

현장 측정 데이터를 이용한 SG 세관 마모량 예측 방법

이용선 · 김태순 · 박치용

한국전력공사 전력연구원 원자력연구실

1. 서 론

기계부품 및 구조물의 상호접촉면이 미소변위에 의해 상대운동을 할 때 접촉면에서는 마모가 발생하고 이러한 마모현상은 당해 구조물의 안전성을 심각하게 위협하는 결과를 초래하게 된다. 이러한 마모 현상에 대한 근래의 연구동향으로는 Engel^(1,2)이 충격(impact)에 의한 마모에 대해, 그리고 Waterhouse⁽³⁾는 미끄럼(sliding) 마모에 대해 연구한 바 있다. 원자력발전소의 증기발생기(steam generator) 내에서 1차측의 세관(tube)과 2차측에 속하는 지지물(supporter) 또는 방진대(antivibration band) 사이에서 세관의 진동으로 인해 지지물과 충돌을 일으키고 충돌 횟수가 누적되면 세관의 마모로 이어져 결국 세관의 건전성은 침해받게 된다.

본 논문에서는 이러한 마모량을 예측하는 방법으로 핵연료 교환주기를 기준으로 마모량을 계산하고, 다음 주기까지의 세관의 건전성을 고려하는 보다 현실적인 방법을 고려하였다. 이를 위해 Engel의 충격모델을 수정하고, 현재의 마모깊이와 측정된 시간을 알 때 역으로 충격모델에 있는 물성상수(material constant)를 산출한 후, 이 물성상수를 이용하여 다음 주기까지의 마모량을 예측하는 방법을 제안하였다. 그리고 충격에 의한 마모와 상호연관이 있는 미끄럼에 의한 마모에 대해서도 두 개의 마모가 독립적으로 일어난다고 가정하고, 미끄럼에 의한 마모량을 Archad의 식을 이용하여 구하였다.

2. 해석 방법

2.1 충격에 의한 세관의 마모

충격에 의한 마모에 대하여 Hertz의 접촉응력을 토대로 기존 연구결과를 수정하여 실제 원전 증기발생기 세관의 마모를 예측할 수 있도록 하였다. 또한 충격을 주는 물체를 구로 생각하여 충격을 주는 물체의 마모 혹은 충격을 받는 물체의 마모에 대해서 생각하였고, 충격을 주는 물체가 원통일 경우의 마모현상에 대해서 고려하였다.^(4,5,6)

충격을 받는 물체의 질량은 원통형 충격체의 질량에 비해 매우 크고, 곡률 반경 또한 무한히 크며 두 물체의 물성치는 동일하다고 가정하였다. 그리고 두 물체의 접촉면은 구형이고 접촉면 길이의 1/2에 해당하는 길이를 b_c 라 하면 이때의 충격하중 q 는,

$$q = \frac{\pi}{2} \frac{1}{K(K')} \frac{E\delta}{2(1-\nu^2)}, \quad [E_1 = E_2 = E, \nu_1 = \nu_2 = \nu = 0.3] \quad (1)$$

여기서 두 물체가 접근하는 변위 δ 와 최대수직접촉응력 q_c 는

$$\delta = \frac{2}{\pi} K(K') \left[\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right] q \quad (2)$$

$$q_c = \frac{b_c}{\Delta} = \left[\frac{2q}{\pi} \frac{R_1+R_2}{2R_1R_2} \frac{1}{\pi(K_1+K_2)} \right]^{1/2} \quad (3)$$

으로 나타낼 수 있다. 만일 충격을 받는 물체가 평면이고 ($R_2 \rightarrow \infty$), 충격체에 비해 질량이 매우 큰 반면에 두 물체의 탄성계수 E 나 푸아송 비 ν 등의 기계적 성질은 유사하다면 q , b_c , q_c 및 t^* 는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} q &= 0.31(E\mu v^2)^{1/2}, & b_c &= 0.83574(R^2 E^{-1} \mu v^2)^{1/4} \\ q_c &= 0.2293(E^3 \mu v^2 R^{-2})^{1/4}, & t^* &= 5.22(mE^{-1})^{1/2} \end{aligned} \quad (4)$$

2.2 충격에 의한 세관의 마모량 계산

원통형의 충격체가 평면에 충격을 가할 때 평면은 마모되지 않으며 충격체만 단면적이 축방향으로 균일하게 마모된다고 가정하였다. 이 때의 마모체적 W_c 와 마모깊이 h 는 Fig. 1에서 보여준 것처럼 간단히 구하였다.

