

# 펄스 레이저 용접시의 유기 플라즈마와 키홀의 동적 거동

## Dynamic Behaviors of Laser-induced Plasma and Keyhole in Pulsed Laser Welding

김종도\*, 최영국\*\*, 김윤해\*, 김영식\*

\* 한국해양대학교, \*\* 종합폴스타(주)

### 1. 서 언

레이저 열원을 이용한 용접에서는, 미소영역에서 극히 짧은 시간에 현상이 완료하기 때문에 용접현상에 관한 충분한 이해가 되어 있지 않다. 특히 증발원소의 반력에 의해서 형성되는 키홀(keyhole) 현상은, 입사레이저 빔과 플라즈마 또는 플라즈마와 재료의 상호작용, 키홀내의 빔의 반사 및 흡수형태 등 다양한 인자에 의해 지배되고 있으므로 이론적 연구를 기초로 한 키홀 용접현상에 대한 연구가 경쟁적으로 이루어지고 있다. 그러나, 이론적 연구는 여러 형태의 가정이나 가설을 토대로 하여 이루어지고 있기 때문에 키홀 용접현상에 대한 상세한 메카니즘은 거의 규명되지 있지 않다.

그래서, 본 연구에서는 초고속도 계측시스템을 이용하여 각종 재료의 용접시 유기하는 플룸의 거동과 키홀 용접현상의 가시화를 꾀하여, 플라즈마와 키홀거동과의 상관성 및 용접결합과의 관련성에 대하여 검토를 행하였다.

### 2. 사용재료 및 실험방법

사용재료는 알루미늄 합금 A5083, A6062, 공업용 순티탄(pure Ti) 및 스텐레스 스틸STS 304등을 이용하였다. 가공열원은 21ms의 펄스 파형 제어형 Nd:YAG 레이저 장치이다.

Fig. 1에 펄스 레이저 용접시 유기하는 플라즈마와 키홀거동의 관찰에 이용한 초고속 계측시스템의 개략도를 나타낸다. 레이저 빔을 광화이버에 의해 전송하여 스폿용접을 행하고, 용접중의 현상을 계측하였다. 플라즈마의 시간변화에 대해서는, High Speed Streak Camera (최대 스트리크속도  $V_{s,max}=300m/s$ , 최대 시간분해능  $R_{t,max}=0.18\mu s$ )와 High Speed Video Camera(최대 촬영속도  $n_{f,max}=40,500 f/s$ )를 동기시켜, 1.16

$\mu s$ 의 시간분해능으로 플라즈마의 거동을 해석하였다. 또한 키홀과 플라즈마 거동의 상관성에 대해서는 2대의 High Speed Video Camera를 동기시켜 계측하였다. 용융 풀(molten pool)의 조명용 광원으로서 Ar 레이저의 514.5nm의 단파장을 이용하고 각각의 광학렌즈에는 간섭필터를 채용하였다.

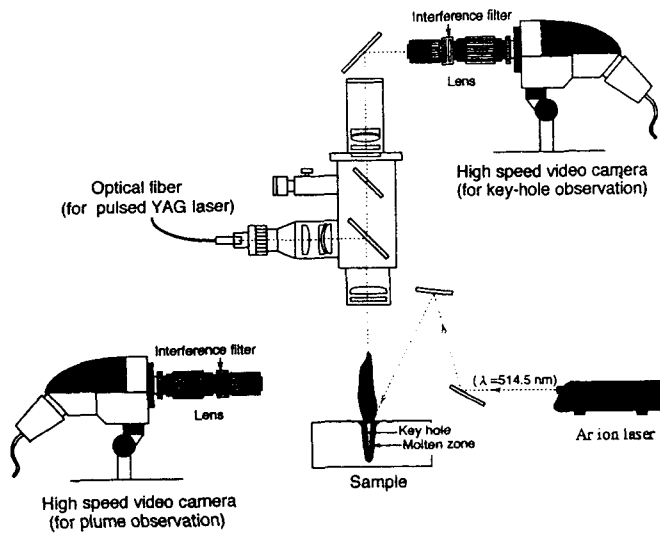


Fig. 1 Schematic optical arrangement for observation of plasma and keyhole behavior by pulsed YAG laser.

