

감육현상을 고려한 가스배관의 파손확률 평가

이상민*, 윤강옥*, 장윤석*, 최재봉*, 김영진#

Failure Probability Assessment of Gas Pipelines Considering Wall-Thinning Phenomenon

Sang-Min Lee*, Kang-Ok Yun*, Yoon-Suk Chang*, Jae-Boong Choi* and Young-Jin Kim#

ABSTRACT

Pressurized gas pipeline is subject to harmful effects both of the surrounding environment and of the materials transmitted in them. In order to maintain the integrity, reliable assessment procedures including fracture mechanics analysis etc are required. Up to now, the integrity assessment has been performed using conventional deterministic approaches even though there are many uncertainties to hinder a rational evaluation. In this respect, probabilistic approach is considered as an appropriate method for gas pipeline evaluation. The objectives of this paper are to estimate the failure probability of corroded pipeline in gas and oil plants and to propose limited operating conditions under different types of loadings. To do this, a probabilistic assessment program using reliability index and simulation techniques was developed and applied to evaluate failure probabilities of corroded API-5L-X52/X60 gas pipelines subjected to internal pressure, bending moment and combined loading. The evaluation results showed a promising applicability of the probabilistic integrity assessment program.

Key Words : First Order Reliability Method(1차 신뢰도지수법), Gas Pipeline(가스배관), Monte Carlo Simulation(몬테카를로 시뮬레이션), Probabilistic Fracture Mechanics(확률론적 파괴역학), Second Order Reliability Method(2차 신뢰도지수법)

1. 서 론

원유와 천연가스 등의 수송을 담당하는 가스배관(gas pipeline)은 부식(corrosion), 공식(pitting), 침식(erosion) 등의 가혹한 환경하에서 설계수명 동안 충분한 건전성을 유지해야 한다. 특히 부식에 의해 손상된 배관의 사고방지와 건전성 확보를 위해서는 파괴역학 분석과 같은 복잡한 평가절차가 요구

된다. 현재까지 가스배관에 관한 건전성평가는 주로 결정론적 접근법(deterministic approach)에 따라 수행되어 왔으나, 배관의 형상, 작용하중 그리고 재료물성 등의 불확실성으로 인해 합리적인 평가를 수행하는데 한계가 존재한다. 기존의 결정론적 접근법에서는 다양한 불확실성을 고려하기 위해 안전계수(safety factor) 개념을 도입하고, 이를 가스배관의 설계 및 수명평가에 활용하여 왔다. 그러

* 접수일: 2005년 4월 26일; 게재승인일: 2005년 8월 9일

* 성균관대학교 기계공학부

교신저자: 성균관대학교 기계공학부

E-mail ykim50@skku.edu, Tel. (031) 290-5274

나 실제 배관의 수명평가가 고려되는 안전계수들이 누적될 경우 지나치게 보수적인 결과를 도출할 가능성이 있다.^{1,2}

확률론적 파괴역학(Probabilistic Fracture Mechanics: PFM)은 결정론적 접근법을 보완할 수 있는 평가방법으로 대두되었다. 확률론적 접근법(probabilistic approach)은 다양한 불확실성의 정량적 분석이 가능하므로 가스배관의 건전성평가 및 위험도기반검사(risk-based inspection)시 적절히 활용될 수 있으며, 지금까지 주요 산업설비와 관련된 문제점을 해결하기 위하여 여러가지 PFM 프로그램이 개발되어 왔다.³⁻⁶ 그러나 확률론적 접근법을 이용하여 배관의 건전성을 평가할 때, 내압(internal pressure)과 굽힘모멘트(bending moment)를 동시에 고려하여 현장문제를 해결할 수 있는 효과적인 평가 프로그램은 전무한 실정이다.

본 논문의 목적은 감육부를 고려한 가스배관의 파손확률을 예측하고, 다양한 하중형태를 고려하여 가스배관의 한계 운전조건을 제시하기 위한 것이다. 이를 위해 신뢰도지수 및 시뮬레이션 기법에 근거한 확률론적 평가 프로그램을 개발하고, 내압, 굽힘모멘트, 복합하중(combined loading)을 받는 감육된 API-5L-X52/X60 가스배관의 파손확률 평가, 민감도분석, 한계 운전조건(limited operating condition) 결정 등을 수행하고자 한다.

