

습도에 따른 자동차용 마찰재의 마찰특성에 관한 연구

김 성 진 · 최 낙 천 · 장 호

고려대학교 공과대학 재료금속공학부

Effect of Humidity on Friction Characteristics of Automotive Friction Material

Seong Jin Kim · Nak Cheon Choi · Ho Jang

Division of Materials Science and Engineering, Korea University

Abstract - The effect of humidity on friction characteristics of friction materials were studied using a pad-on-disk type friction tester. Three different friction materials containing simplified ingredients were investigated by changing the solid lubricant, graphite, MoS₂, and Sb₂S₃. A friction material without solid lubricant was also examined to study the effect of ingredients in the matrix on humidity. Friction material containing graphite showed lower friction coefficient at high humidity level than other conditions, however, friction material containing MoS₂ indicated higher friction coefficient at initial stage under high humidity level. Friction materials without solid lubricant and with Sb₂S₃ were little affected by humidity conditions.

Key words - humidity, solid lubricant, friction characteristics, friction coefficient, drag test.

1. 서 론

자동차 브레이크에 장착되는 마찰재는 일반적으로 12~20종의 기본원료로 구성되는 복합재료로서 사용되는 원료의 종류와 배합방법 그리고 제조공정에 따라 마찰특성이 결정된다[1]. 자동차용 마찰재는 온도, 가압력, 속도, 습도 등의 다양한 제동조건 하에서 마찰특성이 변하지 않아야 한다. 마찰재의 마찰특성은 제동시

안전성과 승차감에 직접적인 영향을 미치며, 주로 마찰계수의 안정성, 토크의 진폭, 그리고 마모율에 의해 표현된다[2-3].

마찰시 마찰계수와 마모량을 감소시키기 위해 1800년대부터 사용되어 왔던 고체윤활제는 연마제와 함께 마찰재의 마찰특성에 가장 큰 영향을 미친다. 특히 고체윤활제는 마찰계수를 조절하고, 내마모성을 향상시키며, 소음을 감소시키는 역할을 한다. 일반적으로 자동차용 마찰재에 사

용되는 고체 윤활제는 분말 형태로 되어 있는 graphite, MoS₂, Sb₂S₃, ZnS, CuS 등이 있다. 현재 마찰재 제조업체에서는 승차감의 향상을 위해 주로 2종 이상의 고체 윤활제를 혼합하여 자동차용 마찰재를 제조하고 있으며, 마찰특성을 고려하여 고체 윤활제의 종류와 상대량을 결정한다 [1,4]. 자동차용 마찰재에 사용되는 고체 윤활제는 온도, 가압력, 속도, 습도에 따라 다른 마찰특성을 나타내며, 특히 마찰계면에 윤활막(transfer layer)을 형성함으로써 마찰계수에 영향을 미치게 된다. R. H. Savage 와 D. L. Schaefer[5]는 소량의 수증기(water vapor)가 탄소와 흑연재료의 내마모성을 향상시킨다고 보고하였으며, 이를 위해 증기압/포화 수증기압의 분율을 상대습도(relative humidity)로 정의하고, 유효분자크기(effective molecular size) 또는 사슬의 길이(chain length)를 측정하여 습도에 따른 graphite의 마모율을 예측하였다. 또한 F. P. Bowen 과 D. Tabor[6-7]는 수증기가 MoS₂층 내 황(sulfur)원자와 쉽게 화학적인 반응을 일으키며, 이러한 반응은 MoS₂의 윤활능력에 영향을 미친다고 보고하였다.

본 연구에서는 각각 다른 고체 윤활제를 사용한 마찰재들이 습도에 따라 어떠한 마찰특성을 나타내는지 연구하기 위해 마찰재에 사용되는 대표적인 4가지 기본원료의 함량은 고정시키고, 고체 윤활제의 종류를 변경하여 마찰재를 제조하였다.

또한 습도에 따른 기본원료의 마찰특성을 분리하여 분석하기 위해 고체 윤활제를 포함하지 않는 시편과 기지(matrix)의 구성원료를 변경한 시편도 시험하였다. 따라서 본 연구에서는 다른 고체 윤활제를 포함한 3가지 시편과 윤활제를 포함하지 않는 3가지 시편(총 6가지)을 대상으로 습도 조절이 가능한 pad-on-disk 형태의 마찰 시험기를 이용하여 습도에 대한 영향을 고찰하였다.

