

조선용 강재의 CO₂레이저 GMA 하이브리드 용접에서 갭 브리징 능력 향상기술 개발

채현병*** · 김철희* · 김정한* · 이세헌**

*한국생산기술연구원 정밀접합팀

**한양대학교 공과대학 기계공학부

Improvement of Gap Bridging Ability in CO₂ Laser-GMA Hybrid Welding

Hyunbyung Chae***, Cheolhee Kim*, Jeong-Han Kim* and Sehun Rhee**

*Advanced Welding and Joining Team, KITECH, Incheon 406-130, Korea

**School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

Abstract

For laser welding in shipbuilding industry, gap bridging capability is one of the most important characteristics to achieve the high productivity and good weld quality. Recently, laser-GMA hybrid welding process is regarded as a distinctive method to overcome the tight gap tolerance with improving the productivity. In this study, the influence of process parameters on the bead formation was experimentally analyzed and the relationship between the process parameters and geometric imperfections was investigated. It was revealed that undercut, excessive weld metal, excessive penetration and incompletely filled groove were the major geometric imperfections. The optimized wire feeding and arc pressure were necessary to ensure the gap bridging ability. The approach to select the process parameters was conducted for butt welding with up to 2mm joint gap, in which the sound weld beads were generated without changing the welding speed.

*Corresponding author : chkim@kitech.re.kr

(Received February 26, 2006)

Key Words : Shipbuilding, Gap bridging capability, Laser-GMA hybrid welding, Geometric imperfection

1. 서 론

조선산업에서 맞대기 용접 시에는 부재가공오차, 핏업(fit-up) 오차, 용접 중 열변형 등에 의하여 불가피하게 이음부에 갭(gap)이 발생하므로 갭브리징(gap bridging) 능력이 뛰어난 용접공정의 적용이 요구된다. 조선산업에서 부재의 절단 시에는 가공물의 사이즈가 크기 때문에 기계적 절단법이 아닌 열절단법을 주로 사용한다. 열절단법은 기계적 절단의 절삭공구에 해당하는 열원의 형상과 크기가 일정하지 않고 자유롭게 변하는 전이기체이므로 피절단재와의 상호작용에 의해 절단면의 형상이 수시로 변할 수 있는 단점이 있고 또한 이

로 인해 맞대기 용접 시 간극의 크기를 관리하는 것이 필요하다¹⁾. 일반적으로 절단품질은 기계적 절단, 레이저 절단, 플라즈마 절단, 가스절단 순인데 경제성은 이와 반대이다. 따라서 간극에 대한 허용치를 확대시킬 수 있다면 보다 더 경제적인 절단공정을 이용하여 선박 제조의 생산원가를 낮출 수 있는 이점이 있다.

평판의 맞대기 용접에서 주로 이용되는 서브머지드아크용접(submerged arc welding, SAW) 공정은 일반적으로 직경 2.4mm 이상의 대구경 용접와이어를 사용하기 때문에 갭브리징 능력이 뛰어나지만 대 전류를 사용할 수 있고 열효율이 가장 높다는 장점이 있다. 그러나 대입열 공정으로 인한 열변형이 심하여 후가공 공수가 많고 턴오버(turn-over)를 통한 양면용

접을 해야 하는 단점이 있다. 따라서, 최근 SAW의 단점을 극복하기 위하여 레이저-아크 하이브리드 용접에 대한 관심이 높아지고 있다.

레이저-GMA(Gas Metal Arc) 하이브리드 용접공정에서의 갭브리징 능력은 기존 공정인 SAW에 비해서는 다소 부족하지만, 단독 레이저용접에 비해서는 월등하다. 일반적으로 단독 레이저 용접은 0.1~0.2mm, 용가재를 첨가하는 레이저 용접은 0.4mm 이하, 그리고 레이저-아크 하이브리드 용접은 1.0mm 정도의 갭브리징 능력을 가지고 있다고 보고되었다²⁾. TWI(The Welding Institute)의 연구결과에서는 CO₂ 레이저-GMA 하이브리드 용접을 두께 8mm의 조선용 강재를 대상으로 와이어 송급속도와 용접속도를 조절하여 1.6mm의 갭브리징 능력을 확보한 것으로 보고되었다. 그러나 1.6mm의 간극에서는 ISO 13919-1의 Class D에 해당하는 결과로서 언더필이 형성되지 않는 범위는 간극 크기 1mm 이하이다³⁾. 또한 TWI는 Nd:YAG-GMA 하이브리드 용접에서 용접속도 조절을 이용한 적응제어를 통하여 1.2mm의 갭브리징 능력을 성취하였다⁴⁾. 국내에서도 H. S. Kim은 조선에 하이브리드 용접을 적용하기 위한 연구에서 1mm의 간극에서 양호한 용접비드를 얻었으며, 두 부재의 상하 단차에 대해서 용접특성을 분석하였다⁵⁾. J. B. Lee *et al.*은 20mm 두께의 강재에 대한 CO₂ 레이저-GMA 하이브리드 용접에서 약 0.8mm의 간극에 대해 양호한 용접품질을 확보하였다⁶⁾. 또한 K. D. Lee는 6000계열 알루미늄을 대상으로 한 Nd:YAG 레이저-GMA 하이브리드 용접이 약 1mm의 갭브리징 능력을 가지고 있음을 조사하였다⁷⁾. 그러나 약 1mm의 갭브리징 능력으로는 조선에서 요구하는 수준에 크게 미치지 못하여 레이저-GMA 하이브리드 용접공정의 현장적용에 애로사항이 되고 있다.

