

工學碩士 學位論文

펄스 TIG용접에서 펄리 와이어
송급속도에 따른 아크압력 변동이
용입에 미치는 영향

指導教授 趙相明

이 論文을

學位論文

출함



釜慶大學校 産業大學院

소재프로세스工學科

金 鎮 佑

金鎮佑의 工學碩士 學位論文을 認准함

2003年 12月

主 審 工學博士

金 雨 烈



委 員 工學博士

李 秉 雨



委 員 工學博士

趙 相 明



목 차

Abstract -----	3
제 1 장 서 론 -----	4
1.1 연구배경 및 필요성 -----	4
1.2 연구목적 및 개요-----	5
제 2 장 이론적 배경 -----	6
2.1 아크현상 -----	8
2.2 GTA 용접현상 -----	11
2.3 아크형상과 아크압력 -----	15
제 3 장 필러 와이어를 사용한 펄스 TIG 비드용접 -----	18
3.1 서 언 -----	18
3.2 실험방법 -----	19
3.3.1 아크모니터링 시스템과 켈리브레이션 -----	20
3.3.2 펄스전류 세기에 따른 TIG비드용접 -----	22
3.3.3 필러 와이어 송급속도에 따른 TIG비드용접 -----	23
3.3 실험결과 및 고찰 -----	24
3.3.1 펄스전류세기에 따른 비드외관 및 용입 -----	24
3.3.2 필러 와이어 송급속도에 따른 비드외관 및 용입 -----	27

3.3.3 필터 와이어 송급속도에 따른 용입 및 용입면적 -----	30
3.4 결 언 -----	33
제 4 장 텅스텐 봉 끝 위치에 따른 아크압력 측정 -----	34
4.1 서 언 -----	34
4.2 실험방법 -----	35
4.3 실험결과 및 고찰 -----	37
4.4 결 언 -----	46
제 5 장 결 론 -----	47
참고문헌 -----	48

The Effects of the Arc Pressure Variation as the Filler Wire Feed Rate on the Penetration in Pulsed TIG Welding

Jin-Woo Kim

Department of Material Processing Engineering, Graduate School,
Pukyong National University

Abstract

In a general TIG bead welding, the faster wire feeding rate is, the narrower bead is and the shallower penetration is. Otherwise, the slower wire feeding rate is, the wider bead is and the deeper penetration is.

In this study, it was in the standpoint of the arc pressure that the relation between wire feed rate and the penetration were investigated. The arc pressure is varied according to the depth-into-arc of the filler wire in pulsed TIG welding. The parameters investigated were the welding current and the filler wire feeding rate. The pure Ar gas was used as a shield gas. By making the experiment on the arc pressure, We could know that the arc pressure was in proportion to the square of welding current and was fluctuated as the depth-into-arc of the tungsten rod. Instead of the filler wire, the tungsten rod was supplied into the molten pool to prevent from melting the filler wire. The arc pressure was measured as the depth-into-arc of the tungsten rod by using the manometer. So, We could know the effect of the wire's depth-into-arc on the arc pressure. It was proved that the arc pressure got higher as the wire feed rate was slow. We could verify that the arc pressure had effect on the penetration and bead shape. By changing the wire feed rate, the penetration could be controlled and bead shape apt to the purpose and the design could be made.

Key Words: Pulsed TIG welding, Arc pressure, Wire feeding rate, Manometer, Penetration, Tungsten rod, Molten pool

제 1 장 서 론

1.1 연구배경 및 필요성

TIG(Tungsten Inert Gas)용접은 아크가 안정적이며, 용접부 품질이 우수하기 때문에 고급용접 및 각종 배관의 초층용접에 주로 사용되고 있다. 가스 메탈 아크 용접과 비교하면 낮은 용접속도 때문에 생산성이 낮은 단점이 있지만, 대구경 파이프 오비탈 용접 시 적층용접, 초내열 합금과 같은 고급재료의 육성용접 등¹⁾과 같이 고품질이 요구되는 부분에는 필러 와이어를 이용한 다층 TIG용접법이 적용된다. 다층 TIG용접의 경우, 제살 TIG용접과는 달리 용접전류와 필러 와이어 송급속도에 대해 정량적으로 고려되어야 한다.

TIG용접의 비드형성에서 아크압력은 가장 중요한 인자 중 하나이다. 텅스텐 전극 형상, 특히 선단각도, 선단절단경의 변화에 따른 아크압력 특성과 용입변화가 보고되었고,¹⁾⁻⁴⁾ 전극각도와 용입형상과의 관계가 플라즈마 기류의 관점에서 보고되었다.⁵⁾

1.2 연구 목적 및 개요

용접공정은 강한 아크 빛, 폼 가스 등 열악한 공정으로 인해 자동화가 절실히 요구된다. 특히 TIG 용접공정은 항공산업, 발전소 설비 등의 용접부 신뢰성이 크게 요구되는 산업기반 시설과 반도체 공장이나 식품 생산 공장과 같이 용접부의 청정성이 요구되는 산업 시설 등에 매우 중요하게 사용된다. 박판이나 후판용접 등 용접부의 용도와 사양에 따라 비드폭, 비드 높이와 용입 등이 다르게 되는데, 본 연구는 많은 인자들 중에서도 필러 와이어의 송급속도와 비드외관, 필러와이어의 송급속도와 용입과의 관계를 규명하기 위해 수행되었다.

본 연구는 필러 와이어의 송급속도, 송급위치와 비드형성의 관계를 규명하기 위해 수행되었고, 이를 아크압력의 관점에서 고찰하였다. 펄스용접 시 I_p , I_b 에 따라 용융지에 미치는 최대아크압력을 필러 와이어 대신 텅스텐 봉을 사용하여 그 끝 위치에 따라 측정하였고, 이 때의 아크압력이 용접부의 용입 정도에 미치는 영향에 대해 고찰하여 기술하였다.

제 2 장 이론적 배경

금속학적 용접, 접합은 접합 대상 부위를 가열시키거나 외력을 가하여 재료 상호간에 용해 및 응고, 확산, 소성변형 등의 금속학적 현상을 동반하는 접합 형태이다.

이들은 다시 접합 현상에 따라 용융용접, 고상용접, 브레이징 및 솔더링 등으로 분류되며, 용융용접은 접합부를 국부적으로 가열하여 모재의 용융을 수반하는 접합방법으로서 용점이 같거나 비슷한 금속재료의 접합에 주로 이용된다. 또, 금속학적용접, 접합법은 Table 2.1과 같이 분류할 수 있다. 에너지 원으로서의 전기아크 또는 전기저항 등과 같은 전기적 에너지, 화학반응에 의한 화학적 에너지, 마찰 에너지 등이 사용되고 있다.

아크용접법은 아크방전에 의해 발생하는 열원(약 6000℃)으로 용접부를 가열, 용융시켜 접합시키는 방법으로 전극이 열원 및 용가제의 역할을 동시에 수행하는 소모전극식(SMAW, GMAW, SAW, EGW)과 전극이 단순히 열원으로만 사용되는 비소모 전극식(GTAW, PAW)으로 구분할 수 있다. 또 이들은 보호가스 및 사용 용가제의 종류에 따라서도 여러 가지 용접법으로 구분되고 있다.

특히, 가스 텅스텐 아크 용접(GTAW)과 같이 아크 방전에 의해 모재를 용융, 접합시키는 용접법에 있어서 아크 자체의 특성 및 아크방전이 발생하는 전극의 특성은 용접품질에 직접적으로 연관되어 있으므로 아주 중요하다.

Table 2.1 Classification of various welding

에너지원	용접법	열 원	압력부가 여부	보호 방법	비 고
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	
	화학적 에너지	DFW	복사열	약한압력	가스보호
EXW		-	극심한 변형	보호없음	고상용접
TW		반응물질	압력없음	플럭스	
기계적 에너지	CW	-	극심한 변형	보호없음	고상용접
	FRW	저항열	소성변형	보호없음	고상용접
	USW	저항열	약한 압력	보호없음	고상용접

(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
 GMAW : gas metal arc 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
 USW : ultrasonic welding

2.1 아크 현상

2.2.1 아크의 원리

아크 용접은 용접봉과 모재 사이에 전기적 방전에 의하여 발생하는 고온의 아크를 이용하여 모재를 접합하는 방법이며 그 방법에 따라서는 용접봉이나 용가재가 아크에 의하여 용융 및 모재로 이행되기도 한다. 아크 용접 공정에서 열원으로 사용하는 아크는 전기적으로 중성이며 이온화된 기체로 구성된 플라즈마(Plasma)이다. 그러므로, 용접 아크의 원리를 이해하려면 플라즈마의 발생 원리와 특성을 이해하는 것이 필요하다.

기체는 온도가 증가하면 기체를 구성하고 있는 분자의 운동량이 증가하며, 분자간의 충돌에 의하여 이온화되어 플라즈마 상태로 변화한다. 플라즈마는 일반적으로 고온이며 전기적으로 중성인데 기체의 종류 및 양극과 음극의 재질에 따라 특성이 변화한다. 아크는 방전구간의 전압과 전류에 따라 Fig. 2.1에 나타난 바와 같이 여러 구역으로 나뉘어지며, 용접에서 사용되는 아크는 10A 이상의 고전류 플라즈마임을 알 수 있다.

