경계윤활에서의 주요 Tribological 인자의 특성

류종관 · 김대은*

연세대학교 대학원, *연세대학교 기계전자공학부

Characteristics of the major tribological parameters in boundary lubrication

Jong-Kwan Ryu and Dae-Eun Kim*

Graduate School, Yonsei University

**School of Electrical & Mechanical Eng., Yonsei University*

Abstract—Machines that normally operate under fluid film lubricated condition also experience surface damage. This is largely due to the failure of the lubricant film which leads to boundary lubrication. Thus, it is important to have a good understanding of boundary lubrication behavior. In this paper the major tribological parameters that influence the boundary lubrication properties are evaluated. It is shown that disk roughness, hardness and normal load affect the friction and wear of metals in boundary lubrication. Also, the mechanism of surface damage is attributed to abrasion and wear particle interaction.

Key words : boundary lubrication, friction, wear, pin-on-disk

I 서 론

대부분의 기계장치를 구성하고 있는 기계요소들이 서로 상대운동을 행할 때 발생하는 소음, 진동 및 열 등으로 인하여 기계적인 에너지 손실을 유발하게되며, 이러한 두 물체간의 미끄럼 운동에 의하여 발생하는 마찰 마멸은 기계요소에 있어서 피할 수 없는 물리적인 현상이다. 일반적으로 이러한 마찰의 현상은 기계적 에너지 손실뿐만 아니라 접촉부의 불안정한 거동의 원인이 될 수 있으므로 기계요소의 설계 시 고려되어야 할 매우 중요한 요소이다. 또한 이로 인하여 발생하는 접촉면에서의 마멸현상도 역시 기계요소의 신뢰성 및 수명에 영향을 미치는 매우 중요한 요인이 된다. 이러한 문제들을 방지하기 위하여 유체윤활 상태의 유지가 필요하나 작동조건에 따라서 더 이상 유체윤활 상태의 유지는 어렵게 되어 고체면 사이의 접촉이 시작되는 경계윤활 상태로 접어들게 된다 [1]. 따라서, 경계윤활 상태의 마찰 마멸 특성에 대한 이해가 대단히 중요하다.

경계윤활이란 용어는 Hardy [2]등의 "경계윤활"이란 논문에서 처음으로 소개되었으며, 그들은 상대운동을 하는 두 고체 면이 윤활 막에 의해 분리되어 있어 고체면이 접선방향으로 운동할 때 이 윤활 막의 미끄럼으로 인하여 마찰이 저하된다는 경계윤활의 기구를 제안하였다.

이후 Bowden과 Tabor [3]는 윤활 상태의 금속을 접촉시켜 하중을 가한 면적은 가하여진 하중을 지지하는 데 충분할 만큼 소성유동을 한다. 이 변형 때문에 윤활막은 두 금속 면 사이에 끼어 들어 그 곳

에서 큰 압력을 받게 된다. 그러나 이 압력은 전 접촉영역에서 같지 않기 때문에 압력이 최고가 되는 부분에서 국부적으로 파단이 일어나며 금속의 흡착이 일어난다는 메커니즘을 제시하였다. 결국 경계윤활면 사이에서의 윤활유의 분자구조와 윤활막의 물리적 성질이 마찰에 중요한 영향을 미친다고 제시하였다.

Campbell과 Thurber [4]는 환경습도가 경계윤활의 기구에 있어서 중요한 역할을 한다라고 하였으며, 그들은 흡수된 수막에 의하여 약하게 결합된 윤활유 때문에 습한 환경에서 높은 마찰계수를 얻었다고 하였다.

Godfrey [5]는 윤활 막의 중요한 물리적 성질은 전단강도, 용융점, 표면에 반응을 잘하는 응착력이고, 윤활 막의 형성은 물리, 화학적 흡착에 의해 발생할 수 있다고 주장했다.

Komvopoulos [6]등은 경계윤활 상태에서의 정상상태 마찰의 주요한 기구는 갈림마찰이며, 미끄럼면 사이의 윤활 막의 전단과 요철사이의 응착도 있으나 전반적으로 마찰력에 갈림 보다 덜 영향을 미친다. 따라서 미끄럼 면의 경도가 갈림 마찰기구에 중요한 영향을 미친다라고 주장했다.

