

외부 부식에 의한 천연가스 수송용 고장력 강관의 신뢰성 평가 Reliability Estimation of High Strength Natural Gas Pipeline by External Corrosion

이역섭¹, *#김홍민², 김동혁², 최혜빈²,

O. S. Lee¹, *#H. M. Kim(kyemong@paran.com)², D. H. Kim², H. B. Choi²

¹인하대학교 기계공학부, ²인하대학교 기계공학과 대학원

Key words : B31G, MB31G, Pipeline, Reliability, Probability, Corrosion, FORM(First Order Reliability Method)

1. 서론

세계적으로 천연가스의 사용은 높은 효율을 가진 청정 에너지로서의 장점으로 인하여 꾸준히 증가하는 추세이다. 이러한 천연가스는 LNG(액화 천연가스) 상태로 공급되거나, 다시 기화시켜 지하 매설 가스배관을 통하여 전국적으로 공급되고 있다¹. 이처럼 사용량 및 공급 경로가 다양해지면서 천연가스 수송용 매설 배관의 안전성에 대한 관심이 자연스럽게 높아지고 있다. 매설 배관의 수명을 지배하는 많은 인자들 중에서 부식에 의한 영향이 많은 부분을 차지하고 있으며, 부식에 의한 손상은 배관의 운송 능력 및 안전도저하에 큰 영향을 끼치는 것으로 조사되고 있다.

본 연구에서는 매설된 배관의 외부 부식에 따른 손상특성을 바탕으로 확률론적인 방법을 이용하여 배관의 신뢰성을 예측해 보았다.

2. 부식 손상부위 평가

내압만이 작용하는 가스 수송 배관의 부식 손상부위를 평가하기 위해 가장 널리 사용되는 기준이 1960년대 초기에 개발된 유효 면적방법이다. 이 방법은 Fig. 1 (a)에서처럼 부식에 의한 배관의 강도 감소는 배관의 축방향을 따라 측정된 두께 감소에 비례한다고 가정하였다. 결함이 존재하는 배관의 파손압력은 다음 식으로 표현된다².

$$P_f = \sigma_{flow} \frac{2t}{D} \left[\frac{1 - A/A_0}{1 - (A/A_0)M^{-1}} \right] \quad (1)$$

여기서 P_f 는 파손압력, σ_{flow} 는 재료의 유동응력, D 는 배관의 외경, A 는 투영된 부식의 면적, L 은 투영된 부식의 길이, t 는 배관의 두께, d 는 최대 부식 깊이, A_0 는 $L \times t$, M 은 별징계수(Folias factor)이다.

2.1 ASME B31G Criterion

유효 면적방법이 처음 개발되었을 때, 현장에서 사용하기 쉽도록 간단하고 보수적인 형태의 식이 필요하여 다음과 같은 변형 식이 제시되었다. 식 (1)과 식 (2)를 비교해보면, ASME B31G에 사용된 세 가지 가정을 알 수 있다. 우선, 유동응력은 항복강도의 1.1 배로 가정하였고, 부식 손상부의 형상을 Fig. 1 (b)와 같이 포물선 형상으로 근사할 수 있으며, $L^2/Dt \leq 20$ 인 경우에만 사용할 수 있게 별징계수를 두 개의 항으로 간략하게 표현하였다.

$$P_f = \frac{2t}{D} (1.1\sigma_{yield}) \left[\frac{1 - (2d/3t)}{1 - (2d/3t)M^{-1}} \right] \quad (2)$$

$$M = \left[1 + 0.8 \frac{L^2}{Dt} \right]^{1/2} \quad (3)$$

2.2 MB31G(Modified B31G) Criterion

MB31G 평가기준은 B31G의 유동응력에 대한 보수성을 줄이기 위한 시도를 하였고, 부식 손상부위를 가정하는 형상인자를 0.85로 변경하였다. 좀 더 정확한 수치적 접근을 위하여 별징계수를 세 개의 항으로 나누어 표현하였다.

