

경수중에서 지르칼로이-4 튜브의 프레팅 마멸특성

조광희 · 노규철 · 김석삼* · 조성재**

경북대학교 기계공학과 대학원, *경북대학교 기계공학부
**한국표준과학연구원 소재특성평가센터

Fretting Wear Characteristics of Zircaloy-4 Tube in Light Water

Kwang-Hee Cho, Kyu-Chul Roh, Seock-Sam Kim* and Seong-Jai Cho**

Graduate School, Department of Mechanical Engineering,
Kyungpook National University, Taegu, Korea

*Department of Mechanical Engineering, Kyungpook National University, Taegu, Korea

**Korea Research Institute of Standards and Science, Materials Evaluation Center, Taejeon, Korea

Abstract—The fretting wear characteristics of Zircaloy-4 tube in light water were investigated experimentally. A fretting wear tester was designed to be suitable for this fretting test. This study was focused on the effects due to the combination of normal load, slip amplitude and number of cycles as the main factors of fretting. The results of this study showed that the wear volume increased abruptly at slip amplitude above 100 μm , which is defined as critical slip amplitude of Zircaloy-4 tube in light water, and that under 160 μm the wear volume decreased as load increased at the same slip amplitude.

Key words—fretting, zircaloy-4 tube, stick, wear volume.

1. 서 론

지금까지 프레팅에 대한 연구가 많이 발표되고 있지만 프레팅에 대한 정의가 정량적이지 못하고 단지 “작은 진폭을 갖는 반복운동에 의해 발생하는 마멸 손상”으로 되어 있어 연구자에 따라 “작은 진폭”에 대한 수치적 이해의 차이로 때로는 상반된 연구 결과들이 발표되기도 했다.

Iwabuchi[1]는 이 작은 진폭을 접촉면적의 크기에 상당하는 것이라고 생각하였으며, 마멸이 발생하기 위해서는 어느 정도 이상의 진폭이 필요한데 이 진폭을 임계진폭이라 했다. 또한 임계진폭 이상에서는 마멸량이 진폭에 직선적으로 비례하며 탄소강에서는 이 임계진폭이 약 50 μm 라고 보고하였다. Halliday 등[2]은 연강봉으로 10⁶cycles까지 실험한 결과 마멸량이 급격히 증가하는 임계진폭이 약 100 μm 에 나타났다고 발표했다. 또한 하중이 프레팅 마멸에 미치는 영향

에 대해 Feng 등[3]은 하중과 마멸량은 비례관계, Uhlig 등[4]은 하중의 증가는 상대 미끄럼을 억제하게 되어 마멸이 감소하게 된다고 각각 보고하고 있다.

원자력 발전소의 증기발생기, 원자로 제어봉 집합체, 연료봉 집합체 등은 운전중에 안전성이 유지되도록 설계되었으나 이들의 튜브 또는 봉에 결함이 발생한 사례가 국내외 운전중인 원자력발전소에서 종종 보고되고 있다. 이는 제작, 조립, 운반, 또는 운전과정 등에서 뜻하지 않은 조립간격의 증대, 기계적 성질의 변화 등으로 유체흐름에 의한 튜브진동이 발생하여 튜브와 지지격자 사이에서 프레팅 마멸을 유도하기 때문인 것으로 알려지고 있다. 실제 가압경수형 원자력 발전소 핵연료봉으로 실제 사용되는 지르칼로이-4 튜브를 공기중에서 프레팅 마멸 실험한 결과 임계진폭이 존재함을 확인했다[5].

유체흐름에 의한 핵연료봉의 움직임은 impact, 반복 sliding 또는 이 운동들의 결합으로 구성될 수 있다[6].

그러나, Ko[7]는 Zirconium alloy를 이용한 프레팅 실험에서 impact motion에 의한 마멸량은 sliding motion에 의한 것 보다 매우 적었음을 발표했다.

