

증기발생기에서 지지대와 세관의 경사면 접촉시 상대변위에 의한 세관 마모량 예측 방법

이용선* · 박문규* · 김태순* · 박치용[†] · 부명환*

A Method for Prediction of Tube Wear by Relative Displacement in the case of Inclined Contact between Tube & Support of Steam Generator

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

Key Words: Steam Generator Tube(증기발생기 세관), Inclined Contact(경사면 접촉), Tube Wear(세관마모), Wear Depth(마모깊이)

Abstract

When the tube contacted to support and antivibration bar of the steam generator in unclear power plant, the contact area is worn out by their relative displacement. In the study, wear depths of the tube inclined to tube support and antivibration bar are approximately predicted by a method using the contact load and relative displacement. In the case of the inclined contact, the results show wear depths of the steam generator tube predicted by the impact model are larger than those by the sliding model.

1. 서 론

원전 증기발생기 세관은 그 위치에 따라 직관부와 곡관부로 이루어져 있으며, 직관부에서는 세관지지대(tube support)와 곡관부에서는 진동방지봉(antivibration bar)과 약간의 간극을 갖고 지지되고 있다. 이러한 증기발생기 세관과 세관지지대 또는 진동방지봉 등과의 상호 접촉면(contact area)은 장시간의 미소변위를 갖는 상대운동으로 인해 마모된다.

비교적 오랜 역사를 갖고 있는, 접촉면의 마모에 대한 연구는 크게 충격에 의한 마모(impact wear)와 미끄럼마모(sliding wear)에 대한 연구로 대별할 수 있다. 특히 최근에는 Engel^(1,2)에 의해 충격에 의한 마모에 대해 활발한 연구가 이루어

져왔으며, 미끄럼 마모에 대한 연구는 Waterhouse⁽³⁾에 의해 이루어진 바 있다. 충격마모 및 미끄럼마모의 지배방정식으로는 Engel의 모델과 Archard의 마모식이 널리 사용되고 있으며, 이와 관련된 실험적 연구들도 상기 지배방정식에 포함되어 있는 물성상수를 찾는 데 집중되고 있다. 그러나 이들 물성상수는 실험조건에 따라 서로 상이한 값을 보이기 때문에 실제 증기발생기의 운전조건하에서 세관의 마모에 관한 물성상수를 찾는 것은 많은 어려움을 수반한다.

본 논문에서는 원전 증기발생기내의 일차측 세관과 이차측에 속하는 세관 지지대 혹은 진동방지봉 사이에서 발생하는 세관의 진동으로 인한 마모에 대해 연구하였다. 이를 위해 기존의 두 가지의 마모모델을 근간으로 하고 측정된 마모량과 시간을 알 때, 역으로 충격 및 미끄럼모델에 있는 물성상수를 산출하는 과정을 거쳐, 이렇게 계산된 물성상수를 이용하여 가까운 미래의 마모량(short distant future)을 산출하는 방법을 제안하였다. 즉 현재의 마모량과 시간을 알면 마모법칙에 포함된 상수를 역으로 계산하여 가까운 미래

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

* 한국전력공사 전력연구원 원자력연구실

의 마모량을 예측하는 방법이다.

이와 관련한 선행 연구^(10,11)에서는 측정된 마모 깊이와 실제 1주기(1 EFPY) 경과한 세관의 마모 깊이를 계산한 결과를 비교하였다. 본 연구에서는 기존의 연구결과를 바탕으로 하여 세관지지대와 세관이 임의의 작은 각도를 이루면서 충격을 가하는 경우, 1EFPY(3600초×24시간×365일×1.25년)에서의 마모량을 알 때, 미래의 마모량을 예측하는 방법이다. 이러한 연구의 일환으로 Goryacheva, Muthy 및 Farris⁽⁹⁾는 충격체가 피충격체와 임의의 각을 이루면서 충격을 가할 때의 접촉응력을 계산한 바 있다. 따라서 이들 결과와 Engel과 Archard에 의한 마모식을 연계하여 마모량을 구하였다.

2. 증기발생기 세관의 마모

2.1 증기발생기 세관에서의 접촉형상 특성 고려

증기발생기 내의 유체유동은 세관의 진동을 유발하며 이 진동에 의해 세관과 세관지지대가 접촉을 함으로써 마모가 진행된다. 이때 세관과 세관 지지대의 배치와 진동특성은 접촉면의 형상과 마모현상을 결정하는데, 이러한 접촉역학의 결과를 쉽게 사용할 수 있는 접촉면의 형태는 원(cycle), 장방형(rectangle) 그리고 타원(ellipse)등으로 극히 제한적인 것이 사실이다. 따라서 증기발생기 세관의 마모는 이런 접촉면을 대상으로 하고, 이미 장방형(rectangle)이나 타원(ellipse) 접촉의 문제는 선행연구에서 다루었다.

