증기발생기 세관과 지지대 간극을 고려한 마모량 예측 방법론

이용선* · 박치용† · 김태순* · 부명환*

Methodology for Wear Prediction Considering the Gap between Tube and Support/Anti-vibration-bar in the Steam Generator

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

Key Words: Steam Generator Tube(증기발생기 세관), Tube Wear(세관마모), Wear Depth(마모깊이), Gap Effects(간극효과), Wear Prediction(마모예측)

Abstract

When the tube contacted to support, anti-vibration bar of the steam generator in nuclear power plant, the contact area is worn out by their relative displacement and contact force. Connors and Au-Yang found the relation between tube worn displacement and volume, or normal work rate at given gap size. The present analysis is obtained the relation between tube worn displacement and normal work rate at various gap size modifying Au-Yang's result. The results are compared with Connors and Yettisir and Pettigrew's results. The comparison shows that Yettisir and Pettigrew result is fairly good agreement with Connors and present results with gap clearance, $0.015in.$

1. 서 론

원전 증기발생기 세관의 진동으로 인한 마모에 대하여는 이미 많은 연구가 이루어졌다. 그러나 증기발생기의 세관과 세관지지대의 간극(gap)에 의한 세관의 마모에 대한 연구는 그리 많지 않다. Connors[1]는 세관의 마모체적을 외경, 지지대의 내경과 마모된 세관의 현(subtend)의 길이로 단면적을 표시하고, 세관과 지지대의 접촉면에 관하여 적분함으로서 구한 바 있다. Connors는 세관의 마모깊이를 가정하였고, 마모체적을 마모계수와 세관과 세관지지대 사이에 일어나는 수직력과 일정 시간(t)동안 움직인 거리를 이용하여 구하였다. Axsia 등[2]은 비선형 유체유발진동(flow induced vibration) 모델을 이용하여 법선일률(normal work rate)을 계산하였다. Au-Yang[3]은 Connors와는 다른 방법으로 법선일률과 깊이의 관계를 구하였다. 즉 세관이 마모될 때 세관과 세관지지대의 거리가 증가하며 비선형관의 동역학적인 성질은 세관과 세관지지대의 간극의 함수임으로 일률은 세관이 마모되는 시간에 따라 변화한다고 생각하였다. Axsia, Autune 및 Villard[2]의 논문에서는 난류여기(turbulence excitation)일 때는 세관과 세관지지대의 간극이 증가할수록 세관의 마모체적은 줄어들고 유체탄성불안정(fluid elastically unstable) 범위 내에서는 간극이 증가하면 세관의 마모체적도 증가한다고 주장하였다. Au-Yang[3]은 Brenneman 및 Gurdal[7]의 일률과 공칭 간극(nominal clearance)의 관계를 이용하여 일률과 세관의 마모를 계산하였다.

본 논문에서는 Connors의 결과를 이용하여 간극의 크기가 마모체적 혹은 마모깊이에 미치는 영향을 고찰하였다. 이에 첨가하여 Au-Yang[3]의 마모깊이와 법선일률에 대하여 고찰하였다. 그 결과 마모계수가 작을 때는 현재의 결과와 대략 일치하였으나 마모계수가 크고 $n<0$이면 현재의 결과를 이용한 마모깊이가 더 보수적으로 나타났다. 이에 첨가하여 Yettisir 와 Pettigrew[10 13]의 법

†책임저자 , 한국전력공사 전력연구원
TEL : (042)865-5553 FAX : (042)865-5514
E-Mail : cypark@kepri.re.kr
* 한국전력공사 전력연구원 원자력연구실

선일률로부터 계산한 마모깊이, 현재의 방법에 따라 계산한 마모깊이 및 Connors[1] 의 방법에 의한 마모깊이를 비교 고찰하였다.

2. 지지대와 세관의 간극에 의한 마모율

2.1 Connors의 간극에 의한 마모율

Connors[1]는 유체유발진동으로 인한 증기발생기의 프레팅 피로(fretting fatigue)에 대한 논문을 발표하였다. 이를 이용하여 증기발생기 세관과 지지대 또는 반진동봉 사이의 간극으로 인한 세관 마모율을 고찰하였다. 이를 위해 세관의 마모와 지지대는 원래의 기하학적 모양을 유지한다고 가정하여 세관의 마모를 고려하였다. 또 세관이 마모되는 모양을 시간에 따라 가정하였고, 세관 마모는 지지대의 반길이(half length)에 대하여 동등하다고 가정하여, 지지대의 반길이에 대한 세관 마모 관계식을 유도하였다. 주어진 지지대의 반경(R_s), 세관의 반경(R) 및 세관과 세관지지대의 거리(c)에 대한 세관의 마모된 단면적은 식(1)과 같이 나타난다.

