

강의 레이저-아크 하이브리드 용접시 공정변수에 따른 비드용접특성 (I)

- 보호가스 유량 및 레이저 아크간 거리의 영향 -

김종도*[†] · 명기훈** · 송무근** · 오재환*** · 서 정****

*한국해양대학교 기관공학부

**한국해양대학교 대학원 기관공학과

***세화산업

****한국기계연구원 부산레이저기술지원센터

The characteristics of bead welding on steel with process parameter during the laser-arc hybrid welding(I)

- Effect of flow rate of shield gas and distance between laser and arc -

Jong-Do Kim*[†], Gi-Hoon Myung**, Moo-Keun Song**, Jae-Hwan Oh*** and Jeong Suh****

*Division of Marine Engineering, Korea Maritime and Ocean Univ., Busan 606-791, Korea

**Graduate School, Korea Maritime and Ocean Univ. Busan 606-791, Korea

***Sae-Hwa Industry, Gimhae 621-916, Korea

****Busan Laser Application Support Center, Korea Institute of Machinery & Materials, Busan 618-230, Korea

[†]Corresponding author : jdkim@kmou.ac.kr

(Received April 17, 2015 ; Accepted April 29, 2015)

Abstract

Recently many studies for improvement of productivity and automation of process are in progress, and among others, laser-arc hybrid welding that combined laser and arc has attracted much attention. Since parameters by interactions as well as the parameters of each heat source should be considered, There are a lot of hardship in actual application, even though many researches have been done so far. Therefore in this study, bead welding was done to examine the effects of the flow rate of shield gas and the distance between laser and arc during laser-arc hybrid welding. As for hybrid heat source, disk laser and MIG were used. As experiment result, sound bead and weld with no defect were formed when the flow rate of front and rear shield gas were respectively 20 l/min and 15 l/min, and deep penetration was done at DLA=3 mm.

Key Words : Hybrid welding, Parameters, Flow rate of shield gas, Distance between laser and arc

1. 서 론

레이저-아크 하이브리드 용접은 두 용접 프로세스를 동시에 사용함으로써 상호 간의 시너지 효과를 통해 효율을 극대화 하는 용접법이다¹⁾. 하이브리드 용접은 저 입열, 빠른 용접속도 및 깊은 용입과 같은 레이저 용접의 장점과 높은 효율 및 갭 브릿지 효과와 같은 아크

용접의 장점을 모두 가진다²⁻⁴⁾.

하이브리드 용접을 사용할 경우 아크 용접시 소모되는 용가제의 양을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 단일 패스로 용접을 행함으로써 용접횟수가 감소하기 때문에 생산성 및 경제성을 향상시킬 수 있다. 또한 고속으로 용접이 가능하므로 입열량이 감소하여 변형 및 결함 발생을 줄임으로써 우수한 용접품질도 달성할 수 있다^{5,6)}.

조선 산업에서 사용하는 용접부재의 용접 길이는 대부분 12m 이상으로, 절단면 및 이음새의 정밀도가 정확하지 않을 경우 레이저만으로는 접합이 곤란하지만, 하이브리드 용접을 사용한 경우에는 용가재에 의해 갭 허용치가 증가하기 때문에 용접이 가능하다.

이와 같이 하이브리드 용접은 레이저 및 아크 용접의 장점을 극대화한 용접법이지만, 두 열원을 결합한 용접법이기에 때문에 레이저의 변수와 아크의 변수를 모두 고려해야하며, 각각의 변수들을 조합하여 하나의 프로세스로써 적용하는 것이 어렵기 때문에 지속적인 연구가 필요하다⁷⁾.

따라서 본 연구에서는 하이브리드 용접의 변수중 보호가스의 유량 및 레이저-아크간 거리를 변화시켜 비드 용접을 실시하였으며, 각 변수에 따른 용접특성을 파악하고 실제 맞대기 용접시 적용할 최적의 용접조건을 도출하고자 하였다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1 실험 재료

실험에서 사용한 재료는 두께 8mm의 일반구조용 압연강재인 SS400과 두께 10mm의 조선용 강판인 AH36이다. SS400은 가공성 및 경제성 등으로 인하여 주요부품을 제외하고 보조 부재로 널리 사용되고 있으며, 특히 용접성이 좋기 때문에 하이브리드 용접시 재료와 열원 사이의 상호작용에 대해 알아보기 위해 사용하였다. 용접 와이어는 연강 및 50kg급 고장력강용인 직경 1.2mm의 SM-70을 사용하였다. Table 1에 모재와 와이어의 화학적 조성을 나타낸다.

