2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

# 증기발생기 세관의 마모 특성 연구

# A Study on the Wear Properties of Steam Generator Tubes

홍 진 기, 김 인 섭, *김 형 남

한국과학기술원
대전광역시 유성구 구성동 373-1
*한국전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

## 요약

국내에서 사용되고 있는 증기발생기 각 세관 재질에 대하여 마모 시험을 수행하였다. 증기발생기 내부의 환경과 비슷한 환경에서 실험을 수행하기 위하여 고온/고압 마모 시험기를 설계, 제작하였다. 마모 시험기는 압력용기, 부하장치, 슬라이딩 마모 실험장치 및 회전 마모실험장치로 구성되어있다. 마모 시험 결과 Incoloy800 세관이 가장 우수한 내마모성을 보였으며, Inconel 600 합금의 내마모성이 가장 낮은 것으로 나타났다. 회전 마모계수는 모든 세관 재질에 대해서 슬라이딩에 비해 매우 크게 나타났다.

## ABSTRACT

Reciprocating sliding and rotating wear experiments have been performed for various steam generator tube materials to examine the wear properties of steam generator tubes. In Korea, the three tube materials(Inconel 600, 690 and Incoloy 800) have been used for steam generator tube. For present study, the test rig was designed to examine the reciprocating and rolling wear properties in high temperatures. The test rig consists of pressure vessel, electric heater, reciprocating, rotating and loading units. Tests were performed at constant applied load and sliding distance. The Incooly 800 has the best wear properties than other steam gnenerator tube materials. The wear coefficient of rotating wear was lager than that of sliding wear.

**Key words :** steam generator, Inconel 690, Inconel 600, Incoloy 800, high temperature,

reciprocating wear, rotating wear

## 1. 서론

원자력발전소의 매우 많은 구성요소 중 얇고 긴 형태의 구조물이 유체에 의한 진동에 노출되어 있다. 이중 특히 증기발생기는 원자력발전소의 열교환기 역할을 하며 고온/고압의 유체가 세관을 따라 이동함에 따라 매우 심한 진동에 노출되어 있으며, 설계 및 가동조건에 따라 얇고 긴 세관과 지지판사이의 틈이 존재하게 되므로 마모 및 고주기 피로에 취약하다. 이러한 마모의 위험은 세관에서만 일어날 뿐만 아니라 원자로 노심의 제어봉관 에서도 발생할 수 있다. 즉 원자력발전소의 내부는 항상 고온/고압의 유체에 의한 진동이 항상 존재하며 이에 대한 설계과정에서의 충분한 고려가 필요하다.

원자력발전소 증기발생기 세관은 고온 고압의 유체에 의한 진동으로 인해 세관과 세관 지지판 사이의 상대적인 운동에 의해 마모 및 마손, 그리고 피로 현상이 일어난다. 가동경험으로 볼 때 매우 많은 국내외 증기발생기에서 이러한 현상이 발생하여 원자력발전소의 가동률을 현저히 감소시키어 왔다.

증기발생기 내부는 그 형태에 따라 다소 차이는 있으나 고온/고압 환경 하에서 가동되고 있다. 또한 원자력발전소에서의 증기발생기 고유의 역할 수행으로 인해 내부는 매우 빠른 유체의 흐름이 일어나고 있다. 이에 따라 증기발생기 상부의 U-자관 영역과 세관 지지판에서 유체에 의한 진동이 발생한다 [1, 2].

