

경계윤활 상태에서의 금속재료의 마찰 및 마멸 특성

Characteristics of friction and wear of the metals in boundary lubrication

류종관 · 김대은*

연세대학교 대학원

*연세대학교 기계공학과

Abstract

Many lubricated systems experience boundary lubrication condition during operation. However, the friction and wear characteristics of boundary lubrication are not clearly understood. In this work the factors which affect the friction and wear between boundary lubricated metallic surfaces are investigated. Experiments were performed on aluminium, copper, and SM45C with bearing ball using a pin-on-disk type tester. The experimental conditions were determined by Taguchi experimental method. From the experimental results, the major factors that influence the friction and wear characteristics of boundary lubrication could be identified.

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

I 서 론

일반적으로 기계장치에 있어서 상대운동을 하는 마찰면은 효율저하, 소음등 발생할 수 있는 문제를 방지하기 위하여 유체윤활 상태의 유지가 필요하나, Stribeck 선도로부터 알 수 있듯이 상대운동의 속도를 낮춘다든가 하중을 증가시킨다면 더 이상 유체윤활 상태의 유지는 어렵게 되어 고체면 사이의 접촉이 시작되는 경계윤활상태로 접어들게 된다[1].

경계윤활이란 용어는 Hardy에 의하여 처음으로 사용되었으며, Hardy등은 상대운동을 하는 두 금속면이 윤활막에 의하여 분리될 때 마찰은 미끄럼면과 윤활막 사이에서 물리, 화학적인 작용 때문에 감소된다는 경계윤활의 메커니즘을 제시하였다[2]. 결과적으로 윤활유의 분자구조, 환경조건, 경계온도 그리고 고체면의 윤활유의 물리, 화학적 흡착을 지배하는 변수들

에 연구가 집중되었다.

이후 Bowden and Tabor는 윤활된 금속을 접촉시켜 하중을 가하면 면적은 가하여진 하중을 지지하는 데 충분할 만큼 소성유동을 한다. 이 변형 때문에 윤활막은 두 금속면 사이에 끼어들어 그 곳에서 큰 고압을 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[3,4].

이전의 경계모델에 의하면, 경계윤활면 사이의 마찰력은 윤활막을 전단하는데 필요한 힘을 가중적으로 합한 것이고 고체 사이의 접촉에서 표면요철의 변형을 일으키는 것이다. 따라서, 마찰계수 μ 는 다음과 같이 표현된다[3,5].

$$\mu = \alpha \left(\frac{s_l}{p_m} \right) + (1 - \alpha) \left(\frac{s_m}{p_m} \right), \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (1)$$

여기서, α 는 윤활막에 의하여 요철과 분리되는 실접촉면적의 비율, s_l 은 윤활막의 전단력, s_m 과 p_m 은 접촉한 금속중 더 연한 금속의 전단력과 경도이다. 위의 경계 윤활 모델은 변수 α 의 크기를 알 수 없어 (1)식으로부터 마찰계수를 직접 계산할 수 없고, 실험적으로 얻은 마찰계수와 차이가 있으며, 표면형태의 변화 및 미끄럼거리에 따라 마찰력의 변화를 설명할 수 없다는 문제점들을 지니고 있다[6].

Rabinowicz는 이러한 마찰계수의 차이를 흡착에너지의 효과를 도입함으로써 개선하였다[7].

최근에 미끄럼거리에 따라 마찰계수의 변화를 규명하기 위하여 Suh and Sin은 마찰계수는 재질의 성질이 아니고 3가지 마찰의 메커니즘 즉, 표면요철의 변형, 경계면에 침입된 마멸입자와 경한 요철에 의한 굽힘, 표면 사이의 흡착에 의존한다고 제시하였으며, 그들은 이러한 메커니즘이 마찰에 미치는 기여는 미끄럼 운동을 하는 재질 뿐만 아니라 표면형태, 환경 그리고 요철의 변형과 굽힘에 의한 기여가 흡착에 의한 것 보다 훨씬 클 수 있다고 제시하였다[8]. 또한 경계윤활 상태에서의 마찰 메커니즘도 마멸입자와 경한 요철에 의한 굽힘이 요철 사이의 흡착력과 미끄럼면 사이의 윤활막의 전단보다도 마찰력에 더 큰 영향을 미친다 라고 제시하였다[6]. 따라서 경계윤활상태에서 요철 사이의 흡착 및 윤활막의 전단 이외에 다른 어떤 작용이 일어날 수 있을 것이며, 본 연구에서는 경계윤활 상태에서 마찰, 마멸에 영향을 미치는 주요인자 및 특성을 파악하는 데 그 목적이 있다.

