

고온 고압 환경에서 인코넬 690 재료의 프레팅 마모 특성에 관한 실험적 연구[§]

이춘열*† · 이주석** · 배준우*

* 영남대학교 기계공학부, ** 한국델파이(주) 기술지원실

Experimental Study on Fretting Wear of Inconel 690 Under High Temperatures and Pressures

Coon Yeol Lee*†, Ju Suck Lee** and Joon Woo Bae*

* School of Mechanical Engineering Yeungnam Univ.

** Delphi Automotive Systems Co., Technical Support

(Received January 4, 2012 ; Revised March 12, 2012 ; Accepted March 19, 2012)

Key Words: Impact(충격), Fretting Wear(프레팅 마모), Inconel Tube(인코넬 관), Simulator(시뮬레이터), Steam Generator(증기발생기)

초록: 증기 발생기 내부의 U-tube와 지지 구조간의 충격에 의하여 발생하는 프레팅 마모는 원자력 발전소 안전성에 영향을 미치게 된다. 증기발생기의 신뢰성을 향상시키기 위하여 이러한 프레팅 마모 현상을 평가하는 것이 필요하며, 본 연구는 프레팅 마모현상을 정성적, 정량적으로 규명하기 위하여 증기발생기의 실제 상황과 같은 조건의 온도와 압력하에서 실험을 수행하였다. 다양한 실험조건에 대하여 기본적인 실험을 수행하였으며 일률과 마모량의 관계를 온도에 따라 구하였다. 90°C, 200°C, 340°C 각각의 온도에서의 마모상수는 $9.051 \times 10^{-16} \text{ Pa}^{-1}$, $3.009 \times 10^{-15} \text{ Pa}^{-1}$, $2.235 \times 10^{-15} \text{ Pa}^{-1}$ 로 구해졌으며 특히 저온 수증상태의 마모상수는 물의 점도의 영향으로 상온 공기중의 값보다 작은 것으로 나타났다.

Abstract: In a nuclear power plant, fretting wear due to impact motion between U-tubes and support structures located in steam generators can cause serious problems. In order to guarantee the reliability of the steam generator, the damage due to fretting wear should be thoroughly investigated. The purpose of this study is to elucidate the fretting wear mechanism qualitatively and quantitatively. Hence, fretting wear simulation is performed for the environments to which the actual steam generators in nuclear power plants are exposed. Initial experimental results are obtained for various experimental parameters, and the effect of the work rate and temperature on fretting wear is evaluated. In water, the wear coefficients for 90°C, 200°C, and 340°C are found to be $9.051 \times 10^{-16} \text{ Pa}^{-1}$, $3.009 \times 10^{-15} \text{ Pa}^{-1}$, and $2.235 \times 10^{-15} \text{ Pa}^{-1}$, respectively. It is also found that the wear coefficient at room temperature is larger than that at low temperature in water because of the dynamic viscosity of water.

1. 서론

증기 발생기는 터빈 발전기를 가동시키는 작동 유체를 만들어 내는 원자력 발전소의 주요 설비 중의 하나이다. 세관 내부로 유동하는 고온의 1차수에 의해 세관 외부의 2차수가 증기로 변하게 되는데, 이 때 세관 외부로 흐르는 2차수의 유동

특성에 의해 유체유발진동(flow induced vibration)이 발생하고 그로 인해 세관과 지지격자 사이에 충격과 미끄럼이 동시에 일어나게 되며 시간이 흐르면 세관의 구조적인 안전성에 영향을 미치게 될 것이다. 더구나 국내 원전 발전설비들의 사용 연한이 길어지면서 설계 수명에 도달해 가는 실정에서, 설비 노후화로 인한 프레팅 마모문제의 중요성은 더욱 부각되고 있다.

프레팅(fretting)에 대한 정의⁽¹⁾는 ASM에 따르면 접촉하고 있는 두 고체의 표면 사이에 작은 진폭으로 진동하는 움직임으로 정의되고 있다. Eden⁽²⁾

§ 이 논문은 대한기계학회 2011년도 추계학술대회 (2011. 11. 2-4., EXCO) 발표논문임

† Corresponding Author, cylee@yu.ac.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

등에 의하여 최초로 이러한 현상에 대한 보고가 있었고 Tomlinson⁽³⁾이 이를 프레팅이라 명명한 이후 많은 학자들의 관심분야가 되었다.

