

# 자동차용 마찰재의 연마제(ZrSiO<sub>4</sub>) 크기에 따른 마찰특성에 관한 연구

홍영석 • 고길주 • 장 호  
고려대학교 공과대학 재료금속공학부

## Tribological Behavior of Automotive Brake Pads with Different Sizes of an Abrasive Material(ZrSiO<sub>4</sub>)

Young-Suk Hong • Kil-Ju Ko • Ho Jang

Division of Materials Science and Engineering, Korea University

**Abstract** – Friction materials with four different sizes of zircon -1 $\mu$ m, 6 $\mu$ m, 75 $\mu$ m, 140 $\mu$ m- were investigated to evaluate the size effects of abrasive particles used in the automotive brake pads on brake performance. Although the brake pads with the largest size of zircon showed a good frictional stability and low wear, rotors were severely abraded due to the aggressiveness of coarse zircon. As the size of zircon decreased, friction force and the amplitude of friction coefficient increased. Considering the above results, abrasive materials were thought to destroy transfer film and the extent of the destruction depends on the size of zircon. The small size zircon was not effective in developing a transfer layer on the rotor surface while minimizing the damage on the counter surface.

**Key words** – friction materials, abrasives, zircon, size effects, transfer film, frictional stability

### 1. 서 론

자동차용 마찰재는 브레이크 시스템의 핵심 부품으로서 10~20 종의 원료로 구성된 복합재료이다. 마찰재의 제동특성은 마찰재와 상대재인 로터(rotor) 사이에 형성되는 윤활막(transfer film)의 유무 및 그 두께와 조성에 의해 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 특히, 마찰재 구성원료 중 고체윤활제(solid lubricant)와 연마제(abrasives)는 윤활막 형성과 이에 따른 마찰계수 및 마모율 변화 측면에서 서로 상반되는 기능을 지니고 있다[1-2].

Phenolic resin 등의 유기물질과 고체윤활제들은 마찰시 온도상승으로 인해 열분해되며, 이러한 현상은 마찰계수를 감소(brake fading)시켜

자동차의 제동성능을 저하시킨다[3]. 따라서, 로터 표면의 열변성된 윤활막을 제거하고 마찰력을 증가시키기 위해 ZrSiO<sub>4</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, MgO 등의 내열성 산화물이나 규산화물이 연마제(abrasives)로 사용되고 있다. 그러나, 다량의 연마제는 윤활막을 파괴시켜 마모율 증가와 제동시 토크 진폭의 증가(judder), 그리고 소음의 발생 빈도를 높이는 것으로 밝혀져 있으므로 최적의 고체윤활제와 연마제를 책정하는 것은 마찰재 설계에서 가장 중요한 과제중의 하나이다[4]. 특히, 고체윤활제와 연마제는 온도구간에 따라 다른 특성을 나타내는 것으로 알려져 있으며 전형적인 윤활제와 연마제의 상대량에 따른 마찰특성은 이미 발표된 바 있다[2-5]. 그러나, 동일한 연마제라도 크기와 형상에 따라

각기 다른 대면 공격성(aggressiveness)과 마멸성(abrasiveness)을 나타내고 있으므로 고체 윤활제의 윤활막 형성에 큰 영향을 미치게 된다.

이에 본 연구에서는 연마제의 부피분율을 동일하게 사용한 경우 그 크기와 형상이 다른 4가지의 연마제(지르콘;  $ZrSiO_4$ )가 마찰특성에 미치는 영향을 고찰하였다.

## 2. 실험 방법

본 실험에서 사용된 마찰재는 기능적 특성을 고려하여 10 가지 성분으로 구성하였으며, 고체 윤활제를 10 vol.% graphite 로 사용하고 연마제인 지르콘을  $1\mu m$ ,  $6\mu m$ ,  $75\mu m$ ,  $140\mu m$  의 4 가지 크기로 선정하여 각각 동일한 부피비를 갖도록 제조하였다(Table 1). 연마제로 사용된 지르콘은 미세한 백색 분말로써 약산이나 고온, 고농도의 황산에도 화학적으로 안정하며, 물에 용해되지 않고, 고온에서도 우수한 열적 특성을 가지고 있다.

