

매설된 강 파일의 경계조건이 파손확률에 미치는 영향

이역섭[#], 편장식^{*}, 김의상^{*}

Effect of Boundary Conditions on Failure Probability of Buried Steel Pile

Ouk-Sub Lee[#], Jang-Sik Pyun^{*}, Eui-Sang Kim^{*}

ABSTRACT

A survey for finding corrosion examples was performed on the underground steel piles buried for 19years in the area of iron and steel making factory near Young-il bay. A failure probability model, which can be used to check the reliability of the corrosive mechanical element, based on Von-Mises failure criterion and the standard normal probability function is proposed. The effects of varying boundary conditions such as temperature change, soil-friction, internal pressure, earthquake, loading of soil, traffic loads and corrosion on failure probability of the buried steel piles 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.

Key Words : Failure probability (파손 확률), Buried steel piles (매설 강 파일), Corrosion (부식), Boundary condition (경계 조건)

1. 서론

기계기술의 지속적인 발달과 신기술의 개발로 인해 산업전반의 기반기술인 기계 장치산업은 점점 복잡해지고 또한 다양화되면서 장치시설을 건전하고 신뢰성 있게 유지하고 관리하는 문제가 매우 중요한 문제로 대두되고 있다. 그 가운데 특히 에너지의 원료인 가스나 오일을 수송하는 압력용기 시스템의 건전성 유지는 이것의 파손사고가 미치는 경제적, 사회적 손실이 지대하기 때문에 매우 중요

하게 인식되고 있다. 가스 및 오일을 운송하는 배관은 설치한지 오래되면 여러 가지 환경적 영향에 의해 부식과 같은 결함이 발생되고 이 결함이 성장하여 임계크기에 도달하여 대형 재난사고로 발전한 경우가 자주 보고 되고 있다.^{1,2}

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 응용 될 수 있는 매우 중요한 기술정보이다. 따라서 배관의

^{1*} 2002년 11월 22일 접수
[#] 교신저자, 인하대학교 기계공학과
Email leeos@inha.ac.kr Tel. (032) 860-7315
^{*} 인하대학교 대학원 기계공학과

환경적인 조건에 따라 손상 및 파손에 대한 연구가 절실하게 요구되고 있다. 배관에서의 부식발생은 그 재료의 강도 등을 현저히 저하시켜서 전체시스템의 건전성을 저하시킨다. 따라서 경년에 대응하는 부식의 형태 및 위치에 따른 응력상태의 변화와 파손수명의 감소 등을 예측하여 위험한 파손사고들을 예방할 수 있는 기준에 대한 연구의 필요성이 대두 되었다.^{3,4}

이와 같이 배관에는 부식등과 같은 여러 가지 형태의 결함이 존재한다. 부식된 배관의 경계조건^{5,6,7}은 배관시스템의 건전성에 큰 영향을 미치게 되며, 이들의 영향을 구체적으로 규명하는 연구가 필요하다. 예를 들면 외부에서의 충격하중이 부식된 배관에 작용하는 경우 원래 의도한 설계하중보다 높은 응력이 발생할 가능성이 있게 된다. 이러한 여러 외부 요소들은 파손해석에 불확실성을 발생시키므로 이런 경우의 파손해석은 결정론적 보다는 확률론적으로 고찰되어야 한다고 사료된다.^{8,9}

본 연구에서는 국내에 매설된 강 파일에 관련된 부식 데이터를 사용하여 Von-Mises 파손 평가 기준에 기초하여 여러 가지 경계조건들이 강 파일의 파손확률에 미치는 영향을 규명 하였다.

2. 매설배관의 경계조건

2.1 부식

지하 매설배관의 부식 등의 결함발생은 그 재료의 강도 등을 현저히 저하시키고 결함부분에 응력이 집중되며 결함이 성장하여 임계크기에 도달하면 파괴에 이르게 되어 많은 경제적 손실을 가져오게 된다. 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 ¹⁰

$$P = kT \quad (1)$$

여기서 P : 배관의 두께 감소량

k : 부식률

T : 배관의 사용년도

부식이 매설배관의 전체에 영향을 미친다고 고

려하면 배관의 두께를 다음과 같이 산정할 수 있으며 이 두께에 대한 강도계산을 수행하여야 한다.

$$t' = t - kT \quad (2)$$

여기서 t' : 부식된 배관의 두께

t : 부식되기 전의 배관의 두께

2.2 부식속도

대부분의 부식속도는 실험실에서 전기화학적으로 측정되어 전류밀도의 형태로 보고 되는 반면에, 부식관련 서적이나 핸드북에서는 단위시간당 두께 감소 혹은 무게감량의 단위로 표현되어 있어서 정확한 단위 환산이 필요한 경우가 많다. 특히 공학 전반에 걸쳐서 SI 단위의 사용이 보편화되어 가고 있으므로 아직도 영미단위계를 많이 사용하고 있는 부식분야에서도 변화가 요망된다.