Waterhouse⁽⁴⁾는 프레팅을 프레팅 마모, 프레팅 피로, 프레팅 부식 등과 같이 구분하였다. Vingsbo와 Söderberg⁽⁵⁾는 프레팅 마모 영역을 고착(stick), 고착 및 미끄럼(mixed stick and slip), 미끄럼(gross slip) 등으로 구분하였고 Ko⁽⁶⁾ 및 Fisher^(7,8) 등은 프레팅 마모 문제를 증기발생기 재료에 대하여 적용하여 주로 실험적으로 마모상수를 고찰하였다. 기타 참고 문헌^(9,10)에 프레팅 마모 및 프레팅 피로에 관한 일반적 이론 및 실험 결과가 언급되고 있다.

국내에서도 프레팅 마모와 피로에 대한 관심이 점점증하고 있으나, 기존의 국내장비 및 연구결과들은 대부분 기본적인 실험을 위한 것이었다. 한편, 본 연구에서는 증기발생기의 실제 환경에 가까운 고온 고압(340℃, 15MPa) 수화학 조건에서 프레팅에 의한 마모를 제어할 수 있는 실험장치를 개발하고, 개발된 시뮬레이션장치를 이용하여 여러 가지 조건에서의 실험 데이터를 구축하여 설계단계뿐만 아니라 보수 점검의 방법 및 시기 결정에도 이용되어 질 수 있는 자료를 제공하여 원전설비 전반의 신뢰성을 향상시키고자 한다.

2. 프레팅 마모 시뮬레이션장치의 개발

시뮬레이션장치의 전체 구성은 Fig. 1에서 보이고 있다. 전체 시스템은 크게 세부분으로 나누어진다. 먼저 증기 발생기 세관의 운동을 모사할 수 있는 액추에이터(actuator)와 히터(heater) 및 센서(sensor)를 포함하고 있는 중앙의 메인 프레임(main frame), 원자력 발전소 2차측의 수화학 환경을 모사하는 우측의 자동 물 순환장치(water loop system), 마지막으로 액추에이터를 제어하고 각 센서로부터 받아들이는 결과를 표시해주는 컨트롤 유닛으로 나누어져 있다. 그 외에 고온의 상태에서 센서를 보호하기 위해 냉각기(chiller)와 워터 재킷(water-jacket)을 이용하고 있다.

2.1 메인 프레임(main frame)

메인 프레임은 Fig. 2에서 보는 것과 같이 크게 상부와 하부로 구분할 수 있다. 하부에는 유체 유발 진동을 모사하기 위하여 액추에이터를 X축

방향과 Y축 방향으로 설치하였다. 하부의 액추에이터는 높은 주파수 조건에서도 정밀한 변위 제어를 위해 선형 모터형 구동기(linear magnetic servomotor)를 사용함으로써 1 μ m의 변위 제어를 할 수 있으며 맞은편에 설치된 접촉식 변위 센서에서 피드백 하여 실시간 제어가 가능하다.

상부는 Fig. 3에서 보는 것과 같이 비 접촉식 변위 센서인 Kaman sensor가 X축과 Y축에 각각 설치되어 있고 수직하중(normal load)을 측정하기 위해 로드셀(load cell)이 네 방향으로 서로 독립하여 설치되어 있다. 시편(specimen)은 튜브이기 때문에 비접촉식 변위센서로는 정확한 값을 읽어 내는데 한계가 있다. 특히 μ m단위의 제어가 필요하기 때문에 시편의 가장 가까운 곳에 센서 목표부(target)를 설치하여 비 접촉변위 센서의 오차를 줄였다. 시편은 로드셀과 접촉하는 길이 30mm만 교체하도록 하여 실험의 효율성을 높였다.

