

## 이상 유동 환경이 증기 발생기 세관과 지지대의 프레팅 마모에 미치는 영향에 대한 연구

박정민 · 정성훈 · 김진선 · 박세민 · 이영제\*

성균관대학교 기계공학부

### The Influence of Two Phase Flow on Fretting Wear between Steam Generator Tube and Supporting Bar

Jung-Min Park, Sung-Hoon Jeong, Jin-Seon Kim, Se-Min Park and Young-Ze Lee\*

Dept. of Mechanical Engineering, Sungkyunkawn University

(Received August 7, 2008; Revised October 17, 2008; Accepted October 23, 2008)

**Abstract** – Tubes in nuclear steam generators are held up by supports because the tubes are long and slender. Fluid flows of high-pressure and high-temperature in the tubes cause oscillating motions between tubes and supports. This is called as FIV (flow induced vibration), which causes fretting wear in contact parts of tube-support. The fretting wear of tube-support can threaten the safety of nuclear power plant. The tube and support materials were Inconel 690 and STS 409. The wear tests were conducted in various environments, which are in water without flow, in flowing water and in flowing water with air. The results showed that the flow of water influenced on the wear-life of tube. The wear-life of tube decreased in water flow as compared with wear-life in stationary water.

**Key words** – Fretting wear, two phase flow, steam generator tube, wear-life, wear coefficient

#### 1. 서 론

원자력 발전소의 증기 발생기는 원자로에서 발생한 열에너지를 발전 터빈에 전달하는 구조물이며, 원전의 1차 계통에 속하는 중요한 구조물이다. 증기 발생기의 내부는 길이가 매우 길고 직경은 작은 관들로 구성되어 있으며 관의 내부 및 외부로 유체가 흐르고 있어서 이로 인하여 발생하는 진동에 매우 취약한 구조를 가지고 있다. 유동하는 유체와 구조물은 유체에 의해 연동(coupling)되어 있어서 유동유체에 의해 발생하는 유체력이 구조물을 변형시키며, 구조물의 변형은 유동의 흐름을 변경하여 유체력을 변하게 한다. 유체가 구조물에 유체력을 작용하면 구조물은 동일한 크기의 힘을 유체에 전달하는데, 이때 두 힘이 일치하면 진폭이 큰 진

동을 발생할 수 있다. 이와 같이 유동유체의 동역학적인 힘과 구조물의 관성, 감쇠 및 탄성력간의 상호 연동 작용에 의한 구조물의 동적 거동과 관련된 현상들을 유체유발진동(flow-induced vibration)이라 한다[1]. 이로 인하여 유체유발진동을 받는 증기발생기 내 세관과 지지대 사이에서 프레팅 마모가 발생하여 손상되게 된다[2].

프레팅 마모에 의한 세관의 손상에 관하여는 다양한 연구가 진행되었는데, 그 중 공기 중과 수중에서의 환경의 변화는 프레팅 마모 특성에 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 마모량의 경우 공기 중에서의 마모량이 수중에서의 마모량보다 매우 크고, 마모 메커니즘의 경우 공기 중에서는 판상박리에 의해 마모가 발생하지만, 수중의 경우 연삭에 의해 마모가 발생한다[3].

즉, 환경의 변화로 인해 세관의 프레팅 마모는상이한 마모 메커니즘을 일으켜 마모량에 있어서 큰 차이를 나타낸다. 따라서 증기와 물이 공존하는 이상유동 환경의

\*주저자 · 책임저자 : yzlee@skku.edu

경우에도 세관의 프레팅 마모 특성에 큰 변화가 있을 것으로 예상된다. 지금까지는 공기 중과 수중의 환경에서 각각 세관의 프레팅 마모 특성이 연구되어 왔으나, 유체의 유동이 존재하는 이상유동 환경에서의 세관의 마모 특성에 관한 연구는 미진하였다. 이는 기존의 세관의 프레팅 마모에 대한 연구가 유체유발진동 현상에 초점을 맞춰 진행되어 왔기 때문이다[4,5]. 따라서 본 연구는 이상유동 환경에서의 세관과 지지대 사이의 프레팅 마모실험을 실시하여 유동으로 인한 세관의 프레팅 마모 특성과 마모 손상기구를 규명하고자 한다.

