

9%Ni강용 국산 피복아크용접봉의 용접부 특성

장웅성, 김상록*, 홍성호**

포항산업과학연구원, 현대중합금속 기술연구소*, 한국가스공사 연구개발원**

Welding Characteristics of Newly Developed Ni-based Covered Electrodes for 9%Ni Steels

Woong-Seong Chang, Sang-Rok Kim*, Seong-Ho Hong**

Research Institute of Industrial Science & Technology(RIST),

Hyundai Welding Co.*, KGC R&D Center**

1. 서 언

우리 나라에서는 1987년 에너지 다원화 정책의 수립과 함께 천연가스의 사용이 본격화 되었으며 전체 에너지 중 천연가스가 차지하는 비중은 1990년의 3.2% 수준에서 2006년에는 18.3%로 높아지게 될 것으로 예상된다¹⁾. 이러한 추세에 근거하여 LNG저장탱크는 1987년 평택에서 처음으로 건설이 시작된 이래 1997년 현재 10만³급 지상식 membrane PC 형식의 탱크 7기가 완성되어 가동 중이며 또한 9%Ni강을 사용하는 지상식 PC LNG 탱크 3기도 인천 인수기지에서 현재 운용 중에 있다.

LNG 저장탱크용 9%Ni강은 LNG 저장온도인 약 -162°C에서도 우수한 저온인성과 강도를 지니는 페라이트계 재료로서 열팽창계수가 작으며 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, 높은 전류를 사용하는 자동용접의 경우에는 Mo를 첨가하여 고온균열 특성을 개선한 Hastelloy계 합금도 사용되고 있다²⁾. 저장탱크의 일반현황과 용접기술 등에 대해서는 대한용접학회에서 '지상식 LNG탱크의 용접기술'이란 주제의 특집³⁾을 통해 상세히 다룬 바 있으므로 참고하기 바란다.

고Ni계 9%Ni강용 용접재료의 경우 선진국에서 기술이전을 극구 기피하는 고부가가치 제품으로서 LNG 탱크의 국산화 제작을 위해서 모재의 국산화와 함께 독자적인 제조기술 확보가 요구되고 있다. 이를 위해 본 연구에서는 지금까지 개발된 제품들에 대하여 심선과 피복체의 특성 분석작업과 함께 제조과정 및 용접시공시 발생 가능한 제반 문제점들에 대한 깊이 있는 검토를 통해 국산 용접봉의 제조기술을 확립하고 작업성, 용접성 및 용접이음부 성능을 평가하여 현장 적용 가능성을 조사하였다..

2. 이론

현재 9%Ni강을 사용하는 LNG 탱크 시공은 앞서 언급한 바와 같이 거의 용융용접에 의해 이루어지고 있다. 9%Ni강이 우수한 저온인성을 지닐 수 있는 것은 첨가된 Ni 조성만에 의한 것이 아니라 제조공정 상에서 적절한 열처리를 실시함으로써 얻어지는 것이다. 이에 비해 LNG 탱크와 같은 대형 구조물은 용접 후 열처리가 불가능하기 때문에 용접된 상태에서 우수한 저온인성을 확보하기 위해서는 용접상태에서 우수한 강도와 인성을 얻을 수 있는 Ni 합금 용접재료를 주로 사용하게 된다. 이러한 재료를 이용하여 9%Ni강을 용접하는 것은 일종의 이중재료 용접이기 때문에 용접시공시 여러 가지 주의사항을 준수하지 않으면 안된다⁴⁾.

우선 9%Ni강용 Ni합금 용접재료를 이용한 용융용접시 Ni기 초합금 용접에서와 마찬가지로 각종 고온균열(응고균열, 액화균열 및 연성저하균열)과 blow hole, 용접후열처리(PWHT)시 발생하는 재열균열 등의 용접결함이 발생하기 쉽다. 특히 Ni계 합금은 오스테나이트 조직이기 때문에 기본적으로 고온균열이 발생하기 쉬워, 9%Ni강용 용접재료 개발시 이 고온균열 문제의 해결이 매우 중요하다. 다량의 Mo가 첨가된 Hastelloy계 용접봉은 Inconel계에 비해 내응고균열성이 양호한 용접금속을 얻는 것이 가능하지만 다층용접과 같이 반복 열이력을 받는 경우 재열균열이 발생하기 쉽다. Hastelloy계 용접봉에서 용접금속의 재열균열 발생원인은 용접부 결정립계에 저용점 Mo 산화물이나 Ni 황화물 등의 형성과 관련된 것으로 알려져 있다. Ni기 합금으로 9%Ni강을 용접할 때 흡습한 용접재료를 사용한 경우에는 열영향부에 저온균열이 발생할 가능성이 있다. Ni계 합금의 용접금속은 상온에서 확산성수소가 전혀 없기 때문에 이러한 수소는 용접금속의 냉각과정 중 용접금속으로부터 열영향부로 확산된 것으로 추측되어 균열은 수소에 기인한 지연균열이라고 생각된다. 따라서 용접부의 기름, 수분 등을 완전히 제거하고, 용접봉 및 플럭스를 충분히 건조하여야 하며 한냉지에서 용접할 시에는 모재를 예열하는 등 주의를 필요로 한다.

