

두꺼운 배관에 존재하는 축방향 경사관통균열의 탄성파괴역학 매개변수 계산

한 태 송* · 허 남 수*†

* 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과

Estimates of Elastic Fracture Mechanics Parameters for Thick-Walled Pipes with Slanted Axial Through-Wall Cracks

Tae-Song Han* and Nam-Su Huh*†

* Dept. of Mechanical System Design Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology

(Received May 25, 2012 ; Revised September 12, 2012 ; Accepted September 12, 2012)

Key Words: Crack Opening Displacement(균열열림변위), Slanted Axial Through-Wall Crack(축방향 경사관통균열), Stress Intensity Factor(응력확대계수), Thick-Walled Pipe(두꺼운 배관)

초록: 본 논문에서는 두꺼운 배관에 존재하는 축방향 경사관통균열의 탄성응력확대계수 및 탄성 균열열림변위 해를 제시하였다. 이를 위해 배관의 두께, 기준균열길이, 경사관통균열 길이비를 체계적으로 변화시키며 3차원 탄성 유한요소해석을 수행하였다. 하중조건으로는 균열 성장에 영향을 미치는 내압을 고려하였다. 유한요소해석 결과를 바탕으로 두꺼운 배관에 존재하는 이상적인 축방향 관통균열과 경사관통균열에 대한 탄성응력확대계수와 탄성 균열열림변위를 균열선단 및 두께를 따라 제시하였다. 특히 응력확대계수의 경우에는 이상적인 축방향 관통균열 결과로부터 쉽게 경사관통균열의 응력확대계수를 구할 수 있는 경사관통균열 보정계수를 제시하였다.

Abstract: The present paper provides the elastic stress intensity factors (SIFs) and the crack opening displacements (CODs) of a thick-walled pipe with a slanted axial through-wall crack. For estimating these elastic fracture mechanics parameters, systematic three-dimensional elastic finite element (FE) analyses were performed by considering geometric variables, i.e., thickness of pipe, reference crack length, and crack length ratio, affecting the SIFs and CODs. As for loading condition, the internal pressure was considered. Based on the FE results, the SIFs and CODs of slanted axial through-wall cracks in a thick-walled pipe along the crack front and the wall thickness were calculated. In particular, to calculate the SIFs of a thick-walled pipe with a slanted axial through-wall crack from those of a thick-walled pipe with an idealized axial through-wall crack, a slant correction factor representing the effect of the slant crack on the SIFs was proposed.

- 기호설명 -

1. 서 론

- a_1, a_2 : 축방향 경사관통균열의 내부 균열길이
 및 외부 균열길이 ($a_1 > a_2$)
- K : 탄성응력확대계수
- p : 내압
- R_i, R_m, R_o : 배관 내반경, 평균반경, 외반경
- t : 배관 두께
- δ : 균열열림변위
- ρ : 무차원화된 축방향 균열길이

배관 계통은 플랜트 기계 구조물 중 많은 부분을 차지하며 플랜트의 안전성 측면에서도 매우 중요한 기계 구조물로 고려되고 있다. 이에 따라 원자력, 가스, 중화학 등 대부분의 에너지 플랜트에서 균열이 존재하는 배관 계통의 건전성을 정확하게 평가하기 위한 파괴역학적 평가 방법론이 지난 30여년간 다수 제시되어 왔다.⁽¹⁻³⁾ 하지만 대부분의 경우 이상화된 형상의 표면균열 혹은 관통균열에 대해 주로 평가식이 제시되어 왔다. 그 이유는 실제 현장에서 비파괴 검사로 균열이 발견될 경우 발견된 균열의 형상을 이상화하여 평가에 활용하는 경우가 대부분이기 때문이다.

† Corresponding Author, nam-su.huh@seoultech.ac.kr

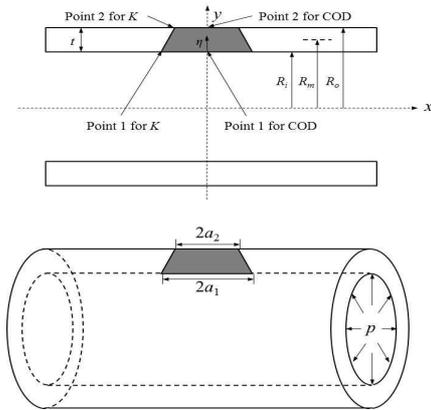


Fig. 1 Schematics of slanted axial through-wall cracked pipe under internal pressure