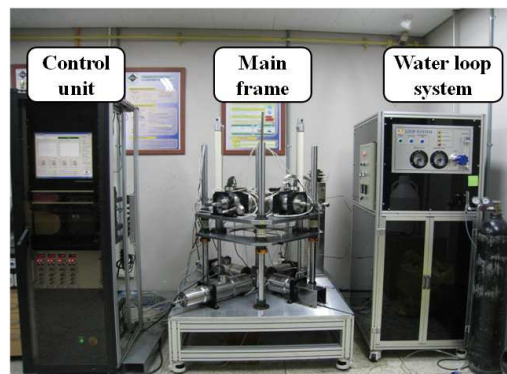


Fig. 1 Fretting wear simulator

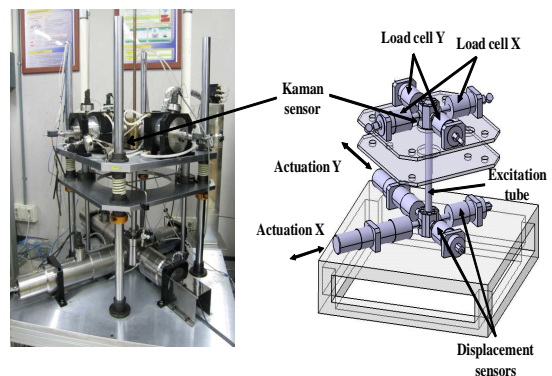


Fig. 2 Main frame of fretting wear simulator and its basic schematics

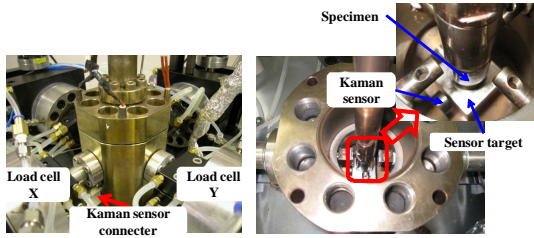


Fig. 3 Exterior and interior view of the upper part of autoclave

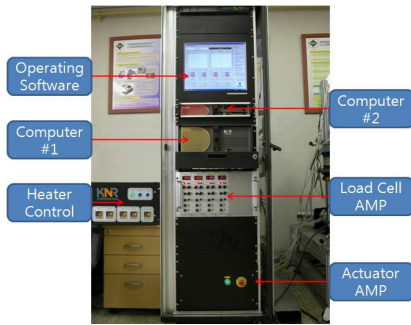


Fig. 4 Control unit

2.2 자동 물 순환장치(water loop system)

고온고압 물속의 환경을 모사하기 위하여 마모 시험기 장치와는 별도로 구성된 루프(loop)에서 예열된 물이 마모시험기의 하부에서 유입되어 상부에 배출되는 구성을 가진다. 이때 사용되는 물은 증기발생기 2차 냉각수와 동일한 조건을 유지한다.

수화학 조건을 만족시키기 위해 질소가스를 이용하여 수중의 산소 농도를 제어하고 이온교환수지를 사용하여 수중 이물질이 자동 물 순환장치에 영향을 주지 않도록 하고 있다.

고압을 유지시켜 주는 고압펌프(high-pressure pump)에서 pre-heater를 통과하여 오토 클레이브(auto-clave)로 들어갈 때 열효율을 높이기 위해 주입부를 시편과 가까운 곳에 설치하였다. 고압펌프의 성능을 최대로 사용할 때 유량에 의하여 오토클레이브내의 대류현상이 발생하여 실험에 영향이 있는 것으로 판단되어 유량을 40%가량 줄임으로써 펌프의 영향을 최소화 하였다.

2.3 컨트롤 유닛(control unit)

Fig. 4에 나타난 컨트롤 유닛은 자동 물 순환장치를 제외한 모든 장비를 제어하고 있으며 정보를 수집하고 저장하는 역할을 수행한다. 기본적

으로 두 개의 컴퓨터로 이루어져 있으며 Deneb DXL(controller)에서 신호를 제어하여 Deneb SV(user control Unit)를 통하여 사용자가 결과를 확인 하게 된다.

