

영향계수를 이용한 원통용기 축방향 표면결합의 응력확대계수의 계산

장창희[†] · 문호림^{*} · 정일석^{*} · 김태룡^{*}
(2002년 3월 23일 접수, 2002년 9월 6일 심사완료)

Stress Intensity Factor Calculation for the Axial Semi-Elliptical Surface Flaws on the Thin-Wall Cylinder Using Influence Coefficients

Changheui Jang, Ho-Rim Moon, Ill-Seok Jeong, and Tae-Ryong Kim

Key Words: Stress Intensity Factor(응력확대계수), Thin-Wall Cylinder(원통형 용기), Influence Coefficient(영향계수), Semi-Elliptical Flaws(반타원균열), Finite Element Analysis(유한요소해석)

Abstract

For integrity analysis of nuclear reactor pressure vessel, including the pressurized thermal shock analysis, the fast and accurate calculation of the stress intensity factor at the crack tip is needed. For this, a simple approximation scheme is developed and the resulting stress intensity factors for axial semi-elliptical cracks in cylindrical vessel under various loading conditions are compared with those of the finite element method and other approximation methods, such as Raju-Newman's equation and ASME Sec. XI approach. For these, three-dimensional finite-element analyses are performed to obtain the stress intensity factors for various surface cracks with $t/R = 0.1$. The approximation methods, incorporated in VINTIN (Vessel INTEgrity analysis-INner flaws), utilizes the influence coefficients to calculate the stress intensity factor at the crack tip. This method has been compared with other solution methods including 3-D finite element analysis for internal pressure, cooldown, and pressurized thermal shock loading conditions. The approximation solutions are within $\pm 2.5\%$ of the those of FEA using symmetric model of one-fourth of a vessel under pressure loading, and 1-3% higher under pressurized thermal shock condition. The analysis results confirm that the VINTIN method provides sufficiently accurate stress intensity factor values for axial semi-elliptical flaws on the surface of the reactor pressure vessel.

1. 서 론

원전의 원자로 압력용기는 운전중 중성자 조사 취화로 인하여 파괴인성이 저하되는 조사취화 현상을 겪게된다. 조사취화된 원자로 압력용기에 균열이 존재하는 경우 가압열충격 사건⁽¹⁾이 발생하는 경우 급격하게 파손될 위험성이 있다. 이러

한 가압열충격에 대한 건전성 평가를 위해서는 상세한 파괴역학 해석이 수행되어야 한다. 특히, 확률론적 파괴역학 해석에서는 각 균열깊이 및 과도상태 진행시간에 대해 균열선단에서 작용하는 응력확대계수(stress intensity factor)와 Monte Carlo 방법으로 모사된 재료의 파괴인성치를 비교하여 균열의 건전여부를 판단한다.⁽²⁾ 이 때 다양한 균열형상 및 깊이에 대해 균열선단에서의 응력확대계수를 정확하게 평가하는 것이 매우 중요하다.

원자로 압력용기의 노심대영역은 노즐이나 헤드부위로부터 멀리 떨어져 있어 일반적으로 응력

[†] 책임저자, 회원, 전력연구원 원자력연구실
E-mail : chjang@kepri.re.kr
TEL : (042)865-5515 FAX : (042)865-5514

^{*} 회원, 전력연구원 원자력연구실

확대계수 계산시 무한원통으로 가정한다. 원통형 용기에 존재하는 균열에 대한 응력확대계수를 계산하는 방법은 크게 직접 계산법과 간접 계산법으로 나눌 수 있다. 직접 계산법은 균열의 존재를 포함한 원통의 기하학적 형상을 모사해 3차원 유한요소모델을 만들고 내압 등 여러 하중 상태에 대한 응력확대계수를 계산한다. 간접 계산법은 Raju-Newman⁽³⁾ 및 ASME Sec. XI App. A 방법⁽⁴⁾과 같이 균열이 없는 조건에서 각 하중조건에 대한 응력분포를 구하고 영향계수를 이용하여 응력확대계수를 계산한다.

대표적인 응력확대계수의 간접계산법 중 하나인 Raju-Newman 방법은 파괴역학분석에 일반적으로 가장 많이 사용되고 있다. Raju-Newman은 두께/반경비(t/R)이 각각 0.1과 0.25인 무한원통을 대상으로, 균열형상을 다양하게 변화시키면서 축방향 1/8 대칭균열모델에 대한 유한요소해석을 수행하고 이로부터 3차 다항식으로 표시되는 응력분포에 사용할 수 있는 영향계수 값들을 제시하였다. 그러나, Raju-Newman의 응력확대계수의 값은 다른 연구자들의 계산값과 $\pm 10\%$ 의 차이를 보인다.⁽⁵⁻¹⁰⁾ 전력연구원에서도 이러한 영향계수값들을 이용하여 원자로 압력용기 내부 표면에 존재하는 축방향 반타원균열에 대한 응력확대계수를 계산하기 위한 모듈을 개발하였고 이를 가압열충격 건진성평가용 확률론적 파괴역학 해석 코드인 VINTIN에 포함시켰다.⁽¹¹⁾ VINTIN 코드의 응력확대계수 계산의 타당성은 USNRC의 확률론적파괴해석 코드인 FAVOR⁽¹²⁾와 비교검증하였으며⁽¹³⁾ 유한요소 해석결과와의 비교검증도 일부 수행하였다.^(14,15)

본 논문은 VINTIN 코드에 사용된 응력확대계수 계산방법의 타당성을 확인하기 위한 노력의 일환으로 VINTIN 방법을 포함한 여러가지 응력확대계수 계산방법을 소개하고 이들의 계산결과를 ABAQUS⁽¹⁶⁾를 사용한 유한요소해석 결과와 비교하였다. 이러한 비교를 통해 VINTIN 코드에서 사용한 근사해 방법의 타당성을 검증하였다.

