

확률론적 파괴역학 기법을 이용한 압력관의 파손확률 평가

손종동[†] · 오동준^{*}

동명대학교 기계공학과 · *안동대학교 기계교육학과
(2007. 6. 18. 접수 / 2007. 8. 10. 채택)

Failure Probability Evaluation of Pressure Tube using the Probabilistic Fracture Mechanics

Jong-Dong Son[†] · Dong Joon Oh^{*}

Department of Mechanical Engineering, Tong Myoung University

*Department of Mechanical Engineering Education, An-Dong National University

(Received June 18, 2007 / Accepted August 10, 2007)

Abstract : In order to evaluate the integrity of Zr-2.5Nb pressure tubes, probabilistic fracture mechanics(PFM) approach was employed. Failure assessment diagram(FAD), plastic collapses, and critical crack lengths(CCL) were used for evaluating the failure probability as failure criteria. The Kr-FAD as failure assessment diagram was used because fracture of pressure tubes occurred in brittle manner due to hydrogen embrittlement of material by deuterium fluence. The probabilistic integrity evaluation observed AECL procedures and used fracture toughness parameters of EPRI and recently announced theory. In conclusion, the probabilistic approach using the Kr-FAD made it possible to determine major failure criterion in the pressure tube integrity evaluation.

Key Words : probabilistic fracture mechanics(PFM), failure probability, failure assessment diagram(FAD), Kr-FAD, pressure tube, hydrogen embrittlement

1. 서 론

기기 건전성 평가를 위한 결정론적 파괴역학 방법은 1970년대 초반까지 연구의 주류를 이루었다. 이는 개념적으로 건전성평가에 대한 파손/비파손의 이분법적인 구분이 가능하기 때문에 적용이 쉽고 대체적으로 잘 맞기 때문에 현재까지도 널리 사용되어지고 있다. 하지만 검사 대상이나 검사 부위, 검사 주기를 결정함에 있어서 정량적인 근거는 제시할 수 없기 때문에 막대한 검사비용과 장시간의 검사시간이 소모되는 결과를 초래하기도 한다. 또한 평가에 필요한 재료물성의 하한값을 사용하는 안전율 개념을 도입하고 있기 때문에 어떤 통계학적인 데이터로써 존재하는 재료거동 특성을 현실적으로 반영하지 못해 효율적인 유지·보수와 관리에 어려움이 있다. 이러한 문제점과 어려움을 해결하기 위

해 1970년대 중반부터 확률론적 파괴역학 개념을 도입한 원자로의 안전성에 대한 건전성 평가 연구가 시작되었다. 현재에는 연구 대상이 압력용기, 배관, 증기발생기 등으로 확대되어 활발한 연구가 진행 중에 있으며, 각종 파손확률 계산 코드도 개발되어 있다. 국내의 경우는 1990년대 중반부터 일부 연구팀에 의해서 연구가 진행되고 있다¹⁾.

확률론적 파괴역학 개념을 도입한 건전성 평가 방법은 평가 대상 기기에 대해 파손확률을 정량적인 수치 데이터로 나타내 줄 수 있을 뿐 아니라, 설계 시에나 운전 중에도 파손확률을 정량적으로 평가하여 안전 유무를 판단하고 적절한 검사주기를 결정할 수 있게 해준다. 또한 파손에 영향을 미치는 주요 변수를 결정하여 사용수명의 연장을 가능하게 해주는 장점을 갖고 있다.

본 연구에서는 세계적인 추세의 확률론적 파괴역학 개념을 도입한 기기 건전성 평가기법을 국내 원자로 압력관에 적용하였다. 확률론적 평가 기법은 크게 응력-강도 간섭 방법, 2차 모멘트 방법, 몬테카

[†] To whom correspondence should be addressed.
djs5@tu.ac.kr

를로 시뮬레이션 방법이 있으나, 본 연구에서는 일반적으로 가장 널리 사용되고 있는 몬테카를로 시뮬레이션 방법(Monte Carlo simulation method)을 사용하였다. 확률 변수와 각 변수들의 확률분포함수 형태는 수집된 문헌의 데이터를 사용하여 결정하였다. 이를 기반으로 선정된 확률변수들을 사용하여 사례해석을 수행하였다. 파손기준으로는 선형탄성 파손평가 기준인 Kr-FAD를 사용하였다.

