

가압중수로 압력관 이물질 프레팅 결함의 탄성 응력집중계수 수식 도출

김 종 성*† · 오 영 진**

* 순천대학교 기계우주항공공학부, ** 한국전력기술(주)

Derivation of Elastic Stress Concentration Factor Equations for Debris Fretting Flaws in Pressure Tubes of Pressurized Heavy Water Reactors

Jong Sung Kim*† and Young Jin Oh**

* Dept. of Mechanical Engineering, Suncheon Nat'l Univ.,

** KEPCO E&C, Co.

(Received September 14, 2013 ; Revised November 6, 2013 ; Accepted December 3, 2013)

Key Words: Pressurized Heavy Water Reactor(가압중수로), Pressure Tube(압력관), Debris Fretting Flaw(이물질 프레팅 결함), Elastic Stress Concentration Factor(탄성 응력집중계수), Finite Element Analysis(유한요소 해석)

초록: 가동중검사 동안 가압중수로 압력관에서 탐지된 베어링 패드 프레팅 결함, 이물질 프레팅 결함 등 체적결함에 대해서는 CSA N285.8-05 에 따라 탄성 응력집중계수 수식을 이용하여 피로균열 및 수소지연균열이 개시되는 것을 평가하여야 한다. CSA N285.8-05 에는 이물질 프레팅 결함에 대해서는 선형과 피역학 기반한 개략적인 수식만이 제시된다. 본 연구에서는 이러한 이물질 프레팅 결함에 대해 2 차원 유한요소 해석과 일부 수정된 Kinectrics 사의 공학적 절차를 통해 이물질 프레팅 결함의 기하학적 특성이 좀더 상세히 고려된 탄성 응력집중계수 수식을 도출하였다. 도출된 수식을 적용한 결과와 3 차원 유한요소 해석 결과를 비교한 결과, 도출된 수식은 유한요소 해석과 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

Abstract: If volumetric flaws such as bearing pad fretting flaws and debris fretting flaws are detected in the pressure tubes of pressurized heavy water reactors during in-service inspection, the initiation of fatigue cracks and delayed hydrogen cracking from the detected volumetric flaws shall be assessed by using elastic stress concentration factors in accordance with CSA N285.8-05. The CSA N285.8-05 presents only an approximate formula based on linear elastic fracture mechanics for the debris fretting flaw. In this study, an engineering formula considering the geometric characteristics of the debris fretting flaw in detail was derived using two-dimensional finite element analysis and Kinectrics, Inc.'s engineering procedure with slight modifications. Comparing the application results obtained using the derived formula with the three-dimensional finite element analysis results, it is found that the results obtained using the derived formula agree well with the results of the finite element analysis.

1. 서 론

가압중수로 압력관은 가압경수로 원자로 압력 용기와 같이 원자로 냉각재 압력경계 유지라는 고유기능을 수행하는 안전 1등급기기로써 파손시 방사능 물질 유출 등 원자로 안전 운전/정지에 주요

한 영향을 미친다.⁽¹⁾ 가동중검사 동안 압력관에서 탐지된 베어링 패드 프레팅 결함, 이물질 프레팅 결함 등 체적결함에 대해서는 가압중수로 가동중 건전성 평가 기술기준인 CSA N285.8-05⁽²⁾에 따라 구조 건전성을 평가하여야 한다. 이러한 체적결함에 대한 구조 건전성 평가시 체적결함으로부터 피로균열 및 수소지연균열이 개시되는 것을 평가하기 위해 탄성 응력집중계수 수식이 이용된다.⁽²⁾

† Corresponding Author, kimjsbat@suchon.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

CSA N285.8-05에 제시된 수식들은 일부 적용상의 문제점(예: 일부 변수에 대해 유한요소 해석 결과와 다른 경향 등)이 존재하여 Kinectrics 사는 2차원 유한요소 해석을 통해 베어링 패드 프레팅 결함의 탄성 응력집중계수 수식을 도출하는 공학적 절차를 제안하였고 최종적으로 베어링 패드 프레팅 결함에 대한 새로운 탄성 응력집중계수 수식을 제시하였다.⁽³⁾ CSA N285.8-05는 이물질 프레팅 결함에 대해서는 균열로 가정하여 도출한 개략적인 수식만을 제시하고 있어 적용상의 문제점(예: 이물질 프레팅 결함의 기하학적 특성을 정확하게 반영할 수 없음 등)이 존재한다.

단순 노치 형상에 대한 응력집중계수는 참고문헌⁽⁴⁾에 제시되어 있다. 손범구 등은 좀더 복잡한 형상을 갖는 배관 감육부의 응력집중계수를 3차원 유한요소해석을 통해 도출하였다.⁽⁵⁾ 기하학적 형상의 큰 차이로 기존 연구들의 결과⁽³⁻⁵⁾를 국부적으로 작은 노치 반경과 경사각을 갖는 이물질 프레팅 결함에 적용할 수 없다.

따라서 본 연구에서는 이러한 이물질 프레팅 결함에 대해 2차원 유한요소 해석과 일부 수정된 Kinectrics사의 공학적 절차를 이용하여 이물질 프레팅 결함의 기하학적 특성이 좀더 상세히 고려된 탄성 응력집중계수 수식을 도출하고자 한다.

