

매설가스배관의 음극방식이 배관의 파괴인성에 미치는 영향

김철만* · 김우식*

The Effects of cathodic protection on fracture toughness of buried gas pipeline

Cheol-Man Kim, Woo-Sik Kim

Key Words: cathodic protection(음극방식), hydrogen embrittlement(수소취화), hydrogen stress cracking(HSC, 수소응력균열), crack tip opening displacement(CTOD, 균열개구변위), fracture toughness(파괴인성),

Abstract

For the corrosion protection of the natural gas transmission pipelines, two methods are used, cathodic protection and coating technique. In the case of cathodic protection, defects are embrittled by occurring hydrogen at the crack tip or material surface. It is however very important to evaluate whether cracks in the embrittled area can grow or not, especially in weld metal. In this work, on the basis of elastic plastic fracture mechanics, we performed CTOD testing with varying test conditions, such as the potential and current density. The CTOD of the base steel and weld metal showed a strong dependence of the test conditions. The CTOD decreased with increasing cathodic potential and current density. The morphology of the fracture surface showed quasi-cleavage. Hydrogen introduced fractures, caused by cathodic overprotection.

1. 서론

한국가스공사의 천연가스배관은 지상으로부터 깊이 1.5m까지 굴착하고 채움 모래로 배관 상하부 및 측면부를 둘러쌓은 후 원지반으로 되메움하여 매설하고 있다. 배관표면은 폴리에틸렌으로 코팅되어 부식으로부터 보호되어 있다. 그러나 완벽한 매설공사를 한다해도 감독자 및 시공자의 눈을 피해 폴리에틸렌 코팅이 일부 파손된 홀리테이가 존재할 가능성은 매우 높다. 그래서 이러한 홀리테이에서의 부식을 억제하기 위해 배관은 항상 외부전원 공급에 의해 황산동 전극(Cu/CuSO₄)에 대하여 최고 -0.85V 이하가 되도록 유

지하고 있다⁽¹⁾. 방식의 측면만을 고려한다면 전위가 낮으면 낮을수록 부식 방지에 효과적이다. 그러나 전위를 낮게 유지하기 위해서는 경제적인 비용이 추가로 소요되며, 더구나 배관표면에서 전기화학적 반응에 의하여 발생한 수소가 고장력강인 배관에 흡수되어 취화될 가능성이 보고되고 있다⁽²⁻⁴⁾. 수소취성은 저합금의 고장력강에서 많이 나타나는 현상으로 응력, 수소침투량, 재료강도의 3가지 요인이 충족될 때 발생한다. 기존의 시험결과에 의하면 탄소강에 전기화학적 반응에 의해 수소가 8wt%ppm까지 침투되며^(2, 6) 고강도강의 경우에는 파면양상이 연성파면에서 초정오스테나이트 계면을 통한 입계파괴 혹은 벽개파괴의 취성파면으로 변화되며, 저강도강에 있어서는 단면감소율을 저하시키는 것으로 보고되고있다⁽⁵⁾.

국내 가스배관의 방식전위는 토양과 같은 외부

* 한국가스공사 연구개발원

환경조건이나 타 시설물의 간섭효과에 의하여 항상 변화하고 있다. 심지어 수소가 발생되어 취화를 야기시킬 수 있는 과방식전위까지 도달되는 경우가 있다. 특히 결함이 존재하는 배관에 음극 과방식 조건이 되었을 경우, 파괴역학적인 관점에서의 접근은 매우 중요한 의미를 갖는다.

그래서 본 연구에서는 결함이 존재하는 배관의 파괴역학적인 안전성을 검토하고자 탄소성 파괴역학을 근거로한 CTOD(Crack Tip Opening Displacement) 시험을 수행하였다. 특히 중성의 버퍼용액내에서 시험속도, 전위 및 전류밀도를 변화시키면서, 모재 및 용접부에 대하여 다양하게 시험하였다.

