

I-형 마멸 손상된 증기발생기 전열관의 파열압력해석

신규인 · 박재학* · 정명조 · 최영환

한국원자력안전기술원 · *충북대학교 안전공학과

1. 서 론

증기발생기 전열관의 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 있다¹⁻³⁾. 국내에서는 1997년 영광 4호기의 증기발생기에 마멸 손상이 보고된 이후 영광 3호기와 울진 3, 4호기에서도 마멸 손상이 발견되고 있으며^{1,2)}, 외국에서는 1992-1993년 기간동안 대략 500~600 개의 전열관이 마멸에 의해 관막음(plugging)된 것으로 보고되었다⁴⁾.

증기발생기 전열관의 마멸에 대한 연구를 살펴보면 Guerout 등⁴⁾은 고온 하중 변위 측정시스템을 개발하여 운전조건에서 관과 지지대 사이의 상호작용을 특정하여 각 변수들이 마멸 손상에 주는 영향을 검토하였다. 그 결과 온도가 마멸 손상에 큰 영향을 주고 있음을 밝혔고, 이에 대해 프레팅 마멸 시험은 운전온도에서 행해져야 한다고 하였다. Alzheimer 등⁵⁾은 여러 형상의 결함 또는 마멸이 존재하는 전열관에 대하여 파열압력 시험과 와류탐상 시험(eddy-current test)을 행하였으며, Fisher 등⁶⁾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 마멸량의 평가 및 각 변수들의 변화가 마멸량에 미치는 영향에 관한 문헌들은 많이 있지만, 마멸이 발생된 결함 전열관의 파열압력에 관한 문헌은 그다지 많지 않다.

정한섭 등¹⁾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 등⁷⁾이 Inconel 600MA와 Inconel 690TT에 대하여 405 및 409 스테인리스강 지지구조물에 대한 마멸시험을 행하여 마멸계수를 실험적으로 구하였다. 김범년 등⁸⁾은 부식에 의한 내부 마멸 배관의 허용 두께 결정 방법에 대하여 연구하였다.

이에 본 논문에서는 증기발생기 전열관에 경사진 형태의 국부적인 마멸(I-type; inclined wear type)이 존재한다고 가정한 후, 손상된 전열관의 파열압력에 대한 설계곡선을 제시하였다. 또한 정한섭 등¹⁾의 실험 결과와 비교하여 본 논문의 해석 결과와 대체적으로 일치함을 보였다.

2. 해석 방법

2.1 I-형 마멸 손상된 전열관의 파열 조건

EPRI 보고서⁹⁾에서는 결함이 존재하지 않는 증기발생기 전열관에 대하여 파열시험을 행하여 파열압력이 다음의 Svensson 식의 결과와 잘 일치함을 보였다.

$$P_{th} = K(n) \sigma_{ut} \ln \left(1 + \frac{t}{R_i} \right) \quad (1)$$

여기서

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

이고 σ_{ut} 는 인장강도, R_i 는 관 내부의 반경, t 는 관 두께이다. 식 (2)에서 e 는 2.71828 이고 n 은 소성지수이다.

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

$$P_{th} = K(n) \sigma_{ut} \ln \left(1 + \frac{t}{R_i} \cdot \frac{e}{t} \right) \quad (3)$$

이를 수정된 Svensson 식이라 부르기로 하자. I-형 마멸에 의하여 손상된 전열관의 파열압력 해석을 위하여 다음과 같은 파열 조건을 사용하였다.

(1) 손상 전열관의 평균 원주응력 σ_θ 가 인장강도(σ_{ut})에 도달하면 파열이 된다.

(2) 손상 전열관의 평균 원주응력 σ_θ 가 $(\sigma_\theta)_{ref.}$ 에 도달하면 파열이 된다.

여기서 평균 원주응력은 마멸에 의해 튜브 두께가 감소된 임의의 지점에서 두께 방향으로 구한 원주응력의 평균값이다. 이때 평균 원주응력은 감소된 두께에서 각 절점에서의 응력을 이용하여 두께를 따라 적분한 후 두께로 나눈 값으로 하였다.

두 번째 조건에서 $(\sigma_\theta)_{ref.}$ 은 다음과 같이 구해진 응력이다. 우선 식 (1)의 Svensson 식으로부터 파열압력 P_{th} 를 구한다. 손상이 되지 않은 완전한 관에 대하여 내압으로 P_{th} 를 가한 후 탄소성 해석을 행한다. 이때 최대 하중에서의 두께 방향으로 평균 원주응력을 구하고 이를 $(\sigma_\theta)_{ref.}$ 로 취한다. 두께가 관의 직경에 비하여 아주 작은 경우는 다음 식으로부터 $(\sigma_\theta)_{ref.}$ 를 계산할 수 있다.

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

여기서 R_i 는 관 내부의 반경이다.

