J_r-FAD를 이용한 캔두 압력관의 확률론적 건전성 평가 모듈 개발

마영화[†] ·오동준[*]·정일석[**]·김영석[***]·윤기봉[****]

Development of the Probabilistic Integrity Evaluation Module of CANDU Pressure Tubes Using the J_r-FAD

Young Wha Ma, Dong Joon Oh, Ill Seok Jeong, Young Suk Kim and Kee Bong Yoon

Key Words: PFM(확률론적 파괴역학), FAD(파손평가선도), DHC(지체수소균열), J_r(탄소성 파괴인성비), Failure Probability(파손확률), Integrity Evaluation(건전성 평가)

Abstract

In this paper probabilistic fracture mechanics(PFM) approach is employed to evaluate the integrity of CANDU Zr-2.5Nb pressure tubes. Modified failure assessment diagram(Jr-FAD), plastic collapse, and critical crack length(CCL) approach are used for evaluating failure probability of the tubes. Jr-FAD was extended from the Kr-FAD because fracture of pressure tubes occurs in brittle manner due to hydrogen embrittlement of material by deuterium fluence. For developing the probabilistic integrity evaluation module, AECL procedures and fracture toughness parameters of EPRI were used.

1. 서 론

세계에서 가동 중인 CANDU형 중수로 원자로는 설계 수명인 30년의 1/3밖에 지나지 않은 시점에서 설계상의 문제로 운전을 중단하는 사례가 보고 되었다. 또한 사용 년 수가 증가함에 따라 원자로 안전성에 대한 우려가 점차 증가하고 있다. 원전의 안전성을 보장하기 위해서는 중수로 원자로의 1차계통인 압력관의 경년열화 손상 관리 기술개발이 필요하다. 그러나 사용 중인 중수로 압력관의 손상에 관한 실험 및 측정에 관한 데이터는 많지 않으므로 기존 데이터를 모두 확보하고 종합하여 결정론적인 평가방법의 취약점을 보완할 수 있는 건전성 평가 절차의 개발이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 이를 위해 확률론적 평가방법을 도입하여 건전성 평가 절차를 개발하였다. 또한 기존의 선형탄성 파손기준인 K_r의 보수적 평가방법을 개선한 J_r파손평가기준을 제안하였다.

**** 책임저자, 회원, 중앙대학교 기계공학부
E-mail : kbyoon@cau.ac.kr
TEL : (02)820-5328 FAX : (02)812-6474
† 중앙대학교 기계공학부 대학원
* 안동대학교 사범대학 기계교육과
** 한전 전력연구원, *** 한국 원자력연구소

2. 이론적 배경

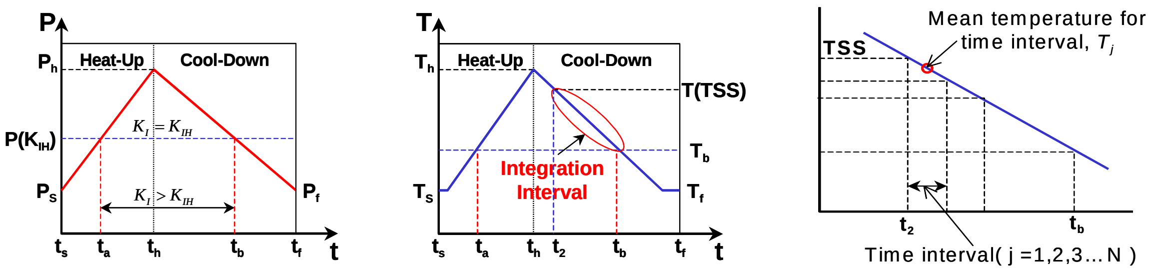
2.1 확률분포함수(Probability Distribution Function)

균일한 분포형태를 갖는 난수는 식(1)에서 얻어진 S_{i+1}을 Park & Mille에 의해 제안된 식(2)에 대입하여 생성한다.[1]

$$S_{i+1} = (aS_i + c) \bmod m \quad (1)$$

$$U_i = \frac{S_i}{m} \quad (2)$$

a, c, m은 균일분포함수 형태를 갖는 난수를 생성하는데 사용되는 선형 합동적 난수 생성자이고 ($a = 7^5$, $c = 0$, $m = (2^{31}-1)$), S_i는 1보다 크고 m