레이저-GMA하이브리드 용접의 선행연구들에서 갭브리징 능력을 향상시키기 위한 방법을 살펴보면 레이저 용접 공정변수보다는 GMA 용접 공정변수의 조절에 의존하는 것이 대부분이며, 이때 사용된 변수는 GMA용접의 용접전류, 용접전압 및 용접속도이다. Y. Sugitani *et al.*은 백킹 플레이트(backing plate)를 사용한 I형 맞대기 용접부의 GMA단독 용접에서 갭브리징 능력에 대한 변수들의 영향을 조사하였는데 그 중에서 용접전류, 용접전압, 용접속도 이외에 와이어 들출길이가 갭브리징 능력에 영향을 미치는 것으로 보고하였다⁸⁾. 이 연구결과에서는 팁-모재간 거리(contact tip-to-workpiece distance, CTWD)를 제어하지 않은 경우에는 갭브리징 능력이 2.4mm인 반면, CTWD제어를

이용하게 되면 갭브리징 능력이 2.8mm로 향상됨을 보여주었다. 회전아크를 이용한 Y. Sugitani *et al.*의 다른 연구에서는 몇 가지 제어 방법을 비교하여 CTWD와 와이어 송급속도, 용접전압을 동시에 제어할 경우 갭브리징 능력이 보다 더 향상됨을 보여주었다⁹⁾.

따라서 본 연구는 선박 상부구조의 갑판(deck) 등에 사용되는 두께 8mm A grade 강재의 맞대기 용접에 CO₂ 레이저-GMA 하이브리드 용접을 적용시 공정변수와 용접비드 형상과의 상관관계를 규명하였으며, 레이저-GMA 하이브리드 용접부에 나타나는 대표적인 결함과의 관계를 조사하였다. 특히 본 연구에서는 2mm까지의 간극이 존재하는 맞대기 용접부에서 생산성 향상을 위하여 백킹 플레이트를 사용하지 않는 조건에서 건전한 용접비드 형상을 얻기 위한 공정변수를 선정하고자 하였다.

2. 레이저-GMA 하이브리드 용접부의 용접결함

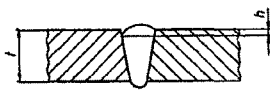
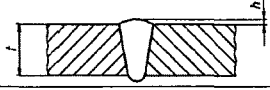
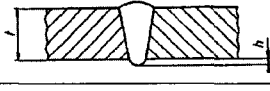

레이저-GMA 하이브리드 용접은 레이저와 GMA용접의 결합이므로 용접부를 평가함에 있어서 본 연구에서는 레이저 용접에 대한 규격과 아크용접에 대한 규격을 함께 검토하고자 한다. 따라서 본 절에서는 레이저 용접부에 대한 용접결함에 관한 규격인 ISO 13919-1과 아크용접에 대한 용접결함에 관한 규격인 ISO 5817의 특징을 비교하여 레이저-GMA 하이브리드 용접부의 평가를 하기 위한 타당한 근거를 만들고자 한다^{10,11)}.

간극이 존재하는 맞대기 용접부의 레이저-GMA 하이브리드용접에서 예상되는 용접결함으로는 언더컷, 과다 용접덧살, 과다 이면비드 그리고 언더필이 있다. 기공도 레이저 용접부의 중요한 용접결함중의 하나지만 CO₂ 레이저-아크 하이브리드 용접에서는 적절한 보호가스의 선정으로 이를 방지할 수 있어 본 연구에서 검토한 용접결함에서 제외하였다¹²⁾. 상기의 네 가지 결함에 대해 ISO 13919-1과 ISO 5817을 비교한 결과 ISO 13919-1이 ISO 5817보다 용접부에 대한 평가를 훨씬 엄격하게 규정하고 있다. 그러나 ISO 13919-1에서도 규정 이하의 언더컷과 언더필을 허용하지만 실제 조선소 현장에서는 이를 허용하지 않는 등 용접결함을 보다 더 엄격하게 관리하고 있다. 따라서 본 연구에서는 보다 높은 신뢰성을 확보하기 위하여 Table 1과 같이 ISO 13919-1에 용접부결함이 전혀 존재하지 않는 상태인 Class B'을 추가한 수정된 ISO 13919-1을 하이브리드 용접부의 평가에 이용하였다.

3. 실험장치 및 방법

본 연구에서 이용한 CO₂ 레이저는 최대출력 12kW

Table 1 The prospective imperfections in laser arc hybrid welding in the modified ISO 13919-1

Imperfection designation	Remarks	Limits for imperfections for quality levels			
		Moderate (D)	Intermediate (C)	Stringent (B)	Very Stringent (B')
Undercut		$h \leq 0.15t$ or 1mm, Whichever is the smaller	$h \leq 0.1t$ or 0.5mm, Whichever is the smaller	$h \leq 0.05t$ or 0.5mm, Whichever is the smaller	$h = 0\text{mm}$
Excess weld metal		$h \leq 0.2\text{mm} + 0.3t$ or 5mm, Whichever is the smaller	$h \leq 0.2\text{mm} + 0.2t$ or 5mm, Whichever is the smaller	$h \leq 0.2\text{mm} + 0.15t$ or 5mm, Whichever is the smaller	
Excessive penetration		$h \leq 0.2\text{mm} + 0.3t$ or 5mm, Whichever is the smaller	$h \leq 0.2\text{mm} + 0.2t$ or 5mm, Whichever is the smaller	$h \leq 0.2\text{mm} + 0.15t$ or 5mm, Whichever is the smaller	
Incompletely Filled groove		$h \leq 0.3t$ or 1mm, Whichever is the smaller	$h \leq 0.2t$ or 0.5mm, Whichever is the smaller	$h \leq 0.1t$ or 0.5mm, Whichever is the smaller	$h = 0\text{mm}$

