

파손평가선도(FAD)와 FORM을 이용한 매설배관의 건전성 평가

이억섭[†] · 김동혁

인하대학교 기계공학과

(2005. 9. 22. 접수 / 2005. 12. 13. 채택)

The Reliability Estimation of Buried Pipeline Using the FAD and FORM

Ouk Sub Lee[†] · Dong Hyeok Kim

Department of Mechanical Engineering, INHA University

(Received September 22, 2005 / Accepted December 13, 2005)

Abstract : In this paper, the methodology for the reliability estimation of buried pipeline with longitudinal gouges and dent is presented and the limit state of buried pipeline is formulated by failure assessment diagram(FAD). The reliability of buried pipeline with defects has been estimated by using a theory of failure probability. The failure probability is calculated by using the FORM (first order reliability method) and Monte Carlo simulation. The results out of two procedures have been compared each other. It is found that the FORM and Monte Carlo simulation give similar results for varying boundary conditions and various random variables. Furthermore, it is also recognized that the failure probability increases with increasing of dent depth, gouge depth, gouge length, operating pressure, pipe outside radius and decreasing the wall thickness. And it is found that the analysis by using the failure assessment diagram gives highly conservative results than those by using the theory of failure probability.

Key Words : reliability, FORM(first-order reliability method), monte carlo simulation, buried pipeline, reliability index, failure probability, FAD(failure assessment diagram)

1. 서 론

경제가 발전하고 공업화가 되어감에 따라 에너지 공급, 전달 그리고 에너지 전환 공업들이 발전되어 가고 있다. 이 에너지를 공급, 수송하는 구조물들, 즉 가스배관, 석유, 원유 송유관, 가스 저장, 수송 및 배분장치, 전력, 정유, 석유화학의 압력 용기 등이 국내에도 여러 지역에 걸쳐 상당한 양이 설치되어 있다. 이러한 배관들은 제작과정 혹은 사용과정 중 결함이 발생하여 안전성 또는 건전성을 위협할 가능성이 존재하고 있다. 제작과정에서는 용접결함, 기계가공에 의한 결함, 설계시의 결함, 수송시의 충격에 의한 결함 등이 발생할 수 있으며, 사용과정 중에는 하중 및 온도변화에 의한 결함, 각종 부식환경에 의한 결함, 타공사나 지반침하와 같은 외력에 의한 결함 등이 발생될 수 있다.

이러한 배관 장치, 압력 용기들은 시간이 지남에 따라 점차 노후화 되어 가지만 경제적, 환경적 요인 때문에 이들의 대체는 쉽지 않다. 따라서 배관에 여러 가지 요인에 의해 결함이 존재할 경우 배관의 건전성을 평가할 필요가 있고 효율적인 건전성 평가 기법 개발에 대한 많은 연구가 수행되고 있다¹⁻⁵⁾.

균열과 같은 결함이 존재하는 구조물의 건전성을 평가하는 방법에는 파손평가선도(Failure Assessment Diagram; FAD)를 이용하는 방법과 균열진전력(crack driving force)을 이용하는 방법이 있지만, 적용의 편이성과 확장성의 용이성을 고려하여 본 연구에서는 파손평가선도를 이용하여 매설배관의 건전성 평가에 관한 연구를 수행하였다^{1-3,6)}.

또한 현재까지는 건전성 평가를 수행할 때 각 변수들을 하나의 정해진 값으로 보고 해석적 모델에 적용하는 결정론적 접근법(deterministic approach)을 사용하였다. 하지만 이러한 방법은 구조물의 형상, 작용하중, 재료물성 등의 변수들이 갖는 여러 가지 불확실성으로 인해 매설배관의 건전성평가를

[†] To whom correspondence should be addressed.
leeos@inha.ac.kr

경제적, 합리적으로 수행하는데 한계가 존재한다. 따라서 각 변수들이 갖는 분포특성을 고려하기 위해 각 변수들을 확률변수로 보고 확률이론을 이용하여 평가를 수행하는 확률론적 접근법(probabilistic approach)으로 매설배관의 건전성을 평가할 필요가 있다^{4,5)}.

본 논문에서는 파손평가선도를 이용하여 매설배관의 건전성 평가를 위한 한계상태(limit state)를 설정하고, 확률이론 중 신뢰도지수(reliability index)를 이용하는 FORM(first order reliability method)를 이용하여 파손확률을 구하고, 이를 이용하여 매설배관의 건전성을 평가하는 방법을 개발하고 예를 통하여 이의 적용성을 검토하였다. 또한 여러 가지 경계조건이 파손확률에 미치는 영향을 체계적으로 규명하였다. 그리고 파손평가선도를 이용하여 매설배관의 건전성을 평가하는 방법의 적절성을 검증하기 위해 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 산출한 결과와 비교, 검토하였다.

