

탄소 섬유를 강화제로 사용한 자동차용 마찰재의 마찰특성에 관한 연구

정기영, 장 호

고려대학교 재료금속공학부

A Study on the Friction Characteristics of Automotive Brake Pads Reinforced with Carbon Fibers

K.Y. Jung, H. Jang

Division of Materials Science and Engineering, Korea University

Abstract -- The friction and wear characteristics of automotive friction materials reinforced with carbon fibers were studied using a direct drive brake dynamometer. Two types of model friction materials, a low-metallic and an NAO type, were prepared and each of the materials was modified by substituting 5 vol% of carbon fibers with other reinforcing fiber used in the model formulations. Drag tests were carried out to investigate the friction properties of these materials at various braking conditions. Results showed that the modified friction materials were improved in the friction stability and the wear resistance.

Key words : carbon fiber, friction material, low-metallic pad, NAO pad, reinforcing fiber, friction stability

1. 서론

자동차용 브레이크에 사용되는 마찰재는 자동차의 제동 특성에 가장 크게 영향을 미치는 부품으로서 자동차의 전체 성능에 영향을 주는 중요한 부품이다. 마찰재는 강화 섬유(reinforcing fiber), 고착제(binder), 연마제(abrasive)와 윤활제(lubricant), 충전재(filler), 그리고, 마찰 조절제(friction modifier) 등의 각기 다른 역할을 하는 8-20 가

지 물질로 구성되어 있다[1]. 이들 중 강화 섬유는 마찰재의 강도 유지와 내마모성을 향상시키기 위해 사용되며, 크게 아라미드 계열의 유기 섬유(aramid fiber)와 강철 섬유(steel fiber)의 두 종류로 대별된다. 마찰재의 종류를 강화 섬유의 종류에 따라 분류하면 유기 섬유를 강화제로 사용한 것을 비석면 유기질 마찰재(non-asbestos organic pad, NAO)라고 하며, 강철 섬유를 강화제로 사용한 것을 저금속 마찰재(low-metallic

pad)라고 지칭한다[2]. 유기질 마찰재는 제동시 안락감과 소음의 측면에서 우수하며, 저금속 마찰재는 수명 및 고온 마찰 특성의 측면에서 우수한 것으로 알려져 있다. 그러나, 이러한 마찰재들은 브레이크 관련 보증 수리비의 대부분을 차지하는 떨림 현상(judder)이나 잡음(noise)현상, 그리고 내마모성 등의 관점에서 완벽한 성능을 발휘하지 못하고 있다. 이로 인해 유기질 섬유나 강철 섬유를 대체할 수 있는 유리 섬유, 합성 섬유, 탄소 섬유 등 여러 강화 섬유들을 사용한 마찰재에 대한 다각적인 연구가 진행되어 왔다[3,4]. 특히, 탄소 섬유의 경우는 아주 낮은 열팽창율, 피로와 산화에 대한 높은 저항성, 그리고 높은 강도 등의 좋은 물리적 성질을 가진 섬유로서 자동차용 마찰재에의 응용에 적합한 물질로 인정받고 있다[5,6].

일반적으로 마찰 특성은 압력, 속도, 온도, 습도 등의 다양한 제동 환경에 따라 크게 달라지며, 마찰재에 함유된 원료 물질들의 종류와 함량에 따라서도 각기 다른 특성을 나타낸다. 그러나, 이러한 여러 가지 변수들에 대해서도 안정된 마찰 특성을 나타내야 좋은 마찰재라 할 수 있겠다.

본 연구에서는, 현재 사용되고 있는 대표적인 저금속 마찰재와 유기질 마찰재의 원료 함량을 참고하여 기준 마찰재를 제작하였다. 또한, 기준 마찰재에 함유된 강화 섬유들을 각각 탄소 섬유로 대체한 2종의 개선 마찰재를 추가로 제작하였다. 이들의

마찰과 마모 특성을 관찰하기 위해 실제 자동차의 캘리퍼와 로터가 장착된 마찰 시험기를 사용하여, 가압력, 속도 등의 변화에 따른 마찰 특성의 변화를 비교 연구하였다.

