特輯 : 지상식 LNG탱크의 용접기술

지상식 LNG 탱크의 용접기술 현황과 향후 동향

上月映野* · 小川恒司*

Trend and Subjects in Welding Technique of LNG Aboveground Storage Tank

Haruya KOUZUKI* and Tsuneshi OGAWA*

1. 머 리 말

경제발전에 따른 에너지 수요의 증가와 지구 온난화 등의 환경문제에 대응하여 천연가스는 높은 열량, 저 유황(S)의 에너지로 각광을 받고 있으며 그 사용량이 증가하고 있다.

천연가스는 지구상에서 비교적 광범위하게 생산되며 구미 등에서는 대부분 pipe line으로 소비지까지 운송하여 사용하고 있지만 일본 등에서는 액화 천연가스(LNG)로 저장, 수송하여 사용하고 있다. LNG 저장탱크는 생산측의 액화기지와 사용측의 수입기지에 설치되며 지금까지 약 240기가 건설되어 있다. 종래 탱크 1기의 용량은 대부분 6~8만m^3 규모였지만, 토지의 유효이용 등으로 대형화되고 있으며, 또 지상식에서는 PC(Prestressed Concrete)의 防液堤를 외부탱크에 근접시켜 외부탱크와 일체화시킨 PC LNG 탱크가 개발 · 설계되었다. 일본에서는 이미 이 방식으로 세계 최대규모인 14만m^3 탱크가 건조되어 가동 중이다.

LNG의 주성분은 메탄이고 비등점은 −161.5℃로 극저온이다. 이러한 저온에서도 취화되지 않고 사용할 수 있는 재료는 9%Ni강, Al 합금, 스테인레스강 및 Invar 등이 있지만, 탱크의 대형화에 따라 가공성, 용접성 및 경제성을 고려하여 요즈음은 9%Ni강이 주로 사용되고 있다. 한편 9%Ni강용 용접재료는 고Ni계 합금 및 모재와 동일한 성분계의 共金系가 있지만 지금까지 고 Ni계 합금이 주로 사용되고 있다.

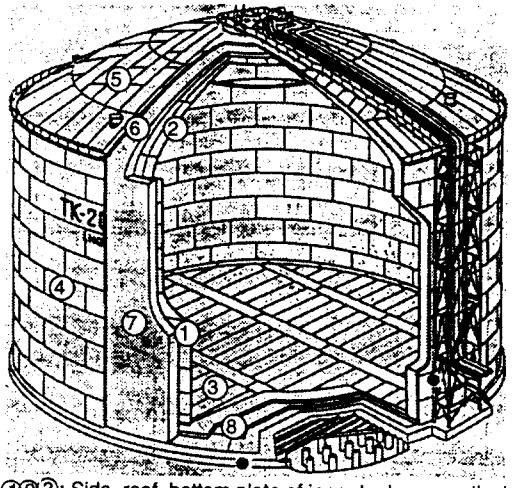
본 내용에서는 9%Ni강을 사용한 지상식 平底円筒形 LNG 탱크를 예로 들어 탱크의 개요 및 용접재료, 용접시공 등을 포함한 용접기술에 대해서 개괄적으로 설명하고자 한다.

2. 탱크의 개요

1977년 카타르에서 발생한 LPG 탱크의 폭발사고를 계기로 LNG 탱크의 구조상의 안전확보가 검토되었다. 구조에 관해서는 종래의 규격인 API나 BS를 보완할 목적으로 EEMUA(The Engineering Equipment and Materials User Association)가 구조규정을 포함한 저온 탱크의 지침은 간행되었다.

이 지침에 규정된 탱크 구조중의 하나가 2重格納방식이다. 이것은 1980년 京都에서 개최된 국제 심포지움 LNG−6에서 Shell사가 제창한 double integrity(2重保全) 개념을 근간으로 한 것으로 요즈음은 이러한 탱크가 많이 건조되고 있다. 내부탱크를 9%Ni[1]강으로 하고 외부탱크를 탄소강으로 한 예를 Fig. 1에 나타내었다.

* 비회원, (株)神戸製鋼所 溶接事業部 技術部
번역 : 이종봉(POSCO, 기술연구소)



①②③; Side ,roof, bottom plate of inner tank ,respectively (9%Ni steel)
④⑤; Side ,roof plate of outer tank, respectively (carbon steel)
⑥⑦⑧; Roof, side,bottom insulation , respectively

Fig. 1 Double dome roof cylindrical LNG tank

3. 적용 법규

LNG 탱크의 설계・시공에 관한 주요한 법규, 규격 및 지침을 아래에 나타내었지만, 일본에서는 통산성, 노동성의 법 및 규격이 적용되고, 일본 외에서는 주로 API 620이 채택되고 있다. 참고로 Table 1에 각 규격의 허용응력 값을 나타내었다.

LNG 탱크의 설계시 판 두께를 산정하는 실제 허용응력으로는 9%Ni강 모재의 강도(QT재에서는 σB : ≥690N/mm², σY 590N/mm²)와 용접금속의 강도(σB≥660N/mm², σY≥350N/mm²) 중에서 낮은 쪽인 용접금속의 강도를 채용하고 있다. 이것에 대하여 API 620 Appendix Q는 1986년 개정되어, 확인시험에 의한 증명은 필요하지만 허용응력 산정시 용접금속 인장강도를 최대 690N/mm², 항복점을 최대 400N/mm²까지 채용할 수 있게 하였다.

Table 1. Allowable stresses in 9%Ni steel LNG tanks

Law, Standard		Formula to calculate allowable stress	Standard of strength (kgf/m²)	Allowable stress (kgf/mm²)
JIS B 8243, Structure of Pressure Vessel		1/4 σB*	σB≧66.8	16.7
High Pressure Gas Industry Law(MITI)		1/4 σB	σB≧66.8	16.7
Gas Industry Law(MITI)		1/4 σB	σB≧66.8	16.7
Electric Industry Law(MITI)		1/4 σB	σB≧66.8	16.7
Labor Safety and Hygine Law(Ministry of Labor)		1/4 σB	σB≧66.8	16.7
API 620 APPENDIX Q		Smaller value of 1/3 σBM** or 2/3 σYM***	σBM≧66.8 σYM≧36.9	22.2
ASME Sec. Ⅷ	DIV. 1	1/4 σB	σB≧66.8	16.7
	DIV. 2	1/3 σB	σB≧66.8	22.2

* σB : Joint tensile strength
** σBM : Tensile strength of deposited metal
*** σYM : Proof stress of deposited metal

일 본

- 통상산업성 : 전기사업법, 가스사업법, 고압가스 취급법
- 노동성 : 노동 안전 위생법(압력용기 구조 규격)
- (社) 일본가스협회 : LNG 지상식 貯槽지침, LNG 지하식 貯槽지침
- JIS(일본 공업규격)

일본 외

- 미국석유학회 규격 : API 620 Appendix Q
- 영국 : BS 4741, 5387
- EEMUA : 저온액화가스 탱크의 설계・건설지침
- ASTM(The American Society for Testing and Materials)
- AWS(American Welding Society)

4. 적용재료

4.1 강 판

지상식 LNG 탱크의 내부탱크 재료로 현재 9% Ni강이 많이 사용되고 있다. 9%Ni강은 LNG 저장온도인 약 −162℃에서도 인성이 우수할 뿐만 아니라 열팽창 계수가 작고 강도가 높은 특성을 가지며, 특히 가공성・용접성 등이 우수하다.

