

증기발생기 세관용 Inconel 690 의 프레팅 마찰 및 마멸특성

이영제[†], 임민규^{*}, 오세두^{*}

(2002년 8월 8일 접수, 2003년 2월 4일 심사완료)

Friction and Wear of Inconel 690 for Steam Generator Tube in Fretting

Young-Ze Lee, Min-Kyu Lim and Se-Doo Oh

Key Words : Fretting Friction(프레팅 마찰), Fretting Wear(프레팅 마멸), Inconel 690(인코넬 690), Stick-Slip(스틱-슬립)

Abstract

Inconel 690 for nuclear steam generator tube has more Chromium than the conventionally used Inconel 600 in order to increase the corrosion resistance. To evaluate the tribological characteristics of Inconel 690 under fretting condition the fretting tests were carried out in air and elevated temperature water. Fretting tests of the cross-cylinder type were done under various vibrating amplitudes and applied normal loads in order to measure the friction forces and wear volumes. From the results of fretting wear tests, the wear of Inconel 690 can be predictable using the work rate model. The amounts of friction forces were proportional to relative movement between two fretting surfaces. The friction coefficients were decreased as increasing the normal loads and decreasing the vibrating amplitudes. Depending on fretting environment, distinctively different wear mechanisms and often drastically different wear rates can occur. It was found that the fretting wear factors in air and water at 20 °C, 50 °C, and 80 °C were $7.38 \times 10^{-13} \text{ Pa}^{-1}$, $2.12 \times 10^{-13} \text{ Pa}^{-1}$, $3.34 \times 10^{-13} \text{ Pa}^{-1}$, and $5.21 \times 10^{-13} \text{ Pa}^{-1}$, respectively.

1. 서론

최근 원자력발전소 증기발생기 세관 재료로 사용되는 Inconel 600 의 부식 저항성을 증가시키기 위해 크롬의 함량을 두 배로 증가시킨 Inconel 690 의 사용이 검토되고 있다.⁽¹⁾ 이를 위해 세관 재질의 내부식성에 관하여 많은 연구가 진행되어 왔으나,⁽²⁾ 세관 사이에서 유체유발진동에 의한 프레팅 현상으로 발생하는 마멸에 대하여는 연구가 활발히 진행되지 못하였다.⁽³⁾

프레팅은 증기발생기의 안전에 영향을 주는 매우 중요한 현상으로 세관과 세관 사이, 또는 세관과 지지대 사이에서 상대운동에 의해 발생한다. 증기발생기는 열 교환을 하기 위해 많은 세관의 다발로 구성되어 있으며, 세관 내부와 외부에 각

기 다른 유동이 있어 세관을 통해 열 교환을 하는데 내부와 외부 유동의 압력차에 의해 세관이 미세하게 진동한다. 이를 유체유발진동(flow induced vibration; FIV) 이라 하는데, 세관과 세관 그리고 세관과 이를 지지하는 격자 사이에서 프레팅이라 하는 상대운동을 하게 된다.^(4,5) 이러한 상대운동은 마멸을 초래하여 세관의 파손으로 이어지며, 원자력발전소의 안전에 매우 심각한 영향을 미친다.^(6,7) 따라서 세관의 프레팅 마멸에 관한 정확한 분석과 예측이 필요하다.

프레팅 현상이 발생하는 경우 두 면의 상대운동은 stick, stick-slip, slip 의 세 가지 모드⁽⁸⁾에 의해 각기 다른 마찰과 마멸 특성을 나타낸다. Stick 의 경우 두면의 강한 응착으로 상대운동에 대한 저항이 증가하며, 이로 인해 마찰력이 감소하고 마멸량도 매우 작게 된다. Slip 이 발생하면 마찰력이 증가하고 마멸량도 증가한다. Stick-slip 은 가장 일반적인 경우로 두 모드의 중간 형태를 나타낸다. 따라서 발생하는 마멸량과 마찰력의 크기는 stick-slip 의 정도에 의해 결정된다.⁽⁹⁾