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

여기서 h는 마모된 세관의 최대마모깊이, $x = [R_s^2 - \frac{\{R^2 - R_s^2 - (h+c)^2\}^2}{4(h+c)^2}]^{\frac{1}{2}}$이다.

세관지지대의 방향으로 세관의 마모깊이가 변하며, 이것은 맨 처음 마모될 때 삼각추가 될 것이고, 마모가 진행됨에 따라 원추모양으로 변한다고 가정하여 마모된 세관의 체적을 구하였다.

만일 $h_1 \le \frac{\theta_0 L_1}{2}$일 때는

$$V = \frac{1}{3}A_1 l = \frac{1}{3}A_1\frac{h_1}{\theta_0} \quad (2)$$

여기서 L_1은 지지대의 길이, θ_0은 지지대에 대한 세관의 상대 기울기, y_0는 최대진폭, L은 세관의 길이이다.

여기서 곡관의 경우는 세관의 고유진동수(f_n)을 알면 그것을 양단고정 혹은 지지보로서 생각하여 그 길이를 구하였다.

만일 $h > \theta_0\frac{L_1}{2} = \theta_0$이면 원추대가 되여 그의 체적은 식(3)과 같다.

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

A_1은 마모 최대깊이(h_1)인 세관의 마모단면적, h_2는 마모깊이($h_2(h_1 > h_2)$)인 세관의 단면적이며, 이는 식(1) 및 (3)으로부터 각각 구할 수 있다.

세관에 대한 지지대 상대기울 θ_0는 식(4)와 같이 구해진다.

$$\theta_0 = dy/dz_{\ z=L} = \pi y_0/L \quad (4)$$

식(1)에서 (4)까지의 변수에 예제를 위한 원전의 변수를 사용하였고, 이는 다음과 같은 값을 가진다. 최대변위 $y_0 = 0.0076in.$ $f_n = 33Hz$, $m_0 = 0.0001115lb.-sec.^2/in.$, $E = 28.5E6lb./in.^2$, 세관의 외반경$(r_0) = 0.375in.$ 내경$(r_i) = 0.33in.$ 세관의 두께 $(t) = 0.042in.$를 사용하였으며, 이 값은 증기발생기 유체출구 영역의 세관에서 추출하였다. 예제 세관은 2중 U자 곡관임에도 불구하고, 이를 직관의 단순 지지봉으로 가정하여 $L = (\frac{\pi}{2f_n})^{1/2}(\frac{EI}{m_0})^{1/4} = 42.9466in.$, 최대보의 기울기는 식 (4)로부터 $\theta = \pi y_0/L = 5.55948E-4.$ 만일 $h_1 \le \theta_0 L_1/2$이므로 $h_1 \le 5.55948E-4in.$이면 식(2)을 사용하고, $h_1 > \theta_0 L_1/2$이면 마모체적은 식(3)을 이용하여 계산한다. 실제 예제 계산에서 $h_1 = 5.55948E-4$ 마모되었을 때 마모체적은 식(1)을 이용하여 계산하였다.

식(1)에서 tube와 지지대의 간극을 $0.0075in.$ $(0.1905mm.)$, $0.015in.(0.381mm.)$, $0.03in.$ $(0.762mm.)$ 및 $0.045in.(1.143mm.)$로 변경하였을 때 세관의 마모와 마모체적을 구할 수가 있다. 여기서 마모된 세관의 깊이가 $h_1 = h_2$면 세관의 모양은 식(3)으로부터 단면적 A_1이고 두께가 $2in.$인 체적이 된다. Fig. 1에 세관의 마모와 마모체적을 세관과 세관 지지대의 간극에 따라 변화하는 모양을 보인다. Fig. 1에서 보이는 것과 같이 주어진 마모체적에서 세관과 세관지지대의 간극