2. 이물질 프레팅 결함의 탄성 응력집중계수 수식 도출을 위한 공학적 절차

2.1 Kinectrics 사의 공학적 절차⁽³⁾

Kinectric 사는 Fig. 1의 형상을 가진 베어링 패드 프레팅 결함의 탄성 응력집중계수 수식을 도출하기 위한 공학적 절차를 개발하였다. a 는 결함깊이, b 는 결함 폭의 반, c 는 결함 축방향 길이이다. Fig. 2에 제시된 바와 같이 이축 하중 하의 무한 평판에 반경 ρ 를 가지는 타원 구멍에 대한 이론적 응력집중계수 k_{iEH} 수식 (1)⁽⁶⁾을 이용하여 중수로 압력관의 결함 루트부 반경이 응력집중에 미치는 영향을 고려한다. 피크 응력은 구멍 루트부의 상대적 작은 영역에서 국부적으로 발생하므로 베어링 패드 프레팅 결함에 대한 첫번째 개략화 수식으로써 수식 (1)을 이용할 수 있다.⁽³⁾

$$k_{iEH} = \{2a\rho b_\rho(1+\lambda) - a^2(1-\lambda) + b_\rho^2(1-\lambda) + (a+b_\rho)^2 \times (1-\lambda)\cos 2\eta\} / \{a^2 + b_\rho^2 + (b_\rho^2 - a^2)\cos 2\eta\} \quad (1)$$

$$b_\rho = \sqrt{a\rho} \quad (2)$$

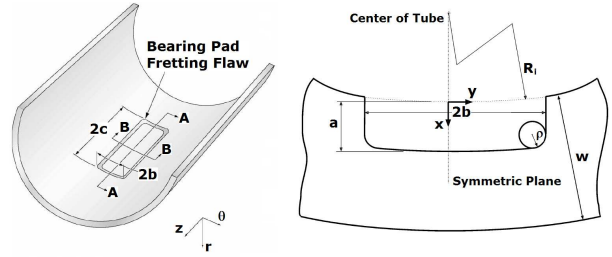


Fig. 1 Idealized bearing pad fretting flaw in a pressure tube

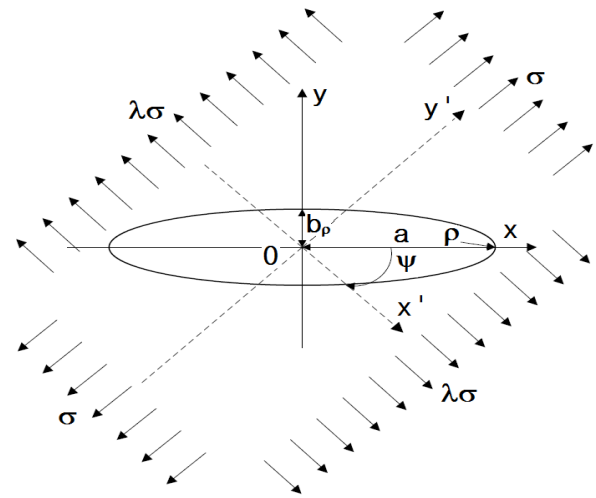


Fig. 2 Elliptical hole in an infinite plate under biaxial loading

여기서 b_ρ 는 베어링 패드 프레팅 결함과 동일한 깊이와 루트 반경을 가지는 타원 구멍의 등가 폭, λ 는 이축 하중 사이의 크기 비, η 는 타원-쌍곡선 좌표계 (ξ, η) 의 한쪽 좌표이다.

식 (2)는 유한한 벽 두께의 효과를 고려하지 못하므로 이러한 효과는 두께 w 에 대한 깊이 a 의 비 a/w 에 대해 곡선 적합된 함수 $F_{a/w}$ 를 이용하여 다음 수식과 같이 고려된다.

$$k_{i2D} = F_{a/w} k_{iEH} \quad (3)$$

여기서 k_{i2D} 는 이차원 유한요소 해석으로부터 결정되는 무한히 긴 프레팅 결함의 탄성 응력집중계수이며, $F_{a/w}$ 는 벽 두께로 나눈 결함 깊이 효과를 고려하는 기하학적 수정 계수이다. k_{iEH} 는 식 (1)로부터 계산된다.

식 (3)은 $F_{a/w}$ 를 결정하기 위해 다음과 같이 정리될 수 있는데 다양한 두께에 대한 결함 깊이비에 대해 변수 해석을 수행하여 $F_{a/w}$ 를 식 (4)와 같은 다항식 형태로 도출할 수 있다.

$$F_{a/w} = k_{I2D} / k_{IEH} = \sum_{i=0}^n a_i (a/w)^i \quad (4)$$

한정된 길이 c 를 가지는 베어링 패드 프레팅 결함의 응력집중계수에 미치는 3차원 효과는 다음 수식과 같이 응력확대계수 개념을 도입하여 고려된다.

$$k_t = F_{a/w} k_{IEH} \left(\frac{K_{I3D}}{K_{I2D}} \right) \quad (5)$$

$$K_{I3D} = \sigma_n \sqrt{\pi a} \left[1.14 - 0.48 \frac{a}{c} + \frac{(a/w)^2}{0.2 + 4.9(a/c)^{1.2}} \right] \quad (6)$$

$$K_{I2D} = \sigma_n \sqrt{\pi a} [1.14 + 5.0(a/w)^2] \quad (7)$$

여기서 k_t 는 3차원 효과까지 고려된 최종적인 탄성응력집중계수이며, K_{I3D} 는 베어링 패드 프레팅 결함을 반타원 균열로 가정시 반타원 균열의 최심점에서의 응력확대계수⁽⁷⁾이다. K_{I2D} 는 무한히 긴 균열에 대한 응력확대계수로서 식 (6)에서 a/c 를 0으로 취할 때 얻어진다. σ_n 은 작용 응력이다.

2.2 Kinectrics 사의 공학적 절차의 수정

베어링 패드 프레팅 결함은 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 압력관 원주방향 및 축방향에 따라 평탄한 형상을 가지는 반면 이물질 프레팅 결함은 Fig. 3과 같이 축방향에 대해서는 반타원적 형상을, 원주방향에 대해서는 일정 루트부 경사각 $2\omega_r$ 를 가지는 노치 형상을 가진다.⁽²⁾ 이러한 형상 차이 때문에 Kinectric사의 공학적 절차를 이물질 프레팅 결함에 대해 바로 적용할 수 없다. 즉, Kinectrics사의 공학적 절차 상 $F_{a/w}$ 는 원주방향에 따른 루트부 각도의 영향을 고려할 수 없으므로(두께에 대한 결함 깊이 비의 영향만 고려) $F_{a/w}$ 에 원주방향에 따른 루트부 각도의 영향도 고려하도록 절차를 다음과 같이 수정하여야 한다.

