

〈論 文〉

탄소성 파괴역학적 건전성 평가 시스템의 개발(I) — 시편의 경우 —

김영진* · 최재봉** · 손상환*** · 이주진**** · 허용학*****
(1990년 2월 9일 접수)

A Development of Integrity Evaluation System Based on Elastic Plastic Fracture Mechanics(I) — Specimen Cases —

Y.J. Kim, J.B. Choi, S.H. Son, J.J. Lee and Y.H. Huh

Key Words : Integrity Evaluation(건전성 평가), Failure Assessment Diagram(파손 평가도),
Stability Assessment Diagram(안정성평가도), J -Integral(J -적분), 찢김계수
(Tearing Modulus)

Abstract

A practically useful system for elastic-plastic fracture mechanics analysis has been developed. The developed system is comprised of the deformation plasticity failure assessment diagram(DPFAD) approach and the J -integral/Tearing modulus(J/T) approach. The system contains analysis routines for five types of fracture specimens : compact tension, center cracked tension, single edge cracked plate in uniform tension, single edge cracked plate in three point bending and double edge cracked plate in tension. A double interpolation scheme was adopted to interpolate J values from the EPRI developed EPFM handbook and the Newton-Raphson method was used to obtain proper loadings for displacement control conditions. A graphic output system was utilized to present numerical results. Several case studies were performed to evaluate the accuracy and the usefulness of the code. It was found that the J/T approach and the DPFAD approach yielded similar results. However, the DPFAD approach is more convenient for quick assessment of integrity of cracked structures while the J/T approach is more useful in evaluating the full history of the fracture process.

1. 서 론

산업의 발달과 더불어 각종 장치산업 설비의 대

형화 및 고성능화가 이루어지고 있으며 사용조건이 가혹화되는 경향이 있다. 주요 장치 설비와 관련하여 안전사고가 발생할 경우 막대한 재산과 인명피해가 일어날 수 있으며 사회적으로도 그 영향이 크므로, 산업 설비들의 안전관리 문제가 더욱 중요시되고 있다.

일반적으로 장치산업설비는 제작과정부터 존재하거나, 사용중 시간이 지남에 따라 발생하는 결함에

*정회원, 성균관대학교 공과대학 기계설계학과

**정회원, 성균관대학교 대학원

***정회원, 생산기술연구원 기술교육센터

****정회원, 한국표준연구소 재료응용실

의해 설비기능이 저하되고 파손에 이르게 된다. 파손사고가 발생하기 전에 비파괴검사를 이용하여 결함을 탐지하고 파괴역학을 이용하여 구조물의 건전성평가(integrity evaluation)를 수행하여 적절한 대책을 세우는 일이 장치산업 설비의 안전관리에 중요한 과제이다.

지금까지 구조물의 건전성평가는 선형탄성파괴역학(Linear Elastic Fracture Mechanics : LEFM)에 근거를 두어 왔다. 그러나 LEFM은 엄밀한 의미에서 재료의 거동이 탄성이고 파괴형태가 취성인 경우에만 적용할 수 있다. 따라서 탄소성 변형을 수반하는 재료의 경우, LEFM의 적용은 부정확한 해석을 초래하게 된다. 특히 연성-취성 천이온도 이상에서 가동되는 재료의 파괴형태는 연성이고, 파괴가 발생하기전 상당한 양의 소성변형을 수반하게 된다. 이같은 문제점은 가동온도가 높고 연성재료가 널리 사용되는 원자력·화력 발전 설비, 석유·화학 설비 및 제철 설비 등에 공통적으로 대두되고 있다.

Rice⁽¹⁾가 소성역을 포함하는 파괴해석의 매개변수로 적분경로에 무관한 J 적분을 제시하고, Begley와 Landes⁽²⁾가 파괴인성치 J 측정법을 제시한 후, 탄소성 파괴역학(Elastic Plastic Fracture Mechanics : EPFM)은 학문적인 측면과 실용적인 측면에서 많은 연구가 이루어졌다. 컴퓨터의 발전과 함께 급격히 성장한 대형 유한요소법 프로그램은 기하학적 및 재료의 비선형해석을 가능하게 하였고 이를 바탕으로 EPFM은 비약적인 발전을 이루게 되었다. 그러나 유한요소법에 의한 EPFM 해석은 막대한 계산비용이 소요되고 고도의 기술을 습득한 전문가만이 수행할 수 있다는 제약에 부딪히게 되어 보다 실용적인 평가법의 개발이 요청되었다.

Harrison 등⁽³⁾은 구조물의 건전성 평가를 위하여 파손 평가도(Failure Assessment Diagram : FAD 또는 R-6 Diagram) 평가법을 제시하였으며, Bloom⁽⁴⁾은 이를 탄소성 변형해석을 포함하는 전변형률 파손평가도(Deformation Plasticity Failure Assessment Diagram : DPFAD) 평가법으로 발전시켰다. 또한 Paris 등⁽⁵⁾은 새로운 탄소성 매개변수로서 찢김계수(tearing modulus) 개념을 도입함으로써 균열성장이 발생하는 경우에도 J 적분을 토대로 한 탄소성 파괴임계값을 추정할 수 있도록 하였다. Kumar 등⁽⁶⁾은 찢김계수와 전변형률 소성

이론(deformation plasticity theory)에 의한 J 값에 근거한 안정성평가도(Stability Assessment Diagram : SAD 또는 J/T) 평가법을 제시하였다. 현재 이들 DPFAD 및 J/T 평가법이 구조물의 건전성 평가를 위한 가장 실용적인 방법으로 정착되어 가고 있다.

