

증기발생기 세관과 지지대 간극이 세관 마모에 미치는 영향

박치용[†] · 이용선* · 부명환* · 김태룡* · 김태순**

Effects of Gap between Tube and Support Plate on the Steam Generator Tube Wear

Chi-yong Park, Yong-son Lee, Myung-hwan Boo, Tae-Ryong Kim and Tae-soon Kim

Key Words: Steam Generator Tube(증기발생기 세관), Gap(갭), Work Rate(일률), Wear Depth(마모깊이), Wear Volume(마모체적)

Abstract

The major flow-induced vibration mechanisms such as fluid-elastic and turbulence excitation can cause the various types of wear of the steam generator tubes in unclear power plant. It is generally accepted that the tube wear due to vibration is affected by the presence of gap clearance between tube and support plate. Connors showed that the tube wear depth could be estimated by using the relationship between wear volume and sliding distance for contact time. Au-Yang predicted the wear depth by using the nonlinear characteristics of normal work rate to contact time. In this study the effect of gap size on the steam generator tubes wear is analyzed by deriving the wear depth versus normal work rate relationship from these previous results.

1. 서 론

원전 증기발생기(steam generator) 세관(tube)과 세관지지대(tube support) 사이를 흐르는 유체는 유동유발 진동(flow induced vibration)에 의해 다양한 형태의 외력과 변위를 발생시킨다. 이로 인하여 세관과 세관지지대는 미소변위에 의한 장기간 상대운동을 하게 되고 그 결과로써 접촉면(contact area)은 마모를 일으킨다. 이때 세관과 세관지지대의 갭(gap)의 크기는 세관의 마모에 많은 영향을 주는 것으로 알려져 있다.^(1,2)

증기발생기 세관에서 유동유발 진동을 일으키는 기구(mechanism)로는 유체탄성가진(fluid-elastic

excitation), 난류여기(turbulence excitation), 와류발산(vortex shedding) 등이 있다. 이 중에서 유체가 임계속도(critical value)를 초과할 때 발생하는 유체탄성가진은 주로 세관의 큰 진폭을 갖는 진동과 함께 급속한 마모를 일으키는 반면에 임계속도 이하에서 발생하는 난류는 장시간에 걸쳐서 마모를 일으키는 경향이 있다. 따라서 증기발생기 세관의 마모는 이 두 가지에 의한 마모를 모두 고려할 필요가 있다.

이러한 원전 증기발생기 세관의 진동으로 인한 마모에 대하여는 이미 많은 연구가 이루어졌다. 그러나 증기발생기의 세관과 세관지지대의 갭에 의한 세관의 마모에 대한 연구는 그리 많지 않다. Connors⁽³⁾는 세관지지대의 내경과 마모된 세관의 현(subtend)의 길이로 단면적을 표시하고 세관과 지지대의 접촉면에 관하여 적분을 행함으로써 세관의 마모체적을 구하였다. 여기에서 세관의 마모깊이는 가정하였고, 마모계수와 세관과 세관지지대 사이에 작용하는 수직력과 움직이는 거리를 이용하여 마모체적을 구하고 그때의 접촉

[†] 책임저자 : 한국전력공사 한전전력연구원

E-mail : cypa가@kepri.re.kr

TEL : (042)865-5656 FAX : (042)865-5514

* 한국전력공사 한전전력연구원 원자력연구실

** 충북대학교 안전공학과

시간을 구하였다.

Axsis 등⁽²⁾은 비선형 유동유발진동 모델을 이용하여 법선일률(normal work rate)과 갭의 관계를 연구하였다. 즉, 난류여기(turbulence excitation)일 때는 세관과 세관지지대의 갭이 증가할수록 세관의 마모체적은 줄어들고 유체탄성불안정 범위(fluid-elastic unstable region) 내에서는 갭이 증가하면 세관의 마모체적도 증가한다는 결론을 얻었다. Au-Yang⁽¹⁾ 또한 Brenneman 및 Gurdal⁽⁴⁾의 법선일률과 갭의 관계를 이용하여 마모깊이(wear depth)를 구하였다. 즉 세관이 마모될 때 세관과 세관지지대의 거리가 증가한다는 사실에 주목하여, 비선형성을 갖는 세관의 동역학적인 성질이 세관과 세관지지대의 갭의 함수임으로 이때의 법선일률은 세관이 마모되는 시간에 따라 변화한다고 생각하였다.

