

## 증기발생기 전열관 보수를 위한 레이저 용접공정 감시기술

### Laser weld process monitoring technique for repair welding of steam generator tube

정진만, 백성훈, 김철중, 장인성\*  
한국원자력연구소, 현대자동차주식회사\*

#### 요 약

원자력발전소의 증기발생기의 전열관이 손상되어 누수가 생기게 되면 다른 보수용관을 삽입하고 내부에서 누수되는 양쪽에 레이저 용접을 하여 보수하게 된다. 레이저빔을 이용한 증기 발생기 전열관 보수 용접은 소형 집광렌즈를 이용하여 집속된 레이저빔 에너지를 이용하여 모재인 전열관을 열적으로 가공한다. 보수방식은 전열관 중심축에 45도 반사 거울을 설치하고 중심축으로 전송된 레이저빔을 전열관 벽으로 조사한 후, 회전 거울을 회전하여 전열관 원주를 레이저로 용접한다<sup>1)</sup>. 레이저 가공 조건은 레이저빔의 상태, 즉, 레이저빔의 발산각 및 초점거리에 따른 빔 크기와 피 가공물의 금속학적 특성 및 구조 형상에 따른 열전도 변화에 따라 결정된다. 레이저 가공에서의 가공상태 역시 대부분 레이저빔의 크기 및 레이저 출력에 따라 결정되는데, 레이저 출력의 변화보다는 레이저빔의 크기 변화에 따른 가공품질의 변화가 크다<sup>2)</sup>. 따라서 전열관 레이저 보수 용접시 용접 상태를 감시하기 위해서는 집속된 레이저빔의 크기 측정이 필요하고 이를 감시함으로써 레이저로 용접된 부위의 상태를 확인할 수 있다. 용접상태를 검사하기 위하여 용접 후에 초음파로 용접폭을 측정하는 검사가 이용되고 있으나, 본 연구에서는 색수차 용접 공정 감시결과와 초음파 검사를 비교하였다.

#### I. 서론

레이저빔의 크기를 측정하기 위해서는 용접시 가공물에 조사된 집광된 레이저빔에

의하여 생성된 용융풀(molten pool)의 크기를 측정하면 된다. 용융풀의 크기는 용융풀에서 발생하는 열복사(thermal radiation)를 측정하고 분석하여 크기를 측정한다. 본 연구에서는 용융풀에서 발생한 열복사 파장을 크게 IR (infrared)와 UV/VIS 영역으로 나누어, 색수차(chromatic aberration)에 의한 각파장의 투과율을 측정, 분석하여 용융풀의 크기 변화를 추정하는 기술을 개발하였다. 열복사량의 크기는 전산 시뮬을 통하여 각각의 파장에서의 색수차에 의한 열복사의 투과율 차이를 분석하고, 실제의 실험치와 비교함으로써 용융풀의 크기와 초점 거리의 변화를 측정한다. 이 방법은 레이저 출력 변화에 의한 용융풀의 크기 변화와 초점거리 변화에 의한 용융풀의 크기 변화를 구별할 수 있다는 장점이 있다. 또한 용융풀 크기의 변화를 측정하여 레이저 용접 상태를 측정할 수 있다<sup>4,5)</sup>.

## II. 색수차 공간여과 원리

레이저빔이 조사, 집광된 용융풀은 수천 도의 고온이므로 상당량의 열복사 빛이 발생, 방출된다. 용융풀에서 방출된 여러 파장 중 특정파장을 선택하여 색수차에 의한 투과율 차이를 이용한 레이저 용접풀 크기를 감시하는 것이 색수차 공간여과의 기본 개념이다. 이 방식의 장점은 레이저 출력 변화에 따른 용융풀 상태 변화와 집광광학계 렌즈의 초점 변화에 따른 용융풀 상태를 구별하여 감시할 수 있다는 것이다.

집광된 레이저빔에 의하여 용융풀에서 방출되는 여러 복사파장은 그림 1 과 같이 레이저 빔 집광 광학계 경로를 통하여 역으로 돌아온다. 집광 광학계를 통하여 역으로 진행된 복사파장은 전송 광섬유로 집속되며, 레이저 빔 전송 광섬유의 단면은 매우 적으므로, 광섬유의 적은 단면적은 구경(aperture) 역할을 하는 된다. 이때, 레이저빔의 집광렌즈는 재질에 따라 색수차를 가지므로, 광섬유에 집속되는 열복사 값의 세기는 복사파장에 따라 다르게 검출된다.

