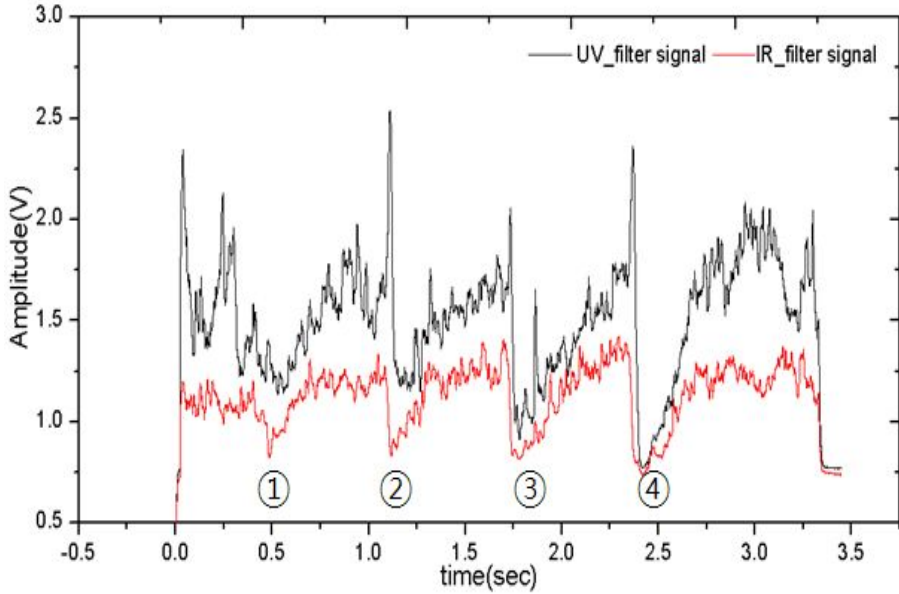


Fig. 4-43 UV and IR filter signal

Fig. 4-44(a),(b)에 나타난 신호는 웨이블릿 영역에서 잡음 제거법(Denoising technique)을 이용하여 신호에 첨가된 화이트가우시안 노이즈(White gaussian noise)를 제거하고 이의 잡음제거 특성을 고찰하였다. 실험에 사용한 시편은 Fig. 4-40에서 설명한 시편을 BOP용접한 결과이다.

Fig. 4-44(a),(b)에서는 ①~④ 구간에서 결함 때문에 발생하는 전압차이를 구분할 수가 있었다. 용접 진행 방향으로 홀의 깊이가 깊어질수록 용융금속이 공간을 채우지 못하고, 비드표면이 시편의 표면이나 후면보다 안쪽에 생기게 된다. 이러한 현상은 Fig. 4-41에 나타내듯이 더욱더 오목한 현상 때문에 전압이 떨어지는 현상을 알 수가 있었다.

원 신호를 웨이블릿 변환 시 각 스케일로 신호를 분리할 수 있게 되는데, 이때 각 스케일에 포함된 잡음성분은 웨이블릿 변환의 특성상 원 신호의 크기보다 상대적으로 작아지게 되고, 웨이블릿 영역에서 잡음치를 추정하여 적절한 threshold 이하의 값을 제거한 후 다시 합성함으로써 잡음성분을 효과적으로 제거할 수 있었다.

