

기기 건전성 평가를 위한 3차원 J -적분 계산 전산코드 응용평가 연구

김영진
성균관대학교 기계공학부

Development of 3-D J -Integral Calculation Method
for Structural Integrity Evaluation

Young-Jin, Kim
School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University

Abstract

In order to evaluate the integrity of nuclear power plants, J -integral calculation is crucial. For this purpose, finite element method is popularly used to obtain J -integral. However, high cost time consuming preprocess should be performed to design the finite element model of a cracked structure. Also, the J -integral should be verified by alternative method 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. 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. 서론

최근 원자력발전소 주요기기에 대한 건전성 평가시 기존의 탄성 파괴역학(Linear Elastic Fracture Mechanics; LEFM) 해석기법을 탄소성 파괴역학(Elastic Plastic Fracture Mechanics; EPFM) 기법으로 확대하려는 노력이 다각적으로 진행되고 있다. 미국원자력규제위원회(USNRC)에

서는 이러한 EPFM 해석방법을 적극 도입하여 원자력발전소 주요기기의 건전성 평가와 관련된 규제 기준에 적용하고 있으며, 원자력 배관의 파단전 누설(Leak-Before-Break; LBB) 설계나 원자로용기의 건전성 평가시 J -적분을 매개변수로 한 J/T 평가법, DPFAD 평가법 등이 널리 사용되고 있다^(1,2)

이와 같이 원자력발전소 주요기기의 건전성 평가 분야에 EPFM을 적용하려면 해석 대상기에 존재하는 균열에 대한 정확한 J -적분의 계산이 필수적이며, 최근에는 이를 위해 유한요소법이 일반적으로 사용되고 있다. 복잡한 실구조물의 EPFM 해석에 유한요소법을 적용하려면 직접 프로그램을 개발하거나 상용화된 프로그램을 이용하는 데 원자력발전소 주요기기의 경우 안전성 확보 측면에서 이미 타당성이 입증된 상용 프로그램을 사용하는 것이 일반화 되어 있다. 그러나 이러한 프로그램들은 상용화를 위해 광범위하고 일반적인 해석에 초점을 맞춰 개발된 것으로, 원자력발전소 주요기기와 같이 특정부위에 대한 J -적분값의 계산에는 여러 가지 복잡한 부수작업을 동반 수행해야 하는 문제점이 있다. 특히 균열부에 대한 3차원 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⁽³⁻⁷⁾에 따라 상이한 경우가 있어 다양한 방법에 의한 결과의 검증이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 원자력발전소 주요기기의 건전성 평가를 위한 J -적분의 계산을 위해 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 기반으로 한 3차원 탄소성 해석 시스템(Elastic Plastic

Analysis System; EPAS)을 개발하고자 한다. 이를 위해 관통균열과 표면균열에 대한 3차원 자동 요소망 생성 프로그램을 개발하고자 한다. 또한 J -적분 계산의 선진 기법인 상당영역적분(Equivalent Domain Integral; EDI)법^(8,9)을 기반으로 한 J -적분 계산 모듈을 EPAS 프로그램에 추가하여 ABAQUS의 영역적분(Domain Integral; DI)법⁽¹⁰⁾으로 구한 J -적분값을 검증할 수 있는 후처리 프로그램을 개발하고자 한다.

2. EPAS 프로그램의 구성

EPAS 프로그램은 원자력발전소 주요기기(원자력 배관, 원자로용기)에 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. Fig. 1은 EPAS 프로그램의 구성과 흐름을 나타낸 것이며, Fig. 2는 본 연구에서 개발한 EPAS 프로그램의 주화면을 나타낸 것이다. EPAS 프로그램은 마이크로 소프트웨어 Windows 98(Microsoft Windows 98) 환경에서 개발되었으며 GUI(Graphic User Interface)를 지원하므로 사용자가 쉽게 데이터를 입력하고 수정할 수 있다.

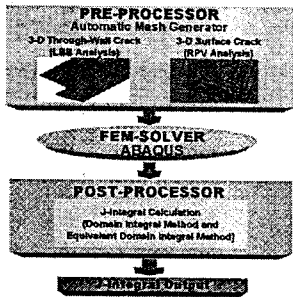


Fig. 1 A schematic illustration of EPAS program

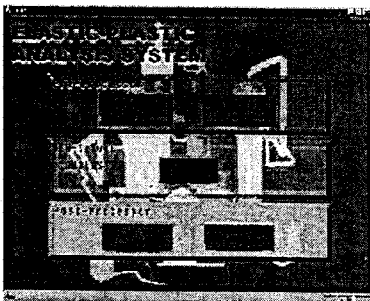


Fig. 2 Main windows for EPAS program

2.1 3차원 자동 요소망 생성 프로그램

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 가정하게 되는데 이 경우에도 배관의 크기, 균열길이 등이 변하게 되면 균열부를 포함한 모든 요소망을 새로 구성해야 한다. 따라서 본 연구에서는 유한요소망과 해석에 필요한 입력데이터를 자동으로 생성하는 3차원 자동 요소망 생성 프로그램을 ABAQUS 프로그램을 기반으로 개발하였다.