h: size (height or width) of imperfection
b: width of weld reinforcement

급으로 가장 최소화된 레이저 빔의 지름은 0.4mm이다. 초점거리는 250mm이며 모재표면에 초점을 두어 실험하였다. GMA용접기는 500A급 인버터 용접기이고 용접와이어의 송급성을 원활히 하기 위하여 푸쉬풀(push-pull) 토치를 사용하였다. Fig. 1은 본 연구에서 사용된 CO₂ 레이저-아크 하이브리드 용접헤드를 보여주고 있으며, 용접현상 관찰을 위하여 초당 3000 프레임의 고속촬영을 실시하였다. 사용된 모재는 두께 8mm A grade 강재이며 조인트 형상은 개선을 치지 않은 I형 맞대기 형태이다. 절단면은 밀링가공을 하였으며 간극의 크기를 0~2mm로 변화시켜 용접을 수행하였다. 맞대기 용접에서 간극이 존재하는 경우에는 이 음부의 공간을 채우기 위해 요구되는 최소용착량이 필

요하다. 따라서 간극 크기에 따른 와이어 용착량을 계산하였고 그에 상응하는 와이어 송급량 및 전류값을 Table 2에 나타내었으며 GMA용접조건선정의 기준으로 이용하였다.

본 연구에서 공통으로 사용된 용접변수 조건을 Table 3에 나타내었다. 특히 공정의 생산성을 결정하는 용접 속도는 레이저출력 8kW에서 1.5m/min으로 고정하였다. 이것은 고출력 레이저를 이용한 하이브리드 용접에서 용입깊이는 레이저 출력과 용접속도에 의해 결정되는데, 간극에 따른 공정변수의 적응제어시 용접속도를 제어하는 경우 레이저출력이 연동되어 공정변수 제어의 복잡성을 높일 수 있기 때문이다. 용접부 단면에서 덧

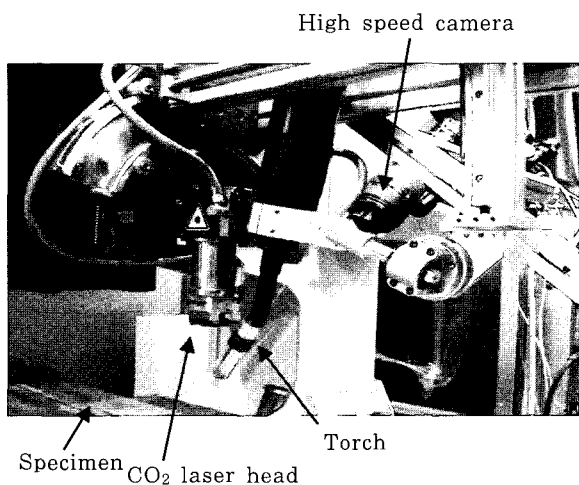


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental arrangement of laser-GMA hybrid head

Table 2 Required wire feed rate according to the gap variation (1.2mm dia. wire)

Gap size(mm)	0.5	1	1.5	2
Wire feed speed (m/min)	5.3	10.5	15.8	21.0
Approx. welding current(A)	210	310	410	490
Gap size(mm)	0.5	1	1.5	2

Table 3 Welding conditions used in experiments.

Laser head angle	90 deg.	
Torch angle	60 deg.	
Travel speed	1.5 m/min	
Contact tip to workpiece distance	18mm	
Distance between laser spot and arc	4mm	
Electrode diameter	1.2mm	
Shielding gas	Type	He, Ar, CO ₂
	Flow rate	50 ℓ/min

살, 이면비드, 언더컷 및 언더필을 실험결과의 평가항목으로 선정하였으며 Class B'을 추가한 수정 ISO 13919-1을 기준으로 평가항목에 대한 공정변수의 영향을 평가하였다.

4. 갭 브리징 능력에 대한 공정변수의 영향

CO₂레이저-GMA하이브리드 용접에서 간극이 없는 맞대기 조인트에 약 220~380A 용접전류 범위의 GMA 용접조건을 적용한 결과에 대한 비드표면 및 비드단면을 Fig. 2에 나타내었다. 비드표면 관찰에서는 전반적으로 균일한 비드폭을 나타내며 언더컷과 같은 결함은

관찰할 수 없었다. 비드단면에서도 양호한 이면비드와 함께 기공과 같은 결함은 나타나지 않았으나 용접덧살의 양이 300A 이하에서는 ISO13919-1의 Class B에 해당하고 그 이상의 전류조건에서는 Class C에 해당하는 정도로 약간 과도한 것으로 나타났다. 따라서 간극이 없는 조건에서는 GMA용접의 용착금속이 전량 용접덧살로 형성되기 때문에 전류조건을 300A이하로 설정하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

간극이 0.5mm인 경우의 하이브리드 용접부 평가결과를 Fig. 3에 나타내었다. 언더필과 과다 백비드는 모두 나타나지 않았으며, 용접덧살의 경우 과도한 용착량을 유발하는 360A이상에서 Class C에 해당하는 결과

