

## 금속계 마찰재와 제동디스크 간의 마찰특성 연구

### Study of Tribological Characteristics Between Metallic Friction Materials and Brake Disk

김상호<sup>†</sup> · 이희성\*

Sang-Ho Kim · Hi Sung Lee

**Abstract** The tribological characteristics such as friction coefficient, friction stability, wear rate and braking temperature between various types of metallic friction materials and heat resistant steel disk, were investigated by using lab-scale dynamometer. Friction materials for high speed train have higher friction coefficient and friction stability as compared to aircraft friction materials even though friction materials for high speed train have lower wear rate. In addition, Cu-matrix friction materials have higher temperature increase rate than Fe-matrix friction materials. All friction surfaces have Fe-base oxide layer after completing test.

**Keywords** : High speed train, Sintered friction materials, Friction coefficient, Wear rate, Friction stability

**요 지** 소형 다이내모 시험기를 이용하여 4종류의 금속계 소결마찰재와 내열합금 디스크간의 마찰특성을 평가하였다. 고속철도용 소결마찰재는 항공기용 소결마찰재 보다 높은 마찰계수와 마찰계수 안정성을 나타내며, 마모량도 적었다. 또한, 동합금 기지 마찰재는 철계 기지 마찰재보다 마찰면의 온도가 급격히 상승하면 냉각도 빨리 이루어졌다. 시험 후 모든 마찰면에서 Fe 기지의 산화피막이 형성되었고, 산화피막에 따라 마찰특성이 달라졌으며, 마찰면에서는 정상마모분이 일부가 마찰면 단차부에서 트랩되는 것을 확인하였다.

**주 요 어** : 고속철도, 소결마찰재, 마찰계수, 마모량, 마찰계수 안정성

## 1. 서 론

최근 들어 운송장치 및 산업기계들은 고성능화, 대형화, 고속화의 경쟁을 벌이고 있으며 대표적인 운송장치인 고속철도와 항공기가 이러한 추세를 주도하고 있다. 대형화, 고속화를 위한 전제조건은 대용량의 출력과 함께 이를 제동할 수 있는 장치 즉, 제동장치의 고성능화이다.

제동장치는 전기식 제동장치(electrical brake system)와 기계식 제동장치(mechanical brake system)로 구분할 수 있으며, 대부분의 운송장치에서는 기초적인 제동장치로 기계식 제동장치를 택하고 있다. 일반적인 기계식 제동장치는 디스크에 마찰재를 압착시켜 운동에너지를 열에너지로 전환하는 방식을 택하고 있으며, 필요한 제동에너지

에 따라서 디스크와 마찰재 소재를 달리하여 적용하고 있다.

철도차량에 사용되는 디스크의 경우 제동에너지 및 차량의 설계 철학에 따라 주철재(Cast iron) 디스크, 주강재(Cast steel) 디스크 및 단조강(Forging steel) 디스크를 사용하고 있으며, 최근에는 디스크 소재로 알루미늄 복합재료에 대한 연구가 이루어지고 있다[1]. 하지만 높은 운동에너지를 제동해야 할 경우 강재(Steel)를 열처리(Heat treatment)하여 사용하는 하는 것이 일반적이다[2].

마찰재는 기지(Matrix)를 이루는 소재에 따라 유기계(Organic) 마찰재, 금속계(Metallic) 마찰재 및 카본(Carbon) 복합재로 나눌 수 있으며, 이러한 마찰재의 적용은 부하(Load), 빈도(Frequency), 경제성(Economic feasibility) 등을 고려하여 적용하게 된다. 유기계 마찰재의 경우는 비교적 저에너지(Low energy)가 필요한 장치에 적용되며, 카본 복합재는 철도차량에서 적용하기에는 경제적인 측면과 기술적인 측면에서 아직까지 해결해야 할 문제점

<sup>†</sup> 책임저자 : 정회원, (주)다윈프릭션, 부장, 서울산업대학교 박사과정  
E-mail : ganaon@dawinf.co.kr  
TEL : (032)821-4621 FAX : (032)821-4623

\* 교신저자 : 정회원, 서울산업대학교, 교수

Table 1. Chemical composition of the disk material

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V
0.24~0.31	0.4~0.7	0.5~0.9	≤0.025	≤0.025	≤0.40	1.3~1.6	0.6~0.9	0.20~0.40

이 있다[3]. 금속계 마찰재는 에너지 흡수능력이나 경제적인 측면에서 고속철도차량에서 적합한 것으로 판단되어 현재 적용되고 있는 상태이나, 아직까지 철도차량 및 고에너지 장치에서 적용되는 내열강 디스크 상호간의 체계적인 제동 마찰특성에 대한 연구는 이루어지지 않은 상태이다.

본 연구는 고속철도 및 항공기에 적용되는 금속계 소결 마찰재와 이에 상대재로 사용되는 내열강(Heat resistance steel) 디스크간의 트라이볼로지(Tribology) 특성을 평가하므로써 상호간의 적절성 여부를 확인하고 향후 개발되는 고성능 기초제동장치의 기초자료를 제공하고자 한다.

## 2. 본 문

본 연구에서는 4종류의 금속계 소결마찰재 저합금 내열강 디스크간의 트라이볼로지 특성을 Lab-Scale Dynamometer를 이용하여 평가하였다. 아울러 저합금 내열강 상호간의 마찰특성도 평가하였다.

