

## 마찰재에 함유된 금속섬유와 마찰 특성의 연관관계

고길주 · 조민형 · 장 호<sup>†</sup>

고려대학교 재료금속공학부

### The Effect of Metal Fibers on the Tribology of Automotive Friction Materials

Kil-Ju Ko, Min-Hyung Cho and Ho Jang<sup>†</sup>

Division of Materials Science and Engineering, Korea University

**Abstract** – Friction and wear properties of brake friction materials containing different metal fibers (Al, Cu or Steel fibers) were investigated. Based on a simple experimental formulation, friction materials with the same amount of metal fibers were tested using a pad-on-disk type friction tester. Two different materials (gray cast iron and aluminum metal matrix composite (MMC)) were used for disks rubbing against the friction materials. Results from ambient temperature tests revealed that the friction material containing Cu fibers sliding against gray cast iron disk showed a distinct negative  $\mu$ - $v$  (friction coefficient vs. sliding velocity) relation implying possible stick-slip generation at low speeds. The negative  $\mu$ - $v$  relation was not observed when the Cu-containing friction materials were rubbed against the Al-MMC counter surface. Elevated temperature tests showed that the friction level and the intensity of friction force oscillation were strongly affected by the thermal conductivity and melting temperature of metallic ingredients of the friction couple. Friction materials slid against cast iron disks exhibited higher friction coefficients than Al-MMC (metal matrix composite) disks during high temperature tests. On the other hand, high temperature test results suggested that copper fibers in the friction material improved fade resistance and that steel fibers were not compatible with Al-MMC disks showing severe material transfer and erratic friction behavior during sliding at elevated temperatures.

**Key words** – metal fibers, Al-MMC, SiC, gray cast iron, friction material.

#### 1. 서 론

브레이크용 마찰재에 사용되는 금속섬유는 비석면 마찰재 개발이 본격화되었던 1980년대부터 사용되기 시작하였으며 현재 저탄소강, 구리, 황동, 청동, 알루미늄이 주종을 이루고 있다[1]. 일반적으로 금속섬유는 마찰재의 내마모성(wear resistance), 열전도도(thermal conductivity) 및 강화성능(reinforcing property)을 향상시키기 위해 사용되며 금속섬유의 종류, 상대량, 그리고 재질특성이 마찰특성에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다[2]. 그러나, 마찰재에 사용되는 다른 원료의

경우와 마찬가지로 금속섬유를 마찰재에 사용하였을 때 나타나는 마찰특성에 관한 자세한 기술적 자료를 접하기는 매우 어렵다.

현재 가장 많이 사용되는 저탄소강섬유는 내마모와 고온 제동력의 면에서 우수한 것으로 알려져 있으나 고온에서 회주철과의 응착현상으로 인하여 로터의 마모를 가속하며 또한 제동소음의 발생빈도를 높이는 것으로 알려져 있다. 그러나, 저탄소강섬유를 사용한 마찰재는 고온 제동력 상실현상(fade) 및 제동력 회복(recovery)의 견지에서 매우 우수한 특성을 나타내고 있다.

반면에 구리 또는 구리합금 섬유는 마찰재의 열확산을 증가시켜 고온 제동력을 유지하기 위해 사용된다. 이러한 특성은 구리 또는 구리합금의 높은 열전도도가

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

마찰계면의 온도상승을 억제할 뿐 아니라 고온에서 생성된 구리산화물이 마찰계수를 증가시키기 때문으로 받아들여지고 있다. 또한 구리와 같은 연한(soft) 금속은 마찰시 상대표면에 전이막을 형성하는 경향이 있으며 이러한 경향은 고체윤활제와의 반응에 의해 더욱 가속되며 전이막의 형성에 따라 마찰계수를 약간 상승시키는 것으로 알려져 있다. 또한 구리는 저탄소강에 비해 경도가 낮으므로 로터에 대한 대면공격성을 작게 하면서 마찰계수를 조절하고자 할 때 사용되기도 한다. 알루미늄 함유는 현재 차세대 경량소재로 주목받고 있는 Al-MMC 로터용 마찰재에 주로 사용되고 있으나 그에 대한 연구결과는 찾아보기 어렵다. 회주철 로터를 사용하는 마찰재의 경우 알루미늄함유는 제동시 마찰계면에서 산화물로 변하여 로터표면에 고착된 탄화물 피막을 제거하는 역할을 하도록 사용되는 것으로 알려져 있다.

제동시 나타나는 마찰특성은 마찰재와 상대재(rotor 또는 drum) 사이의 계면에서 발생하는 현상에 의해 결정되며 따라서 제동특성에 관한 연구는 마찰재의 구성물질뿐 아니라 상대재의 재질을 고려하여 분석하여야 한다. 현재 사용되고 있는 자동차 브레이크용 로터는 대부분 회주철이 사용되고 있으며 최근에 자동차 경량화를 고려하여 회주철의 대체물질로서 알루미늄 합금(A359 또는 A356 Al alloys)을 기지로 SiC(10~50 vol.%) 입자를 첨가한 금속기지 복합재료(Al-MMC)가 개발되어 시험단계에 있다. 회주철은 비교적 우수한 열전도도, 내마모성(wear resistance), 감쇄능(damping capacity)을 나타내고 있으며 가격이 저렴하여 가장 많이 사용되고 있다. 반면에 Al-MMC는 비열이 높고, 열전도도가 매우 우수하며 주철에 비해 중량이 약 1/3이므로 차세대 자동차 브레이크용 로터 재료로서 많은 연구가 진행되어 왔다[3-5].

