

## 경계윤활 상태에서의 금속재료 마찰 및 마멸에 영향을 미치는 주요인자

류종관 · 이홍철 · 김대은\*

연세대학교 대학원  
\*연세대학교 기계전자공학부

### Major Factors that Affect Friction and Wear of Metals in Boundary Lubrication

Jong-Kwan Ryu, Hong-Chul Lee and Dae-Eun Kim\*

Graduate School, Yonsei University

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

**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 using a pin-on-disk type tester with pure aluminum, pure copper, and SM45C steel as the disk material and steel, stainless steel and bearing ball as the ball. The experimental conditions were determined according to the 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 tester.

#### 1. 서 론

일반적으로 두개의 부품이 접촉하여 상대운동을 하는 기계요소의 대부분은 윤활상태에서 작동하고 있으며, 접촉면에서의 기계적 손실에 의한 효율 저하, 마멸, 소음 등의 문제를 최소화하기 위하여 유체윤활 상태를 유지하는 것이 필요하다. 그러나 Stribeck 선도로부터 알 수 있듯이 상대운동의 속도가 낮아지거나 하중을 증가시킨다면 더 이상 유체윤활 상태의 유지는 어렵게 되어 고체면의 요철간에 접촉이 시작되는 경계윤활 상태로 접어들게 된다[1].

경계윤활이란 용어는 Hardy에 의하여 처음으로 사용되었으며, Hardy 등은 상대운동을 하는 두 금속면이 윤활막에 의하여 분리될 때 마찰은 미끄럼면과 윤활막 사이에서의 물리, 화학적인 작용 때문에 감소된다는 경계윤활의 메커니즘을 제시하였다[2]. 이에 따라서 윤활유의 분자구조, 환경조건, 경계온도 그리고

고체면에서 윤활유의 물리, 화학적 흡착을 지배하는 변수들에 대한 연구가 집중되었다.

이후 Bowden and Tabor는 다음과 같은 윤활 메커니즘을 제시하였다[3,4]. 즉, 윤활 상태의 금속을 접촉시켜 하중을 가하면 접촉면은 작용하중에 비례하여 소성변형을 일으키며, 이러한 변형 때문에 윤활막은 두 금속면 사이에서 큰 압력을 받게 된다. 그러나 이 압력은 전 접촉영역에서 같지 않기 때문에 압력이 최고가 되는 부분에서 국부적인 파단과 금속의 응착이 일어난다. 결국 경계윤활면 사이에서의 윤활유의 분자구조와 윤활막의 물리적 성질이 마찰에 중요한 영향을 미친다고 할 수 있다.

주요한 경계윤활 모델에 의하면, 경계윤활면 사이의 마찰력은 윤활막을 전단하는데 필요한 힘과 표면 요철의 변형을 일으키는 힘을 합친 것으로 마찰계수  $\mu$ 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,  $\alpha$ 는 윤활막에 의하여 요철과 분리되는 실 접촉면적의 비율,  $s_r$ 은 윤활막의 전단력,  $s_m$ 과  $p_m$ 은 접촉한 금속 중 상대적으로 연한 금속의 전단력과 경도이다. 그러나 위의 경계윤활 모델은 변수  $\alpha$ 의 크기를 알 수 없어 (1)식으로부터 마찰계수를 직접 계산할 수 없기 때문에 실험에서 측정된 마찰계수와와의 비교가 어렵고, 표면 형상의 변화 및 미끄럼거리에 따른 마찰력의 변화를 설명할 수 없다는 문제점들을 지니고 있다[6].

특히, (1)식에서  $\alpha$ 가 0에 가까운 값에 도달할 때 실험에서 얻어진 값보다 매우 낮은 마찰계수를 얻게 되는데, Rabinowicz는 이러한 마찰계수의 차이를 흡착에너지의 효과를 도입하여  $s_m/p_m$ 의 비를 수정함으로써 개선하였다. 또한, 그는 높은 마찰계수는 흡착에너지와 압입경도의 비가 클 때 얻어질 수 있다고 주장했다[7].

