

研究論文

60kgf/mm²급 C-Mo계 와이어를 사용한 서브머지드 아크 용접금속 인성 및 작업성에 미치는 플럭스 조성의 영향

방 국 수* · 안 영 호**

Effect of Flux Composition on Weld Metal Toughness and Workability in Submerged Arc Welding with 60kgf/mm² Grade C-Mo Type Wires

Kook-soo Bang* and Young-ho Ahn**

Key Words : Weld metal toughness, Flux composition, SAW, C-Mo type wire, Hardenability, Acicular ferrite, Weld bead profile

Abstract

Effect of a flux composition on weld metal toughness in submerged arc welding with 60kgf/mm² grade C-Mo type wires was investigated and interpreted in terms of weld metal microstructure and hardenability. Flux workability was also studied by characterizing a weld bead profile. Compared to other weld metals, weld metal used alumina basic flux with nickel showed lowest oxygen content, highest hardenability and the most acicular ferrite. The highest impact toughness of that weld metal, however, was attributed to the tough matrix due to the nickel rather than to the larger amount of acicular ferrite. Manganese silicate flux had better workability than alumina basic flux, showing broader welding conditions resulting in a depth-to-width ratio of 0.5. The composition of oxides in the weld metal was dependent on the flux composition, showing MnO-SiO₂-TiO in manganese silicate flux and MnO-SiO₂-Al₂O₃-TiO in alumina basic flux. MnO-SiO₂ composition in both oxides was similar to a tephroite.

* 정희원, 산업과학기술연구소 접합가공연구팀

** 정희원, 포항제철(주) 후판연구팀

1. 서 론

서브머지드 아크 용접 (SAW)에서 용접금속의 기계적 성질, 특히 인성은 와이어와 플럭스의 조합에 의하여 결정되기 때문에, 요구되는 범위에서 용접작업성이 우수한 플럭스를 선택하여야 한다. SAW 용접금속은 과도한 입열량으로 주상정이 발달하여 주상정 입계에서 조대한 초석페라이트가 석출하고 입내에서는 침상페라이트가 형성되는 불균일 조직을 나타낸다. 따라서 인성 향상을 위하여서는 이런 불균일조직을 침상페라이트 위주의 균일조직으로 만들어야 하며, 이를 위하여 용접금속 경화능 (hardenability)의 조정이나 Ti, B 등을 미량 첨가하는 방법이 제안되고 있다. Mori 등에 의하면¹⁾ 적량의 Ti-B 첨가에 의해 SAW 용접금속 인성이 대폭 향상된다고 하였다. 이는 Ti가 TiN을 생성하여 B를 N으로부터 보호함과 함께 침상페라이트 변태 핵으로 작용하고, B는 오스테나이트입계에 편석하여 입계페라이트 변태를 억제하기 때문이라고 하였다. 한편 Mn도 침상페라이트의 핵생성을 조장한다고 알려져 있는데 Evans는²⁾ 침상페라이트 석출에 의한 인성 향상과 강도 증가에 의한 인성 저하가 조화를 이루는 약 1.5%에서 가장 인성이 우수하다고 하였다.

中村은³⁾ 플럭스 종류에 따른 용접작업성을 검토하여 MnO, TiO₂가 많을수록, CaO, MgO, CaF₂가 적을수록 작업성이 우수하다고 하였다. 따라서 연강의 필렛 (fillet) 용접이나 고속용접 등 용접작업성이 중요시 될 때에는 MnO, TiO₂가 많은 플럭스를, 반대로 저온용강이나 원자로용강 등 인성이

중요시되는 용접에서는 CaO, MgO, CaF₂가 많은 플럭스를 사용하여야 한다고 하였다. 본 연구에서는 60kgf/mm²급 C-Mo계 와이어를 사용하여 용접하는 경우 플럭스 조성에 따른 용접금속 인성 변화를 용접작업성 변화와 함께 검토하였다.