II 실험 방법

본 연구에서는 다양한 인자들을 고려하여 이들이 마찰 및 마멸의 특성에 어떠한

영향을 미치는지 파악하기 위하여 다양한 인자들을 조합할 경우 엄청난 실험횟수를 줄일 수 있는 직교배열에 의한 다구찌 실험방법[9]과 선정된 인자들이 특성값에 미치는 기여도 만을 파악하기에 적합한 간이분석법[9]을 적용하여, 결과적으로 선정된 인자들중 마찰, 마멸에 미치는 주요인자 및 특성을 파악하고자 하였다.

2.1 실험계획

2.1.1 인자 및 수준의 선정

경계윤활 상태에서의 금속재료의 마찰, 마멸의 특성에 영향을 줄 수 있는 인자 선정 및 수준의 결정을 다음과 같이 하였다.

Table 1. Levels of selected factors

인자와 기호	수준		
	1	2	3
윤활유 점도(cSt) A	10	68	-
윤활유 온도(°C) B	40	70	100
하중(N) C	30	50	70
볼의 직경(mm) D	5.56	6.35	7.14
회전 반경(mm) E	30	35	40
회전속도(rpm) F	100	150	200
시편 거칠기(μm) G	1이하	1~5	6~10
시편 재질 H	Al.	Cu.	SM45C

윤활유는 점도차를 갖는 기계유를 선정하였으며 물리적 성질은 다음과 같다.

Table 2. Properties of oils

종류	항목	동점도 cSt	인화점
		40°C	°C
ISO VG 10(수준1)		9~11	130 이상
ISO VG 68(수준2)		61.2~74.8	160 이상

또한 윤활유가 온도에 따라서 점도가 달라질 것이기 때문에 온도를 3수준으로 선정하였다. 실험장치에 부가하는 하중은 볼이 디스크 표면에 가하는 하중이 각각 30, 50, 70N이 되도록 하였다. 볼의 재질은 STB2로써 베어링 볼을 선정하고, 크기

에 따라서 디스크 시편에 가하는 압력의 차이 및 미끄럼 운동중에 발생하는 마멸 입자가 볼의 크기에 따라 거동이 달라질 것이므로 각각 다르게 선정하였다. 한편, 회전속도 및 회전반경의 선정에 있어서 회전반경은 회전 선속도를 변화시켜 전체 미끄럼 거리를 달리할 것이다. 마지막으로, 시편의 거칠기 및 경도가 마찰, 마멸에 미치는 영향을 파악하기 위하여 실험인자로 선정하게 하였으며, 재질의 선정은 경도의 차가 큰 알루미늄(순도 99.9%), 구리(순도 99.9%) 그리고 철(SM45C)등 3종류의 디스크 시편으로 결정하였다. 사용한 디스크 시편과 베어링 볼의 경도는 다음과 같다.

Table 3. Hardness of specimens

	Al.	Cu.	SM45C	STB2
경도(Hv)	40±5	100±5	230±5	790

2.1.2 실험인자의 할당

2.1.1에서 선정할 각각의 인자를 실험계획의 L_{18} 의 직교배열표에 1열부터 8열까지 순차적으로 할당하였으며 할당표는 다음의 Table 4와 같다[9]. 한편, L_{18} 의 직교배열표에서 18가지 경우의 마찰, 마멸실험을 1시간동안 2회 반복하여 특성치를 얻었다.

2.2 실험장치 및 측정방법

2.2.1 실험장치

경계윤활 상태에서의 마찰, 마멸실험을 수행하기 위해 다음 Fig. 1의 pin-on-disk 장치를 사용하였다. 윤활유를 보유할 수 있는 저장고 및 가열할 수 있는 가열장치를 설치 했으며, 디스크 시편은 회전판 위에 단단하게 고정된 후 원하는 속도로 회전시킬 수 있다. 하중 지지대에 장착되어 있는 볼의 지지구에 볼을 장착한 후 하중 지지대를 볼이 디스크 시편의 면에 닿도록 내려놓은 후 평형 조정추를 움직여 하중 지지대가 평형이 되도록 맞춘다.

