

# 소성 불안정 해석에 기초한 마모 손상된 전열관의 파열압력 해석

신규인 · 박재학

충북대학교 안전공학과

일반적으로 마모 손상된 원자력 발전소의 증기발생기의 전열관은 소성변형의 불안정에 의하여 파열이 발생된다. 이에 본 연구에서는 증기발생기 전열관에 평면형(flat type), 원주형(circumferential type)의 마모가 존재한다고 가정하고 소성 불안정(plastic instability) 해석에 기초하여 파열압력을 구하였다. 또한 실험 결과와 비교하여 본 연구 해석 결과와 잘 일치함을 보였다.

## 1. 서론

원자력발전소의 증기 발생기는 장기 사용됨에 따라 마모를 경험한다. 일반적으로 증기발생기 세관의 마모는 튜브내의 유체가 유체탄성적(fluidelastic)으로 불안정한 경우, 튜브-관판지대(tubesheet plate) 간의 간극이 증가하는 경우에 과도한 진동을 야기하게 되어 발생하게 된다. 증기발생기의 마모 발생부위는 다운커머(downcomer) 출구에서의 튜브 다발(bundle), 피드워터(feedwater) 입구쪽, 그리고 U-밴드(bend) 지역으로 알려져 있다.

일반적으로 전열관의 건정성을 유지하기 위해서는 정상 가동압력의 3배 또는 설계기준 압력의 1.4배를 유지해야한다. 이는 정상가동 중 또는 설계기준사고가 발생하였을 때 결함 전열관이 존재하더라도 전열관의 파단 사고나 과도한 누설을 방지하기 위함이다. 그러나 현재 적용되는 결함의 종류, 형상, 위치 등에 관계없이 모든 결함에 대한 불확실성을 모두 안전여유에 포괄적으로 수용하여 선정된 40% 관두께 정비기준은 전열관의 파열사고 가능성을 완벽하게 차단하지 못하면서도 과도하게 보수적인 측면이 있다.

이에 대체정비기준(ARC; alternative repair criteria)을 적용하여 관두께에 대한 결함의 깊이가 아닌 결함의 위치, 균열의 길이 등 결함 유형별로 건전성을 평가하여 전열관 정비작업 기준을 설정 할 수 있다.

마모 손상된 원자력 발전소의 증기발생기는 갑작스런 과압이 발생된 경우 파열이 일어나기 전에 소성 불안정(plastic instability)이 발생된다. 이에 본 연구에서는 증기발생기 전열관에 평면형(flat type)과 원주형(circumferential type)의 마모가 존재한다고 가정하여 소성 불안정(plastic instability) 해석에 기초하여 파열압력을 해석하였다. 또한 실험 결과와 비교하여 본 연구 해석 결과와 잘 일치함을 보였다.

## 2. 해석 방법

튜브에 내압 또는 축방향 응력이 작용하는 경우에 대한 소성 불안정(plastic instability) 해석은 Hiller[1]에 의해 정의되어있다.

본 연구에서는 소성 불안정 해석을 기초로 유한요소 상용프로그램(ABAQUS v.6.2)을 이용하여 마모 손상된 전열관에 대한 파열압력을 구하였다.

전열관의 마모에 의하여 손상된 전열관의 파열압력 해석을 위하여 두 가지 경우의 응력-변형률 관계를 이용하였다. 첫째로 재료의 변형 특성은 다음의 응력-변형률 관계식을 만족한다고 가정하였다(모델 1)

$$\sigma = K\varepsilon^n. \quad (1)$$

둘째로 식(1)에서 얻어지는 응력이 인장강도  $\widetilde{\sigma}_{ut}$ 보다 커지는 경우는  $\sigma = \widetilde{\sigma}_{ut}$ 로 가정하였다(모델 2). 여기서  $\widetilde{\sigma}_{ut}$ 는 인장강도  $\sigma_{ut}$ 의 진응력이다. 이때 파열 해석시 참고문헌 [4]의 인장시험 결과로부터 소성지수  $n$ 값은 0.36을 이용하였으며,  $K$ 값은 소성 변형률  $\varepsilon_y (= \sigma_{ys}/E)$ 에서의 응력이 항복강도  $\sigma_{ys}$ 가 되도록 정하였다.