2. 확률분포함수

확률론적 건전성 평가는 결정론적 파손평가 절차에 필요한 재료물성, 균열형상 및 크기 그리고 균열발생 시점 등의 변수를 난수로 가정한다. 각각의 변수들에 대해 분산을 반영한 통계학적 파손빈도를 계산한 후 파손확률을 예측하는 것이다. 통계학적으로 사용되는 대표적인 방법이 몬테카를로 시뮬레이션이다. 난수 생성 및 분산을 고려한 확률분포함수들은 다음 수식들에 의해 결정된다.

균일한 분포형태를 갖는 확률변수의 난수 생성은 Park & Mille에 의해 제안된 식 (1)을 이용한다²⁾.

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

a, c, m 은 선형합동적 난수 생성자이며, $a=75, c=0, m=(2^{31}-1)$ 의 값을 갖는다¹⁾. 식 (1)을 사용해서 생성된 난수는 식 (2)~(6)을 사용하여 확률변수들에 대해 각각의 확률분포함수의 형태로 가공된다^{1,2)}.

· 표준정규분포함수:

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

$$V_2 = \sqrt{-2\ln U_1} \sin(2\pi U_2) \quad (3)$$

· 정규분포함수: $u_i = \mu + \sigma V_i$ (4)

· 대수정규분포함수:

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

· 지수분포함수: $(u_e)_i = -\mu \ln(U_i)$ (6)

여기서, σ 는 표준편차, μ 는 평균이다.

3. 파괴역학변수와 기계적 물성

3.1. 한계응력집중계수, K_{IH}

K_{IH} 는 지체수소균열(delayed hydride cracking, DHC)에서의 응력집중계수이며, 온도 의존도가 낮고 증성자조사량이 $1 \times 10^{24} \text{ n/m}^2 (> 1 \text{ MeV})$ 이상일 때는 조사량에 대한 의존도도 낮다. K_{IH} 는 압력관에서 반경방향에 대해 $4.5 \text{ MPa} \sqrt{m}$, 원주방향에 대해 $15 \text{ MPa} \sqrt{m}$ 이다¹⁾.

3.2. 최종고용도

최종고용도(terminal solid solubility, TSS)는 주어진 온도에서 수소의 고용한계가 초과되고 수소화물이 응결될 수 있는 상태에서의 수소농도(hydrogen concentration)이다. 식 (7)은 평균 최종고용도 평가식이다¹⁾. 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)과 (9)로 표현된다²⁾.

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

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

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

여기서 R 은 기체상수, T 는 절대온도이다.

3.3. 상당수소농도, H_{eq}

상당수소농도, H_{eq} 는 식 (10)을 사용하여 계산할 수 있다. 계산된 결과 값은 TSS와 비교하여 균열의 성장 및 발생 여부를 결정한다. H_{eq} 값이 TSS보다 클 때 균열이 발생 및 성장한다¹⁾.

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

H 는 초기수소농도이고 확률분포함수로 얻어지며, D 는 중수소 흡수율로써 데이터 부족으로 본 연구에서는 결정론적인 값, 1.2ppm/year을 사용하였다¹⁾.

3.4. 인장 기계적 물성

증성자 조사량이 $1 \times 10^{24} \text{ n/m}^2 (> 1 \text{ MeV})$ 이상인 조사재료에 대해 결정론적 평가에 사용되는 항복강도와 인장강도는 온도만의 함수로써 표현될 수 있

다¹⁾. 그러나 파괴역학변수를 계산할 때 온도변화에 따른 연속적인 계산이 복잡하고 장시간의 계산시간이 소요되므로 이를 단순화하기 위해 압력관이 가장 취약해지는 조건 즉, 최대 압력과 최대 온도에 도달했을 때의 조건을 평가 조건으로 하였다. 따라서 항복강도와 인장강도의 평균값으로 정의 되는 유동 응력 σ_f 는 본 연구에서 고온(300°C)에서의 인장 물성을 확률분포함수로 결정하였다¹⁾. 항복강도는 결정론적인 값 957MPa를 사용하였다.

