# STS316L 강관의 수평자세 용접을 위한 GTAW 용접조건의 최적화

## 이 형 근<sup>\*,†</sup> · 방 경 식\*\*

\*한밭대학교 공과대학 신소재공학과 \*\*한국원자력연구원 핵주기시스템공학기술개발부

## Optimization of GTAW Parameters for Horizontal Welding of a STS316L Pipe

Hyoung-Keun Lee\*,\* and Kyoung-Sik Bang\*\*

\*Dept. of Advanced Materials Engineering, Hanbat National University, Daejeon, 305-719, Korea \*\*Fuel Cycle System Engineering Technology Development Dept., KAERI, Daejeon, 305-353, Korea

\*Corresponding author : leehk@hanbat.ac.kr (Received September 17, 2015 ; Revised October 14, 2015 ; Accepted October 14, 2015)

#### Abstract

In this study, it was tried to analyze the effects of welding parameters on the weld penetration and aspect ratio when a STS316L pipe was welded in a horizontal position by GTAW. Experiments were systematically designed using a L18 orthogonal array, and the effects of welding parameters were statistically analyzed by ANOVA(Analysis of Variance). The shielding gas type has the largest effect on both the penetration and aspect ratio. The welding current type and shielding gas flow rate have a little effect on the penetration, whereas the electrode tip angle has a little effect on the aspect ratio. When welded at a selected welding condition, which is composed of He shielding gas, pulse current of 300/45 A, electrode tip angle of 900, and shielding gas flow rate of 30 l/min, the estimated interval at least 95 % confidence was  $1.99 \pm 0.18$  mm for the penetration and  $0.31 \pm 0.04$  for the aspect ratio. From the confirmation experiments, the average penetration and aspect ratio were well agreed with the estimation as 1.96 mm and 0.30, respectively. Additionally, the effects of the welding speed and welding current on the penetration and aspect ratio were experimented and analyzed by linear regression. The penetration was linearly increased with the decrease of the welding speed and with the increase of the welding current, but the aspect ratio showed a tendency to a little decrease with the increase of both the welding speed and current.

Key Words : GTAW, STS316L, Optimization, Weld Penetration, Aspect Ratio, Horizontal Position

## 1. 서 론

본 연구는 STS316L 용기 내에 원자력 폐기물을 넣고 밀봉용접하기 위한 공정을 개발하는 과정에서 기초 연구의 하나로서 이루어졌다. 실제 밀봉용접은 수평자 세(horizontal position)에서 강관의 외부에서 용접되 어야 한다. 용접공정은 자동화되고, 원격 제어되어야 하며, 안정적으로 장시간 사용될 수 있어야 한다.

용접공정으로는 GTAW(Gas Tungsten Arc Welding) 를 선택하였다. GTAW는 전원의 제어특성이 우수하며, 스패터(spatter)가 없어 외관이 깨끗하며, 용접부의 기계 적 성능이 우수한 것으로 알려져 있다<sup>1)</sup>. 또한 STS316L 재료는 과도한 입열(heat input)만 피하면 용접성이 우수한 것으로 알려져 있다. 그러나 스테인레스 강의 GTA 용접에서 용접부의 형상은 용접비드의 폭(width) 이 넓으며, 용입(penetration)이 작은 특징을 가진다<sup>2)</sup>. 실제 밀봉용접에서는 8mm 두께의 STS316L 강관을 수평자세에서 서로 맞대기 용접을 해야 하기 때문에, 단층(single pass)에 의해 용접을 완료할 수 없다. 따 라서 강관의 가장자리에 그루브(groove)를 가공하고, 수평자세에서 용가재(filler wire)의 공급과 함께 다층

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

용접을 수행해야 한다. 용접이음매를 설계하기 위해서 는, 용접조건에 따라 용접부 형상의 변화를 예측하는 것이 우선 필요하다. 스테인레스 강의 GTAW에서 용 접변수들이 용접부 형상에 미치는 영향들에 대한 연구 는 최근까지 다양하게 실시되었으나<sup>3.4.5)</sup>, 자세한 용접 환경이 다르며, 특히 수평자세에서 연구된 결과는 드물 다.

