

# 실배관 파괴 거동을 모사할 수 있는 인장 소형 실배관 Compact Pipe tracing fracture behavior of real pipe

\*민준기<sup>1</sup>, 유상수<sup>1</sup>, 허용<sup>2</sup>, 구제민<sup>2</sup>, 석창성<sup>2</sup>

\*J. K. Min<sup>1</sup>, S. S. Yoo<sup>1</sup>, Y. Huh<sup>2</sup>, J. M. Koo<sup>2</sup>, C. S. Seok<sup>2</sup>

<sup>1</sup>성균관대학교 대학원 기계공학과, <sup>2</sup>성균관대학교 기계공학부

Key words : Compact Pipe, Full scale Pipe, J-Q constraint effect, Fracture Toughness

## 1. 서론

현재 국내에서는 원전 배관의 설계 시에 LBB 개념을 적용하고 있으나 배관 재료의 파괴인성치와 관련된 문제점 등으로 인하여 아직도 LBB 개념을 적용하는데 어려움이 있는 실정이다. 그리고 배관으로부터 큰 시편을 채취하는 것이 어렵기 때문에 1T-CT 표준 시험편을 이용해서 파괴인성치를 구한다. 그러나 기존의 표준 시험편은 실배관의 파괴 거동을 매우 보수적으로 평가하는 것으로 알려져 있으며 이에 따라 그 결과를 이용한 LBB 평가 결과도 매우 보수적이다[1]. 이를 해결하기 위해 국내에서는 휘어진 CT 시험편(curved CT; CCT)[2], 흰 광폭평판(curved wide plate; CWP)[3], 굽힘 실배관(real pipe)[4] 시험법 및 인장 소형 실배관(compact pipe; CP)[5] 시험법 등의 비표준 시험법들이 제시되었다. 특히, 인장 소형 실배관은 내압과 굽힘 응력을 받는 원전 배관의 실제 거동을 모사하는 모델이라는 평가를 받고 있다. 따라서 본 연구에서는 인장 소형 실배관이 원전 배관의 실제 파괴 거동을 모사할 수 있음을 보이기 위해 유한요소해석을 수행하여 구속조건을 평가하였으며, 이를 통해 앞으로의 인장 소형 실배관의 연구방향을 제시하고자 한다.

## 2. J-Q 해석법

O'Dowd와 Shih[6]는 구속이 낮은 경우와 높은 경우에 있어서 균열 선단의 수직 응력의 차이가 항상 일정하다는 사실을 밝혀내고, 그 차이의 수정 계수(correction factor)로 Q-응력을 도입한 J-Q 해석법을 제안하였다. Q-응력은 균열 선단에서의 3축 응력(triaxial stress) 상태를 나타내는 매개변수로서, 균열 선단에서의 응력을 표현하면 다음과 같다.

$$\sigma_{ij} \approx \sigma_{ij,HRR} + Q\sigma_0\delta_{ij} \left( \left| \theta \right| < \frac{\pi}{2} \right) \quad (1)$$

여기서,  $\delta_{ij}$ 는 Kronecker delta이며, 식 (1)를 이용하여 Q-응력을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$Q \equiv \frac{\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{\theta\theta,HRR}}{\sigma_0} \quad \text{at } \theta = 0, r = 2 \frac{J}{\sigma_0} \quad (2)$$

여기서,  $\sigma_{\theta\theta}$ 는 균열 선단에서의 실제 수직 응력값이고,  $\sigma_{\theta\theta,HRR}$ 은 해당 지점에서 HRR식으로 계산되는 수직 응력값이다. Q-응력은 유한 변형률이 발생하는 영역(finite strain region)의 바깥 부분이고 균열 진전의 특성을 대표할 수 있는  $r/(J/\sigma_0) = 2$ 에서의 값을 이용한다.

## 3. 유한요소 해석

### 3.1 인장 소형 실배관 시험편의 형상 및 해석 모델

실제 원전 배관은 내압과 굽힘 응력을 동시에 받는 경우가 많으나, 기존 실배관 시험은 굽힘 응력만을 고려하기 때문에 실제 원전 배관의 사용조건과는 다른 경우가 발생한다. 따라서 실제 원전 배관의 파괴 거동을 모사하기 위해 박수 등[5]은 인장 소형 실배관(compact pipe; CP)을 제안하였다. 그 형상은 Fig. 1과 같으며, 배관의 내부의 평균 직경을  $D_m$ 이라 할 때, 배관의 높이는  $1.5D_m$ , 배관의 중심에서 하중점까지는  $2.0D_m$ 이다. 또한, 실제 실험에서 국부소성방

지용 지그를 사용한다는 점을 고려하여 모델링을 하였다.

