<학술논문> DOI:10.3795/KSME-A.2008.32.11.978

하이브리드 용접방식을 이용한 박판 및 후판용접공정

최해운† · 신현명* · 임문혁*

(2008 년 8 월 4 일 접수, 2008 년 10 월 16 일 수정, 2008 년 10 월 17 일 심사완료)

Hybrid Welding Process for Sheet Metal and Narrow Gap Fill Pass

Hae Woon Choi, Hyun Myung Shin and Moon Hyuk Im

Key Words : Hybrid Welding(하이브리드 용접), Sheet Metal(박판용접), Narrow Gap(협개선용접)

Abstract

An application of innovative laser+GMA hybrid welding process is presented for reducing bead humping defects in high speed welding and increasing side wall fusion in narrow groove welding without torch or wire oscillation. In this hybrid process, the laser heat input is applied adjacent to the weld pool at a relatively low power density to produce a wider, flatter weld bead. In bead on plate in sheet metal gauges, the hybrid process was able to produce hump-free welds from 70ipm (~1780mm/min) to over 150ipm (~3810mm/min) of the travel speed compared to the un-assisted GMAW process. A square-butt joint in 15mm A572 Gr50 steel welds was investigated. A square butt joint with a gap of 3.2mm was filled with 6 passes. Liquid Nitrogen calorimetry and innovative CO_2 laser reflective optics were also developed to demonstrate the concept of hybrid welding.

기호설명

m	:	질량 (kg)
χ	:	상대비드크기 (무차원변수)
s	:	용접속도 (mm/min 또는 inch /min)
η	:	용접 효율 (%)
C_n	:	액화질소의 비잠열 (kJ/kg)
T	:	용접시간 (sec)

1. 서 론

용접공정 중 용융된 와이어드롭(wire drop)이 표면에 접한 후 모재의 표면을 통해서 퍼져 나가는 과정(용접비드 형성과정)은 용접품질을 결정짓는데 매우 중요한 역할을 한다. 보다 효율적이고 안정적인 용접비드(weld bead) 생성을 위해서 용접비드주위에 추가열원인 레이저를 조사함으로서 용접비드의 안정화와 표면유동을 제어할 수 있음은 실험 또는 컴퓨터시뮬레이션을 통해서 그 가능성이 증명되었다.[1,2] 본 논문에서는 이러한 하이브리드 용접의 기본 원리와 장점을 이용하여서 고속박판용접(high speed sheet metal welding)과 협개선용접(narrow gap fill pass welding)의 응용에 대한 결과를 보고하고자 한다.

용접시 발생하는 비드불균형 현상은 용접속도 향상을 제한하게 되고, 생산성향상에 한계를 이끌어 오게 되기 때문에 이를 위한 고속용접에서의 용접비드 불연속 현상에 대해서 많은 연구가 진행되어왔다.[3,4] 용접공정에서 용접비드는 길이와 폭의 비가 상대적으로 크며, 유동학적으로 볼 때 표면장력으로 인하여 동적 불안정을 필연적으로

† 책임저자, 회원, 계명대학교 기계자동차공학부
E-mail : hwchoi@kmu.ac.kr
TEL : (053) 580-5216 FAX : (053) 580-5308
* 회원, 계명대학교 기계자동차공학부

Table 1 Specification of equipments

장비	형식		비고
Laser	Resonance medium	CO_2	Rofin-Sinar (RS-850)
	Wavelength	10 μ m	
	Pulse	Continuous wave	
	Max power	5kW	
GMAW	Arc type	Pulsed (Digital)	ESAB
	Pulse mode/trim	Synergic (99-122)	

갖게 된다. 박판 고속 용접응용의 경우는 특히, "핀칭(pinching)"에 의한 표면장력의 비율이 클 경우에는 용접비드 형성 전에 비드의 불균형이 냉각 전에 급속히 일어남으로 인해 이러한 불균형이 더욱 가속화 된다.(2) 또한, 협개선용접(narrow gap)의 경우에는 측면 부위로 용융된 용접비드가 충분히 확산되지 못하는 현상 때문에, 용융불안정(lack of fusion) 현상이 발생하며, 용접 후의 마이크로크랙이나 기포의 원인이 되기도 한다.

