

# 표면 조도의 변화에 따른 마찰 및 마멸 특성

Effect of characteristic of surface roughness on friction and wear in sliding

이상욱\*, 서만식, 구영필(부산대학교 대학원), 조용주, 박노길(부산대학교 기계공학부)

Sang-Wook Lee\*, Man-Sik Seo, Young-Pil Koo, Yong-Joo Cho, No-Gill Park  
(Pusan National University)

## Abstract

The effect of characteristic of surface roughness on friction and sliding wear was studied experimentally with ball-on-disk type wear tester. The test was conducted with specimens those have varying arithmetic mean value, skewness and kurtosis under the condition of different load, sliding speed and lubricant viscosity. The surface of the lower skewness in negative value or the higher kurtosis tends to have low friction for the same arithmetic mean value. There is optimum arithmetic mean value surface roughness for operating variables have load, speed, etc.

## Key Words

Arithmetic mean value, Skewness, Kurtosis, Ball-on-Disk

### 1. 서론

상대운동을 하는 두 면 사이에는 항상 마찰이 작용하고, 과도한 마찰과 마멸에 의해 기계요소의 손상이 발생할 수 있다. 재료의 마찰과 마멸현상은 재료 고유의 물성이 아닌 tribo-system의 특성이므로 재료의 마찰과 마멸을 측정하고 그 현상을 완전히 이해하는 것은 다소 어렵다. Tribo-system의 변수에는 운동의 형태, 하중이나 접촉압력, 미끄럼 속도 및 온도와 같은 작동변수(operating variables)와 재료의 조직, 화학적 구성, 윤활유 및 표면상태와 같은 단일변수(simple parameters)가 있다. 그 중 표면 상태는 다양한 방법에 의해 생성되고, 표면의 형상에

따라 마찰, 마멸 및 윤활특성이 달라진다. 즉 표면의 형상은 마찰특성과 윤활상태에 영향을 미치는 주요 원인이다.

표면 거칠기 변화가 마찰 및 마멸에 미치는 영향에 대하여 이론적 및 실험적 연구가 많이 진행되어 왔다. Staph et al.[1]들은 매끈한 표면은 계면 사이에 이물질이 들어가기 어렵기 때문에 매끈한 표면일수록 마찰특성이 우수하다고 하였다. 반면, Martz[2]는 거친 표면이 돌기 사이에 오일을 공급하여 먼지나 마멸 입자들의 돌출구 작용을 하기 때문에 거친 표면일수록 마찰 특성에 좋은 영향을 미친다고 하였다. 한편, Kang과 Ludema[3]는 거친 표면 또는 매끈한 표면보다는 중간 정도의 거칠기를 가진 표면이 윤

활특성에 더 좋은 효과를 보인다고 하였다. Bossler[4]는 적당한 표면조도를 형성하는 것이 윤활유 pocket 효과를 증대 시키므로 매끈한 표면보다 윤활상태가 좋으며, 또한 불연속면에 형성되는 윤활막은 윤활유 두께가 감소함에 따라 경직화(stiffening)효과를 증대시켜 준다는 가설을 세웠다. 그리고 Suh[5,6]는 건조 미끄럼 접촉시 요철 표면(undulated surface)은 마멸입자를 요철 사이에 억제시킴으로 마찰계수와 마멸량을 감소시킬 수 있다고 하였다.

마찰, 마멸 및 윤활 상태는 기계의 수명 및 성능에 중요한 영향을 미친다는 것이 인식되고 있다. KS규격[KSB 0161], 국제표준기구[ISO 1302]에는 중심선 평균 거칠기( $R_a$ ), 최대 높이 거칠기( $R_{max}$ ) 등의 값이 제시되어 있다. 표면형상이 윤활 상태에 미치는 영향에 대해 제품 설계 시 요구되는 최적의 표면조도는 기존 자료인 중심선 평균 거칠기 값을 그대로 적용하고 있다. 그러나 표면이 동일한 중심선 평균 거칠기( $R_a$ )를 가지더라도 형태적으로 분류한 skewness( $S_k$ )와 kurtosis( $\mu_4$ )가 다른 경우, 표면은 서로 다른 기하학적인 형상을 가지므로 마찰, 마멸 및 윤활 특성이 다르게 나타난다는 연구 결과가 발표되었다[7]. 하지만, 표면의 형태적인 특성인 중심선 평균 거칠기( $R_a$ ), skewness( $S_k$ )와 kurtosis( $\mu_4$ )에 따른 마찰, 마멸 및 윤활특성의 상관관계에 관한 연구는 아직까지 미비하다.

