

지르칼로이-4 튜브 및 지지부의 접촉조건과 미끄럼 상태의 천이 Contact Condition of Zircaloy-4 Tube and Support and Transition of Slip Regime

김형규, 강홍석, 윤경호, 송기남

한국원자력연구소

ABSTRACT: To study the influence of the shape of contacting bodies (especially the end profile) on slip regime, wear test is conducted in the case of the contact between tube and support. Two different end profiles of the support are used such as truncated wedge and rounded punch. During the test, 10, 30 and 50 N are applied as normal force and slip displacement varies between 10-200 μm . The tube and the support specimens are made of Zircaloy-4 and a specially designed wear tester is used. Tests are carried out in air at room temperature. Wear on the tube is examined by measuring microscope. Partial and gross slip regimes are classified from the observed wear shape. Surface roughness tester is also used to measure the wear depth and contour, from which wear volume is evaluated. The transition from partial to gross slip is also investigated by investigating the considerable increase of wear volume. From the result, the boundary between the partial and the gross slip is newly determined in the conventional fretting map for the present specific contact configuration. Since the transition is related with the amount of energy dissipation from the contact surface so is wear, it is regarded that wear can be restrained by designing a proper shape of support.

Key Words: Transition from partial to gross slip, Contact between tube and support, Truncated wedge, Rounded punch, Fretting map, Shape design

1. 서론

일반적으로 마멸량은 접촉 물체 상호 간의 수직 하중과 미끄럼 진폭에 영향을 받는다고 알려져 있다. 그런데 마멸은 두 접촉 물체 사이에 상대 운동이 존재하여야 발생하므로 접촉면에는 수직 하중에 마찰 계수가 고려된 전단 하중을 고려할 수 있다. 이때 접촉면의 전단 하중은 접촉 물체 사이의 상대 변위의 크기와 직접적인 관련이 있다.

한편 접촉 물체 사이의 상대 변위는 작용하는 전단 하중에 의해 두 물체가 접촉면으로부터 떨어진 곳에서 나타나는 변위(강체 변위)와 접촉면에서 발생하는 전단 응력(트랙션)에 의한 변위('탄성 변위'라 하자)로 구분할 수 있다. 이때 강체 변위와 탄성 변위와의 차이가 접촉면에서의 미끄럼 변위가 된다. Coulomb의 마찰 법칙을 적용할 때 접촉면의 전체에서 미끄럼이 발생하는 전 미끄럼(gross slip) 상태에서는 접촉면 모든 점에서 전단 트랙션의 크기가 마찰 계수와 수직 트랙션의 곱이 된다.

그러나 접촉 물체에 작용하는 전단 하중의 크기가 접촉면의 마찰력보다 작아 접촉

면의 일부분에서만 미끄럼이 발생하는 부분 미끄럼(partial slip) 상태에서는 접촉면에서의 상대 탄성 변위와 접촉 물체의 상대 강체 변위의 크기가 같아 상대 미끄럼 변위가 0이 되는 고착 영역이 존재하게 된다. 즉 전단 하중의 크기가 작아 접촉 물체의 상대 강체 변위가 작을 경우 부분 미끄럼 상태가 되기 쉬우며, 따라서 상대 운동 진폭이 작은 경우를 나타내는 프레팅마멸에서 부분 미끄럼 상태가 될 경우가 많다. 한편 마멸은 접촉면의 미끄럼 영역에서 발생하므로 부분 미끄럼 상태에 비해 전미끄럼의 경우에 마멸량이 현저히 증가하게 된다.

부분 미끄럼 과 전미끄럼 상태를 실험적으로 관찰하여 구분할 때 접촉 수직 하중과 미끄럼 진폭을 변수로 사용하여 나타낸 것을 'Fretting Map'이라 한다. Fouvry 등[1]은 평판과 구가 접촉하는 경우의 Fretting Map을 발표하였으며 수직 하중의 감소 또는 미끄럼 진폭의 증가에 의해 부분 미끄럼에서 전 미끄럼 상태로 바뀌는 것을 보였다. 또한 접촉면에서 방출되는 에너지를 고려하여 부분 미끄럼에서 전미끄럼 상태로 될 때 에너지 방출량이 급격히 증가하는 것을 실험

시에 기록된 데이터로부터 나타내었다. 이 때 에너지 방출은 접촉면의 미끄럼 변위와 전단 트렉션의 곱으로 표현되어 미끄럼 영역의 크기에 의존하게 되므로 접촉면 전체에서 미끄럼이 발생하게 되는 전미끄럼 상태에서 에너지의 방출이 급격히 증가하는 것은 예상할 수 있는 결과이다. 그들의 연구는 에너지 방출 정도와 마멸량을 연관시킬 수 있는 실험적 근거를 제공하였다.

