

플라즈마 아크 오비탈 용접의 경사상진자세에서 이면비드 형성에 관한 연구

김효원* · 조상명**†

*부경대학교 대학원 소재프로세스공학과

**부경대학교 신소재공학부 소재프로세스공학전공

A Study on Back Bead Formation in Inclined-up Position of Plasma Arc Orbital Welding

Hyo-Won Kim* and Sang-Myung Cho**†

*Dept. of Materials Processing Eng., Graduate School, Pukyong National Univ., Busan 608-739, Korea

**Div. of Advanced Materials Sci. and Eng., Dept. of Materials Processing Eng., Pukyong National Univ., Busan 608-739, Korea

†Corresponding author : pnwcho@pknu.ac.kr

(Received October 31, 2008 ; Revised December 28, 2008 ; Accepted February 5, 2009)

Abstract

In the circumferential welding of pipe, welding phenomenon changes with the position of pipe. Especially in the overhead position, back bead of vertical-up position would be sunk. To investigate the size of back bead and keyhole with the change of the flow rate of pilot and shield gas at each position, bead-on plate welds were conducted on 6mm thickness SS400 with inclined-up position. When the rest of welding conditions remained constant, the width of back bead was increased as the flow rate of pilot gas was increased. And back bead tended to convex as the flow rate of shield gas was increased.

Key Words : Plasma arc welding, Orbital welding, Keyhole welding, Inclined-up position, Overhead position, Convexity ratio, Back bead, Pilot gas flow rate, Shield gas flow rate

1. 서 론

선박이나 산업 플랜트의 고정 파이프 용접 시 안정적인 이면비드 형성은 매우 중요하다¹⁻³⁾. Fig. 1은 오비탈 용접에서 적용되는 구간 정의와 용접 자세를 나타낸다. 2~3mm의 박육 파이프는 안정적인 이면 비드가 형성되지만, 5mm 이상의 중·후육 파이프의 경우 P06:00 이후의 위보기 자세(Overhead position)에서 수직 상진 자세(Vertical-up position) 사이의 이면비드가 오목하게 되어 전 자세 용접이 어려운 실정이다. 파이프 용접 시 각 구간에 따라 용융 풀에 미치는 중력과 표면장력, 아크력 등의 방향이 변하기 때문이다¹⁻³⁾. 파이프의 각 구간별 힘의 방향은 Fig. 2에 나타나 있다.

J. K Martikainen 등은 플라즈마 키홀(Plasma keyhole)의 안정성이 용접부 품질에 매우 큰 영향을 미친다고 하였으며⁴⁾, Y. M. Zhang 등의 연구에서는 한 번 키홀이 형성되면 키홀 폭은 전류의 증가나 용접 속도의 감소에 따라 변화지 않는다고 밝혔다⁵⁾.

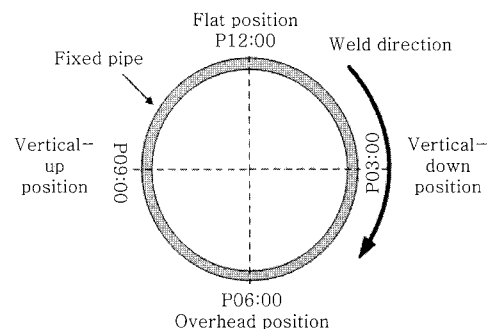


Fig. 1 Definition of section

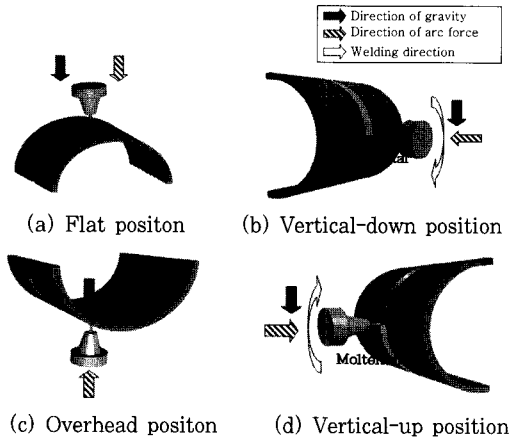


Fig. 2 Direction of forces at each position

선행 연구들은 아래보기 자세(Flat position)에 대해서만 수행 되었고, 전류와 용접속도, 파일럿 가스가 키홀에 미치는 영향에 대한 연구는 있으나 이면비드 블록 정도에 대한 연구는 보고 된 바가 없다⁴⁻⁷⁾. Fig. 3은 두께 7.1mm 고정 파이프의 I-Groove에 대한 플라즈마 키홀 용접 시 위보기 자세인 P06:00 이후의 구간에서 이면비드가 오목하게 되어 품질이 만족스럽지 못한 경우를 보여준다. 이와 같이 P06:00의 위보기 자세에서부터 경사 상진 자세를 거쳐 P09:00의 수직 상진 자세에 이르기까지의 구간에서 생기는 오목한 이면비드로 인해 루트페이스의 용접 전류를 높이지 못하므로 생산성 향상의 제약이 따르게 된다.

