

매설배관의 파손 확률 모델

이억섭*, 편장식**

Failure Probability Model of Buried Pipeline

Ouk Sub Lee*, Jang Sik Pyun**

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 nearby cavity, backfill, load cycle and corrosion on failure probability of the buried pipes are systematically investigated. The location of cavity is found to affect failure probability of buried pipeline within a certain limit. It is noted that the flexibility of backfill plays a great role to change the failure probability of buried pipeline. Furthermore, the corrosion gives less effects than other boundary conditions such as cavity, load cycle, and backfill to the failure probability of buried pipeline.

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

1. 서론

매설배관은 지하에 위치하며, 여러 가지 경계조건에 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⁾. 일반적으로 매설배관의 안전과 보전에 대한 평가는 매설배관에서 야기되는 최대응력에 대응시키거나⁽³⁻⁴⁾ 매설배관에 존재하는 균열에 연관시켜서 균열의 성장거동을 평가하기도 한다⁽⁵⁻⁶⁾.

또한, 매설배관 주위의 여러 가지 환경의 영향,

이를테면 매설배관 주위의 공동(cavity)의 위치, 부식, 토질의 온도, 차량의 하중 등이 매설배관의 신뢰성에 미치는 영향에 대해서도 많은 연구가 수행되고 있다. 본 연구에서는 토질, 내압, 차량하중, 지반침하, 부식등 매설배관의 응력과 변형거동에 영향을 미치는 여러 가지 경계조건들⁽⁷⁻⁸⁾이 매설배관의 파손 확률에 미치는 영향을 체계적으로 규명하였다.

2. 파손 확률 이론

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

2001년 6월 14일 접수

* 인하대학교 기계공학부

** 인하대학교 대학원

$$S_1^2 - 2\nu S_1 S_2 + S_2^2 \gg (\alpha F_y)^2$$

여기서,

S_1, S_2 : 최대, 최소 주응력

ν : 푸아송의 비

F_y : 항복응력

α : 수치인자 ($\alpha = 1$)

범함수 Q 를 항복응력과 주응력의 함수로 다음과 같이 놓으면⁽⁹⁾

$$Q = (\alpha F_y)^2 - (S_1^2 - 2\nu S_1 S_2 + S_2^2)$$

파손확률 P_f 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi\beta}} \exp\left(-\frac{\beta^2}{2}\right)$$

여기서

$$\beta = \frac{\bar{Q}}{\sigma_Q}$$

β : 신뢰도 지수

\bar{Q} : Q 의 평균

σ_Q : Q 의 표준편차

Q 의 평균 \bar{Q} 와 Q 의 표준편차 σ_Q 의 근사치는 다음과 같이 주어진다.

$$\bar{Q} = (\alpha F_y)^2 - (\bar{S}_1^2 - 2\nu \bar{S}_1 \bar{S}_2 + \bar{S}_2^2)$$

$$\sigma_Q^2 = \left(\frac{\partial Q}{\partial \alpha}\right)^2 \sigma_\alpha^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial F_y}\right)^2 \sigma_{F_y}^2$$

$$+ \left(\frac{\partial Q}{\partial S_1}\right)^2 \sigma_{S_1}^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial S_2}\right)^2 \sigma_{S_2}^2$$

여기서, $\sigma_\alpha, \sigma_{F_y}, \sigma_{S_1}, \sigma_{S_2}$ 는 α, F_y, S_1, S_2 의 표준편차이며 $\bar{\alpha}, \bar{F}_y, \bar{S}_1, \bar{S}_2$ 은 α, F_y, S_1, S_2 의 평균을 나타낸다.

각각의 변수에 대한 표준편차는 각각의 변수의 평균과 "불확실성" U 의 곱이다. 주응력에 대한 불확실성 U_s 와 U_ν 는 작용하중, 응력 평가 모델링, 배관과 토질의 특성 등에 대한 불확실성에 의존한다. 저항 인자에서 α 와 F_y 의 불확실성은 저항 크기를 실험할 때의 변화량에 의존한다. 본 연구에서는 S_1, S_2 의 불확실성을 0.25로 하고,

α, F_y 의 불확실성을 0.15로 추정하여 파손확률을 계산하였다⁽⁹⁾.

