

부분안전계수를 이용한 감육배관의 신뢰도 기반 건전성 평가

이재빈^a, 허남수^{a*}, 박치용^b

Reliability-Based Structural Integrity Assessment of Wall-Thinned Pipes Using Partial Safety Factor

Jae-Bin Lee^a, Nam-Su Huh^{a*}, Chi-Yong Park^b

^a Dept. of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology, 232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul, 139-743, Republic of Korea

^b Central Research Institute, Korea Hydro & Nuclear Power Corporation, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	10	April	2013
Revised	15	May	2013
Accepted	20	May	2013

Keywords:

Failure probability
Load and resistance factor design
Partial safety factor
Reliability index method
Target reliability
Wall-thinned pipe

ABSTRACT

Recently, probabilistic assessments of nuclear power plant components have generated interest in the nuclear industries, either for the efficient inspection and maintenance of older nuclear plants or for improving the safety and cost-effective design of newly constructed nuclear plants. In the present paper, the partial safety factor (PSF) of wall-thinned nuclear piping is evaluated based on a reliability index method, from which the effect of each statistical variable (assessment parameter) on a certain target probability is evaluated. In order to calculate the PSF of a wall-thinned pipe, a limit state function based on the load and resistance factor design (LRFD) concept is first constructed. As for the reliability assessment method, both the advanced first-order second moment (AFOSM) method and second-order reliability method (SORM) are employed to determine the PSF of each probabilistic variable. The present results can be used for developing maintenance strategies considering the priorities of input variables for structural integrity assessments of wall-thinned piping, and this PSF concept can also be applied to the optimal design of the components of newly constructed plants considering the target reliability levels.

1. 서론

최근 안전성과 경제성이 대폭 향상된 차세대 원자로(GEN-IV Reactor) 개발 연구가 국내를 비롯한 세계 각국에서 활발히 진행되고 있다^[1]. 그러나 이러한 차세대 원자로의 경우에는 아직 설계나 운전 경험이 충분하지 않기 때문에 기기의 안전성과 경제성을 고려

한 최적 설계를 위해 설계 수명 동안 요구되는 목표신뢰도(혹은 목표파손확률) 정보에 근거한 설계 기법을 정립하기 위한 연구가 미국과 일본 등에서 진행 중에 있다. 특히 서로 상충되는 설계 요건이 있는 경우 이를 모두 고려하여 최적 설계를 수행하기 위해서 설계 수명 기간 동안 요구되는 목표신뢰도 정보에 입각한 설계 기법 개발의 필요성이 크게 대두되고 있다. 일례로 차세대 고온 원자로의

* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-6317

Fax: +82-2-974-8270

E-mail address: nam-su.huh@seoultech.ac.kr (Nam-Su Huh).

경우 큰 열차가 하중이 작용하기에 이로 인한 열응력 혹은 크리프 손상을 방지하기 위해서는 구조물의 두께가 얇아져야 한다. 그러나 두께가 지나치게 얇으면 지진 하중 등에 의한 좌굴의 위험성이 높아진다는 문제가 있을 수 있다^[2]. 따라서 충분한 설계 및 운전 경험이 없는 상태에서 이와 같은 문제를 고려한 최적 설계를 위해서는 설계 수명 동안의 목표신뢰도 정보에 근거한 확률론적 설계 기법의 개발이 필수적이라 할 수 있다.

설계가 진행 중인 차세대 원자로뿐만 아니라 이미 가동 중인 상용 원자로의 경우도 가동중 검사(in-service inspection)를 포함한 기기 유지보수의 효율성 및 경제성 향상을 위해 신뢰도 정보에 근거한 유지보수 기법 정립의 필요성이 지속적으로 제시되고 있다. 만약 유지보수의 경우에도 신뢰도에 근거한 영향 인자별 중요도 등이 정량적으로 평가될 수 있다면 중요도를 고려한 유지보수 전략 수립 등이 가능하여 보다 효율적인 유지보수가 수행될 수 있다.

