

흑연과 지르콘의 상대적 함량에 따른 마찰재의 고온 마찰 및 마모특성

김성진 · 장 호

고려대학교 재료금속공학부

High Temperature Friction and Wear of Friction Material; The Effect of the Relative Amount of Graphite and Zirconium Silicate ($ZrSiO_4$)

Seong Jin Kim and Ho Jang

Division of Materials Science and Engineering, Korea University

Abstract – Tribological behavior of novolac resin-based friction materials with three different relative amounts of graphite and zirconium silicate was investigated by using a pad-on-disk type friction tester. The goal of this paper is to examine the effects of the relative amount of a lubricant and an abrasive in the automotive friction material on friction and wear characteristics at elevated temperature. Friction and wear of friction materials were affected by the existence of transfer film(3rd body layer) at friction interface and the composition of friction material, especially lubricant amount. The friction material with higher content of graphite indicated homogenized and durable transfer film, and resulted in stable friction coefficient regardless of the increase in friction heat. The experimental result also showed that the higher concentration of $ZrSiO_4$ in friction material aggravated friction stability and wear resistance due to the higher friction heat generated at friction interface during high temperature friction test.

Key words – graphite, zirconium silicate ($ZrSiO_4$), friction stability, transfer film, friction oscillation, specific wear rate.

1. 서 론

현재 개발되고 있는 자동차 브레이크용 마찰재는 안전한 제동성능과 더불어 제동시 안락한 승차감이 요구되고 있다. 다양한 제동상황에서 마찰계수의 안정성 및 내구성 그리고 내마모성을 향상시키기 위해서는 마찰재에 첨가되는 구성원료의 종류와 조성에 대한 정확한 이해가 필요하며 혼합된 복합재료의 제동성능과 연계하여 마찰특성을 고찰해야 한다.

자동차 브레이크용 마찰재에 첨가되는 흑연(graphite)과 지르콘($ZrSiO_4$)은 대표적인 윤활제(lubricant)와 연마제(abrasive)로서 서로 상반된 마찰 및 마모특성을 지니고 있으며 마찰계수의 수준을 조절하는 역할을 한다. 일반적으로 마찰재에 첨가되는 고체윤활제로는

graphite, MoS_2 , Sb_2S_3 , ZnS 등이 있으며, 연마제는 $ZrSiO_4$, Al_2O_3 , SiO_2 , quartz 등이 사용되고 있다[1]. 고체윤활제는 제동시 상대재와 마찰재의 마찰표면에 윤활막(transfer film)을 형성시키는 원료로서 안정된 마찰력을 유지시키며 고온 제동특성을 향상시키는 역할을 한다. 특히, 흑연은 고체윤활제로서 가장 빈번히 사용되며, 윤활기구는 분자간 결합구조에 기인한다. 흑연은 MoS_2 와 마찬가지로 층상(lamellar layer)구조를 지니고 있으며 층간에는 분자간의 결합력이 약한 Van der Waals 결합을 이루고 있다. 이러한 층간의 약한 결합은 작은 전단력(shear force)에 의해서도 쉽게 층간 미끄럼을 초래하여 윤활특성을 나타내는 것으로 알려져 있다[2-4]. 마찰재에 첨가되는 흑연으로는 natural flake, synthetic granular, amorphous 형태가

주로 사용되고 있다.

연마제는 마찰계수를 증가시키거나 변성된 윤활막을 제거하는 목적으로 첨가되며 미세하고(1~75 μm) 견고한(6~10 mohs) 분말형태의 소재를 사용한다. 연마제로 첨가되는 지르콘은 정방(tetragonal)구조로서 ZrO_2 , SiO_2 , Fe_2O_3 , TiO_2 등의 화학조성으로 구성되어 있으며, 높은 용점(mp. 2250°C)을 나타내므로 고온에서 쉽게 분해되지 않는 특성을 지니고 있다[5]. 마찰재에 사용되는 지르콘은 flour(평균입자크기: 1~10 μm)와 sand(평균입자크기>150 μm) 형태로 구분되며 마찰특성을 고려하여 종류와 함량을 결정하고 있다. 특히, 연마제는 입도크기와 형상에 따라 마찰특성에 상당한 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며[6], 일반적으로 같은 함량의 연마제를 사용하였을 때 입도크기가 클수록 마찰계수가 증가한다고 보고되고 있다[5].

