

고성능 금속마찰재의 트라이볼로지적 특성

김석삼 · 김재호 · 안효준*

경북대학교 공과대학 기계공학부, *삼성자동차(주)

Tribological Characteristics for High Performance Metallic Friction Materials

Seock-Sam Kim, Chae-Ho Kim and Hyo-June Ahn*

Department of Mechanical Engineering, Kyungpook National University, Taegu, Korea
**Samsung Motors Inc., San #50, Kongse-Ri, Kihung-Eup, Yongin-City, Kyungki-Do, Korea*

Abstract—Friction and wear test for two kinds of Cu-based sintered metallic friction material against cast iron disk was carried out by plate-on-disk type friction and wear tester to investigate the friction and wear characteristics of brake system in severe condition. In this experimental study, the counter specimen was cast iron which is being used generally in brakes of heavy duty equipments. Test friction materials were A type which was manufactured by foreign company and B type by domestic company. Friction coefficient and wear volume were measured and compared with each other. The experiment was performed under room temperature. The worn surface of cast iron disk and friction material were observed by scanning electron microscope. The temperature of surface of disk was measured continuously by the non-contacting thermometer. It was found that A type friction material had stable friction coefficient over the wide range of sliding condition, but B type friction material had unstable friction coefficient and lower value of 0.2 under the severe sliding condition.

Key words— friction brake, metallic friction material, friction, wear, tribological characteristics.

1. 서 론

최근 수송 장비들이 고속·대용량화로 사용 조건이 점점 가혹화됨에 따라 기존 석면계나, 비석면계 마찰재로서는 제동장치의 강도면에서 충분한 안전성을 확보할 수 없는 실정이다. 금속 마찰재는 이들에 비해 높은 강도와 안정된 열적특성을 가지는 장점이 있으므로 고속·대용량 차량의 경우에 금속 마찰재를 활용하려는 경향이 고조되고 있다. 금속 마찰재는 석면, 비석면계에 비해 넓은 온도 범위에서 일정한 마찰특성을 보인다[1,2].

금속 마찰재는 석면·비석면계에 비해 상대적으로 높은 열 전도성을 가지므로 접촉부에서 발생한 열을 마찰재가 흡수·방출해 줌으로써 디스크의 열적 부담을 줄여 과도한 열응력, 표면 연화에 의한 소성 유동

의 발생 등을 억제한다. 석면·비석면계의 경우 고온에서 마찰재와 드럼의 표면 연화에 의해 갑자기 적절 한 마찰특성을 상실하는 페이드 현상이 발생하지만 금속마찰재의 경우는 상당히 높은 온도에서도 높은 마찰계수를 유지하므로 과도한 페달 압력이 없이도 안전하게 차량을 정지시킬 수 있는 장점이 있다[3].

또한 금속의 분말을 소결시켜 만든 금속 소결품은 좋은 성형성과 마찰재로서의 뛰어난 성능으로 여러 산업 분야에서 널리 응용되고 있으며, 특히 고성능 브레이크나 클러치 마찰재료로서 꾸준히 연구되어 왔다 [4,5].

선진국에서는 고속전철과 중장비 등과 같은 고속·고용량의 수송장비의 경우 기존의 석면이나 비석면 마찰재에 비해 우수한 열적 특성, 고온에서 안정된 마찰계수, 내마멸성, 강도면에서 우수한 금속소결 마찰

재를 개발하여 실용화된 상태에 있다[6]. 한편 국내에서도 금속마찰재 관련 연구가 시작되고 있으나, 그 연구가 이제 시작단계로 미미한 실정이다[7-9]. 현재 전량 수입에 의존하고 있는 국산 특수장비 브레이크 시스템에 사용중인 금속 소결 마찰재의 경우는 실제 그 마찰특성에 관해 전혀 실험적으로 제시된 바 없으므로, 이의 국산화를 위한 일환으로서 트라이볼로지적 특성의 규명과 국내에서 제작된 마찰재의 성능 비교는 현 시점에서 시급한 과제로 대두되었다.

이에 본 연구에서는 향후 국가적인 전략사업으로 추진 중인 고속전철과 중장비 개발 분야에서 국내 생산 기술을 절대적으로 필요로 하고 있는 금속 소결 마찰재와 특수장비에 사용되는 고성능 금속마찰재의 국내 개발을 위한 기초자료를 제시할 목적으로 이들 금속 소결 마찰재의 상온, 상압, 무윤활하에서의 트라이볼로지적 특성을 평가하고자 한다.

