

## 세라믹 디스크의 표면 개질에 따른 마찰 마모 특성

김기정 · 황희정 · 장호<sup>†</sup> · 김성진\* · 박홍식\*

고려대학교 신소재공학과, \*현대기아자동차

### Tribological Properties of C-SiC Brake Discs with Surface Modifications

KiJung Kim, Heejeong Hwang, Ho Jang<sup>†</sup>, SeongJin Kim\* and HongSik Park\*

Dept. of Advanced Materials Eng., Korea Univ., \*Hyundai-Kia motors. DACC Co.

(Received July 7, 2008; Revised July 25, 2008; Accepted July 30, 2008)

**Abstract** – Tribological properties of ceramic brake discs were investigated using a commercial friction material. The discs were manufactured by liquid silicon infiltration (LSI) into a C-C preform. The disc surface was modified by two different methods, producing sliding surfaces with chopped carbon fibers and carbon felt. In addition, the composition of the surface was also changed. Friction characteristics of the discs were examined using a 1/5 scale dynamometer. Results showed that the type and composition of the disc surface significantly affected the level of braking effectiveness and high temperature brake performance. The discs with felt surfaces showed higher friction levels than those with chopped fiber surfaces and SiC tended to increase the friction level while C lowered the friction coefficient. The ceramic disc was more sensitive to the deceleration rate than gray iron, showing high speed sensitivity.

**Key words** – ceramic disc, surface modification, friction, wear, brake

#### 1. 서 론

최근 탄화규소(SiC) 기지(matrix)에 탄소섬유(carbon fiber)를 강화시킨 C-SiC 복합재가 자동차 브레이크 및 클러치 재료로 주목받고 있다[1]. 이는 기존 회주철계 디스크는 비중이 크고 마모량이 많으며 고온에서의 마찰력 저하와 같은 단점을 보이는 반면 C-SiC 복합재는 세라믹 재료의 고유한 성질인, 낮은 밀도, 열안정성, 우수한 내마모성, 및 내산화성을 가지고 있어서, 자동차 경량화 및 제동특성 향상에 크게 기여할 것으로 예상되어 많은 연구가 진행되고 있으며, 최근에는 우수한 제동력이 요구되는 경주용 차량 및 고급기종의 차량에 실제로 적용되고 있다[2].

C-SiC 복합재에 관한 연구는 열안정성 및 기계적 성

질을 중심으로 다양하게 진행되어왔으며 제조공정 및 미세조직에 따라 재질특성이 상이하게 나타내는 것으로 알려져 있다[3-5]. 특히 C-SiC 복합재료는 상온 뿐 아니라 고온에서 사용되는 경우가 많아, 고온에서의 재질 특성이 많은 연구자들의 관심을 끌고 있다. 이는 고온에서 탄소섬유가 산화되어 재질특성 및 기계적 성질이 저하되어 이를 방지하기 위한 방법이 요구되기 때문이며 이를 위해 탄소섬유 코팅 등과 같은 다양한 방법이 연구되고 있다[6,7].

일반적으로 C-SiC 복합재의 제조는 화학반응을 이용한 기상함침법(Chemical Vapor Infiltration), 열간성형법(Hot pressing), 용융규소함침법(Liquid Silicon Infiltration) 등이 이용되고 있으며, 자동차용 브레이크 디스크의 제조에는 주로 용융규소함침법이 사용되고 있다. 이때 C-SiC 복합재의 기계적 성질 및 마찰특성은 탄소섬유의 길이 및 배열상태, 함침 시 생성된 탄화규소

<sup>†</sup>주저자 · 책임저자 : jojang@korea.ac.kr

(SiC) 및 반응에 참여하지 않은 규소(Si)의 상대량에 따라 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 일반적으로 자동차 브레이크 디스크에 사용되는 C-SiC 복합재의 경우에는 하중을 받는 부분에는 탄소섬유의 양을 늘리고, 실제 마찰이 발생하는 마찰면은 탄소섬유 및 탄화규소, 규소의 함량을 변화시키는 표면개질을 실시하고 있다[2]. 이는 탄소섬유의 함량이 많으면 강도는 증가하지만 마찰특성을 저하시키기 때문에 사료된다. 그러나 마찰면의 자세한 조성 및 제조방법, 그리고 그에 따른 마찰특성의 변화에 대한 연구는 제조회사의 내부자료로 취급되어 발표되지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 C-SiC 브레이크 디스크의 표면개질에 따른 마찰특성을 보다 체계적으로 고찰하기 위하여 두 가지 다른 표면개질을 이용하여 세라믹 디스크를 제조하고 이들을 대상으로 브레이크 다이내믹 미터를 이용하여 실차와 유사한 제동시험을 실시함으로써 표면에 존재하는 탄화규소, 규소, 탄소의 함량이 마찰특성에 미치는 영향을 평가하였다.

