

STS304L 캡슐의 펄스형 GTA 용접에서 용접변수들이 용접부 형상에 미치는 영향

이 형근* · 한 현수** · 손 광재**

*한밭대학교 신소재공학부 생산가공공학과

**한국원자력연구원 하나로이용연구단

The Effects of Welding Parameters on the Weld Shape in Pulsed GTA Welding of a STS304L Stainless Steel Capsule

Hyoung Keun Lee*, Hyon Soo Han** and Kwang Jae Son**

*Dept. of Welding and Production Engineering, Hanbat National University, Daejeon 305-719, Korea

**Hanaro Center, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-353, Korea

Abstract

The aim of this paper is to investigate the effects of welding parameters on the weld shape in seal-welding of STS304L capsule for manufacturing a radioisotope source which is widely used in nondestructive testing of metal structures using gamma ray. Pulsed gas tungsten arc (Pulsed GTA) welding is performed for thin cross sectional area of the capsule. Seven welding parameters including current waveform parameters and arc length etc. are selected as main process parameters using design of experiment. The weld shape such as bead width, penetration depth, weld area, aspect ratio and area rate is investigated to assess the effects of welding parameters. As results, the combination of pulse duty/welding speed largely affects on bead width, penetration depth, area and aspect ratio. Finally, it is concluded that the key parameters are the combination of pulse duty/welding speed, base current and arc length, and their optimal conditions are 50%/1.77mm/s, 6.4A and 1 mm.

*Corresponding author : leehk@hanbat.ac.kr

(Received September 9, 2007)

Key Words : STS304L stainless steel, Pulsed GTA welding, Welding parameters, Weld penetration, Aspect ratio, Optimization

1. 서 론

금속 구조물의 내부결함을 분석하기 위한 비파괴적인 검사방법들중에 방사선투과시험이 있다. 방사선투과시험용 방사선원으로는 주로 X 선과 감마선을 사용하고 있으나, 건설현장에서는 감마선 장치가 전력이 필요없고 소형으로 휴대가 간편하여 더 많이 사용하고 있다^{1,2)}. 감마선원으로는 Ir-192와 Co-60이 산업용으로 주로 사용되고 있으나, 선원의 85% 이상이 Ir-192를 사용하고 있으며 대부분을 수입에 의존하고 있다²⁾. 감마

선은 방사선 붕괴에 의해 방출되기 때문에 광자의 에너지가 X선에 비해 더욱 높으며, 알파(α)선과 베타(β)선이 동시에 방출되기 때문에 약간이라도 노출되면 극히 위험하다. 비파괴검사를 위한 방사선원은 capsule 내에 철저히 밀봉되어 있기 때문에 알파(α)선과 베타(β)선의 노출위험은 거의 없으나, 혹시나 현장작업 중 용접밀봉부가 파손된다면 매우 위험한 상황이 된다. 방사선원이 capsule 내에 잘 밀봉용접되어 있더라도 간혹 작업자의 실수에 의해 감마선에 잠시(수 초) 노출되어 방사선평부염을 일으킨 사례들이 보고되고 있기 때문에 작업자의 철저한 주의가 요구된다³⁾.

Fig. 1에서는 Ir-192 방사선원이 삽입된 감마선 비파괴검사용 capsule의 도면과 용접부의 위치를 보여준다. Ir-192 방사선원은 내부 capsule에 의해 1차적으로 보호되며, 내부 capsule은 다시 외부 capsule 내에 용접에 의해 밀봉된다. 외부 capsule의 용접방법으로는 용접부 품질이 우수하며, 안정적인 용입과 용접부 형상을 얻을 수 있다고 알려진 펄스형 GTA 용접법을 채택하고 있다⁴⁾. 실제 비파괴검사용 capsule을 제작하기 위해서는 Ir-192 방사선원이 삽입된 상태에서 용접해야 하며, 안전을 위하여 반드시 hot cell 내에 용접장치를 설치하고 로봇에 의해 원격으로 조립 및 용접작업을 실시하여야 한다. hot cell 내에서 capsule의 원격용접에는 몇가지 제약사항이 있다. 첫 번째는 원격으로 조정하는 관계로 전극의 위치가 이음매에서 약간 벗어날 수 있으며, 용접선이 이음매에서 약간 벗어나더라도 안정적으로 완전용입(full penetration)된 용접부를 얻을 수 있어야 한다. 두 번째로는 hot cell 내에 설치된 장치의 교체에는 시간과 비용이 많이 들기 때문에 장치의 교체없이 장기간 용접할 수 있어야 한다. 첫 번째 기준을 만족시키기 위해서 용접부는 충분한 용입을 가져야 하며, 종횡비(aspect ratio)가 커야 하며, root부가 가능한 넓어야 한다. 두 번째 기준을 충족시키기 위해서는 hot cell 내에서 장기간 용접할 수 있도록 전극의 교체시기가 가능한 길어야 한다.

