

열복사의 색수차 공간여과를 이용한 레이저용접 감시기술

Process monitoring of laser welding using chromatic filtering of thermal radiation

백성훈*, 박승규*, 김민석*, 정진만*, 김철중*

Sung-Hoon Baik, Seung-Kyu Park, Min-Suk Kim, Chin-Man Chung and Cheol-Jung Kim

ABSTRACT

An innovative real-time weld monitoring technique using chromatic filtering of the thermal radiation from a weld pool is developed. The thermal radiation from the weld pool is focused on an aperture and the transmitted thermal radiation is monitored at two wavelengths with high-speed single-element detectors. Due to the chromatic aberration introduced in the focusing optics, the transmittance curve of thermal radiation varies by the wavelength. Owing to this difference in the transmittance, the local variation of thermal radiation from the weld pool can be monitored by processing the two spectroscopic signals from two detectors. In this paper, the algorithms to monitor the laser power on the weld specimen and the focus shift are investigated and the performances of laser power and focus monitoring are shown for a pulsed Nd:YAG laser welding. The monitoring of the weld pool size variation is also discussed.

Keywords : 레이저 용접(Laser Welding), 용접 감시(Weld Monitoring), 초점 감시(Focus Monitoring), 용접 검사(Weld Inspection), 색수차(Chromatic Aberration)

1. 서론

레이저 용접은 정밀 용접이 가능하고, 열의 영향을 받는 부위가 적으며, 비접촉/원격 용접이 가능하다는 등의 장점이 있어 최근 많이 사용되고 있다¹⁾. 광섬유 전송 레이저 용접 기술이 확산됨에 따라 광섬유와 집속 광학계의 건전성, 초점 상태 등에 대한 실시간 감시와 용접 깊이, 폭 등에 대한 in-line 용접 검사도 많이 연구되고 있다. 레이저 용접에 대한 가장 기초적인 광학식 감시 방법으로는 광검출기를 사용하여 레이저 용접 단면에서 발

생하는 플라즈마/플룸이나 열복사(thermal radiation) 신호를 분석하는 방법이 있다²⁾. 이 방법은 장치 구성이 간단하면서, 레이저 용접 상태에 대한 기초적인 정보를 얻을 수 있는 장점이 있다. 최근에는 레이저 용접 단면에서 방출되는 열복사의 파장을 분리하여 2개 이상의 광검출기로 측정하는 방법이 연구되고 있다. 이러한 방법은 레이저 빔이 조사되는 순간의 복사 신호를 측정하여 그 크기와 모양으로 현재의 용접 상태를 감시하는 방법과^{3,4)}, 광학계의 색수차를 이용하여 용접 광학계

와 레이저 용접 상태를 감시하는 방법⁵⁾으로 나눌 수 있다. 그러나 기존의 감시 기술들은 레이저 출력 변화에 의한 용접 상태 변화와 레이저 집속 광학계의 초점에 따른 레이저 용접 상태의 변화를 구별하기 어려우며, 용접 깊이 등 용접 결과에 대한 정보를 추출하는데 문제가 있다.

본 연구에서는, 광섬유 전송 레이저 용접장치의 용접 풀에서 발생하는 열복사(thermal radiation) 신호를 선택적으로 측정하고 이 신호를 분석하여, 레이저 출력과 용접 광학계의 초점 상태를 감시할 수 있으며 용접 결과에 대한 정보를 추출할 수 있는 감시 방법을 이론적으로 유도하고, 실험으로 확인하였다. 본 방법은 레이저 전송 광학계의 색수차를 이용함으로써 용접 풀의 크기에 따른 열복사 신호의 파장 별 투과율 차이를 측정/분석하는데 이론적인 기초를 두고 있다⁶⁾. 또한 레이저 용접 헤드의 광학부에 별도의 부가 감시 장치를 필요로 하지 않으므로 장치가 간단하고, 협소 구역에서의 레이저 용접 감시가 가능하다. 본 기술은 3/4" 직경의 원자력발전소 증기발생기 슬리브 보수 용접 상태를 감시하기 위하여 개발된 것으로, 일반적인 레이저 용접 장치에도 사용될 수 있다.

본 논문에서는 레이저 용접 상태 감시 및 용접 결과의 정보를 추출할 수 있는 색수차 공간여과 이론을 도출하고, 이를 구현하기 위한 simulation 결과 및 감시 장치의 구성에 대해 기술하였다. 또한 레이저 용접시의 레이저 출력 변화와 광학계의 초점 변화 감시 실험 및 용접 결과에 대한 정보 추출 가능성에 대해서도 논의하였다.

