

비 이상화된 원주방향 관통균열이 존재하는 두꺼운 배관의 균열 성장 매개변수 계산

Evaluation of Crack Growth Estimation Parameters of Thick-Walled Cylinder with Non-Idealized Circumferential Through-Wall Cracks

한태송*, 허남수*[†], 박치용**

Tae-Song Han*, Nam-Su Huh*[†] and Chi-Yong Park**

초 록 본 논문에서는 두꺼운 배관에 존재하는 비 이상화된 원주방향 관통균열의 탄성 응력확대계수 해를 제시하였다. 이를 위해 3차원 탄성 유한요소해석을 수행하였으며, 배관의 형상 및 비 이상화된 원주방향 관통균열의 영향을 고려하기 위해 배관의 두께, 기준균열길이 및 관통균열길이 비를 체계적으로 변화시켰다. 하중 조건으로는 인장하중, 굽힘모멘트 및 내압을 고려하였다. 또한 본 논문에서는 이상화된 원주방향 관통균열로부터 비 이상화된 원주방향 관통균열의 응력확대계수를 쉽게 계산하기 위해 관통균열 보정계수를 제시하였다. 본 논문의 결과는 실제 균열성장거동을 고려하여 원자력 배관의 배관파단확률을 보다 정확하게 계산하기 위해 적용될 수 있다.

주요용어: 두꺼운 배관, 비 이상화된 원주방향 관통균열, 응력확대계수, 파단전누설

Abstract The present paper provides the elastic stress intensity factors(SIFs) of thick-walled cylinder with non-idealized circumferential through-wall cracks. For estimating these elastic SIFs, the systematic three-dimensional(3D) elastic finite element(FE) analyses were performed. In order to consider practical shape of thick-walled cylinder and non-idealized circumferential through-wall crack, the values of thickness of cylinder, reference crack length and crack length ratio were systematically varied. As for loading conditions, axial tension, global bending and internal pressure were considered. In particular, in order to calculate the SIFs of thick-walled cylinder with non-idealized circumferential through-wall crack from those of thick-walled cylinder with idealized circumferential through-wall crack, the correction factor representing the effect of non-idealized crack on the SIFs were proposed in this paper. The present results can be applied to accurately evaluate the rupture probabilities of nuclear piping considering actual crack growth behaviors.

Keywords: Thick-Walled Cylinder, Non-Idealized Circumferential Through-Wall Crack, Stress Intensity Factor, Leak-Before-Break

1. 서 론

원자력 배관 계통 설계 시 파단전누설(leak-before-break, LBB) 개념[1]을 적용하면 가상배관 파단 사고로 인한 배관 동적 효과[2]를 배제할 수 있기에 배관 계통 설계가 간단해지며, 배관

파단구속장치, 유체충돌차단벽 등과 같은 주변 기기 보호 구조물도 제거 가능하기에 막대한 경제적 비용도 절감할 수 있다. 그러나 대상 배관 계통이 만약 가동 중 열화에 의해 손상 혹은 균열이 발생할 수 있을 것으로 예측되면 LBB 개념을 배관 계통 설계에 적용할 수 없다.

[접수일: 2013. 3. 15, 수정일: 1차: 2013. 4. 8, 게재확정일: 2013. 4. 10] *서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과, **한국수력원자력(주) 중앙연구원, [†]Corresponding Author: Dept. of Mechanical System Design Engineering, Seoul National Univ. of Science and Technology, 232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 139-743, Korea (E-mail: nam-su.huh@seoultech.ac.kr)

최근 이미 LBB 개념이 적용된 일부 배관 계통에서 일차수응력부식균열(primary water stress corrosion cracking, PWSCC) 현상과 같은 가동 중 열화에 의한 균열 발생 사례[3]가 발견됨에 따라 LBB 개념이 기 적용된 배관의 안전성을 확인하고 가동 중 열화 현상을 배제하기 위한 가동중 검사 및 예방정비가 다수 수행되고 있다. 한편 미국 원자력규제위원회(U.S. Nuclear Regulatory Commission, USNRC)에서는 배관 계통에 PWSCC 등이 발생하여도 앞서 언급한 가상 배관과단확률이 매우 낮음을 입증하여 보다 근본적으로 배관 설계 시 가상배관과단으로 인한 배관 동적효과를 배제하기 위한 연구를 진행 중에 있다. 이의 일환으로 수행 중인 연구 가운데 하나가 USNRC를 중심으로 미국 원자력 산업계에서 진행 중인 xLPR(eXtremely low probability of rupture) 프로그램[4]이다.