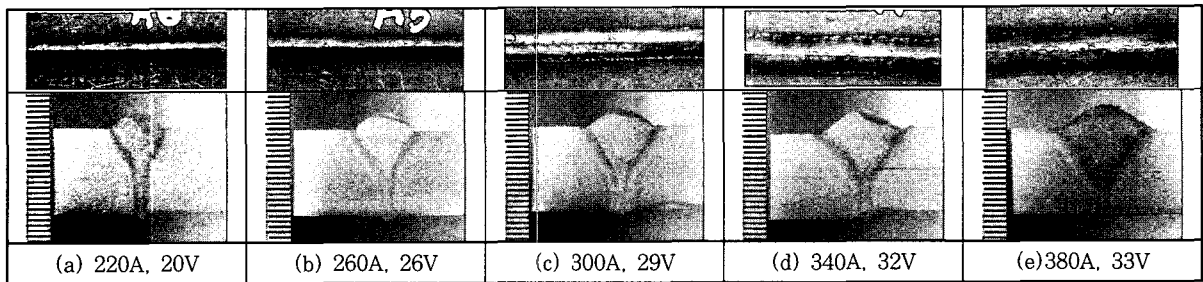


Fig. 2 Top and cross sectional views of hybrid welds on butt joint with no gap

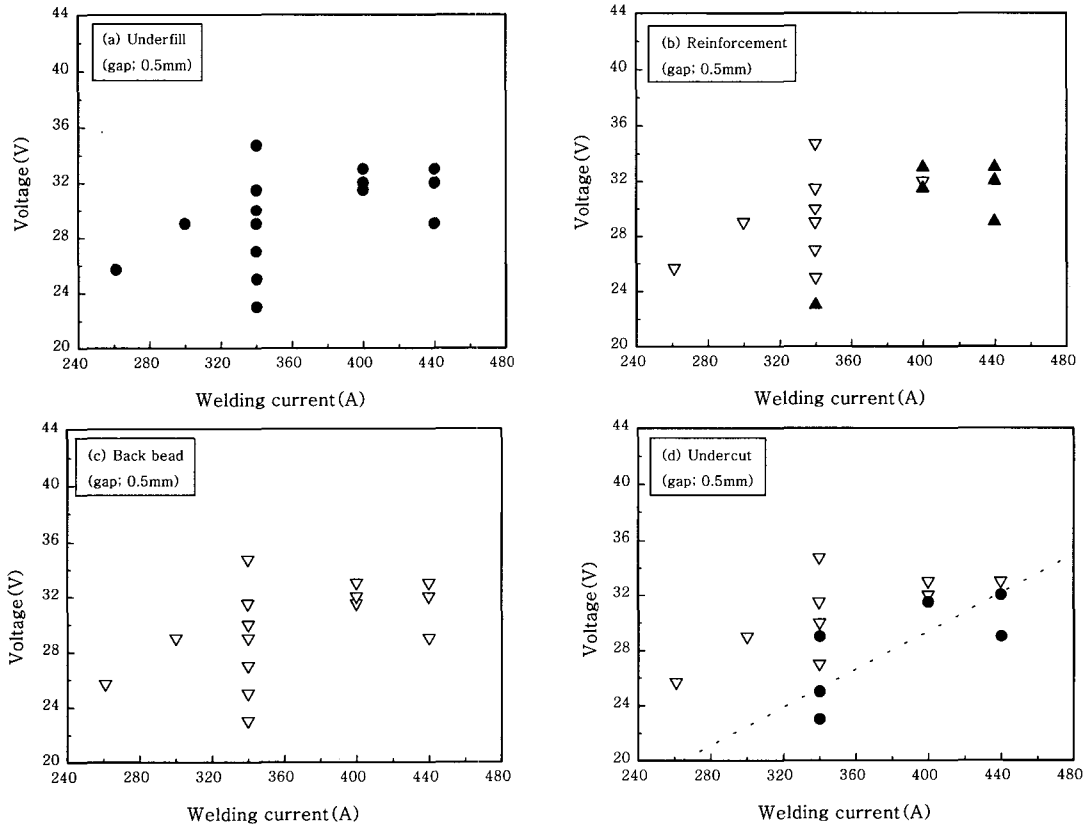


Fig. 3 Effects of process parameters on bead characteristics (gap:0.5mm, class B' ; ●, class B; ○, class C; ▽)

가 나타났다. 340A, 23V의 경우에는 용접전압이 적정 조건에 비해 낮아 과도한 덧살이 관찰되었다. 언더컷은 비교적 용접전압이 높고 용접전류가 낮은 경우에 발생이 되었는데 Fig. 3(d)의 점선은 Class B와 Class B'의 경계를 나타내고 있다. 본 연구의 네 가지 평가항목을 중첩하여 평가한 결과 8kW레이저 출력, 1.5 m/min 용접속도에서 맞대기 용접부재가 0.5mm 간극을 가진 경우에는 340A, 24V이 용접부에 결함이 유발시키지 않는 적절한 아크용접 조건으로 판단된다. 간극이 1.0mm인 경우를 Fig. 4에 나타내었다. 용접비드 특성은 간극이 0.5mm인 경우와 같이 1.0mm 간극에서도 비슷한 경향을 보이고 있으나 간극을 채우기 위하여 용접전류의 값을 0.5mm간극에서 보다 더 크게 선정하여야 함을 알 수 있다. 즉, BOP(bead-on-plate)나 간극이 없는 맞대기 용접에서의 조건과 비교할 때, 0.5mm와 1.0mm 간극이 존재하는 경우에는 간극을 채우기 위하여 상대적으로 많은 용착량이 필요하므로 와이어 송급속도의 증가가 요구되고 언더컷을 방지하기 위하여 상대적으로 낮은 용접전압이 요구된다. 용접덧

살이 과도한 경우 그라인딩과 같은 비교적 간단한 공정으로 제거될 수 있지만 언더컷의 경우는 그라인딩 및 보수용접에 의해서만 개선이 가능하므로 적정 용접조건 선정에 있어서 과도 용접덧살 방지보다는 언더컷 방지를 우선적으로 고려해야 할 것으로 판단된다.