2. 응력확대계수 계산방법

2.1 J -적분을 이용한 K 계산

결합이 있는 원통형용기의 응력확대계수를 구하기 위해서 J -적분을 사용한다. J -적분은 Rice⁽¹⁷⁾

에 의해 제안되었으며 다음과 같이 정의된다.

$$J = \int_{\Gamma} (Wdy - T \frac{\partial u}{\partial x} ds) \quad (1)$$

여기서, Γ 는 2차원 변위장내의 임의의 적분경로로서 반시계방향으로 설정되며, T 는 Γ 상에서의 외향법선응력벡터, U 는 변위벡터, ds 는 적분경로상의 미소길이, W 는 아래의 식과 같이 정의되는 변형에너지밀도(strain energy density)이다.

$$W = \int_0^{\epsilon} \sigma_{ij} d\epsilon_{ij} \quad (2)$$

J -적분은 수학적으로 적분경로에 독립적인 성질을 가지며, 또한 탄성영역에서는 에너지해방률 G 와 같다. 본 논문에서는 응력확대계수 계산을 위해 영역적분법에 의하여 J -적분을 범용 유한요소 프로그램인 ABAQUS를 사용하여 구하였다. ABAQUS해석에 의해 구해진 J -적분값과 응력확대계수, K 와의 관계는 다음과 같이 주어진다.

$$K = \sqrt{\frac{EJ}{(1-\nu^2)}} \quad \text{for plane strain} \quad (3)$$

2.2 Raju-Newman 방법

유한요소해석에 의한 응력확대계수 계산은 정확성 측면에서는 장점이 있으나 해석시간이 많이 걸리고 해석모델 및 해석자에 따라 차이가 발생할 수 있다. 또한 확률론적 파괴역학해석과 같이 다양한 하중조건 및 균열깊이에 대한 응력확대계수가 필요한 경우 현실적으로 사용하기 어렵다. 따라서 검증된 유한요소해석 결과를 이용하여 균열이 없는 경우의 응력분포로부터 응력확대계수를 계산하는 방법이 Raju-Newman에 의해 제시되어 널리 사용되고 있다. 아래에는 Raju-Newman 방법을 간략히 소개하였다.

표면에서 균열선단까지 벽두께 방향의 응력분포는 3차 다항식으로 곡선 적합하여 다음과 같이 구하였다.

$$\sigma = \sum_{j=0}^3 A_j x^j = \sum_{j=0}^3 A_j a^j \left(\frac{x}{a}\right)^j \quad (4)$$

여기서 x 는 원통용기 내부 면에서부터의 거리, a 는 균열깊이이다. 식 (4)와 같은 응력분포가 작

용하는 경우 균열면에서의 응력확대계수는 다음과 같이 계산된다.

$$K = \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \sum_{j=0}^3 G_j A_j a^j \quad (5)$$

여기서 G_j = 영향계수
 A_j = 응력다항식 계수
 Q = 형상계수
 $= 1 + 1.464 \left(\frac{a}{c} \right)^{1.65}$

2.3 ASME Sec. XI 방법

ASME Sec. XI App. A에 제시된 방법은 기본적으로 Raju-Newman이 제시한 방법과 유사하며 응력분포 및 응력확대계수는 다음과 같은 식으로 표시된다.

$$\sigma = \sum_{j=0}^3 B_j \left(\frac{x}{a} \right)^j \quad (6)$$

$$K = \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \sum_{j=0}^3 G_j B_j \quad (7)$$

여기서 B_j = 응력다항식 계수

ASME Sec. XI App. A 방법에는 무한원통 대신 무한판재에 존재하는 반타원균열에 대한 영향계수값들이 제시되어 있다.

2.4 VINTIN을 이용한 근사해 방법

VINTIN에서는 수치해석적인 방법을 이용하여 원자로 압력용기 내부에서의 온도분포 및 응력분포를 직접 구한다. 이러한 응력분포는 아래와 같이 3차 다항식으로 근사된다.

$$\sigma = \sum_{j=0}^3 C_j \left(\frac{x}{t} \right)^j \quad (8)$$

여기서 C_j = 응력다항식 계수

이때 식 (4) 및 (6)과는 달리 응력은 원통의 두께 t 에 대해 normalized된 위치에 대해 표시된다. 응력성분이 식 (8)과 같은 3차 다항식의 형태로 주어지는 경우, 반타원균열 선단에서의 응력확대

계수는 다음 식에 의해 구할 수 있다.

$$K = \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \sum_{n=0}^3 G_n C_n \left(\frac{a}{t} \right)^n \quad (9)$$

위의 관계식들을 이용하여 3차 다항식의 형태로 주어지는 응력성분에 의한 응력확대계수 성분을 균열방향 및 크기에 따라 계산할 수 있다. 균열깊이 및 형상별 응력성분에 대한 영향계수 G_n 은 $t/R = 0.1$ 인 무한원통 내부의 축방향 균열에 대한 Raju-Newman의 1/8 대칭균열모델에 대한 해석결과 및 Wu-Carlsson의 무한균열에 대한 해석결과⁽¹⁸⁾로부터 근사한 3차 다항식으로부터 구한다.⁽¹³⁾ 아래에는 형상비(a/c) = 0.4인 반타원균열에 대한 영향계수를 구하는 식을 예로 나타내었다.