Table 4. Assignment of factors

인자 실험 No.	A	B	C	D	E	F	G	H
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3
5	1	2	2	2	3	3	1	1
6	1	2	3	3	1	1	2	2
7	1	3	1	2	1	3	2	3
8	1	3	2	3	2	1	3	1
9	1	3	3	1	3	2	1	2
10	2	1	1	3	3	2	2	1
11	2	1	2	1	1	3	3	2
12	2	1	3	2	2	1	1	3
13	2	2	1	2	3	1	3	2
14	2	2	2	3	1	2	1	3
15	2	2	3	1	2	3	2	1
16	2	3	1	3	2	3	1	2
17	2	3	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1

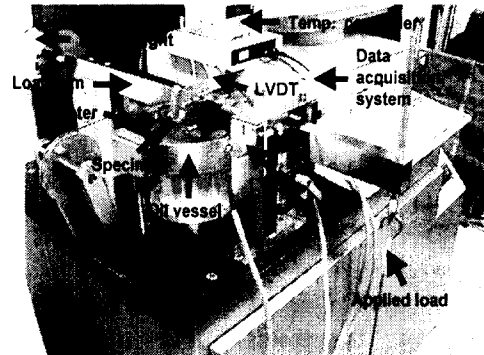


Fig. 1. Pin-on-disk tester

원하는 하중을 하중 지지대에 가한 후 동작시킨다. 매 실험 후에 모든 디스크 시편을 아세톤으로 닦고, 볼은 초음파세척기로 아세톤에 담가 수분간 세척을 하여 접촉면을 전자현미경등을 사용하여 관찰할 수 있도록 하였다. 한편, 윤활유 저장고내의 마멸입자 및 윤활유는 배출시킨 후 알코올 등으로 깨끗이 닦아낸다. 실험의 환경조건은 다음과 같다.

Table 5. Conditions of environment

환경	실험실내 환경
온도(℃)	21~25
상대습도(%)	30~56

2.2.2 측정방법

실험장치에 마찰력 측정을 위한 LVDT (Linear Voltage Displacement Transducer)가 설치되어 있으며 실험전에 교정 및 영점을 맞춘 후 실험을 실시한다. 실험중에 마찰력은 실시간적으로 LVDT를 통해서 측정하게 되며 이의 결과를 컴퓨터의 모니터에 보여준다. 측정된 마찰력으로부터 마찰계수를 구할 수 있다.

한편, 마멸량 측정은 윤회상태에서의 마멸량이 매우 적기 때문에 디스크 시편의 경우는 일반적으로 표면형상 측정기를 이용하여 마멸 트랙을 측정하여 환산할 수 있으며, 볼의 경우는 실험전의 무게와 실험후의 무게를 $10^{-5}g$ 까지 측정 가능한 마이크로밸런스를 이용하여 측정한 후 이로부터 볼의 부피 마멸량을 계산하였다.

III 실험 결과

3.1 현상 분석

실험후 디스크 표면의 마멸된 형상 측정 및 전자현미경을 이용하여 관찰하여 보면 다음과 같다.

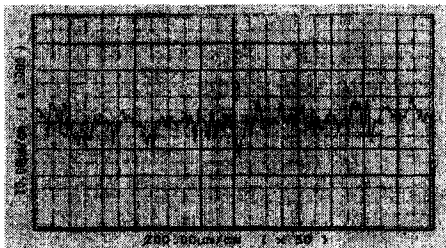


Fig. 2. Surface profile before experiment for No.10

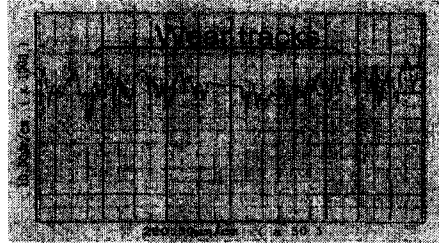


Fig. 3. Surface profile after experiment for No.10

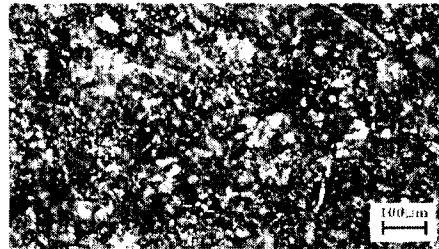


Fig. 4. Surface topography before experiment for No.10



Fig. 5. Surface topography after experiment for No.10

위의 Fig. 2에서 Fig. 5는 실험 No.10의 가장 연한 디스크 시편재질 Al의 실험 전후 표면형상과 마멸 트랙면이다. Fig. 2와 Fig. 3에서 실험전의 표면거칠기는 $Ra_{\text{값}} 3.59 \mu m$ 이고 실험후의 표면거칠기는 $Ra_{\text{값}} 3.24 \mu m$ 이며, Fig. 4와 Fig. 5의 트랙 형상에서 보듯이 실험후의 마멸 트랙면에 표면의 요철이 완전히 제거되지 않은 상태로 남아 있음을 알 수 있다. 가장 연한 Al에서조차도 마멸량을 환산하기 어려울 정도로 마멸이

적게 진행되었으며 이러한 현상은 표면 거칠기를 갖는 시편의 대부분에서 나타났다. 따라서, 디스크의 마멸량은 제외하고 볼의 마멸량만을 결과분석하였다.

