

복합 균열이 존재하는 증기 발생기 전열관에서의 파열 압력 해석

신규인 · 박재학 · 김홍덕* · 정한섭*

충북대학교 안전공학과 · *한국전력공사 전력연구원

1. 서 론

증기 발생기 전열관의 파열 사고는 지난 20년 동안 2년마다 1개씩의 비율로 발생되어왔고 최근 몇 년간은 매년 발생되고 있는 추세이다[3].

전열관의 파열 사고는 응력부식균열, 피로 그리고 마멸 등의 원인에 의해서 발생되고 있는 것으로 알려져 있다.

초기 발전소에서 균열의 발생 및 성장은 축 방향 균열에 국한하여 관심을 가졌었으나 최근 원주 방향 균열에 의한 사고가 발생되면서 원주 방향 균열에 대해 관심을 가지게 되었다.

그러나 단일 축 방향 또는 원주 방향의 균열이 존재하는 튜브에 대한 파열 압력은 여러 문헌에 연구 발표되었으나 축 방향과 원주 방향 균열로 이루어진 복합 균열에 대한 연구는 거의 없는 실정이다.

이에 본 논문에서는 단일 축 방향 균열이 있는 경우와 세 가지 형태의 복합 균열 즉 T-형, L-형 그리고 U-형의 복합 균열에 대하여 탄성 해석을 통하여 축 방향 균열에서의 응력 강도 계수를 구하였고 이를 매개변수로 하여 복합균열에서의 파열압력을 계산하였다.

또한 탄소성 해석을 행하여 축 방향 단일 균열에 대한 파열압력에서의 임계 COA 인 COA_c 를 구하고 이를 매개변수로 사용하여 복합균열이 존재하는 전열관에서의 파열압력을 추정하는 방법을 제시하였고 관관이 파열압력에 주는 영향에 대해서도 살펴보기 위하여 축/원주 방향의 복합균열에서 원주 방향 균열의 한쪽 선단에 관관을 위치시킨 후 복합균열의 파열 압력을 함께 구하여 관관의 영향을 살펴보았다.

본 논문의 결과는 복합균열이 존재하는 튜브에 대하여 한계 길이보수 기준 (length-based repair limit) 기준을 결정하는데 유용하게 이용 될 수 있다. 한계 길이보수 기준은 벨기에와 스웨덴의 발전소에서는 현재 적용하고 있고 프랑스(EDF, Electricite de France) 와 스페인의 발전소에서도 받아들이고 있다[3].

2. 파열 압력 해석

(1) 탄소성 해석 및 모델

단일 균열에 대한 파괴 압력식을 복합균열에 적용하기 위해서는 적절한 매개변수를 선택하여야 한다. 본 논문에서는 유한요소 해석으로부터 응력강도계수(K_I)와 COA (crack opening angle)를 매개변수로 하였다.

탄소성 해석시 COA는 간접적으로 파괴 진행역에서 변형의 크기를 알려주므로 주어진 균열길이에 대하여 동일한 COA값을 가진다면 균열선단의 변형상태가 동일하다고 할 수 있다.

COA의 계산에는 T-형 복합 균열의 경우 원주방향의 변위 u_θ 만을 고려하였고 L-형과 U-형의 경우 u_r 과 u_θ 를 함께 고려하였다. 원통형 구조물의 축 방향 균열의 경우 벌징 현상에 의하여 반경방향의 변위 u_r 이 발생된다.

COA의 크기는 유한요소해석에서 사용되는 균열선단 근처의 요소의 크기에 따라 달라진다. 본 해석에서는 길이 0.1 mm, 높이 0.1 mm되는 요소를 사용하였다. 8절점 2차원 요소를 사용하는 경우는 균열선단에서 가장 가까운 중간 절점에서의 변위값도 구할 수 있다. 그러나 COA는 모서리 절점의 변위에 대해서만 구하였다.

해석시 재료의 변형 특성은 응력-변형률 관계식($\sigma = K\epsilon^n$)을 이용하였다. 복합 균열 해석에 이용된 재료의 항복강도(σ_{ys})와 극한강도(σ_u) 그리고 재료 상수 K와 n은 Table 1에 나타내었다.

전열관 모델은 2차원 8절점의 쉘 요소(shell element)를 이용하였으며 쉘 요소 모델에 이용된 튜브의 공칭 직경은 21.33 mm, 두께는 1.27 mm, 그리고 튜브의 길이는 200.0 mm로 하였다.

