

研究論文

MAG용접의 Arc안정성에 미치는 Si의 영향

안 영 호* · 이 종 봉* · 엄 동 석**

Effect of Si on Arc Stability of MAG Welding

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

Key words : MAG Welding (MAG), Silicon (Si), 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 Si 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 Si content, average arcing time and average short circuit time were increased. Therefore, droplet transfer frequency was decreased, due to the increase of arcing time and peak current at the moment of arc-reignition was increased, due to the increase of short circuit time.

In the region of spray transfer, the fluctuations of arc current and arc voltage was the most stable in wire with Si content of about 0.60 wt. %.

1. 서 론

최근 용접공정의 자동화 및 robot화에 따라 GMA용접의 적용률이 급증하고 있다. 자동화 용접

에 있어서 아크 스타트 특성, 아크 불안정 및 스패터 발생 등은 용접 생산성 및 용접부 품질 저하의 원인이 됨에 따라 자동화 용접의 가장 큰 문제점으로 지적되고 있다. 이러한 GMA용접의 문제점을 극복하기 위하여 용접전원, 용접재료 및 용접

* 1998년 3월 31일 접수

* 정회원, POSCO 기술연구소 후판연구팀

** 정회원, 부산대학교 조선해양공학과

시공 측면의 많은 연구 결과가 보고되고 있다¹⁾.

GMA용접의 아크 안정성은 용접전원 및 용접시공 조건 뿐만 아니라 용접재료의 화학성분에도 크게 영향을 받는 것으로 보고되고 있으며, 아크 안정성에는 용접재료의 화학성분 중 Si, Mn 및 Ti 등과 같은 탈산원소들이 영향을 미치는 것으로 알려져 있다²⁾. 이와 같은 탈산원소들은 고온의 아크 중에서 용적 및 용융지에 많은 산화물을 형성하고, 이때 형성된 산화물은 아크 내의 전자방출 사이트가 되어 아크 안정화에 기여하는 것으로 보고되고 있다³⁾. 특히 와이어 중의 Si은 강탈산원소로서 보호가스의 종류에 따라 적정 첨가량은 크게 구분되고 있으며, 일반적으로 100% CO₂가스를 사용하는 CO₂용접용 와이어에는 0.6~0.9wt. % 정도, 불활성가스 혹은 O₂가나 CO₂가스를 혼합한 가스를 사용하는 MIG/MAG용접용 와이어에는 0.5~0.7wt. % 정도로 다량 첨가되고 있다. 이러한 Si의 영향에 관한 연구로서는 CO₂용접의 스파터 발생 측면 및 아크 안정성에 대한 연구가 일부 보고되고 있으나⁴⁾, 용적이행현상에 미치는 Si의 효과 특히 아크 안정성에 미치는 정량적인 Si함량의 영향에 관한 연구는 아직 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 MAG용접에서의 아크 안정성에 미치는 Si의 영향을 검토하기 위하여 단락이행 영역 및 스프레이 이행 영역에서 Si함량에 따른 아크 안정성 특히 아킹 시간, 단락시간 및 아크 신호의 표준편차 등을 정량적으로 평가하고, 아크 물리적인 관점에서 Si의 영향을 정성적으로 규명하고자 하였다.

2. 시험재 및 실험방법

2.1 시험재

시험재는 성분원소 중 Si함량의 영향을 평가할 수 있도록 진공용해하였으며, 용접재료로 사용할 수

있도록 직경 1.2mm로 선선 및 Cu도금하였다. Table 1은 시험재의 화학성분을 나타낸 것으로 기본 성분계는 0.035%C-1.35%Mn-0.010%S로 하고, Si 함량을 0.28%, 0.56%, 0.85%로 3수준 변화시켰다.