본 논문에서는 마모체적을 마모계수와 수직력, 변위 및 접촉시간의 관계를 이용하여 구하고, 이로부터 갭이 세관의 마모에 미치는 영향을 살펴 보았다. 또한 마모깊이 및 법선일률과 갭의 관계를 고찰하여 마모량을 구할 수 있음을 보였다.

2. 세관과 지지대의 갭에 의한 마모

2.1 마모형상과 갭의 관계에 의한 마모량 계산

유동유발진동으로 인한 증기발생기 세관과 세관지지대의 갭이 세관의 마모에 미치는 영향을 살펴보기 위해 먼저 Connors⁽³⁾의 방법을 이용하였다. Connors는 세관이 마모를 겪는 동안에 세관지지대는 원래의 기하학적 모양을 유지한다고 가정하여 세관의 마모량을 예측하였다. 또 세관의 마모되는 모양을 시간에 따라 가정하였고 세관의 마모는 지지대 길이의 1/2 이 되는 점을 기준으로 같다고 가정하여 지지대의 1/2 에 해당되는 길이에 대하여 세관의 마모를 계산하였다.

Fig. 1에 나타낸 것 과 같이 주어진 지지대의 반경을 R_s , 세관의 반경을 R , 그리고 세관과 세관지지대의 거리를 C 라 하면 세관의 마모 단면적은 다음과 같이 쓸 수 있다.[1]

$$A = R^1 \sin^{-1} \frac{x}{R} + x(R^2 - x^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$- x(R_s^2 - x^2)^{\frac{1}{2}} + 2(h + C)x - R_s^2 \sin^{-1} \frac{x}{R_s} \quad (1)$$

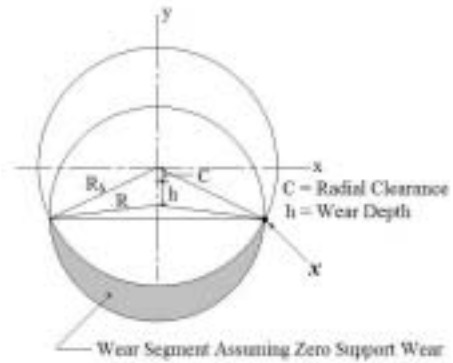


Fig. 1 Wear segment formed as tube wear occurs.⁽³⁾

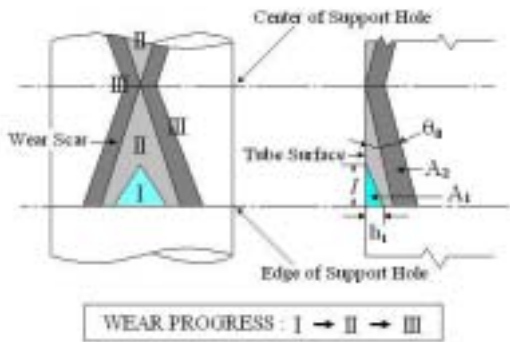


Fig. 2 Progression of SG tube wear.

여기서 h 는 마모된 세관의 최대마모깊이이며, 세관의 외경과 지지대의 내경이 만나는 점 x 는 다음과 같다.

$$x = [R_s^2 - \frac{\{R^2 - R_s^2 - (h + C)^2\}^2}{4(h + C)^2}]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Fig. 2에서처럼 세관의 마모가 진행됨에 따라 세관지지대의 방향으로 세관의 마모깊이는 변하게 된다. 세관의 마모형상은 초기에는 I 형이 되고, 점차 마모가 진행됨에 따라 II, III형으로 변한다고 가정하여 세관의 마모체적을 구하였다.