2. 실험 방법

실제 자동차용 마찰재는 12~20종의 원료를 사용하여 제조하지만, 본 연구에서는 기본원료들의 마찰특성을 고찰하고, 그 결과를 토대로 원인이 되는 원료를 파악하기 위해 여러 원료 중에서 대표적으로 사용되는 3~5가지 원료를 선정하여 마찰재를 제작하였다. 본 실험에서 사용된 마찰재의 조성은 Table 1에 나타내었다. 시편 1,2,3은 각각 고체 윤활제의 종류를 달리하여 일정한 함량인 8 vol %를 첨가하여 제조하였으며, 나머지 성분의 함량은 고정시켰다. 또한 시편 4는 고체 윤활제를 첨가하지 않고 8 vol %에 해당하는 함량을 외부 마찰 조건에 영향을 받지 않는 것으로 알려져 있는 BaSO₄(barite)로 보충하여 제조하였다. 시편 A와 B는 충전재(filler)의 종류가 습도에 의해 마찰특성에 미치는 영향을 고려하기 위해 각각 barite와 potassium titanate를 기본 기지로 제조하였다. 본 실험에서

사용한 제조공정의 구체적인 조건과 개략도는 Fig. 1 과 같다.

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

Raw materials	1	2	3	4	A	B
Phenolic resin	20	20	20	20	20	20
Aramid fiber	6	6	6	6	6	6
Potassium titanate	20	20	20	20	-	74
Barite	46	46	46	54	74	-
Graphite	8	-	-	-	-	-
MoS ₂	-	8	-	-	-	-
Sb ₂ S ₃	-	-	8	-	-	-

Hot mounting press 에 의해 성형된 마찰재의 크기는 5 cm 직경의 디스크 형태이며, 마찰 시험기에 장착할 수 있도록 1cm×1cm×0.5cm 의 크기로 절단하여 실험하였다. 마찰재의 상대재는 실제 상용화 되어 있는 회주철의 로터를 주물가공하여 마찰 시험기에 장착할 수 있도록 12cm 의 직경과 2.5cm 의 두께로 제작하였다. 상대재의 구체적인 조성은 이미 발표된 논문에서 상세히 나타냈으므로 본 논문에서는 생략하였다[1].

MIXING	3 min. primary mixing + 2 min. secondary mixing
PRE-FORMING	100 kgf/cm ² , 100℃ Hot mounting press
HOT PRESSING	250 kgf/cm ² , 150℃ Hot mounting press
CURING	200℃, 6 hours Mechanical convection oven

Fig. 1 Manufacturing process and condition of friction material

습도에 따른 마찰재의 마찰특성을 고찰하기 위해 pad-on-disk 형태의 정속 마찰 시험기를 이용하였으며, 시험기의 개략도는 Fig. 2 에 나타내었다. 마찰시험은 모든 시편에 걸쳐 상대재와 마찰재가 균일한 접촉이 되도록 저압, 저속으로 burnishing 작업을 시행한 후 실험하였다.

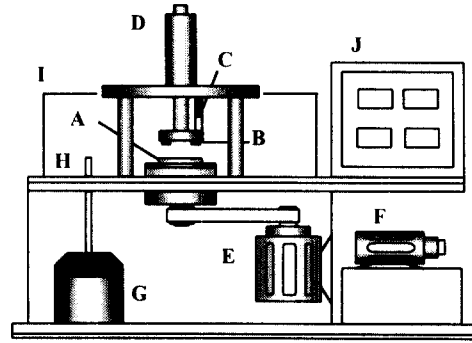


Fig. 2 Schematic diagram of pad-on-disk type friction tester

A: Disk specimen, B: Friction material specimen, C: Load cell, D: Pressure cylinder & sensor, E: Driving motor, F: Motor for oil pressure, G: Humidity controller, H: Humidity evaporator, I: Humidity control chamber, J: Electronic control panel

상대습도에 따른 마찰계수의 영향을 고찰하기 위해 다른 외부 조건을 고정시킨 상태에서 저습도(RH 15-20%), 중습도(RH 50-60%), 고습도(RH 90-95%) 조건에서 35℃의 초기 체동온도로 600 초 동안 끌기시험을 하였다. 고습도 분위기는 밀폐된 공간내에 지속적으로 증기를 증발시켜서 유지하였으며, 저습도 분위기는 건조한 압축공기를 불어넣어 조절하였다.

