

자동차 브레이크용 마찰재에 사용되는 고체 윤활제에 따른 제동특성에 관한 연구

이정주 · 장 호

고려대학교 재료금속공학부

Effect of Different Solid Lubricants in the Automotive Friction Material on Friction Characteristics

Jung Ju Lee and Ho Jang

Division of Materials Science and Engineering, Korea University

Abstract—Friction materials with three different formulations containing different solid lubricants were investigated to study the role of lubricants on the friction performance. The three friction materials contained graphite 10 vol.%, graphite 7 vol.%+MoS₂ 3 vol.%, and graphite 7 vol.%+Sb₂S₃ 3 vol.%, respectively, with the same amount of other ingredients. Results of this work showed that each formulation with different lubricants had unique advantages and disadvantages. The friction materials containing graphite 7 vol.%+MoS₂ 3 vol.% and graphite 7 vol.%+Sb₂S₃ 3 vol.% showed better resistance to fading and improved friction stability compared to the friction materials containing graphite only as a lubricant. However, the friction materials with two lubricants (graphite+MoS₂ or Sb₂S₃) showed disadvantages on DTV generation and rotor wear.

Key words—friction materials, solid lubricants, friction stability, DTV, fading.

1. 서 론

자동차 브레이크용 마찰재는 제동시 안전하게 차량을 정지시킬 수 있어야 하며 동시에 운전자가 편안한 정차감을 느낄 수 있도록 고안되어야 한다[1]. 정차시 요구되는 이러한 제동특성은 로터와 마찰재의 계면 사이에 형성하는 마찰막의 성질에 영향을 받으며, 마찰막에 의한 제동특성은 마찰재의 구성물질 중 연마제와 윤활제의 상대적인 함량에 의해 가장 크게 영향을 받게 된다[2-4].

일반적으로 연마제는 마찰계수의 조절 및 마찰열에 의해 열분해된 마찰막의 제거를 위해 첨가되거나 다량의 연마제를 사용한 경우에는 마찰재와 로터의 마모량을 증가시키며 또한 로터의 DTV(Disc Thickness Variation)를 증가시켜 제동시 심한 토크 변화를 유발한다. 반면에 윤활제의 상대량이 많은 마찰재를 사용

한 경우에는 마찰재와 로터의 마모량을 감소시키며 마찰계수의 안정성(friction stability)이 개선되나 마찰계수가 감소되어 자동차의 정지에 필요한 제동력의 저하를 초래한다[4]. 따라서 연마제와 고체 윤활제의 적정량과 그 종류를 정하는 것은 마찰재 개발에 매우 중요한 과제이다. 자동차용 마찰재에 주로 쓰이는 연마제로는 ZrSiO₄, Al₂O₃, SiO₂, Fe₃O₄ 등이 있으며, 고체 윤활제는 주로 graphite, MoS₂, Sb₂S₃가 사용되고 있다.

현재 자동차에 사용되고 있는 마찰재에는 고체 윤활제로 graphite를 기본으로 하고, 이에 MoS₂ 또는 Sb₂S₃ 등을 혼합하여 사용하고 있다. 이는 각각의 고체 윤활제의 마찰특성이 온도에 따라 상이하게 나타나며 또한 고온 반응 후의 반응생성물이 제동특성에 영향을 미치기 때문에 한가지의 윤활제만으로는 다양한 제동조건 하에서의 우수한 제동특성을 얻어내지

못하기 때문이다[5]. 마찰재에 사용되는 고체 윤활제는 종류에 따라 약간의 차이는 있으나, 약 300°C 이상의 고온에서 열분해 되어 상온에서의 고유성질을 상실하게 되며, 그때의 반응생성물이 고온마찰특성으로 나타내게 된다[6,7]. 현재 마찰재 제조업체에서는 그동안의 경험에 의존하여 고체 윤활제의 상대량을 선정하여 마찰재를 제조하고 있으나 실제로 자동차 제동시 발생하는 고온, 고압 하에서의 고체 윤활제의 현상에 관해서는 자세한 연구보고를 찾아보기 힘들다. 따라서 고체 윤활제의 종류 및 상대량에 따른 마찰특성에 관한 연구는 자동차 제동시 나타나는 떨림현상(judder), 잡음(noise), 및 마찰력 상실(fade) 등의 다양한 현상을 보다 근본적으로 해결하는데 매우 중요하다.