2.2 실험 방법

용접 열원으로는 최대출력 6.6kW의 CW 디스크 레이저와 필스 모드의 MIG를 사용하였다. 광학계의 초점 길이는 223mm이며, 비초점 거리(f_0)는 -3mm로 설정하였다. 용융지는 아크 토치를 통해 80% Ar+20% CO₂의 혼합가스를 사용하여 보호 되었으며, 이면은 99.8%의 Ar 가스를 사용하여 대기로부터 차폐되었다.

Table 1 Chemical composition of materials

Element(Wt %)	C	Si	Mn	P	S	Mo	Cr	Ni
Materials								
SS400	0.14	0.23	0.7	0.015	0.005	-	-	-
AH36	0.15	0.39	1.5	0.02	0.003	0.08	0.03	0.01
SM-70 (Φ 1.2mm)	0.08	0.5	1.05	0.014	0.01	-	-	-

전면 및 이면 보호가스의 유량을 각각 변화시켜 산화가 일어나지 않고 건전한 비드가 형성된 조건을 도출하였다. 사전 실험을 통해 도출된 실제 사용하고자 하는 용접 전류 및 속도 그리고 최적의 보호가스 조건에서 레이저-아크 간 거리(D_{LA})를 변화시켜 실험을 실시하였으며, 용입깊이 및 비드안정성을 평가함으로써 최적의 D_{LA} 를 선정하고자 하였다. 모든 실험은 아크 선행으로 진행되었다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 보호가스 유량의 변화

3.1.1 전면 보호가스 유량의 변화

용접은 기본적으로 금속을 국부적으로 용융시켜 접합하는 프로세스로, 고온에서 액상으로 존재하는 용융금속은 주위의 대기 중 활성기체와 반응하기 쉽다. 따라서 실드 가스는 대기 중의 반응하기 쉬운 기체들과 용융 금속간의 차폐를 목적으로 주로 사용된다.

보호가스 유량(Q_{gs}) 변화에 따른 비드의외관 및 횡단면을 Fig. 1에 나타낸다. 보호가스를 사용하지 않았을 때의 비드의외관을 보면, 비드가 불균일하고 주위에 많은 스패터가 부착된 것을 확인할 수 있다. 이는 산화반응으로 인해 용융금속의 점도가 낮아진 상태에서 레이저에 의한 증발 압력 및 아크 압력에 의해 용융금속이 격렬히 비산하면서 스패터가 발생하고, 이로 인해 아크가 불안정해져 불균일한 비드가 형성된 것으로 판단된다. 또한 용융지가 대기과 완전하게 차폐되지 못해 대기 중 기체가 용융금속 내로 용해된 후 금속의 응고시 가스를 점차 방출하기 때문에 용접부 내부에 기공이 형성되었다. 보호가스 유량이 점차 증가함에 따라 용접부 내부에 기공이 존재하지 않고, 비드가 점점 미려해지는 것을 확인할 수 있었다. 25 l/min의 유량에서는 과도하게 높은 보호가스의 압력으로 인해 용융지가 직접적으로 영향을 받아 불균일한 비드가 형성되었다.

Fig. 2는 보호가스 유량에 따른 용입특성을 나타낸

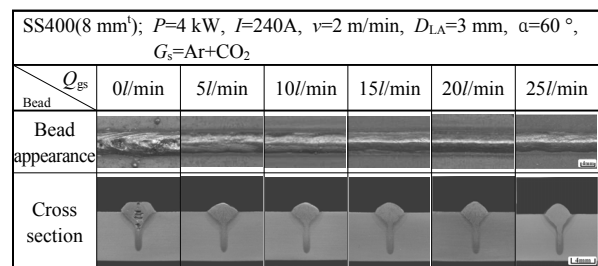


Fig. 1 Bead appearance and cross section with flow rate of front shield gas(Q_{gs})