Table 2. Experimental procedure

BURNISHING 15 kgf/cm ² , 300 rpm, 2 min.			
DRAG TEST IBT= 35°C, 10 min.			
Humidity condition	LRH	MRH	HRH
Pressure	20 kgf/cm ²		
Speed			
300 rpm	TEST 1	TEST 2	TEST 3
600 rpm	TEST 4	TEST 5	TEST 6
900 rpm	TEST 7	TEST 8	TEST 9

마찰계수를 환산하기 위해 필요한 토크량(torque)은 load cell를 이용하여 측정하였으며, 회전하는 상대 디스크의 온도는 적외선 온도측정기(infrared heat tracer, 3M IR-16)를 사용하였다. 상대 디스크의 회전축에 속도 감지기를 설치하여 실제 디스크의 회전속도를 측정하였고, 가압력은 유압 시스템을 이용하여 일정하게 유지하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 습도에 따른 마찰특성의 변화

습도에 따른 마찰계수의 변화를 측정하기 위해 가압력과 속도를 각각 20 kgf/cm², 600 rpm(TEST 5 mode in Table 2)으로 고정하였다. 마찰재의 열이력에 따른 오차를 줄이기 위해 각 조건마다 새로운 시편으로 교체하였으며, 상대 디스크의 편평도를 1 μm 이하로 유지하여 실험하였다.

Fig. 3에 각 습도조건에서 시간에 따른

마찰계수의 변화량과 디스크 표면의 온도 변화를 나타내었다. 고체 윤활제를 제외한 상태에서 제조된 시편 4의 경우는 각 습도조건에서 온도 상승률의 변화에도 불구하고 비교적 일정한 마찰계수의 분포를 나타냈다. Graphite를 함유한 시편 1은 저습도(RH 15~20%)와 중습도(RH 50~60%)에서 유사한 경향을 보였지만 고습도(RH 90~95%) 분위기에서는 끌기시험 전체구간에서 마찰계수가 크게 감소한 결과를 나타내었다. 이러한 현상은 graphite의 윤활막에 물분자가 흡착될 경우 표면에너지의 감소로 인해 나타난 결과이며, 이러한 물분자의 흡착층(adsorbed layer)은 금속표면과 마찰시 자연적으로 형성되고 보완되는 것으로 알려져 있다[8-9]. 외부 기체들은 graphite의 기저면(basal plane)내 탄소원자와 쉽게 반응하여 층간의 결합력을 약화시킨다. Fig. 3(a)와 같이 시편 1은 초기에 graphite의 결합력이 유지되어 마찰계수가 상승하지만, 일정온도에서 마찰계수가 감소하는 fade 현상이 발생하였다. 이것은 온도 상승으로 인해 graphite의 층간 결합력이 약화되고, 균일한 윤활막이 형성되어 마찰계수가 점차 감소한 것으로 평가된다. 특히 고습도 조건에서 물분자는 graphite의 결합력을 약화시키는 역할을 하기 때문에 저온에서도 쉽게 마찰계수의 감소현상이 나타났다.

Fig. 3(b)에 나타난 MoS₂를 함유한 시편 2의 경우, 초기 마찰계수의 분포는 습도조

건에 따라 현저한 차이를 보였으나 점차적으로 일정한 경향을 나타내었다. 이러한 초기 마찰계수의 증가 현상은 MoS₂ 내에 수증기의 작용으로 설명할 수 있다. MoS₂ 기저면의 황원자는 극성(polarity)을 띠고 있기 때문에 같은 극성을 지니고 있는 물분자의 수소원자와 쉽게 결합을 할 수 있다. 이러한 물분자와의 수소결합은 MoS₂의 층간 결합력을 강화시켜 마찰계수를 상승시키는 역할을 한다. 그러나, 상대재의 온도가 100℃ 무렵이 되면 물분자의 탈착(desorption) 현상이 두드러져 습도조건과 무관하게 거의 일정한 마찰계수의 분포를 나타내었다. 전체적으로 시편 1과 달리 시편 2의 경우, 초기에 급격한 마찰계수의 감소현상은 MoS₂의 우선방위 재배열에 기인하며, 마찰계면에 윤활막(transfer layer)이 형성됨으로써 급격히 마찰계수가 낮아진 것으로 판단된다. 따라서 시편 2의 마찰계수는 시편 4의 경우보다 지속적으로 낮고 안정되게 유지시켰다.