3. 배관 응력에 영향을 미치는 경계조건

매설배관의 응력 및 변형에 미치는 영향을 규명하기 위해서는 배관, 토질, 하중조건 등을 포함하는 모델을 구축하여 내압, 토하중, 배관자중, 열하중, 차량하중, 지반침하 등의 다양한 매설조건 및 배관 형상에 따라 매설배관에 가해지게 되는 하중을 사용하여 매설배관의 응력상태를 해석하여야 한다.

3.1 토질의 영향

매설배관에서 토질의 이동과 침하, 종류 등에 따라 매설 배관 내에 응력을 발생시킨다. 토질의 효과는 그 토질의 특성(밀도, 수분 함유량 등)과 하중을 발생하는 요소(토질의 이동, 침하 등)에 기인한다.

토질의 하중은 배관을 둘러싸고 있는 지반에 의한 하중을 말하는데, 여기서는 지반과 지반위의 도로에 의한 하중을 나타내는 것으로 정의한다. 토하중과 배관의 자중에 의한 하중은 중력가속도를 고려하였고 토질하중에 대한 해석은 역채움 형식의 영향에 대해서 해석하였다. 토질의 하중이 배관에 미치는 영향을 정확히 파악하기 위하여 여러 단계의 매설 작업의 영향을 고려하여야 한다.

3.2 내압의 영향

본 연구에서는 내압에 의해 발생하는 응력은 축방향 응력보다 원주방향의 응력이 훨씬 크므로 축방향 응력은 무시하였다.

3.3 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 지역에서 안정적인 배관의 설치와 유지를 위하여 차량하

중의 영향을 파악하는 것이 매우 중요하다. 차량 하중은 지표면에서 지반을 통하여 3차원적으로 전달되므로 차량하중의 영향을 정확히 평가하기 위해서 3차원적 해석을 해야한다.

차량의 하중이 배관에 미치는 영향은 차량의 진행 방향이 관측과 직각방향일 때와 관측방향일 때가 다르며, 일반적으로 관측의 직각방향일 때 영향이 큰 것으로 알려져 있다. 또한 차량의 동적인 특성을 나타내기 위하여 충격계수를 고려하여야 하는데 충격계수는 차량에 의해 가해지는 동하중과 정하중의 비로 정의되며, 차량의 속도, 가속 상태, 자중, 타이어 등과 도로의 표면상태에 따라 값이 달라진다.

3.4 지반침하의 영향

일반적으로 주하중(토질하중, 내압, 차량하중)은 배관의 손상에 큰 영향을 미치지 않으나 주하중 외에 다른 하중들(종하중)이 배관에 작용할 경우에는 이들이 때때로 배관의 안전에 심각한 영향을 초래할 수 있다. 이러한 종하중들 중에서 배관에 축방향 굽힘응력을 발생시키는 길이방향하중에 의해 배관의 변형 혹은 가로방향파괴가 발생할 수 있다. 길이방향 하중에는 열하중, 불균일한 기초 다짐에 의한 하중, 지반침하에 의한 하중, 지진하중 등이 있는데 그중에서 지반침하현상을 모델링하여 배관의 안전을 검토하여야 한다.

매설배관은 일반적으로 관로가 길기 때문에 매설지반의 상태가 동일하지 않다. 그러므로 지반의 이차압력, 지하수 저하에 의한 압력, 차량하중 및 진동에 의한 침하, 기타 공사에 의한 지반의 변화에 의하여 침하가 일어난다. 지반의 불균일성에 의해 생기는 침하에서 종종 매설배관에 대한 안전문제가 발생하게 한다.

3.5 부식의 영향

부식된 파이프라인에 대한 파손 식은 폭발실험의 데이터에 기준을 두고 작성되었으며, 다음과 같이 제안되고 있다⁽⁴⁾.

$$\sigma_f = \sigma \left[\frac{1 - (A/A_0)}{1 - (A/A_0)M^{-1}} \right] \quad (1)$$

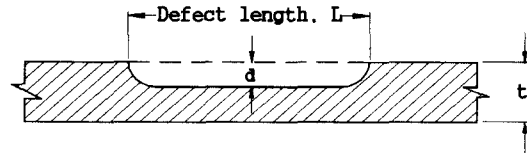


Fig. 1 Section through an idealized corrosion defect

Fig. 1은 외부부식된 파이프의 단면을 보여주고 있으며 식(1)은 부식에 대한 파손응력을 구하는 식이다. 여기서, σ_f 는 파손응력(MPa), σ 는 재료의 유동응력(MPa), A 는 투영된 부식의 단면적(mm^2), A_0 는 $L \times t(\text{mm}^2)$, L 은 투영된 부식길이(mm), t 는 벽의 두께(mm), d 는 최대 부식 깊이(mm), M 은 Folias 벌징계수(bulging factor)이다.