본 연구에서는 전 자세 용접이 가능하도록 하기 위해 P06:00~P09:00에서 실험을 수행하여 이면비드 폭과 키홀의 크기를 관찰 하였으며 이면비드 블록 정도에 영향을 미치는 인자를 탐색하였다.

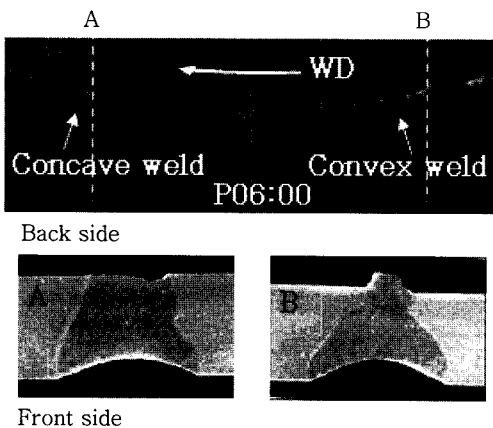


Fig. 3 Back bead shape of orbital welds around P06:00 (t7.1, I-Groove)

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 사용재료

본 연구에서는 폭 40mm, 길이 120mm, 두께 6mm의 SS400을 사용하였고, PAW(Plasma Arc Welding)을 이용해 키홀(Keyhole) 용접을 실시하였다.

2.2 실험방법

Fig. 4는 용접 모식도로써 P06:00에서 P09:00까지를 5등분하여 각 위치에서 판 위에 키홀 용접을 실시하는 것을 나타낸다. 시편을 턴테이블에 고정시키고 플라즈마 토치를 용접용 로봇에 장착하여 용접속도 10cpm으로 움직여 키홀 용접을 수행하였으며 용접부 길이는 100mm이다. 파일럿 가스(Pilot gas, PG)와 실드 가스(Shield gas, SG)는 Ar을 사용하였다.

2.2.1 파일럿 가스와 실드 가스 유량 변경 실험

Table 1은 PG(Pilot Gas)와 SG(Shield Gas) 유량 변경 실험 조건을 나타낸 것이다. Exp. 1은 PG 유량 변경 실험, Exp. 2는 SG 유량 변경 실험이다.

2.2.2 용접 비드 형상 인자의 측정 방법

용접 비드 형상 인자는 표면과 이면비드 폭, 표면과 이면키홀 직경, 이면비드 블록 정도이다.

Fig. 5는 표면(Front side)과 이면(Back side)에서의 비드와 키홀의 측정 인자를 정의한 것이다.

WB_F 와 DK_F 는 표면에서의 비드 폭과 키홀 직경을, WB_B 와 DK_B 는 이면에서의 비드 폭과 키홀 직경을 각각 나타낸다. 버니어 캘리퍼스를 사용하여 WB_F , WB_B , DK_F , DK_B 를 측정하였다.

이면비드 블록 정도는 용접 시작부에서 48mm 이후

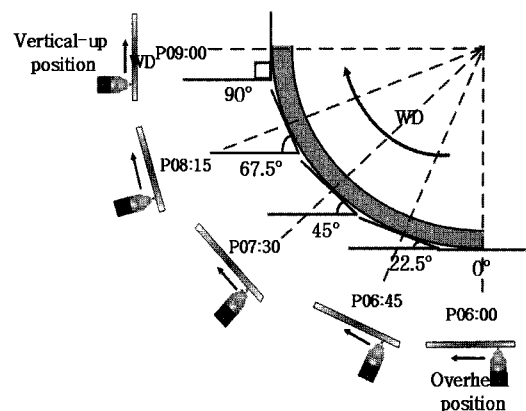


Fig. 4 Schematic diagram of experimental setup

Table 1 Experimental conditions

Fixed	Power source	PAW Machine (Powwel-150XP)
	Welding mode	Keyhole(BOP)
	Material	SS400, t 6
	Welding current	I_p : 140 A I_b : 80 A
	Frequency	2 Hz
	Welding speed	10 cpm
	Set back	2.5 mm
	Stand off	3 mm
	Orifice insert dia.	ϕ 2.4
Exp. 1	Pilot gas flow rate	1.1, 1.3, 1.5, 1.7, 1.9 l/min
	Shield gas flow rate	12 l/min
Exp. 2	Pilot gas flow rate	1.7 l/min
	Shield gas flow rate	12, 15, 18 l/min

