



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 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

스테인리스강 TIG 맞대기 용접 루트 패스에서
단차 극복을 위한 공정 개발



2010年 2月

釜慶大學校 大學院

소재프로세스공학과

任 成 份

工學碩士 學位論文

스테인리스강 TIG 맞대기 용접 루트 패스에서
단차 극복을 위한 공정 개발

指導教授 趙相明

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함



2010年 2月

釜慶大學校 大學院

소재프로세스공학과

任成份

任成份의 工學碩士 學位論文으로 認准함

2010年 2月



主 審 工學博士 李 秉 雨 (印)

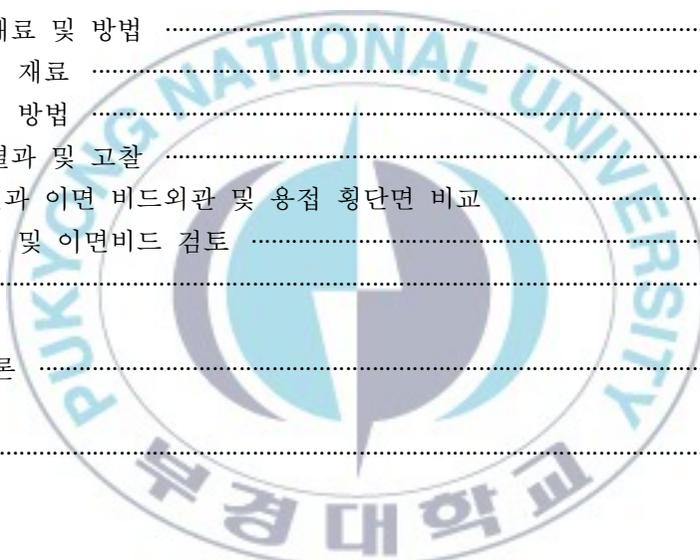
委 員 工學博士 徐 源 贊 (印)

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 TIG 용접 process	4
2.1.1 TIG 용접의 정의	5
2.1.2 TIG 용접의 원리	5
2.2 용접의 아크 물리학	6
2.2.1 용접의 아크 특성	6
2.2.2 전극 형상에 따른 아크압력 분포특성	10
2.3 TIG 용접의 용입	11
2.3.1 TIG 용접의 용입 증가 방법	11
2.3.2 TIG 용접의 용융 금속의 유동	14
2.4 용입 형상비의 정의	17
2.5 용융효율의 정의	18
제 3 장 아크길이가 백비드 형성에 미치는 영향 검토 실험	20
3.1 서언	20
3.2 실험 재료 및 방법	20
3.2.1 실험 재료	20
3.2.2 실험 방법	21
3.3 실험 결과 및 고찰	23
3.2.2 표면 및 이면비드 검토	23
3.2.2 용입 형상비 비교	25
3.2.3 용융효율 비교	26
3.4 결론	27
제 4 장 단차와 아크 길이가 백비드 형성에 미치는 영향 검토 실험	28
4.1 서언	28

4.2 실험 재료 및 방법	29
4.2.1 실험 재료	29
4.2.2 실험 방법	30
4.3 실험 결과 및 고찰	32
4.3.1 표면과 이면 비드외관 및 용접 횡단면 비교	32
4.3.2 표면 및 이면비드 검토	35
4.4 결론	36
제 5 장 단차 존재 시 아크길이와 백 베벨링이 이면비드 생성에 미치는 영향에 관한 실험	37
5.1 서언	37
5.2 실험 재료 및 방법	38
5.2.1 실험 재료	38
5.2.2 실험 방법	39
5.3 실험 결과 및 고찰	41
5.3.1 표면과 이면 비드외관 및 용접 횡단면 비교	41
5.3.2 표면 및 이면비드 검토	45
5.4 결론	47
제 6 장 결론	48
참고문헌	49



Development of welding process to overcome misalignment in root pass at butt joint TIG welding of stainless steel

Sung-Bin, Im

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

Abstract

TIG welding is used to produce high quality weldment. However it has some problems such as unstable backbead after welding. In order to overcome those problems, there are many ongoing studies to investigate

that various welding factors have influence on stable backbead. However it is difficult to find a paper to overcome unstable backbead in case of joint misalignment in weld groove. Therefore, it is necessary to develop TIG welding process that enables to form stable backbead when misalignment exist.

In this study, the effect of misalignment on back bead width with butt joint welding on STS304 thickness 3mm was investigated. Arc length was changed from 1mm to 3mm. Misalignment was changed from 1mm to 2mm. Back beveling height was changed from 0.5mm to 2mm. Back bead width was increased as misalignment and arc length was decreased in this range. Back bead becomes higher as back beveling height up to misalignment though arc length varies from 1mm to 3mm was increased.

Key Words: Misalignment, Arc length, Back beveling, TIG welding, GTAW, STS304, Aspect ratio, Front bead, Back bead, Butt welding

제 1장 서론

1.1 연구배경 및 필요성

TIG 용접은 고품질이고 용접인자의 제어가 쉽고 정확하다는 장점이 있지만, 얇은 용입과 낮은 생산성과 같은 단점이 있다. TIG 용접에서는 용입의 한계 때문에 깊고 넓은 그루브를 가공하여 다층 용접을 하며, 루트 패스에서는 파이프 진원도에 의한 찢업 시 단차의 문제가 자주 발생하여 현재 루트갭을 만들어 수동 용접하는 실정이다. 루트갭의 증가로 용착금속의 양이 증가하고 수동용접으로 인해 비용과 시간이 증가하는 문제가 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 현장에서는 자동 TIG 오비탈 용접을 사용하려 하고 있지만 파이프 진원도에 따른 단차발생을 극복할 수 있는 적절한 대안이 없어 사용을 기피하는 실정이다. 따라서 단차를 흡수할 수 있는 용접 공정 개발이 필요하다.

1.2 연구목적 및 개요

본 연구의 목적은 TIG 용접에서 단차에 따른 용접성을 검토하여 이를 맞대기 용접에 적용했을 때 균일한 이면비드를 얻는 공정을 개발하는 것이다. 따라서 본 연구는 아래보기 자세에서 단차에 따른 용입 특성을 표면비드, 이면비드 및 단면으로 비교 분석하였다.

제 2 장 이론적 배경

2.1 TIG 용접 process

아크 용접법은 아크방전에 의해 발생하는 열원(약 6000℃)으로 용접부를 접합시키는 방법으로 소모전극식 (SMAW, GMAW, SAW, EGW)과 비소모 전극식 (TIG, PAW)으로 구분할 수 있다. Table 2.1은 프로세스 종류별 열원과 보호방법을 나타낸다¹⁾.

Table 2.1 Classification of various welding

에너지원	용접법	열원	압력부가여부	보호방법	비고
전기적 에너지	ESW	저항열	압력없음	플럭스	
	PW PW, RW RW	저항열	압력없음	보호없음	
	LBW	복사열	압력없음	보호없음	
	EBW	복사열	압력없음	진공	
	DFW	복사열	약한 압력	가스 또는 진공	고상용접
	GMAW GTAW PAW EGW FCAW	아크열	압력없음	가스	
	SAW SMAW FCAW	아크열	압력없음	플럭스	
	FW FW, SW SW	아크열	소성변형	보호없음	
(주) CW : cold welding DFW : diffusion welding EBW : electron beam welding EGW : electro gas welding ESW : electro slag welding EXW : explosive welding FRW : friction welding FW : flash welding GTAW : gas tungsten arc welding		LBW : laser beam welding PAW : plasma arc welding PW : projection welding RW : resistance welding SAW : submerged arc welding SMAW : shielded metal arc welding SW : stud arc welding TW : thermit welding USV : ultrasonic welding			

2.1.1 TIG 용접의 정의

텅스텐 이너트 가스 용접(Tungsten Inert Gas Welding)은 Ar, He등과 같은 불활성가스를 실드가스로 사용하면서 비소모성 전극인 텅스텐 전극과 모재사이에서 발생시킨 아크열로 모재를 접합하는 용접법을 말한다. 실드 가스로는 모재와 전극의 산화를 방지하기 위하여 불활성가스인 Ar 이나 He 등을 사용한다. 이 용접법은 모든 용접자세에 적용할 수 있으므로, 아크가 매우 안정되고 용접부 품질이 우수하므로 산화나 질화 등에 민감한 재질의 용접에 사용된다. 그러나 다른 용접법에 비하여 용접속도가 느리므로 생산성이 낮다.

2.1.2 TIG 용접의 원리

TIG 용접은 비소모성 텅스텐 용접봉과 모재간의 아크에 의해 모재를 용접하는 방법으로서 Fig. 2.1과 같이 용접부 주위에 불활성 가스(Ar, He)를 보호가스로 사용하면서 용접하는 것이다²⁾.

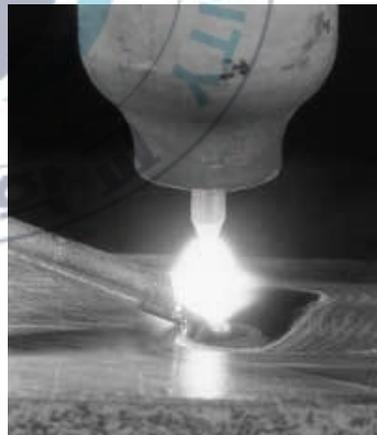
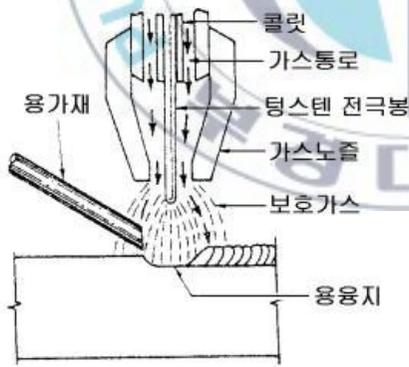


Fig. 2.1 Schematic of GTAW

2.2 용접의 아크 물리학

2.2.1 용접의 아크 특성

(1) 아크 방전현상

특별한 경우를 제외하고 아크와 외부전기 회로사이에는 전극이 존재하며, 전류는 전극을 매개로 하여 기체와 전기회로 사이를 흐르게 된다. 용접 아크의 경우 전극은 탄소이거나 금속이며, 고체거나 액체인 경우도 있다. 부(-)전극을 음극이라 하며, 음극으로부터 전자를 가스 중에 방출시킨다. 반면에 양(+) 전극을 양극이라고 한다^{3,4}.

저기압 가스가 들어있는 방전관 중에서 접촉된 2개의 전기도체에 전류를 흐르게 하고, 약간의 간격을 띄우게 되면 Fig. 2.2와 같이 도체 사이에 방전 현상이 발생한다. 이 아크방전은 다른 방전에 비해 저 전압, 대전류 아크로 큰 에너지로 금속을 용융시키는 용접열원으로 취급이 용이한 특징이 있다^{5,6}.

