

마찰재에 사용되는 지르콘($ZrSiO_4$) 입자의 크기에 따른 마찰특성

홍영석 · 고길주 · 박상진 · 장 호[†]

고려대학교 신소재공학과

Tribological Behavior of Automotive Brake Pads with Different Sizes of Zircon Particles

Young-Suk Hong, Kil-Ju Ko, Sang Jin Park and Ho Jang[†]

Department of Advanced Materials Engineering, Korea University

Abstract – Automotive brake pads with four different sizes of zircon particles (average sizes of 1 μm , 6 μm , 75 μm , and 140 μm , respectively) were investigated to evaluate the size effect of abrasive particles on friction performance. Results showed that the brake pads with the larger size of zircon particles tend to show better frictional stability and low pad wear. However, the rotor surface was severely abraded in the case of using larger zircon particles. On the other hand, the small zircon particles in the pads showed the fast increase of the coefficient of friction with friction force oscillation and the tendency was pronounced at low sliding speeds. The brake pads with small particle sizes also exhibited strong fade phenomena at elevated temperatures.

Key words – friction materials, abrasives, zircon, size effects, transfer film, fade, friction stability.

1. 서 론

마찰재의 제동특성은 마찰재와 상대재인 로터(rotor) 사이에 형성되는 마찰막(transfer film)의 유무 및 그 두께와 조성에 의해 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 마찰재를 구성하는 다양한 원료 중에서 연마제(abrasives)는 고체윤활제와 함께 마찰특성을 결정하는데 매우 중요한 역할을 하며 이들의 종류 및 함량은 마찰계수 및 마모율에 크게 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 또한 마찰막 형성의 견지에서 상반된 역할을 하는 고체윤활제와 연마제는 온도구간에 따라 다른 특성을 나타내며 대표적인 윤활제와 연마제의 상대량에 따른 마찰특성은 이미 발표된 바 있다[1-2].

마찰재에 사용되는 연마제는 로터 표면의 열변성된 마찰막을 제거하고 또한 마찰력을 조절하기 위해 첨가되며 주로 $ZrSiO_4$, Al_2O_3 , SiO_2 , MgO 등의 내열성 산

화물이나 규산화물이 사용되고 있다. 그러나, 동일한 종류의 연마제를 사용한 경우에도 크기와 형상에 따라 각기 다른 대면 공격성(aggressiveness)과 마모양상을 나타내는 것으로 알려져 있으며, 부적절한 연마제의 선택은 마찰재 및 로터의 마모율을 증가시키고 또한 제동시 토크 진폭의 증가(judder) 및 소음(noise)의 발생 빈도를 높이는 것으로 알려져 있다. 따라서 연마제의 종류와 크기의 책정은 마찰재 설계에서 매우 중요한 과제로 알려져 있다[3].

일반적으로 연마제에 의한 연삭마모(abrasive wear) 현상을 분류하면 크게 두 가지로 구분된다[4]. Two-body abrasive wear는 경도가 높은 연마제가 일방적으로 연한 상대표면을 마모시키는 현상을 지칭하며, three-body abrasive wear는 기지(matrix)에서 떨어져 나온 제 3의 입자(또는 의도적으로 계면에 직접 첨가된 입자)가 두 마찰평면 사이에서 구름현상(rolling)을 동반하며 연삭마모를 일으키는 것이다. 마찰재에 사용되는 연마제의 경우, 입자의 크기에 따라 입자가 기지에서

[†]주저자 · 책임저자 : hojang@korea.ac.kr

분리되는 정도가 변화하게 된다. 이와 같이 연마제 입자의 크기에 따라 달리 나타나는 입자의 분리형상은 마찰막의 형성 및 상대재에 대한 공격성의 측면에서도 큰 영향을 미치게 된다.

