

영향계수를 이용한 원통용기 표면결함의 응력확대계수의 계산

장창희* · 문호림* · 정일석*

Stress Intensity Factor Calculation for the Semi-elliptical Surface Flaws on the Thin-Wall Cylinder using Influence Coefficients

Changheui Jang, Ho-Rim Moonn, Ill-Seok Jeong

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

Abstract

As an integral part of the probabilistic fracture mechanics analysis, stress intensity factor calculation scheme for semi-elliptical surface flaws in thin-walled cylinder has been introduced. The approximation solution 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 cooldown boundary condition. The analysis results confirmed that the simplified methods provided 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 조사취화로 인하여 파괴인성이 저하되는 조사취화 현상을 겪게 된다. 조사취화된 원자로 압력용기는 가압열충격 사건 [1]이 발생하는 경우 급격하게 파손될 수 있다. 이러한 가압열충격에 대한 전전성 평가를 위해서는 확률론적 파괴역학 해석이 수행되어야 한다. 확률론적 파괴역학 해석은 원자로 압력용기의 파손확률을 산출하기 위해 몬테카를로 기법을 사용하며 그 원리 면에서 보면 수많은 결정론적 파괴역학 해석이 수행된 것으로 볼 수 있다[2]. 즉, 결정론적 해석에서는 각 균열깊이 및 파도상태 진행시간에 대해 균열선단에서 작용하는 응력확대계수(stress intensity factor)와 Monte Carlo 방법으로

모사된 재료의 파괴인성을 비교하여 균열의 진전여부를 판단한다. 따라서 다양한 균열형상 및 깊이에 대해 균열선단에서의 응력확대계수를 정확하게 평가하는 것이 매우 중요하다.

원자로 압력용기 노심대영역은 노즐이나 헤드부위로부터 멀리 떨어져 있어 일반적으로 응력확대계수 계산시 무한원통으로 가정한다. 원통형용기에 존재하는 균열에 대한 응력확대계수의 계산법은 크게 직접 계산법과 간접 계산법으로 나눌 수 있다. 직접 계산법은 균열의 존재를 포함한 원통의 모든 기하학적 형상을 모사해 3차원 유한요소모델을 만들고 내압 등 여러 하중상태에 대한 응력확대계수를 계산한다. 간접 계산법은 ASME Sec. XI App. A[3] 및 Raju-Newman의 식[4]에 의한 계산 방법으로 균열의 존재를 무시하고 유한요소해석을 하여 구해진 응력분포 및 영향계수를 이용하여 응력확대계수를 계산한다.

특히 Raju-Newman[4]은 t/R 이 각각 0.1과 0.25일 때, 균열형상을 다양하게 변화시키면서 유한요소해석을 수행하고 이로부터 3차 다항식으로 표시되는 응력분포에 사용할 수 있는 영향계수 값들을 제시하였다.

* 전력연구원 원자력연구실 원전설비
지원그룹, 305-380, 대전시 유성구 문지
동 103-16, Tel: 042-865-5515, Fax:
042-865-5514, Email: chjang@kepri.re.kr

Raju-Newman이 제시한 응력확대계수 계산방법은 파괴역학분석에 일반적으로 가장 많이 사용되고 있다. Raju-Newman은 1/8 모델(one-eighth of the vessel)을 사용하여 축방향결합에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 이때 사용한 자유도(degree of freedom)는 6,500개 정도였다. 내부표면결합의 경우, Raju-Newman은 1/8 모델이 1/4 모델보다 2-4% 정도 높게 나옴을 밝힌 바 있다. 또한 Wang과 Lambert는 자유도를 약 20,000 정도로 증가시켜 1/8 모델에 대한 유한요소해석을 수행한 결과 Raju-Newman 해석결과에 비해 6-8% 정도 높은 응력확대계수를 구하였으며 자유도의 차이가 그 원인임을 제시하였다[5].