(2) 탄성 해석

탄성 해석시 축 방향 균열과 복합 균열이 존재하는 증기 발생기 전열관의 해석을 위해 ABAQUS 프로그램(V. 6.2)을 이용하여 균열 길이에 따른 응력 강도 계수로부터 파괴 압력을 구하였다.

해석시 3차원 20 절점의 구조용 요소를 사용하였으며 두께 방향으로 4개의 요소가 형성되도록 하였다. 이때 관판의 영향은 고려하지 않았으며 응력강도계수 K_I 은 균열 선단근처에서의 변위를 이용하여 계산하였다. 즉 응력 강도 계수는 다음의 식 (1)에서와 같이 균열 선단으로부터 1/4 지점에 위치한 절점에서의 변위로부터 얻은 K_I' 과 균열 요소의 끝 절점에서의 변위로부터 얻은 K_I'' 의 응력 강도 계수를 계산하여 얻었다.

$$K_I = 2K_I' - K_I'' \quad (1)$$

윗 식의 K_I 은 다음의 식 (2)으로부터 구하였다.

$$K_I = \frac{\delta\sqrt{2\pi E}}{4(1-\nu^2)\sqrt{d}} \quad (2)$$

여기서 δ 와 d 는 각각 절점에서의 θ 방향 변위와 균열 선단에서 절점까지의 거리이고, E 는 탄성 계수 그리고 ν 는 푸아송비이다.

해석에 사용된 조건들을 살펴보면, 튜브의 형상 및 치수는 내경 20.06 mm, 외경 22.60 mm, 관 두께 1.27 mm, 그리고 튜브의 길이는 200.0 mm로 하였으며 해석에 이용된 재료의 항복강도(σ_{ys})와 극한강도(σ_u) 그리고 재료 상수 K와 n은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Material properties of Inconel 600 for burst pressure analysis

Temperature (°C)	σ_{ys} (MPa)	σ_u (MPa)	K (MPa)	n
20	314.0	698.0	3266.1334	0.36

4. 결과 및 고찰

(1) T-형 복합 균열에 대한 파열 압력 계산

T-형 복합 균열은 탄소성 해석의 경우 6 mm, 9 mm, 12 mm, 15 mm 그리고 18 mm의 축 방향 균열 길이(L)에 대하여 각각의 축 방향 균열의 한쪽 끝을 중심으로 원주 방향의 균열($2c$)이 45° 와 90° 가 존재한다고 가정하였으며 대칭(symmetric) 조건을 이용하여 전체 모델 형상에서 1/2만 나타내도록 하였다.

또한 관판의 영향을 살펴보기 위하여 원주 방향의 균열($2c$)이 45° 인 경우에 대하여 원주 방향 균열이 두께 10 mm, 길이 50mm의 튜브로 가정한 관판의 시작 지점에 위치하도록 하였다. COA의 계산에는 원주방향의 변위 u_θ 만을 고려하였다.

탄성 해석의 경우 3 mm, 6 mm, 9 mm, 12 mm, 15 mm 그리고 18 mm의 축 방향 균열 길이(L)에 대하여 각각의 축 방향 균열의 한쪽 끝을 중심으로 원주 방향의 균열($2c$)이 30° , 60° , 90° 그리고 120° 가 존재한다고 가정하였으며 대칭(symmetric) 조건을 이용하여 전체 모델 형상에서 1/2만 나타내도록 하였다.

Fig. 1은 탄성 및 탄소성 해석결과와 참고 문헌[2]의 파열시험 결과와 함께 나타낸 그림이다.

그림에서 보면 파열 시험의 경우 동일한 축 방향 균열길이에서 원주 방향의 균열 길이가 길어질수록 파열 압력이 떨어짐을 알 수 있었다. 탄성 해석으로부터 구한 파열 압력의 경우 파열 시험의 결과보다 떨어지는 보수적인 결과를 보여주는 것을 알 수 있었다.

탄소성 해석 결과와 비교해보면 원주 방향 균열길이가 90° 인 경우 균열 길이가 짧은 경우는 탄소성 해석 결과가 탄성 해석 결과보다 높게 나타나지만 균열 길이가 길어질수록 두 해석으로부터의 파열압력이 같아짐을 알 수 있었다.

또한 관판의 영향을 살펴보면 동일한 원주 방향 균열길이에서 관판이 없는 경우 보다 높게 나타남을 알 수 있었다.

