

# 주위 온도에 따른 Inconel690의 마멸 거동에 관한 연구

임민규\* · 박동신\* · 김대정\* · 이영재\*\*

\*성균관대학교 대학원 기계공학부

\*\*성균관대학교 기계공학부

## A Study on Fretting-Wear Behavior of Inconel 690 due to Surrounding Temperature

Min-kyu Lim\*, Dong-sin Park\*, Dae-Jung Kim\*, Young-Ze Lee\*\*

### Abstract

In nuclear power steam generators, high flow rates can induce vibration of the tubes resulting in fretting wear damage due to contacts between the tubes and their supports. In this paper the fretting wear tests and the sliding wear tests were performed using the steam generator tube materials of Inconel 690 against STS 304. Sliding tests with the pin-on-disk type tribometer were done under various applied loads and sliding speeds at air and water environment. Fretting tests were done under various vibrating amplitudes, applied normal loads and various temperatures.

From the results of sliding and fretting wear tests, the wear of Inconel 690 can be predictable using the work rate model. Depending on normal loads and vibrating amplitudes, distinctively different wear mechanisms and often drastically different wear rates can occur. At room temperature, the wear coefficient  $K$  of Inconel 690 is  $7.57 \times 10^{-13} \text{Pa}^{-1}$  in air and it is  $1.93 \times 10^{-13} \text{Pa}^{-1}$  in water. At room temperature, it is found that the wear volume in air is more than in water. In water, the wear coefficient  $K$  at  $50^\circ\text{C}$  and  $80^\circ\text{C}$  is  $4.35 \times 10^{-13} \text{Pa}^{-1}$  and  $5.81 \times 10^{-13} \text{Pa}^{-1}$  respectively. Therefore, it is found that the wear volume extremely increases by increasing on temperature in water. This study shows that the dissolved oxygen with temperature increment increases and the wear due to fluidity is severe.

**Key words** : Fretting wear, Sliding wear, Inconel 690, Work rate model, Stick-slip, Temperature.

### 1. 서론

원자력 발전설비의 건전성을 확보하는 것은 생명과 자원, 환경적인 측면에 매우 큰 영향

을 미치는 문제로 지금까지 이에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 특히, 원자력발전소의 원자로와 주요 배관이 파손되는 경우, 방사능 물질이 누출되는 치명적인 사고를 일으키기 때문에 안전한 발전소의 운영 및 관리

의 핵심은 원자로나 배관과 같은 주요기기의 안전성을 확보하는 것이다.

원자력발전소는 크게 1차계통과 2차계통으로 분류되며, 이중 증기발생기(steam generator)는 1·2차계통의 압력경계를 이루고 있는 주요 부품으로 증기발생기의 세관에 관통결함이 발생할 경우 1차측으로부터 2차측으로 방사성물질(방사성 핵연료)을 함유한 냉각재가 흘러나와 대기 확산 및 주변환경의 오염을 유발시킬 가능성이 매우 높다. 원자력 발전소의 셸-관형(shell and tube type) 열교환기(증기발생기, 콘덴서, 재생보일러 등)와 핵연료집합체 등은 직경에 비하여 길이가 길고 가느다란 관군으로 구성되어 있으며, 또한 이들 구조물은 유동하는 유체 속에 잠겨있거나 유체가 관의 내부 및 외부로 흐르고 있어서 진동에 매우 취약한 구조물이다.

이 구조물에서 발생하는 유동유체의 동역학적인 힘과 구조물의 관성, 감쇠 및 탄성력 간의 상호 연동작용에 의한 구조물의 동적 거동과 관련된 현상을 유체유발진동(flow-induced vibration)이라고 한다[1]. 이 현상이 과도할 경우, 열교환기 관군은 마멸(fretting/wear) 및 피로(fatigue)현상, 제동운전의 어려움, 그리고 음향잡음(acoustic noise)등의 현상이 발생한다. 관손상의 주된 원인은 복합적인 요인들에 기인하는 것으로 밝혀졌는데 크게 급속적인 측면의 부식현상과 기계적인 마멸과 피로현상으로 구별할 수 있다. 마멸현상은 세관과 세관, 세관과 지지대 간의 상호작용에 의한 마찰 또는 충돌 등을 지속적으로 반복적으로 받을 때 발생하며 대체로 진폭이 작아서 장기간에 걸쳐서 관을 마멸시킨다. 피로현상은 고주파 수에서 작은 응력이 관에 지속적으로 작용할 때 발생하며 일단 균열이 생기면 급속하게 관을 파손시킨

다. 이러한 유체유발 진동에 의한 세관의 마멸을 프레팅마멸이라 한다[2-5].

