

〈 논문 〉

## 신뢰도지수 및 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 원전 감육배관의 확률론적 손상역학 평가

이상민\* · 윤강옥\* · 장윤석\* · 최재봉\* · 김영진†  
(2005년 3월 9일 접수, 2005년 6월 9일 심사완료)

### Probabilistic Damage Mechanics Assessment of Wall-Thinned Nuclear Piping Using Reliability Method and Monte-Carlo Simulation

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

**Key Words :** First Order Reliability Method(1차 신뢰도지수법), Monte Carlo Simulation(몬테카를로 시뮬레이션), Probabilistic Damage Mechanics(확률론적 손상역학), Second Order Reliability Method(2차 신뢰도지수법), Secondary Piping(2차 배관)

#### Abstract

The integrity of nuclear piping systems has to be maintained sufficiently all the times during operation. 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 approach even though there are lots of uncertainties to hinder a rational evaluation. In this respect, probabilistic approach is considered as an appropriate method for piping system evaluation. The objectives of this paper are to develop a probabilistic assessment program using reliability index and simulation technique and to estimate the damage probability of wall-thinned pipes in secondary systems. The probabilistic assessment program consists of three evaluation modules which are first order reliability method, second order reliability method and Monte Carlo simulation method. The developed program has been applied to evaluate damage probabilities of wall-thinned pipes subjected to internal pressure, global bending moment and combined loading. The sensitivity analysis results as well as prototypal evaluation results showed a promising applicability of the probabilistic integrity assessment program.

#### 1. 서론

원자력발전소 주요기기(major components) 및 이를 연결하는 배관계통(piping system)은 가동중 충분한 건전성을 유지해야 하며, 이를 만족시키지 못할 경우 파괴역학해석과 같은 추가적인 평가를 통해 안전성을 입증하여야 한다. 현재까지 원자력발전소 주요기기에 대한 건전성평가는 주로 결정

론적 접근법(deterministic approach)에 의해서 수행되었으나, 구조물의 형상, 작용하중 그리고 재료물성 등의 불확실성으로 인해 구조물의 건전성평가를 합리적으로 수행하는데 한계가 존재한다. 기존의 결정론적 접근법에서는 다양한 불확실성을 고려하기 위해 안전계수(safety factor) 개념을 도입하고, 이를 구조물의 설계 및 수명평가에 활용하여 왔다. 그러나 실제 구조물의 수명평가지 고려되는 안전계수들이 누적될 경우 지나치게 보수적인 결과를 도출할 가능성이 있다.<sup>(1,2)</sup>

이러한 관점에서 확률론적 손상역학(Probabilistic Damage Mechanics: PDM)은 결정론적 접근법을 보완할 수 있는 평가방법으로 대두되었다. 확률론적 접근법(probabilistic approach)은 다양한 불확실성을 정량적으로 다루기 때문에 원전 주요기기에 대한

† 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부  
E-mail : yjkim50@skku.edu  
TEL : (031)290-5274 FAX : (031)290-5276

\* 회원, 성균관대학교 기계공학부

건전성평가 및 위험기반 의사결정시 적절한 방법론으로 고려된다. 지금까지 주요기기에 대한 기존의 건전성평가지 세기되고 있는 문제점을 해결하기 위하여 여러가지 PDM 프로그램이 개발되어 왔다.<sup>(3-7)</sup> 그러나 확률론적인 접근법을 이용하여 배관의 건전성을 평가할 때, 내압(internal pressure)과 굽힘모멘트(global bending moment)를 동시에 고려하여 현장문제를 해결할 수 있는 효과적인 평가 프로그램은 전무한 실정이다.

