

엘보우 배관에 존재하는 삼차원 균열 해석을 위한 유한요소 교호법의 적용

김태순 · 박재학 · 박치용*

충북대학교 공과대학 안전공학과 · *한국전력공사 전력연구원

1. 서론

설비의 건전성 평가에 유한요소 교호법을 이용하여 다양한 형상을 갖는 삼차원 균열을 해석하려는 많은 시도가 있었다. 특히 Nishioka와 Atluri¹⁾에 등은 타원형의 표면균열 또는 모서리 균열 등을 해석하는 방법을 제안하였고, 박재학 등²⁾은 Forth와 Keat³⁾의 해를 유한요소 교호법에 적용하여 일반적인 삼차원 균열을 해석할 수 있는 방법을 제시하였다. 그리고 Li와 Mear 등이 제시한 변위의 불연속에 대한 감소된 특이성을 갖는 대칭형의 적분방정식의 균열해를 유한요소 교호법에 적용하여 임의의 삼차원 균열을 해석할 수 있는 방법을 제시하였다.

본 논문에서는 이러한 유한요소 교호법을 이용한 삼차원 균열에 대한 해석방법을 보다 실제적인 경우에 적용하였다. 적용을 위해 고려한 대상은 가압중수로형 원전의 1차측 배관과 가압경수로형 원전의 2차측에 설치된 엘보우 배관이다. 이 엘보우 배관은 가공성과 용접성이 우수한 탄소강이 주로 사용되고 있으나, 탄소강은 부식에 취약하여 유동가속부식(FAC, Flow Accelerated Corrosion) 현상에 의한 배관의 두께방향으로 결함이 발생되어 전체 배관 계통에 심각한 손상을 일으킨다. 이러한 건전성 저해요인에 대한 인식에도 불구하고 원전 배관의 경우에는 종류와 형상이 다양하기 때문에 유한요소 해석을 위한 모델링이 쉽지 않은 것이 현실이다. 특히, 엘보우 배관은 직관에 비해 형태가 복잡하고 균열의 위치에 따라 배관의 건전성에 주는 영향이 달라지므로 정확한 형상의 모델링과 함께 보다 많은 계산이 요구된다. 본 논문에서는 엘보우 배관에 존재하는 삼차원 균열의 형상을 모델링한 후 균열의 위치와 조건을 변화시켜가며 응력강도 계수를 구하였다.

2. 유한요소 교호법을 이용한 삼차원 균열 해석

2.1 유한요소 교호법

일반적으로 유한요소법은 다양한 경우의 경계조건을 수용할 수 있으므로 탄성 또는 탄소성 문제를 해석하는 데 널리 사용되고 있고, 물체 내에 존재하는 임의 형태의 삼차원 균열에 대한 모델링에 아주 적합한 방법이다. 유한요소 교호법에서는 균열에 대한 모델링에서는 대칭 Galerkin 경계요소법 등을 이용하여 이론해를 구하고, 균열을 포함하지 않는 유한요소모델에는 유한요소법을 사용하여 해를 구하게 된다.⁴⁾ 그리고 나서

두 모델을 중첩함으로써 균열을 포함한 물체에 대한 해를 구하는 방법으로 유한요소교호법의 해석단계는 참고문헌 4에 기술되어 있다.

2.2 변위의 불연속을 이용한 응력강도계수 계산

무한 물체 내에 임의 형태의 평면 또는 비평면 삼차원 균열이 Fig. 1에서와 같이 존재하고, 균열면 상에는 임의의 표면력(traction)이 작용한다고 하자. 이때 균열은 두 개의 균열면 S_+ 와 S_- 에서의 변위의 불연속의 연속된 분포로 나타낼 수 있다. Li와 Mear 등⁵⁾은 균열에 대하여 다음 식과 같은 낮은 특이성(weak singularity)을 갖는 경계적분 방정식(boundary integral equation)이 만족됨을 보였다.

