

마찰재에 함유된 금속섬유의 종류에 따른 마찰 특성

고길주 · 장 호

고려대학교 재료금속공학부

Tribology of friction materials containing different metal fibers

Kil-Ju Ko and Ho Jang

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 using a pad-on-disk type friction tester. Two different materials(gray iron and Al-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 cast iron disk showed a distinct negative μ - v (friction coefficient vs. sliding velocity) relation implying possible stick-slip generation at low speed. The negative μ - v relation was not observed when the Cu-containing friction materials were rubbed against the Al-MMC counter surface. As applied loads increased, friction materials showed higher friction coefficients comparatively. Friction materials slid against cast iron disks exhibited higher friction coefficients than Al-MMC 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 the 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 particle, gray iron, friction material

1. 서 론

일반적으로 금속섬유는 자동차 브레이크용 마찰재의 내마모성(wear resistance), 열전도도(thermal conductivity) 및 강화성능(reinforcing property)을 향상시키기 위해 사용되며 금속섬유의 종류, 상대량, 그리고 재질특성이 마찰특성에 큰 영향

을 미치는 것으로 알려져 있다[1]. 현재 가장 많이 사용되는 저탄소강섬유는 내마모와 고온 제동력의 면에서 우수하지만 고온에서 회주철과의 응착현상으로 인하여 로터의 마모를 가속하며 또한 제동소음의 발생빈도를 높이는 것으로 알려져 있다. 반면에 구리 또는 구리합금섬유는 마찰재의 열확산을 증가시켜 고

은 제동력을 유지하기 위해 사용되며 저탄소강에 비해 경도가 낮으므로 로터에 대한 대면공격성을 작게 하면서 마찰계수를 조절하고자 할 때 사용되기도 한다. 알루미늄섬유는 Al-MMC 로터용 마찰재에 주로 사용되고 있으나 그에 대한 연구결과는 찾아보기 어렵다. 회주철 로터를 사용하는 마찰재의 경우 알루미늄섬유는 제동시 마찰계면에서 산화물로 변하여 로터표면에 고착된 탄화물 피막을 제거하기 위해 사용되는 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 금속섬유의 종류(Al, Cu, low carbon steel)만을 변화시켜 그에 따른 마찰특성의 변화를 고찰하였다. 또한 회주철과 알루미늄기지 복합재(Al-MMC)를 이용하여 상대재 디스크를 제작한 후 각각 시험하였다[2].

2. 실험방법

본 실험에 사용된 마찰재 시편은 NAO (non-asbestos organic)형의 마찰재로서 제조에 사용된 원료 및 함량을 Table 1에 나타내었다. 마찰재의 제작은 계량, 혼합, 예비성형, 본성형 및 열처리의 순으로 진행되었으며 Rockwell 경도기(Akashi Rockwell ARK-600)를 이용하여 마찰재의 경도분포를 측정된 결과 약 84 ± 5 HR_S (S scale)를 나타내었다.

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 ₂	4
Abrasive	ZrSiO ₄	4
Friction modifier	Cashew	5
Fillers	Barite	26
	Ca(OH) ₂	4

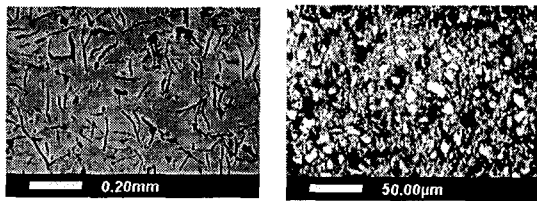
Table 2. Physical properties and dimension of metal fibers used in this study

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 ³]	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
Coeff. of linear expansion[10 ⁻⁶ °C ⁻¹]	22.5	17	11.7
Mohs hardness	2~2.5	2.5~3	5
Elastic modulus [kN/mm ²]	65	115	208

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 주물 가공하여 마찰시험기에 장착할 수 있도록 12cm 의 직경과 2.5cm 의 두께로 제작하였다. Fig. 1 에 본 실험에 사용된 회주철과 Al-MMC 의 미세조직 사진을 나타내었다. 디스크로 사용된 회주철과 Al-MMC 의 물리적 성질을 Table 3 에 나타내었다



(a) Gray cast iron (b) Al-MMC

Fig. 1. Microstructures of two different disk surfaces used in this experiment.