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

C	Si	Mn	P	S
0.036	0.28	1.34	0.008	0.012
0.035	0.56	1.36	0.009	0.011
0.035	0.85	1.36	0.010	0.012

2.2 실험방법

시험 용접조건은 Table 2에 나타난 바와 같이 단락이행 현상이 나타나는 140A-20V 및 스프레이 이행 현상이 나타나는 320A-34V로 하였으며, 용접속도는 30 cm/min로 하였다. 아크안정성은 자체 제작한 용접Arc해석장치(Welding Arc Analyzer)⁵⁾를 사용하여 용접 중 아크전류 및 아크전압 신호를 측정하고, 측정된 아크신호를 자체 개발한 아크 현상 해석 (Arc Phenomena Analysis) S/W⁶⁾를 통하여 아크현상을 정량적으로 해석함으로써 평가하였다. 이때 용접시간은 10초로 하고, 아크 전류 및 아크 전압신호는 각 10,000개씩 측정토록 하였다.

단락이행으로 용접이 이루어지는 저전류 조건에서의 아크안정성은 단락현상을 이루는 평균 아킹 시간, 평균 단락시간, 용적이행 주파수 및 재 아크 시 최대전류 등으로서 평가하였다. 한편 스프레이 이행으로 용접이 이루어지는 대전류 조건에서 아크 안정성의 평가는 아크 전류와 아크 전압의 변동 정도를 나타내는 표준편차를 이용하였다.

한편 시험용접 중의 용적이행현상 및 아크 현상을 직접 관찰하기 위하여 고속카메라를 사용하였으며, 이때 촬영속도는 1000 frames/s로 하였다. 상세한 촬영조건은 Table 3에 나타내었다.

Table 2. Welding conditions

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		

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	

본 내용에서는 편의상 용접중의 순간적인 용접 전압치를 아크전압으로 표기하여 평균 전압치의 의미인 용접전압과 구분하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 용적이행현상

Fig. 1은 Si함량이 다른 시험재에 대하여 140A-20V 용접조건에서 용접시간에 따른 아크 전압의 변동을 비교하여 나타낸 것이다. 용적이행 현상은 Si함량에 관계없이 아킹구간과 단락구간으로 이루어지는 전형적인 단락이행 형태를 보이고 있으나, 용적이행 특성은 Si함량에 따라 다소 차이를 보이고 있다. 즉 Si함량이 0.28% 첨가된 경우는 아킹시간이 7~8 msec인데 비하여, Si함량이 0.85% 첨가된 경우는 20msec 정도로 긴 아킹시간을 나타내는 구간도 다수 발생하고 있음을 알 수 있으며, 이로 인하여 이행현상의 규칙성이 0.28%Si재가 0.85% Si재에 비하여 양호함을 알 수 있다.

