

研究論文

GMA용접에서 와이어 탈산원소 손실 및 용접금속 산소 변화 연구

方國守* · 張雄成**

A Study on the Variation of Elements Loss of Wires and Oxygen Content of Weld Metal in GMAW

Kook-soo Bang* and Woong-seong Chang**

Key Words : GMAW (가스 금속 아크용접), Wire (와이어), Element Loss (손실률),
Deoxidation (탈산), Oxygen Content (산소량), Weld Metal (용접금속),
Impact toughness (충격인성)

Abstract

The effects of welding conditions of gas metal arc welding on the elements loss of solid wire, oxygen content and impact toughness of weld metals were studied. Deoxidizing elements loss was increased with increase of arc voltage in both short-circuit transfer mode and globular transfer mode. It is believed that increase of arc voltage results in increase of reaction time between elements in the droplet and surrounding gas at the end of wire and in the arc column. Based on the thermodynamic equilibrium model, the oxygen content of weld metal can be predicted with the content of silicon and manganese as following: $[\%O] = K([\%Si][\%Mn])^{-0.25}$, $K = -15518/T + 6.01$. The equilibrium temperature was dependent on shielding gas, and it was 1870°C for CO₂ gas and 1800°C for 20%CO₂-80%Ar gas. The oxygen content of weld metal which shows maximum impact toughness was varied with deoxidizing alloy system of wires, 0.041 wt% for Si-Mn type wire and 0.026 wt% for Si-Mn-Ti type wire.

※ 1997년 12월 1일 접수

*정회원, 부경대학교 공과대학 생산가공공학과

**정회원, 포항산업과학연구원 집합가공연구팀

1. 서 론

가스 금속 아크용접 (GMAW)은 자동화가 용이하고 용접부 품질이 우수하여 그 적용이 날로 증대되고 있는 용접법 중의 하나이다. 이러한 GMAW에 사용되는 와이어는 용접과정 중 작업성이 우수하고 용고 후 용접금속의 기계적 성질이 소정의 요구치를 만족시키도록 제조되어야 한다. 용접작업성, 특히 스패터 발생에 미치는 와이어 성분의 영향은 Masumoto 등의¹⁾ 연구를 위시하여 많은 연구가 행하여져 왔다. 荒井 등은²⁾ 와이어 중 탈산원소가 스패터 발생에 미치는 영향을 연구하여 탄소함량이 일정한 경우 Mn, Si, Ti가 증가함에 따라 스패터가 감소한다고 하였으며, 이러한 효과는 방과안의³⁾ 실험결과에서도 확인되고 있다.

와이어 중 탈산원소는 이러한 스패터 발생뿐만 아니라 당연히 용접금속 탈산에도 영향을 미친다. 현재 가장 널리 사용되는 Si-Mn계 솔리드 와이어 (solid wire)에 의한 용접금속 탈산에 관한 연구는 關口에⁴⁾ 의하여 깊이 있게 연구되었다. 그는 Kober와 Oelsen이⁵⁾ 연구한 FeO-MnO-SiO₂ 슬래그와 용융철 사이의 평형을 기초로 하여, 용접금속 탈산이 충분히 일어나기 위하여서는 SiO₂ 불포화의 FeO-MnO-SiO₂ 용액이 형성하게끔 용융철의 Mn과 Si 농도를 조정하여야 한다고 하였다. 이러한 용융지에서의 탈산은 용고 후 용접금속 충격인성에 큰 영향을 미쳐, 일반적으로 산소의 저하와

함께 충격인성이 증가하다가 다시 저하한다고 알려져 있다^{6,7)}. 따라서 요구되는 용접금속의 충격인성을 얻기 위하여서는 와이어 중 탈산원소의 거동을 정확히 이해하는 것이 필수적이다.

본 연구는 스패터 발생이 없고 용접금속 인성이 우수한 GMAW 와이어 제조를 위한 연구의 일환으로, 용접조건이 와이어의 탈산원소 손실 및 용접금속 산소에 미치는 영향을 파악하고 그에 따른 용접금속 충격인성 변화를 조사하였다.

