

자동차용 마찰재에 사용되는 고체 윤활제에 따른 제동특성에 관한 연구

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

이정주, 장호
고려대학교 재료금속공학부

Abstract: In this work, friction materials with three different formulations containing different amounts of the 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 % + Sb₂S₃ 3 vol. % showed better resistance to fading and improved friction stability compare to the friction materials containing graphite only as a lubricant. However, the friction materials with two lubricants (graphite + MoS₂ or Sb₂S₃) showed disadvantages on stick-slip phenomena, amplitude of torque, and rotor wear.

1. 서론.

자동차용 마찰재는 상대재인 로터와의 마찰을 통해 차량의 운동에너지를 열에너지 등의 다른 형태로 변환함으로써 차량을 제동시키는 부품으로서 제동시 안전하게 차량을 정지시킬 수 있는 안정성과 운전자가 편안한 정차감을 느낄 수 있는 안락성을 만족시키도록 고안되어야 한다.[1]

초창기의 자동차용 마찰재는 석면이 구성성분의 대부분을 차지하는 간단한 formulation을 사용하였으나, 1980년대

이후 석면이 발암물질로 사용이 금지됨으로서 그 대체물질들의 개발이 연구되어온 결과 지금은 약 10-20가지의 매우 다양한 물질을 phenolic resin으로 결합시킨 복합재들이 사용되고 있다.[2]

일반적으로 마찰재의 구성성분은 그 역할에 따라 크게 결합제 (binder), 충전제 (filler), 고체윤활제 (solid lubricant), 연마제(abrasive), 마찰조절제 (friction modifier) 등으로 분류되며, 이 중 고체윤활제는 자동차용 마찰재의 제동조건의 변화에 의한 마찰특성의 변화에 매

우 중요한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.[2]

현재 자동차용 마찰재에 쓰이는 고체 윤활제는 주로 graphite, MoS₂, Sb₂S₃ 등이 있으며, 마찰재 개발 초창기에는 주로 graphite만을 사용하였으나, 현재는 graphite를 기본으로 하여, MoS₂ 또는 Sb₂S₃ 등을 혼합하여 사용하고 있다. 각 고체윤활제는 최적의 윤활효과를 나타내는 온도, 속도, 및 압력 범위가 다르게 나타나므로 사용된 윤활제의 종류 및 적용범위에 따라 마찰특성이 변화하게 된다.

본 실험에서는 제동시 고체 윤활제에 따른 마찰특성의 변화를 관찰하기 위하여 구성 물질 중 다른 물질의 조성을 일정하게 유지하고 고체 윤활제의 조성을 각각 Graphite 10%, Graphite 7% + Sb₂S₃ 3%, Graphite 7% + MoS₂ 3% (volume %)로 변화 시킨 시편을 제작한 후, 실차와 같은 관성과 제동력을 구현하는 브레이크용 관성 dynamometer를 이용하여 시험을 하였다.

2. 실험 방법

본 실험에서 사용된 마찰재 시편은 혼합, 예비성형, 본성형, curing을 거쳐 제작되었으며 마찰재를 구성하는 물질 중 고체 윤활제의 조성을 Graphite 10 vol.%, Graphite 7 vol.% + Sb₂S₃ 3 vol.%, Graphite 7 vol.% + MoS₂ 3 vol.%로 변화하여 제작하였다. 각 시편의 구성 물질과 조성은 Table 1.에 나타내었다.

마찰재의 마찰특성을 위해 차량의 관성력을 모사한 inertial dynamometer를 이용하였다. 본 실험에서의 마찰변

수로 이용된 압력, 속도, 토크의 측정 및 제어장치는 computer를 이용하여 제어 및 측정하였다. 마찰시 발생하는 온도를 측정하기 위해 마찰재와(inboard 1 지점, outboard 1지점), 로터에 k-type 열전대를 설치하여 측정하였다. 본 실험에서 inertial dynamometer를 제어하는 기준 온도는 로터쪽의 온도로 지정하였다.

