

MAG용접의 Arc안정성에 미치는 S의 영향

안영호* · 이종봉* · 엄동석**

Effect of S on Arc Stability of MAG Welding

Y.H.An*, J.B.Lee* and D.S.Um**

Key Words : MAG Welding(MAG), Sulphur(S), Arc Stability(아크 안정성), Droplet Transfer Frequency(용적이행주파수), Arcing Time(아킹시간), Short Circuit Time(단락시간), Short Circuit Transfer(단락이행), Spray Transfer (스프레이이행), Standard Deviation of Arc Current(아크전류의 표준편차), Standard Deviation of Arc Voltage(아크 전압의 표준편차)

Abstract

The effect of S content in welding wires on the arc stability was investigated, in the region of short circuit transfer and spray transfer.

In the region of short circuit transfer, with increasing S content, average arcing time and average short circuit time were decreased. Therefore, droplet transfer frequency was increased, due to the reduction of arcing time and peak current at the moment of arc-reignition was decreased, due to the decrease of short circuit time.

In the region of spray transfer, the fluctuation degree of arc current and arc voltage became more stable, with increasing S content.

1. 서 론

최근 용접공정의 자동화 및 robot화에 따라 GMA용접의 적용률이 급증하고 있다. 자동화 용접에 있어서 아크 스타트 특성, 아크 불안정 및 스패터 발생 등은 용접 생산성 및 용접부 품질 저하의 원인이 됨에 따라 용접의 자동화를 위한 가장 큰 문제점으로 지적되고 있다. 이러한 GMA용접의 문제점을 극복하기 위하여 용접전원, 용접재료 및 용접시공 측면의 많은 연구 결과가 보고되고 있다¹⁾.

GMA용접의 아크 안정성은 용접전원 및 용접시공조

건 뿐만 아니라 용접재료의 화학성분에도 크게 영향을 받는 것으로 보고되고 있으며, 아크 안정성에는 용접재료의 화학성분 중 Si, Mn 및 Ti 등과 같은 탈산원소들의 외에 S, Se 등과 같은 표면활성화 원소(surface active element) 등도 영향을 미치는 것으로 알려져 있다²⁾. 특히 표면활성화 원소들은 고온의 아크 중에서 형성되는 용융금속의 표면장력에 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다. 즉 용융금속에 표면활성화 원소의 함량이 증가하면 용융금속의 표면장력은 감소하는 것으로 알려져 있다³⁾. 이러한 표면활성화 원소에 대한 연구는 GTA용접시 용입특성을 개선하기 위하여 Marangoni 효과에 미치는 영향에 대하여 집중적으로

* 1998년 10월 7일 접수

*정회원, POSCO 기술연구소 후판연구팀

** 정회원, 부산대학교 조선해양공학과

• 안영호 : pc543040@smail.posco.co.kr

수행되어졌다^{4,5)}. 한편 GMA용접의 아크현상 및 용적이행 특성에 미치는 표면활성화 원소의 영향에 대한 연구결과는 일부 보고되고 있다. 특히 Shinoda 등⁶⁾은 GMA용접시 표면활성화 원소(S+Se)는 단락이행 영역에 있어서 아크 안정성에 효과적이라 보고하고 있으며, 본 저자⁷⁾도 CO₂용접시 용적이행 현상에 미치는 S의 효과를 일부 보고한 바 있지만, 용적이행특성과 아크 안정성에 미치는 S함량의 정량적인 영향에 대해서는 아직 해명되지 못한 점이 많다.

따라서 본 연구에서는 MAG용접에서의 아크 안정성에 미치는 S의 영향을 상세히 검토하기 위하여 단락이행 영역 및 스프레이 이행 영역에서 S함량에 따른 아크 안정성 특히 아킹 시간, 단락시간, 용적이행 주파수 및 아크신호의 표준편차 등을 정량적으로 평가하고, 아크 물리적인 관점에서 S의 영향을 정성적으로 규명하고자 하였다.

