

압력관의 확률론적평가에 타당한 파손평가선도 작성에 관한 연구

곽상록[†] · 왕종배* · 최영환** · 박윤원**

A Study on FAD Development for Probabilistic Pressure Tube Integrity Assessment

Sang-log Kwak, Jong-bae Wang, Young-hwan Choi and Youn-won Park

Key Words : FAD(파손평가선도), Monte Carlo Simulation(몬테카를로 시뮬레이션), Plastic Collapse(소성붕괴), Probabilistic Integrity Assessment(확률론적 건전성평가)

Abstract

Pressure tubes are major component of nuclear reactor, but only selected samples are periodically examined due to numerous numbers of tubes. Current in-service inspection result show there is high probability of flaw existence at un-inspected pressure tube. Probabilistic analysis is applied in this study for the integrity assessment of un-inspected pressure tube. But all the current integrity evaluations procedures are based on conventional deterministic approaches. So many integrity evaluation parameters are not directly apply to probabilistic analysis. As a result of this study failure assessment diagram are proposed based on test data.

1. 서 론

1.1 논문의 각 절 제목

확률론적 평가기법은 대상물의 평가에 필요한 주요 입력자료를 하나의 값으로 가정하지 않고 분포형태가 고려된 확률변수로 해석하는 방법으로 1970년대 결함이 존재하는 구조물의 수명평가를 위해 연구되었다⁽¹⁾. 입력자료의 확률분포를 유도하기 위해 많은 실험/측정자료가 요구되고, 확률분포를 안전성평가 수식에 바로 반영하지 못해 많은 연구가 진행되지 못하다. 그러나 최근 누적된 실험자료와 정보처리 기술의 발전으로 많은 연구가 진행되고 있다.

본 연구의 대상인 중수형 원자로 압력관은 원자력발전소의 1 차계통 주요기로 호기당 380 개가 설치된다. 핵연료인 천연우라늄 다발을 지지

하기 위해 설치되는 압력관에는 내압과 핵연료의 무게가 작용하는 구조물로 핵연료 인출시의 마찰과 온도-압력의 변화로 인해 결함이 발생할 확률이 높다⁽²⁾. 이러한 압력관은 파손시 엄청난 보수비용과 장기간의 원자력발전소의 가동정지를 유발한다. 반면 압력관에 대한 검사시간과 장비의 제약으로 현재 표본검사를 수행하고 있다. 국내 중수형 원자로의 경우 전체 압력관중 15%의 압력관에 대한 검사가 진행되었으며, 검사대상중 45%에서 결함이 검출되었다. 이중 일부 압력관에서는 기준을 초과하는 결함이 검출되어 교체된바 있다. 아직 검사가 수행되지 않은 85%의 압력관을 고려한다면, 압력관에 존재하는 결함에 대한 안전성평가가 필수적이다⁽³⁾. 그러나 현재 수행중인 평가는 주요 입력자료를 하나의 특정값으로 가정하는 결정론적 평가로 가동중 검사자료가 없는 압력관에 대한 건전성평가를 수행할 수 없다. 반면 확률론적 건전성평가를 수행하면 검사가 수행된 압력관의 자료로부터 유도된 결함의 분포를 이용하여 검사가 수행되지 않은 압력관에 대한 건전성평가가 가능한 장점이 있다⁽⁴⁾.

현재 수행중인 건전성평가⁽⁵⁾에서는 입력변수

[†] 한국철도기술연구원, 안전체계연구그룹

E-mail : silkwak@korea.com

TEL : (031)460-5544 FAX : (031)460-5509

* 한국철도기술연구원, 안전체계연구그룹

** 한국원자력안전기술원, 원자력안전연구실

의 불확실성 또는 측정값의 오차를 고려하기 위해 안전여유를 이용하여 건전성확보 여부를 결정하고 있으나, 확률론적 평가에서는 입력자료의 불확실성을 확률분포로 고려하기 때문에 안전여유를 적용하지 않고 있다. 안전여유를 고려하지 않고 확률분포를 이용하는 확률론적 해석에서는 주된 파손원인이 변경될 수 있으며, 파손여부 대신 가동기간에 따른 파손확률을 제공한다. 현재 수행중인 평가기준은 결정론적 평가를 기준으로 하고 있어 확률론적 평가에 적용가능한 파손기준을 본 연구에서는 제시하고자 하였다. 이를 위해 본 연구에서는 실험자료에 기초하여 작성된 파손평가선도를 확률론적 해석시 활용하고자 하였다.