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

Physical properties	Cast iron	A356+30%SiC
Density[10 ³ kg/m ³]	7.2	2.85
Specific heat [J/g K]	0.498	1.027
Thermal conductivity [W/mK]	47.3	148.1
Coefficient of thermal expansion (50~100°C)[10 ⁻⁶ K ⁻¹]	12.6	17.4
Hardness[kg/mm ²]	70~90	98.4±2.4

본 실험에서는 pad-on-disk 형태의 정속

마찰시험기를 사용하였으며 하중을 부가하기 위해 유압장치를 사용하였다[3]. 마찰재 시편의 크기는 2×2×1cm 이며 2 개의 동일한 마찰재 시편이 사용되었다(총 마찰면적=8cm²). 마찰마모 실험에서 측정된 모든 자료는 PC-based DAQ(LAB-PC-1200, National Instrument)시스템을 이용하여 100Hz 의 데이터 처리속도로 저장하였다. 본 실험에서 실시한 마찰마모시험의 자세한 조건은 Table 4 에 나타내었다. 마찰시험 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.

Table 4. Friction test procedure used in this experiment

Speed sensitivity test	IBT:50℃, 15sec(drag), 0.4, 0.5, 0.6, 0.7Mpa, 0.9, 1.1, 1.3, 1.5, 1.9, 2.4, 2.8, 3.8m/s
Constant interval test	IBT:30℃, 3.3m/s, 0.9Mpa, 60sec(drag) & 20sec(interval), 8times
Wear test	IBT:100℃, 3.3m/s, 0.6MPa, 3min(drag), 20times

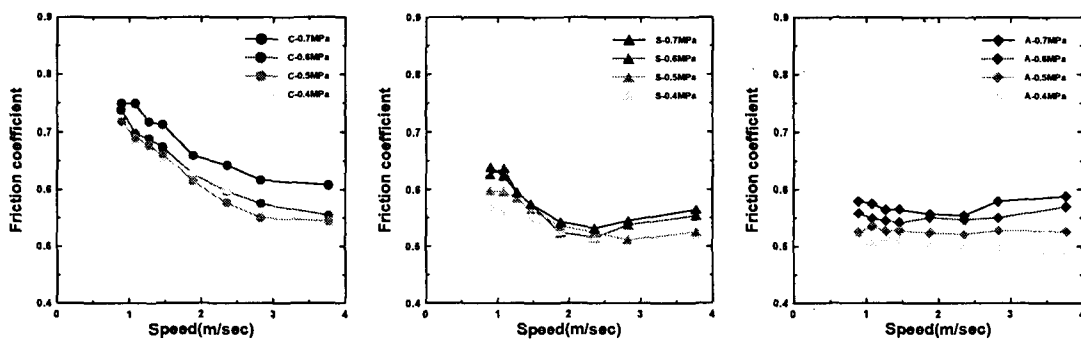
3. 실험결과 및 고찰

3-1. 속도의 변화에 따른 마찰계수의 변화
속도에 따른 마찰계수의 변화는 제동시 나타나는 진동 및 소음현상과 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있다[4,5]. 회주

철 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 나타내었으나, 구리섬유와 저탄소강섬유를 포함한 시편 C와 S는 저속에서 높은 마찰계수를 나타낸 후, 속도의 증가에 따라 마찰계수가 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 가압력이 증가함에 따라 전체적인 마찰계수가 다소 증가하는 현상을 보였다. 이러한 마찰특성은 마찰계면에서 금속성분 간의 응착현상(adhesion)과 밀접한 관계가 있으며 용융점에 비례하거나 또는 재료상용성(material compatibility)의 견지에서 그 정도를 예측할 수 있다[6]. 그러나, 산화물이 마찰 중 표면에 존재하는 경우에는 응착현상이 현저히 감소된다. 구리섬유를 사용한 경우에는 마찰계면에서 구리와 회주철이 응착되어 속도에 따른 마찰계수의 변화가 가장 크게 나타난 반면, 알루미

늄섬유를 사용한 경우에는 알루미늄 산화물에 의해 금속과 금속간의 직접적인 접촉이 감소되어 나타난 것으로 사료된다.