9%Ni강은 문자 그대로 Ni을 9% 포함한 강으로서 1946년에 개발되었으며 1956년 ASTM 규격으로 제정되었고, 일본에서는 1977년 JIS에 규격화 되었다. 현재 9%Ni강은 제강기술의 발전에 따라 청정도가 높은 고품위의 강판이 공급되고 있다.

Table 2에 9%Ni강의 규격을 나타내었다. 모재는 QT(Quenching and Tempering) 또는 NNT(Double Normalizing and Tempering) 처리를 하여 인장강도가 690N/mm² 이상, 흡수에너지가 34J(−196℃)

Table 2. Table of standards for 9% Ni steel

Standards			JIS G 3127				ASTM				ASME	
			SL9N520		SL9N590		A353−87		A553−87 type 1		CASE1308−5	
Maximum plate thickness(mm)			50		50		50		50		50	
Heat treatment*			NNT		QT		NNT		QT		NNT or QT	
Chemical Composition (%)	C max.		0.12		0.12		0.13		0.13		0.13	
	Si max.(JIS)		0.30		0.30		0.15−0.40		0.15−0.40		0.15−0.40	
	Mn max.		0.90		0.90		0.90		0.90		0.90	
	P max.		0.025		0.025		0.035		0.035		0.040	
	S max.		0.025		0.025		0.040		0.040		0.040	
	Ni		8.50−9.50		8.50−9.50		8.50−9.50		8.50−9.50		8.50−9.50	
Tension Test**	0.2% proof stress N/mm²(kgf/mm²)		≧520 (≧53)		≧590 (≧60)		≧515 (≧52.7)		≧585 (≧59.8)		≧585 (≧59.8)	
	Tensile strength N/mm²(kg/mm²)		690−830 (70−85)		690−830 (70−85)		690−825 (70.3−84.4)		690−825 (70.3−84.4)		690−825 (70.3−84.4)	
	Elongation(%)		≧25(t>16)		≧25(t>16)		≧20.0		≧20.0		≧20.0	
Bend Test**	(JIS)	(ASTM,ASME)										
	t≦19	t≦25	R=1t		R=1t		R=2t		R=2t		R=2t	
	t>19	25<t≦40	R=1.5t		R=1.5t		R=2.5t		R=2.5t		R=2.5t	
		40<t≦50					R=3t		R=3t		R=3t	
	Direction***		L	C	L	C	L	C	L	C	L	C
Impact Test	Test temp. −196℃	Specimen dimension(mm)										
		**** Impact value J(kgf-m) 10×10	34(3.5)		41(4.2)		34(3.5)	27(2.8)	34(3.5)	27(2.8)	34(3.5)	
		7.5×10	25(2.6)	−	29(3.0)	−	26(2.7)	20(2.0)	26(2.7)	20(2.0)	26(2.7)	−
		5.0×10	18(1.8)		21(2.1)		16(1.6)	14(1.4)	16(1.6)	14(1.4)	16(1.6)	
		2.5×10	−		−		8(0.8)	7(0.7)	8(0.8)	7(0.7)	8(0.8)	−
		Amount of lateral expansion (mm) 10×10	−	−	−	−	−	≧ 0.381	−	≧ 0.381	−	−

* NNT : Double normalizing and tempering, QT : Quenching and tempering

** t : Plate thickness(mm), D : Dia. of bending(mm), R : Radius of bending(in ASTM additional requirement)

*** L : Direction of rolling, C : Direction at right angles to direction of rolling

**** Lower limit of requirement(In ASTM, additional requirement)

Table 3. Chemical composition and mechanical properties of 9% Ni steel

Thickness (mm)	Chemical composition(%)						Mechanical properties			
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Yield strength (N/mm^2)	Tensile strength (N/mm^2)	Elongation (%)	Absorbed energy 2vE −196℃ Avg.(J)
38	0.05	0.22	0.65	0.001	0.001	9.21	675	717	31	244
40	0.05	0.25	0.64	0.001	0.001	9.46	622	734	33	262
45	0.05	0.22	0.65	0.001	0.001	9.21	657	712	31	248

이상인 고인성 재료이다.

Table 3[2]은 실제 모재 성능의 한 예를 나타낸 것으로, 규격치를 상회하는 양호한 성능을 보이고 있다.

9%Ni강은 고강도 재료임에도 불구하고 용접성은 대단히 양호하다. Fig. 2[3]는 열영향부 최고 경도 시험결과를 나타낸 것으로 경도는 Hv400 정도로 높은 값을 보임에도 불구하고 충분한 연성을 가지고 있는 것이 확인되었다. 또 1960년 응력제거소둔을 하지 않고 시공된 모델 탱크에서도 충분한 연성·인성이 확인되어 ASME Case 1308에는 응력제거소둔을 하지 않는 경우의 규격이 추가되었으며, 그 후 9%Ni강으로 대형 LNG 탱크의 건조가 가능하게 되었다.

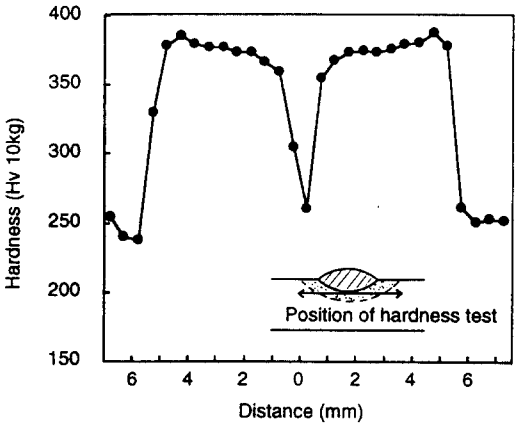


Fig. 2 Maximum hardness test of 9% Ni steel

종래 LNG 탱크의 용량은 8만m^3 크기가 대부분이고 내부탱크 소재인 9%Ni강의 최대 판 두께는 30mm 정도이었지만 현재 가동중인 14만m^3 규모의 탱크에서는 40mm가 사용되고 있다. Fig.3은 탱크 용량과 판 두께의 관계를 나타낸 것으로 ASTM 및 JIS규격에 규정된 최대 판 두께가 50mm인 것을 고려하면 탱크 용량은 20만m^3까지 대형화가 가능할 것이다. 또 이러한 최대 판 두께로 탱크를 건조하기 위하여 각종 시험, 특히 극저온에서 취성균열 발생 저지특성 및 전파 정지특성에 관한 시험이 이미 실시되었고, 이 결과로부터 충분한 안전성이 검증되었다. 이러한 결과의 한 예를 Fig. 4[2] 및 Fig. 5[4]에 나타내었다.

