GMAW-MIG 고속 용접성 향상에 관한 연구

서 지 석^{*,†} · 박 상 민^{*} · 김 용 덕^{*}

^{*}현대중합금속 기술연구소

A Study to Improve GMAW-MIG High-Speed Weldability

Ji-Seok Seo^{*,†}, Sang-Min Park^{*} and Yong-Deok Kim^{*}

^{*}R&D Center, Hyundai welding., Pohang, 06130, Korea

[†]Corresponding author : jsseo@hyundaiwelding.com

(Received May 20, 2019 ; Revised June 25, 2019 ; Accepted July 3, 2019)

Abstract

The poor arc stability of stainless steel GMAW-MIG welding makes high speed welding impossible. In this study, TiO₂ powder with low ionization potential was applied in advance to carbon steel and STS based materials, and as welding progressed, good arc stability and excellent bead appearance was observed, even for 120cpm high speed welding. Analysis of the welding waveform showed that as the output welding current increased, the output welding voltage did not change, and the welding resistance decreased. Analysis of the cross section of the weld showed that the height of the bead decreased, and the bead width and penetration depth increased. Photographs of the arc indicated the length of the arc increased and the stability of the arc improved. Chemical component analysis of the weld metal determined that the Ti content increased by 0.004% and the other components were similar to conventional levels. The tensile strength and impact toughness of the weld metal remained at the same level as before.

Key Words : GMAW-MIG, 100%Ar, High-speed welding, Active flux, TiO₂, Stainless steels

1. 서 론

오늘날 용접시공에 있어서 생산성 향상을 위한 노력은 새로운 용접공정 및 용접기법의 개발을 이끌어 왔다.

GMAW 공정에서 단순히 생산성 향상을 위해서는 용접속도를 증가시키는 것이 가장 큰 영향인이지만, 동일 용접전류에서는 용접속도가 증가할수록 용착량은 감소하고 상대적으로 높은 아크력에 의한 언더컷 또는 험핑비드 등의 불량 발생하거나, 또는 아크 불안정에 의한 비드 말림, 사행 비드 등의 한계도 있다.

특히 Ar, He과 같은 불활성 가스를 보호가스로 사용하는 MIG 기법의 경우, Table 1과 같이 이온화 퍼텐셜이 높아 CO₂나 O₂를 섞은 활성가스를 사용하는 것에 비해 Fig. 1과 같이, 아크 안정성이 저하되어 고속 용접이 불가능한 형태이다.

모재 전체를 비싼 특수강을 사용하는 것이 아니라 표면만 옥성용접하여 원가절감하는 STS, Ni-alloy, Cu-alloy등의 오버레이 용접은 불활성가스 사용으로 아크 안정성이 저하되어 용접속도를 증가시키지 못하는 문제가 있다.

Fig. 1 Bead appearance of stainless steel (ER316L)

Table 1 Ionization potentials of gases & metal vapors¹⁾

Ionization potentials of gases		Ionization potentials of metal vapors	
Element	Electron bolts (eV)	Element	Electron bolts (eV)
Argon	15.76	Carbon	11.260
Hydrogen	15.43	Silicon	8.151
Helium	24.59	Iron	7.870
Nitrogen	15.58	Nickel	7.635
Oxygen	12.07	Copper	7.726
Carbon dioxide	13.77	Titanium	6.820
Carbon monoxide	14.10	Tungsten	7.980

일부에서는 STS-MIG의 고속 용접성 향상을 위해 용접토치 뒤쪽에 후행 가스컵을 설치하여 용융풀에 직접적으로 분사하여 비드외관을 개선한 사례도 있다²⁾.

본 연구에서는 GMAW-MIG의 용접 생산성을 향상시키기 위하여 활성화 Flux(TiO_2)를 GMAW - MIG용접에 적용하여 기존 A-TIG 공법의 기대효과와는 전혀 다른 와이어의 용융성 및 비드 퍼짐성을 향상시켜 동일한 입력전류에서 고속 용접성을 향상시키고자 하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 AWS ER316L 1.2mm Spool Type의 STS-Solid wire를 사용하여 두께 10mm인 일반 탄소강(AH36) 모재, 스테인리스강(STS304)모재에 BOP 용접을 실시하였다.

모재에 적용한 TiO_2 도포재의 경우 TiO_2 를 에탄올에 현탁하여 도포한 후 건조시켜 사용하였다. 자세한 용접 조건은 Table 2에 표기하였다.

입력전류는 200A, 입력전압은 30V로 일정하게 설정하였으며, 보호가스는 100%Ar, 용접속도는 120cpm으로 하여 용접 파형 계측 장치를 설치하여 출력전류, 전압, 송급속도 파형을 계측하였다. 용접저항은 계측 장치의 프로그램에서 출력된 전류와 전압을 기반으로 계산된 값을 사용하였다.

용접 후 시편은 절단 및 부식하여 용접부 형상을 측정하여 형상 변화를 관찰하였다.