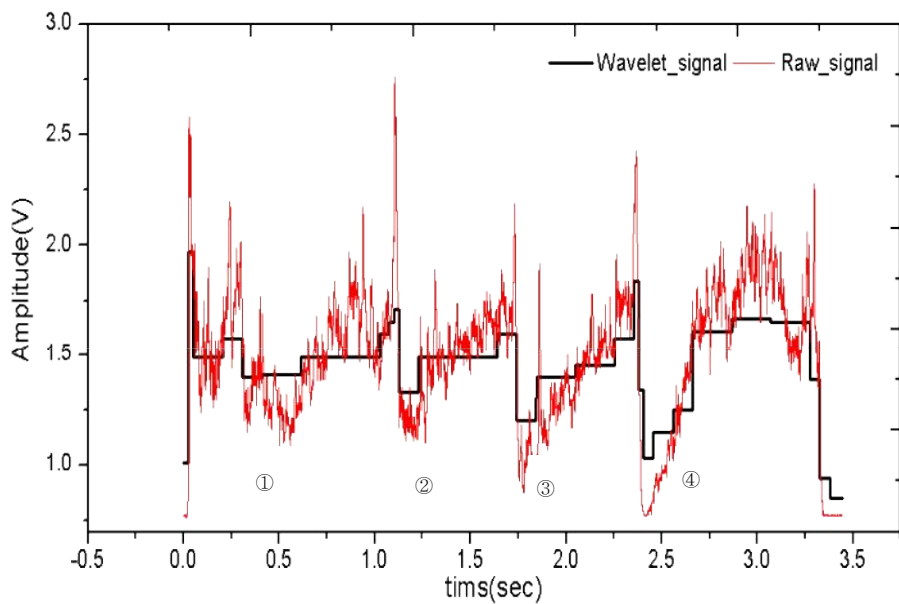


Fig. 4-44(a) UV Haar wavelet signal for laser welding

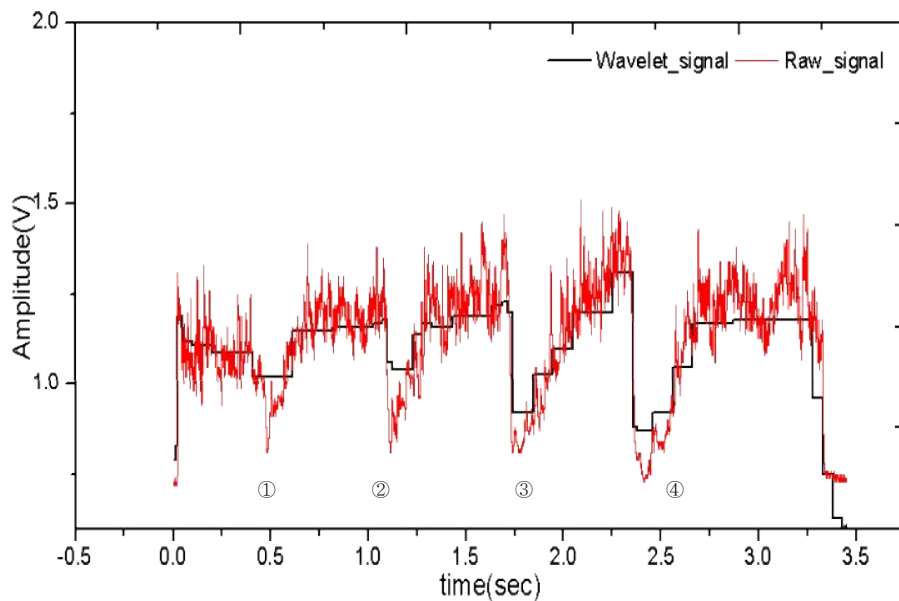


Fig. 4-44(b) IR Haar wavelet signal for laser welding

레이저 용접은 비주기성이지만 최적 신호를 규명하는데 있어서 규칙적인 복합파를 찾기 위한 방법이 필요하다. 그러므로 본 연구에서는 레이저 용접중 발생된 복합파를 시각화하여 분석하기 위한 도구로 웨이브폼(Waveform)과 스펙트럼의 특징이 조합되어 있는 스펙트로그램(Spectrogram)을 제시했다.

Fig. 4-45(a),(b)는 외부결함에 의해 복합파를 시각적으로 일목요연하게 나타내고 있다. 일반적으로 분석하는 신호는 시간에 따라 그 질도 변하고, 그 크기의 변화도 매우 복잡하다. 다시 말해 신호는 시간에 따라 그 구성 성분의 종류와 양이 변화한다.

따라서 스펙트로그램은 시간의 개념 없이 신호의 파형을 구성하고 있는 내용물의 질과 양을 보여주는 스펙트럼과 달리 시간의 축을 덧붙여 주파수와 진폭의 시간에 따른 변화를 보여주는 삼차원적인 그림이라 할 수 있다. 스펙트로그램을 구하는 방법은 임의의 구간 데이터를 시간에 샘플링 주파수를 곱해준다. 해당 구간의 FFT를 처리하여 프로그램 내의 함수를 불러 들여 처리한다. 그러므로 스펙트럼은 x 와 y 의 두 축으로 구성되어 있는 반면, 스펙트로그램은 x , y , z 의 세 축을 가지고 있다.

Fig. 4-45(a),(b)의 스펙트로그램은 x 축을 시간, y 축을 주파수, z 축을 진폭(강도)로 표시했다. 그 결과 깊이의 변화에 따른 신호의 해석 구분이 되었고, 깊이가 깊어질수록 주파수 성분은 낮아지는 것을 확인 할 수가 있었다.