이와 같이 마찰재에 사용되는 고체윤활제와 연마제는 마찰특성에 지대한 영향을 미치는 원료이므로 제동성능을 향상시키기 위해서는 상대적인 함량에 따른 마찰 및 마모특성에 관한 연구가 수반되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 현재 상용 마찰재에 가장 많이 적용되고 있는 흑연과 지르콘의 상대적 함량에 따른 마찰계수의 안정성 및 마찰력에 의한 떨림현상(friction oscillation)과 마모율에 관하여 고찰하였다.

2. 실험방법

본 실험의 마찰재는 페놀수지(straight novolac resin), 아라미드 섬유(Kevlar® #979), 티탄산칼륨 섬유(Tismo-D), 황산바륨을 기본으로 고체윤활제로는 합성흑연(SGS 3083, 평균입자경: 200 μm), 그리고 연마제로는 분말 지르콘(A-PAX-45M, 평균입자경: 1 μm)을 혼합하여 제조하였다. 고체윤활제와 연마제의 상대적

Table 1. The ingredients of simplified friction materials used in this work [vol%]

Raw materials	L7A3	L5A5	L3A7
Phenolic resin	20	20	20
Aramid pulp	10	10	10
Potassium titanate($\text{K}_2\text{O}6\text{TiO}_2$)	20	20	20
Barite(BaSO_4)	40	40	40
Graphite	7	5	3
Zirconium silicate(ZrSiO_4)	3	5	7
Rockwell hardness, HRS	64.4±2.7	70.4±2.6	70.5±3.1

함량에 따른 마찰 및 마모특성을 고찰하기 위해 흑연과 지르콘의 부피분율을 각각 7:3, 5:5, 3:7로 변화시켜 제조하였다(Table 1). 실험에서 사용된 마찰재는 5분 동안 원료혼합 후에 100°C의 온도와 150 kgf/cm²의 저압으로 1분간 예비성형을 시행하였으며 본성형은 160°C의 온도와 350 kgf/cm²의 고압으로 10분간 열성형을 하였다. 본성형을 마친 시편은 200°C의 온도에서 6시간 동안 열처리(curing)를 통해 완성되었다. 제조공정을 마친 마찰재의 경도는 Rockwell 경도기(Akashi® Rockwell ARK-600)를 이용하여 HRS 규격으로 측정하였다. 마찰시험기에 장착되는 시편의 크기는 20×20×8 mm이며, 상대재는 상용 회주철의 로터를 용융하여 12 cm의 직경과 2.5 cm의 두께로 제작하였다.

본 연구에서 마찰 및 마모시험은 pad-on-disk 형태의 정속 마찰시험기를 이용하여 시행되었으며 시험기의 개략도는 앞서 발표한 바 있다[7]. 시험중의 마찰력, 가압력, 디스크 온도, 회전속도는 PC-based DAQ(LAB-PC-1200, NI)시스템을 이용하여 100 Hz의 데이터 처리속도로 저장하였다. 마찰시험은 고온에서의 마찰 및 마모특성을 고찰하기 위해 각각 100, 200, 300°C의 초기 제동온도에서 시행되었으며 구체적인

Table 2. Friction and wear test procedure used in this study

Constant initial temperature test(CITT) IBT(initial brake temperature): 100, 200, 300°C, Applied normal load: 1 MPa, Sliding velocity: 4 m/s(848 rpm), Duration: 60 sec, Number of application: 10
Constant interval test(CINT) IBT: 100°C, Applied normal load: 1 MPa, Sliding velocity: 4 m/s(848 rpm), Duration: 20 sec, Interval: 10 sec, Number of application: 25
Drag test IBT: 100°C, Applied normal load: 1 MPa, Sliding velocity: 4 m/s(848 rpm), Duration: 400 sec
Wear test IBT: 100°C, Applied normal load: 1 MPa, Sliding velocity: 5 m/s(1059 rpm), Total sliding distance: 4000 m

시험조건은 Table 2에 나타내었다. 마찰시험후 마찰재의 표면형상(surface topography)은 SEM(JEOL JSM 5310LV)을 이용하여 분석하였으며, 상대재의 마찰표면은 digital still camera(SONY DSC-F505)를 이용하여 관찰하였다. 마찰시험시 회전하는 상대재의 온도 변화는 적외선 온도측정기(infrared heat tracer, 3M IR-16)를 사용하여 측정하였으며, 마찰력의 크기(진폭)에 따른 떨림현상은 가속도기(Lucas-Schaevitz S05E)를 이용하여 가속도의 변화량을 측정하였다. 마찰재의 열분해 특성은 열분석기(Netzsch STA 409EA)를 이용하여 분당 10°C의 온도 상승률로 1200°C까지 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 마찰계수의 거동