(2) L-형 복합 균열에 대한 파열 압력 계산

L-형 복합 균열은 탄소성 해석의 경우 6 mm, 9 mm, 12 mm, 15 mm 그리고 18 mm의 축 방향 균열 길이(L)에 대하여 각각의 축 방향 균열의 한쪽 끝을 중심으로 원주 방향의 균열($2c$)이 30° 와 50° 가 존재한다고 가정하였다.

또한 관판의 영향을 살펴보기 위하여 원주 방향의 균열($2c$)이 30° 인 경우에 대하여 원주 방향 균열이 두께 10 mm, 길이 50mm의 튜브로 가정한 관판의 시작 지점에 위치하도록 하였다. COA의 계산에는 u_r 과 u_θ 를 함께 고려하였다.

Fig. 2는 탄소성 해석결과와 참고 문헌 [2]의 파열시험 결과와 함께 나타낸 그림이다. 그림에서 보면 파열 시험에서 원주 방향 균열길이가 $2c=15^\circ$ 인 경우 동일한 축 방향 균열길이에서의 파열 압력과 크게 차이가 나지 않음을 알 수 있다.

탄소성 해석 결과를 살펴보면 u_θ 만이 고려되어 얻은 파열 압력이 u_θ 와 u_r 이 함께 고려되어 얻은 파열 압력보다 높게 나타남을 알 수 있다.

L-형 또한 T-형 복합 균열에서와 마찬가지로 원주 방향의 균열로 인하여 축 방향 균열만이 존재 할 때보다 파열 압력이 낮고 균열 길이가 길어질수록 파열 압력은 더 낮아지는 경향을 가지는 것을 알 수 있다.

또한 관판의 영향을 살펴보면 동일한 원주 방향 균열길이($2c=30^\circ$)에서 관판이 없는 경우 보다 높게 나타남을 알 수 있었다.

(3) U-형 복합 균열의 파열 압력 해석

U-형의 복합 균열해석에는 길이(L) 6 mm의 두 축 방향 균열 사이에 원주 방향 균열($2C$)이 각각 30° 와 50° 가 존재한다고 가정하였다.

또한 관판의 영향을 살펴보기 위하여 원주 방향의 균열($2C$)이 30° 인 경우에 대하여 원주 방향 균열이 두께 10 mm, 길이 50mm의 튜브로 가정한 관판의 시작 지점에 위치하도록 하였다. COA의 계산에는 u_r 과 u_θ 를 함께 고려하였다.

Fig. 3은 탄소성 해석결과와 참고 문헌 [2]의 파열시험 결과와 함께 나타낸 그림이다. 그림에서 보면 파열 시험결과 축 방향 균열에서의 파열 압력보다 상당히 낮은 것을 알 수 있다.

탄소성 해석 결과를 살펴보면 원주 방향 균열길이가 30° 와 60° 인 경우에서의 파열 압력의 차이가 거의 없고 u_θ 만이 고려되어 얻은 파열 압력이 u_θ 와 u_r 이 함께 고려되어 얻은 파열 압력보다도 거의 차이가 없음을 알 수 있다.

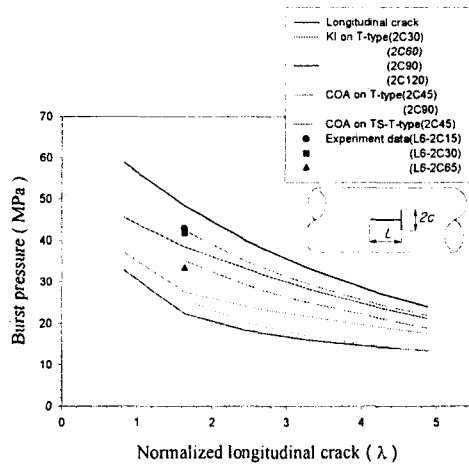


Fig. 1 Comparison of burst pressure (P) between T-type and longitudinal cracks.

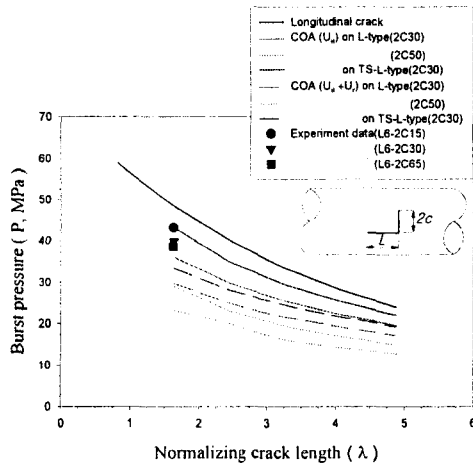


Fig. 2 Comparison of burst pressure (P) between L-type and longitudinal cracks.