현재까지 수행된 xLPR 프로그램에서는 배관의 균열 형상으로 표면균열과 이상화된 원주방향 관통균열만을 고려하여 배관과단확률을 평가하였다. 그러나 이와 같은 이상화된 원주방향 관통균열만을 고려하여 평가한 결과 배관과단확률이 지나치게 과대평가되고 누설률(leak-rate) 또한 지나치게 과대평가되는 것으로 나타났다. 실제로 배관 내부 표면균열이 관통균열로 진전되는 경우 초기 단계에서는 표면균열의 최심점(deepest point)에서 배관 두께를 부분적으로 관통하여 배관 외면에서는 관통균열의 길이가 짧고 배관 내면에서는 균열 길이가 외면에서보다 길게 된다. 그리고 지속적으로 성장하여 내면과 외면에서의 균열각이 동일한 이상화된 관통균열(idealized through-wall crack) 형상으로 성장하게 된다[5]. 따라서 xLPR 프로그램에서는 보다 정확한 배관과단확률 평가를 위해 이와 같은 표면균열에서 관통균열로 균열이 성장하는 과정에서 나타날 수 있는 보다 실제적인 균열 형상, 즉 배관 외면에서의 균열 길이가 내면에서의 균열 길이에 비해 상대적으로 짧은 비 이상화된 관통균열(non-idealized through-wall cracks)을 고려해야 할 필요성을 제기하였다. 또한 최근 PWSCC에 의한 누설이 상대적으로 두꺼운 배관에서 발생한 점을 고려하여 특히 두꺼운 배관에 대한 고려의 필요성도 제기되었다[3].

이상과 같은 비 이상화된 관통균열의 균열 성

장 거동을 정확하게 예측하여 배관과단확률을 평가하기 위해서는 탄성과괴역학 매개변수인 탄성 응력확대계수(elastic stress intensity factor) 해가 비 이상화된 관통균열에 대해 제시되어야 한다. 얇은 배관에 존재하는 이상화된 관통균열의 경우는 그 동안 많은 탄성 응력확대계수가 제시된 바 있으나[6,7] 두꺼운 배관에 존재하는 비 이상화된 관통균열의 경우 아직 균열성장거동 예측에 필요한 탄성 응력확대계수 해가 제시된 바 없다.

따라서 본 연구에서는 3차원 탄성 유한요소해석을 수행하여 두꺼운 배관에 존재하는 비 이상화된 원주방향 관통균열의 균열성장거동 예측을 위해 필요한 탄성 응력확대계수 해를 제시하였다. 이를 위해 두꺼운 배관의 형상 및 비 이상화된 원주방향 관통균열의 영향을 고려할 수 있도록 배관의 두께와 균열 형상을 체계적으로 변화시켜 해석을 수행하였다.

2. 해석 대상 및 유한요소해석

2.1. 해석 대상

Fig. 1은 비 이상화된 원주방향 관통균열이 존재하는 두꺼운 배관의 기하학적 형상을 나타낸 것으로 R_i , R_m , R_o 는 각각 배관의 내반경, 평균반경, 외반경을 의미하며 t 는 배관의 두께를 의미한다. 그리고 p , M , T 는 작용 하중으로 각각 내압, 굽힘모멘트, 인장하중을 의미한다. θ_1 과 θ_2 는 각각 배관의 내면과 외면에서의 균열각의 1/2이며, $\theta_1=\theta_2$ 인 경우는 이상화된 원주방향 관통균열을 의미한다. η 는 두께를 따른 각 균열선단의 위치를 나타내기 위해 정의되었으며, Fig. 1에 나타낸 바와 같이 배관의 내면에서 각 균열선단까지의 수직 거리를 의미한다.

본 논문에서는 탄성 응력확대계수 식을 제시하기 위해 배관의 두께를 R_m/t 값으로 정의하였고, 두꺼운 배관 영역을 고려하기 위해 해당 값을 2, 3, 5의 3가지 경우로 나누어 정의하였다. 이는 전술한 바와 같이 PWSCC에 의한 누설이 발생한 해외 가압기 노즐 부위 등의 R_m/t 값이 약 2~3 정도에 해당하기 때문이다. 또한 비 이상화된 원주방향 관통균열은 기준균열각(θ_1/π)과 배관의 내면과 외면에서의 균열각의 비(θ_1/θ_2)로 정의하여 고려하였다. 기준균열각은 배관 내면에서의 균열각

을 이용하여 정의하였으며, 5가지 경우를 고려하였다. 또한 내면과 외면에서의 균열각의 비는 3가지 경우를 고려하였으며, 전술한 바와 같이 균열각의 비가 1인 경우는 이상화된 원주방향 관통 균열을 의미한다. 본 논문에서 고려된 해석 변수를 정리하여 Table 1에 나타내었다.

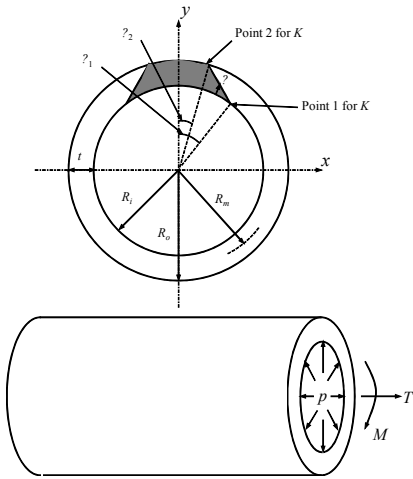


Fig. 1 Schematics of thick-walled cylinder with non-idealized circumferential through-wall crack under axial tension, global bending and internal pressure

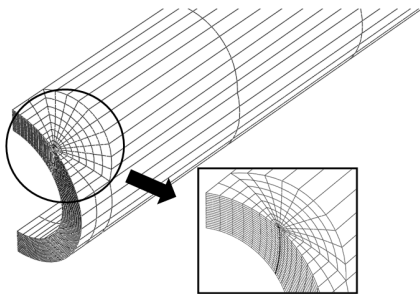


Fig. 2 Typical FE meshes employed in the present FE analyses for thick-walled cylinder with non-idealized circumferential through-wall crack