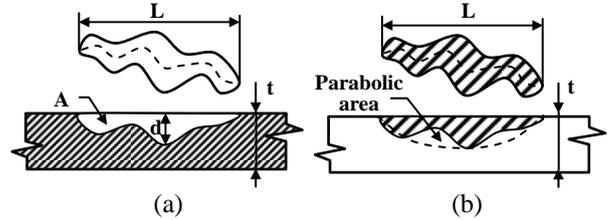


Fig. 1 (a) A simplification of a corroded surface flow in a pipeline. (b) Section through an idealized corrosion defect

다음의 식 (4)는 $L^2/Dt \leq 50$ 인 경우에 사용할 수 있다.

$$P_f = \frac{2t}{D} (\sigma_{yield} + 69MPa) \left[\frac{1 - 0.85(d/t)}{1 - 0.85(d/t)M^{-1}} \right] \quad (4)$$

$$M = \left[1 + 0.6275 \frac{L^2}{Dt} - 0.003375 \frac{L^4}{D^2t^2} \right]^{1/2} \quad (5)$$

3. 파손확률 이론

본 연구에서는 파손압력을 산출하는 모든 변수들을 정규분포로 가정하였고, 파손확률의 간접적인 지표인 신뢰도 지수(β , Reliability Index)를 계산하여 표준 정규 확률분포에 적용, 파손확률을 산출하였다. 파손확률 해석에 있어서 가장 먼저 수행해야 하는 과정인 파손에 대한 한계상태 방정식(Limit State Function)은 식 (6)과 같다.

$$Z = R - L \quad (6)$$

R (Resistance)은 저항성분에 대한 확률변수 이고, L (Load)은 하중성분에 대한 확률변수이다. 각각의 확률변수에서 하중성분이 저항성분을 넘어서는 경우 재료가 파손되었다고 할 수 있다. 본 연구에서는 파손압력 P_f 를 저항성분으로, 한국 가스공사에서 제시한 천연가스 수송시 배관 내부압력인 작동압력(Operating Pressure)을 하중성분으로 하여 파손확률을 산출하였다. 파손확률에 대한 확률 밀도함수는 식 (7)과 같고, 새 확률변수 $U = (Z - \mu_Z)/\sigma_Z$ 를 도입하면 식 (8)과 같이 간단하게 표현할 수 있다.

$$PF = P(Z < 0) = \int_{-\infty}^0 \frac{1}{\sigma_Z \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{Z - \mu_Z}{\sigma_Z} \right)^2 \right] dZ \quad (7)$$

$$PF = \int_{-\infty}^{-\beta} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{U^2}{2} \right] dU = P[Z < 0] = \Phi(-\beta) \quad (8)$$

신뢰도 지수를 구하는데 있어서 식 (8)을 사용하기 위해서는 한계 상태 방정식이 선형이어야 한다. 만약 비선형인 경우 식 (8)을 사용하여 신뢰도 지수를 구할 수 없기 때문에 Rackwitz와 Fiessler가 제안한 Taylor 급수 전개식을 사용하여 선형 근사 시킨다.¹ 본 연구에서는 근사 과정에서 $\Delta\beta$ 가 0.001보다 작아질 때까지 과정을 반복하여 신뢰도 지수를 계산하였다. 한계 상태 방정식의 Taylor 급수 전개식에서 1차 미분 근사항만 사용하여 파손확률을 구하는 경우 이를 FORM(First Order Reliability Method)이라고 한다.

4. A case study

본 연구에서는 천연가스 수송용 고장력 강관(API 5L X65 Size 30)에 대해 외부 부식에 의한 파손확률을 산출하였다. 변수들에 대한 평균(Mean) 값 및 변동계수(C.O.V, Coefficient Of Variables)는 Table 1에 각각 정리하였다.

Table 1 Variables and parameter used in this study

Variables	Mean	C.O.V
$\sigma_{operating}$	17.5 MPa	0.1
σ_{yield}	448 MPa	0.067
D	0.762 m	0.03
L	0.200 m	0.2
t	0.0175 m	0.05
d	0.003 m	0.2

5. 결과

5.1 두께방향 부식에 의한 파손확률

내압이 존재하는 천연가스 수송용 고장력 강관에 대해 외부 부식의 깊이 증가에 따른 파손확률을 Fig. 2에 나타내었다. MB31G 평가기준이 B31G 평가기준보다 허용 부식 깊이가 길게 산정되었다. 부식 깊이가 0에 근접할 때 파손확률이 존재하는 것은 배관의 축방향으로 이미 부식의 길이 L 이 배관 파손에 큰 영향을 끼치고 있기 때문이다.

