

MAG용접의 스패터 발생 및 용적이행현상에 미치는 S의 영향

안영호* · 이종봉* · 최원규*

*포항제철기술연구소

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

Young-Ho An*, Jong-Bong Lee* and Won-Kyu Choi*

*POSCO Technical Research Laboratory, Pohang 790-785, Korea

Abstract

The effect of S 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 S content of wire. Sulfur addition in wire reduced surface tension of droplet and weld pool, and made arc more stable in MAG welding. With increasing S content, the spattering ratio and the ratio of large size spatter ($d \geq 1.0\text{mm}$) were reduced in short circuit transfer mode. In spray transfer mode, spattering ratio, however, was increased when sulfur was added more than 0.020wt.% because surface tension of droplets and weld pool was reduced too much even though arc stability was improved.

(Received December 29, 2000)

Key Words : MAG welding, Arc stability, Droplet transfer phenomena, Spatter, Spattering ratio, Arcing time, Short circuit time, Short circuit transfer, Spray transfer, Standard deviation of arc current, Standard deviation of arc voltage, Surface tension

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 용접재료의 화학성분 등에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다^{1,3)}.

GMA용접의 아크 안정성은 용접전원 및 용접시공조건 뿐만 아니라 용접재료의 화학성분에도 크게 영향을 받는 것으로 보고되고 있으며, 아크 안정성에는 용접재료의 화학성분 중 Si, Mn 및 Ti 등과 같은 탈산원소들 외에 S, Se 등과 같은 표면활성화 원소(surface active element) 등도 영향을 미치는 것으로 알려지고 있다²⁻¹⁰⁾. 특히 표면활성화 원소들은 고온의 아크 중에서 형성되는 용융금속의 표면장력에 영향을 미치

는 것으로 보고되고 있으며, 이로 인하여 용접중 용적이행 및 용융지 거동에 영향을 미치게 된다. 이러한 표면활성화 원소에 대한 연구는 GTA용접시 용입특성을 개선하기 위하여 Marangoni 효과^{4,5)}, 또한 Shinoda 등⁶⁾은 GMA용접시 표면활성화 원소(S+Se)는 단락이행 영역에 있어서 아크 안정성에 효과적이라 보고하고 있다. 본 저자도 CO₂용접시 용적이행 현상에 미치는 S의 효과와 MAG(metal active gas)용접에 있어서 단락이행 및 스프레이 이행영역에서 용적이행특성과 아크 안정성에 미치는 S함량의 정량적인 영향에 대해서는 보고하였다^{7,10)}. 특히 MAG용접에 있어서 S함량이 증가하면 단락이행 및 스프레이 이행 영역에서 아크 안정성이 향상되며, 특히 단락이행 과정중의 핀치현상(Pinching phenomena)이 현저함을 관찰하였다¹⁰⁾. 그러나 단락 및 스프레이 이행 영역에서 용접과정중 비산되는 스패터 발생 특성에 미치는 S의 아크 안정화 효과의 영향에 대한 정량적인 연구결과는 아직 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 MAG용접에서의 스패터 발생에 미치는 S의 영향을 상세히 검토하기 위하여 단락이행 영역 및 스프레이 이행 영역에서 S함량에 따른 스패터 발생률 및 스패터 입도별 비율을 평가하였다. 또한 S 함량에 따른 용융금속의 표면장력은 물론 스프레이 이행 영역에서의 용적 및 용융지의 거동을 관찰함으로써, 전보에서의 아크 안정성 결과와 스패터 발생 특성과의 상관성은 물론 용적이행 특성에 미치는 S의 영향을 아크 물리적인 관점에서 규명하고자 하였다.

2. 시험재 및 실험방법

2.1 시험재

시험재는 성분중 S함량의 영향을 평가할 수 있도록 진공용해하여 직경 1.2mm로 선선 및 구리도금한 용접재료를 사용하였다¹⁰⁾. 시험재의 기본성분계는 0.035%C-0.70%Si-1.35%Mn로 하고, S함량을 0.010, 0.019%, 0.025%로 하였으며 시험재의 S함량에 따라 S10, S19, S25로 표기하였다.

