

고체윤활제(Graphite, MoS₂, Sb₂S₃)의 상대량에 따른 마찰재의 마찰 및 마모특성에 관한 연구

최 낙 천 · 장 호

고려대학교 재료금속공학부

Friction and Wear Characteristics of Automotive Friction Materials Containing Different Relative Amounts of Solid Lubricants(Graphite, MoS₂ and Sb₂S₃)

Nak Cheon Choi · Ho Jang

Division of Materials Science and Engineering, Korea University

Abstract-The effects of solid lubricants on wear and friction characteristics of friction materials were studied using a pad-on-disk type friction tester. Friction materials with ten formulations containing different relative amounts of solid lubricants(graphite, MoS₂, and Sb₂S₃) were investigated. Results of this work showed that each formulation with different relative amounts of the lubricants had unique friction characteristics. At low brake temperatures, friction materials containing rich graphite showed a small amount of μ change during sliding. At elevated temperatures, on the other hand, friction materials with rich Sb₂S₃ and graphite showed smaller μ changes suggesting complementary lubrication of Sb₂S₃ and graphite during sliding. However, the friction materials with rich Sb₂S₃ showed a large amount of wear.

Key words-solid lubricant, friction, wear, friction characteristics, friction test, wear test.

1. 서 론

마찰재의 구성성분은 역할에 따라 크게 결합제(binder), 충전재(filler), 고체윤활제(solid lubricant), 연마제(abrasives), 마찰조절제(friction modifier) 등으로 분류되며, 이들 구성물질들은 마찰계면에 윤활막(transfer layer)을 형성하여 마찰 및 마모특성을 결

정한다. 이들 구성물질중 연마제와 고체윤활제는 제동시 자동차용 마찰재의 마찰 및 마모특성에 중요한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다[1]. 고체윤활제는 마찰재의 마찰계수의 안정성 및 내마모성을 향상시키기 위해 첨가된다. 고체윤활제로 사용되는 물질은 graphite와 황화물 계열의 물질이 주로 사용되고 있으며[2,3],

Table 1. Raw material ingredients used in this work [vol.%]

Specimen #	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Binder	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
Abrasives	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Fillers	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37
Friction modifiers	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Graphite	3	5	2	2	3	4	4	3	2	2
MoS₂	3	2	5	2	2	2	3	4	4	3
Sb₂S₃	3	2	2	5	4	3	2	2	3	4

graphite, MoS₂, Sb₂S₃, ZnS, CuS 등이 있다. 일반적으로 제조되는 상용 마찰재는 graphite를 기본으로 하고, 이에 MoS₂, Sb₂S₃ 등을 혼합하여 사용하고 있다. 이는 각각의 고체윤활제들이 온도, 속도 및 가압력의 범위에 따라 서로 다른 마찰특성을 나타내므로 한가지의 윤활제만으로는 다양한 제동조건 하에서 우수한 제동특성을 유지하지 못하기 때문이다.

본 실험에서는 고체윤활제의 전체 성분비는 일정하게 유지한 후 3 가지 고체윤활제의 배합비율을 조절하여 10 가지 시편을 제작하였으며, 마찰 및 마모특성을 관찰하기 위하여 초기제동온도, 가압력, 속도 조절이 가능한 pad-on-disk 형태의 마찰시험기를 이용하여 시험하였다[4].

2. 실험 방법

본 실험에서 사용된 시편은 전형적인 NAO(non-asbestos organic type)마찰재의 구성물질들로 이루어져 있으며, 기본원료 중에서 고체윤활제(graphite, MoS₂, Sb₂S₃)의 조성만을 변화시켜 제작하였다. 본 연구에 사용된 마찰재 시편들의 개략적인 구성물질들은 Table 1에 나타내었다. 실험에 사용된 시편들은 요인들의 합이 일정한 경우에 사용하는 혼합물에 관한 실험계획법 중 {3,3}격자형 배열법을 이용하여 총

10 개를 제작하였으며, 구체적인 조성변화를 Fig. 1에 나타내었다[5,6].