Fig. 2는 Si함량이 다른 시험재를 사용하여 320A-

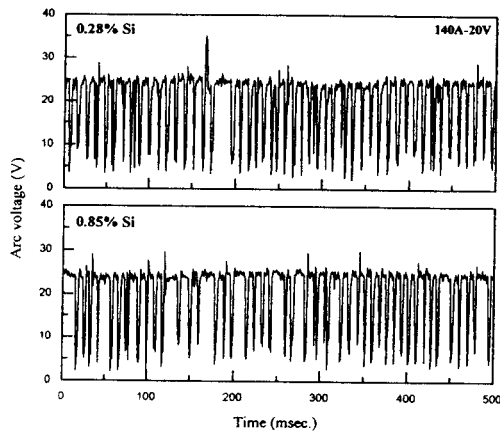


Fig.1 Change of arc voltage in 140A-20V of MAG welding

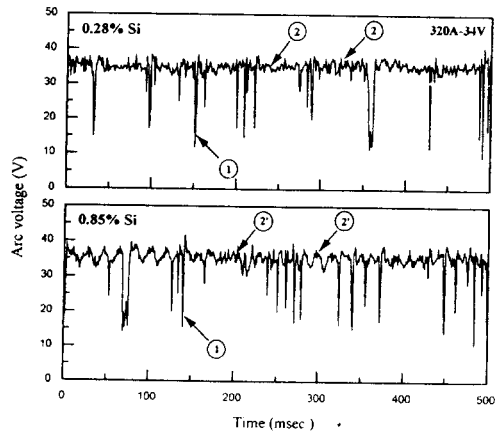


Fig.2 Change of arc voltage in 320A-34V of MAG welding

34V 용접조건에서 용접시간에 따른 아크 전압의 변동을 비교하여 나타낸 것이다. 용적이행 현상은 Si함량에 관계없이 순간단락 현상(그림중 화살표 ①)이 다수 존재하는 불안정한 스프레이이행 형태를 보이고 있으나, 용적이행 특성은 Si함량에 따라 차이를 나타내고 있다. 즉 Si함량이 0.85%인 경우는 0.28%인 경우에 비하여 불안정한 순간단락 현상이 많이 발생하고 있으며, 전반적으로 아크 전압의 변동정도가 현저함(그림중 화살표 ②, ②)을 알 수 있다. 따라서 Si함량이 0.28%인 시험재가 0.85%인 시험재에 비하여 아크안정성이 양호하다고 할 수 있다.

이상과 같이 Si함량의 증가는 저전류 및 대전류 영역의 아크 현상에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

3.2 저전류 영역에서의 아크 안정성

Fig. 3은 Si함량에 따른 평균 아킹 시간의 변화를 나타낸 것이다. Si함량이 0.28%로부터 0.85%로 증가함에 따라 평균 아킹 시간은 7.12msec.로부터 9.6msec.으로 거의 직선적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 따라서 Si함량이 증가하면 평균 아킹 시간이 길어지고, 이와 같이 아킹 시간이 증가하면 전극 선단에 형성되는 용적이 크게 성장할 것으로 판단된다.

Fig. 4는 Si함량에 따른 평균 단락시간의 변화를 나타낸 것이다. Si함량이 0.28%로부터 0.85%로 증가함에 따라 평균 단락시간은 2.48msec.로부터

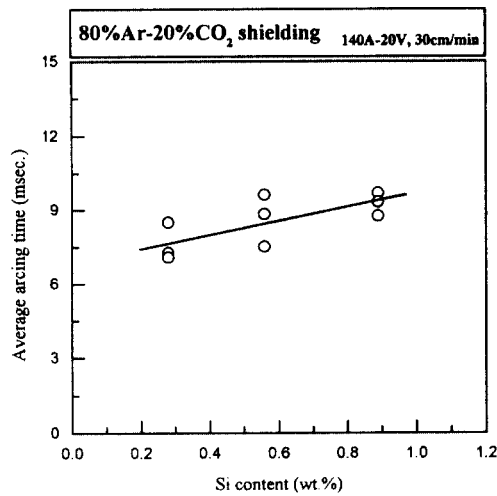


Fig.3 The variation of average arcing time with Si contents

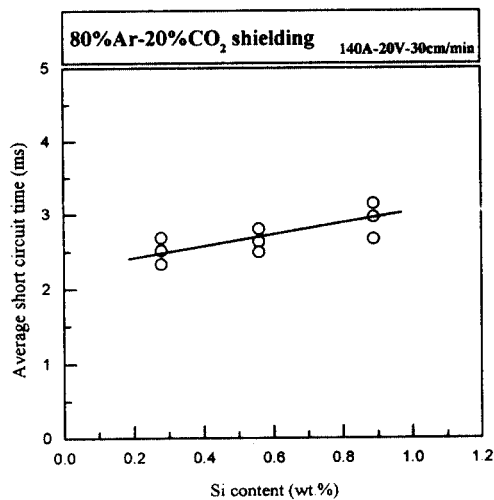


Fig.4 The variation of average short circuit time with Si contents

2.95msec. 으로 거의 직선적으로 증가하는 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 Si함량에 따라 정리한 것이다. Si함량이 0.28%로부터 0.85%로 증가함

에 따라 최대 전류값은 206A로부터 220A 정도로 증가하는 경향을 보이고 있으며, 이는 Si함량에 따른 아킹시간 및 단락시간의 증가가 그 원인인 것으로 생각된다. 따라서 Si함량이 많을수록 재아크시 아크 안정성은 나빠질 것으로 판단된다.