최근에 Suh and Sin은 미끄럼거리에 따른 마찰계수의 변화를 규명함에 있어서 마찰계수는 재질의 물성이 아니고 3가지 마찰 메커니즘- 표면요철의 변형, 경계면에 침입된 마멸입자와 경한 요철에 의한 굽힘, 표면 사이의 흡착에 의존하며, 이중에서도 재질, 표면형상, 환경 그리고 요철의 변형과 굽힘에 의한 영향이 흡착에 의한 것 보다 훨씬 클 수 있다고 제시하였다[8]. 또한 경계윤활 상태에서의 마찰 메커니즘도 마멸입자와 경한 요철에 의한 굽힘이 요철사이의 흡착력과 미끄럼 표면 사이의 윤활막의 전단보다도 마찰력에 더 큰 영향을 미친다 라고 주장하였다[6]. 따라서 경계윤활 상태에서의 마찰 및 마멸 특성을 파악하기 위해서는 요철 사이의 흡착 및 윤활막의 전단 이외에도 다른 인자에 의한 영향이 고려되어야 할 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 작동 중에 경계윤활 상태를 경험하는 기계요소들의 마찰·마멸 현상을 이해하기 위하여 경계윤활 상태의 마찰, 마멸에 영향을 미치는 주요 인자 및 특성을 파악하는 데 그 목적이 있다.

## 2. 실험 방법

본 연구에서는 다양한 인자들을 고려하여 이들이 경계윤활 상태의 마찰 및 마멸 특성에 어떠한 영향을 미치는지 파악하기 위하여 여러 인자들을 조합할 경우 실험횟수를 줄일 수 있는 직교배열에 의한 다구찌 실험방법을 적용하였으며, 간이분석법을 이용하여 선정된 인자들이 특성값에 미치는 기여율을 파악하였다[9]. 결과적으로 선정된 인자들 중 경계윤활

상태에서의 마찰/마멸에 미치는 주요 인자 및 특성을 파악할 수 있도록 실험계획을 수립하였다.

### 2-1. 실험계획

#### 2-1-1. 인자 및 수준의 선정

경계윤활 상태에서 금속재료의 마찰/마멸 특성에 영향을 미칠 수 있는 인자 선정 및 선정된 인자값의 변화를 Table 1에 나타내었다.

실험에 사용한 윤활유는 점도 차를 갖는 미네랄 오일을 선정하였으며, 물리적 성질은 Table 2와 같다.

또한, 윤활유는 온도에 따라서 점도가 변하므로 온도를 3수준으로 선정하였다. 실험시의 하중 조건은 볼이 디스크 표면에 가하는 접촉 하중이 각각 200, 500, 800 gf가 작용되도록 하였으며, 미끄럼 선속도, 미끄럼 거리, 볼의 경도, 디스크 경도 및 디스크 거칠기 등을 실험인자로 선정하였다. 볼은 steel 볼, stainless steel 볼 및 베어링 볼(STB2)을 선정하여 경도를 달리하였으며, 디스크 재질로는 경도의 차가 큰 순수 알루미늄, 순수 구리 그리고 기계 구조용 탄소강(SM45C) 등 3종류를 선정하였다. 사용한 디스크 시편과 볼의 경도는 Table 3과 같다.