본 실험에서는 제동시 고체 윤활제에 따른 마찰특성을 다양한 제동조건에서 관찰하고 이들의 혼합에 의해 발생하는 마찰현상을 분석하기 위하여 구성 물질 중 다른 물질의 조성을 일정하게 유지하고 고체 윤활제의 조성을 변화시킨 3가지 시편을 제작한 후, 실차와 같은 관성과 제동력을 구현하는 브레이크용 관성 dynamometer를 이용하여 시험하였다.

2. 실험 방법

본 실험에서 사용된 마찰재 시편-1, 2, 3은 전형적인 NAO(non-asbestos organic type)마찰재를 구성하는 물질 중 고체 윤활제의 조성을 graphite 10 vol.%, graphite 7 vol.%+Sb₂S₃ 3 vol.%, graphite 7 vol.%+MoS₂ 3 vol.%로 변화시켜 혼합한 후, 예비성형, 본성형, curing을 거쳐 제작되었다. 일반적으로 자세한 제조공정과 그 조건은 마찰재 제조회사의 비밀에 해당하므로 본 논문에서는 생략하였다. 본 연구에서 사용된 마찰재 시편들의 개략적 구성 물질과 조성은 Table 1에 나타내었다.

본 실험에서 사용한 마찰재는 가로 12 cm, 세로 4.5 cm, 두께 1.1 cm(back plate 포함시: 1.68 cm)의 크기로 제작되었으며, 시편-1, 2, 3의 평균표면경도(H_RS, Rockwell Hardness S scale)는 각각 102, 94, 99이었다. 각 시편의 마찰 상대재로 사용된 로터는 현재 시판 중인 자동차에 장착되어 사용되는 회주철로 제작된 제품을 사용하였으며 Table 2에 그 조성을 나타내었다. 마찰재 시편-1, 2, 3의 마찰 상대재로 사용된 로터들의 원주방향으로의 두께 차이인 DTV(disc thickness

Table 1. Raw materials ingredients contained in the friction materials (NAO type) studied in this work

Raw Material	Specimen A	Specimen B	Specimen C
	(vol.%)	(vol.%)	(vol.%)
Resin	18	18	18
Kevlar [®] pulp	8	8	8
Ceramic wool	5	5	5
Other Friction modifiers	59	59	59
Graphite	10	7	7
Sb ₂ S ₃	0	3	0
MoS ₂	0	0	3

Table 2. The composition of cast iron rotor used in this study (wt.%)

C	Si	Mn	Cr	Cu
3.5	1.7	0.8	0.5	0.25
S	P	Sn	Mo	Fe
0.1	0.15	0.05	0.05	Bal.

variation)는 각각 4.3, 4.5, 4.4 μm이었다.

각 마찰재의 마찰특성은 차량의 관성력을 모사한 관성 dynamometer를 이용하여 측정하였으며, 본 시험에 사용한 dynamometer의 구체적인 측정 능력과 그 구조는 이미 발표된 논문에서 상세히 기술하였으므로 본 논문에서는 생략하였다[4]. 마찰시 발생하는 열에 의한 온도 상승을 측정하기 위해 마찰재와 로터의 중심 부분에 K-type 열전대를 표면으로부터 각각 0.5 mm, 1 mm의 깊이로 설치하였으며, dynamometer를 제어하는 기준 온도는 로터 쪽의 온도를 이용하였다.

본 연구에서 행한 dynamometer 시험은 마찰온도에 따른 마찰재의 특성을 측정하기 위해 종종 이용되는 산악하강시험(mountain drag test)으로서 크게 3단계로 이루어져 있으며, 그 첫 단계는 새로 제작된 마찰재가 열이력을 받아 일정시간 사용된 마찰재와 같은 마찰 특성을 나타내도록 하는 burnishing과정이며, 두 번째 단계는 언덕에서 제동하에 하강하면서 240초간 끌기(drag)시험을 행하는 단계이며, 세 번째 단계에서는 가혹한 조건에서의 끌기시험을 시행한 후 정지특성을 측정하기 위해 제동이 시작되는 초기제동온도(initial braking temperature, IBT)와 토크를 각각 변화시키면서 정지(stop)시험을 행하였다. 각 시험 단계의 제동조건을 Table 3에 자세히 나타내었다. 본 실험에서의 마찰변수로 이용된 압력, 온도, 속도, 토크의 측정 및 제

Table 3. A dynamometer test procedure used in this work

1. Burnishing: IBT=100°C, Deceleration=0.35 g, Initial speed=60 km/hr, Number of stops=200.
2. Drag: IBT=100°C, Torque=15 kg·m (constant), Duration= 4 min., Speed=70 km/h, Number of drag cycles=10.
3. Stop: Initial speed=100 km/h, Torque=20, 40, 60, 80, 100 kg·m, IBT=50°C, 100°C, 150°C, 200°C, 250°C (Combination of torque and IBT: total 25 stops).