[†] 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부 교수

E-mail : yzlee@yurim.skku.ac.kr

TEL : (031)290-7444 FAX : (031)290-5276

^{*} 성균관대학교 대학원 기계공학부

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of Inconel 690 and STS 304

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	

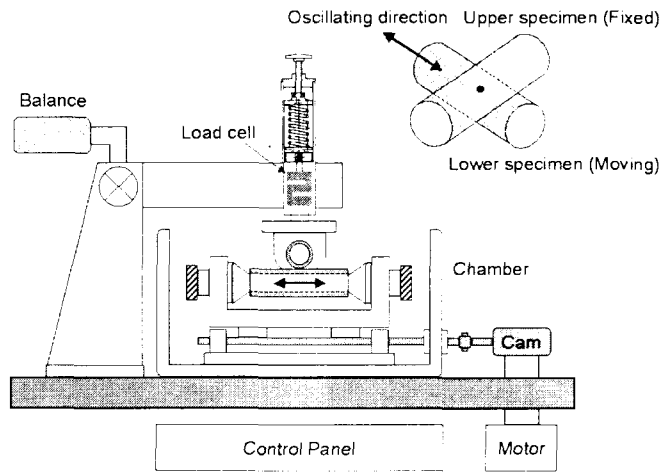


Fig. 1 Schematic diagram of fretting wear tester

본 연구에서는 세관 재질 중 하나인 Inconel 690의 마찰 및 마멸특성을 파악하기 위해서 프레팅 실험을 공기 중과 물 속에서 각각 수행하고, 물의 온도를 올려 특성변화를 살펴보고자 한다. 프레팅 실험은 cross-cylinder 형태의 시험기를 사용하여 stick-slip의 영향이 나타나도록 하중과 진폭을 바꾸어 가며 수행한다. 실험 중에 마찰력을 측정하며, 실험이 종료된 후 마멸량을 측정하여 세관의 마찰 및 마멸특성을 살펴보고자 한다.

2. 시 험

2.1 시 험

실험을 위해 Inconel 690을 상온의 공기 중, 그리고 물(증류수) 속에서 지지격자 재료인 STS 304강과 상대운동을 시킨다. 프레팅 실험에서는 실제 증기발생기에 사용하는 세관(외경 19.1mm, 두께 1.1mm)을 60mm 씩 절단하여 사용하였고, STS 304는 세관과 동일한 크기로 절단하여 사용하였다. Table 1에 사용된 재료의 화학적 조성표와 기계적 물성을 나타내었다. Inconel 690은 기존에 사용하던 재료에 비해 Cr의 함량이 두 배 가까이 증가되었

고, 경도와 인장강도가 증가되었다. 이러한 특성은 마멸이 정도에 반비례한다는 일반적인 경향에는 부합하지만, 상대적으로 소성변형의 정도와 산화막의 형성 등이 마멸에 영향을 주리라 생각한다.

2.2 실험 및 분석

Inconel 690의 마찰 및 마멸 특성을 파악하기 위해 Fig. 1과 같은 cross-cylinder 형태의 시험기를 사용하여 프레팅 실험을 수행하였다. 시험기는 캠을 구동하여 진폭을 수십에서 수백 μm까지 변화시킬 수 있으며, 주파수는 모터의 회전수에 따라 변동시킬 수 있다. 하중은 스프링을 이용하여 screw lever로 가하며, 본 실험에서는 프레팅 마멸의 특징인 stick과 slip을 관찰할 수 있도록, 100 ~ 300 μm의 진폭, 20 ~ 80N의 하중을 사용하였다. 마찰력을 로드셀을 사용하여 실시간으로 측정하였고, 세관의 마멸량은 프레팅 실험 후 마멸면을 표면조도계를 사용하여 측정하여 얻었다. 실험은 우선 공기 중에서 수행하였고, 물속에서는 상온 20℃, 50℃, 그리고 80℃로 온도를 증가시키며 각각 수행하였다. 시험 표면의 성분분석을 분석하기 위해 SEM 사용시 EDS 분석을 수행하였다.

