

극저온용 국산 Inconel계 피복아크용접봉의 특성 평가

Evaluation of Newly Developed Inconel-Type Electrodes for Cryogenic Applications

김영천*, 장웅성**, 이종섭**, 정현호***

*현대중합금속(주) 기술연구소, 경북 포항시

**포항산업과학연구원 설비용접연구팀, 경북 포항시

***한국가스공사 연구개발원, 경기도 안산시

1. 서언

9%Ni강은 LNG 저장온도인 약 -162°C 에서도 우수한 저온인성과 강도를 지니는 페라이트계 재료로서 열팽창계수가 적으며 용접성이 우수할 뿐만 아니라 다량으로 안정적 공급이 가능하여 사용 실적이 증대되고 있으며, 국내에서는 1990년에 들어와 본격적인 개발에 착수하여 최근 들어 선진국 제품과 동등 이상의 우수한 품질 특성을 갖는 9%Ni강을 QLT법을 이용하여 개발하고 국내 LNG 탱크 제작에 공급하고 있다.

이러한 극저온용 9%Ni강 용접에 적용되는 용접재료는 용접금속의 강도 및 열팽창계수가 모재와 비슷하고 극저온에서 높은 인성이 요구되며 동시에 용접작업성도 우수하여야 한다. 이러한 특성을 만족하는 재료로서 종래부터 Ni합금인 Inconel계 합금이 가장 널리 사용되고 있으나 고Ni계 9%Ni강용 용접재료의 경우 선진국에서 기술 이전을 극구 기피하는 고부가가치 제품으로서 LNG 탱크의 국산화 제작을 위해서 모재의 국산화와 함께 독자적인 제조기술 확보가 요구되고 있다. 이를 위해 본 연구에서는 Inconel계 피복아크용접봉 중 현재 국내 현장에서 주로 사용되는 ENiCrFe-4계 재료를 중심으로 시판 제품 및 개발품에 대한 비교 및 검토를 통해 국산 용접봉의 제조기술을 확립하고 개발품에 대한 전반적 특성을 평가하였다.

2. 실험방법

Inconel계 SR-134 개발품은 AWS A5.11 ENiCrFe-4계에 해당하는 피복아크 용접봉으로 Ni합금의 용접이나 탄소강, 스테인레스강, Ni기 합금, Ni간의 이종금속 용접에 적용된다. 현재 일본 및 국내에서 9%Ni강용으로 가장 널리 적용되고 있는 용접봉은 ENiCrFe-4계로서 inner-shell vertical 용접, inner-annular plate용접 등 대부분의 탱크 용접시공이 이 계통의 용접봉을 이용한 수동용접에 의해 이루어지고 있다. ENiCrFe-4계는 ENiCrFe-2계 보다 고강도의 용접봉으로 9%Ni강의 용접시 아크 스퍼링을 방지하기 위하여 교류용접을 적용할 때 사용되어진다. 본 연구에서는 시판재 및 개발품에 대하여 용접금속의 특성을 평가하고 모재인 9%Ni강 적용에 따른 용접이음부 기계적성질 및 고온균열 감수성을 평가하였다.

3. 실험결과

3.1 화학조성 및 기계적성질

시판제품 및 개발품은 각종 화학적, 물리적 시험을 통해 제품별 특성을 비교 평가하여 각종 기계적 성질과 조직의 상관성을 조사하였다. Table 1에는 개발제품에 대한 전용착금속의 화학성분을 나타내고 있으며 개발품인 SR-134의 화학성분은 72Ni-16Cr-1.5Mo-1.8Nb의 성분계로써 ENiCrFe-4계 규격이 정한 성분 범위를 만족하고 있다. 반면에 시판종인 Yawata Weld B, NIC-70Sp에 비해 Cr함량이 높고 C함량이 낮은 특성을 지니는데 이는 사용한 심선의 조성 차이에 기인한 것으로 생각된다.

