

자동차 제동특성에 미치는 연마제의 영향에 관한 연구

홍영석 • 장 호

고려대학교 공과대학 재료금속공학부

The Effect of Abrasive particles on Brake Performance

Young-Suk Hong • Ho Jang

Division of Materials Science and Engineering, Korea University

Abstract – Friction properties of automotive brake pads containing different types of abrasives were investigated. Five different abrasives, including α -quartz, magnesia, magnetite, alumina, zircon, were employed in this investigation and size effects of the abrasives on friction characteristics were also studied using 1, 50, 140 μ m size zircon. Experimental results showed that the hardness and size of these abrasive particles were strongly related to friction behaviors and wear mechanisms. Harder and smaller abrasives showed higher friction coefficient and more wear. The surfaces of friction materials with different sizes of abrasives showed that two different modes of abrasion (two-body and three-body abrasion) appeared during sliding. Considering the above results, abrasive materials were thought to destroy transfer film and the extent of the destruction depends on the types and sizes of abrasive particles. A mechanism of the wear mode transition (two-body to three body abrasive motion) was suggested considering the binding energy and friction energy in terms of abrasive particle size.

Key words – abrasive wear, size effect, hardness effect, transfer film, two-body abrasion, three-body abrasion

1. 서 론

자동차용 브레이크 마찰재에 사용되는 연마제 (abrasives)에는 우수한 고온강도, 낮은 열팽창률, 화학적 안정성 등을 지니고 있는 산화물 (oxide)이나 규산화물(silicate)이 사용되고 있다 [1]. 주로 이러한 연마제는 제동거리를 단축시키며, 유기물질의 열분해에 의한 마찰계수감소 (brake fading)를 억제 시키는 기능적 특성을 지니고 있다[2]. 현재 자동차용 연마제로 가장 많이 사용되고 있는 $ZrSiO_4$, Al_2O_3 , SiO_2 , MgO 등은 마찰표면의 윤활막 (transfer film)을 파괴시켜 마모율 증가와 제동시 토크 진폭의 증가

(judder)를 발생시키는 것으로 밝혀져 있으므로 이들 연마제의 종류별, 크기별 마찰특성에 대한 연구가 절실히 요구되는 실정이다.

이러한 세라믹 재료들의 마찰행태는 주로 경도, 파괴강도, 크기 등의 물리적 특성과 온도, 압력, 습도와 같은 환경적 특성에 크게 의존한다. 특히, 연마제의 종류에 따라 각기 다른 대면 공격성 (aggressiveness)와 마멸성 (abrasiveness)을 나타내고 있으며, 또한, 결합제 (binder)와 강화섬유 (reinforcing fiber)와 같은 기지물질 (matrix)과의 상호작용에 의해 동일한 연마제라도 크기와 형상에 따라 고체 윤활제의 윤활막 형성에 큰 영향을 미치게 된다[3].

Table 1. Formulations of the friction materials studied in this work. (Vol.%)

Classification	Vol%	SI	MG	FE	Al	Z1	Z50	Z140
Abrasive	5	α -quartz (10 μ m)	MgO (1 μ m)	Fe ₃ O ₄ (<1 μ m)	Al ₂ O ₃ (200 μ m)	ZrSiO ₄ (1 μ m)	ZrSiO ₄ (50 μ m)	ZrSiO ₄ (140 μ m)
Lubricant	10				Graphite			
Binder	10				Phenolic resin			
Filler	55				BaSO ₄			
Fiber	20				Aramid fiber, Potassium titanate			

이에 본 연구에서는 동일한 고체윤활제의 조건에서 5 가지의 서로 다른 연마제를 사용한 복합재료의 마찰특성을 분석하였으며, 크기와 형상이 다른 3 가지의 지르콘(ZrSiO₄)이 마찰특성에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 실험 방법

2-1. 시편제작

본 실험에서 사용된 마찰재는 기능적 특성을 고려하여 6 가지 성분으로 구성하였다(Table 1). 연마제의 종류별 특성을 분석하기 위해 α -quartz, MgO, Fe₃O₄, Al₂O₃, ZrSiO₄ 의 5 가지 재료를 선정하여 각각 동일한 부피비를 갖도록 시편을 제조하였으며, 각각의 입도는 현재 상용자동차 마찰재에서 가장 많이 사용되고 있는 것을 선택하였다. 또한, 크기에 따른 마찰특성 변화를 고찰하기 위해 1 μ m, 50 μ m, 140 μ m 의 3 가지 지르콘으로 마찰재료를 구성하였다. 각 연마제의 경도, 탄성계수, 열팽창계수 등의 물리적 특성은 Table 2 에 나타내었다.