### 3. 실험결과 및 고찰

알루미늄 합금 A5083, 스테리스 스틸 STS304 및 순티탄 등의 각종 재료에 레이저 열원을 이용한 스폿 용접을 행하고, 그때 유기되는 플라즈마 및 키홀의 거동에 대해서 고시간 분해능으로 동시 계측하여 가시화 및 분석을 행하였다. Fig. 2는 A5083에 펄스레이저 조사 기간중 유기되는 플라즈마의 프레임상(frame image)을 나타낸다. 펄스폭( $\tau_p$ )은 8ms의 구형파이며, 대기중에서 스폿 용접을 행하였다. 또한, Fig. 3에는 7ms의 레이저 조사기간중 순티탄으로부터 유기 되는 플라즈마의 스트리트상(streak image)과 프레임상을 동시 계측하여 시간적으로 대응시켜 나타낸다. 촬영조건은 스트리크 속도( $V_s$ )=86.12 mm/s, 슬리트 폭( $W$ )=0.1mm, 시간분해능( $R_t$ )=1.16 $\mu$ s이며, 프레임상의 촬영속도는 40,500 f/s이다.

Fig. 2 및 Fig. 3으로부터, 수 ms의 레이저 조사시간중 유기플라즈마는 심하게 변동하고 있음을 알 수 있다. 특히, Fig. 3의 플라즈마의 가시화된 스트리크상으로부터는 격심한 변동 가운데에서도 특정한 주기성을 가지고 있음을 확인할 수 있다. 순티탄과 A5083의 플라즈마 스트리크상을 비교한 결과, 순티탄의 경우 약 230 $\mu$ s의 주기성을 보이는 반면, A5083은 다소 긴 약 440 $\mu$ s임을 알 수 있었다. 또한 플라즈마의 상방향 팽창속도(플라즈마 발생 후 0.5ms까지의 평균속도)는, 각각 20m/s, 5m/s이며, 키홀이 열리는 순간의 일시적인 팽창속도는 A5083의 경우 최대 270m/s이었으며, 플라즈마의 성장방향으로의 전파속도는 모두 아음속이었음을 알 수 있었다.

Fig. 4는 깊은 용입용접시의 키홀의 거동에 대해서 관찰한 것을 나타낸다. 펄스 레이저 조사 후 다소 지연되어 키홀이 형성되고, 시간의 경과에 따라서 키홀의 유형이 커지는가 하면 줄어들고, 때로는 용액에 덮이는 경우도 있으며, 그 형상은 부정형으로 매우 불안정한 거동을 보이고 있음을 알 수 있다. 키홀의 변동 주기는 350~500 $\mu$ s로 평균 440 $\mu$ s의 주기적 거동을 보이고, 광학계로 관찰된 키홀의 직경은 100~700 $\mu$ m의 범위에서 변화하고 있음을 알 수 있었다. 이때 사용한 빔의 스폿 직경은 약 600 $\mu$ m이다.

이러한 키홀의 변동주기는, 시료표면상에서 관찰된 유기플라즈마의 변동주기와 동일한 거동을 나타내었다 이것은 플라즈마의 주기적 거동이 재료 내부에 형성되는 키홀의 거동을 반영하고 있음을 의미하는 것이다. 또한, 본 연구에서는 주기적 거동이 용접결함의 발생 메카니즘에도 관련하고 있음을 확인하였다.

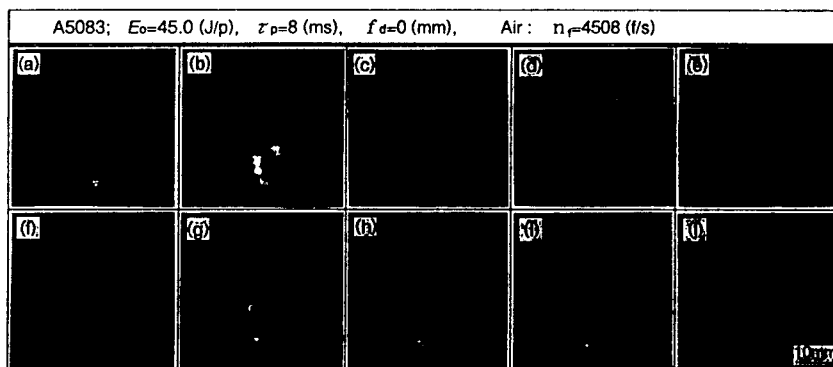


Fig. 2 High speed photographs of pulsed YAG laser induced plasma of A5083 alloy in air.  
 (a) 0.18ms (b) 0.41ms (c) 1.51ms (d) 2.18ms (e) 3.51ms (f) 4.8ms  
 (g) 5.51ms (h) 6.17ms (i) 6.84ms (j) 7.73ms