Table 1 Cases considered in the present FE analysis

Geometry	R_m/t	θ_1/π	θ_1/θ_2
Idealized and non-idealized circumferential through-wall cracks in thick-walled cylinder	2, 3, 5	0.125, 0.25, 0.3, 0.4, 0.5	1, 2, 3

2.2. 탄성 유한요소해석

Fig. 2는 해석에 사용된 대표적인 3차원 유한요소해석 모델을 나타낸 것으로 비 이상화된 원주방향 관통균열이 존재하는 두꺼운 배관에 대하여 3차원 탄성 유한요소해석을 수행하였다. 해석 시 사용한 재료의 탄성계수(Young's modulus, E)는 190 GPa이며, 푸아송 비(Poisson's ratio) 값으로 0.3을 적용하였다. 배관과 균열 형상의 대칭성을 고려하여 전체의 1/4만을 모델링 하였다. 탄성 유한요소해석을 위해서 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS[8]를 사용하였으며, 20절점 등계수 사각 감차적분요소(20-nodes isoparametric brick reduced integration element, C3D20R in ABAQUS element library)를 사용하였다. 두께 방향으로 20개의 요소가 사용되었다. 전체 요소 수는 9,080개이며 노드는 40,761개이다. 하중 조건으로는 원자력 배관에 일반적으로 작용하는 내압, 인장하중, 굽힘모멘트(Fig. 1 참고)를 고려하였다. 내압의 경우 배관 내면에 분포하중의 형태로 작용시켰으며, 배관의 끝단에는 배관의 막힘 효과를 고려하여 상당인장하중(equivalent tensile load)을 작용시켰다. 또한 균열면에 작용하는 압력의 영향을 고려하기 위해 내압의 50%에 해당하는 압력을 균열면(crack-face)에 분포하중의 형태로 작용시켰다.

2.3. 탄성 응력확대계수

탄성 응력확대계수(K)는 유한요소해석으로 구해지는 균열선단을 따른 탄성 J -적분값(J_e)을 이용하여 다음과 같이 정의하여 구하였다.

$$K = \sqrt{E' J_e} = \sigma^\infty \sqrt{\pi a_1} F \tag{1}$$

여기서, a_1 은 기준균열길이로 전술한 바와 같이 본 논문에서는 내면에서의 균열길이($a_1=R_m\theta_1$)로 정의하였으며, F 는 형상보정계수를 의미한다.

식(1)에서 사용된 E' 는 재료의 탄성계수로 본 논문에서는 평면변형률(plane strain) 조건으로 가정하여 다음과 같이 정의하였다.

$$E' = \frac{E}{1-\nu^2} \tag{2}$$

또한 식(1)에서 사용된 σ^∞ 는 배관에 작용하는 공칭응력(remote nominal stress)으로 하중조건에 따라 다음과 같이 정의하였다.

$$\sigma^\infty = \begin{cases} \frac{T}{2\pi R_m t} & \text{- tension} \\ \frac{M}{\pi R_m^2 t} & \text{- global bending} \\ \frac{p R_m}{t} & \text{- internal pressure} \end{cases} \quad (3)$$

3. 해석 결과

본 논문에서는 두꺼운 배관에 존재하는 비 이상화된 원주방향 관통균열이 응력확대계수에 미치는 영향을 정량화하기 위해 관통균열 보정계수인 G 를 다음과 같이 정의하였다.

$$K^{Non-idealized} = \sigma^\infty \sqrt{\pi a_1} F G = K^{Idealized} G \quad (4)$$

여기서, 상첨자 ‘Non-idealized’와 ‘Idealized’는 각각 비 이상화된 원주방향 관통균열이 존재하는 두꺼운 배관과 이상화된 원주방향 관통균열($\theta_1 = \theta_2$)이 존재하는 두꺼운 배관을 의미한다.

즉, 식(4)에 정의된 관통균열 보정계수 G 는 비 이상화된 원주방향 관통균열의 응력확대계수와 이상화된 원주방향 관통균열의 응력확대계수의 비를 의미하며, 이상화된 원주방향 관통균열의 응력확대계수 K 값에 관통균열 보정계수 G 를 곱하여 손쉽게 비 이상화된 원주방향 관통균열에 대한 응력확대계수를 구할 수 있다.

먼저 식(4)에 따라 이상화된 원주방향 관통균열의 응력확대계수 K 값을 구하기 위해서는 식(1)과 (4)에 사용된 형상보정계수 F 값이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 이상화된 원주방향 관통균열에 대해서도 탄성 유한요소해석을 수행하여 응력확대계수 K 값을 구하였고, 이를 식(1)과 (4)에 대입하여 형상보정계수 F 값을 결정하였다.

Table 2~4는 각각 인장하중, 굽힘모멘트 및 내압이 작용하는 이상화된 원주방향 관통균열 배관에서 세 가지 R_m/t 값에 대한 원주방향 관통균열의 형상보정계수 F 값을 나타낸 것이다. Table 2~4에 정의된 F 값은 전체 균열선단에 대한 평균값으로 정의되었다.