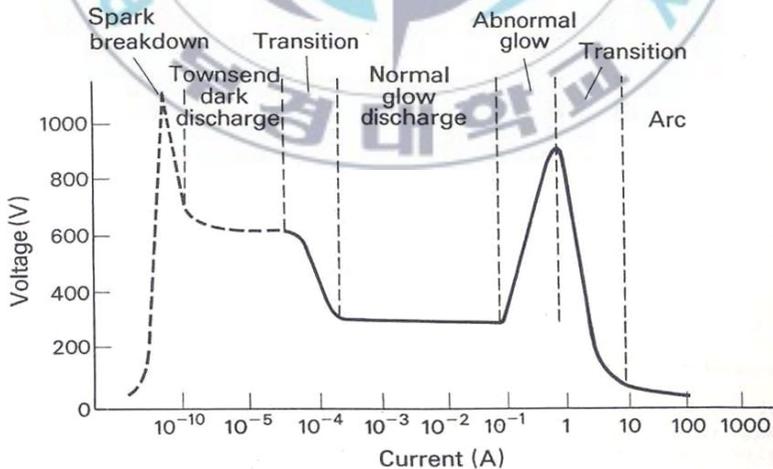


Fig. 2.2 Steady-state voltage-current characteristic of a discharge at about 100N/m^2 , showing order of magnitude values

아크는 기체 중 또는 전극으로부터의 증기 중에서 전극사이의 방전이다. 아크 방전을 상세하게 관찰하면 그 구조와 전압분포는 Fig. 2.3과 같이 나타낼 수 있고, 음극과 양극의 아주 좁은 범위(음극에서는 약 0.01mm 이하)에 전압강하 영역이 존재한다. 그 사이에는 아크 기둥 강하 영역이라는 비교적 전기저항이 작은 부분이 있다. 아크 전압이라고 하는 것은 음극 강하 전압, 아크 기둥강하 전압, 그리고 양극 강하 전압의 합으로 나타낼 수 있다⁷⁻⁸⁾.

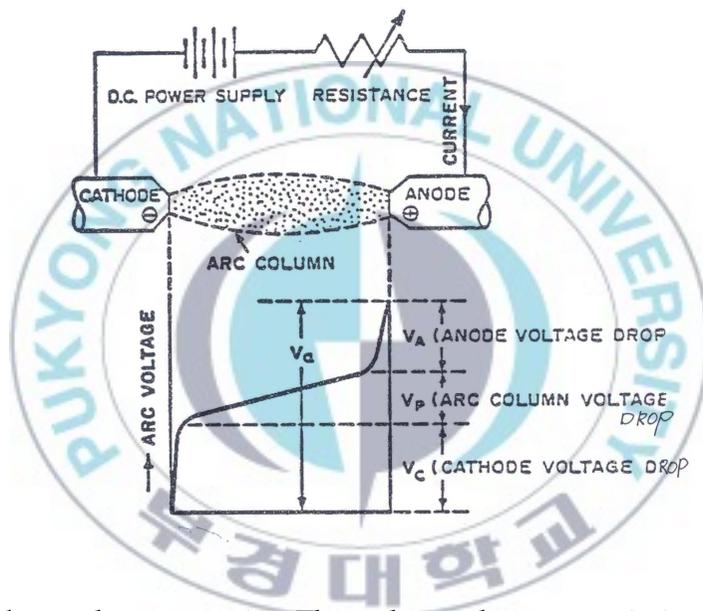


Fig. 2.3 Voltage along arc axis : The voltage along arc axis is divided into three regions; the anode voltage drop, the cathode voltage drop, and arc column^{9,10)}

(2) 아크 전압과 전류 특성

Fig. 2.4는 아크 방전을 TIG 용접에 대한 전류와 전압특성을 조사한 것이다. 수냉동판과 텅스텐 전극을 일정한 거리(즉 아크 길이)만을 띄어서 Ar가스 분위기중에서 아크방전을 시키면 Fig 2.3과 같은 특성 곡선이 얻어진다¹¹⁾.

전류가 낮은 영역에서는 전압이 급격하게 강하하고, 전류가 높은 영역에서는 전압이 서서히 증가하는 특성을 나타낸다. 실제용접에서는 상승특성 영역조건을 사용하는 경우가 많지만 이 아크 특성 곡선은 아크가 소비되는 에너지의 특성을 의미하는 것이다.

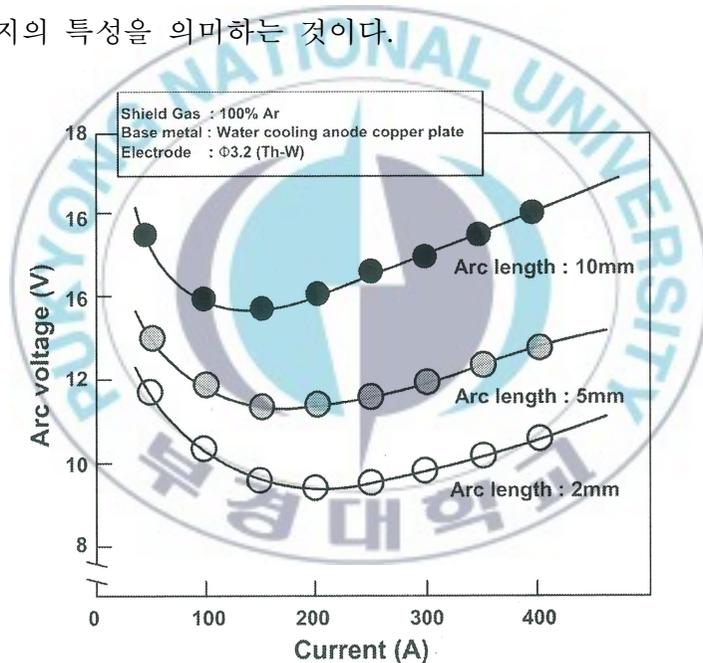


Fig. 2.4 Voltage-current characteristic for TIG welding arc

전류를 일정하게 하고 아크 길이와 전압 관계를 조사하면 Fig. 2.5와 같은 특성곡선을 보이게 된다. 아크 길이와 전압은 거의 비례관계로 증가하며, 전압을 높인다는 것은 아크 길이를 길게 한다는 것을 의미한다. 또한 Fig. 2.4에서 실드가스를 Ar가스와 He가스로 사용한 경우 아크 길이와 전압의 관계도 나타내고 있다. 동일한 아크 길이에서도 실드가스의 종류에 따라 아크 전압이 크게 달라진다는 것을 알 수 있다. 이것은 실제용접에 있어서도 실드가스마다 적정 전압이 달라진다는 것을 나타내고 있다¹¹⁾.

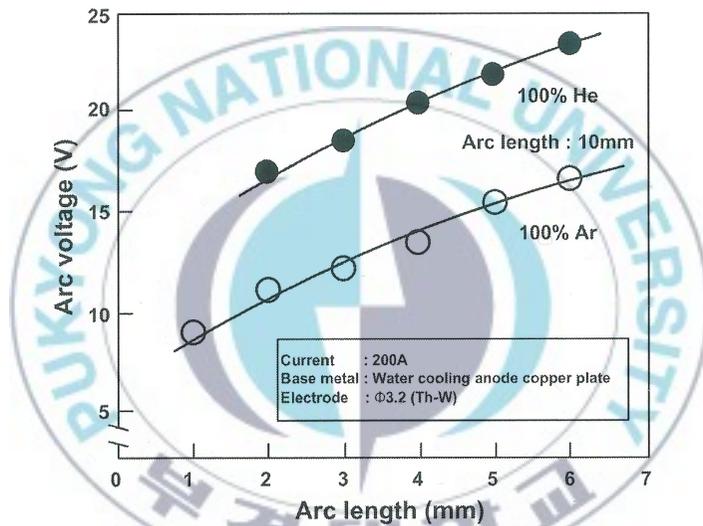


Fig. 2.5 Relation arc length and arc voltage by shield gases

2.2.2 전극 형상에 따른 아크압력 분포특성

Fig. 2.7은 전극팁 형상에 따른 아크압력 분포를 나타내었다. 모재 쪽에서 형성되는 아크면에서의 최대 아크압력은 45° 샤프팁, 60° 샤프팁, 30° 샤프팁 및 60° 연마한 샤프팁의 순으로 나타났다. 60° 샤프팁의 경우는 음극인 전극팁의 아크 루트 직경이 커져서 최대 아크압력이 45°인 경우보다 적어졌고, 전극의 원추각이 적어질수록 전극의 끝단부와 동판과의 최단거리에 아크가 집중하게 된다. 그러나 원추각이 45°보다 작은 30°인 경우는 전극팁이 너무 뾰족해지기 때문에 아크발생부위에서 뒤쪽으로 열이 전도되기 곤란하여 고온영역이 급격하게 확대되므로 열전자 방출이 넓은 영역에 발생하여 모재 쪽의 최대 아크 압력은 낮아지게 된다¹¹⁾.

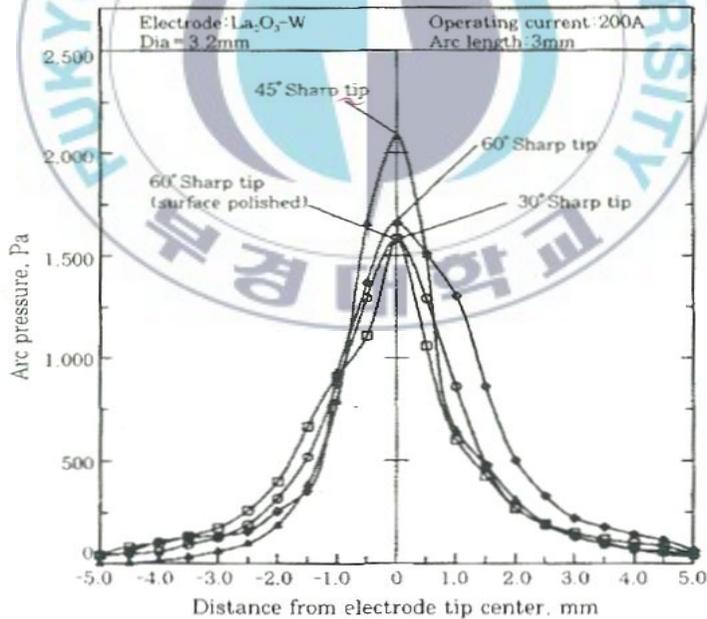


Fig. 2.7 Arc pressure distribution of various electrode tips

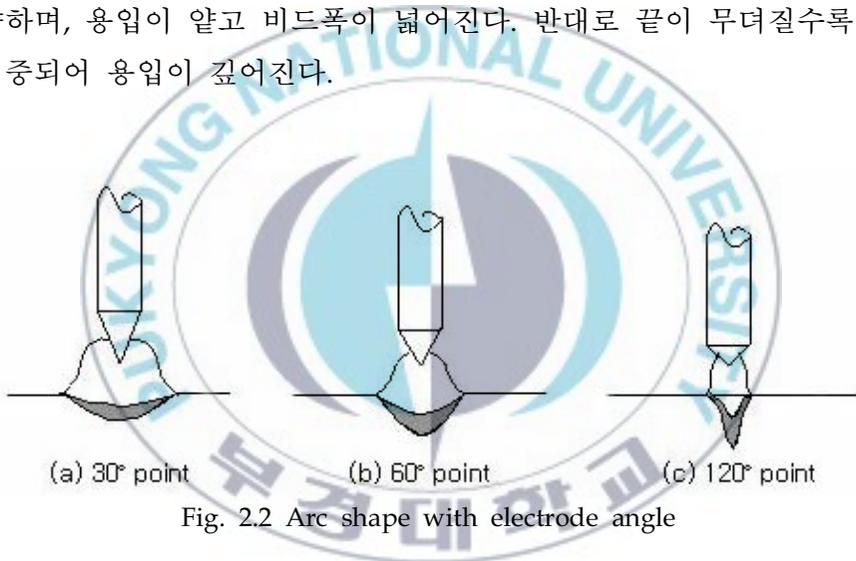
2.3 TIG용접의 용입

2.3.1 TIG용접의 용입 증가 방법

1) 텅스텐 전극 선단각 증가

DCEN 전극은 선단각에 따라 비드 형상이 달라지는데 그 이유는 전자가 전극봉의 경사진 표면으로부터 수직으로 발산되기 때문이다.