ASME Section XI의 결함평가위원회(Flaw Evaluation Committee)에서는 원자력 발전소의 압력용기 및 배관계통의 건전성 평가를 위한 탄소성 파괴역학적 기준을 마련하는 작업이 진행되고 있다^(7,8). 조사취화(radiation embrittlement)에 의해 연성이 저하된 압력용기의 건전성 평가는 J/T 평가법과 DPFAD 평가법을 이용하여 해석할 수 있도록 하였다. 또한 배관계통의 평가는 우선 DPFAD를 이용하여 해석영역을 탄성, 탄소성 및 극한하중(limit load)의 세부분으로 나누고, 탄소성 영역에서는 J/T 평가법을 쓰도록 제정되어 있다.

우리나라의 경우 지난 70년대 이후 중화학공업용 장치산업 및 발전설비가 많이 세워졌으며 점점 노후화되는 설비의 안전관리와 관련하여 안전성 평가 기술의 개발 및 현장적용의 중요성이 시급히 요구되고 있다. 저자들은 이러한 국내상황에서의 응용을 목적으로, EPFM에 바탕을 둔 건전성 평가 절차를 개발하고 있다. 이같은 연구의 일환으로 건전성 평가 시스템 EPIES(Elastic-Plastic Integrity Evaluation System)를 개발하였는데, 본 시스템의 특징은 다음과 같다. 먼저 DPFAD 평가법과 J/T 평가법을 이용하여 종합적인 시스템으로 구성하였으며, 각각의 균열형태에 따라 선택적으로 수행할 수 있도록 하였다. 또한 기억용량이 작은 퍼스널 컴퓨터에서도 사용할 수 있도록 대화식 컴퓨터 프로그램을 개발함으로써 신속하고 경제적인 해석을 가능하도록 하였다.

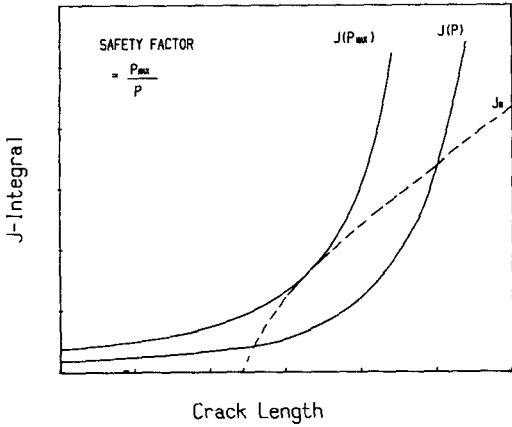
본 논문에서는 EPIES 프로그램의 상세한 내용과 이를 이용한 5가지 파괴역학 시편에 대한 사례 연구에 대하여 보고하고자 한다.

2. 건전성 평가법

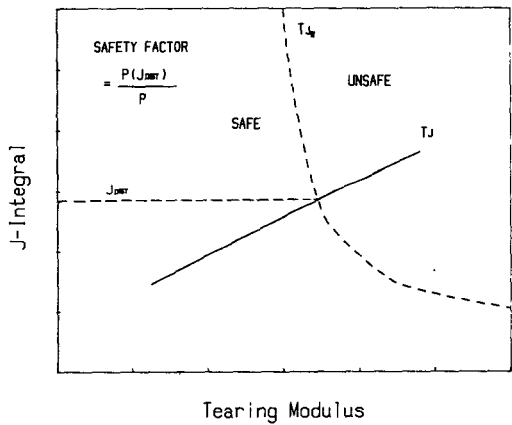
2.1 SAD 평가법

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

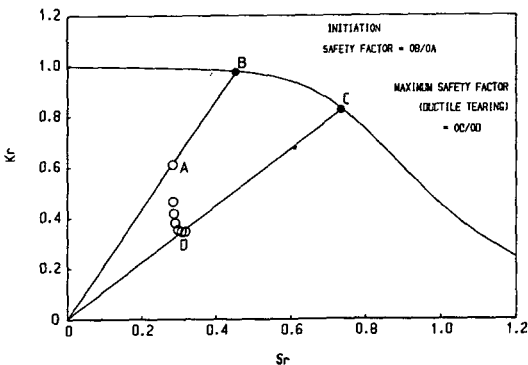
$$\frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0} + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad (1)$$



(a) Crack driving force diagram(CDFD)



(b) J-integral/tearing modulus(J/T)



(c) Deformation plasticity failure assessment diagram(DPFAD)

Fig. 1 Illustration of integrity evaluation method

에 의해 나타낼 수 있다면, 하중 P 가 작용하는 구조물에 존재하는 균열의 균열 진전력은 다음 식으로 구할 수 있다.

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

여기서 J^e 는 Irwin의 소성역을 고려한 유효균열길이(a_{eff})에 근거한 J 값의 탄성성분이며, J^p 는 전변형률 소성이론에 근거한 J 값의 소성성분이다. J^e 값은 LEFM 핸드북⁽⁶⁾에서 구할 수 있고, J^p 값은 EPRI에서 발간한 EPFM 핸드북⁽⁶⁾에 균열의 형상, 가공경화지수(n) 및 h 값의 함수형태로 제시되어 있다.

균열진전력선도(Crack Driving Force Diagram : CDFD)는 실험적으로 측정되는 균열진전 저항력 J_R 값과 역학적으로 계산되는 균열진전력 J 값을 비교함으로써, 균열의 성장 및 파괴과정을 상세하게 해석하는 방법이다. Fig. 1(a)는 CDFD를 도식적으로 나타낸 것으로, 안정성장에 대한 평형조건은 다음과 같다.

$$J(a, p) = J_R(\Delta a) \quad (3)$$

CDFD에서 하중이 고정되어 있는 경우 균열의 불안정 성장 조건은 다음과 같다.

$$\left(\frac{\partial J}{\partial a}\right)p \geq \frac{\partial J_R}{\partial a} \quad (4)$$

여기서 CDFD선도의 기울기, 탄성계수 (J) 및 유동응력(σ_f)을 이용하여 찢김계수(tearing modulus)를 다음과 같이 정의한다.

$$T_J = \frac{E}{\sigma_f^2} \cdot \left(\frac{\partial J}{\partial a}\right)p \quad (5a)$$

$$T_{JR} = \frac{E}{\sigma_f^2} \cdot \frac{\partial J_R}{\partial a} \quad (5b)$$

식 (4)는 식 (5)를 이용하여 균열의 불안정 성장조건을 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$T_J \geq T_{JR} \quad (6)$$

Fig. 1(b)는 식 (5)와 식 (6)에 근거한 J/T 선도를 도식적으로 나타낸 것으로, 작용하중과 균열성장의 조합으로 T_J 값이 T_{JR} 값보다 커지면 불안정 파괴가 일어난다.