부식속도는 두께 감소 단위와 무게감량 단위 사이의 관계를 설명한다. 핸드북 등에서 가장 광범위하게 사용되고 있는 부식속도의 단위는 mpy(mils penetration per year)로 일년 동안의 두께감소를 milli-inch 단위로 표시한 것이다. 이러한 단위 사이의 관계는 다음과 같다.

$$1\text{mpy} = 0.0254\text{mm/yr} = 25.4 \mu\text{m/yr} = 2.90 \text{ nm/hour} \\ = 0.805 \text{ pm/sec}$$

두께감소 단위와 무게감량 단위 사이에는 다음과 같은 일반식을 이용한다.

$$k = \frac{534W}{DAT} (\text{mpy}) \quad (3)$$

여기서 W : 무게손실(mg)

D : 밀도(g/cm^3)

A : 부식면적(in^2)

T : 시간(hour)

위 식을 SI단위계로 바꾸면 다음과 같다.

$$k = \frac{87.6W}{DAT} (\text{mm/year}) \quad (4)$$

여기서 W : 무게손실(mg)
 D : 밀도(g/cm³)
 A : 부식면적(cm²)
 T : 시간(hour)

2.3 여러 가지 경계조건에 의해 발생하는 응력

2.3.1 축방향 응력

1) 토질온도의 변화

축방향으로의 변형률 $\epsilon_{tt} = \alpha \Delta T$ 인 사실을 기억하고 Hooke의 법칙을 적용하면 구속을 받는 배관의 온도가 변화할 때 발생하는 축방향 응력은^{11,15}

$$\sigma_{tt} = E\alpha \Delta T \quad (5)$$

여기서 σ_{tt} : 축방향 구속을 받는 매설 배관에 온도가 변화할 때 발생하는 축방향 열응력

E : 배관재료의 탄성계수

α : 열팽창계수

ΔT : 온도변화

2) 내압의 영향

내압 p에 의해서 축방향으로 구속된 배관에 유기되는 축방향응력, σ_{tt} 는 내압에 의한 축방향응력과 구속에 의한 팽창 혹은 수축 때문에 발생하는 푸아송의 효과를 고려한 응력을 중첩하면^{11,15}

$$\sigma_{tt} = \frac{pr}{2t} \quad (6)$$

여기서 σ_{tt} : 축방향 구속을 받는 배관의 내압에 의한 축방향 인장응력

p : 내압

r : 배관의 내경

t : 배관의 두께

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

3) 토질 마찰의 영향

매설배관과 토양의 마찰이 매설배관에 발생시키는 구속 때문에 야기되는 축방향 응력, σ_{tt} 는 다음과 같다.^{11,15}

$$\sigma_{tt} = \frac{LH_s\gamma\mu}{2t} \quad (7)$$

여기서 σ_{tt} : 토질 마찰 때문에 매설배관에 발생하는 축방향 응력

L : 배관의 길이

H_s : 배관위의 토질 커버의 높이

γ : 토질 커버의 단위 무게

μ : 배관과 토질 사이의 마찰계수

4) 지진하중의 영향

매설배관과 토질사이에 미끄럼이 없다는 가정 하에서 축방향 변형률, ϵ_a 을 다음과 같이 산정할 수 있다.^{11,15}

$$\epsilon_a = \pm \frac{v}{V_a} \quad (8)$$

여기서 ϵ_a : 축방향 최대 변형률

v : 입자속도

V_a : 탄성파의 속도

따라서 축방향 최대 응력, σ_{ts} 는 다음과 같다.

$$\sigma_{ts} = E_p \epsilon_a \quad (9)$$

최대 축방향응력(σ_t)은 축방향으로 발생하는 응력의 합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_t = \sigma_{tt} + \sigma_{tt} + \sigma_{tt} + \sigma_{ts} \quad (10)$$

