

## 원자력발전소 주요기기의 건전성 평가를 위한 3차원 탄소성 해석 시스템의 개발

허남수\* · 임창주\* · 김영진\* · 표창률\*\* · 박치용\*\*\*  
(1999년 11월 25일 접수)

### Development of a Three Dimensional Elastic Plastic Analysis System for the Integrity Evaluation of Nuclear Power Plant Components

Nam-Su Huh, Chang-Ju Im, Young-Jin Kim, Chang-Ryul Pyo and Chi-Yong Park

**Key Words:** Domain Integral(영역적분), Equivalent Domain Integral(상당영역적분), EPFM(탄소성 파괴역학),  $J$ -integral( $J$ -적분), LBB(파단전누설), LEFM(선형탄성파괴역학)

#### Abstract

In order to evaluate the integrity of nuclear power plant components, the analysis based on fracture mechanics is crucial. For this purpose, finite element method is popularly used to obtain  $J$ -integral. However, it is time consuming to design the finite element model of a cracked structure. Also, the  $J$ -integral should be verified by alternative methods since it may differ depending on the calculation method. The objective of this paper is to develop a three-dimensional elastic-plastic  $J$ -integral analysis system which is named as EPAS program. The EPAS program consists of an automatic mesh generator for a through-wall crack and a surface crack, a solver based on ABAQUS program, and a  $J$ -integral calculation program which provides DI (Domain Integral) and EDI (Equivalent Domain Integral) based  $J$ -integral calculation. Using the EPAS program, an optimized finite element model for a cracked structure can be generated and corresponding  $J$ -integral can be obtained subsequently.

#### 1. 서 론

최근 원자력발전소 주요기기에 대한 건전성 평가시 기존의 선형 탄성 파괴역학(Linear Elastic Fracture Mechanics; LEFM) 해석기법을 탄소성 파괴역학(Elastic Plastic Fracture Mechanics; EPFM) 기법으로 확대하려는 노력이 다각적으로 진행되고 있다. 미국원자력규제위원회(USNRC)에서는 이러한 EPFM 해석기법을 적극 도입하여 원자력발전소 주요기기의 건전성 평가와 관련된 규제

기준에 적용하고 있다. 그 예로 원자력 배관의 파단전누설(Leak-Before-Break; LBB) 설계나 저인성 원자로용기의 수명연장 연구시  $J$ -적분을 매개변수로 한  $J/T$  평가법, DPFAD 평가법 등이 널리 사용되고 있다.<sup>(1,2)</sup>

이와 같이 원자력발전소 주요기기의 건전성 평가 분야에 EPFM을 적용하려면 해석 대상기에 존재하는 균열에 대한 정확한  $J$ -적분값의 계산이 필수적이며, 최근에는 이를 위해 유한요소법이 일반적으로 사용되고 있다. 복잡한 실구조물의 EPFM 해석에 유한요소법을 적용하려면 직접 프로그램을 개발하거나 상용화된 프로그램을 이용하는데, 원자력발전소 주요기기의 경우는 안전성 확보 측면에서 이미 타당성이 입증된 상용 프로그램을 사용하는 것이 일반적이다. 그러나 이러한 상용 프로그램들은 광범위하고 일반적인 해석에 초점을 맞춰 개발된 것으로, 균열부의  $J$ -적분

\* 회원, 성균관대학교 기계공학부  
E-mail : yjkim@yurim.skku.ac.kr  
TEL : (031)290-5274 FAX : (031)290-5276

\*\* 회원, 인덕대학 기계과

\*\*\* 회원, 한국전력공사 전력연구원

값 계산에는 여러 가지 부수작업을 수행해야 하는 문제점이 있다. 특히 3차원 균열부에 대한 해석의 경우, 복잡한 요소망 생성 작업에 많은 시간이 소요되며 수작업을 하여야 하므로 효율적인 해석과 최적화된 요소망 구성에 많은 어려움이 있다. 또한 해석을 수행한 이후에도 정확한  $J$ -적분값의 계산을 위한 후처리 프로그램의 작성이 필수적이다. 특히  $J$ -적분값은 계산 방법<sup>(3~7)</sup>에 따라 상이한 경우가 있어 다양한 방법에 의한 결과의 검증이 필요하다.