$$\begin{aligned} G_0 &= 1.079 - 0.3504(a/t) + 1.7931(a/t)^2 - 1.0806(a/t)^3 \\ G_1 &= 0.667 - 0.0470(a/t) + 0.3882(a/t)^2 - 0.1403(a/t)^3 \\ G_2 &= 0.499 + 0.1597(a/t) - 0.2514(a/t)^2 + 0.2639(a/t)^3 \\ G_3 &= 0.410 + 0.2385(a/t) - 0.5007(a/t)^2 + 0.4153(a/t)^3 \end{aligned} \quad (10)$$

이러한 VINTIN 방법은 균열깊이에 따라 응력분포의 계수를 새로이 구하는 Raju-Newman 및 ASME 방법에 비해 균열깊이에 무관하게 동일한 응력분포를 사용하여 응력확대계수 계산 절차가 매우 간단해지는 장점을 가진다. 그러나 위에서 소개된 Raju-Newman 방법, ASME Sec. XI 방법, VINTIN 방법은 모두 기본적으로 유사한 방법을 사용하며 균열선단에서의 응력분포를 나타내는 방법에 다소 차이가 있는 정도이며 모두 동일한 영향계수를 사용할 수 있다.

3. 해석모델 및 조건

3.1 형상 및 조건

해석에 사용된 원자로 압력용기는 내경 2,184mm, 두께는 216mm이며 클래드는 고려되지 않았다. 원통형용기의 길이는 end effect를 무시할 수 있도록 용기의 반경으로부터 계산하였다.⁽¹⁹⁾ Table 1에 모재의 재료물성치를 제시하였으며 Fig. 1에 해석에 사용한 형상을 도시하였다. 벽두께 대 용기의 내경, t/R 은 0.1로 정하였으며 원통형용기의 내벽에 길이 $2c$, 깊이 a 의 반타원 표면결함을 가정하였다. 열전달은 원통 내벽을 통해서만

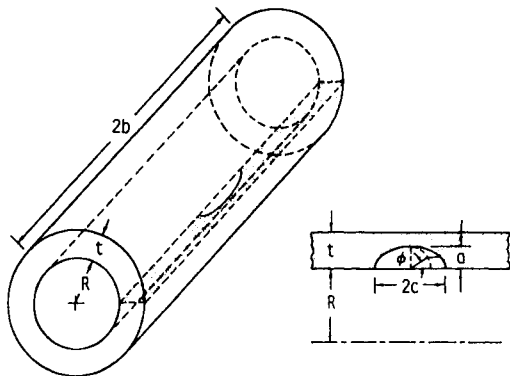


Fig. 1 Schematic of the internal semi-elliptical surface crack in a infinite cylinder

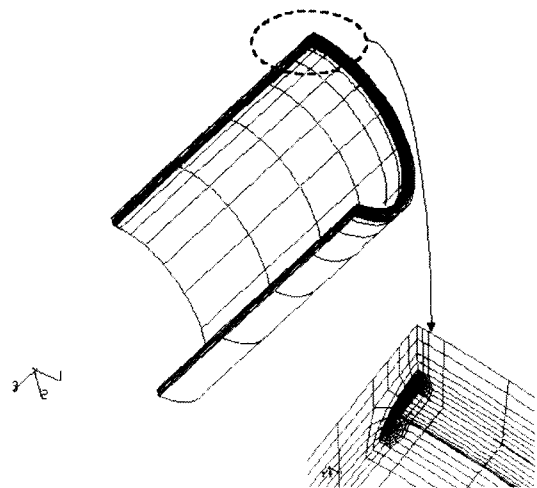


Fig. 2 Details of a typical finite element mesh for symmetric one-fourth of a vessel

Table 1 Thermo-physical properties of the reactor pressure vessel materials

Material Property	Values
Thermal Conductivity, W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹	40.89
Specific Heat, J·Kg ⁻¹ ·°C ⁻¹	509.14
Density, Kg·m ⁻³	7809.2
Modulus of Elasticity, GPa	177.0
Thermal Expansion Coefficient, m·m ⁻¹ ·°C ⁻¹	13.21E-6
Poisson's Ratio	0.3

일어나며 외벽은 단열되어 있다. 내벽면에서의 열전달계수는 1,704W/m²·°C로 일정한 것으로 가정하였다.

해석에 사용된 하중조건 및 해석조건은 아래와 같다.

1) 15.5MPa의 내압조건 : 1/4 및 1/8 대칭균열을 가지는 유한요소해석 결과를 근사식들과 비교

2) 운전온도 288°C의 평형상태에서 원통용기 내부 유체온도가 $T = 51.7 + 236.1 \cdot \exp[-0.05t(\text{min})]$ 에 따라 51.7°C까지 지수함수적으로 급격히 감소하는 냉각조건 : 1/4 대칭균열에 대한 유한요소해석 결과와 근사식 비교

3) 위의 1) 및 2)의 하중이 동시에 발생하는 가압열충격 조건 : 1/4 대칭균열에 대한 유한요소해석 결과와 VINTIN 근사식 비교

3.2 유한요소 해석 모델

유한요소해석은 상용코드인 ABAQUS를 사용하였으며 요소는 20-node quadratic iso-parametric quadratic brick elements with reduced integration 이다. Fig. 2는 해석에 사용된 원통형용기에 대한 1/4 대칭균열모델이며 1/8 모델은 원통의 원주방향으로 90도까지만 있는 것으로 두 가지 유한요소모델의

Table 2 The matrix for finite element analyses

crack depth to crack length(a/c)	Case	Crack depth(a)		Crack length(c), mm
		a/t	a, mm	
1/3	1-1	0.059	12.7	38.1
	1-2	0.118	25.4	76.2
1/5	1-3	0.2	43.2	216
	1-4	0.5	108	540
2/5	1-5	0.2	43.2	108
	1-6	0.5	108	270

자유도는 28,935개로 같다.