2. 시험방법

2.1 재료

시험에 사용된 재료는 API 5L X65 등급의 배관으로, 직경 30" (762mm), 두께 17.5mm이다. 가스 배관은 TMCP(Thermo-mechanical Control Process) 공정으로 제작된 후판을 원형으로 만들어 길이방향으로 내부 및 외부에 대하여 용접한다. 길이방향의 용접은 공장에서 수행되는 것으로, GMAW(Gas Metal Arc Welding)와 SAW(Submerged Arc Welding) 방법으로 되어 있다. 원주 방향의 용접은 현장에서 수행되는데, GTAW(Gas Tungsten Arc Welding)과 SMAW(Shielded Metal Arc Welding) 방법으로 되어 있

및 원주 방향, 심용착금속부 및 원주용착금속부에 대하여 subsize 시험편을 제작하여 시험하였다. 시험편 두께는 5mm로 하였다. CTOD 파괴인성 시험편은 BS7448 part I에 의하여 모재 및 용착금속부에서 채취하였다. 직사각형 모양의 단면으로 폭(W)은 26mm, 두께(B)는 13mm로 하였다. 모재 시험편은 균열진전방향에 따라 T-L과 L-T로 구분하였고, 용접부는 심용착금속과 원주용착금속으로 분리하였다. 특히 CTOD 시험편의 L-T는 압연방향에 대하여 수직방향으로 균열이 전파되는 것을 의미하며, T-L은 압연방향과 평행하게 균열이 전파되는 것을 의미한다. 모든 시험편을 #600의 SiC paper로 균열부분의 표면을 연마한 상태에서 시험하였다.

2.3 시험장치

Fig. 1은 음극방식조건에서 CTOD 파괴인성 시험을 하기 위한 시험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 1N Na₂CO₃와 1N NaHCO₃의 버퍼용액(pH 7.63)내에서 12시간 동안 충분히 시험편에 전류를 통과시킨 후, 시험을 하였다. 대극은 탄소 봉을, 기준 전극은 포화 칼로멜 전극을 사용하였고, 시험편은 작용전극의 역할을 할 수 있도록 시험장치를 설정하였다.

2.4 CTOD 시험

CTOD 파괴인성 시험은 모재 및 용착금속부에 대하여 시험속도, 전위 및 전류밀도 변화에 따라

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

* Ceq. = C + Mn/6 + (Ni+Cu)/15 + (Cr+Mo+V)/5.

다. Table 1은 가스 배관 모재 및 용착금속부의 화학적 조성을 나타낸 것이다. 탄소 함량은 대략 0.08wt%로 분석되었다.

2.2 시편

인장시험은 ASTM E8M에 의하여 모재 길이

수행하였다. BS7448 part I에 따라 이동형 매크로현미경으로 표면균열을 보면서 피로균열길이 대략 시험편의 두께(B, 13mm)까지 진전되도록 반복하중을 주었고, 이때 피로균열을 위한 최종 피로 하중(Pf)을 247.5± 202.5kgf로 설정하였다. 노치 및 피로예비균열 부분만 음극반응이 일어나

도록 나머지 부분은 코팅을 하여 수소 침투를 방지하였다. 시험속도는 0.01~1mm /min, 전위는 -2~-0.4V, 전류밀도는 0.01~10mA /cm²로 각각 설정하였다. COD계이지로 변위를 측정하였고 임계 CTOD(δ_c)는 최대하중에서 결정하였다.

CTOD 시험 후, 시험편을 액체 질소로 냉각시켜 노치를 중심으로 이동분한 후, CCD카메라가 장착된 화상분석기를 사용하여 정확히 최종 균열 길이(기계노치와 파괴예비균열)를 측정하였다. 시험편의 균열 선단 부분을 주사전자현미경으로 관찰하여 파면양상을 분석하였다.

