

최근 9%Ni강의 용접특성

이 중 봉*·한 재 광*

Welding Characteristics of Recently Developed 9% Ni Steel

Jong-Bong LEE* and Jae-Kwang HAN*

1. 머리말

근년 환경문제 및 에너지 위기 대책으로서 열효율이 높고 안전할 뿐 아니라 공해물질이 거의 발생하지 않는 청정연료인 천연가스의 사용이 세계적으로 급증하고 있다. 우리나라도 비약적인 경제발전과 함께 에너지 소비가 급증하게 되었고, 에너지 자원이 빈약한 현실을 고려할 때 석유 의존도를 줄이고 장기 안정적인 에너지의 확보가 필요하다는 인식이 확산되어 1987년 메탄가스가 주성분인 천연가스가 사용되기 시작하였다. 이때를 즈음하여 국내에서도 액화천연가스(LNG : Liquefied Natural Gas)의 저장탱크가 본격적으로 건설되기에 이르렀으며, 국내의 LNG 수요를 예측하여 2006년까지 총 30여기의 탱크가 건설될 예정이다¹⁾.

한편 국내에서 1987년 건설된 초기의 저장 탱크는 지상식의 Membrane PC(Prestressed Concrete) 형식이었고, 9%Ni강은 1994년 인천 인수기지의 지상식 PC LNG 탱크에 처음으로 사용되게 되었으며, 향후 이러한 형식의 탱크가 추가로 건설될 가능성이 크다.

9%Ni강은 1944년 미국의 INCO사(International Nickel Co., Ltd.)에 의해 최초로 개발된 강도가 높고 용접성이 우수한 강재로서, 특히 극저온에서의 충격 인성이 우수하고 경제적으로도 유리하여 LNG 탱크 소재로서 사용한 실적이 많으며, 그동안 일본이 주축이 되어 강재의 품질개선 및 고능률·고품질의 용접기술 개발 등을 비롯하여 탱크의 대형화 추세에

따른 안전성 확보를 위한 연구도 계속되고 있다^{2~10)}.

이러한 추세에 동참하여 우리나라도 1993년 국산의 9%Ni강을 성공적으로 개발하게 되었고, 그 품질특성에 대해서도 국내외에 발표되었으나^{11~13)} 여건이 미비하여 현재 국내에서 건설 중인 탱크의 소재로서는 공급되지 못하였다. 그러나 최근에 개발된 국산 강재는 자체 시험결과 뿐 아니라 외국 유수 연구기관의 시험결과에서도 각종 품질특성이 선진 제품과 동등 이상으로 우수함이 입증되어, 가까운 장래 건설 예정인 국내공사에는 물론 해외에서도 사용될 것으로 기대되고 있다.

따라서 본 해설은 향후 국내외의 LNG 수요를 고려할 때 대형 저장탱크의 건설이 활발해 질 것으로 전망됨에 따라 9%Ni강의 현황과 함께 최근 개발된 국산 강재의 용접특성에 대하여 소개하고자 한다.

2. LNG 수요와 저장 탱크의 현황

우리나라는 1987년 에너지 다원화 정책이 수립됨으로써 천연가스의 사용이 본격화 되었다. Fig.1은 년도별 천연가스의 사용실적 및 수요 예상량을¹⁾ 나타낸 것이다. 전체 사용량을 기준하면 1994년에 578.3만톤을 사용하여 초기인 1987년의 161.2만톤에 비해 약 3.6배 증가하였고, 2006년에는 수요량이 1,400만톤 정도에 이를 것으로 예상된다. 이러한 추세에 근거하여 LNG 저장 탱크는 1987년에 평택에서 처음 건설이 시작된 이래 1995년 현재 10만³급 지상식 Membrane PC 형식의 탱크 6기가 완성되어 가동

* 정희원, 포항종합제철(주), 기술연구소

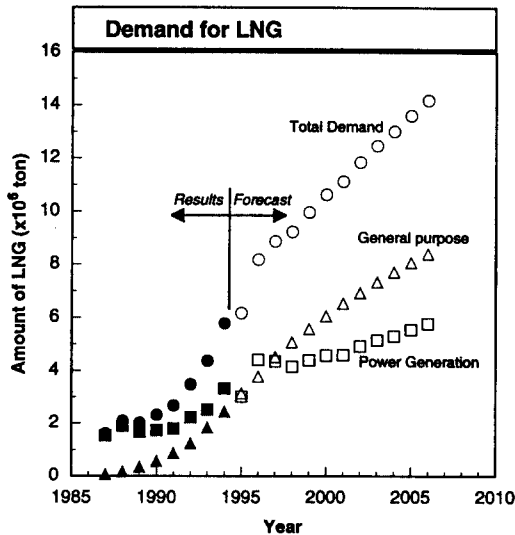


Fig.1 Demand for LNG in KOREA

중이며, 같은 형식의 1기는 거의 완성 단계에 있다. 또한 9%Ni강을 사용하는 지상식 PC LNG 탱크 3기도 1994년 인천 인수기지에 착공되어 1996년도에 완공 목표로 건설 중에 있으며, 급증하는 국내 LNG 수요를 충족시키기 위해 2006년 까지 총 30여기의 탱크를 보유할 수 있도록 건설 계획을 추진 중인 것으로 알려지고 있다.

한편 일본의 경우는 LNG 사용량¹⁴⁾ 1988년 이미 3,043만톤으로서 동년 대비 우리나라의 10배 이상을 사용하였으며, 2005년의 수요량은 우리나라의 5배 정도인 6,644만톤에 이를 것으로 추정하고 있다. 현재 일본이 보유하고 있는 탱크수도¹⁵⁾ 1991년 기준으로 액화기지 48기, 수입기지 190기로서 총 238기에 이르며, 그 중 지상식 탱크수는 전자가 48기, 후자가 135기로서 지하식에 비해 그 수가 압도적으로 많다.

이러한 LNG 저장 탱크의 형식은 크게 지상식과 지하식으로 구분된다. 현재 사용되고 있는 지상식 탱크의 대부분은 2중 구조이며, 주로 지붕의 형태와 외부탱크의 재질에 따라 형식이 구분된다. 이들 중 대표적인 金屬2重殼 형식은 극저온의 LNG에 접하는 내부탱크와 단열층 및 외부탱크로 구성되며, 내부탱크의 소재는 주로 9%Ni강이고 외부탱크에는 연강이 사용되고 있으나 9%Ni강은 간혹 외부탱크의 소재로 사용되는 경우도 있다.

한편 인천 인수기지에 현재 건설 중인 탱크는 내부탱크의 내경이 68m, 전체 높이가 약 43.4m인

10만m³ 규모의 지상식-자립식 탱크로서, 내부탱크의 설계지침은 API 620 Appendix Q에 근거하고 있으며, 주된 사용재료는 내부탱크가 9%Ni강이고 외부탱크는 연강으로 되어 있다.