Fig. 2.2에서 30°각도인 경우와 같이 연필처럼 길게 경사진 경우는 아크가 약하며, 용입이 얇고 비드폭이 넓어진다. 반대로 끝이 무더질수록 아크가 집중되어 용입이 깊어진다.



2) Ar 실드 가스에 He 첨가

좋은 열전도도를 갖는 가스는 모재로 열을 전도하는데 도움을 주게 되기 때문에 중요한 물리적 성질이다. 열전도도의 정도는 용접 비드의 형상과 다음 층에 용접될 금속의 조건에 의하여 영향이 미친다고 보고 되어져 있다.

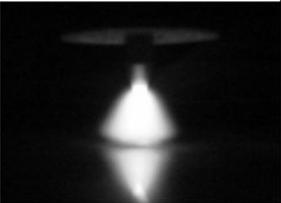
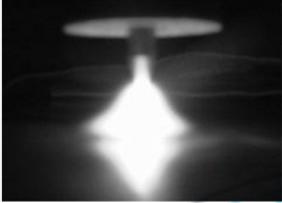
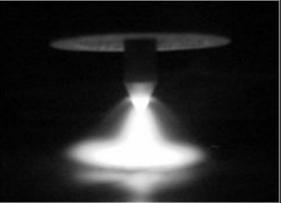
Table 2.1에서 나타나듯이 Ar에 비해 열전도도가 높은 He를 첨가하면 주어진 전류에서 입열량이 증가하는데, 적어도 30% 이상 첨가 되어야 실질적인 증가를 가져온다.

Table 2.2는 헬륨가스의 비에 따른 아크형상을 보여준다.

Table 2.1 Properties of shielding gas

Shield gas	Argon	Helium
Ionization potential	15.8 eV	24.6 eV
Arc initiation	Good	Poor
Arc stability	Good	Poor
Thermal conductivity (cal/cm ² /cm/°C/s)	0.406×10 ⁻⁴	3.32×10 ⁻⁴
Density(relative to air)	1.38	0.137
Cleaning action	Good	Poor

Table 2.2 Arc shape with the mixing ratio of shield gases

	100%Ar	50%Ar+50%He	100%He
100A			
200A			
300A			



2.3.2 TIG 용접의 용융 금속의 유동

TIG 용접에서의 용융 금속의 유동은 Fig. 2.3에서 나타내듯이 아크 중에 발생하는 여러 힘에 의해 일어난다.¹²⁾

이들 힘은 부력, 로렌츠력, 표면장력, 아크 전단응력 등으로 나뉠 수 있고 다음과 같이 설명할 수 있다.

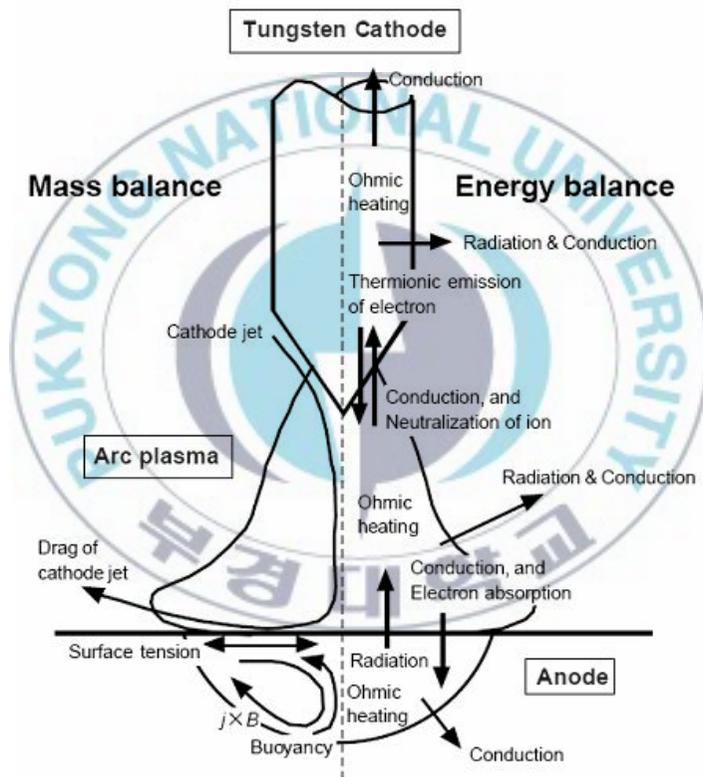


Fig. 2.3 Schematic of mass balance and energy balance in GTAW

1) 부력 (Buoyancy force)

Fig. 2.4는 용융풀에서 부력에 의한 용융 금속의 유동을 나타내었다. 밀도는 온도가 증가함에 따라 감소하는데, 아크 직하의 용융풀의 온도가 아크 바깥쪽의 용융풀의 온도보다 상대적으로 높아서 밀도가 작아 떠오르려는 부력이 발생한다. 부력은 아크반경 방향의 유동에 영향을 미친다.

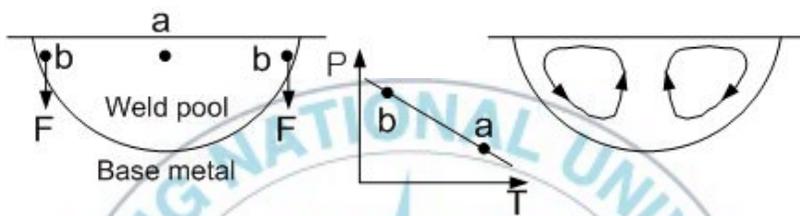


Fig. 2.4 Schematic of buoyancy force in molten pool

2) 로렌츠력 (Lorentz force)

Fig. 2.5는 용융풀에서 로렌츠력에 의한 용융 금속의 유동을 나타내었다. 로렌츠력은 전류의 직각방향으로 작용한다. 로렌츠력은 두께방향의 유동에 영향을 미친다.

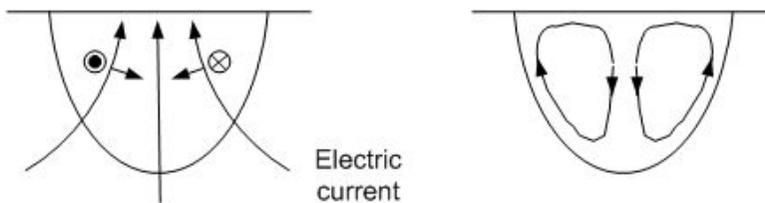


Fig. 2.5 Schematic of Lorentz force in molten pool

3) 표면장력 (Surface tension force)

Fig. 2.6은 용융풀에서 표면장력에 의한 용융 금속의 유동을 나타내었다. 표면장력은 온도가 증가함에 따라 감소하는데, 아크 직하의 용융풀의 온도가 아크 바깥쪽의 용융풀의 온도보다 상대적으로 높아서 표면장력이 약하다. 따라서 용융풀은 아크반경 방향의 유동을 하게 된다.

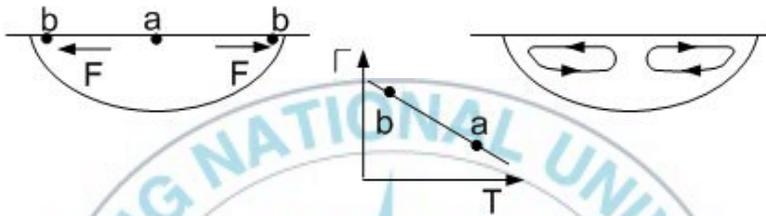


Fig. 2.6 Schematic of surface tension force in molten pool

4) 아크 전단응력 (Arc shear force)

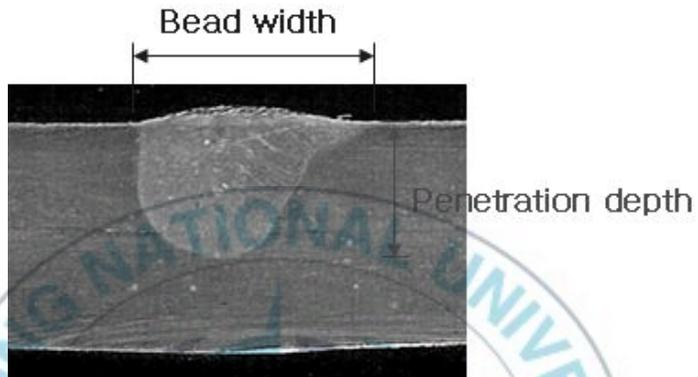
Fig. 2.7은 아크 전단응력에 의한 용융 금속의 유동을 나타내었다. 아크 플라즈마 기류에 의해 용융풀 표면에 아크 전단응력이 발생하고 용융풀은 아크 반경방향으로 유동하게 된다.



Fig. 2.7 Schematic of arc shear stress in molten pool

2.4 용입 형상비의 정의

본 연구에서 검토한 용입 형상비는 Fig. 2.13과 같이 계산하였다.



$$\textit{Aspect ratio} = \frac{\textit{Penetration depth}}{\textit{Bead width}}$$

Fig. 2.13 Definition of Aspect ratio

이 때 용입 형상비가 크게 되면 두께에 따른 횡수축력의 편차가 작아지기 때문에 각 변형 방지에 유리하다.^{13,14)}

2.5 용융효율의 정의

용융효율은 모재로 투입된 에너지에 대한 용접 금속을 녹이는데 사용된 에너지의 비로서 본 연구에서는 J. Tusek의 용융효율 계산식¹⁵⁾을 이용하였다.

$$\eta = \frac{MEt}{\int_0^t IV_a dt} 100[\%] \quad (2.1)$$

여기서 M [g/s]은 단위시간당 용융된 용접 금속의 질량, E [J/g]는 용접 금속 1g을 녹이기 위해 이론적으로 요구되는 에너지(감열+잠열), I [A]는 전류, V_a [V]는 아크전압 그리고 t [s]는 시간이다.

$$M = A_{WM} \times v \times \rho \quad (2.2)$$

여기서 A_{WM} [mm²]은 용융 단면적, v [mm/s]는 용접 속도 그리고 ρ [g/mm³]는 밀도이다.

완전용입시에는 Fig. 2.16과 같은 방법으로 용융 단면적을 구하였다. 사선을 그은 것과 같이 이면비드의 면적은 잘라내고 언더필의 면적만큼 더해서 계산하였다. 이는 Fig. 2.16의 횡단면에서 용융 금속의 양은 이론적으로 언더필과 같은 면적의 이면비드가 나와야 하지만 이 횡단면의 선행 위치나 후행위치에서 용융 금속이 이곳으로 흘러와 언더필 면적보다 큰 면적의 이면비드가 생길 수 있기 때문에 위와 같은 방법으로 용융 단면적을 계산하였다.

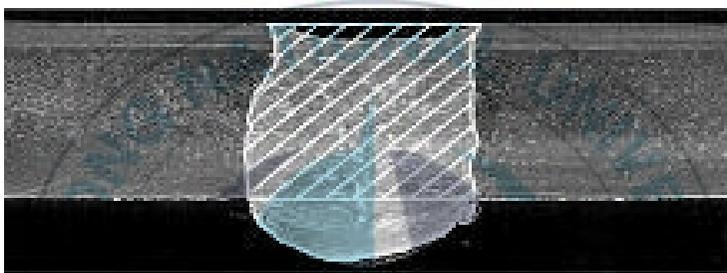


Fig. 2.16 Calculation of section area of weld metal for the underfill and back bead

제 3 장 아크길이가 표면비드 및 이면비드 형성에 미치는 영향 검토 실험

3.1 서언

본 장에서는 아크길이가 표면비드폭, 이면비드폭, 용입 형상비와 같은 용입 특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 각각 아크길이 1mm, 2mm, 3mm 100% Ar 으로 용접하여 용접 비드 외관 및 횡단면을 비교하였다.

