

GMA 용접공정을 이용한 오픈갭 수평고정관 초층 용접의 실험적 연구

김지선* · 김일수*[†] · 박창언* · 나현호* · 이지혜* · 정성명*

*목포대학교 공과대학 기계공학과

An Experimental Study on Root-pass Welding of Open Gap by GMA Welding Process in Pipeline

Ji-Sun Kim*, Ill-Soon Kim*[†], Chang-Eun Park*, Hyun-Ho Na*, Ji-Hye Lee* and Seong-Myeong Jung*

*Dept. of Mechanical Engineering, Mokpo National University, Mokpo 534-729, Korea

[†]Corresponding author : ilsookim@mokpo.ac.kr

(Received December 30, 2010 ; Revised January 25, 2011 ; Accepted June 20, 2011)

Abstract

Since welding process for most pipelines with large diameter has been carried out by the manual process, automation of the welding process is necessary for the sake of consistent weld quality and improvement in productivity. Therefore the development of the optimized algorithm to decide the welding condition is an effective technique to prove the feasibility of interface standards and intelligent control technology to increase productivity and reduce the cost of system integration. In this study, the pipe welding experiment has been carried out using pulsed GMA welding process to select optimal welding condition. And necessary information in root-pass welding has been obtained by applying in the pipeline using the selected welding conditions through the welding experiment.

Key Words : Pipeline, GMA welding, Short circuiting transfer, Root-pass, 5G Welding position, Welding current waveform

1. 서 론

현재 산업의 전 분야에 걸쳐서 많이 사용되고 있는 에너지원인 석유와 천연가스등의 수송을 위한 수평고정관의 제조 및 시공공정에서 용접은 파이프용 소재 자체의 품질과 더불어 가장 중요한 기술로 작업환경의 특수성으로 인해 많은 제약을 받고 있는 현실이다.

수평고정관 초층 용접은 일반 용접공정에 비하여 자동화 공정이 매우 까다롭고, 높은 용접품질을 보장하기 어려우며, 기존 수동 GTA 용접공정은 숙련된 용접인력 및 고가의 인건비로 인해 자동화 용접공정의 대체가 시급히 필요한 실정이다.

특히, 용접공정은 열악한 작업환경과 유해하고 육체적 부담이 크기 때문에 용접자동화가 요구되고 있다.

가스텀스텐아크(GTA) 용접공정은 용접 품질면에서

매우 우수하지만 그루브 형상의 가공 및 낮은 작업속도로 인해 생산성 저해의 원인이 된다. 또한, 매우 민감한 용접공정에 속하는 GTA는 수평고정관의 정렬작업 중 발생하는 갭(gap), 단차(mismatch)에 매우 민감하여 현재 완전자동화하기에는 매우 어려운 실정이다. 이에 따라, 현장에 대부분 사용 중인 GTAW(수동)+FCAW(자동) 용접공정은 수작업에 의해 초층 용접(root-pass)을 수행하고 다층(fill-pass)은 FCAW 공정에 의해 마무리되는 공정을 실시하고 있다.

용접 공정은 기본적으로 복잡하고 비선형적인 공정이기 때문에 물리적인 법칙이나 수치적인 방법에 의해 용접 공정을 위한 모델을 유도하는 것이 어려울 뿐만 아니라 유도된 모델도 많은 가정에 기초하여 유도되기 때문에 용접 공정을 정확하게 Table현하지 못한다. 또 다른 방법은 실험 데이터를 이용하여 용접 공정을 Table현하는 모델을 유도하는 방법이고 회귀 모델과

인공 신경망 모델이 제안되고 있다. 회귀분석과 인공 신경망에 의해 유도된 용접 공정 모델은 용접 공정의 비선형성과 복잡성 때문에 작은 실험 영역에서는 모델의 정확성이 높지만 실험 영역이 커지면 모델의 정확성이 떨어진다. 즉 실험 데이터에 의해 유도된 용접 공정 모델은 제한된 범위 내에서만 타당하기 때문에 어느 정도 양호한 용접 품질을 나타내는 관심 영역을 찾기 위한 선행 실험이 필수적이다.