2.2 해석 모델

파열압력 해석에 이용된 증기발생기 전열관 재료는 Inconel 600으로 재료의 물성치는 Table 1에 나타내었다. 파열압력해석 시 소성지수 n 값은 EPRI 자료⁹⁾의 인장시험 결과로부터 구하였으며, 강도 계수(strength coefficient) K 값은 소성 변형률 $\epsilon_p (= \sigma_{ys}/E)$ 에서의 응력이 항복강도 σ_{ys} 가 되도록 정하였다. 해석시 재료의 변형 특성은 다음의 응력-변형률 관계식을 만족한다고 가정하였다. 그리고 식 (5)에서 얻어지는 응력이 인장강도 σ_{ul} 보다 커지는 경우는 $\sigma = \sigma_{ul}$ 로 가정하였다.

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

본 해석에서는 유한요소 상용프로그램(ANSYS V. 5.0)을 이용하여 마멸 손상된 전열관에 대한 파열압력을 구하였다. 해석 시 20 절점 3 차원 구조용 요소를 사용하였다.

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

Fig. 2는 마멸 손상된 전열관의 유한요소 모델이다. 해석 모델은 축방향의 대칭(symmetric) 조건을 이용할 수 없으므로 전체의 1/2을 모델링 하였다. 해석 시 마멸 길이에서 원주 방향 응력이 가장 높은 곳에서의 응력값을 평균 원주응력으로 하여 마멸에 의해 감소된 두께에서 각 절점에서의 응력을 이용하여 두께를 따라 적분한 후 두께로 나눈 값으로 하였다.

Table 1 Material properties of Inconel 600 for plastic instability analysis

σ_{ys} (MPa)	σ_u (MPa)	K (MPa)	ν	n
340.5	735.5	3190	0.3	0.36

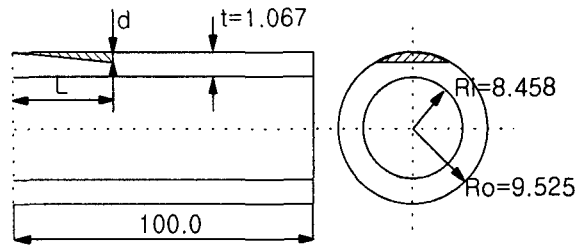


Fig. 1 Schematic diagram of I-type (inclined type) wear in a tube.
d is wear depth.

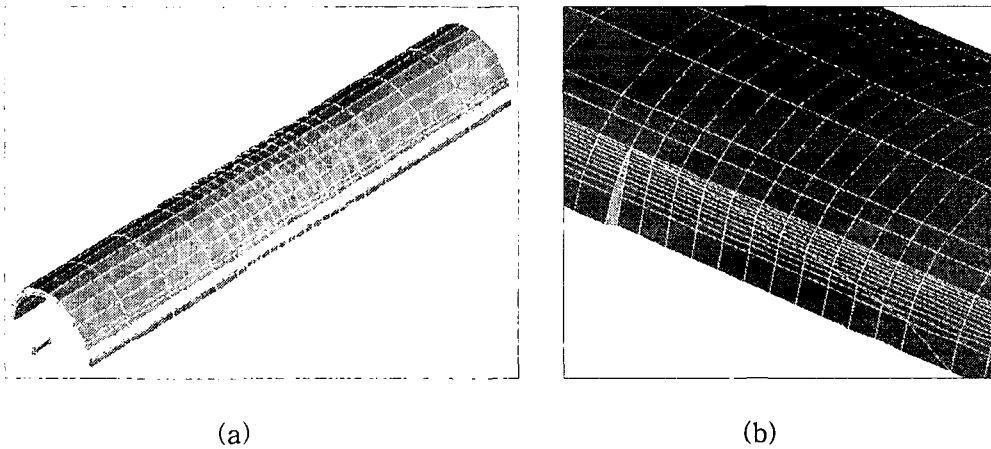


Fig. 2 Element model of I-type worn steam generator tube

3. 해석 결과

I-형 마멸 손상에 대한 해석 결과를 정한섭 등¹⁾에 의해 수행된 실험 값과 함께 비교하였다. Fig. 3 (a)와 (b)는 각각 마멸 결합부 길이(L)가 25.4, 50.8 mm에 대한 결과이다.

Fig. 3 (a)은 마멸 결합부 길이가 25.4 mm인 경우로 마멸 깊이비를 0.2~0.9로 변화시켰으며 두 가지 파열조건으로부터 얻어진 해석결과와 수정된 Svensson 식 (3)을 함께 나타내었다. 정한섭 등[1]은 마멸 길이는 20~30 mm, 마멸 깊이비는 0.3~0.8에 대해서 파열 시험을 수행하였다.

$\sigma_{\theta} = \sigma_{ut}$ 의 파열조건을 사용하였을 때의 해석결과를 볼 때 0.2 이상의 마멸 깊이비에서 실험치와 잘 일치하는 값이 얻어졌다. $\sigma_{\theta} = (\sigma_{\theta})_{ref}$ 의 파열조건은 $\sigma_{\theta} = \sigma_{ut}$ 의 조건보다 보수적인 값을 주게됨을 알 수 있다.