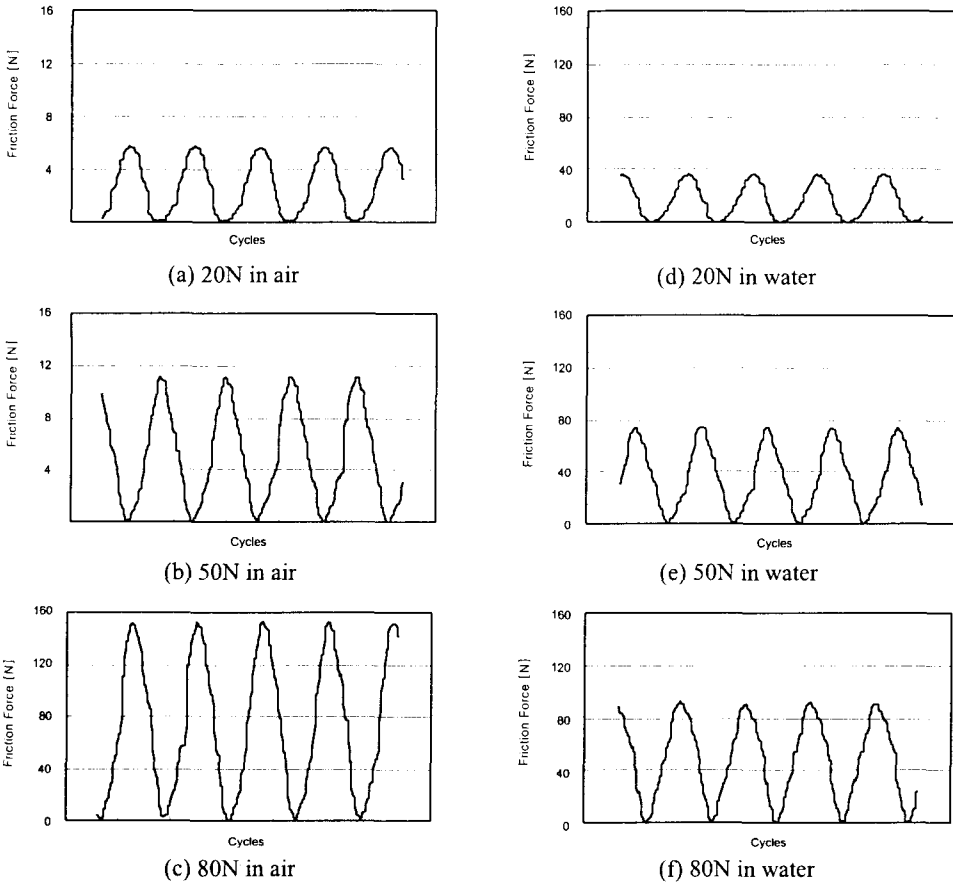


Fig. 2 Friction forces with a constant amplitude of 200 μm during fretting tests in air and water

Table 2 Maximum fretting frictions of Inconel 690 at room temperature in air and water

Load (N)	Amplitude (μm)	Friction Force		Coefficient of Friction	
		In air	In water	In air	In water
20	200	28.80	17.98	1.44	0.90
50	200	56.37	37.09	1.13	0.74
80	200	62.94	46.47	0.79	0.58
50	100	32.89	23.00	0.66	0.46
	200	55.57	36.12	1.11	0.72
	300	76.71	46.89	1.53	0.93

3. 실험결과 및 고찰

3.1 마찰력의 변화

마찰 특성을 파악하기 위해 먼저 공기 중과 물 속에서 실험을 하여 마찰력을 측정하였다. 진폭 200 μm 에서 하중을 20N, 50N, 80N 으로 증가시키며 측정된 마찰력을 Fig. 2 에 나타내고 있고, 하중을 50N 으로 고정하고 진폭을 100 μm , 200 μm , 300 μm 로 증가시키며 측정된 마찰력을 Fig. 3 에 나타

내었다. 마찰력은 실험 시작 후 30 분이 경과한 다음 측정된 값이다.

프레팅 현상과 같이 두 표면이 서로 미세하게 진동하는 경우 마찰은 운동에 따라 마찰력이 최대값과 최소값을 보이며 파형의 형태로 변하고 있다. Table 2 에서 보듯이 실험조건에 따라 측정된 마찰력은 하중이 증가함에 따라, 진폭이 증가함에 따라 증가하고, 마찰계수는 하중이 증가함에 따라, 그리고 진폭이 감소함에 따라 감소한다. 이는 slip 보다 stick 이 활발하여 마찰계수의 감소를 가져왔