무한체 노치부의 응력집중은 노치부의 각도 $2\omega_r$,

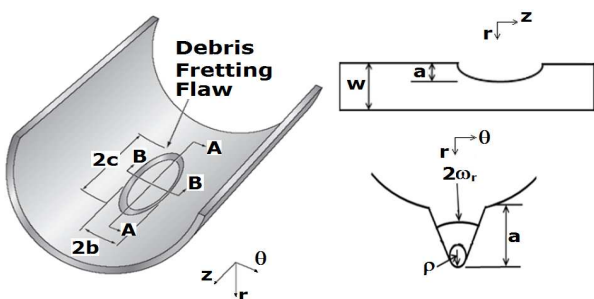


Fig. 3 Idealized debris fretting flaw in a pressure tube

에 무관하다는 Murakami의 연구 결과⁽⁸⁾와 이물질 프레팅 결함의 루트부 형상이 둥근 바닥 베어링 패드 프레팅 결함과 유사하므로 식 (1)에 $\lambda = -1$ 과 $\eta = \pi/180$ (Kinectric사의 공학적 절차에 따르면 둥근 바닥 베어링 패드 프레팅 결함에 대해 상기 제시된 값들이 공학적 판단에 근거할 때 가장 좋은 적합성을 가진다고 제시하고 있음⁽³⁾)을 대입하여 k_{IEH} 에 대한 수식 (8)을 도출한다.

$$k_{IEH} = 2 + \frac{a(-0.00121872a + 1.999391b_\rho)}{0.000304679a^2 + b_\rho^2} \quad (8)$$

결함 루트부 각도와 두께 영향은 이러한 영향을 고려하여 수행한 2차원 유한요소 해석 결과로부터 $F_{a/w}$ 를 a/w 만의 함수가 아닌 ω_r 과 a/w 의 함수식 $F_{a/w}^{\omega_r}$ 으로 도출한다.

결함의 3차원 영향은 기존의 Kinectric사의 절차와 동일하다.

3. 이물질 프레팅 결함의 탄성 응력집중계수 수식 도출

3.1 평가 대상

평가 대상은 지르코늄 합금으로 제작된 중수로 압력관에 이물질과의 프레팅 접촉 마모로 인해 발생하는 이물질 프레팅 결함으로 Fig. 3에 기하학적 형상이 제시되고 있다. 응력집중계수 수식을 도출하기 위해서는 2차원 유한요소 해석을 수행하므로 무한히 긴 결함으로 가정된다.

지르코늄 합금의 탄성계수와 프와송 비는 CSA N285.8에 제시된 운전 온도에서의 값인 91.7GPa과 0.4를 사용하였다.

3.2 유한요소 해석

Table 1은 수정된 Kinectric사의 공학적 절차에 따라 이물질 프레팅 결함의 $F_{a/w}$ 인 $F_{a/w}^{\omega_r}$ 를 도출하기 위한 2차원 해석 경우이다.

유한요소 모델은 상용 유한요소 프로그램인 ABAQUS⁽⁹⁾의 CAE 모듈을 이용하여 개발된다. 피크응력은 유한요소 메쉬에 민감하므로 유한요소 메쉬 크기에 따른 민감도 분석을 수행하여야 한다. 그러나, 2차원 해석의 경우에는 유한요소 크기가 매우 작게 설정된 유한요소 모델을 개발하여 해석하여도 2차원 해석이기 때문에 3차원 해석 경우와 같이 오랜 시간을 요구하지 않는다. 따라서 공학적 판단 하에서 2차원 해석에서는 피크응력의 민감도에 영향을 주지 않을 정도로 매우 작은 크기

Table 1 Parameter values of various two-dimensional finite element analysis cases for deriving $F_{a/w}^{\sigma_r}$ function of the debris fretting flaw

Case	$2\omega_r$ (degree)	a/w	ρ (mm)
2D-1, 2, 3	30	0.1	0.01, 0.5, 1.0
2D-4, 5, 6		0.2	0.01, 0.5, 1.0
2D-7, 8, 9		0.3	0.01, 0.5, 1.0
2D-10,11,12	60	0.1	0.01, 0.5, 1.0
2D-13,14,15		0.2	0.01, 0.5, 1.0
2D-16,17,18		0.3	0.01, 0.5, 1.0
2D-19,20,21	90	0.1	0.01, 0.5, 1.0
2D-22,23,24		0.2	0.01, 0.5, 1.0
2D-25,26,27		0.3	0.01, 0.5, 1.0
2D-28,29,30	120	0.1	0.01, 0.5, 1.0
2D-31,32,33		0.2	0.01, 0.5, 1.0
2D-34,35,36		0.3	0.01, 0.5, 1.0
2D-37,38,39	150	0.1	0.01, 0.5, 1.0
2D-40,41,42		0.2	0.01, 0.5, 1.0
2D-43,44,45		0.3	0.01, 0.5, 1.0

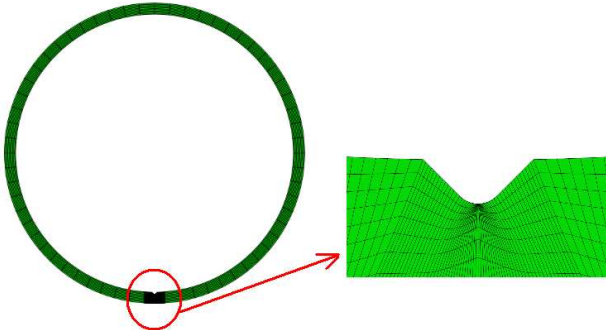


Fig. 4 Two-dimensional finite element model for the case 2D-20

인 루트부 반경의 0.1배로 루트부의 유한요소 크기를 설정하였다.