## 2. 실험 방법

상온 이상유동을 구현하기 위해 Fig. 1의 프레팅 마모 시험기를 제작하였다. 실험은 유동이 없는 수중환경(Water), 물의 유동이 존재하는 환경(Water Flow), 물과 공기의 이상유동이 존재하는 환경(Water/Air Flow)의 세 가지를 상태를 구현하여 각 환경별 프레팅 마모 실험을 실시하였다. 세관과 지지대의 시편은 Fig. 2에 나타나 있으며 세관은 길이 60 mm, 지름 19 mm, 두께 1 mm의 형태로 가공하였으며, 지지대는 길이 50 mm, 폭 2 mm, 높이 5 mm의 형태로 가공하였다. 세관의 재질은 니켈-크롬 합금인 인코넬 690이며 지지대의 재질은 스테인리스 스틸 409이다. 프레팅 마모

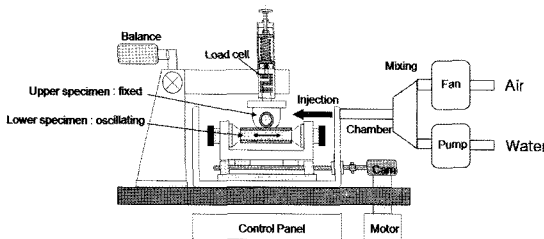


Fig. 1. Schematic diagram of fretting wear tester with two phase flow.

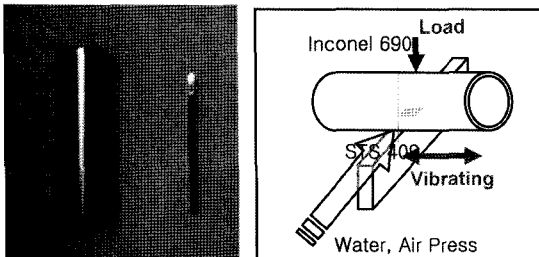


Fig. 2. Configuration of tube and support.

실험기는 캠을 이용하여 가진진폭과 가진주파수를 정확히 조절할 수 있도록 하였으며, 세관-지지대에는 수직하중을 가하였다. 밸브와 유량계를 이용하여 유체의 유량을 일정하게 조절하였다. 세관과 지지대 사이의 상대진폭은 300  $\mu\text{m}$ 이며, 가진주파수는 33 Hz(2,000 rpm)로 일정하게 유지하였고, 수직하중은 10 N~70 N 사이에서 15 N씩 증가시켰다. 이상유동 환경에서 마모 결과를 비교하기 위해 증류수가 담긴 실험조에서 유체의 유동이 존재하지 않는 정적 상태와(Water), 프레팅 마모면에 3 m/s의 물의 유동을 준 상태(Water Flow), 3 m/s의 물의 유동과 15 LPM의 공기 흐름을 혼합하여 마모면에 가한 상태(Water/Air Flow)로 나누어 실험을 하였으며, 실험조의 증류수는 상온의 온도를 유지하면서 실험을 실시하였다. 세관과 지지대의 마모량은 표면 조도계와 광학 현미경을 통하여 마모면의 외각형상을 측정하여 work rate model을 이용하여 구하였다.

## 3. 실험 결과

### 3-1. 마모면 광학사진 및 마모 계수 산출

Fig. 3과 Fig. 4는 유동 환경에 따른 세관과 지지대의 프레팅 마모 실험을 실시한 후 마모면을 촬영한 광학사진들이다.

Fig. 3의 세관 마모면을 유동 환경별로 분석한 결과, 마모면의 크기는 수직 하중이 증가함에 따라 커짐을

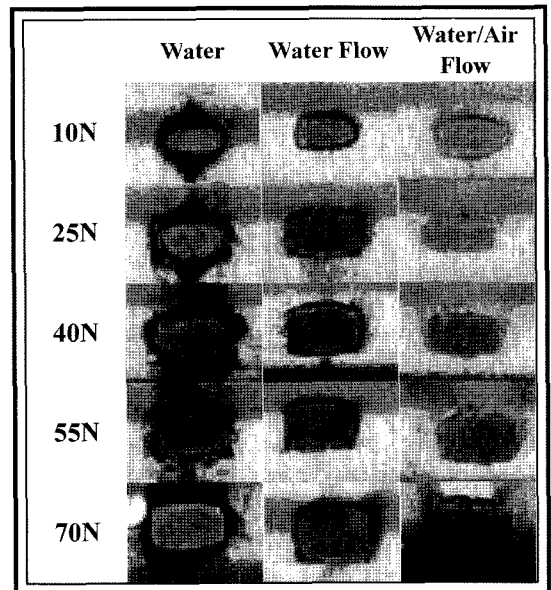


Fig. 3. Wear scars of Inconel 690.