본 연구에서는 실험용 마찰재 1종을 선정하여 사용된 금속섬유의 종류(aluminum, copper, low carbon steel)만을 변화시켜 그에 따른 마찰특성의 변화에 관하여 고찰하였다. 또한 마찰재의 특성은 상대재에 의해 크게 의존되므로 회주철과 알루미늄기지 복합재(Al-MMC)를 이용하여 상대재 디스크를 제작하여 각각 시험하였다.

## 2. 실험 방법

본 실험에 사용된 마찰재 시편은 NAO(non-asbestos

**Table 1. The amount of raw material ingredients used for friction materials [vol.%]**

Raw materials	Content	
Metal fibers	Al fiber	15
	Cu fiber	
	Steel fiber	
Organic fiber	Aramid pulp	15
Binder	Phenolic resin	20
Solid lubricants	Graphite	7
	MoS <sub>2</sub>	4
Abrasive	ZrSiO <sub>4</sub>	4
Friction modifier	Cashew	5
Fillers	Barite	26
	Ca(OH) <sub>2</sub>	4

organic)형의 마찰재로서 강화섬유, 결합제, 연마제, 고체윤활제, 마찰조절제 및 충전재로 구성되어 있으며 제조에 사용된 원료 및 함량을 Table 1에 나타내었다. 마찰재의 제작은 계량, 혼합, 예비성형, 본성형 및 열처리의 순으로 진행되었으며 자세한 제조공정은 이미 발표된 바 있으므로 본 논문에서는 생략하였다[5]. 제작된 마찰재의 원료 혼합상태 및 열처리 상태를 확인하기 위해 Rockwell 경도기(Akashi Rockwell ARK-600)를 이용하여 마찰재의 경도분포를 측정하였으며 약 84±5 HR<sub>s</sub>(S scale)를 나타내었다. 본 연구에서는 마찰재에 사용된 금속섬유의 함량을 15 vol.%로 고정하였으며 본 실험에서 사용한 금속섬유의 형상 및 재질특성은 Table 2에 나타내었다.

본 실험에서 사용한 회주철 디스크는 상용 브레이크 로터를 용융 가공하여 제작한 것이며 알루미늄 복합재료(A356+30%SiC) 디스크는 괴(ingot) 상태의 원료를

**Table 2. Physical properties and dimension of metal fibers used in this study**

Physical properties	Al	Cu	Steel
Length [mm]	1~2.7	1.2~3	1~2
Diameter [mm]	0.1~0.05	0.05	0.04
Density [g/cm <sup>3</sup> ]	2.69	8.96	7.87
Thermal conductivity [W/mmK]	0.22	0.40	0.05
Specific heat [J/gK]	0.896	0.385	0.461
Coefficient of linear expansion [10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup> ]	2.25	17	11.7
Mohs hardness	2~2.5	2.5~3	5
Elastic modulus [kN/mm <sup>2</sup> ]	65	115	208

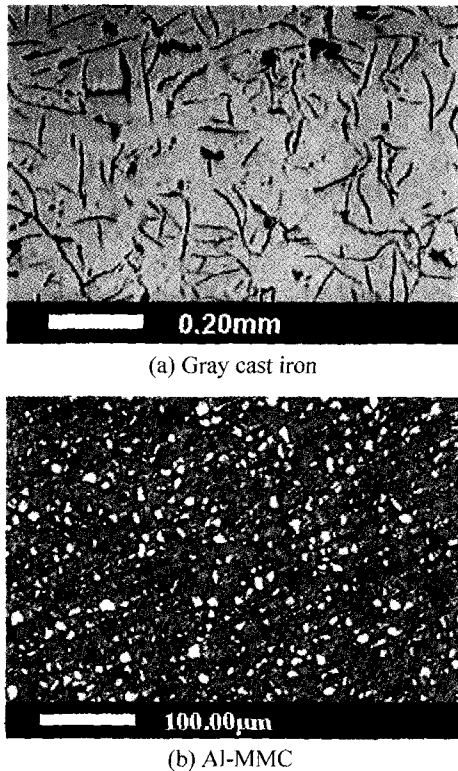


Fig. 1. Microstructures of two different disk surfaces used in this experiment. (a) Gray cast iron, (b) Al-MMC.

주물 가공하여 마찰시험기에 장착할 수 있도록 12 cm의 직경과 2.5 cm의 두께로 제작하였다. 특히, 본 실험에서 사용된 Al-MMC 디스크는 기지금속으로 A356 알루미늄합금을, 강화제로 SiC 입자(30 vol.%)를 사용하였다. Fig. 1에 본 실험에 사용된 회주철과 Al-MMC의 미세조직 사진을 나타내었다. 디스크로 사용된 회주철과 Al-MMC의 물리적 성질을 Table 3에 나타내었다.

