

펄스형 Nd:YAG 레이저와 단락이행모드의 직류 GMA 열원을 이용한 하이브리드 용접 공정에 대한 연구

조 원 익* · 나 석 주*

*한국과학기술원 기계공학과

A Study on the Process of Hybrid Welding Using Pulsed Nd:YAG Laser and Dip-transfer DC GMA Heat Sources

Won-Ik Cho* and Suck-Joo Na*

*Department of Mechanical Engineering, KAIST, Daejeon 305-701, Korea

Abstract

Until now, many researches on laser-arc hybrid welding processes have been conducted mainly for high power CW laser and high direct current arc to weld the thick steel plates for shipbuilding. Recently, however the usage of thin steel plates, which tend to be deformed easily by thermal energy, is been increasing because of demand of light structure such as car body in the automobile industry. Accordingly, heat sources having relatively low heat input such as pulsed laser, dip-transfer DC GMA and pulsed GMA seem to be applied more increasingly and the study about those heat sources is needed more intensively. Any heat source mentioned above can not stand alone without weld defects at a relatively high welding speed for increasing the welding productivity. This is main reason to apply the hybrid welding process which uses pulsed laser and low-heat-input GMA heat sources simultaneously to weld the thin steel plate.

In this study, parameters of pulsed laser and dip-transfer DC GMA welding are studied firstly through preliminary experiments, and then analyzed in the viewpoint of their physical phenomena. Before conducting the hybrid welding, a pulse control technique is developed based on the parallel port communication and Visual C++ 6.0. Owing to development of this technique, interactions of laser and arc pulses can be controlled consistently. Using the pulse control technique, the hybrid welding is conducted and then its interactive welding phenomenon is analyzed.

*Corresponding author : sjna@kaist.ac.kr

(Received October 16, 2007)

Key Words : Hybrid welding, Pulsed Nd:YAG laser, Dip-transferred GMA

1. 서 론

하이브리드 용접 공정에 대한 다양한 연구¹⁻⁵⁾가 1970년대 이래로 현재까지 수행되고 있으며 그 중 레이저와 아크 열원을 조합하는 방식인 레이저-아크 하이브리드 용접이 그 주를 이루고 있다. 이러한 하이브리드 용접은 레이저를 단독으로 사용할 때보다 높은 용접속도, 이음성 향상, 효율증가 등과 경우에 따라 작은 용량의 레이

저 파워를 사용함으로써 초기투자 비용을 줄일 수 있는 장점을 가진다. 이러한 레이저-아크 하이브리드 용접에 관한 연구는 현재까지 대부분 선박의 외판과 같은 후판의 용접에 적용하기 위해 연속파형 레이저와 고전류의 DC 아크 열원을 사용하였다⁶⁾. 하지만 근래에 들어 이 공정의 적용을 자동차용 강판에까지 넓히기 위한 연구⁷⁾가 수행되고 있으며 이는 소재가 박판이라는 점에서 기존의 연구와 차별된 접근이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 박판의 경우 열에 의한 변형이

쉽다는 점에 착안해 상대적으로 열입력이 작은 펄스 레이저와 단락이행모드의 DC GMA 열원을 하이브리드 용접 열원으로 선택하여 실험을 통해 이들 각각과 상호 작용에 대한 물리적 모델을 제시하였다.

2. 예비 용접 실험 및 현상 모델링

레이저 용접과 GMA 용접을 펄스형 Nd:YAG 레이저와 단락이행모드의 DC GMA 열원을 이용해 각각 수행하였다. 용접에 사용된 재료는 최소 인장 응력이 590MPa인 Dual Phase(DP) 강이며 두께는 0.7mm이며 모두 겹치기 이음부의 용접만을 수행하였다. 먼저 DP 강의 용접성을 비교하기 위해 동일한 조건하에서 AISI 1020 연강의 레이저 용접을 수행하여 둘의 용입 깊이를 비교하였다. 그 결과 Fig. 1에서와 같이 두 재료의 차이가 거의 없음을 확인할 수 있었다.

