

전열관의 마모 체적형상에 따른 마모깊이 예측 Prediction of Wear Depth of SG Tube based on Types of Wear Scar

유기완† · 김형진* · 박치용**

Ki-Wahn Ryu, Hyung-Jin Kim, and Chi-Yong Park

Key Words : Wear(마모), SG Tube(증기발생기 전열관), Turbulent Excitation(난류가진), Fixed Point Method(고정점법)

ABSTRACT

Calculation of wear depth with regard to the wear topology is performed numerically. Four typical wear topology, that is round, crescent, flat, and diamond types are adopted to represent the configuration of wear volume. Diamond and flat types are the most severe topology for wear depth history, whereas round and crescent types have small increasing rate of wear depth to the wear volume. Based on this study we can guess that the most severe wear phenomena happens to be upper side of U-tubes in the KSNP SG, because flat or diamond wear will be generated by the wearing motion between tubes and diagonal, vertical, horizontal strips. The misalignment of tube at the stage of manufacturing or distortion of upper structure due to the thermal expansion or vibration of upper structure such as diagonal, vertical, and horizontal strips will be one of the main causes of flat or diamond wear.

1. 서 론

원전 증기발생기 전열관들은 증기발생기 내부에 무수히 많은 다발 형태로 존재하며 원자로에서 가열된 열에너지를 전열관 외부의 냉각수에 전달하여 증기화 하도록 하는 열 전달 기구이다. 또한 전열관은 대략 1mm 정도의 두께를 가지고 방사능 차폐와 열전달 효율 증대라는 두 가지 설계 요구조건을 만족하여야 하는 어려움이 있다. 일반적으로 전열관 외부의 유동은 전열관에 유체유발진동(flow-induced vibration)을 야기하여 전열관 끼리 부딪히는 현상 뿐 만 아니라, 유체탄성불안정성(fluid-elastic instability)이나 난류여기(turbulent excitation)에 따른 진동 문제를 해결하기 위해 전열관 지지대를 두게 된다. 이러한 지지대는 전열관 지지판(tube support plate)이나 수평, 수직, 대각 지지대가 증기발생기 내부에 자리하여 전열관의 과도한 진동을 크게 완화시키는 구실을 하게 된다. Fig. 1은 한국표준원전 증기발생기(KSNP SG)의 내부 단면 구조를 보여주고 있으

며, 그림에 보이는 바와 같이 높이 방향으로의 전열관 지지판과 수평, 수직, 대각 지지대를 보여주고 있다.

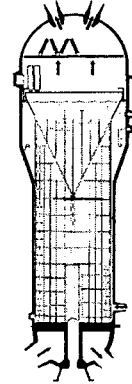


Fig. 1 Sectional view of KSNP SG

한국표준원전에서 중앙공동부위의 상부에 있는 전열관의 수평부위에 마모현상이 집중되고 있고, 이에 대한 원인 분석이 필요한 상황이다[1]. 현재 마모깊이가 전열관 두께의 40%를 초과하였을 경우에는 전열관을 관막음처리하도록 하는 규정을 적용하고 있으며, 원전의 안정적인 운영을 위해서는 미리 관막음을 예측할 수 있는 프로그램을 개발하는 것도 원전 증기발생기 관리 프로그램상에 있어서 중요한 역할

† 책임저자, 전북대학교 기계항공시스템공학부
E-mail : kwryu@chonbuk.ac.kr
Tel : (063) 270-4286, Fax : (063) 270-2472

* 전북대학교 대학원 항공우주공학과

** 한전 전력연구원

을 하리라 본다. 이를 위해 본 연구에서는 단순화된 직관 전열관 하나에 대해서 마모체적에 따른 전열관 마모 깊이가 어떤 경향을 갖는지에 대해서 여러 가지 마모 형상을 상상하여 비교 검토하기로 한다.

2. 마모깊이 계산

2.1 마모형상에 따른 깊이

본 연구에서 마모는 전열관에서만 일어나고 지지대에서는 마모가 없는 것으로 간주하기로 한다. 마모 형상에 대해서는 Connors [2]가 몇 가지 마모 형상에 대한 수식을 제시한 바 있다. Fig. 2는 전열관이 둥그런 구멍이 나있는 전열관 지지판으로 지지됨에 따라 원주방향으로 일정한 깊이로 마모된 형상 (둥근 마모, round wear)을 보여주고 있다. 이 경우에 마모 깊이는 마모체적에 대해 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$h = \frac{d - \sqrt{d^2 - 4V/\pi L}}{2} \approx \frac{V}{\pi d L} \quad (1)$$