CDFD 선도에서 안전계수의 J_R 곡선과 접하는 균열진전력 J 에 해당하는 P_{MAX} 을 구하여 P_{MAX}/P 의 비로서 정의되며, J/T 선도에서는 두 곡선이 만나는 점의 J 값(J_{INST})에 해당하는 P_{MAX} 을 구하여 P_{MAX}/P 의 비로서 정의된다.

2.2 FAD 평가법

영국 CEBG 전력연구소에서 개발한 원래의

FAD⁽³⁾ 평가법은 취성파괴(brittle fracture)와 소성붕괴(plastic collapse)를 파괴기준으로 삼고 있다. Bloom⁽⁴⁾은 재료의 가공경화 효과와 구조물의 기하학적 조건을 고려한 전변형률 소성파손 평가도(Deformation Plasticity Failure Assessment Diagram : DPFAD) 평가법을 제안하였다. Fig. 1(c)는 K_r 을 세로축, S_r 을 가로축으로 한 DPFAD 평가법을 도식적으로 나타낸 것으로, 파손평가곡선은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_r = \sqrt{\frac{J_e}{J}} \quad (7a)$$

$$S_r = \frac{P}{P_0} \quad (7b)$$

여기서 P 는 작용하중, P_0 는 극한해석에서의 극한하중이며 식 (7a)와 식 (2)를 조합하면 다음식을 얻는다.

$$\begin{aligned} J/J^e(a, P) &= 1/K_r^2 \\ &= \frac{J_e(a_{eff}, P)}{J^e(a, P)} + \frac{J^p(a, b, n)}{J^e(a, P)} \\ &= f(S_r) \end{aligned} \quad (8)$$

DPFAD의 평가점의 좌표는 다음과 같이 계산된다.

$$K_r'(a_0 + \Delta a) = \sqrt{J^e(a_0 + \Delta a) / J_R(\Delta a)} \quad (9a)$$

$$S_r'(a_0 + \Delta a) = \frac{P}{P_0(a_0 + \Delta a)} \quad (9b)$$

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

3. 건전성 평가용 프로그램의 개발

3.1 프로그램 EPIES의 구조

건전성 평가를 위한 컴퓨터 프로그램 EPIES는 Fig. 2와 같이 입력부, 해석부 및 출력부의 3부분으로 구성되어 있다. 주 프로그램(main program)의 수행순서는, 먼저 대화식 입력부로부터 필요로 하는 데이터를 읽어 들이고, 주어진 해석조건에 따른 h 값을 선정할 후 FAD (DPFAD) 또는 SAD (CDFD 및 J/T) 해석의 경로를 선택하여 해석작업을 수행한다. 여기서 얻어지는 결과값을 출력부를 통하여 원하는 형태로 출력한다.

EPIES 프로그램은 현재 다음의 5가지 형태의 시편에 대하여 해석할 수 있다.

—Compact tension(CT) specimen

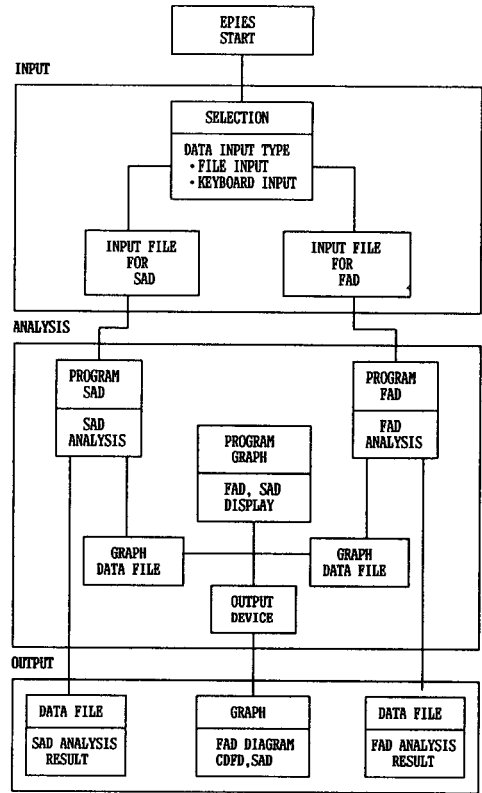


Fig. 2 Flow chart of EPIES program

- Center cracked tension(CCT) specimen
 - Single edge cracked plate(SECP) in three point bending
 - Single edge cracked plate(SECP) in uniform tension
 - Double edge cracked plate(DECP) in tension
- 프로그램의 구성은 앞으로의 해석영역의 확장 및 보완이 용이하도록 모듈 구조의 독립적인 형태로 하였다.

(1) 입력부

입력부는 건전성 평가를 위한 데이터를 입력하는 부분으로 Pascal로 구성되어 있다. 데이터의 입력은 대화식으로 수행되며 입력된 데이터는 파일 형태로 출력되어 해석부로 연결된다. 입력 데이터는 재료의 물성치(Ramberg-Osgood 식의 상수, 항복강도, 인장강도 및 프와송의 비), 파괴저항곡선(J_R 곡선), 시편의 치수, 균열의 길이 및 하중조건을 포함한다. 재료의 물성치와 파괴저항곡선은 사용자가 직접 입력하거나 이미 작성된 텍스트 화

일로부터 EPIES가 읽을 수 있도록 구성하였다.

