원자력발전소 압력용기 및 배관계통의 건전성 평가

김 영 진
성균관대학교 기계설계학과 교수

●1950년생
●파괴 및 피로공학을 전공하였으며, 탄소성 파괴역학을 바탕으로 한 건전성 평가 절차 및 소프트웨어의 개발, 그리고 전문가 시스템 구성에 관심을 갖고있다.

정 해 동
한국원자력안전기술원 선임연구원

●1955년생
●핵공학 및 파괴역학을 전공하였으며, 원자력 발전소 안전성 향상을 위한 건전성 평가 절차 및 소프트웨어의 개발에 관심을 갖고있다.

1. 머 리 말

원자력발전소 핵증기공급계통(NSSS : nuclear steam supply system)의 구조적 건전성(structural integrity)의 원자력규제기관인 USNRC(US nuclear regulatory commission)나 ASME에서 제정한 법규[1]에 의해 평가되고 있다. 이러한 법규는 선형탄성파괴역학(LEFM : ldinear elastic fracture mechanics)에 근거하여 제정되었다. 엄밀히 따지면 LEFM은 재료거동이 주로 탄성이고 파괴형태가 취성(brittle)인 경우에만 적용될 수 있다. NSSS의 가동 환경은 재료의 연성-취성 천이 온도 이상이기에, 균열이 발생할 경우 재료는 큰 소성변형을 수반하게 되고 파괴형태는 연성(ductile)이다. 이러한 경우 LEFM은 재료가 견딜 수 있는 하중을 충분히 이용하지 못하기 때문에 지나치게 보수적인 해석결과를 초래하게 된다. 따라서 LEFM을 NSSS의 설계에 적용하면 과도한 설계가 될 수도 있고, 가동중검사(ISI : in-service inspection)때 발견된 균열의 평가에 적용하면 불필요한 가동 중단이라는 비경제적인 결과를 초래할 수도 있다. 이러한 이유에서 미국 영국등 여러나라에서는 NSSS의 건전성 평가를 좀 더 정확하게 수행할 수 있는 탄소성파괴역학(EPFM : elastic plastic fracture mechanics) 해석기법을 개발하게 되었다.

EPFM 해석기법 개발의 필요성은 1960년대 미국 원자력산업계의 관심의 대상이었던 BWR 배관계통의 입계 응력부식균열(IGSCC : inter-granular stress corrosion cracking) 문제의 해석에서 부터 인식되었다. 또한 1970년대 초반의 HSST(heavy section steel technology) 프로그램에서 압력용기의 파괴거동을 LEFM이 부정확하게 예측하면서 더욱 절실히 요청되었다. 이에 부응하기 위하여 미국의 전력연구소 EPRI(electric power research institute)에서는 1975년경부터 EPFM연구를 위한 전담부서(ductile fracture research project)를 설치하고 원자력 산업체, 연구소 및

대학의 전문가들을 동원하여 광범위한 연구를 수행하고 있다. EPRI의 EPFM관련연구는 1975~1980년 사이의 학문적인 이해와 정립단계를 거쳐 1980~1985년 사이에 NSSS의 건전성 평가에 적용할 수 있는 실용적인 공학적 접근방법(engineering approach)을 개발하기에 이르렀다.

USNRC에서도 EPFM 관련연구를 지원하였으며, 1980년대 초반에 10 CFR 50 법규를 통해 EPFM해석을 인정하였다. 즉 조사취하(irradiation embrittlement)에 의한 최대흡수에너지(USE : upper shelf energy)가 68 Joule (50 ft-lb) 이하로 떨어지는 원자로 압력용기에 대해서 EPFM 해석을 하도록 추천하고 있다. 또한 1985년부터는 EPFM에 바탕을 둔 파단전누설(LBB : leak-before break)설계개념을 배관계통에 적용하도록 추천하고 있다.