2.3.2 원주방향 응력

1) 내압의 영향

내압 p 가 작용하는 배관에서 내압에 의해 원주 방향으로 발생하는 응력은 배관의 지름 방향으로 일정하게 발생한다. 내압이 작용할 때의 원주방향 응력은^{11,15}

$$\sigma_{cf} = \frac{pr}{t} \quad (11)$$

여기서 σ_{cf} : 원주방향 구속을 받는 배관의 내압에 의한 원주방향 인장응력

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^{11,15}

$$\sigma_{cs} = \frac{6k_m C_d \gamma B_d^2 Etr}{Et^3 + 24k_d pr^3} \quad (12)$$

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.

3) 차량하중의 영향

지하에 매설되어 있는 배관은 지표면의 차량에 의한 동적 하중의 영향을 받게 된다. 배관이 고속도로나 철도, 혹은 비행장을 횡단하는 경우 큰 차량의 하중이 배관에 미치는 영향은 원주방향과 축방향으로 발생하는 응력이 다르며, 일반적으로 원주방향 응력이 발생할 때 배관에 미치는 영향이 큰 것으로 알려져 있다. 차량하중에 의해 원주방향으로 발생하는 응력은^{11,15}

$$\sigma_{ct} = \frac{6k_m I_c C_f F Etr}{L_e (Et^3 + 24k_d pr^3)} \quad (13)$$

여기서 I_c : 충격계수
 C_f : 표면하중계수
 F : 차량하중
 L_e : 배관의 길이

최대 원주방향응력(σ_c)은 원주방향으로 발생하는 응력의 합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_c = \sigma_{cf} + \sigma_{cs} + \sigma_{ct} \quad (14)$$

3. 파손 확률 이론

3.1 FORM (first - order reliability method)

본 연구에서는 모든 변수들을 정규분포라 가정하고 확률분포가 평균과 표준편차의해서 결정되는 것을 가정하였다.

FORM(first-order reliability method)은 한계상태 방정식(limit state function, LSF)의 Taylor 급수 전개식의 1차 항만 사용하여 파손확률을 구하는 방법으로 모든 확률변수들의 평균과 분산 및 분포형태를 이용하여 파손확률에 대한 상대적인 지표인 신뢰도 지수(reliability index)를 산정하는 방법이다^{12,13}.

파손확률 해석을 수행할 경우에는 먼저 파손확률수에 대한 정의를 내릴 필요가 있다. 이 함수는 파손에 대한 기준으로 표현할 수 있고, 한계상태방정식(LSF)을 갖는 식으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z = R - L \quad (15)$$

여기서 R 은 저항성분의 확률변수이고, L 은 하중성분의 확률변수이다. 두 확률변수 R 과 L 이 각각 서로 독립적인 정규분포 확률변수라면, 한계상태방정식(LSF)에 의한 새로운 확률변수 Z 의 평균과 분산은 다음과 같다.

$$\mu_Z = \mu_R - \mu_L \quad (16)$$

$$\sigma_Z^2 = \sigma_R^2 + \sigma_L^2 \quad (17)$$

여기서 μ_Z, μ_R, μ_L 는 확률변수 Z, R, L의 평균이고, $\sigma_Z^2, \sigma_R^2, \sigma_L^2$ 은 확률변수 Z, R, L의 분산이다.

위의 확률변수들이 정규분포이므로 파손확률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_f = \text{Prob}[Z < 0] = \int_{-\infty}^0 \frac{1}{\sigma_Z \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{Z - \mu_Z}{\sigma_Z}\right)^2\right\} dZ \quad (18)$$

여기서 새로운 확률변수 U를 $U = (Z - \mu_Z)/\sigma_Z$ 와 같이 정의하면, 식(18)의 파손확률은 다음과 같다.

$$P_f = \int_{-\infty}^{-\beta} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{u^2}{2}\right\} du = \text{Prob}[Z < 0] = \Phi(-\beta)$$

이때 파손확률 P_f 와 표준정규분포함수인 Φ 사에 식 (18)의 관계가 성립하도록 하는 β 를 신뢰도지수(reliability index)라고 하며 다음과 같이 나타낸다.