본 논문에서는 장방형 접촉이나 타원(ellipse) 접촉의 문제와 유사한 방법으로, Goryacheva⁽⁹⁾ 등이 쓴 Punch가 경사를 이루고 끝면이 둥근 형태에 대한 접촉응력식을 Archard의 식과 결합하였다. 이때 세관지지대는 고정되어 있고 세관이 움직인다고 생각하였으며, 이러한 조건들과 Engel 및 Archard의 마모식에 도입하여 마모량 및 마모 깊이를 구하였다.

2.2 세관의 유동유발 진동 속도

증기발생기 세관의 운동은 세관의 외부를 흐르는 유체의 운동에 의하여 유발되며, 본 논문에서는 이 유동유발진동에 관한 연구 결과 중 Pettigrew 및 Yetisir^(4,5), Connors⁽¹²⁾의 결과를 이용하였다. 이들 연구에서 간극속도(gap velocity) v_g

와 임계속도(critical velocity) v_{cr} 는 다음과 같이 정의 된다:

$$v_g = [P/(p-d)]V_0 \quad (1)$$

$$v_{cr} = Kf_n d \{m_0 \delta_0 / \rho d^2\}^{1/2}. \quad (2)$$

여기서 p 는 세관의 피치(pitch), d 는 세관의 직경, V_0 는 이차계통의 자유유속, K 는 불안정상수(instability constant), m_0 는 세관의 질량, δ_0 는 로그 감쇄(log damping), ρ_0 는 유체밀도이다.

이것은 특정 원전(specified plant)에 대하여 고유한 값을 가지므로, 식 (1) 및 (2)의 값은 특정 원전의 열수력 해석 결과를 이용하여 계산될 수 있다. 유동유발진동으로 인해 세관에 작용하는 외력 F 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F = c_F d [\rho v_g^2 / 2g] \sin \omega t \quad (3)$$

본 논문에서 사용한 F 는 v_g 가 최대가 되는 곳에서의 값이며, C_F 는 유체의 유효속도 및 안정비에 의해 결정되는 저항상수이다. 세관의 양쪽 끝단이 모두 구속된 것으로 가정하면, 이때의 변위는 보(beam)의 이론에 의하여

$$\delta_m = C_1 C_2^2 \left(\frac{d}{m}\right) \left(\frac{\rho v_g^2}{2g}\right) \frac{1}{f_n^2} \quad (4)$$

으로 나타낼 수 있다. 따라서 보의 속도는 다음과 같이 표현되고, 이를 세관의 진동속도로 가정하고서 세관과 지지대 사이의 운동거동을 묘사할 수 있다:

$$\begin{aligned} x &= \delta_m \sin \omega t \\ \dot{x} &= \delta_m \omega \cos \omega t \cong \delta_m \omega. \end{aligned} \quad (5)$$

2.3 충격에 의한 마모깊이와 마모량

앞 절에서 유도된 세관의 운동거동에 의해 세관과 세관지지대는 상호작용으로 마모가 발생되며 충돌거동에 대한 마모깊이를 예측하는 방법을 선행연구에서 제시한 바가 있다. 여기서는 본 연구에서 제시한 방법론과 비교하기 위하여 그내용을 간략히 소개하였다. 세관과 세관지지대가 충돌하여 세관의 직경이 순간적으로 변화하는 모양을 정면에서 본 기하학적 마모단면은 Fig. 1과 같

다. 이 그림은 일차원 접촉문제로 두개의 원통이 충격시 가해지는 힘 q 를 받을 때의 문제이다.⁽¹¹⁾ 이 때 두개의 구가 국부적 압력으로 접근하는 거리는 Timoshenko 및 Goodier⁽¹³⁾의 방법으로 구하였으며, Engel⁽²⁾과 Lee⁽¹¹⁾ 등에 의해 두개의 원통이 충돌할 때의 해가 구해졌다.