3.2 실험 재료 및 방법

3.2.1 실험 재료

본 실험에 사용된 재료는 폭 40mm× 길이 100mm× 두께 3mm의 STS 304를 사용하였고, 시편 형상은 Fig. 3.1에 나타내었다.

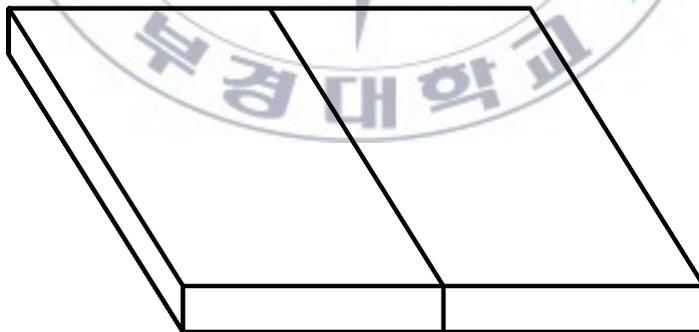


Fig. 3.1 Configuration of base metal

3.2.2 실험 방법

1) 아크길이 변경에 따른 용입 특성 검토 실험

Table 3.1은 용입 특성에 미치는 아크길이의 영향을 알아보기 위한 실험의 용접 조건이다. 실험조건에서 아크길이 1mm 미만은 용융풀의 유동으로 인한 아크길이 변동으로 텅스텐 전극이 손상을 입는 문제가 자주 발생한다. 따라서 아크길이는 1mm 이상으로 하여 실험하였다.

Fig. 3.2는 용접 시편 모식도를 나타내었다. 백킹 플레이트에 의한 열전도의 차에 따른 용입의 변화를 고려하여 시편 양 끝 블록에 위치시켰고 시편 아래쪽은 질소분위기로 백싱팅을 하여 산화를 방지하였으며 아래 보기 자세로 용접하였다. TIG 아크 모니터링 시스템(WAM 3000N)으로 용접 전류, 전압을 계측하였다.

Table 3.1 Welding condition for experiment

Fixed	Electrode	DCEN ϕ 2.4 2%Th-W 45°
	Current	100A
	Welding speed	13cpm
	Shield gas flow rate	Ar 100% 15l/min
Varied	Arc length	1mm, 2mm, 3mm

용접 후 Fig. 3.2의 모재 중심과 $\pm 20\text{mm}$ 에서 시험편을 절단하고 횡단면을 관찰하여 용입 특성을 검토하였다. 용입 형상비를 구하기 위해 용접 횡단면을 마크로 에칭한 후 CAD 디지털이징하여 용입, 비드폭을 측정하였다.

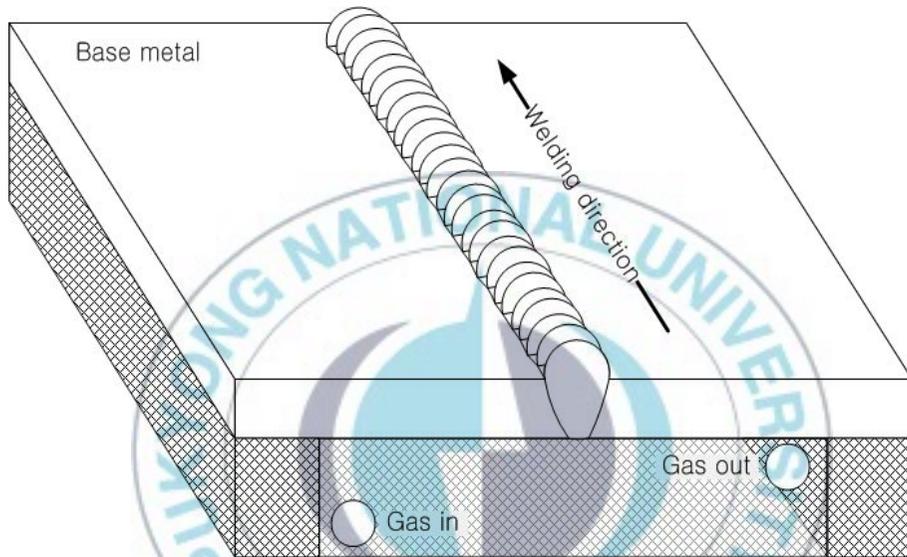


Fig. 3.2 Schematic of welding specimen

3.3 실험 결론 및 고찰

3.3.1 비드외관 및 용접 횡단면 비교

Table 3.2은 아크길이 변경에 따른 상부와 하부 비드외관을 나타내었다. 아크길이가 짧아질수록 표면 비드폭이 좁아졌고 이면 비드폭은 증가하는 경향을 보였다.

Table 3.2 Weld surface with arc length

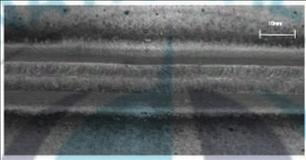
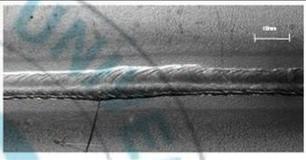
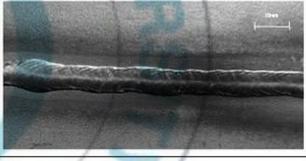
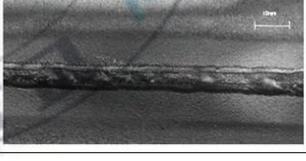
Arc length	표면	이면
1mm		
2mm		
3mm		

Table 3.3는 아크길이에 따른 용접 횡단면을 나타내었다. 아크길이가 짧아질수록 상부 비드폭은 좁아지고 하부 비드폭은 넓어지는 것을 확인할 수 있었다.

Table 3.3 WM cross section and with arc length

Arc length	cross section
1mm	
2mm	
3mm	

3.3.2 표면 및 이면비드 검토

Fig. 3.3은 아크길이에 따른 표면 및 이면 비드폭을 보여준다. 아크길이가 증가할수록 표면 비드폭이 증가하였고 이면비드폭은 감소하였다.

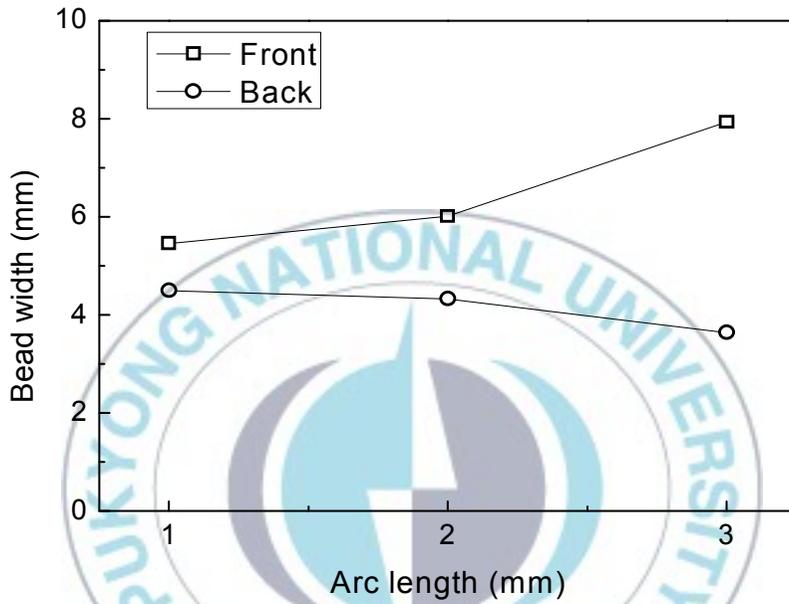


Fig. 3.3 Bead width with arc length

3.3.3 용입 형상비

Fig. 3.4는 아크길이에 따른 용입 형상비를 보여준다. 본 연구에서 검토한 용입 형상비는 용입을 비드 폭으로 나눈 값이다. 아크길이가 증가 할수록 표면 비드폭이 증가하여 용입 형상비가 작아졌다. 아크길이가 짧아질수록 빛과 열로 손실되는 열이 감소하여 아크효율이 증가하고 아크폭은 좁아지므로 비드폭이 좁아지고 좁은 통전면에 의해 전류밀도가 증가하여 깊은 용입을 가지게 되어 형상비가 증가한 것으로 판단된다. 따라서 형상비는 아크길이가 짧아질수록 변형에 유리한 큰 값을 가졌다.

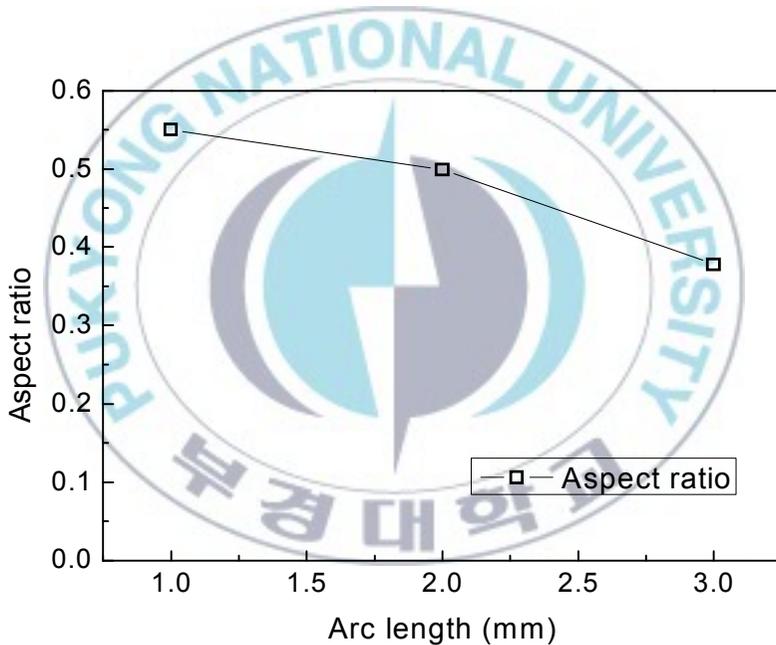


Fig. 3.4 Aspect Ratio with arc length

3.4 결론

아크길이에 따른 비드 특성 검토 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 아크길이 1~3mm 구간에서 아크길이가 짧아질수록 표면 비드폭이 좁아졌고 이면 비드폭은 넓어졌다. 아크길이가 짧아질수록 아크직경 이 감소하여 표면과 접촉되는 아크가 감소하고 대기중으로 아크열 손실이 줄어들어 용융효율이 증가한 결과이다.

2) 아크길이가 짧아질수록 형상비는 변형에 유리한 큰 값을 가졌다.



제 4 장 단차 존재 시 아크길이가 이면비드 형성에 미치는 영향 검토 실험

4.1 서언

본 장에서는 맞대기 용접에서 단차 존재 시 아크길이가 이면비드 생성에 미치는 영향을 관찰하였다. 단차는 1mm, 2mm 아크길이를 1mm, 2mm, 3mm로 하였고 실드가스는 100% Ar 으로 용접하여 용접 비드 외관 및 횡단면을 관찰하였다.