부분 미끄럼 상태에서, 주어진 전단 하중에 의해, 미끄럼 영역이 발생하는 정도와 전단 하중의 증가에 따라 미끄럼 영역이 증가하는 속도는 접촉 물체의 끝단, 즉 접촉부의 형상에 의존한다[2]. 따라서 기계 구조물에서 마멸 손상이 우려되는 접촉부를 설계할 때 접촉부의 형상을 적절히 고려하여 마멸의 발생을 억제할 수 있는 방법을 생각할 수 있을 것이다. 즉 부분 미끄럼 상태를 유지시키거나 전미끄럼 상태로의 전이를 늦추는 방법을 찾을 수 있다면 마멸 손상을 억제하는 관점에서는 매우 유리할 것으로 판단된다. 그리고 접촉부의 형상 설계를 통하여 이 방법을 얻을 수 있다면 기계설계의 측면에서 매우 유용할 것이다.

이에 대한 연구의 하나로서, 본 연구는 튜브와 지지부가 접촉하여 서로 상대 운동하는 경우를 실험하여, 지지부 끝단의 형상에 따른 마멸량 차이를 분석한 것이다. 이와 함께 접촉 물체(특히 접촉부)의 형상이 달라짐에 따라 부분 미끄럼으로부터 전미끄럼으로의 전이에 미치는 영향을 기존의 Fretting Map 과 비교하여 그 차이에 대해 논의하였다. 본 연구는 이러한 실험적 고찰과 함께 마멸을 억제할 수 있는 접촉부의 형상

설계에 그 목적이 있다.

2. 시 험

2.1 시편

튜브 및 지지부 시편의 재질은 모두 Zr-4이며, 그 기계적 성질과 화학 성분을 Table 1에 정리하였다. 튜브 시편의 외경은 9.5 mm, 두께는 0.6 mm 이며, 지지부 시편은 두께 0.46 mm 의 판재를 프레스 가공하여 제작하였다. 튜브와 접촉하는 지지부 형상을 튜브의 길이(축) 방향에서 나타내면 Fig. 1 과 같다. 즉, 지지부의 끝단이 truncated wedge 인 것과 rounded punch 인 것, 두 가지로 하였다. 지지부 끝단의 형상이 달라지면 접촉 응력(트렉션)이 달라지게 되며 이것은 마멸에 영향을 미치게 될 것이다 따라서 본 연구에서 사용한 두 가지의 지지부 형상으로부터 접촉 물체(지지부)의 형상에 따른 마멸의 차이를 관찰할 수 있을 것으로 예상하였다. 한편 튜브 시편의 횡 방향으로는 튜브 표면이 원형이므로 Hertz 접촉 상태라 할 수 있다. 마멸 시험을 시작하기 전 모든 시편은 아세톤으로 세척한 후 건조시켜 사용하였다. 시험 전에 시편의 표면 거칠기를 측정하였으며 그 결과, 튜브 시편의 평균 거칠기(R_a)는 0.76 μm , 지지부 시편은 0.67 μm 이었다.

2.2 시험 장치

Fig. 2 에 본 연구에 사용한 마멸 시험장비의 개략도를 보여 준다. 이 장비는 회전 속도를 가변할 수 있는 서보 모터와 편심 원통, 링크 기구 및 지렛대를 이용하고 있

Table 1. Mechanical and chemical properties of Zircaloy-4.

Mechanical properties (at room temperature)						
Tensile strength	Yield strength (0.2% offset)		Elongation in 2"	Elastic Modulus	Poisson's Ratio	
470 MPa	315 MPa		31%	136.6 GPa	0.294	
Chemical composition (wt. %)						
Sn	Fe	Cr	O	C	Si	Zr
1.28	0.22	0.12	0.114	0.013	0.010	remained

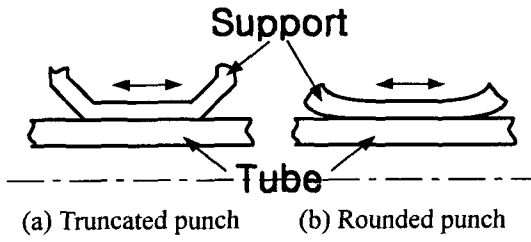


Fig. 1 Different end profiles of support.