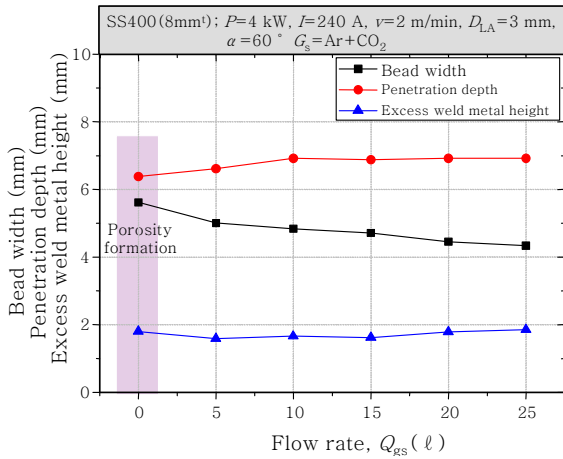


Fig. 2 Variation of penetration characteristic with flow rate of front shield gas(Q_{gs})

것으로, 0 l/min일 때에는 레이저에 의해 형성된 강력한 플라즈마로 인해 레이저 빔의 흡수율이 떨어져 다른 조건에 비해 용입 깊이가 얕았으며, 형성된 플라즈마의 복사열에 의해 비드폭은 넓었다. 보호가스 유량이 5~10 l/min으로 증가함에 따라, 플라즈마의 형성이 억제되어 비드폭은 감소하였으며, 레이저빔의 흡수율이 증대되기 때문에 용입 깊이는 증가하는 경향을 나타냈다. 10~20 l/min의 경우에는 비드폭이 지속적으로 감소하는 반면 용입깊이는 큰 변화가 없었다.

따라서 비드 안정성 및 용입특성을 고려했을 때 최적의 보호가스 유량은 20 l/min으로 판단된다.

3.1.2 이면 보호가스 유량의 변화

맞대기 용접시에는 관통용접을 목적으로 하기 때문에 이면 용융금속의 산화를 방지하기 위해 불활성 가스를 사용하여 대기로부터 차폐할 필요가 있다. 이면 비드를 실드하기 위해 지그 아래쪽에 노즐을 설치하여 불활성 가스를 공급하였으며, 가스의 와류 및 용액에 영향을 미치는 것을 방지하기 위해 반대쪽을 개방하여 가스가 고착되지 않고 흐를 수 있도록 하였다.

Fig. 3은 이면 보호가스 유량(Q_{gsb}) 변화에 따른 비드외관 및 횡단면을 나타낸 것으로, 0 ~ 5 l/min에서는 보호가스 유량의 부족으로 인해 이면비드의 산화가 발생하였다. 10 l/min이상의 조건에서는 이면비드의 산화는 발생하지 않았지만, 10 l/min의 경우 이면비드가 균일하지 못했고, 20 ~ 25 l/min의 경우에는 험핑비드가 형성되었으며, 25 l/min의 경우 더욱 심한 험핑비드가 발생하였다. 유량 20 l/min이상 사용시 험핑비드가 발생한 원인을 살펴보면, 이면 보호가스 유량이 증가함에 따라 이면 용융지의 주위 온도가 낮아져 용융금속의

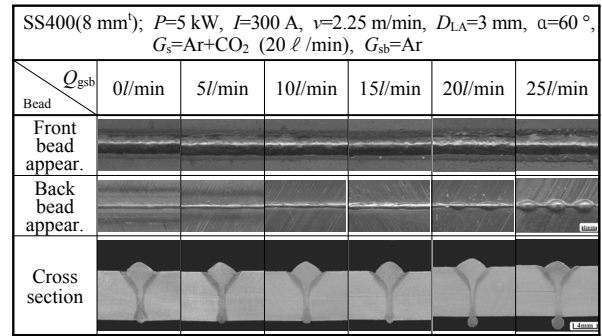


Fig. 3 Front and back bead appearance and cross section with flow rate of back shield gas(Q_{gsb})

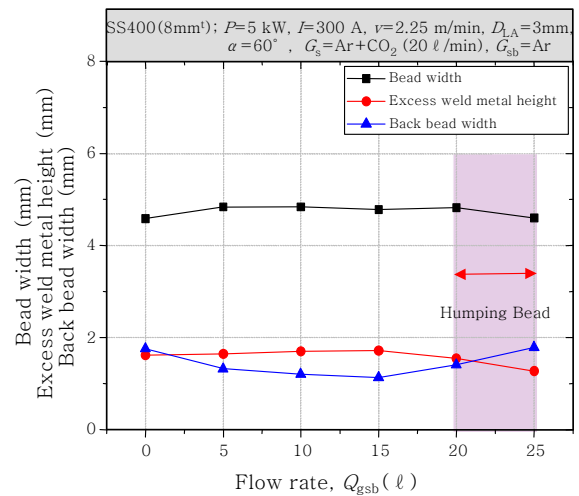


Fig. 4 Variation of penetration characteristic with flow rate of back shield gas(Q_{gsb})

표면장력이 증가하게 되고⁸⁾, 점성이 증가하기 때문에 용융금속이 뭉쳐 둥근형태의 험핑비드가 형성된 것으로 판단된다.