안정적으로 완전용입된 밀봉용접부를 얻기 위해서는 용접부의 형상을 잘 조절하는 것이 무엇보다도 중요하다. Stainless steel의 펄스형 GTA 용접에서 용접변수들이 용접부 형상에 미치는 영향들에 대한 연구는 최근까지 다양하게 실시되었으나^{5,6)}, 모재의 형상과 용접변수들이 본 연구에서 필요로 하는 내용과 달랐기 때문에 그 결과들을 직접적으로 capsule의 용접에 적용하기는 어려웠다. 본 연구는 방사선원의 밀봉용접을 위한 기초연구로서, STS304L capsule의 펄스형 GTA 용접에서 용접변수들이 용접부의 형상에 미치는 영향을

정량적으로 분석하고, 최적 밀봉용접조건을 확립하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 시험편, 용접장치 및 용접변수들의 선정

Fig. 1에서는 Ir-192 방사선원이 삽입된 비파괴검사용 capsule의 도면과 용접부의 위치와 이음매를 보여준다. Ir-192 방사선원이 삽입된 상태에서 용접하기 위해서는 안전을 위하여 반드시 hot cell 내에서 원격으로 작업이 이루어져야 한다. 그러나 hot cell 내에서 다양한 용접실험을 하기가 매우 어려웠기 때문에, 본 연구에서는 실험의 편의와 안전을 위하여 Ir-192 방사선원만을 제거한 동일한 시험편을 사용하여 실험실에서 실험하였다.

얇은 두께의 용접을 위하여 소형 펄스형 GTA 용접기를 사용하였으며, 용접기는 인버터형으로 출력부하전류 0.5 ~ 33 A, 출력부하전압 20 ~ 25 V, 주파수 0.5 ~ 200 Hz의 범위에서 제어할 수 있다. 용접과정은 PLC(programmable logic controller)를 사용하여 모터의 회전, 가스의 공급, 용접의 시작과 종료 등 모든 용접 cycle이 자동으로 작동되도록 하였다.

용접변수들은 예비실험을 통하여 용접부의 형상에 영향을 미칠 것으로 생각되는 7개의 변수를 선택하였다. 선정된 용접변수들로서는 ① 전극의 직경, ② 전극 tip의 각도, ③ 아크길이, ④ 보호가스 유량, ⑤ 용접전류 펄스 주파수, ⑥ 펄스 기저전류(base current), ⑦ duty/용접속도이다. 여기서 duty = (피크전류 통전시간/기저전류 통전시간)*100을 의미하며, 용접속도는 capsule의 회전시 표면속도를 의미한다. Fig. 2에서는 이들 용접변수들의 위치를 도식적으로 보여준다. 각 용접변수들에 대한 실험조건 범위에 대해서도 예비실험을 통해서 적절한 범위를 결정하였다.

2.2 실험계획 및 분석방법

GTA 용접실험은 L18 직교배열표를 사용하여 계획하였다. L18 직교배열표는 1 개의 2 수준 변수와 7 개의 3 수준 변수를 동시에 실험할 수 있으며, 교호작용이 모든 열에 고르게 분산되어 교호작용의 영향이 가장 적은 직교배열표이다. Table 1에서는 실험에 사용된 GTA 용접변수들과 이들의 수준을 보여준다. 전극의 직경을 2 수준에 배치하고, 나머지 6 개의 변수들은 3 수준에 배치하였다. Table 2에서는 L18 직교배열표에

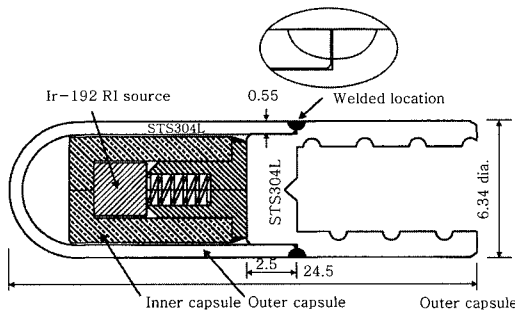


Fig. 1 A schematic drawing of a capsule for γ ray nondestructive test showing its dimensions and the welded location

배치된 각 실험조건을 보여준다. 실험의 적합성을 판단하기 위하여 3 수준의 1 개 열(column)에는 변수를 배치하지 않고 에러(error)로 남겨 두었다. 실험순서는

난수표를 사용하여 무질서하게 하였다.

