

## 환원분철을 이용한 마찰재의 성능에 관한 연구

김병삼<sup>1</sup>, 문상돈<sup>2\*</sup>, 지창헌<sup>1</sup>

### A Study on the Performance of Friction Materials using Reduced Iron

Byoung-Sam Kim<sup>1</sup>, Sang-Don Mun<sup>2\*</sup> and Chang-Heon Chi<sup>1</sup>

**요약** 브레이크 마찰재의 구성성분 중 기존에 사용되던 무기 충전재인 BaSO<sub>4</sub> 대신에 고로슬러지와 그 산화철에 일련의 환원과정을 행하여 얻은 환원분철을 10%, 20%, 30%씩 첨가하면서 몇 종류의 마찰재를 제작하였다. 이 마찰재들에 대해 기본 물성시험, 브레이크 다이아미터를 사용한 마찰성능 시험 등을 행하였다. 그리고 고가의 충전재인 BaSO<sub>4</sub>를 환원분철로 대체하여 마찰재에 첨가한 경우, 발열온도, 마모 등의 마찰특성이 우수한 환원분철의 첨가량은 10%이었다. 고로슬러지나 환원분철 시편에서 고로슬러지와 환원분철의 첨가량이 증가할수록 마찰재의 전단강도와 접착강도는 감소하나 모두 마찰재로서의 적용에는 충분한 강도를 나타내었다.

**Abstract** It was made a friction material of various kinds by adding 10%, 20% and 30% of reduced iron. It was obtained by a connected-reduced process in a blast furnace sludge and oxidized iron, instead of BaSO<sub>4</sub>, which is already a used inorganic filling material among a component of a brake friction material. This was done by a basic physical property test, a friction performance test to use a brake dynamometer. Moreover, in case of an add in the friction material, instead of using BaSO<sub>4</sub>, the more expensive filling material, the reduced iron was also better because it has an excellent a friction property of an exothermic temperature, wear, etc. was 10%. At G1 and G3 specimens, a shear strength and a bonding strength of the friction material was decreased to be able to increase an amount of the blast furnace sludge and the reduced iron, but an application of all friction materials appeared enough strength.

**Key Words** : friction material, filling material, reduced iron, brake dynamometer, bonding strength, blast furnace sludge, friction performance test

### 1. 서론

브레이크 마찰재는 자동차뿐 만 아니라 산업, 건설기계 등에 사용되는 복합재료로서 차량의 제동장치 중 브레이크 라이닝, 패드 및 클러치 페이싱의 형태로, 마찰시 운동에너지를 열에너지로 변환하여 제동하는 역할을 하고 있다.<sup>1)</sup> 마찰재의 제동성능은 마찰재와 상대재인 로터의 재료특성과 그에 따른 마찰특성에 의해 결정되며 마찰재의 제조 조건에 따라 다양하게 변하는데, 제동장치 중 마찰재는 자동차의 안전에 직접적인 관련을 가지고

있으므로 중요한 역할을 담당한다. 브레이크 마찰재에 요구되는 기본적인 성능으로는 내마모성, 내구성, 마찰계수 안정성, 강도, 상대재의 마모 감소 등이며, 마찰에 의해 발생하는 열이 시스템에 전달되지 않도록 열전도율을 낮게 하여 베이퍼 록의 방지와 브레이크 부츠의 손상을 방지하는 것도 중요 역할들 중의 하나이다.

강<sup>2)</sup> 등은 셀룰로오스 섬유와 직조성, 무기충진재의 형태에 따른 마찰특성의 연구를 통해 무기충진재의 양이 증가하면 전체적인 마찰계수가 감소하는 경향을 보인다고 하였다.

장<sup>3)</sup> 등은 연마재와 고온윤활재의 양에 따른 마찰특성의 분석을 통해 고온에서 윤활재의 열분해와 로터의 열변형으로 인한 윤활막의 연속성 결여가 소음을 발생시킨다고 보고하였다.

Watson<sup>4, 5)</sup>은 마찰재의 성분함유량을 조합함으로써 최

이 논문은 2008년도 원광대학교의 교비 지원에 의해서 수행됨

<sup>1</sup>원광대학교 기계자동차공학부

<sup>2</sup>전북대학교 기계설계공학부

\*교신저자 : 문상돈(msd11@naver.com)

적의 제동특성과 저소음 마찰재의 성분을 실험적인 방법으로 제시하고자 하였다.

본 연구에서는 종래 자동차 브레이크 마찰재의 주요 성분인 고가의 BaSO<sub>4</sub> 대체 원료로 제철소 고로 분진인 고로 슬러지를 브레이크 마찰재의 구성성분으로 이용하고자 하였다. 그리고 이를 바탕으로 환원분철을 적용한 마찰재의 성능을 평가하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 환원분철의 생성 및 제조 공정

환원분철은 H<sub>2(g)</sub>/H<sub>2O(g)</sub>, CO<sub>(g)</sub>/CO<sub>2(g)</sub>의 가스 분압 비가 낮은 경우에 산화가 일어난다. 브레이크 마찰재 원료로 사용하는 환원분철의 초기 원료인 고로 슬러지는 현재 주로 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 형태의 산화물로 구성되어 있어서 환원시 직접 Fe로 되지 않고 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 일단 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>의 형태로, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>는 FeO로 환원되어 최종적으로 순수한 Fe로 환원된다.