이와 같은 기기 설계 및 평가 시 수명 기간 동안의 목표신뢰도(혹은 목표파손확률) 정보에 근거하여 설계/평가 변수 별 중요도 정량화 및 이에 근거한 최적 설계, 유지보수 합리화를 실행하기 위해서는 부분안전계수(Partial Safety Factor; PSF) 개념이 필수적으로 활용되어야 한다^[3]. 부분안전계수는 개별 설계 혹은 평가변수가 목표신뢰도에 미치는 영향을 정량적으로 평가할 수 있는 방법론으로 특히 설계 혹은 평가 인자의 불확실성의 차이가 목표신뢰도에 미치는 영향도를 엄밀하게 평가할 수 있다. 따라서 전체 기기의 목표신뢰도에 미치는 개별 인자의 중요도가 평가됨에 따라 목표신뢰도를 고려한 최적 설계는 물론 현재 운전 중인 기기에 대해서도 목표신뢰도를 고려한 기존 설계 및 평가 데이터 검증 및 효율적인 유지보수 전략 수립 등에 활용될 수 있다.

본 논문에서는 목표신뢰도 정보에 근거한 기기 설계 및 평가 체계를 정립하기 위해 감육이 존재하는 배관에 대해 부분안전계수를 평가하였다. 이를 위해 신뢰도지수법에 근거한 감육배관의 부분안전계수 평가 알고리즘 및 프로그램을 개발하였으며, 이를 감육배관에 대한 기존의 결정론적 건전성 평가식에 적용하여 인자별 부분안전계수를 계산하였다. 이를 통해 감육배관의 건전성 측면에서 인자별 중요도를 평가하여 실제 평가 혹은 유지보수 전략이 수립될 수 있도록 하였다.

2. 부분안전계수 평가 이론

2.1 하중-저항(강도)계수 설계법

본 연구에서는 부분안전계수를 계산하기 위해 하중-저항계수 설계법을 이용하였다. 구조물에 작용하는 하중과 재료의 강도는 일반적으로 확정적이 아닌 불확실한 확률분포형태이다. 이러한 특성을 고려하여 파손확률 혹은 신뢰도지수를 계산하기 위한 방법이 하중-

저항(강도)계수 설계법(Load and Resistance Factor Design; LRFD)이다. 이 설계법은 한계상태 설계법(Limit State Design Method; LSD)이라 일컬어지기도 한다. 이 기법에 이용된 한계상태함수는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 하중(L)과 강도(R)의 관계를 확률밀도함수의 개념으로 표현하여 구조물에 대한 파손 상태를 하중변수와 강도변수의 함수로 다음과 같이 정의된다.

$$G = R - L \tag{1}$$

$G > 0$: safe, $G < 0$: unsafe, $G = 0$: limit-state

여기서, G 는 한계상태함수이고, R 은 강도계수 그리고 L 은 하중계수이다.

2.2 신뢰도지수(안전성지표, β)

목표신뢰도 혹은 목표파손확률에 대한 부분안전계수는 안전성지표(β) 계산의 역문제로 설명될 수 있다. 하중과 강도의 확률변수를 기본변수 $X_i (i=1,2,\dots,n)$ 로 설정하고, 각 변수를 정규화하면 새롭게 정규화된 변수는 다음과 같이 정의된다.

