

경계윤활에서 접촉 저항과 트라이볼로지 특성의 상관 관계에 관한 연구

이 홍철, 김 대은*

연세대학교 대학원

*연세대학교 기계전자공학부

Relationship between Contact Resistance and Tribological Behavior in Boundary Lubrication

Hong-Chul Lee, Dae-Eun Kim*

Graduate School, Yonsei University

*School of Electrical & Mechanical Eng., Yonsei University

Abstract- Boundary lubrication condition arises in most lubricated systems, especially during motion reversals and start up phase of operation. In this work electric contact resistance variations with respect to sliding conditions under lubrication is investigated. The motivation was to improve the understanding of the contact condition in the boundary lubrication regime. It is shown that electrical contact resistance is sensitive to sliding speed and surface condition of the specimens. Also, phenomena such as run-in during the initial phase of sliding and lubricant pile up near the sliding pin could be observed. The results of this work will aid in better understanding of the metal to metal contact condition in lubricated systems.

Key Words : boundary lubrication, contact resistance, friction

1. 서론

경계윤활은 상대 운동을 하는 두 물체의 표면 거칠기보다 접촉면 사이에 형성되는 윤활층의 두께가 더 작기 때문에 요철간의 직접적인 접촉이 이루어지는 상태이다. 베어링, 기어, 엔진의 캠/태뎃 등과 같은 많은 기계요소들은 높은 하중과 낮은 속도에서 경계윤활 상태를 경험하게 되며, 이 때에는 요철간의 직접적인 접촉으로 인해 유체윤활 상태보다 높은 마찰계수와 마멸율을 나타내며 부수적으로는 소음 등과 같은 불안정성을 발생시키기도 한다. 따라서 기계요소의 수명을 결정하는 영역으로서 경계윤활의 산업적 중요성은 매우 크다고 할 수 있다. Hardy[1]에 의해 경계윤활이라는 용어가 처음으로 사용된 이후 여러 학자들에 의해서 경계 윤활 상태에서의 다양한 마찰, 마멸 메커니즘이 제시되었다. 초기의 연

구 결과에 의하면 경계윤활에서는 윤활유의 분자 구조, 환경 조건, 접촉면의 온도, 고체와 윤활유간의 흡착 등이 중요한 변수로 인식되어 왔다. 경계윤활 상태에서는 하중이 윤활층의 유체역학적인 작용에 의해서 지지되지 못하고 금속간의 직접적인 접촉이 발생되면서 윤활막이 파손되며[2], 유체윤활 상태로 천이되는 영역에서는 윤활유의 점성이 증가하면 금속간의 직접적인 접촉이 감소하기 때문에 마찰력이 감소한다[3]. Bowden and Tabor[4]는 경계윤활 상태에서의 마찰력을 요철간의 응착력과 윤활막의 전단력으로 나타낸 경계윤활 모델을 제시하면서, 경계윤활면 사이에서의 윤활유의 분자 구조와 윤활막의 물리적 성질이 마찰에 중요한 영향을 미친다고 주장하였다.

그러나 Komvopoulos et al.[5]는 요철간의 응착력이나 윤활막의 전단력보다는 마멸입자와 경한 요철에

의한 갈림(plowing)이 경계윤활에서의 지배적인 마찰 메커니즘이라고 제시하면서 미끄럼 거리의 증가에 따른 마찰계수의 변화를 설명하였다.

위와 같이 경계윤활 상태에서의 마찰/마멸 메커니즘은 매우 다양하며, 표면이 연속적으로 미끄럼 운동을 하는 경우에는 요철간의 접촉/비접촉과 윤활층의 파괴가 동시에 일어나면서 마찰/마멸 메커니즘의 천이가 발생된다. 이때 윤활막에 의하여 요철이 분리되는 면적과 요철간의 접촉 면적의 비율은 마찰/마멸 현상과 직접적인 관계가 있다. 여기서 요철간의 접촉 비율은 표면 거칠기, 윤활유 특성, 하중, 미끄럼 속도 등과 같은 인자들의 복잡한 상관 관계에 의해 좌우되기 때문에 접촉면에서의 트라이볼로지 특성을 예측하거나 분석하기는 매우 어렵다.

