

자동차용 마찰재의 성능에 미치는 강화섬유의 역할

임 현 우 · 윤 호 규 · 장 호
고려대학교 재료금속공학부

The Roles of Reinforcing Fibers on the Performance of Automotive Brake Pads

Hyun Woo Lim · Ho Kyu Yoon · Ho Jang

Division of Materials Science and Engineering, Korea University

Abstract—The friction and wear characteristics of brake friction materials reinforced with aramid fiber, carbon fiber, glass fiber, and potassium titanate whiskers were investigated using a pad-on-disk type friction tester. In particular, the morphology of rubbing surfaces was carefully investigated to correlate the friction performance and properties of transfer films. The aramid fiber reinforced specimen showed severe oscillation of friction coefficient at low speed and low applied pressure. The carbon fiber reinforced specimen showing better friction stability exhibited uniform and stable transfer film than any other specimens. The glass fiber reinforced specimen showed unstable friction changes at high speed and high-applied pressure and the non-uniform transfer film was observed in both friction material and rotor surface. The potassium titanate whiskers reinforced specimen showed stable coherent transfer film. The wear test exhibited the potassium titanate whiskers reinforced specimen was lowest in wear amount and glass fiber reinforced specimen showed the severe wear.

Key words—Friction and Wear, Transfer film, Reinforcing fiber

1. 서 론

자동차 브레이크용 마찰재는 높은 강도와 낮은 마모량, 우수한 제동성능, 그리고 적은 소음과 떨림현상(judder)이 없어야 하는 등의 다양한 특성이 요구된다. 이러한 요건을 충족시키기 위해 마찰재에는 결합제, 강화섬유, 고체윤활제, 연마제, 마찰조절제, 충전제로 분류되는 10~20 종의 원료를 사용하여 제조된다. 이들 원료 중에서 강화섬유(reinforcing fiber)는 마찰재의 강도와 열적 안정성의 증가를 위하여 첨가되며 10 여년 전까지는 우수한 열적 안정성과 저렴한 가격의 장점을 가진 석면(asbestos)이 많이 사용되었다. 그러나 최근에는 석면이 인체 및 환경에 유해한

물질로 밝혀지며 대체재로 아라미드 섬유(aramid fiber), 탄소섬유(carbon fiber), 유리섬유(glass fiber), 세라믹 섬유(ceramic fiber), 금속섬유(metallic fiber) 등이 사용되고 있다. 아라미드 섬유는 최근에 석면의 대체재로 각광을 받고 있는 재료로서 우수한 기계적 강도와 열적 안정성을 가지고 있는 것으로 알려져 있다[1-4]. 탄소섬유는 고온에서 뛰어난 강도와 열전도도, 내마모성의 특징을 보이며 주로 고성능 자동차 및 비행기용 마찰재에 주로 사용되고 있다[5]. 유리섬유는 치수안정성(dimensional stability)은 뛰어나지만 200℃ 이상에서는 강도와 유동성이 현저히 떨어지는 단점이 있다. 세라믹 섬유인 티탄산칼륨 단섬유(potassium titanate whiskers)는 $K_2O \cdot (TiO_2)_n$ 의 일반식을 지닌 단결정 섬유

로서 n 에 따라 층상구조(layer structure)와 터널 구조(tunneling structure)를 나타내며 단열성, 내산성, 내알칼리성이 우수한 인조광물로 알려져 있다[6].

일반적으로 자동차용 마찰재의 마찰특성은 로터 표면에 형성되는 윤활막(transfer film)의 특성에 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다[7,11,12]. 강화섬유가 윤활막의 형성 및 마찰특성에 미치는 영향은 여러 차례 발표된 바 있으나[2,5,7] 이들에 의한 윤활막의 형성기구에 관한 명확한 분석은 보고된 바가 없다. 자동차용 마찰재의 마찰특성은 강도증가와 마찰계면에서의 균일한 윤활막의 형성은 마모량을 낮추며 마찰계수 안정성(friction stability)을 향상시키는 것으로 알려져 있다[11,12]. 일반적으로 자동차 로터의 마찰계면에 생기는 윤활막은 제동시 온도 상승과 함께 마찰재 내의 각종 성분의 일부가 분리되어 로터의 표면에 강하게 고착될수록, 생성된 초기의 윤활막과 마찰재에서 분리된 성분과의 화학적 결합의 강도가 클수록 균일하고 안정되게 성장하는 것으로 알려져 있다[7]. 또한 윤활막은 지속적인 하중으로 인한 압축응력(compressive stress)의 누적이 발생하거나 막을 구성하는 성분의 화학적 결합력 약화(loss of cohesion), 온도 상승에 따른 분해(decomposition) 등에 의해 막의 붕괴(film failure)를 초래한다[8]. 특히 강화섬유는 직경, 길이 그리고 aspect ratio 등에 따라 윤활막 형성에 기여하는 방식이 다르게 나타날 수 있으나 이에 대한 연구 및 고찰이 거의 진행되고 있지 않은 실정이다[8]. 따라서 본 연구에서는 자동차용 마찰재에 사용되는 강화섬유의 종류와 그에 따른 윤활막이 마찰특성에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 실험방법

