

한국형 기동장비 마찰재의 고온성능 연구

A Study on the High Temperature Performance of the Brake Materials Built in Korean Model Combat Vehicle

하 상 준*
Ha, Sang-jun

정 동 윤**
Chung, Dong-Yoon

ABSTRACT

Organic brake materials are installed in the braking system of Korean model combat vehicles. Since the binder resin is decomposed in high temperature region, it may possible to drop the friction force which makes the vehicle stop within the desired distance. This study analyses the braking performance of the brake materials in high temperature region by using the pin-on-disk type friction tester. It is observed radical drop of friction coefficients and rapid increase of wear amounts from the transition temperature. It is due to the formation of oxide layer on the friction surface.

1. 서 론

제동장치에 사용되는 마찰재는 상대 디스크와의 마찰을 통하여 운동에너지를 열에너지로 변환시켜 대기속으로 방출함으로써 제동작용을 한다.

마찰재의 제동성능은 주로 마찰재와 로터의 재료적 특성과 그에 따른 마찰특성에 의해 결정된다. 마찰재의 특성은 마찰재 제조에 사용되는 원료의 종류 및 제조방법에 따라 크게 변하며 기동장비의 제동장치에 관련된 여러 가지 요소들 중에서 매우 중요한 역할을 한다. 마찰재는 주행시 다양한 조건과 환경에서 사용되므로 환경조건 및 운행상태등에 따라 마찰특성이 변화하지 않도록 제작되어야 하므로 이에 대한 연구 및 분석이 매우 난이한 것으로 알려져 있다⁽¹⁾⁻⁽³⁾.

* 군사과학대학원 재료과학과

** 군사과학대학원 재료과학과 교수

마찰재는 경제성과 아울러 안정된 마찰성능과 낮은 마모율, 긴 수명 그리고 저소음 특성 등을 만족시켜야 한다. 그리고 습기중이나 열이력 후에도 마찰특성의 변화가 적어야 하며 고온에서의 마찰특성 등이 양호해야 한다. 마찰재는 제품간의 차이는 있으나 일반적으로 약 10여 가지의 성분으로 된 복합재료이며 강화제, 마찰조절제, 충전제 및 고체윤활제 그리고 이들을 결합하는 결합제 등으로 이루어져 있다. 강화제는 마찰재에 기계적 강도와 인성을 제공하며 대부분의 경우 내마모성도 증가시킨다. 또한 마찰조절제는 세라믹 분말이나 금속분말을 사용하여 마찰계수를 조절하거나, 마찰면의 퇴적물을 떨어내는 역할을 한다. 즉 마찰열에 의해 분해된 후 마찰면에 윤활막을 형성하여 농축이나 응착이 일어나는 것을 막아준다.

안정된 마찰계수를 얻기 위해서는 접촉 표면에 적절한 두께의 산화막이 생성과 탈락을 반복하면서 마

찰재와 상대 디스크와의 직접적인 고체-고체간 마찰을 피하도록 해야 한다. 그러나 이러한 산화막은 마찰재의 사용조건에서 그 기능을 발휘할 수 있다. 낮은 하중과 낮은 속도 등의 조건에서 초기에 산화막이 생성되면 오히려 사용조건인 고온영역에서는 마찰재의 마모량을 증가시키는 결과를 초래하게 된다. 따라서 마찰재를 구성하고 있는 성분 중에서는 산화막의 초기 생성을 방지하기 위하여 세라믹 등으로 구성된 마찰조절제를 사용하게 된다. 이러한 마찰조절제는 적은 양으로도 제동특성에 큰 영향을 미치므로 함량의 조정에 특히 유의해야 한다.

현재 사용되고 있는 마찰재는 비석면 유기질 마찰재와 금속성 마찰재로 크게 분류되며, 금속성 마찰재는 금속성분의 함량에 따라 저금속성 마찰재(금속의 함량이 30%이하인 경우)와 반금속성 마찰재(금속의 함량이 30%이상인 경우)로 다시 나뉘어 진다. 그러나 실제로는 대부분의 마찰재가 유기질 마찰재와 소결 마찰재로 구분되며, 유기질 마찰재는 결합제로서 페놀계 수지를 사용함으로써 주로 자동차용으로 많이 사용되고 있다.