따라서 본 연구에서는 하중, 미끄럼 속도, 온도, 표면상태, 주위분위기, 윤활 등의 변화를 고려하여 마멸시험기를 사용하여, 점 접촉 상태에서 작동조건과 표면거칠기 형상변화 즉, 중심선 평균 거칠기( $R_a$ ), skewness( $S_k$ ), kurtosis( $\mu_4$ ) 변화들이 미끄럼 마찰하에서 마찰특성 변화에 미치는 영향을 실험적으로 규명하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2-1. 실험장치

본 연구에서는 표면거칠기 변화와 윤활상태에 따른 마찰특성을 시험하기 위해 Plint & Partners의 TE67 마멸시험기를 사용하였

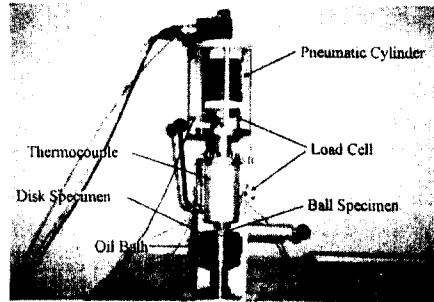


Fig. 1 Experimental Apparatus

다.

Fig. 1은 마멸시험기 하중부과 장치이다. 하중은 설정값에 따라 PC로 제어되며, 공압 실린더(pneumatic cylinder)로 부과된다. 디스크는 용량 2.3kW의 모터에 의해 회전되며, 속도센스에 의해 일정한 미끄럼 속도를 유지할 수 있다. 불과 디스크 사이의 수직력과 마찰력은 내장된 로드셀에 의해 측정되며, 로드셀의 측정 신호는 컨트롤러(controller)를 통해 PC로 전송되며 측정된 마찰특성 변수 값이 자동 연산되고 저장된다.

### 2-2. 실험방법

본 실험에서 사용한 시편은 직경 74mm, 두께 8mm의 디스크와 직경 6.35mm의 볼을 사용했다. 시험 볼의 재질은 STB2로 표면경도는 HRc 67이고 시험 디스크는 기어, 축류에 주로 사용되는 SCM440(AISI 4140)을 사용했으며 표면경도는 HRc 19±1이다. 또한, 디스크 표면은 평면 연삭기(surface grinding machine)로 가공한 후 폴리싱 머신(polishing machine)과 사포(sand paper)를 사용하여 방향성을 갖지 않도록 연마하였다.

실험에 사용된 각 시편들은 사포 메시(mesh)를 달리하여  $S_k$ 와  $\mu_4$ 를 같게하고  $R_a$ 만 다른 시편과  $R_a$ 와  $S_k$ 는 동일하고

$\mu_4$  만 다른 시편 그리고  $R_a$  와  $\mu_4$  를 같게 하고  $S_k$  만 다른 시편을 준비하였다.

Table 1은  $R_a$ ,  $\mu_4$ ,  $S_k$  변화에 따라 달리 가공된 6 가지 시편의 표면 거칠기 파라미터(parameter)이다.

Table 1. Parameters of surface roughness

Specimen	Parameter	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	$S_k$	$\mu_4$
Disk 1		1.306	-1.3	5.9
Disk 2		0.414	-1.3	5.9
Disk 3		0.13	-6.7	86.7
Disk 4		0.13	-6.7	68.1
Disk 5		0.07	-9.460	137
Disk 6		0.414	-9.952	137

실험조건으로 우선, 6가지 표면거칠기 값을 가지는 시편 디스크에 대해 수직하중 400N, 미끄럼 속도 0.4%, 윤활유 점도 34에 대해서 실험하였다. 수직하중의 영향을 관찰하기 위해 미끄럼 속도 0.4m/s, 윤활유 점도 34에서 하중을 300, 500N으로 변화시켜 수직하중에 대한 영향을 측정하고 평가하였다.

미끄럼 속도의 영향을 관찰하기 위해 수직하중 400N, 윤활유 점도 34에서 6가지 시편 디스크에 대해 미끄럼속도 0.3, 0.5m/s의 조건을 설정하여 미끄럼속도에 따른 마찰특성을 측정하고 평가하였다.