연마제 입자의 형상과 크기분포는 이미지 분석기와 Escan-4000 (BMI Plus™) 프로그램을 이

용하여 측정하였다.

마찰재의 제작은 예비성형, 본성형, 열처리 과정으로 진행되었으며, 원료의 혼합상태 및 균일한 열처리를 확인하기 위해 경도 시험기 (Akashi™, ARK-600)를 이용하여 마찰재의 경도를 측정된 결과 로크웰 경도는 80 \pm 7 HR_S 를 나타내고 있었다.

2-2. 마찰마멸시험

실험은 Pad-on-disk type 의 정속 마찰시험기를 이용하여, 1 단계로 30°C 의 IBT(initial braking temperature)에서 속도와 압력 변화에 따른 저온 끌기시험(low temp. drag test), 2 단계로 200°C 의 IBT(initial braking temperature)에서 압력에 따른 고온 끌기시험(high temp. drag test)의 순서로 진행하였다.

측정된 모든 자료는 A/D converter 를 통해 디지털 신호로서 100Hz 속도로 자료를 저장하였으며, 마찰시험기에 대한 자세한 내용은 이미 논문에 게재된 바 있으므로 생략하였다[4]. 모든 마찰실험은 마찰재와 로터간의 균일한 접촉이 되도록 leveling 과 burnishing 작업을 시행한 후 실시하였다.

Table 2. Physical properties of ceramic abrasive particles

Properties	Ceramic material				
	α -quartz	MgO	Fe ₃ O ₄	Al ₂ O ₃	ZrSiO ₄
Specific gravity (g cm ⁻³)	2.65	3.6	4.9	3.97	4.68
Young's modulus (Gpa)	235	247	210	378	230
Mohs hardness	7.0	5.5	6.0	9.0	7.2
Thermal expansion coeff. (10 ⁻⁶ k ⁻¹)	3.8	13.5	12.9	8.8	4.5
Thermal conductivity (cal cm ⁻¹ s ⁻¹ °C ⁻¹)	0.015	0.1	0.17	0.08	0.075

저온과 상온에서의 끌기시험(low or high temperature drag test)의 경우는 3분간 연속적으로 시행하여 시간, 온도, 압력, 회전속도의 변화에 따른 마찰계수의 변화를 고찰하도록 하였다. 이때, 조건에 따른 마찰계수의 안정도는 윤활막의 형성 정도를 판단하는 기준이 되며, 연마제의 기능이 커지면 윤활막이 파괴되어 마찰계수의 진폭이 증가하는 경향이 된다[5].

끌기시험 이후에 마찰표면분석(surface analysis)을 통해 브레이크 패드와 상대재인 로터의 표면을 SEM 과 광학현미경으로 관찰하였다. 이러한 표면분석 실험의 목적은 마찰제와 로터 사이에서 연마제의 기능과 메커니즘을 분석하기 위한 것이었다.

III. 실험결과 및 고찰

3-1. 연마제의 종류에 대한 평가

마찰실험을 통하여 얻은 마찰계수값의 변화를 Fig. 1 에 도시하였다. 그림에서 점선은 연마제를 첨가하지 않은 시편의 마찰계수를 도시한 기준선이며, 실선은 각 연마제의 제동조건에 따른 평균마찰계수값의 분포를 나타내고 있다.

전체적으로 볼 때 연마제의 경도값이 클수록 마찰계수값의 크기가 증가한 것을 확인할 수 있었다. 이는 연마입자의 압점깊이(indentation

depth) 증가로 인한 것으로 판단된다[6].

