

# 인코넬 690 튜브의 프레팅 마모에 관한 실험적 연구

김도형 · 김우석 · 배용탁 · 황 평\* · 채영석\*  
영남대학교 기계공학부 대학원, \*영남대학교 기계공학부

## Experimental Study for Fretting Wear Characteristics of Inconel 690 Tube

Do Hyung Kim, Woo Seok Kim, Yong Tak Bae,  
Pyung Hwang\* and Young Suk Chai\*

Graduate School, Yeungnam University, Gyongsan 712-749, Korea  
School of Mechanical Engineering, Yeungnam University, Gyongsan 712-749, Korea

Abstract- Fretting Wear Behavior and Characteristics were investigated with Inconel 690 tube which is used in Nuclear Power Plant. Fretting Wear Tester has been engaged in the study of characteristics on tube fretted induced to various factors, i.e. vibration amplitude, contact type, material properties, load support geometry, environmental effect. Test has been performed in air and at room temperature. Wear volume rate has been approximately estimated as a function of normal load.

### 1. 서론

기계 및 구조물의 파손 사고의 대부분이 그것을 구성하고 있는 부재의 피로가 원인이 되어 일어난다는 사실은 일반적으로 잘 알려져 있는 사실이다. 고온 피로, 부식 피로, 프레팅을 포함한 피로에 의한 기계 구조물의 파손사례는 기계파괴의 중요한 부분을 차지하고 있으며, 피로 파손에 대해서는 오랜 기간을 통한 연구가 활발히 진행되고 있으나 이에 비하여 프레팅 마모 및 피로에 대한 연구는 많이 진행되어 있지 않다.

프레팅(fretting)의 정의는 ASM에 따르면 접촉하고 있는 두 고체의 표면사이의 작

은 진폭, 즉 일반적으로  $100\mu\text{m}$ 이하로 진동하는 움직임으로 정의되고있다(1).

Eden, Rose, 그리고 Cunningham에 의하여 처음으로 프레팅에 대한 보고(2)가 있던 이후로 연구는 적어도 80년 이상의 관심 분야가 되었으며, Waterhouse의 저서에서는 프레팅을 Fretting wear, fretting fatigue, fretting corrosion과 같이 명백하게 세 가지로 구분하고 있다.(3,4) 그러나 프레팅에 관한 연구는 피로나 기타 마모 이론에 비하여 그 중요성이 낮게 인식되었으며, 일반적으로 프레팅 마모(fretting wear)는 재료손실의 마모 문제로, 프레팅 피로(fretting fatigue)는 크랙

의 문제로 여겨졌다(5). 엄격하게 이야기해서 프레팅 피로가 두 접촉면 사이에서 발생하는 반복하중에 의한 표면의 움직임이라면, 프레팅 마모는 외부진동(Oscillation)에 의하여 발생하는 표면의 움직임으로 인한 마모라고 할 수 있다.

기계요소에서의 프레팅 마모에 관하여 살펴보면 진동이 프레팅을 일으키는 주된 원인이므로 많은 접촉면을 가지고 있는 기계류에서 프레팅에 관한 연구는 필수적이다. Hubs, shrink, press-fits, 베어링 하우징 등 모든 기계요소에서 진동의 영향으로 프레팅 현상이 발생한다.

국내에서는 Kim(10) 등에 의하여 원자력 발전소 경수로 배관 재료인 지르칼로이-4의 프레팅 마모에 관한 연구가 실시되었다.

본 연구에서는 원자력 발전소에서 사용되는 인코넬 690 튜브로 실린더/실린더 마모 접촉을 기본으로 하여 프레팅 마모 실험을 수행하였다.

프레팅 마모에 영향을 주는 여러 인자 즉, 미소진동, 하중, 접촉조건, 환경조건, 표면 거칠기 등이 프레팅 마모에 어떻게 영향을 미치는가를 파악하고 이를 통해서 실험장치의 설계 및 제작에 적용하고, 궁극적으로는 프레팅 마모기구의 분석 및 실험 조건에 따른 프레팅 마모현상 및 마모량의 정량적 측정 등을 하고자한다.