환원분철은 다량의 기공을 함유하고 있어 환원분철을 마찰재 원료로 사용하면 기공 확보가 용이하여 브레이크 소음을 방지하는 역할을 하게 된다. 환원분철의 화학조성 및 물리적 특성은 표 1과 같고 Total Fe는 70~85wt%, Metal Fe는 68~83 wt%이며, 그 외 화합물로서 FeO, SiO<sub>2</sub>, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO가 함유 되어 있으며 미량의 ZnO, C가 있다. 환원분철의 형상은 각형이며 기공이 불균일하게 분포되어 있고 진비중은 5.0~6.0g/cc이다. 환원조건은 로내 온도를 최대 1,030℃로 하고 N<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub> 가스를 혼합하여 상온으로 유입하는데 슬러지는 상온에서 약 200~300kg/h로 장입되고 환원로는 일정속도로 회전하면서 장입시료를 이송시킨다. 시료 내의 산화철은 예비가열 구간을 지나면서 환원이 시작되어 FeO 형태로 존재하고 환원구역을 지나면서 Fe로 환원하게 되는데 환원반응이 빠르게 일어나면 수소가스는 평형상태를 유지하게 된다.

산화철 성분이나 환원분철 성분 함량이 증가할수록 비중량이 감소하는 이유는, 산화철 성분의 평균 비중량은 2.37g/cm<sup>3</sup>로서 BaSO<sub>4</sub>의 비중량 4.5g/cm<sup>3</sup>에 비해 작을 뿐만 아니라 산화철의 입자 크기가 BaSO<sub>4</sub>의 입자 크기에 비해 커서 상대적으로 가공율을 높일 수 있다.

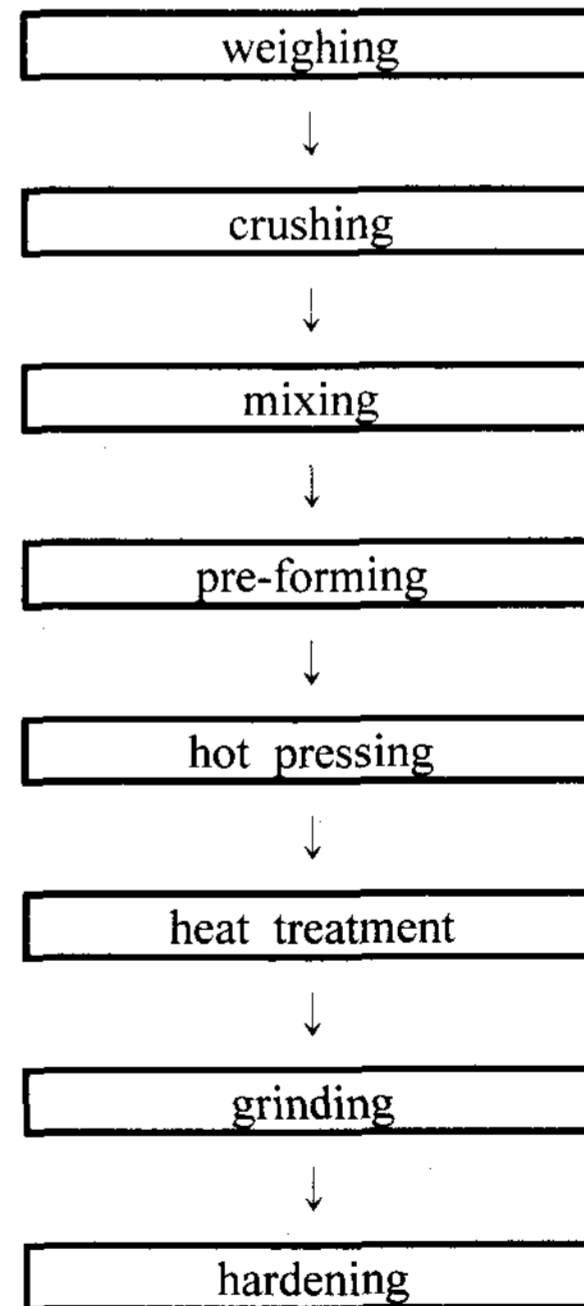
[표 1] Chemical composition and physical characteristics of reduced iron after reducing treatment.

Chemical composition(wt. %)								
T.Fe	M.Fe	FeO	SiO <sub>2</sub>	MgO	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C	ZnO
70~85	68~83	≤2	1.0~8.0	0.3~2.5	1.0~6.0	1.0~5.0	≤1	0.1~1.0
Physical characteristics								
ASG(g/cc)	RSG(g/cc)	Porosity (%)	Grain shape	Pore distribution				
1.55~2.25	5.0~6.0	50~75	angular	irregular				

## 3. 실험방법

### 3.1 시편제작

마찰재 배합설계 후 물성 및 마찰성능 평가를 위한 시험용 브레이크 패드를 제작하였으며 시편제작 공정은 그림 1과 같다.