#### 2-1-2. 실험인자의 할당

실험계획법에서 직교배열표를 사용하는 목적은 재현성, 바람직한 최적조건 결정 및 안정성에 대한 평가 등을 들 수 있으며, 특히 품질공학에서 많이 이

Table 1. Levels of selected factors

수준인자와 기호	1	2	3
윤활유점도 (cSt)	A 10	32	-
윤활유온도 (°C)	B 40	70	100
수직하중 (gf)	C 200	500	800
선속도 (m/s)	D 0.1	0.125	0.15
미끄럼거리 (m)	E 300	500	700
볼경도 (Hv)	F 230	350	780
디스크경도 (Hv)	G 40(Al)	100(Cu)	230(SM45C)
디스크거칠기 ( $\mu\text{m}$ )	H ~1	1~4	4~7

Table 2. Properties of lubricants

항목 종류	동점도 (cSt) at 40°C	인화점 (°C)
ISO VG 10(수준 1)	9~11	130 이상
ISO VG 32(수준 2)	28.8~35.2	170 이상

**Table 3. Hardness of balls and disk specimens**

구분	Steel ball	SUS ball	Bearing ball	Al	Cu	SM45C
Hardness (Hv)	230 ± 5	350 ± 5	780	40 ± 5	100 ± 5	230 ± 5

용되는 직교배열표는 2 수준계인 경우는  $L_{12}$ , 3 수준계인 경우는  $L_{18}$ 이다[9]. 본 연구에서는 3 수준계의 인자조합이므로 Table 1에서 선정한 각각의 인자들을  $L_{18}$  직교배열표의 1열에 윤활유 점도(A)를 할당하고 순차적으로 8열에 디스크 시편의 거칠기(H)까지 할당하였다[10]. 실험은 Table 4에서 제시한 18가지 실험조건으로 2회씩 반복 실시하면서 마찰계수와 볼의 마멸계수를 측정하였다.

**2-2. 실험장치 및 측정방법**

**2-2-1. 실험장치 및 방법**

경계윤활 상태에서의 마찰/마멸 실험을 수행하기 위해 윤활유 저장용기 내에 가열장치를 설치하여 윤활유 온도조절이 가능하도록 Fig. 1과 같은 pin-on-disk 실험 장치를 구성하였으며, Fig. 2에서는 실험장치의 구성도를 보여주고 있다.

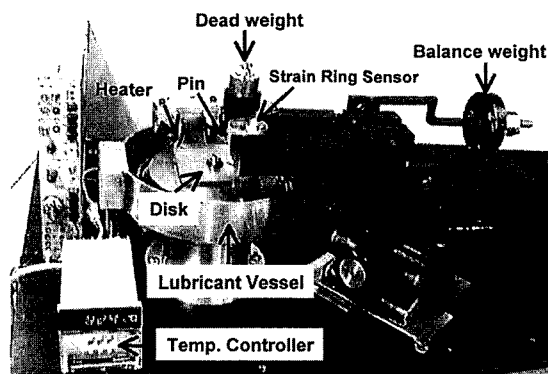
pin-on-disk 실험장치는 윤활유 저장용기 내에서 회전하는 디스크 표면에 구형의 금속 볼이 접촉되면서

경계윤활 상태에서의 두 금속간의 한 방향 운동이 일어난다. 디스크와 볼을 한 쌍의 재료로 하여 시편을 구성하였으며, 볼 부위는 유연한 판 스프링과 스트레인 링 센서에 의해 고정되었고 디스크 시편은 회전판 위에 장착되어 원하는 속도로 회전시킬 수 있도록 하였다. 스트레인 빔에 장착되어 있는 볼의 지지구에 볼이 고정되어 디스크 시편과 접촉한 상태에서 평형추를 조절하여 하중 지지대가 평형이 되도록 한 후에 dead weight 방식으로 원하는 하중을 부가하였다.

