

천연가스 주배관의 재료물성 및 용접방안

김우식

한국가스공사 연구개발원

Material Properties and Welding Procedure of Natural Gas Pipeline

Woo Sik Kim

R&D Center, Korea Gas Corporation

1. 서론

천연가스가 깨끗하고 안전한 에너지라는 인식이 확산되면서 천연가스에 대한 수요가 급증하고 있다. 한국가스공사는 천연가스를 LNG상태로 전량수입하여 인수기지 저장탱크에 저장한 다음 기화시켜 배관을 통해 각 도시가스회사와 발전소에 공급하고 있다. 천연가스의 공급은 지하매설배관을 통해 이루어지고 있다. 이러한 배관은 고장력강이 사용되고 있으며 배관끼리는 용접으로 연결된다. 배관은 사용압력이나 사용위치에 따라 여러종류가 있으며 배관생산공정에서도 차이가 있다. 이렇게 다양한 배관을 용접하면서 생기는 용접부와 열영향부의 특성은 각 배관과 용접공정별로 다르게 나타난다. 즉 배관제작공정시 필요한 심용접과 건설현장에서 배관용접시 필요한 원주용접은 용접공정 자체가 다르며 배관의 종류에 따라 원주용접방안도 변화한다. 본 고에서는 이러한 천연가스 주배관의 종류, 규격 요건 및 재료물성과 여러 용접공정에 의해 생기는 다양한 배관용접부의 미세조직과 기계적특성의 변화를 알아보았다.

2. 천연가스 주배관의 종류 및 배관 재료물성 요건

한국가스공사의 주배관은 1996년말 현재 총길이가 1,309km에 달하고 있는데, 이배관들을 사용압력별로 구분하면 70kg/cm²의 압력배관이 1,131km, 20kg/cm²의 압력배관이 111km, 10kg/cm²의 압력배관이 65km이다. 지역별로는 수도권일원의 환상망과 중부권, 영남권, 호남권공사가 거의 마무리 단계에 있으며, 강원권, 남부권, 서해권등의 공사가 새롭게 시작되고 있는 중이다. 이들 공사가 마무리되는 2000년에는 주배관 총길이가 2150km에 이르게 된다. 이들 고압 주배관들은 API 5L X65 및 X42등급의 고장력강을 사용하는데, 관경은 20인치부터 30인치까지, 두께는 10.3mm부터 17.5mm까지 다양하게 사용한다. 배관은 기본길이가 6m, 12m이며, 강관 제조회사에서 판재를 배관으로 성형한 다음 심용접을 수행하고 각종 검사에 합격한 제품을 사용한다. 표1에 배관의 주요사양을 나타내었다.

배관에 대한 검사는 한국가스공사의 파이프검사기준에 의거하여 수행하여 기준이상의 값을 얻어야 합격된다. 검사는 화학성분 분석시험, 기계적성질 시험, 비

파괴검사, 수압시험등을 수행하여야 한다. 화학성분의 시험방법은 ASTM A751 과 API 5L SEC. 9.8을 따르며 기준은 API 5L SEC 6.1에서 표 2에 그 값을 나타내었다. 탄소의 함량은 최대함유량에서 0.01%씩 감소함에 따라 Mn의 함유량을 0.05%씩 증가시킬수 있으며, Mn의 최대 함유량은 X65등급의 경우 1.45%, X42등급의 경우 1.60%이다. 또한 배관 용접성과 관련된 탄소당량은 $Cep. = (C + Mn/6) < 0.43$ 으로 규정되어 있다.

기계적성질시험은 인장시험, 굽힘시험(가이드벤드시험, 편평시험, 용접부연성 시험), 충격시험등이 있다. 인장시험은 ASTM A370과 API 5L SEC 9.3을 따르며 평가기준은 API 5L SEC 6.2으로 용접부는 인장강도만 평가한다. 굽힘시험중 가이드벤드시험(ASTM A370, API 5L SEC 9.8)은 SAW배관에, 편평시험(API 5L SEC 9.3)과 용접부 연성시험(API 5L SEC 6.2)은 ERW배관에 대하여 각각 실시한다. 충격시험은 ASTM A370방법으로 0°C에서 수행하며 3개의 횡방향 시험편에 대해 실시한 다음 개개의 결과치 및 3개 평균치를 산정한다.