따라서 본 논문의 목적은 확률론적 손상역학에 기초한 배관 건전성평가 프로그램을 개발하고, 이를 이용하여 원전 2차 계통 감육배관의 손상확률을 평가하는 것이다. 배관 건전성평가 프로그램은 1차 신뢰도지수법(First Order Reliability Method: FORM), 2차 신뢰도지수법(Second Order Reliability Method: SORM) 그리고 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation: MCS) 방법 등 3가지 평가모듈로 구성하였다. 또한 감육배관의 한계상태방정식(Limit State Function: LSF)에 따른 손상확률의 차이를 분석하고자 하며, LSF를 구성하는 확률변수의 영향을 평가하기 위해 민감도분석(sensitivity analysis)을 수행하고자 한다.

2. 확률론적 손상역학 해석기법

확률론적 손상역학은 구조물 및 손상 형상, 작용하중, 재료물성의 분산을 고려하여 구조물의 손상확률(Damage Probability:  $P_d$ )을 결정하기 위해 사용될 수 있다. 구조물의 손상확률은 파손거동을 나타내는 LSF인  $g(x)$ 에 의해 결정되며, 이는 각각의 확률변수  $x_i=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 의 함수로 표현된다. 이때  $g(x) < 0$  이면 구조물의 손상이 발생함을 의미하며,  $g(x) > 0$  인 경우에는 손상되지 않음을 의미한다. 최종적으로 구조물의 손상확률은 다음과 같이 정의할 수 있다.<sup>(8)</sup>

$$P_d = \int \dots \int f_1(x_1) \dots f_n(x_n) dx_1 \dots dx_n \quad (1)$$

여기서,  $f_i(x_i)$ 는 변수  $x_i$ 에 대한 확률밀도함수(Probability Density Function: PDF)이며 적분은  $g(x) < 0$  인 구간에서 수행한다. 이러한 해석적 방법을 이용하면 이론적으로 정확한 해를 구할 수 있으나 매우 제한적인 경우에만 해를 계산할 수 있다.

산업현장에 실제 적용 가능한 공학적 파손확률 예측기법으로는 크게 신뢰도지수를 이용하는 방법과 시뮬레이션을 이용하는 방법이 있다. 이중 신뢰도지수를 이용하는 방법은 손상여부를 판단하는 LSF를 결정하고, 확률변수의 평균( $\mu$ )과 표준편차( $\sigma$ )의 조합으로 계산되는 매개변수를 사용하여 파손확률을 구한다. 이러한 매개변수를 신뢰도지수라고 하며 이를 사용하는 모든 기법을 신뢰도지수법이라고 한다. 신뢰도지수를 이용하는 방법은 LSF의 Taylor 전개식 중 근사화된

차수에 따라 1차식까지만 고려하는 FORM과 2차식까지 고려하는 SORM으로 구분된다. FORM의 경우 평가점(evaluation point)에서 LSF를 선형화하여 근사적인 손상확률을 구하며 다음과 같은 식을 통해 계산할 수 있다.

$$P_d \approx \Phi(-\beta) = 1 - \Phi(\beta) \quad (2)$$

여기서,  $\Phi$ 는 누적 표준정규분포,  $\beta$ 는 기본 변수공간에서의 원점과 평가점 사이의 최소거리를 나타내는 신뢰도지수이다.

SORM의 경우 손상확률은 평가점에서 LSF의 주곡률(principal curvature:  $\kappa_i$ )을 사용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$P_d \approx \Phi(-\beta) \prod_{i=1}^{n-1} (1 + \beta \kappa_i)^{-1/2} \quad (3)$$

여기서,  $\Phi$ 와  $\beta$ 는 FORM의 경우와 동일하며,  $\kappa_i$ 는 LSF의  $i$ 번째 주곡률을 나타낸다.

한편 몬테카를로 시뮬레이션 방법을 사용하여 손상확률을 구할 수 있다. 이 방법은 주어진 확률분포에 따라 임의의 확률변수를 난수 형태로 생성하고 이 난수를 LSF에 대입하여 손상여부를 결정 한 후, 최종적으로 손상확률을 결정한다. 손상확률은 다음 식으로 표현된다.

$$P_d = \lim_{t \rightarrow \infty} \left[ \frac{N_d}{N_t} \right] \approx \frac{N_d}{N_t}, \quad 0 \leq P_d \leq 1, \quad t = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

여기서,  $N_d$ 는 손상횟수,  $N_t$ 는 전체 시뮬레이션 횟수이다.

