

## 파이버 레이저에 의한 고속정밀 용접

High speed precision welding using by single mode fiber laser

박 서정, 이 목영, 장 응성, 김 기철, 천 창근

포항산업과학연구원 용접센터

**ABSTRACT** Welding process of ultra thin stainless steel foil was investigated using a single mode Yb-fiber laser with a CW maximum output power 40W. In micro welding, critical power density for keyhole welding was 1 to 2 orders larger higher than in macro-welding due to larger thermal conduction, extremely high speed welding becomes possible.

### 1. 서 론

싱글 모드 파이버 레이저는 최초 통신 기기용으로 개발 되었지만 최근 고출력화가 진행되어 가공용 열원으로 이용 가능하게 되었다<sup>1)</sup>. 뛰어난 빔 품질에 의한 집광성과 신뢰성은 전자산업, 의료기기분야 및 마이크로 부품 등 미세정밀 가공 기술에 유효한 툴로서 기대가 되고 있다.

본 연구에서는 최대 40W 연속발진이 가능한 싱글 모드 파이버 레이저를 이용하여 SUS304 금속 박판 용접을 행하였다. 또한 자체 제작한 빔 측정 장치에 의해 가공점에서의 빔 강도분포를 측정 하였으며, 가공조건으로서 고파워밀도 범위까지 확대, 60m/min이상의 고속용접을 실현 하여 그 용접 특성에 대해 알아 보았다. 용접 중, 재료를 관통하는 레이저 빔 파워를 측정하여 얻어진 실험치와 이동 선 열원 모델에 의해 계산된 입열량을 산출하여 빔 반사손실을 평가하였으며 용접현상으로 비드 천이가 일어나는 파워밀도 조건에 대해 알아보았다.

### 2. 실험방법

본 실험에서 사용 된 최대 출력 40W 파이버 레이저의 발진용 파이버는 더블 코어 구조로 되어 있으며 외측 클래드 층에 도입된 반도체 레이저에 의해 중앙부의 싱글 모드 코어(직경:9 $\mu$ m)를 여기하여 약50%의 광-광 변환효율로 파장 1070nm의 레이저 빔을 발진한다. Fig.1에 본 실험의 개략도를 나타내었다. 집광거리 55mm의 집

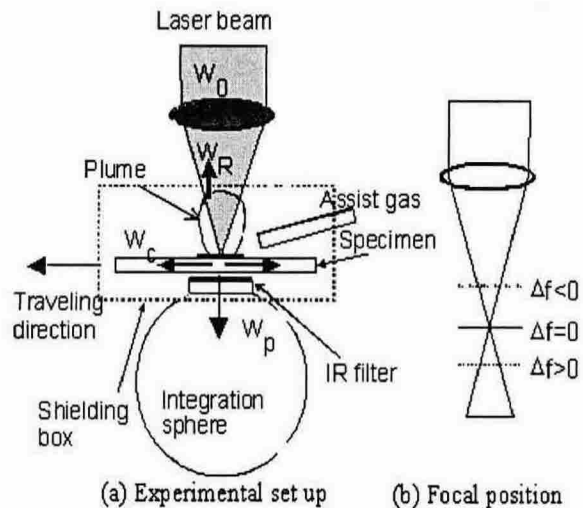


Fig.1 Experimental Set up

광렌즈를 사용하여 이동하는 재료에 입사하여 비드 온 플레이트(Bead on Plate) 용접 실험을 실시하였다. 재료를 관통하는 레이저 파워를 측정하기 위하여 적분구(Integration sphere)를 장착 하였다. 용접실험은 실드 상자(Shield box) 내 Ar 가스분위기 하에서, 어시스트 가스(Assist gas)로는 Ar 가스를 사용 하였다. 시료는 SUS304, 두께  $t=40\mu\text{m}\sim 80\mu\text{m}$  였으며, 레이저 파워, 용접 속도, 빔 집점 거리등의 가공조건으로 비드를 형성하여 단면 형상, 비드 폭, 그리고 관통 파워의 측정을 실시하였다.