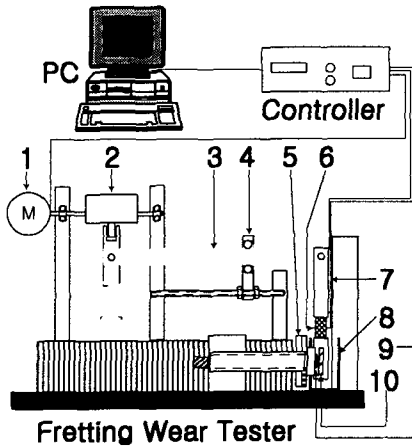


Fig. 2 Schematic diagram of wear tester;
1: Servo-Motor, 2: Eccentric Cylinder, 3: Lever,
4: Movable Hinge, 5: Rotating Device, 6: Biaxial
Loadcell, 7: LVDT, 8: Water Tank, 9: Support
Specimen, 10: Tube Specimen.

으며 시험 변수인 시편 사이의 상대 진폭, 진동수, 수직 하중 등을 조절할 수 있도록 설계되었다. 또한 수중 시험을 위해 시편 부위가 물 속에 잠기게 할 수 있는 물통을 갖고 있으며 튜브와 지지부 시편의 상대 미끄럼 변위 방향을 축 방향 또는 횡 방향으로 바꾸어 시험할 수 있다. 시험 장비에 대한 상세한 설명은 참고 문헌[3]을 참조할 수 있다.

2.3 마멸 시험 및 측정 방법

본 연구에서의 마멸 시험은 상온, 공기 중에서 수행하였다. 미끄럼 변위 범위(진폭의 두 배)는 10, 30, 50, 80, 100, 150 및 200 μm 로 하였으며 수직력으로는 10, 30 및 50 N 으로 하였다. 수직력이 30 N 인 경우는 모

든 미끄럼 변위 범위에 대해 시험하였으며 이 결과로부터 10 N 일 때에는 80 μm 이하, 그리고 50 N 일 때에는 50 μm 이상의 변위 범위에 대하여 시험하였다. 미끄럼 방향은 모두 축 방향으로 하였으며 상대 운동의 반복 주파수는 30 Hz 로 하고 반복 횟수가 100,000 회가 되었을 때 장비를 멈추고 시편을 풀어 내었다.

각각의 시험이 끝난 후 튜브 시편의 표면에 발생한 마멸의 형상을 측정 현미경을 이용하여 관찰하였으며 현미경에 부착된 폐쇄회로 카메라에 의해 화상 데이터를 취득하였다. 또한 마멸의 정량화를 위해 튜브 시편의 마멸부위 깊이를 표면 거칠기 측정 장비를 이용하여 측정하였다. 표면 거칠기 측정 장비에서 기록되는 마멸부의 3 차원 데이터로부터 마멸 부피를 계산하였으며 이때, 개발된 마멸부피 계산 프로그램[4]을 이용하였다.

3. 부분 미끄럼 이론

서로 접촉하고 있는 두 개의 탄성체에 수직 하중 P 와 전단 하중 Q 가 작용하는 평면 접촉문제에서 수직 및 전단 방향의 변위를 각각 $h(x)$, $g(x)$ 라 하고 접촉면에서의 수직 및 전단 트렉션을 각각 $p(x)$, $q(x)$ 라 할 때 접촉역학에서의 지배 방정식은 다음과 같다[5].

$$\frac{E^*}{2} \frac{dh(x)}{dx} = \frac{1}{\pi} \int_{\text{contact}} \frac{p(\eta)}{x-\eta} d\eta - \beta q(x), \quad (1)$$

$$\frac{E^*}{2} \frac{dg(x)}{dx} = \frac{1}{\pi} \int_{\text{contact}} \frac{q(\eta)}{x-\eta} d\eta + \beta p(x) \quad (2)$$

여기서, E^* 및 β 는 각각 두 접촉 물체의 상이한 탄성적 성질을 나타내는 복합 탄성 계수 및 Dunders 상수로서 평면 변형을 상태에서 다음과 같이 정의 된다.

$$\frac{1}{E^*} = \frac{(1-\nu_1^2)}{E_1} + \frac{(1-\nu_2^2)}{E_2} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{1}{2} \left[\frac{\{(1-2\nu_1)/G_1\} - \{(1-2\nu_2)/G_2\}}{\{(1-\nu_1)/G_1\} + \{(1-\nu_2)/G_2\}} \right]. \quad (4)$$

식 (3) 및 (4)에서, 하첨자 1, 2 는 서로 다른 두 접촉 물체를 의미하며 ν 는 프와송비, 그리고 G 는 전단 강성 계수이다. 이제 두 물체의 탄성적 성질이 유사하여 $\beta=0$ 인 경우, 전단 하중 Q 가 작용할 때 접촉면에서 미끄럼이 발생하지 않는다고 가정하면(즉 $g=0$) 식 (2)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$0 = \int_{\text{contact}} \frac{q(\eta)}{x-\eta} d\eta. \quad (5)$$