용접 공정은 다중 입출력 공정이며, 용접 비드 형상 변수들은 서로 연계 되어 있기 때문에, 시행착오법에 의해 용접공정 변수를 조절하여 원하는 용접 비드 형상을 얻는다는 것은 많은 실험과 노력을 필요로 한다. 이런 문제점을 해결하기 위해 용접 공정의 입력 변수와 출력 변수 사이의 모델을 구하고 이것을 이용하여 용접 공정변수를 결정하는 방법들이 제안되고 있다. Drayton¹⁾은 공정변수와 비드형상과의 관계를 나타내기 위하여 수학적 모델 개발에 관하여 연구하였으며, 최적 공정변수를 선정할 수 있는 tolerance box기법을 개발하였다. 그러나 이 방법은 많은 실험이 필요하며, 3개 이상의 공정변수 제어가 불가능한 단점이 있다. Doherty et al.²⁾은 GMA용접을 이용한 비드형상과 공정변수 사이의 수학적인 관계, Raveendra와 Parmar³⁾는 비드 형상 및 크기를 예측할 수 있는 수학적 모델을 최초로 CO₂ 아크용접 방법에 적용하였다. 그러나 대부분의 연구가 가스텅스텐아크(GTA)용접공정의 입출력변수 사이의 관계와 오픈갭(Open gap)형태의 용접이음부가 사용되는 수평고정관 초층 용접에 대하여 제한적인 연구가 수행되고 있다. 또한, 일반적인 GMA용접의 경우 이면비드 형성을 위해 다양한 백킹재를 이용하여 용접을 수행하고 있으나, 파이프 이음부에서는 적용하기 어렵기 때문에 펄스 모드를 사용한 GMA용접공정을 이용하여 초층 용접조건 선정에 대한 연구가 필요하다.

본 연구는 수평고정관 초층용접시 최적조건을 도출하기 위한 용접실험을 수행하고, 실제 수평고정관에 적용하여 기존에 사용중인 수동 GTA 용접공정을 대체 가능한 GMA-P 용접공정을 이용하여, 그에 적합한 초층 용접조건을 선정하는데 목적이 있다.

2. 평판 용접실험

수평고정관 전자세 초층의 용접공정에 펄스를 이용한 GMA용접은 GTA 초층 용접공정에 비해 빠른 용접속도로 고품질의 초층 용접성 확보가 가능하며, 100% CO₂ 보호가스를 사용하여 예산 절감효과 또한 뛰어나다. 다양한 소재의 용접에 대한 적용성이 우수하고 용

접자세의 변화에 따라 이면비드의 형태가 균일한 특징을 가지고 있다. 또한, 낮은 입열량은 초층 용접공정시 가장 빈번하게 발생하는 용락(burn-through)을 감소시킬 수 있으며, 신뢰성있는 초층 용접성확보가 가능하다는 장점을 가지고 있다⁴⁾.

GMA-P 용접기는 전류와 독립적으로 와이어 공급이 가능하며, 표면장력과 핀치효과를 이용하여 와이어를 이행시켜 안정된 용접이 가능하도록 구성되어 있다. 각각의 파형의 형태 (Fig. 1)에 따라 다음과 같은 용융단계를 가진다.

- (a) 와이어를 이행시켜 방울을 형성하는 단계
- (b) 형성된 방울을 모재에 단락시키는 과정으로 가장 낮은 전류값이 부여되는 단계
- (c) 형성된 방울을 모재에 안정되게 이행시키기 위해 핀치효과를 이용하여 물리적으로 분리시키는 단계
- (d) 피크전류값 도달 직전단계로 완전 분리된 방울을 표면장력으로 인해 모재에 안착되는 단계
- (e) 아크길이를 설정하기 위해 피크전류가 부여되는 단계

2.1 용접실험

평판 용접실험을 위한 직선케리지와 가이드레일 및 GMA-P 용접기를 통합한 실험시스템을 Fig. 2와 같이

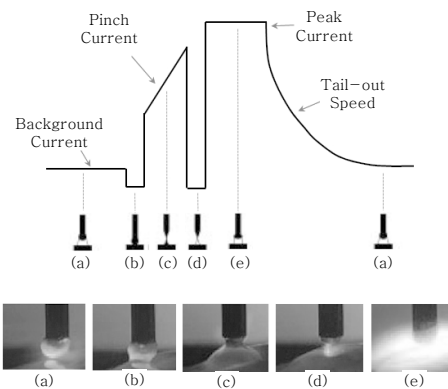


Fig. 1 Waveform of GMA-P welding machine⁴⁾



Fig. 2 Welding machine(GMA-P) & carriage

Table 1 Welding parameters and limit

Welding Parameter	Symbol	-1	0	+1
Peak current (A)	C _p	330	360	390
Base current (A)	C _b	50	60	70
Wire feed speed (cpm)	W _s	250	300	350