### 3. 결과와 고찰

#### 3.1 싱글모드 파이버 레이저의 집광성

본 연구에서 제작한 집광빔 측정 장치를 Fig.2에 나타내었다. 광 검출 센서(Si pin photodiode)

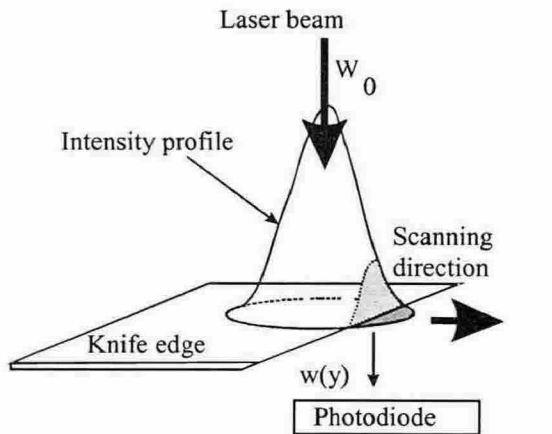


Fig.2 Measurement of focusing beam

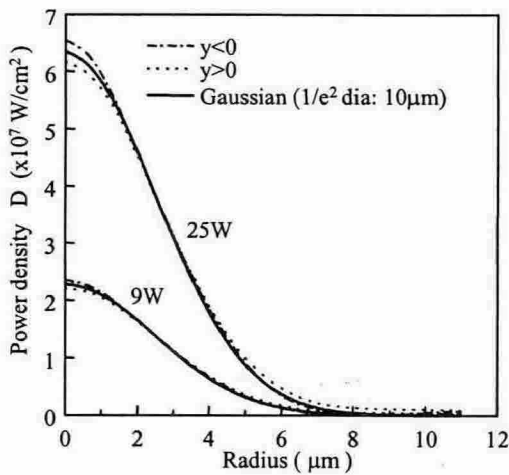


Fig.3 Distribution of beam intensity

를 장착한 적분구 상단에 고속 이동하는 나이프 에지(Knife edge)를 집광빔의 단면 방향으로 스캔하여 강도 분포를 측정하였다. Fig.3은 레이저 파워 9W와 25W에서 측정된 집광빔을 아벨 변환하여 실제 빔의 강도분포와  $1/e^2$ 의 반경을 나타내고 있다. 집광경의 사이즈는 약  $10\mu\text{m}$ 였으며 25W 경우의 파워 밀도는  $6.5 \times 10^7 \text{W}/\text{cm}^2$ 에 달하는 고파워 밀도였고 가우스분포임을 알 수 있다.

### 3.2 용접 특성

레이저 파워와 용접 속도를 파라미터로 하여 SUS304( $t=40\mu\text{m}$ )금속 박판 용접 실험을 실시하였다. Fig.4에는 용접속도가  $450\text{mm}/\text{s}$ ( $27\text{m}/\text{min}$ ), 레이저 파워 9W, 13W, 25W 각각의 상부비드(a)~(c) 및 비드단면(d)~(f) 그리고 하부비드(g)~(h)를 나타내고 있다. 비드의 형태는 대출력 레이저 용접에서 보여지는 것과 같이 비드 표면에 리플무늬의 용융 흐름이 뚜렷이 나타나고 있으며 언더 컷(Under cut)현상이나 기공의 발생