(a)Time Interval for $K_I \geq K_{IH}$ (b)Time Interval for Integrating the DHC Crack Growth (c)Illustration of Sectioning

Fig. 1 Determination of the DHC Crack Growth by Sectioning of Typical Cool-Down Curve

보다 작은 정수이다.(1) 균일분포함수 식(2)를 사용하여 생성된 난수는 식(3)과 식(6)에 대입하여 각각 표준정규분포함수와 지수분포함수로 가공된다. 또한, 표준정규분포함수 식(3)은 식(4)와 식(5)에 의해 각각 정규분포함수와 대수정규분포함수로 가공된다.(1),(2)

$$\left.\begin{array}{l} V_1 = \sqrt{-2 \cdot \ln U_1} \cdot \cos(2\pi U_2) \\ V_2 = \sqrt{-2 \cdot \ln U_1} \cdot \sin(2\pi U_2) \end{array}\right\rangle \quad (3)$$

$$u_i = \mu + \sigma \cdot V_i \quad (4)$$

$$u_i' = Exp\left[\left\{\ln \mu - \frac{1}{2}\ln\left((\sigma/\mu)^2 + 1\right)\right\} + \left\{\left(\ln\left((\sigma/\mu)^2 + 1\right)\right)^{\frac{1}{2}}\right\} \cdot V_i\right] \quad (5)$$

$$(u_e)_i = -1 \cdot \mu \cdot \ln(U_i) \quad (6)$$

σ는 표준편차, μ는 평균이다.

2.2 확률론적 건전성 평가를 위한 변수

2.2.1 최종고용도(Terminal Solid Solubility, TSS)

최종고용도는 주어진 온도에서 수소의 고용한계가 초과되고 수소화물이 응결될 수 있는 상태에서의 수소 집중으로 정의된다. 식(7)은 AECL-EACL에서 실험을 통해 얻어진 평균 최종고용도 평가식이다.(3) 냉각시 수소화물이 석출되는 최대농도(terminal solid solubility for hydride precipitation, TSSP)와 가열시 수소화물이 용해되는 최대농도(terminal solid solubility for hydride dissolving, TSSD)는 식(8)와 식(9)로 표현된다.(2)

$$(C_s)_{avg} = 1.2 \times 10^5 \cdot Exp\left(\frac{-35900}{RT}\right) \quad (7)$$

R은 기체상수(8.314 J/mol), T는 절대온도이다.

$$(C_s)_{TSSP} = 4.11 \times 10^4 \cdot Exp\left(\frac{-28000}{RT}\right) \quad (8)$$

$$(C_s)_{TSSD} = 8.19 \times 10^4 \cdot Exp\left(\frac{-34500}{RT}\right) \quad (9)$$

2.2.2 인장 물성(Tensile Properties)

중성자 조사량이 1x10^{24}n/m^2(>1MeV) 이상인 조사재료에 대한 결정론적 평가에 사용되는 항복강도와 인장강도는 온도만의 함수로써 표현된다.(3) 유동응력, σ_f는 항복강도와 인장강도의 평균값이며, 본 연구에서는 함률분포함수로 결정된다.(2),(3)

2.2.3 DHC에 의한 아임계 균열성장

지체수소균열(DHC)에 의한 균열성장 평가 절차를 Fig. 1에 도시하였다. Fig. 1(a)에서 DHC의 하계 응력집중계수, K_{IH}는 온도 의존도가 낮고, 중성자조사가 1x10^{24}n/m^2(>1MeV) 이상일 때는 조사량에 대한 의존도도 낮다. 균열이 발생하고 성장하기 위해서는 K_I이 K_{IH} 보다 커야 한다. K_{IH}는 반경방향에 대해 4.5MPa$\sqrt{m}$, 원주방향에 대해 15MPa$\sqrt{m}$이다.(3) 칼란드리아 튜브와 접촉하고 있는 냉간가공된 Zr-2.5Nb 압력관에서 하계 임계수소화물 블리스터가 발생할 수 있는 수소 집중의 최소값은 35ppm이다.(3) 따라서 균열이 발생하고 성장하기 위해서는 상당수소농도, H_{eq}가 35ppm 이상이어야 한다. H_{eq}는 식(10)로 계산된다.(2),(3)

$$H_{eq} = H + \frac{1}{2}D \quad (10)$$

H는 초기수소농도이고 확률분포함수로 얻어지며, D는 중수소 흡수율로써 데이터 부족으로 결정론적인 값, 1.2ppm/year을 사용하였다.(2)

