

두 종의 고체윤활제에 따른 마찰재의 마찰성능에 관한 실험적 고찰

김성진 · 배은갑 · 윤호규 · 장 호

고려대학교 재료금속공학부

Experimental Investigation on Friction Performance of Brake Linings with Two Different Solid Lubricants

Seong Jin Kim, Eun Gap Bae, Ho Gyu Yoon and Ho Jang

Division of Materials Science and Engineering, Korea University

Abstract- An experimental investigation was conducted to examine the tribological behavior of NAO (non-asbestos organic) type brake linings containing different volume ratios of graphite and antimony trisulfide (Sb_2S_3). In order to investigate the effect of the solid lubricants on brake performance, three different friction tests (pressure, speed, and temperature sensitive tests) were carried out using a scale dynamometer. The test results showed that the friction characteristics were strongly affected by the type and the amount of solid lubricants in the brake lining. It was found that the brake linings with both solid lubricants were better in friction stability due to the complementary role of the two disparate lubricating properties at various pressure and speed conditions. In particular, the brake lining containing higher concentrations of graphite showed better fade resistance than others during high temperature friction test.

Key words- brake lining, graphite, antimony trisulfide (Sb_2S_3), friction stability, stick-slip, fade resistance

1. 서 론

흑연(graphite)과 삼황화안티몬(Sb_2S_3)은 자동차용 마찰재(brake lining)에 사용되는 대표적인 고체윤활제로서 마찰계수의 안정성, 내마모성, 떨림현상, 제동거리, 소음특성 등의 제동특성과 밀접한 연관성을 지니고 있다 [1,2]. 특히, 고체윤활제는 제동시 전이막 (transfer film)을 형성시키는 주요 원료로서 종류와 함량에 따라 제동 승차감에 크게 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

자동차용 마찰재에 첨가되는 고체윤활제

는 층상구조(lamellar layer structure)를 지니고 있는 흑연과 MoS_2 가 주로 사용되고 있으며, 이들과 함께 황화물 계열의 Sb_2S_3 , ZnS , Cu_2S 등이 첨가되고 있다. 이와 같이 여러 종의 고체윤활제를 혼합하여 마찰재를 제조하는 이유는 단일의 고체윤활제만을 사용하였을 경우 온도, 압력, 속도, 습도 등의 다양한 제동 조건에서 우수한 마찰특성을 만족시키지 못하기 때문이다.

고체윤활제간 상호효과(synergistic effect)에 관한 연구는 고체윤활제를 결합시킨 코팅층 (lubricating film)의 마찰 및 마모특성을 위주로

발표되어 왔다[3,4]. 고체윤활제간 보완효과는 마찰시 화학반응에 의해 생성되는 산화물의 상호역할(interaction)에 기인하는 것으로 알려져 있으며, 이들의 마찰 및 마모특성은 마찰계면의 표면형상(surface topography)을 통해 분석되어 왔다. 그러나 지금까지 마찰재에 사용되는 다양한 고체윤활제의 선택은 주로 경험적인 결과에 의해 결정되었으며, 마찰재의 윤활특성에 관한 문헌자료도 거의 찾아보기 힘든 실정이다.

본 연구에서는 scale dynamometer 를 이용하여 다양한 제동조건에 대한 마찰시험을 통해 흑연과 삼황화안티몬의 상대적 함량에 따른 마찰특성을 분석하였다.

2. 실험방법

본 실험에서 사용한 마찰재는 비석면 유기질재료로서 결합제, 강화섬유, 고체윤활제, 연마제, 충전재 및 마찰조절제 등을 혼합하여 제조하였다. 고체윤활제에 따른 마찰특성을 고찰하기 위해 흑연과 삼황화안티몬의 상대적인 함량을 변화시켜 4 종류의 마찰재를 제작하였으며, 마찰재에 첨가한 고체윤활제의 전체함량은 9 vol.%로 고정하였다(Table 1). 마찰재의 제조공정은 건식혼합, 예비성형, 본성형, 열처리의 순서로 제작되었으며 마찰재의 표면경도는 Rockwell 경도기의 HR_S 규격으로 85.4±3.8 을 나타내었다. 마찰재와 상대재의 겉보기 접촉면적(apparent contact area)은 9cm² 이며, 회주철로 제조된 상대재(disk)는 마찰시험기에 장착할 수 있도록 90mm 의 직경과 9mm 의 두께로 제작되었다.

