

# 진조 및 경계윤활 조건에서 응력이력에 따른 금속재료의 마찰 마멸 특성

## Effect of Stress History on Friction and Wear of Metals in Dry and Boundary Lubricated Conditions

황동환\* (연세대학교 기계공학과 대학원), 김대은 (연세대학교 기계공학과)

### Abstract

Friction and wear characteristics of metals in dry and boundary lubricated sliding conditions are observed experimentally using pin-on-disk and pin-on-plate type tribotesters. The motivation of this research is to investigate the effect of sliding history on the tribological behavior of metals. Cu and SM45C steel materials were used for the experiment. The results show that in dry condition the frictional behavior as well as wear of the specimens differed between uni-directional and bi-directional sliding conditions. The friction coefficient values, wear profile and optical micrograph of the wear track are presented.

### 1. 서론

두 고체간의 미끄럼 접촉에 의해 발생하는 마찰 및 마멸현상은 동적인 기계요소가 존재하는 곳이면 어디에서나 발생될 수 있는 물리적 현상이다. 이러한 마찰 및 마멸을 저감시키기 위한 연구와 노력은 여러각도에서 행하여지고 있으며 여러인자에 대한 메카니즘 규명도 진행 중에 있다[1~7]. 현장에서 사용되는 동적인 기계요소들이 경험하는 환경중에서 마찰 마멸에 영향을 미치는 인자는 수 없이 많을 것이다. 이들 인자 모두를 고려한 마찰 마멸 실험은 현실적으로 많은 어려움이 있으며, 따라서 가장 실질적이고 구체적인 결과를 얻기 위해서는 현장 중심적인 이슈의 도출이 필요할 것이다. 이와같은 배경아래 본 연구에서는 기계요소의 운동형태에 따른 마찰 마멸 거동에 대하여 고찰해보기로 한다.

저어널 베어링에서 베어링과 축과의 마찰현상, 혹은 일반적인 브레이크 시스템에서 발생하는 마찰현상은 한방향으로만 마찰이 일어나는 극단적인 예가 된다. 이와 달리 양방향으로

은 주기를 갖는 미끄럼 마찰운동이 일어날 경우 그 응력 이력이 앞의 경우와는 다르므로 마찰 및 마멸의 거동이 달라질 수 있다. 상하 왕복운동이 행하여지는 엔진내의 실린더벽과 피스톤링과의 마찰운동 혹은 자동차 엔진밸브와 그 지그간의 마찰운동등은 대표적인 양방향운동 시스템의 예가 될 것이다. 이와같이 응력 이력과 관련된 운동의 형태는 마찰계수 및 마멸에 영향을 미칠 것으로 기대되므로 이를 고려한 실험의 필요성이 제기되는 것이다. 본 연구에서 제기하는 또 하나의 문제는, 이와같이 운동의 형태가 다른 기계요소들의 경우 마찰계수 및 마멸을 측정하는 실험실 차원의 연구에서 운동형태에 대한 고려가 필요한 것인지, 즉, 예로서 pin-on-disk 실험장치와 같이 한방향으로 마찰력이 작용하는 계에서 양방향으로 응력이력을 받는 계에 대한 현실적인 결과를 얻을 수 있을 것인지에 있다.

본 연구는 이와같은 배경아래 운동조건, 즉 응력이력이 동일한 하중 및 속도 조건에서 어떠한 영향을 미치는지에 대하여 실험적으로 고찰하였으며 건조조건과 경계윤활조건에서의 결

과를 비교하여 보았고, 마멸된 트랙과 채취된 마멸입자들의 관찰을 통해 응력이력에 따른 마찰 마멸 현상을 규명해 보았다.

## 2. 실험

### 2.1 실험장치

응력이력의 영향을 건조 및 경계윤활조건에 대해서 비교하기 위하여 본 연구에서는 Fig.1과 같은 pin-on-disk tribotester와 Fig.2와 같은 pin-on-plate tribotester를 제작하여 실험에 임하였다. 여기서 pin-on-disk tribotester는 회전하는 disk시편에 한방향 마찰력이 작용하며, pin-on-plate tribotester는 20mm의 스트로크로서 왕복운동하는 plate에 양방향 마찰력이 작용하게 된다. 제작된 실험장치의 제원은 Table 1과 같다.

