

特輯 : 용접재료의 연구개발 동향

9%Ni강용 Ni합금 용접재료

- 피복 아크 용접봉을 중심으로 -

장용성 · 김기철 · 김영천 · 김상록 · 김우식

Ni Alloy Welding Consumables for 9%Nickel Steel

- Welding Electrodes for Shielded Metal Arc Welding -

W. S. Chang, K. C. Kim, Y. C. Kim, S. R. Kim and W. S. Kim



장용성/포항산업과학연구원/1959년생/철강 및 비철재료 개발/용접아금:철강용접성 및 용접재료



김기철/포항 산업과학연구원/1948년생/용접현상 해석 및 공정 제어 System 개발



김영천/현대중합금속(주)/1966년생/용접아금:아크용접에서 아크현상 해석 및 응용에 관심



김상록/현대중합금속(주)/1952년생/용접아금:용융용접아금 및 용접시공에 관심



김우식/한국가스공사 연구개발원 재료연구팀/1963년생/천연가스 설비의 용접 및 파괴역학

1. 서 언

우리 나라에서는 1987년 에너지 다원화 정책의 수립과 함께 천연가스의 사용이 본격화되었으며 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 소재로서는 Al합금, 오스테나

이트계 스테인레스강 및 9%Ni강 등이 사용되고 있으며 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 있다. 이러한 9%Ni강은 1952년 미국에서 액체산소 (사용온도 -183°C)를 저장하는 탱크의 소재로 처음 사용된 후 1956년에 ASTM 규격으로 제정되었다. ASTM에서는 Quenching 과 Tempering처리한 QT재(A553)와 2회 Normalizing한 후 Tempering처리한 NNT재(A353)로 구분하여 규격화하고 있다. 일본의 경우 1969년 개발제품을 사용하여 최초로 4.5만³ 규모의 LNG탱크 4기를 건조한 후 1978년에 JIS 규격(G3127)을 제정하였다. JIS에서는 필요에 따라서

안정된 잔류오스테나이트를 활용하여 인성을 개선시키는 Quenching-Lamellarizing-Tempering (QLT) 처리를 할 수도 있다고 규정하고 있으며 최근 들어서는 가속냉각장치를 이용한 Direct Quenching-Tempering (DQT) 법을 통한 9%Ni강 생산이 시도되고 있다²⁾ 우리 나라에서는 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 있다³⁾

이러한 극저온용 9%Ni강 모재의 품질 개선 노력과 함께 용접기술은 새로운 용접재료의 개발, 장치의 적용, 시공기술의 향상에 따라서 품질, 능률면에서 급속히 발전하고 있다. 9%Ni강을 사용하는 LNG 저장탱크의 용접에는 SMAW (Shielded Metal Arc Welding), GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) 및 SAW (Submerged Arc Welding) 방법이 주로 적용되고 있으며, 1970년대 초기에는 SMAW가 대부분이었으나 최근에는 많은 부분이 자동화되고 있다⁴⁾. 그러나 국내에서는 SAW를 사용하는 일부의 수평용접부위를 제외하고는 대부분이 아직 SMAW만을 적용하고 있는 실정이다. 한편 이와 같은 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 있다. 저장탱크

의 일반현황과 용접기술 등에 대해서는 대한용접학회지에서 지상식 LNG탱크의 용접기술 이란 주제의 특집⁵⁾을 통해 상세히 다룬 바 있으므로 참고하기 바란다.

고Ni계 9%Ni강용 용접재료의 경우 선진국에서 기술이전을 극구 기피하는 고부가가치 제품으로서 국산화 개발을 위해서는 지금까지 개발된 제품들에 대하여 심선과 피복제의 특성 분석작업과 함께 제조과정 및 용접시공시 발생 가능한 제반 문제점들에 대한 깊이 있는 검토가 선행되어야 할 과제라고 할 수 있다. 따라서 본 해설에서는 피복아크용접봉을 중심으로 LNG저장탱크용 9%Ni강 용접시 발생 가능한 문제점들을 검토하고 Ni합금 피복봉의 심선과 피복제와 관련한 일반적인 제조특성 그리고 현재 국내 현장에서 용접시공에 사용되는 용접재료의 특성 평가결과를 정리하였다.

2. 9%Ni강 용접상의 문제

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 제조 공정 상에서 적절한 열처리를 실시하므로서 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 합금을 주로 사용하게 된다. 이와 같이 Ni 합금

Table. 1 Problems in welding of 9%Ni steel with Ni alloy welding consumables

Items	Problems
Weld Defects	Hot crack (especially on crater), Reheat crack
Depth of Penetration	Lack of penetration due to shallow penetration
Dilution	WM composition affected by dilution of base metal
Thermal Expansion Coefficient	Thermal stress added by different thermal expansion coefficients of WM and 9%Ni steel
Mechanical Properties	Lower 0.2% proof stress of WM
Economical Aspect	High nickel welding material is costly

용접재료를 이용하여 9%Ni강을 용접하는 것은 일종의 이중재료 용접이기 때문에 용접시공시 여러 가지 주의점이 필요하게 되며 일반적으로 나타나는 문제점은 Table 1과 같이 요약할 수 있다⁶⁾.

2.1 용접결함

9%Ni강용 Ni합금 용접재료를 이용한 용융용접시 발생 가능한 용접결함으로서는 일반적으로 Ni기 초합금 용접에서와 마찬가지로 각종 고온균열(응고균열, 액화균열 및 연성저하균열)과 blow hole, 용접후열처리(PWHT)시 발생하는 재열균열 등을 들 수 있다^{7,8)}.