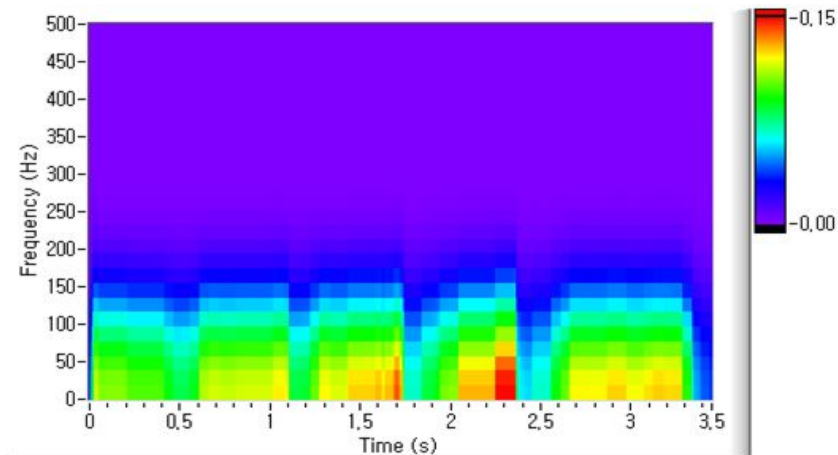


Fig. 4-45(a) UV spectrogram of wavelet signal for laser welding

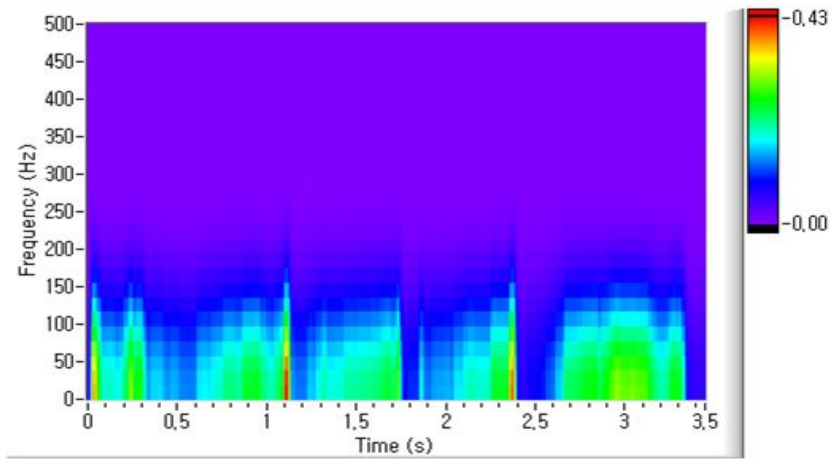


Fig. 4-45(b) IR spectrogram of wavelet signal for laser welding

제 5 장 결 론

본 연구에서는 배터리 팩의 주요 소재로 사용되고 있는 중탄소강(S45C)을 보다 고효율·고품질의 제품을 생산하기 위한 방법으로 최적의 레이저 용접 품질 모니터링 시스템을 개발하였다.

이를 위해 레이저 용접 중 발생하는 플라즈마 광신호를 획득하기 위한 방법으로 포토다이오드 광학헤드를 제작한 후 중탄소강의 니켈 도금 유·무에 따른 레이저 용접성을 고찰했다. 이때 획득된 플라즈마 광신호와 스펙터의 신호를 분석하기 위한 방법으로 원신호(Raw signal)를 필터함수, 주파수 변환(Fourier Transform), 웨이블릿 변환 등을 이용하여 비교 분석했고, 레이저 공정변수의 변화에 따른 용접비드 폭, 침투깊이, 결함검출 등에 관하여 다음과 같은 정성적인 특성과 정량적인 특성을 얻었다.

1. 레이저 용접은 비주기성 신호이기 때문에 용접 중 발생하는 결함을 검출, 데이터의 기준신호를 얻기 위한 방법으로 외관 기구물의 일체형 즉, 포토다이오드 모듈(UV, IR)을 개발하였다. 그리고 레이저 용접 과정 중 광 집속 효율을 높이기 위해 초점거리가 50mm인 Bi-Convex 렌즈를 이용해 방사신호 집속율을 높였다.

2. 비드온플레이트 용접 시 레이저 출력(1200 ~ 2000W)이 증가할수록 플라즈마 방사신호는 점진적으로 증가하는 것을 알 수 있었다. 이때 UV 신호의 DC 평균 전압은 레이저 출력이 200W씩 증가함에 따라 약 0.2V, IR 신호는 약 0.5V씩 증가함을 알 수가 있었다.