2. PFM 프로그램 개발

본 연구를 통해 PFM에 기반을 둔 배관 건전성평가 프로그램을 개발하였다. 프로그램은 FORM, SORM 그리고 MCS 방법 등 3가지 평가모듈로 구성하였으며, 감육배관의 파손확률 평가 시 활용된다.⁷

Fig. 1은 프로그램의 전체적인 평가절차를 나타낸 것으로, 평가모듈 중 FORM과 SORM은 입력변수변환, 반복계산 그리고 수치해석함수 등의 기능이 있으며, MCS는 난수 생성 및 확률분포 생성함수 등의 모듈로 이루어져 있다. 사용자는 FORM, SORM 또는 MCS 모듈을 건전성평가 방법으로 선택할 수 있다.

Fig. 2는 FORM/SORM 그리고 MCS 모듈을 이용한 배관계통 평가화면의 예를 나타낸 것이다. 각 평가화면에서 볼 수 있듯이 공통적으로 확률밀도함수(Probability Density Function: PDF), 평균 그리고

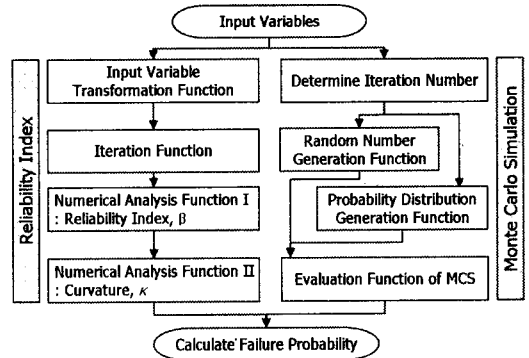
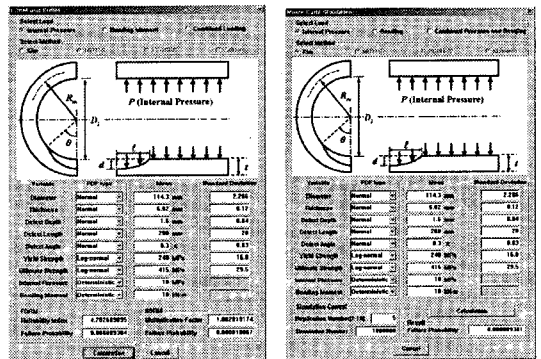


Fig. 1 The flowchart of wall-thinned gas pipeline assessment program



(a) FORM/SORM modules

(b) MCS module

Fig. 2 Pipeline evaluation screen

표준편차로 표현되는 작용하중과 재료물성 정보가 요구된다.

3. 감육배관에 대한 PFM 해석

3.1 평가대상 및 확률변수 결정

감육된 가스배관에 대한 확률론적 접근법 적용을 위해 대표적인 API-5L-X52와 X60을 선정 한 후 전술한 3가지 평가모듈을 기반으로 건전성평가를 수행하였다. 타당한 평가를 수행하기 위해서는 각 확률변수에 대한 평균과 표준편차 또는 변동계수(Coefficient of Variation: CV)의 설정이 필요하다. 본 논문에서는 현장 데이터의 부족함을 고려하여 문헌에 제시된 확률변수의 평균, 변동계수 그리고 PDF 등의 정보를 사용하였다. Table 1은 본 연구에서 고려된 확률변수들을 제시한 것으로서, 이중

Table 1 Basic input variables for PFM analysis

Variable	API-5L-X52		API-5L-X60	
	μ	CV	μ	CV
Defect depth, d (mm)	3.0*	0.1	3.0*	0.1
Defect length, l (mm)	150*	0.1	150*	0.1
Defect angle, θ/π	0.055*	0.1	0.055*	0.1
Outer diameter, D_o (mm)	914.4	0.02	914.4	0.02
Thickness, t (mm)	20.6	0.02	8.7	0.02
Yield strength, σ_y (MPa)	358.0	0.07	413.0	0.07
Ultimate tensile strength, σ_u (MPa)	455.0	0.07	517.1	0.07
Internal pressure, p_{op} (MPa)	15.6-27.3	-	6.0-11.4	-
Bending moment, M_{op} (kN-m)	3500-6500	-	1700-3100	-

* Defect geometry considering 30 years operation

결함형상은 건전배관에 0.1 mm/year의 결함깊이성장률(defect depth growth rate, V_d), 5.0 mm/year의 결함길이성장률(defect length growth rate, V_l), 0.018 rad/year의 결함각성장률(defect angle growth rate, V_θ)을 적용하여 30년 운전기준으로 결정하였다.^{8,9}

3.2 한계상태방정식 구성

감육배관의 건전성 여부를 판단할 때 사용되는 한계상태방정식(Limit State Function: LSF)은 Modified B31G(MB31G)¹⁰, PCORRC¹¹ 그리고 Kim^{12,13}에 의해 제시된 결정론적 기준을 바탕으로 구성하였다. MB31G 기준은 감육배관에 내압이 작용하는 경우에 관한 것으로서, LSF는 배관두께의 순단면(net-section) 응력계산법으로부터 다음과 같이 제시되었다.

