

# 알루미늄 단섬유 및 유리섬유 보강 청동기지 복합재의 마모특성 연구

(Tribological Properties of the Aluminum Short fiber and  
glass fiber Reinforced Tin-Bronze Matrix Composites)

황 순 홍\*, 안 병 길\*\*, 이 범 주\*\*\*, 최 응 수\*\*, 허 무 영\*

\* 고려대학교 재료금속공학부

\*\* 한국과학기술연구원 기전연구부

\*\*\* 대우중공업 중앙연구소

**Abstract** : The tribological properties of the aluminum short fiber and glass fiber reinforced tin-bronze matrix composites manufactured by vacuum hot pressing was studied. The effect of the composition and the relative density on the wear properties was examined by a reciprocal type tribo-test machine. The results were discussed by the observation of the microstructure of sintered specimen and worn surface observation using SEM and EDS. Addition of the fibers led to the wear resistance since the metal matrix was reinforced by the fibers. The reinforcement of the fiber seemed to be stronger as the distribution of the fibers was more uniform. Graphite also reduce the wear loss. The pores in the sintered composites seemed to play an important role to improve the wear resistance since the pores provide the places where the solid lubricants locate.

## 1. 서론

철도차량의 제동장치는 속도제어와 정지를 위해서 중요한 역할을 담당하며, 차량의 속도 향상과 운행시간 단축 그리고 차량과 승객의 안전 운행에 직결되는 중요한 장치이다. 특히, 300 Km/hr 이상이 되는 고속철도나 항공기의 고속성은 속도의 제곱항으로 증가하는 운동에너지를 지닌 차량의 제동을 위한 제동장치의 개념과 개발에 대해 여러 가지 복합적인 고도의 기술과 기존 시스템보다 안전하고 강력한 제동시스템이 요구되고 있다[1-4]. 제동장치의 요구조건으로는 안정성, 정확성 및 신뢰성 등을 들 수 있으며 또

한, 속도조정, 목표제동, 승차감 개선 등을 위해 최적 제동제어기술의 확보와 안정성을 기초로 한 예비성과 다양한 방법의 노력이 진행되어야 할 것이다. 이러한 제동시스템의 여러 구성 요소 중 기초제동장치인 디스크 및 패드는 소모성이 큰 핵심부품으로 기술이전이 매우 엄격하여 자체개발의 필요성이 크다 하겠다. 고속전철은 300 Km/hr 이상의 속력으로 주행됨으로써 제동시 22 KJ이상의 에너지를 발산시키게 됨에 따라 석면계 유기마찰재 또는 철계 소결마찰재 등의 사용은 열화, 내구성, 안정성, 마찰력의 감소등 여러 문제점을 가지고 있다[4]. 따라서 본 연구에

서는 고속, 고하중에서 양호한 마찰성질을 나타내는 한편 열전도도가 양호한 청동계 소결재를 제조하여 마찰평가를 행하였는데 이는 청동기지 복합재료가 제동마찰력이 크고 표면온도가 높아지는 가혹한 환경의 제동기구에서 사용되는 재료가 갖추어야 할 우수한 마찰특성, 온도방열성, 표면순응성 및 내마모성이 우수하기 때문이다 [4-8]. 또한 강화상과 윤활제등 마찰첨가제를 조절하여 최적의 마찰성질을 나타내는 재료를 제조하고자 하였는데 강화상으로는 경도, 강도, 탄성률이 크고, 열팽창계수가 작고 열전도도가 높으며 화학적으로 매우 안정한 유리섬유와 알루미늄나 단섬유를 사용하였다. 특히, 알루미늄나 단섬유는 휘스커 등에 비하여 인체에 무해한 것으로 알려져 있다.[9-11]. 또한 마모량의 감소와 작동안정성을 위하여 고체윤활제로 흑연을 사용하였다. 본 실험에서는 이와 같이 청동기지 복합재료의 조성과 밀도등 미세조직을 조절하여 마찰실험을 행하여 마찰 및 마모기구의 규명을 꾀하였으며, 고속전철용 제동 라이닝에서 요구하는 마찰특성을 가지는 시편의 개발을 꾀하였다.