2.1 레이저 용접

레이저 용접에서는 먼저 펄스 레이저를 이용한 선행 연구자의 결과⁸⁾를 실험을 통해 확인해 보았다. 사용된 용접변수는 Table 1와 같으며 Fig. 2에 결과를 비교하였다.

그 결과 선행연구와 비슷한 결과를 얻었으며 용접부의 형상을 통해 비교적 낮은 용접속도에서만 키홀 모드가 유지되어 용접이 이뤄졌고 이보다 높은 속도에서는 열 전도 모드만 존재해 용접을 위한 충분한 용입이 이뤄지지 않았다. 이와 같은 사실은 현 연구와 선행 연구에서 사용된 레이저 펄스의 평균최대파워밀도가 각각 키홀 형성을 위해 최소한으로 필요한 10^6 W/cm^2 보다 낮은 $4.24 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ 와 $4.67 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ 임을 통해서도 확인할 수 있었다. 이러한 사실로부터 용접시 키

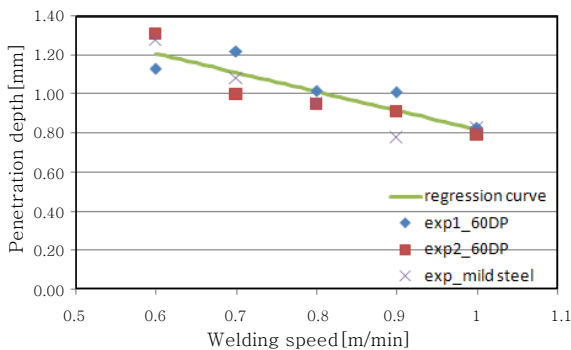


Fig. 1 Comparison of penetration depth of mild steel and dual phase steel in laser welding [laser mean power: 400W(250V, 30Hz, 4ms)]

Table 1 Parameters of laser welding

| laser welding parameters | Value |
|--------------------------------|-------------------------|
| Laser type | 1064nm Pulsed Nd:YAG |
| Welding speed[m/min] | 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 |
| Mean laser power[W] | 400(250V, 30Hz, 4ms) |
| Distance from focal point [mm] | +5 |
| Gap size[mm] | 0 |
| Angle of laser torch[°] | 90 |
| Shielding gas | None |

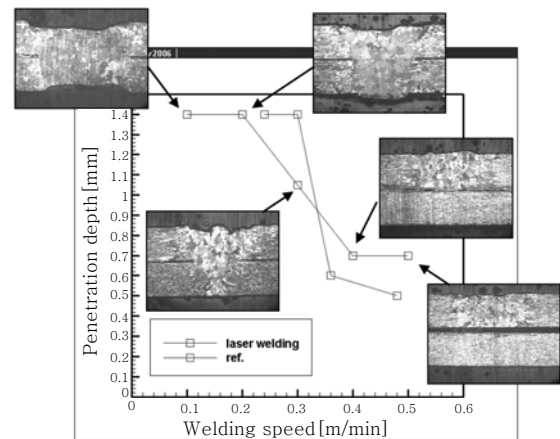


Fig. 2 Comparison of penetration depth with respect to welding speed in laser welding

Table 2 Modified parameters of laser welding

| laser welding parameters | Value |
|--------------------------------|-------------------------|
| Laser type | pulse |
| Welding speed[m/min] | 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 |
| Mean laser power[W] | 500(270V, 40Hz, 4ms) |
| Distance from focal point [mm] | 0 |
| Gap size[mm] | 0 |
| Angle of laser torch | 90° |
| Shielding gas | None |

