

CANDU형 원전 압력관에 존재하는 축방향 균열의 응력확대계수

이국희* · 오영진** · 박흥배** · 정한섭*** · 정하주* · 김윤재†

Stress Intensity Factors for Axial Cracks in CANDU Reactor Pressure Tubes

Kuk-Hee Lee*, Young-Jin Oh**, Heung-Bae Park**,
Han-Sub Chung***, Ha-Joo Chung* and Yun-Jae Kim†

(Received 28 JAN 2011, Accepted 11 FEB 2011)

ABSTRACT

CANDU reactor core is composed a few hundreds pressure tubes, which support and locate the nuclear fuels in the reactor. Each pressure tube provides pressure boundary and flow path of primary heat transport system in the core region. In order to guarantee the structural integrity of pressure tube flaws which can be found by in-service inspection, crack growth and fracture initiation assessment have to be performed. Stress intensity factors are important and basic information for structural integrity assessment of planar and laminar flaws (*e. g.* crack). This paper reviews and confirms the stress intensity factor of axial crack, proposed in CSA N285.8-05, which is an fitness-for-service evaluation code for pressure tubes in CANDU nuclear reactors. The stress intensity factors in CSA N285.8-05 were compared with stress intensity factors calculated by three methods (finite element results, API 579-1/ASME FFS-1 2007 Fitness-For-Service and ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section XI). The effects of Poisson's ratio and anisotropic elastic modulus on stress intensity factors were also discussed.

Key Words : CANDU nuclear reactor(CANDU형 원자로), Crack(균열), Pressure tube(압력관), Stress intensity factor(응력확대계수)

기호설명

a = flaw depth
 c = flaw half-length in the pressure tube axial direction
 F = geometry correction factor
 K_I = Stress intensity factor
 p = Internal pressure
 r_i = inner radius of the pressure tube
 r_o = outer radius of the pressure tube

Q = flaw shape parameter
 w = pressure tube wall thickness
 SIF = stress intensity factor

1. 서론

CANDU형 원전 원자로심은 경수로와 달리 수백 개의 연료채널 다발로 구성된다. 국내에 건설되어 운전중인 CANDU형 원전인 월성 1, 2, 3, 4호기의 원자로에는 각각 380개의 연료채널이 설치되어 있다. 연료채널의 원자로심 영역은 압력관(pressure tube)이 설치되어 핵연료를 위치시켜 지지하고 있으며, 압력관 양쪽 끝단은 종단이음관(end fitting)을 거쳐 공급자관(feeder pipe)으로 연결된다. 압력관은 내경과 길

† 김윤재, 회원, 고려대학교 기계공학과

E-mail : kimy0308@korea.ac.kr

TEL : (02)3290-3372 FAX : (02)929-1718

* 고려대학교 기계공학과 대학원

** 한국전력기술(주)

*** 한국전력공사 전력연구원

이가 각각 약 103mm과 약 6m인 관 형태로서 지르코늄 합금인 Zr-2.5Nb로 제작된다. CANDU형 원전에서도 운전 연수의 증가에 따라 주기기 재료의 경년열화가 설비의 신뢰성에 영향을 미치는 핵심 요소로 부각되고 있으며, 압력관도 원자로심 압력경계 기로서 그 중요도가 높다. 압력관의 경년열화 현상은 가동중검사 프로그램을 통해 관리되고 있으며, 검사를 통해 확인된 경년열화 현상에 대해서는 설계수명 기간 또는 제한된 기간 동안의 구조적 건전성을 입증하여야 한다.

캐나다에서는 COG(CANDU Owners Group)를 중심으로 압력관 가동적합성평가에 대한 지침서를 개발해 왔으며¹⁻³⁾, 2005년에는 CSA(Canadian Standard Association) 표준으로 등재된 CSA N285.8-05이 발행되었다⁴⁾. 국내에서는 압력관 재질특성 관련 기초 연구들이 한국원자력연구원을 중심으로 수행되어 왔으며⁵⁾, 구조해석 측면에서는 CSA에서 발행된 가동적합성평가 지침에 의거한 평가용 전산프로그램의 개발 등이 발전사업자를 중심으로 수행되어 왔다⁶⁾. 하지만, 구조해석과 관련한 기초연구나 CSA에서 발행된 평가 코드에 대한 기술배경 등에 대해서는 아직 국내 연구가 부족한 실정이다.

균열성(평면 및 층상) 결함의 가동적합성평가에 있어서 응력확대계수(SIF: stress intensity factor)는 가장 기초적이고 중요한 정보이다⁴⁾. CSA N285.8-05의 평가절차에 따르면, 발견된 균열에 대하여 정해진 평가기간 동안의 피로 및 지연수소균열에 의한 균열 성장량을 계산하고 평가종료시점에서 성장된 균열길이를 기준으로 균열의 안정성 여부를 평가한다. 본 절차에서 중요하게 고려할 부분은 먼저 균열에 대한 응력상태를 나타내는 응력확대계수의 계산절차이다. 응력확대계수는 소규모 항복 조건에서 균열선단의 응력 크기를 나타내며 피로/파괴역학적 거동을 설명할 수 있는 중요한 인자이다. 따라서, CSA N285.8-05에서 응력확대계수는 다음의 용도로 사용된다. 괄호는 CSA N285.8-05의 절을 나타낸다.

- 균열의 파괴 개시 평가 (5.3.3, A.5.4)
- 균열의 소성 영역 보정 계산 (A.5.2.2.3)
- 피로 균열 성장률 계산 (A.3.3, A.5.3.4.2)
- 체적 결함에서 교번 피크 응력 계산 (A.6.2.3.2)
- DHC 성장 개시를 위한 길이(LDHC) 계산 (A.5.3.3)
- DHC 개시 평가에서 탄성 피크 균열 선단 응력 계산 (A.6.3.2.2)

CSA N285.8-05에서 제시하는 응력확대계수의 적절성을 분석하는 연구가 필요하므로, 본 연구에서는 CSA N285.8-05의 평가절차에서 제시하는 축방향 균열의 응력확대계수 계산 절차를 분석하고 평가하였다. 본 연구 결과는 CSA N285.8에 따른 압력관 가동적합성평가의 적절성 및 보수성 평가결과를 제공하며, 코드 절차에는 제공되지 않는 상세 평가절차 수립에 활용될 수 있다.

