

490MPa급 플럭스코어드 와이어의 스패터, 흠, 미세조직 및 기계적 성질에 미치는 Al, Mn, Si의 영향

김민철* · 정원정*[†] · 이봉근** · 공종관** · 강정윤**

*세아에샵

**부산대학교 재료공학부

Effects of Al, Mn and Si Contents on Spatter, Fume, Microstructure and Mechanical Property with 490MPa Grade Flux Core Wire

Min-Chul Kim*, Won-Jung Jung*[†], Bong-Keun Lee**, Jong-Pan Kong** and Chung-Yun Kang**

*ESAB SeAH Corp. Changwon 641-120, Korea

**Dept. of Material Science and Engineering, Pusan National University, Busan 609-730, Korea

[†]Corresponding author : wonj2@esab.co.kr

(Received August 27, 2009 ; Revised September 16, 2009 ; Accepted January 27, 2010)

Abstract

This paper is concerned with effects of Al, Mn and Si contents on spatter, fume, microstructure and mechanical property with 490MPa Grade Flux Core Wire(FCW). Ten kinds of FCW were fabricated by varying Mn, Si and Al contents and each FCW was weld for check the amount of spatter and fume generations, microstructures and mechanical property. Amount of spatter and fume generations was decreased with the increasing Si contents and decreasing by Al contents in FCW. And, their microstructure of weld metal were changed by Mn, Al and Si contents in FCW. With increasing of Al and Si, acicular ferrite was fine and volume fraction of acicula ferrite was increased. Thereby leading to improvement of Charpy impact property and strength.

Key Words : Flux Core Wire(FCW), Fume, Spatter, Microstructure, Mechanical property, 490MPa grade

1. 서 론

오늘날 기계, 조선, 건축, 전자 등 거의 모든 산업분야에서 용접은 필수적인 가공기술로 대두되고 있으며 적용되는 기술도 다양화되어 가고 있다. 최근 산업의 발달과 작업현장 여건의 변화로 인해 대부분의 산업이 노동집약적인 형태에서 기술 집약적인 형태로 바뀌어 감에 따라 용접분야에서도 고능률화, 고품질화를 위한 용접의 자동 및 반자동화가 급속히 진전되고 있는 추세이다. 이에 따라 고능률 용접법이 개발되고 있으며 국내에서도 플럭스코어드 와이어(이하 FCW)를 중심으로 한 반자동 용접법의 적용이 급속도로 증가하였다.

현재 조선, 건설 교량 등 산업 분야에서 용접기술은 자동화, 로봇 중심으로 한 고효율화가 계속될 것으로 전망되므로, 고용착화, 고속화에 대응할 수 있는 용접 재료의 개발에 대한 당위성이 확실하다. 이와 더불어 선진국의 용접재료 메이커 보다 앞서 가기 위해서는 이제까지 선진국 제품을 모방 하는 방법에서 완전히 벗어난 과학적, 합리적, 체계적인 방법을 강구할 필요가 있다. 그러나, 현재 국내의 대부분의 용접재료 개발은 기존의 데이터화된 자료에 바탕을 둔 것이 아니라, 개발자의 노하우(Know-How)에 의해서 개발되고 있다.

아울러, 용접공정이 인체에 미치는 영향에 대한 연구도 최근에 진행되고 있다^{1,2)}. 이들 연구에서는 스패터

및 흠이 인체에 미치는 영향에 대하여 연구를 진행하였으며, 또한, 스패터 및 흠의 경우 용접특성에 밀접한 관계를 나타냄으로 스패터 및 흠을 줄이는 연구가 최근 까지 지속적으로 연구되고 있다.^{4,5,8,9,10,11)}

본 연구에서는 일반강재의 용접재로 많이 사용되는 490MPa급 FCW에 있어서 Mn, Al 및 Si의 함량 변화에 따른 스패터 및 흠의 발생량에 미치는 영향을 조사하였으며, 이들 원소가 용접 후 용착금속의 미세조직 및 기계적 성질에 미치는 영향을 조사하고 첨가원소들의 영향을 비교 평가하여 FCW제조에 필요한 데이터를 구축하고자 한다.