최근에 얻어진 몇몇 실험적, 이론적인 결과들이 윤활유의 중요한 역할중의 하나가 마멸입자들의 뭉쳐서 성장함을 방지하여 미끄럼 접촉면의 갈림을 최소화함으로써 마찰력을 줄이는 효과라고 주장하였다 [7].

따라서, 경계윤활 상태에서 요철사이의 흡착 및 윤활 막의 전단 이외에 다른 어떤 인자에 의한 작용이 일어날 수 있을 것이라는 것을 예상할 수 있다.

한편, 경계윤활 상태에서의 마멸에 관한 연구 중 초기 실험적 관계가 Burwell과 Strang [8]에 의해서 얻어졌다. 그들의 실험적 연구결과에 의하면 마멸량은 미끄럼거리와 수직하중에 비례하고 접촉면적에 무관하다는 것을 보여주었다.

근래 몇 년 사이에 경계윤활의 경우 요철접합 사이에서 미약한 응착이 예상되고 이 응착이 마멸기구를 지배할 수 없다는 것이 제기되었으며 [9], 경계윤활에 대한 연구에서 미끄럼 초기에 발생하는 미끄럼 면에서의 갈림이 응착보다 더 큰 효과라는 것을 보여주었다 [6].

Jahanmir[10]는 경계윤활에서 $1 \sim 15\ \mu m$ 크기 범위의 마멸입자들이 표면변형, 갈림과 표면하부의 박리에 의하여 중요하게 형성된다는 것을 제시하였으며, Komvopoulos [11]등은 윤활 상태에서의 미끄럼운동을 하는 동안에 마멸입자가 생성되어 접촉면 사이를 끼어 들어가 표면의 갈림과 미세한 절단을 초래하며, 이러한 갈림 상태에서의 실험적 마찰계수는 0.1~0.2의 값이고 마멸계수는 $10^{-6} \sim 10^{-3}$의 범위의 값이 전형적이라 주장했다. 한편, 정상상태의 지배적인 마멸기구는 연삭 마멸기구라고 주장하였다.

본 연구에서는 많은 윤활 기계장치가 동작 중에 경계윤활 상태를 경험하는데, 이에 대한 마찰 마멸 특성의 정확한 이해가 아직까지 부족하기 때문에 경계윤활 상태에서의 마찰 마멸에 영향을 미치는 주요인자에 대한 마찰 마멸 특성을 파악하는 데 그 목적이 있다.

II 실 험

본 연구에서는 경계윤활 상태에서의 금속재료의 마찰 및 마멸 특성에 영향을 미치는 주요인자들에 대하여 인자들의 수준이 변화함에 따른 마찰 마멸의 특성을 파악 할 수 있도록 실험을 실시하였다.

2.1 실험장치 및 방법

본 연구에서는 경계윤활 상태에서의 마찰 마멸의 실험을 위해 Fig. 1과 같은 윤활유 온도조절이 가능한 pin-on-disk 형태의 장치를 사용하였다. 또한 Fig. 2에서는 실험장치의 체계도를 보여주고 있다. 이 pin-on-disk 실험장치는 윤활유 저장용기 내의 윤활유 속에서 디스크의 회전운동과 회전하는 디스크의 면을 구형의 금속 볼

이 접촉을 통하여 경계윤활 상태에서의 두 금속간의 한 방향 운동을 행한다. 디스크와 볼을 한 쌍의 재료로 하여 시편을 구성하며, 볼 부위는 유연한 판 스프링과 스트레인 링 센서에 의해 고정되어 있다.

