

MAG 용접의 스패터 발생 및 용적이행현상에 미치는 Si의 영향

안영호* · 이종봉* · 엄동석**

Effect of Si on Spatter Generation and Droplet Transfer
Phenomena of MAG Welding

Young-ho An*, Jong-bong Lee* and Dong-suk Um**

Key Words : MAG welding(MAG), Silicon(Si), Arc stability(아크 안정성), Droplet transfer phenomena(용적이행현상), Spatter(스패터), Spattering ratio(스패터 발생률), 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), Surface tension(표면장력)

Abstract

The effect of Si content in welding wires on spattering characteristics and droplet transfer phenomena was studied. In MAG welding using 80%Ar-20%CO₂ shielding gas, spattering characteristics and droplet transfer phenomena were varied with Si content of wire. With increasing Si content, the spattering ratio and the ratio of large size spatter ($d \geq 1.0\text{mm}$) were increased. The increase of Si content in molten metal made surface tension increase due to reduction of oxygen content, which resulted from deoxidizing action of silicon. The increase of surface tension resulted in unstable transfer phenomena and arc instability in both short circuit and spray region. With changing Si content of wire, spattering characteristics and droplet transfer phenomena was directly influenced by the variation of surface tension, compared with the effect of arc stability.

1. 서 론

가스메탈 아크 용접(GMAW)은 자동화가 용이하여 산업에 있어서 적용이 날로 증대되고 있는 용접법이다. GMAW에 있어서 용접작업성 특히 아크 안정성 향상 및 스패터 발생 억제에 대한 요구가 있으며, 이를 위하여 용접전원 및 용접시공 조건뿐만 아니라 용접재

료의 화학성분 등에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다^{1~3)}.

용접작업성에 영향을 미치는 주요한 성분은 와이어 중 용융금속의 탈산을 위하여 첨가되고 있는 Si, Mn 및 Ti 등과 같은 탈산원소들이 알려지고 있다¹⁾. 용접작업성, 특히 아크 안정성 및 스패터 발생 특성에 미치는 이들 성분의 영향에 대하여는 많은 연구가 이루어지고 있다. 荒井 등²⁾은 탄소함량이 일정한 경우 Si,

* 1998년 11월 18일 접수

* 정희원, POSCO 기술연구소 후판연구팀

** 정희원, 부산대학교 조선해양공학과

• 안영호 : pc543040@smail.posco.co.kr

Mn, Ti가 증가함에 따라 스패터가 감소한다고 하였으며, 이러한 결과는 방과 안³⁾의 실험결과에서도 확인되었다. 또한 안 등⁴⁾은 Ti가 증가함에 따라 스패터 발생량은 감소하지만 발생하는 스패터가 대립화한다는 실험결과도 보고하였다. 이러한 연구결과들은 CO₂용접에 초점을 두고 있으나, Ar-CO₂ 혹은 Ar-O₂ 등의 혼합가스를 사용하는 마그(MAG) 용접에 있어서 이들 성분에 대한 정량적인 평가결과는 부족한 실정이다. 아크 안정성이 우수하고 스패터 발생을 억제할 수 있는 MAG 용접재료를 개발하기 위한 연구의 일환으로 전보⁵⁾에서는 Si함량이 증가함에 따라 아크시간 및 단락시간이 증가하는 등 아크 안정성이 전반적으로 저하한다는 실험결과를 발표하였다.

본 연구에서는 전보에서의 아크 안정성에 미치는 Si함량의 영향을 기초로하여, Si함량에 따른 스패터 발생 특성 및 용융금속의 물성 등을 정량적으로 평가하고, 용적이행 현상을 관찰함으로써 용접작업성에 미치는 Si의 영향을 조사하였다.

2. 시험재 및 실험방법

2.1 시험재

시험재는 성분중 Si함량의 영향을 평가할 수 있도록 진공용해하여 직경 1.2mm로 신선 및 구리도금한 용접재료를 사용하였다⁵⁾. 시험재의 기본성분계는 0.035%C-1.35%Mn-0.010%S로 하고, Si함량을 0.28, 0.56, 0.85%로 하였으며 시험재의 Si함량에 따라 Si2, Si5, Si8로 표기토록 하였다.