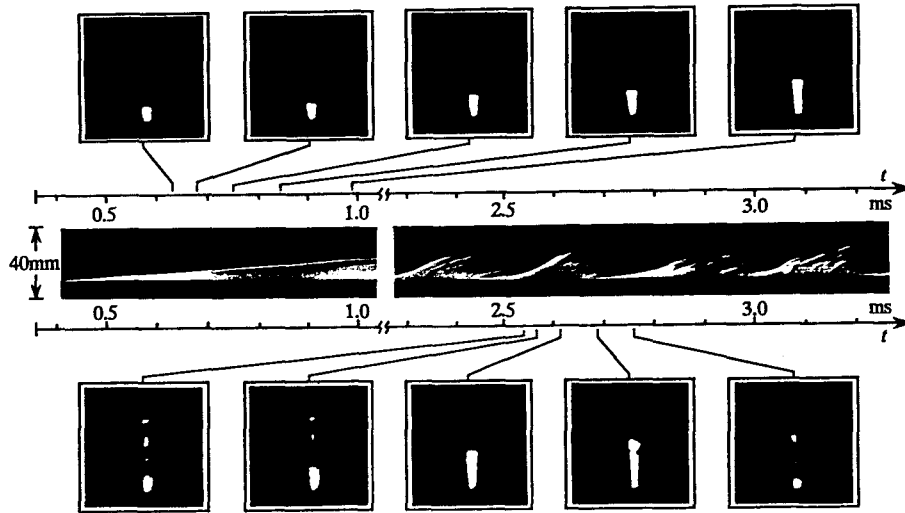


Fig. 3 High speed streak image and frame photograph of pulsed YAG laser induced plasma of pure Ti in air.  
 $(V_s=86.12\text{m/s}, R_t=1.16\mu\text{s}, n_f=40,500\text{f/s}, \tau_p=7\text{ms}, E_0=17.3\text{J/p})$

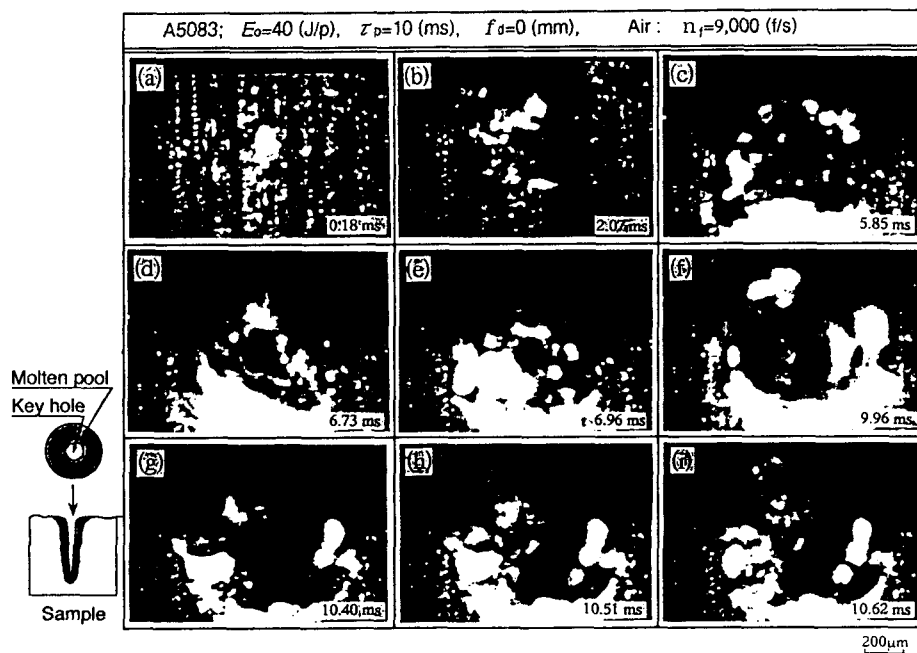


Fig. 4 Typical temporal change in keyhole surface geometry in molten pool during YAG laser spot welding of A5083 alloy in air.