2. 색수차 공간여과를 이용한 용접 감시 이론

2-1 색수차 공간여과의 원리

색수차 공간여과에 의한 용접감시 방법의 원리는 Fig. 1과 같다. 용접 풀은 열복사의 광원이 되는데, 이 광원에서 발산되는 열복사를 영상광학계로 구경에 집속시키고 구경의 뒤에 있는 광검출기로 측정한다. 광검출기에서 측정되는 광량을 영상

광학계와 구경으로 구성된 광학계의 투과량으로 보면, 영상 광학계의 색수차 때문에 파장별로 투과 특성이 다르게 된다. Fig. 1에서 실선은 파장이 950 nm, 점선은 파장이 530 nm 인 열복사의 영상 경로를 나타낸다.

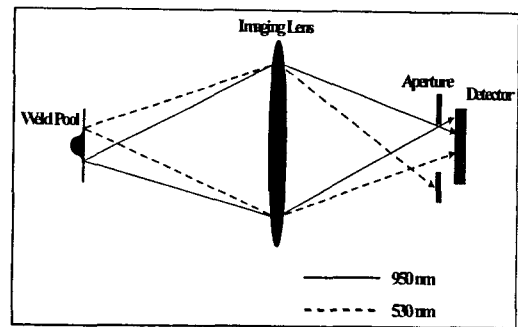


Fig.1 Principle of optical monitoring using chromatic filtering

Fig. 2는 용접 풀의 위치(반경)에 따른 색수차 공간여과 광학계의 투과율 곡선으로, 굵은 선은 초점이 맞는 파장에 대한 것이고 가는 선은 초점이 맞지 않는 파장에 대한 것이다. 초점이 맞는 파장에 대해서는 직사각형 구의 투과율 특성을 가지나 초점이 맞지 않는 파장에서는 용접 풀 주변부의 투과율이 완만하게 변하게 된다. 따라서, 광원의 크기가 변하게 되면 광원의 주변 부위에서 초점이 맞는 파장의 투과율과 초점이 맞지 않는 파장의 투과율의 변화가 다르게 나타난다. Fig. 2에서 투과율 곡선이 이루는 면적은 광학계의 투과량과 관련되어 있는데, 용접 풀의 반지름(r_0)을 경계로 하여 두 파장에서의 투과량이 역전된다. 이러한 특성을 이용하여 두 개의 단일 광소자로 용접 풀의 크기 변화를 감시할 수 있다는 것이, 색수차 공간여과의 기본 원리이다.

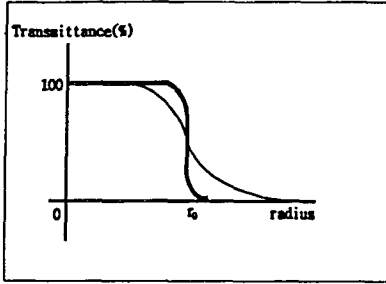
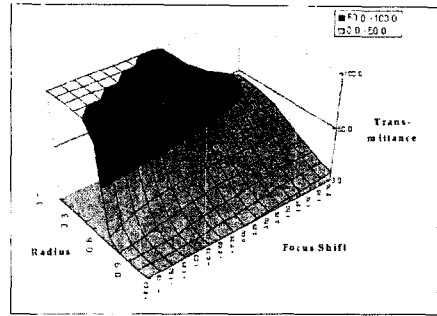
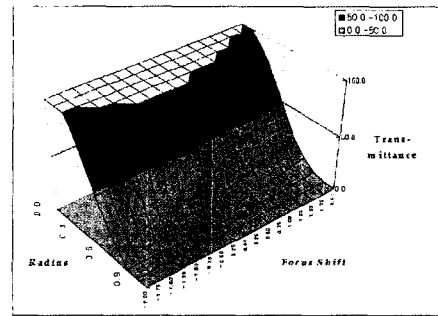


Fig. 2 Typical transmittance functions for chromatic filtering

색수차 공간여과 광학계를 이용하여 영상의 초점 감시를 할 수 있다. Fig. 1의 광학계는 950nm 파장의 실선에 대해서 초점이 정확히 맺힌 상태로 530nm 파장의 점선은 초점이 앞에 맺힌다. 용접 시편이 지금의 초점위치에서 앞 또는 뒤로 움직이면, 두 파장에서의 투과율 특성을 달라진다. 이러한 파장에 따른 투과율(투과량)을 측정함으로써, 현재의 초점이 최적 초점위치에서 어느 방향으로 얼마나 이동되어 있는지에 대한 정보를 분석해 낼 수 있다. Fig. 3은 원자력발전소 증기발생기 슬리브 레이저 보수용접용으로 개발된 광섬유 전송 펄스형 레이저 용접 광학계에 대하여 광학 분석 프로그램을 사용하여 색수차 공간여과 특성을 계산한 것이다. 광학계의 초점거리는 20mm이고, 재료는 색수차가 큰 SF11을 사용하였다. 가로와 세로 축은 각각 초점거리의 이동(defocus 정도)과 용접 풀의 위치(반지름)를 나타내며, 수직 축은 그 때의 투과율을 보여준다. Fig. 3 (a)는 파장이 530nm인 경우의 투과율 곡선으로, 초점이 가까워지면 투과율이 커지고 멀어질수록 투과율이 작아지며 용접 풀의 반지름에 대한 투과율 변화도 완만하다. Fig. 3 (b)는 파장이 950nm인 경우의 계산 결과로, 초점이 최적의 위치에서 가까워지거나 멀어지면 투과율이 떨어지며 용접 풀의 반지름 근처에서 투과율 변화가 급격함을 알 수 있다.



