

증기발생기 튜브재질의 미끄럼 마멸 및 프레팅 마멸 특성

김동구[†] · 조정우 · 이영제^{*‡}

성균관대학교 기계공학부 대학원
^{*}성균관대학교 기계공학부

Sliding Wear and Fretting Wear of Steam Generator Tube Materials

Dong-Goo Kim[†], Chung-Woo Cho and Young-Ze Lee^{*‡}

Graduate School of Mechanical Engineering, SungKyunKwan University
^{*}School of Mechanical Engineering, SungKyunKwan University

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 600 and 690 against STS 304. Sliding tests with the pin-on-disk type tribometer were done under various applied loads and sliding speeds at air environment. Fretting tests were done under various vibrating amplitudes and applied normal loads. From the results of sliding and fretting wear tests, the wear of Inconel 600 and 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. It was found the results that the wear coefficients for Inconel 600 and 690 were $262.3 \times 10^{-15} \text{ Pa}^{-1}$ and $209.2 \times 10^{-15} \text{ Pa}^{-1}$, respectively. This study shows that Inconel 690 can provide much better wear resistance than Inconel 600 in air.

Key words – fretting wear, sliding wear, inconel 600, inconel 690, work rate model, stick-slip.

1. 서 론

원자력발전소 증기발생기 튜브는 유체유동에 의한 진동(FIV, flow induced vibration)이 미세하게 발생한다[1]. 진폭이 커지면 튜브간에, 또는 지지대와와의 사이에 접촉이 생기고 프레팅마멸(fretting wear)이라는 문제가 발생한다[2-5]. 현재 증기발생기 튜브 재료로 사용되는 Inconel 600은 응력부식균열(stress corrosion crack)이 발생하기 쉬워 부식에 강한 Inconel 690의 사용이 검토되고 있다. 그러나 프레팅마멸에 대한 Inconel 690의 특성은 아직 보고되지 않고 있다[6].

본 연구에서는 Inconel 600과 690의 마멸 특성을 비

교하기 위해 우선 미끄럼실험과 프레팅실험을 공기 중에서 수행하고자 한다. 미끄럼실험은 두 재료의 마멸계수를 구하기 위해 pin-on-disk type 시험기를 이용하여 하중과 속도를 바꾸어 수행되었고, 프레팅실험은 cross cylinder type 시험기를 이용하여 하중과 진폭을 바꾸어 가며 수행되었다. 마멸계수(wear factor)를 구하기 위해 일반적으로 사용되는 work rate model을 적용하였다[7].

2. 실 험

2-1. 시편

실험은 Inconel 600과 690을 공기 중에서 STS 304 강과 상대운동 시켜 수행되었다. 미끄럼실험에서는 Inconel을 핀(폭 3 mm, 두께 1 mm, 길이 10 mm)으로 만들어 사용하였고 STS 304 강은 지름 60 mm, 두께

[†]주저자 : ddkim@hanmail.net

[‡]책임저자 : yzlee@yurim.skku.ac.kr

Table 1. Chemical compositions and mechanical properties of Inconel 600, 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
Inconel 600	0.02	0.5	0.5	15	72	0.02	-	0.5	8
STS 304	0.03	0.55	1.81	18.3	8.2	0.02	-	-	Bal
Mechanical properties	Micro Hardness (HRB)		Yield Strength (MPa)		Ultimate Tensile Strength (MPa)		Elongation (%)		
Inconel 690	82		326		727		45		
Inconel 600	68		245~350		561		30		
STS 304	123		270		600		50		

8 mm의 원판으로 가공하여 사용하였다. 프레팅실험에서는 실제 증기발생기에 사용하는 튜브(외경 19.1 mm, 두께 1 mm)를 60 mm씩 절단하여 사용하였고, STS 304 강은 동일한 크기로 절단하여 사용하였다. Table 1은 본 연구에서 사용된 재료의 화학적 조성과 물성을 나타낸다.

