

레이저 가공시 광학적 방법을 이용한 가공상태 감시 및 초점제어

정태문 · 정진만 · 김민석 · 백성훈 · 김철중

Optical Process Monitoring and Focus Control in Laser Material Processing

Tae-Moon Jeong, Chin-Man Chung, Min-Suk Kim, Sung-Hoon Baik and Cheol-Jung Kim

1. 서 론

레이저를 이용한 가공은 열 영향을 받는 부위(HAZ)가 적고, 비접촉식으로 정밀한 용접이 가능해 현재 원자력 시설의 보수 및 해체, 자동차, 전자, 항공우주 등 산업 전반에 걸쳐 이용이 확대되고 있는 추세이다. 이와 같은 레이저 가공은 에너지 효율을 높이기 위해서 레이저 에너지를 특정한 부위에 강하게 집중시켜줄 수 있는 집광 광학계를 필요로 한다. 집광 광학계를 사용할 경우, 집광 광학계는 자체적으로 초점 및 심도를 가지게 되므로 레이저 가공시 초점을 유지시키는 방법이 강구되어야 한다.

집광 광학계의 초점을 유지시키기 위한 방법으로 시편(work-piece)과 집광 광학계가 장착된 노즐 사이의 capacitance를 측정하는 방법¹⁾, 레이저 용접시 시편에서 발생된 플라즈마 플럼(plasma plume)의 형성 시간을 측정하는 방법²⁾, 용융 풀(molten pool)에서 발생한 열 복사를 감시하는 방법³⁾ 등이 있다. 시편과 노즐 사이의 capacitance를 측정하는 방법은 시편에서 생성된 플라즈마의 영향을 받지 않아야 하기 때문에 연속 발진 레이저에서 사용하기가 부적절하고, 플라즈마 플럼의 형성 시간을 측정하는 방법은 오차가 크고, 민감도(sensitivity)가 작은 단점이 있다. 용융 풀에서 발생한 열복사를 감시하는 방법은 영국 Heriot-Watt 대학의 Haran 등이 고안한 방식으로, 용융 풀에서 발생한 열 복사를 IR 영역과 UV/VIS 영역으로 나눈 뒤 두 영역에서 색수차(chromatic aberration)에 의한 투과율의 차이로 초점을 제어하는 방식이다. 그러나, 이 방법은 두 영역에서 얻은 신호의 차이를 이용하므로 레이저 출력의 변화가 초점 제어에 영향을 미치며, 용입의 깊이나 용접폭에 관한

정보를 추출하기 어렵다.

본 논문에서는 현재 한국 원자력 연구소에서 개발하여 사용하고 있는 광학적 방법을 이용한 가공 상태 감시 및 제어에 관한 연구를 살펴본다. 본 연구소에서 사용하는 방식은 색수차 공간여과(chromatic filtering)이라는 방식으로 색수차를 이용한다는 점에서 Haran 등의 방법과 비슷하나, 사용된 레이저 파장과 같은 색수차 특성을 갖는 파장을 선택하고 색수차 특성이 아주 다른 파장을 가시 광선 영역 혹은 근적외선 영역에서 선택하여 이 신호의 비를 이용하는데 아주 큰 차이점이 있다. 이와 같은 방법을 사용하면, 초점 제어는 물론 용융 풀의 크기나 용입의 깊이 등과 같은 특성을 실시간으로 감시할 수 있다^{4~6)}. 본 연구에서는 색수차 공간여과(chromatic filtering) 방식을 이미 수 년전부터 개발하여 펄스형 레이저 용접의 실시간 감시, 자동 초점 추적 및 펄스형 레이저 절단에서 실시간 절단폭 제어⁷⁾ 등에 사용하여 왔으며, 현재 연속 발진 레이저에 적용 가능성을 연구 중에 있다. 본 논문은 가공 상태 감시 이론과 실제 레이저 용접 및 절단에서 실험 결과 등으로 구성되어 있고, 결론에서 지금까지의 실험 결과를 정리하려고 한다.

2. 색수차 공간여과 이론

색수차 공간여과를 이용한 광학적 감시는 앞에서 언급한 바와 같이 용융풀에서 발생한 열 복사(thermal radiation)중에서 특정한 두 개 이상의 파장을 선택하여 두 파장 사이의 색수차(chromatic aberration)에 따른 투과율의 차이를 이용하는 방식으로 레이저 출력 변화에 따른 용접 상태의 변화와 집광 광학계의 초점 변화에 따른 용접 상태의 변화를 구별할 수 있는 장점이 있다. 용융풀의 온도를 일정한 온도 T 라 가정하고

용융풀에서 발생한 열 복사중 임의의 파장 λ_1 과 λ_2 에서 신호의 세기를 각각 I_{λ_1} 과 I_{λ_2} 라 하면, I_{λ_1} 과 I_{λ_2} 는 각각 다음과 같다.

$$I_{\lambda_1} = C_1 \exp\left(-\frac{14380}{\lambda_1 T}\right) \int_{\lambda_1} t_1 dA = C_1 \exp\left(-\frac{14380}{\lambda_1 T}\right) F(\lambda_1, A) \quad (1)$$

$$I_{\lambda_2} = C_2 \exp\left(-\frac{14380}{\lambda_2 T}\right) \int_{\lambda_2} t_2 dA = C_2 \exp\left(-\frac{14380}{\lambda_2 T}\right) F(\lambda_2, A) \quad (2)$$

