

DCVG 결과를 이용한 지하매몰배관 부식부 손상확률 예측

이진한, 박교식, 김진준, 박진희*, 우동유**
한국가스안전공사, 극동도시가스주식회사*, 서울도시가스주식회사**

Estimation of Corrosion Failure Probability of Buried Pipelines Using the DCVG Results

Jin-Han Lee, Kyo-Shik Park, Jin-Jun Kim, 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 각종 운전자료와 검사자료를 토대로 이루어지나, 지하 매설배관에 대한 직접적인 검사방법으로는 최근 자속누출(Magnetic Flux Leakage, MFL)을 이용한 지능형 피그를 사용한 검사방법이 개발되어 있으나, 검사비용이 높고 소구경 또는 곡선 배관에 대해서는 적용할 수 없다. 따라서, 본 연구에서는 상대적으로 검사 비용이 저렴하면서도 현실적으로 적용이 가능한 검사법중 배관의 피복결함을 탐지하는 검사법인 DCVG(Direct Current Voltage Gradient, 직류전위구배법)의 결과를 이용한 손상확률 예측방법을 제시하였다. 이 방법은 간접적인 검사방법으로 배관의 결함 위치는 알 수 있으나, 결함크기를 직접 측정할 수 없다. 따라서, 피복결함을 보수하기 위한 굴착시 수집한 결함크기 데이터를 이용하여 결함깊이와 결함성장속도 분포를 추정하였다. 그 다음 Monte Carlo Simulation을 이용하여 결함부 잔류강도 분포를 예측하고 운전압력과 비교하여 손상확률을 예측하였다. 이 방법은 현실적으로 직접적인 검사법을 적용할 수 없는 매몰 배관에 대해 부식으로 인한 배관의 위험을 예측할 수 있는 경제적인 대안이라고 판단된다.

2. 접근방법

가. DCVG의 유용성

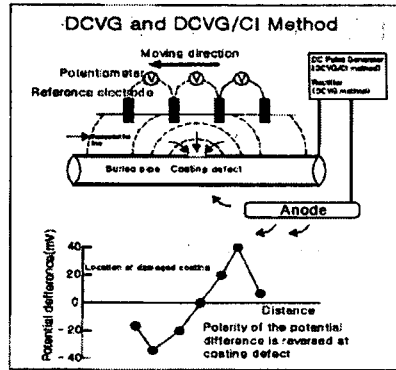
우리나라에 매설된 강관의 대부분은 폴리에틸렌 피복강관을 사용하며, 전기적인 방식조치를 하고 있다. 특히, 천연가스 배관의 경우 부식은 일반적으로 외면 부식만 고려되며, 내부표면 부식은 무시된다. 피복강관은 제작, 시공불량 등으로 인해 일정부분의 피복부 손상이 존재하게 되며 외부표면 부식은 대부분 피복 불

량부에서 나타난다. 물론 부식진행 여부는 방식성능, 토양환경에 의존한다. 일반적으로 방식환경하에서 피복결함부에서 부식이 진행되는 것은 1%미만이다.[1]

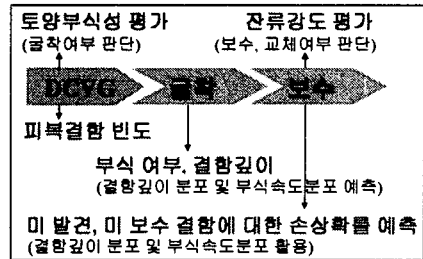
나. DCVG 검사 시나리오

피복결함 검사의 시나리오는 ①피복결함 검사 → ②토양부식성 평가 → ③굴착(부식결함 크기측정) → ④보수단계로 진행된다.

피복결함 검사단계에서 단위 길이당 피복결함 빈도데이터를 얻고, 토양부식성 평가를 통해 굴착여부를 판단한다. 방식상태에서 부식진행 여부는 결함부 방식전위, 토양비저항, 토양 pH 등 여러 가지 요인에 영향을 받게되며, AWWA(American Water Work Association) C105 등에서 토양의 부식성에 대해 평가기준이 나와 있으나, 방식조건하에서의 명확한 판단기준이 정립되어 있지 않다. 그 다음 굴착을 통해 부식진행 여부와 결함크기를 측정하게 되는데 본 연구에서는 여기서 얻어진 데이터를 손상확률 예측에 사용한다. 이에 대해서는 후술하였다. 마지막으로 부식부 잔류강도 평가를 통해 용접보수, 재배관, 피복보수 여부를 결정한다.