Table 1 Specification of Experimental Apparatus

	Pin-on-Disk Tribotester	Pin-on-Plate Tribotester
구 성	Pin+회전식 disk부	Pin + 왕복식 plate부
속 도	60~300rpm	1Hz~5Hz
하 중	50~500gf (dead weight 방식)	50~500gf (dead weight 방식)
센 서	Strain Ring (Full bridge strain gage)	Strain Ring (Full bridge strain gage)

### 2.2 시편

본 연구에서 마찰재로서 사용된 pin, disk 및 plate의 재료는 연마와 같은 마무리 가공이 보장되고 서로 경도가 다른 SM45C, Cu 두 재료를 선택하여 실험에 임하였다. SM45C는 일반적인 기계구조용 탄소강이며 Cu는 순도 99% 이상의 순수재료이다.

실험에 사용된 시편은 disk와 plate, 그리고 pin으로 나누어 제작하였으며 밀링이나 선삭 가공후 연마액을 이용하여 연마를 행하였다. 건조 및 경계윤활상태에서 실험에 사용된 disk와

plate 재료의 특성치와 각종 측정치는 Table 2와 같다.

### 2.3 실험조건

본 실험에 적용된 실험조건은 하중의 경우 200gf를 dead weight 방식으로 적용하였으며,

Table 2 Material properties of specimen

	SM45C	Cu
Dry condition		
Hardness(Hv)	230	100
Roughness Ra(μm)	Disk : radial-0.92, tan-0.60 Plate : 1.08	Disk : radial-0.83, tan-0.98 Plate : 0.34
Boundary lubricated condition		
Hardness(Hv)	260	110
Roughness Ra(μm)	Disk : radial-0.43, tan-0.23 Plate : 0.17	Disk : radial-0.16, tan-0.11 Plate : 0.13
Chemical composition	C:0.42-0.45, Si:0.15-0.35, P:<0.03, S:<0.035,Mn:0.6-0.9	99.9% Cu

접촉속도는 plate의 경우 1Hz(선속 약 7cm/sec = 0.07m/sec), disk의 경우 60rpm(선속도 0.2m/s)에서 행하였다. 환경조건으로는 습도가 30~50%, 온도가 20℃ 정도였다. 실험은 일반 대기 상태에서 행하였으며, 실험시간은 마찰계수가 어느 정도 정상상태에 도달하는 60분으로 하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 건조상태에서의 마찰 마멸 실험

한방향으로 일정한 응력을 받는 pin-on-disk 시편에 비해 양방향 마찰력을 받는 pin-on-plate 시편의 경우 접촉면에 양방향 응력을 받는다는 점에서 더 많은 마멸을 예상할 수 있다.

먼저 각각의 재료에 대하여 마찰계수에 대한 응력이력의 영향을 비교한 실험결과가 Fig.1, Fig.2에 제시되었다. 전반적으로 보았을 때 한

Table 3 Surface roughness of specimen after experiment

	SM45C	Cu
Disk	1.77 $\mu\text{m}$	4.69 $\mu\text{m}$
Plate	1.17 $\mu\text{m}$	1.86 $\mu\text{m}$

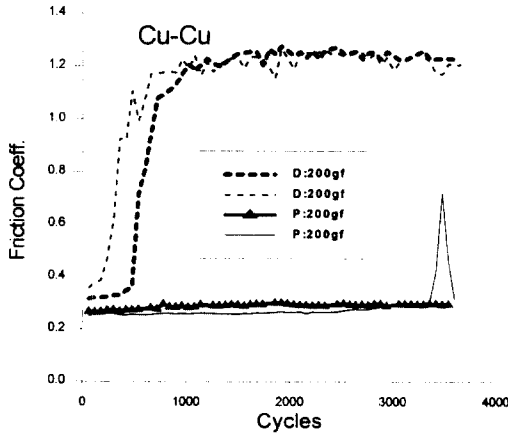


Fig.1 Friction coefficient vs. cycles of Cu-Cu  
( D : pin-on-disk, P : pin-on-plate )

방향 응력을 받는 pin-on-disk 시편에서 높은 마찰계수가 관찰되었다. 실험후 트랙면의 거칠기를 조사한 결과 plate에 비해 disk 시편에서 거칠기가 증가한 것으로 미루어 마멸의 진행이 더 가혹하게 발생하였음을 알 수 있다. Table 3은 실험후 마멸면의 표면거칠기를 미끄럼 방향에 대하여 측정된 결과이다. 특히 Cu의 경우 disk가 plate에 비해 2배 이상의 거칠기를 보이고 있다.

