

자동차용 마찰재에 사용되는 고체 윤활재(Sb_2S_3)와 연마재($ZrSiO_4$)의 상대량에 따른 마찰특성의 변화에 관한 연구.

장 호

고려대학교 공과대학 재료·금속 공학부
서울시 성북구 안암동 5가 1번지, 136-701

초록 (Abstract)

자동차용 마찰재의 원료로 사용되는 고체 윤활재(Sb_2S_3)와 연마재($ZrSiO_4$)의 상대량이 다른 3가지의 마찰재를 제조하여 그들의 마찰특성을 자동차용 Brake Dynamometer를 사용하여 연구하였다. 각각의 마찰재에 관하여 자동차 제동시에 나타나는 마찰계수의 변화와 torque 변화 그리고 시험후의 마찰재와 rotor의 마모량을 측정하였다. 제동특성과 직접 관련 있는 것으로 알려져있는 마찰계수의 안정성은 Sb_2S_3 의 상대량이 높을 때 좋은 특성을 나타내었으며, 반면에 $ZrSiO_4$ 의 상대량이 많은 경우에는 마찰계수의 안정성이 저하되었을 뿐 아니라 제동시의 torque 변화량도 증가 하여, 자동차의 Judder 현상을 해결하는데 좋지않은 경향을 나타내었다. 이는 마찰시에 계면에 형성되는 윤활막의 거동에 의한 현상이며 이때 마찰재 및 상대재의 마모량은 연마재의 양이 증가함에 따라 마모량이 증가 하였다.

1. 서론:

다양한 원료를 이용한 복합재료인 자동차 브레이크용 마찰재에 대한 연구는 자동차 제작 초기부터 기업체를 중심으로 시작되어 주로 제동성능 위주의 연구를 수행하여 왔다 [1,2,3]. 그 이후 1980년대까지는 석면(asbestos)을 주원료로 사용하여 마찰재를 생산하였으며, 석면의 우수한 열 안정성과 높은 강도, 분산의 용이함, 그리고 저렴한 가격 때문에 마찰재의 구성요소 중 약 40-60%를 차지하였다. 그러나 1980년대 후반 미국 환경보호국(EPA)의 석면 사용금지 명령에 따라, 석면의 대체 물질과 석면과 함께 사용되던 다른 주요 재료들에 대한 전반적인 연구가 활발히 시작되었다[4]. 그러나 마찰재의 복합재료적 특성 때문에 제동시의 마찰기구가 충분히 이해되지 않은 상태에서 그 제동 성능에만 의존하여 개발이 시행되어왔다. 마찰현상의 근본적인 기구에 대한 이해의 결핍은 다양한 브레이크 관련 문제점들을 근본적으로 해결하지 못하였으며 따라서 1980년대 후반부터 브레이크 전반에 대한 여러가지 문제점들이 높은 보충

수리비와 함께 대두되었고 이때부터 제동시의 마찰현상에 관해 보다 근본적인 이해를 위한 연구가 본격적으로 시작되었다[5,6].

자동차 브레이크용 마찰재는 일반적으로 약 8 - 20 종류의 다른 원료로 구성된 복합 재료로서 그 구성요소는 크게 약 5가지 정도로 나뉘어 지며, 고착제 (binder), 강화섬유 (reinforcing fiber), 연마재 (abrasives), 고체 윤활재 (solid lubricant), 그리고 충전재료 (filler)로 크게 대별된다 [7]. 이들 각각의 구성원료는 자동차 제동시 요구되는 마찰특성을 얻기 위하여 적정량이 첨가되며 이때 사용된 구성물질의 종류 및 양은 일반적으로 마찰재 생산업체의 비밀로서 공표하지 않는 것이 상례이다.

선진국의 자동차 브레이크용 마찰재에 대한 연구는 현재 주로 마찰재와 상대재 (cast iron rotor) 사이의 계면에서 발생하는 마찰기구에 관하여 연구되고 있다 [8,9]. 이는 마찰계면에서의 현상이 자동차 제동시에 매우 중요한 역할을 하기 때문이다. 따라서 이에 대해 마찰재 구성 물질, 상대재의 재질, 제동압력, 온도 그리고 습도 의한 영향들을

고려하여 심도 있게 연구하고 있다 [10,11]. 본 연구에서는 마찰재에 사용되는 원재료 중 brake의 성능에 가장 크게 영향을 미치는 것으로 알려져 있는 고체윤활재와 연마재 중 한 종류 성을 선택하여 그들의 상대적인 양을 변화시켜 마찰재를 제조하고 그에 따른 마찰특성을 연구하였다. 특히 압력과 온도의 변화에 따른 마찰계수 및 torque의 변화, 그리고 그에 따른 마모량에 관하여 비교 분석하였다.