Fig. 4는 2차원 유한요소 모델(case 2D-20)을 보여주고 있다. 그림에서 보이는 바와 같이 8절점 이차 연속체 저감적분 요소를 사용하였다.

압력관 내면에 내압 10MPa을 작용시켰다. ABAQUS Standard를 이용하여 2차원 탄성 유한요소 응력 해석을 수행하였다.

2차원 유한요소 탄성 응력해석으로부터 도출된 최대 주응력 분포로부터 다음 수식을 이용하여 탄성 응력집중계수 k_{i2D} 를 계산하였다.

$$K_{i2D} = \frac{\sigma_{\max-\max-prin-flaw-by-2D\ FEA}}{\sigma_{\max-prin-no\ flaw}} \quad (9)$$

Table 2 Maximum values of maximum principal stresses and elastic stress concentration factors of the debris fretting flaws with infinite length via the two-dimensional finite element elastic stress analysis

Case	Max. value of max. principal stress (MPa)	Elastic stress concentration factor	Case	Max. value of max. principal stress (MPa)	Elastic stress concentration factor
2D-1	536.2	4.00	2D-22	1872.5	13.94
2D-2	428.5	3.19	2D-23	633.3	4.72
2D-3	341.7	2.54	2D-24	500.9	3.73
2D-4	1890.1	14.07	2D-25	2769.7	20.62
2D-5	636.7	4.74	2D-26	900.4	6.71
2D-6	500.5	3.73	2D-27	709.8	5.28
2D-7	3165.2	23.57	2D-28	916.7	6.83
2D-8	907.5	6.76	2D-29	363.0	2.70
2D-9	711.5	5.29	2D-30	340.9	2.53
2D-10	1606.8	11.96	2D-31	1412.1	10.52
2D-11	424.5	3.16	2D-32	543.1	4.05
2D-12	341.4	2.54	2D-33	497.2	3.70
2D-13	2426.7	18.07	2D-34	2059.0	15.33
2D-14	638.6	4.76	2D-35	873.9	6.51
2D-15	500.9	3.73	2D-36	664.8	4.94
2D-16	2625.5	19.55	2D-37	546.9	4.07
2D-17	903.5	6.73	2D-38	374.5	2.78
2D-18	710.3	5.28	2D-39	322.8	2.40
2D-19	1459.5	10.87	2D-40	789.0	5.87
2D-20	413.2	3.08	2D-41	536.3	4.00
2D-21	340.7	2.53	2D-42	462.6	3.44
			2D-43	1119.6	8.33
			2D-44	757.9	5.64
			2D-45	653.1	4.86

여기서 $\sigma_{\max-\max-prin-flaw-by-2D\ FEA}$ 는 2차원 유한요소 해석을 통해 도출한 이물질 프레팅 결함이 존재하는 압력관의 최대 주응력 최대값, $\sigma_{\max-no\ flaw}$ 는 결함이 없는 압력관의 최대 주응력 값이다.

Table 2는 2차원 유한요소 탄성 응력해석을 통한 최대 주응력의 최대값과 최대 주응력에 대한 탄성 응력집중계수 k_{i2D} 값을 제시하고 있다. Table 1과 2에 알 수 있듯이 루트부 반경이 작을수록, 결함이 깊어질수록 최대 주응력의 최대값과 k_{i2D} 는 증가함을 알 수 있다. 결함 루트부 경사각이 증가함

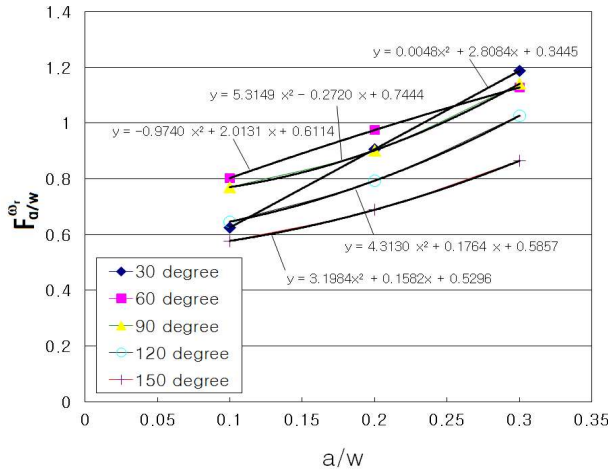


Fig. 5 Variation of $F_{a/w}^{\sigma_r}$ vs. the flaw depth ratio and the flaw inclined angle

에 따라 일반적으로 최대 주응력의 최대값과 k_{I2D} 는 감소하나 얇은 결함 깊이비의 작은 루트부 반경에선 최대 주응력의 최대값과 k_{I2D} 는 증가하다가 감소하는 경향을 일부 보인다.

3.3 수식 도출

2.2절에 제시한 일부 수정된 Kinectrics사의 공학적 절차에 따라 이물질 프레팅 결함에 대한 응력 집중계수 수식을 도출하였다.

