

A-TIG 용접에서 용입 형상비에 미치는 아크길이와 실드가스의 영향

박인기* · 함효식** · 조상명***

*CS 윈드타워 중국

**부경대학교 대학원 소재프로세스공학전공

***부경대학교 신소재공학부

The Effect of Arc Length and Shield Gas on Penetration Aspect Ratio in A-TIG Welding

In-Ki Park*, Hyo-Sik Ham** and Sang-Myung Cho***

*CS Wind Tech China

**Dept of Materials Processing Eng. Graduate School, Pukyong Univ.

***Div. of Advanced Materials Sci. and Eng., Busan 608-739, Korea

*Corresponding author : pnwcho@pknu.ac.kr

(Received April 10, 2008 ; Revised June 19, 2008 ; Accepted November 14, 2008)

Abstract

TIG welding enables to produce high quality weldment. However it has some problems such as shallow penetration and large distortion due to low penetration aspect ratio after welding. In order to overcome those problems, there are many ongoing studies on A-TIG welding, which use active flux.

In this study, the effect of arc length and shield gas on penetration aspect ratio with melt-run welding on STS 304 6t, on which active flux was spreaded, was investigated. Arc length was changed from 1mm to 3mm, and aspect ratio became higher as arc length was decreased in this range. 100% Ar gas, Ar-H₂ mixed gas, Ar-He mixed gas, and 100% He gas were used as shield gas in this study. When Ar-H₂ mixed gas, Ar-He mixed gas, and 100% He gas were applied, penetration and melting efficiency were both increased as compared with 100% Ar gas. Aspect ratio was the highest with Ar-2.5% H₂ mixed gas.

Key Words : Aspect ratio, Penetration, A-TIG, Arc length, Shield gas, Arc voltage, Active flux, Melting efficiency

1. 서 론

TIG 용접은 고품질이고 용접인자의 제어가 쉽고 정확하다는 장점이 있지만, 얇은 용입과 낮은 생산성과 같은 단점이 있다. TIG 맞대기 용접에서는 용입의 한계 때문에 깊고 넓은 그루브 가공을 하여 다층 용접을 한다. 이 때, 패스수가 증가할수록 생산성이 감소하며 입열량은 증가해 변형이 커지는 문제가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 용입이 깊고, 작은 변형량을 가지는 용접방법이 필요하다. 활성 플럭스를 사용하는 것과 실드가스를 변경하는 방법 등의 선행연구가 있다¹⁻³⁾.

스테인리스강판에서 활성 플럭스 TIG (Active flux TIG, 이하 A-TIG) 용접이 일반적인 TIG (Conventional TIG, 이하 C-TIG) 용접보다 용입이 깊다는 선행 연구 결과¹⁻²⁾가 있다. J J Loweke 등의 연구에서는 플럭스를 사용하는 TIG 용접에서 용입이 증가하는 메커니즘을 연구하였다¹⁾. Paulo J. Mondesi 등은 TIG 용접에서 여러 조성의 혼합플럭스가 아닌 단성분 플럭스에 대한 용접특성을 연구하였다²⁾. A-TIG의 용입 증가 메커니즘으로는 마랑고니 효과¹⁻²⁾, 음이온들로 인한 아크 수축효과¹⁾, 절연 플럭스에 의한 아크 수축효과^{1), 2)} 등이 있다.

Manabu Tanaka 등의 연구에서는 스테인리스에서 실드가스를 Ar과 He을 사용하였을 때의 아크특성을 비교하였다. 동일전류에서 He을 사용하였을 때 Ar보다 더 넓은 용융단면적을 가졌다³⁾.

따라서, 본 연구는 깊고 형상비가 큰 용입을 얻기 위하여 활성플럭스와 실드가스를 변경하였다. 활성 플럭스 TiO₂를 써서 A-TIG 용접을 STS 304 6t에 용융주행(Melt-run)법으로 실시하여 아크길이와 실드가스가 용입 형상비에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 이론적 배경

2.1 용입 형상비의 정의

본 연구에서 검토한 용입 형상비는 다음과 같이 계산하였다.

$$Aspect\ ratio = \frac{Penetration\ depth}{Bead\ width} \quad (1)$$

이 때 용입 형상비가 크게 되면 두께에 따른 횡수축력의 편차가 작아지기 때문에 각 변형 방지에 유리하다⁴⁾.

