

<연구논문>

원주방향 관통균열이 존재하는 원통형 구조물의 인장하중에 의한 응력확대계수 비교

정달우*·오창균*·김현수†·권형도**·양준석**

Comparison of Stress Intensity Factors for Cylindrical Structure with Circumferential Through-Wall Cracks subjected to Tensile Load

Dal Woo Jung*, Chang Kyun Oh*, Hyun Su Kim†, Hyeong Do Kweon** and Jun Seok Yang**

(Received 12 November 2021, Revised 13 December 2021, Accepted 23 December 2021)

ABSTRACT

To date, a number of stress intensity factor (SIF) solutions have been proposed for the cylindrical structure with circumferential through-wall cracks. However, each solution has a different format as well as applicable range. It is also known that there is a significant difference in predicted SIF values depending on the shape of the structure and the size of the crack. In this study, the applicability of various SIF solutions was analyzed by comparing the finite element analysis results for the case where a tensile load is applied to the cylindrical structure with circumferential through-wall crack. It is found that the calculated SIF gradually decreases and converges to a certain value with increasing length-to-radius ratio. Therefore, an appropriate length-to-radius ratio should be set in consideration of the dimensions of the actual cylindrical structure. For piping with sufficiently long cylinder, the ASME solution is found to be the most appropriate, and for a short cylinder, the API solution should be applied. On the other hand, the WEC solution requires careful attention to its application.

Key Words : Stress intensity factor (응력확대계수), Through-wall crack (관통균열), FE crack analysis (유한요소 균열 해석), Cracked mesh (균열 요소망), Geometry effect(형상효과)

1. 서 론

원자력발전소의 주요 설비들에 대해서는 가동중 검사를 통해 주기적으로 물리적 상태를 확인하고 있으며, 검사 결과 결함(flaw) 또는 균열(crack)이 발견되면 파괴역학 평가를 수행하여 건전성을 입증하고 있다. 만약 평가결과가 허용기준을 만족하지 못할 경우에는 해당 설비를 보수 또는 교체하여야 한다.

원전의 다양한 설비 중 원통형 구조물은 원통의

두께와 직경 그리고 길이에 따라 배관, 압력용기 (pressure vessel), 튜브(tube) 등으로 구분할 수 있으며, 그 재료에 따라 다양한 파괴역학 평가방법이 적용된다. 여러 평가방법 중 가장 보수적이라고 알려진 응력확대계수(stress intensity factor, SIF) 기반의 선형탄성 평가가 널리 활용되고 있으며, 이를 위해서는 평가 대상의 형상 조건에 적합한 응력확대계수 예측식을 선정하는 것이 매우 중요하다.

현재까지 다양한 형상 및 균열에 대한 응력확대계수 예측식들이 제시되었으(1-9), 이 중 원주방향 관통균열(through-wall crack, TWC)이 존재하는 원통형 구조물에 대해서는 ASME B&PV 코드(6), API 코드(7,8) 및 WEC(9)에 제시된 SIF 예측식이 대표적이

† 책임저자, 회원, 한국전력기술(주)

E-mail : hyunsu@kepeco-enc.com

TEL : (054)421-6471 FAX : (054)421-7509

* 한국전력기술(주)

** 한국수력원자력(주) 중앙연구원

다. 그러나 상기 예측식들은 적용 범위가 각각 상이하 며, 식의 형태와 구성에서도 일부 차이가 있다. 한편 Takahashi⁽⁵⁾ 및 Shim⁽¹⁰⁾ 등의 연구에 따르면 구조물의 형상과 균열의 길이에 따라 각 예측식별 응력 확대계수 계산값에 상당한 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 원통형 구조물에 대한 파괴역학 평가에 앞서 각 예측식별 특성 및 적용조건에 따른 결과의 상세 분석이 필요하다.

이에 본 연구에서는 원주방향 관통균열이 존재하는 원통형 구조물을 대상으로 대표적인 예측식들^(6,8,9)을 이용하여 응력확대계수를 계산하고 이를 유한요소해석 결과와 비교하여 각 예측식의 특성을 상세히 분석하고자 한다. 또한 이를 토대로 다양한 원통형 구조물에 대한 적용방안을 제안하고자 한다.

2. 원통형 구조물의 응력확대계수 예측식

Fig. 1은 원주방향 관통균열이 존재하는 원통형 구조물의 개략도를 나타낸 것이다. 여기서, R은 원통의 반경으로써 R_i는 내경, R_o는 외경이고, L은 원통의 길이, t는 원통의 두께를 나타낸다. 한편 균열 측면에서 a는 균열 길이의 절반, θ 는 균열 각의 절반을 의미한다.

