

요철 표면의 마찰 및 마모 거동에 관한 연구

(A Study on Friction and Wear Behaviour of Undulated Surfaces)

권완섭* · 김경웅**

*(주)유공 대덕기술원, **한국과학기술원

1 서론

일반적으로 윤활은 상대 운동을 하는 두 면 사이에 매우 약한 전단 저항을 가진 고체막 또는 두꺼운 유막을 형성하게 하여 마찰과 마모를 줄이는 것이다. 형성된 윤활막의 두께가 두 상대면의 표면 거칠기보다 매우 클 경우, 미끄럼면 재료의 특성이나 표면의 미세한 거칠기가 윤활 성능에 미치는 영향은 극히 작으며, 마모도 거의 일어나지 않는다. 그러나 이처럼 두꺼운 윤활막에 의해서만 윤활되는 이상적인 윤활 상태가 계속해서 유지되는 경우는 극히 드물다[1, 2]. 기계 시스템이 극고온에서 운전된다거나 고정정 상태에서 운전되는 경우에는 윤활제를 따로 사용하기 어렵기 때문에 건조 마찰이 필연적으로 발생하게 된다[3]. 그리고 각종 미끄럼부의 구동시, 저속 운동시 혹은 윤활제 공급이 원활하지 못한 경우, 일시적인 과하중으로 유막 두께가 급격히 줄어드는 경우에는 경계 윤활 상태에서 운전된다.

Suh와 Sin[4]은 마찰력이 표면 돌기의 변형, 마모 입자 및 표면 미세 돌기에 의한 연삭 효과와 응착에 의하여 영향을 받는다고 설명하였다. 특히 다른 마찰력 성분보다 연삭 마찰 성분이 전체 마찰력에 주된 역할을 한다고 보고하였다. Komvopoulos 등[5, 6]은 건조 마찰에서 뿐만 아니라 경계 윤활 상태에 있는 미끄럼 면에서도 마모 입자에 의한 연삭 마찰 성분이 전체 마찰 성분 중에서 가장 주된 역할을 한다고 보고하였다.

마찰력의 대부분을 차지하는 연삭 마찰 성분을 억제하기 위한 수단으로 표면에 인위적인 요철을 만드는 연구가 진행되어 왔다[3, 7-9]. 표면의 요철은 마모 입자의 성장을 억제하고 마모 입자를 배출하는 역할을 하여 마찰 계수를 감소하게 한다. Suh와 Saka[9]는 요철 표면을 가지는 구리 디스크에 대하여 마찰 마모 거동을 연구하여 표면 요철이 마찰력을 감소시키며 마모를 줄이는 것을 보였다. Tian 등[8]은 일반적인 윤활제로는 윤활하기가 어려운 재료인 티타늄에 대한 요철 표면 실험을 수행하여 마찰 성능 개선을 보고하였으며, Saka 등[9]은 고온에서의 마찰 실험을 수행하여 윤활제가 고온에서 그 성능을 제대

로 발휘하지 못하는 경우에 표면에 요철을 만들어서 저마찰 상태를 유지할 수 있음을 보였다. Oktay와 Suh[10]는 윤활제가 마모 입자의 성장을 억제하는 기능을 가지고 있음을 보였으며, 요철 표면 역시 같은 기능을 한다고 보고하였다.

본 연구에서는 건조 마찰, 윤활제가 부족한 경우의 경계 윤활, 윤활제가 충분한 경우의 경계 윤활 상태에 대한 실험을 수행하여 각 윤활 상태에서의 요철 표면의 성능을 알아 보고 요철 표면의 요철 표면의 성능에 영향을 주는 주된 요인을 알아보았다.

