

# 경사형 마멸 손상부를 가진 증기발생기 전열관의 파열압력 해석

신규인<sup>†</sup> · 박재학\* · 정명조 · 최영환

한국원자력안전기술원 원자력안전연구실 · \*충북대학교 공과대학 안전공학과  
(2004. 1. 15. 접수 / 2004. 5. 7. 채택)

## The Burst Pressure Analysis of Steam Generator Tubes with Inclined Type of Wear Damage

Kyu In Shin<sup>†</sup> · Jai Hak Park\* · Myung Jo Chung · Young Hwan Choi

Nuclear Safety Research Department, Korea Institute of Nuclear Safety

\*Department of Safety Engineering, Chungbuk National University

(Received January 15, 2004 / Accepted May 7, 2004)

**Abstract :** The fretting-fatigue by leaking is one of the significant degradation in steam generator tubes. In this study, the burst pressures of inclined damaged steam generator tubes were obtained from three criterions by using the finite element method. The analysis results were also compared with the experiment data from published references and they showed a good agreement with the experiment data.

**Key Words :** burst pressure, fretting-fatigue, inclined wear, steam generator tube

### 1. 서 론

증기발생기 전열관에서 프레팅-피로(fretting-fatigue)에 의한 마멸은 유체 유발 진동(flow induced vibration)에 의한 전열관과 증기발생기 상부 지지구조물 사이에서 발생하게 되며 원통 지지대(stay cylinder) 상부의 중앙 공공(central cavity) 주변에 집중적으로 발생하는 것으로 보고되고 있다<sup>1-3)</sup>.

프레팅-피로에 의한 마멸에 영향을 미치는 변수들(variables)은 지지구조물의 위치와 강도, 2차축 유속의 속도와 방향 그리고 전열관과 관판 사이의 간극 등에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있으며, 이에 대한 대책으로 반진동봉(AVB; anti-vibration bars)을 설치하여 전열관을 고정시키고 전열관에서 생성되는 진동의 진폭을 제한하는 실정이다.

그러나 외국에서는 1992~1993년 기간 동안 60여 개의 원자로(reactors)에서 프레팅-피로에 의한 마멸에 의해 누설이 발생되었으며, 500~600 개의 전열관이 마멸에 의해 관막음(plugging)된 것으로 보고되었다<sup>4)</sup>.

국내에서는 1998년 영광 4호기 증기발생기에서 마멸 손상이 보고된 이후 영광 3호기와 울진 3, 4호기에서도 마멸 손상이 발견되고 있으며 발생량 또한 증가하는 추세이다<sup>1,2)</sup>.

증기발생기 전열관의 마멸에 대한 연구를 살펴보면 Guerout 등<sup>4)</sup>은 고온 하중 변위 측정시스템을 개발하여 운전조건에서 관과 지지대 사이의 상호작용을 특정하여 각 변수들이 마멸 손상에 주는 영향을 검토하였다.

Alzheimer 등<sup>5)</sup>은 여러 형상의 결함 또는 마멸이 존재하는 전열관에 대하여 파열압력 시험을 수행하였으며 와류탐상 시험(eddy-current test)을 행하여 결함 전열관에 대한 와류탐상 결과와의 상관관계를 연구하였다. Fisher 등<sup>6)</sup>은 VIBIC(vibration of beams with intermittent contact)이라고 하는 비선형 유한요소법 코드를 사용하여 실험에서 구해진 마멸계수를 사용하여 프레팅 마멸의 정도를 예측할 수 있음을 보였다.

증기발생기 전열관에서 프레팅에 의한 마멸의 정도와 변수들의 마멸 양에 미치는 영향에 관한 문헌들은 많이 있지만, 마멸이 발생한 결함 전열관의 파열압력에 관한 문헌은 그다지 많지 않다.

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
kyuinshin@hanmail.net

정한섭 등<sup>1)</sup>은 영광 3, 4호기와 울진 3, 4호기에서 운용 중인 증기발생기 전열관을 대상으로 마멸 손상의 발생 추세, 발생 부위 등을 살펴보고, 여러 마멸 형상에 대하여 파열압력 시험을 수행하였으며, 이영호 등<sup>7)</sup>은 Inconel 600MA와 Inconel 690TT에 대하여 405 및 409 스테인리스강 지지구조물에 대한 마멸시험을 행하여 마멸계수를 실험적으로 구하였다.