2. 시험재 및 실험방법

2.1 시험재

시험재는 진공용해로 제작한 강괴를 선재압연, 신선한 후, 용접재료로 사용할 수 있도록 직경 1.2mm로 신선 및 Cu도금하였다. Table 1은 시험재의 화학성분을 나타낸 것으로 기본성분계는 0.035%C-0.70%Si-1.35%Mn으로 하고, S함량을 0.010, 0.019%, 0.023%의 3 조건으로 변화시켰다.

Table 1. Chemical compositions of wires used (wt.%)

Materials	C	Si	Mn	P	S
S-10	0.036	0.70	1.34	0.008	0.010
S-19	0.035	0.70	1.36	0.009	0.019
S-25	0.035	0.70	1.36	0.010	0.025

2.2 실험방법

사용된 보호가스는 80%Ar-20%CO₂로 하였으며, 시험 용접조건은 Table 2에 나타낸 바와 같이 단락이행 현상이 나타나는 140A-20V 및 스프레이이행 현상이 나타나는 320A-34V로 하였으며, 용접속도는 30 cm/min로 하였다. 아크안정성은 자체 제작한 용접 Arc해석장치(Welding Arc Analyzer)⁸⁾를 사용하여 용접 중 아크전류 및 아크전압 신호를 측정하고, 측정된 아크신호를 자체 개발한 아크 현상 해석 (Arc

Phenomena Analysis) S/W⁹⁾로 아크현상을 정량적으로 해석하여 평가하였다. 이 때 용접시간은 10초로 하고, 아크전류 및 아크전압 신호는 각 10,000개씩 측정하였다. 단락이행으로 용접이 이루어지는 저전류 조건에서의 아크 안정성은 단락현상을 이루는 평균 아킹시간, 평균 단락시간, 용적이행 주파수 및 재 아크시 최대전류 등으로 평가하였다. 또한 스프레이 이행으로 용접이 이루어지는 대전류 조건에서의 아크 안정성 평가는 아크전류와 아크전압의 변동정도를 나타내는 표준편차를 이용하였다.

Fig. 2 Change of arc voltage in 320A-34V of MAG welding

Shielding gas	Welding conditions			Others
	Current (A)	Voltage (V)	Speed (cm/min)	
80%Ar-20%CO ₂	140	20	30	• Power source : Inverter type • Gas flow rate : 20 l/min • Torch distance : 18 mm
	320	34		

한편 시험용접 중의 용적이행현상 및 아크 현상을 직접 관찰하기 위하여 고속카메라를 사용하였으며, 이때 촬영속도는 1,000 frames/s로 하였다. 상세한 촬영조건은 Table 3에 나타내었다.

본 내용에서는, 편의상 용접중의 순간적인 용접전압치를 아크전압으로 표기하여 평균 전압치의 의미인 용접전압과 구분하였다.

Table 3. Photographing conditions for arc and droplet transfer phenomena

Camera	Speed (frames/s)	Lens	Back light	Others
KODAK EK1012	1,000	200mm	1 kW Xenon	

3. 시험결과 및 고찰

3.1 용적이행현상

Fig.1은 S함량이 다른 시험재에 대하여 140A-20V 용접조건에서 용접시간에 따른 아크 전압의 변동을 비교한 것이다. 용적이행 현상은 S함량에 관계없이 아킹 구간과 단락구간으로 이루어지는 전형적인 단락이행 형태를 보이고 있으나, 용적이행 특성은 S함량에 따라

다소 차이를 보이고 있다. 즉 S함량이 0.010% 첨가된 경우는 아킹시간이 12~14 msec인데 비하여, S함량이 0.019% 첨가된 경우는 10msec 정도로 아킹시간이 다소 짧아지며, 이로 인하여 용적이행 주파수도 0.019%S재가 0.010%S재에 비하여 현저히 증가하는 경향을 보이고 있다.