3. PDM 프로그램 개발

본 논문에서는 PDM에 기반을 둔 배관 건전성평가 프로그램을 개발하였다. 프로그램 개발은 FORM, SORM 그리고 MCS 방법 등 3가지 평가모듈을 이용하여 구성하였으며, 개발된 프로그램을 활용하여 감육배관의 손상확률을 평가할 수 있다. Fig. 1은 프로그램의 전체적인 평가절차를 나타낸 것으로, 평가모듈 중 FORM과 SORM은 입력변수 변환, 반복계산 그리고 수치해석함수 등의 기능이 있으며, MCS는 난수 생성 및 확률분포 생성함수 등의 모듈로 이루어져 있다.

Fig. 2는 감육배관 건전성평가 프로그램의 주화면(main window)을 나타내고 있다. 평가를 수행하는 사용자는 FORM, SORM 또는 MCS 모듈을 건전성평가 방법론으로 선택할 수 있다. Fig. 3은 FORM/SORM 그리고 MCS 모듈을 이용한 배관계통 평가화면의 예를

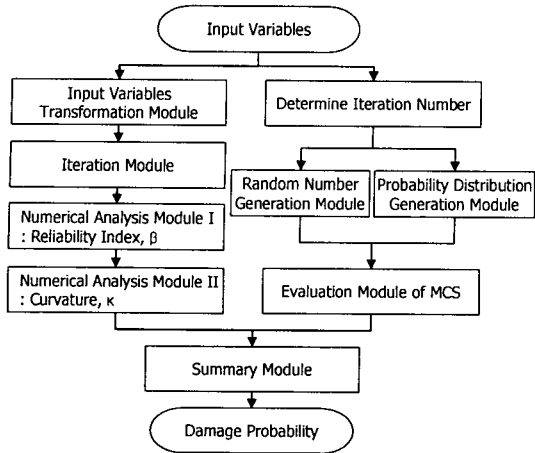


Fig. 1 The flowchart of wall-thinned piping assessment program

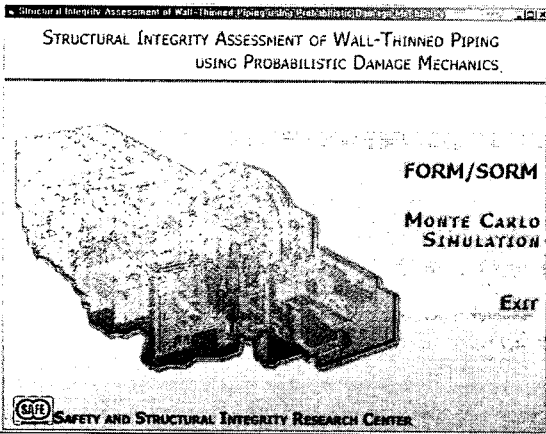
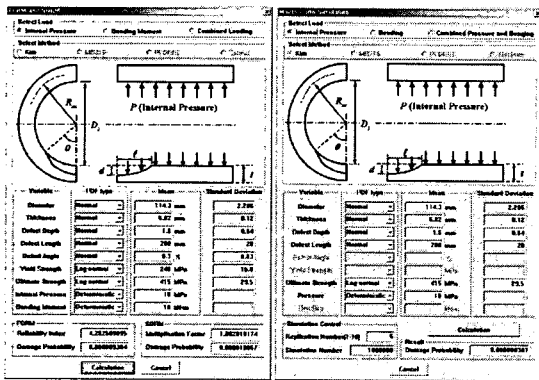


Fig. 2 The main window of wall-thinned piping assessment program



(a) FORM/SORM module (b) MCS module  
Fig. 3 'Piping System' evaluation screen

나타내고 있다. 각 평가화면에서 볼 수 있듯이 공통적으로 확률밀도함수, 평균 그리고 표준편차로 표현되는 작용하중과 재료물성 정보가 요구된다.

