

# Brake Pad용 청동기지 복합재료의 마찰·마모특성에 관한 연구 ( I )

송 건, 허부영\*, 황순홍\*, 공호성\*\*, 최용수\*\*, 정동윤\*\*\*

수원전문대학 금형설계과

\* 고려대학교 금속공학과

\*\* 한국과학기술연구원 Tribology Lab

\*\*\* 육군사관학교 기계공학과

## 1.서론

일반적으로 마모시험의 목적은 재료의 내마모성을 평가하는데 있다고 할 수 있다. 그러나 마모 시험의 결과는 재료의 성질에만 연관된 재료 고유의 성질이 아니기 때문에 시험기의 형상과 시험편의 접촉모드, 시험분위기 등의 재료외적인 인자들에 의해 상당히 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 따라서 재료의 내마모성을 평가하기 위해서는 그 재료가 쓰이고 있는 실제 상황에서 시험을 하는 것이 가장 좋을 것이지만 실제 상황에서 시험을 하기가 어려운 경우가 대부분이므로 모사시험의 방법이 많이 이용되고 있다. 그러나 모사시험의 경우에는 시험결과와 신뢰성이 매우 중요한 요소가 되며 이러한 신뢰성의 구축이 실험결과 못지않게 중요하다고 할 수 있다. 하지만 현재의 마모시험 데이터는 대부분 특정 연구실에서 특정 시험기로 평가한 것이 주류를 이루고 있어 위의 요구사항을 충족시키지 못하는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 마모데이터의 신뢰성을 보장하고, 마모시험의 표준화에 도움이 되고자 마모에 관심이 있는 연구자들이 그룹을 이루어 공동연구를 실시하였다.

연구에 사용된 재료는 고속전철용 브레이크재료가 연구가 활발히 진행되고 있는 분말야금법으로 제조된 청동기지 복합재료를 사용하였는데 이는 청동기지 복합재료가 제동마찰력이 크고 표면온도가 높아지는 고속전철의 브레이크 시스템에 사용되는 재료가 갖추어야 할 우수한 마찰 특성, 온도방열성, 표면순응성 및 내마모성 등이 우수하기 때문이다.

## 2. 실험방법

### 2-1. 시편의 제조

복합재료의 금속기지는로 합금자체가 내마모성이 우수한 Cu-10wt%Sn-10wt%Fe인 조성이 되도록 하였다. 이 금속기지에 마찰조정제로 Mo를 무게비율로 0%, 5%, 10%를 첨가하였고, 마찰조정제 및 내마모제로 SiO<sub>2</sub>를 입자 및 화이버의 형태로 각각 0%, 5%, 10%를 부피분율로 첨가하였으며, 흑연의 경우도 부피분율로 0%, 5%, 10%씩을 첨가하였다. 시편의 제조에 사용된 분말의 형상 및 입도는 표1에 나타난 바와 같으며 유리섬유의 경우 직경 6 $\mu$ m, 길이 3000 $\mu$ m인 제품을 사용하였다. 원료분말의 고른 혼합을 위하여 볼밀을 이용하여 기계적인 혼합을 행하였고, 이 혼합체를 유압프레스를 이용하여 8ton/Cm<sup>2</sup>의 압력으로 성형하였다. 성형된 시편은 평형상태도상의 상평형조건을 충족시키고, 고상확산에 필요한 시간을 부여하기 위하여 수평로에서 2.7°C/min의 승온속도로 가열하여 845°C가 되게 한 후 60분간 상압소결하였다. 이 때 소결분위기를 환원성으로 유지시키기 위하여 수소가스를 2.5l/min의 유속으로 흘려주면서 소결을 하였다.

Table 1. Characteristics of used powders.

	Cu	Fe	Sn	Mo	SiO <sub>2</sub> (f)	SiO <sub>2</sub> (p)	Graphite
Melting Temp.(°C)	1083	1536	231.9	2610	1720	1720	3727
Size of Powder	under 325mesh	under 325mesh	under 325mesh	under 400mesh	φ 6 $\mu$ m x L 3000 $\mu$ m	under 400mesh	60-70 $\mu$ m
Shape of Powder	sponge	particle	spherical	shperical	fiber	particle	plate

### 2-2. 마모시험

본 연구에서는 마모시험기에 따른 시험결과를 비교하여 마모시험 결과의 신뢰성구축과 마모시험방법의 표준화를 위한 기초자료를 도출하는데 목적이 있으므로, 마모시험은 각각의 공동연구자들이 보유하고 있는 pin-on-disc type의 마모시험기를 이용하였으며, 그들의 제원은 표2에 나타난 바와 같다. 마모시험의 조건은 상온 무윤활상태에서 미끄럼 속도를 1m/sec., 마찰거리를 1000m, 마모하중을 14N으로 일정하게 하였으며, 특별히 다른 조건에서 시험된 경우는 그 조건을 따로 기술하였다. 마모시편은 지름 6mm, 높이 10mm가 되게 가공한 후 800번 짜리 연마포까지 표면연마를 행한 후 아세톤으로 초음파세척을 실시하였다. 상대재로는 SCM440강을 열처리하여 경도를 HRC39로 한 디스크를 마모시편과 마찬가지로의 전처리를 하여 사용하였으며, 마모량은

10<sup>-4</sup>g까지 측정가능한 전자저울을 이용하여 마모시험 전 후의 무게를 칭량하여 구하였다. 마모시험시의 마찰계수는 마모시험기의 로드셀과 연결된 개인용 컴퓨터를 이용하여 연속적으로 측정, 저장하였으며 마모시험이 끝난 후 마모표면과 마모입자를 각각 광학현미경 및 전자주사현미경으로 관찰하였으며, 이들의 조성분석을 위하여 EDS를, 상분석을 위하여 XRD를 이용하기도 하였다.