비파괴검사는 SAW배관은 방사선투과시험을 용접부 전길이에서 실시하고 초음파탐상시험을 양관단 25mm폭에서 실시하는데, ERW배관은 초음파탐상을 전용 접선에서 실시한다. 판정기준은 KSB 0845 1급수준을 유지해야만 된다. 수압시험은 $P=2St/D$ (P는 시험압력(Psi), S는 항복강도의 90%(Psi), t는 배관두께(inch), D는 배관외경(inch))의 시험압력에서 10초이상 유지시 누설이 없어야 한다. 또한 외관검사(dent, undercut, crack, arc burn, spot등)와 치수검사(외경, 진원도, 두께, 길이, 진직도, 직각도, 끝단처리, 용접부간 이격거리, 용접비드높이등) 및 중량 검사등을 거쳐야 최종적으로 천연가스용 배관으로 사용될 수 있다.

3. 천연가스 주배관의 용접방안

현재 한국가스공사에서 사용중인 관경 24인치이상의 X65등급 배관은 배관제작시 SAW방법으로 심용접을 하며, X42등급의 24인치이하 배관은 ERW방법으로 심용접을 행하고 있다. 표3에 각 용접방법에 대한 설명을 나타내었다. SAW에 의한 심용접은 GTAW로 가접을 행한후 2개의 전극을 사용하여 내부를 먼저 용접하고 나중에 외부를 용접하는데, 예열이나 후열처리는 행하지 않는다. ERW배관은 18m/min의 매우 빠른 속도로 용접을 행하며, 예열은 행하지 않고 900~950°C에서 15초간 후열처리를 행한다.

천연가스배관 건설현장에서 행하는 원주용접은 API 1104규격을 기준으로 설계한 용접공정에 따라 행하는데 모든 관경, 두께의 배관에서 초층은 GTAW를 행하며 나머지 층은 SMAW을 수행한다. 용접은 용접사 2인이 서로 반대방향에서 상향용접으로 행하며, 예열은 100°C이상으로 하고 후열처리는 행하지 않으며, 용접후 건전성 평가는 KSB845에 의한 방사선투과시험 결과가 1급을 받아야 한다.

3. 배관 모재 및 용접부위의 미세조직

그림1에 각 배관의 심용접부와 원주용접부의 거시적 조직사진을 나타내었다.

SAW를 행한 X65배관과 ERW를 행한 X42배관의 심용접부는 용착금속부와 열영향부의 형상이나 크기에서 확연하게 차이가 난다. X65, X42배관의 원주용접부위는 동일한 용접공정을 적용하므로 큰 차이는 거시적 조직에서는 차이가 없고 미세조직에서 약간 차이가 있을 뿐이다. 열영향부의 크기는 약 1mm(X42배관 심용접부)에서 약 4.5mm(X65배관 원주용접부)까지 다양하게 나타났다. 각 용접부위의 미세조직에 대한 상세한 관찰결과는 별도 설명하도록 하겠다.

4. 천연가스 주배관 모재 및 용접부의 기계적 특성

API 5L X65, X42등급 배관에 대한 인장, 충격, 경도 및 CTOD시험을 설계온도 범위에서 실시하였다. 각 부위별 상온 인장시험 결과를 나타낸 표 4에서 각배관의 항복강도는 500MPa이상으로 기준치를 훨씬 초과한 값을 보이고 있으며 연신율도 36%이상을 나타내고 있다. 그림2에 여러시험온도에서 샤피V노치충격시험한 결과를 나타내었다. X65배관 모재의 길이방향 충격에너지값이 원주방향이나 45°방향보다 더 큰 값을 보이고 있으며, 설계온도 범위에서는 기준치를 훨씬 초과하는 약 350J이상의 높은 값을 나타내었다. 연성-취성전이온도는 약 -55℃부근에서 나타났다. X42배관 모재는 설계온도범위에서 약 300J의 값을 나타내며, 연성-취성 전이온도는 X65등급과 비슷한 값을 보였다.