[그림 1] The manufacturing process of brake disc pad for friction performance test.

### 3.2 마찰재의 배합 설계

실험에 적용할 마찰재의 배합은 고로 슬러지(이하 “G1”이라 함) 및 환원분철(이하 “G3”이라 함)의 함량을 각각 0, 10, 20, 30%로 변량하고 마찰재에서 결합재로 사

용되는 페놀 수지, 티탄산칼륨의 종류를 변화시켜 배합설계를 하였다. 본 연구에서는 환원분철의 함량을 10~30%로 설계하여 표 2와 같이 7종의 시제품을 제작하였다.

[표 2] Compositions of friction materials(wt. %)

Specimens		A	B	C	D	E	F	G
Ingredients								
	Abrasive	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9
	Binder	20.4	20.4	20.4	20.4	20.4	20.4	20.4
	Fiber	10.6	10.6	10.6	10.6	10.6	10.6	10.6
	Lubricant	17.8	17.8	17.8	17.8	17.8	17.8	17.8
	Besides	10.3	10.3	10.3	10.3	10.3	10.3	10.3
Fillers	BaSO <sub>4</sub>	30.0	20.0	10.0	0	20.0	10.0	0
	G1	0	10.0	20.0	30.0	0	0	0
	G3	0	0	0	0	10.0	20.0	30.0

### 3.3 마찰재 성능 평가

#### 3.3.1 물리적 성질

정해진 배합비와 제조조건에 의해 제작된 시편의 물성을 파악하기 위해 아래와 같은 실험항목 및 실험방법을 기준으로 물리적 및 기계적 성질에 관한 실험을 실시하였다.

##### 1) 비중

마찰재와 같이 일정비율의 기공을 함유하고 있는 물질의 비중값은 기공형상 및 크기 등에 따라 달라질 수 있으므로, 본 연구에서는 수은주입법에 의한 기공율 측정 후 마찰재의 비중( $\rho$ )값은 식(1)을 이용하여 구하였다.<sup>6)</sup>

$$P(\%) = \left(1 - \frac{\rho_{se}}{\rho_{sa}}\right) \times 100, \quad V(\%) = 100 - P$$

$$\rho = \frac{\rho_{se}}{\rho_{sa}} = \frac{Bulk}{Skeletal} = \frac{envelope}{absolute} = \frac{apparent}{true}$$

(1)

여기서,  $V$  : 충전율,  $P$  : 기공율,

$\rho_{se}$  : 겉보기 비중,  $\rho_{sa}$  : 절대 비중

##### 2) 기공율

기공율은 마찰재를 10×10×20mm의 크기로 가공하여 기공율 측정법중 수은주입법을 이용한 기공측정기로 마찰재 내에 존재하는 기공 크기를 구하여 기공율을 측정하였다.

##### 3) 경도

로크웰 경도기를 이용하였으며, 각 4군데를 측정하여 산술 평균하였다.

##### 4) 접착강도

브레이크 패드의 백 플레이트와 패드의 접착 강도를 측정하는 방법이다. 지그에 브레이크 패드를 부착시키고, 시편이 완전히 파괴될 때까지 10mm/min의 조건으로 가압하여 측정된 파괴하중을 마찰재 단면적으로 나눈 값을 말한다.

##### 5) 전단강도

마찰재료를 25.4×25.4×5(mm)의 크기로 가공하여 전단강도 지그에 장착하고, 접착강도와 동일한 시험기를 사용하여 측정하였다.

#### 3.3.2 마찰 성능 시험

마찰계수는 마찰시의 토크 값, 캘리퍼에 설치된 피스톤에 의한 가압력, 피스톤의 면적 및 마찰재의 접촉형상으로부터 계산하는데 마찰계수 계산식은 식(2)와 같다.

$$\mu = \frac{T}{2 \cdot P \cdot R_{eff} \cdot \pi \cdot r^2} = \frac{T}{P} \cdot G \quad (2)$$

여기서,  $\mu$  : 마찰계수,  $T$  : 토크(Nm)