Table.2. Speciality of tribotesters which were used to perform the wear test.

	Lab. 1	Lab. 2	Lab. 3	Lab.4	Lab.5
Type of Tribotester	Pin-on-Disc	Pin-on-Disc	Pin-on-Disc	Pin-on-Disc	Pin-on-Disc
Available Sliding Speed	0 - 5 (m/sec)	0 - 10 (m/sec)	0 - 5 (m/sec)	0 - 10 (m/sec)	0 - 5 (m/sec)
Available Applied Load	0 - 10 (kgf)	0 - 20 (kgf)	0 - 10 (kgf)	0 - 20 (kgf)	0 - 10 (kgf)
Environment	Air RoomTemp.	Air or Vac. RoomTemp.	Air RoomTemp.	Air or Vac. RoomTemp.	Air RoomTemp.
Loading Method	Lever System	Direct Loading	Lever System	Direct Loading	Lever System

\* The designation of the laboratorys is as follows.

Lab.1 : Korea University

Lab.2 : KIST-1

Lab.3 : KIST-2

Lab.4 : Korea Military Academy

Lab.5 : Suwon Industrial College

### 3. 결과 및 고찰

#### 3-1. 청동기지 복합재료의 물성

그림1은 분말야금법으로 제조된 청동기지 복합재료들의 소결밀도를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 세라믹상이 포함된 조성이 낮은 소결밀도를 나타내고 있는데 이는 세라믹상과 금속간의 젖음성이 낮기 때문으로 사료되며, 특히 흑연이 첨가된 조성에서는 흑연의 강한 탄성 때문에 소결 후 낮은 상대밀도를 나타낸 것으로 사료된다.

그림2는 각각의 조성으로 제조된 시편의 경도측정결과를 나타낸 것이다. 제조된 모든 시편이 상당량의 기공을 함유하고 있으므로 상대적으로 밀도가 높은 금속기지가 높은 경도를 나타내며, 특히 경한 금속상인 Mo가 첨가된 경우가 가장 높은 경도를 나타냈고, 고체윤활제의 역할을 하는 흑연을 첨가한 조성에서 보다 마찰조정제 및 강화제로 세라믹상을 첨가한 경우가 더 높은 경도 값을 나타냈다.

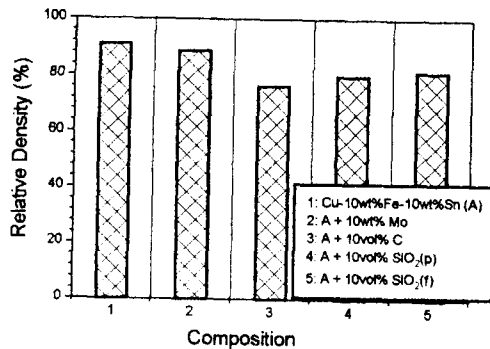


Fig. 1 Variation of sintering density as a function of composition.

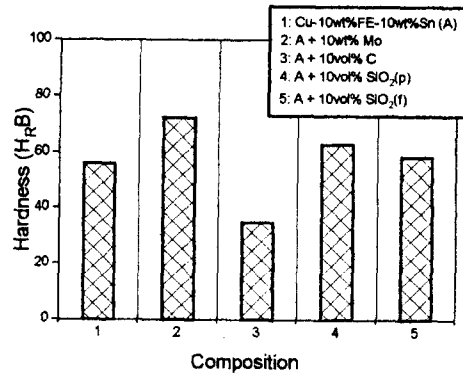


Fig. 2 Variation of hardness as a function of composition.

#### 3-2. 마모시험결과 및 고찰

표3에는 Cu-10%Fe-10%Sn기지에 대한 각 실험실별 마모시험의 결과를 나타냈다. 이들 결과를 비교하여 볼 때 같은 재료, 같은 시험조건이라 하더라도 마모시험기 및 시험수행자에 따라 시험 결과는 커다란 차이를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이같은 마모시험결과의 차이는 특기사항에 나타낸 바와 같이 마모트랙반경, 접촉조건 및 진동 등의 재료 외적인 요소들의 영향으로 사료된다. 따라서 스터디 그룹에 의한 inter-laboratory wear test의 체계적인 추진과 이들 결과의 해석을 통한 마모시험의 표준화 및 실험결과의 신뢰성 제고를 위한 방안이 강구되어야 한다는 점이 더욱 절실해진다.

Table.3. Results of wear test for Cu-10%Fe-10%Sn.

	Lab.1	Lab.2	* Lab.3	Lab.4	Lab.5
Average Coefficient of Friction	0.40	0.50	0.40	0.52	0.72
Average Wear Loss ( x 10 <sup>-3</sup> g )	17.4	7.2	39.3	3.4	2.1
* Wear tests were performed under 49N.					

