

## 가스배관 재료의 기술 현황

김우식\*

### 1. 서 론

지구적인 규모나 개별 국가에서의 에너지 수급체제는 배관망 (pipeline)을 빼고 생각할 수 없을 정도로 배관망은 에너지 산업에서 중요한 역할을 차지하고 있다. 이것은 배관에 의한 에너지 수송이 가장 경제적이고 안전하기 때문이다. US\$ 1의 비용으로 1 톤의 석유제품을 트럭으로는 19 miles, 철도로는 45 miles, 선박으로는 200 miles, 배관으로는 238 miles 의 거리를 운송할 수 있다. 최근에 UN은 이러한 배관망을 '지구적인 자산 (global asset)'으로 인식하여 배관 건설 및 안전 확보와 관련하여 기술적 교류와 이해를 조절하고자 하는 노력을 시도하고 있기도 하다. 또한 개별 국가에 있어서도 배관은 국가의 가장 중요한 기간 시설물의 하나로서 특별한 관심 속에 운용되고 있다. 수송용 배관은 초기 설치비용만 해결되면 에너지원을 생산현장으로부터 안정적으로 공급받을 수 있다는 장점 외에도 관리운영에 드는 비용이 매우 저렴하다는 이유로 가장 실용적인 에너지 운송시스템으로 평가받고 있다

현재 세계에는 약 1,600,000 km의 배관이 운용되고 있으며 매년 약 70,000 km가 건설되고 있다. 특히 현재 건설 중이거나 계획중인 주요 배관망은 여러 국가에 걸친 대형 프로젝트가 대부분으로서 주로 천연가스 수송을 위한 배관망이다. 이것은 21세기의 화두라고 할 수 있는 환경문제와 관련하여 국가별로 에너지원으로서 천연가스 사용을 장려하는 정책을 추진하고 있기 때문이다. 우리 나라의 경우에도 러시아의 이루쿠츠크 (Irkutsk) 북쪽 코빅틴스크(Kovyktinskoye) 가스 콘덴세이트 전의 가스를 개발하여 러시아, (몽골), 중국, (북한)을 거친 배관을 통하여 천연가스를 도입하는 방안이 추진되고 있는 상황이다.

배관망은 시공의 단위가 되는 배관(pipe)의 연결로

서 이루어진다. 배관은 강판(plate)나 강재 코일(coil)을 원통형으로 구부리고 이 때 형성되는 이음줄을 용접하여 제조하게 된다. 이음매가 없는 관이 있기는 하나 대부분의 관은 전기저항용접이나 전호용접(arc welding)에 의해 만들어진다. 관상이나 코일 형태의 강재를 원통형으로 구부리기 위해서는 press bending, roll bending, UOE 등의 방법이 사용된다.

경제적이고 안전한 배관망은 끊임없는 재료 및 시공기술의 개발과 운용기술에 의존하고 있음은 분명한 사실이다. 수송할 에너지의 량 및 운전 압력에 의해 사용될 배관의 종류가 결정되고, 이에 따라 연결방법으로서의 용접(girth welding)과 비파괴검사와 관련된 기술적 사항이 정해진다. 여러 나라를 통과하게 되는 대형 프로젝트의 경우 이러한 기술 사항들은 참여하는 국가들의 합의가 전제되어야 하는데, 이 때 자국의 기술수준을 고려하여 자국의 이익을 극대화하고자 하는 노력이 치열하게 전개되는 것이 보통이다.

“배관산업”의 가장 큰 특징은 여러 가지 산업분야를 포함하는 종합성이라 할 수 있다. 무엇보다도 강도, 내식성, 용접성 등에서 경쟁력 있는 소재가 있어야 하며, 이러한 소재를 관의 형태로 생산할 수 있는 조관기술이 확보되어야 한다. 또한 생산된 관을 건설현장에서 연결하고 연결부위 신뢰성을 확보할 수 있는 용접 및 비파괴검사 기술이 확보되어야만 한다.

