

확률론적 파괴역학을 이용한 압력관의 건전성 평가 모듈 개발

마영화 · 오동준* · 정일석** · 윤기봉***

중앙대학교 대학원,*안동대학교,**전력연구원,***중앙대학교

1. 서 론

현재 운영중인 중수로 원자력 발전소 1차 계통의 압력경계 부품인 중수로 압력관(CANDU pressure tubes)은 고온 인발과 냉간 성형을 거친 Zr-2.5Nb 합금으로 제작되어 있다. 또한 원자로 코어 내에 설치되어 관 내부에 연료 집합체와 냉각재인 중수를 포함하고 있다. 이로 인해 압력관의 내부에는 중성자 조사와 수소화물의 석출 등에 의한 수소지체균열(DHC)이 발생하고 성장하여 파손에 이르게 된다. 압력관의 파손을 예측하고 건정성을 확보하기 위해서는 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 건정성 평가 절차의 개발이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 이를 위해 확률론적 파괴역학을 이용하여 압력관의 건정성을 평가할 수 있는 절차를 개발하였다.

2. 이 론

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⁾

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

a, c, m 은 균일분포함수 형태를 갖는 난수를 생성하는데 사용되는 선형 합동적 난수 생성자이다.⁽¹⁾($a = 7^5, c = 0, m = (2^{31}-1)$) 균일분포함수 식(1)을 사용하여 생성된 난수는 식(2)와 식(5)에 대입하여 각각 표준정규분포함수와 지수분포함수로 가공된다. 또한, 표준정규분포함수 식(2)는 식(3)과 식(4)에 의해 각각 정규분포함수와 대수정규분포함수로 가공된다.^{(1),(2)}

$$V_1 = \sqrt{-2 \ln U_1} \cos(2\pi U_2), \quad V_2 = \sqrt{-2 \ln U_1} \sin(2\pi U_2) \quad (2)$$

$$u_i = \mu + \sigma V_i \quad (3)$$

$$u_i' = \text{Exp} \left[\left\{ \ln \mu - \frac{1}{2} \ln \left(\left(\frac{\sigma}{\mu} \right)^2 + 1 \right) \right\} + \left\{ \left\{ \ln \left(\left(\frac{\sigma}{\mu} \right)^2 + 1 \right) \right\}^{1/2} \right\} V_i \right] \quad (4)$$

$$(u_e)_i = -\mu \ln(U_i) \quad (5)$$

σ 는 표준편차, μ 는 평균이다.

2.2 확률론적 건전성 평가를 위한 변수

2.2.1 최종고용도(terminal solid solubility, TSS)

TSS는 주어진 온도에서 수소의 고용한계가 초과되고 수소화물이 응결될 수 있는 상태에서의 수소 집중으로 정의된다. 냉각시 수소화물이 석출되는 최대농도(terminal solid solubility for hydride precipitation, TSSP)는 식(6)으로 정의 되고, 가열시 수소화물이 용해되는 최대농도(terminal solid solubility for hydride dissolving, TSSD)는 식(7)로 계산된다.

$$(C_s)_{TSSP} = 4.11 \times 10^4 \text{Exp}(-28000/RT) \quad (6)$$

$$(C_s)_{TSSD} = 8.19 \times 10^4 \text{Exp}(-34500/RT) \quad (7)$$

R 은 기체상수(8.314 J/mol), T 는 절대온도이다.

2.2.2 파괴인성(fracture toughness), K_c

파괴 인성치는 H_{eq} 가 35ppm 이상일 때는 온도만의 함수로 정의되며, 식(8)로 표현된다. 본 연구에서는 확률변수로 결정하였다.

$$K_c = 26.3 + 0.022T \quad (8)$$

2.2.3 DHC에 의한 아임계 균열성장

DHC의 하계 응력집중계수, K_{IH} 는 온도 의존도가 낮고, 중성자조사가 $1 \times 10^{24} \text{n/m}^2$ ($>1\text{MeV}$) 이상일 때는 조사량에 대한 의존도도 낮다. 균열이 발생하고 성장하기 위해서는 K_I 이 K_{IH} 보다 커야 한다. K_{IH} 는 반경방향에 대해 $4.5\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, 원주방향에 대해 $15\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 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(9)로 계산된다.^{(2),(3)}

$$H_{eq} = H + \frac{1}{2}D \quad (9)$$

H 는 초기수소농도이고 확률분포함수로 얻어지며, D 는 중수소 흡수율로써 데이터 부족으로 결정론적인 값, 1.2ppm/year을 사용하였다.⁽²⁾