### 2.1 시험편

#### 2.1.1 제동디스크

본 연구에 사용된 디스크는 고속철도용이나 항공기용으로 사용되는 저합금 내열강(Low-alloyed heat resistance steel)을 채택하였으며, 기계가공 후 조질처리(Quenching & Tempering) 하고 연마하여 제작하였다. 디스크의 화학성분을 Table 1에, 물성은 Table 2에 나타내었다. 디스크의 현미경 조직사진은 Fig. 1에 나타내었는데, 전형적인 Tempered Martensite조직을 하고 있다. 연구에 사용된 디스크의 형상은 Fig. 2에 나타내었고, 크기는 외경 110mm, 두께 10mm이다.

#### 2.1.2 마찰재

본 연구에서는 4종류의 금속계 소결마찰재(Sintered Metallic Friction Material)를 사용하였다. 2종류(T1, T2)는 고속철도용 금속계 소결마찰재이며 다른 2종류(A1, A2)는 항공기용 금속계 소결마찰재이다. Table 3에 각각 마찰재에 대한 조성을 나타내었다. 또한, 디스크와 동일 소재로 마찰시편을 제작하였다.

Table 2. Mechanical Properties of the disk material

인장강도(MPa)	항복강도(MPa)	연신율(%)	경도(HB)
1,160	950	12	352



Fig. 1. Microstructure of Low alloyed steel (x500)

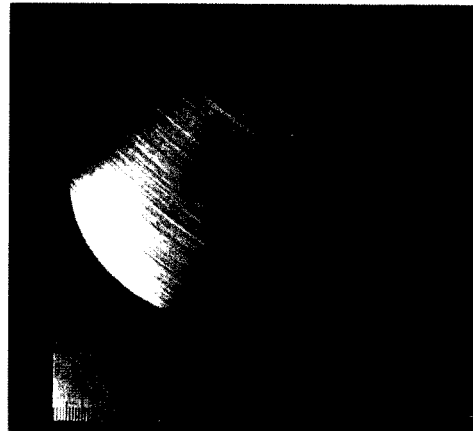


Fig. 2. Brake disc for test

Table 3. Chemical compositions for 4 types of friction materials

	T1, T2				A1, A2		Steel
	Cu	Fe	Si	Al	Cu	Fe	
T1	55~65	10~20	3~8	3~8	6~15	-	5~10
T2	40~50	25~35	3~8	3~8	6~15	-	5~10
A1	60~70	-	3~8	3~8	6~15	2~5	5~10
A2	-	70~80	2~5	2~5	4~10	2~5	5~10
Steel	-	95	-	-	-	-	5

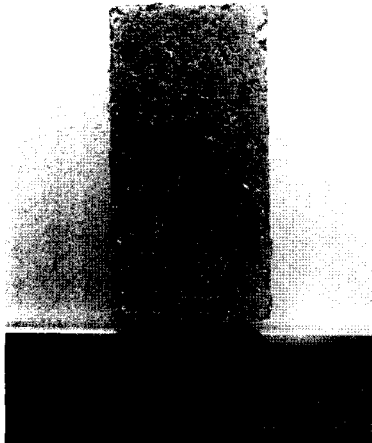
T1과 A1은 동계(Cu-Matrix) 소결마찰재, A2는 철계(Fe-Matrix) 소결마찰재이며, T2는 철과 동이 혼합된 기지를 이루고 있다.

Table 4에는 각 4종류 마찰재의 측정 물성치를 나타내었다.

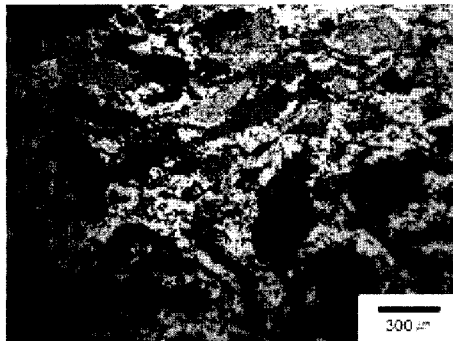
**Table 4.** Mechanical Properties of friction materials

	T1	T2	A1	A2	Steel
경도(HRR)	115	92	107	110	HRC 34
밀도(g/cm <sup>2</sup> )	5.2	3.7	4.9	4.3	7.9

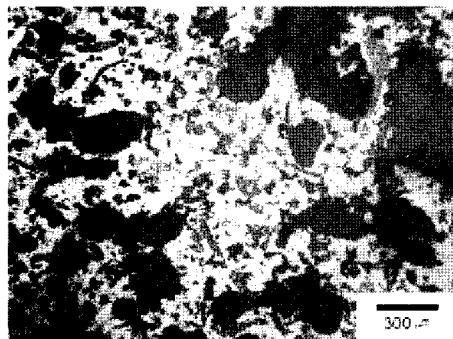
Fig. 3은 마찰시편의 형상을 나타내었고, Fig. 4~7는 각각 마찰재에 대한 광학현미경(Optical Microscope) 사진이다. 각 시편은 35mm × 16mm × 8mm(두께)로 제작하였다.



