

## 펄스형 Nd:YAG 레이저와 GMA 열원을 이용한 하이브리드 용접에 대한 연구

### A Study on Hybrid Welding with Pulsed Nd:YAG Laser & GMA Heat Sources

조원익\*, 나석주\*

\* 한국과학기술원 기계공학과

#### 1. 서 론

다양한 하이브리드 용접에 대한 시도 중 레이저와 아크 열원을 조합한 레이저-아크 하이브리드 용접이 가장 대중적이다. 하지만 이에 대한 이제까지의 연구는 대부분 선박의 외판과 같은 후판의 용접에 적용하기 위해 행해졌으며 따라서 사용된 열원 또한 이에 적합한 큰 입열량의 열원을 사용하였다. 최근 자동차와 같은 박판의 용접에도 이러한 하이브리드 용접법을 적용하려는 시도가 있으며 박판이라는 소재의 특성상 기존의 연구와는 다른 접근이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 박판의 경우 열변형에 취약하다는 관점에서 상대적으로 입열량이 작은 펄스 레이저와 단락이행모드의 DC GMA 열원을 하이브리드 용접 열원으로 사용하여 용접에서의 이들 조합에 대한 가능성을 살펴보고자 한다.

#### 2. 예비 시험

요즘 들어 자동차용 외판재로 많이 사용되고 있는 최소 인장 응력이 590 MPa인 Dual Phase 강을 사용하여 위에서 언급한 열원으로 레이저 용접과 GMA 용접을 각각 수행하였다.

먼저, 펄스 레이저를 사용한 선행 연구<sup>1)</sup>와의 비교를 통해 비교적 낮은 용접속도에서만 키홀 모드가 유지되었고 이는 레이저 열원의 파워밀도와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었다(Fig. 1). 이에 따라 용접 속도를 증가시키기 위해 파워밀도를 증가시켜야 했으며 조정된 용접변수로의 재시험결과 Fig. 2(a)에서와 같은 용접부 결함을 확인할 수 있었다. 1.0 m/min 이하에서는 과도한 열입력으로 인한 스패터가 1.0 m/min 이상에서

는 드릴링이 발생하였다. 또한 1.0 m/min 근처에서는 험핑이 발생했고 이와 같은 현상은 다음 식으로 계산되는 레이저 펄스간의 면적의 겹치는 비와 관련되어 있다. 먼저 1.0 m/min 이하에서의 스패터는 면적비가 커져 과도한 열입력이 원인이고 1.0 m/min 이상에서 발생하는 드릴링은 면적비가 작아져 표면장력이 감소하게 되어 발생하게 된다. 이에 대한 설명을 Fig. 3(a)의 모델로부터 하면, 레이저에 의해 생성된 키홀에서 증기압으로 인해 용융금속이 키홀 뒷면으로 움직이고 여기에 용융금속, 모재, 금속증기간의 표면장력과 중력이 함께 작용하게 된다. 펄스 레이저의 특성상 조사 부위에서 온도가 급격히 상승 또는 하강하게 되고 이로 인해 폭발적으로 상승한 증기압이 용융풀을 이탈시키는 스패터 또는 급격한 냉각으로 인해 험핑이 발생할 수 있다.

다음으로 GMA 용접결과(Fig. 2(b)), GMA 열원만으로 접지기 이음부를 용접하기 위해선 과도한 열량이 필요했고, 2.0 m/min 이상의 용접속도에서는 험핑현상을 관찰할 수 있었다. 이와 같은

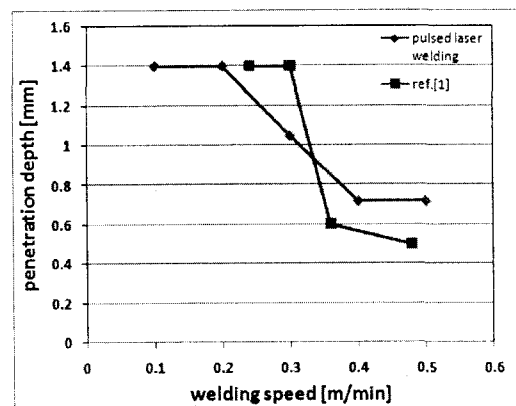


Fig. 1 – Comparison of penetration depth with respect to welding speed in laser welding

