

# 레이저 가공에서의 광학적 진단 및 초점제어 기술

## Optical Focus Monitoring and Control in Laser Material Processing

한국원자력연구소 정진만, 백성훈, 김철중  
현대자동차주식회사 장인성

### I. 서론

레이저 가공은 집광렌즈를 이용한 집속된 레이저 빔 에너지를 이용하여 모재를 열적으로 가공한다. 가공 조건은 레이저 빔의 상태, 즉, 레이저 빔의 quality 및 초점거리에 따른 빔 크기와 피가공물의 물질의 금속학적 특성 및 피가공물의 구조형상에 따른 열전도 변화에 따라 가공품질이 결정된다. 레이저 가공에서의 가공상태는 대부분 레이저 빔의 크기 및 레이저 출력에 따라 가공품질이 대부분 결정되며, 레이저 출력의 변화보다는 레이저 빔의 크기 변화에 따른 가공품질의 변화가 크다. 따라서 레이저 작업시 가공효율을 높이기 위해서는 레이저 빔의 크기 측정이 필요하고 이를 유지하기 위하여 레이저 집광 광학계의 정확한 위치제어가 필요하다.

레이저 빔의 크기는 레이저 집광시 가공물에 생성된 용융풀(molten pool)의 크기를 측정하는 방식으로, 용융풀에서 발생하는 열복사(thermal radiation)를 측정하고 분석하여 크기를 측정한다. 본 연구에서는 용융풀에서 발생한 열복사 파장을 IR (infrared)와 UV/VIS 영역으로 크게 나누어 측정한다. 색수차(chromatic aberration)에 의한 각파장의 투과율을 측정, 분석하여 용융풀의 크기 변화를 추정함으로써 집속 광학계의 초점거리를 제어하게 된다. computer simulation을 통하여 각각의 파장에서의 색수차에 의한 열복사의 투과율 차이를 분석하고, 실제의 실험치와 비교함으로써 용융풀의 크기와 초점거리를 측정한다. 이 방법은 레이저 출력 변화에 의한 용융 풀의 크기 변화와 초점거리 변화에 의한 용융풀의 크기 변화를 구별할 수 있다는 장점이 있다. 용융풀의 변화의 초점거리 성분을 측정하여 집광광학계의 위치를 제어하였다.

### II. 색수차 공간여과 개념

레이저 빔이 조사, 집광된 용융풀은 고온으로, 고온의 용융풀에서는 온도에 따른 열복사 빛이 발생, 방출한다. 복사된 여러 파장중 특정파장을 선택하여 색수차에 의한 투과율 차이를 이용한 레이저 용접풀 상태를 감시한다. 이 방식은 장점은 레이저 출력 변화에 따른 용융풀 상태 변화와 집광광학계 렌즈의 초점 변화에 따른 용융풀 상태를 구별하여 감시할 수 있다.

집광된 레이저 빔에 의하여 용융풀에서 방출되는 여러 복사파장은 그림 1 과 같이

레이저 빔 집광 광학계 경로를 통하여 역으로 진행된다. 집광 광학계를 통하여 역으로 진행된 복사파장은 전송 광섬유로 집속되며, 레이저 빔의 전송 광섬유의 단면이 적으므로 광섬유는 조리개(aperture) 역할을 하는 된다. 이때, 집광 광학계의 렌즈는 재질에 따라 색수차를 가지므로, 광섬유에 집속되는 열복사값의 크기 및 세기는 복사파장에 따라 다르게 검출된다. 그림 1에서 용융 풀의 온도(T)분포가 일정하고, 원형일 경우, 서로 다른 두파장( $\lambda_1, \lambda_2$ )에서 열 복사의 세기를 각각  $I_{\lambda_1}, I_{\lambda_2}$ 라 하면, 두 분광된 파장의 신호값인  $I_{\lambda_1}$ 과  $I_{\lambda_2}$ 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,  $\lambda_1, \lambda_2$ 는 복사 파장이다.  $r_0$ 는 용융 풀의 반경이다. 여기서 첫 번째 상수항 및 두 번째 항은 온도와 관계되므로, 용융풀의 온도 변화가 적어 이 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 광학계 특성에 맞게 simulation 하면, 용융풀 크기에 둔감하고 초점위치 이동에 민감한 광학계를 선정할 수 있다.

그림 2의 simulation 한 그래프에서 용융풀 직경에 따른  $\ln F(\lambda_1, r_0) - \ln F(\lambda_2, r_0)$  값을 초점위치별로 계산한 결과이다. 이 그림 2에서 용융풀의 직경이 약 1 mm 인 곳에서 초점의 변화량이 0.8mm 이동시  $\ln F(\lambda_1, r_0) - \ln F(\lambda_2, r_0)$ 의 변화 같은 0.15 정도가 된다. 이 정도의 변화 값을 식 (1)에서의 두 번째 항의 변화로 환산 할 경우 약 20-30 °K 정도의 변화값에 해당된다. 따라서  $\ln(I_{\lambda_1}/I_{\lambda_2})$  값에 따라 원하는 초점위치를 측정하고 이를 이용한 집광 광학계의 위치를 제어하는 것이 가능하다.

