



저작자표시-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士 學位論文

플라즈마 용접에 의한 오비탈 용접의
경사상진자세에서 이면비드 형성에 관한 연구



2009年 2月

釜慶大學校 大學院

소재프로세스공학과

金 孝 元

工學碩士 學位論文

플라즈마 용접에 의한 오비탈 용접의
경사상진자세에서 이면비드 형성에 관한 연구

指導教授 趙相明

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함



2009年 2月

釜慶大學校 大學院

소재프로세스공학과

金孝元

金孝元의 工學碩士 學位論文으로 認准함

2009年 2月



主 審 工學博士 徐 源 贊 (印)

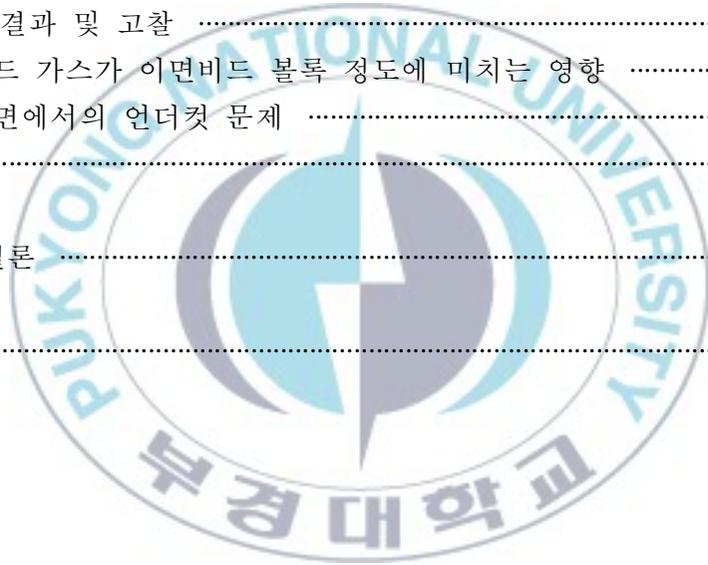
委 員 工學博士 李 秉 雨 (印)

委 員 工學博士 趙 相 明 (印)

목 차

Abstract	1
제 1 장 서론	2
1.1 연구배경 및 필요성	2
1.2 연구목적 및 개요	3
제 2 장 이론적 배경	4
2.1 플라즈마 아크 용접의 원리	4
2.1.1 플라즈마의 정의	4
2.1.2 플라즈마의 물성	5
2.1.3 플라즈마 아크 토치 명칭 및 역할	7
2.1.4 플라즈마 아크 발생 방식	9
2.1.5 플라즈마 용접의 방식	11
2.1.6 중요 공정 변수	13
2.1.7 TIG 용접과 플라즈마 용접의 비교	19
2.2 오비탈 용접의 원리	21
2.2.1 오비탈 용접의 정의	21
2.2.2 오비탈 용접의 위치 정의	22
2.2.3 오비탈 용접의 각 위치별 용접 특성	23
제 3 장 파일럿 가스 유량 변경 실험	27
3.1 서언	27
3.2 실험 재료 및 방법	27
3.2.1 실험 재료	27
3.2.2 실험 방법	28
3.2.3 용접 비드 형상 인자의 측정 방법	32
3.2.4 상관계수 검정	34
3.3 실험 결과 및 고찰	35
3.3.1 이면에서의 키홀 관찰	35

3.3.2 파일럿 가스가 표면과 이면비드의 폭에 미치는 영향	36
3.3.3 파일럿 가스가 표면과 이면키홀의 직경에 미치는 영향	40
3.3.4 파일럿 가스가 이면비드 블록 정도에 미치는 영향	42
3.4 결론	43
제 4 장 실드 가스 유량 변경 실험	44
4.1 서언	44
4.2 실험 재료 및 방법	44
4.2.1 실험 재료	44
4.2.2 실험 방법	45
4.3 실험 결과 및 고찰	46
4.3.1 실드 가스가 이면비드 블록 정도에 미치는 영향	46
4.3.2 표면에서의 언더컷 문제	52
4.4 결론	53
제 5 장 결론	54
참고문헌	55



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

Hyo-Won, Kim

*Department of Materials Processing Engineering, The Graduate School,
Pukyong National University*

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 other of welding conditions were 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

제 1장 서론

1.1 연구배경 및 필요성

선박이나 산업 플랜트의 파이프 용접 시 안정적인 이면비드 형성은 매우 중요하다¹⁻³⁾. 2~3mm의 박육 파이프는 안정적인 이면비드가 형성되지만, 5mm 이상의 중·후육 파이프의 경우 파이프를 시계라고 생각했을 때 P6:00 이후의 위보기자세(Overhead position)에서 수직상진자세(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⁾.

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

선행 연구들은 아래보기 자세(Flat position)에 대해서만 수행 되었고, 전류와 용접속도, 파일럿 가스가 키홀에 미치는 영향에 대한 연구는 있으나 이면비드 볼록 정도에 대한 연구는 보고 된 바가 없다^{4,7)}.

Fig. 1.1은 t7.1mm 고정 파이프 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 루트패스의 용접 전류를 높이지 못하여 생산성 향상의 제약이 따르게 된다.

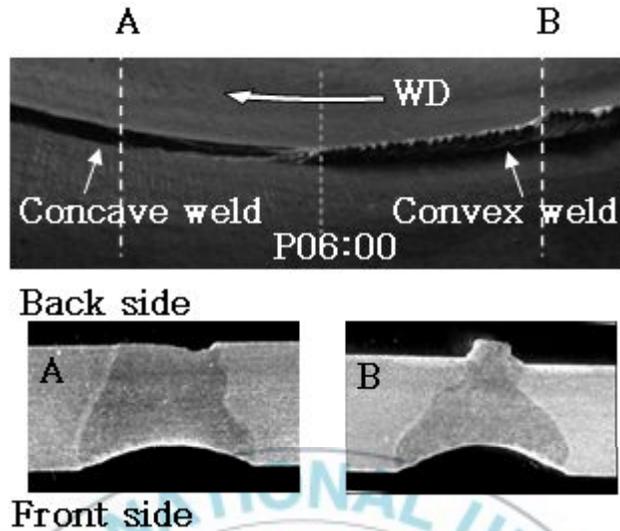


Fig. 1.1 Back bead shape of orbital welds around P06:00
(t 7.1mm, I-Groove)

1.2 연구목적 및 개요

본 연구의 목적은 플라즈마 용접에 의한 오비탈 용접의 경사상진자세에서 볼록한 이면비드를 형성하는 것이다.

전 자세 용접이 가능하도록 하기 위해 P06:00~P09:00에서 실험을 수행하여 이면비드 폭과 키홀의 크기를 관찰 하였으며 이면비드 볼록 정도에 영향을 미치는 인자를 탐색하였다. 이를 위하여 파일럿 가스 유량 변경 실험과 실드 가스 유량 변경 실험을 실시하였다.

제 2 장 이론적 배경

2.1 플라즈마 용접의 원리

2.1.1 플라즈마의 정의

온도를 증가시킴에 따라서 물질 상태는 고체에서 액체로, 또 액체에서 기체로 변한다. 이 기체에 계속 열을 가하여 수천℃가 되면 기체분자는 원자로 해리되고 또 다시 전자와 양전하를 가진 이온으로 전리된다. 이와 같이 고온에서 전자와 이온으로 분리된 기체로서 그 전리도가 낮은 중성 원자에 비해 상당히 높으면서도 전체적으로는 음과 양의 전하수가 거의 같아서 중성을 띠고 있는 기체를 플라즈마라 부른다.

Fig. 2.1과 같이 밀폐된 유리관 속에 두개의 금속판을 전극으로 사용하여 직류전류로 방전을 일으키면 내부에서 방전의 내부기압에 따라서 다르나 음극의 글로우와 양광주(positive column)의 플라즈마가 발생된다. 이들은 플라즈마 원으로 사용되며 또 네온사인 및 형광등의 원리이기도 하다. 이와 같은 방전은 크게 글로우 방전(glow discharge)과 아크 방전(arc discharge)으로 나뉘며 음극에서 전류 밀도가 높아 열전자 방출이 되는 아크방전이 지배적이냐 또는, 전류밀도는 별로 높지 않고 이온이 음극에 충돌하여 일어나는 2차 열전자 방출인 글로우 방전이 주된 것이냐는 방전 시 전자발생방법에 의해 결정된다.

글로우 방전은 대개 저기압(1Torr=1mmHg)에서 생기며 고르게 퍼진 빛을 내고 아크 방전은 고기압(1atm.=760mmHg)에서 가능하며 빛줄기를 보여준다. 아크 용접기와 플라즈마 제트는 아크 방전에 속한다.

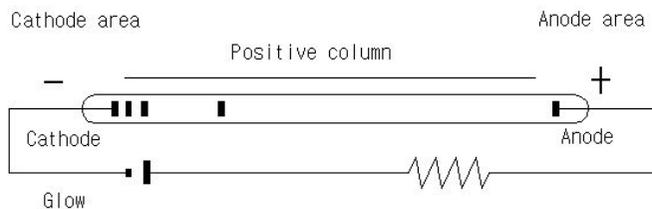


Fig. 2.1 Cathode discharge of plasma

2.1.2 플라즈마의 물성

플라즈마는 열적으로 매우 고온의 성질을 가지며, 따라서 전자, 이온, 여기된 원자 및 분자, 화학적으로 매우 활성이 강한 라디칼(radical)로 구성되어 전기적이나 열적으로 보통의 기체와는 매우 다른 성질을 갖는다.

1) 플라즈마의 전기적 성질

① 도전성

플라즈마는 원자나 분자 속에 속박되지 않은 전자를 많이 가지고 있기 때문에 외부에서 전기장을 가해주면 전류를 흘릴 수 있는 특성을 가지고 있다. 전기전도도는 고체와 달리 온도가 올라갈수록 증가하며(3T/2에 비례), 전자 온도가 약 천만℃일 때 구리의 전기전도도에 가까운 값을 갖는다.

② 자계 내에서 움직이는 플라즈마에 의한 전계발생

운동에너지를 전기에너지로 변환하는 것이 발전기이며 일반적인 발전기에서는 자계 중에서 도체가 움직일 때 생기는 기전력을 이용하고 도체가 플라즈마와 같은 도전성 유체인 경우에도 기전력을 얻을 수 있다.

③ 자계에 놓인 플라즈마 내의 전류에 의한 힘의 발생

전기 에너지를 운동에너지로 변환시키는 것이 전동기이며 플레밍의 왼손법칙에 의해 힘의 방향이 정해진다. 자계 중에 위치한 플라즈마 내에 전류가 흐르면 플라즈마가 움직이는 힘을 받게 되며 이를 이용하여 플라즈마는 초고온, 고압의 상태로 압축된다.

2) 플라즈마의 열적 성질

플라즈마는 내부에 전자나 이온의 활발한 열운동에너지, 원자나 분자의 여기에너지, 해리에너지, 전리에너지의 형태로 내부에너지를 축적할 수 있으며 온도가 높아질수록 내부에너지가 크게 증가하여 고온의 플라즈마는 유효한 열원이 될 수 있어 고온재료의 가공이나 분출을 통한 추진력을 얻는데 이용할 수 있다. 수소 플라즈마의 경우 십만 $^{\circ}\text{C}$ 정도의 온도인 경우 내부에너지 밀도가 $20\text{cal}/\text{cm}^3$, 압력은 100기압 정도에 해당하는 내부에너지를 갖는다.

3) 플라즈마의 화학적 성질

플라즈마내의 전자는 활발한 열운동을 통하여 기체분자나 분자를 여기, 해리, 전리시킬 수 있기 때문에 사용하는 기체의 종류에 따라 플라즈마 내에서나 플라즈마와 접하고 있는 고체표면상에서 화학반응을 일으킬 수 있으며 열적으로 비 평형 상태에서 일어날 수 있는 초고온 화학반응 이온이나 전자가 반응에 참가한다.

2.1.3 플라즈마 아크 토치 명칭 및 역할

Fig. 2.2는 플라즈마 아크 토치의 모식도와 명칭을 나타낸 것이다.

