2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

가압중수로 압력관 결함의 응력확대계수 계산

Calculation of Stress Intensity Factor on Pressure Tube in Pressurized Heavy Water Reactor

최성남, 문호림, 장기상

한국전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

가압중수로 압력관에 Code 허용기준을 초과하는 결함은 파괴역학분석을 통하여 압력관에 대한 안전성을 확인할 수 있도록 Code에 규정되어 있다. 응력확대계수를 계산하기 위한 간접적인 방법인 ASME Boiler & Pressure Vessel Code Sec. XI 방법은 무한평판을 기준한 계산 방법이며, Raju & Newman과 EPRI Ductile Fracture Handbook은 원통형 용기를 기준한 계산 방법이다. 유한요소해석을 통하여 압력관 결함에 대한 응력확대계수를 계산하여, 간접적으로 응력확대계수를 계산한 결과와 비교 검토하였다. 해석 결과 간접적으로 응력확대계수를 구하는 EPRI 및 ASME 계산방법이 유한요소해석보다 보수적인 응력확대계수 값을 갖음을 확인하였으며, 유한요소 해석의 경우 Line Spring Element를 적용할 경우 3차원 유한요소해석에 필요한 시간과 노력을 감소시키면서도 3차원 해석 결과 값과 매우 잘 일치함을 확인하였다.

Abstract

It is written in the CSA code to evaluate and certificate the safety of the pressure tube with flaw of PHWR through the fracture mechanics analysis if the flaw size is not code-allowable. The indirect method to find the stress intensity factor is described by ASME Boiler & Pressure Vessel Code Sec. XI which is based on the infinite plate. The stress intensity factor for the cylindrical vessel can be found indirectly by Raju & Newman method and the method described by EPRI Ductile Fracture Handbook. The stress intensity factors for the flaws in the pressure tube was calculated by the finite element method in this paper. The results was also compared with those calculated by EPRI and ASME methods. It was shown that EPRI and ASME methods give more conservative stress intensity factors than the finite element analysis does. It was also show that 2-D finite element analysis using the line spring element is very efficient and gives good results comparing with 3-D finite element analysis.

1. 서 론

국내 원자력발전소 중 가압경수로(PWR)형은 원자로 압력용기(Reactor Pressure Vessel) 내에서 핵분열을 유도하여 필요한 에너지를 얻지만, 가압중수로(PHWR)형은 원자로 압력용기 대신

핵연료를 운전중에 교체가 가능하도록 설계된 핵연료관에서 핵분열을 유도하여 필요한 에너지를 얻는다. 핵연료관은 핵연료 집합체와 직접 접촉하고 있는 냉각재의 통로로 사용되는 압력관(Pressure Tube), 주위 감속재와 접촉하여 원자로(Calandria)에 용접되어 설치된 원자로관(Calandria Tube), 이것을 양쪽에서 지지하여 주는 End Fitting 및 Bellows, 압력관과 원자로관의 접촉을 막아 냉각재와 감속재 계통의 열전달을 방지하기 위한 Garter Spring Spacer 등으로 구성되어 있다. 특히, 압력관은 길이 6.3m, 직경 103.4mm, 관두께 4.19mm, 평균무게 61.4Kg, 재질은 Zr-2.5% Nb합금으로 설계압력이 300℃에서 10.2MPa이며, 핵연료 물질과 직접 접촉하고 높은 압력과 온도에서 핵분열로 발생된 방사선을 직접 받는 원자로 설비 중에서도 가장 안전성이 요구된다.

국내 월성의 4개 호기 원자력발전소는 가압중수로형이므로, 중수로 압력관(Pressure Tube)은 주기적인 검사와 감시를 수행하여 운영을 안전성을 확인하고 있다. 캐나다 Code CAN/CSA - N285.4-94, 12절에 압력관의 주기적인 감시사항은 다음과 같이 명시하고 있다.

- ○ Code의 허용기준을 초과하는 결함(결함 깊이 0.15mm, 길이 12.7mm, 폭 0.15mm)이 발견되었을 경우 계속 운전을 위해 결함에 대한 건전성 평가를 수행해야 한다.
- ○ 압력관과 칼란드리아관이 접촉되었을 경우 압력관 건전성에 미치는 영향을 평가해야 한다.
- ○ 계속적인 운전을 위해서는 압력관의 파괴인성(Fracture Toughness)을 평가해야 한다.