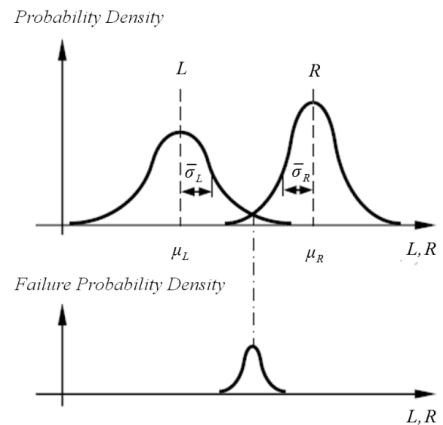


Fig. 1 Load and Resistance model

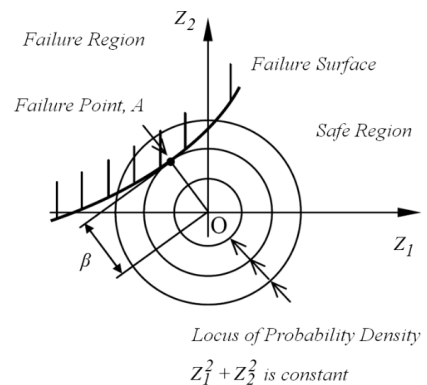


Fig. 2 Definition of Safety Index, β

$$Z_i = \frac{X_i - \mu_X}{\sigma_X} \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (2)$$

여기서, μ_X 와 σ_X 는 확률변수 X_i 의 평균과 표준편차이다. 식 (2)를 통해 X 좌표계의 파손면은 Z 좌표계의 파손면에 선형사상되며 일반적으로 Z 좌표계의 원점은 안전영역 내에 존재하게 된다. Fig. 2에 기본 변수가 2개인 경우에 대한 예를 나타내었다. 안전성지표는 선분 \overline{OA} 로 정의되며 이때 점 A 를 파괴점이라 한다. 이를 바탕으로 안전성지표는 다음과 같이 정의될 수 있다^[4].

$$\beta = \min \left(\sum_{i=1}^n Z_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

즉, 안전성지표란 원점에서 파손점까지의 최단 거리를 의미한다. 또한 각 확률변수가 정규분포를 따르면 안전성지표와 목표파손확률과의 관계는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$P_f = \Phi(-\beta) = 1 - \Phi(\beta) \quad (4)$$

2.3 신뢰도지수법

전술한 바와 같이 부분안전계수는 앞서 기술한 목표신뢰도 혹은 목표파손확률에 대한 안전성지표 계산의 역과정이므로 설정된 한계상태함수와 그에 따른 하중과 강도의 확률변수를 전제로 목표파손확률에 대한(즉 목표 안전성지표 β 에 대한) $G=0$ 상의 파괴점을 구하는 것으로 설명될 수 있다.

본 연구에서는 목표신뢰도 지수값에 대한 파손점 및 부분안전계수 계산을 위해 1차 가우스 근사법에 근거한 Advanced First-Order Second Moment Method (AFOSM)와 Second Order Reliability Method (SORM)를 적용하였다.

AFOSM은 각 확률변수가 독립적인 정규확률변수라는 가정 하에 한계상태함수를 파괴점에 대해 Taylor 전개 후 1차항까지 고려한 방법이다. 확률변수 $X_i (i=1,2,\dots,n)$ 로 정의된 한계상태함수를 파괴점 $(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ 에 대해 Taylor 전개 후 1차항까지 고려하면 다음과 같이 표현된다.

$$G(X_1, X_2, \dots, X_n) \approx G(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) + \sum_{i=1}^n (X_i - x_i^*) \frac{\partial G}{\partial X_i} \Big|_{x^*} \quad (5)$$

주어진 한계상태함수를 이용하여 다음과 같이 정의된 확률변수의 방향벡터(α_i)를 계산한다.

$$\alpha_i = \frac{\left[\frac{\partial G}{\partial X_i} \Big|_{x^*} \right] \sigma_{X_i}}{\left\{ \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial G}{\partial X_i} \Big|_{x^*} \right]^2 \sigma_{X_i}^2 \right\}^{\frac{1}{2}}} \quad (6)$$

식 (3)을 이용하여 목표파손확률에 대한 신뢰도지수(β)를 구한 다음, 위에서 구한 방향벡터(α_i), 주어진 확률변수의 평균(μ_X)과 표준편차(σ_X)를 아래 식에 대입하여 각각의 파괴점을 구한다.

$$x_i^* = \mu_{X_i} - \alpha_i \beta \sigma_{X_i} \quad (7)$$

SORM의 경우는 위와 동일하나 식 (5)에서 Taylor 전개 후 2차항까지 고려한다.

