연속파형 Nd:YAG레이저를 이용한 S45C 강판의 레이저 용접 모니터링에 관한 연구

김도형*, 신호준⁺, 유영태⁺⁺

(Manuscript received: Jul, 31, 2012 / Revised: Sep, 8, 2012 / Accepted: Sep, 13, 2012)

A Study on the Monitoring of Laser Welding for S45C Steel Sheets Using Nd:YAG Laser with Continuous Waves

Do-Hyoung Kim*, Ho-Jun Shin⁺, Young-Tae Yoo⁺⁺

Abstract

Fluctuation of light intensity from the keyhole becomes more significant in full penetration welding than partial penetration welding, since the plasma produced in the keyhole can escape from the rear side of the keyhole. The plasma optical radiation emitted during Nd:YAG laser welding of S45C steel samples has been detected with a Photodiode and analyzed under different process conditions. As the results, 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.

Key Words : Laser welding(레이저용접), Plasma(플라즈마), Filter function(필터함수), Signal processing(신호처리), Histogram(히스토그램)

1. 서론

일반기계구조용강인 S45C는 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. 기존 리튬전지의 경우 극판과 극주의 접합방식을 리벳방식에서 용접방식으로 개선하고 있으며, 모듈 구성시 셀(cell)의 외부에서 전지를 조합하는 방식에서 과감히 탈피하여 단자와 단자간을 직접적으로

연결하여 불필요한 부품의 수를 줄여 전지의 중량을 줄이는 기술의 수요가 증가하고 있다.

산업현장에서 배터리 팩을 포함하여 중요한 기계구조부품으로 사용되는 S45C의 경우 용접에 있어서 몇 가지 좋지 않은 단점을 가지고 있다. 일반적인 중탄소강은 저탄소강에 비해 탄소함유량이 많아 용접했을 때 용접단면에 기공발생 등 열화에 따라 각종 기계적, 금속학적 특성이 저하된다.

레이저 용접은 공정변수에 민감하며, 특히 금속과의 상호작용이 중요한 변수로 작용하기 때문에 레이저빔에 의한 금속재료의 반사율, 흡수율 특성 및 표면가공 상태에 따라 용접성이

* 조선대학교 광응용공학과

+ 전남도립대학교 조선기계과

++ 교신저자, 조선대학교 메카트로닉스공학과 (ytyou@chosun.ac.kr)

주소: 501-759 광주시 동구 서석동 375

다르게 나타난다. 이차전지 산업에서도 밀폐화에 대한 신뢰성과 용접 깊이에 의한 용접강도 및 전기저항을 최소로 하는 용접 기술이 요구되어지고 있다. 이러한 고도의 용접품질을 확보하기 위해서는 효율적인 레이저 용접 시스템을 갖춰야 하는데, 이를 위해서 용접할 때 용접제품의 품질을 판단할 수 있는 실시간 검사 시스템이 필요하다.

실시간에 용접품질을 검사할 수 있는 모니터링 시스템은 레이저 용접 자동화를 위한 요소 기술로 용접 현상을 실시간 관측하기 위한 모니터링 기술 개발에 대한 요구가 레이저 용접 응용 범위가 확대되면서 최근에 크게 증가되고 있다.

기후 용접으로 이루어지는 레이저 용접은 레이저 빔의 파장, 출력, 용접속도, 재료의 열전달, 반사율, 재료의 형상, 보호가스의 종류와 유량, 초점거리에 따라서 용입 깊이, 비드 폭 뿐만 아니라 내부기공, 열간균열, 냉간균열 등 결함이 발생할 수 있어 공정조건에 따라 동일한 재료에서도 용입 특성은 달라진다⁽¹⁾.

레이저 용접은 용접과정에서 플라즈마(Plasma)와 스패터(splatter)가 발생하며 용접품질을 예측하는데 활용된다. 플라즈마와 스패터에서 발생하는 파장은 190~1600nm 내외의 자외선(UV)에서 적외선(IR) 영역에 이르기까지 넓게 분포한다. 레이저 용접의 상태를 예측할 수 있는 플라즈마와 스패터의 거동을 자외선, 적외선 영역의 신호로 분석한 후 키홀(Keyhole)과 용융풀(Melt pool)에서의 거동을 예측하여 용접상태를 모니터링할 수도 있다.

Watanabe, etc 등은 각종 공정간 모니터링법의 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⁽²⁻⁴⁾. Y-L. Mae 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^(5,6).