## 2. 실험 방법

### 2-1. 디스크 시편 제작

본 실험에서 사용한 C-SiC 디스크는 기상함침법을 이용하여 제조하였으며 제조공정은 Fig. 1에 나타난 바와 같다. 본 실험에서 사용한 브레이크 디스크은 vane 이 없는 solid type의 디스크 이며 강도를 향상하기 위해 마찰면과 하중부가 다른 공정을 통해 제작되었다. 하중부는 탄소섬유로 이루어진 3D 성형체(pre-form)를

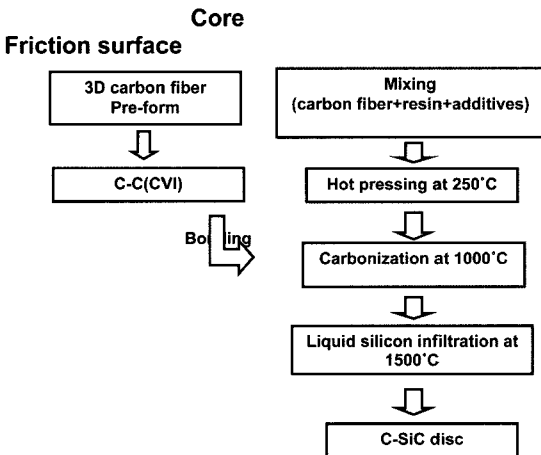


Fig. 1. A block diagram of the manufacturing process for C-SiC discs.

화학적 반응을 이용한 기상함침법(chemical vapor infiltration)을 이용하여 제작하였으며 마찰면은 탄소섬유와 페놀 수지를 혼합 (mixing)하여 250°C에서 압력을 가하여 제작하였다. 이렇게 각각 제조된 마찰면과 하중부를 접합시킨 후 1000°C에서 탄화(carbonization) 시키고 1500°C에서 용융규소와 반응시킴으로써 탄화규소를 형성시키는 공정을 거쳐 디스크를 완성하였다. 마찰면을 제작하기 위해 단섬유(chopped fiber) 및 탄소펠트(carbon felt)가 사용되었으며, 페놀수지와와 혼합비율을 다르게 하였으며, 단섬유를 이용하여 제작한 마찰면 2종(CF1, CF2)과 탄소펠트를 사용하여 제작한 마찰면 2종(FE1, FE2), 제작하여 하중부에 접합함으로써 총 4가지의 디스크를 제작하였다. 이렇게 제작된 디스크는 1/5 scale dynamometer의 규격에 맞게 직경 142 mm, 두께 8 mm로 가공되었으며 디스크의 DTV (Disc Thickness Variation)는 7 μm 이하로 가공하여 DTV가 마찰특성 미치는 영향을 최소화 하였다. 제작 후 디스크의 표면 조성은 조성의 변화에 따라 명암을 다르게 나타내는 후방산란전자상(backscattered electron image)을 분석하여 각 성분의 면적분율(area fraction)을 도출하였다.

### 2-2. 마찰 시험

본 시험에서는 1/5 scale dynamometer (Fig. 2)를 이용하여 실차의 제동과 유사한 상황에서 C-SiC디스크의 마찰특성을 평가하였다. 본 시험에서 사용한 1/5 scale dynamometer는 마찰제의 크기를 실차용 마찰제의 1/5 크기(45 mm×18 mm×7 mm)로 축소하고, 이에 따라 디스크 및 차량의 관성(inertia)을 축소시켜 실제 자동차의 제동상황을 재현할 수 있도록 구성되었다. 디스크는 CF1, CF2, FE1, FE2 (Table 1) 총 4종을 사

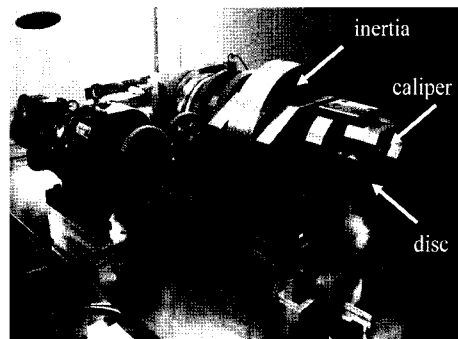


Fig. 2. A photograph of the 1/5 scale brake dynamometer used in this study.