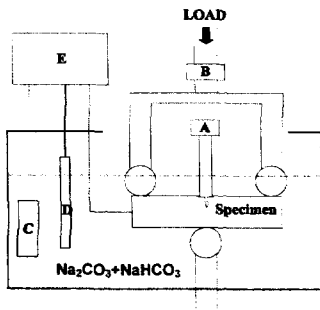


Fig. 1 Schematic diagram of CTOD testing device.
 A : COD gauge, B : Load cell,
 C : Counter electrode, D : Reference electrode,
 E : Galvanostat /Potentiostat

3. 시험결과 및 고찰

Table 2는 모재 및 용착금속부의 기계적 성질을 나타낸 것이다. 미국석유협회(API) 규격에서 모재의 항복 및 인장강도를 최소 448MPa, 530MPa로 규정하고 있는데, 길이 및 원주방향의 모재에 대한 항복 및 인장강도가 모두 API 규격을 만족시켰다. 4가지 종류의 시험편중에서 심용착금속부에 대한 강도가 제일 크게 나타났다.

Figure 2는 길이방향의 모재에 대하여 버퍼용액과 대기중에서 -1V의 전위를 가한 상태에서 시험속도를 변화시켰을 때 CTOD시험결과를 나타낸 것이다. 대기중에서는 CTOD값이 시험속도 변화에 따라 크게 변화하지 않았다. 그러나 -1V

의 음극방식조건에서 시험속도를 변화시켰을 때 매우 급격히 CTOD값이 감소하였다. 음극방식조건에서 시험속도는 파괴인성에 매우 중요한 역할을 하였다.

Table 2. Mechanical properties of X65 base and weld metal.

	Y.S. (MPa)	U.T.S. (MPa)	Elong. (%)
Longi.	457	572	31.6
Circum.	450	559	35.3
Seam	588	660	27.6
Girth	484	597	29.6

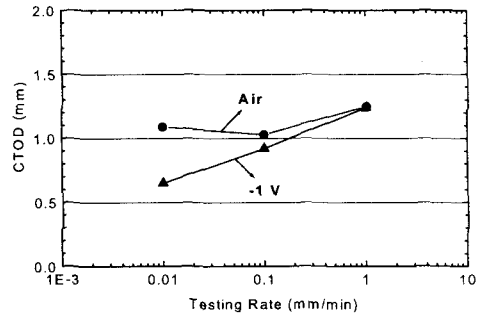


Fig. 2 CTOD variations of X65 base metal (L-T) according to testing rate.

Figure 3은 대기 및 -1V의 음극방식조건에서 L-T방향 모재에 대하여 시험속도 변화에 따라 CTOD 시험을 하였을 때, 파면을 관찰한 것이다. 대기중에서 시험한 파면은 전형적인 연성파면인 덩플 파괴양상을 나타내었고 시험속도 변화에 따라 큰 차이는 없었다. -1V의 음극방식조건에서는 대기중에서 시험한 것과 동일한 연성파면을 나타내었고 상대적으로 덩플크기가 작아졌으며 0.01mm/min의 속도에서는 일부 벽개파면이 관찰되었다

Figure 4는 0.01mm/min의 시험속도에서 T-L 방향의 모재에 대한 하중 대 변위곡선을 나타낸 것이다. -2V의 과방식조건에서 시험한 모재는 항복점근처에 도달하자마자 하중이 서서히 감소하

였고 -0.4V에서 시험한 것은 pop-in이나 뚜렷한 하중감소없이 안정하게 하중이 증가하였다. 이것은 -2V의 과방식조건에서의 CTOD값이 -0.4V에서보다 더 작음을 의미한다.

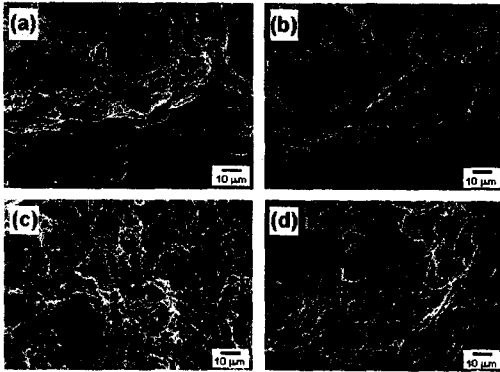


Fig. 3 Fractographs of X65 base metal (L-T).

