

API 5L X65 배관 모재 및 용접부 피로특성 평가

김철만* · 백종현* · 김우식*

Evaluation of fatigue poperties of base and weld metal for API 5L X65 pipeline

Cheol-Man Kim, Jong-Hyun Baek, Woo-Sik Kim

Key Words: High cycle fatigue(고주기피로), S-N curve(S-N 선도), Fatigue strength(피로강도), Base metal(모재), Weld metal(용착금속)

Abstract

The pipelines for natural gas transmission were buried in the ground of 1.5m depth. The pipelines were continuously subjected to vehicle load and internal pressure change by the quantity consumed of natural gas.

In this paper, high cycle fatigue properties of natural gas transmission pipelines were studied. Fatigue specimens were obtained from the base and weld metal of circular pipe. Fatigue strength increased with increasing yield strength. Especially, the fatigue strength of base metal was higher than the yield strength of base metal and the fatigue strength of weld metal by manufactured process of TMCP.

1. 서론

한국가스공사에서 천연가스 공급에 사용되는 배관은 API 5L X65등급의 재질이다. 현재 주로 사용되고 있는 가스배관은 직경 30inch (762mm), 두께 14.3mm 또는 17.5mm의 강관으로 폴리에틸렌 피복이 되어있다.

가스배관은 지하 1.5m의 깊이에 매설되어 있고 차량하중이나 토하중 등의 하중을 지속적으로 받고 있다. 특히 계절 및 사용자의 가스 사용량에 따라 내압이 주기적으로 변하여 배관에 피로를 가하고 있다.

피로특성은 시편 크기, 외부환경, 잔류응력, 용접, 표면조건 등에 따라 민감하게 변화하며, 이에 대한 많은 연구가 수행되어왔다⁽¹⁾. 용접을 할 경

우 슬랙 계재물, 기공 등의 용접결함들로 인하여 모재보다 피로특성이 저하된다⁽²⁻⁵⁾. 특히 표면상 태는 피로특성을 좌우하는데 매우 중요한 역할을 한다. 거칠기가 심하거나 표면에 코팅이나 클래 딩 처리를 할 경우 피로강도가 매우 작아진다^(6,7).

본 연구에서는 원형의 배관에서 직접 모재 및 용접부에 대한 피로 시험편을 채취하여 각각에 대한 피로수명을 평가하였으며, 장기적인 사용에 대한 안전성을 검토하였다.

2. 시험방법

2.1 재료

시험에 사용된 재료는 API 5L X65 등급의 배관 으로, 직경 30" (762mm), 두께 17.5mm이다. 가스 배관은 TMCP (Thermo-mechanical Control Process) 공정으로 제작된 후판을 원형으로 만들

* 한국가스공사 연구개발원

Table 1. The chemical compositions(wt%) of X65 base and weld metal

Elements	C	Mn	P	S	Si	Nb	V	Ti	Cu	Al	Ni	Cr	Mo	Ceq.*
Base metal	0.084	1.22	0.014	0.001	0.279	0.046	0.055	0.023	0.019	0.041	0.026	0.030	0.002	0.31
SAW weld metal	0.080	1.36	0.021	0.005	0.393	0.023	0.035	0.012	0.051	0.026	0.018	0.039	0.160	0.36
SMAW weld metal	0.073	1.06	0.022	0.005	0.525	0.021	0.016	0.030	0.024	0.012	0.023	0.046	0.003	0.27

어 길이방향으로 GMAW (Gas Metal Arc Welding) 와 SAW (Submerged Arc Welding) 방법으로 용접한다. 원주 방향의 용접은 현장에서 수행되는데, GTAW(Gas Tungsten Arc Welding)과 SMAW (Shielded Metal Arc Welding) 방법을 사용한다. Table 1은 가스 배관 모재 및 용착금속부의 화학적 조성을 나타낸 것이다. 탄소 함량은 대략 0.08wt%로 분석되었다.