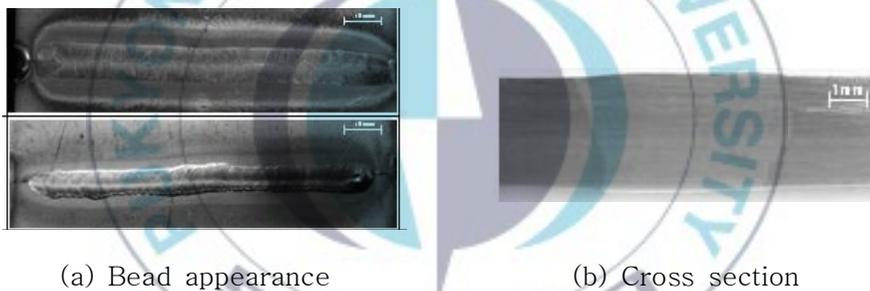


Fig. 4.1 Cross section and bead appearance in STS 304 3mmt

4.2 실험 재료 및 방법

4.2.1 실험 재료

길이 100mm, 폭 40mm, 두께 3mm의 STS 304 시편을 밀링 가공하여 2개를 맞대기 이음으로 단차를 1-2mm 생성시켜 양끝을 가접하였다. 루트 페이스 3mm를 가정하여 시편편 두께를 3mm로 하였고 단차는 실물 두께 10mm를 가정하여 단차 허용범위가 통상 소재두께의 80%mm가 적정 한계이므로 최대 2mm로 실험을 하였다¹⁶⁾.

산화방지를 위해 시편을 고정시킨 후 N_2 가스로 백 실딩을 하여 이면 비드가 미려하게 나오도록 하였다.

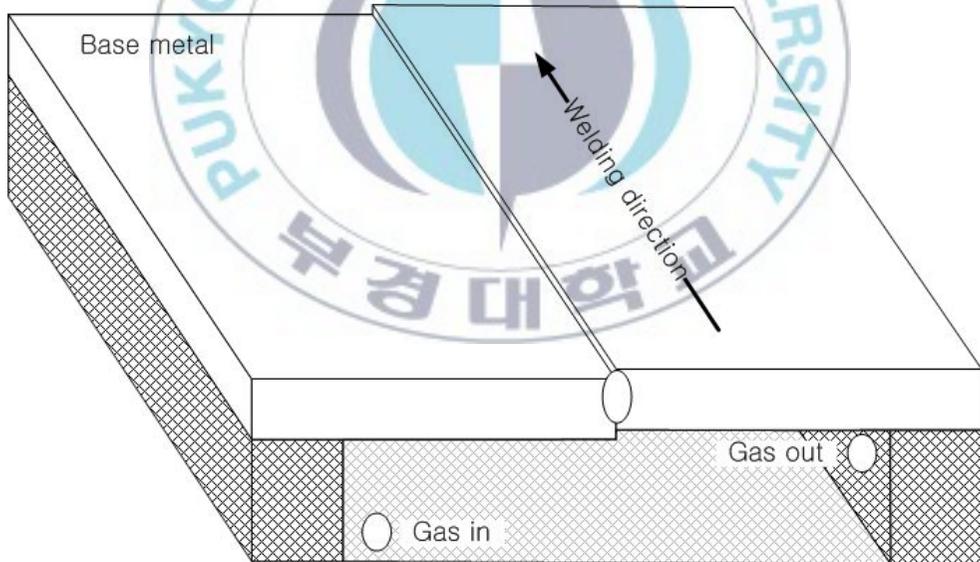


Fig. 4.2 Specimen for TIG welding

4.2.2 실험 방법

Table 4.1은 단차 존재 시 아크길이가 이면비드 형성에 미치는 영향에 대한 실험의 용접 조건이다.

Table 4.1 Welding condition for experiment

Fixed	Electrode	DCEN ϕ 2.4 2% Th-W45°
	Welding current	100A
	Shield gas	100% Ar, 15ℓ/min
	Welding speed	13cpm
	Back shield gas flow rate	100% N2, 5ℓ/min
Varied	Misalignment	1mm, 2mm
	Arc length	1mm, 2mm, 3mm

Fig. 4.2는 용접 모식도를 보여준다. 시편을 고정시킨 후 N2 가스로 백 실딩을 Table 4.2은 실험 순서를 나타내고 Fig. 4.3은 용접 후 비드폭 측정 모식도를 나타낸다. 시험편에서 A, B, C부분을 절단하여 정확한 데이터 획득을 위해 단면 연마 후 표면비드 및 이면비드를 측정하였다.

Table 4.2 Experiments list

No.	Misalignment	Arc length
1	0	1
2		2
3		3
4	1	1
5		2
6		3
7	2	1
8		2
9		3

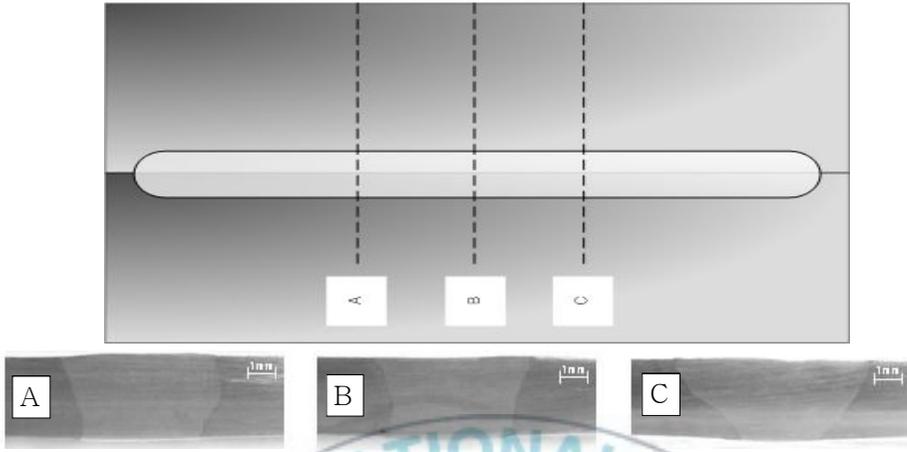
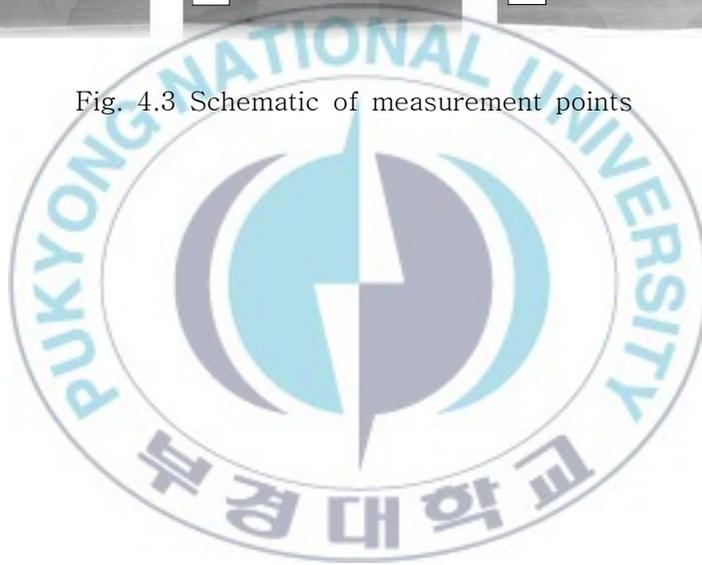


Fig. 4.3 Schematic of measurement points



4.3 실험 결과 및 고찰

4.3.1 표면과 이면 비드외관 및 용접 횡단면 비교

Table 4.3는 단차 0mm에서 아크길이 변경에 따른 표면비드, 이면비드 그리고 용접 횡단면을 보여준다.

아크길이가 증가 할수록 표면비드폭은 증가하였고 이면비드폭은 감소하였다.

Table 4.3 Bead appearance and cross section of misalignment 0mm

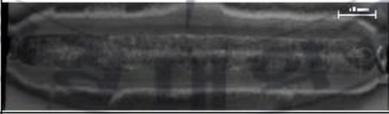
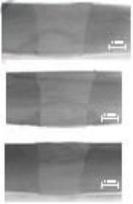
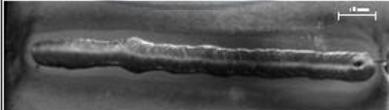
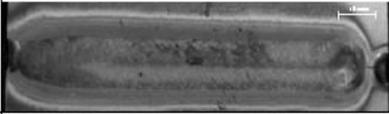
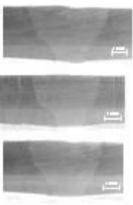
Misalignment 0mm , Arc length		Bead appearance	Cross section
1	Front		
	Back		
2	Front		
	Back		
3	Front		
	Back		

Table 4.4는 단차 1mm에서 아크길이 변경에 따른 표면비드, 이면비드 그리고 용접 횡단면을 보여준다.

아크길이가 증가 할수록 표면비드폭은 증가하였고 이면비드폭은 감소 하였으며 아크길이 3mm에서 이면비드가 형성되지 않았다.

Table 4.4 Bead appearance and cross section of misalignment 1mm

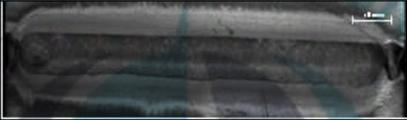
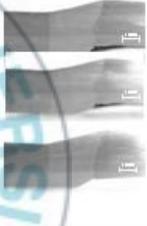
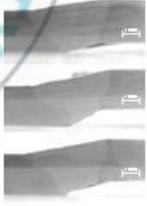
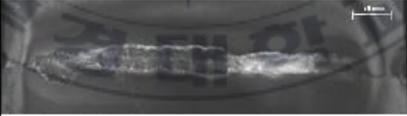
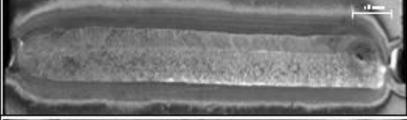
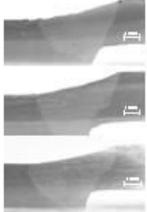
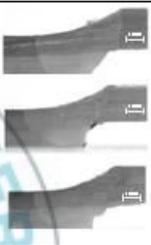
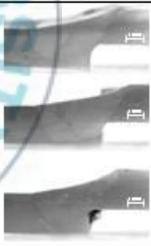
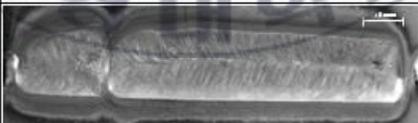
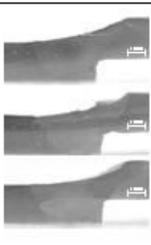
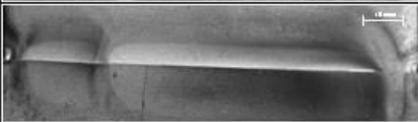
Misalignment 1mm , Arc length		Bead appearance	Cross section
1	Front		
	Back		
2	Front		
	Back		
3	Front		
	Back		

Table 4.5는 단차 2mm에서 아크길이 변경에 따른 표면비드, 이면비드 그리고 용접 횡단면을 보여준다.

아크길이가 증가 할수록 표면비드폭은 소폭 증가하였고 이면비드는 형성되지 않았다.

Table 4.5 Bead appearance and cross section of misalignment 2mm

Misalignment 2mm , Arc length		Bead appearance	Cross section
1	Front		
	Back		
2	Front		
	Back		
3	Front		
	Back		

4.3.2 표면 및 이면비드 검토

Fig. 4.5 - 4.6은 각각 단차와 아크길이 변경에 따른 수평 맞대기 용접의 표면비드와 이면비드 폭을 나타낸다.