2.2 아크 전압의 정의

용접기 출력 전압은 아크전압과 용접회로의 전압으로 구성된다. 용접 시에 용접회로의 저항으로 인해 열이 발생하고 이는 용접에 유효하지 못하다. 실제 용접금속

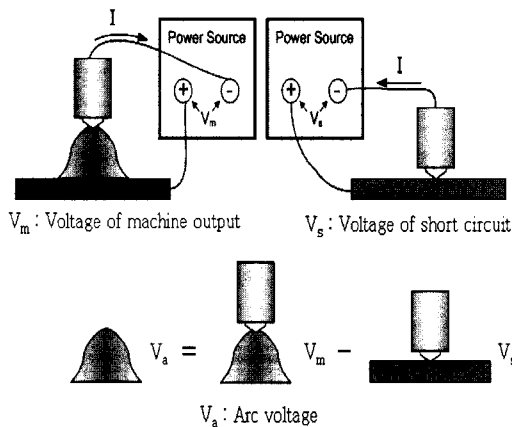


Fig. 1 Definition of arc voltage

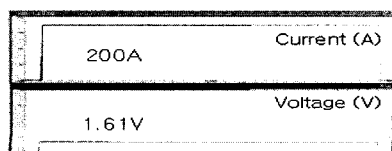


Fig. 2 Voltage of short circuit

을 녹이는 데는 아크전압에 의한 에너지가 이용된다.⁵⁾ 따라서 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 용접기 출력 전압을 측정하고 전극을 단락시켜 측정한 용접회로의 전압을 빼서 아크전압을 구하였다.

Fig. 2는 실제 전극을 단락시켜 측정한 용접회로의 전압이다. 본 연구에서는 200A의 전류를 사용하였고 이 때 전압은 1.61V였다. 이후의 전압은 용접기 출력 전압에서 용접회로의 전압강하인 1.61V를 뺀 아크전압으로 표기하였고, 이 값을 용융효율 계산식에 사용하였다.

2.3 용융 효율의 정의

용융효율은 모재로 투입된 에너지에 대한 용접금속을 녹이는데 사용된 에너지의 비로서 본 연구에서는 J. Tusek의 용융효율 계산식⁶⁾을 이용하였다.

$$\eta = \frac{MEt}{\int_0^t IV_a dt} 100[\%] \quad (2)$$

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

M은 아래와 같이 계산한다.

$$M = A_{WM} \times v \times \rho \quad (3)$$

여기서 A_{WM} [mm²]은 용융단면적, v [mm/s]는 용접속도 그리고 ρ [g/mm³]는 밀도이다.

정상 용접인 경우를 제외하고 용락과 언더필이 생겼을 경우에는 Fig. 3과 같은 방법으로 용융단면적을 구하였다. 사선을 그은 것과 같이 이면비드의 면적을 잘라내고 언더필의 면적만큼 더해서 계산하였다. 이는 Fig. 3의 횡단면에서 용융금속의 양은 이론적으로 언더필 면적과 같은 면적의 이면비드가 나와야 하지만 이 횡단면의 선행위치나 후행위치에서 용융금속이 이곳으로 흘러와 언더필 면적보다 큰 면적의 이면비드가 생길 수 있기 때문에 위와 같은 방법으로 용융단면적을 계산하였다.

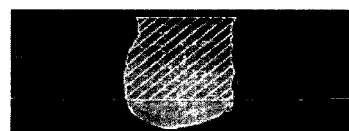


Fig. 3 Calculation of section area of weld metal for the underfill and back bead

3. 사용 재료 및 실험 방법

3.1 사용 재료

모재로는 길이 100mm × 폭 50mm × 두께 6mm의 STS 304판재를 사용하였고, 활성 플럭스 TiO₂를 메탈올에 현탁시켜 바른 후 건조시켜 사용하였다.