2.2 시편

API 5L X65 가스배관(30inch ϕ \times 17.5mmt)의 피로강도를 구하기 위하여 모재 길이 및 원주방향에 대하여, 그리고 심용착금속부와 원주용착금속부에 대하여 시험편을 제작하여 상온에서 피로시험을 실시하였다. 피로시험편은 ASTM E466-96 규격에 따라 Fig. 1과 같이 제작하였다⁽⁸⁾. 피로시험은 INSTRON 8502 모델의 유압식피로시험기를 사용하여 주파수 25Hz, R(Min. Load /Max. Load) 0.1로 설정하였고 하중제어방식으로 실시하였다. 피로수명이 10⁷회에 도달하였을 때, 이에 대한 강도를 피로강도로 설정하였다.

Fig. 2는 피로시험장치를 나타낸 것이다. 고주기 피로시험은 시험편의 표면 거칠기에 상당히

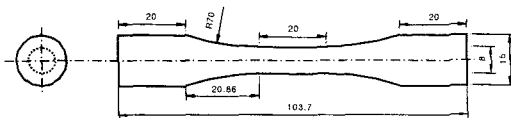


Fig. 1. Shape of high cycle fatigue specimen

영향을 받기 때문에 Fig. 2에서처럼 시험편의 길이방향으로 미세하게 표면연마를 하였다.

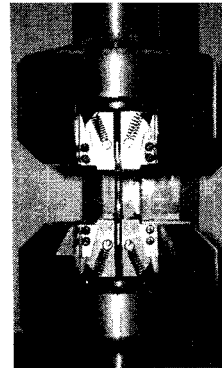


Fig. 2. Photo of high cycle fatigue test

3. 시험결과 및 고찰

Fig. 3은 API 5L X65 모재의 미세조직을 3방향에 대하여 입체적으로 나타낸 것이다. TMCP 공정으로 후판을 제작할 때, 제어압연과 열처리를 반복하였기 때문에 길이방향 및 원주방향으로 길게 연신된 검은색의 퍼일라이트가 관찰되고 있다. 흰색의 다각형 조직은 페라이트를 나타낸 것이다.

Fig. 4는 후판을 원형으로 굽혀서 길이방향으로 접합시키는 심용접부 용착금속에 대한 미세조직사진을 나타낸 것이다. 용착금속부는 1500 $^{\circ}$ C 이상의 온도까지 가열되어 용융된 후 대기중에 냉각시켰기 때문에 전형적인 응고 주조조직을 나타내고 있다. 초석페라이트가 응고방향으로 성장하였고 내부에 흰색의 페라이트가 관찰되고 있다.

Fig. 5와 6은 모재 길이 및 원주방향에 대한

고주기 피로시험 결과를 S-N 곡선으로 나타낸 것이다. 모재 길이 및 원주방향에 대한 피로강도는 항복강도 보다 높게 나타났고 길이방향에 대한 피로강도도 원주방향에 대한 것 보다 높게 나타났다. Fig. 3의 미세조직과 연관시켜 볼 때, 압연방향에 따라 피로강도가 다르게 나타남을 알

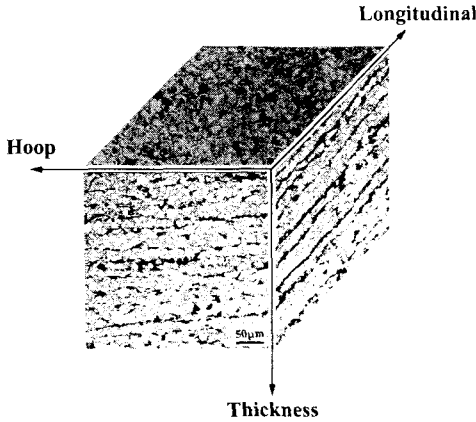


Fig. 3. Microstructure of X65 base metal

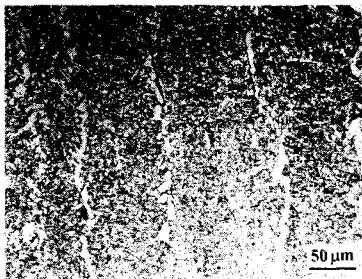


Fig. 4. Microstructure of seam weld metal

수 있다.

