

자동차용 마찰재에 사용되는 금속섬유의 종류에 따른 마찰특성의 변화에 관한 연구

이진수·장호

고려대학교 공과대학 재료금속공학부

Friction Characteristics of automotive friction materials containing different metallic fibers against Al-MMC and cast iron disk specimens

Jin-Soo Lee · Ho Jang

Division of Materials Science and Engineering, Korea University

Abstract— Friction characteristics of automotive friction materials containing different metallic fibers rubbing against Al-MMC and cast iron disk specimens have been studied. Friction materials containing aluminum, copper or low steel carbon fiber were tested. Friction tests were composed of three different phases to investigate the effect of temperature, pressure, speed, and drag time. The results showed that the friction material containing Al fibers has lower friction force and wear amount than the others with Cu or Steel fiber. On the other hand, the wear of friction material was severe in the case of using Al-MMC rotors. These results showed that the thermal decomposition of solid lubricants (and organic components), formation of transfer layer, and SiC particles in the Al-MMC rotor play crucial roles in determining the friction characteristics.

Key words— Al-MMC, SiCp, metallic fiber, transfer layer, Sb_2S_3 , decomposition

1. 서론

현재 사용되고 있는 자동차 브레이크용 로터는 대부분 회주철을 사용하여 제작되고 있으며, 이는 회주철의 비교적 우수한 열전도도, 내마모성(wear resistance), 감쇠능(damping capacity) 그리고 저렴한 가격 때문이다. 그러나 회주철은 비중이 커서 자동차의 경량화에 역행될 뿐 아니라 로

터 제조시 주조방안에 따른 국부적 냉각속도의 차이에 따라 흑연의 형상 및 미세조직의 변화가 심하여 마찰시 불균일한 마모를 나타내며 이로 인해 마찰계면에서 발생한 여기(friction excitation)가 차체와 함께 공진함으로써 잡음을 유발하게 된다. 회주철로터는 제동시 발생하는 마찰열을 확산 시키기에 열전도도가 충분하지 않아 로터

의 열변형이 유발되며 로터온도가 크게 상승되어 마찰재의 열분해로 인해 제동성능 상실을 나타낼 수 있다. 현재 자동차 제조업체에서는 제동시 나타나는 이러한 바람직하지 않은 제동 현상들과 자동차 경량화 문제를 해결하기 위해 회주철의 대체물질로서 알루미늄 합금, 구리 합금 그리고 이들을 기지로 한 복합재료에 대해 연구를 진행하고 있다[1,2,3,4]. 이 중에서 입자강화 알루미늄 복합재료는 많은 부분에서 선호되어지고 있는데 기존 철강 및 비철재료에 비해서 고강도이고 내마모성, 고온특성, 피로특성, 높은 열전도도(단, 강화재가 SiC 인 경우) 등의 측면에서 장점을 가지고 있기 때문에 자동차 브레이크용 로터재료로서 응용이 모색되어지고 있다. 현재 브레이크용 로터제작에 사용되고 있는 대표적인 알루미늄 복합재료(A359+20%SiC)와 회주철의 물성차이를 Table 1.에 나타내었다.

Table 1. Physical properties of gray cast iron and Al-MMCs

	Cast iron	A359+20%SiC
Density[10 ³ kg/m ³]	7.2	2.81
Specific heat [kJ/kg K]	0.498	1.038
Thermal conductivity [W/mK]	47.3	181.2
Coefficient of Thermal expansion (50~100°C)[10 ⁻⁶ K ⁻¹]	12.6	17.5

특히, 현재 많은 주목을 받고 있는 재질은 알루미늄 합금(A359 또는 A356 Al alloys)을 기지로 SiC(10~50vol.%)입자를 첨가한 금속기지 복합재료이며 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 한편, 마찰재와 상대재(rotor)사이의 계면에서 발생하는 현상이 자동차 제동시에 매우 중요한 역할을 하게 되므로 마찰특성에 관한 연구는 마찰재의 구성물질과 상대재의 재질을 상호 연관지어 연구하여야 한다. 마찰재의 구성요소 중 강화재(friction material reinforcement)의 경우 과거에는 석면(asbestos)을 사용했으나 현재는 아라미드(aramid)섬유와 함께 무기질섬유(steel, copper, glass, ceramic 등)가 널리 사용되어지고 있다[9].