$$-\int_S \int_S D_\alpha u_i^*(z) C_{\alpha\beta\gamma}(\xi-z) D_\beta u_j(\xi) dS(\xi) dS(z) = \int_S u_k^*(z) t_k dS(z) \quad (1)$$

여기서 u_i 는 균열면에서의 변위 불연속의 성분, u_i^* 는 시험함수(test function)의 성분, t_k 는 균열면 S 에 작용되는 표면력 성분이다. 이 균열면을 몇 개의 경계요소로 나누면 각각의 요소 내에서의 변위 및 표면력은 다음과 같이 형상함수로 나타낼 수 있다.

$$u_i = N_\alpha u_{i\alpha}, \quad f_i = N_\alpha f_{i\alpha} \quad (2)$$

여기서 아래첨자 i 와 a 는 각각 전체좌표계와 요소 내 절점번호를 나타내고, u_{ia} 와 f_{ia} 는 각각 이들 절점에서의 변위와 표면력 값이다. 시험함수로 형상함수를 사용하고 식(2)를 이용하면 식(1)은 다음과 같이 이중적분의 형태로 된다.

$$-\int_S \int_S C_{\alpha\beta\gamma} D_\alpha N_a(z) D_\beta N_b(\xi) dS(\xi) dS(z) u_{ib} = \int_S N_\alpha N_q(z) dS(z) t_{iq} \quad (3)$$

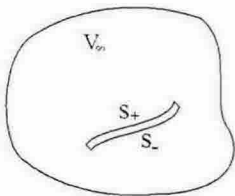


Fig. 1. Crack as displacement discontinuity.

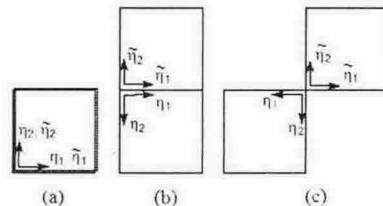


Fig. 2. Singular cases for boundary elements.

Table 1 Analysis condition for surface crack embedded in elbow.

Classification	Variables	
Pipe geometry	Pipe length(l_{th} , mm)	4000.0
	Diameter(D_o , mm)	400.0
	Thickness(t_{nom} , mm)	20.0
	Bend radius(r_b/r_m)	6.0
Crack configuration	Shape	Elliptical surface
	Axis ratio(b/a)	0.5 ~ 2.0
	Location	Inner surface
Loading condition	Internal pressure	10 MPa

식(3)을 사용하여 각 균열 절점에서의 변위의 불연속을 구한 후, 이들 값과 응력강도 계수의 관계로부터 각 모드에서의 응력강도계수를 계산한다. 그런데, 식(3)의 풀이를 위해서는 이중적분을 계산하여야 하므로, 적분은 각 균열요소 S_m 과 S_n 에 대하여 S_m 에 대하여 적분한 후 다시 S_n 에 대하여 적분할 필요가 있다. 이때 Fig. 2의 세 가지 경우들과 같을 때에는 피적분 함수에 특이성이 나타나므로 적분에 어려움이 있다. 이러한 적분의 어려움은 적절한 좌표변환을 통하여 해결할 수 있음이 최근 밝혀졌다.⁶⁾

3. 엘보우 배관에 존재하는 삼차원 균열의 해석

3.1 해석조건

균열을 포함하고 있는 엘보우의 손상거동을 살펴보기 위해, 직경(D_0)이 400mm이고 공칭두께(t_{nom})가 20mm인 엘보우에 직관이 연결된 탄소강 배관을 대상으로 하였다. 엘보우의 곡률반경은 배관의 평균반경(r_m)의 6배로 하였고, 배관의 길이는 4,000mm 하였다. 해석에 사용된 엘보우와 균열에 대한 상세한 사항은 Table 1에 나타난 바와 같다. 하중조건을 구해내기 위해 응력해석용 상용프로그램인 ABAQUS를 이용하였으며, 배관의 내압은 10MPa로 하였다.⁷⁾