C가 증가할수록 세관의 최대 마모깊이는 증가함을 보인다. 이와 반대로 주어진 마모깊이에 대하여 세관과 세관 지지대의 간극(C)이 감소할 때 마모체적은 증가한다는 것을 알 수 있다. Axisa 등[(2)]은 수치계산과 비선형 유체유발진동 모델을 이용하여 보의 중간에 보와 지지대의 간극을 만들고, 양단 지지보라 가정하여 법선일률을 계산하였다. 그 결과 난류(turbulence)만으로 외력이 작용하면 법선일률이 감소할 때 세관과 지지대의 간극이 커진다는 것을 알았다. 또 이와 반대로 유체탄성불안전성이 증가하면 법선일률이 증가하고, 간극(gap clearance)도 증가한다는 것을 알았다. 이들 결과와 본 논문 결과를 비교하면 본 연구 결과는 난류에 의한 진동임을 알 수 있다.

2.2 Anti-vibration Bar(AVB)에서 Au-Yang의 방법을 이용한 마모량 계산

난류와 유체탄성 안정범위 내에서 마모깊이와 법선일률과 함수관계는 Axisa, Antune 및 Villard[(2)]의 논문에 잘 표현되어 있다. Au-Yang[(3)]은 증기발생기의 중간지지대(eggcrate)에서 마모깊이와 법선일률을 EPRI[(4)]와 Fisher 등[(5)]의 마모계수를 이용하여 구하였다. 그러나 Au-Yang[(3)]은 이에 대한 상세한 설명을 생략하였고, 현재 구한 결과와 차가 있으므로 Au-Yang[(3)]의 결과와 현재 구한 방법을 비교할 필요가 있다. Au-Yang은 세관 두께의 시간에 대한 감소율과 세관과 지지대 사이의 간극에 대한 함수관계를 다음과 같이 표시하였다.

$$\frac{dh}{dt} = f(g), \int f(g)dt = g(o) - \Delta h(t) \qquad (5)$$

여기서 h는 세관의 두께, g는 어떤 시간에서의 세관과 세관지지대 사이의 간극이다.

$-\Delta h(t) = \Sigma \dot{h}(t)\Delta t.$, $-f(g) = cexp(nt/\tau)$이면 식(5)에서 $-\Delta h(t) = g_0(exp(nt/\tau) - 1)$. 여기서 τ는 특성시간(characteristic time)으로 정의하였다. 본 논문에서 $47.56E-15Pa^{-1}$(Fisher etal.[(5)])의 마모계수 값으로, 10년후의 세관두께를 계산한 결과가 Fig. 2에 보이고 있다. Fig. 2의 결과 중 $n < 0$의 결과는 Au-Yang[(3)]결과와 차이가 있다. 본 논문에서 $n < 0$는 Au-Yang[(3)]의 결과보다 보수적으로 사용할 수 있다. 본 논문의 결과와 Au-Yang[(3)]의 결과가 다른 이유는 Au-Yang[(3)]의 결과는 모든 n에 대하여 비선형식을 이용한 것이 주된 원인으로 생각된다.

Au-Yang[(3)]의 이론과 본 논문에서 구한 세관의 마모와 법선일률을 AVB(Anti Vibration Bar)에 적용하여 보자. AVB의 재질은 405 stainless steel이고 세관은 Alloy 600이며, 이 때의 마모계수는 $11.02E-15pa^{-1}$(EPRI[(4)])이다. 또 Kawamura[(8)]와 KAIST[(9)]가 찾아낸 마모계수는 각각 $18.0E-15pa^{-1}$ 및 $43.8E-15pa^{-1}$을 이용하고 Au-Yang[(3)]의 수식에 있는 n값은 3.5로서 결정하였다. $n = -3.5$은 후에 설명한 바와 같이 Yettisir 및 Pettigrew[(10 13)]이 찾아낸 법선일률로부터 세관 두께의 마모율과 비교한 결과 $n = -3.5$가 근사적으로 잘 일치함을 보이고 있다. Hofmann 및 Schettler[(6)]의 결과를 AVB에 적용하고 이 부분에 선형부분을 택하면 $\Delta H = \frac{1}{15}(0.53 - 0.13478)$ $= 0.0263478 mm/volumetric\ loss\ mm^3$