본 연구에서 사용된 마찰재 시편은 페

놀수지, 연마제, 고체윤활제, 및 충전제의 함량을 고정하고 4 가지 강화섬유의 상대량을 변화 시키며 제작하였다. 결합제로 사용된 페놀수지는 상용페놀수지(Bakelite™, Bakelite Inc.)를 이용하였으며, 연마제로는 ZrSiO₄, 고체윤활제로 Sb₂S₃ 와 MoS₂, 충전제로는 황산바륨(BaSO₄)을 사용하였다. 강화섬유로는 아라미드 섬유(Kevlar® Type #979, DuPont Inc.), 탄소섬유(1/4" Avox cut staple, Textron Inc.), 유리섬유(3mm, 고려화학), 티탄산칼륨 단섬유(K₂O·6TiO₂ Tismo-D Type, Otsuka Chemical Co.)를 사용하였고 총 강화섬유의 함량이 40vol.%가 되도록 하였다. 본 연구에 사용된 마찰재 시편의 조성과 경도를 Table 1에 나타내었다. 마찰재는 원료의 계량 및 혼합, 예비성형, 본성형, 열처리, 연마의 순서로 제작되었으며 자세한 공정은 이미 발표된 바 있다[10].

끝기 및 마모시험은 pad-on-disk 형태의 정속마찰시험기로 시험하였다. 마찰시험기에 사용된 시편의 크기는 가로 1cm, 세로 1cm, 높이 0.7cm 이며 마찰재의 상대재는 상용화되어 있는 회주철의 로터를 주물 가공하여 마찰시험기에 장착할 수 있도록 지름 6cm, 두께 2.5cm 로 제작하여 사용하였다. 원료혼합의 균일도, 섬유류의 해면여부, 그리고 마찰시험이 끝난 후의 마찰표면은 광학현미경을 사용하여 관찰하였다. 원료의 혼합상태 및 열처리의 균일성을 확인하기 위하여 Rockwell 경도기(Akashi Rockwell ARK-600, S scale)를 사용하여 각 시편의 상하, 좌, 우 및 중앙의 다섯 지점을 측정하였다. 온도는 비접촉식 적외선 온도계(infrared heat tracer, 3M IR-16)로 로터의 온도를 측정하였다. 마찰시험의 순서는 Table 2에 나타내었으며 윤활막의 거동을 관찰하기 위하여 끝기 시험의 각 단계가 끝난 후와 마모시험 후에 광학현미경을 이용하여 마찰표면을 관찰하였다.

Table 1. Composition and hardness of the friction materials used in this work [vol.%]

| Specimen ID. | AF | CF | GF | PF |
|---|------|---------|------|------|
| Raw materials | | | | |
| Phenolic resin | | 20 | | |
| ZrSiO ₄ | | 3 | | |
| Sb ₂ S ₃ + MoS ₂ | | 10(5+5) | | |
| Barite | | 27 | | |
| Aramid fiber | 40 | 20 | 20 | 20 |
| Carbon fiber | | 20 | | |
| Glass fiber | | | 20 | |
| Potassium titanate | | | | 20 |
| Hardness(HR-S) | 85.9 | 103 | 96.9 | 85.4 |

Table 2. Experimental procedure used in this work

| |
|--|
| 1. Drag test |
| Leveling (1.5kgf/cm ² , 3rpm, 2~3sec) |
| Burnishing (6kgf/cm ² , 600rpm, 300sec) |
| 1 st Drag (6kgf/cm ² , 500rpm, 300sec) |
| 2 nd Drag (6kgf/cm ² , 300rpm, 300sec) |
| 3 rd Drag (3kgf/cm ² , 300rpm, 300sec) |
| 2. Wear test |
| Dragging (6kgf/cm ² , 600rpm, 1000sec) |