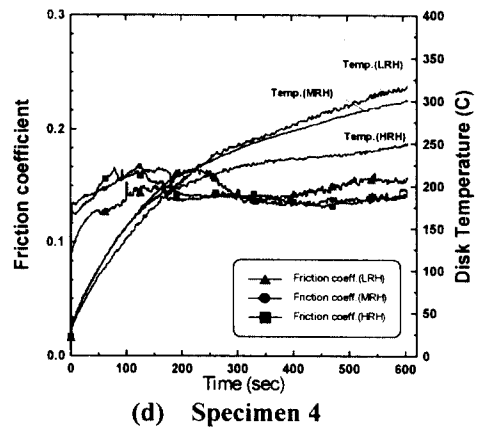
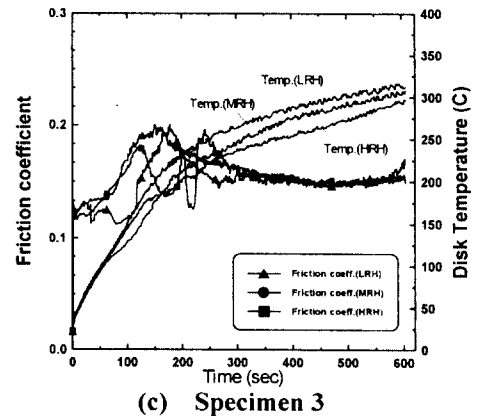
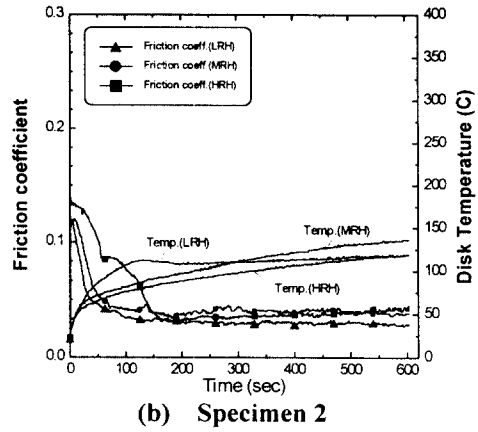
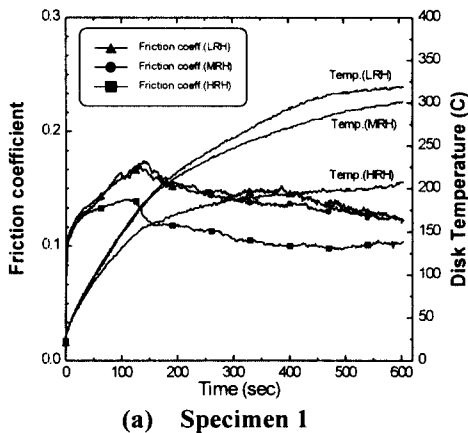


Fig. 3 The variation of friction coefficient and disk temperature as a function of time at three different humidity conditions

Sb_2S_3 를 함유한 시편 3은 Fig. 3(c)와 같이 초기에 불규칙한 마찰계수의 분포를 보이지만, 250°C이상의 온도에서는 모든 습도조건에서 일정한 마찰계수의 분포를 보이고 있다. 초기 불규칙한 마찰계수는 온도 상승으로 Sb_2S_3 가 열분해되어 안정한 산화물로 형성되는 과정에서 나타난 결과라고 평가된다. 일반적으로 Sb_2S_3 는 단일로 마찰재의 고체 윤활제의 역할을 하지 못하며, 주로 다른 윤활제와 혼합하여 사용하고 있다. 따라서 시편 3의 경우, 습도에 의한 마찰계수의 변화는 나타나지 않은 것으로 평가된다.

3-2. 기지(matrix)로 사용된 기본원료의 변화에 따른 습도의 영향

고체 윤활제를 첨가하지 않은 시편 4의 경우, 저습도 분위기에서 초기에는 마찰계수가 낮게 나타난 반면, 그 이후에는 약간의 상승효과를 나타내었다. 그러나 중습도와 고습도 조건에서는 초기의 변화를 제외하고는 거의 유사한 마찰계수의 분포를 나타냈다. 이와 같은 결과를 토대로 보다 자세한 분석을 위해 본 실험에서 사용한 기지(matrix)의 구성원료를 구분지어 시편 A (phenolic resin + aramid fiber + barite)와 시편 B(phenolic resin + aramid fiber + potassium titanate)를 제조하여 습도에 대한 영향을 고찰하였다.