하지만 최근에는 응력부식균열 등으로 인해 원 자력 배관 등에서 보다 다양한 형상의 균열이 다 수 발견됨에 따라 이러한 형상이 복잡한 균열의 균열진전거동(crack growth behavior), 균열안정성 (crack instability), 누설률(leak rate) 등을 보다 정확 하게 평가할 수 있는 건전성 평가 기법 개발의 필 요성이 대두되어 관련 연구가 활발히 진행되고 있 다.^(4,5)

일례로 피로 혹은 응력부식균열로 인해 배관 내면에 표면균열이 발생하면 이 표면균열은 일반적으로 표면균열의 최심점(deepest point)에서 균열진전이 빠르게 나타나 표면균열의 최심점에서 먼저 배관 두께를 부분적으로 관통하게 된다. 이 경우 배관 외면에서 발생한 부분 관통균열은 길이가 짧게 되고 내면에서의 균열길이는 외면에 비해 길게 되어 경사관통균열(slanted through-wall crack)의 형상으로 성장하게 된다.⁽⁵⁾ 그리고 이와 같은 경사관통균열은 구조물 형상, 하중 조건에 따라 서로 다른 모양으로 지속적으로 성장하게 된다.

이와 같은 경사관통균열의 균열진전거동 및 누설률 평가를 위해서는 탄성응력확대계수(elastic stress intensity factor, elastic SIF)와 균열열림변위(crack opening displacement, COD)가 필요하기에 이를 구하기 위한 해석적 연구와 실증하기 위한 실험적 연구가 수행된 바 있다.⁽⁶⁻⁸⁾

하지만 이러한 기존의 연구들은 모두 배관의 두께가 상대적으로 얇은 경우에 대해 수행되어 왔으며 최근 안전성 증진과 추가적 보수 등으로 인해 플랜트에서 두꺼운 배관으로 고려되어야 하는 경우가 증가되고 있는 점을 감안하면 두꺼운 배관에 존재하는 경사관통균열의 균열진전거동, 누설률을 예측할 수 있는 파괴역학 매개변수 계산식이 필요하다.

두꺼운 배관에 존재하는 표면 균열의 균열진전거동 등을 평가하기 위한 탄성파괴역학

Table 1 Cases considered in the present FE analysis

Geometry	R_m/t	ρ_1	ρ_1/ρ_2
Idealized and slanted axial through-wall cracks in thick-walled pipe	2, 3, 5	0.5, 1, 2, 3	1, 1.5, 2, 3, 4

매개변수 계산식은 그 동안 다수 제시되어 왔으나^(9,10) 전술한 경사관통균열의 경우에는 아직 제시되어 있지 않다.

따라서 본 논문에서는 두꺼운 배관에 존재하는 축방향 경사관통균열의 균열진전거동 및 누설률 예측을 위해 필요한 탄성응력확대계수 및 COD 해를 제시하였다. 이를 위해 배관의 두께 조건 및 균열 형상을 다양하게 변화시키며 축방향 경사관 통균열 배관에 대한 3차원 탄성유한요소해석을 수 행하였다. 축방향 경사관통균열임을 고려하여 하 중조건으로는 내압만을 고려하였다. 균열진전거동 을 평가하기 위한 탄성응력확대계수는 균열선단을 따라 제시되었으며, 누설률 평가를 위한 COD는 균열의 중심에서 두께를 따라 계산되었다.

2. 해석 대상 및 유한요소해석

2.1 해석 대상

Fig. 1은 두꺼운 배관에 존재하는 축방향 경사관통균열의 기하학적 형상을 나타낸 것으로 R_i , R_m , R_o 는 각각 배관의 내반경, 평균반경, 외반경을 의미하며, t 는 배관의 두께이다. 또한 a_1 과 a_2 는 각각 배관의 내면과 외면에서의 균열길이($a_1 > a_2$)로 이를 기반으로 다음과 같은 무차원화된 균열길이를 정의하였다.

$$\rho_1 = \frac{a_1}{\sqrt{R_m t}}, \rho_2 = \frac{a_2}{\sqrt{R_m t}} \tag{1}$$

본 논문에서는 응력확대계수 및 COD에 영향을 미치는 기하학적 인자를 고려하기 위해 각 변수를 체계적으로 고려하여 해석을 수행하였다. 먼저 두꺼운 배관 형상을 고려하기 위해 배관의 R_m/t 값으 로 2, 3, 5의 세 가지 경우를 고려하였으며, 균열길 이의 영향을 고려하기 위해 4가지의 기준균열길이 (내면에서의 균열길이, a_1 또는 ρ_1)와 5가지의 경사 관통균열길이비(내면과 외면 균열길이의 비)를 고 려하였다. 본 논문에서 고려된 해석 변수를 정리 하여 Table 1에 나타내었다.