2.1.1 고온균열

Ni계 합금은 오스테나이트 조직이기 때문에 기본적으로 고온균열이 발생하기 쉬워, 9%Ni강용 용접재료 개발시 이 고온균열 문제의 해결이 매우 중요하다. 용접조건은 내균열성에 상당한 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며 용접전류, 운봉비가 높을수록 균열이 발생하기 쉽다. 따라서 균열이 없는 건전한 용접금속을 얻기 위하여서는 용접전류 및 용접속도를 너무 높이지 않도록 하여야 하며, 특히 초층용접 등 구속이 큰 부분에서는 충분한 관리가 필요하다. 또 crater부는 균열이 일어나기 쉬우므로 특히 주의하여야 한다. 고온균열은 발생형태 및 기구에 따라서 응고균열, 액화균열 및 연성저하균열로 구분할 수 있으며 이 중에서 응고균열은 용접금속 중 주상정이 성장함에 따라 잔류용액중의 용질원소의 농도가 진행되고 응고 말기에 수축응력이 주상정 사이에 형성된 저융점의 액막에 작용하므로서 발생한다고 알려져 있다. 이에 비해 액화균열은 모재 또는 다층용접금속의 열영향부 결정립계에서 발생하지만 석출물이나 개재물의 국부용해와 더불어 입계액화 혹은 불순물원소의 입계 편석에 의한 입계액화에 기인한다고 생각되어지고 있다. 이들 균열은 모두 액상이 관여한다는 공통점을 지닌다. 中尾등⁹⁾은 다양한 Ni기 합금에 대한 상기 두 균열에 대한 감수성을 검토하여 합금원소와 균열감수성의 관계를 응고균열감수성지수(P_{SC}) 및 액화균열감수성지수(P_{LC})로 아래와 같이 제안하고 있다.

$$P_{SC} = 69.2Ti + 27.3Nb + 9.7Mo + 300Si - 55.3$$

$$P_{LC} = 48.0C + 2.83Mo + 19.7Ti + 8.93Nb + 27.2$$

한편, 연성저하균열도 액화균열과 마찬가지로 모재 또는 다층용접금속 열영향부의 결정립계에서 발생하지만 P, S 등의 불순물원소 입계편석, 입계 탄화물 등에 의해 입계강도가 저하하여 발생하는 것으로 알려져 있으며 이 균열의 경우 액상과는 관계가 없다. 연성저하균열의 경우 모재에서는 비교적 발생하기 어렵지만 다층용접금속중에서 재가열된 부분에서 발생하는 미소균열에서 잘 확인된다. 균열의 길이는 통상 수백 정도이고 매우 적어서 비파괴적인 검출이 어려운데다가 용접이음부의 강도와 인성에 영향을 미치므로 중요한 문제가 된다. 그러나 일반적으로 고Ni계 용접금속을 사용하여 9%Ni강을 용접하는 경우 열영향부에서의 균열 발생은 문제가 되지 않는다고 알려져 있다.

2.2.2. 재열균열

다량의 Mo가 첨가된 Hastelloy계 용접봉은 Inconel계에 비해 내용고균열성이 양호한 용접금속을 얻는 것이 가능하지만 다층용접과 같이 반복 열이력을 받는 경우 재열균열이 발생하기 쉽다. 재열균열의 발생기구와 관련해서는 다음 사항들이 밝혀진 바 있다. (i) 용접잔류응력, 열응력, γ' 상의 석출에 의한 수축응력을 완화하는 과정에서 발생하는 소성변형량보다 합금의 소성변형능이 작은 경우에 재열균열은 발생한다. (ii) 합금의 소성변형능은 석출물이나 개재물의 국부용융과 더불어 입계액화, 결정립의 조대화, γ' 상에 의한 입내강화, 여기에 S 등의 불순물원소의 입계편석이나 산소에 의한 입계취화 등에 의해 저하한다. (iii) 화학성분적으로는 Ti 등의 γ' 상 석출촉진원소나 입계취화의 주원인 성분인 S량이 많을수록 재열균열 발생이 쉽다. (iv) 재열균열을 방지하는데에는 γ' 상 석출영역 급열, 결정립 미세화, 최적량의 Ca, Mg 첨가, 용접분위기나 PWHT 중 분위기 산소 혼입 억제, 잔류응력 저하 등이 중요하다. Hastelloy계 용접봉에서 용접금속의 재열균열 발생원인은 용접부 결정립계에 저융점 Mo 산화물이나 Ni 황화물등의 형성과 관련된 것으로 알려져 있다.

2.2.3 저온균열

이상에서 언급한 고온균열 및 재열균열과는 별도로 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.

2.2.4 Blow hole

용접 홈 부위에 기름, 산화물, 도료 등의 이물질이 존재하는 경우 고온균열의 발생원인이 될 뿐만 아니라 blow hole 생성도 볼 수 있다. 또한 차폐가스 유량이 부적절한 경우나 그 순도가 불량한 경우에도 blow hole이 발생한다. 예를 들어 순 Ni이나 Cr를 함유하지 않은 Ni기 합금에서는 질소가스가 겨우 0.1~0.2%만 함유되어도 blow hole이 발생한다고 한다.

2.2.5 용입부족

Ni계 합금은 9%Ni강에 비하여 용점이 150°C 정도 낮기 때문에 탄소강의 용접에 비해 용입량이 작아 용입불량을 일으키기 쉽다. 특히 수직 및 위보기 자세 용접에서는 용접비드가 convex한 모양이 되기 쉽다. 따라서 홈 각도를 넓게 하고 용접봉 및 와이어 직경을 작게 하여 용접전류를 제어하는 등, 용접조건 및 시공상의 주의가 필요하다.

2.2 성분의 회석

9%Ni강과 Ni 합금은 화학성분이 크게 다르므로 9%Ni강 모재의 회석이 용접금속 성능에 큰 영향을 미친다. 모재 회석률이 높을수록 강도가 저하하므로 필요 강도를 확보하기 위하여서는 지나친 모재 회석을 피하여야 한다. 판 두께 20mm의 9%Ni강에 60%Ni-15%Cr-Mo계 와이어를 이용하여 수직 전자동 TIG용접을 실시하고 회석률과 강도의 관계를 조사한 결과에 따르면 회석률이 10~30% 변화하여도 이음부 및 용접금속의 인장강도는 현저히

변화하지 않지만 0.2%내력의 경우 회석률의 증가에 따라서 급격히 저하하여 회석률이 25%이상이면 API규격인 363MPa 보다 낮아질 가능성이 있다고 보고하였다⁶⁾. 특히 SAW나 자동 TIG 용접법을 이용한 박판의 아래보기 용접에서는 루트 간격과 용접조건을 적절히 조정하고 가능한 한 다층용접을 실시하여야 한다.