파열압력 해석에 이용된 증기발생기 전열관 모델의 치수는 내경은 16.92mm, 외경은 19.06mm, 두께는 1.07mm 그리고 길이는 200.0mm로 하였으며, 관판은 고려하지 않았다.

해석 방법은 첫째로 마모가 없는 경우의 튜브에 대하여 소성 불안정이 될 때의 압력을 구하였다. 둘째로 마모가 있는 경우의 소성 불안정 압력을 구한 후 다음의 식으로부터 강도 감소 계수(strength reduction factor)를 구하였다

$$f_r = \frac{\text{burst pressure of a damaged tube}}{\text{burst pressure of a tube}}. \quad (2)$$

해석시 소성 불안정 압력은 튜브 모델의 요소 크기, 형상 및 재료의 응력-변형률 특성 등에 영향을 받게 된다. 그러므로 마모가 없는 튜브의 요소의 크기와 있는 경우의 요소의 크기는 서로 비슷하게 유지되어야 한다. 셋째로 균열 또는 마모가 없는 전열관의 파열압력 식은 다음의 Svensson[4] 식으로부터 파열압력  $P_{th}$ 를 구한 후, 강도 감소 계수를 곱하여 최종적으로 마모가 있는 경우의 파열압력을 구하였다

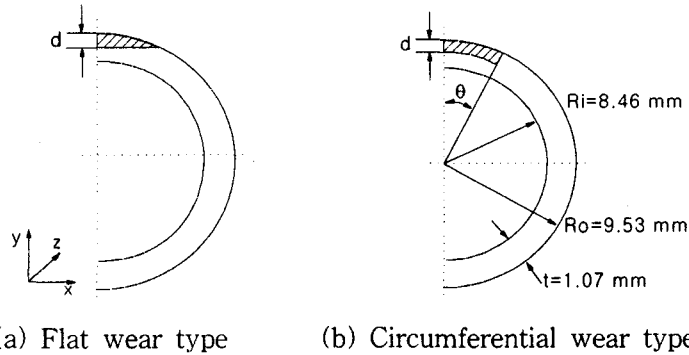
$$P = f_r \cdot K(n) \sigma_{ut} \ln \left( 1 + \frac{t}{R_i} \right). \quad (3)$$

여기서  $K(n) = \left( \frac{0.25}{n+0.227} \right) \left( \frac{e}{n} \right)^n$ ,  $\sigma_{ut}$ 는 인장강도,  $R_i$ 는 관 내부의 반경,  $t$ 는 관 두께,  $e$ 는 2.71828이고,  $n=0.36$ 의 경우  $K(n)=0.882$ 이다.

참고문헌 [4]에서는 결함이 존재하지 않는 전열관에 대하여 파열시험을 행하여 파열압력이 Svensson 식의 결과와 잘 일치함을 보였다.

마모가 있는 전열관의 결함은 Fig. 1에서와 같이 평면형(flat type)과 원주형(circum-

ferential type)이 존재한다고 가정하였다. Fig. 1 (a)의 평면형의 경우 마모 깊이(d)는 20-90%까지, 축방향 마모 길이는 12.7, 25.4, 38.1, 50.8mm 그리고 100mm에 대하여 해석을 수행하였다. Fig. 1 (b)의 원주형의 경우 마모가 원주 방향( $\theta$ )으로  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  그리고  $180^\circ$  존재한다고 가정하였고, 마모 깊이(d)는 20-90%까지, 축방향 마모 길이는 12.7, 25.4, 38.1 그리고 50.8mm에 대하여 해석을 수행하였다. 해석시 x와 z축으로의 대칭조건을 이용하였다.



(a) Flat wear type (b) Circumferential wear type  
 Fig. 1 Schematic diagram of flat and circumferential wear type.  
 d is wear depth.