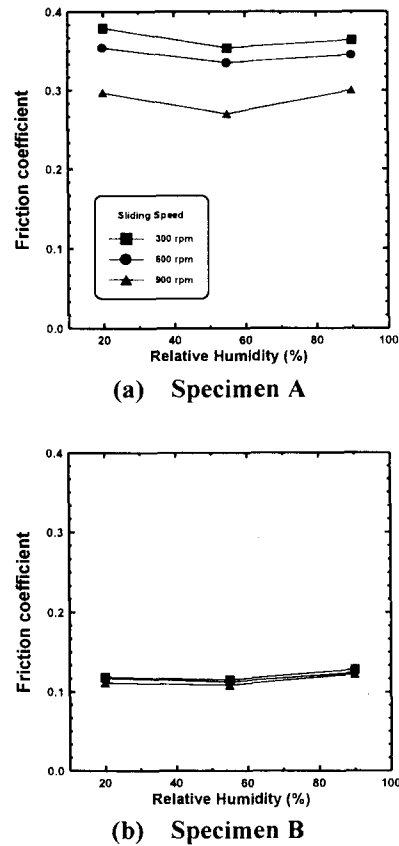


Fig. 4 The change of average friction coefficient as a function of relative humidity levels for (a) specimen A and (b) specimen B

Fig. 4에 나타낸 바와 같이 barite를 기본으로 하여 제작한 시편 A는 습도에 의한 영향이 미소하였으며, 속도의 증가에 따른 마찰계수의 변화는 크게 나타났다. 이러한 현상은 입자형상으로 첨가되는 barite가 단섬유인 potassium titanate보다 stick-slip 현상이 더 크기 때문에 나타난 결과로 판단되며, barite가 다량 첨가된 마찰재를 사용할 경우 anti-fading 현상[10]이 악화되는

가능성을 보여 주었다. 시편 B는 시편 A에 비해 습도와 속도에 대해 매우 안정된 마찰계수를 나타냈다. 결과적으로 습도에 따른 potassium titanate와 barite의 마찰계수에 미치는 영향은 거의 나타나지 않았으며, 특히 potassium titanate가 습도에 대해 우수한 마찰계수의 안정성을 보였다. 따라서 시편 1,2,3에서 기지에 의한 습도의 영향은 거의 존재하지 않은 것으로 평가되며, 주로 고체 윤활제에 따른 습도의 영향으로 판단된다.

4. 결 론

Pad-on-disk 형태의 마찰마모 시험기를 이용하여 습도에 따른 마찰특성을 분석하였다. Graphite를 첨가한 시편 1은 고습도 분위기에서 윤활능력이 향상되었으며, 비교적 낮은 온도에서 fade 현상이 발생하였고, 지속적으로 낮은 마찰계수의 분포를 보였다. MoS₂를 첨가한 시편 2의 경우, 초기에는 습도조건에 따라 마찰계수의 차이를 나타내었지만 일정시간 이후에는 물분자의 탈착현상과 균일한 윤활막의 형성으로 낮고 일정한 마찰계수의 거동을 보였다. 그러나 시편 3과 4는 온도상승에 의한 마찰계수의 영향은 나타냈지만 습도에 따른 영향은 거의 나타나지 않았다. 또한 기지에 의한 습도의 영향은 거의 없었으며, potassium titanate가 습도에 대해 비교적 안정한 원료로 나타났다.

참고 문헌

1. 장 호, "자동차 제동시 나타나는 마찰 특성에 관한 연구," 한국윤활학회지, 제 13 권, 제 1 호, pp.34-41, 1997.
2. 김성진, 장 호, "자동차 제동시 나타나는 마찰재의 마찰특성에 관한 연구," 한국윤활학회지, 제 13 권, 제 3 호, pp. 10-19, 1997.
3. P. Filip, L. Kovarik, and M. A Wright, "Automotive Brake Lining Characterization," SAE 973024, pp.41-61, 1997.
4. 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.
5. R. H. Savage and D. L. Schaefer, "Vapor lubrication of graphite sliding contacts," Journal of applied physics, Vol.27, pp.136-138, 1956.
6. F. P. Bowden and D. Tabor, "The Friction and Lubrication of Solids," Part II, Chap.11, Oxford University Press, pp.186-199, 1964.
7. C. Gao, L. Bredell, D. Kuhlmann-Wilsdorf, and D. D. Makel, "Micromechanics of MoS₂ Lubrication," Wear, vol.162-164, pp.480-491, 1993.
8. D. H. Buckley, "Surface effects in adhesion, friction, wear, and lubrication," Tribology series 5, Chap.10, pp.569-577, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 1981.
9. C. Langlade, S. Fayeulle and R. Olier, "New insights into Adhesion and Lubricating Properties of Graphite-based Transfer Films," Wear, vol.172, pp.85-92, 1994.
10. 이정주, 장 호, "자동차 제동시 나타나는 Anti-Fading 현상에 관한 연구," 한국윤활학회지, 제 14 권, 제 1 호, pp.70-78, 1998.