식 (1)은 다음 두 가지 조건을 고려하여 수정되었다. 첫째, 최대 원환(hoop)응력은 재료의 항복강도를 초과할 수 없다. 둘째, 상대적으로 짧은 부식은 포물선 모양으로 투영되며 긴 부식은 사각형 모양으로 투영된다. 파이프의 부식에 대한 수정된 파손 식은 포물선 모양과 사각형 모양으로 나누어지며 다음과 같다⁽⁴⁾.

i) 포물선 모양

$$\sigma_f = 1.1\sigma_{\min} \left[\frac{1 - (2/3)(d/t)}{1 - (2/3)(d/t)M^{-1}} \right] \quad \left(\sqrt{0.8 \left(\frac{L}{D} \right)^2 \left(\frac{D}{t} \right)} \leq 4 \text{ 인 경우} \right)$$

ii) 사각형 모양

$$\sigma_f = 1.1\sigma_{\min} [1 - (d/t)] \quad \left(\sqrt{0.8 \left(\frac{L}{D} \right)^2 \left(\frac{D}{t} \right)} > 4 \text{ 인 경우} \right)$$

여기서, D 는 파이프의 외경(mm), σ_{\min} 는 최저 항복강도(MPa)이며, 벌징계수(M)는 다음과 같이 정의된다.

$$M = \sqrt{1 + 0.8 \left(\frac{L}{D} \right)^2 \left(\frac{D}{t} \right)} \quad \left(\sqrt{0.8 \left(\frac{L}{D} \right)^2 \left(\frac{D}{t} \right)} \leq 4 \text{ 인 경우} \right)$$

$M = \infty$

$$\left(\sqrt{0.8\left(\frac{L}{D}\right)^2\left(\frac{D}{t}\right)}\right) > 4 \text{ 인 경우}$$

Kiefner와 Vieth는 ANSI/ASME B31G 기준에서 유동응력($\bar{\sigma} = 1.1\sigma_{min}$)과 벌징계수 (M)에 대해 문 제점을 지적하고, $\bar{\sigma} = 1.1\sigma_{min} + 69(MPa)$ 을 새로운 유동응력으로 제시하였고, 새로운 벌징계수 (M)를 다음과 같이 정의하였다⁽¹⁰⁾.

$$M = \sqrt{1 + 0.63\left(\frac{L}{D}\right)^2\left(\frac{D}{t}\right) - 0.0034\left(\frac{L}{D}\right)^4\left(\frac{D}{t}\right)^2}$$

$$\left(\left(\frac{L}{D}\right)^2\left(\frac{D}{t}\right)\right) \leq 50 \text{ 인 경우}$$

$$M = 3.3 + 0.032\left(\frac{L}{D}\right)^2\left(\frac{D}{t}\right)$$

$$\left(\left(\frac{L}{D}\right)^2\left(\frac{D}{t}\right)\right) > 50 \text{ 인 경우}$$

Lee등은 원래의 B31G 코드와 수정된 B31G(MB31G) 코드를 사용하여 얻은 파손압력을 비교한 결과 수정된 유동응력과 벌징계수가 파손 압력에 미치는 개선 영향은 그리 크지 않으나, 유효면적의 영향은 보수적인 설계개념을 크게 개선 시킨다는 사실을 규명하였다⁽⁴⁾.

파이프라인에서 부식은 여러 가지 모양으로 나 타나며, 보통 부식 피트(pit), 부식 밴드(groove) 그 리고 일반적인 부식으로 구분한다. 부식 밴드는 일반적인 피트의 열(row)로 형성되고, 일반적인 부 식들은 파이프 벽에 원주 방향으로 넓게 퍼져서 군집하고 있는 피트들을 의미한다. B31G 및 MB31G 코드는 포물선 모양이나 사각형 모양 중 하나만을 선택하여 평가하게 되어 있으며, 부식의 폭은 고려하지 않고 있다⁽⁴⁾.

4. 매설배관의 파손해석

4.1 파손 해석의 기본 가정

매설배관의 파손해석시 다음과 같은 가정을 하였 다.