마모는 접촉하고 있는 물체들의 주기적이고 반복적인 상호 운동에 의해서 발생하며 이러한 반복적인 상호 운동의 결과로 물체의 표면 손실 및 손상으로 정의 된다. 증기발생기 내부의 세관과 세관 지지판 사이의 마모 현상은 일반적인 슬라이딩 마모와는 접촉 물체의 상대적 운동 변위의 크기에 의해서 구분되는 프레팅 마모이며, 슬라이딩과 충격 두 종류의 운동이 모두 일어나는 충격프레팅 마모이다. [3]

최근, 증기발생기 2 차 측에 내부 구조물 파손 및 작업자의 부주의 등으로 인하여 유입된 금속성 물질(이하 잔류물질)과 증기 발생기 내부의 유체흐름으로 인한 유체 유발 진동으로 인하여 세관과 지지구조물 사이에서 충격 및 미끄럼 마모를 일으켜 세관의 건전성을 위협하는 현상이 빈번히 발생하고 있다. 이러한 잔류물질에 의한 세관의 마모현상은 기존의 세관과 세관 지지대의 마모와는 달리 이물질의 형상 및 재질의 파악이 어려울 뿐만 아니라 그 진동형태 역시 제대로 확인되지 않고 있다. 또한 회전 마모 및 일반적인 세관과 세관 지지판 사이에서 발생하는 마모에 비해 큰 변위를 가지는 슬라이딩 마모가 일어나는 것으로 알려지고 있다. 따라서 본 연구에서는 세관의 건전성을 평가 및 확인하기 위해 필요한 증기발생기 내 이물질 마모에 대한 기본적인 자료를 산출하기 위하여 증기발생기 가동환경에서 슬라이딩 및 회전 마모실험을 수행하였다.

## 2. 실험 방법 및 절차

### 2.1 시편 준비

본 연구에서 사용한 시편은 현재 국내 가압경수로형 원자력발전소 증기발생기 세관으로 사용되는 인코넬(Inconel) 600, 690 합금과 가압중수로형에서 사용되는 인코로이(Incoloy) 800합금을 이용하였다. 본 실험에서는 실제 증기발생기 세관으로 사용되는 시편을 두산중공업으로부터 공급 받아 사용 하였다.

인코넬 600과 690합금은 다량의 Cr을 포함하고 있는 Ni 기지 합금이며 690합금의 경우 30wt% 이상의 Cr 함량을 600합금의 경우 약 15wt%의 Cr을 포함하고 있다. 인코로이 800은 Ni과 Cr을 다량 함유한 Fe 기지 합금이다.

### 2.2 고온/고압 마모시험 실험장치

본 연구를 위하여 고온/고압 마모실험 장치를 설계 제작 하였으며 그림 1에 기본적인 모습을 나타내었다. 고온/고압 마모실험 장치는 회전 마모를 모사하기 위한 회전 운동과 미끄럼 마모를 모사하기 위한 수평왕복 운동이 각각 이루어진다. 회전, 수평왕복 운동 모두 AC모터를 사용하여 구동이 이루어지며, 두 개의 운동장치 모두 압력용기의 측면에 부착되어 있다. 압력용기의 측면에 부착된 히터에 의한 운동장치의 온도 상승을 막기 위해 각각 별도의 냉각 루프가 부착되어 있다. 회전 및 미끄럼 실험장치는 항상 압력용기의 측면에 장착되어 있으며, 회전에서 미끄럼, 미끄럼에서 회전과 같은 실험 모드(mode) 변경 시에는 압력용기 내부의 시험대와 회전 및 미끄럼 실험장치에 부착된 시편 고정대를 변환하여 변경이 가능하다. 또한 부하장치 및 슬라이딩 장치에는 부하 및 변위 측정을 위하여  로드셀(load cell)과 스트레인 게이지(strain gauge)를 장착하였다.

압력용기내의 시편 설치는 슬라이딩 및 회전 마모 시편과 부하시편은 90°로 접촉하고 있다.

### 2.3 실험 변수 및 실험 방법

모든 실험은 국내 증기발생기 가동온도인 290°C, 15Mpa 정도의 압력에서 수행되었다. 실험에 사용 되어진 물은 실험실에서 제조한 증류수를 이용하였다.