내압이 작용하는 경우의 유한요소해석 모델간의 차이를 평가하기 위해 1/4모델과 1/8모델을 사용하였으며 하중조건 2)와 3)에 대해서는 1/4 대칭균열모델을 사용하였다.

형상에서 주어진 대칭면을 따라 각각의 면은 고정경계조건으로 설정하였다. Fig. 2에서는 수평이동을 막기 위해 결합 반대편의 한 점을 구속하였다. 하중조건 1)에 대한 해석에서는 내부표면결합형상을 Table 2와 같이 변화시켰다. Raju-Newman과 동일하게 결합형상비(a/c)는 0.2, 0.4, 결합깊이비(a/t)는 0.2, 0.5로 설정하였다. 또한 결합형상비 1/3, 결합깊이비 0.06과 0.12에 대한 해석도 추가하였다. 결합형상비와 결합깊이비에 따른 총 6가지의 경우에 대해 각각 1/4과 1/8 대칭균열에 대한 유한요소모델을 작성하였다.

하중조건 2)의 경우 Table 3에 나타난 바와 같이 결합형상비(a/c)는 Raju-Newman의 결과 및 ASME Sec. XI App. A의 결과와 비교하기 위해 2/5로 고정시켰으며 결합깊이 a/t는 0.05, 0.1, 0.2, 0.25, 0.4로 변화시켰다.

Table 3 Aspect ratio and a/t of the flaws considered

결함형상비 (a/c)	Case	결함깊이비, a/t	결함깊이, mm (a)
2/5	2-1	0.05	10.8
	2-2	0.1	21.6
	2-3	0.2	43.2
	2-4	0.25	54.0
	2-5	0.4	86.4

하중조건 3)의 경우 결함형상비는 2/5, 균열깊이 $a/t = 0.2$ 에 대해서만 해석을 수행하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 내압조건에서 균열모델의 영향

유한요소모델에 대해 영역적분법으로부터 얻어진 결함 최심점에서의 J -적분 값으로부터 응력확대계수를 구하였다. 주어진 해석모델에 대해 J -적분은 결함선단 부근의 6개의 경로중 결함선단과 가장 가까운 1개의 값을 제외한 5개의 값을 평균하여 계산하였다. 5개의 경로에 의한 J -적분 값은 1% 미만의 차이를 보였다. 최심점에서의 응력확대계수는 평면 변형을 조건에 대한 변환식인 식 (3)에 따라 응력확대계수를 구하였다.

Table 4에 유한요소해석 결과 및 여러 가지 방법에 의한 응력확대계수를 비교하였으며 Fig. 3에서 5에 형상비별로 응력확대계수 계산결과를 나타내었다. Table 4의 마지막 열에서 보듯이 한 개의 결함을 가진 1/4 유한요소모델이 대칭형으로 두 개의 결함을 가진 1/8 유한요소모델의 해석결과값보다 약 4-11% 정도 낮으며 균열깊이가 얇을수록 그 차이가 증가하였다. 이는 Raju-Newman이 낮은 자유도를 가지는 모델로 해석한 결과 제시한 2-4%⁽³⁾에 비해 상당히 큰 차이이다.

Table 4의 세 번째 열에서 보듯이 1/8 유한요소모델을 사용하고 자유도를 4배 정도 증가시킨 본 연구에서는 Raju-Newman의 결과에 비해 응력확대계수가 4-10% 정도 증가하였다. Wang과 Lambert도 자유도를 약 20,000 정도로 증가시켜 1/8 모델에 대한 유한요소해석을 수행한 결과 Raju-Newman 해석결과에 비해 6-8% 정도 높은 영향계수를 구하였으며 자유도의 차이가 그 원인임을 제시하였다.⁽²⁰⁾ 이러한 자유도의 차이로 인해 1/8 균열해석모델을 사용한 Raju-Newman의 응력확대계수 계산값은 현재의 자유도가 증가된 원통용기에 대한 1/4 유한요소모델 해석결과값과

Table 4 Comparison of stress intensity factor from FEM analysis, Raju-Newman's and VINTIN calculation for internal surface crack

Method	Numerical method, %				3D-finite element method, %
	(V-K _{1,8})/K _{1,8}	(R-K _{1,8})/K _{1,8}	(V-K _{1,4})/K _{1,4}	(R-K _{1,4})/K _{1,4}	
Case					
1-1	-8.95%		2.35%		-11.03%
1-2	-8.71%		-0.44%		-8.31%
1-3	-8.44%	-9.59%	-0.43%	-1.68%	-8.05%
1-4	-6.70%	-7.93%	-2.36%	-3.65%	-4.44%
1-5	-7.30%	-8.44%	0.37%	-0.87%	-7.64%
1-6	-3.21%	-4.42%	0.84%	-0.42%	-4.02%

V : VINTIN approximation
 R : Raju-Newman solution
 K_{1,4} : 1/4 symmetric FEM solution
 K_{1,8} : 1/8 symmetric FEM solution

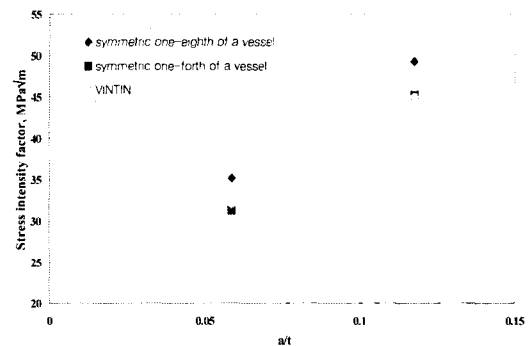


Fig. 3 Comparison of stress intensity factors, for $a/c=1/3$, internal surface crack

비슷하게 되었으며 이는 Table 4의 다섯 번째 열에 나타난 것에서도 알 수 있다.