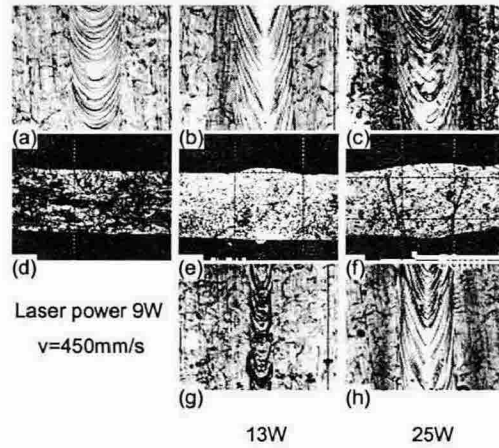


Fig.4 Bead formation at different laser power

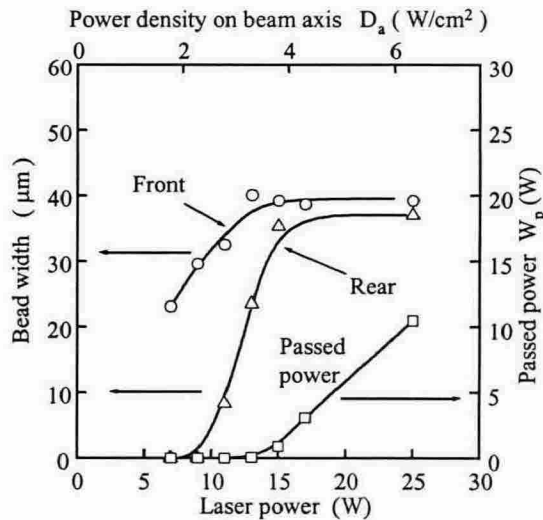


Fig.5 Bead width and penetration beam power

없이 양호한 비드가 형성 되었다.

Fig.5는 동일한 실험 조건에서 용접속도를  $220\text{mm}/\text{s}$ ( $13.2\text{m}/\text{min}$ )로 하여 계측된 상·하단 비드 폭과 시료를 관통한 레이저 파워를 나타내고 있다. 레이저 입사 파워  $W_0=7\text{W}$ (파워밀도  $D_a=2.5 \times 10^7 \text{W}/\text{cm}^2$ ) 이상부터 하단 비드가 형성 되었다. 즉 파워밀도  $D_a=2.5 \times 10^7 \text{W}/\text{cm}^2$  이상이 되면 키 홀이 형성 된다는 것을 시사한다. 일정 이상의 파워가 되면 상·하단 비드의 폭이 같아지면서 관통빔의 파워가 증가하고 있다. 이 상과 같이 종래의 대출력 레이저 용접에서 불가능 이었던 초고속 용접이 가능 하였으며 비드 천이(열전도형 용접에서 키 홀 용접)가 일어나는 파워 밀도가 50~100배 가량 높다는 것을 알 수 있다.

### 3.3 재료에 대한 빔의 흡수·관통·반사

전술 한 바와 같이 관통빔 파워의 측정과 더불어 심플한 열전도 모델을 사용하여 용융폭으로부터 입열량을 산출하였다. 또한 재료 표면 측에서

의 레이저 반사 손실  $W_R$ 과 입사파위에 대한 비율  $R$ 을 추정하였다. 계산을 간단하게 하기 위하여 재료물성의 온도 의존성, 증발·용융 잠열, 복사, 대류 손실 등은 무시하고 정상 상태에서의 2차원 이동 선 열원 모델을 사용하였다.

$$T(x,y) = \frac{W_c}{2\pi Kh} \exp\left(-\frac{vx}{4\alpha}\right) K_0\left(\frac{v\sqrt{x^2+y^2}}{2\alpha}\right) \quad (1)$$

여기서  $K$ : 열전도율,  $\alpha$ : 열확산계수,  $T_m$ : 용점,  $h$ : 용융깊이,  $K_0(u)$ : 제2종 0차 변형 베셀 함수이다. 계산에 사용된 각 물성치(표1)은 실온에서 용점까지의 평균치이다.

Table 1 Property of SUS304

Thermal constants	Values
Thermal conductivity, $K$ [W/mK]	25.5
Thermal diffusivity, $\alpha$ [m <sup>2</sup> /s]	$4.1 \cdot 10^{-6}$
Melting point, $T_m$ [K]	1723

Fig.6에 용접속도  $v=450\text{mm/s}$ ,  $t=40\mu\text{m}$ 의 용접실험에서 레이저 파워에 대한  $W_c$ ,  $W_p$ ,  $W_c+W_p$ 의 변화를 나타낸다.  $W_c$ 는 측정된 비드폭의 실험에 의해 계산된 재료의 입열량을 나타내고 있다.  $W_c, W_p, W_R$  각각의 변화를 분석해 보면, 최초 레