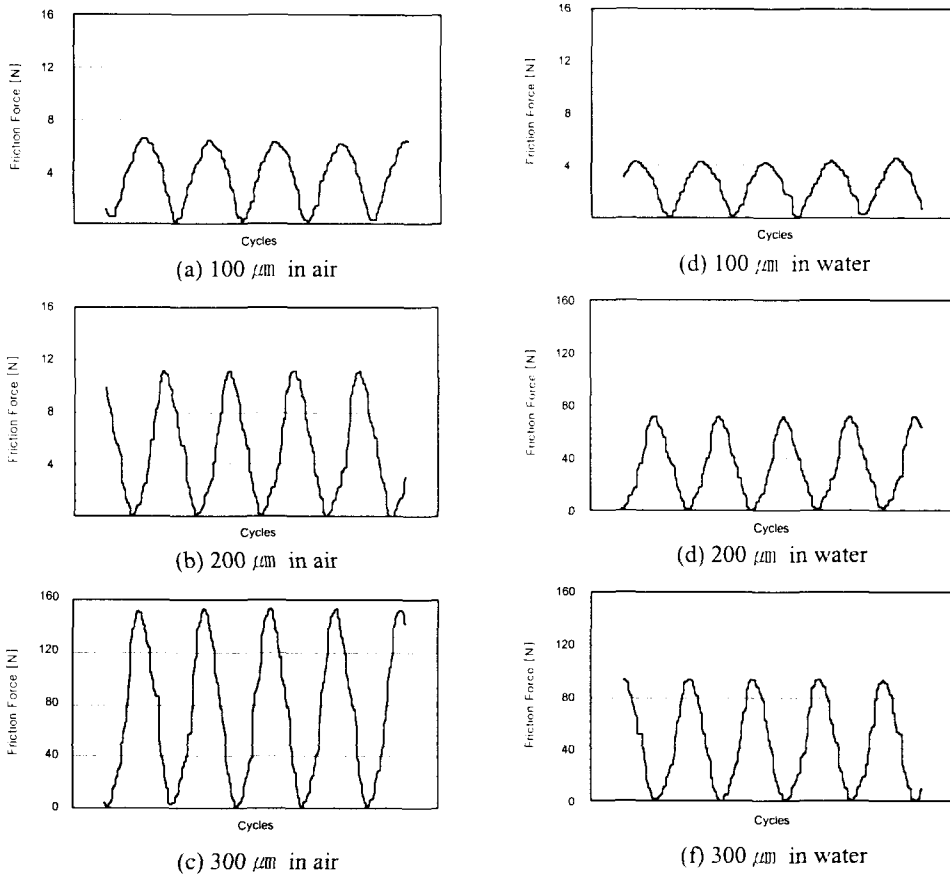


Fig. 3 Friction forces with a constant load of 50N during fretting tests in air and water

기 때문이다. 따라서 stick 과 slip 의 정도가 마찰력에 미치는 영향이 매우 크다는 것을 나타내고 있으며, 미세하게 진동하는 경우 마찰력의 크기는 slip 의 정도에 비례한다는 것을 보이고 있다.

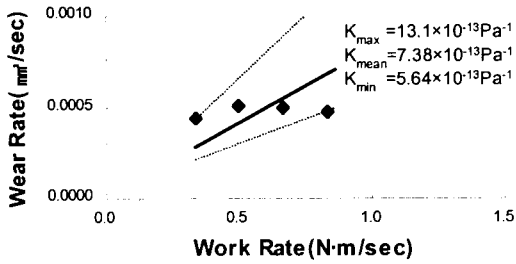
일반적인 미끄럼 운동의 경우 접촉면에 형성되는 산화막이 금속간의 접촉(metallic contact)을 방지하는 반면, 프레팅의 경우 계속 반복되는 접촉으로 산화막의 형성이 어려워, 금속 표면은 oxide free, 즉 clean metal 상태로 되며, 이로 인해 매우 심한 응착이 발생한다. 이때의 초기 마찰력은 상대적으로 연한 재료의 전단강도와 하중에 의한 실질 접촉면적(real contact area)에 의해 결정된다.⁽¹⁰⁾

하중이 증가하면 두 면 사이에는 강한 응착력이 작용하여 실질 접촉면적이 증가하고, 접촉면은 평형을 유지하기 위해 상대운동에 저항하기 위해 접합부성장(junction growth)에 의해 초기 접촉면적은 더욱 증가하게 된다.⁽¹⁰⁾ 따라서 초기 마찰력은 증가하지만, 이로 인하여 두면 간의 상대 운동에 제약을 받게 되며, 즉 slip 이 적게 발생하여 마찰력의 추가적인 상승을 억제하여 Fig. 2 에서 보듯이

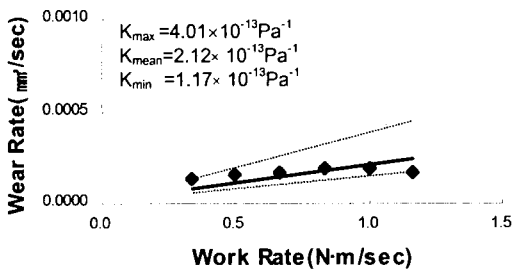
전체적인 마찰력의 증가가 수직하중 증가에 비해 상대적으로 작아서 마찰계수가 감소하게 된다.⁽¹¹⁾ 물속에서 실험한 결과는 공기 중에서 보다 상대적으로 작은 마찰력을 나타내고 있다. 이는 물속에서 실험한 경우 물이 윤활유의 역할을 수행하여 미약하지만 일부 수막을 형성하고, 접촉부 주변에서 물의 흐름에 의해 접촉부의 온도를 감소시킨다. 결국 슬립이 공기 중에서 보다 많이 발생하였지만 마찰력이 감소하였다. 하중이 증가함에 따라 마찰력의 증가가 작아지는데 이는 다시 하중증가에 따라 응착이 발생하여 상대운동의 크기가 감소하기 때문이다. 진폭이 증가하면 상대운동이 보다 원활해지고, 이로 인해 Fig. 3 과 같이 공기중과 물속 모두 마찰력이 동일한 하중이 작용하였어도 진폭에 따라 증가한다. 프레팅 실험에서 측정한 마찰력은 동일한 하중과 진폭에 대해 물 속에서도 보다 공기 중에서 30 ~ 60% 정도 큰 값을 나타내고 있다.