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 사용재료

본 연구에서 사용한 모재는 조선소에서 많이 사용되는 일반 탄소강인 SM490을 사용하였으며, 용접재료는 AWS A5.20 E71T-1C급을 기본으로 Table 1과 같이 Mn, Al 및 Si의 첨가량을 변화시키면서 각 FCW가 스패터, 흠, 미세조직 및 기계적 성질에 미치는 영향을 조사하였다.

2.2 실험방법

스패터(Spatter) 발생량 측정은 Fig. 1과 같이 용접 속도가 조절되는 자동이송장치를 사용하여 실험을 실시하였다. 용접 후 발생하는 슬래그를 제거하고 스패터량을 3회에 걸쳐 측정한 평균을 사용하였다. Table 2는 스패터 측정시의 용접조건을 나타낸다.

용접 흠(Fume) 발생량 측정은 Fig. 2와 같이 흠 포집 장치를 설계하여 측정하였다. 모재가 회전하면서 용접이 진행되며 용접시간은 1분, 용접 흠의 포집 시간은

Table 1 Chemical Composition of FCW. (wt%)

| No | Mn | Al | Si | Al+Si |
|----|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 2.397 | 0.601 | 0.450 | 1.051 |
| 2 | 2.397 | 0.500 | 0.548 | 1.048 |
| 3 | 2.397 | 0.400 | 0.649 | 1.049 |
| 4 | 2.397 | 0.301 | 0.750 | 1.051 |
| 5 | 2.397 | 0.199 | 0.848 | 1.047 |
| 6 | 2.203 | 0.950 | 0.300 | 1.250 |
| 7 | 2.203 | 0.752 | 0.502 | 1.254 |
| 8 | 2.203 | 0.601 | 0.653 | 1.254 |
| 9 | 2.203 | 0.450 | 0.803 | 1.253 |
| 10 | 2.203 | 0.300 | 0.949 | 1.249 |

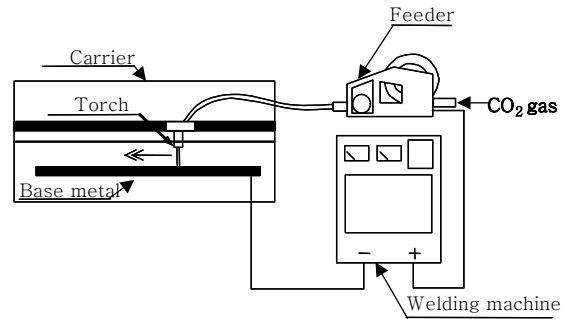


Fig. 1 Schematic illustration of spatter collection equipment

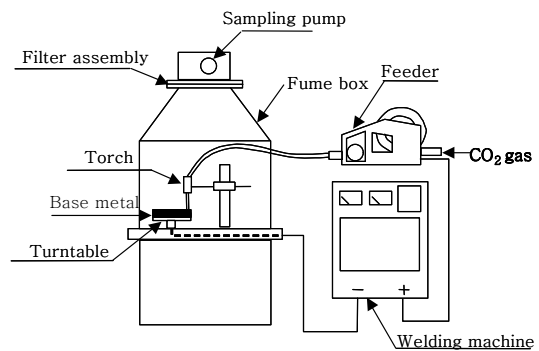


Fig. 2 Schematic illustration of fume collection equipment

Table 2 Welding condition of spatter test

| Voltage(V) | Current(A) | Shield Gas | Welding Speed(cpm) |
|------------|------------|----------------------------------|--------------------|
| 30 | 280 | 100%CO ₂ (20l/min) | 30 |

Table 3 Welding condition of fume test

| Voltage (V) | Current (A) | Shield Gas | Welding Speed (cpm) | Pressure (mmH ₂ O) |
|-------------|-------------|----------------------------------|---------------------|-------------------------------|
| 30 | 280 | 100%CO ₂ (20l/min) | 30 | 340 |

5분이다. Table 3은 용접 흠의 측정시 용접조건을 나타낸다. 흠의 측정에서는 필터의 종류와 보관에 따라 흠량의 변화가 심하게 나타나게 된다⁶⁾. 본 실험에서 사용되어진 필터(Filter)는 건조기에서 100℃로 보관하였으며, 용접후 100℃에서 1hr 보관 후 측정하였다. 흠 측정에 사용된 필터는 화트만(Whatman)사의 유리 섬유형 EPM2000을 사용하였으며, 0.3μm 크기의 입자 포집률이 99.9%를 갖는다.