어는 컴퓨터에 의해 행하여졌으며, 각각의 측정수치는 컴퓨터에 실시간으로 저장되었다. 데이터 측정속도(data access rate)는 압력, 속도, 토크 값은 300 Hz, 그리고 온도는 20 Hz로 저장하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 정지시의 마찰계수의 안정성

제동시 압력, 온도, 속도 그리고 습도 변화에 따른 마찰계수의 안정성(friction stability)은 우수한 마찰재의 개발에 필수적인 조건이라 하겠다. 마찰계수의 안정성은 제동시 각 제동조건에서 나타나는 평균마찰계수의 표준편차로 나타낼 수 있다[8]. 본 실험에서는 제동시 나타나는 마찰계수의 변화를 시간에 대해 나타내었을 때, 마찰재와 로터가 완전히 밀착되지 않은 초기와 말기 각 1초를 제외한 후 평균한 값을 각 제동조건에서의 평균마찰계수로 산출하였다.

윤활제의 조성 변화와 정지시 제동조건 변화에 따른 마찰계수의 안정성을 알아보기 위하여 마찰재 시편-1, 2, 3을 토크와 초기제동온도가 다른 25가지의 제동조건에서 정지시험을 행한 후 각 정지조건에서의 마찰계수 분포를 Fig. 1에 나타내었다.

시편-1, 2, 3의 각 제동조건에서의 평균마찰계수는 각각 0.461, 0.434, 0.415였으며, 표준편차는 0.036, 0.018, 0.017로 나타나 graphite 만을 고체 윤활제로 사용한 시편-1은 마찰조건의 변화에 따른 마찰계수의 변화가 가장 큰 반면에, graphite 7 vol.%에 Sb₂S₃ 또는 MoS₂ 3 vol.%를 혼합하여 사용한 시편-2, 3의 경우에는 비교적 안정적인 마찰계수를 유지하고 있는 것으로 관찰되었다.

시편-1의 제동조건의 변화에 따른 마찰계수의 불안정성은 제동온도의 증가에 의해 graphite가 효율적으로 윤활작용을 하지 못하기 때문으로 사료된다. Graphite

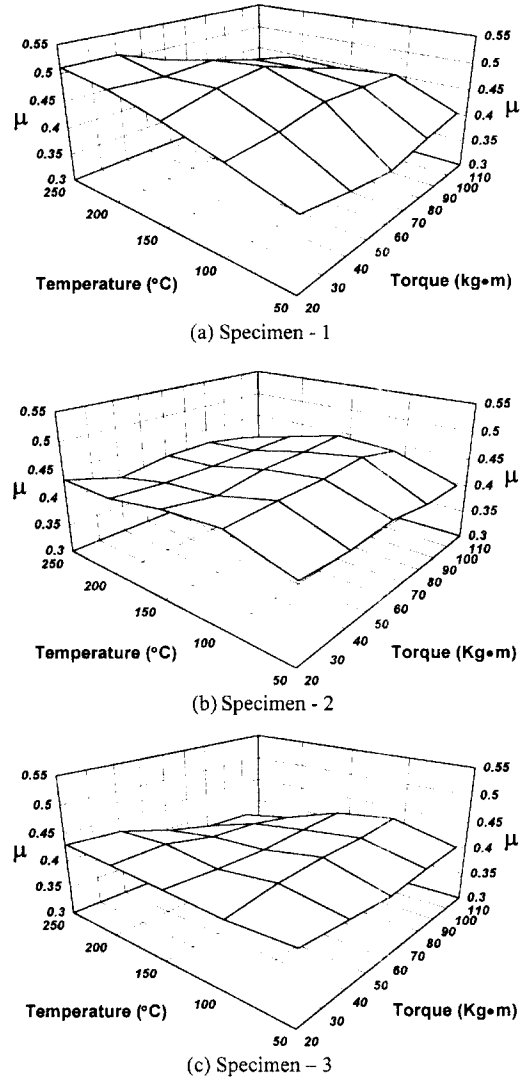


Fig. 1. Change of friction coefficient at different stop conditions for each specimen.