충격에 의한 마모량의 지배방정식은 Engel에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$W_c = K N^b q_c^{3c} \tag{6}$$

여기서 W_c 는 마모량, K , b 및 $3c$ 는 마모상수 ($b=1$), N 는 충격 횟수, q_c 는 최대접촉응력이며 마모깊이 h 및 W_c 는 Fig. 1의 기하학적 마모단면을 이용하여 다음과 같이 구해진다.

$$h = \frac{b^2}{2R_1} (1 - \lambda) \tag{7}$$

$$w_c = \frac{b^3}{2R_1} (1 - \lambda)$$

여기서 b 는 접촉면의 단축, λ 는 마모량의 기하학적 형상계수(R_1/R), R_1 은 마모되지 않은 세관의 반경, R 는 마모된 세관의 곡률반경이다.

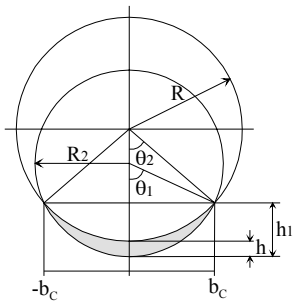


Fig. 1 Geometric configuration for contact model

두 물체가 충돌할 때 물체의 최대중심 접근거리 $\delta = \delta_c$ 및 접촉시간 t^* 는 구(sphere)에 대하여 Timoshenko와 Goodier⁽¹³⁾, 그리고 Creszczuk⁽¹⁴⁾에 의해 계산되어졌으며, 원통형 물체의 충돌에 대한 q , b_c , q_c , t^* 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} q &= 0.301 (Emv^2)^{1/2} \\ b_c &= 0.83574 (R^2 E^{-1} mv^2)^{1/4} \lambda^{-1/2} \\ q_c &= 0.2293 (R^{-2} E^3 mv^2)^{1/4} \lambda^{1/2} = p_0 \\ t^* &= 5.22 (mE^{-1})^{1/2} \end{aligned} \tag{8}$$

여기서 q , b_c , q_c 및 t^* 는 각각 충격하중, 접촉영역, 접촉압력 및 접촉시간이다. λ 는 R_1/R 이며 R_1 은 접촉하기전의 접촉체의 반경이며 R 은 접촉후의 곡률반경이다. 식 (8)의 결과를 식 (6)에 대입하면 물성상수를 구할 수 있다. 이러한 물성상수는 세관마모에 영향을 미치는 수많은 재질 및 환경변수를 포괄하는 특정 운전상황에 대한 것이다. 이러한 물성상수를 이용하여 다음주기의 마모량과 마모깊이를 예측하는 방법을 사용하였다.^(10,11)

3. 상대변위에 의한 마모량 예측 방법

본 논문에서는 Goryachva⁽⁹⁾ 등이 구한 punch가 경사를 이루고 끝면이 둥근형태를 이루는 접촉 문제의 해를 Archard의 식과 결합시켰다. 세관과 세관지지대가 접촉 충돌할 때, 접촉부는 Goryachva⁽⁹⁾ 등에 의하면 접촉형상에 따라 세 가지로 구분할 수 있는데, 본 연구에서는 Fig. 2에서와 같은 접촉 형상을 대상으로 하였다.

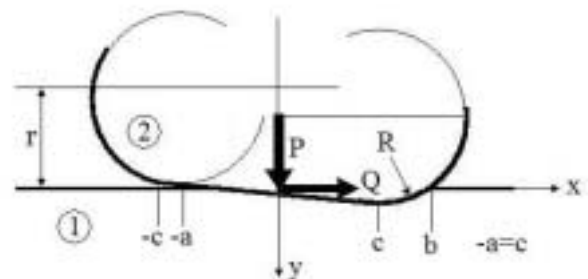


Fig. 2 Schematic diagram of inclined contact.

이때의 접촉압력 $p(y)$ 는 다음과 같다.

$$p(y) = \frac{E^*(a+b)}{2\pi R(1+y^2)} \left[\frac{1-y^2}{2} \left\{ \frac{\pi}{2} - 2 \tan^{-1} y_1 \right\} - \frac{(y-y_1)(1-yy_1)}{1+y_1^2} \ln \left| \frac{y-y_1}{yy_1-1} \right| \right] \quad (9)$$

여기서, y, y_1 은 식 (10)으로 표현된다.