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 마찰계수의 거동

강화섬유의 종류에 따른 마찰계수의 거동을 고찰하기 위해 시간에 따른 마찰계수와 온도분포를 Fig. 1에 나타내었다. 아라미드 섬유만 사용한 시편 AF(Fig. 1(a))의 경우는 끌기 시간의 증가에 따라 마찰

계수가 지속적으로 감소하였다. 가압력과 속도가 낮은 세번째 끌기에서는 마찰계수 진폭의 상대적 크기가 네 시편 중에서 가장 크게 나타났다. 이는 저속저압에서 stick-slip 현상이 크게 나타난 결과로 사료된다. 온도상승에 따른 마찰계수의 거동(Fig. 2)에서 저속저압의 첫번째 끌기와 고속고압 세번째 끌기에서 초기에 마찰계수가 증가하였으나 온도상승에 따라 감소하였다.

탄소섬유로 강화 시킨 시편 CF(Fig. 1(b))은 다른 시편들에 비해 비교적 낮은 마찰계수를 나타내었으며 온도에 따른 마찰계수의 변화가 적었다. 본 실험에 사용된 탄소섬유는 PAN(polyacrylonitrile)에서 만들어진 것으로서 많은 층상의 흑연고리(graphitic lamellar ribbons)가 섬유의 길이 방(fiber axis)으로 배열된 구조를 가지고 있다. 이러한 탄소섬유의 구조는 시험 시 가해지는 하중에 의해 마찰재와 로터사이에서 기존의 고체윤활제(Sb₂S₃와 MoS₂)와 함께 쉽게 윤활작용을 한 것으로 사료된다. 온도상승에 따라 저속저압의 조건에서는 마찰계수가 감소하였으나 고속고압의 조건에서는 일정한 수준의 마찰계수를 유지하였다. 이는 탄소섬유가 온도 상승에 따라 저속저압의 경우보다 마찰계면에 많이 포함되어 안정한 윤활막을 형성하였기 때문이라 사료된다(Fig. 2).

유리섬유로 강화 시킨 시편 GF는 고속고압의 첫번째 끌기에서는 두, 세번째 끌기의 시간에 따른 마찰계수가 비교적 안정한 거동을 보인 것과는 달리 마찰계수의 심한 변화가 나타났다(Fig. 1(c)). 이는 유리섬유의 높은 무게대비강도(strength-to-weight ratio), 상대적으로 낮은 탄성율, 유리전이 온도(glass transition temperature)이상의 온도에서는 강도가 급격히 감소하는 고유성질에 기인한다고 할 것이다. 온도상승에 따른 마찰계수의 거동에서 나타낸 바와 같이 저속저압의 시험조건에서는 마찰계수가 증