가 윤활작용을 하기 위해서는 계면에 수분 또는 탄화수소가 존재하여야 하는데, 마찰시 온도상승으로 인해 이들 물질이 증발하여 마찰계수를 높일 뿐만 아니라 마찰계수의 상승으로 인한 graphite의 산화 현상이 계면에서의 graphite 양을 감소시켜 일어난 현상이라 생각된다[5]. 이러한 현상은 제동 토크의 양이 증가하면서 더욱 심화되어 마찰열에 의한 수지의 분해를 초래함으로써 마찰계면에서의 전단강도가 저하되어 마찰계수 감소현상(fading)을 나타낸 것으로 생각된다.

이에 반해 MoS₂와 Sb₂S₃는 고온에서 마찰열에 의해

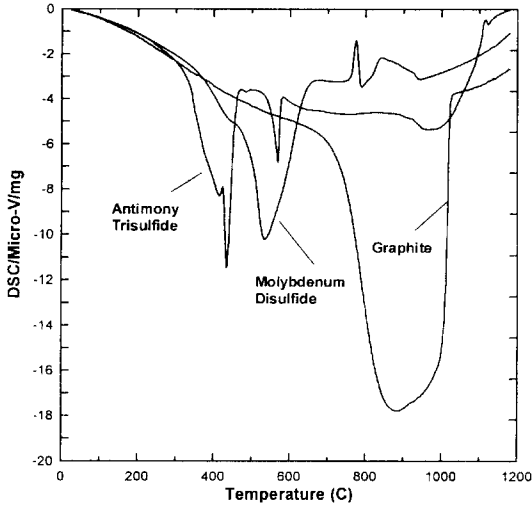


Fig. 2. DSC (differential scanning calorimetry) curves of the solid lubricants showing major reactions at elevated temperatures for solid lubricants; graphite, Sb_2S_3 , and MoS_2 .

산화된 후에도 산화물 상태로 그 마찰계수의 감소를 방지하는 역할을 하므로 이들 물질을 graphite에 첨가하면 이들이 온도의 상승에 의한 graphite의 윤활제로서의 역할 감소에 대해 보완작용을 하기 때문에 온도에 대한 마찰계수의 안정성을 향상시키는 것으로 생각된다. 이러한 현상은 확인하기 위해 각 고체 윤활제를 대상으로 1200°C까지 DSC(differential scanning calorimetry) 열분석 실험을 시행하였다(Fig. 2). Fig. 2에 도시한 바와 같이 graphite는 Sb_2S_3 또는 MoS_2 와 달리 중간 반응물을 생성하지 않고 700°C 이상에서 산화되어 CO 또는 CO_2 로 변화되는데 반해 Sb_2S_3 의 경우에는 온도에 따라 Sb_2O_3 와 Sb_2O_5 를 거쳐 Sb_2O_4 상태의 산화물을 형성하며 MoS_2 의 경우에는 약 400~600°C 범위에서 MoO_3 의 산화물 형성하며 약 800°C에서는 승화현상을 나타내었다. 따라서 MoS_2 또는 Sb_2S_3 를 첨가한 경우에는 고온에서의 산화물이 마찰재의 마찰계수를 유지하는 역할을 한 것으로 사료된다.

3-2. 윤활제의 조성변화에 따른 anti-fade 현상의 발생

정지시의 마찰계수의 변화는 일반적으로 온도의 변화에 의한 마찰계수의 변화뿐만 아니라 속도감소에 따른 마찰계수의 변화를 포함하고 있다. 이는 마찰계수가 속도의 감소에 따라 증가하는 양상을 나타내기

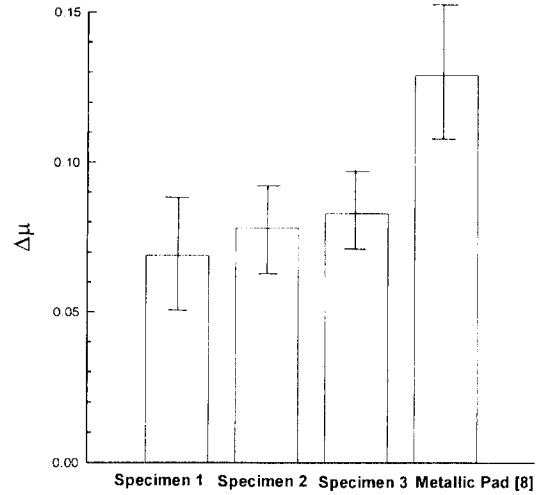


Fig. 3. Average values of anti-fading from 25 stop conditions for specimen 1, 2, and 3. For comparison average anti-fading for a metallic pad is included [reference 8].