중수로 압력관의 건전성 평가는 COG(CANDU Owner's Group)을 중심으로 AECL(Atomic Energy of Canada Limited)과 OPG(Ontario Power Generation)사에서 연구를 수행하고 있으며, AECL에서는 '91년도 압력관 건전성 평가 절차서인 FFSG (Fitness For Service Guideline for zirconium alloy pressure in operation CANDU) Rev. 0을 발행하였고, '96년도 12월에 Rev. 1을 발행하였다. 따라서, 위의 절차에 따라 OPG 사에서는 가압중수로 압력관에서 발견된 결함에 대한 건전성 평가를 수행하고 있다.

결함이 발견된 압력관의 건전성 평가에 있어서 가장 중요한 요소 중 하나는 결함 부위의 응력확대계수(Stress Intensity Factor) 결정이다. AECL에서 개발한 결함 평가 절차서인 FFSG에서의 응력확대계수 계산은 ASME Sec. XI, App. A "Analysis of Flaw"에 기술된 응력확대계수 계산 방법을 사용하고 있다. 하지만, ASME 계산 방법은 무한평판을 기초로 한 응력확대계수 결정이며, Raju & Newmann과 EPRI Ductile Fracture Handbook 응력확대계수 결과 방법은 압력용기의 반경영향을 고려한 응력확대계수 결정 방법이다. 가압중수로형 압력관에 발견된 결함에 대한 응력확대계수 계산결과[1,2]의 보수성 검토하기 위해, 유한요소해석 프로그램 ABAQUS[3]를 이용하여 3차원 모델에서의 J적분 해석과 Shell 모델의 Line Spring Element를 사용하여 유한요소해석을 수행하였으며, ASME와 EPRI Ductile Fracture Handbook 응력확대계수 결과와 비교하였다. 가압중수로 압력관의 경우 간접적으로 계산한 응력확대계수 결과는 3차원 유한요소해석 결과보다 보수적임을 확인하였다. 또한 Shell 모델을 사용한 유한요소해석의 경우 3차원 유한요소해석 결과와 매우 잘 일치함을 확인하였다.

2. 본 론

가. ASME Sec. XI, App. A ('95년판)

ASME Sec. XI, App. A[4]에서는 원통형 용기의 반경 R 의 영향을 무시하고 평판에 기초한 식을 사용하여 내부결함 및 표면결함에 대한 응력확대계수 K_I 을 계산한다. 이러한 평판에 기초한 식으로 원통형 용기의 반경의 변화에 무관하게 동일한 식을 사용한다. 그러므로 압력관과 같은 반경의 영향이 큰 경우와 기하학적 형상 변화가 심한 부위, 즉 응력집중부위에 대해서는 해석결과가 보수적으로 평가된다.

ASME Sec. XI의 '95년도 개정판에서는 표면결함의 응력확대계수 K_I 계산방법을 대폭 수정하였다. '92년도 평가법에서는 K_I 계산시 결함위치에서의 응력분포를 선형으로 가정하여 보수적인 값을 사용하였으나, '95년도 평가법에서는 응력분포를 3차 다항식화하여 실제 상태에 보다 가까운 값을 사용하도록 개정하여 지나친 보수성을 줄이도록 하였다. 응력분포를 나타내는데 사용되는 다항식 항은 다음과 같으며,

$$\sigma = A_0 + A_1\left(\frac{x}{a}\right) + A_2\left(\frac{x}{a}\right)^2 + A_3\left(\frac{x}{a}\right)^3 \qquad (1)$$

여기서,

x = 결함표면으로부터 벽두께 방향으로의 거리

A_0, A_1, A_2, A_3 = 상수

이다.

응력확대계수 K_I 계산식은 다음과 같다.

$$K_I = [(A_0 + A_p)G_0 + A_1G_1 + A_2G_2 + A_3G_3]\sqrt{(\pi\frac{a}{Q})} \qquad (2)$$

여기서,

A_p = 실린더 내부 압력 = $\begin{cases} P & \text{(표면결함)} \\ 0 & \text{(기타결함)} \end{cases}$

G_0, G_1, G_2, G_3 = 자유표면 보정계수

이다.