3. 레이저 용접시 검출된 방사신호의 데이터를 정량적으로 분석하여 부분입열과 완전입열을 구분하기 위한 방법으로 히스토그램의 특징 벡터 검출법을 제시했다. 그 결과 비드온플레이트 용접시 완전 용입 조건과 최적 입열량 판단 기준은 약 1.6V 레벨인 것을 판단된다. 완전입열을 구분하기 위한 방법으로 UV 신호에서 IR 신호 값의 차이를 기준으로 판단하였다. 이 신호의 차이가 0.4V이상 발생되면 완전입열이라고 판별할 수가 있었다.

4. 레이저 출력에 따른 용융풀 유동을 분석하기 위해서 IR 신호를 디지털 필터 버터워스(Butterworth)필터를 사용했고, DC 성분을 분리하기 위해서 저역필터(Low pass filter)를 이용하여 25Hz에서 컷오프(Cut-off)된 표준화 신호를 얻었으며, IR 신호의 AC 성분을 분리하기 위해서 역 체비셰프((Inverse Chebyshev)필터에서 Band Pass filter를 이용하여 낮은 컷오프 주파수는 0.03Hz, 높은 컷오프주파수는 110Hz로 하여 처리하였다. 그 결과로서 위와 같이 분석된 신호는 키홀의 불안정한 정도를 구분할 수가 있었다.

5. 레이저 용접 속도에 따른 FFT 처리 결과는 용접속도 0.7 m/min와 1.5 m/min일 때 주파수는 각각 94Hz와 185Hz로 나타났다. 이 결과를 토대로 용접속도가 증가하면 입열량이 감소하기 때문에 키홀의 크기가 작아지고, 용융부의 깊이가 얇아짐에 따라 키홀의 변동주기가 짧아진다는 것으로 판단할 수가 있었다.

6. 중탄소강의 니켈도금 유·무에 따른 방사신호를 비교했을 때 니켈 도금된 중탄소강이 니켈도금 되지 않은 중탄소강에 비해 UV 신호의 평균 DC 전압은 0.15V로 높게 나타났고, 전압의 주기 폭은 니켈 도금된 중탄소강은 1.4V~1.8V이며, 니켈도금 되지 않은 중탄소강 1.2V~1.9V까지로 신호의 폭이 넓게 형성됨을 알 수 있었다.

7. 외·내부 결함을 판단하기 위한 분석방법의 경우 순간적인 진동 신호는 넓은 주파수 대역을 가지기 때문에 BPF(Band Pass Filter)로는 외부환경 잡음만 효과적으로 제거시킬 수 없다. 그러므로 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 FWT(Fast Wavelet Transform)를 사용한 De-noise방식으로 적용하였다. 이렇게 적용된 알고리즘을 이용해 임의의 시험편에 외부결함에 따른 플라즈마 방사신호를 분석했다. 그 결과 1mm씩 깊이 방향으로 결함을 구분할 수가 있었으며, 0.1V 전압의 차가 발생하는 분해능을 가질 수가 있었다.

8. 중탄소강의 레이저 용접 모니터링시 정상적인 입열량 신호는 UV신호에서 1.4V~1.7V사이가 최적 기준신호를 판단된다. 이 기준신호 범위에 90%이상 들어오면 유동의 흐름이 좋으며, 스패터 발생하는 확률이 낮아져 정상입열이라고 판별할 수가 있었다.

중탄소강의 레이저용접 시 플라즈마 광신호 (UV 신호와 IR 신호)의 모니터링 결과 용접품질을 평가할 수 있는 다음과 같은 정량적 값을 얻었다. .

UV_signal	IR_signal	용접품질
$\geq 1.6V$	$\geq 1.2V$	Good
$\geq 1.6V$	$\leq 1.2V$	Poor
$\leq 1.6V$	$\geq 1.2V$	Cut
$\leq 1.6V$	$\leq 1.2V$	기공, 부분용입
진동(Oscillation)	진동(Oscillation)	협핑, 스페터 등,