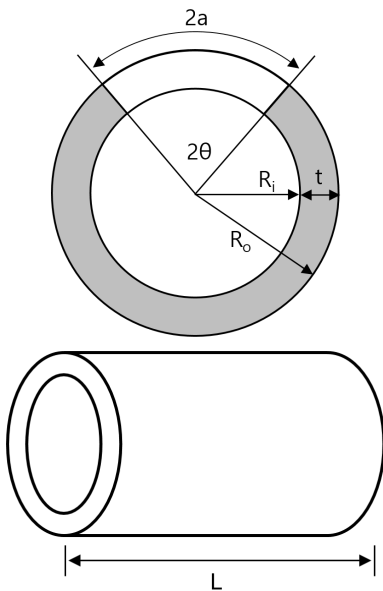


Fig. 1 Schematic of cylindrical structure with circumferential TWC

원주방향 관통균열이 존재하는 원통형 구조물에 대한 대표적인 응력확대계수 예측식은 다음과 같다.

○ ASME (2017) 예측식

2017년판 ASME 코드 Sec. XI, App. C-7320⁽⁶⁾에서는 원주방향 관통균열이 존재하는 배관에 막응력과 굽힘응력이 작용하는 경우에 대한 응력확대계수 계산식을 식 (1)과 같이 제시하였다. 이 식은 균열의 크기 및 하중의 유형에 따른 3차원 유한요소해석 결과를 다항식 형태로 곡선적합(curve fitting)하여 도출한 탄성 F 함수를 이용하며, 적용 범위는 $2 \leq R/t \leq 100$ 및 $0.01 \leq \theta/\pi \leq 0.85$ 이다⁽¹⁰⁾.

$$K_I = [\sigma_i F_i + \sigma_b F_b] \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

여기서,

σ_i = 일차 막응력

σ_b = 일차 굽힘응력

$$F_i = 1 + a_1 (\theta/\pi)^2 + a_2 (\theta/\pi)^4 + a_3 (\theta/\pi)^6 + a_4 (\theta/\pi)^8 + a_5 (\theta/\pi)^{10}$$

$$F_b = [1 + b_1 (\theta/\pi)^2 + b_2 (\theta/\pi)^4 + b_3 (\theta/\pi)^6 + b_4 (\theta/\pi)^8 + b_5 (\theta/\pi)^{10}] \times [1 - 0.4885(t/R_i)^2]$$

○ API 579 (2016) 예측식

API 579-1/ASME FFS-1⁽⁸⁾에서는 원주방향 관통균열이 존재하는 원통에 막응력과 굽힘응력이 작용할 때의 응력확대계수 계산식을 제시하였다. 이 식은 균열의 크기 및 하중의 유형에 따른 3차원 유한요소해석 결과를 3차 다항식 형태로 곡선적합하여 도출한 G 계수를 이용하며, $0.01 \leq t/R_i \leq 1.0$ 범위에서 적용이 가능하다. 여기서, σ_{gb} 는 전역(global) 굽힘응력이고 σ_b 는 국부(local) 굽힘응력이다.

$$K_I = [(\sigma_m + P_c)G_0 + \sigma_b(G_0 - 2G_1) + \sigma_{gb}G_5] \sqrt{\pi a} \quad (2)$$

API 579 예측식의 경우 원통의 내면과 외면에서의 응력확대계수를 각각 계산한다는 특징이 있으며, 계산에 필요한 계수(G)들은 코드에 표로 제시되어 있다.

○ WEC 예측식

WEC⁽⁹⁾는 원통형 형상인 WEC형 및 CE형 원전 원자로내부구조물(RVI)의 노심통(core barrel)과 노심 지지배럴(core support barrel) 용접부 평가를 위해

Tada 등이 제안한 평판(plate)의 SIF 예측식에 곡률을 고려한 형상계수(G_m)을 적용하여 식 (3)과 같은 예측식을 제안하였다.

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a} \cdot G_m \quad (3)$$

WEC는 원통의 형상과 균열의 크기에 따라 G_m 을 다음과 같이 제시하고 있다.

$$G_m = 1 \quad \text{for } x \leq 0.265$$

$$G_m = 0.9772 + 0.0529x + 0.1357x^2 - 0.0344x^3 + 0.0028x^4 \quad \text{for } x > 0.265$$

$$x = \frac{a}{\sqrt{Rt}}$$

3. 응력확대계수 계산을 위한 최적 유한요소 모델 개발

3.1 해석 모델 및 방법

원주방향 관통균열이 존재하는 원통형 구조물을 모사하기 위해 Fig. 2와 같이 소변형(small deformation) 이론에 근거한 3차원 유한요소 모델을 구축하였으며, 이때 대칭성을 고려하여 전체의 1/4만 고려하였다. 한편 재료는 Type 304 스테인리스강으로 가정하여 영률(Young's modulus)은 2.8×10^7 psi, 포아송 비는 0.3을 적용하였으며, 하중은 원통의 끝단면에 1ksi의 인장하중을 균일한 분포응력으로 부가하였다.

