

광학적 방법에 의한 전열관 레이저용접 감시기술

백성훈, 김민석, 정진만, 김철중
한국원자력연구소

요 약

원자력발전소 증기발생기 전열관의 레이저 슬리브 용접시, 레이저 전송 및 용접상태의 광학적 감시방법을 개발하였다. 전열관 레이저용접은 용접 중의 레이저 출력, 레이저 전송 광학계의 파손여부, 광학 정렬상태 등을 정확히 감시하며 수행하여야 하지만, 작업공간의 협소함과 방사능 공간이라는 어려움 때문에 적절한 감시방법이 없었다. 본 연구에서는 레이저 빔 전송을 위한 광섬유 광학계를 그대로 이용하여, 용접시 발생하는 radiation과 용접 표면에서 반사되는 Nd:YAG 레이저 빔을 측정하여 레이저 및 광학계 상태를 실시간 감시할 수 있는 기술을 실험적으로 확인하였다. 실험은 Inconel plate를 시편으로 이루어졌으며, 레이저 펄스 길이, 레이저 반복률에 따른 감시 조건과 초점확인 기능에 대해서도 논의하였다.

1. 서 론

원자력 발전소 증기발생기 전열관의 레이저 슬리브 보수용접기술^[1]은 미국, 일본, 프랑스, 독일등에서 개발하여 실용화되고 있으며, 한국 원자력 연구소에서도 개발 중이다. 이 슬리브 용접 방법은 지름이 1" 이하인 슬리브 튜브 안에 레이저 집속광학계와 가스노즐 등으로 이루어진 용접 head 를 삽입시켜 수행하는데, 용접부에 여유공간이 없고, 또 발전로내에서 이루지는 작업이라 측정 및 감시에 많은 어려움이 있다. 레이저 용접시에는 집속 광학계의 포커스, 레이저 출력 상태, 광학부품의 손상 및 광학부품의 정렬상태 등을 용접 전과정에서 감시하는 것이

이상적이거나, 현실적으로는 용접중 감시는 이루어지지 않고 있다. 증기발생기 슬리브 레이저용접 모니터링 방법으로는 광학적 방법이 여러 가지로 유리하다. 일본 미쓰비씨에서 거의 유일하게 광섬유 광학계에 모니터링을 위한 별도의 광섬유를 같이 설치하여 광학적 감시를 시도하였다.^[2]

본 연구에서는 앞에서 언급한 변수중 레이저 출력 및 광학계 파손에 의한 레이저 출력저하를 레이저 용접중에도 감시할 수 있는 방법을 연구하여, 실제 응용 가능성을 실험적으로 입증하였다. 모니터링 방법은 용접면에서 반사되는 레이저 신호를 일정한 시간대에 측정하여, 특별히 설계/제작된 광섬유 coupler 에서 측정된 입력 레이저신호와 비교, 레이저 입력/전송 여부를 감시하게 된다. 실험은 1kW 급의 펄스형 레이저를 레이저 광원으로 사용하였고, Inconel plate 의 용접 실험으로 각각의 레이저 변수에 대한 감시 가능성을 실험적으로 논의하였다.

2. 실험

그림 1은 용접 감시를 위하여 설계 제작한 광섬유 coupler 와 신호측정 장치도이다. 발전기에서 나온 레이저는 지름 0.8mm 인 광섬유로 전송되어 광섬유 coupler 에서 지름 1 mm 인 광섬유로 전송된다. 이 단계에서 일부 (1%이하) 레이저 출력을 beamsplitter (여기서는 cold mirror 사용)에서 나누어 측정하여, 광섬유 광학계의 입력신호로 사용된다. 레이저 전송광학계의 손상상태와 광학정렬 상태를 용접 중에 감시하기 위하여, 시편에서 반사되어 나오는 레이저 빔과 용접 중 플룸(plume)에 의한 radiation을 측정하였다. 부분반사경으로는 적외선은 투과를 하고 가시광선은 반사를 하는 cold mirror를 사용하였는데, 신호의 세기가 강하여, 각각의 파장 선별을 위한 bandpass filter 뒤에 별도의 density filter를 사용하여 광신호를 감쇄시켜 측정하였다.

실험은 레이저 변수인 레이저 펄스 반복률과 레이저 펄스폭에 대해, 레이저 출력과 집속광학계의 초점위치 감시 여부를 확인하였다. 신호 detector 로는 P-I-N silicon photodiode를 사용하였고, 파장을 추출하기 위한 bandpass filter는 O.D. 4, FWHM 10 nm 인 간섭필터, 신호 감쇄를 위한 density 필터로는 흡수형 ND 필터와 KG 필터를 사용하였다. 신호는 4-channel digital oscilloscope로 처리하였는