Fig. 1(b)에서 균열이 성장할 수 있는 최대 온도, T(TSS)는 H_{eq}를 2.2.1절의 최종고용도식에 대

입하여 결정된다. 균열 성장량 평가방법에는 균열성장속도를 수치 적분하는 방법과 Fig. 1(c)와 같이 분할해서 계산하는 방법이 있다.[(3)] 본 연구에서는 계산이 용이한 후자를 선택하였으며, 계산식을 식(11)에 나타내었다.

$$2\Delta c = 2\sum_{j=1}^{N} DHCV(T_j)\cdot\Delta t \qquad (11)$$

$$\Delta t = \frac{t_b - t_2}{N}$$

$2\Delta c$는 축방향 균열성장량, *DHCV*는 DHC성장속도이다. *DHCV*는 조사(fluence)의 영향을 받지만 온도에 대한 의존도가 훨씬 크기 때문에 온도만의 함수로 단순화하여 다음 식(12)~(15)로 정의할 수 있다.[(3)]

$$\text{입구}\begin{cases}\log_{10} V = 0.51 - \dfrac{4084}{T} + \dfrac{250200}{T^2} & \text{[95\% 상계]} \quad (12)\\ \log_{10} V = -0.97 - \dfrac{2965}{T} & \text{[평균]} \quad (13)\end{cases}$$

$$\text{출구}\begin{cases}\log_{10} V = -2.61 - \dfrac{2244}{T} + \dfrac{102400}{T^2} & \text{[95\% 상계]} \quad (14)\\ \log_{10} V = -3.75 - \dfrac{1770}{T} & \text{[평균]} \quad (15)\end{cases}$$

V는 속도이고 단위는 m/sec^2, T 절대온도이다.

2.2.4 파괴인성(Fracture Toughness), K_c

파괴 인성치는 H_{eq}가 35*ppm* 이상일 때는 수소 농도의 영향을 거의 받지 않기 때문에 온도만의 함수로써 결정론적 평가시 식(16)으로 정의된다.[(3)]

$$K_c = 26.3 + 0.022T \qquad (16)$$

본 연구에서는 확률분포함수로 정의하였다.[(2)]

2.3 파손 기준(Failure Criteria)

2.3.1 임계균열길이(Critical Crack Length, CCL)

임계균열길이는 식(17)로 계산된다.[(3)]

$$c = \frac{K_c^{\ 2}\cdot\pi}{8\sigma_f^{\ 2}\cdot\ln\left[\sec\left(\dfrac{\pi\cdot M\cdot\sigma_h}{2\sigma_f}\right)\right]} \qquad (17)$$

$$M = \left[1 + 1.255\left(\frac{c^2}{R_m\cdot t}\right) - 0.0135\left(\frac{c^2}{R_m\cdot t}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (18)$$

c는 임계균열길이의 1/2, K_c는 임계응력집중계수, σ_f는 유동응력, σ_h는 관통균열에 대한 원주응력, M은 벌징 계수, R_i는 압력관의 내부반경, R_m은 평균반경, t는 압력관 두께이다. 적용 범위는 $\sigma_h \le 0.7\sigma_f / M$ 이고, $\sigma_h > 0.7\sigma_f / M$ 이면 소성붕괴가 발생한다.[(3)]

2.3.2 소성붕괴 및 불안정 균열성장

소성붕괴(plastic collapse) 및 불안정균열성장(unstable crack growth) 평가는 균열의 관통여부에 따라 적합한 평가식을 적용해야 한다. 부분관통균열의 경우, 소성붕괴 평가는 Carter와 Eiber식을 사용하고,[(2),(3),(4)] 불안정균열성장 평가는 Zahoor, Scott Thorpe의 *K*-해와 Zahoor의 *J*-해를 사용한다.[(3),(4)] 관통균열인 경우, 소성붕괴 평가는 Zahoor와 AECL-EACL 보고서 식을 사용하고, 불안정균열성장 평가는 Tada, Zahoor, AECL-EACL의 *K*-해와 Zahoor의 *J*-해를 사용한다.[(3),(4)]