**Table 1. Area fractions of SiC, Si, C on the sliding surfaces**

	SiC (%)	Si (%)	C (%)
CF1	45.6(±3.7)	7.9(±1.4)	46.5(±5.0)
CF2	32.8(±0.9)	11.0(±3.1)	56.2(±3.8)
FE1	36.1(±4.1)	43.6(±3.6)	20.3(±1.3)
FE2	32.7(±0.7)	51.3(±1.6)	16.0(±1.2)

용하였고 상대재인 마찰재는 현재 세라믹디스크를 사용하는 실차에 적용되고 있는 low-steel 계열의 마찰재를 사용하여 디스크만의 특성을 고찰하였다. 또한 현재 자동차 브레이크에 가장 많이 사용되고 있는 회주철 디스크를 이용하여 동일 마찰재로 시험을 병행함으로써 세라믹디스크와 마찰특성을 비교하였다.

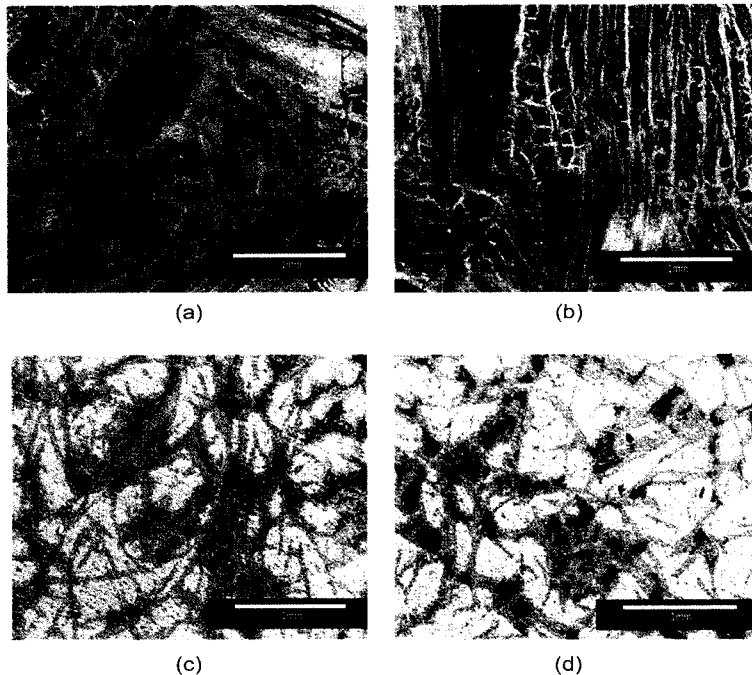
시험평가는 버니쉬(burnish)시험, 효력(effectiveness) 시험, 페이드-회복(fade and recovery test) 시험이 실시되었다. 버니쉬시험은 마찰재와 디스크간의 균일한 접촉을 통해 정상상태(steady state)의 마찰계수에 도달할 수 있도록 시행하는 시험이며, 65 km/hr의 초속도에서 0.35 g (m/s<sup>2</sup>)의 감속도로 총 200회의 제동으로 이루어진다. 효력시험은 각각 50, 100, 130 km/hr의 속도에서 0.1 g~0.8 g의 감속도로 제동하여 감속도에 따

른 마찰계수의 변화를 고찰하였으며 총 3회 실시되었다. 페이드-회복시험은 고온에서의 제동력 저하 현상(fade)과 그 이후 온도를 하강시키면서 제동력의 회복(recovery)정도를 살펴보는 시험으로 총 2회 실시되었다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3-1. 마찰면 조성 분석

