

통계적 방법에 의한 지하매설배관 부식손상빈도 예측 모델

이진한, 조영도, 김지윤, 박진희*, 우동유**

한국가스안전공사, 극동도시가스주식회사*, 서울도시가스주식회사**

Statistical Failure Frequency Estimation Model of Buried Pipelines Caused by Corrosion

Jin-Han Lee, Young-Do Jo, Ji-Yun Kang, Jin-Hee Park*, Dong-Yu Woo**

Korea Gas Safety Corporation, KukDong City Gas Co., Ltd.*, Seoul City Gas Co., Ltd.**

1. 서론

배관의 정량적 위험평가는 배관의 손상확률과 그 손상으로 인한 영향의 곱으로 표현된다. 손상확률의 예측은 결함의 존재 및 크기에 관한 검사자료를 토대로 이루어지나, 국내에서는 경제성을 이유로 배관의 결함에 대한 직접적인 검사를 실시하지 못하고 있는 실정이다. 물론 이에 따라, 정량적 위험평가방법의 적용도 어렵다. 지하 매설배관에 대한 직접적인 검사방법으로는 최근 지능형 피그(Pig)를 배관내부에 삽입하여 MFL(Magnetic Flux Leakage, 자속누출) 또는 초음파를 통해 결함을 검출하는 방법이 개발되어 미국 등 선진국에는 적용하고 있으나, 검사비용이 높고 소구경 또는 곡선 배관에 대해서는 사용할 수 없어 국내에는 일부 고압배관을 제외하고는 적용치 않고 있다. 따라서, 본 연구에서는 상대적으로 검사 비용이 저렴하면서도 일부 도시가스회사에서 적용하고 있는 피복결함 검사법인 DCVG(Direct Current Voltage Gradient, 직류전위구배법) 등 간접검사법과 피복결함을 보수하기 위한 굴착을 통해 수집한 결함크기 데이터를 분석하여 부식속도 분포함수를 얻고 손상확률을 예측하는 통계적인 방법을 제안하였다. 이 방법은 현실적으로 직접적인 검사법을 적용할 수 없는 매몰 배관에 대해 부식으로 인한 배관의 위험을 예측할 수 있는 현실적이고 경제적인 대안이라고 판단된다.

2. 접근방법

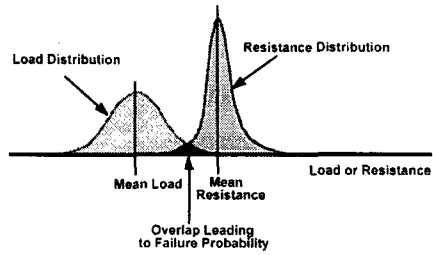
2.1 Stress-Resistance Model

일정한 결함크기를 가진 부식부의 손상확률은 일반적으로 (그림 1)과 같이

Stress(Load=운전압력)과 Resistance(배관강도)를 결합한 Stress-Resistance Model로부터 예측된다. 배관 부식부의 손상확률은 이로부터 유도된 예측식은 다음과 같이 표현된다. (Bay, 2000).

$$P_{failure} = 1 - \Phi(\beta) \quad (\text{식 1})$$

$$\beta = \frac{\ln \left[\frac{R_m}{S_m} \right]}{\sigma_{\ln RS}} \quad (\text{식 2})$$



(그림 1) Stress-Resistance Model

(식 3)

여기서, Φ 는 표준 정규분포 곡선 아래의 면적(Standard Cumulative Normal Distribution)을 말하며 β 는 Safety Index로 표현된다. 여기서 R은 저항 즉 배관의 잔존강도, S는 하중 즉, 운전압력에 해당하며, 첨자 m은 평균을 의미한다. V는 분산(Variance)을 의미하며 충분한 정보가 없을 경우 V_{Rm} 은 0.212 bar, V_{Sm} 은 0.02 bar로 주어진다. (Bea, 1998)

부식배관의 잔존강도(R_m)는 ASME B31G의 잔존강도 평가식에 1.15를 곱하였다. 이는 평가식의 보수성을 보정하였다.