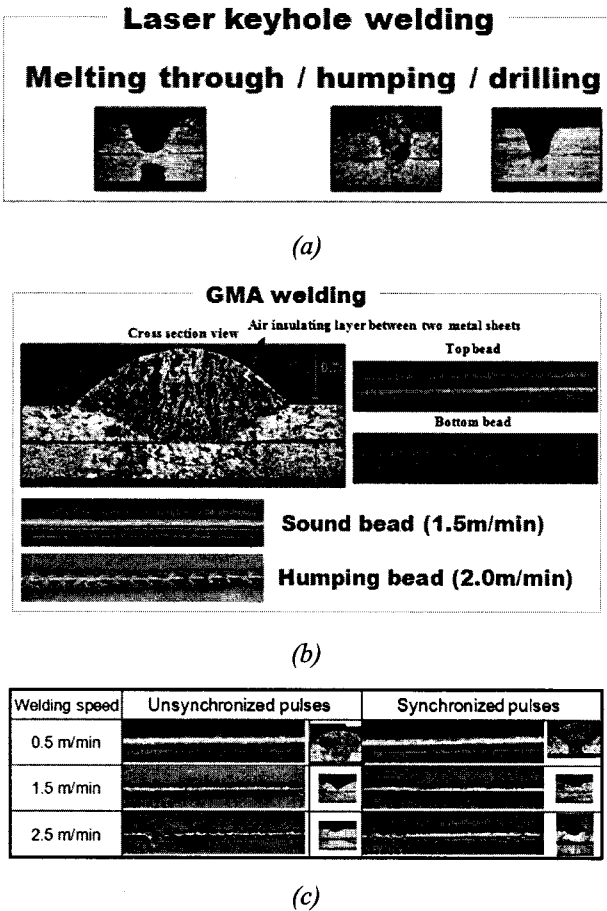


Fig. 2 – 3D Lap-joint weld shape in laser keyhole welding(a), dip-transfer DC GMA welding(b), and pulsed laser-dip-transfer DC GMA hybrid welding w/ and w/o pulse control technique(c)

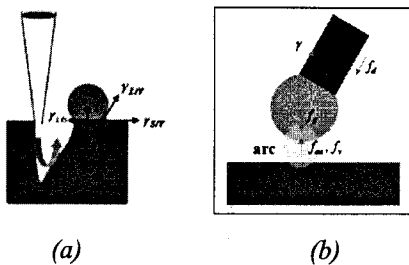


Fig. 3 – (a): schematic of defects generation of pulsed laser welding, (b): physical model of dip-transfer DC GMA welding for anti-deep transfer

은 험핑현상은 비주기적인 단락으로 설명할 수 있으며 여기에서 전극의 끝단에서 용적이 성장하여 모재와 단락이 일어나기 전까지의 용적의 거동이 중요하다. 단락이행모드의 특성상 비교적 낮은 전류에서 용적이 이행되고 따라서 이 구간에서 용적에 작용하는 힘(Fig. 3(b))은 중력, 전

자기력, 표면장력이 상대적으로 클 것이고 이들은 다음과 같이 유도된다<sup>2,3)</sup>.

$$f_g = \rho g \left[ \frac{4}{3} \pi r^3 - \frac{1}{3} \pi h^2 (3r - h) \right] \quad (1)$$

여기서,  $h = r - \sqrt{r^2 - R^2}$  이다.

전자기력:

$$f_{em} = \frac{\mu I^2}{4\pi} \left[ \ln \frac{r \sin \theta}{R} - \frac{1}{4} - \frac{1}{1 - \cos \theta} + \frac{2}{(1 - \cos \theta)^2} \ln \frac{2}{1 + \cos \theta} \right] \quad (2)$$

여기서,  $I$ 는 전류이다.

$$f_s = 2\pi R \gamma \quad (3)$$

여기서,  $\gamma$ 는 표면 장력 계수이다.

