

자동차용 마찰재의 연마재가 마찰특성에 미치는 영향

이은주 · 조근형 · 장호[†]

고려대학교 신소재공학부

The Effect of Abrasive Particles on the Frictional Properties of Automotive Brake Friction Materials

Eun Ju Lee, Keun Hyung Cho and Ho Jang[†]

Dept. of Materials Science and Engineering, Korea University

(Received November 15, 2008; Revised December 29, 2008; Accepted December 31, 2008)

Abstract – The frictional properties of automotive brake pads with four different ceramic materials such as magnesia, hematite, alumina, and zircon were investigated. A Krauss type friction tester using gray iron disks was used to examine the friction coefficient, intensity of friction force oscillation, and the tribo-surfaces. Results showed that the friction coefficient increased as the hardness of abrasives increases. Friction oscillation was also increased with hardness of the abrasives. However, the friction materials containing less abrasive particles produced stable friction films on the sliding surface. The transition between two-body and three body abrasion during sliding also played a crucial role in destructing the friction film on the pad surface and in determining various frictional properties.

Key words – abrasives, brake, friction, friction material, wear

1. 서 론

자동차용 마찰재의 원료 중 하나인 연마재는 마찰력을 제어하고 마찰표면에서 열분해 된 마찰막을 제거하여 안정된 마찰력을 구현하는 역할을 한다[1]. 일반적으로 마찰재에는 3~8 vol. % 정도의 연마재가 혼합되게 되며, 대부분의 연마재는 산화물, 탄화물, 또는 질화물과 같은 세라믹 재료들이다. 이는 세라믹 재료들이 높은 경도, 우수한 고온강도, 낮은 열팽창율, 화학적 안정성을 지니기 때문이다[2]. 일반적으로 마찰재에 사용되는 연마재의 경도는 모스경도로 5~8를 나타내며, 이는 마찰시 상대재로 사용되는 회주철 디스크의 경도보다 높은 수치이다. 연마재의 높은 경도로 인해 마찰시 회주철 디스크는 항상 마모를 일으키게 되므로, 연마재

의 대면공격성은 제동성능에 매우 중요한 요소 중 하나이다. 연마재의 대면공격성이 지나치게 높을 경우 디스크 두께변화를 일으켜서 judder라고 불리는 떨림현상을 야기할 수 있다[3,4]. 또한, 연마재는 마찰막의 형성과 파괴에 직접적으로 영향을 미치기 때문에 계면 상태에 따라 야기되는 소음특성에도 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다[5].

연마재가 마찰재에 혼합되었을 때 나타내는 마찰현상은 연마재의 경도, 파괴강도, 크기 등 물리적 특성뿐 아니라 온도, 압력, 습도 등의 환경적 특성에도 크게 의존한다[4,6,7]. 또한, 마찰에 큰 영향을 미치는 마찰막이 마찰계면에 존재하는 경우 연마재가 수지와 강화섬유 등의 기지물질과 상호작용을 하므로 밀접한 관계가 있으므로, 연마재의 선택에 따라 상이한 마찰현상이 나타날 수 있다. 마찰재에 포함된 연마재 입자는 마찰표면에서 구름마모 혹은 미끄럼 마모 기구로 마찰현상에

[†]주저자 · 책임저자 : hojang@korea.ac.kr

기여하게 된다. 이러한 마모 기구는 마찰 환경과 입자 크기, 형상, 함량 등의 조건에 따라 상호 변환이 일어나기도 한다.

입자의 형상이 마모현상에 미치는 영향과 입자의 크기와 마모의 상관 관계는 이미 연구되어 보고된 바 있다[8,9]. 그러나, 이러한 연구는 입자 하나만을 고려한 것으로써, 마찰재와 같이 기지물질에 포함된 입자의 마찰 마모에 대한 연구는 매우 한정적이다. 따라서, 본 연구에서는 연마제가 마찰재의 원료로써 혼합되었을 때 마찰특성에 미치는 영향을 연구하기 위해 MgO, Fe₃O₄, ZrSiO₄, Al₂O₃를 넣은 마찰재를 제작한 후 마찰시험을 실시하여, 다양한 연마제가 제동시 마찰현상에 미치는 영향을 연구하였다. 연마제의 입자 크기에 따른 영향은 이미 보고한 바 있으므로[7], 본 연구에서는 유사한 입자크기를 지닌 연마제를 선정하여 입자 크기에 대한 영향을 배제하였다.