Table 1 Input variables for PDM analysis<sup>(9,10)</sup>

Variable	$\mu$	COV
Defect depth, $d$ [mm]	3.01	0.1
Defect length, $l$ [mm]	100	0.1
Defect angle, $\theta/\pi$	0.25	0.1
Outer diameter, $D_o$ [mm]	114.3	0.02
Thickness, $t$ [mm]	6.02	0.02
Yield strength, $\sigma_f$ [MPa]	224	0.07
Ultimate tensile strength, $\sigma_u$ [MPa]	415	0.07
Internal pressure, $p_{op}$ [MPa]	10-34	-
Global bending moment, $M_{op}$ [kN-m]	8-24	-

#### 4. 감육배관에 대한 PDM 해석

##### 4.1 문제정의

감육배관에 대한 확률론적 건전성평가는 건설한 3가지 평가모듈을 기반으로 수행하였다. 타당한 평가를 수행하기 위해서는 각 확률변수에 대한 평균과 표준편차 또는 변동계수(Coefficient Of Variation: COV)의 설정이 필요하다. 본 논문에서는 실제 현장 데이터의 부족으로 인해 문헌<sup>(9,10)</sup>에 제시된 확률변수의 평균, 변동계수 그리고 분포함수 등의 정보를 사용하였다.

Table 1은 본 연구에서 고려된 확률변수들을 제시한 것으로서, 이들은 상호간에 독립적인 특성을 갖고 있다. 또한 감육배관의 건전성 여부를 판단할 때 사용되는 LSF는 Kanninen<sup>(11)</sup>과 Kim<sup>(12)</sup>에 의해 제시된 결정론적 기준을 바탕으로 구성하였다.

Kanninen은 감육배관에 굽힘모멘트(global bending moment)가 작용하는 경우에 대하여 배관 두께의 순단면(net-section) 응력계산법으로부터 다음과 같은 LSF를 제시하였다.

$$g(x_i) = M_c - M_{op} \quad (5)$$

여기서,  $M_c$ 는 소성붕괴모멘트이며,  $M_{op}$ 는 작용모멘트이다. 일반적으로  $\alpha \leq \pi - \theta$ 인 경우, 소성붕괴모멘트는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$M_c = 2\sigma_f R_m^2 t \left( 2 \sin \alpha - \frac{d}{t} \sin \theta \right),$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \left( \pi - \frac{d}{t} \theta \right) \quad (6)$$

식 (6)에서  $\sigma_f$ 는 유동응력(flow stress)으로서 항복강도(yield strength:  $\sigma_f$ )와 인장강도(ultimate tensile strength:  $\sigma_u$ )의 산술평균이며,  $R_m$ 과  $t$ 는 각각 배관의 평균반경과 두께를 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,  $\sigma_{local}$ 은 감육배관에 내압, 굽힘모멘트 그리고 복합하중(combined loading)이 작용할 경우에 대해서 최심점(deepest point)으로부터 계산된 등가응력을 의미한다. 각각의 경우에 대한 등가응력식은 식 (8), (11) 그리고 (14)와 같다.<sup>(13)</sup>

내압이 작용하는 경우:

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

여기서,

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

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

굽힘모멘트가 작용하는 경우:

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

여기서,

$$M_{ref} = \frac{M_L}{1.333}; M_L = 4\sigma_y R_m^2 t [\cos(\frac{\pi d}{8t} \theta) - \frac{d}{t} \frac{f(\theta)}{2\theta}] \quad (12)$$

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

복합하중이 작용하는 경우:

$$\sigma_{local}^C = \sqrt{\left(\frac{PR_i}{2t} + \frac{M}{M_{ref}^B / \sigma_y}\right)^2 + \left(\frac{PR_i}{2t} + \frac{M}{M_{ref}^B / \sigma_y}\right)\left(\frac{P}{P_L / \sigma_y}\right) + \left(\frac{P}{P_L / \sigma_y}\right)^2} \quad (14)$$