Fig.6은 Si함량에 따라 용적이행 주파수의 변화를 나타낸 것이다. Si함량이 증가함에 따라 용적이행 주파수는 거의 직선적으로 감소하는 경향을 보

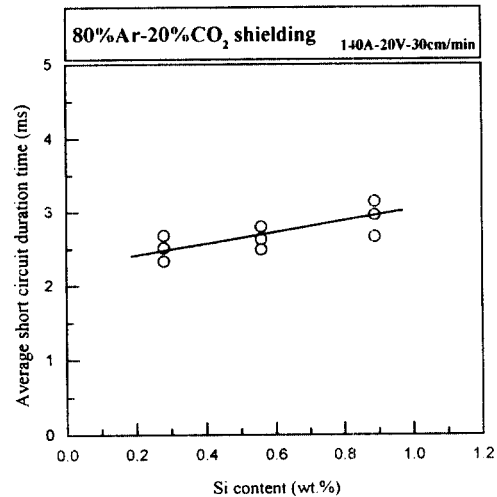


Fig.5 The variation of average peak current at arc re-ignition with Si contents

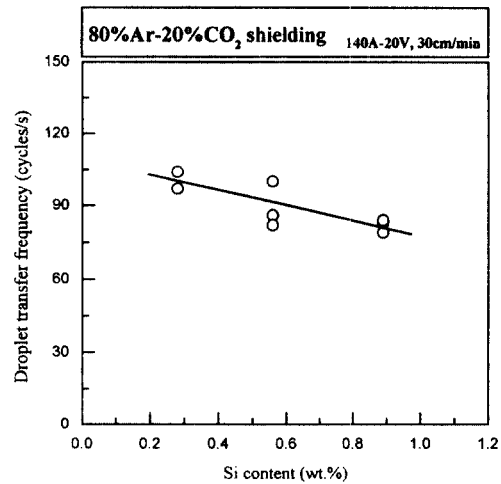


Fig.6 The variation of droplet transfer frequency with Si contents

이고 있다. 특히 Si함량이 0.28%인 경우는 용적이행 주파수가 약 110 cycles/s인데 비하여, Si함량이 0.85%로 증가하면 약 84 cycles/s로 용적이행 주파수가 20% 정도 감소함을 알 수 있다. 이와 같이 Si함량의 증가에 따라 용적이행 주파수가 감소하는 것은 전술한 바와 같이 Si함량의 증가에 따른 아크시간의 증가와 단락시간의 증가가 주된 원인이라 판단된다.

3.3 대전류 영역에서의 아크 안정성

Fig. 7은 Si함량이 0.28%인 시험재의 320A-34V에서 아크의 변동정도를 나타내는 아크 전류(I)-아크 전압(V) 선도를 나타낸 것이다. 320A와 같은 대전류 영역에서는 저전류 영역에서와 같은 명확한 이행현상의 분석이 곤란하기 때문에 아크 안정성의 평가는 전반적인 아크전류 및 아크전압의 변

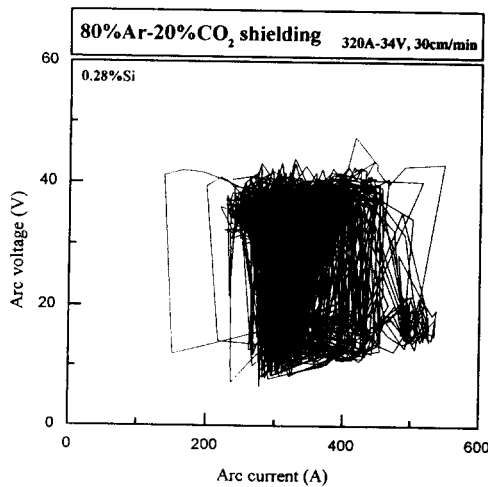


Fig.7 An example of I-V diagram for 320A-34V

동정도로서 평가가 가능할 것으로 판단된다. 이와 같은 아크전류 및 아크 전압의 변동정도는 각각의 표준편차로서 평가가 가능하다.

