

지르칼로이-4 튜브 프레팅 마멸 특성의 환경 의존성과 마멸기구

조광희 · 김석삼*

경북대학교 기계공학과 대학원, *경북대학교 기계공학부

Comparison of Fretting Wear Characteristics of Zircaloy-4 Tube in Light Water and in Air

Kwang-Hee Cho and Seock-Sam Kim*

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

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

Abstract—The fretting wear behaviour of Zircaloy-4 tube used as the fuel rod cladding in PWR nuclear power plants has been investigated at the different test environment, in light water and in air as a function of slip amplitude, normal load, test duration and frequency. Zircaloy-4 tubes were used for both of oscillating and stationary specimens. A fretting wear tester was designed to be suitable for this fretting test. The wear volume and specific wear rate of Zircaloy-4 tube in water was greater than those in air under various slip amplitude. Delaminates and surface cracks were observed at low slip amplitude and high load of fretting test in water, but the traces of adhesion and plowing were observed at and above 200 μm . The water accelerates the wear of Zircaloy-4 tube at lower slip amplitude in fretting.

Key words—Zircaloy-4, delamination, adhesion, plowing.

1. 서 론

원자력발전소(원전)의 핵연료봉들이 원자로내의 유체흐름에 의한 진동이 발생되고, 튜브와 지지격자 사이의 마찰로 튜브에 결함이 발생한 사례가 국내, 외 운전중인 원전에서 발생되고 있어 이에 관한 연구가 근래 활발하게 이루어지고 있으며 결함원인이 대부분 유속에 의한 프레팅 마멸로 알려져 있다. 프레팅마멸에 영향을 미치는 요소가 진폭, 하중, 진동수 외에도 온도, 표면조도, 경도, 주파수(Hz), 진동방향 등 많은 추가 인자들이 있다. Ko[1]는 증기발생기와 열 교환기의 튜브 fretting wear 실험에서 주파수 10~35 Hz에서 주파수가 마멸량 변화에 영향을 미치는 근거가 보이지 않았다고 보고했으나 Vingsbo 등[2]은 mixed stick-slip 단계에서 주파수 증가가 표면 crack 생성과 성장을 촉진하기 때문에 비마멸율은 주파수 증가에 대해 급격히 증가한다고 보고하고 있다.

Kayaba[3] 등은 산화물의 생성속도에 영향을 주는 온도가 상승하면 마멸량은 감소하며 탄소강(S45C)과 스테인레스강(SUS304) 등의 대부분 재질에서 300°C에서의 마멸량은 상온에서의 마멸량의 1/10 이하로 되었다고 보고했다. Iwabuchi[4] 등은 스테인레스강(SUS304)으로 진폭 1.5 mm, 하중 2 N과 55 N 범위의 프레팅실험에서 공기중에서 마멸량이 해수중에서의 마멸량보다 약 100배 많았다고 보고했다. 이와 같이 fretting 환경에 따라 마멸특성이 바뀌고 있음을 알 수 있다.

따라서 원전 핵연료봉 피복재로 사용되는 Zircaloy-4 tube를 공기[5]와 경수중[6]에서 프레팅마멸 실험을 실시하여 그 마멸특성을 각각 발표한 바 있으나 본 연구에서는 Zircaloy-4 tube의 공기중에서의와 경수중에서 진폭과 하중에 따라 발생하는 마멸량과 비마멸율의 비교, 진동수 및 주파수 변화에 따른 마멸량 비교 등을 통하여 Zircaloy-4 tube의 fretting 마멸특성에 미치는 환경변화의 영향과

마멸기구를 조사하였다.

2. 실험

2-1. 실험장치와 시험편

실험장치는 편심 조정식 프레팅시험기[5]에 수조를 설치하여 경수중에서 실험하고, 공기중 실험 시는 수조를 제거하고 실시하여 경수중과 공기중이라는 차이 외에는 경수중에서의 프레팅실험과 공기중에서의 프레팅실험의 조건들이 모두 동일하였다.