특히 X축과 Y축 두 개의 가진부를 독립적으로 작동하거나 유기적인 변위, 진폭 또는 위상 각(phase angle)의 조합으로 여러 형태의 가진 유형으로 변화가 가능하다.

세관의 움직임을 제어하기 위한 각각의 선형 전자기 구동장치의 가진부는 압력의 변화에 의하여 가진 변위의 변화가 없어야 하며 장시간 동안 부여된 조건을 유지해야하기 때문에 센서의 피드백을 받도록 되어 있다.

3. 프레팅 마모 실험 시편

실험에 필요한 시편은 U-tube 제작에 사용되는 Inconel 690 tube (봉 시편)과 지지격자 제작에 사용되는 Stainless steel 409 (판 시편)의 두 가지로 구성되어 있으며 판 시편은 봉 시편의 길이 방향으로 실제지지 격자와 같은 높이를 취했으며 폭은 봉 시편의 지름보다 작게 하여 실험의 유연성을 높였다.

3.1 판 시편

지지격자 지그에 판 시편을 고정된 것을 판 시편 세트라고 한다. 이러한 판 시편 세트 네 개를 Fig. 5와 같이 상부 오토 클레이브 내부에 돌출되어 있는 로드셀에 볼트로 고정을 한다. 지지격자와 같은 형상을 하고 있는 판 시편 세트는 서로 독립되어 각 방향의 수직하중(normal load)을 측정하게 된다.

3.2 봉 시편

Inconel 690 봉 시편은 하단 오토클레이브의 pipe grip에서 상하로 약 10mm정도 이동이 가능하기 때문에 시편간의 충돌이 봉시편의 내부의 일정한 위치에서 발생하도록 지지격자 보다 약간 긴 30mm로 가공되었다. 봉시편은 Fig. 6에 나타난 바와 같이 중앙에 있는 봉 시편을 상단 지그와 하단 지그의 테이퍼 되어진 장착부에 장착되게 된다. 이때 시편 지지용 볼트를 조여 시편을 고정하게 되며 이러한 봉 시편을 센서 목표부와 조립하면 장착이 완료된다.

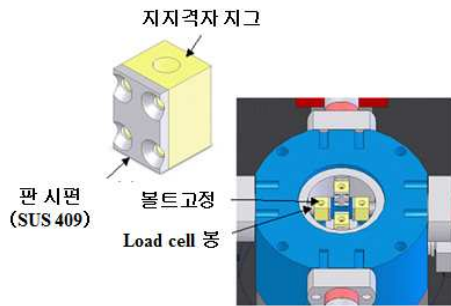


Fig. 5 Plate specimen set and upper autoclave

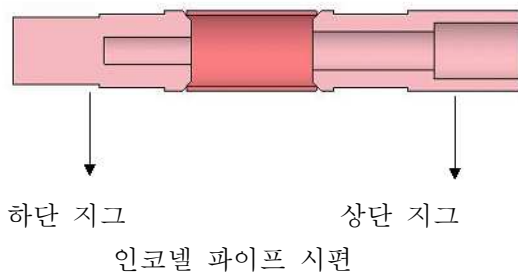


Fig. 6 Assemble of tube specimen

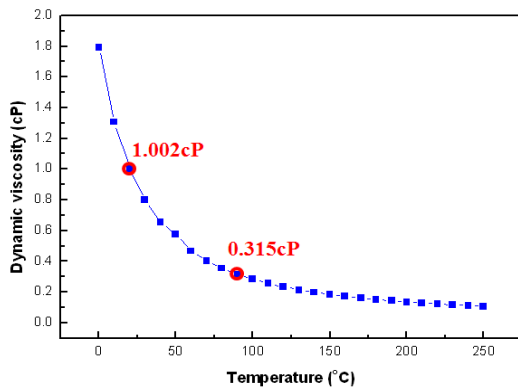


Fig. 7 Change of dynamic viscosity under temperature condition

4. 프레팅 마모 시뮬레이션 실험

인코넬 690 과 스테인리스 스틸 409 을 이용 상온(약 20°C) 공기 중과 90°C (0.101MPa), 200°C (5MPa), 340°C (15MPa) 수중 상태에서 10^5 cycle 동안의 충격 프레팅 마모시험을 수행하여 마모 상수(wear coefficient, K) 값을 계산 하였다. 실험은 2축을 가진 X축의 진폭(amplitude) 값을 조절하여 하중의 크기를 제어 하였으며, Y축의 진폭을 조절하여 일률(work rate) 값을 산출하였다. 일률(\dot{W}) 계산식은 다음과 같다.