2.2 실험방법

스패터 발생 특성은 스패터 발생률과 스패터 입도별 발생비율로서 평가하였으며, 용접중 발생하는 스패터는 구리로 만들어진 반실린더형 포집장치⁶⁾를 사용하였다. 스패터 포집을 위하여 길이 400, 폭 150, 두께 25 mm 인 크기의 SS400강재 표면에 길이방향으로 250mm가 되도록 비드 용접을 실시하였다. 스패터의 발생률은 (1)식과 같이 용착금속에 대한 스패터의 중량비로서 구하였고, 입도별 발생비율은 포집된 스패터를 직경에 따라 D₁(D<0.25mm), D₂(0.25≤D<1.0mm) 및 D₃(D≥1.0mm)로 분류하여 각 입도별 무게를 측정 후 (2)식으로부터 각각의 상대적인 비율로서 평가하였다.

$$\text{Spattering ratio}(\%) = \frac{W_s}{W_w} \times 100 \quad (1)$$

W_w: 용착금속의 중량 (g)

W_s: 스패터 중량 (g)

$$\text{Ratio of } D_i(\%) = \frac{D_i}{D_1+D_2+D_3} \times 100 \quad (2)$$

(i=1,2,3)

D₁: D < 0.25

D₂: 0.25 ≤ D < 1.0

D₃: D ≥ 1.0

D: Diameter(mm)

이상의 스패터 입도중에서 직경 1.0mm이상인 대립의 스패터는 용접후 그의 제거가 곤란하고 화재발생의 위험이 있어, 자동화 용접공정에 있어서 문제점으로 지적되고 있다. 따라서 본 연구에서는 직경 1.0mm이상인 대립의 스패터 발생비율을 중심으로 고찰토록 하였다.

용접 중의 용적이행 현상 및 아크 현상을 직접 관찰하기 위하여 고속카메라를 사용하였으며, 이때 촬영속도는 1,000 frames/s로 하였다.

스패터 포집 및 용적이행 관찰을 위한 용접방법⁵⁾은 80%Ar-20%CO₂가스를 사용하는 MAG용접으로 하였다. 시험 용접조건은 단락이행 현상이 나타나는 140A-20V 및 스프레이이행 현상이 나타나는 320A-34V로 하였으며, 용접속도는 30 cm/min로 하였다.

Si함량에 따른 용융금속의 표면장력 변화를 평가하기 위하여 Inagaki 등⁷⁾이 제안한 표면장력 측정법을 적용하였다. 시험재의 전용착금속을 테이퍼형(taper)으로 기계가공한 시험편(2~5^{mm}×40^{mm}×200^{mm})을 사용하여 용가재없이 GTA(Gas Tungsten Arc) 용접법으로 비드-온-플레이트 용접을 실시하고, 표면장력은 용락되는 임계두께를 측정하여 Inagaki 등⁷⁾이 제안한 다음식을 이용하여 계산하였다.

$$\gamma = 4.3 \frac{E \cdot I}{t_{\max} \cdot \sqrt{v}} \quad (3)$$

γ: 표면장력 (dyne/cm)

E: 용접전압 (V)

I: 용접전류 (A)

t_{max}: 용락임계 두께 (mm)

v: 용접속도 (cm/min)

3. 실험결과 및 고찰

3.1 스패터 발생 특성

Fig.1은 Si함량에 따른 스패터 발생률의 변화를 나타낸 것으로, 용접전류에 관계없이 스패터 발생률은 Si함량에 따라 증가하는 경향을 보이고 있다. 즉 140A-20V의 저전류 용접조건에서 Si함량이 0.28%인 경우 스패터 발생률은 약 1.1%인데 비하여 0.85%첨가된 경우는 약 1.35%로서 Si함량이 증가함에 따라 스패터 발생률은 20%정도 증가하였다. 이러한 Si의 효과는 320A-34V의 용접조건에서도 유사한 경향을 나타내었다. 그러나 320A-34V에서의 스패터 발생률은 시험재 모두 140A-20V에 비하여 감소하고

있음을 알 수 있다. 이는 용접전류가 140A로부터 320A로 증가함에 따른 용적이행 형태의 변화에 기인한 것이라 판단된다.

Fig.2는 Si함량에 따른 직경 1.0mm이상인 대립의 스패터 발생비율의 변화를 나타낸 것이다. D₃ 스패터의 발생비율은 Si함량이 증가함에 따라 용접조건에 관계없이 증가하는 경향을 보이고 있다. 140A-20V의 저전류 용접조건에서 발생비율은 Si함량이 0.28%인 경우 2~3%인 데 비하여 Si함량이 0.85%인 경우 8~9%정도로서 Si함량에 따라 증가하였다. 한편 320A-34V의 용접조건에서는 Si함량이 약 0.6%까지는 그의 증가 경향이 뚜렷하지는 않지만, Si함량이 0.6%이상으로 증가하면 140A-20V에서와 같이 대립