따라서 본 연구에서는 impact motion없이 진폭이 무단으로 조절되고 반복 sliding 운동을 하는 프레팅 시험기를 설계, 제작하여 원자력 발전소에서 연료봉으로 실제 사용되고 있는 지르칼로이-4 튜브를 경수중에서 프레팅 마멸 실험을 하였다. 이 실험을 통해 지르칼로이-4 튜브의 경수중 프레팅 마멸 임계진폭을 조사하고 임계진폭 전, 후에서의 하중과 진폭에 대한 마멸량 및 비마멸율의 관계를 상세히 파악하여 stick, partial slip, gross slip 및 sliding 영역을 나타내는 fretting map을 작성하고자 한다[8].

2. 실험

2-1. 실험장치

본 실험에 사용된 실험장치는 Fig. 1과 같이 모터축에 연결된 편심 플렌지의 편심조정볼트를 회전시켜 필요한 편심량을 설정할 수 있도록 설계, 제작 되었다. 공기중에서 실험한 지르칼로이-4 튜브의 프레팅 마멸특성과 실험장비에 대한 자세한 설명은 Cho[5]의 논문에 잘 나타나 있다.

2-2. 시험편

원자력 발전소의 원자로 내에서 핵연료봉은 11곳이 지지격자로 지지되고 있다[9-10]. 그중 바닥에 있는 지지격자(Inconel)외에는 지지격자의 재질이 모두 피복재와 동일한 지르칼로이-4 재질이므로 본 실험에 사용된 고정 및 이동시편은 외경 9.7 mm의 지르칼로

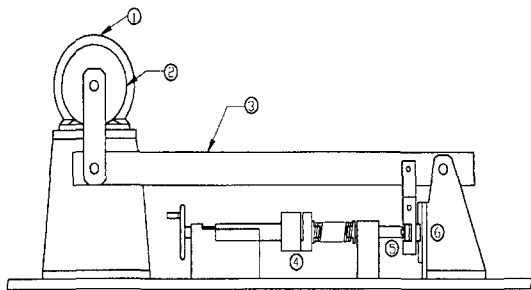


Fig. 1. Schematic diagram of fretting wear tester. ① Motor, ② Eccentric plate, ③ Vibrating beam, ④ Load cell, ⑤ Water box, ⑥ Specimens

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

Chemical element	Sn	Fe	Cr	C	O	Zr
	1.25	0.21	0.11	0.00153	0.134	balance
	Room temperature					399°C
Mechanical properties	UTS (MPa)		696		365	
	0.2%YS (MPa)		517		296	
	Elongation 5.00 (cm)		24		32	

이-4 튜브(두께 1.3 mm)이며 가공전에 육안으로 검사하여 결함이 없는 봉으로 선별하고, 수직(이동)시편 32 mm, 수평(고정)시편 28 mm로 절단하고, 아세톤 용액에서 10분간 초음파 세척을 하고 공기 건조기로 건조시켜 사용하였다. 사용한 시편의 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1과 같다.

2-3. 실험조건

실험은 두 개의 지르칼로이-4 튜브를 경수중에서 직각으로 접촉시키고 접촉력은 20, 40, 60, 80 및 100 N, 진폭은 40, 70, 100, 130, 160, 200, 300, 및 400 μm , 진동수는 1×10^5 cycles, 3×10^5 cycles 및 5×10^5 cycles의 3가지 경우로 실험하였고 시편의 왕복 미끄럼 진동수는 1초당 10회로 고정하였다.

발전소 운전중 핵연료봉은 약 20°C에서 400°C 범위의 경수 중에 위치하지만 실험에 사용한 경수는 약 10°C에서 28°C의 증류수이고, 시편 교체시 매번 교체하였다. 진폭은 편심조정 플렌지에 편심량을 설정하고 시편에 하중을 설정한 후 이동시편의 실제진폭을 확인하였다. 시험편의 손상면은 profilometer를 이용하여 단면곡선을 구하고 마멸량의 측정은 이동시편의 손상된 부분을 구의 일부로 가정하여 손상된 부피를 마멸량으로 계산하였다[5].