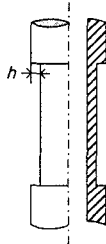


Fig. 2 Round wear scar

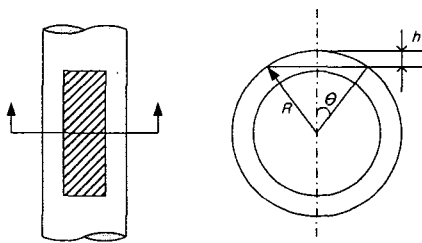


Fig. 3 Flat wear

Fig. 3은 전열관의 한쪽면만 평판 지지대에 의해 마모가 이루어진 형태(평면 마모, flat wear)를 보이고 있다. 이 경우의 마모식은 다음과 같다.

$$V = d^2 L (2\theta - \sin 2\theta) / 8 \quad (2a)$$

$$h = d(1 - \cos \theta) / 2 \quad (2b)$$

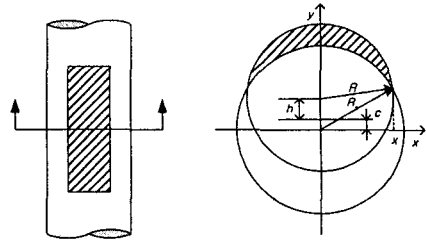


Fig. 4 Crescent wear

근사적인 방법으로는 식 (2a)를 다음과 같이 근사화 시킬 수 있다.

$$V \approx d^2 L \theta^3 / 6 \quad (2c)$$

위 식에서 얻어진 θ 값을 식 (2b)에 대입하면 주어진 마모체적에 대한 최대 마모 깊이를 얻어낼 수 있다.

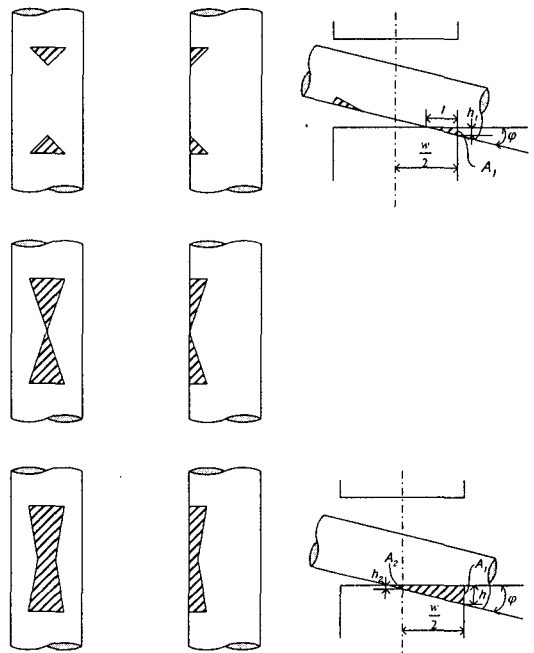


Fig. 5 Diamond wear

Fig. 4는 전열관이 지지대 원형 구멍에서 초승달 모양으로 마모(초승달마모, crescent wear)가 일어나는 경우를 도시한 것이다. 여기서 마모면적 A는 다음과 같이 표현된다.

$$A = R^2 \sin^{-1} x/R + x\sqrt{R^2 - x^2} + 2(h+c)x - R_s^2 \sin^{-1} x/R_s - x\sqrt{R_s^2 - x^2} \quad (3)$$

여기서 x 는 다음과 같다.

$$x = \sqrt{R_s^2 - \frac{[R^2 - R_s^2 - (h+c)^2]^2}{4(h+c)^2}} \quad (4)$$

위 (3)식과 (4)식에서 마모체적 $V = AL$ 이 성립되며, 이를 통해 수치적인 방법으로 주어진 마모체적에 대한 마모 깊이를 구할 수 있다. 이를 위해 마모 깊이를 다음과 같이 표현 하도록 한다.

$$h = [V/L + R_s^2 \sin^{-1} x/R_s + x\sqrt{R_s^2 - x^2} - R_s^2 \sin^{-1} x/R_s - x\sqrt{R^2 - x^2}]/2x - c \quad (5)$$

Fig. 5는 다이아몬드 마모(diamond wear) 형태의 흠집을 보여주고 있다. 이 경우에는 마모 깊이가 $w\phi/2$ 보다 큰 경우와 작은 경우로 나누어서 마모 깊이를 계산하게 된다. 마모체적과 마모깊이의 상관식은 다음과 같다.

i) $h_1 \leq w\phi/2$ 인 경우

$$V = \frac{A_1 l}{3} \quad (6a)$$

$$l = h_1/\phi$$

ii) $h_1 > w\phi/2$ 인 경우

$$V = w[A_1 + A_2 + \sqrt{A_1 A_2}]/6 \quad (6b)$$

$$h_2 = h_1 - w\phi/2$$

위 식에서 A_1 과 A_2 는 각각 깊이 h_1 과 h_2 로 마모된 단면적을 의미하며 w 와 ϕ 는 각각 지지대의 두께와 전열관의 경사 각도를 나타낸다.