### III. 색수차 이용한 집광 광학계 제어

그림 2에서 용융 풀의 크기가 1 mm 부근에서 파장인 950 nm 와 532 nm 인 신호를 측정하여 초점을 제어한다면, 레이저의 출력영향에 따른 용융풀의 크기변화를 적게 받고 집광 광학계 초점을 제어할 수 있다. 집광 광학계의 위치는 가공물로부터 멀어질 경우  $\ln F(\lambda_1, r_0) - \ln F(\lambda_2, r_0)$  증가하고, 반대일 경우  $\ln F(\lambda_1, r_0) - \ln F(\lambda_2, r_0)$ 값은 감

소한다. 용융풀 크기가 최적상태(직경 1mm)에서  $\ln F(\lambda_1, r_0) - \ln F(\lambda_2, r_0)$  값을 선정하고, 변화값과 비교하여 보정함으로서 실시간으로 집광 광학계를 제어할 수 있다.

#### IV. 감시 및 제어장치구성

그림 3과 같은 schematic 으로 장치를 구성하여, 전송 광섬유 중간에 설치하고, 집광 광학계 위치제어를 위하여 집광 광학장치에 linear motor를 부착하여 위치를 제어하였다. 제작된 그림 4와 같은 감시장치는 레이저 빔 조사 후 용융풀에서 발생하는 복사빛 파장별로 분류하고, 수집하는 기능을 갖는다. 분석 장치인 PC는 수집된 data을 12 BIT 로 분해하고 최대 10 kHz까지 분석할 수 있다. 또한 집광 광학계의 위치제어를 위하여 linear motor를 제어한다.

레이저 빔은 직경 800  $\mu\text{m}$  의 전송 광섬유를 사용하여 전송하였으며, 감시 광학계를 거친후 직경 1000  $\mu\text{m}$  의 광섬유로 연결하여 구성하였다. 집광광학계의 구성은 레이저로부터 전송된 레이저빔을 F#/5 로 가공물에 집속하였다.

#### V. 레이저 가공 실험

본 연구에서 개발된 장치를 사용하여 레이저 용접시 집광 광학계의 초점제어 실험을 수행하였다. 그림 5는 평판에 레이저 출력의 변화(A)와 초점 위치의 변화(B)의 용입 깊이 차이를 표시하였다. 그림 5 (A)는 초점위치를 일정하게 유지하면서, 레이저 출력을 150W - 115W - 150W 순차적으로 변화시킨을 경우를 표시한다. 그림 5 (B)는 레이저 초점이 +0.5mm - 0mm - -0.5mm 순으로 선형적으로 변화시키면서 용접한 결과이다. 그림 6에서는 그림 5의 레이저 가공 조건에 따른  $\ln(I_{\lambda_1}/I_{\lambda_2})$  값을 얻었다. 그림 6(A)에서 레이저 출력 변화에 대하여  $\ln(I_{\lambda_1}/I_{\lambda_2})$  값의 변화는 거의 없으며, 그림 6(B)에서는 초점의 변화에 따라  $\ln(I_{\lambda_1}/I_{\lambda_2})$  값이 변화하고 있음을 알 수 있다. 여기서 신호  $\ln(I_{\lambda_1}/I_{\lambda_2})$ 의 fluctuation 값은 약 +/-0.05 정도로 그림 2의 simulation에서 약 +/- 0.25 mm 정도를 나타낸다. 따라서 초점 제어 오차는 +/- 0.25mm 정도라 할 수 있다.

그림 7의 임의곡면 가공물에 이장치를 이용하여 자동적으로 초점을 제어하여 추적한 궤적을 그림 8에 표시하였다.

#### VI. 결론

본 연구에서는 레이저 광학계의 색수차를 이용하여 레이저 초점 상태를 감시할 수 있는 방식을 개발하였고, 이를 실증하였다.

## VII. 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
- [4] Dale U. Chang, "Real-time laser welding quality monitoring system" Proceeding of ICALEO '95, pp.1128-1137, 1995
- [5] F. Haran, D. Hand, C. Peters and J. Jones, "real-time focus control in laser welding" Measurement Science and Technology, Vol. 8, pp.1095-1098, 1995.