- Remarks : Lab.1 : Severe squeal noise, some vibration,  
some transferred materials on the disk wear track.  
radius of wear track : 17mm
- Lab.2 : No squeal noise, stable running,  
no scratch mark on steel disk surface.  
radius of wear track : 35mm
- Lab.5 : Squeal noise, some vibration,  
no transferred materials on the disk wear track.  
radius of wear track : 32mm

그림3은 기지조성(Cu-10%Fe-10%Sn)에 유리섬유를 첨가한 경우 그 첨가량에 따른 마모량 및 마찰계수를 나타낸 것이다. 마모량은 유리섬유의 부피분율이 증가할수록 감소하는 경향을 나타내고 있는데 이는 유리섬유가 기지의 소성유동을 방해하고 접촉면 아래의 부표면부에서 소성전단 변형이 일어나는 것을 막아주어 장범위의 균열전파를 억제하는 효과와 함께 외부에서 전달되는 하중을 지탱하여 마모량을 감소시키는 것으로 사료된다. 마찰계수의 경우 SiO<sub>2</sub>(f)를 첨가함에 따라 약간씩 증가하는 경향을 보이며, SiO<sub>2</sub>(f)의 첨가량이 많을수록 마찰계수의 증가량도 커지고 있다. 이같은 결과는 SiO<sub>2</sub>(f)의 첨가에 따라 상대재로 전이부착되는 물질들을 기지중에 박혀있는 SiO<sub>2</sub>(f)가 계속적으로 벗겨내므로써 깨끗한 표면과의 지속적인 접촉 및 상대재와의 접촉하중 중 상당부분을 SiO<sub>2</sub>(f) 강화재가 담당하므로써 강과 SiO<sub>2</sub>(f)의 마찰에 의한 연삭작용에 기인하는 것으로 사료된다.

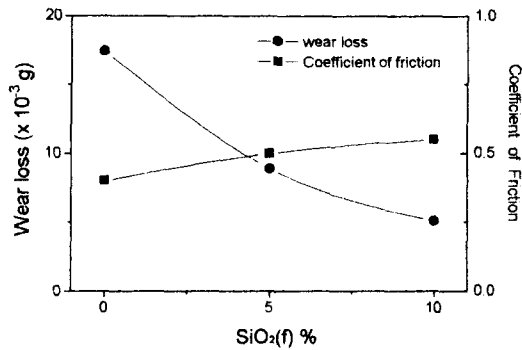


Fig.3 Relationships between volume of SiO<sub>2</sub>(f) and wear loss and coefficient of friction.

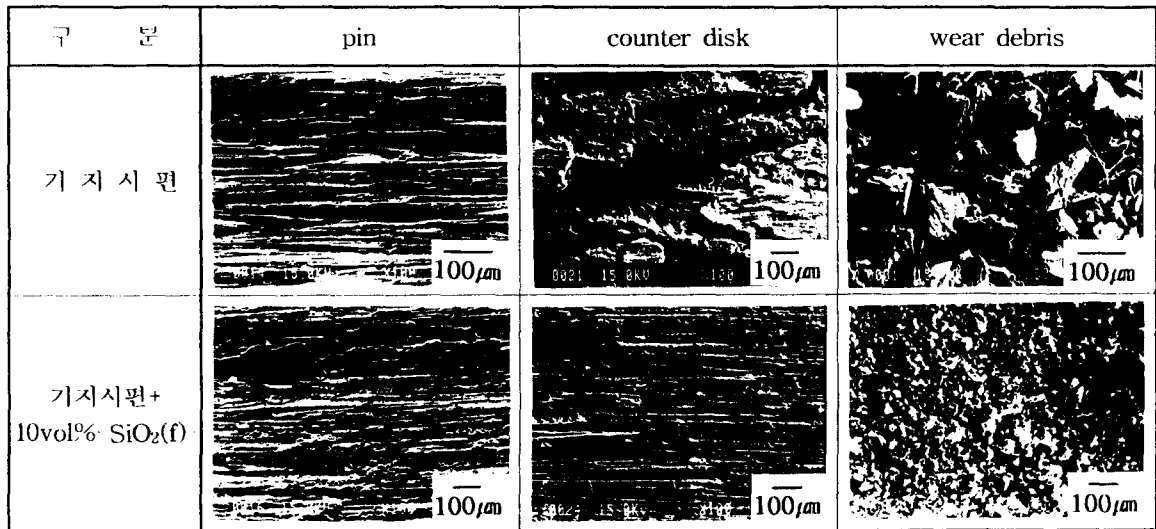
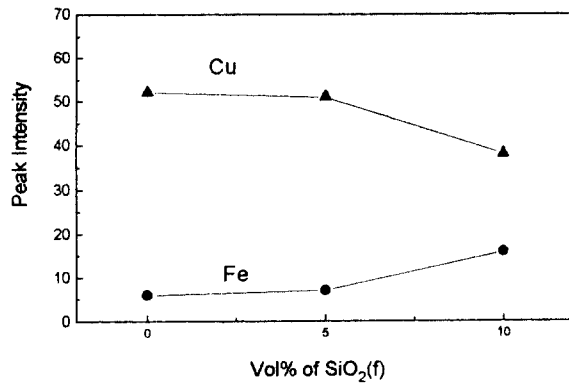


Fig.4 Scanning electron micrographs of worn surfaces and wear debris.