3.2 결과 분석

본 연구에서 적용한 다구찌 실험방법에서 마찰, 마멸의 특성값은 적으면 적을수록 좋으므로 망소특성으로 분석을 하였다. 각각의 실험에서 측정된 정상상태 마찰계수 및 볼의 마멸량으로부터 SN비를 다음의 식에 의하여 구하였다.

$$SN = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum y_i^2 \right) \quad (2)$$

여기서, SN은 signal to noise의 비, n은 측정값의 수, y_i 는 측정값 이다[9]. 식 (2)로부터 계산한 SN비의 결과는 다음과 같다.

Table 6. SN ratio of the results

실험 No.	마찰계수	볼의 마멸량
1	13.56	37.87
2	17.08	11.83
3	17.72	10.26
4	12.40	19.81
5	12.77	37.85
6	13.56	14.94
7	13.15	10.62
8	11.06	-2.31
9	9.37	17.05
10	13.56	8.26
11	13.15	3.90
12	13.98	37.85
13	13.56	-5.84
14	14.42	37.86
15	15.92	7.77
16	14.42	37.87
17	13.98	11.03
18	14.42	0.35

위에서 구한 SN비로부터 각 인자들의 효과를 간이분석법으로 분석하였다. 인자들의 효과는 각 인자들의 수준이 특성값에 미치는 정도를 나타내며, 이들의

최고, 최소치로부터 각 인자들이 특성값에 기여하는 기여율을 계산 할 수 있다 [9]. 마찰계수 및 볼의 마멸량에 대하여 계산된 인자의 효과, 및 기여율은 다음과 같다.

Table 7. Factor effect of friction coefficient

인자 기호	수준의 합			수준차	기여율 (%)
	1	2	3		
A	13.41	14.16	-	0.75	8.56
B	14.84	13.77	12.73	2.11	24.00
C	13.44	13.74	14.16	0.72	8.22
D	13.06	14.16	14.12	1.10	12.51
E	13.71	14.14	13.49	0.65	7.42
F	13.28	13.54	14.52	1.24	14.15
G	13.09	14.54	13.72	1.45	16.56
H	13.55	13.52	14.28	0.76	8.58
합계				8.78	100

Table 8. Factor effect of ball wear

인자 기호	수준의 합			수준차	기여율 (%)
	1	2	3		
A	17.55	15.49	-	2.06	3.41
B	18.39	18.73	12.43	6.30	10.44
C	18.16	16.69	14.70	3.46	5.73
D	16.24	15.44	17.87	2.43	4.03
E	17.59	18.80	13.16	5.64	9.36
F	15.59	15.92	18.04	2.45	4.06
G	34.39	10.80	4.36	30.03	49.79
H	15.02	13.29	21.24	7.95	13.18
합계				60.32	100

위의 마찰계수 및 볼의 마멸량에 대한 인자들의 효과와 기여도로부터 마찰계수에 영향을 미치는 주요인자는 윤활유 온도, 디스크 시편의 거칠기, 회전속도 및 볼의 크기 임을 알 수 있다. 또한 볼의 마멸량에 영향을 미치는 인자는 디스크 시편의 거칠기, 경도, 윤활유의 온도 및 회전반경의 임을 알 수 있으며, 디스크 시편의 거칠기가 지배적인 인자임을 알 수 있다.

3.3 마찰특성

경계윤활 상태에서의 마찰계수의 일부를 다음과 같이 제시한다.