식 (2)에서 A_0, A_1, A_2, A_3는 표면점으로부터 결함깊이 점($0 \le x/a \le 1$)까지의 응력분포를 나타내는 3차 다항식의 상수로서, 결함이 성장하는 경우(피로해석)에는 새로운 결함깊이에 대해 A_0, A_1, A_2, A_3 값을 매 주기마다 새롭게 결정해야 한다.

표면결함에 대한 결함 형상매개변수 Q 는 다음과 같다.

$$Q = 1 + 4.593\left(\frac{a}{l}\right)^{1.65} - q_y \qquad (3)$$

여기서,

l = 결함 길이

a = 결함 깊이

a/l = 결함 형상계수 ($0 \le a/l \le 0.5$)

q_y = 소성역 보정계수

$= [(A_0G_0 + A_1G_1 + A_2G_2 + A_3G_3)/\sigma_{ys}]^2/6$

σ_{ys} = 재료 항복응력

이다.

나. ASME Sec. XI 식 ('92년판)

표면결함에 대한 응력확대계수 K_I은 결함이 없는 상태에서 얻은 벽두께 방향으로의 응력분포를 사용하여 계산한다. ASME Sec. XI 92년판[5]에서는 결함위치에서의 벽두께 방향 응력분포를 그림 1과 같이 막응력과 굽힘응력으로 분리하여 사용한다. 이때 응력분포는 결함의 선단과 표면점에서의 두 응력값을 이용하여 선형분포로 가정한다. 응력확대계수 K_I 계산식

은 다음과 같다.

$$K_I = \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \left(\sigma_m M_m + \sigma_b M_b \right) \quad (4)$$

여기서

σ_m = 막응력(Membrane Stress)

σ_b = 굽힘응력(Bending Stress)

a = 결함 크기(Crack Size)

Q = 형상매개변수(Flaw Shape Parameter)

M_m = 막응력에 대한 수정계수(Correction Factor for Membrane Stress)

M_b = 굽힘응력에 대한 수정계수(Correction Factor for Bending Stress)

이다.

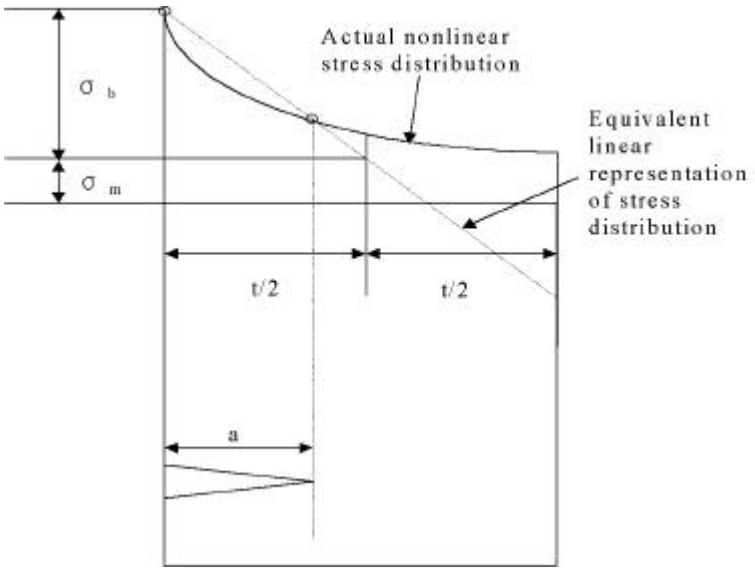

그림 1. 표면결함에 대한 응력분포의 선형화

다. Raju-Newman 식

Raju-Newman 식[6]은 그림 2와 같이 실린더에 존재하는 표면결함에 적용할 수 있으며, 응력분포는 다음과 같은 3차 다항식으로 표현한다.

$$\sigma = \sum_{j=0}^{3} A_j x^j \quad (5)$$

이때 응력확대계수 K_I의 계산식은 다음과 같다.

$$K_I = \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \sum_{j=0}^{3} G_j A_j a^j \quad (6)$$