3.2 마멸계수

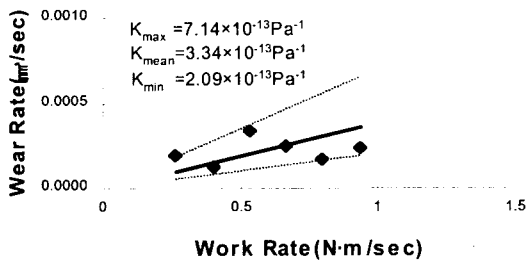
프래팅 마멸은 stick 과 slip 이 동시에 발생하기 때문에 일반적으로 일률(work rate)을 사용하여 나타낸다.⁽¹²⁾ 이는 슬립이 주로 발생하는 경우, 단위 시간당 일의 양, 즉 일률(Nm/sec)과 단위 시간당 마멸량, 즉 마멸률(wear rate, m³/sec) 결과로부터 Fig. 4 와 같이 비례상수로 마멸인자 (wear factor,



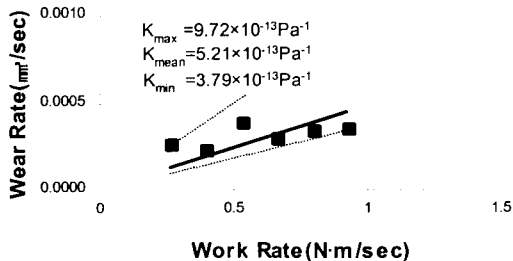
(a) In air at room temperature



(b) In water at room temperature



(c) In water at 50°C



(d) In water at 80°C

Fig. 4 Wear factors of Inconel 690 in air and water at elevated temperatures

Pa⁻¹), K 를 구한다. 실험결과가 분산되어 있는 것은 순수한 slip 이 아니라 어느 정도의 stick 현상이 발생하여 마멸량이 감소하였기 때문이다. 여기서는 최대값과 최소값, 그리고 평균값(7.38× 10⁻¹³ Pa⁻¹)을 나타내었다. K 값으로 시간에 따른 세관 두께의 변화를 알 수 있으며, 이를 이용하여 세관의 마멸 수명을 예측하는데 매우 유용하게 사용된다. 보수적인 설계를 하는 경우 최대값을 사용하는 것이 바람직하다.

상온 공기 중과 물속에서 각각 프래팅 실험을 수행한 결과, 그에 대한 마멸률을 Fig. 5(a)와 Fig. 5(b)에 나타내었다. 하중이 증가함에 따라 일정하게 증가된 마멸률을 볼 수 있다. 이는 공기 중에서도 달리 물에서는 물로 인해 stick 이 그리 크지 않았기 때문이다. 마멸인자의 평균값이 공기 중의 경우와 비교하여 30% 정도(2.12× 10⁻¹³ Pa⁻¹)로 감소하였다. 물의 온도가 50°C, 80°C로 증가한 경우 Fig. 4(c)와 Fig. 4(d)에서 보듯이 K 값은 3.34× 10⁻¹³ Pa⁻¹와 5.21× 10⁻¹³ Pa⁻¹로 각각 증가하였다.

Fig. 5는 공기 중, 상온 물속, 50°C, 그리고 80°C로 온도를 증가시켜며 진폭 200 μm 하중 20N 으로 실험한 시편들의 표면이다. 공기 중에서의 마멸면이 가장 크고, 물속에서는 작아졌다가, 온도가 상승함에 따라 마멸면이 넓어짐을 알 수 있다. Fig. 5(a)는 공기 중에서 실험한 사진인데, 산화막의 영향으로 검붉은 색을 보이고, Fig. 5(b)는 물 속에서 실험한 시편으로 많은 연삭자국을 보이고 있고, 연삭작용에 의해 산화막의 형성이 저조하여 밝은 색을 나타낸다. Fig. 5(c)와 Fig. 5(d)에서는 온도가 증가함에 따라 연삭작용이 감소하여 다시 검붉은 산화막을 관찰할 수 있다.