Figure 1은 성분 회석과 관련하여 시판되고 있는 ENiCrFe-4계 피복아크용접봉 (Yawata Weld B(M))을 이용하여 9%Ni강을 용접한 경우 모재와 용접금속의 경계를 따라 형성된 층의 SEM 조직과 Electron Probe Micro-Analyzer (EPMA)를 이용한 성분별 line scanning결과를 나타낸다. 경계층의 화학조성은 Energy Dispersive X-ray (EDX) 분석결과 약 53Fe-33Ni-6Cr-7Mo의 조성을 나타내어 용착금속의 화학조성 (11.63Fe-63.92Ni-14.95Cr-2.39Mo, Table 6)에 비해 상당히 높은 수준의 Fe 함

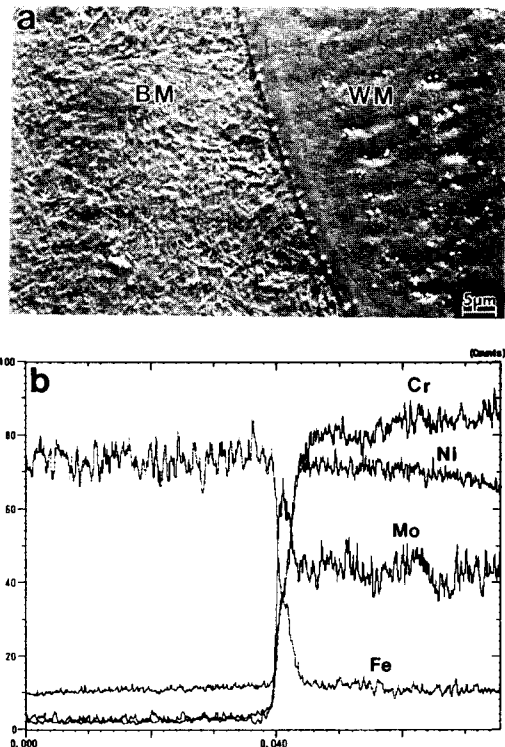


Fig 1. (a) SEM secondary electron image and (b) EPMA line analysis across the fusion line in SMA welded joint. (electrode: NIC-70S)

량을 보이는데 이는 당연히 모재인 9%Ni강으로부터의 회석에 기인한 것이며 Ni, Cr의 함량은 해당 성분이 높은 용접금속에 비해 상당 수준 회석된 값을 나타내는데 비해 Mo의 경우 경계층에서 오히려 국부적으로 증가되는 경향을 보인다. 이러한 성분 분석결과는 EPMA를 통한 line scanning 결과 (Fig. 1(b))와도 잘 일치함을 알 수 있다. 9%Ni강 모재에 Mo가 첨가되지 않는 점을 감안할 때 모재로부터 회석된 Fe성분과 함께 경계층에서의 새로운 상의 형성 가능성을 의미한다. 경계층의 조직 분석과 이 조직과 이음부 성질과의 상관성에 대해서는 추후 깊이 있는 조사가 필요한 부분이다.

2.3 아크 슐림

연강에 비해 9%Ni강 모재는 높은 자성을 띄므로 용접시 아크와 용융지 인접지역에서 전류에 의해 발생하는 자성에 매우 민감하게 반응한다. 이러한 용접전류에 의해 발생된 자력과는 별도로 자기 보유력이 높은 9%Ni강에는 강판 제조공정에서부터 용접작업 직전까지 여러 공정에서 발생한 자기가 잔류되기 쉽다. 이와 같이 가능한 자기원들 간의 상호작용과 높은 용접전류밀도로 인하여 아크 플라즈마 또는 용융지에 자장과 전류의 흐름과 수직방향으로 힘이 가해지고 이로 인해 아크가 한 쪽으로 쏠리고 용착금속이 흠에서 이탈하여 융합 불량 발생하기도 하고, 심한 경우에는 용접이 불가능하게 되는 소위 아크 슐림 현상이 발생하게 된다¹⁰⁾. 일반적으로 9%Ni강은 소재 maker가 탈자

처리를 하여 50Gauss 미만이 되도록 출하하고 있지만 운송, 보관시에 자화되지 않도록 세심한 주의를 하여야 한다. 또 arc air gouging 및 grinding 시에도 강판 단면에 80~100Gauss 정도의 큰 자장이 발생될 수 있으므로 주의해야 한다. 용접전원도 직류보다 교류를 사용하면 아크 슐림을 방지할 수 있다. 이러한 목적을 위해 9%Ni강 용접을 위해 교류 전용 수동용접봉이 개발되어 적용되고 있는데 대표적인 상품으로는 일철공업의 Yawata Weld B(M) 제품 등이 있다.

3. 9%Ni강용 피복아크용접봉

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 있다. 이러한 AWS 규정 피복아크용접봉 중에서 9%Ni강과 같이 저온인성을 요구하는 경우에 적용되는 대표적인 용접봉에 대한 AWS 규격상의 화학성분 및 기계적 성질 규제범위를 Table 2에 정리하였다. 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 (Table 3). 기호가 의미하는 것은 D다음에 9Ni강을 의미하는 9Ni을 붙이고 2종류는 번호로 구분한다. 1번은 Inconel계 용착금속이고 2번은 Hastelloy계 용착금

Table. 2 AWS specification of Ni alloy welding electrodes (AWS A5.11)

Specification	Chemical Compositions (wt%)												Tensile Properties	
	C	Mn	Fe	P	S	Si	Cu	Ni	Cr	Nb+Ta	Mo	W	TS MPa	El %
ENiCrFe-2	0.10	1.0~3.5	12.0	0.03	0.02	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	0.03	0.02	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	0.03	0.02	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	0.03	0.02	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.

Table. 3 JIS specification of covered electrodes for 9%Ni steel (JIS Z3225)

Specifi- cation	Chemical Compositions (wt%)											Mechanical Properties			
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Fe	Nb	W	TS MPa	YP MPa	EI %	vE ⁻¹⁹⁶ J
D9Ni-1	0.15	0.75	1.0 ~ 4.0	0.020	0.015	55.0 min.	10.0 ~ 17.0	9.0	15.0	0.3 ~ 3.0	-	≥660	≥ 360	≥ 25	AVG. ≥34
D9Ni-2	0.10	0.75	3.0	0.020	0.015	60.0 min.	-	15.0 ~ 22.0	12.0	-	1.5 ~ 5.0				MIN. ≥27

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

속에 해당된다. 이러한 용접봉의 전용착금속에서 요구되는 기계적성질을 Table 3과 같이 규정하고 있다.

3.1 Inconel계 용접봉

9%Ni강용 Inconel계 피복아크용접봉은 앞서 Table 2의 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 슐림을 방지하기 위하여 교류용접을 적용할 때에 사용되어진다. ENiCrFe-2계에 비해 ENiCrFe-4계 용접봉은 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. 이러한 Inconel계 피복아크용접봉의 특성을 용접봉의 구성상 심선과 피복제로 나누어 살펴보고 이들 피복봉을 이용한 용접금속의 특성을 조사하였다.