지르칼로이-2의 Ni이 수소흡수를 촉진시켜 수소화물에 의한 치성의 원인이 된다는 사실이 1960년 발견됨에 따라 지르칼로이-2 조성중 Ni를 없애고 대신 Fe를 증가시킨 지르칼로이-4가 개발되어 가압경수형원자로(PWR)용 핵연료 피복관으로 사용되고 있어[7] 본 실험에서는 고정 및 이동시험 모두 외경 9.7 mm의 지르칼로이-4튜브를 사용하였다. 튜브의 두께는 1.3 mm이며 표면거칠기 측정기(Surfest 500)로 측정 한 결과 R_{max} 은 0.6 μm 이다

2-2. 실험조건

실험은 두 개의 지르칼로이-4 튜브를 직각으로 접촉시키고 접촉력을 20, 40, 60, 80 및 100 N까지 5단계로, 진폭은 40, 70, 100, 200, 300, 및 400 μm 6단계에서 진동수는 1×10^5 , 3×10^5 , 및 5×10^5 cycles 3가지 경우에서, 대기 온도가 10~30°C인 실내에서 경수중에서와 공기중에서 각각 수행하였다. 시험편의 왕복 미끄럼 주파수는 10 Hz로 실험하고, 주파수변동에 대한 마멸량의 변화를 알아보기위해 14, 18 Hz에서 추가로 수행하였다.

2-3. 마멸량과 비마멸율의 계산

미끄럼마멸(sliding wear)에 대한 마멸량(V)은 수직하중(F)과 미끄럼거리(S)에 비례하고 시험편의 경도(H)에 반비례한다고 설명하고 있다[8].

즉 $\frac{k}{3H} = \frac{V}{FS} = \frac{V}{2Fdn}$ (비마멸율), 여기서 k: 무차원의 마멸계수, F: 수직하중(N), S: 전 미끄럼거리(m), d: 진폭(m), n: 왕복수(cycles)이다.

마멸량(V)은 $V = \frac{\pi h}{6}(h^2 + 3a^2)$ 으로 구하고[5], 여기서 a: 마멸면 반경(mm), h: 마멸 깊이(mm)이다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 진폭, 하중 증가에 대한 경수중에서와 공기중에서의 마멸량 비교

공기중에서와 경수중에서 프레팅 마멸 실험을 수행한 경우 Fig. 1(a)에서와 같이 약 100 μm 진폭까지는 마멸량이 거의 발생하지 않았다. 이러한 현상은 Iwabuchi[9] 등이 발표한 기존의 연구결과에서도 보여 주고 있다. 하중이 상대적으로 작은 20 N과 40 N의 경우 진폭 100 μm 로 경수중에서 실험한 경우가 공기중에서 실험한 경우보다 마멸량이 20배 이상 많이 발생했다. 이는 경수가 접촉면에서의 마찰력을 감소시키고 시험편의 stick발생을 억제시켜 좀더 큰 상대운동을 할 수 있도록 하기 때문이다. 200 μm 와 300 μm 의 진폭에서는 100 μm 진폭의 경우에 비해 미끄럼거리의 2배와 3배 증가하였으나 마멸량은 공기중에서 하중 20 N의 경우 12배와 34배, 100 N의 경우 12배와 62배 증가하였고 경수중에서는 하중 20 N의 경우 3배와 4배 증가하였으나 하중이 증가할수

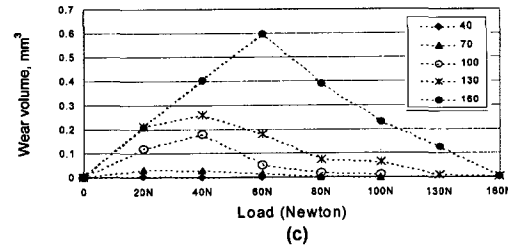
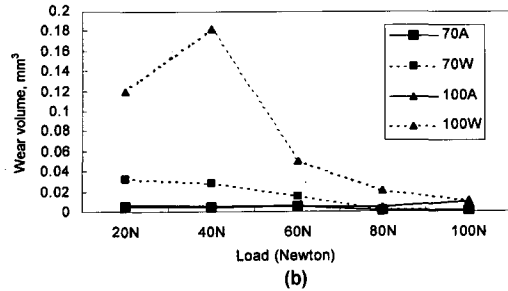
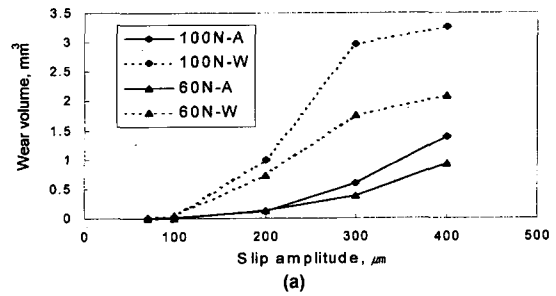