균열이 성장할 수 있는 최대 온도, T(TSS)는 H_{eq} 를 2.2.1절의 최종고용도식에 대입하여 결정된다. 균열 성장량 평가방법에는 균열성장속도를 수치 적분하는 방법과 식(10)과 같이 분할해서 계산하는 방법이 있다.⁽³⁾ 본 연구에서는 계산이 용이한 후자를 선택하였다.

$$2\Delta c = 2 \sum_{j=1}^N DHCV(T_j) \cdot \Delta t \quad (10)$$

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

$2\Delta c$ 는 축방향 균열성장량, $DHCV$ 는 DHC성장속도이다. $DHCV$ 는 조사(fluence)의 영향을 받지만 온도에 대한 의존도가 훨씬 크기 때문에 온도만의 함수로 단순화하여 다음 식(11)~(14)로 정의할 수 있다.⁽³⁾

$$\text{입구} \left[\begin{array}{l} \log_{10} V = 0.51 - \frac{4084}{T} + \frac{250200}{T^2} \quad [95\% \text{상계}] \quad (11) \\ \log_{10} V = -0.97 - \frac{2965}{T} \quad [\text{평균}] \quad (12) \end{array} \right.$$

$$\text{출구} \left[\begin{array}{l} \log_{10} V = -2.61 - \frac{2244}{T} + \frac{102400}{T^2} \quad [95\% \text{상계}] \quad (13) \\ \log_{10} V = -3.75 - \frac{1770}{T} \quad [\text{평균}] \quad (14) \end{array} \right.$$

V 는 속도이고 단위는 m/sec^2 , T 절대온도이다.

2.3 파손 기준(failure criteria)

2.3.1 임계균열길이(critical crack length, CCL)

임계균열길이는 식(15)로부터 계산된다.

$$CCL = \frac{2K_{IC}^2 \pi}{8\sigma_f^2 \ln \left[\sec \left(\frac{\pi M \sigma_h}{2\sigma_f} \right) \right]} \quad (15)$$

$$M = [1 + 1.255\lambda^2 - 0.0135\lambda^4]^{\frac{1}{2}}, \quad \lambda = c^2 / (r_m t) \quad (16)$$

c 는 임계균열길이의 1/2, K_{IC} 는 임계응력집중계수, σ_f 는 유동응력, σ_h 는 원주응력(관통균열의 경우 $\sigma_h = Pr_m/t + P$), M 은 별정 계수, r_m 은 평균 반경, t 는 두께이다.

적용 범위는 $\sigma_h \leq 0.7\sigma_f / M$ 이고, $\sigma_h > 0.7\sigma_f / M$ 이면 소성붕괴가 발생한다.

2.3.2 파손평가선도(Failure Assessment Diagram, FAD)

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 FAD가 개발되었다. 재료가 선형탄성 모델인 경우 FAD는 식(17)에 의해 결정되고, $K_r \geq K_{r,FAC}$ 이면 파손이 발생한다. 탄소성인 경우, 압력관이 수소 집중에 의한 취성파괴가 주로 발생하기 때문에 선형탄성 파손기준을 이용하여 식(19)의 탄소성 파손기준을 정의 하였다.

$$K_{r,FAC} = \left[1 + \frac{L_r^2}{2} \right]^{0.5} \cdot [0.3 + 0.7 \text{Exp}(-0.6L_r^6)] \quad (17)$$

$$L_r = \sigma_a / \sigma_c, \quad K_r = K_l / K_{IC} \quad (18)$$

$$J_{r,FAC} = [K_{r,FAC}]^2 = \left[1 + \frac{L_r^2}{2} \right]^{-1} \{ 0.3 + 0.7 \exp(-0.6L_r^6) \}^2 \quad (19)$$

탄소성 재료거동의 경우 $J_r \geq J_{r,FAC}$ 일 때 파손이 발생한다.