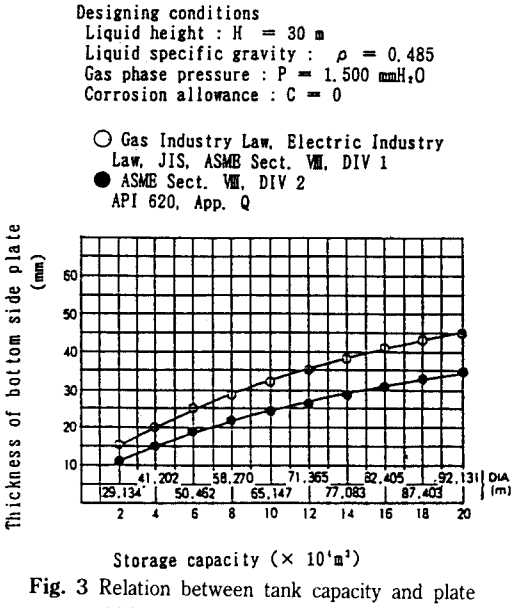


Fig. 3 Relation between tank capacity and plate thickness

4.2 용접재료

9%Ni강용 용접재료에 요구되는 특성으로서는 다음과 같은 것을 들 수 있다.

① 극저온에서 용접금속 인성이 우수할 것
② 용접금속의 강도가 9%Ni강과 동등할 것
③ 용접성(특히 내균열성) 및 용접 작업성이 우수할 것

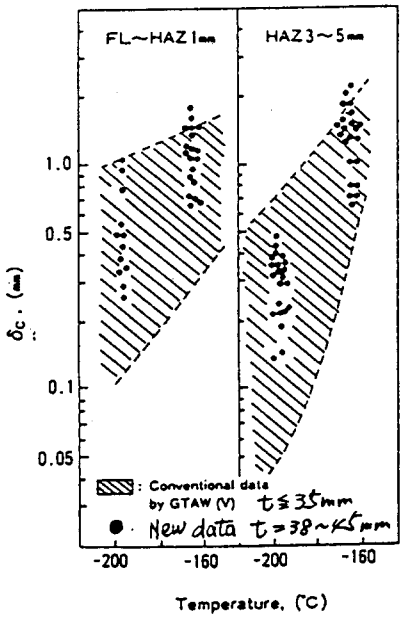


Fig. 4 Relation between critical CTOD value of the welded joint by GTAW(V) and temperature, compared with conventional data

LNG 탱크는 대형구조물이고 또한 용접시공은 대부분 현장시공이므로 용접한 그대로 저온에서 임의의 용접이음부 성능이 확보되어야 한다. 따라서 9%Ni강용 용접재료로서 모재와 동일성분의 共金系도 일부 개발되어 있지만 아직도 대부분의 경우 Ni계 합금을 사용하고 있다.

Ni계 합금은 9%Ni강에 비해서 강도가 낮은 것이 취약점이지만 완전 오스테나이트 조직이기 때문에 극저온에서도 취성파괴를 일으키지 않는 특징을 가지며, 이미 허용응력에 대해서 설명한 바와 같이 실제의 설계・시공에서는 이 점을 고려하여 사용하고 있다.

일본에서는 1966년 액화산소 탱크에 9%Ni강의 용접재료인 Inconel계의 피복 아크 용접봉이 최초로

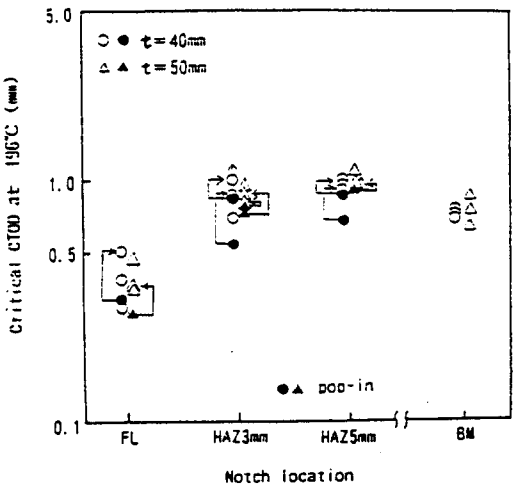


Fig. 5 Critical CTOD of welded joint by GTAW(V) at −196℃

적용되었다. 그 후 용접 자동화가 진행됨에 따라 용접금속의 내균열성 향상, 고강도화의 관점에서 자동용접재료인 Hastelloy계가 개발되어 적용되고 있다. 이들 재료는 JIS에 1985년 9%Ni강용 용접재료로 독립된 규격으로 제정되었고, AWS에는 Ni계 합금 규격의 일종으로서 9%Ni강용 용접재료가 제정되어 있다.

5. 9%Ni강 용접시 주의점 및 문제점

9%Ni강의 용접에 적용하는 용접재료가 Ni계 합금이고, 또한 9%Ni을 함유하고 있는 페라이트계 강을 고 Ni계 합금으로 접합하는 이른바 異種재료의 용접이기 때문에 실제 용접시공에서는 여러가지 주의점 및 문제점이 발생한다.

Table 4에 Ni계 합금의 용접재료를 적용하는 경우 발생하는 용접상 문제점을 나타내었으며, 용접시공상에서 특히 문제가 되는 점은 다음과 같다.

Table 4. Problems at welding of 9%Ni steel with high Ni alloy

Items	Problems
Weld defect	Hot cracking is apt to occur, especially on crater.
Depth of penetration	Lack of penetration is apt to occur because of shallow penetration.
Dilution	Composition of weld metal are affected severely by dilution of base metal.
Mechanical property	Especially, 0.2% proof stress of weld metal is lower than that of 9% nickel steel.
Thermal expansion coefficient	Thermal stress may be added by difference of thermal expansion coefficient between weld metal and 9% nickel steel.

5.1 용접금속의 균열

Ni계 합금은 오스테나이트 조직이기 때문에 기본적으로 고온균열이 발생하기 쉬우며, 9%Ni강용 용접재료의 개발은 이 고온균열 문제를 극복하는 것이 주요한 관건이었다. 현재 내균열성이 우수한 용접재료가 개발되어 있지만 아직도 충분한 주의가 필요하다.

Fig. 6은 피복 아크 용접봉의 용접조건이 내균열성에 미치는 영향을 나타낸 것으로 용접전류, 운봉비(용접속도에 대응함)가 높을수록 균열이 발생하기 쉽다는 것을 알 수 있다. 따라서 균열이 없는 건전한 용접금속을 얻기 위해서는 용접전류 및 용접속도를 너무 높이지 않도록 해야 하며, 특히 초층용접 등 구속이 큰 부분에서는 충분한 관리가 필요하다. 또 crater부는 균열이 일어나기 쉬운 곳이므로 기본적으로 제거하여야 한다.

