

# 프레팅 조건하에 있는 증기 발생기 세관재의 스틱-슬립 영역별 마멸 메커니즘 규명

정성훈 · 박치용\* · 이영제\*\*†

성균관대학교 대학원 기계공학부, \*전력연구원 원자력연구실, \*\*성균관대학교 기계공학부

## Investigation of Wear Mechanisms of Tube Materials for Nuclear Steam Generators due to Stick-Slip Behavior under Fretting Conditions

Sung-Hoon Jeong, Chi-Yong Park\* and Young-Ze Lee\*\*†

Graduate School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University

\*Nuclear Power Laboratory, Korea Electric Power Research Institute

\*\*School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University

**Abstract** – Fretting is the oscillatory motion with very small amplitudes, which usually occurs between two solid surfaces in contact. Fretting wear is the removal of material from contacting surfaces through fretting action. Fretting wear of steam generator tubes in nuclear power plant becomes a serious problem in recent years. The materials for the tubes usually are Inconel 690 (I-690) and Inconel 600 (I-600). In this paper, fretting wear tests for I-690 and I-600 were performed under various applied loads in water at room temperature. Results showed that the fretting wear loss of I-690 and I-600 tubes was largely influenced by stick-slip. The fretting wear mechanisms were the abrasive wear in slip regime and the delamination wear in stick regime. Also, I-690 had somewhat better wear resistance than I-600.

**Key words** – fretting wear, Inconel 690 and 600, wear mechanism, stick-slip, wear coefficient.

### 1. 서 론

원자력 증기발생기내 세관은 온도 275°C, 압력 15 Mpa의 수중환경에 놓여있어 가혹한 열화조건에 노출된다. 또한 세관 주변의 유동에 의한 유체유발진동(flow induced vibration)은 세관과 지지대 사이의 접촉부에 프레팅 마멸을 일으킨다[1,2]. 세관의 마멸은 접촉부의 관두께를 감소시켜 방사능 누출 등의 문제를 유발시킬 수 있으므로 원전의 안전성을 크게 위협한다. 최근 들어 세관의 프레팅 마멸특성을 평가하기 위한 연구가 수행되어오고 있지만, 마멸계수의 산출을 통한 세관의 수명에 초점을 맞춘 연구들이 대부분이며, 마멸 저감책을 제시하기 위해 필요한 세관의 마멸 메커니즘 규명에 관

한 연구는 부족한 실정이다[3-5].

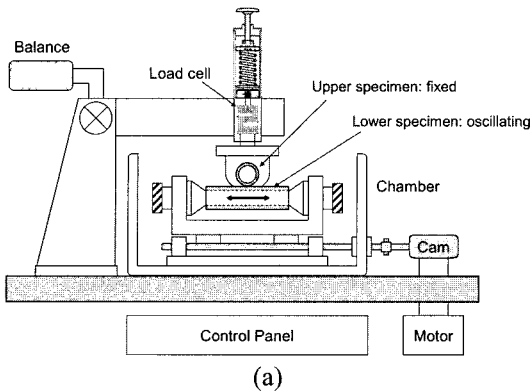
일반적으로 프레팅 마멸시 접촉부에는 스틱-슬립 현상이 발생한다. 스틱-슬립 현상은 프레팅의 마멸 메커니즘을 결정짓는 중요한 현상이다. 이에 본 연구에서는 프레팅 조건하에 있는 증기발생기 세관재의 스틱-슬립 영역별 마멸 메커니즘을 규명해 보고자 한다.

연구 내용으로는 세관 재료인 Inconel 600과 Inconel 690의 프레팅 마멸시 스틱-슬립 영역에 따른 마멸 메커니즘을 규명해보고, 두 재료간의 마멸 저항성을 비교해 보고자 한다.

### 2. 시편 및 실험 방법

프레팅 실험으로 하중변화에 따른 스틱-슬립영역 구분, 스틱-슬립 영역별 마멸 메커니즘 규명, 슬립 영역에

†주저자 · 책임저자 : yzlee@skku.edu



(a) Tube against tube test  
Inconel 690/600 against STS 304

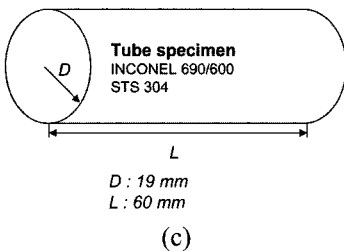
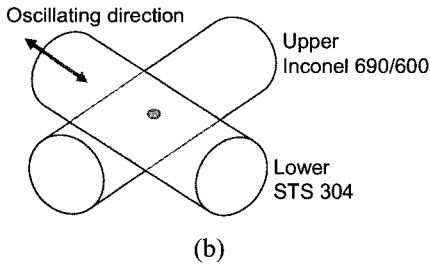


Fig. 1. Schematic diagram of fretting tester and dimensions of tube specimens and flat specimen: (a) fretting tester; (b) tube against tube test; (c) dimensions of tube specimens.