Table 1. 본 실험에 사용한 마찰재 시편의 조성 (단위 : volume %)

원료물질	시편-1	시편-2	시편-3
Resin	18	18	18
Kevlar	8	8	8
Rock Wool	5	5	5
Potassium Titanate	18	18	18
Cashew	10	10	10
Cu Fiber	4	4	4
ZrSiO ₄	4	4	4
BaSO ₄	20	20	20
소석회	3	3	3
Graphite	10	7	7
Sb ₂ S ₃	-	3	-
MoS ₂	-	-	3

Table 2. 본 실험에 사용한 회주철 로터의 조성 (단위 : wt. %)

C	Si	Mn	S	Cr
3.5	1.7	0.8	<0.1	0.5
Cu	P	Sn	Fe	
0.25	<0.2	0.05	Bal.	

측정되어진 데이터는 실시간으로 컴퓨터에 저장되어졌으며, 데이터 측정속도(data aquisition rate)는 압력,속도,토크는 300Hz로, 온도는 20Hz로 각각 측정되었다.

시편의 마찰 상대재로 사용된 로터는 현재 시판되고 있는 자동차에 장착되어 있는 제품으로서 회주철로 제작되어져 있는데 그 조성은 Table 2.와 같다.

이 시험에 사용한 마찰시험 순서는 70km/h의 속도를 유지한 상태에서, 비탈길을 내려온 후 평지에서 100km/h의 속도에서 정지를 하는 경우를 모사하였으며, 크게 4단계로 나뉘어진다.

첫단계는 새로 만들어진 마찰재가 로터표면에 균일한 접촉이 되도록 하는 과정이며, 두 번째 단계로 70km/h의 속도와 150Nm의 토크를 유지한 상태에서 240초동안 끌기(drag)시험을 하였고, 세 번째 단계로 토크를 1000, 800, 600, 400, 200Nm로, 제동이 시작되는 초기제동온도 (initial braking temperature, IBT)를 250, 200, 150, 100, 50℃로 각각 변화시키면서 100km/h의 속도에서 정지시킨 정지(stop)시험을 행하였다. 네 번째 단계는 온도, 토크, 속도의 마찰조건 변화에 마찰특성이 어떻게 변화하는가를 알아야하기 위하여 토크를 200, 400, 600Nm로, 초기제동온도(IBT)를 50, 150, 250℃로 각각 변화시키면서 각각 5, 25, 50, 75, 100km/h의 속도를 유지하며 10초간 끌기(drag)시험을 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 정지시의 마찰계수의 안정성

자동차의 운전자는 차량을 제동할 때 일정한 제동력을 예상하고 브레이크 페달에 일정한 압력을 가하게 된다. 따라서 제동시 제동조건에 따라 마찰계수가 변화하게 된다면, 운전자는 정확한 제동

거리를 예측할 수 없게 되어 제동시마다 심리적으로 불안감을 느끼게 될 뿐만 아니라, 안전한 운행을 저해하는 한 원인이 된다.

이 때문에 제동시 압력, 로터의 온도, 속도 그리고 습도 변화에 의해 마찰계수가 변화하지 않는 마찰재의 개발은 우수한 자동차 브레이크 시스템을 위한 필수적인 조건이라 하겠다.

일반적으로 다양한 제동조건에서 마찰계수가 변화하지 않는 정도를 마찰계수의 안정성으로 지칭하며, 제동시 각 제동조건에서 나타나는 평균마찰계수의 표준편차로 나타낼 수 있다.[3]

본시험에서는 제동시 나타나는 마찰계수의 변화를 시간에 대해 나타내었을 때, 마찰재와 로터가 완전히 밀착되지 않은 초기와 말기 각 1초를 제외한 후 평균한 값을 각 제동조건에서의 마찰계수로 산출하였다.

윤활제의 조성 변화에 의한 정지시 제동조건 변화에 대한 마찰계수의 안정성을 알아보기 위하여 마찰재 시편-1, 2, 3를 토크와 초기제동온도가 다른 25가지의 제동조건에서 제동시켰을 때, 각 제동조건에서의 마찰계수를 측정하여, 각 토크와 초기제동온도(IBT)에서의 평균마찰계수 분포를 Fig. 1에 나타내었다.