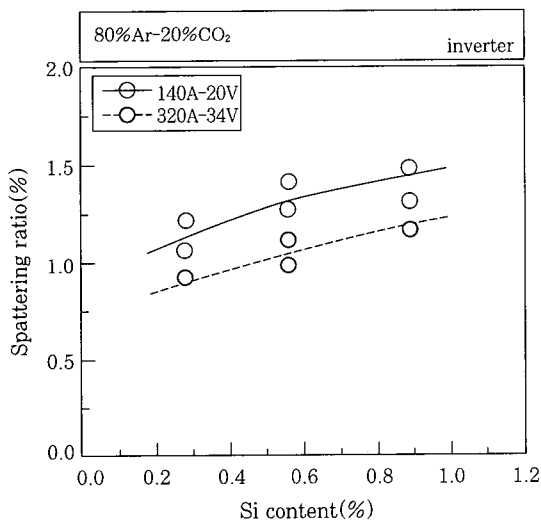


Fig.1 Effect of Si content on spattering ratio

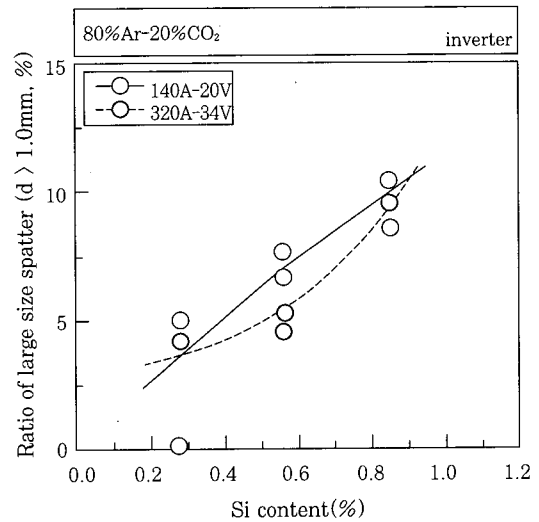


Fig. 2 Effect of Si content on the ratio of large size spatter ($d \geq 1.0\text{mm}$)

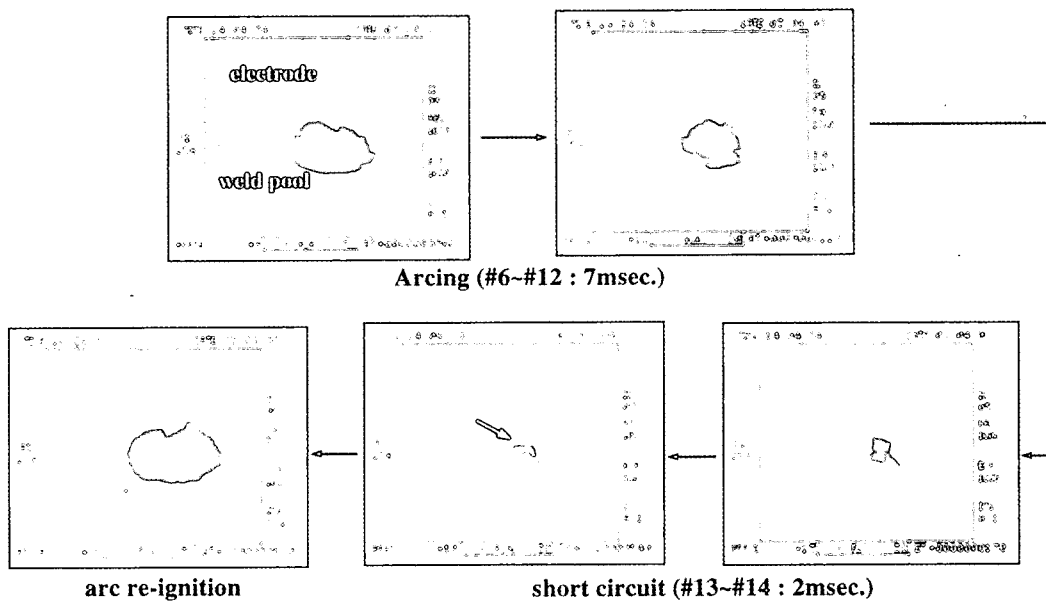


Photo.1 Droplet transfer phenomena of 140A-20V (Si2 wire)

의 스패터 발생비율이 증가함을 알 수 있다.

이와 같이 MAG용접에 있어서 와이어 중에 Si함량이 증가하면 전반적으로 스패터 발생량이 증가하고, 발생하는 스패터가 대립화하였다.

3.2 용적이행 현상

Photo.1 및 Photo.2는 Si2 및 Si8재에 대하여 140A-20V의 용접조건에서 발생하는 용적이행 현상을 나타낸 것이다. 용적이행 형태는 시험재에 관계없이 아킹구간과 단락구간으로 이루어지는 전형적인 단락이행 형태를 보이고 있지만, 단락 말기에 발생하는 핀치현상은 Si함량에 따라 다소 차이가 있다. 즉 Si 함량이 0.28%인 경우는 단락 말기(단락후 2msec.경과)에 뚜렷한 핀치현상이 관찰되지만, Si함량이 0.85%인 경우는 Si2재에 비하여 핀치현상이 명확하게 관찰되지 않고 있다. Photo.3은 아킹시간이 8msec.으로 동일한 경우에 단락과과 직전의 핀치현상을 비교하여 나타낸 것으로, 단락과과 직전의 핀치현상은 Si함량이 감소함에 따라 뚜렷하여짐을 알 수 있다. Si함량에 따른 핀치현상의 차이는 단락시간에도 영향을 미칠 것이며, 이는 전보⁵⁾에서 발표한 바와 같이 Si함량이 증가함에 따라 단락시간이 증가한다는 실험결과와 잘 일치하고 있다. 이와 같이 Si함량에 따라 단락시간이 증가하는 것은 아킹시간의 증가와 용융금속의 물성 변화에 의한 핀치현상의 차이와 밀접한 상관이 있으리라 생각되며, 이에 대하여는 3.4절에서 상세히 기술하였다.