그림 1 에서 용융풀의 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 용융풀의 온도,  $\lambda_1, \lambda_2$ 는 복사 파장이며,  $r_0$ 는 용융풀의 반경이다. 여기서 첫 번째 상수항 및 두 번째 항은 온도와 관계되므로, 용융풀의 온도 변화가 적어 이항이 신호 변화에 무관하다 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)의  $\ln(I_{\lambda_1}/I_{\lambda_2})$  값은 열복사의 파장 및 용융풀의 크기에 따라 다르게 나타난다. 따라서, 열복사 파장을 적절히 선택하고 초점에 따른  $\ln(I_{\lambda_1}/I_{\lambda_2})$  값을 광학계 특성에 맞게 계산하면, 용융풀 크기에 둔감하고 초점위치 이동에 민감한 광학계를 구성할 수 있다.

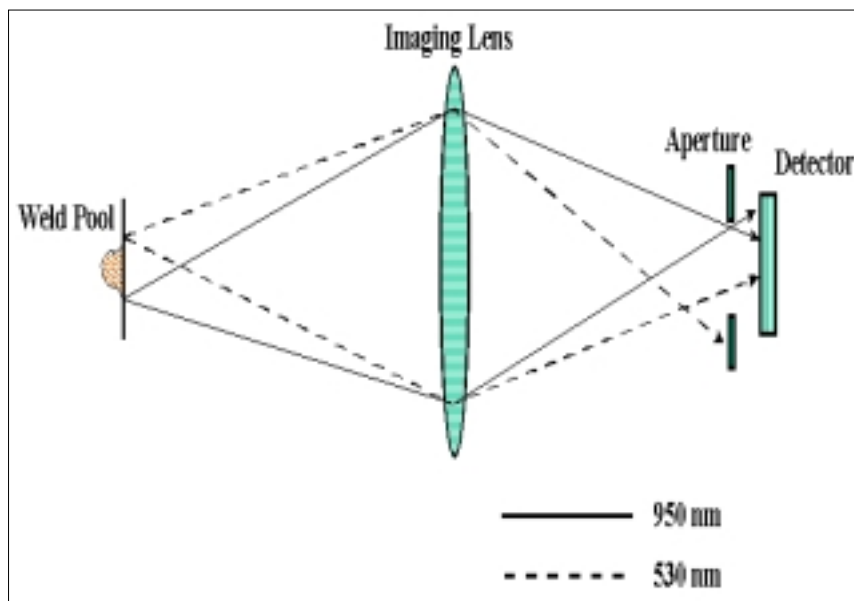


Fig. 1 Principle of optical monitoring using chromatic filtering

그림 2의 그래프는 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 값은 0.15 정도가 된다. 이 정도의 변화 값을 식 (1)에서의 두 번째 항의 변화로 환산 할 경우 약 20-30 °K 정도의 변화 값에 해당된다. 따라서  $\ln(I_{\lambda_1}/I_{\lambda_2})$  값에 따라 레이저빔의 초점위치를 알 수 있다.

그림 2에서 용융 풀의 크기가 1 mm 부근에서 파장인 950 nm 와 532 nm 인 신호를 측정하면, 레이저의 출력영향에 따른 용융풀의 크기변화를 적게 받고 집광 광학계의 위치를 알 수 있는 열복사 신호의 획득이 가능하다. 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 감소한다. 이를 이용하여, 기준 값을 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 광학계의 위치를 감시/제어할 수 있다.