본 실험에서는 pad-on-disk형의 정속마찰시험기를 사용하였으며 하중을 부가하기 위해 유압장치를 사용하였다. 마찰재 시편의 크기는 2 cm×2 cm×1 cm이며 2개의 동일한 마찰재 시편이 사용되었다(총 마찰면적=8 cm<sup>2</sup>). 마찰마모 시험기의 구조 및 개략도는 이미 여러 차례 발표된 바 있으므로 본 논문에서는 생략하였다[6]. 마찰마모 실험에서 측정된 모든 자료는 PC-based DAQ(LAB-PC-1200, National Instrument) 시스템을 이용하여 100 Hz의 데이터 처리속도로 저장하였다. 마찰시험은 속도, 온도, 그리고 마모량을 측정하기 위한

Table 3. Physical properties of gray cast iron and Al-MMC

	Gray cast iron	A356+30%SiC
Density [ $10^3\text{kg/m}^3$ ]	7.2	2.85
Specific heat [J/gK]	0.498	1.027
Thermal conductivity [W/mK]	47.3	148.1
Coefficient of thermal expansion (50~100°C) [ $10^{-6}\text{K}^{-1}$ ]	12.6	17.4
Hardness [ $\text{kg/mm}^2$ ]	70~90	98.4±2.4

Table 4. Friction test procedure used in this experiment

Speed sensitivity test	IBT:50°C, 0.6 MPa, 15 sec(drag) 0.9, 1.1, 1.3, 1.5, 1.9, 2.4, 2.8, 3.8 m/s
Constant interval test	IBT:30°C, 3.3 m/s, 0.9 MPa 60 sec(drag) & 20 sec(interval), 8times
Wear test	IBT:100°C, 3.3 m/s, 0.6 MPa 3 min(drag), 20 times

시험구간으로 구성되었다. 본 실험에서 실시한 마찰마모 시험의 자세한 조건은 Table 4에 나타내었다. 마찰 시험 후 마찰재의 표면형상은 광학현미경(LEICA ME6)을 이용하여 관찰하였으며, 마찰계면에서의 온도는 비접촉식 적외선 온도계(infrared heat tracer, 3M IR-16)를 사용하여 회전하는 디스크의 표면온도를 측정하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3-1. 속도의 변화에 따른 마찰계수의 변화

속도에 따른 마찰계수의 변화는 자동차 제동시 나타나는 진동 및 소음현상과 밀접한 관계를 가지고 있는 것으로 알려져 있다[7]. 일반적으로 마찰계수는 미끄럼 속도에 따라 변하며 그 변화의 크기는 미끄럼운동을 하는 두 물질의 재질특성에 의해 결정된다. 특히 속도에 따른 마찰계수의 변화가 음의 값을 보일 때 stick-slip현상에 의해 마찰력의 진동폭이 커지게 된다[8,9]. Stick-slip 현상은 정마찰계수와 동마찰계수의 차이가 큰 재료들에서 주로 나타나며 자동차의 제동시에 나타나는 소음(squeal noise), creep groan, 떨림(judder) 현상은 주로 속도에 따른 마찰계수의 변화가 큰 음의 값을 나타낼 때 더욱 심하게 나타나게 된다. 따라서 제동시의 소음 진동을 저감하기 위해서는 마찰재 또는

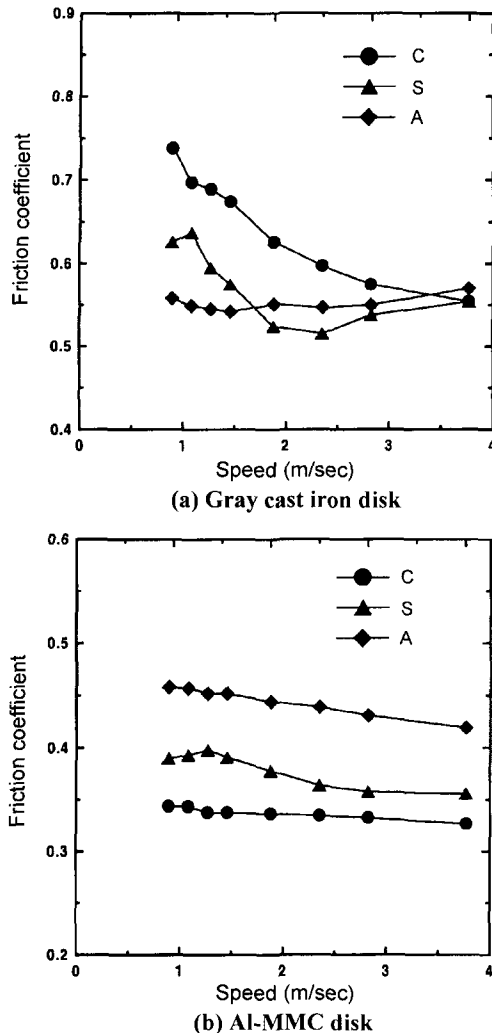


Fig. 2. The coefficient of friction as a function of sliding speed when three different friction materials containing different metal fibers were used. Two different metals ((a) Gray cast iron, (b) Al-MMC) were used as counter disks.

로터의 재질특성을 조절하여 속도에 따라 마찰계수가 변하지 않도록 재료설계를 하여야 한다. 따라서, 본 실험에서는 현재 마찰재의 제조에 사용되는 많은 원료 중 금속섬유의 종류에 따라 나타나는 마찰계수의 속도에 따른 영향을 우선 분석하였다.

