

외부부식된 라인파이프의 파손예측에 대한 기준

이 역섭, 김 호중

인하대 기계. 항공. 자동화 공학부, 인하대원)

ABSTRACT

This paper presents a numerical simulation of the failure behaviour for the pipeline which has external corroded parts along the axis. The numerical study for the pipeline failure analysis is based on an FEM with an elastic-plastic and large-deformation. The predicted failure assessments for the simulated corrosion defects are compared with ANSI/ASME B31G code and a modified B31G method.

1. 서론

손상된 가스 파이프라인의 파손을 예측하는 기술은 파이프라인의 설계 공차를 결정할 때 필수적으로 필요하며 특히, 파이프라인의 수명 점검시에 응용되는 매우 중요한 정보이다. 가스를 운송하는 파이프라인은 화학적 작용 및 여러 가지 환경적 영향에 의해 내부 및 외부 부식이 발생하며 이로 인한 부식은 파이프라인의 강도, 누출 및 폭발에 대한 저항을 감소시키며, 결국은 부식표면에서 크랙이 발생하여 매우 위험한 상황에 이르게 된다. 따라서 파이프라인의 외부 표면에 부식이 발생했을 때 그 곳에서의 응력상태나 수명 등을 예측하여 이를 예방할 수 있는 기준이 필요하다. 지금까지 존재하는 기준은 ANSI/ASME B31G 에서 상세하게 다루었고[1], 이 방법을 수정한 MB31G 의 평가방법은 오일 및 가스산업에서 널리 이용되고 있다. 지난 수십년간 파이프 표면에서의 부식 크기와 위치에 대한 기술들이 발전해왔으며, 현재는 수치해석 방법에 의해 부식의 모양들과 재료의 비선형 거동에 대한 3D 모델링이 가능해짐으로써 부식된 파이프라인의 파손압력을 쉽게 예측할 수 있게 되었다. 본 연구에서는 부식된 파이프라인의 파손거동을 상용 ABAQUS 코드를 사용하여 해석하고 B31G 코드 및 MB31G코드와 비교하였다[2].

2. 이론

원래의 부식평가는 실험데이터에 기준을 두고 작성되었으며, 파괴역학적인 개념을 도입하여 다음과 같은 파손식이 제안되고 있다.

$$\sigma_f = \bar{\sigma} \left[\frac{1 - (A/A_0)}{1 - (A/A_0)M^{-1}} \right] \quad (1)$$

여기서, σ_f 는 파손응력 (MPa), $\bar{\sigma}$ 는 파이프라인 재료의 유동응력 (MPa), A 는 투영된 부식의 단면적(mm²), A_0 는 $L \times t$ (mm²), L 은 부식길이 (mm), t 는 벽의 두께, M 은 벌징계수(bulging factor)이다.

위의 식은 다음 두 가지 조건을 고려하여 수정되었다. 첫째, 최대원환(hoop) 응력은 재료의 항복강도를 초과할 수 없다. 둘째, 상대적으로 짧은 부식은 포물선 모양으로 투영되며 긴 부식은 사각형 모양으로 투영된다.

수정된 파이프의 부식에 대한 파손 예측식은 포물선 모양과 사각형 모양으로 나누어지며 다음과 같다.

● 포물선 모양

$$\sigma_f = 1.1\sigma_{\min} \left[\frac{1 - (2/3)(d/t)}{1 - (2/3)(d/t)M^{-1}} \right] \quad (\text{for } \sqrt{0.8 \left(\frac{L}{D}\right)^2 \left(\frac{D}{t}\right)} \leq 4) \quad (2a)$$

● 사각형 모양

$$\sigma_f = 1.1\sigma_{\min} [1 - (d/t)] \quad (\text{for } \sqrt{0.8 \left(\frac{L}{D}\right)^2 \left(\frac{D}{t}\right)} \geq 4) \quad (2b)$$

여기서, D 는 파이프의 외경, d 는 최대부식 깊이 (mm), σ_{\min} 는 최저 항복강도, M 은 벌징계수 이며 다음과 같이 정의된다.