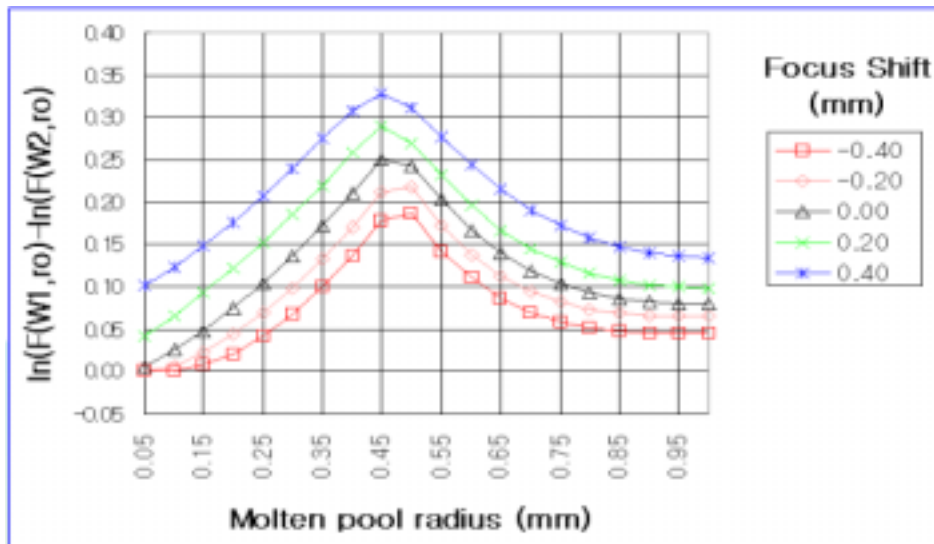


Fig. 2 Focus shift dependence of  $\ln(F(950,r_0)) - \ln(F(1500,r_0))$

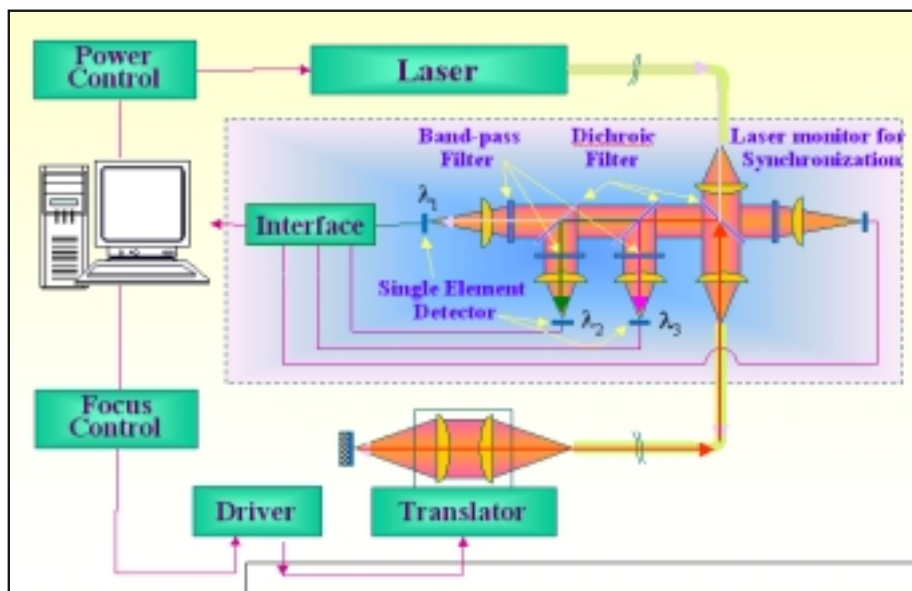


Fig. 3 Schematic diagram of monitoring system



Fig. 4 Optical monitoring system

### III. 감시장치구성

그림 3과 같이 전송 광섬유 중간에 감시할 수 있는 광학장치를 설치하고, 집광 광학계에서 발생하는 복사빛을 수집 분석하였다. 제작된 그림 4와 같은 감시장치는 레이저빔 조사 후 용융풀에서 발생하는 복사빛 파장별로 분류하고, 수집하는 기능을 갖는다. 분석 장치인 PC는 수집된 data를 12 BIT 로 분해하고 최대 10 kHz까지 분석할 수 있다.

레이저빔은 직경 800  $\mu\text{m}$  의 전송 광섬유를 사용하여 전송하였으며, 감시 광학계를 거친 후 직경 1000  $\mu\text{m}$  의 광섬유로 연결하여 구성하였다. 광학설계를 이용하여 집광광학계를 구성하였는데, 레이저로부터 전송된 레이저빔을 F#/5 로 가공물에 집속하였다.