3.1.1 심선

ENiCrFe-4계 용접봉용 심선은 Ni합금 심선에 대한 AWS A5.14규격에 의하면 ENiCrFe-4계와 동일성분의 심선을 규정하고 있지 않고 일반적으로 ERNiCrFe-5 또는 ERNiCr-3계 합금이 널리 적용되

Table. 4 Chemistries of Inconel core wires

Electrodes	Maker	Chemical Compositions (wt%)										
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Fe	Mo	Nb	Cu	Ni
YAWATA WELD B(M)	NITTETSU	0.016	0.10	0.70	0.004	0.002	15.7	8.8	0.014	1.97	0.04	Bal.
NIC-70Sp	KOBE	0.028	0.14	1.10	0.002	0.001	15.4	6.7	0.021	1.66	-	Bal.

고 있으나 각 제조회사별로 심선과 플렉스를 통한 성분 조절 특성에 차이가 있을 수 있다. Table 4는 국내 현장에서 적용되고 있는 ENiCrFe-4계 피복 용접봉의 심선 화학조성을 나타내고 있다. 교류 전용의 Yawata Weld B(M) 및 NIC-70S 피복봉은 심선의 화학조성이 ERNiCrFe-5계에 해당되는 특성을 나타낸다. 이에 비해 유럽 및 미국 제품의 경우 최근들어 ERNiCr-3계 심선의 사용이 일반화되고 있는 실정이다. 즉, 심선의 경우 각 제조회사별로 피복제와 조합을 통한 최종 용착금속의 기계적 성질과 용접성 확보를 위해 고유 성분계를 활용하고 있는 것으로 판단된다.

Figure 2(a)와 (b)는 각각 시판되고 있는 ENiCrFe-4계 입계 및 입내탄화물의 석출은 Yawata Weld B(M)와 NIC-70S 용접봉용 심선을 10% 크롬산 용액을 이용하여 전해 부식한 광학현미경 조직을 나타낸다. Yawata Weld B(M)의 경우 가공 및 열처리에 의한 전형적인 Ni 합금의 결정립 구조를 나타내며 전체적으로 균일한 등축정 조직

을 보이고 결정립 크기는 약 20~50 μm 수준을 나타낸다. 9%Ni강용 용접재료의 경우 미세조직 인자들 중에서 특히 저온인성과 강도향상과 관련한 결정립 크기가 중요한데 통상 고온 creep 성능을 필요로 하는 Ni기 초합금의 경우 조대한 결정립이 유리하지만 저온에서의 기계적 성질 향상을 위해서는 결정립 미세화가 중요한 관리 항목이 된다. 한편, 결정립계와 입내에는 상당량의 석출물들이 다양한 형태로 분포되어 있으며 입계석출물(화살표)의 경우 입내석출물에 비해 조대하고 다소 밝은 contrast를 띄며 주위 기지조직과 facet된 계면을 지니며 석출되어 있다. 일반적으로 Ni계 초합금의 미세조직은 fcc 결정구조를 지니는 기지조직에 MC, M_6C , $M_{23}C_6$ 등과 같은 다양한 형태의 탄화물이 결정립계나 입내에 석출되어 합금의 조직과 성질에 영향을 미친다고 알려져 있다¹¹⁾. 이러한 탄화물외에도 성분계에 따라서 fcc 결정구조의 Ni_3Al (γ' 상)과 bct 구조의 Ni_3Nb (γ'' 상)가 기지와 정합의 관계를 유지하면서 석출되어 합금의 고온물성을 개선하고 또는 복잡한 결정구조를 지니는 Laves 상이나 Nb-rich 탄화물등이 석출되어 기계적성질에 나쁜 영향을 미치는 경우도 있다. Figure 2(a)의 광학현미경 배율 하에서 입계 및 입내탄화물의 석출은 정성적으로 확인할 수 있으나 보다 구체적인 구성상의 분석은 전자현미경을 이용한 해석이 필요하다. NIC-70S심선 조직은 Yawata Weld B(M) 용접봉용 심선에 비해 미세조직 특성이 다소 차이를 나타내는데 평균 결정립 크기는 다소 미세하지만 비정상 성장 결정립이 다수 존재함을 알 수 있다.

여기서 Ni합금 심선 제조에 사용되는 화학성분이 용접금속의 특성 및 용접작업성에 미치는 영향은 아래와 같이 정리할 수 있다.

- i) Ni: 내식성 및 조직 안정화를 위한 기본성분
- ii) Cr: 고강도화, 내blow hole성, 과다 첨가시 인성 저하
- iii) Mo: 고강도화, 내고온균열성, 과다 첨가시 인성 및 가공성 저하
- iv) Nb: 고강도화, 용접작업성 특히 아크안정성, 모재와의 친화성, 과다 첨가시 내균열성 저하
- v) W: 고강도화를 위해 첨가
- vi) Al, Ti: 고강도화, 탈산작용

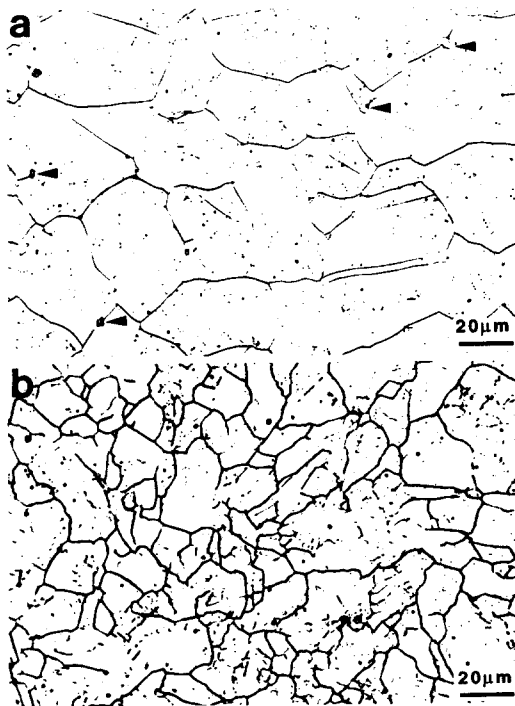


Fig 2. Microstructures of (a) Yawata WeldB(M) and (b) NIC-70S inconel core wires.