Table 4의 두 번째 및 네 번째 열에는 VINTIN 코드를 이용한 근사해와 유한요소해석결과를 비교하였다. VINTIN 방법에 의한 응력확대계수는 전반적으로 Raju-Newman 방법과 유사한 결과를 보이지만 약 1% 내외 정도 크게 평가하였다. 이는 VINTIN 방법 역시 Raju-Newman이 제시한 영향계수를 이용하지만 응력분포를 근사하는 방법간의 차이가 영향을 미치는 것으로 보인다. 1/4 유한요소해석 결과와 비교하면 $\pm 2.5\%$ 범위내에서 일치하는 응력확대계수를 제시하였다.

형상비에 따른 응력확대계수를 비교하여 Fig. 3에서 5에 나타내었다. 모든 균열형상비에서 1/4 유한요소모델, Raju-Newman 방법, VINTIN 방법이 서로 유사한 결과를 나타내며 1/8 유한요소해석에 비해 낮은 응력확대계수를 나타내었다.

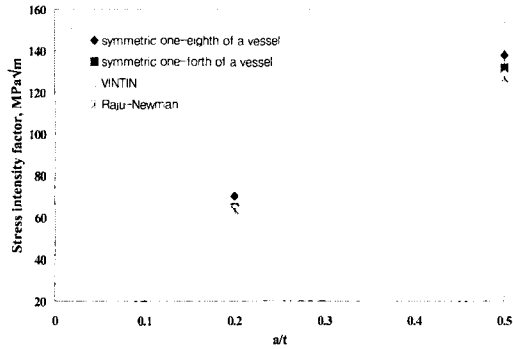


Fig. 4 Comparison of stress intensity factors, for $a/c=1/5$, internal surface crack

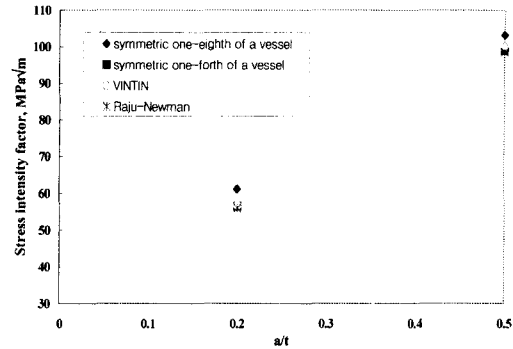


Fig. 5 Comparison of stress intensity factors, for $a/c=2/5$, internal surface crack

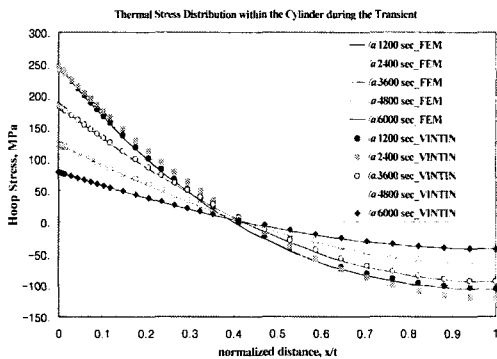


Fig. 6 Comparison of the hoop stress distribution within the vessel at 1200, 2400, 3600, 4800 and 6000 seconds

내압조건에 대한 해석결과를 종합하면 유한요소해석의 자유도 차이로 인해 Raju-Newman의 1/8 유한요소해석 결과는 본 연구의 1/4 유한요소해석 결과와 유사하였다. 따라서 Raju-Newman의 영향계수를 이용한 VINTIN 방법 역시 본 연구의 1/4 유한요소해석 결과와 유사한 응력확대계수를 제시하였다.

4.2 냉각조건에서 계산방법의 영향

4.2.1 응력해석 결과 비교

하중조건 2)에 대한 원통용기 내 응력분포를 Fig. 6에 나타내었다. 두께에 따른 응력분포는 1200초 및 2400초에서 가장 기울기가 급하였으며 열전달/열전도가 진행됨에 따라 이후로는 점차로 완만해지는 경향을 보였다. 그림에서 보는 바와 같이 VINTIN 코드로 계산한 응력분포는 유한요소해석에 의한 것과 거의 일치하였다.

Table 5 Comparison of the influence coefficients, G_n for internal surface crack with $a/c = 2/5$

Case	a/t	App. A				VINTIN			
		0	1	2	3	0	1	2	3
2-1	0.05	1.0879	0.6833	0.5313	0.4482	1.0658	0.6656	0.5064	0.4207
2-2	0.1	1.0947	0.6855	0.5323	0.4488	1.0608	0.6660	0.5127	0.4293
2-3	0.2	1.1210	0.6939	0.5364	0.4511	1.0720	0.6720	0.5230	0.4410
2-4	0.25	1.1399	0.7000	0.5394	0.4528	1.0866	0.6773	0.5273	0.4448
2-5	0.4	1.2135	0.7249	0.5520	0.4605	1.1566	0.7013	0.5395	0.4519

Note : the VINTIN data for case 2)-3 are same as Raju-Newman's

4.2.2 영향계수 비교

주어진 균열조건에 대해 VINTIN에서 계산된 영향계수를 ASME Sec. XI App. A의 값들과 비교한 결과를 Table 5에 정리하였다. Table 5에서 보듯이 VINTIN에 비해 ASME App. A에 제시된 영향계수 값들이 대개 2-6%정도 높음을 알 수 있다. 이는 VINTIN이 $t/R = 0.1$ 인 무한원통에 대해 Raju-Newman이 제시한 영향계수를 이용하여 각 균열깊이에 대한 영향계수를 구하는데 반해 App. A의 값들은 무한판재 (즉, $t/R \rightarrow 0$) 조건에 대해 제시된 값이기 때문으로 볼 수 있다.