홀 모드를 유지한다면 용접속도를 증가시킬 수 있을 것으로 예상된다. 이에 따라 키홀이 유지되도록 Table 2와 같이 변수를 수정하여 용접시험을 수행하였다. 그 결과 Fig. 3에서와 같이 1.0 m/min 이하의 속도에서는 과도한 열입력으로 인해 스패터가 발생했고 반면에 1.0 m/min 이상의 속도에서는 드릴링 현상이 발생했다. 그리고 1.0 m/min 근처의 속도에서는 스패터와 드릴링 현상은 찾아들었지만 험핑현상이 목격되었다. 이러한 이유는 레이저 펄스간의 겹치는 면적의 비로 설명할 수 있으며 낮은 용접속도에서는 레이저 펄스가 생성하는 용융풀의 겹치는 비율이 커져 과도한 열입력에 의한 스패

| Welding speed | Top bead | Bottom bead | Cross section |
|---------------|----------|-------------|---------------|
| 0.5m/min | | | |
| 1.0m/min | | | |
| 1.5m/min | | | |
| 2.0m/min | | | |
| 2.5m/min | | | |

Fig. 3 Lap-joint weld shape with respect to welding speed in laser welding

Table 3 Calculated weld overlapping rate with respect to various welding speed

| Welding speed [m/min] | Weld overlapping rate [%] |
|-----------------------|---------------------------|
| 0.5 | 79.7 |
| 1.0 | 60.3 |
| 1.5 | 41.9 |
| 2.0 | 24.2 |
| 2.5 | 7.4 |

터가 발생하고 높은 용접속도에서는 용융풀 간의 겹치는 비율이 작아 표면장력이 감소하게 되고 따라서 드릴링 현상이 발생하는 것으로 보인다. 펄스 사이의 겹치는 비율은 다음과 같은 식⁸⁾으로 계산이 되며 각 속도별로 계산된 값을 Table 3에 첨부하였다.

$$P_{ER} = \left[1 - \frac{V \times T_F}{W + V \times T_P} \right] \times 100 [\%] \quad (1)$$

여기서, V는 용접속도, T_F는 펄스의 주기, W는 점용접 시 측정되는 최소직경, T_P는 펄스 최대값의 지속 시간이다.

앞서 언급했듯이 펄스 레이저는 낮은 열입력으로 인해 박판의 용접에 유용할 것으로 보인다. 하지만 이의 높은 평균최대파워밀도로 인해 스패터, 드릴링, 험핑과 같은 결함이 쉽게 생길 수 있으며 이와 같은 현상은 Fig. 4(a)의 모델로부터 설명할 수 있다. 먼저 레이저에 의해 키홀이 형성되면 키홀 앞에서 생성된 용융 금속은 높은 증기압, f_g로 인해 키홀 뒷면으로 움직이게 되고 이때 증기압과 함께 용융금속, 모재, 금속증기간의 표면장력인 γ_{L/S}, γ_{L/V}, γ_{S/V}와 중력, f_g이 용융금속부에 작용하게 된다. 펄스 레이저의 특성상 조사 부위에서 온도가 급격히 상승 또는 하강하여 이로 인해 폭발적으로 상승한 증기압이 용융풀을 이탈 시키는 스패터 현상이 발생할 수 있으며 급격한 냉각으로 인해 험핑현상이 발생할 수 있다. Fig. 4(b)는 고속 카메라를 이용해 실제 펄스 레이저 용접에서 중력이나 표면장력에 비해 큰 증기압에 의해 용융풀이 스패터로 키홀 뒷면으로 빠져나가는

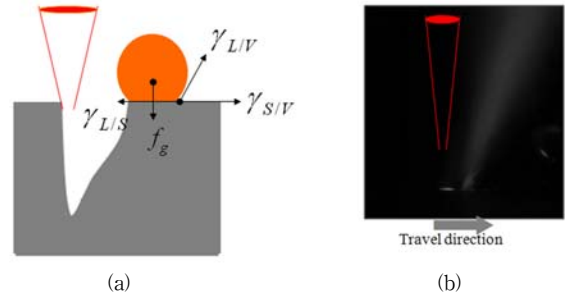


Fig. 4 (a): Schematic of defects generation of pulsed laser welding, (b): high speed camera image of released metal vapor from the back of keyhole

현상을 보여주고 있다.