마찰재 시편은 원료혼합, 본성형, 열처리의 과정을 거쳐 제조되었으며, 각 단계의 제조조건은 이미 발표된 바 있다[1]. 성형된 마찰재의 크기는 직경 5cm, 두께 1cm이며, 이들 시편을 마찰시험기에 장착할 수 있도록 1cm×1cm×1cm의 크기로 절단하여 실험하였다. 마찰재의 상대재로 사용된 로터는 실제 상용화 되어 있는 피주철 로터를 주물 가공하여 12cm의 직경과 2.5cm의 두께로 제작하여 사용하였다.

마찰 및 마모시험은 모든 시편에 걸쳐 상대재와 마찰재가 균일한 접촉이 되도록 2 단계에 걸쳐서 burnishing 작업을 시행한

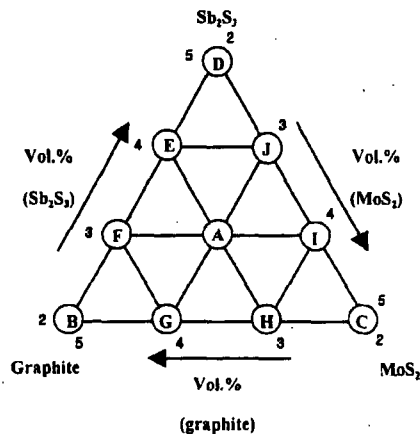


Fig. 1. A schematic diagram of {3,3} simplex lattice design.

Table 2. Experimental procedure

Burnishing						
1 st : IBT=room temperature, P=6kgf/cm ² , V=600rpm, Interval=10min						
2 nd : IBT=room temperature, P=6kgf/cm ² , V=600rpm, Interval=10secx20						
Friction Test (Interval of each test=40sec)						
IBT	Pressure		10kgf/cm ²	8kgf/cm ²	6kgf/cm ²	4kgf/cm ²
	Velocity					
200 °C	500rpm		Test 1	Test 5	Test 9	Test 13
	400rpm		Test 2	Test 6	Test 10	Test 14
	300rpm		Test 3	Test 7	Test 11	Test 15
	200rpm		Test 4	Test 8	Test 12	Test 16
50 °C	500rpm		Test 17	Test 21	Test 25	Test 29
	400rpm		Test 18	Test 22	Test 26	Test 30
	300rpm		Test 19	Test 23	Test 27	Test 31
	200rpm		Test 20	Test 24	Test 28	Test 32
Wear Test						
IBT=room temperature, P=8kgf/cm ² , V=600rpm, Interval=10min						

후 실험하였다. 마찰시험은 초기제동온도 (IBT:initial brake temperature)가 200 °C인 높은 제동조건과 초기제동온도(IBT) 50 °C인 낮은 제동조건의 두 가지 경우에 대해서 속도와 가압력을 변화시키면서 각각 40 초 동안 시행하였다. 마모시험은 속도와 가압력, 초기제동온도를 일정하게 유지하면서 10 분간 마찰시험과 별도로 행해졌으며, 각각의 마찰재 시편의 두께 변화로부터 마모량을 측정하였다.

본 실험에서 사용한 마찰 및 마모시험의 조건은 Table 2 에 상세하게 나타내었다. Table 2 에 나타낸 것과 같이 Test 1~16 은 초기제동온도(IBT)가 200 °C인 경우이며, Test 17~32 는 50 °C의 초기제동온도(IBT)에서 가압력(4, 6, 8, 10kgf/cm²)과 속도(200rpm, 300rpm, 400rpm, 500rpm)를 변화시키면서 시험한 것이다. 이때의 마찰계수는 마찰재와 로터가 완전히 밀착되지 않은 초기 10 초를 제외한 평균값으로 산출되었다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 속도에 따른 마찰계수의 변화

자동차 브레이크용 마찰재는 제동시 속도에 따라 마찰계수의 변화가 나타나며, 이는 속도의 변화에 따라 제동특성이 변화한다는 의미이다.