2. 결함의 파손기준 인자

Zirconium 합금을 냉간가공하여 제작되는 압력관 재질은 가동초기 높은 연성을 가지고 있으나, 가동중 중성자 조사 및 수소화물 발생으로 취성파괴 거동을 보인다. 현재 수행중인 평가절차에서는 응력확대계수와 파괴인성치를 이용한 불안정파괴평가와 작용응력과 소성붕괴응력을 이용한 소성붕괴평가를 각각 수행하고있으나, AECL 에서 수행한 압력관 결함의 파손시험 자료를 검토한 결과 불안정파괴와 소성붕괴가 각각 발생하지 않더라도 파손이 발생하였다⁽⁴⁾. 따라서 보다 정확한 파손예측과 확률론적 해석기법에 타당한 파손기준을 제시하기 위해 본 연구에서는 파손평가선도를 도입하였다. 파손평가선도 적용을 위해 필요한 응력확대계수, 파괴인성치, 작용응력 및 소성붕괴응력 계산의 세부사항을 다음에 수록하였다.

2.1 압력관 재질의 파괴인성치 결정

캐나다에서 수행된 연구결과 압력관 재질인 Zr 합금의 파괴인성치에는 온도의 함수로 결정되며, 응력확대계수와 파괴인성치를 이용하여 불안정파괴 여부를 결정한다. 선행연구에서 현재 사용중인 기준을 적용할 경우 불안정파괴가 압력관 파손의 주요 원인으로 나타났다. 결정론적 평가시 사용되는 온도에 따른 파괴인성치의 하한값을 식(1)에, 확률론적 평가시 사용되는 평균값을 식(2)에 나타내었다.

$$K_C = 26.3 + 0.022T \tag{1}$$

$$K_{C_Mean} = 61.3 + 0.22T \tag{2}$$

여기서, 파괴인성치 단위는 $MPa\sqrt{m}$, T는 $^{\circ}C$ 이며, $0.18 \times 10^{25} \sim 9.8 \times 10^{25} n/m^2$ 의 중성자 조사량에 대한 실험식이다⁽⁶⁾. 결정론적 건전성평가에서는 입력자료의 불확실성을 고려하기 위해 실험값중 온도에 따른 하한값을 곡선접합하여 얻어진 식(1)을 사용하고 있으나, 본 연구에서 수행하려는 확률론적 해석에서는 분산을 고려하여 자료를 입력하기 때문에 평균값을 이용한다. 그러나 원자로 설계시 고려된 다양한 과도상태를 고려한 해석을 위해서는 임의 온도에 대한 파괴인성치 결정이 필요하다. 실제 실험은 특정 온도에 대해 수행되어 임의 온도에서의 확률분포 결정을 위해 본 연구에서는 실험에서 결정된 평균값에 온도에 따라 평균과 표준편차의 비율이 일정하다는 가정, 즉 평균과 표준편차의 비율인 변동계수(coefficient of variation)가 동일하다는 가정을 사용하였다. 사용된 평균값은 주요 온도에 대하여 구한 평균값을 선형으로 곡선적합하여 얻어진 식(2)를 사용하였다. 온도에 따른 압력관 재질의 파괴인성치 분포를 Fig. 1에 나타내었다.

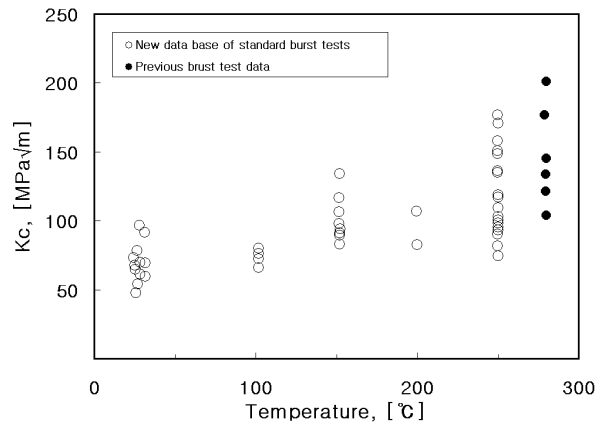


Fig. 1 Distribution of fracture toughness test on CANDU pressure tube material⁽⁶⁾

2.2 압력관 결함의 응력확대계수 결정

압력관에 발생하는 결함은 핵연료 인출시의 마모로 인하여 축방향 결함이 주로 발생한다. 본 연구는 축방향 결함만을 고려하고 있으며, 응력확대계수 계산에는 선행연구⁽⁷⁾에서 얻어진 3 차원 유한요소해석 결과를 사용하였다. 결정론적 해석에서는 가동중 검사에서 검출된 결함의 형상이 입력값으로 사용되나, 확률론적 해석에서는 결함의 형상분포값이 고려된다. 두가지 해석의 경우에 있어 사용되는 수식은 모두 동일하다.