일반적으로 균열을 포함하고 있는 엘보우의 손상거동은 내압에 의한 축방향 균열의 거동과 굽힘모멘트에 의한 원주방향 균열의 거동으로 나누어서 살펴볼 수가 있다. 본 연구에서는 이들 중 축방향 균열에 내압이 작용하는 경우에 대해 해석하였다. 엘보우 배관의 내벽에 고려한 균열의 형상은 반타원형 표면균열로서, 균열을 고려한 위치는 엘보우 배관의 굽힘이 시작되기 직전의 용접부로 하였다. 이것은 용접부에서 발생하는 균열이 실제적으로 배관의 손상과 관련된 많은 문제점을 노출시키고 있기 때문이다. 따라서 내압이 작용하는 엘보우 배관의 용접부 내벽에 존재하는 표면균열의 형상에 따른 응력강도계수를 구하는 문제에 본 연구에서 확장한 유한요소 교호법을 적용하였다.

3.2 표면 균열 해석

엘보우 배관에 존재하는 표면균열의 형상에 따른 응력강도계수를 구하기 위해 기본

적으로 고려한 균열의 형상은 Fig. 3에 나타난 것과 같은 반타원형 표면균열이다. 이 반타원형 표면균열의 장축의 길이 a 와 단축의 길이이자 엘보우 벽 두께방향으로의 균열 깊이인 b 의 길이를 변화시켜가면서 응력강도계수 K_I 의 변화를 살펴보았다.

Fig. 4는 단축의 길이 b 를 두께 h 의 1/2에 해당하는 10mm로 고정하고 a 를 변화시켜가면서 구한 응력강도계수의 값을 나타낸 그림이다. 여기에서 a 와 b 가 같은 경우는 반원형 균열을 해석한 결과이다. 결과에서 보듯이 균열깊이(b)가 일정한 경우 균열의 길이(a)가 증가하면 균열선단에서의 응력강도계수 값은 선형적으로 비례하여 증가하지만 그 증분은 점차 작아지는 것을 알 수 있다. 이런 결과를 균열깊이가 최대인 타원의 90°부분에서의 값을 기준으로 Fig. 5에 나타냈다.

다음으로는 위의 경우와 반대로 장축의 길이 a 를 두께 h 에 해당하는 20mm로 고정하고 균열깊이 b 를 변화시켜가면서 구한 응력강도계수의 값을 Fig. 6에 나타냈다. 균열깊이(b)가 증가함에 따라 균열선단에서의 응력강도계수 값은 앞에서의 경우보다 상당히 급격하게 증가하는 것을 알 수 있다.

마지막으로 장축의 길이와 단축의 길이 모두 변화시켜가면서 이때의 응력강도계수의 값을 구하였다. 이 경우는 균열의 성장에 따른 응력강도계수의 변화를 보기 위한 것으로 그 결과를 두께에 대한 균열깊이의 비 b/h 에 대하여 Fig. 7에 나타냈다. 결과에서 알 수 있듯이 타원형 균열은 점차 원형 균열의 형상으로 변해가는 특성을 고려할 때 실제 배관에서 반타원형 균열에 대한 응력강도계수의 변화는 Fig. 6과 7의 중간정도의 결과를 보일 것으로 판단된다.

3.3 엘보우 배관에 존재하는 삼차원 균열의 성장

원전 엘보우 배관의 용접부 근처에 존재하는 표면균열의 피로에 의한 성장거동을 알아보기 위해, 배관의 두께방향으로 임의의 깊이를 갖는 반타원 표면 균열을 해석하였다. 균열을 성장시키기 위해 가하는 하중은 엘보우 배관의 내벽에 축방향으로 존재하는 균열이므로 내압에 의한 모드 I의 경우만을 고려하고 이를 통하여 응력강도계수 K_I 를 구한다. 반타원형 표면 균열의 초기 장축과 단축의 비 a/b 는 0.5이고, 두께방향으로의 균열의 깊이 a 의 길이는 배관 두께의 1/5이 되도록 하였다. 균열의 형상이나 균열메쉬 등과 같은 다른 조건은 Fig. 3에 나타난 것과 동일하다.