용접부의 미세조직 및 용접성을 평가하기위해 Fig. 3과 같이 인위적으로 6mm 간격을 갖는 T형태의 시험편

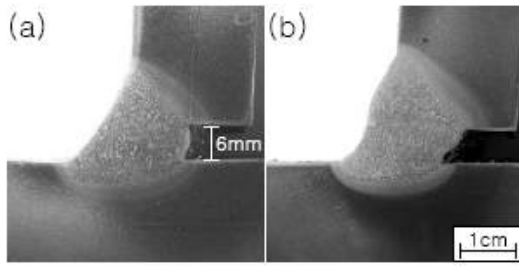


Fig. 3 Macrostructure of fillet welding (a) with No 1 FCW, (b) with No 10 FCW

Table 4 Chemical composition of weld metal. (wt%)

| No | C | Si | Mn | P | Al | S |
|----|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| 1 | 0.042 | 0.454 | 1.247 | 0.014 | 0.0203 | 0.006 |
| 2 | 0.040 | 0.497 | 1.250 | 0.013 | 0.0133 | 0.006 |
| 3 | 0.042 | 0.539 | 1.209 | 0.014 | 0.0121 | 0.006 |
| 4 | 0.044 | 0.584 | 1.223 | 0.014 | 0.0082 | 0.006 |
| 5 | 0.045 | 0.666 | 1.236 | 0.013 | 0.0079 | 0.006 |
| 6 | 0.036 | 0.479 | 1.379 | 0.013 | 0.0522 | 0.005 |
| 7 | 0.038 | 0.569 | 1.295 | 0.013 | 0.0320 | 0.006 |
| 8 | 0.037 | 0.663 | 1.296 | 0.013 | 0.0201 | 0.006 |
| 9 | 0.033 | 0.744 | 1.212 | 0.013 | 0.0125 | 0.006 |
| 10 | 0.035 | 0.865 | 1.240 | 0.013 | 0.0050 | 0.006 |

에 입향상향(Vertical-up)조건으로 용접 가능유무를 평가하였다¹⁰⁾. 용접부의 단면을 1 μ m까지 연마 후 미세 조직은 3% 나이탈(Nital)로 부식시켜서 SEM으로 관찰하였으며, 용착금속의 기계적 성질 변화는 AWS A5.20에 준하여 시험편을 제작 및 인장강도, 충격인성 시험편을 가공하였다. 인장강도의 측정은 50ton 유압식 만능재료시험기를 충격인성은 디지털 충격 시험기 (490J)를 사용하여 평가하였다.

Table 4는 용접 실험 후 용착금속의 화학적 성분을 나타낸다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 스패터 및 흠 발생량 변화

합금원소의 첨가량을 변화시켜 제조한 FCW로 용접 시 스패터와 흠의 변화를 조사하였다. 용접시 스패터와 흠은 용융금속내의 기포가 방출되거나, 용접봉 끝의 용적이 폭발될 때, 아크힘으로 비산될 때, 과대전류, 피복 제층의 수분, 긴 아크의 발생, 운봉각도의 부적당 및 모재의 온도가 낮을 때 등에 많이 발생하는 것으로 알

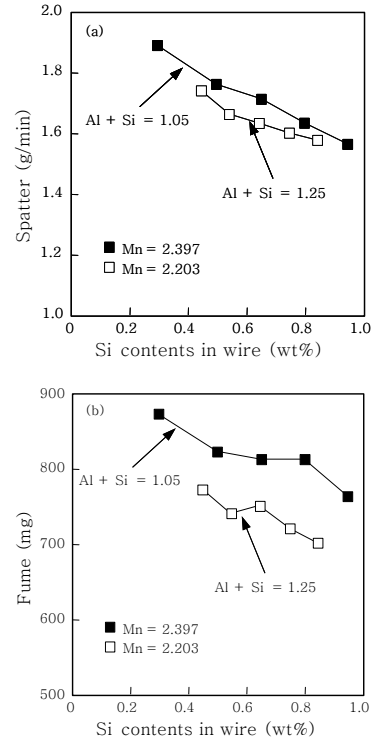


Fig. 4 Amount of (a) spatter and (b) fume generation with the change of Mn, Al and Si contents

려져 있다³⁾.