2. 실험

2-1. 실험장치 및 시험편

본 실험은 Fig. 1과 같이 시험편과 마찰재를 접촉시켜 상대 미끄럼 운동을 하는 기구로 되어 있다. 실험에 사용된 시험편은 상부 시편의 경우 2종의 동계 금속 마찰재와 하부 시편의 경우 구상 흑연 주철 디스크(GCD450)로 구성되어 있다. 마찰재의 경우 A 시험편은 국산 특수장비용으로 사용중인 외국산 수입 동계 금속 소결 마찰재로부터 $10 \times 10 \times 8$ (mm)의 치수로 절단한 직육면체 블록의 형태로 되어 있으며, B 시험편은 국내 업체에서 생산한 동계 소결 마찰재로서 $10 \times 10 \times 4$ (mm)의 치수로 절단한 직육면체 블록의 형태로 제작되었다. Table 1에 마찰재 2종의 주요성분에 대한 화학적 조성을 나타내었다.

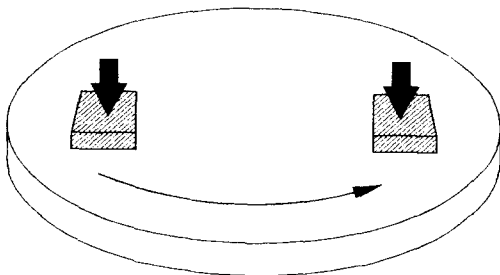


Fig. 1. Schematic illustration of experiment.

Table 1. Chemical composition of friction materials

Type	Chemical composition (wt %)						
	Cu	C	S	Si	Mn	Mo	Fe
A	73.62	9.05	0.027	0.40	0.65	0.003	0.57
B	70.63	4.50	0.002	0.51	0.70	0.01	0.51

Table 2. Chemical composition of disk

Chemical composition(%)				
C	Si	Mn	P	S
4.00	2.52	0.23	0.017	0.003

Table 3. Mechanical properties of disk

Tensile test			Hardness (HB)
Tensile strength (N/mm ²)	Offset point (N/mm ²)	Strain at fracture (%)	
min. 450	min. 280	min. 10	143~217

하부 시험편인 주철제 디스크의 경우 특수장비 브레이크용 디스크 생산라인으로부터 채취한 것으로 지름 120 mm, 두께 8 mm의 디스크형태의 시편으로 제작하였다. Table 2와 Table 3에 본 실험에 사용된 디스크의 화학적 조성과 기계적 성질을 각각 나타내었다.

2-2. 실험 방법

본 실험이 행해진 순서는 디스크의 경우 초음파세척 → 건조 → 마찰·마멸실험 → 초음파세척 → 건조 → 현미경관찰 → 표면거칠기 측정의 순으로 진행되었다. 마찰재의 마멸량은 마찰·마멸실험 전후, 표면을 청결히 한 후 전자저울을 이용하여 무게감소량으로부터 산출하였다. 디스크의 마멸량은 표면거칠기 측정기를 이용하여 얻은 디스크 표면의 단면곡선으로부터 면적계(planimeter)를 사용하여 마멸면 단면적을 구하여 마멸량을 계산하였다. 마찰·마멸 실험은 하부 회전 시험편으로서 주철 디스크를 장착하고 상부에는 블록형태의 한 쌍의 금속 마찰재를 축하중으로 가압한 상태에서 하부 디스크를 회전시켰다. 이 때 축하중은 30 kgf, 50 kgf, 70 kgf의 세 가지 조건으로 가해졌고, 하부 디스크의 회전 속도는 각각 선속도 0.5 m/s, 1 m/s, 2 m/s의 세 가지 조건으로 변화시키면서 실험을 행하였다. 미끄럼 거리는 5,000 m로 실험하여 마멸량을 계산하였다. 모든 실험은 상온·상압하에서 실시되었으며 주철 디스크의 강제적인 공냉은 하지 않았다.

2-3. 실험결과 및 고찰

2-3-1. 미끄럼 거리 증가에 대한 마찰계수와 마찰면 온도의 변화

A 및 B 마찰재의 미끄럼속도 0.5 m/s에 대해 하중의 변화에 따른 마찰계수의 변화를 Fig. 2에 나타내었다. 마찰계수는 실험 초기 미끄럼거리 증가와 함께 꾸준히 증가하다가 일정한 값으로 안정되는 경향을 보인다. 이는 마찰실험 초기 과정에서 디스크와 마찰재의 거친 표면거칠기의 영향으로 최대 마찰계수까지 도달했다가 최대 마찰계수 값을 가지는 미끄럼 거리를 지나고 나면 초기 상대 표면거칠기를 극복하는 run-in과정을 거쳐 일정한 마찰계수로 안정된다고 할 수 있다. Fig. 2-4에 나타난 바와 같이 안정된 마찰계수값에 도달하는 미끄럼거리는 미끄럼 속도가 빨라질수록 짧아지는 경향을 볼 수 있다.

A type의 경우는 마찰계수는 미끄럼속도와 하중에 따라 약간의 차이는 있으나 저하중(30 kgf)으로 실험된 경우를 제외하고는 모든 실험조건에 있어서 일반적인 브레이크용 마찰재의 마찰계수인 0.4~0.6의 범위 안에 드는데 반해 B type의 경우 0.3~0.6의 값을 가짐으로서 다소 작은 마찰계수를 보이고 있다.