## 2. 실험방법

시편의 기지로는 복합제자체가 내마모성이 우수한 Cu-9wt%Sn-9wt%Fe-10wt%Mo-5vol%SiO<sub>2</sub>(p) 조성을 사용하였다. 강화상의 효과를 알아보기 위하여 이 금속기지에 세라믹 보강재로 영구 ICI사의 Saffil 알루미늄나 단섬유를 부피분율 2.5vol%, 5vol%로 변화시켰고 한국유리(주) 제품인 유리섬유(E-glass)가 5vol% 첨가된 조성의 시편도 제조하여 비교실험을 행하였다. 그리고 알루미늄나 단섬유가 5vol% 첨가된 조성에 고체윤활제인 흑연을 부피분율로 10vol%, 15vol%로 변화시켜 5가지 조성의 배합을 행하였다. Table 1에 본 실험에서 실험한 시편의 조성표를 나타내었다. 유리섬유가 첨가된 조성은 불밀을 이용하여 750rpm, 30분의 조건으로 배합을 행하였으며 알루미늄나 단섬유가 첨가된 조성은 메탄올에 습식분산시키는 방법으로 혼합을 행하였다. 이 혼합체는 진공가압소결로(vacuum hot press)

에서 소결을 행하였다. 이때 소결조건은 승온속도 9.58°C/min, 진공도를  $3 \times 10^{-5}$  torr로 고정된 후 승온하여 600°C에서 15분간 소결을 행하였다 [12, 13]. 물체의 마찰성질은 재료의 물성, 접촉부위의 기하학적 형상, 하중, 압력 및 온도, 미끄럼 속도, 재료의 조성등 여러 가지 변수에 의하여 영향을 받게 된다[14, 15]. 본 연구에서는 이중 소결공정에서 제조변수를 조절하고 강화상 및 윤활제의 첨가량등 미세구조를 변화시켜 실험을 행하여 마찰특성의 최적화를 꾀하였다. 시편의 밀도차이에 의한 영향을 살펴보기 위하여 가압력을 8 Mpa, 24 Mpa, 50Mpa로 변화시켜 제조하기도 하였으며, 마찰평가는 pin-on-disk 형태의 마모시험기의 여러 운동 모드중 왕복형(Reciprocal type) 마찰시험기를 사용하여 행하였다. 마찰실험은 15 Hz, 1시간, 상온에서 하중을 98 N 으로 하여 조성을 변화시켜 가며 행하였으며, 상대재는 stainless steel 304를 사용하였다. 소결마찰시편은 다이아몬드 커터기(Accutom-2, Sterus)로 10×10×4 mm의 크기로 절단후 #1000까지 연마지로 연마하였고, 접촉면과 접촉부위를 넓히고 모서리 부분을 45°로 가공한 후 헥산으로 초음파 세척하여 사용하였다. 상대재도 동일한 전처리를 행하였다. 마모량은 10<sup>-4</sup>g까지 측정가능한 전자저울(Satorius, BP-61)을 이용 측정하였다. 마찰실험 후 마찰 및 마모거동을 고찰하기 위하여 광학현미경, 주사전자현미경(Scanning electron microscopy), EDS(Energy Dispersive Spectroscopy), XRD, 조도측정기 등을 사용하였다.

Table 1. Composition of the samples.

	Composition
S-1	Cu-9wt%Sn-9wt%Fe-10wt%Mo-10vol% %C-5vol%SiO <sub>2</sub> (p) (A)
S-2	A+5vol%SiO <sub>2</sub> (f)
S-3	A+2.5vol%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (f)
S-4	A+5vol%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (f)
S-5	A+15vol%C+5vol%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (f)

### 3. 실험결과 및 고찰

본 실험에서 사용한 마찰시험기에서는 고정되어 있는 상대재 위에 소결 pin시편이 왕복운동을 하도록 설계가 되어 있으며, 시험간 마찰계수는 piezo-electric transducer를 이용하여 연결된 컴퓨터에서 측정하였다.