균열성장을 시뮬레이션하기 위한 Paris의 균열성장식의 재료상수로는 앞장에서와 같이 기계구조용 강(steel)에 대해 제안된 $C=3.0 \times 10^{-13}$, $n=3.0$ 을 적용하였다. 반타원형 표면 균열의 성장을 해석하기 위하여 각 절점에서 계산된 응력강도계수에 따라 균열성장식에 의해 구해진 증분만큼 균열선단을 이동시켜 Fig. 8에 균열중심에서 균열선단의 절점에 이르는 각도에 따라 표시하였다. 결과에서 알 수 있듯이 반타원형 표면 균열의 선단에서 구한 응력강도계수는 균열깊이가 최대인 타원의 90°부분에서의 값이 가

장 크게 나타나고 양쪽으로 벗어날수록 응력강도계수가 작게 나타난다.

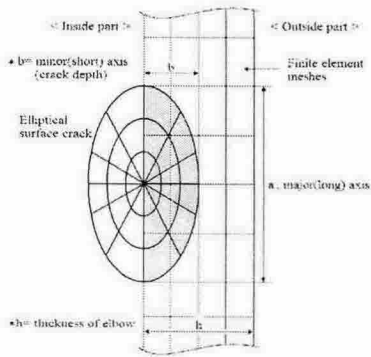


Fig. 3 Mesh configuration for a semi-elliptical surface crack and finite element model.

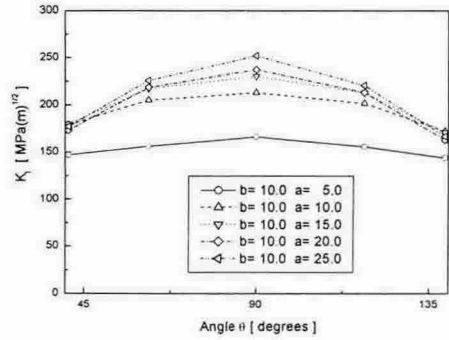


Fig. 4 SIFs according to angle of the crack tip for the surface crack in an elbow.

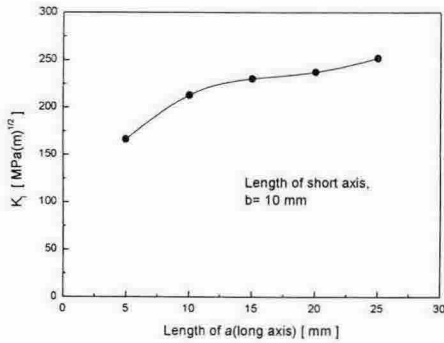


Fig. 5 SIFs according to the major length for a surface crack in an elbow.

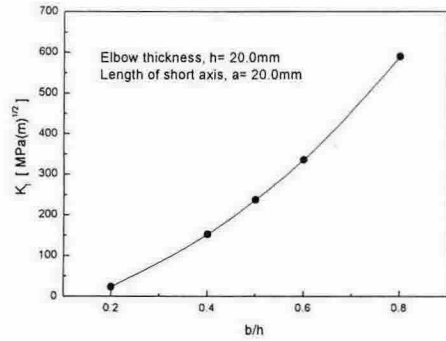


Fig. 6 SIFs according to b/h for a semi-elliptical crack in an elbow.