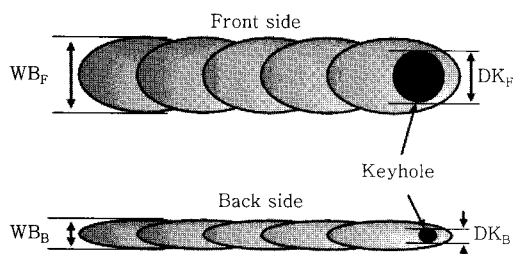


Fig. 5 Geometric parameters of bead and keyhole

부터 9mm 간격으로 5곳을 뺏족한 프로브를 가진 하이 트 게이지를 사용하여 측정하였다. 용접속도 10cpm, 주파수 2Hz이므로 리플(Ripple) 간격은 약 0.835mm이다. Ripple 간격의 정수배가 되지 않도록 9mm 간격으로 이면비드 볼록 정도를 측정하였다. Fig. 6과 7에서 보는 바와 같이 비드 toe부에서 3mm 떨어진 곳에서 P_1 과 P_2 를 측정하여 평균한 값이 기준높이이고, 비드 폭을 4등분하여 B_1, B_2, B_3 을 측정한 후 평균한 값이 이면비드 높이이다. 비드의 형상을 고려하여 B_2 값에 가중치를 주기 위해 2를 곱하여 계산하였다. 후자에서 전자를 뺀 값이 이면비드 볼록 정도이고 각각의 식은 다음과 같다.

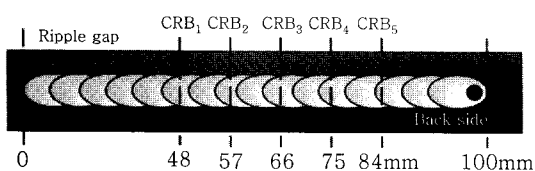


Fig. 6 Schematic of measurement interval for CRB

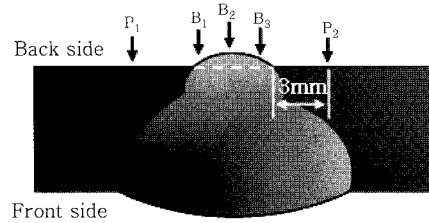


Fig. 7 Schematic of measurement point for CRB

기준 높이(Parent metal Height),

$$H_P = (P_1 + P_2)/2 \quad (1)$$

이면비드 높이(Back bead Height),

$$H_B = (B_1 + 2B_2 + B_3)/4 \quad (2)$$

이면비드 볼록 정도(Convexity ratio of back bead),

$$CRB = H_B - H_P \quad (3)$$

측정하여 계산된 CRB 5점의 평균은 CRB_{aver} 이고, 5점 중의 최소값을 CRB_{min} 이라 정의한다.

평균 이면비드 볼록 정도(Average Convexity ratio of back bead),

$$CRB_{aver} = (CRB_1 + CRB_2 + CRB_3 + CRB_4 + CRB_5)/5 \quad (4)$$

최소 이면비드 볼록 정도(Minimum Convexity ratio of back bead),

$$CRB_{min} = Min(CRB_1 : CRB_5) \quad (5)$$

2.2.3 상관계수 검정

상관계수는 두 변수 사이의 긴밀성의 정도를 표시하는 척도로써 널리 사용되고 있다¹⁵⁾. 두 변수가 서로 관련이 있는지 정량적으로 알아보기 위해 상관분석을 하여 상관계수(Correlation coefficient, R)를 구하였다. 또한 두 변수 사이의 모상관계수 ρ 가 0인지를 유의수준 $\alpha=0.05$ 에서 상관계수 검정을 하였으며 S/W는 Minitab 15를 사용하였다. Table 2는 상관계수에 따른 통계학적 의미를 나타낸다.