2. 실험방법

실험에 사용한 와이어는 직경 4.0mm의 0.15% C-1.83%Mn-0.54%Mo의 C-Mo계 이다. Table 1에 사용한 플럭스의 조성을 나타내었는데 1번은 manganese silicate계 용융형 플럭스, 2번과 3번은 alumina basic계 소결형 플럭스이다. Alumina basic계 플럭스는 TiO₂와 B₂O₃를 함유하며, 특히 3번 플럭스는 Ni를 1.42% 함유하고 있다. 플럭스 조성은 먼저 습식으로 원소별 성분을 분석하여 검량선을 설정한 후 X선 형광분석 (X-ray fluorescence)으로 결정하였다. 각 플럭스의 용융 특성은 고온현미경을 사용하여 DIN 51730 규정에 의거 연화온도, 용융온도 및 유동온도를 측정하여 비교하였다.

전용착금속의 인장 및 충격시험을 위한 용접은 60kgf/mm²급 강 (JIS SPV490)을 모판으로 사용하여 buttering 없이 그대로 용접하였다. 용접조건은 550A-30V-40cpm (입열량 약 25kJ/cm)이며 예열·충간온도는 150℃이다. 용접작업성은 두께 12mm의 연강을 groove 없이 맞대기한 후 전압을 35V로 일정하게 하고 전류를 500~900A, 속도를 30~80cpm으로 변경시키며 bead-on-plate용접을 하여, 용입깊이와 폭의 비가 약 0.5를 나타내는 용접조

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

Flux	SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	FeO	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	B ₂ O ₃	CaF ₂	Ni	BI*
1	39.59	0.20	0.48	1.68	23.18	3.51	2.36	2.90	19.78	0.07	7.49	-	1.08
2	15.21	3.04	0.14	3.84	10.61	23.30	25.02	10.17	0.09	0.45	3.37	-	1.29
3	12.71	2.59	0.11	8.89	14.63	28.49	22.15	2.01	0.12	0.61	4.36	1.42	2.21

$$* \text{Basicity Index} = \frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{BaO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaF}_2 + \frac{1}{2}(\text{MnO} + \text{FeO})}{\text{SiO}_2 + \frac{1}{2}(\text{ZrO}_2 + \text{TiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)}$$

건 영역으로 평가하였다. 용접금속 성분중 C, S는 C/S분석장치, O₂와 N₂는 O₂/N₂분석장치, 기타 원소는 방출분광분석장치를 이용하여 분석하였으며, 조직 분율은 배율 400배에서 영상분석장치(image analyzer)를 사용하여 최소 700번 이상의 점산법으로 측정하였다. 개재물 분석은 추출레플리카(extracted replica)를 사용하여 STEM관찰과 EDX분석을 행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 용접금속 인성 변화

플럭스 종류에 따른 용접금속 성분 변화를 Table 2에 나타내었다.

Manganese silicate계인 1번 플럭스를 사용한 경우 alumina basic계인 2번과 3번 플럭스 보다 Si와 Mn이 높다. TiO₂가 10.17% 첨가된 2번 플럭스의 경우에는 Ti가 0.013%로 가장 높고, B₂O₃가 0.45%와 0.61% 첨가된 2번과 3번 플럭스로 용접한 경우에는 B가 각각 0.0016%와 0.0018%를 나타내어 SiO₂와 MnO 이외에 TiO₂와 B₂O₃의 환원을 확인할 수 있다. 이러한 플럭스 환원반응은 당연 용접금속 산소량에 영향을 미칠 것으로 예상되어 플럭스 성분과 용접금속 산소와의 상관성을 조사하였다. Figure 1에 플럭스 염기도에 따른 용접금속 산소량의 변화를 Eagar의 실험결과와⁴⁾ 함께 나타내었다. 예상되는 바와 같이 염기도가 증가할수록 산소가 저하하며 (1.08, 1.29, 2.21 일 때 각각 750, 460, 330ppm) 그 경향은 Eagar의 실험결과와 유사하다. 용접금속 산소는 대부분 산화물로서 존재하여 플럭스 성분에 따라 산화물 성분도 차이가 날 것으로 예상된다. Figure 2에 대표적인 산화물 전자현미경 사진과 (A), manganese silicate계인

