

지반침하에 대한 매설배관의 건전성 평가

이역섭(인하대 기계공학과)

김의상(인하대 대학원 기계공학과), 김동혁*(인하대 대학원 기계공학과)

Reliability Estimation of the Buried Pipelines for the Ground Subsidence

O. S. Lee(Mech. Eng. Dept., INHA Univ.)

E. S. Kim(Mech. Eng. Dept., INHA Univ.), D. H. Kim(Mech. Eng. Dept., INHA Univ.)

ABSTRACT

This paper presents the effect of varying boundary conditions such as ground subsidence on failure prediction of buried pipelines. The first order Taylor series expansion of the limit state function is used in order to estimate the probability of failure associated with three cases of ground subsidence. We estimate the distribution of stresses imposed on the buried pipelines by varying boundary conditions and calculate the probability of pipelines with von-Mises failure criterion. The effects of random variables such as pipe diameter, internal pressure, temperature, settlement width, load for unit length of pipelines, material yield stress and thickness of pipeline on the failure probability of the buried pipelines are also systematically studied by using a failure probability model for the pipeline crossing a ground subsidence region.

Key Words : Failure Probability (파손확률), Buried Pipeline(매설배관), Boundary Condition (경계조건), Ground Subsidence (지반침하), Elastic Foundation (탄성기반), Reliability Estimation(건전성평가)

1. 서론

지하에 매설되어 있는 가스, 기름 등을 수송하는 배관은 다양한 환경에 노출되어 있는데, 이들 배관은 설치한지 오래되면 여러 가지 환경적 영향에 의한 손상이 발생하게 된다. 이로 인해 대형 재난이 발생할 경우 막대한 경제적, 사회적 손실은 물론 인적피해도 가져올 수 있으므로 배관의 건전성 확보는 무엇보다 중요하게 인식되고 있다¹.

특히 배관이 매설되는 지역은 눈, 밭, 해안가, 도로, 매립지 등 다양하기 때문에 배관이 설치되는 지반의 상태가 동일하지 않다. 그러므로 여러 가지 요인에 의해 지반침하 현상이 나타나는데, 일률적인 지반침하에 대해서는 강관의 휘는 성질에 의하여 큰 문제가 발생하지는 않지만, 지반의 불균일성에 의하여 생기는 부등침하는 매설배관 파손의 주요한 원인으로 지적되고 있다².

본 연구에서는 지반반력기반모델 (subgrade reaction foundation model)^{3,4} 을 이용하여 지반침하에 의해 배관에 발생하는 응력을 분석하고, 지반침하

가 매설배관의 파손확률에 미치는 영향을 체계적으로 규명하였다.

2. 지반침하에 의한 응력

지반침하에 의해 발생하는 배관의 변형과 응력은 배관을 보요소로 보고 지반반력기반모델을 응용하여 해석적으로 구할 수 있다. Winkler 에 의해 제시된 지반반력기반모델에서는 배관 주위의 지반을 탄성기반(elastic foundation)으로 모델링한다^{3,4,5}. 즉 배관과 주위지반의 관계를 스프링의 관계로 설정하여 배관의 변형에 따른 지반 거동을 지반반력으로 모델링하였다.

지반이 받는 압력 p_g 는 배관의 수직변위에 비례한다.

$$p_g = kw_p \quad (1)$$

여기서 k 는 지반반력계수이고, w_p 는 배관의 수직변위이다.

지반반력계수 k 는 다음과 같다.

$$k = \frac{0.65}{D} \left(\frac{E_g D^4}{E_p I_p} \right)^{1/12} \left(\frac{E_g}{1-\nu_g} \right) \quad (2)$$

여기서 E_p 는 파이프의 탄성계수, I_p 는 파이프의 극관성모멘트, E_g 는 지반의 탄성계수, ν_g 는 지반의 푸아송의 비, D 는 파이프의 외경이다.

탄성기반의 단위 길이당 강성 K (modulus of subgrade reaction, FL^{-2})는 $K = k \times D$ 로 나타낼 수 있다.

탄성기반 위에 놓인 배관의 수직 변형에 관한 일반적인 미분방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial^4 w_p}{\partial y^4} + 4\eta^4 w_p = 4\eta^4 w_g = 4\eta^4 \frac{W}{K} \quad (3)$$

여기서 w_g 는 지반의 수직변위이며, K 는 탄성기반의 강성, W 는 배관에 작용하는 단위길이당 하중이다. η 는 다음과 같이 나타내어지며, $1/\eta$ 을 토양-배관 강성도(soil-pipe stiffness)이다.

$$\eta = \sqrt[4]{\frac{K}{4E_p I_p}} \quad (4)$$

본 논문에서는 식(3)을 지반침하의 경우에 적용하여 해석하였다.