서의 마멸계수 비교의 실험이 수행되었다. 프레팅 마멸 실험장치가 Fig. 1과 같이 구성되어 있다. (a)는 시험기의 개략도를 나타내며 (b)는 시편의 구성을 나타내고 (c)는 시편의 크기를 나타낸다. 시험기는 작은 진폭의 가진을 위해서 서보모터에 캠을 연결하여 회전운동을 직선운동으로 바꿔서 가진하는 방식으로 구성되어 있다. 시편의 구성은 세관이 교차되어 접촉하고 있으며 아래의 시편이 가진진폭으로 진동한다. 고정되는 시편의 재료는 Inconel 690 혹은 Inconel 600이며 상

Table 1. Chemical compositions (wt. %) and mechanical properties of Inconel 690, Inconel 600, STS 304

| Chemical compositions | Si   | Mn   | Cr   | Ni  | Fe   |
|-----------------------|------|------|------|-----|------|
| Inconel 690           | 0.33 | 0.26 | 29.5 | 59  | 10.5 |
| Inconel 600           | 0.5  | 0.5  | 17   | 72  | 9.1  |
| STS 304L              | 0.55 | 1.81 | 18.3 | 8.2 | 71   |

| Mechanical properties | Hardness (HV) | Yield strength (MPa) | Ultimate strength (MPa) |
|-----------------------|---------------|----------------------|-------------------------|
| Inconel 690           | 193           | 326                  | 727                     |
| Inconel 600           | 194           | 245~350              | 561                     |
| STS 304L              | 250           | 270                  | 600                     |

대재로는 STS 304를 사용하였다. 시편의 특성은 Table 1에 나타나 있다. 시편의 구성이 교차된 세관이므로 마멸흔이 균일하여 마멸부피 및 마멸계수의 산출이 용이하며 데이터 비교시 신뢰할 수 있다. 각 실험별 실험조건은 다음과 같다.

- 1) 하중 변화에 따른 스틱-슬립 영역 구분
  - 실험 환경은 실온 수중환경, 실험 온도는 실온 약 20°C로 하였다.
  - 기존 연구결과[5]를 참고로 10 N, 40 N, 70 N, 90 N의 네 가지 하중을 선택하여 가진진폭 200 μm, 가진 주파수 10 Hz(600 rpm)로 10시간동안 프레팅 마멸실험을 수행하였다. 이는 스틱-슬립 하중을 구별하여 각 하중별 마멸특성을 연구하기 위한 것이다.
- 2) 슬립영역에서 마멸계수 비교
  - 실험 환경은 실온 수중환경, 실험 온도는 실온 약 20°C로 하였다.
  - 가진진폭 200 μm, 가진 주파수 10 Hz(600 rpm)로 2~20시간동안 프레팅 마멸실험을 수행하였다. 실험 1)의 결과를 바탕으로 마멸량이 가장 큰 40 N의 슬립하중에서 시간 경과에 따른 마멸량을 산출하였다.