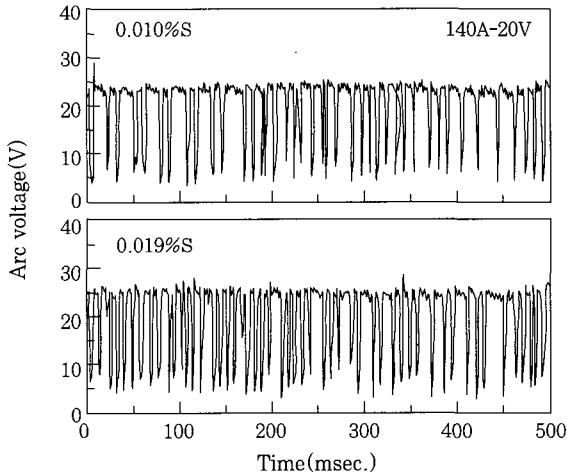


Fig.1 Change of arc voltage in 140A-20V of MAG welding

Fig.2는 S함량이 다른 시험재를 사용하여 320A-34V 용접조건에서 용접시간에 따른 아크전압의 변동을 비교한 것이다. 용적이행 현상은 S함량에 관계없이 다소 불안정한 스프레이이행 형태를 보이고 있다. 용적이행 특성은 S함량에 따라 큰 차이는 없지만, S함량이 0.010%인 경우는 불안정한 아크 현상인 순간단락 현상(그림중 화살표)이 발생하는 경향을 나타내고 있어 0.019%인 경우에 비하여 다소 불안정한 이행특성을 보이고 있다.

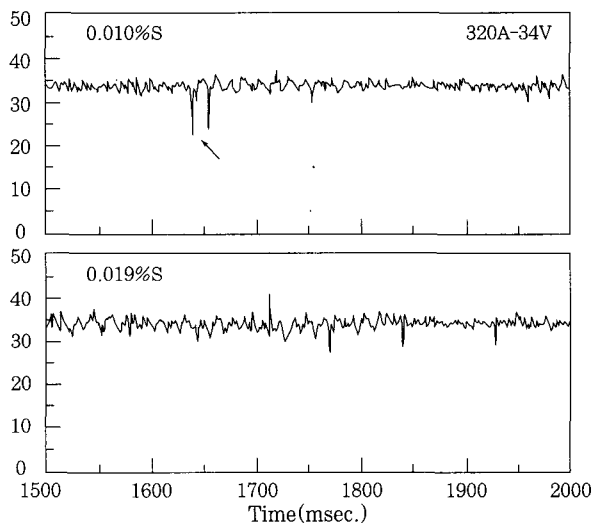


Fig.2 Change of arc voltage in 320A-34V of MAG welding

이상과 같이 S함량의 변화는 저전류 및 대전류 영역에서의 아크 현상에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

3.2 저전류 영역에서의 아크 안정성

Fig.3은 S함량에 따른 평균 아킹시간의 변화를 나타낸 것이다. S함량이 0.010%로부터 0.025%로 증가함에 따라 평균 아킹시간은 12msec 로부터 7.5msec 으로 거의 직선적으로 감소하는 경향을 보이고 있다. 따라서 S함량이 증가하면 평균 아킹시간이 짧아지고, 이와 같이 아킹시간이 짧아지면 용적이행시 이행되는 용적의 크기가 작아질 것이다. 따라서 S함량이 증가하면 작은 용적으로 이행이 이루어짐에 따라 아크 안정성 및 스패터 발생 특성도 개선될 것으로 판단된다.

