

광학적 색수차를 이용한 Nd:YAG 레이저 용접 상태 감시 기술 개발 Development of Optical Weld Monitoring in Nd:YAG Laser Welding

정진만, 정태문, 김철중
한국 원자력 연구소

Abstract

본 논문에서는 Nd:YAG 레이저 용접 시 열 복사의 색수차를 이용한 광학적 감시 방법 및 실시간 자동 초점 제어에 관한 연구를 기술한다. 광학적 감시 및 제어를 위해 두 개의 파장을 선택하였고, 색수차를 최적화 하였다. 실시간 자동 초점 제어는 두 신호의 비를 감시하고 이 신호의 비를 이용하여 초점을 항상 유지하도록 함으로써 임의의 형태로 구부러진 시편의 용접이 가능하였다.

1. 서론

레이저 용접은 열의 영향을 받는 부위가 적고, 비접촉으로, 광섬유 전송을 통한 원격 용접이 가능하기 때문에 용접 분야에서 각광받아 왔다. 레이저 용접 후 파괴적 및 비파괴적 방법으로 레이저 용접 품질을 검사하면 많은 시간과 비용이 소모된다. 따라서, 레이저 용접 상태를 실시간으로 제어하면 많은 시간과 비용을 절약할 수 있다. 레이저 용접 상태를 실시간으로 제어하는 방법으로 광학적 방법이나 음파를 이용한 방법이 주로 사용된다. 광학적 방법으로 과거에는 레이저 용접 단면에서 발생하는 플라즈마 플룸(plasma plume)이나 열복사 신호(thermal radiation)를 분석하였다. 그러나, 이러한 방법으로는 레이저 출력 변화에 따른 용접 상태의 변화와 집속 광학계의 초점 변화에 따른 용접 상태의 변화를 구별하기 어려운 단점이 있다.

본 연구에서는 레이저 용접 시 용접 풀(weld pool)에서 발생한 열 복사를 색수차(chromatic aberration)를 이용하여 용접 상태를 감시하고 실시간 자동 초점 제어(real-time auto-focus control) 방법을 기술한다. 열 복사의 색수차를 이용하기 위해서는 최소한 두 개 이상의 파장에서 신호를 측정한다. 측정된 신호들은 용접 풀의 크기 및 용입의 깊이에 관한 정보를 포함한다. 따라서 이 신호들을 분석하면 실시간으로 용접 상태를 감시할 수 있다.^{1,2} 실시간 자동 초점 제어를 위해서는 용접 풀의 크기를 일정하게 유지시켜야 하며, 이를 위해서 측정된 두 신호의 비를 허용된 범위 내에서 유지시키는 방법을 이용한다. 이와 같은 방법으로 임의의 형태로 구부러진 시편에 대해서 별도의 초점 추적 장치 없이 용접 풀의 크기를 일정하게 유지하는 것이 가능함을 보였다. 본 논문의 2 장에서는 색수차 공간 여과를 이용한 용접 감시 및 자동 초점 제어 이론을 설명하고, 3 장에서는 자동 초점 제어를 이용한 시편의 용접에 관한 실험 결과를 설명하고, 마지막으로 4장에서는 본 연구에 대한 결론으로 구성되어 있다.

2. 색수차 공간 여과를 이용한 용접 감시 및 초점 제어

레이저 용접시 용접 풀이 일정한 온도 T 를 갖는다고 가정하고, λT 가 14380 μmK 보다 작다고 하면, 파장 λ_1 과 λ_2 에서 광검출기로 검출되는 신호의 세기는 아래와 같이 표현된다.

$$I_{\lambda_1} = C_1 \exp\left(-\frac{14380}{\lambda_1 T}\right) \int_0^{r_0} t_1 r dr = C_1 \exp\left(-\frac{14380}{\lambda_1 T}\right) F(\lambda_1, T)$$

$$I_{\lambda_2} = C_2 \exp\left(-\frac{14380}{\lambda_2 T}\right) \int_0^{r_0} t_2 r dr = C_2 \exp\left(-\frac{14380}{\lambda_2 T}\right) F(\lambda_2, T)$$