2. 실험 방법

2-1. 시편의 제작

본 실험에서 사용된 시편은 현재 시판중인 자동차에 사용되는 마찰재중 대표적인 저금속 마찰재와 유기질 마찰재를 선정하여, 이들의 함량을 기준으로 저금속 마찰재 LB(low-metallic base)와 유기질 마찰재 NB(NAO base)의 기준 시편을 각각 제작하였다. 또한, 이들 시편에 사용된 강화재의

Table 1. Formulations of the friction materials used in this experiment(vol%).

Raw materials	LB	LM	NB	NM
Aramid fiber	6.3	6.3	8.0	6.0
Rockwool	7.5	4.3	0	0
Steel fiber	4.2	2.7	0	0
Cut copper	1.4	1.4	4.0	4.0
Bronze fiber	1.0	1.0	0	0
BaSO ₄	27.0	29.4	23.0	23.0
NBR	5.9	5.9	0	0
CaCO ₃	4.1	4.1	0	0
Luborid	3.0	3.0	0	0
ZrSiO ₄	4.6	4.6	4.0	4.0
Phenolic resin	16.3	16.3	18.0	18.0
Cashew dust	9.1	9.1	10.0	10.0
Graphite	9.6	6.9	5.0	5.0
K ₂ Ti ₈ O ₁₇	0	0	18.0	15.0
MoS ₂	0	0	2.0	2.0
Sb ₂ S ₃	0	0	3.0	3.0
Ceramic fiber	0	0	5.0	5.0
Carbon fiber	0	5.0	0	5.0

일부를 각각 5 vol%의 탄소 섬유로 대체한 두 마찰재 시편 LM(low-metallic modified)과 NM(NAO modified)을 추가로 제작하여, 총 4종의 시편을 준비하였다. 시편 제작에 사용된 원료 물질의 종류와 함량을 Table 1에 나타내었다.

Table 1에 나타낸 바와 같이 각 마찰재 시편은 10종 이상의 원료를 사용하며, 계량, 혼합, 열성형(hot pressing), 중저온 장시간 열처리(curing), 단시간 고온 열처리(scorching)와 후처리를 거쳐 완성되었다. 완성된 시편은 직경 50mm, 두께 8mm의 원판 형상이다.

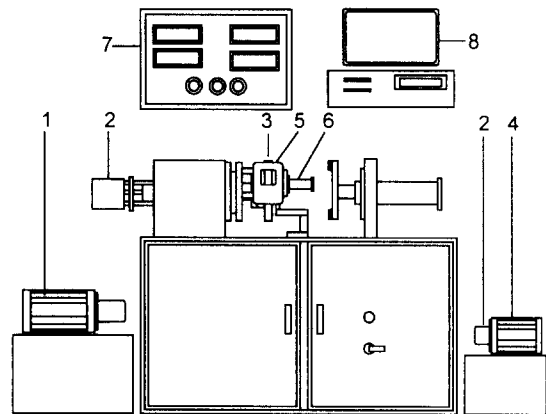
마찰재의 상대제인 로터(rotor)는 모래 거푸집 주조후, 마찰 표면의 연마 처리를 거쳐 완성되는데, 현재 국내 자동차 회사에서 생산된 중형차에 적용되는 제품을 사용하였다. 실험에 사용된 로터는 직경 257 mm, 두께 24 mm의 치수를 가지며, 로터의 냉각을 돕도록 고안된 48개의 직선형 통기구(vane)가 마찰면에 수직하게 뚫려 있다. 원주 방향으로의 두께차 DTV(Disc Thickness Variation)는 다이얼 게이지(dial gauge)를 이용하여 측정하였고, 본 실험에서 사용된 로터의 초기 DTV 값은 약 4.8 μm 이었다.