신규인<sup>8)</sup> 등은 평면형과 원주형 마멸이 존재하는 증기발생기 전열관에 감도감소계수(strength reduction factor)를 이용하여 파열압력 설계곡선을 제시하였으며, 정한섭 등<sup>1)</sup>과 EPRI<sup>5,9)</sup>에서 수행한 실험결과와 비교하여 잘 일치함을 보여주었다.

본 논문에서는 증기발생기 전열관에 경사진 형태의 국부적인 경사형 마멸(inclined wear type)이 존재한다고 가정 후, 손상된 전열관의 파열압력에 대한 설계곡선을 제시하였다.

## 2. 해석 방법

### 2.1. 경사형 마멸 손상된 전열관의 파열 조건

EPRI<sup>9)</sup>에서는 결함이 존재하지 않는 증기발생기 전열관에 대하여 파열시험을 행하여 파열압력이 다음의 Svensson 식 (1)의 결과와 잘 일치함을 보였다.

$$P_m = K(n) \sigma_w \ln \left( 1 + \frac{t}{R_i} \right) \quad (1)$$

여기서

$$K(n) = \left( \frac{0.25}{n+0.227} \right) \left( \frac{e}{n} \right)^n \quad (2)$$

이고  $\sigma_w$ 는 인장강도,  $R_i$ 는 관 내부의 반경,  $t$ 는 관 두께이다. 식 (2)에서  $e$ 는 2.71828이고  $n$ 은 소성지수이다.

식 (1)에서 두께  $t$  대신 마멸부의 남아 있는 두께  $e$ 를 대입하면 다음의 식 (3)과 같이 된다.

$$P_m = K(n) \sigma_w \ln \left( 1 + \frac{t}{R_i} \cdot \frac{e}{t} \right) \quad (3)$$

이를 수정된 Svensson 식이라 부르기로 한다. 경사형 마멸에 의하여 손상된 전열관의 파열압력 해석을 위하여 다음과 같은 세 가지 조건을 이용하여

파열 압력을 계산하였으며, 정한섭 등<sup>1)</sup>의 실험 결과와 비교하였다. 첫째는 손상 전열관의 평균 원주응력 ( $\sigma_\theta$ )이 인장강도( $\sigma_w$ )에 도달하면 파열이 된다고 가정하였다.

둘째는 손상 전열관의 평균 원주응력이 참고평균 원주응력( $(\sigma_\theta)_{ref}$ )에 도달하면 파열이 된다고 가정하였다.

셋째는 수정된 Svensson 식 (3)을 이용하여 파열 압력을 구하였다.

여기서 평균 원주응력은 마멸에 의해 전열관의 두께가 감소된 임의의 지점 즉, 마멸부에 원주 응력이 가장 높은 지점에서 두께 방향으로 구한 원주응력의 평균값으로 각 절점에서의 응력을 이용하여 두께를 따라 적분한 후 두께로 나눈 값으로 하였다.

두 번째 조건에서의 참고평균 원주응력은 다음과 같이 구해진 응력이다. 우선 식 (1)의 Svensson식으로부터 파열압력  $P_m$ 를 구한다. 손상이 되지 않은 완전한 관에 대하여 내압으로  $P_m$ 를 가한 후 탄소성 해석을 행한다. 이때 최대 하중에서의 두께 방향으로 평균 원주응력을 구하고 이를 참고평균 원주응력으로 취한다. 두께가 관의 직경에 비하여 아주 작은 경우는 다음 식으로부터 참고평균 원주응력을 계산할 수 있다.

$$(\sigma_\theta)_{ref} = \frac{P_m \cdot R_i}{t} \quad (4)$$

### 2.2. 해석 모델

파열압력 해석에 이용된 증기발생기 전열관 재료는 Inconel 600으로 재료의 물성치는 Table 1에 나타내었다. 파열압력해석 시 소성지수  $n$  값은 EPRI<sup>9)</sup>의 인장시험 결과로부터 구하였으며, 강도 계수(strength coefficient)  $K$  값은 소성 변형률  $\epsilon_y (= \sigma_y/E)$ 에서의 응력이 항복강도  $\sigma_y$ 가 되도록 정하였다.

