연 구 논 문

셀프실드용접 와이어의 Al 첨가량에 따른 용접금속 인성 및 기공형성 변화

방국수*,†·박 찬*·길 웅**·장웅성***

*부경대학교 신소재공학부
**(주)세아ESAB 용접기술연구소
***포항산업과학기술연구원 용접센타

Variation of Toughness and Porosity Formation in Weld Metal with Al Content in Self-Shielded Arc Welding Wire

Kook-soo Bang*,†, Chan Park*, Kil Woong** and Woong-Seong Chang***

*Div. of Adv. Mat. Sci. & Eng., Pukyong National University, Busan, 608-739, Korea
**Welding Research Institute, ESAB SeAH Corp., Changwon, 641-120, Korea
***Research Institute of Industrial Science and Technology., Pohang, 790-330, Korea

†Corresponding author : ksbang@pknu.ac.kr
(Receive June 25, 2010 ; September 13, 2010 ; Accepted October 27, 2010)

Abstract

Three different welding wires were used to study the effects of Al content on weld metal toughness and porosity formation in self-shielded arc welding. Weld metal microstructure showed that while wire with 1.3% Al content contains coarse δ-ferrite, wires with less than 0.5% Al content showed no such phase. In addition to the microstructural differences, cleanliness in weld metal was also different among wires. It showed that weld metal toughness was influenced by the δ-ferrite formation, cleanliness and Ni addition. Even though wires with less than 0.5% Al content showed higher weld metal toughness, they showed relatively poor workability, forming porosities in weld bead in lower arc voltages.

Key Words : Self-shield arc welding wire, Al content, Weld metal microstructure, Toughness, porosity

1. 서 론

셀프실드아크용접 (SSAW)은 외부로부터 특별한 차폐가스를 사용하지 않는 용접법으로 용접 중 흄 발생이 많고 용접금속 기계적성질이 열악하여 가스용기 설치가 어려운 고층건물이나 한냉지에서 송유관 용접 같은 옥외용접에 주로 사용되어 왔다. 하지만 용접금속의 기계적성질, 특히 충격인성의 지속적인 향상으로 최근에는 해양구조물 등에도 그 적용이 확대되고 있다[1-4]. SSAW는 외부가스를 사용하지 않기 때문에 용접금속에의 질소용해를 억제하기 위하여 플럭스 코어드 와이어에는 가스발생제, 증기압이 큰 금속원소, 혹은 불화물 등을 포함시키나 근본적으로는 Al, Ti, Zr 등 질화물 형성원소를 첨가하여 가스용해에 의한 기공형성을 억제한다[5]. 특히 Al은 강력한 질화물 형성원소로서 SSAW 와이어에서 가장 널리 사용되는 원소 중 하나이다. Kaplan 등은[6] 대기 중에서 용접하는 경우 기공 억제를 위하여 필요한 Al량은 약 0.9~1.0%라고 하였다. Al은 페라이트 형성원소로서 Fe 중에 Al이 약 0.9% 이상 첨가되면 고온 δ-페라이트 영역과 저온 α-페라이트 영역이 하나로 합쳐진다. 따라서 기공형성 억제를 위하여 강 중에 0.9% 이상 Al이 첨가되는 경우 고온에서 형성된 조대한 δ-페라이트가 오스테나이트변태를 거치지 않고 상온까지 그대로 잔존하여 충격인성이 열악하게 된다[7-9]. 본 연구에서는 500MPa급 SSAW 플

스 코어드 와이어를 사용하여 Al 함량에 따른 용접금속 충격인성과 기공형성에 대하여 조사하였다.

2. 실험방법

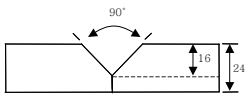
실험에 사용한 와이어는 AWS A5.20 E71T11, E71T8, 그리고 A5.29 E71T8Ni1 세 종류이다. 직경은 T11이 1.6mm, T8과 T8Ni1이 2.0mm이다. 각 와이어를 사용하여 입열량 21~22kJ/cm로 다층용접하였다. Table 1에 용접조건과 이음부형상을 나타내었다.