Fig. 5는 용접전압 증가에 따른 비드표면 및 단면형상을 나타내고 있다. 용접전압이 증가할수록 비드폭이 증가하고 덧살이 감소하는 경향이 나타났으며, 32V이상에서는 언더컷이 유발됨을 관찰할 수 있었다. 언더컷을 방지하기 위해서는 Fig. 3(d)에서와 같이 일정수준 이하의 용접전압이 요구되는데 그림에서 점선은 간극이 0.5mm일 때 언더컷이 발생하지 않는 영역을 나타낸 것이다. 이때 점선의 기울기는 약 0.07로써 용접전압과 용접전류의 비를 나타내고 여기에서 과도 용접덧살이 발생하는 임계 용접전류값을 함께 이용하면 적정 용접전류 및 용접전압값의 선정이 가능하다. 간극이 1mm인 경우에도 위와 같은 방법으로 적정범위의 용접전류와 전압 조건 산출이 가능함을 알 수 있다. 간극이 1.5mm인 경우에서의 하이브리드 용접부의 평가결과를

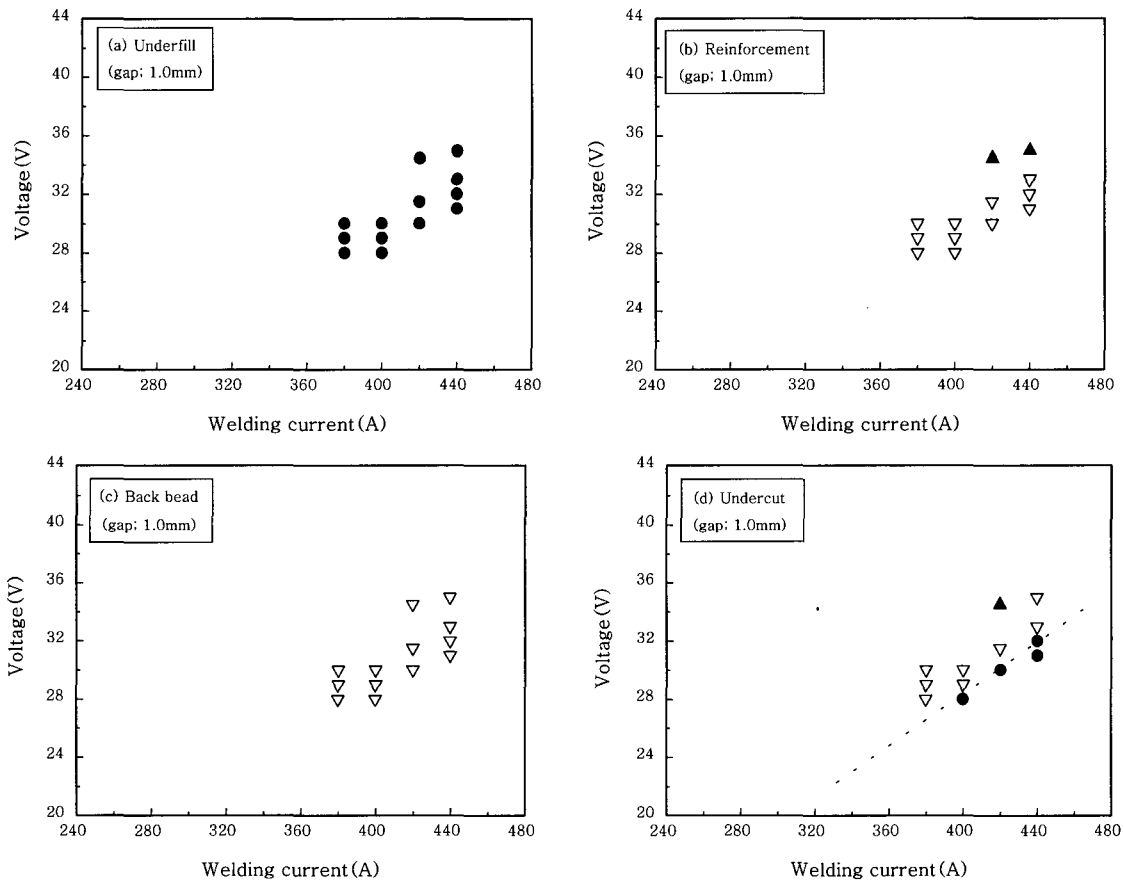


Fig. 4 Effects of process parameters on bead characteristics (gap:0.1mm, class B' : ●, class B; ▽, class C; ▲)

Fig. 6에 나타내었다.

