

매설배관의 경계조건이 파손확률에 미치는 영향

이억섭* · 편장식*

Effect of Boundary Conditions on Failure Probability of Buried Pipeline

Ouk Sub Lee, Jang Sik Pyun

Key Words: Failure Probability (파손확률), Buried Pipeline (매설배관), Boundary Condition(경계조건), Degradation (열화), Von-Mises Criterion(Von-Mises 기준), Backfill Type(역채움 형식)

Abstract

A failure probability model based on Von-Mises failure criterion and the standard normal probability function is proposed. The effects of varying boundary conditions such as internal fluid pressure, external soil, traffic loads, temperature change and corrosion on failure probability of the buried pipes are systematically investigated. To allow for the uncertainties of the design variables, a reliability analysis technique has been adopted; this also allows calculation of the relative contribution of the random variables and the sensitivity of the failure probability.

1. 서 론

매설배관은 지하에 위치하며, 여러 가지 경계 조건에 민감하게 반응하여 열화되기 쉽다. 따라서 이에 대한 안전과 보전에 대한 평가는 경제적, 사회적 측면으로 보아 매우 중요하다. 가스 및 오일을 운송하는 배관 중, 설치한지 오래되거나 여러 가지 환경적 영향에 의해 부식과 같은 결함이 발생되어 대형 재난으로 발전할 경우가 종종 보고되고 있다^(1, 2). 매설배관에 대한 건전성 평가를 수행하기 위해서는 매설배관 주위의 경계조건이 매설배관에 미치는 영향을 우선적

로 정밀성 있게 규명해야 한다.

또한, 매설배관 주위의 여러 가지 환경의 영향, 이를테면 매설배관의 부식, 토질의 온도, 차량의 하중, 내압 등이 매설배관의 신뢰성에 미치는 영향에 대해서도 많은 연구가 수행되고 있다. 본 연구에서는 토질의 온도, 내압, 차량하중, 부식등 매설배관의 응력과 변형거동에 영향을 미치는 여러 가지 경계조건들^(3, 5)이 매설배관의 파손 확률에 미치는 영향을 체계적으로 규명하였다.

2. 매설배관에 작용하는 응력

2.1 축방향 응력

2.1.1 토질온도의 변화

축방향으로 $\epsilon_H = \alpha \Delta \theta$ 인 사실을 기억하고 Hooke의 법칙을 적용하면 구속을 받는 배관의 온도가 변화할 때 발생하는 축방향 응력은 열변형률이

$$\sigma_H = E\alpha\Delta\theta \quad (1)$$

여기서

* 인하대학교 기계공학과

E-mail : leeos@inha.ac.kr

TEL : (032)860-7315 FAX : (032)868-1716

* 인하대학교 대학원

σ_u : 축방향 구속을 받는 매설배관에 온도가 변화할 때 발생하는 축방향 열응력

- E : 배관재료의 탄성계수
- α : 열팽창계수
- $\Delta\theta$: 온도변화

2.1.2 내압의 영향

내압 P 가 작용하는 축방향 구속 배관에 유기되는 축방향응력, σ_u 는 내압에 의한 축방향응력과 구속에 의한 팽창 때문에 발생하는 Poisson의 효과를 고려한 응력을 중첩하면⁽⁷⁾

$$\sigma_u = \frac{\nu P r}{t} \quad (2)$$

여기서

σ_u : 축방향 구속을 받는 배관의 내압에 의한 축방향 인장응력

- ν : Poisson의 비
- P : 내압
- r : 배관의 내경
- t : 배관의 두께

용접이음된 매설배관의 길이가 매우 길면, 배관의 단부가 축방향 구속되지 않더라도 토질마찰 등에 의해서 구속되므로 온도감소나 내압에 의해서 인장응력이 발생하게 되므로 온도감소나 내압에 의해서 인장응력이 발생하게 된다.