세관 지지대의 길이를 L_1 이라 할 때, 마모깊이 h 가 $h_1 \leq \theta_0 L_1 / 2$ 이면, 마모체적 V 는 다음과 같다.

$$V = \frac{1}{3}A_1l = \frac{1}{3}A_1\frac{h_1}{\theta_0} \quad (3)$$

만일, $h > \theta_0 L_1/2 = \theta_0$ 면 마모형상은 III형으로 되어 체적은

$$V = \frac{1}{3}\left(\frac{L_1}{2}\right)(A_1 + A_2 + \sqrt{A_1A_2}) \quad (4)$$

이 된다. 여기서 A_1 은 마모 최대깊이 h_1 인 세관의 마모단면적, A_2 는 마모깊이 h_2 ($h_1 > h_2$)인 세관의 단면적이며 이것은 식(1)과 (4)로부터 각각 구할 수 있다. 이때 최대 기울기 θ_0 는 다음과 같다.

$$\theta_0 = dy/dx_{z=L} = \pi y_0/L \quad (5)$$

여기서 L_1 은 지지대의 길이, θ_0 은 지지대에 대한 세관의 상대 기울기, y_0 는 최대진폭, L 은 세관의 길이이다.

곡관의 경우는 세관의 고유진동수(f_n)을 알면 그것을 양단고정 혹은 지지보로서 생각하여 그 길이를 구하였다. Hoffman 등⁽⁵⁾에 의해 제시된 방진대(anti-vibration bar)와 eggcrate에 대한 세관의 두께 감소와 감소된 체적의 관계를 Fig. 3에 나타냈다. 이 그림으로부터 초기 운전을 제외하면 감소 두께와 체적의 관계는 선형임을 알 수 있다.

2.2 법선일률과 갭의 관계에 의한 마모량 계산

난류와 유체탄성 범위 내에서의 마모와 일률에 대한 함수관계는 Axisa 등^(2,4)의 연구에도 잘 표현되어 있다. Au-Yang⁽¹⁾은 난류(turbulence) 범위 내에서는 세관과 지지대 사이의 간격이 클수록 마모율은 감소되며, 유체탄성영역(fluid elastic region)에서는 마모율은 세관과 세관 지지대의 간격이 증가함에 따라 증가한다고 하였다. 또 세관의 마모율을 일률의 함수로 표시하였다.

Au-Yang이 도출한 마모와 일률의 관계는 다음과 같이 세관 두께의 시간에 대한 감소율과 세관과 지지대사이의 간격에 대한 함수관계로 표시할 수 있다.

$$\frac{dh}{dt} = \dot{h} = f(g) \quad (6)$$

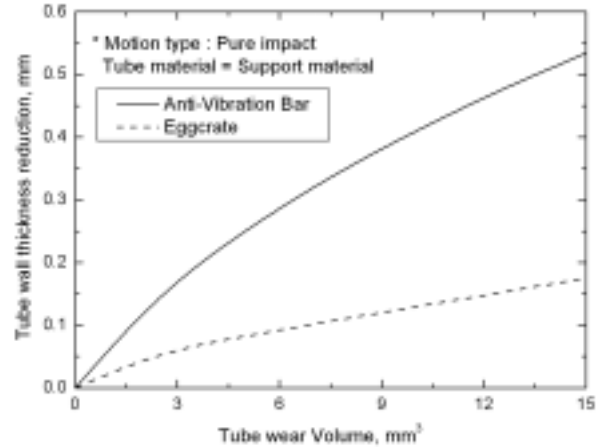


Fig. 3 Tube wall thickness loss versus wear volume.⁽¹⁾

세관과 지지대사이의 갭을 $g(t)$ 라고 하면

$$g(t) = g(0) - \Delta h(t) \quad (7)$$

이 되고, $\Delta h(t)$ 를 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\Delta h(t) = \int \dot{h}(t) \Delta t \quad (8)$$

여기서 예로서 식 (6)에서 세관과 지지대 사이의 갭과 세관의 마모율이 다음 식으로 표시된다고 생각하자.