2.4 부분안전계수

2.3절의 과정을 통해 목표파손확률에 대한 파괴점이 계산되면, 개별 강도 변수 및 하중 변수에 대한 부분안전계수는 다음과 같이 정의된다.

$$PSF_R = \frac{\text{강도의 기준치}}{\text{목표파손확률을 만족하는 강도의 파괴점}} \quad (8)$$

$$PSF_L = \frac{\text{목표파손확률을 만족하는 하중의 파괴점}}{\text{하중의 기준치}} \quad (9)$$

여기서, 하첨자 “R”은 강도측 변수를 의미하며, “L”은 하중측 변수를 의미한다. 또한 강도 및 하중의 기준치는 각 확률변수의 평균값 혹은 시방서 상에 주어진 값으로 정의될 수 있다. 위와 같이 계산된 부분안전계수와 목표파손확률에 대해 계산된 파괴점을 한계상태함수에 대입하면 한계상태함수 $G>0$ 의 안전영역을 만족하는 설계기준치 등을 설정할 수도 있다.

3. 감육배관의 PSF 계산을 위한 한계상태함수

본 연구에서는 감육배관의 부분안전계수 계산을 위해 다양한 결정론적 감육배관의 평가법 가운데 PCORRC식^[5]과 Modified B31G식^[6]을 이용하여 한계상태함수를 구성하였다.

Fig. 3은 내압이 작용하는 감육배관을 도식적으로 나타낸 것이다. D_i 는 배관내경, t 는 배관두께, R_m 은 배관의 평균반경, θ 는 감육각도, $2l$ 은 감육길이 그리고 d 는 감육깊이를 의미한다. PCORRC 식을 이용한 공학적 감육배관의 파열압력 예측식은 다음과 같이 정의된다.

$$P_f = \frac{2t}{D} \sigma_u \left(1 - \frac{d}{t} M\right) \quad (10)$$

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

여기서, σ_u 는 인장강도이다.

PCORRC식을 이용한 한계상태함수는 식 (10)으로 정의된 파열 압력(P_f)과 작용압력(P_{op})이 같아질 때를 한계상태로 하여 정의되며 아래와 같이 기술된다.

$$G = P_f(D, t, \sigma_u, d, l) - P_{op} \quad (11)$$

식 (10)과 식 (11)을 정리하면 아래와 같이 PCORRC식을 이용한 한계상태함수를 정리할 수 있다.

$$G = \frac{2t}{D} \sigma_u \left[1 - \frac{d}{t} \left\{1 - \exp\left(-0.157 \frac{l}{\sqrt{0.5D(t-d)}}\right)\right\}\right] - P_{op} \quad (12)$$

위와 동일한 방법으로 Modified B31G식을 이용한 한계상태함수는 다음과 같이 정의된다.

$$G = \frac{2t}{D} (\sigma_y + 68.95) \left[\frac{1 - 0.85 \frac{d}{t}}{1 - 0.85 \frac{d}{t} \left(0.032 \frac{l^2}{Dt} + 3.3\right)^{-1}} \right] - P_{op} \quad (13)$$

여기서, σ_y 는 재료의 항복강도를 의미한다.

Table 1은 감육배관의 부분안전계수 계산을 위해 식 (12) 및 식 (13)의 한계상태함수에서 사용된 각각의 확률변수의 평균값과 COV, 그리고 분포형을 정리하여 나타낸 것이다. 개별 확률변수의 평균값과 분포형은 참고문헌 [7]에 주어진 값을 사용하였다.

4. 부분안전계수 계산 프로그램

본 연구에서는 Microsoft Visual Basic 6.0을 이용하여 AFOSM과 SORM의 알고리즘을 이용한 감육배관의 부분안전계수 계산 프로그램을 개발하였다. 부분안전계수 계산과정에서 수렴판정을 위한 반복적인 수치계산 등 일련의 복잡한 계산 과정들을 각각의 모듈로 구성하여 쉽게 부분안전계수 등을 계산할 수 있도록 하였으며, GUI 방식을 적용하여 사용자가 쉽게 이용할 수 있도록 구성하였다. Fig. 4는 부분안전계수 계산 프로그램을 작성하기 위한 알고리즘을 도식적으로 나타낸 것이다.