고부하 차량의 제동시 마찰면의 온도는 600°C 이상 상승하게 되는데 유기질 마찰재의 경우는 결합제로서 사용되는 페놀 레진이 약 600°C 이상에서 분해되므로 결합제로서의 기능을 상실한다.

연구대상인 기동장비에는 유기질 마찰재가 드럼형과 패드형으로 설치되어 있다. 야지의 열악한 환경에서 격렬하게 사용되는 기동장비의 마찰재는 차량의 중량과 속도에 의한 운동에너지를 방출하는 동안 고온에 의한 열균열 현상에 대하여 견딜 수 있는 성능이 요구되고 있다.

따라서 본 연구에서는 전용 시험기를 이용하여 고온상태에서의 마찰재 성능을 시험하고 성능저하의 원인을 분석하였다. 그 결과 마찰면의 온도가 상승함에 따라 마찰조절제의 계면을 따라 열균열이 발생하

고 있음을 발견하였고, 고온 영역에서는 마찰계수가 매우 불안정하고 마모량도 급격히 증가하는 것을 확인하였다.

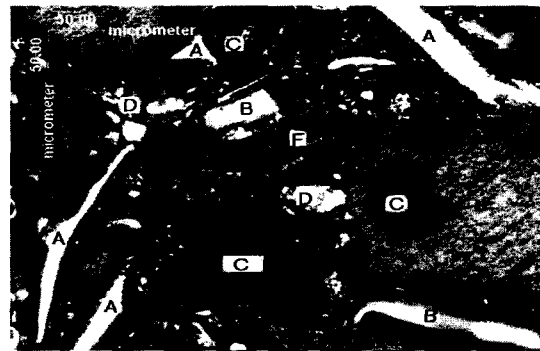
2. 본 론

2-1 시편의 제작

시험을 위한 시편은 현재 기동장비에 장착되어 사용되는 것과 동일한 브레이크 패드를 획득하여, 한개의 패드에서 시편 2개를 제작하였다. 시편의 규격은 25×25×6mm이다. 본 실험에서 사용된 마찰재는 유기질 마찰재로서 Table 1에 나타난 조성을 가지고 있다. 마찰재의 성분은 EPMA(Electron probe Micro Analyzer)를 이용하여 측정된 원소분포를 기록하였다. 또한 마찰재의 초기 표면형상과 성분의 분포를 조직사진 Fig. 1에 나타내었다.

{Table 1} Compositions of the friction material(wt %).

Ba	Ca	Si	Fe	Mg	Cu	Zn	Binder etc.
21.4	14.8	7.92	6.62	4.0	1.03	0.52	42.71



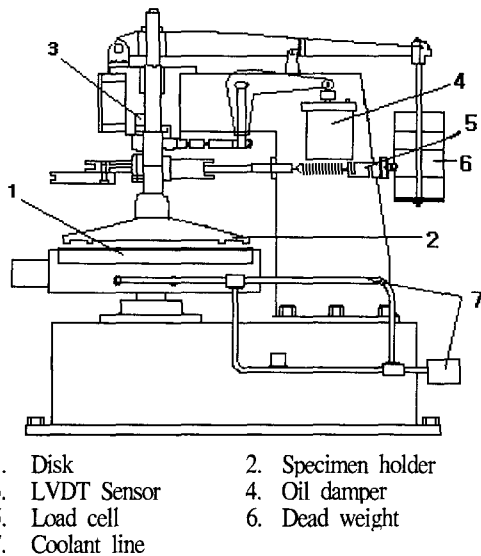
- A: Fe
- B: Fe, O
- C: C, Ba
- D: Cu
- E: Si
- F: Si, Ca, Mg, Ba

{Fig. 1} Micrograph of the surface of test specimen.

시험에 사용된 디스크의 재질은 KS D 4301의 GC 250(회주철)이며, 마찰면의 표면조직은 펄라이트였다.