2. 실험 방법

2-1. 시편제작

연마제의 종류에 따른 마찰특성을 연구하기 위하여 각각의 연마제를 포함하는 마찰재를 제조하였다. 본 연구에 사용된 마찰재는 유기질(NAO) 마찰재 조성을 기본으로 설계되었다. 연마제를 제외한 다른 원료의 영향을 최소화 하기 위하여 연마제를 포함한 6가지 성분으로 그 구성을 단순화 하였으며, 전체 조성 중 연마제의 함량은 부피분율로 5%이다(Table 1). 본 연구에

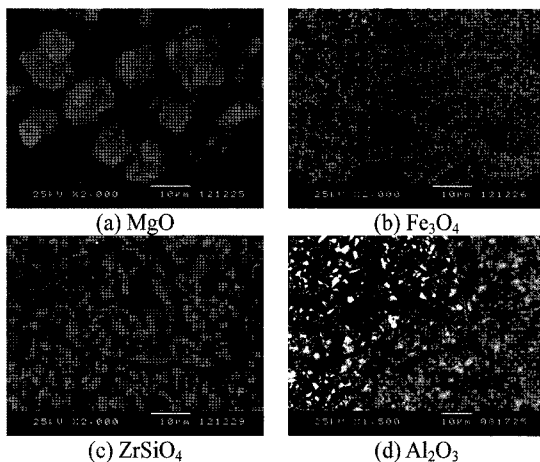


Fig. 1. Morphologies of four different abrasive particles used in this study; (a) MgO, (b) Fe₃O₄, (c) ZrSiO₄, (d) Al₂O₃.

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

	Vol. %	MG	FE	ZR	AL
Abrasive	5	MgO	Fe ₃ O ₄	ZrSiO ₄	Al ₂ O ₃
Lubricant	10	Graphite			
Binder	10	Phenolic resin			
Filler	55	BaSO ₄			
Fiber	20	Kevlar, Potassium titanate			

Table 2. Mohs hardness of abrasive particles

	MgO	Fe ₃ O ₄	ZrSiO ₄	Al ₂ O ₃
Hardness	5.5	6.0	7.2	9.0

Table 3. Detailed burnishing and test procedure

	Burnishing	Friction test
Initial brake temperature (°C)	R.T	30~200
Pressure (Mpa)	0.7	0.3, 0.5, 0.7
Speed (m/s)	3.0	1.6, 3.2, 4.8
Time (sec.)	300	60
Repeatation	4~5	-

서는 상업용 재료로 사용되는 연마제 중 그 입도가 유사한 MgO, Fe₂O₃, Al₂O₃, ZrSiO₄가 사용되었으며, 각 연마제의 비중, 경도 등의 물성을 Table 2에 나타내었다. 연마제의 입도 및 형상은 주사전자현미경과 화상분석기(Escan-4000 BMI Plus)로 분석하였으며, 연마제의 종류에 따라 1~3 mm의 입도를 나타내었다(Fig. 1). 마찰재는 예비성형, 본성형, 열처리의 공정으로 20 mm × 20 mm × 10 mm의 크기로 제작되었다. 마찰시험을 시행하기에 앞서 제조된 마찰재의 원료 혼합상태와 경화의 균일함을 확인하기 위해 경도 시험기(Akashi, ARK-600)로 경도를 측정하였다. 제조된 마찰재의 로크웰 경도는 80HR₅였으며, 각 시편마다 8%의 오차범위를 나타내었다.