3. 확률론적 파손확률 평가 모듈 개발

확률론적 건전성 평가 모듈을 개발하기 위한 입력변수와 흐름도를 각각 Table 1과 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1의 절차와 Table 1의 입력조건에 따라 개발된 원자로 압력관의 확률론적 건전성 평가 프로그램을 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다. 프로그램은 메인창과 사용자 입력창, 결과 출력 및 저장창으로 구성되어 있다. 사용자 입력창은 4개의 탭 화면으로 구성되어 있으며, 시뮬레이션 조건, 확률변수, 결정론적 변수, 평가조건 선택에 있어 사용자가 직접 입력 및 선택할 수 있도록 하였다.

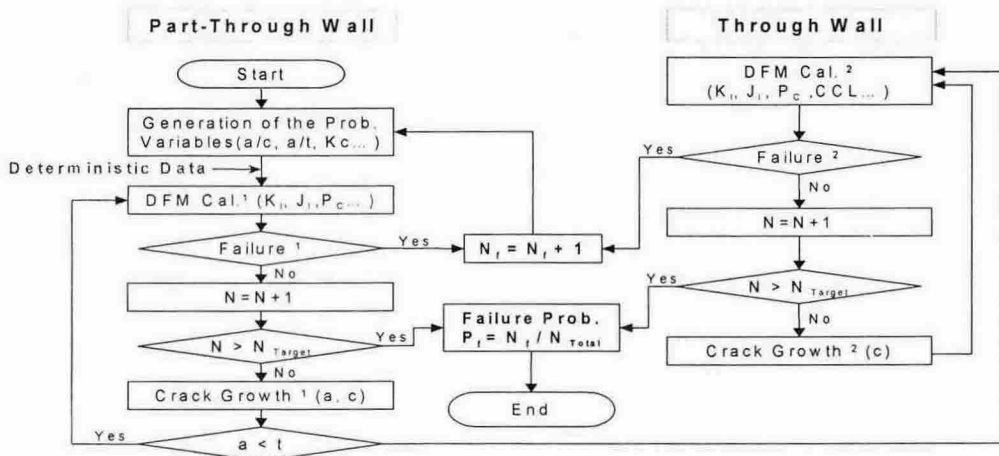


Fig. 1 Flow Chart of the Probabilistic Failure Assessment Program in CANDU Pressure Tubes

Table 1 Input Information for Developing the Probabilistic Failure Assessment Program

입력 자료	내용
MCM 자료	반복계산 횟수, 난수발생 시작점에 따른 반복횟수
원자로 운전조건	설계수명, 과도상태 발생 횟수, 운전 이력
압력관 형상자료	두께 및 내부반경, 사용중 형상 변화량
평가조건	수소화물석출기준, TSS, DHC 발생온도, 파괴인성, 소성붕괴응력, 관통균열기준, 결함파손기준, 결함발생위치
확률변수	균열형상비 및 깊이비, 파괴인성치, 유동응력, 초기수소농도, 결함발생시점

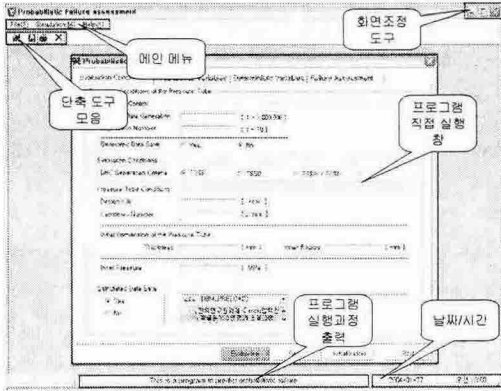


Fig. 2 Main Windows of the Developed Program

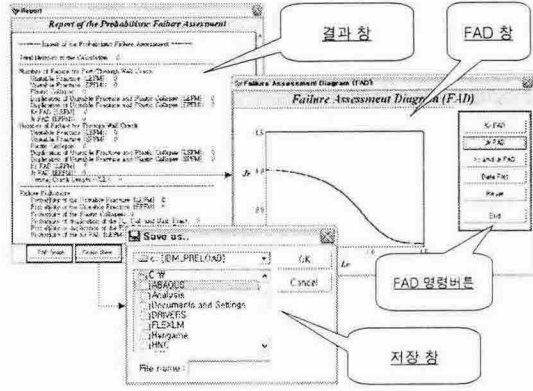


Fig. 3 Sub-Windows for Output and Save

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

4. 파손확률평가

개발된 파손평가 모듈을 사용하여 압력관의 파손확률을 평가하기에 앞서 난수발생 횟수와 난수 발생 시점을 달리한 반복 계산에 따른 민감도를 분석하였다. 분석 결과를 Fig. 4에 도시하였다. 전체 계산횟수가 동일한 경우 파손 발생 시점과 파손확률이 근사한 결과 값을 나타내었다. 그러나 계산횟수가 증가하면 전체적인 누적 파손확률은 감소