2.1 일단이 고정된 관의 침하(case 1)

Fig. 1 과 같은 일단이 고정된 관의 침하에 대해서 최대 굽힘모멘트와 축방향응력은 다음과 같다.

$$M_{max} = E_p I_p \frac{2\eta^2 W}{K} \quad \text{at } x=0 \quad (5)$$

$$\sigma_{a_cs1} = \frac{M_{max} D}{2I_p} \quad \text{at } x=0 \quad (6)$$

축방향응력과 배관재료의 푸아송 비를 적용하여 원주방향 응력을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\sigma_{\theta_cs1} = \nu_p \sigma_{a_cs1} \quad (7)$$

지하에 구조물등의 고정점이 있는 경우의 관의 침하는 일단이 고정된 관의 침하와 동일하게 해석할 수 있다.

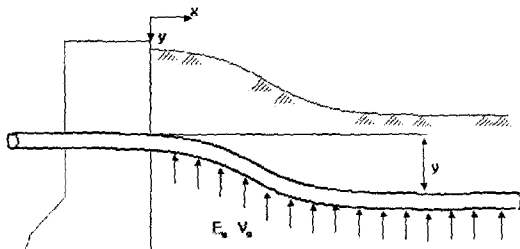


Fig. 1 The schematic diagram of case 1 ground subsidence

2.2 연약지반($k \neq 0$)을 횡단하는 관의 침하(case 2)

Fig. 2 와 같은 지반반력을 약간 기대할 수 있는 연약지반을 통과하는 배관의 응력은 연약지반과 견고지반의 지반반력계수가 다르고, 연약지반의 폭이 변하게 되므로 해석적인 해를 구하기가 어렵다.

그래서 연약지반의 폭을 다양하게 변화시키면서 유한요소 해석을 통해 최대 모멘트 M_{max}/W 와 ηL 사이의 그래프를 그리고, 이를 이용하여 M_{max} 를 구하여 식(5)와 식(6)을 이용하여 축방향응력(σ_{a_cs2}), 원주방향응력(σ_{θ_cs2})을 구한다. 760mm 배관에 대한 해석결과는 Fig. 3 과 같다.

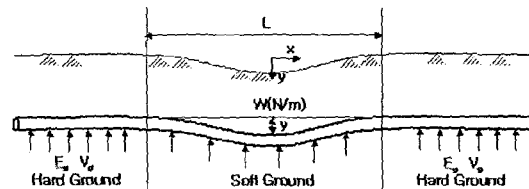


Fig. 2 The schematic diagram of case 2 ground subsidence

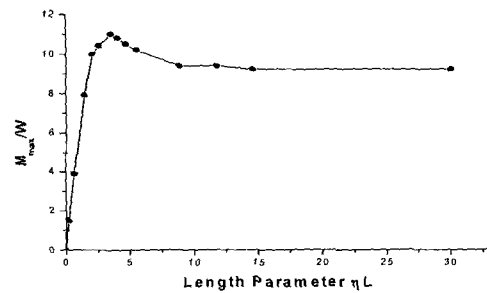


Fig. 3 M_{max}/W parameter plotted against ηL

2.3 연약지반($k=0$)을 횡단하는 관의 침하(case 3)

Fig. 4 와 같이 지반반력이 없는 연약지반을 통과하는 경우의 배관에 작용하는 최대모멘트는 다음과 같다.

$$M_{max} = \frac{1}{6} W \left(\frac{L}{2} \right)^2 \frac{3 + 3\eta L/2 + \eta^2 (L/2)^2}{\eta L/2(1 + \eta L/2)} \quad \text{at } x=0 \quad (8)$$

이때 식(5)와 식(6)을 이용하여 축방향응력(σ_{a_cs3}), 원주방향응력(σ_{θ_cs3})을 구한다.

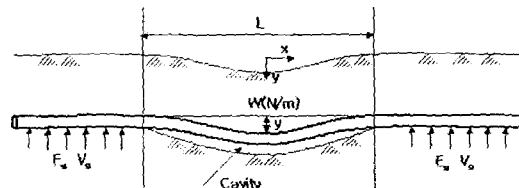


Fig. 4 The schematic diagram of case 3 ground subsidence

3. 파손확률이론

본 연구에서 제안한 매설배관의 파손확률 모델은 아래식과 같은 von-Mises 의 파손평가기준에 기초를 두고 있다⁷.