1번 플럭스로 용접한 경우 (B) 및 alumina basic계인 2번과 3번 플럭스로 용접한 경우의 (C) EDX 분석결과를 나타내었다. Manganese silicate계는 Mn, Si, Ti 성분을, alumina basic계는 Mn, Si, Ti, Al 성분을 나타내어 각각 MnO-SiO₂-TiO와 MnO-SiO₂-Al₂O₃-TiO 복합산화물임을 알 수 있다. 정량 분석 결과 이러한 산화물은 2MnO · SiO₂ (tephroite)에 유사한 조성을 가지며 플럭스 종류에 따라 TiO를 1~2%, Al₂O₃를 5~10% 함유하고 있다. 산화물을 자세히 살펴보면 둥근 형상 주위에 작은 편상의 개재물이 함께 존재하는 경우가 많이 관찰되는데 (Fig. 2(A)에서 화살표로 표시) EDX 분석결과 Mn, Cu, S 성분이 검출되었다 (Fig. 3).

SAW 용접금속중 이러한 개재물은 다른 연구결과에서도 관찰되고 있는데 Court 등은⁵⁾ (Mn, Cu) S, 혹은 CuS 라고 추정하고 있다. 본 연구에서는 Court의 관찰과는 달리 간혹 Si도 검출되고 있으나 1번 플럭스를 제외하고는 작은 양이다 (1번 플럭스의 경우 10%, 2번과 3번 플럭스의 경우 0~6%). 따라서 본 연구에서의 이러한 편상 개재물도

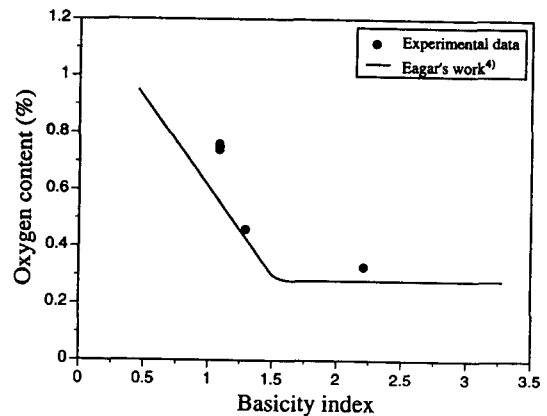


Fig. 1 Variation of oxygen content of weld metal with a flux basicity index.

Table 2 Chemical composition of weld metals (wt-%).

WM	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Al	Ni	Ti	B
1	0.09	0.28	1.56	0.02	0.01	0.02	0.50	0.01	0.03	0.002	Tr
2	0.10	0.16	1.21	0.01	0.01	0.02	0.49	0.01	0.03	0.013	0.0016
3	0.10	0.08	1.15	0.01	0.01	0.02	0.48	0.01	0.68	0.007	0.0018

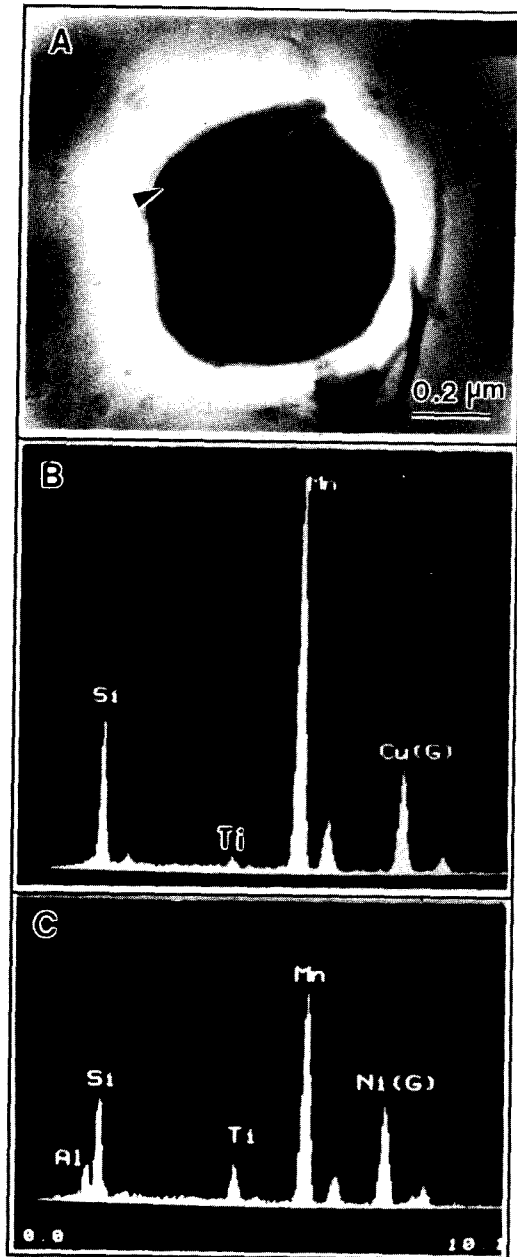


Fig. 2 (A) Typical TEM image and EDX spectrum of oxide inclusion in a weld metal which used (B) manganese silicate flux and (C) alumina basic flux.