2.1 수치계산

마모 체적을 알 때 여러 가지 마모형상에 대한 마모깊이 예측 식은 식(2)에서 식(6)까지 나타내었다. 이 식들을 풀기 위해서는 수치적인 방법을 통한 root finding 절차를 이용하여 원하는 해를 얻을 수 있게 된다 [3]. 본 연구에서는 고정점 방법(fixed point method)을 사용하였으며, 그 절차를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$f(x) = x - g(x) = 0 \quad (7a)$$

$$x^{k+1} = g(x^k) \quad (7b)$$

수렴조건은 10^{-7} 오차에 대해서 수렴한 것으로 간주하였으며, 과도한 반복계산 현상 없이 빠른 속도로 수렴한 결과를 얻을 수 있었다.

3. 결과 및 검토

3.1 수치해석 결과의 검증

먼저 본 연구에서 적용할 수치해석 방법인 fixed point method를 이용한 마모깊이 예측 결과를 flat wear에 대해서 Fig. 6에 비교하였다. 비교 방법은 식 (2)에서 마모 깊이 h 를 입력으로 하여 구한 마모체적 V 값으로부터 얻어낸 마모체적-마모 깊이 테이블을 역계산하여 아래와 같이 curve fitting식을 얻어내었다.

$$h[\text{mm}] = 0.0226V^{0.6672}[\text{mm}^3] \quad (8)$$

여기에서 사용한 전열관과 지지대의 제원은 한국표준원전에서 적용되고 있는 전열관 직경 0.75"와 TSP폭 2" 값으로 하였다. 수치해석한 결과와 역계산을 통해 해석적으로 얻어낸 결과는 매우 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

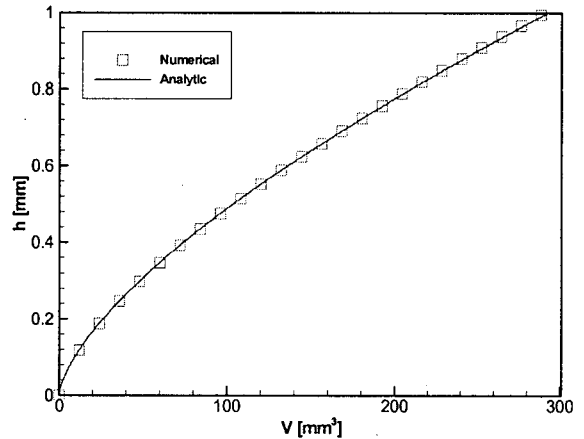


Fig. 6 Validation of wear history

식(8)에서 알 수 있듯이 마모 관계식은 log-log그래프로 그렸을 때 선형 결과를 보여주는 것을 알 수 있다. x -축과 y -축을 그렸을 때 결과 그래프는 Fig. 7과 같이 나타나며, 따라서 전열관의 마모 현상은 초기에 마모 깊이가 빠른 속도로 진전되다가 서서히 그 속도가 줄어들게 됨을 알 수 있다.

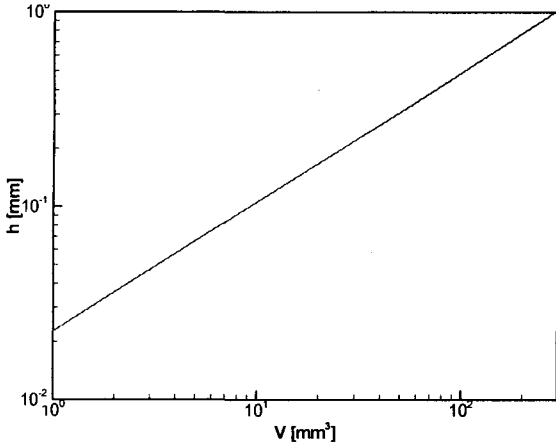


Fig. 7 Log scale of wear depth history

3.2 마모체적에 따른 마모 깊이

Fig. 8에서는 앞 절에서 제시한 4가지 마모체적 형상에 대한 마모 깊이를 수치적으로 계산하여 얻어낸 결과이다. 결과에서 알 수 있듯이 다이아몬드 형태의 마모가 가장 큰 마모 깊이를 보여주고 있으며, 이어서 평면 마모, 초승달 형 마모, 둥근 마모 순의 결과를 보여주고 있다.