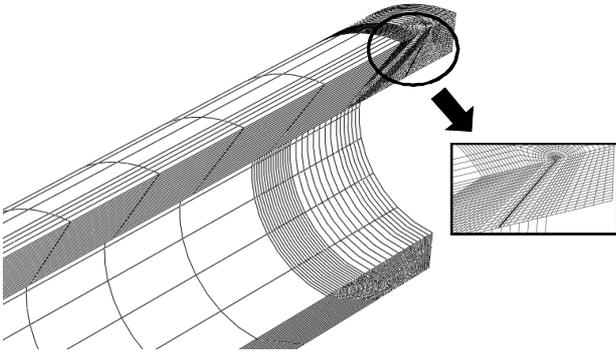


Fig. 2 Typical FE meshes for thick-walled pipe with slanted axial through-wall crack employed in the present FE analyses

2.2 탄성 유한요소해석

Fig. 2는 해석에 사용된 대표적인 유한요소해석 모델을 나타낸 것으로 축방향 경사관통균열이 존재하는 두꺼운 배관에 대한 3차원 탄성 유한요소해석을 수행하였다. 해석 시 배관 재료의 탄성계수(Young's modulus, E)로는 190 GPa를 적용하였으며, Poisson's ratio (ν) 값으로는 0.3이 고려되었다. 배관과 균열 형상의 대칭성을 고려하여 전체의 1/4만을 모델링 하였다. 탄성 유한요소해석을 위해서 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS⁽¹¹⁾를 사용하였으며 20절점 등계수 사각 감차적분요소(20-nodes isoparametric brick reduced integration element, C3D20R in ABAQUS element library)를 사용하였다. 균열 선단은 균열 면을 따라 썸기모양 요소를 배열하였으며 두께 방향으로 20개의 요소가 적용되었다.

전술한 바와 같이 하중조건으로 내압을 고려하였으며, 내압은 배관 내면에 분포하중의 형태로 작용시켰으며 배관의 끝단에는 배관 끝단의 막힘 효과를 고려하여 상당 인장하중(equivalent tensile load)을 작용시켰다. 또한 균열면(crack-face)에 작용하는 압력의 영향을 고려하기 위해 내압의 50%에 해당하는 압력을 균열면에 작용시켰다.

2.3 유한요소 응력확대계수와 COD 계산

탄성응력확대계수(elastic SIF, K)는 경사관통균열에 대한 유한요소해석으로 구해지는 균열선단을 따른 탄성 J -적분값(J_e)을 이용하여 다음과 같이 정의하여 구하였다.

$$K = \sqrt{E'J_e} = \sigma^\infty \sqrt{\pi a_1} F \quad (2)$$

여기서, a_1 은 기준균열길이로 본 논문에서는 내면에서의 균열길이 a_1 을 기준균열길이로 사용하였으며, F 는 형상보정계수이다.

탄성 COD(δ)값은 유한요소해석에서 얻어지는 균열 중심에서 두께를 따른 변위값을 이용하여 다음과 같이 정의하였다.

$$\delta = \frac{4\sigma^\infty a_1}{E'} V \quad (3)$$

탄성응력확대계수와 마찬가지로 기준균열길이로 내면에서의 균열길이 a_1 이 사용되었으며, V 는 형상보정계수를 의미한다.

식 (2)와 (3)에서 E' 은 재료의 탄성계수로 본 논문에서는 평면변형률(plane strain) 조건으로 가정하여 다음과 같이 정의하였다.

$$E' = \frac{E}{1-\nu^2} \quad (4)$$

또한 식 (2)와 (3)에서 σ^∞ 는 배관에 작용하는 공칭응력(remote nominal stress)으로 다음과 같이 정의되었다.

$$\sigma^\infty = \frac{pR_m}{t} \quad (5)$$

참고로 본 논문의 결과를 이용하여 두꺼운 배관에 존재하는 경사관통균열 및 이상화된 관통균열의 탄성응력확대계수 및 탄성 COD를 구하기 위해서는 식 (2)~식 (5)의 정의가 그대로 적용되어야 한다.

3. 해석 결과

3.1 축방향 경사관통균열의 응력확대계수

본 논문에서는 두꺼운 배관에 존재하는 축방향 경사관통균열이 응력확대계수에 미치는 영향을 정량화하기 위해 경사관통균열 보정계수 G 를 다음과 같이 정의하였다.

$$K^{Slanted} = \sigma^\infty \sqrt{\pi a_1} F G = K^{Idealized} G \quad (6)$$

여기서, 상첨자 'Slanted'와 'Idealized'는 각각 축방향 경사관통균열이 존재하는 배관과 이상적인 축방향 관통균열($a_1=a_2$ 또는 $\rho_1=\rho_2$)이 존재하는 배관을 의미한다.