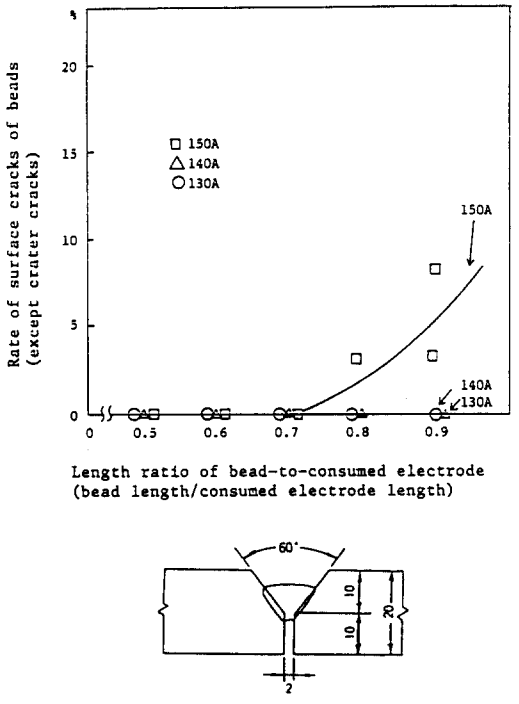


Fig. 6 Results of crack test by FISCO type Inconel type electrode(4.0ϕ)

5.2 용접열영향부의 균열

9%Ni강을 Ni계 합금으로 용접하는 경우에는 일반적으로 열영향부에 균열이 발생할 가능성이 거의 없지만 흡습한 용접재료를 사용한 경우에는 열영향부에 저온균열이 발생할 수 있다. Fig.7[3]은 피복 아크 용접봉에 의한 y형 균열시험 결과를 나타낸 것으로, 시험온도가 저하하면 균열이 증가하는 것을 알 수 있다.

Ni계 합금의 용접금속은 상온에서는 확산성 수소가 전혀 없지만 300℃로 가열하면 수소가 확산하기 시작하는 것이 실험적으로 확인되었으며, 이 수소는 용접 열 cycle을 부여하는 경우 응고, 냉각 중에 용접금속에서 열영향부로 확산하는 것으로 추측되기 때문에 이러한 균열은 수소에 기인한 지연균열이라고 생각된다.

따라서 홈 내에 기름, 수분 등을 완전히 제거할 것, 피복 아크 용접봉 및 서브머지드 아크 용접용 플럭스는 충분히 건조하여 사용할 것, 한냉지에서의 시공시 모재를 예열하는 등 주의가 필요하다.

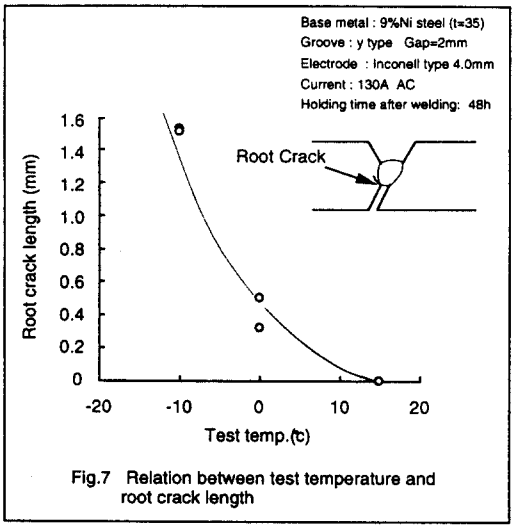


Fig.7 Relation between test temperature and root crack length

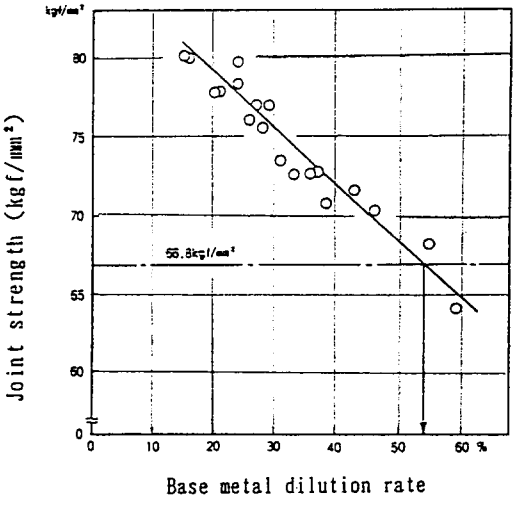
5.3 성분의 희석

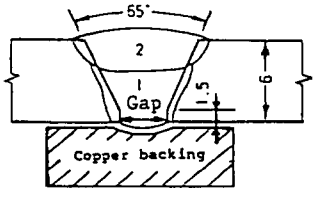
9%Ni강과 Ni계 합금은 화학성분이 크게 상이하기 때문에 9%Ni강 모재의 희석이 용접금속의 성능에

영향을 미치리라는 것은 쉽게 추측할 수 있다. 용접 금속의 성능 중에서도 특히 주의할 것은 강도이다.

Fig. 8은 자동 TIG 용접에 의한 이음부 강도에 미치는 모재 희석률의 영향을 나타낸 것으로, 모재 희석률이 높을수록 강도가 저하하는 것을 알 수 있다. 이것은 용접금속 중의 합금성분이 저하하기 때문이다.

따라서 필요 강도를 확보하기 위해서는 지나친 모재 희석을 피해야 하며, 특히 서브머지드 아크 용접이나 자동 TIG 용접법을 이용한 박판의 아래보기 용접에서는 루트간격, 용접조건을 적절히 조정하고, 가능한 한 다층용접을 실시하는 등의 주의가 필요하다.





Automatic TIG welding in flat position
Welding condition : 220-310 A, 9-11 V, 6-16 cpm
Root gap : 3-7 mm

Fig. 8 Relation between base metal dilution rate and joint strength(Filler wire 1.2 mmφ)

5.4 용 입

Ni계 합금은 9%Ni강에 비해 융점이 150℃ 정도 낮기 때문에 탄소강의 용접에 비해 용입량이 작아 용입불량을 일으키기 쉽다. 특히 수직 및 위보기 용접에서는 용접비드가 凸모양이 되기 쉽다. 이 점에 관해서도 용접재료의 개발・개량이 계속되어 지금은 탄소강용 용접재료와 동등한 재료가 개발되어 있다. 그러나 홈 각도를 넓게 하고 용접봉 및 와이어 직경을 작게 하여 용접전류를 제어하는 등 용접조건 및 시공상의 주의가 필요하다.

5.5 자기 아크 쏠림(Magnetic arc blow)

연강에 비해 Ni을 함유한 강은 자장의 영향을 받아 자력을 띄기 쉽고, 특히 9%Ni강 용접에 있어서는 자기 아크 쏠림이 문제가 된다.