식 (5)의 특이적분 방정식의 해는 접촉 영역을 $-a \leq x \leq a$ 라 할 때 다음과 같다.

$$q(x) = \frac{Q}{\pi\sqrt{a^2-x^2}} \quad (6)$$

즉, 전단 트랙션 $q(x)$ 는 접촉부 경계에서 특이점을 갖게 됨을 알 수 있고 이것은 두 접촉 물체가 상대 변위를 갖지(미끄러지지) 않기 위해서는 마찰계수가 무한대가 되어야 하는 물리적 모순점을 갖게 된다. 따라서 전단 하중이 작용하는 경우에는 접촉부 가장자리에 항상 미끄럼이 발생하게 된다. 이때 미끄럼이 발생하지 않는 접촉면의 중앙 부위를 고착 영역이라 하고 그 크기를 $-c \leq x \leq c$ ($|c| \leq |a|$)라 할 때, Hertz 접촉인 경우 c 는 다음과 같이 구해진다.

$$\frac{c}{a} = \sqrt{1 - \frac{Q}{\mu P}} \quad (7)$$

여기서 μ 는 정지 마찰 계수이다. 즉 Q 가 증가하기 시작하여 μP 가 되기 전까지는 부분 미끄럼 상태이며 $Q = \mu P$ 일 때부터 전 미끄럼 상태가 된다.

4. 시험 결과 및 고찰

4.1 마멸면 관찰

3 절에서의 이론적 방법을 마멸 실험에 적용하기 위해서는 전단 하중 Q 와 정지 마찰 계수 μ 에 대해 고려하여야 한다. 즉, 마멸은 Q 의 증가와 감소가 반복될 때 발생하

며 따라서 부분 미끄럼 상태에서는 고착 영역 크기가 하나의 전단 하중 사이클 내에서 계속 변하게 된다. 또한 마멸 입자가 접촉면에 발생하면 접촉이 시작되었을 때의 μ 가 유지 되지 못하고 변하게 된다. 이에 따라 P 가 일정하게 유지되고 있다 하더라도 전단 하중 사이클의 진행에 따라 μP 가 변하여 고착 영역의 크기를 변화시킨다.

이러한 이유로 마멸 실험에서는 일반적으로 전단 하중 대신에 상대 미끄럼 변위의 진폭을 변수로 이용하며 수직 하중을 또 다른 변수로 하여 실험한 후 마멸부 및 마멸량을 분석함으로써 부분 미끄럼과 전 미끄럼을 구분하고 있다. 또 이로부터 Fretting Map 을 생산하기도 한다. Fig. 3 에는 기 발표된 Fretting Map[1]을 다시 구성하여 보여주고 있으며 본 연구에 사용한 각각의 수직 하중 및 상대 미끄럼 변위의 진폭(즉 변위 범위의 반)을 함께 표시하였다. 이로부터 Fig. 3 의 프레팅 지도에 의해서는 본 연구에서 수행한 시험 조건 중 수직 하중 30 N, 상대 미끄럼 변위의 진폭 5 μm (변위 범위 10 μm)인 경우만 부분 미끄럼 발생 조건으로 볼 수 있으며 그 이외에는 모두 전 미끄럼 상태가 되었음을 알 수 있다. 그러나 본 연구에서 사용한 시편의 형상은 프레팅 지도를 위해 사용된 시편과 다르므로 부분 미끄럼과 전 미끄럼의 분류가 Fig. 3 에서의 프레팅 지도에서 분류된 것과 비교하여 달라질 수 있을 것으로 예상하였다.

마멸 시험이 완료된 후 튜브 시편에 나타난 마멸 흔적을 현미경으로 관찰하여 Fig.

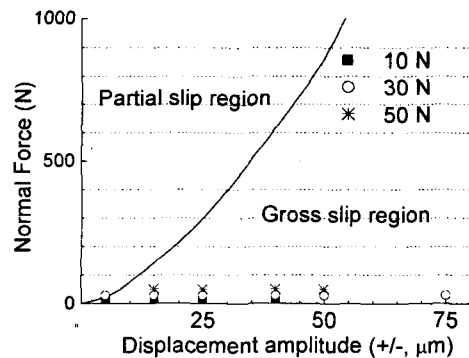
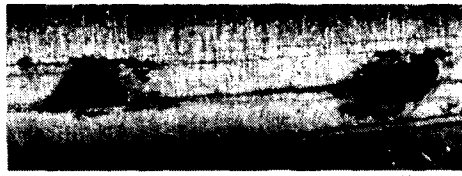
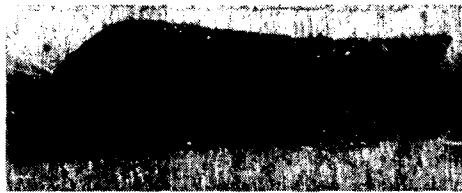


Fig. 3 Present test condition in the fretting map [1].