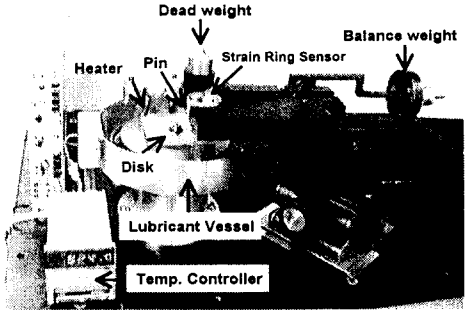


Fig. 1. Photograph of the pin-on-disk tribotester

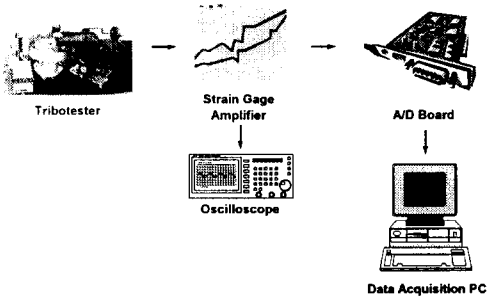


Fig. 2. Schematic diagram of the experimental set-up

디스크 시편은 회전판 위에 단단하게 고정한 후 원하는 속도로 회전시킬 수 있도록 하였다. 스트레인 빔에 장착되어 있는 볼의 지지구에 볼을 장착하고 장착된 볼이 디스크 시편의 면에 닿도록 내려놓는다. 그리고 평형 조정추를 조절하여 하중 지지대가 평형이 되도록 한 후에 원하는 하중의 dead weight를 가한 다음 동작시킨다. 매번 실험 후에 모든 디스크 시편을 아세톤으로 닦고, 볼은 아세톤에 담가 초음파세척기로 수분간 세척을 하여 접촉면을 전자 현미경을 사용하여 관찰할 수 있도록 하였다. 한편, 실험 후 윤활유 저장용기내의 남아있는 마멸입자 및 윤활유는 실험에 사용한 윤활유를 배출시킨 후 알코올 등으로 깨끗이 닦아낸다. 실험의 환경조건은 Table 1과 같다.

Table 1. Environmental conditions

환경	실험실내 환경
온도(℃)	20~23
상대습도(%)	30~45

2.2 실험조건

경계윤활 상태에서의 디스크 거칠기를 고려할 때 마찰 마멸에 영향을 미치는 주요인자인 디스크 거칠기, 수직하중, 미끄럼거리, 윤활유온도 등에 대한 인자의 수준은 Table 2에 제시한 조건에 따르고, 이 때의 디스크 재질은 각각 Al, Cu 그리고 SM45C이다. 디스크의 표면은 디스크 거칠기를 고려한 경우를 제외하고는 매끄러운 표면에 대하여 마찰 마멸 실험을 하였다.

한편, 경도에 따른 마찰 마멸 특성은 같은 재질의 경도를 달리하여 접촉면에서의 화학적 성질 등을 같도록 고려하여야 하므로 원재질을 강(SM45C)으로 선정하여 열처리 방법에 따라서 경도를 달리하여 사용하였으며, 이들의 열처리 방법 및 경도를 Table 3에 나타내었다. Table 2와 3의 경우별 실험조건 이외의 실험조건은 Table 4와 같다.

실험에 사용된 볼로써는 지름이 6.25mm인 베어링 볼(STB2)을 사용하였다. 베어링 볼을 선택한 이유는 첫째, 기계적 강도가 높은 볼을 사용함으로써 볼의 마멸을 최소화하여 디스크의 표면변화에 따른 마찰 마멸 특성을 보려함이며, 두 번째로는 베어링 볼을 사용함으로써 매 실험 때마다 볼과 상대재질 간의 접촉면적을 일정하게 유지시키기 위해서이다. 디스크의 표면은 연마를 행하여

마멸의 혼적이 좀 더 잘 나타나도록 하였다. Table 5에서는 실험에 사용된 시편과 볼의 경도를 제시하고 있다.

Table 2. Experimental conditions for factors

인자 \ 수준	1	2	3
디스크거칠기(㎛)	0.2±0.05	2.8±0.05	4.5±0.05
수직하중(gf)	200	500	800
미끄럼거리(m)	300	650	1000
윤활유온도(℃)	30	80	130

Table 3. Hardness of heat treated steel

인자 \ 수준	1	2	3
열처리 방법	Raw material	P-ion nitrided	Carburized
경도(Hv)	230±5	480±5	660±5

Table 4. Experimental conditions

Normal load(gf)	500 (dead weight)
Linear velocity(m/s, rpm)	0.1, 50
Sliding distance(m)	650
Surface roughness(㎛)	0.20±0.05
Lubricant(cSt)	32 (ISO VG32)
Lubricant temperature	Room temperature