2.2 단락이행모드의 DC GMA 용접

Table 4와 같은 용접조건으로 시험을 수행했으며 아크전류와 전압을 측정하기 위한 데이터 획득 시스템은 Fig. 5와 같고 이를 통해 측정된 신호는 Fig. 6과 같다. 여기서 단락에 의해 전류는 급격히 상승하고 전압은 급격히 감소함을 확인할 수 있었다. 그리고 Fig. 7의 시험

Table 4 Parameters of dip-transfer DC GMA welding

| GMA welding parameters | Value |
|---------------------------|--------------------|
| Welding mode | DC |
| Welding speed [m/min] | 0.5~2.5 |
| Wire feeding rate [m/min] | 3 |
| Open circuit voltage [V] | 16 |
| Angle of electrode [°] | 60 |
| CTWD [mm] | 15 |
| Shielding gas | Ar+20%CO2 |
| Gas flow rate [l/min] | 25 |
| Electrode | φ 0.8mm solid wire |

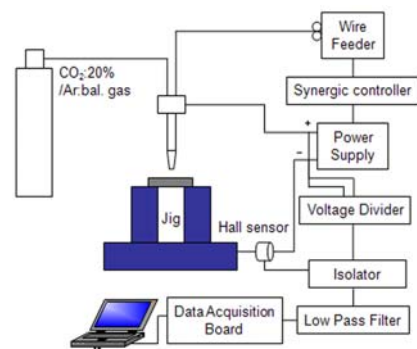


Fig. 5 Data acquisition system for arc welding

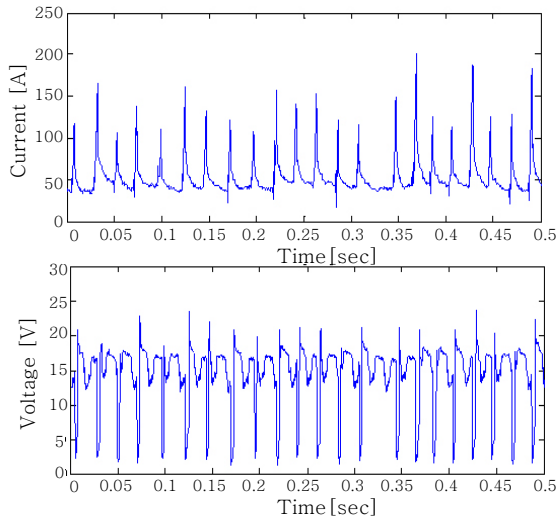


Fig. 6 Measured arc current and voltage signals of dip-transfer DC GMA welding

| Welding speed | Top bead | Cross section |
|---------------|----------|---------------|
| 0.5m/min | | |
| 1.0m/min | | |
| 1.5m/min | | |
| 2.0m/min | | |
| 2.5m/min | | |

Fig. 7 Lap-joint weld shapes with respect to welding speed in dip-transfer DC GMA welding