2-2 마찰시험

본 연구에서는 마찰 시험은 한국 산업규격(KS R 4024)에 따라 이루어졌다. 이를 위하여 Fig. 2에 나타난 바와 같은 pin-on-disk 형의 정속 마찰시험기를 이용하였다.



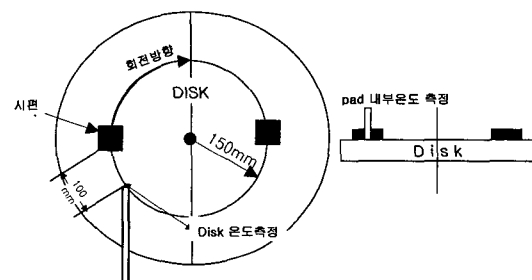
(Fig. 2) Schematic diagram of experimental apparatus.

압착하중은 지렛대 원리를 이용한 추에 의해 하중의 10배로 시편에 작용한다. 시험시 불균형으로 인한 오류를 제거하기 위하여 시편을 대칭되는 방향으로 2개를 설치함으로써 균형을 유지하였다. 작은 시편을 이용한 모의 시험에서는 실제와 같은 온도 상승이 불가능하므로 외부의 열원이 필요하다. 이를 위하여 디스크의 밑부분에 가열 코일을 설치하여 디스크에 추가 열을 공급하였다. 또한 설정된 디스크 온도를 유지하기 위하여 정밀 분사노즐을 설치하였다. 이

노즐은 시험초기에 설정된 온도를 기준으로 $\pm 20^{\circ}\text{C}$ 범위 내에서 디스크의 온도를 유지할 수 있도록 자동으로 개폐되면서 안개와 같은 수분을 분무하여 디스크를 냉각시키도록 제작되었다.

디스크의 회전속도(rpm)는 모터의 속도를 조절할 수 있는 통제시스템을 이용하였으며, 마찰력의 측정에는 $100\text{kg}\cdot\text{f}$ 의 용량을 가진 Load Cell(주 봉신)을 이용하였다. 마모량의 측정에는 Fig. 2의 시험장치에 나타난 바와 같이 LVDT 센서를 이용하여 측정하였으며 실시간으로 PC를 통하여 모니터에 나타나도록 하였다.

Fig. 3은 열전대를 이용하여 디스크의 온도와 패드 내부의 온도를 측정하는 방법을 나타낸 것이다. 디스크의 온도는 시편중심으로부터 10cm 떨어진 회전반경의 중심에서 측정하였으며, 패드의 마찰표면온도는 시편의 중심에 3mm 구멍을 만들어 열전대를 표면까지 삽입시켜 측정하였다.



(Fig. 3) Measurement of temperature in disk and pad.

2-3 시험조건

본 연구에서는 기동장비에 사용되는 마찰재의 고온 영역에서의 성능을 알아보기 위하여 Table 2와 같은 시험 조건을 선정하였다.

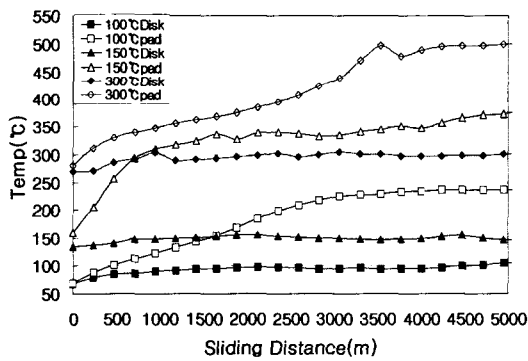
마찰재에 작용하는 압착하중은 기동장비의 제동

(Table 2) Conditions for experiment.

구 분	시험 조건		
디스크온도 (°C)	100	150	300
압착하중 (MPa)	0.8	0.8	0.8
	1.0	1.0	1.0
	1.2	1.2	1.2

시 패드에 작용하는 면압을 고려하였다. 디스크의 회전속도는 기동장비의 3단의 주행속도에 해당하는 300rpm으로 설정하였다. 이를 기동장비의 실제 주행속도로 환산하면 약 25km/h에 상당한다.

Fig. 3의 방법으로 시험 온도를 측정한 결과 Fig. 4와 같이 디스크와 마찰면에서의 패드온도에는 많은 온도차이가 있음을 알 수 있었다.



