

## 경계윤활에서 접촉 저항과 트라이볼로지 특성의 상관 관계에 관한 연구

이홍철 · 김대은\*

연세대학교 대학원  
\*연세대학교 기계전자공학부

## Relationship between Contact Resistance and Tribological Behavior in Boundary Lubrication

Hong-Chul Lee and 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. 서 론

경계 윤활은 상대 운동을 하는 두 물체의 표면 거칠기보다 접촉면 사이에 형성되는 윤활층의 두께가 더 작기 때문에 요철간의 직접적인 접촉이 이루어지는 상태이다. 베어링, 기어, 엔진의 캠/태핏 등과 같은 많은 기계 요소들은 높은 하중과 낮은 속도에서 경계 윤활 상태를 경험하게 되며, 이 때에는 요철간의 직접적인 접촉으로 인해 유체 윤활 상태보다 높은 마찰계수와 마멸율을 나타내며 부수적으로는 소음 등과 같은 불안정성을 발생시키기도 한다. 따라서 기계 요소의 수명을 결정하는 영역으로서 경계 윤활의 산업적 중요성은 매우 크다고 할 수 있다. Hardy[1]에 의해 경계 윤활이라는 용어가 처음으로 사용된 이후 여러 학자들에 의해서 경계 윤활 상태에서의 다양한 마찰, 마멸 메커니즘이 제시되었다. 초기의 연구 결과에 의하면 경계 윤활에서는 윤활유의 분자 구조,

환경 조건, 접촉면의 온도, 고체와 윤활유간의 흡착 등이 중요한 변수로 인식되어 왔다. 경계 윤활 상태에서는 하중이 윤활층의 유체역학적인 작용에 의해서 지지되지 못하고 금속간의 직접적인 접촉이 발생되면서 윤활막이 파손된다[2]. 반면에 윤활유의 점성이 증가하면 유체 윤활 영역으로 천이되면서 금속간의 직접적인 접촉이 감소하기 때문에 마찰력이 감소한다[3]. Bowden과 Tabor[4]는 경계 윤활 상태에서의 마찰력을 요철간의 응착력과 윤활막의 전단력으로 나타낸 경계윤활 모델을 제시하면서, 경계 윤활면 사이에서의 윤활유의 분자 구조와 윤활막의 물리적 성질이 마찰에 중요한 영향을 미친다고 주장하였다. 그러나 Komvopoulos 등[5]은 요철간의 응착이나 윤활막의 전단력보다는 마멸 입자와 경한 요철에 의한 갈림(plowing)이 경계 윤활에서의 지배적인 마찰 메커니즘이라고 제시하면서 미끄럼 거리의 증가에 따른 마찰계수의 변화를 설명하였다. 이와 같이 경계 윤활 상

태에서의 마찰/마멸 메카니즘은 매우 다양하며, 표면이 연속적으로 미끄럼 운동을 하는 경우에는 요철간의 접촉/비접촉과 윤활층의 파괴가 동시에 일어나면서 마찰/마멸 메카니즘의 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 경계 윤활 상태에서 금속간 접촉면에서의 마찰력과 접촉 저항의 변화를 실시간으로 측정하였으며, 동시에 CCD 카메라를 이용하여 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].

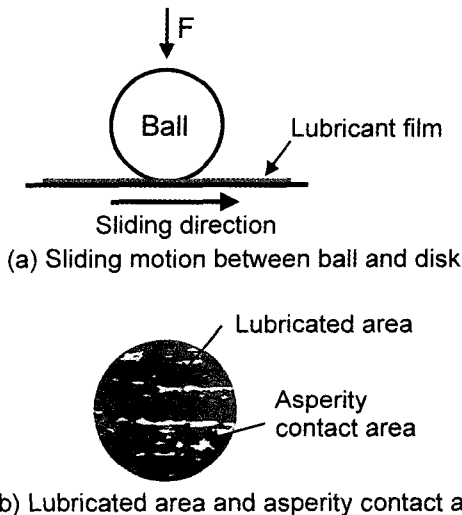


Fig. 1. A schematic view of sliding motion between ball and disk(a) and contact area(b) under boundary lubrication.

