



부식결함을 가진 배관의 파손확률 예측을 위한 단순화된 방법

이진한 · 김영섭 · 김래현

서울산업대학교 에너지환경대학원, *한국가스안전공사 가스안전연구원
(2009년 12월 21일 접수, 2010년 8월 24일 수정, 2010년 8월 24일 채택)

A Simplified Method for Predicting Failure Probability of Pipelines with Corrosion Defects

Jin Han Lee, Young Seob Kim, Lae Hyun Kim

Graduate School of Energy & Environment, Seoul National Univ. of Technology

*Institute of Gas Safety R&D, Korea Gas Safety Corporation

(Received 21. December. 2009, Revised 24. August. 2010, Accepted 24. August. 2010)

요 약

본 논문은 부식 배관의 파손 가능성에 대해 확률론적 분석방법을 설명하고, 이를 단순화하여 계산할 수 있는 방법을 제안하였다. 부식 배관의 파손은 운전압력이 부식 배관의 잔존강도를 초과할 때 발생하는데 이를 한계상태 함수로 설정하여 분석하면 부식이 진행됨에 따른 누출확률에 대한 불확실성을 예측할 수 있다. 이 한계상태 함수는 해석해가 존재하지 않으므로 전통적으로 불확실성을 예측하기 위해 Monte-Carlo Simulation (MCS)을 사용한다. 본 연구에서는 한계상태 함수의 해가 하나만 존재한다는 점에 착안하여 그 해를 수치적으로 찾는 방법을 제안하였다. 이 방법은 MCS를 이용한 결과와 비교할 때 오차가 적으면서도 매우 빠르게 계산할 수 있어 효율적인 방법이라 판단된다.

Abstract - An alternative method is presented for predicting failure probability of pipelines with corrosion defects in this paper. The failure of corroded pipeline occurs when the operating pressure is greater than the remaining strength of the pipeline, and a limit state function can be defined as the differences between the remaining strength and the operating pressure. Then, based on structural reliability theory, we can estimate the failure probability of corroded pipeline, which is dependent on elapsed time of the pipeline with active corrosion defects. In this study, a root finding (RF) method has been adopted to solve the limit state function instead of Monte-Carlo simulation (MCS) method which traditionally has been employed to solve those kinds of problems. The calculation results shows that there are only small differences between the RF and the MCS method but the RF has higher efficiency in calculation than the MCS.

Key words : Pipeline, Failure, Probability, Corrosion, Monte Carlo, Remaining Life

1. 서론

국내 배관 매설 역사는 선진 외국에 비해 짧은 편이나 20여년이 경과함에 따라 건전성 관리의 중요성이 대두되었다. 즉, 과거에는 매설연수가 적은 관계로 굴착공사 등 외부원인에 의한 배관손상에 초점을 두었으나 최근에는 시간의존적인 배관 사고

원인인 부식에 관심을 기울이고 있다. 도시가스 배관에서 일어나는 부식현상은 국내의 경우 피복손상으로 인한 외면부식이 대부분이며, 피복결함부의 활성화된 부식결함은 매설도양 및 방식 환경에 따라 다양한 부식속도를 가지며, 미국, 유럽 등으로부터 수집된 부식속도 데이터를 분석해보면 부식속도분포가 통계적으로 의미가 있다. 따라서 본 연구에서는 통계적 방법에 의한 부식속도 분포로부터 매설연수 경과에 따른 손상확률 변화를 예측할 수 있는 방법을 검토하였다.