Fig. 4는 Mn, Al 및 Si의 함량변화에 따른 스패터 (a) 및 흠(b)의 변화를 측정하여 나타내었다. 스패터는 Mn의 첨가량에 관계없이 Si 함량이 증가하고, 상대적으로 Al의 함량이 감소할수록 적게 발생하였다. 그리고, Mn의 함유량이 낮으면 스패터는 적게 발생하였다. 즉, Si의 첨가량이 증가하면 스패터의 발생이 줄어들고, Al의 첨가량이 증가하면 스패터가 증가하였다. 그리고 흠은 스패터와 마찬가지로 Si 함량의 증가 및 Al 함량이 감소할수록 적게 발생하였다. 즉, Si, Al의 첨가량에 의한 스패터와 흠의 발생 경향은 유사함을 확인하였다.

상기 결과를 정리하면 다음과 같다. Si함량이 높을수록 스패터 및 흠의 발생량이 감소하고 있으며, 기 보고된 연구결과에 따르면 TiO₂, Fe-Si 및 Al₂O₃ 등을 첨가하는 경우 고온증기압을 낮추어 흠이 억제된 것으로 사료된다. Al함량이 높을수록 스패터 및 흠의 발생량이 증가하는 이유는 Fe-Al이 첨가될 경우 고온증기압으로 인해 스패터 및 흠이 증가한다. 이에 반해, Mn의 첨가는 스패터 및 흠에 영향을 적게 미치고 있으며, 이는 Fe-Mn를 첨가할 경우 스패터 및 흠 함량에 영향을 미치지 않는다는 연구결과와 동일하다¹¹⁾.

이와는 별도로, REM, Ti, K 및 Na를 첨가하게 되

면 스패터의 발생량을 낮출 수 있다고 알려져 있는데, REM의 경우 아크 발생형태의 변화를 유도하여 용접이행을 안정화시켜 스패터의 함량을 줄이는 것으로 알려져 있으며¹⁾, Ti의 경우 용접이행 시 용융금속의 안정화를 통해서 단락 횟수를 감소시켜 스패터가 줄어들며²⁾, K의 경우 아크의 안정화로 스패터가 줄어든다고 보고됨으로, 앞으로도 이러한 연구도 추후에 진행되어야 할 것으로 사료된다²⁾.

상기 결과에서 Mn의 함량이 낮아질수록(Al과 Si 총량은 높을수록), 그리고, Si함량이 높아질수록 스패터 및 흠 발생량이 낮아짐을 알 수 있었다. 그러나, Mn, Al 및 Si의 경우 용접시 산화제로 작용됨으로 FCW의 설계시 일정량의 Mn, Al 및 Si를 첨가하여야 한다. 상기 원소의 경우 용접 후 기계적 성질에 영향을 미칠 수 있으며, 이는 상기 원소가 미세조직의 변화를 유발하기 때문에 미세조직을 관찰하였다.

3.2 미세조직 변화

FCW내의 합금원소 변화가 미세조직에 미치는 영향을 조사하기 위하여 용접 후 미세조직을 관찰하였다.

본 실험에서는 용접 가능성 및 미세조직을 관찰하기 위해 조선사 등에서 가장 가혹한 조건으로 알려져 있는¹⁰⁾ 6mm 간격을 갖는 필렛 입향상향(Vertical-up) 조건으로 용접 후 거시 및 미세 조직을 관찰하였다.

Fig. 3은 표 1의 1번과 10번 FCW로 용접시 비드 형상을 나타낸 것이다. 6mm 간격을 갖는 조건에서도 용접이 용이하였으며, 전 조건에서 용접크랙 등 결함은 관찰되지 않았다.