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

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

$\rho_1, \rho_2$ : specific resistances of the contact metals

$\rho_l$ : the resistivity of the lubricant film

$\delta$ : 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

편온-디스크 실험 장치는 Fig. 2와 같이 윤활유를 저장할 수 있는 용기 내부에 디스크를 고정하여 경계 윤활 상태에서 다양한 조건으로 실험이 가능하도록 구성되었다. 윤활유 속에서 회전하는 디스크의 면

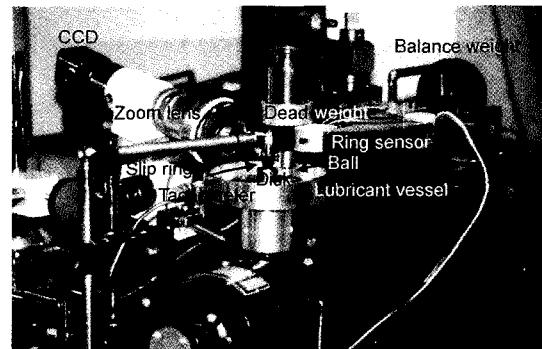


Fig. 2. Photograph of experimental set-up.

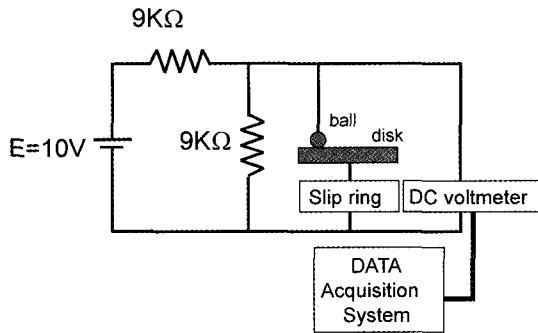


Fig. 3. A schematic view of electric circuit.

에 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 디스크와 볼의 접촉 상태를 관찰함으로써 트라이볼로지 현상을 가시화하였다. 또한 실험 후에는 SEM을 이용하여 디스크 표면의 마멸 현상을 관찰하였다.

3-2. 실험방법 및 조건

윤활유가 뿌려져 있는 디스크를 다양한 하중과 미끄럼 속도로 회전시키면서 디스크와 볼 사이의 마찰력과 접촉 저항을 동시에 측정하였다. 디스크 재질은 SM45H, 상대 재료는 직경이 6.35 mm인 베어링 볼(STB2)을 사용하였다. 하중은 200 gf에서 1000 gf 까지 dead weight 방식으로 일정하게 부과하였으며, 속도는 주어진 하중 조건에서 100 rpm까지 일정한 간격(20 rpm)으로 증가시키면서 하중과 미끄럼 속도의 변화에 대한 마찰 특성과 접촉 저항을 측정하였다. 또한 STS316 디스크에 대해서는 베어링 볼 또는 STS304 편을 접촉시킨 상태에서 동일한 하중과 미끄럼 속도 조건에서 미끄럼 거리를 증가시키면서 경계윤활 상태에서의 마찰/마멸 메커니즘 변화에 따른 트라이볼로지 현상과 접촉 저항을 측정하였다. 접촉면에서 발생하는 순간적인 요철간의 상호 작용을 측정하기 위해서 10 KHz로 데이터를 처리하였으며 동시에 zoom lens를 이용하여 접촉 상황을 모니터링 하였다. 접촉 저항과 마찰력의 변화가 발생되면 실

Table 1. Experimental conditions

구분	재질	경도 (Hv)	표면 거칠기 (Ra, μm)
디스크	SM45H	350	0.04
	STS316	150	0.01 이하
볼	STB2	780	0.03
	STS304	250	0.05
수직하중 (gf)	200, 300, 400, 500, 700, 1000		
미끄럼 속도 (m/s)	0.05 ~ 0.3(20 ~ 100 rpm)		
윤활유 동점도 (cSt)	32		
윤활유 온도 (°C)	20		

험 장비를 멈추고 마멸 트랙면을 관찰하여 측정된 접촉 저항과 트라이볼로지 현상과의 상관 관계를 규명하였다. 실험에 사용된 시편의 종류와 실험 조건은 Table 1과 같다.