본 연구에서는 실차의 조건을 기준으로 1/√10 으로 축소된 scale dynamometer 를 이용

하여 마찰재의 제동성능을 측정하였으며, 마찰시험중 휠하중(wheel load)과 관성력(inertia)은 각각 476.1kg, 0.44kgm² 으로 설정하였다. 마찰특성은 다양한 압력, 속도, 온도의 조건으로 정지시험과 끌기시험 그리고 fade 시험 방법을 통하여 분석되었으며, 시험중간에 re-burnish 를 시행함으로써 전단계 시험에 의한 영향을 최소화하였다(Table 2). 마찰시험중 마찰계면의 온도는 상대재의 중심부에 1mm 의 깊이로 K-type 열전대를 장착하여 실시간으로 측정하였으며, 마찰시험후 마찰재의 표면형상은 주사전자현미경(HITACHI S-4300)을 이용하여 관찰하였다.

Table 1. The composition of the brake linings investigated in this study [vol.%]

Ingredients	9G	6G3S	3G6S	9S
Graphite	9	6	3	0
Sb ₂ S ₃	0	3	6	9
Binder	20	20	20	20
Fibers	32	32	32	32
Abrasives	4	4	4	4
Friction modifiers	20	20	20	20
Fillers	15	15	15	15

Table 2. A scale dynamometer test procedure used in this work

Burnish	Number of applications: 100 stops, V: 22.2m/s(80km/h), 0.34G, IBT: 100°C (initial brake temperature)
Stop test	P: 1, 2, 3, 5, 7MPa, V: 22.2m/s, IBT: 80°C
Drag test	Duration: 10sec, P: 3MPa, V: 1.4, 2.8, 5.6, 11.1, 16.7, 22.2, 27.8m/s, IBT: 80°C
Fade test	Number of applications: 15 stops, V: 27.8m/s, 0.4G, 1st IBT: 80°C, Interval: 60sec

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 압력에 따른 마찰계수의 변화

정지시험시 고체윤활제의 상대적인 함량에 따른 마찰특성을 고찰하기 위해 다양한 압력조건에서 마찰시험을 행하였다. Fig. 1 은 제동시 압력에 따른 평균 마찰계수의 분포를 나타낸 것이다. 고체윤활제의 종류와 함량에 따라 상이한 마찰계수의 수준을 나타내었으며, 압력의 변화에 따라 마찰계수가 크게 변하는 경우와 일정한 경우로 구분되었다. 삼황화안티몬을 첨가한 시편이 흑연을 첨가한 시편보다 높은 마찰계수의 수준을 나타내었으며 두 종을 첨가하였을 경우 상대적으로 낮은 마찰계수를 보여주었다. 특히, 단일 고체윤활제를 첨가한 시편 9G 와 9S 는 압력의 증가에 따라 급격한 마찰계수의 감소현상을 나타낸 반면에 두 종의 고체윤활제를 첨가한 시편들은 비교적 안정된 마찰계수의 분포를 보여주었다. 또한, 흑연의 함량이 상대적으로 많은 시편(6G3S)이 가장 우수한 마찰계수의 안정성을 나타내었다.

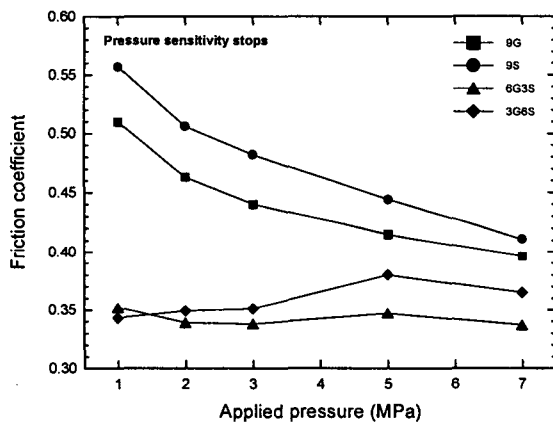


Fig. 1. Change of average friction coefficient as a function of applied pressure.