용접 후 용접금속 성분은 질소는 LECO inert gas fusion (LECO TC-436) 방법으로 그 외 성분은 발광분광분석법으로 분석하였다. 용접금속 조직은 nital로 부식한 후 맨 마지막 패스에서 광학현미경 및 SEM을 사용하여 관찰하였다. 용접금속 중 비금속개재물은 image analyzer를 사용하여 최소 1000개 이상 관찰하여 평균크기, 개수밀도 (number density), 면적분율 등을 측정하였다. 크기별 분포를 측정하기 위하여 직경 0.2μm씩 세분하여 개수도 함께 측정하였다. 용접금속 충격시험은 표면에서 3mm 떨어진 위치에서 노치위치가 용접금속 중앙이 되도록 시편을 채취한 후 표준 Charpy 충격시편으로 가공하였다. 와이어 종류에 따른 용접작업성은 bead-on-plate 용접 후 비드 표면에서의 기공발생 유무로 판단하였다.

3. 실험결과

각 용접금속의 화학성분을 Table 2에 나타내었다. 세 용접금속의 가장 큰 차이점은 Al, C, N 그리고 Ni 함량이다. 먼저 Al함량은 T11, T8, T8Ni1 용접금속이 각각 1.28, 0.44, 0.51%로 T11이 가장 높다. 한편 C함량은 각각 0.18, 0.14, 0.06%로 역시 T11이 가장 높다. T11의 경우 높은 Al함량으로 오스테나이트 변태가 억제되는 것을 피하기 위하여 오스테나이트 형성원소인 C함량을 증가시키고 있음을 알 수 있다. T8Ni1은 Al, C 모두 가장 낮은 함량을 나타내며 다른 두 용접금속에 비하여 Mn이 1.27%로 다소 높고 Ni이 1.02% 첨가되어 있다. N은 T11이 660ppm으로 가장 높고 T8과 T8Ni1은 각각 290, 250ppm으로 상대적으로 낮다.

Table 1 Welding conditions and joint configuration

Wire	Heat input (kJ/cm)	Welding condition	Joint configuration
E71T11	21	240V-20A-14cpm	
E71T8	21	240V-20A-14cpm	
E71T8Ni1	22	240V-20A-14cpm	

CTWD 10~20mm

Fig. 1에 각 용접금속의 광학현미경 조직사진을 나타내었다. T11은 조대한 페라이트와 베이나이트 혹은 펄라이트 혼합조직을 나타낸다. T8은 입계페라이트, 페라이트 사이드 플레이트 그리고 베이나이트가 혼합된 조직을 나타낸다. T8Ni1은 입계페라이트는 거의 없이 입내에서 페라이트 사이드 플레이트 그리고 베이나이트 조직을 나타낸다.

Fig. 2에는 각 용접금속의 비금속개재물 SEM 사진과 EDX 분석결과를 나타내었다. T11에서 대부분의 개재물은 AlN 질화물이다 (그림 a). 하지만 T8 용접금속의 경우에는 EDX 분석결과 질소 피크는 나타나지 않고 대신 산소 피크가 관찰되어 개재물은 질화물이 아닌 산화물임을 알 수 있다. Al 함량의 차이에 따른 이러한 개재물 조성의 차이는 Quintana 등의 실험결과와 잘 일치한다[10]. 산화물 조성은 개개의 개재물에 따라 달라 Al-Mg 산화물, Al-Mg-Ti 산화물, Al-Mg-Zr 산화물 (그림 b) 등을 나타내었다. 한편 T8Ni1 용접금속의 개재물도 T8과 동일하게 산화물을 나타내었다. 하지만 조성은 T8과 달리 대부분 Al-Mg-Mn 산화물이다 (그림 c). Table 3에 각 용접금속에서 개재물 평균크기, 개수밀도 (number density), 면적분율을 나타내었다. 평균크기는 T11이 1.21μm로 가장 크고, T8과 T8Ni1이 각각 0.64, 0.68μm로 비슷하다. 개수밀도는 T11과 T8이 각각 $1.89\times10^{11}/m^2$, 4.09×10^{11}로 비교적 크나 T8Ni1은 $0.28\times10^{11}/m^2$로 낮은 값을 나타낸다. 면적비율은 T11과 T8이 각각 0.76, 0.55%로 비교적 높으나 T8Ni1은 0.04%로 아주 낮은 값을 나타낸다.