여기서, C_1 , C_2 는 광학계의 반사율 및 광검출기의 이득에 관계된 상수이고, A 는 용융풀의 면적, t_1, t_2 는 각각의 파장에서 위치에 따른 투과율 함수이다. 용융 풀의 크기 및 용입의 깊이를 측정하기 위해서는 서로 다른 순간에 측정된 신호의 비를 이용한다. 서로 다른 순간에 신호를 측정하고, 그 비에 자연대수를 취하면,

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

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

이 된다. 여기서, T' 및 A' 은 서로 다른 순간에 온도 및 용융풀의 면적이다. 온도에 의존하는 항을 소거하면,

$$\begin{aligned} & \ln(I_{\lambda_2}/I_{\lambda_2}') - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \ln(I_{\lambda_1}/I_{\lambda_1}') \\ &= \left[\ln(F(\lambda_2, A)) - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \ln(F(\lambda_1, A)) \right] \\ & - \left[\ln(F(\lambda_2, A')) - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \ln(F(\lambda_1, A')) \right] \\ &= S(\lambda_1, \lambda_2, A) - S(\lambda_1, \lambda_2, A') \end{aligned} \quad (5)$$

이 된다. 식 (5)에서 알 수 있는 바와 같이 $\ln(I_{\lambda_2}/I_{\lambda_2}') - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \ln(I_{\lambda_1}/I_{\lambda_1}')$ 은 시간 변화에 따른 용융 풀의 크기에 따라 달라지는 값으로, 광학계의 투과율 특성으로부터 계산하여 구할 수 있다. 서로 다른 두 순간에 $\ln(I_{\lambda_2}/I_{\lambda_2}') - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \ln(I_{\lambda_1}/I_{\lambda_1}')$ 을 측정하여 계산치와 비교함으로써 용융 풀의 크기 변화를 알 수 있다. 그림 1은 용융 풀의 직경에 따른 $\ln(I_{\lambda_2}/I_{\lambda_2}') - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \ln(I_{\lambda_1}/I_{\lambda_1}')$ 의 변화를 계산한 결과이다. 레이저 spot의 크기는 1 mm로 하였고, 파장이

각각 950과 530 nm인 경우에 대해서 계산하였다. 용융 풀의 크기가 작으면 신호의 세기가 크고 용융 풀의 크기가 증가할수록 신호의 세기가 감소하다가 레이저의 spot 크기와 용융 풀의 크기가 일치하였을 때, 세기가 최소가 됨을 알 수 있다. 이와 같은 용융 풀에 따른 $\ln(I_{\lambda_2}/I_{\lambda_2}') - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \ln(I_{\lambda_1}/I_{\lambda_1}')$ 값의 변화는 용입의 깊이에 관한 정보도 준다. 레이저 spot 크기와 용융 풀의 크기가 일치할 때, 즉, $\ln(I_{\lambda_2}/I_{\lambda_2}') - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \ln(I_{\lambda_1}/I_{\lambda_1}')$ 값이 최소가 될 때를 기준으로 매 펄스마다 시간에 따른 크기 변화를 측정하고, 용융 풀의 크기 변화와 깊이와의 관계를 이용하면 용입의 깊이를 감시할 수 있다.

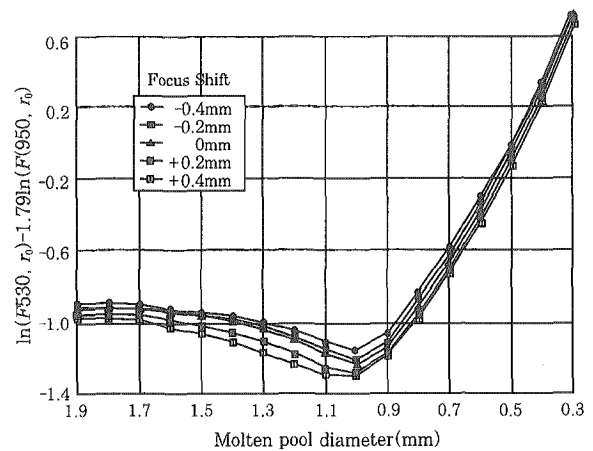


Fig. 1 Focus shift dependence of $\ln(F(530, r_0)) - 1.79 \times \ln(F(950, r_0))$.