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{\mu_R - \mu_L}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_L^2}} \quad (19)$$

3.2 Von-Mises 파손 평가 기준

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

$$\sigma_c^2 - \sigma_c \sigma_l + \sigma_l^2 \gg \sigma_y^2 \quad (20)$$

범함수 Z를 항복응력과 주응력의 함수로 다음과 같이 놓으면

$$Z = \sigma_y^2 - (\sigma_c^2 - \sigma_c \sigma_l + \sigma_l^2) \quad (21)$$

파손확률 PF는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_f = P[Z < 0] = \Phi(-\beta) \quad (22)$$

여기서 β 는 신뢰도 지수이며 Z의 평균값(u_z)와 Z의 표준편차 σ_z 로 나타낼 수 있다.

$$\beta = \frac{u_z}{\sigma_z} \quad (23)$$

$$\text{여기서 } u_z = z(L_e^*, B_d^*, c_d^*, \dots, \Delta \theta^*) + (\bar{L}_e - L_e^*) \frac{\partial z}{\partial L_e} + \dots + (\bar{\Delta \theta} - \Delta \theta^*) \frac{\partial z}{\partial \Delta \theta} \quad (24)$$

$$\sigma_z^2 = (\sigma_{L_e} \frac{\partial z}{\partial L_e})^2 + (\sigma_{B_d} \frac{\partial z}{\partial B_d})^2 + \dots + (\sigma_{\Delta \theta} \frac{\partial z}{\partial \Delta \theta})^2 \quad (25)$$

$\bar{L}_e, \bar{B}_d, \bar{c}_d, \dots, \bar{\Delta \theta}$ 과 $L_e^*, B_d^*, c_d^*, \dots, \Delta \theta^*$ 은 각각의 평균값과 검사 점의 값이다.[16]

$\sigma_{L_e}, \sigma_{B_d}, \sigma_{c_d}, \dots, \sigma_{\Delta \theta}$ 는 각각의 표준편차이다. C.O.V는 다음과 같다.

$$C.O.V = \frac{\sigma_X}{\mu_X} \quad (26)$$

여기서 σ_X : 표준편차
 μ_X : 평균값

4. 부식배관의 사례연구

미국의 NBS(National Bureau Of Standards)에서는 1922년부터 약 23년에 걸쳐 128개소의 토양에 330종의 합금과 방식피복시편을 매설하여 부식시험을 수행하여 이결과가 현재까지 금속재료의 부식에 관한 기본 자료로 활용되고 있다. 그러나 국내에서는 장기간 매설된 철강재 또는 금속재료의 부식에 관한 자료가 거의 없는 실정이다. 국내의 배관 부식 데이터를 찾기 위해 논문자료를 조사하던 중 영일만 매립지역에 장기 매설된 강 파일(piles)의 부식 데이터를 얻을 수 있었다. 이 강파일은 국내

동해안의 영일만 매립지역에 건설된 포항제철의 일부설비를 철거, 교체하는 과정에서 19년간 매설되어 있던 강파일(piles)을 축출할 때 측정된 데이터이다. 이 데이터와 2,3장의 이론을 근거로 이 강파일(piles)에 대한 파손확률을 도출해 보았다. 지하에 매설된 강파일은 깊이 28m정도까지 매설되어 있었으며 외경은 406.4mm, 두께 7.9mm의파이프 형태이다. 파일의 재질은 일반구조용 탄소강관 STK 41(JIS규격)에 해당되며 기계적 성질은 Table 1에 나타내었다.¹⁴

Table 1 Mechanical properties of studied steel piles

	Tensile strength (Mpa)	Yield strength (Mpa)	Elongation (%)
k-pile	451.7	364.3	32.2

부식두께는 2m씩 적당한 크기로 절단하여 측정하였으며 그 결과는 값을 Table 2에서 나타내었다.