3.2 실험 방법

3.2.1 A-TIG 용접에서 용입 형상비에 미치는 아크 길이의 영향

Table 1은 용입 형상비에 미치는 아크길이의 영향을 알아보기 위한 실험A의 용접 조건이다. 실험조건에서 아크길이 1mm미만은 용융풀의 유동으로 인한 아크길이 변동으로 텅스텐 전극이 손상을 입는 문제점이 자주 발생한다. 따라서 아크길이는 1mm이상으로 하여 실험하였다.

Fig. 4는 용접 시편의 모식도를 보여준다. 백킹 플레이트에 의한 열전도의 차에 따른 용입의 변화를 고려하여 시편 양 끝에 블럭을 놓아 용접부는 대기 중에 놓이게 하고 아래보기 자세로 용접하였다. TIG 아크 모니터링 시스템(WAM 3000N)으로 용접 전류, 전압을 측정하였다. 용접 후 Fig. 4의 플럭스 경계면을 기준으로 ±20mm에서 시편을 절단하고 횡단면을 관찰하여 용입과 그 형상비를 측정하였다. 용입 형상비를 구하기 위해 용접 횡단면을 마크로 에칭한 후 CAD 디지털링하여 용입과 비드폭을 측정하였다.

Table 1 Welding condition for experiment A

Fixed	Electrode	DCEN Φ 2.4 2%Th-W 60 \circ
	Current	200A
	Welding speed	20cpm(3.33mm/sec)
	Shield gas flow rate	Ar 100% 15 ℓ /min
Varied	Arc length	1mm, 2mm, 3mm

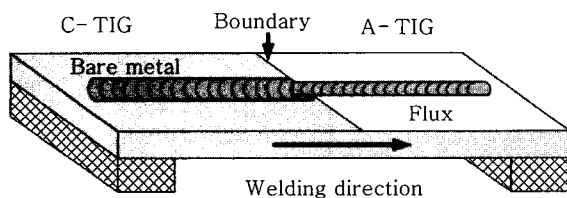


Fig. 4 Schematic of welding specimen

3.2.2 A-TIG 용접에서 용입 형상비에 미치는 실드 가스의 영향

Table 2는 용입 형상비에 미치는 실드가스의 영향을 알아보기 위한 실험B의 용접 조건이다.

용접시편과 용접방향은 Fig. 4와 같게 하였으며 실험 A와 같은 방법으로 용접 전류와 전압을 측정하였고 횡단면을 관찰하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 A-TIG 용접에서 용입 형상비에 미치는 아크길이의 영향

Table 3은 아크길이에 따른 비드외관과 용접파형이고 Table 4는 아크길이에 따른 C-TIG와 A-TIG의 용접 횡단면이다.

C-TIG에서 A-TIG로 바뀌면서 비드폭이 좁아졌고 아크전압은 소폭 증가하였고, 용입은 A-TIG에서 현저히 깊어진 것을 볼 수 있다.

Fig. 5는 아크길이에 따른 용입 측정 결과를 보여주고 Fig. 6은 아크길이에 따른 형상비를 보여준다. 전체적으로 아크길이가 짧아질수록 용입은 증가하였고 비드

Table 2 Welding condition for experiment B

Fixed	Electrode	DCEN Φ 2.4 2%Th-W 60 \circ
	Current	200A
	Welding speed	20cpm(3.33mm/sec)
	Arc length	2mm
Varied	Shield gas	100% Ar Ar-2.5% H ₂ / 5% H ₂ Ar-33% He / 66% He 100% He