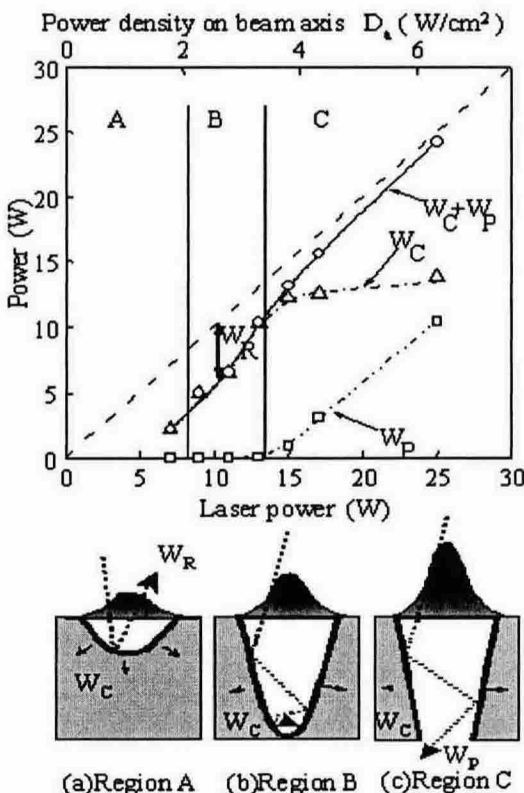


Fig.6 Reflection · Absorption · Penetration beam on material process

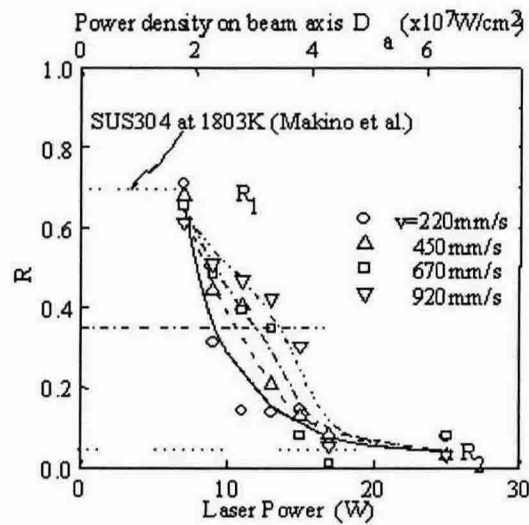


Fig.7 Estimation of laser power for bead transition

이저 조사 시 재료표면으로부터의 반사가 1회 정도로 아직 키 홀이 생성 되지 않은 단계인 A 영역과 표면에서의 증발과 동시에 증발반발력이 증가하여 키 홀 형성이 이루어지며,  $W_c$  변화가 급격해지는 영역 B(비드 천이 영역), 그리고  $W_c$  변화가 일정해 지며  $W_p$ 의 증가 일어나는 C영역으로 대별하여 재료의 흡수·반사 메커니즘을 알아볼 수 있다. Fig.7은 각각의 용접 속도에서 레이저 반사 손실  $R=W_R/W_0$ 을 알아보았다. 레이저 파워가 낮은 경우의  $R$ 의 값은 약 0.35(그림 안  $R_1$ ) 전후였고 이것은 높은 반사율과 일치하고 있다. 그리고 키 홀이 형성 된 후의 빔 반사손실은 0.04로 상당히 작은 값을 나타내고 있다.(그림 안  $R_2$ ) 열전도형 용접에서 키 홀 용접으로의 비드천이에 필요한 파워 밀도는  $2.2\sim 3.5 \cdot 10^7 \text{W/cm}^2$ 로 대출력 레이저 용접 시의 파워 밀도보다 50~100배 정도 높다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

최대연속평균 출력 40W 싱글 모드 파이버 레이저를 이용하여 집광 빔의 측정과 SUS304, 두께  $t=40\mu\text{m}$ 의 용접 실험을 실시하였다.

- 1) 자체제작한 빔 측정 장치에 의해  $1/e^2$ 의 집광빔 사이즈가  $10\mu\text{m}$ 이고, 레이저 파워가 40W 일 경우 파워 밀도는  $10^8 \text{W/cm}^2$ 에 달한다.
- 2) 비드 천이 임계 파워 밀도가  $10^7 \text{W/cm}^2$  레벨이며 이것은 대출력 레이저 용접 보다 50~100배 정도 높다

#### 참고문헌

- 1) J. D. Minelly et al: IEEE Photonics Technology Letters, 15-3, (1993)301-303.