자화된 9%Ni강에서는 아크 쏠림에 의해 용접금속부가 한쪽으로 치우쳐 융합불량이 발생하기도 하고, 또 수직・수평용접 등에서는 비드가 凸모양이 되거나 최악의 경우는 용접이 불가능하게 된다.

9%Ni강은 脫磁처리를 하여 출하하고 있고 운송시에도 자화되지 않도록 세심한 주의를 기울이고 있다. 그러나 한번 자화된 강판은 탈자처리가 곤란하여 출하에서 용접까지의 사이에 자화되지 않도록 주의하고, 특히 마그네틱 크레인의 사용은 엄금하고 있으며 전동 그라인더 등도 사용하지 않는 것이 바람직하다.

한편 용접전원도 직류보다 교류를 사용하면 자기 아크 쏠림을 줄일 수 있다.

6. 용접시공 방법

9%Ni강용 용접방법에는 현재 피복 아크 용접, 서브머지드 아크 용접, 자동 TIG 용접법이 있다. 이러한 방법의 개발경위와 향후의 방향에 대한 개략적인 내용은 다음과 같다.

6.1 피복 아크 용접법

피복 아크 용접법은 9%Ni강의 용접에 있어서 기본적인 방법이다. 초기의 소형 LNG 탱크는 모두 이

방법으로 시공되었다. 많은 부분이 자동화된 현재에도 복잡한 구조나 용접선이 짧은 지붕 철골이나 보강부재 등의 부속품을 포함한 2차부재의 용접에 많이 사용되고 있다.

따라서 피복 아크 용접봉은 기계적 성능이 우수할 뿐만 아니라 전자세 용접에서도 우수한 용접 작업성이 요구되어 지속적으로 개발·개량되어 왔다.

Table 5 및 Table 6에 피복 아크 용접봉의 규격을 나타내었으며, 크게 Inconel계(Ni-Cr Alloy)와 Hastelloy계(Ni-Mo Alloy)로 구분한다.

피복 아크 용접법은 용접 입열량이 비교적 낮아 고온균열이 발생하기 어렵기 때문에 Ni계 합금 가운데에서도 비교적 값이 싼 Inconel계가 사용되고 있다.

단 서브머지드 아크 용접과 자동 TIG 용접부의 가용접(tack weld)이나 누설방지 용접에서는 내균열성이 보다 우수한 피복 아크 용접봉이 필요하게 되어, 자동 용접재료와 동일한 Hastelloy계 용접봉이 개발되어 사용되고 있다. 이들의 성능에 대한 한 예를 Table 7 및 Table 8에 나타내었다.

6.2 서브머지드 아크 용접법

平底円筒形 2重殼 방식의 내부탱크 측면판의 원주 수평 이음부는 용접선이 길고 자동화에 의해 작업능률을 쉽게 향상시킬 수 있기 때문에 서브머지드 아크 용접법이 적용되어 왔다. 초기에는 Inconel계 용접재료가 사용되었지만 내균열성이 나쁘고, 서브머지드 아크 용접에서는 모재의 희석이 크고 강도가 부족하기 때문에 Hastelloy계 용접 와이어와 내균열

Table 5. Chemical composition requirements for deposited metal of SMAW(%)[a]

Spec.	Class.	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Fe	Nb	W
JIS Z3225	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	-
	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
AWS[b] A5.11	ENiCrFe-2	0.10	0.75	1.0-3.5	0.03	0.02	62.0 min.	13.0-17.0	0.50-2.50	12.0	0.5-3.0	-
	ENiCrFe-4	0.20	1.0	1.0-3.5	0.03	0.02	60.0 min.	13.0-17.0	1.0 -3.5	12.0	1.0-3.5	-
	ENiCrMo-6	0.10	1.0	2.4-4.0	0.03	0.02	55.0 min.	12.0-17.0	5.0 -9.0	10.0	0.5-2.0	1.0-2.0

a) Single values are maximum, except where otherwise specified.
b) Copper and total of other elements : 0.5 maximum.

Table 6. Mechanical properties requirements for deposited metal of SMAW

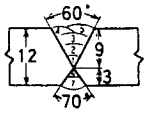
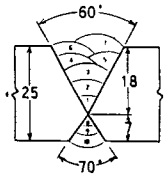
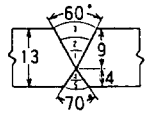
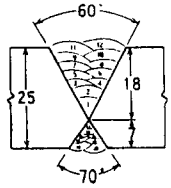
Spec.	Class.	Tensile strength (N/mm^2)	0.2% Offset proof strength (N/mm^2)	Elongation (%)	Absorbed energy 2vE-196℃ (J)
JIS Z3225	D9Ni-1	660 min.	360 min.	25 min.	Avg.34 min., min.27 min.
	D9Ni-2	660 min.	360 min.	25 min.	Avg.34 min., min.27 min.
AWS A5.11	ENiCrFe-2	550 min.	-	30 min.	-
	ENiCrFe-4	650 min.	-	20 min.	-
	ENiCrMo-6	620 min.	-	35 min.	-

Table 7. Chemical composition and mechanical properties for deposited metal of SMAW according to JIS method(%)

Trade Name	JIS Class.	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Fe	Nb	W
NIC-70S	D9Ni-1	0.09	0.26	2.21	0.004	0.002	67.8	13.88	3.86	9.86	1.60	0.63
NIC-1 S	D9Ni-2	0.03	0.48	0.28	0.003	0.002	68.6	1.93	18.52	7.21	-	2.91

Trade Name	JIS Class.	Tensile strength (N/mm^2)	0.2% Offset proof strength (N/mm^2)	Elongation (%)	Absorbed Energy 2vE-196℃ Avg.(J)
NIC-70S	D9Ni-1	686	421	45	68
NIC-1S	D9Ni-2	726	438	50	81

Table 8. Mechanical properties of SMAW welded joints

Trade Name	Thickness (mm)－Welding position	Groove[a] preparation	Pass No.	Electrode Size (mm)	Welding[b] Current (A)	Welded Joint Tensile Test		Impact Test	Longitudinal Bend Test	
						Tensile Strength (N/mm^2)	Location of Fracture	2vE－196℃ Avg.(J)	Face	Root
NIC－70S	12t－F	 Gouging	1,2 3－5 6 7	4.0 5.0 4.0 5.0	140 170 140 170	757	Weld metal	76	Good	－
	25t－V	 Gouging	1－10	4.0	115－125	735	Weld metal	72	Good	Good
NIC－1S	13t－V	 Gouging	1－5	4.0	115－130	761	Weld metal	111	Good	－
	25t－F	 Gouging	1－20	4.0	140	761	Weld metal	115	Good	Good

a) Base metal : 9%Ni steel
b) Power source : AC

성이 우수한 플럭스가 개발되어 적용되기에 이르렀다. 또 본 시공법은 용접량이 많은 측판과 annular 판의 T형 필릿 이음부에도 적용되고 있고 전용 플럭스와 전용 용접기에 의해 시공되고 있다.