본 연구에서는 마찰재에 3 가지 다른 금속섬유(aluminum, copper, low carbon steel)를 각각 사용하여 3 종류의 마찰재를 제조하고 상대재(rotor)를 알루미늄 복합재와 회주철로 제조하여 그에 따른 각각의 마찰특성을 연구하였으며, 특히 3 가지 금속섬유의 마찰거동과 그에 따른 마모에 대해 고찰하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서 제조된 마찰재는 강화재인 아라미드섬유와 함께 알루미늄(aluminum), 구리(copper) 또는 저탄소강(low carbon steel) 섬유를 첨가하여 제조하였으며, 그 조성과

사용된 금속섬유의 물성은 각각 Table 2,3 과 같고 마찰재의 제조공정은 Fig.1 에 나타내었다. Fig. 1 에 나타낸 공정에 의해 성형된 마찰재는 $\phi 5 \times 1 \text{cm}$ 의 디스크 형태이며 마찰시험기에 장착할 수 있도록 $1 \times 1 \times 0.7 \text{cm}$ 의 크기로 절단하여 사용하였다.

Table 2. Formulation for friction materials used in this study [vol.%]

Raw materials	Composition
Phenolic resin	20
Aramid fiber	15
Solid lubricants	11
Fillers	35
Zirconium silicate	4
Metallic fiber	15

Table 3. Physical properties of Metallic fibers used in this study

	Al	Cu	Steel
Length[mm]	0.10-0.30	0.12-0.38	0.12-0.33
Dia.[μm]	30-70	50	40
Density[g/cm^3]	2.7	8.9	7.86
Thermal cond. [W/mmK]	0.22	0.40	0.05
Linear expansion [$10^{-6}/\text{C}^{-1}$]	22.5	17	11.7

마찰재의 상대재(rotor)는 실제 상용화 되어 있는 회주철 및 Al-MMC 로터를 주물 가공하여 마찰시험기에 장착할 수 있도록 $\phi 12 \times 2.5 \text{cm}$ 의 디스크 형태로 제작하였다. 특히, 본 실험에서 사용된 알루미늄 복합재 로터는 기지금속으로 A356, 강화재로

SiC 입자(30vol.%)를 사용했다.

MIXING	primary mixing for 20sec + secondary mixing for 10sec
PRE-FORMING	150kgf/cm ² , 100°C Hot mounting press
HOT PRESSING	300kgf/cm ² , 150°C Hot mounting press
CURING	200°C, 6hrs Convection oven

Fig. 1. Details of manufacturing process and its condition.

회주철과 A356 합금 성분은 Table 4.와 같다.

Table 4. Components of gray cast iron and Al-MMC rotors (wt.%)

	Al	C	Si	Mn	S	
Cast iron		3.5	1.7	0.8	<0.1	
A356	Bal.	-	7	-	-	
Cr	Cu	P	Sn	Fe	Mg	etc.
0.5	0.25	<0.2	0.05	Bal.	-	-
-	-	-	-	0.3	0.3	0.2

본 연구에서 사용된 마찰시험기는 pad-on-disk 형태의 정속 마찰시험기이며 회전하는 상대 디스크의 표면 온도는 적외선 온도 측정기(infrared heat tracer)를 이용하여 측정하였으며 상대 디스크의 회전축에 속도 감지기를 설치하여 실제 디스크의 회전속도를 측정하였고 유압 시스템을 이용하여 가압력을 일정하게 유지 하였다[13].

본 연구에서 시행한 마찰시험은 3 가지의 단계로 나누어 진행되었다. 첫 단계는 일

정속도, 일정압력으로 끌기시험(drag test)을 하였고, 두 번째 단계는 속도와 압력을 변화시키면서 일정시간 동안 끌기 시험을 하였으며 세 번째 단계에서는 온도와 압력을 변화시키면서 일정시간 동안 끌기 시험을 하였다.

Table 5에 시험조건과 과정을 나타내었다.