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. 가해진 하중에 따라 평균마찰계수의 크기는 알루미늄섬유를 사용한 경우 가장 높았고, 구리섬유를 사용한 경우 가장 낮았으며 하중에 따른 변화가 거의 없었다. 특히 알루미늄 섬유를 사용한 경우에는 표면에 존재하는 산화물의 영향에 의해 가장 높은 마찰계수를 나타낸 것으로 사료된다.



(a) Cast iron disk

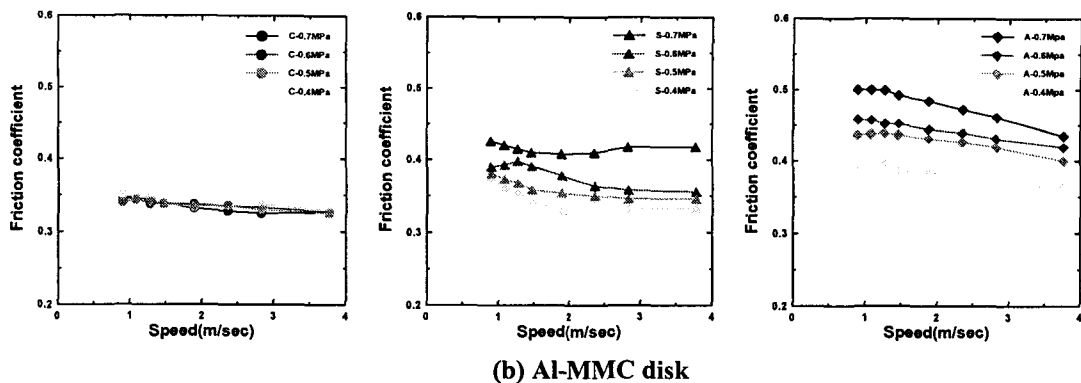


Fig. 2. The coefficient of friction as a function of speed in the case of using three different friction materials containing different metal fibers. Two different materials ((a) Cast iron, (b) Al-MMC) were used for counter disks.

3-2. 온도의 변화에 따른 마찰계수의 변화

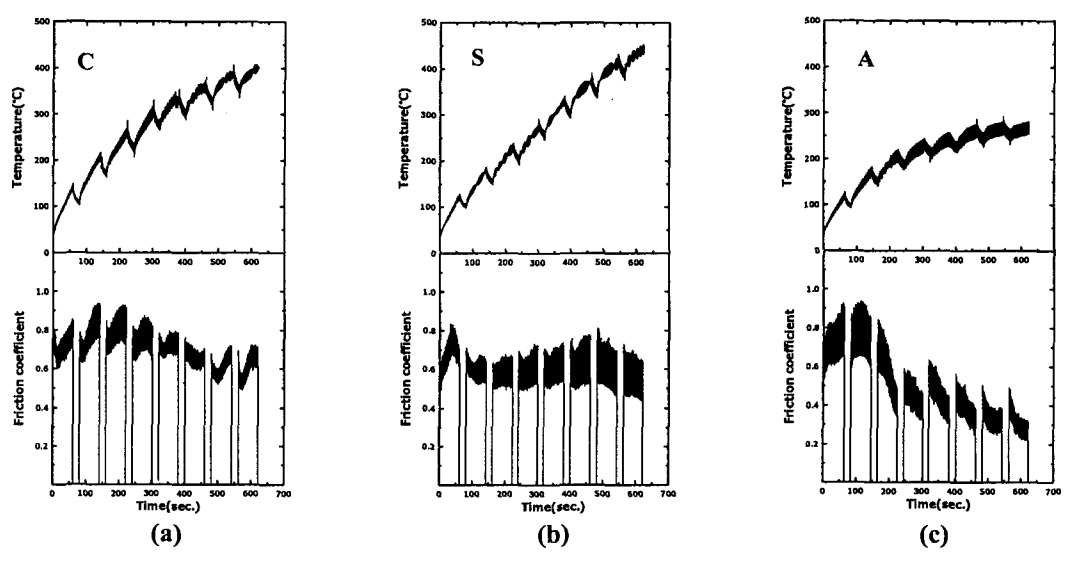
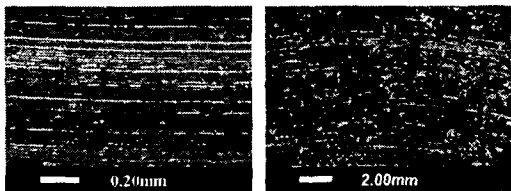


Fig. 3. Change of the friction coefficient during constant interval test using three different friction materials containing 15 vol.% (a) copper, (b) low carbon steel (c) aluminum. Gray cast iron disks were used for these tests.