Fig. 9는 Ni계 합금에서 취화온도폭(ZDR)에 미치는 Mo의 영향에 대하여 나타낸 것이다. Mo은 고온에서의 취화온도폭을 작게하고, 고온균열 발생을 억제하는 작용이 있는 것으로 알려져 Mo량이 많은 Hastelloy계는 Inconel계보다 내균열성은 우수하다고 말할 수 있다.

Table 9 및 Table 10에는 서브머지드 아크 용접재료의 규격을 나나내었고, 성능의 한 예를 Table 11 및 Table 12에 나타내었다.

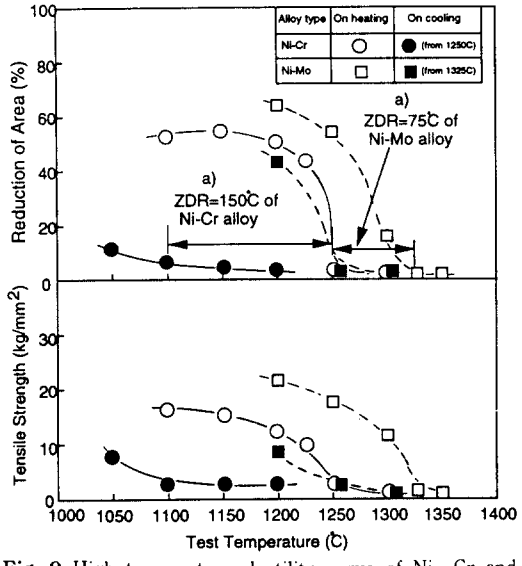


Fig. 9 High temperature ductility curve of Ni－Cr and Ni－Mo alloy
a) ZDR : Zero ductility temperature range

6.3 자동 TIG 용접법

내부탱크 측판의 수직 이음부는 자동화가 가능한 용접 이음부로서 LNG 탱크 건설 초기 무렵부터 Pulse MIG 용접의 실용화가 검토되었으나 이 용접법은 모재와 와이어와의 융점 차에 의한 융합불량 발생 및 용접비드가 凸형상이 되는 등의 문제가 해결되지 않아 사용되지 못하였다.

한편 TIG 용접은 고품질로서 평활한 용접금속을 얻을 수 있으므로 LNG 탱크와 같이 성능을 중요시하는 구조물의 용접에는 가장 적합한 용접법이지만 비능률적이어서 대형구조물에는 적용할 수 없다고 인식되어 왔다. 그러나 일본에서는 자동 TIG 용접이 1972년부터 사용되고 있으며, 더욱이 1979년 무렵에 MC－TIL법(磁氣제어가 부착된 자동 TIG 용접장치)이라고 하는 TIG 용접 자동화 장치가 완성, 실용화되기에 이르러 LNG 탱크의 시공법 중 하나로서 확고한 지위를 차지하게 되었다. 그 이유는 고품질 용접

Table 9. Chemical composition requirements for SAW (%)[a)]

Spec.	Class.	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Fe	Nb	Al,Ti
JIS Z3333	YS9Ni/FS9Ni－F	0.10	1.5	3.5	0.020	0.015	55.0 min.	－	10.0－25.0	20.0	－	－
	YS9Ni/FS9Ni－H	0.10	1.5	3.5	0.020	0.015	55.0 min.	－	10.0－25.0	20.0	－	－
AWS	ERNiCrMo－3[b)]	0.10	0.50	0.50	0.02	0.015	58.0 min.	20.0－23.0	8.0－10.0	5.0	3.15－4.15	0.40

a) JIS Z3333 : for deposited metal, AWS A5.14 : for filler wire.
Single values are maximum, except where otherwise specified.
b) For only reference, because filler wire of this classification is used for welding 9% Ni steel.
Copper and total of other eelements : 0.5 maximum.

Table 10. Mechanical properties requirements for deposited metal of SAW

Spec.	Class.	Tensile strength (N/mm^2)	0.2% Offset proof strength (N/mm^2)	Elongation (%)	Absorbed energy 2vE－196℃ (J)
JIS Z3333	YS9Ni/FS9Ni－F	660 min.	365 min.	25 min.	Avg.34 min., min.27 min.
	YS9Ni/FS9Ni－H	660 min.	365 min.	25 min.	Avg.34 min., min.27 min.
AWS A5.14	ERNiCrMo－3[a)]	760 min.	－	－	－

a) For only reference, because filler wire of this classification is used for welding 9% Ni steel.

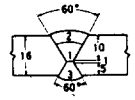
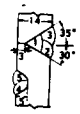
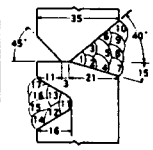
Table 11. Chemical composition and mechanical properties for deposited metal of SAW according to JIS method (%)

Trade[a)] Name	JIS Class.	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Fe	W
US－709S /PFN－3	YS9Ni /FS9Ni－F	0.03	0.12	1.76	0.002	0.001	64.6	1.90	16.89	12.44	2.63
US－709S /PFN－4	YS9Ni /FS9Ni－H	0.03	0.86	0.43	0.003	0.002	65.3	1.91	17.41	12.34	2.71

Trade[a] Name	JIS Class.	Tensile strength (N/mm^2)	0.2% Offset proof strength (N/mm^2)	Elongation (%)	Absorbed energy 2vE−196℃ Avg.(J)
US−709S /PFN−3	YS9Ni /FS9Ni−F	686	401	42	77
US−709S /PFN−4	YS9Ni /FS9Ni−H	700	423	43	71

a) Wire/Flux

Table 12. Mechanical properties of SAW welded joints

Trade[a] Name	Thickness (mm)−Welding position	Groove[b] preparation	Pass No.	Wire Size (mm)	Welding Current (A)	Arc Voltage (V)	Welding Speed (cpm)	Welded Joint Tensile Test		Impact Test	Longitudinal Bend Test	
								Tensile Strength (N/mm^2)	Location of Fracture	2vE−196℃ Avg.(J)	Face	Root
US−709S /PFN−3	16t−F	 Root gap : 3mm	1−2 3	3.2 3.2	[c] 450 450	33 33	30 35	747	Base metal	87	Good	Good
US−709S /PFN−4	14t−H	 Gouging	1−5	2.4	[d] 300−350	26−28	40−55	741	Weld metal	84	Good	Good
	35t−H	 Gouging	1−17	2.4	[d] [e] 300−360	26−28	30−55	726	Weld metal	64	Good	Good

a) Wire/Flux
b) Base metal : 9% Ni steel
c) Power Source AC
d) Power Source DC−RP
e) 300A−30cpm was adopted to weld some passes(pass Nos.1,3,5,6,11,13) in order to prevent a hot cracking.

이음부를 얻을 수 있다고 하는 TIG 용접금속 본래의 특성에 머물지 않고, 보다 능률을 높이고 또한 용접 후 보수가 거의 필요없기 때문에 결과적으로 다른 시공법에 비해 종합적인 능률면에서 조금도 손색이 없는 것이 확인되었기 때문이다.