아크의 발생 조건으로는 양극과 음극 사이의 전압을 거리로 나눈 전압 기울기(Voltage gradient)가 중요한 역할을 한다. 전압 기울기가 일정값 이상으로 증가하면 전극사이에서 스파크가 발생하며 양 극 사이의 기체가 이온화되면서 방전에 의하여 전류가 흐르게 된다. 수소(H₂)나 질소(N₂)와 같은 2원자 분자는 온도가 증가하면 먼저 분자가 원자로 해리되고 그 다음 해리된 원자가 이온화 된다. 기체가 이온화되는 비율인 이온화율은 기체의 온도와 압력, 이온화 전압 등에 영향을 받으며, 아래의 Saha 식으로 표현된다.

$$\frac{\alpha^2}{1-\alpha^2} \times \frac{p}{p_0} = CT^{2.5} \exp(-eV_1/kT)$$

여기서, α : 이온화율

p : 압력

T : 온도

V_1 : 1차 이온화 전압

k : Boltzmann 상수

Saha 식은 아르곤(Ar)이나 헬륨(He) 등의 단일 원자 가스에 대하여 적용이 가능하지만 혼합가스나 이온화에 선행하여 해리가 일어나는 탄산가스(CO₂) 등에는 적용하기 곤란하다. 그러나, 이 식은 용접조건이 이온화율에 미치는 영향을 추정하는 데 유용하게 사용된다. 이온화 전압은 기체의 원소가 이온화하기 위하여 요구되는 전압이며, 압력이 일정하면 이온화율은 온도가 상승함에 따라 증가한다. 일정한 온도와 압력에서 이온화 전압이 낮으면 이온화율은 높아진다. 불활성 기체의 이온화 전압은 일반 기체에 비하여 높다. 또한 금속의 이온화 전압은 일반적으로 기체에 비하여 낮으므로 쉽게 이온화된다. 일반 아크 용접에서 계산한 이온화율은 상당히 낮아서 1% 미만이다.

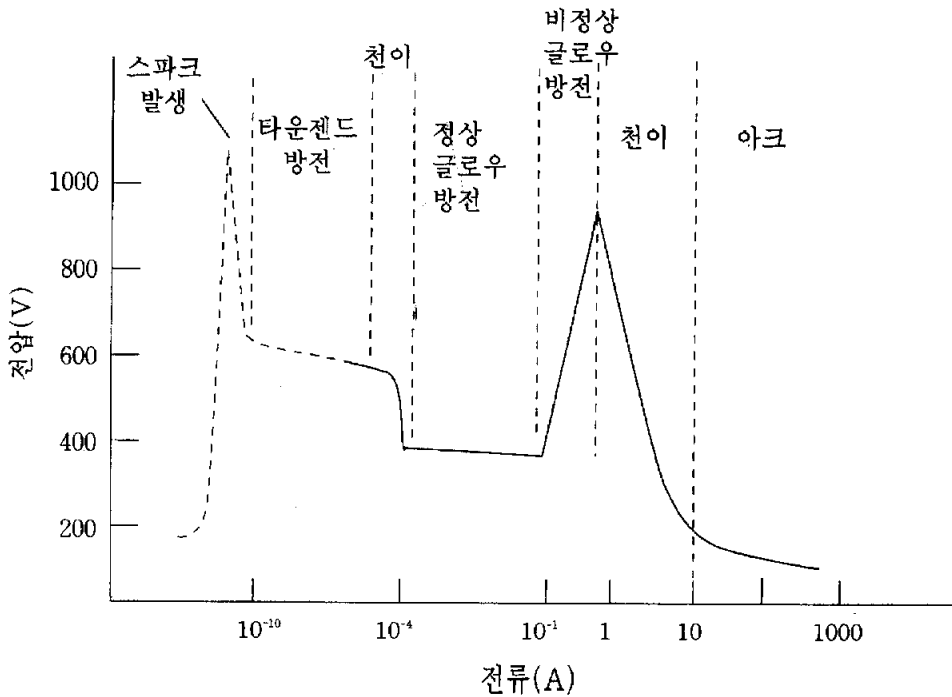


Fig. 2.1 Current-voltage characteristics of discharge

2.1.2 아크의 특성

아크는 Fig. 2.2에 나타낸 바와 같이 아크 길이(또는 아크전압강하)에 따라 양극전압강하(Anode voltage drop)구역, 음극전압강하(Cathode voltage drop)구역 및 플라즈마 혹은 아크기둥의 3구역으로 구분된다.

양극과 음극 전압강하구역은 아크기둥에 비하여 작기 때문에 전압 기울기는 매우 높으며 대략 $10^9 \sim 10^{12}$ V/m 이다. 또한, 이 구역의 전압은 아크 길이의 변화에 무관하게 일정하지만, 전극의 재질과 가스 종류에 따라 변화한다. 전자의 무게는 양자에 비하여 훨씬 가볍기 때문에 아크에서 전류의 흐름은 전자에 의하여 유지된다. 양극과 양극 전압강하 구역은 아크에서 발생한 전자를 받아들여 아크를 유지시키는 역할을 수행한다. 아크기둥은 전기적으로 중성이며, 저항열에 의하여 고온을 유지한다. 아크기둥의 전압기울기는 대략 10^3 V/m로서 양극과 음극 강하구역의 전압기울기에 비하여 매우 작다.

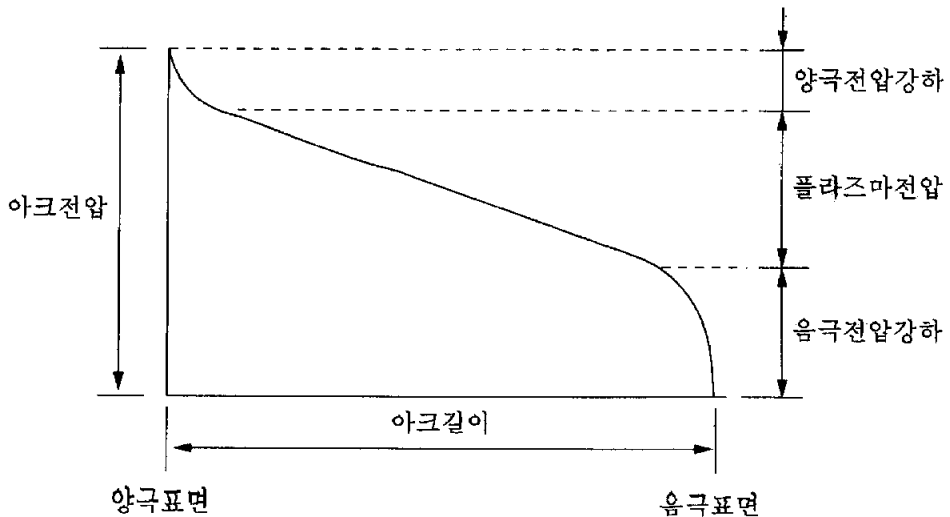


Fig. 2.2 Voltage characteristics of arc

2.2 GTA 용접 현상

2.2.1 GTA 용접의 원리

가스 텅스텐 아크용접(Gas Tungsten Arc Welding, GTAW)은 Fig. 2.3에 보인 바와 같이 텅스텐 전극을 사용하여 발생한 아크 열로 모재를 용융시켜 접합하며, 용가재를 공급하여 모재와 함께 용융시키기도 한다.

보호 가스로는 모재와 텅스텐 용접봉의 산화를 방지하기 위하여 불활성 가스인 아르곤(Ar)이나 헬륨(He) 등을 사용하므로 TIG 용접(Tungsten Inert Gas Welding)으로 부르기도 한다.

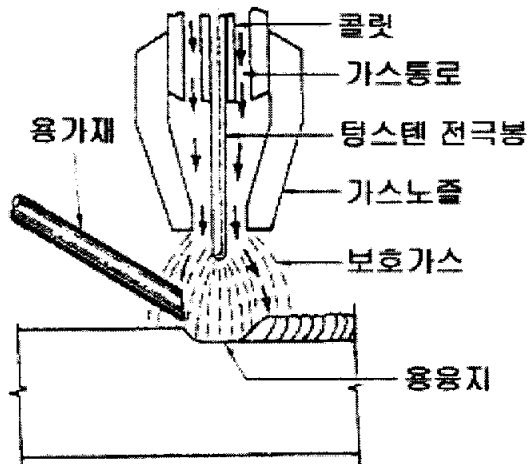


Fig. 2.3 Schematic of GTAW process

Fig. 2.4는 일반적인 GTAW 시스템의 모식도이다. 페달스위치를 밟으므로써 아크를 발생시켰고, 본 실험에서 사용된 용가재 공급은 별도의 자동 필터 와이어 송급장치를 통해 정속적으로 송급하였다.

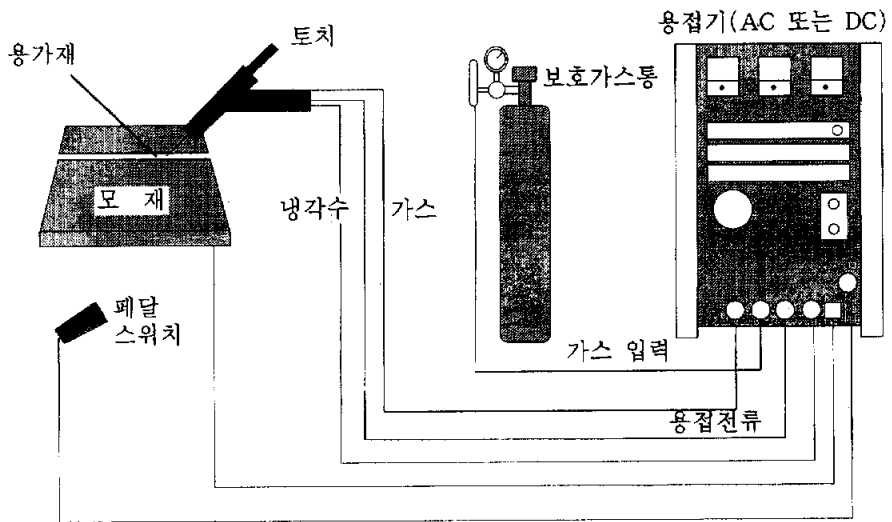


Fig. 2.4 Diagram of GTAW system

2.2.2 펄스 TIG 용접

열에 의한 변형을 감소시키기 위한 방법으로는 Fig. 2.5와 같은 펄스 형태의 전류를 사용한다. 펄스 전류를 사용하면 직류에 비하여 입열 에너지와 변형을 감소시키며 동일한 평균 전류값으로 용입을 증가시킨다. 이 때 피크 전류(peak current)구간에서는 용입을 증가시키고, 베이스 전류(base current)구간에서는 아크와 모재의 용융상태를 유지시키는 역할을 한다. 펄스 전류를 사용하려면 적절한 피크와 베이스 전류 및 지속시간을 선정하여야 한다. 펄스 전류를 사용하면 용융지의 유동이 증가하여 응고 과정에서 결정이 성장하는 것을 방해하므로 금속 조직이 미세화되어 용접부의 기계적 성질도 향상된다.