2. CSA 코드의 응력확대계수

2.1 응력확대계수 계산 절차

CSA N285.8-05의 A.5.2절에 응력확대계수에 대한 상세한 계산식과 방법이 제시되어 있다. 크게 축방향 균열과 원주방향 균열로 나누어 응력확대계수 절차를 제시하고 있으며, Fig. 1과 같은 축방향 균열의 응력확대계수 계산식은 다음과 같이 주어진다.

$$K_I = \left[p \left(\frac{r_i}{w} + 1 \right) F_p + \sigma_h^{res} F_m \right] \left(\frac{\pi a}{Q} \right)^{1/2} \quad (1)$$

여기서, p 는 가해지는 내압, σ_h^{res} 는 잔류응력, r_i 와 w 는 각각 압력관의 내부 반지름과 두께, a 와 $2c$ 는 각각 균열의 깊이와 길이이다. 균열의 형상은 반타원므로 가정되므로 균열 형상인자 Q 는 $Q=1+1.464(a/c)^{1.65}$ 로 주어진다. F_p 와 F_m 는 각각 내압이 가해지는 경우와 막응력(membrane stress) 형태의 잔류응력이 작용하는 경우의 결함 형상보정계수(geometry correction factor)이고, 결함의 크기와 형상 별로 주어진다. 균열 형상에 대한 효과를 반영해 주는 것은 전

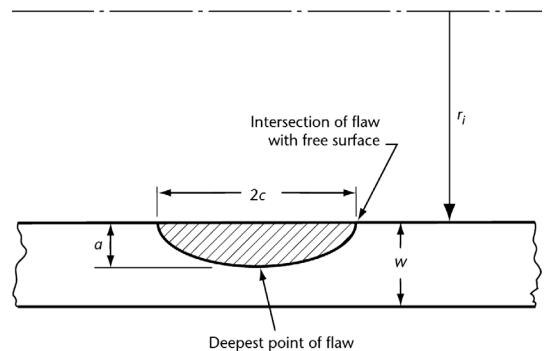


Fig. 1 Schematic of axial crack in the pressure tube with relevant geometric variables

적으로 균열 형상보정계수이므로 응력확대계수의 평가에는 이 계수가 가장 중요하게 고려되어야 한다. CSA N285.8-05 A.5.2절에서 균열 형상보정계수를 균열 최심선단(the deepest point of flaw penetration)과 표면선단(the point of intersection of flaw with the free surface)에서 균열 형상 변수의 범위에 따라 3가지 식으로 나누어 제시한다. 균열 형상 변수의 범위에 따른 형상보정계수 식은 본 논문의 Table 1~5에 정리되어 있다. 이 범위에 따른 분류를 Fig. 2에 도식화하였다. 분류 1은 가장 보편적인 균열 형상에 대한 경우이며, 분류 2는 매우 얇은 균열에 대한 경우, 분

류 3은 매우 긴 균열에 대한 경우이다. 축방향 균열의 표면선단에서의 균열 형상보정계수 일부는 제시되어 있지 않다. 이는 a/c 가 0인 경우에는 표면선단이 존재하지 않거나, a/c 가 0.2 미만인 경우는 균열 길이($2c$)가 상대적으로 매우 길어져서 균열 표면선단의 응력확대계수가 0으로 수렴하기 때문일 것으로 추정된다. CSA N285.8-05에서는 분류상에서 누락된 부분(Fig. 2에서 빗금 친 구간)에 대해서 내삽을 통해

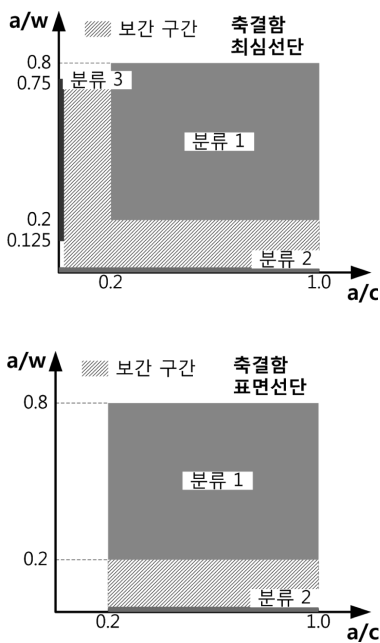


Fig. 2 Ranges of the geometry correction factor

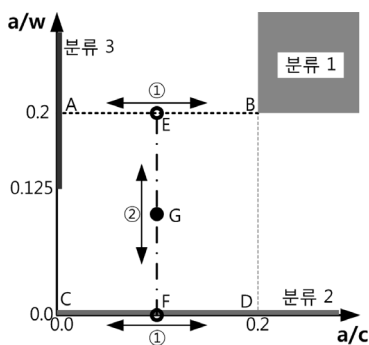


Fig. 3 Interpolation method for the geometry correction factor

Table 1 Geometry correction factors at the deepest point of flaw penetration

분류	형상보정계수 (F)
분류1 $0.2 \leq a/c \leq 1.0$ $0.2 \leq a/w \leq 0.8$	$F_p^{DP} = \frac{wr_o}{(r_o^2 - r_i^2)} \left[2G_0 - 2\left(\frac{a}{r_i}\right)G_1 + 3\left(\frac{a}{r_i}\right)^2 G_2 - 4\left(\frac{a}{r_i}\right)^3 G_3 \right]$ $F_m^{DP} = G_0$ $G_j = \text{influence coefficients (Table 3)}$
분류2 $0.0 \leq a/c \leq 1.0$ $a/w \rightarrow 0$	$F_p^{DP} = \frac{2wr_o}{(r_o^2 - r_i^2)} M_{f(\pi/2)}$ $M_{f(\pi/2)} = 1.13 - 0.07 \sqrt{a/c}$ $F_m^{DP} = M_{f(\pi/2)}$
분류3 $a/c = 0.0$ $0.125 \leq a/w \leq 0.75$	$F_p^{DP} = \frac{2wr_o}{(r_o^2 - r_i^2)} F_{ax}$ $F_{ax} = \text{geometry factor (Table 4)}$ $F_m^{DP} = 1.1261 + 0.6512\left(\frac{a}{w}\right) + 2.1839\left(\frac{a}{w}\right)^2 + 3.7292\left(\frac{a}{w}\right)^3$

r_o : 외반경

Table 2 Geometry correction factors at the point of intersection of the flaw with the free surface