(a) 0.01 and (b) 1mm/min in air
(c) 0.01 and (d) 1mm/min in -1V

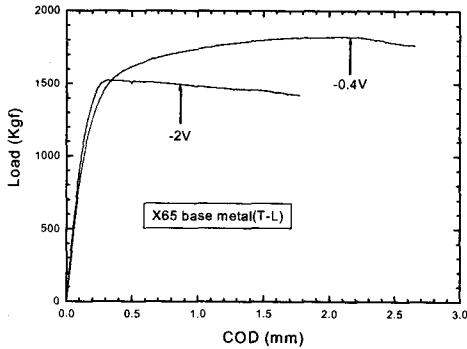


Fig. 4 Load vs. COD graph.

Figure 5는 전위변화에 따른 모재 및 용접부의 CTOD시험결과를 나타낸 것이다. 모든 범위의 전위에서 전위가 감소할 수록(과방식 조건) CTOD값이 감소하였는데, 이것은 균열선단부위에서 응력이 집중되고 음극반응에 의하여 수소가 발생하여 재료에 수소취화현상을 야기시켰기 때문이다. 모재의 CTOD값은 용착금속부보다 더 급격히 감소하였다. 특히 L-T방향의 모재가 모든 전위범위에서 T-L방향의 모재보다 CTOD값

이 높게 나타났고, -2V의 전위에서 T-L방향 모재의 CTOD값이 0.05mm로서 가장 낮게 나타났

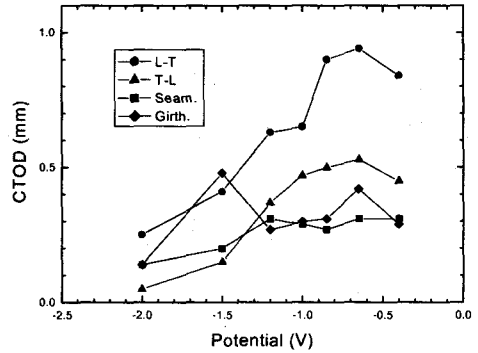


Fig. 5 CTOD variations of X65 base and weld metal according to potential.

다. 음극방식조건일지라도 압연방향에 따라 CTOD값이 크게 좌우됨을 알 수 있다.

내압이 작용하는 배관에서 원주방향의 적용응력이 길이방향의 적용응력보다 2배가 크고 과방식조건에서 T-L방향의 CTOD값이 L-T방향의 CTOD값보다 훨씬작다는 것을 고려하여 볼 때, 길이방향으로 진전되는 결함이 다른 결함보다도 세심한 주의가 필요함을 알 수 있다.

가스공사의 매설배관은 황산동 전극(Cu/CuSO₄)에 대하여 -0.85V이하를 유지하도록 규정하고 있다. 그러나 과방식처리를 하면 Figure 4에서도 알 수 있듯이 수소에 의한 취화현상으로 파괴인성이 작아지기 때문에 적당한 방식전위를 설정하는 것이 필요하다. 미국석유협회(API, American Petroleum Institute)의 API 1104규격에서는 최저 예상 사용온도이하에서 3번 시험을 하였을 때, 원주용착금속부와 열영향부의 CTOD값을 0.127mm 또는 0.254mm로 규정하고 있다⁽⁸⁾. 비록 본 연구에서와 시험조건은 다르지만 -2V의 과방식조건에서 T-L방향 모재의 CTOD값이 위의 규격보다 낮게 나타났고 나머지는 모두 높은 수치를 나타내었다. 그러므로 매설배관의 음극방식전위를 -1.5V이상으로 유지해야 파괴역학적으로 안정할 것으로 생각된다.

심용착금속부와 원주용착금속부의 CTOD값은

전위변화에 따라 큰 차이를 나타내지 않았다. 과방식이 심할수록 전 범위에서 CTOD값이 감소하였다.

Figure 6은 -0.4V와 -2V의 전위조건에서 L-T 방향 모재와 심용착금속부에 대한 CTOD시험편의 파면을 관찰한 것이다. -0.4V 전위조건에서 시험한 L-T방향 모재는 전형적인 연성파괴형태로서 크기가 큰 덩플이 관찰되었다. 동일조건인 심용착금속부도 연성파괴형태를 나타내었지만 상대적으로 덩플크기가 작게 관찰되었다. -2V조건에서의 L-T방향 모재와 심용착금속부는 일종의 취성파괴형태인 벽개파면이 관찰되었다. 따라서 음극방식전위가 증가할수록 CTOD감소와 더불어 벽개파면이 관찰되었다.