Fig. 1. (a) Wear volume in air and in water on 60 N and 100 N at 10^5 cycles, (b) Wear volume in air and in water on 70 μm and 100 μm at 1×10^5 cycles. (c) Wear volume as a function of load in small slip amplitude at 1×10^5 cycles in water.

록 마멸량 증가폭은 더욱 커져 100 N의 경우 88배와 260배로 증가하였다. 따라서 공기중에서는 하중 20 N과 100 N에서 공히 진폭 100 μm 와 200 μm 사이에서 마멸기구가 바뀌는데 비해, 경수중에서는 하중 20 N의 경우는 진폭 100 μm 와 200 μm 사이에서 마멸기구가 바뀌지 않고 100 N의 경우 진폭 100 μm 와 200 μm 사이에서 마멸기구가 바뀌을 알 수 있다. 이는 경수중에서 하중 100 N, 진폭 100 μm 에서는 partial slip 상태이고, 100 N, 200 μm 에서는 마멸량이 급격히 증가하는 gross slip 상태이며[6], 공기중에서는 경수중에 비해 마찰력이 크기 때문에 stick상태의 진폭구간이 넓고 partial slip이 거의 나타나지 않고 gross slip 상태로 발전([5]의 Fig. 9)된 것이다. 진폭 300 μm 와 400 μm 사이 경우 공기중에서는 Fig. 1(a)과 같이 마멸량 증가기울기가 더욱 가팔라지고 있으나 경수중에서는 20 N과 40 N의 경우는 거의 직선적으로 증가하고 있지만 대부분의 하중에서는 마멸량의 증가 기울기가 현저히 감소하고 있다. 이 진폭범위가 공기중에서는 gross slip 단계에 있는데 비해 경수중에서는 하중과 진폭이 증가하여도 비마멸율이 거의 일정한 sliding 단계에 이미 도달했음을 알 수 있다.

또한 하중과 마멸량의 관계를 보면 진폭 300 μm 와 400 μm 에서는 하중이 증가하면 공기중에서나 경수중에서 공히 마멸량은 현저히 많아지지만, 진폭 200 μm 경우는 경수중에서 조금씩 증가하고 공기중에서는 하중이 증가하여도 마멸량의 변화가 거의 없었다.

임계진폭 이하인 70 μm 와 100 μm 진폭에서는 Fig. 1(b)와 같이 비교적 작은 하중인 20 N과 40 N의 경우는 경수중에서 마멸량이 공기중에서보다 최소 6배이상 많지만 하중이 100 N인 경우는 공기중에서나 경수중에서 발생하는 마멸량은 비슷하고 아주 적다. 동일 진폭에서 하중이 증가할수록 마멸기구가 stick상태 쪽으로 진행되어 경수중에서와 공기중에서 공히 마멸량이 감소하고 있어 130 μm 와 160 μm 로 경수중에서 추가 실험한 경우 Fig. 1(c)에서와 같이 40 N 이하에서는 하중이 증가하면 마멸량도 증가하였으나 그 이상의 하중에서는 하중 증가시 stick상태 발생으로 마멸량은 오히려 감소하여 140 N에서는 마멸량이 거의 발생되지 않았다.