분류	형상보정계수 (F)
분류1 $0.2 \leq a/c \leq 1.0$ $0.2 \leq a/w \leq 0.8$	$F_p^{SP} = \frac{wr_o}{(r_o^2 - r_i^2)} \left[2G_0 - 2\left(\frac{a}{r_i}\right)G_1 + 3\left(\frac{a}{r_i}\right)^2 G_2 - 4\left(\frac{a}{r_i}\right)^3 G_3 \right]$ $F_m^{SP} = G_0$ $G_j = \text{influence coefficients (Table 5)}$
분류2 $0.0 \leq a/c \leq 1.0$ $a/w \rightarrow 0$	$F_p^{SP} = \frac{2wr_o}{(r_o^2 - r_i^2)} M_{f(0)}$ $M_{f(0)} = \left[1.21 - 0.1\left(\frac{a}{c}\right) + 0.1\left(\frac{a}{c}\right)^4 \right] \sqrt{\frac{a}{c}}$ $F_m^{SP} = M_{f(0)}$

Table 3 Influence coefficients G_i for the stress intensity factor at the deepest point of an axial flaw

a/c	a/w	G_0	G_1	G_2	G_3
0.2	0.2	1.115	0.673	0.514	0.438
0.2	0.5	1.427	0.783	0.571	0.462
0.2	0.8	1.872	0.96	0.671	0.529
0.4	0.2	1.072	0.672	0.523	0.441
0.4	0.5	1.217	0.723	0.549	0.456
0.4	0.8	1.393	0.806	0.601	0.493
1	0.2	1.015	0.715	0.588	0.512
1	0.5	1.05	0.729	0.596	0.515
1	0.8	1.09	0.76	0.618	0.532

Table 4 Geometry factor F_{ax} for the stress intensity factor for an axial flaw

a/w	r_i/w	F_{ax}
0.125	5	1.19
0.125	10	1.2
0.125	20	1.2
0.25	5	1.38
0.25	10	1.44
0.25	20	1.45
0.5	5	2.1
0.5	10	2.36
0.5	20	2.51
0.75	5	3.3
0.75	10	4.23
0.75	20	5.25

Table 5 Influence coefficients G_i for the stress intensity factor at the point of intersection of the axial flaw with the free surface

a/c	a/w	G_0	G_1	G_2	G_3
0.2	0.2	0.607	0.079	0.023	0.01
0.2	0.5	0.791	0.138	0.052	0.027
0.2	0.8	1.179	0.253	0.104	0.056
0.4	0.2	0.777	0.125	0.043	0.021
0.4	0.5	0.936	0.176	0.069	0.036
0.4	0.8	1.219	0.259	0.106	0.056
1	0.2	1.14	0.197	0.074	0.038
1	0.5	1.219	0.221	0.085	0.044
1	0.8	1.348	0.255	0.099	0.051

균열 형상보정계수를 결정할 수 있다고 언급하고 있다.

본 장에서는 형상보정계수의 내삽에 대한 적절한 방식을 선택하고, 각 균열 형상에 따른 형상보정계수와 응력확대계수의 경향성을 살펴보고자 하겠다. 잔류응력에 따른 응력확대계수는 본 연구에서는 고려되지 않았고, 1차 하중인 내압에 의한 응력확대계수만이 고려되었다. 형상보정계수 계산에 필요한 내반경과 두께는 압력관의 초기 설치 시의 내반경 $r_i=52.108\text{mm}$ 와 초기 두께 $w=4.191\text{mm}$ 를 사용하였다.

2.2 축방향 균열의 최심선단에서의 형상보정계수

축방향 균열의 최심선단에서의 형상보정계수에 대한 식은 CSA N285.8-05 A.5.2.2.4절에 제시되어 있고, 본 논문의 Table 1, 3, 4에 정리되어 있다. 분류 1($0.20 \leq a/c \leq 1.0, 0.20 \leq a/w \leq 0.8$)의 형상보정계수는 Raju and Newman에 의해 유한요소해석을 통하여 제시되었다^{3,7)}. 분류 2($0.0 \leq a/c \leq 1.0, a/w \rightarrow 0$)의 형상보정계수는 두께(w)가 무한한 경우에 대해서 Scott and Thorpe에 의해 제시되었다^{3,8)}. 분류 3($a/c = 0.0, 0.125 \leq a/w \leq 0.750$)의 형상보정계수는 무한한 길이를 가진 균열에 대해서 제시되었다³⁾. CSA N285.8-05 A.5.2.2.2절의 응력확대계수 식은 중첩의 원리에 의해 균열면에 가해지는 내압이 고려된 식이다. 잔류응력에 대한 형상보정계수 F_m 이 막응력에 대한 것이므로, CSA N285.8-05는 잔류응력이 막응력 형태로 작용한다고 가정하고 있다. 평가 시에 잔류응력의 크기를 산정할 때 이러한 점을 고려해야 한다.

Fig. 2의 빗금 친 구간인 다음 구간은 내삽을 통하여 형상보정계수를 계산해야 한다.

- 보간 구간 1 : $0.0 \leq a/c \leq 0.2, 0.0 \leq a/w \leq 0.2$
- 보간 구간 2 : $0.0 \leq a/c \leq 0.2, 0.2 \leq a/w \leq 0.75$
- 보간 구간 3 : $0.2 \leq a/c \leq 1.0, 0.0 \leq a/w \leq 0.2$

보간 구간 1에서는 다양한 방식으로 보간할 수 있지만, Fig. 3에서 도식한 방법으로 보간하는 것이 가장 정확하다. ① 일정한 a/w 값($a/w=0.0, 0.2$)에서 평가할 균열의 a/c 에 대한 형상보정계수를 각각 계산한다. ② 이를 이용하여 평가할 균열의 a/w 에 대한 형상보정계수를 계산한다.