2.1.3 축방향의 굽힘응력

차량하중에 의한 굽힘이 작용하는 동안 발생하는 축방향의 응력⁽⁷⁾,

$$\sigma_b = E r \chi \quad (3)$$

여기서 χ 는 굽은 배관의 뒤틀림 정도를 나타낸다. 최대 축방향응력(σ_b)은 축방향으로 발생하는 응력의 합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_t = \sigma_u + \sigma_a + \sigma_b \quad (4)$$

2.2 원주방향 응력

2.2.1 내압의 영향

내압 p 가 작용하는 배관에서 내압에 의해 원주 방향으로 발생하는 응력은 배관의 지름 방향으로 일정하게 발생한다. 내압이 작용할때의 원주방향 응력은⁽⁷⁾

$$\sigma_{cf} = \frac{p r}{t} \quad (5)$$

여기서

σ_{cf} : 원주방향 구속을 받는 배관의 내압에 의

한 원주방향 인장응력

2.2.2 토질하중의 영향

토질의 하중은 배관을 둘러싸고 있는 지반에 의한 하중을 말하는데, 여기서는 지반과 지반위의 도로에 의한 하중을 나타내는 것으로 정의한다. 큰 토질의 하중에 의해 발생하는 원주방향의 응력은⁽⁷⁾

$$\sigma_{cs} = \frac{6k_m C_d \gamma B_d^2 E t r}{E t^3 + 24k_d p r^3} \quad (6)$$

여기서 C_d : 토질압력계수

γ : 토질의 비중

B_d : 트랜치 폭

E : 배관재료의 탄성계수

k_m : 굽힘 모멘트 계수

k_d : 휨 계수

토질의 하중이 배관에 미치는 영향을 정확히 파악하기 위하여 여러 단계의 매설 작업의 영향을 고려하여야 한다.

2.2.3 차량하중의 영향

지하에 매설되어 있는 배관은 토하중과 내압 외에도 지표면의 차량에 의한 동적 하중의 영향을 받게된다. 배관이 고속도로나 철도, 혹은 비행장을 횡단하는 경우 큰 차량의 하중이 지표면에서 배관으로 전달될 수 있기 때문에 이러한 지역에서의 안정적인 배관의 설치와 유지를 위하여 차량하중의 영향을 파악하는 것이 매우 중요하다.

차량의 하중이 배관에 미치는 영향은 원주방향과 축방향으로 발생하는 응력이 다르며, 일반적으로 원주방향 응력이 발생할 때 영향이 큰 것으로 알려져 있다. 차량하중에 의해 원주방향으로 발생하는 응력은⁽⁷⁾

$$\sigma_{ct} = \frac{6k_m I_c C_f F E t r}{L_e (E t^3 + 24k_d p r^3)} \quad (7)$$

여기서 I_c : 충격계수

C_f : 표면하중계수

F : 차량하중

L_e : 배관의 길이

최대 원주방향응력(σ_{ct})은 원주방향으로 발생하는 응력의 합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_c = \sigma_{cf} + \sigma_{ct} + \sigma_{cs} \quad (8)$$

2.3 부식의 영향

식하 배설배관의 부식 등의 결합발생은 그 재료의 강도 등을 현저히 저하시키고 결합부분에 응력이 집중되어 결합의 성장에 의해 파괴에 이르게 되는 것이다. 따라서 부식 등의 결합의 형태 및 위치에 따른 응력상태나 파손수명 등을 예측하여 위험한 파손사고들을 예방할 수 있는 기준이 필요하게 되었다. 부식된 배관의 두께 감소량은⁽⁸⁾

$$P = kT^n \quad (9)$$

여기서 k : 부식증가계수(0.037~0.066)

T : 배관의 사용년도

n : 부식지수계수(0.14~0.53)