지르콘 입자의 크기분포는 이미지 분석기와 Escan-4000 (BMI Plus<sup>TM</sup>) 프로그램을 이용하여 측정하였다. 연마제의 크기를 분석한 결과  $1\mu m \pm 0.4$ ,  $6\mu m \pm 4.8$ ,  $75\mu m \pm 24.1$ ,  $140\mu m \pm 22.0$  였다.  $1\mu m$ ,  $6\mu m$ ,  $75\mu m$  지르콘의 표면형상은 거칠었고,  $140\mu m$  은 비교적 매끈하였다(Fig. 1).

마찰재의 제작은  $100^\circ C$ ,  $150 kgf/cm^2$  에서 3분간 예비성형(preforming),  $150^\circ C$ ,  $350 kgf/cm^2$  에서 10분간 본성형(hot pressing),  $200^\circ C$  에서 6시간 동안 열처리(curing)과정으로 진행되었다. 마찰재를 제작한 후 원료의 혼합상태 및 균일한 열처리를 확인하기 위해 경도 시험기(Akashi<sup>TM</sup>, ARK-600)를 이용하여 마찰재의 경도를 측정하고 결과 로크웰 경도는  $85HR_S$  정도였으며, 각 시험은 위치에 따라 약 3%의 오차범위를 나타내고 있었다.

마찰실험은 pad-on-disk type 의 정속 마찰시험

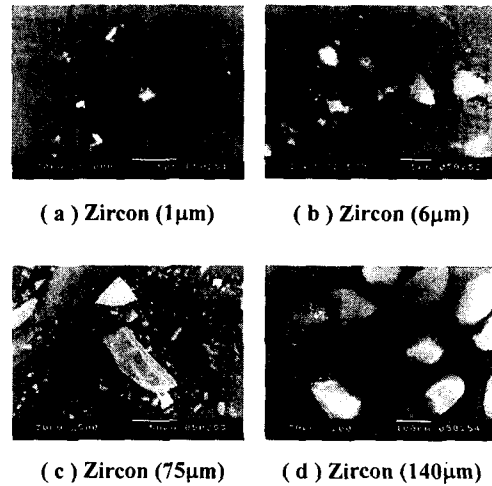


Fig. 1. A morphology of zircon used in our specimen.

기를 이용하여 1 단계로 마찰표면분석 및 마모량평가 시험(wear test & surface analysis), 2 단계로 속도와 압력 변화에 따른 끌기 시험(drag test), 마지막으로 일정 시간간격 시험(constant interval test)의 3 단계로 진행하였다(Table 2). 측정된 모든 자료는 A/D converter 를 통해 디지털 신호로서 초당 10 회의 속도로 자료를 저장하였으며, 본 시험에서 사용된 마찰시험기에 대한 자세한 내용은 이미 논문에 게재된 바 있으므로 생략하였다[6].

Table 1. Ingredients of the friction materials studied in this work.

Classification	Ingredient	Vol. %
Fiber	Kevalr <sup>®</sup>	15
	PMF	
	Copper	
Binder	Phenolic Resin	15
Filler	BaSO <sub>4</sub>	39
	CaCO <sub>3</sub>	
Friction Modifier	NBR	13
	Cashew	
Lubricant	Graphite	10
Abrasive	ZrSiO <sub>4</sub>	8

**Table 2. Friction test procedure**

Burnishing	5 kgf/cm <sup>2</sup> , 500 rpm, 300 sec × 5 times.
Wear Test & Surface Analysis	IBT 30 °C, 5 kgf/cm <sup>2</sup> , 500 rpm 1000 sec. × 1 times
Drag Test	IBT 30 °C Pressure 3 kgf/cm <sup>2</sup> , 5 kgf/cm <sup>2</sup> , 7 kgf/cm <sup>2</sup> Velocity 300 rpm, 500 rpm, 700 rpm 300 sec. × 2 times
Interval Test	IBT 30 °C, 5 kgf/cm <sup>2</sup> , 500 rpm 60 sec. × 10 times

마찰재와 로터간의 균일한 접촉이 되도록 leveling 과 burnishing 작업을 시행한 후 마찰시험을 시행하였으며, 모든 시험은 30°C 의 초기 시작온도(IBT, initial brake temperature)에서 실시하였다.