EPRI[(4)], Kawamura[(8)]와 KAIST[(9)]가 찾아낸 마모계수를 사용하여 각각 $V = 0.3475260$, 0.567648, 1.381277 $(mm^3/yr)(1/mw)$)이다. 총 법선일률은 두께가 $1.0668mm\,(0.042in.)$이므로 EPRI[(4)],, Kawamura[(8)] 및 KAIST[(9)]의 마모계수에 대하여 계산하면 각각 $116.5065 = 1.0668/(V \times \Delta H)$, 71.32785, 29.3218$m\,Watt$을 얻었다. 이 결과들을 사용하여 특성시간($\tau$)는 법선일률 x_j와 x_{j-1}에서 구해낸 평균값을 사용하여 계산하였다. τ_j을 EPRI[(4)]의 마모계수를 이용하여 구해낸 total 법선일률을 사용하여 구해보면 다음과 같다.

$J \neq 1mw$ 이면

$$\tau_j = (109.21119)\frac{g_j}{x_j}, \quad [109.21119 = \frac{116.5065}{1.0668}\frac{mw.yr}{mm}],$$

$$\tau = \frac{1}{2}(\tau_j + \tau_{j-1}) = \frac{1}{2}(109.21119)(\frac{g_j}{x_j} + \frac{g_{j-1}}{x_{j-1}})$$

$$-\Delta h_j = (g_{j-1} + c)(1 - exp(-\frac{t}{3.5\tau}))$$

(C는 세관과 세관지지대의 처음간극), $j = 1m\,watt$이면 $\tau_1 = 109.21119 \times (\frac{C}{1})$, $-\Delta h_1 = c\{1 - exp(-\frac{t}{3.5\tau_1})\}$

법선일률 $x_j = 0$면 $\tau_j \rightarrow \infty$가 됨으로 $-\Delta h_j = 0$이 된다. 위와 같은 방법으로 Kawamura[(8)]와 KAIST[(9)]의 마모계수에 대하여도 $-\Delta h_j$을 얻을 수가 있다. 이 값들을 사용하여 각각 5,10,⋯40년

경과한 세관과 법선일률의 관계를 얻었다.

이들 결과를 종합하면 세관과 세관지지대의 간극이 크면 법선일률은 줄어들고 있다. 그러나 Axisa, Autnnes 및 Villard[(2)]가 말한 유체탄성이 불안정한 범위 내에서 세관과 세관지지대의 간극이 크면 법선일률이 증가한다는 결론을 Au-Yang[(3)]의 방법에 따라 계산한 본 논문에서는 찾아낼 수가 없었다. 간극이 $0.33mm$일 때와 $0.66mm$일 때 법선일률은 같은 두께의 감소에서 볼 때 차이가 제일 크며, 차이는 간극차가 증가할수록 줄어들고 있다. 법선일률이 $10m\,watt$보다 적은 범위 내에서 간극차는 상기 세 마모계수를 사용한 결과 법선일률에 미치는 영향은 무시될 수 있었다.

3. Yettisir 및 Pettigrew, Connors와 본 논문을 사용한 두께 감소에 대한 비교

Yettisir 및 Pettigrew[(10 13)]의 법선일률 $\dot{W_N}$는 네 가지로 구분할 수 있다.

$$\dot{W_N} = 32\pi^3 mL(\frac{R}{L})^{0.75}\sum_{i=1}^{10} f_i^3 Y_s^2,$$

$$\dot{W}_N = 32\pi^3 mL(\frac{R}{L})^{0.75} f^3 Y_s^2 \zeta, \quad (9)$$

$$\dot{W}_N = 16\pi^3 mLf^3 Y_s^2 \zeta/\mu,$$

$$\dot{W_N} = 8\pi^3 mLf^3 Y_s^2 \zeta/\mu$$

이 식들에 국내 증기발생기에서 선정된 특정 튜브 값들을 대입하여 $\dot{W_N}$을 구하였다. 선정된 극한 조건의 튜브에 대한 값은 다음과 같다. $m = 0.849kg/m$, $L = 3.068m$, $R = 0.254m$, $f = 32.748HZ, Y_{rms} = 1.3E-4m$, 감쇄계수 $\zeta = 0.015$이며, 마찰계수 $\mu = 0.5$를 사용하여 $\dot{W_N}$을 각각 얻었다. 식의 첫째식은 $i = 10$까지 모드의 합이다. 식(9)에 사용된 실제값들은 각각 다음과 같다. $\dot{W}_N = 9.29E-3$, $2.6834E-3$, $17.3903E-3$ 및 $8.6951E-3watt$.

