

자동차 제작에서의 CW 레이저 용접 품질 감시기술

CW Laser Weld Quality Monitoring in Automobile Industry

한국원자력연구소 정진만, 백성훈, 김철중
현대자동차주식회사 장인성

I. 서론

레이저를 이용한 용접정밀가공은 지난 십 수년간 실험실 및 산업현장에서 수행되어 왔으며, 점차 산업전반에 걸쳐 이용이 확대되고 있는 추세이다. 최근에는 자동차 제작공정에도 레이저 용접 방법이 사용되는데, 사용되는 레이저는 가스레이저인 CO₂ 레이저에서 광섬유 전송이 가능한 고체 레이저인 Nd:YAG 레이저로 대체되고 있다. 레이저의 작업 시 가공효율을 높이기 위해서는 레이저 집광 광학계의 정확한 제어가 필요하며, 특히 일정한 레이저 용접 품질을 요구되는 자동차 제조공정 등에서는 레이저 가공 상태의 실시간 감시가 필요하다.

색수차를 이용한 광학적 방법의 레이저 용접 품질 감시는 주로 레이저 집광시 생성된 용융 풀(melting pool)에서 발생하는 열복사(thermal radiation)를 측정하고 분석하는 방법을 사용한다. 본 연구에서는 용융 풀에서 발생한 열 복사를 IR(infrared)와 UV/VIS 영역으로 크게 나누어, 색수차(chromatic aberration)에 의한 투과율을 분석하여 용융 풀의 크기 변화와 집속 광학계의 초점거리를 측정하게 된다. 각각의 파장에서의 색수차에 의한 열복사의 투과율 차이를 이론적으로 분석하고, 실제의 실험치와 비교함으로써 용융 풀의 크기와 초점거리를 측정한다. 이 방법은 레이저 출력 변화에 의한 용융 풀의 크기 변화와 초점거리 변화에 의한 용융 풀의 크기 변화를 구별할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 기본적인 이론과 실제 용접 실험에 적용하여 얻은 실시간 용접 품질 감시 실험 결과, 그리고 이를 이용하여 초점거리를 제어하는 장치에 대하여 기술한다.

II. 색수차 공간여과 개념

색수차 공간 여과를 이용한 레이저 용접 풀 상태 감시방식은 용융 풀에서 발생한 열 복사 중 특정 파장을 선택하여, 특정파장의 색수차에 따른 투과율 차이를 이용한다. 본 방법의 가장 큰 장점은 레이저 출력 변화에 따른 용융 풀 상태 변화와 집광 렌즈의 초점 변화에 따른 용융 풀 상태를 구별할 수 있다는 것이다.

가공부위인 용융 풀에서 발생하는 열 복사의 여러 파장은 그림 1 과 같이 집광 광학계 경로를 통하여 조리개(aperture) 역할을 하는 전송 광섬유로 다시 집속된다. 집광 광학계는 색수차를 가지므로, 광섬유에 집속되는 열복사의 크기 및 세기는 파장에 따라 다르게 나타난다. 그림 1에서 용융 풀의 온도(T) 분포가 일정하고, 원형일 경우, 서로 다른 두파장(λ_1, λ_2)에서 열 복사의 세기를 각각 $I_{\lambda_1}, I_{\lambda_2}$ 라 하면, I_{λ_1} 과 I_{λ_2} 의 자연대수 비는 다음 식 (1)과 같다

$$\ln(I_{\lambda_1}/I_{\lambda_2}) = C + \frac{14380}{T} \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) + \ln F(\lambda_1, r_0) - \ln F(\lambda_2, r_0) \quad (1)$$

여기서 C는 상수, T는 용융 pool의 온도이며, λ_1, λ_2 는 복사 파장이다. r_0 는 용융 풀의 반경이다. 여기

서 상수 및 두 번째 항이 신호 변화에 무관하다고 하면,

$$\ln(I_{\lambda_1}/I_{\lambda_2}) = \ln F(\lambda_1, r_0) - \ln F(\lambda_2, r_0) \quad (2)$$

이 된다. 식 (2)에 의한 $\ln(I_{\lambda_1}/I_{\lambda_2})$ 값은 열복사의 파장 및 용융 풀의 크기에 따라 다르게 나타난다. 따라서, 열복사 파장을 적절히 선택하고 초점에 따른 $\ln(I_{\lambda_1}/I_{\lambda_2})$ 값을 측정하면 $\ln(I_{\lambda_1}/I_{\lambda_2})$ 값에 따라 원하는 초점 및 용융 풀의 크기를 측정하고 제어하는 것이 가능하다.