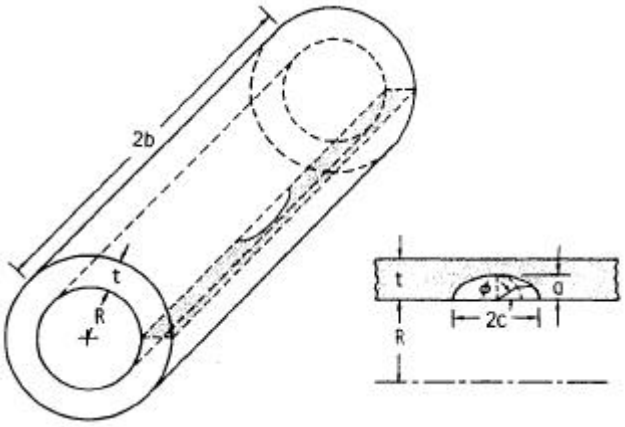

그림 2 원통형 압력용기에 존재하는 내부 표면결함

여기서,

Q = **타원형 결함에 대한 형상매개변수**

$= 1 + 1.464(\frac{a}{c})^{1.65}$

G_j = **영향계수** (t/R, a/c , a/t , $2\phi/\pi$ **의 함수**)

이다.

형상 매개변수 Q **값은** ASME Sec. XI**에서 제시한 식** (3)**과 유사하나 소성역에 대한 보정계수를 포함하지 않고 있다.**

영향계수 G_j **는 반타원형 표면결함**(Semi-Elliptical Surface Crack)**이 원통용기의 안쪽표면에 존재하는 경우와 바깥쪽 표면에 존재하는 경우에 대해** t/R **이 각각** 0.1**과** 0.25**일 때** a/c , a/t , $2\phi/\pi$ **를 변수로 하여 표로 정리되어 있다. 식** (6)**에 의해 계산되는** Raju-Newman **식의 유효적용 범위는** $0.1 < t/R < 0.25$, $0.2 < a/c < 1.0$, $0.2 < a/t < 0.8$**로 이 범위를 벗어나는 경우에 대해서는 적용할 수 없다.**

라. EPRI Ductile Fracture Handbook

EPRI Ductile Fracture Handbook[7]**는 탄소성 하중이 작용하는 다양한 형태의 원통형 기기에 존재하는 결함에 대한 파괴역학분석을 수행하기 위해서 제공된 핸드북이다. 이 핸드북에는 원통용기의 축방향 표면결함에 대한 응력확대계수를 결정하기 위해 그림** 3**과 같이** Finite Length, Axial Part-Throughwall Flaw**가 존재하는 경우 결함깊이가 가장 큰 부위에 대한 응력확대계수는 다음과 같이 정의되었다.**

$$K_I = \sigma(\pi a)^{0.5} \cdot F_2 \qquad (7)$$

여기서, σ= **원주방향응력**

$F_2 = 1.12 + 0.9035\beta + 2.4322\beta^{2.5}$

$\beta = (a/t)(1 - a/2c)^5 (2c/a)^{0.08}$

이다.

식(7)**의 응력확대계수 적용범위는** $0.1 \leq a/t \leq 0.8$, $R/t = 10$**이다.**

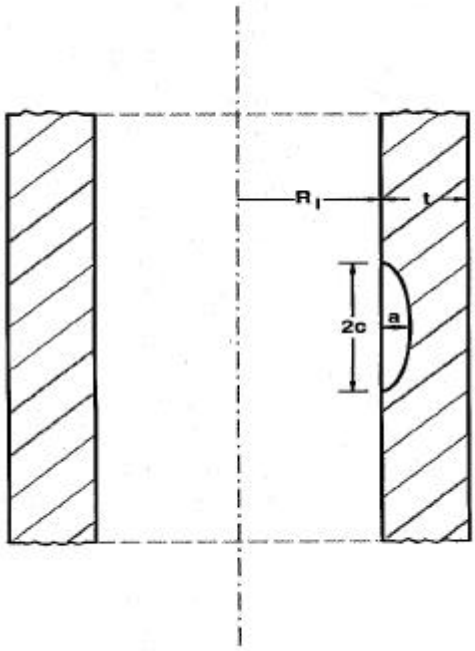

그림 3. 압력관 축방향 결함 형상

마. 유한요소 해석에 의한 응력확대계수 결정

수치적으로 응력확대계수를 계산하는 방법은 여러 가지가 제안되어 있다. 응력확대계수 계산을 위해 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS는 2차원 균열뿐만 아니라 3차원 균열에서 비교적 정확성을 갖는 것으로 평가됨으로 압력관에 표면 결함에 대한 2차원 균열 해석과 3차원 균열해석을 수행하여 압력관 결함 평가시 사용되는 간접법에 의한 응력확대계수와 비교하였다.