USNRC의 요청으로 파괴역학 기준을 제공하는 ASME XI 결함평가 위원회에서는 1987년에 발간한 A-11 보고서를 통해 저인성 압력용기 해석을 위한 해석기법 및 파괴 인성치 추정법을 제시하였다. 또한 ASME XI 배관 결함평가 위원회는 오스테나이트 배관(austenitic piping)에 이어 페라이트 배관(ferritic piping)에 대한 결함평가기법 및 평가 기준을 제공하고 있다. 이상의 작업결과는 ASME XI에 IWB 3640, 3650 및 3740으로 삽입될 예정이다. 이와 같은 EPFM의 발전에 힘입어 각국의 원자력산업계에서는 EPFM을 이용하여 저인성 압력용기의 수명연장, NSSS내에서 발견된 결함에 대한 건전성 평가 뿐만 아니라 배관계통의 설계에도 적용하기에 이르렀다.

본 글에서는 먼저 USNRC, EPRI, ASME 및 영국의 전력연구소 CEGB(central electrictiy generating board) 등에서 개발하고 추천하는 EPFM을 이용한 건전성 평가기법을 소개하고, 이어서 최근 ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. XI에 제정중인 EPFM 평가기준을 소개하고자 한다.

2. 건전성 평가법

2.1 균열 진전력 선도

만일 재료의 거동을 전변형률 소성이론과 Ramberg-Osgood 응력-변형도 관계식

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_o}=\frac{\sigma}{\sigma_o}+\alpha\left(\frac{\sigma}{\sigma_o}\right)^n \tag{1}$$

에 의해 나타낼 수 있다면, 구조물에 존재하는 균열의 균열진전력은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$J=J^e(a_{eff}, P)+J^p(a, P, n) \tag{2}$$

여기서 J^e는 Irwin의 소성역을 고려한 유효균열길이(a_{eff})에 근거한 J값의 탄성성분이며, J^p는 전변형률 소성이론에 근거한 J값의 소성성분이다. J^e값은 LEFM핸드북에서 구할 수 있고, J^p값은 EPRI에서 발간한 EPFM 핸드북[2~4]에 균열의 형상, 가공경화지수 (n)의 함수형태로 제시되어 있다.

균열진전력선도(CDFD : crack driving force diagram)는 실험적으로 측정되는 균열진전 저항력 J_R값과 역학적으로 계산되는 균열진전력 J값을 비교함으로써, 균열의 성장 및 파괴과정을 상세하게 해석하는 방법이다. 그림 1은 CDFD를 도식적으로 나타낸 것으로, 안정성장에 대한 평형조건은 다음과 같다.

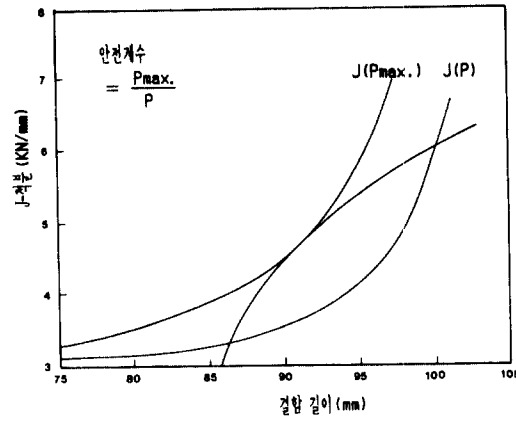

그림 1 균열 진전력 선도(CDFD)

$$J(a, P) = J_R(\Delta a) \tag{3}$$

CDFD에서 하중이 고정되어 있는 경우 균열의 불안정 성장조건은 다음과 같다.

$$\left(\frac{\partial J}{\partial a}\right)_P \geq \frac{\partial J_R}{\partial a} \tag{4}$$

CDFD 선도에서 균열진전력 J값은 하중제어(load control) 및 변위제어(displacement control) 2가지 경우로 구할 수 있다. 하중제어의 경우에는 작용하중 P를 고정시키고 균열길이 a의 변화에 따라 J값을 구하며, 변위제어의 경우에는 하중선변위(Δ_L)를 고정시키고 이에 따른 하중의 변화를 구한 뒤, 다시 균열길이의 변화에 따라 J-적분을 구한다. CDFD선도에서 안전계수는 J_R곡선과 접하는 균열진전력 J에 해당하는 Pmax를 구하여 Pmax/P의 비로서 정의한다.