참 고 문 헌

1. Masao Watanabe, Hideki Okado, Takasi Inoue, 1995, "Features of Various In-process Monitor Methods and Their Application to Laser Welding", ICALEO, pp.553~562.
2. Mao, Y. L., Kinsman, G., and Duley, W. W., 1993, "Real-time Fast Fourier Transform Analysis of Acoustics Emission During CO2 Laser Welding of Materials," Journal of laser Application, Vol.5, No.2/3, pp. 17~22.
3. Teresa S., Antonio A., and Domenico R., 2010, "Plasma Plume Oscillations Monitoring during Laser welding of Stainless Steel by Discrete Wavelet Transform Application," Sensors, Vol. 10, No. 4, pp. 3549~3561.
4. Brooks, R. R., 1997, Multi-Sensor Fusion: Fundamentals and Applications with Software, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
5. Hatwig, A., R. Kutzner and M. Jurca (1990). 'Laser on-line überwachen mit dem Laser Welding Monitor LWM'. Laser Magazin, 4, pp. 20-25.
6. Jurca, M., D. Mokler, R. Ruican and T. Zeller (1994). 'On-line Nd:YAG laser welding process monitoring'. Proceedings of SPIE, 2207, pp. 342-352.
7. Chen, H.B., D.J. Brookfield, K. Williams and W.M. Steen (1991). 'Laser process monitoring with dual wavelength optical sensors'. Proceedings of ICALEO'91, pp. 113-122.
8. Müller, M., F. Dausinger and J. Griebisch (1996). 'On-line-Prozesssicherung beim Laserschweissen'. Proceedings of ECLAT '96, pp. 243-250.

9. Gu, H. and W.W. Duley (1996). 'A statistical approach to acoustic monitoring of laser welding'. J. Phys. D:Appl. Phys. 29, 29, pp. 556–560.
10. Tönshoff, H.K., F. and Ostendorf-A. Alvensleben, Von and R. Rüttler (1998a). 'Process monitoring of CO₂ laser welding processes using a diffractive bending mirror'. Proceedings of ICALEO '98, Section C, pp.78–85.
11. Tsukihara, H., E. Ichikawa, E. Kojima and S. Kimura (1998). 'An approach to monitor YAG laser welding process using its reflected laser power'. Proceedings of ICALEO '98, Section C, pp. 93–101.
12. Ikeda, T., T. Kojima, E. Ohmura, I. Miyamoto, T. Nagashima, S. Tsubota and T. Ishide (1999). 'In-process monitoring of weld qualities using multi photo sensor system in pulsed Nd:YAG laser welding'. Proceedings of ICALEO'99, pp. 59–66.
13. Gu, H. and W.W. Duley (2000). 'A gap-detection technique for laser beam butt welding'. Proceedings of ICALEO '00, Section E, pp. 11–16.
14. Sanders, P.G., J.S. Keske, G. Kornecki and K.H. Leong (1997). 'Capabilities of infrared weld monitor'. Proceedings of ICALEO'97, pp. 1–10.
15. Beersiek, J., R. Poprawe, W. Schulz, H. Gu, R.E. Mueller and W.W. Duley (1997). 'On-line monitoring of penetration depth in laser beam welding'. Proceedings of ICALEO '97, pp. 30–39.
16. Lankalapalli, K. (1997). 'Model-based laser weld penetration depth estimation'. Welding in the world, 39, pp. 304–313.
17. Peters, C., M.D. Fox, F.M. Haran, D.P. Hand, J.D.C. Jones and W.M. Steen (1998). 'Nd:YAG welding penetration-monitoring using backscattered laser light from in and around the keyhole'. Proceedings of ICALEO '98, pp. 149–157.

18. Lhospitalier, S., S. Bres, P. Bourges, C. Dumont and M. Lambertin (1998). 'Thermomechanical phenomena occurring during laser welding of an austenitic stainless steel'. Proceedings of ICALEO '98, C, pp. 53–61.
19. Abels, P., S. Kaierle, C. Kratzsch and W. Poprawe, R. Schulz (1999). 'Universal coaxial process control system for laser material processing'. Proceedings of ICALEO '99, section E, pp. 99–108.
20. Kratzsch, C., P. Abels, S. Kaierle, R. Poprawe and W. Schulz (2000). 'Coaxial process control during laser beam welding of tailored blanks'. Proceedings of SPIE, 3888, pp. 472–482.
21. Beersiek, J. (1999). 'On-line monitoring of keyhole instabilities during laserbeam welding'. Proceedings of ICALEO'99, section D, pp. 49–58.
22. Beersiek, J (2001). 'A CMOS camera as a tool for process analysis not only for laser beam welding'. Proceeding of ICALEO '01, CD-ROM.
23. Holbert, R.K., R.W. Richardson, D.F. Farson and C.E. Albright (2000). 'Image-based penetration monitoring of CO2 laser beam welding'. Welding Research Supplement, pp. 89s–96s.
24. Martin, B, A Loreda, M. Pilloz and D. Grevey (2001). 'Characterisation of CW Nd:YAG laser keyhole dynamics'. Optics & Laser Technology, 33, pp. 201–207.
25. H. Chen, L. Li, D. Brookfield, K. Williams, and W. Steen, "Laser process monitoring with dual wavelength optical sensors," ICALEO'91, pp. 113–122.
26. F. Haran, D. Hand, C. Peters, and J. Jones, "Process-control in laser welding utilizing optical signal oscillations," ICALEO'96, pp. B49–B57.
27. M. Jurca, "Paper 93 LA 030," Jurca Optoelektronik GmbH, Germany, 1993.