### 3. 실험 결과

#### 3-1. 하중변화에 따른 스틱-슬립 영역 구분

Fig. 2는 Inconel 690과 Inconel 600 세관재의 하중 증가에 따른 마멸흔의 형상을 나타낸다. 마멸흔의

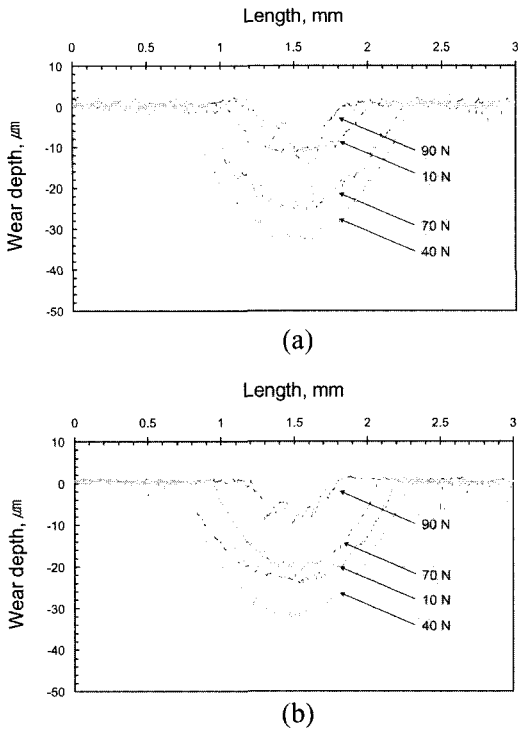


Fig. 2. Topographic graphs of the worn surface by load increase: (a) Inconel 690; (b) Inconel 600.

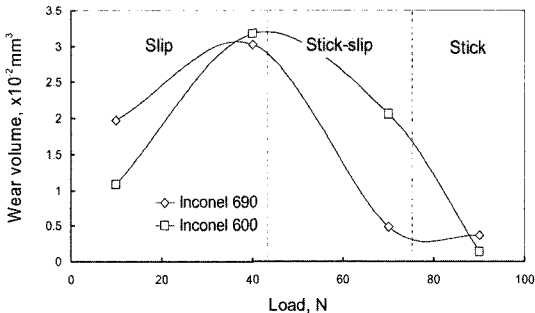


Fig. 3. Wear volume of Inconel 690 and Inconel 600 by load increase (classification of stick-slip regime).

형상은 표면조도계를 이용하여 가장 큰 깊이와 폭을 나타낸 것이다. 10 N, 40 N, 70 N의 경우 마멸흔의 모양이 균일하게 나타났고, 90 N의 경우에는 형상이 불규칙하게 나타났다.

Fig. 3은 하중 증가에 따른 마멸부피 그래프를 나타낸다. 마멸부피는 Fig. 2의 마멸형상에서 마멸깊이와 마멸폭을 이용하여 간단한 산술식으로부터 구해진다. 그 결과 40 N의 하중에서 마멸부피가 가장 큰 것으로

나타났으며, 90 N의 경우에 마멸부피가 가장 작은 것으로 나타났다. 그래프에 보이는 것처럼 마멸영역을 마멸부피의 크기를 기준으로 슬립, 스틱-슬립, 스틱의 세 영역으로 나누었다. 슬립영역은 하중이 증가함에 따라 마멸부피가 증가하는 영역이고, 스틱-슬립영역은 하중이 증가함에 따라 마멸부피가 감소하기 시작하는 영역이며, 스틱영역은 마멸부피가 거의 없는 영역이다. 슬립영역에서 하중이 증가함에 따라 마멸량이 증가하는 이유는 재료의 항복으로 인해 나타나는 elasticshakedown효과 때문이며, 스틱영역에서 고하중에 의해 나타나는 재료의 소성변형량은 그 양이 미미하여 마멸량에 미치는 영향이 거의 없는 것으로 판단된다. 본 실험 결과를 바탕으로 슬립영역에서의 마멸계수 비교 실험 시 실험하중으로 가장 큰 마멸부피를 갖는 40 N의 하중을 선정하여 수행하였다. Fig. 4는 Inconel 690과 Inconel 600의 광학현미경 사진들을 나타낸다. Fig. 4 (a), (b), (c), (d)는 Inconel 690의 광학사진이고, (e)와 (f)는 Inconel 600의 광학사진이다. Inconel 690의 경우 (a) 10 N에서 (d) 90 N으로 하중이 증가함에 따라 마멸흔의 크기는 증가하다가 감소하였다. (c) 40 N에서 가장 컸으며 (d) 90 N의 경우가 가장 작은 것으로 나타났다. (e) 40 N와 (f) 90 N의 Inconel 600의 경우도 40 N의 경우에 마멸흔이 가장 크고 90 N의 경우에 마멸흔이 가장 작은 것으로 나타났다. Fig. 5는 Fig. 4 (b)와 (d) 마멸흔의 SEM사진을 나타낸다. (a)의 경우 Fig. 4 (b) 40 N의 사진으로 슬립 영역이며, (b)는 (a)의 중심부를 확대한 사진이다. (c)의 경우 Fig. 4 (d) 90 N의 사진으로 스틱영역이며, (d)의 경우 (c)의 중심부에 있는 입자가 떨어져나간 곳의 사진이다. (a)의 경우 40배율로 전체적인 모양을 나타낸다. 마멸흔의 경