하이브리드 용접은 이러한 비드불균형(bead instability)을 해소하기 위하여 추가적인 열원인 레이저를 조사하여서 냉각시간(cooling time) 등을 길게 하여서 용접비드의 균일성을 지니게 하며, 협개선용접의 경우에는 측면유동 및 융착을 좋게 하여서 용접부위의 용융불안정 해소 및 강도 향상의 효과가 있을 것으로 기대된다.

2. 실험의 방법

하이브리드 용접 실험을 위해서 레이저 열원으로는 CO_2 laser 를 사용하였고, 아크 열원으로는 펄스 GMAW용접장치가 사용이 되었다. 용접의 특성상, 용접비드 양방향에 레이저빔을 조사해 주기 위해서 반사형 광학장치가 추가로 설계되어서, 레이저빔을 두개의 반원형태로 분리를 하였다(Fig. 1). 본 실험에 사용된 레이저는 최대 5kW의 출력을 낼 수 있는 CO_2 laser(Rofin-Sinar, RS850)로서 출력범위를 3.0kW ~ 3.75kW범위에서 조정을 하였으며, 보호가스(sheid gas)로서는 10% CO_2 와 90% Ar를 사용하였으며, 용접와이어로는 0.045"의 ER70S-6(Lincoln Electric Co.)가 사용이 되었다. GMAW-P 아크용접기로 Digi pulse 450i(ESAB)가 사용되었으며, 상세한 장비 사양은 Table 1 에 기술하였다.

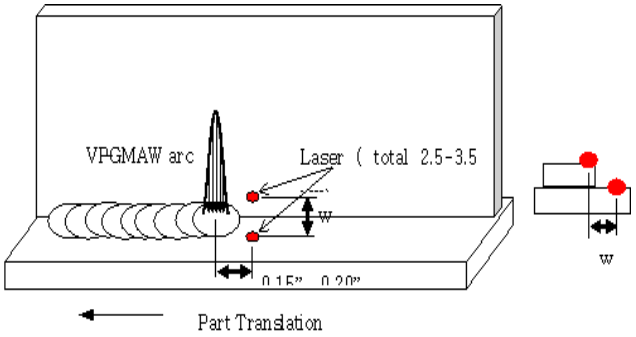

Fig. 1 Experimental setup for hump suppression in tee- and lap- fillet joint

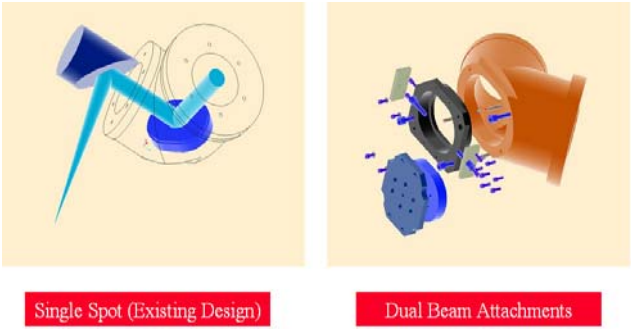

Fig. 2 Dual beam mirror design; (a) existing, (b) new design

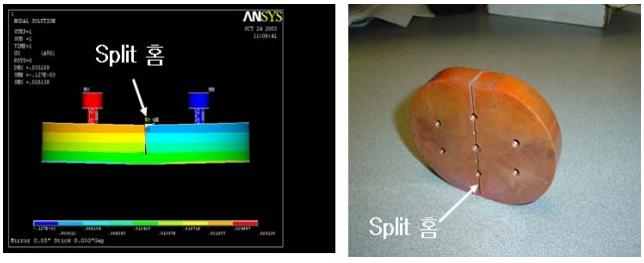

Fig. 3 FEM analysis of reflective mirror (left) and machined mirror (right)

2.1 CO_2 laser 광학 장치 설계

레이저빔은 용접비드의 양쪽에 조사해주는 것이 가장 효과적이기 때문에 레이저빔을 나누는 광학장치를 설계 하였다.