4.1 입력변수의 분포 변환 모듈

신뢰도지수에 근거한 부분안전계수 계산을 위해서는 비정규분포 형태의 확률변수를 정규분포로 변환해야 한다. 비정규분포인 확률변수 $X_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 의 확률분포함수 $F_{X_i}(X_i^*)$, 밀도함수 $f_{X_i}(X_i^*)$ 와 정규분포함수 Φ 및 밀도함수 ϕ 의 관계는 다음과 같다^[8].

$$F_{X_i}(X_i^*) = \Phi\left(\frac{X_i^* - \mu_{X_i}^N}{\sigma_{X_i}^N}\right) \quad (14)$$

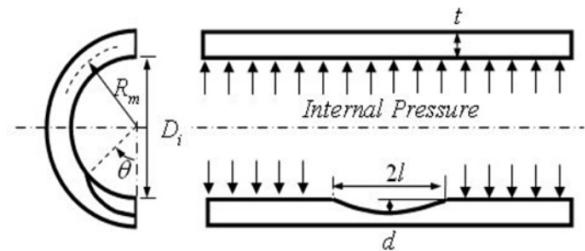


Fig. 3 Schematics of wall-thinned pipe under internal pressure

Table 1 Input variables of the PCORRC and Modified B31G for wall-thinned pipe^[7]

Variables (X_i)	Mean (μ)	COV	Distribution
D_i	914.4 mm	0.02	Normal
t	20.6 mm	0.02	Normal
σ_u	455 MPa	0.07	Log-Normal
σ_y	358 MPa	0.07	Log-Normal
d	8.24 mm	0.10	Normal
l	200 mm	0.10	Normal
P_{op}	7.8 MPa	0.10	Log-Normal

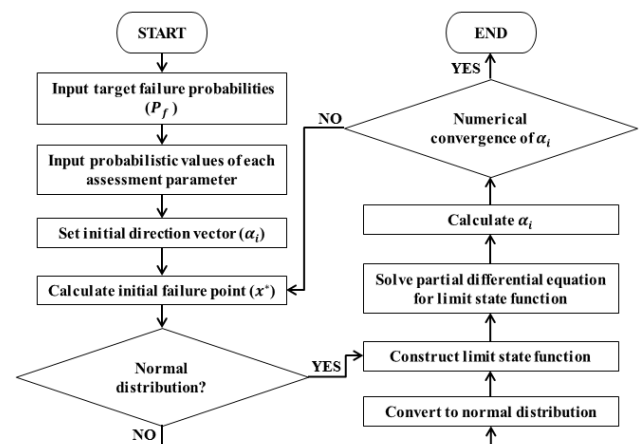


Fig. 4 Algorithm employed in the present work for estimates of the PSF based on the AFOSM and SORM

$$f_{X_i}(X_i^*) = \frac{1}{\sigma_{X_i}^N} \phi\left(\frac{X_i^* - \mu_{X_i}^N}{\sigma_{X_i}^N}\right) \quad (15)$$

여기서, $\mu_{X_i}^N$ 와 $\sigma_{X_i}^N$ 는 각각 비정규분포의 확률변수 X_i 를 등가정규분포로 변환했을 때의 평균과 표준편차를 나타낸다.

4.2 반복 계산 모듈

Taylor 급수 전개식에 따른 선형 근사화 및 목표파손확률에 따른 신뢰도지수 계산을 위해서는 반복적인 수치 계산이 수행되어야 한다. 본 연구에서는 Newton-Raphson법^[9]을 적용하여 반복적인 수렴계산이 수행될 수 있도록 프로그램을 구성하였다.

4.3 수치해석 모듈

설정된 한계상태함수는 복잡한 수식으로 구성되어 있으므로 편미분이 필요한 부분을 모듈화하여 계산이 간단하게 수행될 수 있도록 하였다. 본 연구에 적용된 중심차분법은 다음과 같이 표현된다.

$$f'(x_0) = \frac{f(x_0+2h) + 8f(x_0+h) - 8f(x_0-h) + f(x_0-2h)}{2h} \quad (16)$$

여기서, x_0 는 미분하고자 하는 점(파괴점)을 의미하고, h 는 미소증분치이다. 본 연구에서는 $h = 0.25$ 로 설정하였다.