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 진폭, 하중 증가에 대한 마멸량의 변화

지금까지 발표된 연구 결과에 의하면 미소진폭 즉, 임계진폭 이하에서는 마멸이 일어나지 않았다고 판단하였거나[1], 또는 미미하므로 무시하고 임계진폭 이

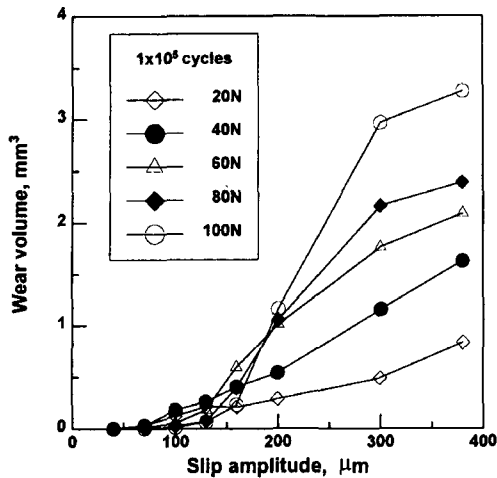


Fig. 2. Wear volume as a function of slip amplitude in light water at 10^5 cycles.

상에서 진폭 또는 하중이 증가하면 마멸량이 증가하는 것으로 보고되고 있다.

본 연구에서는 프레팅의 정의가 미소 진폭에 관한 현상이고 핵연료 집합체 설계시 예상 진동진폭을 약 $100\ \mu\text{m}$ 로 가정하고 있어[10] $100\ \mu\text{m}$ 를 기준으로 진폭을 변화시키면서 마멸현상을 분석해서 Fig. 2와 같이 진폭 $100\ \mu\text{m}$ 와 $200\ \mu\text{m}$ 사이에서 하중에 의한 마멸곡선이 서로 교차하고 있음을 알 수 있다. 이는 하중이 클수록 마멸량이 미소진폭($160\ \mu\text{m}$ 이하)에서는 감소하는 현상에서 $200\ \mu\text{m}$ 이상 진폭에서 마멸량이 증가하는 현상으로 옮겨가는 과정임을 알 수 있다. 이와 같이 진폭의 크기에 따라 하중의 증가가 마멸량을 감소시키는 경우와 증가시키는 경우가 있음은 Pearson, Sato[13], 및 Andreas[11] 등에 의해 연구 보고된 바 있다.

마멸량과 하중의 관계를 더 명확히 하기 위해 Fig. 3을 보면, 진폭이 $200\ \mu\text{m}$ 이상에서는 하중증가와 더불어 마멸량이 서서히 증가하고 있지만 $160\ \mu\text{m}$ 이하에서는 하중이 증가할수록 마멸량은 감소하여 $100\ \text{N}$ 에서는 거의 무시할 수 있을 정도이다. 그러나 $160\ \mu\text{m}$ 이하에서도 아주 작은 하중범위에서는 하중이 증가하면 마멸량이 증가하는 경향을 보이고 일정한 크기(약 $40\sim 60\ \text{N}$)이상에서 하중이 증가할수록 마멸량이 감소한다. Fig. 3은 진폭 $50\ \mu\text{m}$ 는 $60\ \text{N}$ 에서, $70\ \mu\text{m}$ 는 $80\ \text{N}$ 에서, $100\ \mu\text{m}$ 는 $100\ \text{N}$ 에서 마멸이 거의 발생되지 않음을 보여주고 있다.

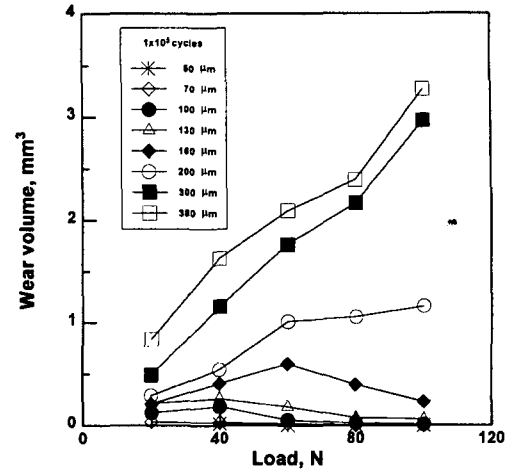


Fig. 3. Wear volume as a function of load in light water at 10^5 cycles.

