

## 고체 윤활제의 특성에 따른 반금속계 마찰재의 마찰 마모특성에 관한 연구

신민욱 · 장호<sup>†</sup> · 김윤철\* · 정동윤\*\*

고려대학교 신소재공학부, \*현대기아자동차 중앙연구소 재료개발팀, \*\*육군사관학교

### Tribological Properties of Semi-metallic Brake Friction Materials Containing Different Solid Lubricants: Graphite, WS<sub>2</sub>, and MoS<sub>2</sub>

Min Wook Shin, Ho Jang<sup>†</sup>, Yun Cheol Kim\* and Dong Yoon Chung\*\*

*Dept. of Materials Science and Engineering, Korea University*

*\*Materials Research Team, Advanced Technology Center, R&D Division for Hyundai Motor Company  
and Kia Motors Corporation*

*\*\*Dept. of Weapons and Mechanical Engineering, Korea Military Academy*

(Received November 15, 2008; Revised December 23, 2008; Accepted December 29, 2008)

**Abstract** – Tribological properties of the semi-metallic friction materials containing different solid lubricants (graphite, WS<sub>2</sub>, MoS<sub>2</sub>) were investigated. The friction materials were fabricated with an experimental formulation and tested with gray cast iron disks. Results showed that graphite contributed to stabilize the friction coefficient during run-in processes. Also, graphite provided better fade resistance than that of WS<sub>2</sub> and MoS<sub>2</sub>. At intermediate temperature ranges, however, friction materials with WS<sub>2</sub> or MoS<sub>2</sub> maintained higher friction effectiveness than that of graphite. On the other hand, friction materials containing MoS<sub>2</sub> showed increased wear rates than that with graphite or WS<sub>2</sub>. Friction materials with proper combinations of two solid lubricants showed better friction and wear properties than that of the friction materials containing single solid lubricant.

**Key words** – brake, fade, friction coefficient, friction materials, solid lubricants, wear

### 1. 서 론

자동차용 브레이크 시스템의 성능은 주로 마찰재와 상대재인 회주철 디스크와의 마찰 마모 특성에 의해 결정된다. 이때 마찰계면은 다양한 조건에 노출되며 이에 따른 제동특성의 변화를 조절하기 위해 일반적으로 마찰재의 조성을 변화시켜 대응한다[1,2]. 이들 중 고온에서의 마찰특성은 제동 시 제동거리를 결정할 뿐 아니라 마찰재의 수명 측면에서 매우 중요한 요소이다. 특히 고온에서 마찰력이 저하되는 페이드(fade)특성은 다양한 마찰재의 요구조건 중 반드시 기준을 만족해야 하

는 마찰특성이다.

일반적으로 마찰재의 종류는 크게 유기질 마찰재(Non-steel)와 저금속성 마찰재(Low-steel) 그리고 반금속(Semi-metallic)계 마찰재의 세가지로 나누어 지는데 이중 반금속계 마찰재는 우수한 제동력을 요구하는 자동차에 사용되는 반면 유기질 마찰재와 저금속 마찰재는 극심한 제동조건에 부합하기 보다는 안락한 제동특성이 요구될 때 사용된다. 이는 반금속 마찰재에는 고분자 원료가 적고 주로 금속섬유나 금속분말로 이루어져있어서 고온제동에 유리하기 때문이다[3,7]. 그러나 최근에는 이러한 마찰재의 전형적인 구분에서 벗어나 각 마찰재의 장점을 부각하고 단점을 감소시킨 융합형 마찰재를 위한 새로운 원료배합비들이 개발되고 있다.

<sup>†</sup>주저자 · 책임저자 : hojang@korea.ac.kr

실차에 사용되는 마찰재는 10가지 이상의 원료가 포함된 다상복합재료가 사용되고 있으며 따라서 원료들의 적절한 선택 및 배합비의 결정이 우수한 마찰재 개발에 가장 핵심이라 할 수 있다.