2. 파손평가선도

파손평가선도란 선형탄성 파괴역학이 성립하는 취성 영역부터 균열 성장 없이 소성 거동만으로 파손이 발생하는 소성붕괴영역에 이르기까지의 모든 파괴역학적 가능성에 대하여 응력확대계수와 작용하중의 두 변수를 대입해 균열이 존재하는 구조물의 사용적합성을 평가할 수 있는 방법이다. 실제 구조물의 손상은 일반적으로 취성파괴와 소성붕괴의 조합으로 나타나기 때문에 파손평가선도에서는 Fig. 1에 나타난 것과 같이 x 축에는 소성붕괴의 영향을, 축

에는 취성파괴의 영향을 변수로 나타내어 두 손상모드를 고려한다. Fig. 1에서 안전(SAFE) 영역과 파손(FAIL) 영역 사이의 경계선은 파괴역학적 이론으로부터 구축된 파손임계선(Failure Assessment Line; FAL)을 나타낸다. 구조물이 가진 결함의 현재상태는 파손평가선도상에서 하나의 점(S_r, K_r)으로 표시될 수 있다. 이때 이 점이 파손임계선 안쪽에 위치하면 평가대상 결함은 허용 가능한 것으로 평가하고, 파손임계선 바깥쪽에 위치할 경우는 허용 불가능한 결함으로 판정하게 된다^{4,6,7)}.

2.1. 소성붕괴에 대한 저항

S_r 로 표시되는 x 축은 소성붕괴에 대한 저항으로 식 (1)과 같이 정의된다. 식 (1)에서 σ_c 는 재료의 유동응력으로 정의되며, σ_{ref} 는 결함을 포함한 배관에 작용하는 응력이다. 작용응력이 커지면 S_r 값이 커지게 되고, 작용응력이 σ_c 에 이르면 배관에 소성붕괴가 발생한다^{4,6,7)}.

$$S_r = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_c} \tag{1}$$

2.2. 취성파괴에 대한 저항

K_r 로 표시되는 y 축은 취성파괴에 대한 저항으로 식 (2)와 같이 정의된다. 식 (2)에서 K_{mat} 는 재료의 고유 파괴인성값을 나타내며, K_f 는 배관에 존재하는 결함에 작용응력이 가해질 때의 응력확대계수값이다. 배관에 작용하는 응력확대계수값이 커지면 K_r 값이 증가하고, 응력확대계수가 K_{mat} 값에 도달하면, 취성파괴가 일어난다^{4,6,7)}.

$$K_r = \frac{K_f}{K_{mat}} \tag{2}$$

2.3. 파손평가선도

Fig. 2와 같은 결함을 갖는 배관에 대하여 파손평가선도를 작성하기 위해서는 소성붕괴에 대한 저항, S_r 과 취성파괴에 대한 저항, K_r 을 구하여야 한다. 이렇게 구한 저항은 식 (3)과 같은 Dugdale 모델에 기초를 둔 식을 이용하여 비교되고, Fig. 1과 같은 파손평가선도를 구축할 수 있다. 본 논문에서 파손평가선도를 구하기 위해 사용한 수식을 Table 1에 정리하였다^{4,6,7)}.

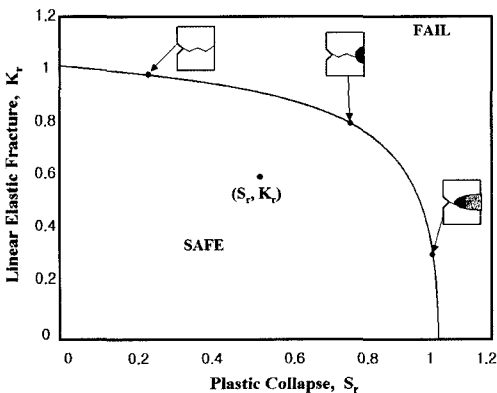


Fig. 1. Typical failure assessment diagram.

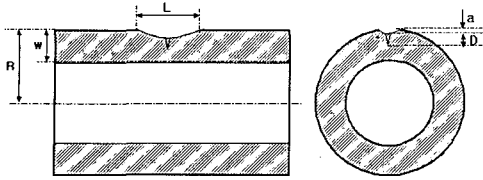


Fig. 2. Schematic of defects of buried pipeline with circumference crack.

Table 1. Equation for organizing the failure assessment diagram

$$K_r = \frac{[\sigma_m Y_m + \sigma_b Y_b] \sqrt{\pi a}}{K_{IC}}, \quad S_r = \frac{\sigma_m \left(1 - \frac{a}{Mw}\right)}{\sigma_f \left(1 - \frac{a}{w}\right)}$$

$$Y_b = 1.12 - 1.39 \left(\frac{a}{w}\right) + 7.3 \left(\frac{a}{w}\right)^2 - 13.0 \left(\frac{a}{w}\right)^3 + 14.0 \left(\frac{a}{w}\right)^4$$

$$Y_m = 1.12 - 0.23 \left(\frac{a}{w}\right) + 10.6 \left(\frac{a}{w}\right)^2 - 21.7 \left(\frac{a}{w}\right)^3 + 30.4 \left(\frac{a}{w}\right)^4$$