본 연구에서는 여러 가지 환경에서 Inconel 690의 프레팅마멸 실험을 통하여 프레팅마멸 특성에 관하여 연구하고자 한다. 프레팅마멸 특성을 알기 위하여 진폭, 하중, 진동수, 고온 등의 변수를 이용한 실험적 데이터를 정립한다. 다음으로 물속에서 온도에 따른 프레팅마멸 특성을 연구함으로써 증기발생기에 가까운 실험조건을 정립할 것이다.

## 2. 실험

### 2.1 시편

실험은 Inconel 690을 공기중과 물속에서 STS 304 강과 상대운동 시켜 수행되었다. 미끄럼 실험에서는 Inconel을 핀(폭3mm, 두께 1mm, 길이 10mm)으로 만들어 사용하였고 STS 304는 지름 60mm, 두께 8mm의 원판으로 가공하여 사용하였다. 프레팅 실험에서는 실제 증기발생기에 사용하는 튜브(외경 19.1mm, 두께 1mm)를 60mm 씩 절단하여 사용하였고, STS 304는 동일한 크기로 절단하여 사용하였다. Table. 1에 사용된 재료의 화학적 조성 및 물성을 나타내었다.

### 2.2 실험장치 및 방법

Inconel 690의 마찰 및 마멸 특성을 파악하기 위해 프레팅 실험 전에 미리 미끄럼 실험을 수행하였다. 미끄럼 실험은 재현성이 좋고 규격화되어 있는 반면, 프레팅 실험은 과정이 매우 까다롭고 시험기의 특성에 따라 다른 결과를 얻을 수 있다. 따라서 미끄럼 실험을 무한 진폭의 slip으로 취급할 경우 그 결과를 프레팅마멸의 극한값으로 보아 프레팅 실험의 결과를 검증할 수 있는 매우 중요한 시험이라 할 수 있다.

Fig. 1에서 보는 시험기를 사용하여 Inconel을 STS 304와 공기 중에서 미끄럼 운동을

Chemical composition	C	Si	Mn	Cr	Ni	Co	Ti	Cu	Fe
Inconel 690	0.02	0.24	0.3	29.5	59	0.01	0.25	0.01	10.6
STS 304	0.03	0.55	1.81	18.3	8.2	0.02	-	-	Bal.
Mechanical properties	Hardness (HRB)		Yield Strength (MPa)		Ultimate Tensile Strength(MPa)		Elongation (%)		
Inconel 690	82		326		727		45		
STS 304	123		270		600		50		

Table. 1 Chemical composition and mechanical property of Inconel 690 and STS 304

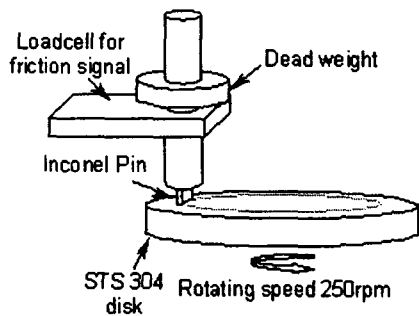


Fig. 1 Schematic diagram of sliding tester.

시커 그 때의 마찰계수와 마멸을 측정하였다. 마찰력은 시험기에 부착된 로드셀을 이용하였고, 마멸은 실험 후 아세톤으로 세척하고, 표면조도계로 표면 형상의 변화를 측정하여 부피로 환산하였다. 회전수를 0.34 m/s로 고정하고 하중을 2.5N에서 12.5N 까지 2.5N 씩 증가하였으며, 후에 하중을 7.5N 으로 고정하고 속도를 0.18 m/s, 0.42 m/s, 0.65 m/s로 변화시켜 실험을 수행하였다. 실험은 각기 세 번 반복하여 평균값을 얻었다.