2 실험

2.1 실험 장치

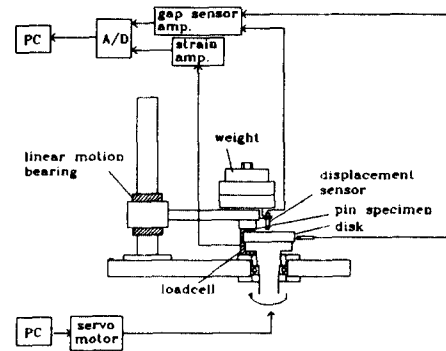


Fig. 1 Schematic of test apparatus

Fig. 1은 마찰 및 마모 실험용으로 제작된 핀-온-디스크형 실험 장치의 개략도이다. 서보 모터는 PC - D/A 변환기 - 서보 모터 컨트롤러에 의해 제어된다. 서보 모터가 타이밍 벨트와 타이밍 풀리를 통해 3개의 회전축을 구동시키며 각 회전축 위에 부착되는 디스크 시편이 정지 상태의 핀 시편과 미끄럼 접촉하며 회전하게 된다.

핀 시편은 토크 암의 끝 부분에 만들어진 시편 홀더에 고정되며, 토크 암의 반대쪽 끝에는 연직 방향과 회전 방향의 운동이 자유로운 직선 운동 베어링이

부착되어 직선 운동 베어링 안내축에 끼워져 있다. 따라서 접촉면에서 발생하는 마찰력은 직선 운동 베어링 안내축을 회전 중심으로 토크 압을 회전시키는 토크로 작용하므로, 로드셀로 이 토크에 의한 운동을 구속함으로써 구속력인 마찰력을 측정한다. 이 때 직선 운동 베어링부에서 작용하는 마찰 토크는 무시하였다. 또한 직선 운동 베어링을 사용하여 실험 도중 디스크가 수직으로 미세하게 움직인든지 혹은 미끄럼 면에서 입자가 성장할 경우 토크 압이 수직 방향으로 평행 이동을 하도록 설계되었다.

디스크의 측면에 변위 센서를 설치하여 회전속도를 측정하였다. 그리고 핀 시편 홀더에도 변위 센서를 설치하여 홀더의 움직임 및 핀 시편의 마모 두께를 측정하였다. 요철 표면의 경우 요철의 캐비티에 존재하는 마모 입자의 무게가 시편 무게에 상당한 영향을 줄 것이므로 이를 해결하기 위하여 변위 센서로 측정된 신호를 기준으로 마모 부피를 계산하였다.

마찰 실험 전후의 핀 시편 및 디스크 시편의 표면을 광학 현미경으로 관찰하였다.

2.2 시편

실험에 사용된 핀 시편은 주석이 주성분인 베어링 메탈(tin base babbitt)을 그 재료로 하였다. 실험에 사용된 베어링 메탈의 구성 성분과 물성값을 Table 1에 나타내었다. 요철 시편의 요철 형상과 그 치수는 Fig. 2와 Table 2에 나타내었다.

Table 1 Composition and properties of pin

composition	Sn 89.5%, Sb 6.9%, Cu 3.6% Pb, Bi, Al and Zn less than 0.01%
hardness	30 Hv
UTS	100 MPa
melting point	230°C
operation temp.	lower than 130°C
specific gravity	7.3

Table 2 Dimensions of surface undulation

land width	100, 200, 300, 400 μm
cavity width	350 μm
cavity depth	100 μm
contact area	4 mm X 4 mm

실험에 사용된 디스크 시편의 재질은 강(SM45C), 직경은 78 mm이고 실험시의 마모 트랙 직경은 63 mm이다. 디스크 시편은 연삭 가공후 1000메쉬 사포로 원주 방향으로 방향성이 있도록 폴리싱을 하였다. 따

라서 디스크가 회전하더라도 핀 시편에 대한 디스크 시편의 표면 거칠기의 방향성은 변하지 않는다.

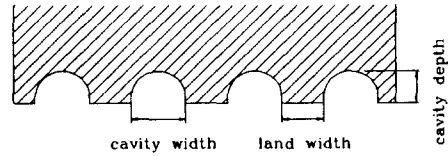


Fig. 2 Shape of surface undulation

2.3 실험 조건

실험 조건은 크게 다음의 세 가지로 나눌 수 있다.