Table 5. Hardness of specimens

Material	Al	Cu	SM45C	STB2
Hardness(Hv)	40±5	100±5	230±5	780

2.3 측정방법

실험장치에 마찰력 측정을 위하여 볼 부위에 부착되어 있는 스트레인 링 센서를 이용하였는데, 접촉 시 발생하는 마찰력이 링 센서의 스트레인게이지에 전달되도록 하였다. 이러한 마찰력에 의해 유발된 스트레인량이 전압으로 변환되고 증폭기(amplifier)로 증폭되어 A/D board를 통해 PC에 저장됨으로써 실시간 측정이 이루어지도록 하였다. 스트레인 링 센서에 부착된 스트레인게이지는 환경에 민감하고, 링의 기하학적인 특성상 사용이 누적될수록 소성변형이 발생할 우려가 있으므로 제작된 스트레인 링 센서에 대한 보정 작업을 각 실험에 앞서 행하였으며, 실험 시에는 센서의 선형성이 보장되는 구간에 한해서 마찰력을 측정하였다.

한편, 디스크의 마멸체적은 Fig. 3에서의 3차원 표면형상측정 결과를 이용하여 Fig. 4에서와 같이 측정한 마멸트랙의 단면적에 트랙의 길이를 곱함으로써 산출하였다.

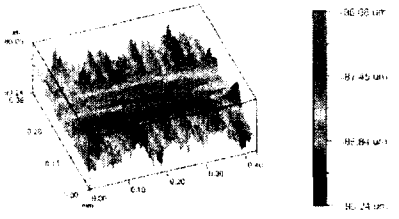


Fig. 3. Example of three dimensional surface profile

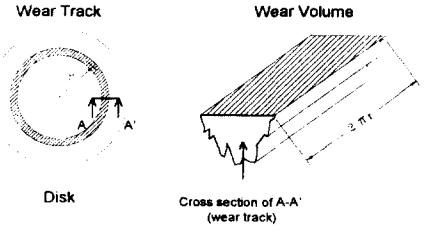


Fig. 4. Calculation of wear volume

Ⅲ 실험 결과

실험은 각각의 경우 3번씩 실시하여 마찰계수의 경우는 평균 및 분산으로 처리했으며, 디스크 마멸체적의 경우는 재질의 경도가 중간 수준인 Cu 시편에 대하여 분석을 실시하였다.

3.1 마찰 마멸 특성

3.1.1 디스크 거칠기의 영향

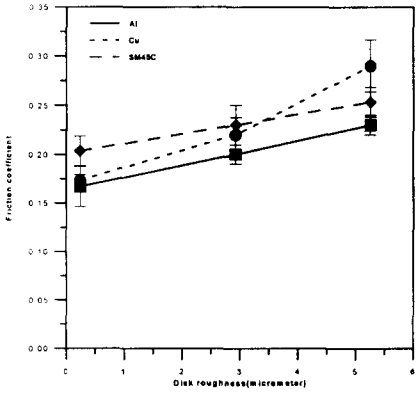


Fig. 5. Friction coefficient w.r.t. disk roughness

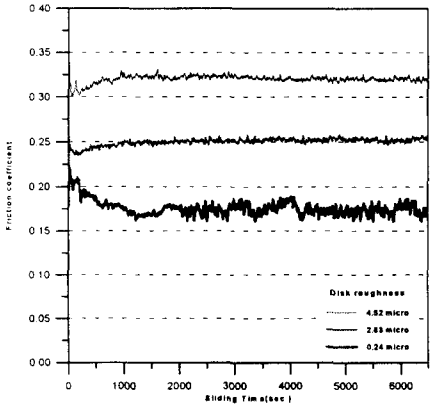
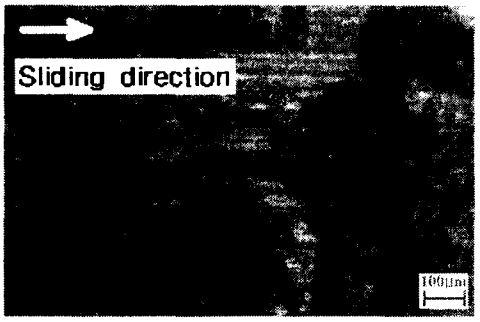