각 조건에서의 평균마찰계수는 시편-1, 2, 3의 경우 각각 0.461, 0.434, 0.415이며, 표준편차는 0.036, 0.018, 0.017이었다.

Graphite 10 vol. %를 윤활제로 사용하고 있는 시편-1은 마찰조건 변화에 마찰계수의 변화가 가장 큰 반면에, Graphite 7 vol.%에 Sb_2S_3 또는 MoS_2 3 vol.%를 혼합하여 사용한 시편-2, 3의

경우에는 비교적 안정적인 마찰계수를 유지하고 있는 것으로 나타났다.

시편-1의 제동조건 변화에 따른 마찰계수의 불안정성은 초기제동온도의 증가에 의해 마찰계수가 증가하여 나타난 것으로 사료된다.

이러한 현상은 graphite가 효율적으로 윤활작용을 하기 위해서는 계면에 수분 또는 탄화수소가 존재하여야 하는데, 마찰시 계면의 온도상승으로 인해 이들 물질이 분해되어 마찰계수가 증가하기 때문인 것으로 생각된다.[4] 이러한 시편-1의 초기제동온도 증가에 의한 마찰계수의 증가는 각 조건에서의 평균마찰계수를 평균한 값이 다른 시편들보다 높게 나타나는 원인이 되고 있다.

이에 반해 MoS_2 와 Sb_2S_3 는 graphite의 경우에 비해 고온에서 좋은 윤활작용을 하므로 graphite와 이들 물질을 혼합하면 온도에 따라 서로 보완 및 상승작용을 하여 온도에 대한 마찰계수 안정성을 향상시키는 것으로 생각된다.

본 실험 결과 graphite 10%만을 윤활제로 사용한 경우보다 graphite 7%에 Sb_2S_3 또는 MoS_2 3%를 혼합하여 사용한 경우가 제동조건 변화에 대한 마찰계수의 안정성이 좋은 것으로 나타나고 있다.

3-2. 윤활제의 조성변화에 따른 fade 및 anti-fade 현상의 발생.

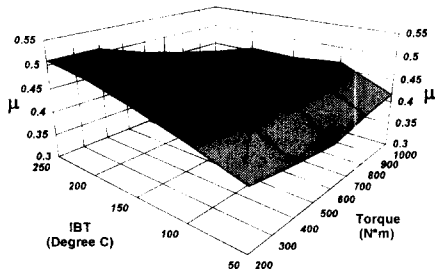
자동차 제동시 발생하는 마찰열은 마찰재와 로터의 온도를 상승시킨다. 이때 온도는 두 가지로 구분하여 나타내며 그 중 하나는 본체의 온도이고 다른 하나는 마찰계면에서의 온도이다.

일반적으로 마찰계면의 온도가 본체

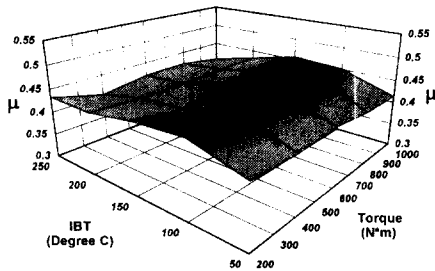
의 온도보다 높으며, 제동시 마찰계면에서 발생하는 마찰막의 분해 및 반응은 마찰계면에서의 온도에 의해 직접적인 영향을 받는다. 반면에 상대재인 로터의 열변형을 예측하거나 계산할 때에는 본체의 온도를 이용한다.

마찰시의 온도상승은 마찰계수, 압력, 그리고 마찰속도에 비례하므로 평균마찰계수가 가장 높은 시편-1를 사용하는 경우에 가장 높은 온도를 나타내게된다. Fig. 1에 나타난 바와 같이 윤활제로 graphite 만을 사용한 시편-1은 온도가 상승함에 따라 제동시 마찰계수가 급격히 증가하며 반면에 graphite와 MoS_2 또는 Sb_2S_3 를 섞어서 윤활제로 사용한 마찰재의 경우에는 마찰계수가 온도에 민감하게 나타나지 않았다. 이는 마찰계면의 온도가 증가하여 graphite에 포함된 수분의 상실로 인해 마찰계수가 증가하거나 또는 탄소가 분해되어 기체(CO_2 , CO)로 변화되어 윤활역할을 상실함으로써 나타난 현상으로 사료된다.