*주저자: genehaan.lee@gmail.com

배관의 잔존강도 분석을 위한 방법은 이미 많은 연구가 이루어져 그 판단기준이 코드화되어있다. ASME B31G, DNV-RP-F101[1]가 대표적인 방법이다. 한편, 신뢰성공학 관점에서 보면, 위의 잔존강도 예측에 사용되는 변수인 부식깊이, 배관두께, 환경은 파손여부를 결정하는 운전압력은 불확실성을 가지므로 확률론적 관점에서 접근할 수 있다. 이 방법은 구조적 신뢰도 분석(Structural Reliability Analysis, SRA)법으로 알려져 있다. 즉, 부식배관의 항복응력 분포(Resistance)와 운전압력 분포(Stress)를 비교하는 방법이다. 한편, 이를 확률론적으로 해석하기 위해 이 두 분포를 차를 한계상태 함수로 두고 Monte-Carlo Simulation (MCS)을 통해 확률을 예측하는 방법이 가장 잘 알려진 방법 중 하나다. MCS 방법이 불확실성은 내재된 지하매설배관의 손상 확률을 예측하는데 매우 유용하며 무작위 추출 시도(Random trial)의 수를 증가시키면 정밀도도 높아진다. 그러나 MCS법은 쉽게 적용하기가 어려울 뿐만 계산시간이 많이 소모된다. 본 연구에서는 이를 보완하기 위해 부식속도를 제외한 다른 변수(운전압력, 항복강도, 환경, 관두께)는 불확실성이 없다고 가정하여 상수로 둬으로써 일반적인 수치적 근삿값 방법을 적용할 수 있도록 단순화하였다. 이러한 단순화된 방법과 전통적인 MCS방법을 비교한 결과, 단순화된 방법이 MCS방법에 의한 결과와 차이가 적으면서도 계산시간을 매우 줄일 수 있음을 알 수 있었다.

II. 접근 방법

2.1. 확률론적 모델

배관의 누출 시나리오는 통상 소누출, 대누출, 파

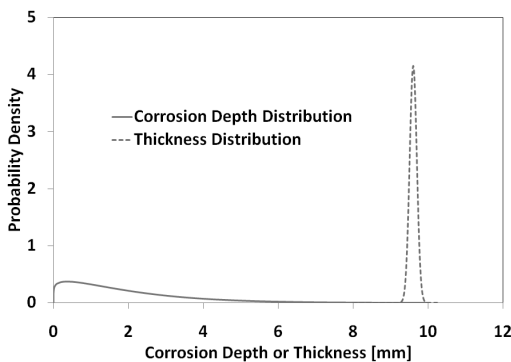


Fig. 1. Failure probability for small leak scenario.

단(Rupture) 3가지 시나리오가 고려된다. 부식원인에 의한 파단시나리오는 그 자체로 파단이 생성되는 것이 아니라 대누출 시나리오로부터 시작하여 분출되는 가스에 의해 균열이 전파되므로 여기서는 소누출 시나리오와 대누출 시나리오를 고려하였다. 소누출 시나리오는 흔히 국부부식에 의한 핀홀(Pinhole) 누출을 모사할 때 사용되며 부식깊이가 배관의 두께를 초과했을 경우이다. 즉 내압에 의한 파손은 무시된다. 따라서 소누출 시나리오를 표현하는 함수는 단순히 부식깊이와 배관 두께의 함수이며, 부식깊이가 두께를 초과했을 때 누출이 발생한다. 확률론적으로 접근하면 Fig.1과 같이 부식깊이 분포와 배관두께의 분포로 표현될 수 있으며, 겹치는 부분이 파손(누출)확률에 해당한다. Fig. 1은 후술하는 Table 1의 입력변수를 사용하여 나타낸 것이다. 한편, 대누출 시나리오는 배관의 내압에 의해 파열이 일어날 정도로 부식으로 인한 감육(Metal loss)이 발생했을 때 일어나며, 이에 대한 구조적 신뢰도 분석방법[2]에 따른 파손확률 표현을 Table 1의 입력변수를 사용하여 Fig. 2에 나타내었다. 즉 Resistance인 파손압력(잔존강도)분포와 Load인 운전압력분포의 겹치는 부분이 파손확률에 해당한다.