2.2 J/T선도

CDFD선도의 기울기, 탄성계수(E) 및 유동응력(σ_o)을 이용하여 찢김계수(tearing modulus)를 다음과 같이 정의할 수 있으며

$$T_{JR} = \frac{E}{\sigma_o^2}\frac{dJ_R}{da} \tag{5a}$$

$$T_J = \frac{E}{\sigma_o^2}\frac{dJ}{da} \tag{5b}$$

균열의 불안정 성장조건은 다음과 같다.

$$T_J \geq T_{JR} \tag{6}$$

그림 2는 식 (5)와 식 (6)에 근거한 J/T선도를 도식적으로 나타낸 것으로, 작용하중과 균열성장의 조합으로 T_J값이 T_{JR}값보다 커지면 불안정파괴가 일어난다. J/T선도에서 안전계수는 불안정파괴가 발생하는 점의 최대지지하중 Pmax을 J-P선도로 부터 구하여 Pmax/P의 비로서 정의된다.

2.3 파손평가도

(1) R6 선도

1976년 CEGB[5]가 제안한 R6 선도는, 근본적으로 다른 2가지 파괴기구 사이의 천이 영역을, 인장력이 작용하는 탄성 · 강소성 무한판재에 존재하는 균열에 대한 Dugdale의 해를 이용하여 파괴의 임계값을 도시한 것으로, 파손평가곡선(FAC : failure assessment curve)은 다음과 같이 표시된다.

$$K_r = S_r\left[\frac{8}{\pi}\ln\{\sec(\pi/2 \cdot S_r)\}\right]^{-1/2} \tag{7}$$

R6 선도의 좌표축은 그림 3과 같이 K_r', S_r'로 정의된다.

$$K_r' = \frac{K_I(a, P)}{K_{Ic}} \tag{8a}$$

$$S_r' = \frac{P}{P_o} \tag{8b}$$

K_r축은 취성파괴기준 K_{Ic}를 임계값으로 하고 있으며, S_r축은 소성붕괴기준인 극한하중 P_o를 임계값으로 하고 있다. 작성된 $R6$ 선도

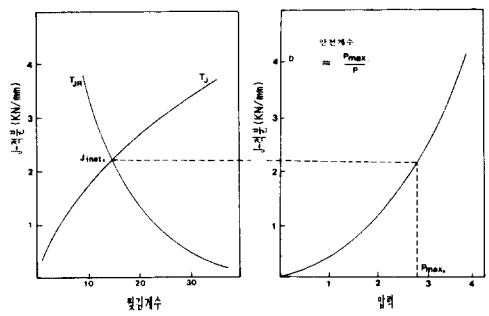

그림 2 안전성 평가도(J/T)

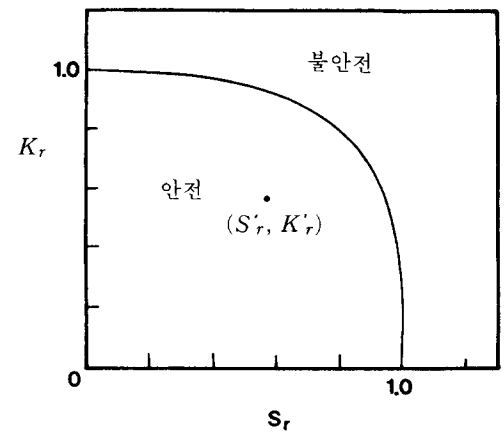

그림 3 파손 평가도(R6)

위에 각각의 균열상태에 따른 K_r' 및 S_r'값을 도시하여, FAC 안에 위치하면 안전하고, 밖에 위치하면 파괴상태로 평가할 수 있다.