Table 3 Weld surface and waveform with arc length

Arc length	Weld surface	Waveform						
1mm	C-TIG	<table border="1"> <tr> <td>200A</td> <td>Current (A)</td> </tr> <tr> <td>8.15V</td> <td>8.26V</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Voltage (V)</td> </tr> </table>	200A	Current (A)	8.15V	8.26V	Voltage (V)	
	200A		Current (A)					
8.15V	8.26V							
Voltage (V)								
A-TIG								
2mm	C-TIG	<table border="1"> <tr> <td>200A</td> <td>Current (A)</td> </tr> <tr> <td>9.32V</td> <td>9.48V</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Voltage (V)</td> </tr> </table>	200A	Current (A)	9.32V	9.48V	Voltage (V)	
	200A		Current (A)					
9.32V	9.48V							
Voltage (V)								
A-TIG								
3mm	C-TIG	<table border="1"> <tr> <td>200A</td> <td>Current (A)</td> </tr> <tr> <td>10.40V</td> <td>10.55V</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Voltage (V)</td> </tr> </table>	200A	Current (A)	10.40V	10.55V	Voltage (V)	
	200A		Current (A)					
10.40V	10.55V							
Voltage (V)								
A-TIG								

Table 4 WM cross section with arc length

Arc length	C-TIG	A-TIG
1mm		
2mm		
3mm		

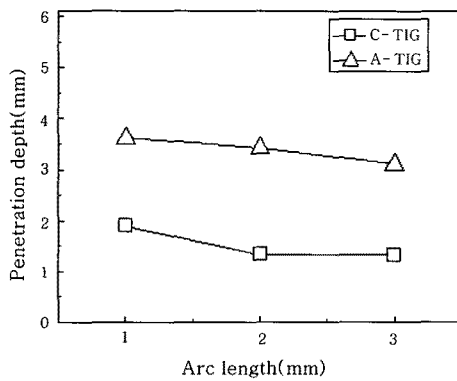


Fig. 5 Penetration depth with arc length

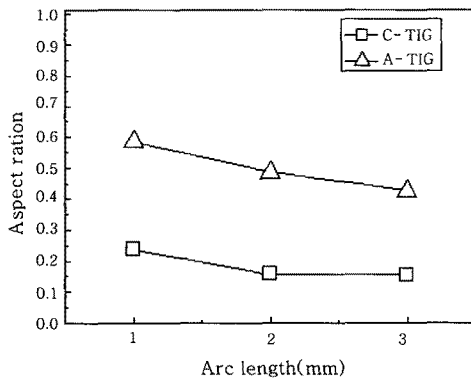


Fig. 6 Aspect ratio with arc length

폭은 좁아졌지만, A-TIG의 경우가 C-TIG에 비해 현저히 용입과 형상비가 커졌다. 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 가졌고, A-TIG용접에서 C-TIG용접 보다 더 큰 경향을 보인다.

4.2 A-TIG 용접에서 용입 형상비에 미치는 실드가스의 영향

Table 5는 실드가스 종류에 따른 비드외관과 용접파형이고 Table 6은 실드가스 종류에 따른 C-TIG와 A-TIG의 용접 횡단면이다.

Table 5 Weld surface and waveform with shield gas

Shield gas	Weld surface	Waveform						
Ar 100%		<table border="1"> <tr> <td>200A</td> <td>Current (A)</td> </tr> <tr> <td>9.32V</td> <td>9.48V</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Voltage (V)</td> </tr> </table>	200A	Current (A)	9.32V	9.48V	Voltage (V)	
200A	Current (A)							
9.32V	9.48V							
Voltage (V)								
Ar - 2.5% H ₂		<table border="1"> <tr> <td>202A</td> <td>Current (A)</td> </tr> <tr> <td>12.03V</td> <td>12.46V</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Voltage (V)</td> </tr> </table>	202A	Current (A)	12.03V	12.46V	Voltage (V)	
202A	Current (A)							
12.03V	12.46V							
Voltage (V)								
Ar - 5% H ₂		<table border="1"> <tr> <td>202A</td> <td>Current (A)</td> </tr> <tr> <td>12.71V</td> <td>14.24V</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Voltage (V)</td> </tr> </table>	202A	Current (A)	12.71V	14.24V	Voltage (V)	
202A	Current (A)							
12.71V	14.24V							
Voltage (V)								
Ar - 33% He		<table border="1"> <tr> <td>202A</td> <td>Current (A)</td> </tr> <tr> <td>10.03V</td> <td>10.17V</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Voltage (V)</td> </tr> </table>	202A	Current (A)	10.03V	10.17V	Voltage (V)	
202A	Current (A)							
10.03V	10.17V							
Voltage (V)								
Ar - 66% He		<table border="1"> <tr> <td>202A</td> <td>Current (A)</td> </tr> <tr> <td>10.58V</td> <td>11.05V</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Voltage (V)</td> </tr> </table>	202A	Current (A)	10.58V	11.05V	Voltage (V)	
202A	Current (A)							
10.58V	11.05V							
Voltage (V)								
He 100%		<table border="1"> <tr> <td>202A</td> <td>Current (A)</td> </tr> <tr> <td>14.12V</td> <td>15.98V</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Voltage (V)</td> </tr> </table>	202A	Current (A)	14.12V	15.98V	Voltage (V)	
202A	Current (A)							
14.12V	15.98V							
Voltage (V)								