1) 건조 마찰 상태

윤활제가 없는 상태에서 운전

2) 윤활제가 부족한 경계 윤활 상태

초기 디스크 상에 5 μm 두께로 윤활막을 형성시킨 후 운전

3) 윤활제가 충분한 경계 윤활 상태

디스크 시편과 핀 시편의 경계면이 윤활제에 완전히 잠긴 상태에서 운전

실험 조건 1)은 시스템이 건조 마찰 상태에서 운전되는 경우의 거동을 보기 위한 것이며, 실험 조건 2)는 시스템이 작동중 윤활제의 공급이 중단되어 윤활 이상이 발생하는 경우의 윤활 문제에 해당한다. 실험 조건 3)은 실제 당시부터 경계 윤활 상태에서 운전되도록 되어 있어 정상적인 상태에서 운전되고 있는 시스템의 성능을 알아보기 위한 조건이다.

가해 준 수직 하중은 건조 마찰인 경우에는 1.08 kg, 경계 윤활인 경우에는 5.11 kg이다.

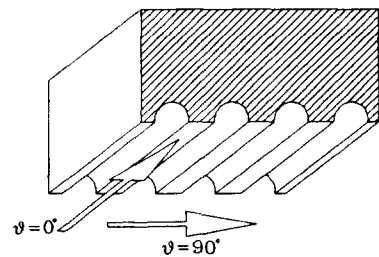


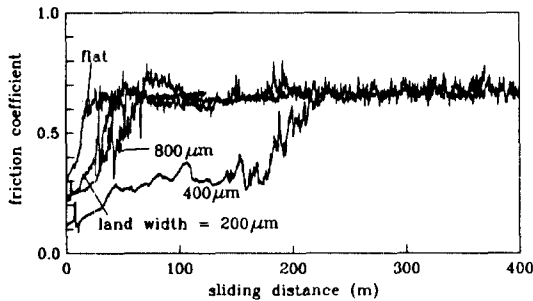
Fig. 2 Definition of sliding direction

실험은 랜드 폭이 다른 각각의 핀 시편에 대하여 미끄럼 방향을 바꾸어 가면서 수행하였다. 요철의 방향과 미끄럼 방향이 이루는 각을 θ 라고 하였으며, 이를 Fig. 3에 나타내었다. θ 가 0° 인 경우를 미끄럼 방향이 평행하다고 하고, 90° 인 경우를 미끄럼

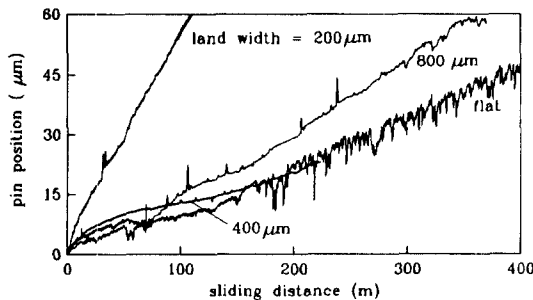
방향이 수직하다고 한다. 미끄럼 속도는 베어링 메탈 시편의 건조 마찰 실험의 경우 10.5 cm/s이고, 경계 윤활 실험의 경우 10 cm/s이다. 실험에 사용된 윤활제는 광유로 40°C에서 점도는 30.07 cSt이며 점도 지수는 106이다.

3 결과 및 고찰

Fig. 4는 건조 마찰 상태 마찰 마모 실험에서의 미끄럼 거리에 에서 핀의 위치대한 마찰력과 핀의 위치를 나타내고 있는 그림이다. 그림 (pin position)가 증가하는 방향이 마모가 되는 방향이다. 핀의 위치가 줄어드는 것은 핀 시편이 디스크와 떨어지는 것이며 마모 입자가 성장하는 것을 나타낸다. 요철 시편의 경우 마찰력이 서서히 증가하는 반면 평 시편의 경우 마찰 계수가 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 요철 시편의 경우 마모가 증가함에 따라 표면에 존재하는 요철이 그 기능을 상실하기 때문에 마찰 계수가 서서히 증가하며 결국 평 시편의 마찰 계수와 비슷한 값을 나타낸다. 평 시편의 경우 마모입자의 성장 탈락 과정인 핀 위치의 급격한 변동이 빈번히 관찰되었으며 요철 시편의 경우 그러한 현상이 매우 드물었다.