결과에서 용접속도 1.5 m/min 이상에서 험핑 현상이 발생하였다. 앞에서 언급했듯이 단락이행의 DC GMA 열원은 입상용적이행, 스프레이이행과 비교해 열 입력이 낮아 박판의 용접에 적당하다. 단락은 상대적으로 낮은 전류에서 일어나며 얼마나 주기적으로 솔리드 와이어 끝의 용적과 모재가 단락이 일어나는지가 용접 품질에 영향을 미친다. 따라서 높은 용접속도에서의 험핑 현상은 비주기적인 단락에 의한 불안정한 비드형성으로 설명할 수 있겠다. 단락이행은 Fig. 8에서와 같이 3단계로 나눌 수 있으며 첫 번째로 아크가 지속되는 동안에 솔리드 와이어 끝에서 용적이 성장하고 두 번째로 성장한 용적이 모재와 단락을 일으키며 마지막으로 전류의 증가와 함께 열핀치효과로 인해 단락부가 떨어지며 다시 아크가 생성된다. 현재까지는 주로 단락이 일어날 때와 아크가 다시 생성될 때 스파터 발생을 제어하는데 많은 연구가 행해졌으나 험핑 현상을 설명하는데 중요함에도 불구하고 단락이 일어나기 전까지의 용적의 거동에 대

한 연구는 미비한 현실이다. 따라서 이 구간에서 작용하는 힘을 통해 험핑 현상을 설명하고자 한다. 먼저 Fig. 9(a)에 구형의 용적에 작용하는 힘^{9,10)}을 보여주고 있으며 형상 변수는 Fig.9(b)에 나타냈다. 이를 통해 유도한 식은 다음과 같다. 단, 전자기력의 경우 $r > R$ 인 축대칭 전극에 유효한 식으로 여기서는 이를 이용해 정확한 수치보다는 경향만을 파악하고자 한다.

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

여기서, $h = r - \sqrt{r^2 - R^2}$ 이다.

$$\text{전자기력: } f_{em} = \frac{\mu I^2}{4\pi} \left[\ln \frac{r \sin \theta}{R} - \frac{1}{4} - \frac{1}{1 - \cos \theta} + \frac{1}{(1 - \cos \theta)^2} \ln \frac{1}{1 + \cos \theta} \right] \quad (3)$$

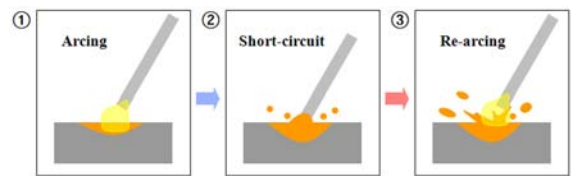


Fig. 8 Three steps of dip-transfer DC GMA welding

여기서, μ 는 진공상태의 투자율이고 I 는 전류이다.

$$\text{표면 장력: } f_s = 2\pi R\gamma \quad (4)$$

여기서, γ 는 표면 장력 계수이다.

$$\text{기화력: } f_v = \frac{m_0}{d_v} IJ \quad (5)$$

여기서, m_0 는 단위 시간과 전류에 대한 기화된 총질량,

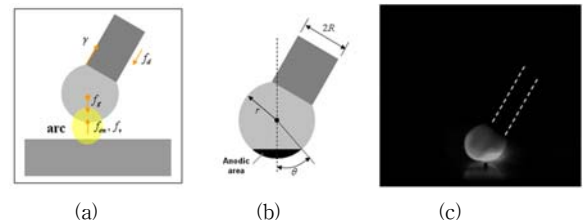


Fig. 9 (a) Physical model of dip-transfer DC GMA welding for anti-deep transfer mode, (b) dimension information for derivation of force equations, (c) high speed camera image for anti-deep transfer mode

d_v 는 증기상태의 밀도, 그리고 J 는 전류 밀도이다.

$$f_d = 0.5\pi U^2 dr^2 C \tag{6}$$

여기서, U 는 차폐가스의 유속, d 는 차폐가스의 밀도, 그리고 C 는 항력계수이다.