3-2. 진동수 증가에 대한 마멸량의 변화

Fig. 2(a)에서는 진폭 200 μm , 하중 20 N의 경우 공기중에서와 경수중에서 진동수 증가에 따른 마멸량의 변화를, Fig. 2(b)는 경수중 하중 20 N에서 진폭 70,

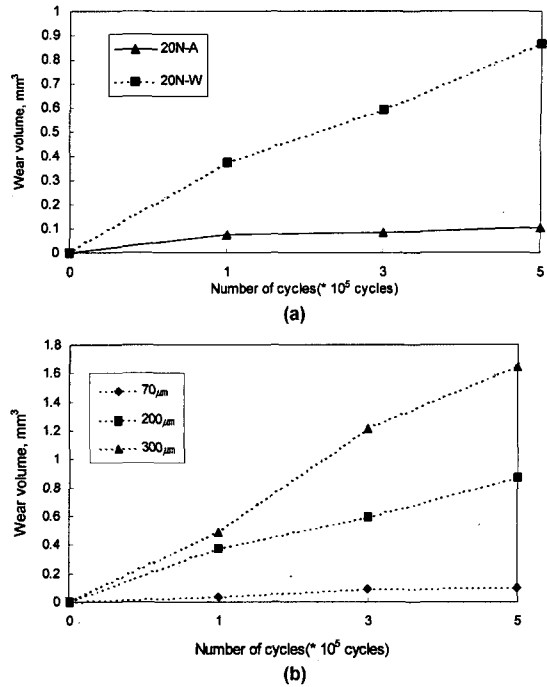


Fig. 2. (a) Comparison of wear volume in water and in air on 200 μm and 20 N, (b) Wear volume as a function of cycles at 20 N in water.

200 μm 와 300 μm 경우 진동수와 마멸량의 관계를 나타내고 있다. Fig. 2(a)에서 나타난 바와 같이 동일한 하중 20N에서 진동수가 증가할수록 마멸량은 공기중에서와 경수중에서 공히 증가한다. 진폭이 200 μm 와 300 μm 인 경수중에서 진동수 증가에 따라 마멸량이 크게 증가하지만 진폭 70 μm 에서는 증가폭이 매우 작았다. 공기중에서 프레팅 실험한 경우가 경수중에서의 경우보다 마멸량은 작지만 각 진폭에서 진동수 증가에 따라 증가하는 경향은 경수중에서와 유사하게 나타났다. 그러나 경수중에서는 마멸량이 진동수에 거의 비례하고 있으나 공기중에서는 프레팅 마멸시험 초기인 10^5 cycles까지 마멸량이 상대적으로 많이 발생하고 그 이후 3×10^5 cycles과 5×10^5 cycles에서는 초기에 비해 적게 증가했다.

경수중에서는 발생된 마멸입자가 접촉면으로부터 이탈이 계속되어 마멸량이 진동수에 거의 비례하지만 공기중에서는 접촉면이 좁은 시험초기에는 마멸입자의 이탈이 용이하여 마멸이 급속히 진행되지만 접촉면이 넓어지면 공기중에서는 마멸입자의 이탈이 어려워 마멸량 증가가 완만하게 된다.

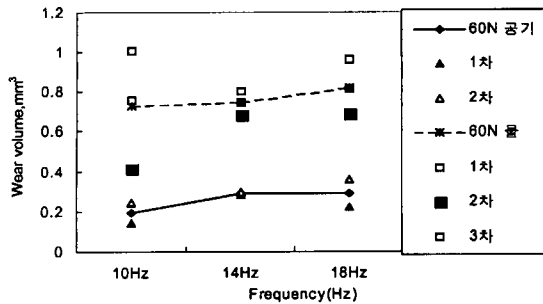


Fig. 3. Comparison of wear volume in water and in air on 200 μm at 10⁵ cycles.

3-3. 주파수 변화와 마멸량의 관계

Ko[1]는 교환기의 튜브 fretting wear 실험에서 주파수가 마멸량 변화에 영향을 미치는 근거가 보이지 않았다고 보고했으나, Vingsbo[12]는 gross slip 조건에서는 주파수가 마멸에 미치는 영향이 미미하지만 mixed stick and slip 조건에서 비마멸율은 주파수 증가에 따라 비마멸율이 급격히 증가하였다고 보고하였다. Berthier 등[10]은 steel시편 fretting 실험에서 주파수가 커질수록 표면 손상이 매우 심하게 발생되며 주파수가 증가하면 새로 발생된 debris가 보다 쉽게 접촉면을 이탈 할 수 있어 third-bodies의 접촉면 보호기능이 감소되기 때문에 주파수가 커질수록 표면 손상이 매우 심하게 발생된다고 설명하였다.