2-2 마찰 및 마모 시험

본 연구에 사용된 시험기(direct drive brake dynamometer)는 pad-on-disc 방식과 캘리퍼 장착 방식의 dual mode로 구성되어 있으며, 본 실험에서는 실차 제동 상황에

가까운 캘리퍼 장착 모드를 채택하였다. 실험에 사용된 direct drive brake dynamometer의 개략도를 Fig.1에 도시하였다. 시험시 로터의 온도는 비접촉식 적외선 온도계(infrared heat tracer; 3M IR-16)를 사용하여 측정하였으며, 토크는 자유롭게 회전할 수 있도록 설계된 회전판에 고정된 캘리퍼가 load cell에 가하는 하중으로부터 환산하여 얻어냈다. 시험기로부터 측정되는 속도, 가압력, 토크, 온도 등의 모든 자료는 초당 20회의 속도로 저장되었다.

마찰 및 마모 시험은 크게 세 단계로 나누어 시행되었다. 첫 단계는 burnishing 과정으로서 초기 마찰 표면의 물성을 안정화시키고, 로터와의 균일한 접촉을 위해 시행하였다. Burnishing 과정에서는 60km/hr의 속도를 유지하면서 로터의 온도가 100℃에



1 Main driving motor, 2 Hydraulic pressure pump, 3 Rotor, 4 Pressure driving motor, 5 Caliper, 6 Pressure cylinder, 7 Controller and indicator, 8 A/D converter and PC for DAQ

Fig. 1 Schematic diagram of the direct drive brake dynamometer.

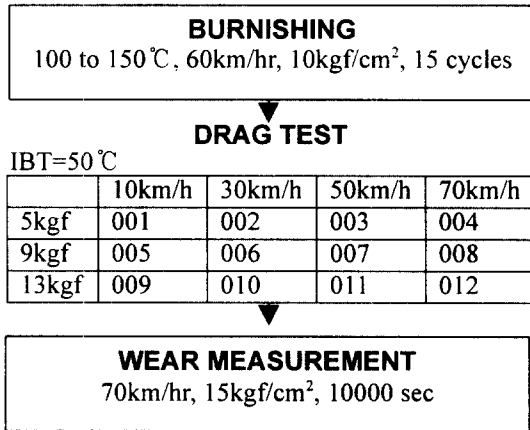


Fig.2 The test procedures applied to each of the friction materials used in this work

서 끌기를 시작하여 150°C가 될 때까지 지속시키는 과정을 15 회 반복하였다. 다음 단계인 끌기 시험(drag test)과정에서는 가압력(applied pressure)과 주행 속도(driving velocity)를 변화시켜 가며, 각 조건에 따른 마찰계수의 변화 양상을 측정하였다. 각 끌기 조건에서 재현성을 확인하기 위해 200 초간 2 회 반복 시험하였다. 마지막으로, 마모 시험(wear test)과정은 초기 로터의 온도가 50°C일 때부터 70km/hr의 일정한 속도로 유지하면서 장시간(10000 초)동안 끌기를 지속하여 유기질 마찰재인 시편 NB와 NM에 대한 마모 정도의 차이를 비교하였다. 본 실험에서 채택한 시험의 순서도와 시험 조건을 Fig.2에 나타내었다.

3. 실험결과

마찰 계수는 압력, 온도, 속도 등의 마찰

조건이 변화함에 따라 변화하였다. 그 중 속도 감소에 따른 마찰 계수의 거동은 크게 평균 마찰 계수의 증가와 마찰 계수의 진폭의 증가로 요약될 수 있다. 속도 감소에 따라 마찰 계수가 증가하는 anti-fading 현상은 stick-slip과 마찰 계면의 온도 상승이 주원인으로 알려져 있으며, 이러한 현상은 제동 말기에 운전자의 몸이 앞으로 쏠리게 하며, 또한 noise의 원인으로도 알려져 있다[2]. 속도 감소에 따른 마찰 계수의 진폭 증가는 차체의 떨림 현상(judder)을 발생시킨다. 본 연구에서는 탄소 섬유 첨가가 마찰 특성에 미치는 영향을 연구하기 위해, 각 마찰재를 대상으로 압력과 속도를 변화시키면서 시험하여 그 결과를 분석하였다.