4. 실험결과 및 고찰

4-1. 미끄럼 속도의 증가에 따른 마찰계수와 접촉 저항의 변화

다양한 하중과 미끄럼 속도에서의 SM45H 디스크와 STB2 베어링 볼의 접촉 실험은 Fig. 4에서 보는 바와 같이 모든 하중 조건에서 미끄럼 속도의 증가에 따라서 평균 마찰계수는 감소하는 경향을 보이고 있다. 이때 접촉면에서 측정된 저항값은 미끄럼 속도에 비례하여 증가하였으며, 같은 미끄럼 속도에서는 하중이 증가하면 저항은 대체로 감소하는 결과를 Fig. 5에서 보이고 있다.

4-2. 하중의 증가에 따른 마찰계수와 접촉 저항의 변화

접촉면에 작용하는 하중의 증가에 따른 마찰계수의 변화는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 초기에는 감

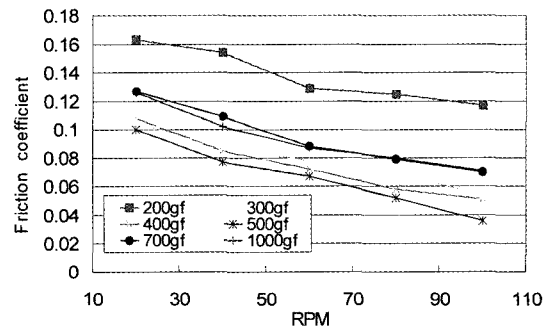


Fig. 4. Friction coefficient variation w.r.t. RPM.

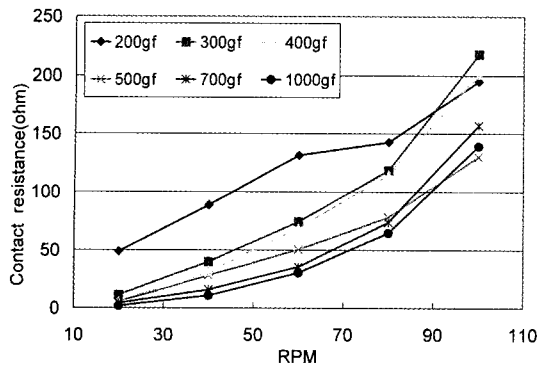


Fig. 5. Contact resistance variation w.r.t. RPM.

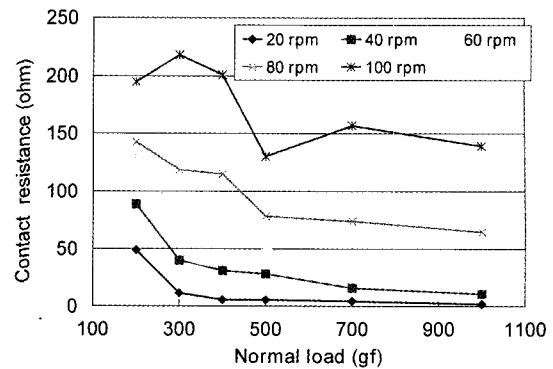


Fig. 7. Contact resistance variation w.r.t. normal load.

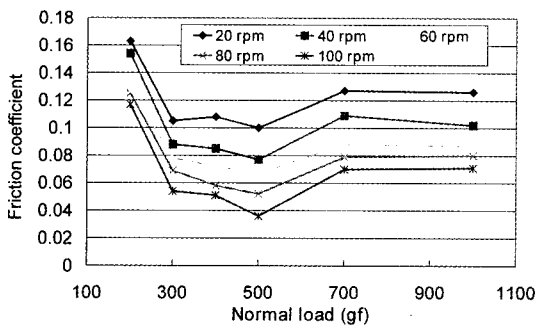


Fig. 6. Friction coefficient variation w.r.t. normal load.