이에 본 연구에서는 자동차용 마찰재의 연마제로서 가장 빈번히 사용되고 있는 지르콘의 크기에 따른 마찰특성에 관하여 고찰하였다. 따라서 마찰재에 포함된 지르콘의 부피 분율을 동일하게 하고 그 지르콘의 크기가 마찰 중 나타내는 마찰계수의 안정성, 회주철 로터 및 마찰재의 마모량에 미치는 영향에 관하여 연구하였다.

2. 실험방법

본 실험에서 사용된 마찰재는 기능적 특성을 고려하여 10가지 성분으로 구성하였으며, 그 중 고체윤활제는 인조흑연(10 vol.%)을 사용하였으며 연마제는 평균 입자의 크기가 1 μm, 6 μm, 75 μm, 140 μm인 4가지 지르콘을 사용하였다. 지르콘의 부피비는 8 vol.%로 고정하였으며 본 실험에서 연마제로 사용된 지르콘은 현재 마찰재 제조업체에서 사용하고 있는 원료를 사용하였다. 마찰재에 사용된 각 원료의 부피비는 마찰재 업

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

Classification	Ingredient	Vol. %
Fiber	Aramid Pulp	15
	PMF	
	Copper	
Binder	Phenolic Resin	15
Filler	BaSO ₄	39
	CaCO ₃	
Friction Modifier	NBR	13
	Cashew	
Lubricant	Graphite	10
Abrasive	ZrSiO ₄	8

계의 관례에 따라 기능적 특성에 따라 구분하여 간략하게 나타내었다(Table 1).

지르콘 입자의 크기분포는 이미지 분석기와 Escan-4000 (BMI Plus™) 프로그램을 이용하여 측정하였다. 연마제의 크기를 분석한 결과 1 μm ± 0.4, 6 μm ± 4.8, 75 μm ± 24.1, 140 μm ± 22.0였다. 1 μm, 6 μm, 75 μm 지르콘의 표면형상은 거칠었고, 140 μm은 비교적 매끈하였다. Fig. 1의 SEM 사진에 나타난 바와 같이 실

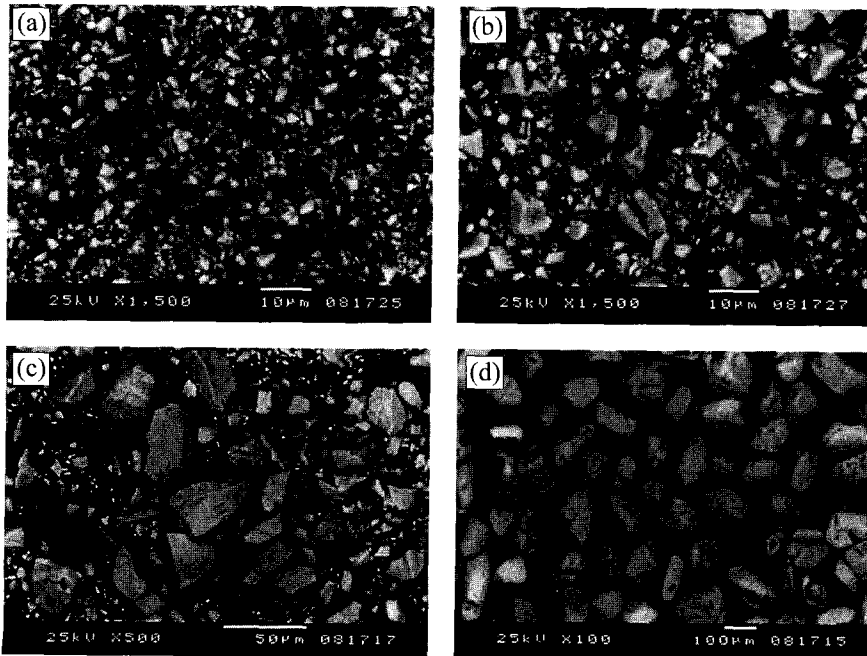


Fig. 1. The micrographs of zircon particles contained in the friction material specimens used in this study (a) contains 1 μm size zircon (ZR1), (b) 6 μm (ZR6) (c) 75 μm (ZR75), and (d) 140 μm (ZR140).