Fig. 2 에서 알루미나를 연마제로 사용한 AL 시편의 경우, 가장 높은 마찰력과 함께 시간경과에 따른 심한 마찰계수 진폭을 확인할 수 있었으며, 이는 알루미나 입자의 높은 마찰력으로 인한 기계적 공진현상 현상에 의한 것으로 사료된다.

일반적으로 마찰재 내에서 연마제의 역할은 마찰력의 증가와 함께 다양한 환경변화에도 안정된 제동능력을 발휘할 수 있도록 열분해된 마찰막의 일부를 제거하여 마찰특성을 유지하는 것이다. 하지만, AL 시편에서처럼 지나친 연마제의 특성은 윤활제의 기능을 감소시키고, 마찰 표면을 크게 손상시킨다. 이는 마찰계수의 진폭을 증가시켜 자동차의 불안정한 제동성능을 나타내게 된다[7].

그림 Fig. 3 은 마찰마멸시험후 시편의 표면상태를 이미지분석기로 관찰한 사진이며, 마찰계수가 높은 AL, SI 시편의 표면은 박리(scraping) 현상이 일어난 것을 확인하였다. 이는 연마제의 기능이 강화되면, 높은 마찰력으로 인한 온도 증가와 대면공격성의 증가로 불균일한 마찰막을 나타나게 됨을 알 수 있다. 반면, 마찰력이 비교적 낮은 MG, FE 시편의 경우, 낮은 경도로 인하여 압점깊이가 적어지므로써 낮은 마찰력과 비교적 균질한 마찰막을 나타내었다.

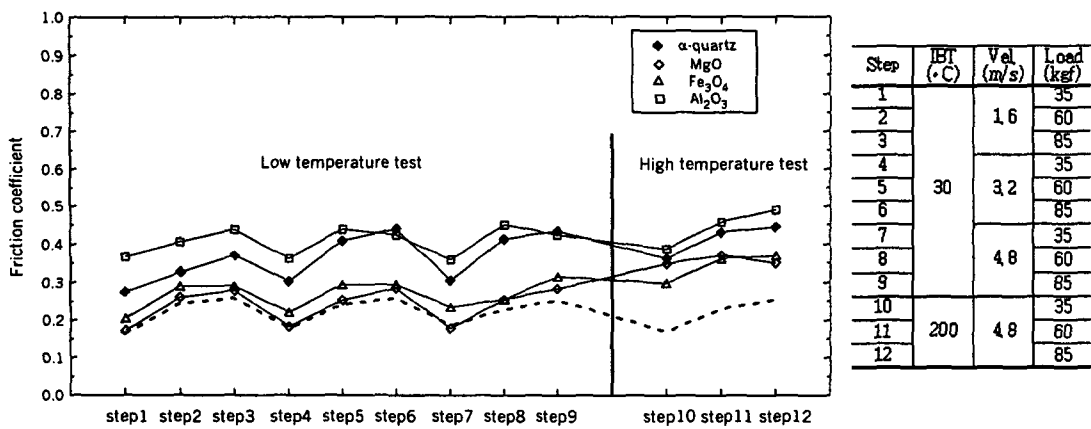


Fig. 1. The change of average friction coefficient of friction materials with different types of abrasive particles at various braking conditions