Table 6 WM cross section with shield gas

Shield gas	C-TIG	A-TIG
Ar 100%		
Ar-2.5% H ₂		
Ar-5% H ₂		
Ar-33% He		
Ar-66% He		
He 100%		

실드가스 변경 실험에서도 C-TIG에서 A-TIG로 바뀌면서 비드폭이 좁아졌고 아크전압이 증가하였다. 용입 또한 C-TIG에 비해 A-TIG에서 현저히 깊어진 것을 볼 수 있다.

Fig. 7은 실드가스 종류에 따른 용입 측정 결과를 보여주고, Fig. 8은 실드가스 종류에 따른 형상비를 보여 준다. 전체적으로 각 가스에서 C-TIG 보다 A-TIG에서 용입과 형상비가 현저히 증가한 것을 볼 수 있다. A-TIG에서 Ar-H₂ 혼합가스와 100% He 가스의 경우, 이면비드가 나오는 깊은 용입이 얻어졌다. 그러나 비드폭은 Ar-H₂ 혼합가스의 경우, 100% Ar 가스에 비해 좁아졌고 Ar-He 혼합가스와 100% He 가스의 경우, 100% Ar 가스에 비해 소폭 증가하였기 때문에 형상비는 100% Ar 가스와 비교하여 Ar-H₂ 혼합가스는 2배 이상 증가한 1.0과 1.2의 값을 가졌고 Ar-He 혼합가스와 100% He 가스는 100% Ar 가스에 비해 소폭 증가한 0.57과 0.7정도의 값을 가졌다.

Ar-He 혼합가스 그리고 100% He 가스를 사용했을 때 비드폭이 증가하였는데 그 이유를 Oh 등의 연구결과⁷⁾인 Fig. 9에서 찾을 수 있다.