험에 사용된 6 μm과 75 μm 입자들은 많은 작은 입자들을 함유하고 있었다. 이러한 작은 입자들은 140 μm 입자를 분쇄하여 작은 입자를 제조할 때 수반된 것으로서 본 실험에서는 작은 입자들을 따로 분리하지 않고 현재 마찰재 업계에서 사용되고 있는 원료를 그대로 사용함으로써 보다 상용 마찰재에 근접된 마찰현상을 구현하고자 하였다.

마찰재의 제조 및 마찰시험기에 관한 설명은 이미 여러 번 발표되었으므로 본 논문에서는 생략하였다 [5,6]. 본 연구에서 사용되는 마찰재 시편은 마찰면적을 8 cm²(4 cm²×2)로 하였으며 상대재로 사용된 로터는 직경이 12 cm이고 두께가 2 cm인 회주철을 사용하였다. 마찰재를 제작한 후 원료의 혼합상태 및 균일한 열처리를 확인하기 위해 경도 시험기(AkashiTM, ARK-

600)를 이용하여 마찰재의 경도를 측정된 결과 로크웰 경도(Rockwell hardness)는 85 HR_C 정도였으며, 각 시편은 위치에 따라 약3%의 오차범위를 나타내고 있었다.

본 실험에서 실시한 시험은 Table 2에 나타난 바와 같이 마모시험과 마찰특성시험으로 구분하여 진행되었으며 본 시험 전에 마찰재와 로터의 균일한 접촉을 위해 burnish를 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 입자의 크기에 따른 마찰특성

제동조건에 따른 마찰계수의 변화를 고찰하기 위해 끌기시험(drag test)을 시행하였으며 이를 이용하여 자동차 제동 중 나타나는 다양한 마찰특성 중 마찰계수

Table 2. Friction test procedure and condition (test condition was described in the order of IBT*, pressure, speed, duration, and No. of applications)

Burnishing	IBT 30°C, 0.5 MPa, 2.38 m/sec (500 rpm), 300 sec × 5 times.
Wear Test & Surface Analysis	IBT 30°C, 0.5 MPa, 2.38 m/sec (500 rpm) 1000 sec. × 1 time
Drag Test	IBT 30°C, 0.3 MPa, 0.5 MPa, 0.7 MPa 1.42 m/sec (300 rpm), 2.38 m/sec (500 rpm), 3.33 m/sec (700 rpm) 300 sec. × 2 times