$$\sigma_b = 10.2 \frac{PRD}{2w^2} \quad \text{and} \quad \sigma_m = \frac{PR}{w} \left(1 - 1.8 \frac{D}{2R}\right),$$

$$K_{IC} = \left(\frac{EC_{v0}}{A}\right)^{1/2} \left(\frac{C_v}{C_{v0}}\right)^{1/2b} \quad \text{and} \quad \sigma_f = \alpha(\sigma_y + \sigma_u)$$

$$M = \left[1 + 0.26 \frac{L^2}{Rw}\right]^{1/2}$$

$$K_r = S_r \left[\frac{8}{\pi^2} \ln \left\{ \sec \left(\frac{\pi}{2} S_r \right) \right\} \right]^{-1/2} \quad (3)$$

여기서 P 는 배관의 작용압력, R 은 배관의 바깥반지름, w 는 배관의 두께, D 는 홈(dent)의 깊이, a 는 구멍(gouge)의 깊이, L 은 구멍의 길이, E 는 배관 재료의 탄성계수, C_{v0} 는 참조 샤르피 에너지, A 는 샤르피 시편의 단면, C_v 는 샤르피 에너지, b 는 샤르피 에너지 상관계수, α 는 유동응력 계수, σ_y 는 배관 재료의 항복강도, σ_u 는 배관재료의 인장강도이다.

3. 파손 확률 이론

본 연구에서는 모든 변수들을 정규분포라 가정하고 확률분포가 평균과 표준편차에 의해서 결정되는 것으로 가정하고 확률이론 중 FORM을 사용하였다. FORM은 한계상태방정식(limit state function; LSF)의 Taylor 급수 전개식의 1차 항만 사용하여 파손확률을 구하는 방법으로 파손확률에 대한 상대적 지표인 신뢰도지수(reliability index)를 산정하는 방법이다. 파손확률 해석을 수행하기 위해서는 파손에 대한 기준이 필요하고 이는 한계상태방정식을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다^{5,8-10)}.

$$Z = R - L \quad (4)$$

여기서 R 은 저항성분의 확률변수이고, L 은 하중성분의 확률변수이다. R 과 L 이 정규분포를 갖는 확률변수이므로 새로운 확률변수 Z 도 정규분포를 갖고 파손확률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$PF = P[Z < 0] = \int_{-\infty}^0 \frac{1}{\sigma_Z \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{Z - \mu_Z}{\sigma_Z} \right)^2 \right\} dZ \quad (5)$$

여기서 새로운 확률변수 U 를 $U = (Z - \mu_Z) / \sigma_Z$ 와 같이 정의하면 식 (5)의 파손확률은 다음과 같다.

$$PF = \int_{-\infty}^{-\beta} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{u^2}{2} \right\} du = P[Z < 0] = \Phi(-\beta) \quad (6)$$

이때 파손확률 PF 와 표준정규분포함수인 Φ 사이에서 식 (6)의 관계가 성립하도록 하는 β 를 신뢰도지수(reliability index)라고 하며 다음과 같이 나타낸다.

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{\mu_R - \mu_L}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_L^2}} \quad (7)$$

신뢰도지수를 구하는데 있어 식 (7)을 사용하기 위해서는 한계상태방정식이 선형(linear)이어야 한다. 만약 한계상태방정식이 비선형(nonlinear)인 경우에는 식 (7)을 사용하여 신뢰도지수를 구할 수 없게 된다.

한계상태방정식이 비선형인 경우에 신뢰도지수를 구하는 방법으로 Rackwitz and Fiessler는 Fig. 3과 같은 과정으로 신뢰도지수를 계산하는 방법을 제안하였다. 본 연구에서는 신뢰도지수가 임의의 값($\Delta\beta \leq 0.001$)에 수렴할 때까지 Fig. 3의 과정을 반복하여 신뢰도지수를 계산한 이후에 식 (6)을 이용하여 파손확률을 구할 수 있다^{9,10)}.

본 연구에서 FORM을 이용하여 축방향 결함이 존재하는 매설배관의 건전성을 평가하기 위해서는 한계상태방정식을 정의할 필요가 있다. 본 연구에서 적용한 한계상태방정식은 파손평가선도를 이용하여 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$Z = S_r \left[\frac{8}{\pi^2} \ln \left\{ \sec \left(\frac{\pi}{2} S_r \right) \right\} \right]^{-1/2} - K_r \quad (8)$$

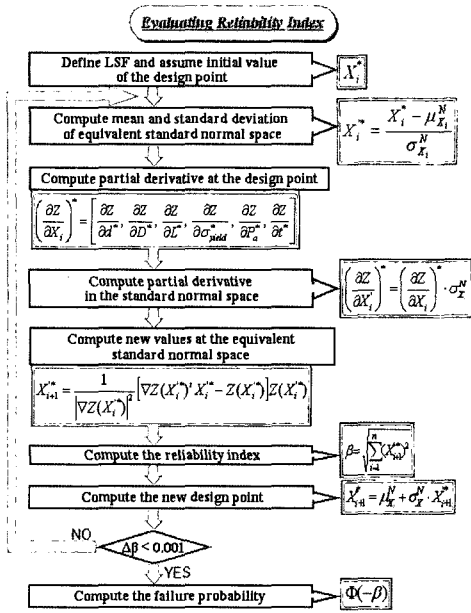


Fig. 3. Processing of computing the reliability index.