- i) 매설배관 주위의 토질과 역채움(backfill)은 신축성 있게 변형한다.
- ii) 차량하중은 포장도로에서부터 토질을 지나 배관에 전달된다.
- iii) 2개의 공동(cavity)이 파이프로부터의 같은

거리에 존재한다.

- iv) 2차원 평면변형의 문제로 단순화 한다.

매설배관의 요소에서 발생하는 응력분포를 관찰 하면 Fig. 3의 요소 1, 요소 2 부분에서 가장 큰 응력이 발생하므로 배관의 파손확률이 이곳에서 가장 높게나올 것으로 예측된다.

4.2 배관의 물성치와 경계조건

배관은 강으로 되어. 있고 직경은 40.64 cm이고 두께는 0.98 cm이다. 이 배관은 지표면으로부터 배관의 중심이 101.6 cm 깊이에 있고 역채움 (backfill)은 배관보다 8.9 cm 만큼 아래까지이고 배관의 중심에서 양쪽으로 38.1 cm 까지 이다. 도로의 콘크리트 두께는 8.9 cm 이다. 공동 (Cavity)의 직경은 25.4 cm이며 배관에서부터의 거 리가 0 에서 227.3 cm 까지 위치하고 있다. 차량 의 하중은 799 N 이다⁽⁹⁾.

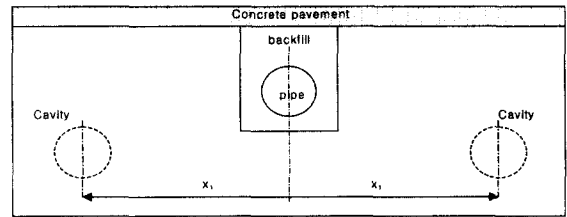


Fig. 2 Pipe and soil configuration

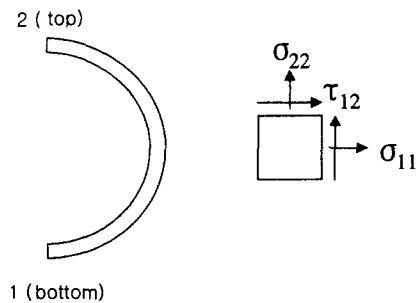


Fig. 3 Critical elements in a buried pipeline and stress components

5. 결과 및 고찰

5. 1 응력분포

지하 매설배관의 최대유효응력에 미치는 하중 사이클의 영향을 해석한 결과를 Fig. 4~Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 4는 요소 1에 작용하는 응력분포가 하중 사이클에 따라 변화하는 양상을 나타낸 것인데 하중 사이클이 클수록 최대유효응력이 커지는 것을 알 수 있다. Fig. 5는 요소 2에 작용하는 응력분포가 하중 사이클에 따라 변화하는 양상을 나타낸 것인데 하중 사이클이 클수록 Fig. 4와 마찬가지로 최대유효응력이 커지는 것을 알 수 있다. Fig. 4와 Fig. 5 비교해보면 요소 2의 최대유효응력이 요소 1 보다 크다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6와 Fig. 7은 배관과 공동(cavity) 사이의 거리에 따른 응력분포를 나타낸 것으로 일정거리 이상이 되면 응력분포가 일정 해지는 것을 알 수 있으며 배관이 공동(cavity) 가까이 있을 때 최대 유효응력에 큰 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

Fig. 8와 Fig. 9은 요소 1와 요소 2의 역채움(backfill(sand, sand & clay, clay))에 따른 응력분포를 나타낸 것으로 모래보다 진흙(clay)인 경우에 더 큰 응력이 발생한다는 사실을 알 수 있다.

위의 Fig. 4~Fig. 9까지의 결과를 분석해보면 요소 1 보다 요소 2에서 더 큰 응력이 작용하는 것을 볼 수 있으며 요소 2에서 파손이 일어날 가능성이 많다는 것을 알 수 있다.