2. 실험방법

실험에 사용한 와이어는 직경 1.2mm의 솔리드 와이어로 Table 1에 습식으로 분석한 화학조성을 나타내었다. 와이어 1~5번은 탈산원소로 Si, Mn, Ti가 첨가되어 있는 반면, 6~9번은 단순히 Si, Mn만 첨가되어 있다. Cu는 와이어에 첨가된 원소가 아니라 동 도금된 그대로의 상태에서 분석한 때문이다. 용접조건에 따른 탈산원소 손실은 Si-Mn-Ti계인 1번 와이어를 사용하여 100%CO₂분위기에서 30cm/min으로 용접한 후 와이어에서의 함량과 용접금속에서의 함량으로 비교하였다. 이때 용접조건은 180A-28~32V, 300A-36~40V이다. 용접금속의 성분분석은 최종 패스 (pass)의 용접금속에서 시편을 채취하여 습식으로 분석하였다. 자체 제작한 전류/전압 측정장치를 이용하여 각 용접조건에서 용접전류 및 아크전압 파형을 동시

Table 1. Chemical composition of solid wires used (wt-%)

	C	Si	Mn	P	S	Ti	Mo	Cu
1	0.07	0.86	2.09	0.012	0.015	0.13	0.32	0.20
2	0.04	0.88	2.02	0.012	0.009	0.14	0.31	0.17
3	0.06	0.74	1.80	0.013	0.010	0.14	0.30	0.17
4	0.09	0.59	1.13	0.011	0.008	0.14	-	0.16
5	0.06	0.79	1.42	0.009	0.013	0.19	-	0.22
6	0.08	0.62	1.08	0.011	0.008	-	-	0.29
7	0.08	0.84	1.47	0.009	0.016	-	-	0.13
8	0.08	0.76	1.36	0.010	0.009	-	-	0.21
9	0.09	0.46	0.91	0.011	0.008	-	-	0.23

에 계측하였다.

용접금속에서 탈산원소와 산소의 상관성은 Si-Mn계인 6~9번 와이어를 사용하여 100%CO₂와 20%CO₂-80%Ar 분위기에서 용접한 다음 최종 패스의 용접금속 성분을 습식분석하여 조사하였다. 이때 용접조건은 180A-22V-30cm/min로 일정하게 유지하였다. 용접금속 산소에 따른 충격인성 변화는 용접전류 혹은 가스 조성을 변경하여 용접한 후 용접금속 중앙부에 V-notch를 가공하여 0°C에서 Charpy 충격시험을 행하여 구하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 용접금속 탈산

용접금속 산소량은 용접와이어 중 탈산원소인 Si, Mn, Ti 등에 영향을 받게 된다. 따라서 Si-Mn-Ti계 와이어인 1번 와이어를 사용하여 이러한 탈산원소가 용접조건 (아크전압과 용접전류)에 따라 어떻게 변하는지를 살펴보았다. Fig. 1과 2에 용접전류를 180A와 300A로 각각 일정하게 한 경우, 아크전압에 따른 탈산원소들의 손실률을 나타내었다. 용접 전류/전압 측정장치를 이용하여 각 용접전류에서 용적이행 형태를 조사한 결과 180A의 경우 단락이행을, 300A의 경우 입상이행을 나타내었다. 그림에서 보는바와 같이 180A의 경우 Si가 29~50 wt% (이하 성분은 모두 wt%), Mn이 35~50%, Ti이 82~88%의 산화손실률, 300A의 경우 Si가 31~55%, Mn이 35~53%, Ti이 84~88%의

산화손실률 나타내어 용적이행 형태에 상관없이 Ti의 산화손실률이 가장 크고 Si와 Mn은 비슷한 산화손실률을 보인다. 한편 아크전압 증가에 따라서는 양 용적이행 형태 모두에서 손실률이 증가하는데, 특히 Si와 Mn의 증가 경향이 크다. 이러한 점으로부터 셋 중 가장 강력한 탈산원소인 Ti이 먼저 대부분 산화 손실된 다음 Si와 Mn이 산화 손실됨을 나타낸다. 용접조건에 따른 이러한 탈산원소 손실률의 차이는 당연히 용접금속 산소의 차이를 나타낼 것이다. Fig. 3에 용접조건 변화에 따른 용접금속 산소의 변화를 나타내었다. 용적이행 형태와 상관없이 아크전압이 증가할수록 산소가 증가하여 180A의 경우 0.052~0.062%, 300A의 경우 0.047~0.056%를 나타내고 있다.