Table 2 Values of the shape factor F for thick-walled cylinder with an idealized circumferential through-wall crack under axial tension

R_m/t	θ_1/π	F
2	0.125	1.160
	0.25	1.515
	0.3	1.735
	0.4	2.369
	0.5	3.385
3	0.125	1.181
	0.25	1.571
	0.3	1.805
	0.4	2.479
	0.5	3.584
5	0.125	1.222
	0.25	1.674
	0.3	1.933
	0.4	2.658
	0.5	3.847

Table 3 Values of the shape factor F for thick-walled cylinder with an idealized circumferential through-wall crack under global bending

R_m/t	θ_1/π	F
2	0.125	1.075
	0.25	1.284
	0.3	1.401
	0.4	1.716
	0.5	2.188
3	0.125	1.121
	0.25	1.360
	0.3	1.489
	0.4	1.835
	0.5	2.372
5	0.125	1.173
	0.25	1.472
	0.3	1.617
	0.4	2.000
	0.5	2.591

Table 4 Values of the shape factor F for thick-walled cylinder with an idealized circumferential through-wall crack under internal pressure

R_m/t	θ_1/π	F
2	0.125	1.232
	0.25	1.610
	0.3	1.843
	0.4	2.517
	0.5	3.596
3	0.125	1.214
	0.25	1.615
	0.3	1.856
	0.4	2.548
	0.5	3.684
5	0.125	1.234
	0.25	1.691
	0.3	1.952
	0.4	2.684
	0.5	3.886

Fig. 3~5는 인장하중이 작용하는 두꺼운 배관에 존재하는 비 이상화된 원주방향 관통균열의 응력확대계수(G 값) 값을 균열선단을 따라 나타낸 것으로, 세 가지의 R_m/t 에 대해 각각 나타내었다. 전술한 바와 같이 비 이상화된 원주방향 관통균열의 응력확대계수는 배관의 균열선단을 따라서 계산되었다(Fig. 1 참고). Fig. 3~5에서 가로축은 무차원화된 배관 두께를 나타낸 것으로 “0”은 배관의 내면 균열선단을 의미하며 “1”은 배관의 외면 균열선단을 의미한다. 그리고 각 그림의 결과는 기준균열길이(θ/π)별 ((a)~(e))로 내면과 외면에서의 관통균열각의 비(θ_1/θ_2) 변화에 따른 결과를 나타내었다.

Fig. 3~5에 나타난 바와 같이 비 이상화된 원주방향 관통균열이 존재하는 두꺼운 배관의 경우 동일 배관에서 상대적으로 균열길이가 더 긴 배관 내면(Point 1)에서의 응력확대계수 값이 가장 작게 나타났으며, 이와 반대로 내면보다 균열길이가 짧은 배관 외면(Point 2)에서의 응력확대계수 값이 가장 크게 나타났다. 또한 비 이상화된 원주방향 관통균열의 응력확대계수값은 이상화된 원주방향 관통균열값에 비해 배관 내면에서는 작았으며 배관 외면에서는 큰 것으로 나타났다.

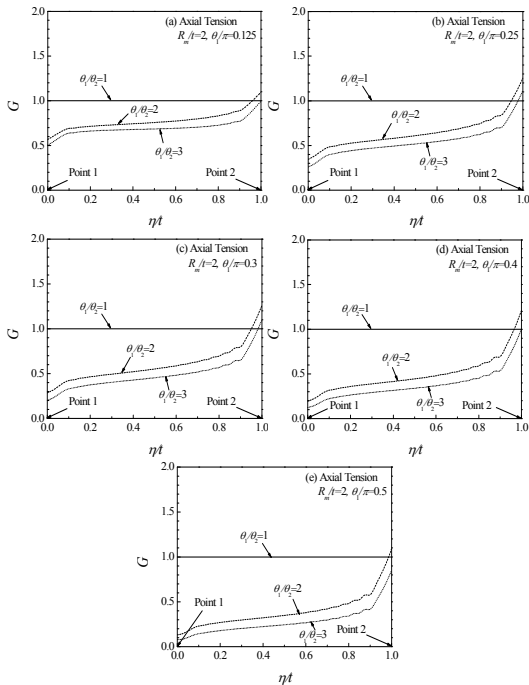


Fig. 3 Variation of G values along the crack front of non-idealized circumferential through-wall cracked cylinder under axial tension, $R_m/t=2$

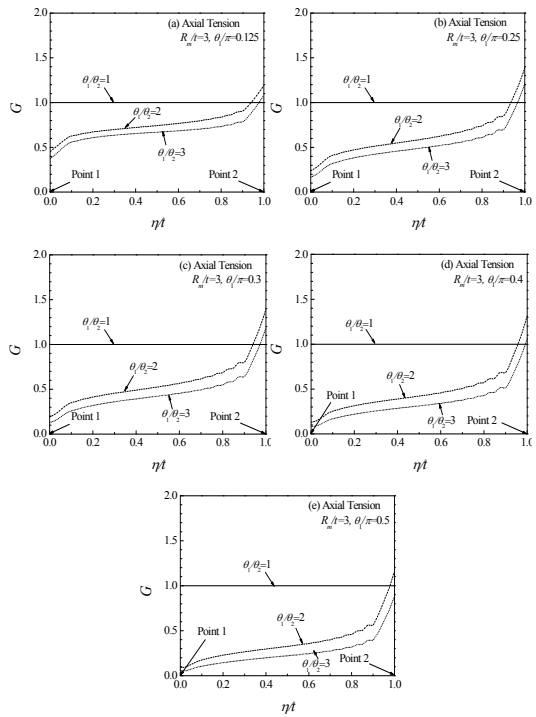


Fig. 4 Variation of G values along the crack front of non-idealized circumferential through-wall cracked cylinder under axial tension, $R_m/t=3$