Constant initial temperature test(이하 CITT)와 constant interval test(이하 CINT)를 이용하여 흑연과 지르콘의 상대적 함량에 따른 마찰계수의 변화를 고찰하였다. CITT 방법은 일정한 초기 온도에서 반복적인 마찰시험을 시행함으로써 평지에서 나타나는 제동특성을 분석하기 위한 경우이고, CINT 방법은 내리막길에서 지속적인 제동을 할 경우의 제동특성을 분석하기 위한 시험방법이다. 초기 제동온도를 100, 200, 300°C로 고정하여 CITT 조건으로 시험한 마찰계수의 변화 및 마찰계수의 표준편차 그리고 최대 마찰온도를 Fig. 1(a)에 나타내었다. 흑연과 지르콘의 상대적인 함량에 따른 마찰계수의 거동은 초기 제동온도가 증가함에 따라 증가하였다가 감소하는 경향을 보여주었다. 200°C의 초기 제동온도에서 나타난 마찰계수의 증가는 고온(200°C 이상)에서 형성되는 탄화숯(carbonaceous char)에 의한 강한 응착(adhesion)의 결과로 평가된다. 제동시 페놀수지로부터 형성되는 탄화숯은 마찰계면에 도포되어 윤활막을 유지시킴으로써 열분해되기 전까지는 고온에서 강한 응집력(cohesive force)을 나타내는 것으로 알려져 있다 [9]. 300°C의 초기 제동온도의 경우 지르콘의 함량이 상대적으로 많은 시편 L3A7은 초기 제동온도와 무관하게 비교적 일정한 마찰계수의 수준을 유지한 반면에 흑연의 함량이 상대적으로 많거나 동일한 시편은 300°C의 초기 제동온도에서 마찰계수의 감소현상이 심하게 나타났다. 일반적으로 마찰시 온도상승에 따른 마찰계수의 감소현상(brake fade)은 제동력의 상

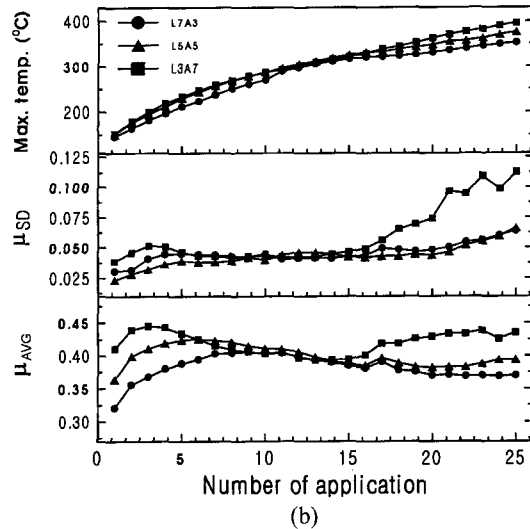
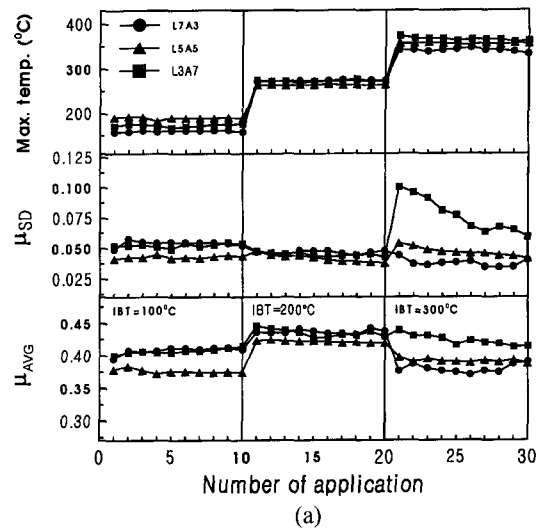


Fig. 1. Change of average friction coefficient, standard deviation of μ , and maximum disk temperature during (a) constant initial temperature test and (b) constant interval test.

