

# 복합균열이 존재하는 증기 발생기 전열관의 파열압력해석

신규인 · 박재학 · 김홍덕\* · 정한섭\*

충북대학교 안전공학과 · \*한국전력공사 전력연구원

## 1. 서론

원전을 가동함에 따라 전열관에서는 SCC(stress corrosion cracking), 프레팅(fretting) 등과 같은 다양한 종류의 결함이 발생된다. 이러한 결함이 발생된 전열관에 대해서는 건정성 평가를 수행하여 계속 가동을 수행하던가, 전열관 막힘(plugging) 또는 재생보수(sleeve) 등의 보수 작업을 수행하게 된다. 현행 전열관의 구조 건정성 확보를 위한 방안 중의 하나로 결함의 종류, 위치 등에 관계없이 모든 결함에 대하여 40% 관두께 기준을 적용하고 있다[1]. 그러나 현재 적용되고 있는 40% 관두께 보수 기준은 전열관의 파열사고 가능성을 완벽하게 차단하지 못하면서도 과도하게 보수적인 측면이 있다.

이에 본 연구에서는 결함이 발생한 전열관에서의 건정성 평가를 위하여 단일 축방향 균열이 존재하는 경우에 대한 탄소성 해석을 행하여 주어진 파열압력에 대한 임계 COA(crack opening angle)를 구하였다. 또한 축방향 단일 균열에서의 임계 COA인 (COA)<sub>c</sub>를 매개변수로 하여 축/원주 방향 복합균열에서의 파열압력을 추정하는 방법을 제시하였고, 관판의 영향을 살펴보기 위하여 관판 근처에 복합균열을 위치시켜 관판이 있는 경우의 파열 압력을 구하였다.

## 2. 복합균열에서의 파열압력

단일 균열에 대한 파열압력식을 복합균열에 적용하기 위해서는 적절한 매개변수를 선택하여야 한다. 본 연구에서는 유한요소 해석에서 얻어지는 COA(crack opening angle)를 매개변수로 택하였다. COA는 간접적으로 파괴진행역에서의 변형의 크기를 알려주므로 주어진 균열길이에 대하여 동일한 COA값을 가진다면 균열선단의 변형상태가 동일하다고 할 수 있다.

탄소성 유한요소해석을 행한 후 균열선단 근처의 변형된 요소들을 표시하면 Fig. 1

과 같이 될 것이다. 이때 COA의 계산에는 원주방향의 변위  $u_\theta$  만을 고려한다. 원통형 구조물의 축방향 균열의 경우 벌징현상에 의하여 반경방향의 변위  $u_r$ 이 발생된다. 그러나 단일균열에 대한 탄소성 해석 결과, 균열선단인 A점과 균열면 상의 첫 번째 모서리 절점인 B점과의  $u_r$ 의 차이는  $u_\theta$ 에 비하여 매우 작음을 알 수 있었다. 따라서 COA의 정의에 변위  $u_\theta$  만을 고려하였다.

COA의 크기는 유한요소해석에서 사용되는 균열선단 근처의 요소의 크기에 따라 달라진다. 본 해석에서는 요소 내 굽힘을 고려할 수 있는 구조용 8절점 쉘요소(shell element)를 사용하였다. 이때 COA는 길이 0.1mm, 높이 0.1 mm되는 요소에서 구하였다

길이 L을 가지는 단일 축방향 균열이 존재하는 전열관의 파열압력은 EPRI에서 제안된 다음의 식 (1)으로부터 구하였다

$$P_N = 0.0613 + 0.536 \exp(-0.278 \lambda), \quad \lambda = \frac{L}{\sqrt{rt}} \quad (1)$$

여기서  $P_N$ 은 주어진 균열 길이에 대한 파열압력을 무차원 인자의 함수로 표현한 값이고, L은 균열길이, r은 전열관의 평균 반경 그리고 t는 전열관의 두께이다.

본 연구에서 적용된 파이프 치수는 내경은 20.06 mm, 외경은 22.60 mm, 두께는 1.27 mm 그리고 길이는 50.0 mm로 하였다. 또한 관판 적용시 축방향 균열의 한쪽 균열 선단부터의 파이프는 두께 10 mm의 관판으로 되어 있다고 가정하여 해석하였다. 관판이 있는 경우에 대한 모델은 Fig. 2에서와 같다.

해석시 재료의 변형 특성은 다음의 응력-변형률 관계식을 이용하였다. 재료의 항복강도( $\sigma_{ys}$ )와 극한강도( $\sigma_u$ ) 그리고 재료 상수 K와 n은 Table 1에 나타내었다.

$$\sigma = K \epsilon^n \quad (1)$$

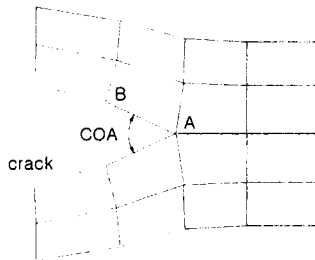


Fig. 1 Definition of COA

Table 1 Material properties of Inconel 600

Temperature( °C)	$\sigma_{ys}$ (MPa)	$\sigma_u$ (MPa)	K (MPa)	n
343	281.7	664.4	2988	0.38

### 3. 복합 균열의 파열 압력 계산

#### 3-1. 축방향 균열 길이의 파열 압력 계산

전열관 내부에 작용하는 유체의 압력으로 인한 전열관의 파열 압력을 알아보기 위하여 유한요소 상용 프로그램인 ANSYS를 이용하여 3, 6, 9, 12, 15, 18 그리고 21 mm의 축방향 균열길이 변화에 따른 COA를 구하고 이로부터 여러 가지 복합균열에서의 파열 압력을 계산하였다. 각각의 축방향 균열 길이에 대한 파열압력(P)과 관판을 고려할 때의 파열압력 결과를 Fig. 3에 함께 나타내었다.

