

축방향 관통균열이 존재하는 증기발생기 세관의 파손확률 예측

문성인*, 이상민*, 배성렬*, 장윤석*, 김영진#, 황성식**, 김정수**

Failure Probability Estimation of Steam Generator Tube Containing Axial Through-Wall Crack

Seong In Moon*, Sang Min Lee*, Sung Ryul Bae*, Yoon Suk Chang*, Young Jin Kim#,
Seong Sik Hwang** and Joung Soo Kim**

ABSTRACT

The integrity of steam generator tubes in nuclear power plant should be maintained sufficiently during operation. For sake of this, complicated assessment procedures are required such as fracture mechanics analysis, etc. The integrity assessment of tubes has been performed by using conventional deterministic approaches while there are many uncertainties to carry out a rational evaluation. In this respect, probabilistic integrity assessment is considered as an alternative method for integrity assessment. The objectives of this study are to develop an integrity assessment system based on probabilistic fracture mechanics and to predict the failure probability of steam generator tubes containing an axial through-wall crack. The developed integrity assessment system consists of three evaluation modules, which apply first order reliability method, second order reliability method and Monte Carlo simulation method, respectively. The system has been applied to predict failure probability of steam generator tubes and the estimation results showed a promising applicability of the probabilistic integrity assessment system.

Key Words : Probabilistic Fracture Mechanics(확률론적 파괴역학), Failure Probability(파손확률), Steam Generator Tube(증기발생기 세관), Plastic Collapse(소성붕괴), Sensitivity(민감도)

1. 서 론

가압경수로형 원자력발전소에 사용되는 증기발생기 세관은 열전달 및 압력경계 구성이라는 두 가지의 중요한 고유 기능을 수행한다. 증기발생기 세관에는 응력부식(stress corrosion) 등의 다양한 원

인으로 결함이 발생하여 성장할 수 있다. 결함세관이 파열되어 1차 냉각재가 누설될 경우, 방사능 유출로 인한 사회적 문제를 일으킬 수 있을 뿐만 아니라 원자력발전소의 가동 정지로 인한 막대한 경제적 손실이 발생된다. 따라서 증기발생기 세관의 구조적 건전성은 정상 및 사고 운전조건에서

접수일: 2005년 4월 22일; 게재승인일: 2005년 8월 9일

* 성균관대학교 기계공학부

교신저자: 성균관대학교 기계공학부

E-mail yikim50@skku.edu Tel. (031) 290-5274

** 한국원자력연구소

모두 충분히 보장되어야 한다.

일반적으로 건전성평가에 사용되는 재료물성과 형상정보 등은 분산(variance)을 포함하고 있기 때문에 평가시 사용되는 데이터에 따라 평가결과가 상이하게 나타날 수 있다. 지금까지 증기발생기 세관의 건전성을 평가하기 위해서는 결정론적 파괴역학(deterministic fracture mechanics) 해석기법을 적용하여 왔으나, 입력자료의 분산을 정량적으로 고려하는 대신 각각에 대한 특정 안전계수(safety factor)를 적용하고 있기 때문에 매우 보수적인 평가결과가 도출되고 있는 실정이다.^{1,2} 이에 반해 확률론적 파괴역학(probabilistic fracture mechanics) 해석기법의 적용시 입력자료의 분산을 고려한 평가가 가능하기 때문에 보다 유용한 평가결과를 제공할 수 있다. 현재 확률론적 파괴역학해석에 기반하여 주요 구조물의 건전성을 평가하기 위한 연구가 활발히 수행되고는 있으나,^{3,5} 증기발생기 세관의 파손확률(failure probability)을 예측하기 위한 연구는 아직 미비한 실정이다.

본 연구의 목적은 확률론적 파괴역학 해석기법을 이용한 건전성평가 시스템(integrity assessment system)을 개발하고, 이를 이용하여 축방향 관통균열이 존재하는 증기발생기 세관의 파손확률을 예측하는 것이다. 증기발생기 건전성평가 시스템은 FORM(First Order Reliability Method), SORM(Second Order Reliability Method), 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation: MCS)의 총 3가지 방법을 사용하여 구성한다.