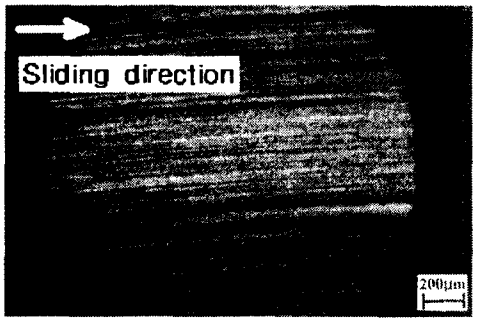
Fig. 6. Friction coefficient w.r.t. sliding time for disk roughness

Fig. 5에서 살펴보면 디스크 거칠기의 증가에 따른 마찰계수의 변화는 Al, Cu 및 SM45C의 경우에 있어서 전반적으로 큰 폭으로 증가한다. Fig. 6에서는 Cu의 경우 미끄럼 시간에 따른 마찰계수의 변화를 디스크 거칠기에 대하여 보여주고 있다.

한편, 디스크 거칠기를 고려할 경우에는 거칠기의 영향으로 볼의 마멸이 많이 발생하게 되며, 디스크 시편의 마멸은 상대적으로 적어 실험 후의 디스크 표면의 요철들이 남아있는 상태이다. 실험조건의 디스크 거칠기의 수준이 3인 경우의 실험 후 디스크와 볼의 마멸트랙 형상을 Fig. 7에 나타내었다.



(a) Disk



(b) Ball

Fig. 7. Wear track for disk roughness

Fig. 7에서 살펴보면 실험결과 볼의 마멸된 면의 직경이 약 2 mm로서 거칠기가 있는 디스크 면에도 2 mm 폭의 접촉을 하게

된다. 이로 인하여 미끄럼시간의 증가에 따라서 접촉면은 넓어지게 되며, 디스크의 표면요철의 일부만이 마멸된 상태로 남아있는 것을 관찰할 수 있다. 따라서 디스크 마멸트랙의 형상을 찾아내기가 곤란하여 이 경우 디스크의 표면 거칠기의 변화를 실험 전후에 비교하여 Table 6에 제시하였다.

Table 6. Surface roughness variation of the specimen before and after experiment (sliding direction)

수 준	1	2	3
실험 전(μm)	0.18	2.81	4.55
실험 후(μm)	-	1.19	1.47

3.1.2 수직하중의 영향

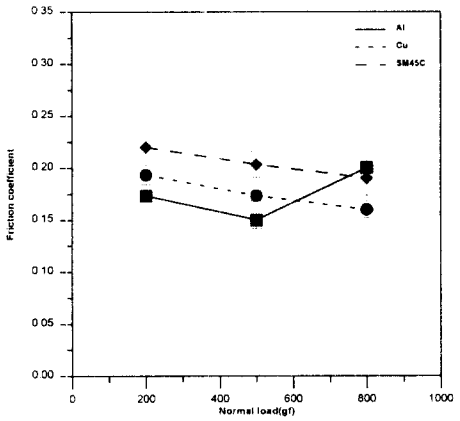


Fig. 8. Friction coefficient w.r.t. normal load

Fig. 8에서 살펴보면 수직하중의 증가에 따른 마찰계수의 변화는 Cu와 SM45C의 경우에 있어서는 전반적으로 감소하며, Al의 경우에는 수직하중이 800 gf의 경우는 다시 급격하게 상승하는 경향을 보이고 있다. 이는 하중이 800 gf의 경우 Al은 마멸량이 증가하지만, Cu와 SM45C의 경우는 마멸량의 증가가 Al에 비하여 크지 않다. 따라서 마멸에 의한 마멸입자들이 Al의 마찰계수에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

한편, Fig. 9에 수직하중에 따른 마멸체적을 나타냈다. 수직하중의 증가에 따른 마멸체적의 변화는 거의 비례하여 증가함을 알 수 있으며, Fig. 10에 마멸트랙 및 형상의 비교를 나타내었다. 수직하중이 200 gf의 경우의 마멸 트랙면은 표면의 요철이 아직 남아 있는 상태이며, 트랙 폭은 약 150 μm, 깊이는 약 1.5 μm이다. 800 gf의 경우는 트랙면에 요철이 제거된 상태로 트랙 폭은 약 250 μm, 깊이는 약 3 μm로 현저하게 구분이 된다.