윤활유 점도의 영향을 관찰하기 위해 수직하중 400N, 미끄럼 속도 0.4m/s에서 6가지 시편 디스크에 대해 윤활유 점도 16, 68(at 40°C, cSt)로 변화시켜 윤활유 점도에 따른 마찰특성을 측정 및 평가하였다. 인위적인 시편 디스크의 표면 거칠기와 형상에 대해 수직하중, 미끄럼 속도 및 윤활유 점도 변화를 주었을 때 마찰 특성 변화를 측정하고 평가하였다. 모든 실험은 볼-온-디스크 방식으로 시험을 수행했으며 볼과 디스크 표면에 붙어있는 이물질 제거를 위해 알코올로 세척한 후 사용하였다.

### 3. 실험결과

실험조건을 변화시켜 가며 여러 종류의 시편에 대하여 실험을 수행한 바, 표면조도에 따라 마찰 및 마멸 특성에 차이를 보이고 있다. 수직하중, 미끄럼 속도, 윤활유 점도에 따라 나타난  $R_a$ ,  $\mu_4$ ,  $S_k$  변화에 따른 마찰계수 그래프는 60분 경과 후의 시점에서 측정된 값이다. 그 결과는 다음 같다.

#### 3-1. 중심선 평균 거칠기( $R_a$ )의 영향

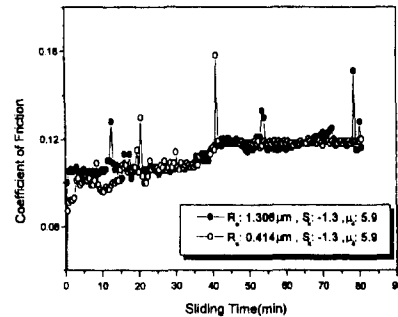


Fig. 2 Variation of friction coefficient as a function of sliding time at normal load, 400N; sliding speed, 0.5%; viscosity, 34 cSt

Fig. 2는 하중 400N, 미끄럼 속도 0.5%, 윤활유 점도 34인 실험조건에서 동일한 skewness와 kurtosis를 갖는 표면에 대하여 중심선 평균 거칠기( $R_a$ )값이 다를 때의 마찰계수를 보여주고 있다. 마찰 실험 초기에는  $R_a$  1.306 $\mu\text{m}$ 가  $R_a$  0.414 $\mu\text{m}$ 보다 약간 높은 마찰계수를 나타냈다.  $R_a$  0.414 $\mu\text{m}$ 는 마찰시험 초기에는 낮은 마찰계수를 나타내고 실험시작 약 41분 후에 마찰계수가 일정하게 마찰계수를 유지한다.

Fig. 3은 하중 변화에 따라 미끄럼 속도 0.4%, 윤활유 점도 34인 실험조건에서 동일

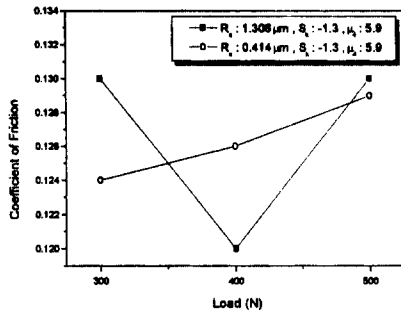


Fig. 3 Arithmetic mean value effect on friction at sliding speed of 0.4% and lubricant viscosity of 34 cSt

한 skewness와 kurtosis를 갖는 표면에 대하여 중심선 평균 거칠기( $R_a$ )값이 다를 때의 마찰계수를 보여주고 있다. 하중 300, 500N에서는  $R_a$  1.306 $\mu\text{m}$ 가  $R_a$  0.414 $\mu\text{m}$ 보다 마찰계수가 높게 나타나며  $R_a$  0.414 $\mu\text{m}$ 는 하중이 증가할수록 마찰계수가 증가한다.

Fig. 4는 미끄럼 속도 변화에 따라 하중 400N, 윤활유 점도 34인 실험조건에서 동일한 skewness와 kurtosis를 갖는 표면에 대하여 중심선 평균 거칠기( $R_a$ )값이 다를 때의 마찰계수를 보여주고 있다. 미끄럼 속도 0.3, 0.4, 0.5%에서  $R_a$  0.414 $\mu\text{m}$ 가  $R_a$  1.306 $\mu\text{m}$ 보다 높은 마찰계수를 나타내며  $R_a$  0.414 $\mu\text{m}$ 와  $R_a$  1.306 $\mu\text{m}$ 는 미끄럼 속도가 증가할수록 마찰계수가 감소한다.

