

# 지르칼로이-인코넬 접촉에서의 프레팅 손상 평가 Fretting Damage Evaluation of Zircaloy-Inconel Contact

김태형<sup>\*</sup>, 김석삼<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup> 경북대학교 기계공학과 대학원

<sup>\*\*</sup> 경북대학교 기계공학부

## Abstract

The fretting damage of the contact between Zircaloy-4 and Inconel 600 have investigated. A fretting wear tester was designed to be suitable for this fretting test. In this study, the number of cycles, slip amplitude and normal load were selected as main factors of fretting wear. As the result of this research the wear volume increased with the increase of loads, slip amplitudes and the number of cycles and was more affected by slip amplitudes rather than by load. According to SEM, stick, partial slip, gross slip were observed on the surface of both specimens and wavy worn surfaces as the typical fretting damage were also investigated due to accumulation of plastic flow.

**Keywords** : Fretting, Wear volume, Specific wear rate, Partial slip

## 1. 서 론

일반적으로 프레팅은 수백  $\mu\text{m}$ 이내의 미소한 거리를 상대운동하는 재료들의 접촉계면에서 발생하는 표면손상을 말한다.[1,2] 그런데, 프레팅이 발생하는 거의 모든 상황은 설계시에는 예상하지 못한 우발적인 미세진동이나 응력변동에 의한 것이므로 과학의 급격한 발전과 더불어 높은 정밀도가 요구되는 기계 및 구조물에서는 이러한 예기치 못한 손상이 반복되어 치명적인 결과를 초래할 수 있다.

에너지의 고효율화와 안정적 공급을 위해 시도되었던 원자력 발전소에서 1970년대로 접어들면서 많은 문제점들이 발생하기 시작하여 여기에 대한 집중적인 연구가 진행되었는데, 그 중 하나의 큰 과제가 프레팅 현상이었다. 원자력 발전소의 원자로 및 열교환기 내에는 고온·고압의 유체의 흐름으로 말미암아 설계시에는 예상하지 못한 진동이 튜

브 시스템에 발생하고 그러한 진동으로 인해 프레팅 손상이 관측되었다. 여기에 대해서는 현재까지도 일반적인 해결책을 찾기 위한 많은 연구가 집중되고 있다.

국내에서는 고리 1호기가 가동된 1978년부터 1996년 9월까지 11기의 원자로에서 모두 288회의 고장이 발생한 것으로 알려져 있다. 그러한 사고의 대부분은 크게 두 가지 원인을 나누어 볼 수 있다.

첫째는 증기발생기 내에서 1차계통 냉각수의 흐름에 의한 증기발생기 튜브의 미세진동으로 인해 발생하는 튜브지지격자와 튜브사이의 충격과 미끄럼 운동에 의한 튜브의 손상이다.[3-6]

둘째는 원자로 내에서 핵연료봉과 지지격자 사이에서 발생하는 미세진동에 의한 핵연료봉 피복재의 손상이다.[7,8] 특히 핵연료봉 피복재의 손상은 방사능 유출과 직결되기 때문에 원자력 발전소의 안정성에 있어 매우 중대한 문제이다.

원자력 발전소의 핵연료봉 피복재는 11개

의 지지격자(spacer grid)에 의해 등간격으로 지지되는데, 가장 아래의 지지격자만 인코넬(Inconel)이며 나머지는 모두 지르칼로이-4(Zircaloy-4)로 구성되어 있다. 지르칼로이-4 끼리의 접촉시 발생하는 프레팅 마멸에 대해서는 이미 연구가 진행되고 있으나[7] 인코넬과 지르칼로이 접촉에 대한 연구는 미미한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 현재 원자력 발전소에서 핵연료봉 피복재로 사용되고 있는 지르칼로이-4 튜브와 지지격자중 재질이 다른 하단의 지지격자와 유사한 재질의 인코넬 600 튜브 접촉의 프레팅 실험을 통한 마멸특성을 연구, 분석하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1 실험장치

본 실험에 사용된 실험장치는 Fig. 1과 같이 모터 축에 연결된 편심 플레이트의 편심 조정볼트를 회전하여 필요한 편심량을 설정할 수 있도록 제작되었다. 실험장비에 대한 자세한 설명은 Cho et al.[7]의 논문에 잘 나타나 있다.

### 2.2 시험편

본 실험에 사용된 시험편은 이동시험편으로 Zircaloy-4 튜브와 고정시험편으로 Inconel 600

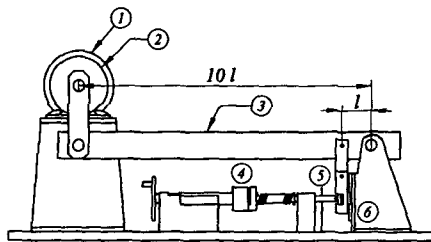


Fig. 1 Schematic diagram of fretting wear tester

- ① Motor
- ② Eccentric plate
- ③ Vibrating beam
- ④ Load cell
- ⑤ Specimen
- ⑥ LM guide

튜브를 특별한 가공 없이 실험에 필요한 길이로 절단하여 사용하였다. 시험편들의 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1과 Table 2에 나타난 바와 같다.