그림4는 기지시핀과 유리섬유를 10vol.% 첨가한 시핀의 마모시험 후 시핀 및 상대재 그리고 마모입자를 주사전자현미경으로 관찰한 것이다. 기지시핀의 경우 미끄럼 방향으로 심하게 손상된 흔적이 있으며, 상대재의 표면에는 기지합금이 소성변형을 받으며 판상으로 부착된 것이 보인다. 이렇게 전이부착된 기지합금이 계속되는 반복응력에 의해 상대재의 표면으로부터 떨어져 나올 때 전이부착층의 부표면부가 부분적으로 같이 떨어져나옴으로써 경한 상대재의 마모도 부분적으로 발생하고 있음을 알 수 있다. 이는 마모입자의 사진으로도 확인 할 수 있는데 보이는 모든 마모입자가 판상의 형태를 띄고 있어 이들이 주로 상대재로 전이부착되었던 기지합금이 반복응력에 의해 상대재의 표면으로부터 떨어져 나온 것임을 알 수 있다. 이같은 현상은 EDS분석결과로도 확인할 수 있었는데 그림5에 나타낸 EDS분석결과에 의하면 마모입자의 성분이 기지합금과 일치함을 확인할 수 있었다.

한편 기지합금에 SiO<sub>2</sub>(f)가 10vol% 첨가된 경우 pin시핀에서 일부 산화막이 형성되어 있음을 그림4의 사진과 그림5의 EDS정성분석결과로 확인할 수 있었으며, 마모입자가 부분적으로 응착되어 있고 미끄럼 방향으로 연삭골이 형성되어 있음을 볼 수 있다. 이는 마찰과정 중에 기지금속이 SiO<sub>2</sub>(f)로 강화되어 쉽게 손상받지 않음으로써 산화막이 형성될 수 있는 시간을 제공하기 때문인 것으로 사료되며, 또한 기지합금이 상대적으로 경도가 큰 상대제와의 마찰시 경도가 낮은 복합재로부터 이탈된 마모입자에 포함된 SiO<sub>2</sub>(f)가 연삭재로 작용하여 연삭골이 형성된 것으로 사료된다. 마모입자의 주사전자현미경 사진을 보면 상대제와의 마찰에 의해 떨어져 나오는 마모입자들이 SiO<sub>2</sub>(f)에 의해 소성변형을 방해받기 때문에 부표면부로의 변형 및 균열이 전파되지 못하고 부분적으로 떨어져 나옴으로 상당히 작은 크기의 마모입자가 형성되는 것을 알 수 있었다.



a) Intensity of Cu and Fe as a function of SiO<sub>2</sub>(f) at worn surface of pin.

구분	pin	counter disk	wear debris																								
기지금속 - 유리섬유	<table border="1"> <caption>Data for Pin O Intensity</caption> <thead> <tr> <th>Vol% of SiO<sub>2</sub>(f)</th> <th>Peak Intensity of O</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>8</td> </tr> </tbody> </table>	Vol% of SiO <sub>2</sub> (f)	Peak Intensity of O	0	1	5	2	10	8	<table border="1"> <caption>Data for Counter Disk O Intensity</caption> <thead> <tr> <th>Vol% of SiO<sub>2</sub>(f)</th> <th>Peak Intensity of O</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>14</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>16</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>16</td> </tr> </tbody> </table>	Vol% of SiO <sub>2</sub> (f)	Peak Intensity of O	0	14	5	16	10	16	<table border="1"> <caption>Data for Wear Debris O Intensity</caption> <thead> <tr> <th>Vol% of SiO<sub>2</sub>(f)</th> <th>Peak Intensity of O</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>12</td> </tr> </tbody> </table>	Vol% of SiO <sub>2</sub> (f)	Peak Intensity of O	0	1	5	2	10	12
Vol% of SiO <sub>2</sub> (f)	Peak Intensity of O																										
0	1																										
5	2																										
10	8																										
Vol% of SiO <sub>2</sub> (f)	Peak Intensity of O																										
0	14																										
5	16																										
10	16																										
Vol% of SiO <sub>2</sub> (f)	Peak Intensity of O																										
0	1																										
5	2																										
10	12																										

(b) Intensity of O as a function of SiO<sub>2</sub>(f).

Fig.5 EDS results of worn surfaces.

- (a) Intensity of Cu and Fe as a function of SiO<sub>2</sub>(f) at worn surface of pin.
- (b) Intensity of O as a function of SiO<sub>2</sub>(f).

그림6은 Lab.2에서 실시한 마모시험의 결과로 기지합금에 입상의 SiO<sub>2</sub>(p)를 부피분율로 각각 5%, 10%씩 첨가하였을 경우의 마모량과 마찰계수를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 SiO<sub>2</sub>(p)의 첨가량에 따라 마모량이 감소하는 것으로 나타났으며 5% 정도에서 SiO<sub>2</sub>(p)의 첨가효과가 포화되는 것으로 나타나고 있다. 이같이 SiO<sub>2</sub>(p)의 첨가에 따라 마모량이 감소하는 것은 앞서 언급한 바와 같이 SiO<sub>2</sub>(p)의 첨가에 따라 기지의 강화효과가 나타나기 때문인 것으로 사료된다. 또한 마찰계수의 변화를 보면 SiO<sub>2</sub>(p)의 첨가에 따른 뚜렷한 변화는 없으나 약간적인 마찰계수가 상승하는 것으로 나타나고 있다. 이는 복합재료 내에 존재하는 SiO<sub>2</sub>(p)가 상대재를 지지하면서 전체적인 응착은 줄이지만 비교적 강한 상대재와 강화상인 SiO<sub>2</sub>(p)의 연삭에 의한 마찰력이 증가하기 때문인 것으로 사료된다.