Fig.1의 Cu의 경우 pin-on-disk와 pin-on-plate 간에 나타난 마찰계수의 결과가 매우 큰 차이를 보이고 있다. 특이한 점은 pin-on-plate의 실험에서 0.2정도의 상당히 안정된 저 마찰계수를 보여주고 있다는 점인데 이는 실험종료시 까지 거의 일정하게 유지되는 것을 알 수 있다. 표면거칠기 측정결과를 살펴보면 초기에 비해 마멸이 진행된것을 알 수 있으며 마찰계수가 낮게 측정됨에도 불구하고 마멸이 진행되었음을 알 수 있다. Disk 시편과 plate시편의

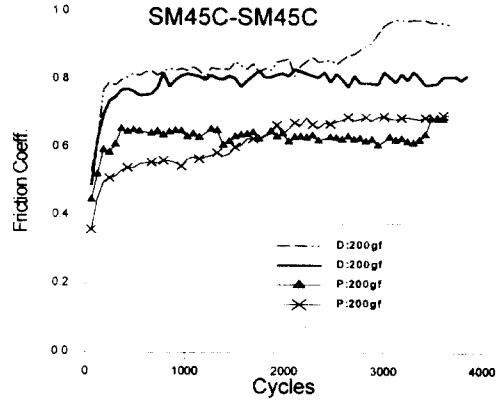
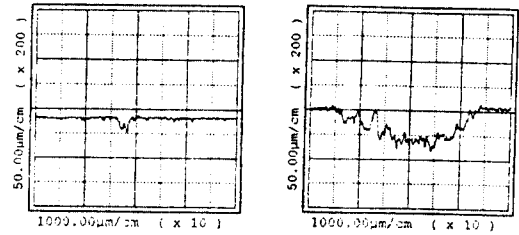
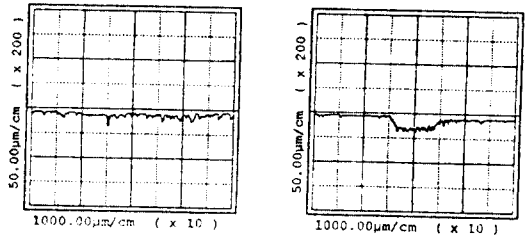


Fig.2 Friction coefficient vs. cycles of SM45C-SM45C  
( D : pin-on-disk, P : pin-on-plate )



(a) Plate (b) Disk

Fig.3 Wear profile of Cu specimen after experiment



(a) Plate (b) Disk

Fig.4 Wear profile of SM45C specimen after experiment

마멸트랙을 비교해보면 표면에 마멸입자로 보이는 흡착물의 차이가 나타나고 있으며 이러한 마찰특성은 재료의 특성과 응력이력이 서로 복

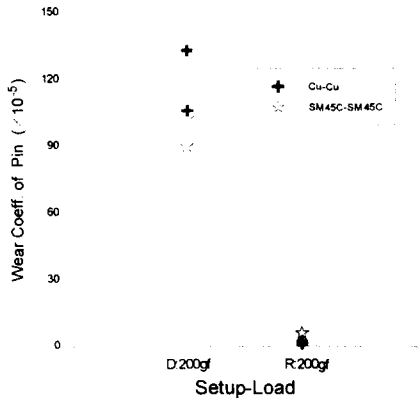
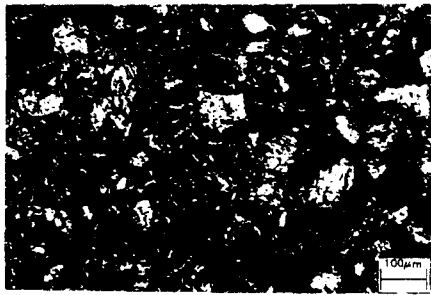
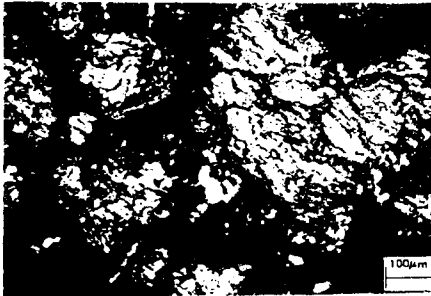