때문이며 속도의 감소에 따라 마찰계면에서 stick-slip 현상이 증가하기 때문이다. 따라서, 정지 시험 시 fading이 일어나기 전까지는 제동시의 마찰계면의 온도 증가와 속도 감소에 의해 마찰계수가 일반적으로 증가하며, 이를 anti-fade 현상이라 한다. 이 현상은 제동 말기에 급격한 마찰계수의 증가를 유발하여 제동 말기에 차량이 주춤거리는 현상(jerking)을 발생시키며, 제동시의 잡음특성에 악영향을 미치는 것으로 알려져 있다[8].

마찰재에 사용된 윤활제의 종류 따른 anti-fade 현상의 발생정도를 정량적으로 분석하기 위해 제동 초기 속도의 90%일 때와 10%일 때의 마찰계수의 차이($\Delta\mu$)를 다양한 제동 조건하에서 측정하였다.

시편-1, 2, 3의 압력과 온도의 변화에 따른 $\Delta\mu$ 의 거동을 나타내면 Fig. 3과 같다. 시편-1, 2, 3의 $\Delta\mu$ 평균 값은 각각 0.069, 0.078, 0.083로서 비교적 작게 나타내었으며 이는 마찰재의 다른 원료를 변화하였을 때에 비해 매우 우수한 것이었다[8]. 따라서 본 실험에서 대상으로 한 고체 윤활제는 anti-fading 현상에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 사료된다.

3-3. 마모량의 변화

시편-1(graphite 10 vol.%), 시편-2(graphite 7 vol.%+ Sb_2S_3 3 vol.%), 시편-3(graphite 7 vol.%+ MoS_2 3 vol.%)을 dynamometer 시험한 후에 측정된 로터와 마찰재의

마모량을 각각 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 동일한 과정의 dynamometer 시험에 따른 마찰재의 마모량은 시편 1이 1.83 wt.%로서 각각 2.33 wt.%, 2.43 wt.%의 마모량을 나타낸 시편-2, 3 보다 마모량이 적게 나타났다. 또한 마찰 상대재인 로터의 마모량은 마찰재 시편-1, 2, 3을 사용하여 마찰시험을 행하였을 때 각각 0.019 wt.%, 0.16 wt.%, 0.18 wt.%로서 시편-2, 3에 의한 마모량이 시편-1에 의한 마모량보다 약 10배정도 더 크게 나타나 윤활제로 graphite만을 사용한 시편 보다 graphite에 3 vol.%의 Sb_2S_3 또는 MoS_2 를 첨가하여 제작한 경우 상대재인 로터에 대한 공격성이 더 심한 것으로 나타났다.

본 실험에서 발생한 마모현상을 이해하기 위해 dynamometer 시험 전과정에서 보여준 로터의 온도변화를 분석하였다. Fig. 5에 각각의 제동단계에서의 초기와 말기의 로터온도를 나타내었다. Fig. 5에 나타난 바와 같이 시편 1을 사용한 경우에 로터온도가 가장 낮게 나타났으며 마찰재 2 또는 3을 사용하였을 경우

에 높은 로터온도를 보여주어 로터온도가 마모량에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

이러한 결과는 시편-2, 3에 첨가된 MoS_2 와 Sb_2S_3 가 고온에서 산화물로 변화되어 마찰재와 로터에 연삭마모(abrasive wear)를 발생시키기 때문에 발생하는 것으로 사료된다. 특히 마찰재 3을 사용한 경우 로터온도가 시편 2를 사용하였을 때 보다 낮았으나 로터의 마모량이 더 크게 나타난 것은 MoS_2 가 마찰도중 H_2SO_4 를 형성하여 마찰막의 형성을 저해할 뿐 아니라 회주철 로터의 부식을 초래하여 나타난 현상으로 사료된다[9,10]. 이러한 결과는 로터의 DTV 증가량에도 반영되어 시편-2, 3을 사용한 경우에 DTV의 증가폭이 크게 나타났다(Fig. 6). 일반적으로 DTV가 클수록 제동시 차량이 진동하는 judder의 발생가능성이 높은 것으로 알려져 있으며, 이러한 DTV의 증가는 윤활제가 제동시 산화물로 변화되어 로터에 대한 공격성이 증가함으로써 나타난 현상으로 생각된다[8].