2.3.3 파손평가선도(Failure Assessment Diagram)

소성붕괴와 불안정균열성장에 의한 파손을 독립적으로 평가했을 때 $K_I < K_{IC}$, $\sigma_a < \sigma_c$인 영역에서는 파손이 발생하지 않는다. 그러나 실제 이 영역에서도 파손이 발생하기 때문에 정확한 건전성 평가를 위해 파손평가선도(FAD)가 사용된다.[(2),(3),(5),(6)] 재료가 선형탄성 모델인 경우 FAD는 식(19)로 제안되었다.[(2)]

$$K_{r,FAC} = \left[1 + \frac{L_r^{\ 2}}{2}\right]^{0.5}\cdot\left[0.3 + 0.7Exp(-0.6L_r^{\ 6})\right] \qquad (19)$$

$$L_r = \sigma_a / \sigma_c, \quad K_r = K_I / K_{IC}$$

이때 $K_r \ge K_{r,FAC}$ 이면 파손이 발생한다. 탄소성 FAD는 원자로 압력관이 수소 집중에 의한 취성파괴가 주로 발생한다.[(3)] 따라서 선형탄성 파손기준을 이용하여 식(20)의 탄소성 파손기준을 정의할 수 있다. $J_r \ge J_{r,FAC}$ 이면 파손이 발생한다.

$$J_{r,FAC} = (K_{r,FAC})^2 = \left[1 + \frac{L_r^{\ 2}}{2}\right]\cdot\left[0.3 + 0.7Exp(-0.6L_r^{\ 6})\right]^2 \qquad (20)$$

L_r은 원주응력과 소성붕괴 응력의 비이다.

3. 확률론적 건전성 평가

3.1 확률론적 건전성 평가 모듈 개발

본 연구에서 개발된 확률론적 건전성 평가 프

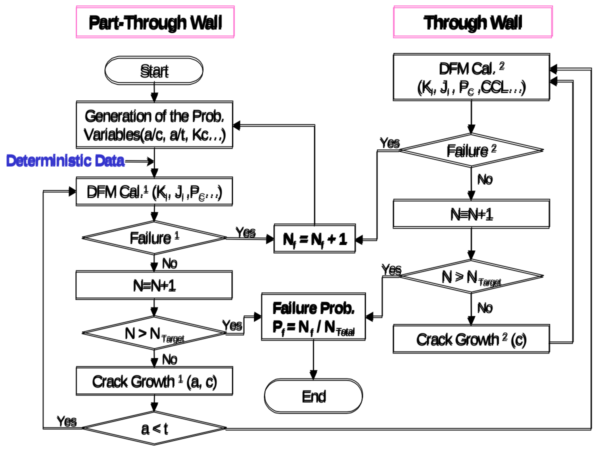


Fig. 2 Flow Chart of the Probabilistic Failure Assessment Program in CANDU Pressure Tubes

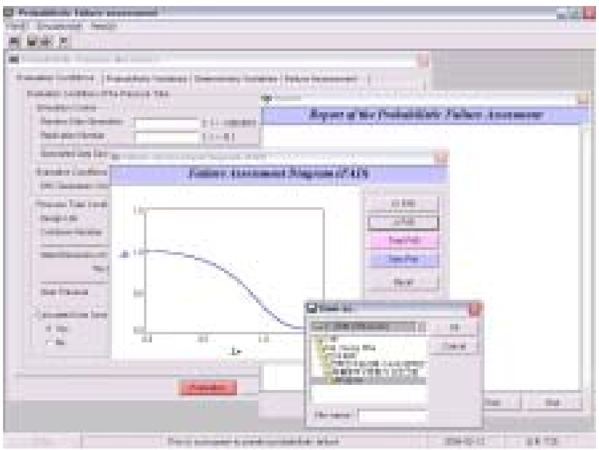


Fig. 3 Windows of the Developed Program to Evaluate the Probabilistic Failure in Pressure Tubes

로그램의 흐름도를 Fig.2에 나타내었다. 확률론적 건전성 평가를 위한 입력정보는 Table 1에 정리하였다. Fig. 2의 절차와 Table 1의 입력조건에 따라 개발된 원자로 압력관의 확률론적 건전성 평가 프로그램을 Fig. 3에 보였다.