(Fig. 4) Temperature Diagram of disk and pad surface at 1MPa, 300rpm.

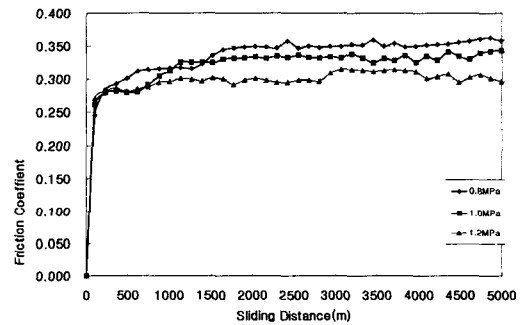
압착하중이 1MPa, 회전속도 300rpm의 조건에서 디스크의 온도가 100±10°C일 때 패드접촉표면의 온도는 점차 상승하여 245±10°C에 도달하였으며, 150±10°C에서는 패드표면온도가 급격히 상승하여 350±10°C에서 유지되었다. 또한 300±10°C에서 패드의 온도는 꾸준히 상승하여 500±10°C에 도달하여 안정되었다.

2.4 분석장비

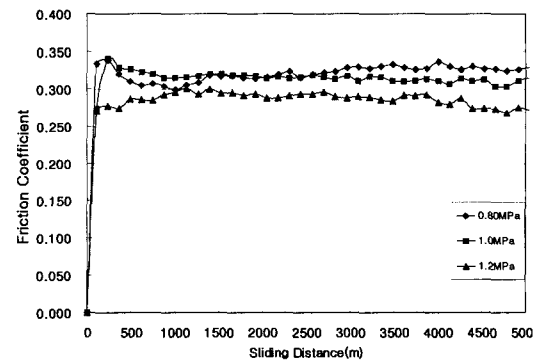
본 연구에서는 표면분석을 위하여 광학현미경과 표면분석장치를 사용하였다. 광학현미경은 Carl Zeiss의 Axiolab을 사용하였다. 표면분석장치는 EDX(Energy Dispersive X-ray Spectrometer)와 Sony Digital color video camera를 사용하였다.

2.5 실험 결과 분석

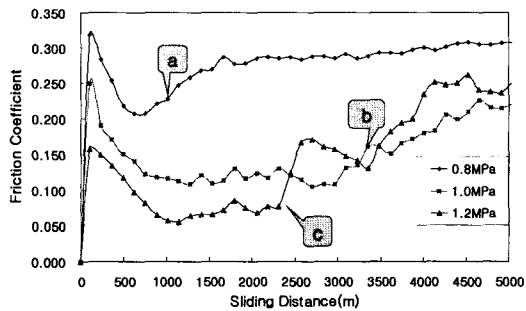
Fig. 5 - Fig. 7은 압착하중의 변화에 따른 시험 온도별 마찰계수 변화를 나타내고 있다.



(Fig. 5) Friction coefficient v.s. sliding distance for each normal load at 100°C.



(Fig. 6) Friction coefficient v.s. sliding distance for each normal load at 150°C.



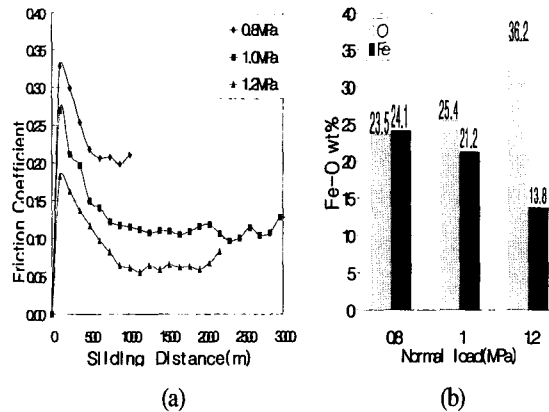
(Fig. 7) Friction coefficient v.s sliding distance for each normal load at 300°C.