$P$  : 하중(MPa),  $R_{eff}$  : 로터의 유효반지름

$r$  : 실린더 반지름,  $G$  : 기하학적인 요소

##### 1) 마찰 성능 시험기

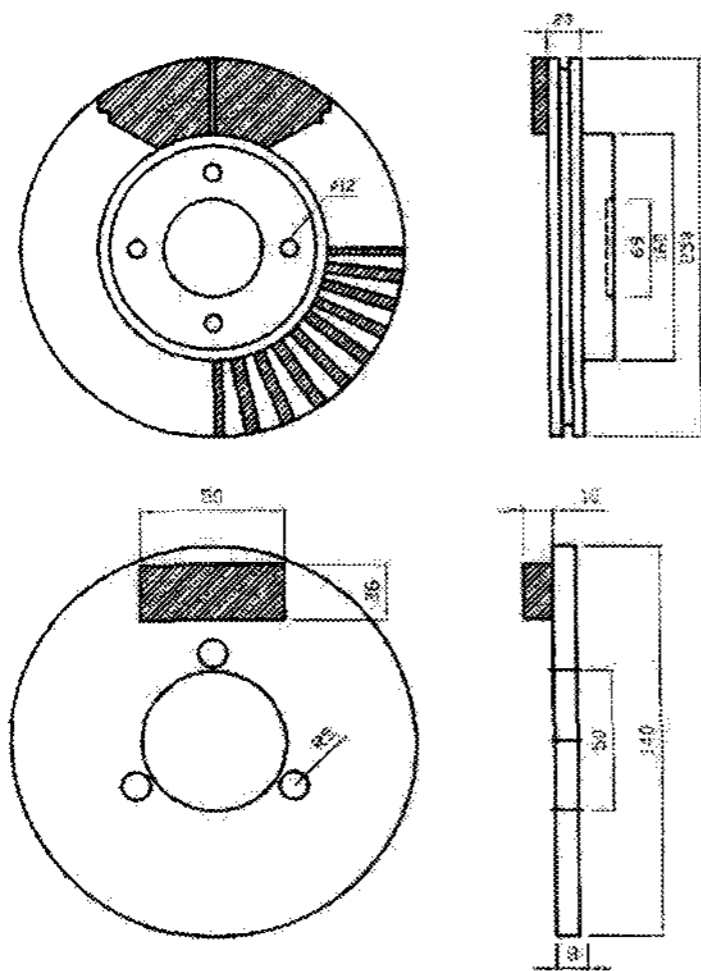
제작된 시편으로부터 규정된 크기로 내·외부 각 1개씩 시편을 제작하여 스케일 테스터 시험기를 이용하여 브레이크 마찰성능시험을 실시하였다.

##### 2) 시험절차

시험에 사용한 시험법은 일본에서 제정한 자동차용 브레이크 패드의 성능시험법인 JASO C406-P1을 기준으로 하였다.

#### 3.3.3 브레이크 다이내모미터를 이용한 마찰성능 시험

패드와 브레이크 디스크는 그림 2와 같은 시판되는 한국의 H자동차의 중형자동차 전문에 사용되는 제품을 사용하였다.



[그림 2] The specification and dimension of pad and break disk.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 성분분석 결과

#### 4.1.1 시편의 성분분석

본 시험에 이용된 고로슬러지와 환원분철의 습식분석 결과는 표3과 같다. 고로슬러지와 환원분철의 탄소함량은 각각 34.21%와 34.86%로 비슷하며 전체 함량 중 순철의 함량은 0.50%, 36.15%, 환원분철의 환원율을 계산하면 91.3%로 나타났다. 환원분철의 환원율 계산은 환원분철 제조 후 전체 시료 중 Fe를 포함하는 화학식을 가진 화합물 중의 Fe량을 Total Fe라 하고 환원된 Fe 분말의 중량을 Metal Fe이라고 할 때 전체 철 중 순철의 중량비를 환원율이라 하여 식(3)을 이용하여 구하였다.

$$\text{환원율(\%)} = [\text{금속철(Metal Fe)/총철(Total Fe)}] \times 100(\%) \quad (3)$$

산화철을 포함한 전체 철의 함량은 G3가 G1보다 49.15% 높는데, 이는 환원과정 중 순철과 산화물을 형성하고 있던 산소의 질량만큼이 전체 질량에서 감량되기 때문이다.

[표 3] Chemical composition of G1 and G3(wt. %)

	C	Total-Fe	Metal-Fe	Reduction ratio(%)
G1	34.21	33.35	0.50	1.50
G3	0.95	82.50	75.30	91.30

### 4.1.2 로우터의 성분분석

보통 주철의 시편과 본 시험에 사용된 시편 및 상업적으로 사용중인 브레이크 디스크의 성분을 분석한 결과가 표4와 같다. 본 연구의 마찰성능시험에 사용된 디스크의 인장강도 25kg/mm<sup>2</sup>이상인 고급 주철(GC250)인데, 미세조직은 페라이트 기지에 미세한 퍼얼라이트와 편상흑연을 갖는 조직이었다.