그림 3은 초점 변화에 따른 용융 풀 크기별 $\ln F(\lambda_1, r_0) - \ln F(\lambda_2, r_0)$ 변화를 계산한 것이다. 용융 풀의 크기가 1 mm 부근에서 파장인 950 nm 와 1500 nm 인 신호를 측정하여 초점을 제어한다면, 레이저의 출력영향에 따른 용융 풀의 크기변화를 적게 받고 집광 광학계의 초점을 제어할 수 있다. 그림 3에서 용접 풀의 직경이 1mm 이고, 초점의 이동거리가 0.8mm 인 경우, $\ln F(\lambda_1, r_0) - \ln F(\lambda_2, r_0)$ 값 즉, $\ln(I_{\lambda_1}/I_{\lambda_2})$ 는 약 0.15가 변화함을 알 수 있다. 또한 집광 광학계가 시편으로부터 멀어질 경우 $\ln F(\lambda_1, r_0) - \ln F(\lambda_2, r_0)$ 증가하고, 반대로 집광 광학계가 시편으로 접근할 경우 $\ln F(\lambda_1, r_0) - \ln F(\lambda_2, r_0)$ 값은 감소한다. 따라서 이를 이용하여 실시간으로 집광 광학계를 제어할 경우 용융 풀의 크기가 최적상태에서 $\ln(I_{\lambda_1}/I_{\lambda_2})$ 값을 선정하고, $\ln(I_{\lambda_1}/I_{\lambda_2})$ 변화 값과 비교하여 보정함으로써 실시간으로 초점을 제어할 수 있다.

용융 풀의 깊이를 측정하기 위해서는 서로 다른 순간에 측정된 신호비를 이용한다. 용융 풀의 온도 (T) 분포가 일정하고, 원형일 경우, 서로 다른 두 파장 (λ_1, λ_2)에서의 열 복사의 세기를 각각 $I_{\lambda_1}, I_{\lambda_2}$ 라 하고, 서로 다른 시간의 세기를 각각 $I_{\lambda_1}', I_{\lambda_2}'$ 면, 각 파장의 자연대수 비는 다음 식 (3), (4)와 같다. 서로 다른 순간의 신호를 측정하여 그 비에 대한 자연 대수를 취하면 다음과 같다.

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

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

여기서 T' 과 r_0' 는 서로 다른 순간의 온도와 용융 풀의 크기이다. 여기서 온도에 의존하는 항을 소거하면, $\ln(I_{\lambda_2}/I_{\lambda_2}') - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \ln(I_{\lambda_1}/I_{\lambda_1}')$ 값은 시간 변화에 따른 용융 풀의 크기에 따라 달라진다.

그림 4는 용융 풀 직경에 따른 $\ln(I_{\lambda_2}/I_{\lambda_2}') - \lambda_1/\lambda_2 \ln(I_{\lambda_1}/I_{\lambda_1}')$ 의 변화를 계산한 결과 이다. 레이저 spot 위 크기를 1mm 라하고, 파장인 950 nm 와 530 nm 인 경우를 계산 하였다. 용융 풀의 크기가 적으면 신호의 세기가 크고, 용융 풀의 크기가 증가할 수록 신호의 크기가 감소하다가 레이저의 spot 크기와 용융 풀의 크기가 일치하였을 때, 세기가 최소가 됨을 알 수 있다.

레이저 spot 크기와 용융 풀의 크기가 같을 경우, 즉, $\ln(I_{\lambda_2}/I_{\lambda_2}') - \lambda_1/\lambda_2 \ln(I_{\lambda_1}/I_{\lambda_1}')$ 값이 최소가 될 경우를 기준으로 하여 매시간 마다 시간에 따른 크기 변화를 측정하면, 용융 풀의 크기변화로 용융 깊이를 알 수 있다. 이런 변화를 이용하여 레이저의 집광 광학계의 위치 및 레이저 출력을 실시간으로 제어하면, 동일할 품질의 레이저 가공상태를 얻을 수 있다.

III. 광학적 레이저 가공 감시 장치 개발

광섬유 전송 Nd:YAG 레이저를 이용한 원격 레이저 가공 시, 실시간 감시를 위해 그림 2 와 같은 장치를 구성하고, 전송 광섬유 중간에 설치하였다. 이장치는 레이저 빔 조사 후 용융 풀에서 발생하는 복사빛의 파장별 크기를 수집 분류, 분석하는 기능을 갖는다. 분석 장치인 PC는 파장별 빛을 최대 10 kHz까지 분석할 수 있다.