아크길이가 증가할수록 표면 비드폭이 소폭 증가하였다. 하지만 이면비드폭은 아크길이가 증가할수록 급격하게 감소하였다.

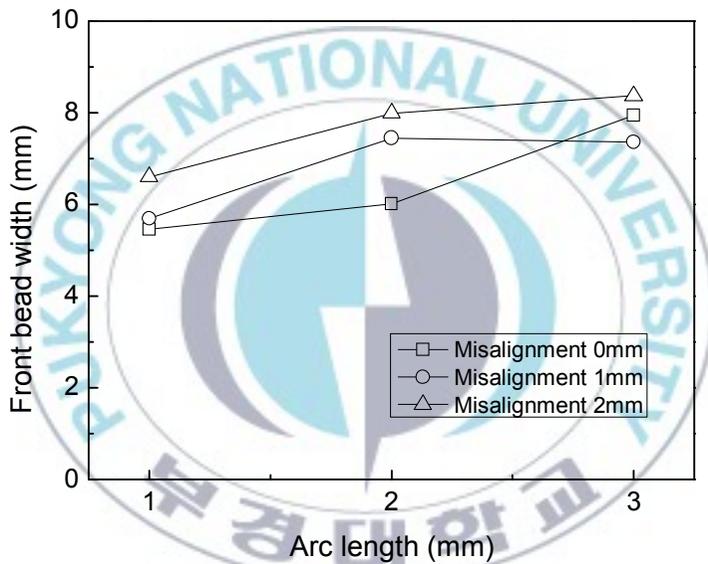


Fig. 4.5 Front Bead width with Arc length.

J. Eggersgluss, G. Krohert and J. Drube의 논문결과¹⁸⁾ 레이저 용접 시 단차는 소재 두께의 0.20배가 넘지 않아야지 건전한 이면비드가 생성된다고 결론되어있다. 본 연구의 결과에서 단차 1mm, 2mm에서 아크길이 3mm일 때 이면비드가 생성되지 않았으며 이는 단차가 모재두께의 0.20배가 넘는 0.33배와 0.67배이므로 같은 결과를 얻었다. 아크길이를 짧게 변경시켜 에너지 밀도를 높여 실험한 시편에서는 단차가 모재두께의 0.67배일 때는 여전히 이면비드가 형성되지 못했지만 단차가 모재두께의 0.33배일 때에 증가한 에너지 밀도로 인해 건전한 이면비드가 형성되었다.

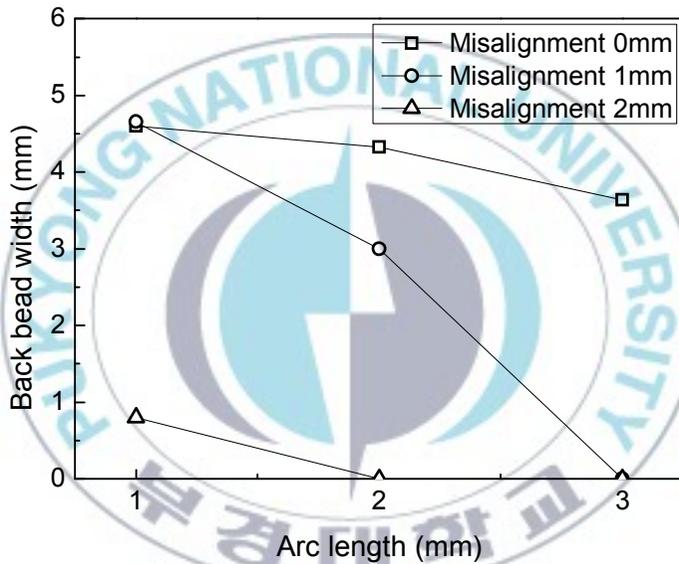


Fig. 4.6 Back Bead width with Arc length.

4.4 결론

수평 맞대기 용접 단차 존재 시 아크길이에 따른 표면 및 이면비드 생성에 관한 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 단차가 0mm에서 2mm로 증가할수록 표면 비드폭은 증가하였고 이면 비드폭은 감소하였다.
- 2) 단차 2mm에서는 이면비드가 생성되지 않았다.
- 3) 아크길이 2mm에서 단차가 증가할수록 표면비드폭은 증가하였고 이면 비드폭은 감소하였다.



제 5 장 단차 존재 시 아크길이와 백 베벨링이 이면비드 형성에 미치는 영향에 관한 실험

5.1 서언

본 장에서는 맞대기 용접에서 단차 존재 시 아크길이와 백 베벨링이 이면비드 생성에 미치는 영향을 관찰하였다. 단차는 1mm, 2mm 아크길이 1mm, 2mm, 3mm, 백 베벨링 0.5mm, 1.0mm, 1.5mm, 2.0mm, 100% Ar 으로 용접하여 비드 외관 및 횡단면을 관찰하였다. 백베벨링은 구조용강 용접기준에서 부등 두께 부재의 맞대기 이음부의 두께완화를 참고하여 설정하였다¹⁷⁾.



Fig. 5.1 Cross section and bead appearance in STS 304 3mm

5.2 실험 재료 및 방법

5.2.1 실험 재료

길이 100mm, 폭 40mm, 두께 3mm의 STS 304 시편을 밀링 가공하여 2개를 맞대기 이음으로 단차를 1mm, 2mm 생성시켜 백 베벨링 된 시험편과 양끝을 가접하였다.

산화방지를 위해 시편을 고정시킨 후 N_2 가스로 백 실당을 하여 이면 비드가 미려하게 나오도록 하였다.

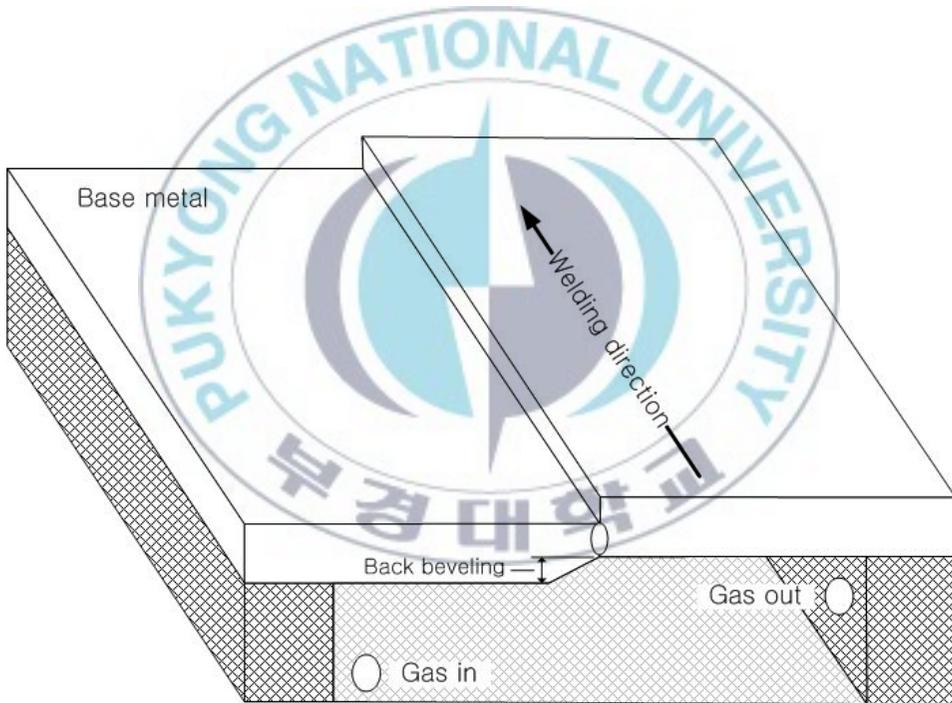


Fig. 5.2 Specimen for TIG welding

5.2.2 실험 방법

Table 5.1은 단차 존재 시 아크길이와 백 베벨링이 이면비드 형성에 미치는 영향에 대한 실험의 용접 조건이다.

Table 5.1 Welding condition for experiment

Fixed	Electrode	DCEN ϕ 2.4 2% Th-W45°
	Welding current	100A
	Shield gas	100% Ar, 15ℓ/min
	Welding speed	13cpm
	Back shield gas flow rate	100% N ₂ , 5ℓ/min
Varied	Misalignment	1mm, 2mm
	Arc length	1mm, 2mm, 3mm
	Back beveling	0.5mm, 1.0mm, 1.5mm, 2.0mm

Fig. 5.2는 용접 모식도를 보여준다. 시험편을 고정시킨 후 N₂ 가스로 백 실딩을 Table 5.2은 실험 순서를 나타내고 Fig. 5.3은 용접 후 비드폭 측정 모식도를 나타낸다. 시험편 중앙 B부분과 20mm 떨어진 A, C부분을 절단하여 3개의 횡단면을 관찰하여 용입 특성을 검토하였다. 정확한 데이터 획득을 위해 단면 연마 후 마크로 예칭한 후 CAD 디지털링하여 표면 비드 및 이면비드를 측정하였다.

Table 5.2 Experiments list

No.	Misalignment	Arc length	Beveling height
1	1	3mm	0.5mm
2			1.0mm
3			0.5mm
4	2	1mm	1.0mm
5			1.5mm
6			2.0mm
7			0.5mm
8			1.0mm
9			1.5mm
10	3	2mm	2.0mm
11			0.5mm
12			1.0mm
13			1.5mm
14			2.0mm

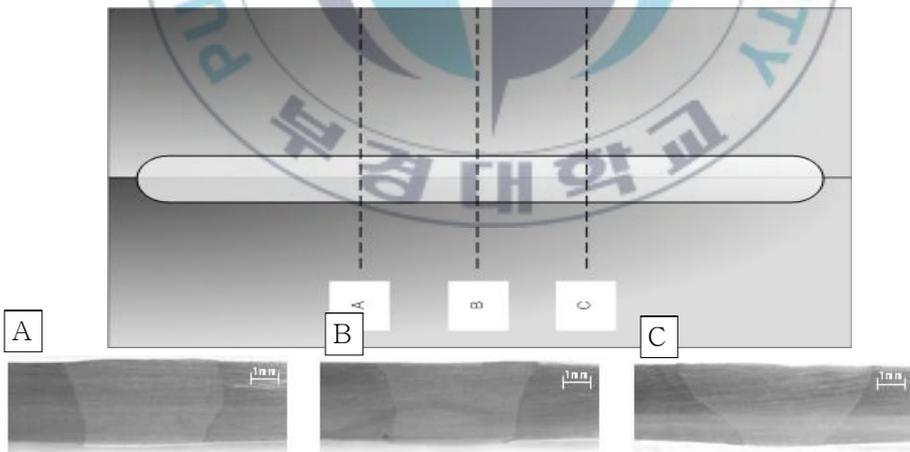


Fig. 5.3 Schematic of measurement points

5.3 실험 결과 및 고찰

5.3.1 표면과 이면 비드외관 및 용접 횡단면 비교

Table 5.3는 실험 순서에 따라 단차 1mm일때 아크길이 3mm에서 백 베벨링 변경실험의 표면비드, 이면비드 그리고 용접 횡단면을 보여준다.

표면비드는 미려하게 나왔으며 아크길이 3mm에서 백 베벨링을 하지 않으면 이면비드가 형성되지 않았지만 백 베벨링을 0.5mm, 1.0mm하여 용접한 결과 양호한 이면비드가 형성되어 백 베벨링의 유효성을 검증하였다.