3-1 속도와 압력에 따른 마찰 계수의 변화

각 시편의 속도에 따른 마찰 계수의 변화가 어떻게 나타나는지 분석하기 위해, 일정 압력 조건(5, 9, 13 kgf/cm²)에서 속도에 따른 마찰 계수의 변화를 살펴 보았다.

Fig.3에 각 압력 조건에서 속도에 따른 마찰 계수의 변화 추이를 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 탄소 섬유를 함유한 시편들이 기준 시편보다 낮은 마찰 계수를 나타내었다. 탄소 섬유는 마찰시 시편으로부터 분리되어 마찰면에 축적되며, 마찰재와 로터 사이에 transfer film을 형성하게 된다. 층상 구조를 가진 탄소 섬유는 윤활 작용을 하게 되고, 마찰재의 낮은 마

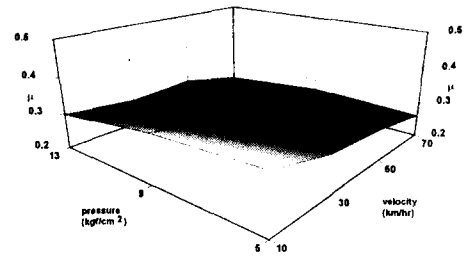
찰 계수를 유도한다. 또한, 저속도에서의 평균 마찰 계수는 고속도에서보다 높은 경향을 보여 주었는데, 이는 저속도에서 stick-slip 현상이 크게 나타나고 있음을 의미한다.

가압력의 변화에 따른 평균 마찰 계수의 거동은 저속도와 고속도에서 각기 다르게 나타났다. 각 시편에 대한 고속도에서의 마찰 계수는 압력에 따라 큰 변화가 나타나지 않았으며, 저속도에서는 압력 변화에 따라 마찰 계수가 상대적으로 불안정한 양상을 나타냈다. 압력에 따른 마찰 계수의 변화에 대한 기구는 아직 명확히 밝혀진 바 없으나, 이론적으로는 압력에 따라 마찰 계수가 변화하지 않는다. 그러나, 마찰 상황에서는 압력에 따라 실제 접촉 면적이 변화하고, 이에 따라 마찰 계수의 변동이 유발된 것으로 사료된다.

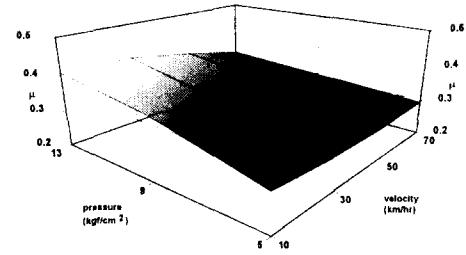
탄소 섬유 첨가에 따른 마찰 안정도의 변화는 유기질 마찰재인 시편 NM 이 시편 NB 에 비해 향상되었으며, 저속도 마찰재의 경우에는 오히려 악화된 결과를 나타냈다. 이로부터 탄소 섬유의 첨가가 마찰 안정도에 미치는 영향은 NAO 시편에 대해 더 효과적임을 알 수 있다.

3-2 마찰 계수의 진폭의 변화

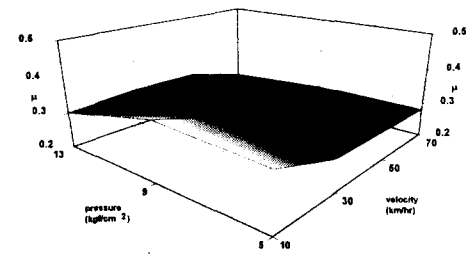
Fig.4 에서 나타나듯이 마찰 계수의 진폭은 저속도로 갈수록 증가하는 경향을 나타내었다. 특히, 탄소 섬유를 함유한 시편 LM 과 NM 의 경우에는 탄소 섬유를 함유