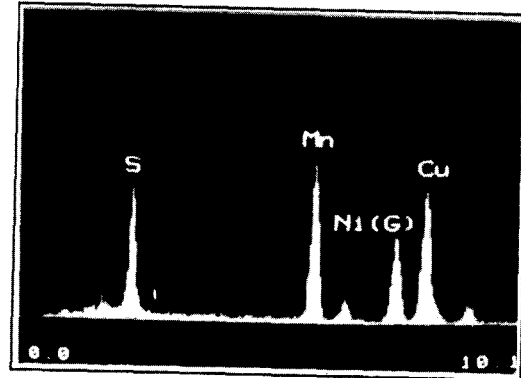


Fig. 3 EDX spectrum of the patched-inclusion indicated by an arrow in figure 2.

manganese copper sulphide라고 추정된다.

전용착금속 인장시험 결과 1, 2, 3번 용접금속 항복강도는 56.6, 58.6, 56.0kgf/mm², 인장강도는 63.5, 64.2, 62.7kgf/mm² 그리고 연신율은 26.7, 27.2, 28%를 나타내어 플럭스 종류에 따른 인장특성은 큰 차이가 없다. Table 2에 나타낸 바와 같이 3번 플럭스로 용접한 경우 용접금속 중 Ni이 0.68% 함유되어 있으나, 인장강도가 다른 두 용접금속과 유사하여 이 정도의 Ni은 용접금속 강도에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. Figure 4에는 전용착금속 충격시험 결과를 나타내었다. 에너지전이온도 (vTrE)는 1번 용접금속이 -33℃, 2번 용접

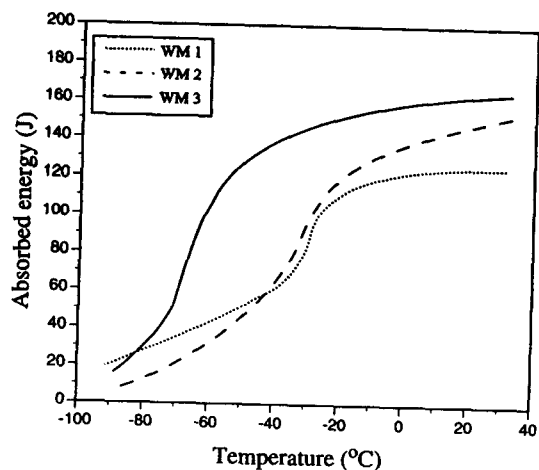


Fig. 4 Variation of impact toughness of weld metal with temperature.

금속이 -35℃, 그리고 3번 용접금속이 -65℃를 나타내고 있다. 용접금속 강도가 비슷함에도 불구하고 이러한 차이가 나는 이유를 조사하기 위하여 각 용접금속에서 침상페라이트 분율을 측정된 결과 각각 69.0, 70.4, 79.4%를 나타내어 충격시험 결과와 일치하고 있다. Figure 5에는 각 용접금속의

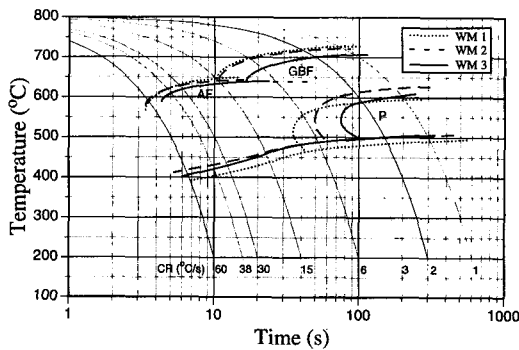


Fig. 5 Continuous cooling transformation diagrams of weld metal.