본 논문의 목적은 원자력발전소 주요기기의 건전성 평가를 위한 효율적인  $J$ -적분값의 계산을 위해 통합 3차원 탄소성 해석 시스템(Elastic Plastic Analysis System; EPAS)을 개발하는 것이다. EPAS 프로그램은 파괴역학 해석시 가장 널리 사용되고 있는 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS<sup>(8)</sup>를 기반으로 개발한다.

## 2. EPAS 프로그램의 구성

EPAS 프로그램은 원자력발전소 주요기기(원자력 배관, 원자로용기 등)에 존재하는 관통균열(through-wall crack)과 표면균열(surface crack)의 요소망을 자동적으로 생성하는 3차원 자동 요소망 생성 프로그램, ABAQUS 프로그램을 기반으로 한 해석부, 그리고 최적화된  $J$ -적분값을 산출하는 후처리 프로그램으로 구성되어 있다.

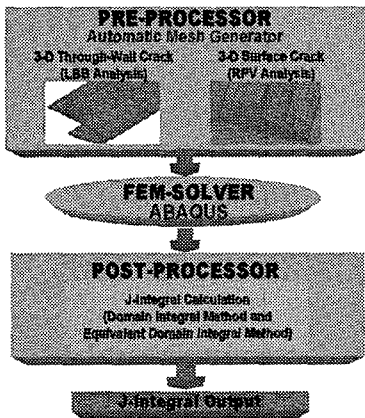


Fig. 1 A Schematic illustration of EPAS program

특히  $J$ -적분 계산의 선진기법인 상당영역적분(Equivalent Domain Integral; EDI)법<sup>(9,10)</sup>을 이용한  $J$ -적분 계산 모듈을 EPAS 프로그램의 후처리부에 추가하여 ABAQUS 프로그램의 영역적분(Domain Integral; DI)법<sup>(11)</sup>으로 구한  $J$ -적분값을 검증할 수 있도록 하였다. Fig. 1은 EPAS 프로그램의 구성과 흐름을 나타낸 것이며, Fig. 2는 본 연구에서 개발한 EPAS 프로그램의 주화면을 나타낸 것이다. EPAS 프로그램은 마이크로소프트 Windows 98(Microsoft Windows 98) 환경에서 개발되었으며 GUI(Graphic User Interface)를 지원하므로 사용자가 쉽게 데이터를 입력하고 수정할 수 있다. 또한 사용자의 편의를 위해서 EPFM 해석 절차를 바탕화면에 도식적으로 나타내어 쉽게 프로그램을 구동할 수 있도록 하였다.

### 2.1 3차원 자동 요소망 생성 프로그램

원자력발전소 주요기기의 건전성 평가를 위한 EPFM 해석을 수행하기 위해서는 균열부에 대한 3차원 요소망을 구성해야 한다. 원자로용기의 경우, 표면균열의 형상이나 클래드(clad)부의 두께가 변경되면 균열부의 요소망을 새로 구성해야 한다. 그러나 이를 상용 프로그램을 이용하여 수작업으로 수행하게 되면 많은 시간과 노력이 소요되며 최적화된 요소망의 생성이 어렵다. 또한 원자력 배관에 대한 LBB 해석시에도 관통균열을 가정하여 유한요소해석을 수행하게 되는데 이 경우에도 배관의 크기, 균열길이 등이 변하게 되면 균열부를 포함한 모든 요소망을 새로 구성해야 한다. 따라서 본 연구에서는 유한요소망과 해석에 필요한 입력 데이터를 자동으로 생성할 수 있는 3차원 자동 요소망 생성 프로그램을 ABAQUS 프로그램을 기반으로 개발하였다.