배관 원용접부에 대한 용접절차서 제정과 특성평가를 위한 시험방법과 평가방안은 API std. 1104규격을 따르고 있다. 상온인장시험 결과를 보면 모재의 인장강도와 거의 비슷한 인장강도를 보이고 있다. 그림1-(b)에서 용접부 충격에너지는 모재보다 상당히 작은 값을 나타내고 있으며, 용접방법이 서로다른 심부위와 원주용접부위의 충격에너지값은 상온에서는 원주용접부위가 더 큰 값을 보이거나 시험온도가 낮아지면 차이는 나타나지 않았다. 미소경도 측정결과는 용착금속부위의 경도가 약간 높고 열영향부에서는 모재와 비슷하거나 낮은 값을 나타내었다. 용접층별로는 초층은 다음층들에 의해 연화되어 모재와 거의 비슷한 값을 보이거나 2층이상에서는 연화현상이 보이지 않았으며, 어느경우든 용착금속부 경도값이 248(일본철강협회 권고치)이상은 나타나지 않았다.

5. 요약

한국가스공사에서 건설중이거나 관리중인 천연가스 주배관의 길이는 날로 크게 증가하고 있다. 이배관의 건전성확보를 위한 배관 재료물성 및 용접부위 특성평가를 다양하게 실시하였다. 그결과 현재 사용중인 배관은 모재와 각종 용접공정에 의한 용접부위의 기계적특성이 각종 규격에서 제시하고 있는 권고치를 초과하는 높은 안전성을 보이고 있으며, 금속 조직 및 강도학적인 측면에서 충분한 건전성을 확보하고 있음을 알 수 있었다.

Table. 1. Specification of pipeline material

Pipe grade		X65	X42
Requirement			
Service pres./Design pres. (kg/cm ²)		70 / 80	30 / 33
Design temperature (°C)		-29~38	-29~38
Mechanical properties requirement	Min. YS (MPa)	448 (65,000psi)	289 (42,000psi)
	Min. UTS (MPa)	530 (77,000psi)	413 (60,000psi)
	Min. elongation (%)	* see below	* see below
	Impact energy(0°C,J)	ave. 68, each 27	ave. 68, each 27
Pipe diameter (inch)		24, 26, 30	20, 24
Pipe thickness (mm)		11.9, 14.3, 15.9, 17.5	6.4, 7.1, 8.7, 10.3

* Elongation = $625,000 \times A^{0.2}/U^{0.9}$

A : cross-section area of specimen (inch²)

U : specified minimum tensile strength (psi)

Table. 2. Chemical composition requirement of pipe for natural gas pipeline

Grade	Composition	C% MAX	Mn% MAX	P% MAX	S% MAX
X65		0.26	1.40	0.03	0.03
X42		0.28	1.25	0.03	0.03

Table. 3: Welding procedures of pipeline

	Seam welding procedure	Girth welding procedure
X65	<ul style="list-style-type: none"> - GTAW + SAW(inside+outsie) (F8A4-EA3K-A4, F8A4-EA3-G) - No preheat, No PWHT - Shielding gas : CO₂, 40ℓ/min - Multiple 2 electrodes(AC+DCEP) 	<ul style="list-style-type: none"> - GTAW(2) + SMAW (ER70S-G + E9016-G) - V groove - Amp./Volt. : 80~130A / 12~23V - Speed : 6~20cm/min. - Preheat : 100°C, - No PWHT - Welding RT : First (KSB0845)
X42	<ul style="list-style-type: none"> - ERW - Amp./Volt. : 8~17A / 9~16.5V - Speed : 10~22m/min - Welding distance : 15~25cm - Frequency range(Max. Hz): 400K - No Preheat - PWHT : Normalizing 	<ul style="list-style-type: none"> - GTAW(1) + SMAW (ER70S-G + E9016) - V groove - Amp./Volt. : 90~130A / 24~32V - Speed : 8~12cm/min. - Preheat : 100°C, - No PWHT - Welding RT : First (KSB0845)