Fig. 1은 초당왕복횟수 15회, 총왕복횟수 54000회(1hr), 하중 98 N으로 S-4 조성의 시편을 8, 24, 50 Mpa 의 가압력으로 변화시켜 상대밀도를 변화시킨 후 마모실험한 후 마모량의 변화를 측정한 결과이다. Fig. 2는 혼합체를 24 Mpa의 가압력으로 가압소결한 후 동일한 조건에서 마찰실험을 행하여 그 마모량의 변화를 나타낸 결과이다.

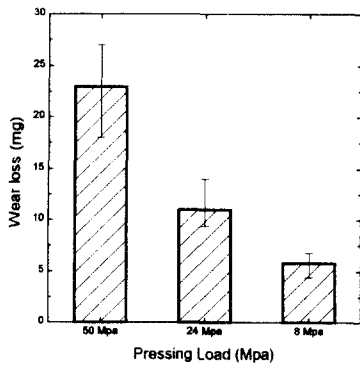


Fig. 1 Variation of wear loss as a function of pressing load in specimen S-4.

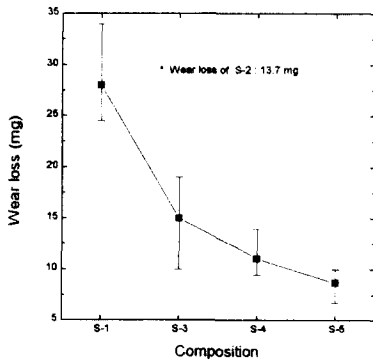


Fig. 2 Variation of wear loss in the samples having different composition.(pressing load : 24 Mpa).

시편의 상대밀도에 따른 마모량의 결과인 Fig. 2와 마찰계수의 결과인 Fig. 3에서 소결시 가압력이 낮은 시편이(낮은 상대밀도) 낮은 마모량과 마찰계수를 나타내는 것으로 확인되었다. 이러한 결과는 고체윤활제로 MoS<sub>2</sub>와 WS<sub>2</sub>를 첨가하였을 경우에도 발견되는 현상으로 윤활제가 첨가된 조성에서 일반적인 경우라고 생각된다. 즉, 시편에 존재하는 미세기공이 마찰표면에서 윤활제가 쉽게 소모되는 것을 억제해주는

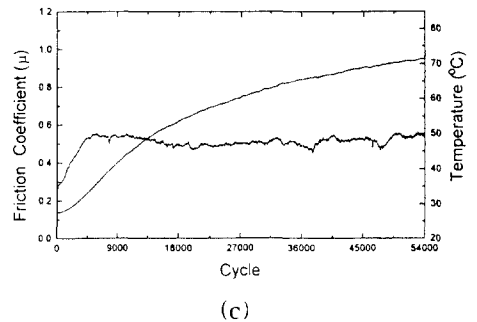
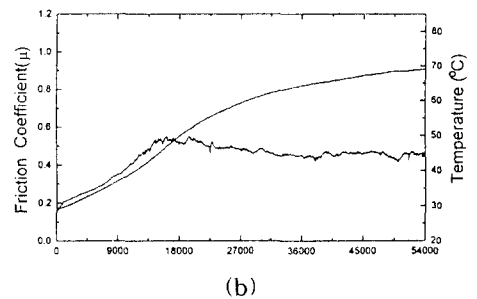
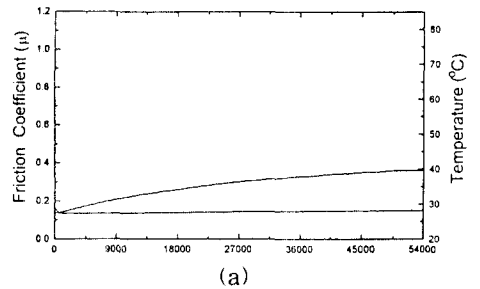
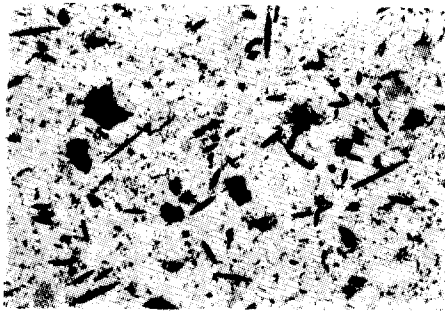
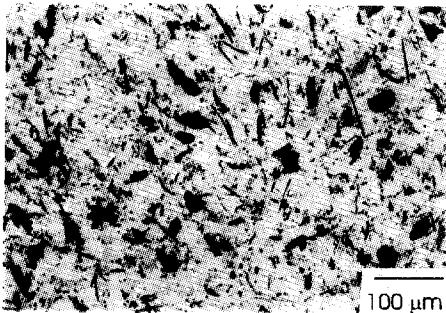


