

주철용접용 Ni-Fe계 용접봉용 와이어 국산화 개발연구

(A study on development of Ni-Fe wire for cast iron welding consumables)

최기용* 장웅성* 박종혁**

* 포항산업과학연구원 설비·용접팀

* 창원특수강 기술연구소

1. 서 언

Ni 및 Ni합금은 우수한 기계적성질과 내식성, 내열성을 지니므로 각종 화학장치(무기화학, 유기화학, 석유정제 등)나 고온장치(에틸렌플랜트, 수소제조플랜트의 가열관 등)에 이용되고 있다. 이들 Ni합금을 이용한 각종 설비의 제작은 다양한 용접방법에 의해 이루어지며 사용되는 용접재료의 경우 순Ni, Ni-Fe계, Incoloy계, Monel계, Inconel 및 Hastelloy계 합금 등 모재의 종류만큼이나 다양하다. Ni합금 용접재료의 우수한 용접부 특성 때문에 동종 성분간의 용접 외에도 각종 이종재료간 용접이나 주철의 보수용접, 9%Ni강을 이용하여 건조되는 LNG탱크 제작 등 특수분야에도 널리 적용되고 있어 그 용도는 실로 산업 전반에 걸쳐 다양하다고 할 수 있다.

현재 국내에서 사용되고 있는 각종 Ni 및 Ni합금 용접재료는 다양한 분야에서 상당량이 적용되어 97년도 기준 수입량이 약 400톤에 이르고 있으나 국산화 개발이 이루어지지 않은 관계로 수입가격이 매우 높게 책정되어 국내 제조업계에 상당한 원가 부담이 되고 있는 실정이며 업계의 활발한 제품개발 및 시장확대에 가장 큰 애로점으로 작용하고 있다. 이러한 관점에서 본 연구팀에서는 주철용접용 Ni 및 Ni-Fe 용접봉용 와이어를 국산화 개발하고 국내 용접재료 업계의 참여 하에 시제품 와이어를 이용한 용접봉 제조와 특성평가를 실시하여 용접봉의 완전국산화와 품질향상을 도모하고자 하였다. 본 연구에서는 일차적으로 Ni-Fe 용접봉용 와이어를 중심으로 와이어의 기본특성과 용접성 평가결과에 대하여 발표한다.

2. 실험방법

국산화 개발된 Ni-Fe 와이어의 화학성분은 Table.1과 같다. 이 와이어의 화학성분상의 특징은 Ni:Fe의 중량비를 약 55:45가 되도록 설계함으로써 주철 용접 후 모재로부터 성분 회석에 의해 최종 용착금속의 조성이 열팽창계수가 낮은 인바합금 조성에 근접하도록 하는 것이다.

Table.1 Chemical composition of Ni-Fe wire

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cu	Fe	O	N
0.026	0.01	0.067	0.002	0.001	55.14	-	Bal.	17ppm	2ppm

Ni-Fe 용접봉용 와이어는 국내에서 개발실적이 전무하고 고부가가치형 특수소재인 관계로 제품의 제조방법이나 특성과 관련한 정보 입수가 제한적이므로 현재 시판 중인 용접재료를 다양하게 입수하여 사용 와이어의 전기적, 화학적, 기계적 특성을 조사하였다. 본 실험에서 평가한 피복아크 용접재료는 Table.2 같다. 이 중 국내 재료업체의 시판 용접봉의 와이어 또한 전량 수입품이다.

Table.1 Covered electrode used.