집광 광학계의 초점을 제어하기 위해서는 두 파장에서 측정된 신호의 비를 이용한다. 두 파장에서 측정된 신호에 자연 대수를 취하면,

$$\begin{aligned} \ln(I_{\lambda_1}/I_{\lambda_2}) &= \ln(C_1/C_2) + \frac{14380}{T} \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right) \\ &+ [\ln(F(\lambda_1, A)) - \ln(F(\lambda_2, A))] \end{aligned} \quad (6)$$

이 된다. 여기서 처음의 상수항과 두 번째 온도에 의존하는 항이 초점이동에 대해서 무관하다고 하면, 초점 이동에 관한 정보는 오로지 용융풀의 크기 및 열 복사 파장에 의해 결정된다. 따라서, 열 복사 파장을 선택하고 초점 이동에 따른 $\ln(I_{\lambda_1}/I_{\lambda_2})$ 값을 관측한다면 $\ln(I_{\lambda_1}/I_{\lambda_2})$ 값에 따라 원하는 초점 및 용융풀의 크기를 선택하고 제어하는 것이 가능하다. 그림 2는 초점 변화에 따른 $\ln(F(\lambda_1, r_0)) - \ln(F(\lambda_2, r_0))$ 값의 변화를 계산한 결과이다. 용융 풀의 크기가 1 mm 부근에서 신호를 측정해서 초점을 제어하면 용접 풀의 크기 변화를 레이저의

출력 변화에 영향을 받지 않고 초점을 제어할 수 있다. 용접 풀의 직경이 1 mm이고 초점 이동거리가 0.8 mm일 때, $\ln(F(\lambda_1, r_0)) - \ln(F(\lambda_2, r_0))$ 값, 즉 $\ln(I_{\lambda_1}/I_{\lambda_2})$ 는 약 0.15 변화함을 알 수 있다. 또한, 집광 광학계가 시편으로부터 멀어질수록 $\ln(F(\lambda_1, r_0)) - \ln(F(\lambda_2, r_0))$ 값은 증가하고, 반대로 집광 광학계가 용접 시편쪽으로 접근하면 $\ln(F(\lambda_1, r_0)) - \ln(F(\lambda_2, r_0))$ 값은 감소한다. 실시간 용접 상태 제어를 할 경우, 용입의 깊이가 가장 최적의 상태일 때의 $\ln(I_{\lambda_1}/I_{\lambda_2})$ 값을 선정하고, $\ln(I_{\lambda_1}/I_{\lambda_2})$ 변화시 선정된 값과 비교하고 보정하여 줌으로써 실시간으로 초점을 제어할 수 있다.

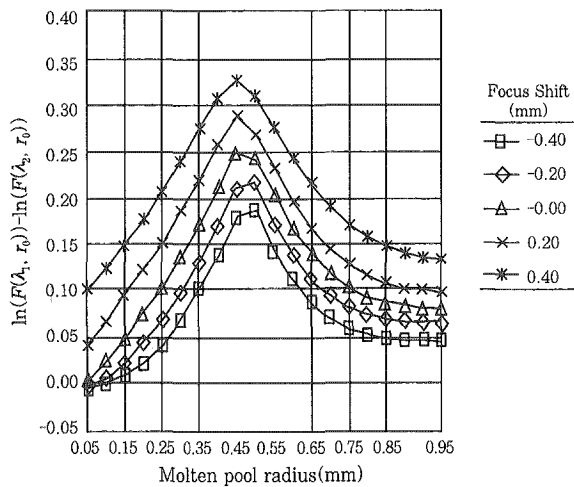


Fig. 2 Focus shift dependence of $\ln(F(530, r_0)) - \ln(F(950, r_0))$.

3. 가공 상태 감시 장치

그림 3은 본 연구에서 사용한 감시 및 제어 장치의 구성도이다. 레이저는 Rofin-Sinar사에서 제작된 펄스형 Nd:YAG 레이저(모델명: RSY-1000P)로 평균 출력이 1 kW까지 가능하다. 레이저에서 발진한 출력은 직경이 800 μm인 광섬유에 결합되어 감시 장치로 입사된다. 감시 장치로 입사된 레이저 출력은 광분할기(beam splitter)에서 반사되어 F-number가 약 3.3인 집속 렌즈에 의해 직경이 약 1 mm인 2차측 전송 광섬유에 결합된다. 2차측 전송 광섬유에서 나오는 레이저 출력은 초점거리가 각각 25 mm와 20 mm인 평면 볼록형(plano-convex) 렌즈에 의해 시편에 집속된다. 집광 광학계를 구성하는 렌즈는 색수차가 큰 SF11으로 만들어졌다. 집광 광학계는 스텝모터(step motor)로 구동되는 선형 이동기 위에 설치되어 있고, 선형 이동기는 한 스텝당 0.1 mm 이동하는 특성을 갖는다. 또한, 원하는 시간에 열 복사 신호를 측정하기

위해서 레이저 펄스의 일부를 트리거 회로에 연결된 광검출기로 입사시켰다. 레이저 조사시 용융 풀에서 발생된 열복사는 집속 렌즈에 의해 다시 2차측 전송 광섬유로 집속되어, 감시 장치로 되돌아가게 된다. 이처럼 2차측 전송 광섬유를 다시 사용할 경우, 광학계의 손상 여부를 실시간으로 감시할 수 있는 장점이 있다. 감시 장치 내에서 열복사는 각각 다른 파장 성분별로 분리되어 두 개 혹은 세 개의 광검출기로 입사된다. 광검출기의 앞단에 원하는 파장만을 선택하기 위해 10 nm의 선폭을 갖는 bandpass 필터를 설치하였다. 광검출기에 검출된 신호는 자체 제작한 12 비트 고속 신호 처리 장치를 통해 컴퓨터로 들어가며, 컴퓨터에서는 획득된 신호를 분석, 처리한다.