마찰재와 로터의 마찰계면에서 연마제의 기능과 메커니즘을 분석하기 위하여 각 시편을 1000 초 동안 끌기를 시행한 후 브레이크 패드와 로터의 표면을 분석하였으며, 이 후에 마모량을 측정하였다. 끌기시험(drag test)의 경우는 300 초간 연속적으로 시행하여 각 압력과 회전속도에서의 시간과 온도증가에 따른 마찰계수의 변화를 고찰하도록 하였다. 이때, 조건에 따른 마찰계수의 안정도는 윤활막의 형성 정도를 판단하는 기준이 되며[7], 연마제의 기능이 커지면 윤활막이 파괴되어 마찰계수의 진폭이 증가하는 경향이 된다.

마지막으로 일정 시간간격 시험(constant interval test)은 1 분 간격으로 끌기를 10 회 반복함으로써 온도상승에 따른 각 구간에서의 마찰계수의 분포를 고찰하였다.

**3. 실험결과 및 고찰**

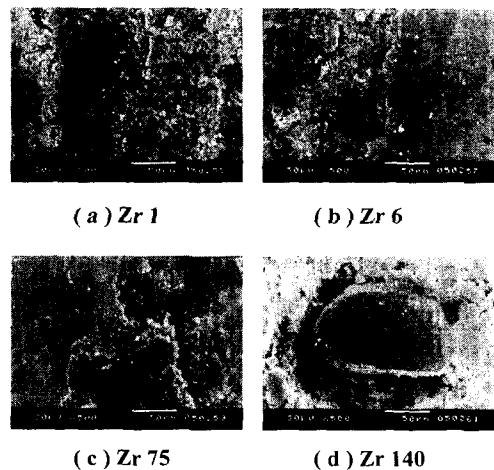
**3-1. 마찰표면 분석 및 마모량 평가 시험**

연마제에 의한 연삭마모(abrasive wear)현상을 크게 분류하면 두가지 범주로 구분된다. Two-body abrasive wear 는 거친 표면을 가진 연마제

가 일반적으로 다른 연한 표면을 마모시키는 현상을 지칭하며, three-body abrasive wear 는 기지(matrix)로 부터 떨어져 나온 제 3 의 입자가 두 마찰평면 사이에서 연삭마모를 일으키는 것이다[8].

마찰재의 연마제로 가장 빈번히 사용되는 지르콘의 역할은 마찰력의 증가와 함께 다양한 환경변화에도 안정된 제동능력을 발휘할 수 있도록 열분해된 마찰막의 일부를 제거하여 마찰특성을 유지하는 것이다. 하지만, 연마제는 윤활제의 기능을 감소시켜 마찰계수의 진폭을 증가시키며, 마찰 표면을 손상시키는 것으로 알려져 있다[5].

Fig. 2 는 마모시험이 끝난 후의 마찰재의 마모표면을 주사전자현미경(SEM)으로 관찰한 사진이다. 표면에서 흰 부분은 마모로 인하여 패드로부터 분리된 지르콘 입자들이며, 크기가 작은 Zr 1 의 경우 three-body abrasive wear 현상으로 지르콘 입자가 쉽게 마찰재로부터 떨어져 나와 패드의 마모율을 증가시키며, 마찰재 표면을 심하게 손상시켰음을 확인 할 수 있었다 [9].