현재 전 세계에서 사용 중인 이들 탱크의 용량은 초기에는 4만m³ 정도였지만 점차 그 크기가 증대되어 요즘은 6~8만m³ 규모가 대부분을 차지하고 있다. 그러나 근년 탱크의 대형화 요구에 부응하여 10만m³ 규모가 주종을 이루고 있고, 최근 일본에서는 세계 최대 규모인 14만m³급의 PC LNG 탱크를¹⁴⁾ 완성하여 초대용량화 추세에 돌입하고 있다. 탱크의 용량과 사용 강재의 최대 두께와의 관계¹⁶⁾에 의하면 규정 및 허용용력의 설정 정도에 따라 다소 다르겠지만 현재 개발된 강재의 최대 두께가 50mm인 것을 고려할 때 향후 탱크의 용량이 20만m³ 정도까지 대형화되리라 생각된다.

한편 LNG 탱크는 사용상 안전성의 확보가 가장 중요하다. 따라서 현재 탱크의 구조 형식에 관한 규격으로서 해외에 널리 적용되고 있는 것은 API 620, BS 4741 및 BS 5387이 있고, 이들을 보완한 것으로서 1986년 발간된 EEMUA(The Engineering Equipment and Materials Users Association)의 저온액화가스 저장 탱크의 설계·건설지침¹⁷⁾ 있다. 또 PC를 적용한 탱크에 대하여 1982년 FIP(Federation and Materials Users Association)가 발간한 설계지침¹⁸⁾ 있다. 이러한 규격 외에도 일본에서는 LNG 지상식貯槽 지침이 있고, 탱크 사용자가 속하고 있는 업종에 따라 가스사업법, 전기사업법 또는 고압가스 취급법 등의 규제를 받고 있다.

3. 9%Ni강의 개발 현황

LNG 저장 탱크용 소재로서는 Al 합금(5080-0재), 오스테나이트계 스테인리스강 및 9%Ni강을 들 수 있다. 그러나 이들 재료 중 9%Ni강은 고강도로서 열팽창계수가 작고 저온인성 및 용접성이 우수할 뿐 아니라 다량으로 안정공급이 가능하고 경제적인 측면에서도 유리하다는 점 때문에 사용된 실적이 많다.

이러한 9%Ni강은 1944년 미국 INCO사에 의해 최초로 개발된 후, 1952년 액체산소(사용온도: -183℃)를 저장하는 탱크의 소재로서 처음 사용되었다. 그 후 1956년에 ASTM 규격으로 제정되었고, LNG 탱크용 소재로서는 1963년 경부터 본격적으로

사용되었다고 한다. 일본의 경우는 1961년 경부터 연구가 시작되었으며, 1969년에 개발 제품을 사용하여 4.5만³ 규모의 LNG 탱크 4기를 건조하였고, 1978년에 JIS 규격화 되었다^{19,20)}.

한편 우리나라는 그동안 여러가지로 불충분한 여건 때문에 90년대에 들어서야 본격적인 개발에 착수하였지만, 1993년 선진국의 제품과 동등 이상의 우수한

품질특성을 갖는 9%Ni강을 성공적으로 개발하게 되었다. 그러나 여건 미비로 1994년 국내에서 최초로 시도된 9%Ni강을 사용한 LNG 탱크의 건설에는 국산 강재가 사용되지 못하였다. 또한 KS 규격화도 아직 안된 상태이다.

Table 1 및 Table 2는 각각 지금까지 알려진 각국의 9%Ni강에 대한 규격과 주요성분 범위 및 이들의

Table 1 Plate specifications and chemical compositions of 9% Ni steel (wt.%)

Contury	Code	C	Si	Mn	Ni	S	P
USA	ASTM A353	≤0.13	0.15-0.40	≤0.90	8.50-9.50	≤0.035	≤0.035
	ASTM A553					≤0.035	≤0.035
	ASTM A844					≤0.020	≤0.020
Japan	JIS G3127	≤0.12	≤0.30	≤0.90	8.50-9.50	≤0.025	≤0.025
	SL9N 520						
	SL9N 590						
UK	BS 1501-509	≤0.10	0.10-0.30	0.30-0.80	8.75-9.75	≤0.030	≤0.025
Germany	VDEh 680 X10 Ni9	≤0.10	0.10-0.35	0.30-0.80	8.0-10.0	≤0.035	≤0.035
France	NFA36-208 9Ni(1966)	≤0.10	0.15-0.30	≤0.8	8.5-9.5	≤0.030	≤0.030
Italy	UNI 5920-66 X10 Ni9	≤0.10	0.15-0.30	≤0.9	8.50-9.50	≤0.035	≤0.035
Norway	DnV(1971) NV20-2	≤0.08	0.15-0.35	0.40-0.70	9.00-9.75	≤0.025	≤0.020
Belgium	NBN 630-70 10Ni 36	≤0.10	0.15-0.35	≤1.00	8.50-9.50	≤0.030	≤0.030

Table 2 Plate specifications and mechanical properties of 9% Ni steel

Condition and property	USA, ASTM			Japan, JIS		UK, BS		Germany	France	Italy	Norway	Belgium
	A353	A553 Type I	A844	SL9N 520	SL9N 590	509	510	X8 Ni9	NFA36-208 (1966)9Ni	5920-6 X10 Ni9	NV 20-2 (1971)	630-70 10Ni 36
Condition	NNT	QT	DQT	NNT	QT	NNT,QT	QT	NNT, QT	-	NNT, QT	-	-
Thickness, mm	≤50	≤50	≤50	6-50	6-50	≤50	≤50	-	30-50	-	-	16-40
Tensile properties at 20°C												
YS, MPa	≥515	≥585	≥585	≥520	≥590	≥530	≥590	≥490	≥588	≥490	≥440	≥529
TS, MPa	690-825	690-825	690-825	690-830	690-830	690	690	640-830	686	690-830	640	637-833
E1, %	≥20	≥20	≥20	≥21 ^{a)} ≥25 ^{b)}	≥21 ^{a)} ≥25 ^{b)}	≥18	≥18	≥17	≥19	≥19	≥20	≥17
Charpy impact properties												
Test temperature, °C	-195	-195	-195	-196	-196	-196	-196	-195	-196	-196	-185	-196
Impact energy, J				(18/14) ¹⁾	(21/18) ¹⁾							
L direction(Av/min)	(34/27)	(34/27)	(34/27)	(25/22) ²⁾	(29/25) ²⁾	(34)	(34)	(41)	(48)	(34)	(34)	(39)
T direction[Av/min]	[27/20]	[27/20]	[27/20]	(34/27) ³⁾	(41/34) ³⁾	[27]	[27]	[24]				
Lateral expansion, mm	≥0.38	≥0.38	≥0.38									

a) : 6 ≤ t ≤ 16 (No.5 Specimen), t > 20 (No.4) b) : t > 16 (No.5)

1) : 6 ≤ t < 8.5 2) : 8.5 ≤ t < 11 3) : 11 ≤ t

* EEMUA(The Engineering Equipment and Materials Users Association)

- 9% Ni steel : 35J(BM, WM) at -196°C

- Improved 9% Ni steel : 100J(BM), 35J(WM) at -196°C

기계적 성질에 대한 규정 범위를 나타낸 것이다. 가장 중요한 특성의 하나인 충격인성은 규격에 따라 다소의 차이는 있지만 대부분이 -196°C 에서의 흡수 에너지가 34J 이상으로 규정되어 있다. 그러나 참고로 병기한 EEMUA에서의 충격인성 요구값은 -196°C 에서 모재 100J, 용접금속 35J 이상으로서 지금까지 알려진 규격 또는 지침 중 가장 엄격한 것이다.