$$\dot{W} = 2d_{p-p}F_p f$$

Table 1 Experimental parameters of fretting wear test

Frequency (Hz)	Amplitude-x (μm)	Amplitude-y (μm)	Force (N)	Work rate (mW)
20	140	100	5	20
	140	500	6	120
	300	500	10	200

Table 2 Result of fretting wear test (25°C, 0.101MPa, air environment)

Frequency (Hz)	Work rate (mW)	Wear volume (μm^3)	Wear volume rate ($\mu m^3/s$)
20	20	4.471×10^5	89.4
	120	12.292×10^5	245.8
	200	37.322×10^5	746.4

Table 3 Result of fretting wear test (90°C, 0.101MPa, water environment)

Frequency (Hz)	Work rate (mW)	Wear volume (μm^3)	Wear volume rate ($\mu m^3/s$)
20	20	1.060×10^5	21.2
	120	5.017×10^5	100.3
	200	7.378×10^5	147.6

Table 4 Result of fretting wear test (200°C, 5MPa, water environment)

Frequency (Hz)	Work rate (mW)	Wear volume (μm^3)	Wear volume rate ($\mu m^3/s$)
20	20	5.804×10^5	116.1
	120	10.142×10^5	202.8
	200	34.359×10^5	687.2

여기서, d_{p-p} 는 미끄럼변위 Y축의 진폭 값을 나타내고, F_p 는 로드셀에서 측정된 충격하중의 크기를 나타내며, f 는 주파수(frequency)를 나타낸다. 실험에 이용한 변수들은 Table 1에 나타나 있다.

5. 프레팅 마모 시뮬레이션 실험 결과

실험 후 비접촉식 표면 거칠기 측정 장치를 이용하여 3차원 형상을 측정하고, Mathematica를 이용하여 마모 부피(wear volume)를 계산하였다. Table 2~4는 실험결과를 나타낸 것으로 실험결과

Table 5 Result of fretting wear test (340°C, 15MPa, water environment)

Frequency (Hz)	Wok rate (mW)	Wear volume (μm^3)	Wear volume rate ($\mu\text{m}^3/\text{s}$)
20	20	4.902×10^5	98.0
	120	9.378×10^5	187.6
	200	25.532×10^5	510.6

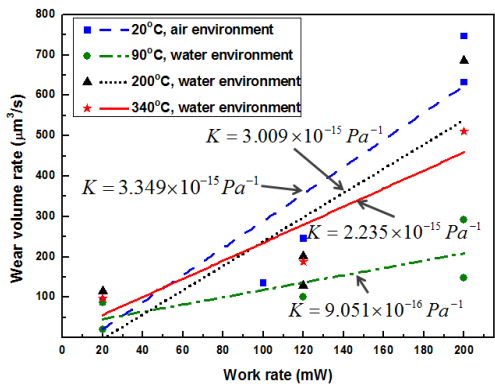


Fig. 8 Comparison of wear volume rate and work rate under temperature condition

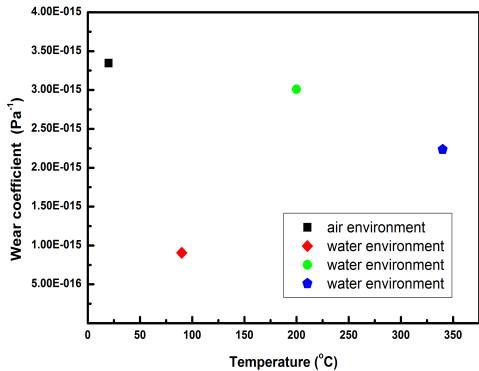


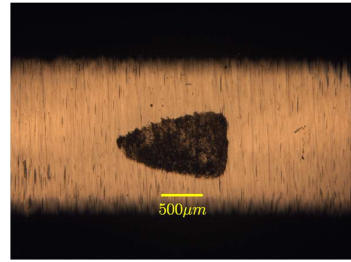
Fig. 9 Variation of wear coefficients under different temperature levels

를 바탕으로 Archard's Wear Equation^(7,8)을 이용하여 마모 상수를 계산 하였다. 그 식은 아래와 같다.