28. J. Griebisch, L. Schlichtermann, M. Jurca, W. Hoving, and C. Nillesen, "Quality assurance of industrial spot welding with a pulsed Nd:YAG laser," ICALEO'96, pp. B164-173.
29. J. Griebisch, L. Schlichtermann, M. Jurca, S. Heissler, and D. Funk, "On-line monitoring of laser welding," Ind. Laser Rev. May, 7-10 (1997).
30. S. York (private communication), Laser Applications Inc., December 16, 1996.
31. C. Shultz (private communication), Agema Infrared Systems, December 16, 1996.
32. D. Atkinson (private communication), Land Infrared, June 4, 1997.
33. B. Zimmerman (private communication), Process Equipment Company, June 11, 1997.
34. F. Kuepper (private communication), Fraunhofer Resource Center, Michigan, November, 1996.
35. M. Ogal (private communication), Conversion Energy, July, 1997.
36. M. Gartner (private communication), Ford Motor Company, July, 1997.
37. K. Zimmermann (private communication), Thyssen Laser-Technik GMBH, December 11, 1996. L. Ang, W. Cohen, and R. Gilgenbach, "Plasma monitoring for laser welding of aluminum," Technical Report for Fraunhofer Resource Center, Ann Arbor, Michigan (1996).
38. D. D. Lang, D. P. Geier, and B. L. Shultz, "Butt weld inspection and weld machine diagnostic system for continuous coil processing lines," Iron Steel Eng. 73, 42-45 (1996).
39. D. Schneberk (private communication), Lawrence Livermore Laboratories, December 17, 1996.
40. S. Urb (private communication), Chrysler Transmission Plant, Kokomo, Indiana, December 17, 1996.
41. A. Rogers (private communication), Synergistic Detector Designs, December 17, 1996.
42. D. Pepper (private communication), Hughes Research Laboratories, December 16, 1996.
43. J. Flynn (private communication), General Motors, December 17, 1996.
44. M. Poszywak (private communication), Air Gage Company, November 26, 1996.

45. A. Wexler (personal communication), Ford Motor Company, April, 1997.
46. M. Littfin (personal communication), Stavely Instruments, June, 1997.
47. A. Zaleski (private communication), Z-Check Corporation, July, 1997.
48. D. Veres (private communication), TRIAM Automotive Corporation, October, 1997.
49. Prometec. Available from: <http://www.prometec.com>.
50. Precitec. Available from: <http://www.precitec.com>.
51. Spawr. Available from: <http://www.spawrindustries.com/>.
52. F. Bardin, A. Cobo, J.M. Lopez-Higuera, O. Collin, P. Aubry, T. Dubois, M. Högström, P. Nylén, P. Jonsson, J.D.C. Jones, and D.P. Hand, Optical techniques for real-time penetration monitoring for laser welding. *Applied Optics*, 2005. 44(19): p. 3869-3876.
53. T. Bautze, K. Diepold, and T. Kaiser. A cognitive approach to monitor and control focal shifts in laser beam welding applications. *Proceedings of ICIS 2009*.
54. J. Gao, G. Qin, J. Yang, J. He, T. Zhang, and C. Wu, Image processing of weld pool and keyhole in Nd:YAG laser welding of stainless steel based on visual sensing. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2010. 21(2): p. 423-428.
55. R. Olsson, I. Eriksson, J. Powell, A.V. Langtry, and A.F.H. Kaplan, Challenges to the interpretation of the electromagnetic feedback from laser welding. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010. 49(2): p. 188-194.
56. R. Fabbro, S. Slimani, I. Doudet, F. Coste, and F. Briand, Experimental study of the dynamical coupling between the induced vapour plume and the melt pool for Nd-Yag CW laser welding. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2006. 39(2): p. 394-400.