2. 확률론적 파괴역학 해석기법

확률론적 파괴역학은 구조물의 형상, 작용하중, 재료물성의 분산을 고려하여 구조물의 파손확률 P_f 를 결정하기 위해 사용될 수 있다. 구조물의 파손확률은 파손거동을 나타내는 한계상태방정식 $g(x)$ 에 의해 결정되며, 이때 한계상태방정식은 각각의 확률변수 $x_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 의 함수로 표현된다. Fig. 1은 한계상태방정식의 의미를 간략히 나타낸 것으로서 $g(x) < 0$ 이면 구조물의 파손이 발생함을 의미하며, $g(x) > 0$ 일 경우에는 파손되지 않음을 의미한다. 궁극적으로 구조물의 파손확률은 다음과 같이 정의할 수 있다.

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

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.^{6,7}

산업현장에 실제 적용 가능한 공학적 파손확률 예측기법으로는 크게 신뢰도지수를 이용하는 방법과 시뮬레이션을 이용하는 방법이 있다. 이중 신뢰도지수를 이용하는 방법은 파손여부를 결정하는 한계상태방정식을 결정하고, 한계상태방정식의 평균(μ)과 표준편차(σ)의 조합으로 계산되는 매개변수를 사용하여 파손확률을 구한다. 이러한 매개변수를 신뢰도지수라 하며 이를 사용하는 모든 기법을 신뢰도지수 방법이라고 한다. 신뢰도지수를 이용하는 방법은 한계상태방정식의 Taylor 전개식 중 근사화된 차수에 따라 1차식까지만 고려하는 FORM과 2차식까지 고려하는 SORM으로 구분된다. FORM의 경우 설계점(design point)에서 한계상태방정식을 선형화하여 근사적인 파손확률을 구하며 다음과 같은 식을 통해 계산할 수 있다.

$$P_f = \Phi(-\beta) = 1 - \Phi(\beta) \quad (2)$$

여기서, ϕ 는 누적 표준정규분포, β 는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 기본 변수공간에서의 원점과 설계점 사이의 최소거리를 나타내는 신뢰도지수이다.

SORM의 경우 파손확률은 설계점에서 한계상태방정식의 주곡률(κ_i)을 사용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

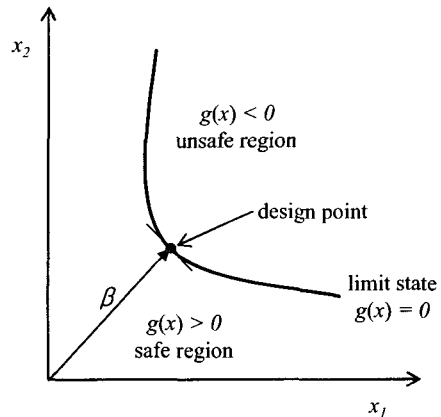


Fig. 1 Definition of design point and reliability index β

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

여기서, ϕ 와 β 는 FORM의 경우와 동일하며 κ_i 는 i 번째 주곡률을 나타낸다.

한편 몬테카를로 시뮬레이션 방법을 사용하여 파손확률을 구할 수 있다. 이 방법은 주어진 확률 분포에 따라 임의의 확률변수를 난수 형태로 생성하고 이 난수를 한계상태방정식에 대입하여 파손 여부를 결정한 후, 최종적으로 파손확률을 결정한다. 파손확률은 다음 식과 같이 표현된다.

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

여기서, N_f 는 파손횟수, N_t 는 전체 시뮬레이션 횟수이다.

3. 확률론적 건전성평가 시스템 개발

증기발생기 세관의 파손확률을 계산하기 위해서는 확률변수 및 확률분포의 선정에서부터 파손 기준을 적용하기까지 많은 수작업과 반복계산이 필요하다. 따라서 시간의 효율성 증대 및 신속하고 다양한 평가를 위해 신뢰도지수 및 시뮬레이션을 이용한 확률론적 건전성평가 시스템을 개발하였다. Fig. 2는 FORM, SORM, 몬테카를로 시뮬레이션 방법을 이용한 파손확률 예측 프로그램의 주화면(main window)을 나타낸 것으로써 사용자가 원하는 방법을 선택할 수 있다. 본 프로그램은 사용자의 편의성을 고려하여 GUI 환경을 적용하여 Microsoft사의 Visual C++로 작성하였다.

Fig. 3은 신뢰도지수를 이용한 파손확률 예측시 사용된 각 모듈의 연계성을 간략히 나타낸 것이다. 제시한 바와 같이 FORM과 SORM을 이용한 파손 확률 예측 프로그램은 입력변수 변환 모듈, 반복계산 모듈, 수치해석 모듈, 결과출력 모듈로 구성되어 있다.