프레팅 실험은 Fig. 2에서 보는 시험기를 사용하였다. 시험기는 캠을 구동하여 진폭을 수십에서 수백  $\mu\text{m}$ 까지 변화시킬 수 있으며, 주파수는 모터의 회전수에 따라 변동시킬 수 있다. 하중은 스프링을 이용하여 screw lever로 가하며, 본 실험에서는 프레팅마멸의

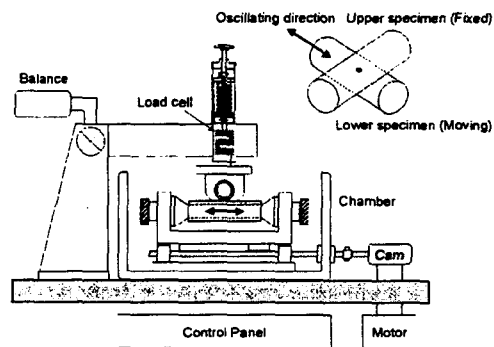


Fig. 2 Schematic diagram of fretting tester.

특징인 stick과 slip을 관찰할 수 있도록, 200  $\mu\text{m}$ 의 진폭, 10~80N의 하중을 선택하였다. 튜브의 마멸은 표면조도계를 사용하여 형상 변화를 측정하여 얻었다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 미끄럼 실험

Table. 2는 Inconel 690을 상대재인 STS 304를 가지고 공기중에서 미끄럼마멸 실험을 통하여 측정한 마찰계수를 정리한 것이다. 이것은 각 조건에서 3번 실험 후 마찰계수가 안정된 구간에서의 평균값을 구한 것이다. 표에서 보듯이 미끄럼 선속도를 0.34m/sec로 고정시키고, 수직하중은 2.5N ~ 12.5N 범위

Linear Velocity m/sec	Test Number Normal Load, N	1	2	3	Average
		Inconel 690	Inconel 690	Inconel 690	Inconel 690
0.34	2.5	0.56	0.57	0.57	0.57
	5.0	0.56	0.58	0.59	0.58
	7.5	0.61	0.59	0.54	0.58
	10.0	0.54	0.56	0.51	0.54
	12.5	0.54	0.55	0.50	0.53
0.18	7.5	0.55	0.59	0.54	0.54
0.42		0.54	0.55	0.52	0.56
0.65		0.55	0.55	0.56	0.55

Table. 2 Coefficient of friction value of Inconel 600 and 690 pin against STS 304 disk specimens at each test condition in air.

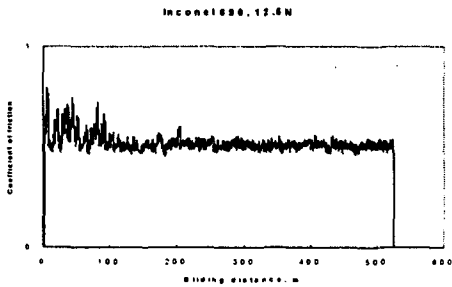


Fig. 3 friction coefficient of Inconel 690 against STS 304 in air at RT

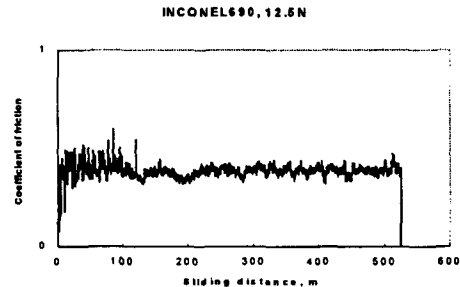


Fig. 4 friction coefficient of Inconel 690 against STS 304 in water at RT.

에서 2.5N씩 증가시켜 실험하였다. 그리고 수직하중을 7.5N으로 고정시키고, 미끄럼 선속도를 0.18, 0.42, 0.65m/sec로 변화시켜 실험하였다. 이러한 실험조건 설정은 프레팅마멸 실험의 실험 조건을 바탕으로 결정한 것이다. 마찰계수는 표에서와 같이 수직하중과

미끄럼 선속도에 영향을 크게 받지 않는 것으로 나타난다. 그 결과 Inconel 690과 STS 304에 대한 마찰계수  $\mu$ 는 0.54로 나타났다. Fig. 3과 Fig. 4는 상온 공기중과 물속의 마찰계수를 나타낸다.