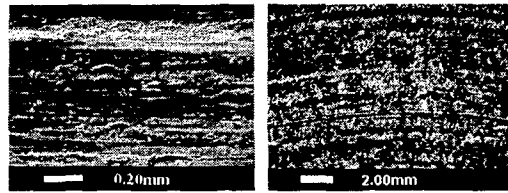
본 연구에서는 고온에서의 마찰계수 변화와 그때 나타나는 마찰력의 진동폭을 측정하기 위해 일정시간간격시험(constant interval test)을 적용하여 온도상승에 따른

마찰계수의 변화를 고찰하였다.

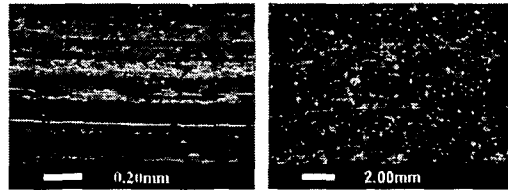
Fig. 3 에 회주철 디스크를 상대재로 사용한 경우에 온도에 따른 마찰계수의 변화를 금속섬유의 종류에 따라 나타내었다. 마찰계수의 크기는 속도시험에서 나타난 순서와 유사한 경향을 나타내었으며, 구리섬유를 포함한 마찰재 C 와 저탄소강을 함유한 마찰재 S 는 고온에서도 비교적 안정된 마찰계수를 유지하였고, 알루미늄섬유를 사용한 마찰재 A 의 경우에는 온도의 증가에 따라 200℃ 이상에서 마찰계수의 급격한 감소를 나타내었다[6]. 마찰재 S 의 경우 마찰계수의 진폭이 온도가 상승함에 따라 증가하였으나 마찰재 A 의 경우는 초기에 마찰계수의 진폭이 크게 나타났으며 온도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보여주었다. Fig. 4 에 고온 실험 후의 회주철 디스크와 마찰재의 표면형상을 나타내었다. Fig. 4(a)에서 마찰재 C 는 시험 후 디스크 및 마찰재 표면에 매끄러운 마찰막이 형성되어 있어 고온에서의 안정된 마찰특성을 뒷받침해주고 있다. 반면에 마찰재 S 를 사용한 경우에는 디스크 및 마찰재 표면이 손상되었음을 보여주고 있다.



(a)Cast iron disk(left) and friction material C



(b)Cast iron disk(left) and friction material S



(c)Cast iron disk(left) and friction material A

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

Al-MMC 디스크를 사용한 경우에는 기지 알루미늄의 우수한 열전도도와 높은 비열로 인하여 회주철 디스크를 사용하여 시험한 경우와 다른 경향을 나타내었다 (Fig. 5). 구리섬유를 포함한 마찰재 C 를 사용한 경우 회주철 디스크를 사용한 경우에 비해 마찰계수가 현저히 감소하였으며 온도에 따른 마찰계수의 변화가 작았다. 반면에 저탄소강섬유를 사용한 마찰재 S 를 사용한 경우에는 저탄소강이 디스크에 대한 심한 대면공격성을 나타내어 마찰온도가 급격히 상승하였으며 극심한 디스크표면 손상으로 인하여 시험이 중단되었다. 알루미늄섬유를 사용한 경우에는 초기에 마찰계수가 증가하였는데, 이는 표면에 치밀한 산화막이 존재하는 알루미늄에 의해 나타난 현상으로서 전형적인 산화마