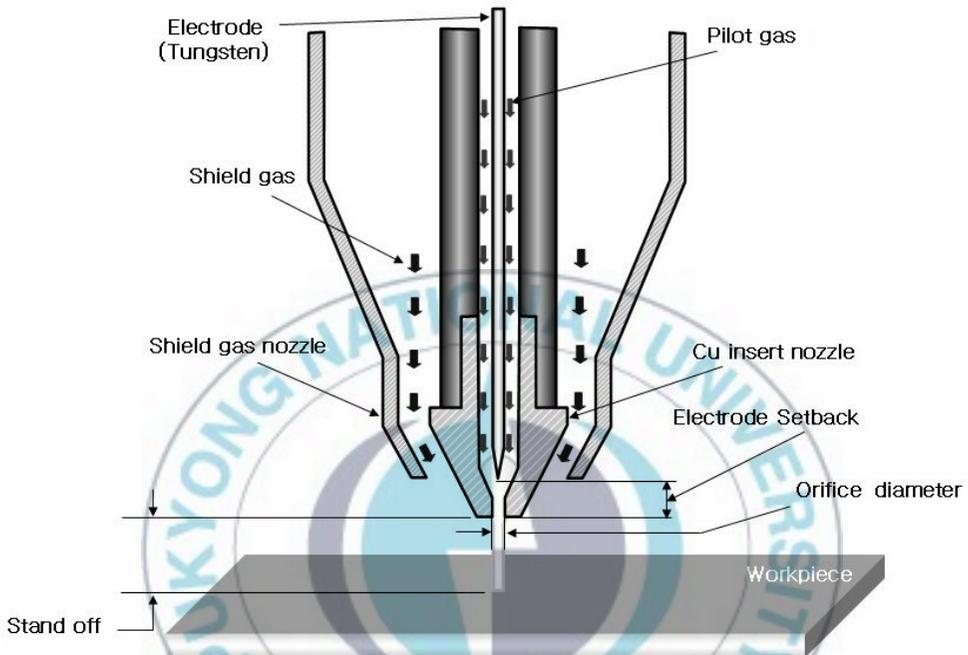


Fig. 2.2 Schematic diagram of Plasma arc torch

- 1) **Electrode** : 소재는 주로 토리아 텅스텐이 사용되며 모재의 종류에 따라 텅스텐의 종류는 다르게 사용된다.
- 2) **Cu insert nozzle** : 파일럿 가스가 흐르는 통로를 제공하며 전기전도성 및 열전도성이 우수한 구리를 사용하여 파일럿 아크 발생을 쉽게 하며 PAW시 아크열에 대한 냉각성능도 좋게 한다.
- 3) **Shield gas nozzle** : 실드 가스가 흐르는 통로를 제공하며 주로 세라믹이나 구리가 사용된다.
- 4) **Pilot gas** : 파일럿 아크를 일으키는데 사용되는 가스로 텅스텐 전극의 산화 방지를 위해 주로 Ar, Ar-H₂ 및 Ar-He등의 불활성 가스들이 사용된다.

5) **Shield gas** : 플라즈마 아크 발생에 사용되는 가스로 모재의 종류에 따라 여러 가지 가스들이 혼합되어 사용될 수 있다. 예로써 Ar, Ar-H₂, Ar-He, Ar-CO₂ 및 Ar-O₂등이 있다.

6) **Orifice diameter** : Cu insert 노즐에서 파일릿 아크가 분출되는 곳이며 적정 플라즈마 키홀 용접에서 이 직경이 너무 작게 되면 모재의 절단 현상 및 Cu insert 노즐의 손상이 초래될 수 있다. 반면에 너무 크게 하면 플라즈마 키홀 용접이 되지 못하고 용입부족(Lack of Penetration)이 생긴다. 따라서 플라즈마 키홀 용접 시 적정 오리피스 직경을 선택하는 것은 아주 중요하다.

7) **Electrode setback** : Cu insert 노즐 선단에서부터 전극 선단까지의 거리로 정의되며 throat length 내에 전극을 위치시켜 플라즈마 키홀 용접을 하면 전극의 손상이 빨라지며 플라즈마 아크의 수축 또한 덜 하므로 플라즈마 키홀 용접이 되지 않을 수 있다.

8) **Stand off** : 용접 전 모재 표면과 Cu insert 노즐 선단 사이의 거리이며 PAW시에는 아크 길이를 의미한다.



2.1.4 플라즈마 아크 발생 방식

1) 이행식(transferred)

Fig. 2.3(a)는 이행식을 나타낸 것으로서 그림에서 보는 바와 같이 전극과 모재 사이에 플라즈마 아크 전원이 접속되어 있다. 또한 전극과 Cu insert 노즐 사이에는 파일럿 아크 전원이 접속되어 있는데 이 회로에는 아크를 발생시키기 위한 고주파 발생기가 부설되어 있다.

플라즈마 아크 발생의 일반적 순서는 우선, 전극과 Cu insert 노즐 사이에 파일럿 가스를 보낸 다음 고주파 발생기를 작동시켜 전극과 Cu insert 노즐 사이에 고주파 아크를 날려 이 부분의 전기절연이 파괴됨으로써 이온화된 전류통로를 만든다. 이것으로 파일럿 아크는 파일럿 가스 중에서 지속적으로 흐르고 아크열에 의하여 플라즈마가 발생한다. 고주파 아크는 파일럿 아크가 흐르는 것을 확인하면 자동적으로 정지하도록 제어회로가 조립되어 있다.

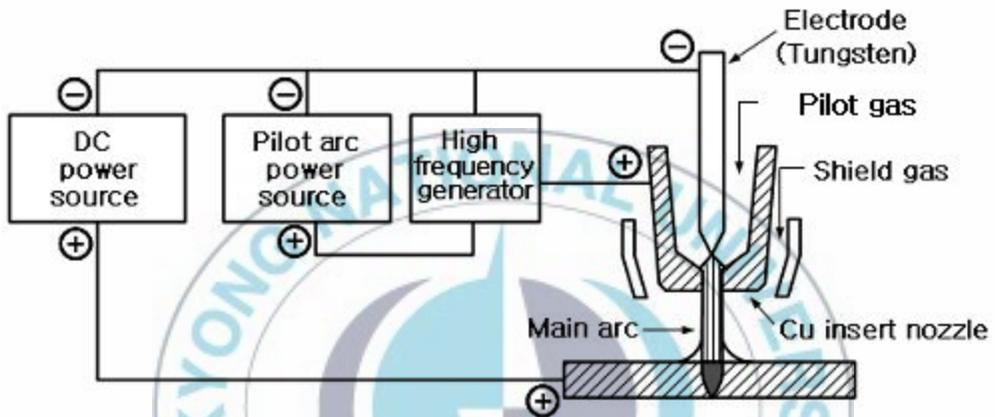
발생된 고온 플라즈마는 팽창하여 Cu insert 노즐 선단의 오리피스 직경으로부터 불꽃을 분출하는데, 이때 Cu insert 노즐에 의하여 아크는 수축되면서 고밀도의 에너지를 갖는다. 고밀도의 에너지를 갖는 플라즈마는 메인 전류(플라즈마 아크 전류)가 흐르게 되면 메인 아크(플라즈마 아크)가 발생하여 용융용접 및 플라즈마 키홀 용접을 가능하게 한다.

파일럿 아크는 메인 아크가 형성되면 정지하는 방식과 그대로 계속 유지되는 방식이 있으나 대전류 기종에서는 정지하는 방식이 많다.

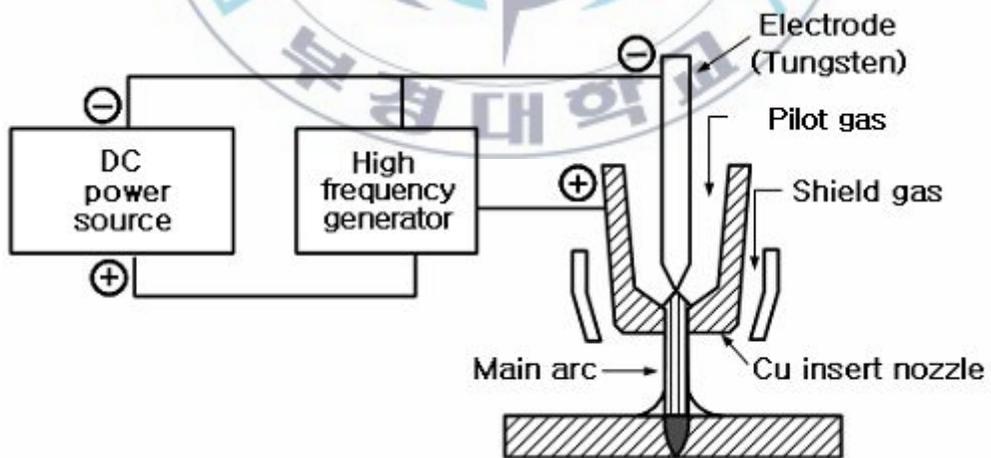
이행식에서는 모재가 전극의 한쪽을 구성하고 있으므로 주로 도전체(금속재료)의 용접에 사용된다.

2) 비이행식(non-transferred)

Fig. 2.3(b)는 비이행식을 나타낸 것이다. 이행식과는 달리 전극과 Cu insert 노즐 사이에 메인 아크를 발생시키는 방식이다. 모재는 통전하지 않기 때문에 비도전체의 적용도 가능하지만 열효율이 나쁘고, 노즐의 부담이 큰 등의 이유로 용접에는 거의 적용되고 있지 않다.



(a) Transferred



(b) Non-transferred

Fig. 2.3 Transferred and non-transferred plasma arc modes

2.1.5 플라즈마 용접의 방식

1) 용융용접

메인 전류와 파일럿 가스 유량이 낮을 때 나타나며 재래의 용융용접법과 같이 플라즈마에 의해 모재로 열이 전달되고 전도된 열에 의해 확산되며 이때 용융 온도 이상까지 가열된 부분이 녹아서 용접이 이루어진다.

2) 플라즈마 키홀 용접

비교적 대전류의 메인 아크는 가늘게 수축되고, 모재를 국부적으로 가열하는 동시에 고속으로 분출하는 파일럿 가스가 용융금속을 강하게 눌러 내려 Fig. 2.4와 같은 플라즈마 키홀을 형성시킨다. 플라즈마 키홀은 용융금속이 플라즈마 제트에 의하여 용접비드 위쪽이 밀려나는 과정에서 발생되는데, 플라즈마 용접 토치를 진행시키면 플라즈마 제트 앞에서 모재가 녹게 되고, 용융금속은 플라즈마 제트의 뒤쪽으로 이동하여 응고하면서 용접금속을 형성한다. 이와 같이 용융금속이 이동하는 과정에서 불순물이나 가스가 제거되기 때문에 용접결함은 발생되지 않는다. 이때 플라즈마 키홀 주변에 유지되는 용융 금속의 크기는 용융 금속의 표면장력과 파일럿 가스 유량 등에 의해서 결정된다. 용융금속의 표면장력 등에 의해 플라즈마 키홀이 유지되기 때문에 파일럿 가스 유량을 낮게 일정하게 유지하는 것이 중요하다.

플라즈마 키홀의 형성은 용접조건에 의해 크게 좌우되고, 그 예가 Fig. 2.5에 나타나있다. 용입 형상은 용접속도 및 파일럿 가스 유량의 설정에 의해 변화되고 다음의 ㉠~㉦의 5개 영역으로 구별된다.

㉠ **용락 영역** : 입열이 과대하고, 플라즈마 제트가 눌러 내리는 힘이 강하기 때문에 과대용입 또는 용락이 생긴다.

㉢ **가우징 영역** : 강한 플라즈마 제트에 의해 용입은 깊어지지만 용접속도가 지나치게 빠르기 때문에 언더컷(undercut)이나 비드 패임 등이 생긴다.

㉓ 플라즈마 키홀 영역 : 적절한 플라즈마 키홀이 형성되고 용입은 와인잔 모양이 된다.

㉔ 플라즈마 키홀 레스 영역 : 용입은 깊지만 이면까지 용융하지 못하고 터널상의 결함을 일으키기도 하기 때문에 이 영역을 사용하는 것은 적다.

㉕ 얇은 용입 영역 : 플라즈마 제트에 의한 눌러 내리는 힘이 약하여 TIG 용접에 가깝고 용입이 얇다²⁾.

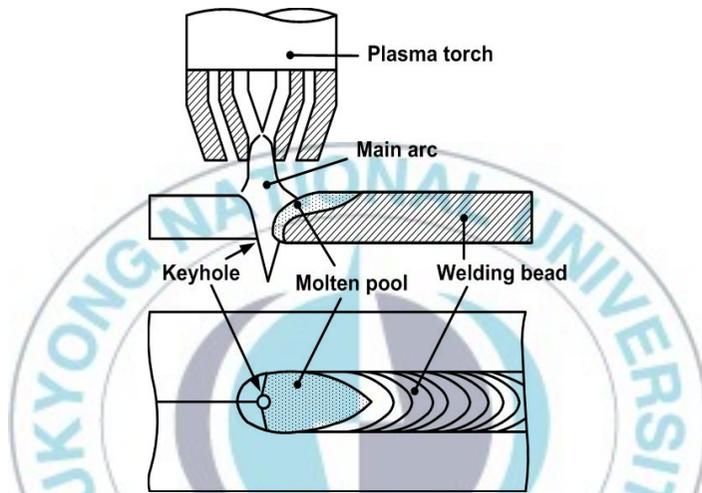


Fig. 2.4 Schematic diagram of plasma keyhole welding

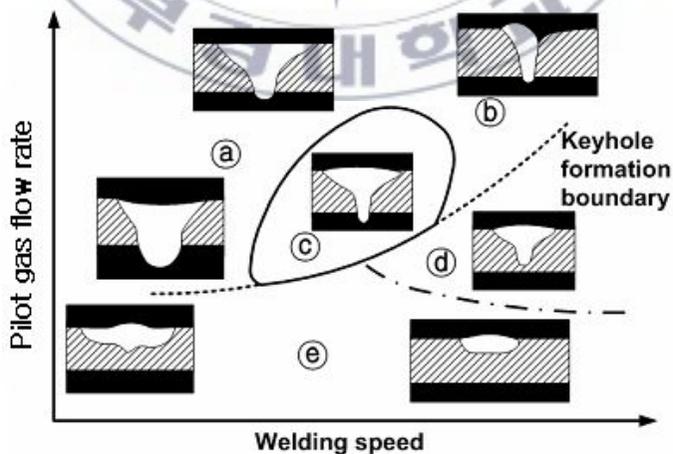


Fig. 2.5 The effect of welding speed and pilot gas flow rate on bead formation

2.1.6 중요 공정 변수

1) 파일럿 가스와 실드 가스

PAW에 사용되는 가스는 파일럿 가스와 실드 가스 두 가지가 있다. 파일럿 가스는 파일럿 아크를 형성하기 위하여 Cu insert 노즐 내부로 공급되는 가스이며 실드 가스는 메인 아크를 발생시키고 용융풀을 보호하는 역할을 하며 실드 가스 노즐을 통해 공급되는 가스이다. PAW에서 파일럿 가스는 용융풀과 직접 접촉하지만 실드 가스는 직접적으로 접촉하지 않기 때문에 용접품질에 미치는 영향은 적다.