(a) Transmittance curve at 530nm



(b) Transmittance curve at 950nm

Fig. 3 Calculated transmittance curve of optical system for laser sleeve welding

2-2 분광신호 처리 알고리즘

두 파장에 대한 투과량 신호로부터 용접 풀의 크기 변화를 감시하고, 이를 이용하여 각종 용접 감시 변수를 추출하는 색수차 공간여과의 원리는 다음과 같다.

용접 풀을 균일한 온도분포를 갖는 원형의 복사 광원으로 가정한다. 레이저 용접시 용접 풀의 온도는 2,000°K 이하이고 측정하는 두 파장이 1 μm 이하이므로 λT는 14380 μmK 보다 훨씬 작다. 따라서, 광검출기로 검출되는 파장 λ₁과 λ₂에서의 열복사의 세기(두 개의 광검출기로 검출된 신호)는 각

$$I_1 = C_1 \text{Exp}\left(-\frac{14380}{\lambda_1 T}\right) \int_0^{r_0} t_1 r dr = C_1 \text{Exp}\left(-\frac{14380}{\lambda_1 T}\right) F(\lambda_1, r_0) \quad (1)$$

$$I_2 = C_2 \text{Exp}\left(-\frac{14380}{\lambda_2 T}\right) \int_0^{r_0} t_2 r dr = C_2 \text{Exp}\left(-\frac{14380}{\lambda_2 T}\right) F(\lambda_2, r_0) \quad (2)$$

식 (1)과 (2)에서, C_1 과 C_2 는 상수이며, T 는 광원의 절대온도이고, t_1 과 t_2 는 각각 파장이 λ_1 , λ_2 일 때 광원의 부위별 투과율이며 r_0 는 용접 풀의 반경이다.

광검출기로 측정된 분광신호를 두 시점에서 측정하여 그 비의 자연대수 값을 구하면 각각 다음과 같다.

$$\ln(I_1/I_2) = \frac{14380}{\lambda_1} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T'}\right) + \ln(F(\lambda_1, r_0)) - \ln(F(\lambda_1, r'_0)) \quad (3)$$

$$\ln(I_2/I_2) = \frac{14380}{\lambda_2} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T'}\right) + \ln(F(\lambda_2, r_0)) - \ln(F(\lambda_2, r'_0)) \quad (4)$$

이때 T' 과 r'_0 는 시간 지연된 시점의 온도와 용접 풀의 반경이다. 다음과 같이 온도 T 에 연관되는 항을 소거할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \ln(I_2/I_2) - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \ln(I_1/I_1) \\ &= \left[\ln(I_2) - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \ln(I_1) + D \right] - \left[\ln(I_2') - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \ln(I_1') + D \right] \\ &= \left[\ln(F(\lambda_2, r_0)) - \ln(F(\lambda_2, r'_0)) \right] - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \left[\ln(F(\lambda_1, r_0)) - \ln(F(\lambda_1, r'_0)) \right] \\ &= \left[\ln(F(\lambda_2, r_0)) - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \ln(F(\lambda_1, r_0)) \right] - \left[\ln(F(\lambda_2, r'_0)) - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \ln(F(\lambda_1, r'_0)) \right] \\ &= S(\lambda_1, \lambda_2, r_0) - S(\lambda_1, \lambda_2, r'_0) \end{aligned} \quad (5)$$

이 결과는 두 시점에서의 $[\ln(F(\lambda_2, r_0)) - (\lambda_1/\lambda_2) \ln(F(\lambda_1, r_0))]$ 값의 차이가 된다.

이 $\ln(F(\lambda_2, r_0)) - (\lambda_1/\lambda_2) \ln(F(\lambda_1, r_0))$ 값은 광원의 크기에 따라 달라지는 값으로, 광학계의 투과율 특성으로부터 계산하여 구할 수 있다. 두 시점에서 용접 풀의 크기 변화가 있으면 측정된 분광 신호로

부터 $\ln(I_2/I_2) - (\lambda_1/\lambda_2) \ln(I_1/I_1)$ 를 구하고, 계산치와 비교함으로써 용접 풀의 크기 변화를 알 수 있다.