본 연구에서는 경계윤활 상태에서 금속간 접촉면의 저항 변화를 실시간으로 측정하였으며, 동시에 광학 현미경으로 볼과 디스크의 접촉 상태를 관찰하였다. 측정된 저항 변화와 접촉 상태를 비교하여 경계윤활 상태에서 금속의 접촉 면적 변화와 접촉 상태를 예측하였으며, 이를 트라이볼로지 특성과 비교 분석하였다.

2. Constriction Resistance Model

윤활유가 덮혀있는 평평한 디스크 위에서 볼이 미끄럼 운동을 하는 경우에 접촉면은 윤활 영역과 요철간의 직접적인 접촉 영역으로 구분할 수 있으며 이를 도식적으로 나타내면 Fig. 1과 같다[6].

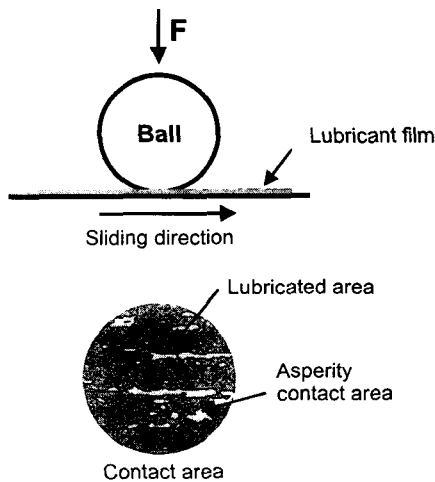


Fig. 1 A schematic view of lubricated area and asperity contact area

미끄럼 운동 중의 접촉 저항은 아래의 식 (1)과 같이 constriction resistance R_c 와 윤활유의 저항 R_l 의 합으로 나타낼수 있다[7].

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_l} = \frac{4rn}{\rho_1 + \rho_2} + \frac{A_l}{\rho_l \delta} \quad (1)$$

ρ_1, ρ_2 : specific resistances of the contact metals

ρ_l : the resistivity of the lubricant film

δ : film thickness

A_l : lubricated area

r : radius of the asperity contact area

n : number of areas

접촉 면적은 요철간의 접촉 면적과 윤활 영역의 합으로 정의할 수 있으며, 주어진 하중 조건에서 접촉 면적은 일정하기 때문에 윤활 영역과 요철간의 접촉 면적 사이에는 반비례 관계가 성립된다 [8]. 특히 윤활유의 전도도가 매우 낮을 때(예를 들면 비전도체)의 저항 변화는 요철간의 직접적인 접촉 면적의 변화만을 반영한 모델이 된다. 따라서 대부분의 윤활유가 비전도체이므로 접촉면에서의 저항 변화를 측정하면 금속 요철간의 직접적인 접촉 면적의 변화를 알 수 있다[9].

3. 실험방법

3.1 실험장치

Pin-on-disk tribotester는 Fig. 2와 같이 윤활유를 저장할 수 있는 용기내에 디스크를 고정하여 경계윤활 상태에서 다양한 조건으로 실험이 가능하도록 구성되었다. 윤활유 속에서 회전하는 디스크의 면에 구형의 금속 볼이 일정한 하중이 작용한 상태로 접촉하면서 두 금속간의 한 방향 미끄럼 운동이 일어난다. 디스크와 볼의 미끄럼 운동에 의한 마찰력은 유연한 판 스프링과 스트레인 링 센서에 전달되고 이때 유발된 스트레인량이 전압으로 변환/증폭되면서 실시간으로 마찰력이 측정되도록 하였다. 디스크와 볼이 접촉할 때의 저항 변화를 측정하기 위해서 Fig. 3과 같은 전기 회로를 구성하였으며, 50~300배의 zoom lens를 이용하여 접촉면 사이에서 발생하는 접촉 현상을 가시화하였다. 또한 실험 후에는 SEM을 이용하여 디스크 표면의 마멸 트랙을 관찰하였다.