Table 5.3 Bead appearance and cross section of misalignment 1mm

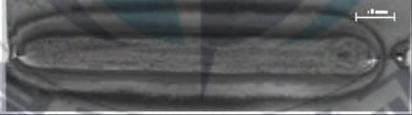
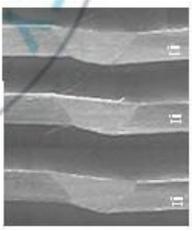
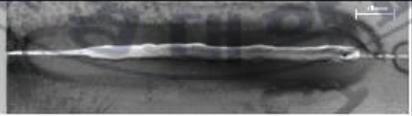
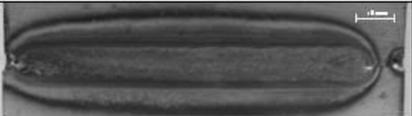
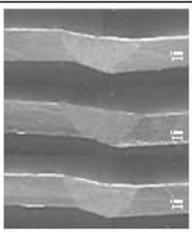
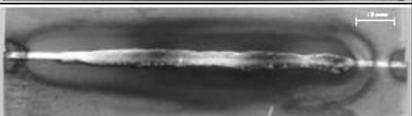
Arc length 3mm , Back beveling height		Bead appearance	Cross section
0.5	Front		
	Back		
1.0	Front		
	Back		

Table 5.4는 실험 순서에 따라 단차 2mm일때 아크길이 1mm에서 백 베벨링 변경실험의 표면비드, 이면비드 그리고 용접 횡단면을 보여준다.

백 베벨링 0.5mm, 1.0mm, 1.5mm 실험 결과 이면비드가 형성되지 않았다. 하지만 백 베벨링을 2.0mm한 시험편에서 이면비드가 양호하게 형성되었다.

Table 5.4 Bead appearance and cross section of misalignment 2mm

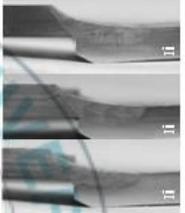
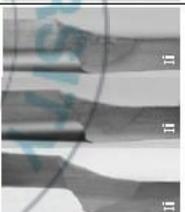
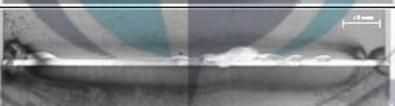
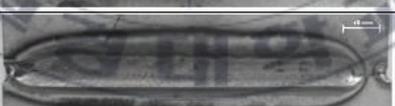
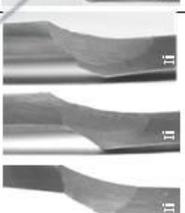
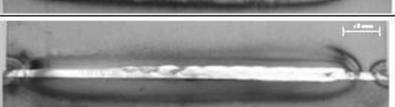
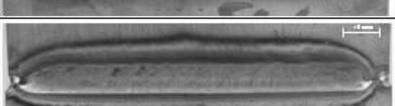
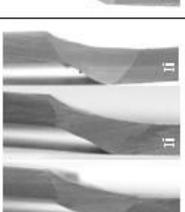
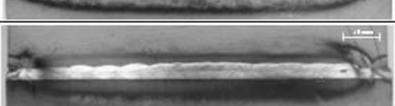
Arc length 1mm , Back beveling height		Bead appearance	Cross section
0.5	Front		
	Back		
1.0	Front		
	Back		
1.5	Front		
	Back		
2.0	Front		
	Back		

Table 5.5는 실험 순서에 따라 단차 2mm일때 아크길이 2mm에서 백 베벨링 변경실험의 표면비드, 이면비드 그리고 용접 횡단면을 보여준다.

백 베벨링을 0.5mm, 1.0mm한 실험 결과 이면비드가 형성되지 않았다. 하지만 1.5mm, 2.0mm 양호한 이면비드가 형성되었다.

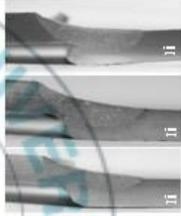
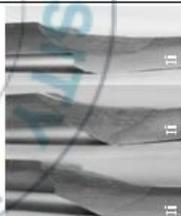
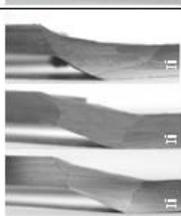
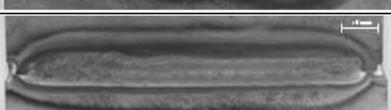
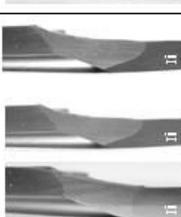
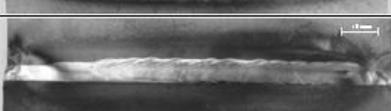
Table 5.5 Bead appearance and cross section of misalignment 2mm

Arc length 2mm , Back beveling height		Bead appearance	Cross section
0.5	Front		
	Back		
1.0	Front		
	Back		
1.5	Front		
	Back		
2.0	Front		
	Back		

Table 5.6는 실험 순서에 따라 단차 2mm일때 아크길이 3mm에서 백 베벨링 변경실험의 표면비드, 이면비드 그리고 용접 횡단면을 보여준다.

백 베벨링 0.5mm, 1.0mm 실험 결과 이면비드가 형성되지 않았다. 하지만 백 베벨링을 1.5mm, 2.0mm한 시험편에서 이면비드가 양호하게 형성되었다.

Table 5.6 Bead appearance and cross section of misalignment 2mm

Arc length 3mm , Back beveling height		Bead appearance	Cross section
0.5	Front		
	Back		
1.0	Front		
	Back		
1.5	Front		
	Back		
2.0	Front		
	Back		

5.3.2 표면과 이면비드 검토

Fig. 5.4는 단차 1mm, 아크길이 3mm에서 백 베벨링 0mm, 0.5mm, 1.0mm 변경에 따른 표면비드와 이면비드 폭을 나타낸다

표면 비드폭은 아크길이가 증가 할수록 소폭 증가하였지만, 백 베벨링 높이에 따른 변화는 없었다.

이면 비드폭은 백 베벨링 높이가 증가 할수록 급격하게 증가하였다.

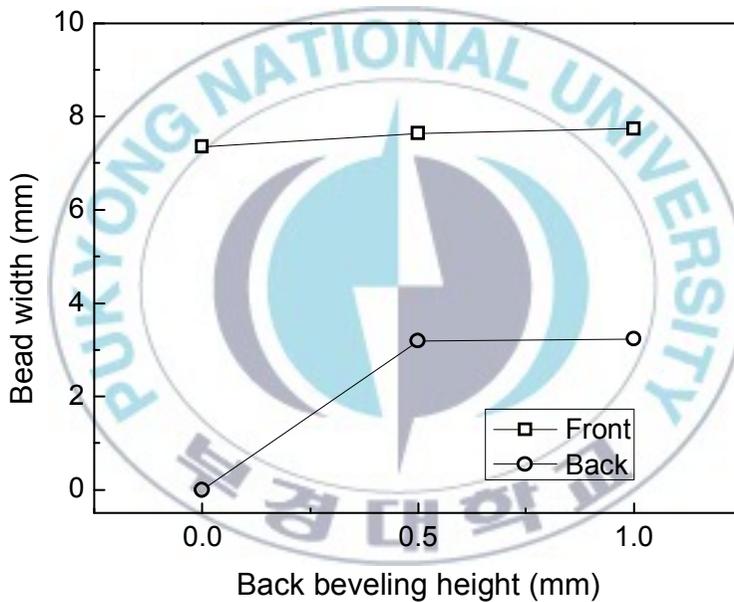


Fig. 5.4 Bead width with beveling height.

Fig. 5.5 - 5.6은 단차 2mm, 아크길이 1mm, 2mm, 3mm에서 백 베벨링 변경에 따른 표면비드와 이면비드 폭을 나타낸다

표면 비드폭은 아크길이 증가 할수록 소폭 증가하였지만, 백 베벨링 높이에 따른 변화는 없었다.

이면 비드폭은 백 베벨링 높이가 증가 할수록 급격하게 증가하였다. 단차 2mm에서 백 베벨링 높이 1mm 이하 시험편은 이면비드가 부분적으로 생성되었지만 시험편 최 하단 엷지부가 용융되지 않았다.

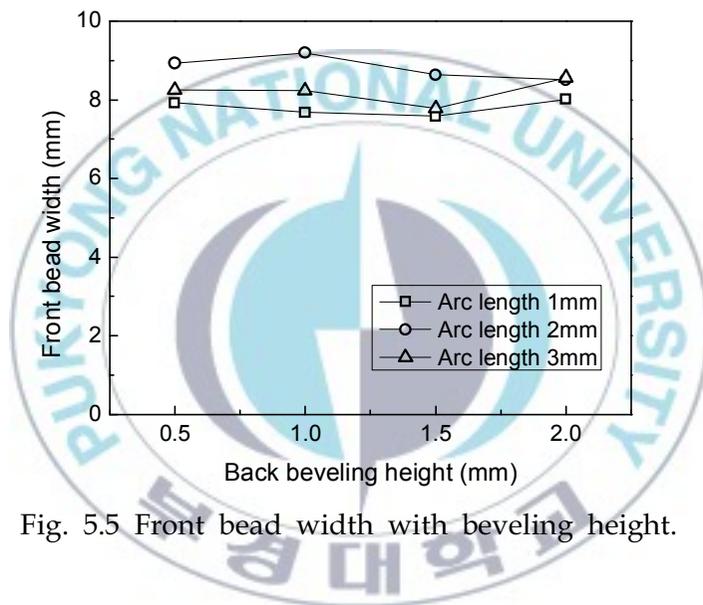


Fig. 5.5 Front bead width with beveling height.

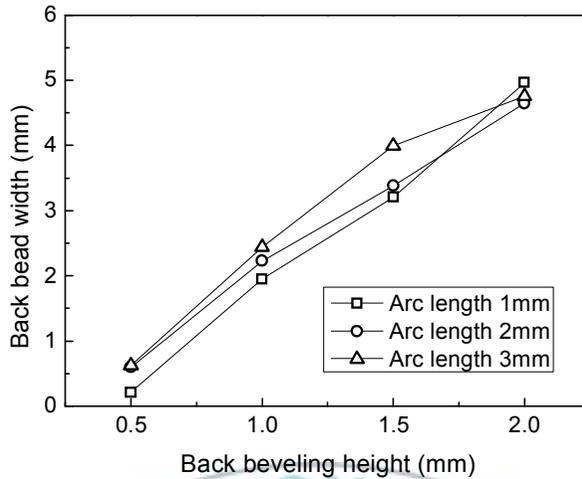


Fig. 5.6 Back bead width with beveling height.

단차 1mm, 2mm 모두 단차와 동일하게 백 베벨링 한 시험편이 가장 이면비드 폭이 넓게 형성되었고 언더컷과 같은 결함이 발생되지 않아 양호한 이면비드가 형성되었다고 판단된다.