*IBT: Initial Brake Temperature

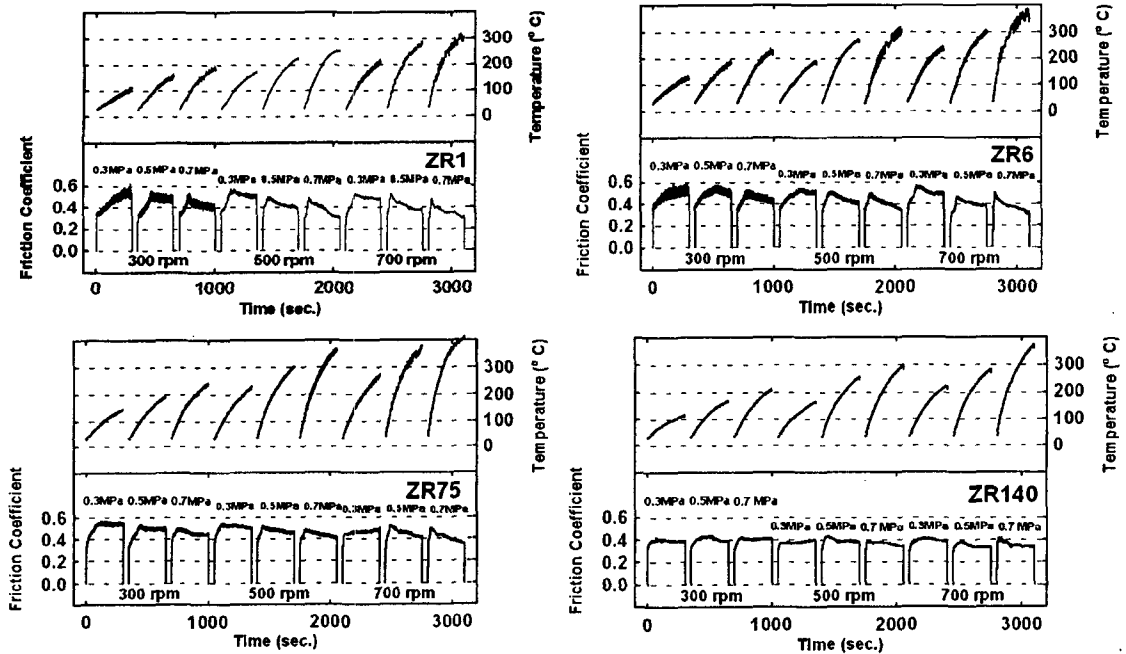


Fig. 2. The coefficient of friction and temperature at the rotor surface during constant interval tests using friction material specimen ZR1, ZR6, ZR75, and ZR140 (100 rpm is equivalent to 47.6 cm/sec).

의 변화와 진폭에 관하여 고찰하였다. Fig. 2는 300 rpm(1.42 m/sec), 500 rpm(2.38 m/sec), 700 rpm(3.33 m/sec)의 속도와 0.3 MPa, 0.5 MPa, 0.7 MPa의 압력조건에서 각각 300초간 순차적으로 끌기시험(drag test)한 결과이다. Fig. 2에서 나타낸 바와 같이 마찰계수의 거동은 연마제 입자의 크기, 가압력, 속도, 그리고 마찰 열에 의한 온도변화에 민감한 변화를 나타내었다. 특히 ZR1마찰재를 사용한 경우 초기 마찰계수의 증가현상이 두드러지게 나타났으며 측정된 로터의 온도가 약 100°C에 도달하였을 때 마찰계수가 서서히 감소함을 나타내었다. 본 실험에서 측정된 마찰온도는 로터의 평균온도(bulk temperature)이며 실제 마찰계면에서의 온도(flash temperature)는 측정된 온도보다 높은 값을 가지는 것으로 예상된다. 이러한 마찰계수의 초기 증가현상은 작은 연마제 입자를 사용한 경우 마찰 중 접촉면적의 증가를 수반하여 나타난 현상이며 또한 100°C 이상에서 나타난 약간의 마찰계수의 감소현상은 상용 마찰재에서 지칭하는 fading현상이라기 보다는 마찰표면이 열이력을 받으며 나타난 현상으로 생각된다. 실차 제동시 나타나는 것과 유사한 fading현상은 ZR1 마찰재의 경우 고압(0.7 MPa)의 마찰조건에서 현저히 나타내고 있다. 작은 지르콘 입자를 사용한 ZR1, ZR6 마찰재에서 나타났던 이러한 마찰계수의 증감현상은 마찰재에 사용된 지르콘 입자의 크기가 증가함에 따라

현저하게 감소하였으며 특히 ZR140마찰재의 경우 압력과 속도의 변화에도 우수한 마찰안정성을 나타내었다. 이러한 현상은 연마제 입자가 큰 경우, 입자가 기지에서 이탈되지 않은 상태에서 상대재 로터와 마찰현상을 이루기 때문이며 지르콘 입자가 마찰계면 거동에 주된 영향을 미치지 않기 때문으로 사료된다. 또한 전반적으로 마찰재에 사용된 입자가 작을수록 평균 마찰계수가 높게 나타난 경향은 접촉면적의 증가에 기인되는 것으로 생각된다.