Fig. 4는 각각의 초점 상태에서 용접 풀의 크기에 따른 $\ln(F(\lambda_2, r_0)) - (\lambda_1/\lambda_2) \ln(F(\lambda_1, r_0))$ 의 변화를 계산한 결과이다. λ_1 은 950nm이고, λ_2 는 530nm로 계산하였다. 계산값은 초점 상태에 따라 약간의 차이를 보이기는 하지만 전체적으로 거의 비슷한 경향을 보이고 있다. Fig. 4에서 극소값에 해당하는 용접 풀의 크기는 집속속된 레이저 spot 크기와 같으며, 이 경우에는 1mm이다. 일반적으로 레이저 용접시 용접 풀의 크기는 레이저가 조사되면서 점점 커져 레이저 spot보다 커지고, 레이저 조사 후 냉각 과정에서 다시 줄어든다. 이 과정은 한 펄스 안에서 용접 풀의 크기 변화가 Fig. 4의 우측에서 시작하여 최소값을 지나 좌측으로 진행한 후 다시 우측으로 진행되는 과정을 나타내게 된다. 따라서 냉각 과정 중에 측정된 두 분광신호 I_1, I_2 를 다른 시점에 측정된 모든 I_1', I_2' 와 비교하여 $\ln(I_2/I_2) - (\lambda_1/\lambda_2) \ln(I_1/I_1)$ 이 최대가 되는 I_1', I_2' 를 찾으면 이때 I_1', I_2' 의 측정 시점은 자동적으로 극소값의 시점이 되고, 이때의 $\ln(I_2/I_2) - (\lambda_1/\lambda_2) \ln(I_1/I_1)$ 값과 Fig. 4에서의 $\ln(F(\lambda_2, r_0)) - (\lambda_1/\lambda_2) \ln(F(\lambda_1, r_0))$ 값의 차이와 비교하면 I_1, I_2 의 측정 시점에서의 용접 풀의 크기를 추출할 수 있다. 후에 다시 언급되지만, 이 용접 풀의 크기 변화율은 용접 깊이와 관계되며, 따라서 용접 후 in-line 용접검사에 사용된다.

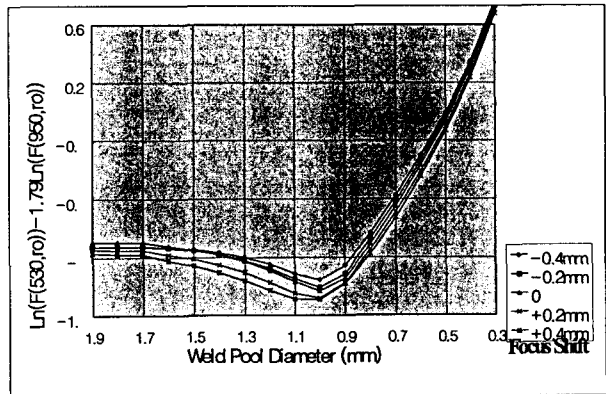


Fig. 4 Focus shift dependence of $\ln(F(\lambda_2, r_0)) - (\lambda_1/\lambda_2) \ln(F(\lambda_1, r_0))$

2-3 초점 감시 알고리즘

앞에서 측정한 두 파장의 분광신호의 비를 이용하여 집속 광학계의 초점 이동을 감시할 수 있다. 식 (1), (2)에서 두 분광 신호의 비의 자연대수를 구하면 다음과 같다.

$$\ln(I_1/I_2) = \ln(C_1/C_2) + \frac{14380}{T} \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) + [\ln(F(\lambda_1, r_0)) - \ln(F(\lambda_2, r_0))] \quad (6)$$

이 식에서 첫째항은 상수항이므로 온도에 관계되는 항 $(14380/T)[(1/\lambda_2)-(1/\lambda_1)]$ 의 변화가 크지 않다면, 둘째항 $\ln(F(\lambda_1, r_0))-\ln(F(\lambda_2, r_0))$ 의 광학계의 투과율에 관련된 값으로부터 초점이동에 대한 정보를 추출할 수 있다. 이 둘째항의 값은 광학계 특성에 따라 결정되므로, 광학계의 특성을 simulation 하여 초점이동에 따른 감도를 최적화하여 구성할 수 있다.

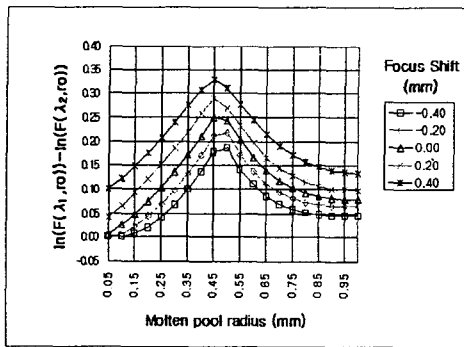


Fig. 5 Focus shift dependence of $\ln(F(\lambda_1, r_0))-\ln(F(\lambda_2, r_0))$

Fig. 5는 용접 풀의 반경에 따른 $\ln(F(\lambda_1, r_0))-\ln(F(\lambda_2, r_0))$ 값을 각각의 초점 위치에서 계산한 것이다. 용접 풀의 크기가 레이저 spot의 크기에서 많이 벗어나지 않은 경우, 용접 풀의 반경에 별 관계없이 0.8 mm 초점거리 이동시 $\ln(F(\lambda_1, r_0))-\ln(F(\lambda_2, r_0))$ 의 변화는 0.15 정도가 된다. 이 값을 이용하는 초점 감시에서는 식 (6)에서의 온도 변화에 의한 항 $(14380/T)[(1/\lambda_2)-(1/\lambda_1)]$ 이 노이즈로 작용하므로, 이 값의 변화가 작아야 초점 감시의