Photo.4는 시험재에 대하여 320A-34V의 용접조건

에서 발생하는 용접 현상을 나타낸 것이다. 용적이행 형태는 전형적인 스프레이이행 현상을 나타내고 있지는 않지만 Si함량에 관계없이 아크가 용적을 폭넓게 감싸고 있으므로 스프레이이행에 가까운 이행현상을 나타내고 있음을 유추할 수 있다. Si함량이 0.28%와 0.56%의 경우는 비교적 안정된 아크 현상을 보이고 있으나, 0.85%인 경우는 순간단락현상으로 보이는 불안정한 아크 현상과 매우 큰 용적이 용융지로 이행되지 못하고 CO₂ 용접에서 전형적으로 관찰되는 반발형 입상용적이행⁹⁾에 가까운 이행현상도 관찰되고 있다. 이러한 이행 현상을 연속적으로 관찰한 결과를 Photo.5에 나타내고 있다. 사진 중 0msec에서 가스 팽창과 같은 현상이 발생하고, 그 이후 와이어 선단의 용적이 와이어 상부로 부상(浮上)되어 용융지로 이행되지 못하여 성장을 계속하며 (사진중 7, 11msec.), 부상된 용적은 와이어 선단으로부터 이탈되어 스패터로 비산되게 된다 (사진중 17msec.). 이때 발생한 스패터는 직경이 1.0mm이상인 대립의 스패터임을 알 수 있다. 따라서 Si함량이 0.85%로 증가하면 스패터 발생량 뿐만아니라 1.0mm이상인 대립의 스패터 발생비율이 증가하는 것은 불안정한 이행현상에 기인한 것이라 판단된다.

3.3 표면장력에 미치는 Si의 영향

Fig.3은 Si함량에 따른 표면장력의 변화를 나타낸 것이다. Si함량이 증가하면 표면장력은 증가하는 경향을 보이고 있다. 즉 Si함량이 0.28%인 경우는 표면장

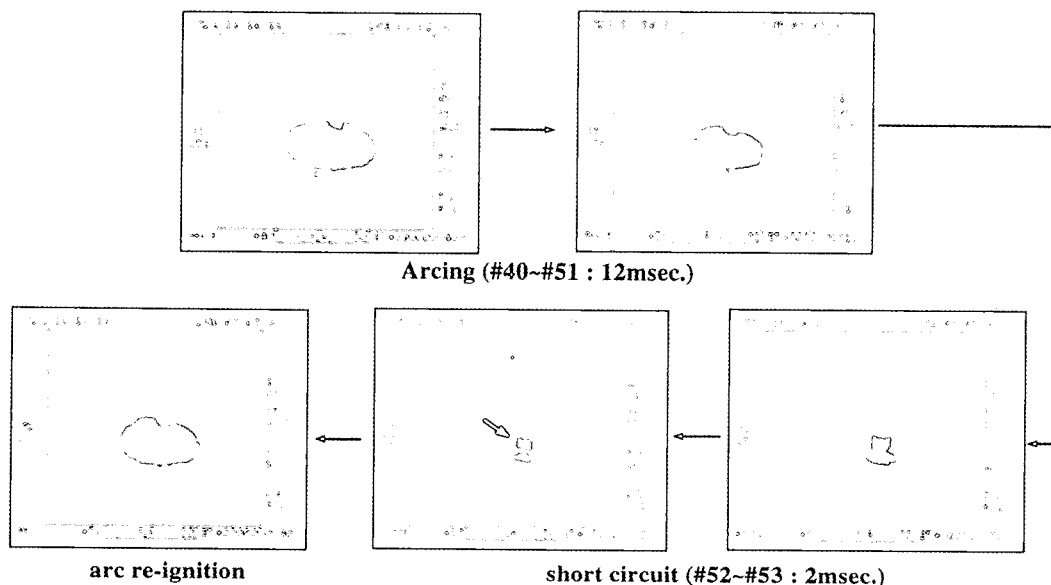


Photo.2 Droplet transfer phenomena of 140A-20V (Si8 wire)

