

탄소성 균열개시조건에 대한 원주방향 관통균열 배관의 부분안전계수 계산

이재빈* · 허남수**

* 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과

Estimates of Partial Safety Factors of Circumferential Through-Wall Cracked Pipes Based on Elastic-Plastic Crack Initiation Criterion

Jae-Bin Lee* and Nam-Su Huh**

* Dept. of Mechanical System Design Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology

(Received June 17, 2014 ; Revised July 31, 2014 ; Accepted August 17, 2014)

Key Words: Circumferential Through-Wall Crack(원주방향 관통균열), Failure Probability(파손확률), Load and Resistance Factor Design(하중-저항계수 설계법), Partial Safety Factors(부분안전계수), Second Order Reliability Method(이차신뢰도지수법), Target Reliability (목표신뢰도)

초록: 최근 제4세대 원자로의 기기 최적설계를 위해 목표파손확률 기반 설계기법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 시스템기반코드(System-Based Code, SBC)가 대표적인 예로 설계 혹은 평가 결과는 부분안전계수(Partial Safety Factor, PSF)의 형태로 도출된다. 따라서 부분안전계수는 가동 기간 중 목표파손확률 기반 설계 및 평가를 위한 핵심 요소 가운데 하나이다. 본 연구에서는 특정 목표파손확률 하에서 원주방향 관통균열이 존재하는 배관의 탄소성 균열개시 조건에 대한 부분안전계수 계산 기법을 정립하고 각 평가 인자가 균열개시에 미치는 중요도를 정량적으로 평가하였다. 균열 배관의 J -적분은 GE/EPRI법과 참조응력법으로 계산하였으며, 부분안전계수는 일차 및 이차신뢰도지수법으로 계산하였다. 또한 재료물성치의 통계적 분포 특성이 미치는 영향도 함께 평가하였다.

Abstract: Efforts are presently underway for developing an optimal design methodology for GEN-IV nuclear reactors based on target failure probabilities. A typical example is the system-based code, in which the results are represented in the form of partial safety factors (PSFs). Thus, a PSF is one of the crucial elements in either component design or integrity assessment based on target failure probabilities during the operation period. In the present study, a procedure for calculating the PSF of a circumferential through-wall cracked pipe based on the elastic-plastic crack initiation criterion is established, in which the importance of each input variable is assessed. Elastic-plastic J -integrals are calculated using the GE/EPRI and reference stress methods, and the PSF values are calculated using both first- and second-order reliability methods. Moreover, the effect of statistical distributions of assessment variables on the PSF is also evaluated.

1. 1. 서론

최근 설계 및 운전 경험이 없는 제4세대(GEN-IV) 원자로 설계 시 기기의 목표파손확률을 고려하여 적절하게 여유도를 설정하고 기기 최적설계를 수행하기 위한 시스템기반코드(system-based

code)에 대한 연구가 미국 및 일본에서 활발하게 진행 중에 있다.⁽¹⁾ 시스템기반코드 방법은 제4세대 원자로 기기의 각 설계 요건 혹은 파손 메커니즘에 대해 전체 수명기간 동안 요구되는 목표파손확률을 설정하고 이를 만족하도록 기기를 설계하는 방법으로 각 설계 인자별로 개별 여유도를 정량화할 수 있기에 설계 인자별 여유도 교환 등 다양한 설계 전략을 수립할 수 있다는 장점이 있다.

시스템기반코드에서 목표파손확률에 대한 최종

† Corresponding Author, nam-su.huh@seoultech.ac.kr
© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

평가결과는 부분안전계수(Partial Safety Factor, PSF)의 형태로 제공된다. 부분안전계수는 목표파손확률을 만족하는 개별 입력변수에 대한 안전계수로 정의되며 결정론적 해석의 안전계수와 유사한 개념으로 생각될 수 있다. 기본적으로 기존의 확률론적 건전성평가에서는 입력 조건에 따른 예상 파손확률을 계산하였다면 부분안전계수는 목표파손확률에 대한 파괴점을 결정하는 것으로 파손확률 계산에 대한 역문제로 정의될 수 있다.

따라서 목표파손확률을 고려하여 개별 인자에 대한 부분안전계수가 계산되면 현재의 설계 요건 혹은 파손 메커니즘에 영향을 미치는 개별 인자의 영향도를 정량적으로 파악할 수 있기에 인자별 중요도를 고려한 설계/평가 전략 수립이 가능하며, 과도한 여유도 저감 및 입력변수 사이의 여유도 교환도 가능해진다.

