

파단전누설 해석 및 균열거동 평가를 위한 축방향 경사관통균열의 탄성 응력확대계수 및 균열열림변위

허남수[†], 심도준^{**}, 최순^{*}, 박근배^{*}

Estimation of Elastic Fracture Mechanics Parameters for Slanted Axial Through-Wall Cracks for Leak-Before-Break and Crack Growth Analysis

Nam-Su Huh, Do-Jun Shim, Suhn Choi and Keun-Bae Park

Key Words : Axial through-wall crack(축방향 관통균열), Crack opening displacement(균열열림변위), Slanted crack(경사균열), Stress intensity factor(응력확대계수)

Abstract

This paper proposes elastic stress intensity factors and crack opening displacements (CODs) for a slanted axial through-wall cracked cylinder under an internal pressure based on detailed 3-dimensional (3-D) elastic finite element (FE) analyses. Based on the elastic FE results, the stress intensity factors along the crack front and CODs through the thickness at the center of the crack were provided. These values were also tabulated for three selected points, i.e., the inner and outer surfaces and at the mid-thickness. The present results can be used to evaluate the crack growth rate and leak rate of a slanted axial through-wall crack due to stress corrosion cracking and fatigue. Moreover, the present results can be used to perform a detailed Leak-Before-Break analysis considering more realistic crack shape development.

1. 서 론

원자력 배관의 LBB 해석을 위해서는 일반적으로 이상적인 형상의 관통균열이 가정된다. 그러나 실제로 내부 표면균열이 성장하여 관통될 때에는 배관 내면과 외면의 균열 길이가 서로 다른 부분 관통균열 형상(경사관통균열, slanted through-wall crack)으로 관통된 후 균열의 형상과 하중 조건에 따라 이상적인 형상의 관통균열로 성장한다. 따라서 정확한 상세 LBB 해석을 위해서는 균열 성장에 따른 균열 형상 및 형상별 누설율(leak rate) 예측 모델이 확립되어야 한다. 내부 표면균열과 이상적인 관통균열의 경우에는 균열 성장 거동 및 누설율 예측을 위한 해석기법이 비교적 잘 정립되어 있으나 경사관통균열의 경우에는 제한적인 결과만이 제시되어 있다.⁽¹⁻³⁾ 본 논문에서는 상세 3차원 탄성

유한요소해석을 수행하여 축방향 경사관통균열이 존재하는 배관의 탄성 응력확대계수(elastic stress intensity factor)와 균열열림변위(Crack Opening Displacement, COD) 해를 제시하였다. 균열성장 거동 평가를 위한 응력확대계수 해는 균열선단을 따라 제시되었으며 누설율 평가를 위한 COD는 균열의 중심에서 두께를 따라 제시되었다.

2. 해석 대상 및 유한요소해석

Fig. 1은 본 논문에서 고려된 축방향 경사관통균열이 존재하는 배관의 기하학적 형상을 나타낸 것으로 경사관통균열은 내면에서의 균열길이와 외면에서의 균열길이($a_1 > a_2$,

$\rho_1 = \frac{a_1}{\sqrt{R_m t}}$, $\rho_2 = \frac{a_2}{\sqrt{R_m t}}$)로 정의된다. 균열 길이의

비는 모두 5가지가 고려되었으며($\rho_1/\rho_2=1, 1.5, 2, 3$ and 4), R_m/t 는 4가지(5, 10, 20, 30)가 고려되었다. 또한 기준 내부균열길이는 4가지($\rho_1=0.5, 1, 2$ and 3)가 고려되었다. 하중은 내압이 작용한다. Fig. 2는 해석에 사용된 대표적인 유한요소모델로 해석에는 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS⁽⁴⁾ 프로그램을 적용하였다.

[†] 회원, 한국원자력연구원 중소형원자로기술개발부
E-mail: nshuh@kaeri.re.kr

TEL: (042) 868-4901 FAX: (042) 868-8990

^{*} 회원, 한국원자력연구원 중소형원자로기술개발부

^{**} 회원, Engineering Mechanics Corporation of Columbus

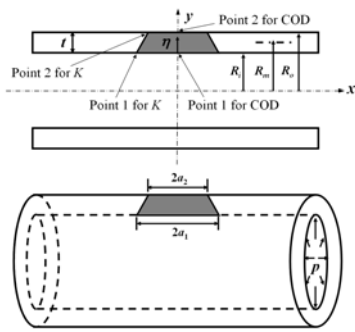


Fig. 1 Schematics of slanted axial through-wall cracked cylinder under internal pressure, p