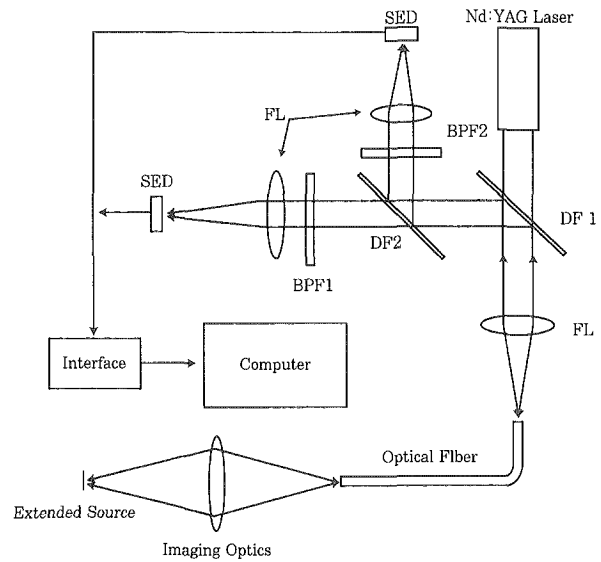


Fig. 3 Experimental setup for material process monitoring using chromatic filtering. FL: Focusing lens, SED: Single-element detector, BPF1,2: Bandpass filters, DF1,2: Dichroic filters.

본 감시 및 제어 장치를 이용하여 초점을 제어하려면, 초점 위치에서 $\ln(I_{\lambda_1}/I_{\lambda_2})$ 의 값을 기준값으로 정한 뒤 임의의 순간에서 $\ln(I_{\lambda_1}'/I_{\lambda_2}')$ 의 값을 측정한다. 만약, 950 nm 파장에서만 $\ln(I_{950})$ 신호를 측정하면, 색수차 특성에 의해서 초점을 기준으로 $\ln(I_{950})$ 신호가 대칭적으로 증가한다. 여기서, 950 nm 파장외에 다른 파장을 선택해서 $\ln(I_{\lambda_1}/I_{950})$ 신호를 측정하면, 색수차 특성에 의해 $\ln(I_{\lambda_1}/I_{950})$ 신호의 최대치가 나타나는 곳이 초점과는 다른 위치로 이동해서 초점이 $\ln(I_{\lambda_1}/I_{950})$ 신호가 선형적으로 변화하는 곳에 위치하게 된다. 이때, 초점에서의 $\ln(I_{\lambda_1}/I_{950})$ 값을 기준값으로 정하고 다른 순간에 $\ln(I_{\lambda_1}'/I_{950}')$ 을 측정하였을 때, $\ln(I_{\lambda_1}'/I_{950}')$ 가

기준값보다 크면 집광 광학계가 초점 위치보다 멀리 혹은 가까이 위치함을 의미한다. 그러나, 실제로는 집광 광학계의 초점 거리가 짧아서 노즐과 시편사이가 가까우므로 집광 광학계가 초점보다 멀리 위치하는 경우만 나타난다. 따라서, 어느 순간에 $\ln(I_{\lambda_1}/I_{950})$ 를 측정하여 기준값과 비교하고 기준값보다 크면 스텝모터를 구동시켜 집광 광학계를 시편쪽으로 이동시키고 작으면 시편의 반대쪽으로 이동시켜 항상 집광 광학계를 초점위치로 이동시킨다. 이 때, 컴퓨터 연산 방식(algorithm)상에 허용 오차의 최대치 및 최소치를 설정할 수 있어서 용접 및 절단폭을 설정할 수 있고, 폭의 변화까지 제어할 수 있다.

4. 색수차 공간여과를 이용한 레이저 용접 감시 및 제어

본 광학적 감시 및 제어 장치를 사용하면, 레이저 용접시 용융 풀의 크기 및 용입의 깊이에 관한 정보를 알 수 있고, 실시간 자동 초점 제어(real-time auto-focus control)를 구현할 수 있다. 레이저 용접시 색수차를 최적화하기 위해서, 950과 530 nm의 파장을 선택하였고 Si 광검출기를 사용하여 열 복사 파장을 측정하였다. 용융 풀의 크기에 관한 정보는 식 5에 의해 구할 수 있다. 그림 4는 7.5 ms의 펄스폭을 갖고 레이저 출력이 각각 170 W와 250 W인 경우에 레이저 펄스가 조사되는 동안, $\ln(I_{\lambda_2}/I_{\lambda_2}') - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \ln(I_{\lambda_1}/I_{\lambda_1}')$ 신호의 값을 측정할 결과이다. 계산에서 예측한 바와 같이 레이저가 조사되면 용융 풀의 크기가 증가하여 신호의 크기가 전체적으로 감소하였다. 레이저의 평균 출력이 250 W인 경우, 약 3.2 ms에서 신호의 크기가 최소가 되었으며 이를 용융 풀의 크기와 레이저 spot의 크기가 같을 때 신호의 크기가 최소라는 계산 결과와 비교하면 레이저 조사 후 약 3.2 ms 정도에서 용융 풀의 크기가 레이저 spot의 크기와 같은 것을 알 수 있다. 그 이후 용융 풀의 크기는 약 4.8 ms 정도까지 증가하다가 감소하는 것은 볼 수 있다. 레이저의 평균 출력이 170 W인 경우, 약 4 ms 정도에서 용융 풀의 크기가 조사된 레이저 spot의 크기와 같은 것을 알 수 있고, 그 이후에 용융 풀의 크기는 거의 같은 수준으로 유지되다가 줄어들음을 알 수 있다.