특히 대부분의 경우 A type의 마찰계수 곡선이 일단 일정한 값에 도달하면 안정되는데 비해 B type의 경우 마찰계수가 미끄럼 거리가 증가함에도 안정되지 못하였다. Fig. 3 및 Fig. 4에는 미끄럼속도 1 m/s와 2 m/s에 대한 A, B 두 종류 마찰재의 마찰계수 변화를 나타낸 것이다.

Fig. 3의 미끄럼속도 1 m/s의 경우 하중증가와 함께 마찰계수가 A type은 0.4~0.6에서 안정된 값을 나타내지만 B type은 마찰계수가 0.2~0.4정도로서 브레이크용 마찰재로써 갖추어야 할 0.4의 절반 정도였다. Fig. 4의 미끄럼속도 2 m/s의 경우도 B type 마찰재의 마찰계수는 하중이 증가할수록 마찰계수가 감소하는 불안정한 값을 보여주고 있다.

Fig. 5에서 Fig. 7은 각 미끄럼속도에서 하중변화에 대한 마찰면의 표면온도를 미끄럼거리에 대해 나타낸 것이다. Fig. 5(a)의 미끄럼속도 0.5 m/s, 하중 30 kgf의 경우 A type의 마찰면 온도는 120°C이며, B type의 경우 60°C로 나타났다.

본 실험의 가혹한 조건인 Fig. 7(c)의 미끄럼속도 2 m/s, 하중 70 kgf의 경우는 A type의 마찰면 온도는 약 500°C, B type의 마찰면온도는 150°C정도까지 상

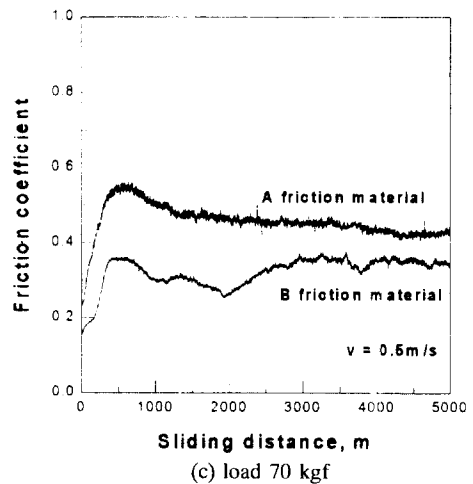
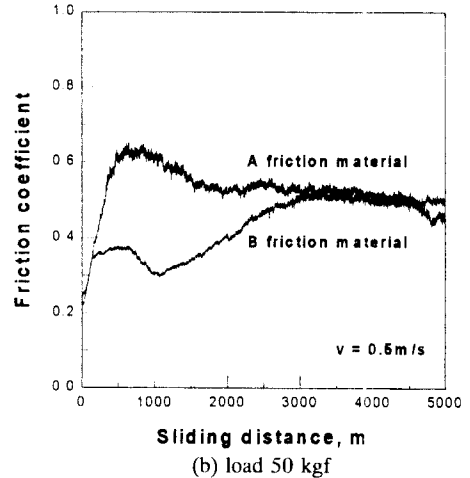
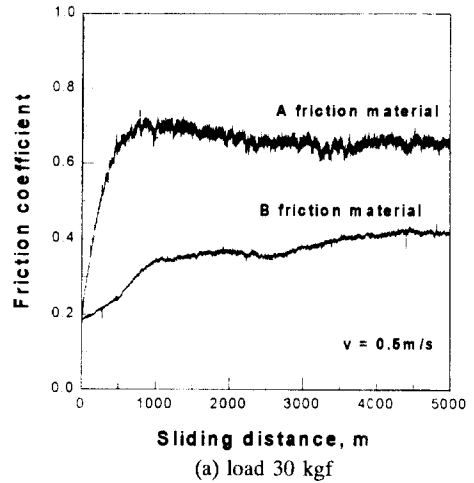


Fig. 2. Friction coefficient of friction materials at the sliding velocity of 0.5 m/s.