위의 Fig. 1과 Fig. 2에서 설명한 부식결함을 가진 배관의 파손확률을 구하기 위해서는 파손 여부를 결정하는 한계상태 함수를 정의하고 이함수에 대해 확률론적 평가를 수행하는 것이 일반적이다[1]. 위의 소누출, 대누출 시나리오에 대한 한계상태 함수는 각각 다음과 표현될 수 있다.

$$z_1(t, d) = t - d \tag{1}$$

$$z_2(p_{burst}, p_{op}) = p_{burst} - p_{op} \tag{2}$$

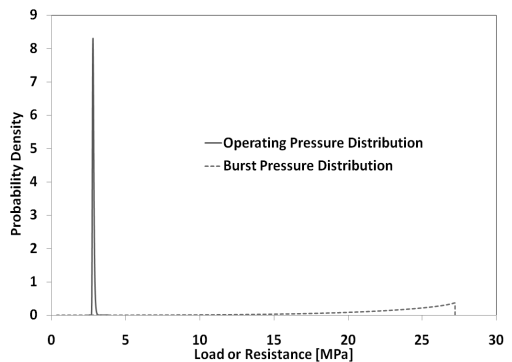


Fig. 2. Failure probability for large leak scenario.

Table 1. Random variables.

Variable	Type	mean	CoV*
Radial Corrosion Rate [mm]	Weibull	0.2	0.87 [9]
Yield Strength [MPa]	Log-normal	493(SMYS×1.1 ^{**})	0.08 [9]
Operating Pressure [MPa]	Gumbel	3.15(MAOP×1.05 ^{***})	0.03 [1]
Pipe Diameter [mm]	Normal	300	0.001 [9]
Pipe Thickness [mm]	Normal	9.6(Nominal×1.01)	0.01 [9]

* CoV : Coefficient of Variance

** SMYS : Specified Yield Strength

*** MAOP : Maximum Allowable Operating Pressure

여기서, t =배관두께, d =최대 부식결함 깊이, P_{burst} =파손압력, P_{op} =운전압력이다.

식 (1)과 식 (2)의 한계상태 함수는 부식으로 인한 손상이 $z_1 \leq 0$ 또는 $z_2 \leq 0$ 일 경우에 일어남을 의미한다.

2.2. 잔존강도 모델

식 (2)에 나타난 부식배관의 잔존강도(파손 압력)에 대한 분석모델은 Kiefner et al[3]에 의해 개발되었으며, 이를 변형하면 다음과 같은 형태의 식을 얻을 수 있다[4].

$$P_{burst} = \frac{2.3t}{D} \sigma_{yield} \left[\frac{1 - h_{avg}/t}{1 - h_{avg}/Mt} \right] \quad (3)$$

여기서, P_{burst} = 잔존강도, t =배관두께, D =관경, σ_{yield} =최소 항복응력, h_{avg} =평균결함깊이, t =부식깊이로서 계산의 용이성을 위해 부식 깊이의 50배[4]라고 가정하였다. 평균 부식결함 깊이는 최대 부식결함 깊이(d)의 1/2로 가정하였으며, 이때 M =Folius Factor로서 다음과 같이 정의된다.

$$M = \sqrt{1 + 0.6275 \frac{l^2}{Dt} - 0.003375 \frac{l^4}{D^2 t^2}} \quad \text{for } \frac{l^2}{Dt} \leq 50$$

$$M = 0.032 \frac{l^2}{Dt} + 3.3 \quad \text{for } \frac{l^2}{Dt} > 50 \quad (4)$$

2.3. 확률론적 분석을 위한 입력변수

식 (1) 및 식 (2)에 사용되는 배관의 부식결함 깊이는 시간 의존적이다. 한편 부식결함 깊이는 부식속도의 함수이다. 부식성장속도는 초기 상태를 제외하면 일반적으로 안정화된 상태에서 일정한 속도를 가진다고 가정될 수 있다. 이러한 가정은

여러 문헌에 서 발견된다[5,6,7].

그러면 외경상 부식 깊이는 다음과 같이 표현될 수 있다[6].

$$d(T) = d_0 + V_r (T - T_0) \quad (5)$$

여기서 $d(T)$ = 시간에 따른 radial방향 부식깊이, V_r = radial방향 부식속도, d_0, T_0 는 마지막 검사가 이루어진 시점(T_0)에서의 부식결함 크기이다.