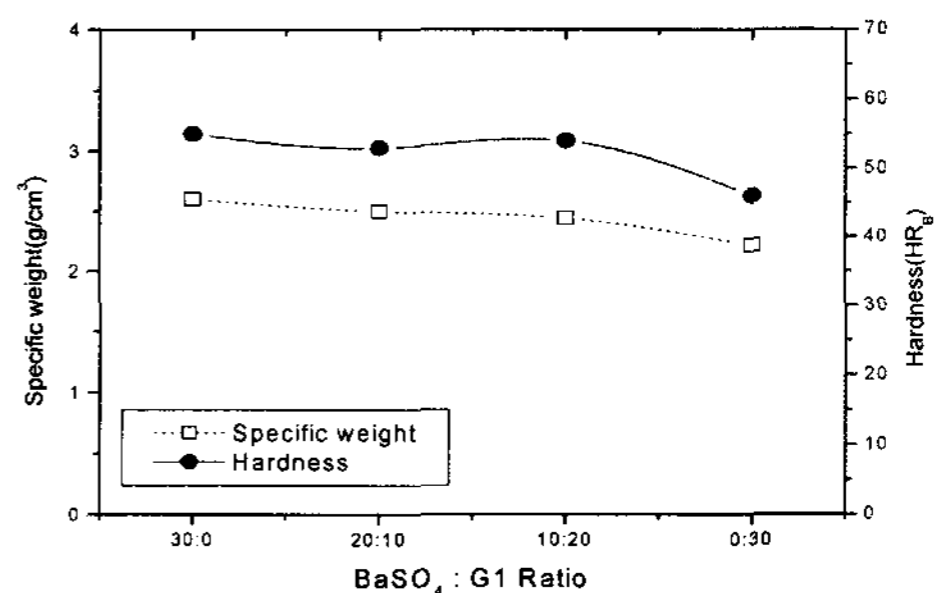
[표 4] Chemical composition of rotors(wt. %).

	C	Si	Mn	S	P	Cr	Cu
Cast iron	2.5 ~ 4.5	0.5 ~ 2.0	0.5 ~ 2.0	0.01 ~ 0.1	0.02 ~ 0.5	-	-
Tester disc	3.23	2.38	0.60	0.20	0.029	0.12	0.11
Commercial disc	3.45	2.01	0.78	0.080	0.028	0.22	0.33

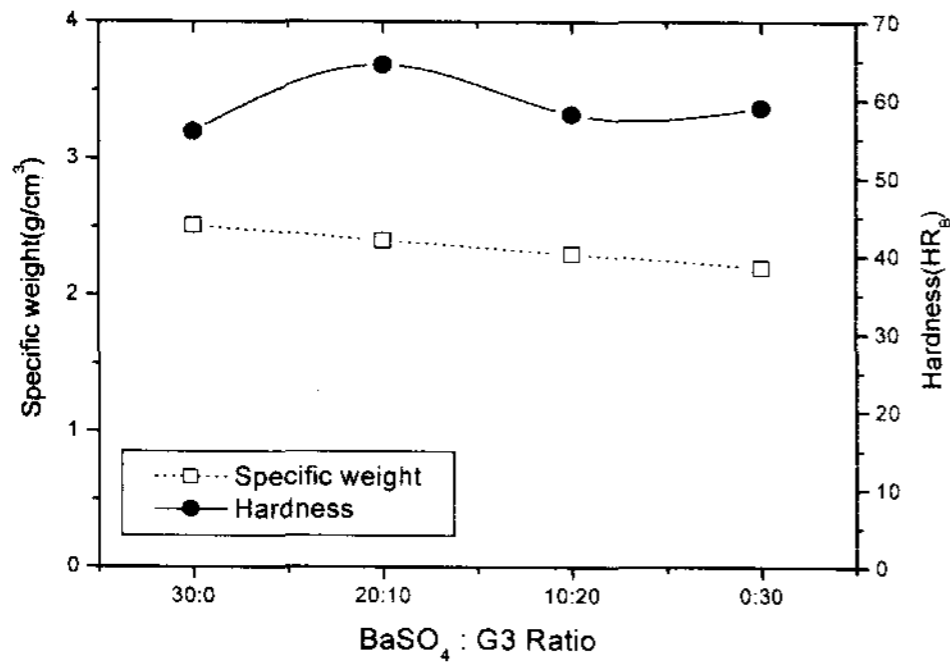
## 4.2 마찰재의 물리적 및 기계적 성질에 미치는 배합비의 영향

각 시편에 대한 비중 및 전단강도는 표 3~표 6과 같이 충전재의 종류(BaSO<sub>4</sub>, G1, G3)에 따라 도시하였다. 고로슬러지 G1과 환원분철인 G3의 양이 증가함에 따라 기존 BaSO<sub>4</sub>를 충전재로 사용된 경우에 비하여 마찰재의 비중이 점차 감소하여 경량화되는 것을 볼 수 있었다.