(그림 1) DCVG법 개요도



(그림 2) DCVG검사를 이용한 손상확률 예측절차

다. 결함깊이 분포함수 추정

굴착단계에서 얻어진 부식결함 크기 데이터는 연도, 방식방법, 토양비저항 별로 분류되어 수집된다. 이렇게 수집된 데이터 셋은 Regression을 통해 특정 분포함수로 가정되고 그 분포함수의 Parameter(평균과 표준편차)를 구한다. 여기서는 결함깊이 확률밀도 함수는 로그정규분포를 가진다고 가정하였다.[2] 로그정규분포 함수는 다음과 같이 표현된다. Parameter를 예측하기 위한 데이터 Regression은 잘 알려진 Least Square법을 사용하였다.

$$f(T') = \frac{1}{\sigma_{T'} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{T' - \mu'}{\sigma_{T'}} \right)^2}$$

다. 부식속도 분포함수 추정

굴착단계에서 얻어진 부식결함 크기 데이터는 일정한 부식속도를 가정하면 매 설연도를 나누어 부식속도를 계산할 수 있다. 이렇게 수집된 부식속도 데이터는 Regression을 통해 특정 분포함수로 가정되고 그 분포함수의 Parameter를 구한다. 여기서는 결함깊이 확률밀도 함수는 와이블분포를 가진다고 가정하였다.[3] 와이블분포를 가정하여 Parameter(평균과 Shape Factor)를 예측한다. 결함깊이와 마찬가지로 Parameter를 예측하기 위한 데이터 Regression은 Least Square 법을 사용하였다.[4]

$$f(T) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{T}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{T}{\eta} \right)^\beta}$$

부식속도 데이터는 부식배관의 수명예측 즉, 일정기간 경과 후 손상확률을 예측하기 위해 사용된다.

라. 부식결함의 잔존강도 평가

부식배관의 잔존강도의 평가는 ASME B31G 코드, RSTRENG Software, DNV RP-F101 등 이미 많은 평가절차 및 판단식이 개발되어 있다. 이들 판단식은 보수여부를 판단하는 기준이므로 어느 정도의 보수성을 가지고 있다. 따라서 실제 부식배관의 잔존강도는 판단식에 따라 계산된 강도값보다는 약간 크며 이는 약 10~20%다. 여기서는 전통적인 평가식인 ASME B31G에 따른 평가식을 사용했으며 아래와 같다.[5]

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

여기서, P_f = 잔존강도, t =배관두께, D =관경, σ_{yield} =최소 항복강도, h =결함깊이이다. M =Folius Factor로서 다음과 같이 표현되며 연구자에 따라서 차이가 있다.

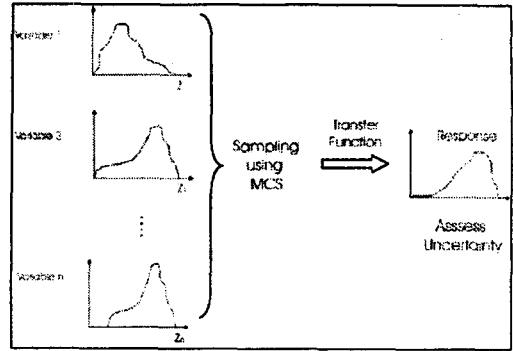
$$M = \sqrt{1 + 0.6275 \frac{l^2}{dt} - 0.003375 \frac{l^4}{d^2 t^2}} \quad \text{for} \quad \frac{l^2}{dt} \leq 50$$

마. 잔존강도의 분포 예측

특정 결함깊이를 가진 배관의 결함부 잔존강도는 (식 1)로서 간단히 계산된다. 그러나, 여기서는 기존 결함깊이 데이터들로부터 검사시 발견되지 않은 결함 또는 검사를 수행하지 않은 유사환경에 놓인 배관의 손상확률을 예측하는 접근방법을 사용하였으므로 결함깊이가 확률함수로 표현되고 그러면 잔존강도도 분포함수로 표현된다.

바. Monte-Carlo Simulation

Monte-Carlo Simulation 법은 입력변수가 분포 함수로 표현될 경우 결과값 역시 분포도로 표현될 수 있으며, 이의 사용을 위해 Random Trial법을 사용한다. 즉, 입력값이 로그 정규분포 함수라면, 로그 정규분포를 가지는 난수를 발생시키고 그 값을 입력값으로 하여 발생된 난수로 반복적 계산을 하면 결과값 또한 분포도로 나타난다. Monte-Carlo



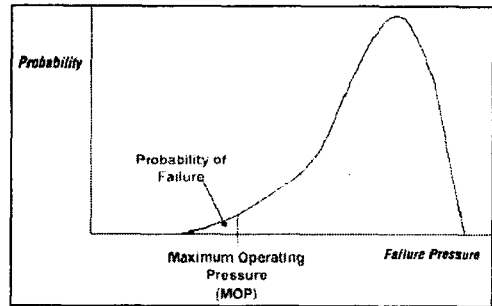
(그림 3) Monte-Carlo Simulation 개념도

Simulation의 개념도를 (그림 3)에 나타내었다.[6]

여기서는 부식배관의 잔존강도 분포를 계산하기 위해 입력변수중 부식결함 깊이를 분포함수로 사용하였다. 전술한 바와 같이 수명예측을 위해서는 추가적인 입력변수로 부식속도도 필요하게 되며 이 또한 분포함수로 주어진다.