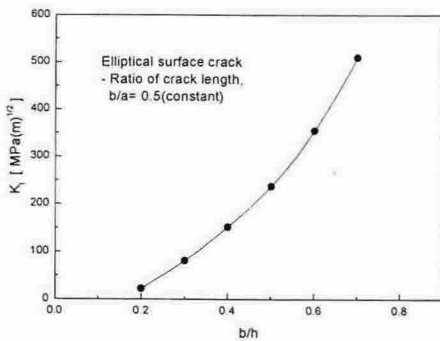


Fig. 7 SIFs according to b/h for a semi-elliptical surface crack in an elbow.

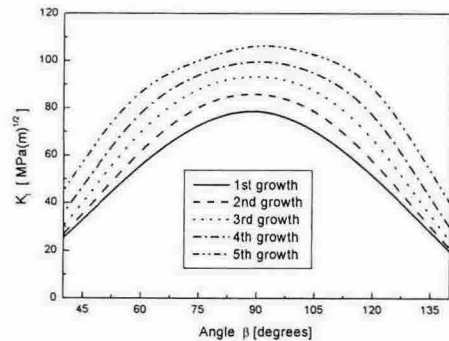


Fig. 8 SIFs of a semi-elliptical crack in an elbow under cyclic loading condition.

4. 결 론

원전 엘보우 배관에 존재하는 삼차원 균열의 해석에 본 논문에서 제안한 유한요소 교호법을 이용한 삼차원 균열 해석방법을 적용하여, 삼차원 표면 균열 선단에서의 응력 강도계수를 구하고, 피로균열 성장을 예측하였다. 엘보우 배관에 존재하는 표면균열의 형상에 따른 응력강도계수를 구하였고, 두께방향으로의 균열깊이가 실제적으로도 배관의 안전성에 치명적인 결과를 가져올 수 있음을 보였다.

엘보우 배관 내에서 반복하중을 받고 있는 반타원형 표면 균열의 성장을 시뮬레이션하여 응력강도계수를 구하고, 이 응력강도계수를 바탕으로 하여 균열의 성장을 예측할 수 있음을 보였다. 그리고 좀 더 실제적인 성장모형을 완성하기 위해서는 반타원형 표면 균열의 선단이 자유표면과 만나는 균열 요소에서의 정확한 해를 구할 수 있는 해석방법이 요구된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단(KOSEF) 산하 성균관대학교 산업설비 안전성 평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- 1) T. Nishioka and S. N. Atluri, "Analytical Solution for Embedded Elliptical Cracks and Finite Element Alternating Method for Elliptical Surface Cracks, Subjected to Arbitrary Loadings," *Engng Frac. Mech.*, Vol. 17, pp. 247~268, 1983.
- 2) 박재학, 김태순, S. N. Atluri, "유한요소 교호법을 이용한 모드 I 하중 하의 삼차원 균열의 해석," *대한기계학회 논문집 (A)*, 제24권, 제4호, pp. 982~990, 2000.
- 3) S. C. Forth and W. D. Keat, "Three-dimensional Nonplanar Fracture Model Using the Surface Integral Method," *Int. J. Fracture*, Vol. 77, pp. 243~262, 1996.
- 4) G. P. Nikishkov, J. H. Park and S. N. Atluri, "SGBEM-FEM Alternating Method for Analyzing 3D Non-planar Cracks and Their Growth in Structural Components," *Comp. Modeling in Engng & Sci.*, Vol. 2, No. 3, pp. 401~422, 2001.
- 5) S. Li and M. E. Mear, "Singularity-reduced Integral Equations for Displacement Discontinuities in Three Dimensional Linear Elastic Media," *Int. J. Fract.*, Vol. 93, pp. 87~114, 1998.
- 6) A. Frangi, G. Novati, R. Springhetti and M. Rovizzi, "Fracture Mechanics in 3D by the Symmetric Galerkin Boundary Element Method," *VIII Conf. on Numerical Methods in Continuum Mechanics*, Liptovsky Jan, Slovak Republik, 2000.
- 7) Hibbitt, Karlson and Sorensen Inc., *ABAQUS User's Manual*, 2001.