Zircaloy-4 tube의 주파수(Hz) 증가에 따른 마멸량의 변화를 알아보기 위해 진폭을 200 μm로 고정하고 10 Hz(14.4 m/hr), 14 Hz(20.16 m/hr), 18 Hz(25.92 m/hr)로 10⁵ cycles까지 경수중에서 20, 40 N과 60 N으로 실험한 결과 각 하중에서 공히 주파수가 증가할수록 마멸량이 증가하였다. 경수중에서와 공기중에서의 주파수 변동에 따른 마멸량의 변화를 비교하기 위해 하중 60 N, 진폭 200 μm에서 2, 3회 프레팅마멸 실험을 실시하여 발생된 마멸량의 평균값을 Fig. 3에서 비교해 보았다. 주파수 증가에 따른 마멸량의 변화는 공기중에서도 경수중에서와 같이 주파수가 증가할수록 마멸량이 증가하고 있다. 10, 14, 18 Hz의 모든 경우에서 공기중에서보다 경수중에서 마멸량이 평균 3배정도 많았다.

3-4. 경수중에서와 공기중에서의 비마멸율 비교

비마멸율은 앞의 2.4항에서와 같이 마멸량을 수직하중과 총미끄럼거리로 나눈 값으로 단위거리와 단위하중에서의 마멸량을 의미한다. 공기중에서와 경수중에서 Zircaloy-4

tube의 프레팅에 의한 비마멸율을 Fig. 4(a)에서 보면 실험한 진폭구간(40~400 μm)에서 공기중에서 보다 경수중에서 항상 높고 진폭이 증가하면 공히 비마멸율이 증가한다. 진폭 100 μm와 200 μm 구간에서 비마멸율이 모두 급격히 증가하지만 공기중에서는 진폭 100 μm에서 400 μm까지 계속 비슷한 기울기로 증가하는데 비해 경수중에서는 진폭 100 μm에서 200 μm사이 구간에서 대부분 10배 이상 급격히 증가하고 그 이후는 증가폭이 완만하게 나타난다. 공기중에서는 400 μm까지도 gross slip 단계에 있는데 비해 경수중에서는 200 μm부터 하중이 증가하여도 비마멸율이 크게 변하지 않는 sliding 단계에 있음을 알 수 있다. 진폭 300 μm에서 경수중에서의 비마멸율이 공기중에서보다 큰 것은 경수중에서는 비마멸율이 급격히 증가하는 gross slip 단계가 끝나고 sliding 단계로 옮겨가는 단계인데 비해 공기중에서는 높은 마찰력에 의해 이제 gross slip 단계로 시작되기 때문이다.

공기중에서는 진폭 300 μm와 그 이상에서 비마멸율이 300 μm 이하에서와 비슷한 기울기로 증가하고 있으나 경수중에서는 높은 비마멸율을 유지하고 있으나 진폭 증가에 대해 거의 일정한 크기를 유지하고 있는 것은

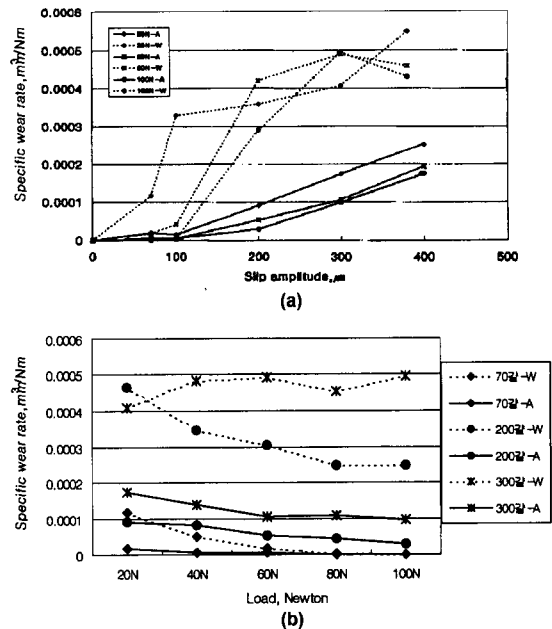
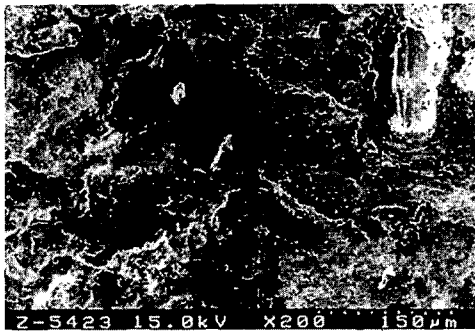


Fig. 4. (a) Comparison of specific wear rate as a function of slip amplitude in water and in air, (b) Comparison of specific wear rate in water and in air at 14x10⁵ cycles.