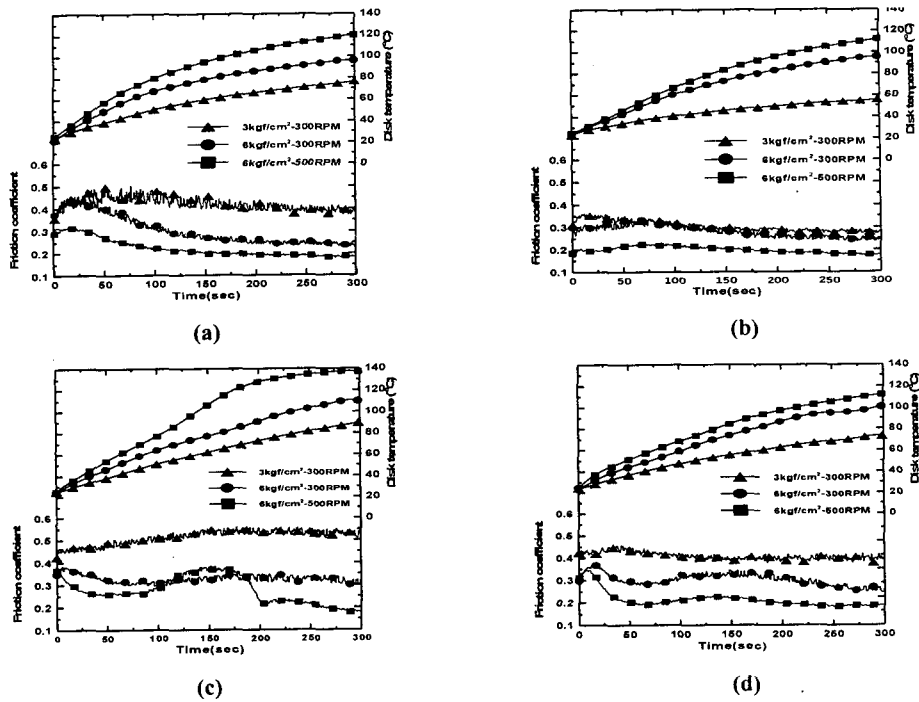


Fig. 1. Coefficient of friction and disk temperature as a function of dragging time for each friction material (a)AF, (b)CF, (c)GF, (d)PF.

가하였고 고속고압의 조건에서는 마찰계수의 변화가 심하였다(Fig. 2).

티탄산칼륨섬유로 강화 시킨 시편 PF는 AF에 비하여 모든 시험조건에서 일

정시간 이후 안정한 마찰계수의 거동을 나타내었다[Fig. 1(d)]. 이는 2~3mm의 단섬유로 펄프형태를 지니는 아라미드 섬유와 미세한 침상형태이며(평균길이 0.3~0.6mm) 고

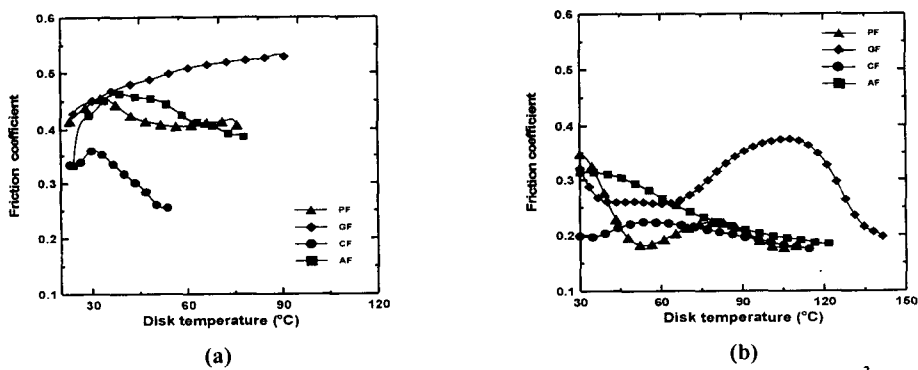


Fig. 2. Coefficient of friction as a function of disk temperature : (a) 3kgf/cm²-300RPM, (b) 6kgf/cm²-500RPM.

온안정성이 우수한 티탄산칼륨 함유가 서로 상호보완의 역할을 함으로써 더욱 마찰계수의 안정성에 기여했다고 사료된다. Fig. 2 에 나타낸 바와 같이 저속, 저압 및 고속고압의 조건에서 AF 의 경우와 달리 지속적인 마찰계수의 감소는 나타나지 않았다.

3-2. 마찰표면에 대한 고찰

본 연구에서는 윤활막의 형상 및 형상에 대한 고찰을 하기 위해 끌기시험의 각 단계 후와 마모시험 후의 로터와 마찰재 시편 표면을 관찰하였다. 먼저 시편 AF 는 시험이 진행될수록 마찰재에서 강도가 강한 아라미드 섬유가 윤활막에 많이 포함됨으로써 안정된 윤활막이 성장함을 알 수 있었다. 그러나 마모시험 후(Fig. 3(a))에는 누적된 열응력과 윤활막의 결합력의 약화로 인해 그 일부가 분리되는 것을 관찰할 수 있었다. 마찰재 표면(Fig. 3(e))은 시험전과 비교하여 wear track 이 형성되었다.

시편 CF 는 시험의 초기인 첫번째 끌기 후 균일한 윤활막이 형성되어 마모시험이 끝날 때까지 유지됨을 알 수 있었다(Fig. 3(b)). 이는 판상 구조의 탄소섬유가 마찰계면에서 쉽게 윤활작용을 하였기 때문이고, 더불어 고온안정성이 좋아 윤활막의 안정성에 기여했다고 사료된다. 마찰재의 표면형상(Fig. 3(f))은 AF 와 유사하였다.