이는 마찰안정성을 개선하기 위해 많은 마찰재 제

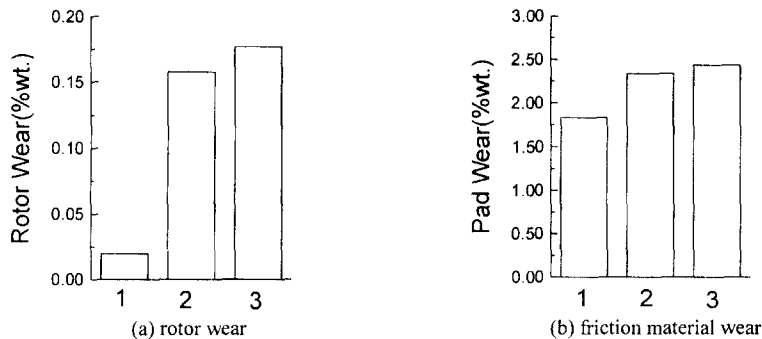


Fig. 4. Rotor and friction material wear during the dynamometer test.

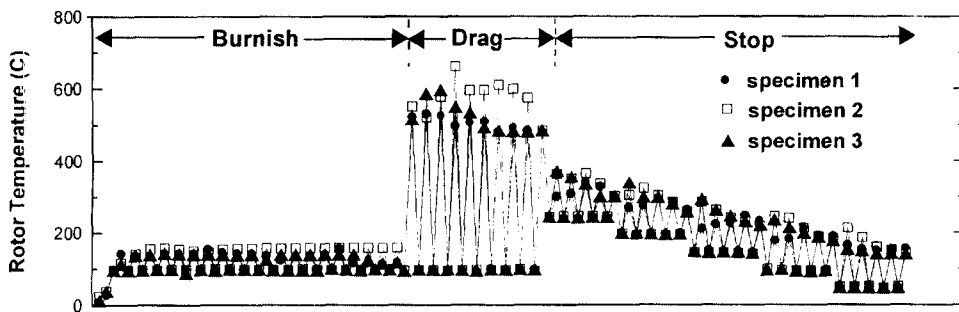


Fig. 5. The change of rotor temperature during dynamometer test for friction material specimen 1, 2, and 3. The initial and the final rotor temperatures were indicated for each brake application during the entire dynamometer test procedure. Data points during the burnish represent the average of 10 burnish stops and data points during stop represent two stops at the same stop condition.

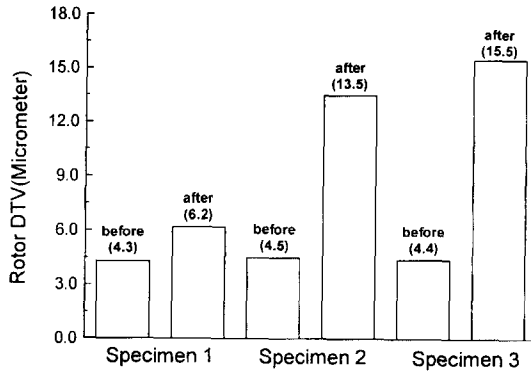


Fig. 6. Rotor DTV change during dynamometer tests using friction materials 1, 2 and 3.

조업체에서 첨가하는 고체윤활제 MoS_2 와 Sb_2S_3 가 마모의 견지에서 볼 때 바람직하지 못할 수 있음을 의미하며 마찰안정성과 로터의 내마모성을 증진시키기 위해서는 가장 최적의 제동특성을 나타내는 고체 윤활제의 상대량에 관한 연구와 또한 고온에서 마찰특성을 유지하는 새로운 고체 윤활제의 개발이 체계적으로 시행되어야 하리라 사료된다.