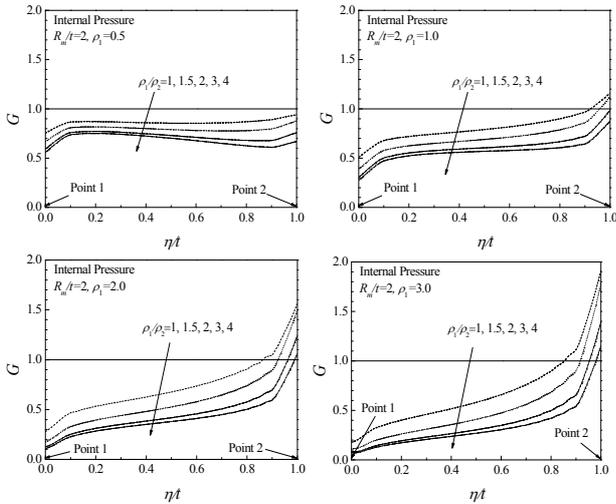


Fig. 3 Variation of G values along the crack front of a thick-walled pipe with slanted axial through-wall crack under internal pressure, $R_m/t=2$

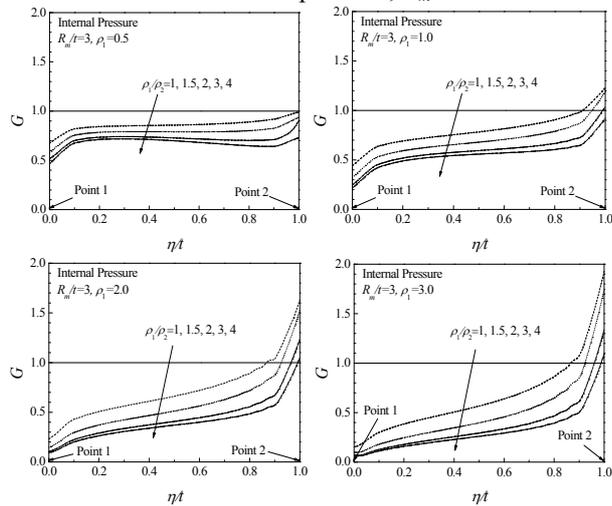


Fig. 4 Variation of G values along the crack front of a thick-walled pipe with slanted axial through-wall crack under internal pressure, $R_m/t=3$

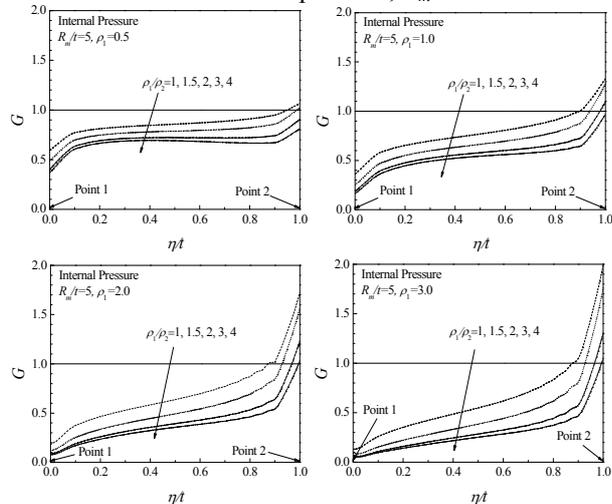


Fig. 5 Variation of G values along the crack front of a thick-walled pipe with slanted axial through-wall crack under internal pressure, $R_m/t=5$

Table 2 Values of the shape factor F for thick-walled pipe with an idealized axial through-wall crack (internal pressure)

R_m/t	ρ_1	F
2	0.5	1.209
	1	1.570
	2	2.356
	3	3.022
3	0.5	1.217
	1	1.588
	2	2.426
	3	3.213
5	0.5	1.222
	1	1.598
	2	2.466
	3	3.297

즉, 식 (6)에 정의된 경사관통균열 보정계수 G 는 축방향 경사관통균열의 응력확대계수와 이상적인 축방향 관통균열의 응력확대계수의 비를 의미하며, 따라서 이상적인 축방향 관통균열 배관의 응력확대계수 K 값에 경사관통균열 보정계수 G 를 곱하면 쉽게 축방향 경사관통균열에 대한 응력확대계수를 구할 수 있다. 식 (6)에 따라 두꺼운 배관에 존재하는 축방향 경사관통균열 배관의 응력확대계수를 구하기 위해서는 먼저 이상적인 축방향 관통균열에 대한 응력확대계수 K (즉, 식 (2)와 식 (6)의 F)값이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 이상적인 축방향 관통균열($\rho_1=\rho_2$)이 존재하는 두꺼운 배관에 대해서도 단성 유한요소해석을 수행하였으며, 이로부터 구한 이상적인 축방향 경사관통균열이 존재하는 두꺼운 배관의 F 값을 Table 2에 정리하였다. Table 2에서 이상적인 축방향 관통균열에 대한 F 값은 전체 균열선단에 대한 평균값으로 정의되었다. 해석 결과의 일관성을 위해 경사관통균열에 대한 G 값을 식 (6)에 따라 구할 때에도 Table 2에 주어진 유한요소해석으로 구한 이상적인 축방향 관통균열에 대한 결과를 이용하였다.