본 실험에서는 고체윤활제의 상대량이 다른 마찰재를 이용하여 속도에 따른 마찰계수의 변화를 측정하였다. 속도에 따른 마찰특성을 분석하기 위해 각각의 속도에서 측정한 평균 마찰계수들 중 최대값과 최소값의 차이($\Delta\mu$)를 이용하였다. Fig. 2 에 마찰계수의 차이가 가장 현저하게 나타난 두 경우(P=10kgf/cm², IBT=50 °C, 200 °C)에 대해서 $\Delta\mu$ 의 분포를 삼원계 상태도에 나타내었다. 이때 사용한 회귀모형식은 $Y = a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{23}x_2x_3 + a_{123}x_1x_2x_3$ 이며, 이 중에서 x_i ($i = \text{Graphite, MoS}_2, \text{Sb}_2\text{S}_3$)는 고체윤활제의 종류를 의미하고, a_i

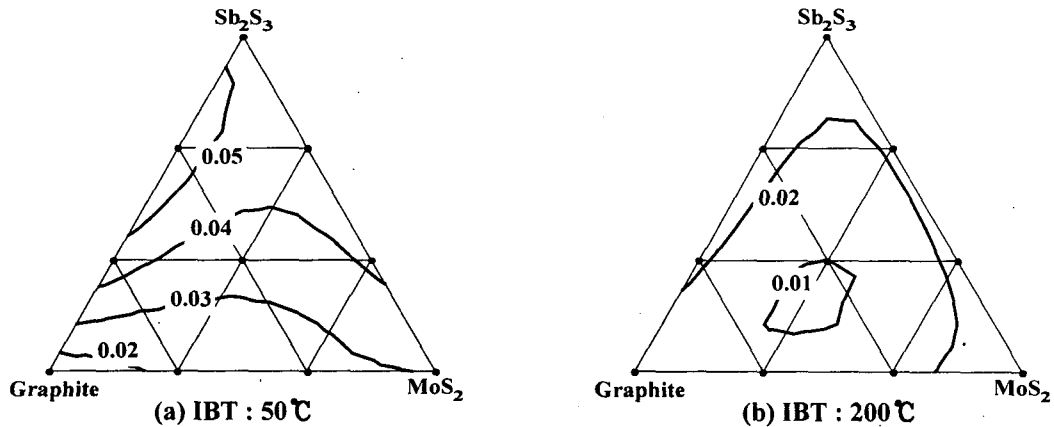


Fig. 2. $\Delta\mu$ as a function of vol.% at constant applied pressure(10kgf/cm^2).

a_{ij} , a_{ijk} 는 계수를 의미한다[6].

Fig. 2(a)에 나타난 것과 같이 초기제동온도(IBT)가 저온인 50°C 에서는 MoS_2 의 함량이 고정되어 있는 경우에 Sb_2S_3 의 상대량이 증가할수록(graphite의 상대량이 감소할수록) $\Delta\mu$ 가 증가하는 경향을 나타내었으며, Sb_2S_3 함량이 고정되어 있는 경우에는 graphite와 MoS_2 의 상대량에 따른 $\Delta\mu$ 의 차이가 적게 나타났다. 반면 초기제동온도(IBT)가 200°C 인 경우에는 세 종류의 고체윤활제의 분량이 비슷하게 첨가된 경우에 $\Delta\mu$ 가 상대적으로 약간 저하됨을 나타내었다. 이러한 결과는 저온(50°C)의 초기제동온도(IBT)에서는 graphite가 다른 고체윤활제들보다 효과적으로 윤활작용을 하기 때문인 것으로 생각되며, 반면에 초기제동온도가 고온(200°C)인 경우에는 Sb_2S_3 와 MoS_2 가 마찰계수의 변화를 감소시키는 역할을 하여 전체적인 $\Delta\mu$ 의 변화가 크지 않은 것으로 생각된다. 특히, graphite의 상대량이 많은 시편 B는 저온에서 graphite에 의해, 고온에서는 MoS_2 와

Sb_2S_3 의 보완작용으로 인해 마찰계수의 변화가 감소한 것으로 평가된다.