4. 결 론

자동차용 마찰재의 윤활제로 사용되는 graphite, Sb_2S_3 , MoS_2 의 상대량을 변화하여, 시편-1(graphite 10 vol.%), 시편-2(graphite 7 vol.%+ Sb_2S_3 3 vol.%), 시편-3(graphite 7 vol.%+ MoS_2 3 vol.%)을 제조한 후, dynamometer를 이용하여 그 마찰특성을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 정지시험시의 제동조건의 변화에 대한 마찰계수 안정성(friction stability)은 graphite만을 윤활제로 사용한 시편-1보다 Sb_2S_3 , 또는 MoS_2 를 혼합하여 사용한 시편-2, 3이 다양한 제동조건의 변화에 대해 비교적 안정적인 평균마찰계수를 나타내었다. 또한 계면의 온도가 일정온도 이상으로 증가 시 마찰계수가 급격히 감소하는 현상인 fading도 Sb_2S_3 또는 MoS_2 를 첨가한 경우에 적게 나타났다. 이는 Sb_2S_3 또는 MoS_2 의 고온 반응생성물(산화물)이 마찰계수의 상승 효과를 나타내었기 때문으로 사료된다.

2. 정지시험시 속도의 감소에 의해 마찰계수가 제동말기에 증가하는 현상인 anti-fading 현상의 정도는 윤활제의 종류나 상대량의 변화에 의해 크게 변하지

않아 본 실험에서 사용한 고체윤활제는 anti-fading 현상에 크게 영향을 미치지 않음을 나타내었다.

3. 마찰재와 로터의 마모량은 시편-2, 3이 시편-1보다 더 크게 발생하였으며, 로터의 원주방향으로의 두께차이인 DTV(disc thickness variation)의 증가 역시 마모가 크게 발생한 시편-2, 3에서 시편-1보다 더 크게 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 결과의 원인은 시편-2, 3에 윤활제로 첨가된 MoS_2 와 Sb_2S_3 가 제동시의 온도상승에 의하여 산화물을 형성하여 연삭마모를 한 때문인 것으로 사료된다. 특히 MoS_2 를 첨가한 경우에 나타난 심한 마모는 마찰계면에서의 화학반응에 의해 H_2SO_4 가 발생하여 로터의 마모를 더욱 악화한 것으로 사료된다.

본 실험의 결과는 마찰계수의 안정성을 증진시키기 위해 첨가한 Sb_2S_3 와 MoS_2 가 로터와 마찰재의 마모 측면에서 바람직하지 않은 현상을 나타내었음을 의미하며, 이를 개선하기 위해서는 고체 윤활제의 상대량을 조절하여 최적의 마찰특성을 도모하거나 고온에서도 마찰특성이 변하지 않는 새로운 고체 윤활제를 개발하기 위한 체계적인 연구와 과학적인 분석이 필요할 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 1997년도 한국과학재단 지원 핵심전문 연구(과제번호: 971-0801-013-2)에 의한 결과의 일부입니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. M.G. Jacko, "Physical and Chemical Changes of Organic Disc Pads in Service," *Wear*, 46(1978), pp. 163-175.
2. M. Morjesson, P. Eriksson, C. Kuylenstierna, P. H. Nilsson and T. Hermansson, "The Role of Friction Films in Automotive Brakes Subjected to Low Contact Forces," *IMEchE*, C444/026, 1993.
3. A. Wirth, K. Stone and R. Whitaker, "A Study of the Relationship Between Transfer Film Chemistry and Friction Performance in Automotive Braking Systems," SAE paper 922541, 1992.
4. 장 호, "자동차 제동시 나타나는 마찰특성에 관한 연구," *한국윤활학회지* 제 13권 제1호, pp. 34-41, 1997.

5. M. N. Gardos, "The Synergistic Effects of Graphite on The Friction and Wear Life of MoS₂ Films in Air," Paper presented at the ASLE Annual Meeting, May 11-14, 1987.
6. D. H. Buckley, "Surface Effects in Adhesion, Friction, Wear, and Lubrication," Tribology Series 5, Elsevier, 1981.
7. F. J. Calauss, "Solid Lubricants and Self-Lubricating Solids," Academic Press, 1972.
8. 김성진, 장 호, "자동차 제동시 나타나는 마찰재의 마찰 특성에 관한 연구 II, 한국윤활학회지," 제 13권, 제 3호, 1997.
9. J. Gansheimer, "Influence of Certain Vapors and Liquids on the Friction Properties of Molybdenum Disulfide," ASLE Transactions, Vol. 10, p. 390 (1967).
10. S. Ross and A. Sussman, "Surface Oxidation of Molybdenum Disulfide," J. of Phys and Chemistry, Vol. 59, p. 889 (1959).