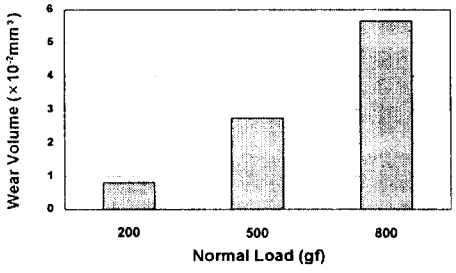
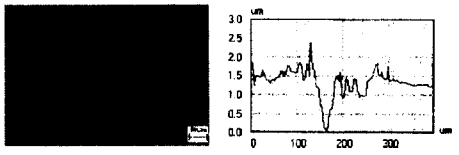
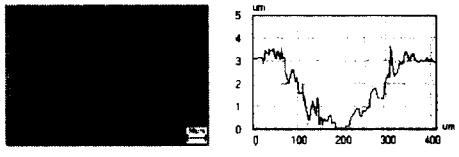


Fig. 9. Wear volume w.r.t. normal load



(a) 200gf



(b) 800gf

Fig. 10. Wear track and profile (Cu vs. STB2)

3.1.3 미끄럼거리의 영향

미끄럼거리의 변화에 따른 마찰계수를 Fig. 11에 나타내었으며, 미끄럼거리의 증가에 따른 마찰계수의 변화는 Al, Cu 및 SM45C의 경우에 있어서는 약 0.01~0.02 값으로 편차의 범위 내에 들어가 별 차이가 없는 것으로 나타났다.

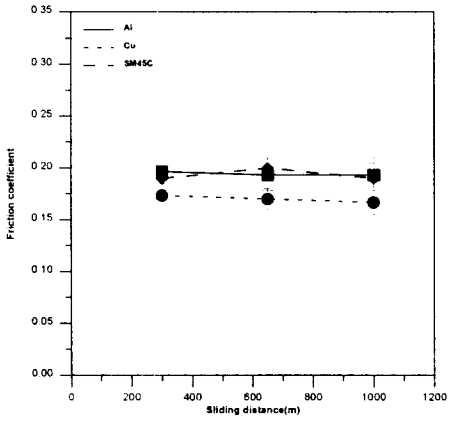


Fig. 11. Friction coefficient w.r.t. sliding distance

한편, 미끄럼거리의 증가에 따른 마멸체적의 변화를 Fig. 12에 나타냈으며, 미끄럼거리의 증가에 따른 마멸체적의 변화도 역시 증가하였다.

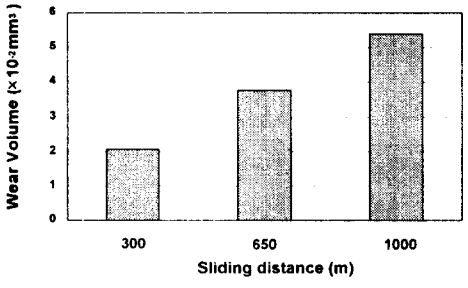


Fig. 12. Wear volume w.r.t. sliding distance

3.1.4 윤활유온도의 영향

윤활유온도 변화에 따른 마찰계수와 마멸체적을 Fig. 13과 14에 나타내었으며, 윤활유의 온도 증가에 따른 마찰계수의 변화는 100℃ 이하의 변화 시는 변화 폭이 적으며, 마멸체적 또한 별 차이가 나지 않으나, 100℃ 이상으로 변화할 때는 마찰계수와 마멸체적의 변화가 급격하게 변화한다. 또한, 마찰계수의 경우 디스크의 경도가 클수록 적은 영향을 받는 것으로 나타났다.