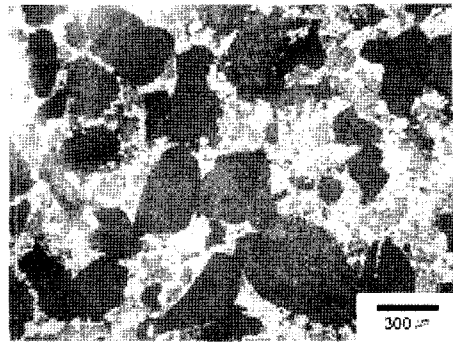
**Fig. 3.** Brake pad for test



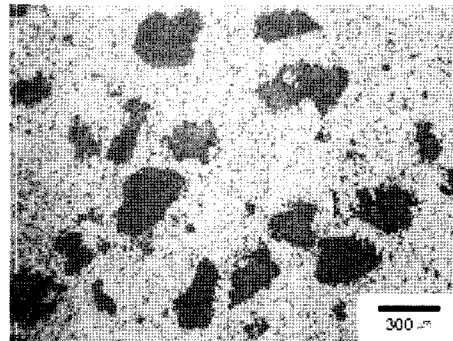
**Fig. 4.** Microstructure of T1 (×50)



**Fig. 5.** Microstructure of T2 (×50)



**Fig. 6.** Microstructure of A1(×50)

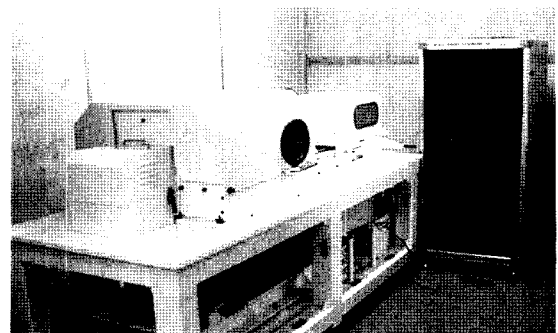


**Fig. 7.** Microstructure of A2 (×50)

## 2.2 시험장치

마찰특성을 평가하기 위하여 소형 다이내모 시험기(Lab-Scale Dynamometer)를 사용하였다(Fig. 8) 소형다이내모 시험기는 구동부(Driving Unit), 기계구조물을 포함한 시료 장착부, 유압-서보시스템 및 유압 장치, 제어 및 계측장치, 전원 장치 및 제어계측용 컴퓨터시스템으로 구성되어 있다(Fig. 9).

본 시험기는 제동디스크를 요구하는 속도로 회전시킨 후 마찰재에 하중을 가하여 이때 발생하는 토크, 회전속도, 하중 등을 실시간으로 측정할 수 있으며, 측정된 데이터는 컴퓨터에 의해 자동으로 분석, 저장 및 프린터 출력이 가능한 구조이다. 시험기의 최대회전수는 5,000rpm이다.



**Fig. 8.** Lab-Scale Dynamometer

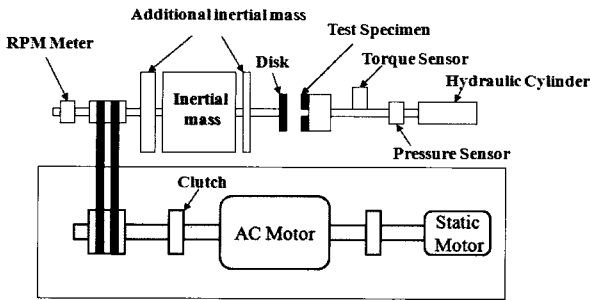


Fig. 9. Schematic of Lab-Scale Dynamometer

2.3 시험방법

2.3.1 제동시험조건

본 연구에서는 실제 제동조건을 반영하기 위해 일정압력으로 마찰재를 디스크에 압착시켜 마찰특성을 평가하는 압력모드(Pressure Control Mode)를 사용하였다. 시험 압력은 제동시험에서 가장 많이 사용하는 490KPa로 설정하였고 [4], 관성질량은 0.095kgf·m·s<sup>2</sup>로 고정하였으며, 마찰반경은 0.044m, 브레이크 패드의 면적은 5.6cm<sup>2</sup>로 시험하였다. 시험을 위한 기초 조건은 Table 5와 같이 하였다

Table 5. Basic conditions for Lab. Scale Dynamometer test

관성질량 (Inertia mass)	패드면적 (Pad area)	마찰반경 (Effe radius)	실린더 면적 (Cyl area)
0.095kgf·m·s <sup>2</sup>	5.6cm <sup>2</sup>	0.044m	7.069cm <sup>2</sup>

2.3.2 갈아 맞춤

본 시험에 앞서 디스크와 마찰재의 접촉을 균일하게 할 목적으로 갈아 맞춤(Bedding)을 실시한다. 갈아 맞춤은 본 실험에 영향을 받지 않도록 저속, 저압에서 제동을 실시하여 마찰재의 접촉 면적이 70% 이상[4] 될 수 있도록 한다. 갈아 맞춤을 위한 제동프로그램을 Table 6에 나타내었다. 만일, 갈아 맞춤 제동프로그램을 완료한 경우에도 마찰재의 접촉면적이 70%가 되지 않을 경우는 다시 한번 갈아 맞춤 프로그램을 실시한다.

Table 6. Bedding Program

순서	시험 패턴	시험압력 (kPa)	회전수(rpm)		제동회수
			주행	정지	
1	압력일정	177	1,097	5	20
2		304			20
3		304	1,645		30
4		422			30

2.3.3 본 실험

본 시험은 규정된 압력에서 회전속도에 따른 마찰특성을

평가하였으며, 각 회전속도에서 50회 제동을 실시하였고, 이를 2회 반복하여 총 300회 제동하였다. Table 7에 본 실험의 시험조건을 나타내었다.