그림 5는 용입의 깊이를 추정하기 위해 용융 풀의 크기 변화를 감시한 결과이다. 펄스폭 7.5 ms, 반복율 20 pps(pulse per second)인 레이저 펄스를 이용하여 평균 출력을 각각 200 W와 300 W로 용접 실험을

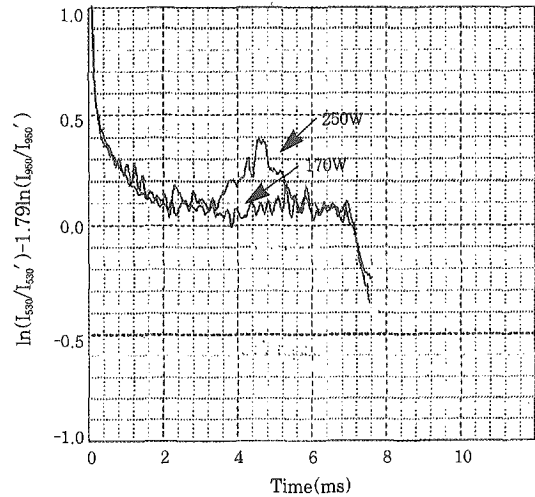


Fig. 4 Power dependence of size variation of a weld pool during one pulse.

수행하였고, 레이저가 발진한 후, 7 ms부터 측정을 시작하였다. $\ln(I_{\lambda_2}/I_{\lambda_2}') - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \ln(I_{\lambda_1}/I_{\lambda_1}')$ 신호의 값이 0보다 크면 레이저 spot 크기 보다 큰 것을 의미하고, 0보다 작으면 spot 크기보다 작은 것을 의미한다. 그림에서 레이저 출력이 높으면 용융 풀의 크기가 더 빨리 줄어들음을 알 수 있다. 레이저 출력이 높을 때, 용융 풀의 크기가 더 빨리 줄어들어는 것은 용입 깊이에 의한 열 전도 면적의 증가에 의한 원인으로 볼 수 있다. 따라서, $\ln(I_{\lambda_2}/I_{\lambda_2}') - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \ln(I_{\lambda_1}/I_{\lambda_1}')$ 을 측정하는 방법으로 용융 풀의 크기 변화를 측정하면 용입의 깊이에 대한 정보를 알 수 있다.

그림 6은 초점 변화에 따른 $\ln(I_{950}/I_{530})$ 신호의 변화를 나타낸다. 레이저가 조사된 후, 7.2 ms 후에 신호가 관측하였으며, 집광 광학계를 초점 전후로 +0.5에서

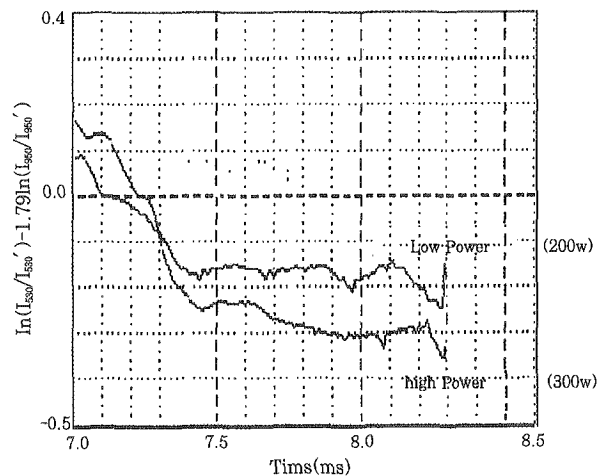


Fig. 5 Experimental results of power dependence on maximum $\ln(I_{530}/I_{530}') - 1.79 \times \ln(I_{950}/I_{950}')$.

-0.5 mm로 이동하였다. 신호의 크기는 이론에서 예측한 바와 같이 집속 광학계가 시편에서 멀리 떨어질수록 크며, 집속 광학계가 시편쪽으로 이동하면서 신호의 크기가 작아졌다. 집광 광학계가 1mm 이동하였을 때, $\ln(I_{530}/I_{950})$ 신호는 약 0.25 변화하였고, 이는 이론적으로 계산한 결과인 0.19와 비슷한 값이다. 따라서, 0.1의 허용 오차 범위는 0.4 mm의 정밀도로 초점 제어를 할 수 있는 것을 의미한다. 그림 7은 초점 이동에 따른 $\ln(I_{530}/I_{950})$ 의 변화를 이용하여 임의의 형태로 구부러진 시편에서 용접을 수행한 결과이다. 이 시편의 경우, 용입의 깊이가 최적인 곳에서 $\ln(I_{950}/I_{530})$ 신호 값은 0.26인 것으로 측정되서, 기준값을 0.26으로 설정하였고 허용 오차의 범위를 최대 0.27 최소 0.25로 하였다. 이와 같은 조건에서 임의의 형태로 구부러진 시편에 대해서 레이저 용접시 초점 제어가 성공적으로 이루어짐을 그림을 통해서 확인할 수 있었다.