몬테카를로 시뮬레이션 방법을 이용한 파손확률 예측 프로그램은 시뮬레이션 횟수의 결정 및 난수생성 모듈, 확률분포생성 모듈, 결과출력 모듈로 구성되어 있다. Fig. 4는 몬테카를로 시뮬레이션 방법에 따른 프로그램의 흐름도를 나타낸 것으로써 4단계의 절차를 거쳐 파손확률을 계산한다.

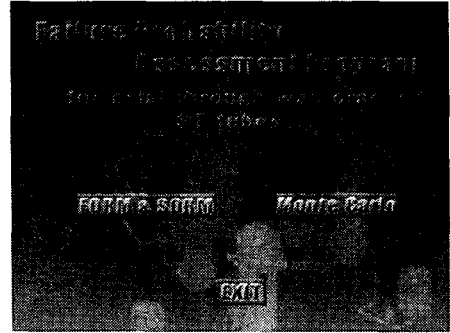


Fig. 2 Main window of PFM program for steam generator tubes

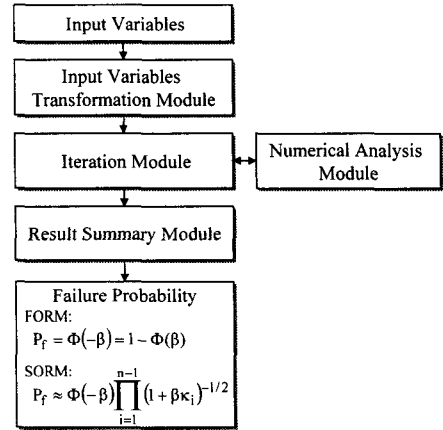


Fig. 3 Connectivity of reliability index modules

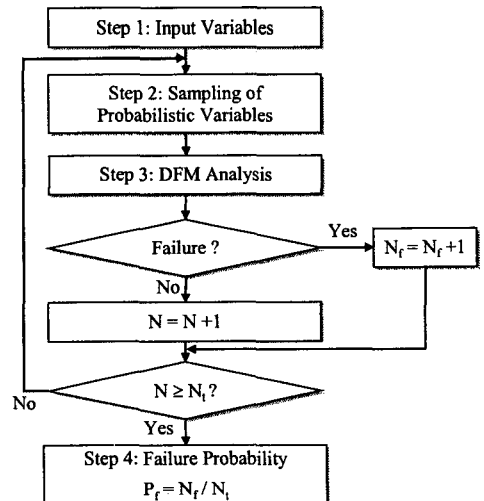


Fig. 4 Flow chart of Monte Carlo simulation method

4. 증기발생기 세관의 파손확률 예측

4.1 문제정의

본 연구에서 개발한 확률론적 건전성평가 시스템을 이용하여 내압이 작용하는 증기발생기 세관의 파손확률을 계산하였다. 파손확률을 예측하기 위해서는 먼저 한계상태방정식의 구성이 필요하다. 축방향 관통균열이 존재하는 증기발생기 세관의 파열압력 p_{cr} 을 예측하기 위한 다수의 식이 제안된 바 있으나,⁸⁻¹⁰ 이중 한계하중법에 기초하여 가장 널리 사용되고 있는 다음 식⁸을 채택하였다.

$$p_{cr} = \frac{\sigma_f \cdot t}{M_T \cdot R} \tag{5}$$

여기서, σ_f 는 유동응력, t 는 관두께, R 은 세관의 평균 반경, M_T 는 Erdogan이 제시한 벌징계수(bulging factor)로서 다음과 같이 표현된다.

$$M_T = 0.614 + 0.481\lambda + 0.386 \exp(-1.25\lambda) \tag{6}$$

for $5 \leq R/t \leq 50$

$$\lambda = [12(1-\nu^2)]^{0.25} (c/\sqrt{Rt}) \tag{7}$$

위 식에서 λ 는 웰 파라미터, ν 는 포아송비, c 는 균열 길이의 1/2이다. 이를 사용하여 구성한 축방향 관통균열이 존재하는 증기발생기 세관에 대한 한계상태방정식은 다음과 같다.

$$g(x) = p_{cr} - p_{op} \tag{8}$$

여기서, p_{op} 는 증기발생기 세관의 내벽과 외벽에 작용하는 압력차이를 나타내며, 파열압력은 내·외압의 절대적인 크기에 상관없이 압력차이에 의해 결정되는 것으로 알려져 있다.¹¹

Table 1은 입력변수의 확률분포를 나타낸 것으로서 확률분포가 파손확률에 미치는 영향을 파악하기 위해 참고문헌¹¹과 공학적 가정으로부터 결정한 2가지 확률분포를 사용하여 파손확률을 예측하였다. 이때 압력차 p_{op} 의 범위는 정상 및 비정상 운전조건을 고려할 경우에 예상되는 최대압력인 약 30MPa 이하가 되도록 고려하였다.