Fig. 3 The curves of friction coefficients in the samples(S-4) pressed (a) 8 Mpa (b) 24 Mpa (c) 50 Mpa.



(a)



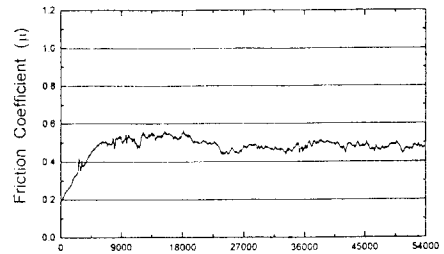
(b)

Fig. 4 Optical micrographs of the distribution of reinforcement.

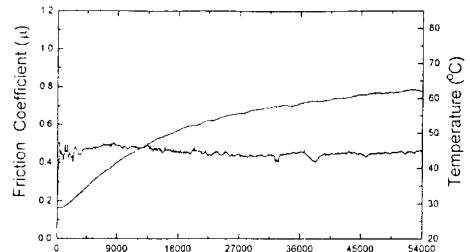
(a)  $\text{SiO}_2(\text{f})$  (b)  $\text{Al}_2\text{O}_3(\text{f})$

reservoir로 작용하기 때문이라고 생각된다. 본 연구에서는 제동마찰재를 염두에 두고 실험을 행하였기 때문에 마모량이 낮고 마찰력이 유지되는 24 Mpa의 가압력으로 시편을 제조하여 조성의 변화에 따른 실험을 수행하였다.

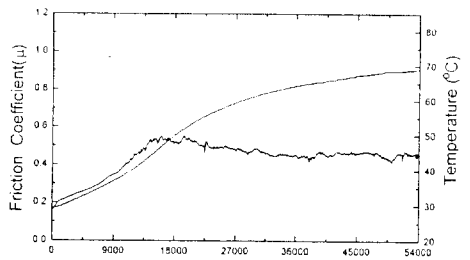
조성을 변화시키고 실험한 Fig. 2(b)의 결과에서 알루미나 단섬유의 증가는 마모량의 감소를 가져왔다. 이는 보강재로 첨가한 알루미나 단섬유가 기지의 소성유동을 억제하는 효과와 함께 균열의 전파를 억제하는 효과를 함을 의미한다. 이러한 효과는 알루미나 단섬유의 첨가량이 증가함에 따라 커졌으나 포화되는 경향이 나타났다. 알루미나 단섬유를 5vol%이상 첨가할 경우에는 분산상태, 기지와 보강재의 계면안정성 등의 여러 가지 문제가 발생하므로[16] 본 연구에



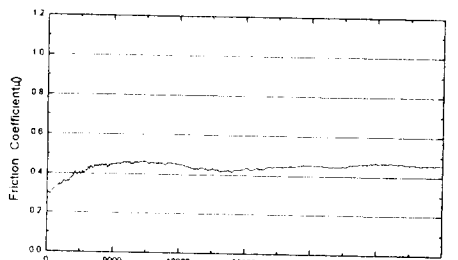
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 5 The curves of friction coefficient in the samples having different composition.

(a) S-1 (b) S-2 (c) S-4 (d) S-5

서는 첨가량을 5vol%이내로 제한하였다.