$$g(x_i) = p_f - p_{op} \quad (1)$$

여기서, p_{op} 는 작용압력이고 파열압력 p_f 는 식 (2)로 표현된다.

$$p_f = (\sigma_y + 68.95 \text{MPa}) \frac{2t}{D} \left(\frac{1 - 0.85 \frac{d}{t}}{1 - 0.85 \frac{d}{t} M^{-1}} \right) \quad (2)$$

여기서,

$$M = \left(1 + 0.6275 \frac{l^2}{Dt} - 0.003375 \frac{l^4}{D^2 t^2} \right)^{0.5} \text{ for } \frac{l^2}{Dt} \leq 50 \quad (3)$$

$$M = 0.032 \frac{l^2}{Dt} + 3.3 \text{ for } \frac{l^2}{Dt} > 50 \quad (4)$$

식 (2)~(4)에서 σ_y 는 항복강도(yield strength)이며, D 와 t 는 배관의 외경과 두께이며, d 와 l 은 감육된 깊이와 길이를 의미한다.

PCORRC 소성붕괴기준(plastic collapse criterion) 또한 감육배관에 내압이 작용하는 경우에 대한 것으로서 식 (1)과 동일한 LSF를 사용하나, 이 경우의 파열압력식은 다음과 같다.

$$p_f = \sigma_u \frac{2t}{D} \left(1 - \frac{d}{t} M \right) \quad (5)$$

여기서,

$$M = 1 - \exp \left(-0.157 \frac{l}{\sqrt{R(t-d)}} \right) \quad (6)$$

식 (5)와 (6)에서 σ_u 는 인장강도(ultimate tensile strength)이며, R 은 배관의 반경을 의미한다.

Kim은 감육배관에 내압과 굽힘모멘트가 작용하는 경우에 대하여 등가응력법(equivalent stress method)을 이용하여 다음과 같은 LSF를 제시하였다.

$$g(x_i) = \sigma_u - \sigma_{local} \quad (7)$$

여기서, σ_{local} 은 감육배관에 내압, 굽힘모멘트 또는 복합하중이 작용할 때 감육부의 최심점(deepest point)에서 계산된 등가응력을 의미한다. 각각의

경우에 대한 등가응력식은 식 (8), (11) 그리고 (14)와 같다.

내압이 작용하는 경우:

$$\sigma_{local}^p = \frac{P_{op}}{(p_{ref} / \sigma_y)} \quad (8)$$

여기서,

$$\frac{p_{ref}}{\sigma_y} = \frac{t}{R_m \sqrt{A^2 - AB + B^2}} \quad (9)$$

$$A = \frac{1}{(1 - \frac{d}{t} + \frac{d}{t} \phi)}; B = \frac{R_i}{2R_m}; \phi = \sqrt{\frac{1.61\lambda^2}{R_i d}} \quad (10)$$

굽힘모멘트가 작용하는 경우:

$$\sigma_{local}^M = \frac{M_{op}}{(M_{ref} / \sigma_y)} \quad (11)$$

여기서,

$$M_{ref} = \frac{M_L}{1.333}; \quad (12)$$

$$M_L = 4\sigma_y R_m^2 t \left\{ \cos\left(\frac{\pi d}{8t} \theta\right) - \frac{d}{t} \frac{f(\theta)}{2\theta} \right\}$$

$$f(\theta) = 0.7854\theta^2 - 0.09817\theta^4 - 0.0040906\theta^6 - 0.000085\theta^8 \quad (13)$$

복합하중이 작용하는 경우:

$$\sigma_{local}^{p+M} = \sqrt{\left(\frac{pR_i}{2t} - \frac{M}{M_{ref}^c / \sigma_y}\right)^2 - \left(\frac{pR_i}{2t} - \frac{M}{M_{ref}^c / \sigma_y}\right)\left(\frac{p}{p_L / \sigma_y}\right) + \left(\frac{p}{p_L / \sigma_y}\right)^2} \quad (14)$$