이들의 합력은 전극이 수직방향에서 30° 기울어져 있으므로 다음과 같이 수직성분과 수평성분으로 나눌 수 있다.

$$F_y = f_{em} - f_g + f_s \cos 30^\circ \quad (4)$$

$$F_x = f_s \sin 30^\circ \quad (5)$$

이 중 수직성분은 비주기적 단락을 설명하는데 중요하며 전자기력은 단락이 일어나지 직전 아크가 용적의 좁은 면적에 집중되어 가장 영향이 커지며 단락을 방해하게 된다. 따라서 단락을 원활하게 하기 위해선 이를 방해하는 전자기력과 표면장력이 줄어들어야 하며 이는 하이브리드 구성을 통해 해결할 수 있을 것이다.

또한, 본 연구에서 제안한 하이브리드 용접 열원의 제어를 위해 펄스제어 기법이 필요했으며 이를 이용해 단락당 한번의 레이저 펄스가 작용하도록 펄스를 동기화 하였다.

### 3. 하이브리드 용접 시험 및 결론

위에서 언급한 펄스제어기법을 이용한 경우와 이용하지 않은 경우에 대해 각각 하이브리드 용접 시험을 수행하였고 그 결과를 Fig. 2(c)에서 비교하였다. 또한, 앞서 제안한 모델과 아크와 레이저의 상호작용에 대한 이전연구결과<sup>4)</sup>를 통해 용적에 작용하는 험핑형 모델을 제안하였고 이는 Fig. 4와 같다. 이와 같은 모델을 통해 하이브리드 용접의 용접성이 향상되는 이유를 다음과 같은 네가지로 들 수 있겠다.

첫째, 새롭게 생성된 아크경로로 인해 전류흐름이 둘로 나뉘게 되고 이는 곧 용적과 모재사이의 전류를 감소시켜 용적의 단락을 방해했던 전

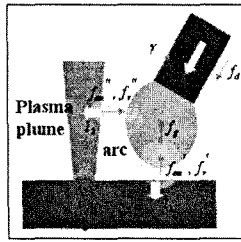


Fig. 4 – Physical model of pulsed laser-dip-transfer DC GMA hybrid welding

자기력과 증기제트력을 감소시킬 수 있다.

둘째, 새롭게 생성된 전자기력과 증기력은 레이저에 의한 금속증기 플라즈마가 존재할 때만 유지된다. 따라서 이들은 용적의 함평형을 순간적으로 깨뜨리는 충격력(impulsive force)로 볼 수 있다.

셋째, 레이저에 의한 금속증기 플라즈마로 인해 주위의 온도와 금속증기 농도가 상승해 용적의 표면장력을 감소시킨다. 이는 결국 용적이 구형을 이루는 것을 어렵게 만들어 쉽게 단락이 일어나도록 유도한다.

넷째, 금속증기 플라즈마가 모재를 예열함으로써 모재의 젖음성이 증가해 용적의 이행이 쉬워지고 결국 결함 없는 비드를 얻을 수 있다.

본 연구에서 용접속도를 상승시키고 또한 모재로의 열입력을 줄이기 위해 키홀 모드의 펄스형 레이저와 단락이행모드의 GMA 열원을 이용하여 겹치기 이음부의 용접을 수행했다. 결과 둘 모두에서 결함이 발생했으며 이를 줄이기 위해 이 두 열원의 하이브리드 용접을 수행하여 속도증가를 얻었다. 특히 펄스제어기법을 사용한 경우 더 큰 속도증대를 기대할 수 있었다.

마지막으로 펄스형 레이저와 단락이행모드의 GMA 열원의 조합은 모재로의 작은 열 입력으로 인해 박판의 용접뿐만 아니라 허용 오차가 작은 구조물의 용접에 적용될 수 있다. 따라서 향후 실제 용접부에 대해 거시적 관점과 미시적 관점에서 다른 용접 기법과의 비교 및 열변형 최소화를 위한 최적 용접조건 도출에 대한 연구가 필요할 것으로 예상된다.

## 참 고 문 헌

1. Y. Tzeng : Parametric Analysis of the Pulsed Nd:YAG Laser Seam-Welding Process, Journal of Material Processing Technology, **102** (2000), 40-47
2. J. F. Lancaster : The Physics of Welding, Pergamon, Oxford, (1984)
3. J. Norrish : Advanced Welding Processes, Institute of Physics Publishing, (1992)
4. Y. T. Cho, S. J. Na : Analysis of the Effect of Laser-Induced Metal Vapor on the Arc Plasma, The International Welding Congress, Mumbai, India, (2005)