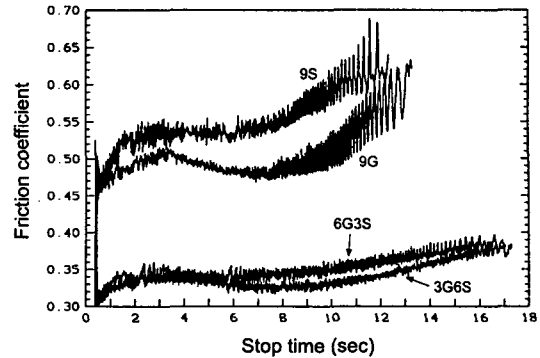


Fig. 2. Change of friction coefficient during stop test at 1MPa of applied pressure. The brake linings 9G and 9S show anti-fading phenomena at the end stage of stop.

두 종의 고체윤활제를 첨가한 시편에서 나타난 마찰계수의 안정성은 서로 다른 온도대역에서의 윤활특성에 기인한 것으로 평가된다. 일반적으로 마찰재에 첨가하는 고체윤활제는 제동시 마찰계면에 균일한 마찰막(friction film)을 형성함으로써 마찰계수의 수준을 일정하게 유지시키는 역할을 한다. 본 실험결과에서 시편 9G 는 모든 압력조건에서 삼황화안티몬을 첨가한 시편(9S)보다 낮은 마찰계수를 나타내었으며 저압에서는 두 시편 모두 상대적으로 높은 마찰계수를 나타내었다. 이러한 결과는 Fig. 2 에서 볼 수 있듯이 시편 9G 와 9S 의 경우 제동말기에 급격한 마찰계수의 증가와 함께 진폭(friction oscillation)의 변화가 증가하여 나타난 결과로 사료된다. 제동말기에 속도가 감소하면서 마찰계수가 증가하는 현상은 stick-slip 에 기인한 결과로서 anti-fading(or rooster tailing)이라 불리운다[5]. 이러한 현상은 낮은 면압에 의해 마찰막이 안정되게 형성되지 않은 경우에 주로 발생되며 가압력이 증가하면서 마찰계수의 감소현

상을 초래한다. 이는 저압에서의 불안정한 마찰막이 가압력이 증가함에 따라 조밀한 마찰막으로 변화하여 나타난 현상으로 추정된다. 이러한 압력에 따른 마찰계수의 변화는 두 종류의 고체윤활제를 사용한 마찰재들의 경우에는 나타나지 않았으며, 이는 저압에서도 균일하게 형성된 마찰막에 의한 영향으로 사료된다.

3-2. 속도에 따른 마찰계수의 변화

고체윤활제에 따른 마찰계수의 변화를 고찰하기 위해 속도를 변화시키면서 10 초 동안 끌기시험을 행하였다. Fig. 3은 속도에 따른 평균 마찰계수의 분포를 나타낸 것이다. 모든 시편에서 마찰계수는 속도의 증가에 따라 감소하였으며 높은 속도에서는 마찰계수의 변화가 상대적으로 작게 나타났다. 특히, 낮은 속도 구간에서 단일 고체윤활제를 첨가한 시편이 두 종의 윤활제를 첨가한 시편보다 높은 음의 μ -v 기울기를 나타내었다. 일반적으로 마찰계수와 속도의 관계가 음의 기울기를 나타낼수록 stick-slip 현상이 가중되는 것으로 알려져 있다[6].

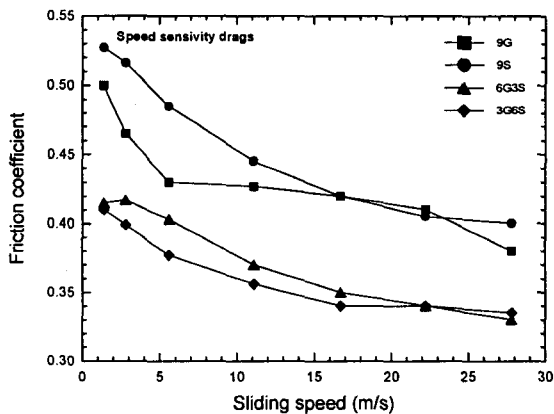


Fig. 3. Change of average friction coefficient as a function of sliding speed.