CO_2레이저는 10.6μm의 파장을 가지는 특성상, 투과형 광학장치(Transmittive optics)의 사용이 매우 어려우므로, 기존 반사형광학장치(reflective optics)를 개조하여서 사용하는 방안이 제안이 되었으며 기존의 형태[Fig. 2(a)]를 변형하여 빔 나눔(beam split)과 거리를 조정할 수 있게 설계를 하였다[Fig. 2(b)], 기존 반사형광학장치(반사미러)는 일체형으

Fig. 4 Laser focus spot burns made with dual focus mirror showing spot size and adjustable spacing; maximum spot spacing = 0.5” (12.7mm)

로 제작되어 있어서, 레이저빔을 나누기가 불가능하기에, 반사미러 뒷면에 Split 홈을 내어서 전면부가 중간부분을 기준으로 하여서 일정량 움직일 수 있도록 설계하였고, 홈의 깊이와 폭은 반사미러의 힌지부분의 최대응력이 재료(구리합금)의 항복응력을 넘지 않도록 FEM 소프트웨어 (ANSYS)를 사용하여 분석하였으며, 결과로 폭 0.8mm 로 1.5mm 의 힌지부분이 남도록 설계 및 가공하였다(Fig. 3).

완성된 반사미러장치를 이용하여서, 레이저빔을 이송시키는 로봇에 적용을 하였고 Fig. 4 에서 보이는 바와 같이 초점위치에 따라서 빔의 크기와, 반사미러에 부착된 조절나사를 조정함으로서 분리된 레이저 빔의 위치가 상대적으로 변화될 수 있음이 실험적으로 입증이 되었다.

3. 실험의 결과

3.1 박판고속용접 (High speed sheet metal welding)

개발된 하이브리드 용접방법을 평가하기 위하여 자동차용 강판에 적용을 하였다(HR 1008 steel plate 14 gauge and 16guage). 초기 실험으로 용접 부재를 100ipm(2.5m/min)의 속도로 이송을 하면서 레이저를 사용한 하이브리드 방법과 레이저를 사용하지 않은 일반 GMAW 용접법을 비교하였다. 레이저빔은 3.25kW 에 고정을 하였고 용접 비드폭보다 넓은 0.1”~ 0.27” (2.5mm ~ 7mm)의 간격으로 레이저빔을 분리하여서 조사하였다.

Fig. 5 에서 예시된 바와 같이 레이저 빔을 용접비드면 주위에 조사한 하이브리드용접의 용접비드는 균일한 반면에, 일반아크용접의 용접비드는 불균형한 모습을 보이고 있다.

동일한 실험방법을 다른 용접속도와 비드크기에 따라서 적용하였으며, 그 결과는 Fig. 6 에 정리 되었다.

여기에서 상대비드크기는 (χ)는,

$$\chi = \frac{Wire\ feed\ rate(\text{와이어속도})}{Welding\ speed(\text{용접속도})} \qquad (1)$$

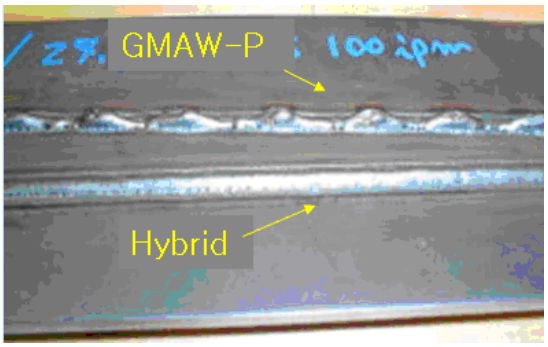

Fig. 5 Bead shape comparison (tip-GMAW, bottom-Hybrid) welding speed: 100ipm (2.5m/min)

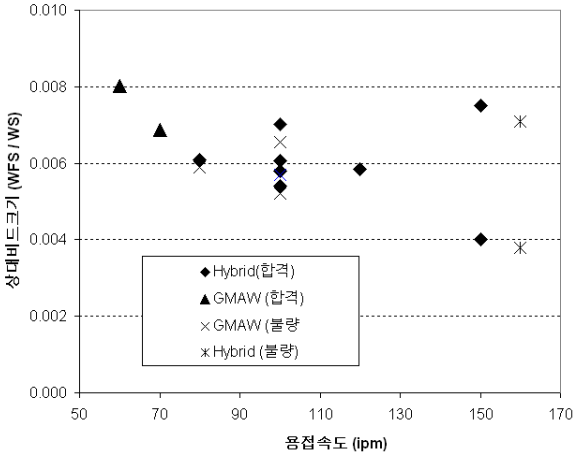

Fig. 6 Manufacturing windows for 16gage bead on plate test

로 정의되며, 용접비드의 크기를 상대적으로 가늠할 수 있는 무차원변수로 정의 되었다.