### 2. 배관재료의 변화

대량의 석유나 천연가스 수송은 고압의 대구경 배관 사용에 의해 가능하며 이를 위해서는 고강도, 고인성의 강관을 사용하여야 한다. 이것은 배관망을 통한 석유나 가스 수송의 경쟁력이 매체의 수송압력 증대 및 대구경화 등에 의한 수송효율(transmission efficiency) 향상으로서 가능해지기 때문이다. 이러한 수송압력의 증가와 대구경화는 재질의 등급 (grade) 향상을 통하여 가능하게 되는데, 등급을 결정하는 주요 인자는 강

\* 한국가스공사 연구개발원  
E-mail : wskim@kogas.re.kr

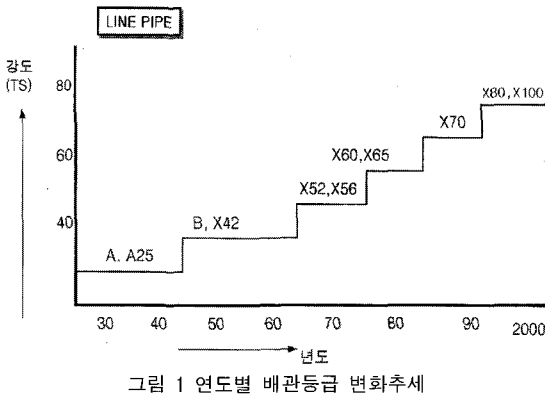


그림 1 연도별 배관등급 변화추세

도이다. 배관설계 원칙에 따르면 주어진 두께에서 강도가 커지면 운전압력을 크게 할 수 있고, 주어진 강도에서 관경이 커지면 두께가 증가되어야 한다. 이것은 강도의 증가에 의해 운전압력을 높이거나 대구경화가 가능함을 의미한다. 그림 1에 연도별 강재의 등급 변화 추세를 정리하였다. 그림에서 A와 B는 각각 API 5L grade A, B인 강종을 의미하며, 인장강도가 각각 30,000psi 및 35,000psi 이상을 나타낸다. 강관 소재의 강도가 지속적으로 증가하고 있으며 1990년 대 이후에는 X80, X100 등급이 개발되고 있다.

현재 가장 보편적으로 사용되고 있는 배관 소재의 강도는 API X65 등급이다. API X65라는 재료등급은 미국석유협회(America Petroleum Institute)의 재료규격(5L)에 명시된 것으로, X65는 금속재료의 항복강도가 65,000psi(448MPa)임을 의미한다. 그러나 일부 진행중이거나 계획중인 배관건설 프로젝트를 살펴보면 재질이 API X65 등급에서 API X70, X80 등급으로 빠르게 변화되고 있는 추세이다. 이것은 일차적으로 강도가 증가함에 따라 두께를 줄일 수 있게 되어 자재비용을 줄일 수 있기 때문이다. 두께의 감소는 용접비용을 줄이는 효과도 있다. 천연가스 배관을 API X60에서 API X70으로 변경함에 따라 배관 벽두께와 무게를 14% 감소시킬 수 있으며, API X70에서 API X80으로 변화시킴에 따라 12.5%를 감소시킬 수 있어 배관 건설비 및 시공기간을 단축할 수 있다. 한국가스공사의 자료에 의하면 배관공사 비용은 1 km 당 육상배관은 873 백만원, 해저배관은 1,653 백만원 정도이다. 이 중에서 배관자재 비용이 약 31%, 용접 등 시공비용이 67% (토목공사 포함), 비파괴검사 비용이 2%를 차지한다. API X70등급 이상의 고강도 배관은 1970년대부터 가스배관으로 사용되기 시작하여 현재 전 세계적으

로 사용빈도가 증가하고 있는 추세이다.