이러한 9%Ni강의 저온인성을 확보하기 위해서는 P 및 S와 같은 불순물 원소의 저감과 적절한 열처리가 필요하다. 먼저 불순물 원소는 최근 제강기술의 발달과 함께 전로정련, 노외정련에 의해 일본에서는 P 및 S를 10ppm 까지 저감시킨 실적이 있고, 국내에서도 S는 10ppm 이하, P는 30~40ppm 수준까지 관리할 수 있게 되었다. 열처리 기술의 경우 초기에는 NNT 또는 QT 처리를 하였지만 그 후 QT 처리 중에 ($\gamma + \alpha$)의 2상 영역에 가열, 냉각처리(Lamellarizing 처리)를²¹⁾ 함으로써 안정된 잔류 오스테나이트를 확보하여 저온인성의 향상을 도모한 QLT 처리가 도입되었고, JIS에는 이미 필요에 따라 QLT 처리를 할 수도 있다고 규정되어 있다. 또 ASTM에도 이미 규정되어 있지만 최근에는 TMCP 장치를 이용하여 직접급냉한 후 뜨임처리하는 DQT도²²⁾ 적용되고 있고, 저C-Mo계의 9%Ni강도⁹⁾ 개발되어 취성파괴 특성이 우수하다고 보고되고 있다.

Fig.2는 현재 국내에서 9%Ni강을 제조하는 주요

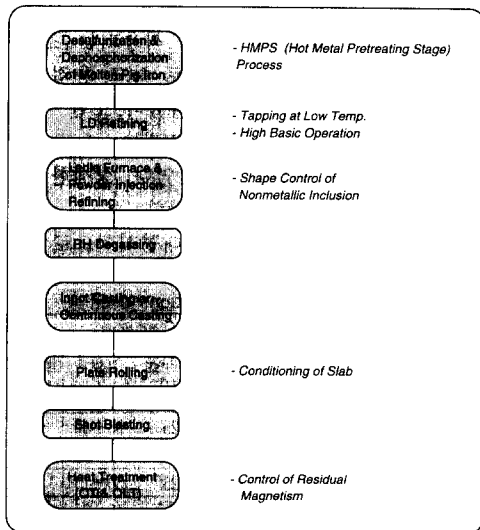


Fig.2 Manufacturing procedure of 9% Ni steel

공정을 나타낸 것으로, 특징은 용선 예비처리 과정에서 탈P, 탈S처리를 하고 비금속 개재물의 형상 제어 및 탈가스 처리를 한 후 강괴제조법 또는 연속주조법으로 슬라브를 제조하는 것이다. 그 후 압연과정을 거치고 열처리하는 QT 또는 QLT 처리를 하며, 최종제품의 잔류자기가 50Guass 미만이 되도록 관리한다.

한편 9%Ni강은 종래 강괴제조법에 의해서만 제조되었으나 불순물 원소의 대폭적인 저감이 가능하게 됨에 따라 연속주조법으로도 제조할 수 있게 되었고, 또한 이들 제품의 품질특성도 양호하여 해외에서 실제 적용된 실적도 있다고 한다. 그러나 아직까지 일본 국내에서는 사용자의 보수적인 고정관념 때문에 강괴제조법에 의한 제품만을 고집하고 있는 실정으로서 당장 변화되리라고 기대하기는 어려울 것이다. 따라서 수요가와 공동연구 등을 통하여 품질에 대한 신뢰를 높이고, 또 경제적이며 안정적인 공급이 가능한 연속주조법의 이점이 보다 크게 부각된다면 머지않아 이들 제품이 거부감 없이 사용될 수 있으리라 확신한다.

4. 국산 9%Ni강의 품질특성

4.1 모재특성

국산의 9%Ni강은 1993년 강괴제조법 및 연속주조법을 병행하여 두께 10mm, 25mm 및 37mm 강재를 QLT 방법으로 시험 생산한 이후 본격적인 생산체제를 갖추게 되었다. 본 내용에서는 주로 강괴제조법을 거쳐 QLT 처리로 생산한 두께 25mm인 시험생산재의 특성에 대하여 기술하고자 한다. 이 강재는



Photo.1 Microstructure of 9% Ni steel

Table 3 Chemical compositions and mechanical properties of 9% Ni steel plate

Chemical Composition(wt.%)							Tensile Property			vE ₋₁₉₆ (J)		
C	Si	Mn	P	S	Ni	Sol-Al	YP (MPa)	TS (MPa)	E1 (%)	L-dir.	T-dir.	L ^{SA}
0.07	0.25	0.68	0.004	0.001	9.26	0.033	671	729	30	220	200	200

L^{SA}: 5% strain-aged at 250°C×1hr, Longitudinal dir.

Photo.1에 나타난 바와 같이 Tempered Martensite 조직을 보이며, 전자 현미경 관찰로서 7% 정도의 잔류 오스테나이트를 포함하고 있음이 확인되었다.

Table 3은 이 강재의 화학조성 및 기계적 성질을 나타낸 것으로, 불순물 원소인 P 및 S 함량이 각각 40ppm 및 10ppm 으로 낮고, 인장특성도 관련 규격을 충분히 만족한다. 특히 -196°C에서의 충격 흡수 에너지는 압연방향에 의한 영향이 작고, 5%의 Prestrain을 부가한 후 250°C에서 1시간 시효처리 한 경우에도 EEMUA의 지침을 훨씬 상회하여 극저온에서의 충격인성 및 가공성도 대단히 우수하다.

한편 BS 5762 (1979)에 기준한 CTOD 시험 결과, -196°C에서의 한계 COD값이 L-방향 0.23mm, T-방향 0.18mm 정도로서 일반적으로 알려진 취성파괴 발생 한계값인 0.1mm를 상회하였으며, LNG 온도 부근인 -170°C에서는 L-방향의 COD값이 0.75mm의 높은 값을 나타내었다. 또한 ASTM E604에 기준한 Dynamic tear 시험 결과 -196°C에서의 에너지가 230kg·m 이상의 높은 값을 보였다. 이러한 소형시험 외에도 극저온에서 대형인장시험, 2중인장시험 및 ESSO 시험으로 모재의 파괴인성을 평가한 결과 취성파괴의 발생특성 및 취성균열의 전파 정지특성도 대단히 우수함이 확인되었다.