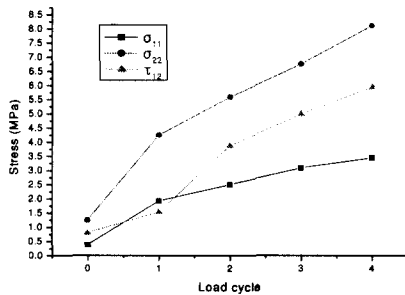


Fig. 4 Pipe normal and shear stresses of element 1

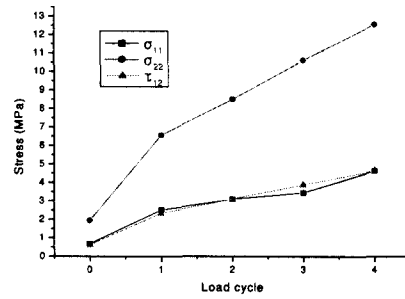


Fig. 5 Pipe normal and shear stresses of element 2

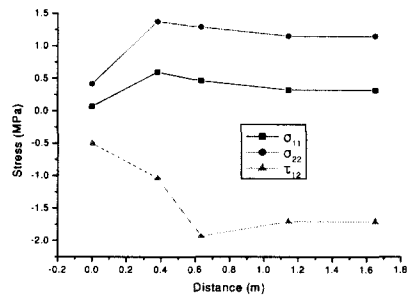


Fig. 6 Pipe normal and shear stresses because of a nearby cavity of element 1

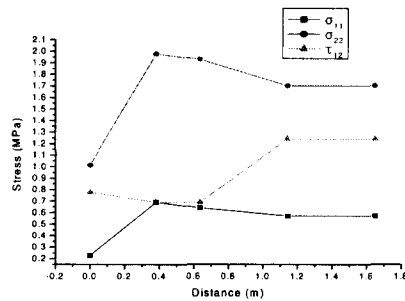


Fig. 7 Pipe normal and shear stresses because of a nearby cavity element 2

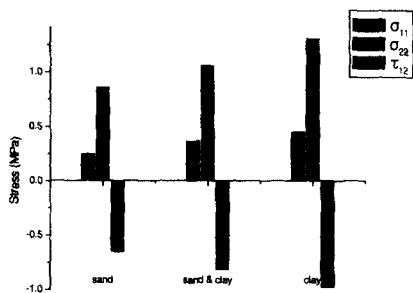


Fig. 8 Normal and shear stresses because of different backfill of element 1

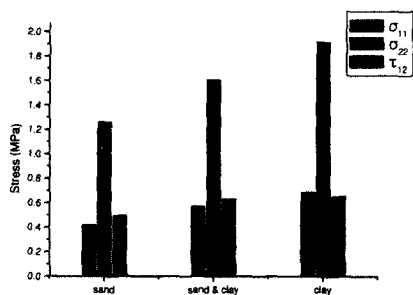


Fig. 9 Normal and shear stresses because of different backfill of element 2

5. 2 매설 배관의 파손 확률

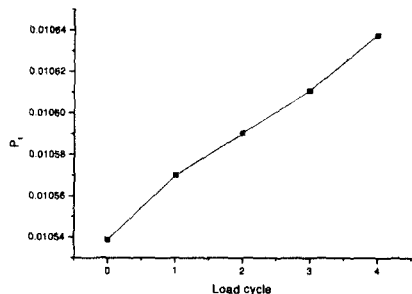


Fig. 10 Failure probability of element 1 (backfill = sand, distance of cavity = 38.1 cm)

Fig. 10은 역채움(backfill)이 모래이고 배관과 공동(cavity)사이의 거리를 38.1 cm로 하였을 때 하중 사이클에 따른 요소 1의 파손 확률을 나타낸 것으로 하중 사이클이 증가할수록 파손 확률이 거의 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 4의 하중 사이클에 따른 응력분포와 비교해보면 응력의 증가에 따라 파손 확률도 증가하는 것을 알 수 있다.

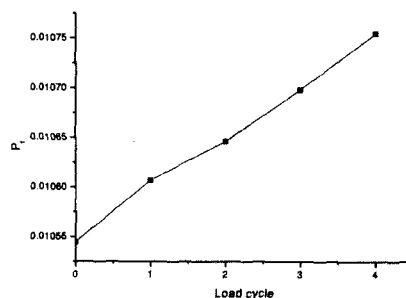


Fig. 11 Failure probability of element 2 (backfill = sand, distance of cavity = 0 cm)

Fig. 11은 역채움(backfill)이 모래이고 배관과 공동(cavity)사이의 거리를 0 cm로 하였을 때 하중 사이클에 따른 요소 2의 파손 확률을 나타낸 것으로 Fig. 10과 마찬가지로 하중 사이클이 클수록 파손 확률이 거의 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다.

