

천연가스배관용 ERW강관

김 우 식

ERW Steel Pipe for Natural Gas Pipeline

Woo-sik Kim

1. 서 론

청정에너지원으로 수요가 지속적으로 증가하고 있는 천연가스는 원유와 마찬가지로 전량 해외에서 수입하고 있다. 가스라는 특성과 공급의 효율성을 위해 전량 배관을 통해 공급되는데, 2001년 4월 현재 전국에 건설되어 있는 주배관 길이만 2,100km에 달하고 있다. 국내 가스배관은 주로 지하에 매설되며, API X65, X42등급의 고장력 탄소강관을 사용하고 있다. 또한 러시아의 이루크츠크 가스전에서부터 중국(북한)을 거쳐 국내로 천연가스를 도입하기 위한 대형 사업이 추진되어 성사단계에 있다¹⁾. Fig. 1에 현재 계획중인 다양한 배관건설 루트를 나타내었다.

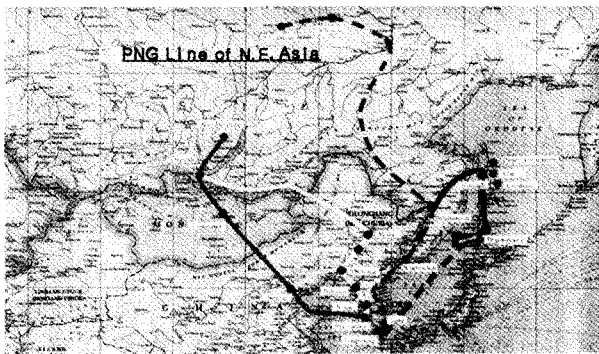


Fig. 1 동북아시아의 장거리가스배관 건설 예상도

배관은 사용압력이나 사용위치에 따라 여러 종류가 있으며 배관생산공정에서도 차이가 있다. 이렇게 다양한 배관은 제작과정이나 건설과정에서 반드시 용접으로 연결되는데, 용접하면서 생기는 용접부와 열영향부의 특성은 각 배관과 용접공정별로 다르게 나타난다. 즉 배관제작공정 시 필요한 심용접과 건설현장에서 배관용접 시 필요한 원주용접은 용접공정 자체가 다르며

배관의 종류에 따라 원주용접방안도 변화한다. 본고에서는 배관제작 일반과 국내 천연가스배관의 재료와 용접부 요건을 정리하고, ERW강관 용접부위의 용접성 평가와 좋은 ERW강관을 만들기 위한 요소들을 알아보았다.

2. 배관 및 제작공정 일반

배관은 다양한 크기가 있으며, 여러 화학조성과 제조 공법상의 차이에 따른 물리적특성의 차이가 있다. 배관제작에 사용되는 강재의 물리적, 화학적 특성은 배관적용 규격에 따라 다르다. 규격은 배관크기, 허용오차, 허용결함과 검사 및 시험 등을 포함한다. 현재 사용되는 배관의 상당수는 미국석유협회(API)의 규격에 따라 제작되는데, 인증된 제작자는 API인증 표식을 사용할 수 있다. 배관의 핵심규격은 API Spec. 5L로서 심이 있는 배관과 심리스 배관 모두를 규정하고 있다. API 배관등급은 psi단위의 최소항복강도에 의해 구분되는데, Gr.A는 30,000psi, Gr. B는 35,000psi, X42는 42,000psi를 의미한다.

배관 강재의 강도는 지속적으로 증가되어 왔다. 현재 고압 장거리 가스배관용으로 API X70등급이 보편적으로 사용되고 있으며, 캐나다의 TransCanada 가스 회사에 의해 X80등급이 처음 사용되었다. 더 높은 강도의 배관은 두께가 얇아지기 때문에 재료의 절약과 이에 따른 용접비용의 절감이 가능하다.