본 연구에서 사용된 모든 조건에서 Class B'에 해당하는 비드단면 형상은 나타나지 않았고 과도한 백비드와 함께 심한 언더컷을 나타내는 경우가 대부분이었으

며 용락에 의한 언더필이 간혹 관찰되었다. 이를 개선하기 위하여 용접전류와 전압을 다양하게 변화시켜보았지만 수정된 ISO13919-1의 Class B'에 해당되는 건전한 비드단면 형상을 확보하는데 실패하였다. Table

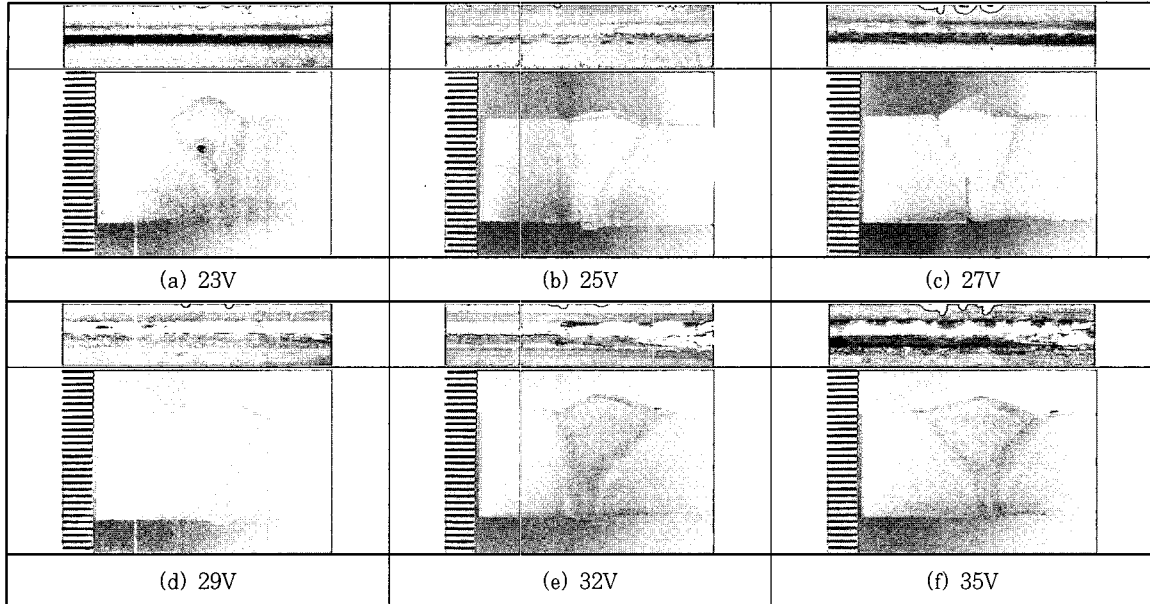


Fig. 5 The Effect of welding voltage on the bead shape in laser arc hybrid welding (welding current: 340A, joint gap: 0.5mm)

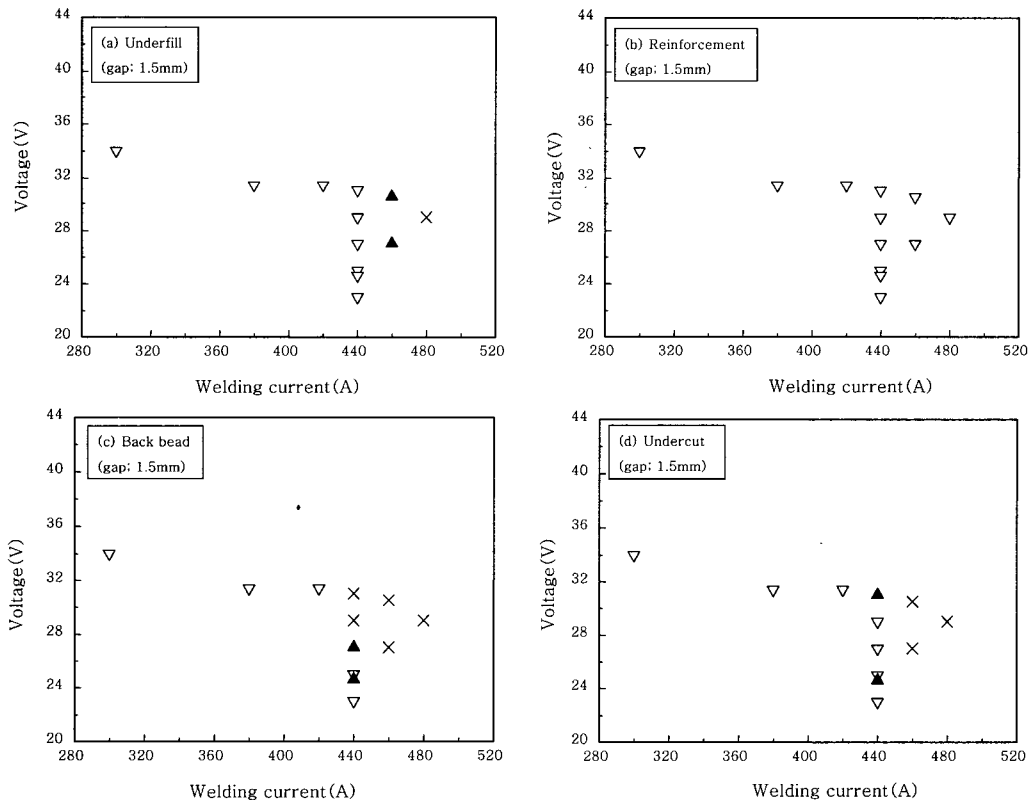


Fig. 6 Effects of process parameters on bead characteristics (gap:1.5mm, class B:▽, class C:▲, class D:X)

2에서와 같이 간극이 1.5mm인 경우 간극을 용착금속으로 채우기 위해서는 1.2mm 직경의 용접와이어를 기준으로 15.8m/min의 와이어 송급속도가 요구된다. 여기에 해당하는 용접전류는 413A로써 용접덧살, 백비드와 스팬터를 고려하면 적절한 용접전류가 약 440A 수준이 된다. 용접전류 440A 이상에서는 과다 백비드와 언더컷이 함께하는 Class C 정도에 해당하는 비드형상이 나타났는데, 이는 높은 용접전류에 의하여 아크압력이 증가되면서 용융풀을 중력방향으로 함몰시키려는 영향이 크기 때문으로 사료된다. 하지만 1.5mm 간극에 의한 공간을 채우기 위해서는 와이어의 송급속도를 낮출 수 없기 때문에 용접전류 감소에 의한 아크압력 감소효과는 나타낼 수 없었다.