제동조건에 따른 마찰계수의 진폭을 나타내기 위하여 각 제동조건에서 최종 10초 구간동안의 마찰계수의 표준편차 값을 Fig. 3에 도시하였다. 일반적으로 마찰계수의 진폭은 그 크기와 주파수특성에 따라 제동소음 및 떨림현상에 영향을 미치게 된다. Fig. 3에 나타난 바와 같이 ZR1과 ZR6의 경우 저압, 저속의 끌기시험에서 마찰계수의 떨림이 크게 나타났으며, ZR75는 중간정도 수준의 마찰계수의 진폭을 보여주고 있다. 반면에 ZR140 시험은 모든 마찰조건에서 마찰계수의 거동이 가장 양호한 것으로 나타났다. 지르콘 입자에 따른 진폭의 변화는 마찰시 마찰계면에서의 입자거동에 의존된다. 작은 입자를 사용하였을 때 나타난 저속저

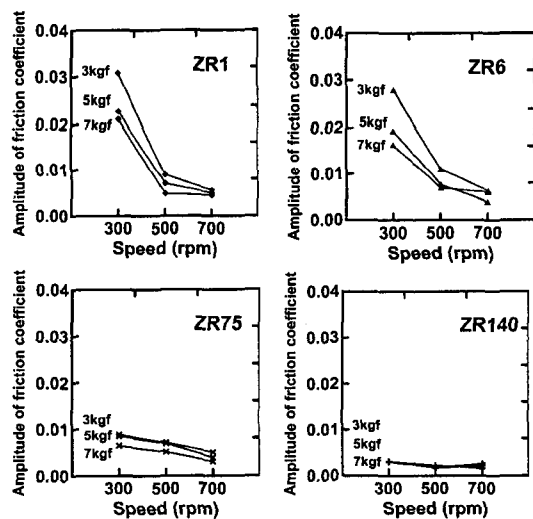


Fig. 3. The amplitude of the coefficient of friction during constant interval tests using friction material specimen ZR1, ZR6, ZR75, and ZR140 (100 rpm is equivalent to 47.6 cm/sec).

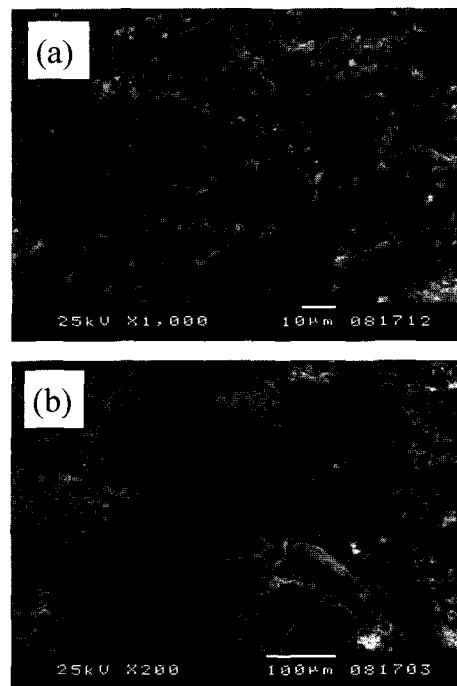


Fig. 4. SEM micrographs of rubbing surfaces of the brake pads after friction test (a) ZR1 and (b) ZR140.

압에서의 큰 진폭은 3-body abrasive wear 상황에서 지르콘 입자들이 기지로부터의 분리와 재합입으로 거듭되는 일련의 현상을 일으키기 때문으로 사료된다. 이러한 현상은 저온저속에서 마찰시험을 시행한 직후 마찰재의 마찰표면에서도 관찰할 수 있다(Fig. 4). 그림에서 나타난 바와 같이 ZR1의 경우에는 마찰계면에 기지에서 분리된 작은 지르콘 입자들을 관찰할 수 있으며 ZR140의 경우에는 마찰재 기지에 지르콘입자가 분리되지 않은 상태로 입자표면이 상대재에 의해 고르게 마모되는 현상을 보여주고 있다.