본 연구는 기본연구로서 그루브 가공과 용가재를 사 용하지 않고, 비드용접(bead-on-plate)에 대한 연구를 수행하였다. 즉 STS316L 강관의 수평자세 GTAW에 서 용접변수들이 용접부의 용입과 형상비(aspect ratio=penetration/width)에 미치는 영향을 직교배열 표를 사용한 통계적인 실험계획과 결과의 분산분석을 통해서 체계적으로 분석하였다. 실제 다층용접과정에서 루트패스(root pass)를 적절히 형성하기 위해서는 용 입이 깊고, 형상비가 큰 용접조건을 얻는 것이 중요하 다. 따라서 이러한 분석을 통하여 용입이 깊고, 형상비 가 큰 최적의 용접조건을 얻고자 하였다. 추가로 용접 속도와 용접전류가 용입과 형상비에 미치는 영향을 분 석하였다.

### 2. 실험 방법

## 2.1 시험재료, 용접방법

모재로는 두께 8 mm, 외경 349 mm의 STS316L 강관을 사용하였다. 강관을 회전시키면서 수평자세에서 강관 표면에 비드용접을 실시하였다. 용접기는 Miller 사의 Matster350 모델을 사용하였으며, 연속전류과 펄스전류를 선택하여 사용할 수 있다. 모든 위치설정과 용접과정은 PLC 제어에 의해 자동화되었다. 아크길이 (arc length)를 정확히 설정하고, 용접과정에서 아크 길이의 변화를 지속적으로 관찰하기 위하여 확대 CCD 카메라를 사용하였다. 텅스텐(W) 전극은 수명이 길고, 오염 가능성이 적으며, 아크발생이 안정적인 WTh-2 (2% ThO<sub>2</sub>)를 사용하였다. 텅스텐 전극의 직경은 3.2 mm, 극성은 DCEN을 사용하였다. 실제 밀봉용접에서 는 용가재를 공급해야 하기 때문에, 용가재와 전극의 접촉을 방지하기 위하여, 아크길이는 가능한 길게 유지



Fig. 1 Locations of welding parameters (top view) ① Welding current type, ② Electrode tip angle, ③ Electrode-out from a nozzle, ④ Shielding gas type, ⑤ Shielding gas flow rate

하고자 하였다. 예비실험에서 아크길이가 3 mm 이상 이 되면 아크의 시작과 유지가 불안정하였기 때문에, 아크길이는 용접시작에서 2.5 mm로 설정하였다. 아크 길이는 용입에 중요한 용접변수이지만, 용접과정에서 지속적인 변동이 발생하여, 용접변수로 선택하기 어려 웠다. 직교배열표 실험에서 용접속도는 480 mm/min 로, 용접전류는 연속전류 200 A, 펄스전류 300A/45A (주파수 2 kHz, duty 50 %)로 일정하게 고정하였다. 용접속도와 용접전류는 용입에 큰 영향을 미치기 때문 에, 별도의 추가실험에 의해 분석하였다.

## 2.2 직교배열표에 의한 통계적 실험계획

예비실험을 통하여 용접변수로서 ① 용접전류 타입, ② 전국 tip 각도, ③ 노즐 끝에서 전국의 돌출길이 (Electrode-out), ④ 보호가스 종류(Ar, He-25%Ar, He), ⑤ 보호가스 유량(l/min)을 선택하였다. Fig. 1 에서는 각 용접변수들의 위치를 도식적으로 보여준다. Table 1에서는 선택된 용접변수들과 수준(level)을 보 여준다. 용접변수들의 수준 역시 예비실험을 통하여 산 정하였다.