3.2 평가변수의 민감도 분석

주요 평가변수로는 시뮬레이션 횟수, 반복횟수, 과도상태발생 횟수, 사용 중 압력관의 형상변화율 등이 있으며, 선택적 평가변수로는 수소화물의 석출기준, 균열성장속도, 결정론적 평가식 등이 있다. 민감도를 분석하기 위해 확률변수로 선정한 변수들의 입력조건을 Table. 2에 정리하였다.[2] 민감도 분석 결과를 Fig. 4~Fig. 8에 도시하였다.

Table 1 Input Information for Developing the Probabilistic Failure Assessment Program

입력 자료	내 용
MCM 자료	- 복계산 횟수 - 수발생 시작점에 따른 반복회수
원자로 운전조건	- 계수명, 과도상태 발생 횟수 - 전 이력
압력관 형상자료	- 께 및 내부반경 - 용중 형상 변화량
평가조건	- 소화물석출기준, TSS, DHC발생온도 - 괴인성(K_I, J_I), 소성붕괴응력 - 동균열기준, 결함파손기준, 결함발생위치
확률변수	- 열 형상 비, 길이 비, 파괴인성치(K_{IC}) - 동응력, 초기수소농도, 결함발생시점

Table. 2 Details of Probabilistic Variables

Prob. Variables	PDF type	Mean	S.T.D	Min.	Max.
Aspect Ratio(a/c)	Exponential	0.12	-	0.1	1.0
Depth Ratio(a/t)	Log-Normal	0.10	0.08	0.01	0.5
Fract. Toughness(Kc)	Log-Normal	67.0	12.0	20.0	120.0
Initial Hydrogen Density (ppm)	Normal	8.30	2.65	5.0	15.5
Flow Stress(MPa)	Normal	1063.3	55.4	600.0	1400.0

Fig. 4는 시뮬레이션 횟수에 따른 파손확률을 비교한 결과이다. 전체 계산횟수가 동일한 경우 파손 발생 시점과 파손확률이 근사한 결과 값을 나타내었다. 그러나 계산횟수가 증가하면 전체적인 누적 파손확률은 감소하고 파손발생시점은 빨라짐을 확인하였다.

Fig. 5는 년 간 과도상태 발생 횟수에 따른 파손확률을 비교한 결과이다. 과도상태 발생 횟수(년 간 1, 3, 5회)가 증가함에 따라 파손 발생 시점이 빨라지며 누적파손 확률은 크게 증가하는 경향을 보였다.

Fig. 6은 수소화물 석출기준에 따른 파손확률을 비교한 결과이다. 결과를 통해 압력관의 파손은 TSSD일 때 빠른 DHC 성장에 의해 파손위험이 높다는 것을 알 수 있다. 또한, TSSP와 TSSD를 개별적으로 적용했을 때의 파손 확률에 비해 동시에 적용했을 때의 파손확률이 높을 뿐 아니라, 개별적인 평가의 파손 확률을 합한 결과보다 높은 누적 파손 확률을 나타내었다. 따라서 압력관의 건전성을 평가하기 위해서는 TSSP와 TSSD를 동시에 고려하여야 할 것으로 판단된다.

