

# 광섬유 전송 고출력 Nd:YAG 레이저 가공에서 실시간 가공상태 원격감시 및 제어기술

## Optical Monitoring and Control for Material Processing with a Fiber-coupled High-power Nd:YAG Laser

한국원자력연구소 정진만, 정태문, 백성훈, 김철중

### I. 서론

레이저를 이용한 정밀가공은 지난 십수년간 실험실 및 산업현장에서 수행되어 왔다. 특히 일반 산업체에서는 가스레이저인 CO<sub>2</sub> 레이저와 고체 레이저인 Nd:YAG 레이저가 생산공정에 사용되었다. 그러나 최근 자동차 공장등과 같이 레이저 가공기와 피가공물간의 거리가 멀 경우, 또는 협소한 작업공간에서는 광섬유 전송이 가능한 Nd:YAG 레이저를 사용하는 추세이다.

레이저를 이용한 용접 및 절단 등을 위해서는 에너지밀도를 높여야 하고, 에너지 밀도를 높이기 위해서는 렌즈등 광학계를 이용하여 피공작물에 레이저 빔을 집광시킨다. 그러나 렌즈등 집광 광학계를 이용하여 가공할 경우, 초점 거리에 대한 심도가 1 - 2mm 정도이하로 매우적어, 초점유지가 어렵다. 이 때문에 거리를 측정하고 제어하는 장치를 개발하여 사용하고 있다.

현재 한국원자력연구소에서도 레이저빔 전송 광섬유를 이용하여 실시간 레이저 가공상태 감시 장치를 개발하였으며, 이를 이용한 레이저 가공기로부터 약 20m 떨어진 곳에서 레이저 원격 가공 실험을 실험실적 실증을 하였다.

### II 광학적 감시 개념

광학계를 이용한 가공 상태 감시방식은 색수차 공간여과를 이용한 방식으로, 레이저 가공시 가공 부위에서 발생하는 열복사 파장중에 두 개이상 파자의 복사 빛 세기를 측정하여 가공중 가공상태를 실시간으로 감시한다. 가공부위에서 발생하는 복사 빛의 여러 파장은 그림 1 과 같은 경로를 통하여 조리개(aperture) 역할을 하는 전송 광섬유로 다시 집속된다. 전송 광섬유 직경이 매우 적으므로, 광섬유에 집속되는 열복사의 크기 및 세기는 파장에 따라 다르게 나타난다.

그림 1에서 용융 pool의 온도분포가 일정하고, 원형일 경우 서로 다른 두파장에서 열 복사의 세기를 각각  $I_{\lambda_1}$ ,  $I_{\lambda_2}$ 라 하면,  $I_{\lambda_1}$ 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  $C$ 는 상수,  $T$ 는 용융 pool의 온도이며,  $\lambda_1, \lambda_2$ 는 복사 파장이다.  $r_0$ 는 용융 pool의 반경이다. 여기서 상수 및 두 번째 항이 신호 변화에 무관하다고 하면,

$$\ln(I_1/I_2) = \ln F(\lambda_1, r_0) - \ln F(\lambda_2, r_0) \quad (2)$$

이 된다. 식 (2)에 의한  $\ln(I_1/I_2)$  값은 열복사의 파장 및 용융 pool의 크기에 따라 달라 다르게 나타난다. 따라서 용융 pool의 크기변화가 있으면 측정된 신호의 변화를 알 수 있다. 따라서 이를 이용하면, 레이저 가공 폭 및 깊이등 가공상태의 변화를 알 수 있다. 이 변화를 이용하여 레이저의 집광 광학계의 위치 및 레이저 출력등을 실시간으로 제어하면, 동일할 품질의 레이저 가공상태를 얻을 수 있다.