### 2.3 실험조건

실제 운전조건 부근의 미끄럼 거리, 하중 및 왕복수 등의 인자들이 프레팅 마멸에 미치는 영향을 조사하기 위해 미끄럼 거리는 40  $\mu\text{m}$ , 70  $\mu\text{m}$ , 100  $\mu\text{m}$ , 200  $\mu\text{m}$ , 300  $\mu\text{m}$ , 400  $\mu\text{m}$ 의 6단계, 하중은 20N, 40N, 60N, 80N, 100N의 5단계로 구분하여 왕복수  $5 \times 10^4$ ,  $1 \times 10^5$ ,  $3 \times 10^5$  사이클에 대해서 각각 조합하여 실험을 실시하였다.

Table 1. Chemical composition and mechanical properties of Zircaloy-4

Element	Sn	Fe	Cr	C	O	Zr
Composition (wt%)	1.25	0.21	0.11	0.0153	0.0134	balance
At room temperature						
Mechanical Properties	UTS (MPa)		696			
	0.2%YS (MPa)		517			
	Elong. 5cm, %		24			

Table 2. Chemical composition and mechanical properties of Inconel 600

Element	Cr	Fe	Mn	Al	Ti	Ni
Composition (wt%)	15.42	8.29	0.20	0.14	0.3	75.33
	~	~	~			75.48
At room temperature						
Mechanical Properties	UTS (MPa)		552			
	0.2%YS (MPa)		241			
	Elong. 5cm, %		30			

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 왕복수 증가에 대한 마멸량의 변화

Fig. 2와 Fig. 3은 각각의 미끄럼 거리에서 왕복수의 증가에 따른 마멸량의 변화를 나타낸 것이다. 왕복수가 증가할수록 주어진 미끄럼 거리에서 지르칼로이-4와 인코넬 600의 마멸량이 모두 증가하고 있음을 보여주고 있다. 이러한 현상은 왕복수의 증가에 따른 전체 미끄럼 거리의 증가로 인해 마멸량이 커지는 것으로 생각된다.

수직하중이 40N인 경우  $5 \times 10^4$  사이클에서  $1 \times 10^5$  사이클까지의 마멸량의 변화가  $1 \times 10^5$  사이클에서  $3 \times 10^5$  사이클까지의 마멸량 변화보다 훨씬 급격하다는 것을 보여주고 있다. 이것은 실험초기에는 이론적인 접촉면

적 상태에서 마멸이 시작되지만, 마멸이 진행됨에 따라 접촉면적은 계속 증가하게 된다. 하지만, 두 시편에 가해지는 수직하중의 크기는 항상 일정하기 때문에 마멸을 유발시키는 접촉 압력은 감소하게 되므로 마멸량의 기울기가 달라지는 현상이 발생하는 것으로 생각된다.

미끄럼 거리가 각각  $40\mu\text{m}$ ,  $70\mu\text{m}$ ,  $100\mu\text{m}$ 일 때는 왕복수가 증가하고 있음에도 불구하고 마멸량의 증가가 상대적으로 매우 적음을 알 수 있다. 이것은 전체 미끄럼 거리는 증가하였지만, 마멸량은 거의 증가하지 않는다는 것을 의미한다. 따라서, 미끄럼 거리가  $100\mu\text{m}$  이하의 영역에서는 왕복수와 하중의 증가에 관계없이 마멸이 아주 적게 진행되기 때문에 미끄럼 거리를  $100\mu\text{m}$  이하로 유지한다면 프레

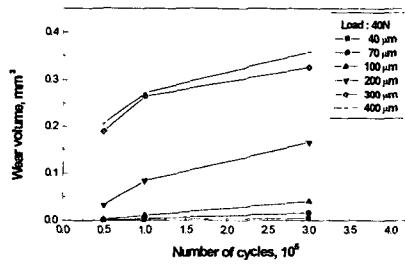


Fig. 2 Wear volume vs. number of cycles at 40N (Zircaloy-4)

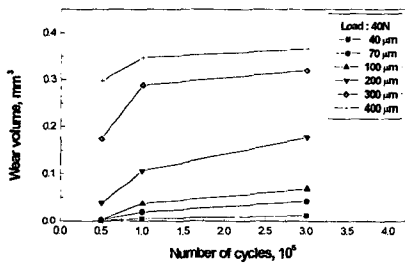


Fig. 3 Wear volume vs. number of cycles at 40N (Inconel 600)