연속냉각변태도 (WM-CCT도)를 나타내었다. 입계페라이트변태를 위한 임계냉각속도 (C_r')는 1번과 2번 용접금속이 약 15℃/s임에 비하여 3번 용접금속은 약 9℃/s를 나타낸다. 일반적으로 용접금속 페라이트변태는 산소가 적을수록 그리고 경화능이 클수록 억제되어 연속냉각변태도가 장시간 축으로 이동한다⁶⁾. 따라서 3번 용접금속은 적은 산소량 (330ppm)과 함께 Ni첨가 (0.68%)에 의한 높은 경화능이 원인으로 입계페라이트변태가 억제되고 그 결과 저온에서 형성되는 침상페라이트가 많이 생성되는 것으로 판단된다. 3번 용접금속의 극히 우수한 인성이 이러한 약 10%의 침상페라이트 증가에 의한 것인가를 확인하기 위하여 1번 플럭스를 사용하여 용접입열량 15kJ/cm로 용접하여 인성을 비교하였다 (이 경우 용접금속 침상페라이트 분율은 약 81%로 3번 용접금속과 거의 동일하다). 침상페라이트 분율이 유사함에도 불구하고 에너지치이온도는 -39℃로 3번 용접금속보다 여전히 높다. 따라서 3번 용접금속의 극히 우수한 인성은 침상페라이트의 증가에 의한 효과보다 Ni 첨가에 의한 기지 자체의 인성 증가 효과가 더욱 큰 것으로 생각된다.

3.2 용접작업성 변화

용융형 및 소결형 플럭스의 용접작업성을 비교하기 위하여 1번과 3번 플럭스를 사용하여 용접조건에 따른 비드 형상 변화를 조사하였다. Figure 6에는 용접전류와 속도에 따른 용입깊이와 폭의 변화를 나타내었다 (이때 전압은 35V). 1번 플럭

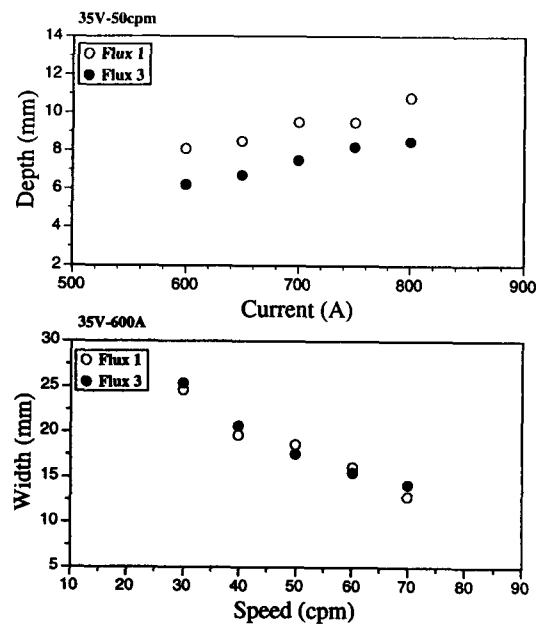


Fig. 6 Variation of depth and width of weld bead with welding current and speed.

스가 3번 플럭스보다 깊은 용입을 나타내나 (700A의 경우 1번 플럭스는 약 9.5mm, 3번 플럭스는 약 7.5mm), 비드 폭에는 큰 차이를 나타내지 않았다. Figure 7에는 각 용접전류와 속도에 대응한 용입깊이/폭의 비를 나타내었다. 용접작업성의 지표로서 이 비가 약 0.5를 만족시키는 용접조건을 채택하여 그림 중에 검은 부분으로 나타내었다. 용융형 1번 플럭스 경우 (A) 대략 600~750A, 40~80cpm 범위를 나타내나, 소결형 3번 플럭스 경우에는 (B) 700~800A, 60~80cpm 범위를 나타낸다. 따라서 적절한 용접조건 범위는 manganese silicate계인 용융형 플럭스가 alumina basic계인 소결형 플럭스보다 큼을 알 수 있다.