2-2. 마찰시험

본 연구에서는 Krauss 방식의 정속 마찰시험기를 이용하여 시행되었으며 시험기의 개략도는 Fig. 2와 같다. 마찰시험은 상온과 고온에서의 마찰 안정성을 평가하기 위해 각각 30°C와 200°C의 초기 제동온도에서 끌기 시험을 실시하였으며, 구체적인 시험조건은 Table 3과 같다. 시험 중의 마찰력 및 압력은 PC-based DAQ

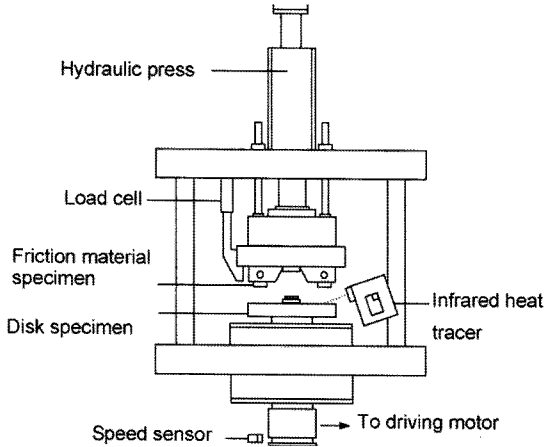


Fig. 2. A schematic of the Krauss type friction tester used in this work.

를 통해 저장하였으며, 회전 중의 디스크 온도는 적외선 온도측정기를 사용하여 측정하였다. 또한, 마찰시험 시 마찰재와 디스크 사이의 균일한 접촉이 되도록 leveling과 burnishing을 실시하였다. 마찰시험 후 마찰재의 마찰계면은 광학현미경으로 관찰하였다.

3. 결과 및 토의

3-1. 연마재 종류에 따른 마찰계수

자동차 제동시 마찰재와 디스크 사이에서 발생하는 마찰력은 초기 제동온도, 가압력, 속도 등 다양한 제동 조건에 의해 변할 수 있다. 상업용 마찰재의 경우 이러한 다양한 제동조건에서도 일정한 마찰력을 나타내는 것이 매우 중요한 항목 중 하나이다. 이는 운전자가 제동시 항상 같은 정도의 마찰력을 예상하기 때문이며, 이러한 성능을 만족시키기 위해서는 마찰재 원료들이 적합한 비율로 혼합되어야 한다. 다양한 제동 조건에서 일정한 마찰력을 나타내는 정도를 마찰 안정성이라 하며, 마찰 안정성은 각 제동조건에서의 마찰계수 분포를 측정함으로써 평가할 수 있다.

본 연구에서는 연마재의 종류에 따른 마찰 안정성을 평가하기 위하여 연마재의 종류만을 바꾼 마찰재를 제작한 후 속도와 압력을 변화시키면서 마찰시험을 실시하였다. 특히, 마찰재의 마찰력은 초기 제동온도에 매우 민감하게 변하기 때문에 초기 제동온도를 30°C부터 200°C까지 7단계로 구분하여 실험을 진행하였다. Fig. 3은 본 연구에 사용된 4가지 마찰재의 평균 마찰계수를 속도와 압력의 변화에 따라 나타낸 것이다. 같은

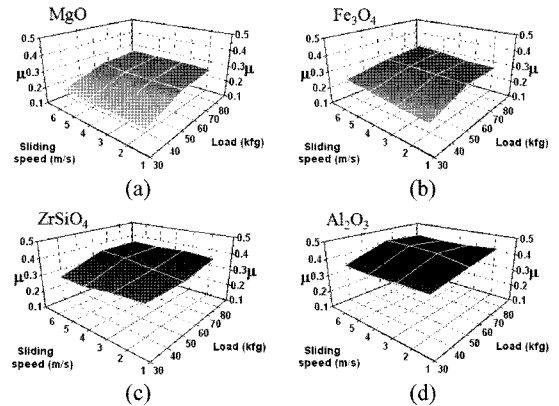


Fig. 3. Change of friction coefficient as function of sliding speed and applied load; (a) MgO, (b) Fe₃O₄, (c) ZrSiO₄, (d) Al₂O₃.