따라서, 마모체적 V는 식(10), 마모체적은 식(11)과 같다.

$$V = k\dot{W}_N T = \dot{k}\dot{W}_N(3600 \times 24 \times 365 \times years) \quad (10)$$

$$k\dot{W}_N T = R^2(\frac{L}{2})(2\alpha - sin2\alpha)$$

$$h = R(1 - cos\alpha) \quad (11)$$

여기서, α는 마모된 단면의 중심각, R는 세관의 외경, L는 지지대의 넓이이며 현재의 계산에서 $L = 2in.$이다. Connors[(1)]는 식(11)을 사용하는 대신 세관을 보(beam)로 가정하여, 보에 걸리는 힘(F_N)과 일정시간(t) 동안의 미끄럼 길이(sliding distance)와 마모계수(k)로 나타내었다.

즉, 마모체적은 식(12)와 같다.

$$V = kF_N\overline{L}' \quad (12)$$

where, $F_N = \pi Dy_0/\mu L^2/(1/A + D^2/4I)$

$$\overline{L}' = 2\pi Dy_0 t/L.$$

실제 계산에서, 이 값들은 크므로 $F_N/2$와 $\overline{L}'/2$을 사용하여 마모체적을 구하였다. 상기 마모계수들은 pa^{-1}의 단위임으로 이 식들은 in^2/lb단위로 환산하면 각각 $k = 7.59765E-11in.^2/lb.$(EPRI[(4)]), $k = 1.2409945E-10in.^2/lb.$ (Kawamura[(8)]) 및 $k = 3.01975E-10in.^2/lb.$ (KAIST[(9)])으로 나타낼 수가 있다. 식(12)에 실제 예제 증기발생기의 값들을 대입하여 보면, $\overline{F}_N/2$와 $\overline{L}'/2$는 $\mu = 0.4$로 하여 $\overline{F}_N = 0.98353lb.$이며, $\overline{L} = 0.013759t$가 된다. 체적은 3개 마모상수값을 대입하면 $V = t1.0436934E-11$, $t1.7047613E-11$, $t4.1482528E-11$가 된다. 이 값들은 식(3)과 동등함으로 t를 구할 수가 있다. 따라서 Yettisir 및 Pettigrew[(10 13)]과 Connors[(1)]와 현재 방법을 이용한 최대 마모깊이와 기간수(t)를 비교할 수가 있다. 이들 중 Yettisir 및 Pettigrew[(12 13)]의 식을 사용하여 Connors[(1)]의 간극이 $0.015in.$와 본 논문에서 기술한 방법을 사용하여 구한 마모깊이와 기간수(t)를 Figs. 3 및 4에 보인다. Fig. 3에서 Connors[(1)]가 구한 두께 감소와 햇수는 Yettisir 및 Pettigrew[(13 14)]와 잘 일치함을 보이고 있다. Fig. 4에서 보이는 것과 같이 현재의 방법에 따라 구한 두께의 감소와 햇수는 약간의 차가 있으나 이것들은 현재의 방법에서 n값을 조절하면 Yettisir 및 Pettigrew가 구한 값에 더 근사하게 만들 수 있다.