Fig. 6 결과에서 알 수 있듯이 아크 용접은 최고용접속도가 70ipm(1780mm/min)에 머무는 반면, 하이브리드 용접은 최고 용접속도가 150ipm (3810mm/min)을 이루어서 2 배가 넘게 생산성 향상을 가져 올 수 있음이 입증이 되었으며, 겹침용접(Lap-fillet)과 T-fillet 용접에서도 유사한 결과가 도출되었다.

3.2 협개선용접 (Narrow gap fill pass welding)

하이브리드 용접의 개념을 선박 및 중공업 장비용으로 사용되는 후판용접에 적용을 하였다. 일반적으로 후판 맞대기 용접은 용접토치와 아크불균형에 대한 문제를 개선하기 위해서, 용접모재를 “V” 자 형태로 가공하거나 산소절단을 하는 방법을 많이 사용하는데, 이로 인해서 전후공정의

Table 2 Process parameters for narrow gap welding

항목	값	비고
Distance between laser & arc	0.125"	Traveling speed dependent
Contact tip to work distance	0.75"	
Arc voltage	27.5V~30V	Adaptive mode
Spot diameter of laser	3.0mm ~ 3.5mm	Split beam
Laser beam focus location	Side wall	Corner at root pass
Average Laser power	3.0kW	CO_2 laser
Average GMAW power	7.5kW	Pulse mode (200Hz)
Traveling speed	40ipm Max	
Wire feeding speed	400ipm	
Root gap	3/16"	

복잡성 뿐만 아니라, 용접공정시 생산성이 크게 감소하게 된다. 실험에 사용된 협개선 용접은"V-groove"형태를 없애고 소재를 직선 형태로 가공하고, 아크토치와 레이저빔을 동시에 조사하여서 용접하는 형태로 고안되었다.

실험에 사용된 재질은 15mm 두께의 A572 Gr 50 (ASTM) 을 사용하였으며, Fig. 7 에 예시된 것 처럼 V-groove 없이 90 도 밀링가공을 하였고, 두 모재의 사이는 1/8"(3.2mm)의 틈을 유지하였다. 박판용접과 비슷한 형태로, 레이저 빔을 모재의 양측면에 조사를 하였고, 틈새의 크기와 용접공정에 따라서 레이저 빔의 에너지와 간격을 조정하였으며, 상세한 용접 변수는 Table 2 에 요약하였다.

레이저 빔은 Fig. 7 에서와 같이 교차형태로 조사되었는데, 이는 레이저 빔이 좁고 깊은 홈 끝까지 조사 될 수 있도록 고안 된 것이다. Fig. 7 에서 예시된 것처럼 3.2mm 의 좁은 틈에도 불구하고, 하이브리드 용접에는 측면부의 불균형이나 불량이 발견되지 않았으며 6 공정(6 passes)에 좁은 틈을 완전히 메울 수 있을 정도로 높은 생산성과 품질을 보였다. 단면의 모양에서도 측면부위가 중앙보다 높이 상승함으로서, 측면용융불안정(side lack of fusion)현상도 많이 줄어듦을 알수가 있다.

용접부위의 내부 품질 평가를 위해서 X-ray 를 이용한 비파괴 X-ray 검사(Non-destructive X-ray evaluation)를 실시하였으며, 결과가 Fig. 8 에 기술이 되어 있다.