실을 의미하며, 이러한 현상은 주로 결합제로 사용되는 페놀수지와 유기물의 열분해에 기인하는 것으로 알려져 있다 [8]. 초기 제동온도에 따라 평균 마찰계수가 변하는 것은 마찰계면에 형성되는 윤활막이 온도범위에 따라 서로 다른 마찰특성을 나타내기 때문이라고 추정된다. 시편 L3A7의 경우 300°C의 초기 제동온도에서 마찰력을 유지하는 것은 여분의 연마제가 고온에서 열분해되지 않고 마찰계면에 존재함으로써 지속적인 연마효과를 나타낸 것으로 평가

된다. 그러나 이러한 연마효과는 Fig. 1(a)에서 볼 수 있듯이 고온(300°C)의 초기 제동온도에서 마찰계수의 감소현상을 나타내지 않았지만 마찰력의 진폭을 증가시켜 마찰계수의 표준편차가 급격히 증가됨을 알 수 있었다. 일정한 가압력에서 마찰계수의 변화가 증가하는 경우는 마찰력의 차이가 크게 변하고 있음을 나타내며 이는 제동시 떨림현상으로 전가할 수 있는 가능성을 제시하는 것이다.

CITT 시험방법과 달리 CINT 시험은 일정한 시간 간격으로 연속적인 마찰시험을 시행함으로써 지속적인 온도상승에 따른 마찰계수의 변화를 고찰할 수 있다. 100°C의 초기 제동온도에서 CINT 시험조건으로 분석한 마찰계수의 분포를 Fig. 1(b)에 나타내었다. 마찰온도가 상승함에 따라 열적연화(thermal softening)에 의한 응착력의 증가로 인해 마찰계수가 증가하였으며, 마찰온도가 300°C 이상으로 증가하였을 경우 시편 L3A7은 다른 시편들과 달리 일정한 마찰계수의 분포를 나타내지 않고 오히려 마찰계수가 증가하는 anti-fading 현상과 더불어 마찰계수의 표준편차도 크게 증가하였다. 실제로 윤활막이 형성된 후 온도상승에 따른 마찰계수의 거동은 마찰재를 구성하는 원료의 열적 특성이 아닌 마찰계면에 형성되는 윤활막의 분포와 특성에 기인한다. 시편의 열분해 특성을 고찰해 보면 800°C 무렵에서 열분해를 시작하는 흑연의 함량이 많을수록 열분해량이 증가함을 알 수 있었다(Fig. 2). 그러나 열분해 특성과 반대로 고온에서 불안정한 마찰계수의 거동을 나타낸

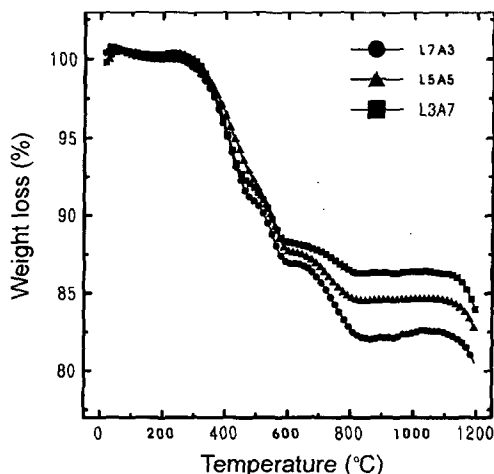


Fig. 2. Weight loss from thermogravimetric analysis (TGA) at 10°C of heating rate up to 1200°C.

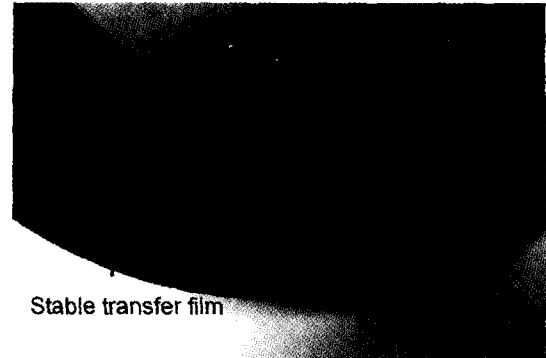


Fig. 3. Rubbing surfaces of counter part for specimen L3A7 after friction test: a photograph showing non-uniform transfer film.

것은 300°C까지 유지되었던 균일한 윤활막이 300°C 이상의 마찰열로 인해 약화되거나 분열됨으로써 일정한 마찰력을 상실한 것으로 추정된다.