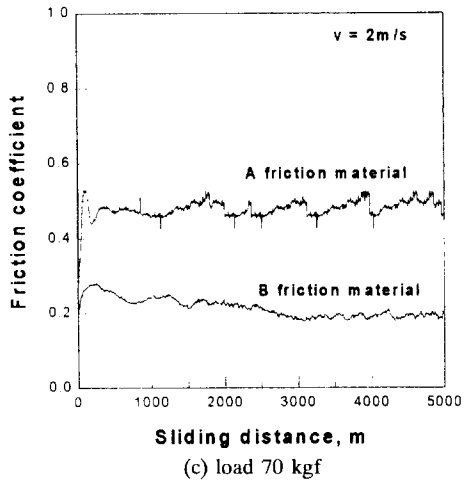
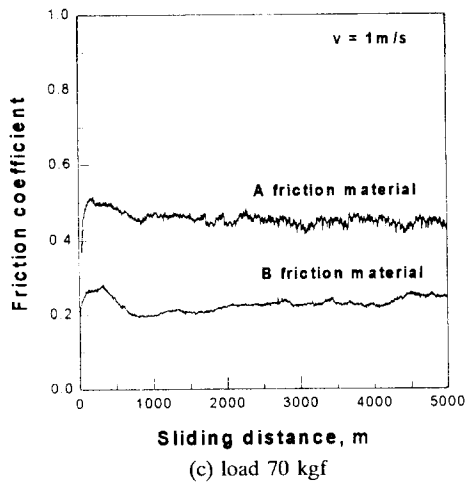
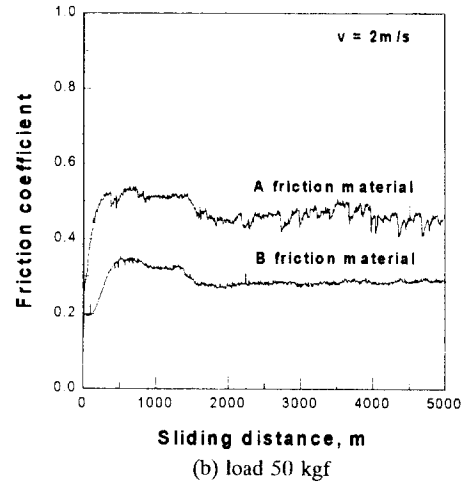
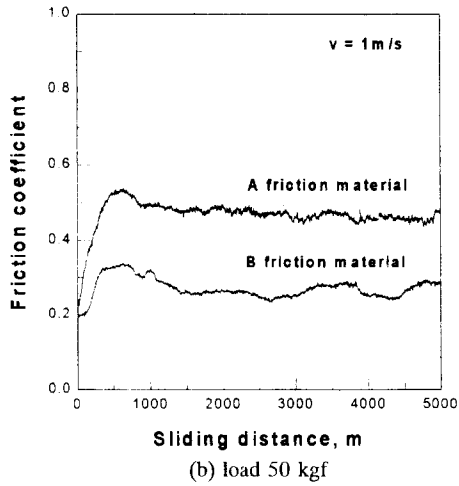
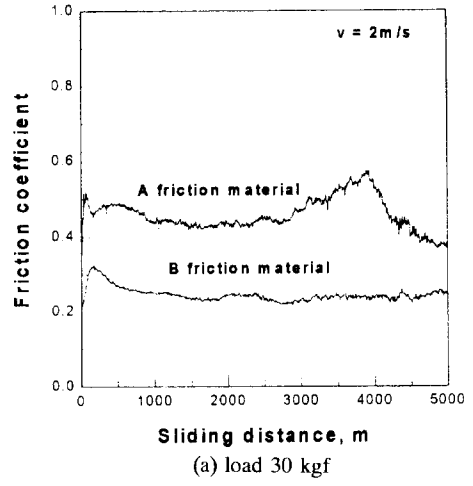
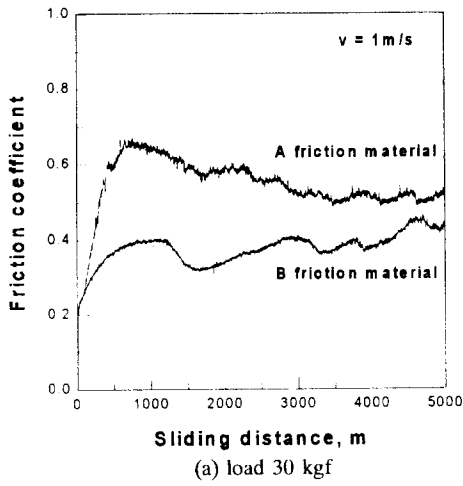


Fig. 3. Friction coefficient of friction materials at the sliding velocity of 1 m/s.

Fig. 4. Friction coefficient of friction materials at the sliding velocity of 2 m/s.