이상과 같은 용접결함 외에도 9%Ni강과 Ni 합금은 화학성분이 크게 다르므로 9%Ni강 모재의 회석이 용접금속 성능에 큰 영향을 미치며 필요 강도를 확보하기 위하여서는 지나친 모재 회석을 피하여야 한다. 한편 연강에 비해 9%Ni강 모재는 높은 자성을 띄므로 용접시 아크가 한쪽으로 쏠리고 용착금속이 흠에서 이탈하여 용합불량이 발생하기도 하고, 심한 경우에는 용접이 불가능하게 되는 소위 아크 쏠림 현상이 발생하게 된다. 따라서 9%Ni강용 용접봉의 국산화를 위해서는 위에서 언급한 용접시 발생 가능한 각종 결함 및 특수현상에 대한 해결책이 고려된 제조기술 확보가 필수적으로 요구된다.

3. 실험

Ni합금은 주로 내열·내식합금으로서 이용되므로 피복아크용접봉에 대한 AWS A5.11-90 규격에서는 용착금속의 화학성분에 의해 Ni-Cr-Fe계, Ni-Mo계, Ni-Cr-Mo계 등으로 나누어 규정하고 있으며 JIS의 경우 Ni합금 용접봉에 대한 규격(JIS Z 3224)과는 별도로 9%Ni강용 피복아크용접봉에 대한 규격(JIS Z 3225)이 별도로 제정되어 Ni-Cr계 조성을 지닌 Inconel계 피복봉과 Ni-Mo계 조성의 Hastelloy계 피복봉으로 구분하고 있다.

9%Ni강용 Inconel계 피복아크용접봉은 AWS ENiCrFe계 재료가 가장 일반적으로 사용되고 있다. ENiCrFe-2는 동일성분의 Ni-Cr-Fe계 Ni합금의 용접이나 탄소강, 스테인레스강, Ni기 합금, Ni 간의 이중금속 용접에 적용되며, ENiCrFe-4는 ENiCrFe-2 보다 고강도의 용접봉으로 직/교류용접에 적용되며 9%Ni강의 용접시 아크 쏠림을 방지하기 위하여 교류용접을 적용할 때에 사용되어진다. ENiCrFe-2계에 비해 ENiCrFe-4계 용접봉

은 C 및 Mo 첨가량이 높고, ENiCrFe-3계의 특징은 용착금속의 고온균열 저항능을 개선하기 위하여 Mn을 다량 함유하는 특징을 보인다. 현재 일본 및 국내에서 9%Ni강용으로 가장 널리 적용되고 있는 용접봉은 ENiCrFe-4계로서 inner-shell vertical 용접, inner annular plate 용접 등 대부분의 탱크 용접시공이 이 계통의 용접봉을 이용한 수동용접에 의해 이루어지고 있다. 한편 유럽의 경우 9%Ni강을 이용한 LNG 탱크 건조에 ENiCrMo계 용접봉이 널리 이용되며 ESAB, Oerlikon 등의 회사에서 ENiCrMo-6, ENiCrMo-3 등의 제품이 상기 용도로 생산되고 있다. Table 1은 9%Ni강 용접에 적용되고 있는 피복아크용접봉에 대한 AWS규격을 정리한 것이다.

본 연구에서는 ENiCrFe-4 및 ENiCrMo-3계 용접봉을 개발 대상으로 하여 앞서 언급한 바와 같이 9%Ni강 용접봉에 요구되는 다양한 용접특성을 고려하여 독자적인 제조기술을 개발하였으며 여기서 시판재 및 개발재에 대하여 용접봉의 구성상 심선과 피복제로 나누어 살펴보고 이들 피복봉을 이용한 용접금속의 특성을 평가하였다.