전력연구원에서 개발된 확률론적 파괴역학 해석 코드인 VINTIN[6]에서는 가압열충격 발생시 원자로 압력용기 표면에 존재하는 축방향 균열에 대한 응력확대계수를 계산하기 위해 Raju-Newman이 제시한 1/8 균열모델에 대한 영향계수를 이용하고 있다. 이는 가압열충격에서 가정하는 다양한 균열형상 및 깊이의 단일균열, 즉 1/4 균열모델에 대한 해석결과가 충분하지 않기 때문이다. 이러한 모델의 차이에도 불구하고 다른 확률론적 파괴역학해석 코드를 사용한 해석결과와 유사한 응력확대계수를 보임으로써 계산의 타당성을 확인하였다[6]. 그러나 유한요소 해석결과와의 비교검증은 아직 수행되지 않았다.

따라서 본 논문에서는 VINTIN에서 사용하는 응력확대계수 계산방법을 소개하고 응력확대계수 계산결과를 유한요소해석 결과와 비교하였다. 이때 무한원통에는 축방향으로 단일균열이 존재하는 경우를 가정하여 유한요소해석시 1/4모델을 사용하였다. 또한 ASME Sec. XI에 제시된 방법과 유한요소 해석결과를 비교하여 VINTIN에서 사용되는 응력확대계수 계산 방법의 적용범위를 평가하였다.

2. 응력확대계수 계산방법

2.1 Raju-Newman 방법 및 ASME Sec. XI 방법

응력확대계수는 균열선단까지의 응력분포를 사용하여 계산하였다. 표면에서 균열선단까지 벽두께 방향의 응력분포는 3차 다항식으로 곡선 적합하여 다음과 같이 구하였다.

$$\sigma = \sum_{j=0}^3 A_j x^j = \sum_{j=0}^3 A_j a^j \left(\frac{x}{a}\right)^j \quad (1)$$

여기서 x 는 표면에서부터의 거리, a 는 균열깊이이다. 균열면에 식 (1)과 같은 응력분포가 작용하는 경우 응력확대계수는 다음과 같이 계산된다.

$$K = \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \sum_{j=0}^3 G_j A_j a^j \quad (2)$$

여기서

G_j = 영향계수

A_j = 응력다항식 계수

Q = 형상계수

$$= 1 + 1.454 \left(\frac{a}{c}\right)^{1.65}$$

Raju와 Newman은 여러 가지 결합형상에 대해 G_j 를 계산하여 표로 제시하였다. ASME Sec. XI에 제시된 방법은 기본적으로 Raju-Newman이 제시한 방법과 유사하다. 단 무한원통 대신 무한판재에 존재하는 반타원균열에 대한 영향계수값들이 제시되어 있다.

2.2 VINTIN을 이용한 근사해 방법

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

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

이때 식 1)과는 달리 응력은 원통의 두께 t 에 대해 normalized된 위치에 대해 표시된다. 응력성분이 식 3)과 같은 3차 다항식의 형태로 주어지는 경우, 반타원균열 선단에서의 응력확대계수는 다음과 같은 기본식에 의해 구할 수 있다.

$$K = \sum_{n=0}^3 G_n C_n \left(\frac{a}{t}\right)^n \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \quad (4)$$

따라서 위의 관계식들을 이용하여 3차 다항식의 형태로 주어지는 응력성분에 의한 응력확대계수 성분을 균열방향 및 크기에 따라 계산할 수 있다. $R/t = 10$ 인 무한원통 내부의 축방향 균열에 대한 Raju-Newman의 1/8 균열모델에 대한 해석결과 및 Wu-Carlsson의 무한균열에 대한 해석결과[7]를 사용하여 주어진 균열깊이 및 형상에 대한 영향계수 값을 구해내어 사용한다. 아래에는 형상비(a/c) = 0.4인 반타원균열에 대한 영향계수를 구하는 식을 나타내었다.

$$G_0 = 1.079 - 0.3504(a/t) + 1.7931(a/t)^2 - 1.0806(a/t)^3$$

$$G_1 = 0.667 - 0.0470(a/t) + 0.3882(a/t)^2 - 0.1403(a/t)^3$$

$$G_2 = 0.499 + 0.1597(a/t) - 0.2514(a/t)^2 + 0.2639(a/t)^3 \quad (5)$$

$$G_3 = 0.410 + 0.2385(a/t) - 0.5007(a/t)^2 + 0.4153(a/t)^3$$

이와 같은 방법은 Raju-Newman 및 ASME 방법에 비해 균열깊이에 무관하게 동일한 응력분포를 사용하는 것으로 응력확대계수 계산 절차가 매우 간단해지는 장점을 가진다.