2. 실험방법

본 실험에서 사용된 시편은 현재 시판중인 자동차에 사용되고 있는 마찰재를 중심으로 구성성분 중 고체윤활재와 연마재의 상대적인 양을 변화시켜 3가지 다른 시편을 제조 하였다. 실험에 사용한 시편의 Sb_2S_3 와 $ZrSiO_4$ 의 상대량은 표 1 과 같다.

표 1. 마찰재에 사용한 Sb_2S_3 와 $ZrSiO_4$ 의 구성함량

시편이름	Sb_2S_3	$ZrSiO_4$	그외의 재료
KU-1	6 wt.%	1 wt.%	93 wt.%
KU-5	4 wt.%	2 wt.%	94 wt.%
KU-9	2 wt.%	4 wt.%	94 wt.%

시편 KU-9의 경우 상대 분량의 변화에 따른 전체 증가량은 마찰재에 사용되는 원료 중 비교적 마찰특성에 영향을 작게 미치는 충전재(bayrite)를 변화시켜서 제조하였다. 제조과정은 원재료 혼합 (mixing), pre-forming, 고온 고압에서의 성형, 그리고 curing을 거쳐 이루어 졌다. Dynamometer시험시 사용된 brake rotor 와 caliper는 회주철로 된 것으로서 현재 시판되고 있는 자동차에 장착되고있는 것과 동일 제품을 사용하였다. Brake rotor의 성분은 optical emission spectroscopy를 이용하여 측정 하였으며 그 결과는 표 2. 와 같다.

표.2. 본 실험에 사용한 회주철 rotor의 조성 (wt.%).

C	Si	Mn	S	Cr	Cu
3.35	2.35	0.66	0.11	0.28	0.22
Mo	Ti	Nb	V	Fe	
0.025	0.048	0.003	0.01	Bal.	

제동시 발생하는 torque의 변화와 압력, 온도 및 그때의 마찰계수를 측정하기 위해 brake test 용 dynamometer (Link Engineering Co.)를 이용하여 실험하였다. 본 실험에서 사용된 brake dynamometer는 최대관성이 $15.7 \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{sec}^2$ 이며 최대 회전속도는 2000 RPM, 유압 servo식 압력 조절기에 의한 압력범위는 $0\text{-}200 \text{ kg/cm}^2$, 최대 감속도는 2g 까지 가능하였다. 시험시 압력, torque, 온도 등의 관한 data 측정 속도 (data access rate)는 최대 1500Hz까지 가능 하였으나 본 실험에서는 300Hz에서 측정 하였다. 본 실험에서의 제동시 실험변수는 brake piston pressure; 100psi(14.5kPa), 200psi(29kPa), 300psi(43.5kPa), 400psi(58kPa)와 초기 rotor의 온도; 100F(38℃), 200F(93℃), 300F(149℃), 400F(205℃)이며, 이 두 가지 변수로 구성된 16가지 다른 마찰조건에서 rotor가 정지할 때까지 시험하였다. 또한 상압에서의 dragging 시험은 rotor의 초기온도 100℃와 75psi (10.8kPa)의 압력하에서 시간에 따른 마찰특성의 변화를 조사하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 제동시 마찰계수의 변화

자동차 제동시에 나타나는 마찰계수는 제동시의 압력, rotor의 온도, rotor 회전속도 그리고 그때의 습도에 따라 변한다. 그러나 우수한 제동능력을 나타내기 위해서는 다양한 제동조건에서도 마찰계수가 변하지 않도록 마찰재를 고안하는 것이 바람직하다. 이는 운전자가 제동시 항상 같은 정도의 마찰력을 예측하기 때문이다. 이러한 안정된 마찰계수를 얻기 위해서는 매우 잘 선택된 원재료를 사용하여야 하며 따라서 원재료들의 종류 및 그들의 상대량을 조절하여 안정된 마찰계수를 얻어낸다. 본 실험에서는 많은 원료들 중에서 고체윤활재 Sb_2S_3 와 연마재 $ZrSiO_4$ 의 상대량에 따른 마찰계수의 안정성을 조사하기 위해 제동초기의 온도와 압력이 다른 16가지 마찰조건에서 마찰계수를 측정하였다. 제동시 초기속도는 100 km/hr 로 고정 하였으며 이때 제동시간은 약 5초 에서 20초 정도이었다. 그림 1은 본 연구에서 사용된 3가지 마찰재 KU-1, KU-5, KU-9의

마찰계수를 온도와 압력의 변화에 따라 나타낸 것이다.