4.2 용접특성

9%Ni강을 사용하는 LNG 탱크에는 SMAW, GTAW 및 SAW 방법이 적용되고 있으며, 1970년대의 초기에는 대부분 SMAW에 의존하였으나 최근에는 많은 부분이 자동화되고 있다²³⁾. 그러나 국내에서 현재 건설 중인 LNG 탱크에는 SAW를 사용하는 일부의 수평 용접부를 제외한 모든 부위에 아직 SMAW만이 적용되고 있는 실정이다.

한편 9%Ni강용 용접재료는 용접금속의 강도 및 열팽창계수가 모재와 비슷하고 극저온에서의 높은 충격인성이 요구되며, 용접 작업성 등도 우수해야

한다. 특히 LNG 탱크와 같은 대형 구조물은 용접 후 열처리가 불가능하기 때문에 용접된 상태에서 우수한 저온 인성을 확보할 수 있어야 한다. 이러한 특성을 만족하는 재료로서 종래부터 고 Ni계 합금이 주로 사용되고 있으며, 이들 재료의 단점을 극복하기 위해 개발된 일부 Fe계 재료는^{24,25)} 아직 대형 LNG 탱크에는 사용된 실적이 없다.

주로 사용되는 고 Ni계 재료의 경우, SMAW에는 일부 자동용접의 假용접부 및 보수용접을 제외한 거의 모든 범위에서 70Ni-Cr계 (Inconel계)가 사용되고 있다. 또 GTAW 및 SAW와 같은 자동 용접 시에는 비교적 높은 전류가 필요하기 때문에 Mo를 첨가하여 고온균열 특성을 개선한 70Ni-Mo계 (Hastelloy계) 와이어가 사용되며, 현재는 70Ni-20Mo-3W계의 Hastelloy B계가 일반적이다²³⁾. 그러나 이러한 고 Ni계 용접재료도 아직 국산화가 되고 있지 않다.

국산 강재의 용접특성은 이러한 용접현황에 근거하여 평가하였다. 즉 용접방법은 SMAW 및 GTAW를 사용하여 수직자세로 상진 (Vertical-up) 용접하였고, 용접조건도 실제 탱크의 용접에 사용되는 조건을 적용하여 층간온도를 150°C 이하로 하고, 용접 입열량은 약 3.0kJ/mm 미만으로 관리하였다. 또한 사용한 용접재료는 시판재로서, SMAW에는 Inconel계, GTAW에는 Hastelloy계를 사용하였다. 상세한 용접 조건은 Table 4에 나타난 바와 같다.

용접특성은 크게 소형시험과 대형시험으로 구분

Table 4 Welding conditions used

Plate Thick. (mm)	Welding Method	Welding Conditions				
		Welding Material	Current (A)	Voltage (V)	Speed (mm/min)	Heat Input (kJ/mm)
25	SMAW	NIC-70S	100-120	25	50-80	2.7
			100-120	25	50-70	2.8
			100-120	25	50-70	2.8
	GTAW	NF196	230-290	10.5	40-60	3.3
37	SMAW	NIC-70S	90-120	25	50-90	2.5
	GTAW	NF196	230-290	10.5	40-70	3.3

하여 평가하였다. 소형시험으로는 용접 이음부의 인장, 굴곡, 경도 등 일반특성과 Charpy 충격특성 및 CTOD 특성을 평가하였으며, 대형시험으로는 대형

인장시험 및 Duplex ESSO 시험을 실시하여 취성파괴 발생특성 및 취성균열 전파 정지특성을 평가하였다.

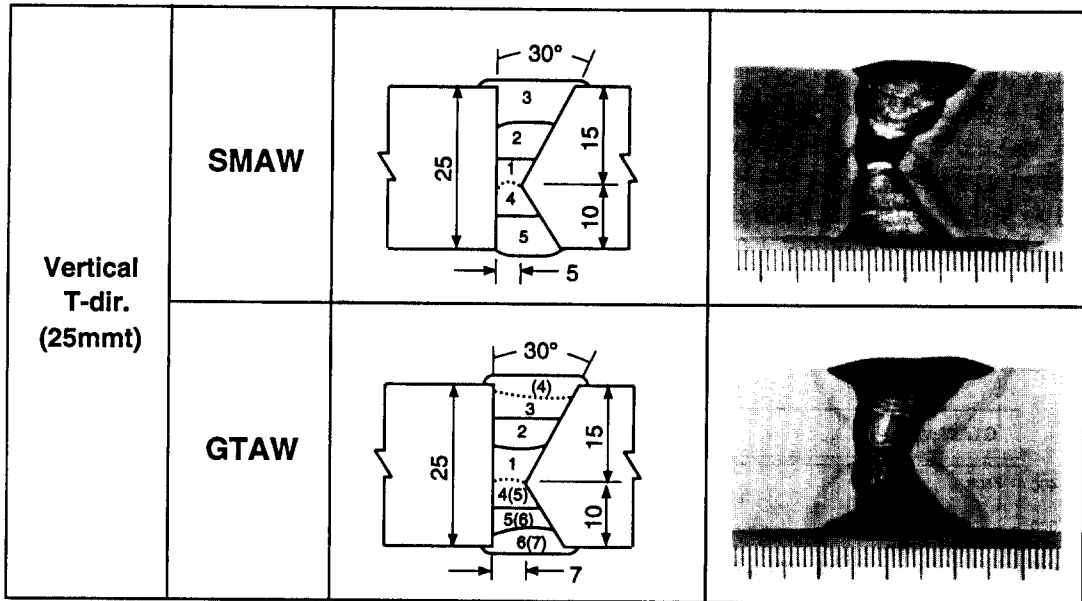


Photo.2 Groove preparation and micro-view of welded joints

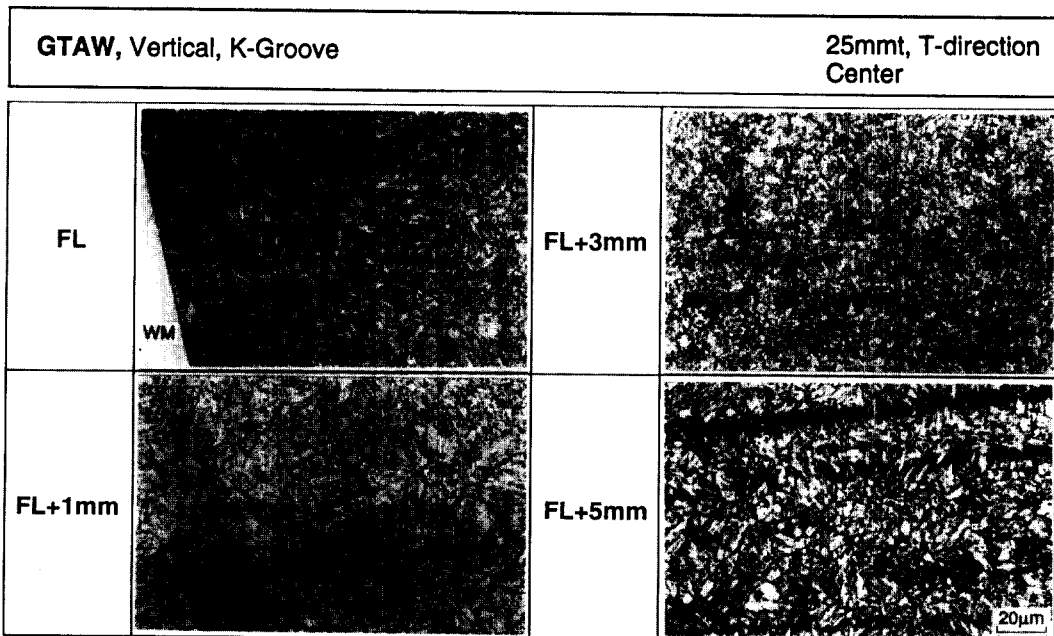


Photo.3 Microstructures of GTAW joint

4.2.1 일반특성

Photo.2는 SMAW 및 GTAW 이음부의 단면 사진을 나타낸 것이다. 또 Photo.3은 GTAW 이음부의 각 위치별 현미경 조직으로서 특별한 이상조직은 관찰되지 않았다.