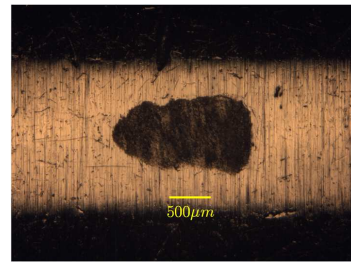
$$\dot{V} = K \dot{W}$$

여기서, \dot{V} 는 마모부피를 마모 부피 변화율을 의미하며, \dot{W} 는 일률을 의미한다.

상온 수중 환경에서 상온 공기 중과 같은 실험 변수를 사용하여 실험을 수행하였으나 마모가 거

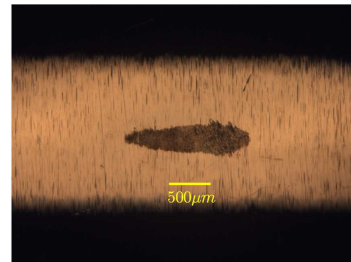


Work rate 120mW

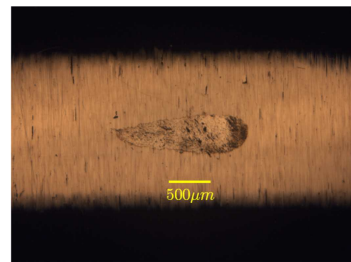


Work rate 200mW

Fig. 10 Wear scar observation by optical microscopy (25°C, 0.101MPa, air environment)



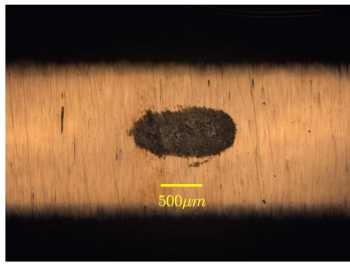
Work rate 120mW



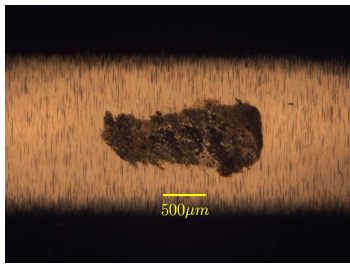
Work rate 200mW

Fig. 11 Wear scar observation by optical microscopy (90°C, 0.101MPa, water environment)

의 발생하지 않거나 적게 발생하였다. 이것은 U-tube 시편과 평판 시편사이에 존재하는 물의 점성에 의한 윤활효과 때문인 것으로 판단되며 Fig. 7에는 온도 에 따른 물의 점도 변화가 나타나있다. Fig. 7에 나타나 있는 바와 같이 물의 점도는 고온으로 올라감에 따라 급격히 감소하며 90°C에서 70%, 200°C에서 90%가량 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 고온

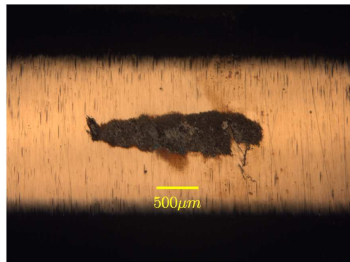


Work rate 120mW

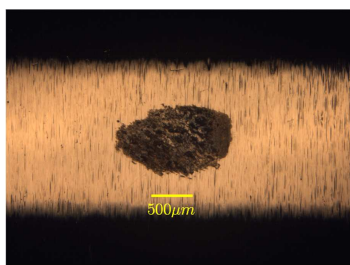


Work rate 200mW

Fig. 12 Wear scar observation by optical microscopy (200°C, 5MPa, water environment)