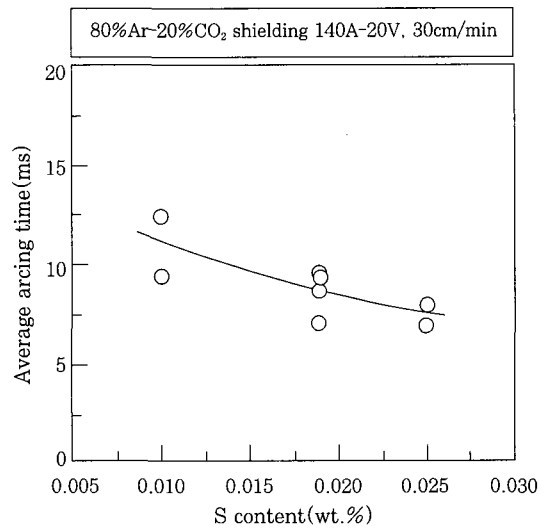


Fig. 3 The variation of average arcing time with S contents

Fig.4는 S함량에 따른 평균 단락시간의 변화를 나타낸 것이다. S함량이 0.010%로부터 0.025%로 증가함에 따라 평균 단락시간은 약 3msec 로부터 약 2.5msec 으로 거의 직선적으로 감소하는 경향을 보이고 있다. 용적이행 현상에서 단락시간이 증가하면 전류가 상승할 수 있는 시간이 증가하고, 이로 인하여 재아크시 강한 아크력이 작용함에 따라 아크가 불안정하게 된다. Fig.5는 재아크시 발생하는 최대 전류의 평균값을 S함량에 따라 정리한 것이다. S함량이 0.010%로부터 0.025%로 증가함에 따라 최대 전류 값은 데이터의 편차는 보이지만 약 222A로부터 210A 정도로 감소하는 경향을 보이고 있으며, 이는 S함량에 따른 단락시간의 감소에 기인한 것으로 생각된다. 따라서 S함량이 많을수록 재아크시 아크 안정성은 개선될 것으로 판단된다.

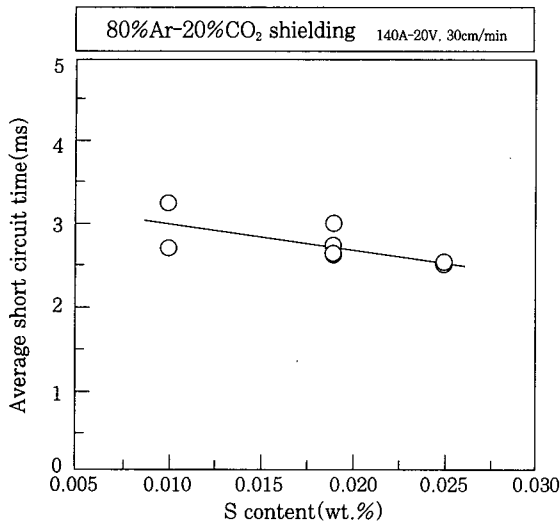


Fig. 4 The variation of average short circuit time with S contents

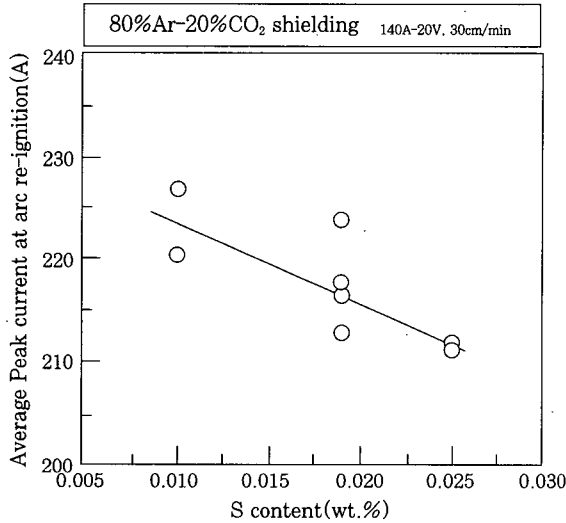


Fig. 5 The variation of average peak current at arc re-ignition with S contents

Fig.6은 S함량에 따른 용적이행 주파수의 변화를 나타낸 것이다. S함량이 증가함에 따라 용적이행 주파수는 거의 직선적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 특히 S함량이 0.010%인 경우는 용적이행 주파수가 약 70 cycles/s인데 비하여, S함량이 0.025%로 증가하면 약 110 cycles/s로 용적이행 주파수가 60% 정도 증가함을 알 수 있다. 이와 같이 S함량의 증가에 따라 용적이행 주파수가 증가하는 것은 전술한 바와 같이 S함량의 증가에 따른 아킹시간 및 단락시간의 감소가 주된 원인이라고 판단된다.

3.3 대전류 영역에서의 아크 안정성

Fig.7은 S함량에 따른 아크전류 표준편차에 대한 변

화를 나타낸 것이다. 아크전류의 표준편차는 S함량이 0.010%로부터 0.025%로 증가하면 데이터의 편차는 다소 있지만 거의 직선적으로 감소하는 경향을 나타내고 있다. 즉 0.010%S재의 경우는 표준편차가 16정도인데 비하여, 0.025%S재의 경우는 12 정도로 25% 정도 감소하는 경향을 보이고 있다.