속도와 압력에서 MgO를 포함한 마찰재의 마찰계수가 가장 낮았으며, Fe₃O₄, ZrSiO₄, Al₂O₃ 순서로 마찰계수가 높았다. 또한, 본 연구에 사용된 모든 마찰재에서 마찰계수가 속도의 변화에는 크게 변하지 않았으나 압력이 증가함에 따라 크게 증가하였다. Fig. 3에 나타난 속도와 압력의 변화에 따른 마찰계수의 변화를 마찰안정도로 평가하면 Al₂O₃과 SiO₂를 사용한 마찰재가 다양한 제동조건에 더 안정적인 것으로 판단할 수 있다. 그러나, Fig. 3에 나타난 마찰계수는 각 조건에서의 마찰시험에서 측정된 마찰계수의 평균값으로써 마찰재의 제동 안정성을 판단하는 근거로 사용하는 데는 신중해야 한다.

이를 보완하기 위해 끌기 시험 동안의 마찰계수 변화를 분석하기 위해 각 시험 조건에서 측정된 마찰계수와 온도변화를 추적하여, 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 3에서 나타난 바와 같이 제동속도가 변해도 같은 제동 압력에서는 유사한 마찰계수를 나타내었으며, 끌기시험 동안의 마찰계수 변화 또한 유사한 경향성을 나타냈다. 그러나, 제동압력이 증가할 수록 마찰계수가 더 증가하였으며, 끌기 시험동안 큰 마찰계수의 증가현상이 나타났다. 특히, 0.7 MPa의 압력으로 마찰시험을 하였을 경우 큰 마찰계수 변화를 나타냈다.

이러한 마찰계수의 증가현상은 마찰 중 접촉면적의 증가에 의해 나타난 것으로 판단된다. 같은 길보기 면적을 지닌 마찰재라도 실제 마찰현상에 영향을 미치는 유효 접촉면적은 다르다. 실제로 마찰시험을 실시한 마찰재 표면을 보면 다른 부분보다 돌출된 평평한 영역을 관찰할 수 있는데, 이러한 평탄면들이 유효 접촉면

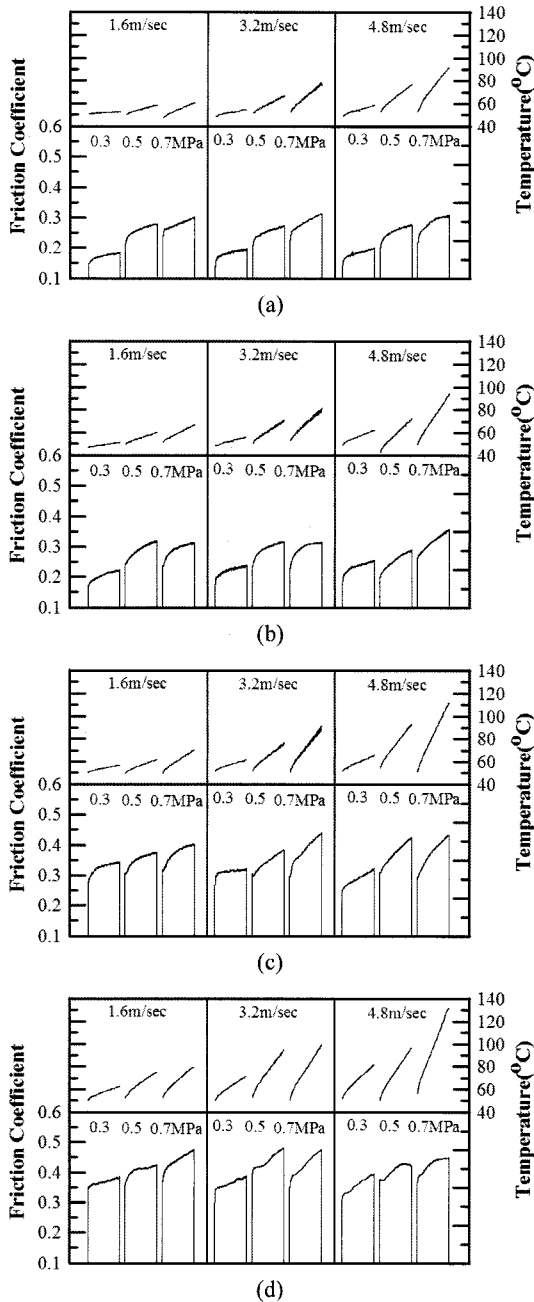


Fig. 4. The coefficient of friction and temperature as a function of pressure and speed during drag tests at 30°C for friction materials containing (a) MgO, (b) Fe₃O₄, (c) ZrSiO₄, (d) Al₂O₃.