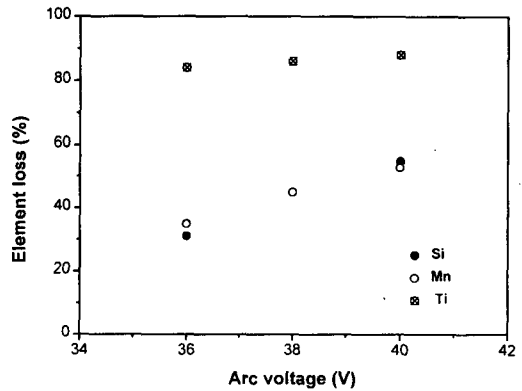


Fig. 2 Variation of element loss with arc voltage (welding current: 300A).

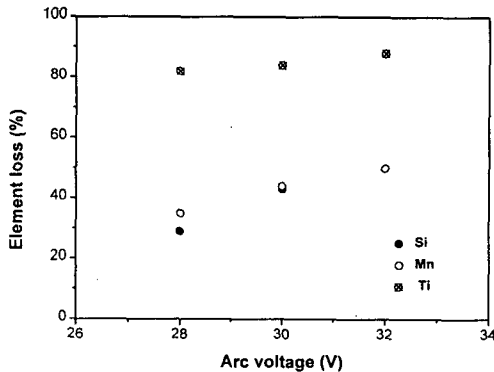


Fig. 1 Variation of element loss with arc voltage (welding current: 180A).

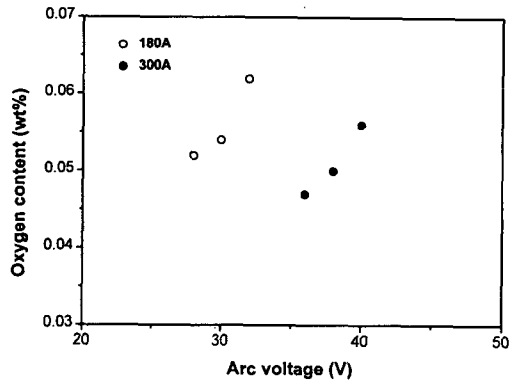
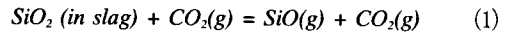


Fig. 3 Variation of oxygen content of weld metal with arc voltage.

아크전압 증가는 아크길이를 증대시키기 때문에 탈산원소 손실률 혹은 용접금속 산소의 변화를 아크길이 변화의 영향으로 해석해 보았다. 먼저 단락이행의 경우, 아크전압을 증가하여 아크길이를 증대시키면 단위시간 당 단락이행 회수가 감소하는 결과를 나타낼 것이다. Fig. 4에 용접전류 180A에서 아크전압에 따른 단락회수 변화를 나타내었다. 이때 단락회수는 10초 동안의 용접 중 아크가 규칙적으로 단락되는 것만으로 하였다. 예측한 바와 같이 아크전압의 증가에 따라 단락회수는 저하하여, 28V에서 32V로 증가하면 단락회수가 219에서 65로 감소한다. Fig. 1에 나타낸 탈산원소 손실률을 이러한 단락회수 변화로 나타내면 Fig. 5와 같다. 그림에서 보는바와 같이 단락회수의 증가에 따라 손

실률이 감소하고 있다. 이러한 결과는 와이어 선단에서 용적 중의 탈산원소가 주위 gas와 반응하고 있음을 의미한다. 즉 단락회수가 증가하여 용적이행이 빨라지면 용적과 주위 gas와의 반응하는 시간이 짧아져 손실률이 감소한다고 생각된다. 이러한 경향은 Smith⁸⁾, Bentley의⁹⁾ 실험결과에서도 보여지고 있다. Grong과 Christensen은¹⁰⁾ 와이어 선단에서의 용적을 급랭시킴에 의하여 용적 중 탈산원소의 손실을 조사하여, Si는 아래 식 (1)과 같은 반응에 의하여 가스 상태로 손실이 일어나며 Mn은 증발에 의하여 감소 한다고 하였다.



한편 입상이행 형태에서 아크전압 증가에 따른 탈산원소 손실률 증가는, 탈산원소가 와이어 선단에서뿐만 아니라 아크기둥 (arc column)을 통과하는 동안에도 주위 gas와 반응함을 나타낸다. 즉 아크전압 증가는 아크길이의 증대를 나타내고, 그 결과 용적이 와이어 선단으로부터 용융지에 도달하는데 걸리는 시간, 즉 반응시간이 길어져 손실률이 증가한다고 생각된다. 이러한 결과로부터 용접 와이어 중 탈산원소의 산화손실은 용융지에서뿐만 아니라 와이어 선단 및 아크기둥을 통과하는 동안에도 발생함을 알 수 있다.