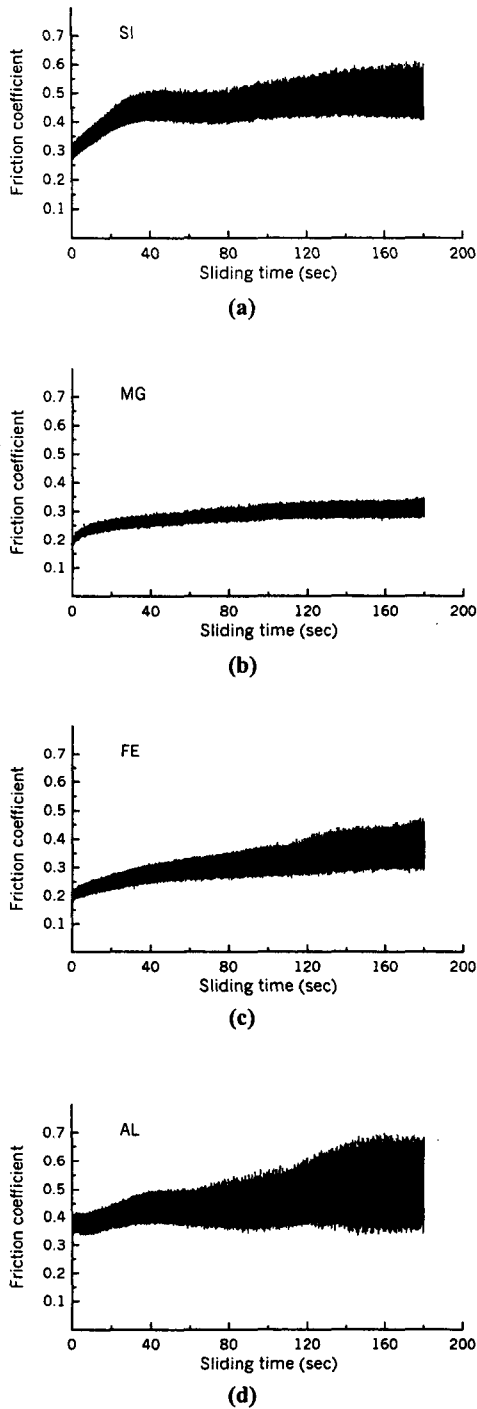


Fig. 2. The change of friction coefficient of different friction materials during sliding.

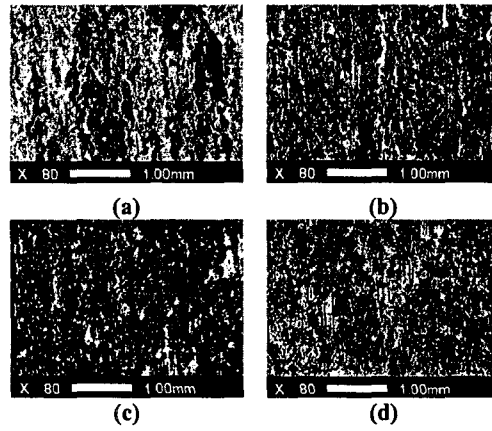


Fig. 3. Worn surface of friction materials (a) SI, (b) MG, (c) FE, (d) AL after sliding procedure.

3-2. 연마제의 크기에 대한 평가

연마제의 마찰거동은 크게 구름마찰(rolling friction)에 의한 3-body abrasive wear 와 끌기마찰(grooving friction)에 의한 2-body abrasive wear 으로 구분될 수 있으며, 주로 각 입자에 가해지는 하중과 기지(matrix)와의 결합력에 의해 결정된다[8].

Fig. 4 는 연마제로 지르콘을 사용한 경우, 크기분포가 마찰특성에 미치는 결과를 도시한 그림이다. 지르콘 입자의 크기가 감소할수록 마찰계수의 증가는 크게 나타났다. 이는 마찰재 내의 다른 기지조직(matrix)과의 낮은 결합력으로 인하여 표면에 유착된 지르콘 입자의 수가 증가하였음을 보여주며, 200°C 의 고온실험에서 이러한 사실은 더욱 두드러진다. 또한, Fig. 5 와 Fig. 6 에서 마찰시험 이후의 마찰재와 상대재인 로터의 표면분석은 이러한 사실을 뒷받침해 준다. 즉, 입도가 작은 Z1 시편의 경우 three-body abrasive wear 메커니즘으로 지르콘 입자가 기지로부터 쉽게 떨어져 나와 마찰재 표면을 심하게 손상시켰으며, 반면 상대재인 로터에 대한 대면 공격성(aggressiveness)은 크게 나타나지 않았다.