Table 2 Chemical composition of weld metals (wt%)

Wire	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Al	Ti	N
E71T11	0.18	0.39	0.61	0.01	0.003	0.03	0.05	1.28	0.01	0.066
E71T8	0.14	0.13	0.71	0.01	0.003	0.04	0.11	0.44	0.04	0.029
E71T8Ni1	0.06	0.29	1.27	0.01	<0.002	0.04	1.02	0.51	0.01	0.025

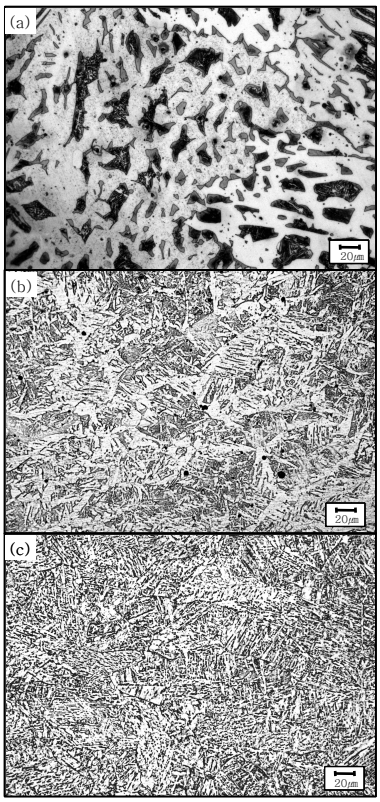


Fig. 1 Optical microstructure of (a) E71T11, (b) E71T8, and (c) E71T8Ni1 weld metals

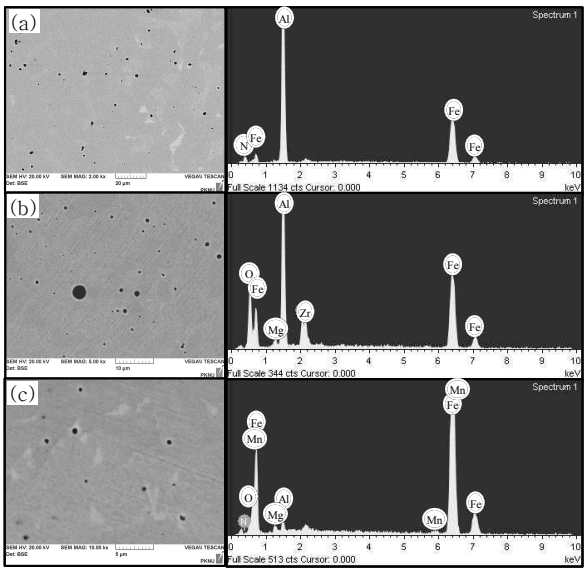


Fig. 2 Non-metallic inclusion and its EDX spectra in (a) E71T11, (b) E71T8, and (c) E71T8Ni1 weld metals

용접금속 충격시험 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 세 용접금속은 비슷한 강도를 나타냄에도 불구하고 충격인성은 큰 차이를 보이고 있다. T11의 경우 상온에서부터 -60℃까지 전 시험온도범위에서 5~14J의 매우 낮

Table 3 Characteristics of non-metallic inclusion in weld metal

Wire	Average diameter (㎛)	Number density (/m^2)	Area percent (%)
E71T11	1.21	1.89×10^{11}	0.76
E71T8	0.64	4.09×10^{11}	0.55
E71T8Ni1	0.68	0.28×10^{11}	0.04