Fig.5 Wear coefficient of pin after experiment



(a) Plate



(b) Disk

Fig.6 Optical micrograph of wear particles of Cu specimen after experiment

합적으로 작용하는 것으로 보인다. 이에 대해서는 좀 더 많은 실험결과를 필요로 한다. Fig.3에서는 실험후 Cu시편의 마멸트랙 형상을 보여주고 있다.

Fig.2에서 보여주고 있는 SM45C의 마찰특성은 disk와 plate의 경우 모두 초기에서부터 증가하는 것이 이전에 행하여진 많은 실험결과[8]와 비슷한 경향을 나타내고 있으나 여전히disk

의 경우가 plate 시편에 비해서 높은 마찰특성을 나타내고 있다. 마멸의 경우에도 disk 시편에서 더욱 진전된 결과를 보여주고 있으며, Fig.4은 이러한 SM45C의 마멸트랙을 비교하여 나타내고 있다. 한편 pin의 마멸경향을 살펴보면 역시 disk의 경우에 더 많은 마멸경향을 나타내고 있다. Fig.5는 실험전후에 pin에 대한 질량변화를 측정하고 마멸계수로 산출하여 나타낸 것이다. Cu와 SM45C의 경우 plate 실험에 비해 disk 실험시 높은 마멸계수를 보이고 있다. 이와같은 실험결과는 응력이력에 대한 고려가 필요함을 보여주고 있으며, 실험후 채취한 마멸입자(Fig.6)로 부터 이와같은 두 실험조건 사이에 차이가 있음을 알 수 있다.

### 3.2 경계윤회상태에서의 마찰 및 마멸 실험

본 연구에서는 건조상태에서의 응력이력에 따른 마찰 마멸현상이 경계윤회상태에서도 비슷한 경향을 나타내는지 알아보기 위하여 경계윤회조건인 경우 동일한 재료에 대하여 마찰 마멸 실험을 행하였다. 본 실험결과는 3.1절과 비교하여 마찰현상이 윤회유무에 관계없이 비슷한 경향을 나타내는지에 초점을 맞추었다. 이때 사용된 실험장치는 3.1절과 동일하며 시편의 홀더(disk 혹은 plate부)에 oil bath를 부착하여 실험시에는 pin이 윤회유에 잠기도록 하였다. 사용된 시편은 앞서의 시편 종류와 동일하게 SM45C 및 Cu를 선정하였다. 윤회유는 볼스크류용 윤회유(DTE 24, vg:46cst)를 사용하였으며 실험조건은 동일하다. 시편에 대한 각종 특성치는 앞서 Table 2에서 제시한 바와 같다. 실험시 측정된 마찰계수의 결과를 Fig.6, Fig.7에 나타냈다.

경계윤회의 실험결과를 살펴보면 전반적으로 두 재료의 마찰계수가 0.1~0.2 정도의 범위에 있다는 것을 알 수 있다. 근소한 차이지만 SM45C의 경우 disk시편에서 좀 더 높은 마찰계수가 관측되었다. Cu의 경우에는 건조마찰시 plate의 마찰계수 측정결과와 큰 차이가 없는 것으로 나타났으며 이는 Cu의 경우 윤회가 마찰 특성에는 별로 큰 영향을 미치지 못하거나 건

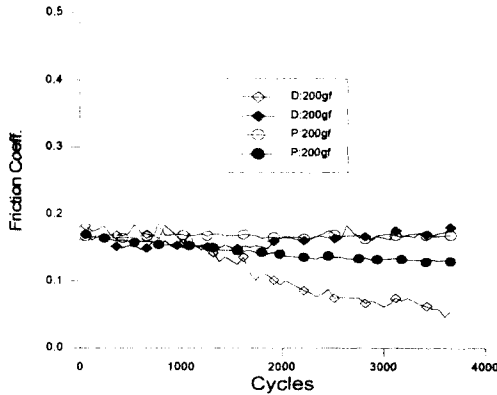


Fig.6 Friction coefficient vs. cycles of Cu specimen in boundary lubricated condition (D : pin-on-disk, P : pin-on-plate)