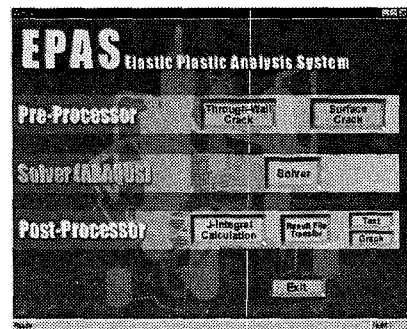


Fig. 2 Main windows for EPAS program

### 2.1.1 관통균열에 대한 자동 요소망 생성

#### 프로그램

관통균열에 대한 자동 요소망 생성 프로그램의 세부적인 기능은 다음과 같다.

#### - 균열형상 입력부

균열형상 입력부에서는 배관의 크기, 관통균열의 길이 등을 입력한다. 특히 LBB 해석시 감지 가능한 누설균열길이(detectable leakage crack length) 산출에 사용되는 PICEP 프로그램<sup>(12)</sup>과의 인터페이스부를 개발하여 쉽게 누설균열길이를 산출할 수 있도록 구성하였다.

#### - 재료물성치 입력부

재료물성치 입력부에서는 해석에 필요한 배관의 재료물성치를 입력한다. LEFM 해석인 경우에는 탄성계수(Young's modulus)와 포아송의 비(Poisson's ratio) 등을 입력하고, EPFM 해석인 경우에는 탄성계수와 재료의 응력-변형률 특성을 입력한다. 특히 EPFM 해석시 필요한 Ramberg-Osgood 상수를 결정하기 위해 USNRC<sup>(13)</sup>에서 제시한 기준에 따른 Ramberg-Osgood 곡선 적합 모듈을 개발하여 프로그램에서 쉽게 상수를 결정할 수 있도록 구성하였다.

#### - 하중조건 입력부

하중조건 입력부는 원자력 배관에 작용하는 하중조건을 입력하는 부분으로 내압(internal pressure)과 굽힘 모멘트(bending moment)의 크기를 입력한다. 굽힘 모멘트는 4점 굽힘법(4-point bending method)을 이용하여 작용되며, 내압의 크기를 입력하면 균열면에 내압의 1/2에 해당하는 압력이 자동으로 작용된다.

#### - 입력파일 생성부

입력파일 생성부에서는 앞에서 입력한 기하학적 형상과 재료물성치, 하중조건 등을 바탕으로 해석에 필요한 최종 입력파일을 생성한다.

### 2.1.2 표면균열에 대한 자동 요소망 생성

#### 프로그램

표면균열에 대한 자동 요소망 생성 프로그램의 세부적인 기능은 다음과 같다.

#### - 균열형상 입력부

균열형상 입력부에서는 균열의 방향(축방향, 원주방향), 클래드의 유무 등을 결정하고, 그에 따른 균열깊이, 균열길이, 원자로용기의 내경 및 두께, 클래드의 두께 등을 입력한다. 또한 균열부의 유한요소수,  $J$ -적분값을 구하기 위한 적분 경로수 등을 사용자가 정의할 수 있다.

#### - 재료물성치 입력부

재료물성치 입력부에서는 해석에 필요한 원자로용기의 모재부와 클래드부의 재료물성치를 입력한다. 세부적인 입력 사항은 관통균열의 경우와 동일하다.

#### - 하중조건 입력부

하중조건 입력부는 원자로용기에 작용하는 하중조건을 입력하는 부분으로 내압과 굽힘 모멘트의 크기를 입력한다. 굽힘 모멘트는 끝단에서 MPC(Multi-Point Constraint)를 이용하여 작용된다.

#### - 입력파일 생성부

입력파일 생성부에서는 관통균열에 대한 요소망 생성 프로그램과 동일하게 앞에서 입력한 기하학적 형상과 재료물성치, 하중조건 등을 바탕으로 해석에 필요한 최종 입력파일을 생성한다.