펄스 피크전류(peak current)는 최대부하전류인 33 A로 고정하여 사용하였다. 펄스형 GTA 용접에서 용입은 펄스 피크전류에 의해 상당히 영향을 받으나, 본 연구에서는 펄스 피크전류를 고정시키고 다른 용접변수의 영향을 분석하고자 하였다. 펄스 피크전류를 33 A로 일정하게 사용하였을 때 용접전압은 다른 용접조건들에 거의 무관하게 약 20 V로 측정되었다. 텅스텐 전극의 극성은 전극의 손상을 최대한 줄이고 용입을 크게하기 위하여 전극을 음극으로 하였다. 용접부의 폭(width), 용입(penetration)과 면적(area)은 입열량(heat input)에 의해 달라진다. 따라서 입열량에 무관하게 용접변수들의 영향을 분석하기 위하여 가능한 입열량을 일정하

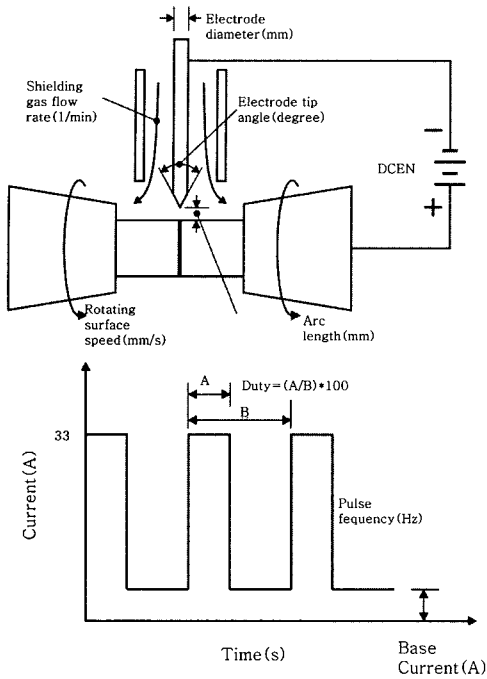


Fig. 2 Schematic drawings showing experimental setup and welding parameters

Table 1 Pulsed TIG welding parameters and their levels

Chr.	Parameter	Level		
		1	2	3
A	Electrode diameter (mm)	1.6	1.0	-
B	Electrode tip angle (degree)	30	45	75
C	Arc length (mm)	1.0	1.2	1.4
D	Shielding gas flow rate (l/min)	7	11	15
E	Pulse frequency (Hz)	4.7	7.2	9.8
F	Base current (A)	3.3	4.6	6.4
G	Duty(%) / Welding speed(mm/s)	30/0.89	40/1.33	50/1.77

Table 2 Experimental assignments of the welding parameters to a L18 apthogonal array, and the experimental results

No.	A	B	C	D	E	F	G	Width (mm)	Penetration (mm)	Aera (mm)	Heat input (KJ/mm)	Aspect ratio	Area rate
1	1.6	30	1.0	7	4.7	3.3	30/0.89	1.50	0.28	0.29	0.29	0.18	0.69
2	1.6	30	1.2	11	7.2	4.6	40/1.33	2.03	0.61	0.82	0.24	0.30	0.66
3	1.6	30	1.4	15	9.8	6.4	50/1.77	2.15	0.58	0.83	0.22	0.27	0.66
4	1.6	45	1.0	11	7.2	6.4	50/1.77	2.55	0.64	1.28	0.22	0.25	0.79
5	1.6	45	1.2	15	9.8	3.3	30/0.89	1.64	0.34	0.38	0.31	0.21	0.68
6	1.6	45	1.4	7	4.7	4.6	40/1.33	2.50	0.60	1.13	0.24	0.24	0.76
7	1.6	75	1.0	7	9.8	4.6	50/1.77	2.30	0.58	1.05	0.21	0.25	0.78
8	1.6	75	1.2	11	4.7	6.4	30/0.89	2.20	0.59	0.84	0.34	0.27	0.65
9	1.6	75	1.4	15	7.2	3.3	40/1.33	1.98	0.48	0.56	0.22	0.24	0.59
10	1.0	30	1.0	15	7.2	4.6	30/0.89	1.43	0.24	0.26	0.32	0.17	0.74
11	1.0	30	1.2	7	9.8	6.4	40/1.33	2.15	0.60	0.90	0.26	0.28	0.69
12	1.0	30	1.4	11	4.7	3.3	50/1.77	2.16	0.50	0.73	0.19	0.23	0.68
13	1.0	45	1.0	15	4.7	6.4	40/1.33	2.15	0.60	0.98	0.26	0.28	0.76
14	1.0	45	1.2	7	7.2	3.3	50/1.77	2.14	0.58	0.86	0.19	0.27	0.70
15	1.0	45	1.4	11	9.8	4.6	30/0.89	1.72	0.30	0.30	0.33	0.17	0.59
16	1.0	75	1.0	11	9.8	3.3	40/1.33	1.75	0.44	0.49	0.24	0.25	0.63
17	1.0	75	1.2	15	4.7	4.6	50/1.77	1.89	0.57	0.76	0.20	0.30	0.71
18	1.0	75	1.4	7	7.2	6.4	30/0.89	2.01	0.40	0.55	0.35	0.20	0.67