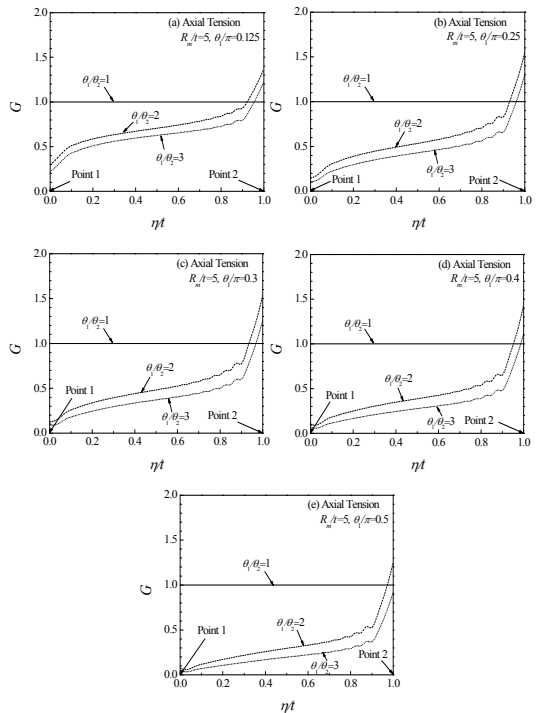


Fig. 5 Variation of G values along the crack front of non-idealized circumferential through-wall cracked cylinder under axial tension, $R_m/t=5$

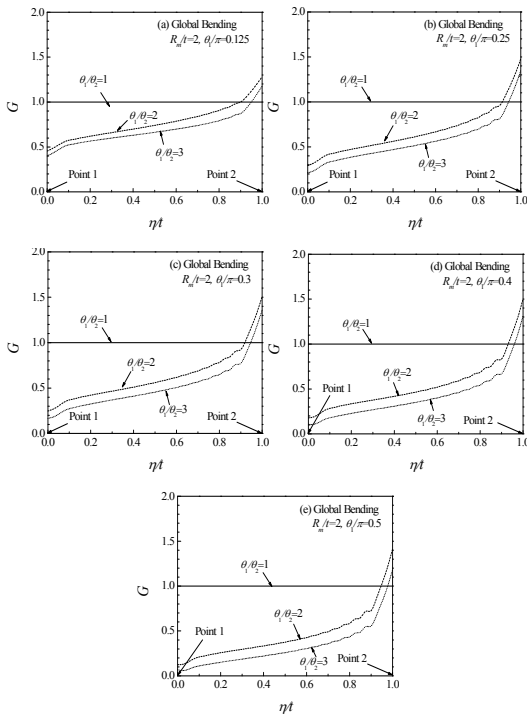


Fig. 6 Variation of G values along the crack front of non-idealized circumferential through-wall cracked cylinder under global bending, $R_m/t=2$

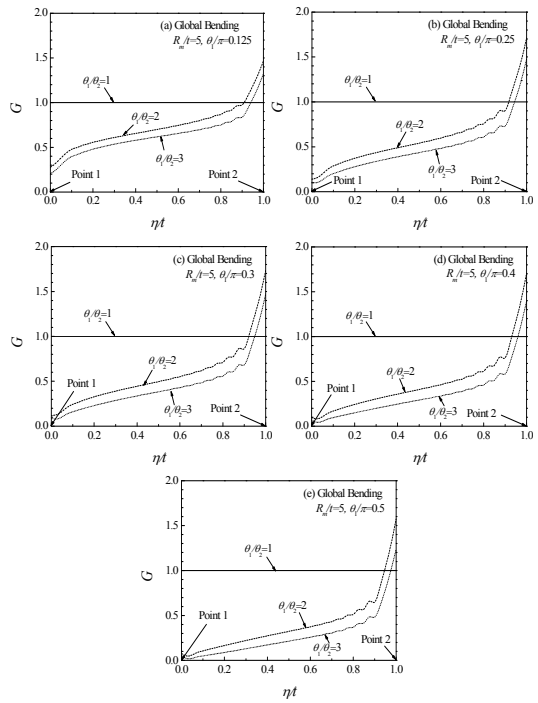


Fig. 8 Variation of G values along the crack front of non-idealized circumferential through-wall cracked cylinder under global bending, $R_m/t=5$

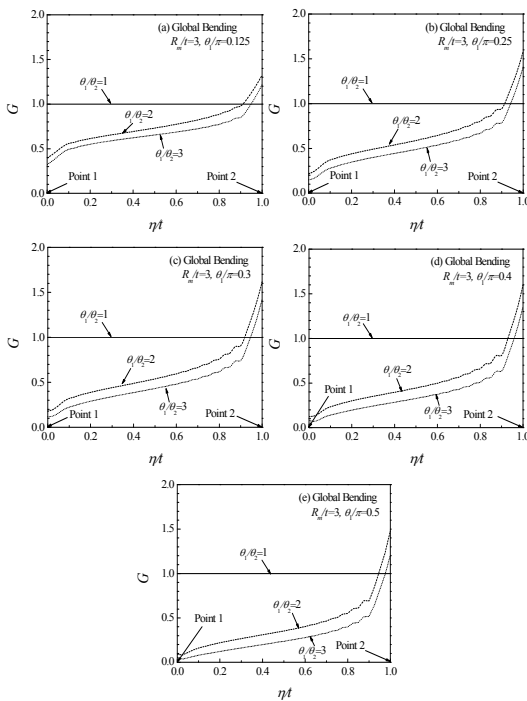


Fig. 7 Variation of G values along the crack front of non-idealized circumferential through-wall cracked cylinder under global bending, $R_m/t=3$

