파손압력모델의 경계조건을 이용한 매설배관의 파손확률 평가

이억섭†· 김의상*· 김동혁**

Estimation of Failure Probability Using Boundary Conditions of Failure Pressure Model for Buried Pipelines

Ouk Sub Lee, Eui Sang Kim and Dong Hyeok Kim

Key Words : Buried Pipeline(매설배관), Corrosion(부식), Failure Probability(파손확률), Reliability Estimation(신뢰성 평가), Failure Pressure Model(파손압력모델)

Abstract

This paper presents the effect of boundary condition of failure pressure model for buried pipelines on failure prediction by using a failure probability model. The first order Taylor series expansion of the limit state function is used in order to estimate the probability of failure associated with various corrosion defects for long exposure periods in years. A failure pressure model based on a failure function composed of failure pressure and operation pressure is adopted for the assessment of pipeline failure. The effects of random variables such as defect depth, pipe diameter, defect length, fluid pressure, corrosion rate, material yield stress, material ultimate tensile strength and pipe thickness on the failure probability of the buried pipelines are systematically studied by using a failure probability model for the corrosion pipeline.

기호설명

P_f	:	파손압력(MPa)
P_a	:	작용압력(MPa)
σ_{yield}	:	배관의 항복응력(MPa)
σ_{uts}	:	배관의 극한강도(MPa)
P	:	배관의 두께 감소량(mm)
L	:	투영된 부식길이(mm)
t	:	벽의 두께(mm)
d	:	최대 부식깊이(mm)
D	:	배관의 직경(mm)
M	:	Folias 벌징계수(bulging factor)
x	:	부식길이에 대한 부식률(mm/year)
k	:	부식깊이에 대한 부식률(mm/year)
T	:	배관의 사용년수

† 인하대 기계항공공학부
E-mail : leeos@inha.ac.kr
TEL : (032)860-7315 FAX : (032)868-1716
* 인하대 대학원 기계공학과
** 인하대 대학원 기계공학과

1. 서 론

가스 및 오일을 운송하는 배관은 대부분 지하에 매설되어 있고, 다양한 환경에 위치하여 있는데, 이러한 배관은 설치한지 오래되면 여러 가지 환경적 영향에 의해 부식과 같은 결함이 발생되고 이 결함이 성장하여 임계크기에 도달하여 대형 재난으로 발전하는 경우가 종종 보고 되고 있으며 이로인한 경제적, 사회적 손실이 지대하기 때문에 매우 중요하게 인식되고 있다[1].

부식에 의해 손상된 배관의 파손을 예측하는 기술은 배관의 설계시 부식여유를 결정할 때 필수적으로 필요하며 특히 노후된 배관의 안전수명 점검시에 응용될 수 있는 매우 중요한 기술정보이다.

배관에서의 부식발생은 그 재료의 강도 등을 현저히 저하시켜 전체시스템의 건전성을 저하시킨다. 따라서 부식의 형태 및 위치에 따른 응력상태의 변화와 파손수명의 감소 등을 예측하여 위험한 파손사고들을 예방할 수 있는 기준에 대한 연구의

필요성이 대두되었다[2].

배관은 부식등과 같은 여러 가지 형태의 결함을 가지고 있다. 이러한 부식된 배관에 과도한 운전 압력 등에 의해 의도한 설계하중보다 높은 응력이 발생할 수 있다. 이러한 요소들로 인해 파손해석에 불확실성이 야기되므로 파손해석은 결정론적 보다는 확률론적으로 고찰되어야 한다[3].

본 연구에서는 매설배관 부식부위에 대한 여러 가지 잔류강도 평가 방법을 비교 분석하고, 각각의 평가 방법들을 신뢰도 지수를 이용한 확률론적 평가 방법 중 하나인 FORM(first-order reliability method)을 이용하여 여러 가지 경계조건들이 배관의 파손확률에 미치는 영향을 체계적으로 규명하였다.

2. 파손압력모델

고압가스 수송 파이프라인이 가동 중 파손되는 주된 원인으로는 기계적인 손상과 부식을 들 수 있다. 이러한 원인들이 파이프라인의 건전성에 미치는 영향을 평가하기 위해서 정수압 시험을 정기적으로 행한다든지, 부식 평가기준을 이용한다.