Fig. 4는 이면 보호가스 유량에 따른 용입 특성을 나타낸 것으로, 0 ~ 20 l/min의 유량에서는 비드폭의 변화는 크지 않았지만, 25 l/min의 유량을 사용한 경우에는 이면비드의 험핑으로 인해 상부 쪽의 용융금속 양이 부족하여 비드폭이 감소하였다. 동일한 이유로 이면에 험핑 비드가 형성된 20 l/min과 25 l/min의 조건에서 덧살 높이가 감소하였다. 0 l/min의 조건에서 이면 비드폭이 넓게 형성되었고 유량이 점점 증가함에 따라 이면 비드폭이 감소하는 경향을 나타내었는데, 이는 관통 용접시 전면뿐만 아니라 이면비드 방향으로도 강력한 플라즈마가 분출되기 때문이며, 0 l/min의 경우에는 플라즈마의 형성이 더욱 격렬하기 때문에 플라즈마의 복사열에 의해 비드폭이 넓어지며, 유량이 증가함에 따라 플라즈마 형성이 억제되어 이면 비드폭이 점점 감소하는 것으로 판단된다.

따라서 이와 같은 결과를 토대로 이면비드가 안정되고 결함이 없으며 산화가 발생하지 않는 $Q_{gsb} = 15 \text{ l/min}$ 이 최적의 이면 보호가스 유량으로 판단된다.

3.2 레이저-아크간 거리(D_{LA})의 변화

3.2.1 용접전류 변화시 D_{LA} 에 따른 용입특성

하이브리드 용접은 아크와 레이저가 피용접재에 동시에 작용하므로, 용접시 아크에 의해 용융된 부분에 레이저가 조사된다. Jinbo Wang 등은 레이저와 아크간 거리가 가까운 경우 레이저 에너지가 용적에 흡수되어 모재로 전달되는 에너지양이 감소하며, 너무 먼 경우에는 용융지의 고온부에 레이저가 조사되지 못해 깊은 용입을 얻지 못한다고 보고하였다⁹⁾. 또한 Matsuda¹⁰⁾ 및 Kutsuna¹¹⁾ 등은 아크에 의해 형성된 용융지의 가장 깊은 부분에 레이저가 조사되도록 D_{LA} 를 유지해야만 최대 용입 깊이를 얻을 수 있다고 보고하고 있다. 따라서 용융지의 형상에 영향을 미치는 전류를 변화시켜 D_{LA} 에 따른 용입특성을 검토하였다.

Fig. 5의 용입 깊이 변화를 보면, $v = 2 \text{ m/min}$ 의 조건에서 240 A와 300 A를 사용하였을 때 모두 $D_{LA} = 0 \sim 1 \text{ mm}$ 의 조건에서 용입깊이가 얇은 것을 확인할 수 있는데, 이는 레이저-아크간 거리가 가까운 경우 용적에 레이저가 조사되어 모재로 전달되는 레이저 에너지의 양이 감소하기 때문으로 판단된다. 가장 깊은 용입은 240 A의 경우 2 mm, 300 A의 경우에는 4 mm에서 각각 나타났는데, 이는 본 실험에서 사용한 아크 토치의 각도가 60° 로 기울인 형태이기 때문에 Fig. 6에 나타난 바와 같이 전류가 증가함에 따라 아크력에 의해 용융지의 가장 깊은 부분이 레이저 조사점에서 멀어지게 되고, 이러한 이유로 전류가 증가할수록 가장 깊은 용입을 나타내는 D_{LA} 가 멀어지는 것으로 생각된다.