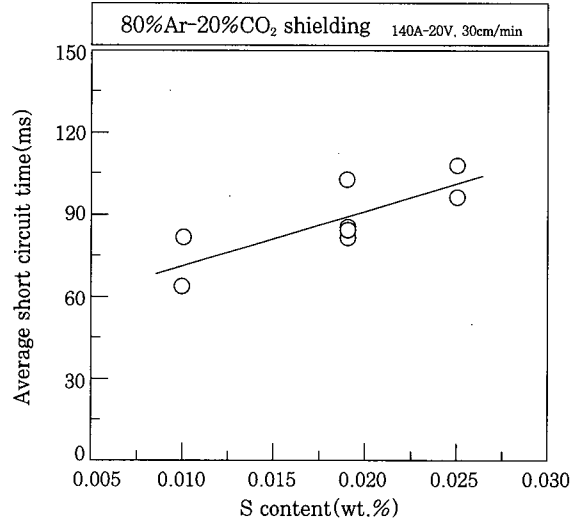


Fig. 6 The variation of droplet transfer frequency with S contents

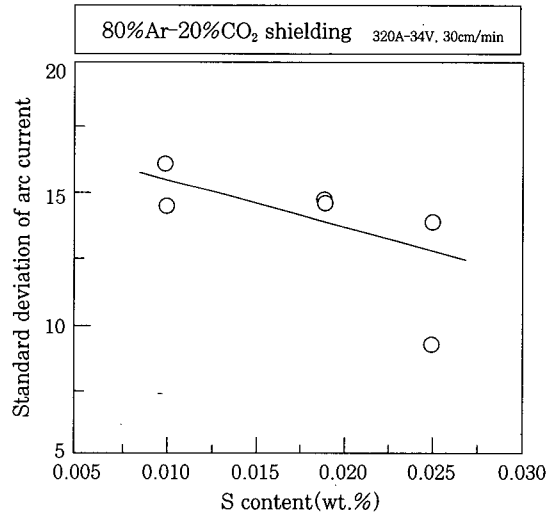


Fig. 7 The variation of the standard deviation of arc current with S contents

Fig.8은 S함량에 따른 아크전압 표준편차에 대한 변화를 나타낸 것이다. 아크전압의 표준편차도 S함량이 0.010%로부터 0.025%로 증가하면 아크전류의 경우와 마찬가지로 거의 직선적으로 감소하는 경향을 나타내고 있다. 즉 0.010%S재의 경우는 표준편차가 2.1 정도인데 비하여, 0.025%S재의 경우는 1.5 정도로 30% 정도 감소하는 경향을 보이고 있다.

이상과 같이 용적이행이 스프레이 이행으로 이루어지는 320A의 용접조건에서 S함량이 증가하면 아크전류 및 아크전압의 표준편차는 감소하고 이로 인하여 아크의 변동이 현저히 개선되어 아크 안정화를 도모할 수 있으리라 생각된다.

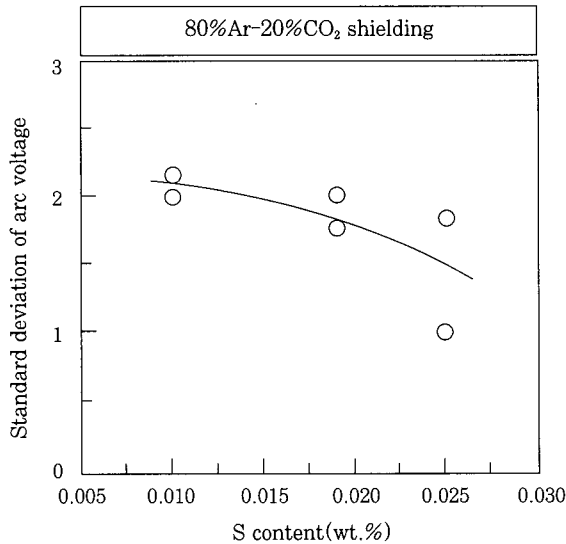


Fig. 8 The variation of the standard deviation of arc voltage with S contents

3. 4 고 찰

140A의 저전류 영역에서는 와이어 중의 S함량이 증가할수록 아킹시간 및 단락시간이 감소함에 따라 용적이행 주파수가 증가하고 재아크시 아크 안정성이 개선되었으며, 320A의 대전류 영역에서는 S함량이 증가하면 아크의 변동정도가 개선되어 아크가 안정됨을 알았다.