본 연구에서는 마찰재에 사용되는 다양한 원료들 중 고온제동 특성에 크게 영향을 미치는 고체 윤활제에 관하여 연구하였다. 이는 마찰계면의 온도가 증가함에 따라 고체 윤활제의 화학적 특성이 바뀌고 이에 따라 마찰특성의 변화가 수반되기 때문이다[4,8]. 특히 고체 윤활제의 종류와 조합에 따른 영향을 보기 위하여 흑연(Graphite), 이황화 텅스텐( $WS_2$ ), 이황화 몰리브데늄( $MoS_2$ )을 사용하여 시편을 제작하고 고온 마찰 시험기를 사용하여 마찰마모 특성을 평가 하였다.

## 2. 실험 방법

본 실험에서 사용한 마찰재는 결합재, 금속, 마찰조절제, 고체윤활제, 연마제, 충전재 등의 원료를 혼합하

**Table 1. Ingredients in the friction material specimens (Vol. %)**

Raw materials	Specimen (Volume %)					
	A	B	C	D	E	F
Binder	13	13	13	13	13	13
Metal	34	34	34	34	34	34
Abrasive	10	10	10	10	10	10
Filler	18	18	18	18	18	18
Friction modifier	20	20	20	20	20	20
Graphite	5	0	0	2.5	2.5	0
$MoS_2$	0	5	0	2.5	0	2.5
$WS_2$	0	0	5	0	2.5	2.5

**Table 2. Friction test procedure**

1 <sup>st</sup> Burnish
Initial brake temperature(IBT): 25°C
Pressure: 0.7 MPa, Speed: 3 m/s
Duration: 300 sec
2 <sup>nd</sup> Burnish
IBT: 100°C, Pressure: 0.7 MPa
Speed: 3 m/s, Duration: 300 sec
Constant interval test (3 times)
IBT: 25, 100, 150°C, Pressure: 0.7 MPa
Speed: 3 m/s, dragging: 20 sec, interval: 10 sec Total time: 600 sec

여 제조 되었다. 마찰 시험에 사용된 마찰재의 구체적인 조성을 Table 1에 나타내었다.

시편의 제조 공정은 원료의 계량, 혼합(mixing), 성형(hot pressing), 열처리(post-curing), 후처리(scorching)의 순서로 진행하였으며, 구체적인 제조 공정은 이미 발표된 바 있다[5,6]. 마찰 시험기에 사용되는 시편의 크기는  $2 \times 2 \times 1 \text{ cm}^3$ 이며 총 접촉 면적은  $8 \text{ cm}^2$ 이다. 상대 디스크는 상용화 되어 있는 회주철의 로터를 주물 가공하여 12 cm의 직경과 2.5 cm의 두께로 제작하여 사용하였다.

본 실험에서는 pad-on-disk 형태의 마찰 시험기를 이용하였으며[5]. 마찰시험시 마찰력, 가압력, 디스크 온도는 PC-based DAQ (Lab-PC-1200, NI) 시스템을 이용하여 100Hz의 데이터 처리속도로 저장하였다. 디스크 온도는 비접촉식 적외선 온도계(Infrared thermometer, IR tec P500+)를 이용하여 측정 하였다.

마찰시험은 마찰력 안정화 시험(burnish)과 일정주기 실험(constant interval test)으로 구성되어 있으며 구체적인 마찰시험 조건은 Table 2에 나타내었다. 복합재의 비마모율(specific wear rate)은 3.6 km의 일정주기 실험 동안 체적 마모량과 적용하중을 고려하여 계산하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3-1. 고체 윤활제에 따른 마찰 특성

고체 윤활제의 종류에 따른 마찰특성을 연구하기 위하여 세 종류(Graphite,  $MoS_2$ ,  $WS_2$ )의 고체 윤활제를 각각 동일량 배합하여 시편 A, B, C 를 제작한 후 고온 마찰시험을 수행하였다. Fig. 1은 시편 A, B, C의 마찰 온도 상승에 따른 마찰계수의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서의 마찰계수는 20초 동안 시행되는 정속마찰 시험구간에서의 평균 마찰계수를 표시한 것이다.