Graphite가 원활한 윤활작용을 하기 위해서는 수분 또는 탄화수소가 존재하여야 하는데, 고온에서 마찰시험을 할 경우에는 계면의 온도 상승으로 인하여 이들 물질이 증발되어 윤활작용이 감소하는 것으로 알려져 있다[1]. 이에 반해 MoS_2 , Sb_2S_3 의 경우에는 고온에서 마찰열에 의해 산화한 후에도 산화물이 마찰계수를 유지하는 역할을 하므로 온도상승에 따른 graphite의 윤활제로서의 역할 감소에 대해 보완작용을 하게 된다[1].

3-2. 가압력 변화에 따른 마찰계수의 변화

자동차 브레이크용 마찰재는 가압력에 따라 마찰계수가 변하며, 이는 동일한 속도로 주행시 운전자가 페달(pedal)을 밟는 가압력에 따라서 제동성능이 변경됨을 의미한다. 본 실험에서는 200°C 의 초기제동온도와 500rpm 의 속도조건에서 가압력에 따른 마찰계수의 변화를 고찰하였으며, Fig

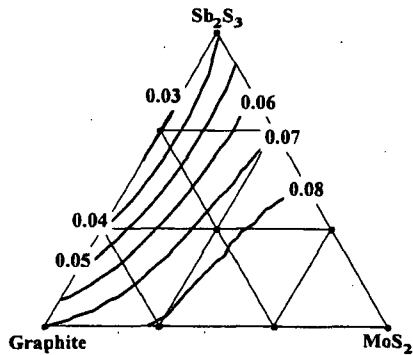


Fig. 3. $\Delta\mu$ as a function of vol.% of at constant IBT(200 °C) and velocity(500rpm).

3 에 가압력의 변화에 따른 $\Delta\mu$ 의 분포를 나타내었다.

속도의 변화에 따른 $\Delta\mu$ 의 결과와 상이하게 초기제동온도가 200 °C인 고온에서는 Sb_2S_3 의 함량이 고정된 경우 graphite의 상대량이 증가할수록(MoS_2 의 상대량이 감소할수록) 압력 변화에 따른 마찰계수의 변화($\Delta\mu$)가 감소하였으며, graphite의 상대량이 고정되어 있는 경우에도 Sb_2S_3 의 상대량이 감소할수록(MoS_2 의 상대량이 증가할수록) $\Delta\mu$ 가 증가하였다. Graphite와 Sb_2S_3 의 상대량이 많은 시편 B, D는 속도 변화에 의한 $\Delta\mu$ 와 유사하게 나타났으며, MoS_2 의 상대량이 많은 시편 C의 경우에는 속도의 변화에 의한 $\Delta\mu$ 보다 높게 나타났다. 이러한 결과는 MoS_2 의 상대량이 많은 시편의 경우에 온도에 의한 것보다는 상대적으로 압력에 의한 영향이 크기 때문이라고 생각된다.

3-3. 마모량의 변화

마모량의 변화를 알아보기 위해 각 시편에 대해 동일한 조건으로 마찰시험 한 후

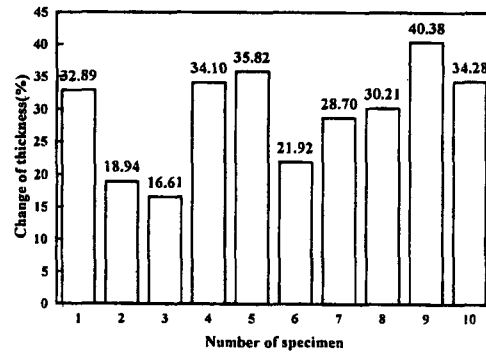


Fig. 4. Amounts of friction materials wear measured after friction.

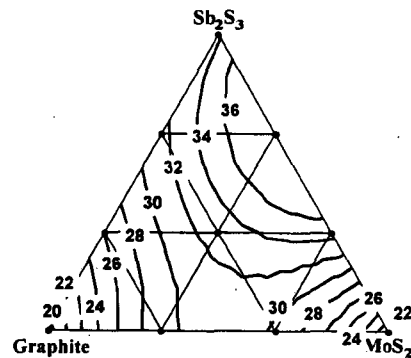


Fig. 5. Wear amount(%thickness change).