$$\dot{h} = kg(t) \quad (9)$$

그리고 갭 $g(t)$ 는

$$g(t) = g(0) + \{h(0) - h(t)\} \quad (10)$$

가 되며, 식 (7)과 (8)로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$-\frac{dh}{dt} = \frac{dg}{dt} = kg(t) \propto g(t) \quad (11)$$

식 (11)을 풀면

$$g(t) = g_0 e^{kt} = g_0 e^{t/\tau}, \quad (k = \frac{1}{\tau}) \quad (12)$$

여기서 τ 는 특성시간(characteristic time)으로 정의하였다. 식 (10)을 시간에 대하여 미분하면

$$\frac{dg(t)}{dt} = \frac{dh(t)}{dt} = -\dot{h}_0 g(t) \quad (13)$$

$$h(t) = \sum \dot{h}(t) dt \quad (14)$$

식 (14)를 식 (10)에 대입하여 정리하면,

$$-\sum \dot{h}(t) dt = g(0)(e^{t/\tau} - 1) \quad (15)$$

이 된다. $\dot{h}(t)$ 는 음의 값(negative value)이므로 식 (16)의 우측은 양의 값(positive value)이 된다.

만일 $\dot{h}(t) = f(g)$ 로 감소하고, 세관의 마모율은 Axisa 등과 Au-Yang에 의 연구에서와 같이 난류 범위 내에서는 세관과 지지대 사이의 갭이 클수록 감소되며, 유체탄성영역에서는 갭이 클수록 증가하므로 $f(g) = g_0 e^{\frac{nt}{\tau}}$ 으로 가정한다.^(1,3) 여기서 n 은 마모와 갭의 상관성을 나타내는 지수로서 $n < 0$ 이면, 갭과 마모율의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$-\Delta h(t) = g_0 (e^{\frac{nt}{\tau}} - 1) \quad (16)$$

여기서 g_0 는 초기의 세관과 지지대의 갭이다. 만일 $n = 0$ 이면 세관의 마모율은 갭의 크기에 독립이며, $n < 0$ 이면,

$$-\Delta h_i(t) = g_i (1 - \exp(-\frac{t}{|n|r_i})) \quad (17)$$

이 된다. 이 n 값에 따른 세관의 마모율과 법선일률의 관계를 운전시간 5년이 흐른 eggcrate와 방진대에 대하여 Fig. 4와 5에 나타냈다.

3. 세관의 마모량 계산

유동유발진동으로 인한 증기발생기 세관의 마모에 세관과 지지대의 갭이 미치는 영향을 Connors의 방법을 이용하여 살펴보았다. 이를 위해 식(1)에서 (4)까지의 변수에 실제 원전 증기발생기의 세관에서 추출한 값을 각각의 변수에 사용하였다.

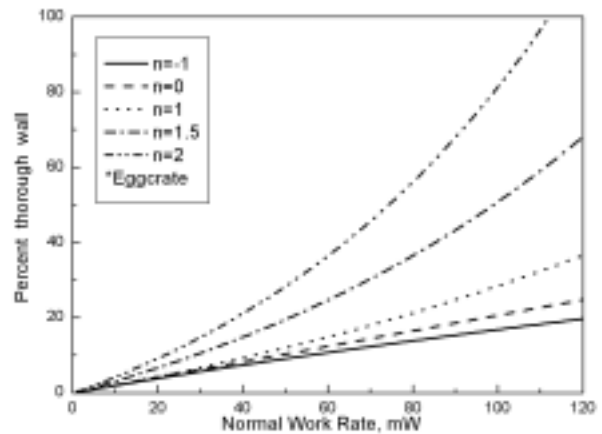


Fig. 4 Tube thickness loss vs. normal work rate of eggcrate.

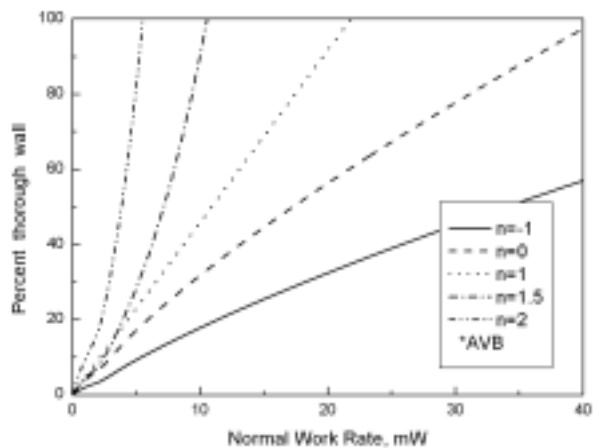


Fig. 5 Tube thickness loss vs. normal work rate of anti-vibration bar.