2.2. 실험장치 및 방법

Inconel의 마찰 및 마멸 특성을 파악하기 위해 프레팅실험 전에 미리 미끄럼실험을 수행하였다. 미끄럼실험은 재현성이 좋고 규격화되어 있는 반면, 프레팅실험은 과정이 매우 까다롭고 시험기의 특성에 따라 다른 결과를 얻을 수 있다. 따라서 미끄럼실험을 위한 진폭의 slip으로 취급할 경우 그 결과를 프레팅마멸의 극한값으로 보아 프레팅실험의 결과를 검증할 수 있는 매우 중요한 실험이라 할 수 있다.

Fig. 1에서 보는 시험기를 사용하여 Inconel 시편을 STS 304 시편과 공기 중에서 미끄럼운동을 시켜 그때의 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 고정

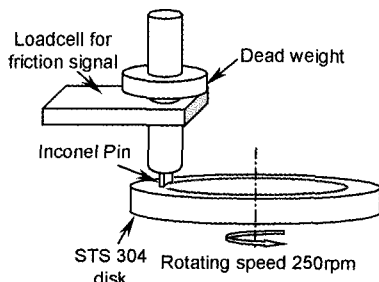


Fig. 1. Schematic diagram of sliding tester.

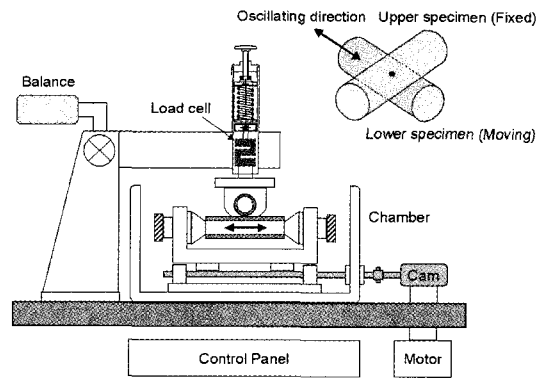


Fig. 2. Schematic diagram of fretting tester.

하고 하중을 2.5 N에서 12.5 N까지 2.5 N씩 증가하였으며, 후에 하중을 7.5 N으로 고정하고 속도를 0.18 m/s, 0.42 m/s, 0.65 m/s로 변화시켜 실험을 수행하였다. 실험은 각기 세 번 반복하여 평균값을 얻었다.

프레팅실험은 Fig. 2에서 나타난 시험기를 사용하였다. 시험기는 캠을 구동하여 진폭을 수십에서 수백 μm 까지 변화시킬 수 있으며, 주파수는 모터의 회전수에 따라 변동시킬 수 있다. 하중은 스프링을 이용하여 screw lever로 가하며, 본 실험에서는 프레팅마멸의 특징인 stick과 slip을 관찰할 수 있도록, 100-250 μm 의 진폭, 10~80 N의 하중을 선택하였다. 튜브의 마멸은 표면조도계를 사용하여 형상변화를 측정하여 얻었다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 미끄럼실험

Table 2는 미끄럼실험에서 구한 Inconel 600과 690의 STS 304에 대한 마찰계수를 나타내고 있다. 마찰계수는 미끄럼운동을 시작한 후 20분 후에 5분간 측

Table 2. Coefficient of friction values of Inconel 600 and 690 pin against STS 304 disk at various test conditions

Linear Velocity (m/sec)	Test Number Normal Load (N)	1		2		3		Average	
		Inconel 600	Inconel 690	Inconel 600	Inconel 690	Inconel 600	Inconel 690	Inconel 600	Inconel 690
0.34	2.5	0.59	0.56	0.67	0.57	0.67	0.57	0.64	0.57
	5.0	0.57	0.56	0.60	0.58	0.60	0.59	0.60	0.58
	7.5	0.58	0.61	0.62	0.59	0.61	0.54	0.60	0.58
	10.0	0.60	0.54	0.69	0.56	0.60	0.51	0.63	0.54
	12.5	0.67	0.54	0.67	0.55	0.65	0.50	0.66	0.53
0.18		0.57	0.55	0.66	0.59	0.66	0.54	0.63	0.54
0.42	7.5	0.60	0.54	0.63	0.55	0.62	0.52	0.62	0.56
0.65		0.61	0.55	0.65	0.55	0.61	0.56	0.62	0.55