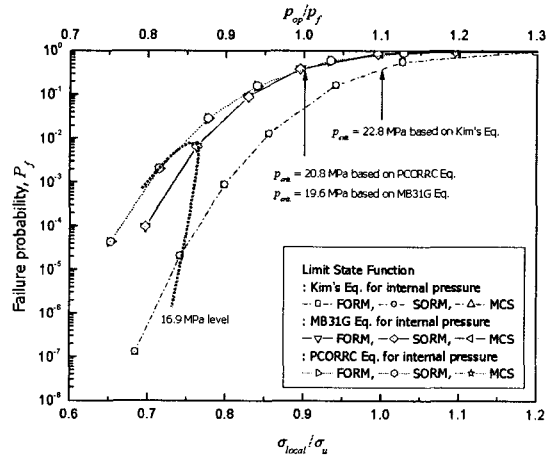
여기서,

$$p_L = \frac{\sigma_y t}{R_m} \left(1 - \frac{d}{t} + \frac{d}{t} \phi\right); \phi = \sqrt{1 + \frac{1.61l^2}{R_i t}} \quad (15)$$

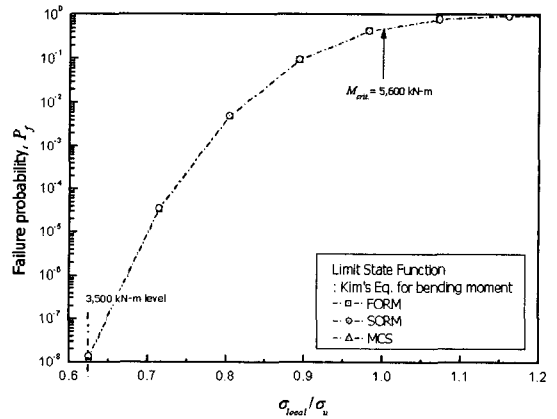
$$M_{ref}^c = 3R_m^2 t \sigma_y \left\{ \cos\left(\frac{\pi d \theta}{8t} + \frac{\pi p R_m}{4t \sigma_y}\right) - \frac{d}{t} \frac{f(\theta)}{2\theta} \right\} \quad (16)$$

3.3 파손확률 평가결과

전술한 LSF 및 이와 관련된 확률변수들을 이용하여 감육배관의 파손확률을 계산하였다. Fig. 3은 감육배관에 각각 내압(p_{op}) 및 굽힘모멘트(M_{op})가 작용하는 경우에 대한 파손확률 평가결과를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 파손확률은 채



(a) Internal pressure



(b) Bending moment

Fig. 3 The prototypal failure probability results for API-5L-X52 gas pipeline with $d=3.0$ mm

택된 LSF에 따라 상당한 차이를 보이나 각 평가 모듈에 의한 영향은 거의 없음을 알 수 있다.

먼저 API-5L-X52 가스배관에 내압이 작용하는 경우, LSF는 MB31G, PCORRC 그리고 Kim에 의해 제시된 식을 사용하였다. API-5L-X52 가스배관에 작용하는 대표적 압력은 7.8 MPa이다.⁸ 이를 감육 깊이가 3.0 mm(30년 운전 고려)인 배관에 작용하였을 때 파손확률은 10^{-8} 이하로 계산되었으며, 압력을 15.6 MPa에서부터 27.3 MPa까지 증가시켰을 때 파손확률은 채택된 LSF에 따라 약 $10^{-7} \sim 10^{-5}$ 으로부터 1까지 증가하였다. Kim 식을 이용하여 파손확률을 계산한 결과, 감육부 최심점의 등가응력

이 항복강도에 이르게 하는 임계내압(critical internal pressure: p_{crit})은 운전압력의 약 3배로 나타났다. 이는 사고압력[운전압력(7.8 MPa)×안전계수(3)] 하에서도 건전성을 유지하여야 한다는 결정론적 조건을 만족하는 결과이다. MB31G와 PCORRC 식을 이용하여 구한 임계내압은 Kim 식에 기반한 결과보다 9~14% 작은 값을 보였다. 한편 Table 1에 주어진 정보를 바탕으로 두께는 상대적으로 얇지만 재료특성이 보다 우수한 API-5L-X60 가스배관의 파손확률을 계산한 결과, 각 평가식에 따른 임계내압은 8.7~9.6 MPa로써 운전압력과의 비는 API-5L-X52 결과와 유사하였다.