정밀도가 높다. 이 항의 값이 0.1 이하일 조건을 계산하여 보면, 1과 2가 각각 950nm, 530nm 이고 T를 1800 °K 로 가정할 때 ΔT 가 20 - 30 °K 정도이어야만 된다. 이와 같은 조건은 급속한 냉각이 시작되면 만족할 수가 없으므로, 레이저 펄스가 종료되기 직전의 온도 변화가 크지 않은 시점에서 측정하여야 한다. 더구나 이 시점은 용접 풀의 크기가 레이저 spot 크기와 비슷한 순간인데, Fig. 5에서 보면 이 부근에서는 용접 풀의 크기 변화 즉 레이저 출력 변화에 의한 영향도 작으므로 출력변화에 의한 용접 풀의 크기변화에는 무관하게 정밀 초점 감시가 가능하다.

2-4 레이저 출력 감시 알고리즘

대부분의 레이저 장치는 발전기에서 나오는 레이저의 출력을 감시하는 기능이 있다. 그러나 레이저가 광섬유를 통하여 용접 시편으로 전송될 때, 실제로 용접 시편에 조사되는 레이저의 출력을 직접 감시하는 것은 쉽지 않다. 식 (3)에서 용접 풀의 반경 r_0 와 r_0' 가 1에 대한 용접 광학계의 field of view 보다 충분히 크면 투과율의 시간에 따른 변화가 없어져 둘째항 $\ln(F(\lambda_1, r_0)) - \ln(F(\lambda_2, r_0))$ 은 0이 된다. 이 경우 $\ln(I_1/I_2)$ 은 다음 식과 같이 된다.

$$\ln(I_1/I_2) = \frac{14380}{\lambda_1} \left(\frac{1}{T'} - \frac{1}{T} \right)$$

이 값은 용접 풀의 온도 변화를 나타내는데, 용접 시편에 조사되는 레이저 출력에 따라 용접 풀의 냉각 속도가 달라지므로 이 값을 측정하여 실제 용접 시편에 조사되는 레이저의 출력을 감시할 수 있다.

3. 용접감시장치 구성 및 실험

Fig. 6은 본 실험에서 구성한 광섬유 전송 레이저 용접 장치와 색수차 공간여과를 이용한 용접 감시 장치의 구성도이다. 본 장치에서는 광섬유 끝 단면을 색수차 공간여과 광학계의 구경(aperture)

으로 사용하므로 용접 헤드부에 별도의 부가 장치가 필요 없으며, 광섬유 결합(coupling) 부에 용접 풀에서 발생하는 열복사를 측정하는 감시장치를 설치하였다.

레이저는 Rofin-Sinar사에서 제작된 평균 출력 1.2 kW 급의 펄스형 Nd:YAG 레이저를 사용하였으며, 용접 감시장치를 위한 두 개의 파장 λ_1 과 λ_2 로는 950nm와 530nm를 선정하였다. 950nm는 1.06 μm 의 Nd:YAG 레이저 파장과 거의 같은 색수차를 가지고 있으나 용접시 반사되는 레이저빔을 간섭필터로 차단할 수가 있으며, 530nm는 950nm에 대하여 충분한 색수차 효과를 보이며 광검출기로 사용한 실리콘 포토다이오드로 충분히 검출할 수 있기 때문에 선정하였다.

두 개의 광검출기에서 검출된 신호를 처리하기 위하여 12bit 고속 신호획득 장치를 설계/제작하였다. 두 개의 분광신호와 동기를 위한 레이저출력 신호는 고속 12bit 아날로그-디지털 변환회로를 거쳐 IBM PC의 병렬 포트에 컴퓨터에 연결된다. RISC 방식의 고속 1 칩 프로세서로 구성된 마이크로프로세서로 레이저 출력과의 동기 및 시간 지연을 제어하였다. 제작된 분광신호 검출장치의 제원은 Tab.1과 같다. 또한 측정된 신호를 디스플레이하고 분석하기 위한 프로그램을 개발하였다.