한편 알루미늄 단섬유와 유리섬유가 5vol% 첨가된 조성의 마찰실험후 마모량을 측정한 결과 알루미늄 단섬유가 첨가된 조성에서 낮은 마모량을 나타내었다. 이러한 이유는 Fig. 4의 소결 조직사진에서 알 수 있듯이 입도가 작은 알루미늄 단섬유가 유리섬유보다 기지내에 양호한 분산을 하고 있기 때문이라고 생각된다[9-11, 16]. 즉, 볼밀로 혼합을 행한 유리섬유첨가 조성은 장경비의 유지를 위하여 심한 혼합을 행할수 없기 때문에 완벽한 분산이 어려운 반면, 알루미늄 단섬유는 습식분산을 통하여 장경비가 파괴되는 우려없이 우수한 분산상태를 획득할수 있었다.

마모량은 고체윤활제인 흑연이 15vol% 첨가된 S-5조성에서 가장 낮은 값을 나타내었다. 이는 고체윤활제로 첨가된 흑연이 마찰면에 작용, 금속-금속간 접촉을 억제하여 기지의 소성변형을 억제하는 역할을 나타내었기 때문이라고 생각된다.

Fig. 5는 24 Mpa의 가압력으로 소결된 S-1, S-3, S-4, S-5 조성의 시편을 마모실험한 후 마찰계수의 변화를 측정한 결과이다. 마찰계수는 모두 0.4-0.5정도의 범위에서 조성에 따라 크게 변화하지 않는 것으로 관찰되었다. 그러나 S-1 조성의 결과에서는 기지의 응착으로 인한 마찰계수의 변화가 일부 관찰되며 흑연이 15vol%첨가된 S-5조성의 결과에서 상대적으로 가장 안정한 결과를 나타내었다.

Fig. 6은 24 Mpa의 소결가압력을 제조한 시편을 마모실험한 후 그 표면을 주사전자현미경으로 관찰한 후 정성적인 화학분석을 위하여 EDS로 관찰한 결과이다. S-1조성의 결과인 Fig. 6(a)에서는 소성유동의 흔적과 연삭골을 확인할 수 있는데 이는 상대적으로 강한 상대재가 약한 pin시편을 긁어 떨어져 나온 시편의 일부가 반복하중에 의하여 소성변형되어 연삭재로 작용하였기 때문으로 생각된다. 또한 강화재로 섬유상이 첨가된 조성의 결과인 (b), (c)에서는 일부 소성유동의 흔적이 존재하기는 하지만 상대적으로 손상을 거의 받지 않은 것으로 보여지

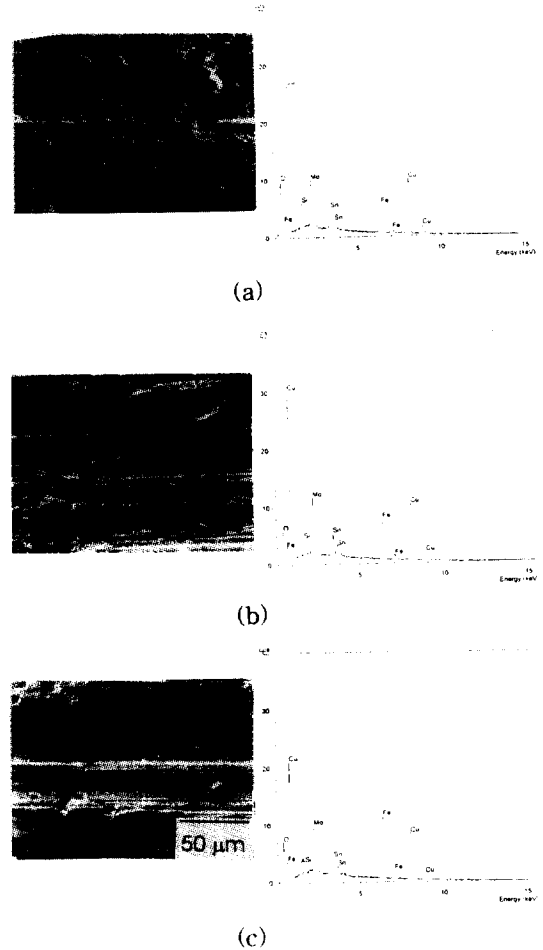


Fig. 6 SEM image and EDS results of the worn surface in (a) S-1 (b) S-2 (c) S-4.