그러나 진폭 $130\ \mu\text{m}$ 와 $160\ \mu\text{m}$ 의 경우 $100\ \text{N}$ 에서도 소량의 마멸량이 측정되어 하중 $120\ \text{N}$, $140\ \text{N}$ 까지 추가로 실험을 실시한 결과 마멸량은 계속 감소하여 진폭 $130\ \mu\text{m}$ 는 $120\ \text{N}$ 에서, $160\ \mu\text{m}$ 는 $140\ \text{N}$ 에서 마멸량이 거의 발생되지 않았다.

3-2. 진동수 증가에 대한 마멸량의 변화

공기중에서와 같이 경수중에서 실시한 프레팅 마멸 실험에서도 마멸량은 진폭과 하중의 크기에 관계없이 진동수가 증가하면 증가율의 차이는 있으나 증가한다. 또한 진폭이 증가하면 진동수 증가에 따른 마멸량의 증가폭이 커지고 있다. 이는 전체 미끄럼거리의 증가와 진폭증가에 따른 비마멸율의 증가에 기인한다[11].

Fig. 4에서 나타난 바와 같이 동일한 하중 $40\ \text{N}$ 에서 진동수가 증가할수록 마멸량은 모든 진폭에서 증가한다. 그러나 진폭이 $100\ \mu\text{m}$ 보다 큰 경우는 진동수 증가에 따라 마멸량이 크게 증가하지만 그보다 작은 진폭에서는 진동수가 증가하여도 마멸량의 변화는 매우 작다.

Fig. 5는 경수 중에서도 진폭 $200\ \mu\text{m}$ 로 실험한 경우로 진동수 증가에 따라 일반적으로 마멸량이 비례하여 증가함을 보여주고 있다.

3-3. 진폭, 하중 증가에 따른 마멸단면의 변화

Fig. 6은 마멸단면 곡선을 나타내는 그림으로써 왼쪽이 이동시편, 오른쪽이 고정시편이다.

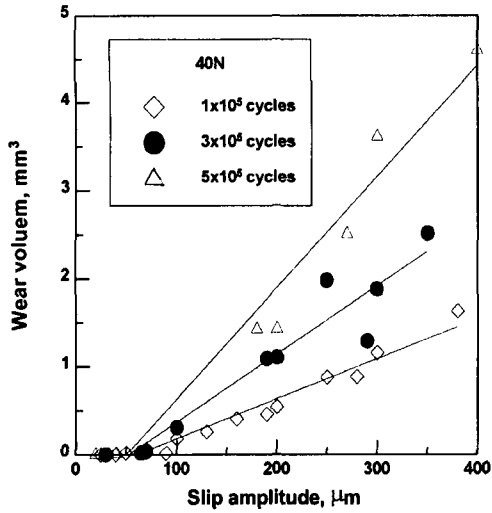


Fig. 4. Wear volume as a function of slip amplitude for each cycles at 40 N.

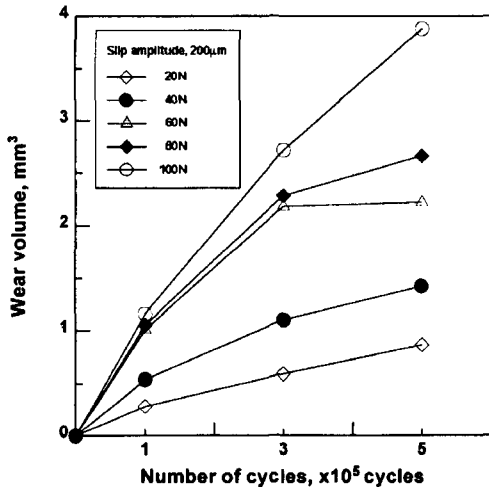


Fig. 5. Wear volume as a function of number of cycles at 200 μm slip amplitude.