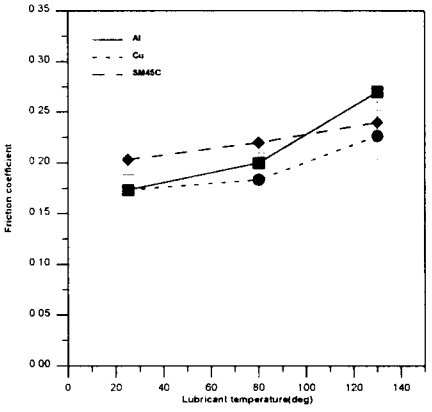


Fig. 13. Friction coefficient w.r.t. lubricant temperature

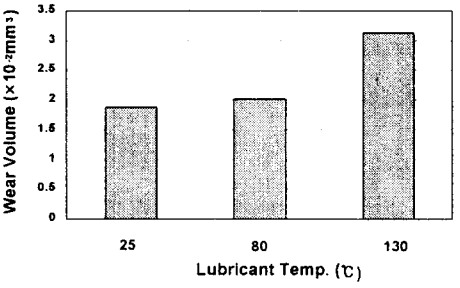


Fig. 14. Wear volume w.r.t. lubricant temperature

3.1.5 디스크경도의 영향

강의 표면을 프라즈마 이온(plazma-ion

nitrided)열처리와 침탄(carburized)열처리에 의하여 경도를 각각 다르게 한 디스크경도의 변화에 따른 마찰계수를 Fig. 15에 나타내었으며, 디스크경도의 증가에 따른 마찰계수의 변화는 0.14~0.20의 폭으로 감소하는 경향을 볼 수 있는데, 이는 경도가 높을수록 소성변형이 적어 마찰에 덜 영향을 미치는 것으로 판단된다. Fig. 16에서는 경도가 다른 강의 경우 미끄럼시간에 따른 마찰계수의 변화를 보여주고 있다.

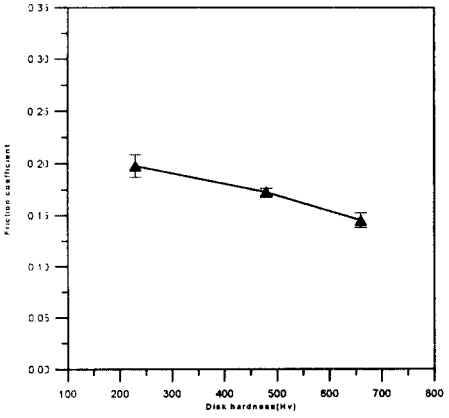


Fig. 15. Friction coefficient w.r.t. disk hardness

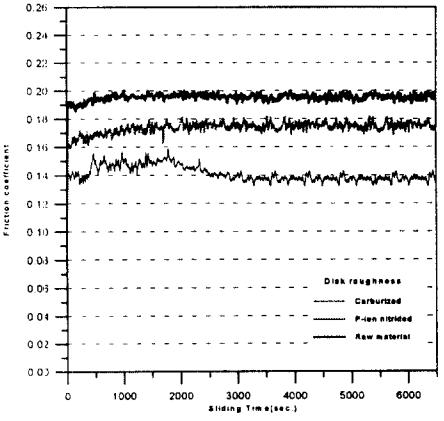
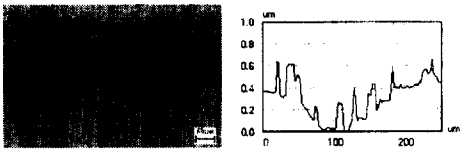
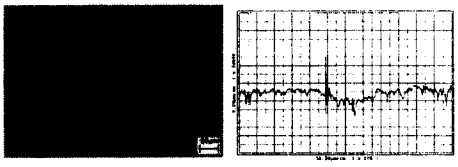


Fig. 16. Friction coefficient w.r.t. sliding time for disk hardness

한편, 디스크경도의 변화에 따른 마멸특성을 보기 위해 실험결과 열처리하지 않은 원재질과 침탄 열처리를 하여 경도가 가장 높은 경우에 대한 마멸트랙과 트랙형상을 Fig. 17에 나타내었다.