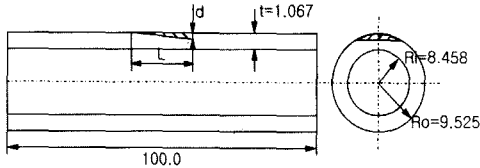
해석 시 재료의 변형 특성은 다음의 응력-변형률 관계식을 만족한다고 가정하였다. 그리고 식 (5)에서 얻어지는 응력이 인장강도  $\sigma_w$ 보다 커지는 경우는  $\sigma = \sigma_w$ 로 가정하였다.

$$\sigma = K \epsilon^n \quad (5)$$

본 해석에서는 유한요소 상용프로그램(ANSYS V. 5.0)을 이용하여 20 절점 3 차원 구조용 요소를 사용하였다.

Table 1. Material properties of Inconel 600

$\sigma_{ys}$ (MPa)	$\sigma_w$ (MPa)	K (MPa)	$\nu$	$n$
340.5	735.5	3190	0.3	0.36

Fig. 1. Schematic diagram of inclined wear type in a tube.  $d$  is wear depth.

파열압력 해석에 이용된 증기발생기 전열관 모델의 치수는 Fig. 1에서와 같이 내경은 16.916mm, 외경은 19.05mm, 두께는 1.067mm 그리고 길이는 100.0 mm로 하였다.

경사형 마멸 길이( $L$ )는 25.4와 50.8mm가 전열관에 존재한다고 가정하였고, 각각의 마멸길이에 대하여 마멸 깊이비( $d/t$ )를 0.2~0.9까지 변화 시켜가며 마멸깊이비에 따른 파열압력해석을 수행하였으며 정한섭 등<sup>1)</sup>이 수행한 파열 시험 결과와 함께 비교하였다.

Fig. 2는 마멸 손상된 전열관의 유한요소 모델이다. 해석 모델은 축방향의 대칭(symmetric) 조건을 이용할 수 없으므로 전체의 1/2을 모델링 하였다.

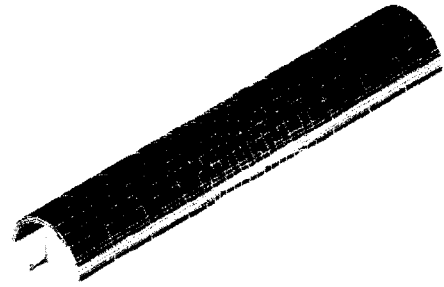
### 3. 결과 및 고찰

경사형 마멸 손상에 대한 해석 결과를 정한섭 등<sup>1)</sup>에 의해 수행된 실험 값과 함께 비교하였다. Fig. 3(a)와 (b)는 각각 경사형 마멸 결함부 길이( $L$ )가 25.4, 50.8mm에 대한 결과이다.

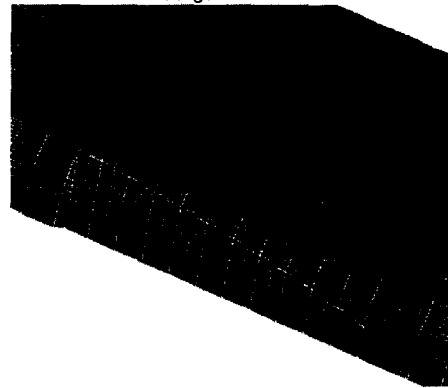
Fig. 3(a)는 경사형 마멸 길이는 25.4mm가 존재한다고 가정한 후 마멸 깊이비( $d/t$ )를 0.2~0.9로 변화시켜 세 가지 조건으로부터 마멸 깊이비에 따른 파열압력해석을 수행한 해석 결과로, 정한섭 등<sup>1)</sup>이 마멸 길이 20~30mm, 마멸 깊이비 0.3~0.8에 대하여 수행한 파열압력 시험 결과와 함께 비교하였다.

첫 번째 조건인  $\sigma_\theta = \sigma_w$ 의 파열조건을 사용하였을 때의 해석결과를 볼 때 0.2 이상의 마멸 깊이비에서 정한섭 등<sup>1)</sup>이 수행한 파열 시험 결과와 잘 일치하는 값이 얻어졌다.

두 번째 조건인  $\sigma_\theta = (\sigma_\theta)_{ref}$ 의 파열조건은  $\sigma_\theta = \sigma_w$ 의 조건보다 보수적인 값을 주게됨을 알 수 있다.



(a) global model



(b) detailed wear region

Fig. 2. Finite element model of inclined wear type in a steam generator tube.