Table. 4. Tensile test results of pipe at room temperature

Pipe grade	X65 (ASTM A370)			X42 (API 5L)		
	YS (MPa)	UTS (MPa)	Elong. (%)	YS (MPa)	UTS (MPa)	Elong. (%)
Base metal	454	550	36	427	520	39
Seam weldment	507	587	22	527	566	22
Girth weldment	454	576	28	478	550	27

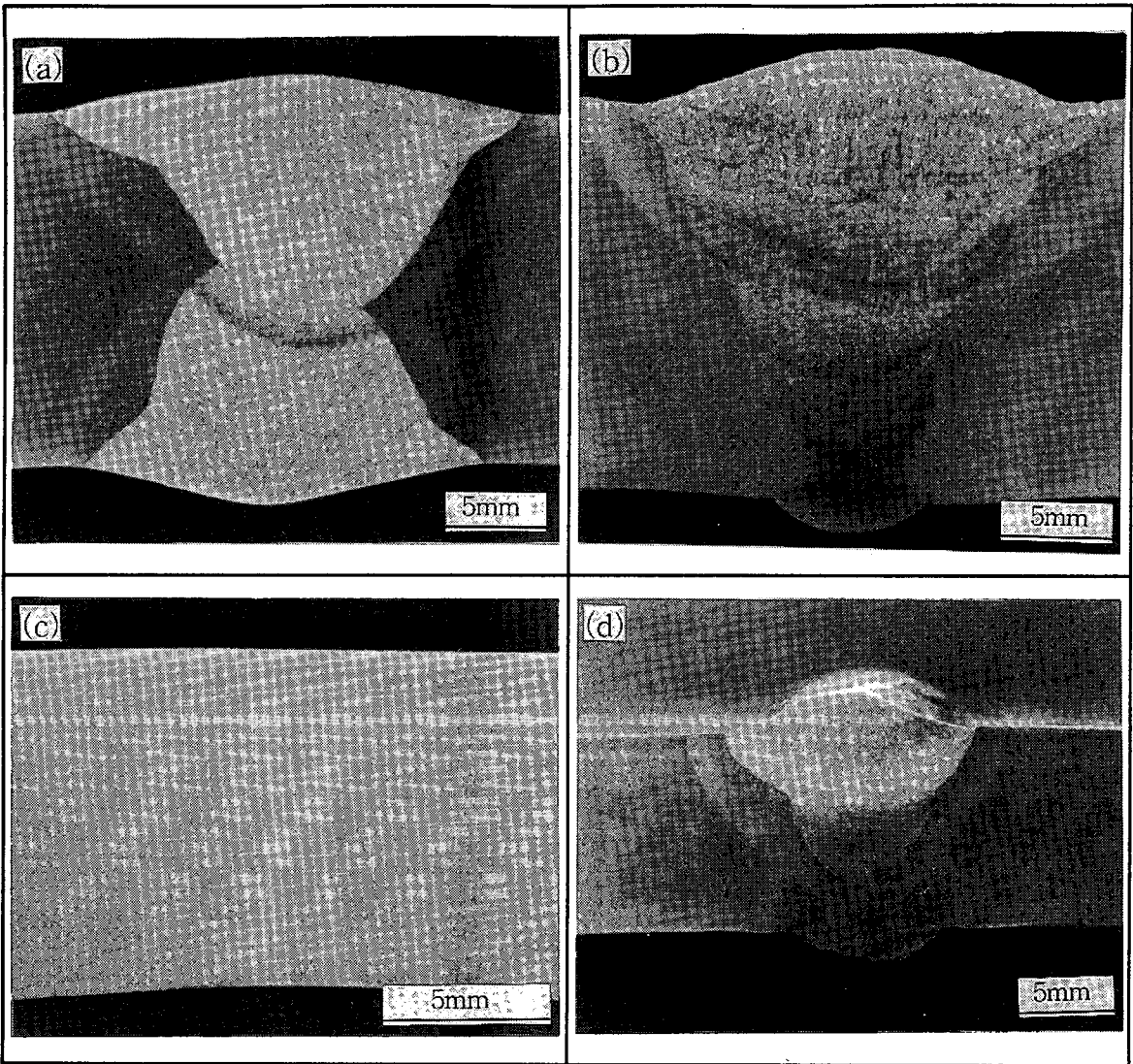


Fig. 1. Macrostructure of X65 and X42 weld joint.