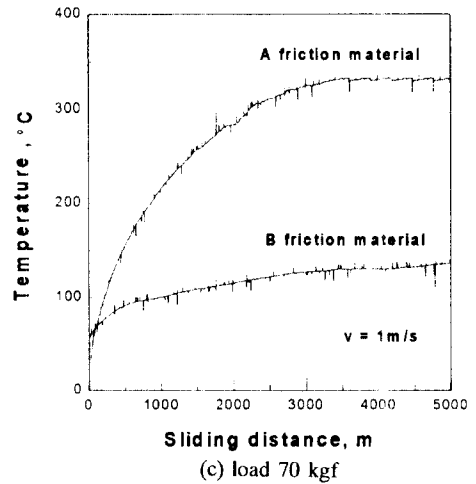
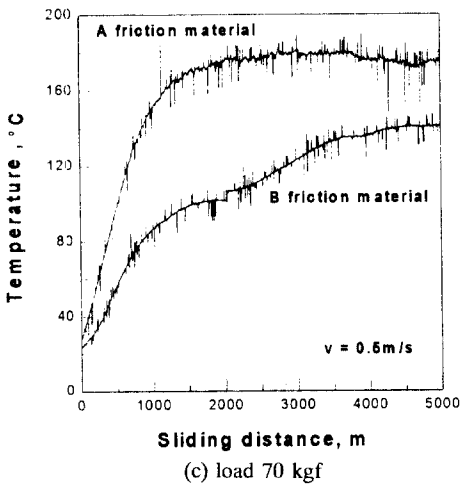
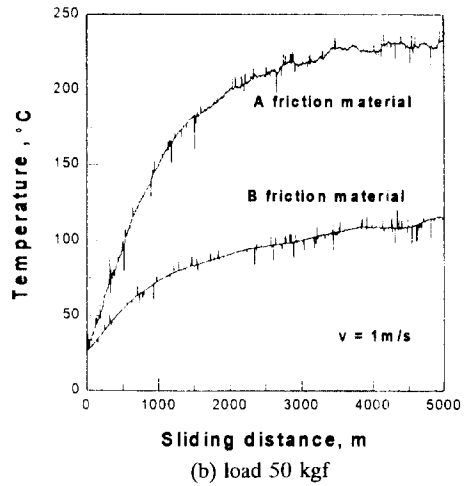
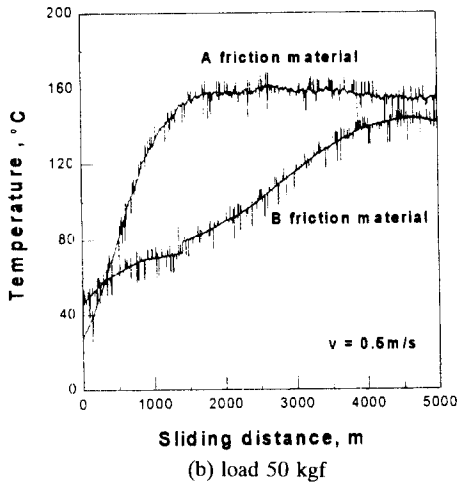
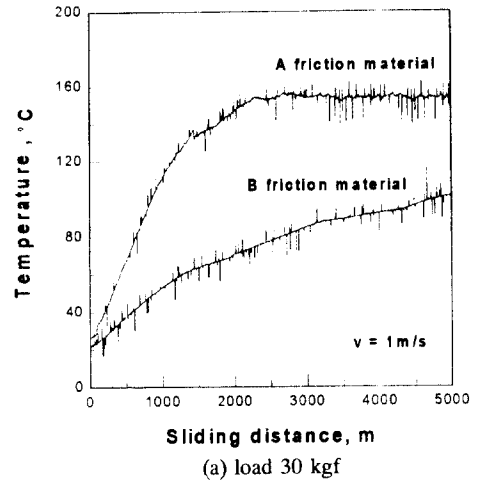
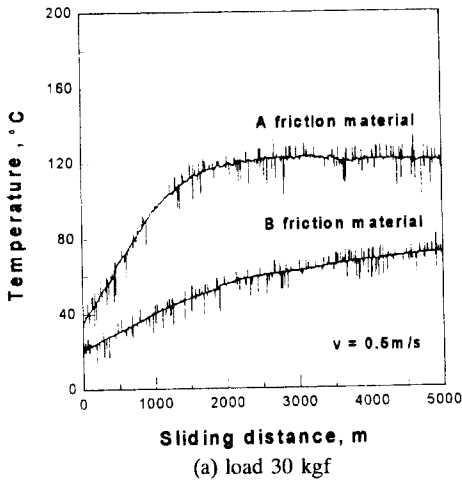


Fig. 5. Surface temperature of disks at the sliding velocity of 0.5 m/s.

Fig. 6. Surface temperature of disks at the sliding velocity of 1 m/s.