소하였다가 다시 증가하는 경향을 보이고 있다. 반면에 접촉 저항은 하중의 증가에 반비례하여 감소하는 현상을 Fig. 7에서 확인할 수 있으므로 하중의 변화에 따른 마찰계수와 접촉 저항 사이의 일관성 있는 상관 관계는 나타나지 않았다. 위와 같은 경우에는 하중에 의한 접촉 저항의 변화가 금속간의 접촉 면적 변화에 의한 영향보다 크기 때문에 하중의 변화에 따른 마찰계수와 접촉 저항과의 직접적인 상관 관계를 도출하기는 불가능하였다.

4.3. 초기의 마찰/마멸 특성

접촉 초기의 마찰/마멸 특성을 확인하기 위해 500 gf의 일정한 하중이 가해진 상태에서 80 rpm의 미끄럼 속도로 STS316 디스크를 회전시키면서 마찰력과 접촉 저항을 측정하였다. 동시에 zoom lens를 이용하여 접촉면에서 발생하는 트라이볼로지 현상을 관찰하였다. 디스크와 베어링 볼의 접촉에서는 미끄럼 운동이 시작된 후 15초까지는 마찰계수와 접촉 저항이 동시에 주기적인 peak를 나타내며 fluctuation 되는 현상을 Fig. 8에서 보여 주고 있다. 이 시점에서는

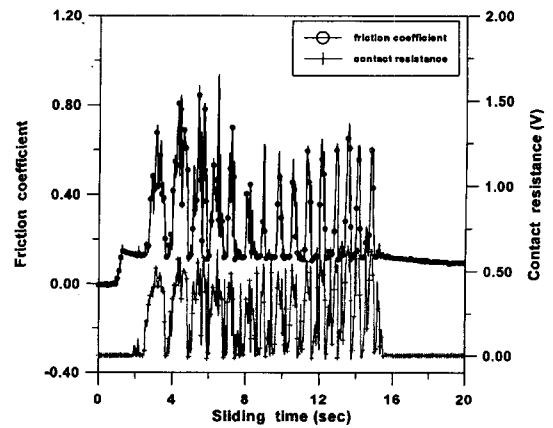


Fig. 8. Friction coefficient and resistance variation during 15 sec (STS316 disk-STB2 ball).

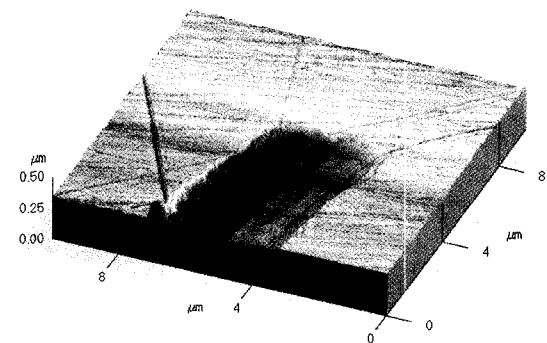


Fig. 9. AFM image of initial contact point (STS316 disk-STB2 ball).

긴식 상태와 같은 높은 마찰계수가 유발되었으며, 마멸 트랙에서는 Fig. 9, 10에서와 같은 scratch 흔적만이 발견되었다. 그러나 디스크의 경도와 유사한 STS 304 핀의 경우에는 동일한 조건에서도 초기 마찰계

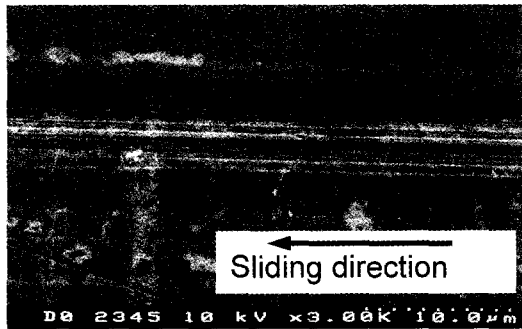


Fig. 10. SEM micrograph of wear track after 15sec sliding (STS316 disk-STB2 ball).