3. 1. 2 피복제

일반적으로 Inconel계 피복아크용접봉의 피복제는 크게 lime계와 lime · titania계로 나눌 수 있는데 전자세용접을 목적으로 석회석과 형석을 주원료로 하는 lime계 피복제를 이용하는데 이러한 피복봉은 아래보기, 옆보기 혹은 fillet용접에서 비드형상, 외관 및 슬라그 박리성이 나쁘다고 알려져 있다. 이러한 결점을 해결하기 위하여 석회석-형석의 lime계 피복봉 대신에, 아래보기, 옆보기 전용으로 티탄산화물-금속탄산염-금속불화물의 lime-titania계 피복봉이 개발되어 그 기술이 공개된 바 있다¹²⁾. 즉 Ni를 98% 이상 함유하고 산소량을 0.008% 이하로 제어한 심선에, 티탄산화물 10~40%, 금속탄산염 5~25%, 금속불화물 3~15%를 함유하고 심선 중량비로 환산하여 Cr 16~25%, Mo 6~12%, Mn 10% 이하를 함유하고 전수분량을 0.3% 이하로 제어한 용접봉이다. 심선의 산소량을 제어하고 또한 아래보기, 옆보기 전용의 용접봉이기 때문에 탈산제는 첨가하지 않고 있다. 여기서 티탄산화물은 아크를 안정화하고 슬라그 유동성, 피포성, 박리성을 향상시켜 비드형상, 외관을 양호하게 할뿐만 아니라 용접금속의 주상정을 미세화하여 수소취성 및 고온균열감수성을 현저하게 낮춘다고 하였다.

Ni 용접봉의 봉 적열현상은 심선의 전기저항이 높기 때문만이 아니라, 피복제의 배합에도 원인이 있다. 즉 Ni계 용착금속은 연강 용착금속보다 용점이 낮기 때문에, 슬라그 용점을 낮추기 위하여 연강 용접봉보다 피복제에 형석을 많이 첨가하고 있다. 형석이 많이 첨가되면 용접과정 중 용접봉 선단으로부터 2/3 정도에서부터 용접봉이 붉게 가열되어 보호통의 형성이 곤란하게 되어 아크의 집중성이 나빠지고, 아래보기 용접에서도 비드형상이 convex로 되고 슬라그 혼입이 발생하게 된다. 이러한 결점을 해결하기 위하여 형석의 배합

량을 연강 용접봉 배합량 정도로 유지하는 대신, 규회석을 첨가하여 슬라그 유동성을 좋게 함과 동시에 용접봉이 가열되어도 보호통 형성이 유지되는 Ni계 피복아크 용접봉이 개발된 바 있다¹³⁾.

여기서 피복제에 첨가되는 대표적인 화합물의 역할을 정리하면 다음과 같다.

i) 금속탄산염: 슬라그에 고염기성을 부여하고 용접금속 중 P, S 및 Si 증가 억제

분해 생성되는 CO₂가스는 수소의 분압을 낮추고 연강용접봉과 동등한 수준의 고전류용접에서도 용접금속의 내균열성을 충분히 양호하게 하기 위해 적정 첨가량이 필요하며 과다첨가시 오히려 슬라그 박리성이나 유동성이 떨어지는 경향이 있으므로 주의해야 한다.

ii) 금속산화물: 일반용접봉 피복제에서와 마찬가지로 아크안정화, 슬라그 유동성 및 박리성을 개선하고 bead 형상 및 외관을 양호하게 만든다. 또한 용접금속 주상정을 미세화 시켜서 수소취성이나 고온균열감수성을 현저히 줄여준다.

iii) 금속불화물: 슬라그 유동성을 개선하고 bead 형상이 flat하고 슬라그 혼입이 없는 건전한 용접금속을 형성한다.

iv) 규산염화합물: 슬라그 유동성 및 아크 안정화에 기여

Table 5는 국내 현장에서 주로 사용되는 Inconel계 피복봉의 피복제를 분석한 결과를 보여준다. 두 제품 모두 금속탄산염을 기본 성분으로 하여 금속산화물, 형석, 규산염화합물 등을 적절히 배합되어 있음을 알 수 있다.

3. 1. 3 용접금속

현재 선진 용접재료 maker들은 이상에서 언급한 심선과 피복제의 적절한 조합을 통해 각사 고유의 피복용접봉을 생산하고 있다. 시판중인 피복봉을 이용하여 전용착금속의 특성을 비교 조사하였다.

Table. 5 Flux analysis of Inconel welding electrodes

Electrodes	Maker	Chemical Compositions (wt%)							
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	CaF ₂	T-Fe	CaCO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
YAWATA WELD B(M)	NITTETSU	15.34	14.32	3.06	8.82	17.27	30.57	2.53	1.80
NIC-70Sp	KOBE	7.46	18.61	5.58	18.36	22.40	30.71	1.44	1.64

Table. 6 Chemistries of Inconel SMA Weld Metals

	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	YAWATA	WELD B (M)	4.0	0.065	0.22	4.69	0.016	0.003	14.95
11.63	2.39	1.65	63.92	NIC-70Sp	3.2	0.03	0.25	2.33	0.003	0.002	14.03
	9.75	3.53	1.76	67.04	4.0	0.05	0.22	3.65	0.018	0.005	13.33

Table. 7 Mechanical properties of Inconel SMA Weld Metals

Electrodes	Dia. (mm)	Tensile Properties		Impact Properties	
		T. S (kgf/mm ²)	El. (%)	R. T (Joule)	-196℃ (Joule)
Spec. (ENiCrFe-4)		≥66.8	≥20	N/A	
YAWATA WELD B (M)	4.0	72.0	41.3	71.5	55.9
NIC-70Sp	3.2	70.3	42.0	84.3	70.6
	4.0	69.1	42.0	79.2	62.4

시판용접봉의 전용착금속 화학조성 및 기계적 성질 시험결과를 평가하고 그 결과를 Table 6과 7에 정리하였다. 앞서 심선의 경우와는 달리 두 제품의 용착금속 화학조성은 ENiCrFe-4 규격의 성분 한정범위를 대체적으로 만족시키고 있다. 두 제품의 인장강도는 동일 직경의 용접봉을 기준으로 비교할 때 용착금속 중 카본함량이 다소 높은 Yawata Weld B (M) 제품이 NIC-70Sp에 비해 약 4% 높은 706MPa를 나타낸다. 그러나 이러한 용착금속의 인장강도는 9%Ni강 모재의 ASTM 인장강도 규격인 690~825MPa과 비교시 규격의 하한 또는 규격 이하의 값에 해당하는 낮은 수준임을 알 수 있다. -196℃에서의 충격흡수에너지값이 두 제품 모두 4.0mm 직경재의 경우 약 56~62J 수준으로 JIS 규격에서 요구하는 34J 이상의 요구치를 거의 2배 이상으로 만족하는 값에 해당한다.