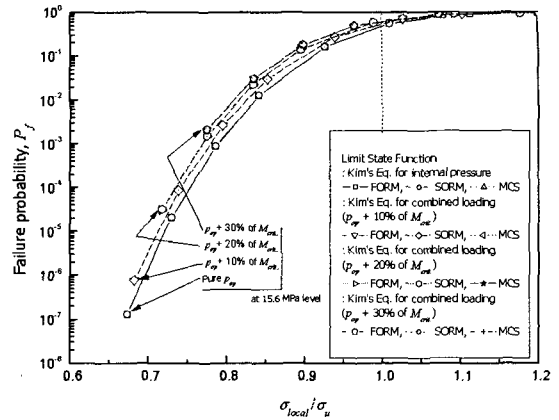
굽힘모멘트가 작용하는 경우의 LSF로는 Kim에 의해 제시된 식을 채택하였다. API-5L-X52 가스배관에 3,500 kN-m의 굽힘모멘트를 작용하였을 때의 파손확률은 1.5×10^{-8} 수준으로 상당히 낮았으며, 굽힘모멘트를 증가시켜 가며 구한 소성붕괴 유발 임계값(critical bending moment: M_{crit})에서의 파손확률은 약 0.5이었다. 또한 API-5L-X60 가스배관에 대한 임계굽힘모멘트는 2,750 kN-m로 계산되었으며, 이 때의 파손확률 역시 약 0.5이었다.

Fig. 4는 복합하중($p_{op}+M_{op}$)이 작용하는 경우에 대하여 감육깊이가 3.0 mm인 API-5L-X52 가스배관의 파손확률을 비교한 것이다. 앞서 정의한 임계내압 및 굽힘모멘트 값을 10, 20, 30% 증가시키며 파손확률을 계산하였다. Fig. 4(a)는 임계굽힘모멘트 증가에 따른 계산 결과로써, 15.6 MPa의 내압이 작용할 때의 파손확률은 최소 83%에서 최대 6,747% 정도 증가하였다. Fig. 4(b)는 임계내압 증가에 따른 계산 결과로써, 3,500 kN-m의 굽힘모멘트가 작용할 때의 파손확률은 최소 45%에서 최대 5,657% 정도 증가하였다. 그러나 동일한 무차원 국부응력(σ_{local}/σ_u) 조건에서의 파손확률 차이는 그다지 크지 않았다.

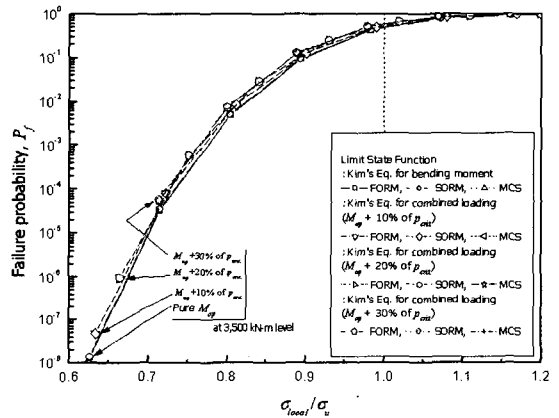
이상의 평가결과를 종합적으로 판단해 볼 때, 굽힘모멘트가 내압에 비해 파손확률에 미치는 영향이 상대적으로 크므로, 현재의 내압만을 고려한 기준으로는 감육된 가스배관의 정확한 건전성평가가 어렵다. 따라서 Kim 등의 복합하중을 고려할 수 있는 LSF를 이용하여 배관 건전성평가를 수행하는 것이 보다 바람직한 것으로 판단된다.

3.4 주요 확률변수에 대한 민감도분석

확률론적 건전성 평가 시 주요 변수에 대한 민



(a) Internal pressure vs. combined loading



(b) Bending moment vs. combined loading

Fig. 4 The comparison of prototypal failure probability evaluation results for API-5L-X52 gas pipeline with $d=3.0$ mm

감도분석 과정은 평가결과의 신뢰성을 나타내기 위하여 필요하다. 즉, 민감도분석을 통해 주요 확률변수가 구조물의 안전에 영향을 미치는 우선순위를 결정하여 효율적인 설계 또는 평가를 수행할 수 있다. 본 논문에서는 주요 변수들이 감육배관의 파손확률에 미치는 영향을 평가하기 위해, 내압이 작용하는 대표적인 경우에 대하여 Kim이 제시한 LSF를 이용하여 민감도분석을 수행하였다. 확률변수로는 감육깊이, 감육길이, 배관외경, 배관두께 그리고 인장강도를 선택하였으며, Fig. 5에 각 변수의 CV($=\sigma/\mu$)값 변화에 따른 영향을 나타내었다. 이때, Table 1에 제시된 자료를 기준으로 하여