Table 7. Main test program for Lab. Scale Dynamometer

순서	시험패턴	시험압력 (kPa)	회전수(rpm)		제동회수
			주행	정지	
1	일정압력	490	1,645	10	50
2			2,194		50
3			2,742		50

2.4 마찰특성 평가

본 연구에서는 마찰재와 디스크간의 마찰특성을 평가하기 위해 마찰계수, 마찰계수의 안정성, 마찰재의 마모량, 디스크의 마모량 및 제동시 온도를 측정하였다.

마찰계수는 제동시 발생하는 토오크 값과 압부력 그리고 마찰반경에 의해 결정된다. 마찰반경이 일정하고, 압력일정모드로 시험을 실시하였으므로 토오크 값의 변화가 마찰계수의 변화가 된다.

$$\mu = \frac{T}{P_0 R}$$

단,  $T$  : 제동 토오크(Friction Torque)

$P_0$  : 제동압력(Braking Pressure)

$R$  : 마찰반경(Friction Radius)

마찰계수 안정성(Stability)은 제동시 마찰계수의 변화를 평가하는 항목으로 제동시 순간마찰계수의 변화가 평균마찰계수에서 벗어난 정도를 나타낸다. 마찰계수 안정성을 식[5]으로 나타내면 다음과 같다.

$$\mu_s = [(\mu_{ave}) - (\mu_{max} - \mu_{min}) \times \frac{1}{2}] \times \frac{100}{(\mu_{ave})}$$

단,  $\mu_s$  : 마찰계수 안정성

$\mu_{ave}$  : 평균 마찰계수

$\mu_{max}$  : 최고 마찰계수

$\mu_{min}$  : 최저 마찰계수

마찰재의 마모량 평가는 본 실험 전 후의 무게차를 측정하고 이를 밀도 및 표면적을 적용하여 마모두께로 나타내었다.

마찰재에 의한 디스크의 마모량(Wear rate)은 본 실험이 완료된 후 표면조도계(Roughness tester)로 마모트랙을 측

정하여 Ra(중심선 평균조도) 값과 Ry(최대높이 거칠기)값을 산출하였다.

마찰재의 제동시 온도는 마찰면에서 1mm 떨어진 부위에 K-Type 열전대(Thermocouple)를 장착하여 측정하고, 냉각과정의 온도 변화도 관측하였다.

### 3. 시험 결과 및 고찰

#### 3.1 평균마찰계수

Fig. 10는 5종류의 마찰재와 내열강 디스크간의 각 속도에 대한 평균마찰계수를 나타내었다.

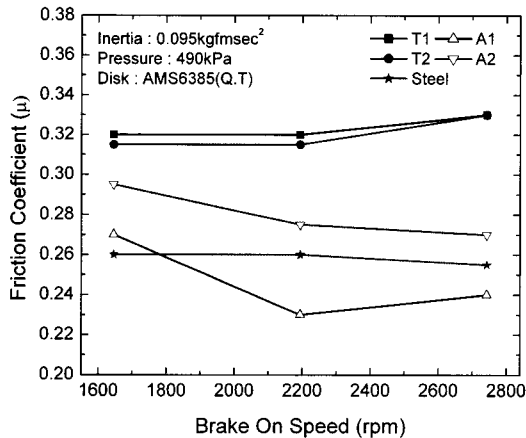


Fig. 10. Friction coefficient of 5 type materials coupling

시험결과 고속철도용 마찰재와 항공기용 마찰재의 특성은 뚜렷이 달랐다. 고속철도용 마찰재인 T1, T2의 평균마찰계수는 전속도 구간에서 0.31~0.33수준의 안정된 값을 나타내었고, 반면 항공기용 마찰재인 A1, A2의 평균마찰계수는 0.23~0.29 수준으로 상대적으로 낮고 속도에 따른 변화폭이 많은 것으로 나타났다.

항공기용 마찰재중에서 철계 마찰재인 A2가 동계 마찰재인 A1에 비해 상대적으로 0.03수준의 높은 평균 마찰계수를 나타내었지만, 이것은 각 운송장치의 특성에 맞추어 마찰재를 설계했기 때문인 것으로 판단된다.

강(steel)마찰시편과 강(steel) 디스크간의 평균마찰계수는 속도에 따른 변화가 거의 없이 0.26을 유지하였다. 이러한 평균마찰계수는 항공기용 마찰재와 디스크간의 평균마찰계수의 ±10%이내의 값이다. 항공기용 마찰재의 경우 강(Steel)판에 마찰재가 비교적 얇게 접합되어 있는 형태인데, 부득이한 경우 마찰재가 전량 마모되어 강(Steel)과 강(Steel)이 마찰 될 때에도 제동거리를 확보할 수 있어야 한다는 설계철학이 반영된 것으로 판단된다.

반면 고속철도용 마찰재와 디스크간의 평균마찰계수와

는 강(Steel)/강(Steel) 간의 평균마찰계수는 약 20% 이상의 평균마찰계수 차이를 보여준다. 고속철도용 브레이크 마찰재는 강판에 마찰재가 비교적 두껍게 접합되어 있는 구조인데 마찰재가 전량 마모되어 강(Steel)/강(Steel)의 마찰이 일어나는 경우 제동거리 확보가 어려워질 수 있음을 의미한다.

#### 3.2 마찰계수 안정성

Fig. 11은 각 조합(Coupling)에 대한 마찰계수 안정성을 나타내었다.

모든 마찰재의 경우 저속(1,645rpm)에서 높은 마찰계수 안정성을 보여주며, 중속(2,194rpm)과 고속(2,742rpm)에는 동일 수준의 마찰계수 안정성을 나타낸다.