마찰시험중 나타난 마찰특성과 마찰계면에 존재하는 윤활막 형태와의 연관성을 고찰하기 위해 마찰시험후 마찰재와 상대재의 마찰표면을 관찰하였다. Fig. 3는 고온에서 불규칙한 마찰계수의 분포를 나타낸 시편 L3A7의 상대재의 표면형상을 나타낸 것이다. 연마재의 함량이 많은 시편 L3A7을 사용한 경우 회주철 상대재의 마찰표면에 손상된 윤활막이 부분적으로 관찰되었다. 균일한 부분은 윤활막이 일정하게 도포되어 있었으나 손상된 부분은 연마효과에 의해 윤활막이 분열된 상태를 볼 수 있었다.

윤활막의 차이는 마찰재의 마찰표면에서도 관찰할 수 있었다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 상대적으로 윤활제의 함량이 많은 시편 L7A3의 경우 마찰표면이 분리되지 않고 균일한 윤활막이 유지되어 있었으나 시편 L3A7은 마찰표면이 크게 손상되어 있었으며 윤활막이 서로 분리되어 있었다. 마찰재의 표면에 불균일한 윤활막이 형성되는 것은 윤활제의 부족과 연마효과의 증가로 인해 마찰열이 상승됨으로써 윤활막이 열분해되었기 때문으로 사료된다. 이러한 불균일한 윤활막은 마찰력의 차이를 유발시킴으로써 judder와 같은 떨림현상의 원인이 될 수 있다. 이와 같이 마찰계수의 안정성은 마찰계면에 형성되는 윤활막과 밀접한 관계를 가지며, 상대적으로 윤활제의 함량이 적은 경우 안정된 윤활막의 형성이 저해되고 이로 인해 연마재에 의한 연마효과가 증가됨으로써 마찰열의 상승을 가속시키는 것으로 평가된다.

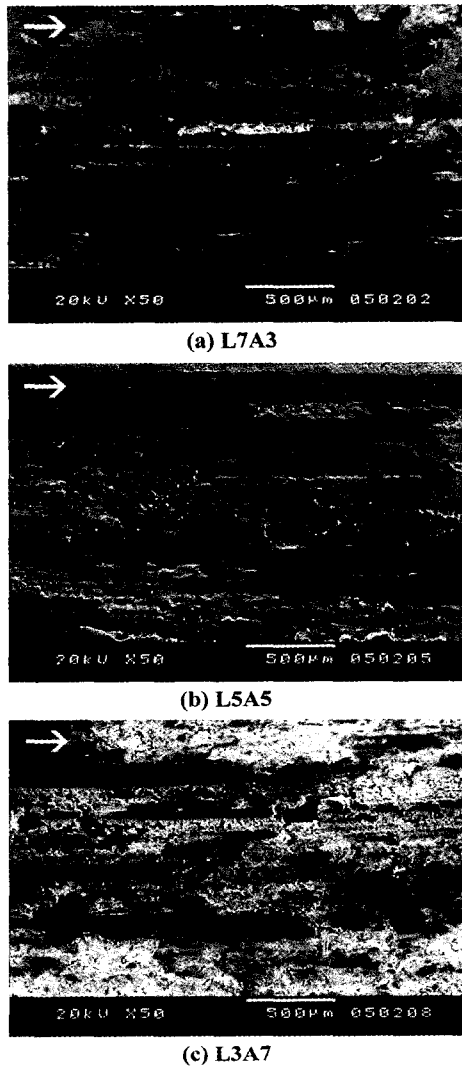


Fig. 4. Worn surfaces showing a morphology of the transfer film on the friction materials after friction test. Arrows indicate sliding direction.

3-2. 마찰력의 변화량

마찰력의 변화량(진폭)은 일정한 가압력 상태에서 마찰재와 상대재의 마찰을 통한 지속적인 끌기시험으로 분석할 수 있다. 본 연구에서는 PV factor를 4 MPam/s로 고정하였으며 시험 장작부분에 가속도기를 설치하여 마찰력과 가속도(감속도)의 변화량을 함께 측정하였다. 마찰시험시 마찰력의 크기는 미끄럼 시간에 따라 증가하거나 감소하지만 가속도의 변화는 기준축을 중심으로 변위의 차이를 나타내므로 마찰력의 크기를 객관적으로 측정할 수 있는 장점이

있다.