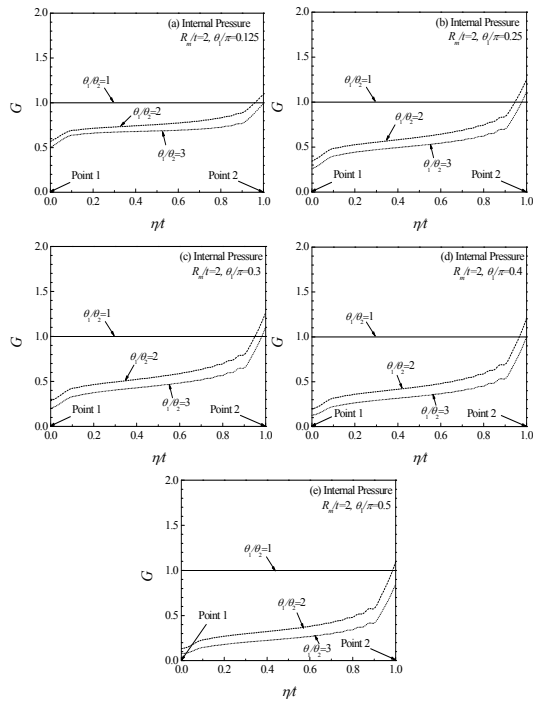


Fig. 9 Variation of G values along the crack front of non-idealized circumferential through-wall cracked cylinder under internal pressure, $R_m/t=2$

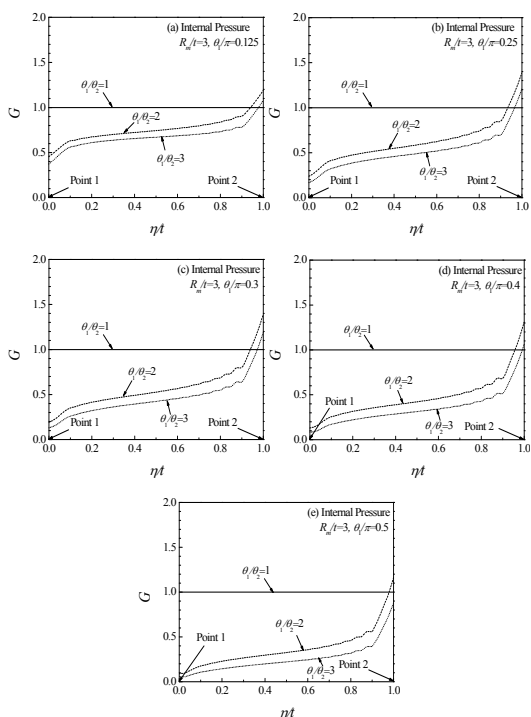


Fig. 10 Variation of G values along the crack front of non-idealized circumferential through-wall cracked cylinder under internal pressure, $R_m/t=3$

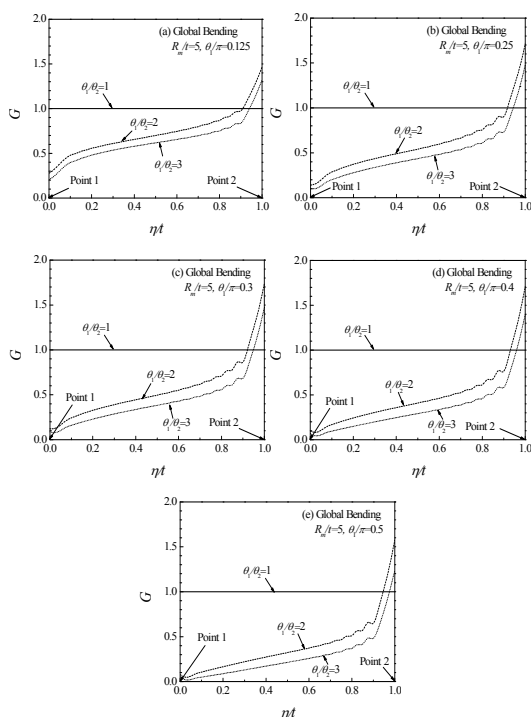


Fig. 11 Variation of G values along the crack front of non-idealized circumferential through-wall cracked cylinder under internal pressure, $R_m/t=5$

Table 5 Values of correction factor G of non-idealized circumferential through-wall cracked cylinder under axial tension