본 실험을 위해 제작된 4종류의 세라믹 디스크 마찰면에 표면 조성을 분석하기 위해 후방산란전자상을 이용하였다(Fig. 3). 그림에 나타난 바와 같이 세라믹 디스크의 표면에는 탄소, 탄화 규소, 규소 성분이 존재하며 이미지에서 검은색은 탄소, 회색영역은 탄화규소, 그리고 백색 영역은 규소를 나타낸다. 화학분석을 이용하여 면적분율을 도출한 결과(Table 1) 단섬유 마찰면은 탄소함량이 매우 높고 규소함량이 매우 낮은 것에 반해 탄소펠트 마찰면은 상대적으로 규소의 함량이 높고 탄소 함량이 낮게 나타났다. 이러한 마찰면의 변화는 각 상이 가지고 있는 열적, 기계적 성질의 차이 때문에 각 디스크의 마찰특성에 직접적인 영향을 나타내게 된다. 특히 탄소 단섬유를 사용하여 제작된 CF1 및 CF2 시편들은 단섬유 다발을 실리콘과 잔류탄소가



**Fig. 3. Backscattered electron images of sliding surfaces: (a) CF1, (b) CF2, (c) FE1, and (d) FE2.**

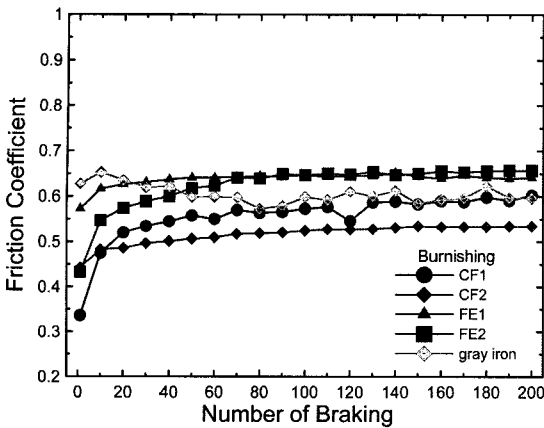


Fig. 4. Friction coefficients of 4 disc specimens during burnish tests.

들러싸고 있는 양상을 보여주고 있으며 실리콘의 양이 탄소펠트를 사용하여 제작한 디스크에 비해 현저히 적음을 보여주고 있다. 반면에 펠트를 사용하여 제작한 마찰면은 잔류 규소의 양이 잔류탄소 보다 커서 규소에 의한 마찰특성이 나타나도록 고안되었음을 나타내고 있다.

### 3-2. 고속/고온 마찰특성

다양한 조건에서의 마찰특성을 측정하기 위해 마찰재에 정상상태의 열이력을 제공하기 위해 200회의 제동으로 이루어진 버니쉬 시험을 우선 실시하였으며 그 결과를 Fig. 4에 도시하였다. 일반적으로 상용 마찰재의 마찰계수는 버니쉬 시험의 마지막 200회 마찰계수를 이용하여 마찰력의 대표값으로 통용되며 이를 기준으로 제동력을 상, 중, 하로 표현하기도 한다. 본 시험의 결과를 토대로 분석하면 본 연구에서 사용된 상용 마찰재는 제동력이 큰 마찰재로 판단된다. 동일한 마찰재를 사용하여 시험한 경우 각 디스크가 제동력에 미치는 영향을 분석하여 보면 마찰면에 단섬유가 사용된 CF1의 경우 마찰계수가 0.60수준을 보이고 있고, CF2는 0.53수준의 마찰계수를 나타내었다. 이는 Table 1에 나타낸 것과 같이 탄화규소 함량의 차이에 기인한 것으로 사료된다. 이는 높은 모오스 정도(9-10)를 나타내는 탄화규소가 강한 연마재로서 작용하여 마찰계수의 상승효과를 나타내는 것으로 판단된다. 또한 탄소펠트면을 사용한 FE1, FE2의 경우 0.65수준으로 단섬유 디스크에 비해 높은 마찰계수를 나타내었다. 단섬유 마찰면 시편과 탄소펠트 마찰면 시편의 마찰계수 수준의 차이는 표면에 존재하는 탄소 및 규소 함량에