Fig. 5은 윤활유 점도 변화에 따라 하중 400N, 미끄럼 속도 0.4%인 실험조건에서 동일한 skewness와 kurtosis를 갖는 표면에 대하여 중심선 평균 거칠기( $R_a$ )값이 다를 때의 마찰계수를 보여주고 있다. 점도 16과 34에서는  $R_a$  0.414 $\mu\text{m}$ 가  $R_a$  1.306 $\mu\text{m}$ 보다 마찰계수가 높게 나타나며 점도가 커질수록  $R_a$  0.414 $\mu\text{m}$ 는 마찰계수가 감소하고  $R_a$  1.306 $\mu\text{m}$

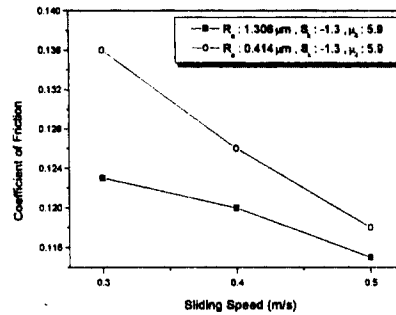


Fig. 4 Arithmetic mean value effect on friction at normal load of 400N and lubricant viscosity of 34 cSt

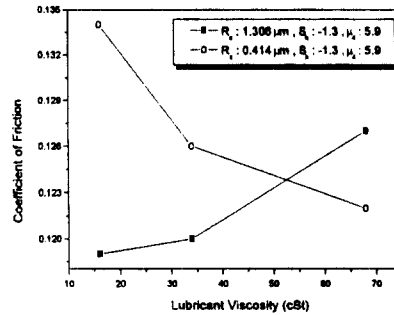


Fig. 5 Arithmetic mean value effect on friction at normal load of 400N and sliding speed of 0.4%

는 마찰계수가 증가한다.

### 3-2. kurtosis( $\mu_4$ )의 영향

Fig. 6은 하중 400N, 미끄럼 속도 0.5%, 윤활유 점도 34인 실험조건에서 동일한 중심선 평균 거칠기와 skewness를 갖는 표면에 대하여 kurtosis( $\mu_4$ )가 다를 때의 마찰계수를 보여주고 있다.  $\mu_4$  86.7에서는 미끄럼이 진행되는 약 41분경 후에는 마찰계수가 일정한 상태를 유지하고 있다.  $\mu_4$  68.1일 때는 실험 시작 약 66분 경에 scuffing이 발생하

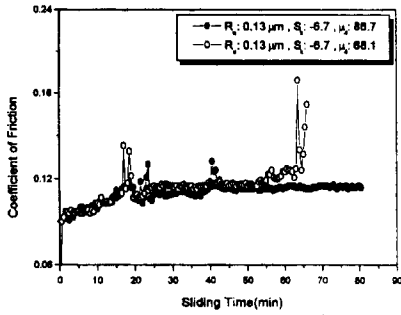


Fig. 6 Variation of friction coefficient as a function of sliding time at normal load, 400N; sliding speed, 0.5%; viscosity, 34 cSt

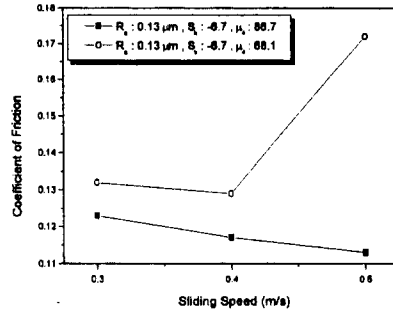


Fig. 8 Kurtosis effect on friction at normal load of 400N and lubricant viscosity of 34 cSt

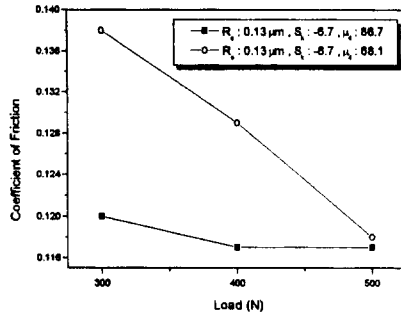


Fig. 7 Kurtosis effect on friction at sliding speed of 0.4% and lubricant viscosity of 34 cSt

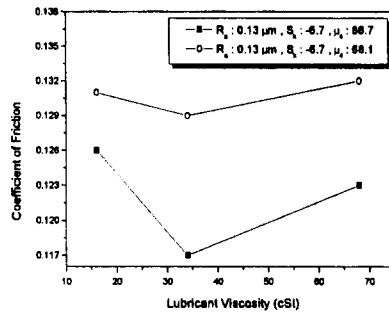


Fig. 9 Kurtosis effect on friction at normal load of 400N and sliding speed of 0.4%

였다.