(a) $P = 30 \text{ N}$, $\delta = 30 \mu\text{m}$ (partial slip)



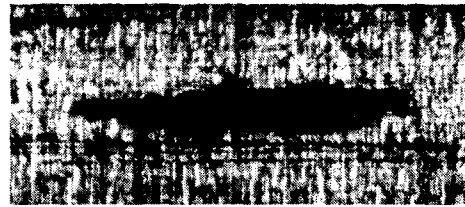
(b) $P = 30 \text{ N}$, $\delta = 200 \mu\text{m}$ (gross slip)

Fig. 4 Wear scar on tube specimen induced by the contact with truncated wedge (Fig. 1(a)).

4 및 Fig. 5 에 나타내었으며 각각 지지부의 형상이 Fig. 1(a)와 (b)인 경우 관찰된 마멸을 보여 준다. 지지부의 끝단이 *truncated wedge* 형상인 Fig. 1(a)인 경우에는 부분 미끄럼과 전 미끄럼 상태를 마멸이 접촉부 경계에서 나타난 경우와 접촉부 전체에서 나타난 경우로 뚜렷하게 구분할 수 있었다. 이와는 달리 Fig. 1(b)의 *rounded punch* 인 경우에는 마멸 흔적의 위치로부터는 뚜렷하게 구분하기가 힘들었다. 이때에는 마멸부의 길이가 접촉부 전체의 길이보다 짧게 나타난 것과 동일하게 나타난 것으로 구분할 수 있었으며 이를 각각 부분 미끄럼과 전 미끄럼에 해당하는 경우로 생각하였다.

해석적 관점에서 보면 *rounded punch* 의 경우에 비해 *truncated wedge* 인 경우에 접촉 트랙션의 최대값이 더 크게 된다. 즉 *truncated wedge* 에서는 평탄부 끝단의 기울기가 달라지는 양 경계에서 트랙션 값이 급격히 증가하나 *rounded punch* 에서는 라운딩 반지름이 클수록 접촉부 경계 부근에서 나타나는 최대 트랙션이 상당히 감소하게 된다[6,7]. 이에 따라 Fig. 1(a)의 경우에 접촉부의 경계에서 마멸 흔적을 더욱 뚜렷이 볼 수 있었던 것으로 추정된다. 이것은 향후 미끄럼 영역에 대한 고찰과 함께 해석적으로 연구하기에 흥미 있는 주제라 사료된다.

Table 2 및 Table 3 에는 각각 Fig. 1(a) 및 Fig. 1(b)의 지지부 형상에 대해 튜브 시편에



(a) $P = 30 \text{ N}$, $\delta = 30 \mu\text{m}$ (partial slip)



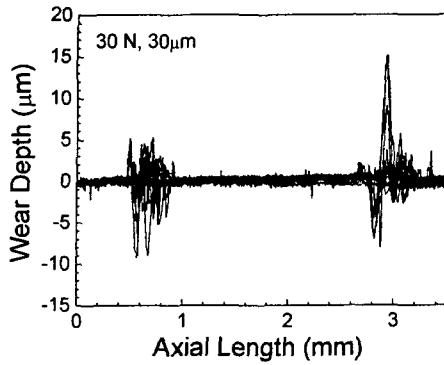
(b) $P = 30 \text{ N}$, $\delta = 200 \mu\text{m}$ (gross slip)

Fig. 5 Wear scar on tube specimen induced by the contact with rounded punch (Fig. 1(b)).