$$\sigma_c^2 - \sigma_c \sigma_l + \sigma_l^2 \gg \sigma_y^2 \quad (9)$$

여기서 σ_c, σ_l 은 각각 축방향, 원주방향 응력이고 σ_y 는 항복응력이다. 범함수 z 를 항복응력과 주응력의 함수로 다음과 같이 놓으면

$$z = \sigma_y^2 - (\sigma_c^2 - \sigma_c \sigma_l + \sigma_l^2) \quad (10)$$

파손확률 P_f 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_f = \int_{-\infty}^{-\beta} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{u^2}{2}\right\} du = \Phi(-\beta) \quad (11)$$

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

$$\beta = \frac{u_z}{\sigma_z} \quad (12)$$

여기서,

$$u_z = z(D^*, L^*, \dots, v_p^*) + (\bar{D} - D^*) \frac{\partial z}{\partial D} + \dots \quad (13)$$

$$\sigma_z^2 = (\sigma_D \frac{\partial z}{\partial D})^2 + (\sigma_L \frac{\partial z}{\partial L})^2 + \dots \quad (14)$$

$\bar{D}, \bar{L}, \dots, v_p$ 와 D^*, L^*, \dots, v_p^2 은 각각의 평균값과 검사점의 값이고 $\sigma_D, \sigma_L, \dots, \sigma_{v_p}$ 는 각각의 표준편차이다. 각각의 변수에 대한 표준편차는 각각의 변수의 평균과 "편차계수(C.O.V)"의 곱이다.

4. 배관의 사례연구

지반침하가 매설배관의 파손확률에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위해 Table 1 의 변수와 값을 사용하였다. 지반반력계수 k 의 값은 지반의 탄성계수에 비례하는데, 연약지반의 경우에는 0.98MN/m^3 , 견고한 지반은 29.4MN/m^3 , 보통 지반은 9.8MN/m^3 의 값을 보통 사용하며 본 연구에서도 위와 같은 값을 사용하였다^{6,7}.

Table 1 Random variables and their parameter used in the example

Variable	Mean	C.O.V
D(배관의 외경)	760mm	0.04
d(배관의 내경)	740mm	0.06
E_p (배관의 탄성계수)	201MPa	0.033
σ_y (관의 항복강도)	400MPa	0.05
v_p (푸아송의 비)	0.3	0.1

5. 결과 및 고찰

Table 1 의 변수값을 이용하여 결정한 매설배관에 작용하는 단위 길이당 하중에 따른 파손확률을 Fig. 5 에 나타내었다. 매설배관에 작용하는 하중은 배관의 매설깊이에 비례한다. 배관의 매설깊이에 따라 변화하는 파손확률이 Fig. 5 에 나타나있다. 일단이 고정된 배관과 지반 반력이 없는 연약지반을 통과하는 배관은 약 500N/m 이상의 하중에서는 파손확률이 급격히 증가한다. 반면 약간의 지반반력이 있는 연약지반을 통과하는 배관은 1000N/m 이상의 하중에서 파손확률이 증가하지만, 다른 두 경우와 비교해볼 때 서서히 증가한다. Fig. 5 에서 배관을 일정깊이 이상으로 매설하게 되면 배관에 작용하는 하중이 증가하여 파손확률이 증가한다는 것을 알 수 있다. 또한 배관에 작용하는 하중이 2000N/m 이상일 경우에 파손확률은 거의 일정해지고 일단이 고정된 배관의 파손확률이 가장 크다는 것을 알 수 있다.

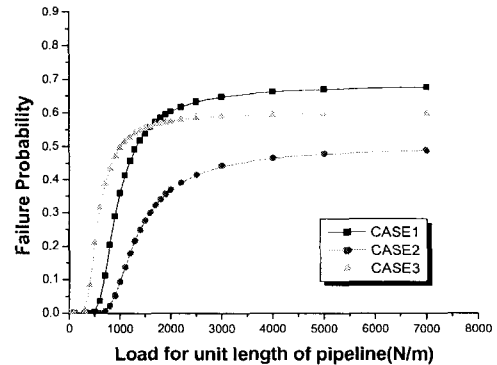


Fig. 5 A relationship between failure probability and load for unit length of pipelines

Fig. 6 에는 배관의 두께변화에 따른 파손확률의 변화를 나타내었다. 3 가지 경우 모두 배관의 두께가 늘어나면 파손확률은 감소한다는 것을 알 수 있다. 지반 반력이 있는 경우와 없는 경우의 연약지반을 통과하는 배관은 두께가 늘어날수록 비슷한 형태로 파손확률이 감소하고, 일단이 고정된 배관의 파손확률은 다른 두 경우보다 급격하게 감소함을 알 수 있다. 파손확률을 줄이기 위해 무조건 배관의 두께를 늘리고 매설깊이를 줄일 수는 없다. 두께를 늘리면 배관의 내경이 작아져, 결국은 유량이 작아지므로 배관의 효율이 떨어지기 때문이다. 따라서 여러 가지 경계조건이 매설배관에 미치는 영향을 고려하여 적절한 두께와 매설깊이를 선택해야 한다.