게 유지시켰다. 입열량을 일정하게 유지하기 위하여, 전류의 duty와 capsule 회전속도의 표면속도(용접속도)를 상대적으로 변화시켰다. 즉 기저전류의 영향을 무시하고서 duty/용접속도의 수준에 따른 입열량을 대략적으로 계산해 보면 duty/용접속도가 30/0.89의 조건에서 입열량은 $20V \cdot 33A \cdot 0.3 / 0.89mm \cdot s^{-1} = 222 J/mm$ 이며, 40/1.33의 조건에서 입열량은 $20V \cdot 33A \cdot 0.4 / 1.33mm \cdot s^{-1} = 198 J/mm$ 이며, 50/1.77의 조건에서 입열량은 $20V \cdot 33A \cdot 0.5 / 1.77mm \cdot s^{-1} = 186 J/mm$ 이다. 초기에 실험장치의 조절과정에서 duty/용접속도의 수준에 따라 입열량을 정확하게 일치시키는 것이 어려웠기 때문에 약간의 입열량 차이가 발생하였다. 수준에 따른 입열량의 차이의 영향을 분석하기 위하여 모든 실험조건에 대하여 oscilloscope를 사용하여 용접전류를 직접 측정하였으며 이를 사용하여 실제 입열량을 계산하였다. Table 2의 2 번 조건(피크전류: 33 A, 기저전류: 4.6 A, 펄스 주파수: 7.2 Hz)에 대하여 시간에 따른 전류의 변화를 측정한 예를 Fig. 3에서 보여준다. 그림에서 그래프 아래쪽의 면적이 평균 용접전류에 해당한다. 입열량을 계산하기 위하여 입열량(H.I.) = (용접

전압*평균용접전류)/(용접속도)의 식을 사용하였다. 용접전압으로는 20 V를 사용하였다. 모든 조건들에 대한 입열량의 측정결과는 Table 2에 수록하였다.

용접 시험편들은 단면을 절단하고, mounting, 연마, polishing, 에칭한 후 광학현미경에 의해 용접부 단면 사진을 관찰하였다. 컴퓨터 software를 사용하여 용접부의 폭, 용입 및 면적을 정확히 측정하였다. 용접부는 가능한 중횡비가 크며, 완전용입(full penetration)을 가져야 한다. 또한 hot cell에서 원격으로 용접하기 때문에 전극의 위치가 약간씩 달라지는 경우가 발생하였다. 이때 전극의 위치가 접합선에서 약간 벗어나며, 용접부가 완전용입되더라도 접합선에서는 부분용입(partial penetration)되는 현상이 발생하였다. 따라서 root부에서 용접부가 가능한 넓게 형성되는 것이 더 바람직하였다. root에서 용접부가 넓게 형성되는 정도를 판단하기 위하여 면적율(area rate)을 측정하였다. 면적율은 "면적율(area rate) = [면적(area)]/[폭(width)*용입(penetration)]"로 정의하였다. 면적율이 클수록 root가 평평한 형상을 가질 것으로 판단된다. Fig. 4에서는 용접부의 중횡비와 면적율을 측정하는 방법을 보여준다.

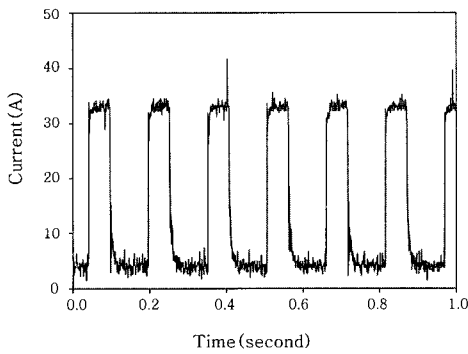


Fig. 3 Current pattern measured by an oscilloscope for No. 2 condition in Table 2

3. 실험결과

3.1 실험결과와 분석

용접부의 형상은 전반적으로 용입에 비해 폭이 매우 넓어서 작은 중횡비(aspect ratio)를 가졌으며, 이러한 작은 중횡비는 stainless steel의 아크용접에서 일반적으로 일어나는 현상으로 알려져 있다⁷⁾. 용접부 형상은 용접조건에 따라 다양한 형태를 가졌으며, 용접 이동때의 비대칭성 때문에 용접부 형상도 비대칭을 가졌다. 벽 두께가 얇은 부분에서 열전달이 잘되지 않아 더 많은 용융을 일으킨 것으로 보인다. 각 용접조건에 대해