Fig.5와 Fig.6에서 나타난 바와 같이 디스크 온도 100°C와 150°C에서는 압착하중의 증가에 따라서 마찰계수(μ)가 낮아지는 마찰의 일반적 경향을 따르며, 마찰계수가 0.3 ± 0.05 수준으로 가용범위 내에서 안정적인 값을 보여주고 있다⁽⁴⁾. 이런 경향은 압착하중의 증가에 따라 마찰면에서의 진실접촉면적이 증가하는 것에 기인한다. 즉, 100°C, 150°C의 경우 Fig. 8에서 보는바와 같이 마찰면에 잘 형성된 산화막으로 인하여 안정된 마찰계수를 보여주고 있으며, 마찰계수의 크기 또한 디스크 마찰재로서 적절한 값을 나타내고 있다.

한편 디스크 온도가 300°C일때 Fig. 7에 나타난 바와 같이 압착하중의 변화에 대하여 마찰계수가 크게 변화하고 있음을 보여주고 있다.



(Fig. 8) Worn surface of the test specimen at 1.2MPa, 150°C, 300rpm.



(Fig. 9) The weight percent of Fe-O on the worn surfaces at the lowest friction coefficient.

이와 같이 각 하중별 마찰계수의 변화가 급격하게 일어나는 원인을 분석하기 위하여 동일재질의 시편을 이용하여 Fig. 7에서 각 하중에 대한 마찰계수의 최저점에 해당하는 a,b,c지점까지 같은 시험조건으로 시험을 실시하였다. 그 결과 Fig. 9 (a)와 같이 각 압착하중에 따른 마찰계수 변화의 재현성을 확인할 수 있었으며, 이때의 마찰 표면의 상태를 알아보기 위하여 EDX 시험을 실시하였다. Fig. 9 (b)는 EDX 시험 결과 마찰 표면층에서의 산소(O)와 철(Fe)에 대한 분율(wt%)의 변화를 압착하중에 대하여 나타내고 있다. 표면층에 산소와 철의 분포가 시편 초기표면의 원소보다 높게 나타났으며, 산소(O)의 분율이 압착하중의 증가에 따라서 높아지고 있다. 이는 마찰면의 온도 변화가 산화막의 생성에 영향을 미치는 것으로 보여진다.

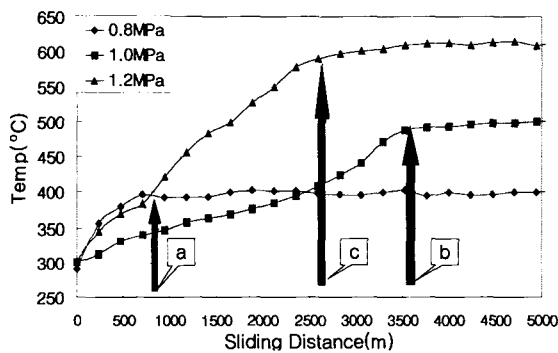
Fig. 10은 디스크 온도 300°C에서 각 하중별 패드 표면의 온도를 Fig. 3의 방법으로 측정된 결과를 나타내고 있다.

압착하중이 0.8MPa의 경우, 미끄럼 거리가 800m에 도달하는 동안(a점)온도가 급격히 상승하여 약400°C에 도달한다. 한편 압착하중이 1.0MPa일 때 3500m

(b점)까지 꾸준히 상승하여 패드 표면온도가 약500°C에, 그리고 1.2MPa일 때는 2600m(c점)에서 약600°C 이상 상승하였다.

Quinn에 의하면[5,6] 접촉면의 온도가 산화막의 생성에 미치는 영향을 발표한 바 있는데 300°C이하에서는 α -Fe₂O₃가 생성되고, 371°C~448°C사이에서는 Fe₃O₄가 그리고 580°C이상에서는 FeO가 생성됨을 밝힌 바 있다. a점에서는 온도가 상승함에 따라 α -Fe₂O₃가 마찰표면에 생성되어 윤활효과를 일으켜서 마찰계수가 급격히 떨어지는 것의 원인이 되었다.(Fig. 7.) 그리고 α -Fe₂O₃는 Fe₃O₄와 FeO에 비해 취성이 강하여 잘 떨어져나가 계면에서 구르면서 마찰계수가 안정되고 있다.