2.1.1 관통균열에 대한 자동 요소망 생성 프로그램

Fig. 3은 본 연구에서 개발한 관통균열의 자동 요소망 생성 프로그램의 주화면을 나타낸 것이다. 사용자의 편의를 위해 요소망의 생성 과정을 주화면에 도식적으로 나타내었으며 세부적인 기능은 아래와 같다.

- 균열형상 입력부

균열형상 입력부에서는 배관의 크기, 관통균열의 길이 등을 입력한다. 특히 LBB 해석시 감지가 가능한 누설균열길이를 구하기 위해서 PICEP 프로그램⁽¹¹⁾과의 인터페이스부를 개발하여 쉽게 누설균열길이를 구할 수 있도록 구성하였다.

- 재료물성치 입력부

재료물성치 입력부에서는 해석에 필요한 배관의 재료물성치를 입력한다. 탄성 해석인 경우에는 탄성 계수(Young's modulus)와 포아송의 비(Poisson's ratio) 등을 입력하고, 탄소성 해석인 경우에는 탄성 계수와 재료의 응력-변형률 특성을 입력한다. 특히 탄소성 해석시 필요한 Ramberg-Osgood 상수를 결정하기 위해 USNRC⁽¹²⁾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 굽힘법을 이용하여 작용되며, 내압의 크기를 입력하면 균열면에 내

압의 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

Fig. 4는 본 연구에서 개발한 표면균열에 대한 자동 요소망 생성 프로그램의 주화면을 나타낸 것으로 세부적인 기능은 다음과 같다.

- 균열형상 입력부

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

- 재료물성치 입력부

재료물성치 입력부에서는 해석에 필요한 원자로용기의 모재부와 클래드부의 재료물성치를 입력한다.

- 하중조건 입력부

하중조건 입력부는 원자로용기에 작용하는 하중조건을 입력하는 부분으로 내압의 크기를 입력한다.

- 입력파일 생성부

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

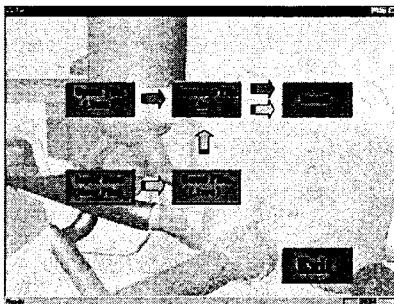


Fig. 3 Mesh generator for through-wall crack

2.2 ABAQUS를 기반으로 한 해석부

ABAQUS 프로그램을 기반으로 한 해석부는 Client/Server 개념을 이용하여 구성하였다. 일반적으로 상용 유한요소해석 프로그램은 server인 공학용 워크스테이션에서 구동되기 때문에 자동 요소망 생성 프로그램으로 작성한 입력파일을 네트워크를 통해 server인 워크스테이션으로 전송한다. 입력파일의 전송이 완료되면 자동으로 server에 접속되므로 사용자는 ABAQUS 프로그램을 이용한 탄소성 해석을 수행할 수 있다. Fig. 5는 본 연구에서 개발한 입력파일의 전송부를 나타낸 것이다.

2.3 J -적분 산출을 위한 후처리부

앞서 언급한 바와 같이 J -적분값은 계산 방법에 따라 차이가 발생할 수 있기 때문에 정확한 J -적분값의 산출을 위해서는 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 있다. Fig. 6은 EDI 기반의 J -적분 계산 절차를 나타낸 것이다.

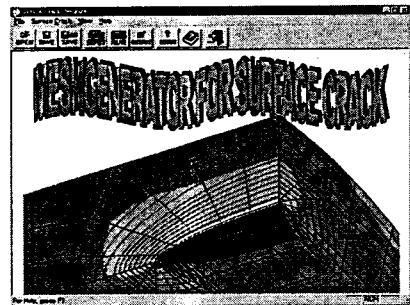


Fig. 4 Mesh generator for surface crack

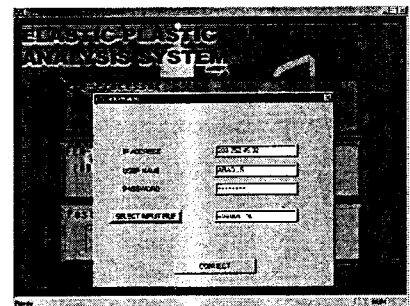


Fig. 5 Windows for input file transfer

3. 사례 해석

본 연구에서는 EPAS 프로그램의 타당성을 검증하기 위해서 원자력 배관에 존재하는 관통균열에 대한 3차원 탄소성 해석을 수행하였다. 배관의 형상 및 균열의 크기는 Table 1에 정리하였다. Fig. 7은 본 연구에서 개발한 관통균열에 대한 자동 요소망 생성 프로그램으로 구성된 배관의 유한요소 모델을 나타낸 것으로 대칭성을 고려하여 전체의 1/4만을 모델링하였다. 하중조건은 순수 굽힘 모멘트만을 작용시켰다.