Fig. 7은 하중 변화에 따라 미끄럼 속도 0.4%, 윤활유 점도 34인 실험조건에서 동일한 중심선 평균 거칠기와 skewness를 갖는 표면에 대하여 kurtosis( $\mu_4$ )가 다를 때의 마찰계수를 보여주고 있다.  $\mu_4$  86.7은 하중이 증가해도 낮은 마찰계수를 유지하지만  $\mu_4$  68.1은 하중이 증가함에 따라 마찰계수가 크게 감소한다.

Fig. 8은 미끄럼 속도의 변화에 따라 하중 400N, 윤활유 점도 34인 실험조건에서 동일

한 중심선 평균 거칠기와 skewness를 갖는 표면에 대하여 kurtosis( $\mu_4$ )가 다를 때의 마찰계수를 보여주고 있다.  $\mu_4$  86.7은 미끄럼 속도가 증가함에 따라 마찰계수는 감소하고  $\mu_4$  68.1은 미끄럼 속도 0.4%에서 마찰계수가 감소하다가 0.5%에서는 마찰계수가 증가한다.

Fig. 9는 윤활유 점도의 변화에 따른 하중 400N, 미끄럼 속도 0.4%인 실험조건에서 동일한 중심선 평균 거칠기와 skewness를 갖

는 표면에 대하여 kurtosis( $\mu_4$ )가 다를 때의 마찰계수를 보여주고 있다.  $\mu_4$  68.1이  $\mu_4$  86.7보다 높은 마찰계수를 유지하고 있으며  $\mu_4$  86.7과  $\mu_4$  68.1은 점도 34에서 마찰계수가 감소하였고 점도 68에서는 마찰계수가 증가한다.

### 3-3. skewness( $S_k$ )의 영향

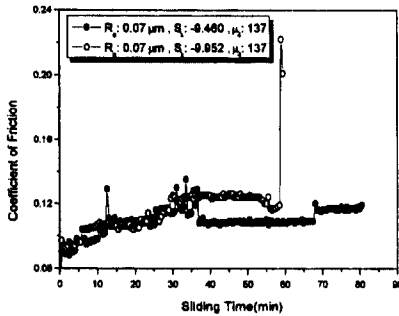


Fig. 10 Variation of friction coefficient as a function of sliding time at normal load:400N, sliding speed:0.5%, viscosity:34 cSt

Fig. 10은 하중 400N, 미끄럼 속도 0.5%, 윤활유 점도 34인 실험조건에서 동일한 중심선 평균 거칠기와 kurtosis를 갖는 표면에 대하여 skewness( $S_k$ )가 다를 때 마찰계수를 보여주고 있다.  $S_k$  -9.952일 때는 마찰계수가 증가하다가 약 59분 경에는 마찰계수가 급격히 증가하여 scuffing이 발생하였다.

Fig. 11은 하중 변화에 따라 미끄럼 속도 0.4%, 윤활유 점도 34인 실험조건에서 동일한 중심선 평균 거칠기와 kurtosis를 갖는 표면에 대하여 skewness( $S_k$ )가 다를 때 마찰계수를 보여주고 있다. 수직하중 300, 400, 500N에서  $S_k$  -9.460이  $S_k$  -9.952보다 낮은 마찰계수를 나타내며  $S_k$  -9.952와  $S_k$  -9.460은 수직하중이 증가할수록 마찰계수가 낮아진다.

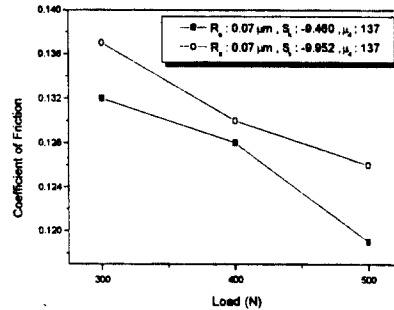


Fig. 11 Skewness effect on friction at sliding speed of 0.4% and lubricant viscosity of 34 cSt