Table 2 Result of thickness measurement of pile

Depth (m)	Thickness(mm)				Average corrosion thickness (mm)
	1	2	3	Average	
0	7.485	7.667	7.604	7.585	0.315
2	7.802	7.703	7.747	7.751	0.149
4	7.815	7.751	7.742	7.769	0.131
6	7.605	7.636	7.697	7.646	0.254
8	7.620	7.673	7.658	7.650	0.250
10	7.647	7.820	7.675	7.714	0.186
12	7.740	7.665	7.733	7.713	0.187
14	7.776	7.798	7.809	7.794	0.106
16	7.774	7.789	7.792	7.785	0.115
18	7.798	7.774	7.797	7.790	0.110
20	7.803	7.784	7.815	7.801	0.099
22	7.807	7.822	7.820	7.816	0.084
24	7.824	7.842	7.855	7.840	0.060
26	7.646	7.763	7.720	7.710	0.190
28	7.646	7.555	7.842	7.681	0.219

부식진행률(Corrosion rate)은 일반적으로 Weibull 분포를 하는 것으로 알려져 있으며 Fig. 1에서 보는 것과 같이 Table 2의 부식 데이터도 Weibull 분포에

대응함을 알 수 있다.

Data Set

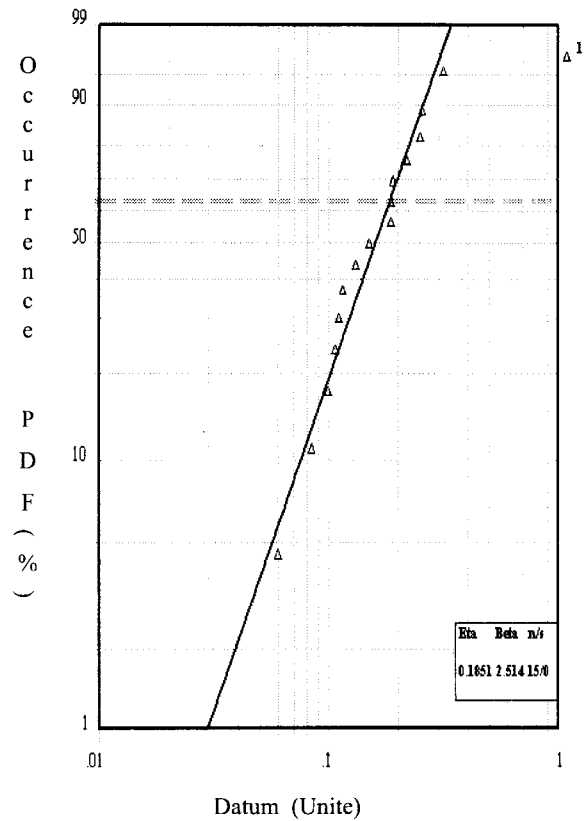


Fig. 1 Weibull distribution

이 경우, 누적 분포 함수(Cumulative Distribution Function)는 다음과 같다.

$$F(t) = 1 - \exp[-(t/\eta)^\beta] \quad (27)$$

여기서 $\eta=0.1851$, $\beta=2.514$ 이다. Table 2에 나와 있는 데이터 중 무작위로 4곳(0.315mm, 0.250mm, 0.115mm, 0.060mm)을 선택하여 여러 가지 경계조건을 갖는 파일의 파손확률에 미치는 각각의 변수의 영향을 규명하기 위해 Table 3에 나온 변수와 그 값을 이용 하였다. Table 3에 나타낸 C.O.V 는 정규 분포에 대한 값들인데 충분히 많은 비정규분포인 확률변수들의 선형함에 의해 정의되는 확률변수는

근사적으로 정규분포가 된다는 중심극한정리(Central Limit Theorem)에 의해 weibull 분포인 위의 데이터를 정규분포에 적용하여 분석하였다.

Table 3 The mean and C.O.V of random variables

Variable		Mean	Coefficient of variation (C.O.V)
Sym bol	Description		
E	Modules of elasticity	201Mpa	0.033
α	Thermal expansion coefficient	$11.7 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$	0.1
ΔT	Temperature differential	10 $^\circ\text{C}$	0.15
P	Internal fluid pressure	5Mpa	0.1
r	Pile radius	203.2mm	0.04
t	Pile wall thickness	7.9mm	2.318
L	Pile length	28m	0.1
H_s	Hight of soil cover above buried pile line	700mm	0.1
γ	Unit weight of soil cover	$18.9 \times 10^{-6} \text{N/mm}$	0.1
μ	Friction coefficient between buried pile and soil	0.3	0.1
v	Particle velocity	3.425m/s	0.1
V_a	Wave velocity	762m/s	0.1
k_m	Bending moment coefficient	0.235	0.15
C_d	Calculation coefficient	1.32	0.2
B_d	Width of ditch	760	0.1
k_d	Deflection coefficient	0.108	0.15
I_c	Impact factor	1.25	0.2
C_t	Surface load coefficient	0.12	0.15
F	Wheel load of traffic	150KN	0.1
σ_y	Material yield stress	364.3Mpa	0.05

5. 결과 및 고찰

사용년수에 대한 부식파일의 파손확률 변화 양상을 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서 보면 부식이 된 후 약5년 후부터는 파손확률이 조금씩 증가하다가 10년 후부터는 부식 깊이 0.250mm와 0.315mm가 파손확률이 비교적 크게 증가함을 알 수 있다.