4.4 신뢰도지수법 선택 모듈

목표파손확률에 대한 부분안전계수 계산 시 AFOSM과 SORM 가운데 사용자가 원하는 신뢰도지수 계산법을 선택할 수 있도록 하였다.

4.5 산출결과 출력 모듈

입력변수 입력, 분포변환, 반복계산 등이 모두 수행되면 각 목표신뢰도에 따른 입력 변수별 부분안전계수가 출력되도록 하였다. 또한 목표신뢰도를 만족하는 설계기준치, 안전계수 등도 자동 계산, 출력될 수 있도록 하였다.

5. 감육배관의 부분안전계수 계산

5.1 감육배관의 부분안전계수 계산 결과

Table 2는 PCORRC식과 AFOSM을 이용하여 구한 감육배관의 부분안전계수를 정리한 것이며, Table 3은 Modified B31G식과 AFOSM을 이용하여 구한 부분안전계수를 나타낸 것이다. 두

경우 모두 운전조건에 따라 3가지 목표파손확률(P_{fa})^[3]에 대해 부분안전계수를 구하였다. Table 2에 나타난 바와 같이 인장강도(σ_u)와 작용압력(P_{op})의 부분안전계수가 다른 변수의 그것보다 큰 것으로 나타나 감육배관의 파손과 관련하여 가장 영향이 큰 변수인 것으로 평가되었다. 그리고 감육부의 형상(감육깊이(d), 감육길이(l))은 파손에 미치는 영향이 비교적 적고, 배관 두께(t) 및 내경(D_i)의 부분안전계수가 가장 작은 것으로 나타나 배관 형상이 감육배관의 파손에 미치는 영향도가 매우 적은 것으로 나타났다. 즉 감

Table 2 The values of PSF according to target reliabilities based on PCORRC and AFOSM

P_{fa}	10^{-6} / year	10^{-3} / year	10^{-2} / year
D_i	1.02	1.01	1.00
t	1.02	1.02	1.01
σ_u	1.25	1.17	1.13
d	1.10	1.07	1.05
l	1.06	1.04	1.03
P_{op}	1.33	1.19	1.14
t_N	17	15	14

Table 3 The values of PSF according to target reliabilities based on Modified B31G and AFOSM

P_{fa}	10^{-6} / year	10^{-3} / year	10^{-2} / year
D_i	1.01	1.01	1.01
t	1.02	1.02	1.01
σ_y	1.17	1.12	1.10
d	1.17	1.12	1.09
l	1.00	1.00	1.00
P_{op}	1.39	1.22	1.15
t_N	20	18	17

Table 4 Differences of PSF values between AFOSM and SORM based on PCORRC

P_{fa}	10^{-6} / year	10^{-3} / year	10^{-2} / year
D_i	1.889E-13	2.997E-14	7.993E-14
t	2.997E-14	9.992E-15	0
σ_u	8.788E-13	5.778E-15	3.446E-14
d	1.998E-14	3.996E-14	1.998E-14
l	5.599E-13	4.600E-13	9.992E-15
P_{op}	4.700E-13	5.997E-14	6.664E-14

육배관의 파손 압력 관리 측면에서 중요도가 높은 변수들은 작용압력과 재료의 강도인 것으로 나타났으며, 감육부 및 배관 형상의 경우는 상대적으로 중요도가 낮은 것으로 나타났다. 특히 배관 두께 및 내경의 부분안전계수가 작은 이유는 현재 고려된 조건에서 두 변수의 COV 값이 다른 변수의 그것보다 작기 때문이며 (Table 1 참조), 따라서 본 연구의 결과로부터 감육배관 평가 시 배관의 두께와 내경은 주요 변수에서 제외할 수 있으며 그로 인해 중요 변수의 수를 상대적으로 단순화시킬 수 있음을 의미한다. 이와 같이 부분안전계수 개념을 적용하면 중요 변수를 고려한 유지/보수 전략 수립 등이 가능하다는 장점이 있다.