4. 확률론적 파손평가 절차

4.1. 아임계 균열성장량 평가

균열성장량은 결정론적 방법과 확률론적 방법을 결합하여 평가하였다. 즉, 초기 균열길이 및 깊이는 확률분포함수로 결정하였고, 균열성장량 계산은 결정론적 방법을 사용하였다. DHC에 의한 아임계균열 성장 평가 절차를 Fig. 1에 나타내었다. 균열성장량 평가의 첫 번째 단계는 Fig. 1(a)의 압력-시간 곡선에서 K_I 이 K_{IH} 보다 클 때의 압력, $P(K_{IH})$ 를 계산하여 이때의 시간, t_a 와 t_b 를 결정한다. 두 번째 단계는 결정된 t_a 와 t_b 를 Fig. 1(b)의 온도-시간 곡선에 적용하여 균열성장이 발생할 수 있는 최저온도, T_a 와 T_b 를 결정한다. 균열이 발생하고 성장하기 위한 최대 온도, $T(TSS)$ 는 식 (7)~(9)의 최종고용도식으로 계산된다. 위 두 단계에 의해 결정된 균열이 발생 및 성장하는 온도 범위에서 균열 성장량을 평가하는 방법은 균열성장속도를 수치 적분하는 방법과 Fig. 1(c)와 같이 분할해서 계산하는 방법이 있다¹⁾. 본 연구에서는 계산이 용이한 후자를 선택하였으며, 계산식을 식 (11)에 나타내었다.

$$2\Delta c = 2 \sum_{j=1}^N V(T_j) \Delta t \quad (11)$$

$$\Delta t = \frac{(t_b - t_a)}{N} \quad (12)$$

$2\Delta c$ 는 축방향 균열성장량, $V(T_j)$ 는 DHC성장속도이다. 이때 $V(T_j)$ 는 조사의 영향을 받지만 온도에 대한 의존도가 훨씬 크기 때문에 온도만의 함수로 단순화하여 식 (13)~(16)으로 정의할 수 있다¹⁾. 식 (13)과 (14)는 각각 압력관 입구쪽에서의 95% 상계 속도식과 평균속도식이고, 식 (15)와 (16)은 각각 출구쪽 95% 상계 및 평균속도식이다.

$$\log_{10} V = 0.51 - \frac{4048}{T} + \frac{250200}{T^2} \quad (13)$$

$$\log_{10} V = -0.97 - \frac{2965}{T} \quad (14)$$

$$\log_{10} V = -2.61 - \frac{2244}{T} + \frac{102400}{T^2} \quad (15)$$

$$\log_{10} V = -3.75 - \frac{1770}{T} \quad (16)$$

여기서 $V(T_j)$ 의 단위는 m/sec^2 이다.

4.2. 파손 기준

4.2.1. 임계균열길이

임계균열길이(critical crack length, CCL)는 식 (17)로부터 계산된다¹⁾.

$$CCL = \frac{2K_r^2 \pi}{8\sigma_f^2 \ln \left[\sec \left(\frac{\pi M \sigma_n}{2\sigma_f} \right) \right]} \quad (17)$$

$$M = [1 + 1.255\lambda^2 - 0.0135\lambda^4]^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