흑연을 사용한 경우(A)에는 온도가 변함에 따라 마찰특성이 크게 변하지 않는 우수한 마찰 특성을 보이고 있다. 반면 이황화 몰리브데늄이나 이황화 텅스텐을 사용한 경우(B, C)에는 200°C 이하의 온도에서는 마찰계수가 상승하나 이 후에는 마찰계수가 급격히 떨어지는 현상을 보이고 있다. 그리고 동일한 마찰 안정화를 실시한 후 얻어지는 마찰 특성을 살펴보면 시편 A가 B, C보다 더 빨리 마찰 안정화를 이루는 것으로 나타났다. 이는 흑연의 마찰계수가 다른 두 종류의 마찰계수보다 낮은 것으로부터 기인된다고 판단된다. 그

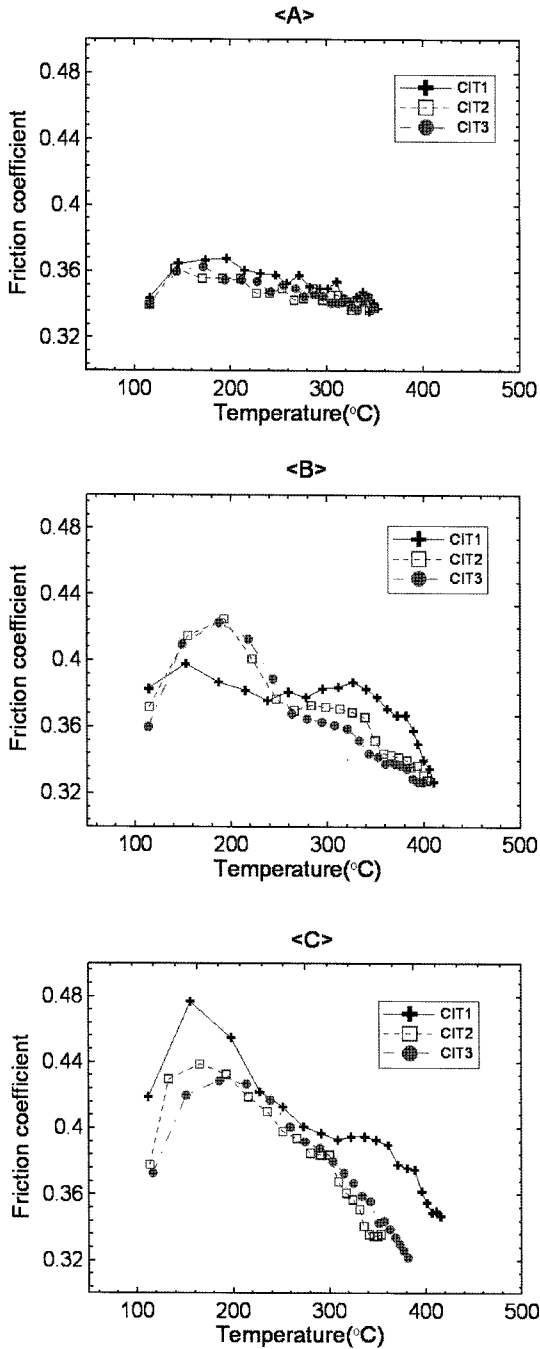


Fig. 1. Friction coefficient of the friction materials A, B, and C as a function of temperature. The drag tests were repeated three times.

림에서 온도 상승의 범위가 시편에 따라 다른 이유는 마찰계면에서 고체윤활제가 열분해 되는 상태가 고체 윤활제의 종류에 따라 다르기 때문으로 사료된다[3,9].

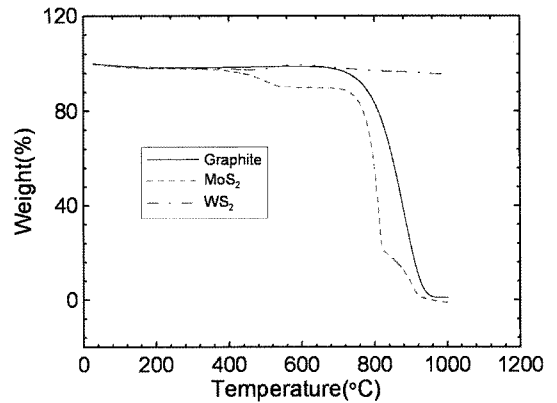


Fig. 2. TGA curves showing weight changes of the three solid lubricants as a function of temperature.