2.3 소성붕괴응력의 결정

압력관은 반지름과 두께의 일반 원자력 배관에 비해 두께가 얇다. 인성이 낮은 재질에 결함이 존재하는 경우 작용응력이 기준응력 이상으로 커지면 결함이 진전하여 구조물은 불안정 파괴에 이르나, 고온가동 조건에서와 같이 인성이 큰 상태에서는 결함전단의 응력이 완화되어 작용응력이 커져도 결함은 진전하지 않는다. 이 경우 잔여 리가먼트(ligament) 영역에서의 응력이 더 이상의 하중을 지지할 수 없는 소성붕괴 응력에 도달하면 구조물은 소성붕괴에 의해 파손된다. 소성붕괴해석은 한계하중(limit load)해석으로 불리며, 최대 작용압력은 유동응력(flow stress; σ_f)값과 결함 형상보정계수, M 값을 이용하여 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$P_{max} = \sigma_f \times M \quad (3)$$

현재 수행중인 압력관 평가에서 유동응력은 항복강도와 인장강도의 평균값을 사용하고 있다. 항복강도와 인장강도는 파괴인성치와 마찬가지로 온도만의 함수로 결정할 수 있다⁽⁶⁾. 캐나다 AECL 에서 압력관의 실험을 통해 얻어진 실험식의 하한값이 현재 사용되고 있다. 온도에 따른 항복강도와 인장강도의 하한값을 식 (4)와 (5)에 나타내었으며, 이들로부터 계산된 유동응력은 식 (6)과 같다.

$$\sigma_{y \text{ lower bound}} = 988 - 1.154 \times T \quad (4)$$

$$\sigma_{u \text{ lower bound}} = 1021 - 1.245 \times T \quad (5)$$

$$\sigma_f \text{ lower bound} = 1004.5 - 1.1995 \times T \quad (6)$$

여기서, T 는 °C, 응력의 단위는 MPa 이다. 파괴인성치와 마찬가지로 확률론적 건전성평가를 위해서는 유동응력의 분포가 필요하며, 평가시 사용되는 평균값을 식 (7)에 나타내었다.

$$\sigma_{f \text{ mean}} = 1095.7 - 1.2 \times T \quad (7)$$

확률론적 해석시 과도상태에 따른 임의 온도에서의 유동응력값 계산이 필요하다. 파괴인성치의 경우 온도가 증가할수록 분산이 증가하여 평균에 대한 표준편차의 비율을 고정하여 평가시 사용되는 파괴인성치 값을 결정할 수 있었다. 유동응력의 경우 온도가 증가하여도 분산량은 동일하게 유지되는 것으로 실험결과 나타났다⁽⁶⁾.

따라서 확률론적 해석시 온도에 따른 상한값과 하한값의 차이가 온도에 따라 유지된다는 가정을 이용하여 임의 온도에서의 유동응력을 결정하였다. 소성붕괴응력은 국부영역의 소성붕괴(local collapse) 기준과 광범위 영역의 소성붕괴(global collapse) 기준으로 나눌 수 있다. 현재 사용중인 평가에서는 Kiefner⁽⁸⁾ 식에 기초한 국부영역의 소성붕괴 기준을 적용하고 있으며, 이 기준은 결함의 깊이가 80%를 초과하는 경우 소성붕괴가 예측되어 파단전누설 평가와 동시에 적용할 수 없다. 따라서 누설 이후 파손확률을 결정하기 위해서는 광범위 영역의 소성붕괴에 근거한 Carter⁽⁹⁾식의 적용이 타당하다. 반면 관통균열의 소성붕괴에 관해서는 Erdogan, Folias, Zahoor⁽¹⁰⁻¹²⁾ 등의 연구가 있으며, 압력관 파단실험 결과와 비교한 결과 Fig. 2 에 나타난 바와 같이 Zahoor 수식이 소성붕괴를 가장 잘 예측하였다. Fig. 2 에서 가로축은 관통균열의 길이이며, 세로축은 실험시 측정된 소성붕괴하중과 수식을 통해서 유도된 소성붕괴하중의 비율이다. 즉 세로축의 값이 “1”에 근접할수록 파손을 잘 예측한다 할 수 있다.