Fig. 6에서 보면 진폭 70 μm 이하에서 이동시편은 적게나마 마멸현상이 나타나는데 비해 고정시편은 대부분 마멸이 발생되지 않았고 프레팅마멸 실험을 하기 전보다 오히려 높게 측정되었다. 이들 마멸량이 0이 되는 조건의 시편들의 마멸단면을 Fig. 6에서 보면 진폭 70 μm, 하중 100 N인 경우와 같이 10⁵사이클 후에도 한쪽 시편의 표면이 초기 표면 높이와 같거나 오히려 높은 stick 현상이 있었음을 알 수 있다. stick 현상은 진폭이 작을수록 작은 하중에서 발생되고 진

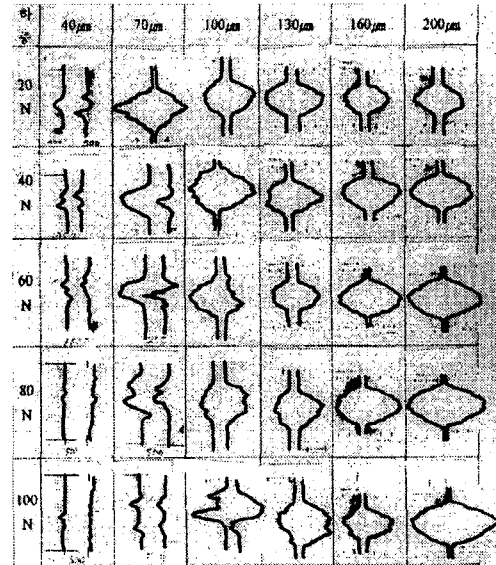


Fig. 6. The profile curve of Zircaloy-4 tube worn in light water.

폭이 클수록 stick현상으로 접근시키는 하중이 커지게 된다. 이로써 동일 미소진폭에서 하중이 클수록 마멸량이 감소한 원인이 stick 현상에 있음을 알 수 있다.

진폭 100 μm부터 160 μm까지는 이동시편과 고정시편 모두 진폭 증가에 따라 마멸깊이와 마멸량이 증가하지만 동일진폭에서는 하중이 증가되면 초기에는 하중 증가에 따라 마멸깊이가 깊어지지만 40 N 또는 60 N부터는 마멸단면의 중심부가 예각에서 점점 넓어지며 마멸되지 않은 고원이 마멸단면 중심부에 생성되면서 마멸깊이와 마멸량이 감소하게 된다. 그러나 진폭 200 μm 이상에서는 stick 현상이 발생되지 않으므로 하중이 증가할수록 마멸량이 늘어나게 된다. 그러므로 진폭 200 μm는 모든 하중에서 gross slip 현상이 시작되는 진폭이라고 할 수 있다.

3-4. 진폭, 하중 증가에 대한 비마멸율의 변화

비마멸율은 마멸량을 하중과 미끄럼거리로 나눈 값으로써 구해지며, 마멸특성을 이해하기 위해 종종 사용된다[12]. Fig. 7은 10⁵cycles동안 프레팅마멸 실험 후 진폭의 변화에 대한 이동시편의 비마멸율의 변화를 나타내고 있다. Vingsbo와 Soderberg는 프레팅 마멸을 표면 결함이 거의 발생하지 않고 피로균열의 성장도 없는 stick regime, 프레팅 피로가 발생되고 재료의 피로수명을 단축시키는 균열의 성장이 가속되어

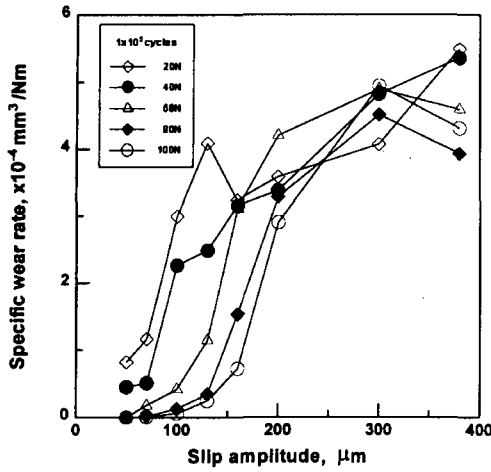


Fig. 7. Specific wear rate of moving specimen at 10^5 cycles.