Fig. 5는 각 조건에서 미끄럼마멸 실험 후

Linear Velocity m/sec	Test Number Normal Load, N	1	2	3	Average
		Inconel 690	Inconel 690	Inconel 690	Inconel 690
0.34	2.5	0.39	0.40	0.40	0.40
	5.0	0.41	0.39	0.39	0.40
	7.5	0.39	0.39	0.39	0.39
	10.0	0.39	0.39	0.41	0.40
	12.5	0.40	0.40	0.39	0.40
0.18	7.5	0.41	0.40	0.40	0.40
0.42		0.40	0.39	0.41	0.40
0.65		0.40	0.39	0.40	0.40

Table. 3 Coefficient of friction value of Inconel 600 and 690 pin against STS 304 disk specimens at each test condition in water.

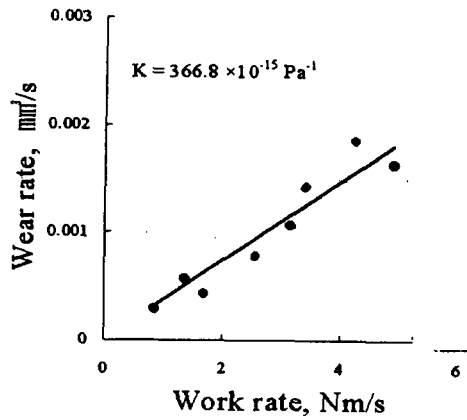


Fig. 5 Sliding wear coefficient of Inconel 690 in air.

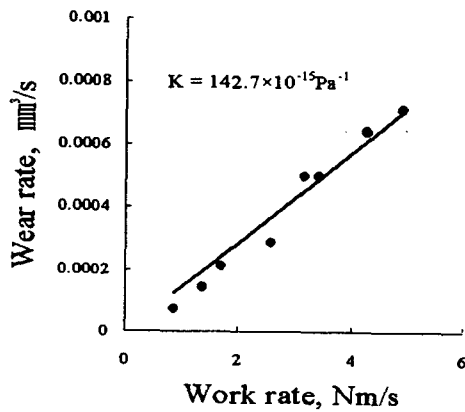


Fig. 6 Sliding wear coefficient of Inconel 690 in water.

측정된 마멸부피를 이용하여 Inconel 690의 미끄럼마멸 선도(sliding-wear curve)를 작성한 것이다. Inconel 690의 STS304에 대한 마멸계수(wear coefficient)  $K$ 는  $366.8 \times 10^{-15} \text{Pa}^{-1}$ 로 나타났다.

Table. 3은 동일한 조건하에서 물속에서 미끄럼마멸 실험을 통하여 측정한 마찰계수를 정리한 것이다. 그 결과 Inconel 690의 마찰계수  $\mu$ 는 0.4로 나왔다.

그리고 Fig. 6을 통하여 알 수 있듯이 물속에서 Inconel 690의 STS 304에 대한 마멸

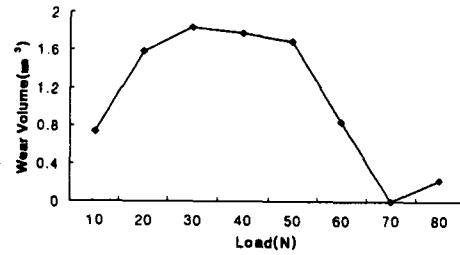


Fig. 7 Change of wear volume with variations of normal load in air at RT. (amplitude=250 $\mu\text{m}$ ).

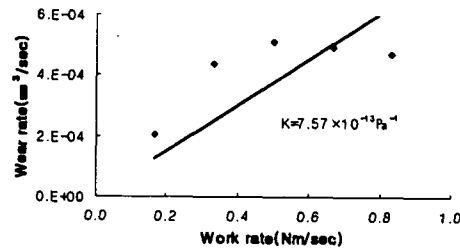


Fig. 8 Wear coefficient of Inconel 690 in air at RT. (amplitude=250 $\mu\text{m}$ )

계수  $K$ 는  $142.7 \times 10^{-15} \text{Pa}^{-1}$ 로 나타났다.

