

# 부식 배관의 경계조건이 파손확률에 미치는 영향

이역섭(인하대 기계공학부), 편장식\*(인하대 대학원 기계학과)

## Effect of Boundary Conditions on Failure Probability of Corrosion Pipeline

O. S. Lee(School of Mech. Eng., InHa Univ.), J. S. Pyun(Graduate School, InHa Univ.)

### ABSTRACT

This paper presents the effect of internal corrosion, external corrosion, material properties, operation condition, earthquake, traffic load and design thickness in pipeline on the failure prediction using a failure probability model. A nonlinear corrosion is used to represent the loss of pipe wall thickness with time. The effects of environmental, operational, and design random variables such as a pipe diameter, earthquake, fluid pressure, a corrosion rate, a material yield stress and a pipe thickness on the failure probability are systematically investigated using a failure probability model for the corrosion pipeline.

**Key Words :** Failure Probability (파손확률), Buried Pipeline (매설배관), Corrosion(부식), Boundary Condition(경계조건)

### 1. 서론

기계기술의 지속적인 발달과 신기술의 개발로 인해 산업전반의 기반기술인 기계 장치산업은 점점 복잡해지고 또한 다양화되면서 장치시설을 건전하고 신뢰성있게 유지하고 관리하는 문제가 매우 중요한 문제로 대두되고 있다. 실제로 가스 배관의 경우 지하매설 배관의 파손으로 인하여 가스가 누출하였을 경우 물질적인 피해뿐만이 아니라 소중한 인명을 앗아가는 대형 재난으로 발전할 수 있게 되므로 신뢰성있게 안전성을 유지하는 방법론이 개발되어야 하겠다<sup>(1,4)</sup>.

부식에 의해 손상된 배관의 파손강도 및 수명을 예측할 수 있는 기술은 배관의 설계시 부식여유를 결정할 때 필수적으로 필요한 설계정보이며 특히, 경년 노후된 배관의 안전수명 점검 시에 응용될 수 있는 매우 중요한 기술정보이다. 따라서 배관의 환경적인 조건에 따라 손상 및 파손에 대한 연구가 절실하게 요구되고 있다.

이러한 여러 외부 요소들은 파손해석에 불확실성을 발생시키므로 이런 경우의 파손해석은 결정론적 보다는 확률론적으로 고찰되어야 한다.

본 연구에서는 토질, 지진, 내압, 온도, 차량하중, 내부부식, 외부부식등 매설배관의 응력에 영향

을 미치는 여러 가지 경계조건들이 매설배관의 파손확률에 미치는 영향을 체계적으로 규명하였다.

### 2. 배관 응력에 영향을 미치는 경계조건

#### 2.1 축방향 응력

##### 2.1.1 토질온도의 변화

축방향으로의 변형률  $\epsilon_u = \alpha \Delta T$ 인 사실을 기억하고 Hooke의 법칙을 적용하면 구속을 받는 배관의 온도가 변화할 때 발생하는 축방향 응력은

$$\sigma_u = E\alpha \Delta T \quad (1)$$

여기서

$\sigma_u$  : 축방향 구속을 받는 매설배관에 온도가 변화할 때 발생하는 축방향 열응력

$E$  : 배관재료의 탄성계수

$\alpha$  : 열팽창계수

$\Delta T$  : 온도변화

##### 2.1.2 내압의 영향

내압  $p$ 에 의해서 축방향으로 구속된 배관에 유기는 축방향응력,  $\sigma_y$ ,는 내압에 의한 축방향응력과 구속에 의한 팽창 혹은 수축 때문에 발생하는 프라운호프의 효과를 고려한 응력을 중첩하면

$$\sigma_y = \mp \frac{pr}{2t} \quad (2)$$

여기서,  $\sigma_y$  : 축방향 구속을 받는 배관의 내압에 의한 축방향 인장응력

- $\nu$  : 프아송의 비
- $p$  : 내압
- $r$  : 배관의 내경
- $t$  : 배관의 두께

### 2.1.3 지진하중의 영향

지진에 의해 발생한 탄성파가 배관에 미치는 영향은 매설배관과 토질사이에 미끄럼이 없다는 가정 하에서 배관에 발생하는 축방향 변형률,  $\epsilon_a$ , 을 다음과 같이 산정할 수 있다<sup>(3)</sup>.

$$\epsilon_a = \pm \frac{v}{V_a} \quad (3)$$

여기서

- $\epsilon_a$  : 축방향 최대 변형률
- $v$  : 입자속도
- $V_a$  : 탄성파의 속도

따라서 축방향 최대 응력,  $\sigma_b$ , 는 다음과 같다.

$$\sigma_b = E_p \epsilon_a \quad (4)$$

최대 축방향응력( $\sigma_l$ )은 축방향으로 발생하는 응력의 합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_l = \sigma_H + \sigma_y + \sigma_b \quad (5)$$