용융지에서 탈산원소는 용해된 산소와 반응하여 산화물을 형성하고, 이들은 용융지 표면으로 부상 분리되어 슬래그로 제거된다. Grong 등에¹¹⁾ 따르면 용융지에서 형성된 산화물 중 아크 바로 밑의 고온 영역에서 형성된 것은 큰 대류작용으로 인하여 부상분리가 계속적으로 일어나, 그 주위의 비교적 저온 영역에서 형성된 것은 부상 분리되지 못하고 잔존하여 최종적인 용접금속 산소량은 이러한 저온 영역에서의 탈산원소와 산화물 사이의 열역학적 평형에 의하여 결정된다고 하였다. 본 실험에서는 이러한 열역학적 평형 모델을 이용하여 용접금속 탈산원소와 산소의 상관성을 예측하여 보았다. Fig. 6과 7에 Si-Mn계 와이어인 6~9번 와이어를 사용하여 100%CO₂와 20%CO₂-80%Ar 분위기에서 각각 용접한 경우 용접금속의 Si와 Mn에 따른 산소의 변화를 나타내었다. 분위기에 상관없이 용접금속 중 Mn과 Si가 증가할수록 산소는 저하하며, 100% CO₂ 분위기 보다 혼합가스 분위기에서

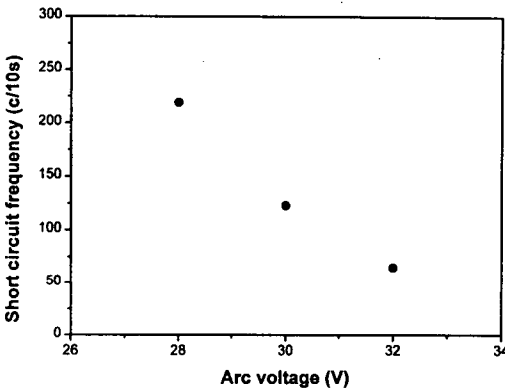


Fig. 4 Variation of short-circuit frequency with arc voltage.

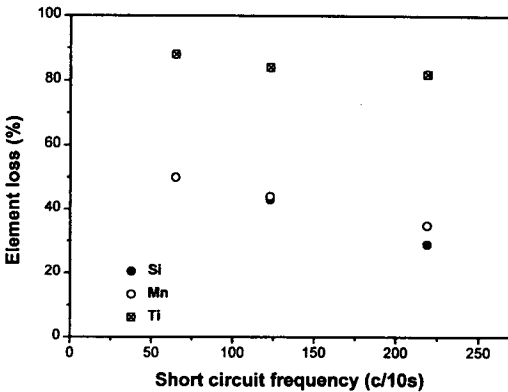


Fig. 5 Variation of element losses with short-circuit frequency.

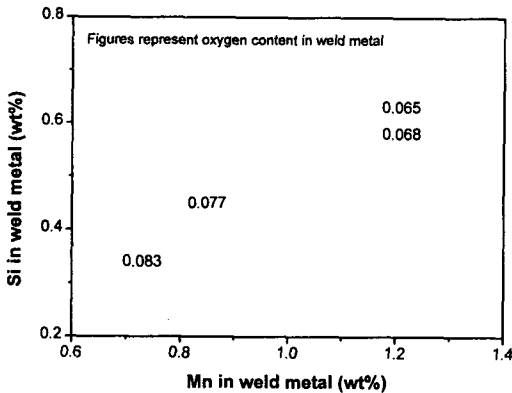


Fig. 6 Variation of oxygen content with manganese and silicon content in weld metal (shielding gas: 100%CO₂).

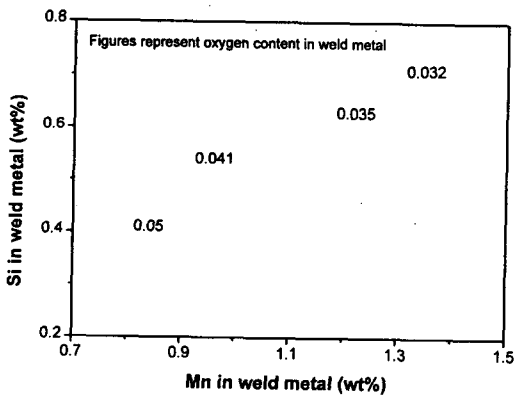
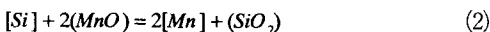


Fig. 7 Variation of oxygen content with manganese and silicon content in weld metal (shielding gas: 20%CO₂-80%Ar).