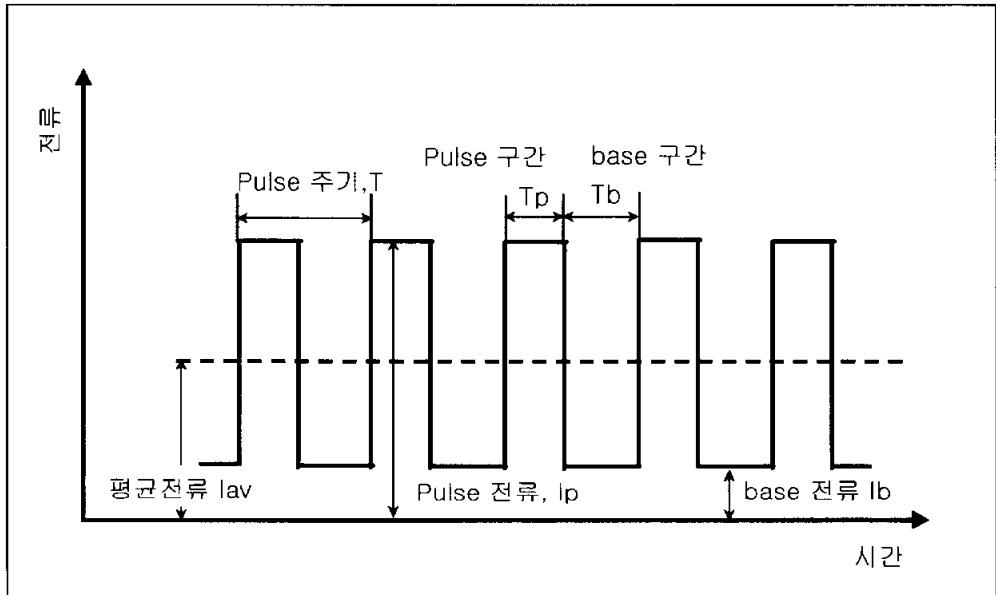
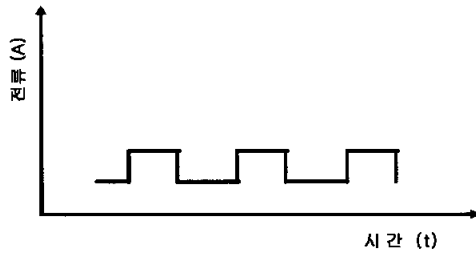
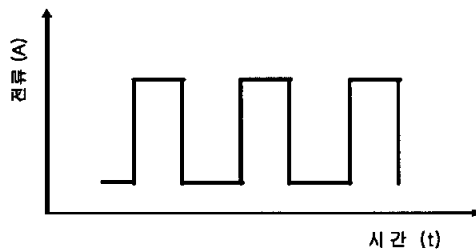


Fig. 2.5 Waveform of pulse current

- ① 펄스 주파수 = $1/(\text{펄스주기})$, Hz
- ② 피크 전류 : 큰 아크력 형성, 깊은 용입 지배, 용융지 크기 증가, 입열량 증가
- ③ 베이스 전류 : 용융지 크기 감소, 입열량 감소
- ④ 펄스 폭 : 큰 아크력의 작용시간 조절, 입열량 조절, 용융지 크기 조절
- ⑤ 용융지의 크기 = mQ (Q : 입열량)
- ⑥ 피크 전류의 비 = 피크전류/베이스전류 :
 - 작을 때 → 용융지의 크기 변동 감소, 아크력 변동 감소
 - 클 때 → 용융지의 크기 변동 증가, 아크력 변동 증가



(a) Peak current ratio is low



(b) Peak current ratio is high

Fig. 2.6 Peak current ratio

2.3 아크형상과 아크압력

Fig. 2.7은 아크압력의 개념을 그림으로 설명한 것이다.⁶⁾ 용접이 진행되면서, 아크가 아크압력에 의해 아크 직하의 용융금속을 짓누르면서 아크 직하의 용융지부터 비드정점까지의 높이, 즉 정수압 (ρgh)과 아크압력, P_{Arc} 가 균형을 이루면서 비드높이가 결정된다. 실제로는 표면장력의 영향 또한 크지만, 본 연구에서는 간단하게 하기 위해 무시하였다. 여기서, 아크압력 P_{Arc} 는 전류와 전류밀도의 곱에 비례하므로, 전류를 일정하게 하고, 용접속도를 높이면 작은 비드를 형성하게 되며, 용접금속은 P_{Arc} 와 균형을 이루는 높이, h 까지 불려져서 쌓이게 된다. 아크압력을 낮추기 위해 용접전류를 낮추면 용착량이 부족하게 되므로, 속도의 한계가 있게 되고, 용착량을 증가시키기 위해 전류를 증가시키면 P_{Arc} 가 증가하므로, 보다 볼록비드의 경향으로 된다.

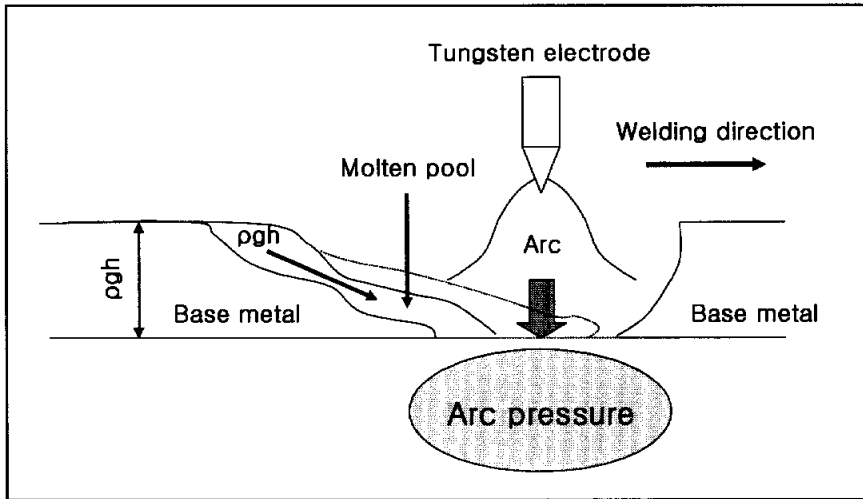


Fig. 2.7 Explanation of arc pressure

Fig. 2.8은 종 모양의 아크형상을 촬영한 것이다.

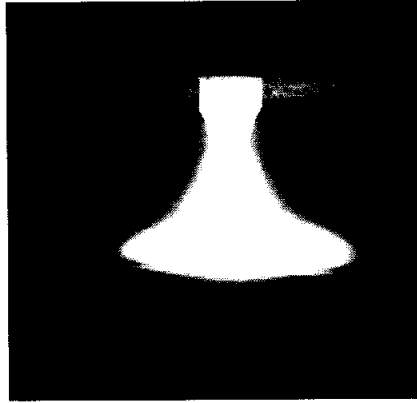


Fig. 2.8 Shape of arc like a bell

Fig. 2.9은 마노메타를 사용하여 계측한 초기 전극 팁의 형상에 따른 아크 압력 분포를 나타낸 것이다. Cho 와 Seo¹⁾의 보고에서 인용한 것으로서, 전극 팁의 재질과 형상에 관계없이 계측한 아크 압력은 전극 팁의 중심부 직하가 가장 높고 전극 팁의 중심에서 멀어질수록 아크 압력은 감소하는 경향을 나타내었다. 또한, Fig. 2.8에서 종 모양의 아크형상과 똑같이 아크압력의 분포상태도 종 모양으로 나타나고 있다.

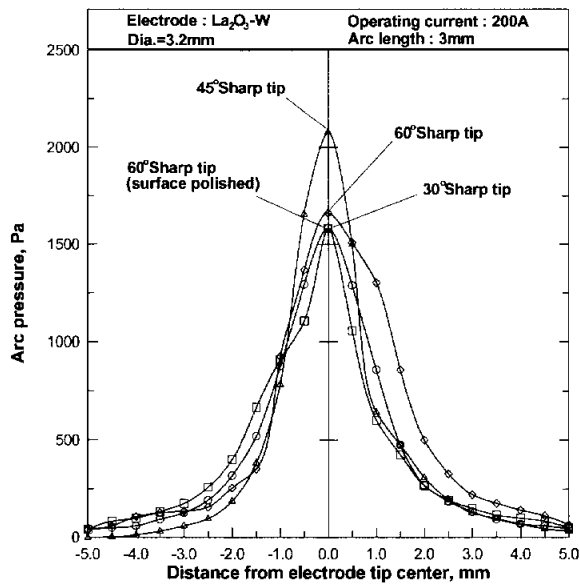


Fig. 2.9 Arc pressure distribution of various electrode tips

제 3 장 필러 와이어를 사용한 펄스 TIG 비드용접

3.1 서 언

필러와이어를 사용한 펄스 TIG용접에서 펄스전류의 세기와 필러와이어의 송급속도에 따라 비드용접을 실시하였다.

펄스전류의 세기와 필러 와이어의 송급속도에 따라 비드외관과 용입정도가 달라지게 되는데, 그 원인과 결과를 아크압력의 관점에서 고찰하였다.

3.2 실험방법

Fig. 3.1은 필러 와이어를 사용하여 아래보기자세로 자동 용융주행(melt run)용접을 하기 위해 필러 와이어 자동 송급기를 TIG용접 토치에 부착하여 고안한 장치이다. 사용한 모재는 연강판재로서 두께 3 mm로 한쪽면을 연마하여 녹을 완전히 제거하여 사용하였다. 공업용 Ar 가스를 유량 10 l/min로 송급하였고, 전극 마이너스 극성으로 하여 직류용접만을 실시하였으며, 전극은 2% ThO₂-W (직경3.2mm)으로 하였다. 용접토치는 정속주행하도록 자동주행대차에 부착되었고, 필러 와이어(ϕ 1.2)의 송급각도는 20~25도¹⁰⁾, 필러 와이어의 송급속도를 조절함으로써, 용융지 내에서 필러 와이어의 끝 위치를 다르게 하여(F_f , F_m , F_s , Non-filler) 비드용접을 실시하였다.