본 논문에서는 굽힘모멘트가 작용하고 원주방향 관통균열이 존재하는 배관의 부분안전계수를 탄소성 균열개시(crack initiation) 조건에 대해 평가하였다. 부분안전계수는 일차 및 이차 신뢰도지수법(first- and second-order reliability methods)을 이용하여 계산하였으며, 균열개시 조건을 평가하기 위한 탄소성 파괴역학 매개변수인 J -적분은 두 가지 대표적인 공학적 계산식으로 결정하였다.

또한 재료물성치의 통계적 분포 특성이 서로 다른 국외 및 국내 자료를 적용하여 통계적 분포 특성에 따른 부분안전계수값의 변화도 함께 평가하였다.

2. 부분안전계수 평가 이론

2.1 부분안전계수

전술한 바와 같이 부분안전계수란 목표파손확률을 만족하는 각 확률변수(평가에 사용되는 변수)의 파괴점에서의 값과 기준값의 비로 정의된다. 일반적으로 하중 관련 변수(작용하중, 배관 반지름 등)에 관한 부분안전계수는 목표파손확률을 만족하는 파괴점에서의 하중 관련 변수의 값과 기준값의 비로 정의되며, 강도 관련 변수(재료강도, 배관 두께 등)에 관한 부분안전계수는 강도의 기준값과 목표파손확률을 만족하는 파괴점에서의 강도 관련 변수 값의 비로 정의된다. 일반적으로 기준값으로는 확률분포형의 평균값이나 설계값 등이 사용되며 위와 같은 부분안전계수의 정의로 인해 부분안전계수 값은 1 이상이 된다.

2.2 하중-저항(강도)계수 설계법

설계 요건 혹은 파손 메커니즘에 따른 목표파손확률을

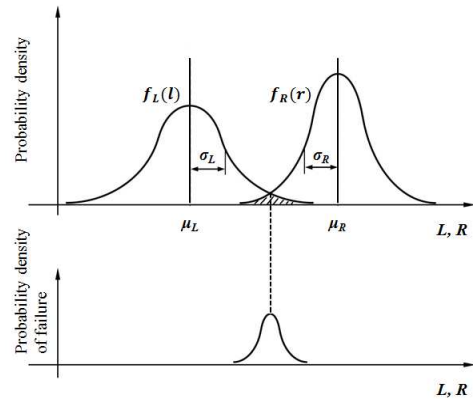


Fig. 1 Schematic of load and resistance factor design⁽²⁾

고려한 파괴점에서의 부분안전계수 계산을 위해서는 먼저 한계상태함수(limit state function)를 정의해야 하며 본 연구에서는 이를 위해 하중-저항(강도)계수 설계법(Load and Resistance Factor Design, LRFD)을 적용하였다. 하중-저항계수 설계법에서 한계상태함수는 강도 관련 변수와 하중 관련 변수의 관계를 확률밀도함수의 개념으로 표현하여 식 (1)과 같이 정의되며, Fig. 1은 이를 도식적으로 나타낸 것이다.⁽²⁾

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

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

여기서, G 는 한계상태함수이고, R 은 강도 관련 변수 그리고 L 은 하중 관련 변수를 의미한다. 식 (1)의 한계상태함수에서 만약 하중 관련 변수가 강도 관련 변수보다 크면 파손이 일어난 상태가 되며, 반대로 강도 관련 변수가 하중 관련 변수보다 크면 안전한 상태로 평가된다. 그리고 $G=0$ 일 때가 해당 설계 요건 혹은 파손 메커니즘에 대한 한계상태로 정의된다.

2.3 신뢰도지수

목표파손확률 혹은 목표신뢰도에 대한 부분안전계수는 신뢰도지수(안전성지표, β) 계산의 역문제로 정의될 수 있다. 먼저 하중과 강도 관련 확률변수(평가변수)를 기본변수 $X_i(i=1, 2, \dots, n)$ 로 설정하고 각 변수를 하나의 한계상태함수에서 계산하기 위해 정규화하면 새롭게 정규화된 변수는 다음과 같이 정의된다.