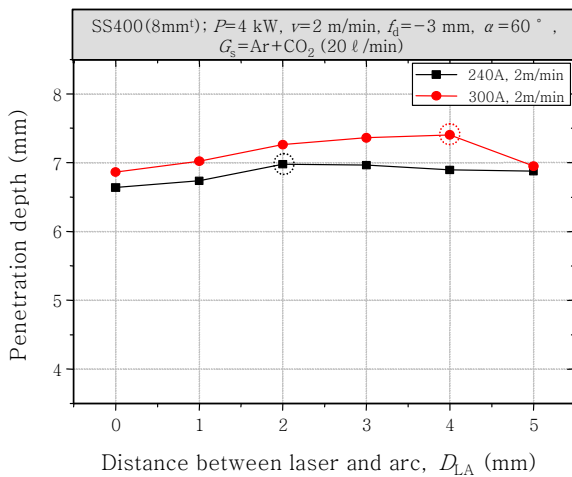


Fig. 5 Variation of penetration depth with D_{LA} ($v = 2 \text{ m/min}$)

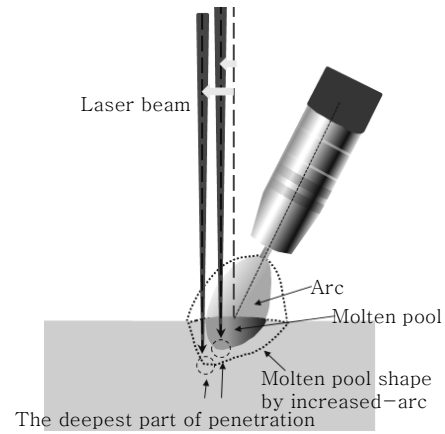


Fig. 6 Schematic illustration of molten pool and arc shape with current

이러한 결과를 통해 최적의 D_{LA} 는 살펴보면, 240 A의 경우 2 mm에서 가장 깊었지만 1 mm에서 용입의 감소폭이 크기 때문에 $D_{LA} = 3 \text{ mm}$ 가 적합하다고 판단되며, 300 A의 경우 용입은 4 mm에서 가장 깊었지만, 5 mm에서 급격한 용입 감소로 인해 $D_{LA} = 3 \text{ mm}$ 를 사용하는 것이 더욱 적합하다고 판단된다.

3.2.2 용접속도 변화시 D_{LA} 에 따른 용입특성

동일한 전류 240 A의 조건에서 속도를 2 m/min 과 3 m/min 으로 변화시켰을 때, D_{LA} 에 따른 용입깊이 변화를 Fig. 7에 나타낸다. 가장 깊은 용입은 $v = 2 \text{ m/min}$ 에서 $D_{LA} = 2 \text{ mm}$, $v = 3 \text{ m/min}$ 에서는 $D_{LA} = 3 \text{ mm}$ 에서 나타났으며, 이를 통해 동일한 전류조건에서 속도가 증가할수록 깊은 용입이 나타나는 D_{LA} 가 멀어지는 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 8과 같이 아크 선행시 용접 속도가 빨라짐에 따라 아크의 형상이 뒤쪽으로 처지게 되고, 이로 인해 아크에 의한 용융지의 가장 깊은 부분이 레이저 조사점에서 멀어지기 때문에 속도가 증

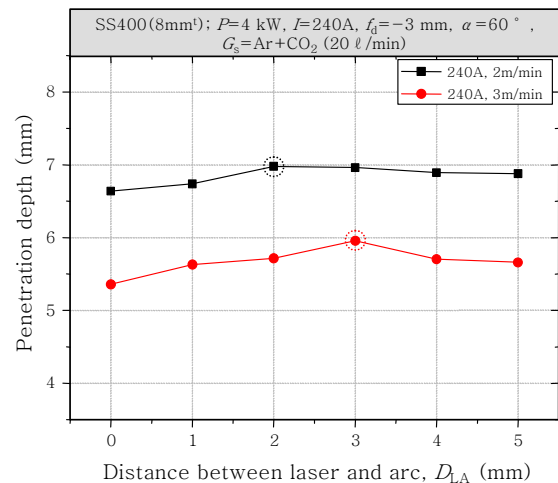


Fig. 7 Variation of penetration depth with D_{LA} ($I = 240 \text{ A}$)

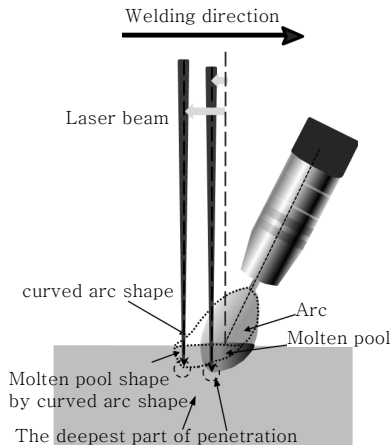


Fig. 8 Schematic illustration of molten pool and arc shape with speed

가할수록 D_{LA} 를 증가시켜야 가장 깊은 용입을 얻을 수 있는 것으로 생각된다.