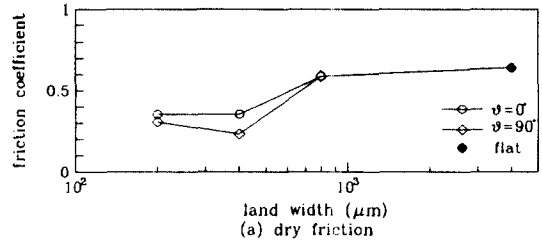
(a) friction coefficient vs. sliding distance



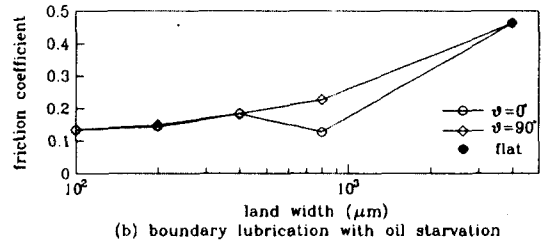
(b) pin position vs. sliding distance

Fig. 4 Friction coefficient and pin position vs. sliding distance, dry friction, $\theta = 90^\circ$

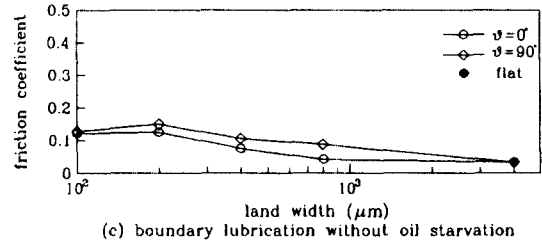
건조 마찰 실험을 수행한 베어링 메탈 요철 시편에 서는 Fig. 5(a)에 나타난 바와 같이 랜드 폭이 변함에 따라 그 마찰 계수 감소 효과도 다르게 나타났다. 랜드 폭이 감소하면 마모 입자의 성장이 억제되어 마찰 계수가 감소된다. 건조 마찰의 경우 랜드 폭이 400 μm 까지는 랜드 폭이 작을수록 저마찰 계수를 나타내지만, 200 μm 일 때에는 다시 마찰 계수가 증가하였다.



(a) dry friction



(b) boundary lubrication with oil starvation



(c) boundary lubrication without oil starvation

Fig. 5 Friction coefficient vs. land width

핀 표면의 요철이 기계적 충격으로 디스크 표면에 붙어 있는 마모 입자를 탈락시킬 수 있으며, 이 경우 핀 표면에 요철의 수가 증가할수록 디스크 표면의 마모 입자의 탈락이 쉽게 일어날 수 있으므로 마모 입자의 성장을 억제하게 된다. 본 실험에서 사용한 핀 시편은 랜드 폭이 작을수록 요철의 수가 증가하므로, 랜드 폭이 작은 시편은 요철의 기계적 충격에 의한 마모 입자의 성장 억제 효과가 더 크다. 따라서 랜드 폭이 감소할수록 마모 입자의 크기와 마찰 계수가 감소한다.

건조 마찰 실험에서 랜드 폭이 200 μm 인 시편의 경우 마찰면에서의 면압이 핀 시편 재료가 견디기에는

너무 가혹한 조건이 되어 오히려 마찰 및 마모 특성이 나빠지는 것으로 관찰되었다. 마찰 계수 저감 효과가 가장 큰 최적의 랜드 폭은 재료와 가해 준 하중의 영향을 받는 것으로 추정된다.