## 2.2 원주방향 응력

### 2.2.1 내압의 영향

내압  $p$ 가 작용하는 배관에서 내압에 의해 원주방향으로 발생하는 응력은 배관의 지름 방향으로 일정하게 발생한다. 내압이 작용할때의 원주방향응력은<sup>(5)</sup>

$$\sigma_{cf} = \frac{pr}{t} \quad (6)$$

여기서

$\sigma_{cf}$  : 원주방향 구속을 받는 배관의 내압에 의한 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<sup>(5)</sup>

$$\sigma_{cs} = \frac{6k_m C_d \gamma B_a^2 E t r}{E t^3 + 2A k_d p r^3} \quad (7)$$

여기서

- $C_d$  : 토질압력계수

$\gamma$  : 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 받게 된다. 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<sup>(5)</sup>

$$\sigma_{ca} = \frac{6k_m I_c C_t F E t r}{L_e (E t^3 + 2A k_d p r^3)} \quad (8)$$

여기서  $I_c$  : 충격계수

$C_t$  : 표면하중계수

$F$  : 차량하중

$L_e$  : 배관의 길이

최대 원주방향응력( $\sigma_c$ )은 원주방향으로 발생하는 응력의 합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_c = \sigma_{cf} + \sigma_{cs} + \sigma_{ca} \quad (9)$$

### 2.3 부식의 영향

지하 매설배관의 부식 등의 결함발생은 그 재료의 강도 등을 현저히 저하시키고 결함부분에 응력이 집중되며 결함이 성장하여 임계크기에 도달하면 파괴에 이르게 되는 것이다. 따라서 부식 등의 결함의 형태 및 위치에 따른 응력상태나 파손수명 등을 예측하여 위험한 파손사고들을 예방할 수 있는 기준이 필요하게 되었다. 공학적으로 많이 사용하고 있는 부식된 배관의 두께 감소량은  $P$ 는

$$P = kT \quad (10)$$

여기서  $P$  : 배관의 두께 감소량

$k$  : 부식률

$T$  : 배관의 사용년도

부식이 매설배관의 전체에 영향을 미친다고 고려하여 배관의 두께를 다음과 같이 산정할 수 있으며 이 두께에 대한 강도계산을 수행하여야 한다.

$$t' = t - kT \quad (11)$$

여기서  $t'$  : 부식된 배관의 두께

$t$  : 부식되기 전의 배관의 두께

### 3. 파손확률이론

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

$$\sigma_c^2 - \sigma_c \sigma_l + \sigma_l^2 \gg \sigma_y^2 \quad (12)$$

여기서,  $\sigma_c, \sigma_l$ : 원주방향, 축방향 응력

$\sigma_y$ : 항복응력

범함수  $z$ 를 항복응력과 주응력의 함수로 다음과 같이 놓으면

$$z = \sigma_y^{-1} (\sigma_c^2 - \sigma_c \sigma_l + \sigma_l^2) \quad (13)$$

파손확률  $P_f$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_f = \int_{-\infty}^{-\beta} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du \quad (14)$$

여기서,

$\beta$ 는 신뢰도 지수이며  $z$ 의 평균값( $u_z$ )와  $z$ 의 표준편차  $\sigma_z$ 로 나타낼 수 있다.

$$\beta = \frac{u_z}{\sigma_z} \quad (15)$$

여기서,

$$u_z = z(L_e^*, B_d^*, \dots, \Delta\theta^*) + (\bar{L}_e - L_e^*) \frac{\partial z}{\partial L_e} + \dots + (\bar{\Delta\theta} - \Delta\theta^*) \frac{\partial z}{\partial \Delta\theta} \quad (16)$$

$$\sigma_z^2 = (\sigma_{L_e} \frac{\partial z}{\partial L_e})^2 + \dots + (\sigma_{\Delta\theta} \frac{\partial z}{\partial \Delta\theta})^2 \quad (17)$$

$\bar{L}_e, \bar{B}_d, \bar{c}_d, \dots, \bar{\Delta\theta}$ 과  $L_e^*, B_d^*, c_d^*, \dots, \Delta\theta^*$ 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.

### 4. 부식배관의 사례연구

여러 가지 경계조건을 갖는 배관의 파손확률이 각각의 변수에 의해 어떤 영향을 받는지 알아보기 위해 Table. 1에 나온 변수와 그 값을 이용하였다<sup>(2)</sup>.

본 연구에서는 부식배관은 내압, 토질하중, 지진, 차량하중 외에는 다른 작용력이 없다고 가정하였다.

### 5. 결과 및 고찰

Table. 1의 모든 변수값에 의해 산정한 부식배관의 파손확률의 사용 년수에 대한 변화 양상을 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에서 보면 부식이 된 후 약 20년후부터는 파손확률이 조금씩 증가를 하다가 30년 후부터는 파손확률이 크게 증가함을 알 수 있다.

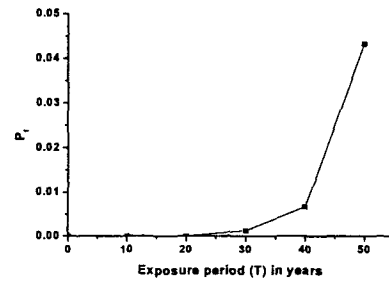


Fig 1. A relationship between failure probability( $P_f$ ) and exposure period(T)

Fig. 2는 부식률에 따른 파손확률을 나타낸 것으로 사용년수가 30년까지는 파손확률에 변화가 없으며 30년후 부터는 부식률이 클수록 파손확률은 크게 증가한다.