Table 3에 나타낸 바와 같이 Modified B31G식을 기반으로 부분안전계수를 평가한 결과, 강도측 변수에서는 항복강도(σ_y)와 감육깊이(d)가, 하중측 변수에서는 작용압력(P_{op})의 중요도가 큰 것으로 나타났다.

본 연구에서는 AFOSM 뿐만 아니라 SORM을 이용해서도 감육배관의 부분안전계수를 계산하였으며 Table 4에 PCORRC식을 이용하여 AFOSM과 SORM으로 구한 부분안전계수의 차이를 정리하여 나타내었다. Table 4에 나타낸 바와 같이 AFOSM과 SORM으로 구한 부분안전계수의 차이는 거의 없었으며 이는 감육배관 건전성 평가의 경우 한계상태함수의 비선형성이 크지 않음을 의미한다. 따라서 계산의 효율성을 고려하면 감육배관의 경우 AFOSM을 이용하여 신뢰도지수, 파괴점, 그리고 부분안전계수를 구하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

5.2 감육배관의 부분안전계수를 이용한 설계기준치 계산

5.1절에서 계산된 개별 변수에 대한 부분안전계수와 변수별 평균값을 이용하면 각 목표신뢰도 혹은 목표파손확률을 만족하는 입력 변수별 설계기준치를 설정 가능하다. 설계 및 평가 시 중요한 배관 두께에 대한 설계기준치(t_N)는 다음과 같이 계산할 수 있다. 먼저 PCORRC식을 이용하여 구한 목표파손확률(P_{fa}) 또는 목표신뢰도(β)를 만족하는 개별 입력 변수의 파괴점을 각각 D_i^* , t^* , σ_u^* , d^* , l^* 그리고 P_{op}^* 이라 정의하면 식 (12)는 다음과 같이 표현된다.

$$G(D^*, t^*, \sigma_u^*, d^*, l^*, P_{op}^*) = \frac{2t^*}{D^*} \sigma_u^* \left[1 - \frac{d^*}{t^*} \left\{ 1 - \exp \left(-0.157 \frac{l^*}{\sqrt{0.5D^*(t^* - d^*)}} \right) \right\} \right] - P_{op}^* = 0 \quad (17)$$

식 (8)과 식 (9)에 정의된 부분안전계수와 기준치를 이용하면 각 파괴점은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$D^* = PSF_D \times D_N \quad (18)$$

$$t^* = \frac{t_N}{PSF_t}$$

$$\sigma_u^* = \frac{\sigma_{u,N}}{PSF_{\sigma_u}}$$

$$d^* = PSF_d \times d_N$$

$$l^* = PSF_l \times l_N$$

$$P_{op}^* = PSF_{P_{op}} \times P_{op,N}$$

여기서, 각 하첨자는 앞에서 사용된 각 입력변수를 의미하며, 하첨자 “N”은 설계 기준치를 의미한다.

식 (18)을 식 (17)에 대입하고 이를 t_N 에 대해 정리하면 목표파손확률을 만족하는 두께의 설계기준치를 구할 수 있다. PCORRC식을 이용하여 구한 배관두께의 설계기준치(t_N)를 Table 2에 함께 나타내었다. 각 목표파손확률에 대하여 두께의 설계기준치는 14~17 mm 정도 인 것으로 계산되었다. 이 값은 Table 1에 주어진 설계에서 제시된 평균 배관 두께 20.6 mm 보다 작기에 각각의 목표파손확률 하에서 충분한 두께를 유지하고 있는 것으로 평가되었다. 이와 같이 부분안전계수 개념을 이용하면 목표신뢰도를 만족하는 설계 기준값도 정의할 수 있으며 이를 통해 기존 설계 혹은 평가의 타당성도 목표신뢰도에 입각하여 검증할 수 있게 된다. Modified B31G식에 입각하여 구한 두께의 설계기준치도 Table 3에 함께 나타내었다. 이 경우 각각의 목표파손확률을 만족하는 설계기준치는 17~20 mm 인 것으로 계산되었다.