## 2.2 ABAQUS를 기반으로 한 해석부

ABAQUS 프로그램을 기반으로 한 해석부는 클라이언트/서버(Client/Server) 개념을 이용하여 구성하였다. 일반적으로 상용 유한요소해석 프로그램은 서버인 공학용 워크스테이션(engineering workstation)에서 구동되기 때문에 자동 요소망 생성 프로그램으로 작성한 입력파일을 네트워크를 통해서 서버인 워크스테이션으로 전송한다. 입력파일의 전송이 완료되면 자동으로 서버에 접속되고 ABAQUS 프로그램을 이용한 EPFM 해석이 자동으로 수행된다.

### 2.3 $J$ -적분 산출을 위한 후처리부

앞서 언급한 바와 같이  $J$ -적분값은 계산 방법에 따라 차이가 발생할 수 있기 때문에 다양한 방법에 의한 검증이 필요하다. 본 연구에서는 ABAQUS 프로그램의 기본 사양인 DI법으로 구한  $J$ -적분값을 EDI법으로 검증하는 모듈을 개발하여

일관적인 후처리부를 구성하였다. DI법과 EDI법으로 구한  $J$ -적분값은 텍스트 형식과 그래프 형식을 이용하여 쉽게 비교할 수 있도록 하였다. EDI법을 이용한  $J$ -적분값의 산출에 대해서는 다음 장에 자세하게 기술하였다.

### 3. EDI법을 이용한 $J$ -적분 계산 기법의 개발

#### 3.1 EDI법을 이용한 $J$ -적분식<sup>(10)</sup>

EDI법을 이용한 3차원  $J$ -적분식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$J = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \int_{\Gamma_\epsilon} \left[ wn_1 - \sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_1} n_j \right] d\Gamma \quad (1)$$

여기서,

- $w$  = 변형에너저밀도
- $\sigma_{ij}$  = 응력
- $u_i$  = 변위

여기에서,  $J$ -적분값은 좌표계에 무관하지만 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 균열선단에 수직인 방향을  $x_1$ , 균열면과 균열선단에 수직인 방향을  $x_2$ , 균열면과 균열선단에 평행한 방향을  $x_3$ 로 설정하는 것이 편리하다. Fig. 3에 나타낸 바와 같이 균열선단에 작은 튜브를 설정하면, 튜브의 표면을 따른  $J$ -적분은 다음과 같이 표현할 수 있다.

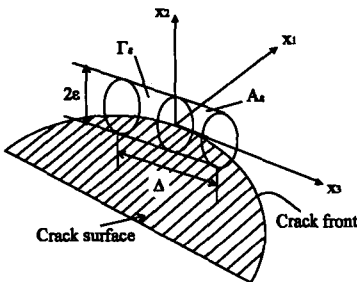


Fig. 3 Crack tip coordinate system

$$J = \lim_{\substack{\epsilon/\Delta \rightarrow 0 \\ \Delta \rightarrow 0}} \int_{A_\epsilon} \left[ wn_1 - \sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_1} n_j \right] d\Gamma \quad (2)$$

Fig. 4와 같이 균열면과 수직이며 균열선단을 중심으로 하는 두께가 얇은 원판을 고려하면 식 (2)는 다음 식과 같이 표현된다.

$$Jf = - \int_{A-A_\epsilon} \left( wn_1 - \sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_1} n_j \right) SdA \quad (3)$$

여기서,

- $A$  = 체적이  $V$ 인 원판의 표면적
- $A_\epsilon$  = 체적이  $V_\epsilon$ 인 원판의 표면적
- $S = S(x_1, x_2, x_3)$ 인 임의의 연속함수
- $f = S$  함수의 면적

식 (3)에 발산정리(divergence theorem)를 적용하면 아래와 같이 된다.

$$\begin{aligned} Jf &= - \int_{V-V_\epsilon} \left( w \frac{\partial S}{\partial x_1} - \sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_1} \frac{\partial S}{\partial x_j} \right) dv \\ &\quad - \int_{V-V_\epsilon} \left[ \frac{\partial w}{\partial x_1} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_1} \right) \right] Sdv(4) \\ &\quad + \int_{A_1+A_2} \left( wn_1 - \sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_1} n_j \right) SdA \end{aligned}$$

여기서,  $A_1$ 과  $A_2$ 는 원판의 양쪽 면적이다.