시편 GF 는 첫번째 끌기부터 로터의 전 영역에 걸쳐 불균일한 윤활막이 형성되어 윤활막이 특정부분에 치우쳐 형성되었으며 마모시험이 끝난 후엔 윤활막의 붕괴 형태가 하나의 띠를 이루며 연속적인 양상을 나타냄을 관찰할 수 있었다(Fig. 3(c)). 이는 시험이 진행됨에 따라 열에 약한 유리섬유가 마찰계면에 축적되었기 때문이다. 마찰재 표면(Fig. 3(g))은 많은 부분에서 시편의 일부가 분리되었음을 알

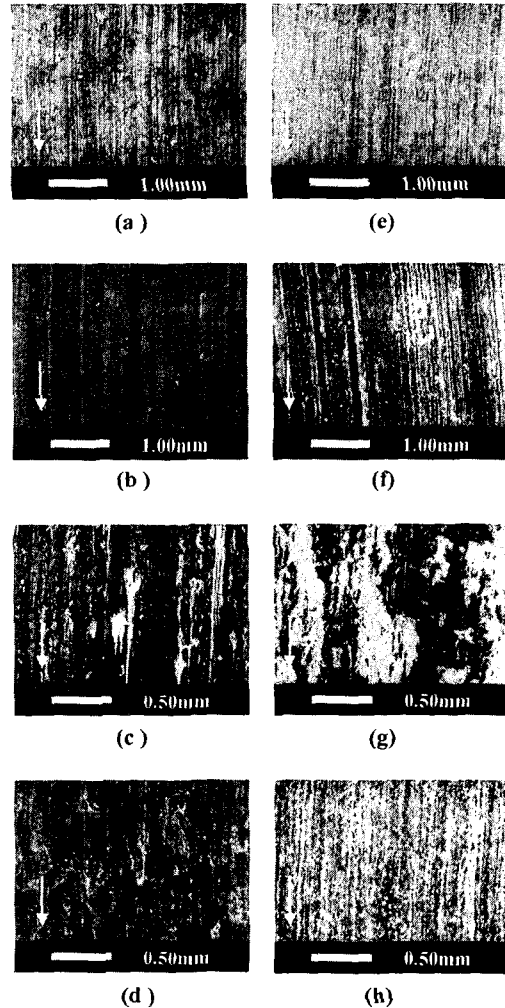


Fig. 3. Optical micrographs of rubbing surfaces after wear test; rotor surface: (a)AF, (b)CF, (c)GF, (d)PF. Surfaces of friction materials: (e)AF, (f)CF, (g)GF, (h)PF. The arrows indicate the sliding direction.

수 있었다.

시편 PF 는 끌기 및 마모시험에서 비교적 안정한 윤활막이 형성(Fig. 3(d))되었고 AF 와 비교하여 마모시험이 끝난 후에도 부분

적인 윤활막의 붕괴가 나타나지 않았다. 이는 미세한 티탄산칼륨섬유는 페놀수지와 결합력이 우수하고 단열성과 충전성(filling)이 뛰어나고 또한 강도가 강하여 펄프형태의 아라미드 섬유와 상호 보완효과에 의해 윤활막이 더욱 안정하게 성장하였다고 사료된다. 마찰재 표면(Fig. 3(h))은 다른 시편과는 달리 wear track이 발견되지 않았다. 이는 균일하고 강한 윤활막이 마찰시 생성되는 asperity의 영향을 최소화했기 때문이라고 사료된다.

3-3. 마모량에 대한 고찰

마찰재의 마모량은 첨가된 강화섬유가 저속저압에서는 마찰력과 연마제에 의하여 두께가 얇아지거나(fiber thinning), 고속고압의 조건에서 마찰 계면의 온도상승에 따른 강화섬유의 분리(fiber pull-out)와 마찰재 성분의 열분해(thermal degradation)에 의해 마모량이 증가하는 것으로 알려져

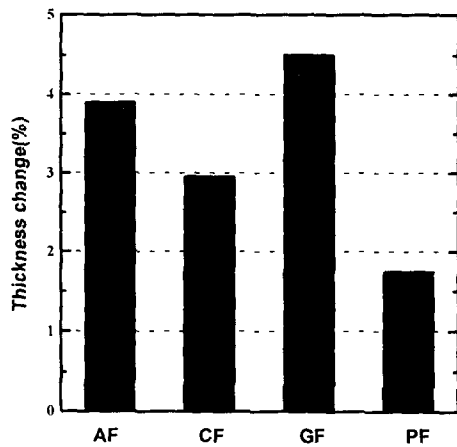


Fig. 4. Thickness change of each friction material AF, CF, GF, PF.