Figure 3은 광학현미경과 Scanning Electron Microscope (SEM)을 이용하여 ENiCrFe-4계 NIC-70Sp의 용착금속 조직을 관찰한 것이다. 용착금속 조직은 전형적인 주상정 응고조직을 나타내며 보다 고배율로 조직 관찰시 다양한 화합물들이 주상정 내부와 주상정 사이에 형성되어 있음을 알 수 있다. Figure 3(b)의 SEM 조직에서 구분한 기지

조직 (a), 피상 화합물 (b) 및 구상의 화합물 (c)에 대한 EDX 분석결과 기지조직은 전용착금속의 화학조성 분석 결과와 유사한 성분을 나타내고 피상의 밝은 contrast를 띤 제2상은 Nb, Mo가 주성분인 화합물이고 구상의 화합물은 알루미늄 계열의 산화물임을 알 수 있었다.

마지막으로 ENiCrFe-4계의 Yawata Weld B (M) 및 NIC-70Sp 제품에 대한 작업성 평가 결과 두 제품 모두 AC 작업 조건에서 슬라그의 박리성과 유동성, 아크 안정성, 비드 외관과 퍼짐성 등 전반적으로 양호한 용접작업성을 보유하고 있음을 확인하였다.

3.2 Hastelloy계 피복아크용접봉

Hastelloy계 피복봉은 현재 LNG탱크 시공시 주로 자동용접부의 수동 보수용접에 적용되고 있으나 Hastelloy계 Ni합금은 피복아크용접봉용 심선은 물론 GMA용접용 와이어, SAW용 와이어 등에 거의 동일한 조성의 AWS A5.14 규격의 ERNiMo-3계 합금이 대표적으로 적용되고 있다. Inconel계 피복봉이 용접금속 중 응고균열의 발생이 용이하여 저전류, 저속도의 용접조건을 적용하지 않으면 안되

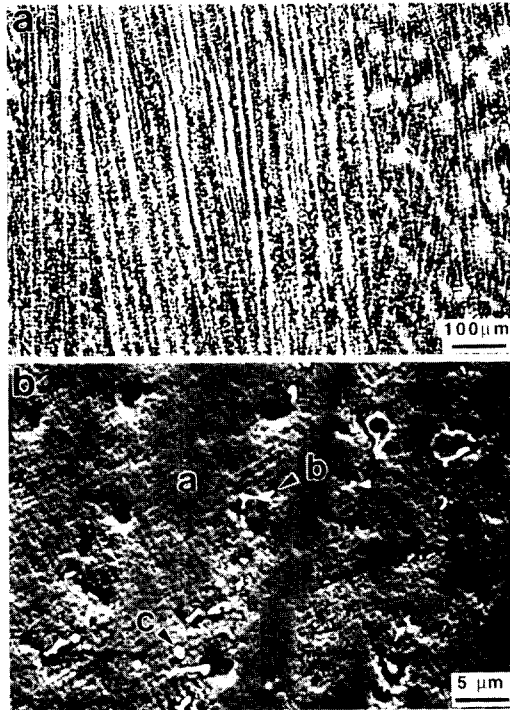


Fig 3. (a) Reflected light micrograph showing dendritic solidification structure. (b) SEM secondary electron image showing secondary phases in interdendritic region. (electrode: NIC-70S)

는데 비해 Hastelloy계 용접봉은 Inconel계와 같은 용접능률과 관련한 문제없이 내용고균열성이 양호한 용접금속을 얻는 것이 가능하지만 다층용접과 같이 반복 열이력을 받는 경우 재열균열이 발생하기 쉽고 용접금속의 굽힘 특성이 나빠지는 결점이 있어서 적용 범위가 제한적이다.

3.2.1 심선

Inconel계 AWS-A5.14 ERNiCr-3 심선을 SAW 공정에 적용하면 강도가 불충분하고 고온균열의 문제가 있어 Mo 함유 와이어를 이용하여 SAW 고능률화와 이음부 품질 안정화를 도모한다. 이 경우 Mo함유량 증대에 따라서 와이어 자체의 단조성이나 압연성이 나빠져서 신선가공 등에 있어서 생산실수율이 현저히 저하된다. 이는 Hastelloy 성분계 용접용 심선 제조시 가장 중요한 문제중의 하나이

다. 즉, 단조시나 압연시 균열이 발생한 경우 조대균열이 있으면 불량품이 되지만 미소균열의 경우 양품으로서 인발기에 투입되고 이 단계에서 와이어 파단 등을 일으켜 생산상의 중대한 문제를 일으킨다. 또한 가공이 가능한 경우에도 와이어 표면에 미소한 균열이 남아서 이 중에 윤활제 등이 남게 되어 용접작업성 등에 나쁜 영향을 미친다. 따라서 Mo 첨가 Hastelloy계 용접재료용 심선의 단조성과 압연성을 양호하게 함과 동시에 일단 용접한 후에는 저온인성과 내고온균열성을 지니는 용접금속을 얻기 위한 노력이 행해지고 있다. 그 일환으로 Ti, Al, Mg 등의 원소를 활용하므로써 Mo 첨가에 따른 단조성, 압연성 저하를 억제하는 역할을 한다. 이들 원소는 원래 탈산능이 강한 금속이지만 이 탈산능력이 단조성이나 압연성 회복에 있어서 중요한 영향을 미친다.

3.2.2 피복제

Hastelloy계 용접봉에서 용접금속의 재열균열 발생원인은 앞서 언급한 바와 같이 용접부 결정립계에 저용점 Mo 산화물이나 Ni 황화물등의 형성에 기인한 것으로 생각되어 지고 있다. 이러한 관점에서 Hastelloy계 감호용접용 플럭스에 금속불화물이나 Al, REM을 미량 함유시키면 Mo 산화물이나 Ni 황화물등이 용접금속 결정립계에 형성되는 것을 억제하므로써 내재열균열성을 확보한다고 알려져 있다. 마찬가지로 피복봉의 경우에 있어서도 피복제에 금속불화물을 첨가하고 동시에 심선이나 피복제에 Al, REM(Ca, Y 등도 동일한 효과를 지님)을 적절히 함유시키면 동일한 효과를 얻을 수 있다. 금속불화물은 용접시 슬라그-금속 반응에 의해 탈산, 탈인 및 탈황의 각 반응을 촉진하고 용접금속 중의 O, P 및 S를 저감시켜 내재열균열성을 높이는 작용이 있고 특히 Al, REM 등에 의한 탈인 반응을 효과적으로 진행시키는데 필수적 성분이다¹⁵⁾.