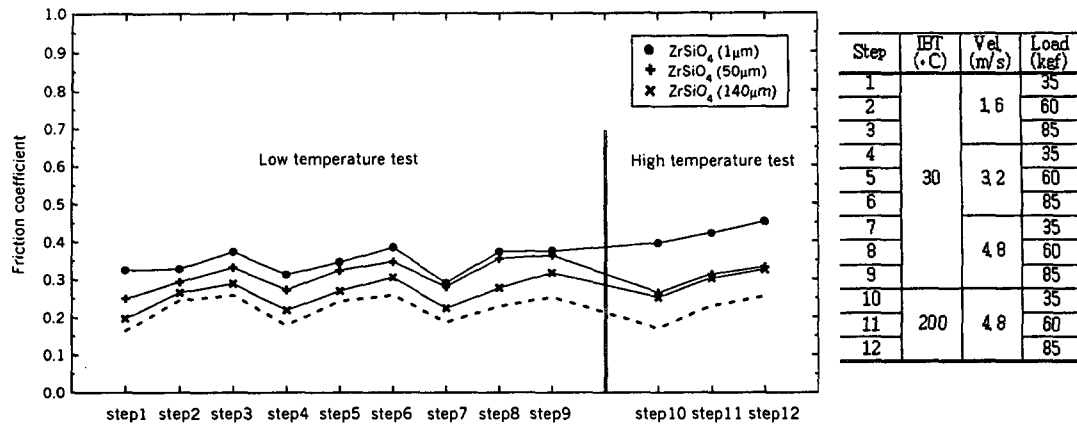


Fig. 4. The change of average friction coefficient of friction materials with different sizes of zircon at various braking conditions.

연마제의 크기가 증가할수록 이와는 상반된 결과를 보여주었으며, 특히 Z140 시편은 two-body abrasive wear 메카니즘에 의하여 마찰이 진행되었음을 확인할 수 있었다. Fig. 5 에서 140µm 의 지르콘을 사용한 Z140 의 표면상태는

비교적 균일하였으나, Fig. 6 에 나타난 바와 같이 로터의 손상이 매우 심하게 나타났다[9]. 이런 현상은 입도가 큰 지르콘 입자로 인하여 상대재인 로터에 심각한 연삭마모(abrasive wear)가 유발된 것으로 사료된다.

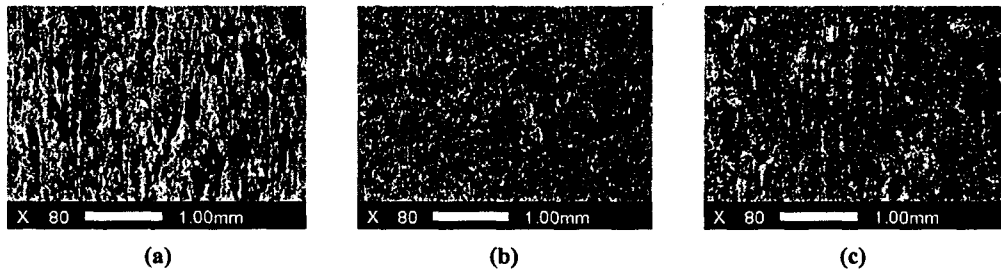


Fig. 5. Worn surface of friction materials with zircon (a) 1µm, (b) 50µm, (c) 140µm after sliding procedure.

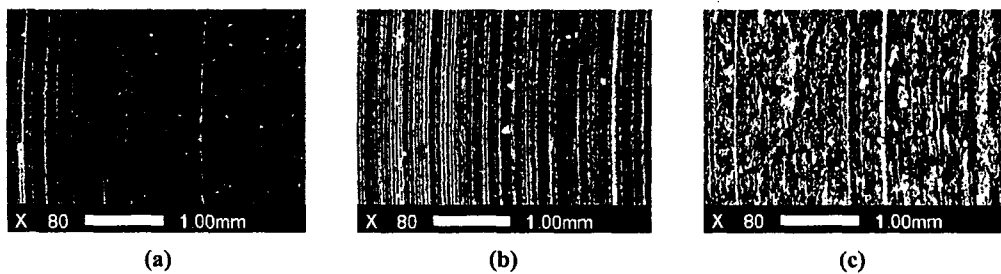


Fig. 6. Worn surface of rotors with zircon (a) 1µm, (b) 50µm, (c) 140µm after sliding procedure.