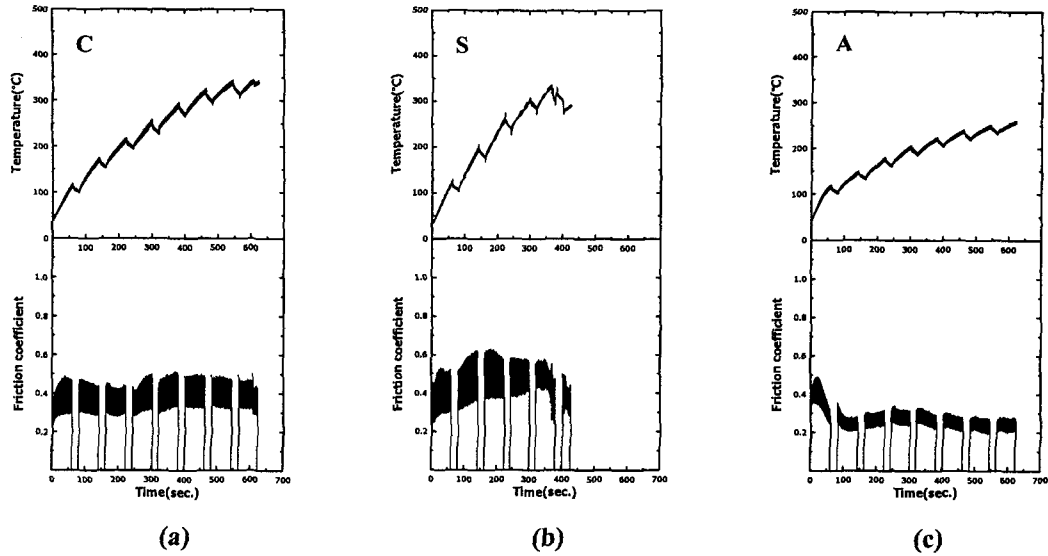
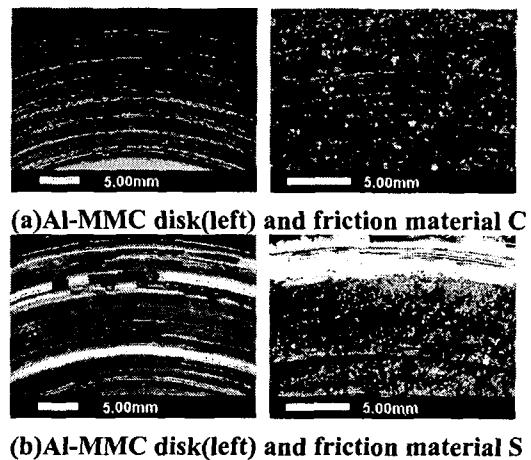


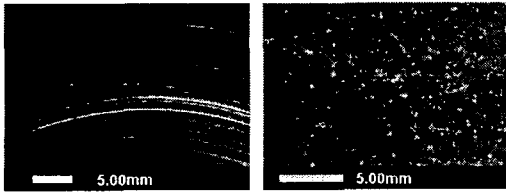
Fig. 5. Change of the friction coefficient during constant interval test using three different friction materials containing 15 vol.% (a) copper (b) low carbon steel (c) aluminum. Al-MMC disks were used for these results.

모(oxidative wear)의 면모를 보여주고 있다. 그러나 마찰온도가 100°C 이상으로 상승하면서 디스크 및 마찰재의 알루미늄 성분이 용융되어 마찰계수가 현저히 감소된 것으로 사료된다[7].

Al-MMC 디스크를 사용한 경우 고온 마찰시험 후의 디스크 및 마찰재의 표면을 관찰 하였다(Fig. 6). 저탄소강섬유를 사용한 마찰재 S 를 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 온도 상승을 가속하였으며 급속한 마모로 인하여 시험을 중단하게 되었다. 이때 측정된 디스크의 표면온도는 대략 330°C였으며, 이것으로부터 마찰계면에서의 실제온도가

측정온도 이상의 고온임을 확인할 수 있었다. 알루미늄섬유를 함유한 마찰재 A 의 경우에는 비교적 마찰에 따른 온도상승이 작았으며 마찰계면에서의 심한 물질전이 나 표면손상이 나타나지 않았다.