57. I. Eriksson, J. Powell, and A.F.H. Kaplan, Signal overlap in the monitoring of laser welding. *Measurement Science and Technology*, 2010. 21(10): p. 105705.
58. A. Molino, M. Martina, F. Vacca, G. Masera, A. Terreno, G. Pasquettaz, and G. D'angelo, FPGA implementation of time-frequency analysis algorithms for laser welding monitoring. *Microprocessors and Microsystems*, 2009. 33(3): p. 179-190.
59. M. Schmidt, A. Otto, and C. Kägeler, Analysis of YAG laser lap-welding of zinc coated steel sheets. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2008. 57(1): p. 213- 216.
60. D. Rizzi, T. Sibillano, P. Pietro Calabrese, A. Ancona, and P. Mario Lugarà, Spectroscopic, energetic and metallographic investigations of the laser lap welding of AISI 304 using the response surface methodology. *Optics and Lasers in Engineering*, 2011.
61. F. Bardin, A. Cobo, J.M. Lopez-Higuera, O. Collin, P. Aubry, T. Dubois, M. Högström, P. Nylén, P. Jonsson, J.D.C. Jones, and D.P. Hand, Optical techniques for real-time penetration monitoring for laser welding. *Appl. Opt.*, 2005. 44(19): p. 3869-3876.
62. T. Sibillano, A. Ancona, V. Berardi, and P.M. Lugarà A Real-Time Spectroscopic Sensor for Monitoring Laser Welding Processes. *Sensors*, 2009. 9(5): p. 3376-3385.
63. M. Jager and F.A. Hamprecht, Principal Component Imagery for the Quality Monitoring of Dynamic Laser Welding Processes. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 2009. 56(4): p. 1307-1313.
64. J.M. Jauregui, B.J. Aalderink, R.G.K.M. Aarts, J.O. Benneker, and J. Meijer, Design, implementation and testing of a fuzzy control scheme for laser welding. *Journal of Laser Applications*, 2008. 20(3): p. 8.
65. G. Li, Y. Cai, and Y. Wu, Stability information in plasma image of high-power CO₂ laser welding. *Optics and Lasers in Engineering*, 2009. 47(9): p. 990-994.

66. C. Bagger and F.O. Olsen, Laser welding closed-loop power control. *Journal of Laser Applications*, 2003. 15(1): p. 6.
67. Y. Kawahito, T. Ohnishi, and S. Katayama, In-process monitoring and feedback control for stable production of full-penetration weld in continuous wave fibre laser welding. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2009. 42(8): p. 085501.
68. S. Yang, W. Huang, D. Lin, F. Kong, and R. Kovacevic, Monitoring of the Spatter Formation in Laser Welding of Galvanized Steels in Lap Joint Configuration by the Measurement of the Acoustic Emission. *ASME Conference Proceedings*, 2008. 2008(48517): p. 143-146.
69. M. Doubenskaia, M. Pavlov, and Y. Chivel, Optical System for On-Line Monitoring and Temperature Control in Selective Laser Melting Technology. *Key Engineering Materials* 2010. 437.
70. A. Heralic, A.-K. Christiansson, M. Ottosson, and B. Lennartson, Increased stability in laser metal wire deposition through feedback from optical measurements. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010. 48(4): p. 478-485.
71. P. Stritt, R. Weber, T. Graf, S. Müller, and C. Ebert, Utilizing Laser Power Modulation to Investigate the Transition from Heat-Conduction to Deep-Penetration Welding. *Physics Procedia*, 2011. 12(Part 1): p. 224-231.
72. S. Tsukamoto, High speed imaging technique Part 2 - High speed imaging of power beam welding phenomena. *Science and Technology of Welding & Joining*, 2011. 16: p. 44-55.
73. S. Katayama, A. Yohei, M. Mizutani, and Y. Kawahito, Development of Deep Penetration Welding Technology with High Brightness Laser under Vacuum. *Physics Procedia*, 2011. 12(Part 1): p. 75-80.

74. B. Ribic, P. Burgardt, and T. Debroy, Optical emission spectroscopy of metal vapor dominated laser-arc hybrid welding plasma. *Journal of Applied Physics*, 2011. 109(8): p. 083301-10.
75. P. Stritt, R. Weber, T. Graf, S. Müller, and C. Ebert, Utilizing Laser Power Modulation to Investigate the Transition from Heat-Conduction to Deep-Penetration Welding. *Physics Procedia*, 2011. 12(Part 1): p. 224-231.
76. Y. Pan and I.M. Richardson, Keyhole behaviour during laser welding of zinc-coated steel. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2011. 44(4): p. 045502.
77. E. Le Guen, M. Carin, R. Fabbro, F. Coste, and P. Le Masson, 3D heat transfer model of hybrid laser Nd:Yag-MAG welding of S355 steel and experimental validation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2011. 54(7-8): p. 1313-1322.
78. C. Emmelmann, M. Kirchhoff, and N. Petri, Development of Plasma-Laser-Hybrid Welding Process. *Physics Procedia*, 2011. 12(Part 1): p. 194-200.
79. J. Blackburn, C. Allen, P. Hilton, and L. Li, Nd:YAG laser welding of titanium alloys using a directed gas jet *Journal of Laser Applications*, 2010. 22(2): p. 71-78.
80. X. Jin, A three-dimensional model of multiple reflections for high-speed deep penetration laser welding based on an actual keyhole. *Optics and Lasers in Engineering*, 2008. 46(1): p. 83-93.
81. H. Fennander, V. Kyrki, A. Fellman, A. Salminen, and H. Kälviäinen, Visual measurement and tracking in laser hybrid welding. *Machine Vision and Applications*, 2009. 20(2): p. 103-118.
82. C.S. Yoon, "A DSP System for On-line Monitoring in Laser Welding Using a IR and UV Sensor", *Journal of Korea Welding and Joining Society*, Vol.23, No.4, pp.53-58, 2005