이 자동화 장치의 개발과 함께 자동 TIG 용접용 와이어로서 대입열 및 고용착량임에도 내균열성이 우수하고 비드형상이 좋은 Hastelloy계 와이어가 개발되어 많은 LNG 탱크에 적용되고 있다.

Fig.10[5]에 MC−TIL법의 개념을, Fig.11[5]에는 그

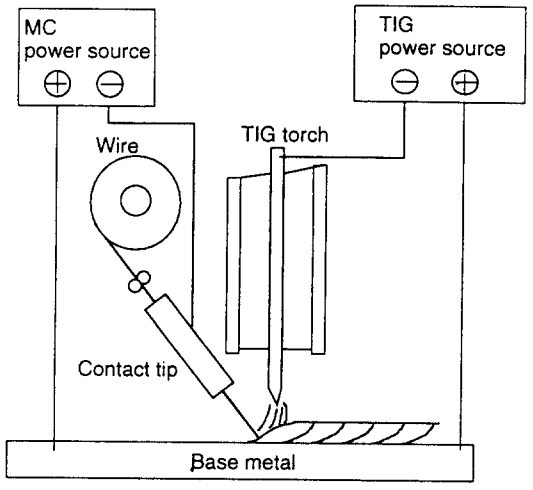


Fig. 10 Schematic of MC－TIL method

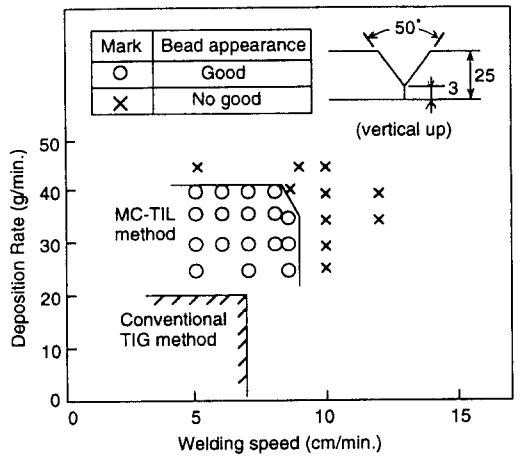


Fig. 11 Comparison of deposition rate

능률을 비교하였고, Table 13 및 Table 14에는 와이어의 규격을 나타내었다.

1985년 이후는 공기단축을 위하여 협개선화(狹開先化)가 시도되었다. 또 한편으로는 TIG 용접 본래의 특징인 뒷면비드 용접을 X 홈 등의 초층에 적용하고 뒷면가공을 생략하는 시공법을 채용하여 공기단축뿐 아니라 아크 에어 가우징, 그라인딩 등 뒷면가공 및 마무리 작업이 필요없게 되어 작업환경이 대폭적으로 개선되게 되었다.

최근에는 새롭게 개발된 아크 추적기술 등의 도입으로 안정된 용접시공이 가능하게 되었고 더욱 脫技能化·省人化가 이루어지고 있다. 또 종래 서브머지드 아크 용접에 의존하던 수평용접에도 자동 TIG 용접이 실용화되고 있어 향후 자동 TIG 용접장치의

Table 13. Chemical composition requirements for filler wire of GTAW (%)[a]

Spec.	Class.	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Fe	Nb	Al,Ti
JIS Z3332	YGT9Ni－1	0.10	1.50	5.0	0.015	0.015	55.0 min.	5.0－20.0	－	20.0	－	－
	YGT9Ni－2	0.10	1.50	－	0.015	0.015	55.0 min.	－	10.0－25.0	20.0	－	－
	YGT9Ni－3	0.10	1.50	－	0.015	0.015	55.0 min.	5.0－20.0	5.0－20.0	20.0	－	－
AWS A5.14	ERNiCrMo－3[b]	0.10	0.50	0.50	0.02	0.015	58.0 min.	20.0－23.0	8.0－10.0	5.0	3.15－4.15	0.40

a) Single values are maximum, except where otherwise specified.
b) For only reference, because filler wire of this classification is used for welding 9% Ni steel.
Copper and total of other elements : 0.5 maximum.

Table 14. Mechanical properties requirements for deposited metal of GTAW

Spec.	Class.	Tensile strength (N/mm^2)	0.2% Offset proof strength (N/mm^2)	Elongation (%)	Absorbed energy 2vE－196℃ (J)
JIS Z3332	YGT9Ni－1	660 min.	360 min.	25 min.	Avg.34 min., min.27 min.
	YGT9Ni－2	660 min.	360 min.	25 min.	Avg.34 min., min.27 min.
	YGT9Ni－3	660 min.	360 min.	25 min.	Avg.34 min., min.27 min.
AWS A5.14	ERNiCrMo－3[a]	760 min.	－	－	－

a) For only reference, because filler wire of this classification is used for welding 9% Ni steel.

특징을 살린 시공이 확대될 것으로 생각한다.

Table 15에 새롭게 개발된 자동 TIG 용접법의 주된 기술을 소개한다. 용접선이나 홈 폭의 변동에 대하여 용접 토치가 추적할 수 있는 기술과 모재에 대한 용입을 안정화시키는 기술로 크게 나눌 수 있다. Fig. 12[6]에는 아크추적을 응용한 용입 안정화 기구를 나타내었다. 또 Table 16 및 Table 17에는 MC－TIL법에 의한 성능의 한 예를 나타내었다.

Table 15. Technique of new TIG arc welding process

Arc Sensing for Groove Tracking
Tracing Data memorizing & Replaying
Point To Point(PTP) Teaching & Replaying
Laser Sensing Bead Height Control(LC Process)
Torch Returning for Side-stop
Synchronized Pulse(Welding Current, Wire Feeding Rate)

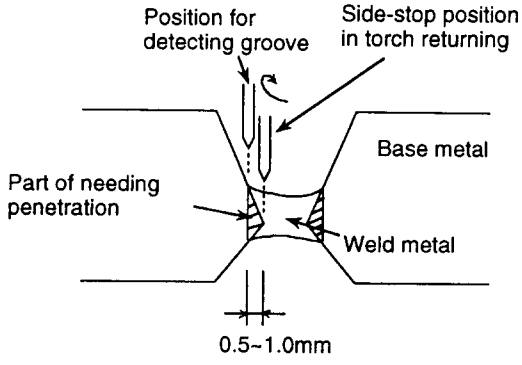


Fig. 12 Mechanism of torch returning for side-stop

6.4 가스쉴드 아크 용접법

탄소강 및 스테인레스강 분야에 있어서는 피복 아크 용접법 대신에 플럭스 코어드 와이어에 의한 아크 용접법이 많이 사용되고 있으며 9%Ni강 용접에서도 실용화가 기대되고 있다. Ni계 합금에서 시험개량한 결과 Table 18과 같은 기계적 성능의 와이어가 개발되어 일본에서는 지하식 LNG 탱크 지붕판의 필릿용접에 처음으로 적용되었다.