식 (5)의 의미는 주어진 개별 부식결함은 매설기간(Life time)동안 일정한 부식속도를 가진다는 것이다. 그러나 각각의 부식결함은 다른 부식속도를 가진다. 이러한 각각의 부식결함들에 대한 부식속도에 대한 불확실성은 와이블(Weibull)분포로 잘 묘사된다[8,9]. 부식속도에 대해 살펴보면, Worthingham[10]은 최초 피검사를 통한 부식깊이 데이터와 5년후 데이터를 비교하여 부식속도를 계산하였다. 문헌[9]에 따르면 부식속도가 중간에서 높은 속도의 범위는 0.15-0.25 mm/yr범위에 있었다[9]. 여기서는 모든 부식결함이 배관 매설초기부터 활성화 되어 시간이 경과함에 따라 일정한 속도(0.20 mm/yr)를 가진다고 가정하였으며 식 (5)는 다음과 같이 표현된다.

$$d(T) = V_r T \quad (6)$$

확률론적 분석을 위해 부식속도를 포함해 배관의 항복강도, 운전압력, 배관의 관경 및 두께의 확률분포는 Table 1에 나타내었다.

2.4. Monte-Carlo Method

한계상태 함수인 식 (1), 식(2)는 각각 두 항이 분포함수를 포함하므로 해석적 해가 존재하지 않는다. 이러한 확률론적 모델의 문제를 풀기 위해 Monte-Carlo simulation 법은 매우 유용한 방법 중의

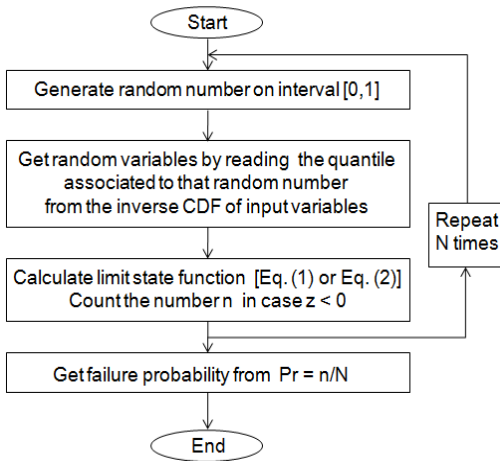


Fig. 3. Flow chart for MCS.

하나다. Fig. 3에 MCS 절차를 나타내었다.

2.5. 간단한 방법 제안

Fig. 3과 같은 방법은 Random Number를 증가시킴으로써 정밀도를 높일 수 있다. 그러나 Monte-Carlo Simulation 방법은 많은 사람에게 친숙한 방법이 아니고 계산 시간도 많이 소요된다. 따라서 본 연구에서는 이의 대안으로 부식속도만을 확률론적 변수(Stochastic Variable)로 두고 그 나머지 변수(운전압력, 항복강도, 환경, 관두께)는 불확실성이 없다고 가정하여 결정론적 변수(Deterministic variable)를 사용하였다. Table 1에 나타난 바와 같이 변동계수(Coefficient of variance, CoV)를 비교해 보면 부식속도를 제외하면 다른 변수들은 변동변수 값이 상대적으로 작음을 알 수 있다. 이는 식 (1), 식 (2)의 한계함수의 계산 값의 변동성에 가장 큰 영향을 미치는 변수가 부식속도라는 것을 의미한다.

부식속도 외에는 다른 변수를 결정론적 값, 즉 상수(여기서는 평균 값을 사용하였다.)로 두면 식 (1)은 단지 부식 깊이만의 함수로 단순화된다.

$$z_1(d) = t - d \tag{7}$$

여기서, 부식깊이는 확률론적 변수인 동시에 식 (6)과 같이 부식속도로부터 계산되는 시간의존적인 함수이다. 그리고 시간을 고정하면 부식깊이 분포는 특정 시간의 부식속도 분포를 의미한다.

식 (7)의 값이 0일 경우($d = t$)에 누출이 발생하며, 이를 확장해서 생각하면 특정 시점에서의 소누출 시나리오 발생확률은 두께를 경과시간으로 나눈 값

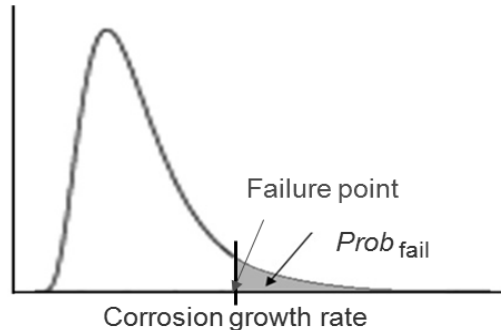


Fig. 4. Failure probability from corrosion growth rate.