용접전류 타입은 연속전류와 펄스전류로 구분된다. 수평자세에서 용접전류가 과다하면 용융금속이 아래로 처진다. 용접전류는 예비실험을 통하여 적절히 설정하 였다. 연속전류는 200 A를 사용하였으며, Ar 보호가 스를 사용할 때 용접기에서 측정한 전압은 약 13 V이 었다. 따라서 용접출력은 13V\*200A=2600 W이며, 단위 길이당 입열량은 2600W/(8mm/s)=325 J/mm

Level	1	2	2	
Parameter	1	2	5	
Welding current type	continuous	pulse	-	
Electrode tip angle (degree)	30	60	90	
Electrode-out from a nozzle (mm)	4	6	8	
Shielding gas type	Ar	He-25%Ar	He	
Gas flow rate (1/min)(Ar, He-Ar, He)	Low(10,18,20)	Middle(15,23,25)	High(20,28,30)	

 Table 1 Welding parameters and their levels

에 해당한다. 반면 펄스전류에서는 주파수는 2 kHz. 피크전류(peak current)는 300 A, 기저전류(base current)는 45 A, 사용률(duty)은 50 %를 사용하 였다. 역시 Ar 보호가스를 사용할 때 용접기에서 측정 한 전압은 약 14 V이나, 아크길이에 따라 상당한 진 폭을 가지고 변화하였다. 펄스전류를 사용할 때 용접 출력은 14V\*345A\*0.5 = 2415 W이며, 입열량은 2415W/(8mm/s) = 301 J/mm에 해당한다. GTAW 에서 사용하는 보호가스 유량은 Ar 혹은 He을 사용하 는가에 따라 차이가 난다. 주로 Ar이 11 l/min이면, He은 19 l/min를 사용한다<sup>1)</sup>. 기본적으로 Ar은 무겁 고 확산속도가 낮기 때문에 적은 유량을 사용하나, He 은 가볍고 확산속도가 빠르기 때문에 많은 유량을 사 용해야 한다. 따라서 실험에서 Ar, He-25%Ar, He 가스의 유량의 수준은 가스종류에 따라서 저(10Ar. 18Ar-He, 20He), 중(15Ar, 23Ar-He, 25He), 고 (20Ar, 28Ar-He, 30He)로 구분하여 사용하였다. Table 2에서는 용접조건들을 L18 직교배열표에 배치 한 결과를 보여 준다. 실험순서는 난수표를 사용하여 무질서하게 실시하였다.

실험결과는 분산분석에 의해 각 용접변수의 효과를 통계적으로 분석하였다. 또한 용입과 형상비를 크게 할 수 있는 최적용접조건을 설정하고, 확인실험에 의해 결 과의 유효성을 확인하였다.

실험계획법에 의해 얻어진 용접조건을 기준으로, 용 접속도와 용접전류의 변화에 따른 용입과 형상비의 변 화를 추가로 분석하였다.

## 3. 실험결과의 분석 및 검토

## 3.1 직교배열표 실험결과의 분석 및 검토

용접부 단면에 대한 확대 현미경 사진을 촬영하고, 컴퓨터 software를 사용하여 용접부의 폭과 용입을 측 정하고 형상비를 계산하였다. Table 2에는 측정된 용 접부의 폭, 용입 및 형상비가 수록되었다. Fig. 2에서 는 각 용접변수들이 용입과 형상비에 미치는 영향을 그 래프로 정리하였다. 그래프는 용접변수들이 용입과 형 상비에 미치는 영향을 정성적으로 평가할 수 있게 해 준다. 용접변수들의 영향을 좀 더 정량적으로 분석하기 위하여, 용입과 형상비에 대해서 분산분석(ANOVA. Analysis of Variance)을 실시하였다. Table 3은 용 입과 형상비에 대해 분산분석한 결과를 표시한다. 분산 (V)이 클수록 효과가 큰 용접변수들이다. F. G. I의 오차항(ERROR)을 보면 분산(V)이 매우 작아서 실험 의 신뢰도가 매우 높은 것을 확인할 수 있다. 분산이 작은 용접변수들을 오차항으로 풀링(pooling)하면 분석 의 신뢰도를 높일 수 있다<sup>6)</sup>.