4. 몬테카를로 시뮬레이션

확률론적인 방법에 의해 얻어진 결과는 실험적으로 증명하는 것이 쉽지 않다. 본 연구에서는 매설 배관에 축방향 결함이 존재할 경우 FORM을 이용하여 파손확률을 산출하였고 그 결과를 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 비교 분석하여 FORM을 적용하는 방법의 적절성을 검증하였다. 본 연구에서 사용한 몬테카를로 시뮬레이션은 Fig. 4와 같은 절차에 따라 시행하여 파손확률을 산출하였다^{9,10}.

몬테카를로 시뮬레이션에서는 실제상황에 근사한 결과를 얻기 위해 많은 수의 반복 모의실험이 필요하다. 각 모의실험에서 각각의 변수값은 확률밀도 함수에 따라 임의로 생성되고 이를 한계상태방정식에 적용하여 시스템의 파손여부를 평가하게 된다. 몬테카를로 시뮬레이션에서의 파손확률은 전체모의실험횟수와 한계상태방정식을 평가하여 얻은 파손횟수를 이용하여 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$P[Z < 0] = \frac{N_f}{N} \quad (9)$$

여기서 N_f 는 $Z < 0$ 일 경우의 모의실험횟수, 즉 파손에 이르는 횟수를 나타내고, N 은 전체모의실험횟수를 나타낸다.

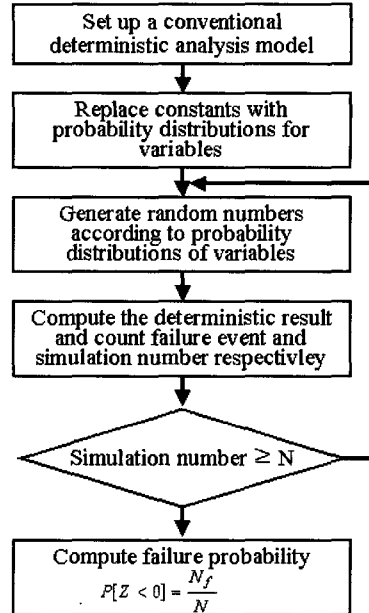


Fig. 4. Processing of computing the failure probability using Monte Carlo simulation.

몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 실제 상황에 가장 가까운, 즉 신뢰성 있는 해석 결과를 얻기 위해서는 전체모의실험횟수, N 을 충분히 크게 선택하여야 하고, 다음과 같은 식에 의해 선택한 이후에 모의실험을 수행하여야 한다.

$$N \geq \frac{100}{PF} \quad (10)$$

여기서 PF 는 시스템이 안전할 수 있는 최대 목표파손확률을 나타낸다. 본 연구에서는 부식결함이 있는 배관이 안전할 최대 목표 파손확률을 $PF = 10^{-6}$ 의 수준으로 나타낼 수 있기 때문에 전체모의실험횟수를 10^8 으로 선택하였다.

5. A Case Study

매설배관에 축방향 결함이 존재할 경우 파손평가선도와 확률이론을 이용하여 배관의 건전성을 평가하고 여러 가지 경제조건이 여러 가지 경제조건이 파손확률에 미치는 영향을 규명하기 위해 Table 2에 나타낸 변수와 그 값을 이용하였다^{4,5,7}.

확률변수들의 분포특성을 나타내는 변동계수 (coefficient of variation, C.O.V)는 다음과 같다.

$$C.O.V = \frac{\sigma_X}{\mu_X} \quad (11)$$

여기서 σ_X 는 표준편차, μ_X 는 분산이다.

Table 2. Random variables and their parameters used in a case study

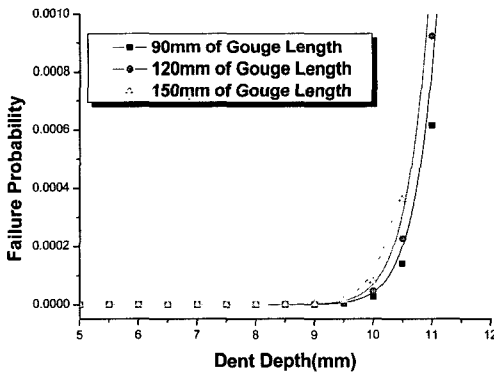
Variable	Mean	C.O.V
P	7MPa	0.01
E	207GPa	0.04
C_{50}	112,300MJ	0.02
A	53.55mm ²	0.03
C_r	55,200MJ	0.025
σ_y	445.9MPa	0.029
σ_μ	593.4MPa	0.024
R	457.2mm	0.016
w	12.8mm	0.023
D	2mm	0.015
a	2mm	0.015
L	120mm	0.01
b	0.495	-
α	0.5	-