회주철 디스크를 상대재로 사용하였을 때 각 마찰재의 속도에 따른 마찰계수의 변화를 Fig. 2(a)에 나타내었다. 알루미늄섬유를 사용한 시편 A의 경우는 속도와 무관하게 상대적으로 낮고 안정된 마찰계수를 나타내

었으나, 구리섬유와 저탄소강섬유를 포함한 시편 C와 시편 S는 저속에서 높은 마찰계수를 나타낸 후, 속도의 증가에 따라 마찰계수가 감소하는 경향을 나타내었다. 이러한 마찰특성은 미끄럼 중 마찰계면에서 나타나는 금속성분 간의 응착현상(adhesion) 및 금속의 용융점의 견지에서 그 정도를 예측할 수 있다[9]. 그러나, 산화물이 마찰 중에도 표면에 존재하는 경우에는 이러한 응착현상이 현저히 감소된다. Fig. 2(a)에 나타난 바와 같이 구리섬유를 사용한 경우 속도에 따른 마찰계수의 변화가 가장 크게 나타났다. 이러한 경향은 마찰계면에서 구리와 회주철이 응착되어 나타난 현상으로 보여진다. 반면에 알루미늄섬유를 사용한 경우에는 알루미늄 산화물에 의해 금속과 금속간의 직접적인 접촉이 감소되어 나타난 것으로 사료된다. 저탄소강의 경우는 계면에서의 응착현상이 구리보다는 적고 알루미늄보다는 커서 중간정도의 현상이 나타난 것으로 간주된다. 그러나 미끄럼표면에서의 금속응착이나 산화물의 분석은 마찰재가 다양한 원료를 포함한 복합재료라는 특성 때문에 분석결과를 정량적으로 도출하는 데는 성공하지 못하였다.

Fig. 2(b)는 Al-MMC 디스크를 상대재로 사용한 경우 속도에 따른 마찰계수의 변화이다. 그림에 나타난 바와 같이 Al-MMC 디스크를 사용한 경우에는 회주철 디스크를 사용한 경우에 비해 속도의 증가에 따른 마찰계수의 변화가 비교적 적게 나타났다. 이러한 현상은 알루미늄 표면에 존재하는 치밀한 산화막이 마찰재의 금속섬유와 Al-MMC의 직접적인 금속간 접촉(metal-to-metal contact)을 차단하여 나타난 현상으로 사료된다. 평균마찰계수의 크기는 알루미늄섬유를 사용한 경우 가장 높았으며, 구리섬유를 사용한 경우 가장 낮았다. 특히 알루미늄 섬유를 사용한 경우에는 표면에 존재하는 산화물의 영향에 의해 가장 높은 마찰계수를 나타낸 것으로 사료된다.

### 3-2. 온도의 변화에 따른 마찰계수의 변화

대부분의 재료는 온도에 따라 마찰계수의 변화를 나타내며 이는 온도에 의해 마찰시 수반되는 응착현상과 재료의 변형저항(deformation resistance)이 변화되기 때문에 나타나는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 상기한 3가지 마찰재를 대상으로 고온에서의 마찰계수 변화와 그때 나타나는 마찰력의 진동폭을 측정하기 위해 일정시간간격시험(constant interval test)을 적용하여 온도상승에 따른 마찰계수의 변화를 관찰하

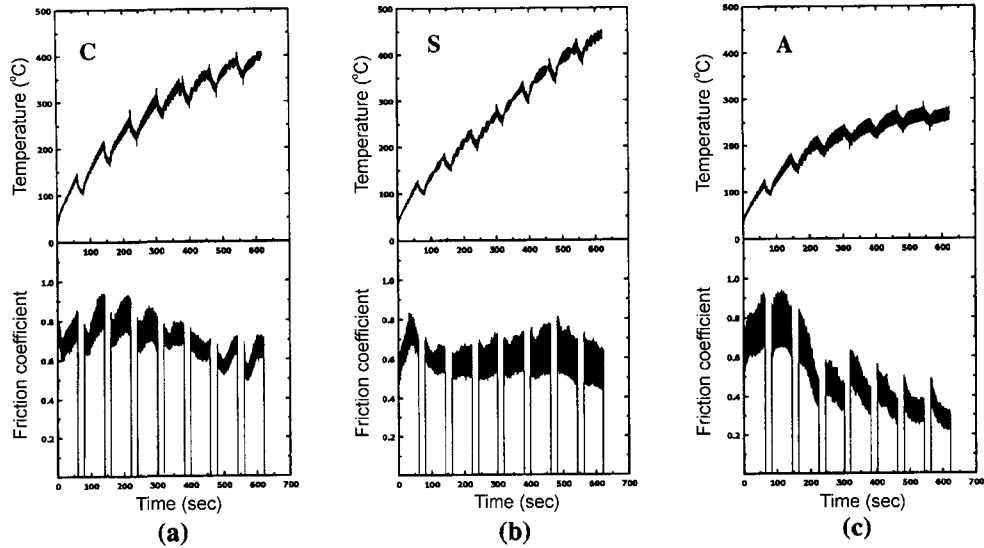


Fig. 3. Change of the friction coefficient during constant interval test using three different friction materials containing 15 vol.% (a) copper, (b) low carbon steel, and (c) aluminum. Gray cast iron disks were used for these tests.

였다.