균열에 대한 요소망은 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS의 20절점 구조해석용 축약적분(reduced integration) 요소인 SOLID186을 사용하여 구성하였으며, 균열 선단(crack tip)에서의 $1/\sqrt{r}$ 응력 특이성(singularity)을 고려하기 위해 균열 선단을 구성하는 요소의 중간 절점들을 1/4 위치로 이동시켰다⁽¹¹⁾. 대표적인 유한요소해석 모델은 Fig. 2에 도시하였다.

한편 응력확대계수는 균열 선단에서의 대표 J-적분값을 구한 후 이를 SIF 값으로 변환시켜 계산하였다. 현재 대표 J-적분값을 선정하기 위한 여러 방법⁽¹²⁾이 제시되어 있는데, Fig. 3과 같이 두께방향으로 2개의 요소가 적용된 경우를 예로 들면 각 절점에서의 J-적분값($J_1 \sim J_5$)을 단순히 평균하는 방법, 각 요소의 중간 절점(mid-side node)은 고려하지 않고, 요소의 외곽 절점에서의 J-적분값(J_1, J_3, J_5)만을 평균하는 방법이 있다. 이외에 자유표면(J_1, J_5)에서 계산된

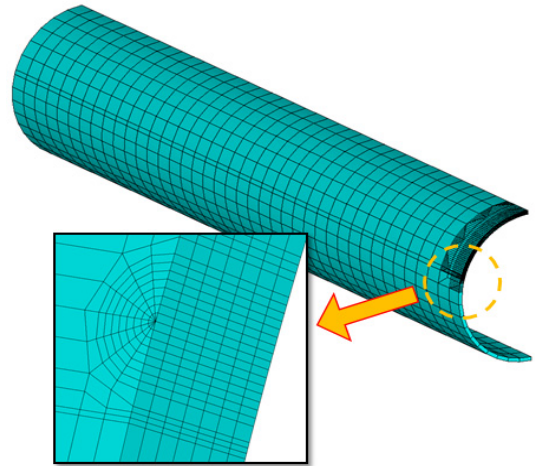


Fig. 2 Representative FE model with circumferential TWC

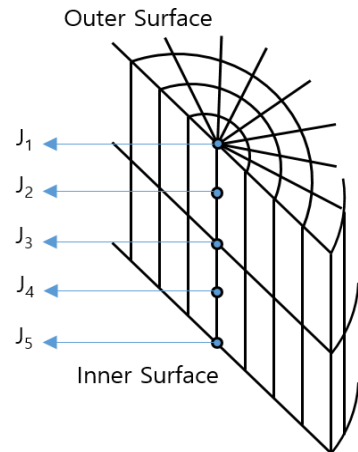


Fig. 3 Calculating location of J-integral at the crack tip

응력확대계수는 신뢰도가 낮은 것으로 알려져 있으므로⁽¹³⁾, 이를 제외하고 내부 절점의 값만을 평균하는 방법과 균열 선단의 모든 위치에 대하여 동일한 가중치를 주기 위해 다항식을 이용한 외삽(extrapolation) 방법도 제시되어 있다⁽¹⁰⁾.

상기에 언급한 여러 방법 중 다항식을 이용한 외삽방법은 자유표면에서의 절점값은 제외하고 내부 절점(J_2, J_3, J_4)에서의 값을 이용하여 4차 함수로 곡선 적합한 후 각 두께별 J-적분값을 식 (4)와 같이 평균하여 대표 J-적분값을 도출하는 것이다.

$$J = \frac{J_{0t} + J_{1/4t} + J_{2/4t} + J_{3/4t} + J_5}{5} \quad (4)$$

식 (4)와 같은 외삽 방법은 신뢰도가 낮은 자유표면에서의 J-적분값을 적절한 값으로 대체함으로써 전체 평균값의 신뢰도를 높일 수 있는 것으로서, 유럽의 SINTAP 코드와 ASME 코드의 SIF 예측식 개발에 적용된 바 있다⁽¹⁰⁾.

따라서 본 연구에서는 상기와 같은 종합 검토결과를 토대로 대표 J-적분값 계산을 위해 식 (4)와 같은 평균 방법을 적용하였으며, 이때 불확실한 J-적분값을 도출하는 것으로 알려진 균열선단 부근인 Contour 1~2에서의 값을 제외하고 나머지 Contour 3~8의 값을 사용하였다⁽¹⁰⁾.