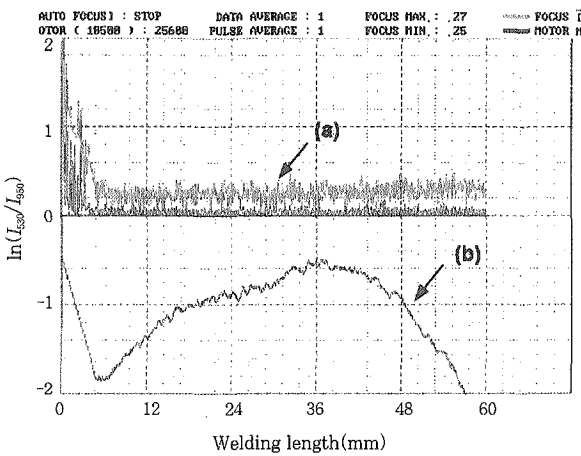


Fig. 6 a) Maintenance of $\ln(I_{1500}/I_{950})$ to a target value and (b) the trace of a step motor when the optical monitoring and control system was applied to a curved workpiece.

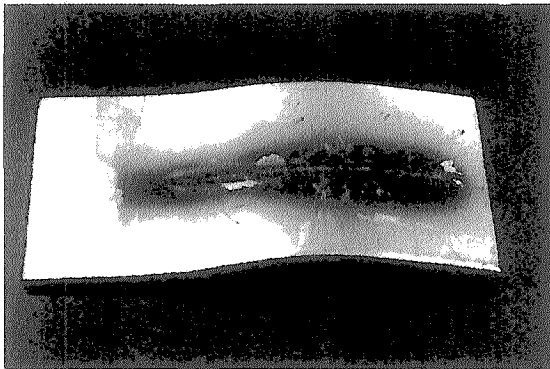


Fig. 7 Photograph representing a uniform bead width of a curved workpiece when using a optical monitoring and control system.

5. 색수차 공간여과를 이용한 레이저 절단 감시 및 제어

레이저 절단시 사용된 열복사 파장은 950과 1500 nm로 각각을 측정하기 위해서 Si 광 검출기와 InGaAs 광 검출기를 사용하였고 보조 가스로 산소를 사용하였다. 그림 8은 2 ms의 펄스폭을 갖는 레이저 펄스를 이용하여 절단 실험을 수행시 발생한 I_{950} 및 I_{1500} 신호의 모양을 보여준다. 그림과 같이 초기 약 20 번째 펄스까지는 각각의 신호 초기에 강한 스파이크 신호가 관측됨을 볼 수 있다. 이 강한 스파이크 신호는 시편이 레이저에 의해 용융되고 있는 상태에서 발생한 열복사임을 알 수 있다. 초기 20 번째 이후의 펄스에서는 강한 스파이크 신호가 관측되지 않았으며, 이는 용융된 부분중 많은 양이 보조 가스에 의해 제거되었기 때문으로 생각된다.

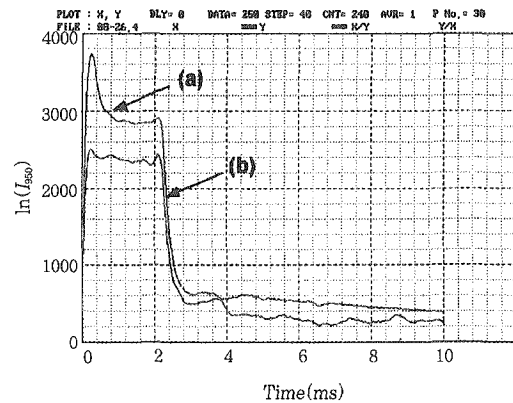


Fig. 8 950 nm signal measured with respect to time. 950 nm signal at (a) the first shot and (b) after 20 shots.

그림 9는 $\ln(I_{1500}/I_{950})$ 의 기준값, 즉 절단폭이 최소가 되는 위치에서 $\ln(I_{1500}/I_{950})$ 값을 찾기 위해 두께가 1 mm인 스테인레스 시편에서 횡방향으로 50 mm 이동하고 초점이 4 mm 이동하였을 때 $\ln(I_{1500}/I_{950})$ 신호를 나타낸다. 신호는 레이저 펄스 조사 시작 후 1.5 ms 후에 수집되었고, 횡방향으로 약 18 mm 이동하였을 때 가장 좁은 절단 폭(kerf width)를 갖는 것으로 관측되었고, 이 때, $\ln(I_{1500}/I_{950})$ 신호의 크기는 약 1.7이었다.