2.2 실험방법

스패터 발생 특성은 스패터 발생률과 스패터 입도별 발생비율로서 평가하였으며, 용접중 발생하는 스패터는 구리로 만들어진 반 실린더형 포집장치⁷⁾를 사용하였다. 스패터 포집을 위하여 길이 400, 폭 150, 두께 25mm인 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 $D_1(D < 0.25\text{mm})$, $D_2(0.25 \leq D < 1.0\text{mm})$ 및 $D_3(D \geq 1.0\text{mm})$ 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)

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

($i = 1, 2, 3$)

$D_1: D < 0.25$

$D_2: 0.25 \leq D < 1.0$

$D_3: D \geq 1.0$

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 용접방법은 80%Ar-20%CO₂가스를 사용하는 MAG용접으로 하였다. 시험 용접조건은 단락이행 현상이 나타나는 140A-20V 및 스프레이이행 현상이 나타나는 320A-34V로 하였으며, 용접속도는 30cm/min로 하였다.

Si함량에 따른 용융금속의 표면장력 변화를 평가하기 위하여 Inagaki 등¹¹⁾이 제안한 표면장력 측정법을 적용하였다. 시험재의 전용착금속을 테이퍼형(taper)으로 두께 2~5mm, 폭 40mm, 길이 200mm로 기계가공한 시험편을 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. 실험재료 및 실험방법

3.1 실험재료

Fig. 1은 140A-20V의 용접조건에서 S함량에 따른 스패터 발생특성의 변화를 스패터 발생률 및 직경 1.0mm 이상인 대립 스패터 발생비율로서 나타낸 것으로, 스패터 발생률 및 대립의 스패터 발생비율은 S함량에 따라 거의 직선적으로 감소하는 경향을 보이고 있다. 즉 S함량이 0.010%인 경우 스패터 발생률은 약 1.75%인데 비하여 0.025%첨가된 경우는 1.12%로서 S함량이 증가함에 따라 스패터 발생률은

약 40% 감소하였다. 이러한 S의 효과는 대립의 스패터 발생비율에서도 유사한 경향을 보이고 있으며, 다소 데이터의 편차는 있지만 0.025%로 S가 첨가된 경우에는 대립의 스패터가 발생치 않는 경우도 있다.

Fig. 2는 320A-34V의 용접조건에서 S함량에 따른 스패터 발생특성의 변화를 스패터 발생률 및 직경 1.0mm이상인 대립 스패터 발생비율로서 나타낸 것이다. 스패터 발생률 및 대립의 스패터 발생비율은 S함량이 일정량 이하 혹은 이상인 경우에 증가하는 경향을 보이고 있다. 즉 스패터 발생률은 S함량이 0.019%인 경우에는 약 0.6% 인데 비하여, S함량이 0.010%, 0.025%인 경우는 각각 스패터 발생률이 약 1.0% 및 1.30%로 증가하였다. 대립의 스패터 발생율도 S함량이 0.019%인 경우 약 2%인 데 비하여 S함량이 0.010% 및 0.025%인 경우는 약 10% 정

도 증가하였다.

이와 같이 MAG용접에 있어서 S함량에 따른 스패터 발생 특성은 용접조건 특히 용적이행 형태에 따라 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 이에 대하여는 표면장력의 변화, 용적이행 현상 및 아크 안정성 측면에서 상세히 검토하도록 하겠다.

3.2 스패터 발생 특성과 아크 안정성과의 상관성

GMA용접용 와이어내 S함량에 따른 스패터 발생 특성은 용적이행 형태에 따라 큰 차이를 보였다. 즉 140A의 저전류 용접조건인 단락이행 영역에서는 S함량이 증가하면 스패터 발생량이 저하되는 경향을 보이나, 320A의 대전류 용접조건인 스프레이 이행영역에서는 스패터 발생이 저하되는 S함량의 범위가 존재하였다. 이와 같은 스패터 발생특성에 미치는 S함량의 영향과 전보¹⁰⁾에서 발표한 S에 의한 아크 안정화 효과와의 상관성을 검토코자 한다.