7. 용접기술의 과제와 금후의 전망

9%Ni강용 용접재료 및 시공법은 오랫동안의 연구・개발을 통해 일단 확립되었다고 생각되지만 공기단축, 숙련 용접사의 부족 및 경비 절감 등의 관점에서 향후 다음과 같은 과제가 더욱 검토되어야 한다고 생각한다.

7.1 용접재료의 고강도화에 의한 모재 판두께 저감화

전술한 바와 같이 API 620 APPENDIX Q에서는 고강도 설계기준이 수립되었고 이에 따라 고강도 용접재료가 개발되어 일부의 LNG 탱크에 적용됨으로써 판 두께 저감 효과를 얻고 있다.

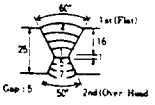
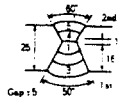
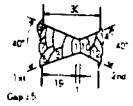
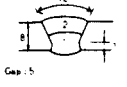
LNG 탱크가 대형화 할수록 이러한 판두께 저감 효과는 증가하기 때문에 금후에도 고강도화는 설계・시공에 도입될 것으로 생각되며 용접재료의 고강도화가 기대되고 있다.

Table 16. Chemical composition(wire) and mechanical properties(doposited metal) of GTAW according to JIS method (%)

Trade Name	JIS Class.	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Fe	W
TGS－709S	YGT9Ni－2	0.023	0.03	0.03	0.002	0.001	70.4	1.96	18.99	5.48	3.01

Trade Name	JIS Class.	Tensile strength (N/mm^2)	0.2% Offset proof strength (N/mm^2)	Elongation (%)	Absorbed energy 2vE－196℃ Avg.(J)
TGS－709S	YGT9Ni－2	736	448	49	157

Table 17. Mechanical properties of GTAW welded joints

Trade Name	Thickness (mm) – Welding position	Groove[a] preparation	Pass No.	Wire Size (mm)	Welding Current[b] (A)	Welding Speed (cpm)	Wire Feeding Rate (g/min.)	Welded Joint Tensile Test		Impact Test	Longitudinal Bend Test	
								Tensile Strength (N/mm^2)	Location of Fracture	2vE – 196℃ Avg.(J)	Face	Root
TGS-709S	25t – V(45)		1–7	1.2	240–280	4–5	12–25	721	Weld metal	140	Good	Good
	25t – V		1–5	1.2	220–300	4–5	12–32	686	Weld metal	140	Good	Good
	30t – H		1–14	1.6	240–350	9–18	15–38	705	Weld metal	143	Good	Good
	8t – F		1–2	1.6	300–320	9–10	40–45	685	Weld metal	71 (half size)	Good	Good

a) Base metal : 9% Ni steel, 1st pass welding : with copper backing
b) Power source DC–SP

Table 18. Mechanical properties for deposited metal of FCW according to JIS Z3225[a]

Trade Name	Tensile strength (N/mm^2)	0.2% Offset proof strength (N/mm^2)	Elongation (%)	Absorbed energy 2vE – 196℃ Avg.(J)
DWN–70S	710	420	45	81

a) Power source : DC–RP, Shielding gas : Ar-20% CO_2

7.2 자동용접의 省人化

일본에서는 현재 숙련용접사의 부족, 고령화 및 작업환경의 열역화에 따라 용접사의 역할 경감이 요구되고 있다. 용접사가 항상 용접기를 조종하는 것이 아니고 이상이 있을 경우에만 대응하는 정도의 자동 용접장치가 기대된다.

이를 위해서는 홈의 상태를 높은 精度로 감지할 수 있는 기술, 또 모니터에 의해 여러대의 용접기를 원격 조작할 수 있는 기술의 개발 등이 기대되고 있다.

7.3 가스쉴드 아크 용접 와이어의 실용화

LNG 탱크의 시공에서는 자동 용접화가 어려운 부위가 많아 숙련 용접사에 의한 피복 아크 용접에 의지할 수 밖에 없는 실정이지만 일반적으로 탄소강 및 스테인레스강 용접과 같이 가스쉴드 아크 용접 와이어에 의한 반자동 용접의 적용 확대가 기대된다.

7.4 共金 용접재료의 실용화

共金 용접재료는 현재까지 TIG 와이어만 개발되어 있기 때문에 본 내용에서는 특별하게 취급하지 않았다. 그러나 최근 용접재료의 고강도화 및 경비 저감화 추세에 따라 자동 TIG 용접법의 확대와 함께 LNG 탱크에도 共金 용접재료의 적용이 현실화 될 것으로 기대된다.

Table 19 및 Table 20[7]에는 자동 TIG 장치에 의한 共金계 와이어의 조성과 성능에 대한 예를 나타내었다.

Table 19. Chemical composition of filler wire with that same as base metal (%)

Trade Name	C	Si	Mn	P	S	Ni
TGS−9N	0.02	0.01	0.37	0.002	0.002	11.2

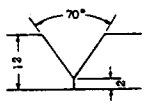
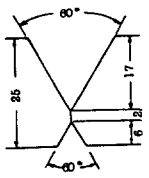
8. 결 론

9%Ni강을 이용한 지상식 LNG 탱크의 용접기술의 개요를 보고하였지만 금후 LNG 탱크의 건설이 점점 증가할 것으로 예상되기 때문에 보다 안심하고 사용할 수 있는 용접재료, 용접시공 기술 등을 개발·개량하여 수요가 여러분의 기대에 부응토록 노력해 갈 것입니다.

참 고 문 헌

1) 村本 聖一 : 溶接技術, 1993年 1月號, pp.76−84
2) 町田 進 外 : JHPI, Vol.29, No.6, (1991), pp.341−355
3) 杉山 暢 : 9%Ni鋼溶接のABC
4) 町田 進 外 : JHPI, Vol.31, No.6, (1993), pp.353-360

Table 20. Mechanical properties of GTAW welded joints

Trade Name	Thickness (mm) − Welding position	Groove[a] preparation	Pass No.	Wire Size (mm)	Welding[b] Current (A)	Arc Voltage (V)	Welding Speed (cpm)	Welded Joint Tensile Test		Impact Test	Transverse Bend Test	
								Tensile Strength (N/mm^2)	Location of fracture	2vE−196℃ Avg.(J)	Face	Root
TGS−9N	12t − F	 Gouging	1−5	1.2	200	10.5	8	775	Base metal	160	Good	Good
	25t − V	 Gouging	1−9	1.2	250	12	5	787	Base metal	180	Good	Good

a) Base metal : 9% Ni steel
b) Power source : DC−SP

5) 永島 仁：溶接技術, 1982年 11月號
6) 菅 哲男 外：R&D(Kobe Steel Engineering Report), Vol.45, No.1, (1995)
7) (株) 神戶製鋼所 技術資料, RDPD－7901, (1979)