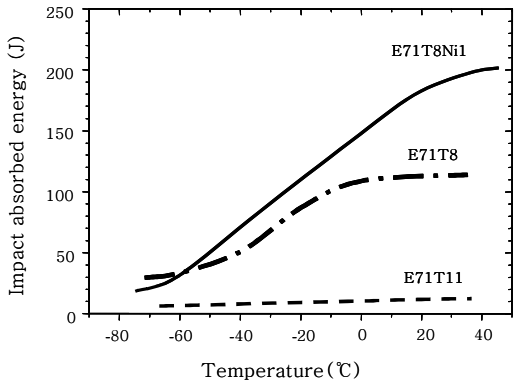


Fig. 3 Comparison of impact test results of weld metals

은 흡수에너지를 나타낸다. T8은 상온에서 110J을 나타낸 후 온도의 저하와 함께 저하하여 -60℃에서 32J을 나타낸다.

T8Ni1은 상온에서 187J을 나타낸 후 온도의 저하와 함께 비교적 급격히 저하하여 -60℃에서 29J을 나타낸다. -30℃에서 흡수에너지를 비교하면 T11, T8, T8Ni1이 각각 7, 65, 90J로 T11이 가장 낮고 T8Ni1이 가장 높다.

Fig. 4에는 용접속도와 CTWD를 각각 15cpm, 20mm로 일정하게 유지하며 전류/전압을 변경하며 bead-on-plate용접한 후 비드표면에서 기공발생 여부를 조사한 결과를 나타내었다. Al 함량이 높은 T11의 경우 (그림 a) 실험범위 내에서 기공이 발생하지 않았다. 하지만 Al 함량이 낮은 T8과 T8Ni1의 경우에는 (그림 b) 전압이 21V 이상이 되면 기공이 형성하기 시작하였다. 즉 T8과 T8Ni1 와이어는 기공 형성 없이 용접할 수 있는 한계전압이 20V로 T11에 비하여 매우 낮아 용접작업성이 열악함을 알 수 있다.

4. 고 찰

세 용접금속은 비슷한 강도를 나타냄에도 불구하고 충격인성은 큰 차이를 보이고 있다. 즉 -30℃ 흡수에너지는 T11 용접금속이 7J로 T8과 T8Ni1에 비하여 매

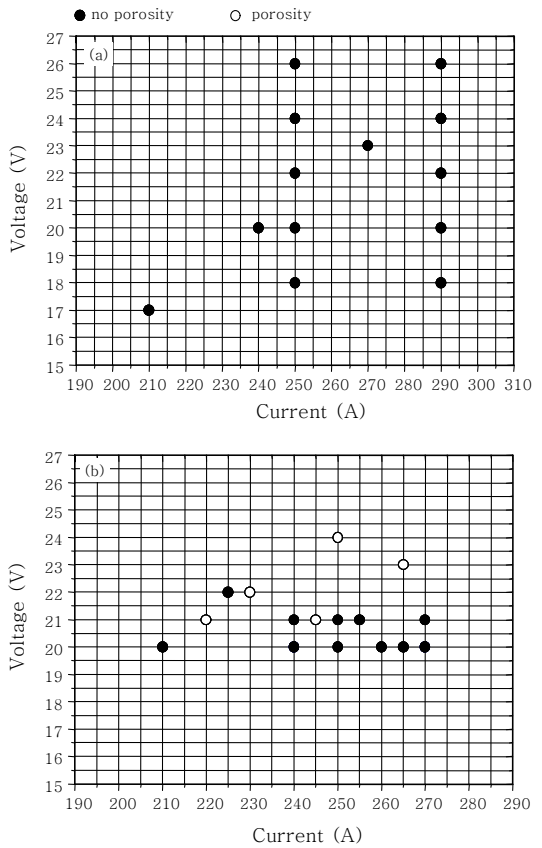


Fig. 4 Results of porosity formation test in (a) E71T11, (b) E71T8 and E71T8Ni1 wires