비마멸율이 서서히 증가하는 stick and slip regime, 심각한 프레팅 마멸 발생으로 비마멸율이 급격히 증가하고 이로 인해 피로균열의 성장은 제한되는 gross slip regime, unidirectional sliding 특성에 의해 마멸 결합이 나타나는 sliding regime으로 정의하고 있다[6].

경수중에서 수행한 본 실험에서도 진폭이 증가함에 따라 비마멸율이 증가하고 있으나, 진폭 200 μm 이하에서 하중에 따라 비마멸율이 크게 변화하는 구간이 있고 그 이상의 진폭에서는 서서히 증가하고 있다. 하중별로 보면 20 N과 40 N의 경우는 75~100 μm 구간에서, 60 N과 80 N의 경우는 130~160 μm 구간에서, 100 N은 160~200 μm 구간에서 비마멸율이 급격히 증가한다. 비마멸율이 급격히 증가하는 이 구간은 접촉면의 중심에 stick된 부위가 있던 partial slip 단계를 지나 마멸량이 급격히 증가하는 gross slip 단계에 해당된다. 그러나 진폭 증가에 따라 gross slip이 sliding 현상으로 발전되며 Fig. 7에서와 같이 비마멸율은 진폭 증가에 따라 완만하게 증가하고 있다.

Fig. 8은 하중증가에 대한 비마멸율의 변화를 보여준다. 진폭이 200 μm 미만인 경우 하중이 20 N이면 200 μm 이상 진폭의 경우와 같이 높은 비마멸율을 나타내지만, 하중이 증가할수록 비마멸율이 급격히 감소하여 약 100 N에서는 0에 가깝게 된다. 진폭 70 μm 와 50 μm 의 경우는 하중이 20 N인 경우에도 비마멸율이 매우 작다. 진폭 200 μm 이상에서도 하중의 증가에 따라 비마멸율이 감소하고 있으나 그 변화 폭이 작아 거의 일정하다고 볼 수 있다. 이는 진폭 200 μm 이상에

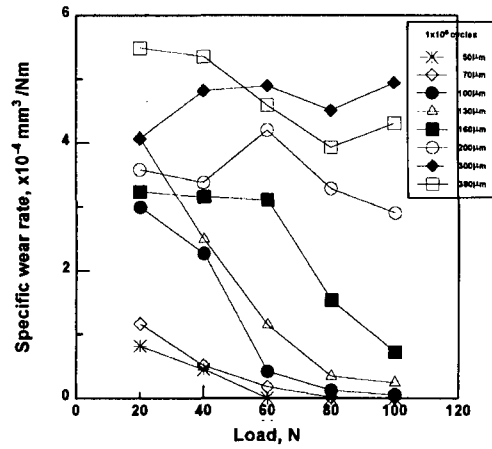


Fig. 8. Specific wear rate of moving specimen at 10^5 cycles.

서는 gross slip이 끝나고 마멸율이 일정한 sliding 단계임을 나타낸다.

3-5. 마멸면의 미시적 관찰

마멸면의 미시적 형상을 조사하기 위해 SEM을 사용했다. Fig. 9 (a)는 10^5 cycles 동안 접촉하중 40 N, 진폭 70 μm 로 프레팅 마멸실험을 수행한 후 이동시편의 마멸면을 SEM으로 촬영한 것이다. 가장자리의 검은 링 형태의 마멸면은 가운데의 밝은 부분보다 훨씬 가혹하게 손상되었음을 뜻한다. 이는 접촉영역 모두에서 마멸이 동일하게 일어나지 않음을 말하는데, 그것은 가운데 부분에서 stick이 발생했기 때문이다.