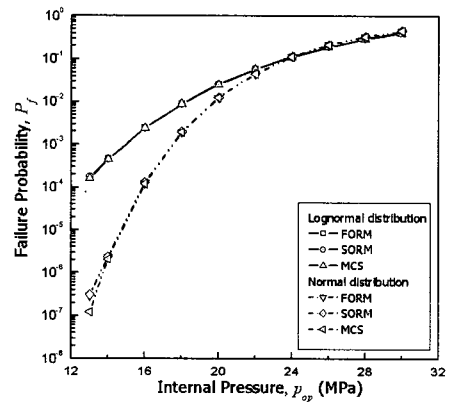
4.2 해석결과

Fig. 5는 p_{op} 가 13~30MPa일 경우 축방향

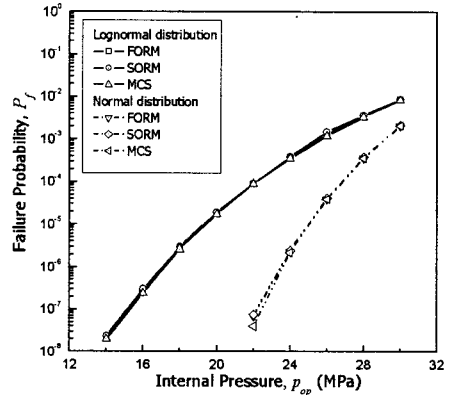
Table 1 Input data of probabilistic variables

Variable	μ	σ
Yield strength, σ_Y (MPa)	362 ^[a]	38.0 ^[a]
Ultimate tensile strength, σ_U (MPa)	718 ^[a]	38.0 ^[a]
Crack length, $2c$ (mm)	10.3 ^[a]	3.2 ^[a]
	5.15 ^[b]	1.6 ^[b]
Mean radius, R (mm)	9.525 ^[a]	0.025 ^[a]
Thickness, t (mm)	1.092 ^[a]	0.039 ^[a]

Note: [a] Reference, [b] Engineering assumption



(a) $\mu=10.3, \sigma=3.2$



(b) $\mu=5.15, \sigma=1.6$

Fig. 5 Failure probability of steam generator tube under internal pressure

관통균열이 존재하는 증기발생기 세관의 파손확률 예측결과를 나타낸 것이다. 그림에 나타낸 바와

같이 확률밀도함수 형태, 균열길이 분포, 해석방법에 따라 파손확률은 상당한 차이를 보였다. 구체적인 예로써, 동일한 평균과 표준편차를 나타낼 경우에도 정규분포(normal distribution)를 사용하여 계산한 경우에는 편대수정규분포(log-normal distribution)를 사용하여 계산한 경우에 비해 14MPa의 하중하에서 약 10^2 배 이상 위험도가 크게 평가되었다. 또한 균열길이의 평균과 표준편차를 기준값($\mu=10.3, \sigma=3.2$)에 비해 작은 값($\mu=5.15, \sigma=1.6$)을 사용하여 계산한 경우 14MPa의 하중하에서 파손확률이 약 10^4 배 수준으로 감소하였다. 따라서 확률변수의 분포가 파손확률에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있으며, 보다 정확한 파손확률을 예측하기 위해서는 실제 현장 데이터를 활용하여 의미있는 확률변수의 분포선정이 이루어져야 할 것으로 판단된다. 또한 FORM, SORM, 몬테카를로 시뮬레이션 방법을 이용하여 예측한 파손확률은 서로 잘 일치하였

으며 모든 경우에 정상 운전조건하에서의 파손확률은 10^{-4} 이하로 매우 작은 값을 보였다.