Fig. 9는 전극팁 끝으로부터 아크 반경 거리에 따른

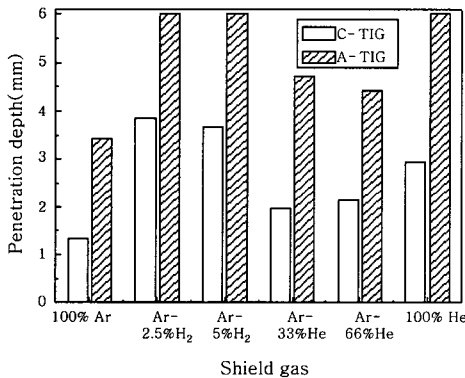


Fig. 7 Penetration depth with shield gas

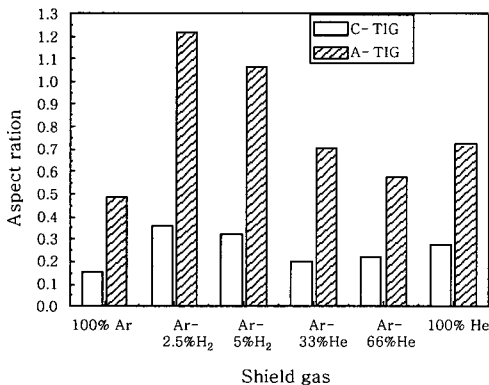


Fig. 8 Aspect ration with shield gas

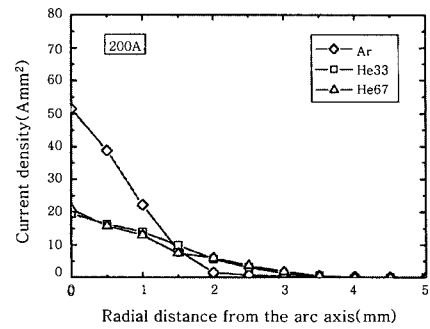


Fig. 9 Current density distribution at 200A⁷⁾

100% Ar 가스와 Ar-He 혼합가스의 전류밀도를 보여 준다. 100% Ar 가스보다 Ar-He 혼합가스일 때, 전극 팁 직하에서 전류밀도가 낮았기 때문에 전류가 아크 반경 방향으로 넓게 통전되어 비드폭이 증가한 것으로 판단된다.

Ar-H₂ 혼합가스일 때 비드폭이 좁아졌는데 그 이유는 다음과 같다. 수소는 고온에서 환원성이 강하기 때문에 아크전방의 절연체인 TiO₂는 900℃ 정도의 온도에서 환원되어⁸⁾ 모재로의 좁은 통전 경로가 보다 쉽게 만들어진다. 따라서 아크 전류는 그 통전 경로에 쉽게 집중하므로 비드폭이 좁아진 것으로 판단된다.

Fig. 10과 11은 실드가스 종류에 따른 용융단면적과 용융효율을 보여준다. Ar과 비교하여 H₂와 He이 열전도도가 높기 때문에 Ar-H₂혼합가스, Ar-He 혼합가스 그리고 100% He 가스의 경우, A-TIG와 C-TIG 모두에서 용융단면적이 증가하였다. 그러나 Ar-H₂ 혼합가스, Ar-He 혼합가스 그리고 100% He 가스를 사용했을 때 아크전압이 상승하였기 때문에 용융효율은 A-TIG의 100% Ar 가스와 비교하여 비슷하거나 약간 높았다.

그리고 Ar-2.5% H₂ 혼합가스에서 용융단면적이 C-TIG가 A-TIG보다 넓었고 Ar-2.5%와 5% H₂ 혼합가스에서 용융효율이 C-TIG가 A-TIG보다 높았는데