1986년 CEGB[6]는 R6-Rev.3을 통해 재료의 가공경화를 고려한 다음 3가지 형태의 파손평가곡선을 제시하였다.

· 방법 1

$$K_r=(1-0.14L_r^2)[0.3+0.7\exp(-0.65L_r^6)] \quad (9)$$

· 방법 2

$$K_r=\{E\varepsilon_{ref}/L_r\sigma_y+L_r^3\sigma_y/2E\varepsilon_{ref}\}^{-1/2} \quad (10a)$$

$$L_r=\sigma_{ref}/\sigma_y \quad (10b)$$

여기서 ε_{ref}, σ_{ref}는 단축인장시험으로부터 얻어지는 진변형률(true strain), 진응력(true stress)이다.

· 방법 3

$$K_r=\sqrt{\frac{J_e}{J}} \quad (11a)$$

$$L_r=P/P_o \quad (11b)$$

FAC의 선택은 사용자에게 주어져 있으며, 해석에 요구되는 정확도와 FAC를 구하는데 사용가능한 정보에 따라 결정된다. 일반적으로 방법 1(그림 4)은 가공경화율이 작고 재료의 항복강도 값만 알고있는 경우에 사용되며, 방법 2는 가공경화율이 크고 응력-변형도 곡선을 전체적으로 알고있는 경우에 사용된다. 방법 3은 모든 경우에 사용할 수 있으나 J값을 정확히 알아야만 FAC가 정확해진다.

(2) 전형변형률 파손평가 선도

이 방법은 B & W사의 Bloom[7]에 의해 제시된 것으로서 초기 R6선도에 재료의 가공경화 효과와 구조물의 기하학적 조건을 고려한 방법이다. 그림 5는 K_r을 세로축, S_r을 가로축으로 한 전변형률 파손평가 선도(DPFAD : deformation plasticity failure assessment diagram)평가법을 도식적으로 나타낸 것으로 파손평가곡선은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_r=\sqrt{\frac{J_e}{J}} \quad (12a)$$

$$S_r=P/P_o \quad (12b)$$

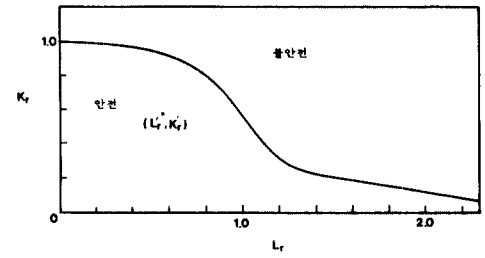

그림 4 파손 평가도(R6-Rev.3)

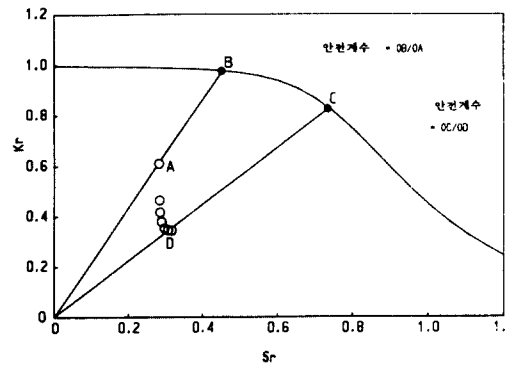

그림 5 전변형률 파손 평가도(DPFAD)

식 (12a)와 식(2)를 조합하면 다음 식을 얻는다.

$$J/J^e(a,P)=1/K_r^2=\frac{J^e(a_{eff},P)}{J^e(a,P)}+\frac{J^p(a,P,n)}{J^e(a,P)}=f(S_r) \quad (13)$$

DPFAD의 평가점의 좌표는 다음과 같이 계산된다.