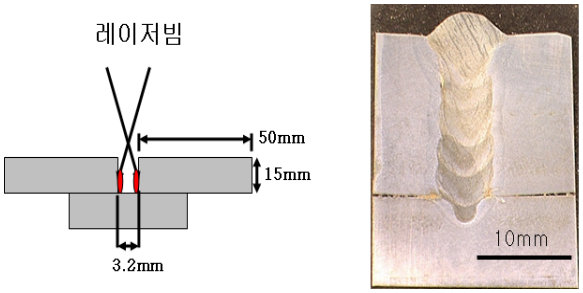

Fig. 7 The concept of narrow gap welding (left) and cross section of 6passes (s=20ipm with 1/8" gap (ESAB-P WFS 400ipm / 123 Tr (30V))

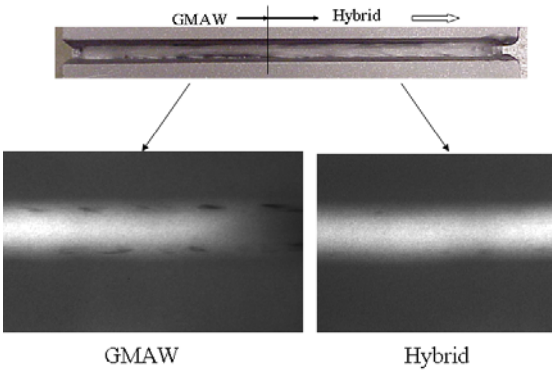

Fig. 8 Non-destructive evaluation by X-ray, GMAW left) and Hybrid welding (right)

결과에서 보이는 것과 같이, 일반 GMAW 에서 발견된 많은 불량(검은색 직선)에 비해서 하이브리드 용접에서는 상대적으로 이러한 불량이 급격히 줄어듦을 알 수가 있다.

3.3 액체질소를 이용한 용접효율실험

실험의 마지막으로 하이브리드 용접의 효율을 일반 아크용접과 비교하여 보았다. 이를 위해서 액체질소를 이용한 효율 측정 하였다. 액체질소를 이용한 원리는, 용접공정 직후에 용접샘플을 액체질소 속에 넣어, 액체질소가 기화하면서 액체질소의 무게는 줄어드는 반면 용접샘플의 온도는 액체질소와 동일한 온도로 감소하게 된다. 이때, 기화한 액체 질소의 무게변화를 측정하여서, 용접시 흡입된 에너지와 비교하여서 효율을 측정하게 된다.[5]

아크용접기를 통해서 공급된 에너지의 합은, 10kHZ 의 샘플링을 할 수 있는 DAQ(Data Acquisition)를 사용하여서 전류와 전압곱의 평균값

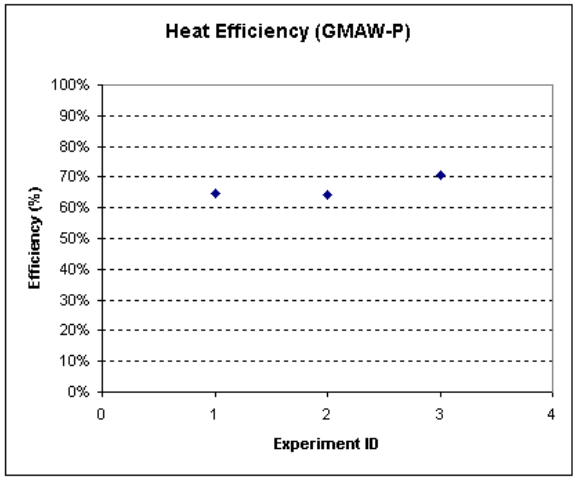

Fig. 9 Efficiency measurement of GMAW-P

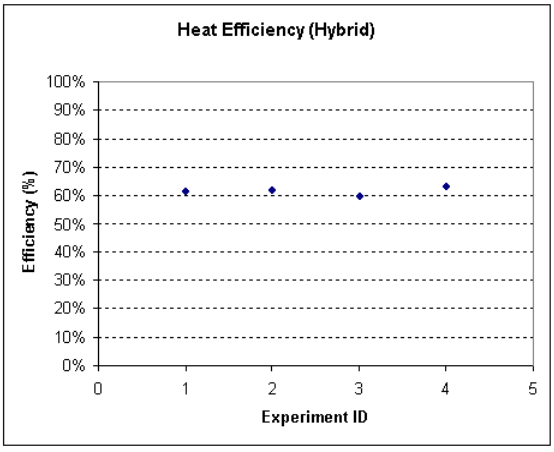

Fig. 10 Efficiency measurement of Hybrid welding

으로 계산하였으며, 상세한 계산 방법은 식 (2) ~ 식 (4)에 기술 되어 있다.

$$P_{in} = \frac{1}{T}\int V \cdot I dt \tag{2}$$

$$P_{out} = (m_{nt}C_n - m_{na}C_n)/T \tag{3}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \tag{4}$$

여기서, P_{in} 은 단위시간당 입력에너지, P_{out}은 액화질소에 의한 단위시간당 방출에너지, m_{nt} 와 m_{na} 액화질소의 총방출질량 및 상온에서의 자연 방출 질량, 그리고 C_n 는 액화질소의 잠열 (Latent specific heat)을 나타낸다.