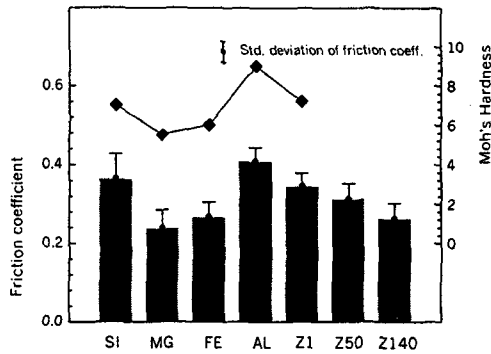


Fig. 7. Average friction coefficient of friction material with different types and size abrasive particles

결론적으로 미세한 지르콘을 연마제로 사용한 경우, 마찰력을 증가시키지만, 균일한 윤활막 형성을 방해함으로써 마찰계수의 진폭을 가중시킴을 확인할 수 있었다. 이는 연마제가 scratch 나 홈(groove)을 만들면서 표면의 윤활성분을 외부로 이동시키는 현상으로 설명될 수 있다[9].

Fig. 7 은 연마제의 종류 및 크기변화에 따른 마찰계수의 변화를 종합한 것이다. 요약하면, 연마제의 경도증가에 따라 압점깊이(indentation depth)가 증가하여 마찰계수의 증가가 발생하였으며, 연마제의 크기감소에 따라 마찰표면에서 입자의 수가 증가함으로 마찰계수가 증가하였다.

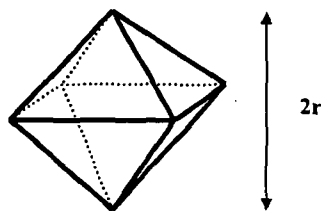


Fig. 8. The octahedron shape of abrasive particle assumed in this paper.

IV. 연마제의 크기에 따른 Abrasion mode 변화에 대한 고찰

본 실험에서 나타난 결과를 통해 연마제의 경도와 크기에 따라 압점깊이(indentation depth)가 변화함을 확인할 수 있었다. 따라서, 이런 결과를 바탕으로 연마제의 특성에 따라 마모형태를 구분할 수 있으며, 마찰계수를 예측하는 것이 가능한 범주라고 여겨진다. 따라서, 본 연구에서는 계산의 편의를 위해 연마제의 형태를 Fig. 8 의 octahedron 구조로 가정하고 연마제의 크기 변화에 따른 마찰계수의 변화를 수치적으로 분석했다.

위에서 살펴본 바와 같이 연마제의 주요변수는 indentation depth 이며, 경도와 밀접한 관계를 갖고 있다. 일반적으로 경도가 높은 물질은 압점의 깊이가 큰 것을 알 수 있다[10]. 따라서, 같은 하중을 주었을 때, Fig. 9 처럼 경도가 큰 Al_2O_3 의 압점 깊이가 MgO 의 압점 깊이보다 크다는 사실을 예측할 수 있다. 따라서, 최고 압점깊이(maximum indentation depth)를 h 라 할 때, $h_{Al_2O_3}$ 가 h_{MgO} 보다 클 것을 예측할 수 있으며, 경도가 큰 AL 시편의 마찰계수는 항상 경도가 작은 MG 시편의 마찰계수보다 큰 값을 갖게 된다.

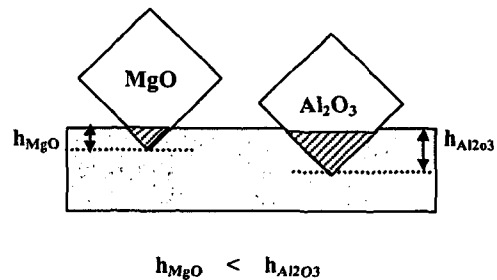


Fig. 9. The schematic diagram that shows the indentation depth (h) can effect the friction force.

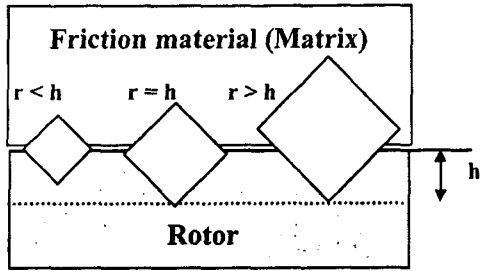


Fig. 10. The schematic diagram that shows the increase of surface area in the variation of particle radius r.