3.2 해석모델의 검증

본 연구에서 채택한 유한요소해석 모델 및 대표 J-적분값 예측방법의 적용 타당성을 확인하기 위해 다양한 형상조건에 대한 검증해석을 수행하였다. 이때 원통의 반경비(R_i/t)는 대표적인 1차계통 배관의 값인 5와 20을 선정하였고, 2차계통 배관 및 두께가 얇은 기기에 대한 영향을 파악하고자 50을 추가로 고려하였다. 한편 원통의 길이(L)은 배관 내경(R_i)의 10배로 선정하였고, 균열의 길이(θ/π)는 0.1~0.5 범위로 변화시켰다.

해석결과는 식 (1)에 나타난 Mode I 응력확대계수(K_I) 예측식에서 인장응력에 대한 무차원 형상함수인 F_t 를 이용하여 비교하였다. Fig. 4는 유한요소해석 결과와 기존 Shim 등의 연구결과⁽¹⁰⁾를 비교하여 도시한 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 본 연구에서 수행한 유한요소해석 결과는 모든 조건에서 기존 연구결과⁽¹⁰⁾와 매우 잘 일치하였으며, 가장 큰 오차는 약 2% 정도로 나타났다.

이러한 결과로부터 본 연구에서 채택한 유한요소 해석 모델 및 방법은 타당한 것으로 판단되었다.

4. 최적 응력확대계수 예측식 제안

4.1 형상효과 분석

유한요소해석 수행 시 원통형 구조물의 내경 대비 두께비(R_i/t) 및 길이(L)에 따라 응력확대계수 계산결과가 변하는 형상효과(geometry effect)가 발생할 수 있다. 따라서 해석대상에 적합한 응력확대계수 결과값을 얻기 위해서는 형상효과를 고려하여 유한요소 모델의 크기를 결정하여야 한다.

본 연구에서는 원통의 두께비와 길이에 따른 형상효과를 정량화하고자 다양한 조건에 대하여 유한요소해석을 수행하였다. 이때 원통의 내경 대비 두께비는 20, 50, 75의 세 경우를 가정하였으며, 원통의 길이는 R_i 의 1~15배까지 가정하였다. 또한 균열의 길이는 원주의 10~50%($0.1 \leq \theta/\pi \leq 0.5$) 범위를 고려하였다.

형상효과에 대한 해석결과를 종합하여 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서와 같이 균열이 작은 경우($\theta/\pi=0.1$) 원통의 길이비(L/ R_i)에 무관하게 응력확대

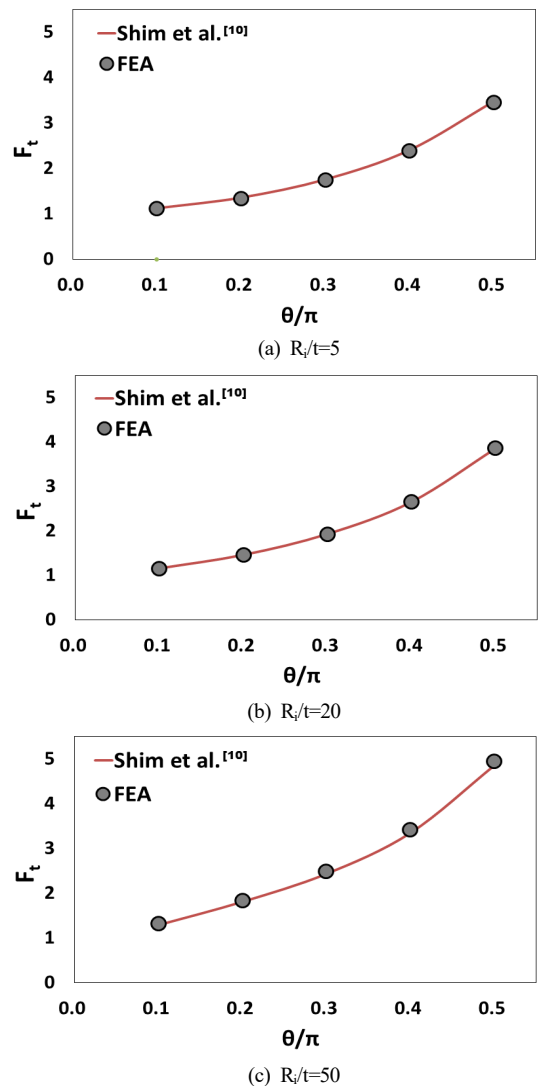


Fig. 4 Comparison of F_t values obtained from FE analyses and existing solution

계수는 일정하나, 균열이 점차 커질수록 L/R_i 에 따라 응력확대계수가 크게 변화한다. 또한 모든 경우에서 L/R_i 가 작을 때 큰 응력확대계수가 도출되나, L/R_i 가 증가할수록 응력확대계수는 점차 감소하여 일정한 값에 수렴하는 경향을 보였다. 한편 두께가 두꺼운 1차계통 배관에 해당하는 $R_i/t=20$ 의 경우 응력확대계수가 수렴하는 L/R_i 는 9 정도이었고, 두께가 좀 더 얇은 $R_i/t=50$ 의 경우는 10 부근에서 수렴하며, 두께가 극단적으로 얇은 $R_i/t=75$ 의 경우는 L/R_i 가 12 이상에서 응력확대계수가 수렴하는 것으로 나타났다.