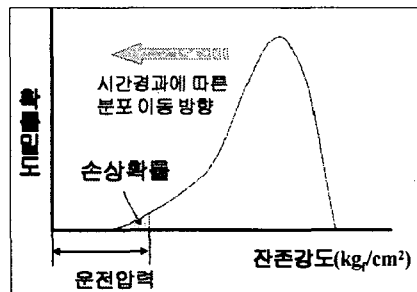
$$R_m = P_f = \frac{2.3t}{D} \sigma_{yield} \left[\frac{1 - h_{avg}/t}{1 - h_{avg}/Mt} \right] \quad (\text{식 4})$$

여기서, P_f = 잔존강도, t =배관두께, D =관경, σ_{yield} =최소 항복강도, h_{avg} =평균결함깊이, l =부식길이이다. M =Folius Factor로서 다음과 같이 표현된다[6].

$$M = \sqrt{1 + 0.6275 \frac{l^2}{dt} - 0.003375 \frac{l^4}{d^2 t^2}} \quad \text{for } \frac{l^2}{dt} \leq 50 \quad (\text{식 5})$$

2.2 압력이 일정할 경우

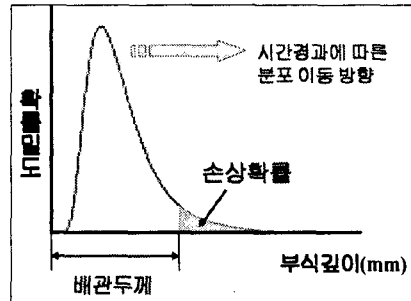
국내 도시가스 공급배관(Distribution Pipeline)은 대부분 거의 일정한 압력으로 운전되며, 수송배관(Transmission Pipeline)보다 저압으로 운전된다. 따라서 운전압력의 편차는 무시할 수준이 된다. 이 경우 운전압력이 일정하다고 가정하면, 손상확률은 잔존강도를 초과할 경우에 해당되며, 그 모델 개념도는 Fig. 2와 같다.



(그림 2) 손상확률 예측모델(일정압력)

2.3 운전압력이 낮을 경우

국내 일반도시가스회사의 경우 대부분 배관 운전압력이 10km/cm²이하로 운전된다. 한편 (식 4)의 잔존강도 평가식뿐만 아니라 현재 개발된 대부분의 잔존강도 평가식이 은 이와 같이 저압일 경우 적용이 어렵거나 부정확하다. 따라서 이 경우 운전압력 및 잔존강도를 무시하고 단지 부식깊이만으로 손상확률을 예측하는 방법이 유용하다. 즉 그림 3과 같이 분포도의 배관두께 이상인 아래 면적이 소누출 시나리오의 손상확률이 된다. 일정기간 경과후의 결합깊이 성장속도 분포를 결합하여 구하게 된다.



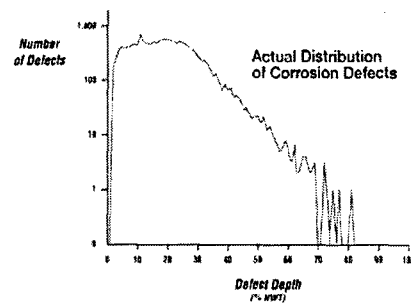
(그림 3) 손상확률 예측모델(저압)

분포는 현재의 결합깊이 분포, 결합

3. 모델적용

3.1 부식데이터 분류

매물배관 부식은 배관의 방식방법, 방식전위, 토양비저항, 토양산성도 등 환경적 영향에 의존적이다. 따라서 서로 다른 방식환경에서 수집된 데이터는 균일한 데이터가 아니므로 서로 결합된다면 데이터의 신뢰성이 매우 저하된다. 따라서 부식깊이 데이터는 위의 방식환경에 따라 분류되어 수집되어야 한다. (그림 4)에 실제 ILI(In-Line Inspection)을 통해 구한 부식깊이 데이터분포이다.