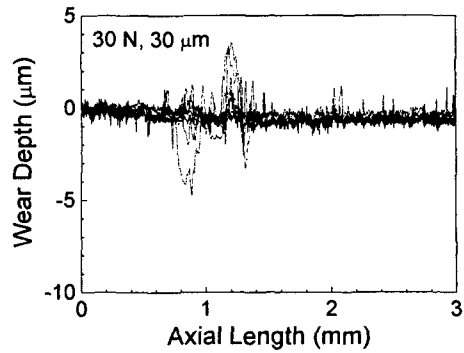
나타난 마멸의 형상을 관찰한 결과를 다음 절에서 서술할 마멸 깊이와 부피와 함께 보여 주고 있다. 이때 마멸의 형태를 'Type 1' 과 'Type 2'로 구분하였으며 Type 1 형태의 마멸은 부분 미끄럼에서의 마멸을 정의한 것으로서 Fig. 1(a) 지지부(*truncated wedge*)와의 접촉인 경우에는 접촉부 양쪽 경계에서 분리 되어 나타난 것(즉 Fig. 4(a)), Fig. 1(b) 지지부(*rounded punch*)와의 접촉인 경우에는 접촉부 길이보다 짧은 마멸 흔적이 나타난 것(즉 Fig. 5(a))을 의미한다. 한편 Type 2 는 전 미끄럼을 나타내며 지지부의 형상에 관계 없이 접촉부 전 길이에서 마멸이 발생한 것으로 정의하였다. Table 2 및 Table 3 에 나타난 Type 1 과 Type 2 의 분포로부터 수직 하중이 증가하면 부분 미끄럼 상태가 되는 미끄럼 변위가 증가하는 현상을 확인할 수 있다.

4.2 마멸 깊이 및 부피 분석

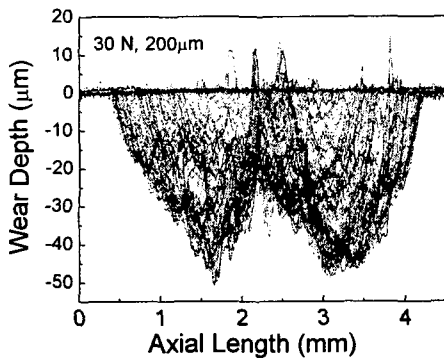
측정 현미경에 의해 튜브 시편의 마멸면을 관찰한 후 표면 거칠기 측정장비를 이용하여 마멸부의 궤적을 측정하였다. 사용한 표면 거칠기 측정장비는 접촉식으로서 탐침(*stylus*)이 튜브 시편에 접촉하여 마멸부 위를 진행할 때 마멸의 깊이만큼 탐침이 상하이동하며 위치의 좌표값이 기록되는 것으로 마멸의 깊이를 직접 측정할 수 있다. 이때 탐침의 진행 방향에 직각인 방향으로 일정



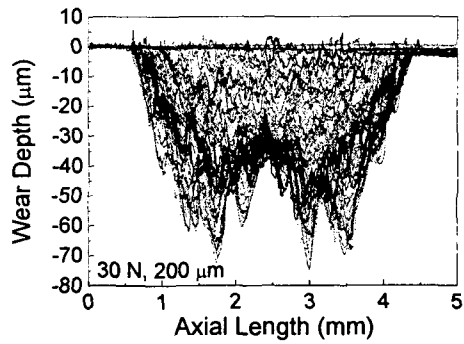
(a) $P = 30 \text{ N}$, $\delta = 30 \mu\text{m}$ (partial slip)



(a) $P = 30 \text{ N}$, $\delta = 30 \mu\text{m}$ (partial slip)



(b) $P = 30 \text{ N}$, $\delta = 200 \mu\text{m}$ (gross slip)



(b) $P = 30 \text{ N}$, $\delta = 200 \mu\text{m}$ (gross slip)

Fig. 6 Wear profiles of Fig. 4 (i.e., wear induced by the contact with truncated wedge).

Fig. 7 Wear profiles of Fig. 5 (i.e., wear induced by the contact with rounded punch).

거리만큼씩 이동시키며 측정을 반복하면 마멸 부위 전체에 대한 3 차원적 데이터를 얻게 된다.

Fig. 6 및 Fig. 7 에는 각각 Fig. 1(a) 및 Fig. 1(b)의 지지부 형상에 대해 튜브 시편에 나타난 Type 1 과 Type 2 마멸을 표면 거칠기 측정장비로 측정한 결과를 보여 주고 있다. 여기서 마멸부의 깊이 방향 궤적이 매우 불규칙한 것을 알 수 있으며 따라서 기 개발 하였던 프로그램을 이용하여 마멸 부피를 계산하였다[4]. 이 프로그램은 Fast Fourier Transform 과 Windowing 등 신호처리 방법을 활용한 것으로서 마멸부의 형상을 단순화하여 부피를 구하는 것보다 정확하고 타당한 결과를 줄 수 있다. 특히 부분 미끄럼에서의 마멸과 같이 마멸량이 크지 않은 경우에

유용한 방법이다.