GMA 용접 토치가 수직축에서 30° 기울어진 관개로 작용하는 힘의 성분을 다음과 같이 모재 표면에 수직인 방향과 평행한 방향으로 나눌 수 있다.

$$F_y = f_{em} + f_v - f_g + f_s \cos \phi - f_d \cos \phi \tag{7}$$

$$F_x = f_s \sin \phi - f_d \sin \phi \tag{8}$$

이 중 모재 표면에 수직인 성분에 해당하는 식 (7)은 단락을 설명하는데 중요하다. 단락 이행모드가 낮은 전류에서 발생하므로 용적에 작용하는 힘 중 중력, 전자기력, 표면장력이 중요할 것이며 이중 전자기력은 단락이 일어나기 직전 아크가 용적의 좁은 면적에 집중되어 가장 영향이 커지며 단락을 방해하는 힘이 될 것이다. 이는 Fig.9(c)의 고속 카메라 사진을 통해서 확인할 수 있으며 그림에서 용적이 모재의 위쪽으로 들어올려지고 있음을 보여주고 있다. 이 사실로부터 단락이 원활히 일어나기 위해선 위의 단락을 방해하는 전자기력과 표면장력을 줄여야 하며 이는 레이저 열원을 추가하여 발생하는 플라즈마를 통해 해결될 수 있겠다. 따라서 본 연구에서는 하이브리드 열원을 도입하고자 한다.

3. 펄스 제어 기법

본 장에서는 펄스 레이저와 유사펄스 형태의 아크의 상호작용에 대한 연구를 수행하기 위해 필요한 값싼 실시간 제어 기법을 제안한다. 단락이행에 의해 발생하는 아크 펄스가 비 주기적으로 배열되어 있으므로 아크 펄스 발생 시점에 따라 레이저 펄스 발생을 제어하기로 한다. 펄스 제어 기법에 대한 개념도는 Fig. 10(a)와 같으며 병렬통신을 위해 Pentium 2 MMX, 8 bit ADC 등을 사용하였고 윈도우용 소프트웨어 개발을 위해 Microsoft Visual C++6.0을 사용하였다. Fig. 10(b)에는 펄스 제어를 통해 단락이 일어난 후 레이저 펄스가 일정한 시간지연을 가지고 발생되도록 제어한 결과를 보이고 있다.

4. 하이브리드 용접 실험

본 장에서는 앞에서 제시한 레이저와 단락이행모드의 GMA 용접모델을 이용하여 하이브리드 용접 현상 모델을 제안하였다. 특히 아크가 레이저에 의해 발생하는 금

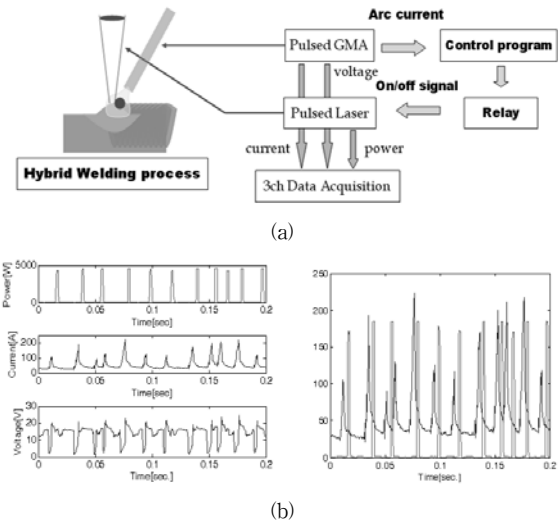


Fig. 10 (a) Schematic diagram of pulsed control technique, (b) example for pulsed control technique

속증기 플라즈마로 전류경로를 바꿀 수 있다는 이전의 연구결과¹¹⁾를 이용하여 용적에 작용하는 부가적인 힘을 추정하였다. 하이브리드 용접 시험은 두가지 경우로 나눠 수행하였다. 첫 번째는 펄스 Nd:YAG 레이저와 40Hz, 3ms 으로 일정한 펄스 주파수와 펄스폭을 가지는 GMA 열원을 조합한 경우이다. 두 번째는 앞장에서 언급한 펄스제어 기법을 통해 한 번의 단락 당 한 개의 레이저 펄스가 형성되도록 두 열원을 조합한 경우이다. 두 경우 모두 레이저와 아크의 상대거리는 2mm, 용접속도는 0.5에서 2.5m/min으로 0.5m/min 간격으로 변화시켰고 나머지 변수들은 각각의 용접에서와 같은 값을 사용하였다. 앞서 언급한 두 가지 다른 하이브리드 용접 실험의 결과를 Fig. 11에 비교하였다. 그림을 통해 용접 속도가 증가하면 펄스제어기법을 적용한 쪽이 상부 비드 형상의 면에서는 더 나은 결과를 보여줬지만 용입 깊이 면에서는 비슷한 값을 보여줬다. 이 결과를 용적에