1) 가압중수로 압력관 결함 응력확대계수 계산

월성 1호기 가압중수로 압력관 설계수명 210,000 EFPH 말기의 두께는 크리이프와 부식에 의한 벽두께 감소를 포함한 값이다. 따라서 표 1과 같이 응력확대계수 계산에 사용된 압력관의 크기[8]는 설계수명까지의 압력관 두께보다 작은 반경과 큰 두께를 사용하였다.

압력관 내면에 표면결함을 응력확대계수를 비교하기 위해 표 2와 같이 결함을 가정하였다. ASME Sec. XI, App. A(92년판)에 의한 응력확대계수 계산 식(4)와 EPRI Ductile Fracture Handbook에 의한 응력확대계수 식(7)을 적용한 응력확대계수를 계산하였다. 그러나, Raju & Newman에 의한 응력확대계수 계산은 식(6)에 대한 제한조건을 벗어나므로 사용하지 않았다.

표. 1 압력관 모델 치수

압력관 (Pressure Tube)	응력해석 모델		설계 수명	
	반경 R (mm)	벽두께 t (mm)	반경 (mm)	벽두께 (mm)
	52.7	4.46	53.4	4.31

표. 2 압력관 결함 크기

결함 깊이 a (mm)	결함 길이 2c (mm)	정상운전 압력 (MPa)	정상운전 온도 (℃)	반경영향 (R/t)	결함형상 (a/t)
0.19	4.5	10.2	312.2	11.82	0.043

2) 3차원 유한요소 해석

ABAQUS 응력해석 프로그램을 이용하여 3차원 파괴역학분석을 수행하였다. 응력해석 모델은 그림 4와 같이 모델의 대칭성을 고려하여 결함의 1/4만을 모델링 하였으며, 해석에 사용된 모델은 20절점 Quadratic Brick Element를 이용하였다. 결함부위는 1/4절점 요소(Quarter-Point Element)를 사용하였으며, 요소를 세분화하였다.

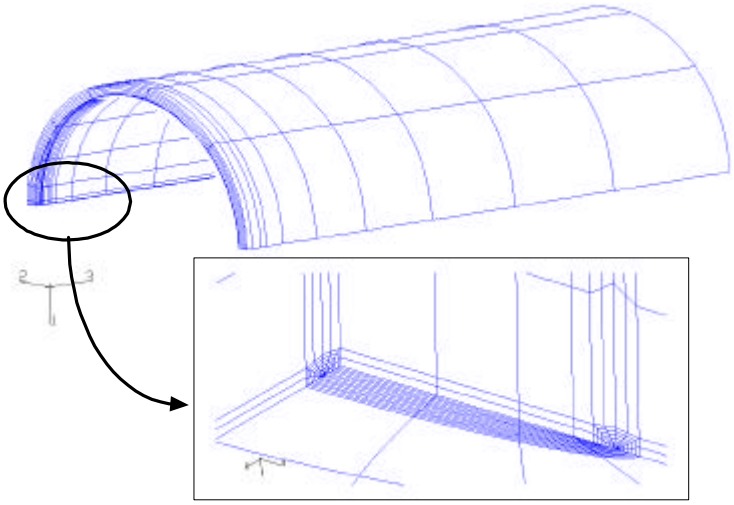

그림 4. 3차원 압력관 표면결함 모델링

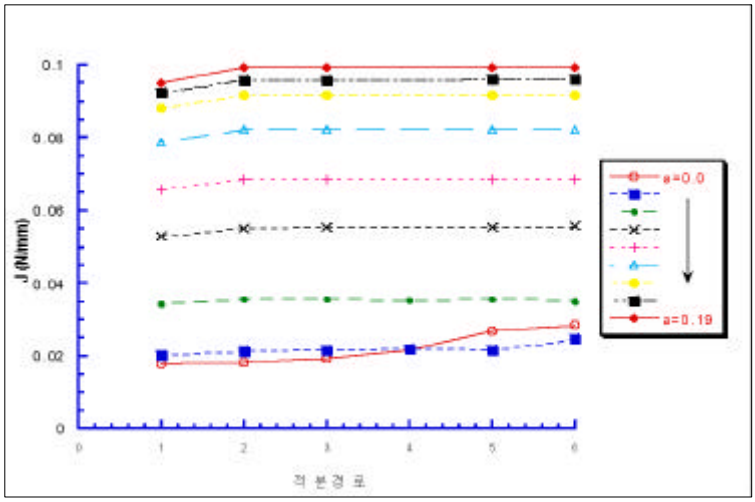

그림 5. 3차원 유한요소 해석 결함부위 J적분값

결함부위는 표면결함으로 거동하도록 구속조건을 사용하지 않았으며, 압력관 내부에 10.2 MPa의 압력을 부여하였다. 유한요소 해석 결과 표면결함의 깊이에 따른 J적분 값은 그림 5와 같다. 그림 5에서와 같이 J 적분 값은 적분 경로에 무관한 값을 나타낸다.