Fig. 3은 전보¹⁰⁾에서 보고한 140A-20V에서의 S함량에 따른 단락과괴후 재아크시의 최대전류 및 용적이행 주파수의 변화를 나타낸 것이다. S함량이 증가함에 따라 단락과괴시의 최대전류는 감소하는 경향을 보이며, 용적이행 주파수는 반대로 증가하는 경향을 보이고 있다. 단락이행의 용접조건에서 스패터 발생은 이행되는 용적의 크기와 단락 파괴후 재아크의 안정성에 크게 영향을 받는 것으로 보고되고 있다¹²⁾. S함량이 증가함에 따라 용적이행 주파수가 증가한다는 것은 용적의 성장과 관계있는 아킹시간의 감소를 뜻하므로 S함량의 증가는 곧 이행되는 용적의 크기가 작아지는 것을 나타내며, 아울러 S함량이 증가함에 따른 재아크

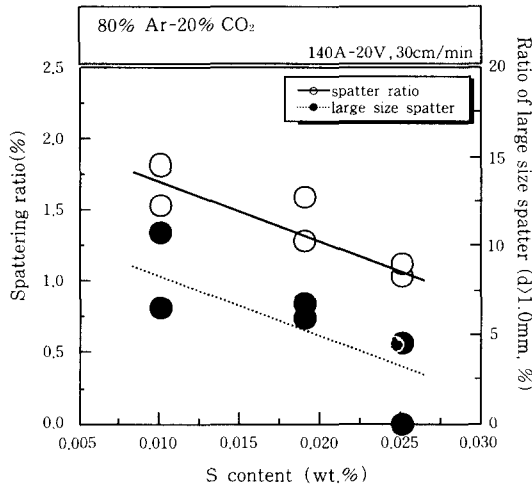


Fig. 1 Effect of sulfur content on spattering characteristics in 140A-20V

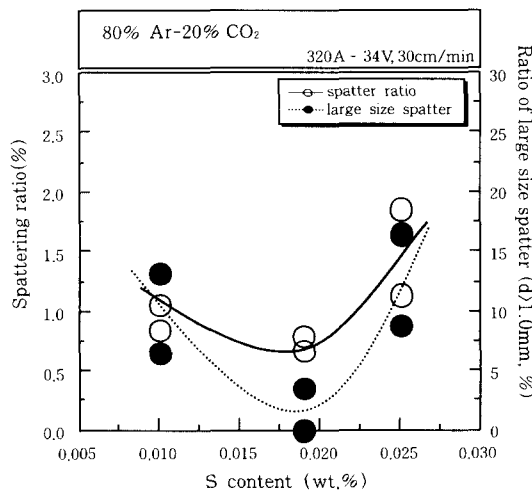


Fig. 2 Effect of sulfur content on spattering characteristics in 320A-34V

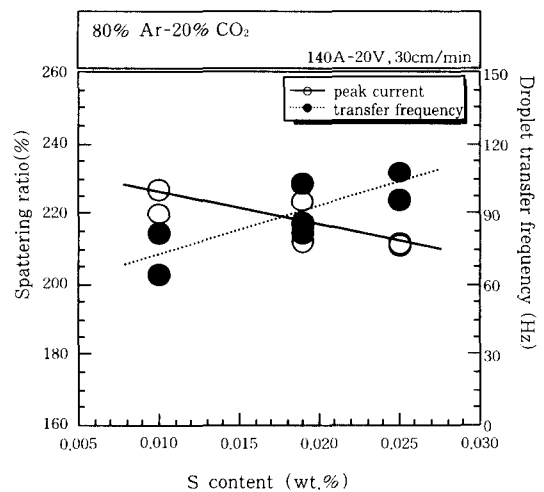


Fig. 3 Effect of sulfur content on droplet transfer in 140A-20V

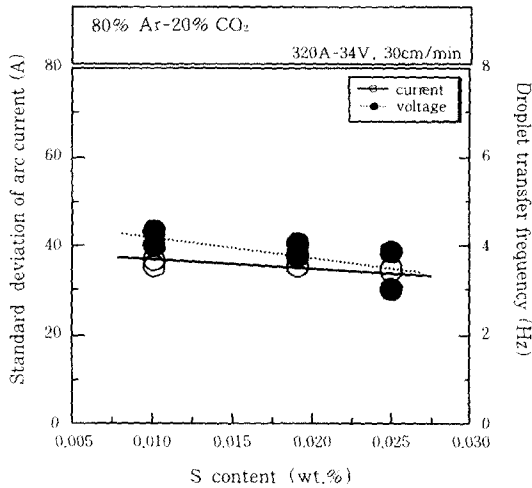


Fig. 4 Effect of sulfur content on arc fluctuation in 320A-34V

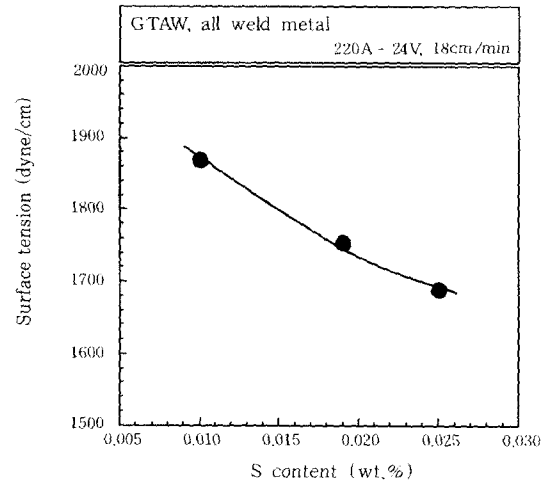


Fig. 5 Effect of sulfur content on surface tension in 320A-34V

시 최대전류값의 감소는 아크력에 영향을 미치고 궁극적으로 스패터 발생의 구동력을 감소시킴에 따라 재아크시의 안정성이 개선됨을 나타낸다고 할 수 있다. 따라서 단락이행 영역에서 S함량이 증가하면 스패터 발생 특성이 개선되는 원인은 S함량이 증가함에 따라 아크의 안정화가 가능하였기 때문으로 판단된다.