$$Z_i = \frac{X_i - \mu_i}{\sigma_i} \quad (i=1, 2, \dots, n) \tag{2}$$

여기서, μ_i 와 σ_i 는 확률변수 X_i 의 평균과 표준편차이다. Fig. 2는 기본변수가 2개인 경우에 대한 신

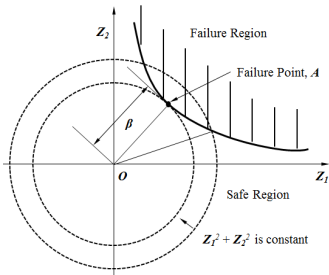


Fig. 2 Definition of reliability index, $\beta^{(3)}$

뢰도지수를 도식적으로 나타낸 것이며, 식 (2)를 통해 X -좌표계의 파손면은 Z -좌표계의 파손면에 선형사상되며 일반적으로 Z -좌표계의 원점은 안전 영역 내에 존재하게 된다. 신뢰도지수는 원점에서 파괴점까지의 최단거리, 즉 선분 OA 의 길이로 정의되며 이 때 점 A 를 파괴점(failure point)이라 한다. 이를 바탕으로 신뢰도지수는 다음과 같이 정식화된다.⁽³⁾

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

또한 각 확률변수가 정규분포를 따르면 신뢰도지수와 목표파손확률(P_{fa})과의 관계는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$P_{fa} = \Phi(-\beta) = 1 - \Phi(\beta) \quad (4)$$

2.4 신뢰도지수법

한계상태함수를 설정한 후에 목표파손확률에 대한 목표신뢰도지수를 이용하여 파괴점을 최적화하는 기법을 신뢰도지수법이라 한다. 먼저 부분안전계수 평가 대상에 대한 입력변수의 평균과 표준편차 그리고 통계분포를 결정한 후에 하중-저항계수 설계법에 근거한 한계상태함수를 설정한다. 이 한계상태함수를 표준정규분포상에 식 (2)를 이용하여 정규화시켜 선형사상한 후에 목표파손확률에 대응되는 목표신뢰도지수를 만족하는 파괴점을 최적화 기법을 통해 결정한다.

파괴점에 대해서 한계상태함수를 Taylor 급수 전개하여 1차항까지 고려하면 일차신뢰도지수법(Advanced First-Order Second Moment Method, AFOSM)으로 정의되며 2차항까지 고려하면 이차신뢰도지수법(Second Order Reliability Method, SORM)으로 정의된다.⁽²⁾ 일반적으로 SORM은 한계상태함수에 대한 Taylor 급수 전개 후 2차항까지 고려하므로 한계상태함수의 비선형성이 큰 경우 정확한 결과를 얻을 수 있다는 장점이 있으나 이로 인해

AFOSM에 비해 계산과정이 복잡하다는 단점이 있다.

표준정규분포상의 한계상태함수를 파괴점 Z_i^* ($i=1, 2, \dots, n$)에 대해 Taylor 전개 후 2차항까지 고려하면 다음과 같이 표현된다.

$$G(Z) \approx G(Z^*) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial G}{\partial Z_i} \Big|_{Z^*} (Z_i - Z_i^*) + \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n \frac{\partial^2 G}{\partial Z_i \partial Z_j} \Big|_{Z^*} (Z_i - Z_i^*)(Z_j - Z_j^*) \quad (5)$$

AFOSM의 경우는 위 Taylor 급수 전개식에서 1차항까지 고려하며 최적화 과정에 사용되는 식은 다음과 같다.

$$u_i = - \frac{\nabla G(Z_i)}{|\nabla G(Z)|} \quad (6)$$

$$Z_i^* = u_i \beta \quad (7)$$

$$X_i^* = \mu_i + Z_i^* \sigma_i \quad (8)$$

여기서, 식 (6)은 방향벡터(u_i)를 계산하는 식으로 이를 이용하여 식 (7)의 관계식에 대입한 후 주어진 목표신뢰도지수와 곱으로 다음 파괴점을 계산한다. 이렇게 구한 표준정규분포상의 파괴점을 초기 정규화과정의 역과정인 식 (8)에 평균(μ_i)과 표준편차(σ_i)와 함께 대입하면 각 확률변수의 통계분포상의 파괴점 X_i^* ($i=1, 2, \dots, n$)로 변환할 수 있다. 위 과정을 방향벡터가 수렴 시까지 반복 계산한다. 방향벡터 및 부분안전계수의 수렴 조건은 3.3절에 예와 함께 나타내었다.

3. 탄소성 균열개시 조건에 대한 원주방향 관통균열 배관의 부분안전계수

3.1 탄소성 균열개시 조건에 대한 한계상태함수

본 연구에서는 탄소성 균열개시 조건에 대한 굽힘 모멘트가 작용하는 원주방향 관통균열 배관의 부분안전계수 계산 시 탄소성 파괴역학 평가 매개변수인 J -적분 계산을 위해 GE/EPRI법⁽⁴⁾과 참조응력법(reference stress method, RSM)⁽⁵⁾을 적용하였다.