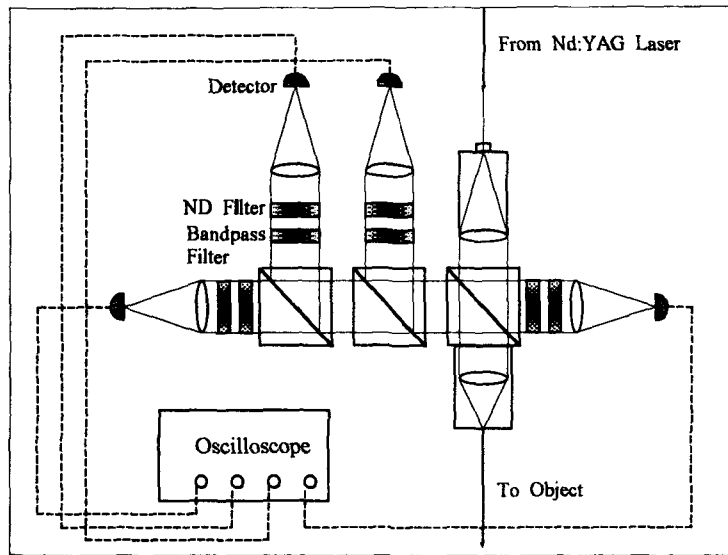


그림 1. Monitoring 신호측정을 위한 fiber coupler 구성도

데, 실제 적용시에 사용할 전용의 신호처리 장치와 프로그램은 현재 개발중이다.

3. 결과 및 논의

그림 2는 레이저의 출력을 변화시킬 때 플룸에서 나오는 radiation 신호와 반사되는 레이저빔을 오실로스코프 sequence mode 로 100 pulse 기록한 것이다. 각 channel 의 신호는 ch.1은 레이저 출력신호, ch.2는 900nm, ch.3는 530nm, ch.4는 1064nm의 bandpass filter 를 거친 후의 신호이다. 레이저 펄스길이가 6ms, 반복률 10 Hz, 평균출력 140W 에서 15% 의 출력변화를 주면서 실험한 것이다. 그림에서 ch.2와 ch.3 신호는 레이저 출력이 클 때 같이 커지는 것을 볼 수 있으나 신호의 요동폭이 큰 반면, ch.4의 반사 레이저빔의 경우에는 요동폭이 크지 않고, 특히 중간에 짙게 보이는 신호는 아주 안정된 신호를 나타낸다. 그림 3은 그림 2의 ch.4의 100 개의 sequence 중 50 번째 신호를 화면전체에 걸쳐 확대한 신호로, 신호중 짙게 보이는 신호부분은 그림 3의 중간이후의 안정된 펄스 부분을 나타낸 것으로 이 부분의 신호만을 측정함으로써 안정된 감시가 가능하다.

레이저 반복률을 20 Hz 로 높이고, 펄스길이는 3ms 로 하여 동일한 실험을 하였을 경우에는 앞의 경우와 같이 안정된 신호를 보이지 않았다. 즉 반사되는 레이저 빔이 3ms 펄스폭내에서 안정적이지 못하였는데, 따라서 이 경우에는 이 방법의 모니터링은 어렵다. 실제 적용시에는 ch.1의 레이저 신호와 ch.4의 중간이후 신호를 비교함으로써 광학계 정렬과 광학부품의 손상에 의한 레이저 전송상태를 감시할 수 있다.

그림 4는 용접 head 레이저 집속광학계를 초점 상태의 모니터링 가능성을 보기 위한 실험결과이다. 레이저 출력은 일정하게 하고, 레이저 집속 광학계의 초점 위치를 변화하면서 실험한 것인데, 정확히 in-focus 가 되는 위치에서 $\pm 3\text{mm}$ 를 이동시키면서 측정한 결과이다. 그림은 100개의 pulse 를 sequence mode 로 잡은 것인데, 20 번째 pulse 부터 용접 시편에 레이저가 조사되었고, 초점의 위치는 70 번째 펄스 근처이다. Ch.1에서 레이저 출력은 일정함을 알 수 있으며, ch.2와 ch.3 의 신호에서 초점근처에서 신호가 강함을 알 수 있다. 그림에서 초점위치 $\pm 3\text{mm}$ 에서 신호변화가 $\pm 40\%$ 정도로, 측정오차 및 레이저 출력 fluctuation이 $\pm 10\%$ 이내인 것을 감안하면 초점확인에 활용이 가능할 것으로 판단된다.