### IV. 레이저 가공 실험

본 연구에서 개발된 장치를 사용하여 레이저 용접실험을 수행하였다. 그림 5는 평판에 레이저 출력의 변화(A)와 초점 위치의 변화(B)에 대한 용입 깊이 차이를 표시하였다. 그림 5(A)는 초점위치를 일정하게 유지하면서, 레이저 출력을 150W - 115W - 150W 순차적으로 변화시킨 경우이고, 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 요동 값은 약  $\pm 0.05$  정도로 그림 2의 계산 결과에서 보면 약  $\pm 0.25$  mm 정도를 나타낸다. 따라서 초점 제어 오차는  $\pm 0.25$ mm 정도라 할 수 있다.

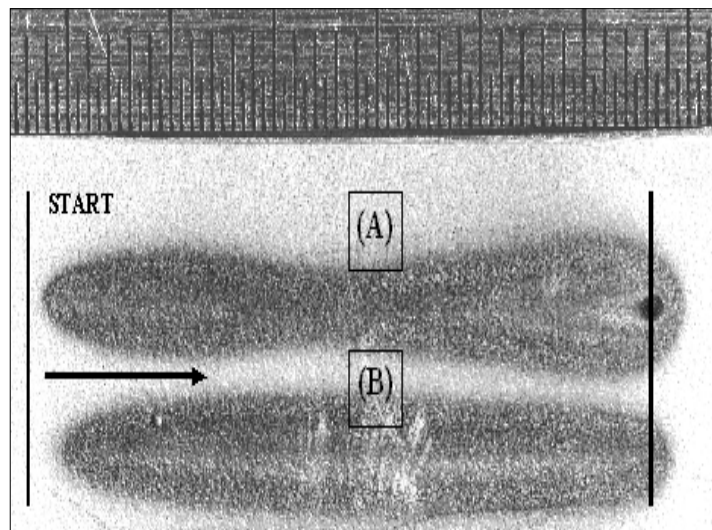


Fig. 5 Oxidation pattern for power variation(A) and focus shift(B)

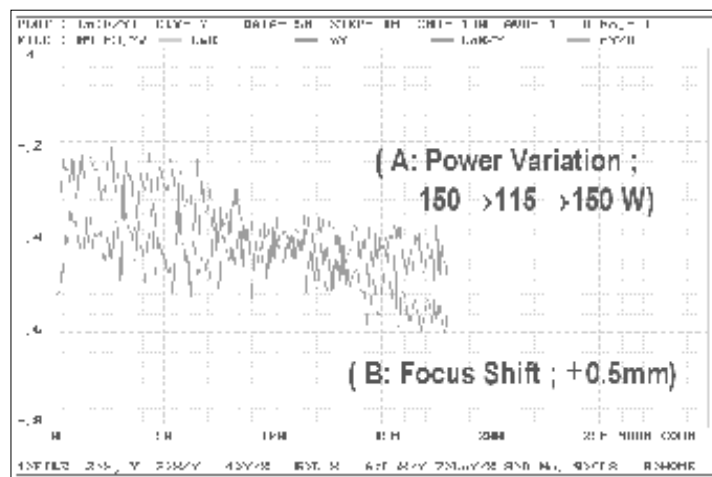


Fig. 6 Variation of  $\ln(I_1/I_2)$  for power variation(A) and focus shift(B)

## V. 증기발생기 레이저 보수용접

레이저 용접은 광섬유 전송 펄스형 Nd:YAG 레이저를 이용하였으며, 약 300 W 출력이 용접에 사용되었다. 그림 7의 왼쪽은 초음파로 측정된 용접 폭이며 오른쪽의 상단은 색수차에 의한 초점이동 신호이며 아래쪽은 용접깊이 신호이다. 초음파 검사에서는 처음과 끝 부분의 용접결합의 원인을 알 수 없으나, 색수차 용접공정 감시방법은 용접깊이가 작아진 이유가 초점이동에 기인한 것을 알려 준다. 그림 8 은 (A) 와 (B) 부분에서 레이저펄스가 끝나고 식을 때의 용접풀의 크기변화를 보여준다. (A) 에서는 용접풀이 초기에는 커지다가 매우 빨리 작아지나, (B) 에서는 초기에도 작으며 작아지는 속도가 매우 느린 것을 보여 준다. 이는 (B) 에 gap 이 생겼다는 것을 의미한다. 이는 보수용관을 삽입 후에 확관하는 과정에서 타원형으로 확관되어서 gap 도 생기고 초점이동도 발생된 것을 알려준다.