용입의 분산분석 결과에서 분산(V)이 작은 용접변수 인 전극 tip 각도, Electrode-out은 오차항으로 풀링 하였다. 유의수준(α)을 0.05로 하였을 때, F-분포표 로부터 F(1, 12; 0.05)= 3.18, F(2, 12; 0.05)= 2.81이다. 용입의 분산분석 결과에서 F<sub>0</sub>와 비교하면 용접전류 타입과 가스종류와 가스유량이 유의수준 5 % 에 유의한 것으로 판명되었다. 용접변수의 중요도는

No	Current	Current Tip angle		Gas	Gas flow	Measured results		
INO.	type	(degree)	out (mm)	type	(l/min)	W(mm)	P(mm)	Aspect ratio
1	conti	30	4	Ar	Low(10,18,20)	7.18	1.22	0.17
2	conti	30	6	He-Ar	Mid(15,23,25)	9.00	1.27	0.14
3	conti	30	8	He	High(20,28,30)	8.83	1.88	0.21
4	conti	60	4	He-Ar	Mid(15,23,25)	8.75	1.44	0.16
5	conti	60	6	He	High(20,28,30)	7.62	2.19	0.29
6	conti	60	8	Ar	Low(10,18,20)	6.97	1.20	0.17
7	conti	90	4	Ar	High(20,28,30)	6.05	1.55	0.26
8	conti	90	6	He-Ar	Low(10,18,20)	8.13	1.49	0.22
9	conti	90	8	He	Mid(15,23,25)	6.39	1.88	0.29
10	pulse	30	4	He	Mid(15,23,25)	7.04	1.92	0.27
11	pulse	30	6	Ar	High(20,28,30)	5.97	1.43	0.24
12	pulse	30	8	He-Ar	Low(10,18,20)	8.11	1.25	0.15
13	pulse	60	4	He	Low(10,18,20)	6.73	1.76	0.26
14	pulse	60	6	Ar	Mid(15,23,25)	5.99	1.11	0.19
15	pulse	60	8	He-Ar	High(20,28,30)	7.67	1.20	0.16
16	pulse	90	4	He-Ar	High(20,28,30)	6.67	1.44	0.22
17	pulse	90	6	He	Low(10,18,20)	6.56	1.74	0.27
18	pulse	90	8	Ar	Mid(15,23,25)	5.74	1.31	0.23

Table 2 Experimental assignments of the parameters to a L18 orthogonal array, and their results



Fig. 2 Effects of welding parameters on the weld penetration and aspect ratio

기여율(R<sub>o</sub>)의 크기로 판단할 수 있다. 가스종류의 기여 율이 약 77.5 %를 차지하여, 가스종류의 영향이 매우 크다는 것을 알 수 있다. 용접전류 타입과 가스유량은 약간 영향을 미침을 알 수 있다. 즉 큰 용입을 얻기 위 해서는 반드시 He 가스를 사용해야 한다. 그 다음에 용접전류 타입과 가스유량을 선택하면 된다. 즉 용입을 크게 하기 위해서는, 보호가스는 He, 용접전류 타입은 연속전류, 가스유량은 High로 설정하도록 추천한다. 영향이 작은 다른 용접변수들은 편리에 따라 선택하면 된다.

다음에는 형상비의 분산분석 결과를 검토해 보기 로 하자. 분산(V)이 작은 용접변수인 용접전류 타입, Electrode-out, 가스유량은 오차항으로 풀링하였다. 유의수준(α)을 0.05로 하였을 때 F-분포표로부터 F(2, 13 ; 0.05) = 2.76이다. 분산분석 결과에서의 F<sub>0</sub>와 비교하면 가스종류와 전극 tip 각도가 유의수준 5 %에서 유의한 것으로 판명되었다. 용입에서와 마찬가 지로 가스종류의 기여율(R<sub>0</sub>)이 62.7 %로서 매우 큰 영향을 미쳤다. 또한 전극 tip 각도도 11.4 %로 상당 한 영향을 미쳤다. 즉 큰 형상비를 얻기 위해서는 반드 시 He 가스를 사용해야 하며, 전극 tip 각도를 90°로 사용할 것을 추천한다. 나머지 영향이 작은 용접변수들 은 편리에 따라 선택하여도 된다.