Fig. 9 (b)는 (a)를 표면 거칠기로 측정된 단면형상을 보여주고 있는데, stick영역과 slip영역의 구분을 잘 나타내고 있다. 점접촉임을 고려해 볼 때 가장 깊은 마멸면은 접촉면의 중심이어야 하지만, 중심부분에서 stick이 발생했기 때문에 가장자리 부분이 많은 손상을 입게 되어 가장자리 부분이 더 깊게 된다. 이는 전형적인 partial slip 영역의 형상을 잘 보여 주고 있다.

3-6. Stick, Partial slip, Gross slip, Sliding의 관계

경수중에서 10^5 cycles 동안 실시한 프레팅마멸 실험 결과 얻은 마멸량의 변화를 분석해 보면, 마멸량이 거의 발생되지 않는 stick 현상이 하중 60 N일 때는 50 μm 이하에서, 80 N일 때는 70 μm 이하에서, 100 N일 때는 100 μm 이하에서 발생되고 있다. 마멸량이 조금

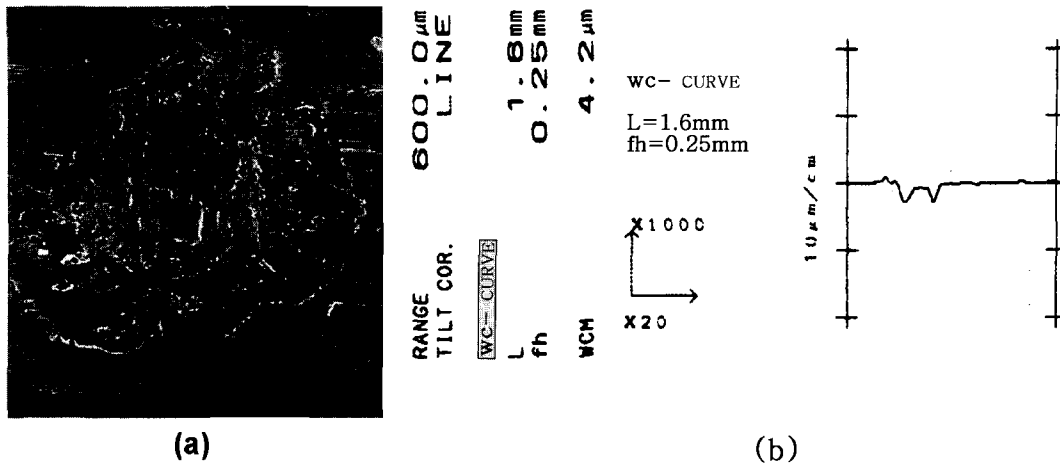


Fig. 9. (a) SEM photograph showing partial slip, (b) Profile curve of the worn surface (70 μ, 40 N, 1*10⁵ cycles)

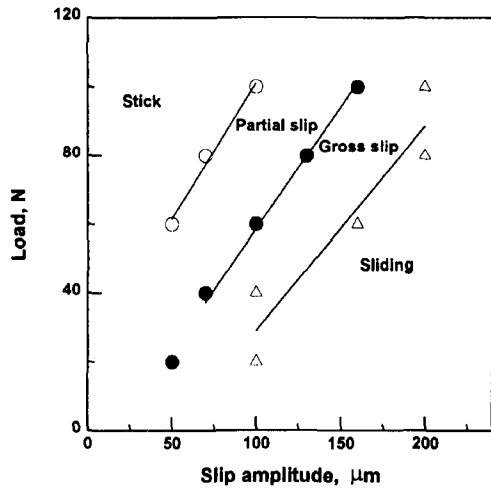


Fig. 10. Fretting map of Zircoloy-4 tube.

씩 발생하기 시작하는 partial slip 현상[6]은 하중이 20 N일 때는 50 μm, 40 N일 때는 70 μm, 60 N일 때는 100 μm, 80 N일 때는 130 μm, 100 N일 때는 160 μm 까지 나타나고 있다. 마멸량이 급격히 증가되는 gross slip 현상은 하중이 20, 40, 60, 80, 100 N일 때 각각 100, 100, 160, 200, 200 μm까지 나타나고 있으며, 그 이상에서는 마멸량은 많이 발생되나 비마멸율이 마멸 증가에 따라 조금씩 증가하는 sliding 현상이 나타나고 있다. 이러한 하중과 진폭의 관계를 그림으로 나타내면 Fig. 10과 같은 fretting map이 그려진다. Fig. 10에서 보면 동일 하중에서는 진폭이 증가할수록 sliding 영역에 가까워지고, 동일 진폭에서는 하중이