Table 2 Guidelines for the interpretation of a correlation coefficient¹⁶⁾

Correlation	Negative	Positive
Small	-0.3 to -0.1	0.1 to 0.3
Medium	-0.5 to -0.3	0.3 to 0.5
Large	-1.0 to -0.5	0.5 to 1.0

3. 실험결과 및 고찰

3.1 파일럿 가스 유량 변경 실험 결과

3.1.1 이면에서의 키홀 관찰

Fig. 8은 P07:30의 경사각에서 이면 키홀과 용융금속의 거동을 카메라로 촬영한 것이다. (a)는 적절한 용접 조건일 때의 이면 키홀의 모습을 나타내고, (b)는 부적절한 용접조건일 때의 이면 키홀의 모습을 나타낸다. 전류 또는 PG 유량이 너무 크거나 용접속도가 너무 느릴 때 (b)와 같이 용융금속이 과도하게 형성되었다가 용락이 발생하게 된다.

3.1.2 표면과 이면비드의 폭 및 키홀의 직경

PG 유량에 따른 비드 폭 WB_F 와 WB_B 는 각각 Fig. 9와 10에 나타나 있다. Table 3에서 보는 바와 같이 PG 유량과 WB_F 의 상관계수는 0.231로 약한 양의 상관관계를 가지고 있으며 P-value가 0.05 보다 크므로 귀무가설을 기각하지 못한다. 즉 'PG 유량과 WB_F 사이

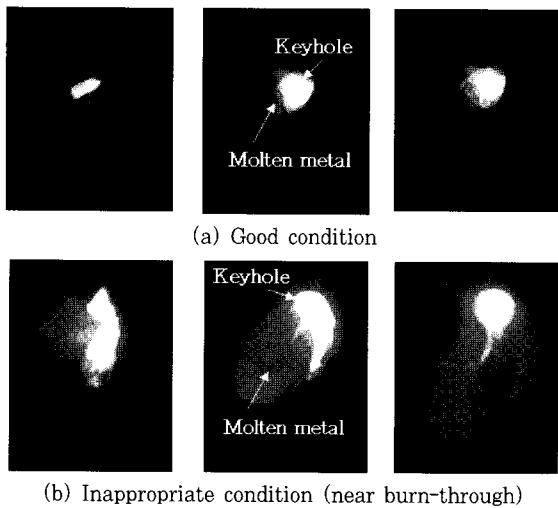


Fig. 8 Back side view of keyhole and weld pool

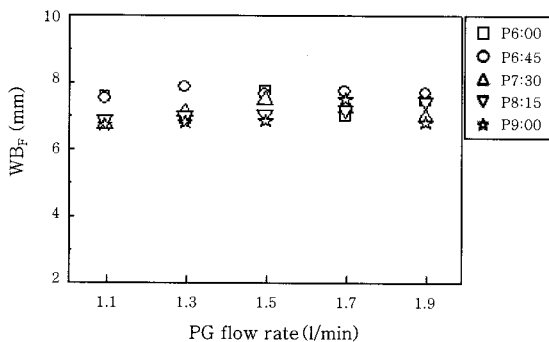


Fig. 9 Relationship between PG flow rate and WB_F at each position

에는 선형관계가 있다.' 라고 결론 내릴 수 없다. 반면 WB_B 의 경우 모든 경사면에서 PG 유량이 증가할수록 넓어지는 경향이 나타났다. 상관계수가 0.789로 강한 양의 상관관계를 가지고, P-value가 0.05 보다 작기 때문에 PG 유량이 증가하면 WB_B 도 증가한다고 할 수 있다.

Fig. 11, 12와 Table 3에서 보는 바와 같이 키홀 직경의 경우, 강한 양의 상관관계를 가지고 있다. Fig. 13은 모든 경사면에서 DK_B 와 WB_B 가 비례하는 경향을 나타낸다. 따라서 WB_B 를 통해 용접 중의 DK_B 를 짐작할 수 있을 것이라 생각된다.

Y. M. Zhang 등에 의해 수행된 아래보기 자세의

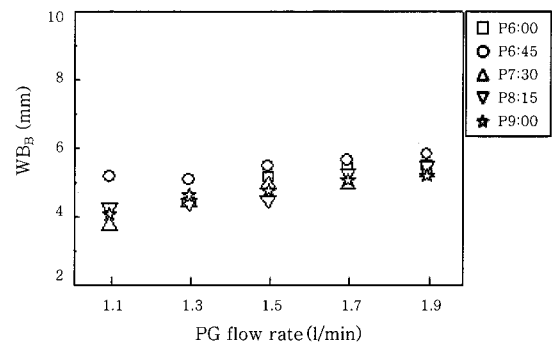


Fig. 10 Relationship between PG flow rate and WB_B at each position

Table 3 Correlation coefficient and P-value(Exp. 1)