(2) 해석부

해석부는 FAD(DPFAD) 해석부, SAD(CDFD) 및 J/T 해석부 및 h 데이터 베이스부로 구성되어 있으며 독립된 FORTRAN 프로그램으로 이루어져 있다. 이들 해석 프로그램은 Pascal로 구성된 주 프로그램의 제어에 의해 수행되며 입력부에서 출력된 입력화일에 의해 해석이 수행된다.

FAD 해석부의 흐름도는 Fig. 3과 같으며 다음의 두 단계로 이루어져 있다. 먼저 주어진 데이터에 따라 식 (8)로 주어진 파괴임계곡선식을 계산한다. 이때 J 계산에 필요한 h 값은 별도로 작성된 부 프로그램(subprogram)에 의하여 계산되며, 응력확대계수 K 값은 Tada등⁽⁹⁾의 K 핸드북에 제시된 식을 사용하였다. CT시편의 경우 사용된 수식^(10,11)은 다음과 같다.

$$\frac{1}{J} = \frac{1}{K_r^2}$$

$$= \frac{(2 + a/b \cdot a_e/a)^2 \cdot (1 - a/b)^3}{(1 - a/b \cdot a_e/a)^3 \cdot (2 + a/b)^2} + \frac{a \cdot h_1(a/b, n) \cdot S r^{n-1}}{(1 - \nu^2) \cdot F_1^2 \cdot \Lambda^2 \cdot a/b \cdot (1 - a/b)} \quad (10)$$

여기서

$$\frac{a_e}{a} = 1 + \frac{1}{6\pi} \cdot \frac{(n-1)}{(n+1)}$$

$$F_1^2(a) \cdot \Lambda^2 \cdot (1 - a/b)^2 \cdot \frac{S r^2}{1 + S r^2}$$

$$F_1(a) = \frac{2(2 + a/b)}{(1 - a/b)^{3/2}} \cdot \frac{0.663}{(a/b)^{1/2}}$$

$$\Lambda = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{0.3 + \sqrt{0.9 + 0.4\zeta}}{\zeta}$$

$$\zeta = 1 + 1.1025 \left[\frac{1 + a/b}{1 - a/b} \right]^2$$

이어서 입력된 J 값과 a 값에 따라 식 (9)로 각 포인트별 해석점(K_r' , $S r'$)을 계산하고 그에 따른 안전계수를 계산하며, 최대의 안전계수를 나타내는 지점의 J_R^* 값이 파괴의 임계값으로 출력된다. 이때 2차응력에 의한 열응력 확대계수(thermal

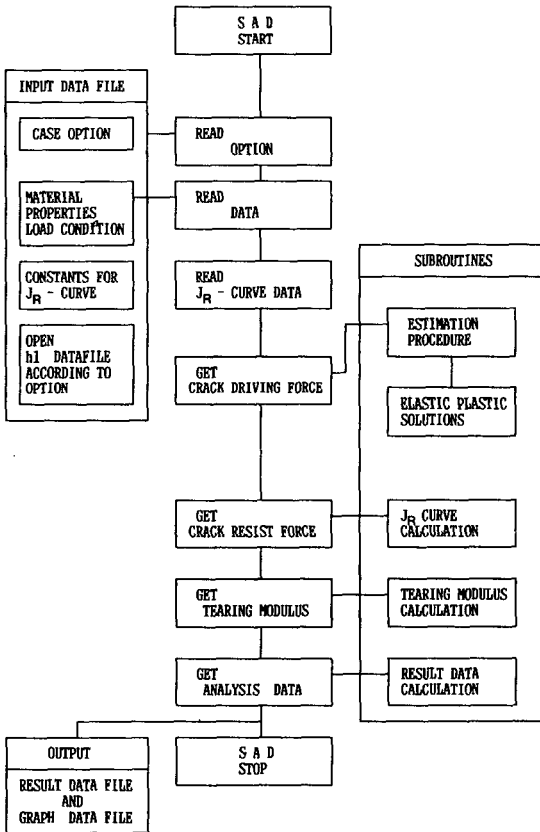


Fig. 3 Flow chart of FAD module

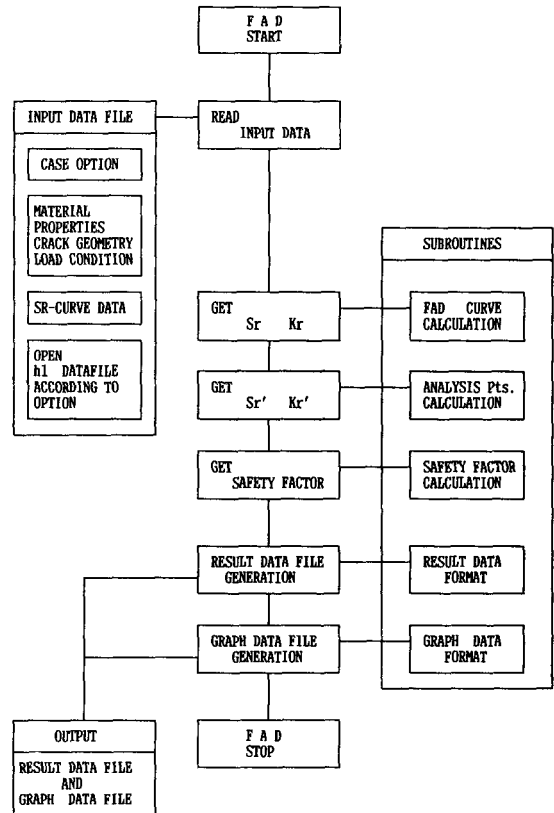


Fig. 4 Flow chart of SAD module

stress intensity factor)도 고려하여 안전계수를 계산할 수 있도록 하였다.