6. 결과 및 토의

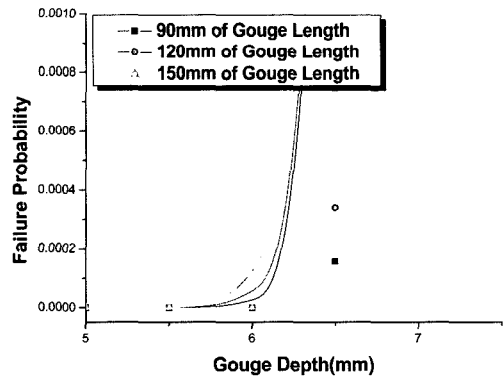
본 연구에서는 파손평가선도에 Table 1의 수식과 Table 2의 변수값을 적용하고 파손확률이론 중의 하나인 FORM을 이용하여 여러 가지 확률변수의 변화에 따른 파손확률을 산출하였다.

Fig. 5에는 홈의 깊이, 구멍의 깊이, 배관의 작용압력, 배관의 반경, 배관의 두께 등의 확률변수의 변화에 따른 파손확률의 변화를 나타내었다. 확률변수의 C.O.V는 고정하고 평균값을 변화시키며 파손확률을 구하고 이를 Fig. 5의 그래프에 나타내었다. Fig. 5에서 보는 것과 같이 홈의 깊이가 증가할수록, 구멍의 깊이가 증가할수록, 구멍의 길이가 증가할수록, 작용압력이 증가할수록, 배관의 반경이 증가할수록, 배관의 두께가 감소할수록 파손확률이 증가하는 것을 알 수 있다.

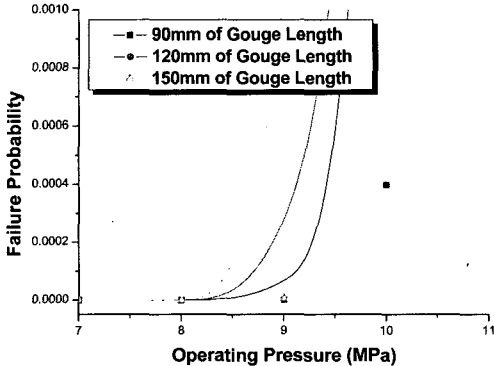
구멍의 길이가 각각 90mm, 120mm, 150mm 일 때 홈의 깊이가 약 10mm까지는 파손확률이 서서히 증가하다가 약 10mm 이상에서는 파손확률이 급격히 증가하고 구멍의 깊이가 약 6mm 까지는 파손확률



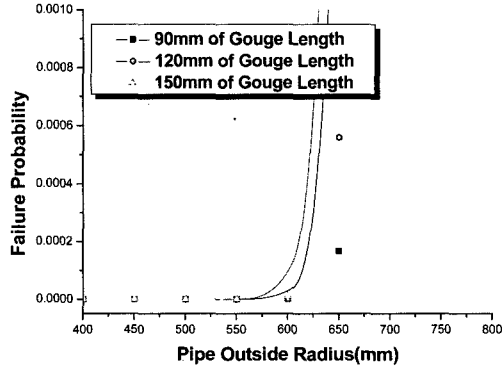
(a) Failure probability VS. Dent depth



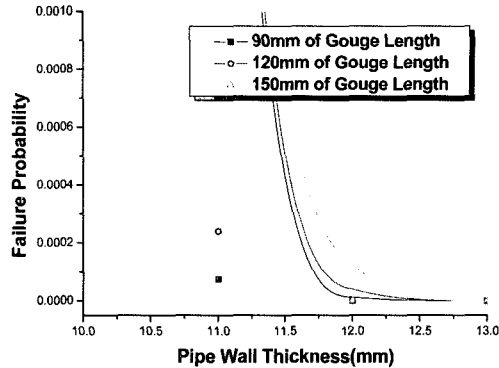
(b) Failure probability VS. Gouge depth



(c) Failure probability VS. Operating pressure



(d) Failure probability VS. Pipe outside radius



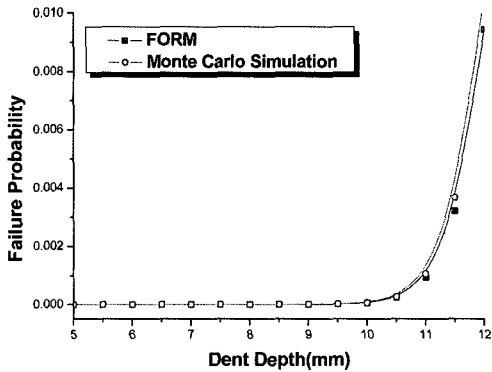
(e) Failure probability VS. Pipe wall thickness

Fig. 5. A relationship between failure probability and various random variables.