Fig. 3 (a)에는 식 (3)의 수정된 Svensson 식에 의해 계산된 결과도 함께 표시하였다. 식 (3)에 의해 계산된 결과와 비교하면 마멸 깊이가 작은 경우 $\sigma_{\theta} = (\sigma_{\theta})_{ref}$ 의 파

열조건에서 얻은 결과와 아주 유사한 값을 주고 있음을 알 수 있다. 그러나 마멸 깊이가 깊어질수록 식 (3)에 의한 파열압력은 $\sigma_{\theta} = (\sigma_{\theta})_{ref}$ 에서 얻은 결과보다 더 낮은 압력 값을 주게 된다. 식 (3)은 마멸부의 최소 두께의 함수이며 결합부의 형상에는 무관한 식이다. 따라서 결합부 형상의 영향을 보기 위해서는 수정된 Svensson 식 (3) 대신 $\sigma_{\theta} = (\sigma_{\theta})_{ref}$ 의 조건을 사용하여야 한다.

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

Fig. 3 (b)는 결합부 길이를 50.8 mm로 하였고 마멸 깊이비를 0.2~0.9로 변화시켰다. 정한섭 등[1]은 마멸 길이는 50 mm, 마멸 깊이비는 0.7~0.8에 대해서 파열 시험을 수행하였다. 그림에서 보면 $\sigma_{\theta} = \sigma_{ut}$ 의 파열조건을 사용하였을 때의 해석결과를 볼 때 마멸 깊이가 50.8 mm인 경우 실험치와 유사한 값이 얻어짐을 알 수 있으며, $\sigma_{\theta} = (\sigma_{\theta})_{ref}$ 의 파열조건은 $\sigma_{\theta} = \sigma_{ut}$ 의 조건보다 보수적인 값을 주게됨을 알 수 있다.

또한 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 아주 유사한 값을 주고 있으나 마멸 깊이가 깊어질수록 $\sigma_{\theta} = (\sigma_{\theta})_{ref}$ 에서 얻은 결과보다 더 낮은 압력 값을 주는 것을 알 수 있다.

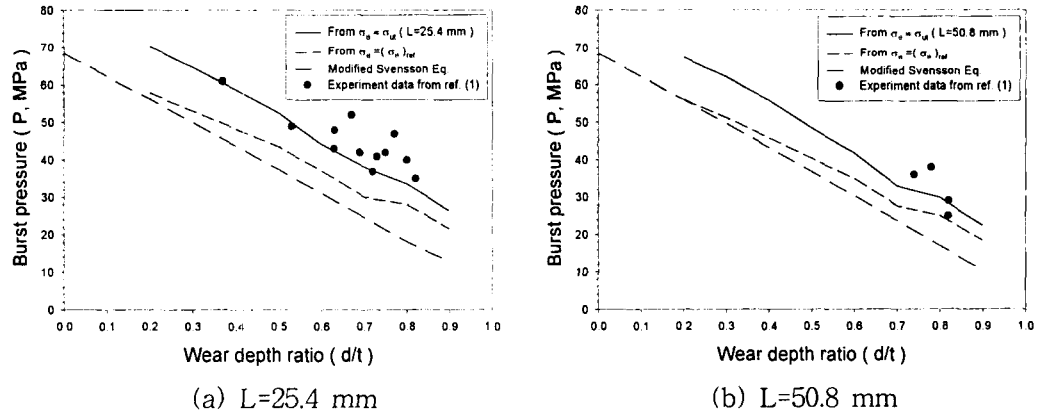


Fig. 4 Burst pressure of I-type worn steam generator tube

4. 결론

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

1. 마멸 깊이비 0.2 이상의 마멸 손상의 경우 $\sigma_{\theta} = \sigma_{ut}$ 의 파열조건에서 구해진 파열압력은 기존의 실험에서 구해진 파열압력과 유사한 결과가 나타났다.

2. $\sigma_{\theta} = (\sigma_{\theta})_{ref}$ 의 파열조건은 $\sigma_{\theta} = \sigma_{ut}$ 의 파열조건 보다 보수적인 파열압력을 보여 주었다.
3. $\sigma_{\theta} = (\sigma_{\theta})_{ref}$ 의 파열조건에서 구해진 파열압력은 마멸손상의 경우 결함부의 형상에는 무관한 식인 수정된 Svensson 식 (3)의 결과보다는 높게 나타났으며 이러한 결과로부터 보수적인 파열압력을 얻기 위하여 식 (2) 또는 식 (3)을 사용할 수 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 정한섭, 김기태, 김홍덕, “증기발생기 전열관 건전성 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, 1979, “Steam Generator Tube Integrity Program Phase I Report”, NUREG CR-0718 report.
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 건전성 Workshop, 한국원자력안전기술원, 2000.
8. 김범년, 김진원, 박치용, “감육배관의 최소 허용두께 결정방법에 대한 고찰”, 대한기계학회 제2회 보일러 및 압력용기 위원회 학술대회 논문집, pp. 35-41, 1999.
9. EPRI NP-6865-L, “Steam generator tube integrity, Volume 1: Bust test results and validation of rupture criteria”, 1991.