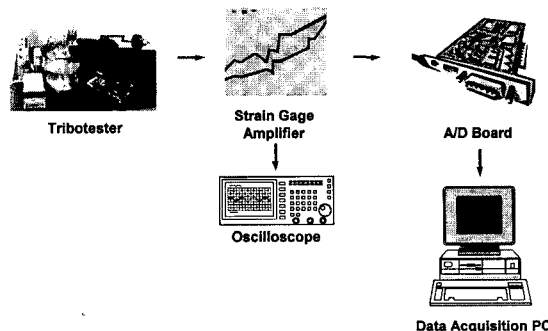
매 실험 후 모든 디스크 시편은 아세톤으로 닦고, 볼은 초음파세척기를 이용하여 수분간 세척을 실시한 뒤에 접촉면을 광학 현미경으로 관찰하였다. 그리고 실험 후에는 윤활유 저장용기내에 남아있는 마멸입자 및 윤활유를 제거한 뒤에 알코올 등으로 깨끗

**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. Photograph of the pin-on-disk type tester.**



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

**Table 5. Environmental conditions**

환경	실험실내 환경
온도 (°C)	21~25
상대습도 (%)	30~56

꽃이 닦아내어 실험 조건을 일정하게 유지하였다. 세부적인 실험 조건은 Table 5과 같다.

### 2-2-2. 측정방법

실험장치에서 마찰력 측정은 볼 부위에 부착되어 있는 스트레인 링 센서를 이용하였다. 접촉 시 발생하는 마찰력이 링 센서의 스트레인게이지에 전달되고 이때 유발된 스트레인량이 AMP에서 전압으로 변환, 증폭되어 A/D board를 통해 PC에 저장됨으로써 실시간 측정이 이루어지도록 하였다.

스트레인 링 센서에 부착된 스트레인게이지는 환경에 민감하고, 링의 기하학적인 특성상 사용이 누적될수록 소성변형의 가능성이 존재하므로 제작된 스트레인 링 센서에 대한 보정작업을 각 실험에 앞서 행하였으며, 실험시에는 센서의 선형성이 보장되는 구간에서만 마찰력을 측정 하였다.

한편, 미끄럼 운동 중에는 볼이 항상 디스크 시편과 접촉을 하므로 볼의 마멸체적을 측정하는 다음 이로부터 마멸계수를 환산하였다. 마멸체적의 측정은 윤활상태에서의 마멸량이 매우 적기 때문에 실험전의 무게와 실험후의 무게를  $10^{-5}$  gf까지 측정 가능한 정밀저울을 이용하여, 각각의 볼 시편에 대하여 5번씩 측정 후 이들의 평균값으로부터 볼의 마멸체적을 산출하였으며, 마멸계수는 다음의 Archard 식으로부터 계산하였다[11].

$$k = \frac{HV}{Ld} \quad (2)$$

여기서  $k$ 는 마멸계수,  $H$ 는 상대적으로 연한 시편의 경도,  $V$ 는 마멸체적,  $L$ 은 총 하중, 그리고  $d$ 는 미끄럼 거리를 나타낸다.

실험 후 디스크 표면에 형성된 마멸 트랙의 마멸 상태를 광학현미경으로 관찰하였으며, 표면형상의 측정은 3차원 표면 측정기를 사용하였다.

## 3. 실험 결과

### 3-1. 결과 분석

본 연구에서 적용한 다구체 실험방법의 경우 마찰/마멸의 특성값은 적을수록 좋은 특성이므로 망소특

성의 분석방법을 적용하였다. 각각의 실험 후에 마찰계수 및 환산된 마멸계수로부터 SN비를 다음의 식에 의하여 구하였다.

$$SN = -10\log\left(\frac{1}{n}\sum y_i^2\right) = -10\log\sigma^2 \quad (3)$$

여기서, SN은 signal to noise의 비,  $n$ 은 측정값의 수,  $y_i$ 는 측정값 및  $\sigma^2$ 은 분산이다[10]. 따라서 SN비의 값이 크다는 의미는 평균값과 표준편차가 작음을 의미한다. 식 (3)으로부터 계산한 SN비의 결과는 Table 6과 같다.