Fig. 4는 전보¹⁰⁾에서 보고한 320A-34V 용접조건에서 S함량에 따른 아크 안정성의 변화로서 아크 전류 및 아크 전압 표준편차의 변화를 나타낸 것이다. S함량이 증가하면 아크 전류 및 아크 전압의 표준편차는 현저하지는 않지만 감소하는 경향을 보이고 있어, S함량이 증가하면 아크의 안정화 효과가 있음을 알 수 있다. 이러한 아크 안정화 효과와 전술한 스패터 발생 특성을 검토하면, S함량이 0.010%로부터 0.019%로 증가함에 따라 스패터 발생 특성이 개선되는 것은 아크 안정화 효과로 설명이 가능하지만, 그 이상으로 S함량이 증가하면 아크 안정성과 스패터 발생 특성간에는 상관성을 보이지 않고 있다. 이에 대하여는 S함량에 따른 표면장력의 변화와 용적이행 현상의 관찰을 통하여 검토토록 하였다.

3.3 표면장력에 미치는 S의 영향

Fig. 5는 S함량에 따른 표면장력의 변화를 나타낸 것이다. S함량이 증가하면 표면장력은 현저히 감소하는 경향을 보이고 있다. 즉 S함량이 0.010%인 경우는 표면장력이 1865dyne/cm이지만 S함량이 0.025%로 증가하면 약 1690dyne/cm로서 0.010%S재에 비하여 170dyne/cm 정도의 표면장력이 감소하였다. 이와 같이 S함량에 따른 용융금속의 표면장력 감소는

표면활성화 원소로서 S가 작용하기 때문이며, 이러한 경향은 B.J.Keene 등¹⁰⁾의 연구결과와도 일치하고 있다.

3.4 스패터 발생 현상에 미치는 S의 영향

S함량에 따른 스패터 발생 특성은 용적이행 형태에 따라 차이를 보였으나, 아크 안정성은 용적이행 형태에 관계없이 S함량이 증가할수록 개선되었다. 즉 저전류 영역의 단락이행으로 용접이 이루어지는 경우에는 S함량의 증가에 따른 아크 안정성 개선의 효과가 직접적으로 스패터 발생에 영향을 미치기 때문에, S함량이 증가할수록 스패터 발생률 및 대립의 스패터 발생비율이 개선되었다. 반면에 대전류 영역의 스프레이이행으로 용접이 이루어지는 경우에는 S함량에 따른 아크 안정성 개선효과와 스패터 발생과는 상관성을 나타내지 않았다. 이와 같이 아크 안정성 및 스패터 발생 특성에 미치는 S의 효과는 S에 의한 표면장력의 감소와 직접적인 상관성이 있으리라 생각된다.