3.1.1 GE/EPRI 법

GE/EPRI법에서는 유한요소해석을 통해 제시된 배관 및 균열의 형상, 재료의 가공경화지수에 대한 무차원 소성영향함수(plastic influence function)를 이용하여 J -적분을 계산한다.

Fig. 3은 본 연구에서 고려된 원주방향 관통균열

이 존재하는 배관을 도식적으로 나타낸 것으로 GE/EPRI법을 이용한 J -적분 계산식은 아래와 같이 표현된다.⁽⁴⁾

$$J = J_e + J_p \quad (9)$$

$$J_e = \pi a \left(\frac{R_m}{I} \right)^2 F^2 \left(\frac{\theta}{\pi}, \frac{R_m}{t} \right) \frac{M^2}{E} \quad (10)$$

$$J_p = \alpha \sigma_o \varepsilon_o c \frac{\theta}{\pi} h_1^B \left(\frac{\theta}{\pi}, n, \frac{R_m}{t} \right) \left(\frac{M}{M_o} \right)^{n+1} \quad (11)$$

$$M_o = 4 \sigma_o R_m^2 t \left[\cos \frac{\theta}{2} - \frac{1}{2} \sin \theta \right] \quad (12)$$

여기서, J_e 는 J -적분의 탄성성분, J_p 는 J -적분의 소성성분이며, R_m 은 배관의 평균 반경, t 는 배관의 두께, M 은 작용 모멘트를 의미한다. M_o 는 소성한계모멘트이며, a 와 θ 는 각각 균열길이와 균열각의 1/2이다. 또한 c 와 I 는 각각 균열이 없는 원주방향 길이 (= $R_m(\pi - \theta)$)와 단면2차모멘트 ($\approx \pi R_m^3 t$)이고 E 는 재료의 탄성계수, σ_o 는 항복강도, ε_o 는 항복강도에서의 변형률이다. α 와 n 은 각각 인장특성에 대한 Ramberg-Osgood 상수와 가공경화지수(strain hardening exponent)이며, F 와 h_1^B 는 탄성 형상함수 및 굽힘모멘트에 대한 소성영향함수로 유한요소해석을 통해 테이블 형태로 제시되어 있다.

최종적으로 탄소성 균열개시 조건에 대한 한계상태함수는 굽힘모멘트가 작용하는 원주방향 관통 균열 배관의 J -적분과 재료의 파괴인성치(J_{IC})를 각각 하중 및 강도계수로 정의하여 다음과 같이 표현된다.

$$G = J_{IC} - J(\alpha, n, E, M) \quad (13)$$

식 (13)에 나타낸 바와 같이 J_{IC} 가 작용하중에 의한

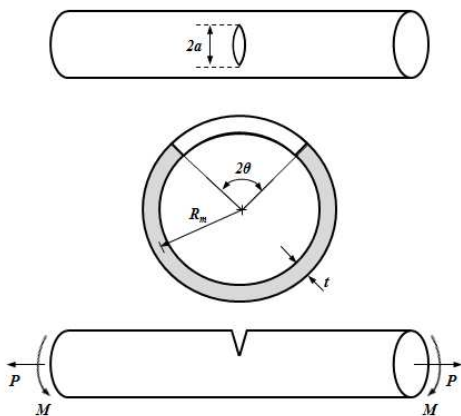


Fig. 3 Schematics of circumferential through-wall cracked pipes

J -적분보다 작으면 배관에서 균열개시가 발생한다.

3.1.2 참조응력법

GE/EPRI법으로 배관의 J -적분값을 계산할 경우에는 먼저 재료의 인장특성을 Ramberg-Osgood 관계로 이상화해야 하나 참조응력법의 경우에는 이러한 이상화 과정이 필요 없다.

원주방향 관통균열 배관에 대하여 참조응력법을 이용한 공학적 J -적분 계산식은 다음과 같이 표현된다.⁽⁵⁾

$$J = J_e F(L_r), \quad L_r = \frac{M}{M_o} \quad (14)$$

여기서, J_e 는 탄성 J -적분, M_o 는 소성한계모멘트 공식 (12)와 동일하며, M 은 작용 모멘트이다. 또한 $F(L_r)$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$F(L_r) = \frac{1 + 0.5L_r^2}{(0.3 + 0.7e^{-0.6L_r^2})^2} \quad (15)$$

최종적으로 탄소성 균열개시 조건에 대한 한계상태함수는 J_{IC} 와 J -적분을 비교하여 다음과 같이 정의된다.

$$G = J_{IC} - J(E, M) \quad (16)$$

3.2 확률변수의 설정

식 (13)과 식 (16)에 나타낸 바와 같이 GE/EPRI법을 이용하여 한계상태함수를 결정한 경우에는 5개의 입력변수(J_{IC} , α , n , E , M)가 확률변수로 설정되었으며, 참조응력법으로 한계상태함수를 표현한 경우에는 3개의 입력변수(J_{IC} , E , M)가 확률 변수로 고려되었다. 이는 참조응력법의 경우에는 전술한 바와 같이 인장특성에 대한 Ramberg-Osgood 이상화가 필요없기에 α , n 이 계산 과정에서 사용되지 않기 때문이다.