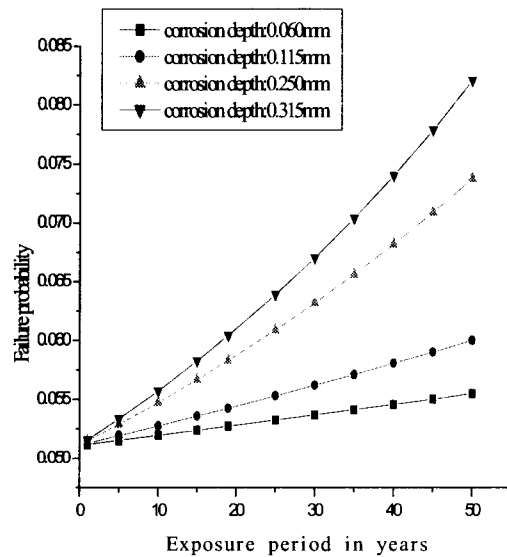


Fig. 2 A relationship between failure probability and exposure period

파일의 부식 깊이가 0.115mm까지는 파손확률에 영향을 주지 않다가 부식 깊이가 0.115mm이상으로 커지면 파손확률이 비교적 증가 하는 것을 알 수 있다. Fig. 3~6는 여러 가지 변수 값들의 변화에 따른 파손확률의 변화양상을 나타낸 것이다. Fig. 3에서는 파일의 두께가 파손확률에 미치는 영향을 나타내고 있다. 파일의 두께가 두꺼울수록 파손확률이 감소하는 사실을 알 수 있으며 사용년수가 길어지면 파손확률에 미치는 두께를 무조건 두껍게 할 수는 없으므로 파일의 두께와 파손확률 사이의 변화양상과 경계조건의 영향을 감안하여 적절한 두께를 선택해야 한다.

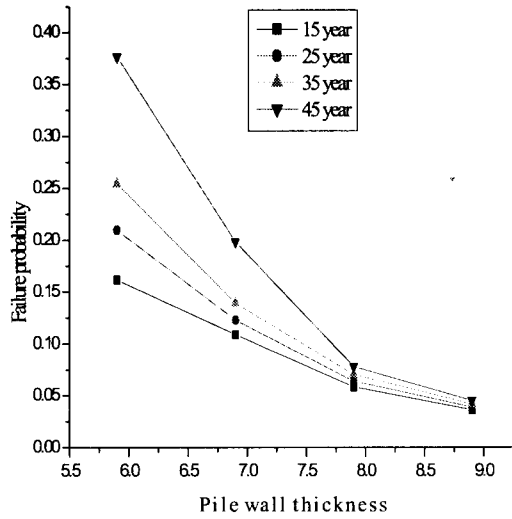


Fig. 3 Relationships between failure probability and pile wall thickness for varying exposure periods

Fig. 4는 두께가 같은 파일의 직경 크기에 따른 파손확률을 나타낸 것으로 직경의 크기에 상관없이 25년 정도 사용하여도 파손확률에는 큰 차이가 없는 것을 볼 수 있다. 직경이 초기 측정치 406.4mm 인 경우 사용년수에 상관없이 파손확률이 거의 증가 하지 않는다는 것을 알 수 있다. 직경이 500mm 이상인 경우는 사용년수가 25년 이상 되면 파손확률이 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. 파손확률은 사용년수에 따라 파일의 직경이 커지면 파손확률의 증가 비율도 커진다는 것을 알 수 있다. 파손확률을 낮추기 위해 파일의 직경을 무조건 작게 할 수는 없다. 직경이 작아지면 그만큼 유량이 작아지므로 파일의 사용 효율이 떨어지기 때문이다. 따라서 파일의 직경과 파손확률 사이의 변화 추이와 경계 조건의 영향을 감안하여 적절한 직경의 크기를 선택하도록 해야 한다.