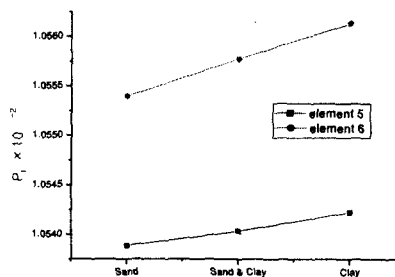


Fig. 12 Failure probability comparison of element 1 and element 2 (Load cycle = 0, distance of cavity = 38.1 cm)

Fig. 12는 하중 사이클이 0이고 배관과 공동(cavity)사이의 거리를 38.1 cm 로 하였을 역채움(backfill)에 따른 요소 1와 요소 2의 파손확률을 비교한 것으로 요소 2 가 요소 1 보다 파손확률이 크다는 것을 알 수 있으며, 요소 1와 요소 2 사이의 파손확률 차이가 모래 보다 진흙(clay)의 경우가 더 크다는 사실을 알 수 있다.

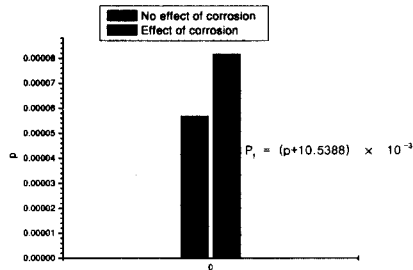


Fig. 13 Effect of corrosion on failure probability

마지막으로 Fig. 13은 부식에 대한 파손확률을 나타낸 것으로 부식이 있는 경우와 없는 경우의 파손 확률 차이는 상대적으로 차이가 나는 것을 알 수 있다. 그리고 심하면 부식이 발생하는 부분에서 파손이 일어날 확률은 커진다고 사료된다.

6. 결론

지하 매설배관의 응력분포와 파손 확률에 미치는 공동(cavity)의 영향, 하중 사이클의 영향, 역채움(backfill)의 영향과 부식에 의한 영향을 해석한 결과, 다음과 같이 결론을 얻었다.

- 1) 공동(cavity)의 위치가 배관과 가까울수록 최대 유효응력에 미치는 영향이 크며 파손확률에도 큰 영향을 미친다. 그리고 공동(cavity)의 위치가 어떤 거리 이상으로 멀어지면 응력 분포의 변화가 없다는 것도 알 수 있다.
- 2) 하중 사이클의 수가 증가함에 따라 파손확률에 미치는 영향이 크다는 것을 알 수 있다. 하중 사이클의 수가 증가할 경우 역채움(backfill)을 다른 것으로 하거나 배관의 두께를 크게 하여 파손확률을 감소시킬 수 있다.
- 3) 역채움(backfill)의 종류에 따른 영향을 보면 유동성이 큰 것일수록 파손 확률에 미치는

영향이 크다는 사실을 규명하였다.

- 4) 부식된 파이프라인의 부식 깊이와 부식길이의 변화가 매설배관의 파손확률에 영향을 주고 있음을 확인하였지만 공동(cavity), 하중 사이클, 역채움(backfill)의 영향보다는 파손확률에 적은 영향을 준다는 사실이 규명되었다.

후기

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. O.S. Lee, S.S. Choi, H.H. Ryu and S.K. Hong, "Effects of Square Cavity on Buried Pipeline," Proceedings of the KSME Materials and Fracture Division 98, No. 2, pp. 113~119, 1998.
4. O.S. Lee and H.J. Kim, "Effects of Width of External Corrosion in Pipeline on Failure Prediction," Proceedings of the KSME Materials and Fracture Division 99, No. 2, pp. 132~137, 1999.
5. Qian, J. and Fatemi, A., "Mixed mode fatigue crack growth: A literature survey," Eng. Frac. Mech., 55, pp. 969~990, 1996.
6. Gao, H., Brown, M. and Miller, K., "Mixed mode fatigue threshold," Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 5, pp. 1~17, 1982.
7. 이역섭, 황인현, "파이프라인의 건전성 평가,"

- 한국산업안전학회 2000년도 추계학술논문발표회 논문집, pp. 25-30 (ERC), 2000.
8. 이역섭, 황인현, "축직각 표면타원균열이 존재하는 매설배관의 축방향응력에 대한 건전성평가," 한국정밀공학회 2000년도 추계학술대회 논문집, pp. 417-420 (ERC), 2000.
 9. J. Mohammdi, S. K. Saxena, Y. T. Wong, "Modeling Failure Probability of Underground Pipes," in *Advances in Underground Pipeline Engineering*, J. K. Jayepalan (Ed.), American Society of Civil Engineers Publication, Aug., 1985.
 10. 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.