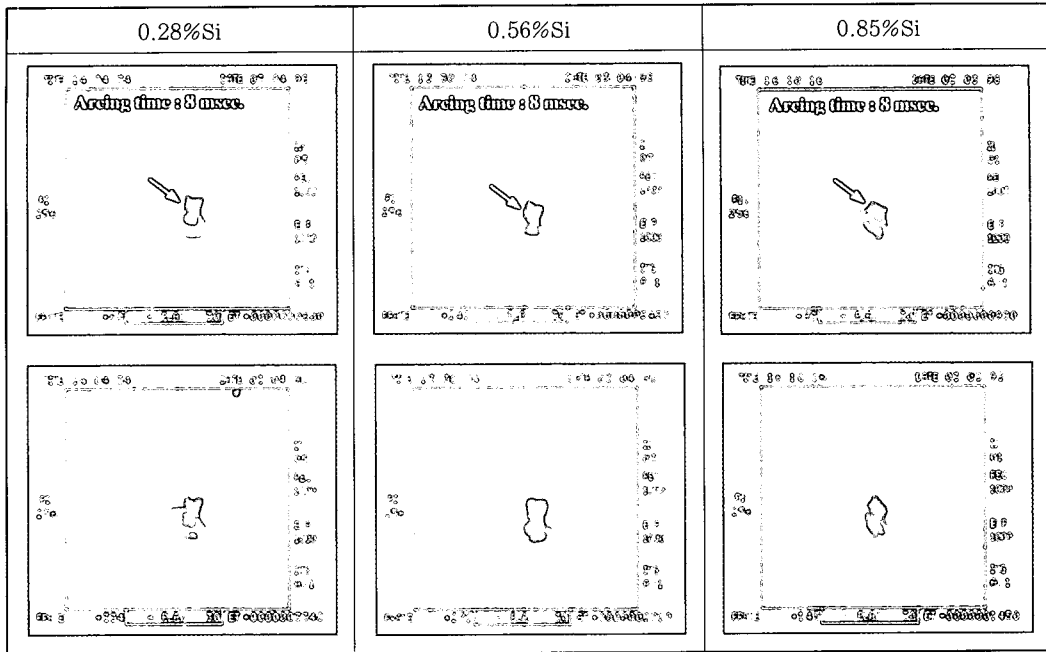


Photo.3 Pinching phenomena just prior to arc re-ignition (arcing time : 8msec)

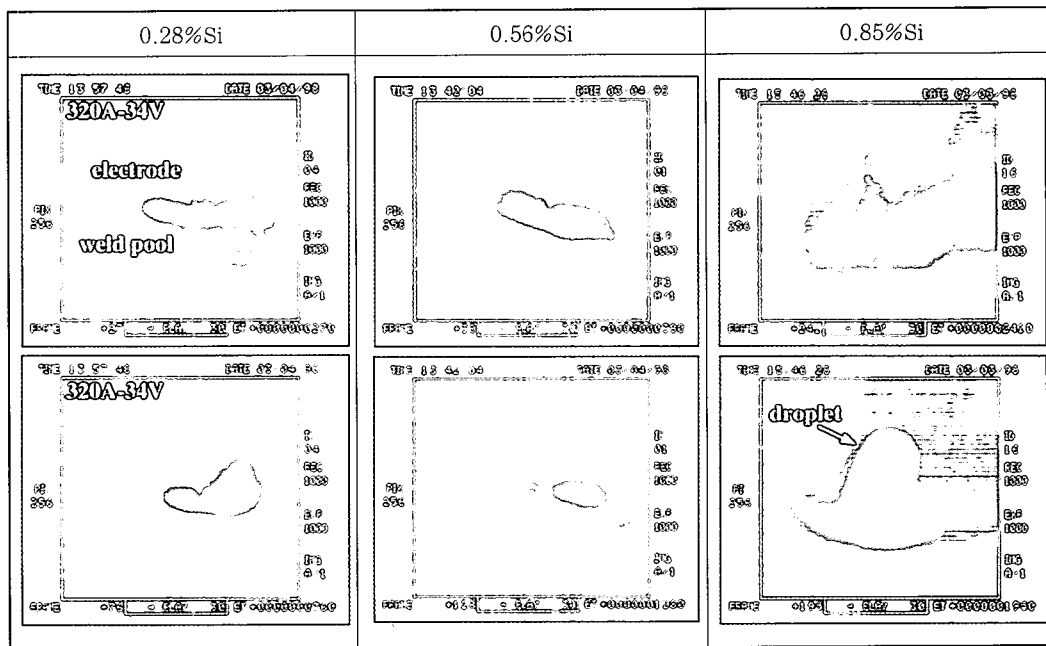


Photo.4 Arc phenomena in 320A-34V

력이 1840.2dyne/cm이지만 Si함량이 0.85%로 증가하면 1942.4dyne/cm로서 0.28%Si재에 비하여 102.2dyne/cm 정도로 표면장력이 증가하였다. 이와 같이 Si함량에 따라서 표면장력이 증가하는 것은 용융 금속의 산소량과 직접적인 상관이 있으리라 판단된다. 즉 Si은 용융금속내에서 강력한 탈산작용을 하기 때문에 Si함량이 증가하면 용융금속 내의 산소량이 저하하게 된다. 방등¹⁰⁾은 Si, Mn등과 같은 탈산원소 함량

이 증가하면 GMA용접금속의 산소량은 감소한다는 실험 및 해석 결과를 보고하고 있다. 따라서 Si함량이 증가하면 용융금속의 산소량이 감소하며, 이와같이 용융금속내의 산소량이 감소하면 표면장력은 증가하는 것으로 알려지고 있다¹¹⁾. 따라서 Si함량이 증가함에 따라 표면장력이 증가하는 것은 Si의 강력한 탈산작용에 의하여 용융금속내 산소량의 저하가 그 원인인 것으로 판단된다.