본 연구에서는 현대 자동차 차체의 레이저 용접 시 용접 품질을 감시하기 위하여 장치를 설계제작 하였다. 현대 자동차에서 소유한 레이저는 독일 HAAS 사의 최대출력 4 kW 급의 CW Nd:YAG 레이저 이며, 최종 전송 광섬유는 직경 600um 의 Si type 이다. 광섬유 연결과 용접 풀에서의 신호 수집을 위한 광학계를 그림 5과 같이 구성하였다. 레이저로부터 전송된 F#/5 의 레이저빔을 전송 광섬유에 집속 시키고, 다시 기존의 HAAS 집광 장치를 사용하기 위하여, 직경 800 um 의 전송 광섬유를 사용하였다. 그림 6은 광섬유 연결시 전송광섬유에 집광시 spot 크기를 위치별로 계산한 그림이다. 광섬유위치가 +/- 1mm 정도에서 직경이 약 780um이며, 최종 전송 광섬유는 안전을 고려하여 800um 광섬유를 사용하였다.

실시간으로 레이저 용접 품질 검사를 위한 초점 제어를 위해서는 $\ln(I_{\lambda_1}/I_{\lambda_2})$ 를 측정하고, 이를 이용한 용접 품질 data를 nstjr하는 과정을 거친다.

IV. 레이저 가공 실험

본 연구에서 개발된 광학적 감시장치를 이용하여 레이저 용접 실험을 수행하였다. 그림 4는 펄스 폭이 12 msec. 인 레이저 용접시 950nm의 신호모양을 나타낸다. 열 복사로 방출된 빛 중에서 색수차 공간여과를 최적화하기 위한 파장으로 950 과 1500 nm를 선택하였고, 이 파장을 측정하기 위해 각각 Si 과 InGaAs 광검출기를 사용하였다. 레이저 가공시 보호가스의 유속에 따라 용접부위에서 방출되는 복사 파장 세기가 다르게 나타나며, 이번 실험의 경우 N₂ 가스를 약 10 liter/min 속도로 공급하여 실험하였다.

표 1 레이저 용접 실험 조건

	수출용 (두께)	내수용 (두께)
1 층	SGARC340 60/60 1.2t	SPRC 340 1.2t
2 층	SGARC340 60/60 1.4t	SPRC 340 1.4t
3 층	SGACEN F30/60 0.7t	SPCEN 0.7t
비고	Galvanized steel	Non- Gal. steel

사용된 재질은 수출용과 내수용 강판이 다르므로, 표 1과 같은 재질조건으로 3중 겹치기 용접실험을 수행하였다. 수출용인 경우 레이저 용접시 용융점이 907도인 Zn 가 먼저 기화되어 레이저 용접시 비드 부위에 기공을 형성하게 된다.

색수차 공간여과를 이용한 레이저 용접은 내수용으로 실험하였으며, 레이저 용접 조건은 펄스폭

14-15msec. 반복율 8pps, 용접 속도 60mm/min 으로 이동시 펄스당 약 55J의 power 로 용접하였다. 또한 수출용의 경우 내수용과 동일한 조건으로 다만 펄스당 약 50J 정도의 power 로 용접하였다. 그림 8 은 내수용 시편의 레이저 용접 표면을 나타낸 것으로, 레이저 출력에 의하여 파인 부분이 나타나며, 이 변화에 따른 초점 변화는 그림 7에 나타난다. 그림 7은 레이저 용접구간에서의 $\ln(I_{1500})/(I_{950})$ 의 신호 값을 표시한다. 신호 값은 매 펄스의 시작점으로부터 4 msec. 위치에서 수집하였다. 그림 7에서 보는 바와 같이 파인 용융 풀의 직경크기는 약 1.0mm정도로 일정하게 나타나며, 그림 7 신호 값에서는 초점 거리에 대한 정보이다. 따라서 $\ln(I_{1500})/(I_{950})$ 의 신호 값을 감시하여 초점 거리를 감시할 수 있으며, 역으로 신호 값의 적정치를 설정하면 레이저 용접 상태를 제어할 수 있다. 실제 $\ln(I_{1500})/(I_{950})$ 의 0.05 신호값 변화는 0.6mm의 용접 노즐의 위치변화 값이다.

V. 결론

자동차 차체의 레이저 품질을 광학적 감시 방식을 이용하여 실시간으로 감시하기 위하여, CW HAAS 레이저에 적용할 수 있도록 광학적 레이저 가공 감시장치를 자체 설계/제작하였고 이를 이용한 레이저 용접 실험에 적용하였다.