그림7은 Lab.3에서 실시한 마모시험의 결과를 나타낸 것이다. Lab.2에서 사용한 시편과 마찬가지로 입상의 SiO<sub>2</sub>를 각각 5%, 10% 씩 첨가한 시편을 사용하였다.

그러나 이때에는 49N의 하중을 가하여 시험한 것으로 Lab.2의 시험조건과는 상이한 시험조건이므로 마모량도 Lab.2의 그것과는 다른 양상을 나타내고 있다. 즉 Lab.2의 결과는 SiO<sub>2</sub>(p)의 첨가로 인한 기지강화효과 때문에 마모량이 뚜렷이 감소하고 있지만 여기서는 5%까지는 마모량의 감소가 거의 없다가 10%를 첨가하였을 경우에는 급격히 마모량이 감소하고 있다. 이같은 결과는 접촉하중이 커짐에 따라 SiO<sub>2</sub>(p)의 첨가량이 많지 않을 때에는 그에 의한 기지강화의 효과가 크게 나타나지 못하다가 첨가량이 증가함에 의해서 기지강화의 효과를 나타내기 때문인 것으로 사료된다. 그림8은 마모시험 후 상대재의 마모면을 주사전자현미경으로 관찰한 것으로 10% SiO<sub>2</sub>(p)인 경우보다 5% SiO<sub>2</sub>(p)에서 보다 많은 전이부착층을 확인할 수 있었으며, 이러한 전이부착층은 복합재료의 소성유동응력이 적을수록 많아지게 되므로 SiO<sub>2</sub>(p)의 첨가량이 많을수록 기지강화의 효과 때문에 복합재료의 소성유동응력을 증가시켜 전이부착층의 양이 감소하고, 따라서 마모량이 적게 나타난다.

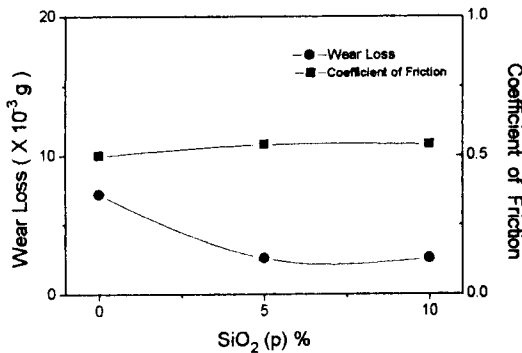


Fig.6 Relationships between volume of SiO<sub>2</sub>(p) and wear loss and coefficient of friction. (Wear tests were performed in Lab.2)

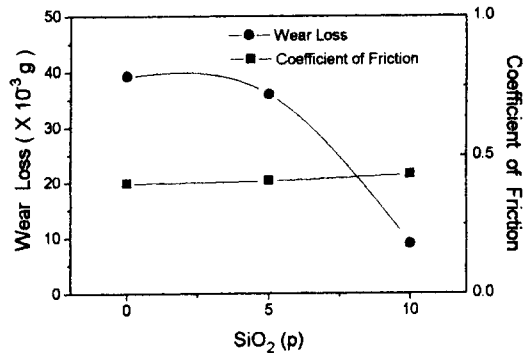


Fig.7 Relationships between volume of SiO<sub>2</sub>(p) and wear loss and coefficient of friction. (Wear tests were performed in Lab.3. Applied load was 49N)



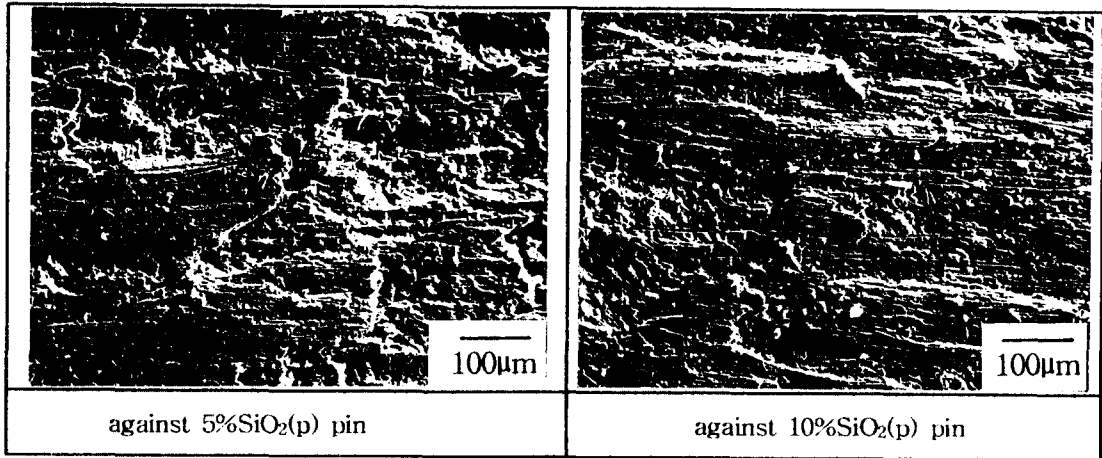


Fig.8 Scanning electron micrographs of worn disk surface.