Keeney 등은 30,000개 이상의 자유도를 가진 1/4 유한요소모델에 대하여 a/t 를 0.01에서 0.5까지 변화시켜 가면서 해석을 수행하여 영향계수를 계산하였다. a/t 가 0.2, 0.5, a/c 가 0.2인 경우에 Keeney는 Raju-Newman 보다 G_0 값을 5% 높게, ASME App. A보다는 1% 낮게 제시하였다.⁽²¹⁾

4.2.3 응력확대계수 비교

Table 6에는 형상비 $a/c = 2/5$ 인 원통용기 내부표면의 반타원 균열의 깊이별로 과도상태 진행에 따라 1200초, 2400초, 3600초, 4800초 및 6000초에

Table 6 Comparison of the applied stress intensity factors calculated by various methods

Case	a/t	At 1200 Sec				At 2400 sec				At 3600 Sec				At 4800 Sec				At 6000 Sec			
		RN*	AS*	VIN	FEM	RN*	AS*	VIN	FEM	RN*	AS*	VIN	FEM	RN*	AS*	VIN	FEM	RN*	AS*	VIN	FEM
2-1	0.05		38.34	37.64	36.71		38.77	38.03	37.12		29.12	28.55	27.78		19.65	19.27	18.67		12.61	12.36	11.92
2-2	0.1		48.62	47.41	47.47		49.84	48.55	48.53		37.58	36.61	36.45		25.41	24.75	24.55		16.32	15.89	15.70
2-3	0.2	52.17	54.95	52.96	52.39	54.97	57.85	55.72	54.96	41.79	43.97	42.35	41.61	28.35	29.83	28.73	28.10	18.24	19.19	18.48	18.04
2-4	0.25		54.67	52.63	51.69		58.31	56.09	54.89		44.48	42.78	41.71		30.23	29.07	28.24		19.46	18.71	18.13
2-5	0.4		47.63	46.17	44.40		52.49	50.90	48.52		40.42	39.19	37.15		27.57	26.73	25.23		17.78	17.24	16.22

* Used stress distribution fitted using FEM results

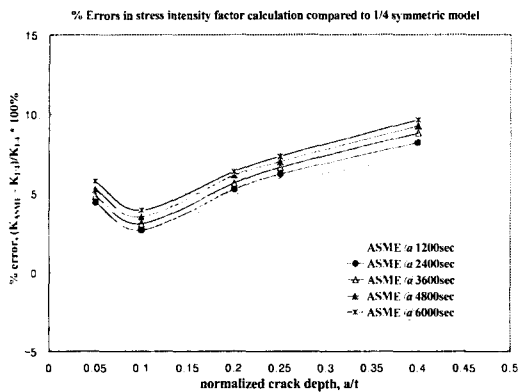


Fig. 7 Percent difference in stress intensity factors, $(K_{ASME} - K_{1.4}) / K_{1.4} * 100\%$

서 균열선단에서의 응력확대계수 계산결과를 정리하였다. 단, Raju-Newman 방법 및 ASME Sec. XI App. A 방법에 따른 응력확대계수 계산을 위해 유한요소해석으로부터 구한 균열선단까지의 응력 분포를 3차 다항식으로 근사한 후 사용하였다. 균열깊이 $a/t = 0.2$ 인 경우 모든 시간에서 Raju-Newman 방법과 VINTIN 방법이 1/4 균열모델을 사용한 유한요소 해석에 의한 응력확대계수와 가장 근사한 값을 제시하였으며 이는 앞에서 다룬 내압조건에 대한 해석 결과와도 잘 일치한다.

전체적으로 ASME Sec. XI App. A 방법은 유한요소해석 및 VINTIN 방법에 비해 큰 응력확대계수를 제시하였으며 이는 무한원통 대신 무한판재 형상을 가정하였기 때문으로 생각된다. Fig. 7에는 ASME App. A 방법에 따른 해석결과와 유한요소해석 결과의 차이를 나타내었다. 균열깊이 a/t 가 0.1일 때는 ASME App. A 방법이 유한요소해석에 비해 약 2.4% 정도 큰 응력확대계수를 나타내었으나 그 외 균열크기에 대해서는 대개 5-10% 로 그 차이가 증가하였다. 또한 과도상태가 진행됨에 따라 차이가 커지는 경향을 보였다.

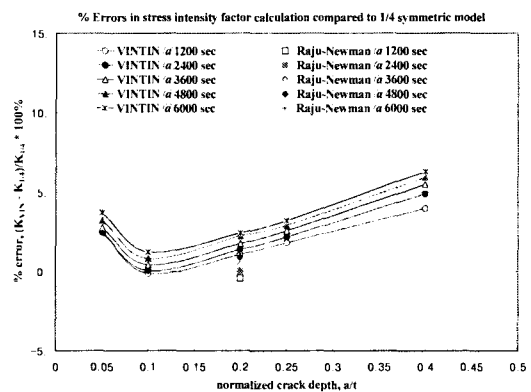


Fig. 8 Percent difference in stress intensity factors $(K_{VINTIN} - K_{1.4}) / K_{1.4} * 100\%$