모든 결함 루트부 반경들에 대해 계산된 $F_{a/w}^{\sigma_r} = k_{I2D} / k_{IEH}$ 의 평균치를 결함 깊이비와 결함 루트부 경사각에 따라 Fig. 5와 같이 제시하고 각 경사각도 별로 결함 깊이비에 대한 비를 최소자승법에 의해 Fig. 5와 같이 함수화하였다. Fig. 5에 제시된 함수들의 각 계수들을 결함 경사각에 대한 함수로 $F_{a/w}^{\sigma_r}$ 를 도출한 후 $F_{a/w}^{\sigma_r}$ 를 식 (5)의 $F_{a/w}$ 대신에 대입하여 이물질 프레팅 결함의 최대 주응력에 대한 최종적인 탄성 응력집중계수 수식 $k_{I-max-prin}^{DF}$ 을 다음과 같이 도출하였다. 상첨자 DF는 derbis fretting flaw를 의미한다. Fig. 5에서 보이는 바와 같이 $F_{a/w}^{\sigma_r}$ 를 a/w 의 2차 함수로 적합하여도 a/w 에 대한 $F_{a/w}^{\sigma_r}$ 의 변화 거동을 충분히 정확하게 묘사할 수 있다. $2\omega_r=90^\circ$ 를 기준으로 2차 함수 내 각 계수들이 ω_r 에 대해 변화하는 거동 특성이 변화하여 동일한 함수로 표현하면 함수의 적합성이 떨어지기 때문에 각 계수들을 90° 를 기준으로 구분하여 함수로 제시하였다.

$$k_{I-max-prin}^{DF} = F_{a/w}^{\sigma_r} k_{IEH} \left(\frac{K_{I3D}}{K_{I2D}} \right) \quad (10)$$

$$F_{a/w}^{\sigma_r} = a_0 + a_1(a/w) + a_2(a/w)^2 \quad (11)$$

$$a_0 = -0.0563 + 0.893337\beta - 0.244204\beta^2 \quad (30^\circ \leq 2\omega_r \leq 90^\circ, 0.1 \leq a/w \leq 0.3) \quad (12)$$

$$a_0 = 1.8361 - 0.988925\beta + 0.187120\beta^2 \quad (90^\circ < 2\omega_r \leq 150^\circ, 0.1 \leq a/w \leq 0.3) \quad (13)$$

$$a_1 = 2.1139 + 2.749052\beta - 2.717071\beta^2 \quad (30^\circ \leq 2\omega_r \leq 90^\circ, 0.1 \leq a/w \leq 0.3) \quad (14)$$

$$a_1 = -4.4168 + 3.975373\beta - 0.850977\beta^2 \quad (90^\circ < 2\omega_r \leq 150^\circ, 0.1 \leq a/w \leq 0.3) \quad (15)$$

$$a_2 = 8.2511 - 22.689229\beta + 13.254336\beta^2 \quad (30^\circ \leq 2\omega_r \leq 90^\circ, 0.1 \leq a/w \leq 0.3) \quad (16)$$

$$a_2 = 7.6424 - 1.158425\beta - 0.205905\beta^2 \quad (90^\circ < 2\omega_r \leq 150^\circ, 0.1 \leq a/w \leq 0.3) \quad (17)$$

$$\beta = \frac{\pi\omega_r}{90} \quad (18)$$

여기서 k_{IEH} , K_{I3D} 와 K_{I2D} 는 각각 식 (8), (6)과 (7)에 제시되어 있다.

4. 탄성 응력집중계수 수식의 검증

4.1 검증 유한요소 해석

Table 3은 이물질 프레팅 결함에 대한 도출된 탄성 응력집중계수 수식의 타당성을 검증하기 위해 수행된 다양한 3차원 해석 경우이다.

피크응력은 유한요소 메쉬에 민감할 뿐만 아니라 너무 작은 유한요소 크기의 모델로 3차원 해석을 수행시 오랜 해석시간이 요구될 수 있으므로 유한요소 메쉬의 크기에 대한 피크응력의 변화를 고찰하는 민감도 분석을 수행하였다. Fig. 6은 case 3D-2에 대한 유한요소 메쉬 크기 변화에 따른 최대 주응력의 최대값 변화를 보여주고 있다. L_{avg} 는 결함 루트부의 측면과 바닥면 최근접 유한요소 길이(깊이 방향)의 평균값을 의미한다. Fig. 6에서 보이는 바와 같이 유한요소 메쉬 크기가 감소할수록 최대 응력값이 증가하다가 일정 크기 이하에서는 일정한 값을 보임을 알 수 있다. 본 민감도 분석 결과에 따라 유한요소 해석시 결함 루트부 근처에서는 루트부 반경 대비 약 0.3 정도의 크기를 가지는 유한요소 메쉬를 사용하였다.

Fig. 7은 3차원 유한요소 모델 (case 3D-2)을 보여주고 있다. 그림에서 보이는 바와 같이 20절점 이차 연속체 저감적분 요소를 사용하였으며 요소 수와 절점 수는 각각 68,056개와 294,508개이다.

Table 3 Parameter values of various three-dimensional finite element analysis cases for verifying the elastic stress concentration factor equations of the debris fretting flaw

Case	a/w	c/b	ρ (mm)	$2\omega_r$ (degree)
3D-1	0.2	2.5	0.5	45
3D-2	0.2	2.5	0.5	90
3D-3	0.2	2.5	0.5	150
3D-4	0.2	1.0	0.5	90
3D-5	0.2	4.0	0.5	90
3D-6	0.1	2.5	0.5	90
3D-7	0.3	2.5	0.5	90
3D-8	0.2	2.5	0.01	90
3D-9	0.2	2.5	1.0	90

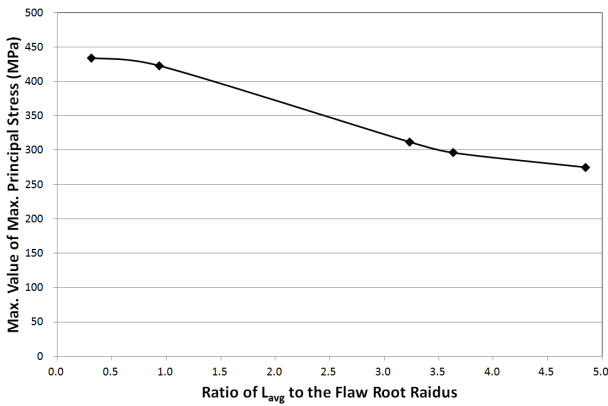


Fig. 6 Variation of maximum value of the maximum principal stress vs. the finite element size (case 3D-2)