아래의 Table 6의 SN비로부터 각 인자들의 효과를 간이분석법으로 분석하였다. 인자들의 효과는 각 인자들의 수준이 특성값에 미치는 정도를 나타내며, 이들의 최고, 최소값으로부터 각 인자들이 특성값에 미치는 기여율을 계산할 수 있다[10]. 마찰계수 및 마멸계수에 대하여 계산된 인자의 효과 및 기여율은 다음의 Table 7, 8과 같다.

### 3-2. 마찰에 미치는 지배적 인자 및 특성

Table 7의 마찰계수에 대한 인자들의 효과와 기여율로부터 마찰계수에 영향을 미치는 주요 인자를 살펴보면 기여율의 누적이 85% 이내에 해당하는 인자들은 디스크 거칠기, 디스크경도, 미끄럼거리, 윤활

**Table 6. SN ratio of the result**

실험 No.	마찰계수	마멸계수
1	10.60	41.33
2	10.90	-1.87
3	13.35	4.85
4	12.58	-5.52
5	13.35	23.89
6	14.06	18.57
7	11.01	-6.45
8	15.90	15.88
9	12.03	2.92
10	15.90	49.60
11	12.21	1.38
12	9.89	-20.30
13	15.11	47.76
14	8.51	-28.35
15	16.19	49.10
16	10.15	-10.16
17	9.36	-20.13
18	12.73	55.85

**Table 7. Factors affecting the friction coefficient**

인자 기호	수준의 합			수준차	기여율 (%)
	1	2	3		
A	12.64	12.23	-	0.41	3.31
B	12.14	13.30	11.86	1.44	11.49
C	12.56	11.71	13.04	1.34	10.71
D	12.16	12.17	12.98	0.82	6.55
E	11.52	12.60	13.18	1.66	13.30
F	12.49	12.11	12.71	0.60	4.81
G	10.76	12.90	13.65	2.89	23.14
H	14.11	12.41	10.78	3.33	26.67
합 계				12.49	100

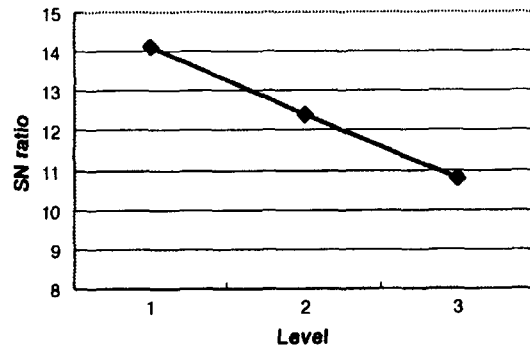
**Table 8. Factors affecting the wear coefficient**

인자 기호	수준의 합			수준차	기여율 (%)
	1	2	3		
A	10.40	13.86	-	3.46	2.64
B	12.50	17.58	6.32	11.26	8.58
C	19.43	-1.53	18.50	20.96	15.97
D	11.52	16.48	8.40	8.08	6.16
E	13.72	4.52	18.15	13.63	10.38
F	13.85	12.11	10.44	3.42	2.60
G	1.56	14.80	20.04	18.48	14.08
H	39.28	9.77	-12.65	51.93	39.58
합 계				131.20	100

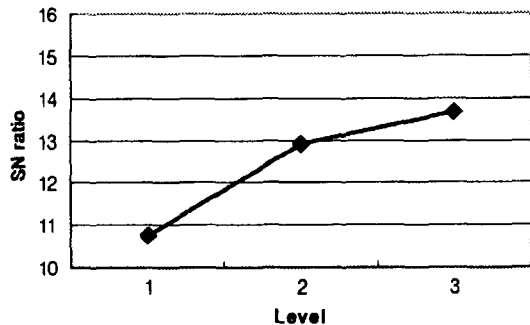
유온도와 수직하중의 순 임을 알 수 있다. 따라서 경계윤활 상태에서의 마찰계수에 영향을 주는 요소는 윤활유 및 디스크 시편의 특성, 미끄럼운동의 이력 그리고 두 물체에 작용하는 수직하중이며, 이 중에서도 디스크 거칠기와 디스크 경도가 지배적인 인자라 할 수 있다. 지배적 인자에 대한 마찰계수의 경향을 살펴보면, 디스크 경도의 증가에 따라서 마찰계수는 감소하지만 디스크 거칠기가 증가하면 마찰계수는 증가하는 경향을 Fig. 3에서 보여주고 있다. 이때의 마찰계수는 여러가지 실험조건에 따라 0.15~0.40 정도의 값이 측정되었다. 실험 후의 마멸 트랙면에서는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 매끈한 표면이나 거친 표면의 모든 경우에 유사한 경향으로 groove와 scratch들이 명확히 존재하는 것을 관찰할 수 있었다.