배관제작은 크게 구분하여 심리스와 심용접 방법이 있다. 심리스 배관은 원하는 크기와 특성의 배관을 만드는데 심용접 없이 열간가공으로 만드는 것이다. 용접배관은 여러 제작 공정이 있다. 전기용접배관은 추가적인 금속의 첨가 없이 전기저항용접, 전기유도용접, 전기플래쉬용접으로 단일 심을 갖는 배관을 제작하는 것으로 API에 의해 규정되어 있다. Fig. 2에 전

기저항용접에 의한 배관제작 모식도를 나타내었다. 잠호아크용접배관은 자동잠호아크용접으로 단일 통심을 갖는 배관을 제작하는 것으로 최소한 배관 내부 한 패스와 외부 한 패스를 가져야 한다. 가스금속아크용접은 연속공정으로 가스금속아크용접에 의해 단일 통심을 갖는 배관을 제작하는 것이다. 역시 최소한 배관 내부 한 패스와 외부 한 패스를 가져야 한다.

이중심용접배관은 API Spe. 5L에는 Gr. A부터 X80까지 외경36인치 이상의 배관에 대해 잠호아크용접이나 가스금속아크용접공정으로 심이 서로 180°에 위치하도록 배관을 제작하는 것으로 규정되어 있다. 스파이럴용접배관은 배관길이방향으로 나선형태의 심을 갖도록 전기용접공정이나 자동잠호아크공정으로 배관을 제작하는 것이다. 적어도 한 용접패스는 배관 내부에서 수행하고 배관외부에서도 적어도 한 패스의 용접을 수행해야 한다. 스파이럴배관은 아직 가스나 원유수송배관으로 많이 사용되지는 않고 있다. 이는 규격을 만족시키는 원소재의 생산이 작기 때문인데, 외경 64인치 이상의 배관을 생산하는 것이 가능하고 다양한 크기의 배관제작에 많은 성형설비가 필요치 않다는 장점이 있다²¹.

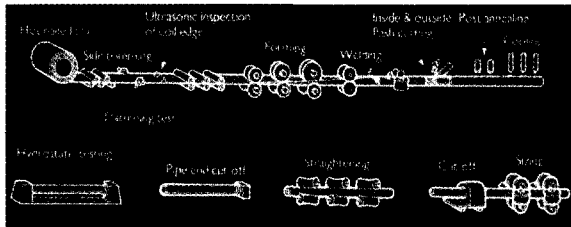


Fig. 2 ERW 배관 제작 공정

3. 국내 천연가스 배관의 종류 및 재료 요건

국내 천연가스의 도매기능을 담당하는 한국가스공사의 주배관은 대부분 70kgf/cm²의 고압배관으로 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. Table 1에 배관의 주요사양을 나타내었다.

배관에 대한 검사는 화학성분 분석시험, 기계적성질 시험, 비파괴검사, 수압시험 등을 수행한다. 화학성분의 시험방법은 ASTM A751과 API 5L SEC. 9.8을 따르며 기준은 API 5L SEC 6.1을 만족시켜야한다.

Table 1 배관재료 규격

요건	배관등급	X65	X42
사용압력/설계압력(kg/cm ²)		70 / 80	70 / 80
설계온도 (°C)		-29~38	-29~38
기계적 특성 요건	최소항복강도(psi)	65,000	42,000
	최소인장강도(psi)	77,000	60,000
	최소연신율 (%)	* 주)	* 주)
	충격에너지(0°C, J)	평균 68, 각각 27	평균 68, 각각 27
배관관경 (inch)		24, 26, 30	20, 24
배관두께 (mm)		11.9, 14.3, 15.9, 17.5	6.4, 7.1, 8.7, 10.3

* 주) 연신율 = 625,000 x A0.2/U0.9

A : 시편의 단면적 (inch²), U : 규정된 최소인장강도 (psi)

탄소의 함량은 최대함유량에서 0.01%씩 감소함에 따라 Mn의 함유량을 0.05%씩 증가시킬 수 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 있다³¹.