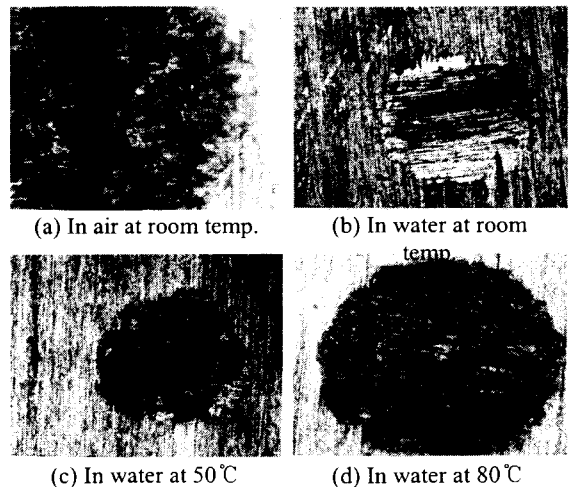


Fig. 5 Worn surfaces of Inconel 690 in each environment (× 100)

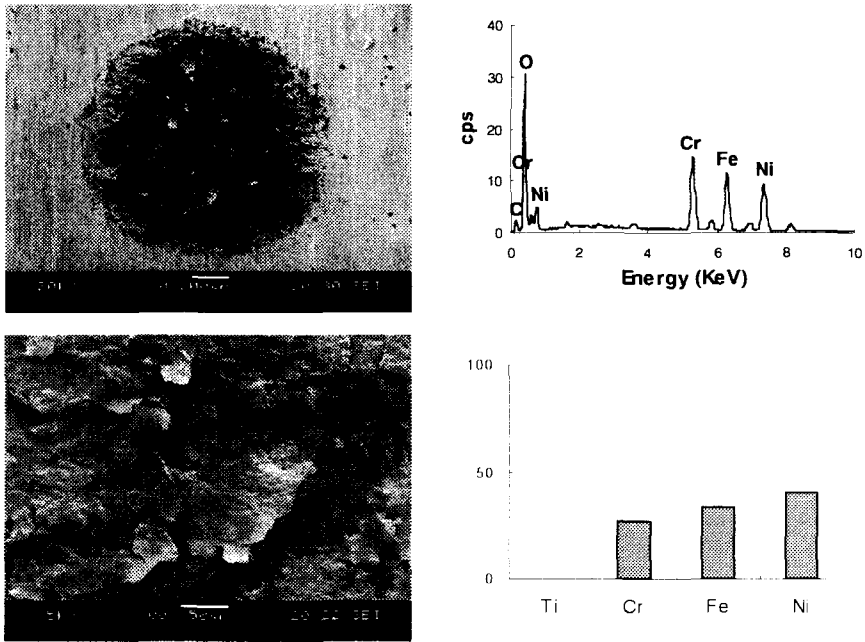


Fig. 6 Microstructure and EDS analysis of Inconel 690 in air at room temperature

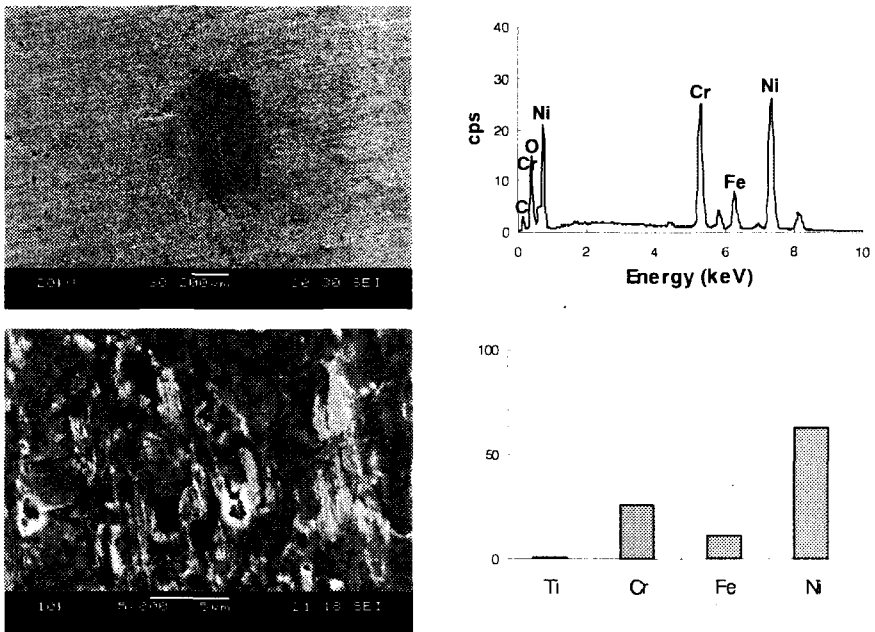


Fig. 7 Microstructure and EDS analysis of Inconel 690 in water at room temperature

Fig. 6에서 Fig. 9는 마멸이 진행된 세관 표면의 SEM 사진과 EDS 분석 결과를 나타내고 있다.