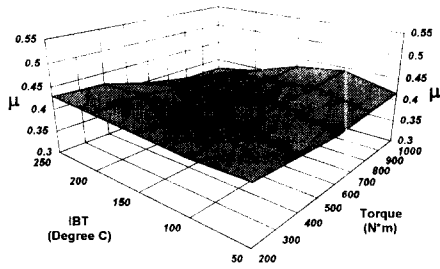
이러한 마찰계수의 상승현상은 궁극적으로 과도한 마찰열을 초래하여 마찰재에 포함된 원료들을 열분해하게 되며 그로 인해 마찰계수의 감소를 가져오게 된다. 이러한 마찰계수의 감소를 fade 현상이라 지칭되며 비탈길을 내려올 때 과도한 제동력의 적용으로 인해 발생된다. 그러나 fade 현상이 일어나기 전에는 초기에 온도가 증가함에 따라 마찰계수가 증가하게 되므로 정상적으로 정지 시험을 하는 경우에는 마찰계수가 시간에 따라 증가하는 경향을 보인다. 그러나 이때의 마찰계수의 증가는 일반적으로 속도감소에 따른 마찰계수의 변화분을 포함하고 있다.



(a) 시편 - 1



(b) 시편 - 2



(c) 시편 - 3

Fig. 1 초기제동온도와 제동에 사용된 토크량에 따른 마찰계수의 변화

이러한 속도감소에 따른 마찰계수 변화 현상은 속도의 감소에 따른 stick-slip 현상의 증가에 의해 마찰계수가 증가함에 따라 나타난다. 따라서 정지 시험 시에는 마찰 계면의 온도 증가와 속도 감소에 의해 마찰계수가 증

가하게되며 이를 anti-fade 현상이라 한다. anti-fade현상은 제동 말기에 급격한 마찰계수의 증가를 유발하여 제동 말기에 차량이 주춤거리는 jerking 현상을 발생시키는 원인이 된다.[3]

마찰재의 종류에 따른 anti-fade현상을 정량적으로 분석하기 위해 정지 시험시 나타난 마찰계수의 변화량을 $\Delta\mu$ 로 표시 하였다.(Fig. 2) 그림에 나타낸 바와 같이 $\Delta\mu$ 는 제동 초기속도의 90%일 때와 10%일 때의 마찰계수의 차이를 의미한다. 압력과 온도의 변화에 따른 $\Delta\mu$ 의 거동을 시편-1, 2, 3에 대해 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 3에 나타낸바와 같이 본 연구에서 대상으로 한 3가지 마찰재 중에서 윤활제로 Graphite 10%만을 사용한 시편 1에서 anti-fade현상의 발생이 가장 작게 나타났고, 마찰재 시편-3 (Graphite 7% + MoS₂ 3%)의 경우 anti-fade현상이 가장 크게 발생하였다.

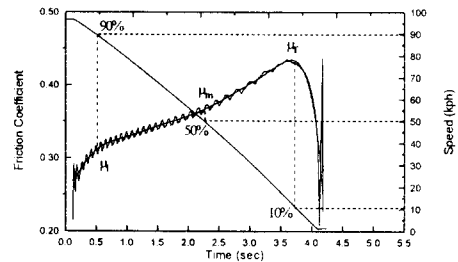
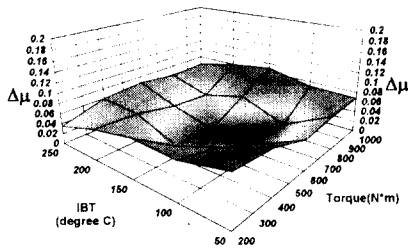
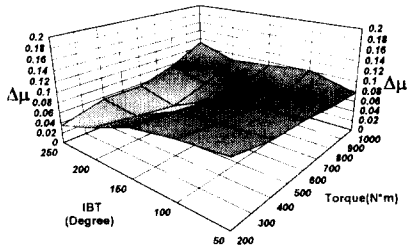