구성하였다. 천연가스 수송용 라인 파이프 강재와 유사한 API X60 재질의 강판을 사용하였으며, 500×200×15.9t의 규격으로 절단 후 70°의 그루브각(루트면 1.5mm, 루트갭 2.5mm)을 부여하여 맞대기 시험편을 제작하였다. 완전한 요인시험으로 연구할 수 있는 n 요소를 갖는 최소한의 처리 콤비네이션과 주 영향 및 상호작용 영향도 연구가 가능한 방법을 선정하여 중심합성 계획법을 이용한 실험계획을 수립하였다. 3개의 공정변수의 실험 수준과 한계는 Table 1에 나타낸 바와 같다.

총 20회의 실험 완료 후 용접부의 비드형상을 측정하기 위하여 용접이 완료된 시험편의 단면부에 대한 에칭작업을 수행한 후 정확한 비드형상의 측정을 위하여 광학 현미경 시스템을 이용하였으며, 측정된 비드의 형상을 Table 2에 제시하였다.

Table 2 Measured bead geometry

410 / 60 / 300	360 / 60 / 385	360 / 76 / 300
330 / 70 / 350	360 / 43 / 300	330 / 50 / 250
330 / 70 / 250	360 / 60 / 300	390 / 50 / 250
390 / 70 / 250	390 / 50 / 350	390 / 70 / 350
390 / 60 / 300	360 / 60 / 300	330 / 50 / 250
390 / 50 / 250	330 / 70 / 250	390 / 70 / 250

* 용접조건(5G) : 피크전류/베이스전류/와이어송급속도

* 360/60/215 , 330/50/350 : 실패

2.2 용접실험 결과 및 고찰

2.2.1 수학적 모델 개발

평균 용접실험 결과를 바탕으로 회귀분석을 이용한 수학적 모델을 개발하였다. 용접비드 형상을 최적화하기 위한 용접공정의 입력변수는 피크전류(C_p), 베이스전류(C_b) 와이어 송급속도(W_s)로 선정하였으며, 출력변수인 이면비드의 폭(W_b)과 이면비드 높이(H_b)에 대한 관계식을 2차 모델로써 다음 식 (1)~(2)과 같다.

$$W_B = -6.29 - 0.045C_p + 0.619C_B - 0.0417W_s + 0.00013C_p^2 - 0.00089C_B^2 + 0.00003W_s^2 - 0.00125C_pC_B + 0.00013C_pW_s - 0.00025C_BW_s \quad (1)$$

$$H_B = -27.4696 - 0.0408C_p + 0.1332C_B + 0.1013W_s + 0.0001C_p^2 - 0.0043C_B^2 - 0.00001W_s^2 + 0.0004C_pC_B - 0.0004C_pW_s + 0.0009C_BW_s \quad (2)$$

개발된 수학적 모델의 유의성을 판단하기 위하여 안정적인 용접조건을 이용한 5회 추가 용접실험을 수행하였으며, Figs. 3~4는 이면비드 폭 및 높이에 대하여