R_m/t	θ_1/π	Inner surface point			Mid-thickness point			Outer surface point		
		θ_1/θ_2			θ_1/θ_2			θ_1/θ_2		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
2	0.125	1.000	0.568	0.503	1.000	0.756	0.684	1.000	1.095	0.994
	0.25	1.000	0.345	0.259	1.000	0.610	0.517	1.000	1.254	1.116
	0.3	1.000	0.286	0.202	1.000	0.551	0.453	1.000	1.264	1.104
	0.4	1.000	0.196	0.126	1.000	0.443	0.338	1.000	1.210	1.002
	0.5	1.000	0.133	0.080	1.000	0.348	0.243	1.000	1.090	0.850
3	0.125	1.000	0.454	0.373	1.000	0.743	0.669	1.000	1.190	1.082
	0.25	1.000	0.238	0.167	1.000	0.582	0.486	1.000	1.390	1.213
	0.3	1.000	0.192	0.130	1.000	0.525	0.422	1.000	1.394	1.186
	0.4	1.000	0.130	0.086	1.000	0.421	0.311	1.000	1.314	1.061
	0.5	1.000	0.090	0.058	1.000	0.326	0.221	1.000	1.159	0.881
5	0.125	1.000	0.296	0.220	1.000	0.705	0.625	1.000	1.369	1.224
	0.25	1.000	0.147	0.105	1.000	0.534	0.429	1.000	1.549	1.304
	0.3	1.000	0.124	0.090	1.000	0.481	0.370	1.000	1.534	1.260
	0.4	1.000	0.095	0.068	1.000	0.385	0.275	1.000	1.431	1.115
	0.5	1.000	0.073	0.050	1.000	0.295	0.197	1.000	1.245	0.919

기준균열길이가 증가함에 따라서 배관 내면과 외면의 응력확대계수 차이는 더 크게 나타나는 경향을 보였다. 이러한 경향은 모든 R_m/t 에 대해 동일하였다. 이는 균열길이가 상대적으로 짧은 배관 외면에서 가해지는 하중의 대부분을 지지하기 때문인 것으로 생각된다. 또한 기준균열길이에 따른 균열 성장 속도 차이는 존재하지만 배관 내면에서는 피로 혹은 응력부식균열에 의해 균열

진전이 외면에 비해 상대적으로 더디게 진행되며, 균열길이가 짧은 외면에서 내면보다 상대적으로 빠르게 균열 성장이 발생할 것을 예측할 수 있다. 즉 비 이상화된 원주방향 관통균열은 배관 외면의 균열길이가 보다 빠르게 성장하여 최종적으로 배관의 외면과 내면의 균열각이 동일한 이상화된 관통균열 형태로 진전될 것으로 예측된다. 그러나 기존 연구에서는 이러한 보다 실제적

Table 6 Values of correction factor G of non-idealized circumferential through-wall cracked cylinder under global bending

R_m/t	θ_1/π	Inner surface point			Mid-thickness point			Outer surface point		
		θ_1/θ_2			θ_1/θ_2			θ_1/θ_2		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
2	0.125	1.000	0.454	0.401	1.000	0.740	0.663	1.000	1.283	1.178
	0.25	1.000	0.293	0.213	1.000	0.610	0.513	1.000	1.477	1.348
	0.3	1.000	0.248	0.168	1.000	0.559	0.455	1.000	1.511	1.360
	0.4	1.000	0.178	0.107	1.000	0.464	0.350	1.000	1.502	1.314
	0.5	1.000	0.125	0.069	1.000	0.375	0.258	1.000	1.413	1.181
3	0.125	1.000	0.396	0.324	1.000	0.732	0.653	1.000	1.325	1.216
	0.25	1.000	0.216	0.148	1.000	0.587	0.488	1.000	1.582	1.410
	0.3	1.000	0.177	0.117	1.000	0.537	0.430	1.000	1.619	1.425
	0.4	1.000	0.125	0.079	1.000	0.443	0.327	1.000	1.599	1.357
	0.5	1.000	0.089	0.056	1.000	0.366	0.249	1.000	1.480	1.204
5	0.125	1.000	0.276	0.204	1.000	0.698	0.616	1.000	1.463	1.323
	0.25	1.000	0.141	0.101	1.000	0.541	0.434	1.000	1.711	1.474
	0.3	1.000	0.122	0.087	1.000	0.495	0.381	1.000	1.740	1.473
	0.4	1.000	0.097	0.069	1.000	0.409	0.292	1.000	1.708	1.394
	0.5	1.000	0.077	0.053	1.000	0.323	0.213	1.000	1.576	1.236

Table 7 Values of correction factor G of non-idealized circumferential through-wall cracked cylinder under internal pressure

R_m/t	θ_1/π	Inner surface point			Mid-thickness point			Outer surface point		
		θ_1/θ_2			θ_1/θ_2			θ_1/θ_2		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
2	0.125	1.000	0.567	0.502	1.000	0.756	0.684	1.000	1.095	0.992
	0.25	1.000	0.344	0.258	1.000	0.610	0.517	1.000	1.255	1.118
	0.3	1.000	0.285	0.202	1.000	0.551	0.453	1.000	1.265	1.103
	0.4	1.000	0.195	0.125	1.000	0.443	0.338	1.000	1.209	1.004
	0.5	1.000	0.133	0.079	1.000	0.348	0.244	1.000	1.093	0.849
3	0.125	1.000	0.454	0.373	1.000	0.743	0.670	1.000	1.190	1.080
	0.25	1.000	0.238	0.167	1.000	0.583	0.487	1.000	1.388	1.207
	0.3	1.000	0.192	0.131	1.000	0.525	0.423	1.000	1.390	1.188
	0.4	1.000	0.130	0.086	1.000	0.421	0.312	1.000	1.311	1.064
	0.5	1.000	0.090	0.058	1.000	0.326	0.221	1.000	1.163	0.880
5	0.125	1.000	0.299	0.224	1.000	0.707	0.629	1.000	1.363	1.217
	0.25	1.000	0.147	0.106	1.000	0.535	0.431	1.000	1.543	1.301
	0.3	1.000	0.124	0.090	1.000	0.481	0.372	1.000	1.532	1.262
	0.4	1.000	0.095	0.069	1.000	0.385	0.276	1.000	1.426	1.113
	0.5	1.000	0.073	0.050	1.000	0.295	0.197	1.000	1.249	0.922