부식 배관의 건전성을 평가하기 위해서는 배관의 부식부위의 기하학적 형상을 단순화 시켜야 한다. Fig. 1 은 부식모델을 나타낸 것이고, 부식모델의 표면 결함의 기하학적 양상을 Fig. 2, Fig 3 와 같이 단순화시켜서 이론해석이 용이하게 하였다.

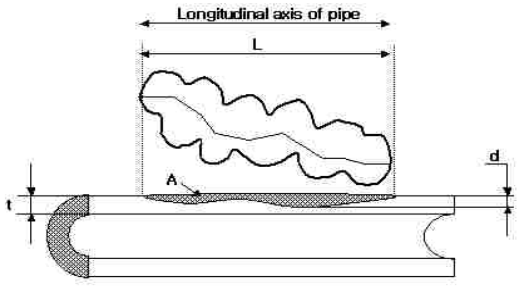


Fig. 1 A simplification of a corroded surface flaw in a pipeline

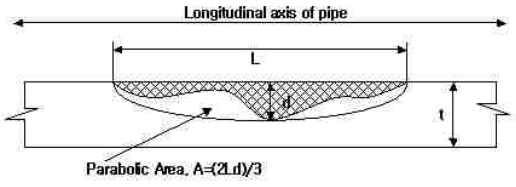


Fig. 2 Section through an idealized corrosion defect(Parabolic)

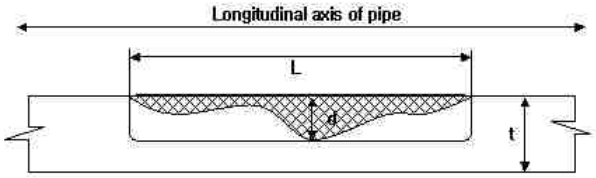


Fig. 3 Section through an idealized corrosion defect(Rectangular)

2.1 ANSI/ASME B31G

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

$$P_f = \frac{2t}{D}\sigma\left[\frac{1-A/A_0}{1-(A/A_0)M_T^{-1}}\right] \qquad (1)$$

식(1)은 부식에 대한 파손응력을 구하는 식이다. 식(1)은 다음 두가지 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 파손압력 식은 포물선 모양과 사각형 모양으로 나누어지며 다음과 같다[4].

2.1.1 포물선 모양

$$P_f = 1.11\frac{2\sigma_{\min}t}{D}\left[\frac{1-(2/3)(d/t)}{1-(2/3)(d/t)/M}\right]$$

$$\left(\text{for}\quad \sqrt{0.8\left(\frac{L}{D}\right)^2\left(\frac{D}{t}\right)} \le 4\right) \qquad (2)$$

2.1.2 사각형 모양

$$P_f = 1.1\frac{2\sigma_{\min}t}{D}\left[1-(d/t)\right]$$

$$\left(\text{for}\quad \sqrt{0.8\left(\frac{L}{D}\right)^2\left(\frac{D}{t}\right)} > 4\right) \qquad (3)$$

벌징계수(M)는 다음과 같이 정의된다.

$$M = \sqrt{1+0.8\left(\frac{L}{D}\right)^2\left(\frac{D}{t}\right)}$$

$$\left(\text{for}\quad \sqrt{0.8\left(\frac{L}{D}\right)^2\left(\frac{D}{t}\right)} \le 4\right) \qquad (4)$$

$$M = \infty$$

$$\left(\text{for}\quad \sqrt{0.8\left(\frac{L}{D}\right)^2\left(\frac{D}{t}\right)} > 4\right) \qquad (5)$$

2.2 MB31G(Modified B31G) Code

Kiefner 와 Vieth 는 ANSI/ASME B31G 기준에서 부식된 파이프라인 Grade X52 의 유동응력 $(\overline{\sigma}=1.1\sigma_{\min})$과 벌징계수(M)에 대해 문제점을 지적하고, $\overline{\sigma}=1.1\sigma_{\min}+69$ (MPa)을 새로운 유동응력으로 제시하였고, 파손압력은 다음과 같이 정의 한다.

$$P_f=\frac{2(\sigma_{\min}+69)t}{D}\left[\frac{1-0.85d/t}{1-0.85(d/t)M_T^{-1}}\right] \quad (6)$$

새로운 벌징계수(M)를 다음과 같이 정의하였다 [4,5].