**3-3. 마멸에 미치는 지배적 인자 및 특성**

한편, Table 8의 마멸계수에 대한 인자들의 효과와



(a) For disk roughness



(b) For disk hardness

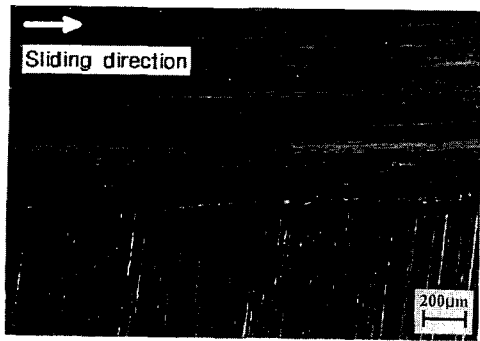
**Fig. 3. Variation of SN ratio from friction coefficient.**

기여율로부터 마멸계수에 영향을 미치는 주요인자를 살펴보면 기여율의 누적이 85% 이내에 해당하는 인자들은 디스크 거칠기, 수직하중, 디스크경도, 미끄럼거리, 윤활유온도의 순서로 나타나고 있으며, 디스크 시편의 거칠기가 지배적인 인자임을 알 수 있다.

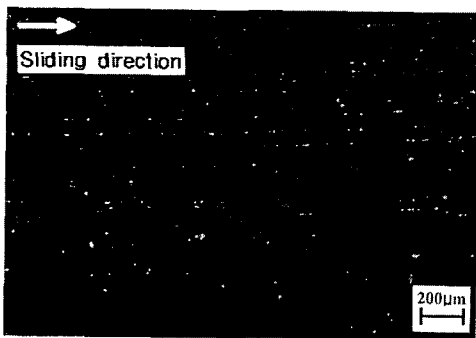
경계윤활 상태에서의 마멸계수에 영향을 미치는 지배적인 인자가 디스크 거칠기이기 때문에 이에 따른 마멸계수의 경향을 살펴보면 다음의 Fig. 5와 같다.

Fig. 5에서는 디스크 거칠기가 증가할수록 마멸계수가 명확히 증가하는 경향을 보여주고 있다. 지배적인 인자인 디스크 거칠기의 변화에 따른 볼의 마멸상태를 관찰하기 위하여 실험 후 디스크와 볼의 마멸 트랙면의 형상을 관찰해 보면 다음의 Fig. 6, 7과 같다.

실험 No. 8의 경우 볼은 경도가 가장 연한 직경 6.25 mm인 steel 볼이며, 디스크는 경도가 가장 경한 SM45C로서 Ra 값이 0.19  $\mu\text{m}$ 인 매끈한 표면 상태이며 수직하중은 500 gf이다. 반면에 실험 No. 16의 경우는 볼의 경도가 가장 경한 베어링 볼(STB2)이며,



(a) Smooth surface(Ra 0.18 µm) for experiment No.1 (Al)



(b) Rough surface(Ra 5.52 µm) for experiment No.9 (Al)

Fig. 4. Wear track of disk.