$$y = \tan \frac{1}{2} \sin^{-1} \frac{2x-b+a}{a+b} \quad (10)$$

$$y_1 = \tan \frac{1}{2} \sin^{-1} \frac{2c-b+a}{a+b}$$

접촉점 $-a$ 및 b 는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$-\frac{2P}{E^*} = \frac{1}{R} \left[l_2 \frac{3a+b+2c}{4} + \frac{a+b}{8} (b-3a-3c) \left(\frac{\pi}{2} - \theta_2 \right) - K\pi \frac{a+b}{2} \right] \quad (11)$$

$$KR = \frac{1}{\pi} \left[l_2 - \frac{2c+a-b}{2} \left(\frac{\pi}{2} - \theta_2 \right) \right]$$

여기서, l_2, θ_2 는 다음과 같이 표현된다.

$$l_2 = \{(a+c)(b+c)\}^{1/2}$$

$$\theta_2 = \sin^{-1} \frac{2c-b+a}{a+b}$$

또 K 는 알고 있는 값이다. 미끄럼영역(slip region)인 $(-a, d_1)$ 에서 변위는 식 (12)와 같고, (d_2, b) 범위에서는 식 (13)과 같이 유도된다.

$$s(x) = -\frac{2\mu}{\pi E^*} \int_{-a}^b p(x') \ln \left| \frac{x-x'}{d_1-x'} \right| dx' + \frac{2}{\pi E^*} \int_{d_1}^{d_2} q^*(x') \ln \left| \frac{x-x'}{d_1-x'} \right| dx' \quad (12)$$

$$s(x) = -\frac{2\mu}{\pi E^*} \int_{-a}^b p(x') \ln \left| \frac{x-x'}{d_2-x'} \right| dx' + \frac{2}{\pi E^*} \int_{d_1}^{d_2} q^*(x') \ln \left| \frac{x-x'}{d_2-x'} \right| dx' \quad (13)$$

여기서 $-c \leq d_1 < c < d_2 < b$ 내에 있을 때 $q^*(\eta)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$q^*(\eta) = \frac{\mu E^*(d_2-d_1)}{2\pi R(1+\eta^2)} \left\{ \frac{1-\eta^2}{2} \left[\frac{\pi}{2} - 2 \tan^{-1} \eta_1 \right] - \frac{(\eta-\eta_1)(1-\eta\eta_1)}{(1+\eta_1^2)} \ln \left| \frac{\eta-\eta_1}{\eta\eta_1-1} \right| \right\} \quad (14)$$

$|\eta| \leq 1.$

이때, η, η_1 은 다음과 같이 표현된다.

$$\eta = \tan \frac{1}{2} \sin^{-1} \frac{2x-d_2-d_1}{d_2-d_1} \quad (15)$$

$$\eta_1 = \tan \frac{1}{2} \sin^{-1} \frac{2c-d_2-d_1}{d_2-d_1}$$

고착영역(stick region)인 (d_1, d_2) 는 다음 식을 이용하여 결정한다.

$$-\frac{2R(\mu P-Q)}{\mu E^*} = -K\pi R \frac{d_2-d_1}{2} + [S_2 \frac{-3d_1+d_2+2c}{4} + (d_2+3d_1-4c) \left(\frac{\pi}{2} - \phi_2 \right)] \quad (16)$$

$$KR = \frac{1}{\pi} \left[S_2 - \frac{2c-d_1-d_2}{2} \left(\frac{\pi}{2} - \phi_2 \right) \right] \quad (17)$$

여기서,

$$\phi_2 = \sin^{-1} \frac{2c-d_1-d_2}{d_2-d_1} \quad (18)$$

$$S_2 = \{(c-d_1)(d_2-c)\}^{1/2}$$

상기 식들은 Goryacheva⁽⁹⁾ 등에 의하여 주어져 있는 정적접촉상태에서의 변형에 의한 국부 미끄럼 변위 및 국부응력에 대한 표현식이다. 식(9), (11), (14), (16) 및 (17)을 무차원 식으로 고쳐 쓸 수 있다. $\bar{p} = \frac{2pR}{E^*c}, \bar{P} = \frac{2PR}{E^*c^2}, \bar{K} = \frac{KR}{c},$

$$\bar{q}^* = \frac{2q^*R}{\mu E^*c}, \frac{2QR}{\mu E^*c^2} = \bar{Q} \text{로 고쳐 쓸 수 있다.}$$