가스종류의 영향에서 He은 Ar에 비해 이온화 에너 지가 더 크기 때문에, 아크전압이 더 높고, 아크는 더 높은 에너지 상태에 있으며, 따라서 용입과 형상비가 증가한다고 알려져 있다<sup>1)</sup>. 용접전류 타입의 영향에서 연속전류가 펄스전류에 비해서 용입이 약간 더 증가하 였으며, 형상비에는 거의 영향이 없었다. 이것은 연속 전류의 평균전류가 펄스전류에 비해 약간 높기 때문으 로 보인다. 만약 평균전류가 같다고 하면, 본 용접조건 에서는 용접전류 타입은 용입이나 형상비에 거의 영향 을 미치지 않는 것으로 보인다. 일반적으로 펄스전류를 사용하는 경우에 용입과 형상비를 크게 할 수 있다고 알려진다. 특히 10 kHz 이상의 초고주파 펄스를 사용 하는 경우 아크압력이 증가하며, 용입이 증가한다고 보 고되었다<sup>7)</sup>. 본 연구에서 연속전류와 펄스전류의 차이가 거의 없는 이유는 주파수가 2 kHz로서 비교적 낮았기 때문으로 판단된다. 일반적으로 전극 tip 각도가 증가 하면 아크가 용융지에 집중되어, 용접부의 폭이 감소하 고 용입이 증가한다고 알려져 있다<sup>1)</sup>. 본 연구에서는 전 극 tip 각도가 증가하면 형상비는 증가하였으나, 용입

Table 3 ANOVA for the weld penetration and aspect ratio

Chr. Parameter		Weld penetration					Aspect ratio				
		$D_{\rm f}$	SS*10 <sup>-2</sup>	V*10 <sup>-2</sup>	Fo	R <sub>o</sub> (%)	Df	SS*10 <sup>-3</sup>	V*10 <sup>-3</sup>	Fo	R <sub>o</sub> (%)
Α	Current Type	1	5.1	5.1	3.2	2.2	(1)	0.5	0.5	-	-
В	Electrode tip angle	(2)	2.6	1.3	-	-	2	6.2	3.1	4.76	11.4
C	Electrode out	(2)	3.6	1.8	-	-	(2)	1.3	0.7	-	-
D	Shielding gas type	2	130.2	65.1	41.0	77.5	2	28.2	14.1	21.62	62.7
Е	Gas flow rate	2	9.5	4.8	3.0	3.9	(2)	2.2	1.1	-	-
F	ERROR	(2)	1.5	0.8	-	-	(2)	0.6	0.3	-	-
G	ERROR	(2)	1.5	0.8	-	-	(2)	0.2	0.1	-	-
Ι	ERROR	(2)	1.4	0.7	-	-	(2)	0.6	0.3	-	-
e	error	(2)	8.5	4.2			(2)	3.0	1.5		
(e)	pooled error	(12)	(19.1)	(1.6)		25.9	(13)	(8.5)	(0.7)		25.9
	Total	17	163.9			100.0	17	42.9			100.0
Df: Degree of freedom(parentheses mean pooled), SS: Sum of square, V: Variance, Fo: F value,											
F(1, 12; 0.05) = 3.18, F(2, 12; 0.05) = 2.81, F(2, 13; 0.05) = 2.76, Ro; Percentage contribution											

이 증가하지 않았다. 이것은 아크길이를 비교적 길게 유지한 때문으로 보인다. Electrode-out은 용입과 형 상비에 거의 영향이 없기 때문에, 용융금속의 보호에만 문제가 없다면, 전극을 길게 돌출하여 사용하여도 무방 하다. 즉 Y 그루브를 가지는 강관의 루트부 용접에서 노즐의 접촉 때문에 전극을 길게 돌출시키는 것이 작업 에 유리하다.