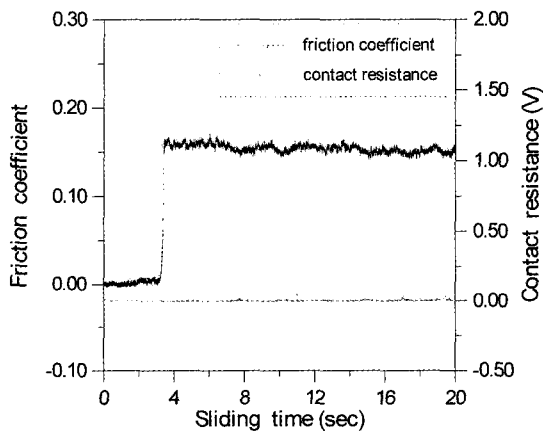


Fig. 11. Friction coefficient and resistance variation during 15 sec (STS316 disk-STB304 pin).

수와 접촉 저항의 fluctuation 현상이 나타나지 않았다(Fig. 11). 따라서 경도차가 큰 재료는 윤활 상태에서 미끄럼 운동이 일어날지라도 접촉 초기에는 경한 재료의 국부적인 요철에 의한 갈림 또는 scratch에 의해서 건식 상태와 유사한 마찰 특성을 보이다가 요철이 마멸에 의해 제거되면서 경계 윤활 상태로 천이되는 반면에 경도가 비슷한 재료의 경우에는 run-in 과정에서 갈림 또는 연삭 마멸 메커니즘의 영향이 감소하는 현상을 알 수 있다.

4-4. Run-in 이후의 마찰/마멸 특성

볼과 디스크 표면의 국부적인 요철들이 제거된 run-in 이후에는 Fig. 12와 같이 일정한 마찰계수를 나타내며, 정지 상태에서와 같은 낮은 저항값을 보여 주고 있다. 이 때의 마멸 트랙은 표면의 요철들이 제거되어 매우 매끈한 상태를 유지하고 있다(Fig. 13). 동일한 조건에서 미끄럼 속도를 증가시키면 마찰계

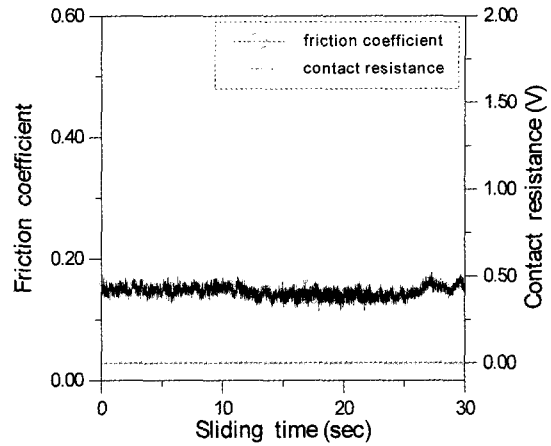


Fig. 12. Friction and resistance signal without fluctuation after run-in (STS316-STB2, 500 gf, 20 rpm).

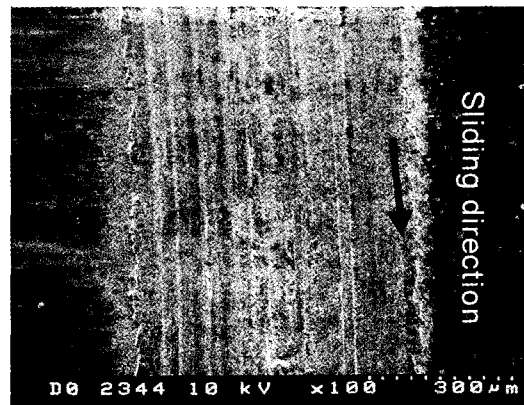


Fig. 13. SEM micrograph of smooth wear track (STS316-STB2, 500 gf, 20 rpm).