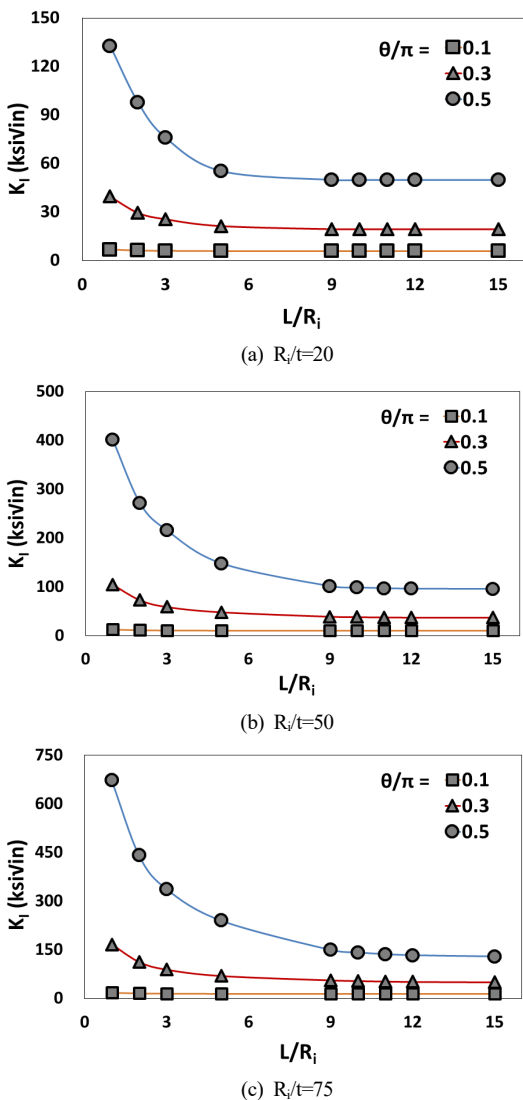


Fig. 5 Comparison of SIF values according to cylinder length

해석결과를 종합해보면 원통의 길이비(L/R_i)를 크게 할수록 형상효과가 감소하여 길이에 대해 수렴하는 응력확대계수를 구할 수 있으나, 이 경우 요소 개수가 증가함에 따라 해석시간도 급격히 늘어나게 되기 때문에 적절한 수준에서 유한요소 모델의 길이비(L/R_i)를 제한하는 것이 효율적이다. 따라서 실제 길이가 매우 긴 배관의 경우 $R_i/t \leq 50$ 조건까지는 유한요소 모델의 길이비를 10으로 설정하고, $R_i/t > 50$ 조건에서는 길이비를 10 이상으로 하는 것이 적절하다. 한편 이러한 결과는 원전 배관을 대상으로 ASME 코드 적용을 위해 응력확대계수 예측식을 제시한 기존 연구결과⁽¹⁰⁾와 부합한다.

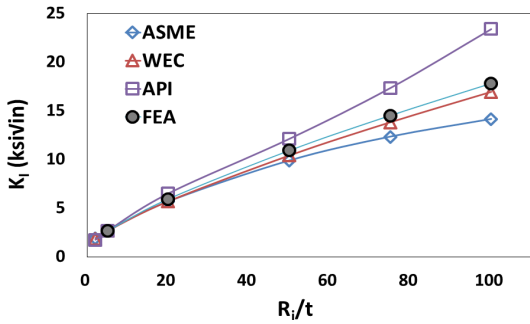
4.2 다양한 응력확대계수 예측식 비교

원주방향 관통균열이 존재하는 원통형 구조물을 대상으로 문헌상에 제시된 여러 응력확대계수 예측식들의 특성 및 차이를 상세히 비교하기 위해 ASME 코드⁽⁶⁾, API 코드⁽⁸⁾, WEC⁽⁹⁾ 제시 예측식을 이용하여 응력확대계수를 계산하고 동일 조건에 대한 유한요소해석 결과와 비교하였다. 유한요소해석 시 배관과 같은 긴 원통 형상을 모사하기 위해 Fig. 5의 결과를 참조하여 길이비(L/R_i)를 15로 적용하였다.