압점깊이(indentation depth)와 연마제의 크기도 밀접한 관계를 지니고 있다. Fig. 10의 개략도에서 보듯이 실제로 임계크기(h) 이상의 입자는 상대재에 더 이상 압점을 가할 수 없는 상황이 발생됨을 예상할 수 있게 된다. 이러한 현상의 주요한 요인은 마찰재내의 matrix를 구성하고 있는 물질들의 경도(Mohs hardness)가 연마입자(abrasive particle)나 상대재인 로터의 경도보다 작기 때문이다. 따라서, 연마제입자의 크기가 임계크기(h) 이상이 되면, 경도가 높은 로터 쪽보다는 경도가 낮은 Matrix 쪽으로 연마제가 눌리는 효과가 발생하게 된다.

그러므로, 마찰재의 크기를 1cm×1cm×1cm라 할 때, 마찰표면근처에 있는 연마입자의 표면적비율(area fraction of particle; A)을 연마제입자 크기(r)과 임계압점크기(h)의 관계로부터 다음과 같이 표현될 수 있다.

(i) for $r < h$

$$A_1 = [\text{No. of particle near friction surface}] \times [\text{average area per particle}]$$

$$= (r_1/1\text{cm}) N_1 \times \{ (\int_0^r 2r_1^2 dr) / r_1 \} / 1\text{cm}^2$$

$$= (2/3) r_1^3 N_1$$

(ii) for $r > h$

$$A_2 = (r_2/1\text{cm}) N_2 \times \{ (\int_0^h 2h^2 dh) / h \} / 1\text{cm}^2$$

$$= (2/3) r_2 N_2 h^2$$

[A_1, A_2 : surface proportion of abrasive particle,
 r : radius of octahedron shape particle,
 N_1, N_2 : total number of particle in 1,2 specimen,
 h : max. indentation depth of particle]

따라서, 마찰력이 마찰표면에 있는 연마제의 표면적비율(A)과 비례한다면, 연마입자 한 개당 받는 마찰력의 증가(friction force per particle; E_F)는 다음과 같이 기술할 수 있다.

(i) for $r < h$

$$E_F = [\text{const.}] \times [\text{area fraction of particle}] / [\text{No. of particle}]$$

$$= CA_1 / r_1 N_1 = C (2/3) r_1^3 N_1 / r_1 N_1$$

$$= C^* r_1^2$$

(ii) for $r > h$

$$E_F = CA_2 / r_2 N_2$$

$$= C^* h^2$$

[C, C* : numeric constant]

또한, 연마입자와 기지조직(matrix)사이의 결합력을 ϵ 라 하고, 입자의 면적과 무관한 변수라 하면

$$E_B = 2\sqrt{3} r^2 \epsilon$$

임을 알 수 있다.

따라서, 입자가 받는 마찰력(E_F)이 연마입자와 기지조직사이의 결합력(ϵ)보다 크면 입자는 마찰재로부터 떨어져나오게 된다. 하지만, 결합력이 입자가 받는 마찰력보다 크게되면, 연마입자는 마찰재내에서 떨어져 나오지 않는 현상을 예상할 수 있다.

즉, $E_F > \epsilon$ 이면, 연마입자는 마찰재로부터 떨어져 나와 마찰재와 상대재인 로터사이에서 three-body abrasion에 의하여 연마작용을 하게 되며, 상대적으로 $E_F < \epsilon$ 이면, 연마입자는 마찰재내에 고착된 상태에서 two-body abrasion을 하게된다.

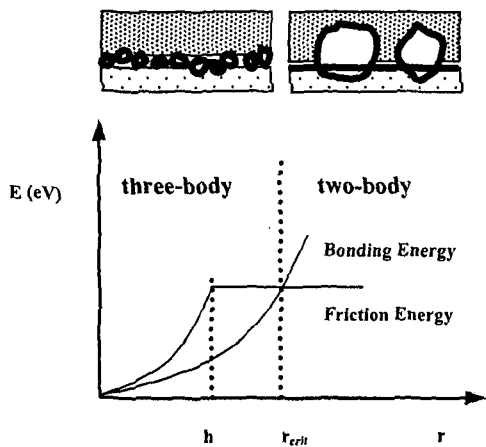


Fig. 11. The transition of abrasive wear mode in variation of particle radius r .