우 낮다. 이런 이유는 Fig. 1에서 보는바와 같이 T11 용접금속에서 조대한 페라이트 형성이 하나의 원인으로 판단된다. SSAW 용접금속 조직에 Al함량이 큰 영향을 미친다는 것은 잘 알려져 있다. Fig. 5에 thermo-calc을 이용하여 직접 작성한 각 용접금속의 Fe-Al 의평형 상태도를 나타내었다. Ni이 첨가된 T8Ni1의 경우 (그림 (c)) 감마 루우프가 조금 더 확대되고 변태온도가 조금 낮으나 C, Si, Mn 등 조성의 차이에도 불구하고 상태도는 매우 유사함을 알 수 있다. T11에 해당하는 그림 (a)에 Al함량인 1.28%를 점선으로 나타내었다. 그림에서 보는 것처럼 본 조성의 용접금속은 BCC δ-페라이트로 응고한 후 냉각과정 중 일부만 FCC 오스테나이트로 고상변태한다. 따라서 상온에서의 최종조직은 응고과정 중 형성된 조대한 δ-페라이트와 냉각과정 중 오스테나이트로부터 변태한 베이나이트 혹은 펄라이트의 혼합조직이 됨을 알 수 있다. 이런 점은 실제 조직관찰 결과와 잘 일치한다. T8에 해당하는 그림 (b)에도 Al함량인 0.44%를 점선으로 나타내었다. T11과 달리 δ-페라이트로 응고한 다음 냉각과정에서 δ-페라이트가 전부 오스테나이트로 변태한다. 따라서 상온에서

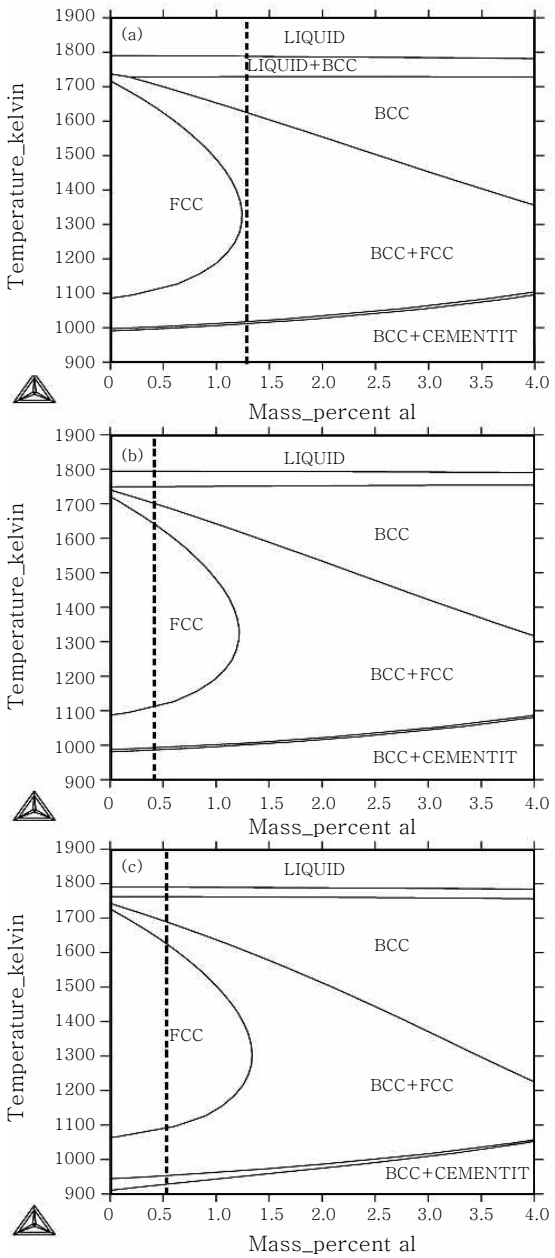


Fig. 5 Quasi-equilibrium Fe-Al phase diagram of (a) E71T11, (b) E71T8, and (c) E71T8Ni1 weld metals