SAD 해석부의 흐름도는 Fig. 4와 같으며 하중제어(load control) 및 변위제어(displacement control) 조건에 대한 해석을 수행할 수 있도록 하였다.

하중제어의 경우 균열 진전력 J 값은 고정된 하중하에서 균열길이 a 를 증가시키며 계산한다. CT 시편의 경우 사용된 수식⁽⁶⁾은 다음과 같다.

$$J = J^e + J^p \\ = \frac{a F_1^2(a/b)}{E' b} \cdot p^2 + a \sigma_0 \epsilon_0 C h_1(a/b, n) \\ (P/P_0)^{n+1} \quad (11)$$

여기서

$$E' = \begin{cases} E & (\text{평면응력}) \\ E/(1-\nu^2) & (\text{평면변형률}) \end{cases} \\ P_0 = \begin{cases} 1.071 \eta C \sigma_0 & (\text{평면응력}) \\ 1.455 \eta C \sigma_0 & (\text{평면변형률}) \end{cases}$$

식 (11)에 의해 구한 균열진전력 곡선에서 하중을 점증시키며 J_R 곡선에 접하는 균열진전력 곡선을 찾도록 하였다. 이 곡선에 해당하는 하중값이 P_{MAX} 이고 접점의 균열성장량이 Δa_{INST} 이다. 그리고 안전계수는 P_{MAX}/P 로 계산하였다. J/T 해석인 경우에는 식 (5a)에 의해 T_J 선도로 얻고 식 (5b)에 의해 J_{JR} 선도를 얻은 후 그 두 선도의 교차점으로부터 J_{INST} 를 얻는다. 이 J_{INST} 에 해당하는 P_{MAX} 를 P 로 나눔으로써 안전계수를 얻도록 하였다.

변위제어의 경우는 불안정파괴 발생없이 안정된 상태로 파괴에 도달한다. 따라서 균열진전력 J 값의 계산은 주어진 변위에 해당하는 하중값을 Newton-Raphson method로 구한 후 이에 해당하는 J 값을 계산하는 방법으로 구성하였다. 변위제어의 경우에는 Δa 값을 점증시키며 J, J_R 값을 계산함으로써 해석이 완료되도록 하였다.

(3) 출력부

해석부에서 해석작업이 종료되면 결과를 수록한 화일과 선도작성을 위한 데이터 화일이 출력된다. 각 데이터 화일은 출력부 프로그램에 입력되어 우선 화면상에 선도가 작성되며, 프린터 또는 플로터를 이용하여 출력하도록 하였다. 이러한 작업은 대화식으로 선택적으로 이루어지도록 구성하였다. 각 출력장치의 운용을 위한 출력부 프로그램은 Pascal을 사용하였으며 부프로그램으로 독립적으로 구성하여 한정된 퍼스날컴퓨터의 RAM을 효율

적으로 사용하도록 하였다. 이들 프로그램은 주 프로그램에 의해 제어되도록 하여 선택조건에 따라 요구되는 출력장치를 이용하도록 하였다.

3.2 h 데이터 베이스

FAD 해석과 SAD 해석에서 균열진전력 J 계산에 요구되는 h 값은 EPRI 핸드북에 6-7개의 a/b (b 는 시편의 폭)와 9개의 n 에 대한 계산결과가 테이블화 되어 있으나 이를 손쉽게 이용할 수 있도록 데이터 베이스화 하였다. 각 경우에 대한 h 값은 데이터 화일형태로 저장하였으며 입력조건에 따라 필요한 화일이 열려 해석 프로그램에 입력된다. h 값의 계산은 별도의 부 프로그램으로 구성하여 각 a/b 에 해당되는 h 값이 계산되도록 하였다. 따라서, 해석하려는 모델의 (a/b) 값이 주어지면 이와 가장 인접한 두 값, 즉 $(a/b)'$ 와 $(a/b)''$ 이 Fig. 5와 같이 결정된다. 그리고 주어진 n 값에 가장 인접한 n_1, n_2 에 해당하는 4개의 h 값 (h_A, h_B, h_C, h_D)을 구할 수 있다.

먼저 주어진 n 에 해당하는 A 와 B 및 C 와 D 사이의 $0', 0''$ 점의 h 값을 보간법으로 구하면

$$h_{0'} = h_A + \frac{(h_B - h_A)}{(n_2 - n_1)} \cdot (n - n_1) \quad (10a)$$

$$h_{0''} = h_C + \frac{(h_D - h_C)}{(n_2 - n_1)} \cdot (n - n_1) \quad (10b)$$

이어서 $h_{0'}, h_{0''}$ 값을 주어진 a/b 에 대해 같은 방법을 적용하면 원하는 h 값을 얻을 수 있다.

$$h_0 = h_{0''} + \frac{(h_{0'} - h_{0''})}{[(a/b)' - (a/b)'']} \cdot [(a/b) - (a/b)''] \quad (11)$$