본 연구에서는 증기발생기 세관 시편과 세관 시편 사이의 슬라이딩 마모 시험과 회전 마모 시험을 수행하였으며, 모든 실험은 동종재질을 사용하였다. 슬라이딩 마모 시험의 경우, 변위 1200μm, 하중은 10,20,30N, 왕복운동은 30Hz의 속도로 수행되었다. 회전 마모 시험의 경우 슬라이딩 마모시험과 동일한 시편 조합으로 600rpm의 속도로 회전시편이 회전 하였다.

마모량의 측정은 실험 전과 후 측정한 시편의 질량과 각 시편 재질의 밀도를 이용하여 계산하였으며, 실험 전후의 시편의 질량측정은 초음파 세척기로 세척한 후 건조 과정을 거쳤다. 각 시편의 질량은 0.1mg 까지 측정이 가능한 미세저울을 사용하여 12회 측정 후 최대 값과 최소값을 배제한 후 평균값을 사용하였다.

### 2.4 일률 모델(Work Rate Model. Modified Achard's Equation) 적용

본 연구에서는 증기발생기 세관의 마모 손상 예측에 가장 많이 사용되고 있는 모델인 일률 모델을 이용하여 각 세관의 마모량 비교 및 수명 예측을 수행하였다.
Archard의 슬라이딩 마모에 대한 식은 마모 부피 V가 수직 하중 F와 총 미끄럼 변위 S의 곱에 비례하고 경도 H에 반비례하는 것으로 나타내어진다.

$$V = k\frac{FS}{3H} \quad (1)$$

여기서 k는 무차원 마모 계수라 불리워지며 재료의 마모 성질과 밀접한 관계를 가진다. 그리고 3은 일종의 형상 계수(Shape Factor)이다. 이러한 Archard[4] 마모식은 응착(Adhesion)에 의한 마모를 고려하여 성립되었으며 기존의 미끄럼 마모의 경우에는 적용이 가능하나 원자력발전소 증기발생기 마모에는 잘 적용되지 않는다는 것이 밝혀졌다. 또한 경도가 높은 재질의 마모 성질이 우수하다는 것은 모든 재질에 적용되는 것이 아니다. 이에 Frick[5] 등에 의해서 개발된 Work-Rate 모델의 경우에는 재료의 물성 요소인 경도를 무차원 마모 계수 K에 포함 시켰으며 일률 개념을 도입하여 새로운 모델을 개발하였다.

$$\dot{W} = \frac{1}{t}\int Fds \quad (2)$$

$$\dot{V} = K\dot{W} \quad (3)$$

## 3. 실험 결과 및 고찰

국내 원전 증기발생기 세관으로 사용되는 각 재료들에 대해 마모 실험을 수행하였다. 실험은 증기발생기 조건인 290°C 물 분위기에서 수행되었으며, 실험 시 압력용기 내부 압력은 100MPa 정도였다.

### 3.1 슬라이딩마모와 회전마모

Inconel 690합금의 고온 마모계수를 그림 2에 나타내었다. 회전 마모실험의 마모계수가 슬라이딩 마모실험 시의 마모계수 보다 약 5배정도 큰 값을 보였다. 또한 Inconel 600 합금의 경우 약 4배의 증가(그림 3), Incoloy 800 합금의 경우 15배(그림 4)의 매우 큰 값을 나타내었다.  회전 마모시의 이러한 마모계수 값의 증가는 슬라이딩 마모의 경우 실험 시 변위가 1200μm로 정해져 있는데 비해 회전 마모의 경우 변위가 매우 크기 때문인 것으로 보인다.
증기발생기 내부의 환경은 평균 290°C의 가압된 물이 존재하며, 세관의 재질은 세관의 부식으로 인한 파손을 막기 위해 산화피막의 생성 속도가 매우 빠른 니켈과 크롬의 함량이 매우 큰 합금이 사용되고 있다. 이러한 산화피막은 일반적으로 금속 재질에 비해 큰 경도를 가지며, 합금 사이의 직접적인 접촉을 막아 마모량의 감소 시키는 것으로 알려져 있다. 또