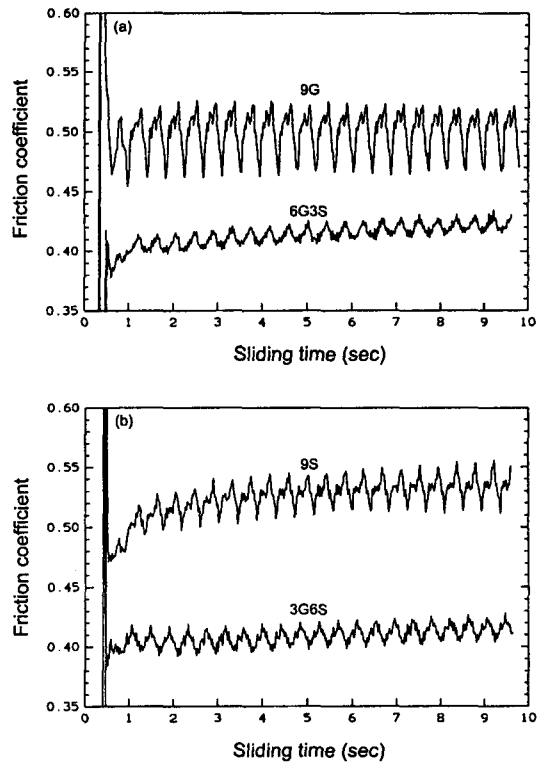


Fig. 4. Change of friction coefficient during drag test at 1.4m/s of sliding speed for the brake linings: (a) 9G and 6G3S; (b) 9S and 3G6S.

Stick-slip 현상이 커질 경우에는 제동시 높은 토크의 진폭을 나타냄으로써 차체의 떨림 현상(judder)이나 creep groan 을 유발하여 제동 승차감에 좋지 않은 영향을 미치게 된다. 이러한 결과는 Fig. 4 에서 볼 수 있듯이 저속에서 높은 음의 μ -v 기울기를 나타낸 시편 9G와 9S가 상대적으로 높은 마찰계수의 진폭을 나타내고 있음을 확인할 수 있었으며, 이는 저속에서 발생하는 stick-slip 현상에 기인된 결과라고 평가된다.

본 연구에서는 재료적인 측면을 고찰한 결과 고체윤활제의 종류와 함량이 μ -v 관계에 영향을 미침을 알 수 있었다. 즉, 단일 고체

윤활제를 첨가한 시편은 저속에서 stick-slip 현상이 증가함으로써 높은 음의 μ -v 기울기를 나타내었으며 진폭의 변화도 심하게 나타났다. 그러나 두 종의 고체윤활제를 첨가한 경우에는 상호 윤활역할로 인해 저속에서도 작은 진폭의 변화를 보여주었으며 비교적 낮은 음의 μ -v 기울기를 나타냄을 확인할 수 있었다.

3-3. 온도에 따른 마찰계수의 변화

마찰온도가 상승함에 따라 열이력(thermal history)에 따른 마찰계수의 감소현상(fading)을 고찰하기 위해 60 초의 일정 시간간격(interval)으로 15 회의 연속적인 fade 시험을 행하였다. Fade 시험은 마찰재의 열적 효력을 평가할 수 있는 방법으로서 마찰시 형성되는 마찰막의 내구성에 의해 마찰특성이 크게 좌우된다. Fig. 5 는 fade 시험시 온도상승에 따른 마찰계수의 분포를 나타낸 것이다. 300°C 의 마찰온도까지는 온도상승에 따라 마찰계수가 상승하였으며 300°C 이상에서는 고체윤활제에 따라 서로 다른 고온 마찰특성을 보여 주었다. 300°C 이하의 온도에서 나타난 마찰계수의 증가현상은 마찰온도가 상승함에 따라 마찰막이 조밀해짐으로써 상대재와의 응집력(cohesion)이 증가하여 나타난 결과라고 추정된다. 고온에서의 마찰계수의 거동을 살펴보면 단일 고체윤활제를 사용한 경우 시편 9G 는 350°C 의 온도까지 마찰계수의 안정성을 유지하지만 그 이상의 온도에서는 급격히 마찰계수가 감소하는 경향을 보여주었다. 그러나 시편 9S 는 300°C 부터 마찰계수의 감소와 함께 불규칙한 증감현상을 나타내었다. 또한 상대적으로 삼황화안티몬의 함량이 많이 함유된 시편 3G6S

의 경우 불규칙한 거동은 감소하였으나 전반적으로 마찰계수가 감소하는 경향을 보여주었다. 그러나 시편 6G3S 는 윤활제의 효과적인 상호작용으로 인해 고온에서도 우수한 마찰계수의 안정성을 나타내었다.