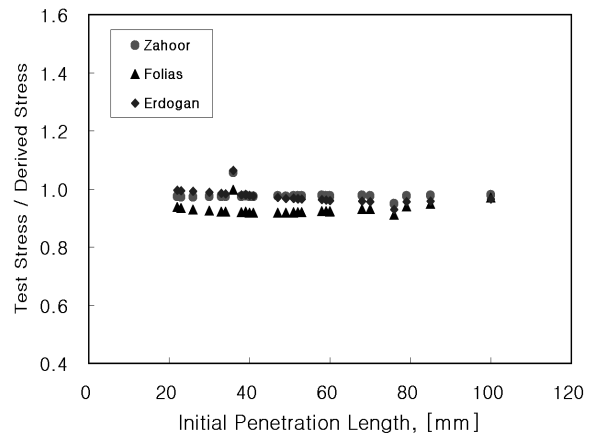


Fig. 2 Comparison of plastic collapse solution as a function of initial crack length

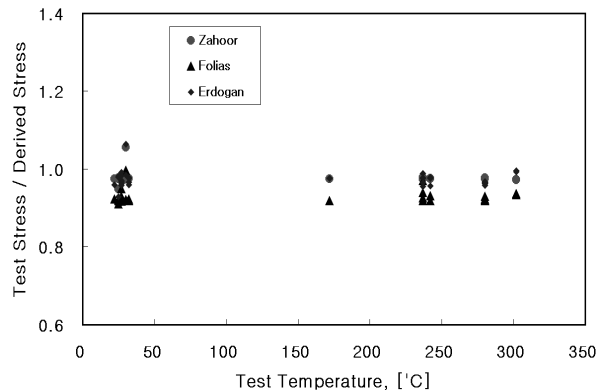


Fig. 3 Comparison of plastic collapse solution as a function of test temperature

Fig. 3 에는 동일한 자료를 시험온도를 가로축으로 하여 나타내었다. 본 연구에서는 표면균열의 소성붕괴평가에는 Carter 식을, 관통균열의 소성붕괴평가에는 Zahoor 식을 사용하였다. 해석에 사용된 식은 다음과 같다.

$$P_{\max Carter} = \sigma_f \left(\frac{a}{R_i M} + \ln \left(\frac{R_o}{R_i + a} \right) \right) \quad (8)$$

$$M_{Carter} = \sqrt{1 + \frac{1.61c^2}{R_i a}} \quad (9)$$

$$P_{\max Zahoor} = \sigma_f \left(\frac{t}{R_m M} \right) \quad (10)$$

$$M_{Zahoor} = (1 + 1.2987\lambda^2 - 0.026905\lambda^4 + 5.3549 \times 10^{-4} \lambda^6)^{1/2} \quad (11)$$

$$\lambda = \frac{c}{\sqrt{R_m \times t}} \quad (12)$$

여기서, a 는 결함의 깊이, c 는 결함의 길이, Ri 는 관의 내부반지름, Ro 는 관의 외부반지름, Rm 은 평균반지름이다.