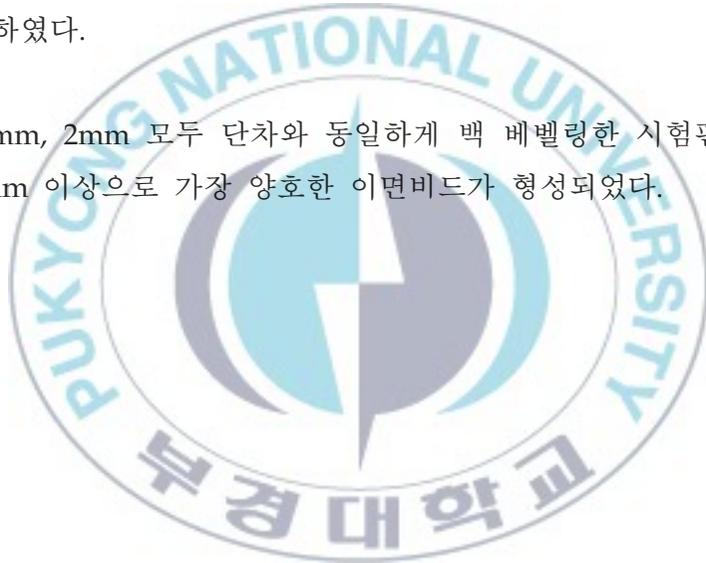
단차 존재 시 아크길이가 단차 만큼 증가하여 에너지 밀도가 감소하였지만 백 베벨링이 단차와 동일하게 되어 있어 용융 체적이 감소하고 이면 쪽으로의 냉각이 감소하여 양호한 이면비드가 형성된 것으로 판단된다.

Inspection standard for shipbuilding supervision¹⁹⁾에서는 단차의 최대 허용 범위 3mm 이내로, 모재 두께의 0.20배로 규정한다. 규정에 맞춰 시험편 두께를 10mm로 가정하고 루트페이스 3mm에서 단차가 2mm 존재 할 때 전류를 단차에 따라 변경하지 않고 동일하게 고정하면서 이면비드를 양호하게 형성시킬 수 있는 백 베벨링 기법을 개발하였다. 파이프 오비탈 용접에서 문제시 되는 3시에서 경사 하진 할 때 텅스텐 전극과 용융풀의 접촉을 막기 위해 아크길이를 길게하여 전류를 상승시켜 이면비드를 얻고 있는 기존의 방법에 백 베벨링 기법을 적용하여 전류의 변동없이 아크길이를 일정하게 고정하여 양호한 이면비드를 얻을 수 있을 것이라 판단된다. 결과적으로 기존보다 강건한 프로세스를 개발하였고 수동 파이프 오비탈 용접에서 자동으로 전환할 수 있는 하나의 결과를 얻었다.

5.4 결론

수평 맞대기 용접 단차 존재 시 아크길이와 백 베벨링에 따른 표면 및 이면비드 생성에 관한 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 단차 1mm에서 백 베벨링이 0mm에서 1mm로 증가할수록 표면 비드 폭은 소폭 증가하였고 이면비드폭이 3mm이상으로 양호하게 형성되었다.
- 2) 단차 2mm에서 백 베벨링이 0mm에서 2mm로 증가할수록 이면 비드 폭이 증가하였다.
- 3) 단차 1mm, 2mm 모두 단차와 동일하게 백 베벨링한 시험편의 이면비드폭이 4mm 이상으로 가장 양호한 이면비드가 형성되었다.



제 6 장 결론

스테인리스강 3mm TIG 맞대기 용접 루트패스에서 단차 존재 시 아크길이와 백 베벨링이 이면비드 형성에 미치는 영향을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 아크길이 3mm에서 1mm로 감소할수록 표면 비드폭은 약간 감소하였으나 이면 비드폭은 증가하였다. 아크길이 짧아질수록 에너지 밀도가 증가하고 아크 압력이 좁은 영역에 작용되어 용융금속을 밀어내는 힘이 증가하여 이면비드폭이 증가한 것으로 판단된다.
- 2) 단차 1mm일때 아크길이 3mm에서이면비드가 형성되지 않았고 단차 2mm에서는 아크길이 1mm, 2mm, 3mm 모두 이면비드 형성이 불가능 하였다.
- 3) 최대 단차 2mm에서 백 베벨링을 단차만큼 가공함으로써 아크길이 1mm, 2mm, 3mm 모두에서 양호한 이면비드가 형성되어 아크길이 변동에 강건한 프로세스를 개발할 수 있었다.

참 고 문 헌

- 1) 김덕원 : 자동차용 주철 금형 트리밍 날의 경화육성용접 공정개발, 부경대학교 대학원 석사학위 청구논문(2005), pp. 6
- 2) 조상명 : 용접공정 개론, (2002), pp. 19
- 3) Patrcio F. Mendez, Krista L. Niece and Tomas W. Eagar : Humping Formation High Current GTA Welding, ASM International, In proceedings International Conference on Joining of Advanced and Speciality Materials II, (Materials Solutions Conference and Exposition), OH, (ASM International), November 1999.
- 4) R. T. C Choo, J. Szekely and R. C. Westhoff : Modeling of High-Current Arcs with Emphasis on Free Surface Phenomena in the Weld Pool, Welding Journal, AWS, 69(9), 1990, 346s~361s.
- 5) Patrcio F. Mendez, Krista L. Niece and Tomas W. Eagar : Humping Formation High Current GTA Welding, ASM International, In proceedings International Conference on Joining of Advanced and Speciality Materials II, (Materials Solutions Conference and Exposition), OH, (ASM International), November 1999.
- 6) R. T. C Choo, J. Szekely and R. C. Westhoff : Modeling of High-Current Arcs with Emphasis on Free Surface Phenomena in the Weld Pool, Welding Journal, AWS, 69(9), 1990, 346s~361s.
- 7) J. F. Lancaster : The Physics of Welding, Pergamon Press, England, 1984.
- 8) M. Satou : Fundamentals of Welding, Arc Phenomenon, Journal of the Japan Welding Engineering Society, 45-9, 149~153. (in Japanese)
- 9) AWS : Welding Handbook, Vol. 2, 8th Ed, 1991.

- 10) N. S. Tsai, : Heat Distribution and Weld Geometry in Arc Welding, Doctor of Philosophy, MIT, 1983.
- 11) R. T. C Choo, J. Szekely and R. C. Westhoff : Modeling of High-Current Arcs with Emphasis on Free Surface Phenomena in the Weld Pool, Welding Journal, AWS, 69(9), 1990, 346s~361s.
- 12) Manabu Tanaka : Numerical study of gas tungsten arc plasma with anode melting, Science direct Vacuum 73 (2004) pp. 381-389
- 13) V. Vel Murugan and V. Gunzaral : Effects of process parameters on angular distortion of gas metal arc welded structural steel plates, Welding journal (2005) pp. 165-171
- 14) 박정웅 : 용접변형(2), 대한용접학회 제22권 제5호 (2004) pp. 395-397
- 15) J. Tusek and M. Suban : Experimental research of the effect of hydrogen in argon as a shielding gas in arc welding of high-alloy stainless steel, International journal of hydrogen energy 25(2000) pp. 369-376
- 16) 대한용접학회 : 용접 · 접합 편람, (1998), pp.121-122
- 17) ANSI/AWS D1.1-96 : 구조용강 용접기준 PP.57
- 18) J.Eggersgluss,G.KrohertandJ.Drube:Weldingofthinsheetmetals, LaserAssistedProcess,ECO-1(1988),pp.38-421
- 19) Korea register of shipping : Inspection standard for shipbuilding supervision, 1992. 2, p19

학위과정 중 주요 발표논문

1. 임성빈, 함효식, 하종문, 서지석, 김근수, 우정문, 조상명, 연강과 스테인리스강 TIG용접에서 실드가스 유량이 용융효율에 미치는 영향, 대한용접학회 춘계학술발표대회 논문집, 제51권, 2009. 04, pp. 141
2. 함효식, 하종문, 임성빈, 오동수, 조상명, TIG용접에서 용융지표면에 작용하는 아크압력과 실드가스압력의 측정 및 응용, 대한용접학회 춘계학술발표대회 논문집, 제51권, 2009. 04, pp. 61
3. 하종문, 함효식, 임성빈, 서지석, 김근수, 우정문, 조상명, TIG용접의 표면 실드가스가 위보기 및 경사상진 자세의 이면 비드에 미치는 영향, 대한용접학회 춘계학술발표대회 논문집, 제51권, 2009. 04, pp. 139
4. 함효식, 임성빈, 하종문, 서지석, 조상명, 후관 스테인리스강 용접에서 높은 용입 형상비의 저변형 ATIG용접 공정 개발, 대한용접 접합학회 추계학술발표대회, 2009. 11. 27
5. 하종문, 함효식, 임성빈, 서지석, 조상명, 위보기 및 경사상진자세의 TIG용접에서 비드 성형기의 물리적 힘에 의한 용융지 제어, 대한용접 접합학회 추계학술발표대회, 2009. 11. 27
6. 서지석, 하종문, 함효식, 임성빈, 조상명, Arc용접에서 CDP Gas Nozzle에 의한 비드 성형기의 물리적 힘에 의한 용융지 제어, 대한용접 접합학회 추계학술발표대회, 2009. 11. 27
7. 임성빈, 함효식, 하종문, 서지석, 조상명, 스테인리스강 TIG 맞대기 용접 루트 패스에서 단차 극복을 위한 공정 개발, 대한용접 접합학회 추계학술발표대회, 2009. 11. 27

8. 조상명, 함효식, 김효원, 임성빈, 하종문, 정연호, 서지석, 가스력을 이용한 고효율 전자세 용접기와 그 방법, 2009. 04. 20특허출원
9. 조상명, 함효식, 김효원, 임성빈, 하종문, 정연호, 서지석, 가스노즐, 이를 구비하는 용접토치조립체 및 용접장치, 2009.09.24 특허출원
10. 조상명, 함효식, 김효원, 임성빈, 하종문, 정연호, 서지석, 백비드 성형장치 및 이를 구비하는 오비탈 용접기, 2009.09.24 특허출원



감사의 글

2007년 겨울 용접IT연구실을 처음 들어왔을 때 모든 것이 낯설고 잘 해낼 수 있을지, 연구실에 들어온 것이 잘 한건지 의문이었습니다. 하지만 지금은 그때의 선택이 옳았다는 것을 당당하게 말할 수 있습니다. 그리고 3년간의 연구실 생활이 제가 사회로 당당하게 나갈 수 있는 힘을 주었습니다.

학문뿐 아니라 인생의 큰 가르침을 주시고 앞으로 나아갈 방향을 제시 해주신 조상명 교수님께 먼저 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

학부 및 대학원 과정을 지도해주시고, 논문 완성까지 질책과 격려를 아끼지 않으셨던 김우열 교수님, 박홍일 교수님, 김성규 교수님, 이병우 교수님, 방국수 교수님, 서원찬 교수님, 이길근 교수님께 진심으로 감사의 마음을 올립니다.

연구실에 처음 들어와 부족한 저에게 많은 것을 가르쳐 주시고 지금은 사회로 나가 인정받고 계신 조진안, 윤승중, 김대만, 고찬식, 추용수, 문영덕, 추환수, 이정현 선배님 그리고 친구 박인기, 김성덕 동생인 황규민, 김효원, 윤영현, 배광무에게 머리 숙여 감사드립니다. 그리고 지금도 실험실에서 저에게 많은 도움을 주시는 고명훈, 고미혜 선배님 실험실 기둥이자 언제나 많은 힘이 되어준 함효식 그리고 든든한 후배 서지석, 신희섭, 손창희, 김남규, 변재규, 전재호, 이지은, 연구실원 모두를 언제나 따뜻하게 돌봐주시는 박미숙 비서님, 3년동안 같이 고생한 대학원 동기 김성호, 정연호, 하중문, 박경도에게 진심으로 감사드립니다.

끝으로 지금까지 학업을 계속할 수 있게 뒤에서 묵묵히 지원해주신 어머니 그리고 누나에게 진심으로 머리 숙여 감사드리면서 이 논문을 마칩니다