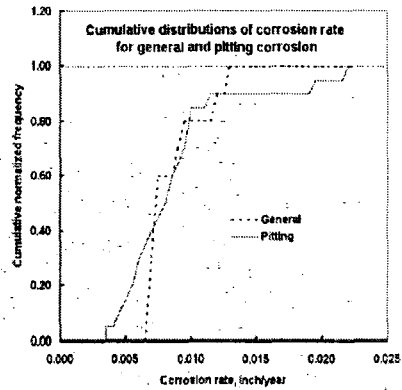
(그림 4) 실제 부식깊이 분포

3.2 부식속도 분포

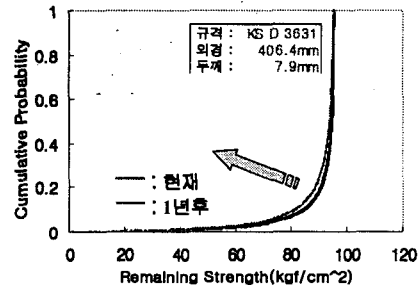
굴착 등으로부터 얻어진 부식결함 크기 데이터는 일정한 부식속도를 가정하면 매설연도를 나누어 부식속도를 계산할 수 있다. 이렇게 수집된 부식속도 데이터는 Regression을 통해 특정 분포함수로 가정되고 그 분포함수의 Parameter를 구한다. Fig. 4에 미국 OPS(Office of Pipeline Safety)에 자료에 근거한 실제 결합성장속도(부식속도)의 누적분포의 예를 나타내었다. (그림 5)에서 알 수 있듯이 결합성장속도 분포도 결합깊이 분포와 마찬가지로 로그정규분포를 가정할 수 있다.

3.3 손상확률 예측

부식속도 분포 데이터로부터 매설연수에 따라 부식깊이를 계산할 수 있다. 이로부터 결함부 잔존강도는 (식 4)로서 간단히 계산된다. 그러나 (식 4)의 입력값인 부식깊이가 분포함수 형태로 주어지기 때문에 해석적인 해를 구하기 어려우며, 이런 이유로 여기서는 Monte-Carlo Simulation을 사용하였다. 이 방법은 입력변수가 분포 함수로 표현될 경우 결과값 역시 분포도로 표현될 수 있으며, 이의 사용을 위해 Random Trial법을 사용한다. 즉, 입력 값이 로그 정규분포 함수라면, 로그 정규분포를 가지는 Random Variate를 발생시키고 그 값을 입력 값으로 하여 발생한 Variate를 부식깊이 입력값으로 하여 반복적 (식 4)를 계산을 하면 결과값도 (그림 6)와 같이 분포도로 나타난다. 그러면, 배관의 최대 운전압력이 일정하다고 가정할 때 그 압력까지의 확률밀도분포도 아래면적이 손상확률이 된다.[5] 실제 계산에 있어서는 아래면적을 적분하여 구하는 것이 아니라 누적분포로부터 직접 계산된다.



(그림 5) 부식속도 분포



(그림 6) 잔존강도 추정 예

3.4 일정기간 동안 손상확률

손상확률을 예측하는 이유는 일정시간 경과후의 손상확률을 예측함으로써 손실을 최소화하려는 위험예측에 활용하기 위해서다. 그러나 계산된 손상확률은 특정시점의 예측된 손상확률이며 시간 의존적이어서 시간에 따라 연속적인 값으로 표현된다. 따라서 확률의 일반적인 표현인 단위 기간당 확률이 계산되어야 하는데 단순하게 기준시점으로부터 일정기간 경과후의 손상확률의 차이로 표현될 수 있다. 즉, 일정기간 경과 후에는 부식속도에 따라 부식깊이는 증가하고 잔존강도는 줄어들게 되며 이에 따라 손상확률은 증가하게 된다.

3.5 단위구간의 손상확률

부식크기가 알려진 결함에 대한 손상확률 예측방법은 실제 현장에서는 활용하기에는 그 유용성이 떨어진다. 그 이유는 통상 결함이 발견되면 대부분 그 결함은 수리되거나, 더 이상 부식이 진행되지 않도록 조치된다. 따라서 위 식은 결함

이 알려져 있으나 수리되지 않았을 경우에 한해 제한적으로 사용된다.

앞서 계산된 손상확률은 개별결함 하나의 손상확률이다. 즉, 모든 결함의 크기를 알 수 있는 경우에 모든 결함부의 손상확률의 합으로 단위배관의 손상빈도를 구할 수 있다. 그러나 직접검사법을 적용하지 않는 이상 결함크기를 모두 알 수 없어 현실적으로는 적용이 어렵다. 따라서 단위배관의 손상확률은 부식결함의 빈도와 알려지지 않은 개별결함 손상확률의 곱으로 표현된다. 예로서, DCVG검사를 수행한 배관의 경우 굴착을 통해 부식결함이 확인되면 수리를 하게된다. 그러나, DCVG의 특성상 부식결함을 포함할 수 있는 부식결함을 100% 발견할 수 없다. 실제 DCVG를 통해 발견될 수 있는 피복결함 발견율은 85%정도라고 한다 [9]. 따라서 검사를 수행한 단위구간의 손상확률은 검사와 굴착을 통해 확인된 부식결함빈도와 결함 미발견률(1/발견율 - 1)과의 곱으로 예측될 수 있다.