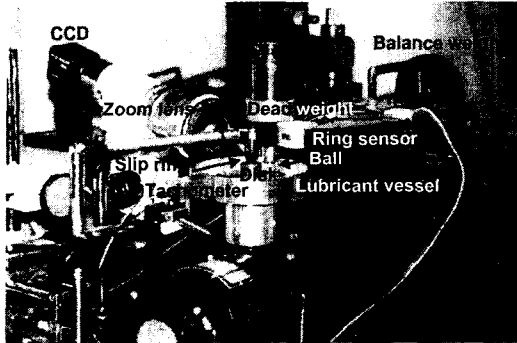


Fig. 2. Photograph of experimental set-up

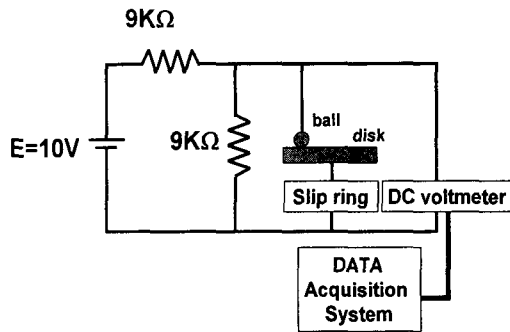


Fig. 3. A schematic view of electric circuit

3.2 실험방법 및 조건

윤활유가 뿌려져 있는 디스크를 다양한 하중과 미끄럼 속도로 회전시키면서 디스크와 볼사이의 마찰력과 접촉 저항을 동시에 측정하였다. 디스크 재질은 SCM45H, 상대 재료는 직경이 6.35mm인 베어링 볼 (STB2)을 사용하였다. 하중은 200gf에서 1000gf까지 dead weight 방식으로 일정하게 부과하였으며, 속도는 주어진 하중 조건하에서 100 rpm까지 일정한 간격으로 증가시켰다. SUS 디스크에 대해서는 베어링 볼 또는 SUS 핀을 접촉시킨 상태에서 일정한 하중과 속도로 미끄럼 거리를 증가시키면서 경계운행 상태에서의 마찰/마멸 메커니즘 변화에 따른 마찰력과 접촉 저항을 측정하였다. 접촉면에서 발생하는 순간적인 요철간의 상호 작용을 측정하기 위해서 10 KHz로 데이터를 처리하였으며 동시에 zoom lens를 이용하여 접촉 상황을 모니터링하였다. 접촉 저항과 마찰력의 변화가 발생되면 실험 장비를 멈추고 마멸 트랙면을 관찰하여 측정된 마찰력과 접촉 저항과의 상관 관계를 규명하였다.

Table 1. Experimental conditions

디스크 경도(Hv)	150, 350
볼경도(Hv)	250, 780
디스크 거칠기(μm)	0.01 이하
수직하중(gf)	200, 300, 400, 500, 700, 1000
미끄럼 속도(m/s)	0.05~0.3(20~100 rpm)
윤활유 점도(cSt)	32
윤활유 온도($^{\circ}\text{C}$)	20

4. 실험결과 및 고찰

4.1 미끄럼 속도의 증가에 따른 마찰계수와 접촉 저항의 변화

아래의 Fig. 4에서 보는 바와 같이 모든 하중 조건에서 미끄럼 속도의 증가에 따라서 마찰계수는 감소하는 경향을 보이고 있다. 이때 접촉면에서 측정된 저항값은 미끄럼 속도에 비례하여 증가하였으며, 같은 미끄럼 속도에서는 하중과 반비례 관계를 보이고 있다.