한편 용접부의 인장시험 결과 대부분 용접금속부에서 파단되었고 강도는 관련 규격을 충분히 만족하였으며, L-방향으로 실시한 굴곡시험 결과도 양호하였다. 또한 용접부의 경도분포를 조사한 결과, 용접금속부가 Hv200 정도로서 모재의 Hv250 정도에 비해 다소 낮았고, 가장 높은 경도값을 나타낸 모재에 가까운 열영향부도 Hv400 미만으로서 경화정도가 그다지 크지 않았다 (Fig.3).

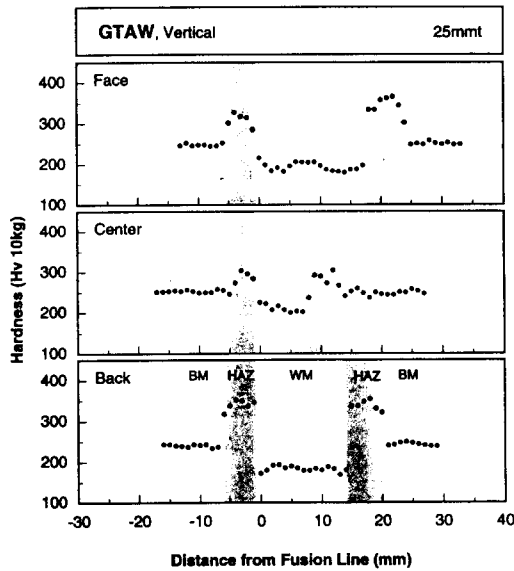


Fig.3 Hardness distributions of GTA welded joint (K-groove)

4.2.2 Charpy 충격특성

Fig.4 및 Fig.5는 각각 SMAW 및 GTAW 이음부의 각 위치별 충격 흡수 에너지의 변화를 나타낸 것이다. 두 결과 모두 -170°C 및 -196°C의 시험온도에 따른 차이는 거의 볼 수 없으며, 용접금속 중심부(WM)가 최소값을 나타내고 있다. 이러한 WM의 충격인성은 Hastelloy계가 Inconel계를 사용한 경우에 비해 다소

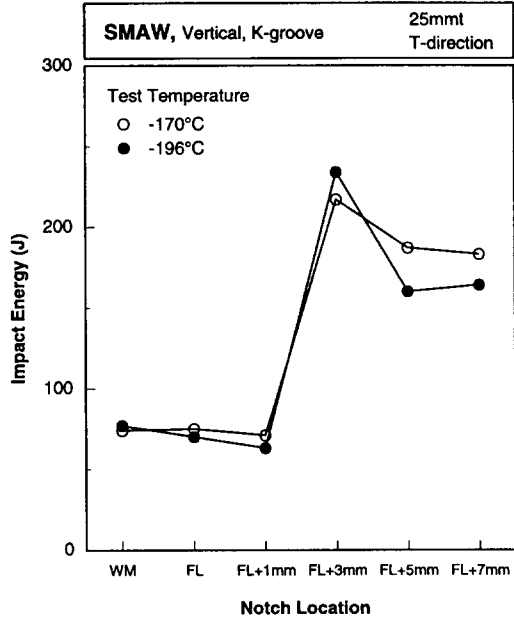


Fig.4 Impact energy variations with notch location in SMA welded joint

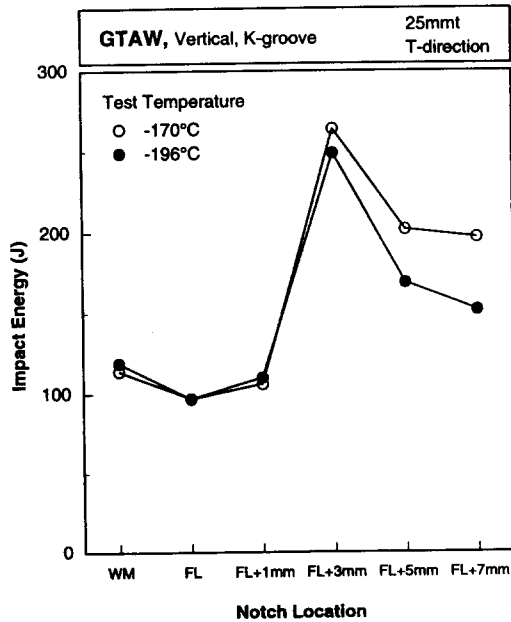


Fig.5 Impact energy variations with notch location in GTA welded joint

높다. 또한 FL, FL+1mm의 흡수 에너지는 용접시 용접금속 성분의 회석에 의해 WM과 비슷하며, FL+3mm 부근에서는 모재보다도 높은 최대값을 나타내고 있다. 그러나 이러한 모든 결과는 Table 2의 각종 규격과 가장 엄격한 EEMUA 지침보다 충분히 높은 값이다.

4.2.3 CTOD 특성

Fig.6 및 Fig.7은 각각 SMAW 및 GTAW 이음부의 각 위치별 한계 COD 값을 나타낸 것이다. 이 값은 대부분 최대하중에서 계산하였으며, Pop-in이 발생하는 경우에는 Pop-in 발생시의 하중에서도 계산함으로써(화살표 아래쪽 결과) 서로 구분하였다. 시험 결과에 의하면 GTAW 이음부의 경우 최소값이 -196°C에서 0.1mm 정도를 나타내지만, 이 부분도 LNG 사용온도 부근인 -170°C에서는 0.8mm 이상의 높은 값을 보이고 있다.