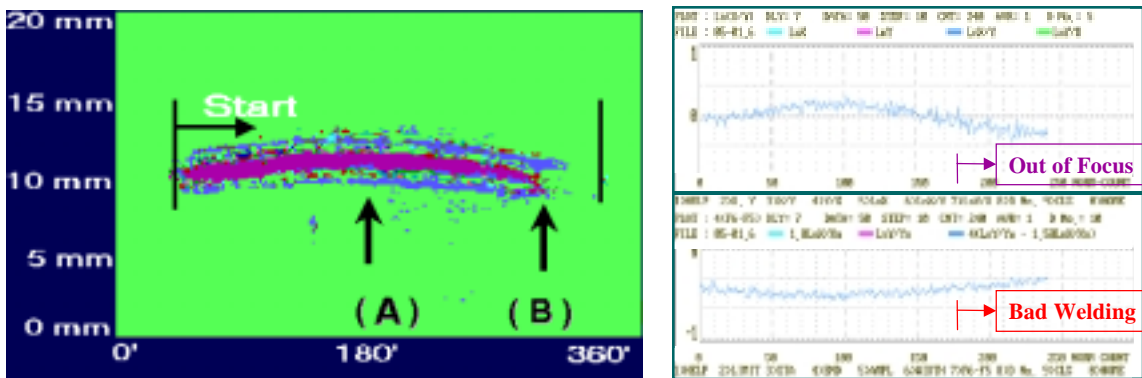


Fig. 7 Laser welding results of UT and chromatic filtering (focus variation)

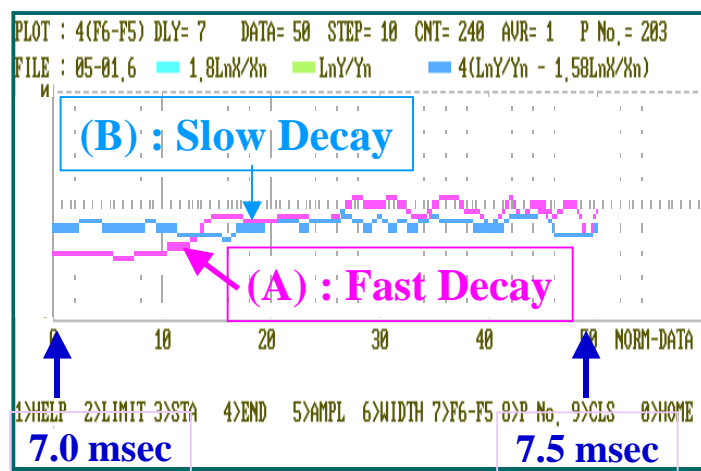


Fig. 8 Size variation of welding pool after laser pulse

## VI. 결 론

본 연구에서는 레이저 광학계의 색수차를 이용하여 레이저 초점 상태를 감시할 수 있는 기술을 개발하였고, 이를 전열관 실증실험에 적용하였다. 색수차에 의한 레이저 용접의 공정감시 및 제어를 펄스형 및 연속발진 레이저에 적용하여 초점이동 및 용접풀의 크기변화를 감시하고 제어하는 방법과 실제로 펄스형 레이저를 이용한 증기발생기 보수 용접에의 적용결과에 대하여 알아보았다. 색수차를 이용한 용접공정 감시 방법은 기존 방법과 달리 초점이동 및 용접풀의 크기변화를 동시에 감시할 수 있으며 특히, 상호 독립적으로 감시할 수 있다는 장점이 있다.

증기발생기 보수용접에 적용 결과, 실시간으로 용접상태를 감시할 수 있었으며, 용접 후에 수행한 초음파 검사와 비교한 결과 비슷한 결과를 얻었다. 앞으로는 자동차 차체 용접과 같은 연속발진 레이저 용접공정에 적용하려고 하며, 또한 국내에 많이 보급된 전자 부품 등의 레이저 점용접의 실시간 검사에도 적용하려고 한다.

## 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. &, pp.1095-1098, 1995.