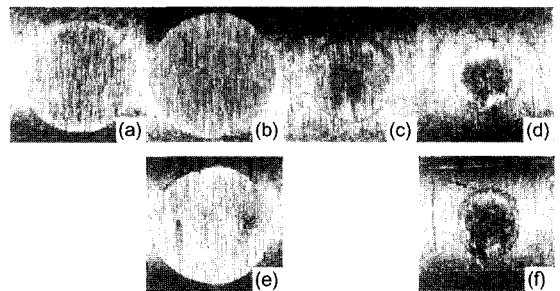


Fig. 4. Optical microscope images of Inconel 690 and Inconel 600: (a) 10 N, (b) 40 N, (c) 70 N and (d) 90 N-Inconel 690; (e) 40 N and (f) 90 N-Inconel 600, respectively.

계가 희미하게 보인다. (b)의 경우 (a)를 1,000배로 확대한 사진으로 마멸 베커니즘이 연삭마멸이라는 것을 나타내고 있다. (c)의 경우 전체적인 형상을 나타낸다. 마멸흔의 중앙부에 판상박리의 형태로 마멸입자가 떨어져 나간 흔적을 보여주고 있다. (d)는 마멸입자가 떨어져 나간 부분을 확대한 것으로 마멸입자의 크기는 대략 가로 100 μm, 세로 50 μm, 깊이 20 μm 정도인 것으로 나타났다. 즉, 90 N의 경우 마멸 베커니즘은 연삭마멸보다는 판상박리 마멸의 경향이 강한 것으로 나타났다. 이는 프레팅 마멸시 스틱 조건에서는 마멸

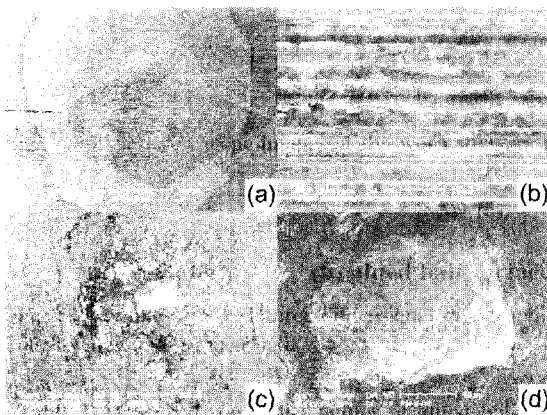


Fig. 5. SEM micrographs of the worn surfaces formed on Inconel 690 tube specimens tested for 10 hours: (a) slip regime (40 N, x40), (b) is magnified image (x1,000) of (a); (c) stick regime (90 N, x100), (d) is magnified image (x500) of (c), respectively.

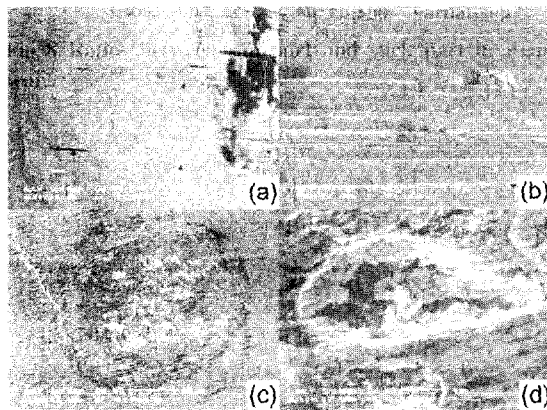


Fig. 6. SEM micrographs of the worn surfaces formed on Inconel 600 tube specimens tested for 10 hours: (a) slip regime (40 N, x40), (b) is magnified image (x1,000) of (a); (c) stick regime (90 N, x100), (d) is magnified image (x4,000) of (c), respectively.