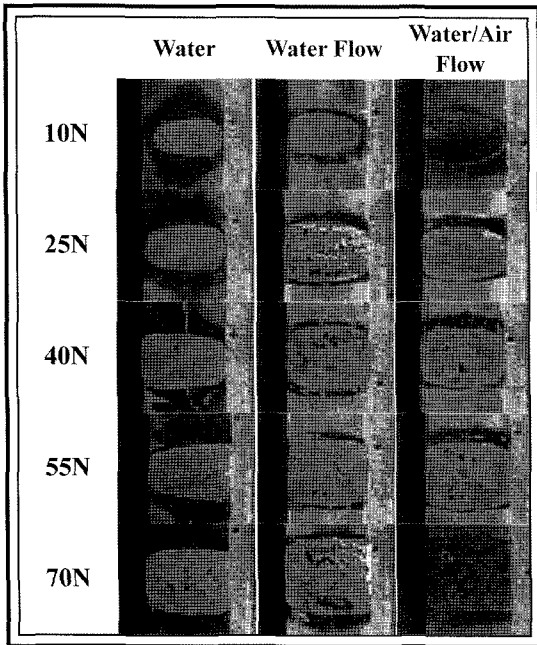
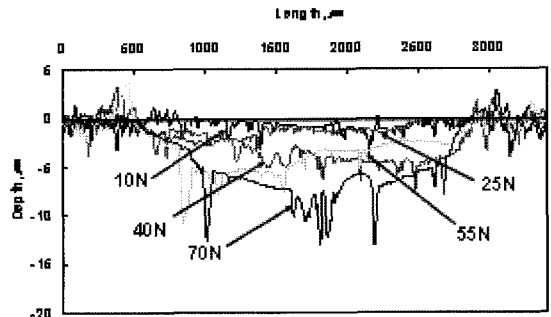


Fig. 4. Wear scars of STS 409.

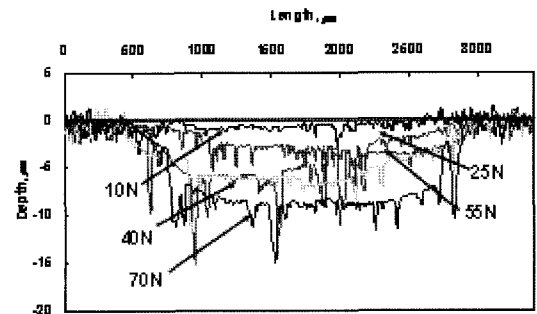
확인할 수 있었다. 동일 하중에서 유동 환경별로 마모 흔을 비교하였을 때 Water/Air Flow 환경이 다른 환경보다 크게 나타났다. 그러나 하중이 증가수록 마모면 크기의 차이가 줄어들었다. 또한 하중이 증가함에 따라 마모면의 중앙부에서 검은색의 이물질이 발견되었다.

Fig. 4의 지지대 마모면을 분석한 결과 세관과 유사하게 하중이 증가함에 따라 마모흔의 크기도 증가하였다.

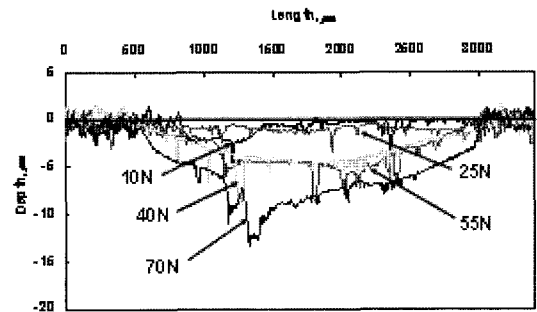
Fig. 5와 Fig. 6은 실험 후 세관과 지지대의 마모면들을 조도계로 측정한 그래프이다. Fig. 5의 세관의 그래프에서는 모든 환경에서 하중이 증가함에 따라 마모 깊이도 증가하는 것을 알 수 있다. 마모면의 길이는 40 N의 하중까지는 증가하였지만, 그 이상의 하중에서는 마모면의 길이가 2.5 mm에서 크게 변하지 않았다. 10 N의 하중에서 세관의 마모 깊이를 비교한 결과, Water와 Water Flow 환경에서는 약 1 μm였지만, Water/Air Flow 환경에서는 최대 깊이가 약 2 μm였다. 이를 통해 저하중에서는 이상유동으로 인해 세관의 마모가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 70 N의 하중에서는 Water 환경이 약 8 μm의 마모 깊이를 나타냈으며, Water Flow와 Water/Air Flow 환경에서는 약 9 μm의 최대 깊이를 나타내었다. 높은 하중에서 유동 환경 변