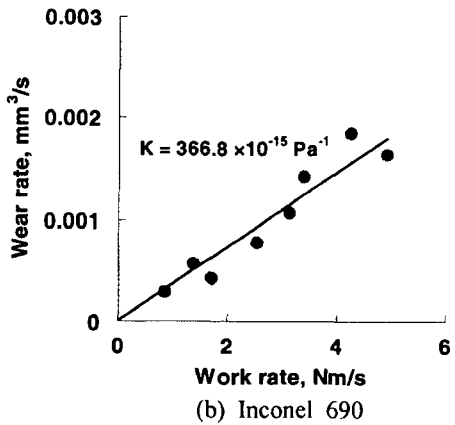
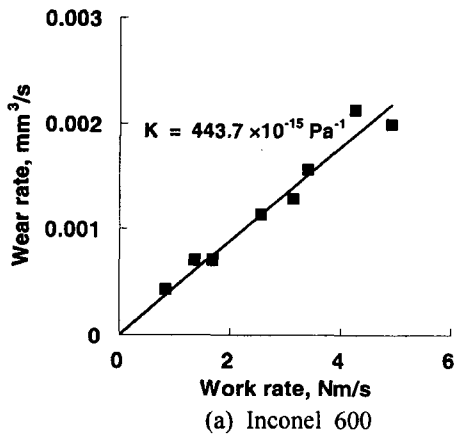


Fig. 3. Sliding wear curve on Inconel 600 and 690 pin with STS 304 disk specimen.

정한 값의 평균치이다. Inconel 600과 690 모두 공기 중에서 하중과 속도의 변화가 마찰계수의 값에 크게 영향을 주지 않았다. Inconel 600은 반복 실험의 평균

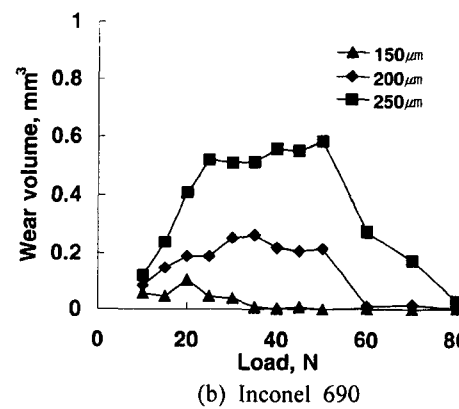
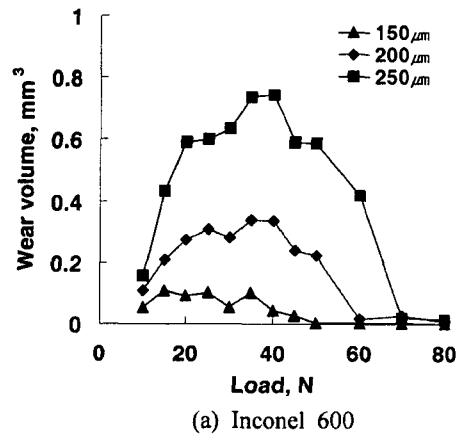


Fig. 4. Change of wear volume with variations of amplitude and normal load.

값으로 0.60~0.66, 그리고 Inconel 690은 0.53~0.58의 마찰계수를 나타내었다. 따라서 Inconel 690은 뛰어난 내식성 뿐 아니라 마찰특성도 Inconel 600 보다 우수하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 3은 마멸계수를 구하기 위해 두 재료의 work rate에 대한 마멸율(wear rate)을 나타내고 있는데, 좋은 선형성을 보이고 있다. Inconel 690은 상대적으로 낮은 마찰계수의 영향으로 $366.8 \times 10^{-15} \text{ Pa}^{-1}$ 의 마멸계수를 나타내고 있어, $443.7 \times 10^{-15} \text{ Pa}^{-1}$ 의 Inconel 600보다 20% 정도 우수한 내마멸성을 보이고 있다.