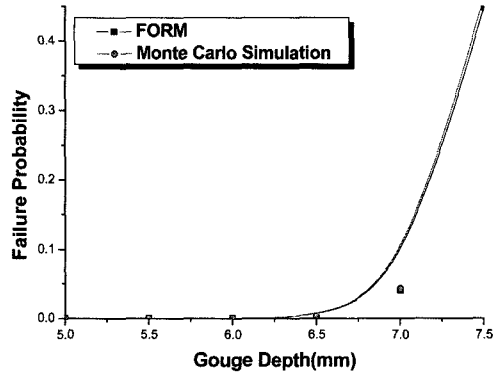
이 거의 일정하지만 약 6mm 이상에서는 파손확률이 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 파손확률은 작용압력이 약 8.5MPa까지는 서서히 증가하지만 작용압력이 약 8.5MPa 이상에서는 파손확률이 급격히 증가하고, 배관의 반경이 약 600mm까지는 파손확률의 증가량이 미비하지만 약 600mm 이상에서는 파손확률의 증가량이 갑자기 커지는 것을 알

수 있다. 그리고 배관의 두께 증가에 대해서는 약 12mm까지는 파손확률이 급격히 감소하지만 약 12mm 이상의 배관 두께에 대해서는 파손확률이 거의 일정해지는 것을 알 수 있다.

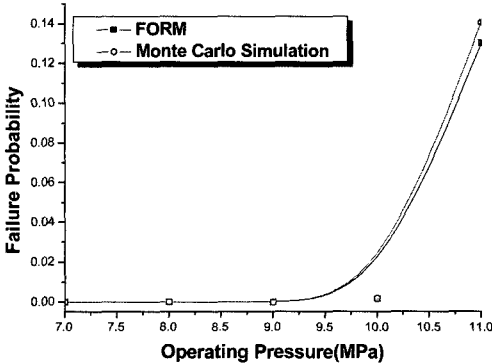
또한 구멍의 길이가 증가할수록 홈의 깊이, 구멍의 깊이, 배관의 반경, 배관의 두께 변화보다는 배관의 작용압력 변화에 대해서 파손확률의 증가량이 더



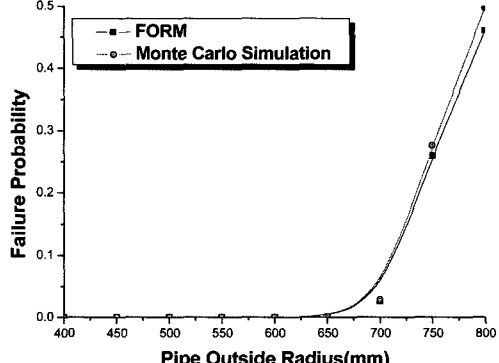
(a) Dent depth



(b) Gouge depth



(c) Operating pressure



(d) Pipe outside radius

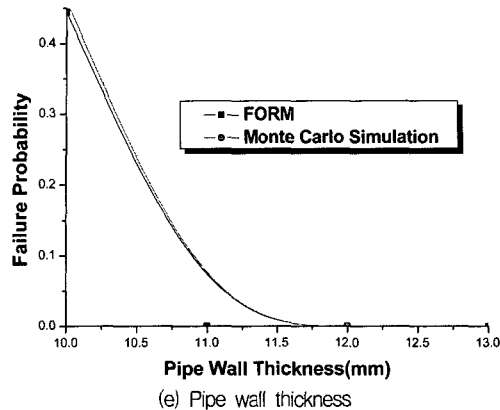


Fig. 6. A relationship between the results of FORM and Monte Carlo simulation.

크게 나타나는 것을 알 수 있다.

Fig. 6에는 구멍의 길이가 120mm인 경우에 대하여 각 확률변수의 변화에 따라 확률이론중의 하나인 FORM과 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 구한 파손확률을 비교하여 나타내었다. 몬테카를로 시뮬레이션에 의하여 계산된 파손확률과 FORM에 의하여 얻어진 파손확률을 비교함으로써 파손평가선도에 확률이론인 FORM을 적용하는 것의 적절성을 검증하였다. Fig. 6에서 보는 것과 같이 두가지 방법에 의하여 얻어진 파손확률은 거의 비슷한 것을 알 수 있다. FORM을 이용하여 구한 파손확률과 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 구한 파손확률을 정량적으로 비교하기 위해 두 결과의 평균 오차를 계산하여 Table 3에 나타내었다. Table 3에서 보는 것과 같이 평균 오차는 10% 이하인 것을 알 수 있다. Fig. 6에서는 두 결과가 거의 비슷한 것으로 나타났지만 축방향 결함이 있는 배관의 파손확률의 값이 너무 작아 실제 차이가 크지 않음에도 불구하고 평균오차의 결과가 크게 나타났다.