부식을 고려하여 배관에 발생하는 응력을 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\sigma_{cr} = \frac{pr}{t - kT^n}$$

$$\sigma_{cs} = \frac{6k_m C_d \gamma B_d^2 E r (t - kT^n)}{E(t - kT^n)^3 + 24k_d p r^3}$$

$$\sigma_{cr} = \frac{6k_m I_c C F E r (t - kT^n)}{L_c (E(t - kT^n)^3 + 24k_d p r^3)}$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{H p r}{t - kT^n}$$

3. 파손 확률 이론

본 연구에서 제안한 매설배관의 파손확률 모델은 아래식과 같은 Von-Mises의 파손평가기준에 기초를 두고 있다.

$$\sigma_y^2 - \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_1^2 \gg \sigma_y^2 \quad (11)$$

여기서,

σ_1, σ_2 : 원주방향, 축방향 응력

σ_y : 항복응력

범함수 z 를 항복응력과 주응력의 함수로 다음과 같이 놓으면⁽⁵⁻⁶⁾

$$z = \sigma_y^2 - (\sigma_1^2 - \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2^2) \quad (12)$$

평균파손확률 P_f 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_f = P(z < 0) = \Phi(-\beta) \quad (13)$$

여기서, $\Phi(\dots)$ 는 변수의 분포함수이다. β 는 신뢰도 지수이며 z 의 평균값(u_z)과 z 의 표준편차 σ_z 로 나타낼 수 있다.

$$\beta = \frac{u_z}{\sigma_z} \quad (14)$$

여기서,

$$u_z = z(L_e^*, B_d^*, C_d^*, \dots, \Delta\theta^*) + (\bar{L}_e - L_e^*) \frac{\partial z}{\partial L_e} + \dots + (\bar{\Delta\theta} - \Delta\theta^*) \frac{\partial z}{\partial \Delta\theta} \quad (15)$$

$$\sigma_z^2 = (\sigma_{L_e} \frac{\partial z}{\partial L_e})^2 + (\sigma_{B_d} \frac{\partial z}{\partial B_d})^2 + (\sigma_{C_d} \frac{\partial z}{\partial C_d})^2 + \dots + (\sigma_{\Delta\theta} \frac{\partial z}{\partial \Delta\theta})^2 \quad (16)$$

$\bar{L}_e, \bar{B}_d, \bar{C}_d, \dots, \bar{\Delta\theta}$ 와 $L_e^*, B_d^*, C_d^*, \dots, \Delta\theta^*$ 은 각각의 평균값과 검사점의 값이다. $\sigma_{L_e}, \sigma_{B_d}, \sigma_{C_d}, \dots, \sigma_{\Delta\theta}$ 는 각각의 표준편차이다. 각각의 변수에 대한 표준편차는 각각의 변수의 평균과 "편차계수(cov)"의 곱이다.

N번째 검사점에서의 파손확률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_f = 1 - (1 - P_{f1})(1 - P_{f2})(1 - P_{f3}) \dots (1 - P_{fN}) \quad (17)$$

파손함수에서 변수(x)들의 기여정도(α_x^2)를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha_x^2 = \left(\frac{\partial z}{\partial x} \sigma_x \right)^2 / \sigma_z^2 \quad (18)$$

4. 사례연구

여러 가지 경계조건을 갖는 배관의 파손확률이 각각의 변수에 의해 어떤 영향을 받는지 알아보기 위해 Table. 1에 나온 변수와 그 값을 이용하였다⁽⁶⁾.

Table 1. Random variables and their parameters used in the example

Variable	Mean	cov
L_e	1000mm	0.10
B_d	760mm	0.10
C_d	1.32	0.20
C_i	0.12	0.15
E	201GPa	0.033
F	150kN	0.10
l_c	1.25	0.20
k	0.066	0.56
k_d	0.108	0.15
k_m	0.235	0.15
n	0.53	0.26
p	5.0MPa	0.10
r	225mm	0.04
σ_v	400MPa	0.05
t	7mm	0.06
γ	18.9×10^{-6} N/mm	0.10
α	11.7×10^{-2} /°C	0.10
χ	-1.0×10^{-4} rad/mm	0.10
μ	0.3	0.023
$\Delta\theta$	10.0°C	0.15