3-2. 프레팅실험

Fig. 4는 프레팅 진폭이 각각 150 μm , 200 μm , 250 μm 에 대하여 하중을 10 N에서 80 N으로 증가시키며 Inconel 600과 690의 마멸부피(wear volume)를 측정된 결과이다. 진폭이 150 μm 인 경우 저하중 영역에서는 하중이 증가함에 따라 마멸이 증가하다가 Inconel 600은 35 N, 690은 20 N부터 다시 감소하였다. 하중이 각기 50 N과 25 N부터는 시편으로부터 마멸을 측정하기가 어려울 정도로 마멸이 감소하였다. 진폭 200 μm 와 250 μm 에서도 150 μm 의 경우와 유사한 양상을 나타내었다. 일반적으로 미끄럼 실험에서는 Archard Law에서 보듯이 하중증가에 따라 마멸이 증가하지만, 프레팅 경우에는 하중증가가 두 표면의 상대운동을 방해하여 마멸이 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 스틱-슬립(stick-slip)현상으로 설명할 수 있다 [8]. 프레팅은 마멸기구(wear mechanism)에 따라 네 영역으로 구분할 수 있다. 첫 번째 영역은 진폭이 하중에 비해 매우 작아서 스틱이 발생하고, 따라서 마멸이 거의 발생하지 않는 영역이다. 두 번째 영역은 스틱과 슬립이 공존하는 경우인데, 스틱과 슬립의 경계에서 크랙이 발생하기 시작하여 마멸을 초래한다. 세

번째 영역은 상대운동 표면 전반에 걸쳐 슬립이 발생하는 경우인데, 마멸이 급속히 진행된다. 네 번째 영역은 진폭이 매우 커서 진동이라기 보다는 미끄럼운동에 가까운 경우로 가장 큰 마멸을 나타낸다. Fig. 4에서 마멸기구의 변동으로 마멸부피가 각기 다른 세 영역이 존재함을 알 수 있다.

Fig. 5는 진폭이 100 μm 인 경우로 Fig. 4와 마찬가지로 마멸기구에 따라 다르게 발생하는 마멸을 뚜렷하게 나타내고 있다. Inconel 600은 15 N에서 690은 10 N에서 스틱-슬립 현상에 의해 마멸이 감소하기 시작하여 30 N에서는 스틱 현상에 의해 아주 미세한 마멸만이 측정되었다. Fig. 6은 Fig. 5 실험에서 사용된 표면의 사진과 마멸량을 구하기 위해 표면형상을 측정된 결과이다. Fig. 6(a)는 Inconel 600 100 μm 의 진폭으로 10 N, 20 N, 30 N, 40 N의 하중으로 실험한 표면의 광학현미경 사진이며, 그 때의 마멸면을 표면조도계로 측정된 결과이다. 10 N에서는 슬립이 활발하여 마멸이 상당히 진전되었고, 하중이 증가함에 따라 마멸이 줄어들음을 알 수 있다. Fig. 6(b)는 Inconel

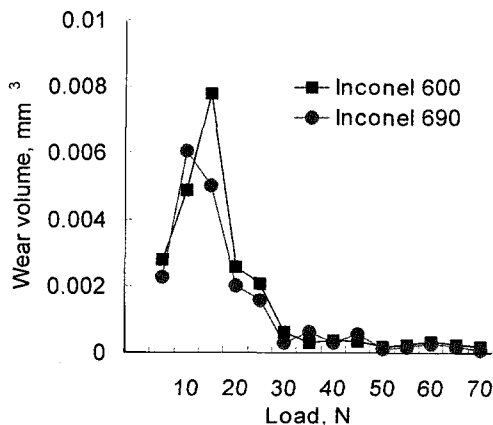


Fig. 5. Wear volume with normal load variation at a amplitude of 100 μm .