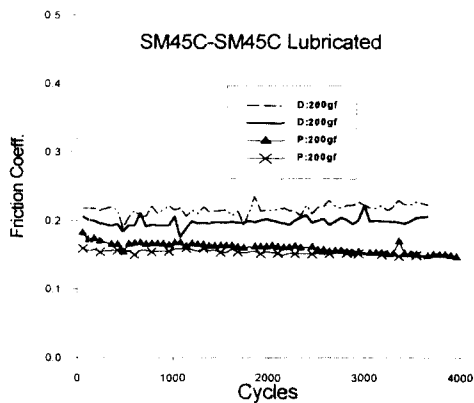


Fig.7 Friction coefficient vs. cycles of SM45C-SM45C specimen in boundary lubricated condition (D : pin-on-disk, P : pin-on-plate)

조상태에서 양방향 용력을 받는 경우와 비슷한 메카니즘이 작용하는 것으로 보인다. 그러나 실험후 마멸트랙의 측정에서는 마멸트랙의 정확한 검출이 어려울 만큼 작은 트랙이 발생되었으며, 건조상태에서는 disk 실험의 마멸이 가속화되었던것에 비해 경계윤활실험에서는 상대적으로 plate시편의 트랙이 비교적 선명하게 확인되었다는 점에서 후자의 가정은 맞지 않는다는 것을 의미한다. 따라서 경계윤활상태와 건

조마찰에서는 용력이력에 대한 마찰현상의 거동이 서로 다른 메카니즘을 보이는 것으로 예상된다.

경계윤활실험의 경우, 앞서 건조상태와 비교하기 위한 표면 형상이나 마멸량 측정이 필요하지만 실험후 측정결과를 살펴보면 마멸트랙을 식별하기 어려울 만큼의 마멸량을 나타냈으며 이는 pin의 마멸량을 측정할 경우에도 마찬가지였다. 따라서 경계윤활 실험의 경우 좀 더 가혹한 조건, 예를들어 미끄럼 거리를 증가시키거나 적용하중을 증가시키고 이를 건조상태와 비교하는 방법이 필요할 것이다.

이상과 같은 고찰로부터 마찰 마멸 현상을 지배하는 것은 용력이력도 하나의 인자가 됨을 알 수 있으며 앞으로 이에 대한 추가적인 연구의 필요성이 제기된다.

#### 4. 결론

건조 및 경계윤활조건에서 용력이력에 대한 마찰 마멸 실험을 Cu 및 SM45C에 대하여 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 건조상태에서 마찰 마멸 특성은 한방향 용력을 받는 경우 높은 마찰계수와 마멸을 나타내었다.
2. 경계윤활상태에서 두재료는 모두  $0.2 \pm 0.05$  정도의 마찰계수 변화를 보여 큰 차이가 없는 것으로 나타났으나 양방향 용력을 받는 경우에 있어서 마멸트랙의 파손이 큰 것으로 나타났다.

#### 5. 후기

본 연구는 한국과학재단 '95년도 핵심전문 연구과제의 연구비로 수행되었습니다.

#### 6. 참고문헌

- [1] Bhushan, B., and B.K. Gupta, *Handbook of Tribology*, McGraw-Hill, New York, 1991.
- [2] Dowson, D., *History of Tribology*, Longman, London, 1979.

- [6] Rabinowicz, E., "The Role of Surface Energy in Adhesion in Metal Working", J. Inst. Metals, Vol.95, 1967.
- [7] Suh, N. P., *Tribophysics*, Prentice-Hall, 1986.
- [8] Kim, D.E., and D. H. Hwang, "Surface Integrity and Tribological Properties of Machined Surfaces", Korea-USA Tribology Symposium, 1995.
- [3] Holmberg, K., and A. Matthews, *Coatings Tribology*, Elsevier, London, 1994.
- [4] Bell, T., "Engineering the Surface to Combat Wear", 19th Leeds-Lyon Symposium on Tribology - Thin Films in Tribology, Leeds, 1993.
- [5] Bowden, F., and D. Tabor, *The Friction and lubrication of Solids*, Clarendon Press, Oxford, 1954.