$$K_r'(a_0+\Delta a)=\sqrt{\frac{J^e(a_0+\Delta a,\ P)}{J_R(\Delta a)}} \quad (14a)$$

$$S_h'(a_0+\Delta a)=\frac{P}{P_0(a_0+\Delta a)} \quad (14b)$$

DPFAD선도의 안전계수는 원점에서 평가점을 통과하는 직선과 파손평가곡선이 만나는 점으로부터 구할 수 있다. 즉 균열개시점에서는 안전계수가 OB/OA로 구해지며, 균열성장의 경우 최대안전계수는 OC/OD로 구해진다.

3. ASME XI 법규 제정

3.1 저인성 원자로 압력용기(IWB 3740)

10 CFR 50 Appendix G-파괴인성요건에 의하면, 가동중인 원자로 재료의 샤르피 충격에너지는 68 Joule (50 ft-lb) 이상이어야 한다. 그러나 중성자 조사취화(irradiation embrittlement)로 인하여 68 Joule 이하로 떨어질 수도 있으며, 이러한 경우 발전소가동을 계속하기 위해서는 해석을 통해 안전함을 입증하여야 한다. 1982년 USNRC[8]는 NUREG 0744를 통해 저인성 원자로 압력용기 문제를 제기한 바 있다.

ASME XI 결함평가위원회에서는 A-11 저인성 압력용기 파괴역학 해석을 위한 평가기준 및 평가법을 제정하고 있다. 1987년 8월 첫번째 시안(draft)을 발간한 이래 1990년 1월 현재 다음과 같이 판정기준을 수정 제시하였다.

(1) Level A&B(정상 및 이상상태)의 경우

반타원 내벽 표면균열($a/t=1/4$, $a/\ell=1/6$)이 길이방향으로 존재한다고 가정하며, 다음조건을 만족해야 한다.

첫째, 설계압력(design pressure)의 1.25배가 작용하는 가상결함에 대한 applied J가 0.1 mm 안정균열성장 했을 때의 재료성질의 J값, Jmax($\Delta a=0.1$mm) 보다 작아야 한다. 여기서 열응력에 대한 안전계수는 "1"이다.

둘째, 연성균열성장에 대해 안정해야 한다. 여기서 가동압력(operating pressure)에 대한 안전계수는 "1.5"이고, 열응력에 대해서는 "1"이다.

(2) Level C&D(긴급 및 손상상태)의 경우

가정하는 균열의 형태 및 방향은 Level A & B의 경우와 같으나 깊이는 1 in ($a/t\cong1/8$)로 한다. 안전계수는 압력 및 열응력에 대해 각각 "1"을 사용하여 균열이 안정성장함을 입증하여야 하며, 그렇지 못할 경우에는 벽두께 75%내에서 균열이 정지될 수 있음을 보여야 한다.

이상의 판정기준을 요약하면 표 1과 같다.

표 1 저인성 원자로 압력용기 파괴역학 해석에 대한 허용기준

판정기준 1	· Applied J ($P=P^*$, $a=a_0+0.1$) $<J_{MAT}(\Delta a=0.1)$ · $dJ/da<dJ_{MAT}/da$ 여기서 P^*=3125psi+열응력
판정기준 2	Instability Check · Applied J ($P=P^*$, $a=a_0+\Delta a^*$) $<J_{MAT}(\Delta a=\Delta a^*)$ · $dJ/da<dJ_{MAT}/da$ 여기서 $P^*=1.5P_0$+열응력 P_o=가동압력 $\Delta a^*=0.2, 0.3, 0.4, 0.5\cdots$

3.2 배관

(1) 페라이트 배관(IWB 3650)

EPRI와 ASME XI의 배관 결함평가 위원회는 기존의 Section XI IWB-3514.2의 허용기준(벽두께의 10%)을 초과하는 페라이트 배관에 존재하는 결함에 적용할 결함평가법을 발전시켰다.