**Fig. 2. Worn surfaces of friction materials with (a) Zr 1, (b) Zr 6, (c) Zr 75, (d) Zr 140 after wear test.**

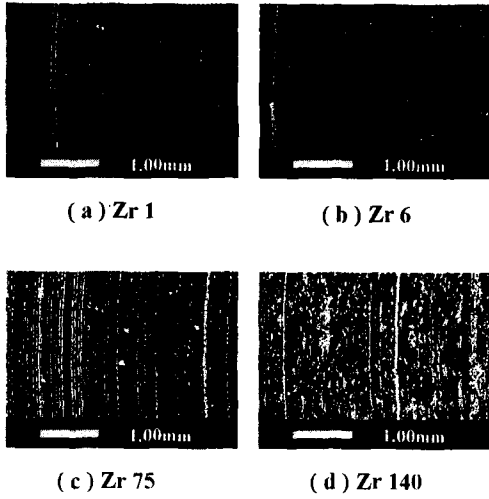


Fig. 3. Worn rotor surfaces after wear test (a) Zr 1, (b) Zr 6, (c) Zr 75, (d) Zr 140.

반면 상대재인 로터에는 약간의 홈(track or groove)을 만들었을 뿐이며, 지르콘의 입도가 작은 Zr 1 시편의 대면 공격성은 크게 나타나지 않았다(Fig. 3).

연마재의 크기가 증가할수록 마찰재 표면과는 상반된 결과를 보여주었으며, 특히 Zr 140 시편은 two-body abrasive wear 기구에 의하여 마찰이 진행되어 가장 손상이 적은 마찰재 표면 형상을 보여 주었으나, Fig. 3 에 나타난 바와 같이 로터의 손상이 매우 심하게 나타났다[9]. 따라서, 입도가 큰 지르콘으로 인하여 상대재인 로터에 심각한 연삭마모(abrasive wear)가 유발된 것으로 사료된다.

마찰재의 마모속도를 평가하기 위해 일정압력(5kgf/cm<sup>2</sup>)에서 속도 변화에 따른 마찰재의 두께변화를 측정하였다. Fig. 4 는 1000 초 동안 연속적으로 마모시험을 시행한 결과이다. 로터의 회전속도가 증가하면 주행거리의 증가로 마모율은 증가하였으며, 500rpm 이상의 속도에서는 Zr 140 을 제외한 나머지 시편의 마모량 변화가 거의 일정하였다[10]. 이러한 현상은 지르콘의 각 크기별 분포에서 1 $\mu$ m, 6 $\mu$ m, 75 $\mu$ m 의

지르콘은 Zircon sand(140 $\mu$ m)의 분쇄로부터 얻어지므로 Zr 75 의 시편에서도 실제로 수  $\mu$ m 정도의 매우 작은 입자가 존재하고 있으며, 장시간의 마모시험 진행과정에서 지르콘 입자끼리의 충돌로 미세한 입자로 변화되어 일어난 것으로 사료된다(Fig. 2).

결론적으로 패드의 마모율은 지르콘의 크기가 증가할수록 감소하는 경향을 보였으며, Zr 140 의 경우가 가장 작은 마모율을 나타냈다. 하지만, 로터의 마모율은 패드의 마모율과 반비례하는 하는 경향을 지니고 있었으며, Zr 140 의 시험에서 가장 큰 로터의 마모율을 보여주었다(Fig. 5).

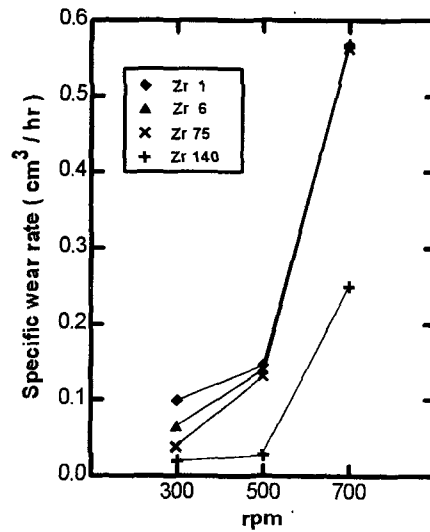


Fig. 4. Specific wear rate as a function of velocity at load of 5kgf/cm<sup>2</sup>.

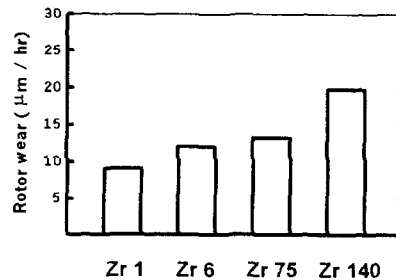


Fig. 5. Amount of rotor wear after wear test.