## 2. 실험방법

### 2-1. Fretting Wear Test

프레팅 마모의 정의는  $100\mu\text{m}$ 이내의 변위를 가지는 미소 진동(Oscillation)으로 인한 두 재료간의 마모 형태를 일컫는다. 따라서 이러한 조건에 적합한 프레팅 실험장치를 자체 설계, 제작하였다.

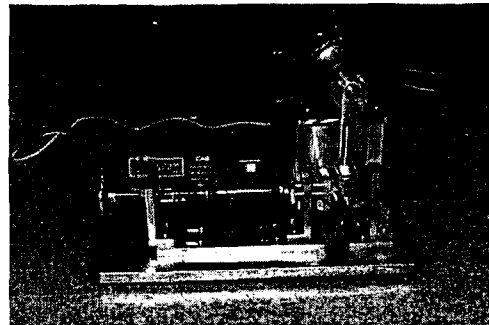


Fig. 1 프레팅 마모 시험장치

실험 장치는 Fig. 1에서 보는 것과 같이 가진기로 사용된 모터(0.75Kw)의 회전으로부터 변위를 얻어내기 위하여 일정량의 편심을 조절할 수 있도록 설계하였으며 모터의 회전에 의하여 상하 변위가 발생하도록 하였다. 또한, 시편의 원활한 상하 왕복 운동을 위하여 직선베어링을 시편의 고정부에 설치하였다. 시편의 상하 변위를 측정하기 위하여 변위 센서- 190 PROXIMITOR, Probe 직경 4.83 mm, Scale factor 8V/mm - 를 부착하여 일정한 변위의 진단이 가능하도록 하였다. 실험을 위하여 변위는 약  $100\mu\text{m}$ 로 조정해서 프레팅 마모의 조건에 맞도록 고정을 해 놓았다. 하중 조건에 따른 마모량의 변화를 살피기 위하여 로드셀(CAS CT-100L)을 이용하여 시편에 가해지는 하중의 크기를 조정하였다. 로드셀로부터 나온 하중은 디지털 인디케이터(CAS-CI 1010A)를 통하여 조절되며 이때 마모량 만큼의 하중을 보완해주기 위하여 로드셀 후반부에는 반발 스프링을 사용하여 항상 일정한 하중이 시편에 가해지도록 실험을 실시하였다. 그림1은 프레팅 마모시험 장치의 제작도를 나타낸 것이다.

일반적인 프레팅 마모장치 시편부의 기하학적 형상은 Fig. 2에서 나타난것과 같다.

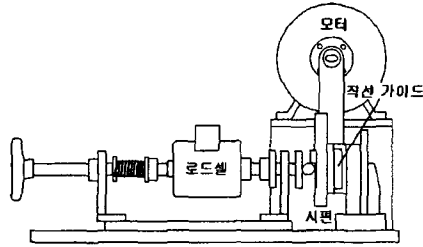


Fig. 2 프레팅 마모시험 장치 개략도

이 실험은 원통형 시편과 원통형 시편의 접촉으로 선 접촉이 일어나는 조건에서 실험이 실시되었다. 일반적으로 하중이 가해지는 시편은 고정되어 있으며 상대편의 시편이 일정량의 상하 운동을 하여 미소 마모를 일으키게 된다. 원자력 발전소에서 위험요소로 작용하는 것으로 관의 접촉부에서 유체의 흐름에 의한 진동으로 관 접촉부에 장기간의 빈번한 접촉이 발생하며 이는 프레팅 마모의 주된 원인으로 사고를 유발시킬 수 있다.

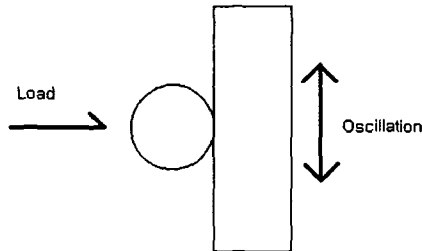


Fig. 3 실린더/실린더 접촉기구

Fig. 3은 본 실험에서 이용된 접촉기구인 실린더/실린더 접촉의 마모기구를 보여준다. 수직으로 된 실린더가  $100\mu\text{m}$ 으로 미소진동을 함으로써 수평으로 된 실린더에 접촉을 일으키게 되며 왼쪽에서 하중을 가하게 되어 있다.