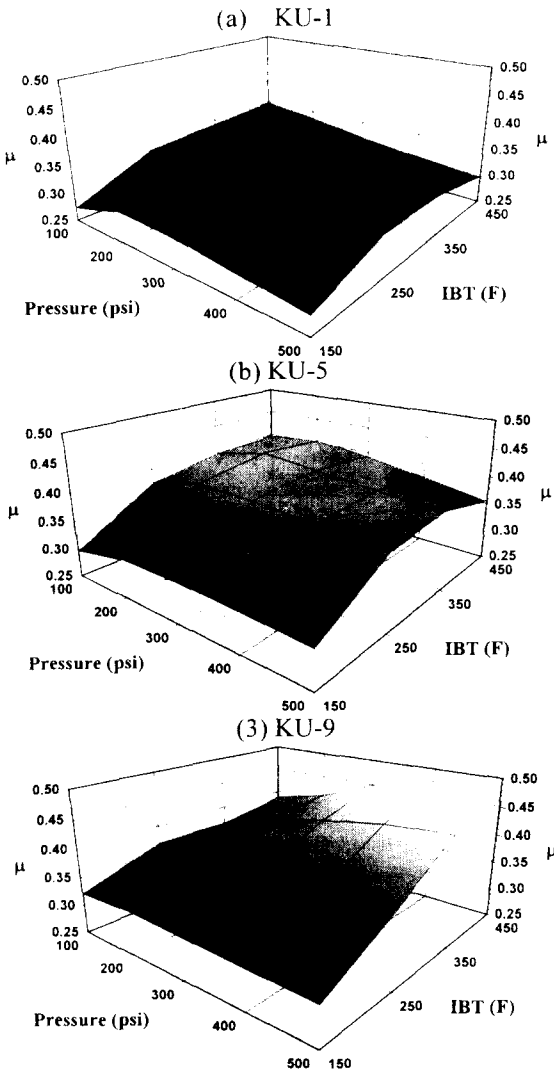


그림 1. 압력과 온도 (IBT=initial brake temperature)에 따른 마찰계수의 변화

마찰계수의 변화는 Sb_2S_3 가 다량 포함되어 있는 KU-1가 가장 적은 변화도를 나타내었고 Sb_2S_3 의 양이 가장 적고 $ZrSiO_4$ 의 양이 가장 많은 KU-9에서 가장 심하게 나타내 보였다. 특히, KU-9의 경우 다른 경우에 비하여 고온 고압에서 마찰계수의 변화가 크게 나타났다. 이는 고온 고압하에서 다량의 연마재가 작용하여

윤활막의 형성을 저해함으로써 나타난 현상으로 보여진다.

3-2 일정 압력 하에서 dragging(끌기시험)시 나타나는 마찰계수 및 torque의 변화량.

Dragging test는 마찰재의 접촉압력을 일정하게 한 상태에서 rotor를 회전시키면서 그때의 마찰계수 변화와 torque 변화를 측정하는 시험이다. 본 실험에서는 상기한 3가지 마찰재를 대상으로 접촉압력을 75psi(10.8kPa), 초기 rotor온도 100°C에서 4분간 dragging을 시행함으로써 그때의 마찰특성을 관찰하였다. 그림 2는 마찰재 KU-1, KU-5, KU-9를 사용하여 dragging 시험할 때 마찰시 나타난 torque의 변화와 그때의 압력을 나타낸 것이다.

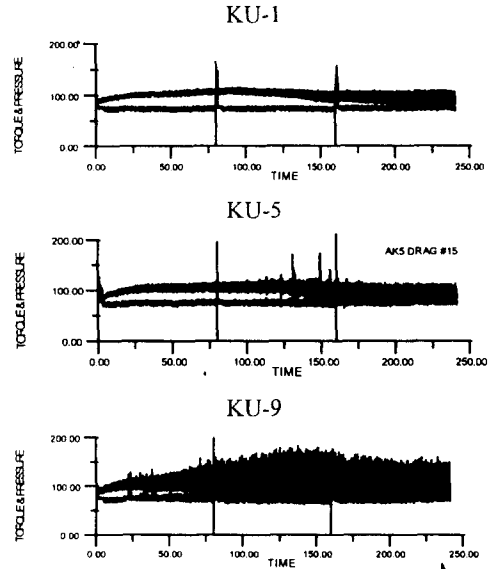


그림 2. Dragging시 나타난 압력과 torque의 변화. (압력=75psi, IBT=100°C)