Fig. 8은 Si함량에 따른 아크 전류 표준편차의 변화를 나타낸 것이다. 아크 전류의 표준편차는 Si함량이 0.28%로부터 0.60%로 증가하면 저하하는 경향을 나타내지만, 그 이상의 Si함량에서는 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이와 같은 경향은

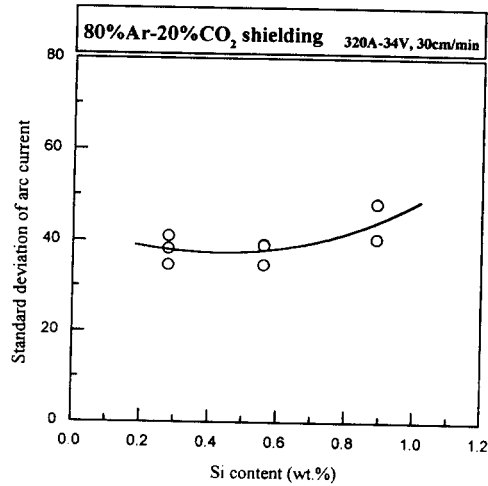


Fig.8 The variation of the standard deviation of arc current with Si contents

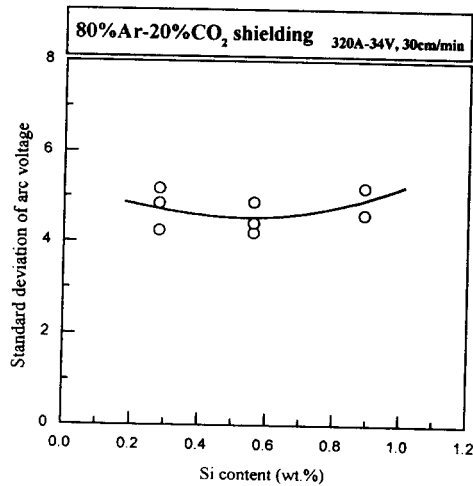


Fig.9 The variation of the standard deviation of arc voltage with Si contents

Fig. 9에서 나타낸 바와 같이 아크 전압의 표준편차에서도 유사함을 확인할 수 있으나, 아크 전류와 같은 현저한 변화는 관찰되지 않았다.

Photo. 1은 고속 카메라를 사용하여 320A-34V의 용접조건에서 Si함량이 0.28%인 경우와 0.85%인 경우의 아크 현상의 예를 비교한 것이다. Si함량이 0.28%인 경우는 전형적인 스프레이 이행현상은 아니지만 스프레이 이행에 가까운 현상을 보이고