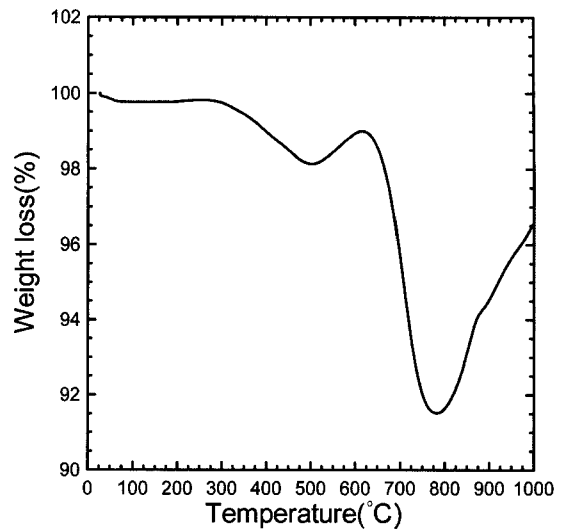


Fig. 5. Thermogravimetric analysis (TGA) of the friction material used in this study.

크게 영향을 받은 것으로 보인다. 단섬유 마찰면에 다량으로 함유되어 있는 탄소 및 탄소섬유는 마찰 시 SiC또는 Si에 비해 윤활작용을 하여 마찰계수를 감소시키는 것으로 판단된다. 특히 CF1 및 CF2 마찰면에 다량으로 사용된 탄소섬유의 경우, 흑연(graphite) 구조를 가지고 있기 때문에 마찰 시 마찰계수를 감소시키는 역할을 하는 것으로 추정된다. 이 때문에 CF1과 FE2의 경우를 비교하여보면 탄화규소의 함량은 오히려 CF1이 높음에도 불구하고 FE2의 마찰계수 수준이 더 높은 것을 알 수 있다. 한편, 버니쉬 과정에서 나타난 전체적 마찰계수의 변화추이를 보면 일반적으로 100회 이후의 제동 후에는 세라믹 디스크들의 마찰계수가 회주철 디스크에 비해 매우 안정적인 수준을 유지함을 나타내고 있다. 이는 세라믹 디스크의 마찰특성이 회주철에 비해 비교적 우수한 열적안정성을 가지고 있기 때문으로 판단된다.

페이드-회복시험은 고온에서 마찰계수가 급격히 감소하는 페이드(fade) 현상과 온도 하강 시 마찰계수의 회복 정도를 측정하는 시험이다. 일반적으로 마찰재의 페이드 현상은 결합재로 사용되는 페놀수지가 200°C 이상에서 열분해하는데 기인하는 것으로 알려져 있다[8]. 본 연구에서 사용된 마찰재의 열분해 온도를 측정하기 위해 Fig. 5에 온도에 따른 시료의 질량변화를 측정하는 TGA 곡선을 도시하였다. 그림에 나타난 바와 같이 본 연구에서 사용한 마찰재는 300°C 부근에서 질량의 변화를 보인 후 600°C 부터 급격한 무게변화가 발생

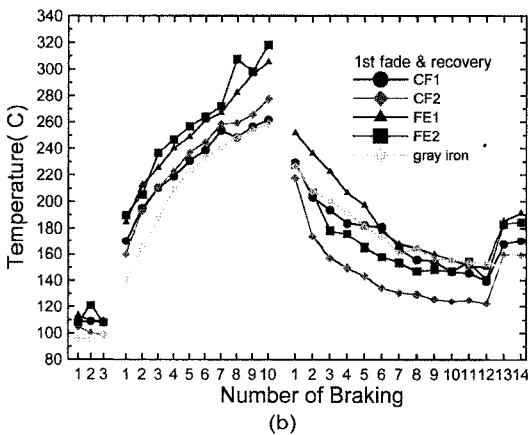
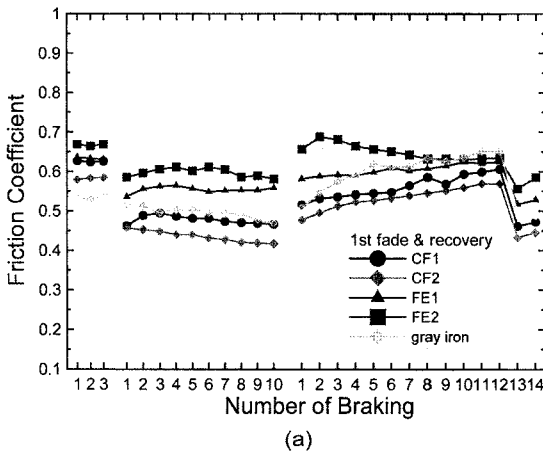


Fig. 6. Average friction coefficient (a) and maximum temperature (b) at each braking during first fade & recovery test.