Fig. 5은 300°C의 초기 제동온도에서 CITT 시험방법으로 측정한 마찰력과 가속도의 변화량을 나타낸 것이다. 시험 L3A7은 다른 시험과 달리 마찰력의 진폭이 크게 증가하였으며 이와 함께 가속도의 변화도 증폭되고 있음을 알 수 있었다. Fig. 6(a)에 나타낸 바와 같이 마찰력의 진폭이 커질수록 가속도의 변화는 증가하였으며, 단시간 동안 마찰력과 가속도의 변화[Fig. 6(b)]도 일정한 형태의 주기를 나타내었다. 가속도의 크기(진폭)가 증가하는 것은 마찰력이 크게 변하고 있음을 나타내며 이는 자체 떨림현상이 가중되고 있음을 의미한다. 마찰력의 진폭이 증가하는 현상은 크게 2가지로 분류할 수 있다. 우선 상대재의 표면상태로부터 기인되는 DTV(disk thickness variation), run out, 표면거칠기 등의 편차에 따른 마찰력의 불안정성을 설명할 수 있고, 다른 한가지는 마찰재의 열적효과에 의한 마찰계면의 불안정성을 들 수 있다[10]. 본 실험은 윤활제의 상대적인 부재로 인해 고온에서 균일한 윤활막을 유지하지 못한 결과로서 후자의 경우로 평가되지만 초기의 표면거칠기를 일정하게 연마하더라도 마찰시험중 연마효과에 의한 표면거칠기에 따른 영향도 마찰력의 진폭을 증가시킨 것으로 사료된다.

Fig. 7은 100°C의 초기 제동온도에서 400초 동안 끌기시험을 통해 나타난 마찰력과 온도의 변화를 보여주고 있다. 윤활제의 함량이 적은 시험 L3A7은 300°C 무렵부터 불안정한 마찰력의 증가현상을 나타내었지만 윤활제의 함량이 상대적으로 많거나 동일한 시험들은 약 340°C까지 일정한 마찰력의 분포를 보여주었다. 이러한 현상은 마찰계면에 형성된 윤활막의 마찰특성에 의한 결과로서 윤활제가 윤활막에 보충됨으로써 마찰열의 상승에도 불구하고 더 높은 온도까지 마찰력을 유지하는 것으로 평가된다. CITT와 CINT 시험에서도 볼 수 있듯이 연마제는 마찰계수의 수준을 유지하는데 도움을 주었지만 상대적으로 윤활제보다 함량이 많아질 경우 고온 제동시 마찰계면에서 연마효과를 증폭시킴으로써 마찰력의 진폭을 증가시키는 것으로 추정된다.

3-3. 마모율

마찰재의 마모특성은 미끄럼거리, 마찰열, 마찰력의 크기, 열영향 마찰층(frictional heat-affected layer)의 내구성 등에 영향을 받으며, 특히 윤활막 및 열

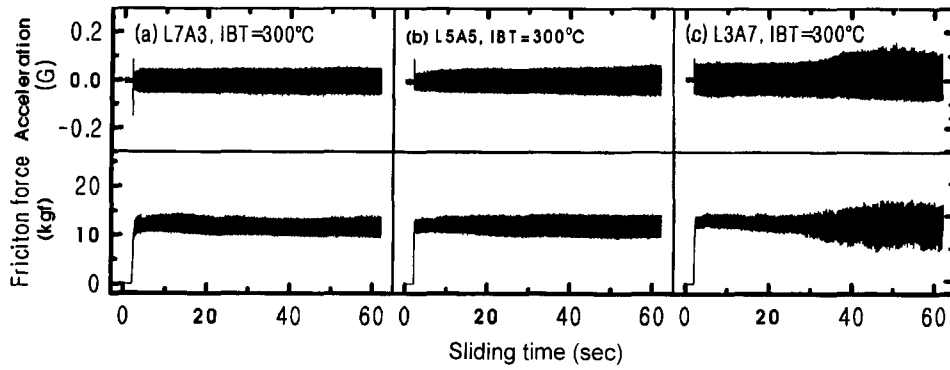


Fig. 5. Variations of friction force and acceleration (or deceleration) at initial brake temperature (IBT) of 300°C during a constant temperature test.