Fig. 5는 파일의 항복응력에 따른 파손확률의 변화를 나타낸 것으로 항복응력이 400Mpa인 경우 사용년수가 45년까지는 파손확률에 변화가 없음을 알 수 있다. 항복응력이 약 365Mpa인 경우는 파일의 사용년수가 25년까지는 파손확률에 변화가 거의 없으나 25년 이후에는 파손확률의 변화를 뚜렷하게 볼 수가 있다. 즉, 사용초기에는 항복응력에

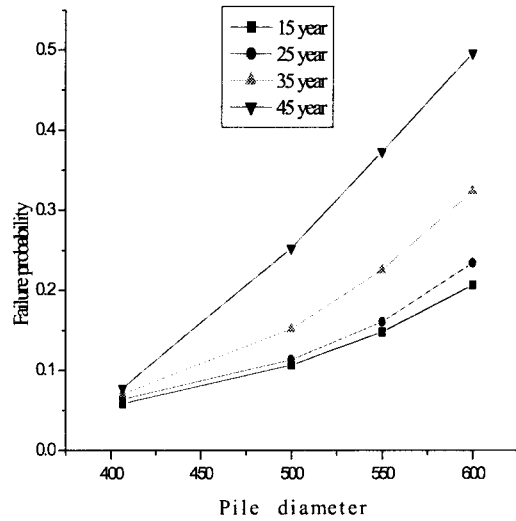


Fig. 4 Relationships between failure probability and pile diameter for varying exposure periods

상관없이 파손확률의 변화가 작다는 것을 알 수 있지만, 사용년수가 증가할수록 항복응력이 작아지면 파손확률의 변화에 미치는 영향이 크다는 것을 알 수 있다.

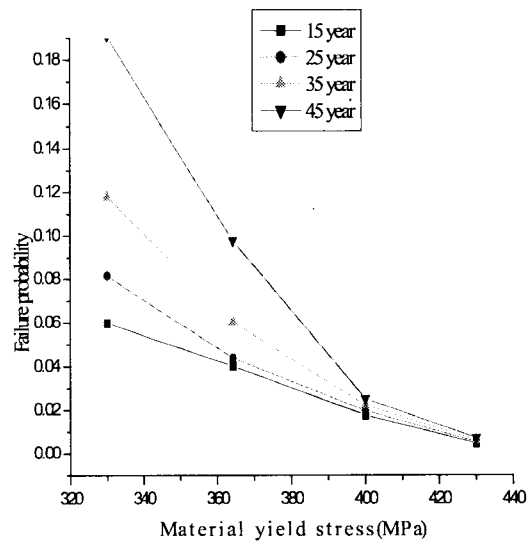


Fig. 5 Relationships between failure probability and material yield stress for varying exposure periods

Fig. 6은 부식률에 따른 파손확률의 변화를 나타낸 것으로 파일의 부식률이 약 0.003mm/year인 경우 사용년수에 관계없이 파손확률 변화에 영향이 없음을 알 수가 있다. 그러나 부식률이 0.006mm/year 이상인 경우 사용년수가 25년 이상일 때는 실질적으로 부식률이 파손확률에 미치는 영향을 고려해야 할 사항으로 생각된다. 파일의 사용 장소에 따라 부식률이 다르므로 장소에 따라 알맞은 재질의 파일을 선택하여야 한다. 가령 모래질 토양의 경우는 깊이가 깊을수록 부식률이 감소하고 점토질의 경우는 부식률이 많아진다는 실험결과가 보고 되고 있다. Table 2에 나와 있는 데이터는 매설깊이에 따라 부식정도의 증가 또는 감소를 단적으로 나타낼 수 없는 상태이나 모래질의 토양이 많기 때문에 깊이가 깊을수록 부식정도가 적은 것이 타당할 것이며 실제로 깊이 14m~24m에서는 매우 작은 부식량을 나타내고 있다.