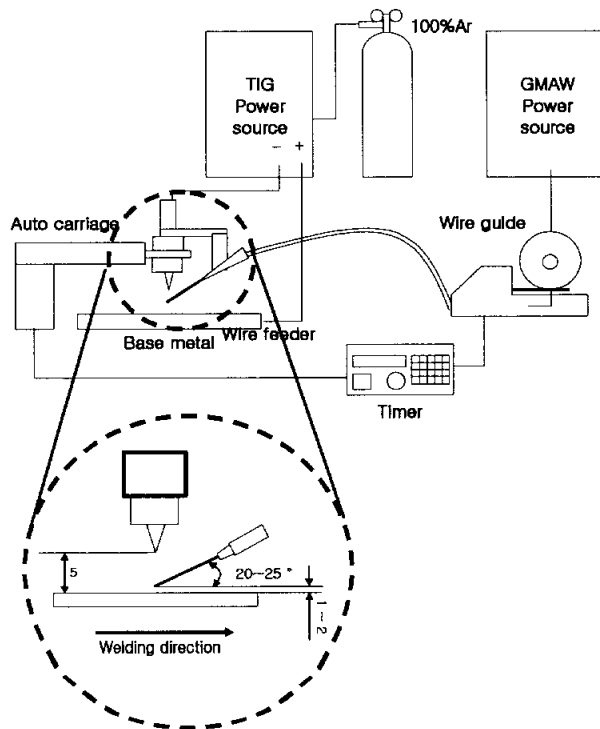


Fig. 3.1 Schematic of filler wire TIG welding experiment

3.2.1 아크 모니터링 시스템의 캘리브레이션

Fig. 3.2는 아크모니터링 시스템(이하 계측기)의 캘리브레이션 data를 나타낸 것이다. 용접실험을 정확하게 행하기 위해 용접전류를 계측하였고, 그 전류값을 확인한 후 실험하였다. 보이는 바와 같이, 측정되는 용접전류값은 표준전류와 거의 일치함을 볼 수 있다.

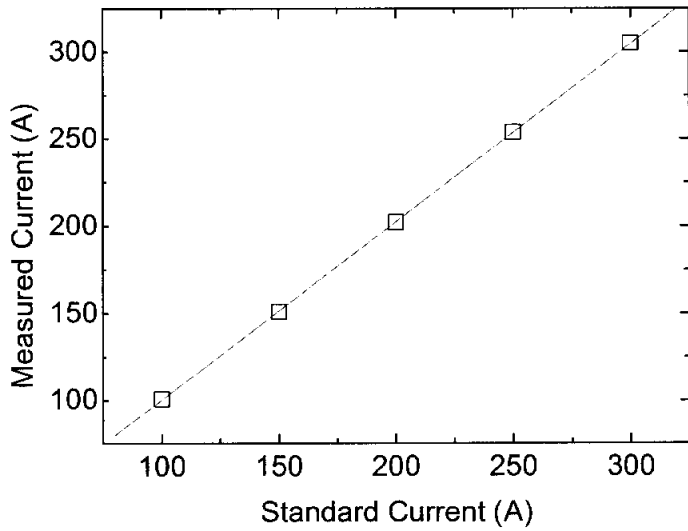


Fig. 3.2 Calibration of arc monitoring system

Fig. 3.3은 I_p : 200A, I_b : 60 A, pulse frequency; 4Hz, pulse width; 50% 의 용접조건으로 용접하였을 때, 모니터링 된 용접전류와 용접전압의 파형을 나타낸 것이다. 1초 동안 4 cycle의 pulse주기를 갖는 것을 볼 수 있다.

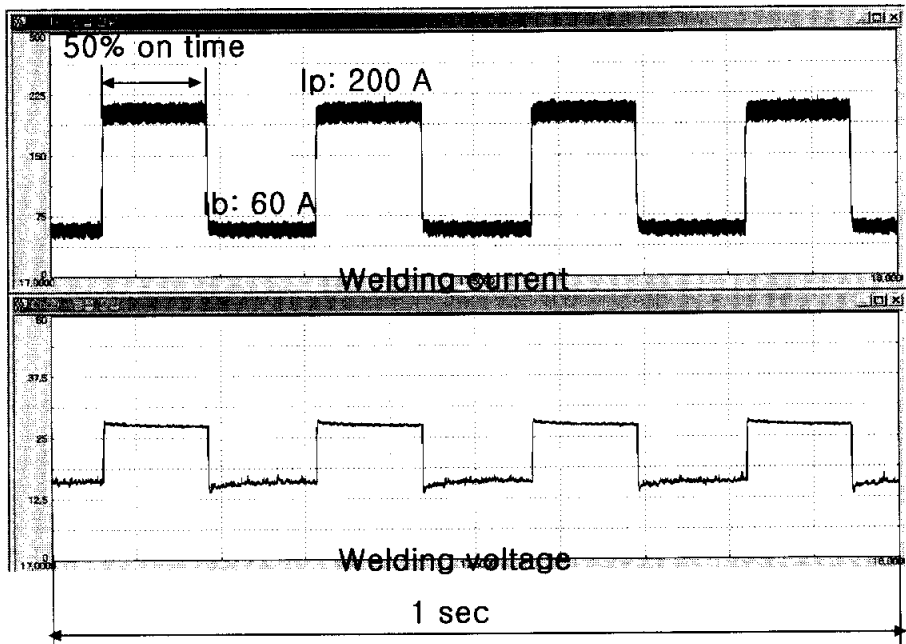


Fig. 3.3 Waveform of welding current & voltage in pulsed TIG welding

3.2.2 펄스전류 세기에 따른 비드외관 및 용입

Table 3.1은 펄스 TIG 비드용접 실험조건을 나타낸 것이다. 필러 와이어 송급속도가 같고, 평균전류가 130 A인 모두 같은 상태에서 펄스 전류를 각각 다르게 조절하여(Non-pulse, I_p : 200A, I_p : 300 A) 펄스 TIG 비드용접을 행하였다. I_p : 300 A에서는 펄스폭을 조절하여 평균전류 130A로 맞추었다.

필러 와이어의 송급위치는 용접진행방향에 대하여 전방으로 하였고,¹⁰⁾ 작업각 90도, 진행각 0도로 하였다.

Table 3.1 The condition(I) of TIG welding with filler wire

Base metal		Mild steel 150×40×2t
Angle of tungsten electrode		45°
Diameter of filler wire		φ 1.2
I_p (I_b : 60A)		300 A
		200 A
		Non-pulse
$I_{avg.}$		130 A
Pulse frequency		4 Hz
Welding speed		20 cpm
Supply of filler wire	Angle	20 ~ 25°
	Speed	110 cpm
	Position	Forward supply

3.2.2 필러 와이어 송급속도에 따른 비드외관 및 용입

Table 3.2는 펄스 TIG 비드용접실험조건을 나타낸 것이다. 필러 와이어 송급속도를 각각 다르게 조절하여 송급위치가 다르게 되도록 하였으며, 용접속도는 20cpm으로 정속주행하였다.

필러 와이어의 송급위치는 용접진행방향에 대하여 전방으로 하였고, 작업각 90도, 진행각 0도로 하였다.

Table 3.2 The condition(II) of TIG welding with filler wire

Base metal		Mildsteel 150×40×2t	
Angle of tungsten electrode		45°	
Diameter of filler wire		φ 1.2	
Ip (Ib: 60 A)		200 A	
Iavg.		130 A	
Pulse frequency		4 Hz	
Welding speed		20 cpm	
Supply of filler wire	Angle	20 ~ 25°	
	Speed	F _f [*]	173 cpm
		F _m ^{**}	110 cpm
		F _s ^{***}	74 cpm
Position	Forward supply		

*: fast feed rate **: middle feed rate ***: slow feed rate

3.3 실험결과 및 고찰

3.3.1 펄스전류세기에 따른 비드외관 및 용입

Fig. 3.4 은 필러 와이어를 사용하여 펄스 TIG 비드용접을 하기 위한 장치사진이다. 토치 옆에는 필러 와이어 자동송급기가 부착되어 있다. 용접진행방향에 대해 전방에서 와이어를 송급하였다.

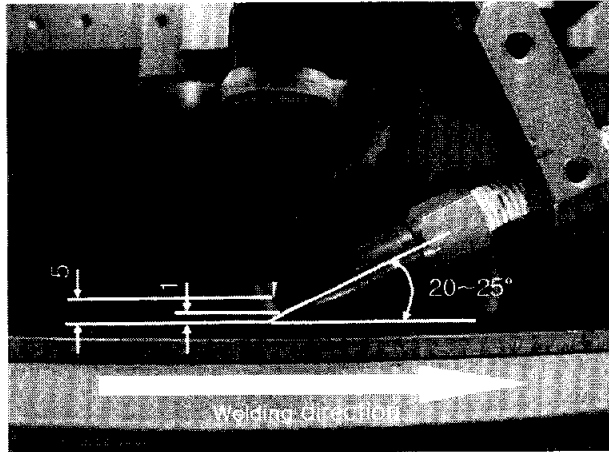


Fig. 3.4 Equipment of TIG welding with filler wire

Fig. 3.5는 Cho의 보고³⁾에서 인용한 것으로 최대아크압력과 용접전류의 관계를 나타내고 있다. 최대아크압력은 용접전류의 제곱에 비례함을 알 수 있다.