4. 고찰 및 결론

본 논문은 세관의 마모와 소요되는 시간과의 관계를 도출하는 것이 목적이다.세관이 마모되기 위해서는 세관과 세관 지지대의 간극(gap)이 세관과 지지대의 기계적 특성에 첨가하여 중요하다는 것을 알았다. 이를 위하여 Connors[(1)]와 Au-Yang[(3)]의 결과식을 이용하여 세관의 마모와 시간에 대한 관계 및 세관의 마모와 법선일률과의 관계를 도출하였다. Connors[(1)]의 결과를 이용하여 세관의 마모와 시간의 관계를 마모계수, k와 수직력급 마모거리를 시간의 함수로 표시하여 마모량을 여러가지 간극에 대하여 구하였다. 여기에 요하는 시간은 마모량과 기하학적으로 구해낸 마모량과 동등하다고 가정하여 구하였다. Au-Yang[(3)]의 결과와 본 논문을 이용한 것은 마모깊이를 $g_i(1-exp(-\frac{t}{3.5\tau}))=-\Delta h_n$이라 놓고 구하였다. 여기서 τ_i는 마모계수와 법선일률 등의 함수이고 g_i는 마모된 시간 t에서의 gap의 거리이며 상수 n은 현재의 문제에서 3.5로 결정하였다. 즉 Yettisir와 Pettigrew[(12 13)]과 실제 원전 예제 세관의 운전상황과 기계적 성질 및 기타 상수를 고려하여 얻은 법선일률을 이용하여 마모두께를 계산하고, 이들과 본 논문의 결과식을 인용한 마모깊이를 비교한 결과 간극이 0.38mm(0.015$in.$)이고 $n=-3.5$일 때 서로 잘 맞는다는 것을 알았다.

그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

i) 세관 마모깊이와 시간과의 관계를 보면 Yettisir 및 Pettigrew의 결과 중 $W_N = 8\pi^3(m\dot{L})f^3 Y_{rms}\zeta/\mu$ 이 Connors[(1)] 결과와 잘 일치한다.

ii) 세관 마모깊이와 시간과의 관계를 Yettisiti와 Pettigrew 결과, Au-Yang[(3)] 및 현재 방법을 종합한 방법의 결론과 비교하면 $\dot{W}_N = 8\pi^3(mL)f^3 Y_{rms}\zeta/\mu$가 근사적으로 맞는다.

iii) 마모체적과 마모깊이를 비교하면 Fig. 5에서 보이는 것과 같이 주어진 마모깊이에 대하여 Connors[(1)]의 마모체적이 제일 많고 Au-Yang[(3)]과 현재 방법을 종합하여 구한 것과 근사적으로 구한 마모체적은 거의 동일하고 Connors[(1)]의 그것보다 적다.

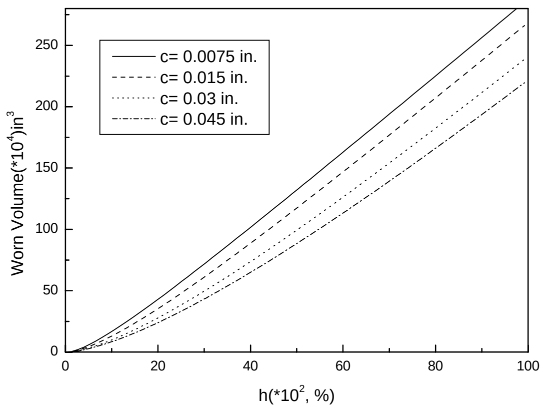

Fig. 1. Worn volume versus wear depth

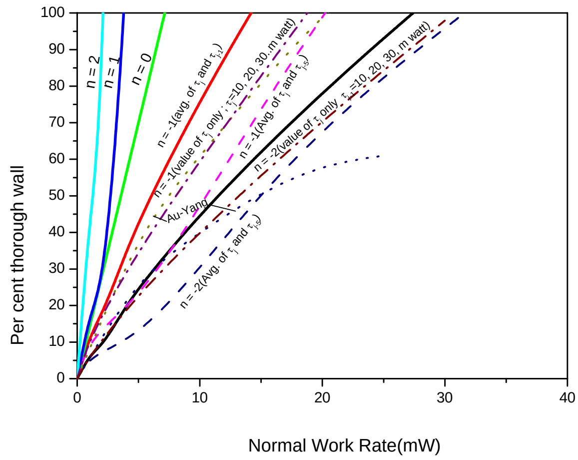

Fig. 2. 10 years wall thickness loss : a function of normal work rate based on Chalk River (eggcrate)