Table 2는 각 재료별 전용착금속의 인장 및 충격 시험결과를 정리한 것으로 ENiCrFe-4계 개발품인 SR-134의 경우 인장강도가 69.4kgf/mm^2 으로 규격 강도를 만족하며 연신율은 40.5%의 높은 값을 나타내지만, 9%Ni강 모재의 ASTM 인장강도 규격인 $71\text{--}85\text{kgf/mm}^2$ 과 비교시 규격의 하한 또는 규격 이

하의 값에 해당하는 낮은 수준임을 알 수 있는데 이는 Inconel계 용접봉의 일반적인 현상이다. 한편 개발품인 SR-134의 저온 충격인성값은 -196℃에서의 흡수에너지가 평균 73J로서 Yawata Weld B(M)나 NIC-70Sp의 경우에 비해 향상된 저온인성 특성을 나타낸다.

모재인 9%Ni강에 적용된 용접이음부의 기계적 시험결과를 Table 3에 나타내었다. 인장강도의 경우 모재와의 희석에 의한 강도상승으로 용착금속의 인장강도와 유사(V-up)하거나 그 이상(flat)의 값을 나타내고 있다.

Table 1 Chemical compositions of all-weld metals

Electrodes	Chemical Compositions(wt%)									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Fe	Mo	Nb	Ni
Spec.(ENiCrFe-4)	≤0.20	≤1.0	1.0-3.5	≤0.03	≤0.02	13.0-17.0	≤12.0	1.0-3.5	1.0-3.5	≥60.0
SR-134	0.040	0.23	1.47	0.014	0.003	16.26	5.25	1.55	1.85	72.34
Yawata Weld B(M)	0.065	0.22	3.05	0.016	0.003	15.87	11.63	2.72	1.65	63.92
NIC-70Sp	0.050	0.22	2.20	0.018	0.005	14.26	10.46	3.74	1.36	66.73

Table 2 Mechanical properties of all-weld metals

Electrodes	Dia (mm)	Tensile Properties		Impact Properties (Joule)	
		T.S(kgf/mm ²)	EL.(%)	R.T	-196℃
Spec.(ENiCrFe-4)		≥66.3	≥20	N/A	
SR-134	4.0	69.4	40.5	87	73
Yawata Weld B(M)	4.0	72.0	41.3	72	56
NIC-70Sp	4.0	69.1	42.0	84	71

Table 3 Tensile test results of butt-joint

Welding position	T.S (kgf/mm ²)	Location of fracture	CVN-Impact value (Joule)		
			Test Temp.	R.T	-196℃
Flat	72.5	Weld metal	Flat	108	85
			V-up Face	86	79
Vertical-up	69.4	Weld metal	V-up Root	91	76

3.2 미세조직관찰

용착금속의 조직특성은 광학현미경과 SEM을 이용하여 조사하였으며 Fig.1에 조직특성을 정리하였다. 응고형태는 fcc 단상응고 특성을 보이고 모재인 9%Ni강과의 용융선을 따라 분명한 경계조직이 형성되어 있음을 알 수 있다. 용착금속 조직은 전형적인 주상정 응고조직을 나타내며 주상정 조직은

용접 비드 경계를 지나서 연속적으로 성장되는 전형적인 epitaxial growth 특성을 지닌다. 주상정 조직의 SEM을 이용한 고배율로 관찰결과 제2상이 주상정 경계를 따라 형성되어 있음을 알 수 있다. 용착금속 조직의 화학성분 분석결과와 유사한 성분을 나타내고 괴상의 밝은 contrast를 띤 제2상은 Nb, Mo가 주성분인 화합물이고 괴상의 화합물은 알루미늄 계열의 산화물임을 알 수 있다.