이러한 용접봉에 첨가되는 주요 성분의 역할은 다음과 같다. Si, Mn성분은 Hastelloy계 용접봉에 있어서 넓은 입열 범위에서 저온인성이 우수한 용접금속 확보에 필수적인 성분이고 Al은 탈산제로서 매우 중요한 성분으로서 용접금속 중 산소량을 저감시켜 내재열균열성을 개선하고 REM, Ca, Y 등의 탈인 및 탈황 작용을 촉진한다. 특히 Mg의

Table. 8 Chemistries of a Hastelloy core wire and SMA weld metal

Electrodes (NITTETSU 196)	Chemical Compositions (wt%)									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Fe	Mo	W	Ni
Spec. (JIS D9Ni-2)	≤0.10	≤0.75	≤3.0	≤0.02	≤0.015	-	≤12.0	15.0 -22.0	1.5 -5.0	≥60.0
Weld Metal	0.013	0.34	0.30	0.004	0.017	0.41	3.16	17.72	-	Bal.
Core Wire	0.016	0.08	0.10	0.003	0.001	2.37	5.27	16.43	-	Bal.

경우 다층용접시 후속패스에 의한 재가열을 받는 경우 저용접개재물 생성원인이 되는 용접금속 중의 P, S, O 등을 결정립내에 고정시켜 입계로의 이동을 저지하고 재열균열 발생을 방지한다고 알려져 있다. 입계로의 이동 저지 작용은 Mg 첨가에 의해 비로소 발휘되지만 과다 첨가시 내용고균열성에 악영향을 미치므로 금속불화물이나 Al, REM 등에 의해 용접금속 중의 P, S, O양을 충분히 낮은 수준으로 저감시킨 후 비로소 유효하게 작용한다. 마지막으로 REM, Ca, Y 등의 원소는 우수한 탈황, 탈인 성능을 지녀서 용접금속 중 P, S, O를 저하시켜 내재열균열성을 높이는 필수성분이다. 이들 원소는 동시에 강력한 탈산제로서 산소가 다량 존재시 탈산 반응에 의해 우선적으로 소비되어 탈황, 탈인이 불충분하게 되므로 용접금속 중 산소량을 낮은 수준으로 억제한다는 의미에서 금속불화물 및 Al과의 공존이 불가피한 요건이다.

Ni-Mo기 피복아크용접봉은 피복체에 탈산, 탈질제를 첨가하여 용접금속에서 blow hole 발생을 방지하도록 한다. 탈산, 탈질제인 Al, Si, Ti 등은 내blow hole성은 개선하지만 용접금속의 고온균열감수성을 높인다고 알려져 있으므로 내균열성을 확보하면서 내blow hole성을 개선시키기 위해 피복체로부터의 첨가량에 제한이 있다. 아래보기, 옆보기 등의 용접조건에서는 내blow hole성에 문제가 없지만 수직자세 용접에서는 불안정한 용접 자세로 인해 blow hole 발생 방지를 위해 필요한 아크길이의 단축이 어렵고 또한 발생한 기포가 용접금속 위로 부상하지 못하고 blow hole로 남게 된다. 전자세 용접중 특히 수직자세 용접에서의 내blow hole성을 양호하게 하려면 탈산, 탈질제인 Al, Si, Ti 등을 이용하지만 이들 성분은 고Ni계 용접금속의 고온균열감수성을 높여서 특히 고전류를

사용하여 용접한 경우 용접금속의 회색에 의한 강도 저하, 결정립 조대화 등이 겹쳐서 crater부 뿐만 아니라 bead 중앙부에서도 균열이 발생하는 문제가 있다. 한편 내균열성을 증시하여 탈산제를 감소시키면 내blow hole성이 저하되는 문제가 있다.

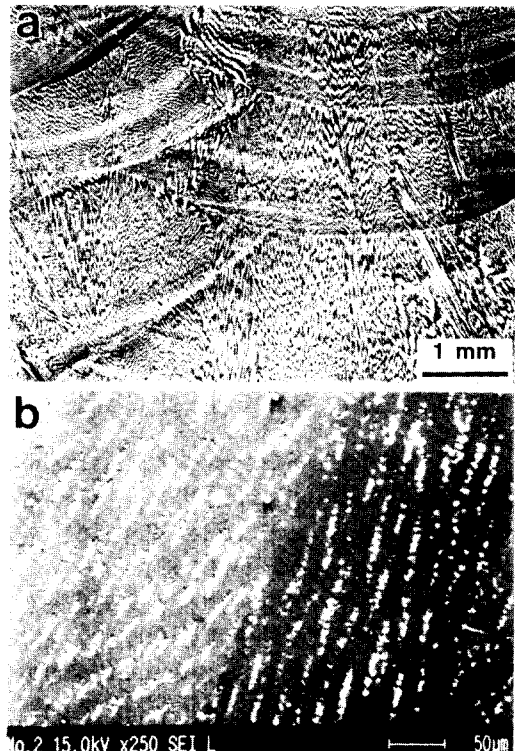


Fig 4. (a) Reflected light micrograph showing dendritic structure retained across adjacent weld passes. (b) SEM secondary electron image showing secondary phases in interdendritic region. (electrode: NITTETSU 196)

3.2.3 용접금속

현재 선진 용접재료 maker들은 이상에서 언급한 심선과 피복체의 적절한 조합을 통해 각사 고유의 Hastelloy계 피복용접봉을 생산하고 있다. 시판중인 피복봉을 이용하여 전용착금속의 특성을 조사하였다. 시판용접봉의 심선과 전용착금속의 화학조성을 Table 8에 정리하였다. ENiCrFe-4계 Inconel 용접봉에 첨가되는 Cr 대신에 거의 유사한 중량 비율의 Mo가 첨가된 조성 특성을 보인다. 이 제품의 인장강도 및 연신율은 각각 757MPa과 48.6%로 Inconel계 용접봉에 비해 매우 높은 값을 보이며 9%Ni강 모재강도와 유사한 수준이 얻어짐을 알 수 있다. -196°C에서의 충격흡수에너지값이 약 105J 수준으로 앞서 Inconel계 합금의 용착금속 흡수에너지 값에 비해 2배 정도 높은 수준을 나타낸다. 즉, Inconel계 용접봉에 비해 다량의 Mo가 첨가되므로서 용접금속의 인장 및 충격특성이 현저히 향상되는 결과가 나타난다.