6. 결론

본 논문에서는 목표신뢰도 정보에 근거한 감육배관의 확률론적 건전성 평가를 위해 부분안전계수 계산 프로그램을 개발하고 두 가지의 결정론적 평가법을 적용하여 부분안전계수를 평가하였다. 한계상태함수 구성을 위한 결정론적 평가법으로는 감육배관의 건전성 평가 시 가장 널리 적용되고 있는 PCORRC식과 Modified B31G식을 적용하였다. 또한 목표신뢰도에 해당하는 파손점 및 부분안전계수 계산을 위해서 신뢰도지수법 가운데 AFOSM과 SORM을 적용하였다. 목표신뢰도로는 운전 조건에 따라 3가지 다른 목표신뢰도(목표파손확률)를 적용하였다. 이와 같은 연구를 통해 얻은 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 부분안전계수 평가 결과, 작용 압력과 재료의 강도가 감육배관 파손과 관련하여 가장 영향도가 큰 것으로 나타났으며(큰 부분 안전계수) 감육 형상 및 배관 형상 정보는 상대적으로 영향도

가 작은 것으로 평가되었다. 따라서 감육배관에 대한 평가 시 배관의 두께와 내경과 같은 형상 변수는 중요 변수에서 제외할 수 있다.

- (2) 감육배관의 부분안전계수를 AFOSM과 SORM으로 평가한 결과 두 방법으로 구한 부분안전계수의 차이는 거의 없었으며 이는 감육배관 건전성 평가의 경우 한계상태함수의 비선형성이 크지 않음을 의미한다.
- (3) 부분안전계수 개념을 이용하면 목표파손확률을 고려한 최적설계가 가능하며 입력 변수별 중요도를 고려하며 설계 및 평가 전략을 수립할 수 있다. 본 연구의 결과는 목표파손확률을 고려한 차세대 원자로 기기의 최적설계에 활용될 수 있으며, 상용 원자로의 유지보수 전략 최적화에도 적용될 수 있다.

후 기

본 연구는 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20111520100010)

References

- [1] Hahn, D. H., Kim, Y. I., Lee, C. B., Kim, S. O., Lee, J. H., Lee, Y. B., Kim, B. H., Jeong, H. Y., 2007, Conceptual Design of the Sodium-Cooled Fast Reactor KALIMER-600, Nuclear Engineering and Technology, 39:3 193-206.
- [2] Lee, J. H., Park, C. K., Kim, J. B., Koo, K. H., 2007, Structural Concept Design of KALIMER-600 Sodium Cooled Fast Reactor, Proceedings of KSME Spring Annual Conference, 37-42.
- [3] Bloom, J. M., 2000, Partial Safety Factors (PSF) and Their Impact on ASME Section XI, IWB-3610, ASME Pressure Vessels and Piping Conference PVP, 407.
- [4] Thoft-Christensen, P., Baker, M. J., 1982, Structural Reliability Theory and Its Applications, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 81-93.
- [5] Leis, B. N., Stephens, D. R., 1997, 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, 624-641.
- [6] Kiefner, J. F., Vieth, P. H., 1990, New Method Corrects Criterion for Evaluating Corroded Pipe, Oil & Gas Journal 88 56-59.
- [7] Caleyo, F., Gonzalez, J. L., Hallen, J. M., 2002, A Study on the Reliability Assessment Methodology for Pipelines with Active Corrosion Defects, International Journal of Pressure Vessels and Piping, 79:1 77-86.
- [8] Rackwitz, R., Fiessler, B., 1976, Note on Discrete Safety Checking When Using Non-normal Stochastic Models for Basic Variables, Loads Project Working Session MIT Cambridge.
- [9] Rao, S., 1996, Engineering Optimization-Theory and Practice, Wiley, New York, 80-99.