고체 윤활제의 종류에 따라 다르게 나타나는 마찰특성의 원인이 고온에서 고체윤활제의 상태변화라고 고려되어 열분석을 실시하였다(Fig. 2). 그림에 나타난 바와 같이 흑연이나 이황화 몰리브데늄에 비해 이황화 텅스텐이 매우 우수한 열적 안정성을 보이는 것을 알 수 있다. 이는 흑연이 고온에서 산화되어 이산화탄소 또는 일산화탄소로 변화하고 이황화 몰리브데늄이 고온에서 삼산화 몰리브데늄으로 변화하는데 비해 이황화 텅스텐은 매우 열에 안정하기 때문이다[1]. 이는 마찰실험을 통해 얻어진 결과와 비교할 때 상반되는 현상이다. 이러한 상반된 결과는 고온에서의 마찰계수 변화가 고체윤활제의 열분해 뿐 아니라 각 고체윤활제의 고유마찰계수의 차이에도 기인하기 때문인 것으로 사료된다. Fig. 1(A)에 나타난 온도에 따른 마찰계수변화는 흑연의 낮은 마찰계수 때문에 마찰계면의 온도가 비교적 늦게 증가하여 서서히 결합체를 분해시킨 결과이며 Fig. 1(B)의 경우는 초기의 낮은 마찰계수가 이황화 몰리브데늄의 산화로 인해 마찰계수의 상승을 초래하여 마찰계수를 상승시키고 그에 따라 결합체가 분해되어 나타난 현상으로 사료된다. 이 경우 약 300°C 부근에 나타난 마찰계수의 재상승은 삼산화 몰리브데늄의 승화작용에 따른 현상으로 사료된다[1]. 반면에 이황화 텅스텐을 사용한 경우에는 WS<sub>2</sub>의 고유마찰계수가 다른 두 종의 고체윤활제에 비해 높아 급격한 마찰열을 발생하고 이어서 결합체의 열분해가 수반되어 나타난 현상으로 보인다.

A 시편의 마찰거동은 흑연의 마찰특성에 의한 것으로 사료된다. 이는 흑연이 수분이나 탄화수소 같은 흡착물들과 결합하여 마찰막을 형성하며, 온도가 상승하

면 흡착물들이 증발하여 마찰막 형성을 방해하기 때문이다. 반면 시편 B와 C는 황 성분이 금속과의 친화력이 우수하여 마찰막을 형성하는데 흑연보다 우수한 성질을 지니고 있다. 고체 윤활제인 이황화 몰리브데늄

은 산화반응으로 삼산화 몰리브데늄( $MoO_3$ ), 황( $S^2$ ), 사산화황이온( $SO_4^{2-}$ )이 생성된다[10]. 따라서  $200^{\circ}C$ 까지는 디스크, 마찰재 표면에 황 이온들이 수증기 및 탄화수소 같은 흡착물들과 결합하기 때문에 금속표면에 흡착되어 마찰막 형성을 돕지 못한다. 하지만 온도가 높아지면 수증기 및 흡착물들이 산화되어 사라지기 때문에 황 이온들이 금속 표면에 흡착하여 디스크의 금속 성분과 마찰재의 금속성분들간의 접촉을 방지하는 마찰막 형성에 기여한다[10,11]. 이황화 텅스텐의 경우도 이황화 몰리브데늄과 같이 텅스텐과 황으로 이원화 된 극성으로 인해 위와 유사한 방법으로 마찰막을 형성하며 따라서 온도에 따른 마찰계수의 성향이 비슷한 형태로 보인다.

본 연구에서는 온도대역에 따라 각각 다른 마찰특성을 지닌 세가지 고체윤활제의 상호보완 역할을 도출하기 위해 두 가지 고체윤활제를 혼합하여 제작한 마찰재 D, E, F를 제작한 후 마찰 시험을 실시 하였다. Fig. 3에 마찰재 D, E, F를 이용하여 동일한 일정주기 마찰시험을 실시하였을 때의 결과를 나타내었다.