마찰재의 두께변화를 측정하였으며, Fig. 4에 마모량을 백분율로 환산하여 나타내었다. 환산된 각 시편의 마모량의 백분율을 Fig. 5에 고체윤활재의 성분비에 대해서 나타내었다. 전체적으로 Sb_2S_3 가 상대적으로 많이 함유되고 graphite(or MoS_2)가 적게 함유된 영역에서 마모량이 증가하였다. 이는 Sb_2S_3 가 고온에서 Sb_2O_3 , Sb_2O_4 등의 산화물로 변화되어 연마재의 역할을 하여 마찰계수를 유지함으로써 상대적으로 높은 마모량을 나타낸 것으로 사료된다[1]. MoS_2 의 고온 산화물들은 Sb_2S_3 의 고온 산화물에 비해 고온에서 마찰계수를 유지하는 역할을 하지 못하여, 마모량

에 미치는 영향이 적은 것으로 사료된다 [7,8].

4. 결 론

Pad-on-disk 형태의 마찰시험기를 이용하여 고체윤활제의 성분비에 따른 마찰재의 마찰 및 마모특성을 분석하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 초기제동온도(IBT)가 50°C인 저온의 경우에 속도 변화에 따른 마찰계수의 변화($\Delta\mu$)는 graphite의 상대량이 많을수록 적었다. 이는 저온에서 graphite의 윤활 작용이 효과적으로 일어나기 때문으로 생각된다.
2. 초기제동온도(IBT)가 200°C인 고온의 경우에는 graphite의 윤활제로서의 역할 감소에 대해 MoS₂보다 Sb₂S₃의 고온 산화물들이 보완작용을 하는 것으로 사료되며, 특히 Sb₂S₃의 상대량이 많이 함유되면 고온에서 마찰계수를 일정하게 유지시키는 것으로 생각된다.
3. MoS₂의 상대량이 많은 시편의 경우에는 온도에 의한 것보다 가압력 변화에 의한 $\Delta\mu$ 가 크게 나타났다.
4. 마모량은 Sb₂S₃의 함량이 높아지면 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 마찰시 계면의 온도 상승으로 인해 생성된 Sb₂S₃의 고온산화물들이 마찰재에 연삭마모(abrasive wear)를 유발시켜서 마찰계수를 유지하기 때문에 나타난 결과로 생각되며, MoS₂의 고온 산화물은 고온에서 마찰계수를 유지하는 역할을 하지 못하여 마모량에 적은 영향을 나타낸

것으로 생각된다.

후 기

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

참고 문헌

1. H. Jang, J. J. Lee, S. J. Kim and K. Y. Jung, The Effect of Solid Lubricants on Friction Characteristics, SAE 982235, pp.1-8, 1998.
2. F. P. Bowden and D. Tabor, "The Friction and Lubrication of Solids," Part II, Chap.11, Oxford University Press, pp.186-199, 1964.
3. D. H. Buckley, "Surface Effects in Adhesion, Friction and Lubrication," Tribology series 5, Chap.10, Elsevier Scientific Publishing Company, pp.569-577, 1981.
4. 김성진, 홍영석, 장호 "자동차용 마찰재에 사용되는 페놀수지의 종류에 따른 마찰특성의 영향에 관한 연구," 한국윤활학회 춘계학술대회 초록집, 영남대학교, 1999.
5. Y. Handa and T. Kato, "Effects of Cu Powder, BaSO₄ and Cashew Dust on the Wear and Friction Characteristics of Automotive Brake Pads," Tribology transactions, Vol.39(2), pp.346-353, 1996.
6. 박성현, "현대실험계획법," Chap.17, 민영사, pp.573-590, 1995.
7. M. N. Gardos, "The Synergistic Effects of Graphite on the Friction and Wear of MoS₂ Films in Air," Tribology transactions, Vol.31(2), pp.214-227, 1987.
8. C. Gao, L. Bredell, D. Kuhlmann-Wilsdorf, and D. D. Makel, "Micromechanics of MoS₂ Lubrication," Wear, vol.162-164, pp.480-491, 1993.