a) Water



b) Water Flow



c) Water/Air Flow

Fig. 5. Wear Depth profiles of tubes.

화에 따른 세관의 마모 깊이의 상대적인 차이가 감소하는 것으로 보아, 고하중에서 세관의 마모 정도를 결정하는 주요한 인자는 유동의 영향이라기보다는 하중의 영향이라 할 수 있다.

Fig. 6의 지지대의 마모 그래프에서도 하중이 증가함에 따라 모든 유동 환경에서 마모 깊이가 증가하였으나, 세관과는 다르게 마모면의 길이도 하중이 증가함에 따라 길어지는 것을 확인할 수 있었다. 동일 하중에서 환경에 따른 마모 깊이를 비교하였을 때 10 N의 하중에서는 Water와 Water Flow에서 약 10 μm이며, Water/Air Flow에서는 약 20 μm이다

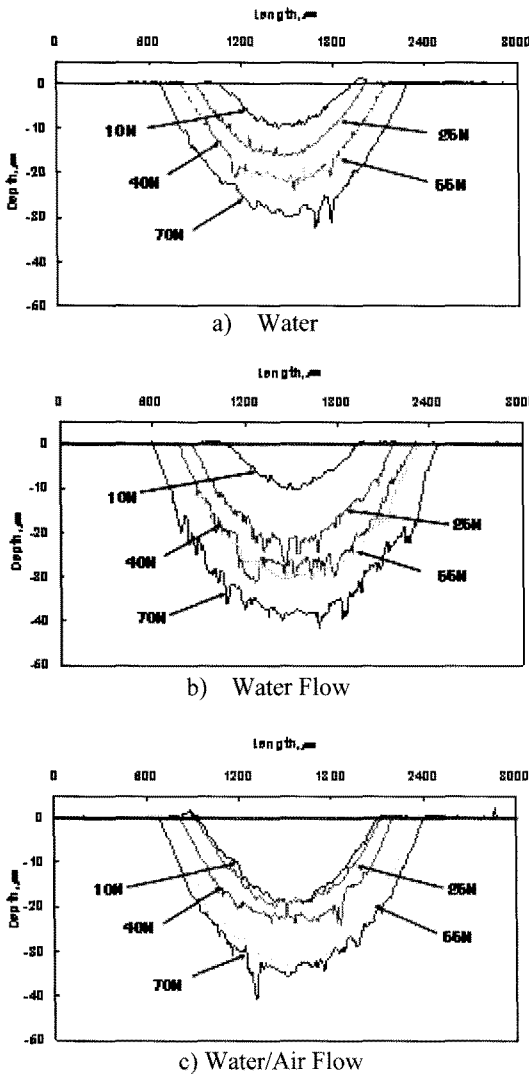


Fig. 6. Wear Depth profiles of Supports.

마모면의 길이를 비교하면 Water와 Water Flow에서는 약 0.9 mm 이지만, Water/Air Flow에서는 약 1.2 mm이다. 지지대 역시 저하중에서는 이상유동이 마모에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

70 N의 하중에서 지지대의 마모면을 비교한 결과, Water에서는 마모 깊이가 약 30 μm이고 Water Flow와 Water/Air Flow에서는 약 37 μm의 깊이를 나타냈다. 마모면의 길이도 Water에서는 약 1.5 mm이고, Water Flow와 Water/Air Flow에서는 약 1.8 mm이다. 저하중에 비하여 상대적으로 유사한 마모 길이와 깊이를 나타낸다. 따라서 고하중에서는 세관과 마찬가지로 유체의 유동보다는 하중이 마모의 정도를 결정하는 인

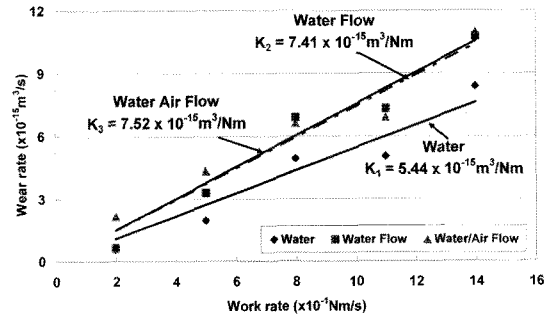


Fig. 7. Wear coefficients of tubes.