4. 결과 및 고찰

4.1 응력분포

Table 1의 변수값에 의해 산정한 부식배관에 발생하는 응력의 사용연수에 대한 변화 양상을 Fig. 1~2에 나타내었다. Fig. 1은 부식이 일어나면서 배관에 발생하는 원주방향의 응력을 나타낸 것이다. 원주방향의 응력중에 내압에 의해 발생하는 응력이 가장 크며, 사용수명이 길어질수록 내압에 의해 발생하는 응력이 굽힘응력보다는 증가비율이 큰 것을 알수 있다.

Fig. 2는 부식이 일어나면서 배관에 발생하는 축방향의 응력을 나타낸 것이다. 축방향으로 발생하는 응력은 사용수명이 길어져도 큰변화가 없음을 알수있으며 원주방향의 응력보다는 작다는 것을 알수 있다.

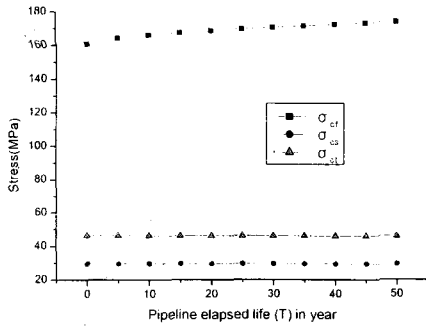


Fig. 1 Pipe circumferential stresses due to pipeline corrosion

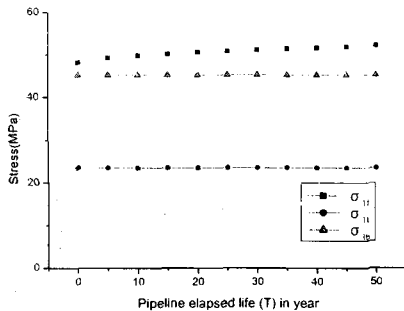


Fig. 2 Pipe longitudinal stresses due to pipeline corrosion

4.2 파손확률

변수값에 의해 산정한 부식배관의 파손확률의 사용연수에 대한 변화 양상을 Fig. 3에 나타내었다. 파손확률이 사용연수가 30년까지는 큰변화가 없다가 그 이후부터는 파손확률이 크게 증가하는 것을 볼 수 있다.

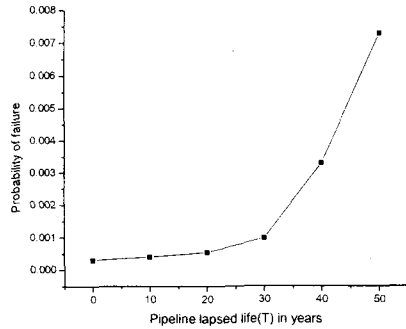


Fig. 3 Failure probability of buried pipeline

Table 2. Results of relative contribution (α^2) and reliability calculations as a function of elapsed pipeline life T

Variable	Contribution α^2 (%)	
	20 years	50 years
L_c	4.71	0.06
B_d	4.19	0.09
C_d	3.75	0.08
C_i	7.18	0.12
E	1.10	0.04
F	3.62	0.05
L_c	11.03	0.21
k	1.07	24.37
k_d	23.36	0.31
k_m	15.35	0.31
n	0.83	63.81
p	1.79	3.37
r	0.00	0.47
σ_y	17.16	2.16
t	3.28	4.49
γ	1.11	0.02
χ	0.23	0.02
μ	0.03	0.01
$\Delta \theta$	0.14	0.01
α	0.07	0.01

Table 2는 각 변수들의 파손확률에 대한 기여 정도를 나타낸 것이다. 사용수명이 길어질수록 부식에 관련된 변수가 파손함수에 많은 영향을 주는 것을 알수 있다.