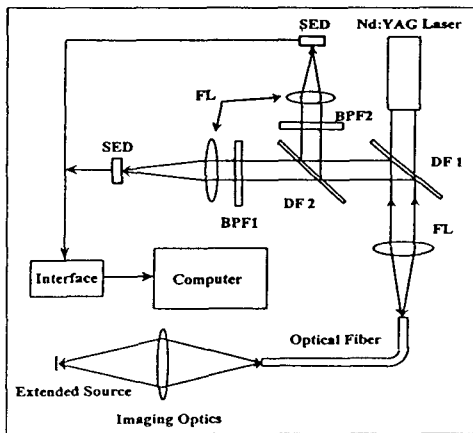


Fig. 6 Experimental setup for weld process monitoring using chromatic filtering (SED: single-element detector, DF1/DF2: dichroic filter)

Tab. 1 Specifications of signal acquisition module

구 격	제 원
분해능	12 BIT
측정속도	5 - 1000 μsec
동기 지연시간	0.1 - 100 ms
컴퓨터 인터페이스	Centronics Interface
데이터 메모리	1 MBYTE

4. 실험 결과

4-1 용접 풀의 크기 변화 감시

식 (5) 를 이용하여 용접 풀의 크기 변화를 감시하였다. 실험은 두께 1.0 mm 인 SUS 304 plate 를 겹쳐 용접하였으며, 용접에 사용된 레이저는 펄스 폭 7.5msec, 반복율 20pps 이다. Fig. 7은 레이저 평균 출력이 200W와 300W일 때, 레이저 펄스가 끝나갈 때의 $\ln(I_2/I_1) - (\lambda_1/\lambda_2) \ln(I_1/I_2)$ 의 값을 측정한 것이다. 가로축은 시간 축으로 레이저가 발진된 후 7ms부터 측정을 시작하여 100kHz로 데이터를 수집하였다. 측정값의 부호는 현재의 측정값이 최소값보다 앞에서 측정한 값이면 양의 값이고, 뒤에서 측정한 값이면 음수이다. Fig. 7에서 고출력 레이저 용접시 용접 풀의 크기가 빠르게 줄어드는 것을 알 수 있다. 이는 용입이 깊기 때문에 용융부의 표면적이 넓고, 따라서 전도에 의한 열의 이동이 많기 때문으로 판단된다. 따라서 이것을 감시함으로써 용입 깊이에 대한 정보를 추출할 수 있다. 이에 대한 실험 결과는 추후 다른 논문에서 더 자세히 다루고자 한다.

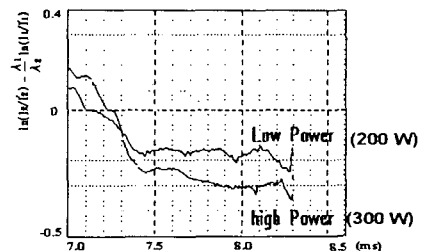


Fig. 7 Experimental results of power dependence on

$$\text{maximum } \ln(I_2/I_1) - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \ln(I_1/I_2)$$

Fig. 8은 레이저 평균 출력이 각각 250W, 170W 인 경우에, 레이저 펄스가 조사되고 멈출 때의 $\ln(L/I_2) - (\lambda_1/\lambda_2)\ln(L/I_1)$ 값을 측정하는 것이다. 데이터의 수집은 25kHz로 하였다. 그림에서 초기에는 큰 값을 갖고 계속적으로 작아져 안정 상태를 이루다가, 4.8ms를 전후하여 250W의 경우는 다시 커진 후 작아지고 170W의 경우는 계속 비슷한 값을 이루다가, 7ms를 전후하여 급격히 작아진다. 이 실험결과는 Fig. 4의 simulation 결과와 비교하여 다음과 같이 설명할 수 있다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 레이저 펄스 초기에 용접 풀의 반경이 작은 상태에서 커질 때에는 $\ln(F(\lambda_{1,r})) - (\lambda_1/\lambda_2)\ln(F(\lambda_{1,r}))$ 값이 크다. 따라서 Fig. 8에서 레이저 펄스의 초기 부분은 큰 값을 갖고 시간이 지날수록 계속 떨어지다가 Fig. 4에서 최소값을 갖는 순간, 즉 용접 풀의 단면이 레이저 spot 과 같은 크기가 되는 순간에서는 거의 0에 근접한 값을 갖는다. 데이터가 전체적으로 0보다 조금 큰 것은 데이터의 fluctuation 때문으로 판단된다.

그 이후 레이저 출력이 250W인 경우에는 다시 커지다가 이후에 줄어드는데, 이것은 Fig. 4에서 용접 풀의 크기가 레이저 spot의 크기보다 계속 커진 후 용접 풀이 냉각을 시작하면서 다시 작아지는 현상을 나타낸다. 이에 비해 레이저 평균 출력이 170W인 경우에는 용접 풀의 크기가 최소 값 부근에서 계속 머물다가 7ms이후에 떨어지는(다시 작아지는) 현상을 보인다. Fig. 8에서 $\ln(L/I_2) - (\lambda_1/\lambda_2)\ln(L/I_1)$ 값은 현재의 측정값이 두 번째 최소 값보다 시간적으로 앞에 있으면 양의 부호로 하고, 그 뒤에 있으면 음의 부호를 갖도록 처리하였다. 즉 Fig.8에서 7ms이후의 음의 값은 현재의 측정값이 두 번째 최소 값 이후에 측정된 값을 나타낸다. 용접 풀의 크기 감시 실험 결과를 Fig. 4의 계산결과와 비교하면 정량적인 용접 풀 크기에 대한 정보를 추출할 수 있다.