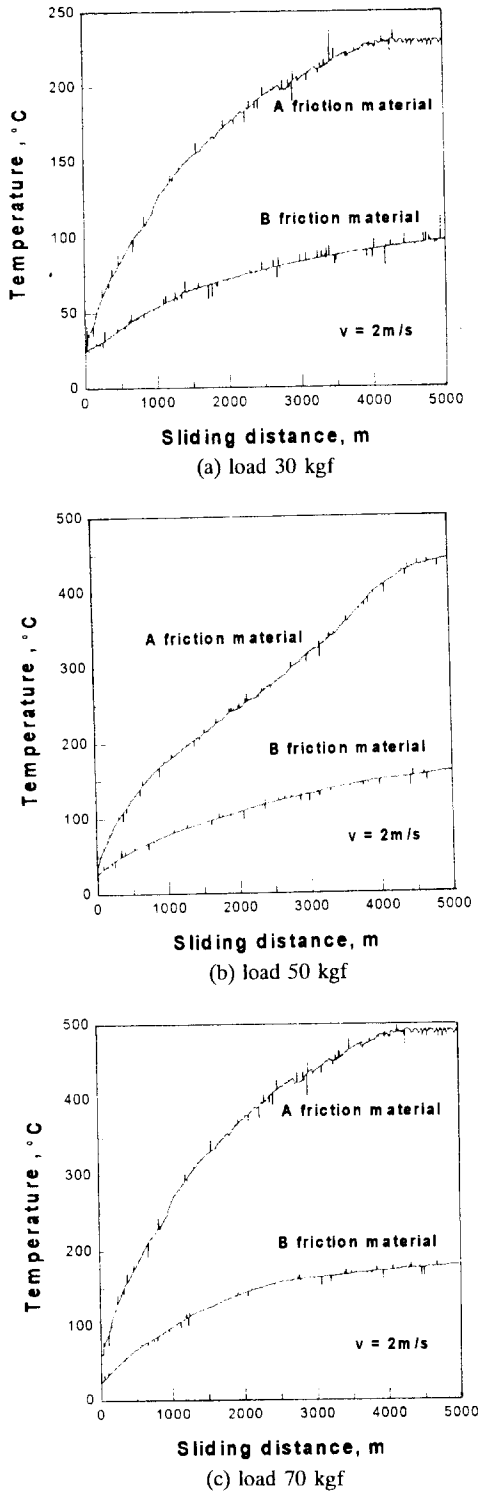


Fig. 7. Surface temperature of disks at the sliding velocity of 2 m/s.

승하고 있음을 나타내고 있다. 전체적인 접촉면의 온도에 있어서 B type의 경우가 A type보다 정상 상태 온도의 값이 훨씬 낮게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이는 평균적으로 낮은 마찰계수로 인한 낮은 마찰력 때문에 열에너지의 생성도 그만큼 작기 때문이라고 할 수 있다. 이와 같은 낮은 마찰계수와 마찰면 온도가 나타난 것은 마찰재 속에 포함되어 있는 성분중 마찰재의 안정된 마찰성능을 위해 마찰력을 감소시켜 주는 흑연 등의 윤활제 성분이 다소 많이 포함되어 발생하는 현상으로 볼 수가 있다.

2-3-2. 마찰재의 마멸 특성

Fig. 8 (a), (b)는 각 마찰재의 하중과 미끄럼 속도에 대한 마찰재의 마멸량을 나타낸 것이다. A type 마찰재의 경우 미끄럼 속도가 낮을 수록, 하중이 증가할 수록 마멸량이 많이 발생하는 현상이 뚜렷이 나타나며, 이 때 하중증가와 미끄럼속도 증가에 대해 마멸량은 거의 일정한 기울기의 증가양상을 보인다. 일반적으로 고하중, 고속도 조건에서 마멸량은 증가한다고 알려져 있으나 이 경우 고속도의 영향으로 야기된 표면 온도의 상승으로 접촉면에서의 마멸 기구가 변화된 것을 확인할 수 있다. B type 마찰재의 경우는 A type 마찰재와는 다소 다른 경향이 나타남을 볼 수 있다. 즉 하중 30 kgf의 조건에서 표면온도는 미끄럼 속도에 관계없이 최고 100°C를 넘지 않았다. 따라서 이 하중조건에서는 일반적인 마멸 이론대로 미끄럼 속도가 증가함에 따라 마멸량이 증가하는 경향을 보였으며, 하중 50 kgf에서도 미끄럼 속도 2 m/s에서 가장 큰 마멸량의 결과를 나타내고 있다. 그러나 하중이 70 kgf의 경우는 마멸량이 미끄럼 속도에 크게 영향을 받지 않고 있으며, 오히려 가장 빠른 미끄럼 속도에서 가장 작은 마멸량을 나타냄으로써 역시 표면 온도의 증가로 인한 마멸기구의 변화가 발생하고 있음을 알 수가 있다.

A type과 B type의 마멸량은 상대적으로 비교해 보면 A type이 B type보다 마멸량이 높게 나타나고 있다.