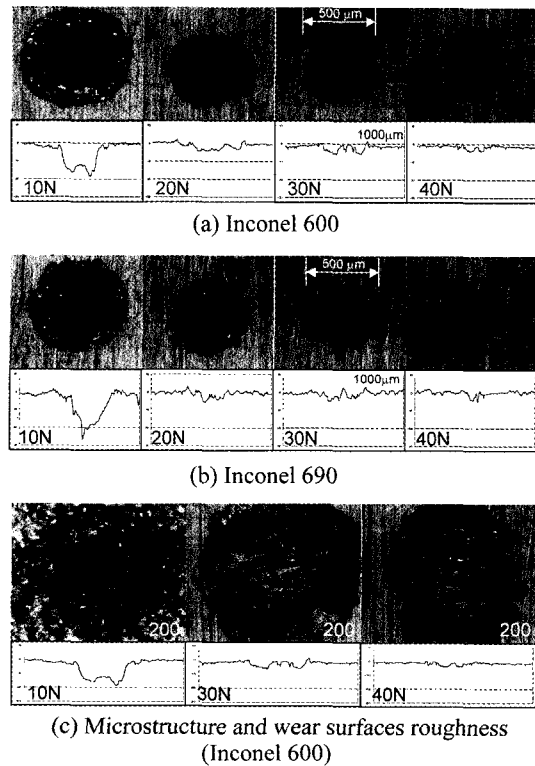
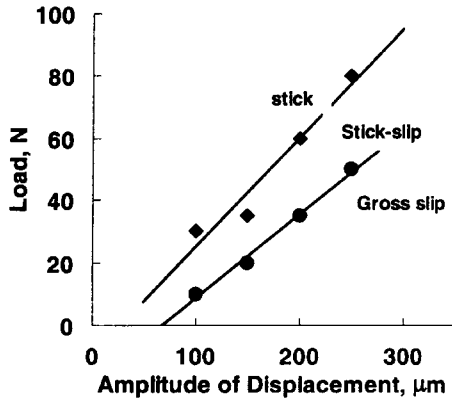
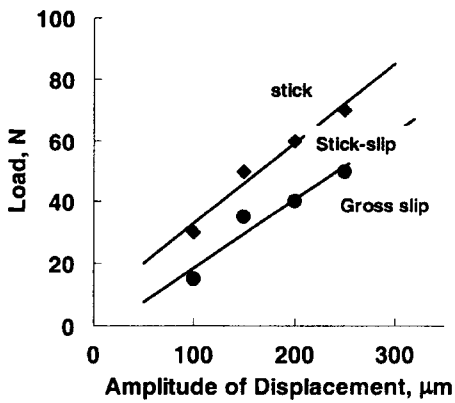


Fig. 6. Microstructure and wear surfaces roughness at a amplitude 100 μm with various loads.



(a) Inconel 600



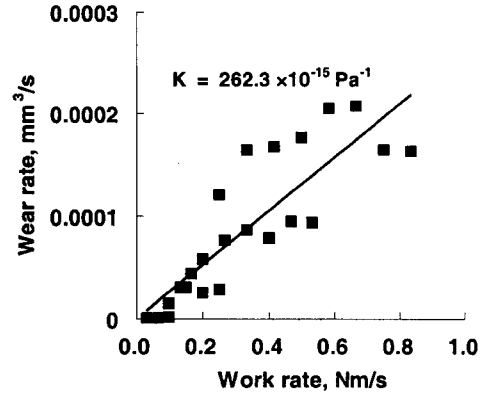
(b) Inconel 690

Fig. 7. Fretting transition map.

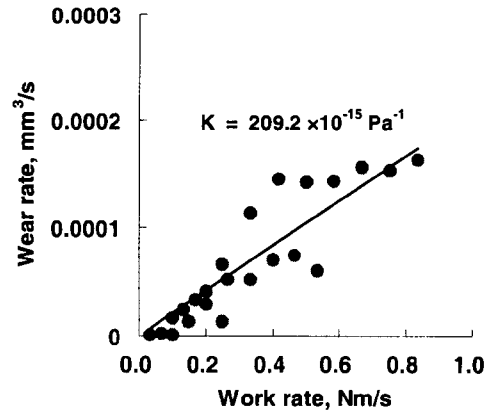
690의 Fig. 6(a)와 같은 조건에서 실험한 마멸면의 사진과 형상이다. 마찬가지로 하중이 증가할수록 마멸기구가 바뀌었으며, 마멸량이 감소하였다. Fig. 6(c)는 Inconel 600의 마멸면을 확대한 것인데, 하중이 증가함에 따라 슬립현상에서 30 N의 경우 스틱-슬립, 그리고 40 N 하중에서는 스틱현상이 지배적이었다.

Fig. 7은 프레팅 마멸기구의 변화를 한번에 볼 수 있는 Inconel 600과 690의 Fretting Transition Map이다. 일정한 진폭 하에서 하중을 증가시키면 슬립영역에서 스틱-슬립영역, 그리고 스틱영역으로 바뀌어 갔다.