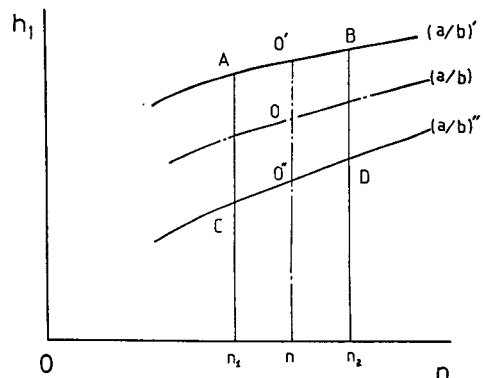


Fig. 5 Illustration of double interpolation scheme

4. 건전성 평가 적용 사례

4.1 해석 결과

본 연구를 통하여 개발된 건전성 평가 소프트웨어 EPIES를 이용하여 5가지 시편에 대한 해석을

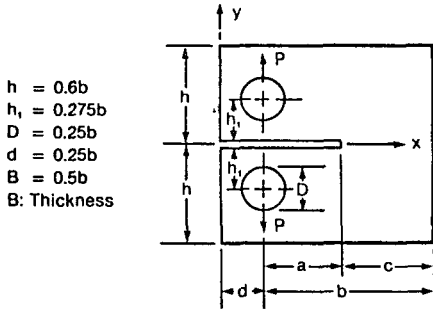


Fig. 6 Geometry of CT specimen

Table 1 Material properties input data for case studies

Material property		
n (Ramberg-Osgood constant)	8.42	
α (Ramberg-Osgood constant)	1.11	
ν (Poisson's Ratio)	0.30	
E (Young's Modulus)	228.00KN/mm ²	
YS (Yield Strength)	0.75 KN/mm ²	
US (Ultimate Strength)	0.75 KN/mm ²	
J_{IC}	1.023 mm-KN/mm ²	
$J_R = C_1(\Delta a) C_2$ (mm-KN/mm ²)	C_1	1023
	C_2	0.673

Table 2 FAD analysis result of CT specimen

No.	Δa (mm)	J_R (mm-KN/mm ²)	S_r	K_r	Safety Factor
1	.500	641.6	1.1129	.6498	1.0535
2	1.5000	1344.0	1.1435	.4577	1.1644
3	2.5000	1895.3	1.1753	.3931	1.1921
4	3.0000	2142.8	1.1916	.3734	1.1939
5	4.0000	2600.5	1.2253	.3458	1.1709
6	5.0000	3021.9	1.2604	.3274	1.1449

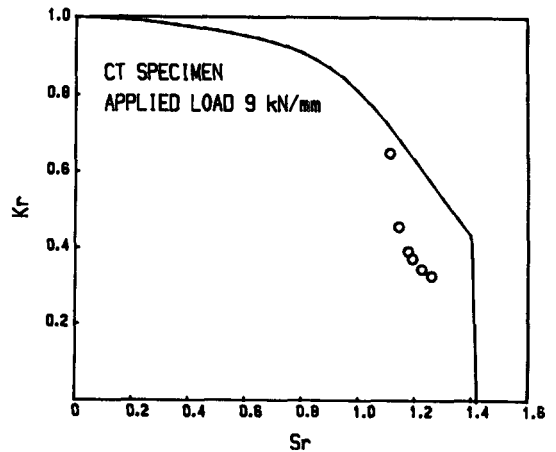
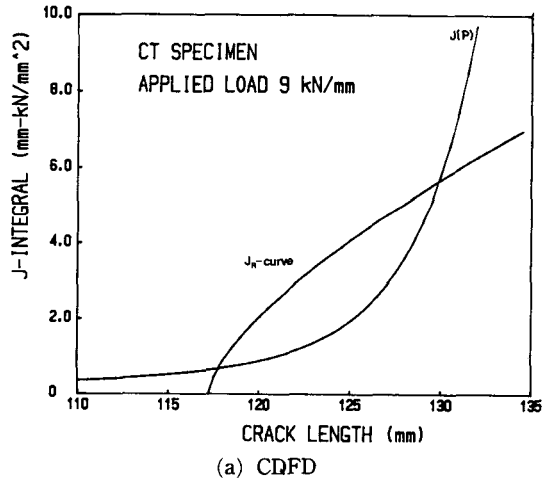
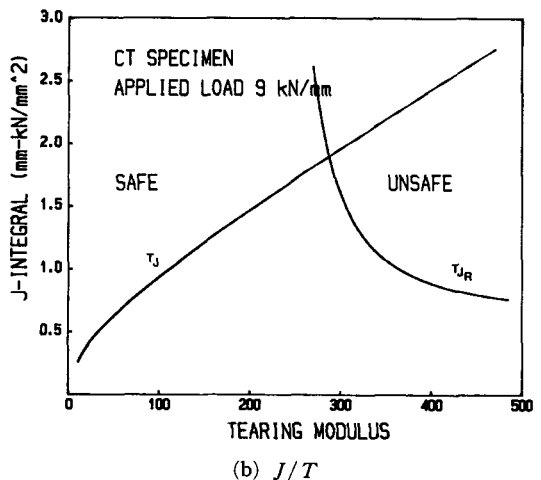


Fig. 7 DPFAD results of CT specimen



(a) CDFD



(b) J/T

Fig. 8 SAD results of CT specimen

수행하였다.

Fig. 6은 해석에 사용된 CT시험편으로 주요 치수는 $a=117.2\text{mm}$, $b=200\text{mm}$, $B=100\text{mm}$ 이며 가해진 단위 두께당 하중(P/B)은 9kN/mm 이다. 이 재료는 한국중공업(주)에서 원자력발전소 압력용기용으로 제작한 A 508 단조강으로, ASTM E813법으로 파괴인성치 측정실험⁽¹³⁾을 수행한 결과 Table 1과 같은 물성치를 갖고 있다. Table 2는 DPFAD해석 결과이며, Fig. 7은 이를 플로터로 출력한 것이다. Fig. 8은 CDFD 및 J/T 해석결과를 플로터로 출력한 것이다. CDFD에 의한 안전계수(P_{MAX}/P)는 1.18이고 FAD의 경우는 1.19로 CDFD를 기준으로 하여 약 0.7%의 차이를 보여주고 있다.