으로 알려져 있다[10]. 또한, 이러한 평탄면들은 큰 원료 입자들에 의해 마찰 초기부터 존재하기 하고, 마찰

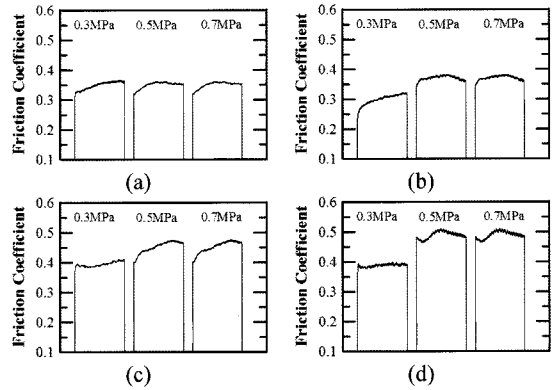


Fig. 5. The coefficient of friction at different applied load during drag tests at 200°C and 4.8 m/s; (a) MgO, (b) Fe₃O₄, (c) ZrSiO₄, (d) Al₂O₃.

시 발생하는 마모 입자들이 단단하게 뭉쳐서 2차적인 평탄면을 생성하기도 한다. 자동차 제동 시 이러한 마찰면들은 성장하기도 하고, 파괴되기도 한다. 본 연구에 사용된 연마재 입자들은 그 크기가 1~3 μm로 매우 작기 때문에 마찰시험 초기부터 평탄면을 형성하여 유효 접촉면적에 기여하기 어렵다. 때문에, 이러한 작은 원료들은 마찰시험중 마모입자에 포함되어 2차적인 평탄면을 성장시키는 데 기여할 것으로 판단된다. 이러한 작은 입자들이 2차 평탄면 형성에 기여하여 마찰계수를 향상시키는 현상은 ZrSiO₄의 입자크기가 마찰현상에 미치는 영향을 고찰한 다른 연구에서 이미 설명한 바 있다[7].

한편, 마찰계수가 상대적으로 높은 ZrSiO₄, Al₂O₃를 포함한 마찰재가 마찰계수가 상대적으로 낮은 MgO, Fe₃O₄를 넣은 마찰재보다 더 크게 마찰계수가 상승했다. 이는 ZrSiO₄, Al₂O₃를 포함한 마찰재의 경우 높은 마찰계수로 인해 마찰계면 온도가 MgO, Fe₃O₄를 넣은 마찰재보다 더 상승하여 마찰계면에 공급되어지는 에너지가 증가한 것에 기인한 것으로 판단되며, 이로 인해 2차 평탄면의 성장이 촉진된 것으로 사료된다.

초기 제동온도가 200°C인 경우 마찰시험 초기에만 마찰계수가 상승한 후 안정된 마찰계수를 나타냈다 (Fig. 5). 그러나, Al₂O₃를 포함한 마찰재의 경우 마찰시험이 시험이 진행됨에 따라 다시 마찰계수가 감소하는 현상이 나타났다. 초기 제동온도가 30°C였을 때와는 달리 마찰계수가 상승하는 현상이 초기에만 나타나는 것은 높은 마찰계면 온도로 인해 2차 평탄면 형성이 빠르게 진행되고 균일한 마찰막이 형성되면 마찰계

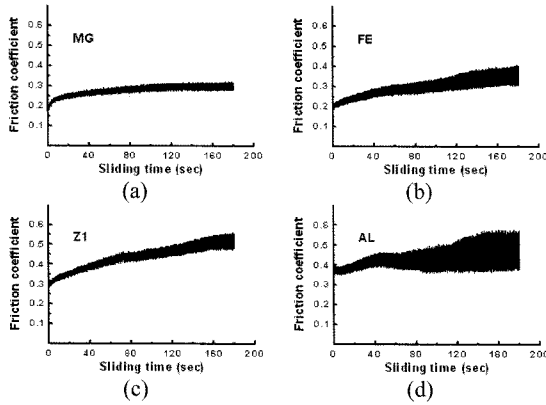


Fig. 6. The coefficient of friction during drag tests for 180 seconds at 0.7 Mpa; (a) MgO, (b) Fe₃O₄, (c) ZrSiO₄, (d) Al₂O₃.