분산분석 결과로부터 용입와 형상비를 최대로 하기 위한 최적용접조건은 Table 4에서 보여 준다. 보호가 스는 He, 전극 tip 각도는 90°, 용접전류는 연속전류, 가스유량은 30 l/min로 채택되었다. 그러나 모든 변수 들 중에서 가스종류가 거의 절대적으로 영향을 미쳤다.

#### 3.2 최적용접조건에서 확인실험

실험결과의 유효성을 확인하기 위하여, 확인실험을 수행하였다. 확인실험은 Table 4에서의 최적용접조건 에 준하여 실시하였다. 단 확인실험에서 용접전류는 연 속전류 대신에 펄스전류를 사용하였다. 펄스전류를 사 용하면 용입은 약간 줄어드나, 형상비는 거의 차이가 없었다. 즉 보호가스는 He, 전극 tip 각도는 90°, 용 접전류는 펄스전류(300A/45A, 2 kHZ, 50%), 가스 유량은 30 l/min의 조건으로 용접하였을 때, 95 % 신뢰구간에서 용입과 형상비의 추정치는 다음과 같다.

용입의 추정구간 = 1.99 ± 0.18 mm 형상비의 추정구간 = 0.31 ± 0.04

확인실험은 2회 수행하였다. 용입은 각각 1.89 mm, 2.02 mm로서 평균 1.96 mm을 얻었으며, 형상비는 각각 0.30, 0.31로서 평균 0.30을 얻었다. 측정값들 은 예측범위에 들어가기 때문에 실험결과의 유효성은 인정된다.

#### 3.3 용접속도와 용접전류의 영향

지금까지는 용접속도와 용접전류가 고정된 조건 하에 서 용입과 형상비를 크게 하기 위한 최적의 용접조건을 도출하였다. 그러나 용접속도와 용접전류는 용입과 형 상비에 큰 영향을 미친다. 즉 용접속도가 감소하면 용 입과 형상비는 증가하며, 용접전류가 증가하면 용입은





증가한다고 알려진다<sup>1)</sup>. 따라서 용접속도와 용접전류가 용입과 형상비에 미치는 영향은 여기서 별도로 분석하 였다.

Fig. 3(a)에서는 각각 200 A의 연속전류와 300A/ 45A의 펄스전류 하에서, 용접속도의 변화(300, 360, 420, 480 mm/min)에 따른 용입과 형상비의 변화를 보여 준다. 각 그래프에 대해 95 % 신뢰수준에서, 용 입과 형상비에 대한 직선회귀식과 결정계수(R)을 구하 였다.

연속전류 200 A: 용입(mm)= 2.91 - 0.284\*용접속도, R=0.99 형상비= 0.36 - 0.022\*용접속도, R=0.77

펄스전류 300A/45A, 2 kHz, 50 %: 용입(mm)= 2.50 - 0.206\*용접속도, R=0.92 형상비= 0.35 - 0.017\*용접속도, R=0.83

용입-용접속도의 선형회귀식은 연속전류와 펄스전류 모두에서 결정계수(R)가 거의 "1"에 가깝다. 따라서 용 입-용접속도는 직선적인 관계를 매우 잘 만족한다. 펄 스전류보다 연속전류를 사용할 때 더 큰 용입이 얻어졌 다. 반면 형상비는 전류타입에 무관하며, 용접속도가 증가함에 따라 약간 감소하는 경향을 가진다. 그러나 결정계수(R)가 작아서, 형상비와 용접속도 사이에는 미 약한 직선관계를 가진다.

Table 4 Results of the confirmation experiments using the optimized welding conditions

	Analysis results						
Current	Tip angle	Electrode-out	Gas turna	Gas flow	penetration(mm)/aspect ratio		
type(A)	(degree)	(mm)	Gas type	(l/min)	1	2	Average
Conti.(200)	90	6	He	30	1.89/0.30	2.02/0.31	1.96/0.30

용접속도 480 mm/min: 용입(mm)= 1.73 - 0.265\*전류, R=0.99 형상비= 0.30 - 0.028\*전류, R=0.79

용입-전류의 선형회귀식은 결정계수(R)가 거의 "1"에 가깝기 때문에, 용입과 용접전류는 직선적인 관계를 매 우 잘 만족한다. 반면 형상비는 전류가 증가하면 약간 감소하는 경향을 가지나, 결정계수(R)가 작아서 형상비 와 용접전류 사이에는 미약한 직선관계를 가진다.