보간 구간 2에서는 분류 1과 분류 3을 선형 보간하여 형상보정계수를 계산할 수 있다. 보간 구간 3에서는 분류 1과 분류 2을 선형 보간하여 형상보정계수

를 계산할 수 있다.

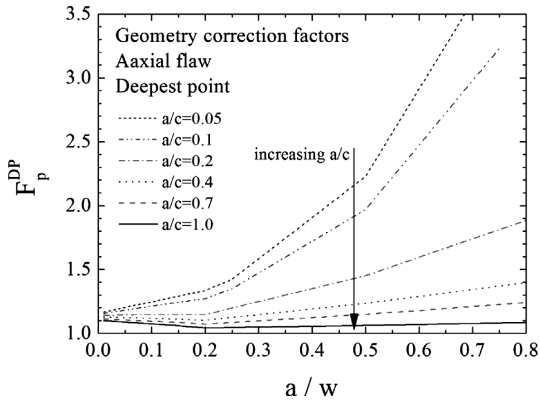


Fig. 4 The variations of geometry correction factor at the deepest point of flow penetration

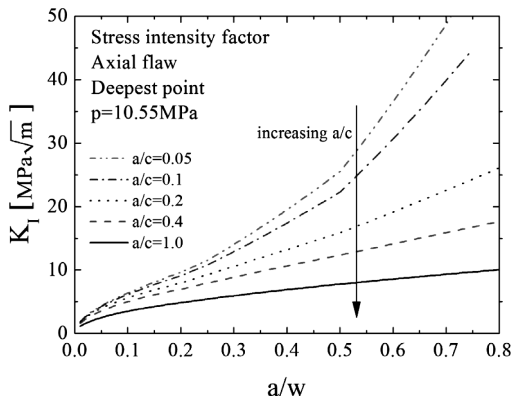


Fig. 5 The variations of stress intensity factor at the deepest point of flow penetration

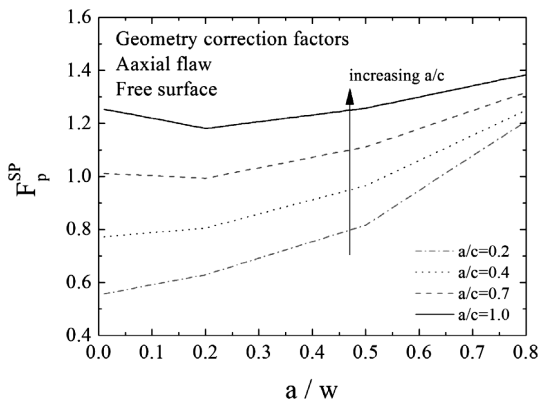


Fig. 6 The variations of geometry correction factor at the point of intersection of flaw with the free surface

Fig. 4에서 축방향 균열의 최심선단에서의 형상보정계수의 경향성을 나타내었다. 대체적으로 a/w 가 증가하면서 형상보정계수가 증가하고, a/c 가 증가하면서 형상보정계수가 감소한다. $a/c > 0.4$ 이고 $a/w < 0.2$ 인 경우에는 a/w 가 증가하면서 형상보정계수가 미세하게 감소한다. a/c 가 낮아지면서 a/w 에 따른 형상보정계수의 증가율이 급격하게 증가한다.

Fig. 5에서 축방향 균열의 최심선단에서의 응력확대계수의 경향성을 나타내었다. 내압은 정상운전 최대 내압인 10.55MPa를 사용하였다. a/w 가 증가하면서 응력확대계수가 증가하고, a/c 가 증가하면서 응력확대계수가 감소한다. a/c 가 낮아지면서 a/w 에 따른 응력확대계수의 증가율이 급격하게 증가한다.

2.3 축방향 균열의 표면선단에서의 형상보정계수

축방향 균열의 표면선단에서의 형상보정계수에 대한 식은 CSA N285.8-05 A.5.2.2.5 절에 제시되어 있고, 본 논문의 Table 2, 5에 정리되어 있다. 분류 1 ($0.20 \leq a/c \leq 1.0$, $0.20 \leq a/w \leq 0.8$)의 형상보정계수는 Raju and Newman에 의해 유한요소해석을 통하여 제시되었다^{3,7)}. 분류 2($0.0 \leq a/c \leq 1.0$, $a/w \rightarrow 0$)의 형상보정계수는 두께(w)가 무한한 경우에 대해서 Scott and Thorpe에 의해 제시되었다^{3,8)}. $a/c < 0.2$ 인 경우에 대한 형상보정계수는 제시되어 있지 않다. 이는 $a/c = 0$ 인 경우에는 표면선단이 존재하지 않거나, a/c 가 0.2 미만인 경우는 균열 길이($2c$)가 상대적으로 매우 길어져서 균열 표면선단의 응력확대계수가 0으로 수렴하기 때문일 것으로 추정된다. CSA N285.8-05 A.5.2.2.2 절의 응력확대계수 식은 중첩의 원리에 의해 균열면에 가해지는 내압이 고려된 식이다.

Fig. 2의 빗금 친 구간과 같이 다음 구간은 내압을 통하여 형상보정계수를 계산해야 한다.

○ 보간 구간 $1: 0.2 \leq a/c \leq 1.0$, $0.0 \leq a/w \leq 0.2$

보간 구간 1에서는 분류 1과 분류 2를 선형 보간하여 형상보정계수를 계산할 수 있다.

Fig. 6에서 축방향 균열의 표면선단에서의 형상보정계수의 경향성을 나타내었다. a/w 가 증가하면서 형상보정계수가 증가한다. 최심선단에서와 반대로 표면선단에서는 a/c 가 증가하면서 형상보정계수가 증가한다. $a/c > 0.7$ 이고 $a/w < 0.2$ 인 경우에는 a/w 가 증가하면서 형상보정계수가 미세하게 감소한다.