보다 낮은 값을 나타내고 있다. Grong의 모델에 따르면¹¹⁾ 용융지에서 탈산반응에 의하여 형성하는 산화물이 FeO가 거의 없는 manganese silicate라고 하면 탈산원소인 Si, Mn과 산소 사이에는 다음 식 (2)와 같은 반응이 일어난다. 이때 형성된 manganese silicate가 미포화 상태이면 SiO₂의 활동도가 낮아져 탈산반응이 계속적으로 일어난다.



따라서 탈산반응의 정도, 즉 용접금속 산소는 manganese silicate 중의 SiO₂ 활동도에 의하여 지

배된다. 이때 Si와 O에 의한 SiO₂ 형성반응은 다음 식 (3)과 같이 쓸 수 있으며 그 때 온도에 따른 평형상수 K₃는 식 (4)와 같다. 식 (4)에서 보느냐와



$$K_3 = a_{SiO_2} / ([\%Si][\%O]^2) \quad (4)$$

같이 탈산원소에 따른 SiO₂ 활동도 변화만 알면 어떤 온도에서의 평형산소를 계산할 수 있다. 이러한 관계는 Walsh 등의¹²⁾ 실험결과를 이용할 수 있다. 즉 Fe-Mn-Si-O계에 있어서 탈산 생성물 중 SiO₂ 활동도는 다음 식 (5)와 같이 나타내어진다. 따라서 식 (4)와 (5)를 결합하면 Mn과 Si에 따른 평형산소를 나타내는 다음식 (6)을 얻을 수 있다.

$$a_{SiO_2} = K_5([\%Mn]/[\%Si])^{-0.5} \quad (5)$$

이때 평형상수 K₆은 (K₅/K₃)^{0.5}로, 다음 식 (7)과 같이 주어진다.

$$[\%O] = K_6([\%Si][\%Mn])^{-0.25} \quad (6)$$

$$\log K_6 = \frac{-15518}{T} + 6.01 \quad (7)$$

Fig. 8에 Fig. 6과 7에 나타낸 각 용접 분위기에서 용접금속 중 산소 변화를 ((%Si)(%Mn))^{-0.25}에 따라 다시 나타내었다. 그림에서 실선은 상기 식 (6)에 의한 1800°C와 1870°C에서의 산소변화를 나타낸 것이다. 100%CO₂ 분위기에서는 1870°C에서의 평형산소와, 그리고 20%CO₂-80%Ar 분위기에서는 1800°C에서의 평형산소와 좋은 상관관계를 나타내고 있다. 따라서 100%CO₂ 용접의 경우에는 용융지에서 형성된 산화물 중 활발한 대류작용으로 부상 분리되는 것과 그렇지 못하는 것과의 경계온도는 1870°C인 반면, 20%CO₂-80%Ar 용접의 경우에는 그 온도가 1800°C임을 알 수 있다. 따라서 동일한 탈산능력, 즉 동일한 ((%Si)(%Mn))^{-0.25}에도 불구하고 100%CO₂ 용접의 경우가 20%CO₂-80%Ar 용접의 경우보다 높은 산소를 나타내고 있다.

3.2 용접금속 인성

용융금속 응고과정 중 부상 분리되지 않고 잔존

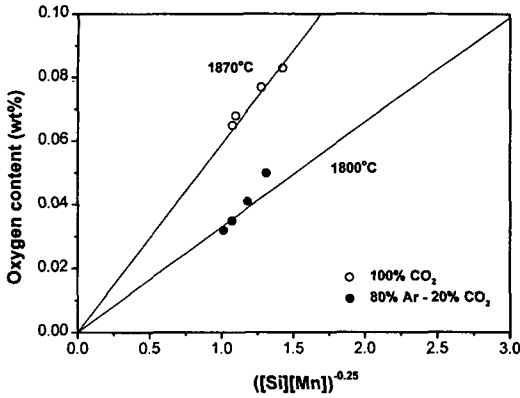


Fig. 8 Relationship between weld metal oxygen content and deoxidation parameter ($([Si][Mn])^{0.25}$).