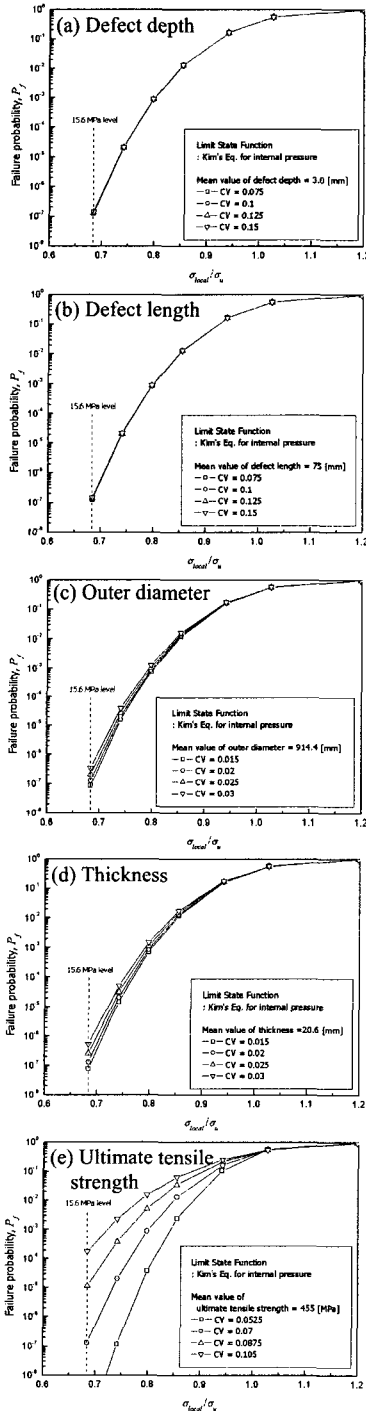


Fig. 5 The effect of probabilistic variables on failure probability under internal pressure

CV를 25% 감소 또는 25 및 50% 증가시키며 사례 해석을 수행하였고, 이중 내압이 15.6 MPa일 때의 파손확률을 비교하였다.

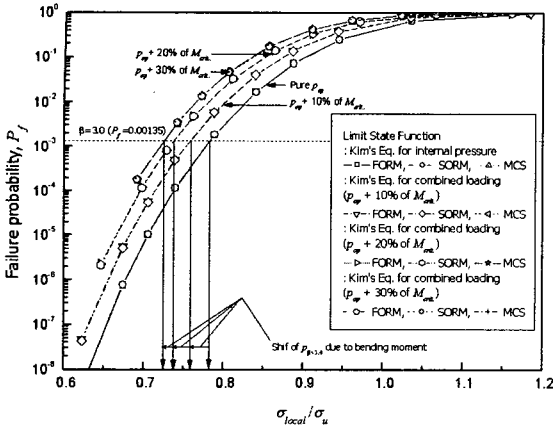
Figs. 5(a)와 5(b)는 각각 감육 깊이와 길이의 CV 변화에 따른 파손확률을 나타낸 것이다. CV값이 0.075에서 0.15까지 각각 25%씩 증가하더라도 파손확률의 변화는 미미하였다. Fig. 5(c)는 배관의 외경의 CV 변화에 대한 평가결과를 나타낸 것이다. CV값이 0.015에서 0.03까지 각각 25%씩 증가함에 따라 파손확률은 각각 50~70%씩 증가하였다. Fig. 5(d)는 배관두께의 CV 변화에 대한 영향을 나타낸 것으로, 각각의 CV 변화에 따라 파손확률은 70~110%씩 증가하는 것으로 나타났다. Fig. 6(e)는 인장강도의 CV 변화에 대한 평가결과를 나타낸 것이다. CV값이 0.0525에서 0.105로 변화함에 따라 파손확률은 약 1,400% 이상씩 증가하였다.

민감도분석 결과를 종합적으로 볼 때 5가지 확률변수 중에서 인장강도가 가스배관의 파손확률에 가장 큰 영향을 미치는 인자이며, 감육 깊이와 길이의 변화는 파손확률에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 또한 배관 외경과 두께가 파손확률에 미치는 영향은 비교적 작은 것으로 평가되었다. 따라서 신뢰성 있는 파손확률을 계산하기 위해 인장강도에 대한 정확한 PDF를 결정하는 것이 상당히 중요하다. 또한 파손확률에 미치는 기여도가 높은 확률변수, 즉 민감도가 높은 입력변수를 선정할 때 현장 데이터를 활용함으로써 그 입력자료에 대한 신뢰도를 높이거나 부분안전계수 (partial safety factor) 개념을 도입하여 보다 정확한 설계를 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