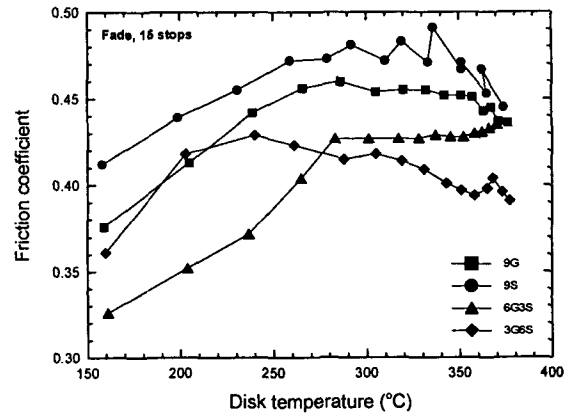


Fig. 5. Change of friction coefficient as a function of disk temperature.

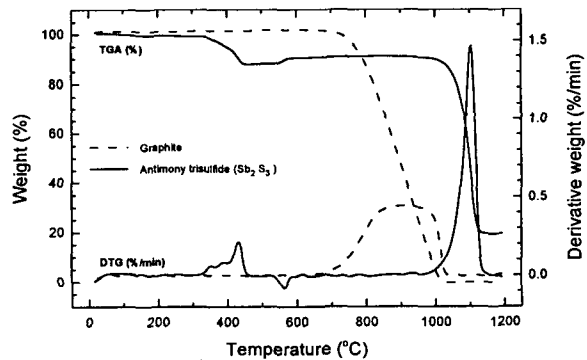


Fig. 6. Weight loss and derivative weight loss curves from thermogravimetric analysis at 10°C of heating rate up to 1200°C.

고온에서 서로 다른 마찰특성을 나타내는 것은 온도분포에 따라 고체윤활제의 열분해 특성의 차이에 기인된 결과라고 평가된다. 따라서 열무게측정방법(TGA; thermogravimetric analysis)을 이용하여 고체윤활제의 열적특성

을 고찰하였다(Fig. 6). 열분석시 온도상승과 마찰시 발생하는 온도상승을 직접적으로 비교할 수 없지만 고체윤활제의 고온특성을 상대적으로 평가할 수 있었다. 그림에서 볼 수 있듯이 흑연과 삼황화안티몬은 서로 다른 온도대역에서 열적반응이 진행됨을 알 수 있다. 특히, 흑연은 약 700°C 까지 고온안정성을 유지한 후에 CO 또는 CO₂ 로 변성되는 특징을 나타내지만 삼황화안티몬의 경우 700°C 이하의 온도에서 산화물(Sb₂O₃, Sb₂O₄, or Sb₂O₅)을 형성한 후에 열분해되는 특징을 지니고 있다. 따라서 삼황화안티몬이 단일로 사용될 경우 흑연보다 낮은 온도구간에서 열적반응을 일으킴으로써 상대적으로 고온 마찰특성이 저해된 것으로 사료된다. 특히, 두 종의 고체윤활제를 사용하더라도 상대적인 함량에 따른 윤활제의 상호작용이 고온 마찰특성에 크게 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 마찰시험후 두 시편의 표면형상을 통해서도 관찰할 수 있었다. Fig. 7(a)와 (b)는 각각 시편 6G3S와 3G6S의 마찰표면이며 (c)는 (b)의 사각부분을 고배율로 관찰한 SEM 조직사진이다. 그림에서 볼 수 있듯이 시편 6G3S는 비교적 마찰막이 분리되지 않고 균일한 형태를 유지하고 있었으나 시편 3G6S의 마찰막은 서로 격리되어 불규칙한 분포를 나타내었다. Fig. 7(c)에서 볼 수 있듯이 마찰시험후 마찰재의 표면은 마찰막(primary friction film)과 마찰막이 열분해된 하부표면층(sub-surface)으로 구성되어 있으므로 실질적으로 접촉하는 마찰막의 분포와 형상에 따라 마찰특성이 결정된다. 따라서 시편 3G6S의 경우 마찰특성에 직접적으로 기여하는 마찰막이 쉽게 분리됨으로써 마찰력을 크게 상실한 것으로 평가되며 이

에 반해 시편 6G3S는 상대적으로 안정한 마찰막을 유지함으로써 fade에 대한 저항성(fade resistance)이 향상된 것으로 사료된다.