전반적으로 세 마찰재 모두의 경우에서 단일 고체윤활제를 사용했을 경우 보다 안정된 마찰 특성을 보였다. 이는 여러 온도 범위에서 고체 윤활제들이 서로 다른 특성을 가지기 때문에 상호 보완적인 역할을 함으로써 마찰 특성을 개선할 수 있는 것으로 사료된다. 특히, 흑연과 이황화 텅스텐을 사용한 마찰재(E)의 경우가 가장 안정된 마찰 특성을 보였으며 평균 마찰계수 변화량이 0.02에 지나지 않았다. 이것은 흑연과 이황화 텅스텐을 섞어 사용하게 되면 단일 고체 윤활제를 사용하는 것보다 전 온도 범위에서 더 우수한 시너지 효과를 얻을 수 있다는 것을 보여주고 있다. 다른 고온 마찰특성을 보였던 이황화 몰리브데늄과 이황화 텅

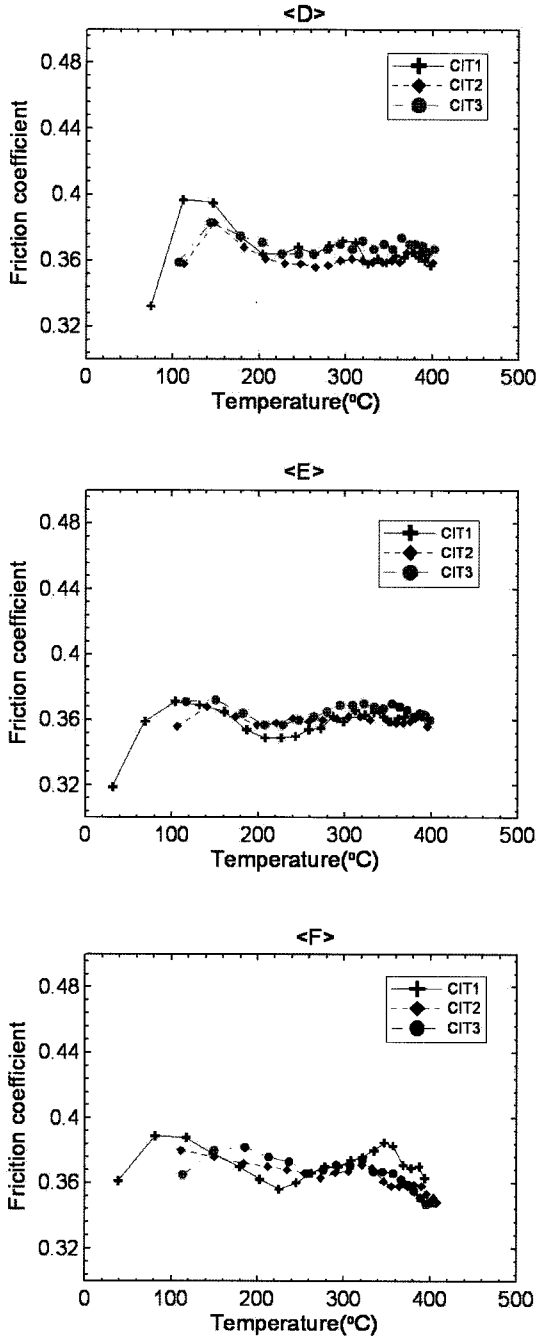


Fig. 3. The friction coefficient of specimen D, E, and F as a function of temperature.

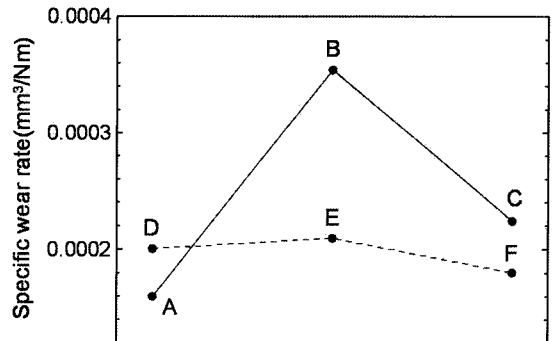


Fig. 4. Specific wear rate after constant interval test.

스텐을 섞어 사용한 경우에도 마찰특성이 더욱 안정화된 것을 볼 수 있다. 이를 통해 두 고체 윤활제가 상호 보완적인 작용을 한다는 것을 알 수 있다.

이러한 시너지 현상은 계면에서 마찰시 수반되는 고압고온에서의 복잡한 화학반응 및 반응속도에 따른 결과이나 마찰재의 구성원료의 수가 많아 그에 대한 정확한 기구에 대한 분석은 앞으로 진행될 연구과제로 남아 있다.