① 파일럿 가스

파일럿 가스는 오리피스 가스, 센터 가스라고도 불리며 주로 Ar 혹은 Ar-H₂ 혼합가스가 사용된다. 또한 파일럿 가스 유량은 플라즈마 키홀 용접 시 중요 인자로 작용하며 모재의 두께와 관련이 깊다. Fig. 2.6은 플라즈마 키홀 용접에 있어서 모재 두께에 따른 파일럿 가스 유량의 적정 범위를 제시한다.

◆ **Ar** : 파일럿 가스로서 가장 널리 사용되는 불활성 가스이다. Ar은 이온화 전압이 낮기 때문에 아크 발생이 용이하고 아크 안정성도 우수하며 텅스텐 전극 보호에도 좋다. 그러나 열전도도가 낮기 때문에 조건에 따라서는 불균일한 용접비드가 생성된다. 파일럿 가스 유량이 너무 낮으면 전극 손상과 불완전 용입을 초래하고 너무 높으면 용접부에 기공과 언더컷 결함이 발생하기 쉽다.

◆ **Ar-5%H₂** : H₂는 Ar에 비하여 열전도도가 크므로 열적 핀치효과를 촉진하고 가스의 유출속도를 증가시킨다. 그리고 H₂와 같은 2원자 분자는 아크열에 의해 원자상태로 분리되는데, 분리된 수소원자가 모재 표면에서 냉각되어 본래의 분자상태로 재결합하는 과정에서 열을 방출하므로 모재 입열을 증가시킨다. 따라서 Ar에 H₂(약 5%)를 혼합하여 사용하면 Ar을 사용했을 때보다 비드가 매끈하고 언더컷 발생이 적어진다. 그러나 H₂는 폭발성이 큰 인화성 가스이므로 용기의 조정기 설치부, 토치 연결부, 압력 조정기 등의 가스누설에 주의하지 않으면 폭발사고의 위험이 있다. 그리

고 텅스텐 전극의 수명은 순수한 Ar을 사용할 때보다 단축되고 H₂와 친화력이 있어 화합물을 생성하게 되는 Ti이나 Zr과 같은 활성금속의 용접에는 사용하지 않는 것이 좋다.

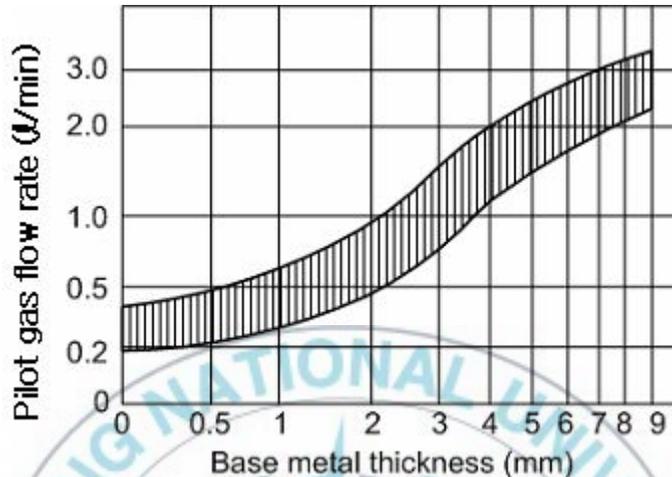


Fig. 2.6 Pilot gas flow rate with base metal thickness in plasma keyhole welding

② 실드 가스

주로 Ar, Ar-H₂, Ar-He, Ar-O₂ 등이 실드가스로 사용된다.

◆ **Ar** : 모든 금속에 사용할 수 있고 아크 안정성과 낮은 전류(20A)에서 청정작용이 있다. 특히, Al, Cu 합금, Ti과 활성금속 용접에 좋다. 그러나 Ar은 용융지의 유동성이 나쁘고 약간의 언더컷을 발생시킨다.

◆ **Ar-5%H₂** : Ar-H₂혼합 가스는 용접 입열을 증가시켜 주며, H₂첨가로 인해 용융풀의 표면장력을 감소시켜 결과적으로 용접속도를 증가시킨다. 또한 용융금속의 표면장력 감소로 인해 용융지의 가스제거가 쉽게 되어 기공발생도 감소한다. 이 분위기에서는 용접속도가 증가하여도 언더컷이 없고 용접부 표면이 매우 양호하다. H₂는 용접 입열의 증가 이외에도 스테인리스강, Ni과 Ni 합금을 용접할 때 생기는 산화물 생성을 감소시키는 작용을 하고 Ni 합금 용접 시 기공발생도 방지해 준다.

◆ **He** : He는 Ar에 비해 약 25%정도 용접 입열 증가를 가져오는데 이것은 He의 이온화 전위가 높기 때문이다. 주로 열전도도가 큰 Al 합금, Cu 합금 및 후판의 Ti 용접에 좋다.

◆ **Ar-He** : Ar에 He을 첨가하면 주어진 전류에서 입열이 증가되는데, 적어도 He이 40%이상 첨가되어야 실질적인 아크열의 증가를 가져온다. Ar-75%He 혼합 가스는 Cu 합금 또는 Ti 후판용접에 사용된다.³⁾

Table 2.1은 재료에 따른 적절한 파일럿 가스, 실드 가스 및 백킹 가스의 선택을 나타낸 것이다.

Table 2.1 Typical gas selection for material

Material	Pilot gas	Shield gas	Backing gas
Austenite STS	Ar	Ar-5~10%H ₂	N ₂
			N ₂ -2~10%H ₂
			Ar
	Ar-2~10%H ₂	Ar-2~10%H ₂	Ar-2~10%H ₂
Mild steel	Ar	Ar-5%H ₂	Ar
			Ar-2~5%H ₂
	Ar-2%H ₂	Ar-2~5%H ₂	No shield
	Ar-2%H ₂	Ar-15~20%CO ₂	No shield
Ti, Cu, Mo and Zr	Ar	Ar or Ar-He	Ar

2) 전극

전극은 PAW에서 메인 아크 전류에 맞게 적절한 직경 선택하여야 한다. Table 2.2는 전극 직경에 대한 적정 메인 아크 전류의 값을 나타낸 것이다. DCEN(direct-current electrode negative)은 thorium electrode의 메인 아크 전류 허용치이며 DCEP(direct-current electrode positive)는 pure electrode에 대한 메인 아크 전류 허용치이다.

일반적으로 DCEN의 전극 선단 가공에 있어서 PAW 전류 50A이하에서는 30°, 100A이상에서는 40°에서 전극 선단이 잘린 truncated 형상으로 가공한다.

Table 2.2 Allowable main arc current by electrode diameter

Electrode dia. (mm)	Main arc current(A)	
	DCEN	DCEP
0.5	5~20	-
1.0	15~80	-
1.6	70~150	10~20
2.4	150~250	15~30
3.2	250~400	25~40
4.0	400~500	40~55
4.8	500~800	55~80
6.4	800~1000	80~125

3) 오리피스 직경

일반적으로 PAW 전류 밀도가 클수록 용접조건이 폭이 넓어지지만 Cu insert 노즐에 의한 수축이 심하면(극단적으로 오리피스 직경이 아주 작은 것을 사용하든가, PAW 전류를 극도로 높이면) Fig. 2.7에 제시하는 바와 같이 전극에서 메인 아크 전류가 나누어지고 Cu insert 노즐을 통하여 모재에 흐르는 double arc(series arc)가 발생된다. 또한 수축 아크로서의 기능을 상실하여 사행비드가 되거나 플라즈마 키홀이 생성되지 못하므로 결국 Cu insert 노즐을 손상시켜 용접을 불가능하게 만든다. 따라서 Cu insert 노즐의 오리피스 직경에 대한 허용 최대 메인 아크 전류치를

Table 2.3에서 제시하였다. 여기서 파일럿 가스 유량은 1.5 ℓ/min이다.

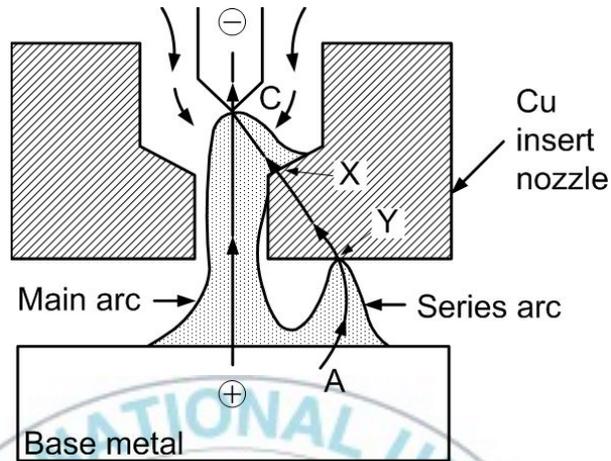


Fig. 2.7 Schematic view of double arc

Table 2.3 Allowable maximum main arc current by orifice diameter in plasma keyhole welding

Orifice dia. (mm)	Allowable maximum main arc current(A)
0.8	1~45
1.2	~70
1.6	~100
2.0	~125
2.6	~230
3.2	~300
4.0	~500

4) 스탠드오프

Fig. 2.8은 일반적인 메인 아크 전류 변화에 따른 스탠드오프의 적정 영역을 나타낸다.

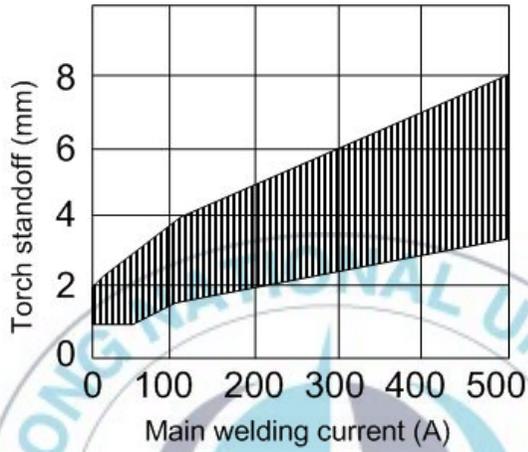


Fig. 2.8 Standoff range by main arc current variation

2.1.7 TIG 용접과 플라즈마 용접의 비교

Fig. 2.9는 TIG 용접과 PAW 시스템의 기본적인 모식도를 나타낸다. TIG 용접 토치의 텅스텐 전극은 실드가스노즐의 선단을 기준으로 모재 방향으로 돌출되어 있다. TIG 아크는 수축되지 못하고, 대략적으로 원뿔형이라고 가정한다. 따라서 모재표면에 상대적으로 넓은 열 패턴을 발생시킨다. 입력된 용접 전류에 대해, 모재표면에 미치는 원뿔형상의 영향 영역은 electrode-to-work-distance에 따라 변한다. 그러므로 아크길이의 작은 변화에도 단위면적당 입열에 있어서 상대적으로 큰 변화를 만든다.

반면에 플라즈마 아크 토치 내에 있는 전극은 Cu insert 노즐 내에서 후퇴해 있다. 아크는 동일 방향으로 향하게 되고 상대적으로 적은 영역의 모재 표면이 Cu insert 노즐에 의해 집중된다. 이 플라즈마 아크의 형상은 필수적으로 원통형이기 때문에 스탠드오프가 변화하더라도 모재표면의 접촉 영역에 대한 변화는 거의 없다. 그러므로 PAW 프로세스는 TIG 용접 공정보다 torch-to-work distance 변동에 대해 덜 민감하다. 이러한 PAW의 특징으로 인해 TIG 용접에 비해 용접 변형 감소 및 고속 용접으로 인한 생산성 향상을 기대할 수 있다.