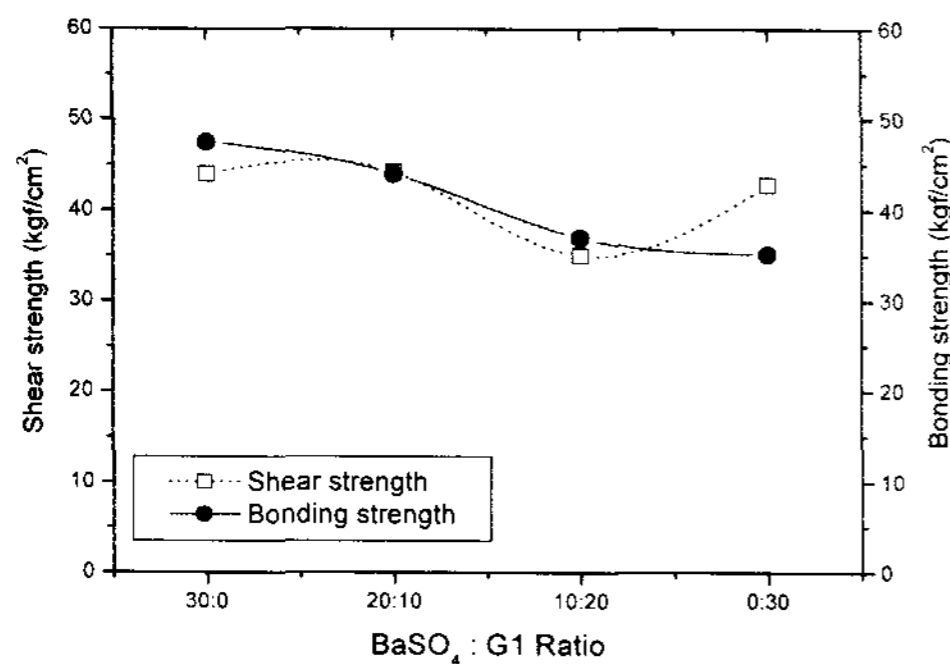
마찰재와 백플레이트 사이의 접착력을 시험하는 접착강도 시험 결과, 거의 모든 패드에 걸쳐 실제 파단은 접착부에서 일어나지 않고 마찰재에서 파괴되었는데, 이로부터 마찰재와 백플레이트 사이의 접착강도는 마찰재의 전단강도보다 높음을 알 수 있다. 시험 결과, G1의 함량이 증가함에 따라 접착강도와 전단강도는 감소하는 경향이 뚜렷하게 나타났다. G3 성분의 함량이 10% 함유된 경우는 접착강도와 전단강도가 기존 시제품과 별 다른 차이를 보이지 않았으나, 환원분철 함량이 10% 이상 증가함에 따라 접착강도와 전단강도는 감소하는 경향을 보였다.



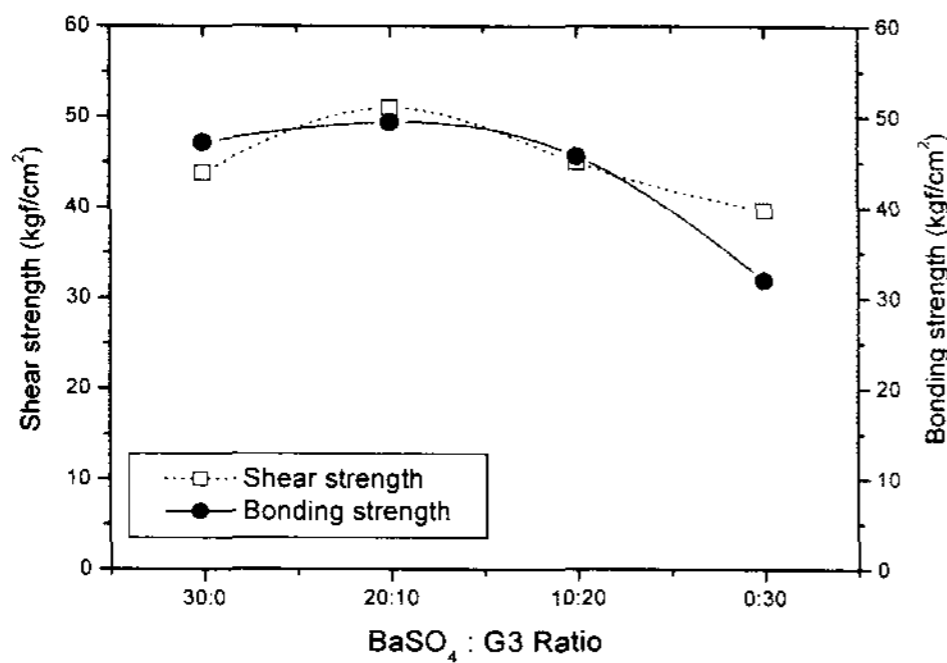
[그림 3] Variation of physical properties with compound ratio(BaSO<sub>4</sub>:G1).



[그림 4] Variation of physical properties with compound ratio(BaSO<sub>4</sub>:G3).



[그림 5] Variation of physical properties with compound ratio(BaSO<sub>4</sub>:G1).