Table 2 와 Table 3 에는 각각 Fig. 1(a) 및 Fig. 1(b)의 지지부 형상에 대해 수직 하중 P 와 미끄럼 변위 범위 δ 에서 나타난 마멸의 측정 결과를 요약하여 보여 주고 있다. 예상한 대로 마멸의 형태가 Type 1 에서 Type 2 가 될 때 마멸 부피가 급격히 증가함을 알 수 있다. 이것은 마멸 부위의 면적과 깊이가 증가함에 따라 나타난 것이다. 마멸의 형태가 Type 2 일 때에는 지지부의 형상에 관계 없이 각 수직 하중에서 미끄럼 변위 범위가 증가하게 되면 마멸 깊이와 부피가 동시에 증가하였다.

그러나 마멸 형상이 Type 1 일 경우에는 조금 다른 경향을 보였다. 즉 Table 2 와 Table 3 에서 공통적으로 10 N 의 수직 하중에서 10 μm 일 때의 마멸 깊이와 부피가 30

Table 2. Wear depth, volume and type on tube specimen in the case of the contact with truncated wedge.

δ \ P	10 N			30 N			50 N		
	Depth (μm)	Volume (10^{-6}mm^3)	Wear Type	Depth (μm)	Volume (10^{-6}mm^3)	Wear Type	Depth (μm)	Volume (10^{-6}mm^3)	Wear Type
10 μm	10.51	62.36	1	7.02	20.24	1	-	-	-
30 μm	5.30	31.02	1	9.29	32.30	1	9.74	42.89	1
50 μm	8.08	500.57	2	16.98	83.82	1	2.47	3.10	1
80 μm	19.11	1258.40	2	20.84	3057.93	2	23.36	198.91	1
100 μm	-	-	-	29.81	5417.76	2	26.03	5063.47	2
150 μm	-	-	-	39.84	11203.71	2	-	-	-
200 μm	-	-	-	50.98	22016.01	2	-	-	-

Table 3. Wear depth, volume and type on tube specimen in the case of the contact with rounded punch.

δ \ P	10 N			30 N			50 N		
	Depth (μm)	Volume (10^{-6}mm^3)	Wear Type	Depth (μm)	Volume (10^{-6}mm^3)	Wear Type	Depth (μm)	Volume (10^{-6}mm^3)	Wear Type
10 μm	34.81	627.01	1	7.98	36.39	1	-	-	-
30 μm	15.53	197.21	1	4.71	5.16	1	-	-	-
50 μm	29.76	1733.54	2	10.24	153.90	1	3.34	3.85	1
80 μm	-	-	-	32.25	3942.98	2	13.31	109.08	1
100 μm	-	-	-	33.83	9023.89	2	25.85	3563.80	2
150 μm	-	-	-	57.65	15367.59	2	-	-	-
200 μm	-	-	-	72.48	28758.87	2	-	-	-

μm 일 때의 그것보다 크며 50 N에서 50 μm 의 미끄럼 변위 범위로 시험한 경우의 마멸 깊이 및 부피가 다른 경우에 비해 현저하게 작게 나타난 현상을 볼 수 있다. 또 Table 3에서 30 N이고 30 μm 일 때의 마멸 깊이와 부피가 다른 경우에 비해 작은 것, 특히 수직 하중이 10 N 일 때의 마멸 깊이 및 부피가 30 N과 50 N 일 때보다 큰 것으로부터 부분 미끄럼 상태 내에서 마멸이 현저하게 줄어드는 어떤 특정한 하중 및 미끄럼 변위 범위 값이 존재하는 것처럼 보인다. 이러한 값(또는 범위)의 존재는 좀 더 많은 시험을 통하여 확인할 수 있을 것이며 특히 지지부의 형상에 대한 의존성을 밝혀야 할 것이다.

부분 미끄럼에서 전 미끄럼 상태로의 전이를 접촉면에서의 에너지 방출이 급격히 증가하는 것이라 할 때, 전 미끄럼 상태가 시작되면 급격한 마멸량의 증가가 있게 된다고 생각할 수 있다. 이에 따라 Table 2와 Table 3의 결과로부터 접촉부 길이 전체에 대해 마멸이 발생하여 마멸 부피가 급격히 증가할 때를 전 미끄럼 상태로의 전이라 판

단하였다. 즉, 수직 하중 10, 30, 50 N 일 때 미끄럼 변위 범위가 각각 50, 80, 100 μm 이 되면 전 미끄럼으로의 전이가 발생한 것으로 생각하였다.