X	Y	R	P-value
PG flow rate	WB_F	0.231	0.268
PG flow rate	WB_B	0.789	0.000
PG flow rate	DK_F	0.596	0.002
PG flow rate	DK_B	0.559	0.004
DK_B	WB_B	0.812	0.000
PG flow rate	CRB_{aver}	0.152	0.470

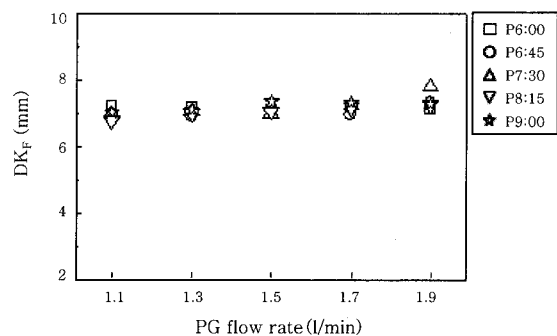


Fig. 11 Relationship between PG flow rate and DK_F at each position

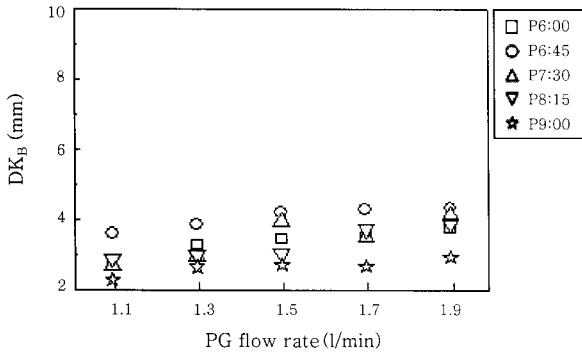


Fig. 12 Relationship between PG flow rate and DK_B at each position

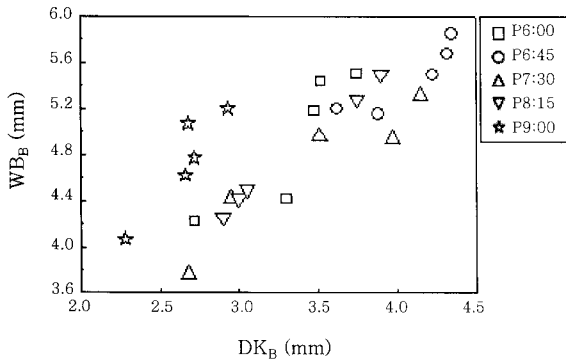


Fig. 13 Relationship between DK_B and WB_B at each position

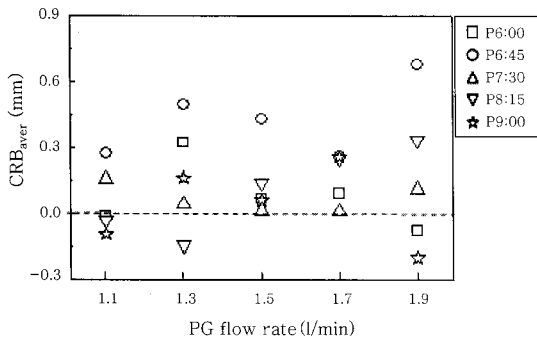


Fig. 14 Relationship between PG flow rate and CRB_{aver} at each position

두께 3mm STS 304 BOP 실험에서도 PG 유량이 증가할수록 DK_B 가 증가하였다⁵⁾. PG 유량 외에도 DK_B 에 용접 전류, 용접 속도, 수축 노즐 직경 등이 영향을 미친다⁸⁾.

Fig. 14는 각 경사면에서의 PG 유량 변경에 따른 CRB_{aver} 를 보여준다. PG 유량과 CRB_{aver} 는 상관계수가 0.152로 상관성을 나타내지 않았다. 따라서 안정적인 키홀이 형성되었을 때 PG 유량이 증가할수록 WB_B 는 증가하지만, CRB_{aver} 에는 영향을 미치지 않는다고 할 수 있다.

3.2 실드 가스 유량 변경 실험 결과

3.2.1 실드 가스 유량이 이면비드 블록 정도에 미치는 영향

이면비드 폭이 좁으면 용접선 추적(Seam tracking) 정밀도가 높아야 한다. 특히, 파이프 용접 시 이면비드를 관찰할 수 없는 경우에는 이면비드가 어느 정도는 형성되어야 바람직하다. 따라서 모든 경사면에서 WB_B 가 5mm 이상 나오는 PG 1.7 l/min 조건에서 SG 유량 변경 실험을 실시하였다.

Fig. 15는 SG 유량에 따른 평균 이면비드 블록 정도를 나타낸 것이고, Fig. 16은 최소 이면비드 블록 정도를 나타낸 것이다.