이상과 같이 S함량에 따라 아크 안정성이 변화하는 것은 고온의 용융금속 내에서의 S의 역할과 밀접한 관련성이 있을 것으로 생각된다. 즉 S는 표면활성화 원소로서 용융금속 내에 S함량이 증가하면 용융금속의 표면장력이 감소하는 것으로 보고되고 있다³⁾. Fig.9는 용융금속내에서의 S의 역할을 정성적으로 설명하기 위한 개략도를 나타낸 것이다. 즉 MAG용접과 같이 Ar + CO₂ 혼합가스를 사용하는 경우에는 용적에 작용하는 힘은 크게 용적이행을 조장하는 힘(detaching force)과 용적이행을 억제하는 힘(attaching force)으로 구분된다. 용적이행을 조장하는 대표적인 힘으로는 용적의 크기에 의하여 결정되는 중력(F_G : gravitational force)과 아크전류의 공급에 비례하는 전자기력(F_E : electromagnetic force) 등이며, 용적이행을 억제하는 힘은 용적과 와이어 사이에 형성되

며, 용융금속의 성분에 의하여 주로 결정되는 표면장력(F_S : surface tension)인 것으로 보고되고 있다¹⁰⁾. 따라서 S함량의 증가에 따라 용적의 표면장력이 감소하면 용적이행을 억제하는 힘이 약해지므로 상대적으로 작은 용적으로도 와이어 선단으로부터 이탈할 수 있게 된다.

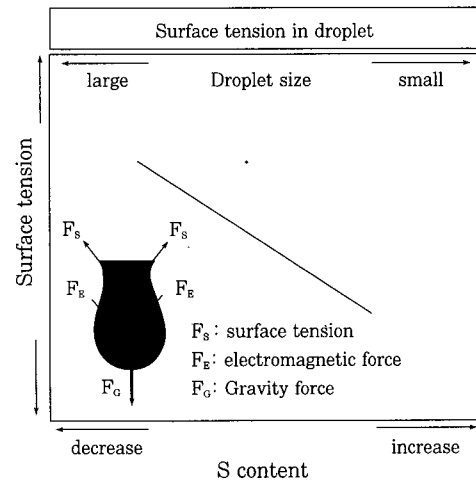


Fig. 9 Schematic diagrams for the effect of S content on liquid metal

따라서 단락이행 영역에서 S함량이 증가함에 따라 아킹시간 및 단락시간이 감소하고 용적이행 주파수가 증가하는 것은 S함량의 증가에 따른 용적의 표면장력이 감소하는 것이 그 원인인 것으로 판단된다. Photo.1은 단락이 파괴되어 재아크가 발생되기 직전의 단락형상을 시험체에 따라 비교하여 관찰한 것으로, S함량에 따른 표면장력의 효과가 명확하게 관찰됨을 확인할 수 있다. S함량이 0.010%인 경우는 용융지와 용적사이에 명확한 핀치현상을 관찰할 수 없으나, S함량이 0.019%, 0.025%로 증가함에 따라 용적의 핀치현상이 명확하게 나타남을 알 수 있다. 이와 같이 S함량이 증가함에 따라 핀치현상이 명확하게 되는 이유는 용융금속의 표면장력과 밀접한 관계가 있다고 생각된다. 즉 아킹시간에 형성된 용적은 단락이 되면 와이어로부터 용융지로 이행하고, 한편 전류는 아크의 중단에 의한 저항의 감소로 급격히 상승하게 된다. 전류가 흐르는 도체에는 도체를 수축하려는 방향으로 전기적 핀치력이 작용하게 됨으로써 단락이 되면 와이어-용적-용융지로 흐르는 전류가 상승하게 되고 단락된 용융금속에 큰 핀치력이 작용하게 된다. 따라서 용융금속을 이루는 표면장력이 작으면 작을수록 핀치력에 의한 용융금속의 핀치현상은 뚜렷하게 나타나게 되며, 결과적으로 단락시간이 짧아질 것으로 판단

S content	Pinch phenomena just prior to arc re-ignition	
0.010%		
0.019%		
0.025%		

Photo.1 Pinch phenomena just prior to arc re-ignition

된다.