또한, Teresa Sibillano 등은 용접 모니터링에서는 플라즈마와 스패터 광신호를 획득하여 비주기적인 과도현상을 해석하기 위해서 필터함수(Filter Function), 웨이브렛 변환(Wavelet Transform) 등을 이용하여 용융풀의 크기와 스패터의 양을 검출하는 알고리즘 연구를 수행 하였다^(7,8).

따라서 본 연구에는 배터리 팩을 구성하는 재료로 사용하는 S45C강을 시편으로 하여 레이저 용접 공정 변수에 따라 용접 특성이 달라지기 때문에 레이저 용접 공정변수에 따라 달라지는 플라즈마와 스패터의 거동을 모니터링 하여 용접결과를 예측하는데 활용 하고자 한다. 레이저 용접시 발생하는 플라즈마와 스패터의 신호를 측정된 후, 히스토그램과 UV와 IR신호의 DC전압차를 이용하여 레이저 용접 파워별 신호를 정량적으로 표현하였다. 계측된 신호(Raw signal)를 필터함수, 주파수 변

환(Fourier Transform)등을 이용하여 용입의 특성 및 신호의 신뢰성을 확보하기 위해 연구하였다. 이를 통해 레이저 공정변수의 변화에 따른 용접비드의 폭, 침투깊이, 기공 등을 검출할 수 있도록 실시간 레이저 용접 모니터링 기술을 개발하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험장치

본 연구에서 사용한 레이저는 평균유효출력이 2kW인 연속파(Continuous wave : CW) Nd:YAG 레이저이다. 용접할 때 초점거리(Focal Length)는 200mm의 용접렌즈를 사용하여 초점직경이 0.6mm인 빔을 시험편 표면에 고정된 후 실험하였다. 보호가스는 플라즈마 영향을 상쇄시키는 아르곤(Ar)를 사용하였고, 유량과 분사노즐의 입사각은 각각 15ℓ/min와 45°로 고정하였다. Fig. 1은 용접상태를 실시간 모니터링하기 위해 레이저 용접기에 시스템을 개발하여 부착한 사진을 나타내고 있다. 레이저 용접 모니터링 시스템은 시편 표면을 기준으로 45°로 50mm 높이에 설치하여 신호를 획득 하였다. 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 일체형으로 구성하였다.

레이저 용접 중 발생하는 스패터로 인한 광학계 손상을 피하기 위해 광학헤드 모듈 앞단에 윈도우(Windows)를 부착하였고 집속효율을 높이기 위해 초점거리가 50mm인 Bi-convex Lens을 사용하였다. 파장별 신호를 획득하기 위해서 다층 유전체(Dielectric) 코팅으로 95%의 가시광선을 반사하고 90%이상 적외선 파장을 투과하는 Cold Mirror와 가시광선영역에서 90%의 이상의 투과율을 가지며 95%이상 적외선 파장을 반사하는 Hot Mirror를 사용하였다. 또한, 신호의 광량(Quantity of Light)을 조절하기 위해서 ND 필터(Neutral Density Filter)를

Fig. 1 Measurement set up of signals in Nd:YAG laser welding

삽입하였다. 이상 설명한 광학계의 구성도를 Fig. 2에 나타냈다. 레이저 용접 하면서 각각의 파장대역별 센서에서 획득된 신호들은 내·외부 환경에 따라 막대한 영향을 끼치므로 잡음

Fig. 2 Diagram of the Optical head module

Fig. 3 The experimental set-up of Laser welding monitoring Systems

Table 1 Parameter of laser welding

	Bead-on-plate(BOP)
Laser power(W)	1200, 1400, 1600, 1800, 1900, 2000
Welding speed(m/min)	0.7~2.0
Focal position(mm)	0(Focal length:200mm)
Shielding gas(ℓ/min)	Argon, 15

Table 2 Chemical compositions of S45C steel(wt%)

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

Table 3 Physical properties of the material

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

(Noise)을 제거하기 위해 광학모듈과 접지하였고, 플라스마 신호를 증폭함에 있어서 나타나는 60Hz 전원 잡음제거를 위하여 노이즈 필터(Noise Filter)를 사용하였다. 증폭된 신호는 1차 LC 필터회로(Inductor Capacitor Filter Circuit)로 처리하여 신호 변환장치인 DAQ(Data Acquisition)보드(Board)를 사용하였다. DAQ보드 분해능은 16 bit이고, 샘플링 속도는 초당 10,000개의 데이터를 받도록 설정하여 분석 하였다. 레이저 용접할 때 실시간 모니터링하기 위한 광센서와 관련 회로도 구성은 Fig. 3에 나타냈다.