실험을 통한 최적의 D_{LA} 는 240 A의 경우 2 mm에서 가장 깊은 용입을 나타내었지만 그래프에 보이는 바와 같이 1 mm에서 용입의 감소폭이 크기 때문에 임계값을 고려하여 D_{LA} 가 3 mm일 때가 가장 적합하다고 판단된다. 300 A의 경우 역시 4 mm에서 용입깊이가 가장 깊었지만 5 mm에서 급격한 용입감소를 보이기 때문에 3 mm가 더욱 적합하다고 판단된다.

3.2.3 AH36의 경우 D_{LA} 변화에 따른 용접특성

두께 10 mm의 AH36의 경우에는 두께의 증가로 인해 더욱 높은 입열이 필요하다고 판단되어 레이저 출력 5 kW, 용접전류 360 A의 조건에서 속도를 2 m/min, 2.5 m/min으로 변화시켰으며, 각속도에서 D_{LA} 변화에 따른 용입특성을 Fig. 9에 나타낸다. 0 ~ 1 mm의 경우 레이저가 용적에 직접 조사됨으로써 오히려 용입깊

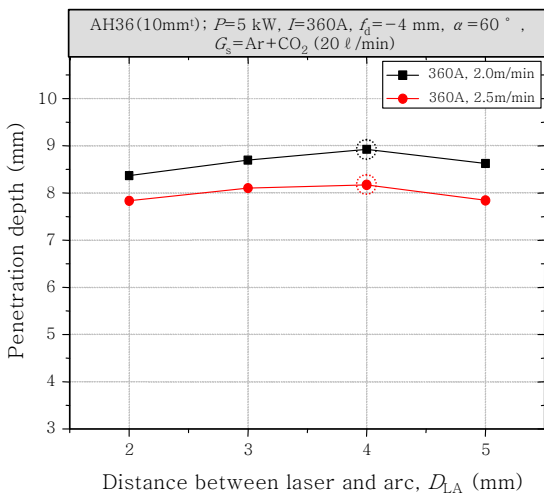


Fig. 9 Variation of penetration depth with D_{LA} in AH 36

AH36(10 mm); $P=5$ kW, $I=360$ A, $f_d=-4$ mm, $\alpha=60^\circ$, $G_s=Ar+CO_2$ (20 l/min),		
v	D_{LA}	Bead appearance
2.0 m/min	2 mm	
	3 mm	
	4 mm	
	5 mm	
2.5 m/min	2 mm	
	3 mm	
	4 mm	
	5 mm	

Fig. 10 Appearance of humping bead with D_{LA} in AH36

이 면에서 불리하다고 판단되어 2 ~ 5 mm를 변수로 두었다. $v = 2$ m/min과 2.5 m/min을 사용하였을 때 모두 D_{LA} 가 증가함에 따라 용입이 깊어지는 경향을 나타냈으며, $D_{LA} = 4$ mm에서 용입이 가장 깊었다.

Fig. 10은 비드 안정성을 나타낸 것으로, $v = 2$ m/min에서는 2 mm에서 험핑비드가 형성되었으며, $v = 2.5$ m/min에서는 2~3 mm의 조건에서 험핑비드가 형성되었다. 험핑비드가 형성되는 조건보다 D_{LA} 를 더욱 증가시켰을 때 비드가 점점 안정화 되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 험핑비드는 하이브리드 용접시 빠른 용접 속도로 인해 아크가 레이저 조사점 쪽으로 치우치게 되고, 이때 레이저에 의해 발생한 플라즈마의 높은 압력이 아크 플라즈마에 영향을 미치기 때문에 아크가 불안정해져 형성되는 것으로 사료된다. 이를 근거로 $v = 2.5$ m/min의 경우 $v = 2$ m/min보다 더욱 빠른 속도로 인해 아크의 치우침 현상이 더욱 커지게 되어 레이저에 의해 발생한 플라즈마의 압력에 영향을 받기 쉽기 때문에 $v = 2$ m/min의 경우보다 더욱 D_{LA} 를 멀리하여야 안정되고 미려한 비드가 형성되는 것을 확인할 수 있다.