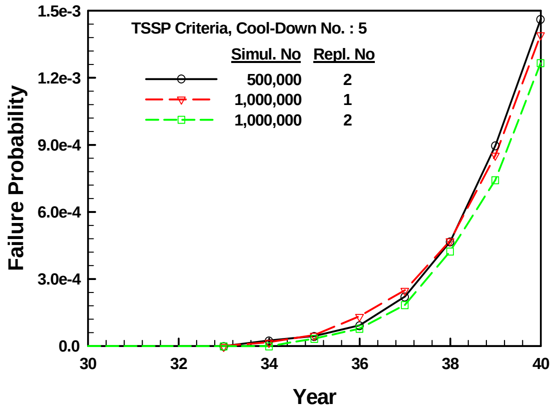


Fig. 4 Comparison of Failure Probability as Total Calculation Number Change

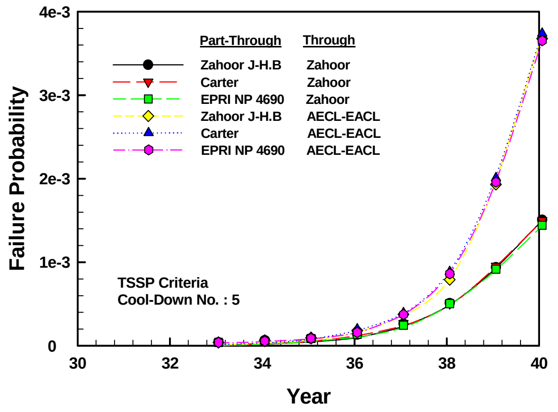


Fig. 7 Comparison of Failure Probability as Through-Wall Criteria

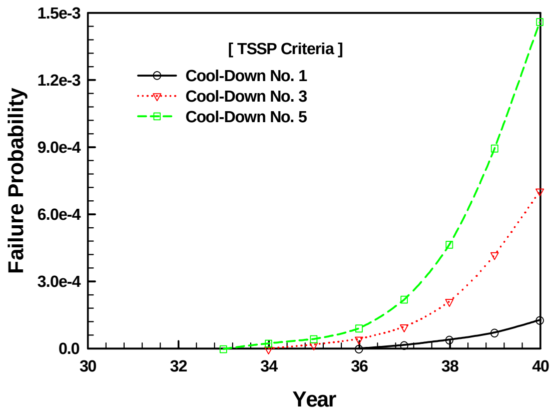


Fig. 5 Comparison of Failure Probability as Cool-Down Number Change

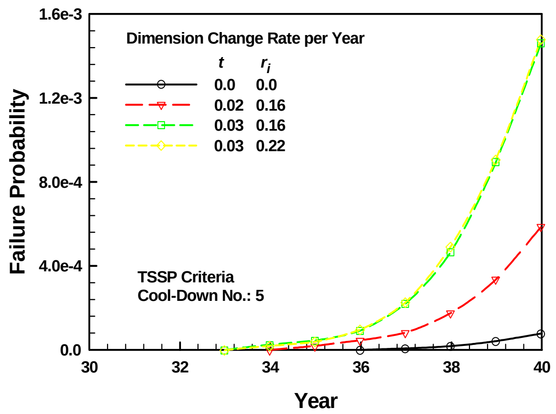


Fig. 8 Comparison of Failure Probability as Dimension Change Rate

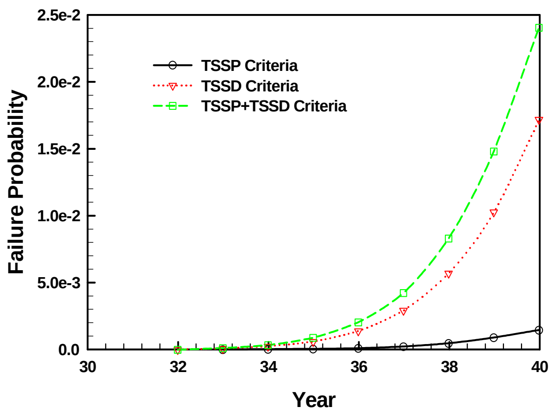


Fig. 6 Comparison of Failure Probability as Criteria of Terminal Solid Solubility

Fig. 7은 소성붕괴 평가 적용식에 따른 파손확률을 비교한 결과를 도시한 것이다. 부분관통균열 평가식에 따른 파손확률의 변화는 거의 나타나지 않았다. 그러나 관통균열 평가식에 따라서는 파손확률이 크게 차이를 나타내었다.

Fig. 8는 압력관의 형상 변화율에 따른 파손확률을 비교한 결과이다. 내부 반경변화율이 파손확률에 미치는 영향은 거의 없었다. 반면 두께 변화율에 따른 파손 확률은 큰 차이를 보였다.