2.3 J-적분을 이용한 K 계산

결합이 있는 원통형용기의 응력확대계수를 계산하기 위해서 J-적분값을 사용한다. J-적분값은 Rice[8]에 의해 제안되었으며 다음과 같이 정의된다

$$J = \int_{\Gamma} \left(W dy - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x} ds \right) \quad (6)$$

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

$$W = \int_0^c \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \quad (7)$$

J-적분은 수학적으로 적분경로에 독립적인 성질을 가지며, 또한 탄성영역에서는 에너지해방률 G 와 같다. 한편, J-적분은 결합진전에 따른 포텐셜에너지의 변화로 다음과 같이 표시된다.

$$J = -(\frac{\partial \Pi}{\partial a}) \quad (8)$$

여기서, Π 는 포텐셜에너지를 나타낸다. 본 논문에서는 응력확대계수 계산을 위해 현재까지 제시된 것 중에서 가장 정확하다고 알려진 Shih 등의 영역적분법에 의하여 J-적분을 구한 후 응력확대계수를 계산하였다. 영역적분법에 의한 J-적분 및 계산은 범용 유한요소 프로그램인 ABAQUS[9]를 사용하였다. ABAQUS해석에 의해 구해진 J-적분값과 응력확대계수와의 관계는 다음과 같이 주어진다.

$$K = \sqrt{EJ} \quad (\text{for plane stress}) \quad (9a)$$

$$K = \sqrt{\frac{EJ}{(1-\nu^2)}} \quad (\text{for plane strain}) \quad (9b)$$

3. 해석모델 및 조건

3.1 형상 및 조건

해석에 사용된 모델은 내경 66 inch, 모재의 두께 6.5 inch이며 클래드는 고려되지 않았다. 모재의 재료물성치는 Table 1에 나타난 바와 같다. Fig. 1에 해석에 사용한 형상을 도시하였다. 원통형용기의 내벽에 길이 2c, 깊이 a의 반타원 표면결함을 가진다. 벽두께 대 용기의 내경, t/R은 0.1로 정하였다.

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

Material Property	Values
Thermal Conductivity, BTU/hr-ft-°F	23.63
Specific Heat, BTU/lb-°F	0.1216
Density, lb/ft ³	487.53
Modulus of Elasticity, ksi	26520
Thermal Expansion Coefficient, in/in-°F	7.386E-6
Poisson's Ratio	0.3

해석에 사용된 하중조건은 550°F에서 평형상태에 있는 원자로 압력용기 내벽에서 냉각이 발생하여 운전온도인 550°F로부터 125°F까지 $T = 125 + 425 \cdot \exp[-0.05t(\text{min})]$ 에 따라 지수함수적으로 급격히 감소하며 외벽은 단열된 것으로 가정하였다. 벽면에서의 열전달계수는 300 BTU/hr-ft²-°F로 일정하게 유지되는 것으로 가정하였다. 전체 과도상태 기간 중 압력을 작용하지 않는 것으로 가정하였다.

3.2 FEM 모델

유한요소해석에 사용된 요소의 종류는 20-node quadratic iso-parametric quadratic brick elements with

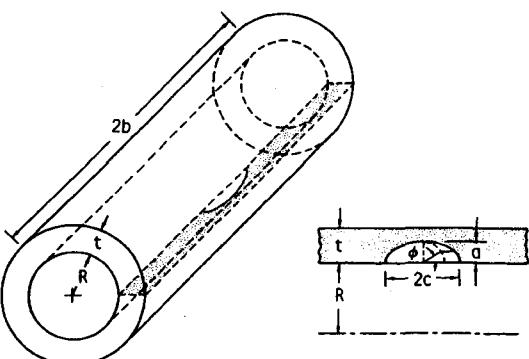


Fig. 1 Internal semi-elliptical surface crack in a cylinder.

reduced integration이다. Fig. 2는 해석에 사용된 원통형 용기에 대한 1/4모델(symmetric model for one-fourth of a vessel, single crack)이며 유한요소모델의 자유도는 28,935개이다.