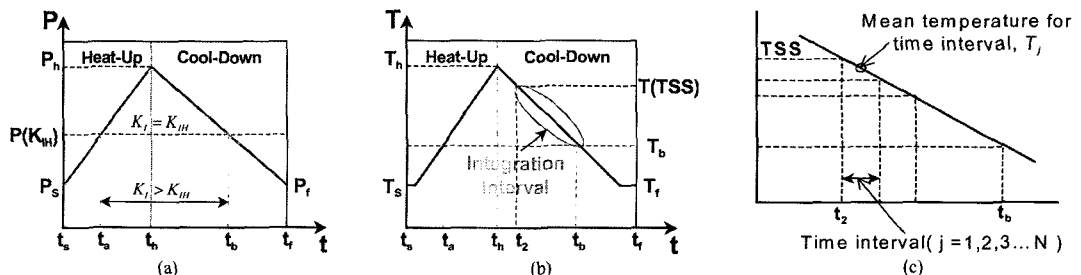


Fig. 1. Determination of the DHC Crack Growth by Sectioning of Typical Cool-Down Curve (a) Time Interval for $K_I \geq K_{IH}$, (b) Time Interval for Integrating the DHC Crack Growth, (c) Illustration of Sectioning.

$$\lambda = \frac{c^2}{r_m t} \quad (19)$$

σ_f 는 유동응력, σ_h 는 원주응력, M 은 벌징 계수, r_m 은 평균반경, t 는 두께, c 는 축방향 균열길이이다. 적용 범위는 $\sigma_h \leq 0.7\sigma_f/M$ 이다¹⁾.

4.2.2. 파손평가선도

파손평가선도(failure assessment diagram, FAD)는 선형탄성 파손평가 기준식 식 (20)을 사용한다^{1,4,5)}.

$$K_{r,FAC} = \left(1 + \frac{L_r^2}{2}\right)^{-\frac{1}{2}} \{0.3 + 0.7\exp(-0.6L_r^6)\} \quad (20)$$

여기서 $L_r = \sigma_a/\sigma_c$ 이다. 이때 σ_c 는 소성붕괴 응력이며, σ_a 는 적용응력으로 내압에 의한 원주응력 σ_h 와 같다. 파손은 $K_r \geq K_{r,FAC}$ 또는 $L_r \geq 1.0$ 일 때 발생한다.

4.3. 파손확률 평가 절차

확률론적 건전성 평가를 위한 입력변수와 흐름도를 각각 Table 1과 Fig. 2에 나타내었다. 확률변수로 선정된 변수는 Table 2에 정리하였다. 확률변수의 입력 값들은 문헌을 따랐다¹⁾. Fig. 2는 내부 표면균열로부터 관통균열로 성장하여 임계균열에 이르기까지의 전 과정에 대해서 연속적으로 파손확률에 대해 평가하는 절차를 보여준다.

Table 1. Input Information of Probabilistic Failure Assessment

입력 자료	내용
MCM자료	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, 결합파손기준, 결합발생위치
확률변수	균열형상비 및 깊이비, 파괴인성치, 유동응력, 초기수소농도, 결합발생시점

Table 2. Details of Probabilistic Variables

Prob. Variables	PDF type	Mean	STD	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	1400

파손확률평가를 위한 이론적 계산식은 균열의 관통여부에 따라 적합한 평가식을 적용해야 한다. 본 연구에서는 평가 대상 구조물의 적용성을 다양화하기 위해 최근까지 발표되고 검증된 파괴역학 이론식들을 적용했을 경우 평가 결과를 상호 비교하였다. 부분관통균열의 경우에 대해 소성붕괴 평가는 Carter와 Eiber식^{1,3)}, 불안정균열성장 평가는 Zahoor와 Scott Thorpe의 K-해^{1,3)}를 사용한 결과를 비교하였다. 관통균열인 경우에 소성붕괴 평가는 Zahoor와 AECL-EACL 식, 불안정균열성장 평가는 Tada, Zahoor, AECL-