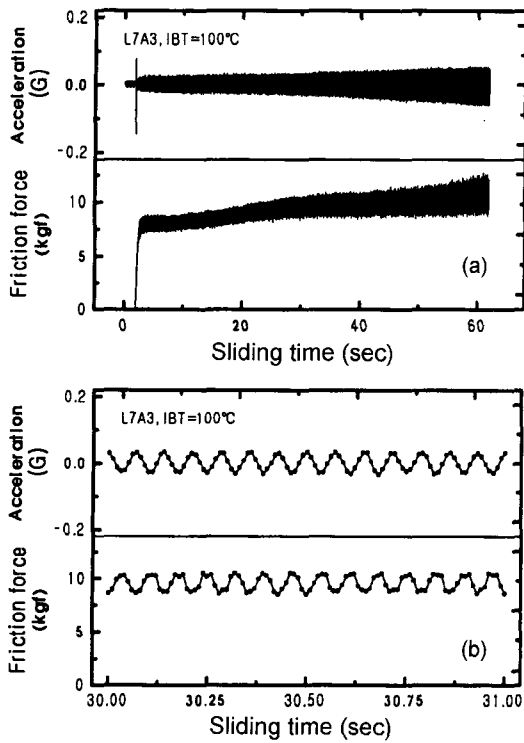


Fig. 6. Variations of friction force and acceleration for (a) 60 seconds and (b) 1 second during constant temperature test (IBT = 100°C).

영향 마찰층의 강도와 밀접한 관계를 가지고 있다. 윤활제와 연마제의 상대적 함량에 따른 마모량을 분석하기 위해 500 m의 미끄럼거리마다 시편의 두께를 측정하였으며, 마모시험중 가해진 에너지를 고려하여 마찰재의 비마모율(specific wear rate, W_s)

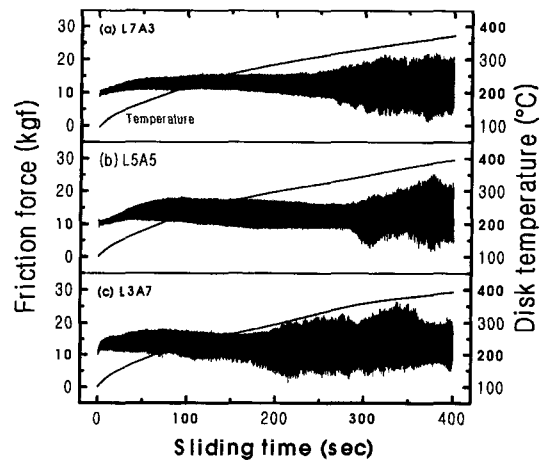


Fig. 7. Friction oscillations and change of disk temperature during drag test for specimen L7A3, L5A5, and L3A7.

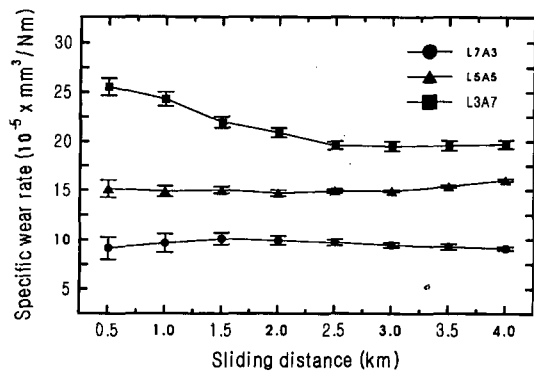


Fig. 8. Variations of the specific wear rate as a function of sliding distance for specimen L7A3, L5A5, and L3A7.

을 계산하였다(Fig. 8). 마모율의 계산식은 다음과 같다 [11].

$$W_v = \frac{\Delta V}{LS} [\text{mm}^3/\text{Nm}] \quad (1)$$

여기서 ΔV 는 체적마모량(volume loss, mm^3)이며, L 과 S 는 각각 작용하중(applied normal load, N)과 미끄럼거리(m)이다.

연마제의 함량이 많을수록 마찰재의 마모율은 증가하였으며 미끄럼거리에 따른 마모율은 흑연과 지르콘의 상대적인 함량에 따라 일정한 차이를 나타내었다. 이러한 현상은 마찰시험에서도 볼 수 있듯이 마찰열이 상승하면서 시편 L3A7의 윤활막은 쉽게 분해되고 연마제의 연삭마모(abrasive wear) 현상이 가중되기 때문에 마모량이 증가한 것으로 평가된다. 또한 시편 L7A3과 L5A5의 경우 미끄럼거리의 증가에 따라 비교적 일정한 마모율의 변화를 나타낸 반면에 시편 L3A7은 초기에 점차적으로 마모율이 감소하다가 2.5 km 이상의 미끄럼거리부터 일정한 수치로 접근함을 알 수 있었다. 마모율이 소폭으로 감소하는 현상은 마찰계면에서의 연마입자들이 초기에는 two-body와 three-body의 연삭마모[12-14]를 일으키다가 마찰시험이 진행되면서 이착된 연마입자들이 다시 마찰재의 표면에 삽입(embed)됨으로써 three-body 연삭마모 현상이 감소되어 나타난 결과로 추정된다[15].