3) 2차원 유한요소해석

ABAQUS를 이용하여 압력관을 Shell Element로 그림 6과 같이 모델링하여 파괴역학분석을 수행하였다. 결함부위는 Line Spring Element를 사용하여 결함부위의 응력확대계수를 구하였다. 결함부위의 J적분 값은 그림7과 같으며, 최대 깊이에서 가장 큰 응력확대계수 값을 갖는다.

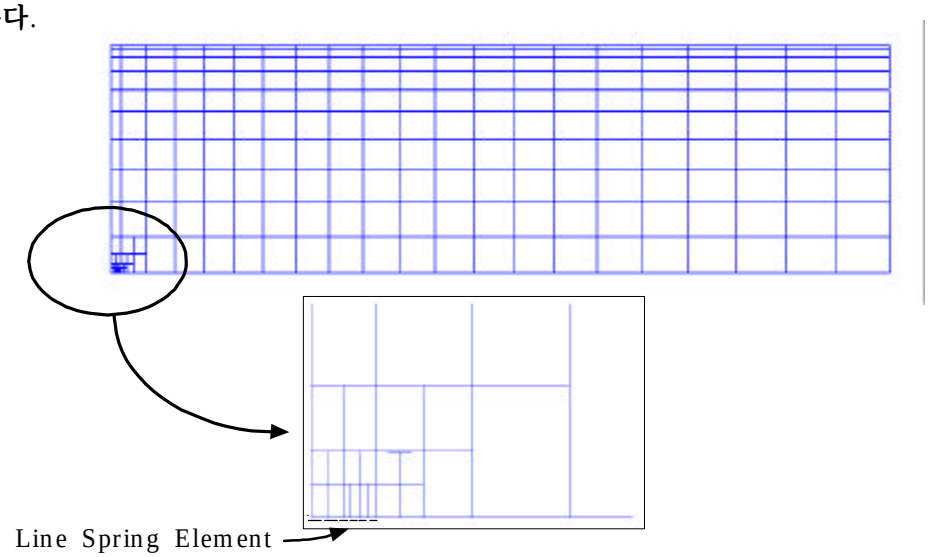

그림 6. 압력관 2차원 표면결함 모델링

4) 응력확대계수 비교

압력관 표면결함의 최대깊이에서의 ASME Sec. XI, App. A, EPRI Ductile Fracture Handbook, 3차원 유한요소해석과 2차원 유한요소해석 결과는 표4와 같다. 또한 표면 결함의 3차원 요한요소 해석 결과인 J적분 평균값과 2차원 유한요소 해석 결과인 J적분값은 그림 7과 같다.

표. 4 압력관 표면결함 응력확대계수 비교

응력확대계수 결정 방법	ASME Sec.	EPRI Handbook	3차원 균열해석	Line Spring Element
응력확대계수* ($N/mm^{3/2}$)	111.71	117.34	105.95	103.6
3차원 모델과의 상대오차(%)	5.44	10.75	0	2.22