Work rate 120mW

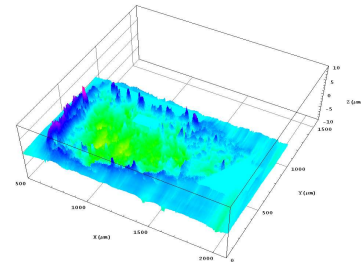


Work rate 200mW

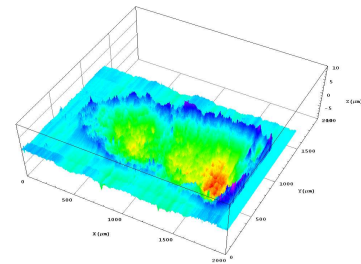
Fig. 13 Wear scar observation by optical microscopy (340°C, 15MPa, water environment)

수중 환경 하에서의 실험에서 마모가 상온시보다 급격하게 증가하는 것으로 확인할 수 있었다.

Fig. 8은 일률에 따른 마모 부피 변화율의 변화를 나타낸 것이다. 충격 프레팅 마모실험을 실행한 결과 상온 공기 중에서의 마모상수 $3.349 \times 10^{-15} Pa^{-1}$ 비해 90°C 수중 상태에서의 마모상수는 $9.051 \times 10^{-16} Pa^{-1}$ 로 더 작음을 확인할 수 있다. 그러

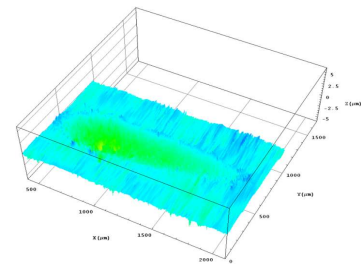


Work rate 120mW

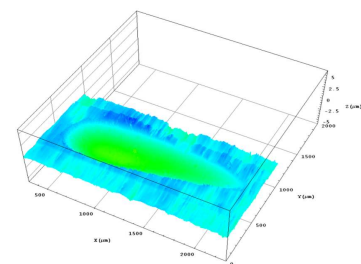


Work rate 200mW

Fig. 14 25°C, 0.101MPa, air environment



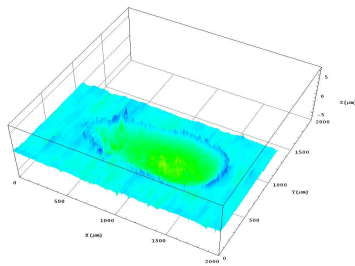
Work rate 120mW



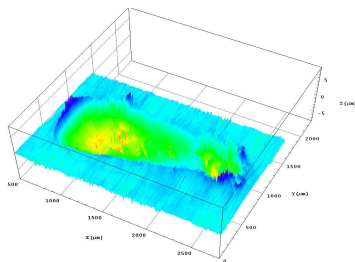
Work rate 200mW

Fig. 15 90°C, 0.101MPa, water environment

나 전술한 바와 같이 고온상태에서는 물의 점도가 급격히 감소하면서 마모량이 증가하여, Fig. 9에서와 같이 200°C 수중 상태의 마모상수는 $3.009 \times 10^{-15} Pa^{-1}$ 로 90°C 수중 상태에서의 마모상수보다 증가하였다. 340°C 수중에서는 마모상수가 $2.235 \times 10^{-15} Pa^{-1}$ 로 다소 감소됨을 확인할 수 있다. 이는 기타 문헌을 통해 인코넬 690의 특이한 성질임을 확인할 수 있다. 인코넬 합금의 온도에 따른

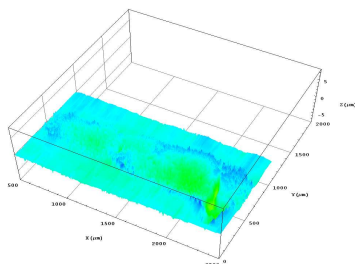


Work rate 120mW

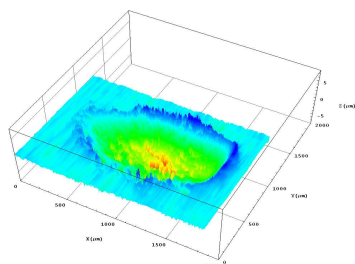


Work rate 200mW

Fig. 16 200°C, 5MPa, water environment



Work rate 120mW



Work rate 200mW

Fig. 17 340°C, 15MPa, water environment

마모영향은 온도에 따라 증가하다가 200°C 근처에서 다시 감소하는 것으로 알려져 있다.^(11,12)