2-3-3. 주철의 마멸 특성

Fig. 9(a),(b)는 하중과 미끄럼 속도에 대한 주철제 디스크의 마멸량을 나타내었다. A type 마찰재에 의한 디스크의 마멸량은 Fig. 8(a)의 마찰재 마멸량과 마찬가지로 고하중, 저미끄럼 속도에서 마멸량이 크게 나타난 것을 볼 수 있다. Fig. 9(b)에서는 B type 마찰재에 의한 디스크의 마멸량을 나타내었다. B type 마

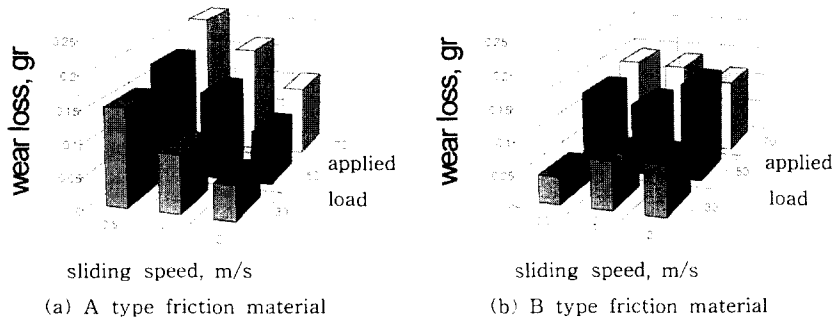


Fig. 8. Wear loss of friction materials after sliding distance of 5,000 m.

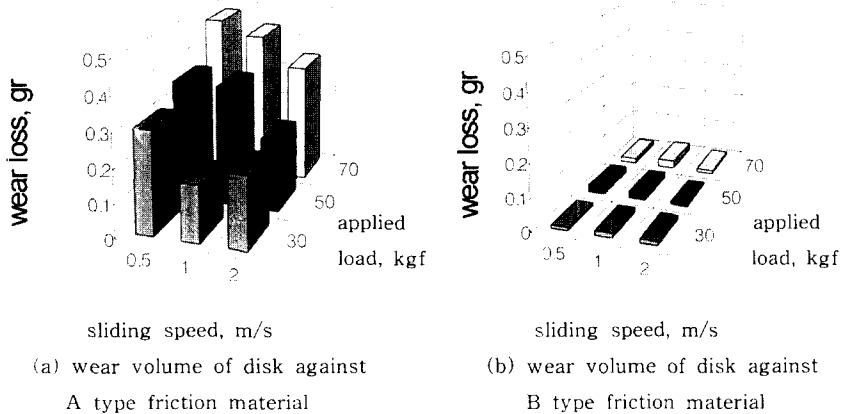
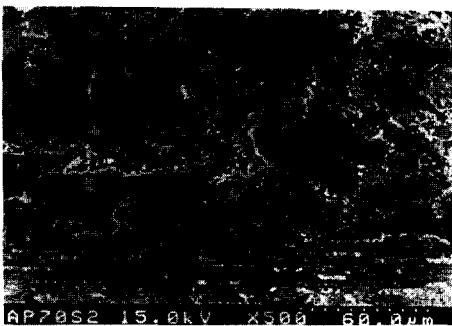
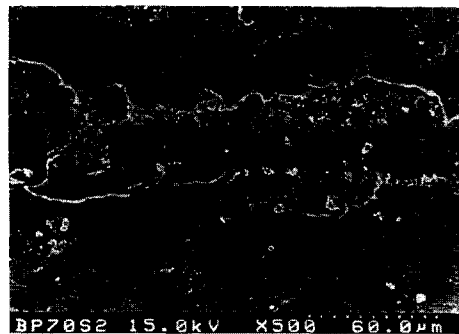


Fig. 9. Wear loss of cast iron disks after sliding distance of 5,000 m.



(a) worn surface of disk against A type friction material



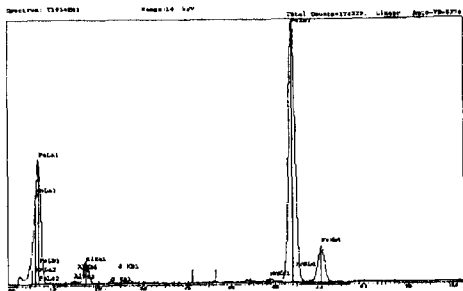
(b) worn surface of disk against B type friction material

Fig. 10. SEM photograph of worn surface of disk after sliding distance of 5,000 m (applied load: 70 kgf, sliding speed: 2 m/s).

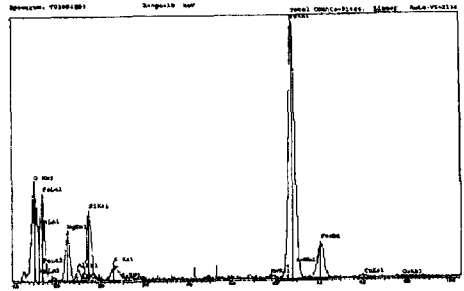
찰재의 불균일로 인해 B type 마찰재의 디스크쪽 마멸 공격성이 불균일하게 나타나고 있다. 이는 마찰 특성에서의 마찰계수와 마찰면온도 특성과의 상관관계

가 있다.