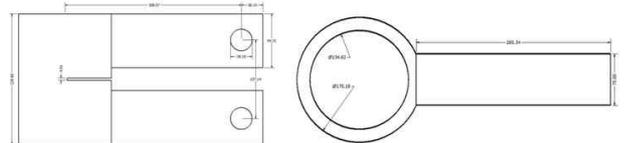


Fig. 1. Schematic diagram of compact pipe

본 연구에서 사용된 배관은 SA312 TP304L 스테인리스강으로서, 탄성계수는 200 GPa이며, 인장시험으로부터 구한 항복강도와 인장강도는 각각 269, 530 MPa이다. Table 1에 본 연구에 사용된 배관 시험편의 치수 및 균열 길이 등을 나타내었다.

Table 1. Details of compact pipe test specimen

Material	Outer Diameter, (mm)	Wall Thickness, (mm)	Crack Angle, (degree)	Height, (mm)
SA312 TP304L	170.18	17.78	180	228.6

유한요소해석을 위해 시험편과 동일한 형상의 3차원 모델을 구성하였다. 해석 대상의 대칭성을 고려하여 전체의 1/4만을 모델링 하였다. 재료는 탄성-완전 소성 재료로 가정하였으며, ABAQUS 프로그램을 사용하여 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 요소는 20 절점 등계수 사각주요소이며, 전체 약 13,000개의 요소로 구성하였다. 균열 길이비( $\theta/\pi$ ) 0.5에 대하여 해석을 수행하여 인장 소형 실배관 시험편의 굽힘 응력 대 인장 응력의 비를 구하였다.

Fig. 2에 유한요소해석 모델을 나타내었다. 해석의 정밀도를 높이기 위해서 모든 경우 균열선단 부근에 특이요소(singular element)를 삽입하였다. 핀은 강체로 가정하였으며 시험편의 홀과 핀의 접촉면에 접촉요소를 배치하였다.

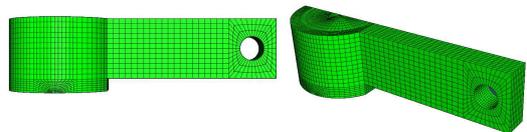


Fig. 2 Finite element model for compact pipe specimen

### 3.2 유한요소해석을 이용한 하중비 설계

본 연구의 유한요소 모델인 Fig. 2에 핀 하중을 부과하고 굽힘 응력과 인장응력을 동시에 받게 하여 균열부의 하중 방향 응력을 얻었다. 그 결과와 배관의 리거먼트 부분 전체에 같은 응력을 주어 순수 인장응력만을 받게 한 경우와 비교하여 Fig. 5.(A)와 Table 2에 나타내었다. 순수 인장응력만을 받는 경우는 균열부 전체에 걸쳐서 거의 일정한 데 비하여, 굽힘응력과 인장응력을 동시에 받는 경우에는 배관 내부에서 큰 응력이 발생하였으며, 배관 외부로 갈수록 응력이 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 현재의 형상에 의한 인장소형실배관의 평균 굽힘 응력과 평균 인장 응력의 비는 약 9:1 이는데, 이것으로부터 레버 길이와 시험편의 높이를 조절하여 실 배관의 사용조건에 맞는 굽힘과 인장비를 구할 수 있음을 확인할 수 있었다.

Table 2. Bending stress and tensile stress in CP

	Bending stress,	Tensile stress,
	%	%
1	90	10
2	90	10
3	90	10
4	90	10
5	90	10
6(crack center)	90	10
7	90	10
8	89	11
9	89	11
10	89	11
11	89	11
Average	90	10

4. 소형 실패관 시험편의 구속 조건

Fig. 2의 인장 소형 실패관(compact pipe; CP)과 굽힘 실패관의 해석 결과로부터 Q-parameter를 구하여 구속 조건을 비교 평가하였다.

4.1 굽힘 실패관 구속 상태 해석[4]

소형 실패관과 굽힘 실패관의 구속 상태를 비교하기 위해 박재실 등[4]의 굽힘 실패관 해석을 참고하였다. Fig. 3에 실패관의 구속 상태 해석을 위해 구성한 대표적인 유한요소 모델을 나타내었으며, 해석 모델의 대칭성을 고려하여 전체의 1/4만을 모델링 하였다. 전체 요소수는 약 3,000개이며, 모델에 굽힘 하중이 작용하도록 해석을 수행하였다.

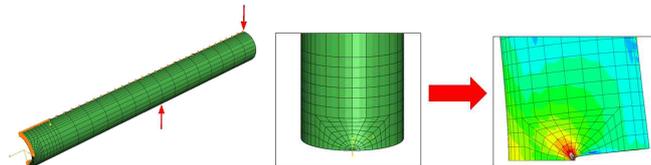


Fig. 3 Three-dimensional mesh and boundary conditions for a full-scale pipe

4.2 소형 실패관 구속 상태 해석

소형 실패관의 구속 상태를 정량적으로 분석하기 위하여 3차원 유한요소해석을 수행하였다.