모든 경사면에서 SG 유량이 증가할수록 이면비드 블록 정도가 증가하였고, Table 4에서 보는 바와 같이 실드 가스 유량과 이면비드 블록 정도 사이에는 강한 양의 상관관계를 가짐을 알 수 있다. 또한 P-value가

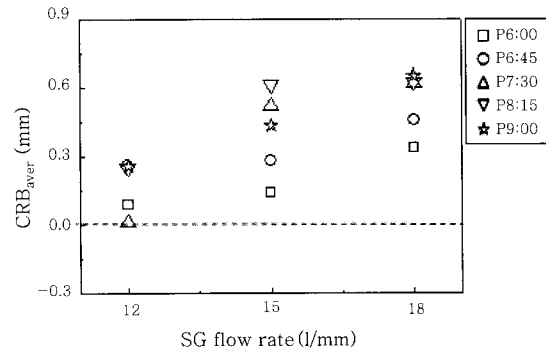


Fig. 15 Relationship between SG flow rate and CRB_{aver} at each position

Table 4 Correlation coefficient and P-value (Exp. 2)

X	Y	R	P-value
SG flow rate	CRB_{aver}	0.739	0.002
SG flow rate	CRB_{min}	0.764	0.001

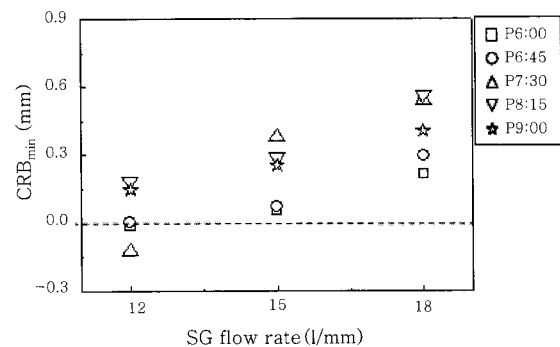


Fig. 16 Relationship between SG flow rate and CRB_{min} at each position

0.05 보다 작으므로 귀무가설을 기각할 수 있다. 즉 'SG 유량과 CRB_{aver}사이, SG 유량과 CRB_{min}에는 선형관계가 있다.' 라고 결론 내릴 수 있다.

Fig. 17을 보면 SG 유량이 12 l/min일 때는 오목 이면비드가 존재 하였으나 15 l/min 이상에서는 볼록 이면비드만 형성되었다. 특히, Fig. 18의 단면 사진을 보면 P07:30의 경사각 실험의 12 l/min에서는 오목 비드가 형성되었음을 알 수 있으나 실드 가스 유량을 증가시킴에 따라 이면비드가 볼록해짐을 알 수 있다.

이와 유사한 경향으로 T. Anzai의 연구에 의하면 Backing gas의 압력이 증가할수록 이면비드가 오목해졌다¹²⁾. 즉, 액체상태의 용융금속이 가스 압력에 따라 볼록 또는 오목해질 수 있음을 알 수 있다.

실드 가스 유량이 증가할수록 이면비드가 볼록해지는 것은 유체의 운동량 방정식을 이용하여 설명할 수 있으며 Fig. 19는 운동량 방정식 설명을 위한 모식도이다.

유체의 운동량 방정식을 통해 고정된 판에 작용하는 분류 방향의 힘, F를 구하면 다음과 같다.

$$-F_1 = \rho Q(0 - V_0) \tag{6}$$

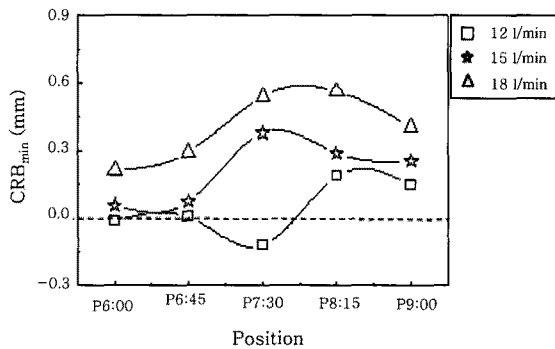


Fig. 17 Relationship between position and CRB_{min} at each SG flow rate

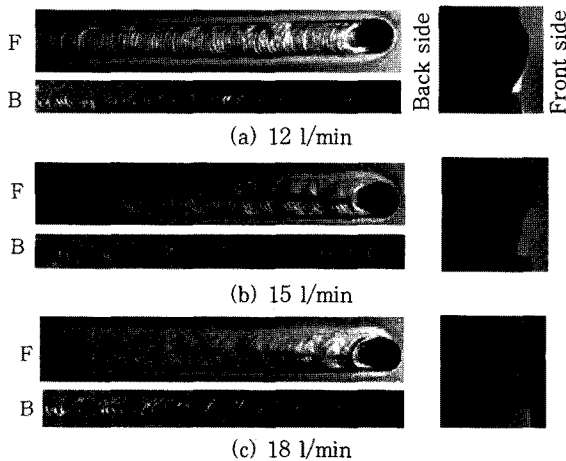


Fig. 18 Surface and back bead appearances(P7:30, PG 1.7 l/min)