3-2. 입자의 크기에 따른 마찰표면 분석 및 마모량 평가

Fig. 5는 마모시험이 끝난 후의 로터의 마모표면을 주사전자현미경(SEM)으로 관찰한 사진이다. 표면에서 밝은 부분은 마모로 인한 요철 중 흠 부분을 나타낸다. 이는 시편에서 방출되는 secondary electron의 양이 많음을 의미하며 따라서 밝게 선으로 나타난 부분은 회주철의 기지가 외부에 노출되었음을 의미한다[7]. 따라서 Fig. 5의 (a)와 (b)에서 나타난 바와 같이 지르콘 입자의 크기가 작은 ZR1이나 ZR6를 연마제로 사용한 경우에는 대면공격성이 적어 로터표면에 비교적 요철이 적게 나타났으며 또한 로터표면에 형성된 전이

막이 전자를 차단하여 어둡게 나타내고 있다. 반면에 입자의 크기가 큰 연마제를 사용한 경우에는 주사전자현미경 사진에 나타난 바와 같이 (Fig. 5(c), (d)) 굵고 밝은 선들을 다량 관찰할 수 있으며 이는 마찰재에서 전이된 마찰막이 유지되지 못할 정도로 심하게 로터표면이 연삭되어 나타난 현상으로 사료된다[8]. 이러한 현상은 연마제로 사용된 지르콘이 입자의 크기에 따라 마찰재와의 결합강도가 변함으로써 나타난 현상으로 사료된다. 일반적으로 마찰재는 페놀수지를 결합제로 사용하며 강도와 내마모성을 증가시키기 위해 아라미드 펄프, 세라믹섬유 등 다양한 원료를 혼합하여 [3,5,9] 열성형하므로 지르콘 입자가 작은 경우 미끄럼 시험 중에 분리될 확률이 커지게 되어 3-body abrasive wear 형태의 마찰기구를 따르게 된다. 그러므로 마찰재에 입자가 작은 연마제를 사용하는 경우에는 마찰열에 따른 페놀수지의 열분해에 의해 지르콘 입자가 마찰재에서 분리되어 미끄럼 중에 구름과 연삭을 동시에 나타내게 된 것으로 생각된다. 일반적으로 3-body abrasive wear상태에서는 마찰계면에서 입자가 구름과 연삭을 동시에 나타나며 대부분의 입자가 구름에 사용되고 로터의 연삭에는 일부만이 작용하는 것으로 알려져 있다[10-12]. 따라서 Fig. 5에 나타난 바와 같이 작은 연마제 입자를 사용한 경우 로터에 대한 대면공

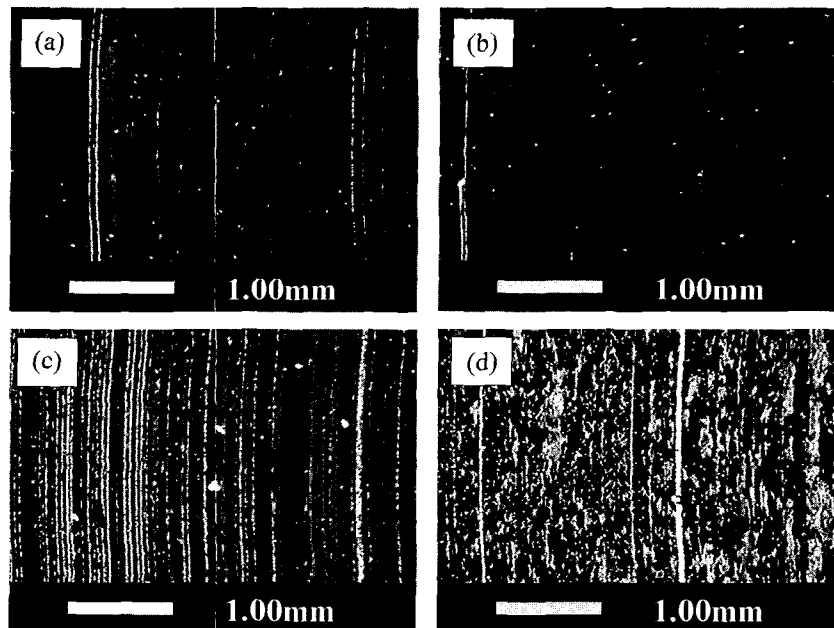


Fig. 5. Worn surfaces of rotor after wear test with friction materials (a) ZR1, (b) ZR6, (c) ZR75, and (d) ZR140.