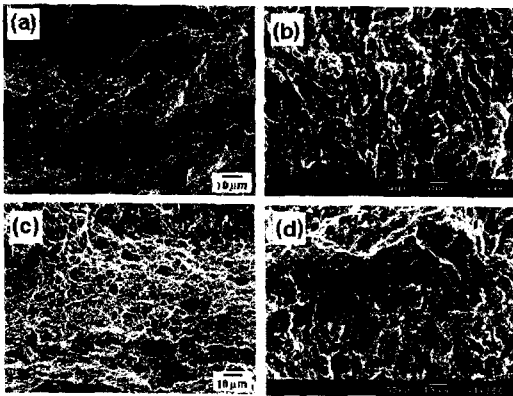


Fig. 6 Fractographs of X65 base and weld metal at 0.01mm/min.
 (a) -0.4V and (b) -2V in L-T
 (c) -0.4V and (d) -2V in seam weld metal

Figure 7은 전류밀도 변화에 대하여 모재 및 용착금속부의 CTOD 시험결과를 나타낸 것이다. 모든 범위에서 전류밀도가 증가할수록 CTOD값이 감소하였다. L-T방향의 모재에 대한 CTOD값이 가장 크게 감소하였고 심용착금속부에 대한 것이 가장 작게 감소하였다. 전류밀도가 증가할수록 CTOD값이 작아지는 것은 Figure 4에서도 언급하였듯이 균열선단부위에서 수소가 발생하고 응력이 집중되어 재료가 취화되는 수소응력균열 현상이 발생하기 때문이다.

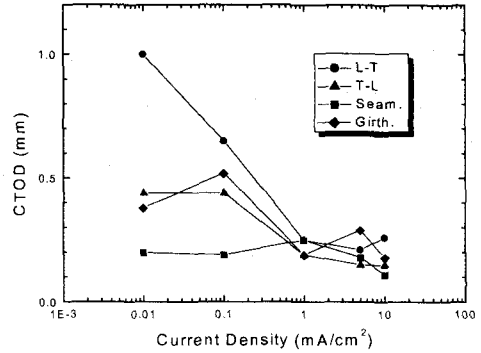


Fig. 7 CTOD variations of X65 base and weld metal according to current density.

Figure 8은 T-L방향의 모재에서 전류밀도가 0.01mA/cm²와 1mA/cm²일 때, CTOD시험후의 시험편 형상을 거시적으로 관찰한 것이다. 전류밀도가 큰 시험편의 균열선단부위는 예리하게 균열이 진전되었지만 전류밀도가 작은 것은 균열선단부위에 심한 소성변형이 발생하였다. 따라서 전류밀도가 높을수록 균열이 예리하게 진전되어 CTOD값이 작게 나타났다.

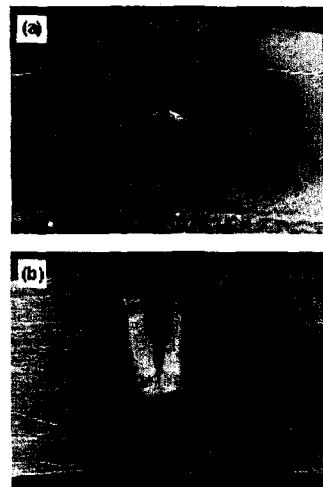


Fig. 8 Crack growth type of X65 base metal (T-L).