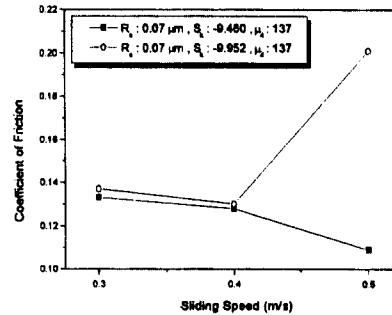
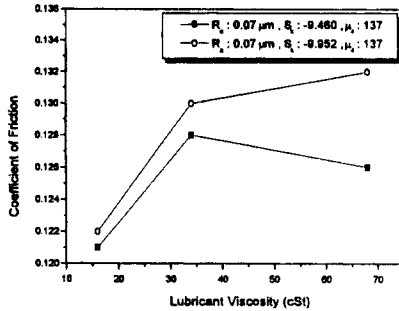


Fig. 12 Skewness effect on friction at normal load of 400N and lubricant viscosity of 34 cSt

Fig. 12는 미끄럼 속도 변화에 따라 수직 하중 400N, 윤활유 점도 34인 실험조건에서 동일한 중심선 평균 거칠기와 kurtosis를 갖는 표면에 대하여 skewness( $S_k$ )가 다를 때 마찰계수를 보여주고 있다.  $S_k$  -9.952일 때는 미끄럼 속도 0.4%에서 마찰계수는 감소하고 0.5%에서는 마찰계수가 급격히 증가하였다.

Fig. 13은 윤활유 점도 변화에 따라 수직 하중 400N, 미끄럼 속도 0.4%인 실험조건에서 동일한 중심선 평균 거칠기와 kurtosis를 갖는 표면에 대하여 skewness( $S_k$ )가 다



**Fig. 13 Skewness effect on friction at normal load of 400N and sliding speed of 0.4%**

를 때 마찰계수를 보여주고 있다.  $S_k$  -9.952는 윤활유 점도가 커질수록 마찰계수가 증가한다.

#### 4. 결론

Ball-on-disk형 마멸 시험기를 사용하여 여러가지 작동조건에서 표면거칠기 - 중심선 평균 거칠기, skewness, kurtosis가 마찰에 미치는 영향을 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 동일한 중심선 평균 거칠기와 skewness를 갖는 면에서 kurtosis값이 낮을 때 마찰계수는 높게 나타났다.
- (2) 동일한 중심선 평균 거칠기와 kurtosis를 가지는 디스크 표면구조에서 절대치가 큰 음(-)의 skewness가 높은 마찰계수를 보였다.
- (3) skewness와 kurtosis가 동일할 때 중심선 평균 거칠기가 거친 표면에서 낮은 마찰계수를 유지하였다.
- (4) 면이 매끈할수록 반드시 낮은 마찰계수

를 나타내는 것은 아니고 기계부품의 작동조건에 따라 최적의 표면거칠기가 있음을 확인하였다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초 연구 지원비(과제번호:96-0200-09-01-3)로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. H. E. Staph, P. M. Ku and H. J. Carper, "Effect of Surface Roughness and Surface Texture on Scuffing", Mechanism and Machine Theory, Vol. 8, pp. 197~208, 1973.
2. L. S. Martz, "Preliminary Report of Developments in Interrupted Surface Finishes", Proc. Inst. Mech. Engrs. Vol. 161, pp. 1~9, 1949.
3. S. C. Kang and K. C. Ludema, "The breaking-in of Lubricated Surface", Wear, Vol. 100, pp. 315~331
4. R. B. Bossler, Jr. "Improved Boundary Layer Lubrication Behavior," Lubr. Engrg., Vol. 21, No. 3, pp. 104~111, March 1965.
5. N. P. Suh and N. Saka, "Surface Engineering", Annals of the CIRP, Vol. 36/1, pp. 403~408, 1987.
6. H. Tian, N. Saka and N. P. Suh, "Boundary Lubrication Studies on Undulated Titanium Surfaces" Tribology Transactions, Vol. 32, pp. 289~296. 1989.
7. David J. Whitehouse, "Handbook of Surface Metrology" Rank Taylor Hobson Ltd, 1994.
8. A. Dyson, "Scuffing - a review",

Tribology International, pp. 77~87,  
April 1975.

9. J. Peklenik, "New Developments in Surface Characterization and Measurements by Means of Random Process Analysis", Proc. Instr. Mech. Engrs. Vol. 182 Pt 3k, pp. 108~126, 1968.
10. C. A. Kotwal and B. Bhushan, "Contact Analysis of Non-Gaussian for Minimum Static and Kinetic Friction and Wear", Tribology Transactions, Vol. 39 (1996), 4, pp. 890~898