Fig. 6은 공기 중에서 실험한 시편으로 심한 응착과 관상박리마멸을 보인다. EDS 분석에 의하면 접촉면에 Ni 과 Cr 외에 상당한 양의 Fe 성분이 나

타난다. 접촉면에 강한 응착 때문에 물 속과 비교할 때 상대운동량은 작다. 그러나 취성이 강한 철 산화물이 많기 때문에 마멸이 많이 발생하였다. Fig. 7, Fig. 8, 그리고 Fig. 9에서 보듯이 물 속에서는 온도가 증가함에 따라 점차 크롬과 니켈의 연

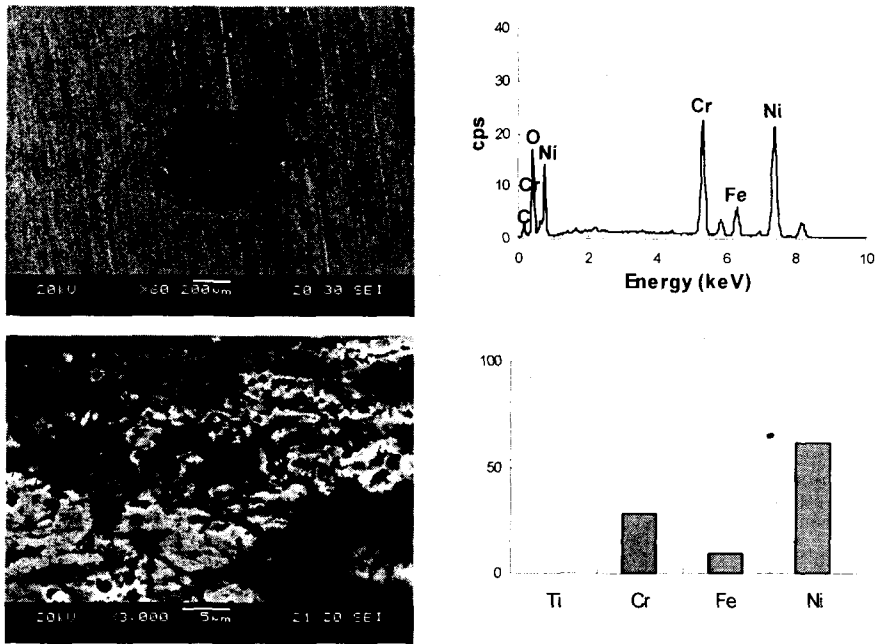


Fig. 8 Microstructure and EDS analysis of Inconel 690 in water at 50°C

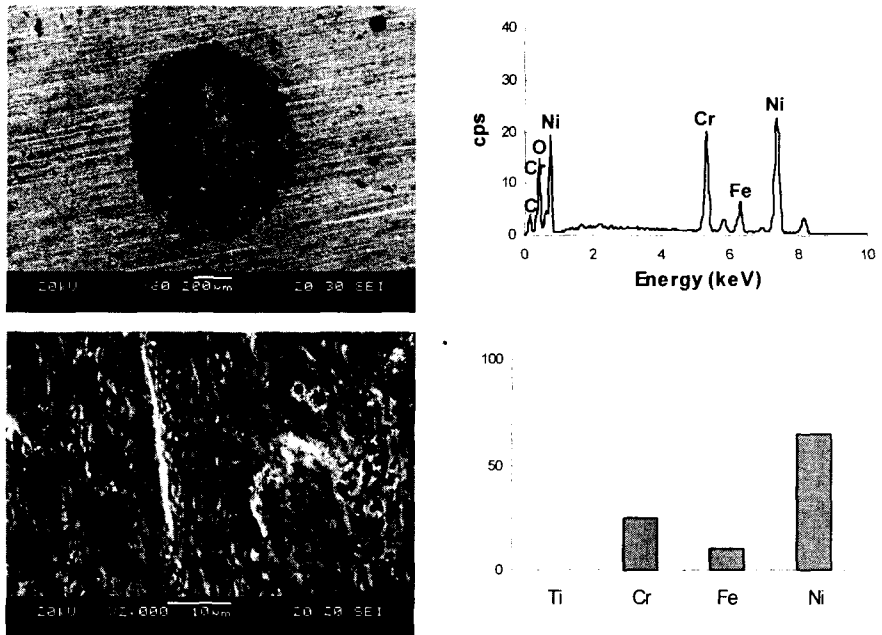


Fig. 9 Microstructure and EDS analysis of Inconel 690 in water at 80°C

속적이고 두꺼운 산화물이 형성되는 것을 알 수 있으며, 철산화물은 상대적으로 감소하였다. 온도 증가에 따라 형성되는 크롬과 니켈의 산화물에 의해 상대운동이 원활하게 되어 마멸량은 증가하였다.