$$M = \sqrt{1 + 0.8 \left(\frac{D}{L}\right)^2 \left(\frac{D}{t}\right)} \quad (\text{for } \sqrt{0.8 \left(\frac{L}{D}\right)^2 \left(\frac{D}{t}\right)} \leq 4) \quad (3a)$$

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

수정된 유동응력과 벌징계수가 파손응력에 미치는 개선 영향은 그리 크지 않으나, 유효면적의 영향은 보수적인 설계개념을 크게 개선시켰다. Kiefner 와 Vieth는 B31G 기준에서 유동응력($\bar{\sigma} = 1.1\sigma_{\min}$)과 벌징계수(M)에 대해 문제점을 제시하고 새로운 유동응력 값을 $\bar{\sigma} = 1.1\sigma_{\min} + 69$ (MPa)로, 투영된 부식모양에 대한 유효면적을 A/A_0 , 그리고 새로운 벌징계수를 다음과 같이 정의하였다[3,4].

$$M = \sqrt{1 + 0.6275 \left(\frac{D}{L}\right)^2 \left(\frac{D}{t}\right) - 0.003375 \left(\frac{D}{L}\right)^4 \left(\frac{D}{t}\right)^2}$$

$$\left(\text{for } \left(\frac{L}{D}\right)^2 \left(\frac{D}{t}\right) \leq 50\right) \quad (4a)$$

$$M = 3.3 + 0.032 \left(\frac{D}{L}\right)^2 \left(\frac{D}{t}\right) \quad \left(\text{for } \left(\frac{L}{D}\right)^2 \left(\frac{D}{t}\right) \geq 50\right) \quad (4b)$$

파이프라인에서 부식은 여러 가지 모양으로 나타나며, 보통 부식피트(pit), 부식밴드(groove) 그리고 일반적인 부식으로 구분된다. 부식밴드는 일반적인 피트의 열(row)로 형성되고, 일반적인 부식들은 파이프 벽에 원주 방향으로 넓게 퍼져서 균집하고 있는 피트들을 의미한다. 지금 존재하는 코드는 포물선이나 사각형 모양중 하나만을 택일하여 평가하게 되었으며, 부식의 폭은 고려되지 않았다.

3. ABAQUS에 의한 응력 해석

FEM 코드 ABAQUS 실행을 위한 모델링은 부식 피트(pit)와 부식밴드(groove)로 하였으며, 피트(pit) 모델은 지름이 60 mm 인 준 구모양이고 부식밴드(groove)는 폭 (w)이 60 mm 이고 길이가 190.5 mm ($L/D=0.25$)인 준 실린더 모양이다. 세 가지의 부식깊이, $d/t=0.25, 0.50$, 그리고 0.75 로 나누어 ABAQUS 프로그램을 실행하였으며, 파이프의 치수는 바깥지름이 762 mm, 벽의 두께는 15.88 mm 로 하였다.

모델 재료는 API grade X60 ($\sigma_Y=400 \text{ MPa}$, $E=193.2 \text{ GPa}$)이며, 이 재료의 진 응력-변형률 관계를 유한 요소 해석에 사용하였다[5,6].

4. 결과

Fig. 1 은 부식 피트(pit)와 부식밴드(groove) 를 3D 모델링한 양상을 보여주고 있다. 유한 요소 분석은 ABAQUS v7.3을 사용하였고, 내부압력의 증가에 따른 부식된 외부표면에서의 von Mises 응력을 산정하여 파손을 예측하였다. Figs. 2와 3 은 부식 피트(pit) 모델과 부식 밴드(groove) 모델에서 압력이 증가함에 따른 내부 벽면과 중간점 그리고 부식 표면에서의 von Mises 응력의 변화를 보여주고 있다. 응력상태 변화는 세 구간으로 나타났으며, 첫 번째 구간은 탄성 변형 구간이며, 압력이 증가하면서 부식표면은 재료의 항복강도에 이르게 되고, 두 번째 구간에서 소성 변형을 하여 결국은 파이프 안쪽 표면까지 소성영역이 확산된다. 세 번째 구간은 소성역 확산에 의해 재료가 극한값에 이르는 것을 보여주고 있다. Figs. 4 와 5 는 부식 피트(pit) 모델과 부식 밴드(groove) 모델에 대한 국부응력 상태를 나타낸 것이다. 이 결과로부터 부식 깊이와 부식길이의 변화가 파손 압력 차이에 영향을 주고 있음을 알 수 있으며, 이 손상 거동은 부식 폭에 가장 큰