Table 3. Comparison of the mean percentile differences between results obtained by the FORM and the Monte Carlo simulation*

Variable	Error(%)
Dent depth	8.005
Gouge depth	9.811
Operating pressure	8.847
Pipe outside radius	6.022
Pipe wall thickness	4.515

* percentile error = {(result of Monte Carlo simulation)-(result of FORM)}/ (result of Monte Carlo simulation)×100

Fig. 7에는 파손확률을 구하기 위해 각 확률변수를 변화시키고 그때의 평가점을 파손평가선도에 나타내었다. FORM은 파손확률을 구하기 위해 신뢰도 지수를 산출하는데 이때 신뢰도 지수가 특정값에 수렴할 때까지 반복적인 계산을 수행하고, 수렴한 신뢰도 지수 값을 이용하여 파손확률을 산출한다. 따라서 Fig. 7에서는 신뢰도 지수가 특정값에 수렴하기 위한 반복계산 전과 후의 평가점을 함께 파손평가선도에 나타내었다.

Fig. 7에 나타난 것과 같이 반복계산 전에는 대부분의 평가점들이 파손평가선도상에서 안전 영역내에 있고 반복계산 후에는 파손평가선도에서 파손임계선 위에 위치하는 것을 알 수 있다. 이것은 신뢰도 지수가 반복계산을 통해 특정값에 수렴함에 따라 한계상태방정식의 계산 결과가 '0'이 되기 때문이다. 이는 파손평가선도에 확률이론 중 FORM을 적용하여 파손확률을 구한 결과가 적절하다는 것을 나타내는 또 다른 증거가 된다.

결함이 존재하는 매설배관의 파손확률을 계산하였을 때 파손확률 값이 약 10^{-4} 수준 이하일 때 배관이 안전한 것으로 알려져 있다. Fig. 5에서 보는 것과 같이 위와 같은 기준에서는 각각의 평가점에 대해 파손확률을 계산해 보면 약 절반이상이 안전하지 않은 것으로 나타난다. 하지만 Fig. 7의 결과에서 보면 대부분의 평가점이 파손임계선 아래에 위치하므로 대부분의 평가점에 대하여 매설배관은 안전하다고 할 수 있고, 이는 확률론적 접근법을 사용한 결과와 비교할 때 상당히 보수적인 평가임을 알 수 있다.