함을 알 수 있다. 일반적으로 상용 마찰재에 사용되는 원료는 10가지 이상이며 유기 및 무기원료가 혼합된 상태이므로 적확히 분석을 할 수는 없으나, 결합재로 사용된 페놀릭 레진의 경우 250°C부근에서 유리현상 (glass transition)을 보이며 600°C 이상에서 열분해되어 char 형태의 탄소로 변환되는 것으로 알려져 있다.

Fig. 6에 도시한 페이드-회복 실험결과를 분석해 보면 본 실험에서 사용된 세라믹 디스크 4 시편 모두 마찰계수의 수준이 고온에서도 0.4 이하로 감소하지 않은 것을 알 수 있다. 이는 디스크의 종류에 관계없이 온도 상승에도 불구하고 마찰특성에 변화를 주고 있지 않음을 의미한다. 특히 세라믹디스크의 경우 페이드 시험 중 온도의 상승이 더 높음에도 불구하고 마찰계수가 잘 유지되고 있음은 괄목할 만한 특성으로 생각된다. 이러한 온도의 상승은 디스크의 마찰표면에 분포

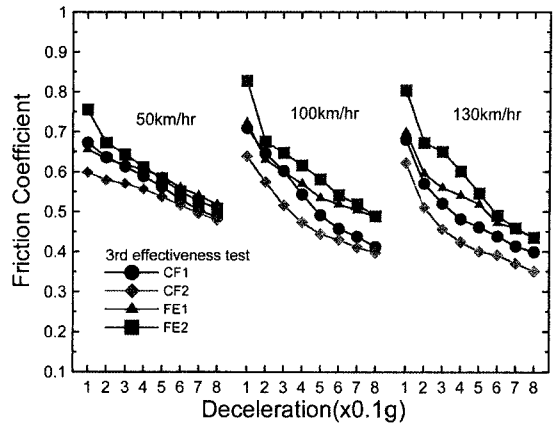
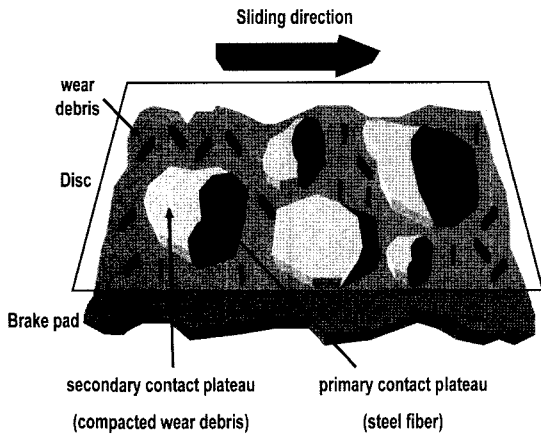


Fig. 7. Change of the friction coefficient as a function of deceleration during effectiveness tests.

되어 있는 원료들의 열전도도에 비례하리라 사료되며 열전도도가 좋은 탄소 단섬유의 함량이 많을 때(CF1, CF2) 온도가 덜 상승하고 반대로 탄화규소 및 규소의 함량이 많은 경우(FE1, FE2)에는 온도가 적게 상승함에 기인한다.

브레이크의 성능에 중요한 인자로 알려져 있는 속도 및 감속도의 변화에 따른 마찰특성 시험인 효력시험 (Effectiveness test)을 동일한 마찰재를 이용하여 실시 하였다(Fig. 7). 효력시험 결과 세라믹 디스크 4개의 시편 모두 감속도가 증가함에 따라 마찰계수가 낮아지는 현상을 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이CF1 디스크의 경우, 50 km/hr의 속도에서는 마찰계수가 0.67~0.50의 수준이었으나 100 km/hr 및 130 km/hr의 속도에서는 마찰계수가 감소하여 최저 0.4수준으로 하강하는 현상을 보이고 있다. 이러한 감속도 및 속도에 따른 마찰계수의 변화는 마찰재에 사용되는 원료의 종류 및 디스크의 표면특성에 기인하는 것으로 사료된다. 특히 속도증가에 따른 마찰계수의 감소현상은 마찰계면에서의 응착면의 감소에 기인하는 것으로 알려져 있으며 마찰재와 디스크가 미끄럼을 일으키는 계면의 특성에 의해 결정된다. 본 연구에서 사용된 4가지 디스크들은 모두 속도에 따른 효력시험에서 유사한 경향성을 나타내었으며 단지 디스크 마찰면의 조성에 따른 마찰계수에 따른 높낮이의 변화만이 관찰되었다. 이는 디스크의 표면조성은 속도에 따른 마찰특성의 변화에 크게 영향을 주지 않음을 의미한다.