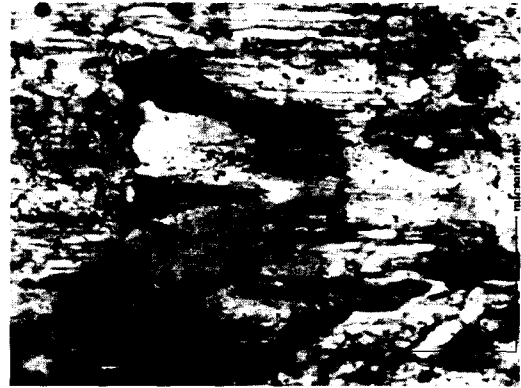
b점에서는 α -Fe₂O₃와 Fe₃O₄의 산화막이 생성되어 오랜 미끄럼거리 동안 낮은 마찰계수를 나타내고 있다. 또한 C점의 경우, 패드 표면의 온도가 상승하는 동안 FeO 산화막이 생성되어 낮은 마찰계수를 보이다가 산화막이 파괴되면서 불안정한 형태로 마찰계수가 상승하게 된다.



(Fig. 10) Surface temperature for each normal load at 300°C

Fig. 11은 디스크 온도300°C에서 1.2MPa의 하중으로 마찰계수의 최저점에 도달했을 때의 대표적인 표면을 나타낸 것이다. 마찰표면은 고온에 의해 약해진

결합력으로 인해 산화막의 파괴와 세라믹 성분의 입자가 떨어져 나가는 현상을 보여주고 있다. 이 단단한 마모입자(3-body)는 계면에서 많은 마모를 일으키는 원인을 제공하게 된다.



(Fig. 11) Worn surface of the test specimen at 1.2MPa, 300°C, 300rpm.

2-7 마모량

Fig. 12 - Fig. 14는 디스크의 회전속도가 300rpm일 때, 각 디스크의 온도에 대한 마모량을 나타내고 있다. 그 결과 100°C와 150°C에서의 마모량은 압착하중의 증가에 따라 마모량이 1500m까지는 선형적으로 증가하다가 그 이후에는 안정화되어가는 경향을 나타내었다. 이것은 마찰면의 산화막의 생성과 파괴가 적절히 반복됨으로써 마찰계수와 마모량이 일정하게 나타나는 것으로 보인다.

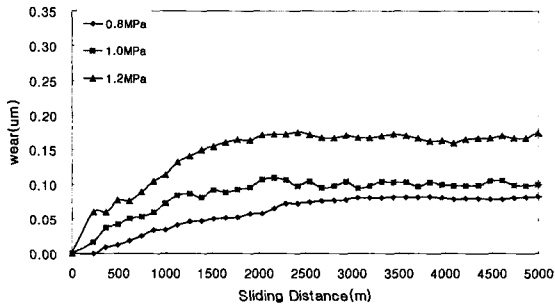
그러나 Fig. 14는 300°C에서 압착하중별 마모량의 변화가 급격히 증가하고 있음을 보여주고 있다. 이러한 현상은 마찰계수의 변화를 나타낸 Fig. 7의 결과와 잘 일치하고 있다. 즉 Fig. 7에서 압착하중 0.8MPa의 경우는 약 1000m, 1.0MPa 및 1.2MPa의 경우는 3000m까지 산화막이 형성되어 마찰계수가 대단히 낮게 나타났는데 그 결과 산화막의 마찰 표면에 대

한 윤활효과로 인하여 마모량의 증가가 매우 낮게 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 미끄럼거리 3000m이 후부터 마찰계수가 급격히 증가하는 것과 함께 Fig. 14에서도 마모량이 급격히 증가하고 있음을 알 수 있다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 마찰열에 의하여 마찰

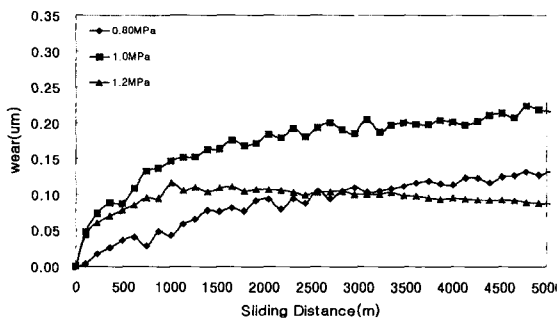
재 표면의 일부 성분이 용융되면서 결합제(Resin)의 분해와 함께 산화막의 파괴가 심해지고 이로 인해 마모량이 급격히 증가한다는 것을 입증한 것이다.