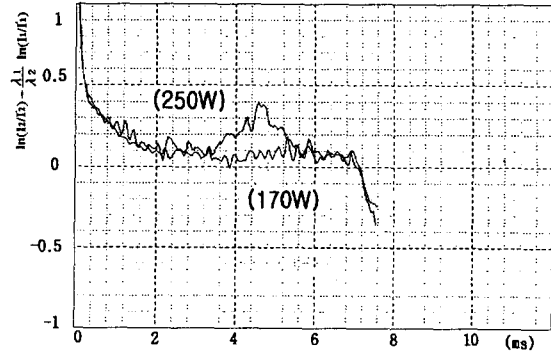


Fig. 8 Power dependence of size variation of a weld pool during one pulse

4-2 출력변화와 초점이동 감시

Fig. 9는 출력과 초점을 변화시키면서 두 개의 판을 용접했을 경우의 용접 깊이를 보여준다. Fig. 9(A)는 초점은 유지하면서 레이저 출력만을 변화시킨 경우로, 처음에 150W에서 시작하여 115W까지 줄이다가 다시 150W로 크게 하면서 용접하였다. Fig. 9(B)는 레이저 출력은 일정하게 하면서, 집속 광학계의 초점을 +0.5mm(최적의 초점에서 0.5mm먼 곳)에서 시작하여 선형적으로 움직여 최종적으로는 -0.5mm인 지점에서 끝난 경우이다. Fig. 9는 용접된 판 후면의 사진으로 oxidation 패턴이 넓을수록 용입이 크며, 따라서 레이저 출력에 클 때와 초점이 잘 맞은 경우 용입이 깊은 것을 볼 수 있다.

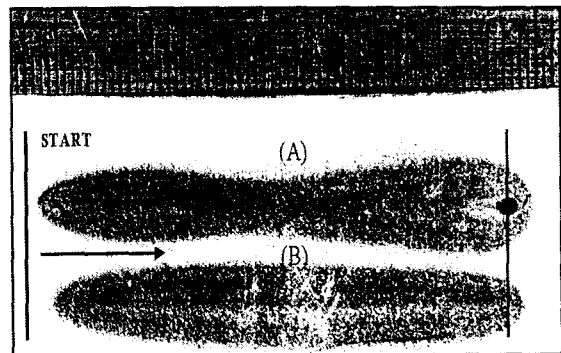


Fig. 9 Oxidation pattern for power variation (A) and focus shift (B)

(A) Power variation : 150W → 115W → 150W

(B) Focus shift : +0.5mm → -0.5mm

Fig. 10은 이 실험에서 식 (6)의 초점감시 알고리즘을 사용하여 초점을 감시한 실험결과이다. 앞에서 언급한대로 초점 감시를 위해서는 레이저 조사가 끝나기 직전 용접 풀의 크기가 레이저 spot 크기와 비슷한 상태에서 준 안정상태에 있을 때 신호를 측정하여야 한다. Fig. 10은 레이저 조사 시작 후 7.2ms가 지난 후, 레이저 출력이 떨어지기 시작할 때 측정된 결과이다. 세로축은 $\ln(L/L_1)$ 의 값이고, 가로축은 레이저 조사 회수를 나타낸다. Fig. 10에서 $\ln(L/L_1)$ 의 값은 출력변화에 대해서는 거의 차이가 없으며 오로지 초점 변화에 의해서만 변하고 있음을 보여준다.

초점이동 감시 실험결과를 Fig. 5의 simulation 결과와 비교하면 정량적인 초점 정보를 추출할 수 있다. Fig. 10에서 초점감시 신호의 fluctuation은 ± 0.05 정도인데, 이것을 Fig. 4의 simulation 결과로 보면 $\pm 0.25\text{mm}$ 정도에 해당한다. Fig. 10의 결과는 평균이나 중심선 추출등의 후 처리를 거치지 않은 것으로, 이러한 처리를 할 경우 초점 감시 정밀도는 $\pm 0.25\text{mm}$ 보다 훨씬 좋아질 것으로 생각된다.