이와 같이 보수적인 해석 결과가 나타난 것은 본 연구에서 적용한 파손평가선도는 각 변수가 갖는 분

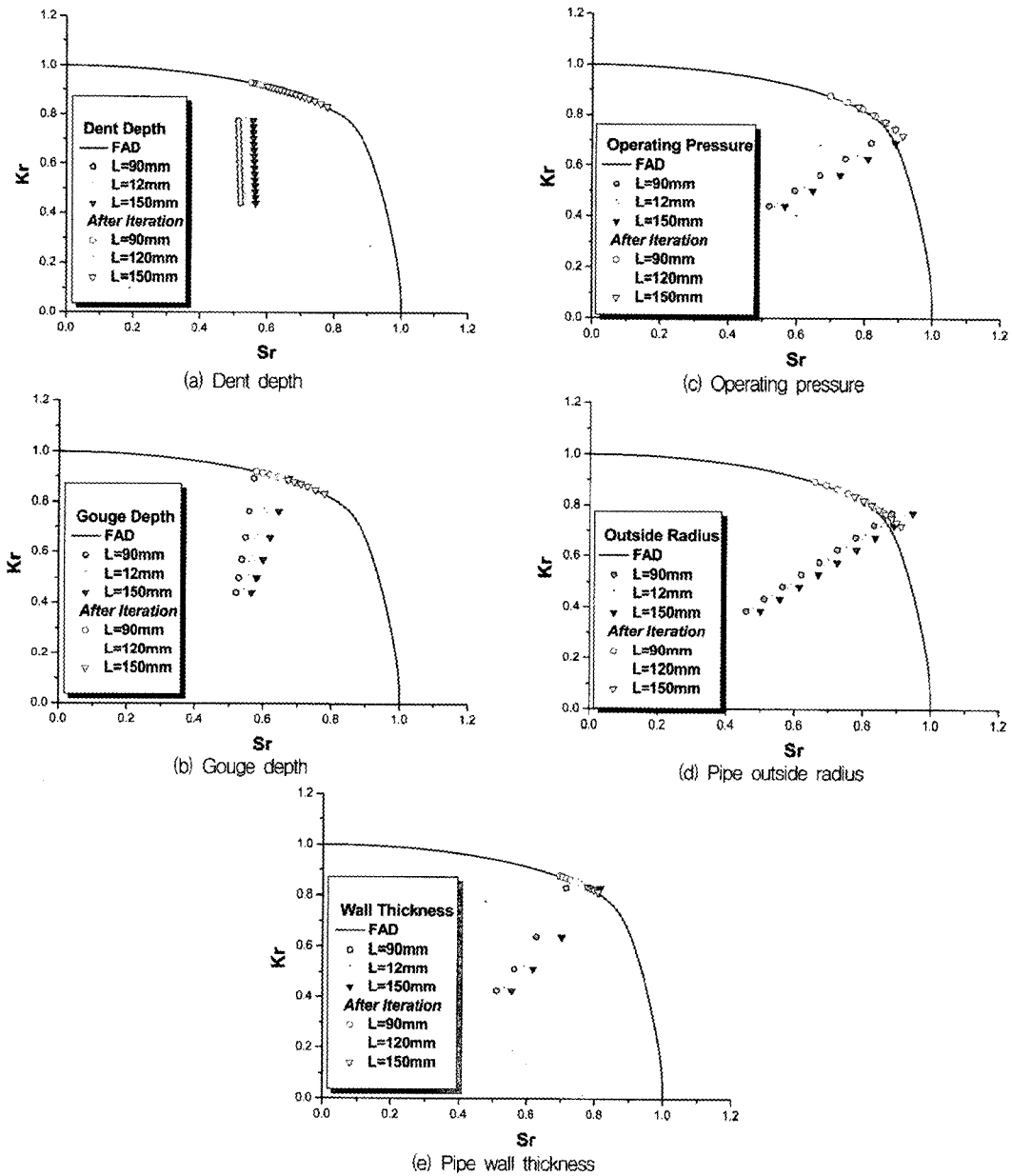


Fig. 7. The difference in failure assessment diagram before and after iteration to calculation of reliability index.

포 특성을 고려하지 않아 각 변수들이 지닌 불확실성으로 인한 결과라 생각된다. 또한 본 연구에서 적용한 파손평가선도는 선형 탄성파괴역학을 기반으로 해석하였고 배관에 발생하는 결함의 형상을 단순화 시켰기 때문이라고 생각된다. 따라서 향후 탄소성 파괴역학을 기반으로 파손평가선도를 적용하고 실제 결함의 형상을 적절히 나타낼 수 있는 형상계

수를 사용하여야 할 것이다.

7. 결론

본 연구에서는 확률론적 해석방법 중 하나인 FORM (first order reliability method)을 이용하여 축방향 결함이 존재하는 매설배관의 파손확률을 산출하였다.

파손평가선도를 이용하여 한계상태를 설정하고 여러 가지 확률변수 및 경계조건이 매설배관의 파손확률에 미치는 영향을 체계적으로 분석하여 아래와 같은 결과를 얻었다.

1) 홈의 깊이가 증가할수록, 구멍의 깊이가 증가할수록, 구멍의 길이가 증가할수록, 작용압력이 증가할수록, 배관의 반경이 증가할수록, 배관의 두께가 감소할수록 파손확률이 증가하였다.

2) FORM과 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 해석결과와 평균오차는 10% 이내로 FORM을 이용하여 파손확률을 구하는 방법의 적용이 적절한 것을 확인하였다.

3) 파손확률을 구하기 위한 반복계산 전에는 대부분의 평가점이 파손임계선 아래에 위치하지만 반복계산 이후에는 모든 평가점들이 파손임계선 위에 위치한다.

4) 파손평가선도를 이용한 매설배관의 건전성 평가 결과는 확률론적 접근법을 이용한 결과와 비교할 때 보수성이 큰 것을 확인하였다.

감사의 글 : 본 연구는 인하대학교의 교수연구진흥비 중 POSCO 석좌교수 기금에 의한 연구지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- 1) H. Seo, T.S. Han and H.Y. Lee, "Failure Assessment Diagrams of Semi-Elliptical Surface Crack with Constraint Effect", Journal of KSME, Vol. 23, No. 11, pp. 2022~2032, 1999.
- 2) Y.C. Lin, Y.J. Xie and X.H. Wang, "Probabilistic Fracture Failure Analysis of Nuclear Piping Containing Defects Using R6 Method", Nuclear Engineering and Design, Vol. 229, pp. 237~246, 2004.
- 3) S.L. Kwak, J.B. Wang, Y.W. Park and J.S. Lee, "Application of FAD on Pressure Tube for the Probabilistic Integrity Assessment", Journal of KSME, Vol. 28, No. 3, pp. 289~295, 2004.
- 4) Y. J. Kim, D. J. Shim, N. S. Huh and Y. J. Kim, "Elastic-Plastic Fracture Mechanics Assessment of Test Data for Circumferential Cracked Pipes", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 71, pp. 173~191, 2004.
- 5) O.S. Lee and D.H. Kim, "Estimation of Failure Probability Using Boundary Conditions of Failure Pressure Model of Buried Pipelines", Key Engineering Materials, Vol. 270, pp. 1688~1693, 2004.
- 6) T.L. Anderson, "Fracture Mechanics; Fundamentals and Applications; Second Edition", CRC press, 1995.
- 7) B. Limited, "Probabilistic methods : Uses and abuses in structural integrity", HSE, 2001.
- 8) M. Ahammed, "Probabilistic estimation of remaining life of a pipeline in the presence of active corrosion defects", Int. J. Pressure Vessels and piping, Vol. 75, No. 4, pp. 321~329, 1998.
- 9) S. Mahadevan and A. Haldar, "Reliability Assessment Using Stochastic Finite Element Analysis", John Wiley & Sons, 2000.
- 10) S. Mahadevan and A. Haldar, "Probability, Reliability and Statistical Method in Engineering Design", John Wiley & Sons, 2000.