배관결함평가법은 배관재료의 인성에 따라 페라이트 배관의 파괴는 취성파괴, 탄소성파괴 및 소성붕괴의 3가지 형태에 의해 발생할 수 있다는데 근거하고 있다. 먼저 DPFAD평가법을 사용하여 파괴 영역을 다음 3곳으로 구분하여 파괴해석을 하도록 되어 있다.

$K_r'/S_r'\geq1.8$……LEFM 해석

$1.8>K_r'/S_r'/0.24$……EPFM 해석

$K_r'/S_r'\leq0.24$……극한하중 해석

EPFM 해석방법으로는 J/T평가법이 추천되고 있으며, 평가기준 및 안전계수는 표 2와 같다. 이 값들은 A106 *Gr B* 및 *C*와 A516 *Gr*70강의 하한계 물성치에 근거하고 있으며, J_{Ic}값은 최소 105 kN/m 이어야 한다.

IWB-3650은 Appendix *Z*를 사용하도록 권장하고 있으며, Main Committee에서 Code Case *N*-463으로 인준받았다. 그러나 Appendix *Z*에는 다음과 같은 현안의 문제가 있다.

· 1차굽힘응력이 1차막응력보다 크거나 같아

표 2 배관계통 EPFM 해석을 위한 ASME XI에서 제안한 안전계수

분 류	하중형태	
	1차하중	2차하중
Level A & B 설계조건		
· 원주방향 균열	2.77	1.0
· 축방향 균열	3.00	1.0
Level C & D 설계조건		
· 원주방향 균열	1.39	1.0
· 축방향 균열	1.50	1.0

* 1차하중은 압력과 굽힘응력을 포함하며,
2차하중은 열응력 및 잔류응력을 포함한다.

야 한다.

· 안전계수가 결함크기 및 하중조합에 대해 일정하지 않다.

· J_{Ic}값은 105kN/m(600 in-lb/in²)보다 크거나 같아야 한다.

· 탄성해석 및 탄소성해석에 잔류응력이 고려되어야 한다.

한편 위의 제한조건을 벗어나는 영역은 DPFAD평가법을 사용하는 절차가 Appendix J에 준비되고 있다.

(2) 오스테나이트 배관(IWB 3640)

오스테나이트 배관에 존재하는 결함에 적용할 평가기준은 Section XI IWB 3640과 Appendix C에 규정되어 있으며 구체적인 내용은 이미 문헌[9]에 보고되어 있다. 오스테나이트 배관의 경우 인성이 높은 모재에서는 소성붕괴에 의한 파괴, 인성이 낮은 용접부에서는 탄소성파괴가 일어날 수 있다. 따라서 각각의 파괴형태를 고려한 극한해석 및 EPFM해석을 통해 얻어진 허용결함 크기가 배관직경의 함수로 제시되어 있다. 여기에 사용된 안전계수는 페라이트 배관의 경우와 같다.

3.3 재료물성치

(1) J-R곡선의 유효한계

EPFM평가를 하는 경우에, 일반적으로 널리 사용되는 전변형률 J적분(deformation J, J_D)대신에 수정 J적분(modified J, J_M)이 사용된다. 양자간의 차이는 파괴인성 시험으로 얻어진 하중 VS 하중선 변위 곡선으로 부터 J-적분을 계산하는 수식에 기인한다. J-controlled 성장조건을 만족하는 균열성장의 유효한계는 J_D의 경우 리거멘트의 약 10%에 불과하나, J_M을 사용하면 리거멘트의 약 50%가 된다. 따라서 J_M을 사용하면 좀 더 높고 실용적인 안전계수를 구할 수 있다.

1987년, 미국 David Taylor 해군연구소에서 수행한 시험결과에 의하면 J_M 저항곡선 값은 시편 크기에 따라 불규칙적으로 변한다는 것이 밝혀졌으며, USNRC에서는 J_M 및 J_D 저항곡선의 유효한계를 구하기 위한 연구를 후원하고 있다. 현재 추천되는 유효한계는 J_D값을 잔여 리거멘트의 30%까지 사용하자는 것이다.