여기서, C_1 과 C_2 는 각각 검출기의 이득과 광분할기에서의 반사율 등에 의해 결정되는 상수이고, T 는 용접 풀의 온도, t_1 과 t_2 는 용접 풀의 반경 방향으로 투과율, r_0 는 용접 풀의 반경이다. 두 신호(I_{λ_1} 과 I_{λ_2})의 비에 자연 대수를 취하면,

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

과 같다. 우변의 첫째항은 상수항이고 온도에 관계되는 항의 변화가 크지 않다면, $\ln(I_{\lambda_1}/I_{\lambda_2})$ 는 단지 광학계의 투과율에 관련된 값($\ln(F(\lambda_1, r_0)) - \ln(F(\lambda_2, r_0))$)으로 나타난다. 광학계의 투과율은 초점 이동에 따라 변화하는 양으로 $\ln(I_{\lambda_1}/I_{\lambda_2})$ 를 감시하면 초점 이동을 감시하는 결과가 된다. 그림 1은 초점 이동에 따른 $\ln(F(\lambda_1, r_0)) - \ln(F(\lambda_2, r_0))$ 값의 변화를 나타낸다. 여기서는 색수차를 최적화 하기 위해서 파장을 각각 950nm 와 530 nm로 선택하였다. 그림1로부터 $\ln(F(\lambda_1, r_0)) - \ln(F(\lambda_2, r_0))$ 값, 즉 $\ln(I_{\lambda_1}/I_{\lambda_2})$ 는 용접 풀의 직경이 1 mm이고 초점 이동거리가 0.8 mm일 때, 약 0.15 변화함을 알 수 있다. 또한, 집광 광학계가 시편으로부터 멀어질수록 $\ln(F(\lambda_1, r_0)) - \ln(F(\lambda_2, r_0))$ 값은 증가하고, 반대로 집광 광학계가 용접 시편쪽으로 접근하면 $\ln(F(\lambda_1, r_0)) - \ln(F(\lambda_2, r_0))$ 값은 감소한다. 실시간 용접 상태 제어를 할 경우, 용입의 깊이가 가장 최적의 상태일 때의 $\ln(I_{\lambda_1}/I_{\lambda_2})$ 값을 선정하고, $\ln(I_{\lambda_1}/I_{\lambda_2})$ 변화시 선정된 값과 비교하고 보정하여 줌으로써 실시간으로 초점을 제어 할 수 있다.

3. 색수차 공간 여과를 이용한 임의의 시편의 레이저 용접

그림 2는 본 실험에서 사용한 색수차 공간 여과를 이용한 용접 감시 및 실시간 자동 초점 제어 장치도이다. 사용된 레이저는 Rofin-Sinar사의 펄스형 Nd:YAG 레이저로 평균 출력은 최고 1.2 kW까지 가능하고, 레이저 출력은 직경이 800 μm 인 광섬유에 결합되어 감시 장치로 입사된다. 감시 장치를 통과한 레이저 출력은 직경이 1 mm인 광섬유에 결합된 후, 초점 거리가 각각 25 mm와 20 mm인 SF11 plano-convex 렌즈로 시준(collimation) 및 집속(focusing)된다. 시준 및 집속 렌즈로 구성된 광학계는 초점 제어를 위해 스텝 모터(steping motor)위에 장착되어 있다. 사용된 스텝 모터는 한 스텝당 0.1 mm씩 이동한다. 레이저 용접 시 용접 풀에서 발생된 열 복사는 다시 시준 및 집속 렌즈를 통해서 감시 장치로 되돌아가며, I_{950} 및 I_{530} 신호를 그림과 같이 bandpass 필터를 이용해서 선택적으로 실리콘 포토 다이오드를 통해 검출한다. 실시간 자동 초점 제어를 위해 $\ln(I_{\lambda_1}/I_{\lambda_2})$ 를 계산하고 기준 값과 비교한 후, 기준 신호보다 크면 스텝 모터를 앞으로 이동시키고 기준 신호보다 작으면 스텝모터를 뒤로 이동시키는 방법으로 초점 제어를 구현하였다.