플라즈마 아크 토치의 전극은 Cu insert 노즐 내부에 후퇴해 있기 때문에, 전극이 모재와 접촉하는 것은 불가능하다. 이러한 특징은 전극재료로 인해 용접봉을 오염시키는 가능성을 크게 감소시킨다.

Fig. 2.10은 온도와 전압에 미치는 아크 수축의 영향을 모식도로 나타내었다. 수축아크(플라즈마 아크)는 동일 용접 조건에서 비 수축아크(TIG 아크)에 비해 높은 온도, 좁은 집중 면적 및 아크 전압이 30V로 비 수축 아크보다 2배 높다.¹¹⁾

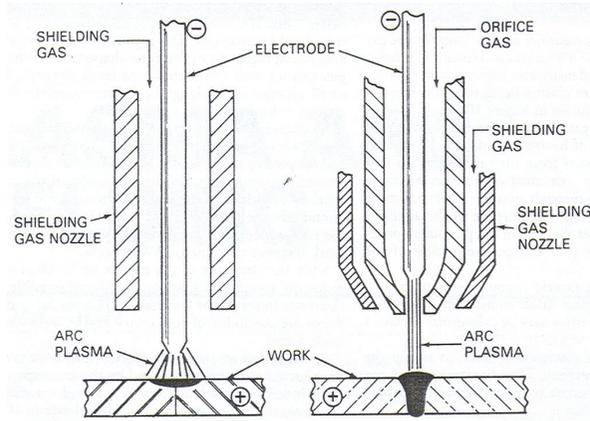


Fig. 2.9 Comparison of gas tungsten arc and plasma arc welding process

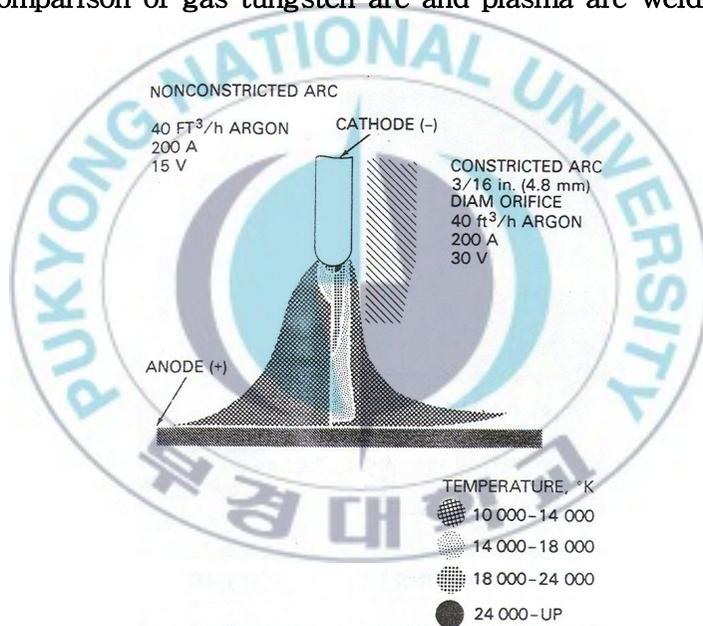


Fig. 2.10 Effect of arc constriction on temperature and voltage

2.2 오비탈 용접의 원리

2.2.1 오비탈 용접의 정의

오비탈 용접(Orbital Welding)이란 용어는 라틴어 ORBIS = Circle(원형)이란 용어에서 유래 하였다. 이것은 주로 우주공학에서 주로 적용이 되어 왔으며 명사로 Orbit 또는 형용사의 Orbital의 용어로 사용이 되었으며 인공위성이나 탄도 로켓 몸체의 궤적 등의 용어에 사용이 되었다.

Orbital 과 Welding의 조합은 통상적으로 튜브나 파이프의 주위를 따라 돌며 행해지는 용접을 가리키는 말로 쓰인다.

Orbital Welding은 기본적으로 Arc가 장애 없이 작업되는 파이프 주위를 360도 이상 회전하며 용접되는 과정을 가리키는 용어다.

따라서 종종 MIG/MAG 용접에서 2개의 반원형으로 용접되는 과정 즉 360도 용접 과정의 방해를 받는 용접은 엄밀한 의미에서 Orbital welding 이라 할 수 없다.



2.2.2 오비탈 용접의 위치 정의

고정 파이프의 원주 용접 시 일반적으로 Fig. 2.11과 같이 구간을 정의한다. 파이프를 시계라고 생각했을 때 P12:00에서는 아래보기자세(Flat position), P03:00에서는 수직하진자세(Vertical-down position), P06:00에서는 위보기자세(Overhead position), P09:00에서는 수직상진자세(Vertical-up position)가 된다.

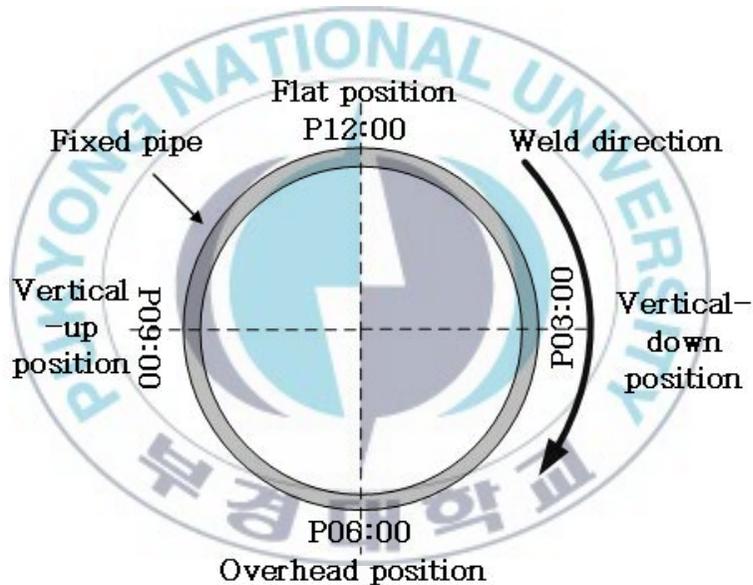


Fig. 2.11 Definition of section

2.2.3 오비탈 용접의 각 위치별 용접 특성

파이프 원주 용접 시에는 파이프의 각 구간에 따라 용접 현상이 변하게 된다. 그에 따라서 용접 전류, 전압과 용접 속도 등의 파라미터의 영향을 고려하지 않으면 안 된다.

용접 시 용융 풀에 영향을 주는 인자는 중력, 표면장력, 아크력, 액상·고상의 계면장력 등의 인자가 있으며, 파이프 용접 시 용융 풀에 가장 크게 영향을 미치는 인자는 중력과 표면장력, 아크력 등이다.

1) 아래보기자세(Flat position)의 특성

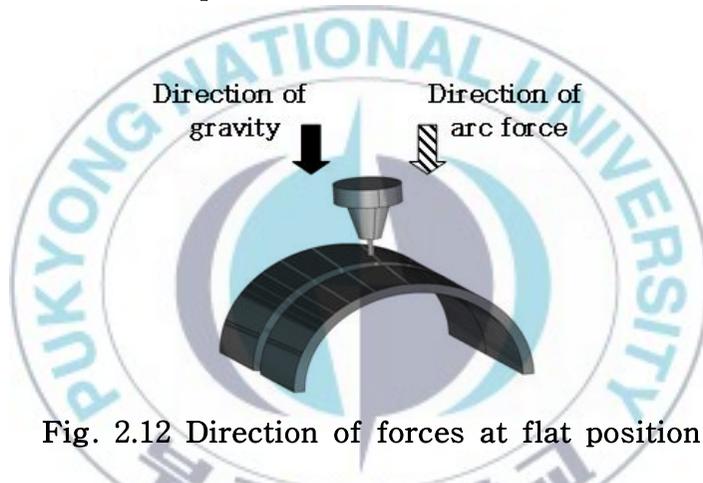


Fig. 2.12 Direction of forces at flat position

Flat position에서 힘의 방향은 중력의 방향과 아크력의 방향이 일치한다. Flat position에서는 이러한 두 힘의 방향 일치에 의하여 용융금속에는 하부의 이면비드 쪽으로 큰 힘이 작용하므로 쉽게 이면비드가 블록해지거나 심하면 용락(Burn-through)이 생길 수 있는 구간이다.

2) 수직하진자세(Vertical-down position)의 특성

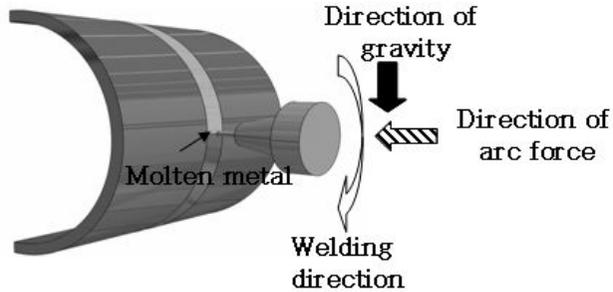


Fig. 2.13 Direction of forces at vertical-down position

Vertical-down position에서 힘의 방향은 중력의 방향은 밑으로 향하는데 아크력은 모재를 향하고 있다. 따라서 용융금속은 밑으로 처지는 경향을 보이므로 용융금속이 아크를 선행하기 때문에 아크가 용융금속 위에서 발생을 한다. 이 때문에 Vertical-down position에서는 모재 두께와 용융금속의 두께가 더해진 상태에서 균일 비드를 형성시키기 위해서 높은 전류로 큰 아크력을 발생시켜 용입을 크게 한다.

3) 위보기자세(Overhead position)의 특성

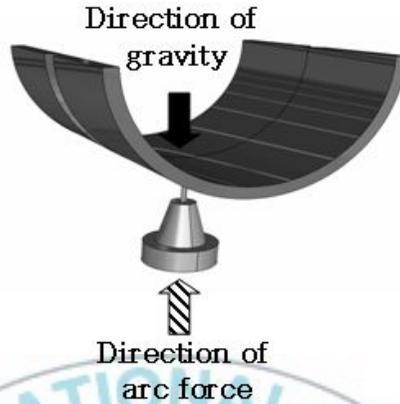


Fig. 2.14 Direction of forces at overhead position

Overhead position에서는 Fig. 2.14에 나타낸 바와 같이 중력의 방향과 아크력의 방향이 반대로 작용을 하므로 용융금속을 모재쪽으로 밀어붙이는 힘은 아크력 하나에만 의존하게 된다. 그러나 Overhead position에서 아크력이 용융금속으로 인한 중력을 감당하는 것은 한계가 있으므로, 오목한 이면비드 및 용입 부족이 될 가능성이 높다.

만약 아크력이 허용하는 용융금속의 무게보다 용융금속이 커지게 되면 중력의 영향으로 인하여 용융금속이 밑으로 떨어져 버리는 현상이 발생을 하게 되고, 또한 아크력이 작으면 이면비드의 형성이 불가능하게 된다.

4) 수직상진자세(Vertical-up position)의 특성

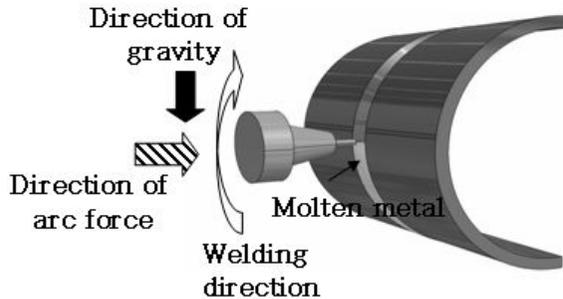


Fig. 2.15 Direction of forces at vertical-up position

Vertical-up position에서는 Fig. 2.15에서 보는 바와 같이 중력의 방향은 아래로 향하는 반면, 아크력의 방향은 모재쪽으로 향하고 있다. 힘의 방향은 Vertical-down position과 같으나 용접방향이 다르다.

Vertical-up position에서는 그림에서 보는 바와 같이 용융금속이 중력의 영향으로 인해 밑으로 처지는 경향을 보이므로 아크가 용융금속의 위가 아닌 앞의 모재위에서 발생하게 된다. 즉, 아크가 모재의 루트부에서 발생하므로 같은 용접전류라도 용입이 깊어지기 쉽게 된다.

따라서 Vertical-down position과 같은 전류로 용접을 하게 되면 높은 아크력에 의해 용락될 가능성이 아주 높게 된다.

Vertical-up position에서의 용접전류는 다른 포지션에서와는 달리 이면비드가 형성될 정도로 전류를 유지하면서 용락을 방지해야 한다.

제 3 장 파일릿 가스 유량 변경 실험

3.1 서언

본 장에서는 플라즈마 아크 용접의 키홀(Keyhole) 용접 시 이면에서의 키홀 거동을 관찰하기 위해 사진 촬영을 하였다. 그리고 P06:00~P09:00의 경사각에서 파일릿 가스 유량에 따른 표면과 이면비드 폭, 키홀 직경 및 이면비드 볼록 정도를 알아보았다.