그림9는 Lab.4에서 실시한 마모시험의 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 윤활제로 흑연을 첨가시킨 경우 첨가량의 증가에 따라 마찰계수가 낮아지고 있었으며, 5% 정도에서 흑연의 윤활효과가 포화되는 것으로 나타나고 있다. 그러나 복합재료의 마모량은 5% 흑연의 경우 기지와 비슷하게 나타나고 있으나 10%에서는 마모량이 적어지고 있다. 이같은 결과는 흑연의 첨가에 따라 복합재료의 강도가 낮아지기 때문에 5%의 경우 기지의 강도저하에 의해 윤활의 효과가 상쇄되는데 반하여 10% 첨가의 경우 윤활작용이 커져 복합재료가 받는 전단응력이 저하하기 때문에 마모량이 적어지는 것으로 사료된다.

또한 고속마찰에 있어서 흑연의 첨가효과를 고찰하고자 5% 흑연을 첨가한 시편으로 10m/sec의 마찰속도로 시험을 행한 결과를 그림10에 나타냈는데, 마찰계수가 0.61 정도로 급격히 상승하였고 표면관찰결과 상대재 표면에 상당한 복합재료의 전이부착층이 형성된 것을 확인할 수 있었다. 이는 같은 그림에 나타낸 바와 같이 복합재료 시편의 bulk온도가 급격히 상승하고 있어 복합재료의 소성유동응력을 낮게하고 금속간의 응착을 촉진시키기 때문인 것으로 사료된다. 따라서 고속의 마찰이 발생하여 표면의 온도가 높이 상승하는 경우에는 윤활제로 첨가하는 흑연의 적정량을 결정하기 위해선 고온마모시험의 자료가 필요할 것으로 생각된다.

그림11은 Lab.5에서 실시한 마모시험의 결과를 나타낸 것이다. 마찰조정제로 첨가하는 Mo의 첨가량이 증가함에도 불구하고 마찰계수는 약간 감소하는 것으로 나타났고, 마모량은 오히려 증가하는 양상을 나타내고 있다. 이같은 결과는 그림2에도 나타냈듯이 기지조성의 경도가 가장 높게 나타난 기계적 특성 외에 기지조성과 상대재와의 마찰시에는 상대재료의 전이부착층이 거의 형성되지 않는데 비하여 Mo가 첨가된 시편에서는 상당량의 전이부착층이 형성되기 때문이다. 이같은 결과가 나타나는 이유는 Cu와 Fe와의 고용도가 전혀 없기 때문에 Cu의 농도가 큰 기지조성의 경우 기지시편의 응착에 의한 전이부착층의 형성이 쉽지 않은 반면에 Mo를 첨가한 시편의

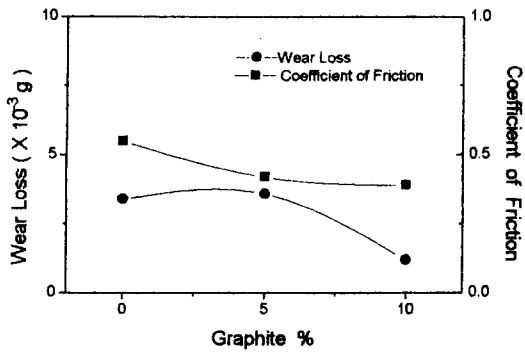


Fig.9 Relationships between volume of graphite and wear loss and coefficient of friction.

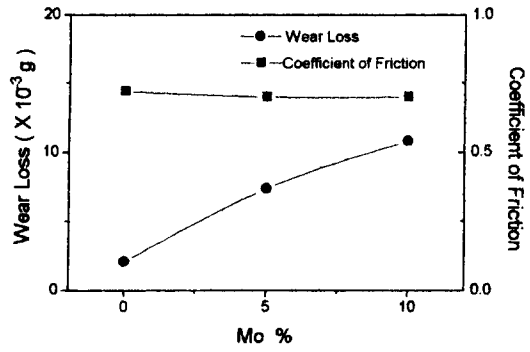


Fig.11 Relationships between volume of Mo and wear loss and coefficient of friction.