그림에서 보여준 바와 같이 마찰재 중 연마재인 $ZrSiO_4$ 의 양이 증가함에 따라 torque의 진폭이 크게 증가함을 알 수 있다. 이는 세가지 원인으로 설명할 수 있다. 우선 rotor의 온도가 상승함에 따라 rotor가 열변형 함에 따른 해석과 두 번째로는 마찰계면의 온도가 고체윤활재의 분해온도 이상으로 상승함으로써 안정된 윤활막이 형성되지 못하고 따라서 연마재에 의한 연마

효과가 상대적으로 상승됨으로써 마찰계면의 온도를 가속시키는데 그 원인이 있다. 또한 불안정한 윤활막의 형성에 의해 불균일한 윤활막이 rotor 표면에 형성됨에 따른 torque의 발생이 그 원인이 될 수 있다. 이러한 해석을 뒷받침하기 위해 적외선 온도계를 rotor측면에 설치하여 dragging중의 rotor의 온도변화를 측정하였다. 그림 3은 3가지 마찰재 KU-1, KU-5, KU-9를 사용할 때 dragging에 따른 torque변화와 그때의 rotor 온도를 나타낸 것이다.

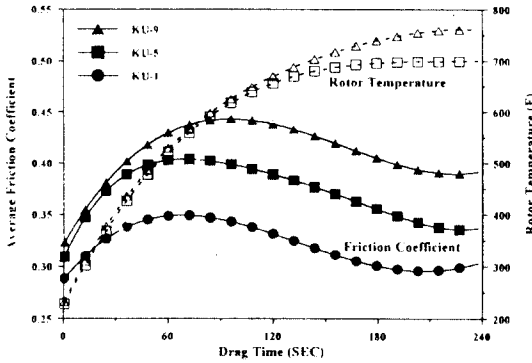


그림3. Dragging 시험시 나타난 시간에 따른 온도와 마찰계수의 변화.

그림3에서 나타난 바와 같이 rotor의 온도가 상승하면서 약 200-300°C에서 fading 현상을 보임에도 불구하고 그림 2에서와 같은 높은 torque 변화량을 dragging 말기에 나타내는 것은 rotor의 열변형과 불균일한 윤활막에 의한 현상에 의한 것으로 생각된다.

3-3 마찰재의 aggressiveness와 rotor의 DTV가 torque의 변화에 미치는 영향.

Dynamometer test 전과 후의 rotor DTV(Disk Thickness Variation)의 변화량을 비교함으로써 연마재의 공격성(aggressiveness)에 따른 torque 변화량을 관찰하였다. 일반적으로는 rotor의 angular position에 따른 DTV와 그때의 torque값이 시험 초기에는 비교적 잘 일치하는 것으로 알려져 있다. 그러나 이러한 경향은 제동시험이 진행되면서 마찰재에 의한 영향과 rotor온도의 변화에 의해 편차를 보이게된다. 그림 5에 dynamometer 시험

초기와 시험 말기에 나타난 rotor DTV와 그에 따른 torque변화량을 나타내었다.

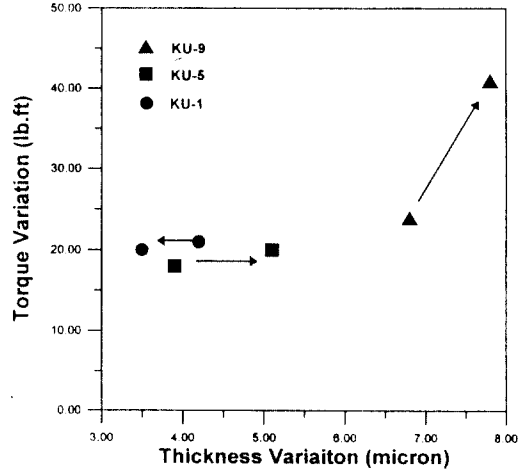


그림 5. dynamometer 시험 초기와 시험 말기에 나타난 rotor DTV와 그에 따른 torque변화량. 화살표는 시험 초기조건에서 시험 말기 조건으로 방향표시하였다.

그림에서와 같이 마찰재의 공격성에 의해 torque 변화가 증가하는 추세를 보이는 반면 비공격성인 마찰재는 시험 말기의 torque 변화량이 크게 변화하지 않았다. 이러한 결과는 과거 10년간 자동차의 brake를 연구하는 많은 연구자들이 관심을 가져온 현상으로서 공격적인 마찰재를 사용함으로써 출고 시의 초기 rotor DTV가 주행을 거듭하면서 증가하는지 혹은 감소하는지에 대해 일면을 설명해주고 있다. 비록 본 실험은 자동차의 주행 수명에 비해 초기 단계의 실험이지만, 마찰재의 공격성이 증가 할수록 rotor의 DTV와 torque변화가 함께 증가 함을 보여 주었다. 이러한 경향을 재확인 하기 위해서는 보다 긴 주행을 대상으로 실험할 필요가 있을 것으로 간주된다.