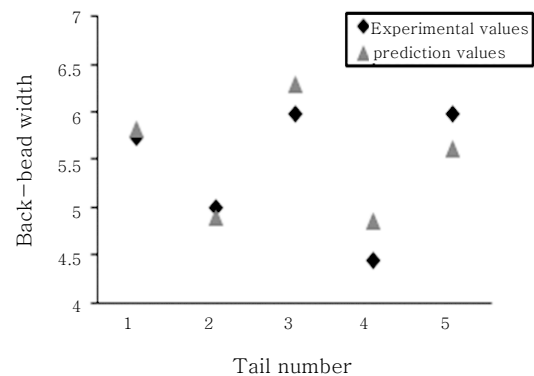


Fig. 3 Comparison of measured and predicted back-bead width

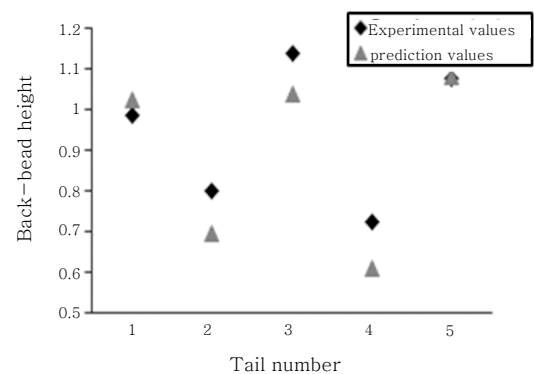


Fig. 4 Comparison of measured and predicted back-bead height

추정된 회귀식을 바탕으로 예측값과 추가 실험값의 비교를 나타냈다.

실험과 예측결과를 비교한 결과(Figs. 3~4) 이면비드 폭의 경우 차이가 0.5mm, 이면비드의 높이는 0.2mm 이내로 용접 이면비드의 측정 오차를 감안하면 상당히 정확한 예측성능을 확인하였다.

2.2.2 최적 용접조건 선정

최적의 용접조건 선정을 위하여 반응표면 분석법 중 등고선 플롯을 이용하여 이면비드 폭과 높이에 대한 영역을 확인하고, 양호한 이면비드 형상을 도출할 수 있는 안정영역에 대한 목표값을 선정하여 목표값에 근접한 용접조건을 도출하였다. Tables 3~4는 이면비드의 목표값과 그에 대한 최적의 용접조건(5G)을 나타낸다.

3. 수평고정관 적용 용접실험

3.1 수평고정관 용접실험

수평고정관 초층 용접공정의 자동화를 위하여 현장작업에 적용되는 실제 크기의 수평고정관 시험편을 토대로 전문 용접사를 통한 수동용접을 수행함으로써 적용 대상물에 대한 초층 용접가능성을 검토하고 기본 초기 조건의 범위(Table 1)를 적용하였다. 천연가스 수송용 라인 파이프 강재인 API X60을 사용하였으며, 실험에 사용된 GMA-P 용접기, 캐리지 시스템 및 파이프용 가이드레일을 이용하여 Fig. 5와 같이 실험 장비를 구성하였다.

단락이행 파형을 이용한 파이프 용접실험은 대칭성이 존재한다고 가정된 후, 0°~180°까지의 조건을 동일하게 적용하여 전체 수평고정관의 초층 용접을 수행하였다. 각기 다른 조건을 이용하여 5회 용접실험을 실시하였으며, 실험 조건은 Table 6에 제시하였다. 용접실험

Table 3 Setting up the back-bead target

	Min.	Target	Max	Significance
Back-bead width(mm)	3.5	5.5	7.5	1
Back-bead height(mm)	-0.1	0.3	0.5	1

Table 4 Optimal welding condition

Predicted response		Optimal conditions		
Back-bead width(mm)	Back-bead height(mm)	Peak Current(A)	Base Current(A)	W/F Speed(cpm)
5.0	1.0	397.5	57.46	315



(a) Welding carriage (b) Pipe guide rail

Fig. 5 The apparatus for welding experiment

Table 6 The welding conditions for pipe weld

No.	Peak current(A)	Background current(A)	Wire feed speed(cpm)	Welding speed(cpm)	Torch angle(°)
1	390	60	315	15	55
2	380	55	300	14	60
3	370	50	285	13	65
4	360	45	270	12	70
5	350	40	250	11	75

Table 7 The welding condition fixed

Root gap	Root face	Shielding gas	Pipe size	Thickness	Groove angle
2.5mm	1.5mm	18l/min	700∅	15.9t	70°

은 하진용접으로 용접 시작점(0°)부터 끝점(180°)까지 연속적으로 이루어졌으며, 토치각은 진행각(전진각)으로 수행하였다. 본 용접 실험은 가접된 시험편에 수평고정관 초층 용접실험을 진행하였다. 가접부는 수동 용접사에 의해 일정한 구간에 10~20mm 정도의 가접을 실시하여 수행하였고, 실험에 적용된 고정변수는 Table 3과 같다.