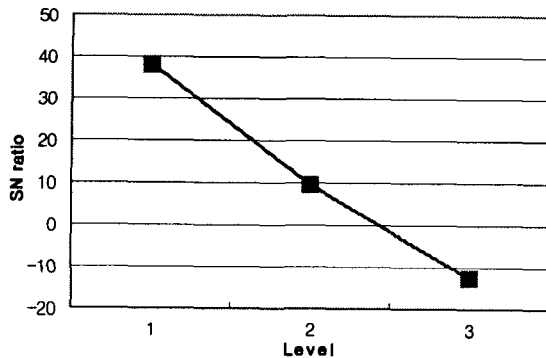
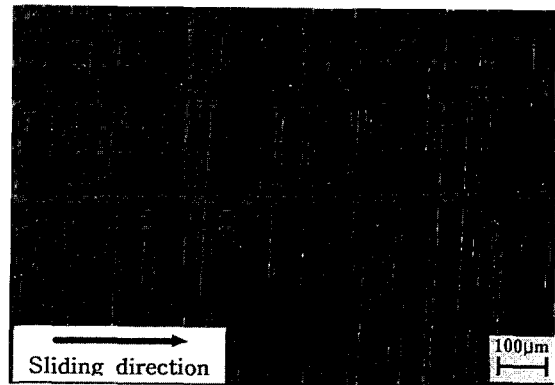
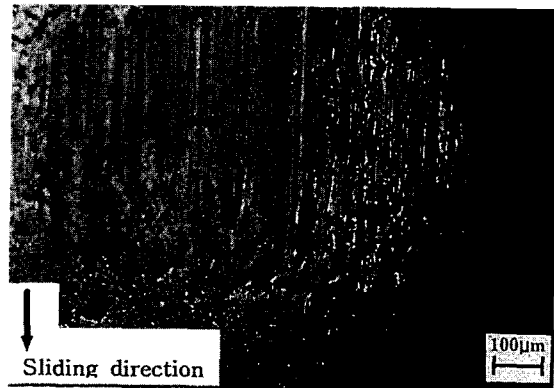


Fig. 5. Variation of SN ratio for disk roughness from wear coefficient.

디스크의 경도는 가장 연한 Al이지만  $R_a$  값이 5.08 µm로서 상대적으로 거친 표면 상태에서 수직하중도 가장 낮은 200 gf의 실험조건이다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 실험 No. 8의 경우에는 볼의 마멸이 적게 발생하여 소량의 scratch들만이 관찰되었다. 이 경우 볼의 마멸체적은 0.0174 mm<sup>3</sup>, 마멸계수는 1.597 × 10<sup>-3</sup>이다. 그러나 No. 16의 경우는 디스크 거칠기의 영향으로 볼의 마멸이 상당히 진행되었음을 Fig.7에



(a) Disk



(b) Ball

Fig. 6. Wear track for experiment No.8.

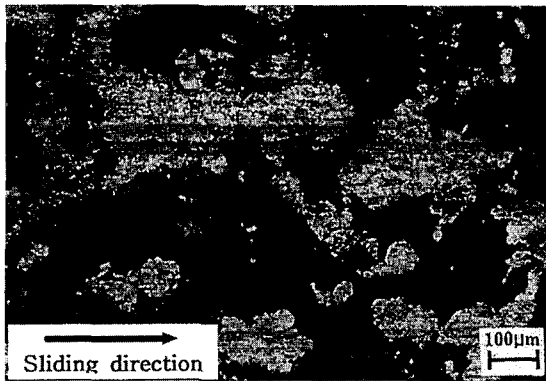
서 관찰 할 수 있으며, 이 때 측정된 볼의 마멸체적은 0.041 mm<sup>3</sup>, 마멸계수는 3.200×10<sup>-4</sup>이다. 따라서, 디스크 거칠기가 볼의 마멸에 미치는 영향이 매우 크다는 것을 알 수 있었다.