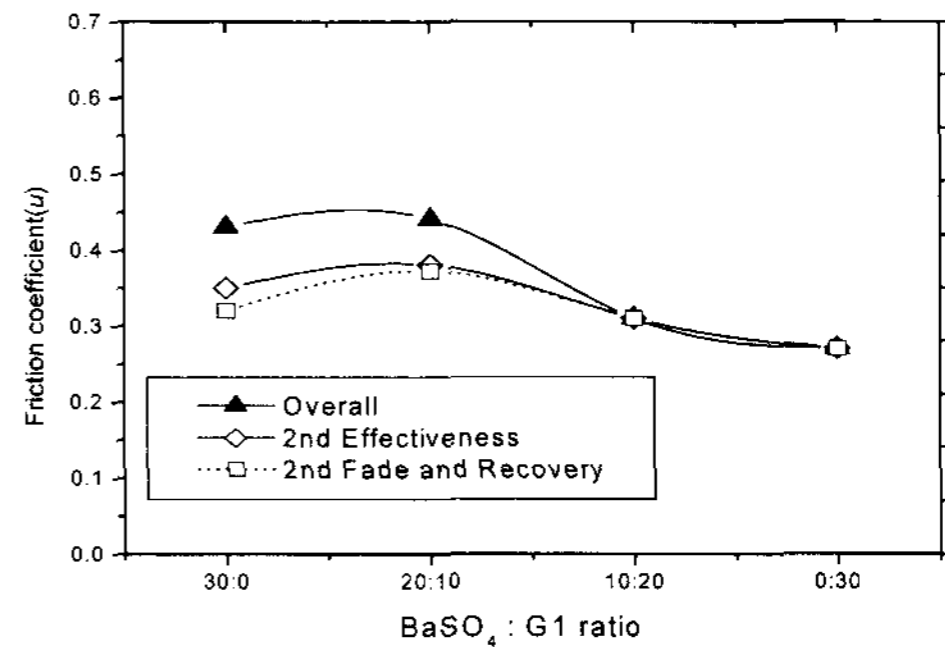


[그림 6] Variation of physical properties with compound ratio(BaSO<sub>4</sub>:G3).

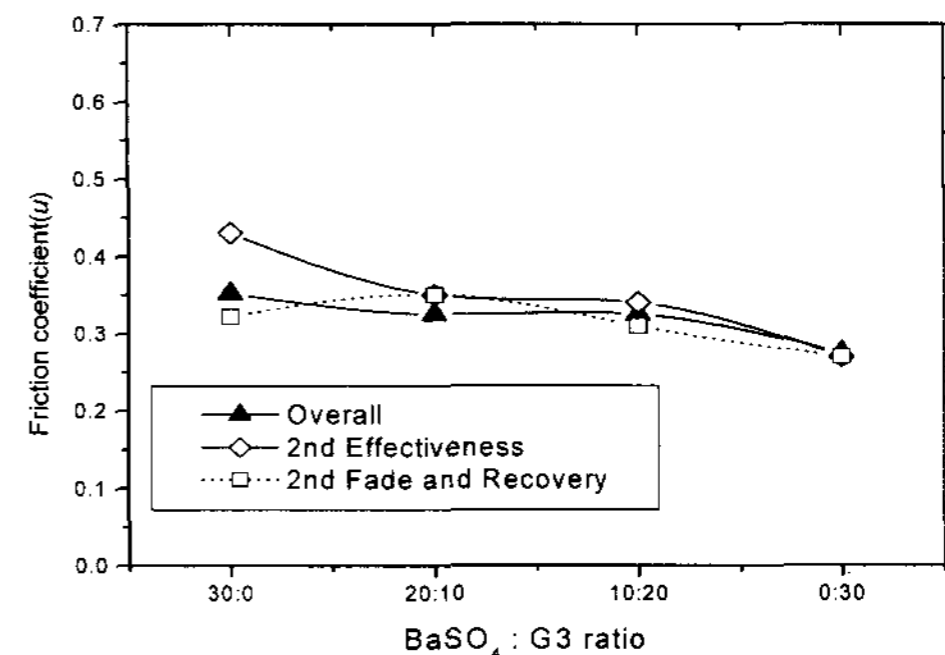
### 4.3 브레이크 다이내모미터에 의한 마찰 성능 평가

그림 7과 그림 8은 브레이크 다이내모미터를 사용하여, JASO C-406 P1의 실험규정에 의해 실시한 마찰성능 시험 결과를 나타낸 것이다.

그림 7에서 고로슬러지(G1)의 함량 증가에 따른 마찰 성능의 변화를 살펴보면, G1의 양이 10% 정도의 구간까지는 전반적으로 마찰계수가 기존 시제품에 비해 별다른 차이를 보이지 않지만, 그 함량이 20% 이상 증가하면 마찰계수는 감소하는 경향을 보였다. 그림 8에서 환원분철(G3)의 함량이 증가함에 따라 마찰계수는 전반적으로 감소하는 경향을 보였다. 산화철이나 환원분철의 함량이 증가할수록 마찰계수가 감소하는 주원인은 마찰재의 기공 증가에 따른 경도 감소로 판단된다. 여기서, 처음 BaSO<sub>4</sub>만 사용한 경우에는 2nd Fade & recovery의 마찰계수가 2nd Effectiveness의 마찰계수에 비해 크게 감소하는 것에 반하여, 산화철이나 환원분철 함량이 많이 포함된 마찰재의 경우에는 전반적인 마찰계수는 기존 시제품에 비하여 다소 낮지만 Effectiveness와 Fade & recovery 과정에서의 마찰계수의 격차가 없어지는 경향을 보였다. 이는 다양한 제동조건에 따른 마찰계수의 신뢰성이 증가하는 의미로 해석될 수 있다.