(2) 기준 피로균열성장곡선

Section XI Appendix A에 수록된 대기환경하에서의 기존의 피로균열성장곡선에 응력비 $R(=K\min/K\max)$값의 영향을 고려한 곡선이 수정 제시되어 1989년 addendum에 포함되었다. 한편 ASME 산하의 MPC(material properties council)에서는 A533, A508등의 압력용기 재료의 물환경(water environment)에서의 기준 피로균열 성장곡선을 개발하고 있다.

4. 맺음말

본 글에서는 EPFM을 이용한 구조물의 건전성 평가법을 소개하였다. 이러한 방법을 원자력발전소 NSSS평가에 적용하면 좀 더 정확한 해석결과를 얻을 수 있으며 불필요한 가동중단이나 보수작업을 피할 수 있다. 한편 ASME XI에서 현재 제정중인 EPFM 관련법규도 소개하였는데, 가까운 장래에 결정될 최종안에는 약간의 내용변화가 있으리라 생각된다.

근래에는 건전성평가를 위한 컴퓨터 소프트

웨어가 많이 개발되어 이용되고 있다. 필자들이 아는 바로는 B & W사에서 개발한 DPFAD, Structural Integrity Associate 사에서 개발한 PC-CRACK, 그리고 LBB 설계용으로 EPRI에서 개발한 FLET등이 있다. 국내에서는 필자들에 의해 개발된 EPIES가 있는데 자세한 내용은 관련문헌[10,11]을 참고하기 바란다.

본글에서 소개한 EPFM평가법은 원자력 발전소 뿐만 아니라 가동온도가 높고 연성재료가 널리 사용되는 화력 발전설비, 석유 · 화학설비 및 제철설비등에도 공통적으로 적용될 수 있다.

참고문헌

(1) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, 1989.

(2) Kumar, V., German, M.D. and Shih, C. F., 1981, "An Engineering Approach for Elastic-Plastic Fracture Analysis", EPRI Report No. NP-1931, General Electric Company.

(3) Kumar, V., German, M.D., Wilkening, W.W., Andrews, W.R., deLorenzi, H.G. and Mowbray, D.F., 1984, "Advance in Elastic-Plastic Fracture Analysis", EPRI Report No. NP-3607, General Electric Company.

(4) Kumar, V., German, M.D., 1988, "Elastic-Plastic Analysis of Through-Wall and Surface Flaw in Cylinders", EPRI Report No. NP-5596, General Electric Company.

(5) Harrison, R.P., Loosemore, L. and Milne, I., 1976, "Assessment of the Integrity of Structurs Containing Defects", CEGB Report No. R/H/R6.

(6) Milne, I., Ainsworth, R.A., Dowling, A.R. and Stewart, T., 1986, "Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects", CEGB Report R/H/R6-Rev. 3.

(7) Bloom, J.M., 1982, "A Procedure for the Assessment of the Integrity of Nuclear Pressure Vessels and Piping Containing Defects", EPRI Report NP-2431.

(8) USNRC, 1982, "Resolution of the Task A-11 Reactor-Vessel Materials-Toughness Safety Issue", NUREG-0744, US Nuclear Regulatory Commission.

(9) ASME, 1986, "Evaluation of Flaws in Austenitic Steel Piping", prepared by the ASME Section XI Task Group on Pipe Flaw Evaluation, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 108, pp. 352~366.

(10) 김영진, 최재붕, 손상환, 이주진, 허용학, 1990, "탄소성 파괴역학적 건전성 평가시스템의 개발(Ⅰ)", 대한기계학회논문집, 제14권, pp. 645~655.

(11) 김영진, 1990, "탄소성 파괴역학 적용사례 분석", KINS/HR-001, 한국원자력안전기술원 연구보고서.