### 3. 해석 결과

Fig. 2는 평면형(flat type)의 마모에 대하여 축방향 마모 길이(L) (a) 12.7mm, (b) 25.4mm, (c) 38.1mm, (d) 50.8mm 그리고 (e) 100mm에 대한 파열압력을 구한 결과이다. Fig. 2 (a)에서 (d)의 경우 마모 깊이 20-90%까지 파열압력을 구하였고 Fig. 2 (e)의 경우 0-90%까지 파열 압력을 구하였다. 마모깊이가 0%인 경우 Svensson식에 의한 파열 압력과 일치한 값이다.

Fig. 2 (a)에서 실선은 첫 번째로 가정한 모델 1의 응력-변형률 곡선 식으로부터 해석한 결과이고, 점선은 두 번째 모델 2의 가정 즉, 진응력의 인장강도  $\widetilde{\sigma}_u$ 보다 커지는 경우  $\sigma = \widetilde{\sigma}_u$ 로 가정하여 해석한 결과이다. 그림에서 보면 마모 깊이가 깊어질수록 파열 압력은 떨어지는 것을 알 수 있고, 모델 1로부터 해석한 파열압력이 모델 2로부터 해석한 파열압력보다 높은 것을 알 수 있다. 또한 참고 문헌[2]의 파열 시험결과와 함께 비교해보면 모델 1로부터 해석한 파열압력이 실험 결과보다는 약간 높은 경향이 있으나 모델 2로부터 해석한 파열압력이 약간 낮게 나타나 보수적인 결과를 보여준다.

Fig. 2 (b), (c), (d) 그리고 (e)의 경우 (a)의 경우와 비슷하게 축방향 마모깊이가 길어질수록 파열 압력은 떨어지고 참고문헌[2]의 시험 결과와 비교해보면 모델 2로부터 해석한 파열압력이 약간 낮게 나타나 보수적인 결과를 보여준다.

Fig. 3은 원주형 마모에 대한 파열압력을 구한 결과이다. 원주형 마모는 원주방향

( $\theta$ )으로 30°, 60° 그리고 120°로 하였고 축 방향 마모 길이는 (a) 12.7mm, (b) 25.4mm, (c) 38.1mm 그리고 (d) 50.8mm로 하여 파열압력을 구하였다. 원주형의 경우 참고문헌 [3], [4]로부터 실험 결과와 함께 나타내었다.

Fig. 3 (a)의 그림에서 보면 원주 방향의 마모가 커질수록, 마모가 깊어질수록 파열 압력을 떨어지는 것을 알 수 있다. 또한 모델 2로부터 해석한 파열압력이 가장 낮게 나타나고 모델 1로부터 해석한 파열압력이 실험 결과보다 낮게 값을 보여주는 것을 알 수 있다. 그러나 참고문헌 [3], [4]의 실험 결과와 비교해보면 두 해석한 결과보다 참고문헌의 시험 결과가 높게 나타남을 알 수 있는데 이는 시험 방법과 시험 재료의 열처리 등의 영향에 의한 것으로 예상된다.

Fig. 3 (b), (c) 그리고 (d)의 경우 Fig. 3 (a)의 경우와 비슷하게 축방향 마모길이가 깊어질수록 파열 압력은 떨어지고 모델 2로부터 해석한 파열압력이 약간 낮게 나타나 보수적인 결과를 보여준다.