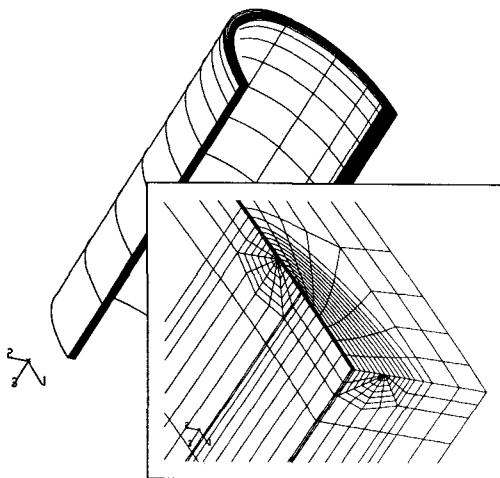


Fig. 2 Details of a typical finite element mesh for symmetric one-eighth of a vessel.

형상에서 주어진 대칭면을 따라 각각의 면은 고정경계조건으로 설정하였다. Fig. 2에서는 수평이동을 막기 위해 결합 반대편의 한 점을 구속하였다. 내부표면결합형상은 Table 2와 같이 변화시켰다. 결합형상비(a/c)는 Raju-Newman의 결과 및 ASME Sec. XI App. A의 결과와 비교하기 위해 2/5로 고정시켰으며 결합깊이 a/t 는 0.05, 0.1, 0.2, 0.25, 0.4로 변화시켰다. 따라서 본 연구에서는 총 5가지 경우에 대한 3차원 유한요소모델을 구성하였다.

Table 2. Aspect ratio and a/t of the flaws considered

결합형상비 (a/c)	Case	결합깊이비. a/t	결합깊이, inch (a)
2/5	1	0.05	0.325
	2	0.1	0.65
	3	0.2	1.3
	4	0.25	1.625
	5	0.4	2.6

4. 결과 및 고찰

4.1 영향계수 비교

주어진 균열조건에 대해 VINTIN에서 계산된 영향계수를 ASME Sec. XI App. A의 값들과 비교한 결과를 Table 3에 정리하였다. Table 3에서 보듯이 VINTIN에 비해 ASME App. A에 제시된 값들이 대개 2-5%정도 큰 것을 알 수 있다. 이는 VINTIN이 $t/R = 10$ 인 무한원통에 대해 Raju-Newman이 제시한 영향계수를 이용하여 각 균열깊이에 대한 영향계수를 구하는데 반해 App. A의 값들은 무한판재(즉, $t/R \rightarrow \infty$) 조건에 대해 제시된 값이기 때문에 불수 있다.

4.2 응력확대계수 비교

Fig. 3에는 유한요소해석 결과 구해진 파도상태 진행에 따른 응력분포의 변화를 나타내었다. 두께에 따른 응력분포는 1200초에서 가장 기울기가 급하였으며 이후로는 점차로 완만해지는 경향을 보였다. 그러나 최대응력으로 normalize 시킨 응력분포는 거의 일정하게 유지되어 응력분포 및 응력확대계수로부터 영향계수를 역으로 구하기에는 어려움이 있었다. 즉 영향계수를 구하기 위해서는 normalize 된 응력분포가 확연히 달라지도록 적절한 열전달 경계조건들을 설정하여 3차원 유한요소해석을 수행하는 것이 필요한 것으로 판단되었다.

Table 3. Comparison of the influence coefficients, G_n

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

Table 4에는 각 균열깊이에 대해 1200초, 2400초, 3600초 및 4800초에서의 균열선단에서의 응력확대계수 계산결과를 정리하였다. 단, Raju-Newman 방법 및 ASME Sec. XI App. A 방법에 따른 응력확대계수 계산을 위해 유한요소해석으로부터 구한 균열선단까지의 응력분포를 3차 다항식으로 근사한 후 사용하였다. 모든 균열깊이 및 시간에서 1/4 균열모델을 사용한 유한요소 해석에 의한 응력확대계수가 가장 작은 값을 나타내었다.