실제 수치계산에서는 $c=1.0$ $R=0.1in.$ 을 사용하였다. 종합하여 보면 $-a$ 와 b 및 d_1 과 d_2 을 식 (11)와 식 (16)과 (17)을 사용하여 구할 수 있고 그들 사이에서의 접촉압력 $p(x)$ 및 $q^*(x)$ 도 식 (9)과 식 (14)을 사용하여 구할 수 있고 접촉 변위 $s(x)$ 도 식 (12)과 (13)을 사용하여 구할 수가 있다. 이를 Archard의 방정식에 대입하고 측정 시점까지의 충돌횟수를 곱하여 총 마모량을 계산한다. Archard의 식은,

$$W_1 = \frac{K}{3H}PS \quad (19)$$

이며 $\frac{K}{3H}$ 는 마모계수, P 는 수직력이며 S 는 수평변위이고, $P = \bar{P}_{max}(E^*C^2)/2R (lb/in.)$ 이다. S 는 식(12)과 (13)중 최대값을 선정하여 $S = \bar{s}_{max}(\frac{\mu C^2}{R}) = \bar{s}_{max}(\frac{0.4 \times 1^2}{0.1}) = 4\bar{s}_{max}$ 을 사용하였다. 1EFPY 즉, 1.25년 사이에 충돌하는 횟수는 $1.25 \times 3600 \times 24 \times 365 \times f_n$ 이므로, 식 (19)를 1EFPY에서의 식으로 다시 쓰면,

$$W = \frac{K}{3H} (1.30086 \times 10^9) fPS \quad (20)$$

$$= \frac{b_c^3}{2R_1} (1 - \lambda)(l)$$

로 치환하였으며, l 은 단위길이로 가정하였다. 식 (7)의 접촉길이 b_c 를 식 (20)에 대입하여, 1EFPY 일 때 마모량(h)을 알면 $\left. \frac{K}{3H} \right|_{f=1}$ 을 구하고 그 값을 식 (20)에 대입하여 2EFPY 때의 λ_2 을 구하고 $\left. \frac{K}{3H} \right|_{f=2}$ 일 때의 값을 결정한다. 이것을 다시 식 (20)의 좌변에 대입하고 $f=3$ EFPY 일 때의 λ_3 를 결정한다. 이러한 방법을 n EFPY까지 반복하면 1EFPY일 때의 마모량만을 알면 n EFPY일 때의 총 마모량을 계산할 수 있다.

6. 결과 및 고찰

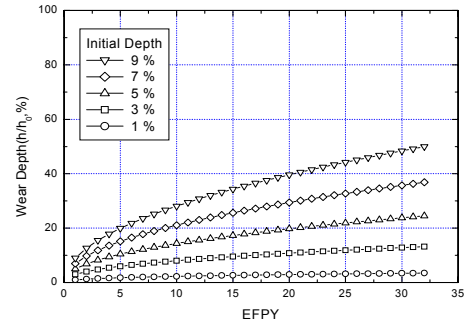


Fig. 3 Wear depth by impact model

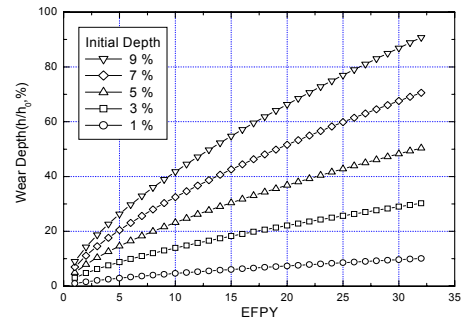


Fig. 4 Wear depth by sliding model

세관지지대와 세관이 임의의 작은 각도를 이루면서 접촉할 때의 상대변위에 의한 마모량을 계산하는 예로 본 연구에서는 다음과 같이 조건을 선정하였다. 즉, $m_0 = 1.216E-4 lb - sec^2/in^2$, $f_n = 33Hz$, $y_0 = 0.0076in.$ $R = 0.375in.$, $E = 28.5E6 lb/in.^2$, $v = 1.576in./sec.$ 으로 하였고, 또한 1EFPY일때 초기 마모깊이를 전체 세관 두께를 기준으로 1, 3, 5, 7 및 9%로 가정하였다. 초기 마모깊이에 따른 각각의 계산 결과를 Fig. 3과 4에 나타냈다. Fig. 3은 그림에서 설명한 충격으로 인한 마모깊이를 나타내는 것으로 식 (8)를 사용하여 구한 결과이다. Fig. 4는 3절에서 제안한 방법을 사용하여 세관과 지지대의 접촉시 상대변위에 따른 미끄럼에 의한 마모깊이의 변화를 나타내며, 미끄럼에 의한 마모깊이를 구하는 식 (20)을 이용하여 구한 결과이다.