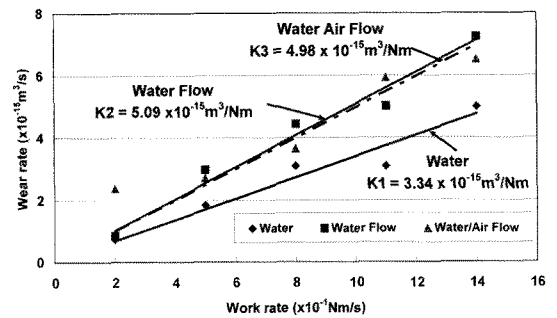


Fig. 8. Wear coefficients of supports.

자임을 알 수 있다.

### 3-2. 마모계수 산출 및 마모 성분 분석

증기 발생기의 세관과 지지대의 프레팅 마모를 정량적으로 파악하기 위해서 work rate mode을 이용하여 세관의 마모 계수를 비교하였다. Fig. 5, Fig. 6의 세관과 지지대의 마모 데이터를 이용하여 마모 계수를 구하였으며, 이를 세관과 지지대로 정리하여 Fig. 7와 Fig. 8로 나타내었다. 세관과 지지대의 마모계수의 추세 선도를 통해 각 유동환경에서 마모량의 차이를 보다 명확하게 알 수 있다.

세관의 경우 Water환경에서 마모 계수 값은  $5.44 \times 10^{-15} \text{ m}^3/\text{Nm}$ 였으나, Water Flow환경에서는 이보다 36% 증가한 값을, Water/Air Flow환경에서는 38% 증가한 값을 보였다. 지지대의 경우에는 Water환경의 마모 계수 값은  $3.34 \times 10^{-15} \text{ m}^3/\text{Nm}$ 이나, Water Flow환경에서는 52% 증가하였으며, Water/Air Flow환경에서는 49% 증가하였다. Water환경에서의 마모계수 값이 Water Flow와 Water/Air Flow환경에서의 마모 계수 값에 비하여 많은 차이를 보였으나, Water Flow와 Water/Air Flow환경에서 둘의 마모계수의 차이는 미미

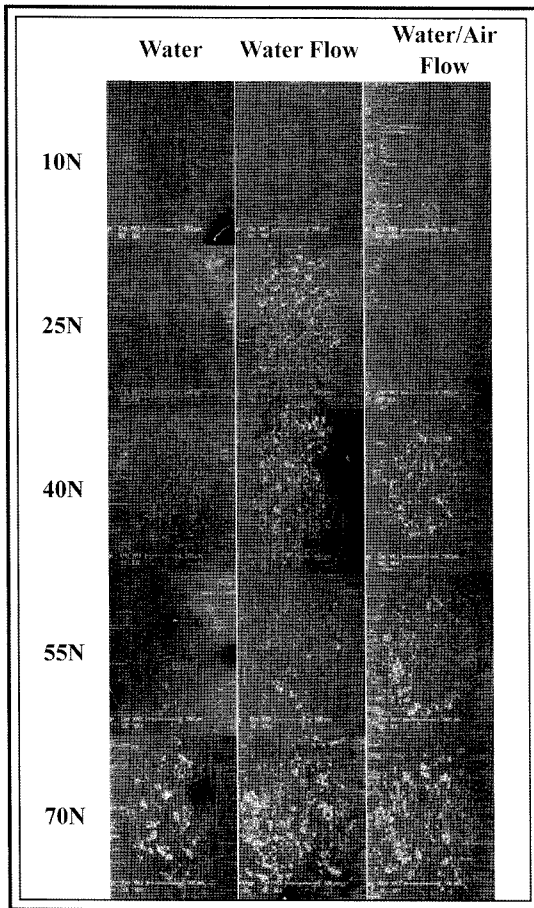


Fig. 9. SEM image of tubes.

하였다.