4. 결 론

Pad-on-disk 형태의 마찰시험기를 이용하여 흑연과 지르콘의 상대적인 함량에 따른 고온 마찰 및 마모특성을 고찰하였다. 자동차용 마찰재는 윤활제와 연마제의 상대적인 조성에 따라 마찰력의 차이를 나타내었으며, 이러한 마찰력의 진폭은 제동시 떨림현상과 밀접한 관계를 가지고 있었다. 또한 제동시 상대재와 마찰재의 표면에 형성되는 윤활막의 분포와 특성에 따라 마찰계수의 안정성이 결정되었으며 균일하고 강한 윤활막을 형성할수록 마찰력의 안정성이 향상되어 일정한 수준의 마찰계수를 유지하였다. 특히, 연마제의 함량이 상대적으로 많을 경우 고온 제동시 마찰계수의 수준을 유지하는데 도움을 주었지만 마찰계면에서 연삭마모를 유발시킴으로써 마찰열의 상승과 윤활막의 분열을 가중시켜

불안정한 마찰계수의 분포와 높은 마모율을 나타내었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(과제번호: 98-0200-02-01-3) 지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. H. Jang, J.J. Lee, S.J. Kim and K.Y. Jung, "The Effect of Solid Lubricants on Friction Characteristics," SAE Transactions 982235, pp.1-8, 1998.
2. F.P. Bowden and D. Tabor, "The Friction and Lubrication of Solids-Part II," Chap.11, pp.186-204, Oxford Univ. Press, London, 1964.
3. L.C. Lipp, "Solid Lubricants-Their Advantages and Limitations," ASLE Lubrication Engineering, Vol.32, No.11, pp.574-584, 1975.
4. R. Holinski and J. Gansheimer, "A Study of the Lubricating Mechanism of Molybdenum Disulfide," Wear, Vol.19, pp.329-342, 1972.
5. K. Friedrich, "Advanced in Composite Tribology," Composite Materials Series, 8, Chap.16, pp.613-626, Elsevier, Amsterdam, 1993.
6. W. Simm and S. Freti, "Abrasive Wear of Multiphase Materials," Wear, Vol.129, pp.105-121, 1989.
7. S.J. Kim and H. Jang, "Friction and Wear of Friction Materials Containing Two Different Phenolic Resins Reinforced with Aramid Pulp," Tribology International, Vol.33, No.7, pp.477-484, 2000.
8. H. Jang and S.J. Kim, "The Effects of Antimony Trisulfide(Sb_2S_3) and Zirconium Silicate(ZrSiO_4) in the Automotive Brake Friction Material on Friction Characteristics," Wear, Vol.239, No.2, pp.229-236, 2000.
9. M.G. Jacko, P.H.S. Tsang and S.K. Rhee, "Wear Debris Compaction and Friction Film Formation of Polymer Composites," Wear, Vol.133, pp.23-38, 1989.
10. 장 호, "자동차 제동시 나타나는 마찰특성에 관한 연구 I," 한국윤활학회지, 제13권, 제1호, pp.34-41, 1997.
11. C. Lhymn and R. Light, "Effect of Sliding Velocity on Wear Rate of Fibrous Polymer Composites," Wear, Vol.116, pp.343-359, 1987.
12. E. Rabinowicz, "Friction and Wear of Materials," Chap.7, pp.191-209, JOHN WILEY & SONS, New York, 1995.
13. K.C. Ludema, "Friction, Wear, Lubrication," Chap.8, pp.149-151, CRC Press, Boca Raton, 1996.
14. D.H. Buckley, "Surface Effects in Adhesion, Fric-

- tion, Wear, and Lubrication," Tribology Series, 5, Chap.7, pp.469-472, Elsevier, Amsterdam, 1981.
15. R.I. Trezona, D.N.Allsopp and I.M. Hutchings, "Transitions between Two-body and Three-body Abrasive Wear: Influence of Test Conditions in the Microscale Abrasive Wear Test," Wear, Vol.225-229, pp. 205-214, 1999.