3. 파손평가선도의 적용

3.1 압력관 파손평가선도의 작성

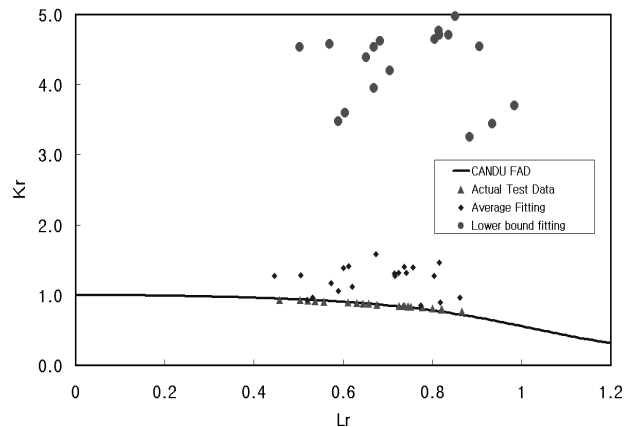
압력관은 냉간가공으로 제작되는 구조물로서 가동초기에는 탄소성 파괴역학의 적용이 가능하나 수소화물 생성 및 중성자 조사로 인해 취성 파괴가 발생하여 현재는 응력확대계수와 파괴인성치를 이용한 불안정파괴평가, 작용응력과 소성붕괴응력을 이용한 소성붕괴평가를 각각 수행하고 있다. 근본적으로 다른 두 가지 파괴기구, 즉 현재 압력관의 건전성평가지 사용중인 불안정파괴와 소성붕괴를 동시에 평가하기 위해서는 파손평가선도가 효과적으로 적용될 수 있다. 현재 건전성평가지 사용중인 소성붕괴 기준은 결함부의 잔여 리가먼트의 하중지지 능력에 기초하여 작성된 국부적인 소성붕괴 기준식을 적용하고 있어, 결함이 관두개의 80%이상 성장한 경우 파손을 예측하고 있다. 이 경우 누설 발생전에 파단이 발생하여 파단전누설 기준과 함께 적용할 수 없다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 식 (13)에 제시된 파손평가곡선 (K_{FAL})^(13,14)을 이용하였다. 캐나다 AECL 에서

수행한 압력관의 파단실험결과와 파손평가선도를 Fig. 4 에 함께 나타내었다. Fig. 4 에서 세로축은 식 (14)와 같은 응력비(stress ratio; K_r)로 응력확대계수와 파괴인성치의 비를, 가로축은 식 (15)에 나타낸 바와 같은 하중비(load ratio; L_r)로 작용응력과 소성붕괴응력의 비를 나타낸다. Fig. 4(a)는 응력비 5 까지 나타내었으며, Fig. 4(b)는 응력비 2 미만의 영역에 대해 확대된 선도이다. 각각의 균열상태에 대한 평가변수를 계산하여 파손평가선도에 도시하여, 곡선 아래에 위치하면 안전하고, 곡선 위쪽에 위치하면 파괴상태로 평가할 수 있다.

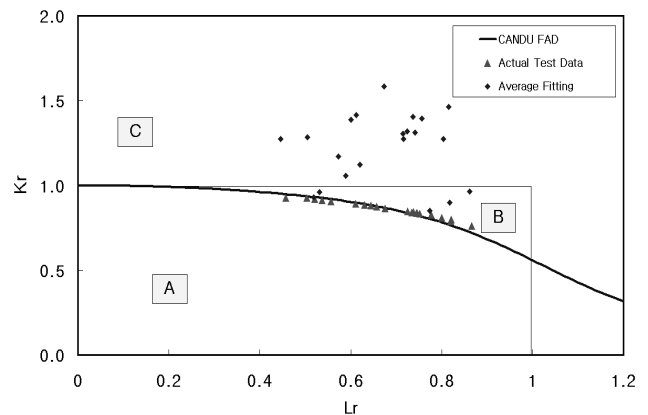
$$K_{FAL} = \left[1 + \frac{L_r^2}{2} \right]^{-1/2} \times [0.3 + 0.7 \exp(-0.6L_r^6)] \quad (13)$$

$$K_r = K_I / K_{IC} \quad (14)$$

$$L_r = \sigma_a / \sigma_c \quad (15)$$



(a) Failure assessment line versus burst test data (for stress ratio range under 5)



(b) Failure assessment line versus burst test data (for stress ratio range under 2)