Fig. 4은 비접촉 변위 센서로 실험 적용된 진동 변위를 측정된 결과를 보여주는 것으로 디지털 오실로스코프(Tektronix

TDS 3012)로부터 얻어낸 신호로 약  $100\mu\text{m}$ 의 변위를 나타내고 있다. 로드셀을 통하여 하중의 변화에 따른 시편의 마모량을 측정하기 위하여 본 실험에서는 각각 50N, 100N, 150N의 하중을 가하여 실험을 실시하였다. 각각의 하중 조건에 따라 180분간의 실험을 실시하였다. 즉 1130rpm 속도의 모터로 각 하중에 따라서  $122.04 \times 10^5$  cycle의 왕복운동을 주었다.

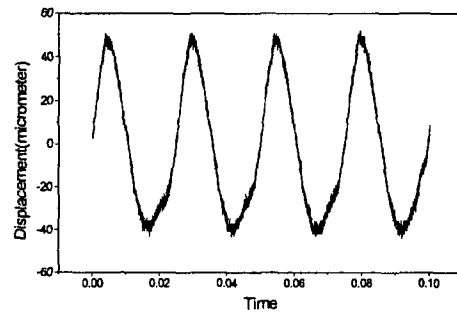


Fig. 4 비접촉 변위센서로 측정된 파형

## 2-2. 인코넬 690의 화학적 조성 및 기계적 물성치

Inconel 690은 고온에서의 심한 부식성 분위기에 사용하는 표준 합금이다. Table 1에서 보는 것과 같이 Ni, Cr, Fe이 약 60, 30, 9%를 차지하며 미소량의 Ti, Mn, Si, Co, Mo 등의 화학적 성분으로 이루어져 있다. Inconel 690의 기계적 물성치는 Table 2에서 보는 것과 같다.[9] 이 합금은 높은 부식 저항과 내 용접 크랙에 관한 강도를 가지고 있으며 높은 크립-파열 강도를 가지고 있다. 주로 가스터빈, 로켓 모터, 우주선, 핵발전소 및 펌프의 재료로 사용되고 있다.

Table 1 Chemical composition of Inconel 690

Ni	Cr	Fe	Al	Ti	Mn	Si	Co	Mo
59.84	29.97	9.1	0.34	0.33	0.19	0.18	0.01	0.01

Table 2 Mechanical Properties of Inconel 690

Micro hardness (Vickers)	Yield Strength (MPa)	Ultimate Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
186.7	350.2	700.5	51

### 2-3. 마모량의 추정 (Estimation of Wear Volume Rate)

Suh(1986)의 설명에 의하면 Archard의 미끄럼 마모에 대한 방정식에서 마모량(wear volume)은 수직 하중(F)와 미끄럼 길이(S)의 곱에 선형적으로 비례하고 재료의 경도(H)에 반비례한다. 따라서

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

여기서 비례상수  $k$ 는 무차원 마모 계수라고 하며, 이상적인 재료의 조합이나 환경에 대한 상수를 나타낸다고 본다.

Baker(1997)는 Rabinowicz 마모 계수를 계산하여 이용하였는데 그 식은 다음과 같다.

$$k_R = \frac{H W_R}{d_s l} \quad (2)$$

여기서  $H$ 는 경도,  $W_R$ 은 마모량,  $D_s$ 는 전체 미끄럼 변위,  $l$ 은 하중을 나타낸다.

프레팅 마모량(Fretting wear volume)은 E. Marui(1998)등에 의해 보고된바 있는 마모량을 기본식으로 하였다.

$$V_f = \frac{\pi d}{6} (3r^2 + d^2) \quad (3)$$

여기서  $d$ 는 마모형상 깊이,  $r$ 은 평균 마모형상 반경이다. 표면 조도로부터 구면 시편의 마모형상 깊이를 측정한다는 것은 매우 힘들고 따라서 마모형상 표면의 곡률 반경은 다음에서 나오는 식에 의해서 계산되어지는 구면의 반경과 마모형상 깊이로서 대략적으로 추정할 수 있다.

$$d = R - \sqrt{R^2 - r^2} \quad (4)$$

여기서  $R$ 은 시편의 구면반경,  $r$ 은 평균 마모형상 반경이다.