본 절에서는 기본적인 가정하에 증기발생기 세관의 파손압력 예측을 통해 개발한 확률론적 건전성평가 시스템의 프로그램의 적용성을 검토하였으며, 향후 다양한 열화기구, 관막음기준, 균열성장 등에 대한 추가적인 연구를 거쳐 실제 산업현장에서 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

4.3 주요 입력변수에 대한 민감도 분석

확률론적 건전성평가지 민감도 분석과정은 주요 확률변수의 불확실성과 평가결과의 신뢰성을 나타내기 위하여 필요하다. 즉, 민감도 분석을 통해 주요 확률변수가 구조물의 안전에 영향을 미치는 우선순위를 결정하여 효율적인 구조물 설계 또는 평가를 수행할 수 있다. 본 연구에서는 확률변수들이 증기발생기 세관의 파손확률에 미치는 영

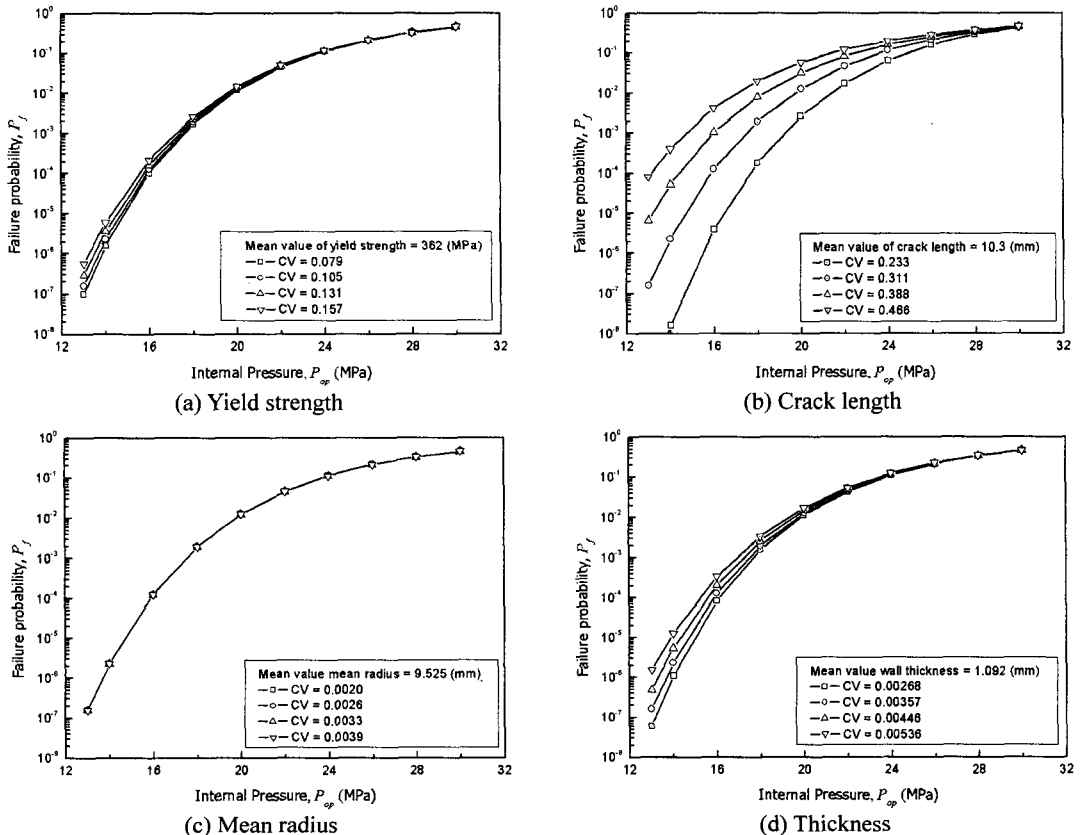


Fig. 6 Sensitivity analysis result for probabilistic variables

향을 평가하기 위해 Erdogan이 제시한 한계상태방정식을 이용하여 민감도 분석을 수행하였다. 확률 변수로는 항복강도, 균열길이, 세관반경 그리고 세관두께를 선택하였으며, Fig. 6에 각 변수의 $CV(=\sigma/\mu)$ 값 변화에 따른 영향을 나타내었다. 이때, Table 1에 제시된 자료를 기준으로 하여 CV를 25% 감소 또는 25, 50% 증가시키며 사례해석을 수행하였다.

Fig. 6(a)는 항복강도의 CV 변화에 따른 파손확률을 나타낸 것이다. CV값이 0.079에서 0.157까지 각각 25%씩 증가함에 따라, 파손확률은 각각 40~66% 증가하였다. Fig. 6(b)는 균열길이의 CV 변화에 따른 파손확률을 나타낸 것으로서, CV값이 0.233에서 0.466으로 변화함에 따라 파손확률은 각각 600% 이상의 변화를 나타내었다. Fig. 6(c)는 세관반경의 CV 변화에 대한 평가를 나타낸 것으로, 파손확률 변화에는 미미한 영향을 미치는 것으로 계산되었다. Fig. 6(d)는 세관두께의 CV 변화에 대한 영향을 나타낸 것으로, CV 각각의 변화에 따라 파손확률이 110~130% 변화하는 것으로 나타났다.