여기서,

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

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

### 4.2 손상확률 평가결과

전술한 LSF와 관련된 확률변수들을 이용하여 감육배관의 손상확률을 계산하였다. Fig. 4는 감육배관에 내압( $p_{op}$ ) 및 굽힘모멘트( $M_{op}$ )가 작용하는 경우에 대하여 각각의 손상확률 평가결과를 나타낸 것이다.

먼저 감육배관에 내압이 작용하는 경우, LSF는 Kim에 의해 제시된 식을 사용하였다. 원전 2차 계통 배관에 작용하는 압력은 대부분 10 MPa 미만이다. 이와 같은 압력이 감육비( $d/t$ )가 0.5( $d=3.01$  mm,  $t=6.02$  mm)인 감육배관에 작용하였을 경우 손상확률은  $10^{-8}$  이하로 계산되었으며, 14 MPa에서부

터 34 MPa까지 증가할 때 손상확률은 약  $10^{-8} \sim 10^{-7}$  으로부터 1까지 증가하였다. 결국 손상확률 1에 이르게 하는 내압은 운전압력의 약 3배 이상이며, 이는 사고압력[운전압력(10 MPa)×안전계수(3)] 하에서도 건전성을 유지하여야 한다는 결정론적 조건을 만족하는 결과이다.

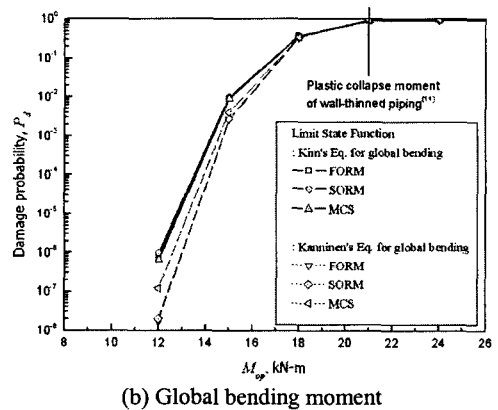
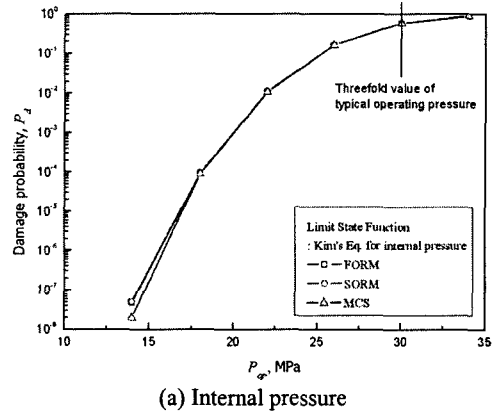


Fig. 4 The prototypal damage probability evaluation results for secondary piping

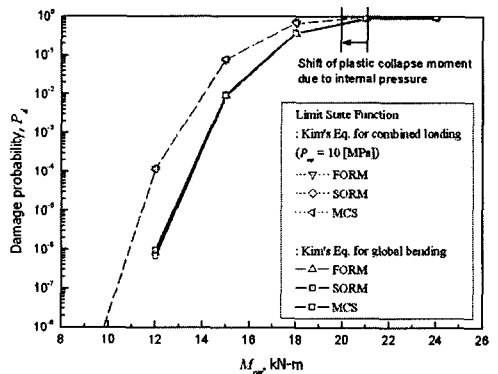


Fig. 5 The comparison of prototypal damage probability evaluation results under global bending moment and combined loading