### 3-2. 마찰 계수의 변화

제동조건에 따른 마찰계수의 변화를 고찰하기 위해 끌기시험(drag test)과 일정 시간간격 시험(constant interval test)을 실시하였다. Fig. 6 은 300rpm, 500rpm, 700rpm 의 속도와 3kgf/cm<sup>2</sup>, 5kgf/cm<sup>2</sup>, 7kgf/cm<sup>2</sup>의 압력조건에서 각각 300 초 간 순차적으로 끌기시험(drag test)을 한 결과이다.

지르콘의 크기가 작을수록 마찰력의 증가로 인해 마찰계수가 높아지는 경향을 보여주었으며, 온도상승으로 인해 마찰계수의 시간에 따른 감소현상(fading)이 현저하게 나타났다. 이러한 마찰계수의 감소현상은 마찰계면에서 유기물질과 고체윤활제의 열분해로 인하여 발생된 것이며, Fig. 2 에서 Zr 1 과 Zr 6 가 불안정한 윤활막을 형성한 사실에 기인된 것으로 판단된다. 따라서, 미세한 연마제는 마찰력을 증가시키지만, 균일한 윤활막을 형성하지는 못하는 것으로 보여진다.

300rpm 의 저속 조건하에서 Zr 1 과 Zr 6 시편은 stick-slip 현상으로 인한 마찰계수의 진폭이 상당히 크게 나타났음을 알 수 있다. 지르콘의 입자가 매우 작을 경우에는 시편과 로터 사이에 다량의 지르콘이 윤활막 형성을 저해한 것으로 사료되며(Fig. 2), 이는 연마제가 scratch 나 홈(groove)을 만들면서 표면의 물질을 외부로 이동시키는 현상으로 설명될 수 있다[12-13]. 따라서, 미세한 지르콘 입자가 연마제로서 보다 효과적으로 마찰막의 성분을 제거하고 있음을 확인할 수 있으며, 지르콘의 크기가 증가할수록 연마제로서의 기능은 상대적으로 떨어져 마찰계수는 안정된 값을 유지하고 있다.

반면, Fig. 6 에 나타난 바와 같이 700rpm 의 고속조건으로 갈수록 시편의 종류에 관계없이 마찰계수의 진폭은 적게 나타났다.

각 제동조건에 따른 마찰 계수의 진폭을 나타내기 위하여 최종 10 초 구간동안의 마찰계수의 표준편차 값을 Fig. 7 에 도시하였다. Zr 1

과 Zr 6 의 경우 저압, 저속의 끌기시험에서 연마제의 윤활막 파괴에 의해 마찰계수의 떨림이 큰 분포를 나타내었으며, Zr 75 는 중간정도 수준의 마찰계수의 진폭을 보여주고 있다. Zr 140 시편은 모든 마찰조건에서 마찰계수 변화는 적었으나, 마모량 평가시험(wear test)에서 나타난 바와 같이 로터에 대한 지나친 공격성(aggressiveness)으로 장시간의 제동시에는 로터의 마모량 증가와 함께 로터의 DTV 가 증가할 것으로 사료된다[5].