(a) X65 seam (b) X65 girth (c) X42 seam (d) x42 girth

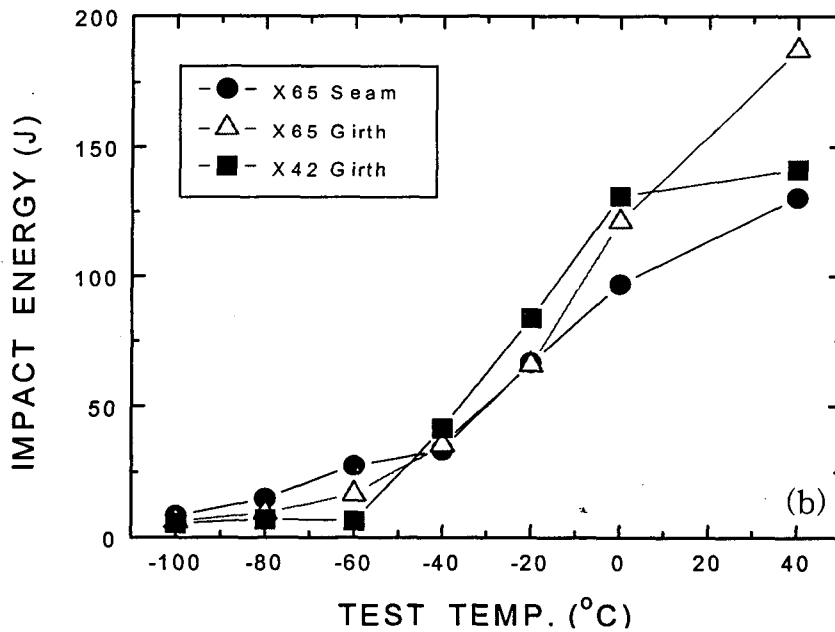
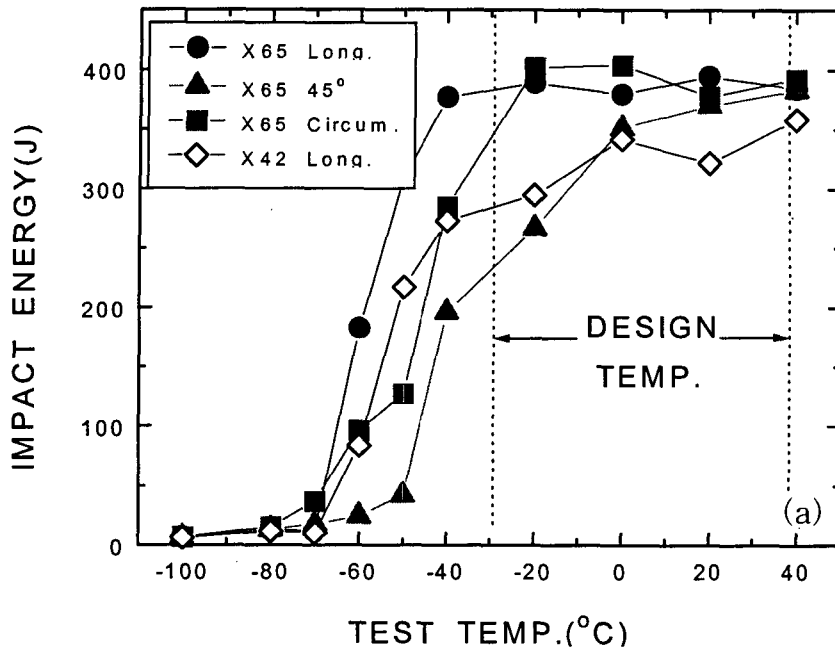


Fig. 2. Variation of impact energy with test temperature.
 (a) base metal of pipe (b) weldments of pipe