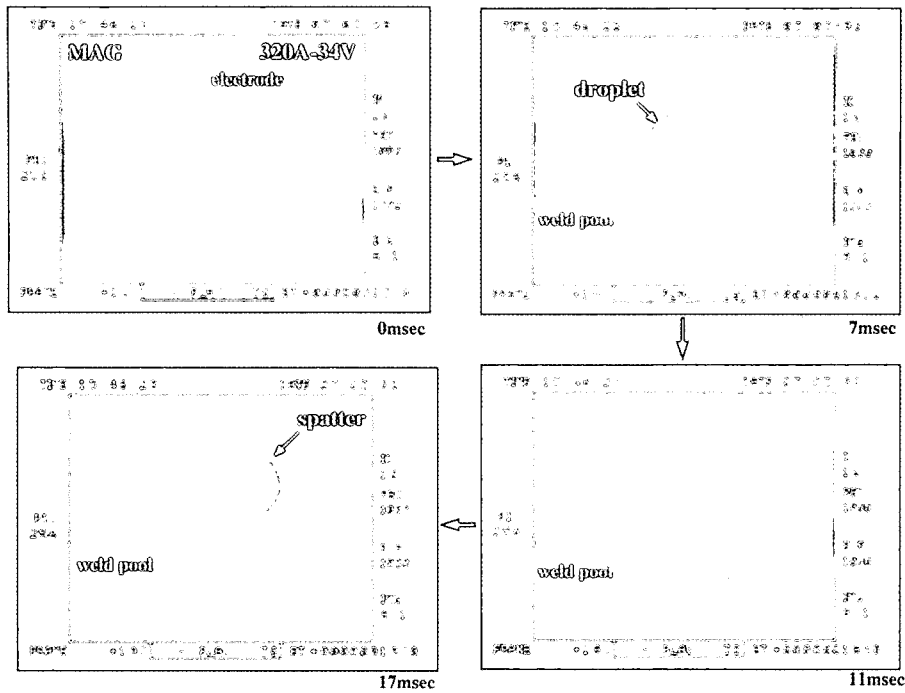


Photo.5 Unstable droplet transfer phenomena of Si8 wire in 320A-34V

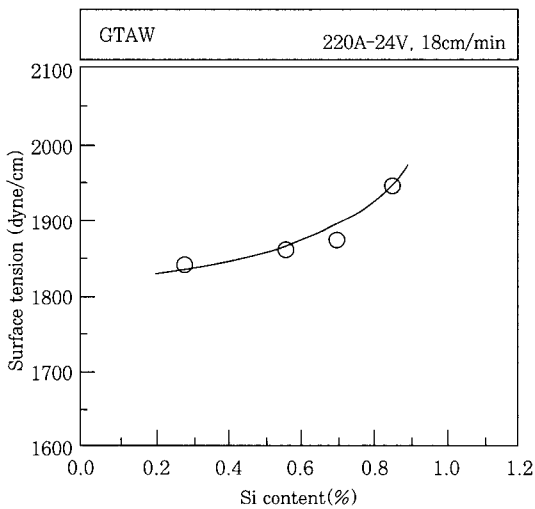


Fig.3 Effect of Si content on surface tension

3.4 Arc현상에 미치는 Si의 영향

용접 와이어 중의 Si는 아크 안정성⁵⁾ 및 스패터 발생 특성에 영향을 미치고 있음을 알았다. 스패터 발생 특성은 용적이행 형태에 관계없이 Si함량이 증가할수록 스패터 발생량이 증가하고, 발생되는 스패터가 대립화 되는 경향이 있다. 전보에서 기술한 바와 같이 아크 안정성에 대한 Si의 영향은 용적이행 형태에 따라 다소 상이하였다. 용적이행이 아킹구간과 단락구간으로 이루어지는 저전류 단락이행 영역에서는 Si함량에 따라서 아킹시간 및 단락시간이 증가하고 단락후 재아크

발생과정에서 작용하는 아크 전류가 증가함에 따라 불안정한 아크상태로 되어, 스패터 발생량은 물론 대립의 스패터 발생비율도 증가하였다. 한편 자유비행이행으로 이루어지는 대전류 스프레이이행 영역에서는 Si함량 범위에 따라 아크 안정성과 스패터 발생 특성에 일치하지 않는 영역이 보이고 있다. 즉 Si함량이 0.56% 이상에서는 함량이 증가할수록 아크 안정성 및 스패터 발생 특성 모두 저하하는 경향을 나타내고 있어 아크 안정성과 스패터 발생 특성간에 양호한 상관성이 있으나, 0.56% 이하에서는 Si함량이 증가할수록 아크신호의 표준편차가 감소하여 아크가 다소 안정화 되는 경향은 보이고 있으나, 스패터 발생량 및 대립의 스패터 발생비율은 증가하고 있어 아크 안정성과 스패터 발생 특성간에는 상관성이 보이지 않고 있다.