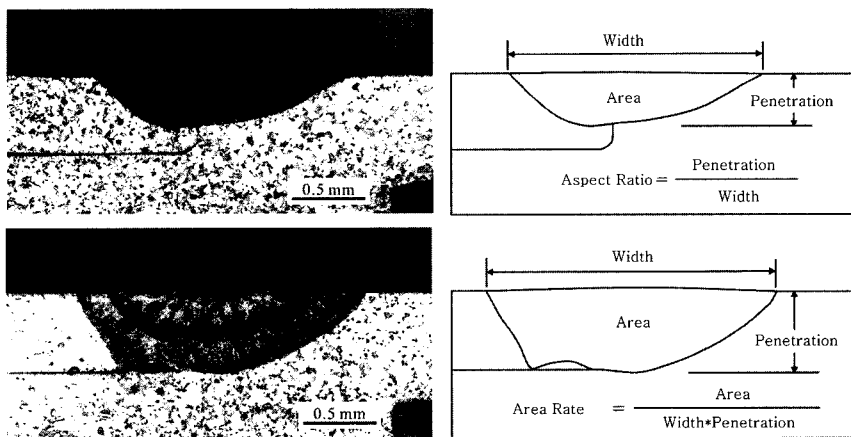


Fig. 4 Identification of aspect ratio and area rate

여 용접부의 폭, 용입, 면적, 종횡비 및 면적율과 입열량을 측정된 결과는 Table 2에 수록하였다. Fig. 5에서는 각 용접변수가 용접부의 폭, 용입 및 면적에 미치는 영향을 그래프로 보여준다. 용접부의 폭, 용입 및 면적은 모두 duty/용접속도에 가장 큰 영향을 받았다. 또한 전극직경, 아크길이가 기저전류가 어느 정도 영향을 미치는 것으로 보인다. 그래프에 의해서는 용접변수들이 특성치들에 미치는 영향을 정성적으로는 평가할 수 있으나, 정량적으로는 평가하기가 어렵다.

Fig. 6에서는 용접변수들이 종횡비와 면적율에 미치는 영향을 그래프로 보여준다. duty/용접속도의 조합

이 종횡비에 가장 크게 영향을 미치며, 아크길이가 상당히 영향을 미치는 것으로 보인다. 면적율에 있어서는 모든 용접변수들의 영향이 거의 비슷한 것으로 판단된다. 역시 그래프에 의해서는 각 용접변수의 영향을 직관적으로 평가하기에는 좋으나, 정량적인 영향을 평가하기는 어렵다.

그래프에 의한 분석은 변수들의 영향을 직관적으로 판단하기는 쉬우나, 실제로 어떠한 변수들이 유효한 영향을 미치는지를 판단하기에는 어려운 점이 있다. 각 용접변수들의 영향을 좀 더 통계학적이고 정량적으로 분석하기 위하여 분산분석(ANOVA, analysis of variance)