한편 최근 14만³ 규모의 탱크에 적용하기 위해 개발된 두께 40mm의 고인성 9%Ni강의 파괴인성을 검토한 결과에 의하면⁸⁾, 길이 0.1t, 깊이 0.2t 크기의 초기 결함이 존재하는 가장 취약한 용접부가 -164°C에서 단주기 지진이 발생할 때 취성파괴의

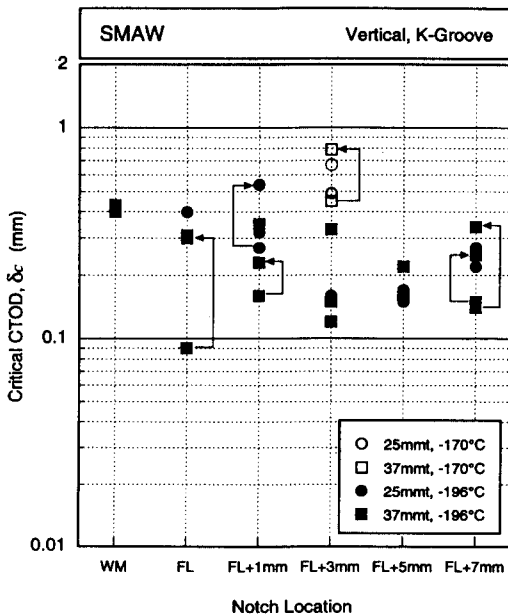


Fig.6 Critical CTOD variations with notch location in SMA welded joint

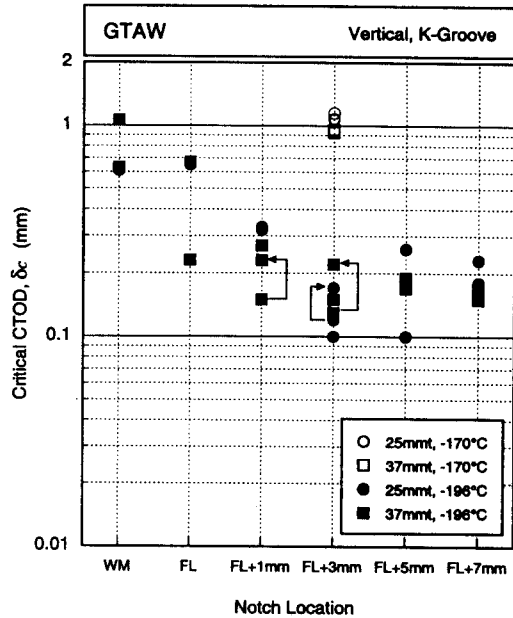


Fig.7 Critical CTOD variations with notch location in GTA welded joint

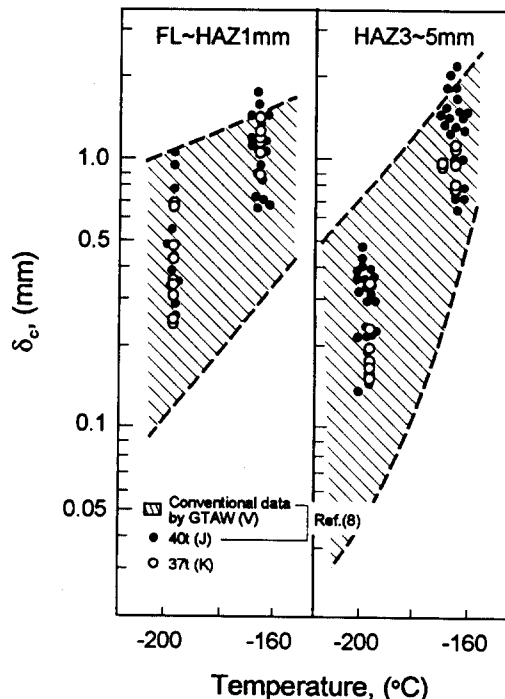


Fig.8 Comparison of critical CTOD obtained from 37mm thick. GTA welded joint with referential data

발생을 위해 필요한 CTOD 값이 0.085mm 라고 보고하고 있다. 또한 Fig.8은 비교를 위하여 상기 계산에 사용된 고인성 9%Ni강의 GTAW 이음부에 대한 CTOD 시험결과에 두께가 37mm로서 비슷한 국산 강재의 GTAW 이음부에 대하여 시험한 결과를 삽입한 것이다. 그림에는 빗금으로 표시된 종래의 결과도 함께 표시되어 있다. 이와 같은 최근의 계산값 및 시험결과와의 비교로 부터 국산 강재의 CTOD 값이 선진 제품과 거의 동등한 수준이며 대단히 우수한 파괴인성을 보임을 알 수 있다.

4.2.4 취성파괴 발생특성

대형인장 시험편은¹²⁾ 500ℓ×400w의 시험편 중앙부에 총 길이 240mm, 선단 크기 0.1mm인 노치를 가공하였으며, 노치 선단은 FL+3mm에 위치하도록 하였다.

Table 5는 -170°C 및 -196°C에서 시험한 결과를 나타낸 것이며, Fig.9에는 이들 결과를 용접방법 및 판 두께별로 정리하였다. 모든 시험편에서 Pop-in이 발생하였고, 최소 파괴응력은 SMAW 이음부

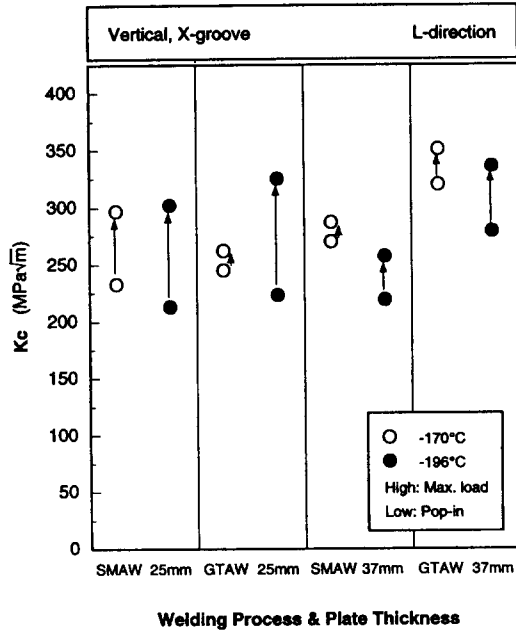


Fig.9 Fracture toughness value, Kc, of welded joints

Table 5 Results of center notched wide plate tension test of welded joint

Plate Thick. (mm)	Welding Method	Dimension of Specimen			Test Temp. T (°C)	Fracture Load P (kN)	Fracture Stress		Fracture ⁽¹⁾ Toughness Kc (MPa√m)	COD			Note
		Thick. t (mm)	Width 2B (mm)	Notch Length 2a (mm)			Gross σ _g (MPa)	Net σ _n (MPa)		Measured ⁽²⁾ Value		δ _c [mean] (mm)	
										Left	Right		
25	SMAW	24.2	400	240.0	-170	2870	296	741	233	0.918	0.770	0.565	Pop-in
						3657	378	944	297	2.80	2.48	2.04	Max. Load
		24.3	400	240.2	-196	2631	271	678	213	0.372	0.322	0.205	Pop-in
	GTAW	24.3	400	240.0	-170	3737	384	962	302	1.39	1.10	0.934	Max. Load
						3029	312	780	245	1.05	1.01	0.712	Pop-in
		24.4	400	240.1	-196	3238	333	834	262	2.33	2.45	1.72	Max. Load
37	SMAW	36.8	400	240.1	-170	2770	284	710	223	0.375	0.340	0.217	Pop-in
						4035	413	1034	325	1.40	1.27	1.03	Max. Load
		36.8	400	239.8	-196	5042	336	857	270	0.920	0.925	0.713	Pop-in
						5361	364	911	287	1.30	1.33	1.02	Max. Load
		36.9	400	240.0	-170	4105	279	696	219	0.480	0.455	0.297	Pop-in
						4823	328	818	257	1.13	1.08	0.785	Max. Load
	36.9	400	240.2	-196	6008	407	1018	320	1.17	1.12	0.885	Pop-in	
					6596	447	1117	351	1.83	1.70	1.36	Max. Load	
	GTAW	36.9	400	240.0	-170	5231	354	886	279	0.555	0.560	0.418	Pop-in
						6317	428	1070	336	1.58	1.51	1.19	Max. Load