조직은 응고과정 중 형성된 조대한 δ-페라이트 없이 오스테나이트로부터 변태한 페라이트와 베이나이트 등의 혼합조직을 나타내어 T11에 비하여 상대적으로 우수한 충격인성을 나타냄을 알 수 있다. 그림 (c)의 T8Ni1의 경우에는 Ni 첨가에 의하여 T11과 T8에 비하여 FCC인 γ영역이 조금 더 확대되어 있으며 0.51% Al함량에서 T8과 동일하게 δ-페라이트가 전부 오스테나이트로 고상변태한다. 하지만 T8Ni1의 상온 조직은 입계 페라이트 없이 대부분 페라이트 사이드 플레이트와 베이나이트를 나타내어 T8Ni1이 T8보다 냉각과정 중 경화능

이 큼을 알 수 있다. 이러한 T8Ni1의 상대적으로 높은 경화능은 1% Ni 첨가가 하나의 원인으로 생각된다.

T8과 T8Ni1은 모두 조대한 δ-페라이트의 형성을 억제하여 T11보다 인성이 우수하나 둘 사이에는 T8Ni1이 더욱 우수하다. 이러한 원인은 먼저 T8Ni1의 Ni 첨가에 의한 기지 강인화 효과를 들 수 있다. 하지만 T8Ni1 용접금속의 높은 청정도도 인성 증가의 다른 하나의 요인으로 생각된다. Table 3에 나타낸 것처럼 T8Ni1과 T8은 개재물 평균크기는 비슷하나 면적비율은 T8Ni1이 매우 낮다. Fig. 6에 나타낸 것처럼 크기가 큰 개재물이 취성파괴의 기점으로 작용하는 것을 감안하면 T8Ni1 용접금속의 높은 청정도도 인성향상에 기여할 것으로 판단된다. T8Ni1의 청정한 용접금속 형성은 높은 Si, Mn함량과 관련이 있는 것으로 추측된다. Si, Mn함량은 T8이 0.13, 0.71%이나 T8Ni1은 0.29, 1.27%이다. 탈산원소인 Si와 Mn이 많을수록 탈산이 촉진되어 청정한 용접금속이 형성될 것으로 기대된다. 또한 개재물 조성의 차이에 따른 부상분리 속도의 차이도 존재할 것으로 예상할 수 있다. T8Ni1은 Al-Mg-Mn 복합산화물을 형성하나 T8은 Al-Mg-Ti나 Al-Mg-Zr 복합산화물을 형성한다. 이 점에 대해서는 좀 더 연구가 필요하다.

Al함량이 낮은 T8과 T8Ni1 와이어는 Al함량이 높은 T11 와이어에 비하여 용접금속 인성은 높으나, Fig. 4에서 보는바와 같이 기공을 형성하지 않고 용접할 수 있는 전압범위가 매우 낮아 작업성이 열악하다. Al함량이 낮은 와이어가 높은 와이어에 비하여 기공 없이 용접할 수 있는 전압범위가 낮은 이유는 비교적 쉽게 이해된다. 일반적으로 용접과정 중 아크전압이 높아질수록 용융금속에 용해되는 질소량이 많아진다[6]. 따라서 Al함량이 높은 와이어에서는 아크전압이 높아 질소용해가 많아도 충분히 탈질이 이루어져 기공형성을 억제하나 Al함량이 낮은 와이어에서는 그렇지 않을 것이다. 이런 점에서 SSAW 와이어에서 인성과 작업성을 동시에 확보하기 위해서는 적정의 Al함량을 선정하는 것이 아주 긴요함을 알 수 있다.