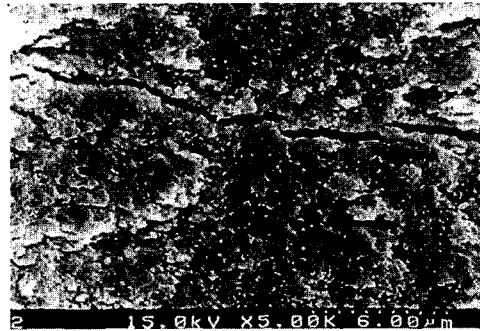
작은 진폭에서 stick현상을 억제하여 비마멸율을 증가하게 하는 역할을 했던 경수가 진폭이 증가하여 마멸상태가 sliding 단계로 들어서면 상대운동하는 두 물체 사이에서 윤활작용을 수행하여 하중이 증가하여도 비마멸율이 거의 일정하게 되어 마멸량은 하중에 비례 증가하는 sliding특성을 나타내고 있다.

하중과 비마멸율과의 관계를 Fig. 4(b)에서 보면 경수

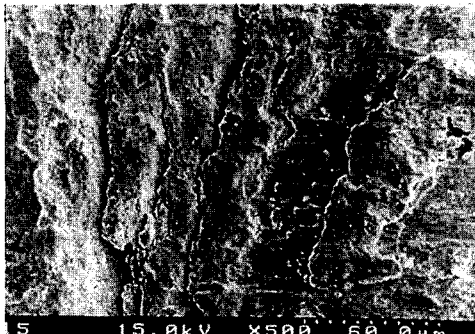
중 진폭 300 μm 이상에서는 하중이 증가하여도 비마멸율은 거의 일정하지만 200 μm 이하에서는 하중이 증가하면 비마멸율이 감소하고 있다. 그러나 공기중에서는 전 진폭 구간에서 하중 증가에 따라 비슷한 기울기로 비마멸율이 감소하고 있다. 공기중에서 하중증가에 따라 비마멸율의 감소가 경수중에서보다 민감한 것은 공기중에서는 두 접촉면이 건조마찰로 하중증가에 따라 마찰계수가 크



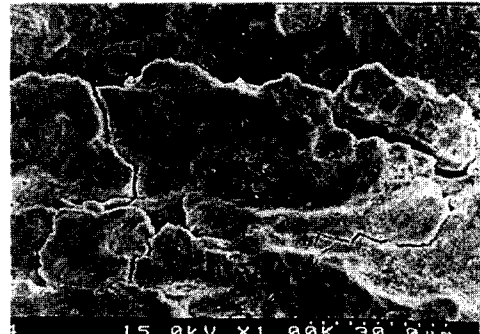
(a) Worn surface in air(300 μm , 40N, 3 X 10⁵ cyc.)



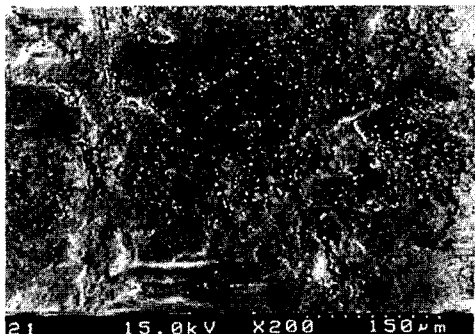
(b) Initiation and propagation of crack in water(100 μm , 60N, 1 x 10⁵ cyc.)



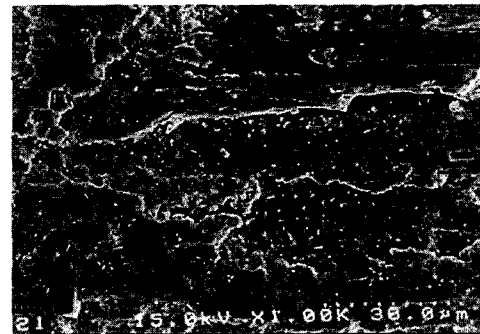
(c) Delaminated debris in water(70 μm , 100N, 1 x 10⁵ cyc.)