따라서 상대재로 STS 304로 Inconel 690의 마찰 및 마멸 특성을 공기중과 물속에서 비교해 본 결과 Inconel 690의 마멸량이 물속보다 공기중에서 더 큰 것으로 나타났다.

### 3.2 프레팅 실험(상온, 공기중)

프레팅마멸 선도에서 보는 바와 같이 일반적으로 Inconel 690은 물속보다는 공기중에서 마멸이 더 많이 일어나고 있음을 알 수 있다. 그리고 공기중과 물속 모두 저하중에서부터 마멸량이 점차 증가하는 것을 볼 수 있다. Fig. 7은 공기중에서 진폭 250 $\mu\text{m}$ 의 프레팅마멸 실험을 통한 inconel 690의 수직하중에 따른 마멸선도를 나타낸다. 공기중에서 Inconel 690은 수직하중 10N 부근에서부터 마멸량이 증가하기 시작하여 30N에서 가장 많은 마멸량을 가지고 50N까지 상당한 마멸이 진행된다. 수직하중이 60N이상에서는 마

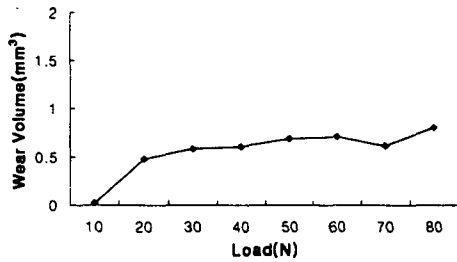


Fig. 9 Change of wear volume with variations of normal load in water at RT. (amplitude=250 $\mu$ m)

떨이 급속히 감소하여 고하중에서는 마멸이 거의 일어나지 않는 상태로 진행되어 진다.

일반적으로 미끄럼마멸 실험에서는 작용하중이 증가할수록 마멸량은 비례하여 증가하게 된다. 그러나 프레팅마멸 실험에서와 같이 미소진동을 가지고 왕복 운동하는 두 물체 표면 사이에서는 작용하중의 증가는 서로의 미끄럼 운동을 방해하는 요소로 작용하여 마멸량을 감소시키는 결과를 초래한다. 이것은 미소 진동에 의해 일어나는 프레팅마멸의 전형적인 마멸현상으로 Stick-Slip 현상으로 설명되어질 수 있다. Stick-Slip 현상을 수반하는 프레팅마멸은 그 마멸 메커니즘에 따라 크게 4가지 영역으로 나뉘어 진다. 그 영역은 1) 프레팅마멸의 초기단계 및 아주 작은 미소진동에서 나타나는 마멸이 거의 일어나지 않는 Stick 영역과, 2) Stick과 Slip의 경계영역에서 크랙생성이 활발히 일어나는 Stick과 Slip이 공존하는 Stick-Slip 영역, 3) 마멸면 전체에서 Slip이 발생하고 마멸량이 급격히 증가하는 Gross Slip 영역, 4) 그리고 왕복진동에 의하지 않고 프레팅 거동이라고 보기에는 아주 큰 진폭을 가지고 운동하는 두 재료 표면에서 작용하는 미끄럼에 의한 Sliding 영역으로 나뉘어 진다. 따라서 Fig 7의 프레팅마멸 선도 안에는 이러한 Stick-Slip 현상이 존재하고 있다.

일정 진폭하에서 작용하중이 증가할수록 마멸 영역은 Slip 영역에서 Stick 영역으로 거동을 하게 된다. 즉 Inconel 690 튜브와 튜브 지지대인 STS 304가 진폭 250 $\mu$ m를 가

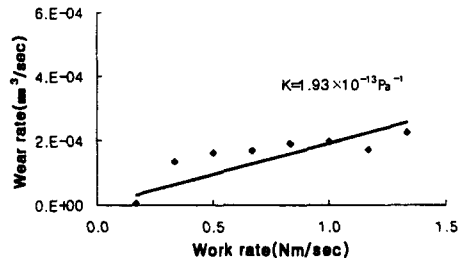


Fig. 10 Wear coefficient of Inconel 690 in water at RT. (amplitude=250 $\mu$ m)