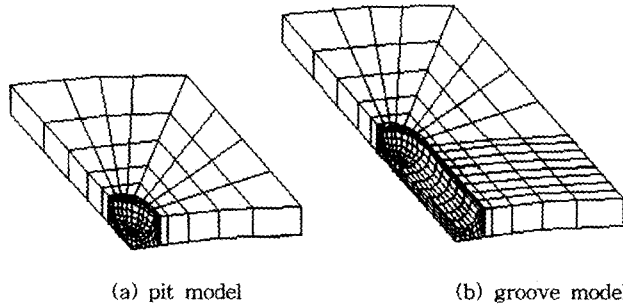


Fig. 1 Details of the 3D FE models

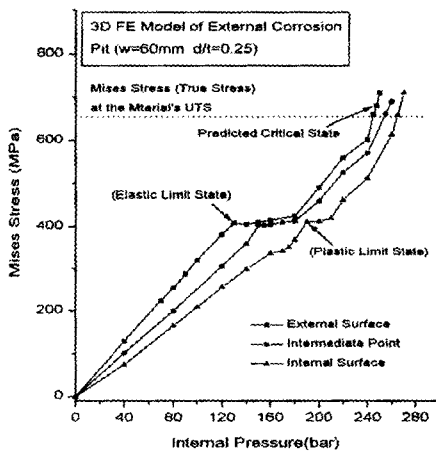


Fig. 2 Variations of von Mises Stress at an External Corrosion Pit ($w/t=3.8$, $d/t=0.25$)

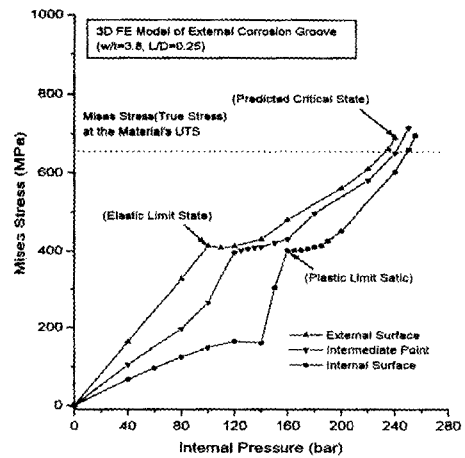


Fig. 3 Variations of von Mises Stress at an External Corrosion Groove ($d/t=0.25$, $L/D=0.25$)

영향을 받고 있다. Figs. 2와 3에서의 결과를 보면, 부식 표면에서 최대응력이 재료의 항복강도에 이르면 탄성 한계 상태가 파손 기준이 되고, 파이프 내부 벽면에 최저응력이 재료의 항복강도에 이르면 소성한계 상태가 파손 기준이 된다. ABAQUS에 의해 얻어진 결과를 B31G 그리고 MB31G에 의해 예측된 결과와 비교하여 Table 1에 나타냈다.

Table 1에서 보면 수정된 B31G 방법은 B31G 코드를 사용해 얻은 예측 값보다 부식 깊이가 낮은 부식밴드(groove) 모델에서 파손 압력이 약간 증가한다는 사실을 알 수 있다. 하지만 중간깊이와 가장 깊은 부식에서는 B31G

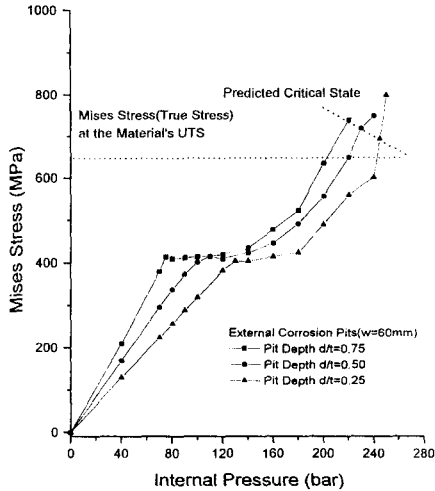


Fig. 4 Variations of the Local Stress at the External Surface of the Corrosion Pit Models.