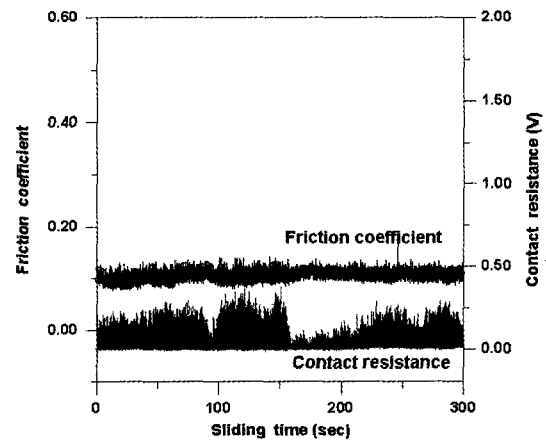


Fig. 14. Contact resistance variation due to increased sliding speed (500 gf, 80 rpm).

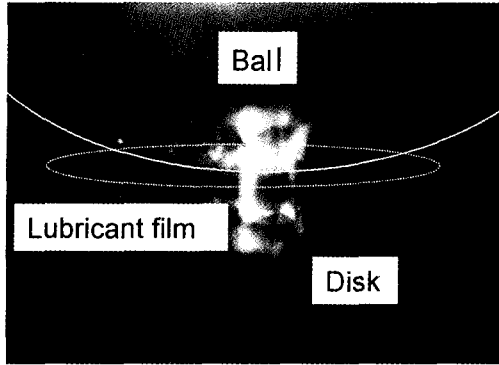


Fig. 15. CCD image of interface between ball and disk (STS316-STB2, 500 gf, 20 rpm).

수는 감소하고 접촉 저항은 증가하는 현상이 Fig. 14와 같이 나타났으며, 접촉면 앞에 형성된 윤활막이 좌우로 분리되는 현상을 관찰할 수 있었다. 낮은 미끄럼 속도에서는 Fig. 15에서 보는 바와 같이 볼과 디스크의 완전한 접촉으로 인해 접촉면 앞에 디스크 표면의 윤활유가 계속 쌓이지만, 미끄럼 속도가 증가하면 볼과 디스크 사이의 접촉 면적이 감소되기 때문에 이 부분에서는 윤활유의 유동이 제약을 받지 않으므로 윤활유가 접촉면 앞에 쌓이지 않고 좌우로 분리되는 현상을 Fig. 16에서 확인할 수 있었다.

4.5. 표면 손상 시점에서의 마찰/마멸 특성

STS316 디스크와 STS304 핀이 접촉한 상태에서 일정한 하중과 미끄럼 속도의 조건(500 gf, 60 rpm)으로 미끄럼 거리가 증가하면서 Fig. 17과 같이 접촉면에서 발생하는 마멸 입자의 양은 증가하였다.

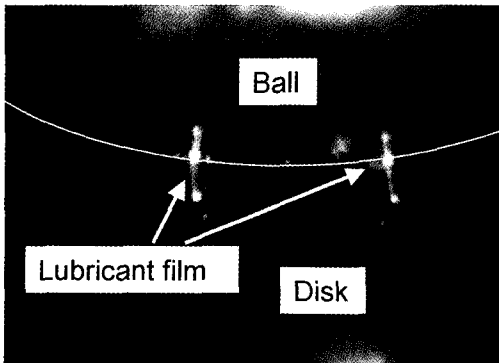


Fig. 16. CCD image of interface between ball and disk (STS316-STB2, 500 gf, 80 rpm).

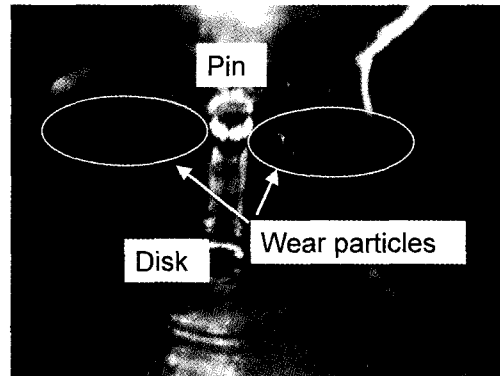


Fig. 17. CCD image of interface between pin and disk with particle generation.