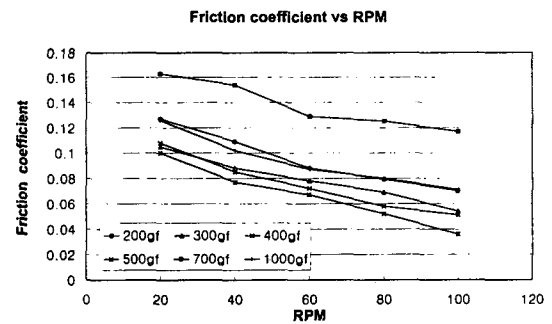


Fig. 4. Friction coefficient variation w.r.t. RPM

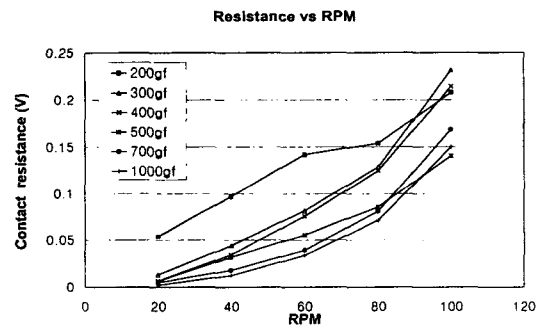


Fig. 5. Contact resistance variation w.r.t. RPM

4.2 하중의 증가에 따른 마찰계수와 접촉 저항의 변화

접촉면에 작용하는 하중의 증가에 따른 마찰계수의 변화는 초기에는 감소하였다가 다시 증가하는 경향을 보이고 있다. 반면에 접촉 저항은 하중에 반비례하여 감소하고 있으므로 하중의 변화에 따른 마찰계수와 접촉 저항 사이에는 상관 관계가 없는 것으로 나타났다. 이런 경우에는 하중이 접촉 저항에 미치는 영향이 마찰계수 변화-금속간의 접촉 면적 변화-에 의한 저항 변화보다 크기 때문에 하중의 변화에 따른 마찰계수와 접촉 저항 사이의 상관 관계를 직접 도출하기는 어렵다.

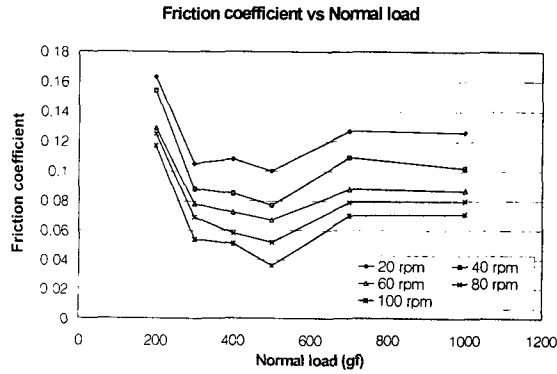


Fig. 6. Friction coefficient variation w.r.t. normal load

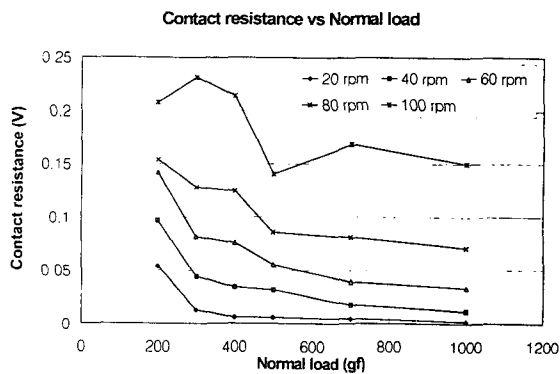


Fig. 7. Contact resistance variation w.r.t. normal load

4.3 초기의 마찰/마멸 특성

500gf의 일정한 하중이 가해진 상태에서 80 rpm의 미끄럼 속도로 SUS 디스크를 회전시키면서 마찰력과 접촉 저항을 측정하였으며 동시에 zoom lens

를 이용하여 접촉면에서 발생하는 트라이볼로지 현상을 관찰하였다. 미끄럼 운동이 시작된 후 15sec까지는 마찰계수와 접촉 저항이 동시에 주기적인 peak를 나타내며 fluctuation 되는 현상을 Fig. 8에서 보여 주고 있다. 이 시점에서는 건식상태와 같은 높은 마찰계수가 유발되었으며, 마멸 트랙면에서는 Fig. 9, 10에서와 같은 scratch 흔적만이 발견되었다. 그러나 디스크와 경도가 유사한 SUS 핀의 경우에는 동일한 조건에서도 위와 같은 초기 마찰계수와 접촉 저항의 fluctuation 현상이 나타나지 않았다. 따라서 경도차가 큰 재료는 윤활상태에서 미끄럼 운동이 일어날지라도 접촉 초기에는 경한 재료의 국부적인 요철에 의한 갈림 또는 scratch에 의해서 건식 상태와 유사한 마찰 특성을 보이다가 요철이 마멸에 의해 제거되면 경계윤활 상태로 천이되는 현상을 알 수 있다.