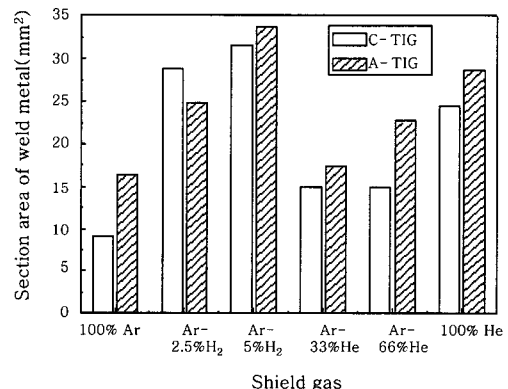


Fig. 10 Section area of weld metal with shield gas

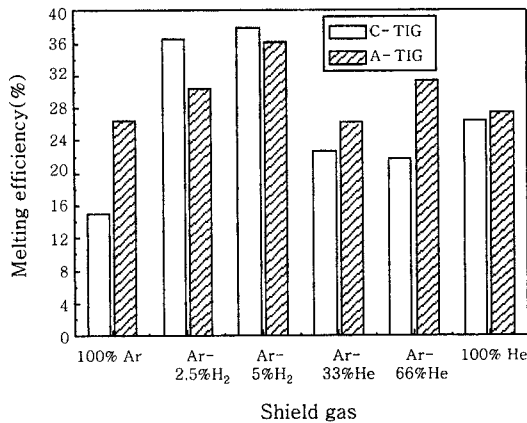


Fig. 11 Melting efficiency with shield gas

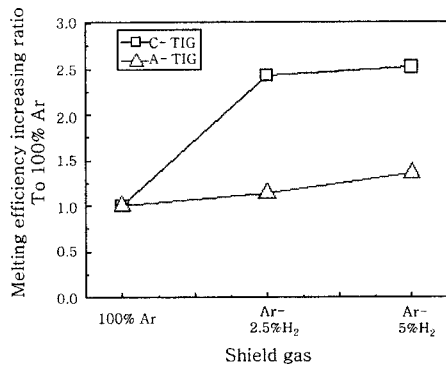


Fig. 12 Melting efficiency increasing ratio to 100% Ar with shield gas

이는 수소의 플럭스에 대한 환원 특성 때문에 통전경로가 좁아지고 그로 인해 비드폭이 좁아졌기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 12는 실드가스에 따른 100% Ar에 대한 용융 효율 증가비를 보여준다. 100% Ar에 대한 용융 효율 증가비는 A-TIG의 경우 C-TIG보다 현저히 작은 것을 볼 수 있다. 이 것 또한 A-TIG에서 비드폭이 좁았기 때문에 위와 같은 결과가 나왔다.

5. 결 론

C-TIG와 비교하여 A-TIG 용접에서 비드폭에 대한 용입의 비로 정의되는 형상비에 미치는 아크길이와 실드가스의 영향에 관한 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 아크길이 1~3mm구간에서 아크길이 짧아질수록 형상비는 변형 방지에 유리한 큰 값을 가졌고, 특히 A-TIG의 경우가 C-TIG에 비해 현저히 큰 형상비를 가져서 변형에 유리하다.

2) 실드가스 변경 실험에서 형상비는 C-TIG에 비해 A-TIG에서 전체적으로 높았고, A-TIG에서 100% Ar 가스보다 혼합가스와 100% He 가스일 때 큰 형상비를 나타내었지만, Ar-2.5% H₂ 가스의 경우가 가장 큰 형상비 1.2를 보였다.

3) Ar과 수소혼합가스를 실드가스로 쓸 때는 C-TIG에 비해 A-TIG의 용융효율이 감소하는 결과를 보였다. 특히 수소 혼합비가 작은 Ar-2.5% H₂ 가스에서는 용융단면적도 A-TIG가 더 작았고 용융효율은 현저히 낮았다. 그 이유는 TiO₂ 플럭스에 대한 수소의 환원 작용으로 통전 경로가 좁아지고 그로 인해 비드폭이 좁아져 가장 큰 용입 형상비를 나타내었기 때문인 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- J J Lowke, M Tanaka and M Ushio : Mechanisms giving increased weld depth due to a flux, *Journal of physics D applied physics*, **38** (2005) 3438-3445
- Paulo J. Mondesi, Eustaquio R. Apolinario and Iaci M. Pereira : TIG welding with single-component fluxes, *Journal of materials processing technology* **99**(2000) 260-265
- Manabu Tanaka : Numerical study of gas tungsten arc plasma with anode melting, *Science direct Vacuum* **73** (2004) 381-389
- Hyo-Sik Ham, In-Ki Park, Young-Duk Moon and Sang-Myung Cho : Development of A-TIG Welding process for deep Penetration and decreasing deformation, *Proceedings of the KOSME 2006 Second Conference*, 139-140 (in Korean)
- Jin-An Cho, Dong-Soo Oh, Dong-Soo Hwang and Sang-Myung Cho : Development of the high performance digital calorimeter to measure the melting efficiency of arc welding, *Proceedings of the 2006 Autumn Annual Meeting of Korean Welding and Joining Society*, 92-94 (in Korean)
- 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) 369-376
- Dong-Soo Oh, Yeong-Sik Kim and Sang-Myung Cho : Derivation of Current Density Distribution by Arc Pressure Measurement in TIG Welding, *Science and Technology of Welding and Joining*, **10**(4), 2005 442-446
- Chul-Woo Nam, Yeong-Yoon Choi, Byung-Su Kim, Dong-Hyo Yang and Kyung-Ho Park : Recovery Technology of Metals by Chlorination, *KIGAM Bulletin* **10**-1, 43-58