$$M=\sqrt{1+0.6275\left(\frac{L}{D}\right)^2\left(\frac{D}{t}\right)-0.003375\left(\frac{L}{D}\right)^4\left(\frac{D}{t}\right)^2} \quad \left(\text{for} \quad \left(\frac{L}{D}\right)^2\left(\frac{D}{t}\right)\le 50\right) \quad (7)$$

$$M=3.3+0.032\left(\frac{L}{D}\right)^2\left(\frac{D}{t}\right) \quad \left(\text{for} \quad \left(\frac{L}{D}\right)^2\left(\frac{D}{t}\right)>50\right) \quad (8)$$

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

2.3 Kanninen Shell Theory Criterion

Southwest Research Institute 의 Kanninen 은 선형탄성 축대칭 셸이론을 기초로 하여 내압만을 고려한 부식손상부의 파괴기준을 개발하였다. 여기서 부식손상부는 Fig. 4 에 나타낸 것과 같이 배관원주가 완전히 일정한 깊이로 축대칭형 손상이 존재하는 것으로 가정하였다. 축방향 하중이 없는 경우에 파손압력은 다음과 같이 표현하였다 [8,9].

$$P_f=\frac{2t}{D}\sigma_{uts}\left[\frac{1-d/t}{1-(d/t)B_T^{-1}}\right] \quad (9)$$

여기서

$$\begin{aligned}B=&[(1+\eta^4)(\cosh\alpha\cdot\sinh\alpha+\sin\alpha\cdot\cos\alpha)\\&+2\eta^{3/2}(\cosh^2\alpha-\cos^2\alpha)\\&+2\eta^2(\cosh\alpha\cdot\sinh\alpha-\sin\alpha\cdot\cos\alpha)\\&+2\eta^{5/2}(\cosh^2\alpha\cdot-\sin^2\alpha)]\\&/[(\cosh\alpha\cdot\sinh\alpha+\sin\alpha\cdot\cos\alpha)\\&+\eta^2(\sinh\alpha\cdot\cos\alpha-\cosh\alpha\cdot\sin\alpha)\\&+2\eta^{5/2}(\cosh\alpha\cdot\sin\alpha)]\end{aligned} \quad (10)$$

$$\alpha=\frac{0.9306L}{\sqrt{D(t-d)}} \quad (11)$$

$$\eta=1-d/t \quad (12)$$

부식손상 배관에 축대칭 셸이론을 적용하는 것은 Folias factor 보다 더욱 상세한 벌징계수 관계를 보여주게 된다. 위 식은 배관의 인장강도를 사용하였다.

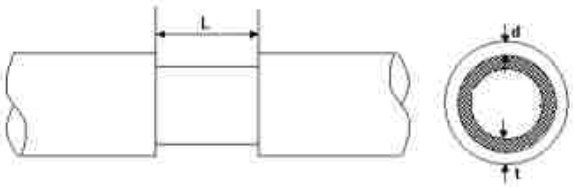


Fig. 4 Kanninen's axisymmetric shell criterion

2.4 Sims Pressure Vessel Criteria

Sims 는 압력용기와 배관에 존재하는 부식손상부를 대상으로 부식손상부의 소성붕괴압력에 대해 많은 탄소성 유한요소해석을 수행하여 잔류강도 계산을 위한 실험식을 개발하였다. 유한요소해석은 가공경화를 고려하지 않는 이상적인 탄소성재료 모델을 사용하였으며, 부식 손상부분에서 최대 2%의 소성변형률이 발생하면 파괴되는 것으로 고려하였다. Sims 는 그루브 형상에 대한 두가지 형태(좁은 그루브와 넓은 그루브)에 대해서 수학적 표현을 개발하였다. 넓은 그루브에 대한 기준은 다음과 같다[8,9].

$$P_f=\frac{2t}{D}\left(\frac{\sigma_{yield}}{0.9}\right)\frac{R_t}{1-(1-R_t)M^{-1}} \quad (13)$$

$$M=\sqrt{1+0.8\left(\frac{D}{t}\right)\left(\frac{L}{D}\right)^2} \quad (14)$$

위식이 적용되는 결함의 최소폭은 다음과 같다.

$$W>6(t-t_{mm})+0.1D \quad (15)$$

이 기준에서 부식손상부의 형상은 포물선이나 곡선형이 아니라 동일한 깊이로 손상된 것으로 가정하고 있다. 벌징계수는 ASME B31G 와 동일하다. Sims 는 손상된 부분의 소성붕괴 하중은 손상되지 않은 부분의 90% 이상이라고 제안하였다. 좁은 그루브에 대한 기준은 다음과 같다.