Fig. 7에서 축방향 균열의 표면선단에서의 응력확대계수의 경향성을 나타내었다.

대계수의 경향성을 나타내었다. 내압은 정상운전 최대 내압인 10.55MPa를 사용하였다. a/w 가 증가하면서 응력확대계수가 증가한다. 대략 $a/w < 0.4$ 이면 a/c 가 증가하면서 응력확대계수가 증가하나, 대략 $a/w > 0.4$ 이면 이러한 경향성은 반대가 된다. 이는 균열 형상인자 Q 와 형상보정계수의 상호 작용 때문에 발생한다.

a/c 가 1에 가까워지면 표면선단에서의 형상보정계수가 최심선단의 형상보정계수보다 크다. Fig. 8에서 이를 확인할 수 있다. $a/w=0.2$, $a/c > 0.8$ 인 구간과 $a/w=0.8$, $a/c > 0.6$ 인 구간에서 표면선단에서 형상보정계수가 최심선단에서의 형상보정계수보다 더 크다.

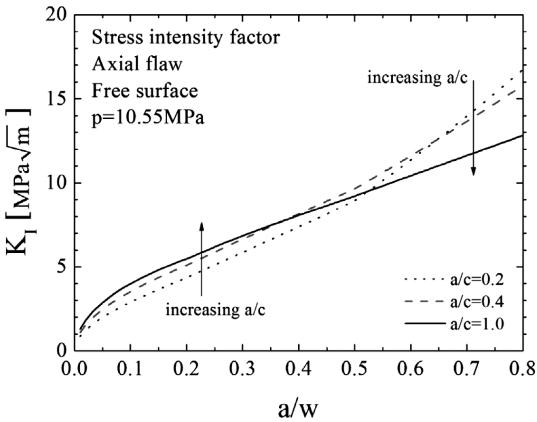


Fig. 7 The variations of stress intensity factor at the point of intersection of flaw with the free surface

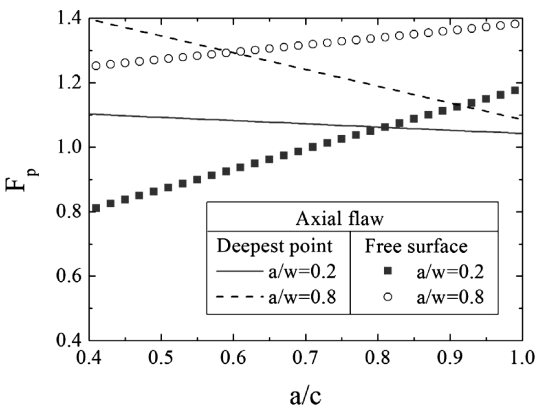


Fig. 8 Comparison between geometry correction factor at the deepest point of flaw penetration (Deepest point) and at the point of intersection of flaw with the free surface (Free surface)

3. CSA 코드 응력확대계수의 적절성 평가

CSA N285.8-05 A.5.2절의 응력확대계수 계산절차의 적절성을 평가하기 위해서 CSA N285.8-05에서 제시된 축방향 균열의 응력확대계수를 다음 3가지 방법으로 계산된 응력확대계수와 비교하여 검토하였다.

- 유한요소해석 결과
- API 579-1/ASME FFS-1 2007 Fitness-For-Service⁹⁾
- ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section XI¹⁰⁾

압력관에 작용 하중으로 1차 하중인 내압이 고려되었다. 응력확대계수의 비교를 위해서 압력관의 내반경과 두께는 초기 내반경 52.108mm와 초기 두께 4.191mm를 사용하였다.

3.1 유한요소해석

상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS v6.9¹¹⁾를 이용하여 균열의 응력확대계수를 계산하기 위한 3차원 유한요소해석을 실시하였다. 20절점 3차원 저감적분 요소(C3D20R)를 사용하였다. 유한요소해석에 사용된 요소망은 대칭 모델을 사용하였으며 Fig. 9와 같다. 균열의 표면선단 부근에서 응력 구배가 크게 발생되므로 이곳의 요소망을 조밀하게 구성하였다. 요소망이 조밀하지 않으면 균열 표면선단에서 정확한 응력확대계수를 계산할 수 없다. 재료는 등방성 특성을 가진다고 가정하였으며, 중수로 정상운전 온도(섭씨 314도)에서의 포아송비로 0.4, 탄성계수로 90.8GPa을 사용하였다.

축방향 균열을 가진 배관에 내압을 가하였으며, 균열 표면에도 내압과 동일한 압력을 가하였다. 내

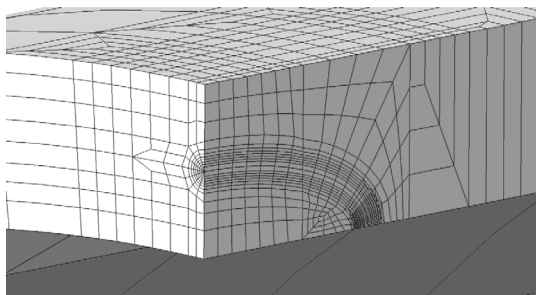


Fig. 9 Finite element mesh.

반경과 두께는 초기 내반경 52.108mm와 초기 두께 4.191mm를 사용하였다. 유한요소해석에 사용된 균열 형상은 $a/c=0.1, 0.2, 0.4, 0.7, 1.0$ 과 $a/w=0.2, 0.5, 0.8$ 이다.

2번째 contour부터 에너지 해방률(energy release rate)이 수렴하므로 5번째 contour에서 에너지 해방률을 추출하였다. 균열 최심선단에서 균열 주변부의 변형 구속이 심하므로 평면 변형을 조건을 사용하여 에너지 해방률을 응력확대계수로 변환하였다. 균열 표면선단 가장 바깥쪽에서는 에너지 해방률이 수렴하지 않고 부정확하게 계산되므로, 균열 표면선단에서 안쪽으로 요소 1개가 들어간 위치에서 에너지 해방률을 추출하였다. 표면선단의 조건은 평면 응력과 평면 변형을 조건 사이에 존재하지만, 여기서는 보수적으로 응력확대계수를 계산하기 위해서 평면 변형을 조건을 사용하여 에너지 해방률(G)을 응력확대계수(K_I)로 변환하였다. 변환식은 다음과 같다.

$$G = \frac{K_I^2}{E'} \quad (2)$$

여기서, 평면 응력 조건에서는 $E'=E$ 이고 평면 변형 조건에서는 $E'=E/(1-\nu^2)$ 이다. E 는 탄성계수이고, ν 는 포아송비이다.