Fig. 5는 1, 5, 6, 10번 FCW로 용접한 시험편의 미세조직을 관찰한 결과이며, Fig. 6(a)는 Fig. 5(c)

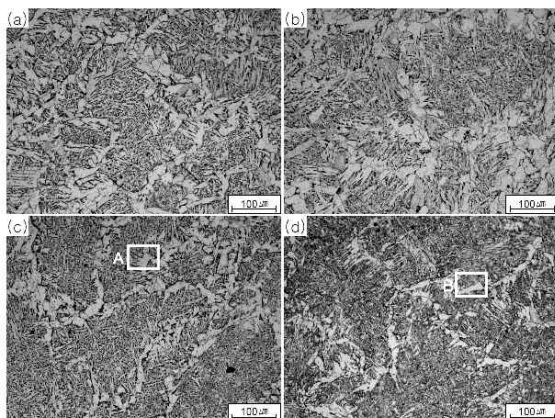


Fig. 5 Microstructure of weld metals with different of FCW. (a) with No 1 FCW, (b) with No 5 FCW, (c) with No 6 FCW, (d) with No 10 FCW

의 A영역, (b)는 Fig. 5(d)의 B영역을 확대한 사진이다. Fig. 5 및 Fig. 6에서는 Acicular Ferrite(이하 AF), Grain Boundary Ferrite(이하 GF), Widmanstatten Ferrite(이하 WF)가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 특히, AF와 GF는 기계적 성질에 중대한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다⁷⁾.

Fig. 5 및 Fig. 6에서 보는 바와 같이 Mn의 첨가량이 낮은 조건(Fig. 5(c)(d))에서 미세한 AF가 다량 관찰되며, 이에 반해 GF의 양은 많지 않은 것으로 관찰된다.

일반적으로 오스테나이트 안정화 원소인 Mn의 함량이 증가할수록 AF 함량이 증가하는 경향이 나타나게 되는 것으로 알려져 있으나, Mn의 첨가량이 줄어든 5~10번 시험편에서 AF의 함량이 증가하게 되는데, 이는 Table. 2에 나타난 바와 같이 용착금속 중 Mn의 함량이 증가하기 때문인 것으로 사료된다. Mn의 첨가량이 적은 FCW에서 높은 Mn의 회수율을 나타내는 이유는 아래와 같다.

일반적으로 FCW에서 Mn, Si, Al은 탈산제 및 슬래그 형성제로 작용하며, 특히, Fig. 7의 엘링감도표에 나타난 것과 같이 Al 및 Si이 Mn에 비하여 탈산효과가 강력하므로 상대적으로 Mn이 산화제로서의 작용이

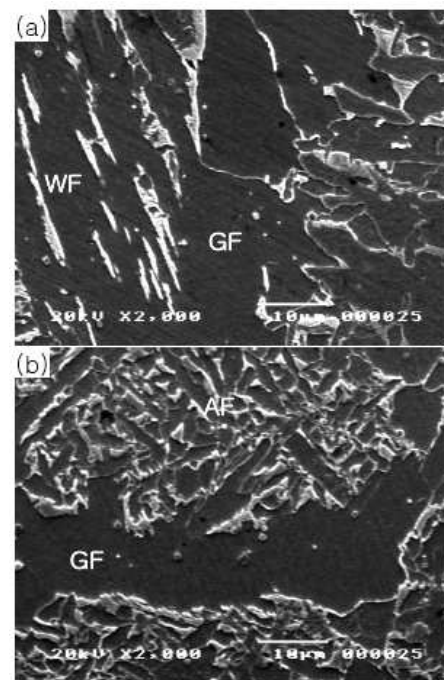


Fig. 6 SEM microstructure, (a) A area in the Fig. 5 (a) (b) B area in the Fig. 5 (d) (GF : Grain boundary Ferrite, AF : Acicular Ferrite, WF : Widmanstatten Ferrite)

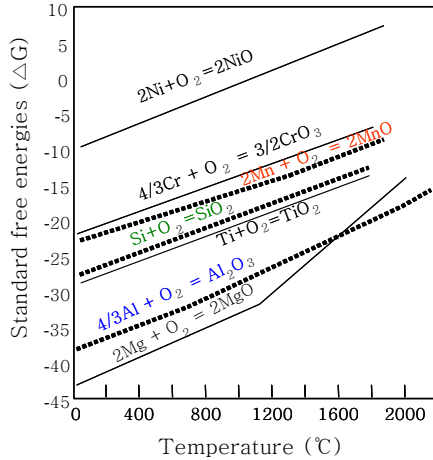


Fig. 7 Elingham diagram of metal oxidation

억제되어 회수된 용착금속 중 Mn 함량이 증가된 것으로 사료된다.

이들 미세조직의 변화는 용착금속의 기계적 특성과 밀접한 상관관계가 있으며, 미세조직 결과와 기계적 성질을 상호 비교하고자 하였다.