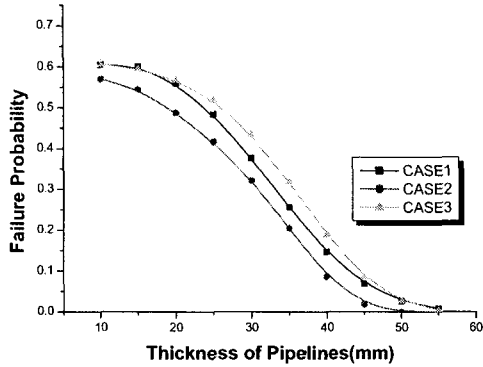


Fig. 6 A relationship between failure probability and thickness of pipelines

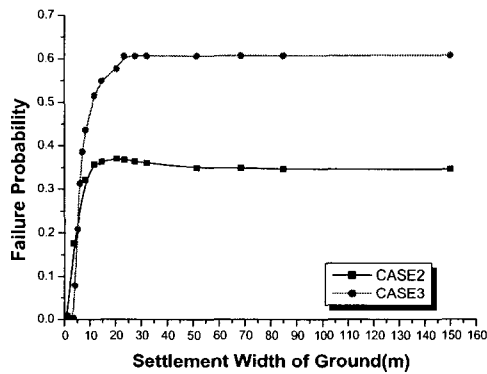


Fig. 7 A relationship between failure probability and settlement width of ground

매설배관이 연약지반을 통과하는 경우 지반의 침하폭에 따른 배관의 파손확률 변화를 Fig. 7에 나타내었다. 지반 침하폭이 25m 정도까지는 배관의 파손확률이 급격히 증가하는 것을 알 수 있고 지반 침하폭이 25m 이상인 경우에는 배관의 파손확률이 서서히 증가하거나 조금 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 지반반력이 전혀 없는 연약지반을 통과하는 배관의 파손확률이 지반반력을 약간 기대할 수 있는 연약지반을 통과하는 경우보다 더 크고, 지반반력이 있는 연약지반을 통과하는 배관의 파손확률은 20m의 지반 침하폭에서 최대가 되고 이후 조금 감소하는 것을 알 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 von-Mises 파손평가기준을 이용하여 3 가지 경우의 지반침하 형태가 배관의 파손

확률에 미치는 영향을 체계적으로 규명하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 지반침하가 발생하는 지반을 통과하는 배관의 파손확률은 배관의 매설깊이에 비례한다. 이 경우 일단이 고정된 배관의 지반침하가 형태가 파손확률이 가장 크게 나타난다.
- 2) 배관의 두께가 증가할수록 파손확률은 감소한다. 파손확률을 줄이기 위해 무조건 매설깊이를 줄이고, 두께를 크게하는 것은 배관의 효율이 떨어지므로 여러가지 경계조건의 영향을 고려해 적절한 두께와 매설깊이를 선택한다.
- 3) 연약지반을 통과하는 경우, 지반 침하폭이 증가할수록 파손확률은 급격히 증가하고 일정폭 이상에서는 파손확률이 거의 일정해진다. 20m 이내의 작은 지반 침하폭에서도 배관의 파손확률이 급격히 증가하므로 연약지반을 통과하는 배관의 설계시 지반 침하폭을 최소로 할 수 있도록 설계해야 한다.

후 기

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

참고문헌

1. M. Ahammed, R. E. Melchers, "Reliability Estimation of Pressurized Pipelines Subject to Localised Corrosion Defects", Int. J. Pres. Ves. & Piping, Vol. 69, pp. 267-272, 1996.
2. Attewell, "Ground Movements and Their Effects on Structures", Blackie & son Ltd, 1984.
3. Vesic, A.S., Jou. Eng. Mech. Division, ASCE, Vol. 87, EM2, pp.35-53, April, 1961.
4. Hetenyi, M., "Beams on Elastic Foundation", University of Michigan Press, An Arbor, 1946.
5. Winkler. "Die Lehre von der Elastizität und Festigkeit (on Elasticity and Flexibility)" Prague, 1867.
6. I. W. Bang, H. S. Kim, Y. C. Yang, W. S. Kim, K. W. Oh, "Development of the Computer Program Calculating the Stress Induced by Various Loads for Buried Natural Gas Pipeline", Journal of the Korean Institute of Gas, Vol.2, No.2, 1998.
7. 이억십, 편장식, "매설배관의 파손확률모델", 한국정밀공학회지, Vol. 18, No. 11, pp. 116-123, 2001.