따라서 차선책으로서 용접전압을 31V에서 23V까지 단계적으로 감소시킴에 의한 아크압력 감소를 유도하였으며 그때 나타나는 현상을 고속촬영한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 용접전압이 감소되면서 아크길이가 짧아지고 그에 따른 용융풀의 함몰이 감소됨을 관찰할 수 있었으나, 그럼에도 불구하고 과다 백비드와 언더컷을 완전히 제거할 수 없었다. 이 문제를 극복하기 위하여 1mm 간극까지 고정변수였던 CTWD를 18~32mm까지 변화시켰으며 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 비드 단면의 평가에서 CTWD를 증가시킬수록 과도하게 나타났던 백비드가 줄어들면서 용접덧살이 생성되는 것을

관찰할 수가 있었다. CTWD가 28mm 이상에서 육안으로 관찰할 수 있을 정도의 덧살이 생성되었으며 건전한 비드형상을 얻을 수 있었다. 고속 촬영결과에서도 CTWD의 증가에 따라 용융풀의 함몰이 현저히 감소함을 확인할 수 있다. 이는 정전압모드의 GMA 용접전원에서 CTWD가 커지는 경우 와이어 돌출길이가 증가하고 이에 따라 용접전류값이 낮아지므로 아크 압력이 감소하기 때문이다¹³⁾. 즉, Fig. 9와 같이 CTWD의 증가에 따라 용접 전류값은 감소하므로 간극을 채우기 위한 17.2m/min의 와이어 송급속도를 유지하면서도 용접전

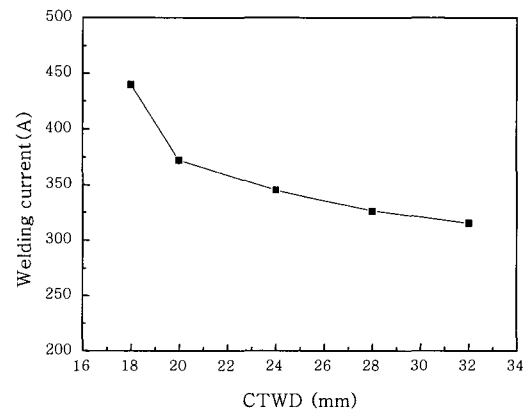


Fig. 9 Relationship between CTWD and welding current (wire feed speed: 17.2m/min, voltage: 25V)

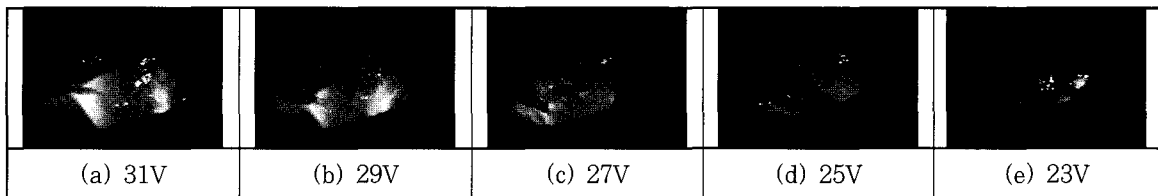


Fig. 7 Effect of welding voltage on the welding pool depression (Welding current: 440A, Gap size: 1.5mm)

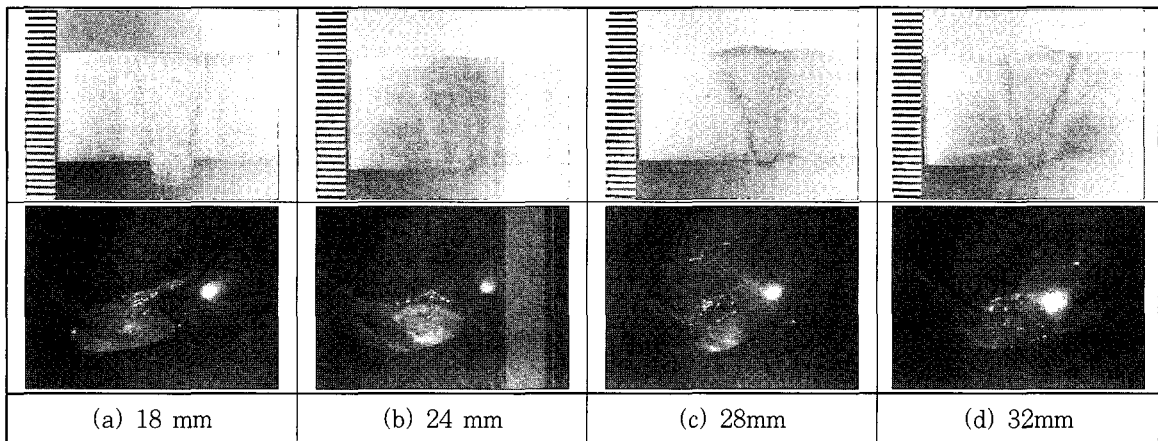


Fig. 8 Effect of CTWD on bead characteristics with 1.5mm gap (wire feed speed: 17.2m/min, voltage: 25V)

류값을 낮추어 아크압력제어가 가능함을 확인하였다.