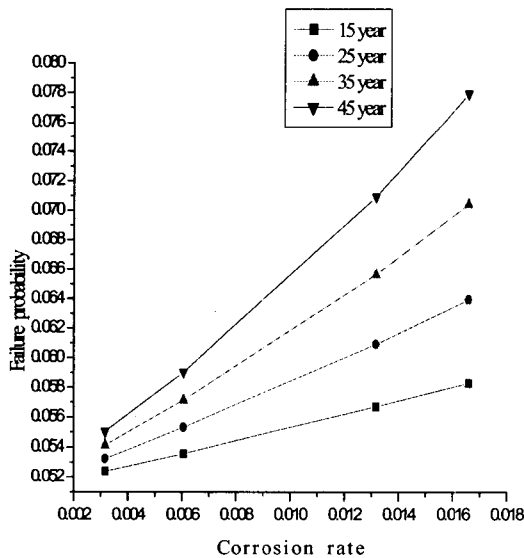


Fig. 6 Relationships between failure probability and corrosion rate for varying exposure periods

6. 결론

본 연구에서는 강 파일(pile)의 여러 가지 경계 조건이 파손확률에 미치는 영향에 대하여 체계적으로 규명하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 파일(pile)의 두께, 직경, 항복응력은 파손확률에 큰 영향을 주며 특히 파일(pile)의 두께와 직경의 변화가 파손확률에 미치는 영향이 더 크다. 따라서 설계 시 부식을 고려하여 파일(pile)을 사용하는 장소에 따라 부식여유를 다르게 주어야 한다.

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

(3) 파일(pile)의 수명이 길어질수록 부식의 관련된 변수들이 파손확률에 큰 영향을 준다는 사실을 규명하였다.

(4) 파일(pile)의 사용시 사용 장소에 따라 부식률은 다르므로 장소의 특성을 고려하여 사용하되 부식률의 변화비율이 증가하면 파손확률은 급속도로 증가하므로 부식률을 낮추어 파손확률의 증가를 억제하도록 하여야 한다.

후기

본 연구는 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업 설비 안전성 연구센터(SAFE)의 연구지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

- Kim, S. H., Kim, J. W., Kim, K. J., "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. 171-78, 1997.
- Choi, S. C., "Coating Flaw Prevention of Underground Buried Pipeline, Gas Safety Journal, Vol. 26, No. 5, pp. 25-33, 2000.
- Lee, O. S., Kim, H. J., "Criterion for Predicting Failure External Corroded Pipeline," Proceeding of Korea Institute of Industrial Safety, pp. 261-266, 1998.

4. Lee, O. S., Kim, H. J., "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. ANSI/ASME B31-1985, "Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipeline," Supplement to ANSI/ASME B31G Code for Pressure Piping. The American Society of Mechanical Engineers, New York, 1985.
6. 이억섭, 황인현, "파이프라인의 건전성 평가," 한국산업안전학회 2000년도 춘계학술논문발표회 논문집, pp. 25-30 (ERC), 2000.
7. 이억섭, 황인현, "축직각 표면타원균열이 존재하는 매설배관의 축방향응력에 대한 건전성평가," 한국정밀공학회 2000년도 추계학술대회, 2000.
8. Hopkins P, Jones DG. A study of the behaviour of long and complex shaped corrosion in transmission pipelines. In Proceedings of the 11th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, ASME, Volume V, Part A, pp. 211-217, 1992.
9. Mohammdi, J., Saxena, S. K., Wong, Y. T., "Modeling Failure Probability Underground Pipes," Underground Pipeline Engineering, pp. 193-205.
10. Kucera, V., Mattsson, E., Atmospheric Corrosion in Corrosion Mechanics, F. Mansfeld, Marcel Dekker, New York, 1987.
11. Spangler, M. G., Handy, R. L., Soil Engineering, 4th edn, Harper and Row, New York, 1982.
12. Mahadevan, S. and Haldar, A., Probability, Reliability and Statistical Method in Engineering Design, John Wiley & Sons, 2000.
13. Nowak, A. S. and Collins, K. R., Reliability of Structures, Mc Graw Hill, 2000.
14. 권영각, 윤병현, 장래웅, "Corrosion Survey on Underground Steel Pile in Young-il Bay," 한국부식학회지.
15. 이억섭, 편장식, "매설배관의 파손확률 모델," 한국정밀공학회지, pp. 116-123, 2001.
16. Lee, O. S., Pyun, J. S., "Failure Probability of Corrosion Pipeline with Varying Boundary Condition," KSME International, Vol. 16 No. 7, pp. 889-895, 2002.