이상과 같은 아크 안정성 및 스패터 발생 특성에 미치는 Si함량의 영향은 고온의 아크 중에서 아크와 용융금속의 물성에 대한 Si의 역할에 기인한 것으로 생각되며, 아크 안정성과 스패터 발생 특성간에 다소 차이를 보이는 것은 Si의 상반되는 작용이 원인인 것으로 생각된다. 즉 탈산작용으로 Si계 산화물이 다량 생성되며, 형성된 산화물은 아크를 안정화시키는 작용을 하는 반면, 탈산작용에 의한 용융금속중 산소량의 감소는 표면장력을 증가시키고 이로 인하여 용적이행이 억제되어 아크를 불안정하게 한다.

이와 같은 Si의 상반되는 역할을 스패터 발생 특성으로 볼 때 Si에 의한 아크 안정화 효과보다는 표면장력

증가에 의한 용적이행의 억제 효과가 지배적으로 작용하는 것으로 판단된다. 이는 Ar-CO₂ 혼합가스를 사용하는 마그 용접에 있어서 용적에 작용하는 주요한 힘들을 고찰함으로써 해석이 가능하리라 판단된다. 즉 용적에 작용하는 힘들중 용적이행을 촉진하는 대표적인 힘은 전자기력과 중력이며, 용적이행을 억제하는 힘은 와이어와 용적 사이에 형성되는 표면장력으로 보고되고 있다¹²⁾. 여기서 중력은 용적의 크기에 의하여 결정되며, 전자기력은 전류의 공급에 비례하고¹³⁾, 그의 방향은 보호가스의 종류에 의하여 결정되어 진다¹⁴⁾. 따라서 Si함량의 증가로 인하여 표면장력이 증가하면 용적이행을 억제하는 힘이 용적이행을 조장하는 힘의 합력(전자기력+중력)과의 균형으로 볼 때 용적이행을 위해서는 보다 큰 용적의 크기가 요구될 것이다. 따라서 용융금속의 표면장력이 증가하면 용적이행이 억제될 것이다. 단락이행 영역에서 아킹시간 및 단락시간이 증가하는 것은 바로 용적의 표면장력 증가가 직접적인 원인이라 판단된다. 특히 단락과 직전의 핀치현상이 Si함량에 따라 변화하는 것은 단락된 용융금속의 표면장력 차이에 기인한 것으로 생각된다. 즉 표면장력은 표면에 작용하는 힘에 대하여 표면을 최소로 유지하려는 작용을 하기 때문에, 단락된 용융금속의 표면장력이 작을수록 표면에 작용하는 전자기력(핀치력)에 의한 핀치현상은 뚜렷하게 되는 것이다. 또한 Fig.4에서 나타낸 바와 같이 스프레이이행 영역에서는 Si함량이 0.56%이상 첨가된 경우에 Si 함량에 따라 아크 전류/전압의 표준편차가 증가하는 것은 표면장력이 증가함에 따라 용적이행이 되지 못하고 성장한 용적이 용융지와의 순간단락 등과 같은 불안정한 아크 현상을 동반하기 때문이다. 한편 Si함량이 0.56%이하인 경우에는 Si함량이 증가함에 따라 아크 전류/전