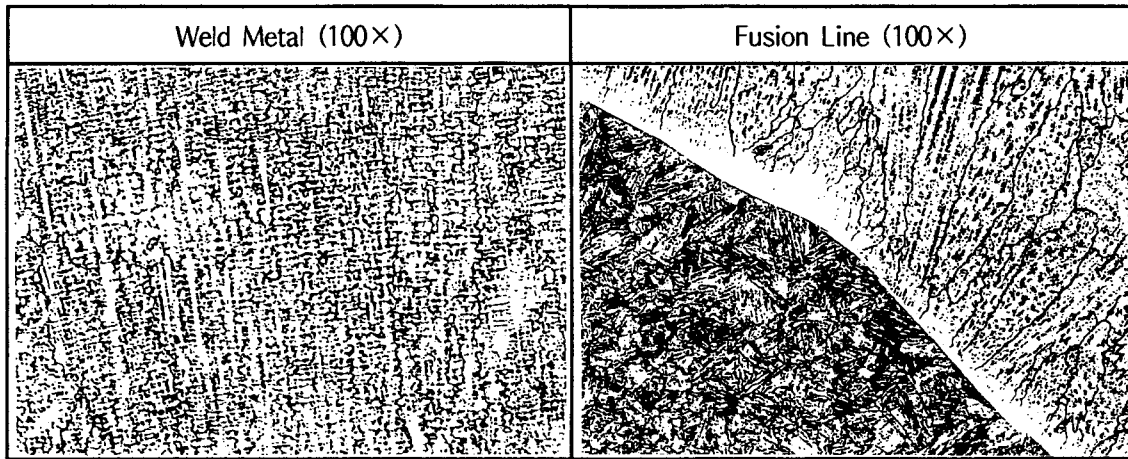


Fig.1 Microstructures of SMA welded joint using SR-134 covered electrode

3.3 고온균열감수성

각종 용접재료의 응고균열 감수성은 일본공업규격(JIS)에 규정되어 있는 C형지그 구속 맞대기용접 균열시험 방법(Z3155)과 Mini-Varestraint 균열시험법을 이용하여 평가하였다. FISCO 시험법이라 불리는 C형지그 구속 맞대기용접 균열시험 방법에 의한 평가 결과 응고균열은 주로 비드 starter부와 crater부에서 집중적으로 발생하는 경향을 보였고 각 제품별 응고균열감수성을 비교하기 위하여 용접 부를 강제 파단하여 Crack Ratio를 구하여 정성적으로 비교하였을 때 아래 도표에서 보는 바와 같이 전반적으로 개발품은 시판제품과 유사한 응고균열감수성을 지니는 것을 확인하였다.

제품별로 보다 정량적인 균열감수성 차이를 확인하기 위해서 Mini-varestraint 시험법으로 각 재료별 용착금속의 고온균열감수성을 평가하였다. 이 시험법에서는 GTA 용접을 이용하여 제살용접 (autogeneous)을 실시하는데 두께는 3mm로 하였고, 용접전류는 75-85A 범위, 용접속도는 150-200mm/min.의 범위에서 조절하였으며 Ar 유량은 15ℓ/min.이었다. 본 연구에서는 균열감수성 지수로서 가장 범용적으로 사용되는 TCL(Total Crack Length)을 이용하여 균열감수성을 평가하였고 전체 균열 발생율에서 개발품이 상대적으로 우수한 결과를 나타내었으며, 취성온도 범위(BTR, Brittle Temperature Range)를 나타내는 MCL 측정 결과 최대균열길이는 NIC-70Sp가 개발재에 비해 약간 작게 나타났으며 Yawata weld B(M)이 개발재와 유사한 결과를 나타내었다. 이상의 결과로부터 개발품의 고온균열 감수성면은 시판제품에 비해 동등 또는 그 이상의 성능을 나타냄을 확인하였다.

Table 4 Hot crack resistance test results by using varestraint method

Electrode	Crack sensitivity (%)			
	TCL		MCL	
SR-134	5.0	5.0	0.80,	0.83
Yawata weld B(M)	5.5,	7.2	0.73,	0.89
NIC-70Sp	5.2,	7.4	0.64,	0.67

Note : TCL (Total Crack Length)

MCL (Maximum Crack Length)