고속철도용 마찰재인 T1, T2의 경우가 항공기용 마찰재인 A1, A2 및 강(Steel)에서 보다 높은 마찰계수 안정성을 나타내었다. 이러한 결과는 제동감속도만을 요구사항으로 하는 항공기용 마찰재에 비해 민수용인 고속철도용 마찰재가 더욱 세심한 재료설계에 의해 제작되었기 때문인 것으로 판단된다.

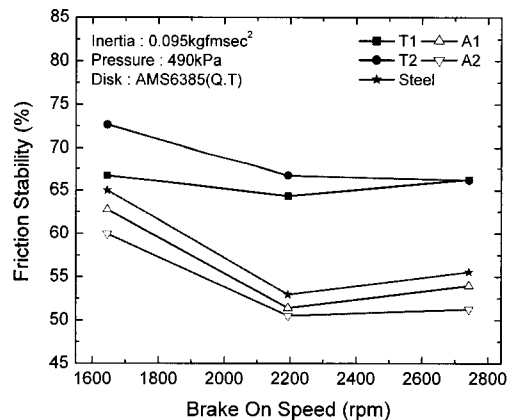


Fig. 11. Friction stability for 5 types of materials coupling

#### 3.3 마찰시편 마모량

Fig. 12는 마찰재의 마모량을 나타내었다. 고속철도용 마찰재인 T1, T2의 마모량이 항공기용 마찰재인 A1, A2의 약 2.0~2.5배 높게 나타났다. 강(Steel)의 마모량은 다른 마찰재에 비해 약 2~6배 많은 것으로 나타났다. 강의 마모량이 다른 마찰재에 비해 높다는 것은 항공기용 마찰재의 경우에도 임시적으로 몇 차례를 제동에 적용 할 수는 있지만 장시간 사용은 불가능 하다는 것을 의미한다.

마찰계수가 높을수록 마모량이 많을 것이라는 추측이 일반화 되어 있지만, 본 연구결과에서 보듯이 고속철도용 브레이크 마찰재는 항공기용 마찰재에 비해 마찰계수가 약

20% 높은데도 불구하고 마모량은 오히려 50% 수준에 불과하다. 항공기용 마찰재의 마모량이 이처럼 많은 것은 본 시험조건이 고온에서 제동되는 항공기 제동조건을 반영하지 못한 것에 기인한 것으로 판단된다.

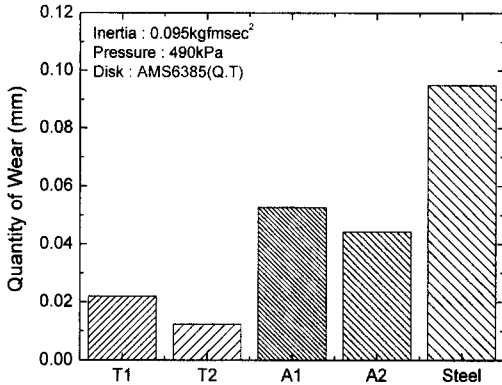


Fig. 12. Wear rate for 5 types of materials coupling

### 3.4 디스크 공격성

Fig. 13은 마찰재에 의한 디스크 공격성을 나타내었다. 디스크 공격성은 디스크 마모트랙을 표면조도 측정기로 평가한 것이다.

Ra 값은 T1, A1은 비슷한 수준이나, 마찰재의 마모량이 가장 적은 T2는 다른 마찰재의 2배수준으로 나타났다. 강(Steel)의 Ra값도 높은 값으로 나타났다.

철계 마찰재인 A2와 철/동계인 T2 및 강(Steel)의 Ry값이 동계인 T1, A1에 비해 2~5배 높게 나타난 현상도 주목할 만한 결과이다.

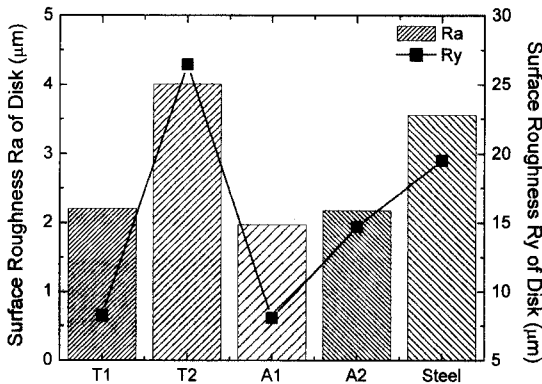


Fig. 13. Disk wear for 5 types of materials coupling

### 3.5 마찰재 온도

Fig. 14는 고속(2,742rpm)에서 제동시 마찰시편의 마찰 표면 1mm 밑에서 측정된 온도의 변화를 나타내었다. 최고 온도는 강(Steel)이 가장 높은 420°C, A1은 400°C, T1과 A2는 370°C이며 T2가 가장 낮은 270°C 수준이다. T2에서

온도가 낮은 것은 T2의 밀도가 낮는데 기인한 것으로 판단된다.