Table 2 Welding conditions

Power source	Fronius TPS4000	
Welding mode	CV-mode (Continues voltage)	
Welding consumable	ER316L 1.2mm spool type	
Welding current	200A	
Welding voltage	30V	
Travelling speed	120cpm	
CTWD	15mm	
Shielding gas	100%Ar	
Welding position	1G (BOP)	
Base metal	AH36(C/S) 10mmt	STS304 10mmt

3. 실험 결과

3.1 TiO_2 적용에 따른 비드형상

Fig. 2는 각 조건에서 용접 직 후의 비드외관을 보여 준다.

TiO_2 를 모재에 적용하지 않고 용접을 실시하였을 때 탄소강과 스테인리스강 모재 모두 120cpm의 빠른 용접속도에 의해 비드폭이 매우 좁고 불균일한 형상이 나타났다.

TiO_2 를 모재에 적용한 후 동일한 입력값으로 용접 진행하였을 때 비드폭이 상대적으로 균일하고 증가한 형상이 나타났다.

Table 3는 출력전류, 전압, 송급속도, 용접저항을 측정한 값이다.

탄소강과 스테인리스강 모재 모두 TiO_2 를 적용하였을 때 출력전류가 상승하고 출력전압은 소폭 감소, 송급속도는 유사, 용접저항은 감소한 것을 확인 할 수 있었다.

Fig. 3는 Table 3의 파형을 부분 확대한 것으로 0.1sec 동안의 세부파형이다.

TiO_2 미적용시 용접전압의 경우 아크 단락이 나타났고 용접전류 파형에 아크 재점화를 위한 Peak 전류파형이 나타난다.

반면에 TiO_2 적용시 용접전압에서 단락파형이 나타나지 않고, 용접전류 또한 Peak 전류 파형도 없는 전형적인 스프레이 이행의 파형이 나타났다.

Base metal	AH36 (C/S)	STS304
Without TiO_2
With TiO_2

Fig. 2 Bead appearance

Table 3 Analysis of welding waveforms

Parameter		AH36 (C/S)		STS304	
		Without TiO ₂	With TiO ₂	Without TiO ₂	With TiO ₂
I-E curve
Output current (A)	Avg.	201.9	226.8	174.9	220.7
	Std.	11.31	4.84	18.54	4.93
Output voltage (V)	Avg.	30.2	29.5	30.8	29.5
Wire feeding rate (cpm)		862.98	861.35	860.2	859.1
Welding resistance (mΩ)		150.27	130.11	177.8	133.5

Fig. 3 Welding waveform(0.1sec)

Table 3에서 전압 측정값의 0.7~1.0V의 감소는 단락 후 아크 재점호때 전압이 상승하는 파형이 나타나지 않아 전압이 상대적으로 낮은 것으로 나타났다.

TiO₂의 적용소재에서 출력전류 값은 TiO₂ 미적용 소재의 단락 후 재점호시 Peak 전류와 유사한 것으로 나타났다는데 이는 TiO₂의 적용이 출력 용접전류를 증가시켜 스프레이이행을 촉진한 것으로 판단된다.

Fig. 4는 하나의 STS 소재에 반만 TiO₂를 적용하여 동일한 입력 용접조건으로 60, 120cpm의 용접속도로 연속 용접하여 비드외관 변화 및 용접파형 변화를 비교하였다.

시험결과 60, 120cpm 모두 TiO₂를 적용한 경계에서부터 비드폭의 증가가 나타났고 용접파형을 계속하였을 때 출력전류 상승 및 용접저항 감소가 일어났다. 또

Fig. 4 Bead appearance and waveform

Fig. 5 Arc shape change during continuous welding

한 연속용접시 아크영상을 촬영해 보았을 때 Fig. 5와 같이 아크 길이와 비드폭의 증가가 함께 나타났다.

입력 용접조건의 변화 없이 출력전류가 상승하고 용접저항이 감소하였다는 것은 아크 자체의 저항이 감소하였다는 것을 의미하고 이는 아크 분위기내에 Table 1의 이온화 퍼텐셜이 낮은 Ti 증기의 첨가가 원인으로 판단된다.

또한 출력전류의 증가는 아크력의 증가로 이어진다^{3,4)}. Table 4는 용접 후 용접부의 단면형상을 나타낸 사

진이다. Table 5에 비드높이, 비드폭, 용입깊이를 측정하여 그래프로 비교해 보았다.

TiO₂를 적용한 경우 용접속도에 상관없이 비드높이는 감소하였고, 비드폭과 용입깊이는 증가하였다.

이는 TiO₂를 적용하였을 때 아크력이 증가하여 STS MIG용접에서 고속 용접성을 향상시킨다는 것을 뒷받침 한다.

일반적으로 아크력이 증가하면 과도한 아크력에 의해 용융풀이 밀려나 고속용접시 험핑비드나 언더컷이 발생하기 쉽다⁴⁾.

아크력이 증가하였음에도 불구하고 언더컷이나 험핑비드가 일어나지 않고 오히려 비드외관이 향상된 원인은 Fig. 6의 용융풀에 작용하는 Arc Shear Stress의 증가에서 찾을 수 있다.