(1) $Kc = \sigma_{R\sqrt{\pi a}} \cdot F(a/B)$
 $F(a/B) = [1 - 0.025(a/B)^2 + 0.06(a/B)^4] \sqrt{\sec(\pi a/2B)}$
 (2) 8mm from notch tip

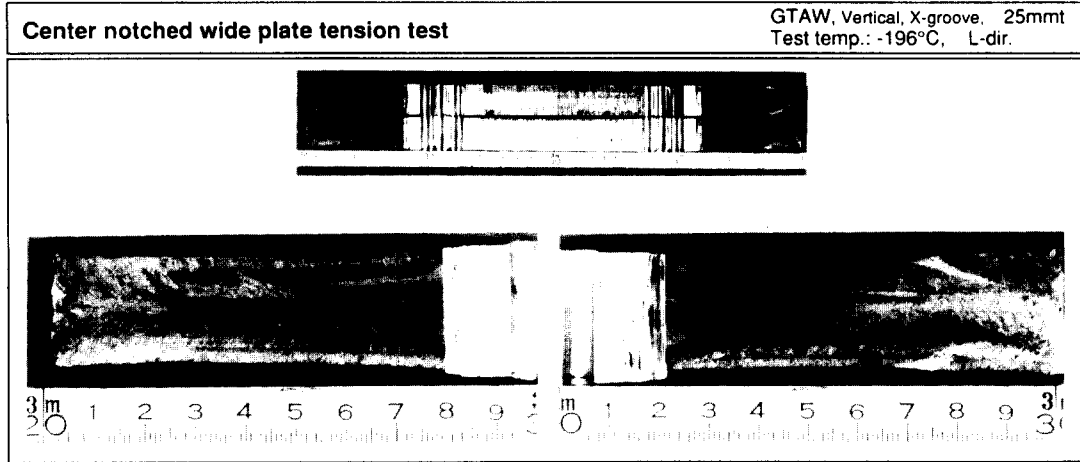


Photo.4 Fractured face of center notched wide plate tension test specimen

(25mmt)를 -196°C 에서 시험한 경우 얻어진 값인 678MPa 이다. 그러나 이 최소값은 14만m^3 탱크의 단주기 지진 발생시의 응력인 220MPa^{a} 및 LNG 지상식 貯槽 지침에서의 지진발생시 허용응력인 375MPa^{a} 을 훨씬 상회하고 있다. 또한 Kc 값은 -170°C 에서 $233\sim 351\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, -196°C 에서는 $213\sim 336\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 정도로서 상당히 높은 범위를 보이며, 최초로 발생한 Pop-in을 기준하면 -170°C 에서의 Kc 값이 -196°C 에서의 값보다 $20\sim 41\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 정도 높다. 또한 Kc값은 시험한 범위 내에서는 용접방법 및 판 두께에 따라 변화하지 않았다.

한편 Photo.4는 GTAW 이음부에 대한 파단면의 예를 나타낸 것으로 Pop-in 현상을 볼 수 있고, 균열은 노치 선단으로부터 용접금속 쪽으로 전파하며 하중이 계속 부가됨에 따라 최후에는 최대하중을 지나 용접금속부에서 파단되는 형상을 보이고 있다. 이러한 파단형태는 모든 시험편에서 동일하게 나타났다.

4.2.5 취성균열 전파 정지특성

Duplex ESSO 시험편은¹²⁾ 취화판과 시험판을 SAW 용접하고, 취화판에서 발생한 균열이 시험편의 FL+3mm 위치로 정확히 전파될 수 있도록 취화판의 표면에 Guide 노치를 가공하였다. 또 시험편으로의 균열 전파속도는 900m/sec 이상으로 유지하였다.

Photo.5는 -170°C 에서 시험한 시험편의 파단면 사진으로서 취화판에서 전파하기 시작한 취성 균열이 시험편에서 모두 정지되고 있음을 볼 수 있다.

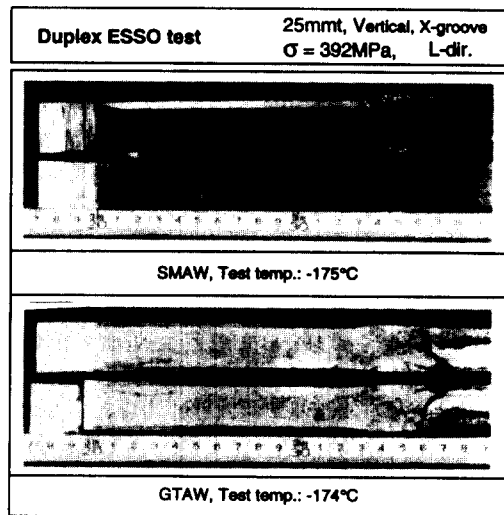


Photo.5 Fractured face of duplex ESSO test specimen

Table 6은 시험결과를 종합한 것으로, Kca 값은 모재가 $308\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 이상, 용접부가 $296\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 이상의 값을 나타내고 있다. 이러한 Kca 값은 두께가 40mm 인 9%Ni강의 경우 LNG 온도에서 전파균열을 정지시키기 위해서는 통상 운전시 $127\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, 지진 발생시 $159\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 가 필요하다는 종래의 연구결과에²⁷⁾ 비해 훨씬 높은 것으로, 국산 강재는 취성균열의 전파 정지특성도 대단히 우수하다고 말할 수 있다.

Table 6 Results of duplex ESSO test

Plate Thick. (mm)	Welding Method	Position	Dimension of Specimen		Applied Stress σ (MPa)	Test Temp. T (°C)	Arrested Crack Length a (mm)	Fracture ⁽¹⁾ Toughness Kca (MPa \sqrt{m})	Note
			Thick. t (mm)	Width W (mm)					
25	—	BM	24.3	500	392	-174	176	>308	Arrest
	SMAW	HAZ	24.4	500	392	-175	169	>300	WM Arrest
	GTAW	HAZ	24.3	500	392	-174	165	>296	HAZ Arrest
37	—	BM	36.8	500	392	-173	178	>310	Arrest
	SMAW	HAZ	36.8	500	392	-173	174	>306	WM Arrest
	GTAW	HAZ	36.8	500	392	-174	176	>308	WM Arrest

$$(1) Kca = \sigma \sqrt{\pi a} \sqrt{(2W/\pi a) \tan(\pi a/2W)}$$

5. 향후 전망

향후 LNG 수요의 지속적인 증가와 탱크의 대형화 추세에 따라 강재두께 및 용접길이가 증가하고, 특히 속련 용접사가 부족하게 되리라는 것은 쉽게 예상할 수 있다.