[그림 7] Variations of friction coefficients in friction materials with different G1 contents, which was tested in the brake dynamometer.



[그림 8] Variations of friction coefficients in friction materials with different G3 contents, which was tested in the brake dynamometer.

### 5. 결론

자동차 브레이크의 마찰재의 구성성분 중 기존에 사용되던 무기 충전재인 BaSO<sub>4</sub> 대신에 고로 분진에서 추출한 G1과 그 산화철에 일련의 환원과정을 행하여 얻은 G3를 10%, 20%, 30%씩 첨가하면서 몇 종류의 마찰재를 제작하였으며, 이 마찰재들에 대해 기본 물성시험, 브레이크 다이아미터를 사용한 마찰성능 시험 등을 행하였다. 그리고 자동차 브레이크의 마찰재 원료 중 하나였던 고가 충전재인 BaSO<sub>4</sub>를 환원분철로 대체하여 마찰재에 첨가한 경우, 발열온도, 마모 등의 마찰특성이 우수한 환원분철의 첨가량은 10%이었다. 그리고 기본물성 시험에서는 G1이나 G3의 함량이 증가할수록 비중이 감소하였다. G1과 G3 시편에서 고로슬러지와 환원분철의 첨가량이 증가할수록 마찰재의 전단강도와 접착강도는 감소하나 모두 마찰재로서의 적용에는 충분한 강도를 나타내었다.

### 참고문헌

[1] Kim, K.T., "Review on characteristics of organic and sintered friction material," 대우기보, No.41, pp. 73 ~ 81(1996).

[2] 강전익, 한홍구, 최응수, "습식 클러치용 마찰재의 조성별 마찰특성에 관한 연구," 한국자동차공학회지, 제12권, 제4호, pp. 56 ~ 65 (1990).

[3] 장호, 권오관, "자동차 제동시 나타나는 마찰특성에 관한 연구," 한국윤활학회지, 제13권, 제3호, pp. 10 ~ 19(1997).

[4] Watson, C. and Millsap, T., "Friction material : from prototype to production," SAE paper 1999-01-3389, pp.13 ~ 18(1999).

[5] Bergman, F., "The effect of Cu<sub>2</sub>S solid lubricant addition and varying density, on the occurrence of brake squeal for one low-metal, organic type brake pad," SAE paper 1999-01-3384, pp. 134 ~ 143(1999).

[6] 김영수, "비석면 마찰재의 개발사례(무기계를 중심으로)," KATECH 부품기술 세미나 proceedings(2'nd), pp.23 ~ 46(1994).

[7] 김병삼, 장일도, 문상돈, "차량 동력 전달계의 비틀림 가진력 해석," 한국산화기술학회논문지, 제7권, 제6호, pp. 1021~1027(2006).

[8] 송오성, 김종률, "FIB를 이용한 다이아몬드 기판 위의 나노급 미세 패턴의 형상 가공," 한국산화기술학회논문지, 제7권, 제6호, pp.1047~1055(2006).

[9] 윤기정, 송오성, "Ir과 Co를 첨가한 니켈모노실리사이드

드의 고온 안정화 연구," 한국산화기술학회논문지 제7권, 제6호, pp. 1056~1063(2006).

### 김 병 삼(Byoung-Sam Kim) [정회원]



- 1985년 2월 : 전북대학교 정밀기계공학과 (공학사)
- 1987년 2월 : 전북대학교 정밀기계공학과 (공학석사)
- 1994년 2월 : 전북대학교 정밀기계공학과 (공학박사)
- 2006년 3월~현재 : 원광대학교 기계자동차공학부 교수

<관심분야>  
자동차 새시, 자동차 소음공학

### 문 상 돈(Sang-Don Mun) [정회원]



- 1991년 2월 : 전북대학교 정밀기계공학과 (공학사)
- 1992년 2월 : 전북대학교 정밀기계공학과 (공학석사)
- 1997년 8월 : 전북대학교 정밀기계공학과 (공학박사)
- 2002년 3월~현재 : 전북대학교 기계설계공학부 교수

<관심분야>  
정밀연삭가공, 절삭가공, 자동차공학

### 지 창 현(Chang-heon Chi) [정회원]



- 1979년 2월 : 전북대학교 기계공학과 (공학사)
- 1984년 2월 : 전북대학교 기계공학과 (공학석사)
- 1987년 8월 : 전북대학교 기계공학과 (공학박사)
- 1990년 3월~현재 : 원광대학교 기계자동차공학부 교수

<관심분야>  
기계요소설계, 기계제도, 자동차공학