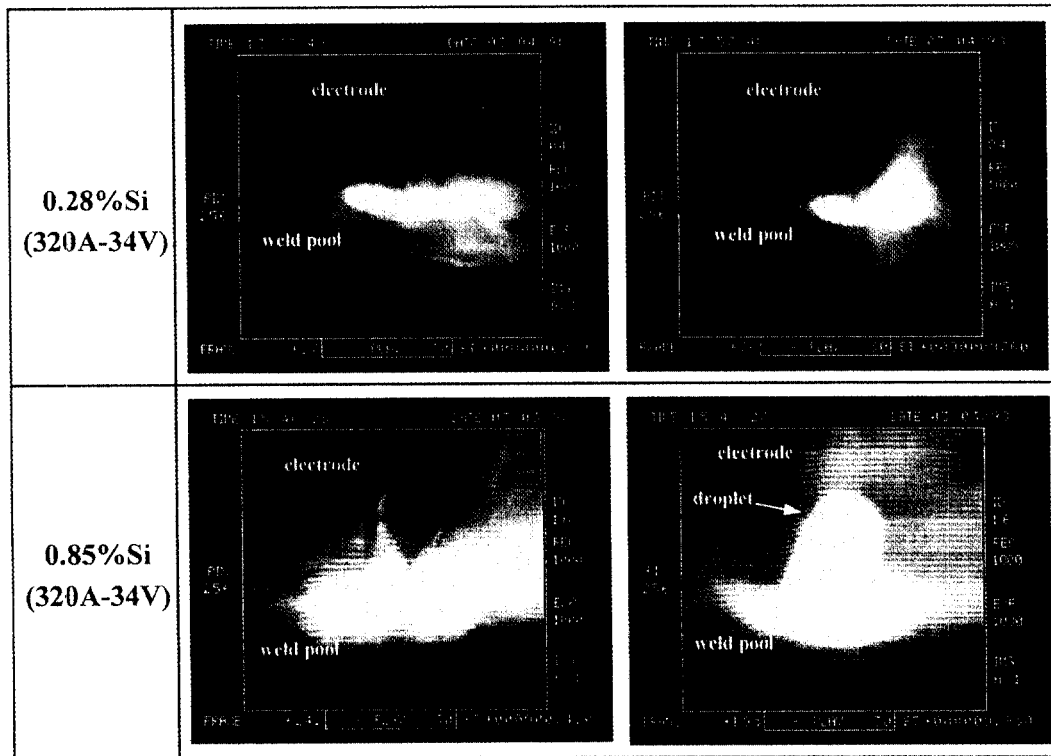


Photo.1 Arc phenomena of 320A-34V during MAG welding

있다. 그러나 0.85% 정도로 Si함량이 증가하면 용적이행 현상은 반발형(replled type) 이행과 유사한 이행특성을 보이며, 용적의 성장이 현저함을 확인할 수 있다. 따라서 0.85%로 Si함량이 증가함에 따라 용적이행 현상이 불안정한 원인은 원활하지 못한 용적이행으로 인하여 용적이 크게 성장하고, 크게 성장한 용적과 용융지와의 순간단락과 같은 불안정한 아크 현상에 기인한 것으로 판단된다.

이와 같이 320A에서는 아크 안정성 확보를 위해서는 최적의 Si함량 범위가 존재함을 알 수 있으며, 그 이상 혹은 그 이하의 범위로 Si이 첨가되면 아크 안정성은 저하될 가능성이 있음을 알 수 있다.

3.4 고찰

140A의 저전류 영역에서는 와이어 중의 Si함량이 증가할수록 아킹 시간 및 단락시간이 증가하여 용적이행 주파수가 감소하고 재아크시 아크 안정성이

저하하였으며, 320A의 대전류 영역에서는 적정 함량의 이하 및 이상으로 Si이 첨가되면 아크의 변동 정도가 심하여 아크가 불안정하여짐을 알았다.

이상과 같이 Si함량에 따라 아크 안정성이 변화하는 것은 고온의 아크 및 용융금속 내에서의 Si의 역할과 밀접한 상관성이 있으리라 판단된다. 즉 Si은 강탈산원소로서 용융금속내에서 산소와 작용하여 SiO₂와 같은 산화물을 형성하고, 이로 인하여 용융금속내의 산소량을 감소시킬 것으로 판단된다. 따라서 Si함량이 증가하면 용융금속내의 산화물량이 증가하고, 이로 인하여 음극(cathode)에서의 전자 방출사이트로서 작용할 수 있는 산화물의량이 증가할 것이다. 따라서 음극에서 산화물에 의한 전자 방출이 용이하여 전위구배(potential gradient)가 감소하고 이로 인하여 아크가 안정화될 가능성이 있으나²⁾, 동일 전압에서 아크길이가 길어지기 때문에 용적의 크기가 증가할 가능성도 있다. 한편 Si함량의 증가는 탄산작용에 의하여 용

용융속 내의 산소량을 저하하게 된다⁸⁾. 일반적으로 용융속의 산소량이 저하하면 용융속의 표면장력이 증가하는 것으로 알려지고 있다^{9,10)}. 따라서 Si함량이 증가하면 강력한 탈산작용에 의하여 용융속 내의 산소량을 저하시키게 되고 이로 인하여 표면장력은 증가하게 될 것이다. 또한 용융속내의 Si함량이 증가하면 점성(viscosity)을 감소하기 때문에 유동성이 좋아지는 것으로 보고 되고 있다¹⁰⁾.