량이 거의 발생하지 않지만 (d)의 경우에서처럼 판상 박리형태로 상당히 큰 입자가 분리되는 것으로 보아 스틱영역에서의 마멸도 주의 깊게 살펴보아야 할 것으로 판단된다. 이런 면에서 프레팅 마멸이 발생하는 곳은 잘 보이지 않는 위치에 있기 때문에 그 치명성이 더한 것이라 할 수 있다. Fig. 6은 Inconel 600의 SEM 사진으로 Fig. 4 (e) 40 N와 (f) 90 N의 마멸흔의 경우이다. Fig. 5와 마찬가지로 (a), (b)는 40 N의 경우, (c), (d)는 90 N의 경우를 나타낸다. (b)에서 연삭마멸의 형태를 볼 수 있으며 (d)의 경우에서 Inconel 690의 경우와 마찬가지로 판상박리의 형태를 볼 수 있지만 마멸입자의 크기가 상대적으로 매우 작았다. Fig. 7은 슬립하중과 스틱하중에서 Inconel 690과 Inconel 600 마멸흔의 중심부의 EDX분석결과를 마멸되지 않은 원래의 표면과 비교하여 나타낸다. (a) Inconel 690의 경우 슬립영역인 40 N의 경우에 산소의 무게 비율이 약간 증가하였고 스틱 영역인 90 N의 경우에 원래의 Inconel 690표면과 거의 같은 결과를 나타내었다. (b)의 Inconel 600의 경우 슬립과 스틱에 상관없이 원래의 표면과 큰차이를 나타내지 않았다.

하중증가에 따른 스틱-슬립 영역구분 실험결과 Inconel 690과 Inconel 600의 슬립하중은 40 N이었으

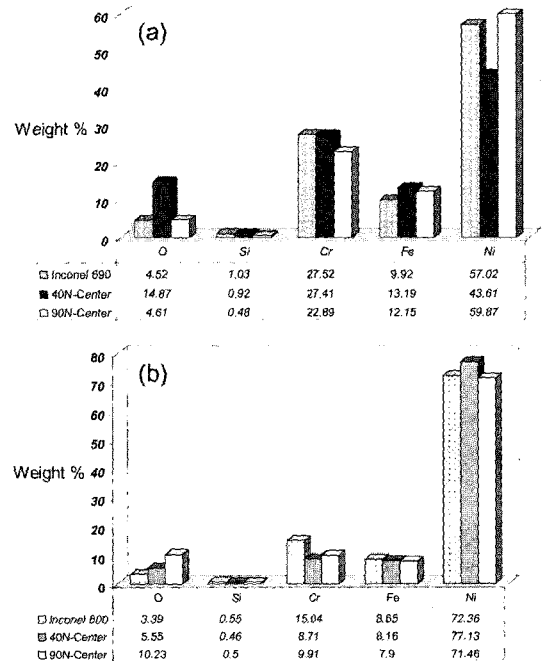


Fig. 7. EDX analyses of the worn surface on cylinder specimens: (a) Inconel 690 and (b) Inconel 600.

며 스틱하중은 90 N 이상이었다. 40 N의 하중에서 마멸량이 가장 컸으며 연삭마멸을 나타내었다. 90 N의 하중에서는 마멸량이 가장 적었으며 판상박리 마멸 현상이 나타나 슬립구간에서의 연삭마멸 메커니즘과는 다른 양상을 나타내었다. 따라서 슬립영역에서의 마멸량에 관심을 갖는 것도 중요한 문제이지만, 스틱영역에서 크게 떨어져 나가는 마멸입자가 발생하는 부분도 주의 깊게 살펴볼 필요가 있다.

3-2. 슬립영역에서의 마멸계수 비교

Fig. 8은 슬립하중인 40N에서 Inconel 690과 Inconel

600의 시간 경과에 따른 마멸형상의 변화를 나타낸다. 시간 경과에 따라 마멸폭과 깊이가 두 세관재 모두 균일하게 증가하는 경향을 나타내었다. 마멸흔이 균일하게 증가한 이유는 슬립영역에서의 마멸 메커니즘이 연삭이기 때문이다. 일반적으로 연삭마멸은 일정 조건하에서는 시간에 관계없이 일정한 것으로 알려져 있다[6]. 따라서 본 연구에서도 마찬가지로 마멸폭과 마멸깊이가 균일하게 증가한 것으로 판단된다.

Fig. 9는 Fig. 8의 결과를 바탕으로 두 세관재의 마멸계수 그래프를 나타낸다. 여기에서의 마멸계수(wear coefficient)는 일에 대한 마멸부피의 비로 마멸저항성을 나타낼 수 있다. 마멸계수 값은 Inconel 690의 경우  $5.6 \times 10^{-15} \text{ m}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 이며, Inconel 600의 경우 조금 더 큰  $5.9 \times 10^{-15} \text{ m}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 이었다. 이는 마멸저항성에 있어서 Inconel 690이 아주 근소한 차이로 우수한 것을 나타낸다.