4. 결론

증기발생기 세관재료로 새로이 검토되고 있는

Inconel 690 의 마멸 특성을 파악하기 위해 STS 405 를 상대재료로 이용하여 공기 중과 물 속에서 온도에 따라 프레팅 실험을 수행하였다.

(1) 프레팅 실험에서 마찰력의 크기는 상대운동량에 비례한다. 물속에서 실험한 결과는 공기 중에서 보다 상대적으로 작은 마찰력을 나타낸다. 이는 물속에서 실험한 경우 물이 윤활유의 역할을 수행하여 미약하지만 일부 수막을 형성하고, 접촉부 주변에서 물의 흐름에 의해 접촉부의 온도를 감소시킨다. 결국 슬립이 공기 중에서 보다 많이 발생하였지만 마찰력이 감소하였다. 하중이 증가함에 따라 마찰력의 증가가 작아지는데 이는 다시 하중증가에 따라 응착이 발생하여 상대운동의 크기가 감소하기 때문이다. 진폭이 증가하면 상대운동이 보다 원활해지고, 이로 인해 공기중과 물속 모두 마찰력이 동일한 하중이 작용하였어도 진폭에 따라 증가하였다.

(2) 공기 중에서 실험한 시편은 응착과 판상박리 마멸을 보인다. 이는 강한 응착으로 상대운동이 활발치 못한 결과로 취성이 강한 철산화물에 의해 발생하였다. 마멸계수는 $7.38 \times 10^{-13} \text{ Pa}^{-1}$ 이었다. 물속에서는 온도가 증가함에 따라 점차 크롬과 니켈의 연속적이고 두꺼운 산화물이 형성되는 것을 알 수 있으며, 철산화물은 상대적으로 감소하였다. 온도 증가에 따라 형성되는 크롬과 니켈의 산화물에 의해 상대운동이 원활하여져 마멸량이 증가하였다. 온도가 증가함에 따라 마멸계수는 $2.12 \times 10^{-13} \text{ Pa}^{-1}$, $3.34 \times 10^{-13} \text{ Pa}^{-1}$ 와 $5.21 \times 10^{-13} \text{ Pa}^{-1}$ 로 각각 증가하였다.

후 기

본 논문은 과학기술부 지정 성균관대학교 산업설비안전성평가 연구센터의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

(1) Kim, D.G. and Lee, Y.Z., 2001, "Experimental

- Investigation on Sliding and Fretting Wear of Steam Generator Tube Material," *WEAR*, Vol. 250, pp. 673~680.
- (2) Miglin, B.P. and Sarver, J.M., 1991, "Investigation of Lead as a Cause of Stress Corrosion Cracking at Support Plate Intersections," *Electric Power Research Institute*, EPRI NP-7367-M.
- (3) Kang, S.C., Song, M.H., et al., 1999, Regulatory Technical Report on the Steam Generator Safety of Nuclear Power Plants, Korea Institute of Nuclear Safety, Report KINS/AR-669, pp. 5~37.
- (4) MacDonald, P.E., Shah, V.N., et al., 1996, Steam Generator Tube Failure, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Report NUREG/CR-6365, pp. 1~77.
- (5) Ko, P.L. and Basista, H., 1984, "Correlation of Support Impact Force and Fretting-Wear for a Heat Exchanger Tube," *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 106, pp. 69~77.
- (6) Ko, P.L., 1985, "Heat Exchanger Tube Fretting Wear : Reviews and Application to Design," *Journal of Tribology*, Vol. 107, pp. 149~156.
- (7) Taylor, C.E., Pettigrew, M.J., et al., 1998, "Vibration Damping in Multispan Heat Exchanger Tubes," *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 120, pp. 283~289.
- (8) Stachowiak, G.W. and Batchelor, A.W., 1993, *Engineering Tribology*, Elsevier, pp. 683~700.
- (9) Guerout, F.M. and Fisher, N.J., 1999, "Steam Generator Fretting-Wear Damage : A Summary of Recent Findings," *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 121, pp. 304~310.
- (10) Bowden, F.P. and Tabor, D., 1964, *The Friction and Lubrication of Solids*, Clarendon Press.
- (11) Rabinowicz, E., 1995, *Friction and Wear of Materials*, Wiley Publication, pp. 68~72.
- (12) Fisher, N.J., Chow, A.B., et al., 1995, "Experimental Fretting-Wear Studies of Steam Generator Materials," *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 117, pp. 312~320.