(a) Raw material vs. STB2



(b) Carburized steel vs. STB2

Fig. 17. Wear track and profile

Fig. 17의 (a)에서의 열처리를 하지 않은 원 재질의 마찰 마멸 실험결과의 디스크 마멸 트랙의 트랙 폭이 약 150 μm, 트랙깊이는 약 0.4 μm정도로 매우 미약한 마멸이 진행되었으며, Fig. 17의 (b)의 침탄 열처리를 하여 경도를 높인 경우의 마멸 트랙형상은 폭이 약 125 μm, 깊이는 약 0.1 μm정도의 트랙이 형성되어 거의 흔적만을 찾아볼 수 있었다. 따라서, 경도가 높은 디스크 시편의 경우 마멸의 저항이 매우 높음을 나타낸다.

Ⅳ 결 론

경계윤활 상태에서의 마찰 마멸에 미치는 주요 인자에 대한 특성을 파악하기 위하여 경계윤활 상태에서 마찰 마멸 실험결과와 실험 후 마멸트랙 면의 관찰을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 경계윤활 상태에서 금속재료와 베어링 볼 사이의 마찰계수의 특성은 디스크 거칠기, 디스크경도 및 하중의 변화에 따라서 크게 영향을 받으며, 거칠기의 감소, 경도의 증가에 따라서 마찰계수는 감소하는 경향을 알 수 있었다.

2. 경계윤활 상태에서 금속재료와 베어링 볼 사이의 마멸체적의 특성은 디스크 거칠기, 디스크경도 및 하중의 변화에 따라서 영향을 받으며, 디스크경도의 증가 및 하중의 감소에 따라서 마멸체적은 감소하는 경향을 알 수 있었다.

3. 디스크 거칠기의 증가에 따른 마찰의 증가 및 디스크 경도의 증가에 따른 마찰의 감소되는 결과로부터 경계윤활 상태에서의 마찰은 재질의 소성변형 및 미끄럼 운동 중에 발생하는 마멸입자에 의해 영향을 받는 것으로 나타났다.

4. 실험 후 마멸트랙 면에 긁힌 자국이 현저하게 나타나는 것으로 보아 이는 경계윤활 상태에서 금속재료의 미끄럼 운동 중 발생하는 마멸입자와 더 경한 요철의 긁힘에 의한 갈림 마찰과 연삭 마멸이 발생한다는 것을 나타낸다.

후기

본 연구는 한국과학재단 지정 정보저장기기 연구센터 (과제번호 : 97K3-0907-02-02-1)의 지원을 받아 이루어 졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고 문헌

[1] B. Bhushan, and B. K. Gupta, *Handbook of Tribology*, McGraw Hill, 1991.

[2] W. B. Hardy, and I. Doubleday, "Boundary Lubrication-The Paraaffin Series", Proc. Roy. Soc. A, Vol. 102, pp. 550-574, 1922.

[3] F. P. Bowden, and D. Tabor, *The Friction and Lubrication of Solids*, Clarendon Press, pp. 176-199, 1958.

[4] W. E. Campbell, and E. A. Thurber, "Studies in Boundary Lubrication-Ⅱ. Influence of Adsorbed Moisture Films on Coefficient of Static Friction between Lubricated Surfaces", Trans. ASME, New York, pp. 401-408, 1969.

[5] D. Godfrey, "Boundary Lubrication", Interdisciplinary Approach to Friction and Wear, NASA SP-181, pp. 335-384, 1968.

[6] K. Komvopoulos, N. Saka, and N. P. Suh, "The Mechanism of Friction in Boundary Lubrication", Trans. ASME, Vol. 107, pp. 452-462, 1985.

[7] S. T. Octay, and N. P. Suh, Wear Debris Formation and Agglomeration, Trans. ASME, Vol. 114, pp. 379-393, 1992.

[8] J. T. Burwell, and C. D. Strang, "On the Empirical Law of Adhesive Wear", J. Appl. Phys., 23, pp. 18-28, 1952.

[9] S. Jahanmir, "On the Wear Mechanism and the Wear Equations", *Fundamentals of Tribology*, N. P. Suh, and N. Saka, MIT Press, Cambridge, MA, pp. 455-467, 1980.

[10] S. Jahanmir, "Wear Mechanisms of Boundary-Lubricated Surfaces", Wear, Vol. 73, pp. 169-184, 1981.

[11] K. Komvopoulos, N. P. Suh, and N. Saka, "Wear of Boundary-Lubricated Metal Surfaces", Wear, Vol. 107, pp. 107-132, 1986.