최대변위 $y_0 = 0.19304$ mm, $f_n = 33$ Hz, $m_0 = 0.001285$ N-sec²/mm, $E = 196.5$ GPa, 세관의 외반경 $r_0 = 9.525$ mm, 내반경 $r_i = 8.382$ mm, 세관의 두께 $t = 1.0668$ mm를 사용하였다. 선정된 세관은 실제 곡관이나 이것을 직관의 단순지지보로 생각하여 $L = (\frac{\pi}{2f_n})^{1/2} (\frac{EI}{m_0})^{1/4} = 1090.8$ (mm)로, 최대 보의 기울기 θ 는 0.0142로 하였다.

식 (4)로부터 만일 $h_1 \leq \theta_0 L_1 / 2$ 이므로 $h_1 \leq 0.0142$ mm이면 식(2)을 사용하고 $h_1 > \theta_0 L_1 / 2$ 이면 마모체적은 식(3)을 이용하여 계산하면 된다. 실제 계산에서 $h_1 = 0.0142$ mm 마모되었을 때 마모체적은 식(1)을 이용하여 계산하였다. 식(1)에서 세관과 지지대의 갭을 각각 0.1905, 0.381, 0.762 및 1.143 mm로 하여 세관의 마모깊이와 마모체적을 구하여 Fig. 6에 나타냈다.

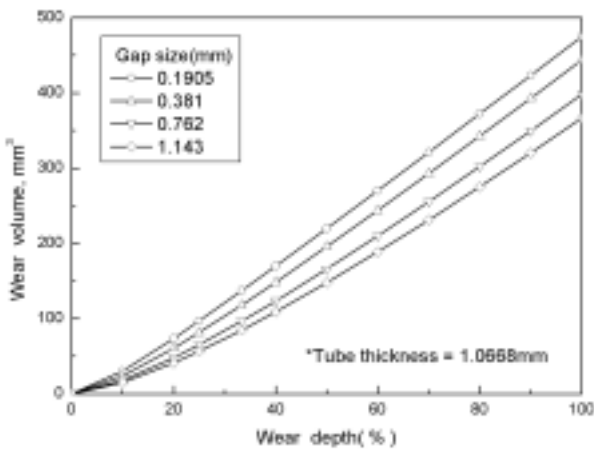


Fig. 6 Worn volume versus wear depth.

이때 마모된 세관의 깊이가 $h_1 = h_2$ 면 마모된 세관의 모양은 식(3)으로부터 단면적 A_1 이고 두께가 50.8 mm인 체적이 된다. Fig. 1에서 알 수 있듯이 주어진 마모체적에서 세관과 세관지지대의 갭 C 가 증가할수록 세관의 최대 마모깊이 역시 증가한다. 이와 반대로 주어진 마모깊이에 대하여 세관과 세관 지지대의 갭(C)이 감소할 때 마모체적은 증가한다는 것을 알 수 있다.

다음으로 Au-Yang⁽¹⁾의 이론과 본 논문에서 구한 세관의 마모와 법선일률을 방진대에 적용하였다. 방진대의 재질은 405 스테인리스강이고, 세관은 Inconel 600이며, 마모계수는 EPRI⁽⁶⁾에 의해 제안된 값인 $11.02E - 15 \text{ Pa}^{-1}$ 로 하였다.