그러나 모든 디스크의 경우에 전반적으로 나타난 속도에 따른 마찰계수의 변화는Eriksson 등 [9]이 분석한

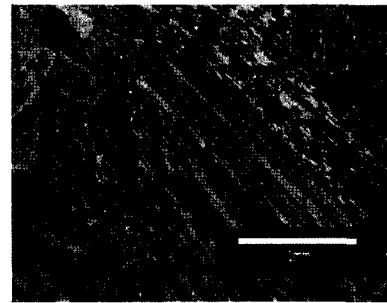


**Fig. 8. A schematic diagram of friction interface between ceramic disc and friction material.**

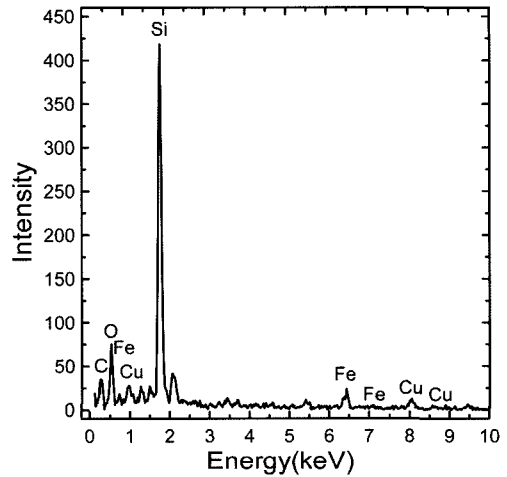
바와 같이 마찰재에 함유되어 있는 강철 섬유(steel fiber)나 연마재가 마찰시 계면에서 돌출된 초기 평탄면(primary plateau)을 형성하고 이러한 초기 평탄면 주위에 마찰재의 마모입자들이 쌓여 제 2의 평탄면(secondary plateau)이 형성하여 나타난 현상으로 판단된다. 이러한 평탄면은 마찰재의 기지(matrix)보다 높게 형성되어 실제 디스크와 마찰재간의 접촉은 이 평탄면에 의해 결정되며[9], 이 평탄면은 압력, 온도 및 속도에 따라 그 크기가 다르게 형성되며 이러한 평탄면의 형성 및 실접촉면적(real contact area)이 마찰특성에 영향을 미친다. Fig. 7에 나타난 바와 같은 감속도가 증가함에 따른 마찰계수의 저하 현상은 디스크와 마찰재간 접촉에 의해 설명될 수 있다. Fig. 8에 디스크와 마찰재 사이의 마찰계면의 모식도에 나타난 바와 같이 세라믹 디스크의 마찰계수를 증가시키는 역할을 하는 금속성분, 특히 강철섬유가 초기 평탄면을 형성하고 그 주변에 마모입자들이 쌓여 제 2 평탄면을 형성하게 되는데 고온 고압으로 갈수록 그리고 속도가 증가할수록 plateau의 크기가 작아진다[10]. 따라서 저감속에서의 마찰계수 상승은 저감속에서의 낮은 압력 때문에 평탄면의 크기가 증가되어 나타난 현상이며 초기 평탄면과 디스크간의 금속-세라믹 접촉에 의한 마찰계수 상승으로 나타난 것으로 판단된다. 그러나 고감속에서는 압력의 증가로 인한 제 2 평탄면이 감소하여 마찰계수의 감소가 나타나는 것으로 판단된다.