기계적성질 시험은 인장시험, 굽힘시험(가이드벤드시험, 편평시험, 용접부연성시험), 충격시험 등이 있다. 인장시험은 ASTM A370과 API 5L SEC 9.3을 따르며 평가기준은 API 5L SEC 6.2으로 용접부는 인장강도만 평가한다. 굽힘시험 중 가이드벤드시험(ASTM A370, API 5L SEC 9.8)은 SAW(Submerged Arc Welding) 배관에, 편평시험(API 5L SEC 9.3)과 용접부 연성시험(API 5L SEC 6.2)은 ERW(Electric Resistance Welding)배관에 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 전 길이에서 실시하고 초음파탐상시험을 양 관단 25mm폭에서 실시하는데, ERW배관은 초음파탐상을 전 용접선에서 실시한다. 판정기준은 KSB 0845 1급 수준을 유지해야만 된다. 수압시험은 $P = 2St/D$ (P는 시험압력(Psi), S는 항복강도의 90%(Psi), t는 배관 두께(inch), D는 배관외경(inch))의 시험압력에서 10초 이상 유지 시 누설이 없어야 한다. 또한 외관검사(dent, undercut, crack, arc burn, spot등)와 치수검사(외경, 진원도, 두께, 길이, 진직도, 직각도, 끝단처리, 용접부간 이격거리, 용접비드 높이 등) 및 중량검사 등을 거쳐야 최종적으로 천연가스용 배관으로 사용될 수 있다.

현재 한국가스공사에서 사용중인 관경 24인치 이상의 X65등급 배관은 배관제작 시 SAW방법으로 심용

접을 하며, X42등급의 24인치 이하 배관은 ERW방법으로 심용접을 행하고 있다. Table 2에 각 용접방법에 대한 설명을 나타내었다. SAW에 의한 심용접은 GTAW(Gas Tunsten Arc Welding)로 가접을 행한 후 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℃에서 15초간 후열처리를 행한다.

천연가스배관 건설현장에서 행하는 원주용접은 API 1104규격을 기준으로 설계한 용접공정에 따라 행하는데 모든 관경, 두께의 배관에서 초층은 GTAW를 행하며 나머지 층은 SMAW(Sheild Metal Arc Welding)을 수행한다. 용접은 용접사 2인이 서로 반대방향에서 상향용접으로 행하며, 예열은 100℃이상으로 하고 후열처리는 행하지 않으며, 용접 후 건전성 평가는 KSB0845에 의한 방사선투과시험 결과가 1급을 받아야 한다³⁾.

Table 2 배관용접 공정

	심용접 공정	원주용접 공정
X65	-GTAW + SAW(inside+outsie) (F8A4-EA3K-A4, F8A4-EA3-G) - No preheat, No PWHT - Shielding gas : CO ₂ , 40l/min - Multiple 2 electrodes(AC+DCEP)	-GTAW(2) + SMAW (ER70S-G + E9016-G) - V groove - Amp./Volt. : 80~130A /12~23V - Speed : 6~20cm/min. - Preheat : 100℃, - No PWHT - Welding RT : First (KSB0845)
X42	- 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	-GTAW(1) + SMAW (ER70S-G + E9016) - V groove - Amp./Volt. : 90~130A/24~32V - Speed : 8~12cm/min. - Preheat : 100℃, - No PWHT - Welding RT : First (KSB0845)

4. 배관용 강재의 요구 특성

대량의 가스수송은 고압공급, 대구경 배관 사용에 의해 가능하며, 이를 위해서는 고강도, 고인성, 고내식성 및 용접성이 우수한 강관을 사용하여야 한다. 가스배관 및 석유배관에서 요구되는 특성에 대한 변화양상을 보면 모재부 흡수에너지와 용접부 충격흡수에너지의 요구치가 점차 저온에서 큰 값을 필요로 하고 있으며 낙하충격에너지(DWTT)값도 요구하고 있다¹⁾. 고강도와 함께 배관용 강재에서 요구되는 성질은 우수한 저온인성 및 수소유기균열(HIC), 유화물응력부식균열