Fig. 9는 해석에 사용된 CCT 시험편으로 주요 치수는 $a=26.2\text{mm}$, $b=50\text{mm}$, $t=50\text{mm}$, $L=150\text{mm}$ 이며 가해진 하중(P/B)은 35kN/mm 이다. Table 3은 DPFAD해석결과이며, Fig. 10은 이를 플로터로 출력한 것이다. Fig. 11은 CDFD 및 J/T

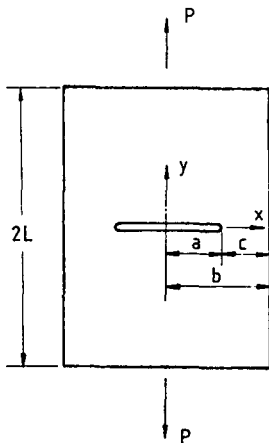


Fig. 9 Geometry of CCT specimen

Table 3 FAD analysis result of CCT specimen

No.	Δa (mm)	J_R (mm -KN/ mm ²)	S_r	K_r	Safety Factor
1	.500	641.6	1.2273	.3086	1.0521
2	1.0000	1023.0	1.2542	.2489	1.0769
3	1.5000	1344.0	1.2823	.2212	1.0806
4	2.0000	1631.1	1.3117	.2045	1.0754
5	2.5000	1895.3	1.3425	.1933	1.0591
6	3.0000	2142.8	1.3748	.1853	1.0335

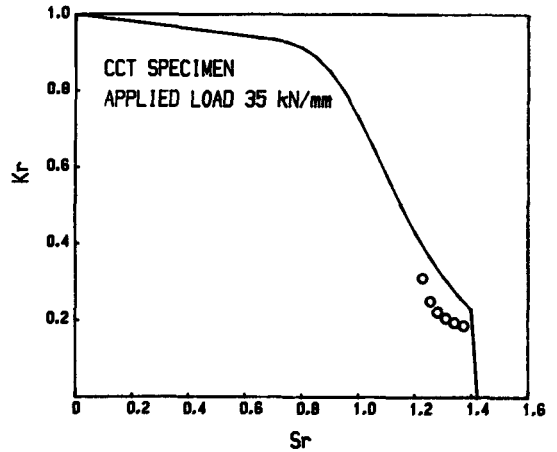


Fig. 10 DPFAD results of CCT specimen

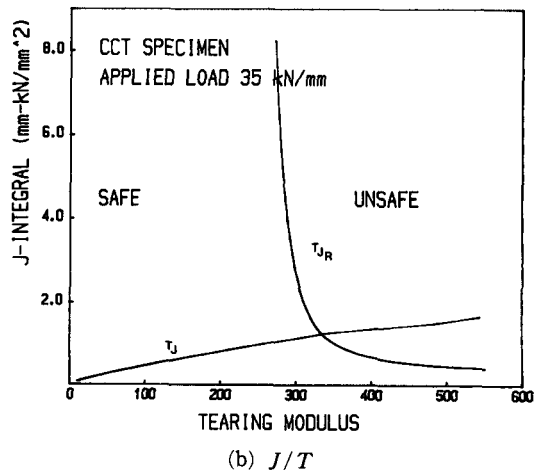
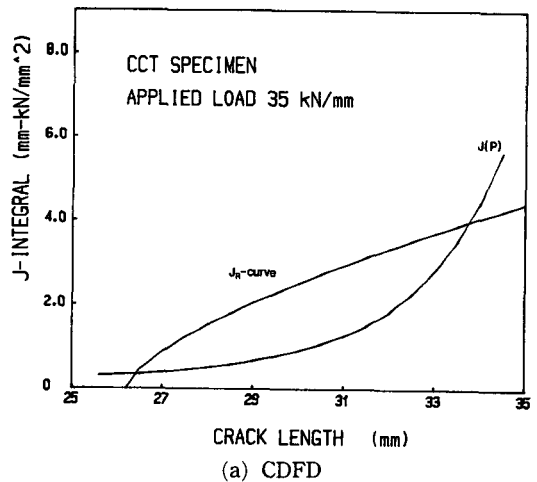


Fig. 11 SAD results of CCT specimen

Table 4 Analysis result of 5 type of specimen

Specimen type	SAD analysis			FAD Analysis	
	P_{MAX} (KN)	Δa_{INST} (mm)	Safety Factor	J_R^*	Safety Factor
CT	1062.1	3.30	1.185	2143.	1.194
CCT	1192.8	2.25	1.136	1344.	1.081
SECP (tension)	1379.7	1.90	1.380	1344.	1.277
SECP (bending)	518.5	2.90	1.152	1313.	1.092
DECP	5392.4	6.20	1.800	2377.	1.951

Note : P_{MAX} ; J_R 곡선과 접하는 J 곡선에 해당하는 하중값

Δa_{INST} ; 안정균열성장량

J_R^* ; 최대안정계수점의 J_R 값

T 해석 결과를 플로터로 출력한 것이다.

안전계수는 CDFD의 경우는 1.14, FAD의 경우는 1.10으로 CDFD를 기준으로 한다면 약 3.5% 이내의 차이를 보여주고 있다. Table 4는 위의 2가지 시편을 포함한 5가지 파괴역학 시편에 대한 해석결과를 정리한 것이다.

4.2 토의

기계나 구조물의 사용도중 가동중 검사(in-service inspection)시에 결함이 발견되면 부품에 작용하는 응력을 고려하여 결함/응력 상호작용 해석(interaction analysis)을 한다. 먼저 부품의 치수와 결함의 형상을 고려하여 해석 모델을 설정하는데, 가급적 보수적(conservative)인 결과를 얻을 수 있는 모델을 EPIES의 5가지 시편 중에서 하나 선택하여 균열진전력을 계산한다. 가혹한 환경속에서 장시간 사용되는 재료는 재료의 열화(degradation)를 고려하여 재료의 파괴저항곡선을 선정한다. 균열 진전력과 파괴저항곡선을 비교하는 것이 결함평가(flaw evaluation) 단계이며 FAD 평가법과 SAD 평가법을 이용할 수 있다.