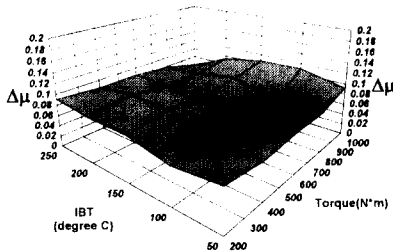
Fig. 2 정지 시험시의 속도의 감소에 의한 마찰계수의 변화형태 및 $\Delta\mu$ 의 측정



(a) 시편 - 1



(b) 시편 - 2



(c) 시편 - 3

Fig. 3 세 시편의 각 제동조건에서의 anti-fade의 발생량

3-3. 마모량의 변화

시편-1(Graphite 10%), 시편-2 (Graphite 7% + Sb_2S_3 3%), 시편-3(Graphite 7% + MoS_2 3%)을 dynamometer 시험을 한 후에 측정된 로터와 마찰재의 마모량을 각각 Fig. 4, 5에 나타내었다. 본 시험에서 마찰재의 마모량은 시편 1이 1.83 wt%로서 각각 2.33 wt%, 2.43wt%의 마모량을 나타

낸 시편-2, 3 보다 마모량이 작게 나타났으며, 로터의 마모량은 마찰재 시편-1, 2, 3을 사용하여 마찰시험을 행하였을 때 각각 0.019 wt%, 0.16wt%, 0.18wt%로 나타나, 시편-2, 3에 의한 마모량이 시편-1에 의한 마모량보다 10배 정도 더 크게 나타났다. 이 결과로부터 윤활제로 Graphite만을 사용한 마찰재로 보다 Graphite와 Sb_2S_3 또는 MoS_2 를 사용한 시편의 공격성이 더 심한 것으로 결론 내릴 수 있다.

각 마찰재 시편에 따른 로터의 마모량의 차이는 graphite만을 사용한 경우보다 두 윤활제를 섞어서 사용한 경우에 약 10배의 마모량 차이를 보이고 있으며, 이는 graphite와는 달리 MoS_2 와 Sb_2S_3 를 윤활제로 사용한 경우 마찰시 발생하는 열에 의하여 윤활제가 산화되어 산화물을 형성함으로써 연마제로서의 역할을 하기때문인 것으로 생각된다.

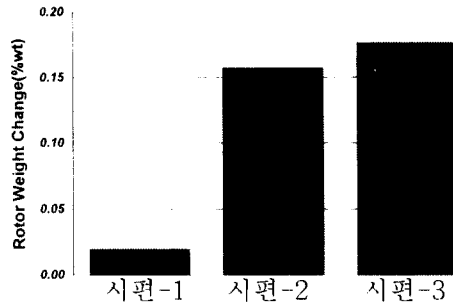


Fig. 4 로터의 마모량

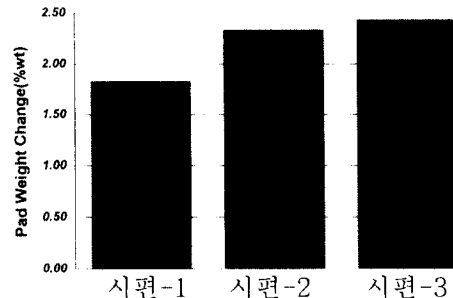


Fig. 5 마찰재의 마모량

참고 문헌

1. M.G.Jacko, Physical and Chemical Changes of Organic Disc pads in Service, *Wear*, 46(1978), pp.163-175
2. Katushiro Shibata, Akira Goto, Satoshi Yoshida, Yuichi Azuma, and Koju Nakamura, Development of Brake Friction Material, SAE paper 930806, 1993
3. 김성진, 장호, 자동차 제동시 나타나는 마찰재의 마찰 특성에 관한 연구Ⅱ, 한국윤활학회지(1997), 제 13권 제3호
4. Donald H.Buckley, Surface Effects in Adhesion, Friction, Wear, and Lubrication, *Tribology Series 5*, Elsevier, 1981
5. 이정주, 장 호, 한국윤활학회지, 준비 중