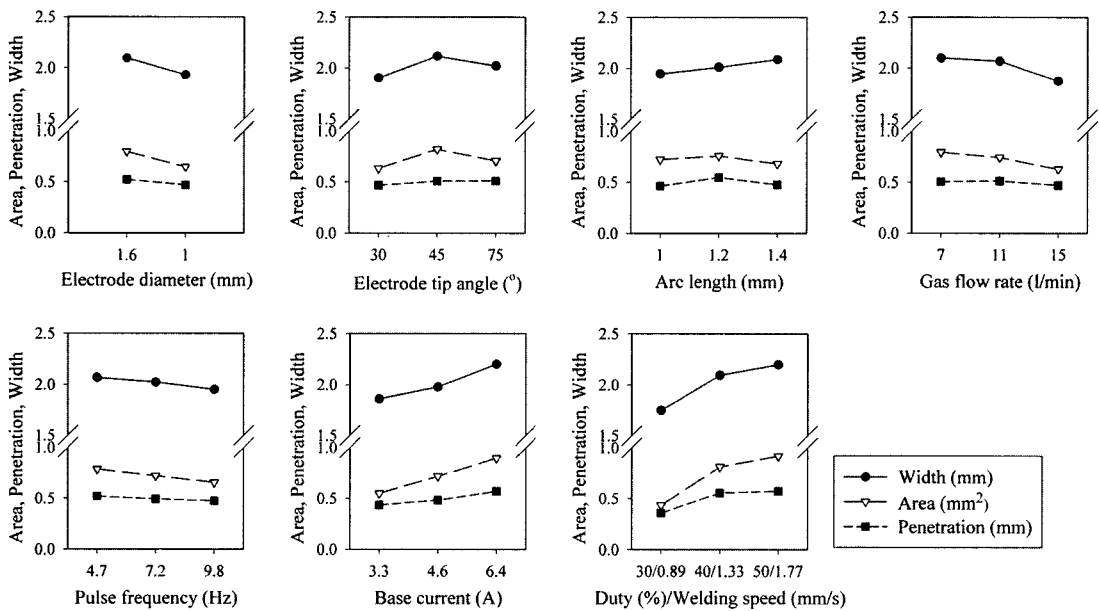


Fig. 5 Effects of the welding parameters on weld width, penetration and area

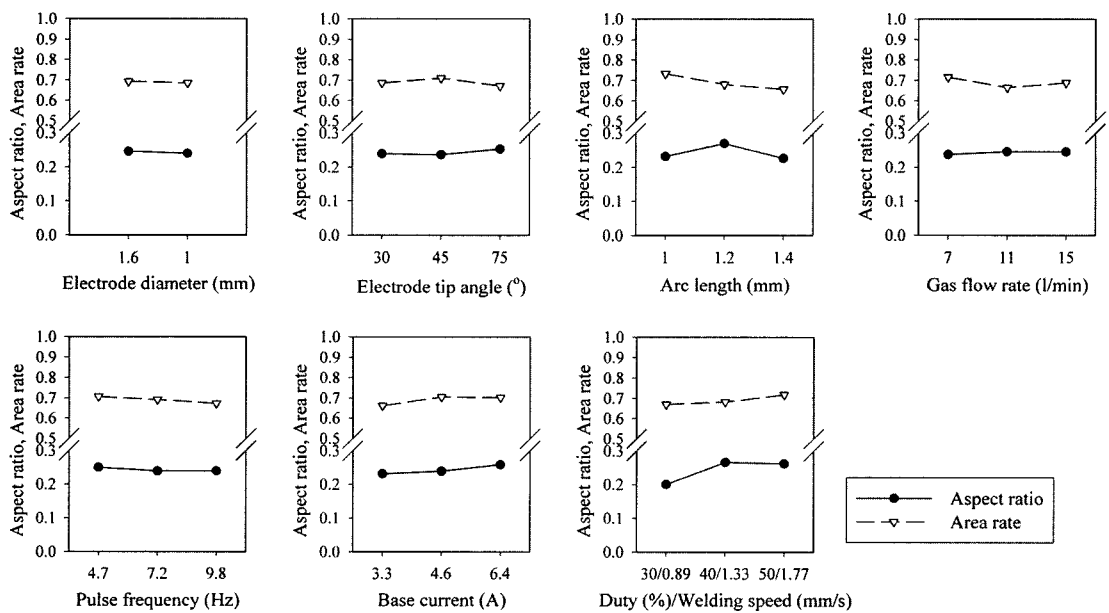


Fig. 6 Effects of the welding parameters on aspect ratio and area rate

을 실시하였다. 최종적으로 중요한 특성치인 종횡비와 면적율에 대해서 분산분석한 결과는 Table 3와 Table 4에 수록하였다. 용접부의 폭, 용입, 면적에 대한 분산 분석 결과 종횡비의 결과와 비슷하여 생략하였다.

Table 3과 Table 4에서 용접변수들에 대한 분산값 (V)과 F₀ 값이 클수록 그 용접변수가 각각 종횡비와 면적율에 미치는 영향이 크다는 것을 의미한다. F 분포 표로부터 F(1, 4 ; 0.1) = 4.54, F(2, 4 ; 0.1) = 4.32 이다. 각 용접변수들에 대한 F₀ 값이 유의수준 (α) 10% 에서의 F 값보다 클 때 그 변수의 영향이 크다고 말할 수 있다⁸⁾. 이러한 관점에서 Table 3의 종횡비의 분산분석 결과를 보면 duty/용접속도 조합이 다른 변수들에 비해 종횡비에 월등히 큰 영향을 미쳤으며, 또한 아크길이와 기저전류가 종횡비에 상당히 영향을 미쳤다는 것을 알 수 있다. 기타 다른 용접변수들은 종횡비에 거의 영향을 미치지 않았다. Table 4에서 면적율의 분산분석 결과를 보면 대부분의 용접변수들이

면적율에 미치는 영향은 매우 작다는 것을 알 수 있다. 용접변수들 중에서 유일하게 아크길이만이 면적율에 유효한 영향력을 가졌다.

대부분 용접변수들에 대해서 수준에 따라 사용한 입열량의 차이가 거의 없었으나, duty/용접속도와 기저전류는 수준에 따라서 사용한 입열량의 차이가 발생하였다. 기저전류의 수준에 따라서는 입열량의 차이가 적었으나, duty/용접속도의 수준에 따라서는 입열량의 차이가 다소 발생하였다. 따라서 duty/용접속도의 수준에 따른 입열량의 차이가 종횡비에 주도적인 영향을 미쳤는지 알아보았다. Fig. 7에서는 입열량의 변화에 따른 종횡비의 변화를 그래프로 표시하였다. 그래프에서 동일한 duty/용접속도의 수준에 해당하는 데이터는 하나의 폐곡선 안에 표시하였다. duty/용접속도의 조합이 50/1.77과 40/1.33의 수준에서는 비슷한 입열량이 사용되었으나, 30/0.89의 수준에서는 상당히 작은 입열량이 사용되었다. 그러나 동일한 duty/용접속도의