3.2 실험 재료 및 방법

3.2.1 실험 재료

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

Table 3.1은 실험에 사용된 SS400의 화학조성과 기계적 성질을 나타낸 것이다.

Table 3.1 Chemical composition and mechanical properties of SS400
(a) Chemical composition (wt. %)

C	Si	Mn	P	S
0.15	0.26	0.61	0.13	0.17

(b) Mechanical properties

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
361	481.7	24

3.2.2 실험 방법

Fig. 3.1은 용접 모식도로써 P06:00에서 P09:00까지를 5등분하여 각 위치에서 판 위에 키홀 용접을 실시하는 것을 나타낸다. 시편을 턴테이블에 고정시키고 플라즈마 토치를 로봇에 물려 용접속도 10cpm으로 움직여 키홀 용접을 수행하였으며 용접부 길이는 100mm이다.

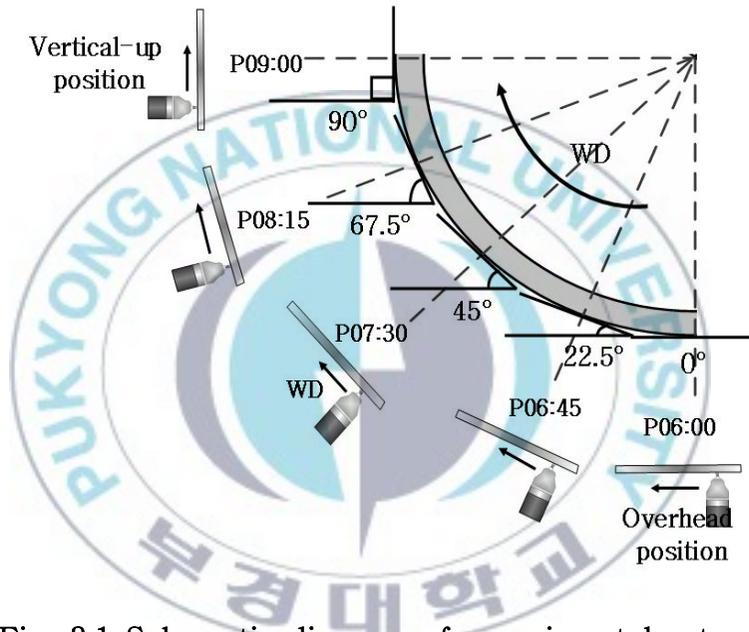


Fig. 3.1 Schematic diagram of experimental setup



Fig. 3.2 Used Digital protractor

P06:00에서 P09:00까지를 5등분하였을 때 각 경사각과 토치의 각도를 정확하게 맞추기 위해 디지털 각도계를 사용하였다. Fig. 3.2는 본 실험에서 사용한 디지털 각도기(최소눈금 0.0°)를 보여준다.

Table 3.2는 파일럿 가스 유량 변경 실험의 조건을 나타낸다. 파일럿 가스와 실드 가스는 모두 아르곤(Ar)을 사용하였다.

Table 3.2 Experimental conditions

Power source	PAW Machine (Powwel-150XP)
Welding mode	Keyhole(BOP)
Material	SS400, t 6mm
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 mm
Shield gas flow rate	12 l/min
Pilot gas flow rate	1.1, 1.3, 1.5, 1.7, 1.9 l/min



Fig. 3.3 Used PAW Machine



Fig. 3.4 Used Robot (MOTOMAN HP 6)



Fig. 3.5 Panel of PAW Machine used in experiment

Fig. 3.3은 본 실험에서 사용한 플라즈마 키홀 용접기를 나타내고, Fig. 3.4는 본 실험에서 사용한 6축 다관절 로봇을 보여준다.

Fig. 3.5는 플라즈마 키홀 용접기의 패널(Panel)을 보여준다. 파일럿 가스 유량은 A를 통해 0~2.0 l/min까지 0.01 단위로 제어 가능하고, 실드 가스 유량은 B를 통해 0~20 l/min까지 조절 가능하다.

Fig. 3.6은 이면에서 키홀을 관찰하기 위한 실험 셋팅을 보여주며 Table 3.3은 사진 촬영 조건을 나타낸 것이다. 사진 촬영을 위해 시편을 고정하고 토치를 이송시켰다.

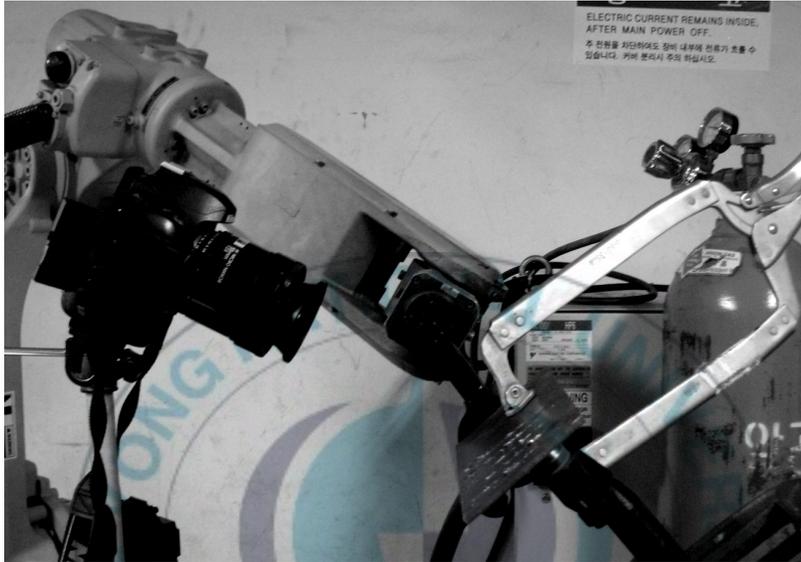


Fig. 3.6 Photo of experimental setup

Table 3.3 Photographic conditions

Camera	Nikon D70s
Lens	AF Micro Nikkor F2.8D
Filter	TOPAZ UV L37C B+W IR 20-40x HOYA R72

3.2.3 용접 비드 형상 인자의 측정 방법

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

Fig. 3.7은 표면(Front side)과 이면(Back side)에서의 비드와 키홀의 측정 인자를 정의한 것이다.

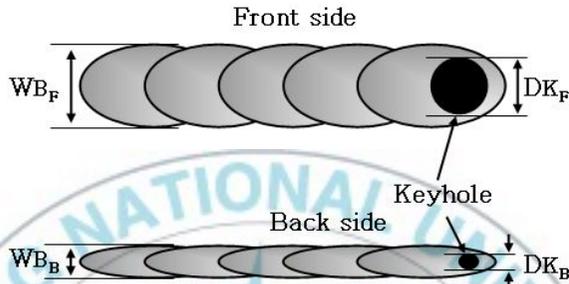


Fig. 3.7 Geometric parameters of bead and keyhole

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 캘리퍼스(최소눈금 0.01mm)를 사용하여 WB_F , WB_B , DK_F , DK_B 를 측정하였다.

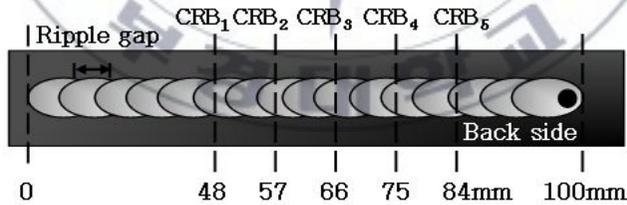


Fig. 3.8 Schematic of measurement interval for CRB

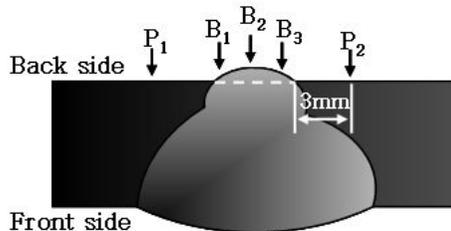


Fig. 3.9 Schematic of measurement point for CRB

이면비드 볼록 정도는 용접 시작부에서 48mm 이후부터 9mm 간격으로 5곳을 뺀 프로브를 가진 하이트 게이지(최소눈금 0.001mm)를 사용하여 측정하였다. 용접속도 10cpm, 주파수 2Hz이므로 리플(Ripple) 간격은 약 0.835mm이다. Ripple 간격의 정수배가 되지 않도록 9mm 간격으로 이면비드 볼록 정도를 측정하였다. Fig. 3.8과 3.9에서 보는 바와 같이 비드 toe부에서 3mm 떨어진 곳에서 P₁과 P₂를 측정하여 평균한 값이 기준높이이고, B₁, B₂, B₃을 측정하여 평균한 값이 이면비드 높이이다. 비드의 형상을 고려하여 B₂ 값에 가중치를 주기 위해 2를 곱하여 계산하였다. 후자에서 전자를 뺀 값이 이면비드 볼록 정도이고 각각의 식은 다음과 같다.

기준 높이(Parent metal Height),

$$H_P = (P_1 + P_2) / 2 \quad (3.1)$$

이면비드 높이(Back bead Height),

$$H_B = (B_1 + 2B_2 + B_3) / 4 \quad (3.2)$$

이면비드 볼록 정도(Convexity ratio of back bead),

$$CRB = H_B - H_P \quad (3.3)$$

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),

$$CRB_{aver} = (CRB_1 + CRB_2 + CRB_3 + CRB_4 + CRB_5) / 5 \quad (3.4)$$

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

$$CRB_{min} = \text{Min}(CRB_1 : CRB_5) \quad (3.5)$$

3.2.4 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 3.4는 상관계수에 따른 통계학적 의미를 나타낸다.

$$\text{귀무가설}(H_0) : \rho=0 \quad (3.6)$$

$$\text{대립가설}(H_1) : \rho \neq 0 \quad (3.7)$$

이고, 가설의 판정은 다음과 같다.

$$P\text{-value} < \alpha : \text{귀무가설}(H_0) \text{ 기각} \quad (3.8)$$

Table 3.4 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

3.3 실험 결과 및 고찰

3.3.1 이면에서의 키홀 관찰

Fig. 3.10은 P07:30의 경사각에서 이면 키홀과 용융금속의 거동을 사진으로 촬영한 것이다. (a)는 적절한 용접 조건일 때의 이면 키홀의 모습을 나타내고, (b)는 부적절한 용접조건일 때의 이면 키홀의 모습을 나타낸다. 전류 또는 파워가 너무 크거나 용접속도가 너무 느릴 때 (b)와 같이 용융금속이 과도하게 형성되었다가 용락이 발생하게 된다.

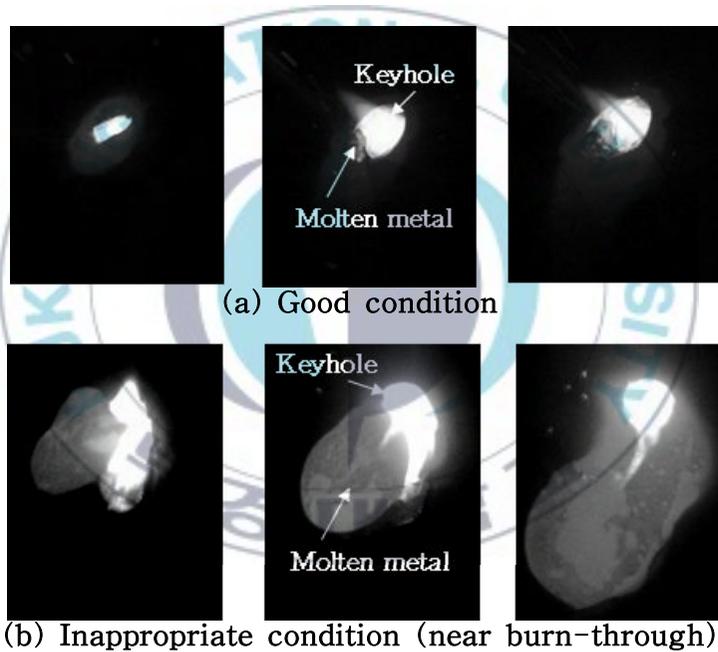


Fig. 3.10 Back side view of keyhole and weld pool

3.3.2 파일럿 가스가 표면과 이면비드의 폭에 미치는 영향

Fig. 3.11~3.15는 P06:00~P09:00의 경사각에서 실드 가스 유량 12 l/min 조건에서 파일럿 가스(Pilot Gas, PG) 유량을 변경하였을 때의 표면과 이면 비드를 보여준다.