간극이 2mm인 경우에는 레이저 빔과 GMA의 용접 와이어가 간극 사이를 통과하여 아크가 발생되지 않거나 아크가 발생되더라도 매우 불안정하여 심한 용락과 함께 언더필이 발생되어 정상적인 용접이 이루어지지 않았다. 따라서 직경 1.2mm 용접와이어를 1.4mm로 대체하여 용접을 수행한 결과 용접은 이루어졌으나 1.5mm 간극의 경우와 같이 용접전류와 전압의 제어만으로는 건전한 용접부를 형성하지 못하였다. 따라서 1.5mm 간극에서 수행했던 동일한 방법으로 CTWD를 34mm까지 증가시켰으며 Fig. 10에서와 같이 CTWD가 32mm이상에서는 언더필과 과다 백비드를 방지할 수 있었으며 ISO 13919-1 Class B'에 해당하는 결과를 획득할 수 있었다.

5. 결 론

간극이 존재하는 I형 맞대기 용접부에 CO₂ 레이저-GMA 하이브리드 용접을 적용하여 2mm 이하의 간극에 적용가능한 공정변수를 선정하고자 하는 본 연구를 통하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 1mm이하의 간극이 존재하는 맞대기 용접부에 하이브리드 용접을 적용할 때 주로 발생하는 용접불량은 과다 용접덧살과 언더컷이었으며, 1.5mm이상의 간극을 가진 경우에는 언더컷, 과다 백비드, 언더필이 주된 용접결함임을 확인하였다.

(2) 1mm이하의 간극에서 발생하는 과다 용접덧살과 언더컷의 원인은 각각 과도한 와이어 송급속도와 용접전압이며, 이와 같은 용접결함을 방지할 수 있는 와이어 송급속도와 용접전압의 비를 제시하였다.

(3) 1.5mm이상의 간극에서는 간극 이음부를 채우기 위한 와이어 송급속도의 증가가 요구되나 이에 따른 높은 용접전류에 의한 아크 압력의 증가로 인하여 용융플라즈마에 의한 언더필, 과다 백비드 및 언더컷이 발생되었다. 이들 용접결함은 용접전압을 낮추고 와이어 송급속도를 유지하면서 용접전류를 낮출 수 있는 CTWD를 증가시킴으로써 아크압력을 감소시켜 방지할 수 있었다.

(4) 간극의 크기가 1mm이하에서는 CTWD 제어없이 용접전류와 용접전압의 조정만으로 건전한 비드형상 확보가 가능하였으며, 간극의 크기가 1.5mm에서는 양호한 품질의 용접비드를 얻기 위해서는 용접전류, 용접

전압 및 CTWD의 제어가 요구되었다. 또한 2mm 간극에서는 직경 1.4mm이상의 와이어 사용과 CTWD제어가 동시에 필요함을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. 대한용접학회편: 용접·접합편람, 대한용접학회, 1998, 693 (in Korean)
2. S. Herbert: Laser-Hybrid Welding of Ships, *Welding Journal*, 83-6 (2004), 39-43
3. S. G. Shi and P. A. Hilton: A Comparison of the Gap-Bridging Capability of CO₂ Laser and Hybrid CO₂ Laser MAG Welding on 8mm Thickness C-Mn Steel Plate, TWI Members Report 798/2004
4. S. G. Shi, P. A. Hilton, S. Mulligan and G. Verhaeghe: Hybrid Nd:YAG Laser-MAG Welding of Thick Section Steel with Adaptive Control, *Proceedings of the 23th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics 2004*
5. H. S. Kim: Study on the Laser Hybrid Welding Technology for Shipbuilding, *Journal of Korean Welding Society*, 22-2 (2004), 117-120 (in Korean)
6. J. B. Lee and S. K. Hong: 조선분야의 레이저-아크 하이브리드 용접기술, 제 1회 중공업 생산성 혁신을 위한 차세대 하이브리드 용접 기술 개발 과제 심포지엄, 한국생산기술연구원, 2004, 13-28 (in Korean)
7. K. D. Lee: Laser-Arc Hybrid Welding Process of Aluminum Alloy, *Journal of Korean Welding Society*, 22-2 (2004), 121-125 (in Korean)
8. Y. Sugitani and Y. Nishi: Investigation of a Method for Optimum penetration control, *Welding International*, 4-2 (1990), 116-122
9. Y. Sugitani and W. Mao: Automatic Simultaneous Control of Bead height and back bead shape using an Arc Sensor in One-Sided Welding with a Backing Plate, *Welding International*, 9-5 (1995), 366-374
10. International Organization for Standardization: Welding-Electron and Laser-Beam Welded Joints-Guidance on Quality Levels for Imperfections: Part 1 (ISO 13919-1), ISO, 1996
11. International Organization for Standardization: Arc-Welded Joints in Steel- Guidance on Quality Levels for Imperfections (ISO 5817), ISO, 1992
12. H.-B. Chae, C.-H. Kim, J.-K. Kim, N.-H. Kang, J.-H. Kim and S. Rhee: The Effect of Shielding Gas Composition in CO₂ Laser-MIG Hybrid Welding, *Proceedings of the 2004 Autumn Meeting of Korean Welding Society*, 2004, 52-54 (in Korean)
13. J. F. Lancaster: *The physics of welding*, 2nd edition, Pergamon Press, 1986, 221-222