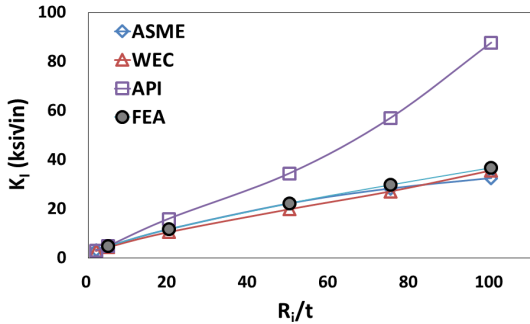
한편 API 579 예측식의 경우 원통의 내면과 외면에서의 응력확대계수를 각각 계산하므로, ASME 코드 및 WEC 제시 식과의 비교를 위해 Shim⁽¹⁰⁾의 방법을 참조하여 내면과 외면에서의 응력확대계수를 평균하여 적용하였다.

Fig. 6은 네가지 방법으로 구한 응력확대계수 비교 결과를 종합하여 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 원통의 두께비(R_i/t)가 작을수록, 그리고 균열의 길이(θ/π)가 짧을수록 각 예측식 및 유한요소해석 결과의 차이는 작게 나타났으나, 두께비가 점차 커질수록 일부 예측식은 차이가 점차 증가하는 것으로 나타났다.

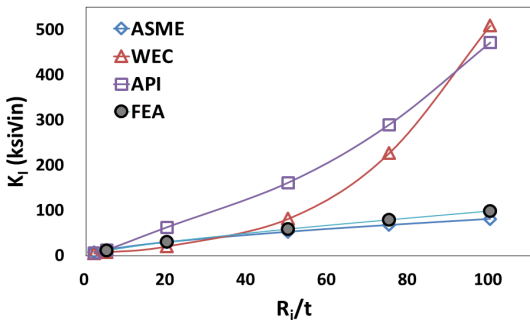
또한 ASME 코드 제시 예측식을 활용한 결과는 모든 경우에서 유한요소해석 결과와 잘 일치하였으나, WEC 예측식의 경우 균열의 길이와 두께비가 커질수록 보수성이 크게 증가하는 것으로 나타났다. 한편 API 코드 예측식의 경우 전체적으로 보수적인 경향을 보이며, 특히 균열의 길이에 무관하게 두께비가 커질수록 타 결과 대비 약 3배 이상 큰 응력확대계수를 도출하는 것으로 나타났다.



(a) $\theta/\pi=0.1$



(b) $\theta/\pi=0.2$



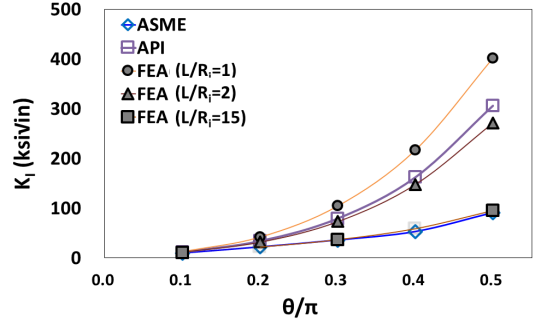
(c) $\theta/\pi=0.4$

Fig. 6 Comparison of SIF values obtained by various methods for $L/R_i=15$

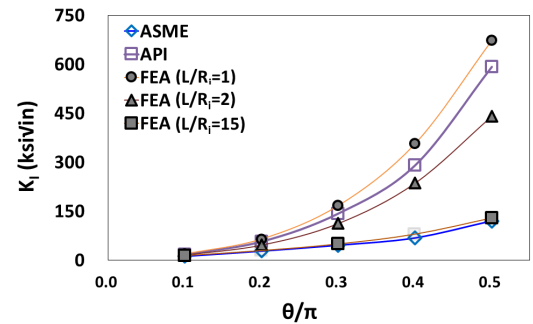
이러한 결과로부터 원통의 길이비(L/R_i)가 매우 긴 배관에 대해서는 균열의 길이에 무관하게 ASME 코드 예측식이 가장 적합한 것으로 판단되었다.

4.3 최적 응력확대계수 예측식

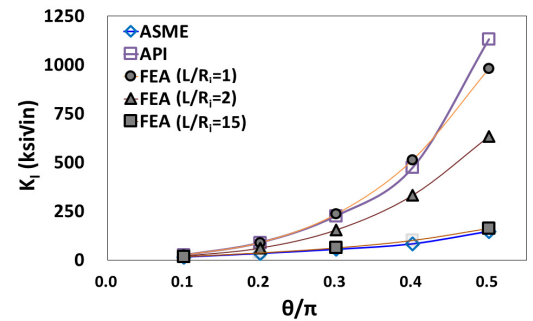
앞서 기술한 바와 같이 API 코드 예측식⁽⁸⁾의 경우 ASME 코드 대비 전체적으로 보수적이며, 특히 Fig. 5에서와 같이 원통 형상의 두께비 및 길이비가 커질수록 보수성이 크게 증가하는 것으로 나타났다. 이에 원통의 형상비에 따라 응력확대계수가 크게 변