$$W_c = \frac{b_c}{2} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R} \right) = \frac{b_c^3}{2} \frac{1}{R_1} (1-\lambda) l \quad (5)$$

$$h = \frac{1}{2} \frac{b_c^2}{R_1} (1-\lambda) \quad (6)$$

그리고 마모의 형상은 실제 원전 증기발생기의 마모된 관을 관찰한 결과 Fig. 2에서처럼 측면이 삼각형 형상을 띠는 쐐기형(wedge type)과 마모가 진행됨에 따라 마모의 깊이가 균일하게 되는 장방형(rectangular type)으로 나눌 수 있다. 이 때의 마모량은 먼저 쐐기형 마모의 경우에는

$$W_R/l = R_1^2 \left(\frac{h_0}{R_1} \right)^{3/2} \left(\frac{2\sqrt{(2)}}{5} - \frac{h_0}{7R} \right), \quad \left(a = \frac{h_0}{\tan 1.5^\circ} \right) \quad (7-a)$$

이고, 장방형 마모의 경우에는

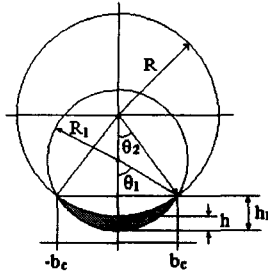
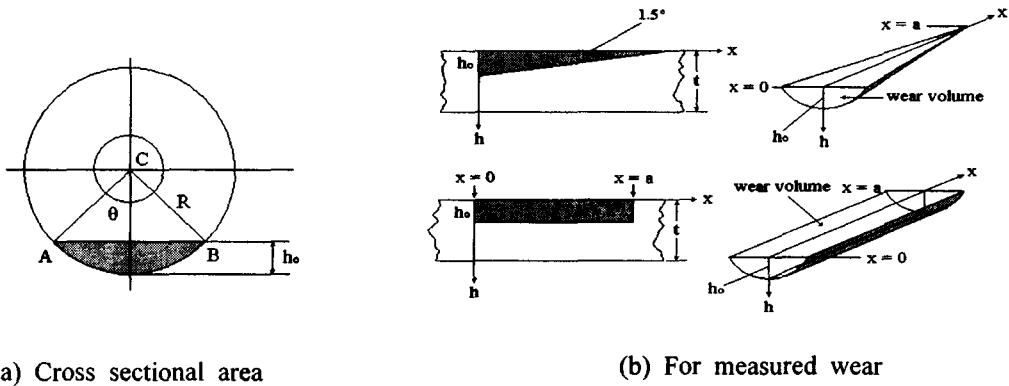


Fig. 1 Configuration for dynamic contact model.



(a) Cross sectional area

(b) For measured wear

Fig. 2 Cross sectional area configuration

$$W_R/l = R_1^2 \left(\frac{h_0}{R_1} \right)^{3/2} \left(2^{1/2} - \frac{h_0}{2R} \right) \quad (7-b)$$

으로 나타낼 수 있다. 식(4)에서 R 는 초기반경이라 생각하여 도출한 결과식이므로 R 대신 변화된 곡률반경인 R_1/λ 를 대입하면 마모된 후의 q , b_c , q_c 및 t^* 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} q &= 0.301(E\mu v^2)^{1/2}, & b_c &= 0.83574(R^2 E^{-1} \mu v^2)^{1/4} \lambda^{1/2} \\ q_c &= 0.2293(E^3 \mu v^2 R^{-2})^{1/4} \lambda^{1/2}, & t^* &= 5.22(mE^{-1})^{1/2} \end{aligned} \quad (8)$$

Engel^(2,3)은 마모체적 W_c 와 충격횟수 N 와 최대접촉응력 q_c 와의 관계를 다음과 같이 생각하였다.

$$W_c = KN^b q_c^{3c} \quad (9)$$

여기서 K , b , c 는 물질상수로 c 는 아직 그 값을 모르는 물질상수이며, $3c/2$ 는 N 이 N_1 과 N_2 사이에서는 불변이라는 가정 하에 $N=N_2$ 일 때의 다음 식을 만족하는 λ 를 구할 수 있다.

$$\ln \frac{N_2}{N_0} + \frac{3+3c}{2} \ln \lambda_0 + \ln(1-\lambda_0) + \frac{3+3c}{2} \ln \lambda - \ln(1-\lambda) = 0 \quad (10)$$

식 (10)에서 근은 Newton-Raphson 근사식을 이용하여 성장할 수 있는 마모깊이와 마모체적을 구할 수 있다.