용접 시작은 가접부에서 실시하였으며, 연속적인 용접을 위해 가접 구간을 통과하는 형태로 실험을 실시하였다. 가접부가 증가할수록 수축 변형을 감소시키는 장점이 있으나 Fig. 6에 나타난 것과 같이 가접부 주변의 용접 불량은 균일한 이면비드 형성에 악영향을 미친다는 것을 확인하였다.

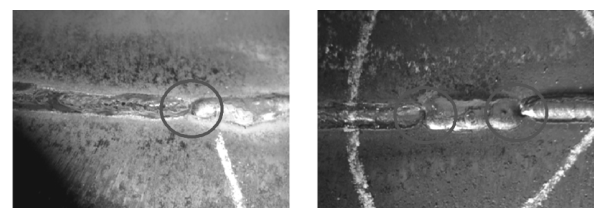
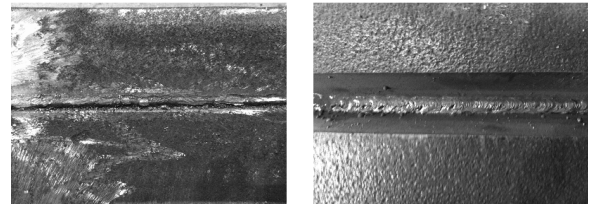


Fig. 6 Weld defects by tack welding

실험이 완료된 시험편의 마크로 형상 추출을 위하여 5개의 용접 조인트에서 각각 3개의 마크로 시험편을 가공하여 측정된 비드형상을 구간별로 Table 8에 제시하였다. 수평고정관에 적용한 초층 용접실험은 아래보기자세(0°)-구간 1에서는 대체적으로 볼록한 형태의 이면비드를 형성하고, 수직자세(90°)-구간 2와 위보기자세(180°)-구간 3으로 진행될수록 이면비드의 높이는 감소하나 이면비드의 폭은 일정하게 유지되었다. 또한, 용접 중 발생하는 수축변형으로 인해 Fig. 7과 같이 루트갭의 감소와 가접부 주위에서 발생하는 용접 결함이 이면비드 형성을 저해하는 요소임을 확인하였다.

그리고 표면비드의 경우 양호한 형태를 보이나, 이면



(a) Back-bead (b) Surface-bead

Fig. 7 Weld defects by shrinkage

비드의 경우 함몰형태의 이면비드가 형성되었다. 이는 루트갭의 축소로 인해 표면장력을 이용하여 용접부에 안착시키는 GMA-P 용접기의 특징으로 인해 루트면을 충분히 용융시키지 못하여 생긴 결함이라고 판단하였다.

평판 용접실험을 통해 얻은 기본 초층 용접 조건을 이용하여 실험한 결과 수평고정관 실험에서 이면비드의 형성에 미치는 중요한 변수는 수축변형에 의한 루트갭의 축소임을 확인하였다. 수평고정관 초층 용접실험은 일정한 형태의 루트갭이 존재하여야 하며 축소로 인한 루트갭의 감소는 이면비드의 형성에 큰 영향을 미친다.

3.2 용접실험 결과 및 고찰

수평고정관 용접실험을 통해 단락이행 파형 용접공정을 이용한 수평고정관 초층 용접 조건을 선정하였으며, Table 9와 같은 형태의 파이프 초층 용접공정 절차를

Table 8 The experimental results

No.	Section 1 (0°~45°)		Section 2 (45°~135°)		Section 3 (135°~180°)	
1						
	Peak Current	Background current	Wire Feed Speed (cpm)	Welding Speed (cpm)	Torch Angle(°)	
	390	60	315	15	55	
2						
	Peak Current	Background current	Wire Feed Speed (cpm)	Welding Speed (cpm)	Torch Angle(°)	
	380	55	300	14	60	
3						
	Peak Current	Background current	Wire Feed Speed (cpm)	Welding Speed (cpm)	Torch Angle(°)	
	370	50	285	13	65	
4						
	Peak Current	Background current	Wire Feed Speed (cpm)	Welding Speed (cpm)	Torch Angle(°)	
	360	45	270	12	70	
5						
	Peak Current	Background current	Wire Feed Speed (cpm)	Welding Speed (cpm)	Torch Angle(°)	
	350	40	250	11	75	