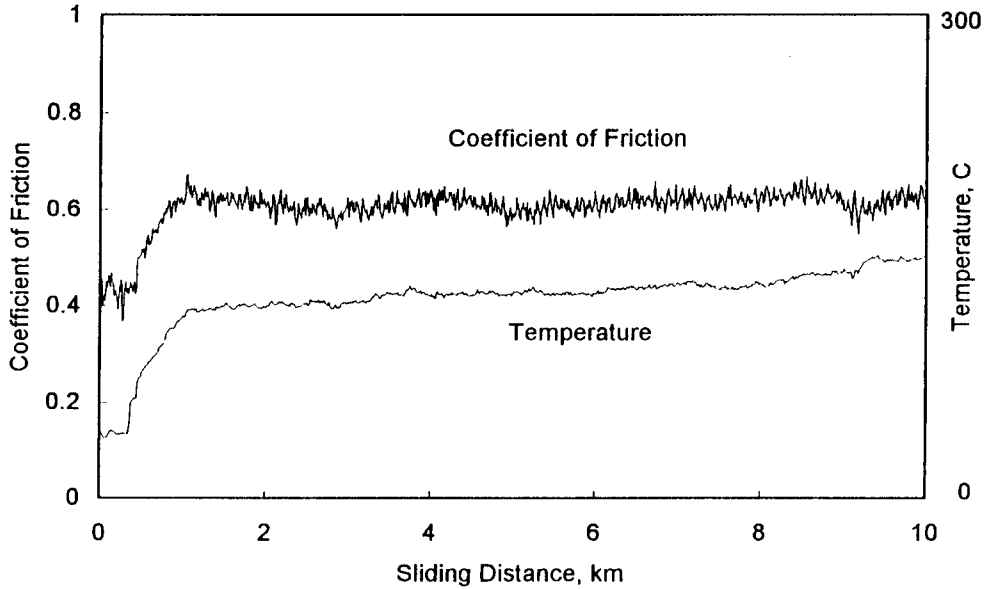
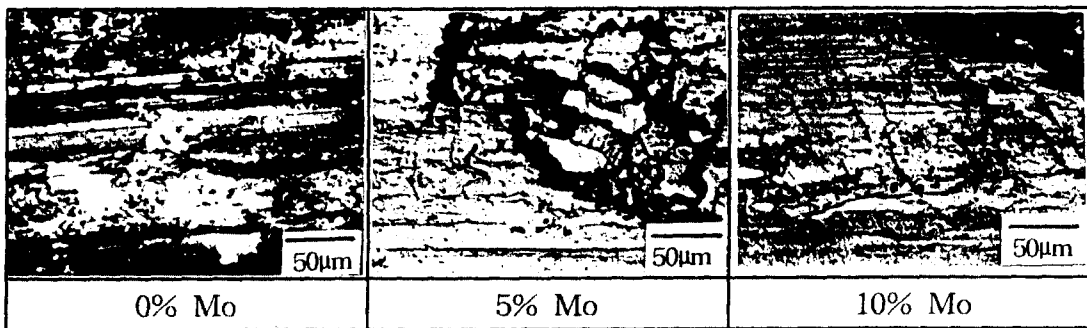


Fig.10 Variation of coefficient of friction and bulk specimen temperature in accordance with sliding distance. ( sliding distance : 10m/sec. )

경우에는 Mo가 Cu에는 고용하지 않으나 Fe와의 고용도는 있으므로 상대재와의 응착에 기인하는 전이부착층의 형성이 쉽기 때문이라고 사료된다. 또한 그림12에 나타낸 마모표면의 사진에서도 알 수 있듯이 기지조성의 경우가 표면에서의 소성변형능력(deformation capability)이 크기 때문에 전단응력에 의해 표면이 변형하지만 Mo가 첨가된 시편의 경우 소성변형능력이 작아 전단응력이 가해지면 시편의 표면에서 소성변형이 용이치 않아 마찰방향에 수직으로 균열이 발생, 결국은 쉽게 마모입자로 탈락되기 때문이라 판단된다.

여기에서 실제 고속전철의 급제동시에는 높은 마찰속도와 제동력으로 인하여 순간적인 표면온도는 약 700°C까지 올라가므로 고온에서의 Mo의 첨가효과를 살펴보기 위해서 마모시험을 500°C에서 실시한 결과, 마찰계수의 변화를 그림13에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 Mo를 첨가함에 따라 고온마찰계수가 증가하고 있어 Mo의 첨가이유는 고온에서의 마찰계수 조정을 위한 것임을 확인할 수 있었다. 그림에 마모량을 나타내지 않은 것은 마모시험온도가 높아 시험 전후의 무게를 측정한 결과 시험 후의 무게가 더 크게 나타나 마모량을 구할 수 없었기 때문이다.

그림14에는 고온마모시험 후 마모면의 광학현미경 사진을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 기지조성의 시편은 고온에서 표면소성유동응력이 급격히 감소되고, 상대표면에 응착된 전이부착물질들도 고온에서의 강도가 낮아 쉽게 소성변형하므로 마모면은 높은 온도와 전단력 때문에 금속유리상태(metallic glassy)로 되어 낮은 마찰계수를 나타내지만 Mo가 첨가된 시편에서는 Mo에 의한 기지의 고온강도가 유지되므로 상대재와의 마찰시 응착 및 연삭에 의한 마찰력이 생기기 때문으로 사료된다.



sliding direction →

Fig. 12 Optical micrographs of worn pin surface.