이 결과를 [1]에서 제시된 Fretting Map에 같이 도시하면 Fig. 8과 같다. 본 연구에서의 시험 결과로부터 부분 미끄럼 영역이 더 넓어짐을 알 수 있다. 이것은 접촉 물체의 형상이 마멸과 에너지 방출에 영향을 미친다는 것을 의미한다. 따라서 기계 설계 측면에서 접촉부에서의 마멸 손상을 억제하기 위해 부분 미끄럼 상태를 형성시키기 위해서는 접촉부의 형상 설계가 중요하다는 것을 알 수 있다.

한편 일반적으로 마멸의 깊이 방향으로의 궤적은 부분 미끄럼일 경우 접촉부의 양쪽 가장자리에서 마멸이 발생하는 이유로 “W” 형상이 되며 전 미끄럼인 경우는 접촉부 전체에서 마멸이 발생하므로 “V” 또는 “U” 형상이 된다고 알려져 있다. 그러나 Fig. 6(b) 및 Fig. 7(b)에서 나타난 마멸부 궤적으로부터 튜브와 지지부의 접촉에서는 전 미

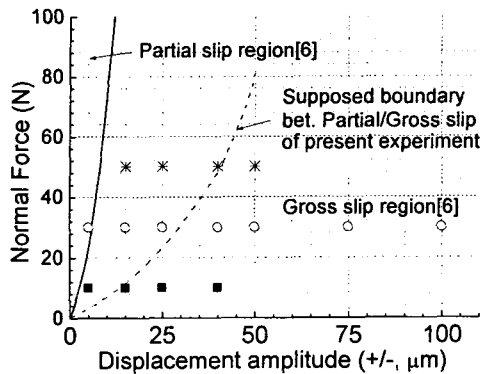


Fig. 8 The boundary between partial and gross slip for the present contact.

끄럼 상태에서도 “W” 형태로 된다는 것을 알 수 있었다. 또한 Fig. 7(a)에서 볼 수 있는 것과 같이 Fig. 1(b)의 지지부에 의해 접촉부 양 경계에서 마멸이 발생하지 않은 경우에도 관찰된 마멸부 한곳 내에서 “W” 형태의 마멸이 발생하는 것을 알 수 있었다.

5. 결론

부분 미끄럼에서 전 미끄럼 상태로의 천이에 영향을 미치는 접촉부의 형상에 대한 실험적 연구로서 지르칼로이-4 로 된 튜브와 truncated wedge 및 rounded punch 형상의 끝단을 갖는 지지부와 접촉 마멸 시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 천이 시의 미끄럼 변위 값은 수직 하중의 크기에 따라 달라지며 10 N 일 때 30 - 50 μm, 30 N 일 때 50 - 80 μm, 50 N 일 때 80 - 100 μm 으로 나타났으며, 기존의 Fretting Map 보다 부분 미끄럼의 영역이 더 크게 평가된 점으로부터 접촉부 형상이 미끄럼 상태 천이에 영향을 미치고 있다는 것을 확인하였다.
2. 부분 미끄럼 상태에서 truncated wedge 형태의 지지부에 의한 접촉에서는 접촉부의 경계에서 부분 미끄럼에서의 특징적인 마멸이 관찰되었으나 rounded punch 인 경우에는 이러한 현상이 발견되지 않고 접촉부 길이보다 짧은 마멸이 관찰되었다. 이것은 rounded punch 인 경우 접촉면에서의 응력이 현저히 작기 때문으로 사

료된다. 이의 검증을 위해서는 접촉역학을 이용한 이론적 분석이 필요하다.

3. 부분 및 전 미끄럼 상태 모두에서 마멸부는 접촉부 양 가장자리 부분에서 깊이 패이는 “W” 형태가 되며, 마멸 궤적이 불규칙한 형상을 갖는다. 따라서 마멸 부피를 계산할 때에 본 연구에서 앞서 발표한 방법[4]이 타당한 결과를 줄 수 있다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업 중 고성능지지격자 구조기술 개발과제에서 수행되었음.

참고 문헌

1. S. Fouvry, P. Kapsa and L. Vincent, *Wear*, 200 (1996) 186-205.
2. 김형규 외 3 인, 대한기계학회 1998 충청지부 추계학술대회 논문집, 169-174.
3. 김형규 외 4 인, 한국원자력학회 2000 추계학술발표회 논문집, 논문번호 59.
4. 김형규, 김선재, 한국윤활학회지, 17 (2001) 33-39.
5. K.L. Johnson, *Contact Mechanics*, (1989) Cambridge Univ. Press.
6. M. Ciavarella, D.A. Hills and G. Monno, *Proc. ImechE Part C*, 212 (1998) 319-328.
7. M. Ciavarella and G. Demelio, *Int. J. Mech. Sci.*, 41 (1999) 1533-1550.