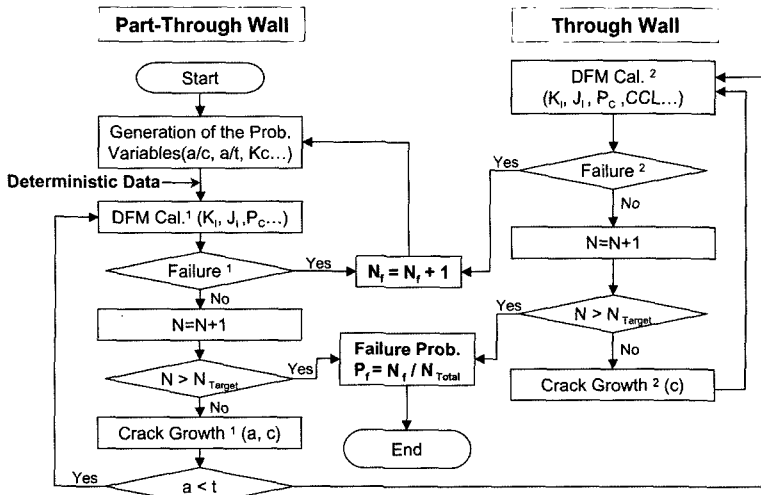


Fig. 2. Flow Chart of the Probabilistic Failure Assessment Program in CANDU Pressure Tubes.

EACL의 K-해^{1,3)}를 비교하였다.

5. 확률론적 파손평가 사례 해석

5.1. 평가식 적용 사례

Fig. 3은 소성붕괴 평가식에 따른 누적파손확률을 비교하여 도시한 결과이다. 이때 기동정지 횟수는 5회로 하였다. 또한 냉각시 수소화물의 석출 농도가 가열시 보다 높고 이로 인해 균열의 발생 및 성장 가능성이 높기 때문에 고용도 평가는 식 (8)을 사용하였다. 평가절차는 Fig. 2를 따랐다. Fig. 3의 결과로부터 부분관통균열 평가식에 따른 파손확률의 차이는 거의 없음을 알 수 있다. 하지만 관통균열 평가식에 따라서는 Zahoor와 AECL-EACL에서 제시하고 있는 식의 적용 결과가 큰 차이를 보였다. AECL-EACL에서 제안하고 있는 평가식을 사용한 결과가 누적파손확률이 높게 평가되었다. 원자로 압력관의 경우에 소성붕괴 평가는 AECL-EACL 식을 사용하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 왜냐하면 이 평가식은 원자로 압력관의 파손을 예측하기 위한 목적으로 개발된 평가식이기 때문이다. 또한, 원자로 압력관의 경우 높은 안전율 즉, 10^{-6} 보다 낮은 파손확률을 가져야 하므로⁶⁾ 보수적인 평가가 오히려 유리하기 때문이다.

5.2. 사례 해석

Kr-FAD에 의한 파손확률 예측 결과를 Fig. 4에 도시하였다. 평가 대상은 국내 W원자로 압력관이며, 입력 값과 평가 조건들은 참고문헌을 따랐다¹⁾. Fig. 4에 보인 결과를 통해 균열성장에 의한 파손 발

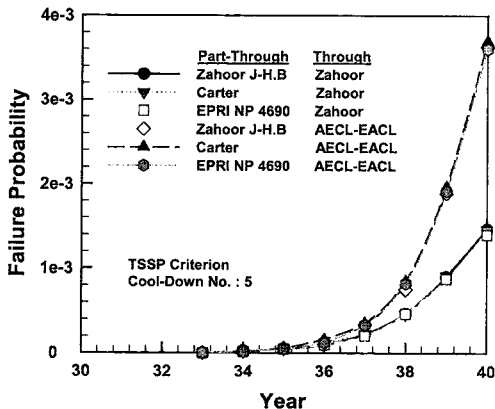


Fig. 3. Comparison of Failure Probability as Through-Wall Criteria.