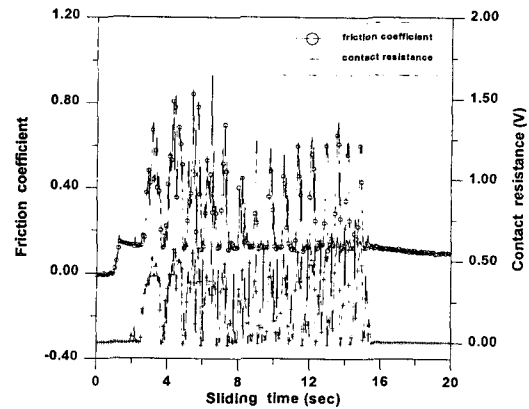


Fig. 8. Friction coefficient and resistance variation during 15sec

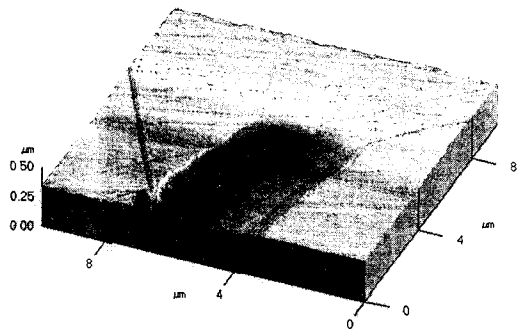


Fig. 9. AFM image of initial contact point

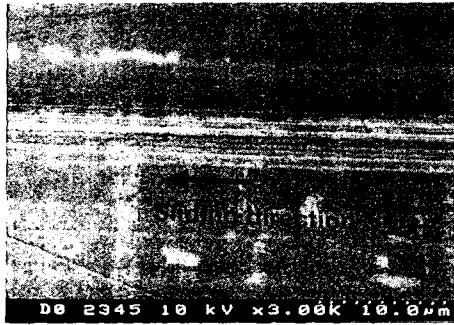


Fig. 10. SEM micrograph of wear track after 15sec sliding

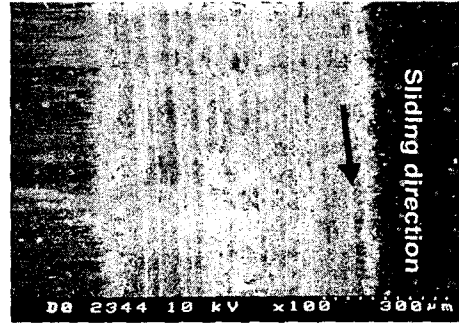


Fig. 12. SEM micrograph of smooth wear track

4.4 Run-in 이후의 마찰/마멸 특성

볼과 디스크 표면의 국부적인 요철들이 제거된 run-in 이후에는 일정한 마찰계수를 나타내며, 접촉 저항은 정지 상태와 같은 낮은 값을 보여 주고 있다. 이때의 마멸 트랙은 Fig. 12에서 보는 바와 같이 표면의 요철들이 제거되어 매우 매끈한 상태를 유지하고 있다. 그러나 미끄럼 속도를 증가시키면 마찰계수는 감소하며 접촉 저항은 증가하는 현상이 Fig. 13과 같이 나타났다. 접촉면 앞에 형성된 윤활막이 좌우로 분리되는 현상을 관찰할 수 있었다. 낮은 미끄럼 속도에서는 볼과 디스크의 완전한 접촉으로 인해 접촉면 앞에 디스크 표면의 윤활유가 계속 쌓이지만, 미끄럼 속도가 증가하면 급속간의 접촉 면적이 감소되기 때문에 이 부분에서는 윤활유의 유동이 제약을 받지 않으므로 윤활유가 접촉면 앞에 쌓이지 않고 좌우로 분리되었다.