그러나 세 번째 조건 즉, 수정된 Svensson 식 (3)에 의해 계산된 결과와 비교하면 마멸 깊이비가 0.2인 경우  $\sigma_\theta = (\sigma_\theta)_{ref}$ 의 파열조건에서 얻은 결과와 아주 유사한 값을 주고 있음을 알 수 있다. 그러나 마멸 깊이가 깊어질수록 수정된 Svensson 식 (3)에 의한 파열압력은  $\sigma_\theta = (\sigma_\theta)_{ref}$ 에서 얻은 결과보다 더 낮은 압력 값을 주게 된다.

이러한 결과로부터 보수적인 파열압력을 얻기 위하여 식 (2) 또는 식 (3)을 사용할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 3(b)는 결함부 길이를 50.8mm로 하였고 마멸 깊이비를 0.2~0.9로 변화시켜 세 가지 조건으로부터 마멸 깊이비에 따른 파열압력 해석 결과와 정한섭 등<sup>1)</sup>이 마멸 길이는 40~55mm, 마멸 깊이비는 0.6~0.8에 대해서 파열 시험을 수행한 결과를 함께 비교하였다.

그림에서 보면  $\sigma_\theta = \sigma_w$ 의 파열압력 해석 결과는 Fig. 3(a)인 경우와 비슷하게 파열 시험 결과와 유사한 값이 얻어졌으며,  $\sigma_\theta = (\sigma_\theta)_{ref}$ 의 파열조건은  $\sigma_\theta = \sigma_w$ 의 조건보다 보수적인 값을 주게됨을 알 수 있다.

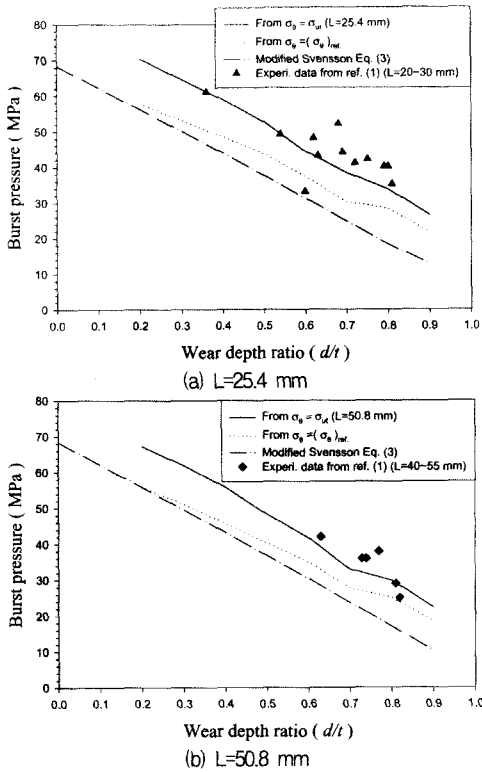


Fig. 3. Burst pressure of inclined wear type in a steam generator tube.

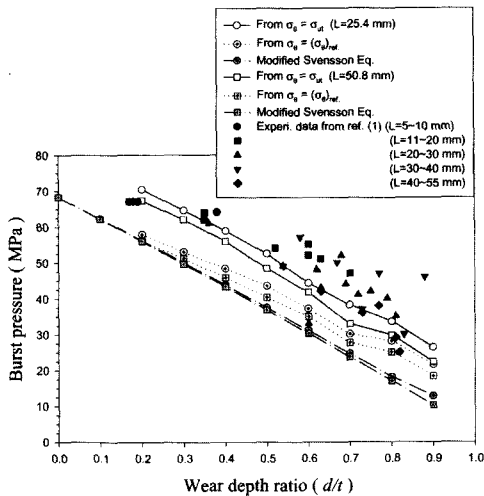


Fig. 4. Comparison of burst pressure of inclined wear type in a steam generator tube.