증가할수록 stick 영역에 가까워짐을 알 수가 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 실제로 원자로에서 사용되고 있는 핵연료봉의 프레팅 마멸실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 경수중에서 실시한 지르칼로이-4 튜브의 프레팅 마멸 실험은 진폭 100 μm 미만까지는 진폭이 증가해도 마멸량이 거의 발생되지 않지만, 100 μm부터는 진폭이 증가할수록 마멸량이 서서히 증가한다. 그러므로 임계진폭은 100 μm임을 알 수 있다.
2. 진폭 160 μm까지는 접촉하중이 증가할수록 두 시편 사이에 발생하는 stick현상으로 인해 마멸량이 점차 감소하여 일정 하중 이상에서는 무시할 수 있을 정도로 아주 적게 된다. 그러나 진폭 200 μm 이상에서는 하중이 증가할수록 마멸량이 증가한다. 따라서 진폭 100 μm와 200 μm 사이에서 하중 변화에 대한 마멸량 변화곡선이 서로 교차하게 된다.
3. 진동수 증가는 미끄럼거리의 증가이므로 마멸량은 진동수 증가에 따라 증가한다.
4. 비마멸율은 일반적으로 모든 진폭 구간에서 진폭과 하중의 증가에 따라 증가한다. 특히 비마멸율이 급격히 증가하는 진폭 구간이 있는데 이 구간은 partial slip과 sliding 영역 사이에 나타나는 gross slip 영역이다.
5. Fretting map은 각 영역을 잘 보여주는데, 하중과

진폭에 크게 영향을 받는다.

후 기

이 논문은 1997년도 한국학술진흥재단 자유공모과제(1997-001-E00049) 연구결과의 일부이며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Iwabuchi, A., "The Effects of Slip Amplitude and Load in Fretting Wear," Japanese Society of Mechanical Engineers, Vol.44, No.378, pp.692-699, 1978.
2. Halliday, J. S. and Hirst, W., "The Fretting Corrosion of Mild Steel," Proc. Roy. Soc. Lond., Ser.A, 236, pp. 411-425, 1956.
3. Feng, I. Ming and Uhlig H. H., J. Appl. Mech., 21, p. 395, 1954.
4. Uhlig, H. H., ASTM, Spec. Tech. Pub. No.144, p.77, 1953.
5. Cho, K. H., Kim, T. H., Kim, S. S., "Fretting Wear Characteristics of Zircaloy-4 Tube," Wear, Vol.219, pp.3-7, 1998.
6. Fisher, N. J., Chorv, 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.
7. Ko, P. L., "Experimental Studies of Tube Frettings in S/G and Heat Ex.," Journal of Pressure Vessel Technology, Vol.101, pp.125-133, 1979.
8. Olof Vingsbo, Staffan Söderberg, "On Fretting Maps," Wear, Vol.126, pp.131-147, 1988.
9. Olof Vingsbo, Ali R. Massih, Stig Nilsson, "Evaluation of Fretting Damage of Zircaloy Cladding Tubes," Journal of Tribology, Vol.118, pp.705-710, 1996.
10. 영광 원자력발전소 3,4호기 최종안전분석보고서 (YGN 3,4 FSAR) 제4,2,3조 "Design Evaluation" pp. 42-54-55.
11. Krell, A. and Klaffke, D., "Effects of Grain Size and Humidity on Fretting Wear in Fine-Grained Alumina, Al₂O₃/TiC, and zirconia," J. Am. Ceram. Soc., Vol.79, No.5, pp.1139-1146, 1996.
12. Yoshiyuki Saito and Kazuaki Mino, "Elevated Temp. Wear Maps of X40 and Mar-M247 Alloys," Transactions of the ASME, Vol.117, pp.524-528, 1995.