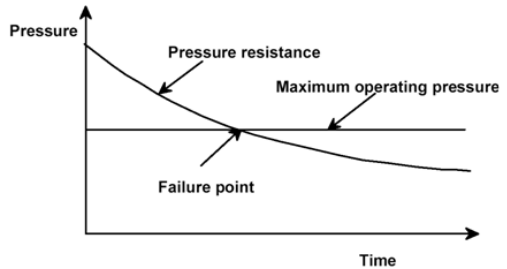


Fig. 5. Failure point of aging pipeline.

(t/T)에 상응하는 만큼의 부식속도를 가질 확률임을 의미한다.

전술한 부식속도를 가질 확률을 구하는 방법은 Fig. 4에 그 개념도를 나타내었다. 이를 수식으로 표현하면 아래와 같다.

$$Pr = 1 - cdf(V_r) \tag{8}$$

대누출 시나리오의 경우도 다음과 같이 시간의존적인 부식깊이만의 함수로 한계상태 함수를 표현하면 다음과 같다.

$$z_2(d) = p_{burst}(d) - p_{op} \tag{9}$$

그러면, 식 (9)로부터 $z=0$ 인 부식깊이를 수치적 근 찾기 방법으로 찾을 수 있으며, Fig. 5에 그 개념을 나타내었다. 특정 기간 경과 후 누출확률은 소누출 시나리오와 마찬가지로 근 찾기 방법으로 구해진 깊이, 즉 파손이 일어날 때의 그 부식 깊이(두께보다 작은 값임)에 경과시간 나눈 값(d_{burst}/T)에 상응하는 만큼 부식속도를 가질 확률이다. 이 부식속도를 가질 확률은 소누출과 마찬가지로 식

(8)로부터 구해질 수 있다.

III. 결과 및 고찰

전술한 바와 같이 MCS방법은 해석적인 해를 찾기 어려운 경우 해를 찾을 수 있는 매우 유용한 방법이다. 그리고 Random Trial의 수를 늘림으로써 정밀도도 높일 수 있다. 따라서 이 MCS 방법은 어떤 근사 모델의 정확도를 비교하기 위해 이용되기도 한다. 따라서 본 연구에서 제안한 방법을 검증하기 위해 MCS 결과와 비교하였으며, 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 이는 부식속도, 운전압력, 항복강도, 배관두께, 환경에 대한 불확실성(Uncertainty)을 가진 단일결함의 경과연수에 따른 누출확률의 변화를 나타낸다. 소누출 시나리오의 경우 MCS방법과 제안된 방법 간에는 거의 차이를 보이지 않았다. 그 이유는 입력되는 변수 중 불확실성이 포함된 통계적 변수가 부식속도 외에 배관 두께 하나만 포함되어 있기 때문으로 보인다. 또한, 대누출 시나리오의 경우에도 제안된 단순화된 방법으로 계산한 결과가 MCS방법으로 계산된 방법과 비교할 때 미소한 차이가 나는 것을 알 수 있다. 다시 말해 단순화된 방법이 MCS방법에 의한 결과와 차이가 적으면서도 간편하게 사용할 수 있으면서도 계산 시간을 매우 줄일 수 있음을 알 수 있었다. 따라서 매우 긴 배관의 부식결함 배관을 평가할 경우 제안된 방법을 사용할 경우 계산시간을 많이 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

위의 방법은 고비용이 소요되거나 환경, 곡관의 존재 등의 현실적인 문제로 피검사를 적용할 수 없는 배관에 대해 유사환경의 부식속도 분포 데이터를 활용하여 불확실성 분석을 수행함으로써 누출(파손)빈도를 확률론적 접근을 통해 구할 수 있

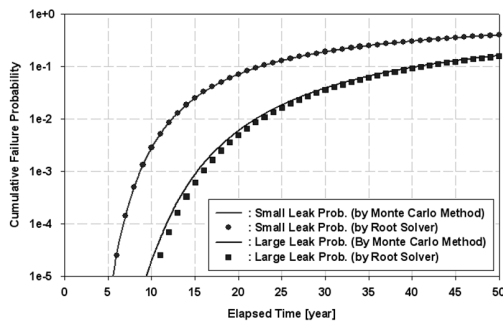


Fig. 6. Comparison between MCS and Root finding method.