일반적으로 일정 용접전압에서 용접전류와 용접

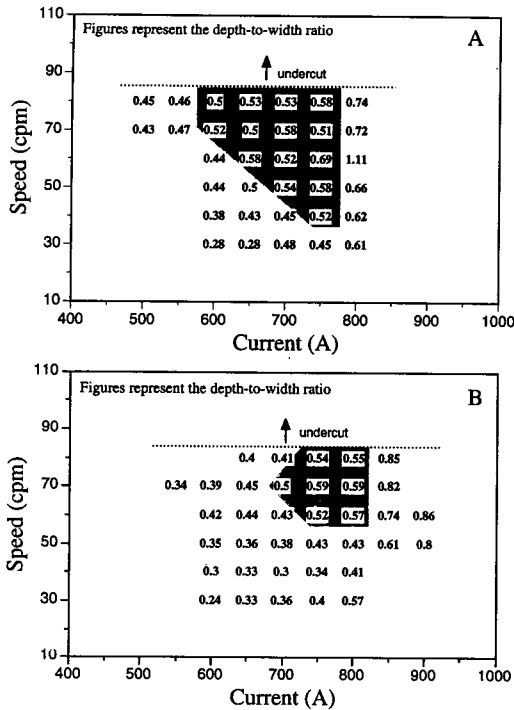


Fig. 7 Variation of depth-to-width ratio of weld bead with welding current and speed: (A) Flux 1; (B) Flux 3.

속도를 변경하며 용접하는 경우 적정 용접전류 이하에서는 용입부족을 나타내고 그 이상에서는 과도한 비드 높이를 나타낸다. 한편 적정 용접속도 이하로 용접하면 비드 폭이 과도하게 되고 그 이상에서는 undercut을 발생시킨다. 본 연구에서 용접 작업성의 지표로 삼고 있는 용입깊이/폭의 비가 0.5를 나타내는 용접조건 범위는 이러한 용접결함을 형성하지 않고 적절한 비드 형상을 나타내는 용접조건 범위라 할 수 있다. Hazlett는⁷⁾ 순수한 단일 성분계의 플럭스를 사용하여 용입깊이를 측정할 결과 CaCO₃, K₂CO₃, CaF₂는 얇은 용입을, MgO, SiO₂, Na₂CO₃, MnO₂, Al₂O₃, Na₂SiO₃는 중간정도의 용입을, 그리고 MgCO₃는 깊은 용입을 나타낸다고 하였으며, Jackson과 Shruballs은⁸⁾ MnO의 첨가는 깊은 용입을 나타낸다고 하였다. Schwemmer 등은⁹⁾ 플럭스 구성에 따른 용입깊이 변화를 용융플럭스, 즉 슬래그 점도, 아크 안정성 그리고 슬래그/용융금속, 슬래그/모재 사이의 계면장력으로 설명

하였다. 그들에 따르면 슬래그 점도가 클수록 용입깊이가 증가하는데 이것은 비드 퍼짐을 저해하여 아크가 좁은 면적을 통하여 전달되기 때문이다. 같은 이유로 안정한 아크의 발생도 용입깊이를 증가시킨다. 한편 슬래그/용융금속의 계면장력 (γ_{FL})이 클수록, 슬래그/모재 사이의 계면장력 (γ_{FM})이 작을수록 용입이 깊어지는데 이것은 용융금속 표면적이 감소되어 열효율이 증가하기 때문이다. 이러한 연구결과를 토대로 본 연구에서 용융형 1번 플럭스가 소결형 3번 플럭스 보다 깊은 용입을 나타내는 이유는 다음과 같이 설명할 수 있다. 본 연구에서 점도의 측정은 행하지 않았지만 1번 플럭스가 3번 플럭스보다 점도가 높을 것으로 생각한다. 그 이유는 1번 플럭스의 SiO₂는 39.6%인데 비하여 3번 플럭스의 SiO₂는 15.2%에 불과하다 (silica는 network구조를 가져 점도가 높다). Ferrera는¹⁰⁾ MnO-SiO₂ system에서 MnO가 증가할수록, MnO-SiO₂-CaO system에서 CaO가 증가할수록 아크 안정도가 증가하고 γ_{FM}/γ_{FL} 이 감소한다고 하였는데 이러한 경향은 상대적으로 많은 MnO와 CaO를 함유하는 1번 플럭스가 (MnO: 19.78%, CaO: 23.18%) 3번 플럭스보다 (MnO: 0.12%, CaO: 14.63%) 깊은 용입을 나타내는 본 연구결과와 일치하고 있다.