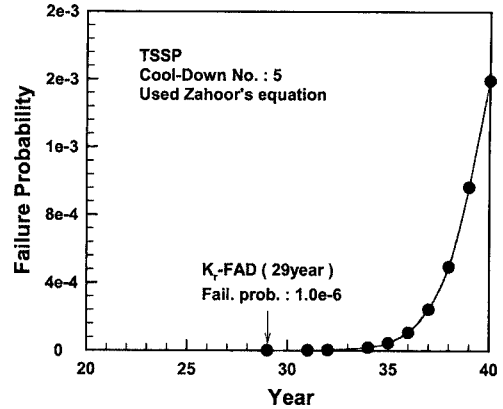


Fig. 4. Failure Probability as FAD Criteria for Material Behavior.

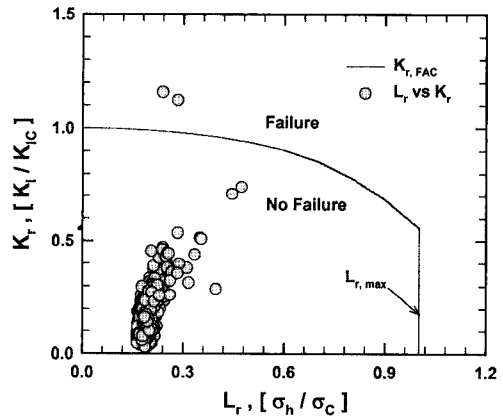


Fig. 5. Failure Assessment Diagram(FAD) Using the LEMF Parameter K_r .

생을 확인할 수 있다. 또한, 파손발생 시점은 약 29년부터 시작하였다. Fig. 5는 Fig. 4의 결과 데이터 중 1000개를 무작위로 추출하여 Kr-FAD상에 도시한 것이다. Kr-FAD의 곡선 안쪽에 위치한 데이터들은 파손이 발생하지 않음을 보여준다. 반면 곡선의 바깥쪽에 위치한 데이터들은 파손이 발생하였음을 나타낸다. FAD를 통해 나타난 Kr값들의 분포는 압력관의 경우 소성붕괴용력 기준 ($L_r \geq 1.0$)에 의한 파손보다는 Kr-FAD 곡선 기준 ($K_r \geq K_{r,FAC}$)에 의해 파손이 발생한다는 것을 보여준다. 결국 파괴인성이 파손평가의 기준임을 알 수 있다.

4. 결론

1) 압력관의 건전성 평가를 위한 확률론적 파괴역학 기법을 도입하였다. 또한, 최근까지 발표되고 검

증된 파괴역학 이론식들을 적용했을 경우 평가 결과를 상호 비교하였다. 결과로부터 부분관통균열 평가식에 따른 파손확률의 차이는 거의 없었다. 하지만 관통균열 평가식에 따라서는 AECL-EACL에서 제안하고 있는 평가식을 사용한 결과가 Zahoor 식을 사용한 결과에 비해 누적파손확률이 높게 평가되었다.

2) 사례해석을 통해 파손평가선도(failure assessment diagram, FAD)에 나타난 K_r 값들의 분포는 원자로 압력관의 경우 소성붕괴응력 기준 ($L_r \geq 1.0$)보다는 K_r -FAD 곡선 기준($K_r \geq K_{r,FAC}$)에 의해 파손이 발생할 수 있었다. 즉, 파괴인성이 파손평가 시의 주요 기준임을 확인하였다.

참고문헌

- 1) Kwak, S. L., "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., 1999.
- 2) "Numerical recipes in C++", the art of scientific computing second edition, Cambridge Univ. Press.
- 3) Zahoor, A., "Ductile Fracture Handbook", EPRI Report, Vol. 2~3, 1990.
- 4) Huang, W. L and Tan, J. Z., "Failure Assessment Diagram(FAD) for I-II mixed-mode crack structures under biaxial loading", Int. J. Pres. Ves. & Piping, Vol. 69, pp. 53~58, 1995.
- 5) Wang, B., Hu, N., Kurobane, Y., Makino, Y. and Lie, S. T., "Damage Criterion and Safety Assessment Approach to Tubular Joint", Eng. Struct., Vol. 22, pp. 424~434, 2000.
- 6) KINS/HR-254, "Development of Probabilistic Evaluation Methodology for Structural Integrity of Nuclear Components," 1999.