그림 3은 초점 변화에 따른 $\ln(I_{950}/I_{530})$ 신호의 변화를 나타낸다. 레이저가 조사된 후, 7.2 ms 후에 신호가 관측되었으며, 초점이 이동함에 따라 $\ln(I_{950}/I_{530})$ 의 신호 크기가 변화하였다. 신호의 크기는 이론에서 예측한 바와 같이 초점이 시편에서 멀리 떨어질수록 컸다. 초점의 변화는 +0.5 mm에서 -0.5 mm까지 변화하였고, 이 때 $\ln(I_{950}/I_{530})$ 신호는 약 0.25 변화하였다. 이와 같은 신호의 변화는 이론에서 예측한 1mm 거리 이동시 $\ln(I_{950}/I_{530})$ 변화에 대한 0.19 값과 거의 비슷함을 알 수 있다.

그림 4는 임의의 형태로 구부러진 시편의 용접 모양을 보여주는 사진이다. 이 시편의 경우, 용입의 깊이가 최적인 곳의 $\ln(I_{950}/I_{530})$ 신호의 값은 0.26인 것으로 측정되었다. 따라서 기준값을 0.26 으로 설정하였다. 그림 5는 그림 4의 시편에서 스텝 모터가 이동한 궤적을 표시한다. 스텝모터의 궤적은 최대 약 10 mm정도 움직인 것을 볼 수 있다. 레이저 펄스의 반복율이 20 Hz이고 한 펄스당 스텝 모터는 약 0.1 mm가 이동하므로 이론적으로 이 감시 및 제어 장치는 55%의 기울기를 갖는 시편의 용접이 가능하다. 본 실험에서는 선형이동기가 약 50 mm 이동하는 동안 스텝 모터의 이동거리가 10 mm 이었으므로 약 20%의 기울기를 갖는 시편을 성공적으로 추적하여 용접할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 열 복사의 색수차 공간여과 방식을 이용한 용접 상태 감시 및 실시간 자동 초점 제어를 구현하였다. 색수차 공간여과 방식을 이용하기 위해 두 개의 파장을 선택하였고, 최적화된 두 파장은 각각 950과 532 nm였다. 실시간 자동 초점 제어를 위해 용접 풀의 크기를 일정하게 유지시키는 연산 방식(algorithm)으로서 두 신호의 비가 유지되도록 하였다. 이러한 방식으로 약 20%의 기울기를 갖는 임의의 형태로 구부러진 시편을 성공적으로 추적하여 용접할 수 있었다.

5. 참고 문헌

1. C-J Kim, M-S Kim, and K-S Kim, "Size variation monitoring of an extended thermal radiation source by chromatic filtering," Optics Communications, Vol. 152, 1998, pp. 239-242.
2. 백성훈, 박승규, 김민석, 정진만, 김철중, "열복사의 색수차 공간여과를 이용한 레이저 용접 감시 기술," 한국레이저가공학회지, Vol. 2, 1999, pp. 18-26.

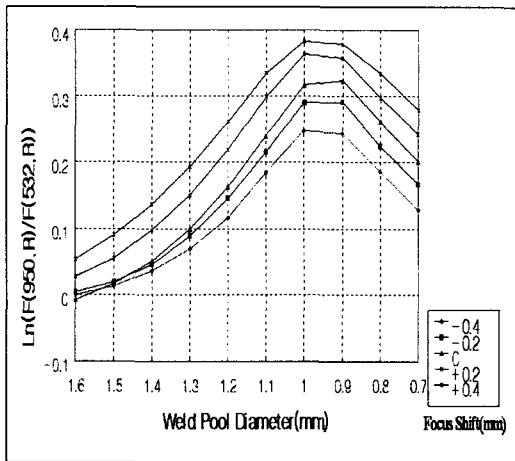


Fig. 1 Dependence of $\ln(F(\lambda_1, r_0)) - \ln(F(\lambda_2, r_0))$ on the focus shift.