Fig. 4~9는 충격계수(I_c), 부식증가계수(k), 휨계수(k_d), 굽힘 모멘트계수(k_m), 부식지수계수(n), 항복응력(σ_y)가 편차계수(COV)의 변화에 따른 파손확률을 나타낸 것으로 Fig. 4에서는 사용년수가 30년 이하인 경우 편차계수가 증가할수록 파손확률에 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. Fig. 5에서는 충격계수와는 반대로 사용년수가 40년 이상인 경우 편차계수가 증가할수록 파손확률에 크게 증가하는 것을 볼 수 있다.

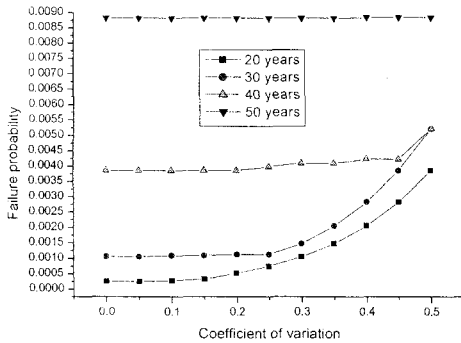


Fig. 4 Failure Probability vs coefficient of variation of impact factor(I_c) for various values of pipeline elapsed life

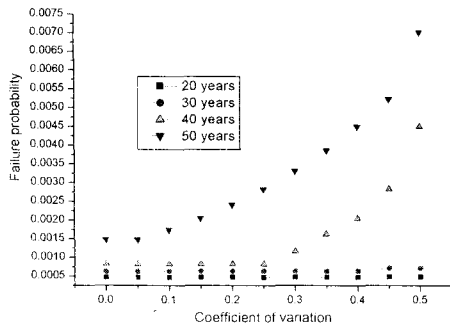


Fig. 5 Failure Probability vs coefficient of variation of corrosion multiplying constant(k) for various values of pipeline elapsed life

Fig. 6에서는 파손확률이 편차계수가 0~0.3사이에서는 사용년수에 따라 차이가 나지만 0.3이상에서는 사용년수에 상관없이 같음을 알 수 있다. Fig. 7에서는 사용년수에 따른 파손확률이 편차계수가 증가할수록 파손확률은 증가하지만 편차계수가 0.5부터는 사용년수에 관계없이 파손확률이 비슷해짐을 알 수 있다.

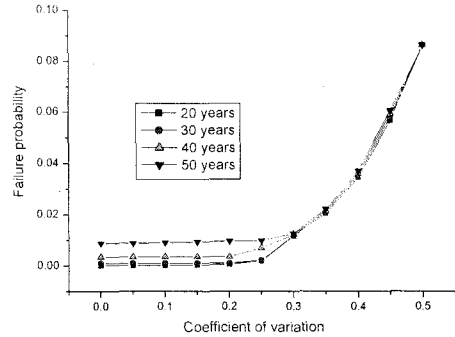


Fig. 6 Failure Probability vs coefficient of variation of deflection coefficient(k_d) for various values of pipeline elapsed life

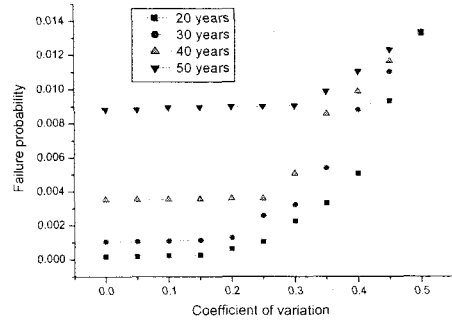


Fig. 7 Failure Probability vs coefficient of variation of bending moment coefficient(k_m) for various values of pipeline elapsed life

Fig. 8에서는 사용년수에 따른 파손확률이 편차계수가 0~0.2사이에서는 차이가 없지만 편차계수가 0.2이상 일때는 사용년수에 따라 파손확률의 증가비율이 다르다는 것을 볼 수 있다. Fig. 9에서는 사용년수에 상관없이 파손확률이 비슷함을 알 수 있다.