이론에서 살펴보면 색수차 공간여과를 이용하기 위해서 다른 파장들의 조합을 사용하는 것이 가능하다. 색수차의 효과에 의한 초점 위치와 $\ln(I_{\lambda_1}/I_{\lambda_2})$ 신호의 최소치사이의 어긋남을 측정하기 위해서, 1500과 530 nm와 950과 530 nm의 파장 조합에 대해서 ln신호를 측정하였다. 집광 광학계는 횡방향으로 50 mm 이

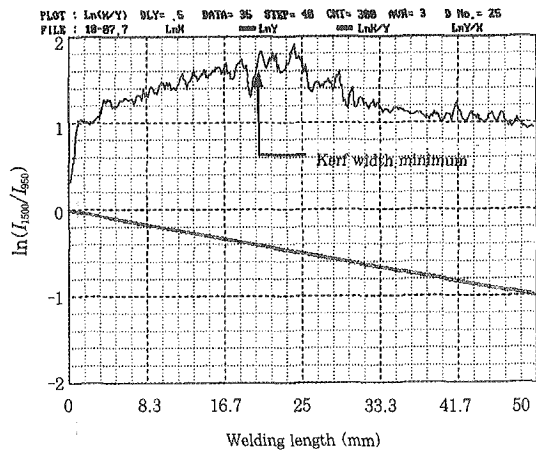


Fig. 9 $\ln(I_{1500}/I_{950})$ signal with respect to the focus shift during 50 mm cutting.

동하였고 이 때, 초점은 5 mm 이동하였다. 그림 10은 초점이동에 따른 $\ln(I_{1500}/I_{530})$ 신호를 보여준다. 최소의 절단폭은 횡방향으로 약 20 mm 이동하였을 때 관측되었으며, $\ln(I_{1500}/I_{950})$ 신호의 최소값은 횡방향으로 약 30 mm 이동하였을 때 관측되었다. 이러한 결과는 색수차 공간여과가 초점의 위치와 $\ln(I_{1500}/I_{950})$ 신호의 크기가 최소가 되는 위치의 어긋남을 유발하는 것을 보여준다. 집광 광학계가 집광 광학계의 초점에서 멀리 떨어졌을 때, $\ln(I_{1500}/I_{950})$ 신호가 포화되면서 약간 감소하는 것을 볼 수 있다. 이것은 초점 이동에 의한 용융 풀의 증가에 의한 투과율의 감소와 초점 이동에 의한 1500 nm 신호의 증가의 상호작용에 의한 요인으로 생각된다. 950과 530 nm 파장의 경우에는 초점 위치 근방에서 $\ln(I_{1500}/I_{950})$ 신호가 평탄해서 초점 위치를 정확히 알 수 없었다. 결론적으로, 1500과 530 nm의 경우 초점 근방에서는 높은 정확도를 갖고 집광 광학계의 위치를 제어할 수 있고, 1500과 950 nm의 경우 초점에서 멀리 떨어진 경우에 집광 광학계

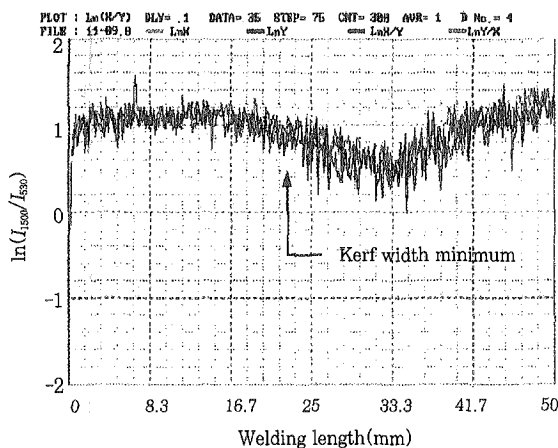


Fig. 10 $\ln(I_{1500}/I_{530})$ signal with respect to the focus shift during 50 mm cutting.

의 위치를 잘 제어할 수 있다. 따라서, 원하는 영역에서 초점을 제어하고자 하면 단지 bandpass filter를 교체하는 것으로 쉽게 구현할 수 있다.

본 광학적 감시 및 제어 장치를 이용하면, 허용오차의 최대값 및 최소값을 결정함으로써 레이저 절단시 절단 폭의 변화를 제어할 수 있다. 그림 11은 임의의 형태로 구부러진 시편에 대해서 서로 다른 최대값 및 최소값에 대한 절단폭의 변화를 나타내는 그림이다. 레이저 절단시 허용 오차의 최대값과 최소값 차이를 0.01까지 줄일 수 있었으며, 이는 이론적으로 0.04 mm 정도의 정밀도로 초점 이동을 제어함을 의미한다. 절단폭 및 절단폭의 변화는 허용 오차의 최대값 및 최소값이 좁을수록 좁게 나타났다. 본 연구에서 사용된 감시 및 제어 장치를 이용하였을 때, 곡면 기울기의 최대 허용 각도는 약 50%로 계산되었다.

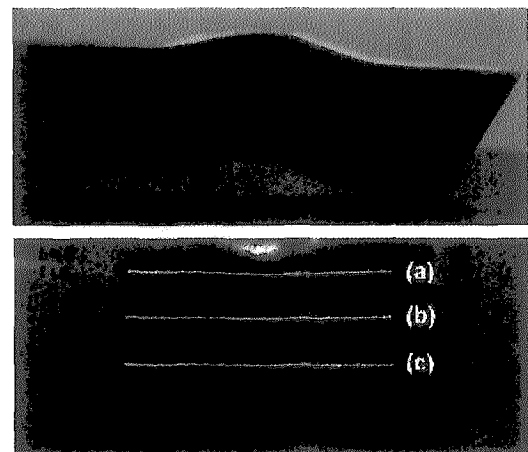


Fig. 11 Kerf width variation with respect to different upper and lower bounds of $\ln(I_{1500}/I_{950})$. Upper/lower bounds: (a) 1.43/1.20, (b) 1.43/1.35, and (c) 1.38/1.37.