(d) Generation and pull-out of debris in water(100 μm , 60N, 5 x 10⁵ cyc.)



(e) Deformation of asperities in water (130 μm , 60N, 1 x 10⁵ cyc.)



(f) Plastic flow and abrasive in water (300 μm , 20N, 1 x 10⁵ cyc.)

Fig. 5. SEM photo of worn surface.

게 증가하여 마멸입자들이 접촉면으로부터 제거되기 더욱 어려워지기 때문에 비마멸율이 감소되는데 비해 경수중에서는 접촉면 사이에 있는 경수가 마멸입자 제거작용도와 주어진 하중(20~100 N) 범위에서는 하중에 비례하는 마멸량이 발생하여 하중이 증가 하여도 비마멸율이 거의 일정하게 된다고 생각된다. 100 μm 이하 진폭의 경우는 공기중에서와 경수중에서 공히 비마멸율이 아주 적었다.

3-5. 지르칼로이-4 튜브 프레팅 마멸단면의 미시적 관찰 및 마멸기구

두 개의 球가 미끄럼 없이 압축되면 최대인장응력이 접촉면의 가장자리에서, 최대전단응력은 접촉표면의 조금 아래에서 발생되고, 마찰이 있는 경우 failure는 접촉면의 뒤 끝단(back edge)에서 발생되기 시작한다[11]. Ghasemi 등[12]은 1.25 cm의 鋼球시편으로 작은 진폭(약 20 μm)과 다양한 하중(4~20 N)에서 수행한 프레팅 실험에서 주된 마멸기구가 미세균열과 박판상의 마멸입자(delamination) 생성이라고 생각했다.

Fig. 5(a)는 진폭 300 μm , 하중 40 N, 3×10^5 사이클 동안 공기중에서 실험을 수행한 후의 마멸면을 SEM으로 관찰한 것이다. 마멸면 전체에 걸쳐 얇은 박판 형태가 층계를 이루어 마멸이 진행된 것을 관찰할 수 있다. 이러한 형태의 마멸면은 진폭, 하중과는 관계없이 대부분의 프레팅 마멸면에서 유사하게 관찰되었다.

경수중에서는 진폭과 하중에 따라 마멸면의 형태가 다르게 나타났다. 40 $\mu\text{m} \times 60$ N의 경우 표면에 접촉압력에 의한 접촉 흔적이 있으나 마멸은 보이지 않았고, 프레팅 진폭 100 μm , 하중 60 N에서 10^5 cycles 진행 후는 마멸면 바닥에 균열들이 Fig. 5(b)에서와 같이 관찰되었으나, 5×10^5 cycles 진행 후는 표면에 생성된 박판상의 마멸입자들이 분쇄되어 시편으로부터 떨어져 나가고 있음이 Fig. 5(d)에서 관찰되었다. 즉 작은 진폭(70 μm 와 100 μm)에서 100 N의 큰 하중이 작용한 경우에는 표면에 박판상의 마멸입자들이 생성되었다. 진폭 300 μm 인 경우 마멸장 하나 하나의 크기가 약 $100 \times 500 \mu\text{m}$ 정도이지만 40 μm 경우는 $60 \times 150 \mu\text{m}$ 크기로 작았다. 그러나 20 N의 작은 하중이 작용한 경우와 진폭이 200 μm 이상인 경우(20~100 N)는 비교적 많은 마멸이 발생되었으나 마멸면에 균열이나, 박판상의 마멸입자들이 관찰되지 않고 공기중에서와 같이 연삭에 의해 마멸된 비교적 매끈한 마멸면이 관찰되었다. 진폭 130 μm , 하중 60 N인 경우 마멸표면을 Fig. 5(e)에서 관찰해 보면 마

멸이 심하게 발생되었으나 균열들은 보이지 않고 표면의 돌기들(asperities)이 변형되거나 마멸되었음을 알 수 있다. 또한 주파수는 10 Hz로 고정된 상태에서 진폭을 300 μm 로 증가시켜 프레팅 마멸실험을 한 경우 미끄럼 방향의 연삭마모 현상과 소성유동이 있었음을 Fig. 5(f)에서 알 수 있다.