Fig. 3에서 보면 균열길이가 길어질수록 파열 압력은 낮아지고 관판이 있는 경우 균열길이가 짧은 경우는 파열 압력이 높아 관판의 영향이 크나 균열 길이가 길어질수록 파열 압력이 낮아져 관판에 의한 영향이 거의 없는 것으로 나타났다.

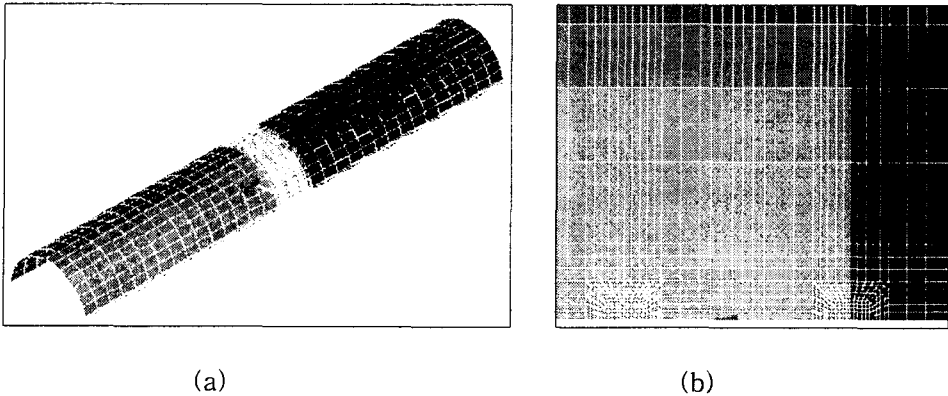


Fig. 2 Element model of a longitudinal crack in a pipe(L=6 mm) with tubesheet.

#### 3-2. 복합 균열의 파열 압력 계산

##### (1) T-형 복합 균열에 대한 파열 압력 계산

전열관에 존재하는 복합 균열을 해석하기 위하여 T-형의 복합 균열에 대하여 파열 압력을 해석하였다. T-형의 복합 균열은 축방향 균열 길이(L)이 6, 12 그리고 18 mm의 세 가지 균열에 대하여, 축방향 균열의 한쪽 선단에 45°의 원주각을 가지는 원주방향 균열이 존재한다고 가정하였다.

균열 선단에서의 모델 형성은 축방향 균열 길이에서의 균열 선단에서와 같도록 0.1 mm씩 간격으로 하여 파열 압력 계산 후에  $(COA)_C$  와 축방향 균열에서의  $(COA)_C$ 를 비교할 수 있도록 하였다.

작용 하중으로는 각각의 균열 길이에서 구한 파열압력(P)을 내부 압력으로 작용시켰

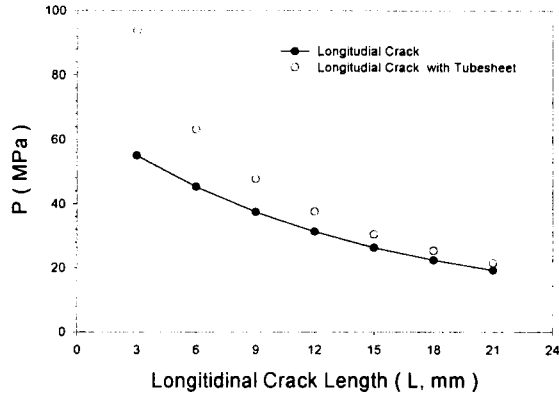


Fig. 3 Burst pressure(P) for longitudinal cracks with and without tubesheet

고, 이에 의하여 발생되는 축방향 응력도 함께 고려하였다.

Fig. 4는 균열길이(L)가 6, 12, 그리고 18 mm에 대하여 축방향 균열에서 얻은  $(COA)_C$  와 동일한  $(COA)_C$ 에서의 T-형 복합 균열의 파열 압력을 비교한 것이다.

이때 T-형 복합균열은 관관이 없는 경우와 원주방향 균열에 관관을 위치시켜 파열 압력에서의 관관의 효과를 비교하였다.

그림에서 보면 T-형 복합 균열에서는 원주 방향의 균열로 인하여 축방향 균열만이 존재 할 때보다 파열 압력이 낮음을 알 수 있다. 그러나 관관에 T-형 복합균열이 있는 경우와 비교해보면 균열이 작은 경우 축방향 균열만이 존재 할 때보다는 낮지만 균열이 길어질수록 원주 방향 균열과는 무관하게 관관의 효과는 없어지고 파열압력은 관관과 무관하게 비슷한 값을 알 수 있다.