마모 계수 선도에서 저하중 조건의 마모량을 비교했을 때 세관과 지지대 모두 Water/Air Flow환경이 다른 두 환경에 비해서 큰 차이를 보임을 확인할 수 있는데, 이를 통해 저하중에서는 이상유동이 마모를 가속화 시키는 요인이라고 할 수 있다.

Fig. 9은 프레팅 마모 실험을 한 세관의 표면을SEM 촬영을 한 후 하중과 유동 환경에 따라 정리한 것이다. 모든 실험 환경에서 저하중의 마모 표면에서 three body 마모 메커니즘에 의한 연삭 마모 줄무늬 형태의 마모흔이 주로 관찰되나, 고 하중으로 갈수록 연삭 마모흔 외에 세관의 표면이 떨어져 나간 것을 확인할 수 있다. 이는 하중이 증가할수록 접촉한 두 시편의 미세한 간극이 좁아짐으로 유체의 흐름이 존재하지 않게 되어, 직접적인 접촉이 증가하게 되고 이로 인해 Three body에서 Two body로 마모의 메커니즘이 변화

가 되면서 응착에 의한 마모흔이 생성된 것을 의미한다. Water/Air Flow환경의 경우 고하중에서는 Water Flow환경과 마찬가지로 Two body 마모 메커니즘에 의한 응착현상이 발생했음을 보여주는 마모흔을 볼 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 원자력 발전소의 증기발생기 세관과 지지대 사이에서 발생하는 이상유동이 프레팅 마모에 어떠한 영향을 미치는지를 알아보기 위해 Inconel 690과 STS 409를 사용하여 실험을 수행하였고 프레팅 마모 특성을 평가하였다. 또한 work rate model에 적용하여 마모 계수 K를 구하고, 세관 표면에 대한 광학 및 SEM 분석을 통하여 세관의 마모 메커니즘을 파악하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1. 유동 환경의 변화에 따른 세관-지지대의 프레팅 마모 실험을 바탕으로 마모 계수 값을 비교한 결과, 유체의 유동으로 인해 세관의 프레팅 마모가 증가됨을 알 수 있다.

2. 유체의 유동이 존재하는 Water Flow와 Water/Air Flow환경의 마모계수는 유사한 값을 보였으나, 하중에 따라서 마모를 비교하였을 때는 Water/Air Flow환경이 Water Flow환경보다 저하중에서 마모량이 많은 것을 알 수 있었다. 이는 세관과 지지대에 작용하는 하중이 작은 경우에는 유체의 이상유동이 마모에 지배적인 영향을 미친다는 것을 의미한다.

3. 세관의 프레팅 마모면을 분석한 결과, 저하중에서는 연삭 마모만 존재하였으나 하중이 증가 할수록 연삭 마모와 응착 마모가 함께 존재하는 것을 확인 하였다. 특히 유동이 존재하는 Water Flow, Water/Air Flow환경에서는 Water 환경에 비하여 응착에 의한 마모가 낮은 하중에서는 물론이고, 전반적으로 발생하였다. 이는 유체의 유동이 세관과 지지대 사이에 있는 마모 입자를 제거시켜 응착 마모의 발생이 쉬운 상태가 된 것이라 할 수 있다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부 전력산업연구개발사업 전력선행기술에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

### 참고 문헌

1. C.E Taylor, M.J.Pettigrew et al, "Vibration Damping in Multispan Heat Exchanger Tubes", *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 120, pp. 283-289, 1988.
2. P.L. Ko and H. Basista, "Correlation of Support Impact Force and Fretting - Wear for a Heat Exchanger Tube", *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 106, pp. 69-77, 1984.
3. D.G. Kim and Y.Z. Lee, "Experimental Investigation on Sliding and Fretting Wear of Steam Generator Tube Materials", *Wear*, Vol. 250, pp. 673, 2001.
4. S.H. Jeong, B.J. Lee, and Y.Z. Lee, "Wear Transitions of Tube-Support Materials for a Nuclear Steam Generator Through Sliding Wear Test and Fretting Wear Test", *Key Engineering Materials*, Vol. 321-323, pp. 430-433, 2006.
5. S.H. Jeong, J.M. Park, J.H. Lee, and Y.Z. Lee, "Wear Transitions of Tube-Support Components for Nuclear Steam Generator under Fretting Conditions", *Key Engineering Materials*, Vol. 326-328, pp. 1253-1266, 2006.