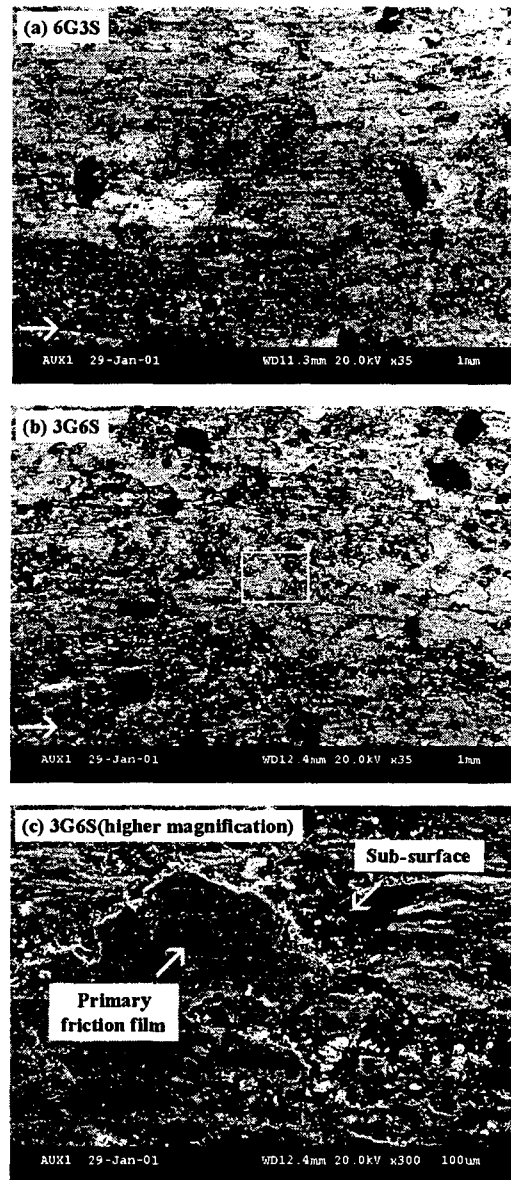


Fig. 7. Worn surface showing a morphology of the friction film on the brake linings (a) 6G3S, (b) 3G6S, and (c) 3G6S(higher magnification of specified area) after friction test.

4. 결 론

자동차용 마찰재의 고체윤활제로 사용되는 흑연과 삼황화안티몬의 상대적인 함량에 따른 제동특성을 scale dynamometer 를 이용하여 고찰하였다. 마찰시험결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 마찰재의 제동특성은 고체윤활제의 종류와 함량에 따라 크게 영향을 받았으며 두 종의 고체윤활제를 첨가한 경우 윤활제간 보완작용에 기인하여 압력과 속도에 따라 우수한 마찰계수의 안정성을 보여주었다.
2. 고온 마찰시험 결과 두 종의 고체윤활제를 첨가한 시편중 흑연의 함량이 상대적으로 많은 경우 효과적인 윤활제의 상호작용으로 fade 에 대한 저항성이 향상되었다.
3. 온도상승에 따른 마찰막의 분포와 형상은 마찰특성과 밀접한 연관성을 나타내었으며 안정한 마찰막을 형성할수록 우수한 마찰계수의 안정성을 나타내었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(과제번호: 98-0200-02-01-3) 지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. Jang, H., Lee, J. J., Kim, S. J., Jung, K. Y., SAE Transactions 982235, pp.1-8, 1998.
2. Jang, H., Kim, S. J., Wear, Vol.239, No.2, pp.229-236, 2000.
3. Bartz, W. J., Holinski, R., Xu, J., ASLE Lubrication Engineering, Vol.42, No.12, pp.762-769, 1985.
4. Lavik, M. T., Hubbell, R. D., McConnell, B. D., ASLE Lubrication Engineering, Vol.31, No.1, pp.20-27, 1973.
5. Kim, S. J., Jang, H., KSTLE International Journal, Vol.1, No.1, pp.1-7, 2000.
6. Rabinowicz, E., Friction and Wear of Materials, Chap.4, pp.105-112, John Wiley & Sons, New York, 1995.