Table 5. Experimental procedures

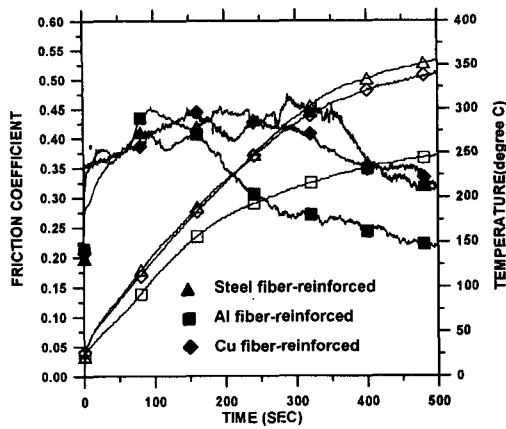
Phase I	[Dragging] 800 rpm, 7 kgf/cm ² , 500sec, IBT : room temp.
Phase II	[Burnishing before test] 800 rpm, 7 kgf/cm ² , 100sec, 3 times, IBT : room temp.
	IBT : 100°C [Range of conditions] Pressure(kgf/cm ²) : 5, 7, 9, 11 Rpm : 400, 500, 600, 700, 800 20sec., respectively
Phase III	[Burnishing before test] 800 rpm, 7 kgf/cm ² , 100sec, 3 times, IBT : room temp.
	Rpm : 800rpm [Range of conditions] Pressure(kgf/cm ²) : 5, 7, 9, 11 Temp. (°C) : 40,80,120,160,200 20sec., respectively

3. 실험결과 및 고찰

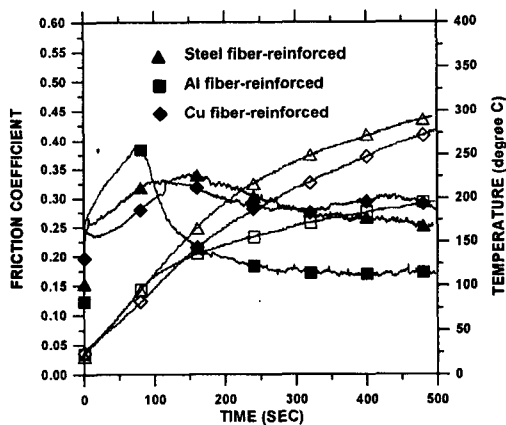
3-1. 금속섬유에 따른 초기 마찰특성의 변화(Phase I)

금속섬유의 종류에 따른 초기 마찰계수의 변화를 측정하기 위해 초기 조건을 일정(800rpm, 7kgf/cm², 100sec, 3 times)하게 유지하고 상온의 초기온도(IBT : initial brake temperature)에서 끌기 시험을 시행하여

마찰열에 의한 평균 마찰계수의 변화와 온도를 측정 하였다. Fig.2-(a),(b)에서 볼 수 있듯이 회주철과 AI-MMC 로터의 경우 모두 구리와 저 탄소강보다는 알루미늄 섬유를 함유한 마찰재를 사용했을 때 상대적으로 낮은 마찰계수를 나타냄을 알 수 있다. 또한 회주철보다는 AI-MMC 로터를 사용했을 경우가 전반적으로 비교적 낮고 안정화된 마찰계수를 보여 주며, 특히 이러한 경향은 알루미늄 섬유를 함유한 마찰재의 경우 두드러지게 나타난다. 마찰열에 의해 상승되는 로터의 온도를 비교해 보면 저탄소강과 구리 섬유보다는 알루미늄 섬유를 함유한 마찰재의 경우에 약 100°C 정도 낮은 로터 온도의 상승폭을 보이고 또한 회주철보다는 비교적 열전도도가 좋은 AI-MMC 로터의 경우에 로터 온도가 더욱 낮음을 알 수 있다. 대체적으로 로터의 온도가 약 100°C 에 도달할 때까지는 마찰계수의 증가 현상을 보이고 있는데 이러한 현상은 페놀수지(phenolic resin)의 변성에 의한 특성이라고 평가되어진다[11]. 그러나 Fig. 2-(b)에서는 약 100 초를 지나서 알루미늄 금속섬유 마찰재의 경우는 전형적인 마찰력 감소현상을 보이고 다른 금속 섬유의 경우는 다소 안정화된 마찰계수를 유지하고 있는데 이것은 마찰재에 포함되어 있는 윤활제의 열분해에 기인한다고 판단되어진다[12]. 이러한 마찰계수의 거동은 마찰열에 의한 마찰계면의 온도상승과 직접연관이 있으며 실제 마찰계면에서의 온도는 로



(a) Cast iron rotor



(b) Al-MMC rotor

Fig. 2. Change of initial friction coefficient and rotor temperature during dragging using three different friction materials rubbing against gray cast iron and Al-MMC rotors(both of friction coefficient and temperature are mean values after drag test).