Fig. 3에 회주철 디스크를 상대재로 사용한 경우에 온도에 따른 마찰계수의 변화를 금속섬유의 종류에 따라 나타내었다. 마찰계수의 크기는 속도시험에서 나타난 순서와 유사한 경향을 나타내었으며, 구리섬유를 포함한 마찰재 C와 저탄소강을 함유한 마찰재 S는 고온에서도 비교적 안정된 마찰계수를 유지하였고, 알루미늄섬유를 사용한 경우에는 온도의 증가에 따라 200°C 이상에서 마찰계수의 급격한 감소를 나타내었다. 구리섬유를 사용한 경우는 우수한 열전도율 때문에 마찰계면의 열확산을 용이하게 하며 또한 마찰계면에서 구리성분이 회주철 디스크의 표면에 전이된 후 산화물로 변화되어 고온에서 마찰계수의 감소를 방지하는 역할을 한 것으로 사료된다[10]. 반면에, 낮은 용점(660°C)의 알루미늄은 고온에서 강화섬유로서의 역할을 상실하여 마찰계수의 급격한 감소를 나타낸 것으로 평가된다. 이러한 실험결과는 마찰계면에서의 실제 표면온도(flash temperature)가 디스크 표면에서 측정된 온도보다 현저히 높음을 간접적으로 보여주고 있다. 저탄소강섬유를 사용한 마찰재의 경우 마찰온도가 다른 두 종류의 마찰재를 사용한 경우에 비해 높게 증가하였으며 이는 저탄소강의 열전도도가 다른 금속섬유들에 비해 낮기 때문으로 사료된다.

일반적으로 온도변화에 따른 마찰계수의 변화는 고

온 제동력과 밀접한 관계가 있으며 마찰계수의 진폭은 진동관련 제동특성에 직접 영향을 주는 것으로 알려져 있다[7]. 본 실험결과를 분석하여 보면 저탄소강섬유를 함유한 마찰재 S의 경우 마찰계수의 진폭이 온도가 상승함에 따라 증가함을 보여주었다. 반면에 알루미늄섬유를 사용한 마찰재 A의 경우는 초기에 마찰계수의 진폭이 크게 나타났으며 온도가 증가함에 따라 마찰계수의 진폭이 감소하는 경향을 보여주고 있다. 이러한 경향은 고온에서 마찰재에 포함된 금속섬유와 회주철이 반응하여 나타난 현상으로 고온 마찰실험 후 회주철 디스크와 마찰재의 표면관찰을 통하여 그 이유를 추론할 수 있다. Fig. 4에 고온 실험 후의 디스크와 마찰재의 표면형상을 나타내었다. Fig. 4(a)는 구리섬유를 함유한 마찰재 시편 C를 회주철 디스크를 사용하여 마찰시험 한 경우이다. 사진에 나타난 바와 같이 시험 후 디스크 및 마찰재 표면에 매끄러운 마찰막이 형성되어 있어 고온에서의 안정된 마찰특성을 뒷받침해 주고 있다. 일반적으로 마찰시 마찰계면에 형성되는 마찰막은 마찰재와 상대재 원료물질로 구성되며, 균일한 마찰막은 디스크와 마찰재의 직접적인 접촉을 방지하여 자동차의 제동특성을 향상시키는 것으로 알려져 있다[12]. 반면에 저탄소강섬유를 함유한 마찰재 S를 사용한 경우에는 디스크 및 마찰재 표면이 손상되었음을 보여주고 있다. 이러한 현상은 고온에서 나타

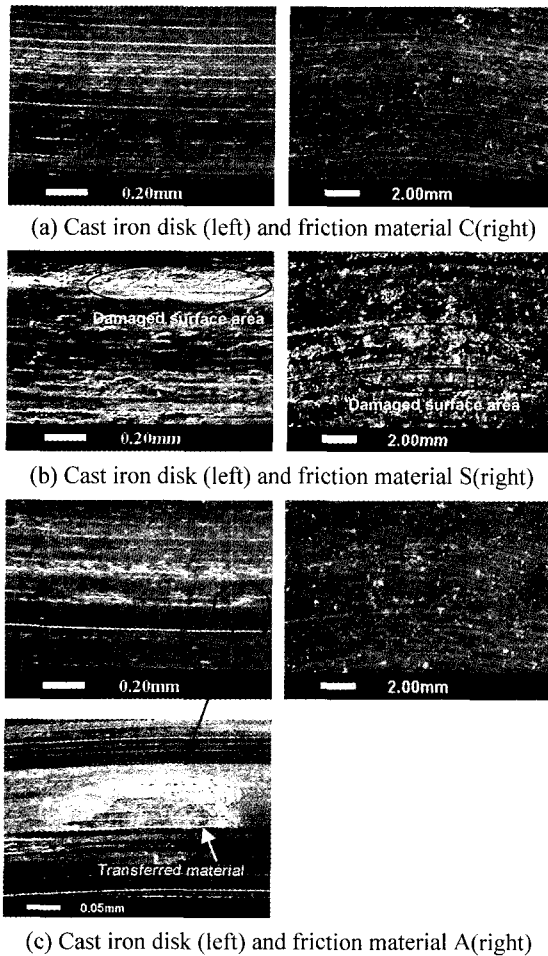


Fig. 4. Rubbing surfaces of cast iron disks and friction materials after constant interval test (CIT).