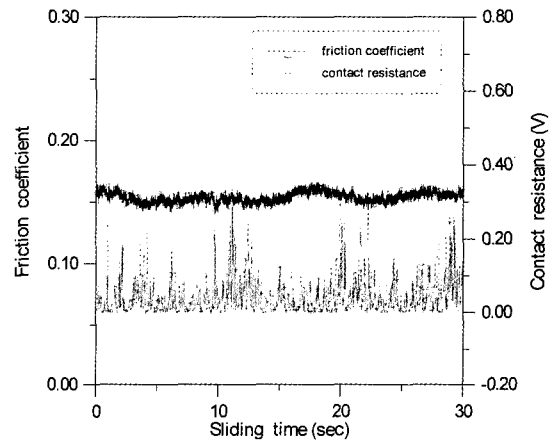


Fig. 18. Contact resistance fluctuation due to the wear particle generation (STS316-STB304, 500 gf, 60 rpm).

이 시점에서 마찰계수의 변화는 없었으나 작은 범위(0.2 V)내에서의 전기 저항의 변동이 발생하는 현상을 Fig. 18에서 확인할 수 있었다. 또한 Fig. 19와 같이 주기적으로 마찰계수와 접촉 저항이 증가하는 경우의 마멸 트랙에서는 Fig. 20에서와 같은 국부적인 손상 흔적이 발견되었으며, 이와 같은 현상은 볼이 마멸 트랙의 손상 부위(hump and valley)를 지날 때마다 마찰력과 접촉 저항이 순간적으로 크게 증가하는 것으로 판단된다. 더 이상의 실험을 지속하기가 불가능할 정도로 심한 마찰음과 진동이 수반되는 마멸(severe wear)이 발생하는 시점에서의 마찰계수는 순간적으로 건식 상태에서와 유사한 높은 값을 나타내었고 접촉 저항도 마찰계수의 변화 주기와 일치되면서 불규칙하게 나타났다 (Fig. 21,22).

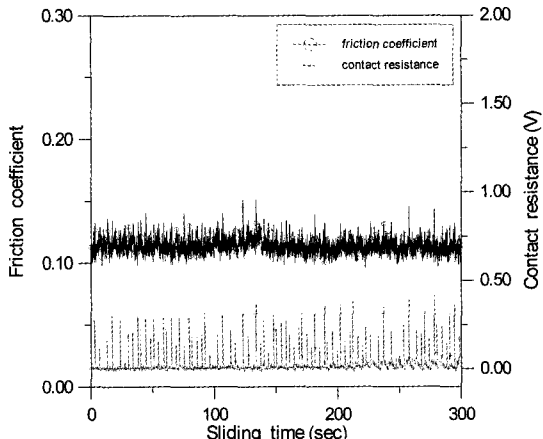


Fig. 19. Friction and resistance fluctuation due to the irregular interface topography (STS316-STB2, 500 gf, 80 rpm).

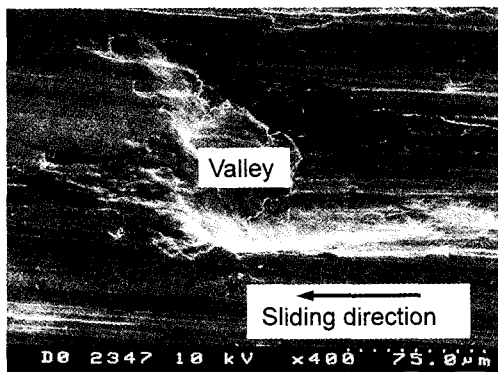


Fig. 20. SEM micrograph of wear track with hump and valley (STS316-STB2, 500 gf, 80 rpm).

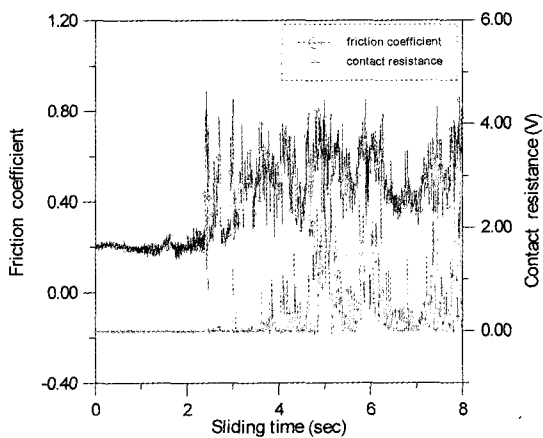


Fig. 21. Friction and resistance fluctuation due to the severe wear (STS316-STB2, 500 gf, 80 rpm).