Fig. 7과 8은 용착금속에 대한 S-N 곡선을 나타낸 것이다. 피로수명에 대한 강도기울기가 모재에 대한 것보다 급격히 감소하였고, 피로강도도 항복강도보다 작게 나타났다. 즉 모재보다 항복강도 및 인장강도는 상당히 높지만 피로강도는 오히려 작음을 알 수 있다.

Table 2는 모재와 용착금속부의 피로강도(σ_f)를 항복강도 및 인장강도의 비로 나타내어 상호 비교한 것을 나타내었다. 항복강도 및 인장강도는 모재 원주방향, 길이방향, 원주용착금속, 심용착금속 순으로 높게 나타났다. 항복비(σ_f/σ_{YS})는 모재 길이방향, 원주방향, 원주용착금속, 심용착금속 순으로 낮게 나타났다. 특히 모재 길이방향이 원주방향보다 항복강도 및 항복비가 높게 나타나 방향성에 따라서 차이가 존재함을 알 수 있고 항복비가 낮음에 따라 피로강도가 작아짐을 알 수 있다. 그러나 용착금속은 항복비가 낮아짐에 따라 피로강도가 약간 증가하였다.

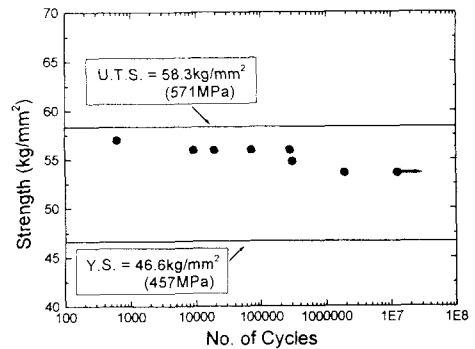


Fig. 5. S-N curve of base metal for longitudinal direction

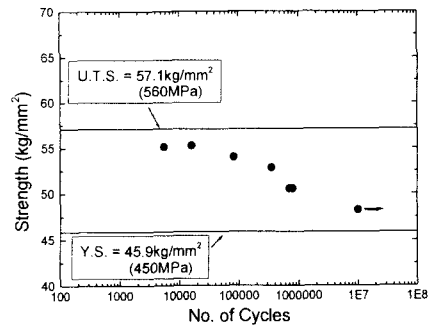


Fig. 6. S-N curve of base metal for circumferential direction

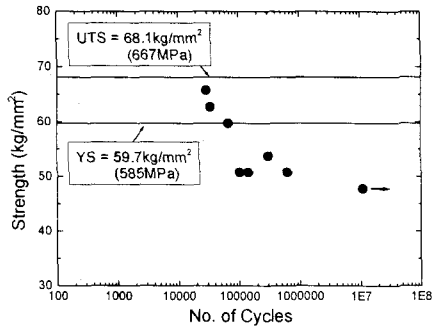


Fig. 7. S-N curve of seam weld metal

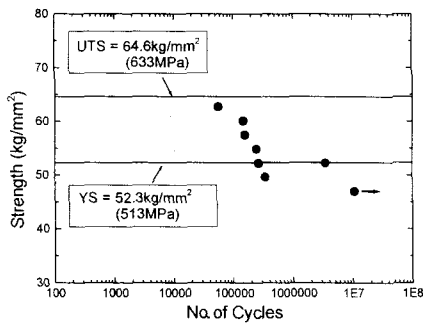


Fig. 8. S-N curve of girth weld metal

Table 2. Results of high cycle fatigue test

	σ_{YS}^*	σ_{UTS}^*	σ_f^*	σ_f/σ_{YS}	σ_f/σ_{UTS}
Longi.	46.6	58.3	53.6	1.15	0.92
Circum.	45.9	57.1	48.2	1.05	0.84
Seam	59.7	68.1	47.8	0.80	0.70
Girth	52.3	64.6	47.0	0.90	0.73

* 단위 : kg/mm²

Fig. 9는 모재 및 용접부 고주기 피로시험편의 파단면을 주사전자현미경으로 관찰한 것이다. 모재의 경우 S-N선도에서도 알 수 있듯이, 피로강도가 항복강도보다 높기 때문에 상당량의 소성

변형이 된 후 표면의 특정 위치에서 균열이 발생하여 전파되었다. 용착금속의 경우는 기공이나 불순물 등의 용접결함에서부터 균열이 생성되어 전파되었다.