각 확률변수에 대한 통계적 특성은 TP304 재료에 대한 국외⁽⁶⁾ 및 국내⁽⁷⁾ 데이터 값을 참고하였으며, 이를 각각 Table 1과 Table 2에 정리하였다. Table 1과 Table 2에 나타낸 바와 같이 동일한 재료에 대한 통계분포이지만 실험결과의 차이로 인해 평균(Mean, μ)과 표준편차(S.D., σ)가 서로 다르며 특히 가공경화지수의 경우 국외 데이터에 비해 국내 데이터의 표준편차값이 큰 것으로 나타났다.

비정규분포인 확률변수에 대해서는 Rackwitz-Fiessler 변환법⁽⁸⁾을 사용하여 등가의 정규분포로 근사화하였다. 또한, 각 확률변수의 평균값을 부분안전계수 계산을 위한 기준값으로 설정하였다.

Table 1 Input variables for circumferential through-wall cracked pipes (International data)⁽⁶⁾

Variables(X_i)	Mean(μ)	S.D.(σ)	Distribution
α	8.073	3.54	Log-Normal
n	3.8	0.55	Log-Normal
J_{IC}	1242.6 [kJ/m ²]	584	Log-Normal
E	182.7 [GPa]	9.135	Normal
M	2260 [kN-m]	226	Normal

Table 2 Input variables for circumferential through-wall cracked pipes (Domestic data)⁽⁷⁾

Variables(X_i)	Mean(μ)	S.D.(σ)	Distribution
α	3.79	3.86	Log-Normal
n	7.62	3.12	Log-Normal
J_{IC}	1340 [kJ/m ²]	428	Log-Normal
E	204.5 [GPa]	2.1	Normal
M	2260 [kN-m]	226	Normal

Table 3 Details of deterministic variables in circumferential through-wall cracked pipes⁽⁶⁾

θ/π	0.125
	0.4
R_m	355.6 [mm]
t	35.56 [mm]
σ_o	154.78 [MPa]

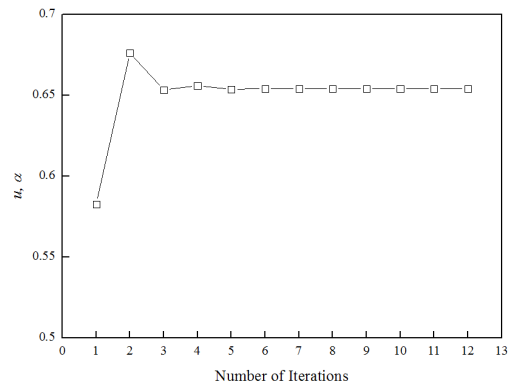
Table 3은 본 연구에서 고려된 배관 및 균열의 형상, 항복강도값을 정리하여 나타낸 것으로 균열 길이의 경우 균열길이가 평가 결과에 미치는 영향을 검토하기 위해 짧은 경우($\theta/\pi=0.125$)와 긴 경우($\theta/\pi=0.4$)의 서로 다른 두 가지 경우를 고려하였다.

3.3 부분안전계수 평가 결과

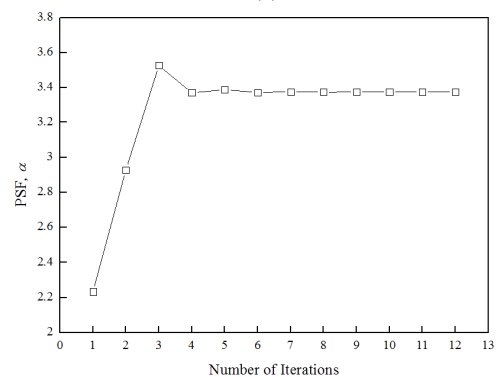
Table 4는 국외 통계 데이터와 GE/EPRI법, 그리고 이차신뢰도지수법에 입각하여 각 확률변수에 대해 부분안전계수를 계산한 결과를 나타낸 것이다. 목표파손확률(P_{fa}) 값으로 3가지 경우를 고려하였다.⁽⁹⁾ 2.4절에서 기술한 방향벡터의 수렴 여부와 관련하여 본 연구에서는 각 반복수에서 계산된 전후 두 값의 차이가 10^{-6} 미만($\Delta u < 10^{-6}$)이 되면 수렴이 된 것으로 판정하였으며, Fig. 4에 Ramberg-Osgood 상수(α)에 대해 반복수에 따른 방향벡터와 최종 부분안전계수값의 변화(수렴성)를 나타내었다.