Fig. 4에는 ASME App. A 방법에 따른 해석결과와 유한요소해석 결과의 차이를 나타내었다. 균열깊이 a/t 가 0.05일 때는 ASME App. A 방법이 약 5% 정도 큰

Table 4. 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				
		RN*	AS*	VIN	FEM	RN*	AS*	VIN	FEM	RN*	AS*	VIN	FEM	RN*	AS*	VIN	FEM	
1	0.05	24.43	24.368	24.056		20.716	20.294	20.287		12.924	12.46	12.516		6.977	6.794	6.665		
2	0.1	31.49	30.996	30.020		26.863	26.002	25.524		16.791	16.01	15.885		9.077	8.734	8.552		
3	0.2	34.40	36.21	35.144	33.688	29.871	31.427	29.92	29.097	18.774	19.750	18.5	18.206	10.188	10.717	10.118	9.842	
4	0.25		36.45	35.17	33.497		31.866	30.150	29.158		20.07	18.685	18.300		10.907	10.225	9.925	
5	0.4		32.815	31.484	29.108		29.222	27.474	25.719		18.509	17.122	16.195		10.098	9.394	8.789	

* Used stress distribution fitted using FEM results

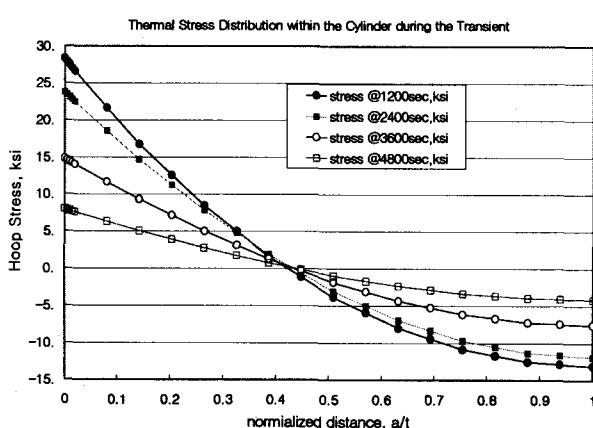


Fig. 3 Hoop stress distribution through the thickness at 1200, 2400, 3600, and 4800 seconds.

응력확대계수를 나타내었으나 균열깊이가 증가할수록 그 차이가 최대 15%까지 증가하였다. 즉 무한판재에 대한 해석결과와 무한원통에 대한 해석결과의 차이가 균열깊이가 증가할수록 커지는 일반적인 경향을 확인 할 수 있었다.

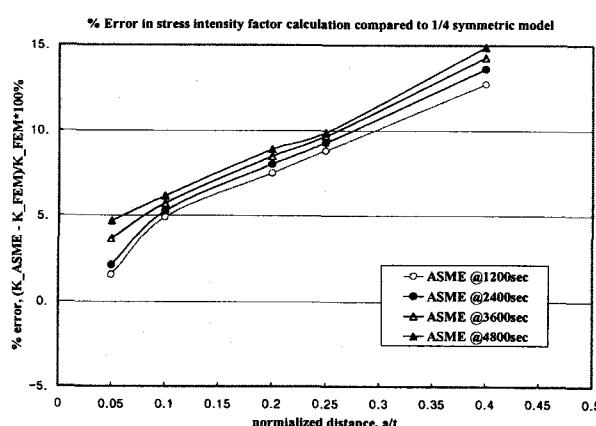


Fig. 4 Percent difference in stress intensity factors, $(K_{ASME}-K_{FEM})/K_{FEM} \times 100\%$