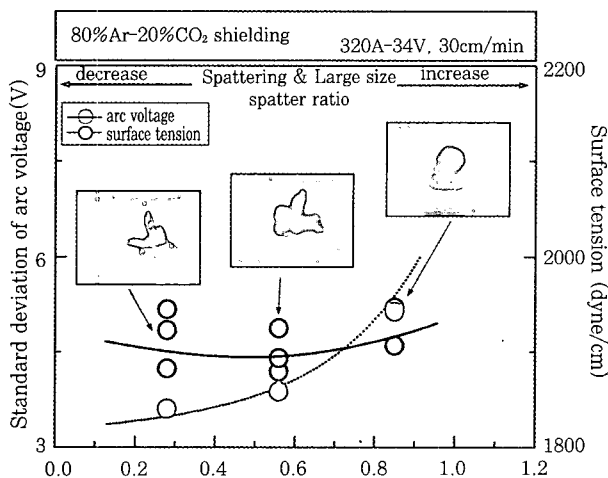


Fig. 4 Effect of Si content on arc stability and surface tension in 320A-34V

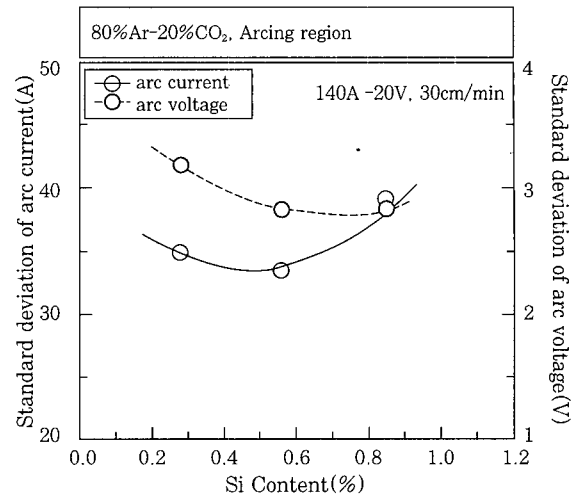


Fig. 5 Effect of Si content on arc stability in short circuit region

압의 표준편차가 다소 안정화되는 경향을 나타내고는 있으며, 이러한 Si에 의한 아크 안정화 효과는 Fig.5에서 나타낸 바와 같이 단락이행 영역의 아킹구간에서도 유사한 경향이 있음을 확인할 수 있다. 그러나 스패터 발생 측면에서는 Si에 의한 아크 안정화 효과보다는 표면장력의 증가 효과가 지배적으로 작용하기 때문에, Si함량이 증가할수록 종합적인 아크 안정성이 저하하고, 스패터 발생률은 물론 대립의 스패터 발생비율이 증가하는 것으로 판단된다.

4. 결 론

- 1) 단락이행 및 스프레이이행 영역에서 Si함량이 증가하면 스패터 발생률 및 대립의 스패터 발생비율이 증가하였다.
- 2) Si은 고온의 아크내에서 탈산원소로 작용하므로 Si함량이 증가하면 용융금속 내의 산소량이 감소하고 이로 인하여 표면장력이 증가하며, 특히 0.6%이상으로 첨가되면 표면장력이 현저히 증가하였다.
- 3) 용접 와이어중의 Si은 아크를 안정화시키며, 용융금속의 산소량을 감소시키며 따라 표면장력을 증가시킨다.
- 4) 단락이행 및 스프레이이행 영역에서 Si함량에 따라 스패터 발생률 및 대립의 스패터 발생비율이 증가하는 것은 용융금속의 표면장력이 증가함에 따라 용적이행이 억제되는 것이 주된 원인이며, Si에 의한 아크 안정화 효과보다는 Si함량에 따른 표면장력의 증가 효과가 지배적으로 작용하였기 때문이다.

참 고 문 헌

1. 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
 狀, 50-11 (1981), pp.35~50
2. 荒井敏夫, 山田忠昭, 管哲男 : 炭酸가스아크溶接に
 におけるスパッタの發生, 溶接學會論文集,
 1-2 (1983), pp.177~182
 3. 방국수, 안영호 : GMA 용접에 있어서 스패터 발
 생에 미치는 와이어 탈산원소의 영향, 대한용접학
 회지, 14-5 (1996), pp.145~150
 4. 안영호, 이종봉, 방국수, 엄동석 : CO₂용접시 스
 패터 발생에 미치는 Ti의 효과, 대한용접학회지,
 14-5 (1996), pp.106~pp.112
 5. 안영호, 이종봉, 엄동석 : MAG용접의 Arc현상에
 미치는 Si의 영향, 대한용접학회지, 16-6
 (1998), pp.52~58
 6. 안영호, 이종봉, 최원규, 엄동석 : MAG 용접의
 Spatter발생 및 Arc현상에 미치는 Si의 영향, 대
 한용접추계학술발표대회 강연개요집 (1998),
 pp.111~112
 7. 稻垣道夫 他 : 溶接加工, 誠文堂, (1971), pp.257
 ~259
 8. 안영호 : GMA용접의 용적이행현상에 대하여, 대
 한용접학회지, Vol.16, No.4 (1998), pp.36~38
 9. Classification of metal transfer, IIW, DOC.
 F-173-76 (1976)
 10. 방국수, 장웅성 : GMA용접에서 와이어 탈산원소
 손실 및 용접금속 산소 변화 연구, 대한용접학회
 지, Vol.16, No.2 (1998), pp.93~99
 11. G. S. Ershov, V. M. Bychev: Influence of
 gases on the surface tension of liquid iron
 and low alloy steel, Russian Metallurgy, 4
 (1975), pp.45~46
 12. J. H. Waszink, L. H. J. Graat:
 Experimental Investigation of the Forces
 Acting on a Drop of Weld Metal, Welding
 Journal, 4 (1983), pp.108s~116s
 13. J. C. Amson: Lorentz force in the molten
 tip of an arc electrode, BRIT.J., 16-4
 (1965), pp.1169~1179
 14. 益本功, 岡田明之 : 現代溶接技術大系 第7卷, 産報
 出版, (1970), pp44~49