캐비티의 부피에 대한 마모 부피의 비율과 마찰 계수의 관계를 그림으로 나타내면 Fig. 6과 같다. 캐비티의 부피에 대한 마모 부피의 비율이 증가할수록 마찰 계수가 증가한다. 이전의 연구 [7-10]에서는, 디스크 표면에 캐비티가 존재하므로 마모 입자가 자중에 의해 캐비티로 완전히 빠지게 되어 있고, 따라서 캐비티에 있는 마모 입자는 더 이상 미끄럼 시스템에 영향을 주지 못하므로 실험 시작부터 끝까지 거의 같은 마찰 계수를 유지하게 된다. 그러나 본 연구의 경우에는, 핀 시편에 캐비티가 존재하여 그 속의 마모 입자가 미끄럼 시스템에 계속해서 영향을 주기 때문에 마찰 계수가 실험중 계속 증가한다.

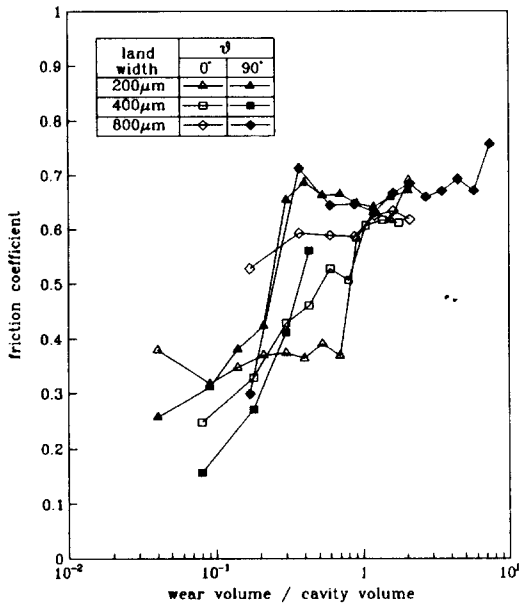


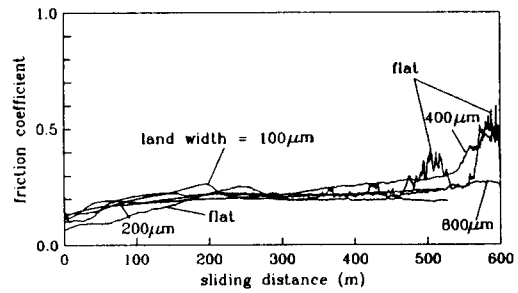
Fig. 6 Friction coefficient vs wear volume to cavity volume ratio, dry friction

Fig. 7은 윤활제가 부족한 경계 윤활 상태 마찰 마모 실험에서의 미끄럼 거리에 대한 마찰력과 핀의 위치를 나타낸 그림이다. 이 때에는 미끄럼 거리가 증가함에 따라 마찰 계수가 서서히 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 이 상태에서 요철 표면이 저마찰 계수를 오랜 시간 유지하는 것을 알 수 있으며, 이는 윤활제 공급이 중단되는 등의 이상이 발생하는 경우

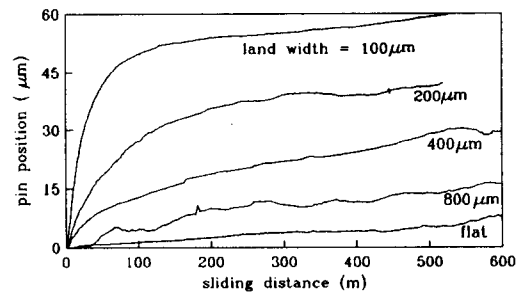
에 요철 표면을 사용하는 장점이 될 수 있다.

윤활제가 부족한 경계 윤활 실험의 경우 Fig. 5(b)에 나타낸 바와 같이 랜드 폭이 증가할수록 마찰 계수가 증가하는 경향을 보인다. 그러나 이와 같은 마찰 계수의 증가는 랜드 폭의 증가에 따른 요철 수의 감소에 의한 효과라기 보다는, 요철 표면의 캐비티 부분에서 윤활제를 함유하고 있기 때문에 생기는 결과이다. 윤활제를 많이 함유할 수 있는 경우, 즉 랜드 폭이 작아서 캐비티의 수가 많은 경우의 마찰 계수가 작게 나타났다.