지는 프레팅마멸 거동을 할 때, 작용하중 30N 이하에서는 Gross Slip에 의한 마멸거동을 보이고, 작용하중 60N 이상에서는 Stick에 의한 마멸거동이 나타내게 된다. 그리고 30N과 60N 사이에서는 Stick과 Slip이 공존하는 Stick-Slip에 의한 마멸거동을 보이게 된다. 기계 재료의 프레팅마멸은 Slip 영역에서 급격히 증가함으로 그 재료의 프레팅마멸 특성은 이 Slip 영역에서 찾아야 한다. 프레팅마멸 거동을 일으키는 물체에 있어서 Gross Slip 영역에서의 마멸거동은 그 물체의 한계수명을 결정하는데 직접적인 영향을 준다.

따라서 이러한 프레팅마멸 거동에 따른 Inconel 690의 프레팅마멸 특성을 알아보기 위하여 최근 증기발생기 튜브의 마멸특성을 비교하는데 많이 사용되고 있는 Work rate 모델을 적용하여 각 영역별 마멸계수를 알아 보았다. Fig. 8은 Inconel 690의 Gross Slip 영역에서의 마멸계수를 나타낸 그림으로 공기중에서 Inconel 690 튜브의 마멸계수 K는  $7.57 \times 10^{-13} \text{Pa}^{-1}$  임을 보여주고 있다.

### 3.3 프레팅 실험(상온과 고온, 물속)

Inconel 690의 물속에서의 프레팅마멸 특성을 평가하기 위하여 프레팅마멸 실험을 물속 상온과 고온에서 수행하였다.

Fig. 9는 상온 물속에서 수직하중을 10N에서 80N으로 변화시켜갈 때 진폭 250 $\mu$ m에서의 Inconel 690 시편의 마멸량을 나타낸 그

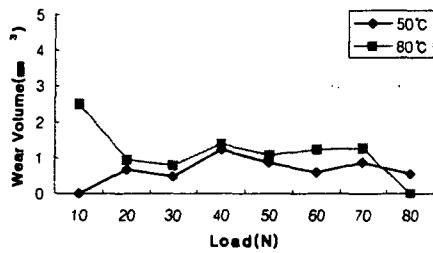


Fig. 11 Change of wear volume with variations of Temperature and normal load in water. (amplitude=200 $\mu\text{m}$ )

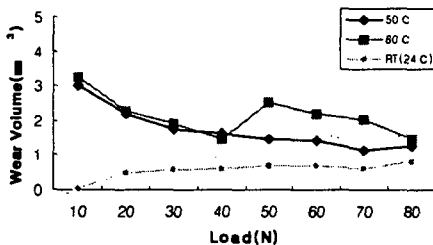


Fig. 12 Change of wear volume with variations of Temperature and normal load in water. (amplitude=250 $\mu\text{m}$ )

림이다. 물속에서의 실험 결과는 공기중에서의 그것과는 달리 수직하중이 증가할수록 전구간에 걸쳐 마멸량은 점진적으로 증가하고 있다. 그리고 물속에서는 두 재료의 표면사이에 Stick-Slip의 영향에 의한 마멸량의 감소가 나타나지 않고 있다. 즉 물은 두 재료의 프레팅마멸 거동에 있어 윤활제로 사용되면서 전체적으로 Slip영역에 있음을 보여주고 있다.

물속에서 Inconel 690의 수직하중과 진폭의 변화에 따른 마멸량의 변화 결과를 Work rate model에 적용하여 마멸계수 K를 Fig 10에 나타내었다. Inconel 690은  $1.93 \times 10^{-13} \text{Pa}^{-1}$ 가 나왔다.

물속에서의 Inconel 690이 온도에 따라 어떤 영향을 받는지에 대해서 연구해 보았다.