한편, 실험 후 마멸 트랙면을 광학현미경으로 관찰한 Fig. 4, 6과 7에서는 마멸 트랙면에 groove와 scratch들이 현저하게 존재하고 있음을 확인할 수 있었으며, 이와 같은 현상은 매끈한 표면의 경우나 거친 표면의 경우에 모두 나타났다.

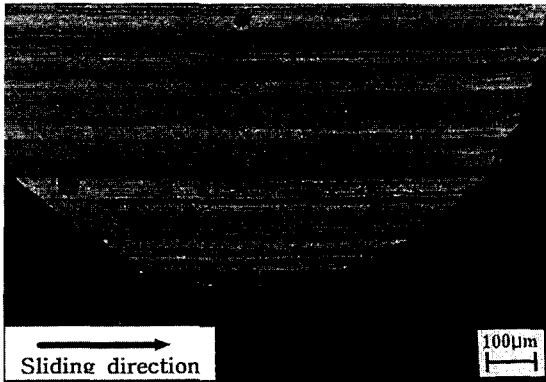
#### 4. 결 론

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

1. 경계윤활 상태에서 금속재료와 볼 사이의 마찰



(a) Disk



(b) Ball

Fig. 7. Wear track for experiment No. 16.

계수에 영향을 미치는 주요 인자는 디스크 시편의 거칠기, 디스크 시편의 경도, 미끄럼 거리, 윤활유 온도, 수직하중의 순서였으며, 이 중에서 디스크 시편의 거칠기, 디스크 시편의 경도가 지배적인 인자임을 알 수 있었다.

2. 경계윤활 상태에서 금속재료와 볼 사이의 마멸 계수에 영향을 미치는 주요 인자는 디스크 시편의 거칠기, 디스크 시편의 경도, 수직하중, 미끄럼 거리, 윤활유 온도의 순임을 알 수 있었으며, 이 중에서 디스크 시편의 거칠기가 지배적인 인자임을 알 수

있었다.

3. 실험 후 마멸트랙면에 굵은자국이 현저하게 나타나는 것으로 보아 이는 경계윤활 상태에서의 금속재료의 미끄럼 운동 중 발생하는 마멸입자와 상대적으로 경한 요철의 굽힘에 의한 마찰과 연삭마멸이 발생한다는 것을 알 수 있었다.

## 후 기

이 논문은 1998년 한국학술진흥재단의 학술연구비에 의하여 지원되었음

## 참 고 문 헌

1. Bhushan, B. and Gupta, B. K., Handbook of Tribology, McGraw Hill, 1991.
2. Hardy, W. B. and Doubleday, I., "Boundary Lubrication-The Paraffin Series," Proc. Roy. Soc. A, Vol. 102, pp.550-574, 1922.
3. Bowden, F. P. and Tabor, D., The Friction and Lubrication of Solids, Clarendon Press, pp.176-199, 1958.
4. Boyd, J. and Robertson, B. P., "The Friction Properties of Various Lubricants at High Pressures," Trans. ASME, Vol.167, pp.51-59, 1945.
5. Bowden, F. P., Gregory, J. N. and Tabor, D., "Lubrication of Metal Surfaces by Fatty Acids," Nature, Vol.156, pp.97-101, 1945.
6. Komvopoulos, K., Saka, N. and Suh, N. P., "The Mechanism of Friction in Boundary Lubrication," Trans. ASME, Vol. 107, pp. 452-462, 1985.
7. Rabinowicz, E., Friction and Wear of Materials, John Wiley, 1995.
8. Suh, N. P. and Sin, H. C., "The Genesis of Friction," Wear, Vol.69, pp.91-114, 1981.
9. 田口玄一, 개발·설계단계의 품질공학, 한국공업표준협회, 1991.
10. 박성현, 다구찌 방법을 중심으로 한 응용실험계획법, 영지문화사, 1990.
11. Archard, J., "Contact and Rubbing of Flat Surfaces," J. of Appl. Physics, Vol.24, pp.981-988, 1953.