2.3 미끄럼에 의한 세관의 마모량

다음으로 미끄럼에 의한 세관의 마모량을 Archad의 식을 이용하여 구하였다. 만약 미끄럼 물체의 질량을 m 이라 하고, 미끄럼에 관여하는 마찰력을 μp 라 하자. 여기서 p 는 수직 충격하중이고, 미끄럼 물체가 움직이는 거리를 x 라면 Archad의 식은,

$$W = K \frac{\mu p x}{3H} \quad (11)$$

으로 나타낼 수 있으며, 식(11)에서 물질상수 $K/3H$ 가 다음 주기 동안 변하지 않는다고 가정하면 결국,

$$\frac{K_2^3}{2R_1} \frac{1-\lambda}{\lambda^{3/2}} = \left(\frac{K}{3H} \right) \frac{2\mu p_0^2 t^*}{\mu \pi} N_1 \quad (12)$$

으로 나타낼 수 있고, 식(12)를 이용하면 측정된 여러 마모깊이에 대하여 다음 주기까지의 미끄럼에 의한 마모량을 예측할 수 있다.

3. 해석결과

본 연구에서 대상으로 한 실제 원전 A와 B에 대하여 측정된 관의 마모량과 충격모델과 미끄럼 모델을 이용하여 측정된 시기로부터 1 EFPY 지난 시점에서의 마모깊이를 비교하였다.

원전 A는 1 EFPY 지난 후의 마모를 측정된 결과 14%에서 40%까지 마모가 일어남을 알 수 있었다. 이 마모된 관이 1 EFPY 지난 후 다시 마모깊이를 측정된 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 원전 B에 대해서는 4 EFPY 운전 후 관의 마모량을 측정하여 이 마모된 관이 1 EFPY 지난 후 다시 마모깊이를 측정된 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

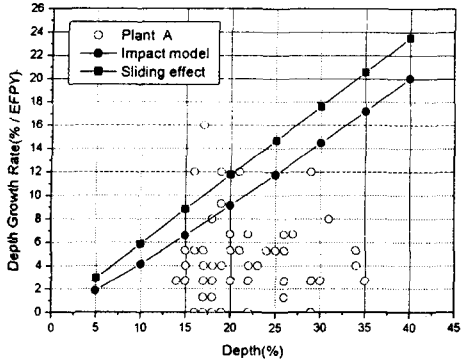


Fig. 3 Predicted & measured wear depth from 1 EPFY to 2 EPFY.(Plant A)

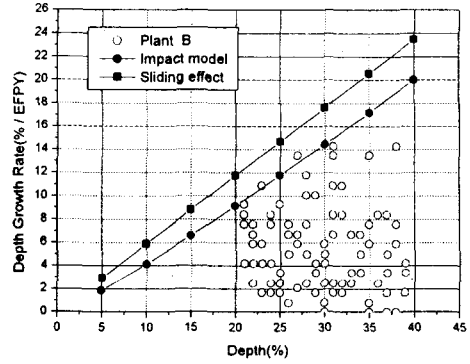


Fig. 4 Predicted & measured wear depth from 1 EPFY to 2 EPFY.(Plant B)

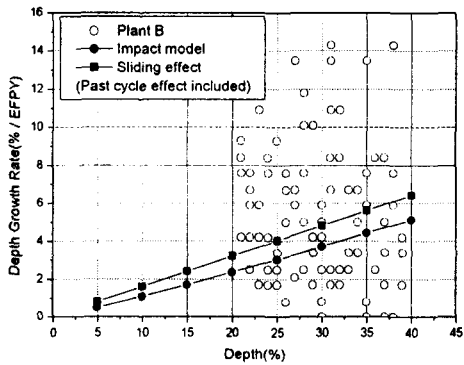


Fig. 5 Predicted & measured wear depth from 4 EPFY to 5 EPFY.

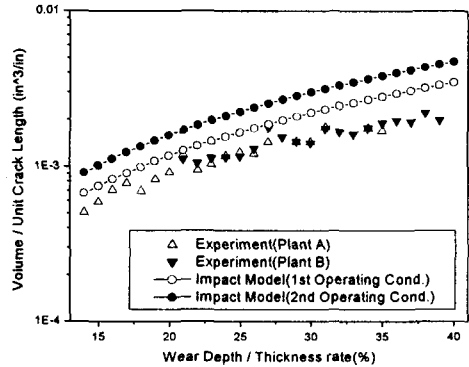


Fig. 6 Predicted & measured wear volume.