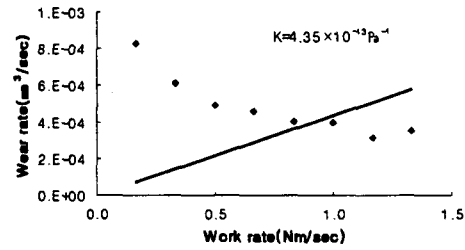


Fig. 13 Wear coefficient of Inconel 690 in water at 50°C. (amplitude=250 $\mu\text{m}$ )

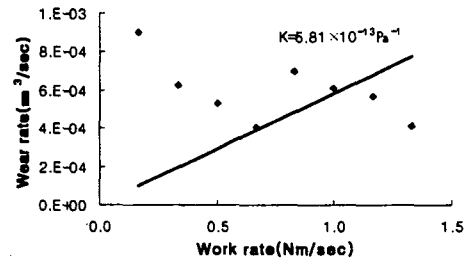


Fig. 14 Wear coefficient of Inconel 690 in water at 80°C. (amplitude=250 $\mu\text{m}$ )

Fig. 11과 Fig. 12에서 보는 바와 같이 200  $\mu\text{m}$ , 250 $\mu\text{m}$  모두 온도가 상승함에 따라 마멸량도 증가하는 것을 알 수 있다. 그 이유는 고온이 되면서 산화물 생성이 증가하고 생성된 산화물이 물에 의해서 씻겨나가기 때문에 온도가 증가할수록 마멸량도 증가함을 알 수 있다. 고온 물속에서는 상온 공기중에서 보다 마멸량이 더 크다. 물속 진폭 250 $\mu\text{m}$ 의 실험에서 50°C와 80°C 각각의 마멸계수 K는 Fig. 13과 Fig. 14와 같이  $4.35 \times 10^{-13} \text{Pa}^{-1}$  과  $5.81 \times 10^{-13} \text{Pa}^{-1}$ 를 나타내었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 원전 증기발생기에서 유체 유발 진동에 의해 세관-세관, 세관-관지지대 사이 등에서 발생하는 프레팅마멸의 마찰·마멸 특성을 알아보기 위하여 증기발생

기 세관의 재료로 쓰이고 있는 Inconel 690TT 세관의 프레팅마멸 특성을 파악하고 분석하였다. 그리고 이렇게 구해진 데이터를 Work rate model에 적용하여 마멸계수 K를 구하였다.

1. 상온 공기중에서 증기발생기 세관 재료인 Inconel 690TT의 마멸계수 K는  $7.57 \times 10^{13} \text{Pa}^{-1}$  로 상온 물속에서 Inconel 690TT의 마멸계수  $1.93 \times 10^{13} \text{Pa}^{-1}$  이다. 따라서 상온 공기중에서는 Inconel 690TT가 물속보다 마멸량이 크다. 상온 공기중의 마멸계수 K는 Stick-Slip 메카니즘 중 Slip 영역에 해당되는 값이고 상온 물속의 마멸계수는 Slip영역이 전 범위에 걸쳐 발생하므로 전체 값을 나타낸다.

2. 상온(24℃) 물속에서의 Inconel 690TT의 마멸계수 K는  $1.93 \times 10^{13} \text{Pa}^{-1}$ , 50℃ 물속의 마멸계수 K는  $4.35 \times 10^{13} \text{Pa}^{-1}$  그리고 80℃ 물속의 마멸계수 K는  $5.81 \times 10^{13} \text{Pa}^{-1}$  이다. 따라서 물속에서 Inconel 690TT는 온도가 낮을 수록 내마멸성이 우수하다. 물속에서는 프레팅의 Stick-Slip 메카니즘 중 Slip 영역이 지배적이다.

#### 참고문헌

[1] C.E. Taylor, M.J. Pettigrew et al, "Vibration Damping in Multispan Heat Exchanger Tubes", Journal of Pressure Vessel Technology, 120 1998 283-289.  
 [2] P.L. Ko, H. Basista, "Correlation of Support Impact Force and Fretting-Wear for a Heat Exchanger Tube", Journal of Pressure Vessel Technology, 106 1984 69-77.  
 [3] P.L. Ko, M.C. Taponat et al, "Wear Studies of Materials for Tubes and Antivibration Bars in Nuclear Steam Generators", Journal of Pressure Vessel Technology, 118 1996 287-300.

[4] F.M. Guerout, N.J. Fisher, "Steam Generator Fretting-Wear Damage: A Summary of Recent Findings", Journal of Pressure Vessel Technology, 121 1999 304-310.

[5] N.J. Fisher, A.B. Chow et al, "Experimental Fretting-Wear Studies of Steam Generator Materials", Journal of Pressure Vessel Technology, 117 1995 312-320.