Product nation	Imported				Domestic			
Brand Name	DM 150	MG 260	GRICAST 3	Nickel 55	A	B	C	D
Manf. Company	니찌와	Messer	Lincoln	W.A.	A CO.,LTD	B CO.,LTD	C CO.,LTD	D CO.,LTD

이러한 시판용접재료에 대한 특성평가(전기적 특성, 용접작업성, 조직특성, 기계적특성)를 실시하고 용접작업성은 별도의 판단기준에 의거하여 상대 평가하였다. 먼저, 와이어의 전기적 특성(비저항)은 용접시 봉 적열현상에 의한 용접작업성과 밀접한 관계가 있으므로 제품별 비저항 특성을 비교 조사하였다. 비저항은 0°C에서 단위길이당 단면적의 도체저항이다. 따라서 아래의 식과 같이 나타내어진다.

$$\rho = \left(\frac{A}{l} \right) R$$

여기서, 단면적 A는 각 시험편의 지름에 따라 결정되고 길이 l은 200mm의 동일한 조건에서 측정하였다. 전류는 100mA(100×10⁻³A)으로 일정하게 가해 주었으며 이때의 전압을 측정하여 비저항을 구하였다.

용접작업성은 각 용접봉 maker가 추천하는 적정 용접조건 범위 내에서 동일한 조건으로 실시하였다. 전류는 100A 정전류 조건으로 예열없이 200×200×20mm 회주철 모재에 bead on plate 용접을 적용하면서 아크특성(아크집중성, 안정성, 소리)과 슬라그 특성(유동성 및 박리성), 비드퍼짐성과 용융성, spatter 발생, 봉가열현상 등에 대해 평가하였고 이와 같이 실용접시험에 의해 평가된 용접봉에 대해 bead 외관 및 단면관찰을 실시하였다.

조직적 특성은 각종 용접부 시험편에 대해 용접금속의 조직, 개재물 및 결합에 대해 광학현미경과 SEM, EPMA 등을 이용하여 조사하였다. 전용착금속의 기계적성질을 조사하기 위하여 비커스 경도 시험을 이용하여 bead on plate 용접부에서 모재와 용접금속간의 경도 변화를 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 전기적 특성

Ni-Fe 와이어의 전기비저항을 대표적인 금속과 함께 Fig.1에 나타내었다. A와 B 및 DM 150 제품의 전기저항률은 순 Ni 금속의 6배정도 높은 값을 지닌다. 시제품 와이어의 전기저항률은 현재 국내 용접재료업체가 수입하여 사용 중인 와이어 특성과 유사한 수준이다. Ni-Fe 와이어를 내부 Ni 심선을 Fe 관으로 둘러싼 형태의 2중관 형식으로 제조한 GRICAST3 용접봉 심선은 전기저항률이 통상 제품의 1/3 수준으로 낮은 값을 나타내고 Ni-Fe 심선에 Cu 도금을 실시한 Nickel 55 제품의 경우 전기저항률은 이보다 조금 낮은 연강 수준이다. 한편, MG 260은 통상의 심선과 특별한 차이가 없는 데도 불구하고 전기저항률이 타제품보다 약 15% 정도 낮다. 여기서 MG 260 제품이 낮은 전기저항 특성을 보이는 이유를 살펴보기 위해 와이어 성분상의 특이점을 EDX를 이용하여 살펴보았고 그 결과를 Fig.2에 비교하였다. 전체적으로 Ni-Fe를 주성분으로 하고 Mn, Si가 첨가된 화학조성을 가지며 Ni 및 Fe 성분에 다소 차이가 있음을 알 수 있다. Ni 함량은 MG 260이 가장 높고 Fe 함량은 시제품이 가장 높은 특징을 지닌다. 여기서 MG 260의 낮은 전기저항률이 화학성분상 Ni/Fe 함량비가 다른 제품에 비해 높은 점과 관련이 있는지 검토하였다. Fig.3은 Ni-Fe 2원계 합금에 있어서 성분 변화에 따른 전기저항을 나타낸 것으로 Ni, Fe 순금속에 비해 합금성분이 증가하면 전기저항은 증가하는 경향을 나타낸다. 이것은 Ni-Fe 합금의 결정구조가 달라지면 전기저항이 급격하게 변함을 의미한다. 즉, 약 30%Ni 조성을 기준으로 그 이상일 때는 오스테나이트 조직을 가지며 그 이하의 페라이트 조직에 비해 약 2배 정도 높은 전기저항을 보인다. 따라서 앞서 MG 260의 낮은 전기저항은 Ni-base 합금에서 Fe 함량이 낮다는 점과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