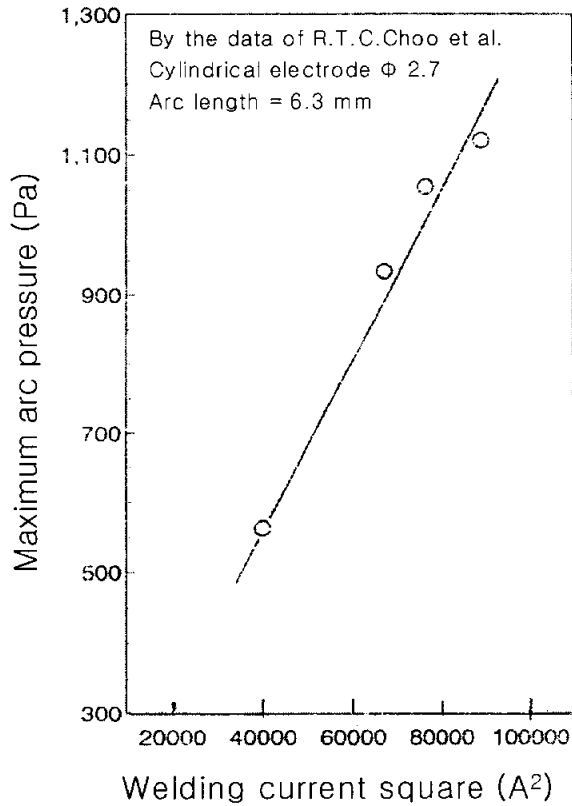


Fig. 3.5 Relation between maximum arc pressure and welding current square ^{3),4)}

Fig. 3.6은 Table 3.1에 있는 용접조건으로 펄스 TIG 비드용접한 후 비드외관과 마크로 단면사진을 나타낸 것이다. 동일한 필러 와이어 송급속도 (110 cpm)에서 평균전류는 130A 로서 같고, 펄스전류인 I_p 를 다르게 한 용접비드로서 각각 Non-pulse, I_p : 200A, 300A 조건에서 행한 것이다. 비드 폭과 용입이 각각 Non-pulse < 200A < 300A 순으로 나타났다.

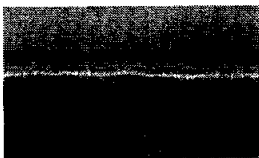
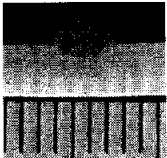
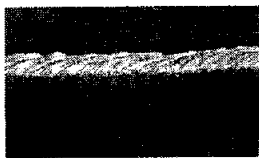
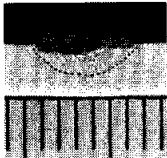
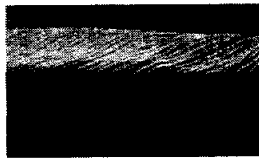
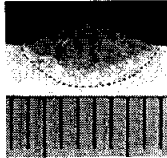
Wire feed rate	Current		Bead appearance	Peneration
Fm (110 cpm)	Non-pulse	130A		
	Pulse (Iavg.: 130A)	I_p 200A		
		I_p 300A		

Fig. 3.6 Bead appearance and penetration according to welding current

3.3.2 필러와이어 송급속도에 따른 비드외관 및 용입

Fig. 3.7은 필러 와이어 TIG 비드용접 시의 사진이다. Fig. 3.1, 3.2의 설명대로 용접진행방향에 대해 와이어는 전방에서 송급하였다.

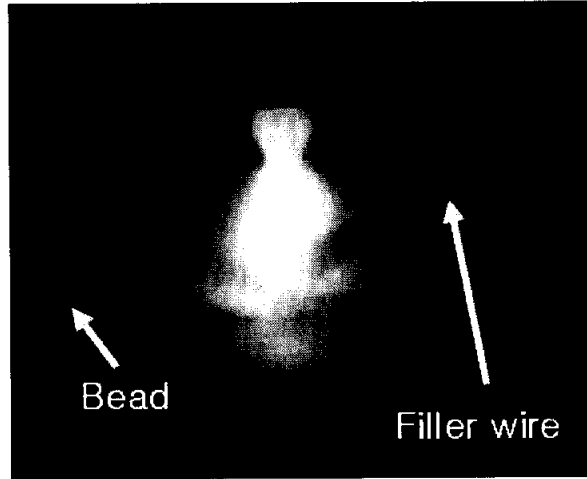


Fig. 3.7 The actual image of TIG welding with a filler wire

Fig. 3.8은 Table 3.2의 용접조건으로 펄스 TIG비드용접한 후 비드외관
과 마크로 단면사진을 나타낸 것이다. 동일한 펄스용접전류에서 용접비드
폭과 용입은 필러와이어의 송급속도에 따라 다르게 나타났고, 그 순서는 각
각 $F_f < F_m < F_s < \text{Non-filler}$ 였다.

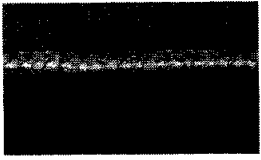
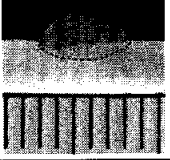
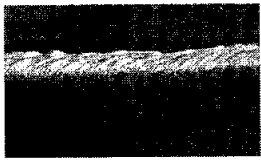
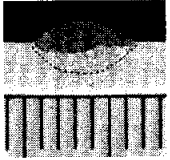
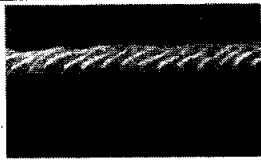
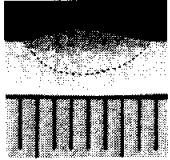
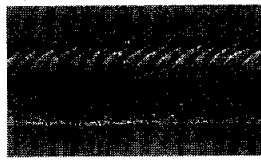
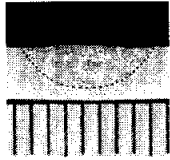
End position of filler wire	Wire feed rate (cpm)	Bead appearance	Peneration
Ff	173		
Fm	110		
Fs	74		
Non-filler	-		

Fig. 3.8 Bead appearance and penetration according to feed rate of filler wire in pulsed TIG welding (Average current: 130A, I_p : 200A)

3.3.2 필터 와이어 송급속도에 따른 용입 및 용입면적

Fig. 3.10은 Fig. 3.8에서 마크로 단면사진의 용입과 용입면적을 필터 와이어 끝 위치에 대해 나타낸 것이다. Fig. 3.9는 용입면적을 계산한 방법을 설명한 것이다. 마크로 단면에서 용입부의 세 점(그림 참조)을 연결하여 만든 삼각형, S1의 면적을 계산하여 용입면적으로 나타냈다. 용입면적의 정확한 계산법은 아니지만, 근사값을 계산함으로써 아크압력과 용입면적과의 정성적인 관계를 보기위해 이용하였다. Fig. 3.10은 Fig. 3.9의 설명과 같이 용입면적을 계산하여 필터 와이어의 송급위치에 따른 용입과 용입면적을 나타낸 것이다. 용입과 용입면적은 필터 와이어의 송급속도에 따라 비례하는($F_f < F_m < F_s < \text{Non-filler}$) 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 적절한 비드를 얻기 위해서는 적절한 송급속도가 필요하다고 할 수 있다. 루트패스와 같이 용입이 깊은 용접이 요구될 때는 와이어 송급속도를 늦게 하는 것이 바람직하고, 얇은 용입의 비드를 블록하게 쌓는 육성용접과 같은 경우는 와이어 송급속도를 높게 하는 것이 바람직하다.

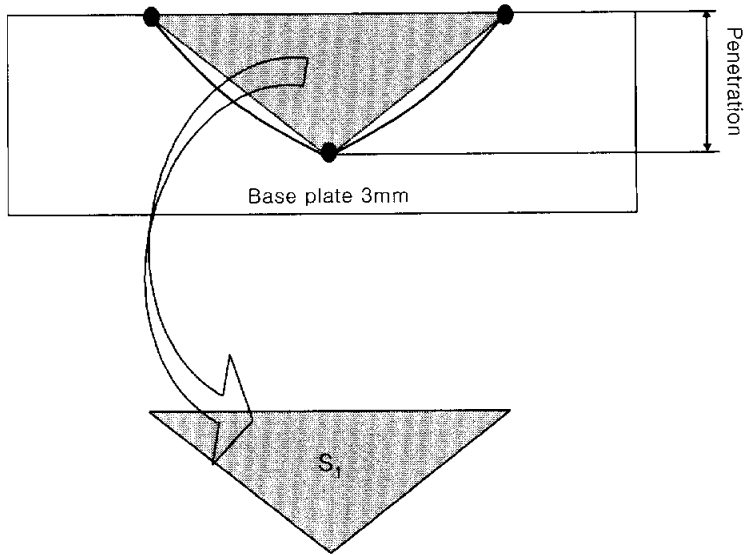


Fig. 3.9 Explanation about the calculation of the penetration area

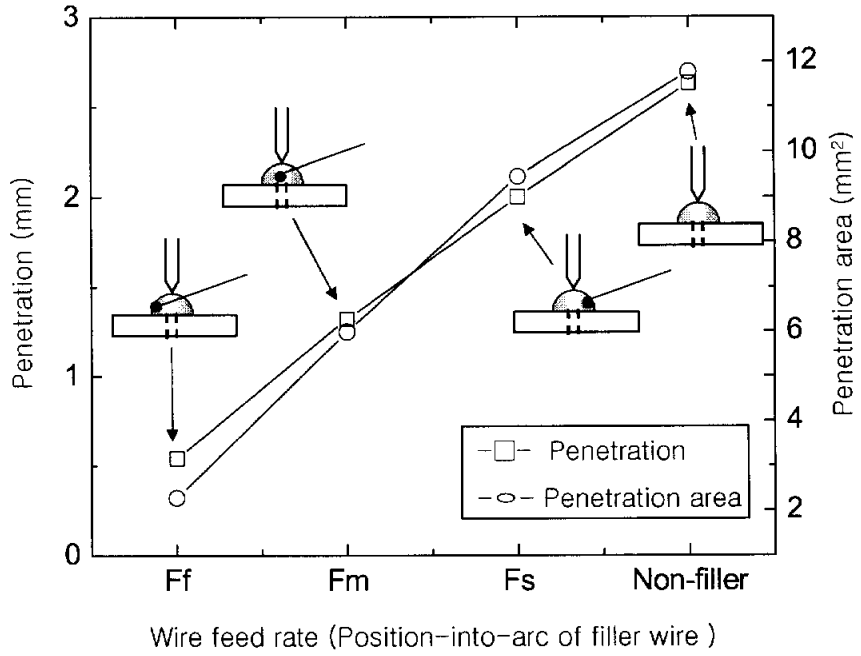


Fig. 3.10 Penetration and penetration area according to feed rate of a filler wire

3.4 결 언

필러 와이어의 송급속도를 다르게 하여 펄스 TIG 비드용접을 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 필러 와이어 송급속도에 따라 와이어 끝의 아크 내 위치가 달라졌고, 그 위치가 달라짐에 따라 비드 폭, 비드 높이 및 용입이 달라짐을 알 수 있었다.
- 2) 와이어 송급속도를 조절함으로써 와이어 끝 위치를 제어할 수 있었고, 이를 통해 비드외관과 용입을 조절할 수 있었다.
- 3) 루트패스와 같이 용입이 깊은 용접이 요구될 때는 와이어 송급속도를 늦게 하여 큰 아크압력이 작용하도록 하는 것이 바람직하며, 하드페이싱 용접과 같이 적층량을 많이 하기 위해서는 와이어 송급속도를 빠르게 하여 낮은 아크압력이 작용하도록 하는 것이 바람직하다.
- 4) 적절한 비드를 얻기 위해서는 적절한 송급속도와 펄스전류가 균형있게 조절되어야 한다.