Fig. 6은 140A-22V의 단락이행 영역에서 S함량에 따른 스패터 발생률과 표면장력과의 상관성을 나타낸 것이다. 전보에서 언급한 바와 같이 단락이행 과정은 용적이 성장하는 아킹과 용적이행이 일어나는 단락으로 크게 구분되어지며, 표면장력이 감소할수록 용적의 처짐현상이 촉진되어 아킹시간이 감소하고 이로 인하여 와이어 선단에 형성되는 용적의 크기가 감소하며, 아울러 용적이행 주파수가 증가하게 된다. 이러한 효과는 단락에도 영향을 미쳐 단락시간이 감소하고 이는 곧 단락과피후 재아크때 작용하는 아크전류를 감소시켜 재아크시의 안정성을 확보케한다. 따라서 단락이행

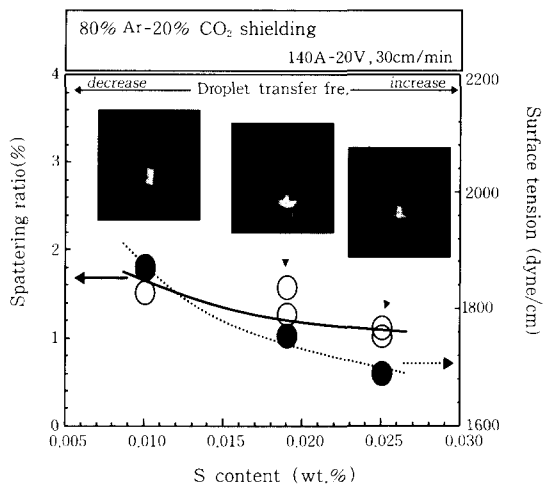


Fig. 6 Effect of sulfur content on spatter generation in 140A-20V

영역에서 S함량이 증가함에 따라 스패터 발생률이 감소하는 것은 S함량에 따른 표면장력의 감소에 의한 용적이행 현상의 안정화에 기인한 것으로 판단된다.

Fig. 7은 320A-34V의 스프레이이행 영역에서 S함량에 따른 스패터 발생률과 표면장력과의 상관성을 나타낸 것이다. 표면장력과 스패터 발생률과는 일치하지 않음을 보이고 있다. 즉 S함량이 0.010%로부터 0.019%로 증가하면 스패터 발생률이 감소하여 표면장력과 상관성이 인식되지만, 그이상으로 S함량이 증가하면 오히려 스패터 발생률은 현저히 증가하게 된다. 한편 전보에서 기술한 바와 같이 아크 안정성은 S함량이 증가할수록 현저하지는 않지만 개선되는 경향을 보이고 있어, 아크 안정성과 표면장력은 상관성을 나타내지만, 아크 안정성과 스패터 발생률간에는 상관성이 없음을 알았다. 따라서 이러한 원인을 규명하기