실험변수는 용접스패터가 가장 적게 발생하도록 용접 process parameter 를 조정하였으며, 용접속도 20ipm(약 500mm/min)로 3 초간 진행하였다. 실험의 결과 GMAW-P 를 통한 단위시간당 공급 에너지는 6.77 kW 로 계산이 되었고, 액화질소의 증발량을 계산하여 용접모재에 입열된 단위시간당 에너지는 4.3 kW 에서 4.8 kW 로 계산 되었으며, 결과적으로 효율은 63.5%에서 70.9% 범위를 가지는 것으로 계산되었다(Fig. 9 참조).

동일한 방법으로 하이브리드 용접을 하였을 때, 아크와 레이저를 통해서 입열된 단위시간당 에너지는 전체 6.05 kW (아크: 4.3 kW; 레이저:1.75 kW)로 계산 되었으며, 액화질소의 증발량을 통한 용접모재에 입열된 단위시간당 에너지는 3.6 kw 에서 3.8 kw 로 계산되어서, 전체적인 용접 효율은 59.5%에서 62.8% 의 효율을 갖는 것으로 나타났다(Fig. 10 참조).

용접효율비교를 통해서, 아크용접의 효율(평균 65%)이 하이브리드 용접의 효율(평균 62%) 보다 약간 더 높은 것을 볼 수가 있다. 이는 아크용접에 비해서 하이브리드 용접시 레이저 입열량이 많은 반면 레이저의 높은 표면반사율 때문일 것으로 추론 된다.

4. 결 론

본 논문은 레이저와 아크용접을 결합한 하이브리드형태의 용접방법을 고속박판용접과 협개선 용접에 적용한 결과를 기술하고 있다. 실험결과 하이브리드 용접은 고속박판용접에서 용접불균형을 효과적으로 감소시켜줄 뿐만 아니라 기존 아크용접속도 (70ipm)보다 훨씬 빠른 150ipm 까지 실현됨을 보여주었다. 또한, 좁은틈 후판 맞대기 용접의 경우는 후판사이의 간격을 3.2mm 까지 줄일 수 있었으며, 6 공정으로 15mm 두께의 후판들을 효과적으로 접합 할 수 있어서 생산성 증대가 예상이 된다. 하이브리드 용접은 박판과 후판에 모두 효과적으로 사용되어 용접의 신뢰도를 높일 수 있는 방법으로 제안될 수 있으며, 추가적인 광학장치개발과 용접변수개발로 기술안정화를 이룰 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구내용은 비사신진연구비로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사를 드립니다.

참고문헌

(1) Choi, H. W., Farson D. F., and Cho M. H., 2006, “Hybrid Laser+GMAW Process for Control of the Bead Humping Defect,” *Welding Journal*, Vol. 85, No. 8, pp. 174S~179S.

(2) Cho M. H., Farson D. F., Lim Y. C., and Choi H. W., 2007, "Simulation-Based Design of a Hybrid Welding Process for Cyclical Loading Applications,” Science *and technology of welding and joining*, Vol. 12, No. 8, pp. 677~688.

(3) Rayleigh J. 1892, “On the Stability of Cylindrical Fluid Surfaces,” *Phil. Mag*. Vol. 5, No.34, pp. 177~180.

(4) Scotti A., Larson U. , Norrish J., 1991, “Bead Instability of Mechanised P-MIG [pulsed MIG] Welding in Vertical-up Position,” *Int. J. Joining Mater.*, Vol. 3, No. 1, pp. 18~24.

(5) Joseph A., Harwig D., Farson D. F., Richardson R., 2003, “Measurement and Calculation of GMAW-P Arc Power and Heat Transfer Efficiency,” *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 8, No. 6, pp. 400~406.