Fig. 10~13은 광학식 현미경으로 관찰한 그림이며, Fig. 14~17은 비접촉식 표면 거칠기 측정 장치를 이용하여 3차원 형상을 측정하고 수치계산 프로그램을 이용하여 평면형상과 마모형상을 나타낸 것으로 역시 상온 공기 중에 비해 90°C 수중 상태에서의 마모량이 더 작게 나타나며

200°C 수중 상태에서 마모량이 증가하였다가 340°C 수중 상태에서는 200°C 수중보다 다소 작게 나타난다는 것을 알 수 있다.

5. 결론

시뮬레이션 장치 개발을 위해 상온환경 실험에서부터 고온고압의 실험을 수차례 반복하여 증기 발생기 내의 상황을 재현하고 발생가능성이 있는 문제를 해결 하였으며, 기초 실험을 통해 장치의 적절한 실험영역을 확인하였다.

(1) 상온(약 20°C) 공기 중과 90°C (0.101MPa), 200°C (5MPa), 340°C (15MPa) 수중 상태에서의 충격 프레팅 마모 실험을 수행하여 각각의 상태에서의 마모량과 일률의 관계를 구하였다.

(2) 저온 수중 상태에서의 마모상수는 상온 공기 중의 마모 상수 보다 더 작음을 확인하였다. 이는 물의 점도에 영향을 받는 것으로 사료된다.

(3) 수중 상태에서는 온도가 올라갈수록 마모 상수 값이 증가하는 경향을 보였다. 하지만, 200°C 이상에서 마모 상수 값이 더 이상 증가하지 않는 현상을 발견하였다.

참고문헌

- (1) Peter, J., Blau, et al., 1995, "Friction, Lubrication and Wear Technology," ASM Handbook, Vol. 18, pp. 242~270.
- (2) Eden, E.M., Rose, W.N. and Cunningham, F.L., 1911, "Endurance of Metals," Proc. Inst. Mech. Eng., Vol. 4, pp. 839~974.
- (3) Tomlinson, G.A., 1927, "The Rusting of Steel Surfaces in Strength," Proc. R. Soc., London, Vol. A115, pp. 472~483.
- (4) Waterhouse, R.B., 1972, "Fretting Corrosion," Pergamon, Oxford.
- (5) Vingsbo, O. and Söderberg, S., 1988, "Fretting Maps," Wear, Vol. 126, pp. 131.
- (6) Ko, P.L., 1979, "Experimental Studies of Tube Fretting in S/G and Heat Exchange," Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 101, pp. 125~133.
- (7) Fisher, N.J., Chow, A.B. and Weckwerth, M.K., 1995, "Experimental Fretting Wear Studies of Steam Generator Materials," Journal of Pressure

- Vessel Technology, Vol. 117, pp. 312~320.
- (8) Guerout, F.M., Fisher, N.J., Grandison D.A. and Weckwerth, M.K., 1996, "Effect of Temperature on Steam Generator Fretting Wear," ASME PVP, Vol. 328, pp. 233~246.
- (9) Waterhouse, R.B. and Lindley, T.C., 1994, "Fretting Fatigue," Mechanical Engineering Publications Limited, London.
- (10) de Gee, A.W.J., Commissaris, C.P.L. and Zaat, J.H., 1964, "The Wear of Sintered Aluminium Powder(SAP) under Directions of Vibrational Contact," *Wear*, Vol. 7, pp. 535~550.
- (11) Park, C.Y., 2005, "Development of Assessment Technologies for Mechanical Damages for Steam Generator Tubes," Ministry of Education, Science and Technology.
- (12) Hong, J.K., et al., 2001, "High Temperature Wear Behavior of Inconel 690 Steam Generator Tube," *Korean Society of Tribologist and Lubrication Engineers Conference*, Vol. 30, pp. 59~65.