따라서 $I = 360$ A, $v = 2.5$ m/min 이상의 전류 및 속도 사용시에는 D_{LA} 를 4 mm이상으로 설정하여야 최대 용입 깊이뿐만 아니라 미려한 비드를 얻을 수 있는 것으로 판단된다.

4. 결 론

레이저 아크 하이브리드 용접을 이용한 보호가스 유

량 및 레이저-아크간 거리에 따른 용접성을 평가한 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

1) SS400에 대해 전면 보호가스 유량을 변화시킨 결과, 유량이 부족할 경우 용접부 내에 기공이 발생하고 비드외관에 많은 스패터가 부착된 것을 확인할 수 있었으며, 유량이 과도하게 많을 경우에는 비드가 불균일하게 형성되었다. 20 l/min의 유량을 사용한 경우 용접부 내에 결함이 존재하지 않고 균일한 비드가 형성되었다.

2) SS400에 대해 이면 보호가스 유량을 변화시킨 결과, 이면 보호가스 유량이 부족하거나 과도할 경우 각각 이면에 산화 및 험핑비드가 발생하였다. 15 l/min의 유량을 사용하였을 때 이면에 산화 및 험핑비드가 발생하지 않는 건전한 용접부가 형성되었다.

3) 가장 깊은 용입을 나타내는 D_{LA} 는 용융지의 형상에 영향을 미치는 용접 전류 및 속도에 따라 변화하였으며, $D_{LA}=3$ mm에서 용입이 깊고 안정적인 용접부가 형성되었다.

4) AH36에 대해 360 A의 전류를 사용하여 D_{LA} 를 변화시킨 결과, D_{LA} 가 가까울 경우 전면 비드에 험핑이 발생하였으며, 속도가 빠를 경우 험핑이 발생하는 D_{LA} 구간이 더욱 넓게 나타났다. 험핑이 발생하는 조건보다 D_{LA} 를 더욱 증가하였을 때 험핑이 억제되는 것을 확인하였다.

References

1. Ming Gao, Xiaoyan Zeng and Qianwu Hu : Effect of gas shielding parameters on weld penetration of CO₂ laser-TIG hybrid welding, *Journal of Materials Processing Technology*, 184(1-3) (2007), 177-183
2. S. Tetsuo, M. Yasuo, K. Taizo, U. Tomoyuki and U. Yuji : Research on laser arc hybrid welding of HT780 Steel, *Journal of the Japan Welding Society*, 29(4) (2011), 248-257 (in Japanese)
3. G. Campana, A. Fortunato, A. Ascari, G. Tani and L. Tomesani : The influence of arc transfer mode in hybrid laser-MIG welding, *Journal of Material Processing Technology*, 191 (2007), 111-113
4. Cheol-Hee Kim, Hyun-Byung Chae, Jun-Ki Kim and Jeong-Han Kim : Welding Phenomena in Laser-GMA Hybrid Welding Process with and without Arc Rotation, *Journal of KWS*, 24(3) (2006), 15-21 (in Korean)
5. Liu Zhongjie : CO₂ laser-MAG hybrid welding of 590MPa high strength steel, *Journal of The Japan Welding Society*, 24(1) (2006), 17-25 (in Japanese)
6. Ming Gao, Shuwen Mei and Zemin Wang : Process and joint characterizations of laser-MIG hybrid welding of AZ31 magnesium alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, 1338-1346 (2012)
7. J. Tusek and M. Suban : Hybrid welding with arc and laser beam, *Sci. Technol. Weld. Joining*, 308-311 (1999)
8. Liming Liu, Minghua Chen : Effect of electric arc on laser keyhole behavior based on direct observation during low power pulsed laser-arc hybrid welding process, *Optics and Lasers in Engineering*, 51 (2013), 1153-1160
9. Jing-bo Wnag and Hitoshi Nishimura : Study of improvement of gap tolerance in laser-MIG arc hybrid welding of aluminium alloy, *Journal of Light Metal Welding*, 46(10) (2009), 447-458
10. J. Matsuda, A. Utsumi and M. Hamasaki : TIG or MIG arc augmented laser welding of thick mild steel plate, *Joining and Materials*, 1, No. 1(1988), 31-34
11. M. Kutsuna and L. Chen : Interaction of both plasmas in CO₂ laser-MAG hybrid welding of carbon steel, *Proceeding of SPIE*, 4831(2003), 357-362