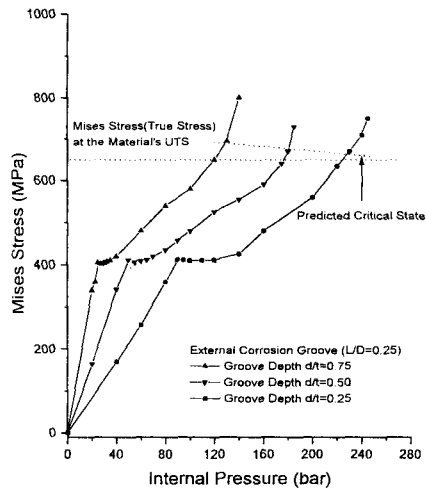


Fig. 5 Variations of the Local Stress at the External Surface of the Corrosion Groove Models.

코드의 예측 값보다 낮은 값을 보이고 있다. ABAQUS를 사용하여 얻은 파손 압력이 B31G 와 MB31G 에 의해 예측된 파손 압력 보다 부식 깊이와 부식 모델에 따라서 13%~27% 정도 높은 값을 나타내었다.

Table 1 Pit 모델과 Groove 모델에 대하여 예측된 파손압력 비교

| d/t | 예측된 파손 압력(bar) | | | | | |
|------|----------------|-------|-------|-----------------|-------|-------|
| | 부식 피트(pit) 모델 | | | 부식밴드(groove) 모델 | | |
| | FEM | MB31G | B31G | FEM | MB31G | B31G |
| 0.25 | 248.0 | 198.0 | 186.0 | 230.0 | 180.1 | 173.8 |
| 0.50 | 230.0 | 193.3 | 180.6 | 190 | 151.3 | 154.4 |
| 0.75 | 210.0 | 186.0 | 172.3 | 130.0 | 109.8 | 130.2 |

5. 결론

FEM 코드 ABAQUS를 사용하여 부식된 라인파이프에서의 파손거동에 대한 평가를 수행하였고, 현재 사용하고 있는 이론식 보다 다양한 범위에서 라인파이프에 대한 파손압력을 평가 할 수 있음을 밝혔다. 본 연구결과를

확장하여 외부 부식뿐 아니라, 내부 부식 및 부식 면에서의 균열 발생에 대해서도 효과적인 기준을 제시하게 될 것이다.

후기: 본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업 설비 안전성 평가 연구 센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서 이에 관계자 여러분들께 감사 드립니다.

6. 참고 문헌

- (1) ANSI/ASME B31-1995. "Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipeline." - A Supplement to ANSI/ASME B31 Code for Pressure Piping. The American Society of Mechanical Engineers, New York, (1995).
- (2) ABAQUS v5.7, Hibbit, Karlson and Sorenson Inc. Providence, (1993).
- (3) Kiefner, J.F. and Vieth, P.H. "A Modified Criterion for Evaluating the Remaining Strength of Corroded Pipe". Project PR 3-805 Pipeline Search Committee, American Gas Association, (1989).
- (4) Kiefner, J.F. and Vieth, P.H. "New method corrects criterion for evaluating corroded pipe." *Oil and Gas Journal*, 88(32), pp. 56-59, (1990).
- (5) Frantisek, V., Miroslav, S., Miroslav, S. & Jir, M., "Remaining load carrying capacity of gas pipeline damaged the surface corrosion". *Int. J. Pres. Ves. & Piping* 59, pp. 217-226, (1994)
- (6) Kiefner, J.F. and Hisey, D.T. and O'Grady, T.J. "Pressure calculation for corroded pipe developed." *Oil and Gas Journal*, pp. 84-89, (1992).