일반적인 레이저 절단 실험의 경우 레이저 출력 변화는 절단폭의 변화를 유발할 수 있다. 본 감시 및 제어 장치를 이용하였을 때, 레이저 출력 변화에 따른 절단폭의 변화를 조사하였다. 그림 12는 레이저 절단 실험 중간에 레이저의 출력을 각각 10%와 20% 변화시켰을 때, 절단폭을 나타낸다. 20%의 레이저 출력 변화에 대해서 약간의 절단폭 변화가 관측되었으며, 10% 정도의 레이저 출력 변화에 대해서 레이저 절단폭의 변화는 관측되지 않았다.

6. 결 론

본 논문에서는 현재 한국 원자력 연구소에서 개발하여 사용하고 있는 색수차 공간여과를 이용한 레이저

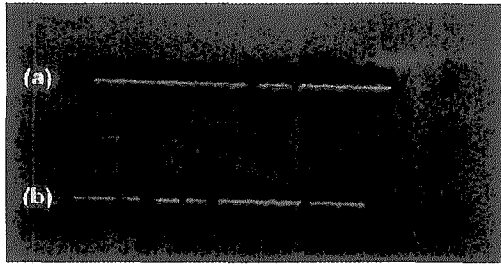


Fig. 12 Kerf width variation with respect to the laser power variation. The laser power was artificially increased by 10% (a) and 20% (b) in the middle of cutting.

가공 상태의 광학적 감시 및 제어 방법에 관해 기술하였다. 색수차 공간여과 방식을 이용하였을 때, 레이저 용접시 용융 풀의 크기 및 용입의 깊이에 대한 정보를 추출할 수 있었고, 레이저를 이용한 용접 및 절단시 실시간 자동 초점 제어(real-time auto-focus control)를 구현할 수 있었다. 본 연구에서 제작된 감시 및 제어장치를 이용해서 임의의 형태로 구부러진 시편에 대해서 초점 추적이 가능함을 증명하였으며, 최대 약 55%의 기울기를 갖는 곡면에 대해서 성공적으로 초점 추적을 시현하였다. 추후에 연속 발전 레이저를 이용한 용접에 대해서도 본 감시 및 제어 장치를 이용하여 실험할 예정에 있다.

참 고 문 헌

1. S. Beirmann, A. Topkaya, and M. Jagiella, 1992 European Conf. on Laser Treatment of Materials pp. 51.
2. J. Meijer, F. Wisselink, and R. Kessel, "Process Control by Plume Registration in Laser Materials Processing," Proceedings of ICALEO '95, pp. 404-411.
3. F. Haran, D. Hand, C. Peters, and J. Jones, "Real-time focus control in laser welding," Meas. Sci. Technol. 7, pp. 1095-1098.
4. 백성훈, 박승규, 김민석, 정진만, 김철중, "열복사의 색수차 공간여과를 이용한 레이저 용접 감시 기술" 한국레이저가공학회지, vol. 2, (1999), pp.18-26.
5. C.-J. Kim, M.-S. Kim, and K.-S. Kim, "Size variation monitoring of an extended thermal radiation source by chromatic filtering," Optics Communications, Vol. 152 (1998), pp. 239-242.
6. C.-J Kim, "Demonstration of Auto-focus Control by Chromatic Filtering," Proceedings of ICALEO 98 (1998), pp. C226-235.
7. C.-M. Chung, T.M. Jeong, S.-H. Baik, M.-S. Kim, and C.-J. Kim, "Application of Chromatic Filtering to Focus Control and Kerf Width Monitoring in Pulsed Nd:YAG Laser Cutting," Proceedings of ICALEO 99 (1999), to be printed



- 정태문(鄭泰汶)
- 1970년생
- 한국원자력연구소 양자광학기술개발팀
- 레이저 개발, 레이저 용접 및 평가
- e-mail : jeongtm@kaeri.re.kr



- 정진만(鄭鎭滿)
- 1954년생
- 한국원자력연구소 양자광학기술개발팀
- 레이저 용접, 평가 및 공정개선
- e-mail : cmchung@kaeri.re.kr



- 김민석(金珉錫)
- 1957년생
- 한국원자력연구소 양자광학기술개발팀
- 용접자동화
- e-mail : mskim2@kaeri.re.kr



- 백성훈(白聖煥)
- 1961년생
- 한국원자력연구소 양자광학기술개발팀
- 광학적 용접 감시
- e-mail : shbaik@kaeri.re.kr



- 김철중(金哲中)
- 1951년생
- 한국원자력연구소 양자광학기술개발팀
- 레이저 용접, 용접 공정 감시
- e-mail : chjkim@kaeri.re.kr