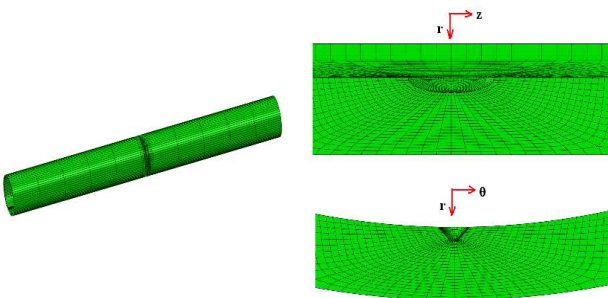


Fig. 7 Three-dimensional finite element model for the case 3D-2

압력관 내면에 내압 10MPa이 작용하며, 압력관 한쪽 끝단은 축방향과 원주방향을 구속하였고 다른 끝단은 end-cap 압력 -59.76MPa를 작용시켰다. ABAQUS Standard를 이용하여 3차원 탄성 유한요소 응력 해석을 수행하였다.

Fig. 8은 case 3D-2의 최대 주응력 분포를 나타내고

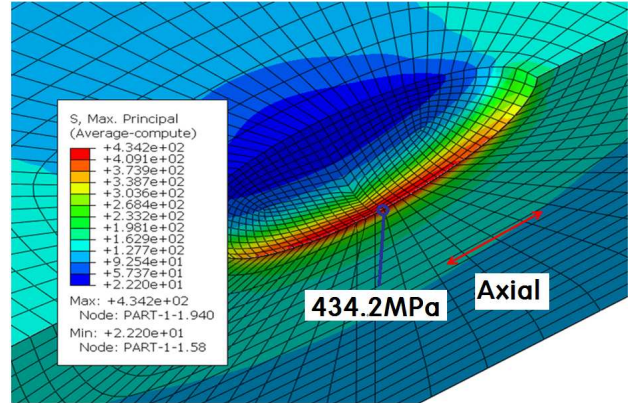


Fig. 8 Maximum principal stress distribution for the case 3D-2

있다. Fig. 8로부터 최대 주응력의 최대 값은 결함의 루트부에서 발생함을 알 수 있다.

4.2.3 차원 유한요소 해석결과와의 비교 검증

본 연구에서 도출된 탄성 응력집중계수 수식의 타당성을 검증하기 위해 3차원 유한요소 해석 결과로부터 도출한 탄성 응력집중계수 값과 CSA N285.8-05에 제시된 응력확대계수 기반 응력집중계수 수식의 적용 결과와 비교한다. 3차원 유한요소 탄성 응력해석으로부터 도출된 최대 주응력 분포로부터 다음 수식을 이용하여 탄성 응력집중계수 k_{t3D} 를 계산하였다.

$$k_{t3D} = \frac{\sigma_{\max-\max-prin-flaw-by-3DFEA}}{\sigma_{\max-prin-no\ flaw}} \quad (19)$$

여기서 $\sigma_{\max-\max-prin-flaw-by-3DFEA}$ 는 3차원 유한요소 해석을 통해 도출한 이물질 프레팅 결함이 존재하는 압력관의 최대 주응력 최대값이다.

CSA N285.8-05에 제시된 응력확대계수 기반 응력집중계수 수식은 다음과 같다.

$$k_{t-\max-prin}^{SIF} = 1 + \frac{2}{\sqrt{\pi\rho}} F_p \left(\frac{\pi a}{Q}\right)^{0.5} \quad (20)$$

여기서 F_p 는 내압이 작용하는 압력관 내면 축방향 균열의 응력확대계수에 대한 기하학적 수정 계수이며 Q 는 결함 형상 변수로서 CSA N285.8-05에 계산하는 절차가 제시되어있다.

Fig. 9 는 일정 결함 깊이비($a/w=0.2$), 일정 결함 형상비($c/b=2.5$)와 일정 결함 루트부 반경 ($\rho=0.5mm$) 하에서 결함 경사각의 변화에 따른 최대 주응력에 대한 응력집중계수 변화 (3 차원 유한요소 해석을 통해 식 (19)에 의해 계산된)를

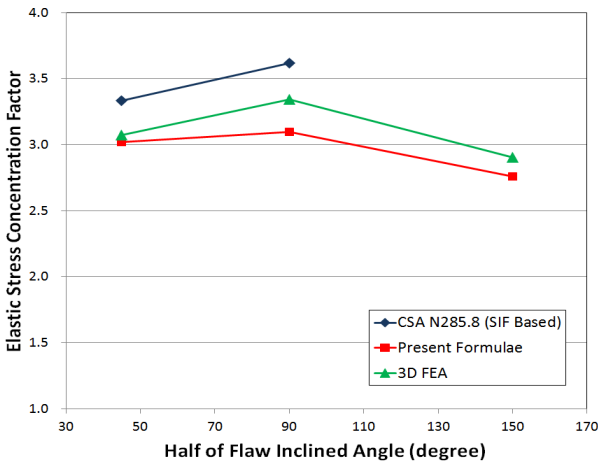


Fig. 9 Variations of the stress concentration factors for the maximum principal stresses vs. the flaw inclined angle ($a/w=0.2$, $c/b=2.5$, $\rho = 0.5mm$)