나는 마찰계수의 진동현상과 관련되며 이러한 진동현상은 자동차 제동시 나타나는 소음 및 떨림현상의 근본원인 중의 하나로 알려져 있다. 알루미늄섬유를 사용한 마찰재 A의 경우에는 비록 시험 후 마찰재 및 디스크의 표면이 심하게 손상되지 않았으나 마찰재에 사용된 알루미늄섬유의 용융으로 인해 고온에서 비교적 낮은 마찰계수와 작은 진폭을 나타낸 것으로 사료된다. 또한 Fig. 3에 전반적으로 나타난 초기마찰계수 상승현상은 마찰초기에 마모입자(wear particle)들이 불균일한 마찰계면에 채워지면서 접촉면적의 증가로 인해 마찰계수가 상승하여 나타난 현상으로 사료된다[13].

Al-MMC 디스크를 사용한 경우에는 기지 알루미늄의 우수한 열전도도와 높은 비열로 인하여 회주철 디스크를 사용하여 시험한 경우와 다른 경향을 나타내었

다(Fig. 5). 구리섬유를 포함한 마찰재 C를 사용한 경우 회주철 디스크를 사용한 경우에 비해 마찰계수가 현저히 감소하였으며 온도에 따른 마찰계수의 변화가 작았다. 반면에 저탄소강섬유를 사용한 마찰재 S를 사용한 경우에는 저탄소강이 디스크에 대한 심한 대면공격성을 나타내어 마찰온도가 급격히 상승하였으며 극심한 디스크표면 손상으로 인하여 시험이 중단되었다. 알루미늄섬유를 사용한 경우에는 초기에 마찰계수가 급격히 증가하였는데, 이는 표면에 치밀한 산화막이 존재하는 알루미늄(마찰재의 알루미늄섬유와 디스크의 알루미늄기지)에 의해 나타난 현상으로서 전형적인 산화마모(oxidative wear)의 면모를 보여주고 있다. 그러나 마찰온도가 100°C 이상으로 상승하면서 디스크 및 마찰재의 알루미늄 성분이 용융되어 마찰계수가 현저히 감소된 것으로 사료된다[11].

Al-MMC 디스크를 사용한 경우 마찰재의 종류에 따라 나타난 마찰특성에 관한 이해를 위해 고온 마찰시험 후의 디스크 및 마찰재의 표면을 관찰하였다(Fig. 6). Fig. 6(a)에 구리섬유를 포함한 마찰재를 사용한 경우의 디스크 및 마찰재의 마찰표면을 나타내었다. 이 경우에는 양쪽의 마찰면에 고른 마찰막이 형성되어 있었으며 이러한 마찰막의 형성이 마찰계수의 변화를 작게 하는데 영향을 미친 것으로 사료된다. 반면에 저탄소강섬유를 사용한 마찰재를 사용한 경우에는 마찰재 및 디스크의 표면에 전이된 알루미늄 및 탄소강 섬유에 의해 심한 요철을 보여주고 있다(Fig. 6(b)). 이러한 심한 물질전이 현상과 그에 따른 심한 표면파괴는 온도상승을 가속하였으며 급속한 마모로 인하여 시험을 중단하게 되었다. 이때 측정된 디스크의 표면온도는 대략 330°C였으며, 이것으로부터 마찰계면에서의 실제온도가 측정온도 이상의 고온임을 다시 확인할 수 있었다. 알루미늄 섬유를 함유한 마찰재 A의 경우에는 비교적 마찰에 따른 온도상승이 작았으며 마찰계면에서의 심한 물질전이나 표면손상이 나타나지 않았다. 또한 Al-MMC를 디스크로 사용한 경우에는 회주철 디스크를 사용하여 시험한 경우와 달리 시험 초기에 나타나던 마찰계수 상승현상이 현저히 둔화되었음을 발견할 수 있는데 이는 Al-MMC의 경우 전이막의 형성이 용이하여 마찰계면에서의 접촉면적이 빠른 시간 내에 포화되어 나타난 현상으로 사료된다.