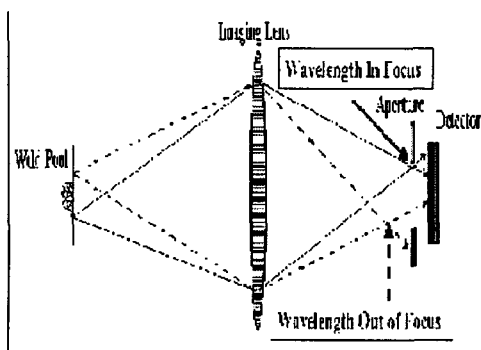


Fig. 1 Principle of optical monitoring using chromatic filtering

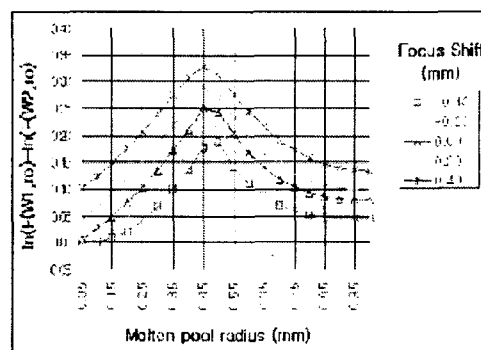


Fig. 2 Focus shift dependence of  $\ln(F(950,r_0))-\ln(F(1500,r_0))$

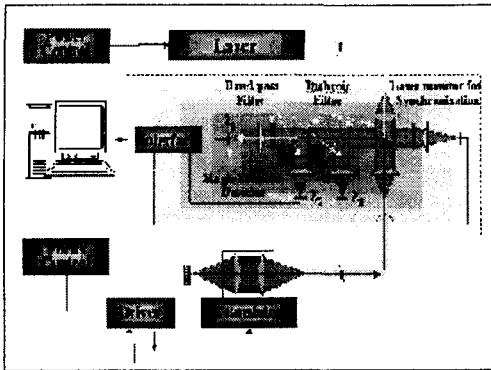


Fig. 3 Schematic diagram of monitoring system

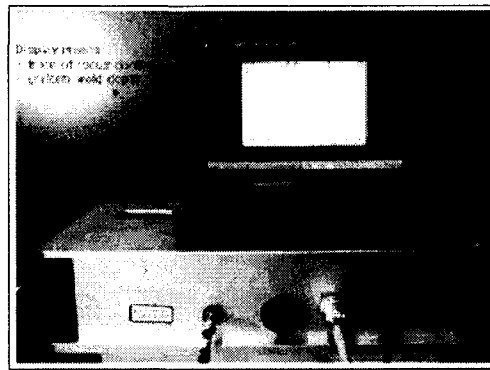


Fig. 4 Optical monitoring system

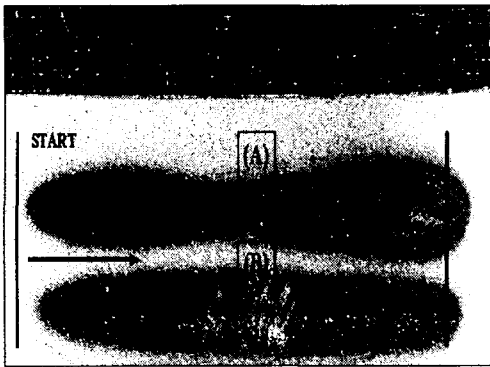


Fig. 5 Oxidation pattern for power variation(A) and focus shift(B)

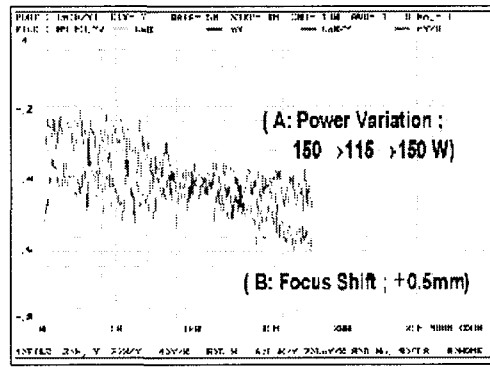


Fig. 6 Variation of  $\ln(I_1/I_2)$  for power variation(A) and focus shift(B)

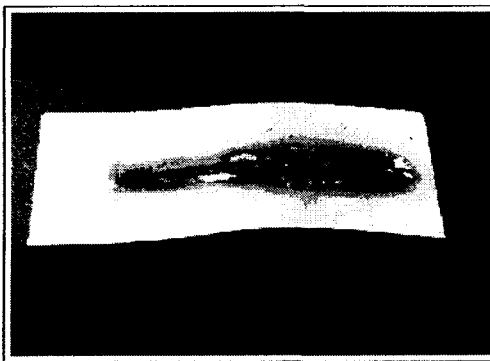


Fig. 7 Shape of curved welding sample

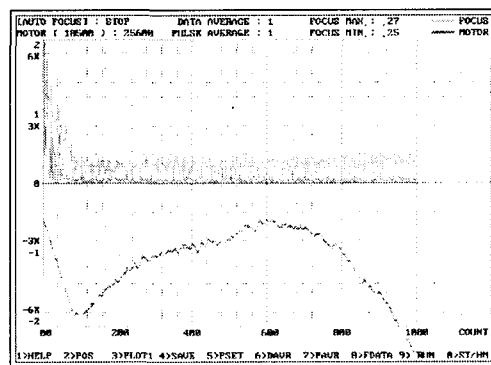


Fig. 8 Profile monitoring in focus control