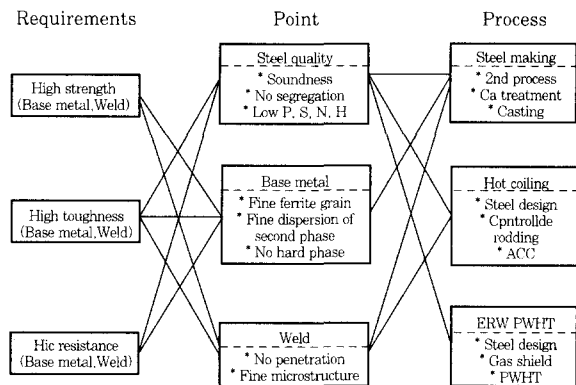


Fig. 3 ERW 배관의 품질을 조절하는 요인들

(SSCC)저항성이다. Fig. 3은 배관용 강재에서 요구되는 특성인 강도, 인성 및 HIC 저항성을 향상시키기 위해 고려해야 할 야금학적인 요인과 이를 위해 개발되어 적용되고 있는 신기술의 상호관계를 보여주고 있다¹⁾. 특히 한랭 지역에서 사용되는 line pipe 강에 요구되는 우수한 저온인성을 증가시키기 위해서는 결정립 미세화 방법이 매우 유효하며 또 탄소함량을 감소시키는 것도 중요하다. 탄소 함량을 감소시키는 방안은 용접성을 증가시키는데 도움을 주고 있기 때문에 탄소 함량이 점진적으로 감소되어 왔다.

5. API강관 강재의 용접성 평가

배관제작을 위해 강관회사에서 하는 조관용접(심용접)은 SAW으로 구분된다.

SAW를 사용한 조관에는 다시 두 가지로 구분된다. 첫째로 열간압연에 의하여 제조된 코일형태의 소재를 나선형으로 감으면서 배관을 만드는 Spiral 배관으로 배관용 소재, 용접와이어, 용접플럭스의 조합 및 용접조건에 의하여 용접부 품질이 결정된다. 두 번째는 Roll Bending 배관 및 UOE배관으로 판재형태의 소재를 원형으로 변형시켜 길이방향으로 용접을 진행시키는 조관방법으로서 배관모형으로 변형시키는 방법에 따라 Roll Forming, UOE Forming이라고 부른다.

ERW를 사용하는 조관은 열간압연에 의하여 제조된 코일형태의 소재를 사용하여 배관을 만들때 적용되는 용접법으로서 주로 고주파를 적용하기 때문에 HFERW로도 약칭으로 부른다. ERW는 가열방식에 따라 고주파유도용접법과 고주파저항용접법의 두 가지로 구분할 수 있다. SAW에 의한 조관에서 용접이음부 품질은 배관용 소재와 용접재료의 복합적인 작용에 의하여 결정되는데 반하여, ERW용접법의 특징은 용접부의 품질특성이 배관용 소재 자체만의 품질 특히 화학조에 의하여 결정된다는 점이다. 즉 배관용 소재의 용융 및