제 4 장 텅스텐 봉 끝 위치에 따른 아크압력 측정

4.1 서 언

TIG 용접의 비드형성 및 용입에서 아크압력은 가장 중요한 인자 중 하나이다. 텅스텐 전극형상, 선단각도, 선단절단경, 아크유지시간 등이 아크압력에 미치는 영향에 관한 보고들이 다수 있다.¹⁾⁻⁴⁾

하지만, 필러 와이어가 아크 내에 있을 경우의 아크압력에 관한 보고는 없다. 그래서, 본 장에서는 필러 와이어가 아크 내에 있을 경우의 아크압력을 용점이 높은 텅스텐 봉을 대신 사용하여 측정하였고, 이를 통해 실제 필러 와이어 TIG용접 시 와이어 끝의 위치에 따른 비드외관 및 용입이 달라지는 현상을 아크압력의 관점에서 고찰하였다.

4.2 실험방법

필러 와이어의 송급 시 아크압력을 측정할 때, 와이어가 용융하기 때문에 Cu 블록의 구멍이 막힐 우려가 있다. 이를 방지하기 위해 텅스텐 봉을 사용하였다. 아크중심에서의 최대아크압력을 측정하기 위해 텅스텐 전극을 Cu 블록의 작은 구멍 중앙에 설치하였다. Fig. 4.1은 U자형 마노미터를 사용한 아크압력(Arc pressure)측정을 위한 실험 모식도이다. 아크열에 의해 작은 구멍이 용융되지 않게 하기 위해 14t 동판을 사용하여 수냉시켰다.^{1),2)} 텅스텐 봉의 용융을 억제하기 위해 수냉장치를 사용하였고, Fig. 4.2와 같이 텅스텐 봉끝 위치 a, b, c에서 아크압력을 측정하였다. 또한 펄스 TIG용접에서 펄스전류(I_p), 베이스전류(I_b) 시 아크압력을 알기 위해 용접전류 150A, 60A에서 아크압력을 측정하였다.

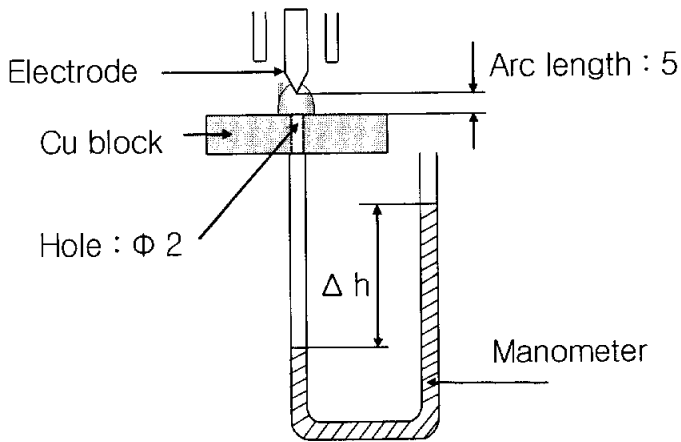


Fig. 4.1 Schematic for measurement of arc pressure

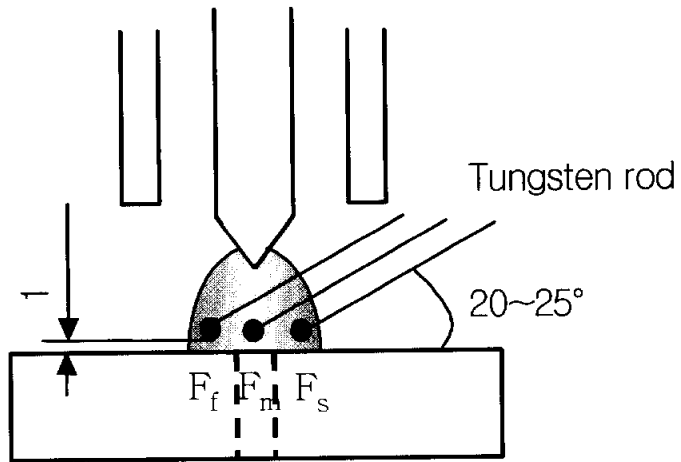


Fig. 4.2 Definition for the supply position of tungsten rod measuring arc pressure

4.3 결과 및 고찰

Fig. 4.3은 정지상태의 아크압력을 측정하기 위한 실험준비 상태를 이미지로 나타낸 것이다.

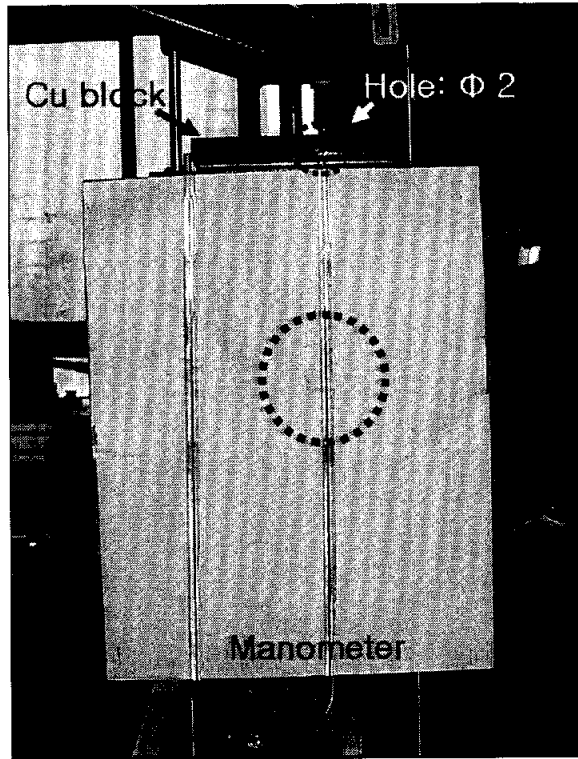


Fig. 4.3 The actual image in measurement of arc pressure

Fig. 4.4는 아크압력을 실제로 측정할 때, 마노미터 안에 있는 물기둥의 높이가 변동하는 것을 이미지로 나타낸 것이다. 물기둥의 위치가 잘 보이도록 하기 위해 잉크 미량을 혼합하여 측정하였다.

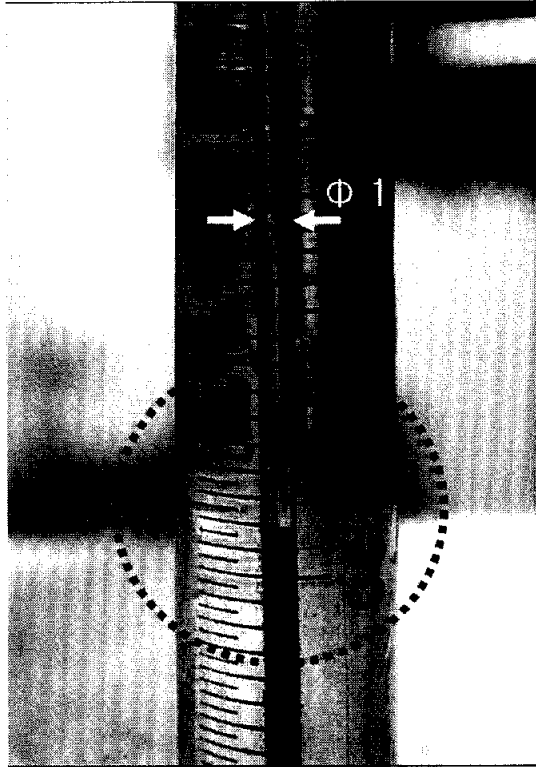
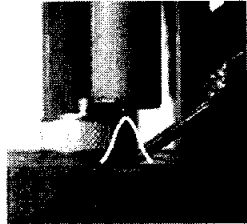




Fig. 4.4 The magnified image of manometer in measurement of arc pressure

Table 4.1은 아크압력을 측정하기 위해 텅스텐 봉이 아크 속으로 들어간 깊이를 정의한 것이다. 필러 와이어 송급속도가 0, F_s , F_m , F_f 였을 때, 필러 와이어 끝이 아크 속으로 들어간 깊이는 각각 0, 2, 5, 8 mm 였다.

Table 4.1 Depth of tungsten rod into arc

Wire feed rate	Depth-into-arc of tungsten rod	Photo
Non-filler	0 mm	-
F_s	2 mm	
F_m	5 mm	
F_f	8 mm	


※ Welding direction : 

Table 4.2는 Fig. 4.3과 같이 행한 실험결과를 나타낸 것이다. Fig. 4.4에
 서와 같이 마노미터의 눈금을 읽음으로서 텅스텐 봉의 송급위치에 따른 수
 두차를 나타낸 것이다. 식 (4.1)은 정수압을 나타내는 식이며, 이 식을 통해
 아크압력을 계산하였다.

Table 4.2 Difference of water head in manometer according to
 the supply position of Tungsten rod

	Position- into-arc	Δh (m)			
		Ff	Fm	Fs	Non filler
Current	150A	0.036	0.04	0.05	0.06
	60A	0.016	0.016	0.016	0.02

$$P_{arc} = \rho \times g \times \Delta h \text{ (Pa)} \quad (4.1)$$

여기서, P_{arc} : Arc pressure (Pa)

ρ : Density of water (kg/m^3)

g : Gravitational acceleration (m/s^2)

Δh : Difference of water head (m)

Fig. 4.5는 텅스텐 봉이 아크 속으로 들어간 깊이에 따른 아크압력의 변화를 식 (4.1)에 의해 계산하여 각각 나타낸 것이다. 텅스텐 봉이 아크 속으로 들어간 깊이가 깊을수록 아크압력은 감소하는 경향을 보였다.