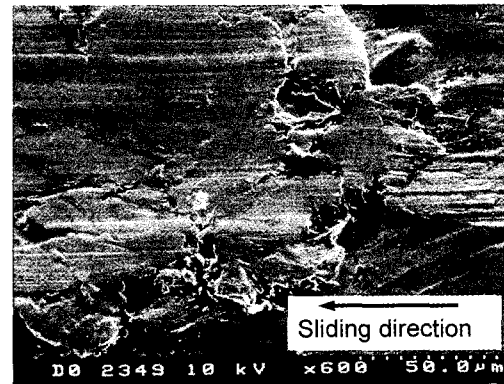


Fig. 22. SEM micrograph of severe wear (STS316-STB2, 500 gf, 80 rpm).

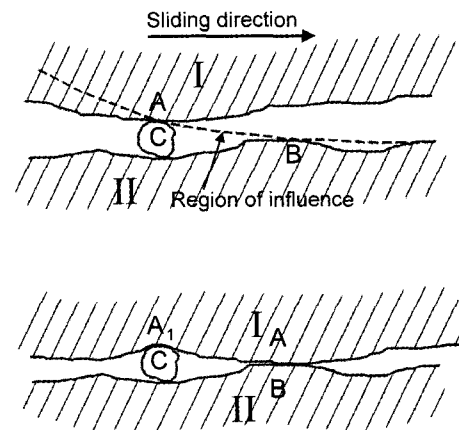


Fig. 23. Effect of particle on electrical contact noise.

#### 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 전기 저항 노이즈는 Fig. 23에서 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 영역이며,

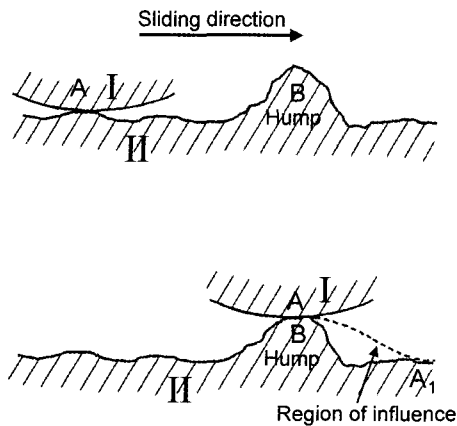


Fig. 24. Effect of hump (asperity) on friction and contact resistance during severe wear.

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. 볼이 요철(또는 hump)을 지나는 경우를 가정하면 Fig. 24의 A에서 B까지 이동하면서 마찰력은 크게 증가하지만 접촉 저항은 일정할 것으로 예상된다. 그러나 B점을 지나면서 순간적으로 볼이 디스크와 분리되면서 저항이 크게 증가할 수 있을 것이다. 실제로 이 두 가지 상황은 거의 동시에 일어나기 때문에 마찰계수와 접촉 저항은 동시에 크게 증가할 수 있는 것이다.

## 5. 결 론

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

1. 경계 윤활 상태에서는 미끄럼 속도가 증가하면 금속간의 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 이용하여 접촉면에서 발생하는 다양한 트라이볼로지 현상을 예측할 수 있었다.

## 후 기

이 논문은 1998년 한국학술진흥재단의 학술연구비에 의하여 지원되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

1. W. B. Hardy and I. Doubleday, "Boundary lubrication-the paraffin series," Proc. Roy. Soc. A, Vol. 102, pp. 550-574, 1922.
2. D. Dowson, *Lubricant and Lubrication*, Elsevier Science, pp. 617-633, 1995.
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. F. P. Bowden and D. Tabor, *The Friction and lubrication of Solids*, Clarendon Press, pp.176-199, 1958
5. 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.
6. X. Jiang, D. Y. Hua, H. S. Cheng, X. Ai and Si C. Lee, "A mixed elastohydrodynamic lubrication model with asperity contact," ASME J. 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.