Table 3 각 등급별 API 강재의 용접성 평가 항목

시험항목		일반용 / 한냉지용						비고
소재 조건	등급	X42~X52			X56~X60			
	화학조성형태	C-Mn-Nb(X52)			C-Mn-Nb-V			등급증가→첨가 량증가
	판두께(mm)	4.5~19.0			4.5~19.0			판두께증가→ 첨가량증가
용접 이음부 특성	용접방법	ERW	SAW	SMAW GMAW	ERW	SAW	SMAW GMAW	조관용접: ERW, SAW 현장용접: SMAW, GMAW
	용접입열량 (kJ/cm)	-	15-25	5-23	-	15-25	5-23	조관용접: 두께별 일정 현장용접: 패스별 차이
	조직검사	○	○	○	○	○	○	
	경도분포측정	○	○	○	○	○	○	
	이음인장시험	○	○	○	○	○	○	
	굽힘시험	○	○	-	○	○	-	
	충격시험(CVN)	○	○	○	○	○	-	
	DWTT시험	-	-	-	-	-	-	
	COD시험	-	-	-	-	-	-	
	Hard Spot경도	-	-	-	-	○	○	
	HIC, SSCC	-	-	-	-	-	-	
	용접재료 선정	-	○	○	-	○	○	
	PWHT	-	-	-	-	-	-	ERW: seam annealing SAW: △
용접 가공 특성	HAZ최고경도	-			-			
	저온균열시험	-			○			Pre-heating
	SH-CCT	-			○			

가압에 의하여 용접부가 완성되는 것이다.

배관용 소재로서는 열간압연에 의해 제조된 판재형태의 소재와 코일형태의 소재로 두 가지가 사용된다. 어느 소재가 사용되어도 용접열에 의하여 조직이 변태되는 열영향부(HAZ, Heat Affected Zone)의 품질은 소재 자체가 가지고 있는 품질수준과는 판이하게 다른 성질을 가지게 된다. 따라서 배관의 설계에서 요구하는 품질수준이 용접부에서도 충분한 값을 가지기 위해서는 HAZ의 품질을 결정하는 몇 가지 요소들에 대하여 집중적인 검토가 필요하다.

우선 열영향부 충격인성 확보문제로 결정립조대화 영역에서의 결정립 성장억제(TiN, TiO₂ 등)를 하여야 하며 마르텐사이트-오스테나이트 조성에 의한 국부취화영역을 대한 대책(주로 Si저감)을 세워야 한다. 또한 열영향부 연화를 방지하기 위해 대입열 용접부에서 적정 입열량을 가지도록 최적의 용접공정을 개발하고 경화성 원소를 활용하며, 충분한 이음부 강도를 가진 용접재료를 사용한다. 용접이음부 특성평가는 이음부

강도, 용접부 파괴인성 등과 같은 기계적성질과 용접부 경화조직 생성에 의한 저온균열 발생을 방지하기 위한 합금설계, 확산성수소나 용접입열량 등을 제어하기 위한 용접공정에 대한 평가를 해야만 한다^{4,5)}.

ERW조관용접 시에는 용접재료를 사용하지 않고 소재의 용융 및 가압에 의하여 용접부를 형성하기 때문에 강재의 화학조성변화에 따른 용접부 충격인성 변화, 용접조건 변화에 따른 품질 변화(전류, 전압, 주파수, 조관속도, 가압력, 인입각도 등), 후열처리에 의한 용접부 경화성 완화정도 평가, 용접조건변화에 의한 용접결함의 발생상황 평가 등이 필요하다. 다음의 Table 3은 포항제철에서 수행하고 있는 API강재의 등급별 용접성 평가항목들이다⁶⁾.

6. 요약

본 고에서는 배관 재료일반과 용접공정에 대해 ERW강관을 중심으로 알아보았다. 국내 가스배관에

Table 3 각 등급별 API 강재의 용접성 평가 항목(계속)