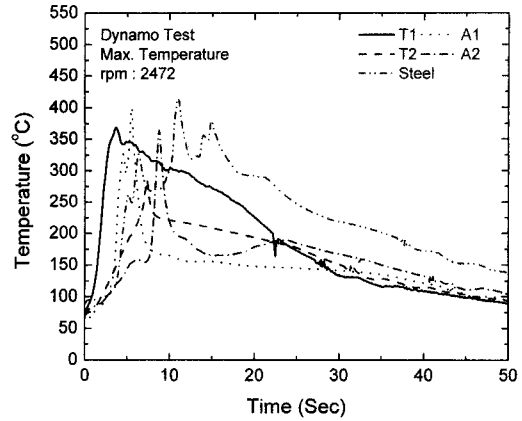


Fig. 14. Braking temperature profile

동계마찰재인 T1과 A1이 가장 빨리 온도가 상승하나, 마찰성분이 비교적 단순한 A1은 빨리 냉각되는 반면, 마찰성분이 많은 T1은 냉각속도가 늦다. 강(Steel)이 가장 늦게 온도가 상승하고 가장 늦게 냉각되는 것으로 확인되었다. 즉, 합금성분이 많을수록, Fe성분이 많을수록 서서히 온도가 상승하고 냉각도 늦어지는 경향이 있는 것으로 확인되었다.

### 3.6 마찰면 분석

Fig. 15~18은 제동시험 후 각 마찰재의 마찰표면을 SEM (Scanning Electron Microscopy)으로 관찰한 것이다.

Fig. 15(a)는 T1 마찰시편의 마찰면 SEM사진으로 진한 검정색은 마찰재의 성분에 포함된 흑연(Graphite)이며 나머지 대부분인 진한 회색 부분은 마찰면에 형성된 산화피막이다. Fig. 15(b)는 T1의 마찰면의 어두운 회색부위(A)를 EDX(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)로 분석한 결과로 산소(Oxygen)가 46at% 검출되고 주 피크(peak)는 Fe 성분이다. 마찰면에서의 최고온도가 350°C를 초과하므로 마찰면의 산화물은  $Fe_2O_3$ 와  $Fe_3O_4$ 로 판단된다. Fig. 15(c)는 T1 마찰면의 밝은 부위(B)의 EDX Spectrum으로 산소는 검출되지 않으며 주 피크는 Fe이다. 즉, T1의 마찰면은 디스크로부터 Fe가 마찰재로 전이(Transfer)된 후 안정적인 산화피막을 형성하는 것으로 판단된다. 이러한 산화피막은 마찰재의 마모, 디스크의 공격성 및 제동소음등에 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 금속계 소결마찰재의 산화피막 특성은 향후 더 연구가 필요한 분야이다.

Fig. 16(a)는 T2 마찰시편의 마찰면 SEM사진으로 T1과는 달리 어두운 회색(A)과 밝은 색(B)이 혼재되어 있다. Fig. 16(b), 16(c)는 T2의 마찰면의 진한 회색부분과 밝은

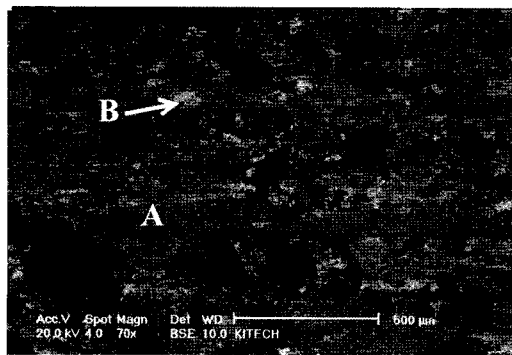


Fig. 15(a). Friction surface of T1

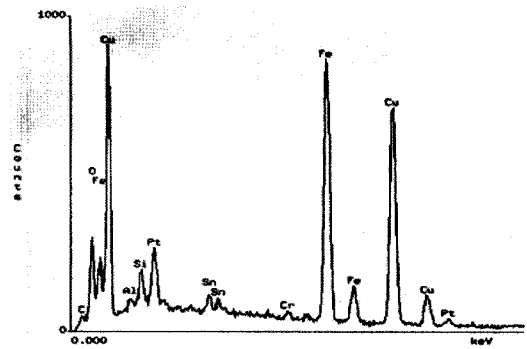


Fig. 16(b). EDX Spectrum of T2(Dark Grey)

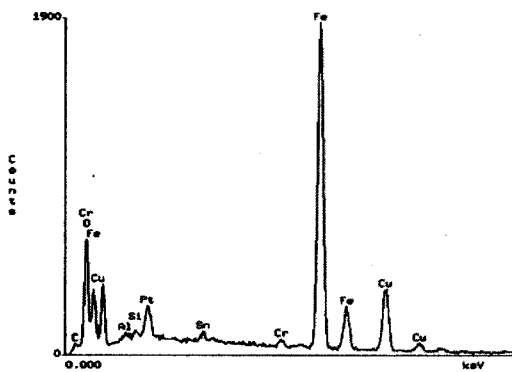


Fig. 15(b). EDX Spectrum of T1 Surface

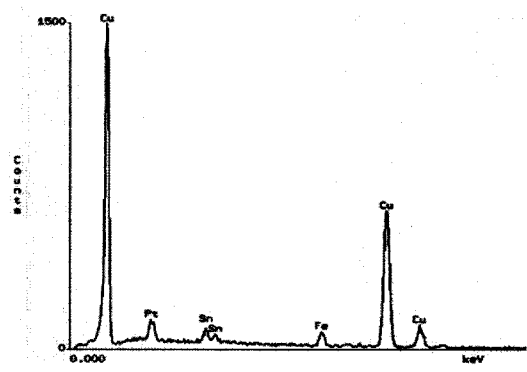


Fig. 16(c). EDX Spectrum of T2(Bright)