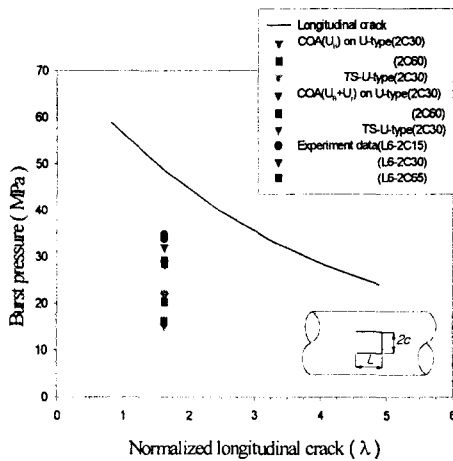


Fig. 3 Comparison of burst pressure (P) between U-type and longitudinal cracks.

5. 결 론

T-형, L-형 그리고 U-형의 복합 균열에 대하여 탄소성 해석과 탄성 해석을 통하여 복합균열에서의 파열압력을 추정하는 방법을 제시하였다.

또한 관판이 파열압력에 주는 영향에 대해서도 살펴보기 위하여 원주 방향 균열의 한쪽 선단에 관판을 위치시킨 후 복합균열의 파열 압력을 함께 구하였다.

1. T-형 복합균열의 해석 결과 균열 길이가 짧은 경우는 탄소성 해석 결과가 탄성 해석 결과보다 높게 나타나지만 균열 길이가 길어질수록 두 해석으로부터의 파열 압력이 같아짐을 알 수 있었다. 관판의 영향을 살펴보면 동일한 원주 방향 균열길이에서 관판이 없는 경우 보다 높게 나타남을 알 수 있었다.

또한 탄성 해석으로부터 구한 파열 압력의 경우 파열 시험의 결과보다 떨어지는 보수적인 결과를 보여주는 것을 알 수 있었다.

3. 전열관에 존재하는 L-형의 복합 균열에 대하여 탄소성 해석 결과 u_θ 만이 고려되어 얻은 파열 압력이 u_θ 와 u_r 이 함께 고려되어 얻은 파열 압력보다 높게 나타남을 알 수 있었고, 원주 방향의 균열로 인하여 축 방향 균열만이 존재 할 때보다 파열 압력이 낮고 균열 길이가 길어질수록 파열 압력은 더 낮아지는 경향을 가지는 것을 알 수 있었다. 또한 관판의 영향을 살펴보면 동일한 원주 방향 균열길이 ($2c=30^\circ$)에서 관판이 없는 경우 보다 높게 나타남을 알 수 있었다.
4. U-형의 복합 균열에 대하여 탄소성 해석 결과 원주 방향 균열이 30° 와 60° 인 경우에서의 파열압력의 차이가 거의 없고 u_θ 만이 고려되어 얻은 파열 압력이 u_θ 와 u_r 이 함께 고려되어 얻은 파열 압력과도 거의 차이가 없음을 알 수 있었다.

이러한 결과로부터 본 연구에서 제안된 COA와 응력강도계수 K_I 을 매개변수로 이용한 파열 압력 해석 결과는 참고문헌 [2]의 파열시험 결과보다 보수적인 결과를 나타내었고 증기발생기 전열관의 건전성 평가에 이용될 수 있음을 보여 주었다.

참고문헌

1. A. Zahoor, 1990, "Ductile Fracture Handbook Volume 2".
2. Kyu-In Shin, Jai-Hak Park, Hong-Deok Kim and Han-Sub Chung, 2001, "Analysis of the Burst Pressure of Cracked S/G Tubes", *Journal of the Korean Institute for Industrial Safety*, Vol. 16, No. 5, pp. 5-8.
3. EPRI NP-6865-L report, 1991, "Steam Generator Tube Integrity, Volume 1: Burst test results and validation of rupture criteria".
4. R. S. Barsoum, R. W. Loomis and B. D. Stewart, 1979, "Analysis of Through Cracks in Cylindrical Shells by the Quarter-point Elements", *International Journal of Fracture*, Vol. 15, No. 3, P. 259-280.