| Welding speed | Uncontrolled hybrid | Pulse controlled hybrid |
|---------------|---------------------|-------------------------|
| 0.5m/min | | |
| 1.0m/min | | |
| 1.5m/min | | |
| 2.0m/min | | |
| 2.5m/min | | |

Fig. 11 Lap-joint weld shapes of pulsed laser-dip- transfer DC GMA hybrid welding with and w/o pulse control technique

작용하는 힘평형 모델부터 설명하고자 한다. 앞의 GMA 모델과 비교하면 레이저와의 상호작용으로 인해 약간의 수정이 필요하다. 레이저에 의해 발생하는 금속증기 플라즈마는 이온과 전자로 이뤄져 매우 전도성이 큰 물질이다. 이로부터 아크의 경로가 플라즈마 쪽으로 생성될 수 있다고 예상할 수 있으며 Fig.12(a)에 이 현상을 설명한 모델을 제시하였다. 다음으로 고속카메라로 촬영한 결과를 Fig. 12(a) 제시하였다. 그림에서 짙은 부분이 온도가 높은 부분으로 레이저가 조사되는 동안에 용적과 레이저 조사부 사이에도 아크가 분포함을 확인할 수 있다. 따라서 Fig. 12(a)에서와 같이 용적과 플라즈마 기둥 사이에 부가적인 아크 경로가 생긴 것으로 생각했다. 이로 인해 GMA 용접에서 용적과 모재사이에 존재하던 아크로 인해 발생했던 전자기력, f_{em} , 증기제트력, f_v 은 각각 f'_{em} 과 f'_v 로 감소하게 되고 새로운 아크경로를 통해 전자기력, f''_{em} 과 증기제트력, f''_v 가 새롭게 생성된다. 이와 같은 모델을 바탕으로 하이브리드 용접의 경우 용접성이 향상되는 이유를 다음과 같이 설명할 수 있다.

첫째, 새롭게 생성된 아크경로로 인해 전류흐름이 둘로 나뉘게 되고 이는 곧 용적과 모재사이의 전류를 감소시켜 용적의 단락을 방해했던 전자기력과 증기제트력의 감소를 이끌었다. 이는 높은 용접 속도에서도 용적과 모재의 단락이 일어나도록 도움을 준다.

둘째, 새롭게 생성된 전자기력, f''_{em} 과 증기제트력, f''_v

는 레이저에 의한 금속증기 플라즈마가 존재할 때만 유지된다. 따라서 이들은 용적의 힘평형을 순간적으로 깨뜨리는 충격력(impulsive force)로 볼 수 있으며 모재에 수평인 성분과 수직인 성분은 다음과 같이 시간의 함수로 나타낼 수 있다.

$$F_x = f_s \sin\phi - f_a \sin\phi + (f'_{em} + f'_v)\delta(t - nT) \tag{9}$$

$$F_y = \frac{(I - I_2\delta(t - nT))^2}{I^2} f_{em} + \frac{(I - I_2\delta(t - nT))(J - J_2\delta(t - nT))}{IJ} f_v - f_g + f_s \cos\phi - f_a \cos\phi \tag{10}$$

여기서, n은 양의 정수이다.

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.