한 마모면에 마모 시 생성되는 마모 입자층 역시 마모량을 감소 시키는 역할을 한다. 그림 5에 슬라이딩 마모 시에 생성되는 마모 입자층을 나타내었다.
슬라이딩 마모 시에는 회전 마모와 비교하여 상대적으로 작은 변위와 작은 진동수에 의해 마모 입자층의 생성 및 산화피막의 생성이 회전 마모에 비해 쉬울 것으로 판단되며, 마모면에 생성된 마모 입자층이 마모량의 감소에 영향을 미쳤을 것으로 생각된다. 또한 회전 마모 시에 발생하는 마모 입자의 쉬운 배출 역시 마모 입자층의 생성을 방해하여 마모량의 증가에 역할을 하였으며, 마모 면으로부터 떨어져 나온 마모 입자들은 마모면 사이에 존재하여 연삭마모 기구에 의한 마모를 일으켜 마모량을 증가시킨 것으로 판단된다.
위의 실험결과로 보아 세관의 마모는 증기발생기 내부의 잔류 물질이 세관 외부의 유체 흐름에 의해서 회전 운동을 하는 경우 더 커질 것으로 판단 된다.

### 3.2 증기발생기 세관의 마모계수

본 연구의 마모 실험에 사용된 시편은 국내 원전의 증기발생기 세관으로 사용되는 Inconel 690, 600 및 Incoloy 800 재질이다. Inconel 합금의 경우 니켈 기지 합금이며, Incoloy 800 시편의 경우 철 기지 합금이다.
마모 실험 결과 슬라이딩 마모와 회전 마모 계수 모두 Incoloy 800 합금이 가장 작은 값을 나타내었으며, Inconel 690 합금이 Inconel 600 합금에 비해 작은 마모계수를 가지는 것으로 판명되었다.
세관 재질에 따라 서로 다른 마모계수를 가지는 원인은 크게 미세경도, 인장 성질 등 재료의 기계적 성질 차이, 또는 세관 표면을 덮고 있는 산화피막의 성질차이와 마모표면에서 생성되는 마모 입자층의 생성여부 등으로 알려져 있다. 특히 마모 시 발생되는 마모표면의 가공경화(work hardening)은 재료 표면의 경도를 변화시킴으로써 마모 성질에 영향을 미치며, 이러한 표면의 경도는 재료의 조성에 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 이영호 [6]등의 논문에 따르면 Inconel 600 과 Inconel 690 합금의 마모 성질 차이는 이러한 마모면의 가공경화에 따른 경도의 차이에 의해서 발생되는 것으로 보고되었다. 그리고 마모면에 생성된 마모 입자층은 실험 환경 특히 온도에 의해서 많은 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 홍진기[7]등의 논문에 의하면 Inconel 690합금과 Incoloy 800 합금은 마모면 분석 결과 표면의 산소농도 및 조성이 다른 것을 확인하였으며 이러한 마모면 조성의 차이에 의해서 마모량의 차이가 발생하는 것으로 보고되었다.
따라서 본 연구에서 사용된 세관 재질에 따른 마모 계수 값의 차이는 세관의 기계적 성질과 세관의 표면을 덮고 있는 산화피막의 성질 등에 의해 영향을 받은 것으로 판단되며, 산화피막 및 기계적 성질이 세관의 마모에 미치는 영향에 대한 연구가 수행되어야 할것으로 보인다.