4. 결 론

본 연구에서는 Inconel 690/600의 세관재와 STS 304상대재를 이용하여 수중환경에서의 프레팅 마멸 메커니즘의 규명에 관한 연구가 수행되었다. 세관의 프레팅 마멸시 슬립영역에서는 연삭마멸이 주된 마멸 메커니즘이었고, 스틱영역에서는 판상박리 마멸이 주된 마멸 메커니즘이었다. 일반적으로 프레팅 마멸에 대한 평가시 마멸량이 가장 큰 슬립영역에 초점을 맞추고 있으나, 본 연구의 결과에서처럼 판상박리 마멸시 마멸입자가 상당히 클 수도 있으므로 주의 깊은 관찰이 요구된다는 것도 알 수 있었다.

1. 실온 수중환경하에서 증기발생기 세관재의 스틱-슬립 영역별 마멸 메커니즘이 규명되었다. 슬립영역에서의 마멸 메커니즘은 연삭마멸이었으며, 스틱영역에서는 판상박리 마멸의 형태를 나타내었다.

2. 세관재인 Inconel 690과 Inconel 600을 비교한 결과 아주 근소한 차이로 Inconel 690의 마멸저항성이 약간 더 우수한 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 과학기술부 및 한국과학기술기획평가원의 지원을 받아 2004년도 원자력연구개발 중·장기 사업을 통해 수행되었습니다.

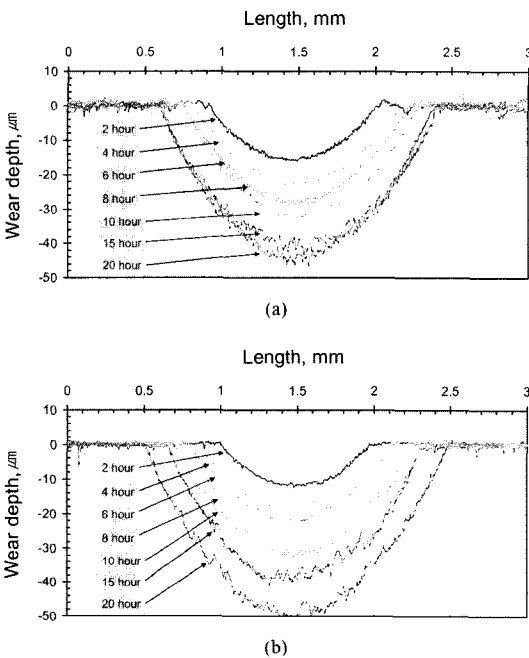


Fig. 8. Topographic graphs of the worn surfaces by time passage: (a) Inconel 690 and (b) Inconel 600.

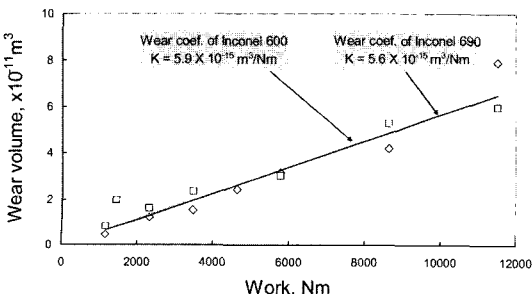


Fig. 9. Wear coefficients of Inconel 690 and Inconel 600.

### 참고 문헌

1. Guerout, F. M., Fisher, N. J., "Steam Generator Fretting-Wear Damage: A Summary of Recent Findings," *Journal of Tribology*, Vol. 121, pp. 304-310, 1999.
2. Au-Yang, M. K., "Flow-Induced Wear in Steam Generator Tubes-Prediction Versus Operational Experience," *Journal of Tribology*, Vol. 120, No. 2, pp. 138-143, 1998.
3. Ko, P. L., Taponat, M. C., Zbinden, M., "Wear Studies of Materials for Tubes and Antivibration Bars in Nuclear Steam Generators," *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 118, pp. 287-300, 1996.
4. Dyke, J. M., "Fretting in Nuclear Steam Generators - A New Approach," *11th International Conference on Nuclear Engineering*, ICONE11-36443, JSME, pp. 1-7, 2003.
5. Kim, D. G. and Lee, Y. Z., "Experimental Investigation on Sliding and Fretting Wear of Steam Generator Tube Materials," *Wear*, Vol. 250, pp. 673-680, 2001.
6. Rabinowicz, E., "Friction and Wear of Materials," 2nd edition, *John-Wiley & Sons, INC.*, pp. 196, 1995.