강도와 더불어 배관 소재에서 요구되는 특성은 배관의 시공성 및 내구성을 확보하기 위한 용접성 및 내식성이다. 특히 용접성의 중요성은 아무리 강조해도 지나치지 않을 인자로서 강관이나 코일을 사용하여 관을 제작하는 과정에서의 조관용접(seam welding)과 관과 관을 연결하는 현장용접(girth welding)으로 나누어 생각해 볼 수 있다. 조관용접으로서는 ERW 혹은 SAW 용접법이 사용되고 현장용접으로서는 SMAW, GMAW 혹은 자동 MAG 등의 용접법이 사용되고 있다. 배관설계에서 요구되는 품질 수준이 용접부에서도 충분한 값을 갖기 위해서는 용착금속부, 열영향부의 품질을 결정하는 인자들에 대한 집중적인 검토와 검증이 필요하다. 용접성이 우수하여 예열처리를 필요로 하지 않거나 용접공정의 자동화가 가능하게 되면 시공비용과 시간을 크게 절감할 수 있게 된다.

내식성은 최근에 강조되고 있는 배관 재료의 특성이다. 이것은 원유 및 천연가스를 수송하는 line pipe 강이 사용되는 사용환경이 극한지, 해저 등으로 점점 가혹해지고 있고 H<sub>2</sub>S 등 sour gas를 포함하는 부식성 분위기에서 사용되는 경우가 많아지고 있기 때문이다. 현재 건설 중이거나 계획중인 대규모 배관공사의 약 75% 이상이 극한지나 해저를 통과하는 경우이다, 이에 따라서 요구되는 배관재질도 변화되고 있는데 저온인성 보증강, 耐 HIC(hydrogen induced cracking) 및 耐 SSCC (sulfide stress corrosion cracking) 보증강 등이 요구되고 있다. 일반적으로 내식성을 확보하기 위해서는 소재의 청정성을 확보하고 비금속 계재물의 감소 및 형상제어가 관건이 된다.

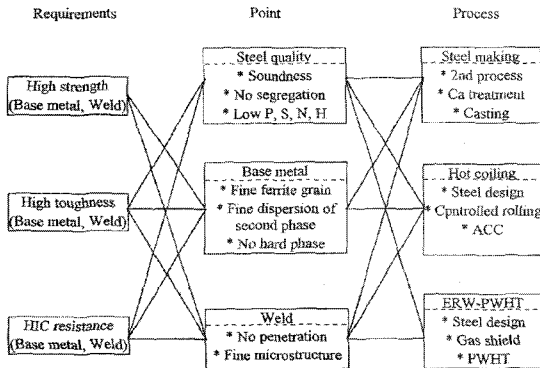
현재 많은 배관건설공사가 진행중인 중국의 경우 이미 API X70이나 X80등급의 배관이 사용되고 있다. 이에 따른 배관재료, 조관 및 용접관련 연구도 상당히 다양하게 수행하고 있다.

한 예로 2001년도 중국 秦皇島政府 자료에 의하면 HuaYuan General Corporation의 Shanhaiguan Industry Company는 Straight Seam Submerged Arc Welded (LASW) 공법에 의한 대구경 배관 생산 공장 건설을 계획하고 있다. 秦皇島政府는 배관생산 공장 건설을 위해 생산설비의 핵심장비를 국외로부터 수입하고 일 반장비는 중국 내에서 조달할 예정이다. 강관제 성형, 자동 SAW 용접설비, 배관 확관설비, X-ray 설비, Ultra-Sonic 설비 등을 구축하여 연간 100,000~150,000톤 용량의 파이프를 생산할 예정이다. 강관생산 목표는

API 5L X80등급, 외경 457~1625mm (18인치~64인치), 두께 6~40mm, 배관길이 8~12m로 설계해 놓고 있다. 배관생산 공장 건설에 투입되는 예산은 \$34,000,000이며 이중 \$1,000,000은 외국자본을 사용할 계획이다. 중국내의 경제성장이 힘입어 석유화학설비, 천연가스수송용 및 신도시 건설분야 등에서 대구경 배관 수요가 계속되며 秦皇島政府는 석유화학설비, 천연가스 수송을 위하여 약 20,000 km의 배관을 건설할 것으로 계획하고 있다.