3.2 작업성 관련 용접 특성

Ni-Fe 용접봉의 작업성 평가결과 MG 260 및 GRICAST3 용접봉은 전반적으로 우수한 용접작업성을 지닌 것으로 판명되는데 이는 와이어 제조시 봉가열 저감을 위한 특수 제조기술 도입과 피복제 배합의 특수성에 기인한 것으로 판단된다. 국산 용접봉 중 B 제품은 외국제품과 대등한 수준의 우수한 작업성을 지니고 있으며 그 외의 제품들은 아크 특성, 슬래그 특성, 특히 봉가열 현상 등이 다소 불안정한 것으로 비교된다. 국산 용접봉에 있어서 와이어를 시제품으로 교체한 결과 국산제품은 다소 향상된 결과를 보인다. 한편 위의 작업성 평가결과에서 용접작업자에 의해 주관적으로 평가된 용접봉별 작업성 비교우위를 객관적 기준에 의해 검증하기 위한 작업으로 비드 퍼짐성 평가 결

과를 단면 마크로 조직에서 구한 비드의 aspect ratio(비드 폭/비드 높이)항으로 확인하였다. Fig.4는 aspect ratio와 비드 퍼짐성에 대한 평가와의 관련성을 나타낸 것이다. 즉, 본 연구에서 정의한 비드 높이에 대한 비드 폭의 비는 용접작업성 평가 항목 중 비드 퍼짐성과 양호한 상관성을 지닐 수 있다.

3.3 조직 특성

Ni-Fe 용접봉을 이용한 용착금속 미세조직 관찰결과 용접봉에 따라 응고조직, graphite 상의 크기 및 분포, 마크로 편석에 의한 이상조직 형성 등 조직특성이 달라진다. MG 260, GRICAST3 등 선진 용접봉에 의한 용착금속의 미세조직은 균일한 셀상 수지상 응고조직을 바탕으로 미세한 graphite 입자가 고르게 분산된 조직형태를 보인다. 국산 용접봉에 의한 용착금속 조직은 거시적 편석에 의한 조직의 불균일성이 존재하고 graphite의 입자 크기나 분포가 균일하지 못한 특징이 관찰된다. 이 결과는 용착금속의 미세조직은 용접봉의 작업성과 밀접한 연관이 있음을 의미한다. 즉 용접작업성이 우수할수록 용착금속의 조직은 거시적 편석이 존재하지 않으며 균일한 셀상 수지상 응고조직을 바탕으로 미세한 graphite 입자가 고르게 분산된다는 것이다. 한편 크기는 조금씩 차이가 있지만 시제품을 포함한 거의 모든 제품의 bond line 근방의 용착금속에서 blowhole이 발생하였다. 이 원인은 용접봉의 흡습이나 용접 중 모재에서 탄소의 연소가스 중의 하나로 생각한다. 이 중 용접시 주철의 특성에 의한 모재의 graphite에서 탄소의 연소가스에 의해 blowhole이 발생하는 것이 가장 타당한 원인으로 생각되며 이를 방지하기 위해서는 가능한 용입을 줄이거나 예열을 행해야 할 것으로 판단된다. 또한 일부 제품에서 underbead crack이 발생하였다. underbead crack의 원인은 용접부의 급냉 때문으로 생각되며 이를 방지하기 위한 대책으로는 적당한 예열과 서냉이 필요하리라 판단된다.