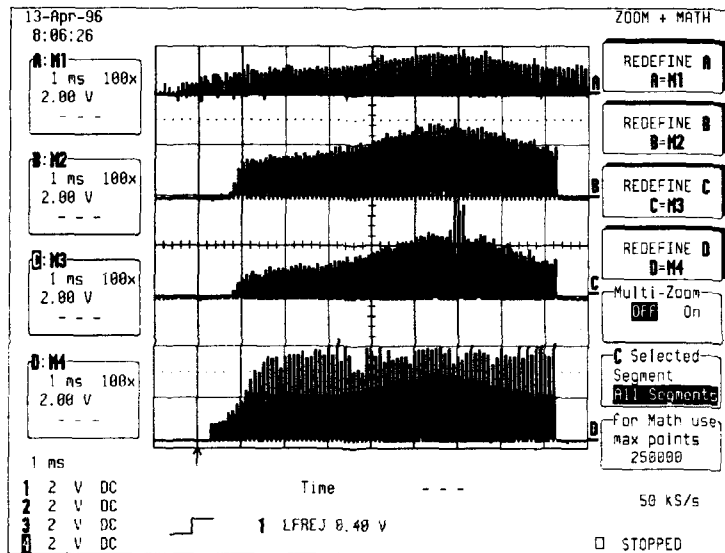


그림 2. 레이저 출력변화에 따른 플룸복사 및 반사레이저 신호

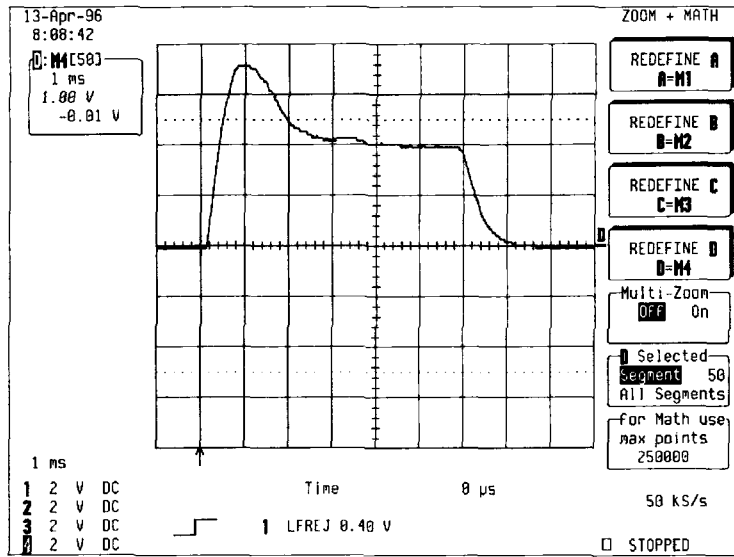


그림 3. 용접면에서 반사되는 레이저 신호 모습

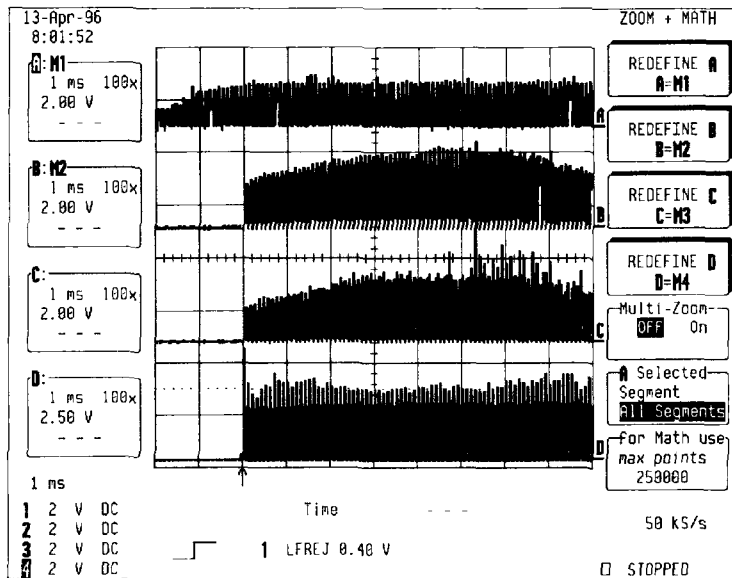


그림 4. 레이저 초점변화에 따른 플룸 복사 및 반사레이저 신호

4. 결 론

Nd:YAG 레이저 슬리브 용접시 레이저 용접면에서 반사되는 Nd:YAG 레이저 신호를 측정함으로써 용접중에 용접광학계의 상태를 모니터링할 수 있음을 실험을 통하여 확인하였다. 이 방법은 레이저 용접시 사용하는 광섬유 전송 광학계를 그대로 이용하는 방법으로서, 원격이며 간단하다는 장점으로, 현재 적절한 실시간 감시방법이 없는 증기발생기 레이저 보수용접감시에 활용도가 높을 것으로 기대된다. 현재, 실제 적용을 위한 tube 용접시의 모니터링 조건을 찾는 실험을 진행 중이며, 용접 공정제어 과정의 computer 제어장치에 활용할 수 있는 신호처리 장치와 프로그램을 계속 개발중이다. 또한 앞에서 확인한 다른 파장의 플룸 radiation 신호와 레이저 off 직후의 thermal radiation 신호에 의한 초점확인 및 감시에 대해서도 계속 연구중이다.

5. 참고문헌

- [1]. Takashi Ishide, etc., "High power YAG laser welded sleeving technology for steam generator tubes in nuclear power plants", Proceedings of LAMP '92, p.957(1992)
- [2]. 穗坂重孝외, " 蒸氣發生器 電熱管 의 YAG 레이저 鎔接 知的監視", 三菱重工 技報, Vol.29, No.2, 110(1992-3)