3.3 기계적 성질 변화

용접 후 용착금속의 인장강도 및 충격인성을 측정하여 미세조직과의 상관관계를 조사하였다.

Fig. 8은 Mn, Al 및 Si 변화에 따른 인장강도를 나타내고 있다. Mn의 용착금속내 함유량이 높을수록 인장 및 항복강도가 높게 나타나는 것을 확인 할 수 있었으며, 연신율은 저하되지 않았다.

이러한 변화에 대해서 미세조직 결과와 비교해 보면 다음과 같다.

항복 및 인장강도는 앞서 언급한 바와 같이 미세조직에서 AF의 함량은 용착금속내 Mn 함유량 증가에 따라

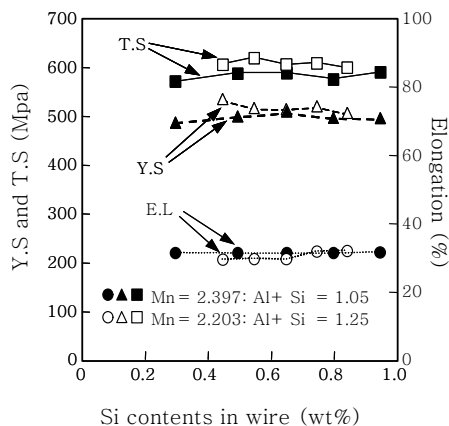


Fig. 8 Mechanical property with the change of the chemical composition

증가하고, 이로 인해 인장 및 항복 강도가 증가하며, 연신율의 저하를 발생시키지 않는 것으로 사료된다. 그리고 탈산제로서 Al 및 Si의 탈산효과가 Mn에 비해 높기 때문에 용착금속의 청정도를 높이는 효과를 나타낸 것으로 사료된다.

기 보고된 연구결과에 따르면 Al과 Si가 페라이트내의 청정도를 높여 연성을 증가시키며,⁽¹²⁾ 이로 인해 연신율의 저하를 발생시키지 않은 것으로 사료되며, 이러한 Al 및 Si의 탈산효과는 C에 대해서도 거의 동일하게 나타나기 때문에 상대적으로 용착금속내 Mn의 함유량이 높은 6~10번 시험편의 C 함량이 1~5번 시험편의 C 함량 보다 낮게 나타나는 것으로 유추 할 수 있다.

Fig. 9는 Mn, Al 및 Si 변화에 따른 충격인성을 -20°C에 측정한 결과이다. 용착금속내 Mn의 함유량이 높은 시험편의 충격인성이 상대적으로 높게 나타나고 있으며, 용착금속내 Mn의 함유량이 적은 시험편의 경우 편차가 크며 일부 용접재료에서는 다소 낮은 충격인성을 나타내고 있다. 그러나, Al과 Si 총량이 높은 용접재료의 용착금속은 편차가 크지 않으며 다소 높은 충격인성을 얻을 수 있었다.

이는 앞서 언급한 바와 같이 용착금속내 Mn의 함유량이 높은 시험편의 경우 다량의 미세한 AF가 생성되기 때문이며, 아울러, Al 및 Si에 의한 청정작용에 의한 페라이트의 청정도 개선효과에 기인하는 것으로 사료된다.

이상의 결과들로부터 FCW에 첨가된 Mn, Al 및 Si가 용접시 스파터 및 흠의 발생과 용접 후 미세조직 및 기계적 성질에 미치는 영향을 조사하였다. 그러나, 각각의 특성에 미치는 원소의 영향은 개별적으로 작용하는 것이 아니라 복합적으로 작용함으로써 실제 FCW 제조시에 특히 유의해야 할 것으로 사료되며, 계속적인 연구와 데이터의 축적이 필요할 것으로 사료된다.

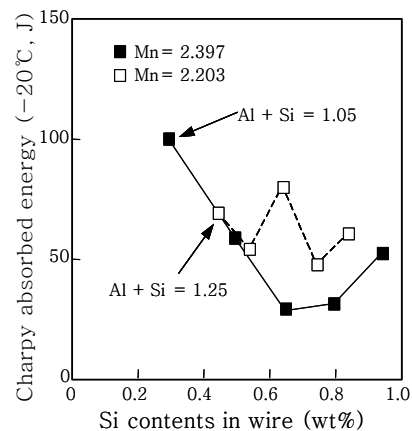


Fig. 9 Effect of change of chemical composition on the toughness of the weld metal

4. 결 론

본 연구에서 얻어진 주요한 결론은 다음과 같다.