### III 광학적 레이저 가공 감시 장치 개발

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

본 연구에서는 장거리 전송을 위한 광섬유 연결 광학계를 그림 3과 같이 구성하였다. 전송된 레이저 빔의 재집속을 위하여 F#/3.3인 입사 렌즈를 사용하였고, 집광시 spot 크기가 약 780um 값을 갖도록 제작되었다. 최종 전송 광섬유는 안전을 고려하여 1000um 광섬유를 사용하였다. 레이저 가공기에서 나온 레이저 빔은 광섬유로 약 20m 전송되고, 레이저 가공 부위의 집광장치로 가공물에 집속, 가공한다. 집광장치 광학계는 f=25mm와 f=20mm의 lens로 구성되었으며, 집속된 초점크기는 직경 800um으로 설계 하였다.

실시간으로 초점 제어를 위해서는  $\ln(I_1/I_2)$ 를 측정하여 얻은 집광 광학계의 위치를 최소 절단 폭을 갖는 위치에서 얻은  $\ln(I_1/I_2)$ 값과 비교하여 집광 광학계의 위치를 최소 절단폭을 갖는 위치로 보정하는 과정을 거친다. 집광 광학계는 스텝 모터에 부착되어 있고, 스텝 모터는 한 스텝당 0.1 mm 이동한다.

### IV 레이저 가공 실험

본 연구에서 개발된 광학적 감시장치를 이용하여 레이저 절단 실험을 수행하였다. 그림 4는 펄스 폭이 2 msec. 인 레이저 절단시 950nm의 신호모양을 나타낸다. 열 복사로 방출된 빛 중에서 색수차 공간여과를 최적화 하기 위한 파장으로 950 과 1500 nm를 선택하였고, 이 파장을 측정하기 위해 각각 Si과 InGaAs 광검출기를 사용하였다. 레이저 가공시 보호가스의 유속에 따라 절단부위에서 방출되는 복사파장 세기가 다르게 나타나며, 이번 실험의 경우 O<sub>2</sub> 가스를 약 10 liter/min 속도로 공급하여 실험하였

다.절단시 첫 번째 펄스에서는 침투 신호가 발견되면, 펄스가 약 30 번이상 지나면 침투 신호가 거의 발견되지 않는다. 침투 신호의 시간길이는 모재 절단시 레이저가 절단에 대부분 기여한 시간이며, 나머지 시간 동안 절단면의 주위에서 발생하는 열복사 신호이다. 그림 5는 50mm 레이저 절단구간에서 4mm 의 초점거리를 변화 시켰을 때 나타난  $\ln(I_{1500})/(I_{950})$ 의 신호값을 표시한다. 신호값은 매 펄스의 시작점으로부터 1.5 msec. 위치에서 수집하였다. 그림 6에서 보는 바와 같이 최소 절단 폭은 시작점에서 약 10mm에서 나타나며, 그림 5 신호값에서는 약 55 위치에 이다. 그림 5 최소점 좌측에서는 집광 광학계가 절단 모재와 떨어져 있는 부분이며, 우측부분은 절단체와 광학계가 근접한 부분을 나타낸다. 실제 절단시 좌측부분에서 초점으로 접근하며 절단이 이루어지며, 우측부분의 공간적 여유는 절단 노즐과 절단가공체의 거리가 근접되므로 거의 없다. 따라서  $\ln(I_{1500})/(I_{950})$ 의 신호값의 최대치와 최소치를 설정하면, 절단폭을 제어할 수 있다. 여기서 신호값 설정의 최소치는 노즐의 최대 이격 거리를 뜻한다. 실제  $\ln(I_{1500})/(I_{950})$ 의 0.05 신호값변화는 0.6mm의 절단 노즐의 위치변화 값이다.

그림 7은 임의의 형태로 구부러진 곡선시편에 대해서 다양한 최대값 및 최소값 설정 변화에 따른 절단폭을 나타낸다. 여기서 최소폭  $\ln(I_{1500})/(I_{950})$  값은 그림 5에서 약 1.4정도 값을 나타낸다. 최대값 및 최소값이 최소 절단 폭을 갖는 값으로 접근할수록 절단폭이 줄어들었다. 본 연구에서의 절단속도는 0.18 mm/레이저 pulse로 이동하고, 초점제어를 위한 집광광학계 이동용 스텝 모터는 0.1mm/step 이동이 가능하므로 약 30 도 정도의 기울기를 갖는 곡면에도 절단이 가능하다.