$$P_f = \frac{2t}{D}\left(\frac{\sigma_{yield}}{0.9}\right)\frac{R_t}{1-(1-R_t)M^{-1}} \quad (16)$$

$$M = \sqrt{1+2.5\left(\frac{D}{t}\right)\left(\frac{L}{D}\right)^2} \quad (17)$$

R_t 는 두께비(thickness ratio)로 다음과 같다.

$$R_t = \frac{t_{mm}}{t} = 1-\frac{d}{t} \quad (18)$$

3. 파손 확률 이론

3.1 FORM(first-order reliability method)

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

FORM(first-order reliability method)은 한계상태방정식(limit state function, LSF)의 Taylor 급수 전개식의 1 차 항만 사용하여 파손확률을 구하는 방법으로 모든 확률 변수들의 평균과 분산 및 분포형태를 이용하여 파손확률에 대한 상대적 지표인 신뢰도지수(reliability index)를 산정하는 방법이다[8,9].

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

$$Z = R - L \quad (19)$$

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.

$$\mu_Z = \mu_R - \mu_L, \quad \sigma_Z^2 = \sigma_R^2 + \sigma_L^2 \quad (20)$$

여기서 μ_Z, μ_R, μ_L는 확률변수 Z, R, L 의 평균이고 σ_Z^2, σ_R^2, σ_L^2은 확률변수 Z, R, L 의 분산이다.

위의 확률변수들이 정규분포이므로 파손확률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$PF = P[Z<0] = \int_{-\infty}^{0}\frac{1}{\sigma_Z\sqrt{2\pi}}\exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{Z-\mu_Z}{\sigma_Z}\right)^2\right\}dZ \quad (21)$$

여기서 새로운 확률변수 U 를 $U = (Z-\mu_Z)/\sigma_Z$ 와 같이 정의하면 식(21)의 파손확률은 다음과 같다.

$$PF = \int_{-\infty}^{-\beta}\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\exp\left\{-\frac{u^2}{2}\right\}du = P[Z<0] = \Phi(-\beta) \quad (22)$$

이때 파손확률 PF 와 표준정규분포함수인 Φ 사이에 식(22)의 관계가 성립하도록 하는 β 를 신뢰도지수(reliability index)라고 하며 다음과 같이 나타낸다.

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{\mu_R - \mu_L}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_L^2}} \quad (23)$$

편차계수(coefficient of variation, C.O.V)는 다음과 같다.

$$C.O.V = \frac{\sigma_X}{\mu_X} \quad (24)$$

여기서 σ_X 는 표준편차, μ_X 는 분산이다.

3.2 부식배관의 한계상태방정식(LSF)

파손확률 해석을 위해 먼저 파손함수는 배관의 파손에 대한 기준으로 파손압력(failure pressure)과 작용압력(operating pressure)이 포함된다. 작용압력은 배관내부의 유체의 압력이다. 파손함수(Z)는 파손압력(P_f)와 작용압력(P_a) 사이의 차이로 정의할 수 있다.

$$Z = P_f - P_a \quad (25)$$

3.3 배관의 부식

지하 매설배관의 부식 등의 결함발생은 재료의 강도저하 및 응력집중에 의해 파손의 원인이 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 는

$$P = kT \quad (26)$$

3.4 부식배관의 사례연구

미국에서는 NBS(National Bureau Of Standards)등에서 많은 부식 자료를 보유하고 있으나 국내에서는 장기간 매설된 철강재 또는 금속재료의 부식에 관한 자료가 거의 없는 실정이다.

자료수집 중 국내 동해안의 영일만 매립지역에 건설된 포항제철의 일부설비를 철거, 교체하는 과정에서 19 년간 매설되어 있던 강파일(piles)을 축

출할 때 측정한 데이터를 확보하였다. 이 데이터를 사용하여 각 파손압력모델의 파손확률을 비교해보았다. 지하에 매설된 강파일은 깊이 28m 정도까지 매설되어 있었으며 파일의 재질은 일반구조용 탄소강관 STK 41(JIS 규격)에 해당되며 부식두께의 측정치에서 필요한 변수의 값만을 Table 1 에 나타내었다[10].