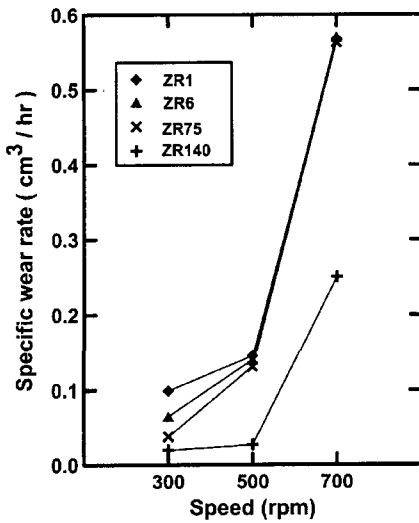


Fig. 6. Specific wear rate of brake pads as a function of velocity at load of 5 kgf/cm² (100 rpm = 47.6 cm/sec).

격성이 적게 나타났다.

지르콘 입자의 크기에 따른 거동은 마찰재 및 로터의 마모량에도 큰 영향을 나타내었다. 본 실험에서는 마찰재의 마모속도를 평가하기 위해 일정압력(0.5 MPa)에서 속도 변화에 따른 마찰재의 두께변화를 측정하였다. Fig. 6은 1000초 동안 연속적으로 마모시험을 시행한 결과이다. 로터의 회전속도가 증가하면 주행거리의 증가로 마모율은 증가하였으며, 500 rpm 이상의 속도에서는 ZR140을 제외한 나머지 시편의 마모량 변화가 거의 일정하였다. 이러한 현상은 본 실험에서 사용한 지르콘이 표기된 평균크기 보다 미세한 입자들을 함유하고 있으며(Fig. 1(b), (c)) 또한 장시간의 마모시험 진행과정에서 지르콘 입자끼리의 충돌로 미세한 입자로 변화되어 일어난 것으로 사료된다.

결론적으로 패드의 마모율은 지르콘의 크기가 증가할수록 감소하는 경향을 보여 ZR1 마찰재가 가장 높은 마모율을 나타낸 반면에 로터의 마모율은 패드의 마모율과 반대의 경향을 나타내어 ZR140 마찰재를 사용한 경우 가장 심한 로터마모를 보여주었다(Fig. 7). 이러한 현상은 마찰재 및 로터의 마모에 연마제의 크기가 결정적인 역할을 할 수 있음을 보여 주는 결과다. 특히 작은 연마제 입자를 사용하였을 때 나타난 마찰재의 마모량 증가는 연마제 입자와 다른 원료와의 결합력과 직접적인 관계가 있음을 시사하는 매우 흥미

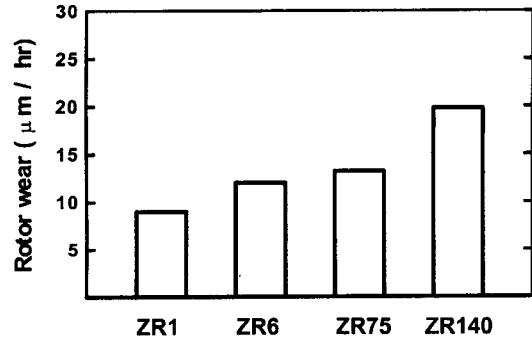


Fig. 7. Wear rate of the rotor after friction tests.

로운 결과이며 이에 따른 구체적인 마모기구에 대한 미시적 연구가 본 연구실에서 현재 체계적으로 진행되고 있다.

4. 결 론

자동차용 마찰재에 연마제로 사용된 지르콘(ZrSiO₄) 입자의 크기에 따른 마찰특성을 분석한 결과를 아래와 같이 요약하였다.