수가 안정화 되기 때문인 것으로 판단된다. 한편 Al₂O₃를 사용한 마찰재의 경우, 마찰계수가 상승하다 다시 감소하는 현상은 다른 마찰재보다 마찰력이 강하여 연마재 입자가 기지에서 떨어져 나와 발생한 것으로 판단된다.

3-2. 고온에서의 연마재 종류에 따른 마찰 특성

경사진 내리막길에서 브레이크를 적용할 경우 마찰면에 지속적인 압력이 가해지는 환경이 오랫동안 지속되기 때문에 마찰계면에는 일반적인 제동 시 보다 더 많이 에너지를 공급받게 된다. 이러한 환경을 재현하기 위해 마찰재와 디스크의 접촉압력을 일정하게 유지하면서 디스크를 회전시키는 연속끌기 시험을 실시하였다. 끌기 시험은 4.8 m/s의 속도로 진행되었으며, 접촉압력은 0.7 Mpa로 유지하여 3분간 끌기를 지속하면서 마찰계수를 측정하였다. 끌기시험 동안 측정된 마찰계수를 나타낸 Fig. 6을 보면 MgO를 포함한 마찰재의 경우 마찰계수의 진폭이 끌기시험 동안 비교적 일정하게 유지된 반면 Fe₃O₄, ZrSiO₄, Al₂O₃를 넣은 마찰재의 경우 끌기시험 초기에는 작은 마찰계수 진폭을 나타내다가 실험이 진행될수록 마찰계수의 진폭이 증가되었다.

이러한 마찰계수의 진폭증가는 연마재의 경도에 비례하여 증가하였다. 연마재의 경도는 압력이 가해졌을 때 연마재 입자가 디스크 표면에 압입되는 정도를 결정한다. 따라서, 연마재의 경도가 높을 경우 더 깊게 디스크 표면으로 압입하게 되며, 압입되는 깊이가 깊을수록 더 높은 마찰력을 나타낸다. 그러나, 이러한 압

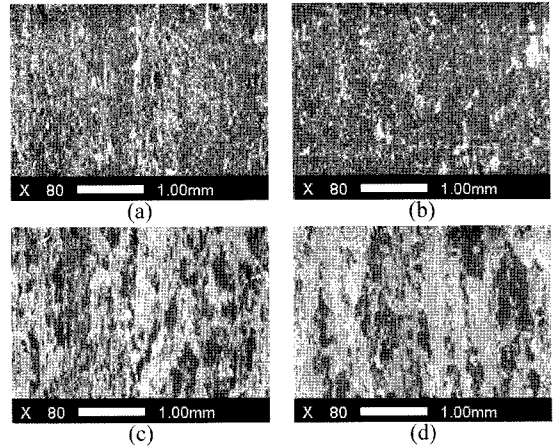


Fig. 7. The friction surface of the friction materials containing (a) MgO, (b) Fe₃O₄, (c) ZrSiO₄, (d) Al₂O₃.