VI. 참고문헌

- [1] C. Kim, S. Baik, M. Kim and C. Chung (April,1997) " Remote optical power and focus [1] H. Takamatsu, Nuclear Engineering International, Jan. (1991) 26. monitoring in pulsed Nd:YAG laser welding", Proc. of XI International Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers and High-Power Laser Conference, SPIE Proceedings 3092 : 538-541
- [2] C-J Kim et.al. Size Monitoring of a weld pool in pulsed laser welding by chromatic filtering . The 1st Asian Pacific Laser Symposium, April 27-29, 1998.
- [3] C. Chung, T. Jeong, S. Baik, M. Kim and Ch. Kim "Application of Chromatic Filtering to Focus Control and Kerf Width Monitoring in Pulsed Nd:YAG Laser Cutting" Proceeding of ICALEO 99 (1999), to be printed

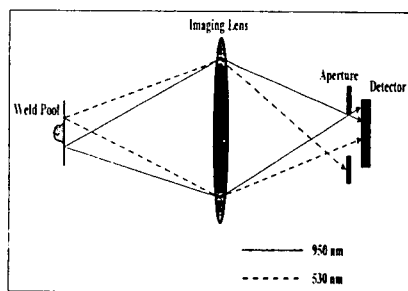


Fig 1 Principle of optical monitoring using chromatic filtering

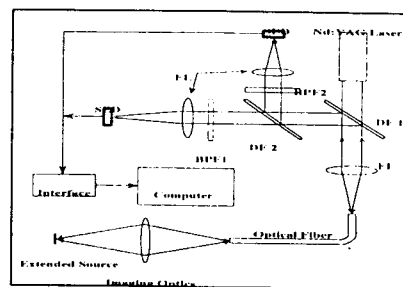


Fig. 2 Schematic diagram of monitoring system

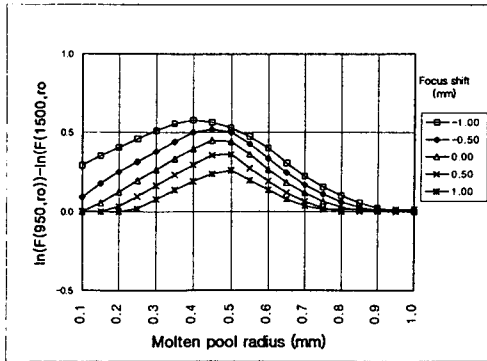


Fig. 3 Focus shift dependence of $\ln(F(950,r_0))-\ln(F(1500,r_0))$

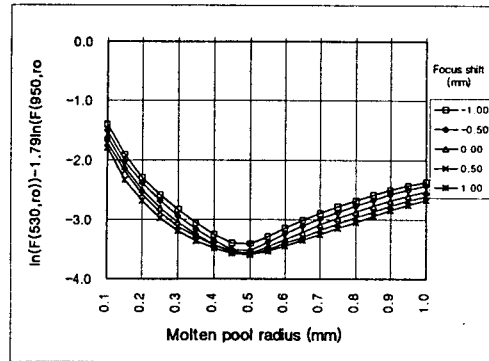


Fig. 4 Focus shift dependence of $\ln(F(530,r_0))-1.79\ln(F(950,r_0))$

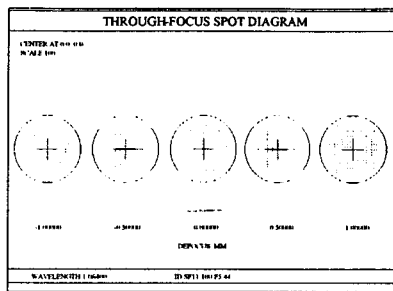


Fig. 5 Focus spot size diagram on optical fiber position

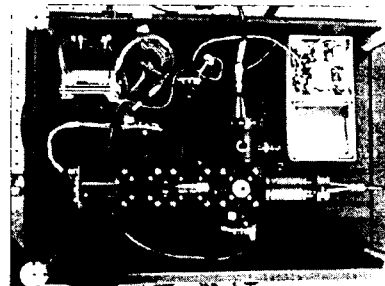


Fig. 6 Optical monitoring system

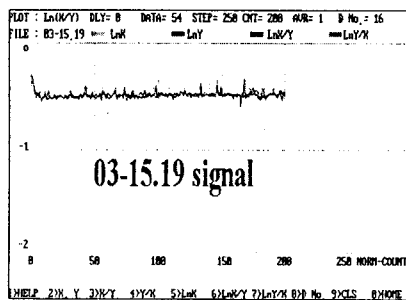


Fig. 7 $\ln(I1500/I950)$ signal with respect from molten pool

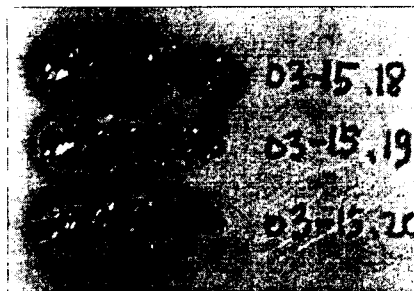


Fig. 8 Molten pool depth variation (03-15.19) in focus