## (2) L-형 복합 균열의 파열 압력 해석

L-형의 복합 균열해석에는 축방향 균열이 길이(L) 6 mm 균열에 대하여 각각 원주 방향 균열(C)이 축방향 균열을 중심으로 위로 15°, 30°, 45° 그리고 60° 의 원주각을 가지며 존재한다고 가정하였다.

Fig. 5는 균열길이(L)가 6 mm에 대하여 축방향 균열에서 얻은 (COA)<sub>c</sub> 와 동일한 (COA)<sub>c</sub>에서의 L-형 복합 균열의 파열 압력을 비교한 것이다. 그림에서 보면 L-형 또한 T-형 복합 균열에서와 마찬가지로 원주 방향의 균열로 인하여 축방향 균열만이 존재할 때보다 파열 압력이 낮음을 알 수 있다.

관판에 L형 복합균열이 있는 경우와 비교해보면 원주방향 균열이 작은 경우(C=15°) 축방향 균열보다는 파열 압력이 높은 값을 가지나 원주 방향 균열이 커질수록(C=60°) 관판의 효과는 없어지고 파열압력은 관판과 무관하게 비슷한 값을 가짐을 알 수 있다.

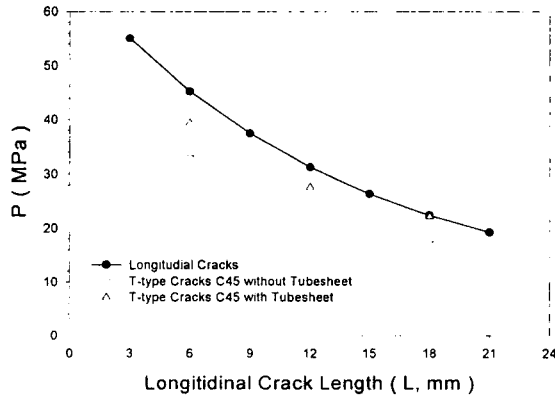


Fig. 4 Comparison of burst pressure (P) between T-type and longitudinal cracks

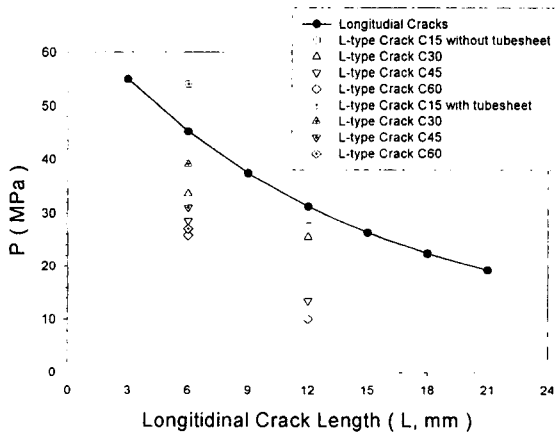


Fig. 5 Comparison of burst pressure (P) between L-type and longitudinal cracks.

#### 4. 결론

- 제안된 파열식으로부터 축방향 균열의 파열압력과 COA를 계산하였고 COA를 매개변수로 하여 관판이 있는 경우와 관판이 없는 경우에서의 복합균열 파열압력을 살펴보았다.
- T-형 복합균열은 원주 방향의 균열로 인하여 파열압력이 낮아졌다. 관판이 있는 경우 단일 축방향 균열보다는 낮았지만 균열이 길어질수록 축방향 균열의 파열압력과 거의 같아짐을 알 수 있었다.
- L-형 복합균열의 경우 축방향 균열과 비교시 원주 방향의 균열이 길어질수록 파열 압력이 낮아졌다. 관판이 있는 경우 원주 방향균열이 작을 때는 단일 축방향 파열 압력보다는 높게 나타났지만 원주 방향의 균열이 길어질수록 관판이 없는 경우의 L-복합균열의 파열압력과 거의 같아져 관판의 효과가 없어짐을 알 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국전력 전력연구원과 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성 평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 정한섭, 김기태, 김홍덕, 이희중, 남민우, “증기 발생기 전열관 건전성 평가기준 개발”, KEPRI 보고서, 1998.
2. EPRI NP-6865-L, “Steam generator tube integrity, Volume 1: Bust test results and validation of rupture criteria”, 1991.
3. EPRI NP-6865-L, “Steam generator tube integrity, Volume 2: Leak-Before-Break analysis for primary water stress corrosion cracking near the tubesheet”, 1991.
4. J.H. Lee, Y.W. Park, M.H. Song, Y.J. Kim and S.I. Moon, “Investigation on Interaction Effects of Two Collinear Through-Wall Axial Cracks in Steam Generator Tubes”, 제 6 회 원전기기 건전성 워크샵, KINS AR-560, Vol. 2, pp. 185-195, 1999.
5. E.S. Folias, “A finite line crack in a pressured cylindrical shell”, Int. J. Fracture, Vol. 1, pp. 104-113, 1965.