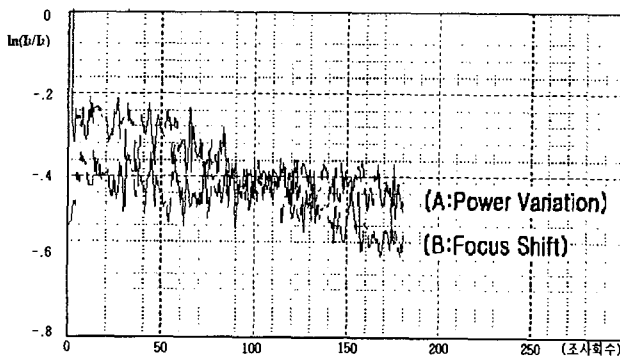


Fig. 10 Variation of $\ln(L_1/L_2)$ for power variation(A) and for focus shift(B)

Fig. 11은 동일한 실험에서 식 (7)의 $\ln(L/L_1)$ 값을 구한 결과이다. 세로축은 $\ln(L/L_1)$ 의 값이고, 가로축은 레이저 조사 회수를 나타낸다. 앞에서 언급하였듯이 출력 감시를 위한 분광신호는 레이저 용접 풀의 크기가 충분히 클 때의 의 신호를 사용하

는데, 본 실험에서는 레이저 발진 7.0ms 후에 $\Delta t = 10 \mu\text{s}$ 간격으로 측정된 값을 사용하였다. Fig. 11(A)에서 알 수 있듯이 $\ln(L/L_1)$ 값은 레이저 출력 변화에 대해 감도를 가지나, Fig. 11(B)에서와 같이 초점 이동에 대해서는 거의 변화가 없음을 알 수 있다.

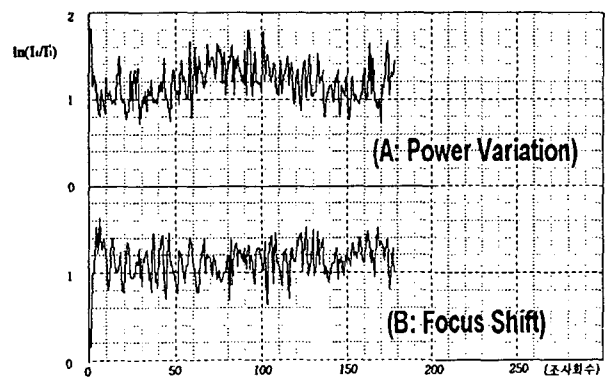


Fig. 11 Variation of $\ln(L_1/L_1)$ for power variation(A) and focus shift(B)

레이저 출력 감시 알고리즘은 레이저 출력에 따라 용접 풀의 냉각 속도가 다르다는데 착안하여 이루어진다. 레이저 출력에 따른 냉각속도의 차이는 현재 정량적으로 규명하지 못한 상태로, 레이저 출력 감시의 이론적인 유도나 정량적인 분석도 아직 이루어지지 못하고 있다. 그러나 같은 실험 조건에서 반복적인 실험 결과를 얻을 수 있으므로, 이를 이용하여 실제 감시에 적용할 수 있다고 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 펄스 레이저 용접시 집속 광학계의 색수차를 이용하여 용접 단면에서의 레이저 출력과 집속 광학계의 초점 상태를 감시할 수 있는 방법을 개발하였고, 이를 실험적으로 구현하였다. 개발된 방법은 하나의 기준으로부터의 초점 이동 상태를 정량적으로 측정 할 수 있으며, 레이저 발

진기에서 나오는 레이저 출력 뿐 아니라 실제 용접 대상체에 조사되는 레이저 출력을 실시간 감시할 수 있다는 장점이 있다. 또한 대부분의 레이저 용접 감시 방법이 출력의 변화에 의한 효과와 초점이동에 의한 효과의 구별이 어려운데 비해, 본 논문에서 구현한 방법은 어느 정도의 작은 출력변화와 초점이동 변화에 대해 서로 독립적으로 측정할 수 있다는 장점이 있다. 본 방법은 초점이동 정보를 이용한 자동초점 용접 장치의 구현과 용입 깊이 및 용접 결함 정보 추출에도 응용 가능할 것으로 기대된다.

Communications, Vol. 152, No. 4-6, pp.239-242, 1998.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

1. 정진만, 권성욱, 김철중, "Nd:YAG 레이저를 이용한 증기발생기 전열관 sleeve 보수 용접 연구," 한국원자력학회 '95 추계학술발표회 논문집 II, pp.961-966, 1995.
2. Dale U. Chang, "Real-time laser weld quality monitoring system" Proceedings of ICALEO '95, pp.1128-1137, 1995.
3. H. Chen, L. Li, D. Brookfield and W. Steen, "Multi-frequency fibre optic sensors for in-process laser welding quality monitoring," NDT & E International, Vol. 26, No. 2, pp.67-73, 1993.
4. K. J. Swidwa, "Infrared weld quality monitoring of laser welds during sleeve repair of steam generator tubes", Proceedings of Welding and Repair Technology for Power Plants : Third International EPRI Conference, 1998.
5. F. Haran, D. Hand, C. Peters and J. Jones, "Real-time focus control in laser welding," Measurement Science and Technology, Vol. 7, pp.1095-1098, 1995.
6. C-J Kim, M-S Kim and K-S Kim, "Size variation monitoring of an extended thermal radiation source by chromatic filtering," Optics