3.4 기계적 특성

기계적 특성평가의 일환으로 bead on plate 용접한 시험편을 이용하여 용접부 단면으로부터 주철 모재에서 용접금속으로 연속 경도를 용융선의 수직방향으로 측정하여 각 부위별 경도 수준을 비교하였다. Fig.5는 NiFe 용접봉에 대한 비커스 경도 측정 결과를 나타낸 것이다. 주철 모재의 경우 Hv 150 수준으로 회주철의 전형적인 경도값을 나타낸다. 용접열영향부의 경우 bead on plate 용접을 예열없이 두께 20mm 판에 약 5kJ/cm의 소입열 용접을 실시하였으므로 회주철 조직의 경화가 심하게 발생할 수 있다. 이는 경도 실험 결과에서도 잘 나타나는데 C 제품과 GRICAST3의 경우 최고경도가 Hv 427, 429 수준으로 모재에 비해 매우 높다. 나머지 NiFe 용접봉의 경우 약 Hv 350~370 수준의 최고 경도를 나타낸다. 이러한 열영향부 경화는 주철 용접시 발생하는 백선화 현상과 관련이 있다. 이러한 백선화를 억제하기 위해서는 용접시 약 150℃ 정도의 예열을 실시하면 효과적이라고 알려져 있다.

4. 결론

이상의 실험결과로부터 국내 용접재료업체와 공동으로 추진한 시제품 와이어를 적용한 국산 용접봉의 작업성 수준은 수입와이어를 이용한 기존의 용접봉에 비교하여 거의 동등 수준 또는 그 이상의 작업성이 얻어지는 것으로 결론지었다. 그러나 와이어의 화학조성과 관련하여 MG260 와이어의 예에서 보듯이 Ni-Fe 2원계에서 Fe 함량이 증가할수록 전기저항은 증대되므로 Fe 함량을 가능한 낮게 관리하는 방안이 검토될 수 있으나 소재의 제조원가가 상승하는 문제가 있으므로 적절한 함량 조절이 필요하다. 그리고 용접봉의 용접작업성은 역시 피복제의 배합비 및 사용 원재료의 조건에 의해 가장 민감하게 영향을 받으므로 본 연구 결과 얻어진 수입 완제품과 국산용접봉의 작업성 차이를 근간으로 이에 대한 개선노력이 다각적으로 검토되어야 할 과제이다.

후 기

본 연구는 포항종합제철의 연구비 지원에 의하여 이루어진 내용의 일부로서 이에 감사 드립니다. 또한, 본 재료개발에 참여한 창원특수강, 현대중합금속, 고려용접봉, 조선선재, 세아ESAB사 관계자 여러분께 감사 드립니다.