Table 1 AWS specification of Ni alloy welding electrodes (AWS A5.11)

Specification	Chemical Compositions (wt%)										Tensile Properties	
	C	Mn	Fe	Si	Cu	Ni	Cr	Nb+Ta	Mo	W	TS MPa	EI %
ENiCrFe-2	0.10	1.0~3.5	12.0	0.75	0.50	62.0 min	13.0~17.0	0.5~3.0	0.50~2.50	-	≥550	≥30
ENiCrFe-4	0.20	1.0~3.5	12.0	1.0	0.50	60.0 min	13.0~17.0	1.0~3.5	1.0~3.5	-	≥650	≥20
ENiCrMo-3	0.10	1.0	7.0	0.75	0.50	55.0 min	20.0~23.0	3.15~4.15	8.0~10.0	-	≥760	≥30
ENiCrMo-6	0.10	2.0~4.0	10.0	1.0	0.50	55.0 min	12.0~17.0	0.5~2.0	5.0~9.0	1.0~2.0	≥620	≥35

1. Single values shown are maximum percentages.
2. Other elements are total percentage.

3.1 전용착금속 특성

시판용접봉 및 개발제품은 각종 화학적, 물리적 시험을 통해 제품별 특성을 비교 평가하고 각종 기계적성질과 조직의 상관성을 조사하였다. Table 2에는 개발제품에 대한 전용착금속의 화학성분을 나타내고 있다. 개발재인 SR-112DC재의 화학성분은 전체적으로 ENiCrMo-3 규격이 정한 성분 범위를 만족하고 약 62Ni-22Cr-9Mo-3.5Nb의 성분계를 지닌다. 반면에 ENiCrFe-4계 재료의 경우 규격 범위내의 조성을 만족하고 있으며 시판 중인 Yawata Weld B, NIC-70Sp에 비해 Cr 함량이 높고 C함량이 낮은 특성을 지니는데 이는 사용한 심선의 조성 차이에 기인한 것으로 생각된다.

Table 3은 각 재료별 전용착금속의 인장 및 충격 시험결과를 정리한 것으로 Mo가 약 9% 수준으로 첨가된 ENiCrMo-3계 재료가 ENiCrFe-4계 재료에 비해서 인장강도가 높게 나타나는 대신 연신율은 다소 감소하는 경향을 보인다. 개발품인 SR-112DC의 경우 시판중인 제품들에 비해 유사한 수준의 강도값을 유지하면서도 연신율은 아주 높은 값을 나타낸다. 충격시험의 경우 -196°C에서의 충격흡수에너지값이 평균 약 60J수준으로 AWS 규격에는 충격치와 관련한 제한이 규정되어 있지 않지만 JIS 규격에서 요구하는

34J 이상의 요구치를 거의 2배 이상으로 만족하는 값에 해당한다. ENiCrFe-4계 개발재인 SR-134의 경우 인장강도가 67.7kgf/mm²으로 규격 강도를 만족하며 연신율은 45.8%의 높은 값을 나타내지만 약 80kgf/mm² 수준의 인장강도를 지닌 ENiCrMo-3계 제품에 비해 낮은 값을 보인다. 이러한 ENiCrFe-4계 용착금속의 인장강도는 9%Ni강 모재의 ASTM 인장강도 규격인 690~825MPa과 비교시 규격의 하한 또는 규격 이하의 값에 해당하는 낮은 수준임을 알 수 있다. 한편 개발품인 SR-134은 시판되는 일본 제품들에 비해 매우 우수한 상온 및 저온 충격인성을 나타내는데 -196°C에서의 흡수에너지가 개발재는 평균 101J로서 Yawata Weld B(M)나 NIC-70Sp재의 경우보다 1.5배 정도 향상된 우수한 저온 인성값을 나타낸다.

Table 2 Chemistries of all weld metals

Electrodes	Dia. (mm)	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	4.0	0.034	0.21	3.26	0.010	0.003	16.21	11.64	2.52	1.49	63.47
Spec.(ENiCrMo-3)		≤0.10	≤0.75	≤1.0	≤0.03	≤0.02	20.0 -23.0	≤7.0	8.0 -10.0	3.15 -4.15	≥55.0
SR-112	4.0	0.021	0.41	0.90	0.012	0.005	21.67	0.40	9.05	3.47	62.17

Table 3 Mechanical properties of all weld metals

Electrodes	Dia. (mm)	Tensile Properties		Impact Properties	
		T.S (kgf/mm ²)	El. (%)	R.T (Joule)	-196°C (Joule)
Spec.(ENiCrFe-4)		≥66.8	≥20	N/A	
SR-134	4.0	67.7	45.8	101.0	88.0
Spec.(ENiCrMo-3)		≥77.4	≥30	N/A	
SR-112	4.0	82.4	44.9	80.0	58.7