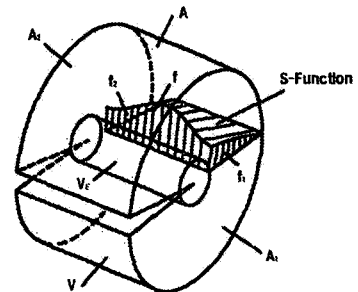


Fig. 4 Integration volume  $V$  around a crack front segment

Fig. 5는 위의 식을 기반으로 본 연구에서 개발한 EDI법을 이용한  $J$ -적분 계산 모듈의 계산 절차를 나타낸 것이다.

3.2 EDI법을 이용한  $J$ -적분 계산 모듈의 검증

본 연구에서는 EDI법을 이용한  $J$ -적분 계산 모듈의 타당성을 검증하기 위해서 연성파괴핸드북(ductile fracture handbook)<sup>(14)</sup>에 제시된 수식으로 구한 결과와 EDI법으로 구한 결과를 비교하였다.

해석대상은 외경(outer diameter)이 356mm, 두께가 35.7mm인 원주방향 관통균열이 존재하는 배관이다. 재료는 SA312 TP316으로 Table 1에 재료 물성치를 정리하였다. 또한 해석을 위해 가정된 관통균열의 길이는 99mm이다. 하중조건은 113 kN-m의 순수 굽힘 모멘트를 작용시켰다.

Fig. 6은 EDI법으로 구한  $J$ -적분값과 굽힘 모멘트의 관계를 연성파괴핸드북으로 구한 결과와 비교하여 나타낸 것이다. 해석 결과, EDI법으로 구한 결과와 연성파괴핸드북으로 구한 결과가 3% 내에서 잘 일치하였다. 따라서 본 연구에서 개발한 EDI법을 이용한  $J$ -적분 계산 모듈의 타당성이 입증되었다.

4. 사례해석

4.1 해석대상

EPAS 프로그램의 타당성과 효용성을 입증하기 위해서 다양한 경우에 대한 사례해석을 수행하였다. 해석대상은 원주방향의 관통균열과 표면균열이 존재하는 배관과 축방향의 표면균열이 존재하

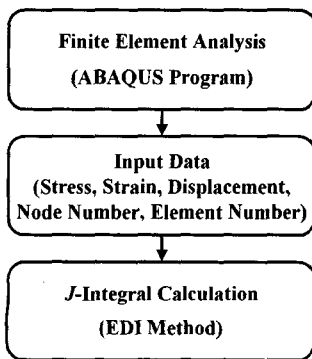


Fig. 5  $J$ -integral calculation procedure based on EDI method

는 배관으로 하중 조건의 변화에 따라 총 9가지 경우에 대해 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 배관 및 균열의 형상을 Table 2에 정리하였으며, Table 3은 각 경우의 하중 조건을 나타낸 것이다. 하중 조건은 원자력발전소 주요기기에 가장 일반적으로 작용하는 내압과 굽힘 모멘트를 고려하였다. Fig. 7은 EPAS 프로그램을 이용한 사례해석에 사용된 대표적인 균열부의 유한요소모델을 나타낸 것으로 (a)는 관통균열에 대한 요소망이며 (b)는 표면균열에 대한 요소망이다.

4.2 해석결과

Fig. 8과 Fig. 9는 EPAS 프로그램의 후처리부로 구한 대표적인 사례해석 결과로 Fig. 8은 Case 3에 대한 해석결과이며, Fig. 9는 Case 5에 대한 해석결과이다. Table 3에 나타낸 바와 같이 Case 3은 원주방향 관통균열이 존재하는 배관에 내압과 굽힘 모멘트를 동시에 작용시킨 경우이며, Case 5는 원주방향 표면균열이 존재하는 배관에 내압만을 작용시킨 경우이다.