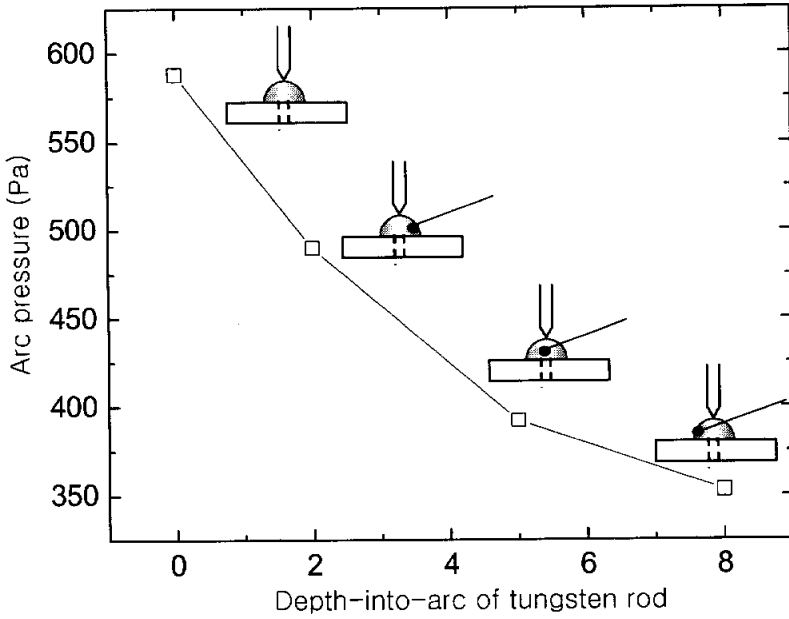


Fig. 4.5 Arc pressure according to position-into-arc of tungsten rod

Fig. 4.6은 필러와이어 송급속도에 따른 아크압력과 용입의 관계를 그래프로 나타낸 것이다.

Fig. 4.5의 결과는 제 3장의 ' Fig. 3.8 Penetration and penetration area according to feed rate of a filler wire '의 결과와 많은 상관이 있다.

I_p : 200 A, I_{avg} : 130 A의 조건에서 필러와이어 송급속도를 0, F_s , F_m , F_f 로 조정하였을 때, 필러와이어가 아크 속으로 들어간 깊이는 각각 0, 2, 5, 8 mm 였다. (Table 4.2) 이를 정확하게 재현하여 아크압력을 측정한 결과, Fig. 4.6과 같이 아크압력과 용입사이에는 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었다.

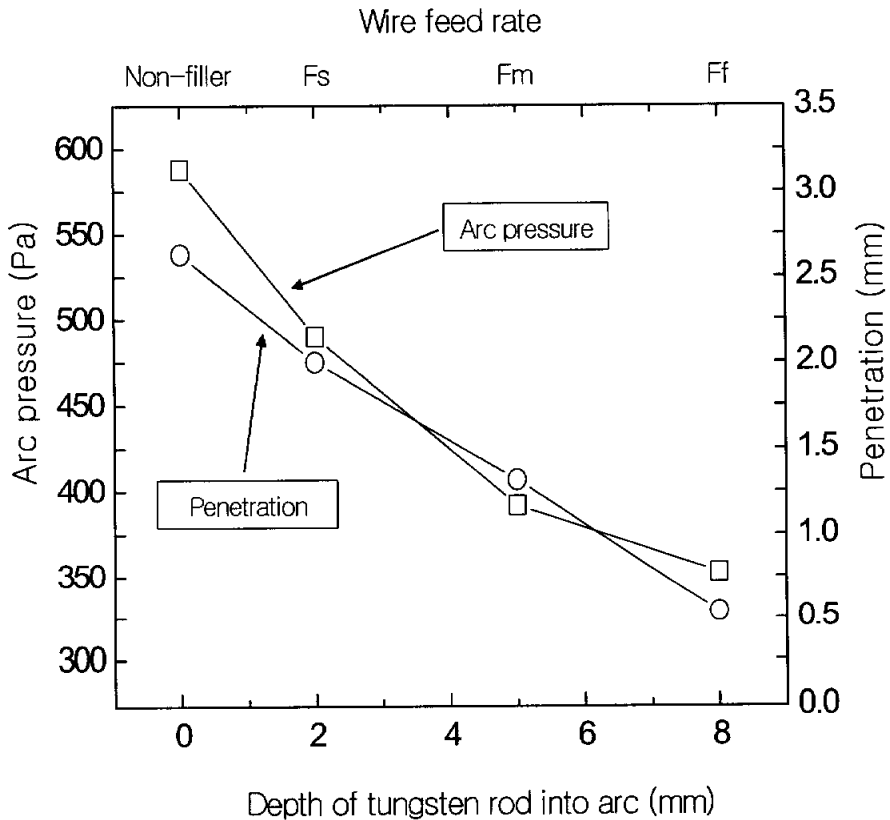


Fig. 4.6 Relation of arc pressure and penetration according to wire feed rate

아크압력은 텅스텐 봉을 송급하지 않았을 때, 가장 높게 나타났다. 또한, 텅스텐 봉을 송급한 경우, 아크 속으로 삽입된 깊이에 따른 아크압력은 '0>2>5>8(mm)' 순으로 나타났다. 이것은 텅스텐 봉이 아크 내에 있기 때문에 플라즈마 기류를 방해하여 아크압력이 떨어지는 것으로 판단되고, 텅스텐 봉이 아크 내에 깊게 들어갈수록 아크압력 이 떨어지는 경향을 보이는 것으로 판단된다.

한편, 필러 와이어를 송급하지 않았을 때, 아크압력의 경우와 마찬가지로 용입이 가장 깊었다. 필러 와이어를 송급한 경우, $F_s > F_m > F_f$ 순으로서 아크압력의 경우와 똑같은 순서로 나타났다. 이를 통해 필러 와이어의 송급속도에 따라서 아크압력이 변동되며, 변동하는 아크압력에 의해 용입이 달라짐을 알 수 있다.

Fig. 4.7은 아크압력과 용입의 관계를 비로 나타낸 것이다. R_{ap} 는 tungsten rod를 아크 속으로 송급하지 않았을 때의 아크압력에 대한 tungsten rod를 F_f, F_m, F_s 의 위치로 각각 송급하였을 때의 아크압력 비이며, R_p 는 필러와이어를 송급하지 않았을 때의 용입에 대한 송급속도 173, 110, 74 cpm 으로 각각 송급했을 때의 용입 비를 의미한다. 이를 통해, 아크압력과 용입은 서로 비례함을 알 수 있다. $I_p : 200A$ 에서 필러 와이어 송급속도에 대한 용입변동과 $I_p : 150A$ 에서 텅스텐 봉 끝 위치에 따른 아크압력 변동을 직접 비교하는 것은 곤란하다. 하지만, Cho 등¹⁾과 R.T.C.Choo 등⁴⁾의 보고에 의하면 200A에서의 아크압력, P_{200} 과 150A에서의 아크압력, P_{150} 의 다른 점은 P_{200} 이 P_{150} 보다 $(200/150)^2$ 에 비례하여 높으므로, R_{ap} 와 R_p 를 나타냄으로서 아크압력과 용입을 비교하는 것은 타당하다고 할 수 있다.

지금까지, TIG 용접에 있어서 아크압력은 아크전류의 제곱과 아크길이에 따라 비례한다는 보고는 다수 있었다.^{1),4),5),9),10)} 그러나, 필러 와이어를 쓰는 TIG 용접에서는 와이어 송급속도를 다르게 함으로서 필러 와이어 끝의 위치 변동에 따라서도 아크압력이 달라짐을 본 연구를 통해서 알 수 있었다.

Arc pressure ratio, R_{ap} ,

$$R_{ap} = \frac{\text{Arc pressure by supply position of tungsten rod}}{\text{Arc pressure at Non filler}} \quad (4.2)$$

Penetration ratio, R_p ,

$$R_p = \frac{\text{Penetration by wire feed rate}}{\text{Penetration at Non filler}} \quad (4.3)$$

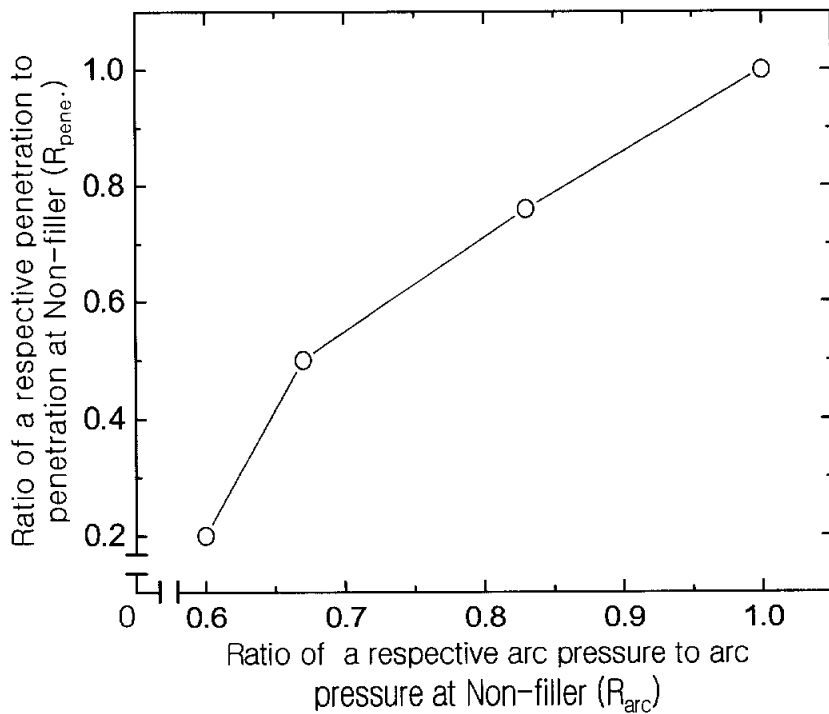


Fig. 4.7 Relation between arc pressure and penetration

4.4 결 언

φ 2.4 텅스텐 봉을 필러와이어 대신 사용하여, 필러 와이어 송급속도에 따라 달라지는 아크압력을 계측하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 용접전류가 높아짐에 따라 아크압력은 용접전류의 제곱에 비례하였다.
- 2) 와이어 송급속도에 따라 와이어 끝이 아크속으로 들어가는 깊이가 달라졌고, 그 깊이에 따라 아크압력이 달라짐을 알 수 있었다.
- 3) 아크 내에 텅스텐 봉이 없는 경우, 아크압력이 가장 높게 나타났다.
- 4) 아크 내에 텅스텐 봉이 있는 경우, 텅스텐 봉 끝이 아크 속으로 들어간 깊이가 얕을수록 (Fs) 아크압력이 높게 나타났다.
- 5) 베이스 전류(60A)에서 아크압력은 텅스텐 봉 끝 위치에 따른 차이가 현저하지 않았다.
- 6) 아크압력이 증가함에 따라 용입이 깊어짐을 알 수 있었다.