3.2 작업성

작업성 평가는 본 연구팀의 자체 평가기준에 의거하여 아크, 슬라그, 비드 및 스패터 특성 등을 상대적으로 비교하였다. ENiCrMo-3계 개발품인 SR-112DC의 경우 1차 개발 완료 시점에서 아크안정성과 슬래그 유동성이 다소 떨어지는 것으로 나타났으나 지속적인 플럭스 조성 변화 시험을 통해 용접작업성은 전반적으로 양호한 수준이 확보된 상태이다. ENiCrFe-4계 개발품 SR-134는 현재 AC 작업조건에서 슬라그의 박리성과 유동성, 아크 안정성, 비드 외관과 퍼짐성 등 전반적으로 양호한 용접작업성을 보유하여 시판되고 있는 Yawata weld B(M) 및 NIC-70SP 제품에 비해 동등 수준 이상의 작업성이 확보 가능한 수준에 도달하였다.

3.3 고온균열감수성

본 연구에서는 각종 용접재료의 응고균열 감수성은 일본공업규격(JIS)에 규정되어 있는 C형지그 구속 맞대기용접균열시험 방법(Z3155)을 이용하여 평가하였다. FISCO 시험법이라 불리우는 이 시험은 홈 가공된 시험편을 시험장치에 삽입하여 상부와 측면의 나사를 이용하여 일정한 압력으로 시험편을 상하 좌우로 구속한 뒤 용접을 실시하며 용접 완료후 10분이 경과한 후 용접부를 강제 파단하여 전체 비드 길이에 대한 응고균열 발생 길이의 비를 측정한다. 시험용접시 전류 및 전압은 각각 약 120A, 25V로 일정하게 적용하였으며 Root Gap은 4mm로 하였다.

응고균열은 주로 비드 starter부와 crater부에서 집중적으로 발생하는 경향을 보인다. 각 제품별 응고균열감수성을 비교하기 위하여 용접부를 강제 파단하여 Crack Ratio를 구하여 정성적으로 비교하였으며 전반적으로 개발 용접봉은 시판 제품과 유사한 응고균열 감수성을 지님을 확인하였다. 제품별로 보다 정량적인 균열감수성 차이를 확인하기 위해서는 보다 다양한 용접조건 적용시험과 아울러 Vareststraint 시험 등과 같은 기존의 고온 균열 평가시험법 등을 함께 적용하여 본 실험 결과의 타당성을 검증할 필요가 있다고 판단되며 향후 이러한 실험들을 수행할 계획이다.

4. 결론

9% Ni강용 수동용접봉의 개발을 목표로 하여 본 연구를 수행하였으며 아래와 같은 성과를 얻었다.

1. ENiCrMo-3계 수동용접봉의 제조기준을 확립하고 시제품(상품명 SR-112) 생산을 성공적으로 완수하였다. 본 제품의 경우 상온 및 극저온 기계적성질이 시판재에 비해 우수하게 얻어지며 전반적으로 양호한 작업성 확보가 가능하였다.
2. ENiCrFe-4계 수동용접봉은 ERNiCr-3계 심선과 독자적인 플럭스 제원 조합을 통해 우수한 극저온 인성과 양호한 작업성 확보가 가능한 시제품(상품명 SR-134) 개발에 성공하였다.
3. 용접봉의 고온균열감수성 평가를 위한 시험체계를 구축하였으며 개발재의 고온균열감수성은 시판재와 유사한 수준으로 평가되었다.
4. 이상의 실험결과를 바탕으로 9%Ni강용 국산 피복아크용접봉의 실용접이음부 성능 시험, 대형 인장 및 파괴인성 시험 등을 거쳐 최종적으로 현장 적용이 가능한 국산 용접봉 생산이 가능할 것으로 판단한다.

후 기

본 논문은 한국가스공사의 연구비 지원에 의하여 이루어진 내용의 일부로서 이에 감사드립니다.

5. 참고문헌

- 1) 홍성호: 액화천연가스 저장탱크의 현황 및 전망, 대한용접학회지, 13, No.3, (1995), pp.1-7
- 2) 片山典彦, 今村和久, 山川武人, 廣瀬仁志: 地上式低温貯槽と溶接技術, 溶接學會誌, 63, (1994), pp.104-109조
- 3) 대한용접학회 편집위원회: 지상식 LNG탱크의 용접기술, 대한용접학회지, 13, No.3, (1995), pp.1-45
- 4) 杉山 暢, 西川 裕, 古賀保行: 9%Ni鋼の溶接および溶接材料, R&D 神戸製鋼技報, 28, No.4, (1978), pp.40-45