## 4. 결론

국내에서 사용되고 있는 증기발생기 세관 각 재질에 대한 슬라이딩 및 회전 마모시험 결과

Incoloy 800 합금의 내마모성이 가장 우수한 것으로 확인되었으며, Inconel 600합금에 비해 Inconel 690합금의 내마모성이 더욱 우수한 것으로 확인되었다. 이러한 세관 재질에 따른 마모 성질의 차이는 기계적 성질 및 표면의 산화막에 의해 유발된것으로 판단된다. 회전 마모계수가 슬라이딩 마모계수에 비해 작게는 4배 크게는 15배까지 큰 것으로 확인되었다. 마모 모드(회전, 슬라이딩)에 따른 마모계수의 차이는 마모기구(wear mechanism)의 차이에서 기인하는 것으로 보인다.

References

[1] P. L. Ko, Journal of Tribology, 107 (1985) 149-156.

[2] C. E. Taylor, M. J. Pettigrew, T. J. Dickinson, I. G.. Currie P., Vidalou, Journal of Pressure Vessel Technology, 120 (1998) 283-289.

[3] O. Vingsbo, S. Soderberg, Wear of Materials, 2 (1987) 885-894

[4] P. L. Ko, Journal of Pressure Vessel Technology, 101 (1979) 125-133.

[5] T. M. Frick, T. E. Sobeck, Reavis J. R., Symposium on Flow induced vibration, ASME Special Publication, 3 (1984) 149-161.

[6] Young-Ho Lee, In-Sup Kim, Sung-Sik Kang and Hae-Dong Jung, Wear, 250 (2001 ), 718-725.

[7] Jin-Ki Hong and In-Sup Kim, Wear, 255 (2003), 1174-1182.