는 방법이다. 여기에 결함빈도를 결합하면 단위길 이당 손상확률을 예측할 수 있다. 현재 배관의 사고빈도를 $10^4/\text{km}$ 로 규제하고 있는 상황에서 이 방법은 부식으로 인한 배관손상 위험 좀 더 정밀하게 예측할 수 있는 방법으로 사용될 수 있으며, 정량적 위험분석을 위한 토대가 될 것으로 판단된다. 한편, 현장의 실제적인 배관 내면검사(In-Line Inspection) 데이터를 본 연구에서 제시된 통계적 방법으로 분석하면, 배관의 잔존수명을 예측할 수 있는 도구로도 매우 유용하게 활용될 것으로 기대한다.

IV. 결론

배관파손 예측모델을 활용해 한계함수를 설정하고 이를 MCS 방법을 이용해 부식배관의 누출확률에 대한 불확실성을 예측할 수 있었다.

복잡한 MCS 방법 대안으로 변동계수(CoV)가 적은 변수를 확률적 변수가 아니라 그 평균값을 취하는 결정론적(Deterministic) 변수로 대체하고 여기에 한계함수의 해를 구하기 위해 근 찾기 방법을 사용한 간략화 된 예측방법을 제안하였다.

제안된 모델의 검증을 위해 사례연구(Case-Study)를 수행하여 MCS방법에 의한 예측 값을 비교한 결과, 단순화된 방법이 MCS방법에 의한 결과와 차이가 적으면서도 계산시간을 매우 줄일 수 있음을 알 수 있었다. 따라서 이 방법은 계산 소요시간이 많이 소요되는 MCS법을 대체할 수 있는 유용한 방법이라 판단된다.

참고문헌

- [1] DNV, *Corroded pipelines*, Recommended Practice DNV-RP-F101 (2004)
- [2] Melchers, R.E., *Structural Reliability Analysis and Prediction*, 2nd edition, John Wiley and Sons, NY. (1999)
- [3] Kiefner, J.F., Maxey, W.A., Eiber, R.J. and Duffy, A.R., "Failure stress Levels of Flows in Pressurized Cylinders. Progress in Flaw Growth and Fracture Toughness Testing. ASTM STP 536", *American Society for Testing and Materials*, pp 461-481 (1973)
- [4] Pandey, M.D., "Probabilistic models for condition assessment of oil and gas pipelines", *NDT&E International*, Vol. 31, No. 5, pp. 349-358, (1998)
- [5] Ahammed M., Melchers R.E., "Reliability Esti-

- mation of Pressurized Pipelines subject to localized corrosion defects”, *Int. J. Pressure vessels and Piping*, 69:267-72, (1998)
- [6] Caley F, Gonzalez J.L., Hallen J.M., “A study on the reliability assessment methodology for pipelines with active corrosion”, *Int. J. Pressure vessels and Piping*, 79:77-86, (2002)
- [7] Shu-Xin Li, Shu-Rong Yu, Hai-Long Zeng, Jian-Hua Li, Rui Liang, “Predicting corrosion remaining life of underground pipelines with a mechanically-based probabilistic model”, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 65 162-166 (2009)
- [8] Moglia, M., Davis, P., Burn S., “Strong exploration of a cast iron pipe failure model”, *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 93. issue 6, pp. 885-896, (2008)
- [9] Teixeira, A.P., Guedes Soares, C., Netto, T.A., Estefen, S.F., “Reliability of pipelines with corrosion defects”, *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 85: 228-237 (2008)
- [10] Worthingham, R.G, Fenyvesi, L.L., Morrison T.B, Desjardins, G.J, “Analysis of Corrosion Rates on a Gas Transmission Pipeline”, *Pipeline and Gas Technology Magazine*, Nov/Dec 2002 issue -pg45 (2002)