용접과정 중 슬래그 혼입은 플럭스 용융특성에 큰 영향을 받는다. Figure 8에 용융형 1번 플럭스의 가열온도에 따른 연화, 용융 및 유동과정의 고온현미경 사진을 나타내었다. DIN규격에 의하면 연화온도는 1162℃ (A), 용융온도는 1180℃ (B), 유동온도는 1268℃ (C)를 나타내고 있다.

Figure 9에는 소결형 2번과 3번 플럭스의 고온현미경 사진을 나타내었다. 2번 플럭스의 경우 연화온도는 1358℃ (A), 용융온도는 1516℃ (B)를 나타내고 있으나, 유동온도는 1600℃ 까지 측정되지 않아 그 이상의 온도일 것으로 생각되며, 3번 플럭스는 연화온도가 1408℃를 나타내나 (C) 용융온도 및 유동온도는 1600℃까지 측정되지 않았다. 따라서 소결형 플럭스가 용융형 플럭스 보다 용융온도가 높음을 알 수 있다. 이러한 점은 소결형 플럭스가 주로 대전류의 용접에 적용되는 사실과 잘 일치하고 있다.

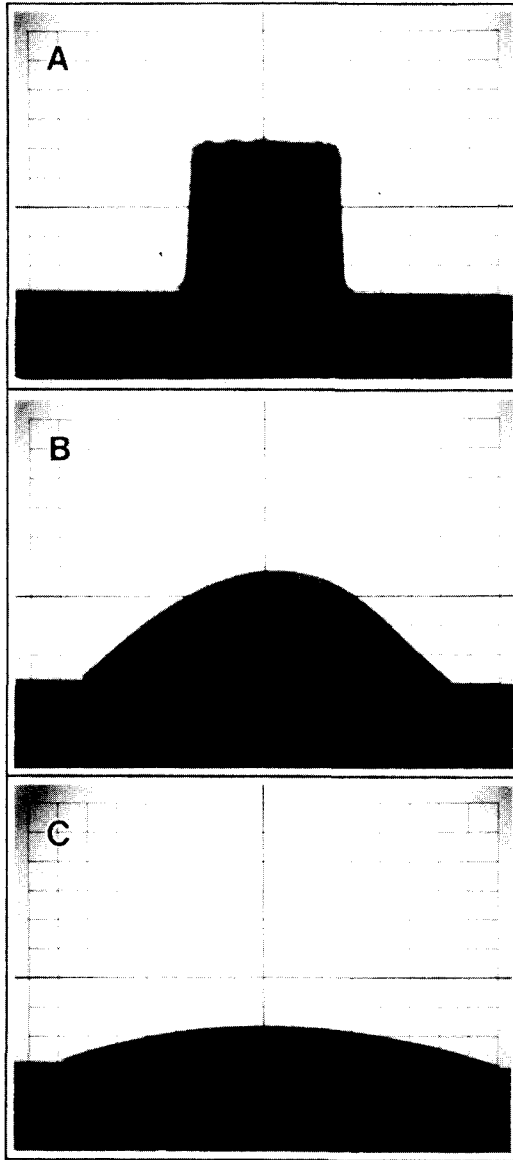


Fig. 8 Change in appearance of flux 1 on heating in heating microscope: (A) Softening; (B) Melting; (C) Flowing.