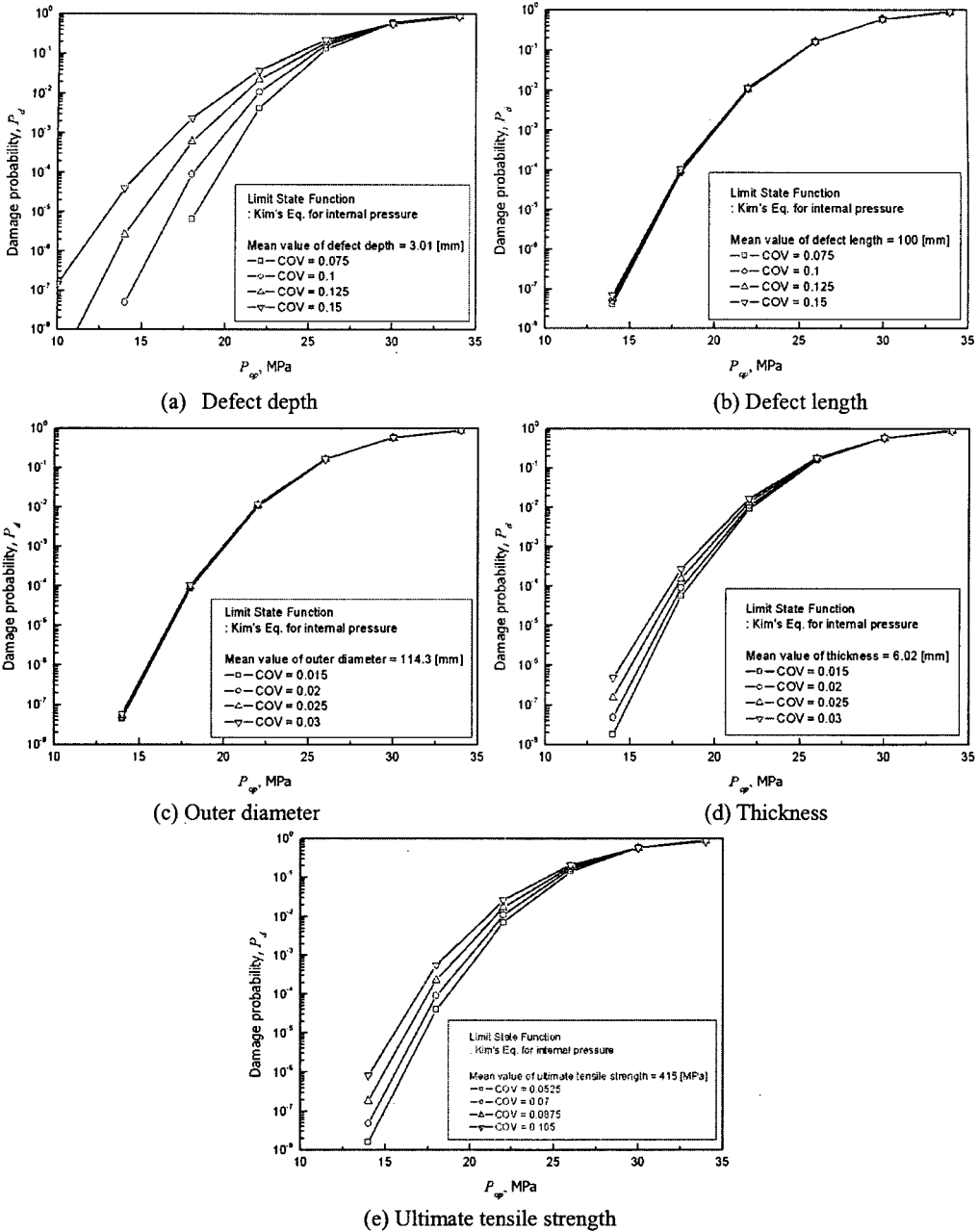


Fig. 6 The effect of probabilistic variables on damage probability under internal pressure

굽힘모멘트가 작용하는 경우의 LSF로는 Kim 과 Kanninen 에 의해 제시된 식을 채택하였다. 배관에 작용하는 굽힘모멘트가 12 kN·m 일 때, 채택된 LSF 및 평가모듈에 따라 손상확률은 약  $10^{-8} \sim 10^{-6}$  으로 차이를 보였다. 하지만 굽힘모멘트가 감육부의 소성붕괴를 유발하는 실험값인 21 kN·m<sup>(11)</sup>까지

증가할 때, LSF 또는 평가모듈의 차이에 관계없이 손상확률은 약 1로 거의 일치하였다. 따라서 개발된 건전성평가 프로그램을 이용하여 구한 손상확률은 타당한 것으로 판단된다.