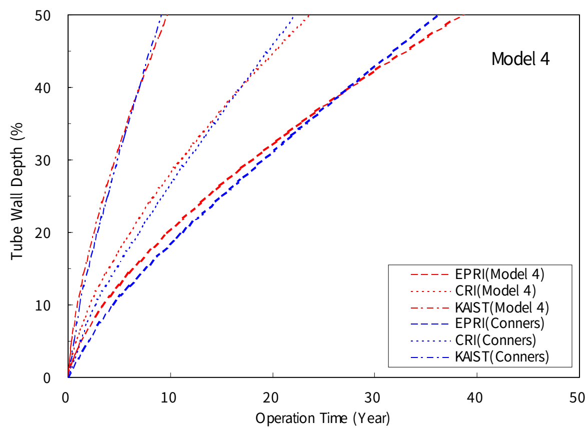

Fig. 3. Comparison of results obtained by Yettisir and Pettigrew, and Connors

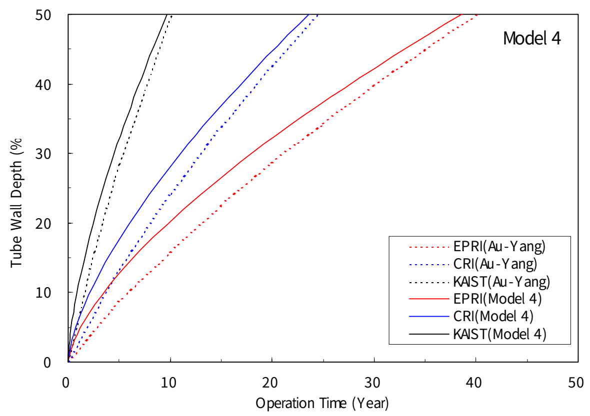

Fig. 4. Comparison of results obtained by Yettisir and Pettigrew and combined results of Au-Yang and Present one.

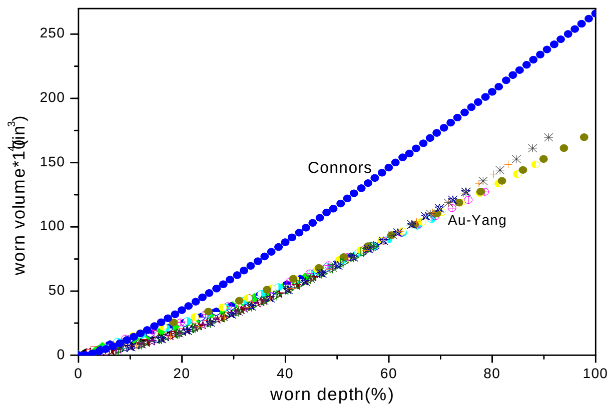

Fig. 5. The comparison of worn volume and depth obtained by Connors(gap $0.015in.$), Au-Yang(gap $0.015in.$) and approximate method

참고문헌

(1) Connors. H. J., 1981, Flow Induced Vibration and Wear of Steam Generators, Nuclear Technology, Vol. 55, P. 381.

(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, P. 6.

(3) Au-Yang, M. K., 1998, flow-Induced Wear in Steam Generators Tubes - prediction versus operational Experience, Transaction of ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 120, P. 138.

(4) PWR Steam Generators Tubes Fretting and Fatigue Wear, 1989, EPRI NP-6341.

(5) Fisher, N. J., Chow, A. B., and Weekwerth, M. K., 1994, Experimental Fretting-Wear Studies of Steam Generators Materials, ASME PVP. Vol-273, Flow-Induced Vibration-1994ed. M. K. Au-Yang.

(6) Hofmann, P. J., and Schettler, T., 1989, PWR Steam Generators Tubes Fretting and Fatique, NP-6341, Research Projects S174-2, S 310-2, P4-13.

(7) Brennemann, B., and Gurdal, R. J., 1997, A Time Domain Formulation and Solution of Fluid-elastic Instability in Steam Generators Tubes Bundles, Presented at the 4th international symposium on Flow-induced Vibration and Noise., Dallas., Tx

(8) Kawamura, A. Y., and Inada, F., 1991, Tube to Support Dynamics Interaction and Wear of Heat Exchanger Tube Caused by Turbulent Flow-Induced Vibration, ASME PVP-Val. 206.

(9) Lee, Y. H., 2001, A study on Wear Coefficients and mechanisms of Steam Generators Tubes Materials, Wear

(10) 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, P.297.

(11) Yetisir, M., and Pettigrew, M. J., 1999, A Simple Approach to Estimate to U-bend Tubes, PVP-Vol. 389, Flow Induced Vibration ASME, P.273.

(12) 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 ASME, P.27.

(13) Pettigrew, M., and Yetisir, M., 2002, A Simple Energy Approach to Asses Fretting-Wear Damage, 4th CNS International Steam Generator Conference.