상술한 바와 같이, 4가지 확률변수 중에서 균열길이의 영향이 파손확률에 가장 큰 영향을 미치는 인자이며 세관반경의 영향은 파손확률에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 또한 항복강도와 세관의 두께가 파손확률에 미치는 영향은 비교적 작은 것으로 평가되었다. 따라서 신뢰성 있는 파손확률을 계산하기 위해 균열길이에 대한 정확한 PDF를 결정하는 것이 상당히 중요하다. 또한 파손확률에 미치는 기여도가 높은 입력자료, 즉 민감도가 높은 입력자료를 선정함으로써 그 입력자료에 대한 신뢰도를 높이기 위한 관련 연구를 수행하거나 부분안전계수(partial safety factor) 개념을 도입한 설계를 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 확률론적 파괴역학에 입각하여 건전성평가 시스템을 개발하고, 이를 축방향 관통 균열이 존재하는 증기발생기 세관에 적용하여 파손확률을 계산하였다. 여기서 얻은 주요 결론은 다음과 같다.

(1) FORM, SORM, 몬테카를로 시뮬레이션 방법을 적용하여 건전성평가 시스템을 구축하였고, 이

를 사용하여 내압을 받는 증기발생기 세관의 파열 압력을 예측하여 그 유용성을 확인하였다.

(2) 확률밀도함수의 형태 및 균열길이 분포의 차이가 파손확률에 상당히 큰 영향을 미침을 확인하였다.

(3) 주요 확률변수에 대한 민감도를 분석하여 각 변수가 세관의 파손확률에 미치는 영향을 분석하였다. 그 결과 균열길이의 영향이 가장 크게 나타났다. 세관반경의 영향은 미미한 것으로 나타났다.

후 기

본 논문은 한국원자력연구소 및 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사 드립니다.

참고문헌

1. Yagawa, G., Kanto, Y., Yoshimura, S., Machida, H. and Shibata, K., "Probabilistic Fracture Mechanics Analysis of Nuclear Structural Components: A Review of Recent Japanese Activities," Nuclear Engineering and Design, Vol. 207, pp. 269-286, 2001.
2. Yagawa, G. and Yoshimura, S., "A Study on Probabilistic Fracture Mechanics for Nuclear Pressure Vessels and Piping," International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 73, pp. 97-107, 1997.
3. Dillstrom, P., "ProSINTAP - A Probabilistic Program Implementing the SINTAP Assessment Procedure," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 67, pp. 647-668, 2000.
4. Roy, S., Grigory, S., Smith, M., Kanninen, M.F. and Anderson, M., "Numerical Simulation of Full-Scale Corroded Pipe Tests with Combined Loading," ASME Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 119, pp. 457-466, 1997.
5. Walker, Z.H., "Managing Flow Accelerated Corrosion in Carbon Steel Piping in Nuclear Plants," Proceedings of Pressure Vessel and Piping, Vol. 471, pp. 155-165, 2004.
6. Haldar, A. and Mahadevan, S., "Probability,

Reliability and Statistical Methods in Engineering Design," John Wiley & Sons, Inc., USA, 2000.

7. Cizelj, L. and Mavko, B., "On the risk-based steam generator lifetime optimisation," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 23, pp. 129-137, 1995.
8. Erdogan, F., "Ductile Fracture Theories for Pressurised Pipes and Containers," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 4, pp. 253-283, 1976.
9. Folias, E.S., "An Axial Crack in a Pressured Cylindrical Shell," *International Journal of Fracture Mechanics*, Vol. 1, pp. 104-113, 1965.
10. Hahn, G.T., Sarrate, M. and Rosenfield, A.R., "Criteria for Crack Extension in Cylindrical Pressure Vessels," *International Journal of Fracture Mechanics*, Vol. 5, No. 3, pp. 187-210, 1969.
11. Cho, S.K., Bae, B.K. and Seok, C.S., "Effect of External Pressure on the Burst Strength of Steam Generator Tube," *Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers - Autumn Meeting*, pp. 353-358, 2004.
12. Cizelj, L., "On the Estimation of the Steam Generator Maintenance Efficiency by the Means of Probabilistic Fracture Mechanics," *KfK 5359*, Slovenia, 1994.