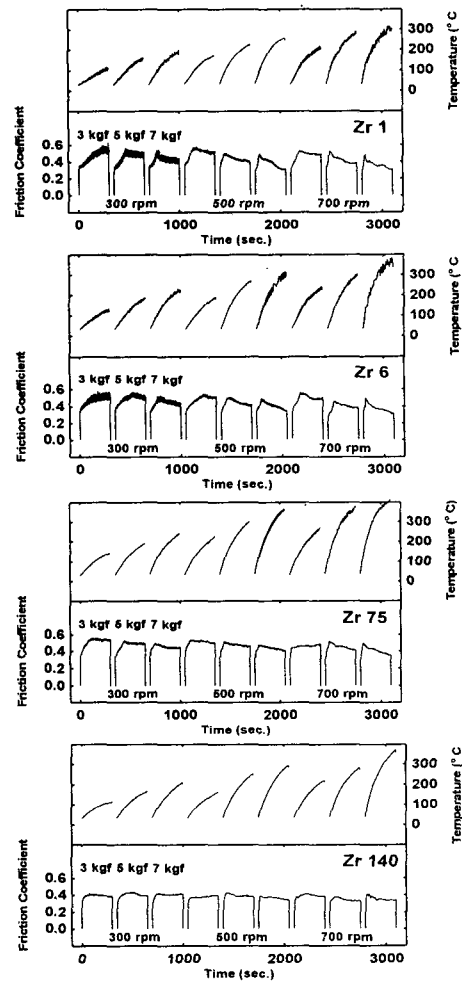


Fig. 6. Change of friction coefficient as functions of pressure and speed during dragging.

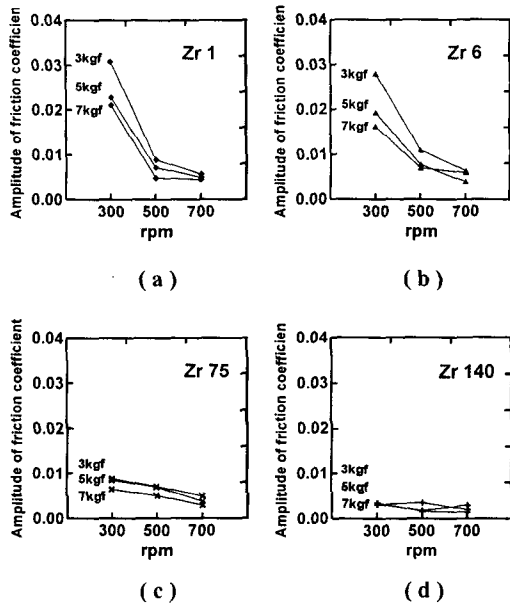


Fig. 7. The amplitude of friction coefficient (a) Zr 1, (b) Zr 6, (c) Zr 75, (d) Zr 140 during dragging.

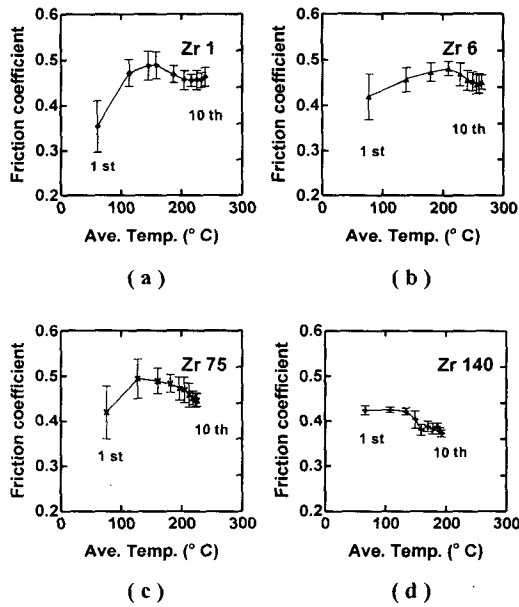


Fig. 8. Graph of average friction coefficient vs. average temperature for friction materials (a) Zr 1, (b) Zr 6, (c) Zr 75, (d) Zr 140 during constant interval test.

Fig. 8 은 온도상승에 따른 마찰계수의 거동을 관찰하기 위해 500rpm 과 5kgf/cm<sup>2</sup> 의 제동조건에서 1 분 간격으로 10 회에 걸쳐 끌기를 반복한 실험 결과이다. 마찰재는 고온에서 열분해(pyrolysis)되어 성분의 물리적, 화학적 변성을 수반하므로 10 회까지의 반복 시험에서 나타난 마찰계수 값들의 변화는 온도변화 및 열이력에 따른 제동특성을 표현하고 있으며, 각 구간에서의 표준편차 값은 마찰계수의 진폭을 나타내고 있다. 위의 일정 시간간격 시험(constant interval test)의 결과로부터 마찰표면에 유착된 지르콘의 수가 가장 적다고 판단되는 Zr 140 시편의 온도 상승이 가장 낮고, 마찰계수가 비교적 일정하게 나타났다. 이는 끌기시험(drag test)에서 보여준 결과와 일치하며, Zr 140 시편의 경우 안정된 윤활막이 형성되었음을 보여주고 있다.