이와 같은 Si의 효과로 볼 때, 저전류 단락이행 영역에서 Si함량이 증가하면 아크 안정성이 저하하는 것은 산화물의 증가로 인한 아킹 상태의 안정성 효과보다는 표면장력의 증가로 인한 효과가 지배적으로 작용하였기 때문이라 판단된다. 즉 표면장력 증가로 인하여 아킹시간이 길어지고 이로 인하여 용적이행주파수가 감소함은 물론 용적이 크게 성장하고, 단락시간이 길어져 단락시 전류의 상승정도가 현저하여, 재아크시 불안정한 현상이 발생하게 될 것이라 판단된다.

한편 대전류 영역에서 Si함량이 0.6%이하에서 아크가 불안정한 원인은 지나친 Si함량의 저하로 인하여 전자방출 사이트로서 충분한 량의 산화물이 음극에서 형성되지 못하였기 때문이며, 0.6% 이상에서 아크가 불안정한 원인은 지나친 Si함량에 의하여 용융속내의 산소량이 현저히 감소함에 따른 표면장력의 증가로 인하여 용적이행이 원활하지 못하기 때문이며, 한편 Si함량의 증가로 인한 용융속의 유동도도 아크 안정성의 저하를 조장하였을 가능성이 있으리라 판단된다.

4. 결 론

MAG용접의 아크 안정성에 미치는 Si의 영향을 관찰하기 위하여 Si함량을 변화시켜, 단락이행 영역에서의 아킹시간 및 단락시간 등, 스프레이 이행 영역에서의 아크 변동정도를 정량적으로 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 단락이행 영역에서는 Si함량이 증가함에 따라 아킹시간 및 단락시간이 증가하고, 용적이행주파수가 감소하였다. 또한 단락시간이 증가함에 따라 재아크시 작용하는 최대전류가 증가하여 아크 안정성을 저해하였다.

2) 단락이행 영역에서 Si함량에 따라 아킹시간 및 단락시간이 증가하는 것은 용융속에 있어서 산소량의 저감에 따른 표면장력의 증가에 기인한 것으로 판단된다.

3) 스프레이 이행 영역에서는 Si함량이 0.6wt. % 이하 및 이상 첨가된 경우에는 아크 안정성이 저하하였다.

참 고 문 헌

1. Tetsuo Suga : Recent Progress of MAG Welding Material for Automation Welding in the World, Vol. 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, Vol. 50, No. 11 (1981), pp. 35-50
3. A. E. Guile : Processes at arc cathode roots on nonrefractory metals having films of their own oxide, Arc Physics and Weld Pool Behavior. ed. W. Lucas (1979), pp. 79-86
4. 荒井敏夫, 山田忠昭, 管哲男 : 炭酸가스아크溶接におけるスパッタの發生, 溶接學會論文集, Vol. 1, No. 2 (1983), pp. 177-182
5. 안영호, 이종봉, 방국수, 엄동석 : CO₂용접시 스파터 발생에 미치는 Ti의 효과, 대한용접학회지, Vol. 14, No. 5 (1996), pp. 106-112
6. 안영호, 이종봉, 엄동석 : CO₂용접시 Arc 현상에 미치는 Ti의 효과, 대한용접학회 국제학술발표개요집, (1997), pp. 182-184
7. P. G. Jonsson, A. B. Murphy and J. Szekely : The influence of oxygen additions on argon-shielded gas metal arc welding process, Welding Jo., No. 2 (1995), pp. 48s-58s
8. G. M. Evans and N. Bailey : Metallurgy of basic weld metal, Abington Publishing, (1997), pp. 128-129
9. B. J. Keene, K. C. Mills, J. W. Bryant, E. D. Hondros : Effects of Interaction between surface Active Elements on the Surface Tension, Canadian Metallurgical Quarterly, 21-4 (1982), pp. 393-403
10. B. Pollard : The effects of minor elements on the welding characteristics of stainless steel, Welding Jo., No. 9 (1988), pp. 202s-213s