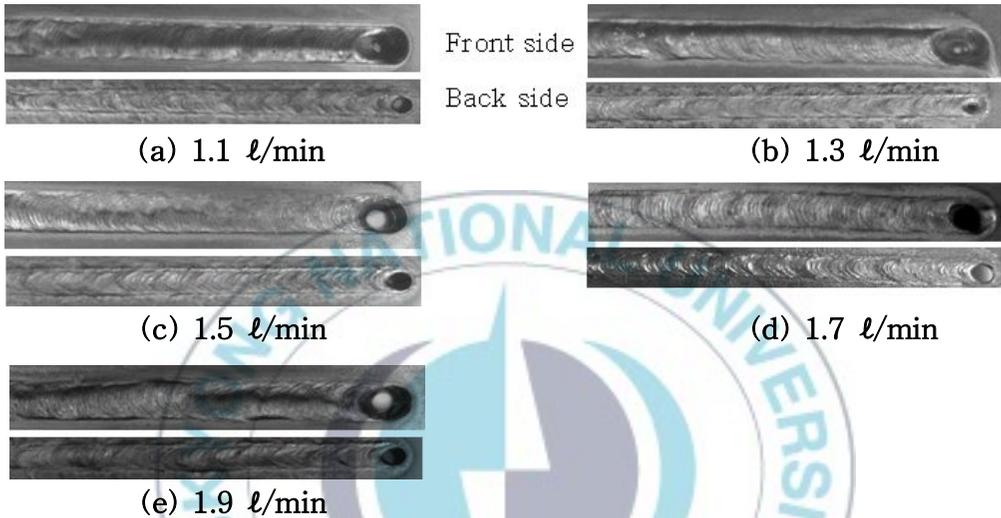


Fig. 3.11 Surface and back bead appearances (P6:00, SG 12 l/min)

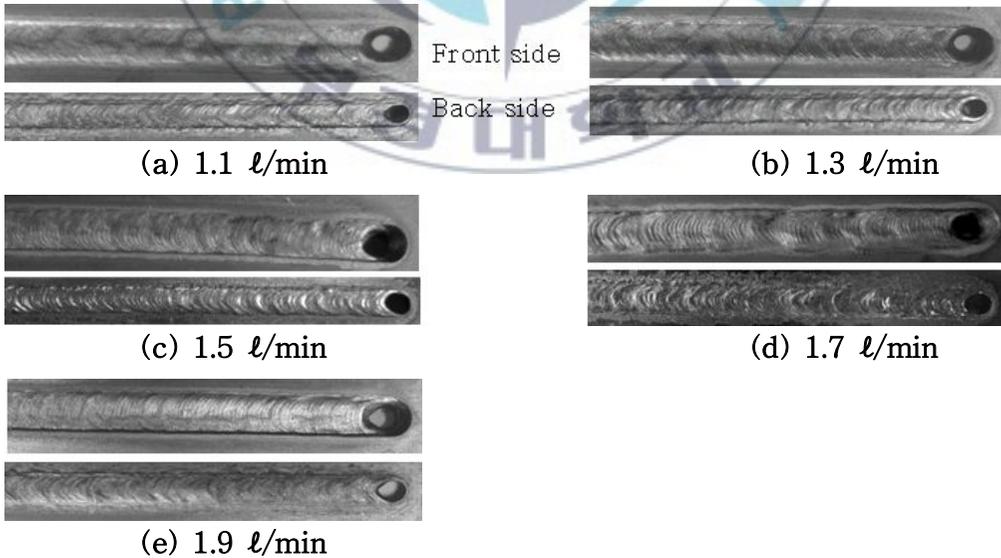


Fig. 3.12 Surface and back bead appearances (P6:45, SG 12 l/min)

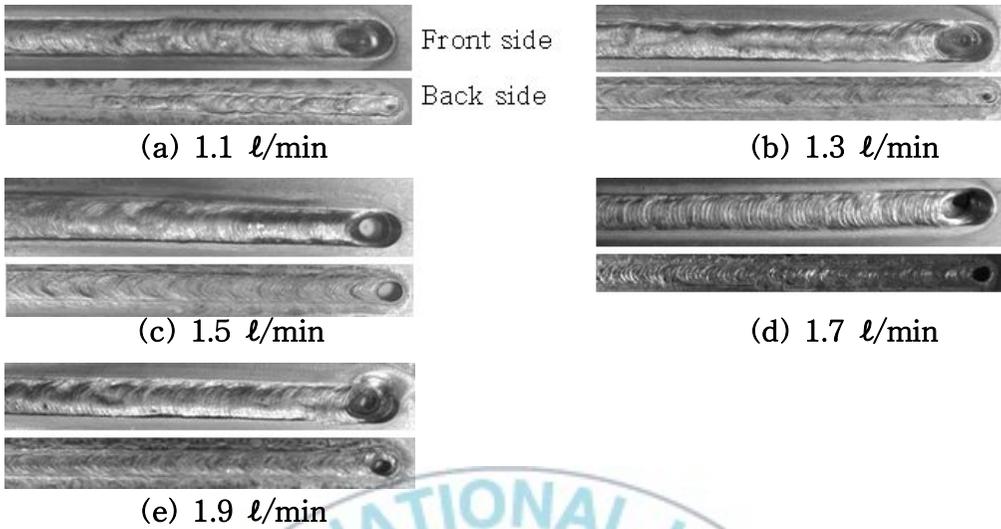


Fig. 3.13 Surface and back bead appearances (P7:30, SG 12 l/min)

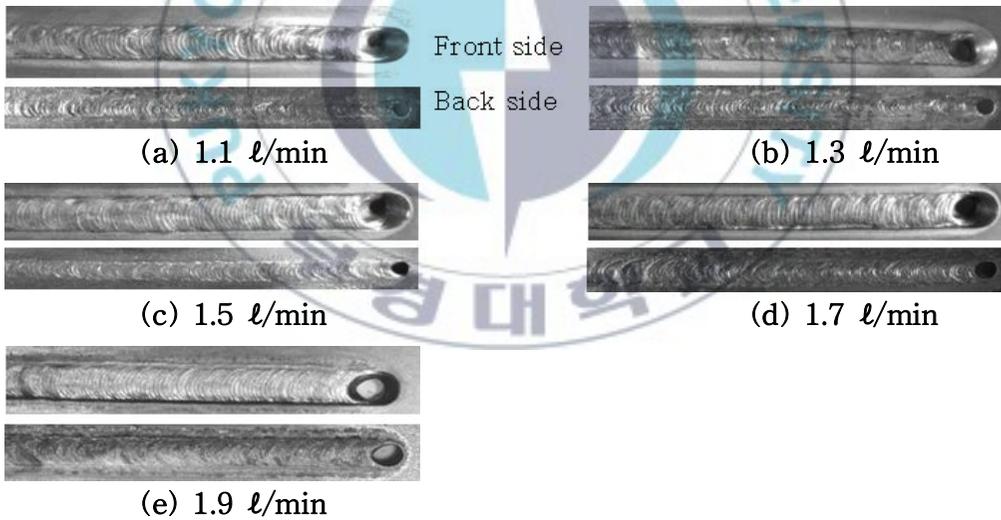


Fig. 3.14 Surface and back bead appearances (P8:15, SG 12 l/min)

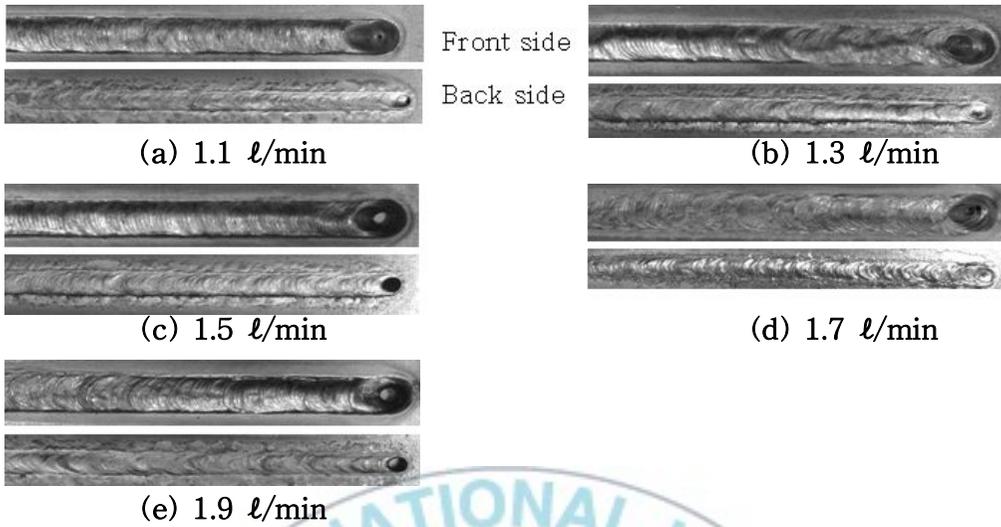


Fig. 3.15 Surface and back bead appearances (P9:00, SG 12 l/min)

PG 유량에 따른 표면비드 폭 WB_F 와 이면비드 폭 WB_B 는 각각 Fig. 3.16과 3.17에 나타나 있다. Table 3.5는 PG 유량과 WB_F , PG 유량과 WB_B 사이의 상관계수와 P-value를 각각 나타낸다.

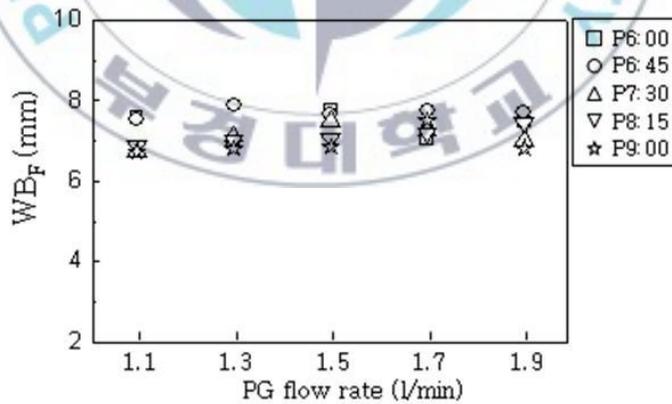


Fig. 3.16 Relationship between PG flow rate and WB_F at each position

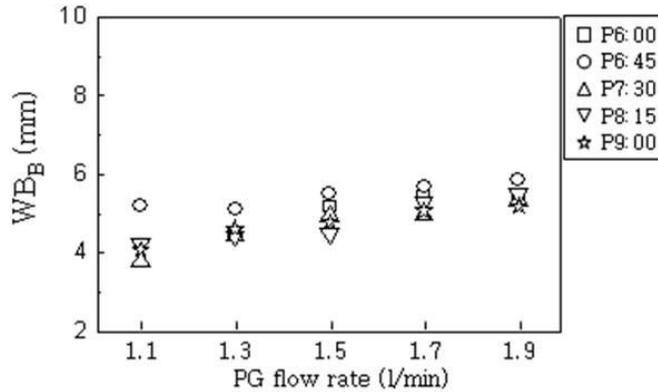


Fig. 3.17 Relationship between PG flow rate and WB_B at each position

Table 3.5 Correlation coefficient and P-value

X	Y	R	P-value
PG flow rate	WB_F	0.231	0.268
PG flow rate	WB_B	0.789	0.000

Table 3.5에서 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 사이에는 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.

3.3.3 파일럿 가스가 표면과 이면키홀의 직경에 미치는 영향

PG 유량에 따른 표면키홀 직경 DK_F 와 이면키홀 직경 DK_B 는 각각 Fig. 3.18과 3.19에 나타나 있다. Fig. 3.20은 DK_B 와 WB_B 사이의 관계를 보여준다.

Table 3.6는 PG 유량과 DK_F , PG 유량과 DK_B , DK_B 와 WB_B 사이의 상관계수와 P-value를 각각 나타낸다.

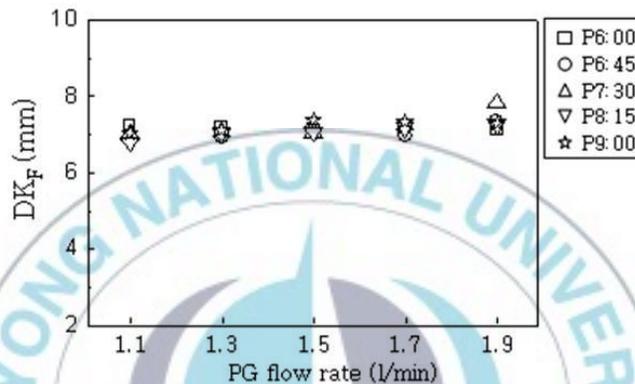


Fig. 3.18 Relationship between PG flow rate and DK_F at each position

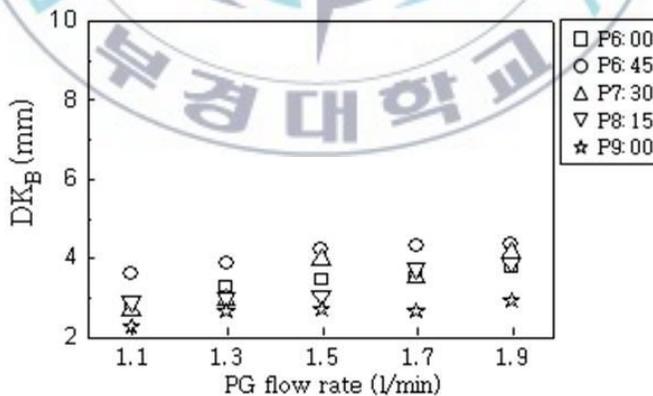


Fig. 3.19 Relationship between PG flow rate and DK_B at each position

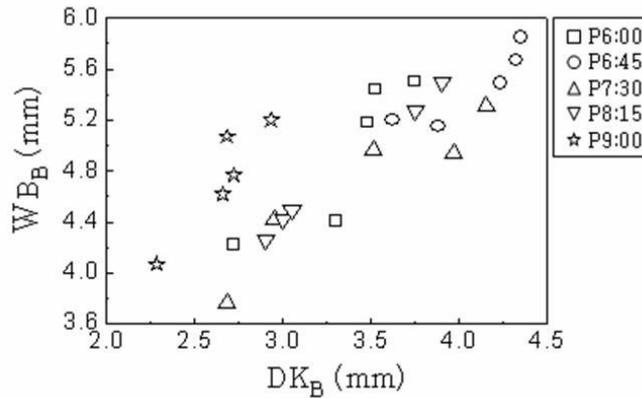


Fig. 3.20 Relationship between DK_B and WB_B at each position

Table 3.6 Correlation coefficient and P-value

X	Y	R	P-value
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

Fig. 3.18, 3.19와 Table 3.6에서 보는 바와 같이 키홀 직경의 경우, 강한 양의 상관관계를 가지고 있다. Fig. 3.20은 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 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⁾.