Fig. 5는 복합하중( $P_{op}+M_{op}$ )이 작용하는 경우에 대하여 감육배관의 손상확률을 계산하여 굽힘모멘

트가 작용하는 경우의 결과와 비교한 것이다. 굽힘모멘트가 12 kN-m 크기로 작용하는 경우, 내압의 영향으로 인하여 손상확률 결과는 약  $10^{-6}$ 과  $10^{-4}$ 으로 차이를 보였으나 굽힘모멘트의 크기가 커짐에 따라 손상확률 평가결과에 반영되는 내압 효과는 점점 작아지는 것으로 나타났다. 결국 10 MPa의 내압이 동시에 작용할 때, 소성봉괴를 유발하는 굽힘모멘트는 복합하중 효과로 인해 21 kN-m에서 약 20 kN-m로 작아졌으며, 이때 FORM, SORM 및 MCS 평가모듈에 따른 손상확률의 변화는 미미한 것으로 계산되었다.

#### 4.3 주요 확률변수에 대한 민감도분석

확률론적 건전성평가시 주요 변수에 대한 민감도분석 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 손상확률에 미치는 영향을 평가하기 위해, 내압이 작용하는 대표적인 경우에 대하여 Kim이 제시한 LSF를 이용하여 민감도분석을 수행하였다. 확률변수로는 감육깊이, 감육길이, 배관외경, 배관두께 그리고 인장강도를 선택하였으며, Fig. 6에 각 변수의 COV( $=\sigma/\mu$ )값 변화에 따른 영향을 나타내었다. 이때, Table 1에 제시된 자료를 기준으로 하여 COV를 25% 감소 또는 25, 50% 증가시키며 사례해석을 수행하였다.

Fig. 6(a)는 감육깊이의 COV 변화에 따른 손상확률을 나타낸 것이다. 내압이 18 MPa 작용할 때 COV값이 0.075에서 0.15까지 각각 25%씩 증가함에 따라, 손상확률은 각각 80%씩 증가하였다. Figs. 6(b)와 6(c)는 각각 감육길이와 배관외경의 COV 변화에 대한 평가결과를 나타낸 것으로, 손상확률에 미치는 영향은 미미하였다. Fig. 6(d)는 배관두께의 COV 변화에 대한 영향을 나타낸 것으로, 내압이 18 MPa 작용할 때 각각의 COV 변화에 따라 손상확률은 각각 40%씩 증가하는 것으로 나타났다. Fig. 6(e)는 인장강도의 COV 변화에 대한 평가결과를 나타낸 것이다. COV값이 0.0525에서 0.105로 변화함에 따라, 내압이 18 MPa인 경우 손상확률은 각각 약 60%씩 증가하였다.

이상과 같이 5가지 확률변수 중에서 감육깊이가 손상확률에 가장 큰 영향을 미치는 인자이며, 감육길이와 배관외경의 변화는 손상확률에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 또한 배관두께와 인장강도가 손상확률에 미치는 영향은 비교적 작은 것으로 평가되었다. 따라서 신뢰성 있는 손상확률을 계산하기 위해 감육깊이에 대한 정확한 PDF를 결정하는 것이 상당히 중요하다. 또한 손상확률에 미치는 기여도가 높은 확률변수, 즉 민감도가 높은 입력변수를 선정할 때 현장 데