3.3 탄소성 모델의 파손평가 선도

본 연구에서는 선형탄성 파손기준으로 널리 사용되고 있는 K_r-FAD에 의한 보수적 평가를 개선하기 위해서 탄소성 재료거동의 J-적분을 사용하

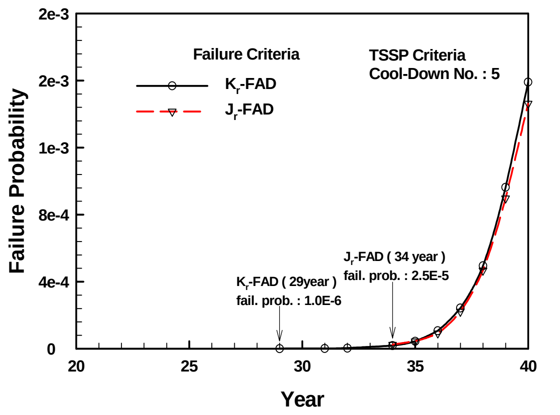


Fig. 10 Comparison of Failure Probability as FAD Criteria for Material Behavior

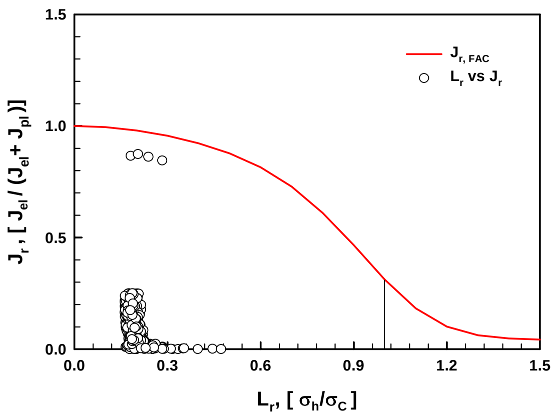


Fig. 11 FAD Result of Fracture Toughness Ratio, J_r Using the EPFM Parameter J-integral

여 파손평가 기준, J_r-FAD를 제안하였다.(5),(6) K_r-FAD에 의한 평가 결과와 비교를 위해 J_r-FAD를 적용했을 때의 파손확률 평가 결과를 Fig. 10에 도시하였다. Fig. 11은 J_r-FAD의 결과이다. Fig. 10에서 J_r-FAD에 의한 파손은 발생하지 않았고, CCL과 소성붕괴에 의한 파손만이 발생하였다. K_r-FAD를 파손기준으로 사용했을 때는 FAD에 의한 파손도 발생하여 J_r-FAD를 파손기준으로 사용했을 때보다 약간 높은 파손확률을 보였다. 이는 K_r-FAD에 의한 보수적인 평가 때문인 것으로 판단된다. 따라서 실제 재료거동에 근접한 탄소성 파손평가 기준인 J_r-FAD를 사용하는 것이 파손을 평가하는데 있어서 보다 정확한 기준으로 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

1. 확률 및 결정론적 입력변수 선정의 최적화를 통한 GUI 환경 모듈을 개발하였다.

2. 입력변수에 따른 파손확률의 민감도를 분석한 결과 과도상태 발생 횟수, 형상변화율, 최종고용도에 의해 파손확률 변화가 뚜렷하게 발생하였다. 반면 확률분포의 최대 · 최소 값은 파손확률에 미치는 영향이 작았다.

3. 기존의 파손평가 기준인 K_r-FAD를 개선한 J_r-FAD를 제안함으로써 압력관의 건전성을 평가하는데 보다 신뢰성 있는 평가기준을 제시하였다.

후 기

본 논문은 과기부 원자력연구개발 중·장기계획 사업인 "경년 열화 손상관리 적용 기술 개발" 과제의 "압력관의 사용중 손상 및 구조건전성 관리 기술 개발" 의 연구비 지원에 의해 이루어진 연구 결과이며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

(1) "Numerical recipes in C++," the art of scientific computing second edition, Cambridge Univ. Press

(2) Kwak, S. L., 1999, "A Study on the Integrity Assessment of CANDU Pressure Tube Using Probabilistic Fracture Mechanics," Ph. D. Thesis, Department of Mech. Eng., Sung Kyun Kwan Univ.

(3) AECL EACL., 1996., "Fitness for Service Guidelines for Zirconium alloy Pressure Tubes in Operating CANDU Reactors," Revision.1, COG-91-66.

(4) Zahoor, A., 1990 "Ductile Fracture Handbook," EPRI Report, Vol.2~3.

(5) Huang, W. L and Tan, J. Z., 1995, "Failure Assessment Diagram(FAD) for I-II mixed-mode crack structures under biaxial loading," Int. J. Pres. Ves. & Piping, Vol.69, pp.53~58.

(6) Wang, B., Hu, N., Kurobane, Y., Makino, Y. and Lie, S. T., 2000, "Damage Criterion and Safety Assessment Approach to Tubular Joint," Eng. Struct., Vol.22, pp.424~434.