하는 산화물은 고상변태 과정 중 페라이트변태의 핵으로 작용하여 용접금속 조직에 큰 영향을 미친다. 일반적으로 산화물이 너무 많으면 고온에서 페라이트가 다량 석출하여 조대한 페라이트가 되기 쉽고, 너무 적으면 조대한 베이나이트가 되기 쉽다. 이러한 점은 용접금속의 인성이 산소의 저하와 함께 증가하다가 재차 저하한다는 실험결과로부터도 확인할 수 있다^{6,7)}. 본 실험에서도 이러한 결과를 확인하기 위하여 용접금속 산소에 따른 충격인성 변화를 조사하였다.

Fig. 9에 Si-Mn계 와이어로 용접한 경우의 용접금속 산소변화에 따른 0°C에 있어서 충격인성 변화를 나타내었다. 그림에서 보는바와 같이 산소가 저하함에 따라 충격인성은 증가하여 0.041%에서 최대치 (160J)를 나타낸 후 재차 감소하고 있다. Fig. 10에는 Si-Mn-Ti계 와이어로 용접한 경우의 결과를 나타내었다. 그림 중에는 伊藤 등의¹³⁾ 실험결과를 함께 나타내었다. 그들은 혼합가스 중 CO₂가스의 비율을 변경시키며 대전류 (800A)의 GMA용접을 행하여 단층용접으로 용접금속을 얻었다. 용접조건의 차이에도 불구하고 약 0.03~0.06%의 산소범위에서 본 실험결과와 거의 비슷한 충격인성을 나타내고 있다. Si-Mn계 와이어로 용접한 경우와 동일하게 산소의 저하와 함께 충격인성은 저하하다가 약 0.026%에서 최대치 (170J)를 나타낸 후 재차 감소하고 있다. 따라서 두 경우 모두 산소에 따른 충격인성 변화는 동일한 경향을 보이거나 최대치

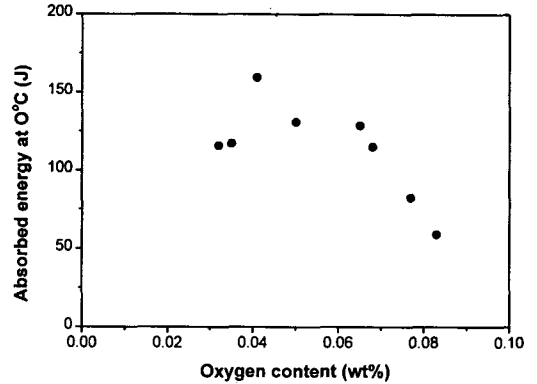


Fig. 9 Variation of weld metal impact toughness with oxygen content of weld metal (wires: Si-Mn type).

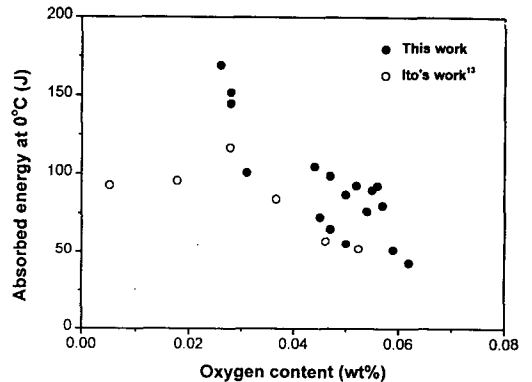


Fig. 10 Variation of weld metal impact toughness with oxygen content of weld metal (wires: Si-Mn-Ti type).

의 인성을 나타내는 산소는 다르다. 즉 Si-Mn계 와이어로 용접한 경우는 0.041%인 반면 Si-Mn-Ti계 와이어로 용접한 경우는 0.026%로 Si-Mn-Ti계 와이어로 용접한 경우가 0.015% 만큼 낮은 값을 나타낸다.

와이어의 탈산원소 종류에 따라 이러한 차이가 나는 이유는 명확하지 않으나 한가지 추론은 가능하다. Mori 등은¹⁴⁾ TiO 성분은 존재하는 용접금속 개재물이 침상페라이트 (acicular ferrite) 불균일 핵생성을 촉진한다고 하였으며, 이러한 결과는 다른 많은 연구에서도 확인되고 있다^{15,16)}. 따라서 Si-Mn-Ti계 와이어로 용접하여 TiO를 함유한 산화물

을 형성시키면 침상페라이트 석출이 촉진되어 더 낮은 산소까지 높은 인성을 나타내는 것으로 판단된다.