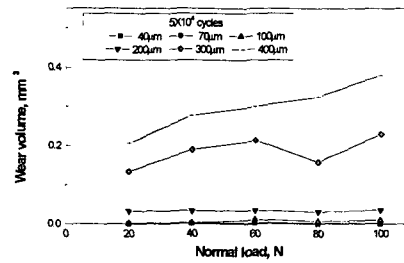


Fig. 4 Wear volume vs. normal load at  $5 \times 10^4$  cycles (Zircaloy-4)

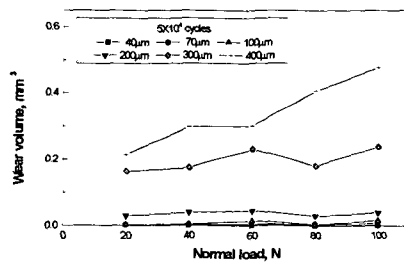


Fig. 5 Wear volume vs. normal load at  $5 \times 10^4$  cycles (Inconel 600)

팅 마멸로 인한 치명적인 손상을 입지 않을 것으로 생각된다.

### 3.2 수직 하중의 증가에 대한 마멸량의 변화

Fig. 4와 Fig. 5는 각각의 미끄럼 거리에서 수직하중 증가에 따른 마멸량의 변화의 길이를 나타낸 그림으로 대체적으로 수직하중이 증가함에 따라 마멸량도 증가하는 것을 알 수 있다.

이는 수직하중에 증가로 접촉하고 있는 재료간의 접촉 면적이 증가하게 되고 재료의 탄성학적 특성의 차이로 말미암아 주어진 미끄럼 거리에 대한 접촉표면의 형상이 달라지게 되어서 마멸량의 차이가 나타나는 것으로 생각된다.

### 3.3 미끄럼 진폭의 증가에 대한 비마멸율의 변화

Fig. 6과 Fig. 7은 미끄럼 거리에 대한 비마멸율의 변화를 각각의 하중에 대해서 나타낸 것이다. 비마멸율은 마멸량을 하중과 전체 미끄럼 거리로 나눈 값으로 구해지며 마멸특성을 이해하기 위해 종종 사용된다. 대부분의 경우 하중이 커짐에 따라 비마멸율은 감소하는 경향을 보이고 있다.

특히, 100 $\mu\text{m}$ 이상에서 비마멸율이 증가하기 시작하여 200 $\mu\text{m}$ 와 300 $\mu\text{m}$ 사이에서는 비마멸율의 기울기가 아주 커짐을 알 수 있다. 비마

멸율이 급격하게 증가하는 이 구간은 접촉면의 중심부위에 stick된 부위가 존재하는 partial slip 단계를 지나 마멸량이 급격히 증가하는 gross slip 단계에 해당된다고 할 수 있다. 그러나, 300 $\mu\text{m}$ 가 넘어서면서 gross slip 단계가 sliding 현상으로 발전되게 되므로 비마멸율의 기울기는 다시 완만해지는 경향을 보이고 있다.

### 3.4 프레팅 마멸면의 미시적 관찰

프레팅의 마멸 단계는 일반적으로 stick, partial slip, gross slip의 3단계로 구분할 수 있다. Stick 단계란 프레팅의 초기 단계로서 마멸이 거의 일어나지 않는 단계를 말하며, partial slip의 단계는 stick과 slip이 공존하는 단계로서 stick 영역에서는 마멸이 거의 발생되지 않고 slip 영역에서 주로 마멸이 발생된다. 이 단계에서는 stick과 slip의 경계 부근에서 크랙 생성이 활발하다. Gross slip의 단계는 stick 영역이 없어지고 마멸면 전체에서 slip이 발생하는 단계로 마멸량이 급격히 증가하게 된다.[9]

이러한 프레팅의 마멸단계와 마멸면의 미시적 형상을 조사하기 위해 SEM과 표면 거칠기 측정기(Surfest-500)를 사용했다. Fig. 8 (a)는 미끄럼 진폭 40 $\mu\text{m}$ , 수직하중 100N으로  $3 \times 10^5$  사이클 동안 프레팅 마멸 실험을 한 후 지르칼로이-4의 마멸면을 100배 확대

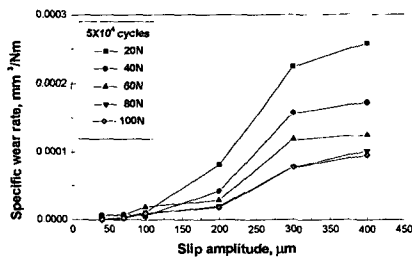


Fig. 6 Specific wear rate vs. slip amplitude at  $5 \times 10^4$  cycles (Zircaloy-4)