며, 특히 알루미늄 단섬유가 첨가된 (c)에서 두드러졌다. 그리고 강화재의 보강효과로 상대재 성분인 철의 peak가 가장 높았음을 알 수 있다.

Fig. 7은 동일한 방법으로 마모실험 후 그 상대재를 주사전자현미경으로 관찰한 결과이다. S-1조성의 결과에서는 pin시편으로부터 물질 전달이 일어나 전이부착층이 형성된 것을 확인할 수 있으며, 섬유상이 첨가된 (b), (c)의 결과에서는 섬유상에 의한 연삭골과 부분적인 전이층을

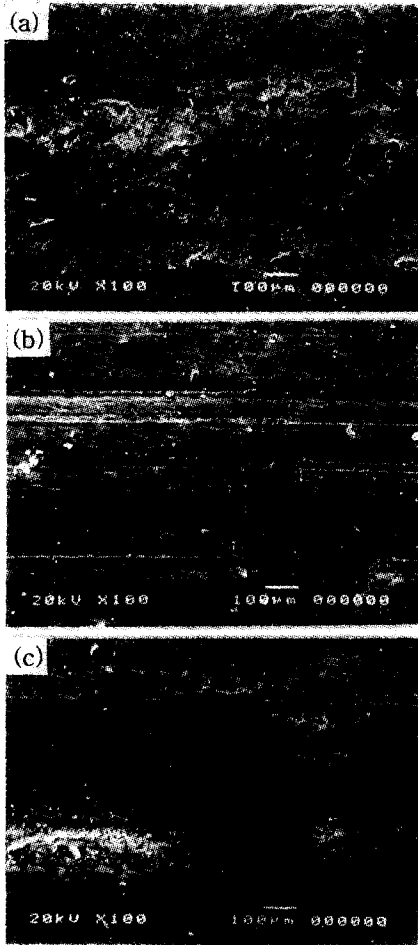


Fig. 7 SEM image of couter steels in the specimen (a) S-1 (b) S-2 (c) S-4

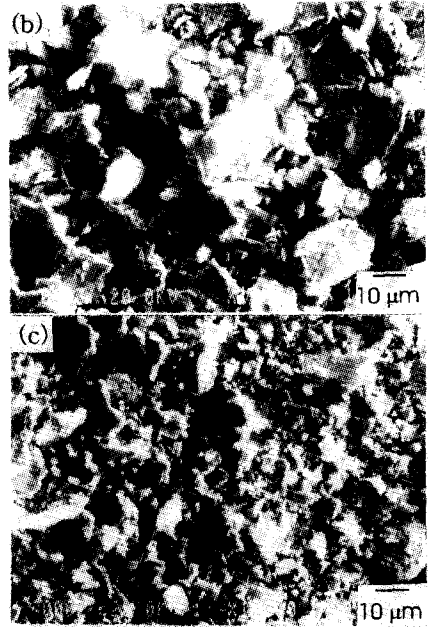
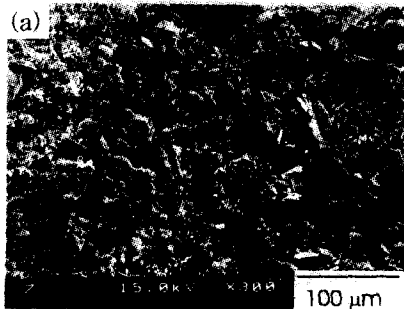


Fig. 8 SEM image of wear debris in the specimen (a) S-1 (b) S-2 (c) S-4

관찰할수 있었으나 양호한 마찰면을 보여주었다.