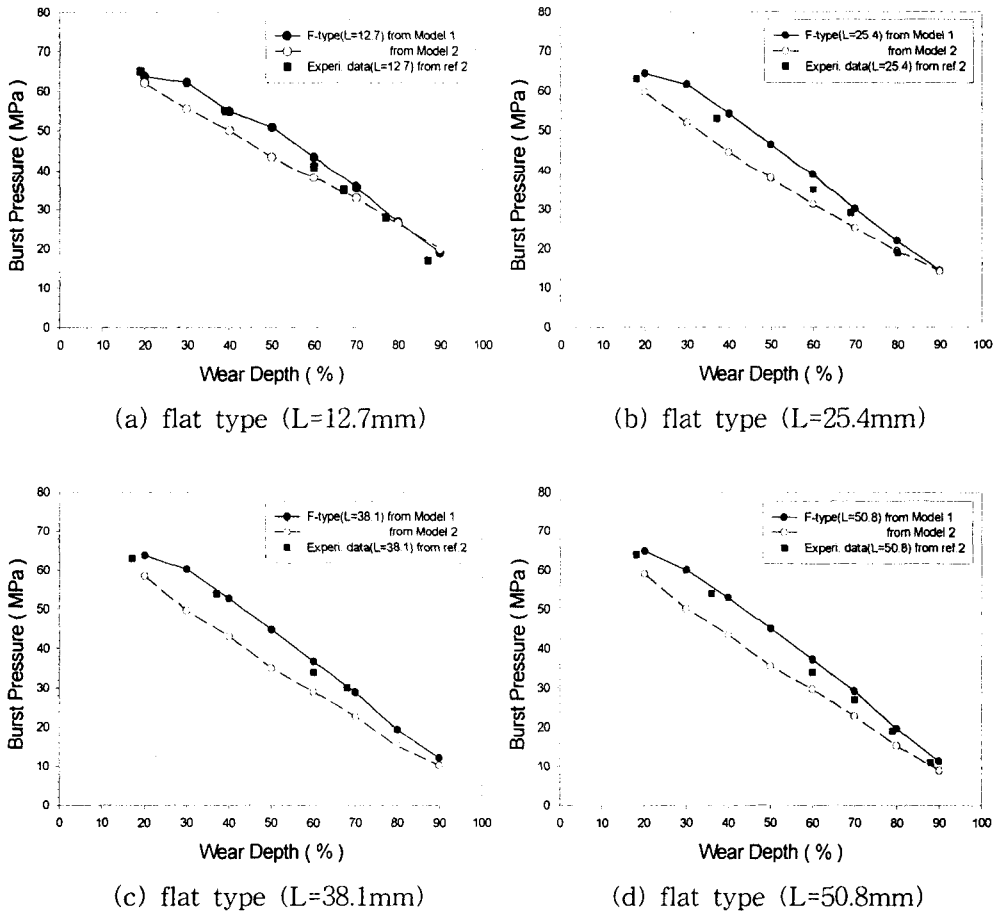
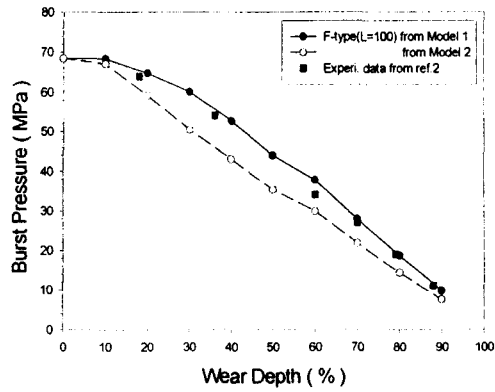
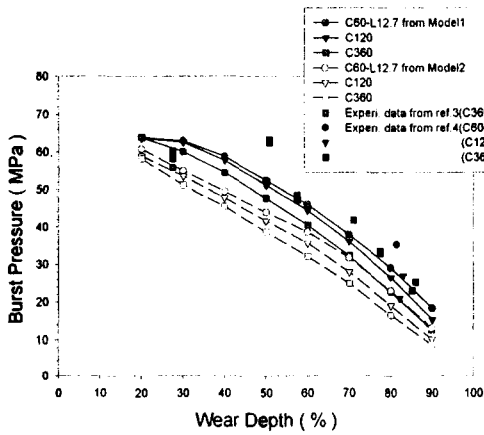


Fig. 2 Calculated burst pressure using strength reduction factor( $f_r$ ) for flat type (continued)

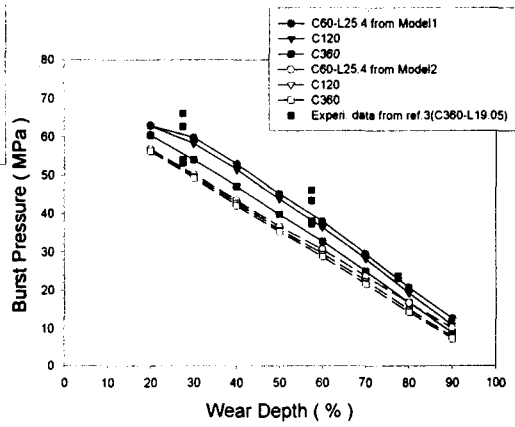


(e) flat type (L=100mm)