Figure 4는 광학현미경과 SEM을 이용하여 관찰한 Hastelloy계 NITTETSU 196 피복봉의 용착금속 조직을 나타낸다. 용착금속 조직은 전형적인 주상정 응고조직을 나타내며 주상정 조직은 용접 비드 경계를 지나서 연속적으로 성장되는 전형적인 Epitaxial Growth 특성을 지닌다. 주상정 조직을 SEM을 이용하여 고배율로 관찰 상당량의 제2상이 주상정 경계를 따라 형성되어 있음을 알 수 있다.

3.3 순 Ni 심선을 이용한 피복봉

현재 시판되고 있는 9%Ni강용 Ni계 피복아크 용접봉은 사용하는 심선의 화학성분에 따라 크게 두 종류로 나눌 수 있다. 하나는 성분조정을 위한 소량의 합금제가 포함된 피복체를 Ni, Cr 등의 주성분이 포함된 Ni기 합금의 심선에 도포한 용접봉과, 또 하나는 목표성분을 위한 합금제가 대량으로 포함된 피복체를 순 Ni 심선에 도포한 용접봉이다. Ni기 합금을 심선으로 사용하는 용접봉은 주된 합금성분이 심선에 첨가되어 있어 용접금속의 합금성분 편석은 작지만, 심선의 전기저항이 연강의 약 10배 정도로 높아서 봉 적열현상이 발생하기 쉬워 최대허용전류를 제한하게 되어 작업성을 저해하는 결점이 있다. 따라서 용접전류는 일반 연강 피복봉에 비해 한 단계 낮은 수준의 전류, 예를

들어 직경 4mm의 용접봉에 대해 연강봉 3.2mm 적용 전류로 용접해야 하므로 용접작업능률이 낮아지는 문제점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 전기비 저항이 50cm 이하로 연강과 동일한 수준인 순 Ni를 사용하는 피복봉이 개발되어 용접작업능률 개선을 시도하고 있다¹⁶⁾. 그러나 이 경우 피복체로부터 합금을 첨가하기 때문에 심선에 비하여 합금의 실수율이 나빠, 다량의 합금원소를 첨가하여야 한다. 따라서 피복의경과 피복율이 크게 되고, 특히 용접금속에 합금성분의 편석이 생기기 쉽다.

Ni합금 용접금속은 오스테나이트 조직을 나타내어 고온균열 발생이 큰 문제로 되는데, 특히 대전류 용접이 가능한 순 Ni 심선을 사용하는 용접봉 경우에는 더욱 큰 문제로 된다. 따라서 고온균열 억제제를 위하여 앞서 언급한 바와 같이 Si, Ti, Al 등의 탈산성분을 저감하는데, 이런 경우에는 특히 위보기 자세 용접에서 용접금속중 blow hole 발생이 문제로 된다. 순 Ni 심선을 사용하는 용접봉에서 고전류 용접을 행하여도 내균열성 및 내 blow hole성이 우수한 용접봉을 제조하기 위하여 Si, Ti, Al 등의 탈산성분을 첨가함과 동시에 순 Ni 심선의 금속수분을 0.3% 이하로 제어하므로서 용접금속 중 산소량도 적고 기계적 성질도 우수하여 탈산제를 다량으로 첨가할 필요가 없는 용접봉의 제조방법이 보고되고 있다¹⁶⁾.

4. 결 론

본 해설에서는 Inconel계와 Hastelloy계로 구분되는 9%Ni강용 피복아크용접봉을 중심으로 LNG저장탱크 용접시공시 발생 가능한 문제점들을 검토하고 Ni합금 피복봉의 심선과 피복체와 관련한 일반적인 제조특성을 살펴 보았다. 또한 현재 국내 현장에서 용접시공에 사용되는 용접재료의 화학적, 기계적 특성과 함께 용접작업성을 평가한 결과 이들 피복아크용접봉들은 규격이 정한 요구조건들을 만족하면서 비교적 양호한 용접작업성을 확보하고 있는 것으로 판단되었다. 이상의 검토 결과는 향후 9%Ni강용 Ni합금 피복아크용접봉의 국산화 개발에 기초자료로 활용될 것으로 기대된다.

후 기

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

5. 참고 문헌

1. 홍성호: 액화천연가스 저장탱크의 현황 및 전망, 대한용접학회지, 13, No. 3, (1995), pp. 1-7
2. 齊藤直樹, 豊福昭典, 矢野清之助: 直接焼入れ法による高アレスト性能を有する9%Ni鋼の開発, 製鐵研究, 第318號, (1985), pp. 43-50
3. 이종봉, 한재광: 최근 9%Ni강의 용접특성, 대한용접학회지, 13, No. 3, (1995), pp. 34-45
4. 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
5. 대한용접학회 편집위원회: 지상식 LNG탱크의 용접기술, 대한용접학회지, 13, No. 3, (1995), pp. 1-45
6. 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
7. 溶接學會: 溶接·接合便覽, 日本溶接學會, 丸善株式會社, (1990), p. 989
8. 中尾嘉邦, 姜晶允: 초내열합금의 용접과 접합, 대한용접학회지, 8, No. 4, (1990), pp. 8-20
9. 中尾嘉邦 외: Ni基超耐熱合金の高温割れに関する研究, 日本溶接協會耐熱材料接合技術研究小委員會資料, SWR-60-3, (1985)
10. F.C. Breismeister and C.R. Sibley: A-C Welding of Nickel Steel Cryogenic Vessels, Welding J. 46, No. 5, (1967), pp. 416-422
11. C.T. Sims, N.S. Stoloff and W.C. Hagel: Superalloys II, John Wiley & Sons, New York, (1987), p. 99
12. 日本特許 No58-9794: 極低温鋼用被覆アーク溶接棒, 日本特許公報 (1983)
13. 日本特許 No56-8712: Ni基被覆アーク溶接棒, 日本特許公報 (1981)
14. 日本特許No59-92195: Ni-Cr基被覆アーク溶接棒, 日本特許公報 (1985)
15. 日本特許No61-14100: Ni基被覆アーク溶接棒, 日本特許公報 (1986)
16. 日本特許No62-57796: Ni-Mo基被覆アーク溶接棒, 日本特許公報 (1981)