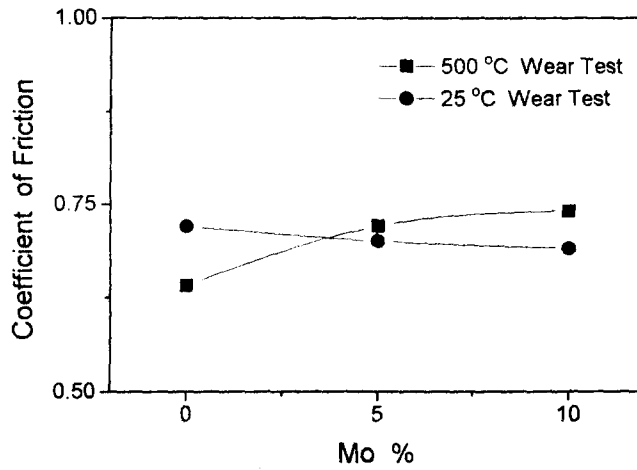
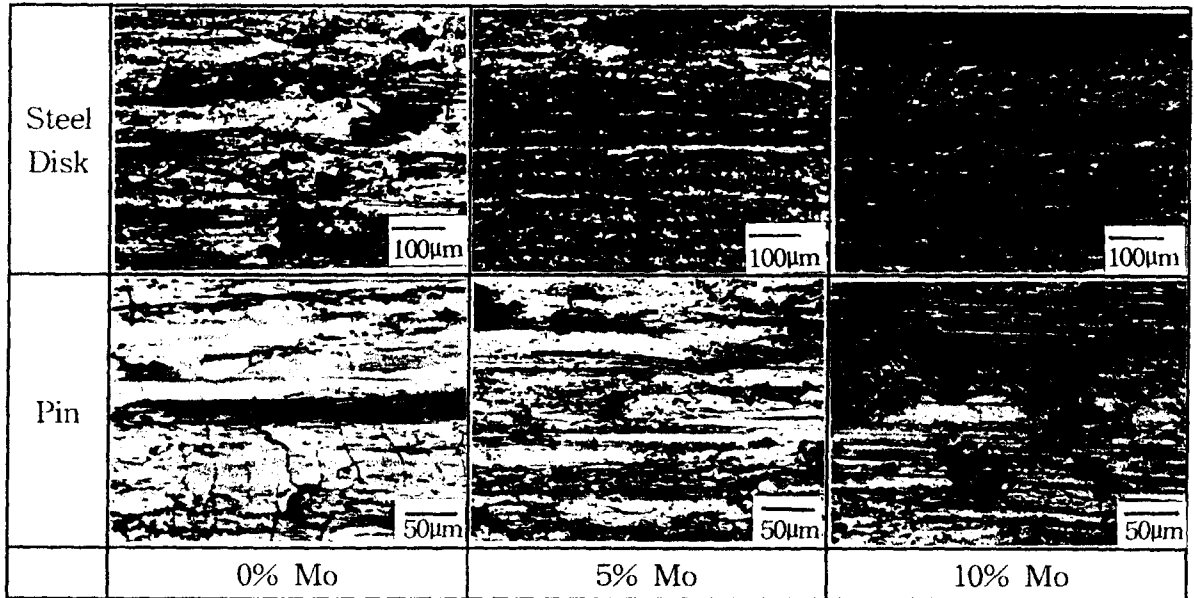


Fig.13 Coefficient of friction plotted as a function of Mo % .



sliding direction →

Fig. 14 Optical micrographs of worn surface.  
( Wear tests were performed at 500°C. )

#### 4. 결 론

이상과 같은 나자간의 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1. 같은 시험기 구조, 같은 시험조건이라 하더라도 시험기 및 시험자 등의 제반 조건들이 마모 시험의 결과에 상당한 영향을 미치므로, 시험결과의 판단에는 신중을 기해야 하고 신뢰성있는 결과의 도출을 위해서는 마모시험 조건 및 시험기의 표준화가 필요하다.
2.  $\text{SiO}_2(\text{f})$ 는 그의 첨가량이 증가함에 따라 마찰계수가 증가하고 마모량도 감소하고 있다. 이같은 결과는  $\text{SiO}_2(\text{f})$ 가 기지를 보강하여 시편에 산화막을 형성시킬 시간을 제공함으로써 마모입자의 발생을 억제시키고  $\text{SiO}_2(\text{f})$ 에 의한 연삭작용이 나타나기 때문이며, 따라서  $\text{SiO}_2(\text{f})$ 의 역할은 마찰조정제 및 내마모성 첨가제로 판단된다. 그러나  $\text{SiO}_2(\text{p})$ 의 경우 그의 첨가에 따라 마모량의 감소는 눈에 띄게 나타나고 있으나, 마찰계수의 변화는 크게 나타나지 않고 있어 마찰조정제로써  $\text{SiO}_2$ 를 첨가시킬 때에는 그의 형상에 관한 고려를 하여야 할 것으로 판단된다. 또한 인가하중이 증가하였을 때엔 내마모성을 나타내기 위한  $\text{SiO}_2(\text{p})$ 의 첨가량도 증가하는 것을 알 수 있었다.
3. 흑연의 첨가에 따라 마찰계수는 확연히 감소하였으나, 일정량의 흑연이 첨가되지 못하면 기지의 강도를 저하시켜 마모량은 오히려 약간 증가하는 경향이 보였다. 또한 5% 흑연첨가의 시편에 대한 고속의 시험에 의하면 상온에서보다 상당히 높은 마찰계수를 나타내고 있어 고속, 고압에서의 유효효과를 위해서는 상온에서보다 다량의 흑연이 첨가되어야 할 것으로 사료된다.
4. Mo의 첨가는 상온에서는 기지의 소성변형능력을 감소시켜 내마모성을 저해하고, 마찰계수도 약간 저하했지만 고온의 시험에서는 마찰계수를 상승시키고 있어 Mo은 고온에서의 마찰조정제로 이용할 수 있음을 알았다.