## 4. 결 론

본 연구는 STS316L 강관의 수평자세 GTAW에서 용접변수들이 용접부의 용입과 형상비에 미치는 영향을 분석하고, 용입과 형상비를 크게 할 수 있는 최적의 용 접조건을 도출하고자 하였다. 얻어진 결론은 다음과 같 이 요약된다.

L18 직교배열표를 사용한 실험에서 보호가스 종
 류가 용접부의 용입과 형상비 모두에 매우 큰 영향을
 미쳤다. 또한 용입에는 용접전류 타입과 보호가스 유량
 이 약간의 영향을 미쳤으며, 형상비에는 전극 tip 각도
 가 약간의 영향을 미쳤다. 반면 노즐 끝에서 전극의 돌
 출길이는 용입이나 형상비에 거의 영향을 미치지 않았다.

2) 분산분석 결과에서 용입과 형상비를 크게 하기 위해서 반드시 He 보호가스를 사용해야 한다. 추가로 용입을 증가시키기 위해서는 용접전류는 연속전류, 가 스유량은 30 l/min를 사용할 것을 추천하며, 형상비를 크게 하기 위해서는 전극 tip 각도를 90o로 사용할 것 을 추천한다.

3) 보호가스를 He, 전극 tip 각도는 90°, 용접전류 는 펄스전류(300A/45A), 가스유량은 30 l/min의 조 건으로 용접하였을 때, 95% 신뢰구간에서 용입의 추정 구간은 1.99 ± 0.18 mm, 형상비의 추정구간은 0.31 ± 0.04로 예측되었다. 2 회의 확인실험 결과에서 평균 용입은 1.96 mm, 평균형상비는 0.30으로 예측값과 잘 일치하였다.

4) 추가로 용접속도와 용접전류가 용입과 형상비에 미치는 영향을 분석하였다. 용입은 용접속도가 감소하 거나, 용접전류가 증가하면 직선적으로 증가하였다. 용 입-용접속도 및 용입-용접전류 사이에는 직선적인 관계 를 매우 잘 만족하였다. 형상비는 용접속도나 용접전류 가 증가하면 약간 감소하는 경향을 가졌으나, 명확한 직선적인 관계는 가지지 않았다

## 후 기

본 연구는 한국원자력연구원의 자금지원으로 수행되 었습니다.

#### References

- 1. R.L. O'Brien : Welding Handbook 2: Welding Processes (4th Edition), *AWS*, (1995), 74-107.
- 2. J.F. Lancaster : Metallurgy of Welding (6th Edition), *Abington Publishing*, (1999), 313-316.
- H.K. Lee, H.S. Han and K.J. Son : The Effects of Welding Parameters on the Weld Shape in Pulsed GTA Welding of a STS304L Stainless Steel Capsule, *Journal* of KWJS, 25 (5) (2007), 64-71. (in Korean)
- S.C. Juang, Y.S. Tarng : Process parameter selection for optimizing the weld pool geometry in the tungsten inert gas welding of stainless steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 122 (1) (2002), 33-37.
- G. Lothongkum, P. Chaumbai, P. Bhandhubanyong : TIG pulse welding of 304L austenitic stainless steel in flat, vertical and overhead positions, *Journal of Materials Processing Technology*, 89 (90) (1999), 410-414.
- P. J. Ross : Taguchi techniques for quality engineering, 2nd ed., *McGraw-Hill*, *New York*, (1996), 143-146.
- M.X. Yang, B.J. Qi, B.Q. Cong, F.J. Liu, Z. Yang : Effect of pulse frequency on microstructure and properties of Ti-6Al-4V by ultrahigh frequency pulse gas tungsten arc welding, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 68 (2013), 19 - 31.

436