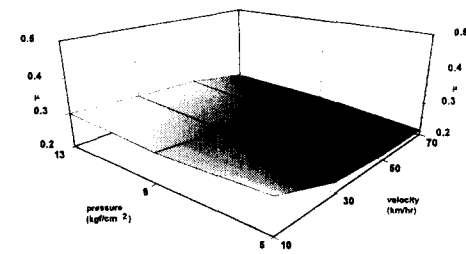
(a) LB



(b) LM



(c) NB



(d) NM

Fig.3 P-V-Mu surface plot; The change of average friction coefficient as functions of applied pressure and velocity at 50°C IBT.

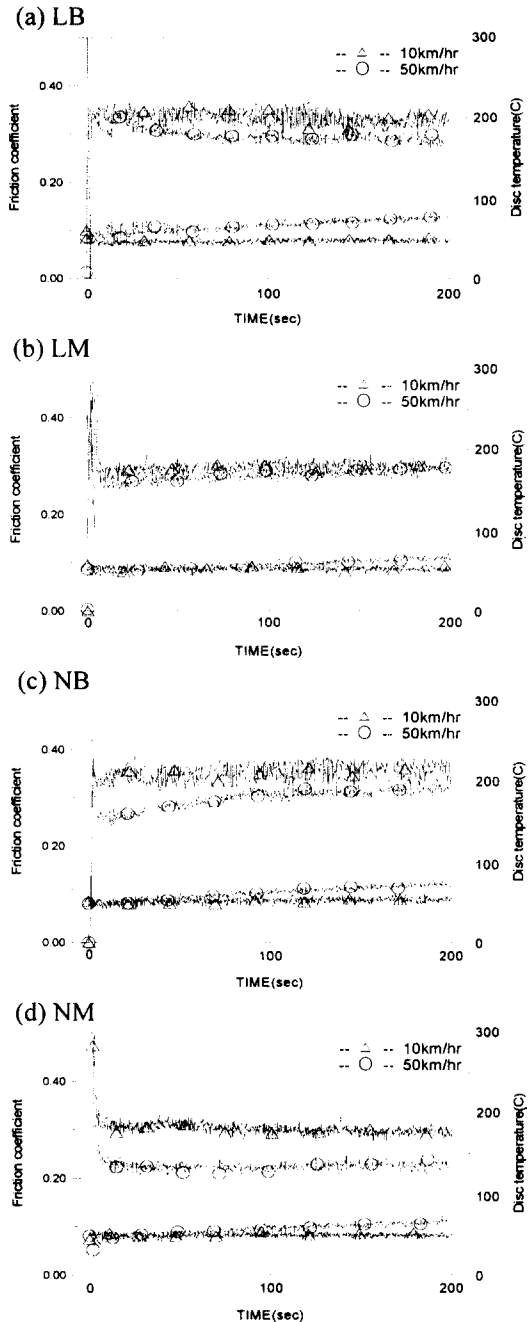


Fig.4 The change of friction coefficient at different velocities; 10 and 50 km/hr maintaining applied pressure at 5 kgf/cm².

하지 않은 시편에 비해 속도 감소에 따른 마찰 계수 진폭의 증가가 현저히 감소하였다.

마찰 계수의 진폭은 온도 증가에 따른 로터의 열변형으로 인한 로터의 DTV 변화와 마찰 표면에 생성되는 transfer film이 막의 안정성과 분포 및 응착 정도를 변화시키면서 발생하는 stick-slip의 변화에 따른 영향으로 알려져 있다[7,8]. 본 실험의 경우는 비교적 낮은 가압력 범위의 실험이므로 로터 온도의 상승은 크지 않았다. 따라서, 탄소 함유 함유 시편의 마찰 계수의 진폭이 증가한 본 실험의 결과는 로터의 열변형에 의한 영향보다 탄소 함유가 마찰 계면에 지속적으로 transfer film을 형성하여 stick-slip의 발생 빈도를 감소시키는 것이 주원인으로 분석되었다.