1. 입자의 크기가 작은 지르콘을 마찰재에 사용한 경우, 마찰이 진행되면서 상대재와의 접촉면적 증가로 인하여 급속한 마찰계수의 증가를 나타내었으며 기지에서 분리된 입자들의 거동으로 인하여 진폭의 증가를 초래하였다.
2. 미세한 지르콘 입자를 사용한 마찰재들은 로터표면에 균일한 마찰막을 형성하였으나 마찰재 쪽의 마찰 표면에는 마찰막이 형성되지 않았으며 고온에서의 fade 현상을 나타내었다.
3. 입자의 크기가 큰 지르콘을 사용한 마찰재의 경우에는 지르콘 입자가 기지에 유지된 상태에서 마찰현상이 일어나 비교적 안정된 마찰계수의 거동을 나타내었으며 이로 인하여 마찰재의 마모는 최소화 할 수 있었으나 대면공격성이 증가하여 로터 마모량의 증가를 초래하였다.

위의 결과로부터 마찰재와 로터에 대한 공격성을 줄이며, 마찰계수의 안정성을 높이기 위해서는 크기가 다른 지르콘들을 혼합한 실험에 대한 고찰이 필요하며 또한 작은 지르콘 입자가 페놀수지에 강하게 결합되도록 지르콘 입자에 전처리를 하거나 변성된 페놀수지를 사용하여 결합력을 강화함으로써 마찰 및 마모특성을 향상시키기 위한 실험이 요구된다.

후 기

본 연구는 2001년도 고려대학교 특별연구비에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌

1. Jang, H., Kim, S. J., "The Effects of Antimony Trisulfide (Sb_2S_3) and Zirconium Silicate ($ZrSiO_4$) in the Automotive Brake Friction Material on Friction Characteristics," *Wear*, Vol.239, pp.229-236, 2000.
2. Jang, H., Lee, J. J., Kim, S. J., Jung, K. Y., "The Effect of Solid Lubricants on Friction Characteristics," SAE Technical Paper 982235, 1998.
3. Jacko, M. G., Rhee, S. K., "Brake Linings and Clutch Facings," *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, 4th ed., Vol.4, pp. 523-536, 1992.
4. Gahr, K.H. Zum, "Classification of Wear Processes and Grooving wear," in "Microstructure and wear of materials," Tribology Series 10, Elsevier, Amsterdam, 1987.
5. Kim, S. J., Cho, M. H., Lim, D. -S., Jang, H., "Synergistic effects of aramid pulp and potassium titanate whiskers in the automotive friction materials," *Wear*, Vol.251, pp.1484-1491, 2001.
6. Jang, H., Lee, J. S., Fash, J. W., "Compositional Effects of the Brake Friction Material on Creep Groan Phenomena," *Wear*, Vol.251, pp.1477-1483, 2001.
7. Goldstein, J. I., Yakowitz, H., "Practical Scanning Electron Microscopy," Plenum Press, New York, 1977.
8. Dwyer-Joyce, R. S., Sayles, R. S., Ioannides, E., "An investigation into the mechanisms of closed three-body abrasive wear," *Wear*, Vol.175, pp.133-142, 1994.
9. Handa, Y., Kato, T., "Effects of Cu powder, $BaSO_4$ and Cashew Dust on the Wear and Friction Characteristics of Automotive Brake Pads," *Tribology Transaction*, Vol.39, pp.346-353, 1996.
10. Rabinowicz, E., "Friction and Wear of Materials," John Wiley & Sons, New York, 1995.
11. Verspui, M. A., De With, G., Buijs, M., Van der Varst, P. G. Th., "Bed thickness and particle size distribution in three-body abrasion," *Wear*, Vol.188, pp.102-107, 1995.
12. Fang, L., Kong, X. L., Su, J. Y., Zhou, Q. D., "Movement Patterns of Abrasive Particles in Three-body Abrasion," *Wear*, Vol.162-164, pp.782-789, 1993.