3. 결 론

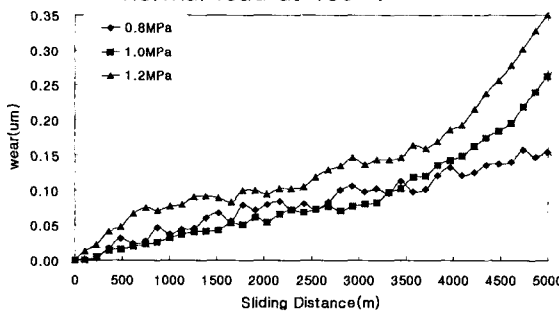
기동장비에 사용되는 유기질 마찰재의 고온 특성을 Pin-on-Disk형 마모시험기를 이용한 실험을 통하여 분석하였다. 시험조건은 미끄럼 선속도를 4.7 m/s로, 하중을 0.8, 1.0, 1.2MPa로 증가시키면서 고온 특성을 알아보기 위하여 디스크의 온도를 100 °C와 150 °C 및 300 °C로 변화시켰다. 이상의 시험 조건을 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.



(Fig. 12) Wear v.s. sliding distance for each normal load at 100°C.



(Fig. 13) Wear v.s. sliding distance for each normal load at 150°C.



(Fig. 14) Wear v.s. sliding distance for each normal load at 300°C.

1. 디스크의 온도가 100°C와 150°C일 때, 마찰계수는 약 0.3이상을 유지하며 안정적인 가용범위내에 있음을 보여주었다.
2. 디스크의 온도가 상승함에 따라 마찰계수가 증가하였으며, 300 °C의 경우 마찰계수의 급격한 변화를 나타냈다. 이는 마찰면의 온도가 상승함에 따라 마찰재 표면에서 생성된 산화막의 영향에 기인한 것이다.
3. 디스크의 온도가 100 °C와 150 °C 인 경우 미끄럼 거리가 증가함에 따라 마모량이 선형적으로 증가하였다. 그러나 디스크의 온도가 300 °C인 경우에는 일정 미끄럼 거리 이상에서는 마모량이 급격히 증가하는 현상을 나타냈다. 이러한 현상은 마찰면의 온도 상승에 기인하며, 마찰계수의 급격한 변화현상과 매우 잘 일치하고 있음을 확인하였다.
4. 마찰면의 조건이 가혹해짐에 따라 마찰재 표면에 열 균열 현상이 발생하였다. 이러한 현상은 마찰조절제로 쓰이는 세라믹 입자의 계면을 따라 발생하였으며, 이는 마찰면의 온도가 상승함

에 따라 마찰재 성분의 결합제로 사용되는 페놀계 레진이 분해되기 때문이다.

참 고 문 헌

1. R. G. McLellan, "Requirements of friction materials in commercial vehicle disk brake applications", C451, IMechE, 1988.
2. 장 호, "자동차 제동시 나타나는 마찰재의 마찰 특성에 관한 연구," 한국윤활학회지, Vol.13, No.1, pp. 34-41, 1997.
3. 정동윤, "Statistical analysis for the effects of compositions on the braking parameters". 한국자동차공학회 추계학술 대회, 1992.
4. 한국 산업 규격(KS R 4024), "brake linings and pads for automobiles" pp.2-3.
5. T.F.J Quinn, "Review of Oxidational wear ;Part I and II: The origins of Oxidational wear", Tribology International, Vol.16. pp. 257-271 (part I)/pp. 305-315(part II), 1983.
6. T.F.J Quinn and W. O. Winer, "The thermal aspects of Oxidational wear", Wear Vol.102, pp. 67-80, 1985.
7. T.F.J. Quinn, Physical analysis for tribology, Cambridge. pp. 301-306, 1991.