터 표면에서 측정된 값보다 높은 온도를 유지하는 것으로 알려져 있다. 따라서 마찰계면의 온도가 고체 윤활제의 분해 온도 이상으로 상승되어 마찰재에 함유된 고체 윤활제인 Sb_2S_3 (열변형 온도:300-430°C)의 열분해가 진행되어 Sb_2O_3 , Sb_2O_5 등의 산화물로 변화함으로써 구리와 저탄소강 섬유를 포함한 마찰재의 경우에서 마찰계수의 안정화에 도움을 주고 있다. 반면 알루미늄 섬유를 포함한 마찰재의 경우에는 온도 상승폭이 낮아 열분해 온도에 이르지 못하고 약 200 초까지는 fade 현상을 보이다가 이후 안정화된 마찰계수를 나타내고 있음을 알 수 있다. 회주철 로터의 경우 열전도도의 차이에 의해 Al-MMC 로터에 비해 로터 온도 상승폭이 높아서 약 170 초까지는 3 가지 마찰재의 경우에 모두 Sb_2S_3 열분해에 의한 작용이 유지되다가 이후 Al-MMC 로터의 경우와 유사한 경향을 보이고 있다. 한편, Fig. 3에서 보듯이 끌기시험 후 마찰재의 마모량을 보면 저탄소강 섬유를 함유한 마찰재가 가장 많은 마모량을 보였고 구리섬유의 경우는 그 보다 약간 적었으며 알루미늄 섬유의 경우는 다른 두 섬유의 마찰재보다 두드러지게 적은 값을 나타냈다. 이러한 현상은 각 마찰재와 로터 재질에 따른 마찰계수의 거동과 그에 따른 마찰계면의 온도가 윤활막(transfer layer)의 형성에 영향을 미쳐서 나타난 현상으로 판단되며 회주철과 Al-MMC 로터의

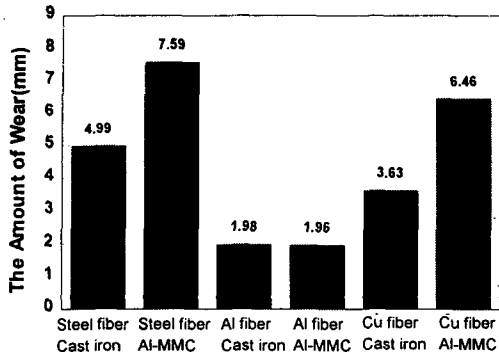


Fig. 3 Amount of friction material wear after Phase I.

경우 모두 알루미늄 섬유를 함유한 마찰재와의 마찰시 상대적으로 온도 상승폭이 낮으므로 다른 두 금속섬유를 함유한 마찰재보다는 두터운 윤활막이 유지되어 낮은 마모량을 나타낸 것으로 사료된다 [5,6,7,8,9,10]. 또한 Al-MMC 로터의 경우가 회주철에 비해서 많은 마찰재의 마모량을 보이는 것은 매우 강한 SiC 입자가 마모에 영향을 주고 있기 때문이다. 그리고 구리와 비교해서 저탄소강 섬유의 경우가 더 많은 마모량을 보이는 것은 Mohs scratch hardness 값(Cu:2.5 / Steel:5)이 더 큰 저탄소강 섬유가 상대적으로 로터의 윤활막을 쉽게 파괴하므로 로터에 의한 마찰재의 마모가 증가하는 것으로 사료된다.