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

Variable	Mean	C.O.V
P_a	5MPa	0.1
σ_{yield}	364.3MPa	0.05
σ_{uts}	451.7MPa	0.045
L	110mm	0.4
t	7.9mm	0.2
d	0.164mm	0.27
D	406.4mm	0.02
k	0.1mm/year	0.1
x	3mm/year	0.1

4. 결과 및 고찰

Table 1 의 변수값을 각각의 모델에 적용하여 산정한 부식배관의 사용년수에 따른 파손확률의 변화를 Fig. 5 에 나타내었다.

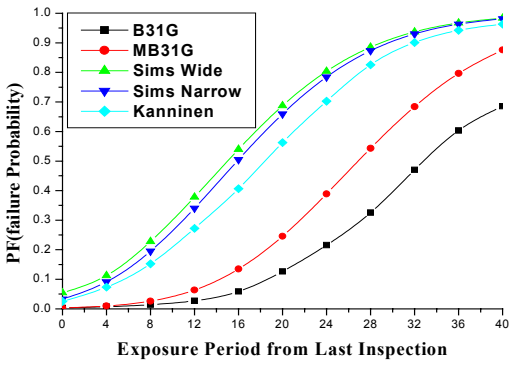
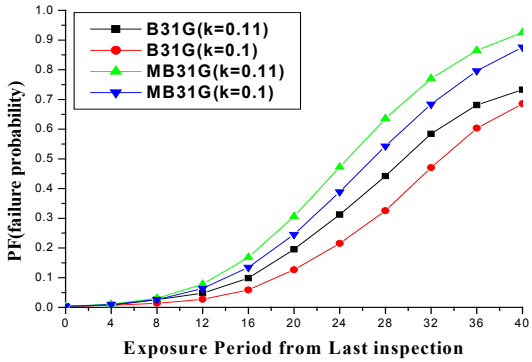
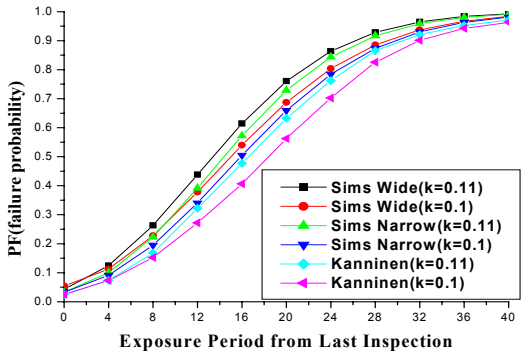


Fig. 5 A relationship between failure probability and exposure period for several failure pressure models

Fig. 5 에서 각각의 파손압력모델에 대하여 사용년수가 길어지면 파손확률이 증가하는 것을 알 수 있다. 비교한 파손압력모델 중 Sims 모델의 파손확률이 가장 크게 나타나는 것을 볼 수 있고, 같은 항복응력을 파손기준으로 택한 B31G, MB31G 모델은 상대적으로 보수성이 강함을 알 수 있다. 또한 초기 부식결함이 발견된 후 12 년 정도까지는 파손확률의 증가가 없다가 이후 급격히 증가함을 알 수 있다. 반면에 Sims 모델과 Kanninen 모델은 부식결함 발견이후 서서히 파손확률이 증가하다가 8 년 이후에는 급격히 증가함을 알 수 있다.



(a) B31G and MB31G model



(b) Sims criterion (wide and narrow groove) and Kanninen theory

Fig. 6 A relationship between failure probability and exposure period for varying corrosion rate of corrosion depth

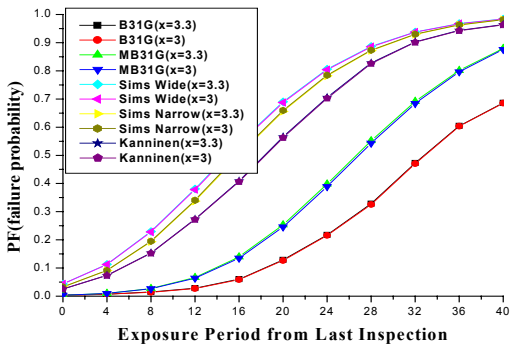


Fig. 7 A relationship between failure probability and exposure period for varying corrosion rate of corrosion length