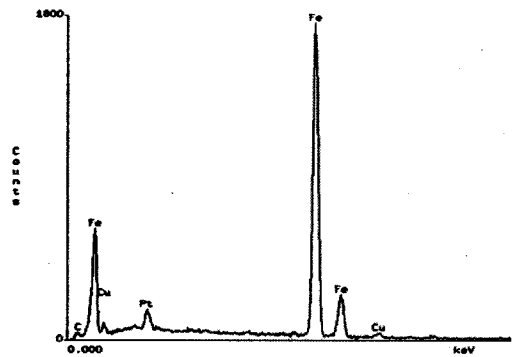


Fig. 15(c). EDX Spectrum of T1(Bright)

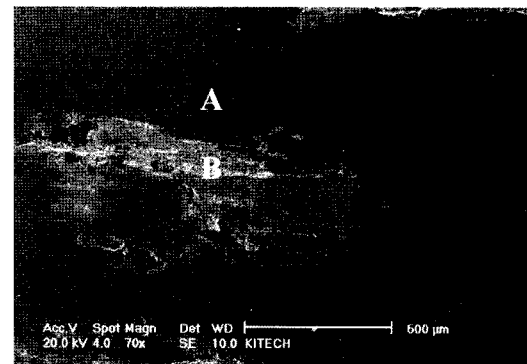


Fig. 17. Friction surface of A1

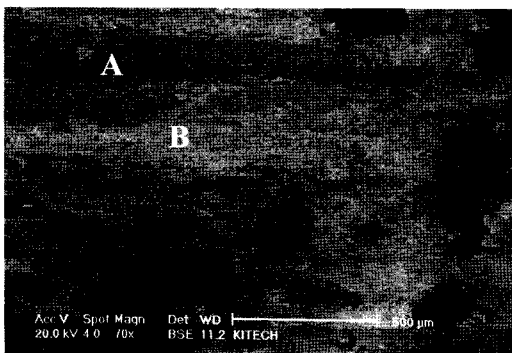


Fig. 16(a). Friction surface of T2

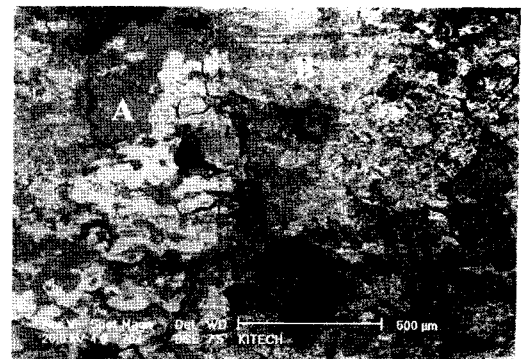


Fig. 18. Friction surface of A2

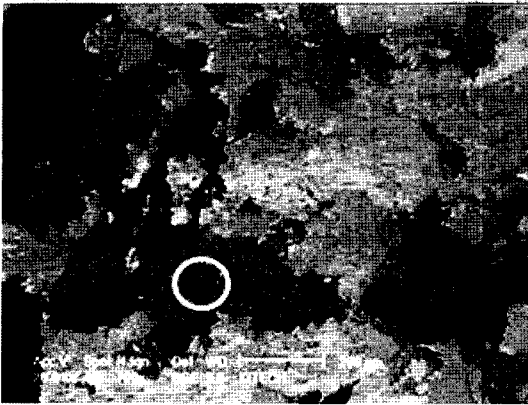


Fig. 19(a). Friction Surface of T1



Fig. 21. Friction Surface of A2

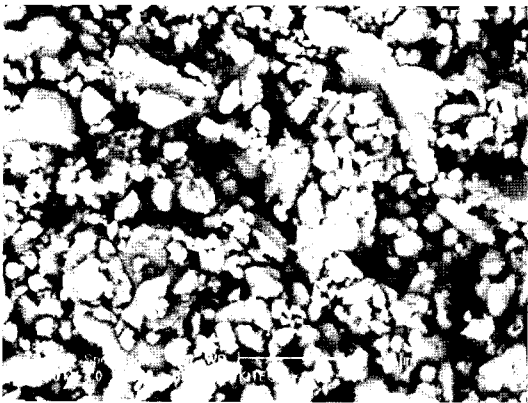


Fig. 19(b). Debris on the Surface of T1

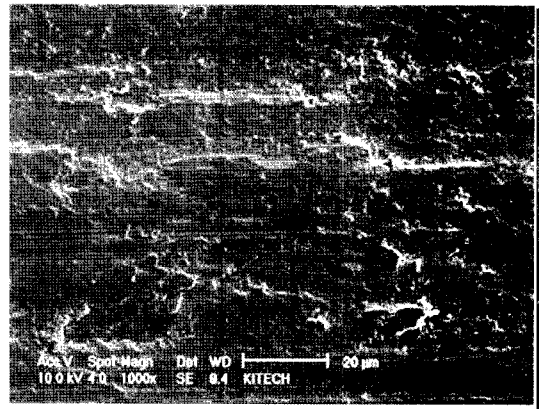


Fig. 22(a). Friction Surface of T1(Disk)



Fig. 20. Friction Surface of T2

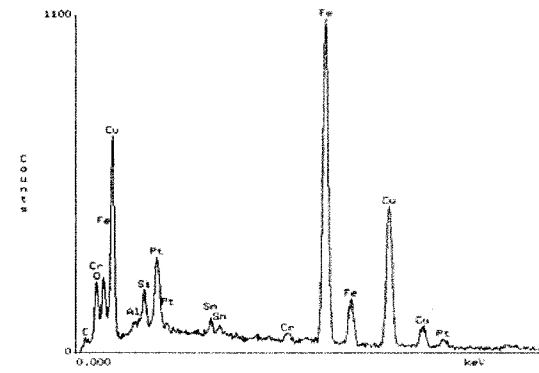


Fig. 22(b). EDX Spectrum of T1(Disk)

부분에 대해 EDX 결과를 나타내었다. 진한 회색부분에서는 산소(Oxygen)이 40at%를 나타내며 주 피크(peak)가 Fe와 Cu로 구성되어 있다. 반면, 밝은 부분은 거의 산소(Oxygen)가 검출되지 않고 주 피크가 Cu로 되어 있다. Fig. 13에서 나타내었듯이 T2는 디스크 공격성이 높으면서도 디스크의 성분(Fe)이 효과적으로 마찰재로 전이되지 못하고 탈락하였음을 의미한다.