있다. 마모량은 Fig. 4에 나타난 바와 같이 GF, AF, CF, PF의 순으로 작게 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 자동차용 마찰재의 성능에 강화섬유가 미치는 영향을 고찰하기 위해 아라미드섬유, 탄소섬유, 유리섬유, 티탄산칼륨 섬유로 강화시킨 마찰재 시편을 pad-on-disk 형태의 정속마찰시험기로 시험하였다.

1. 아라미드섬유만을 포함하고 있는 시편 AF는 온도상승에 따라 마찰계수가 감소하였으며 가압력과 속도가 낮은 시험 조건에서 마찰계수의 진폭의 변화가 다른 마찰재 시편에 비해 상대적으로 컸다.
2. 탄소섬유로 강화시킨 시편 CF는 다른 마찰재에 비해 상대적으로 마찰계수가 낮았다. 특히 고속고압의 조건에서 안정한 마찰계수를 나타내었다. 마모량도 비교적 작게 나타났다.
3. 유리섬유로 강화시킨 시편 GF는 고속, 고압의 시험조건에서 심각한 마찰계수의 변화가 나타났다. 마모량 또한 4 시편 중 가장 크게 나타났다.
4. 티탄산칼륨섬유로 강화시킨 마찰재 시편은 시편 AF에 비하여 시간에 따른 마찰계수의 감소나 저속저압의 끌기시험 조건에서 마찰계수의 떨림이 나타나지 않았다. 마모량도 4 시편 중 가장 낮게 나타났다.
5. 온도에 따른 마찰계수의 거동은 고속고압의 끌기조건에서 GF는 변화가 심하였고 그 외 시편은 온도 상승에 따라 마찰계수가 약 0.2로 수렴하였다.

후 기

본 연구는 1998년도 한국과학재단 지원 특 정기초연구(과제번호:98-0200-02-01-3)에 의

한 결과의 일부입니다. 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. H. Jang, J. J. Lee, S. J. Kim, and K. Y. Jung, "The Effect of Solid Lubricants on Friction Characteristics," SAE Transactions, 982235, pp.1-8, 1998.
2. P. Gopal, L. R. Dharani, and F. D. Blum, "Hybrid Phenolic Friction Composites Containing Kevlar Pulp," Wear, Vol.193, pp.199-206, 1996.
3. Y. Handa and T. Kato, "Effects of Cu Powder, BaSO₄ and Cashew Dust on the Wear and Friction Characteristics of Automotive Brake Pads," Tribology Transactions, Vol.39, pp.346-353, 1996.
4. P. Gopal, L. R. Dharani, and F. D. Blum, "Fade and Wear Characteristics of a Glass-fiber -reinforced Phenolic Friction Material," Wear, Vol.174, pp.119-127, 1994.
5. B. Keith Friley, Brent E. McNeese and James T. Trainor, "Effect of Carbon Fiber in Dry Brake Formulations," SAE paper 91191, 1991.
6. 김성진, 임현우, 장 호, "자동차용 마찰재에 사용되는 아라미드 섬유와 티탄산칼륨 섬유의 역할," 한국윤활학회, 제 30 회 추계학술대회, pp.213-218, 1999.
7. T. Kato and A. Magario, "The Wear of Aramid Fiber Reinforced Brake Pads: The Role of Aramid Fibers," Tribology Transactions, Vol.37, pp.559-565, 1994.
8. J. K. Lancaster, "Transfer Lubrication for High Temperatures," Journal of Tribology, Vol.107, pp.437-443, 1985.
9. Krishan K. Chawla, "Composite Material s," Chap.2, Springer,1998, pp.6-71.
10. 김성진, "마찰조건에 따른 자동차용 마찰재의 마찰특성에 관한 연구," 고려대학교 석사학위논문,1998.
11. S. Bahadur, L. Zhang, and J.W. Anderegg, "The Effect of Zinc and Copper Oxides and Other Zinc Compounds as Fillers on the Tribological Behavior of Thermosetting Polyester," Wear, Vol.203-204, pp.464-473 1997.
12. A. Wirth, D. Eggleston, and R. Whitaker, "A Fundamental Tribochemical Study of the Third Body Layer formed During Automotive Friction Braking," Wear, Vol.179, pp.75-81, 1994.