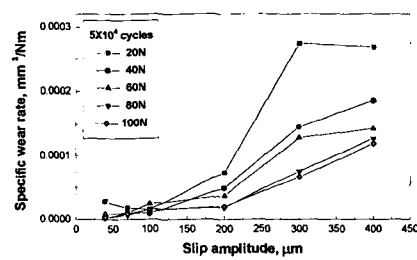


Fig. 7 Specific wear rate vs. slip amplitude at  $5 \times 10^4$  cycles (Inconel 600)

한 사진이다. 이 사진은 진폭이 작고 하중이 큰 경우에 발생하는 partial slip의 마멸 단면 형상을 잘 보여주고 있다. 접촉형태가 점접촉임을 고려해 볼 때 접촉면의 중심부에서 더 많은 마멸이 발생할 것으로 예상되지만 미끄럼 진폭이 작은 경우에는 중앙부에는 탄성변형만이 반복되고 가장자리로 갈수록 미끄럼이 발생하게 된다.

Fig. 8 (b)는 표면 거칠기 측정기로 (a)의 마멸면을 측정한 그림이다. 그림에서 볼 수 있듯이 마멸이 접촉면 전체에서 발생하는 것이 아니라 가장자리에만 국한되어서 발생하는 것을 알 수 있다.

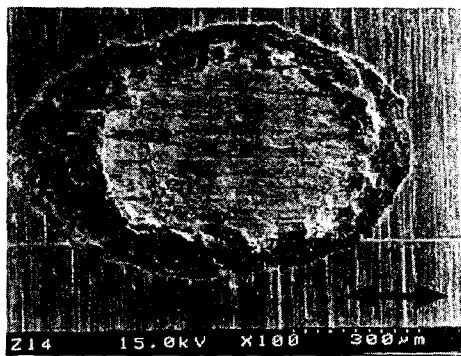


Fig. 8 (a) SEM photograph of a worn surface (Zircaloy-4, 40µm, 100n, 3×10<sup>5</sup>cycles)

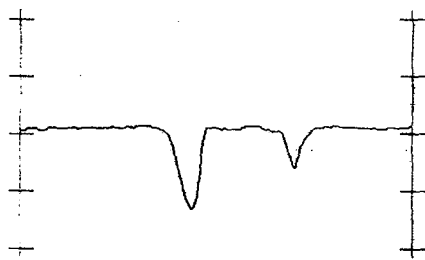


Fig. 8 (b) Profile curve of a worn surface (Zircaloy-4, 40µm, 100n, 3×10<sup>5</sup>cycles)

#### 4. 결 론

본 연구에서는 지르칼로이-인코넬 접촉의 프레팅 마멸특성을 평가하기 위해 지르칼로이-4 튜브와 하단의 지지격자와 유사한 재질의 인코넬 600 튜브를 사용하여 상온·상압하에서 무윤활 상태로 프레팅 마멸실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 왕복수가 증가함에 따른 전체 미끄럼 거리의 증가로 인하여 마멸량이 증가하였다.
2. 미끄럼 거리의 증가와 더불어 마멸량이 서서히 증가하다가 일정한 미끄럼 거리 이상에서는 마멸량이 급격히 증가하는 천이점이 관찰되었다.
3. 지르칼로이-4와 인코넬 600 접촉의 프레팅 마멸에는 stick, partial slip, gross slip의 단계가 존재함이 확인되었다.

#### 참고문헌

1. OECD, Glossary of Terms and Definitions in the Field of Friction, Wear and Lubrication, OECD pub., Paris, 1969.
2. Waterhouse R. B., Fretting Corrosion, p.36, Pergamon Press, 1975.
3. Fisher, N. J., Chow, A. B. and Weckwerth, M. K., Experimental Fretting Wear Studies of Steam Generator Materials, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 117, pp.312-320, 1995.
4. Ko, P. L., Heat Exchanger Tube Fretting Wear : Review and Application to Design, Journal of Tribology, Vol. 107, pp.149-156, 1985.
5. Cha, J. H., Wambsganss, M. W. and Jendrzejczyk, J. A., Experimental Study on Impact/Fretting Wear in Heat Exchanger Tubes, Journal of Pressure Vessel

- Technology, Vol. 109, pp.265-274, 1987.
6. Ko, P. L., Experimental Studies of Tube Frettings in Steam Generators and Heat Exchangers, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 101, pp.125-133, 1979.
  7. Cho, K. H., Kim, T. H. and Kim, S. S., Fretting Wear Characteristics of Zircaloy -4 Tube, Wear, Vol. 219, pp.3-7, 1998.
  8. Vingsbo, O., Massih, Ali R. and Nilsson, S., Evaluation of Fretting Damage of Zircaloy Cladding Tubes, Journal of Tribology, Vol.118, pp.705-710, 1996.
  9. Vingsbo, Olof, On Fretting Maps, Wear, Vol. 126, pp.131-147, 1988.