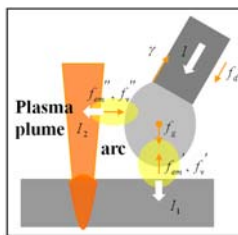
마지막으로 금속증기 플라즈마가 모재를 예열함으로써 모재의 젖음성이 증가해 용적의 이행이 쉬워지고 결국 미려한 비드를 얻을 수 있다.

만약 레이저가 단락 중에 조사될 경우, 금속증기압이 용융풀의 급격한 압력변화와 맞물려 스패터를 증가시키게 되고 심지어는 아크발생을 방해하게 되어 아크가 소멸된다. 따라서 Fig. 11에서와 같이 펄스제어기법에 의해 펄스를 동기화 시키는 방법을 사용했을 때 더 나은 결과가 나온 것으로 사료된다.

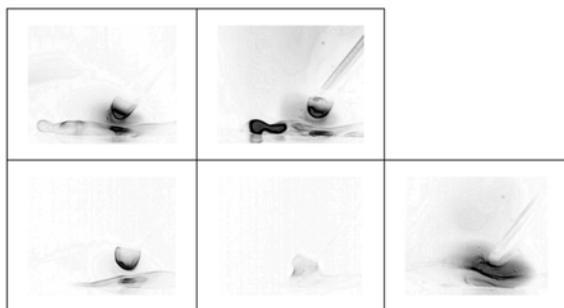
5. 결 론

본 연구에서 용접속도를 상승시키고 또한 모재로의 열입력을 줄이기 위해 킥 모드 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. 이러한 용접 현상을 설명하기 위해 본 연구에서는 각각의 모델을 제안했으며 고속카메라를 이용하여 모델의 타당성을 검증하였다.

서론에서도 언급했듯이 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 필요하다.



(a)



(b)

Fig. 12 (a) Physical model of pulsed laser-dip-transfer DC GMA hybrid welding, (b) high speed camera images for hybrid welding using pulse control technique

참 고 문 헌

1. W. M. Steen, M. Eboo and J. Clarke : Arc augmented laser welding, *Advanced in Welding Processes Proceedings*, 4th International Conference, Harrogate, U.K., (1978), 9-11
2. M. Hamazaki, M. Katsumura, J. Matsuda and S. Nagata : Effect of TIG Current on Combined Laser TIG Welding, *Journal of High Temperature Society*, **9** (1983), 79-83
3. J. Matsuda, A. Utsumi, M. Katsumura, M. Hamasaki and S. Nagata : TIG of MIG Arc Augmented Laser Welding of Thick Mild Steel Plate, *Joining & Materials*, 1(1) (1998), 31-34
4. E. Beyer, R. Imhoff, C. Maier, J. Neuenhahn, K. Behler and U. Dilthey : New Aspects in Laser Welding with an Increased Efficiency, 13th International Congress on Applications of Laser & Electro-Optics, Orlando, (1994), 182-192
5. M. Ono, Y. Shinbo, A. Yoshitake and M. Ohmura : Development of Laser-Arc Hybrid Welding, *NKK Technical Review*, **86** (2002)
6. S. Herbert : Laser-Hybrid Welding of Ships, *Welding Journal*, **83-6** (2004), 39-43
7. T. Graf and H. Staufer : Laser-Hybrid Welding Drives VW Improvements, *Welding Journal*, **82-1** (2003), 42-48
8. Y. Tzeng : Parametric Analysis of the Pulsed Nd:YAG Laser Seam-Welding Process, *Journal of Material Processing Technology*, **102** (2000), 40-47
9. J. F. Lancaster : *The Physics of Welding*, Pergamon, Oxford, (1984)
10. J. Norrish : *Advanced Welding Processes*, Institute of Physics Publishing, (1992)
11. Y. T. Cho and S. J. Na : Analysis of the Effect of Laser-Induced Metal Vapor on the Arc Plasma, *The International Welding Congress*, Mumbai, India, (2005)