바. 손상확률 예측

결함깊이 분포와 부식속도(결함성장속도)로부터 예측된 잔류강도 분포는 손상확률을 예측하는데 사용된다. (그림 4)와 같이 부식부 잔류강도분포가 예측된다. 그러면 배관의 최대 운전압력이 알려져 있을 경우 그 압력까지의 분포도 아래면적이 그 손상확률이 된다.[7]



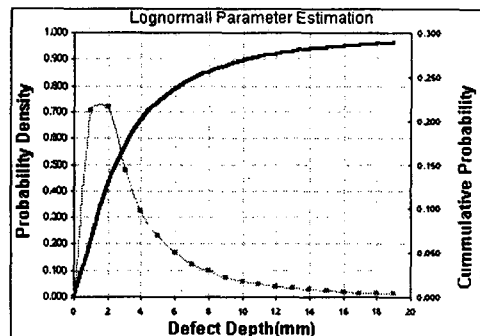
(그림 4) 손상확률 예측방법

3. 예측 결과

(그림 5)에 결함깊이 데이터로부터 얻은 확률밀도함수와 누적확률함수를 구하는 예를 나타내었다.

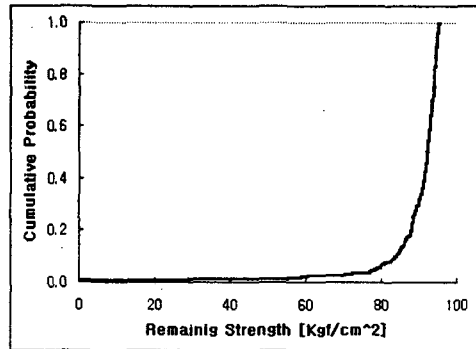
이로부터 얻어진 분포함수로부터 이 분포도를 가지는 난수를 발생시킨다. 난수의 수는 많으면 많을수록 정밀도는 높아지나 계산시간을 고려하여 정할 수 있다.

(그림 6)에 발생된 난수 개수만큼을 결함깊이 입력변수로 하여 외경



(그림 5) 로그 정규분포 예

400mm, 두께 7.9mm, (식 3)에 따라 잔존강도를 계산한 결과를 누적 확률로 나타내었다. 이 결과로부터 (그림 5)에 따라 계산된 평균 부식깊이 0.9mm, 표준편차 1.12인 확률을 가지는 결함에 대한 잔존강도는 0에서 최대강도인 95 kg/cm² 까지 (그림 6)과 같은 확률을 가지는 것으로 계산되었다. 이 분포도로부터 운전압력에 따른 손상확률을 쉽게 계산할 수 있다.



(그림 6) 잔존강도 분포 예측결과

4. 결론

국내 일반 도시가스사업자의 공급배관의 매설후 검사는 지상에서 FID를 이용한 누출검사, 가압하여 일정시간 압력강하를 측정하는 기밀검사 이외의 방법은 적용되지 않는다. 최근에는 방식효율을 높이고 부식진행을 근원적으로 차단하기 위해 피복결함 검사법(DCVG)이 확대되고 있다. 그러나, 이들 데이터를 활용한 위험평가 기술은 적용되지 않고 있으며, 지난 80년 초반에 개발된 정성적인 배관 위험평가법인 SPC법이 사용되고 있다[8]. 그러나 최근에는 많은 연구자, 엔지니어들에 의해 위험비용 분석, 수명예측 등 평가결과의 유용성 때문에 정량적인 위험평가방법 적용을 시도하고 있다. 정량적인 위험평가는 사고 확률(Probability or Frequency)과 사고 영향(Consequency)의 곱으로 표현되며[9] 본 연구의 결과는 부식원인에 의한 배관의 사고확률을 예측하는데 유용하게 사용될 수 있으리라 본다.

5. 참고문헌

- [1] Leeds, J. M., "Modifide 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] Stephen F. D. and Eric H. B., "Weibull Parameter Estimation -Theory and Background Information", Connection Reserve Technology, LLC (2001)
- [5] 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)

[6] Hiroshi, F. and Atsushi, W., "Monte Carlo Simulation for The Strength of Unidirectional Composites", Univ. of Tokyo

[7] Robert, G. W., Morrison, T. B., "Analysis of Corrosion Rates on a Gas Transmission Pipeline", 2002 NACE Expo and Conference, Denver Canada (2002)

[8] 한국가스안전공사, "도시가스배관 안전성평가(SPC) 기법 개정판" (1998)

[9] API, "Risk Based Inspection Base Resource Document", API Publication 581, First Edition, May 2000, American Petroleum Institute (2000)