배관의 부식깊이와 부식길이의 초기 부식률을 10%를 증가시켰을 때 부식률의 변화에 대한 파손확률의 변화를 Fig. 6 과 Fig. 7 에 나타내었다. 대부분의 파손압력모델이 부식길이의 증가는 파손확률에 큰 영향을 미치지 못하지만 부식깊이의 증가는 파손확률의 증가에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 특히 부식 깊이가 증가하면 Sims, Kanninen 모델보다 B31G, MB31G 모델의 파손확률이 크게 증가함을 알 수 있다. 또한 그래프에서는 명확하게 나타나지 않지만 부식 길이의 증가에 의해 파손확률이 미세하게 커지지만 좁은 부식 그루브에 대한 Sims 모델은 오히려 파손확률이 미세하게 감소함을 알 수 있었다. 이것은 넓은 그루브와 좁은 그루브에 대한 Sims 모델중 식(15)에 의해 결함의 폭을 고려한 후 선택하여 적용하여야 하는데 비록 영일만 강파일의 데이터에서는 결함의 폭이 측정되지 않았지만 이 데이터에서는 넓은 그루브에 대한 Sims 모델이 적절하기 때문에 좁은 그루브에 대한 Sims 모델은 적절하지 않음을 보여주는 것이라고 생각한다.

5. 결 론

본 연구에서는 확률론적 해석방법의 하나인 FORM 을 이용하여 부식배관의 파손확률을 예측하였다. 각 파손압력모델을 비교 분석하고 파손확률에 영향을 주는 변수인 부식깊이, 부식길이, 배관의 두께, 직경, 내압, 배관의 항복응력, 부식률이 각 파손압력모델의 파손확률에 미치는 영향을 체계적으로 규명하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 배관의 두께, 직경, 항복응력은 파손확률에 큰 영향을 주며 특히 배관 두께의 변화가 파손확률에 영향을 크게 미친다. 따라서 부식이 파손확률에 미치는 영향이 크다는 것을 알 수 있다. 따라서 배관의 건전성을 평가할 때 파손확률에 큰 영향을 미치는 부식깊이를 자세히 고려해야 한다.

2) 비교 분석한 파손압력모델 중 좁은 부식 그루브에 대한 Sims criterion 모델이 파손확률이 가장 크게 나타났고 상대적으로 B31G, MB31G 모델은 보수성이 강한 것으로 나타났다.

3) 배관의 매설장소 및 환경에 따라 부식률이 달라진다. 부식률의 크기가 증가하면 파손확률은 급속도로 증가하므로 배관의 매설환경 특성을 고려하여 부식률을 낮추어 파손확률의 증가를 억제하여야 한다.

후 기

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

참고문헌

(1) S. C. Choi, 2000, “Coating Flaw Prevention of Underground Buried Pipeline", Gas Safety Journal, Vol.26, No.5, pp. 25-33.
(2) O. S. Lee and H. J. Kim 1999, “Effect of External Corrosion in Pipeline on Failure Prediction.”, Proceeding of Korean Society of Mechanical Engineering, Vol. 23, No. 11, pp. 2096-2101.
(3) Hopkins, P. and Jones, D. G., 1992, "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, Vol. V, Part A, pp. 211-217.
(4) Mahadevan, S. and Haldar, A., 2000, "Probability, Reliability and Statistical Method in Engineering Design", John Wiley & Sons.
(5) Caleyo, F., Gonzalez, J. L. and Hallen, J. M., 2002, "A study on the reliability assessment methodology for pipelines with active corrosion defects", International Journal of Pressure Vessels and piping, Vol. 79, pp. 77-86.
(6) Kiefner, J. F. and Vieth, P. H., 1990, "New Method Corrects Criterion for Evaluating Corroded Pipe", 88(32), pp. 56-59.
(7) ANSI/ASME B31-1985, 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.
(8) Denny R. Stephens and Robert B. Francini, 2000, “A Review and Evaluation of Remaining Strength Criteria for Corrosion Defects in Transmission Pipelines”, Proceedings of ETCE/OMAE 2000 Joint Conference, ETCE2000/OGPT-10255
(9) Y. P. Kim, J. H. Baek, W. S. Kim and Y. T. Kho, 2002, “The Evaluation of Burst Pressure for corroded Pipeline by Full Scale Burst Test”, Korean Society of Mechanical Engineering, Vol. 26, No. 1, pp. 203-210.
(10) Y. G. Kweon, B. H. Yoon and R. W. Chang, 1992, “Corrosion Survey on Underground Steel Piles in Young-il Bay”, Journal of corrosion Science Society of Korea, Vol. 21, No. 4, pp.301-309.