윤활제가 충분한 경계 윤활 상태에서는 미끄럼 거리가 증가함에 따라 마찰 계수가 서서히 감소하거나 일정한 값을 유지하였다.



(a) friction coefficient vs. sliding distance



(b) pin position vs. sliding distance

Fig. 7 Friction coefficient and pin position vs. sliding distance, boundary lubrication with oil starvation, $\theta = 90^\circ$

윤활제가 충분한 경계 윤활 실험에서 접촉부 면압과 마찰 계수의 관계를 그림으로 나타내면 Fig. 8과 같이 면압이 증가할수록 마찰 계수가 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이 경우 Fig. 5(c)에서와 같이 랜드 폭이 감소할수록 마찰 계수 값이 증가한다. 이때의 마찰 계수는 접촉부의 접촉 면압에 의하여 크게 영향을 받는 것으로 생각된다. 이전에 수행된 경계

4 결론

윤활 상태에서의 요철 표면에 대한 마찰 마모 실험의 경우, 윤활제가 제 기능을 못하는 상태에서의 실험이 있기 때문에 요철 표면이 그 성능을 제대로 발휘하였다. 윤활제가 제 기능을 충분히 발휘하는 상태에서는 요철 표면이 그 성능을 발휘하지 못한다.

건조 마찰 상태인 Fig. 4에서 표면에 요철이 있는 경우의 마모 두께는 요철이 없는 경우의 마모 두께와 비슷하거나 더 크다. 윤활제가 부족한 경계 윤활 상태인 Fig. 7에서는 표면에 요철이 있는 경우가 없는 경우보다 더 큰 마모 두께를 나타내었다.

건조 마찰 상태에서 미끄럼 거리와 베어링 메탈 핀 시편의 마모 부피와의 관계를 보면 표면에 요철이 있는 경우가 없는 경우보다 마모 부피가 더 작다. 또한 미끄럼 방향에 수직인 경우가 마찰 계수를 작게 나타낼 뿐만 아니라 마모량도 더 작았다. 경계 윤활 실험에서는 표면에 요철이 있는 경우가 없는 경우에 비하여 마모량이 더 크게 나타났다.

요철 시편과 평 시편의 건조 마찰 및 경계 윤활 상태의 마찰 마모 실험을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 건조 마찰 상태에서는 핀 표면에 요철을 만듦으로써 마모 입자의 성장을 억제하여 마찰 계수와 마모량을 줄일 수 있다.
- 2) 건조 마찰 상태에서 마찰 계수는 캐비티의 부피에 대한 마모 부피의 비와 랜드 폭의 크기에 직접적인 영향을 받으며, 마찰 계수를 최소로 하는 최적의 랜드 폭이 존재한다.
- 3) 본 연구의 실험 조건에서 경계 윤활 상태에서의 마찰 계수는 표면의 기하학적 형상보다 접촉면의 면압에 더 영향을 받는다.
- 4) 경계 윤활 상태인 경우 표면 요철은 접촉부의 면압을 높이는 효과가 있어 오히려 마찰 마모 성능을 저하시킨다.

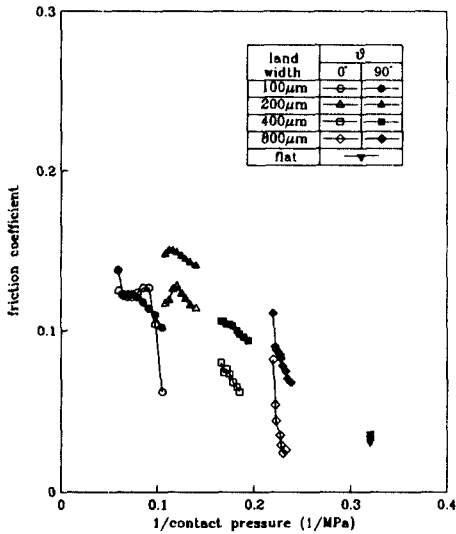


Fig. 8 Friction coefficient vs. inverse contact pressure, boundary lubrication without oil starvation