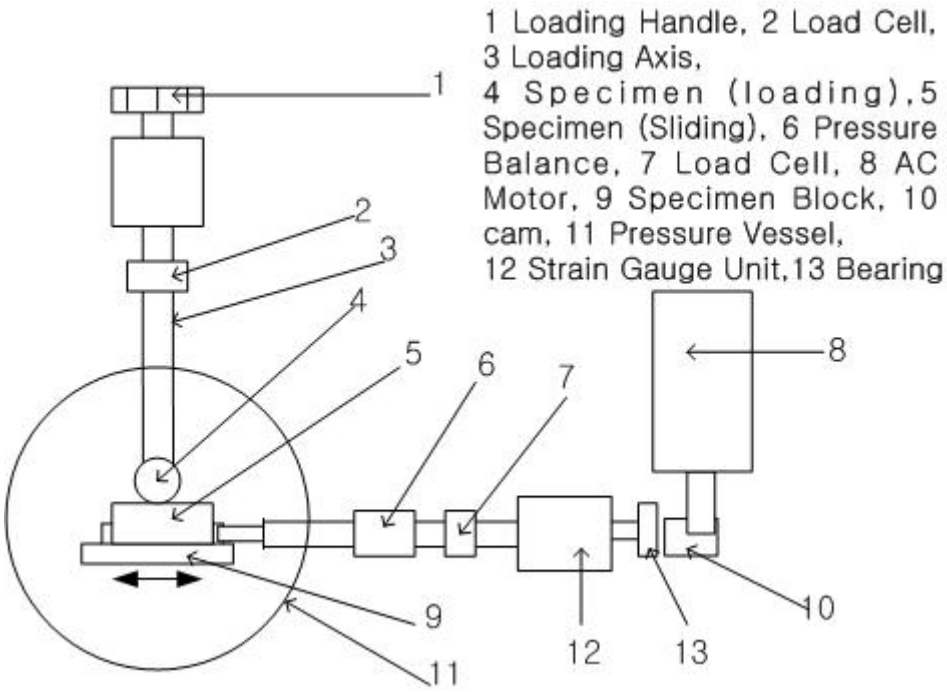
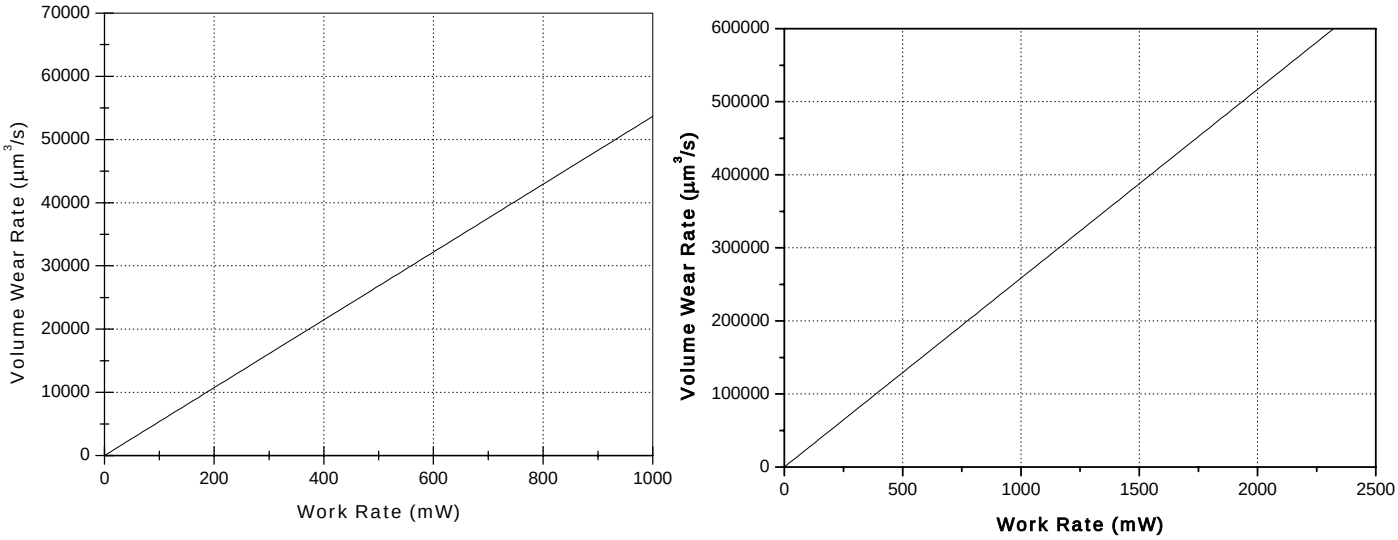
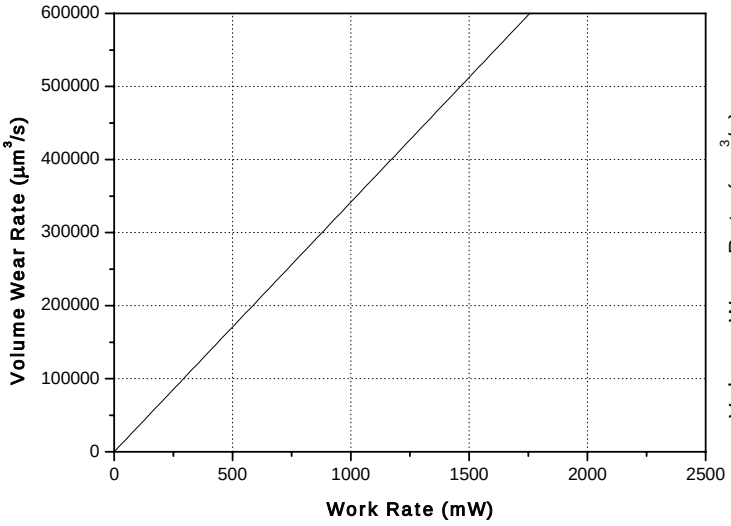