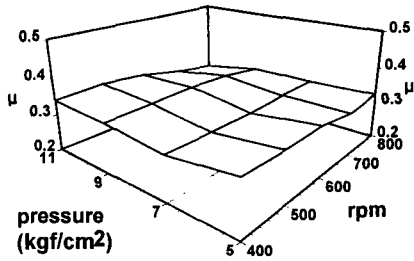
3-2. 속도와 압력의 변화에 따른 마찰특성(Phase II)

Burnishing(800rpm, 7kgf/cm², 100sec, 3 times)

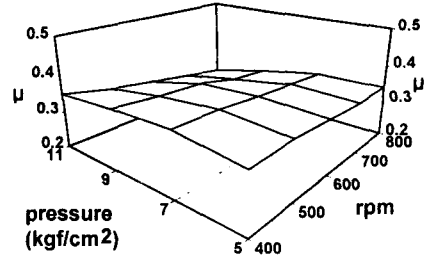
을 실시한 후 초기온도를 100°C로 유지하고 압력을 5~11kgf/cm², 속도를 400~800 rpm 범위에서 변화시키면서 속도와 압력의 변화에 따른 마찰계수의 변화를 비교하였다. Phase II의 마찰시험은 20초간의 끌기 시험으로부터 얻은 마찰계수의 평균 값으로 평가하였으며 Fig.4에 나타난 바와 같이 마찰재에 사용한 금속섬유의 종류에 관계없이 비교적 우수한 마찰특성을 나타내었다. 이러한 결과는 Phase I 실험과는 달리 비교적 마찰열에 의한 로터온도의 상승이 적어서 마찰재에 포함되어 있는 다른 원료들이 안정된 마찰효력을 유지하였으며 동시에 금속섬유만으로는 저온에서 마찰력에 두드러진 차이를 보이지 않고 있기 때문으로 사료된다. 특히 속도(rpm)에 따른 마찰계수의 영향은 400rpm 이하의 속도에서 나타나리라 생각되며 현재 이에 대한 보충 실험이 진행되고 있다.

3-3. 온도와 압력의 변화에 따른 마찰특성(Phase III)

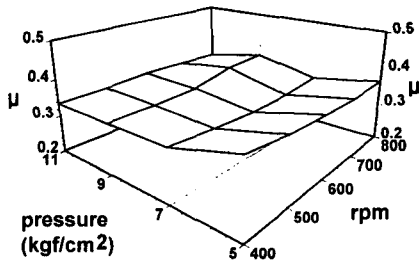
Burnishing(800rpm, 7kgf/cm², 100sec, 3 times)을 실시한 후 로터의 속도를 800rpm으로 유지하고 압력을 5~11kgf/cm², 온도를 40~200°C 범위에서 변화시키면서 온도와 압력의 변화에 따른 마찰계수의 변화를 비교하였다. 구리섬유를 포함한 마찰재를 사용한 Fig.5-(c)(d)의 경우는 온도가 상승할수록 마찰계수가 증가함을 보이는 반면, 알루미늄 섬유 마찰재를 사용한 Fig.5-(a)(b)에서는 상대적으로 고온(및 고압력)에서