### 3-2. 고체 윤활제에 따른 마모 특성

마찰재에 사용된 고체윤활제의 마모특성을 비교하기 위해 일정한 주기로 시행된 마찰실험을 3회 실시하였으며 산출된 체적 마모량을 마찰에너지로 나누어 비마모율을 도출하였다(Fig. 4).

그림에 나타난 바와 같이 단일 고체윤활제를 사용한 경우 상대적으로 마찰계수가 낮은 흑연 만을 포함한 A 시편을 제외하고는 (A, B, C) 보다 2종의 고체 윤활제를 섞어 사용했을때 (D, E, F) 전반적으로 마모율이 감소하였음을 관찰할 수 있었다. 이것은 마찰 특성 뿐만 아니라 마모 특성에서도 상호 보완 적인 효과를 보이는 것이라 할 수 있으며 이러한 결과는 마찰재의 고온 내마모를 향상하기 위해서는 두 가지 이상의 고체윤활제를 섞어 사용하는 것이 효과적인 것으로 사료된다[1].

## 4. 결 론

1. 반금속 계열 마찰재를 이용하여 마찰 시험한 결과 각각의 고체 윤활제는 고온에서 서로 상이한 마찰 특성을 나타내었으며 이러한 결과는 마찰특성이 고체 윤활제의 열분해 특성뿐 아니라 고유의 마찰계수 수준에도 의존됨을 보여주었다.

2. 단일 고체 윤활제를 사용한 경우 보다 2종의 고체윤활제를 사용한 경우 최고 60% 내마모 특성이 향상되었다.

3. 윤활특성 및 열분해 특성을 고려하여 마찰 시험한 결과 흑연과 이화화 텅스텐을 혼합하여 고체 윤활제로 사용하는 것이 가장 우수한 고온 마찰 마모특성을 나타내었다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 국가지정 연구실 사업(과제번호: R0A-2007-000-10011-0)에 의해 수행되었습니다.

## 참고 문헌

1. M.H. Cho, J.J. Lee, S.J. Kim, and H. Jang., "Tribological Properties of Solid Lubricants (Graphite,  $Sb_2S_3$ ,  $MoS_2$ ) for Automotive Brake Friction Materials", *Wear*, Vol. 260, pp. 855-860, 2006.
2. M.G. Jacko and S.K. Lee., "Brake Linings and Clutch Facings in: Kirk-othmer Encyclopedia of Chemical Tribology", Vol. 4, fourth ed., pp. 523-536, 1992.
3. T. Liu and S.K. Rhee., "High Temperature Wear of Semimetallic Disc Brake Pads", *Wear*, Vol. 46, pp. 213-218, 1978.
4. J. Bijwe *et al*., "Influence of Modified Phenolic Resins on the Fade & Recovery Behavior of Friction Materials", *Wear*, Vol. 259, pp. 1068-1078, 2005.
5. S.J. Kim, M.H. Cho, D.S. Lim, and H. Jang., "Synergistic Effects of Aramid Pulp and Potassium Titanate Whiskers in the Automotive Friction Materials", *Wear*, Vol. 251, pp. 1484-1491, 2001.
6. S.J. Kim, K.S. Kim, and H. Jang., "Optimization of Manufacturing Parameters for a Brake Lining using Taguchi Method", *Journal of Materials Processing technology*, Vol. 136, pp. 202-208, 2003.
7. T.A. Libsch and S.K. Rhee., "Microstructural Changes in Semimetallic Disc Brake Pads Created by Low Temperature Dynamometer Testing", *Wear*, Vol. 46, pp. 203-212, 1978.
8. G.W. Stachowiak and A.W. Batcheoler, *Engineering Tribology*, Butterworth-Heinemann, Oxford, pp. 411-416, 2001.
9. Ernest Rabinowicz, *Friction and wear of materials: 2<sup>nd</sup> ed.*, Wiley, New York, pp. 198-217, 1995.
10. K.C. Wong *et al*., "Surface and Friction Characterization of  $MoS_2$  and  $WS_2$  Third Body thin Film under Simulated Wheel/rail Tolling-sliing Contact", *Wear*, Vol. 264, pp. 526-534, 2008.
11. M.H. Cho, E.G. Bae, and H. Jang., "The Role of Raw Material Ingredients of Brake Linings on the Formation of Transfer Film and Friction Characteristics", SAE Paper, No.2001-01-3130, 2001.