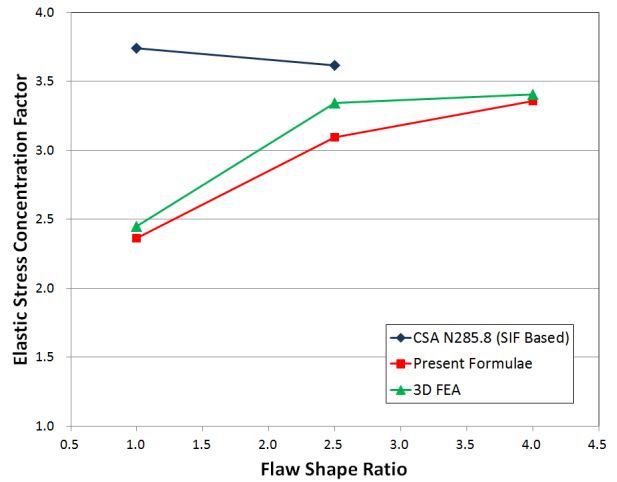


Fig. 11 Variations of the stress concentration factors for the maximum principal stresses vs. the flaw shape ratio ($2\omega_r = 90^\circ$, $a/w=0.2$, $\rho = 0.5mm$)

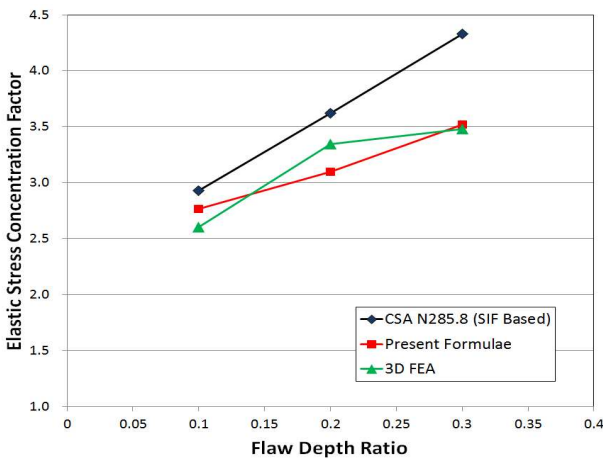


Fig. 10 Variations of the stress concentration factors for the maximum principal stresses vs. the flaw depth ratio ($2\omega_r = 90^\circ$, $c/b=2.5$, $\rho = 0.5mm$)

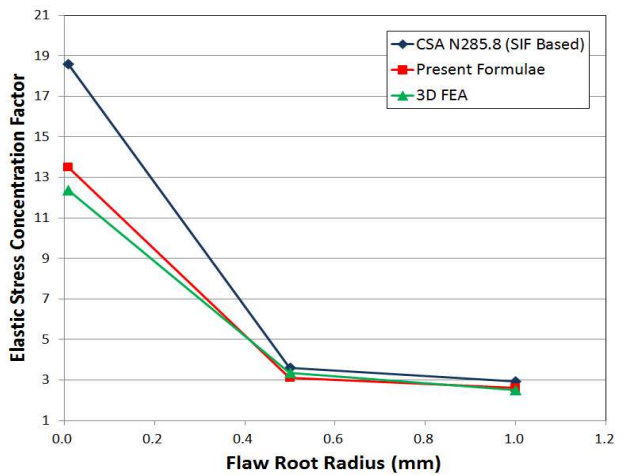


Fig. 12 Variations of the stress concentration factors for the maximum principal stresses vs. the flaw root radius ($2\omega_r = 90^\circ$, $a/w=0.2$, $c/b=2.5$)

본 연구를 통해 도출한 수식의 적용 결과 및 CSA N285.8-05 에 제시된 응력확대계수 기반 식 (20)의 적용 결과와 함께 비교 제시하고 있다. 결함 경사각이 증가할수록 응력집중계수가 증가하다가 감소하는 경향을 보인다. 또한, 유한요소 해석 결과는 수식 적용 결과와 비교적 잘 일치하며 CSA N285.8-05 의 응력확대계수 기반 식 (20) 적용 결과 보다 덜 보수적임을 알 수 있다. CSA N285.8-05 의 응력확대계수 기반 식 (20)의 적용 결과가 다른 방법들과는 달리 2 개 지점만 제시된 것은 CSA N285.8-05 의 응력확대계수 기반 수식의 기반이 되는 응력확대계수 수식의 제한 범위 때문이다.

Fig. 10 은 일정 경사각($2\omega_r = 90^\circ$), 일정 결함 형상비($c/b=2.5$)와 일정 결함 루트부 반경 ($\rho = 0.5mm$) 하에서 결함 깊이비의 변화에 따른

최대 주응력에 대한 응력집중계수 변화(3 차원 유한요소 해석을 통해 식 (19)에 의해 계산된)를 본 연구를 통해 도출한 수식의 적용 결과 및 CSA N285.8-05 에 제시된 응력확대계수 기반 식 (20)의 적용 결과와 함께 비교 제시하고 있다. 세 방법 모두 결함 깊이비가 증가할수록(결함이 깊어질 수록) 응력집중계수가 증가하는 경향을 보인다. 또한, 유한요소 해석 결과는 수식 적용 결과와 비교적 잘 일치하며 CSA N285.8-05 의 응력확대 계수 기반 식 (20) 적용 결과 보다 덜 보수적임을 알 수 있다.