Fig. 4에 구속 상태 해석을 위해 구성한 CP 시험편의 3차원 유한요소 모델을 나타내었다. 해석 모델의 대칭성을 고려하여 전체의 1/4만을 모델링 하였다. 해석에는 20절점 등계수요소(20-nodes isoparametric brick reduced integration element)를 사용하였으며, 전체 요소수는 약 78,000개이다. 균열부는  $\theta/\pi$ 가 0.5인 경우에 대하여 유한요소해석을 수행하였으며, Fig. 5에 나타낸 바와 같이 변위 제어(displacement control)를 통해 하중을 작용시켰다. 해석 결과로부터 식 (2)을 이용하여 Q값을 계산하였다.

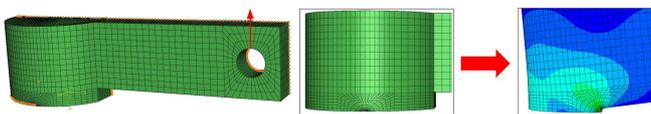


Fig. 4 Three-dimensional mesh and boundary conditions for a compact pipe

4.4 해석 결과

Fig. 5.(B)에 J-Q 해석 결과를 나타내었다. 굽힘 실패관보다 인장 소형 실패관의 구속 조건이 정량적으로 더 높게 평가되었다. 즉, 인장 소형 실패관에서는 J-integral을 사용한 탄소성 파괴역학이 잘 적용된다는 것을 의미한다. 또한, 대규모 항복 조건하에서도 인장 소형 실패관의 경우에 J의 지배가 유지되며, HRR장으로

응력과 변형률장을 특성화할 수 있음을 알 수 있다.

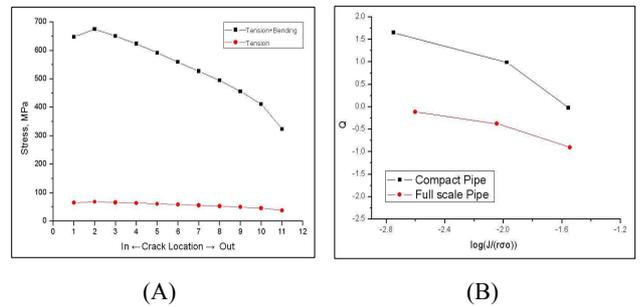


Fig. 5 Result in analysis (A) Comparison between bending stress and tensile stress in CPB. (B) Comparison of J-Q curve for compact pipe and full scale pipe

5. 결론

(1) 인장 소형 실패관에 대하여 굽힘 응력과 인장 응력의 비를 구함으로써 앞으로 레버의 길이와 시편의 높이를 조정함에 따라 실제 원전 배관의 내압과 굽힘 응력을 받는 거동을 모사할 수 있음을 확인하였다.

(2) 인장 소형 실패관 모델에 대하여 J-Q constraint effect 해석을 수행하여 굽힘 실패관과 결과를 비교하였다. 그 결과 인장 소형 실패관이 굽힘 실패관보다 구속조건이 더 높다는 것을 확인하였다. 따라서 J-integral을 사용한 탄소성 파괴역학이 인장 소형 실패관에 더 잘 적용된다고 해석할 수 있다. 향후, 실제 시험을 통하여 J-R curve를 얻어 이를 검증하는 것이 필요하다.

후기

본 논문은 2단계 두뇌한국 사업과 2009년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2009-008 1802)

참고문헌

- Joyce, J. A., Hackett, E. M. and Roe, C., 1993, "Effects of Crack Depth and Mode of Loading on the J-R Curve Behavior of a High-Strength Steel", "Constraint Effects in Fracture, ASTM STP 1171, pp. 239~263.
- 윤기봉, 박태규, 김영석 "Zr-2.5Nb 압력관의 휘어진 CT시편으로 측정된 J 저항곡선의 정확도에 관한 연구", 대한기계학회 A권, 제 27권 제11호, pp. 1986~1996, 2003
- 허남수, 김윤재, 최재봉, 김영진, 임혁순, 정대을 "원 광폭평판 시험을 이용한 원자력 배관의 파괴거동예측", 대한기계학회 A권, 제 28권 제4호, pp. 352-361, 2004
- 박재실, 석창성, 김영진 "실패관 파괴특성 평가에 관한 연구", 대한기계학회 A권, 제 29권 제1호, pp. 107-114, 2004
- 박수, 최정훈, 허용, 구재민, 석창성 "인장 실패관 시험편을 이용한 원전배관 파괴인성 평가", 대한기계추계학회, 2009
- Shih, C. F., O'Dowd, N. P. and Kirk, M. T., "A Framework for Quantifying Crack Tip Constraint," Constraint Effects in Fracture, ASTM STP 1171, pp. 2~20, 1993