접깊이로 Fig. 6에 나타낸 연마재의 종류에 따른 마찰계수의 진폭증가를 설명하는 데는 어려움이 있다. Al₂O₃를 포함한 마찰재에서 나타난 바와 같은 큰 마찰계수 진폭은 불안정한 마찰계면에서 기인하는 것이 일반적이기 때문에 끌기시험 후 마찰재의 마찰계면을 현미경을 통해 분석하였다(Fig. 7). 비교적 안정적인 마찰계수 진폭을 나타낸 MgO를 포함한 마찰재 표면은 마찰 시 형성된 윤활막이 큰 손상없이 유지된 것을 관찰할 수 있다. 그러나, 끌기 시험이 진행됨에 따라 마찰계수의 진폭이 증가하였던 Fe₃O₄, ZrSiO₄, Al₂O₃를 넣은 마찰재의 경우 윤활막이 부분적으로 박리되어 손상된 표면이 관찰되었다. 특히, 마찰계수 진폭증가가 가장 컸던 Al₂O₃를 포함한 마찰재의 경우 표면 손상이 매우 커서 윤활막이 부분적으로만 존재하는 것을 관찰할 수 있다. 일반적으로 윤활막이 균일할수록 제동시 마찰계수를 안정적으로 유지시켜 주는 것으로 알려져 있으므로, Fig. 6에서 나타낸 불안정적인 마찰계수는 윤활막의 손상여부와 관계가 있음을 알 수 있다.

마찰재 표면에 형성된 윤활막을 손상시키는 요인으로서는, 디스크가 마찰재 표면에 접촉함으로써 발생하는 마모와, 마찰시 발생하는 마모입자 혹은 마찰재로부터 빠져나온 입자들에 의한 마모를 생각할 수 있다. 끌기 시험 후 디스크 표면을 관찰하였으나, 사용된 마찰재에 따른 큰 차이는 관찰할 수 없었으며, 마모입자들의 경우 대부분 나노크기의 입자들로써 윤활막을 크게 손상시키지는 않을 것으로 판단되었다. 따라서, 마찰시 마찰재 기지로부터 떨어져 나온 입자들이 윤활막을 손상시켰을 것으로 판단되며, 특히 대면공격성이 큰 연

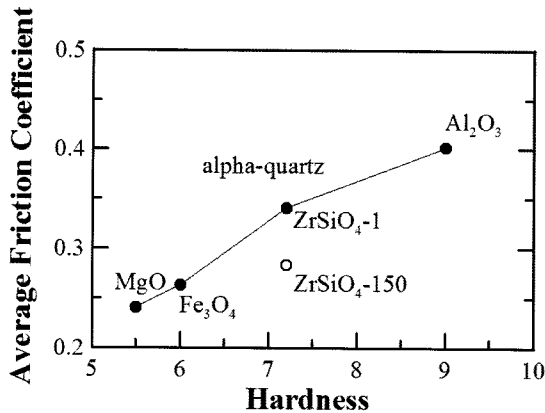


Fig. 8. The coefficient of friction as a function of Mohs hardness of the abrasive particles.

마재 입자가 주요 요인인 것으로 사료된다.

연마재가 마찰재 기지와 결합을 유지한 상태에서는 디스크 계면을 연마하여 열분해된 마찰막이나, 산화된 표면을 제거하여 마찰력을 유지하는데 기여하지만, 제동시 발생하는 마찰력이 연마재와 기지 사이의 결합력보다 클 경우 기지로부터 분리되어 구름마모를 일으키게 되며 이러한 구름 마모에 의해 마찰재 표면의 윤활막이 손상되는 것으로 판단된다. 본 연구에 사용된 연마재들과 마찰재 기지의 결합력을 측정하진 않았으나, Fig. 6과 Fig. 7의 결과를 통해 경도가 높을 경우 연마재 입자의 압입깊이와 마찰력이 증가하여 연마재 입자가 기지로부터 떨어져 나올 가능성이 증가하고, 이로 인해 마찰재 표면 손상이 커질 것으로 예상할 수 있다.

3-3. 연마재의 경도가 마찰력에 미치는 영향

마찰시험과 끌기시험의 결과에서 나타난 바와 같이 연마재의 경도가 증가할수록 마찰계수와 마찰계수의 진폭이 증가한다. 연마재의 경도와 마찰계수의 관계를 정량적으로 표현하기 위해 Fig. 8과 같이 나타내었다. Fig. 8에서 나타난 바와 같이 연마재의 경도와 마찰계수는 선형적인 경향성을 지니고 있다. 그러나, 마찰력은 입자의 경도 뿐 아니라 입자 크기도 큰 영향을 받을 것으로 예상되기 때문에 150 μm 의 입자크기를 지닌 ZrSiO₄의 마찰계수도 함께 비교하였다. 본 연구에 사용된 ZrSiO₄와 같은 경도를 지녔음에도 불구하고 입자크기가 증가하였을 경우 마찰계수가 감소함을 알 수 있다. 이러한 결과는 입자의 크기가 클 경우 입자와