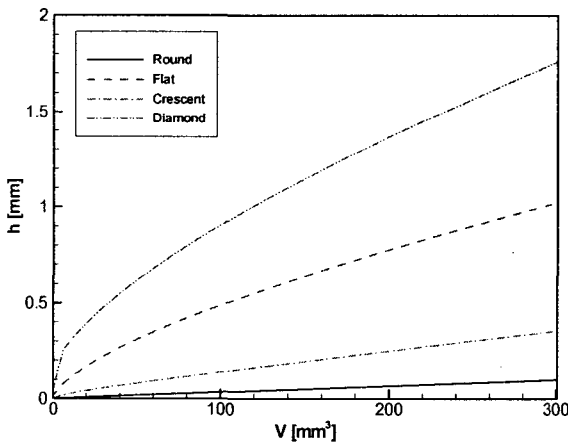


Fig. 8 Comparison of wear depth with various wear scars

주로 둥근 마모는 TSP에서 전열관의 중심축을 기준으로 한 회전운동이 주 원인이라고 볼 수 있으며, 원주를 따라 고르게 마모가 되기 때문에 동일한 마모체적에서 마모깊이가 가장 작게 나오는 결과를 보이고 있다. 초승달 형태의 마모는 전열관이 TSP 전열관 구멍에 중심이 일치되지 않는 초기 오차를 가지고 조립되었을 때 난류여기에 의해 마모가 되는 메커니즘이라고 볼 수 있다. 상대적으로 이러한 마모체적 형상은 나머지 마모체적 형상인 평면 마모나 다이아몬드 형태의 마모에 비해서 마모 깊이가 작은 결과를 보인다는 것을

알 수 있다. 평면 마모나 다이아몬드 형 마모는 한국표준원전(Korea Standard Nuclear Powerplant, KSNP) 증기발생기 전열관의 경우로 보면 전열관 상부의 대각, 수직, 수평 지지대에서 발생할 확률이 매우 높다고 볼 수 있다. 또한 Fig. 8에서 알 수 있는 것은 조립상태에 따른 조립오차나 각도 오차가 전열관의 마모에 아주 심각한 영향을 줄 수도 있다는 것이다. 특히 조립각도 편차는 썩기형태의 마모 형상을 유발하고 특정지점에서 마모 깊이를 크게 증가시킨다는 문제점을 안고 있다. 이러한 조립오차는 증기발생기 제작과정 뿐만이 아니라, 증기발생기 운전에 의한 열팽창에 따른 전열관 상부지지 구조물(대각지지대, 수직지지대, 수평지지대)의 열팽창과 열비틀림, 전열관 상부지지 구조물 자체의 진동모드와 난류 여기에 의한 전열관 마모 증가 등의 현상을 유발할 것으로 보여진다.

4. 결 론

여러 마모체적형상을 산정하여 이에 대한 마모깊이를 예측할 수 있는 수식을 정립하고 수치해석을 통해 주어진 마모체적과 형상에 대한 마모 깊이를 얻어내었다. 마모체적 증가 (즉, 시간 증가) 에 대해 마모 깊이는 진전속도가 둔화됨으로 알 수 있었으며, log-log 스케일로 그래프를 나타내었을 때 선형 경향을 보여주었다. 따라서 원전 증기발생기 전열관의 마모 진전속도는 초기에 빠른 속도로 증가하다가 서서히 둔화되는 경향을 보인다고 볼 수 있다.

마모체적형상에 따른 마모깊이는 둥근 마모, 초승달 마모, 평면 마모, 다이아몬드 마모 순으로 큰 값을 갖는 것을 보여주었다. 따라서 한국표준원전 증기발생기 전열관을 예로 들자면 증기발생기 TSP hole에서의 마모 현상에 비해서 증기발생기 상부구조물들에 조립각도나 치수 오차에 의한 마모 현상이 매우 심각한 관측음의 원인이 될 것이라는 것을 규명할 수 있었다.

후 기

본 연구는 한전 전력연구원의 원자력증장기개발과제의 일환으로 수행되었음

참 고 문 헌

- (1) 박치용, 2003, "증기발생기 세관 및 마모평가 자문보고서," 한전전력연구원 기술메모 TM.02NE05.P2002.498.
- (2) Connors H. J., 1981, "Flow-Induced Vibration and Wear of Steam Generator Tubes," Nuclear Technology, pp. 311~331.
- (3) Chapra, S. C., and Canale R., 1998, Numerical Methods for Engineers, McGraw-Hill, 2nd edition.