Fig. 8에는 VINTIN 해석결과와 유한요소해석 결과의 차이를 나타내었다. 전체적으로는 Fig. 7과 유사한 거동을 보이나 유한요소해석 결과와의 차이는 a/t 가 0.1일 때 -0.1-1.2%로 크게 줄어들며 다른 균열깊이에 대해서도 최대 6.3% 이내로 유지되었다. 내압조건에서의 결과와 비교하면 $a/t = 0.2$ 인 경우 내압조건에서의 차이가 0.4%인데 비해 냉각조건에서는 1.1-2.5%로 그 차이가 다소 증가하였다. 이 보다 깊은 균열의 경우 $a/t = 0.5$ 의 경우 내압조건에서의 차이는 0.8%이나 냉각조건에서의 경우 $a/t = 0.4$ 에서 차이는 4.0-6.3%로 증가하였다. 따라서 내압조건에 비해 냉각조건에서 VINTIN 방법과 유한요소해석의 차이가 커지는 것을 알 수 있다. 이는 내압조건의 경우 응력분포의 상수항에 대한 영향계수 G_0 의 영향이 가장 크지만 냉각조건의 경우 나머지 영향계수들의 영향과 응력을 3차 다항식으로 근사할 때 발생하는 오차들이 복합적으로 작용하여 유한요소해석과의 차이가 증가하는 것으로 생각할 수 있다.

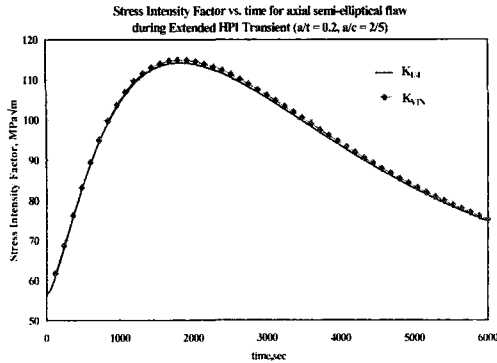


Fig. 9 Comparison of stress intensity factor at the tip of semi-elliptical axial crack during the PTS transient

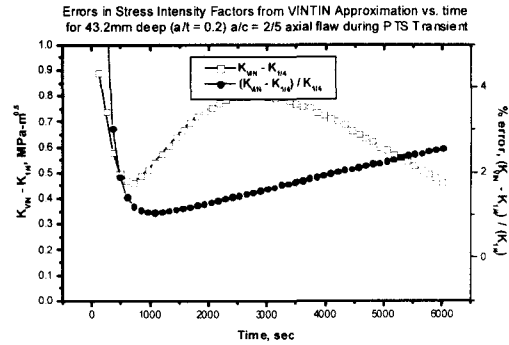


Fig. 10 Differences between VINTIN approximation and 1/4 symmetric FEM solution of stress intensity factor at the tip of semi-elliptical axial crack during the PTS transient

4.3 가압열충격조건에서 VINTIN 근사해석

앞에서는 각각 내압조건 및 냉각조건에서의 유한요소해석결과와 VINTIN을 포함한 여러 가지 근사해 방법을 비교하였다. 내압과 냉각조건이 동시에 작용하는 가압열충격 평가에서는 열응력과 압력에 의한 응력이 동시에 고려되고 압력 및 열응력에 의한 응력확대계수 계산에 미치는 영향을 평가하여야 한다.

가압열충격 조건인 하중조건 3)에 대해 1/4 유한요소모델 및 VINTIN에 의해 구해진 $a/t = 0.2$ 인 균열 선단에서의 응력확대계수를 Fig. 9에 나타내었다. 전 과도상태 기간 동안 유한요소해석에 비해 VINTIN 방법이 거의 일치하는 응력확대계수 값을 제시하는 것을 알 수 있다.

Fig. 10에 과도상태 시간별로 응력확대계수 간의 차이를 나타내었다. VINTIN 방법은 전체 해석 기간 동안 1/4 대칭균열모델의 유한요소해석에 비해 1 MPa√m 이내로 크게 계산하였으며 비율로는 과도상태 발생 초기를 제외하고는 대개 1-2.5% 보수적으로 크게 평가하였다. 이러한 차이는 내압조건 (약 0.4%) 보다는 크지만 냉각조건 (최대 2.5%)에 비해서는 작은 값이다.

비록 균열크기가 증가하면 열응력에 의한 응력확대계수는 결과의 차이가 다소 증가하지만 여전히 ASME Sec. XI App. A 방법에 비해서는 차이가 적을 것으로 예상된다. 열응력에 의한 영향이 큰 가압열충격을 포함한 원자로 압력용기 건전성평가에 VINTIN 방법을 사용하는 경우 관심있는 균열크기(대개 $a/t < 0.5$)에 대해서 최대 5% 이하의 차이를 보일 것으로 예상되어 다소 보수적이지만

유한요소해석 대신 사용할 수 있을 것이다.

5. 결론

본 논문에서는 원통형 용기 내부의 축방향 반타원 균열에 대한 응력확대계수 계산 방법들을 소개하고 이를 유한요소해석 결과와 비교하였다. 내압조건, 냉각조건, 가압열충격 조건 등과 같은 다양한 하중조건 및 균열형상에 대한 해석을 수행한 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) Raju-Newman의 응력확대계수 계산값은 원통형용기에 대한 1/8 대칭균열모델을 사용하여 3차원 유한요소해석을 통해 얻어진 값이나 내압조건에서 현재의 1/8 유한요소모델의 해석결과와는 4-10% 차이가 있다.

(2) Raju-Newman 방법과 VINTIN 방법이 1/4 균열모델을 사용한 유한요소 해석에 의한 응력확대계수와 가장 근사한 값을 제시하였다.