### 3.3. 금속섬유의 종류에 따른 마모량의 변화

함유된 금속섬유의 종류에 따른 마찰재의 마모량을

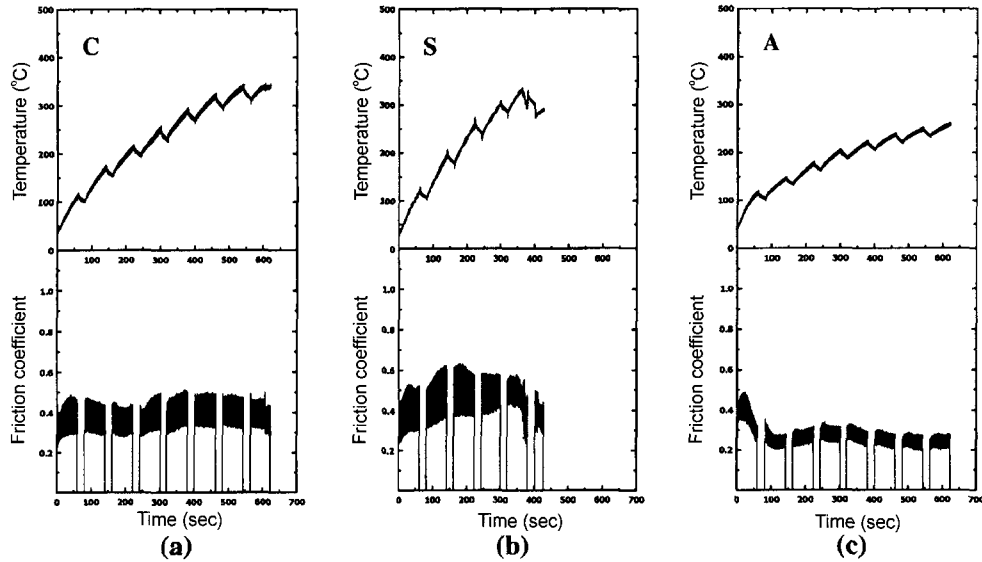


Fig. 5. Change of the friction coefficient during constant interval test using three different friction materials containing 15 vol.% (a) copper (b) low carbon steel, and (c) aluminum. Al-MMC disks were used for these results.

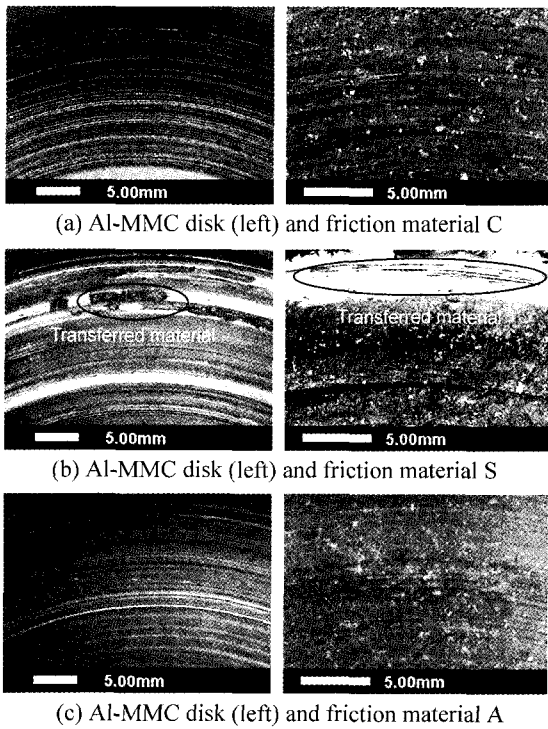


Fig. 6. Rubbing surfaces of Al-MMC disks and friction materials after constant interval test (CIT).

측정하기 위해 마모시험을 시행하였다. 마모시험은 디스크의 초기온도를 100°C로 하여 0.6 MPa의 압력하에

서 3분 끌기시험으로 이루어져 있으며(constant initial temperature tests), 동일한 조건에서 20회 반복 시험한 후에 시험 전후 마찰재의 부피변화를 측정하고 후 변화량으로 마모율을 도출하는 데 사용하였다. 일반적으로 마찰시험에 따른 마모량을 산출할 때는 동일한 시험조건 하에서 시험한 후, 시험전후의 시편부피(또는 무게)를 측정하여 마모율을 도출하는 것이 일반적이거나 본 실험에서는 실차 제동에 따른 마찰재의 마모량을 비교하는데 그 목적이 있으므로 마모율을 산출할 때 마찰재에 수반된 에너지량을 고려하였다. 이는 자동차를 제동할 때는 본 실험에서 실시한 것과 같이 일정 압력 하에서 마찰현상이 일어나는 것이 아니라 일정 마찰력(또는 마찰계수)을 유지함으로써 달리는 자동차를 정지 혹은 감속하게 되므로 실제로는 일정 마찰력을 유지하기 위해 압력의 변화가 가능한 마찰마모 시험기 또는 brake dynamometer를 사용하여야 실차에서의 마찰재의 마모량을 예측할 수 있기 때문이다. 본 연구에서는 가능한 실제 마찰재의 마모량에 근접한 결과를 도출하기 위해 마찰시험동안 발생된 마찰에 수반된 에너지의 양으로 마모량을 나눈으로써 다시 마모율을 나타내었다.

Fig. 7에 마찰재에 사용된 금속섬유의 종류와 디스크의 종류에 따른 마모량의 변화를 고온시험으로 나타내었다. 마찰재의 마모량은 회주철 디스크를 사용한 경우가 Al-MMC를 사용한 경우에 비해 전반적으로 다소 크게 나타났으며 구리나 저탄소강섬유를 함유한 마

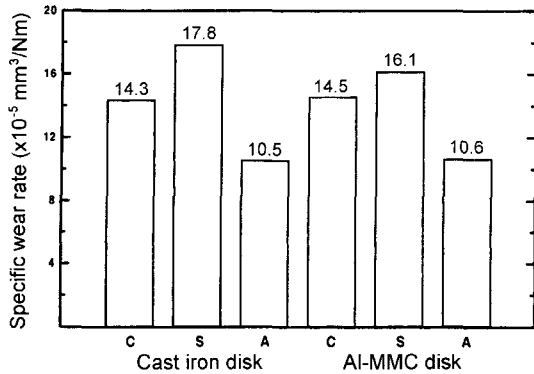


Fig. 7. Specific wear rate of friction materials normalized by friction energy accompanied by the level of friction force during wear tests.