- 1) 스패터와 흠의 발생량은 Si의 함량이 증가할수록, Al의 함량이 감소할수록 감소하며, 스패터 및 흠의 발생량은 거의 유사하게 변화하는 것을 확인할 수 있었다.
- 2) Mn의 회수율은 Si 및 Al의 첨가량에 따라 변화하며, 이로 인해 AF 및 GF의 변화를 관찰할 수 있었으며, 특히, Mn의 회수율은 Si 및 Al의 함량이 증가할수록 크게 나타나 AF의 생성량도 증가하고 있다.
- 3) 항복 및 인장강도는 Mn의 용착금속내 함유량이 높을수록 높게 나타나며, 연신율의 경우 변화가 없었다. 이는 Al 및 Si의 탈산효과에 의해 Mn의 회수율 증가와 페라이트의 청정도가 높아지기 때문인 것으로 사료된다.
- 4) 충격인성은 Mn의 함유량이 증가할 경우 높게 나타나며, 이는 언급한 바와 같이 Al 및 Si의 탈산효과에 기인하는 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부/한국과학재단 국가핵심연구센터사업 (No. R15-2006-022-02004-0)지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. Chung Sik Yoon, Dong Uk Park and Doo Youn Park : A Study on the Content Variation of Metals in Welding Fumes, Kor. J. Env. Hlth. Soc, 29-2 (2002), 117-129 (in Korean)
2. Chungsik Yoon : Welding Fume and Ohters from Welding Processes, Kor, J, Env, Thlth, 30-4 (2004), 320-328
3. 김경중 : Flux Cored wire의 특성 및 사용상의 유의점, Journal of KWS, 6-3 (1988), 8-20 (in Korean)
4. Kataoka Tokihiko, Ikeda Rinsei, Ono Moriaki, Yasuda Koichi and Hirata Yoshinori : Effect of REM Addition of Wire on CO₂ Gas Shiedled Arc Phenomenon, Journal of JWJS, 26-1 (2008), 37-41 (in Korean)
5. Kataoka Tokihiko, Ikeda Rinsei and Yasuda Koichi : Influence of Minor Elements in Electrode Wire on Spattering Phenomena in CO₂ Gas Shiedled Arc Welding, Journal of JWJS, 25-3 (2007), 410-415 (in Korean)
6. H.B.Chae, J.H.Kim and S.C.Yang : Analysis of the Fume Generation Rates in the Flux Cored Arc Welding, International Journal of KWS, 1-1 (2001) 71-77 (in Korean)
7. C.W.Yang, C.S.Kang, S.H.Hwang and K.J.Kim : The Effect of Silicon and Manganese on Mechanical Properties of Modelling Flux Cored Arc Welded Deposit, Journal of KWS, 8-2 (1990) (in Korean)
8. Kataoka Tokihiko, Ikeda Rinsei, Yasuda Koichi and Hirata Yoshinori : Development of Low Spatter CO₂ Arc Welding Process with High Frequency Pulse Current, Journal of JWJS, 25-4 (2007) 480-485 (in Korean)
9. Kataoka Tokihiko, Ikeda Rinsei, and Yasuda Koichi : Development of Ultra-Low Spatter CO₂ Gas-shielded Arc Welding Process, JFE Technical Report, 10 (2007)
10. Koshishi fusaki : Welding materials, Journal of JWS, 72-2 (2003) 108-111
11. 박대식, 스에나가카즈유키, 김동수 : 저 Fume Flux-cored Wire의 개발, 대한용접학회 특별강연 및 학술발표대회 개요집 제1권 (1998) 239-241 (in Korean)
12. T.K.Han, K.Y.Lee and J.S.Lim : Recent Developments and Weldability of Advanced High Strength Steels for Automotive Applications, Journal of KWJS, 27-2 (2009) 131-135 (in Korean)
13. 허만주 : 2009년 대한금속.재료학회 철강기술강좌 (2009) 31-51 (in Korean)