Table 4 The values of PSF according to target reliabilities using SORM (International data, GE/EPRI)

Variables	θ/π	P_{fa}		
		$10^{-6}/\text{year}$	$10^{-3}/\text{year}$	$10^{-2}/\text{year}$
α	0.125	3.37	2.20	1.76
	0.4	1.75	1.54	1.40
n	0.125	1.24	1.09	1.05
	0.4	1.73	1.39	1.26
J_{IC}	0.125	1.23	1.33	1.37
	0.4	1.11	1.11	1.11
E	0.125	1.02	1.01	1.01
	0.4	1.01	1.01	1.01
M	0.125	1.32	1.21	1.16
	0.4	1.23	1.16	1.12



(a)



(b)

Fig. 4 Example of convergence of direction vector (u) and PSF with number of iterations for Ramberg-Osgood constant (α): (a) direction vector and (b) PSF (International data, GE/EPRI, $\theta/\pi=0.125$)

Fig. 4에 나타낸 바와 같이 반복수 증가에 따라 두 값이 잘 수렴하는 것으로 나타났다. 부분안전계수 계산 결과 먼저 균열 길이에 관계없이 Ramberg-Osgood 상수 α 의 부분안전계수 값이 모든 목표파손확률에

Table 5 The values of PSF according to target reliabilities using SORM (International data, RSM)

Variables	θ/π	P_{fa}		
		$10^{-6}/\text{year}$	$10^{-3}/\text{year}$	$10^{-2}/\text{year}$
J_{IC}	0.125	1.91	1.59	1.51
	0.4	1.12	1.12	1.12
E	0.125	1.05	1.02	1.01
	0.4	1.05	1.03	1.02
M	0.125	1.45	1.30	1.22
	0.4	1.47	1.30	1.23

대해서 가장 큰 것으로 나타났으며, J_{IC} 와 굽힘모멘트의 부분안전계수도 상대적으로 크게 평가되었다. 따라서 위의 3개의 변수가 원주방향 관통균열 배관의 탄소성 균열개시 조건에 큰 영향을 미치는 변수인 것으로 나타났다. 반면 탄성계수는 모든 목표파손확률에 대해 가장 작은 부분안전계수값을 나타내어 해당 조건에 대해 영향도가 가장 작은 것으로 나타났다. 가공경화지수의 경우는 목표파손확률이 높은 경우($10^{-2}/\text{year}$)에는 부분안전계수가 상대적으로 작았지만 목표파손확률이 낮아질수록 증가하였다. 이에 따라 목표파손확률에 따라 중요도가 달라지는 변수로 고려될 수 있으며 특히 균열 길이가 길어질수록 그 중요도가 증가하여 $\theta/\pi=0.4$ 인 경우에는 부분안전계수가 두 번째로 컸다.

Table 5는 국외 통계 데이터와 참조응력법 그리고 이차신뢰도지수법에 입각하여 각 확률변수에 대해 부분안전계수를 계산한 결과를 나타낸 것이다. 계산 결과, 균열길이에 관계없이 모든 목표파손확률에 대해서 굽힘모멘트의 부분안전계수가 상대적으로 크게 나타났으며, 이와 반대로 탄성계수는 가장 작게 평가되었다. 이 결과는 앞서 평가한 GE/EPRI 법을 이용한 결과와 유사한 것으로 원주방향 관통균열 배관의 건전성 평가 시 참조응력법의 경우도 탄성계수의 중요도는 낮다고 판단할 수 있다. 굽힘모멘트와 탄성계수의 경우 균열길이에 따른 부분안전계수의 차이가 작게 평가되었지만 파괴인성치의 경우는 균열길이가 길어짐에 따라 감소하였다. 그러나 균열길이가 짧을 때에는 중요도가 가장 큰 것으로 나타났다. 따라서 균열길이 범위에 따라 파괴인성치의 중요도는 변화하는 것으로 나타났다.