(a) $R_i/t=50$



(b) $R_i/t=75$



(c) $R_i/t=100$

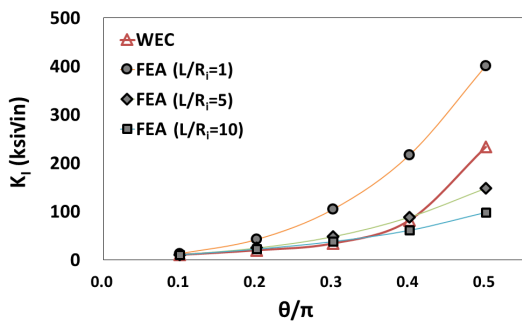
Fig. 7 Comparison of SIF values by FEA and API /ASME solutions varying L/R_i

화하는 점에 착안하여 API와 ASME 코드 예측식의 특성 및 제한점을 상세히 파악하고자 형상비를 변화시키면서 유한요소해석을 추가로 수행하였다.

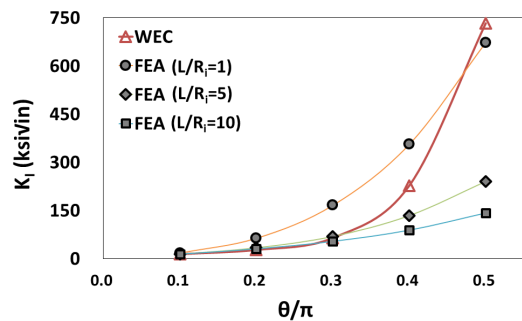
Fig. 7은 유한요소해석과 API/ASME 코드 예측식을 이용하여 구한 응력확대계수를 비교하여 나타난 것이다. 그림에서와 같이 원통의 두께비(R_i/t)가 50 이상으로 큰 경우 API 코드 예측식으로 구한 응력확대계수는 ASME 예측결과에 비해 매우 보수적인 경향을 보였으며, L/R_i 가 1~2 범위의 유한요소해석 결과와 잘 일치하였다. 반면에 ASME 코드 예측식

으로 구한 응력확대계수는 L/R_i 가 15인 경우에 대한 유한요소해석 결과와 잘 일치하였다. 한편 원전의 일반적인 1차계통 배관의 두께비(R_i/t)인 20 이하에서는 ASME와 API 코드 예측결과의 차이가 작았다.

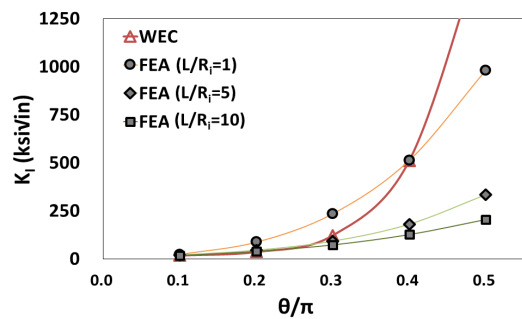
Fig. 7에서처럼 API 코드 예측식이 ASME에 비해 보수적인 경향을 보이는 이유는 배관의 길이를 감안하여 긴 원통($L/R_i=10$ 이상)을 모사한 것으로 파악된 ASME 코드의 예측식과는 달리 L/R_i 가 2 이하인 짧은 원통을 모사하였기 때문으로 판단되었다.



(a) $R_i/t=50$



(b) $R_i/t=75$



(c) $R_i/t=100$

Fig. 8 Comparison of SIF values by FEA and WEC solution varying L/R_i

한편 WEC 제시 예측식⁽⁹⁾이 균열의 길이와 두께 비가 큰 일부 조건에서 과도하게 보수적인 경향을 나타내는 원인을 파악하고자 유사한 방법으로 해석을 수행하였다. Fig. 8은 유한요소해석과 WEC 예측식을 이용하여 구한 응력확대계수를 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 L/R_i 를 다양하게 변화시켜 가면서 해석을 수행한 결과 작은 균열($\theta/\pi \leq 0.3$)의 경우 긴 원통을 모사한 결과와 잘 일치하나, 큰 균열의 경우는 오히려 짧은 원통을 모사한 결과와 유사하여 API 코드의 경우처럼 보수적 경향에 대한 명확한 원인을 찾을 수 없었다. 이는 WEC 예측식이 유한요소해석 결과로부터 도출된 것이 아니라 Tada가 제시한 평판에 대한 응력확대계수 예측식에 원통의 곡률 영향을 반영하기 위한 경험적 보정계수를 적용⁽⁹⁾하여 유한요소해석의 변수인 L/R_i 와는 관련을 지을 수 없기 때문으로 추정되었다.