5.2 배관 외경 변화에 의한 파손확률

Table 1에서와 같이 모든 변수들의 평균 값이 존재하는 가운데 배관의 외경만을 변화시켜 Fig. 3과 같이 파손확률을 산출하였다. 외부 부식이 존재하는 배관의 외경이 증가

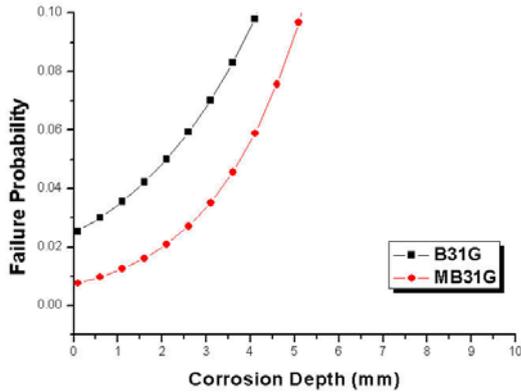


Fig. 2 Relationship between failure probability and corrosion depth

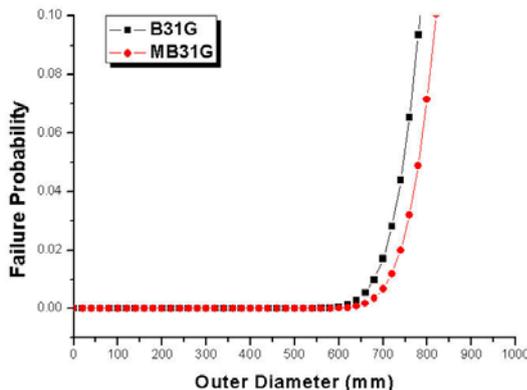


Fig. 3 Relationship between failure probability and outer diameter

하는 경우 파손확률은 점차 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 두께가 고정된 가운데 외경만이 증가하여 식 (2)와 식 (4)에 의해 파손압력이 감소되는 결과가 나오기 때문이다. 또한 외경의 증가에 따라 배관이 받는 원주방향 응력 및 축방향 응력의 증가도 그 원인으로 볼 수 있다.

5.3 배관 내 작동압력 변화에 의한 파손확률

Fig. 4는 내압의 변화에 따른 파손확률을 보여준다. Table 1에서 내압에 대한 확률변수의 평균을 17.5MPa로 선정하였으나, 결과적으로 그 이하에서 배관의 안전성이 유지된다는 것을 알 수 있다. MB31G 평가기준이 허용 작동압력이 높은 것으로 나타났다.

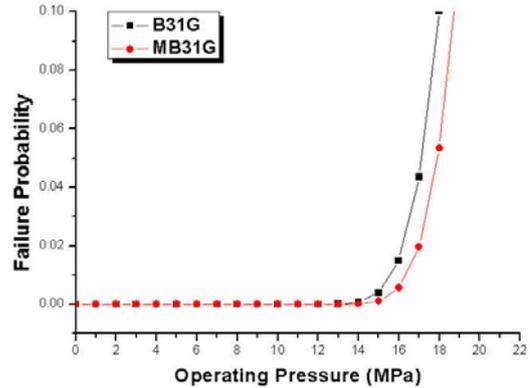


Fig. 4 Relationship between failure probability and operating pressure

6. 결론

본 연구에서는 내압이 존재하는 천연가스 수송용 고장력 강관(API 5L X65)에 대하여 부식 평가기준인 B31G 및 MB31G를 사용하여 외부 부식에 의한 파손확률을 산출하였다. 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 두께방향으로의 부식 깊이가 증가에 따라 B31G는 배관 두께의 약 23%에 해당하는 4mm, MB31G는 배관 두께의 약 30% 정도에 해당하는 5mm의 부식 깊이에서 파손확률이 10%에 도달하는 것으로 나타났다.

2) 두께는 일정한 가운데 외경만이 증가하는 경우 파손확률은 점차 증가하는 것으로 나타났다. 이는 부식 평가기준 파손압력 식에서 외경의 증가가 파손압력을 감소시키기 때문이다.

3) 배관 내 작동압력이 존재하는 경우 두 가지 평가기준 모두 13MPa 이하에서 배관의 파손확률이 0으로 나타났다. 13MPa 이후에서는 MB31G 부식 평가기준이 더 높은 작동압력을 허용함을 규명하였다.

후기

본 연구는 인하대학교 BK 21(Brain Korea 21) 사업단의 연구 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- 이억섭, 김홍민, 김동혁, 최혜빈, “표면 균열이 있는 천연가스 수송용 고장력 강관의 신뢰성 평가,” 대한기계학회 제표 및 파괴부분부분 춘계학술대회 강연 및 논문집, 277-282, 2008
- Ahamed, M., Melchers, R. E., “Reliability Estimation of Pressurised Pipelines Subject to Localised Corrosion Defects,” Int. J. Press. Ves. & Piping, 69, 267-272, 1996