Table 6 The values of PSF according to target reliabilities using SORM (Domestic data, GE/EPRI)

Variables	θ/π	P_{fa}		
		$10^{-6}/\text{year}$	$10^{-3}/\text{year}$	$10^{-2}/\text{year}$
α	0.125	-	2.07	2.04
	0.4	-	-	-
n	0.125	-	1.98	1.45
	0.4	-	-	-
J_{IC}	0.125	-	1.08	1.11
	0.4	-	-	-
E	0.125	-	1.00	1.00
	0.4	-	-	-
M	0.125	-	1.20	1.15
	0.4	-	-	-

Table 7 The values of PSF according to target reliabilities using SORM (Domestic data, RSM)

Variables	θ/π	P_{fa}		
		$10^{-6}/\text{year}$	$10^{-3}/\text{year}$	$10^{-2}/\text{year}$
J_{IC}	0.125	1.59	1.36	1.30
	0.4	1.06	1.06	1.06
E	0.125	1.00	1.00	1.00
	0.4	1.00	1.00	1.00
M	0.125	1.46	1.30	1.22
	0.4	1.47	1.31	1.23

Table 6과 Table 7은 국내 통계 특성에 대해 이차신뢰도지수법에 입각하여 부분안전계수를 계산한 결과를 나타낸 것이다. Table 6의 결과를 Table 4의 국외 통계 데이터를 이용한 결과와 비교 시 가장 두드러진 차이점은 가공경화지수의 부분안전계수가 국외 데이터를 이용한 그것보다 크게 평가되었으며, 이는 국내 데이터의 표준편차가 크기 때문이다(Table 1과 Table 2 참고). 이것은 통계적 불확실성이 큰 변수가 부분안전계수도 크다는 것을 의미한다.

특히 Table 6에 나타낸 바와 같이 국내 데이터를 이용하여 GE/EPRI법으로 부분안전계수를 계산할 때에는 값이 계산되지 않는 경우가 발생하였다. 그 이유는 국내 데이터의 가공경화지수의 표준편차가 국외 데이터의 그것에 비해 약 5.7배 커서 가공경

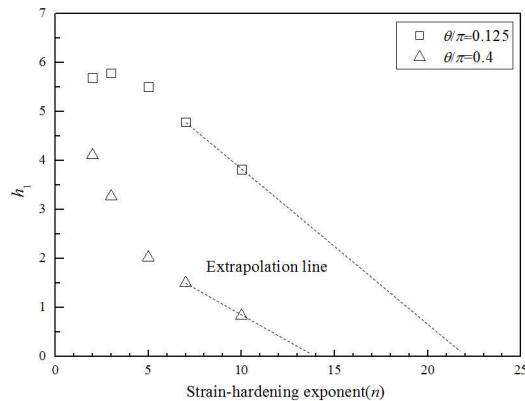


Fig. 5 Variations of plastic influence function (h_1) of GE/EPRI with strain hardening exponent for circumferential through-wall cracked pipes

화지수의 파괴점이 상대적으로 크게 계산되는데 이때 가공경화지수의 증가에 따라 소성영향함수(즉, 소성 J -적분값)가 음의 값이 되는 영역에서는 한계상태함수가 물리적 의미를 상실하기 때문이다. Fig. 5에 가공경화지수에 따른 소성영향함수(소성 J -적분값)의 변화를 균열길이에 따라 나타내었으며, 그림에 나타난 바와 같이 n 값이 특정값 이상이 되면 음의 J -적분값이 계산되게 된다. 그러나 국외 데이터의 경우는 n 값의 표준편차값이 적어 계산과정 중 음의 J -적분값이 계산되는 현상이 발생하지 않았다.

Table 7은 국내 데이터에 대해 참조응력법으로 구한 부분안전계수 결과를 나타낸 것으로 전반적인 경향은 국외 데이터의 경우와 비슷하였으나 탄성계수와 파괴인성치의 표준편차가 국내 데이터가 더 작아 부분안전계수도 작게 평가되었다.

앞의 결과들은 이차신뢰도지수법에 입각하여 계산된 부분안전계수이지만 본 논문에서는 추가적으로 일차신뢰도지수법을 이용하여 원주방향 관통균열 배관의 탄소성 균열개시 조건에 대한 부분안전계수를 평가하였다. Table 8과 Table 9는 Table 1의 국외 데이터를 이용하여 이차신뢰도지수법과 일차신뢰도지수법으로 구한 부분안전계수의 차이를 나타낸 것이다. Table 8은 GE/EPRI법에 대한 결과이며 Table 9는 참조응력법에 대한 결과이다. 비교 결과, 이차신뢰도지수법으로 구한 결과와 일차신뢰도지수법으로 구한 결과의 차이는 최대 약 0.412% 이하로서 미미한 것으로 나타났으며 이는 원주방향 관통균열 배관의 경우 탄소성 균열개시 조건에 대한 한계상태함수의 비선형성이 두 공학적 J -계산식 모두에 대해 그리 크지 않음을 의미한다.