인 균열 성장 형태는 고려하지 못하고 이상화된 관통균열의 경우만을 고려하였기에 배관과단확률 이 과대하게 예측되었으며 본 연구의 결과를 이용하면 이러한 실제 균열성장거동을 보다 정확하게 고려할 수 있을 것으로 생각된다.

Fig. 6~8과 Fig. 9~11은 각각 굽힘모멘트와 내압이 작용하는 두꺼운 배관에 존재하는 비 이상화된 원주방향 관통균열의 응력확대계수 값을 정리하여 나타낸 것으로 두 하중 조건 모두 인장하중이 작용하는 비 이상화된 원주방향 관통균열의 응력확대계수 값과 유사한 경향을 보였다.

Table 5~7은 각각 인장하중, 굽힘모멘트 그리고 내압이 작용하는 두꺼운 배관의 배관 내면, 두께의 중심 그리고 배관의 외면에서 비 이상화된 원주방향 관통균열의 응력확대계수 값(관통균열 보정계수)을 정리하여 나타낸 것이다.

이와 같이 본 논문에서 제시한 두꺼운 배관에 존재하는 비 이상화된 원주방향 관통균열에 대한 응력확대계수 결과는 두꺼운 배관에 존재하는 비 이상화된 원주방향 관통균열의 정확한 균열성장 거동 평가를 위해 적용될 수 있으며 이를 통해 실제 균열성장거동을 고려한 보다 정확한 배관과단확률 계산에 사용될 수 있다.

본 논문에서는 하중 조건으로 내압, 굽힘모멘트 그리고 인장하중만을 고려하여 탄성 응력확대계수를 제시하였다. 그러나 일반적으로 원자력 배관은 이러한 하중이 두 가지 이상 복합적으로 작용하게 되는데 본 논문에서 제시한 결과는 탄성 응력확대계수이기에 복합 하중이 작용하는 경우에는 본 논문에서 제시한 개별 하중에 대한 결과를 선형 중첩하면 복합하중의 탄성 응력확대계수를 구할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 두꺼운 배관에 존재하는 비 이상화된 원주방향 관통균열의 탄성 응력확대계수 값을 제시하였다. 이를 위해 배관의 두께, 기준균열길이, 관통균열길이 비를 체계적으로 변화시키며 3차원 탄성 유한요소해석을 수행하였다. 탄성 응력확대계수는 유한요소해석 결과를 바탕으로 균열선단을 따라 제시하였으며, 이상화된 원주방향 관통균열의 탄성 응력확대계수 값으로부터 쉽게 두꺼운 배관에 존재하는 비 이상화된 원주방

향 관통균열의 응력확대계수를 구할 수 있는 보정계수를 제시하였다. 또한 배관의 내면, 두께의 중심 그리고 배관의 외면에서의 비 이상화된 원주방향 관통균열의 탄성 응력확대계수 값을 표 형태로 제시하였다.

본 논문의 결과는 비 이상화된 원주방향 관통균열이 존재하는 두꺼운 배관의 균열성장거동 평가 및 실제 균열성장거동을 고려한 배관과단확률 계산을 위해 적용될 수 있다.

후 기

본 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] Korea Institute of Nuclear Safety, "Safety Review Guidelines for Light Water Reactors (Revision 3)," KINS/GE-N001 (2009)
- [2] Nuclear Safety and Security Commission, "Regulation on Technical Standard for Nuclear Reactor Facilities, etc., Article 15 (Environmental Effect Design Bases, etc.)," (2011)
- [3] EPRI, Materials Reliability Program, "Welding Residual and Operating Stresses in PWR Alloy 182 Butt Welds(MRP-106)," EPRI Report (2004)
- [4] D. Rudland and C. Harrington, "xLPR Pilot Study Report," NUREG-2110, U.S. Nuclear Regulatory Commission. (2012)
- [5] D. J. Shim, D. Rudland and D. Harris, "Modeling of subcritical crack growth due to stress corrosion cracking: transition from surface crack to through-wall crack," PVP2011-57267, *ASME Pressure Vessels and Piping Conference*, Baltimore, Maryland, USA (2011)
- [6] A. Zahoor, "Ductile Fracture Handbook," Novetech Corp. (1989)
- [7] H. Tada, P. C. Paris and G. R. Irwin, "The Stress Analysis of Cracks Handbook," Del Research Corp., Hellertown, Pennsylvania, USA (1973)
- [8] "User's Manual," ABAQUS Ver. 6.11-1, Dassault Systemes (2012)