또한 n 값은 -3.5 로 결정하였다. 이것은 $n = -3.5$ 는 Yettisir 및 Pettigrew^(7~9)가 찾아낸 법선일률로부터 세관 두께의 마모율과 비교한 결과 $n = -3.5$ 가 근사적으로 잘 일치하기 때문이다. Hofmann 및 Schettler⁽⁶⁾의 결과를 방진대에 적용하여 법선일률을 구하고 이 일률로부터 마모깊이를 구할 수 있다. 이 값들을 사용하여 임의의 시간

동안 운전을 겪은 세관과 지지대의 갭이 마모깊이와 법선일률에 미치는 영향을 각각 운전시간 5년, 10년, 15년 및 20년에 대하여 Fig. 7에서 Fig. 10까지 나타내었다.

이 결과로부터 세관과 세관지지대의 갭이 증가하면 법선일률은 줄어들고 있음을 알 수 있다. 또한 운전시간이 증가함에 따라 마모깊이에 따른 법선일률 감소하기 때문에 결과적으로 갭의 영향도 함께 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

그러나 Axisa 등⁽²⁾에 의하면 유체탄성불안정 영역 내에서 세관과 세관지지대의 갭이 크면 법선일률이 증가한다고 하였으므로, Au-Yang⁽¹⁾의 방법을 이용하여 계산한 본 논문의 결과는 장기간에 걸쳐 난류의 영향을 고려할 수 있는 경우에 적용될 수 있다. 또한 마모깊이에 대한 법선일률은 갭이 증가할수록 점차 줄어들고 있으며, 법선

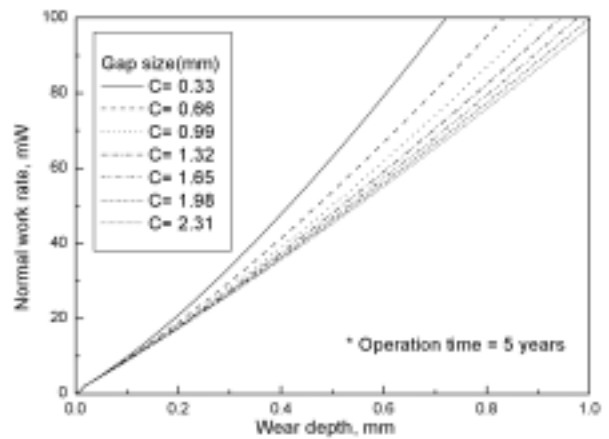


Fig. 7 Wear depth vs. work rate according to the various gap sizes at 5 years.

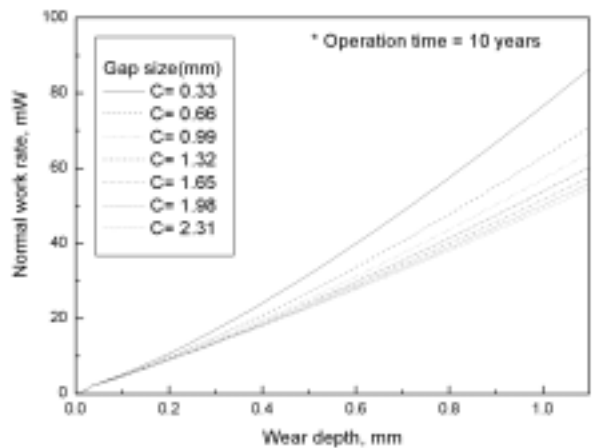


Fig. 8 Wear depth vs. work rate according to the various gap sizes at 10 years.

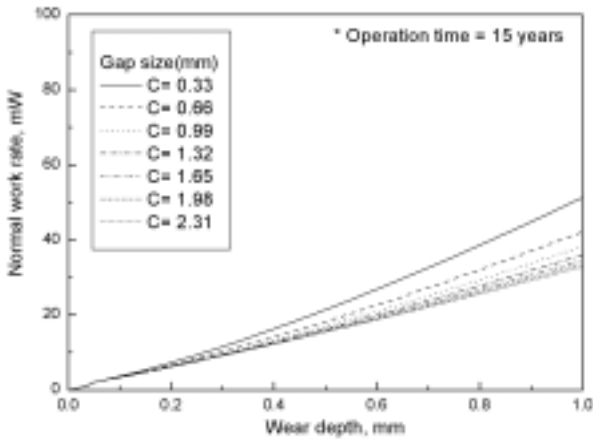


Fig. 9 Wear depth vs. work rate according to the various gap sizes at 15 years.