따라서 대략적인 프레팅 마모량은 (4)식에서 구한 마모형상 깊이를 (3)식에 넣어 계산함으로써 구해낼 수 있다.

## 3. 실험결과

### 3-1 마모형상 관찰

프레팅 마모가 발생한 후의 형상을 관찰하기 위하여 SEM사진을 촬영하였다. Fig. 5는 50N의 하중을 가했을 때 나타나는 인코넬 690튜브의 마모형상이다. Fig. 6은 100N, Fig. 7은 150N을 각각 가했을 때 발생한 마모형상을 SEM사진으로 보여준다. 100N과 150N일 때는 형상이 도넛 모양으로 나타났고, 50N을 가했을 때는 완전한 도넛 형태는 만들어지지 않았는데 이것은 접촉하는 하중이 100N, 150N에 비해서 낮은 까닭으로 완전한 원모양으로 접촉이 이루어지지 않고 몇 군데에 걸쳐 눌러면서 진동 변위 만큼 생겨난 국소 마모형태로 보여진다.

Fig. 6은 100N의 하중을 주었을 때 나타난 마모 형상으로 진동 변위(약 100 $\mu$ m)만큼의 띠를 가진 도넛 형상으로 마모가 일어났다. 원의 직경이 50N때 보다 훨씬 넓어진 것을 볼 수 있으며, 약 500 $\mu$ m정도의 마모 직경을 나타내었다. 도넛 모양의 마모된 띠의 폭은 역시 약 100 $\mu$ m으로 발생하였다. Fig. 7는 150N을 주었을 때의 형상으로 원의 직경이 더 커져서 약 800 $\mu$ m정도가 되었으며 Fig. 8은 Fig. 7의 마모된 띠 모양 부분을 확대한 것으로 마모입자(Debris)에 의한 Abrasive 마모의 양상도 발견되었다. 따라서, SEM사진으로 본 결과는 프레팅 마모는 Adhesive 마모와 Abrasive 마모의 두가지 마모기구의 양상이 모두 발견된 것을 볼 수 있다.

Fig. 9에서는 마모율이 하중에 따라 증가하는 것을 보여주는데 50N일때는 극히 마모가 일어나지 않았고, 100N에서부터 도넛 형태의 마모가 생기기 시작하고 100N이상이 되면서부터는 마모량이 급격히 증가하는 것을 볼 수 있었다. 따라서 마모량은 하중에 직접적으로 영향을 미친다고 할 수 있다.