3.2 API 579-1

API 579-1/ASME FFS-1 2007 Fitness- For-Service⁹⁾에 제시된 응력확대계수를 계산하여 CSA N285.8-05의 응력확대계수와 비교하였다. API 579-1의 응력확대계수는 최근의 3차원 유한요소해석을 이용하여 제시되어 있다. 따라서 API 579-1의 응력확대계수는 유한요소해석과 잘 일치하는 것으로 알려져 있다.

API 579-1 C.5.4.절과 C.5.10절에 내압(p)이 가해지는 배관의 축방향 균열의 응력확대계수 평가식이 제시되어 있고 다음과 같다.

$$K_I = \frac{pr_o}{r_o^2 - r_i^2} \left[2G_0 - 2G_1 \left(\frac{a}{r_i} \right) + 3G_2 \left(\frac{a}{r_i} \right)^2 \right] \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \quad (3)$$

$$\left[-4G_3 \left(\frac{a}{r_i} \right)^3 + 5G_4 \left(\frac{a}{r_i} \right)^4 \right]$$

여기서, G_i 는 영향인자(influence coefficient)로 API

579-1에서 표(Table C.10, C.12)로 주어져 있다. r_o 는 외반경이며, r_i 는 내반경이다. 적용 가능한 균열 깊이 범위는 $0.0 \leq a/w \leq 0.8$ 이다. $0.03125 \leq a/c \leq 2.0$ 인 경우에 최심선단과 표면선단에서 영향 인자를 계산할 수 있으며, $a/c=0$ 인 경우의 최심선단에서 영향인자가 제시되어 있다. 따라서 최심선단에서 $0.0 \leq a/c \leq 0.03125$ 인 범위는 위의 두 구간의 형상인자를 내삽하여 사용한다.

3.3 ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section XI

ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section XI 코드¹⁰⁾의 A-3000에 제시된 응력확대계수를 계산하여 CSA N285.8-05의 응력확대계수와 비교하였다. ASME 코드에서는 결함의 방향(원주방향, 축방향)에 따라서 응력확대계수를 구분하여 제시하지 않고 일괄적으로 제시하고 있다. ASME 코드를 이용하여 응력확대계수를 계산하기 위해서는 표면 균열면의 수직방향의 응력(σ)을 다음 형태로 보간하여 계산해야 한다.

$$\sigma = A_0 + A_1 \left(\frac{x}{a} \right) + A_2 \left(\frac{x}{a} \right)^2 + A_3 \left(\frac{x}{a} \right)^3 \quad (4)$$

여기서, x 는 균열이 발생된 면부터의 두께 방향의 거리이고, a 는 균열 깊이이다. A_i 는 곡선 보간을 통하여 구하는 상수이다. 균열이 발생하지 않는 구조물의 응력해석으로 A_i 를 구한 다음에 다음 식을 이용하여 응력확대계수를 구할 수 있다.

$$K_I = [(A_0 + A_p)G_0 + A_1G_1 + A_2G_2 + A_3G_3] \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \quad (5)$$

여기서, A_p 는 균열면에 가해지는 압력이고, G_i 는 ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section XI의 표 A-3320-1, A-3320-2에서 찾아서 보간하여 사용하는 보정 계수이다. G_i 는 최심선단에서는 $0.0 \leq a/w \leq 0.8, 0.0 \leq a/c \leq 0.5$ 인 구간에서 제시되어 있고, 표면선단에서는 $0.0 \leq a/w \leq 0.8, 0.1 \leq a/c \leq 1.0$ 인 구간에서 제시되어 있다. 내압이 가해지는 압력관의 응력 해석을 수행하고 이를 보간하여 A_i 를 계산하였다. Q 는 균열

형상인자이고 다음 식을 이용하여 계산한다.

$$Q = 1 + 4.593 \left(\frac{a}{2c} \right)^{1.665} \quad (6)$$

3.4 CSA N285.8-05의 응력확대계수 계산절차 평가

CSA N285.8-05의 응력확대계수 계산절차를 위에서 언급한 유한요소해석 및 API 579-1 코드, ASME 코드와 비교하였다. Fig. 10과 11에서 CSA N285.8-05의 응력확대계수(K_I^{CSA})와 유한요소해석, API 579-1 코드, ASME 코드의 응력확대계수(K_I^{FEA}, K_I^{API}, K_I^{ASME})의 비를 나타내었다. K_I^{CSA}/K_I^{FEA}, K_I^{CSA}/K_I^{API}, K_I^{CSA}/K_I^{ASME}가 1보다 크면 CSA N285.8-05의 응력확대계수가 유한요소해석, API 579-1 코드, ASME 코드

의 응력확대계수보다 보수적인(큰) 경우이다.

Fig. 10은 최심선단의 응력확대계수의 비이다. 0.2 ≤ a/c ≤ 1.0 경우에는 CSA의 K_I와 유한요소해석 및 API 코드의 K_I의 차이가 -8~2%이고, a/c=0.1 경우에는 그 차이가 -1~17%이다. 0.2 ≤ a/c ≤ 1.0 경우에는 CSA의 K_I와 ASME 코드의 K_I의 차이가 -2~10%이다. 하지만 a/c=0.1이고 a/w > 0.4인 경우에는 오차가 a/w가 증가함에 따라 증가한다. 이는 a/c=0인 경우에 ASME 코드가 매우 큰(보수적인) 응력확대계수를 예측하기 때문이다. CSA N285.8-05에서 a/w > 0.5인 균열을 허용하지 않기 때문에, 이 범위의 균열의 응력확대계수는 크게 중요하지 않다.