Fig. 4 Application of failure assessment diagram

3.2 파손평가선도의 적용성 검토

실험결과에는 유동응력, 파괴인성치 등의 측정자료가 주어지나, 결함을 가정하여 해석하는 경우 이들 값을 가정해서 파손평가선도를 적용해야 한다. Fig. 4에서 “Actual test data”는 실험자료에 제시된 유동응력과 파괴인성치를 이용한 경우를, “Average fitting”은 온도에 따른 유동응력과 파괴인성치의 평균값을 이용한 경우를, “Lower bound fitting”은 온도에 따른 유동응력과 하한값을 이용하여 얻어진 경우에 대한 결과를 나타낸다. 하한값을 이용한 경우, 즉 결정론적 해석의 경우 응력확대계수와 파괴인성치의 비가 2 이상인 영역에서도 파손을 예측하여 매우 보수적인 결과를 예측한다. 반면, 평균값을 이용한 경우는 “C”영역과 “B”영역의 파손을 정확히 예측할 수 있었다. 파손평가선도에 나타난 파손 중 “B”로 표시된 영역에 나타난 파손은 불안정 파괴와 소성붕괴 조건을 개별적으로 적용시 파손을 예측할 수 없으며, 파손평가선도 적용시에만 예측되는 점이다. “A”로 표시된 영역은 파손이 발생하지 않는 영역이다. “C”로 표시된 영역은 파손이 예상되는 점으로 파괴인성치와 유동응력의 평균값과 하한값을 적용하여 예측한 점들이 대부분 이곳에 표시된다. 따라서 관통균열의 파손을 예측하기 위해서는 “B”영역의 파손을 고려할 수 있는 파손평가선도를 적용해야 한다 할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 압력관 결함의 확률론적 건전성평가에 타당한 파손기준 연구로 다음의 결과를 얻었다.

압력관 파손실험자료를 활용하여 현재의 파손기준 보다 실제 파손을 보다 정확히 예측할 수 있는 파손평가선도를 제시하였다.

파손평가선도 작성에 필요한 파괴인성치, 유동응력, 소성붕괴응력을 제시하였다.

제시된 파손평가선도는 현재의 파손기준으로는 예측하지 못하는 파손을 예측할 수 있어 안전여유를 적용하지 않는 확률론적 평가에 효율적으로 적용할 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

(1) Bloom, J.M., 1984, “Probabilistic Fracture Mechanics - A State of the Art,” ASME Pressure

Vessel and Piping, symposium on advances in probabilistic structural analysis, Vol. 92, pp. 1-19.
 (2) Walker, J.R., 1990, “A Probabilistic Approach to LBB in CANDU pressure tubes,” International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 43, pp. 229-239.
 (3) Park, W.Y., Kang, S.S. and Han, B.S., 2002, “Structural integrity assessment of pressure tubes for Wolsong Unit 1 based on operational experiences,” Nuclear Engineering and Design, Vol. 212, pp. 41-48.
 (4) Sang-log Kwak, Joon-seong Lee, Young-jin Kim, Youn-won Park, 2003, “A Probabilistic Integrity Assessment of Flaw in Zirconium Alloy Pressure Tube Considering Delayed Hydride Cracking,” International Journal of Modern Physics B, Vol. 17, Nos. 8 & 9, pp. 1587-1593.
 (5) Moan, G. D., Coleman, C.E., Price, E.G., Rodgers, D.K. and Sagat, S., 1990, “Leak-Before-Break in the Pressure Tubes of CANDU Reactors,” Journal of PVP, Vol. 43, pp.1-21.
 (6) AECL, 1996, “Fitness-For Service Guideline for Zirconium Alloy Pressure Tubes in Operating CANDU Reactors,” COG Report No. 91-66.
 (7) Young-jin Kim, Sang-log Kwak, Joon-seong Lee, Youn-won Park, 2003, “Integrity Evaluation System of CANDU Pressure Tube,” International Journal of KSME, Vol. 17, No. 7, pp. 947-957.
 (8) Kiefner, J.F., Maxey, W.A., Eiber, R.J. and Duffy, A.R., 1973, “Failure Stress Levels of Flaws in Pressurized Cylinders,” ASTM STP 536, pp. 461-481.
 (9) Carter, A.J., 1992, “A library of limit loads for FRACTURE-TWO,” Nuclear Electric Report TD/SID/REP/0191.
 (10) Erdogan, F., 1976, “Ductile failure theories for pressurized pipes and containers,” International Journal of Pressure Vessel and Piping, Vol. 4, pp.253-283.
 (11) Folias, E. S., 1975, “On the fracture of nuclear reactor tubes,” SMiRT III, London, Paper C4/5.
 (12) Zahoor, A., 1991, “Ductile Fracture Handbook,” Novetech Corp. & EPRI, Vol. I,II,III.
 (13) Milne, I, Ainsworth, R, Dowling, A.R., Stewart, A.T., 1987, “Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects,” CEBG, Report R/H/R6-Rev.3.
 (14) Ruiz Ocejo, J., Gutierrez-Solana, F., Gonzalez-Posada, M.A. and Gorrochategui, I., 1997, “Failure Assessment Diagram,” Cantabria Univ., Report/SINTAP/UC/05.