Fig. 3~5는 균열선단을 따른 축방향 경사관통균열의 G 값의 변화를 세 가지의 R_m/t 에 대해 나타낸 것이다. 그림에서 x -축은 무차원화된 배관 두께를 나타낸 것으로(Fig. 1 참고) 0은 배관의 내면 균열선단을 의미하며 1은 배관의 외면 균열선단을 의미한다.

Fig. 3~5에 나타난 바와 같이 축방향 경사관통균열의 경우 균열길이가 긴 배관 내면(Point 1)에 비해 균열

Table 3 Values of slant correction factor G at the inner surface point of thick-walled pipe with slanted axial through-wall crack under internal pressure

R_m/t	ρ_1	ρ_1/ρ_2				
		1	1.5	2	3	4
2	0.5	1.000	0.753	0.667	0.592	0.558
	1	1.000	0.510	0.391	0.307	0.275
	2	1.000	0.279	0.177	0.127	0.111
	3	1.000	0.178	0.113	0.084	0.073
3	0.5	1.000	0.674	0.580	0.516	0.464
	1	1.000	0.439	0.322	0.245	0.217
	2	1.000	0.231	0.146	0.106	0.092
	3	1.000	0.153	0.100	0.075	0.064
5	0.5	1.000	0.591	0.486	0.401	0.366
	1	1.000	0.359	0.250	0.186	0.164
	2	1.000	0.182	0.119	0.089	0.078
	3	1.000	0.130	0.091	0.068	0.058

Table 4 Values of slant correction factor G at the mid-thickness of thick-walled pipe with slanted axial through-wall crack under internal pressure

R_m/t	ρ_1	ρ_1/ρ_2				
		1	1.5	2	3	4
2	0.5	1.000	0.855	0.789	0.729	0.702
	1	1.000	0.790	0.689	0.605	0.569
	2	1.000	0.676	0.526	0.418	0.379
	3	1.000	0.580	0.409	0.302	0.268
3	0.5	1.000	0.858	0.790	0.728	0.699
	1	1.000	0.783	0.679	0.594	0.558
	2	1.000	0.661	0.511	0.407	0.369
	3	1.000	0.566	0.396	0.292	0.259
5	0.5	1.000	0.857	0.787	0.721	0.690
	1	1.000	0.769	0.663	0.579	0.542
	2	1.000	0.637	0.492	0.392	0.356
	3	1.000	0.548	0.384	0.283	0.251

길이가 짧은 배관 외면(Point 2)에서 응력확대계수 값이 항상 큰 것으로 나타났다. 특히 배관 내면에서의 기준균열길이(ρ_1)가 길어질수록 내면에서의 응력확대계수값은 감소하였으며 외면에서의 응력확대계수값은 증가하였는데 이는 균열길이가 짧은 외면 쪽이 균열길이가 긴 내면에 비해 더 큰 하중을 지지하기 때문이다. 그리고 내면에서의 기준균열길이가 짧아질수록, 배관의 두께가 두꺼워질수록 내면과 외면에서의 응력확대계수값의 차이는 감소하였다. 이는 내면 기준균열길이가 긴 경우에는 내면에서는 피로 혹은 응력부식에 의해 균열진전이 거의 발생하지 않으며 균열길이가 짧은 외면 쪽에서 주로 균열진전이 발생함을 의미한다.

Table 5 Values of slant correction factor G at the outer surface point of thick-walled pipe with slanted axial through-wall crack under internal pressure

R_m/t	ρ_1	ρ_1/ρ_2				
		1	1.5	2	3	4
2	0.5	1.000	0.940	0.879	0.758	0.671
	1	1.000	1.160	1.127	0.987	0.878
	2	1.000	1.563	1.505	1.245	1.064
	3	1.000	1.917	1.783	1.397	1.155
3	0.5	1.000	0.993	0.939	0.909	0.733
	1	1.000	1.230	1.193	1.039	0.922
	2	1.000	1.628	1.531	1.237	1.050
	3	1.000	1.931	1.746	1.339	1.096
5	0.5	1.000	1.064	1.021	0.906	0.810
	1	1.000	1.332	1.280	1.099	0.967
	2	1.000	1.722	1.567	1.235	1.034
	3	1.000	1.991	1.761	1.307	1.052

따라서 최종적으로 축방향 경사관통균열은 내면과 외면에서 길이가 같아져 이상적인 축방향 관통균열 형상으로 진전될 것으로 예측된다. 반면 내면에서의 기준균열길이가 짧아질수록 내면과 외면에서 비슷한 속도로 동시에 균열진전이 발생하게 된다. 따라서 축방향 경사관통균열이 존재하는 배관의 경우에는 내면 기준균열길이의 길이에 따라 균열진전거동이 서로 다를 것으로 나타났다.