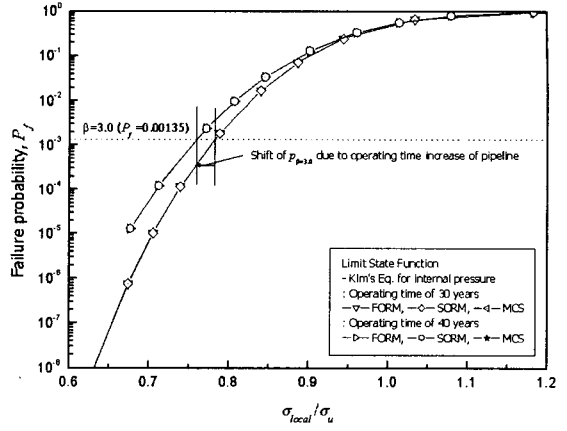
3.5 가스배관의 한계 운전조건 결정

신뢰성 이론에 기반하여 산업설비의 안전성을 정량적으로 평가하고 이를 설계단계에서 고려하기 위하여 목표 신뢰도지수(target reliability index, β) 개념을 도입하였다. 강구조물로 이루어진 주요 산업설비의 목표 신뢰도지수는 3.0으로 설정할 수 있으므로,¹⁴ 본 논문에서는 감육된 API-5L-X60 가스배관에 복합하중이 작용하는 경우에 대하여 Kim 식을 바탕으로 한계 운전조건을 결정하였다.

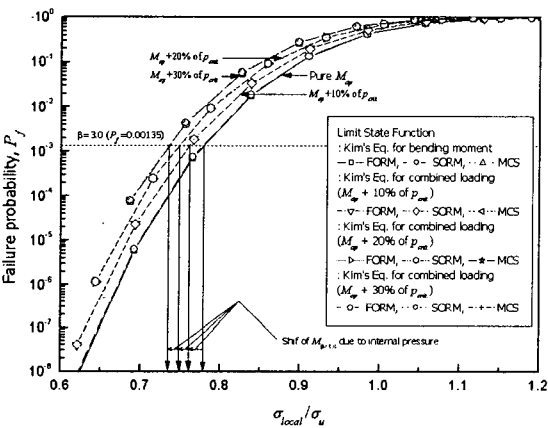
Fig. 6(a)는 API-5L-X60 가스배관에 복합하중이 작용할 때의 목표 신뢰도지수($\beta=3.0$, $P_f=0.00135$)를 만족하는 한계 운전압력(limited operating pressure, $p_{\beta=3.0}$)을 제시한 것이다. 임계굽힘모멘트 값이 10,



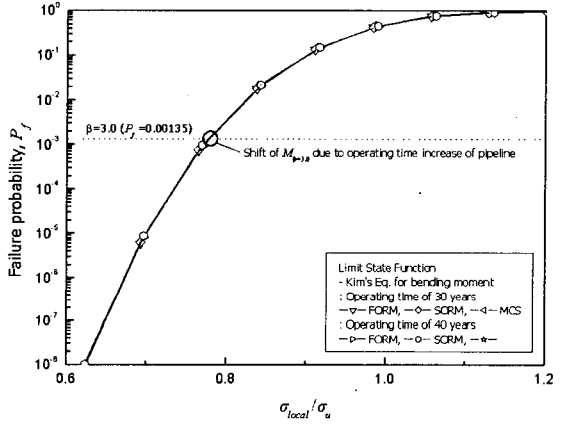
(a) Internal pressure vs. combined loading



(a) Internal pressure



(b) Bending moment vs. combined loading



(b) Bending moment

Fig. 6 The limited operating conditions of combined loading for API-5L-X60 with $d=3.0$ mm

20, 30% 증가함에 따라, 한계 운전압력은 임계압력의 66~80% 정도의 값을 갖는 것으로 계산되었다. Fig. 6(b)는 한계 운전모멘트(limited bending moment, $M_{\beta=3.0}$)의 변화를 나타낸 것으로서, 임계압력 값이 증가할 때 한계 운전모멘트는 임계모멘트의 67~78%로 계산되었다. API-5L-X52 가스배관의 경우에도 한계 운전압력과 모멘트의 변화는 API-5L-X60의 경우와 유사한 결과를 보였다.

Fig. 7은 API-5L-X60 가스배관에 내압과 굽힘모멘트가 작용하는 경우 Kim 식을 바탕으로 운전기간에 따른 감육부의 성장을 고려하여 한계 운전조건을 계산한 것이다. Fig. 7(a)는 내압이 작용하는

Fig. 7 The comparison of prototypal failure probability results for API-5L-X60 gas pipeline under internal pressure according to operating time

경우에 대한 결과로써, 가스배관의 운전기간이 기준이 되는 30년에서 40년으로 증가했을 때 한계 운전압력은 7.6 MPa에서 6.4 MPa로 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 보통 API-5L-X60 가스배관의 대표적인 최대 가동압력은 약 5.7 MPa이므로 40년 가동한 가스배관의 경우에도 한계 운전압력 값에 안전여유가 있는 것으로 계산되었다.⁹ Fig. 7(a)는 굽힘모멘트가 작용하는 경우에 대한 결과로써, 10년의 운전기간 증가에 따른 한계 운전모멘트의 감소량은 1% 미만의 무시할 만한 수준이었다. 또한 이러한 경향은 API-5L-X52 가스배관의 경우에도 동일하게 나타났다.