상기의 평가결과들을 종합하여 정리해 보면 원통의 길이비(L/R_i)가 매우 긴 배관의 경우 ASME 코드 예측식이 가장 적절하며, 만약 API 코드 또는 WEC 예측식을 적용할 경우 과도하게 보수적인 결과를 도출할 수 있다. 반면에 배관에 비해 상대적으로 길이가 짧은 압력용기나 링(ring) 형태 구조물의 경우 실제 L/R_i 가 10 미만인 경우가 다수 존재하며, 여기에 ASME 코드 예측식을 적용하면 매우 비보수적인 응력확대계수가 도출될 수 있다. 따라서 이 경우에는 짧은 원통을 대상으로 도출된 API 코드 예측식을 적용하는 것이 가장 적절하며, WEC 예측식의 경우 사전에 적용 가능성을 주의 깊게 확인하여야 할 필요가 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 원주방향 관통균열이 존재하는 원통형 구조물에 인장응력이 작용하는 경우를 대상으로 유한요소해석 결과와의 비교를 통해 다양한 응력확대계수 예측식의 적용성을 분석하였다.

원통의 길이비(L/R_i)가 작을 때 큰 응력확대계수가 도출되며, 길이비가 증가할수록 응력확대계수는 점차 감소하여 일정한 값에 수렴하므로, 유한요소해석 모델 개발 시 평가대상의 치수를 고려하여 적절한 길이비를 선정하여야 한다.

원통의 길이비(L/R_i)가 매우 긴 배관에 대해서는 ASME 코드 예측식이 가장 적절하며, 길이가 짧은

압력용기나 링 형태의 구조물에 대해서는 API 코드 예측식을 적용해야 한다. 한편 WEC 예측식의 경우 평가대상의 치수 등을 상세히 검토하여 적용 가능성을 사전에 확인할 필요가 있다.

참고문헌

- (1) Sanders, J. L. and Lyell, J., 1982, "Circumferential Through-Cracks in Cylindrical Shells Under Tension," *J APPL MECH-T ASME*, Vol. 49, Issue 1, pp. 103-107.
- (2) Kumar, V. and German, M. D., 1988, "Elastic-plastic Fracture Analysis of Through-wall and Surface Flaws in Cylinders," Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, *NP-5596*.
- (3) Zahoor, A., 1988, "Ductile Fracture Mechanics Methodology for Complex Cracks in Nuclear Piping," *NUCL ENG DES*, Vol. 106, Issue 2, pp. 243-256.
- (4) Huh, N. S., Kim, Y. J. and Kim, Y. J., 2002, "An Engineering Method for Non-Linear Fracture Mechanics Analysis of Circumferential Through-Wall Cracked Pipes Under Internal Pressure," *Trans. of the KSME*, Vol. 26, No. 6, pp. 1099-1106.
- (5) Takahashi, Y., 2002, "Evaluation of Leak-Before-Break Assessment Methodology for Pipes with a Circumferential Through-Wall Crack. Part I: Stress Intensity Factor and Limit Load Solutions," *INT J PRES VES PIP*, Vol. 79, pp. 385-392.
- (6) ASME BPVC Sec. XI, 2017, "Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components", American Society of Mechanical Engineers, NY.
- (7) API 579, 2000, "Fitness-For-Service," American Petroleum Institute, Washington, D.C.
- (8) API 579-1/ASME FFS-1, 2016, "Fitness-For-Service," American Society of Mechanical Engineers, NY.
- (9) Westinghouse, 2013, "Generic Flaw Acceptance Criteria for Combustion Engineering and Westinghouse MRP-227-A Core Barrel and Core Shroud Welds Fitness-For-Service," Westinghouse Electric Company, Madison, PA, *WCAP-17684-P*, Rev. 0.
- (10) Shim, D. J., Xu, S. and Lee, D., 2014, "Closed-Form Stress Intensity Factor Solutions for Circumferential Through-Wall Cracks in Cylinder," *Proc. of ASME 2014 PVP Conference*, Anaheim, CA, July 20-24, PVP2014-28049.
- (11) Anderson, T. L., 2017, *Fracture Mechanics*, CRC Press, Boca Raton, FL.
- (12) Ahn, J. S., Kim, Y. W. and Woo, K. S., 2012, "Analysis of Patched Cylindrical Shells with Circumferential Through-Wall Cracks," *KSCE J. Civil and Env. Eng. Res.*, Vol. 32, No. 6A, pp. 411-418.
- (13) Nakamura, T. and Parks, D. M., 1991, "Determination of Elastic T-stress along 3-D Crack Fronts using an Interaction Integral," *INT J SOLIDS STRUCT*, Vol. 29, pp. 1597-1611.