찰재 C 또는 S를 사용한 경우가 알루미늄섬유를 사용한 경우에 비해 마모정도가 더 큰 것으로 나타났다. 이러한 결과는 3-2(온도의 변화에 따른 마찰계수의 변화)에서 나타난 바와 같이 높은 마찰계수에 수반되는 마찰열에 의한 영향이 마모량에 반영된 것으로 간주된다[14,15].

#### 4. 결 론

본 연구에서는 마찰재에 포함된 금속섬유(Al, Cu, Steel fiber)의 종류에 따른 마찰특성을 고찰하였다. 이를 위해 회주철 디스크뿐만 아니라 Al-MMC로 제조된 디스크를 상대적으로 함으로써 각각의 경우에 따른 마찰특성에 관해 분석하였다.

1. 저온에서의 속도에 따른 마찰계수의 변화(negative ( $\mu$ -v relation)는 상대적으로 회주철을 사용하는 경우 구리섬유 마찰재 > 저탄소강섬유 마찰재 > 알루미늄섬유 마찰재의 순으로 나타나 마찰재에 포함되는 다량의 구리함량은 특히 마찰계면의 온도가 높지 않을 때 stick-slip을 발생시킬 영향이 큰 것으로 나타났다. 반면에 Al-MMC 디스크를 사용하여 시험한 경우에는 마찰재의 속도에 따른 마찰계수의 변화가 세가지 마찰재의 경우 모두 작게 나타났다.

2. 고온에서의 마찰계수 변화는 회주철 디스크를 사용하는 경우 알루미늄섬유를 함유한 마찰재에서 가장 크게 나타났으며 구리 또는 저탄소강섬유를 함유한 마찰재의 경우는 비교적 마찰계수의 변화가 적었다. 그러나, 저탄소강을 포함한 마찰재의 경우 마찰에 따른 온도상승이 크게 나타났으며 온도의 상승에 따라 마찰

계수의 진폭이 증가하였다. 반면에, Al-MMC 디스크를 사용한 경우에는 구리를 사용한 마찰재의 경우에 마찰계수의 변화가 작았고 저탄소강섬유를 사용한 마찰재의 경우에는 마찰계면에서의 심한 물질전이로 인하여 표면손상이 심하였으며 급속한 마모를 초래하였다.

3. 마찰재의 마모량은 회주철을 디스크 재질로 사용한 경우가 Al-MMC 디스크를 사용한 경우에 비해 더 크게 나타났다. 마찰재에 함유된 금속섬유의 종류에 따른 마모량은 저탄소강 > 구리 > 알루미늄의 순이었다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(과제번호:98-0200-02-01-3) 지원으로 수행되었음.

#### 참고문헌

- Anderson, A. E., Metal Handbook, 19th ed., Vol.18, pp.569-577.
- Anderson, A. E., "Friction Materials Performance Issue," in Proceedings of Fibers in Friction Materials Symposium, Friction Materials Standard Institute, pp.2-57, 1987.
- Urquhart, A. W., "Novel Reinforced Ceramics and Metals: A Review of Lanxide's Composite Technologies," Materials Science and Engineering, A144, pp. 75-82, 1991.
- Wilson, S. and Alpas, A. T., "Effect of Temperature on the Sliding Wear Performance of Al Alloys and Al Matrix Composites," Wear, Vol.196, pp.270-278, 1996.
- 이진수, 장 호, "자동차용 마찰재에 사용되는 금속섬유의 종류에 따른 마찰특성의 변화에 관한 연구," 제 29회 춘계 유행학술대회 초록집, pp.255-264, 1999.
- Kim, S. J. and Jang, H., "Friction and Wear of Friction Materials containing Two Different Phenolic Resins Reinforced with Aramid Pulp," Tribology International, Vol.33, No.7, pp.477-484, 2000.
- Anderson, A. E., "Friction Excited Oscillation," Link Brake Technology Report-FEV1, 1995.
- Symmon, G. R. and McNulty, G. J., "Acoustics Output from Stick-Slip Friction," Wear, Vol.113, pp. 79-82, 1986.
- Rabinowicz, E., "Friction and Wear of Materials," Second Edition, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, INC.
- Katsuhiko, S., Akira, G., Satoshi, Y., Yuichi, A. and Koji, N., "Development of Brake Friction Material,"



- SAE Paper, No.930806, pp.149-161, 1993.
11. Mahdavian, S. M. and Mai, Y. W., "Further Study in Friction, Metallic Transfer and Wear Debris of Sliding Surfaces," *Wear*, Vol.95, pp.35-44, 1984
  12. Kim, S. J. and Jang, H., "A Study of Binder. Resins and Reinforcing Fibers in Automotive Friction Materials on Friction and Wear" *J of KSTLE*, Vol. 15, pp. 314-320, 1999.
  13. Gahlin, R. and Jacobson, S., "The Particle Size Effect in Abrasion Studied by Controlled Abrasive Surfaces," *Wear*, Vol.224, pp.118-125, 1999.
  14. Liu, T., Rhee, S. K., and Lawson, K. L., "A Study of Wear Rates and Transfer Films of Friction Materials," *Wear*, Vol.60, pp.1-12, 1980.
  15. Allan, W., Karen, S. and Robert, W., "A Study of the Relationship between Transfer Film Chemistry and Friction Performance in Automotive Braking Systems," SAE Paper, No.922541, pp.1-8, 1992.