(3) VINTIN의 응력확대계수 계산값은 1/4 대칭균열의 유한요소해석 결과와 내압조건에서는 ± 2.5% 이내, 냉각조건에서는 a/t 가 0.1일 때 -0.1-1.2%, 깊은 균열에 대해서도 최대 6.3% 이내의 보수적인 결과를 제시하였다.

(4) 열응력과 압력이 동시에 작용하는 가압열충격 조건의 경우 VINTIN에 의한 응력확대계수 해석결과는 1/4 대칭균열모델을 사용한 3차원 유한요소 해석에 비해 1-2.5% 범위에서 보수적으로 평가되었다.

(5) VINTIN을 이용한 방법은 열응력에 의한 영

항이 큰 가압열충격을 포함한 원자로 압력용기 건전성평가시 대부분의 균열크기($a/t < 0.5$)에 대해 최대 5% 이하의 차이를 보일 것으로 예상되어 다소 보수적이지만 유한요소해석 대신 사용할 수 있을 것이다.

참고문헌

- (1) USNRC, 1982, "NRC Staff Evaluation of Pressurized Thermal Shock," *SECY82-465*.
- (2) Simonen, F. A. et al., 1986, "VISA-II-A Computer Code for Predicting the Probability of Reactor Vessel Failure," Pacific Northwest Laboratory, *NUREG/CR-4486*.
- (3) Raju, I. S. and Newman, J. C., 1982, "Stress Intensity for Internal Surface Cracks in Cylindrical Vessels," *ASME Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 104, pp. 293~298.
- (4) ASME, 1995, "Analysis of Flaws," *ASME B&PV Code Sec. XI, App. A*.
- (5) Atluri, S. N. and Kathiresan, K., 1979, "3-D Analysis of Surface Flaws in Thick-Walled Reactor Pressure Vessels Using Displacement-Hybrid Finite Element Method," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 51, pp. 163~176.
- (6) Heliot, J., Labbens, R. C. and Pellissier-Tanon, A., 1979, "Semi-Elliptical Cracks on the Meridional Plane of a Cylinder Subjected to Stress Gradients," *Fracture Mechanics, ASTM STP 677*, American Society for Testing and Materials, pp. 341~364.
- (7) Kobayashi, A. S., 1974, "A simple Procedure for Estimating Stress Intensity in Regions of High Stress Gradients," *In Significance of Defects in Welded Structure* (Edited by Kanazawa, T. and Kobayashi, A. S.), University of Tokyo Press, Tokyo, Japan, pp. 127~143.
- (8) Kobayashi, A. S., Emery, A. F., Polvanich, N. and Love, W. J., 1977, "Inner and Outer Surface Cracks in Internally Pressurized Cylinders," *ASME Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 99, pp. 83~89.
- (9) McGowan, J. J., and Raymund, M. 1979, "Stress Intensity Factor Solution for Internal Longitudinal Semi-Elliptical Surface Flaws in a Cylinder under Arbitrary Loading," *Fracture Mechanics, ASTM STP 677*, American Society for Testing and Materials, pp. 365~380.
- (10) Underwood, J. H., 1972, "Stress Intensity Factors for Internally Pressurized Thick-Wall Cylinders," *Stress Analysis and Crack Growth, ASTM STP 513*, American Society for Testing and Materials, pp. 59~72.
- (11) Jang, C. H., Moonn, H. R., Jeong, I. S., and Hong, S. Y., 2001, "Development of the Improved Probabilistic Fracture Mechanics Analysis Code: VINTIN," *Proc. 2001 Spring Meeting of KNS*, Cheju, Korea, 2001. 5.25~26.
- (12) Dickson, T. L., 1994, "FAVOR: A Fracture Analysis Code for Nuclear Reactor Pressure Vessels, Release 9401," Oak Ridge National Laboratory, *ORNL/NRC/LTR/94/1*.
- (13) Jang, C. H., et al., 2000, "VINTIN: Vessel Integrity Analysis Inner Flaws," *KEPRI TM.00NP10.P2000.350*.
- (14) Moonn, H. R. and Jang, C. H., "Comparison of Stress Intensity Factors for Longitudinal Semi-elliptical Surface Cracks in Cylindrical Pressure Vessels," *Proc. 2001 Spring Meeting of KSME*, Cheju, Korea, 2001. 6. 28~29.
- (15) Jang, C. H., Moonn, H. R., and Jeong, I. S., 2001, "Stress Intensity Factor Calculation for the Semi-elliptical Surface Flaws on the Thin-Wall Cylinder using Influence Coefficients," *Proc. 2001 Spring Meeting of KSME*, Cheju, Korea, 2001. 6. 28~29.
- (16) Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., 1999, *ABAQUS User's manual*.
- (17) Rice, J. R., 1968, "A Path Independent Integral and Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks," *Journal of Applied Mechanics*, pp. 379~386.
- (18) Wu, X. and Carlsson, A. J., 1991, *Weight Functions and Stress Intensity Factor Solutions*, Pergamon Press, Oxford.
- (19) Timoshenko, S., 1940, *Theory of Plate and Shells*, McGraw-Hill, New-York.
- (20) Wang, X. and Lambert, S. B., 1996, "Stress Intensity Factors and Weight Functions for Longitudinal Semi-Elliptical Surface Cracks in Thin Pipes," *International Journal of Pressure Vessel & Piping*, Vol. 65, pp. 75~87.
- (21) Keeney, J. A. and Bryson J. W., 1995, "Stress Intensity Factor Influence Coefficients for Semielliptical Inner Surface Flaws in Clad Pressure Vessels," *Fracture Mechanics*, Vol. 26, pp. 430~443.