Fig. 8은 ABAQUS 프로그램의 DI법으로 구한 J -적분값과 EDI법으로 구한 J -적분값을 비교하여 나타낸 것으로 6%내에서 잘 일치하였다. 따라서 EPAS 프로그램을 사용하면 DI법과 EDI법으로 구한 J -적분값을 서로 비교함으로써 정확한 J -적분값을 산출할 수 있다.

Table 1 Summary of cracked pipe geometry

Material	SA312 TP316
Outside Diameter (mm)	356
Wall Thickness (mm)	35.7
Crack Length (% of pipe circumference)	19.6

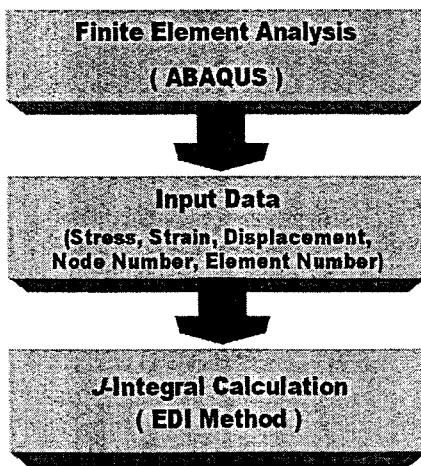


Fig. 6 J -integral calculation procedure based on EDI method

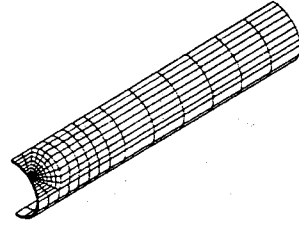


Fig. 7 Three dimensional mesh design obtained from automatic mesh generator

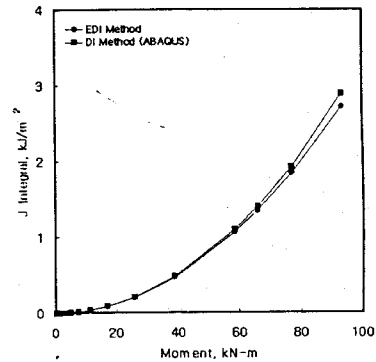


Fig. 8 Comparison of J -integral calculation results

4. 결론

본 연구에서는 원자력발전소 주요기기의 건전성 평가를 위한 J -적분의 계산을 위해 범용 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS를 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.

5. 참고문헌

- (1) "Evaluation of Potential for Pipe Break," NUREG 1061, Vol. 3, USNRC, 1984
- (2) "Evaluation of Reactor Pressure Vessels with

- Charpy Upper-Shelf Energy Less Than 50 ft-lb," Reg. Guide 1.161, USNRC, 1995
- (3) D.M. Parks, "The Virtual Crack Extension Method for Nonlinear Material Behavior," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 12, pp. 353-364, 1977
 - (4) T.K. Hellen, "On the Method of Virtual Crack Extensions," *Int. Journal of Numerical Methods in Engineering*, Vol. 9, pp. 187-207, 1975
 - (5) H.G. deLorenzi, "On the Energy Release Rate and the J-integral for 3-D Crack Configurations," *Int. Journal of Fracture*, Vol. 19, pp. 183-193, 1982
 - (6) H.G. deLorenzi, "Energy Release Rate Calculations by the Finite Element Method," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 21, pp. 129-143
 - (7) B.R. Bass, J.W. Bryson, "Energy Release Rate Techniques for Combined Thermo-Mechanical Loading," *Int. Journal of Fracture*, Vol. 22, R3-R7
 - (8) G.P. Nikishkov, S.N. Atluri, "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, 1987
 - (9) G.P. Nikishkov, S.N. Atluri, "Three-Dimensional Elastic-Plastic J-integral Calculations for Semi-Elliptical Surface Cracks in a Tensile Plate," *Engineering Fracture Mechanics*, 1987
 - (10) C.F. Shih, B. Moran, T. Nakamura, "Energy Release Rate along a Three-Dimensional Crack Front in a Thermally Stressed Body," *Int. Journal of Fracture*, Vol. 30, pp. 79-102, 1986
 - (11) D.M. Norris, B. Chexal, "PICEP : Pipe Crack Evaluation Program," EPRI Report NP3596-SR, 1987
 - (12) "Approximate Methods for Fracture Analyses of Through-Wall Cracked Pipe," NUREG/CR-4853, USNRC, 1987