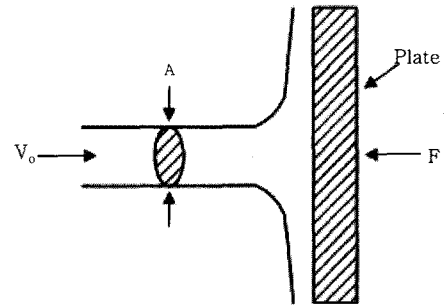


Fig. 19 Schematic of momentum equation

$$F_1 = \rho Q V_0 \tag{7}$$

$$V = \frac{Q}{A} \tag{8}$$

$$F = \frac{\rho}{A} \cdot Q^2 \tag{9}$$

여기서, Q는 유량(cm³/sec), V₀는 유속(cm/sec), ρ는 밀도(g/cm³)

Table 5는 가스 노즐 직경이 일정한 상태에서 실드 가스 유량이 12 l/min, 18 l/min 일 때 식 9를 통해 구한 힘 F를 나타낸다.

실드 가스 노즐에서 같은 거리에 위치한 용융금속이 실드 가스로부터 받는 힘 F는 18 l/min일 때 12 l/min에 비해 2.25배 증가하게 되어 용융금속이 이면 쪽으로 밀려 볼록한 이면비드를 형성하게 되는 것이다.

SG 유량이 18 l/min에서 P07:30, P08:15, P09:00의 경우 CRB_{aver}가 0.6mm 이상으로 모재 두께의 약 10% 이상의 이면비드가 형성되었다. Fig. 2 (d)에서 보는 바와 같이 중력의 방향은 아래로 향하는 반면, 아크력의 방향은 모재 쪽으로 향하고 있으며 힘의 방향과 용접 방향이 다르다. 따라서 용융금속이 중력의 영향으로 아래방향으로 처지게 되고 아크는 용융금속 위가 아닌 앞의 모재 위에서 발생하게 된다. 그로 인해 같은 용접 조건이라도 용입이 깊어져 CRB_{aver}가 크게 나온 것이라 생각된다. 적정 CRB_{aver}와 CRB_{min}이 얻어지는 SG 유량을 선택 후, P07:30~P09:00 구간에서 SG 유량을 순차적으로 조금씩 줄여 용접을 실시한다면

Table 5 Force by shield gas flow rate

	Shield gas flow rate	
	12 l/min	18 l/min
F	$\frac{\rho}{A} \cdot 200^2$	$\frac{\rho}{A} \cdot 300^2$

P06:00에서 P09:00의 전체에 걸쳐 안정적인 이면비드를 얻는 것이 가능하다.

J. K Martikainen는 플라즈마 키홀 용접에서 연강과 같은 구조용강은 오스테나이트 스테인리스 강과 티타늄보다 용융풀의 표면장력과 점성이 더 낮기 때문에 용융풀과 키홀의 안정적 제어가 어렵다고 하였으나⁶⁾ 본 연구에서는 파일럿 가스와 실드 가스 유량 등의 용접 변수를 적절히 제어함으로써 안정적인 이면비드를 가지는 용접부를 얻을 수 있었다. 또한 이면비드 블록 정도를 제어할 수 있기 때문에 고정 파이프 원주 용접 시 전 자세 용접이 가능할 것이라 판단된다.

3.2.2 표면비드에서의 언더컷 문제

모든 경사면에서 SG 유량이 증가할수록 이면비드가 블록해졌으나 언더컷이 다소 심해졌음을 Fig. 18의 단면 사진을 보고 알 수 있다. 언더컷이 심할 경우 다음 패스를 용착시켰을 때 융합 불량과 같은 용접 결함을 발생시킬 수 있다.

언더컷을 예방하기 위해 J. K Martikainen 등은 용가재(Filler wire)를 사용하였고⁴⁾, Z. Sun 등은 GTAW로 재 용융 시켰으며¹³⁾ I. T Kim의 경우 Ar-5%H₂를 실드가스로 사용하였다¹⁴⁾. 선행연구와 같은 조치를 취할 경우 본 연구에서 발생한 언더컷은 해결이 될 것이라 생각된다.