계산 결과에서 알 수 있듯이 경사면 접촉시의 증기발생기 세관의 마모는 이미 선행연구에서 다루어졌던 장방형(rectangle)이나 타원(ellipse) 접촉의 경우와 마찬가지로 미끄럼에 의한 세관의 마모깊이가 충격에 의한 마모깊이에 비해 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 운전기간의 증가에 따라 더욱 누적되어 32EFPY(40년)에서는 2배 정도의 마모깊이를 갖는 것으로 나타났다. 따라서 경사면 접촉시의 증기발생기 세관의 마모에 대한 기준은 미끄럼에 의한 마모를 기준으로 생각하는 것이 더 보수적임을 알 수 있다.

7. 결론

본 논문에서는 증기발생기 내의 세관지지대와 세관이 임의의 각을 이루면서 접촉하는 경사면 접촉시의 마모량 계산을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 충격체와 피충격체가 임의의 각을 이루면서 충격을 가하는 이른바 경사면 접촉시의 상대변위에 의한 충격과 미끄럼현상을 고려함으로써, 측정된 초기 마모깊이를 알고 있을 경우 가까운 미래의 마모량을 예측할 수 있는 방법을 제시하였다. 즉, 충격 및 미끄럼모델에 관련된 물성상수 $3C/2$ 또는 $K/3H$ 를 이미 알고 있는 h_i 와 충격 횟수 N 으로부터 역으로 산출하여 세관과 세관지지대의 경사면 접촉시 가까운 미래의 마모량을 근사적으로 예측할 수 있다.

2) 세관과 세관지지대의 경사면 접촉시의 마모깊이는 미끄럼에 의한 마모깊이가 충격에 의한 마모깊이에 비하여 크게 나타났으며, 그 차이는 운전주기가 증가할수록 더욱 커진다.

참고문헌

(1) Engel, P. A., 1993, "Impact Wear of Materials," Tribology Series 2, Elsevier Scientific Publishing Co.
 (2) Engel, P. A., 1995, "Impact Wear," ASM Handbook, Vol. 18, Friction, Lubrication and Wear Technology, pp. 263~270.
 (3) Waterhouse, R. B., 1995, "Fretting Wear," ASM Hand Book, Vol. 18 Friction, Lubrication and

Wear Technology, pp. 242~256.
 (4) Pettigrew, M. J., 1996, "Flow Induced Vibration - Excitation Mechanism in Cross Flow and Nuclear Fuel Vibration ; Fretting-Wear Damage and Piping Vibration," ASME PVP-Vol. 328.
 (5) Yetisir, M. and Pettigrew, M. J., 1999, "A Simple Approach to Estimate Heat Exchanger Tube Fretting-Wear Damage ; Application to U-Bend Tubes, Flow-Induced Vibration," ASME PVP-Vol. 389, pp. 273~282.
 (6) Yetisir, M., Mckerrow, E and Pettigrew vessel Technology, Vol. 120, pp.297.
 (7) Yetisir, M. and Pettigrew, M. J., 2002, " A simple Approach to Estimate Fretting-wear Damage in Heat Exchanger, " Verification and validation, PVP-Vol. 420-1, Flow-Induced Vibration, pp.27-33.
 (8) Pettigrew M. J., and Yetisir, M., 2002, "A simple Energy Approach to Assess Fretting wear Damage, " 4th CNS International steam Generators conference
 (9) Goryacheva, I. G., Murthy, H. and Farris, T. N., 2002, " contact problem with partial slip for the inclined punch with rounded Edger; Int. Jorurnal of Fatigue, Vol. 24, PP. 1191.
 (10) Lee, Y. S., Park, C. E., Kim, C. S., and Kim, H. D., 2003, The Method to Predict wear Depth and Wear Volume of Tube at Near-Distant Future from Measured or Prescribed Depth at Presnt time, Nuclear Engineering and Design, Accepted
 (11) 이용선, 김태순, 박치용, 부명환, 2003, 측정된 마모깊이와 시간을 이용한 마모상수 및 마모깊이 예측, KSME, May, 03S030
 (12) Connors, Jr. H. J., 1980, "Fluid-elastic Vibration of Tube Arrays Excited by Nonuniform Cross Flow, Flow-induced Vibration of Power Plant Components," ASME PVP-Vol. 41, pp. 93.
 (13) Timoshenko, S. T. and Goodier, J. N., 1977, "Theory of Elasticity," McGraw-Hill Book Co.
 (14) Creszczuk, L. B., 1975, Response of Isotropic and Composite Materials to Particle Impact, ASTM STP 568, pp. 183~211.