마찰 실험후 핀 표면은 Fig. 9와같이 건조 마찰 상태에서 미끄럼 방향을 수직으로 하여 실험한 요철 시편 시편의 표면에는 같이 작은 그루브들이 존재하였으나, 미끄럼 방향을 평행으로 하여 실험한 핀 표면에는 깊은 그루브들이 관찰되었으며, 이는 미끄럼 방향이 요철 표면의 마찰 마모에 상당한 영향을 주는 것을 보여 주고 있다.

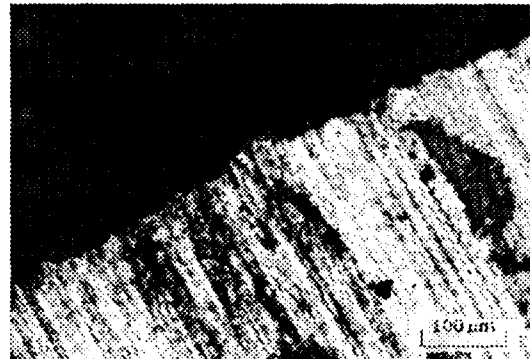


Fig. 9 Worn undulated surface, dry friction, $\theta = 90^\circ$, land width = 400 μm

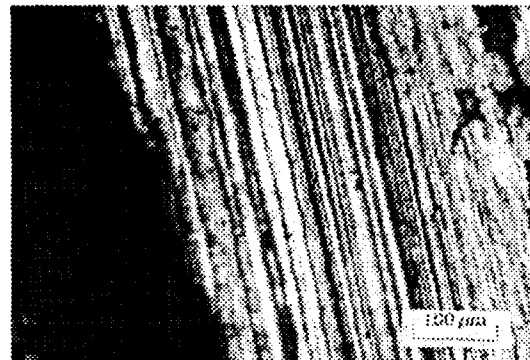


Fig. 10 Worn undulated surface, dry friction, $\theta = 0^\circ$, land width = 400 μm

참고문헌

1. G. C. Pratt, (1973), "Materials for Plain Bearing," International Metallurgical Reviews, Vol.18, pp.62-88.
2. N. A. MacQuarrie and D. S. Green (1982), "Bearing Material Requirements for the Future," Proceedings of 9th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, Univ. of Leeds, England, Tribology of Reciprocating Engines, Butterworths, pp.191-200.
3. N. P. Suh, M. Mosleh and P. S. Howard (1994), "Control of Friction," Wear, Vol. 175, pp.151-158.
4. N. P. Suh and H. C. Sin (1981), "The Genesis of Friction," Wear, Vol. 69, pp.91-114.
5. K. Komovopoulos, N. Saka and N. P. Suh (1985), "The Mechanism of Friction in Boundary Lubrication," ASME J. of Tribology, Vol. 107, pp.452-462.
6. K. Komovopoulos, N. Saka and N. P. Suh (1986), "Plowing Friction in Dry and Lubricated Metal Sliding," ASME J. of Tribology, Vol. 108, pp.301-313.
7. N. P. Suh and N. Saka (1987), "Surface Engineering," Annals of the CIRP, Vol. 36, pp.403-408.
8. H. Tian, N. Saka and N. P. Suh (1989), "Boundary Lubrication Studies on Undulated Titanium Surfaces," Tribology Transactions, Vol. 32, No. 3, pp.289-296.
9. N. Saka, H. Tian and N. P. Suh (1989), "Boundary Lubrication of Undulated Surfaces at Elevated Temperature," Tribology Transactions, Vol. 32, No. 3, pp.389-295.
10. S. T. Oktay and N. P. Suh (1992), "Wear Debris Formation and Agglomeration," ASME J. of Tribology, Vol. 114, pp.379-393.