(a) 0.01mA/cm² (b) 1mA/cm² at 0.01mm/min

Figure 9는 0.01mA/cm²와 1mA/cm²의 전류밀도조건에서 L-T방향 모재와 심용착금속부에 대한 CTOD시험편의 파면을 주사전자현미경으로

관찰한 것이다. $0.01\text{mA}/\text{cm}^2$ 의 전류밀도조건에서 모재 및 용착금속부는 전형적인 연성파괴형태인 덩플들이 관찰되었고, $1\text{mA}/\text{cm}^2$ 의 전류밀도조건에서는 부분적으로 벽개파면형태를 나타내었다. $0.01\text{mA}/\text{cm}^2$ 의 전류밀도조건에서 모재 및 용착금속부가 연성파괴형태를 나타내고 있지만, 덩플의 크기가 차이가 있음을 알 수 있다. 이것은 모재보다 용착금속부에 불순물이 많이 존재하고 이러한 불순물들이 파괴의 근원으로 작용하였기 때문인 것으로 생각된다.

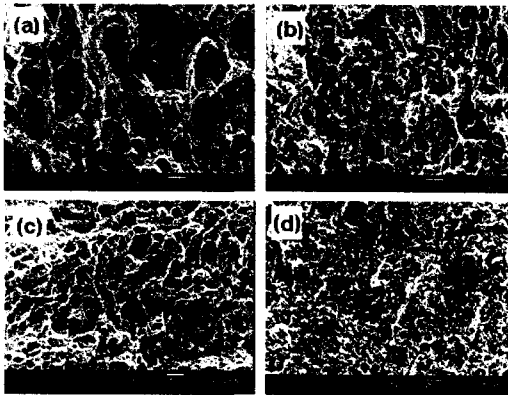


Fig. 9 Fractographs of X65 base and weld metal at 0.01mm/min.

- (a) $0.01\text{mA}/\text{cm}^2$ and (b) $1\text{mA}/\text{cm}^2$ in L-T
(c) $0.01\text{mA}/\text{cm}^2$ and (d) $1\text{mA}/\text{cm}^2$ in seam weld metal

4. 요약

- (1) API 5L X65 모재 및 용착금속부의 CTOD값은 음극방식조건하에서 시험속도의 감소에 따라 작아졌고, 대기중에서는 거의 변화가 없었다.
- (2) 음극방식전위 및 전류밀도가 증가할수록 CTOD값이 감소하였다.
- (3) 음극방식조건에서도 L-T방향의 CTOD값이 T-L방향의 것보다 크게 나타났다.
- (4) 방식의 측면에서는 음극방식전위를 황산동

전극(Cu/CuSO_4)에 대하여 -0.85V 이하로 유지해야 하지만, 수소취성으로부터 가스배관의 파괴역학적 안전성을 확보하기 위해서는 전위값을 -1.5V 이상으로 설정해야한다고 생각된다.

참고문헌

- (1) NACE Standard RP0169-92, "Control of external corrosion on underground or submerged metallic piping systems"
- (2) Komei Kasahara and Tsuyoshi Isowaki, 1981, "Behavior of Line Pipe Steel under Cathodic Protection", Tetsu to Hagane, vol. 2, pp.148-157
- (3) N. Hagiwara and N. Oguchi, "Fracture Toughness (CTOD) of Line Pipe Materials under Cathodic Protection", '97 Osaka Gas Forum, paper No 200
- (4) Yuchiro Yamaguchi and Hidemasa Nonaka et al, 1992, "Hydrogen Cracking Susceptibility Evaluation of Buried Steel Pipe under Cathodic Protection", Tetsu to Hagane, vol.12, pp.66-71
- (5) I.-O.Shim and J.G. Byrne, 1990, "A Study of Hydrogen Embitterment in 4340 Steel I:Mechanical Aspects", Mat. Sci. & Engin. A:Struc. Mat: Properties, Microstructure and Proc., vA123, n2, pp. 169-180
- (6) Scot X. Mao and J.L.Luo et al, 1998, "Hydrogen Facilitated Anodic Dissolution Type Stress Corrosion Cracking of Pipeline Steels in Coating Disbondment Chemistry", International pipeline conference proceeding, vol.1, pp485-492
- (7) BS 7448 Part 1, 1991, "Method for determination of K_{Ic} , critical CTOD and critical J values of metallic materials"
- (8) API Standard 1104, 1999, "Welding of pipelines and related facilities"