3.6 누출 시나리오 가정

전술한 방법으로 부식결함으로 인한 누출빈도를 예측할 수 있다. 그러나 누출 크기는 알 수 없다. 따라서 누출 홀크기를 결정하기 위해서는 Historical 데이터를 분석하여 그 크기를 가정하는 방법을 사용하였다. 일반적으로 누출크기는 누출을 대표할 수 있는 홀의 크기에 따라 대누출, 소누출, Rupture 3가지로 구분될 수 있다[4]. 즉 첫 번째는 부식결함으로 인해 부식부의 잔존강도가 내압을 견디지 못하여 누출이 발생하는 경우로서 고압배관에서는 무시할 수 없으며 대누출 시나리오에 사용된다. 두 번째는 일반적으로 운전압력이 낮은 경우로서, 부식결함깊이가 배관두께를 초과하여 누출이 발생하는 경우 하는 경우이다. 이는 소누출로 가정되며 도시가스배관에서 흔히 나타나는 편홀누출 손상을 잘 설명한다. 세 번째는 첫 번째의 심각한 경우로서 누출하는 가스의 압력으로 인해 배관이 찢어지면서 파열(Rupture)되는 경우이다. 10kgf/cm^2 이하로 운전되는 일반 도시가스회사 배관의 경우 무시할 수 있다.

3.7 모델 활용

부식원인에 의한 누출은 시간의존적이다. 즉 부식이 진행되면 부식깊이는 어느 정도 일정하게 증가하게 되며, 부식깊이가 배관두께에 근접하면 누출확률은 급격히 증가한다. 한편, 일정기간 경과후 부식속도를 예측할 수 있으면 누출확률을 예측할 수 있다는 것을 의미한다. 또한 누출확률을 예측할 수 있으면 여기에 피해영향(Consequence)을 곱하여 손실(Loss)을 예측할 수 있다. 손실예측결과는 비용/편익분석을 통한 투자효용성, 배관의 수명주기, 최적검사주기 결정 등 도시가스회사의 배관 유지보수 전략수립에 매우 유용하게 사용될 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 매설배관에 대한 간접검사 데이터를 분석하여 부식결함 손상확률을 예측하는 모델 및 그 절차를 제시하였다. 도시가스회사에서 배관 내부검사 등 직접검사법을 사용할 수 없는 국내 현실을 감안할 때 여기에 제시된 모델 및 절차는 현실적인 대안이라고 본다.

5. 참고문헌

- [1] Leeds, J. M., "Modified analysis method helps coating fault, pipe assessment", Journal of Pipeline & Gas Industry Vol. 83 No. 3 (2000)
- [2] Bea, R. G., "Pipeline Inspection, Maintenance and Performance Information System Progress Report", MMS (1998)
- [3] Sheikh, A. K., Boah, J. K. and Hansen, D. A., "Statistical Modeling of Pitting Corrosion and Pipeline Reliability", Corrosion, Vol. 46, No. 3, March (1990)
- [4] Fearnough, G. D., "The Control of Risk in Gas Transmission Pipeline. Institute of Chemical Engineers, Symposium Series No. 93 (1985)
- [5] Robert, G. W., Morrison, T. B., "Analysis of Corrosion Rates on a Gas Transmission Pipeline", 2002 NACEexpo and Conference, Denver Canada (2002)
- [6] Kiefner, J. F., Vieth, P. H., "A Modified Criterion for Evaluation the Remaining Strength of Corroded Pipe", A Report for the Pipeline Corrosion Supervisory Committee of Pipeline Research Committee of American Gas Association, Project PR 3-805 (1989)
- [7] Hiroshi, F. and Atsushi, W., "Monte Carlo Simulation for The Strength of Unidirectional Composites", Univ. of Tokyo
- [8] Hald, A., "Statistical Theory with Engineering Applications", John Wiley & Sons, Inc., New York (1952)