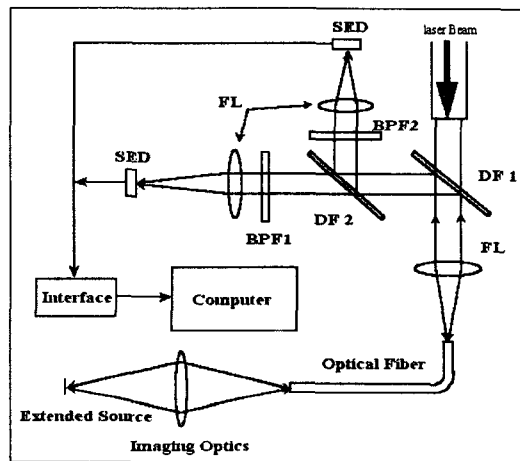


Fig. 2 Schematic diagram of an optical weld monitoring and auto-focus control system.

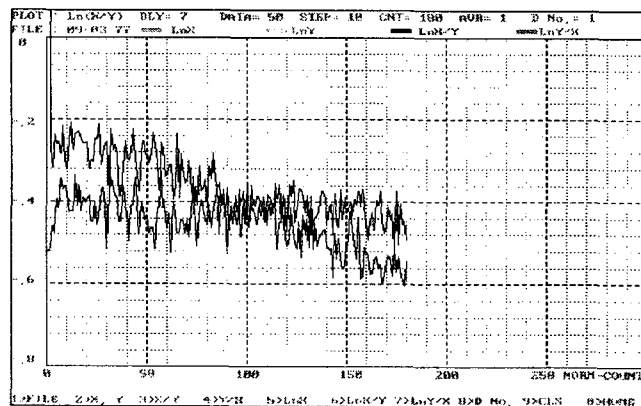


Fig. 3 Variation of $\ln(F(\lambda_1, r_0)) - \ln(F(\lambda_2, r_0))$ with respect to the focus shift.

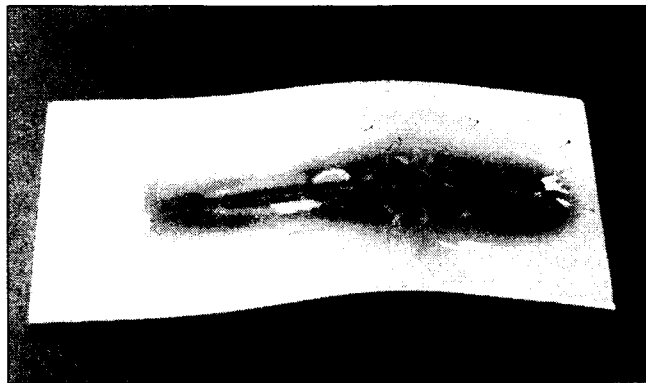


Fig. 4 Photograph of an arbitrarily shaped workpiece welded with an optical monitoring and auto-focus control system.

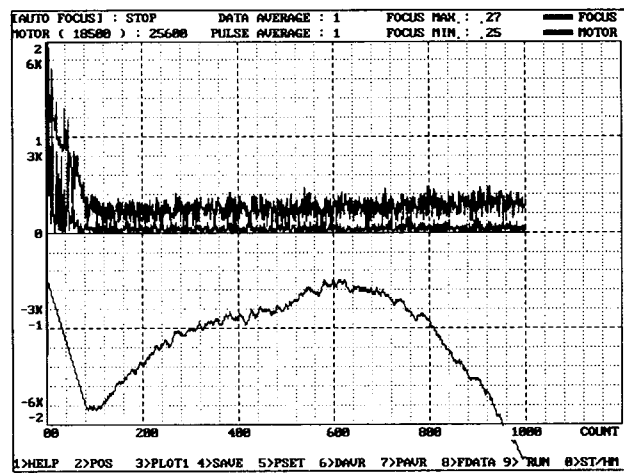


Fig. 5 Trace of a stepping motor along an arbitrarily shaped workpiece