#### 4. 결 론

자동차용 마찰재에 연마제로 사용된 지르콘(ZrSiO<sub>4</sub>)의 크기별 마찰특성을 분석한 결과를 아래와 같이 요약하였다.

1. 지르콘의 크기가 매우 작을 경우에는 상대재와의 접촉면적이 증가하여 윤활제를 계면 밖으로 밀어내는 역할을 한다. 따라서, 높은 마찰력을 유지할 수 있었으나, 균일한 윤활막 형성에는 저해가 되는 것으로 판단된다.
2. 미세한 지르콘은 안정된 윤활막을 파괴함으로써 저속에서 마찰계수의 떨림과 고온에서 마찰계수의 감소현상을 나타내었다.
3. 지르콘의 크기가 증가할 경우에는 지르콘 자체의 접촉면적이 감소하여 마찰계수는 안정되며, 마찰재의 손상은 줄어들지만, 큰 입자로 인해 상대재에 대한 지나친 공격성을 나타내었다.

위의 결과로부터 마찰재와 로터에 대한 공격성을 줄이며, 마찰계수의 안정성을 높이도록 크기가 다른 지르콘들을 혼합해서 사용하는 것이 바람직하며, 최적 성분비를 찾는 것이 새로운 실험 방향이 될 것이다.

## 후 기

본 연구는 1998 년도 한국과학재단 지원 특정기초연구(과제번호: 98-0200-02-01-3)에 의한 결과의 일부입니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. Yuji Handa and Takahisa Kato, "Effects of Cu powder, BaSO<sub>4</sub> and Cashew dust on the wear and friction characteristics of automotive brake pads," Tribology Transaction, 39, pp.346-353, 1996.
2. 이정주, 장 호, "자동차 브레이크용 마찰재에 사용되는 고체 윤활제에 따른 제동특성에 관한 연구," 한국윤활학회지, 제 14 권, 제 3 호, pp.17-23, 1998.
3. 김성진, 장 호, "자동차용 마찰재에 사용되는 결합제와 강화섬유에 따른 마찰 및 마모 특성에 관한 연구," 한국윤활학회지, 제 15 권, 제 4 호, pp.314-320, 1999.
4. Ho Jang, Jung Joo Lee, Sung Jin Kim and Kee Young Jung, "The Effect of Solid Lubricants on Friction Characteristics," SAE982235, pp.1-8, 1998.
5. 장 호, "자동차 제동시 나타나는 마찰특성에 관한 연구 - I. 고체윤활제와 연마제의 함량에 따른 영향," 한국윤활학회지, 제 13 권, 제 1 호, pp.34-41, 1997.
6. 김성진, 홍영석, 장 호, "자동차용 마찰재에 사용되는 페놀수지의 종류에 따른 마찰특성의 영향에 관한 연구," 제 29 회 춘계윤활학회 학술대회, pp.92-100, 1999.
7. Allan Wirth, Karen Stone and Robert Whitaker, "A Study of the Relationship between Transfer Film Chemistry and Friction Performance in Automotive Braking Systems," SAE922541, pp.1-8, 1992
8. D.H. Buckley. "Surface Effects in adhesion, friction, wear and lubrication," pp.469-485, 1981.
9. R. S Dwyer-Joyce, R. S. Sayles and E. Ioannides, "An investigation into the mechanisms of closed three-body abrasive wear," Wear, 175, pp.133-142, 1994.
10. C. Lhymn and R. Light, "Effect of Sliding Velocity on Wear rate of Fibrous Polymer Composites," Wear, 116, pp.343-359, 1987.
11. M. A. Verspui, G. de With, P. G. Th. van der Varst M. Buijs, "Bed thickness and particle size distribution in three-body abrasion," Wear, 188, pp.102-107, 1995.
12. L. Fang, X. L. Kong, J. Y. Su and Q. D. Zhou. "Movement patterns of abrasive particles in three-body abrasion," Wear, 162-164, pp.782-789, 1993.