2.2 실험방법

본 실험에서 용접할 때 공정변수는 레이저 출력과 용접속도를 변화시키면서 비드온플레이트(Bead-on-plate: BOP) 실험과정 중 획득한 플라스마 방사신호를 분석하였다.

실험에 있어서 용접공정은 Table 1에 나타낸 것과 같이 레이저 출력은 1200~2000W까지 변화를 시켰고, 용접 길이 50mm, 용접속도는 1900W에서 0.7~2m/min로 변화시켜 실험 하였다. 시편의 크기는 100×60×3.2mm 제작하였고, 사용된 시편은 S45C 강으로 기계적 특성과 화학 조성을 각각 Table 2과 Table 3과 같다.

3. 결과 및 고찰

3.1 레이저 출력에 따른 방사신호 특성

레이저 용접은 키홀 용접으로 레이저의 출력이 증가하면 키홀의 크기가 증가하여 키홀 벽면에서 다중흡수·반수 현상이 발생하면서 인입되는 입열량이 증가한다. 고에너지 밀도를 갖는 레이저빔이 시편에 조사되면 키홀이 열리고 레이저빔이 이동하면 키홀 뒷부분에서 응고가 시작되면서 키홀이 닫혀지게 된다. 키홀을 열리게 하는 레이저의 출력과 키홀이 닫히게 되는 레이저빔의 이송속도에 따라 용접결과가 달라지게 된다⁹⁾.

양호한 레이저 용접의 품질을 확보하기 위해선 레이저빔의 출력, 이송속도를 기본으로 하여 재료의 반사율, 표면상태가 용접결과에 중요한 영향을 미치게 된다. 그리고 소재의 구성 성

분, 두께, 구조적 형상에 따라 용접성을 평가하는 기준이 달라진다. 레이저용접은 일반적인 용접에 비해 입열량이 작아 용접 후 변형이 적고, 빠른 용접속도가 강점으로 작용하고 있는 만큼, 레이저 용접의 높은 품질을 확보하기 위해 실시간 모니터링이 필요하다.

모니터링하는 방법으로 음파, 플라즈마, 스패터, 영상 등을 이용한 다양한 방법이 있다⁽¹⁰⁾. 이들 모니터링 방법에서 양호한 용접조건에 대한 결함이 발생했을 때, 비교 가능한 기준 신호를 분석하여 사전에 용접성을 평가할 수 있는 방법을 개발하는 것은 매우 중요한 과제이다.

본 연구에서는 레이저빔의 이송속도는 일정하게 하고 레이저 출력을 변화시키면서 비드온플레이트(Bead On Plate : BOP) 용접을 했다. 이송속도를 고정하고 출력을 변화시키면서 BOP 용접했을 때 플라즈마 파장을 신호로 분석하여 용접상태를 실시간 모니터링 할 수 있는 시스템을 개발하였다. 실험에 사용된 공정변수는 초점위치와 용접속도를 각각 0mm(focal length; 200mm)와 1.0m/min로 하고, 레이저 출력은 Table 1과 같이 1200W, 1400W, 1600W, 1800W, 1900W, 2000W로 변화시켰다.

Fig. 4는 레이저빔으로 BOP 용접했을 때 레이저 출력에 따른 플라즈마 강도의 신호를 나타내고 있다. 레이저 용접시 킥홀에서 분출되는 금속증기는 레이저 에너지를 흡수하여 플라즈마 상태를 나타내고, 이 플라즈마는 레이저 출력의 변화, 킥홀의 요동 및 킥홀에서 발생하는 금속증기의 변화에 의하여 급격하게 변화한다. 방출되는 플라즈마 방사광은 여러 영역의 파장을 갖고 있지만 대부분이 UV 영역이다. 킥홀의 거동에 의한 플라즈마의 변화가 용접상태에 대한 정보를 갖고 있으며 킥홀의 생성, 용입정도를 측정하는데 사용된다. IR 신호영역대역 발광신호는 재료의 용융 및 응고 과정에서 스패터가 발생하면

서 발광한다. 이러한 신호들을 획득하여 용접상태에 대한 정보를 알 수가 있기 때문에 이들 신호를 기준으로 레이저 모니터링 시스템을 개발하였다.