Fig. 8은 프레팅마멸이 가장 활발히 발생하는 슬립 영역에서 work rate model을 이용하여 마멸계수를 구한 그림이다. Inconel 600은 마멸계수가 $262.3 \times 10^{-15} \text{ Pa}^{-1}$, Inconel 690은 $209.2 \times 10^{-15} \text{ Pa}^{-1}$ 이었다. 따라서 전반적으로 Inconel 690이 Inconel 600에 비해 내마멸성이 우수하였다.



(a) Inconel 600



(b) Inconel 690

Fig. 8. Wear coefficient of Inconel 600 and 690.

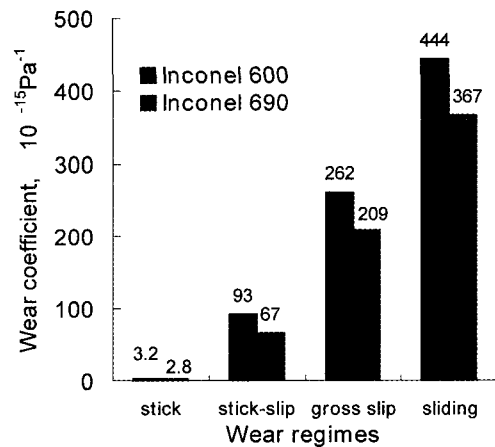


Fig. 9. Wear coefficient in each wear regimes.

Fig. 9는 프레팅마멸의 각 영역에서의 마멸계수와 미끄럼실험에서의 마멸계수를 나타내었다. 슬립영역에서

두 재료의 마멸계수는 스틱영역에서의 마멸계수 보다 100배 정도 컸으며, 스틱-슬립영역에서의 마멸계수보다는 3배정도 컸다.

4. 결 론

원자력발전소 증기발생기 세관재료로 사용되는 Inconel 600과 690의 마멸 특성을 파악하기 위해 STS 304를 상대재료로 이용하여 공기 중에서 미끄럼실험과 프레팅실험을 수행하였다.

1. 미끄럼실험 결과를 work rate model에 적용하여 마멸계수를 구하였는데, Inconel 690이 Inconel 600보다 마찰계수가 10% 작았으며, 내마멸성이 17% 정도 우수하였다.

2. 프레팅실험으로부터 두 재료 모두 진폭 100 μm 에서 250 μm 사이에서 스틱과 슬립에 의해 마멸량이 달라지는 천이영역이 존재하는 것을 알 수 있었다. 특히, 슬립에 의해 마멸량이 많고 프레팅 손상으로 이어질 수 있는 영역에서 Inconel 690은 마멸계수가 $209.2 \times 10^{-15} \text{Pa}^{-1}$ 이었고, Inconel 600은 $262.3 \times 10^{-15} \text{Pa}^{-1}$ 로 나타났다. 그 외의 영역에서도 Inconel 690의 내마멸성이 Inconel 600보다 15~20% 우수하여, Inconel 690은 잘 알려진 내식성뿐 아니라 내마멸성도 Inconel 600에 비해 뛰어났다.

후 기

이 연구는 과학기술부 원자력기초사업 연구비 지원으로 산업설비안전성평가연구소에서 수행되었습니다.

참고문헌

1. P.E. MacDonald, V.N. Shah *et al*, Steam generator Tube Failure, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Report NUREG/CR-6365, pp.1-77, 1996.
2. P.L. Ko, 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. P.L. Ko, "Heat Exchanger Tube Fretting Wear : Reviews and Application to Design," *Journal of Tribology*, Vol.107, pp.149-156, 1985.
4. F.M. Guerout, N.J. Fisher, "Steam Generator Fretting-Wear Damage : A Summary of Recent Findings," *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol.121, pp. 304-310, 1999.
5. 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, 1998.
6. S.C. Kang, M.H. Song *et al*, Regulatory Technical Report on the Steam Generator Safety of Nuclear Power Plants, Korea Institute of Nuclear Safety, Report KINS/AR-669, pp.5-37, 1999.
7. C. Phalippou *et al*, "The Predictive Analysis of Wear Work-rates in Wear test Rigs," *Journal of Pressure Vessel Piping*, Vol.328, 1996.
8. O. Vingsbo, S. Sorderberg, "On Fretting Maps," *Wear*, Vol.126, pp.131-147, 1988.