또한 수정된 Svensson 식 (3)에 의해 계산된 결과와 비교하면 마멸 깊이가 작은 경우 Fig. 3(a)의 결과와 유사하게  $\sigma_\theta = (\sigma_\theta)_{ref}$ 의 파열조건에서 얻은

결과와 비슷한 경향을 보여주고 있으나 마멸 깊이가 깊어질수록  $\sigma_\theta = (\sigma_\theta)_{ref}$ 에서 얻은 결과보다 더 낮은 압력 값을 주는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 Fig. 3(a)와 (b)의 해석결과와 정점 등<sup>1)</sup>이 마멸깊이는 5~55mm, 마멸 깊이비는 0.17~0.92까지 수행한 파열압력 시험 결과를 함께 나타낸 그림이다. 그림에서 보면  $\sigma_\theta = \sigma_w$ 의 파열조건은 파열 시험 결과와 잘 일치하였고,  $\sigma_\theta = (\sigma_\theta)_{ref}$ 의 파열조건은  $\sigma_\theta = \sigma_w$ 의 조건보다 보수적인 값을 보여주나 두 조건 모두 마멸 길이에 대한 영향을 받을 수 있다. 그러나 수정된 Svensson 식 (3)은 마멸 길이에 무관한 식을 보여준다.

이에 본 연구에서 제안한 식 (3)은 마멸부의 최소 두께의 함수이며 결함부의 형상에는 무관한 식으로 결함부 형상의 영향을 보기 위해서는  $\sigma_\theta = (\sigma_\theta)_{ref}$ 의 조건을 사용해야 하지만 마멸 길이와 형상에 무관한 수정된 Svensson 식 (3) 또한 사용할 수 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결론 및 토의

경사형(inclined type) 마멸에 의해 손상된 전열관의 해석을 통하여 다음과 같은 사실들을 알 수 있었다.

- 1) 마멸 깊이비 0.2 이상의 마멸 손상의 경우  $\sigma_\theta = \sigma_w$ 의 파열조건에서 구해진 파열압력은 기존의 실험에서 구해진 파열압력과 유사한 결과가 나타났다.
- 2)  $\sigma_\theta = (\sigma_\theta)_{ref}$ 의 파열조건은  $\sigma_\theta = \sigma_w$ 의 파열조건 보다 보수적인 파열압력을 보여주었다.
- 3)  $\sigma_\theta = (\sigma_\theta)_{ref}$ 의 파열조건에서 구해진 파열압력은 마멸손상의 경우 결함부의 형상에는 무관한 식인 수정된 Svensson 식의 결과보다는 높게 나타났으며 이러한 결과로부터 보수적인 파열압력을 얻기 위하여  $\sigma_\theta = (\sigma_\theta)_{ref}$ 의 파열조건으로부터 구한 파열압력 식 또는 수정된 Svensson 식을 사용할 수 있음을 알 수 있었다.

감사의 글 : 본 연구는 한국과학재단 산하 성공관대학교 산업설비 안전성 평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- 1) 정한섭, 김기태, 김홍덕, “증기발생기 전열관 건

- 전성 평가기준 개발”, 전력연구원 보고서 (TR-96NJ14), 2000.
- 2) 한국중공업 보고서, “한국표준원전 증기발생기 전열관 마모 장,단기 시책 프로그램”, 2000.
  - 3) K. M. Sweeney, J. A. Begley, B. W. Woodman, R. E. Johnson, D. P. Siska and J. Thakkar, “Palo Verde Nuclear Generating Station Unit 2 Operational Assessment; Batwing Support Induced Wear Degradation of Steam Generator Tubing during Cycle 7”, 97-SGPG- 001 Report, 1997.
  - 4) F. M. Guerout and N. J. Fisher, “Steam Generator Fretting-Wear Damage: A Summary of Recent Findings”, ASME J. of Pressure Vessel Technology, Vol. 121, pp. 304~310, 1999.
  - 5) J. M. Alzheimer, R. A. Clark, C. J. Morris and M. Vagins, “Steam Generator Tube Integrity Program Phase I Report”, NUREG CR-0718 report, 1979.
  - 6) N. J. Fisher, A. B. Chow and M. K. Weckwerth, “Experimental Fretting Wear Studies of Steam Generator Materials”, ASME J. of Pressure Vessel Technology, Vol. 117, pp. 312~320, 1995.
  - 7) 이영호, 김인섭, 강성식, 송명호, “증기발생기 전열관 재료의 마모계수 평가”, 제7회 원전기기 건설성 Workshop, 한국원자력안전기술원, 2000.
  - 8) 신규인, 박재학, “마멸에 의해 손상된 증기발생기 전열관의 파열압력 해석”, 산업안전학회지, 제18권, 제5호, pp. 1~7, 2003.
  - 9) EPRI NP-6865-L, “Steam generator tube integrity, Volume 1: Bust test results and validation of rupture criteria”, 1991.