레이저 출력이 클수록 킥홀 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 나타남을 알 수가 있다. 그러나 킥홀의 요동이 매우 급격하게 진행되어 관찰이 쉽지 않고, 용융풀에서 스패터와 플라즈마에 의한 잡음성분이 유입되어 용접특성을 분석하는 것이 용이하지 않다.

레이저 용접시 검출된 방사신호의 데이터를 정량적으로 분석하기 위해 식 (1)을 이용하여 히스토그램(Histogram)의 특징벡터 검출 하였다.

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

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

Fig. 5는 레이저 출력 변화에 따른 UV 신호의 히스토그램으로 나타냈다. 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; 이하 V)이었고, 출력이 증가함에 따라 1.6~1.5V의 전압 빈도수가 가장 많이 나타났다. 이때 레이저 출력은 1600W에서 2000W로 증가시켰을 때 실험결과 이다. 실험결과를 분석한 완전 용입 조건과 최적 입열량 판단 기준이 1.6V에 근사

Fig. 4 UV and IR signal for laser powers

Fig. 5 Histogram of UV_signal in Laser power; (a) 1200W, (b) 1400W, (c) 1600W, (d) 1800W, (e) 1900W, (f) 2000W

Fig. 6 Average DC voltage of signals in laser welding

Fig. 7 FFT analysis for UV signal in laser welding

하기 때문에 1.6V기준으로 전압의 변위차가 적은 범위를 확보해야 용접 품질을 결정짓는 판단기준이 된다.

Fig. 6은 레이저 출력에 따른 플라즈마 방사신호를 DC 평균 전압변화량으로 분석한 결과를 나타냈다. 기존의 연구에서는 UV신호를 계측·비교함으로써 완전용입과 부분용입을 판별하였고, 더불어 완전용입시 UV 신호가 감소하였다⁽¹¹⁾. 그러나 Fig. 4에 나타난 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. 이렇게 관찰된 신호를 DC 평균전압 변화량을 이용해 분석했을 때 약 40%의 전압차가 발생할 경우 완전용입이 되었음을 판단하는 기준이 된다.

Fig. 7은 레이저 용접 속도에 따른 주파수성분 변화량을 나타

내었다. 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.

3.2 신호분석법에 의한 용입특성 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 있

다. 그리고 소재의 형상 및 두께에 대해 용접조건이 적절한 경우 레이저빔에 의한 용접부 키홀이 소재를 관통하여 진행하게 되면 키홀에서 발생된 금속증기가 분출하면서 스파터가 발생하면서 에너지가 관통되어 후면비드가 형성된다. 용접한 결과는 후면비드와 전면비드의 상태를 근거로 하여 용접품질의 정도를 판단하게 된다. 이와 같은 특성을 활용하여 산업현장에서는 제품의 특성에 따라 부분용입과 완전 용입을 분리해서 용접해야 하는 경우가 많다.

앞서 언급한 것처럼 UV신호와 IR신호는 키홀의 거동과 용융물과의 상호연관성을 지니고 있다. 또한 용입조건에 따라 방사신호의 전압차를 발생하는 현상을 확인했기 때문에 용접중 실시간으로 검출된 원(Raw)신호를 분석하면 용접성을 판단할 수 있는 중요한 변수로 활용할 수 있을 것으로 생각된다.

본 연구에서는 이런 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 체비셰프(Inverse Chebyshev) 필터에서 밴드패스 필터(Band pass filter)를 적용시켜 고주파대역의 신호를 수식적으로 표현했다. 이 신호를 이용하면 키홀의 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. 8에 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.

Fig. 8 Raw signals and filter signals in laser welding(Laser power: 1200W, welding speed: 1m/min)

이를 용접부의 파괴검사 및 육안검사로 관찰했을 때 용접부의 종횡비(폭/깊이)는 1이하로 나타났다. Fig. 9는 Fig. 8과 같은 조건으로 용접할 때 레이저빔의 출력을 1600W로 증가시켰을 때 UV와 IR신호를 나타내고 있다. 그림에서 표시한 A와 B는 용접할 때 시작점과 끝나는 점을 도시 하였다. Fig. 8과 Fig. 9의 실험결과에서 특이점을 레이저빔의 출력이 증가하면 UV신호와 IR신호가 저출력으로 부분용입이 되었을 경우와 비교해서 분리되고 있다. 이와 같은 현상은 뒤에 설명할 Fig. 10에 나타낸 것처럼 출력이 2000W로 더 증가하면 출력이 1600W나 1200W일 때 나타난 IR과 UV 신호의 중첩현상이 없이 완전히 분리된 실험 결과를 관찰할 수 있다.