Fig. 11은 표면선단의 응력확대계수의 비이다. 0.2 ≤ a/c ≤ 1.0 경우에는 CSA의 K_I와 유한요소해석 및 API코드의 K_I의 차이가 -7~0%이고, a/c=0.2 경우에

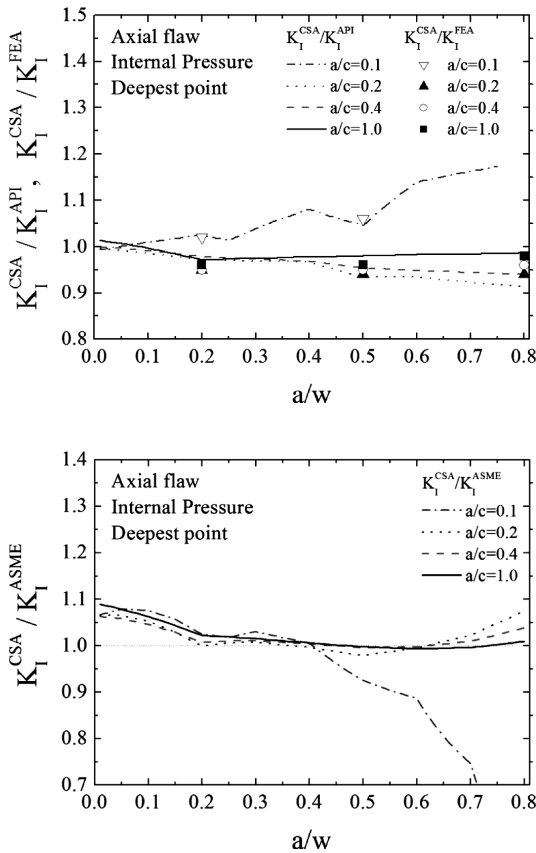


Fig. 10 The comparisons of the SIF in CSA N285.8-05 with the SIFs by the three methods (FEA, API, ASME BPVC Sec. XI) for the deepest point of axial flow

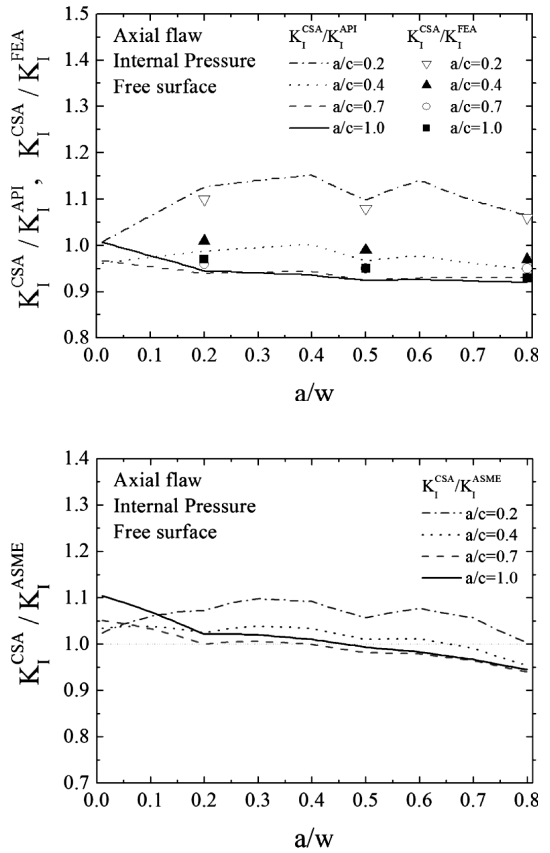


Fig. 11 The comparisons of the SIF in CSA N285.8-05 with the SIFs by the three methods (FEA, API, ASME BPVC Sec. XI) for the free surface of axial flows

는 차이가 1~15%이다. 전반적으로 CSA의 K_I 와 ASME 코드의 K_I 의 차이는 -5~10%이다. 전반적으로 CSA N285.8-05의 응력확대계수가 유한요소해석, API 579-1 코드, ASME 코드의 응력확대계수와 적절한 범위 내에서 일치하므로 CSA N285.8-05의 응력확대계수를 실제 균열 평가에 적용하는 데 적당하다고 사료된다.

4. Zr-2.5Nb재료에 따른 응력확대계수

CSA N285.8-05에 제시되어 있는 응력확대계수 식은 포아송비가 0.3에서 0.33인 경우에 대한 식이지만³⁾, 압력관 재료인 Zr-2.5Nb의 포아송비가 0.4이다. 본 연구에서 다양한 균열 형상($0.20 \leq a/c \leq 1.0$, $0.20 \leq a/w \leq 0.8$)에 대한 유한요소해석을 수행한 결과, 포아송비가 0.3인 경우의 응력확대계수가 포아송비가 0.4인 경우의 응력확대계수에 비해서 최심선단에서 약 2% 더 작고 표면선단에서 약 0~9% 정도 더 크므로 포아송비에 따른 오차는 크지 않다.

Zr-2.5Nb로 제작된 압력관의 탄성계수는 축방향과 원주방향, 두께방향으로 각각 다른 이방성을 가진다¹²⁾. 탄성계수가 이방성을 가지는 경우에 응력확대계수가 등방성인 경우에 비해서 커지거나 작아질 수 있다. ABAQUS V.6.9¹¹⁾에서 이방성 재료의 응력확대계수를 직접 계산할 수 있다. 본 연구에서 ABAQUS V.6.9를 이용하여 탄성계수가 이방성인 경우의 응력확대계수를 구하고, 이를 등방성인 경우와 비교하였다. CSA N285.8-05 코드에서 제시하고 있는 탄성계수는 원주방향의 탄성계수이다³⁾. 한국원자력연구원에서 Zr-2.5Nb로 제작된 압력관의 탄성계수를 각 온도와 각 방향에 대해서 측정하였고¹²⁾, 본 연구에서는 이 결과를 이용하였다. 300°C에서의 다음 물성치를 이용하여 유한요소해석을 수행하였다. 포아송비는 0.4를 이용하였다.

$$E_{rr} = 80\text{GPa}, E_{\theta\theta} = 90\text{GPa}, E_{ll} = 75\text{GPa}, \\ G_{\theta l} = 28\text{GPa}, G_{rl} = 26\text{GPa}, G_{r\theta} = 32\text{GPa}$$

여기서, E 는 탄성계수이고, G 는 전단 탄성계수이다. 첨자 r 은 반지름(두께) 방향, θ 는 원주방향, l 은 축방향을 나타낸다.