출력전류 증가에 의한 아크력의 증가는 용융풀에 작용하는 Arc Shear Stress를 증가시켜 용융풀내 Outward flow를 형성하고 비드폭을 증가시킨다⁵⁾.

비드폭을 증가시키는 Outward flow로 인해 험핑비드와 언더컷을 방지한 것으로 예상된다.

또한 TiO₂ 미적용시 모재의 아크 접점이 계속 변경되면서 불안정한 아크솔림이 발생하는데 비해 TiO₂ 적용의 경우 이온화 퍼텐셜이 낮은 TiO₂의 영향으로 아크가 안정적으로 형성되면서 비드외관이 향상된 것을

Table 4 Cross section of weldment

Traveling speed	Without TiO ₂			With TiO ₂		
	×1	×2	×3	×1	×2	×3
60cpm						
120cpm						

Table 5 Result of measuring bead height, bead width, penetration depth

Fig. 6 Schematics of weld pool convection

확인할 수 있었다.

3.2 TiO₂ 적용에 따른 용착금속 성능

TiO₂ 적용에 따른 용착금속의 화학성분 및 기계적 성능 변화를 관찰하기 위해 Fig. 7의 모식도와 같이 TiO₂를 적용하여 다층 용접 후 용착금속의 화학성분 및 용착금속의 물성을 분석하였다.

평가결과 용착금속의 화학성분 중 대부분의 화학성분 중 특이사항은 없었고 Ti함량이 0.004% 차이가 나는 것으로 보아 적용한 TiO₂가 용착금속에 이행되지 않고 대부분 기화한 것으로 판단된다.

용착금속의 인장강도 및 -60, -196℃ 저온인성 또한 모두 AWS규격을 만족하였고 두 시편이 유사한 것으로 나타났다.

4. 결 론

GMAW-MIG 공정에서 고속 용접성을 향상하기 위해 모재에 TiO₂를 적용하여 STS용접을 실시한 결과 결론을 얻었다.

Fig. 7 Joint preparation and welding conditions

1) TiO₂를 적용하여 고속용접시 일반 탄소강 모재와 STS 모재에서 아크 안정성과 비드외관의 향상이 나타났다.

2) TiO₂를 적용하여 용접과형을 계측하였을 때 출력 전류 증가, 출력전압 변화 없음, 용접저항 감소가 나타났고 용접부의 단면형상을 확인하였을 때 비드높이 감소, 비드폭과 용입깊이 증가가 나타났다. 아크 형상을 촬영하였을 때 아크 길이의 증가와 아크안정성 향상이 나타났다.

이는 이온화 퍼텐셜이 낮은 TiO₂가 용접중에 기화되어 아크의 출력전류를 증가시키고, 아크력 증가로 인한 Arc Shear Stress는 비드폭을 증가시켜 고속용접시 아크안정성 및 비드외관이 개선된 것으로 판단된다.

3) TiO₂를 적용 유무에 따른 용접금속의 화학성분 및 물성을 비교해 보았을 때 TiO₂ 적용하였을 때 용착금

Table 6 Chemical composition of all weld metal (wt%)

Test item	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Nb	Ti
Without TiO ₂	0.016	0.39	1.82	0.021	0.009	12.5	18.4	2.44	0.09	0.004	0.005
With TiO ₂	0.017	0.39	1.80	0.022	0.009	12.5	18.3	2.50	0.09	0.012	0.009

Table 7 Mechanical properties of all weld metal

Test item	TS (Mpa)	EL. (%)	Impact test (Joule)							
			-60℃				-196℃			
			x1	x2	x3	Avg.	x1	x2	x3	Avg.
Without TiO ₂	609	37.2	108	116	118	114	61	63	63	62
With TiO ₂	609	36.2	115	117	125	119	73	75	83	77
AWS A5.9 ER316L	≥490	≥30	Not-Specified							

속 내 Ti 성분 증가는 0.004%이었고 그 외 성분은 유사하였다.

용접금속의 인장강도 및 충격인성은 유사수준이었다.
(AWS 규격 만족)

ORCID: Ji-Seok Seo: <https://orcid.org/0000-0001-7375-4434>

References

1. American Welding Society, Welding Handbook, Welding Science & Technology, 9th Edition, 1, *American Welding Society (AWS)*, Miami, USA (2013) 83.
2. Dong, C., Xue, J., Zhang, Z., Jin, L., Hu, Y., Wu, W., High-Speed Welding of Stainless Steel with Additional Compensatory Gas Jet Blow Molten Pool. *Appl. Sci.* 8 (2018) 2170.
<https://doi.org/10.3390/app8112170>
3. Y. S. Kim, T. W. Eagar, Analysis of Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding, *Weld J. Res. Suppl.* 72 (1993) 269-278.
4. D. S. Oh, Y. S. Kim, S. M. Cho, Effect of He Mixing Ratio on the Characteristics of TIG Welding with High Current and High Speed, *J. Korean Weld. Join. Soc.* 23(3) (2005) 266-272.
5. S. Kou, Welding Metallurgy, 2nd Edition, *Wiley Interscience*, New Jersey, USA (2003) 104-105.