### 3. 배관재료 요구특성

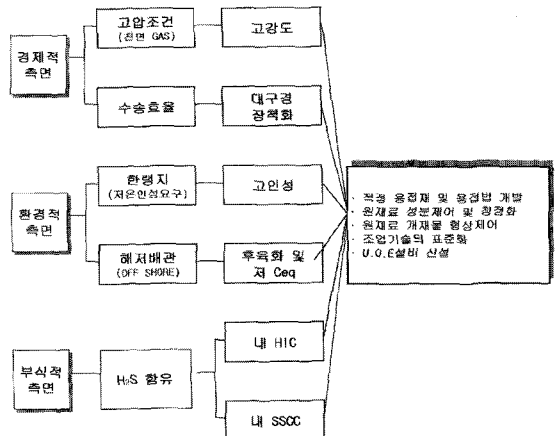
원유 및 천연가스를 수송하는 Line Pipe강은 사용되는 사용 환경이 점점 가혹함에 따라 요구되는 고강도, 고인성, 양호한 용접성, 내부식성 측면에서 점차 까다로워지고 있는 추세이며, 경제적인 운송을 위해 매체의 수송 압력 증대, 대구경화가 가능토록 Grade를 향상시킴과 동시에 자원고갈에 따른 엄격한 환경에 견딜 수 있는 극한지용 강관, 부식 환경에 견딜 수 있는 강관의 요구가 가속화되어 국내외로 한층 증대되고 있는 실정이다. 특히 한랭지역에서 사용되는 Line Pipe강은 저온인성이 매우 좋아야 한다. 저온인성을 증가시키기 위해서는 결정립 미세화 방법이 유효하며 또 탄소당량을 감소시키는 것도 중요하다. 그리고 생산되는 SLAB의 편석을 감소시키고 BANDED STRUCTURE를 없애는 것도 저온인성 향상에 상당한 기여를 하는 것으로 알려져 있다. 탄소당량을 감소시키는 방안은 저온인성과 더불어 용접성을 증가시키는데 큰 도움을 주기 때문에 Line Pipe용 고강도강의 경우 첨가되는 탄소함량이 점진적으로 감소되어 왔던 것이 그 동안의 추세였다.



또한 고강도와 더불어 저온인성과 HIC 및 SSCC 저항성이 용접부에서도 갖춰져야 한다. 이러한 용접성을 평가하는 중요한 평가지수는 Ceq나 Pcm이 많이 이용되고 있으며 이 값들이 낮을수록 용접성이 좋아진다. 그 예로 적용되는 TMCP재는 C함량을 줄이는 반면에 합금성분계로 강도를 증가시켜 용접성을 향상시킬 수 있게 되었다. 그림 2는 line pipe 강에서 요구되는 특성인 강도, 인성 및 HIC 저항성을 향상시키기 위해 고려해야 할 야금화적인 요인과 이를 위해 개발되어 적용되고 있는 신기술의 상호관계를 보여주고 있다.

철강재료의 강화기구에는 결정립 미세화, 고용강화, 석출강화, 전위강화, 변태강화 등이 있다. 다양한 강화기구를 중에서 재료의 강도와 인성을 동시에 향상시키기 위해서는 결정립 미세화가 결정적인 기술이라 할 수 있다. 결국 초세립강 생산을 위한 합금설계와 제조 공정기술 확보가 관건이 되는 것이다. 합금설계에는 저탄소, 저 Mn, 저 P, 저 S와 더불어 Ca첨가 기술이 중요하며, 석출강화원소인 Nb, V, Ti을 활용하고, 고용강화원소인 Si, Mo을 활용하며, 소입형 강화원소인 Cr, Mo활용기술이 확보되어야 한다. 제강공정이후의 연주 공정에서는 무엇보다 중요한 핵심기술은 압연기술이다. 저온인성 보증용 고강도강 생산을 위해서는 제어압연 후 빠른 냉각으로 조직을 미세화할 수 있는 제어압연-가속냉각의 가공열처리기술이 핵심적인 기술이 된다.