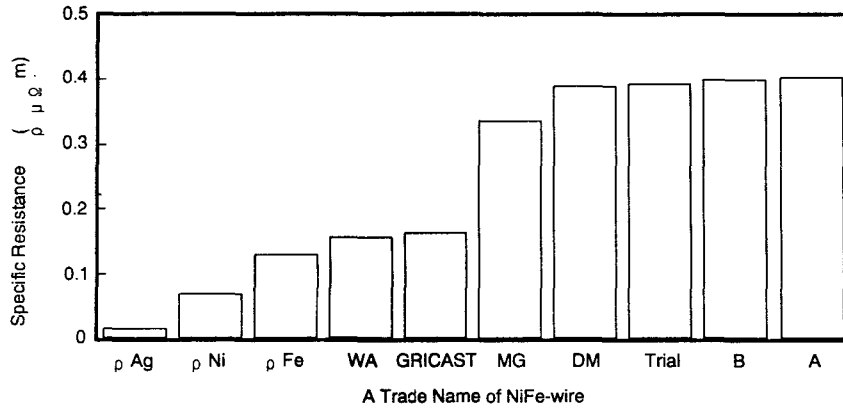


Fig.1 Comparison of specific resistance of Ni-Fe wires

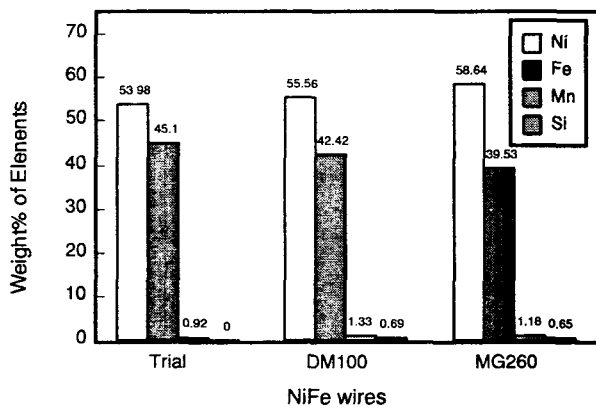


Fig.2 Comparison of chemical compositions in various Ni-Fe wires with different electrical resistivity

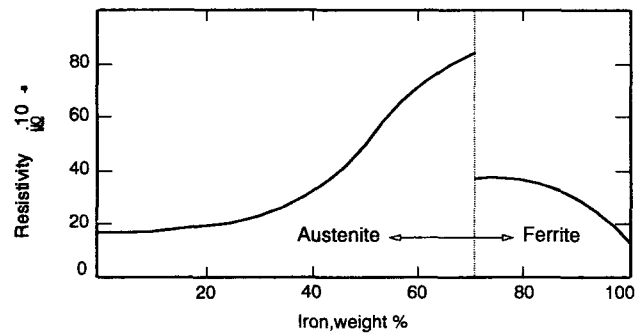


Fig.3 Electrical resistivity of Nickel-Iron alloys

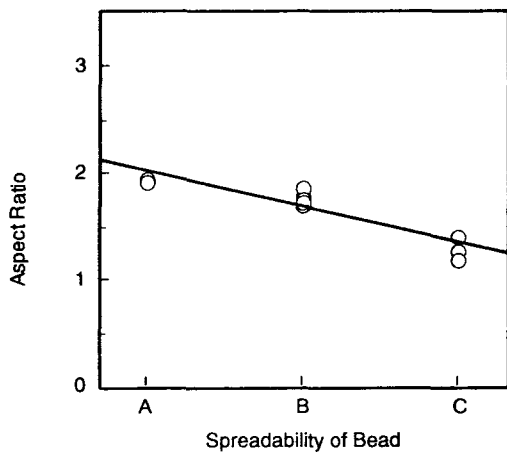


Fig.4 Correlation between spreadability and aspect ratio

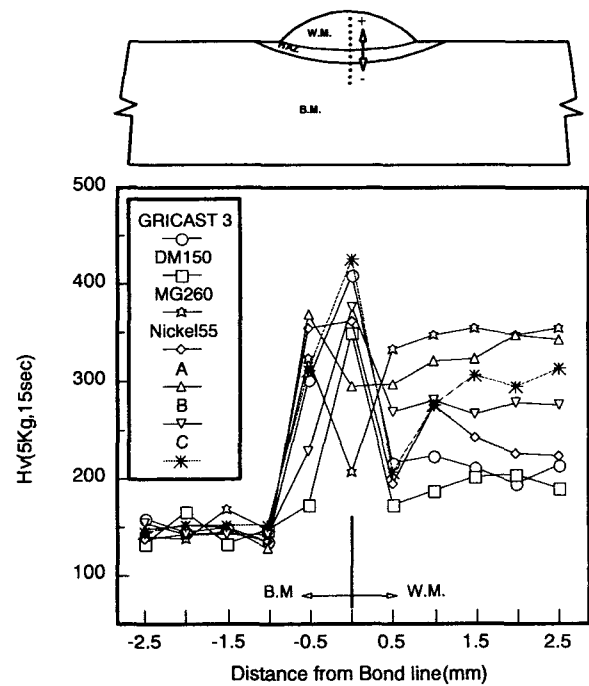


Fig.5 Vickers hardness distribution profiles of various Ni-Fe