FAD 평가법은 취성파괴와 소성붕괴를 극한적인 파괴기준으로 삼고 있으므로 재료의 물성치와 무관하게 사용할 수 있다. 그러나 SAD 평가법은 파괴형식이 연성찢김(ductile tearing)인 경우에만 사용

할 수 있다.

본 해석결과 FAD 및 SAD 평가법은 거의 비슷한 안전계수 값을 보여주고 있다. FAD 평가법은 그 해석방법이 매우 간단하며 구조물의 전체적인 상태를 안전계수로 평가하고자 하는 경우에 매우 유용하다. 그러나 SAD 평가법은 임계하중, 불안정 균열성장량 등에 대한 구체적인 값들을 계산할 수 있다. 따라서 건전성 평가시 우선적으로 FAD 해석을 수행한 후 보다 구체적인 해석결과를 원할 경우에는 SAD 해석을 병행하는 것이 바람직하다.

현재 LEFM 해석을 할 수 있는 소프트웨어는 다수 보급되어 있으나, EPFM 해석을 위한 소프트웨어로는 B & W사⁽¹¹⁾에서 개발한 FAD와 EPRI⁽¹²⁾에서 개발한 FLET 정도가 있다. 그러나 이들 소프트웨어는 특정방법에 대한 해석법으로 한정되어 있으며 h 함수는 EPRI핸드북에서 찾아서 수작업으로 입력하도록 구성되어있다.

본 EPIES 소프트웨어는 기존의 소프트웨어와는 달리 파괴역학에 대한 기본적인 지식만 갖추고 있는 사용자면 누구나 손쉽게 사용할 수 있도록 대화식, 도식적으로 구성되어 있으며, 특히 h 함수는 데이터 베이스를 활용한 보간법을 이용하므로 정확도를 높일 수 있다는 것이 장점이다.

현재 EPIES 소프트웨어에는 원통구조물, 표면균열 등에 대한 해석도 가능하도록 확장하는 작업이 진행중에 있으며 미국 NRC에서 제정중인 J/T 선도를 이용한 안전계수계산법에 관한 연구도 진행중이다. 이에 관한 연구결과는 지면관계로 다음편으로 미루고자 한다.

5. 결 론

균열이 존재하는 구조물의 건전성을 탄소성 파괴역학적으로 평가할 수 있는 컴퓨터 소프트웨어 EPIES를 개발하였다. 본 소프트웨어는 파손평가도평가법(FAD), 안정성평가도평가법(SAD)을 사용자가 선택적으로 이용할 수 있도록 구성하였으며 탄소성 균열진전력을 데이터 베이스화 하여 보간법을 사용하였으므로 해의 정확도를 높일 수 있었다. 개발된 EPIES를 이용하여 5가지 파괴역학 시편에 대한 해석을 수행한 결과, FAD 및 SAD 해석결과는 거의 비슷한 안전계수값을 보여주고 있다. 따라서 FAD 평가법은 안전계수만을 구하고자 할 경우에 유용하며, 파괴과정 전반에 대한 구체적인 값들

을 얻고자 할 경우에는 SAD평가법이 바람직하다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 일반기초연구(891-0908-008-2)와 과학기술처 특정연구 연구비 지원으로 이루어진 연구결과의 일부로서 관계제위께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Rice, J.R., 1968, "A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks", Journal of Applied Mechanics, Vol. 35, pp. 379~386.
- (2) Begley, J.A. and Landes, J.D., 1972, "The J-Integral as a Fracture Criterion in Fracture Toughness Testing", in Fracture Toughness, ASTM STP 514, pp. 1~23.
- (3) Harrison, R.P., Loosemore, L. and Milne, I., 1976, "Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects", CEGB Report No. R/H/R6.
- (4) Bloom, J.M., 1982 "A Procedure for the Assessment of the Integrity of Nuclear Pressure Vessels and Piping Containing Defects", EPRI Report NP-2431.
- (5) Paris, P.C., Tada, H., Zahoor, A. and Ernst, H., 1979, "The Theory of Instability of the Tearing Mode of Elastic-Plastic Crack Growth". ASTM STP 668, pp. 5~36.
- (6) Kumar, V., German, M.D. and Shih, C.F., 1981, "An Engineering Approach for Elastic-Plastic Fracture Analysis", EPRI Report No. NP-1931.
- (7) ASME Section XI Working Group on Flaw Evaluations, 1986, "Development of Criteria for Assessment of Reactor Vessels with Low Upper Shelf Fracture Toughness", Draft of All Criteria Document.
- (8) Piping Review Committee, 1984, "Evaluation of Potential for Pipe Break", NUREG-1061, Vol. 3, US Nuclear Regulatory Committee.
- (9) Tada, H., Paris, P.C. and Irwin, G.R., 1973, "The Stress Analysis of Cracks Handbook", Del Reserach Corporation, Hellertown, Pennsylvania.
- (10) Bloom, J.M., 1980, "Prediction of Ductile Tearing of Compact Fracture Specimens Using the R-6 Failure Assessment Diagram", Int. J. Pres. Ves & Piping, Vol. 8, pp. 215~231.
- (11) Zien, H.M. and Bloom, J.M., 1984, "User's Guide for the Failure Assessment Diagram", Babcock & Wilcox.
- (12) Chexal, V.K., Norris, D.M. and Server, W.L., 1988, "Leak-before-break: An Integrated Approach for High Energy Piping", Int. J. Pres. Ves. & Piping, Vol. 34, pp. 237~254.
- (13) 송달호, 김영진, 홍준화, 조영삼, 1988, "국산 원자로용기 재료의 피로 및 파괴특성 시험결과", 1988년 한국원자력학회 춘계학술발표회 초록집, pp. 233~239.