3.3.4 파일럿 가스가 이면비드 블록 정도에 미치는 영향

Fig. 3.21은 각 경사면에서의 PG 유량 변경에 따른 CRB_{aver} 를 보여준다. PG 유량과 CRB_{aver} 는 상관계수 0.152, P-value 0.470으로 상관성을 나타내지 않았다. 따라서 안정적인 키홀이 형성되었을 때 PG 유량이 증가할수록 WB_B 는 증가하지만, CRB_{aver} 에는 영향을 미치지 않는다고 할 수 있다.

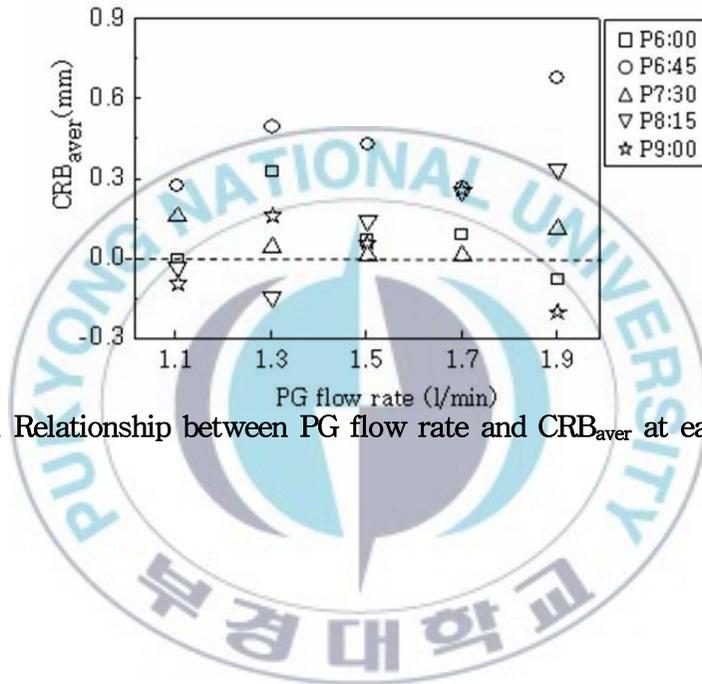


Fig. 3.21 Relationship between PG flow rate and CRB_{aver} at each position

3.4 결론

- 1) P07:30의 경사각에서 이면 키흔과 용융금속의 거동을 카메라로 촬영하여 관찰하였다. 적절한 용접 조건일 때는 이면비드가 안정적으로 생성되었으나, 부적절한 용접조건 즉, 전류 또는 파일럿 가스 유량이 너무 크거나 용접속도가 너무 느릴 때는 용융 금속이 과도하게 형성되었다가 용락이 발생하였다.
- 2) 두께 6mm의 SS400에서 위보기 자세에서부터 수직 상진 자세까지 파일럿 가스 유량을 1.1~1.9 l/min으로 변화시켰을 때 안정적인 키흔이 형성 되었다.
- 3) 파일럿 가스 유량은 이면비드 볼록 정도에는 그다지 영향을 미치지 않았지만, Y. M Zhang의 연구와 마찬가지로 파일럿 가스가 증가할수록 이면비드 폭과 키흔 직경은 넓어지는 경향이 나타났다.
- 4) 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.

제 4 장 실드 가스 유량 변경 실험

4.1 서언

이면비드 폭이 좁으면 용접선 추적(Seam tracking) 정밀도가 높아야 한다. 특히, 파이프 용접 시 이면비드를 관찰할 수 없는 경우에는 이면비드 폭이 어느 정도는 형성되어야 바람직하다. 따라서 모든 경사면에서 이면비드 폭 WB_B 가 5mm 이상 나오는 파일럿 가스 유량 1.7 l/min 조건에서 실드 가스 유량 변경 실험을 실시하여 P06:00~P09:00의 경사각에서 이면비드 볼록 정도를 알아보았다.

4.2 실험 재료 및 방법

4.2.1 실험 재료

본 연구에서는 3장과 동일한 폭 40mm, 길이 120mm, 두께 6mm의 SS400을 사용하였고, PAW(Plasma Arc Welding)을 이용해 키홀(Keyhole) 용접을 실시하였다.

4.2.2 실험 방법

3장의 실험과 동일한 방법으로 P06:00에서 P09:00까지를 5등분하여 각 위치에서 판 위에 키홀 용접을 실시하였다. 시편을 턴테이블에 고정시키고 플라즈마 토치를 로봇에 물려 용접속도 10cpm으로 움직여 키홀 용접을 수행하였으며 용접부 길이는 100mm이다.

Table 4.1은 실드 가스 유량 변경 실험의 조건을 나타낸다. 파일럿 가스와 실드 가스는 모두 아르곤(Ar)을 사용하였다.

Table 4.1 Experimental conditions

Power source	PAW Machine (Powwel-150XP)
Welding mode	Keyhole(BOP)
Material	SS400, t 6 mm
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 mm
Pilot gas flow rate	1.7 l/min
Shield gas flow rate	12, 15, 18 l/min

4.3 실험 결과 및 고찰

4.3.1 실드 가스가 이면비드 블록 정도에 미치는 영향

Fig. 4.1~4.5는 P06:00~P09:00의 경사각에서 파일럿 가스 유량 1.7 l/min 조건에서 실드 가스(Shield gas, SG) 유량을 변경하였을 때의 표면과 이면비드를 보여준다.

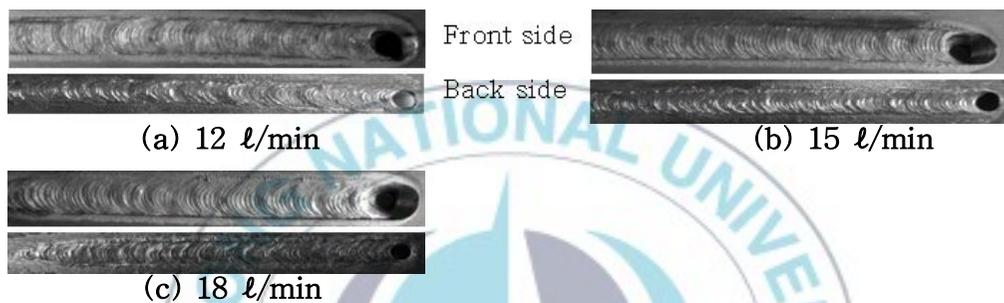


Fig. 4.1 Surface and back bead appearances (P6:00, PG 1.7 l/min)

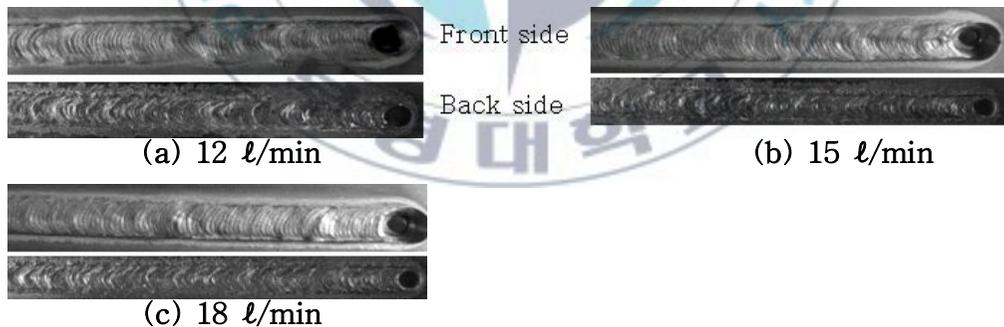


Fig. 4.2 Surface and back bead appearances (P6:45, PG 1.7 l/min)

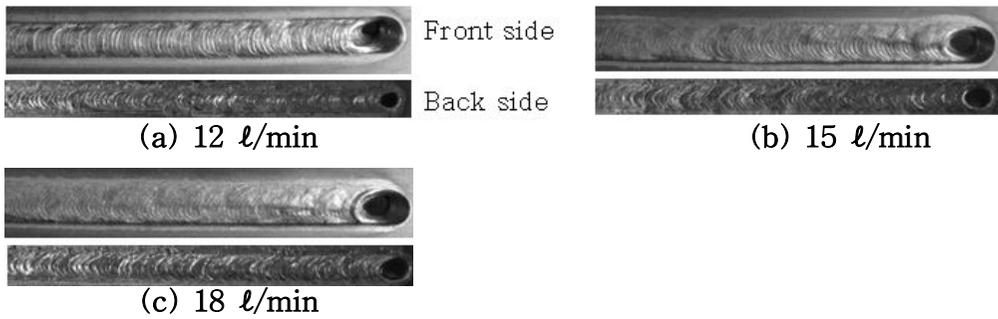


Fig. 4.3 Surface and back bead appearances (P7:30, PG 1.7 l/min)

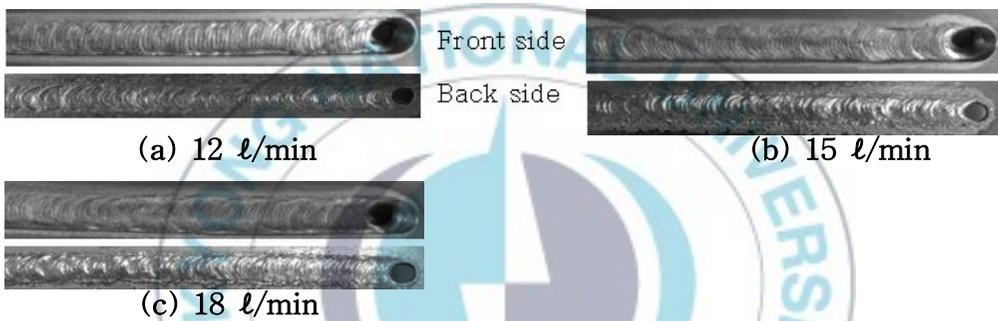


Fig. 4.4 Surface and back bead appearances (P8:15, PG 1.7 l/min)

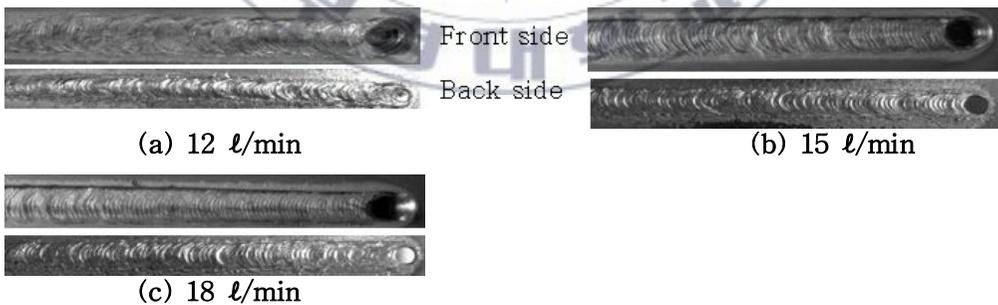


Fig. 4.5 Surface and back bead appearances (P9:00, PG 1.7 l/min)

Fig. 4.6은 SG 유량에 따른 평균 이면비드 볼록 정도를 나타낸 것이고, Fig. 4.7은 최소 이면비드 볼록 정도를 나타낸 것이다. Table 4.2는 SG 유량과 평균 이면비드 볼록 정도 CRB_{aver} , SG 유량과 최소 이면비드 볼록 정도 CRB_{min} 사이의 상관계수와 P-value를 각각 나타낸다.