Fig. 8은 동일한 방법으로 실험한 후 마모부스러기를 주사전자현미경으로 관찰한 결과이다. S-1조성의 결과에서는 기지의 손상에 의한 판상의 마모부스러기가 관찰되었다. 첨유상이 첨가된 조성의 결과인 (b), (c)는 상대재와의 마찰로 인하여 떨어져 나가던 마모시편의 표면이 첨유상에 의하여 소성변형을 방해받게 됨에 따라 부표면으로 변형이 진행되지 못하고 그 상태에서 떨어져 나가게 되어 상당히 작은 크기를 갖게 됨을 보여주었다. (b)와 (c)의 크기차이는 전기한 바와 같이 입도가 작은 알루미늄 단첨유의 분포상태가 더욱 양호함에 따라 유리첨유가 첨가된 조성에서 보다 더욱 미세한 크기의 마모부스러기가 관찰된 것으로 생각된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 청동기지 복합재의 제조공정변수에 따른 마찰 및 마모거동의 변화를 왕복형(reciprocal type) 마모시험기를 사용하여 실험하

여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 실험의 결과 강화상으로 알루미늄 단섬유를, 고체윤활제인 흑연을 15vol%첨가한 조성의 혼합체를 24 Mpa의 가압력으로 제조한 시편에서 가장 낮은 마모량과 양호한 마찰계수를 얻었다. 이는 알루미늄 단섬유의 첨가가 기지의 소성유동을 방해하고 균열의 전파를 억제하는 보강재로서의 역할을 나타내었기 때문으로 생각된다.
2. 강화상으로 유리섬유와 알루미늄 단섬유 첨가의 영향을 비교할때 알루미늄 단섬유의 첨가가 내마모성에 우수한 영향을 나타내었다. 이것은 알루미늄 단섬유가 균일하게 분포하였기 때문이라고 생각된다.
3. 상대밀도의 감소는 마찰력과 마모량의 감소를 가져왔다. 이는 고체윤활제로 첨가된 흑연이 시편에 존재하는 미세기공을 메우기 때문이라고 믿어진다.

## 5. 참고문헌

1. M. Eudier and H. Yossef, "Friction Materials in Rail Transportation", Powder Metallurgy, Vol. 35, No. 4, pp. 258-259, 1992.
2. V. A. Tracey, "Powder Materials on Rail Transport", Powder Metallurgy, Vol. 35, No. 1, pp. 34, 1992.
3. N Kumagai, H, Yasuda "The New JR Brake Performance Test Plant Capable of Developing of 500 km/h", QR of RTRI, Vol. 34, No. 3, pp. 154-156, 1993.
4. 고속전철 제동역학 해석 및 시스템 예비설계 기술개발, 한국기계연구소 연구보고서, 1995.
5. 송건, 황순홍, 공호성, 최웅수, 정동윤, 허무영, "Brake Pad용 청동기지 복합재료의 마찰·마모 특성에 관한 연구", 한국윤활학회 1996년도 제23회 춘계학술대회, pp. 63-75. 1996.
6. K. D. Dolbear, "Friction Materials in Rail Transportation", Powder Metallurgy, Vol. 35, No. 4, pp. 258-259, 1992.
7. F. E. Kennedy, "Thermal and Thermochemical effects in dry sliding", Wear, Vol. 100, pp. 453-476, 1984.
8. 정동윤, 김기열, 조정환, "B<sub>4</sub>C 첨가에 따른 동계소결합금마찰재의 특성 변화에 관한 연구", 한국윤활학회 1996년도 제23회 학술대회, pp. 99-107, 1996.
9. 최준호, 허무영, "알루미늄 단섬유 보강 청동기지 복합재의 상온 및 고온 마모", 한국윤활학회지, 제11권 제4호, pp. 45-52, 1995.
10. 최준호, 허무영, "가압소결법으로 제조된 알루미늄 단섬유 보강 청동기지 복합재의 마모특성", 한국소성가공학회지, 4, 4, pp. 398-409, 1995.
11. 이상로, 허무영, "알루미늄 단섬유 및 입자강화 알루미늄 청동기지 복합재의 마모특성", 한국윤활학회지, 10, 3, pp. 39-46, 1994.
12. 이준근, "세라믹스의 소결", 반도출판사, 1987.
13. The Materials Information Society, ASM Handbook Book. 7, Vol. 9, 1984.
14. The Materials Information Society, ASM Handbook Book. 18, Vol. 10, 1992.
15. B. Bhushan, B. K. Gupta, Handbook of Tribology, McGraw-Hill, New York, 1991.
16. H. C. Park, "Wear Behavior of Hybrid Metal Matrix Composites Materials", Script. Met., Vol. 27, pp. 465-470, 1992.