기지 사이의 결합력이 증가하여 구름마모를 일으키는 입자와 기지의 분리현상이 감소되기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 결과는 연마재를 통해 마찰재의 마찰계수를 조절할 때, 연마재의 경도 뿐 아니라 연마재의 입자 크기도 함께 고려해야 함을 제시한다.

4. 결 론

마찰 시험기를 사용하여 회주철 디스크를 대상으로 마찰시험을 실시하였다. 마찰시험결과 초기제동 온도가 낮을 경우 마모입자에 의해 2차 평탄면이 성장하여 마찰계수가 증가하는 현상이 나타났으며, 경도가 높은 연마재의 경우 마찰계수 증가폭이 더 크게 나타났다. 초기 제동온도가 높을 경우 초기에만 마찰계수가 증가한 후 마찰계수가 안정화 되었다. 그러나, 경도가 높은 Al₂O₃를 포함한 마찰재는 높은 마찰계수로 인해 마찰계수가 다시 하강하는 현상이 나타났다. 끌기시험 결과 경도가 높은 연마재를 사용할 경우 마찰재의 윤활막이 손상되어 마찰계수 진폭이 증가하였다. 유사한 입자크기를 지닌 연마재를 사용할 경우 경도가 높을수록 마찰계수가 증가하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 국가지정 연구실 사업(과제번호:R0A-2007-000-10011-0)에 의해 수행 되었습 니다.

참고 문헌

- Jang, H. and Kim, S. J., "The Effect of Antimony Trisulfide and Zirconium Silicate in the Automotive Brake Friction Material on Friction Characteristics", *Wear*, Vol. 239, pp. 229-236, 2000.
- Ma, T., Martynkova, G. S., Valášková, M., Matijka, V., and Lu, Y., "Effects of ZrSiO₄ in Non-metallic Brake Friction Materials on Friction Performance", *Tribol. Int.*, Vol. 41, pp. 166-167, 2008.
- Wirth, A., Stone, K., and Whitaker, R., "A Study of the Relationship Between Transfer Film Chemistry and Friction Performance in Automotive Braking Systems", SAE Technical Paper, 1992.
- Chan, D., and Stachowiak, G. W., "Review of Automotive Brake Friction Materials," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part D-J. Automob. Eng.*, Vol. 218, pp. 57-64, 2003.

5. Cho, M. H., Cho, K. H., Kim, S. J., Kim, D. H., and Jang, H., "Effects of Ingredients on Tribological Characteristics of a Brake Lining an Experimental Case Study", *Wear*, Vol. 258, pp. 1682-1687, 2005.
6. Jang, H., Yoon, J. H., Kim, S. J., Lee, J. Y., and Park, H. D., "The Effect of the Composition and Microstructure of Gray Cast Iron on Preferential Wear During Parasitic Drag and on Intrinsic Damping Capacity," SAE technical paper, 2003-01-3313, 2003.
7. Cho, K. H., Jang, H., Hong, Y. S., Kim, S. J., and Basch, R. H., "The Size Effect of Zircon Particles on the Friction Characteristics of Brake Lining Materials", *Wear*, Vol. 264, pp. 291-297, 2008.
8. Gahlin, R. and Jacobson, S., "The Particle Size Effect in Abrasion Studied by Controlled Abrasive Surfaces", *Wear*, Vol. 224, pp. 128-135, 1999.
9. Pellegrin, D. V. D. and Stachowiak, G. W., "Simulation of Three-dimensional Abrasive Particles", *Wear*, Vol. 258, pp. 208-216, 2005.
10. Eriksson, M. and Jacobson, S., "Tribological Surfaces of Organic Brake Pads", *Tribology International*, Vol. 33, pp. 817-827, 2000.