Fig. 5에는 VINTIN 해석결과와 유한요소해석 결과의 차이를 나타내었다. 전체적으로는 Fig. 4 와 유사한 거동을 보이나 유한요소해석 결과와의 차이는 a/t 가 0.05일때는 최대 2%, a/t 가 0.4 일때는 최대 8%정도로 ASME App. A 방법에 비해 크게 줄어들었다. 이 결과는 내압 하중조건에서 VINTIN 해석결과가 1/4 균열모델에 대한 유한요소해석 결과와 2% 이내에서 일치한다는 보고[10]에 비해 매우 큰 값이다. 이는 내압 조건의 경우 가장 영향이 큰 G_0 가 실제값에 비해 큰 차이가 없으나 열응력조건의 경우 고려되는 나머지 영향계수들의 계산 및 응력을 3차 다항식으로 근사할 때 발생하는 오차들에 의해 열응력조건에서는 유한요소해석과의 차이가 증가하는 것으로 생각할 수 있다. 그러나 가압열충격 평가에서는 열응력과 압력에 의한 응력이 동시에 고려되고 압력에 의한 응력확대계수가 상대적으로 매우 크므로 이 경우 총 응력확대계수는 1/4 균열모델에 대한 유한요소해석 결과와 약 2-5% 이내에서 보수적으로 평가될 것으로 예상할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 원자로 압력용기 가압열충격 평가에 사용하기 위한 해석코드에 사용된 응력확대계수 계산방법을 소개하고 이에 대한 유한요소해석을 통한 검증결과를 제시하였다. ASME App. A에 제시된 방법, VINTIN에 사용된 근사계산식, 무한원통에 대한 1/4 모델의 유한요소해석 결과 값을 비교하였다. 본 논문을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 근사식을 이용한 VINTIN의 응력확대계수 해석결과는 1/4 균열모델에 대한 유한요소해석에 비해 최대 8%정도 보수적인 결과를 제시하였다.
2. ASME Sec. XI App. A 방법에 따른 해석은 VINTIN에 비해 큰 응력확대계수를 계산하며 유한

요소해석에 비해서도 최대 15% 정도 크게 계산되었다.

3. VINTIN에서는 1/8 균열모델에 대한 Raju-Newman의 해석결과를 사용함에도 불구하고 오히려 1/4 균열모델에 대한 유한요소해석 결과에 더욱 가까운 결과를 제시하였다.

4. 열응력과 압력이 동시에 작용하는 가압열충격 조건의 경우 VINTIN에 의한 응력확대계수 해석결과는 3차원 유한요소 해석에 비해 2-5% 범위에서 일치할 것으로 예상된다.

참고문헌

- (1) USNRC, 1982, NRC Staff Evaluation of Pressurized Thermal Shock, SECY82-465.
- (2) Simonen, F. A. et al., VISA-II, 1986, A Computer Code for Predicting the Probability of Reactor Vessel Failure, NUREG/CR-4486.
- (3) ASME, 1995, Analysis of Flaws, ASME B&PV Code Sec. XI, App. A.
- (4) Newman, J. C. and Raju, I. S., 1982, "Stress Intensity for Internal Surface Cracks in Cylindrical Vessels," *ASME Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 104, pp. 293~298.
- (5) 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 Vessel & Piping*, Vol. 65, pp. 75~87.
- (6) 장창희, 문호림, 정일석, 홍승열, 2001, "개선된 확률론적 파괴역학해석 전산코드 개발: VINTIN," 한국원자력학회 춘계학술발표회, 제주, 2001. 5.25-26.
- (7) Wu, X. and Carlsson, A. J., 1991, Weight Functions and Stress Intensity Factor Solutions, Pergamon Press, Oxford.
- (8) 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.
- (9) ABAQUS User's manual, 1999, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc..
- (10) 문호림, 장창희, 2001, "내압이 작용하는 축방향 표면결함의 응력확대계수 계산방법 비교," 대한기계학회 춘계학술대회, 제주, 2001. 6. 28-29.

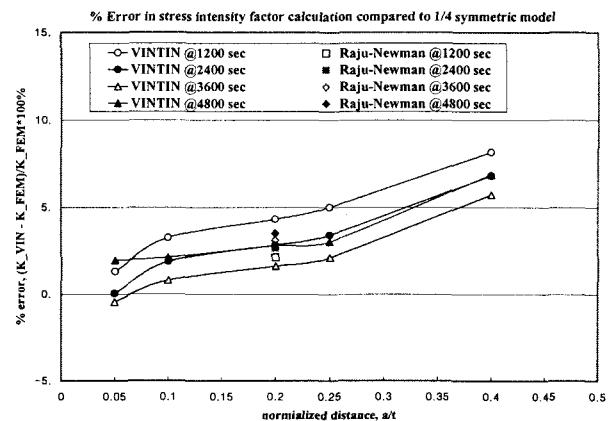


Fig. 5 Percent difference in stress intensity factors,
 $(K_{VINTIN} - K_{FEM})/K_{FEM} * 100\%$