3-4. 마찰재의 공격성에 따른 마찰재와 rotor의 마모량

상기한 3가지 마찰재 KU-1, KU-5, KU-9를 이용하여 dynamometer 시험한 후 마찰재와 rotor의 마모량을 측정하였다. 일반적으로 마찰재의 공격성이 증가할수록 rotor의

마모량이 증가하는 것으로 알려져 있으며 본 실험에서도 동일한 결과를 나타내었다. (그림 6).

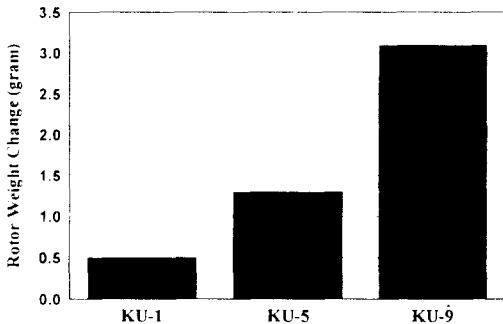


그림 6. Dynamometer 시험후 측정된 rotor의 마모량.

그러나 본 실험에 따른 마찰재의 마모량은 일반적인 연삭마모의 경향과 상이한 결과를 나타내었다. 그림 7에서 나타낸 바와 같이 마찰재의 마모량은 마찰재의 공격성이 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었으며, 이는 고체 윤활재의 상대량이 감소함에 따라 rotor 표면에 윤활막이 충분히 형성되지 못하여 이에 따른 마찰계면의 온도가 상승함으로써 binder로 사용되고 있는 resin이 열분해 되어 결합력을 상실하였기 때문으로 간주된다.

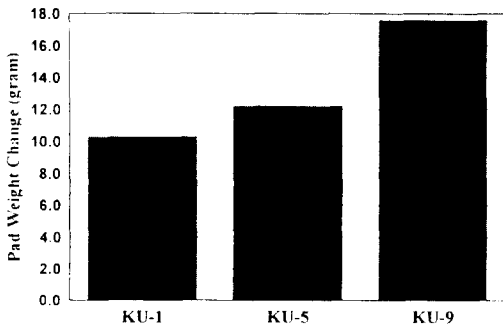


그림 6. Dynamometer 시험후 측정된 마찰재의 마모량.

4. 결론

Braking중에 나타난 torque의 변화는 rotor의 초기 DTV에 의해 크게 좌우되며 또한 연마재와 윤활재의 양에 의해서도 영향을 받고 있음을 보였다. 제동조건에 따른 마찰계수의 안정성(stability)은 윤활재의

상대량이 많은 마찰재에서 가장 우수하게 나타났으며 특히 연마재가 윤활재에 비해 상대량이 많을 경우 dragging시 torque 변화가 현저하게 증가함을 보였다. Brake 실험후 DTV의 변화는 rotor의 마모도와 밀접한 관계가 있었으며, 특히 연마재를 많이 사용할 때 큰 DTV 변화를 나타내었다. Rotor 및 마찰재의 마모량은 마찰재에 포함되어 있는 고체윤활재 및 연마재의 상대량에 의해 크게 좌우되며 특히 연마재가 많이 포함되어 있는 경우 마모량이 크게 증가하였다.

5. 참고문헌:

1. M.G. Jacko, R.T. DuCharme, Society of Automotive Engineers, SAE 730191 (1973).
2. L.S. Bark, Wear, 41 (1977) 309-314.
3. M.G. Jacko, Wear (1978) 163-175
4. A.E. Anderson, Proceedings of "Fibers in Friction Materials Symposium", Atlantic City, N.J. (1987) 2-49.
5. J.W. Longley, R. Gardener, IMechE C453/88 (1988).
6. P. Gopal, L.R. Dharani, F.D. Blum, Wear, 174 (1994) 119-127.
7. A.E. Anderson, Metals Handbook, 10th ed. Vol. 18, 569-577.
8. R. Wtaker, A. Wirth, J. Appl. Phys. D (1992) 38-43.
9. H. Jang, J.W. Fash, W.T. Donlon, FRL Report SR-95-097.
10. P.J. Blau, H. Jang, ORNL CRADA 94-0286 (1994). A. Wirth, R. Eggleston, Wear, 179 (1994) 75-81.
11. H. Block, IMechE Vol. 2, (1973) 222.