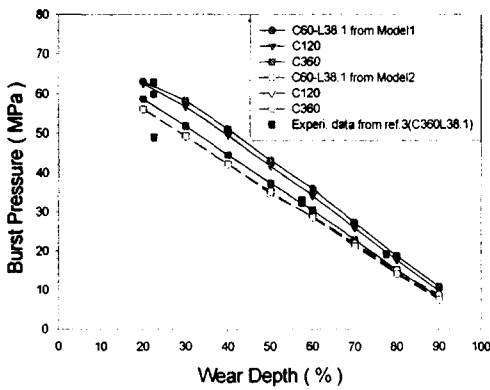
Fig. 2 Calculated burst pressure using strength reduction factor( $f_r$ ) for flat type



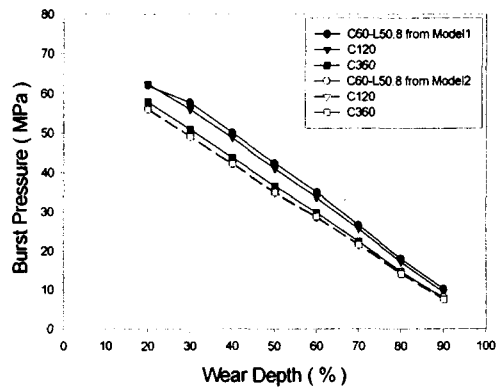
(a) circumferential type (L=12.7mm)



(b) circumferential type (L=25.4mm)



(c) circumferential type (L=38.1mm)



(d) circumferential type (L=50.8mm)

Fig. 3 Calculated burst pressure using strength reduction factor( $f_r$ ) for circumferential type

### 3. 결 론

증기발생기 전열관에 평면형(flat type)과 원주형(circumferential type)의 마모가 존재한다고 가정하고 소성 불안정(plastic instability) 해석에 기초하여 파열압력을 구하였고, 참고 문헌의 실험 결과와 비교하였다.

해석시 첫째로 재료 변형 특성의 응력-변형률 관계식을 이용한 모델과 둘째로 응력이 진응력의 인장강도  $\widetilde{\sigma}_{ut}$ 보다 커지는 경우  $\sigma = \widetilde{\sigma}_{ut}$ 로 가정한 모델의 두 가지 경우에 대하여 해석하였다.

해석결과 평면형의 경우 마모 깊이가 깊어질수록 파열 압력은 떨어지는 것을 알 수 있고, 모델 1로부터 해석한 파열압력이 모델 2로부터 해석한 파열압력보다 높은 것을 알 수 있다. 또한 참고 문헌[2]의 파열 시험결과와 함께 비교해보면 모델 1로부터 해석한 파열압력이 실험 결과보다는 약간 높은 경향이 있으나 모델 2로부터 해석한 파열압력이 약간 낮게 나타나 보수적인 결과를 보여준다.

원주형의 경우 원주 방향의 마모가 커질수록, 마모가 깊어질수록 파열 압력을 떨어지는 것을 알 수 있다. 또한 모델 2로부터 해석한 파열압력이 가장 낮게 나타나고 모델 1로부터 해석한 파열압력이 실험 결과보다 낮게 값을 보여주는 것을 알 수 있다.

### 감사의 글

본 연구는 한국전력 .전력연구원과 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성 평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로써 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

### 참고문헌

1. M. J. Hillier, "Tensile plastic instability of thin tubes-I", Int. J. Mech. Sci. Vol. 7, pp. 531-538, 1965.
2. 정한섭, 김기태, 김홍덕, "증기발생기 전열관 건전성 평가기준 개발", 전력연구원 보고서(TR.96NJ14), 2000.
3. NUREG/CR-0718 report, "Steam generator tube integrity program phase I report", 1979.
4. EPRI NP-6865-L report, "Steam generator tube integrity Vol. 1: Burst test results and validation of rupture criteria", 1991.
5. Y. Mou, W. D. Reinhardt, R. K. Kizhatil and G. H. McClellan, "Plastic instability in pressure vessels and their role in design", Pressure Vessel and Piping, Vol. 370, pp. 135-142, 1998.