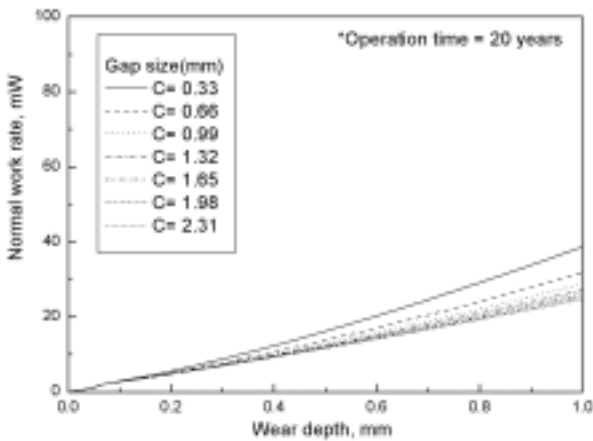


Fig. 10 Wear depth vs. work rate according to the various gap sizes at 20 years.

일률이 10 mW보다 적은 범위 내에서 갭의 크기가 마모량과 범선일률에 미치는 영향은 무시될 수 있다.

4. 결론

세관과 지지대의 갭이 증기발생기 세관의 마모에 미치는 영향을 살펴보기 위해, 마모깊이 및 마모체적과 접촉시간 등의 관계를 이용하였고, 마모와 범선일률과의 관계를 도출하였다. 이 결과를 바탕으로 하여 세관의 마모와 시간의 관계를 마모계수, 수직력 및 마모거리를 시간의 함수로 표시하여 마모량을 다양한 갭의 크기에 대하여 구하였다.

이 결과로부터 유동유발진동에 의한 증기발생

기의 마모량을 예측하는데 세관과 세관지지대의 갭이 미치는 영향을 파악하였다. 또한 유체의 유동특성에 따른 범선일률과 마모깊이의 관계를 이용하여 갭의 증가에 따른 세관의 마모량 변화를 예측하였다.

참고문헌

- (1) Au-Yang, M. K., 1998, "Flow-Induced Wear in Steam Generators Tubes - prediction versus operational Experience," *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 120, pp. 138~143.
- (2) Axisa, F., Antunes, J., and Villard, B., 1988, "Overview of Numerical Methods for Predicting Flow-Induced Vibration," ASME, *Journal of Pressure Vessels Technology*, Vol. 110, pp.6~14.
- (3) Connors, H. J., 1981, "Flow Induced Vibration and Wear of Steam Generators Tubes," *Nuclear Technology*, Vol. 55, pp. 311~331.
- (4) Brennemann, B., and Gurdal, R. J., 1997, "A Time Domain Formulation and Solution of Fluidelastic instability in Steam Generators Tubes Bundles," *4th International Symposium on Flow-induced Vibration and Noise.*, Dallas., Tx
- (5) Hofmann, P. J., and Schettler, T., 1989, *PWR Steam Generators Tubes Fretting and Fatigue*, NP-6341, Research Projects S174-2, pp.4-13.
- (6) *PWR Steam Generators Tubes Fretting and Fatigue Wear*, 1989, EPRI NP-6341.
- (7) Yetisir, M., Mckerrow, E., and Pettigrew, M. J., 1998, "Fretting Wear Damage of Heat Exchanger Tube; A Proposed Damage Criterion Based on Tube Vibration Response," *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 120, pp.297~305.
- (8) Yetisir, M., and Pettigrew, M. J., 1999, "A Simple Approach to Estimate Heat Exchanger Tube Fretting-Wear: Application to U-bend Tubes," PVP-Vol. 389, *Flow Induced Vibration*, pp.273~282.
- (9) Yetisir, M., and Pettigrew, M. J., 2001, "A Simple Approach to Estimate Fretting-Wear Damage in Heat Exchanger Tubes: Verification and Validation," PVP-Vol. 420-1, *Flow-Induced Vibration*, pp.27~33.