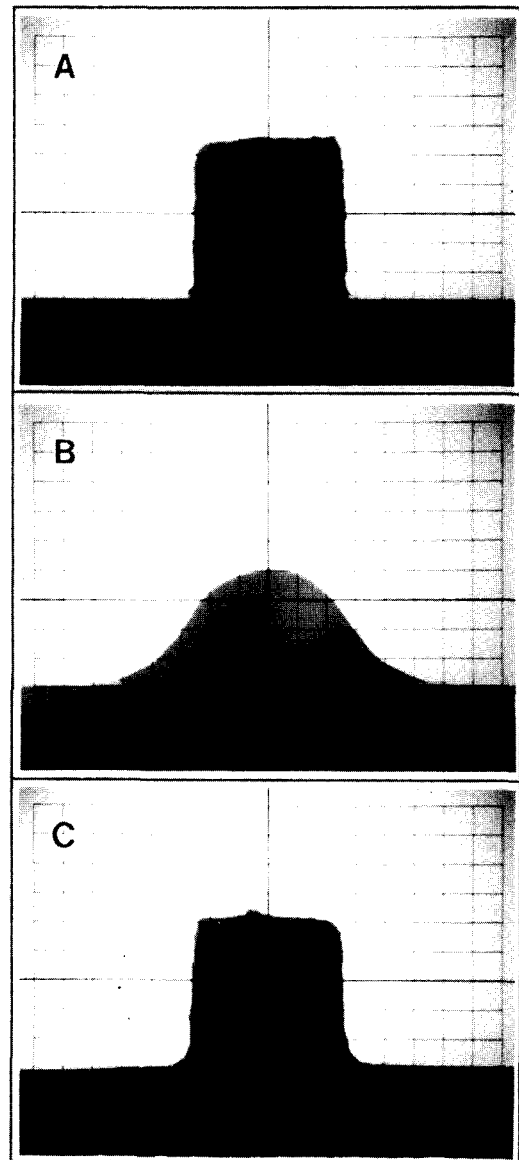


Fig. 9 Change in appearance of flux 2 and 3 on heating in heating microscope: (A) Softening and (B) melting of flux 2; (C) Softening of flux 3.

4. 결 론

60kgf/mm²급 C-Mo계 와이어를 사용하여 서브머지드 아크 용접하는 경우 플럭스 조성에 따른 용

접금속 인성과 용접작업성 변화를 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Ni첨가 alumina basic계 플럭스를 이용하여 용접한 경우 용접금속 인성이 가장 우수하였다. 이것은 적은 산소와 높은 경화능에 의한 침상페라

이트 증대효과 보다 Ni에 의한 기지 자체의 인성 향상 효과가 더욱 크기 때문이다.

(2) 용융형 manganese silicate계 플럭스는 소결형 alumina basic계 플럭스 보다 우수한 작업성을 나타내어 용입깊이/폭의 비가 0.5를 나타내는 용접조건 범위가 넓다 (manganese silicate계 플럭스: 600~750A, 40~80cpm; alumina basic계 플럭스: 700~800A, 60~80cpm).

(3) Manganese silicate계 플럭스의 용융온도는 1180℃를 나타낸 반면 alumina basic계 플럭스는 1516℃를 나타내어 소결형 플럭스가 대전류용접에 적합함을 나타내었다.

(4) 용접금속 산화물은 manganese silicate계 플럭스의 경우 MnO-SiO₂-TiO, alumina basic계 플럭스는 MnO-SiO₂-Al₂O₃-TiO를 형성하며, 이때 MnO-SiO₂는 2MnO · SiO₂ (tephroite)에 유사한 조성을 가진다. 구형의 산화물 주위에는 작은 편상의 manganese copper sulphide가 함께 존재하는 경우가 많다.

참 고 문 헌

1. N. Mori et al: Mechanism of notch toughness improvement in Ti-B bearing weld metals, IIW Doc. IX 1196, 1981
2. G. Evans: Effect of manganese on the

microstructure and properties of all-weld-metal deposits, Welding Journal, March, 1980, pp67s-75s

3. 中村成宏: サフ"マ-シ"ア-ク溶接用材料の選ひ"方, 溶接技術, No. 12(1971), pp53-58
4. T. W. Eagar: Sources of weld metal oxygen contamination during submerged arc welding, Welding Journal, March, 1978, pp76s-80s
5. S. Court and G. Pollard: Microanalysis of weld metal inclusions, Journal of Materials Science Letters, 4 (1985), pp427-430
6. 伊藤, 中西, 小溝: 溶接金屬の組織と靱性に関する研究 (第2報), 溶接學會誌, Vol. 51 No. 2(1982), pp111-118
7. T. Hazlett: Coating ingredients influence on surface tension, arc stability and bead shape, Welding Journal, January, 1957, pp18s-22s
8. C. Jackson and A. Shrubbsall: Control of penetration and melting ratio with welding technique, Welding Journal, April, 1953, pp 172s-178s
9. D. Schwemmer et al: The relationship of weld penetration to the welding flux, Welding Journal, May, 1979, pp153s-160s