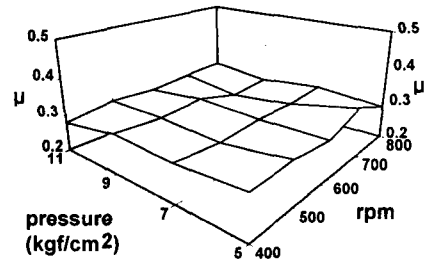
(a) Al fiber-cast iron rotor



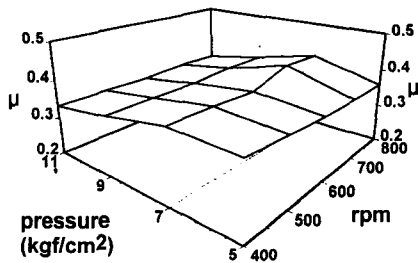
(b) Al fiber-Al-MMC rotor



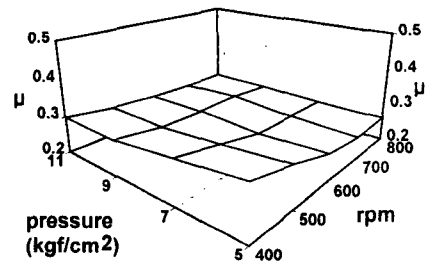
(c) Cu fiber-cast iron rotor



(d) Cu fiber-Al-MMC rotor

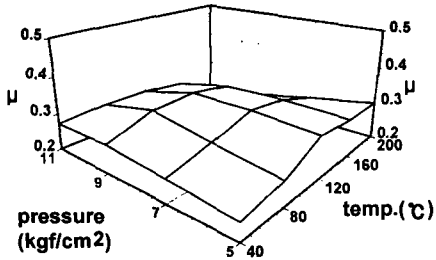


(e) Steel fiber-cast iron rotor

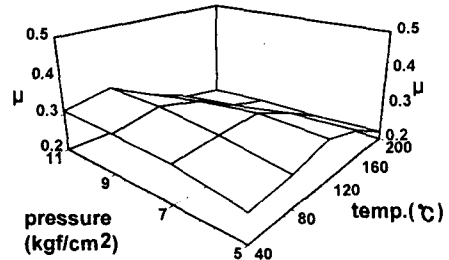


(f) Steel fiber-Al-MMC rotor

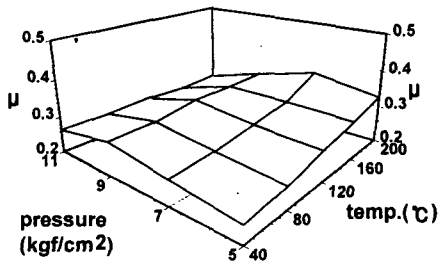
Fig. 4. Change of friction coefficient as functions of pressure and speed(rpm) during Phase II friction test.



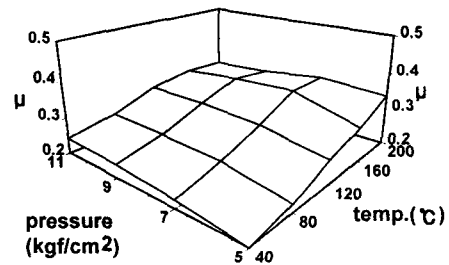
(a) Al fiber-cast iron rotor



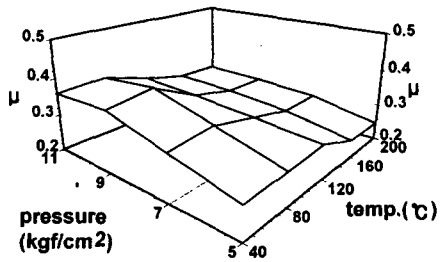
(b) Al fiber-Al-MMC rotor



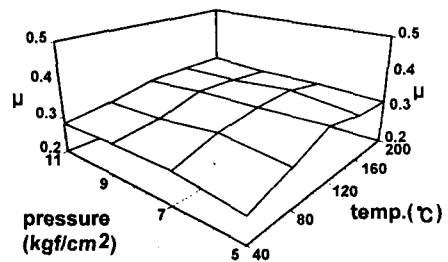
(c) Cu fiber-cast iron rotor



(d) Cu fiber-Al-MMC rotor



(e) Steel fiber-cast iron rotor



(f) Steel fiber-Al-MMC rotor

Fig. 5. Change of friction coefficient as functions of pressure and initial brake temperature during Phase III friction test.

마찰계수가 감소하는 현상을 보이고 있다. 이러한 현상은 알루미늄이 고온에서 마찰 효율을 상실함을 의미한다. 한편, 저탄소강 섬유 마찰재를 사용했을 경우 온도가 증가할수록 회주철 로터에서는 마찰계수가 감소하며 상대적으로 Al-MMC 로터에서는 증가 현상을 보이고 있고 비교적 안정적이다. 이러한 마찰현상은 금속섬유의 용융점, 상대재와의 물질적 특성차이(compatibility), 이에 따른 마찰계수의 거동 그리고 마찰열에 따른 다른 원료의 변성이 함께 나타난 것이며 현재 이들을 구분하여 분석하기 위한 보충실험이 진행되고 있다.