또한 내면으로부터 두께의 약 90% 정도까지는 경사관통균열의 응력확대계수값이 이상화된 축방향 관통균열의 응력확대계수값보다 작은 것으로 나타났다.

Table 3~5는 축방향 경사관통균열이 존재하는 두꺼운 배관의 내면, 두께의 중간, 외면에서의 경사관통균열 보정계수 G 값을 정리하여 나타낸 것이다.

이와 같이 본 논문에서 제시한 두꺼운 배관에 존재하는 축방향 경사관통균열에 대한 응력확대계수 결과는 균열진전거동 평가 및 선형탄성파괴역학에 입각한 축방향 경사관통균열 배관의 결함 안정성 평가를 위해 적용될 수 있다.

3.2 축방향 경사관통균열의 탄성 COD

Fig. 6~8은 축방향 경사관통균열이 존재하는 두꺼운 배관의 탄성 COD 결과를 나타낸 것으로 전술한 바와 같이 유한요소해석으로 얻어진 균열 중간에서의 변위값을 이용하여 식 (3)과 같이 정의되는 형상보정계수 V 를 나타내었다. 응력확대계수의 경우와 동일하게 식 (3)에서 기준균열길이를 내면에서의 균열길이인 a_1 이 적용되었다.

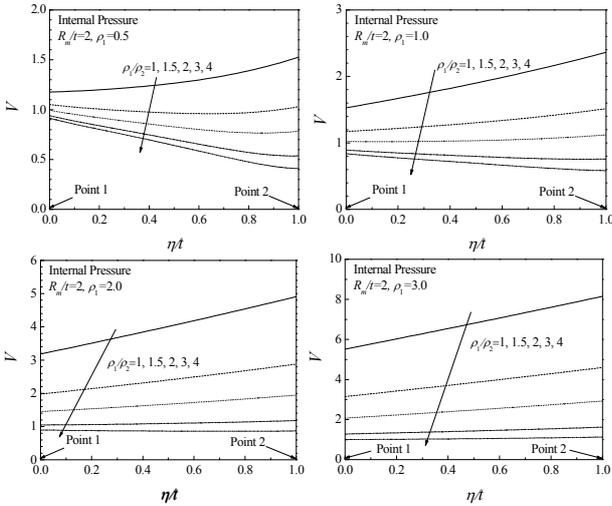


Fig. 6 Variation of V values along the thickness at the center of crack of thick-walled pipe with slanted axial through-wall crack under internal pressure, $R_m/t=2$

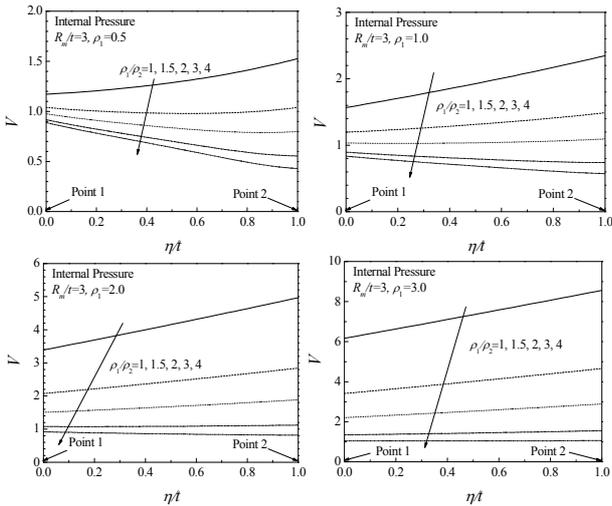


Fig. 7 Variation of V values along the thickness at the center of crack of thick-walled pipe with slanted axial through-wall crack under internal pressure, $R_m/t=3$