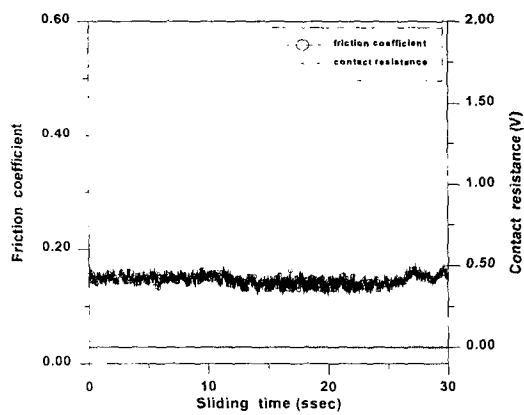


Fig. 11. Friction and resistance signal without fluctuation after run-in

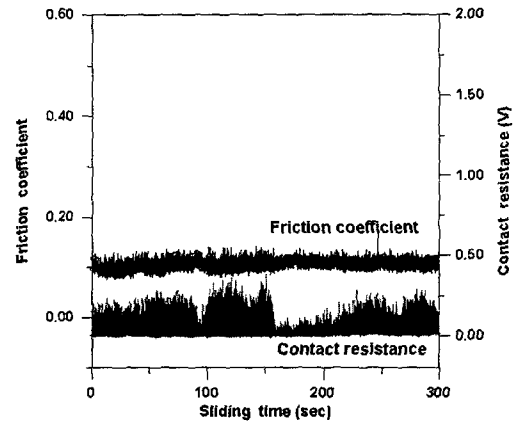


Fig. 13. Contact resistance variation due to increased sliding speed

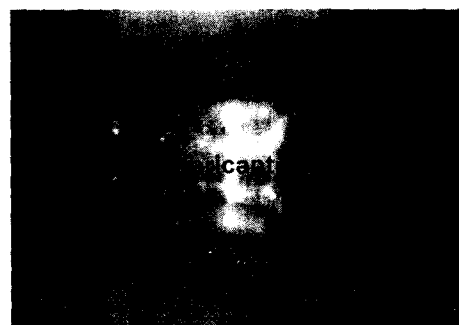


Fig. 14. CCD image of interface between ball and disk(500gf, 20 rpm)



Fig. 15. CCD image of interface between ball and disk(500gf, 80 rpm)



Fig. 17. CCD image of interface between pin and disk with particle generation

4.5 표면 손상 시점에서의 마찰/마멸 특성

미끄럼 거리의 증가에 따라 접촉면에서 발생하는 마멸 입자의 양은 증가하였으나, 마찰계수의 변화는 없었다. 반면에 마멸 입자가 관찰되는 시점에서는 작은 범위(0.2V)내에서의 electric fluctuation이 발생되었다. Fig. 18과 같이 주기적으로 마찰계수와 접촉 저항이 증가하는 경우의 마멸 트랙에서는 국부적인 손상 흔적이 발견되었다. 또한 표면에서 심한 마찰음과 진동이 수반되면서 마멸(severe wear)이 진행될 때에는 마찰계수가 순간적으로 건식 상태에서와 같은 높은 값을 나타내며, 접촉 저항도 마찰계수의 변화와 일치되면서 불규칙하게 나타났다.

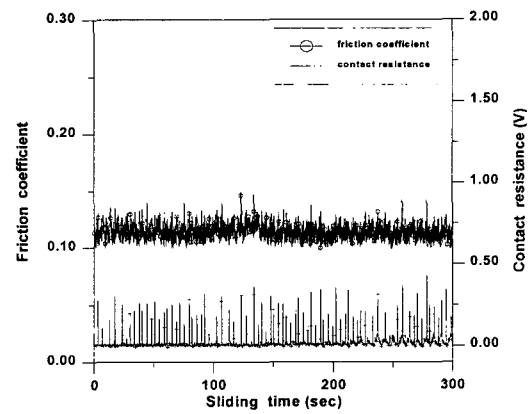


Fig. 18. Friction and resistance fluctuation due to the irregular interface topography