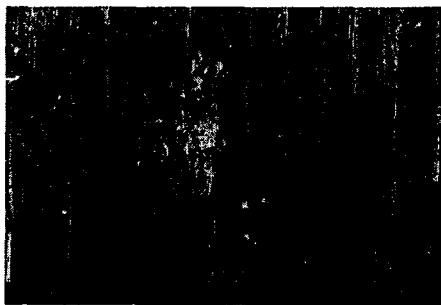


Fig. 5 변위 100 $\mu$ m, 하중 50N 에서 마모된 상태의 SEM 사진



Fig. 6 변위 100 $\mu$ m, 하중 100N에서 마모된 상태의 SEM 사진

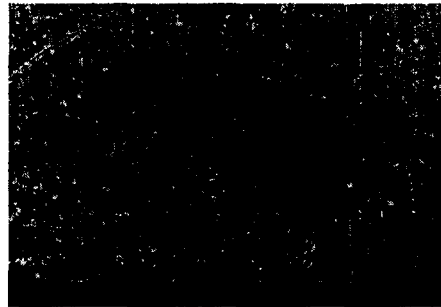


Fig. 7 변위 100 $\mu$ m, 하중 150N에서 마모된 상태의 SEM 사진

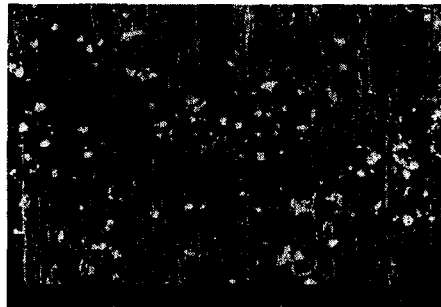


Fig. 8 변위 100 $\mu$ m, 하중 150N에서 마모된 도넛 띠 부분의 확대 SEM 사진

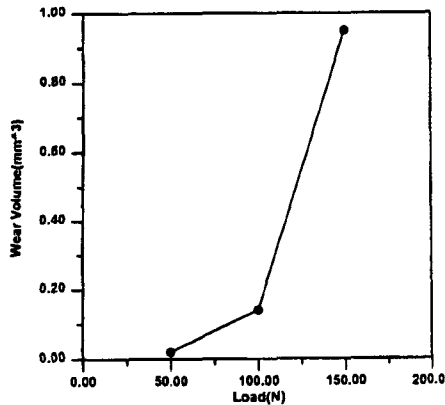


Fig. 9 하중에 따른 마모량 변화 곡선 (변위 100 $\mu$ m)

#### 4. 결론

본 연구에서는 원자력 발전소에서 사용되는 인코넬 690 튜브를 사용하여 마모 이론을 바탕으로 프레팅 마모 기초 실험을 수행하였다.

1. 미소 진폭 100 $\mu$ m에서의 Inconel 690 튜브의 프레팅 마모실험에서 주어진 하중 100N이상에서부터 도넛 형태의 마모형상이 발견되었고, 띠의 너비는 변위의 진폭으로 나타났다. 또한 하중이 50N이하일때는 거의 마모가 일어나지 않고 150N이상에서부터 마모량이 급격히 증가하는 것을 볼수 있었다.

2. 본 실험에 나타난 프레팅 마모 기구는 주로 표면이 고온에서 미끄럼 접촉으로 인해 용착되어 생기는 Adhesive 마모이고 부분적으로 입자(Debris)에 의해 표면에 손상을 주는 Abrasive 마모 현상도 관찰되었다.

3. 앞으로 수행해야할 과제는 본 실험의 결과를 바탕으로 미소 변위, 접촉 형태, 환경 변수 등 다양한 실험 조건으로부터 프레팅 마모의 전반적인 이론 정립을 위한 연구를

수행 할 것이다.

#### 4. 참고문헌

1. Waterhouse R.B., *Friction, Lubrication and Wear Technology*, P.J. Blau, volume chairman, ASM handbook, Vol.18, ASM Int'l, Edit pp242-256
2. E.M. Eden, W.N. Rose, and F.L. Chunningham, *Endurance of Metals, Proc. Inst. Mech. Eng.*, Vol 4, 1911, pp839-974
3. Waterhouse R.B., *Fretting-corrosion*, pergamon, Oxford, 1972
4. Waterhouse R.B., *Fretting-fatigue*, Applied Science, London, 1981
5. Z.R. Zhou, L. Vincent., "Cracking induced by fretting of aluminium alloys," *Transaction of the ASME*, Vol. 119, Jan. 1997 pp. 36-42
6. G.A. Tomlinsion, "The Rusting of Steel Surfaces in Contact," *Proc. R. soc. (London)A*, Vol A115, 1927, p472-483
7. F.P. Bowden, D. Tabor, "The friction and lubrication of solids," Oxford University Press, 1950, p19
8. I.M. Peng, H.H. Uhlig, "Fretting Corrosion of Mild Steel in Air and Nitrogen," *J. Appl. Mech.*, Vol 21, 1954, pp395-400
9. H.B. Park, Y.H. KIM, B.W. Lee and K.S. Rheem, "Effect of heat treatment on fatigue crack growth rate of Inconel 690 and Inconel 600" *Journal of Nuclear Materials*, 231, pp. 204- 212 1996
10. 조 광희, 김 석삼, "지르칼로이-4 튜브 프레팅 마멸 특성의 환경의존성과 마멸기구" *Journal of KSTLE*, Vol.15, No.1 1999, pp.83-89