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

Variable		Mean	Coefficient of Variation	Variable		Mean	Coefficient of Variation
Symbol	Description			Symbol	Description		
E	modulus of elasticity	201MPa	0.033	$C_d$	calculation coefficient	1.32	0.2
$\alpha$	thermal expansion coefficient	$10.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	0.1	$B_d$	width of ditch	760mm	0.1
$\Delta T$	temperature differential	10 $^\circ\text{C}$	0.15	$k_d$	deflection coefficient	0.108	0.15
p	internal fluid pressure	6MPa	0.1	$I_c$	impact factor	1.25	0.2
r	pipe radius	250mm	0.04	$C_s$	surface load coefficient	0.12	0.15
t	pipe wall thickness	7mm	0.06	F	wheel load of traffic	150kN	0.1
$\gamma$	unit weight of soil cover	$18.9 \times 10^{-3} \text{N/mm}$	0.1	$L_e$	pipe effective length	1000mm	0.1
v	particle velocity	3.425m/s	0.1	k	multiplying constant	0.02	0.56
$V_s$	wave velocity w.r.t.	762m/s	0.1	$\sigma_y$	material yield stress	400MPa	0.05
$k_b$	bending moment coefficient	0.235	0.15				

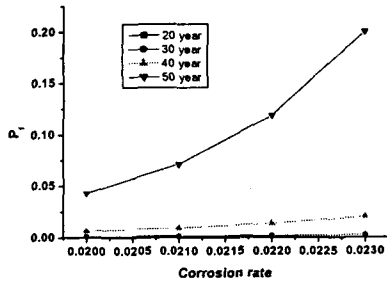


Fig 2. Relationships between failure probability ( $P_f$ ) and corrosion rate ( $R_d$ ) for varying exposure periods ( $T$ )

Fig. 3은 매설배관과 토질사이에 미끄럼이 없다고 가정할 때 지진에 의해 발생한 탄성파가 배관의 파손확률에 미치는 영향을 나타낸 것으로 배관 주위의 입자속도가 30m/s 이상일 때 파손확률이 크게 증가하는 것을 볼 수 있다.

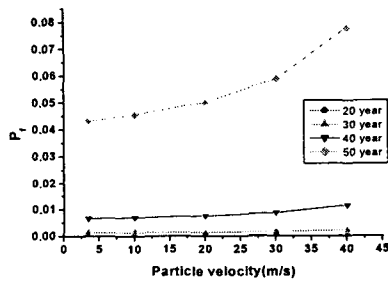


Fig 3. Relationships between failure probability ( $P_f$ ) and particle velocity ( $v$ ) for varying exposure periods ( $T$ )

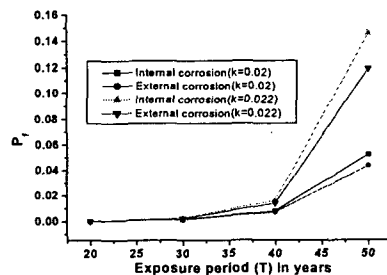


Fig 4. Relationships between internal corrosion and external corrosion for varying exposure periods ( $T$ )

Fig. 4는 외부부식과 내부부식의 관계를 나타낸 것으로 같은 부식률하에서는 내부부식에 의한 영향이 크다는 것을 볼 수 있었으며, 사용기간 40년까지는 같은 부식률 하에서 외부부식과 내부부식이 파손확률에 미치는 영향에는 별 차이가 없다는 것을 알 수 있다.

## 6. 결론

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

- 1) 동일한 부식률에서는 내부부식이 외부부식보다는 파손확률에 미치는 영향이 더 크다.
- 2) 지진의 진원지와 일정거리 이내에서는 배관의 파손확률이 크게 증가하는 것을 볼 수 있으며 진원지와 배관사이의 토질의 탄성계수가 클수록 배관의 파손확률에 큰 영향을 미친다.

## 후기

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

## 참고문헌

1. O. S. Lee, H. J. Kim, "Effect of External Corrosion in Pipeline on Failure Prediction", Proceeding of Korean Society of Mechanical Engineering, Vol. 23, No. 11, pp. 2096-2101, 1999.
2. 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.
3. Y. Chen, "Simplified and Refined Earthquake Analyses for Buried Pipes", Mathl. Comput. Modelling, Vol 21, No. 11, pp47-60, 1995.
4. O. S. Lee, H. J. Kim, "Effect of External Corrosion in Pipeline on Failure Prediction.", Proceeding of Korean Society of Mechanical Engineering, Vol. 23, No. 11, pp. 2096-2101, 1999.
5. M. G. Spangler, R. L. Handy, "Soil Engineering", 4th edn, Harper and Row, New York, 1982.
6. M. Ahammed, "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, 1998.