Table 9 The root-pass welding process in pipeline

Welding process	GMAW-P (Pulsed GMAW) method				
	GMA-P inverter welding machine				
Joint geometry	Welding joint shape		V-Groove		
	Groove angle		30°~35°		
	Root gap		2~2.5mm		
	Root face		1.5~2mm		
Filler metal	Solid Wire (ER70S-G) 1.2 Ø				
Shielding Gas	CO ₂ 18 ℓ/min				
Welding technic	Welding position: 5G Welding direction: downhill welding Manipulation of electrode: Straight bead Tack welding: Open Gap shape (Using the internal clamp) Welding start: Start by weaving welding				
Welding conditions	Peak current	Back-ground current	Wire feed speed	Welding speed	Torch angle
	360~380	40~50	280~300	13~15	60~70

Table 10 The welding experimental results

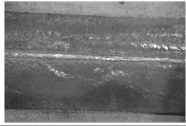
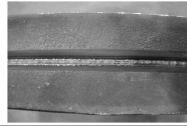

Back bead		Bead face		Welded specimen
				
Peak current	Background current	Wire feed speed(cpm)	Welding speed(cpm)	Torch angle(°)
370	45	280	13	70

Table 11 The experimental results

Position	Back-bead width(mm)	Back-bead height(mm)
0°~45°	5.53mm	1.4mm
45°~135°	5.8 mm	0.7mm
135°~180°	5.5mm	0.5mm

개발하였다. 검증실험을 위해 Table 9와 동일한 조건을 적용하였으며, Table 10은 용접을 실시한 결과를 나타낸다. 용접 조건 외의 파이프의 정렬 상태 및 가접부 형태를 최대한 정밀하게 준비하여 검증을 위한 용접 실험을 수행하였다.

각 구간별 이면비드의 폭과 높이에 대한 형상치수를 비교·분석한 결과를 Table 11에 나타냈다. 0°(용접 시작점)에서 180°(용접 끝점)로 용접 구간이 점차 이동할 때 이면비드의 높이가 감소함을 확인하였다. 이러한 현상은 수평고정관 용접의 특징으로 중력에 의한 용융풀의 처짐현상이다.

4. 결 론

수평고정관의 초층 용접공정의 최적화 방안을 제시를 위하여 평판 및 파이프 용접실험 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 자동용접용 캐리지 시스템을 이용한 평판용접실험을 수행하여 단락이행 파형 용접의 각 공정변수에 대한 영향을 확인함으로써 최적의 용접 조건선정을 위한 실험계획에 필요한 기초데이터를 확보하였다.

2) 수평고정관의 최적 용접조건 선정을 위한 평판 용접실험의 이면비드 폭과 높이에 대한 비교를 통해 양호한 이면비드형상을 도출할 수 있는 용접조건 및 조건영역을 도출하였다.

3) 평판 용접실험 결과와 선정된 최적의 용접조건을 토대로 수평고정관의 용접실험에 적용함으로써 초층 용접의 가능성을 확인하였으며 용접자동화에 필요한 정보를 제공하였다.

4) 수평고정관 용접실험을 통해 용접 중 발생하는 수축변형에 의한 루트갭의 축소가 이면비드의 형성여부를 결정하는 중요한 요소이며, 일정한 형태의 루트갭이 필요함을 확인하였다.

후 기

본 논문은 2005년도 BK21사업에 의하여 지원되었습니다.

참 고 문 헌

1. Drayton, P. A., : An examination of the influence of process parameters on submerged arc welding. The Welding Institute Report 4-1972-PE, The Welding Institute, 1972
2. Doherty, J., Shinoda, T. & Weston, J. : The relationships between arc welding parameters and fillet weld geometry for MIG welding flux cored wire,. The Welding Institute Report 82 (1978)
3. Raveendra, J. & Parmer, R. S. : Mathematical models to predict weld bead geometry for flux cored arc welding. Metal Construction, 19-2 (1987), 33-35
4. www.lincolnelectric.com
5. M. J. Kang, S. H. Rhee and K. W. Um : A study of Estimation of the Arc Stability in Short-circuiting Transfer Region of GMA Welding Using Multi-layer Perceptrons, Journal of KWS, 17-8 (1999), 362-370 (in Korean)