이와 같은 결과로부터 B 마찰재가 마찰재의 중요한 조건중의 하나인 디스크에 대한 공격성이 훨씬 적다



(a) EDX graph before experiment



(b) EDX graph after experiment

Fig. 11. EDX graph of cast iron disk.

고 할 수는 있으나 실제 브레이크용 적정 마찰계수에 도달하지 못하고 있다는 결과를 볼 때 다소 부족한 부분이 있으며, 상용 브레이크용 적정 마찰계수로 마찰계수를 상승시킬 수 있다면 B type의 마찰재가 디스크에 대한 공격성 측면에서는 우수하다고 말할 수 있다.

2-3-4. 마찰면의 미시적 관찰

Fig. 10(a), (b)는 각각 A type 마찰재와 B type 마찰재를 이용하여 가장 고하중인 70 kg, 가장 빠른 미끄럼속도인 2 m/s로 실험한 디스크 표면의 전자현미경 사진이다. 저하중, 저속의 경우에 비해 상당히 심한 마멸의 형태를 보였다. 미끄럼방향으로 디스크 표면의 마멸흔적을 확인할 수 있으며, B type 마찰재는 A type 마찰재보다 표면이 반복 미끄럼접촉에 의한 판상마멸입자가 크게 탈락되고 있음을 알 수 있다. Fig. 6(a), (b)에서 알 수 있는 바와 같이 금속마찰재에 의한 주철제 디스크 접촉면 마멸기구는 마찰열에 의한 응착마멸과 마찰재속의 경질입자에 의한 연삭마멸이 주된 기구임을 알 수 있다.

Fig. 11(a), (b)는 실험전과 실험후의 디스크 표면에 대한 EDX 분석그래프이다. 표면의 EDX 분석 결과 마찰재의 주 구성성분들이 디스크 표면으로 이착되었음을 알 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 중장비 브레이크용 동계소결 마찰재의 트라이볼로지적 특성을 조사하기 위하여 현재 수입해서 사용중인 마찰재 A type과 국내 생산된 마찰재 B type의 두 가지 재료를 시편으로, 구상흑연주철(GCD450) 디스크를 상대재료로 하여 마찰·마멸 실험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. A type 마찰재는 미끄럼 거리 증가에 따라 안정된 0.4~0.6의 마찰계수를 나타내는데 반해 B type 마찰재의 경우 상대적으로 불안정한 0.2~0.4의 마찰계수를 나타내었으며, 브레이크용 마찰재로서 B type은 사용될 수 없다.

2. 마찰면의 온도상승의 영향은 하중변화에 대한 마찰면 온도상승의 민감도에 비해 미끄럼 속도변화에 대한 온도민감도가 크게 나타났다.

3. 디스크의 마멸량은 A 마찰재를 이용한 경우보다 B 마찰재를 이용한 경우가 현저히 적게 나타났다.

4. 금속마찰재에 대한 주철제 디스크 접촉부의 마멸 기구는 마찰열에 의한 응착마멸과 마찰재에 내포된 경질입자에 의한 연삭마멸이 복합적으로 나타났다.

후 기

본 연구는 1996년도 교육부 학술연구조성비(ME96-E-02)에 의한 연구결과입니다.

참 고 문 헌

- Ogiwara, O. and Idemura, K., "Tribology of Brakes," Journal of Japanese Society of Tribologists, Vol. 41, No. 4, pp.275-280, 1996.1.
- Sin, W.H., David, H., Kum, F.W., Lin, C.S., "Friction Properties of Copper-based and Iron-based Friction Materials," Advances in Powder Metallurgy, Vol. 5, 1991.
- Day, A.J. and Ashi, A.B., "Heat Flow and Temperatures in Friction Material During Braking," Vehicle Tribology, Elsevier, pp.183-191, 1990.
- Jenkins, A., "Powder Metal Based Friction Materials," Powder Metall., 12, pp.503-518, 1969.

5. Jones W.D., *Fundamental Principles of Powder Metallurgy*, Arnold, London, pp.787-794, 1960.
6. Kumagai, N., "Brake Systems in Rolling Stocks," *Journal of Japanese Society of Tribologists*, Vol. 41, No. 4, pp.293-298, 1996.
7. 송분석, 권성태, 권석진, 김기열, "철도차량용 제동마찰재의 마찰특성에 관한 연구," *대한기계학회 '95년도 추계학술대회논문집(I)*, 1995, pp.106-110.
8. 김정, 최병호, 이종형, "동계 소결 마찰재에 대한 성형압력의 영향," *대한기계학회 '95년도 추계학술대회논문집(I)*, 1995, pp.111-115.
9. 송건, 허무영, 황순홍, 공호성, 최웅수, 정동윤, "Brake pad용 청동기지 복합재료의 마찰·마모특성에 관한 연구(1)," *한국윤활학회 '96년 춘계학술대회논문집*, 1996, pp.63-75.