Table 1 Material properties for SA312 TP316

SA312 TP316	Young's modulus, $E$ (GPa)	190
	Yield strength, $\sigma_y$ (MPa)	138
	Poisson's ratio, $\nu$	0.3
	Ramberg-Osgood constant, $\alpha$	6.78
	Strain hardening exponent, $n$	3.36

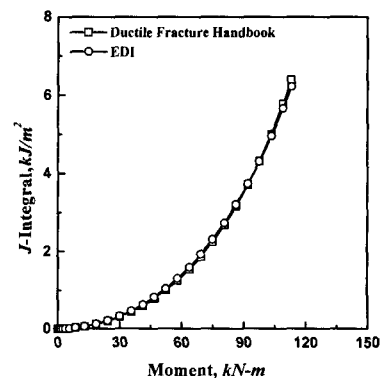
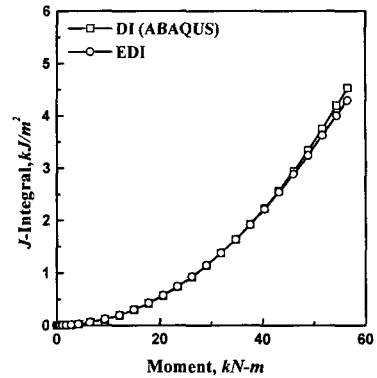


Fig. 6 Comparison of verification results

**Table 2** Summary of cracked pipe geometry

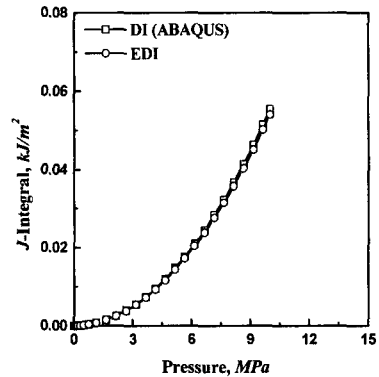
Through-wall cracked pipe	Outer diameter (mm)	356
	Thickness (mm)	35.7
	Crack length (mm)	99
Surface cracked pipe	Outer diameter (mm)	145
	Thickness (mm)	6.6
	Crack length (mm)	1.65
	Crack depth (mm)	4.98



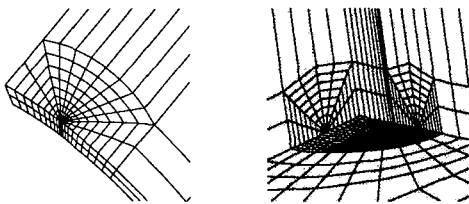
**Fig. 8** Analysis result for Case 3

**Table 3** Analysis matrix for case studies

Case	Crack Shape	Crack Orientation	Loading Condition
Case 1	Through-wall	Circumferential	Bending
Case 2			Pressure
Case 3			Bending + Pressure
Case 4	Surface	Circumferential	Bending
Case 5			Pressure
Case 6			Bending + Pressure
Case 7		Longitudinal	Bending
Case 8			Pressure
Case 9			Bending + Pressure