4. 결 론

본 논문에서는 확률론적 파괴역학에 기반을 둔 건전성평가 프로그램을 개발하고, 이를 감육부가 존재하는 API-5L-X52/X60 가스배관에 적용하여 파손확률을 계산하였다. 여기서 얻은 주요 결과는 다음과 같다.

(1) FORM, SORM, 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 내압, 굽힘모멘트 그리고 복합하중을 받는 가스배관의 파손확률을 예측하고, 이를 결정론적 계산식과 비교하여 그 유용성을 확인하였다.

(2) 감육부에 복합하중이 작용하는 경우 내압보다는 굽힘모멘트 증분의 효과가 파손확률에 지배적으로 작용하므로, 내압에 근거한 현 설계기준을 실제 조건인 복합하중을 고려할 수 있도록 개선하는 것이 바람직하다.

(3) 주요 확률변수에 대한 민감도분석 결과, 인장강도의 영향이 가장 크고, 감육 깊이 및 길이의 영향은 미미한 것으로 나타났다.

(4) 신뢰도지수 3.0을 만족하는 30년 기준 한계 운전조건은 임계 내압과 굽힘모멘트의 66~80%로 계산되었으며, 이는 가스배관의 운전 및 건전성평가 기준으로 사용될 수 있다.

(5) 감육부의 성장을 고려하여 구한 가스배관의 40년 기준 한계 운전압력은 약 16% 정도 감소하였으나, 건전성은 지속적으로 유지할 수 있는 것으로 나타났다.

후 기

본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

- Ahamed, M., "Probabilistic estimation of remaining life of a pipeline in the presence of active corrosion defects," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 75, pp. 321-329, 1998.
- Ahamed, M. and Melchers, R.E., "Probabilistic analysis of underground pipelines subject to combined stress and corrosion," *Engineering Structures*, Vol. 19, No. 12, pp. 988-994, 1997.
- Dillstrom, P., "ProSINTAP - A probabilistic program implementing the SINTAP assessment procedure," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 67, pp. 647-668, 2000.
- Roy, S., Grigory, S., Smith, M., Kanninen, M.F. and Anderson, M., "Numerical simulations of full-scale corroded pipe tests with combined loading," *ASME Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 119, pp. 457-466, 1997.
- Rahman, S., "Probabilistic fracture analysis of cracked pipe with circumferential flaws," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 20, pp. 223-236, 1997.
- Machida, H., Arakawa, M. and Kamishima, Y., "Probabilistic fracture mechanics analysis for pipe considering dispersion of seismic loading," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 212, pp. 1-12, 2002.
- Haldar, A. and Mahadevan, S., "Probability, reliability, and statistical methods in engineering design," *John Wiley & Sons, Inc.*, 2000.
- Caleyo, F., Gonzalez, J.L. and Hallen, J.M., "A study on the reliability assessment methodology for pipelines with active corrosion defects," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 79, pp. 77-86, 2002.
- Pandey, M.D., "Probabilistic models for condition assessment of oil and gas pipelines," *NDT&E International*, Vol. 31, No. 5, pp. 349-359, 1998.
- Kiefner, J.F. and Vieth, P.H., "New method corrects criterion for evaluating corroded pipe," *Oil & Gas Journal*, Vol. 88, pp. 56-59, 1990.
- Leis, B.N. and Stephens, D.R., "An alternative approach to assess the integrity of corroded line pipe-part I: current status, part II: alternative criterion," *Proceeding of 7th International Offshore and Polar Engineering Conference*, 1997.
- Kim, Y.J., Shim, D.J., Lim, H. and Kim, Y.J., "Reference stress based approach to predict failure strength of pipes with local wall thinning under single loading," *ASME Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 126, pp. 194-201, 2004.
- Shim, D.J., Kim, Y.J. and Kim, Y.J., "Reference stress based approach to predict failure strength of pipes with local wall thinning under combined

loading,” ASME Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 127, pp. 76-83, 2005.

14. Faber, M.H and Sorensen, J.D., “Reliability Based Code Calibration,” Proceeding of JCSS Workshop, Zurich, Switzerland, 2002.