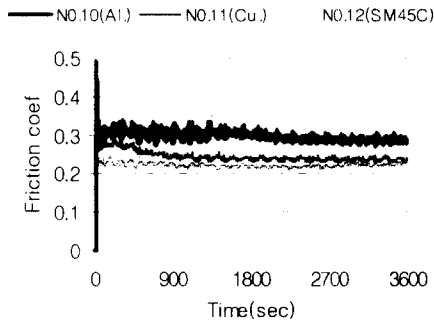


Fig. 6. Friction coefficient

위의 결과에서 알 수 있듯이 경계윤활 상태에서의 정상상태 마찰계수는 개략적으로 경도가 높을수록 낮은 경향을 보이며, 여러가지 실험조건이 결합된 경우에 전반적으로 0.15~0.35 정도의 값을 보여주었다. 또한 실험후 마멸 트랙면을 고찰해 보면 앞의 Fig. 5와 다음의 Fig. 7, Fig. 8에서 보는 바와 같이 모든 경우에 비슷한 경향으로 grooves와 scratches들이 현저하게 존재하는 것으로 보아 경계윤활 조건에서 금속재료의 미끄럼 운동중 발생하는 마멸입자와 더 경한 요철의 굽힘에 의한 마찰이 발생된다는 것을 알 수 있었다.

3.4 볼의 마멸특성

경계윤활 상태에서의 마찰, 마멸 실험후 마멸 트랙면의 형상은 다음과 같다.

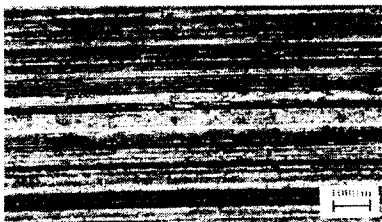


Fig. 7. Wear tracks of disk for experiment No.9

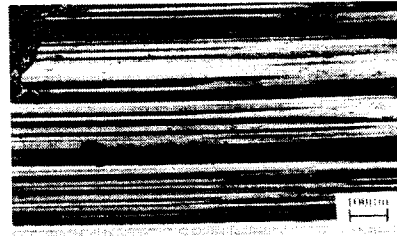


Fig. 8. Wear tracks of ball for experiment No.9

실험 No.9의 경우는 표면연마된 Cu.로써 표면거칠기 R_a 값이 0.16이며, 이에 상응운동하는 베어링 볼의 직경은 5.56mm이다. 실험후 마멸트랙면을 전자현미경으로 관찰한 결과 마멸 트랙면에 grooves와 scratches들이 현저하게 존재한다. 이와 같은 현상은 Fig. 5에서와 같이 표면거칠기를 갖는 경우에도 나타났다. 따라서 경계윤활 조건에서 금속재료의 미끄럼 운동중 마멸입자와 더 경한 요철에 의한 연삭마멸이 발생된다는 것을 알 수 있었다.

IV 결 론

경계윤활 상태에서의 마찰, 마멸에 미치는 주요 인자 및 특성을 파악하기 위하여 다구찌 실험방법에 의한 실험과 간이분석 그리고 표면형상의 관찰을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 경계윤활 상태에서 금속재료와 베어링 볼사이의 마찰계수에 영향을 미치는 주요 인자는 윤활유 온도, 디스크 시편의 거칠기, 회전속도 및 볼의 크기이다.
2. 경계윤활 상태에서 금속재료와 상대운동을 하는 베어링 볼의 마멸량에 영향을 미치는 주요 인자는 디스크 시편의 거칠기, 경도, 윤활유의 온도 및 회전반경이며, 이중 디스크 시편의 거칠기가 지배적임을 알 수 있었다.
3. 실험 후 마멸 트랙면에 굽힘자국이 현

저하계 나타나는 것으로 보아 이는 경계
윤했 상태에서 금속재료의 미끄럼 운동
중 발생하는 마멸입자와 더 경한 요철의
긁힘에 의한 마찰과 연삭마멸이 발생한다
는 것을 나타낸다.

[9] 박성현, *다구찌 방법을 중심으로 한 응
용실험계획법*, 영지문화사, 1990.

후기

본 연구는 한국과학재단 지정 정보저장
기기연구센터(과제번호:97K3-0907-02-02-
1)의 지원을 받아 이루어 졌으며 이에 관
계자 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] J. Boyd, and B. P. Robertson, "The Friction properties of Various Lubricants at High Pressures", Trans. ASME, Vol. 167, pp. 51-59, 1945.
- [5] F. P. Bowden, J. N. Gregory, and D. Tabor, "Lubrication of Metal Surfaces by Fatty Acids", Nature, Vol. 156, pp. 97-101, 1945.
- [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] E. Rabinowicz, *Friction and Wear of Materials*, John Wiley, 1995.
- [8] N. P. Suh, and H. C. Sin, "The Genesis of Friction", Wear, Vol. 69, pp. 91-114, 1981.