Fig. 8에서 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

Fig. 9 Raw signals and filter signals in laser welding(Laser power: 1600W, welding speed: 1m/min)

Fig. 10 Raw signals and filter signals in laser welding(Laser power: 2000W, welding speed: 1m/min)

관련성이 깊은 것으로 판단되고, 이런 전압의 응답시간 폭이 낮은 경우 키홀의 크기가 매우 작아 관통용접보다는 부분용접 용접될 가능성이 많은 요소로 판단기준이 된다. 그리고 “B” 지점은 키홀이 열린 후 에너지가 단절될 때 키홀 압력과 용융층의 표면장력 그리고 냉각시간에 의해 크레이터로 나타난다.

Fig. 9은 레이저 출력을 1600W로 하여 레이저빔을 시편에 조사했을 때 재료와 상호작용하면서 발광하는 신호를 획득한 키홀과 용융풀의 거동을 나타냈다. 레이저빔의 출력이 1200W에서 1600W로 증가시키면 Fig. 8에 나타난 것처럼 IR신호와 UV신호가 중첩되었다가 IR신호가 분리되는 것이 관찰된다. 이는 레이저출력이 증가하면서 용융풀의 체적이 증가하면서 흡수된 에너지가 방사되는 파장인 UV신호의 강도가 증가하였기 때문이라고 생각된다. IR신호와 UV신호가 분리되는 전압차를 기준으로 부분용접 용접의 용입깊이를 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 밴드패스 필터를 적용한 신호를 분석하면 Fig. 8보다 주파수의 요동 성분이 감소하고 있는데 이는 용융풀의 질량이 레이저출력의 증가와 함께 커지기 때문으로 요동하는 성분이 감소하는 것으로 판단된다.

레이저빔의 출력을 2000W로 증가 시켰을 때 용접하면서 방사되는 IR신호와 UV신호를 Fig. 10에 나타냈다. 레이저출력이 증가하면서 Fig. 8과 같이 UV신호와 IR신호가 중첩되어 나타난 것과는 다르게 UV신호와 IR신호가 분리되었다. 이는 Fig. 9에서 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 있

다. Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10에 나타난 것처럼 레이저빔의 출력이 증가할수록 UV신호의 강도가 증가하는 것은 에너지가 큰 UV 파장의 강도가 증가하기 때문이다.

실험결과를 나타낸 Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10의 비교해 보면 본 연구를 위해 개발한 모니터링 시스템이 양호하게 작용하고 있음을 나타내고 있다.

Table 4는 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. 9와 Fig. 10에서 언급한 것처럼 용접 키홀의 깊이가 깊어져 후면비드가 형성되면 UV신호와 IR신호가 분리된 결과와 비교하면 Table 4의 결과와 일치하고 있다. IR신호를 밴드패스 필터 적용한 실험결과에서 A와B 부분이 움푹 들어간 이유는 용접할 때 초기 피어싱(Piercing)할 때와 용접 종료시 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 Table 5에 나타냈다. 출력 변화에 따라 용접단면 내부에 기공이 발견되고 있다. 레이저빔이 시편표면에 조사되어 충분한 입열량으로 키홀이 발생하면 증발된 금속증기의 압력이 키홀내에 상승하게 된다. 키홀내에 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 키홀이 열리고 닫히는 과정이 반복되면서 용접이 이루어진다.

Table 4 Variation of the bead shape according to laser powers

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

Table 5 Photo X-ray of the laser welding side bead

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

중탄소강은 용접시 탄소와 대기 중의 산소가 반응하여 CO, CO₂의 가스가 형성된다. 이런 반응은 용융금속 내부에서 발생하며, 이 가스는 용융금속의 응고 후 캐비티로 남게 된다. 용접 과정에서 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, 응고시간보다 배출되는 시간이 길게 되면 기홀 내부에 갇히게 되어 기공을 형성하게 된다.

BOP 용접단면을 나타낸 Fig. 10에서 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 나타난 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 닫히면서 포획되었기 때문이다.

이와 반대로 레이저 출력이 1800W 이상일 경우에는 입열량 증가로 기홀이 충분히 형성되어 용융금속의 응고가 지연되면서 발생된 기포가 용융금속 내에서 부유할 수 있는 충분한 시간이 확보되어 기포가 탈출할 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.