그림 3은 새로운 강관 개발 및 건설시 고려해야될 사항들을 나타낸 것이다. 경제적, 환경적, 부식적 측면에서 다각도로 필요조건들을 검토하여 각각에 맞는 용접공정, 용접재료, 배관소재, 배관조관 기술 등을 개발하여야 가장 효율적이고 안전한 배관건설 및 운용이 가능하다.



#### 4. 배관재료 용접성

용접성은 강재의 용접이음부에 있어서 기계적성질을 비롯한 이음부에 요구되는 제반 품질특성을 구조물의 설계치 이상으로 확보할 수 있도록 하기 위한 소재의 품질, 용접재료 및 시공기술의 종합이다. 용접성은 용접의 안정성, 안전성, 가능성 등에 대한 검토가 필요하다. 배관을 건설하기 위한 용접은 크게 두 가지로 나눌 수 있는데, 첫째 강관사에서 배관을 만들기 위한 조관용접 즉 심용접이 있고, 둘째 강관공장에서 만들어진 배관을 건설현장에서 연결하는 현장용접 즉 원주용접으로 구분할 수 있다.

조관용접은 다시 크게 SAW(Submerged Arc Welding)과 ERW(Electric Resistance Welding)으로 구분된다. SAW를 사용한 조관에는 다시 크게 두 가지로 구분된다. 첫째로 열간압연에 의하여 제조된 코일형태의 소재를 나선형으로 감으면서 배관을 만드는 Spiral 배관으로 배관용소재, 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 고주파 유도 용접법과 고주파 저항용접법의 두 가지로 구분할 수 있다. SAW에 의한 조관에서 용접이음부 품질은 배관용소재와 용접재료의 복합적인 작용에 의하여 결정되는데 반하여, ERW용접법의 특징은 용접부의 품질특성이 배관용 소재 자체만의 품질 특히 화학조성에 의하여 결정된다는 점이다. 즉 배관용 소재의 용융 및 가압에 의하여 용접부가 완성되는 것이다.

배관건설현장에서 연결하는 현장원주용접은 과거에는 주로 SMAW에 의한 수동용접이 사용되어 왔으나 최근에는 용접작업 효율을 향상시키기 위하여 GMAW를 적용하며 원주용접자재를 자동용접으로 하는 추세로서, 자동 MAG welding은 원주용접작업효율과 용접부 품질의 안정성이 우수한 방식이다.

배관용 소재로서는 열간압연에 의해 제조된 판재형태의 소재와 코일형태의 소재로 두 가지가 사용된다. 어느 소재가 사용되어도 용접열에 의하여 조직이 변태

되는 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, TiO<sub>2</sub> 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.

용접재료는 조관용접법인 SAW와 현장 원주용접 작업 시 적용되는 SMAW, GMAW에서 고려되어야 하는 부분이다. 조관용접재료로서 SAW재료는 미세한 결정립의 페라이트 조직형성에 의해 충격인성 확보가 가능하도록 재료개발이 이루어져야 하며 경화성원소들의 조정에 의한 경도증가 억제를 이루어야 한다. 원주용접재료는 저온균열 발생방지를 위해 합금원소의 조절이 필요하며 플럭스의 종류와 조성별로 배관소재와의 적합성을 평가해야 한다.

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.