위의 결과를 종합하면, Fig. 11 과 같은 결과를 유추할 수 있으며, 입자의 입자크기(r_c) 이상에서 three-body abrasion 에서 two-body abrasion 으로 of 천이(transition)가 발생함을 도식적으로 증명할 수 있다. 이러한 기술은 비록 개략적이기는 하나, Ambrish 의 실험과 같이 실제로 입자크기 이상에서 시편의 마모율이 입자크기와 무관함을 보일 수 있다[11].

V. 결 론

자동차용 연마제로 사용되는 세라믹 물질인 $ZrSiO_4$, Al_2O_3 , SiO_2 , MgO , Fe_3O_4 를 사용하여 자동차 제동특성에 미치는 영향을 고찰하였다.

Fig. 10 에서 연마제의 종류에 따른 마찰계수의 변화와 마찰계수의 진폭을 도시하였으며, 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1. 연마제의 물리적 특성중에서 경도가 마찰계수와 밀접한 관계가 있음을 확인하였다. 이는 경도가 높은 연마제가 상대재에 대한 압점깊이(indentation depth)를 증가시켜 높은 마찰력을 나타낸 사실로 기인하다.

2. 연마제인 지르콘의 입도가 작을 경우에는 상대재와의 접촉면적이 증가하여 윤활제를 계면 밖으로 밀어내는 역할을 한다. 따라서, 높은 마찰력을 유지할 수 있었으나, 균일한 윤활막 형성을 저해함으로써 불안정한 마찰계수를 나타내었다.

3. 연마제인 지르콘의 입도가 증가할 경우에는 지르콘 자체의 접촉면적이 감소하여 마찰계수는 안정되지만, 큰 입자로 인해 상대재에 대한 지나친 공격성을 나타내었다.

4. 도식적인 증명으로부터 two-body abrasion 으로부터 three-body abrasion 으로의 천이가 될 수 있음을 확인하였다.

위의 결과로부터 마찰재와 로터에 대한 공격성을 줄이며, 마찰계수의 안정성을 높이기 위해서는 여러가지 연마제를 혼용하여 사용하는 것이 바람직할 것으로 사료되며, 실험적인 기법으로부터 연마제와 기저조직사이의 결합에너지를 구한다면 마찰계수의 개략적인 예측이 가능함을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 2000 년도 미국 포드자동차의 URP 기금에 의한 결과의 일부입니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

(The authors would like to appreciate the support of Ford motors company by URP).

참 고 문 헌

1. K. Kato, "Tribology of ceramics," Wear, 136, pp.117-133, 1990.
2. L. Coes, Jr. "Abrasives," Springer-Verlag, New York Wien, 1971.
3. 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

4. 김성진, 홍영석, 장 호, "자동차용 마찰재에 사용되는 페놀수지의 종류에 따른 마찰특성의 영향에 관한 연구," 제 29 회 춘계윤활학회 학술대회, pp.92-100, 1999.

5. 이정주, 장 호, "자동차 브레이크용 마찰재에 사용되는 고체 윤활제에 따른 제동특성에 관한 연구," 한국윤활학회지, 제 14 권, 제 3 호, pp.17-23, 1998.

6. 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.

7. Ho Jang, Seong Jin Kim, "The effects of antimony trisulfide and zirconium silicate in the automotive brake friction material on friction characteristics", *Wear*, 239, pp.229-236, 2000.

8. 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.

9. 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.

10. N. Axn, S. Jacobson and S. Hogmark, "Influence of hardness of the counterbody in three-body abrasive wear – an overlooked hardness effect", *Tribology International*, 27, pp.233-241, 1994.

11. Ambrish Misra and Iain Finnie, "On the size effect in abrasive and erosive wear," *Wear*, 65, pp.359-373, 1981