Fig. 11 은 일정 경사각($2\omega_r = 90^\circ$), 일정 결함 깊이비($a/w=0.2$)와 일정 결함 루트부 반경 ($\rho = 0.5mm$) 하에서 결함 형상비의 변화에 따른 최대 주응력에 대한 응력집중계수 변화(3 차원

Table 4 Relative differences of the derived elastic stress concentration factor formulae and the CSA N285.8-05's equations to the three-dimensional finite element analysis

Case	Relative Difference ¹⁾	Relative Difference ²⁾	Relative Difference ³⁾
3D-1	-1.7%	8.5%	-9.3%
3D-2	-7.4%	8.3%	-14.5%
3D-3	-5.0%	-	-
3D-4	-3.4%	53.0%	-36.8%
3D-5	-1.3%	-	-
3D-6	6.2%	12.4%	-5.5%
3D-7	1.1%	24.5%	-18.7%
3D-8	9.1%	50.3%	-27.4%
3D-9	4.8%	16.9%	-10.4%

1) = 100 x (Derived formulae - FEA) / FEA

2) = 100 x (CSA N285.8-05 - FEA) / FEA

3) = 100 x (Derived formulae - CSA N285.8-05) / CSA

유한요소 해석을 통해 식 (19)에 의해 계산된)를 본 연구를 통해 도출한 수식의 적용 결과 및 CSA N285.8-05 에 제시된 응력확대계수 기반 식 (20)의 적용 결과와 함께 비교 제시하고 있다. Fig. 11 에서 보이는 바와 같이 응력확대계수 기반 식을 제외한 두 방법은 결함 형상비가 증가할수록 (결함이 압력관 축방향으로 길어질수록) 응력집중계수가 증가하는 경향을 보인다. 또한, 유한요소 해석 결과는 수식 적용 결과와 비교적 잘 일치하며 CSA N285.8-05 의 응력확대계수 기반 식 (20) 적용 결과 보다 덜 보수적임을 알 수 있다. CSA N285.8-05 의 응력확대계수 기반 식 (20)의 적용 결과가 다른 방법들과는 달리 2 개 지점만 제시된 것은 CSA N285.8-05 의 응력확대계수 기반 식 (20)의 기반이 되는 응력확대계수 수식의 제한 범위 때문이다.

Fig. 12는 일정 경사각($2\omega_r = 90^\circ$), 일정 결함 깊이 비($a/w=0.2$)와 일정 결함 형상비($c/b=2.5$) 하에서 결함 루트부 반경의 변화에 따른 최대 주응력에 대한 응력집중계수 변화(3차원 유한요소 해석을 통해 식 (19)에 의해 계산된)를 다양한 방법들과 함께 비교 제시하고 있다. Fig. 12에서 보이는 바와 같이 세가지 방법 모두 결함 루트부 반경이 감소할수록 응력집중계수는 증가하는 경향을 보인다. 3차원 유한요소 해석 결과는 본 연구를 통해 도출한 수식의 적용 결과와 잘 일치하며 CSA N285.8-05의 응력확대계수 기반 식 (20) 적용 결과보다 덜 보수적임을 알 수 있다. 특히 루트부 반경이 작아질수록 CSA N285.8-05의 수식의 보수성이 증가함을 알 수 있

다.

Table 4는 3차원 유한요소 해석 결과에 기반한 응력집중계수를 기준으로 하는 상대 오차를 Table 3에 제시된 해석경우에 대해 제시하고 있다. Table 4로부터 도출된 수식은 3차원 유한요소 해석 대비 최대 약 10% 이내 범위에서 잘 일치하며 CSA N285.8-05의 응력확대계수 기반 수식은 3차원 유한요소 해석 대비 최대 약 50% 더 보수적임을 알 수 있다. CSA N285.8-05의 수식이 가장 보수적임을 알 수 있다. 본 연구를 통해 도출된 수식은 CSA N285.8-05의 수식 대비 약 10% 이상 보수성이 완화되었음을 알 수 있다. CSA N285.8-05의 수식은 체적결함을 균열로 가정하여 파괴역학 매개변수인 응력확대계수에 기반하여 도출된 수식인 반면 본 연구에서 제시한 수식은 체적결함의 기하학적 특성을 고려한 유한요소 해석을 통해 도출되었으므로 CSA N285.8-05 수식의 과도한 보수성이 완화된 것으로 판단된다.

5. 결 론

이물질 프레팅 결함에 대한 탄성 응력집중계수 수식을 도출하고 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 이물질 프레팅 결함에 대한 탄성 응력집중계수 수식을 도출하기 위해 이물질 프레팅 결함의 기하학적 특성을 적절히 반영하기 위해 Kinectreic사의 공학적 절차를 일부 수정하였음
- (2) 도출된 수식은 3 차원 유한요소 해석과 최대 약 10% 이내 범위에서 잘 일치함
- (3) CSA N285.8-05 의 응력확대계수 기반 수식은 결함 형상비(결함 폭에 대한 결함 길이의 비)의 영향을 적절히 반영하지 못하며 경우에 따라서는 과도한 보수성을 보임

참고문헌

- (1) AECL EACL, 1996, *Technical Basis for the Fitness for Service Guidelines for Zirconium Alloy Pressure Tubes in Operating CANDU Reactor*, COG-96-651, Rev.0.
- (2) CSA, 2005, *Technical Requirements for In-Service Evaluation of Zirconium Alloy Pressure Tubes in CANDU Reactors*, N285.8-05..
- (3) Wasiluk, B.S. and Scarth, D.A., 2009, "Engineering Procedure for Calculation of Elastic Stress Concentration Factors of Bearing Pad Fretting Flaws," *Proceedings of ASME PVP 2009*, PVP2009-

- 77271.
- (4) Peterson, R.E., 1974, *Stress Concentration Factors*, John Wiley & Sons, Inc.
- (5) Son, B.G., Kim, Y.J., and Kim. Y.J., 2004, "Finite Element Based Stress Concentration Factors for Pipes with Local Wall Thinning," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol.28, No.7, pp.1014~1020.
- (6) Gao, X.L., 1996, "A General Solution of an Infinite Elastic Plate with an Elliptic Hole under Biaxial Loading," *Int. J. of Pressure Vessels and Piping*, Vol.67, pp.95~104.
- (7) Dufresne, J., 1981, *Probabilistic Application of Fracture Mechanics in Advances in Fracture Research (Fracture 81)*, Vol.2, Oxford: Pergamon Press, pp.517~531.
- (8) Murakami, Y., 2005, *Introduction to Stress Concentration*, YoKendo.
- (9) Simulia, 2012, *ABAQUS User's Manuals*, Ver.6.10.