Table 8 Differences of PSF values between AFOSM and SORM based on GE/EPRI method (International data, %)

Variables	θ/π	P_{fa}		
		$10^{-6}/\text{year}$	$10^{-3}/\text{year}$	$10^{-2}/\text{year}$
α	0.125	0.021	0.182	0.260
	0.4	0.027	0.016	0.019
n	0.125	0.351	0.080	0.179
	0.4	0.116	0.023	0.013
J_{IC}	0.125	0.105	0.217	0.168
	0.4	0.381	0.347	0.099
E	0.125	0.321	0.123	0.412
	0.4	0.022	0.185	0.242
M	0.125	0.133	0.018	0.070
	0.4	0.074	0.049	0.239

Table 9 Differences of PSF values between AFOSM and SORM based on reference stress method (International data, %)

Variables	θ/π	P_{fa}		
		$10^{-6}/\text{year}$	$10^{-3}/\text{year}$	$10^{-2}/\text{year}$
J_{IC}	0.125	0.001	0.000	0.000
	0.4	0.004	0.001	0.000
E	0.125	0.004	0.000	0.087
	0.4	0.009	0.001	0.000
M	0.125	0.000	0.000	0.000
	0.4	0.002	0.037	0.000

4. 결론

본 연구에서는 일차 및 이차신뢰도지수법을 이용하여 원주방향 관통균열 배관의 부분안전계수를 탄소성 균열개시 조건에 대해 평가하였다. 이를 위해 서로 다른 통계적 특성과 공학적 계산식을 고려하였으며 이를 통해 얻은 주요 결론은 다음과 같다.

(1) 부분안전계수 계산 결과, Ramberg-Osgood 상수, 파괴인성치 및 굽힘모멘트가 원주방향 관통균열 배관의 탄소성 균열개시 조건에 있어 영향도가 큰 변수로 평가되었다. 또한 탄성계수는 그 영향도가 낮아 원주방향 관통균열 배관 평가 시 중요 변수에서 제외할 수 있다.

(2) 가공경화지수는 균열길이가 긴 경우는 영향도가 컸으나 균열길이가 짧은 경우에는 영향도가 작은 것으로 나타났다.

(3) 국내 데이터로 구한 가공경화지수의 표준편차가 국외 데이터의 그것보다 커서 국내 데이터를 이용한 가공경화지수의 부분안전계수가 크게 계산되었다.

(4) 일차 및 이차신뢰도지수법으로 구한 부분안전계수의 차이가 크지 않아 원주방향 관통균열 배관의 경우 균열개시 조건에 대한 한계상태함수의 비선형성이 고려된 두 가지 공학적 계산식에 대해 크지 않은 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌 (References)

- (1) Watanabe, D., Chuman, Y., Asayama, T., Takaya, S., Machida, H. and Kamishima, Y., 2013, "Development of Limit State Design for Fast Reactor by System Based Code," *ASME Pressure Vessels and Piping Conference*, PVP2013-97154.
- (2) Sundararajan, C., 1995, *Probabilistic Structural*

Mechanics Handbook, Chapman & Hall, New York, pp. 1~31.

- (3) Nikolaidis, E., Ghiocel, D.M. and Singhal, S., 2005, *Engineering Design Reliability Handbook*, CRC-Press, New York, Chapter 14.
- (4) Kumar, V., German, M.D. and Shih, C.F., 1981, "An Engineering Approach for Elastic-Plastic Fracture Analysis," EPRI Report NP-1931.
- (5) British Energy Generation Ltd., 2001, *Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects*, UK, R6, Revision 4, Sec. 1.6.
- (6) Rahman, S. and Kim, J.S., 2001, "Probabilistic Fracture Mechanics for Nonlinear Structures," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 78, pp. 261~269.
- (7) Lee, K.H., 2002, "Development of Failure Probability Estimation for Circumferential Cracked Pipes based on Reliability Index," Master Thesis Sungkyunkwan University.
- (8) Rackwitz, R. and Fiessler, B., 1976, "Note on Discrete Safety Checking When Using Non-normal Stochastic Models for Basic Variables," Loads Project Working Session, MIT, Cambridge.
- (9) Yoo, Y.S., Huh, N.S., Choi, S., Kim, T.W. and Kim, J.I., 2010, "Collapse Pressure Estimates and the Application of a Partial Safety Factor to Cylinders Subjected to External Pressure," *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 42, No. 4, pp. 450~459.