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

3-3. 금속섬유의 종류에 따른 마모량의 변화

마모시험은 디스크의 초기온도를 100℃로 하여 0.6MPa의 압력하에서 3분 끝기 시험으로 이루어져 있으며(constant initial temperature tests) 20회 반복 시험한 후, 시험 전후 마찰재의 파괴변화를 측정하였다. 본 연구에서는 가능한 실제 마찰재의 마모량에 근접한 결과를 도출하기 위해 마찰시험동안 발생된 마찰에 수반된 에너지의 양으로 마모량을 나눔으로써 마모율을 나타내었다.

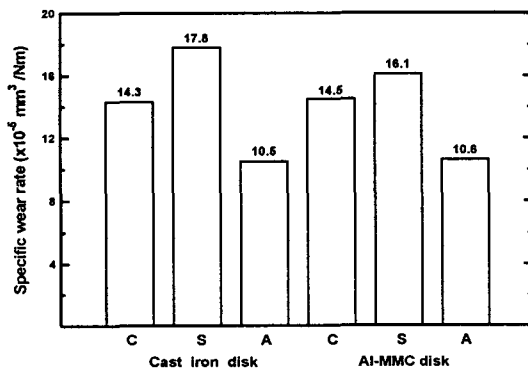


Fig. 7. Specific wear rate of friction materials normalized by friction energy accompanied by the level of friction force during wear tests(IBT:100℃).

Fig. 7에 마찰재에 사용된 금속섬유의 종류와 디스크의 종류에 따른 마모량의 변화를 나타내었다. 마찰재의 마모량은 구리나 저탄소강섬유를 함유한 마찰재 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 마와 같이 높은 마찰계수에 수반되는 마찰열에 의한 영향이 마모량에 반영된 것으로 간주된다[8,9].

4. 결 론

본 연구에서는 마찰재에 포함된 금속섬유(Al, Cu, Steel fiber)의 종류에 따른 마찰 특성을 고찰하기 위해 상대재로 회주철과 Al-MMC로 제조된 디스크를 사용하여 각각의 경우에 따른 마찰특성을 분석하였다.

1. 저온에서의 속도에 따른 마찰계수의 변화(negative μ -v relation)는 상대재로 회주철을 사용하는 경우 구리섬유 > 저탄소강섬유 > 알루미늄섬유 마찰재의 순으로 나타나 마찰재에 포함되는 다량의 구리함량은 stick-slip을 발생시키는 것으로 나타났다. 반면에 Al-MMC 디스크 경우에는 속도에 따른 마찰계수의 변화가 세가지 마찰재 경우 모두 작게 나타났다.

2. 고온에서의 마찰계수 변화는 회주철 디스크를 사용하는 경우 알루미늄 섬유를 함유한 마찰재에서 가장 크게 나타났으며 구리 또는 저탄소강섬유를 함유한 마찰재의 경우는 비교적 마찰계수의 변화가 적었다. 그러나, 저탄소강을 포함한 마찰재의 경우 마찰에 따른 온도상승이 크게 나

타났으며 온도의 상승에 따라 마찰계수의 진폭이 증가하였다. Al-MMC 디스크를 사용한 경우에는 저탄소강섬유를 사용한 마찰재가 마찰계면에서의 심한 물질전지로 인하여 표면손상이 심하였으며 급속한 마모를 초래하였다.

3. 마찰재에 함유된 금속섬유의 종류에 따른 마모량은 저탄소강 > 구리 > 알루미늄의 순으로 나타났다.

후 기

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

참고문헌

1. Anderson, A. E., Metal Handbook, 19th ed., Vol.18, pp.569-577.
2. 이진수, 장 호, “자동차용 마찰재에 사용되는 금속섬유의 종류에 따른 마찰 특성의 변화에 관한 연구,” 제 29 회 춘계 윤활학술대회 초록집, pp.255-264, 1999.
3. 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.
4. Anderson, A. E., “Friction Excited Oscillation,” Link Brake Tech. Report-FEV1, 1995.
5. Rabinowicz, E., “Friction and Wear of Materials,” 2nd Edition, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, INC.
6. Katsuhiko, S., Akira, G., Satoshi, Y., Yuichi, A. and Koji, N., “Development of Brake Friction Material,” SAE Paper, No.930806, pp.149-161, 1993.
7. 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.
8. 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.
9. 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.