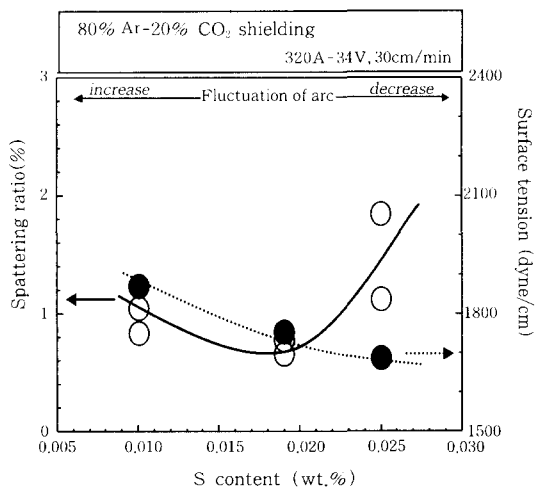


Fig. 7 Effect of sulfur content on spattering phenomena in 320A-34V

위하여 용적이행현상을 관찰하였다. Photo. 1은 320A-34V의 용접조건에서 각 시험재의 전형적인 스패터 발생현상을 나타낸 것이다. 스패터 발생현상은 S 함량에 따라 큰 차이를 보이고 있다. 즉 S 함량이 0.019%인 경우는 용융지 및 용적으로부터 비산되는 미세한 입도의 스패터가 발생하는 경향을 보이고 있으나, S함량이 0.010% 혹은 0.025%인 경우는 ㉔, ㉕ 및 ㉖와 같이 대립의 스패터가 발생하는 경향이 있으며, 특히 이러한 현상은 S함량이 0.025%첨가된 S25 재가 현저함을 알았다. Photo.2는 S10재의 ㉖ 스패터 발생현상을 Type I로 하고, 연속적인 현상을 관찰한 것이다. 0ms의 사진으로부터 가스팽창 현상에 의하여 큰 용적이 아크 상부로 부상하고 있음을 알 수 있으며, 이러한 부상에 의하여 와이어로부터 분리되어 용융지로 이행되지 못하고, 스패터로 비산됨(9ms)을 알 수 있다. 따라서 이 경우는 비교적 큰 표면장력으로 인하여 와이어로부터 용적의 이탈이 원활치 못하기 때문에 용적이 지나치게 크게 성장한 것이 주요한 원인으로 판단된다. 한편 Photo.3은 S25재의 ㉔의 스패터 발생현상을 Type II로 하고, ㉕의 현상을 Type III로 하여 연속적인 현상을 관찰한 것이다. 스패터 발생 원인은 Type II와 Type III의 경우에 차이를 알 수 있다. 즉 Type II의 경우는 순간단락 현상에 기인한 것이고, Type III는 용융지로부터의 현저한 가