Fig. 17은 A1의 마찰면 SEM사진으로 어두운 회색 부분

(A)이 매끈한 형태로 넓게 분포하고 있으며, 부분적으로 밝은 부분도 존재한다. EDX분석결과 진한 부분과 밝은 부분은 T1, T2와 유사하게 산소(Oxygen)의 함량 차이가 뚜렷하게 나타났다.

Fig. 18은 A2의 마찰면의 SEM 사진으로 다른 3종의 마찰면과는 차별된 형상으로 미세한 마찰재의 결정립이 보이며 산화피막이 불안정하게 형성되어 있다. 이러한 원인은 A2가 철계마찰재로 강 디스크와 마찰된 것에 기인하는 것



으로 추정된다.

Fig. 19(a)는 T1의 마찰면 SEM사진이고 이 사진의 ○로 표시된 부분을 확대한 사진이 Fig. 19(b)이다. Fig. 19(b) 사진에서는 수 마이크론의 정상 마모분이 결집되어 있는 것이 확인된다. 이러한 마모분이 결집되는 위치는 대부분 마찰재의 흑연 주위나 결정립계등 단차가 있는 곳이다. 즉, 마찰면에서 단차가 있는 곳은 마모분의 집결지(Reservoir)로 작용하는 것으로 판단된다.

정상 마모분이 마찰면에 존재하는 현상은 T1 뿐만이 아니라, T2, A2(Fig. 20~21)에서는 관찰되지만, Fig. 17에서 보여주듯이 마찰면에 단차가 없는 A1의 경우에는 관찰되지 않는다. 이러한 마찰면에서 마모분의 역할은 다른 마찰 시스템에서는 다소 연구가 진행되었지만[6], 소결마찰재와 강(Steel) 디스크간에는 아직 연구가 이루어지지 않는 상태이며 이에 대한 연구는 추후 추진될 예정이다.

Fig. 22(a)는 T1 마찰시편에 대한 디스크면의 SEM사진이며, Fig. 22(b)는 EDX분석 결과이다. 디스크 마찰면에는 산소(Oxygen)와 Cu, Fe가 다량 검출된다. 이러한 것은 실제 마찰되는 부분은 대부분 산화피막(Oxide layer)의 접촉에 의한 것임을 의미한다. 나머지 디스크에서도 동일한 양상을 나타내었다.

#### 4. 결론

대표적으로 높은 운동에너지를 가지는 고속철도와 항공기의 제동장치에 적용되는 금속계 소결마찰재와 내열강간의 트라이볼로지 특성 연구를 목적으로 각각 2종류의 고속철도용 금속계 마찰재와 항공기용 금속계 마찰재를 Lab-Scale Dynamometer를 이용하여 시험한 결과는 다음과 같다.

1. 고속철도용 금속계 마찰재는 항공기용 마찰재에 비해 높은 마찰계수 및 마찰계수 안정성을 나타내었다.
2. 고속철도용 금속계 마찰재는 항공기용 마찰재에 비해 약 50% 수준의 마모량을 가졌으며, 디스크 공격성은 동계 마찰재가 철계 마찰재보다 낮은 것으로 나타났다.
3. 동계 마찰재가 철계 마찰재보다 제동시 급격하게 온도가 상승하며, 냉각도 동계 마찰재가 빨리 되지만, 동계 마찰재라도 마찰재의 기지의 량에 따라 달라지는 것으로 나타났다.
4. 마찰재에 따라 마찰면에 형성되는 산화피막의 안정성과 마모분의 거동도 달라졌다.
5. 마찰재와 디스크는 각각 금속전이에 의해 금속성분이 이동하며, 특히 마찰재에서는 디스크에서 전이된 Fe가 산화피막을 형성하여 마찰시 실질적인 접촉을 이루게 되었다.

#### 참고문헌

1. T. Zeuner, "MMCs, an Alternative Material for Railway Car Braking Systems", *Materials World*, vol 6, no. 1, pp. 17-19, January 1998.
2. G.L Dunlop, "Ferrite morphologies and carbide precipitation in a Cr-Mo-V creep resisting steel", *Metal Science* April 1976, pp. 124-132.
3. 김상호, 이희성, "철도차량용 제동디스크의 트라이볼로지 특성연구", *윤활학회지*, Vol. 23, No. 1, 2007, pp. 19-28.
4. "Disc brake and disk brake linings(1)", *International Union of Railway* 1985.1.7, 3rd Edition.
5. 한국철도기술연구원(2005), 제동시스템 실요기술 개발 보고서.
6. N.P. Sub, "Tribophysics", pp. 80-81.

접수일(2008년 7월 1일), 수정일(2009년 2월 2일),  
게재확정일(2009년 2월 6일)