## V. 결론

레이저 가공 상태의 실시간 광학적 감시를 위하여, 레이저 가공 감시장치를 자체 설계/제작하였고, 펄스형 Nd:YAG 레이저를 이용한 곡면 시편의 절단 실험에서 집광 렌즈의 초점거리제어를 성공적으로 실증하였다.

## 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.

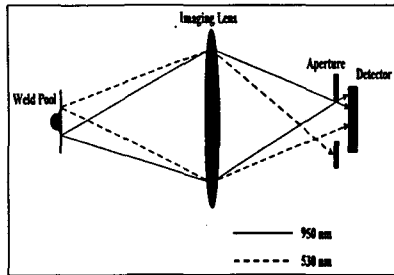


Fig. 1 Principle of optical monitoring using chromatic filtering

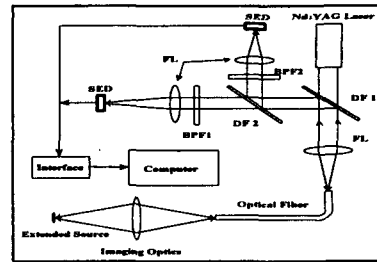


Fig. 2 Schematic diagram of monitoring system

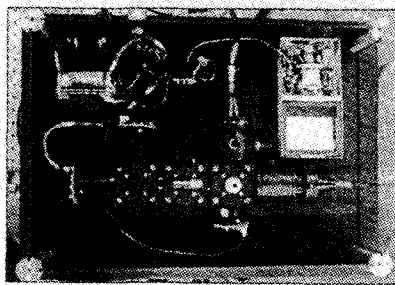


Fig. 3 Optical monitoring system

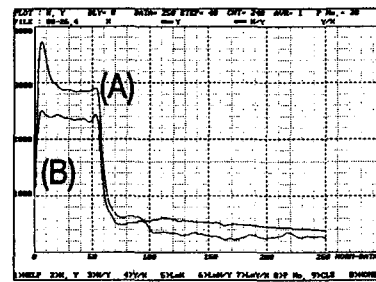


Fig. 4 950 nm signals measured with respect to time (horizontal unit: 4 ms/100). (a) First shot, (b) After first 30 shots

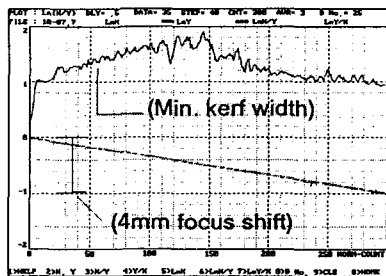


Fig. 5  $\ln(11500/1950)$  signal with respect to 4mm focus shift

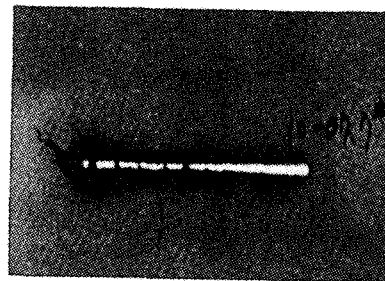


Fig. 6 Kerf with variation in 4mm focus shift

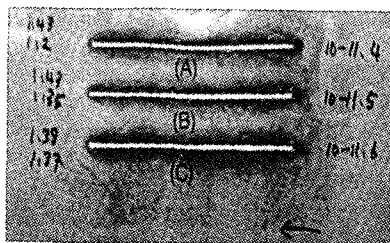


Fig. 7 Kerf width and kerf width variation with respect to different upper and lower bounds of  $\ln(11500/1950)$ . (a) upper bound: 1.43, lower bound: 1.2 at 10-11.4, (b) upper bound: 1.43, lower bound: 1.35 at 10-11.5, (c) upper bound: 1.38, lower bound: 1.37 at 10-11.6.