Fig. 12는 균열 최심선단과 표면선단에서의 등방성 응력확대계수($K_I^{Isotropic}$)와 이방성 응력확대계수($K_I^{Anisotropic}$)의 비이다. 최심선단에서 등방성 응력확

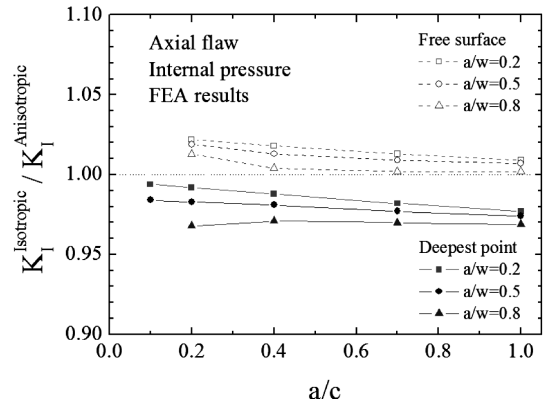


Fig. 12 The ratios of isotropic SIF to anisotropic SIF

대계수가 이방성 응력확대계수보다 최대 3% 더 작고, 표면선단에서 등방성 응력확대계수가 이방성 응력확대계수보다 최대 2% 더 크다. a/w 가 증가하면서 $K_I^{Isotropic} / K_I^{Anisotropic}$ 는 감소하고, a/c 가 증가하면서 $K_I^{Isotropic} / K_I^{Anisotropic}$ 는 감소한다. 전반적으로 등방성 응력확대계수와 이방성 응력확대계수의 차이가 4% 미만이므로 재료의 이방성을 고려하지 않아도 적절한 평가를 하는 데 큰 오류를 발생시키지 않는다. 탄성계수의 이방성을 고려하면 평가 절차가 복잡해지므로 이방성을 고려하지 않고, 등방성으로 가정하고 평가를 실시하는 것이 합리적이다.

5. 결론

CANDU형 중수로 압력관의 균열성(평면 및 층상) 결함의 가동적합성평가에 있어서 응력확대계수는 가장 기초적이고 중요한 정보이고 다양한 평가 절차에서 사용된다. CSA N285.8-05에서 제시한 응력확대계수 평가식을 분석하여 아래의 결론을 도출하였다.

1. CSA N285.8-05에 따르면, 특정 형상의 균열에 대해서는 보간을 통해 응력확대계수를 결정하여야 하며, 보다 신뢰성 높은 응력확대계수 평가를 위한 상세 보간절차를 개발하여 제시하였음
2. 0.4의 포아송비와 이방성 탄성계수 특성을 갖는 Zr-2.5Nb압력관 재질의 특성을 고려한 유한요소해석을 수행하였으며, 0.3의 포아송비와 등방성 탄성계수 특성을 갖는 일반 재질의 경우와 비교하여 상기 특성이 응력확대계수에 미치는 영향이 5% 미만임을 확인하였음. 따라서 CSA N285.8-05에서 제시한 포

아송비 0.3 및 등방성 탄성계수에 기반한 응력확대 계수 평가식의 적용은 타당함

3. 축방향 균열 형상에서 전반적으로 CSA N285.8-05의 응력확대계수가 유한요소해석, API 579-1 코드, ASME 코드의 응력확대계수와 적절한 범위 내에서 일치함

후 기

본 연구는 한전 전력연구원의 지원으로 수행된 “주기기 재료신뢰도 기계해석 기술 개발”의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. IAEA, 1998, “IAEA TECDOC-1037, Assessment and management of ageing of major nuclear power plant components important to safety : CANDU pressure tubes.”
2. AECL, 1991, “COG-91-66, Fitness for service guideline for zirconium alloy pressure tubes in operating CANDU reactors, Rev. 0.”
3. AECL, 1996, “COG-91-66, Fitness for service guideline for zirconium alloy pressure tubes in operating CANDU reactors, Rev. 1.”
4. Canadian Standards Association, 2005, “CSA N285.8-05, Technical Requirements for In-service Evaluation of Zirconium Alloy Pressure Tubes in CANDU Reactors.”
5. 한국원자력연구소, 2005, “중수로 압력관 건전성 평가 기술개발.”
6. Choi, S. N., Kim, H. N., Yoo, H. J., Kwon, D. K. and Hwang, W. G., 2010, “Development of an Integrity Evaluation System (WIES) for Fuel Channels in CANDU Reactors,” Trans. of the KSME, Vol. 34, No. 9, pp. 1273-1279.
7. Raju, I. S. and Newman, J. C., 1982, “Stress Intensity Factors for Internal and External Surface Cracks in Cylinder Vessels,” Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 104, pp. 293-298.
8. Scott, P. M and Thorpe, T. W., 1981, “A critical review of crack tip stress intensity factors for semi-elliptic cracks,” Fatigue of Engineering Materials and structures, Vol. 4, No. 4, pp. 291-309.
9. API (American Petroleum Institute), 2007, “API 579-1/ASME FFS-1 2007 Fitness-For-Service : Annex C-Compendium of stress intensity factor solutions(Normative).”
10. ASME, 1998, “Boiler and Pressure Vessel Code Section XI.”
11. ABAQUS Version 6.9, 2009, “User’s Manual,” Dassault Systèmes Simulia Corp., USA.
12. Cheong, Y. M., Kim, S. S. and Kim, Y. S., 2002, “Temperature effect of dynamic anisotropic elastic constants of Zr-2.5Nb pressure tube by resonant ultrasound spectroscopy,” Journal of Nuclear Materials, Vol. 303, pp. 83-91.