Table 3 ANOVA results for the aspect ratio

Chr.	Parameter	Df	SS(×10 ³)	V(×10 ³)	F ₀	F,10%
A	Electrode diameter (mm)	1	0.17	0.17	0.63	4.54
B	Electrode tip angle (degree)	2	0.98	0.49	1.85	4.32
C	Arc length (mm)	2	6.82	3.41	12.94	4.32
D	Shielding gas flow rate (l/min)	2	0.26	0.13	0.50	4.32
E	Pulse frequency (Hz)	2	0.44	0.22	0.83	4.32
F	Base current (A)	2	2.34	1.17	4.44	4.32
G	Duty(%) / Welding speed(mm/s)	2	16.25	8.12	30.81	4.32
e	error	4	1.06	0.26		
	Total	17	28.31			

Df : degree of freedom, SS : Sum of square, V : Variance,
 F₀ : F value, F(1,4:0.1) = 4.54, F(2,4:0.1) = 4.32

Table 4 ANOVA results for the area rate

Chr.	Parameter	Df	SS(×10 ³)	V(×10 ³)	F ₀	F,10%
A	Electrode diameter (mm)	1	0.30	0.30	0.14	4.54
B	Electrode tip angle (degree)	2	4.50	2.25	1.01	4.32
C	Arc length (mm)	2	18.27	9.13	4.09	4.32
D	Shielding gas flow rate (l/min)	2	7.73	3.87	1.73	4.32
E	Pulse frequency (Hz)	2	3.65	1.83	0.82	4.32
F	Base current (A)	2	7.56	3.78	1.69	4.32
G	Duty(%) / Welding speed(mm/s)	2	7.80	3.90	1.75	4.32
e	error	4	8.92	2.23		
	Total	17	58.74			

Df : degree of freedom, SS : Sum of square, V : Variance,
 F₀ : F value, F(1,4:0.1) = 4.54, F(2,4:0.1) = 4.32

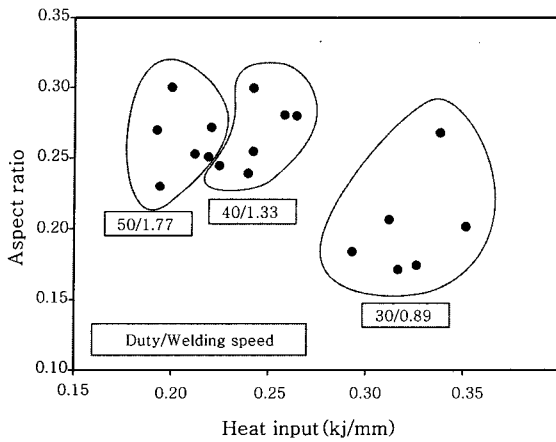
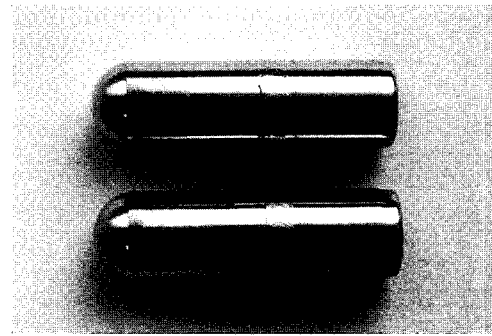


Fig. 7 Plot showing correlation between aspect ratio and heat input

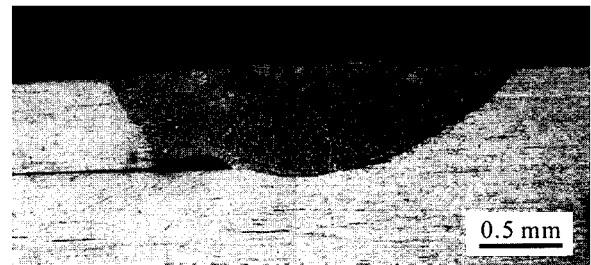
수준에 해당하는 각각의 폐곡선 내에서는 입열량 변화에 따른 종횡비의 변화는 특정한 경향을 보여 주지 못하였다. 따라서 입열량의 차이가 종횡비에 큰 영향을 미쳤다고 보기는 어려우며, duty/용접속도의 조합이 종횡비에 큰 영향을 미친 것으로 판단된다. 현재로서 그 원인에 대해서는 잘 알 수 없으나, Fig. 4의 용접부 단면의 미세조직을 보면 각 하나의 pulse 동안 용융과 응고가 완료된 것으로 보인다. 분산분석의 결과로부터 큰 duty와 빠른 용접속도의 조합이 pulse에 의한 용융을 상대적으로 폭은 좁고 용입은 깊게 하는 것으로 보인다.