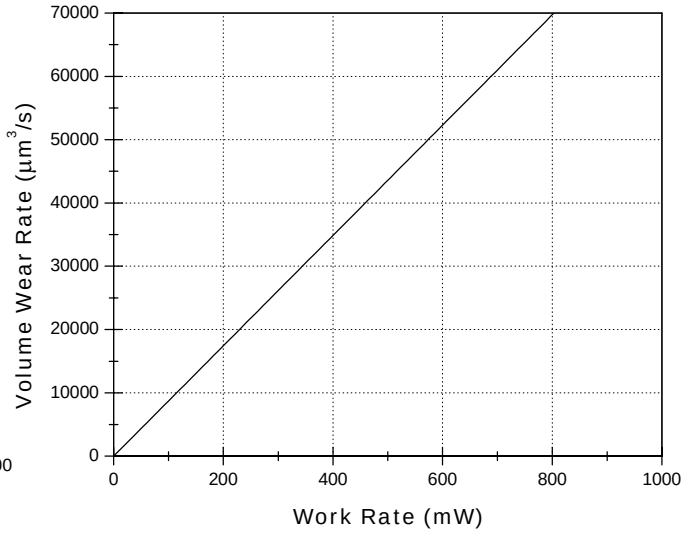

그림 1. 고온/고압 마모실험장치




(a) (b)

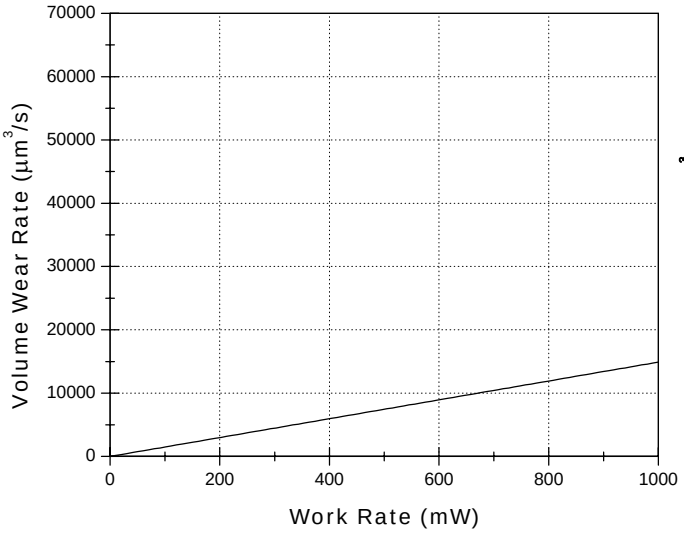
그림 2. Inconel 690의 마모계수 (a) 슬라이딩 마모계수 (b) 회전 마모계수

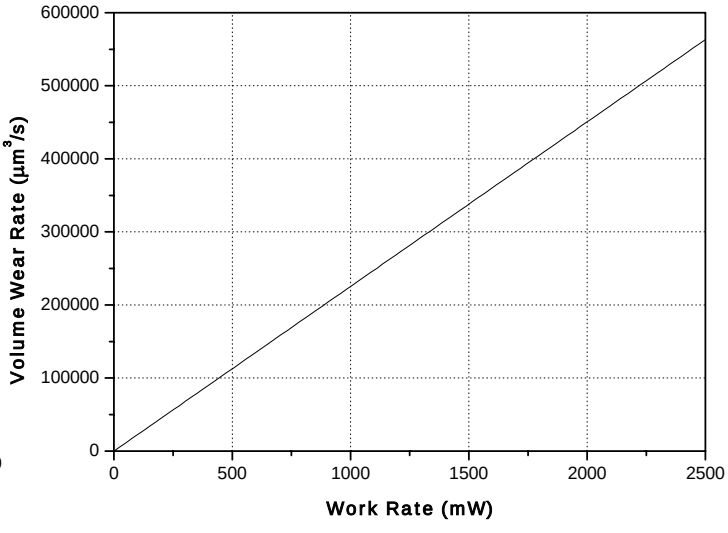



(a) (b)

그림 3. Inconel 600의 마모계수 (a) 슬라이딩 마모계수 (b) 회전 마모계수




(a) (b)

그림 4. Incoloy 800의 마모계수 (a) 슬라이딩 마모계수 (b) 회전 마모계수


그림 5. 마모 실험 후의 마모면