제 5 장 결 론

펄스 TIG용접에서 필러 와이어 송급속도에 따른 아크압력 변동이 용입에 미치는 영향에 대해 연구하기 위하여 실제 펄스 TIG 비드용접을 행하였고, ϕ 2.4 텅스텐 봉을 필러 와이어 대신 사용하여, 필러 와이어 송급속도에 따라 달라지는 아크압력을 송급위치별로 측정하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- 1) 아크압력은 아크전류의 제곱과 아크길이에 따라 비례한다고 보고되고 있다. 하지만, 필러 와이어를 쓰는 TIG 용접에서는 와이어 송급속도를 다르게 함으로서 필러 와이어 끝의 위치변동에 따라서도 아크압력이 달라짐을 본 연구를 통해서 알 수 있었다.
- 2) 필러 와이어 송급속도차로 인한 아크압력을 측정할 수 있었고, 그 아크압력이 필러와이어를 쓰는 TIG용접 비드형상과 용입에 영향을 미침을 확인할 수 있었다.
- 3) 루트패스와 같이 용입이 깊은 용접이 요구될 때는 와이어 송급속도를 낮게 하여 큰 아크압력이 작용하도록 하는 것이 바람직하다.
- 4) 같은 평균전류에서도 I_p 의 크기에 따라 아크압력은 전류의 제곱에 비례하여 변동하므로 용입, 비드형상에 영향을 미침을 확인할 수 있었다. 따라서, I_p 의 크기를 조절함으로써 적절한 용입과 비드형상을 얻을 수 있다.
- 5) 적절한 비드를 얻기 위해서는 적절한 송급속도와 I_p 가 균형있게 조절되어야 한다.

참고 문헌

- 1) Sang-Myung Cho and Sang-Goun Seo ; The Effect of Configuration and Surface Polishing in Tungsten Electrode Tip for Gas Tungsten Arc Welding on the Characteristics, Journal of KWS, Vol.19, No.1 Feb., 2001 p.33-39 (in Korean)
- 2) Kazuo Hiraoka, Akira Okada and Inagaki ; Effect of Electrode Geometry on Maximum Arc Pressure in Gas Tungsten Arc, Journal of JWS, Vol. 3, No. 2, 1985 p.246-252 (in Japanese)
- 3) Sang-Myung Cho ; A Study on the Bead Stability in High Speed TIG Welding, Journal of KOSME, Vol.18, No.3, 1996 p.318-327 (in Korean)
- 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, Journal of Welding Research, Jeffrey. D.Weber Editor, (1990), pp.346s - 361s
- 5) Jin-Woo Kim and Sang -Myung Cho ; The Effect of the Arc Pressure Variation on the Penetration as the Supply Position of Filler Wire in Pulsed TIG Welding, Proceedings of the 2003 Spring Annual Meeting of KWS, Vol. 40, p.169-171 (in Korean)
- 6) Yasuhiko NISHI ; Weaving Welding, 日本溶接學會誌 第67卷, 第4号, 1998 p.321-325 (in Japanese)
- 7) 대한용접학회편 ; 용접 • 접합편람, 대한용접학회, 1998, pp. 516, 517, 536, 537 (in korean)
- 8) 대한용접학회 ; 용접 • 접합 용어사전, 2001 (in korean)
- 9) 安藤,西川,和田 ; アーク溶接における溶入みの生成機構に関する考察, Journal of JWS, Vol. 37, No. 4, 1968 p.359-368 (in Japanese)

- 10) Hiroshi Maruo and Yoshinori Hirata ; Bead Formation in Pulsed TIG Welding, Journal of JWS, Vol. 3, No. 2, 1985 p.253-260 (in Japanese)
- 11) Jetline Engineering, inc. Product Information, Cold Wire Feeders
- 12) 安藤, 長谷川 ; 溶接アーク現象<増補版>, 産報 (in Japanese)
- 13) J.F.Lancaster ; 溶接アーク物理<第2版>, 社団法人 溶接學會(1990) p.297 (in Japanese)
- 14) 馬場信 ; 新版ティグ溶接法の基初と實際, 日本溶接協會編, 産報出版(1992) p.39 (in Japanese)

◇ 석사 과정 중 연구발표 및 논문투고 실적

◆2002년 4월: 인라인 너트 프로젝션 용접품질 전문가 시스템의 개발 (대한 기계학회, 춘계 학술발표대회 발표)

◆2002년 5월: 너트 저항 프로젝션 용접품질 모니터링을 위한 전문가 시스템의 개발 (대한 용접학회, 춘계 학술발표대회 발표)

◆2003년 5월: 펄스 TIG용접에서 Filler 와이어 송급위치에 따른 아크압력 변동이 용입에 미치는 영향 (대한 용접학회, 춘계 학술발표대회 발표)

◆2003년 11월: 펄스 TIG용접에서 필러 와이어 송급속도에 따른 아크압력 변동이 용입에 미치는 영향 (대한 용접학회, 논문 투고)

감사의 글

교수님을 처음 뵈는 지가 엇그제 같은 데, 벌써 3년이 지나갔습니다. 융접IT연구실에서 석사과정을 지나오며, 저의 꿈을 키울 수 있었고, 제 인생에 있어 큰 전환점이 됨과 동시에, 짧은 기간동안에 가장 빨리 발전하였고, 제게 이런 기회를 주신 조 상명 교수님께 정말 감사드립니다.

석사과정 동안 지도해주시고, 논문심사 지도해주신 김 우열 교수님, 박 홍일 교수님, 김 성규 교수님, 이 병우 교수님, 방 국수 교수님, 서 원찬 교수님, 이 길근 교수님께 많은 감사드립니다. 특히, 저를 융접IT연구실로 소개시켜 주셨고, 제가 부정대학교와 인연을 맺어 많은 공부할 수 있게 해주신 박 홍일 교수님께 정말정말 감사드립니다.

처음 연구실에 들어와 낯선 환경에서 잘 적응할 수 있게 도와준 호재에게 고마움을 전합니다. 항상 배우려는 자세와 후배들에게 모범이 되시는 오 동수 선배님, 황 동수 선배님, 지 정민 선배님께 감사드립니다. Arc pressure 측정의 know-how를 잘 가르쳐줘 많은 도움을 준 서 상균 선배님 고맙습니다. 저의 취업에 많은 도움 주신 이 광원 사장님 감사합니다.

1년차 과정동안 많이 도움 주고, 연구실에 대해 함께 많이 고민했던 최 규원 님, 임 성룡 님, 하 승협 님 모두 감사드립니다. 석사과정을 거의 같이 지나오면서 많이 가르쳐 주고, 도움주었던 박 찬우 님, 공 현상 님, 윤 훈성 님, 김 기정 님, 탁 정수 님께도 감사드립니다.

학부과정 선이수 과목을 수강하면서 친해졌고, 석사과정 초기의 학교생활에 적응하는 데, 많은 도움되었고, 연구실에서도 같은 일원으로서 많은 정을 쏟았던 진안이, 상준이, 재선이, 영주도 정말 고마웠습니다. 남자들만 있으면 다소 썰렁해질 수 있는 연구실의 분위기를 화기에해하게 하는데 많은 역할을 해준 미혜, 선희씨, 내성적이면서도, 당차고, 강한 나영이에게도 감사드립니다. 우리 연구실 살림을 맡으면서 항상 어머니같기도, 때로는 누님같이 자상한 인생선배가 되주신 박 영희 님, 김 외숙 님께도 정말 감사드립니다.

나한테 야단도 많이 맞았지만, 잘 따르는 광선이, 연구도 열심히, 축구도 열심히 백감 조 성우 님, 늦은 나이에 불구하고, 열심히 임하며, 진지한 김 인태 님께도 감사드립니다.

직장생활의 와중에도 배움의 열의로 인연이 되어 많은 도움, 간접경험들을 하게 해주신 박 대구 님, 최 기화 님, 김 덕원 님, 이 재형 님, 김강식 님, 박 금기 님께도 감사드립니다.

특히, 논문 실험 때 같이 고민하며, 많이 도와주었던 진안이, 취직을 한 후 연구실에 몸이 있지 못해 사소한 부탁을 잘 들어주고, 논문이 정리되는 데에 많은 도움을 준 덕조에게 깊은 감사드리며 많은 발전을 기원합니다.

든든한 아들이 되지 못해 불철주야 많은 걱정을 끼쳐 드린 부모님께 한없이 감사드립니다. 어리게만 생각되는 동생, 말없이 잘 밀어주신 형님, 따뜻한 말 한마디가 고마운 형수님께 정말 감사드립니다.

그리고, 저에 대한 믿음과 사랑이 없었다면 불가능했을지도 모르는 아내 박 영예 님께 정말 감사드립니다. 묵묵히 옆에서 지켜봐주신 장인어른, 장모님께도 늦게나마 감사드립니다.

끝으로, 융접IT연구실의 무궁한 발전이 있기를 기원하며, 후배님들의 밝은 내일을 기원합니다.