이터를 활용함으로써 그 입력자료에 대한 신뢰도를 높이거나 부분안전계수(partial safety factor) 개념을 도입하여 보다 정확한 평가를 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 논문에서는 확률론적 손상역학에 기반을 둔 건전성평가 프로그램을 개발하고, 이를 감육부존재하는 원전 2차 계통 배관에 적용하여 손상확률을 계산하였다. 여기서 얻은 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) FORM, SORM 그리고 몬테카를로 시뮬레이션 방법을 이용하여 건전성평가 프로그램을 구축하였다.
- (2) 개발된 프로그램을 활용하여 내압, 굽힘모멘트 그리고 복합하중을 받는 감육배관의 과열압력을 예측하고, 이를 평가조건 및 실험값과 비교하여 그 유용성을 확인하였다.
- (3) 감육부에 복합하중이 작용하는 경우, 작용 굽힘모멘트의 크기가 작을수록 손상확률 평가결과에 내압 효과가 크게 반영되었다. 하지만 굽힘모멘트의 크기가 소성봉괴모멘트에 가까워짐에 따라, 손상확률 평가결과에 미치는 굽힘모멘트의 영향이 지배적이었다.
- (4) 주요 확률변수에 대한 민감도를 분석하여 각 변수가 감육배관의 손상확률에 미치는 영향을 분석하였다. 그 결과 감육깊이의 영향이 가장 크게 나타났으며, 감육길이와 배관외경의 영향은 미미한 것으로 나타났다.

## 후 기

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

## 참고문헌

- (1) Yagawa, G, Kanto, Y., Yoshimura, S., Machida, H. and Shibata, K., 2001, "Probabilistic Fracture Mechanics Analysis of Nuclear Structural Components: A Review of Recent Japanese Activities," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 207, pp. 269-286.
- (2) Yagawa, G and Yoshimura, S., 1997, "A Study on Probabilistic Fracture Mechanics for Nuclear Pressure Vessels and Piping," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 73, pp. 97-107.
- (3) Dillstrom, P., 2000, "ProSINTAP - A Probabilistic Program Implementing the SINTAP Assessment Procedure," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 67,

- pp. 647~668.
- (4) Roy, S., Grigory, S., Smith, M., Kanninen, M. F. and Anderson, M., 1997, "Numerical Simulations of Full-Scale Corroded Pipe Tests with Combined Loading," *ASME Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol.119, pp. 457~466.
- (5) Walker, Z. H., 2004, "Managing Flow Accelerated Corrosion in Carbon Steel Piping in Nuclear Plants," *Proceedings of Pressure Vessel and Piping*, Vol. 471, pp. 155~165.
- (6) Erdogan, F., 1976, "Ductile Failure Theories for Pressurized Pipes and Containers," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 4, pp. 253~283.
- (7) Cizelj, L., 1994, "On the Estimation of the Steam Generator Maintenance Efficiency by the Means of Probabilistic Fracture Mechanics," KfK 5359, Slovenia.
- (8) Haldar, A. and Mahadevan, S., 2000, "Probability, Reliability, and Statistical Methods in Engineering Design," John Wiley & Sons, Inc., USA.
- (9) Caleyo, F., Gonzalez, J. L. and Hallen, J. M., 2002, "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.
- (10) Miyazaki, K., Kanno, S., Ishiwata, M., Hasegawa, K., Ahn, S. H. and Ando, K., 1999, "Fracture Behavior of Carbon Steel Pipe with Local Wall Thinning Subjected to Bending Load," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 191, pp. 195~204.
- (11) Kanninen, M. F., Broek, D., Marschall, C. W., Bybicki, E. F. and Wilkowski, G. M., 1978, "Toward an Elastic Fracture Mechanics Predictive Capability for Reactor Piping," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 48, pp. 117~134.
- (12) Kim, Y. J., Shim, D. J., Lim, H. and Kim, Y. J., 2004, "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.
- (13) Shim, D. J., Kim, Y. J. and Kim, Y. J., 2005, "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.