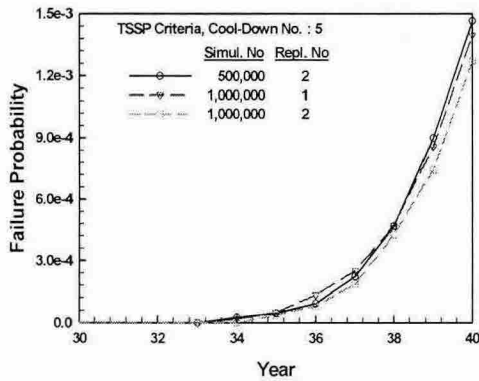


Fig. 4 Comparison of Failure Probability as Total Calculation Number Change

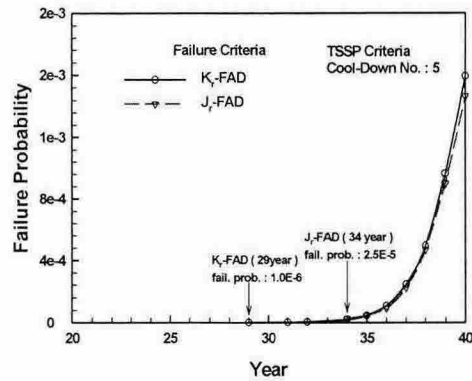


Fig. 5 Comparison of Failure Probability as FAD Criteria for Material Behavior

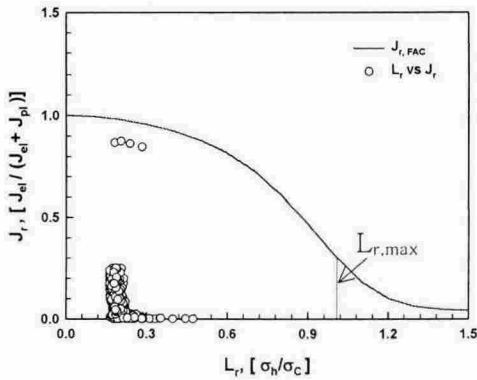


Fig. 6 Failure Assessment Diagram(FAD) Using the EPFM Parameter J-integral

결과 그래프의 하단부에서 균열이 성장함에 따라 하중비는 증가하는 반면 J_r 은 감소하는 경향을 보였다. 이는 균열이 성장하면서 균열선단 주위에 소성영역이 탄성영역 보다 크게 발달되기 때문이다. 위쪽에 분포하는 데이터는 관통균열이 발생하는 시점에서 구속조건이 제거됨에 따라 J-적분 값이 작아지고 상대적으로 탄성부분의 값은 증가하여 높은 J_r 값을 보였다.

4. 결론

1. 압력관의 건정성 평가를 위한 확률론적 평가 모듈을 개발하였다.
2. 기존의 불안정균열성장예에 의한 파손평가 기준인 K_r -FAD를 개선한 J_r -FAD를 제안하였다.
3. 확률론적 파손확률평가 결과 K_r -FAD 기준을 적용한 경우에 비해 J_r -FAD를 적용한 경우가 파손확률이 낮게 나타남을 확인하였다.

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.

하고 파손발생시점은 빨라짐을 확인하였다.

본 연구에서 제안한 개선된 파손기준, J_r -FAD와 기존의 파손기준, K_r -FAD에 의한 파손확률평가 결과를 비교하기 위해 결과를 Fig. 5에 도시하였다. Fig. 5에서 J_r -FAD 기준을 적용한 경우 CCL과 소성붕괴에 의한 파손만이 발생하였다. K_r -FAD를 파손기준으로 사용했을 때는 FAD 기준에 의한 파손도 발생하여 J_r -FAD를 파손기준으로 사용했을 때보다 높은 파손확률을 보였다.

Fig. 6은 난수발생횟수를 1000회로 하여 해석한 결과를 J_r -FAD상에 도시한 것이다.