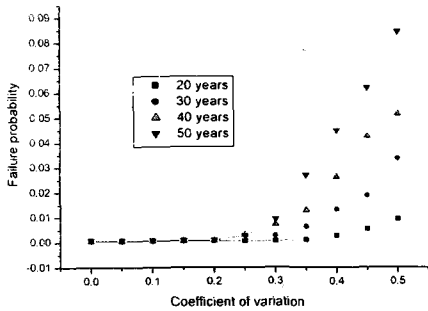


Fig. 8 Failure Probability vs coefficient of variation of corrosion exponential constant(n) for various values of pipeline elapsed life

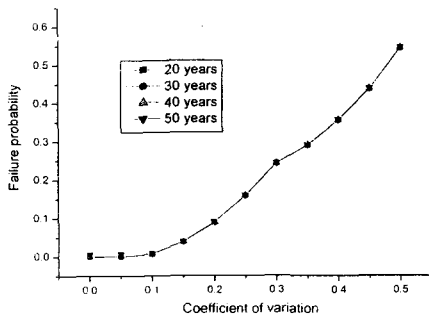


Fig. 9 Failure Probability vs coefficient of variation of material yield stress(σ_y) for various values of pipeline elapsed life

5. 결론

본 연구에서는 매설배관의 여러 가지 경계조건이 파손확률에 미치는 영향에 대하여 체계적으로 규명하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 여러 가지 작용하중에 의해 발생하는 응력중에 내압에 의해 발생하는 응력이 가장 크며 토질에 의한 경계조건이 파손확률에 미치는 영향도 무시할수 없다는 사실을 밝혔다.

(2)차량하중에 의한 축방향 굽힘이 축방향 응력에 미치는 영향이 매우 크다는 사실도 규명하였다.

(3) 배관의 사용초기에는 충격계수, 힘계수, 굽힘모멘트계수, 항복응력 등이 파손함수에 많은 영향을 미치지만 사용수명이 길어질수록 부식에 관련된 변수들이 파손함수에 큰 영향을 준다는 사실을 규명하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단산하 성균관대학교 산업설비안전성연구센터(SAFE)의 연구지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

- (1) S.H. Kim, J.W. Kim, K.J. Kim, "Three-Dimensional Dynamic Analysis of Underground Openings Subjected to Explosive Loadings", Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea, Vol. 10, No.2, pp. 171~178, 1997.
- (2) S.C. Choi, "Coating Flaw Prevention of Underground Buried Pipeline", Gas Safety Journal, Vol. 26, No. 5, pp. 25~33, 2000.
- (3) 이억섭, 황인현, "파이프라인의 건전성 평가", 한국산업안전학회 2000년도 춘계학술논문발표회 논문집, pp. 25-30 (ERC), 2000.
- (4) 이억섭, 황인현, "축직각 표면타원균열이 존재하는 매설배관의 축방향응력에 대한 건전성평가", 한국정밀공학회 2000년도 추계학술대회 논문집, pp. 417-420 (ERC), 2000.
- (5) M. Ahammed, 1998, "Probabilistic Estimation of Remaining Life of a Pipeline in the presence of active corrosion defects", International Journal of Pressure Vessels and Piping 75, pp. 321-329
- (6) M. Ahammed, R. E. Melchers, "Probabilistic Analysis of Underground Pipelines Subject to Combined Stresses and Corrosion", Engineering Structures, Vol. 19, No. 12, pp. 988-994, 1997.
- (7) M. G. Spangler, R. L. Handy, "Soil Engineering", 4th edn, Harper and Row, New York, 1982.
- (8) V. Kucera, E. Mattsson, "Atmospheric Corrosion", in Corrosion Mechanics, F. Mansfeld, Marcel Dekker, New York, 1987.