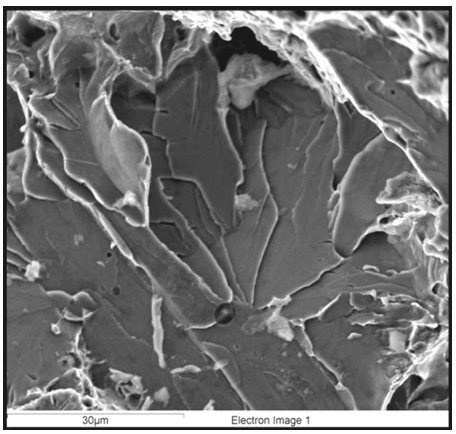


Fig. 6 Non-metallic inclusion initiating a cleavage fracture in weld metal

5. 결 론

Al함량이 다른 AWS A5.20 E71T11, E71T8, 그리고 A5.29 E71T8Ni1 세 종류의 500MPa급 SSAW 와이어를 사용하여 입열량 21~22kJ/cm로 용접한 후 용접금속 인성과 작업성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 용접금속 조직은 Al함량에 따라 큰 차이를 나타내어 1.3%인 T11는 응고과정에서 생긴 조대한 δ-페라이트가 상온까지 잔존하나 0.4~0.5%인 T8과 T8Ni1은 δ-페라이트가 전부 오스테나이트로 변태한다.

2) -30℃ 충격흡수에너지는 T11, T8, T8Ni1이 각각 7, 65, 90J을 나타내어 T8Ni1이 가장 높은 충격인성을 나타내었다. T8Ni1의 우수한 충격인성은 낮은 Al함량에 따른 조대한 δ-페라이트 형성억제, Ni첨가에 의한 기지인성 향상, 그리고 비금속개재물 형성억제에 기인하는 것으로 판단된다.

3) 용접전류 150~340A 범위에서 아크전압에 따른 비드표면 기공발생을 조사한 결과, Al 함량이 높은 T11은 31V까지 기공이 발생하지 않았으나 Al 함량이 낮은 T8과 T8Ni1은 21V 이상에서 기공이 발생하였다. 따라서 SSAW 와이어에서 인성과 작업성을 동시에 확보하기 위해서는 적정 Al함량을 선정하는 것이 긴요함을 나타내었다.

참 고 문 헌

1. R. de Haeck, B. Phelps and A.A. Smith: Developing Consumables and Process for Work on Offshore Platforms, Weld. and Metal Fab., Sep. (1980) 441-449
2. T. Keeler: Innershield Welding, Part 1 Development and Applications, Met. Const., 13-11 (1981) 667-673
3. T. Keeler: Innershield Welding, Part 2 Properties, Met. Const., 13-12 (1981) 750-753
4. K.J. Rodergs and J.C. Lochhead: Self-Shielded Flux Cored Arc Welding - The Route to Good Fracture Toughness, Weld. J., 66-7 (1987) 49-59
5. R. Killing: Welding with Self-Shielded Wires - the Mechanism of Shielding and Droplet Transfer, Met. Const., 12-9 (1980) 433-436
6. H.I. Kaplan and D.C. Hill: Thermodynamics of Air-Operating Flux Cored Electrodes and an Analysis of Weld Toughness, Weld. J., 55-1 (1976) 13s-19s

7. J.C. Gonzalez, C.L. Llorente and H. Biloni: Correlation between Microstructure and Mechanical Properties for Two Self-Shielded Flux Cored Wires, Cand. Metall. Quarterly, 25-4 (1986) 319-326
8. S.S. Babu, S.A. David and M.A. Quintana: Modeling Microstructure Development in Self-Shielded Flux Cored Arc Welds, Weld. J., 80-4 (2001) 91s-97s
9. D.J. Kotecki and B. Narayanan: Welding Consumable Developments in the Aftermath of the Northridge Earthquake, Weld. in the World, 49-1/2 (2005) 42-46
10. M.A. Quintana, J. McLane, S.S. Babu and S.A. David and : Inclusion Formation in Self-Shielded Flux Cored Arc Welds, Weld. J., 80-4 (2001) 98s-105s