또한 측정된 관의 초기 마모깊이 h_i 에 대하여 물질상수 $3c/2$ 를 구한 후 이를 토대로 1 EPFY 경과 후의 마모량을 계산하여 Fig. 3 및 Fig. 4에 같이 보였다. 그리고 원전 B에 대하여 과거의 충격수 $N_1=4N$ 을 고려한 물질상수 $3c/2$ 를 이용하여 4 EPFY까지 측정된 마모깊이를 기준으로 한 4 EPFY에서 5 EPFY까지의 관의 마모깊이를 계산하여 Fig. 5에 나타냈다.

미끄럼에 대하여도 주어진 마모깊이에 해당하는 물질상수 $K/3H$ 를 구하고, 이 물질상수 $K/3H$ 를 근거로 구한 곡률반경의 비 λ 를 기준으로 1 EPFY 후의 마모깊이를 구할 수 있다. 이러한 결과는 Fig. 3, 4 및 5에 충격모델의 결과와 같이 나타냈다. Fig. 5에서는 과거의 충격수들을 고려하여 예측한 마모깊이는 측정된 값과 일치하지 않는 것을 볼 수 있는데, 이는 측정된 마모깊이로부터 다음주기까지의 마모깊이를 예측하고자 할 경우에는 과거의 충격수들을 무시하고 측정된 주기로부터의 충격수를 고려하여

예측하는 것이 타당함을 보여주고 있다.

다음으로, 원전A 및 B의 증기발생기 관의 평균 마모깊이를 측정하여, 장방형 마모체적을 계산한 결과를 Fig. 6에 보였다. Fig. 6에는 많은 측정된 양의 평균치를 각각의 깊이에서 구하고 1 EFPY동안의 단위 깊이당의 마모체적과 Fig. 4 혹은 Fig. 5에서 구한 λ 와 식 (24)의 W_c 를 사용하여 얻은 값을 사용하였다. 예측한 장방형마모의 체적은 충격모델을 사용한 값이 측정된 마모깊이로부터 구한 값보다 크게 나타났다.

4. 결 론

본 논문에서는 충격 및 미끄럼 모델에 의한 마모깊이를 구하는 공학적 모델을 수정하였다. 모델에 포함된 물질상수를 이용하는 대신 주어진 시간에서의 마모깊이와 충격수를 가정하여 역으로 주어진 마모깊이와 충격수에 대하여 물질상수를 구하고, 가정된 충격수로부터 다음 시간까지의 마모깊이 혹은 체적을 구하였다. 이 결과를 실제 원전 A 및 B의 증기발생기 세관의 마모깊이와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 충격에 의한 마모량에 대해 측정된 마모깊이 및 충격수를 이용하여 역으로 물질상수 $3c/2$ 를 구한 후 다음 주기의 마모깊이를 계산하여, 실제 측정된 마모깊이가 다음 주기까지 성장했을 때의 마모깊이를 측정하여 얻은 결과와 비교하였다.

2) 과거의 충격수들을 고려하여 4 EFPY에서 5 EFPY까지 1주기 동안 성장한 후의 마모깊이를 구한 결과 측정값보다 매우 적게 나타났으며, 실제 측정된 평균 마모체적은 충격모델 또는 미끄럼모델을 이용하여 얻은 값보다 적게 나타났다. 이것은 충격하중 또는 마모깊이를 구하는데 최대충격속도를 사용하였기 때문이다.

4) 충격 또는 미끄럼모델에 관련된 물성상수를 이미 알고 있는 마모깊이와 충격수로부터 역으로 산출하여 근사적으로 가까운 미래의 마모량을 예측할 수 있다.

참고문헌

- (1) Engel P. A., 1978, "Impact Wear of Materials", *Tribology Series 2*, Elsevier Scientific Publishing Co.
- (2) Engel P. A., 1995, Friction, "Lubrication and Wear Technology", *ASME Handbook vol. 18*, p.263.
- (3) Waterhouse R. B., 1995, Fretting Wear, *ASME handbook*, vol.18, Friction, Lubrication and Wear Technology, p.242
- (4) Seely F. B. and Smith J. O., 1952, Advanced Mechanics of Materials, *John Wiley and Sons Inc.*
- (5) Johnson K. L., 1985, Contact Mechanics, *Cambridge University Press.*
- (6) Cresczuk L. B., 1975, "Response of Isotropic and Composite Materials to Particle Impact", *ASTM STP 568*, p.183.