Fig. 11 Effect of aspect ratio on welding speeds

3.3 용접속도에 따른 방사신호 특성

레이저 빔이 재료표면에 흡수된 입열량을 결정하는 변수로 용입폭과 용입깊이가 중요한 변수이다. Fig. 11은 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 용융폭에 비해 용융깊이가 작아 종횡비가 급격하게 감소하였다.

Fig. 12는 용접속도변화에 따른 플라스마 방사신호를 나타냈다. 레이저빔의 이송속도가 느려 레이저빔과 재료가 상호작용하는 시간이 상대적으로 길 때는 IR신호와 UV 신호가 분리되

(a)

(b)

Fig. 12 Comparison with UV and IR signal according to welding speeds

었다. 레이저빔의 이송속도가 빨라 레이저빔과 재료가 상호작용하는 시간이 짧은 경우는 IR신호와 UV신호가 중첩되어 나타났다. 이와 같은 실험결과와 Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10에서 설명한 내용과 일치하고 있다.

Fig. 12(a)는 용접속도가 1.3m/min로 용접했을 때 UV 및 IR신호를 분석했고, IR신호를 역 체비 셰프(Inverse Chebyshev) 필터에서 밴드패스 필터(Band pass filter)를 적용시켜 고주파 대역의 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 균일하게 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 Table 5에서 언급한 것과 일치한다. Fig. 12(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. Table 5에서 설명한 이유로 X-ray 사진과 같이 용접부 내부에 기공의 다량으로 검출되는 것을 볼 수 있다.

4. 결론

본 연구를 위해 레이저 용접 모니터링 시스템을 제작하여 용접조건에 따른 신호의 특성을 분석한 결과로서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 레이저 출력이 클수록 키홀 및 UV 방사신호가 커지고 높은 온도에서 용융풀(melting pool)의 폭넓게 형성되어 IR 신호도 커짐을 알 수가 있었고, 레이저 출력별 방사신호를 DC평균 전압 변화량을 이용해 분석했을 때 약 40%의 전압차가 발생할 경우 완전용입이 되었음을 판단하는 기준을 세울 수가 있었다.
- (2) 측정된 신호를 필터함수에 적용하여 키홀의 거동과 플라즈마를 분석한 결과로서 신호의 요동은 플라즈마와 키홀의 안정도로 표현하여 용입특성에 대한 지표로 삼아 부분용입과 완전용입을 구분할 수가 있었다.
- (3) 따라서 본 연구를 위해 제작한 용접모니터링 시스템이 레이저 공정 변화에 따라 용접하면서 나타나는 신호를 잘 검출하고 있어 레이저 용접 모니터링 시스템을 신뢰할 수 있다고 생각된다.

References

- (1) Park, Y. W., and Rhee, S., 2008, "Monitoring of Laser Material Processing and Developments of Tensile Strength Estimation Model using Photodiodes," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 17, No. 1, pp. 98~105.
- (2) Watanabe, M., Okado, H., and Inoue, T., 1995, "Features of Various In-process Monitor Methods and Their

- Application to Laser Welding,” *Proceedings of ICALEO*, pp. 553~562.
- (3) Voelkel, D. D., and Mazumder, J., 1990, “Visualization and Dimensional Measurement of the Laser Weld Pool,” *ICALEO*, Vol. 71, pp. 422~429.
 - (4) Sun, A., Kannatey-Asibu Jr., E., and Gartner, M., 2002, “Monitoring of Laser Weld Penetration using Sensor Fusion,” *Journal of Laser Applications*, Vol. 14, No. 2, pp. 114~121.
 - (5) 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.
 - (6) Steen, W. M., and Mazumder, J., 2003, *Laser Material Processing*, Springer, Berlin. pp. 485~515.
 - (7) Smith, E. T., 1999, *Monitoring Laser Weld Quality using Acoustic Signals*, A Thesis for a Doctorate, University of Michigan, USA.
 - (8) 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.
 - (9) Sun, A., Kannatey-Asibu, E., Gartner, M., and Williams, W., 2001, “Time-frequency Analysis of Laser Weld Signature,” *Proc. of SPIE*, Vol. 4474, pp. 103~114.
 - (10) Postma, S., Aarts, R., Meijer, J., Jonker, B., and Zweers, W. M., 2001, “Features of Various In-process Monitoring Methods and their Applications to Laser Welding,” *ICALEO 2001*, 81e, pp. 1083~1092.
 - (11) Zhang, Y., Li, L., and Zhang, G., 2005, “Spectroscopic Measurement of Plasma Inside the Keyhole in Deep Penetration Laser Welding,” *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 38, No. 5, pp. 703~710.