앞서 언급하였듯이 모재는 용착금속에 비하여 항복강도는 낮지만 피로강도는 높게 평가되었다. 이것은 모재 자체가 강도는 작지만 TMCP공정에 의하여 제어압연과 열처리를 통하여 강도가 증가되었고 특히 피로특성이 향상되었기 때문이라고 생각된다. 용착금속부는 응고구조조직으로 편석이나 용접결함이 존재해 피로강도가 작게 나타나지만^(7,8), 용접부 자체가 모재보다 강도가 높은 재료이기 때문에 항복강도가 크고 피로강도가 작게 나타난다고 생각된다. 강구조물의 최대허용응력이 정상운전조건일 경우 항복강도의 60%, 극한일 경우 항복강도의 80%를 초과하지 못하도록 규정되어 있는 규격과 비교하여 볼 때⁽⁹⁾, 모재와 용착금속의 피로강도는 충분히 높을 것으로 생각된다.

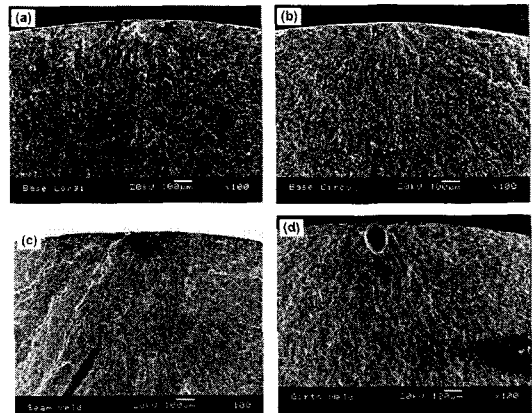


Fig. 9. Fractographs of fatigue specimen
(a) L and (b) T direction of base metal
(c) Seam and (d) Girth weld metal

4. 요약

API 5L X65 배관의 모재 길이 및 원주방향, 심

용착금속, 원주용착금속에 대한 고주기피로시험 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 모재 길이방향이 원주방향보다 항복강도 및 항복비가 높게 나타나 압연 방향에 따라 피로특성이 다르게 나타났고, 항복비가 작아질수록 피로강도가 작아졌다.

(2) 모재의 피로강도는 항복강도보다 높게 나타났지만 용착금속의 피로강도는 낮게 나타났다.

(3) 용착금속은 모재보다 항복강도 및 인장강도가 상당히 높지만 피로강도는 오히려 작게 나타났다.

참고문헌

- (1) 한봉희, 최성조, "X선회절법에 의한 잔류응력과 피로에 관한 연구", 대한금속학회지, 제18권, 1980
- (2) Proceedings of the conference on welded structures, Vol.I and II, The Welding Institute, Cambridge, England, 1971
- (3) "Materials and processes for the '70s", Science of advanced materials and process engineering, Proceedings, 15, Western Periodicals, Azusa, Calif., 1969
- (4) 渡辺正紀, 蒲池一義(1961), "容接欠陥と継手強度の關係", 容接學會誌, 30, 376
- (5) Ishii, Y. and Iida, K. "Low and intermediate cycle weld defects", 非破壊検査, 18, No.10, 443
- (6) Thomas, W.N., "Effect of scratches and various workshop finishes upon the fatigue strength of steel", Engineering, 116, 1923
- (7) Hooker, R.N., "Surface finish vs. fatigue life for 75S-T6 spar cap material", Tech. Note Dev-950, Douglas Aircraft Co., Long Beach, Calif.
- (8) "Standard practice for conducting force controlled constant amplitude axial fatigue

tests of metallic materials", ASTM E466-96

(9) "Code of practice for fatigue design and assessment of steel structures", BS7608-93