따라서 지르칼로이-4 튜브의 경수중 프레팅 마멸실험에서 진폭이 작은 경우(약 100 μm 이하)에는 마멸을 지배하는 주원인이 피로에 의한 균열 발생과 박판상의 마멸입자 발생(하중이 큰 경우)이고, 진폭이 큰 경우(약 300 μm 이상)는 표면의 돌기들이나 기 발생된 마멸입자에 의한 연삭 마모임을 알 수 있다. 하중이 작은 경우(약 40 N 이하)는 진폭의 크기에 관계없이 돌기들의 변형에 의한 마멸이 지배적이다.

4. 결 론

1. 지르칼로이-4 튜브의 프레팅 마멸량이 임계진폭(약 100 μm) 이상에서 경수중과 공기중에서 공히 진폭과 하중 증가에 따라 증가하지만 마멸량은 공기속에서 보다 경수중에서 많이 발생했다.

2. 미소진폭(160 μm 이하)에서의 지르칼로이-4 튜브 프레팅마멸 실험에서 40 N까지는 하중이 증가하면 마멸량이 증가하지만 하중이 60 N 이상 되면 stick면적의 증가로 경수중에서와 공기중에서 공히 마멸량이 감소한다.

3. 지르칼로이-4 튜브 프레팅마멸은 공기중에서 실험한 경우는 모든 진폭에서 비마멸율이 서서히 증가하지만, 경수중에서는 비마멸율이 진폭 200 μm 이하에서 급격히 증가하는 구간이 존재한다.

4. 공기중에서의 마멸기구는 대부분 연삭마멸이고, 경수중에서는 진폭 100 μm 이하에서는 피로에 의한 미세균열과 박판상의 마멸입자 생성, 진폭 300 μm 이상에서와 하중 40N 이하인 경우는 응착과 연삭마모가 주된 마멸기구였다.

참 고 문 헌

1. Ko, P. L., "Experimental Studies of Tube Frettings in S/G and Heat Ex.," Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 101(1979. 5) 125-133.
2. Vingsbo, O. and Soderberg, S., "On Fretting Maps," Wear, 126(1988) 131-147.
3. Kayaba, T. and Iwabuchi, A., "The effect of temperature on fretting wear," 日本潤滑, 第27卷 第1号(1982), pp 31-38.

4. Iwabuchi, A., Sasaki, T. and Hori, K., "Tribological properties of SUS304 steel in seawater (1st Report)," Japanese S. of Mech. E., Vol.56 No. 531(1990) pp. 3075-3080.
5. Cho, K. H., Kim, T. H. and Kim, S. S., "Fretting Wear Characteristics of Zircaloy-4 Tube," Wear, Vol. 219 (1998.8.) p3-7.
6. 조광희, 노규철, 김석삼, 조성재, "경수중에서 지르칼로이-4 튜브의 프레팅 마멸특성," 한국윤활학회지(1998), 제14권 제4호 pp.1-7.
7. 윤용구, 임상호, "지르코늄과 그 합금의 특성, 응용 및 제조기술," 대한금속학회지 제22권 제3호(1984.3), pp211-219.
8. Fisher, N. J., Chorv, A. B. and Weckwerth, M. K., Experimental Fretting Wear Studies of S/G Materials, Trans. of ASME, Vol. 117, Nov. 1995, p.312.
9. Iwabuchi, A. "The Effects of Slip Amplitude and Load in Fretting Wear," Japanese Society of Mechanical Engineers, 44-378, p.692-699.
10. Berthier, Y., Vincent, L. and Godet, M., "Fretting wear mechanisms and their effects on fretting fatigue," ASME J. of Tribology, Vol. 110, pp517-524, 1988.
11. Hamilton, G. M., "Explicit equations for the stresses beneath a sliding spherical contact," Proc. Instn. Mech. Engrs, Vol.197C, pp53-59, 1983.
12. Ghasemi, H. M., Furey, M. J. and Kajdas, C. "Surface temp. and fretting corrosion of steel under conditions of fretting contact," Wear, 162-164, 78-83, 1993.