Fig. 6~8 에 나타난 바와 같이 이상적인 축방향 관통균열의 경우에는 외면에서의 COD 값이 내면에서의 COD 값보다 항상 크게 나타났다. 그러나 응력확대계수의 경우와 달리 COD 의 경우는 경사관통균열 길이비가 증가할수록 외면에 비해 내면에서 값이 크게 나타났으며 이러한 경향은 내면에서의 기준균열길이가 짧을수록 명확하게 나타났다. 이는 경사관통균열 길이비가 증가할수록 (즉, 외면에서의 균열길이가 내면에서의 균열길이에 비해 작아질수록) 하중은 균열길이가 짧은 외면에서 주로 지지되게 되어 응력확대계수는 외면이 내면보다 더 크지만 COD 의 경우는 균열길이가 긴 내면이 외면에

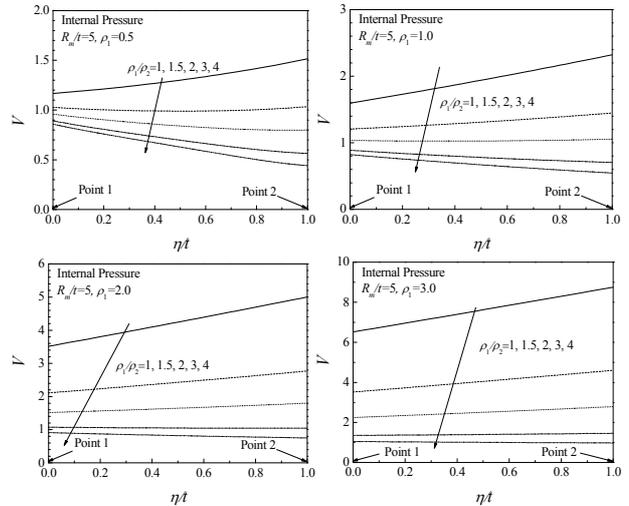


Fig. 8 Variation of V values along the thickness at the center of crack of thick-walled pipe with slanted axial through-wall crack under internal pressure, $R_m/t=5$

비해 상대적으로 강성이 감소하게 되어 변위가 증가하게 되며 이로 인해 내면의 COD 가 외면에 비해 커지는 것으로 생각된다. 이러한 경향은 배관의 R_m/t 값에 무관하였다.

원자력 배관의 상세 누설률 평가를 위해서는 탄소성 COD 값이 적용되는 것이 바람직하지만 탄소성 COD 값이 없는 경우에는 탄성 COD를 사용하여 보수적인 누설률 평가가 가능하다. 따라서 본 논문에서 제시된 탄성 COD 결과는 향후 소성 COD 결과와 함께 전체 탄소성 COD 평가를 위해 적용될 수 있으며 혹은 보수적 평가를 위해 탄성 COD 자체로도 적용될 수 있다.

응력확대계수의 경우와 동일하게 축방향 경사관통균열이 존재하는 두꺼운 배관의 내면, 두께의 중심, 외면에서의 COD 값(형상보정계수 V 값)을 Table 6~8에 정리하여 나타내었다.

4. 결론

본 논문에서는 두꺼운 배관에 존재하는 축방향 경사관통균열의 탄성응력확대계수 및 탄성 COD 해를 제시하였다. 이를 위해 배관의 두께, 기준균열길이, 경사관통균열 길이비를 체계적으로 변화시키며 3차원 탄성 유한요소해석을 수행하였다.

유한요소해석 결과를 바탕으로 두꺼운 배관에 존재하는 이상적인 축방향 관통균열과 경사관통균열에 대한 탄성응력확대계수와 탄성 COD를 균열 선단 및 두께를 따라 제시하였다. 특히 응력확대계수의 경우에는 이상적인 축방향 관통균열에 대한 값으로부터 쉽게 경사관통균열의 응력확대

Table 6 Values of shape factor V at the inner surface point of thick-walled pipe with slanted axial through-wall crack under internal pressure

R_m/t	ρ_1	ρ_1/ρ_2				
		1	1.5	2	3	4
2	0.5	1.177	1.052	0.994	0.940	0.914
	1	1.528	1.174	1.022	0.893	0.837
	2	3.184	1.980	1.452	1.048	0.897
	3	5.520	3.149	2.074	1.282	1.002
3	0.5	1.172	1.040	0.977	0.918	0.889
	1	1.568	1.196	1.034	0.896	0.836
	2	3.390	2.075	1.506	1.078	0.918
	3	6.170	3.413	2.208	1.346	1.048
5	0.5	1.168	1.027	0.959	0.892	0.858
	1	1.594	1.207	1.035	0.888	0.823
	2	3.515	2.112	1.517	1.076	0.912
	3	6.520	3.519	2.246	1.356	1.051

Table 7 Values of shape factor V at the mid-thickness of thick-walled pipe with slanted axial through-wall crack under internal pressure