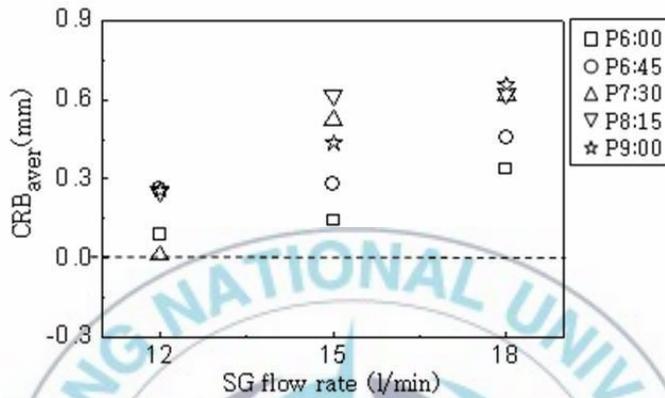


Fig. 4.6 Relationship between SG flow rate and CRB_{aver} at each position

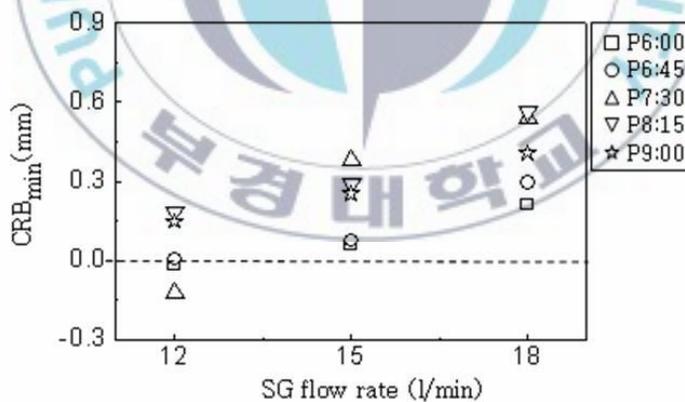


Fig. 4.7 Relationship between SG flow rate and CRB_{min} at each position

Table 4.2 Correlation coefficient and P-value

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

모든 경사면에서 SG 유량이 증가할수록 이면비드 볼록 정도가 증가하였고, Table 4.2에서 보는 바와 같이 실드 가스 유량과 이면비드 볼록 정도 사이에는 강한 양의 상관관계를 가짐을 알 수 있다. 또한 P-value가 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.

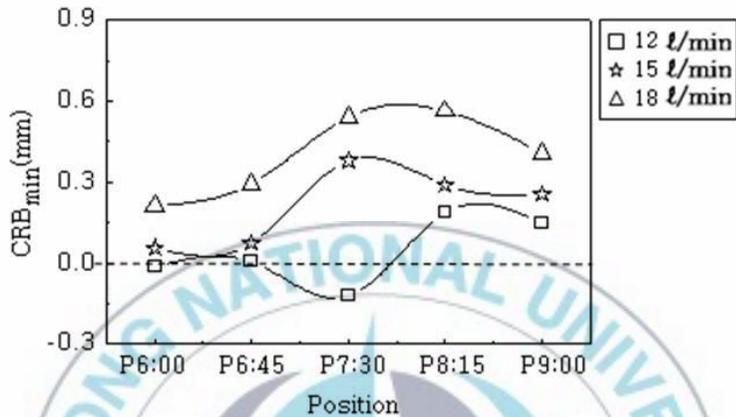
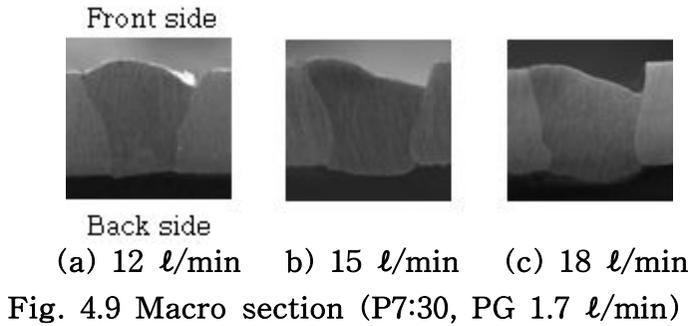


Fig. 4.8 Relationship between position and CRB_{min} at each SG flow rate

Fig. 4.8을 보면 SG 유량이 12 l/min일 때는 오목 이면비드가 존재 하였으나 15 l/min 이상에서는 볼록 이면비드만 형성되었다. 특히, Fig. 4.9의 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. 4.10은 운동량 방정식 설명을 위한 모식도이다.

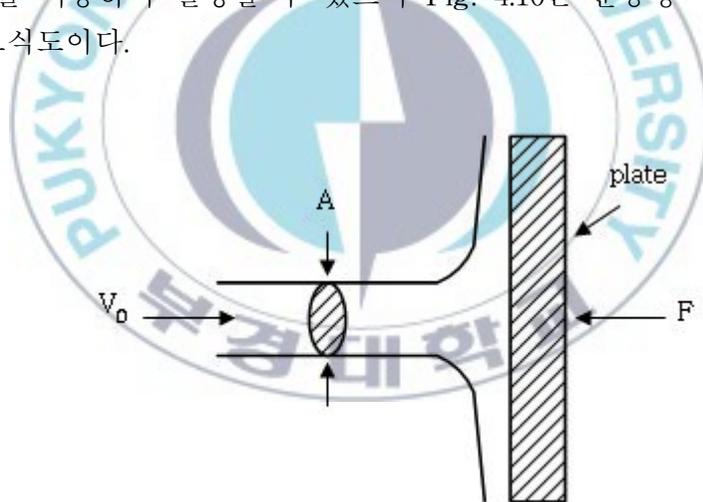


Fig. 4.10 Schematic of momentum equation

유체의 운동량 방정식을 통해 고정된 판에 작용하는 분류 방향의 힘을 구하면 다음과 같다.

$$-F = \rho Q(0-V_0) \quad (4.1)$$

$$F = \rho Q V_0 \quad (4.2)$$

$$V = \frac{Q}{A} \quad (4.3)$$

$$F = \frac{\rho}{A} \cdot Q^2 \quad (4.4)$$

여기서,

Q는 유량(cm³/sec), V₀는 유속(cm/sec), ρ는 밀도(g/cm³)를 나타낸다.

Table 4.3은 가스 노즐 직경이 일정한 상태에서 실드 가스 유량이 12 l/min, 18 l/min 일 때 식 4.4를 통해 구한 F를 나타낸다.

Table 4.3 Force by shield gas flow rate

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

실드 가스 노즐에서 같은 거리에 위치한 용융금속이 실드 가스로부터 받는 힘은 18 l/min일 때 12 l/min에 비해 2.25배 증가하게 되어 용융금속이 이면쪽으로 밀려 불룩한 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. 2.15에서 보는 바와 같이 중력의 방향은 아래로 향하는 반면, 아크력의 방향은 모재 쪽으로 향하고 있으며 힘의 방향과 용접 방향이 다르다. 따라서 용융금속이 중력의 영향으로 아래방향으로 쳐지게 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 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.

4.3.2 표면에서의 언더컷 문제

모든 경사면에서 실드 가스 유량이 증가할수록 이면비드가 블록해졌으나 언더컷이 다소 심해졌음을 Fig. 4.9를 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.

4.4 결론

- 1) 모든 경사면에서 실드 가스 유량이 증가할수록 이면비드 볼록 정도가 증가하였다. 이는 액체상태의 용융금속이 가스 압력에 따라 볼록 또는 오목해질 수 있음을 나타낸다.
- 2) J. K Martikainen는 플라즈마 키흔 용접에서 연강과 같은 구조용강은 오스테나이트 스테인리스 강과 티타늄보다 용융풀의 표면장력과 점성이 더 낮기 때문에 용융풀과 키흔의 안정적 제어가 어렵다고 하였으나 본 연구에서는 파워릿 가스와 실드 가스 유량 등의 용접 변수를 적절히 제어함으로써 안정적인 이면비드를 가지는 용접부를 얻을 수 있었다.
- 3) 아래보기 자세와 비슷한 볼록 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.

제 6 장 결론

두께 6mm의 SS400에 대한 플라즈마 용접에 의한 오비탈 용접의 경사상진 자세에서 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.
- 2) 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.
- 3) J. K Martikainen는 플라즈마 키홀 용접에서 연강과 같은 구조용강은 오스테나이트 스테인리스 강과 티타늄보다 용융풀의 표면장력과 점성이 더 낮기 때문에 용융풀과 키홀의 안정적 제어가 어렵다고 하였으나 본 연구에서는 파일럿 가스와 실드 가스 유량 등의 용접 변수를 적절히 제어함으로써 안정적인 이면비드를 가지는 용접부를 얻을 수 있었다.
- 4) 고정 중·후육 파이프의 원주 용접 시, P06:00 이후의 위보기 자세와 수직상진 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.

참고문헌

- 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, The Korean Welding and Joining Society, 2003. 5, 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, The Korean Welding and Joining Society, 2004. 2, 169-171 (in Korean)
- 3) Ki-Joung Kim, Jin-Woo Kim, Youn-Bae Kang, Sang-Myung Cho : Heat input control in orbital GTA welding to stainless steel and mild steel pipes, The Korean Welding and Joining Society, 2002. 11, 2881-2885 (in Korean)
- 4) J. K. Martikainen and T. J. I Moio : Investigation of the effect of welding parameters on weld quality of plasma arc keyhole welding of structural steels, Welding Research Supplement, 1993, 329-340
- 5) Y. M. Zhang and S. B. Zhang : Observation of the keyhole during plasma arc welding, Welding Research Supplement, 1999, 53-58
- 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, 138-140 (in Korean)
- 10) J. C. Metcalfe and M. B. C. Quigley : Keyhole stability in plasma arc welding, *Welding Journal*, 1975, 401-404
- 11) *Welding handbook* chapter 10, Plasma arc welding, 331-333
- 12) T. Anzai : Automatic TIG Welding for high purity stainless steel pipework, *Welding International*, Vol.8, No.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) 이레테크 : 새 Minitab 실무완성, 2005, 391-396 (in Korean)
- 16) J. Cohen, : *Statistical power analysis for the behavioral sciences* 2nd ed., 1988

학위과정 중 주요 학술지 게재 및 발표논문과 특허

1. 주요 학술지 게재 논문

플라즈마 용접에 의한 오비탈 용접의 경사상진자세에서 이면비드 형성에 관한 연구, 대한용접학회지(1차 심사 중)

2. 학술발표대회 발표논문

• 김효원, 황규민, 유병승, 조상명, 구리 초음파 스폿 용접에서 파형해석을 통한 용접품질 평가, 대한용접학회 추계 학술발표대회 개요집, 48권, 2007. 11, 297-299

• 김효원, 조상명, 플라즈마 용접에 의한 오비탈 용접의 경사상진자세에서 이면비드 형성에 관한 연구, 대한용접학회 추계 학술발표대회 개요집, 50권, 2008. 11, 147

3. 특허 (출원 후 심사 중)

발명의 명칭 : 오비탈 용접기(Orbital Welding device)

출원 번호 : 10-2008-0113187

출원인 : 부경대학교 산학협력단

발명인 : 조상명, 김효원

감사의 글

용접 IT 연구실은 저에게 새로운 인생의 장을 열어준 곳이라 할 수 있습니다. 소중한 인연이 많았던 이 곳에서 여성용접엔지니어로서의 자질을 갖추게 되었습니다. 황금과 같았던 그 시간동안 저는 용접에 대한 전문적인 지식뿐만 아니라 현장 밀착형 과제를 수행해오면서 문제를 해결하기 위한 능동적·창의적·분석적 사고능력, 리더십 등을 향상시킬 수 있었습니다.

저를 많이 아껴주시고 배움의 자세를 가르쳐주신 지도 교수님인 조상명 교수님께 가장 먼저 감사드립니다.

학부 과정과 대학원 과정에서 많은 지도를 해주신 서원찬 교수님, 이병우 교수님, 김우열 교수님, 박홍일 교수님, 김성규 교수님, 방국수 교수님, 이길근 교수님께도 진심으로 감사드립니다.

연구실에 들어와서 만나게 된 많은 선배들님과 후배님들과의 인연은 저의 큰 재산이 되었습니다. 마치 여동생처럼 저를 보살펴주신 박사과정의 고미혜님, 졸업하신 이정현님께 고마움을 전합니다. 또한 항상 친절하게 많은 도움을 주었던 박사과정의 고명훈님, 함효식님, 먼저 졸업하신 박덕조, 김인태, 김영주, 유광선, 고찬식, 조진안, 윤승중, 김대만, 김진욱, 문영덕, 황규민, 박인기, 김성덕님께도 고마움을 전합니다.

그리고 많은 추억을 함께한 저의 대학원 동기인 추환수, 배광무, 윤영현님께도 고마움을 전합니다. 연구실 생활을 하면서 활력소가 되었으며 많은 도움을 주신 정연호, 김성호, 하종문, 박경도, 임성빈, 서지석, 신희섭님께도 감사드립니다. 항상 연구에만 몰두할 수 있도록 돌봐주신 김외숙님과 박미숙님께도 감사드립니다.

또한 힘들 때마다 격려해주시고 아껴주시는 지인들께 감사드립니다.

마지막으로 막내딸을 항상 지켜 봐주시는 하늘에 계신 아버지와 따뜻하게 옆에서 지켜 봐주시는 어머니, 언니와 형부께 머리 숙여 감사드립니다.