3-3 유기질 마찰재의 마모율 비교

유기질 마찰재인 시편 NB와 NM에 대해 고속도(70km/hr)와 고압력(15kgf/cm²)의 조건에서 10000초 동안 끌기를 하여 마모 정도를 비교하였다. 실험시 로터의 온도는 최고 450°C까지 상승하였으며, 비교적 가혹한 조건에서의 시험이라고 할 수 있다.

그 결과를 Fig.5에 나타내었는데, 시편 NM은 시편 NB에 비해 상대적으로 낮은 마모율을 나타내었다. 이는 탄소 함유의 높은 강도와 transfer film을 통한 윤활 작용, 그리고 그로 인한 마찰 계수 진폭의 감소에 기인한다.

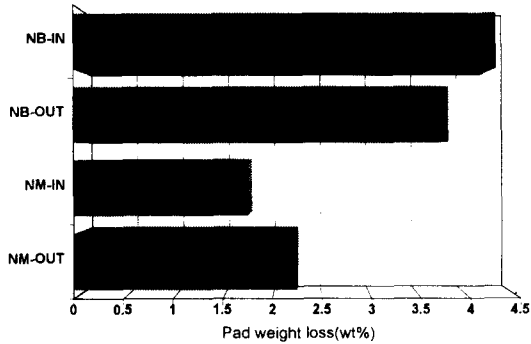


Fig.5 Inboard and outboard pad weight loss in specimen NB and NM.

4. 결론

저금속 마찰재와 유기질 마찰재, 그리고 그들 각각에 함유된 강화재를 탄소 섬유로 대체한 네 가지 시편에 대하여 속도와 압력 조건의 변화에 따른 마찰 특성 변화의 추이를 분석하였다. 탄소 섬유를 함유한 시편 LM 과 NM 은 평균적으로 낮은 마찰 계수를 보였고, 이는 탄소 섬유가 마찰 계면에서 윤활 작용을 하기 때문이다.

마찰 계수 진폭의 측면에서는 탄소 섬유를 함유하지 않은 마찰재인 시편 LB 와 NB 의 경우 저속도에서 큰 진폭이 나타난 반면, 탄소 섬유를 함유한 시편 LM 과 NM 이 속도 감소에 따라 진폭 증가가 작게 나타났다. 유기질 마찰재 시편을 대상으로 한 마모 시험에서 탄소 섬유를 함유한 시편 NM 이 작은 마모량을 나타냈다. 이는 탄소 섬유의 높은 강도와 윤활 특성에 의해 나타난 결과로 평가된다.

참고 문헌

- [1] 장 호, “자동차 제동시 나타나는 마찰 특성에 관한 연구 I,” 한국윤활학회지, 제 13 권, 제 1 호, 1997.
- [2] 김성진, 장 호, “자동차 제동시 나타나는 마찰재의 마찰 특성에 관한 연구 II,” 한국윤활학회지, 제 13 권, 제 3 호, 1997.
- [3] P. Gopal, L.R. Dharani, F.D. Blum, “Fade and Wear Characteristics of a Glass-fiber-reinforced Phenolic Friction Material,” Wear, 1994.
- [4] P. Gopal, L.R. Dharani, F.D. Blum, “Load, Speed and Temperature Sensitivities of a Carbon-fiber-reinforced Phenolic Friction Material,” Wear, 1995.
- [5] Erich Fitzer, “Technical Status and Future Prospects of Carbon Fibers and their Application in composites with Polymer Matrix(CFRPs),” Carbon Fibers and Their Composites, 1985.
- [6] B.K. Friley, B.E. McNeese and J.T. Trainor, “Effect of Carbon Fiber in Dry Brake Formulations,” SAE papers #911951, 1991.
- [7] C. Gao and Kuklmann-Wilsdorf, “On-stick-slip and the Velocity Dependence of Friction at Low Speeds,” Transactions of the ASME, 1990.
- [8] J.K.Lancaster, “Lubrication of Carbon Fibre-reinforced Polymers, Part I,” Wear, 1972.