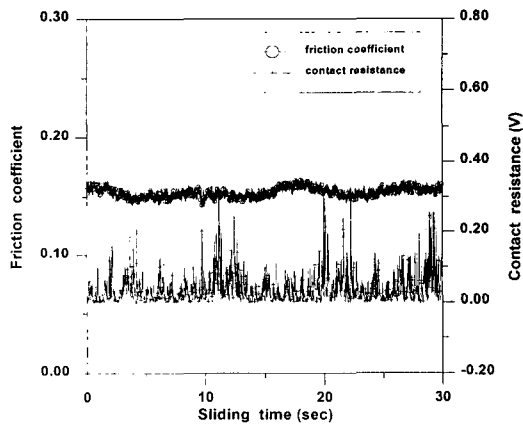


Fig. 16. Contact resistance fluctuation due to the wear particle generation

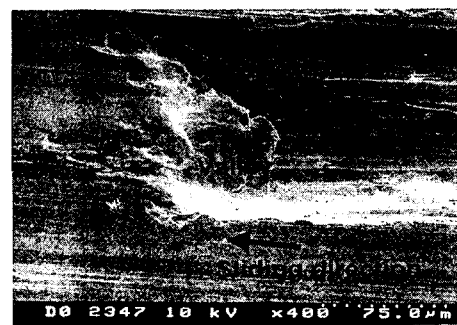


Fig. 19. SEM micrograph of wear track with hump and valley

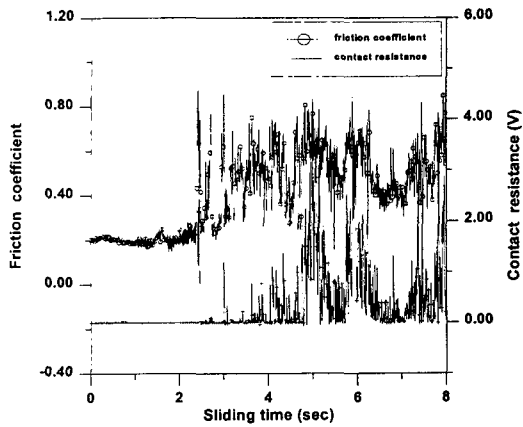


Fig. 20. Friction and resistance fluctuation due to the severe wear

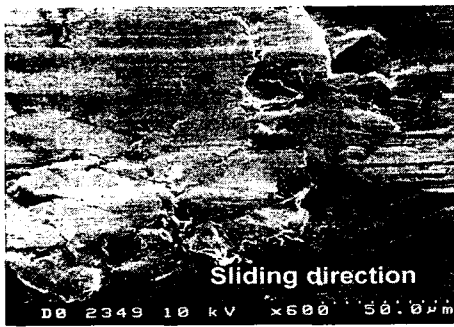


Fig. 21. SEM micrograph of severe wear

4.6 실험결과 고찰

본 연구에서는 constriction resistance model에서 제시한 바와 같이 미끄럼 속도가 증가함에 따라서 금속 요철간의 실 접촉 면적이 감소되어 마찰계수는 감소되고 접촉 저항은 증가하는 결과를 얻었다. 또한 미끄럼 거리의 증가에 따라 접촉면에서 발생하는 다양한 트라이볼로지 현상과 이 때의 마찰계수와 접촉 저항과의 상관 관계를 확인하였다. 마멸 트랙에서 관찰된 트라이볼로지 특성과 접촉 저항사이의 상관 관계를 도식화하여 제시하면 다음과 같다.

접촉면 사이의 마멸 입자에 의해서 발생하는 electrical noise는 Fig. 22에서 보는 바와 같이 마멸 입자에 의해서 두 고체간의 직접적인 접촉이 순간적으로 제약을 받으면서 저항의 변화가 유발되는 현상을 가정할 수 있다. 이때 점선으로 표시된 A→B의 궤적이 마멸 입자에 의해서 접촉이 안 되는 영역이

며, 마멸 입자의 크기가 작은 경우에는 큰 영향을 주지 못한다.

마멸 트랙면에 형성된 불규칙한 요철이나 severe wear 발생시의 wedge 등을 지날 때에는 기계적인 상호 작용(mechanical interlocking)에 의해서 마찰력과 접촉 저항이 크게 증가할 수 있다. 불이 요철(또는 hump)을 지나는 경우를 가정하면 Fig. 23의 A에서 B까지 이동하면서 마찰력은 크게 증가하지만 접촉 저항은 일정할 것으로 예상된다. 그러나 B점을 지나면서 순간적으로 불이 디스크와 분리되면서 저항이 크게 증가할 수 있을 것이다. 실제로 이 두가지 상황은 거의 동시에 일어나기 때문에 마찰계수와 접촉 저항은 동시에 크게 증가할 수 있는 것이다.