**Fig. 9** Analysis result for Case 5



(a) Through-wall crack      (b) Surface crack

**Fig. 7** Three dimensional mesh design for cracked area obtained from mesh generator

해석결과 Fig. 8과 Fig. 9에 나타난 바와 같이 Case 3의 경우에는 ABAQUS 프로그램의 DI법으로 구한  $J$ -적분값과 EDI법으로 구한 값이 6%내에서 잘 일치하였으며 Case 5의 경우도 3%내에서 잘 일치하였다. 모든 경우에 대해 해석을 수행한 결과, 최대 6% 정도의 오차가 발생하였으며 모든 균열 형상 및 하중 조건에 대해 EPAS 프로그램의 후처리부에서 DI법과 EDI법으로 구한  $J$ -적분값이 잘 일치하였다. 따라서 EPAS 프로그램을 사용하면 원자력발전소 주요기기의 건전성 평가시 필요한  $J$ -적분값의 계산을 위해 관통균열 및 표면균열의 3차원 유한요소망을 쉽고 효율적으로 구성할 수 있으며, DI법과 EDI법을 사용하여 검증된  $J$ -적분값을 구할 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 원자력발전소 주요기기의 건전성 평가를 위한  $J$ -적분값의 효율적인 계산을 위해 ABAQUS 프로그램을 기반으로 한 3차원 탄소성 해석 시스템인 EPAS 프로그램을 개발하였다. EPAS 프로그램은 원자력발전소 주요기기에 존재하는 관통균열과 표면균열의 요소망을 자동으로 생성하는 3차원 자동 요소망 생성 프로그램, ABAQUS 프로그램을 기반으로 한 해석부, 그리고 최적화된  $J$ -적분값을 산출하는 후처리 프로그램으로 구성되어 있다. EPAS 프로그램을 사용하면 균열부에 대한 3차원 유한요소망을 쉽게 구성할 수 있으며, DI법과 EDI법으로 구한  $J$ -적분값을 비교, 검증함으로써 정확한  $J$ -적분값을 구할 수 있다. 따라서 보다 신속하고 정확하게 EPFM 해석을 수행할 수 있으므로 원자력 배관의 LBB 해석이나 원자로용기의 건전성 평가에 소요되는 시간이 대폭 감소하며, 이로 인해 막대한 설계, 유지 및 보수 비용이 절감될 수 있을 것으로 기대된다.

## 후 기

본 논문은 기초전력공학공동연구소의 연구비 지원('98 전력기술 기초연구)으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) 허남수, 김영진 등, 1999, "차세대 원전배관의 LBB 적용을 위한 수정배관평가선도의 개발," 대한기계학회논문집 A권, 제23권, 제5호, pp. 763~771.
- (2) 1995, "Evaluation of Reactor Pressure Vessels with Charpy Upper-Shelf Energy Less Than 50 ft-lb," Reg. Guide 1.161, USNRC.
- (3) Parks, D.M., 1977, "The Virtual Crack Extension Method for Nonlinear Material Behavior," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 12, pp. 353~364.
- (4) Hellen, T.K., 1975, "On the Method of Virtual Crack Extensions," *Int. Journal of Numerical Methods in Engineering*, Vol. 9, pp. 187~207.
- (5) deLorenzi, H.G., 1982, "On the Energy Release Rate and the J-integral for 3-D Crack Configurations," *Int. Journal of Fracture*, Vol. 19, pp. 183~193.
- (6) deLorenzi, H.G., 1985, "Energy Release Rate Calculations by the Finite Element Method," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 21, pp. 129~143.
- (7) Bass, B.R. and Bryson, J.W., 1983, "Energy Release Rate Techniques for Combined Thermo-Mechanical Loading," *Int. Journal of Fracture*, Vol. 22, R3~R7.
- (8) 1998, "ABAQUS User's manual," Hibbitt, Karlson & Sorensen, Inc.
- (9) Nikishkov, G.P. and Atluri, S.N., 1987, "An Equivalent Domain Integral Method for Computing Crack-Tip Integral Parameters in Non-Elastic, Thermo-Mechanical Fracture," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 26, pp. 851~867.
- (10) Nikishkov, G.P. and Atluri, S.N., 1987, "Three-Dimensional Elastic-Plastic J-integral Calculations for Semi-Elliptical Surface Cracks in a Tensile Plate," *Engineering Fracture Mechanics*, pp. 81~87.
- (11) Shih, C.F., Moran, B. and Nakamura, T., 1986, "Energy Release Rate along a Three-Dimensional Crack Front in a Thermally Stressed Body," *Int. Journal of Fracture*, Vol. 30, pp. 79~102.
- (12) Norris, D.M. and Chexal, B., 1987, "PICEP : Pipe Crack Evaluation Program," *EPRI Report NP 3596-SR*.
- (13) 1987, "Approximate Methods for Fracture Analyses of Through-Wall Cracked Pipe," NUREG /CR-4853, USNRC.
- (14) Zahoor, A., 1989, "Ductile Fracture Handbook, Vol. I," Electric Power Research Institute.