4. 결 론

GMA용접 중 용접조건에 따른 와이어의 탈산원소 손실률과 용접금속 산소 및 충격인성 변화를 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 와이어 중 탈산원소 산화손실은 단락이행 및 입상이행 모두에서 아크전압 증가와 함께 증가하였다. 이것은 단락이행의 경우 아크전압 증가가 단락회수를 저하하여 와이어 선단에서 탈산원소와 주위 가스가 반응하는 시간이 길어지기 때문이며, 입상이행의 경우 아크전압 증가가 아크길이를 증대하여 아크기등을 통과하는 동안 반응시간이 길어지기 때문이다.

(2) 용접금속 산소는 탈산원소에 따라 변화하여 열역학적 평형상태를 가정할 경우 다음과 같은 예측이 가능하다.

$$[\%O] = K([\%Si][\%Mn])^{0.25}$$

$$\log K = \frac{-15518}{T} + 6.01$$

이때 평형온도, T는 용접 분위기에 따라서 100% CO₂ 분위기에서는 1870°C (2143K)를, 20% CO₂-80%Ar 분위기에서는 1800°C (2073K)를 나타내었다.

(3) 용접금속 충격인성은 산소가 저하함에 따라 증가하여 최대치를 나타낸 후 재차 감소한다. 하지만 최대치를 나타내는 산소는 용접 와이어에 따라서 Si-Mn계 와이어에서는 0.041%를, Si-Mn-Ti계 와이어에서는 0.026%를 나타내었다.

참 고 문 헌

- I. Masumoto et al : Effect of Titanium in Steel Electrode Wire for CO₂ Arc Welding on the Usability and Mechanical Properties of Weld Metal, IIW Doc. XII-B-135-73 (1973)
- 荒井敏夫 外 : 炭酸カースアーク溶接におけるスハクタの發生, 溶接學會論文集, Vol. 1, No. 2 (1983), pp279~284
- 방국수, 안 영호: GMA용접에 있어서 스패터 발생에 미치는 와이어 탈산원소의 영향, 大韓溶接學會誌, Vol. 14, No. 5 (1996), pp145~150
- 關口春次郎 : 溶接學會誌, Vol. 19, No. 1, 2 (1950), pp40
- F. Kober and W. Oelsen: Kaiser-Wilhelm-Institut für Eisenforschung, Bd XV (1933)
- I. Watanabe et al : Study on Notch Toughness of Weld Metal -Interaction of Microalloying Elements with Oxygen and Nitrogen-, Nippon Kokan Technical Report, No. 47 (1986), pp2~8
- 中西睦夫 外 : 高強度鋼溶接金屬の韌性改善法, 溶接學會誌, Vol. 52, No. 2 (1983), pp 125~131
- A. Smith : The Influence of Shielding Gas Composition on Weld Metal Properties, IIW Doc. XII-B-4-65 (1965)
- K. Bentley : Element Transfer in CO₂ Welding, BWRA Bulletin, Vol. 7, No. 7 (1966), pp204~209
- O. Grong and N. Christensen : Factors Controlling MIG Weld Metal Chemistry, Scandinavian J. of Metallurgy, Vol. 4 (1983), pp155~165
- O. Grong et al : A Model for the Silicon-Manganese Deoxidation of Steel Weld Metals, Metall. Trans. A, Vol. 17A, No. 10 (1986), pp1797~1807
- R. Walsh and S. Ramachandran: Equilibrium in the Fe-Mn-Si-O System, Trans. Metall. Soc. of AIME, Vol. 227, No. 6 (1963), pp560~562
- 伊藤慶典 外 : 溶接金屬の連續冷却變態舉動におよぼす酸素の影響, 溶接學會誌, Vol. 50, No. 12 (1981), pp1211
- N. Mori et al : Mechanism of Notch Toughness Improvement in Ti-B Bearing Weld Metals, IIW Doc. IX-1196-81 (1981)
- A. Mills et al : Nature of Inclusions in Steel Weld Metals and Their Influence on Formation of Acicular Ferrite, Materials Science and Technology, Vol. 3, No. 12 (1987), pp1051~1061
- J. Dowling et al : Inclusion Phases and the Nucleation of Acicular Ferrite in Submerged Arc Welds in High Strength Low Alloy Steels, Metall. Trans. A, Vol. 17A, No. 9 (1986), pp1611~1623