* 결함깊이가 가장 큰 위치

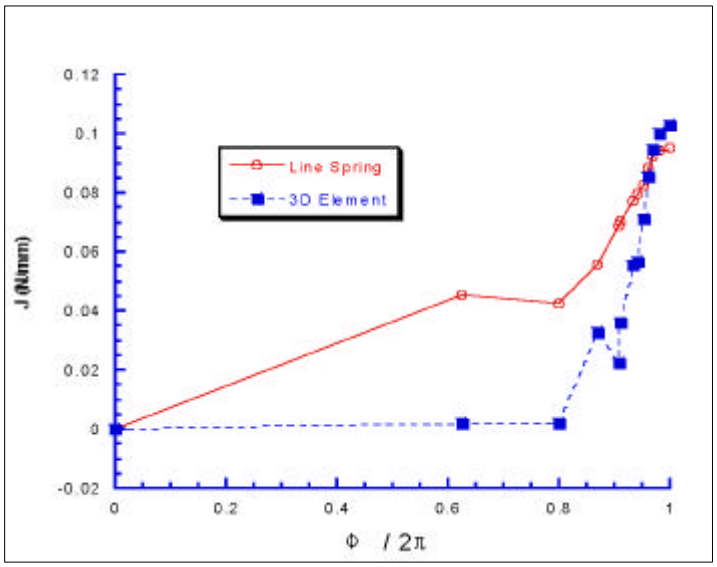

그림 7. 3차원, 2차원 유한요소 해석 결함부위 J적분 값

3. 결 론

가압중수로 압력관 내부에 Code 허용기준을 초과한 결함이 존재할 경우 이에 대한 건전성 평가에 있어서 중요 인자는 결함 주위의 응력확대계수 계산이다. 중수로 압력관의 반경영향을 고려하지 않은 응력확대계수 계산 방법인 ASME Sec. XI과 EPRI Ductile Fracture Handbook 계산결과와 실제 압력관에 결함을 모델링한 유한요소해석 계산 결과와 비교하였다.

1) 압력관의 반경영향을 고려하지 않은 응력확대계수 계산 방법인 ASME Sec. XI 및 EPRI Ductile Fracture Handbook을 이용한 해석결과는 EPRI Handbook값이 ASME 계산방법보다 약 5%정도 보수적으로 평가되었다. EPRI Handbook의 응력확대계수 적용을 위한 제한 조건인 R/t와 a/t를 벗어나 결과로 추정된다.

2) ASME Sec. XI과 EPRI Fracture Handbook에 의한 응력확대계수 계산 결과는 유한요소 해석에 의한 응력확대계수 계산 결과보다 보수적으로 평가됨을 확인하였다. 유한요소해석은 실제 압력관의 반경영향을 고려한 계산이므로 보다 실제적인 응력확대계수 결과로 평가된다.

3) 표면내부 균열에 대하여 유한요소해석에 의한 응력확대계수 비교에서 3차원 해석결과와 2차원 Line Spring Element를 적용한 해석결과는 결함 깊이가 가장 큰 부위에서 약 2.2% 정도 3차원해석 결과가 낮게 나타났다. 3차원 응력해석에 대한 시간과 노력을 비교할 때, Line Spring Element를 적용한 응력확대계수 값은 매우 경제적인 응력확대계수 결정 방법임을 알 수 있다.

참고문헌

[1] "Assessment of Flaws found in Wolsong NGS Unit 1 Fuel Channels during The February 1994 In-Service Inspection Program," Report No. A-NFC-94-67-P, Ontario Hydro Technologies, Feb. 1994.

[2] "Wolsong Nuclear Power Plant Unit 1 Reactor Fuel Channel Inspection," Ontario Hydro, Feb, 1994.

[3] HIBBITT, KARLSSON & SORENSEN, INC "ABAQUS USER MAMUAL," Vol. I, II, III, 1996.

[4] American Society of Mechanical Engineers, "ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. XI," Rules for In-Service Inspection of Nuclear Power Plant Components , July. 1995.

[5] American Society of Mechanical Engineers, "Analysis of Flaws", ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. XI", Rules for In-Service Inspection of Nuclear Power Plant Components, July. 1992.

[6] Raju, I.S. & Newman, J.C., "Stress Intensity Factors for Internal and External Surface Cracks in Cylindrical Vessels," Journal of Pressure Vessel TechnologyVol. 104, pp. 293 298, 1982.

[7] A. Zahoor, "Ductile Fracture Handbook," EPRI RP-1757-69, Vol. 3, Oct. 1990, pp. 8.1-1 7.

[8] "Wolsung-1 Nuclear Power Plant Fuel Channel Assembly Stress Report," SR-59-31100-1, AECL, Dec. 1982.

[9] 김진수, 최재붕, 김영진, 최성남, 장기상, "원자로의 클래드효과가 응력확대계수에 미치는 영향," 대한기계학회 논문집 A권, 제22권 제 10호 pp. 1938 1964, 1998.

[10] 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터, "영광2호기 가압기 안전노즐 용접결함의 파괴역학해석, 최종보고서," 1998.