따라서 먼저 용접재료의 경우 강도가 강재에 비해 낮기 때문에 수반되는 판 두께의 증가를 최소화하기 위하여 현재 주로 사용되고 있는 고 Ni계 용접재료의 고강도화와 함께 대형 구조물에도 사용 가능한 고품질의 공급계 용접재료의 개발이 기대된다. 또 현재 자동용접이 불가능하여 수동용접에 의존하는 부분을 반자동 MAG 용접할 수 있도록 관련 용접재료의 개발도 이루어 질 것이다.

한편 용접방법은 현재의 GTA 용접에 의한 자동화 범위가 확대되고, 보다 고능률화를 위해 대전류를 사용하는 복수의 와이어를 송급하는 방식과, 용착량을 감소시킬 수 있는 협개선화도 이루어 질 것이다. SAW도 대전류-細徑 와이어를 사용하여 전류밀도를 증가시킴으로써 용착효율을 높이는 방법이 적용될 것이다. 또한 현재보다 성역화 할 수 있도록 로보트의 활용도를 높이고, 모니터에 의한 원격조종으로 복수의 용접기를 운용하는 등 자동화의 차원도 한단계 높아질 것이다. 그리고 향후 Laser, 전자 beam과 같은 고밀도의 열원을 이용한 용접방법도 적용될 것으로 기대하고 있다.

이러한 용접기술의 발전 추이에 부응하여 강재도 보다 고인성화가 필요하고, 대입열 용접 및 고밀도 열원을 이용하는 용접에 적합한 특성을 갖도록 이미 개발된 강의 특성을 개선한 새로운 강재의 개발이 기대된다.

참고 문헌

- 1) Korea Gas Corporation(KGC), 1995 Annual Report
- 2) R.H.Tharby, D.J.Heath and J.W.Flannery : "Welding 9% Ni Steel - A Review of the Current Practices -", Conference on Welding Low Temperature Containment Plant, TWI, Nov. (1973)
- 3) 渡邊 之, 鈴木元昭, 松田 穰, 山形俊介, 矢島 浩 : 9%Ni鋼および溶接部の脆性龜裂傳播 停止特性(第1報) , 日本造船學會論文集, 第155號, (1984), pp.389-400
- 4) 渡邊 之, 鈴木元昭, 松田 穰, 山形俊介, 矢島 浩 : 9%Ni鋼および溶接部の脆性龜裂傳播停止特性(第2報), 日本造船學會論文集, 第155號, (1984), pp.401-407
- 5) E.F.Nippes and J.P.Balaguer : "A Study of the Weld Heat-Affected Zone Toughness of 9% Nickel Steel", Welding Jr., Vol.65, No.9, (1986), pp.237s-243s

- 6) R.D.Stout, S.K.Tarby and S.J.Wiersma :
"Fracture Toughness of Modern 9% Nickel
Cryogenic Steels", Welding Jr., Vol.65, No.12,
(1986), pp.321s-325s
- 7) 淵原洋一, 岡井大八 : LNG地上式貯槽の現状と
將來の展望, 壓力技術, 第29卷, 第2號, (1991),
pp.95-103
- 8) 町田 進, 石倉則義, 久保尚重, 片山典彦, 萩原行
人, 有持和成 : 厚肉9%Ni鋼板の脆性破壊 特性と
大形LNGタンクへの適用性, 壓力技術, 第29卷,
第6號, (1991), pp.341-355
- 9) 町田 進, 出口明雄, 香川裕之 : LNG貯槽用厚肉
9%Ni鋼の脆性破壊特性, 壓力技術, 第31卷,
第6號, (1993), pp.353-360
- 10) 本郷 進, 久保尚重 : LNG地上式貯槽の現状と大
容量化, 溶接學會誌, Vol.63, No.2, (1994),
pp.95-99
- 11) 이종봉, 장래웅, 한재광, 안승개 : 9%Ni강의 용
접성 (I), 대한용접학회 춘계학술발표 개요집,
(1994), pp.51-53
- 12) 이종봉, 한재광, 장래웅, 소문섭 : 9%Ni강의 용
접성(II), 대한용접학회 춘계학술발표 개요집,
(1994), pp.229-231
- 13) J.B.LEE and J.K.HAN : "Weldability of
Improved 9% Ni Steel", JOM-7, Helsingor,
Denmark, May 31-June 2, (1995), pp.60-67
- 14) 土田榮二 : "溶接技術はどう展開しているか
-LNGタンク-", 溶接技術, 1月號, (1993),
pp.114-120
- 15) 村本聖一 : "溶接技術はどう展開しているか
-貯槽-", 溶接技術, 1月號, (1993), pp.76-84
- 16) KOBE STEEL LTD. Welding Division :
"9% Ni-Steel LNG Tanks and Welding
Consumables", June (1991)
- 17) EEMUA-1986 "Recommendation for the
Liquefied Gas Storage Tanks"
- 18) FIP-1982 "Preliminary Recommendations
for the Design of Prestressed Concrete
Containment Structures for the Storage of
Refrigerated Liquefied Gases (RLG)"
- 19) 栗山良員, 河野武亮, 豊増清明, 片山典彦, 横倉
三雄 : 5.5%Ni鋼の陸上LNGタンクへの適用性,
石川島播磨技報, 第17卷, 第2號, (1978),
pp.125-134
- 20) 多喜乃 雄, 藤本六郎 : LNGタンクの溶接技術,
製鐵研究, 第309號, (1982), pp.173-176
- 21) K.J.KIM and L.H.Schwartz : "On the Effects of
Intercritical Tempering on the Impact Energy
of Fe-9Ni-0.1C", Material Science and
Engineering, Vol.33, (1978), pp.5-20
- 22) 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
- 23) 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-現状と今後の動向-,
溶接學會誌, Vol.63, No.2, (1994), pp.104-109
- 24) 五代友和, 杉山 暢, 西川 裕, 池田一夫, 青木 満,
木内 晃 : 9%Ni鋼共金溶接部の破壊じん性, R&
D 神戸製鋼技報, Vol.28, No.2, (1978), pp.55-59
- 25) 市原 泉, 杉山 暢, 藍田 勳, 西川 裕 : 9%Ni鋼板
の共金溶接施工法, R&D 神戸製鋼技報, Vol.28,
No.4, (1978), pp.46-51
- 26) 社團法人ガス協會 : LNG地上式貯槽指針,
1981年 12月
- 27) Consortium of Five Japanese Companies(OG,
IHI, TKK, NSC, SMI) : "Crack Arrest
Properties of 9% Ni Steel and Relation between
Crack-Initiation and Crack-Arrest Test", GRI-
86/0007, Gas Research Institute, Feb. (1986)