R_m/t	ρ_1	ρ_1/ρ_2				
		1	1.5	2	3	4
2	0.5	1.266	0.966	0.828	0.701	0.642
	1	1.901	1.303	1.034	0.797	0.694
	2	4.012	2.401	1.674	1.094	0.864
	3	6.805	3.849	2.477	1.434	1.048
3	0.5	1.287	0.980	0.836	0.702	0.639
	1	1.927	1.313	1.037	0.794	0.687
	2	4.157	2.438	1.678	1.084	0.853
	3	7.345	4.017	2.534	1.439	1.044
5	0.5	1.301	0.990	0.840	0.698	0.629
	1	1.940	1.310	1.027	0.780	0.669
	2	4.245	2.428	1.647	1.051	0.822
	3	7.625	4.051	2.508	1.399	1.007

계수를 구할 수 있는 경사관통균열 보정계수를 제시하였다.

본 논문의 결과는 축방향 경사관통균열이 존재하는 두꺼운 배관의 균열진전거동 평가를 위해 적용할 수 있으며, 경사관통균열을 고려한 상세 누설률 계산을 위해서도 적용될 수 있다. 비록 본 논문에서는 하중 조건으로 내압만을 고려하였지만, 굽힘모멘트 및 인장하중의 경우에는 배관 축방향 응력성분만을 발생시키며 이는 축방향 관통균열의 균열진전거동 혹은 균열열림거동에 거의 영향을 미치지 않기 때문에 내압에 대한 본 논문의 결과는 굽힘모멘트 및 인장하중이 작용하는 경우에도 적용가능하다.

Table 8 Values of shape factor V at the outer surface point of thick-walled pipe with slanted axial through-wall crack under internal pressure

R_m/t	ρ_1	ρ_1/ρ_2				
		1	1.5	2	3	4
2	0.5	1.525	1.030	0.784	0.537	0.410
	1	2.363	1.515	1.121	0.757	0.584
	2	4.907	2.881	1.947	1.182	0.868
	3	8.155	4.602	2.927	1.622	1.126
3	0.5	1.528	1.040	0.799	0.556	0.430
	1	2.347	1.488	1.095	0.739	0.573
	2	4.970	2.842	1.886	1.122	0.817
	3	8.560	4.659	2.890	1.556	1.063
5	0.5	1.515	1.034	0.800	0.564	0.442
	1	2.322	1.448	1.054	0.706	0.547
	2	5.005	2.770	1.800	1.045	0.751
	3	8.755	4.605	2.790	1.460	0.979

후 기

본 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Rahman, S., Brust, F., Ghadiali, N. and Wilkowski, G., 1998, "Crack-opening-area Analyses for Circumferential Through-wall Cracks in Pipes-part I: Analytical Models," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 75, pp. 357~373.
- (2) Zahoor, A., 1991, "Ductile Fracture Handbook," Novetech Corp., Gaithersburg, MD, USA.
- (3) Ainsworth, R.A., 1984, "The Assessment of Defects in Structures of Strain Hardening Materials," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 19, pp. 633~642.
- (4) Deardorff, A.F., Cofie, N.G., Dijamco, D.G. and Chintapalli, A., 2006, "Net Section Plastic Collapse Analysis of Two-Layered Materials and Application to Weld Overlay Design," PVP2006-ICPVT 11-93454, ASME Pressure Vessels and Piping Conference.
- (5) Rudland, D., Shim, D.J. and Csontos, A., 2008, "Natural Flaw Shape Development Due to Stress Corrosion Cracking," PVP2008-61205, ASME Pressure Vessels and Piping Conference.
- (6) Brickstad, B. and Sattari-Far, I., 2000, "Crack Shape Development for LBB Application," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 67, pp. 625~646.
- (7) Yoo, Y.S., Ahn, S.H. and Ando, K., 1998, "Fatigue Crack Growth and Penetration Behaviours in Pipes Subjected to Bending Moment," ASME Pressure Vessels and Piping Conference, Vol. 371, pp. 63~70.

- (8) Huh, N.S., Shim, D.J., Choi, S., Wilkowski, G.M. and Yang, J.S., 2008, "Stress Intensity Factors for Slanted Through-wall Cracks Based on Elastic Finite Element Analyses," *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol. 31, pp. 197~209.
- (9) Navid, H., Fenner, R.T., Nadiri, F. and Webster, G.A., 1985, "Stress Intensity Factors for Internal and External Cracks in Pressurised Thick-walled Cylinders," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 18, pp. 241~254.
- (10) Kirkhope, K.J., Bell, R. and Kirkhope, J., 1991, "Stress Intensity Factors for Single and Multiple Semi-Elliptical Surface Cracks in Pressurized Thick-walled Cylinders," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 47, pp. 247~257.
- (11) "User's Manual," ABAQUS Ver. 6.11-1, Dassault, 2012.