SAW조관용접 시 강재에 대해서는 강재의 화학조성변화에 의한 용접성 평가(C, Si, Mn, Mo, Ni, Nb, Ti등의 함량에 의한 품질 변화), 강재의 두께별 용접입열량의 변화에 따른 충격인성변화(용접부 노치위치별, 사용온도별 충격인성 보증한도, 용융성에서의 충격인성), 용접전극 수에 다른 입열조건 변화의 영향평가, 현장용접인 원주용접 작업 시 루트페이스부위 저온균열 발생방지(저온균열 감수성 평가), 열영향부 연화에 의한 이음부 강도저하 방지(화학조성의 변화에 대응한 용접부 연화정도 및 강도변화 평가)등에 대한 연구가 필요하다. 용접재료에 대해서는 소재의 화학조성과 연계된 용접재료의 개발(강도, 충격인성 보증), 동일 와이어에 대한 플럭스 종류변화의 영향, 동일 플럭스에 대한 와이어 종류변화의 영향, Hard Spot의 경화성 완화문제 등에 대한 평가가 필요하다.

ERW 조관용접 시에는 용접재료를 사용하지 않고

가스배관 재료의 기술 현황

표 1 API 강재의 용접성 평가 항목.

시험항목		일반용 / 한냉지용						비고
소재 조건	등급	X65~X70			80~X100			
	화학조성 형태	C-Mn-Nb-V-Mo			C-Mn-Nb-V-Mo-Ni			등급증가→첨가량 증가
	판 두께(mm)	7.0~17.0			7.0~17.0			판두께증가→첨가량 증가
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	○	○	○	○	○	○	
	경도분포 측정	○	○	○	○	○	○	
	이음인장시험	○	○	○	○	○	○	
	굽힘시험	○	○	-	○	○	-	
	충격시험(CVN)	○	○	○	○	○	○	
	DWTT시험	△	△	-	△	△	-	
	COD시험	△	△	-	△	△	-	
	Hard Spot경도	○	○	○	○	○	○	
	HIC, SSCC	-	-	-	-	-	-	
	용접재료 선정	-	○	○	-	○	○	충격인성 요구수준
PWHT	○	△	△	○	△	△	ERW: seam annealing SAW: △	
용접 가공 특성	HAZ최고경도	○			○			
	저온균열시험	○			○			Pre-heatinf
	SH-CCT	○			○			

소재의 용융 및 가압에 의하여 용접부를 형성하기 때문에 강재의 화학조성변화에 따른 용접부 충격인성 변화, 용접조건의 변화에 따른 품질 변화(전류, 전압, 주파수, 조관속도, 가압력, 인입각도 등), 후열처리에 의한 용접부 경화성 완화정도 평가, 용접조건변화에 의한 용접결함의 발생상황 평가 등이 필요하다.

원주용접부에서는 강제면에서 원주용접 입열량 변화에 따른 충격인성 변화(용접부 노치위치별, 사용온도별 충격인성 보증한도, 용융선에서의 충격인성 저하), 용접 패스수의 변화에 따른 입열량 변동변위, 루트패스부위 저온균열발생 방지를 위한 시험 등이 필요하고, 용접재료면에서는 소재의 화학조성과 연계된 용접재료의 개발(강도, 충격인성 보증, 저온균열감수성 완화를

위한 합금설계), 플럭스 종류 변화의 영향, 보호가스 종류 변화 및 수동/자동 용접부 품질 변화 등에 대한 검토가 있어야 한다. 표 1은 포스코에서 수행하고 있는 API강재의 등급별 용접성 평가항목들의 한 예를 나타낸 것이다.

참고문헌

- (1) "International Construction Report", Pipeline and Gas Industry, Vol. 84, No. 11, 2001
- (2) 인터넷 자료: [www.qhd.gov.cn/xm2001/p04.htm](http://www.qhd.gov.cn/xm2001/p04.htm)
- (3) 제 8회 기술강습회 자료, "고장력 API 강관용 강재의 제조 및 사용기술", 1998.11.24., 대한금속학회 포항지부