4. 결 론

현재 자동차용 브레이크에 사용되고 있는 회주철 로터의 대체재로 주목을 받고 있는 알루미늄 기지 복합재(강화재로 SiC 입자를 사용함) 로터에 대해 3 가지 다른 금속섬유(Al, Cu, Steel)를 함유한 마찰재의 상대적 마찰특성을 연구하였다. 끌기시험 시에는 Al-MMC 로터에 대한 마찰계수가 회주철로터에 비해 비교적 낮고 안정화된 것을 확인할 수 있었다. 특히, 알루미늄 섬유를 포함한 마찰재를 Al-MMC 로터에 사용한 경우에 마찰계수가 가장 낮고 비교적 안정된 마찰계수를 보였다. 구리와 저탄소강 섬유 마찰재의 경우는 로터온도가 약 100°C 에 도달하였을 때 고체 윤활제인 Sb_2S_3 가 열분해 되어 마찰계수의

안정성을 유지하는 역할을 하였고 알루미늄 섬유 마찰재의 경우 마찰력상실 현상을 나타내는 것은 알루미늄 섬유가 고온에서 마찰력을 상실하였으며 또한 Al-MMC 로터의 온도가 Sb_2S_3 열분해 온도까지 상승하지 못한 결과로 판단된다. 또한 SiC 입자로 인해 회주철보다는 Al-MMC 로터를 사용한 경우에 마찰재의 마모량이 상대적으로 많았다고 사료된다.

후 기

본 연구는 1998 년도 한국과학재단 지원 특정기초연구(과제번호:98-0200-02-01-3)에 의한 결과의 일부입니다. 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. Dong woo Suh, Dongil Kwon and Sunghak Lee, "Fracture Toughness Analysis of Cast A356-SiCp Composites", 대한금속학회지, 34 권 1 호, 1996.
2. Woo-Sang Kim, Dong-Sub and Sung hak Lee, "Microstructure and Mechanical Properties of A356 Al-SiCp Composites Processed By Vacuum Compo-Casting Method", 대한금속학회지, 34 권 8 호, 1996.
3. Tae-won Lee, Byoung-Kwon Sub, Doo-Myun Lee and Chi-Swan Lee, "Microstructure and Mechanical Properties of Die Cast

- SiCp/Al Alloy Composites”, 대한금속학회지, 35 권 3 호, 1997.
4. A.W.Urquhart, “Novel reinforced ceramics and metals : a review of Lanxide’s composite technologies”, Materials Science and Engineering, A144, 75-82, 1991.
 5. D.H.Hwang, D.E.Kim and S.J.Lee, “Influence of wear particle interaction in the sliding interface on friction of metals”, Wear 225-229,427-439,1999.
 6. Seong K.Rhee, Michael G.Jako, and Peter H.S.Tsang, “The Role of Friction Film in Friction, Wear and Noise of Automotive Brakes”, SAE Paper No 900004,29-36, 1990.
 7. Allan Wirth, Karen Stone and Robert Whitaker, “A Study of the Relationship Between Transfer Film Chemistry and Friction Performance in Automotive Braking Systems”, SAE Paper No 922541,1-8,1992
 8. Ernest Rabinowicz, “Friction and Wear of Materials”, A Wiley-Interscience Publication JOHN WILEY & SONS,INC., 12-43.
 9. Katsuhiko shibata, Akira Goto, Satoshi Yoshida, Yuichi Azuma and Koji Nakamura, “Development of Brake Friction Material”, Honda Research & Development No 930806, 149-161, 1993
 10. D.Massinon and V.Constantin, R.Adam, I sallit ad O.Lequec, “Tribological Characteristics and Wear Mechanisms of Hyper-Eutectic Alloys”.
 11. Seong Jin Kim, Young Suk Hong and Ho Jang. “Effects of the Phenolic Resins in the Automotive Friction Materials on Friction Characteristics”.
 12. Ho Jang, Jung Joo Lee, Sung Jin Kim, and Kee Young Jung, “The Effect of Solid Lubricants on Friction Characteristics”, SAE Paper No 982235, 1998.
 13. 김성진, 최낙천, 장 호, “습도에 따른 자동차용 마찰재의 마찰특성에 관한 연구”, 제 28 회 추계 윤활학술대회 초록집, 323-329, 1998.