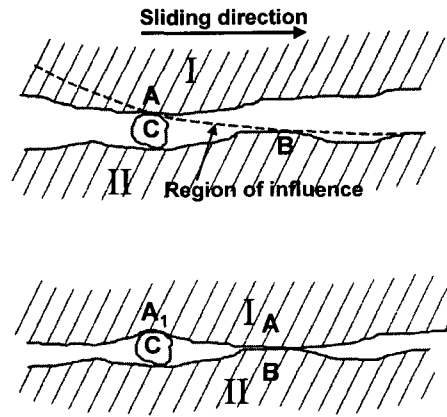


Fig. 22. Effect of particle on electrical contact noise

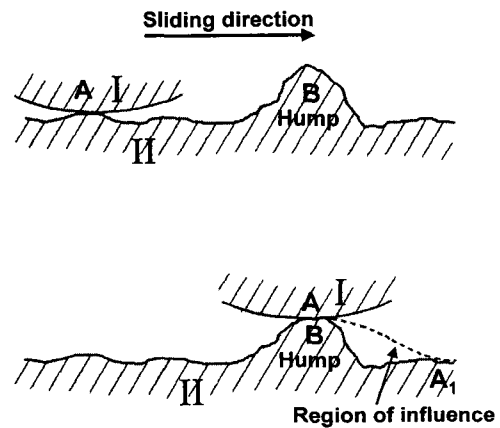


Fig. 23. Effect of hump(asperity) on friction and contact resistance during severe wear

5. 결 론

다양한 하중과 미끄럼 속도의 조건으로 경계윤활 상태의 마찰 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 경계 윤활 상태에서는 미끄럼 속도가 증가하면 급속간의 접촉 면적이 감소하면서 마찰계수는 감소하고 접촉 저항은 증가하였다.

2. 하중 변화에 대해서 마찰계수는 일정한 경향을 보이지 않지만 접촉 저항은 하중 증가에 비례하여 감소하였다.

3. 미끄럼 거리의 증가에 따라 접촉면에서 발생하는 다양한 트라이볼로지 특성은 마찰계수, 접촉 저항과 밀접한 상관 관계를 보이고 있으며, 이 때의 마찰계수와 접촉 저항을 이용하면 접촉면에서 발생하는 다양한 트라이볼로지 특성을 예측할 수 있다.

후 기

“이 논문은 (1998)년 한국학술진흥재단의 학술연구비에 의하여 지원되었음”

참고 문헌

- [1] W. B. Hardy and I. Doubleday, "Boundary Lubrication-The Paraffin Series", Proc. Roy. Soc. A, Vol. 102, pp. 550-574, 1922.
- [2] W. Hirst and J. V. Stafford, "Transition Temperatures in Boundary Lubrication," Proc. Instn. Mech. Engrs, Vol 186, pp. 179, 1972
- [3] M. J. Furey and J. K. Appeldoorn, " The Effect of Lubricant Viscosity on Metallic Contact and Friction in a Sliding System," ASLE Trans. Vol. 5, pp. 149-159, 1962
- [4] K. Komvopoulos, N. Saka, and N. P. Suh, "The Mechanism of Friction in Boundary Lubrication", ASME J of Tribology, Vol. 107, pp. 452-462, 1985.
- [5] S. T. Oktay and N. P. Suh, Wear Debris Formation and Agglomeration, ASME J of Tribology, Vol. 114, pp. 379-393, 1992.
- [6] X. Jiang, D. Y. Hua, H. S. Cheng, X. Ai and Si C. Lee, "A Mixed Elastohydrodynamic Lubrication Model with Asperity Contact", Journal of Tribology, Vol. 121, pp. 481-491, 1999.
- [7] R. Holm, Electric Contacts : Theory and Application, Springer-Verlag, 1967
- [8] Y. Z. Lee and K. C. Ludema, "The Shared-load Wear Model in Lubricated Sliding : Scuffing Criteria and Wear Coefficients", Wear, Vol. 138, pp. 13-22, 1990.
- [9] J. A. Greenwood, "Constriction Resistance and the Real Area of Contact", Brit. J. Appl. Phys., Vol. 17, pp. 1621-1632, 1966.