스프레이이행 영역에서 S함량이 증가하면 표면장력이 감소하고, 이로 인하여 와이어 선단에서 성장하는 용적의 크기가 작아도 이행을 조장하는 힘($F_G + F_p$)이 이행을 억제하는 힘을 능가하기 때문에 작은 용적으로도 이행이 이루어질 것으로 생각된다. 이와 같이 S함량이 증가하면 작은 용적으로 용적이행이 가능하기 때문에 용적의 성장에 따른 아크 전류 및 아크 전압의 변동이 작은 범위에서 유지될 수 있다고 판단된다.

4. 결 론

MAG용접의 아크 안정성에 미치는 S함량의 영향을 관찰하기 위하여 S함량을 3 조건으로 변화시켜, 단락이행 영역에서의 아킹시간 및 단락시간 등, 스프레이이행 영역에서의 아크변동 정도를 정량적으로 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 단락이행 영역에서는 S함량이 증가함에 따라 아킹시간 및 단락시간이 감소하고, 용적이행 주파수가

증가하였다. 또한 단락시간이 감소함에 따라 재아크시 작용하는 최대전류가 감소하여 아크 안정성을 개선하였다.

2) 스프레이이행 영역에서는 S함량이 증가할수록 아크전류 및 아크전압의 변동 폭이 감소함에 따라 아크가 안정화되었다.

3) S함량이 증가함에 따라 단락이행 및 스프레이이행 영역에서 아크가 안정화되는 것은 용융금속의 S함량이 증가하면 용융금속의 표면장력이 감소하기 때문이라 판단된다.

참 고 문 헌

1. Tetsuo Suga : Recent Progress of MAG Welding Material for Automation, *Welding in the World*, 34, (1984), pp.301~308
2. 山内信幸, 阿草一男 : 가스시ールド아크溶接現象に及ぼす微量元素の影響に関する日本の研究の現状, 50-11, (1981), pp.35~50
3. Keene B.J et al : Effects of Interaction between Surface Active Elements on the Surface Tension of Iron, *Canadian Metallurgical Quarterly*, 21-4, (1982), pp.393~403
4. B.Pollard : The effects of minor elements on the welding characteristics of stainless steel, *Welding Jr.*, 78-9, (1988), pp.202s~213s
5. P.R.Scheller, R.F.Brooks, K.C.Mills : Influence of Sulphur and Welding Conditions on Penetration in Thin Strip Stainless Steel, *Welding Jr.*, 85-2, (1995), pp69s~76s
6. T.Shinoda, H.Nishikawa : Monitoring and Signal Processing of Short Circuiting Metal Transfer of Gas Metal Active Gas Welding Process, *Procse 7th Int. Conf. Joining of Materials*, (1995), pp.558~565
7. 안영호, 방국수, 이종봉, 신병현 : GMAW 용적이행에 미치는 Ca 및 S의 영향, *대한용접학회 추계 학술발표개요집*, (1992), pp.132~134
8. 안영호, 이종봉, 방국수, 엄동석 : CO₂용접시 스팩터 발생에 미치는 Ti의 효과, *대한용접학회지*, 14-5, (1996), pp.106~pp.112
9. 안영호, 이종봉, 엄동석 : CO₂용접시 Arc 현상에 미치는 Ti의 효과, *대한용접학회 춘계 학술발표개요집*, (1997), pp.182~184
10. J.H.Waszink, L.H.J.Graat : Experimental Investigation of the Forces Acting on a Drop of Weld metal, *Welding Jr.*, 73-4, (1983), pp.108s~116s