3.2 최적 용접조건의 선정

본 연구에서 원하는 최적의 용접조건은 면적율과 종횡비가 크며 완전용입을 가지는 조건이어야 하며, 전극의 수명을 가능한 길게 할 수 있는 조건이어야 한다. 우선 아크길이는 면적율과 종횡비 모두에 상당한 영향을 미쳤다. 종횡비와 용입은 duty/용접속도에 가장 크게 영향을 받았으나, 면적율은 거의 아크길이에만 영향을 받았다. 따라서 아크길이는 면적율의 최적화를 위해서 1 mm로 짧게 유지하는 것이 필요하다. 종횡비를 크게 하기 위해서는 duty/용접속도를 40/1.33 혹은 50/1.77으로 설정하는 것이 바람직하다. 그러나 50/1.77에서 용입이 더 컸기 때문에 완전용입을 확보하기 위하여 50/1.77의 조건을 선정하였다. 종횡비와 용입에는 역시 기저전류가 상당한 영향을 미쳤기 때문에 완전용입을 확보하기 위하여 6.4 A를 선정하였다. 나머지 변수들은 거의 영향이 없었으며 어떠한 조건을 선정하여도 무방하다. W 전극 직경은 hot cell 내에서 더 오래 사용할 수 있는 1.6 mm의 굵은 쪽을 선택하였다. 전



(a) Surface appearance



(b) Cross-section

Fig. 8 Surface appearance and cross-section of the capsules welded with the optimized condition

극 tip 각도도 장기간 연마의 필요성이 없게 하기 위해서 각도가 큰 75°를 선택하였다. 가스유량은 거의 영향은 없으나, 모재의 보호에 다소 유리한 15 l/min을 선택하였다. 펄스 주파수 역시 거의 영향이 없었으며, 아크 안정성 면에서 유리할 것으로 판단되는 9.8 Hz를 선택하였다. Fig. 8에서는 선정된 최적조건과 예열과 크레이터 처리 등의 조건을 추가하여 용접 제작한 capsule의 외관과 단면의 형상을 보여 준다. 용접부는 적당한 폭을 가지며 충분한 용입을 가지고 있었다. 제작한 capsule들은 규정에 따른 다양한 기계적인 시험을 실시하였으며, 최종 적합한 것으로 판정받았다.

5. 결 론

본 연구에서는 Ir-192 방사선원을 STS304L capsule 내부에 밀봉용접하기 위한 기초연구를 수행하였다. 펄스형 GTA 용접법에 의한 STS304L capsule의 밀봉용접에서 용접변수들이 용접부의 형상에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 분석결과들을 바탕으로 STS304L capsule의 최적용접조건을 도출하고, 확인 용접실험을 수행하였다. 연구결과 얻어진 내용은 다음과 같이 요약될 수 있다.

1) 펄스형 GTA 용접에서 7 개의 용접변수(전극의 직경, 전극 tip의 각도, 아크길이, 보호가스 유량, 펄스 주파수, 기저전류, duty/용접속도)가 용접부의 형상

(폭, 용입, 면적)과 중횡비 및 면적율에 미치는 영향을 통계적인 방법에 의해 정량적으로 분석하였다.

2) 용접부의 폭, 용입, 면적은 모두 duty/용접속도의 조합에 가장 큰 영향을 받았으며, duty/용접속도가 50/1.77의 수준일 때 가장 큰 값을 가졌으며, 30/0.89의 수준에서 가장 낮은 값을 가졌다.

3) 중횡비와 면적율에 대해서 분산분석을 수행하였다. 분산분석 결과 중횡비는 duty/용접속도 조합에 가장 큰 영향을 받았으며, 아크길이와 기저전류에도 상당한 영향을 받았다. 반면 면적율은 아크길이에만 유효한 영향을 받았으나, 다른 변수들에는 거의 영향을 받지 않았다.

4) 분석결과들을 근거로 STS304L capsule의 최적용접조건으로서 duty(%) / 용접속도(mm/s)는 50/1.77, 기저전류는 6.4 A, 아크길이는 1 mm로 설정하였다. 기타 다른 용접변수들은 전극의 수명과 사용의 편리성에 따라 전극직경은 1.6 mm, 전극 tip 각도는 75°, 보호가스유량은 15 l/min로 설정하였다.

참 고 문 헌

1. Kyung-Shik Cho : Radiographic Testing of Welds, Journal of KWS, **21-4** (2003), 374-380 (in Korean)
2. Hong-Keun Lee : Current status of nondestructive testing using radiation in Korea, Journal of the Korean Professional Engineers Association, **33-3** (2000), 20-24 (in Korean)
3. Kea Jeung Kim, Yae Hak Yoo: Radiodermatitis from occupational exposure to Ir-192, Korean J. Occup. Med., **10-1**(1998), 128-135 (in Korean)
4. R.L. O'Brien : Welding Handbook : Vol.2 Welding Processes (8th Edition), AWS, 1991, 74-107
5. S.C. Juang, Y.S. Tarn : Process parameter selection for optimizing the weld pool geometry in the tungsten inert gas welding of stainless steel, Journal of Materials Processing Technology, **122**-(2002), 33-37
6. 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
7. J. F. Lancaster : Metallurgy of Welding (6th Edition), Abington Publishing, 1999, 313-316
8. P. J. Ross, Taguchi techniques for quality engineering, second ed., McGraw-Hill, New York, 1996