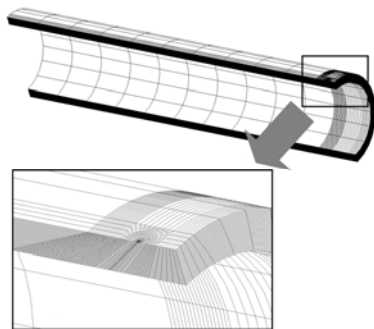


Fig. 2 Typical FE mesh employed in the present work

3. 해석 결과

Fig. 3은 균열선단을 따른 응력확대계수 계산 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 응력확대계수는 식 (1)과 같이 정의되는 보정계수 G 로 정의되었다.

$$K^{Slanted} = \sigma^\infty \sqrt{\pi a_1} \cdot F \cdot G = K^{Idealized} \cdot G \quad (1)$$

그림에 나타난 바와 같이 최대 응력확대계수는 외면에서 발생하였으며 최소값은 배관의 내면에서 발생하였다. 또한 상대적으로 내부 균열길이가 긴 경우에는 내면 응력확대계수는 “0”으로 접근하며 외면으로 갈수록 증가한다. 따라서 피로 하중 작용시 내압이 작용하는 경사관통균열은 이상적인 형상의 균열로 성장할 것으로 예측된다. Fig. 4는 두께를 따른 COD 계산 결과 예를 나타낸 것이다. 여기서 COD는 식 (2)와 같이 표현되는 형상계수(shape factor)로 표현되었다.

$$\delta_e = \frac{4}{E} \sigma^\infty a_1 \cdot V \quad ; \quad \sigma^\infty = \frac{pR_i}{2t} \quad (2)$$

4. 결론

본 논문에서는 3차원 탄성 유한요소해석을 수행하여 축방향 경사관통균열이 존재하는 배관의 탄성 응력확대계수 및 COD 해를 제시하였다. 해석 모델 및 방법의 타당성은 이상화된 관통균열에 대한 기존 해와 비교하여 검증하였다.

본 논문에서 제시한 결과는 피로 하중을 고려한 균열 성장 해석 및 균열 진전 거동을 고려한 상세 LBB 해석을 위해 사용될 수 있다. 본 논문에서는 축방향 경사관통균열에 대한 결과만 제시하였으나 원주방향 경사관통균열이 존재하는 배관과 경사관통균열이 존재하는 평판에 대한 저자들의 이전 결과와 종합하면 경사관통균열이 존재하는 구조물의 응력확대계수 및 COD 거동은 균열 방향(축방향/원주방향), 구조물 형상(평판/배관), 하중 조건(인장하중/압하중/내압)에 무관하게 유사한 거동을 보여주었다.

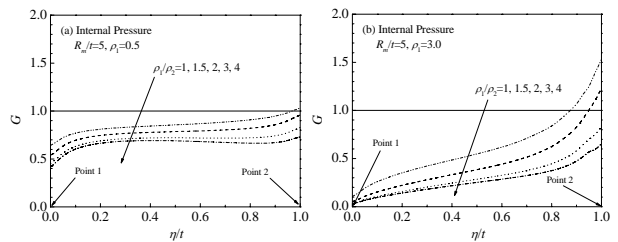


Fig. 3 Variation of G values along the crack front of a slanted axial through-wall cracked cylinder under internal pressure, $R_m/t=5$

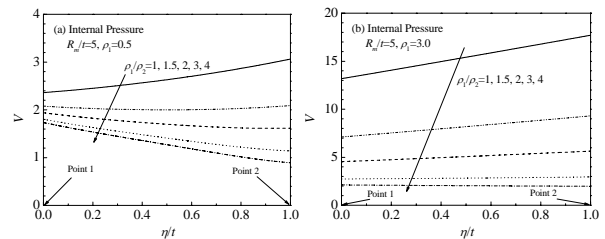


Fig. 4 Variation of V values along the thickness at the center of crack of a slanted axial through-wall cracked cylinder under internal pressure, $R_m/t=5$

후 기

본 논문은 교육과학기술부 지원 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행된 것으로서 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) British Energy Generation Ltd., 2001, “R6: Assessment of the integrity of structures containing defects,” Revision 4.
- (2) Yellowlees, S.F., Lynch, K.M., Warren, A.P., Sharples, J.K. and Budden, P.J., 2005, “Development of guidance for leak-before-break analysis of complex shaped cracks,” ASME PVP Conference, PVP2005-71382, Denver, Colorado, U.S.A.
- (3) 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. 197~208.
- (4) “User’s manual, Version 6.8-1.,” ABAQUS, Inc., 2008.