83. H.S. Park, S.H. Rhee and K.W.Um, "Estimation of Co₂ Laser Weld Bead by Using Multiple Regression", Journal of Korea Welding and Joining Society, Vol.17, No.3, pp.29-35, 1999
84. Steen, W.M., "Laser Materials Processing" (4nd ed), Springer-Verlag, Berlin (2010)
85. 김도훈., “레이저가공학”, 경문사 (2009)
86. Kannatey-Asibu, E. "Principles of laser materials processing", John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey (2009)
87. Postma, S., Aarts, R.G.K.M., Meijer, J., “Penetration detection in Nd:YAG laser welding using optical sensors”, Proceedings of the 9th International Conference on Sheet Metal, SheMet, April, 2001
88. Holtgen, B., Treusch, H. G., and Aehling, H., 1988, Diagnostic system for lasers in the visible and near infrared region, SPIE Laser Assisted Processing, Vol. 1022, pp. 52-54.
89. Yi Zhang, Lijun Li and Gang Zhang, 2005,"Spectroscopic measurement of Plasma inside the Keyhole in deep Penetration laser welding”, J. Phys. D: Appl. Phys. 38, 703-710.
90. Ahmed, R., and Rao, K. R., 1975, Orthogonal Transforms and Digital Signal Processing, Springer-Verlag, Berlin.
91. Stanley, W. D., 1975, Digital Signal Processing, Reston Publishing, Reston, VA.
92. Brooks, R. R., 1997, Multi-Sensor Fusion: Fundamentals and Applications with Software, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
93. Sun, A., Kannatey-Asibu, E., Gartner, M., and Williams, W., 2001, “Time–frequency analysis of laser weld signature, Proceedings of SPIE Advanced Signal Processing Algorithms, Architectures, and Implementations” XI, Vol. 4474, pp. 103–114.

94. Sun, A., Kannatey-Asibu, E., Gartner, M., and Williams, W., 2001, Time–frequency analysis of laser weld signature, Proceedings of SPIE Advanced Signal Processing Algorithms, Architectures, and Implementations XI, Vol. 4474, pp. 103–114.
95. Hess-Nielson, N., and Wickerhauser, M. V., 1996, “Wavelets and time–frequency analysis, Proceedings of the IEEE”, Vol. 84, No. 4, pp. 523–540.
96. Daubechies, I., 1990, The wavelet transform, time–frequency localization and signal analysis, IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 36, pp. 961–1005.
97. Burrus, C. S, . Gopinath. R. A, and Guo. H, “Introduction to Wavelets and Wavelet Transforms” A primer. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall(1998)
98. Hess-Nielson, N., and Wickerhauser, M. V., 1996, Wavelets and time–frequency analysis, Proceedings of the IEEE, Vol. 84, No. 4, pp. 523–540.

저작물 이용 허락서

학 과	광응용공학과	학 번	20067439	과 정	박사
성 명	(한글) 김 도 형 (한문) 金 度 亨 (영문) Kim, Do Hyoung				
주 소	광주광역시 북구 삼각동 모아호반 102동 1805호				
연락처	E-mail : do-brother@hanmail.net				
논문제목	(한글) 레이저 강판 용접을 위한 실시간 모니터링 시스템에 관한 연구				
	(영문) A Study on Real-time Monitoring System for Laser Steel Sheets Welding				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건 아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함.
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집과 형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함.
3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물 이용의 허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음.
7. 소속 대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.

레이저 표면경화

동의여부 : 동의(○) 반대()

2012년 12월 31일

저작자: 김 도 형 (인)

조선대학교 총장 귀하