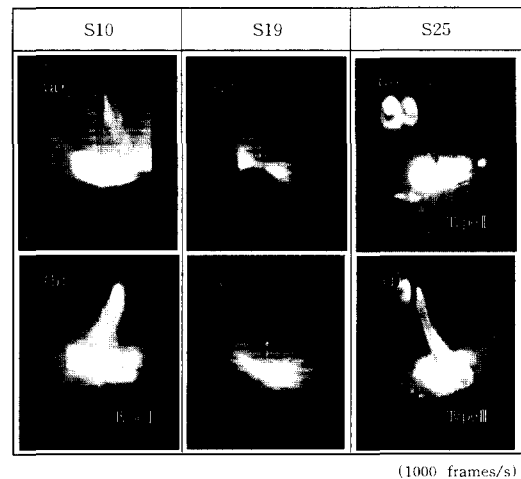


Photo. 1 Spattering phenomena in 320A-34V

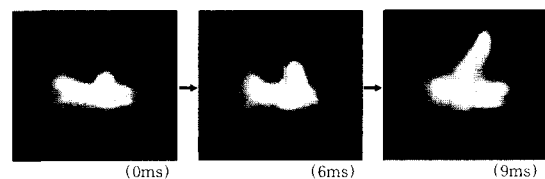


Photo. 2 Type I spattering phenomena of S10 wire in 320A-34V

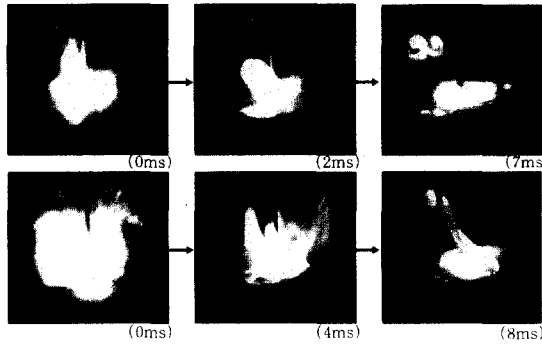


Photo. 3 Type II and type III spattering phenomena of S25 wire in 320A-34V

스팽창에 기인한 것이다. 그러나 스패터가 발생하는 곳은 두 경우 모두 용융지로부터 발생하고 있음을 알 수 있다. 이는 0.025% S에 의하여 용융금속의 표면장력이 지나치게 감소하였기 때문이라 판단된다. 즉 용접현상중 순간단락 및 가스팽창과 같은 불안정 상태에서 순간적으로 강한 아크력이나 가스팽창 압력(이후 가스압력)이 용적이행 용융지에 작용함에 따라, 이때 이러한 힘에 대한 저항력의 역할을 하는 용융금속의 표면에너지가 감소하면 용적이행 용융지로부터 스패터가 현저하게 발생되리라 생각된다. 따라서 320A-34V의 용접조건에서 S함량이 0.019% 이상으로 첨가된 경우, 아크 안정성 효과와 스패터 발생 특성간에 상관성이 나타나지 않는 원인은 용융금속 표면 에너지가 지나치게 감소하여 불안정한 용접현상(순간 단락, 가스팽창 등)에 기인한 강한 아크력/가스압력에 대한 저항성이 저하하여, 스패터 발생이 촉진되기 때문이다.

4. 결 론

1) 단락이행 영역에서 S함량이 증가하면 스패터 발생률은 물론 직경 1.0mm 이상인 대립의 스패터 발생 비율이 감소하였다. 한편 스프레이이행 영역에서는 최적의 스패터 발생특성을 나타내는 S함량이 존재하고 그 이하 및 그 이상으로 S함량이 첨가되면 스패터 발생률 및 대립의 스패터 발생비율이 증가하였다.

2) S함량의 증가는 용융금속의 표면장력을 거의 직선적으로 저하시킴에 따라 단락이행 영역에서 아크시간의 감소 및 스프레이이행 영역에서의 아크 특성을

개선하였다.

3) 단락이행 영역에서 S함량이 증가함에 따라 스패터 발생 특성이 개선되는 것은 표면장력의 감소에 의한 아크 특성 및 용적이행 현상이 안정화되었기 때문이다.

4) 스프레이이행 영역에서 S함량이 0.019% 이상으로 첨가되면 스패터 발생현상이 현저한 것은 용접과정중의 순간단락과 가스 팽창 등과 같은 불안정한 아크 현상에 의한 강한 아크력, 가스압력 등에 대한 용융금속의 표면에너지가 감소로 인하여 용융지로부터 스패터 발생이 촉진되기 때문이다.

참 고 문 헌

1. Tetsuo Suga : Recent Progress of MAG Welding Material for Automation, *Welding in the World*, 34(1984) 301~308
2. 山内信幸, 阿草一男 : 가스-스틸 아크 용접 현상 및 그 미세 요소의 영향에 관한 일본의 연구, *溶接學會誌*, 50-11(1981) 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) 393~403
4. B.Pollard : The effects of minor elements on the welding characteristics of stainless steel, *Welding Jr.*, 78-9(1988) 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) 69s~76s
6. T.Shinoda, H.Nishikawa : Monitoring and Signal Processing of Short Circuiting Metal Transfer of Gas Metal Active Gas Welding Process, 7th Int. Conf. *Joining of Materials*(1995) 558~565
7. 안영호, 방국수, 이종봉, 신병현 : GMAW 용적이행에 미치는 Ca 및 S의 영향, *대한용접학회 추계 학술발표개요집*(1992) 132~134
8. 안영호, 이종봉, 방국수, 엄동석 : CO₂용접시 스패터 발생에 미치는 Ti의 효과, *대한용접학회지*, 14-5(1996) 106~112
9. 안영호, 이종봉, 엄동석 : CO₂용접시 Arc 현상에 미치는 Ti의 효과, *대한용접학회 춘계 학술발표개요집*(1997) 182~184
10. 안영호, 이종봉, 엄동석 : MAG용접의 Arc안정성에 미치는 S의 효과, *대한용접학회지*, 17-1(1999) 55~61
11. 稲垣道夫 他 : 溶接加工, 誠文堂(1971) 257~259
12. 三田常夫 : スパッタはどこまで防止できるか?(1), *溶接學會誌*, 59-8(1990) 12~16