**3-3. 디스크 표면 분석**

마찰 시험 후 디스크 표면의 형상변화와 조성을 살



(a)



(b)

**Fig. 9. SEM image (a) of the CF1 disc after the friction tests and EDX spectrum (b) of the surface.**

펴보기 위하여 SEM/EDX을 이용하여 분석을 실시하였다. Fig. 9에 시험 후의 디스크 표면 및 에너지 분산 X선 분광기(energy dispersive x-ray spectrum)를 이용한 분석결과를 나타내었다. Fig. 9에 나타난 바와 같이 시험 후 디스크의 표면에는 철산화물과 구리산화물로 추정되는 마찰막이 형성되었으며, 이러한 성분은 마찰재로부터 전이된 것으로 판단된다. 이러한 산화물 층은 마찰재의 원료가 고온에서 산화되어 디스크표면에 형성된 것을 사료되며 마찰시 중간층의 역할을 하여 디스크의 내마모성을 향상시킬 뿐 아니라 마찰특성에도 중요한 역할을 하는 것으로 알려져있다[11]. 그러나 본 실험에서 사용된 세라믹 디스크의 경우에는 표면경도가 매우 높아서 이러한 전이막의 형성은 디스크의 마모에 큰 영향을 미치지 않고, 마찰재의 마모율을 감소시키는 역할을 하는 것으로 보인다. 또한 디스크에 존재하는 탄화규소에 의한 마찰재 마모를 방지하

는 역할을 하는 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 차세대 자동차 제동 시스템에 적용되고 있는 탄소 세라믹 브레이크의 마찰 특성에 관하여 고찰하였다. 특히, 마찰면의 조성에 따른 마찰 계수의 수준과, 속도, 압력에 따른 마찰 특성의 변화를 중점적으로 고찰하였다. 본 연구에서 도출한 결과는 다음과 같다.

1. 마찰면에 탄화규소 함량이 높을 때 높은 마찰계수를 나타내었고 탄소의 함량이 적은 탄소펠트 마찰면이 단섬유 마찰면에 비해 마찰계수가 높게 나타났다.
2. 고온에서의 마찰계수는 300 영역에서도 0.4 이상의 수준이 유지되는 안정적인 마찰특성을 나타내었다.
3. 효력 시험에서 감속도의 증가에 따라 마찰계수가 감소하는 현상을 나타내었으며 디스크의 표면조성은 감속도의 증가에 따른 효력변화에 영향에 미치지 않았다.
4. 시험 후 세라믹 디스크의 표면에 전이막이 형성되었고 이는 마찰재의 마모율을 감소시키는 역할을 하는 것으로 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 2006년도 고려대학교 교내 연구비에 따른 연구결과입니다.

#### 참고문헌

1. Krenkel, W. and Berndt, F., "C/C-SiC Composites for Space Applications and Advanced Friction Systems," *Mat. Sci. Eng. A*, Vol. 412, pp. 177-181, 2005.
2. Krenkel, W., "C/C-SiC Composites for Advanced Friction Systems," *Adv. Eng. Mater.*, Vol. 4, No. 7, 2002.
3. He, X., "Microstructure of a Carbon-fiber-reinforced Silicon-carbide Composite Produced by Precursor Pyrolysis and Hot Pressing," *Composites Science and Technology*, Vol. 61, pp. 117-123, 2001.
4. Jian, K., "Effects of Pyrolysis Processes on the Microstructures and Mechanical Properties of C/SiC Composites Using Polycarbosilane," *Mat. Sci. Eng. A*, Vol. 390, pp. 154-158, 2005.
5. Schulte-Fischedick, J., "The Morphology of Silicon Carbide in C/C-SiC Composites," *Mat. Sci. Eng. A*, Vol. 332, pp. 146-152, 2002.
6. Labruquere, S., "Enhancement of the Oxidation Resistance of Interfacial Area in C/C Composites. Part I," *J. Euro. Ceram. Soc.*, Vol. 22, pp. 1001-1009, 2002.
7. Wang, H. J., "Preparation and Oxidation Behavior of Three-dimensional Braided Carbon Fiber Coated by SiC," *Materials letters*, Vol. 59, pp. 486-490, 2005.
8. Kim, S. J. and Jang, Ho., "Friction and Wear of Friction Materials Containing Two Different Phenolic Resins Reinforced with Aramid Pulp," *Tribology International*, Vol. 33, pp. 477-484, 2000.
9. Eriksson, M. and Jacobson, S., "Tribological Surfaces of Organic Brake Pads," *Tribology International*, Vol. 33, pp. 817-827, 2000.
10. Eriksson, M., Bergman, and Jacobson, S., "On the Nature of Tribological Contact in Automotive Brakes," *Wear*, Vol. 252, pp. 26-36, 2002.
11. Godet, M., "The Third-body Approach: a Mechanical View of Wear," *Wear*, Vol. 100, pp. 437-452, 1984.