시험항목		일반용 / 한냉지용						비고
소재 조건	등급	X65~X70			X80~X100			
	화학조성형태	C-Mn-Nb-V-Mo			C-Mn-Nb-V-Mo-Ni			등급증가→첨가량증가
	판두께(mm)	7.0~17.0			7.0~17.0			판두께증가→첨가량증가
용접 이음부 특성	용접방법	ERW	SAW	SMAW GMAW	ERW	SAW	SMAW GMAW	조관용접: ERW, SAW 현장용접: SMAW, GMAW
	용접입열량 (kJ/cm)	-	15-25	5-23	-	15-25	5-23	조관용접: 두께별 일정 현장용접: 패스별 차이
	조직검사	○	○	○	○	○	○	
	경도분포측정	○	○	○	○	○	○	
	이음인장시험	○	○	○	○	○	○	
	굽힘시험	○	○	-	○	○	-	
	충격시험(CVN)	○	○	○	○	○	○	
	DWTT시험	△	△	-	△	△	-	
	COD시험	△	△	-	△	△	-	
	Hard Spot경도	○	○	○	○	○	○	
	HIC, SSCC	-	-	-	-	-	-	
	용접재료 선정	-	○	○	-	○	○	
PWHT	○	△	△	○	△	△	ERW : seam annealing SAW : △	
용접 가공 특성	HAZ최고경도	○			○			
	저온균열시험	○			○			Pre-heating
	SH-CCT	○			○			

서 ERW강관이 사용되는 것은 외경 24인치 이하 배관이며 그 이상 크기의 배관에서는 SAW강관이 사용된다. 배관의 안전성 및 건전성 확보를 위하여 가장 주의할 사항이고 평가해야 할 대상은 손상 및 결함의 발생 비율이 가장 높은 심용접부 및 원주용접부이다. 이들 배관 용접부의 건전성 확보를 위해서는 모재와는 다른 특성을 지닌 용접부위에서 다양한 금속학적, 역학적 인자들의 영향에 대한 정확한 분석과 평가를 실시하여야 한다. 용접부위 품질확보는 가스배관의 안전과 안정적운용에 반드시 필요한 부분이다.

- Pipeline & Gas Journal, Feb., (1990), 29
- 4) 한국가스공사 배관자재 규격
- 5) 장재일, "초저온용강 용접열영향부의 파괴특성에 관한 연구" 서울대학교 공학박사 학위논문, (2000), 서울대학교
- 6) 김충명, "API강재의 용접성 보증기술", 대한금속학회 포항지부 제 8회 기술강습회 교재, 45



- 김우식(金愚植)
- 1963년생
- 한국가스공사 연구개발원
- 재료의 파괴거동 및 건전성 평가
- e-mail : wskim@kogas.re.kr

참 고 문 헌

- 1) 1999년 산업자원부 중기거점 기획조사사업 보고서(극한지 가스배관 재료 및 용접시공기술 개발)
- 2) John L. Kennedy, "Oil and Gas Pipeline Fundamentals" 50-59, PennWell Pub. USA(1993)
- 3) P&GJ Staff Report, "The Making of ERW Line Pipe",

Table 3 각 등급별 API 강재의 용접성 평가 항목(계속)

시험항목		일반용 / 한냉지용						비고
소재 조건	등급	X52~X56			X60~X70			
	화학조성형태	C-Mn-Nb			C-Mn-Nb-Cu-Ni			등급증가→첨가 량증가
	판두께(mm)	4.5~19.0			4.5~17.0			판두께증가→ 첨가량증가
용접 이음부 특성	용접방법	ERW	SAW	SMAW GMAW	ERW	SAW	SMAW GMAW	조관용접: ERW, SAW 현장용접: SMAW, GMAW
	용접입열량 (kJ/cm)	-	15-25	5-23	-	15-25	5-23	조관용접: 두께별 일정 현장용접: 패스별 차이
	조직검사	○	○	○	○	○	○	
	경도분포측정	○	○	○	○	○	○	
	이음인장시험	○	○	○	○	○	○	
	굽힘시험	○	○	-	○	○	-	
	충격시험(CVN)	○	○	○	○	○	○	
	DWTT시험	△	△	-	△	△	-	
	COD시험	△	△	-	△	△	-	
	Hard Spot경도	○	○	○	○	○	○	
	HIC, SSCC	○	○	○	○	○	○	
	용접재료 선정	-	○	○	-	○	○	
	PWHT	○	△	△	○	△	△	ERW: seam annealing SAW: △
용접 가공	HAZ최고경도	○			○			
특성	저온균열시험	○			○			Pre-heating
	SH-CCT	○			○			