4. 결 론

두께 6mm의 SS400에 대한 플라즈마 용접에 의한 오비탈 용접의 경사상진자세에서 이면비드 형성에 관한 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 파일럿 가스 유량은 이면비드 블록 정도에는 그다지 영향을 미치지 않았지만, Y. M Zhang의 연구와 마찬가지로 파일럿 가스가 증가할수록 이면비드 폭과 키홀 직경은 넓어지는 경향이 나타났다. 용접선 추적에 대한 강건성을 높이기 위해서는 이면비드 폭을 다소 넓게 형성시켜야 하기 때문에 파이프 두께에 따라 파일럿 가스 유량을 어느 기준치 이상 설정하는 것이 바람직하다.

2) 고정 중·후육 파이프의 원주 용접 시, P06:00 이후의 위보기 자세와 수직 상진 자세 사이의 이면비드의 오목 현상은 실드 가스 유량을 증가시키면 실드 가스 유량에 비례하여 블록해지는 현상이 나타났다. 따라서 아래보기 자세와 비슷한 블록 정도를 가진 이면비드를 얻기 위해서 위보기 자세에서는 실드가스 유량을 증가시키고, 다른 자세에서는 그 중간의 적절한 값을 갖도록 제어한다면 전 구간에 걸쳐 균일한 이면비드의 형성이 가능할 것이라고 기대된다.

후 기

플라즈마 용접기를 쓸 수 있도록 협조 해준 (주)파워웰과 본 연구의 실험에 도움을 준 우리 연구실의 서지석군에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Ki-Joung Kim, Jin-Woo Kim, Youn-Bae Kang, Sang-Myung Cho : Heat transfer simulation and temperature measurement for heat input control in orbital welding, Journal of KWS, **21-1** (2003), 115-158 (in Korean)
2. Jin-Woo Kim, Sang-Myung Cho : The effect of the arc pressure variation on the penetration by the filler wire feed rate in pulsed TIG welding, Journal of KWS, **22-1** (2004), 169-171 (in Korean)
3. 김기정, 김진우, 강윤배, 조상명 : 스테인리스강과 연강 파이프의 자동 원주 GTA용접의 입열량 제어, 대한기계학회, 대한기계학회 기타 간행물 2002년도 기계관련 산학연 연합심포지엄 강연 및 논문 초록집, 2002. 11, 2881-2885 (in Korean)
4. J. K. Martikainen and T. J. I Moiso : Investigation of the effect of welding parameters on weld quality of plasma arc keyhole welding of structural steels, Welding Research Supplement, 1993, 329s-340s
5. Y. M. Zhang and S. B. Zhang : Observation of the keyhole during plasma arc welding, Welding Research Supplement, 1999, 53s-58s
6. J. K. Martikainen : Conditions for achieving high-quality in the plasma-arc keyhole welding of structural steels, Journal of Materials Processing Technology **52**, (1995), 68-75
7. Y. F. Hsu and B. Rubinsky : Two dimensional heat transfer study on the keyhole plasma arc welding process, Journal of Heat and Mass Transfer, **Vol. 31** (1988), 1409-1421
8. 대한용접학회편 : 용접·접합 편람, 대한용접학회, 1998, 545-546 (in Korean)
9. 김대주, 김경주, 백성호 : 루트갭과 단차에 의한 플라즈마 아크 용접성에 관한 연구, 대한용접학회 추계학술발표대회 개요집 제 45권, 2005. 11 (in Korean)
10. J. C. Metcalfe and M. B. C. Quigley : Keyhole stability in plasma arc welding, Welding Journal, 1975, 401s-404s
11. Welding handbook chapter 10, Plasma arc welding, 331-333
12. T. Anzai : Automatic TIG Welding for high purity stainless steel pipework, Welding International, **8-1**, (1994), 70-73
13. Z. Sun, M. Kuo, I. Annergren, D. Pan : Effect of dual torch technique on duplex stainless steel welds, Materials Science and Engineering A356, 2003, 274-282

14. In-Tae Kim : Development of middle-thick butt welding process by plasma-MAG tandem welding, Master dissertation in Pukyong graduate school, 2006, 36-39 (in Korean)
15. 이태택 : 새 Minitab 실무완성, 2005, 391-396 (in Korean)
16. Cohen, J. Statistical power analysis for the behavioral sciences (2nd ed.), 1988