

## 혼성섬유 보강복합재의 마찰 및 마모 특성

주혁중 · 이영재 · 최돈목 · 오인석 · 심규윤

충남대학교 공과대학 고분자공학과

### Friction and Wear Characteristics of Hybrid Fiber Reinforced Composites

H.J. JOO, Y.J. LEE, D.M. Choi, I.S. Oh, K.Y. Sheem

Dept. of Polymer Science & Engineering, Chungnam National University

초 록 페놀수지 결합재에 PAN섬유(PF), PAN계 탄소섬유(CF) 그리고 아라미드 섬유(AF)를 보강재로 사용하여 단일섬유 보강복합재를 제조하였으며 이들 섬유를 각 각 두 종류씩 혼성하여 혼성섬유 보강복합재를 제조하였다. 각 보강복합재를 섬유의 보강분율에 따른 마찰 및 마모특성을 시험하였다.

CF 보강복합재(CFRP)가 마찰계수와 마모량이 가장 낮게 나타났으며, PF 보강복합재(PFRP)는 가장 높은 마찰계수와 마모량을 나타내었다.

PF에 CF나 AF를 보강한 혼성복합재의 경우 마찰계수가 0.311~0.328로 혼성비에 따라서는 큰 차이를 보이지 않은 반면, PF의 보강분율이 증가할 수록 마모량은 증가하였다. CF와 AF를 보강한 혼성복합재의 마찰계수는 0.264~0.309로 가장 낮게 나타났고, AF의 보강분율이 증가함에 따라 마찰계수는 증가하는 양상을 나타내었으며, 가장 적은 마모량과 함께 안정된 마모형태를 보였다.

**Abstract** Single or hybrid type fiber reinforced composites were fabricated with phenolic resin as a matrix and PAN fiber (PF), PAN based carbon fiber (CF), and Aramid fiber (AF) as a reinforcement. And then we tested the their friction and wear properties according to the fiber reinforcing weight fraction.

Carbon fiber reinforced composites (CFRP) has the lowest friction coefficient and wear weight and PAN fiber reinforced composites (PFRP) has the highest one. In case of hybrid type composites made by PAN fiber and PAN based carbon fiber (PF/CF) or PAN and Aramid fiber (PF/AF), their friction coefficients were in the range of 0.311~0.328, and the fiber reinforced amounts of fraction (wt.%) did not effect on friction coefficient. The wear weight was increased with the increase of PAN fiber. In case of hybrid type composites, CF/AF exhibited the lowest friction coefficient (0.264~0.309). And friction coefficient was increased with the increase of Aramid fiber reinforced amounts of fraction (wt%), also wear weight was the lowest and wear diagram was the stablest.

### 1. 서 론

휘스커 (whisker)나 고기능성 섬유들은 비강도와 비강성률 등이 우수하지만 그 자체로는 구조재로 직접 사용하는 것이 불가능하고, 플라스틱 재료는 가벼운 반면에 강도 및 강성률이 낮은 단점을 갖고 있으므로 이들 각 각의 재료로는 엔지니어들의 모든 욕구를 충족시키지 못하였다<sup>12)</sup>.

따라서, 이상적인 엔지니어링 재료를 얻기 위한 방법으로 두가지 또는 그 이상의 특성이

다른 재료들을 조합하여 물성을 상호 보완시켜 주는 복합재 형태로의 개발이 이루어지고 있다.

복합재료에 사용되는 보강섬유에는 탄소섬유, 유리섬유, 아라미드섬유, 보론섬유, 석면섬유 등이 있으며, 결합재와 함께 보강재를 탄소섬유/유리섬유 또는 탄소섬유/아라미드섬유 등과 같이 두 종류 이상의 보강재를 사용하여 혼성복합재로 제조하기도 한다. 혼성복합재는 각 보강재의 장단점을 고려하여 목적에 따라 재료를 설계할 수 있을 뿐만 아니라 물성이

급격한 변화가 일어나지 않는 범위내에서 경제성을 부여해 줄 수 있는 장점을 갖고 있다<sup>3)</sup>.

산업기술의 발달과 더불어 자동차와 산업기계의 고속화, 고성능화에 따라 내열성, 내마모성이 우수하고 높은 강도와 적당히 높은 마찰계수를 갖는 제동장치가 요구되었다<sup>4)</sup>. 제동장치는 많은 산업기계에 없어서는 안되는 중요한 기능부품으로서 운동체의 운동에너지를 제동과정에서 마찰메카니즘에 의해 열에너지로 변환시켜 주어 운동을 정지시키는 기계부품이다.

제동장치에 사용되는 마찰재료에는 석면을 보강재로 하고 페놀수지등의 유기 화합물을 결합재로 한 유기 마찰재, 소결합금을 주체로 한 금속 마찰재, 고분자 복합재 및 탄소/탄소 복합재 등 여러 종류가 있다<sup>5)</sup>.

많은 나라에서는 1960년대말까지 대부분의 제동장치에 보강재로 석면섬유를 사용하였으나 제동시 발생하는 석면마모입자가 발암성분으로 판명되어 이의 사용을 법으로 제한하게 되었다<sup>6~8)</sup>. 한편 1975년 미연방 자동차 안전기준 105조항(Federal Motor Vehicle Safety Standard 105; FMVSS 105)에 의하여 제동안정성을 개선할 목적으로 석면대체물질, 연료절감, 소음문제 등과 같은 요구사항을 법으로 규정한 바 있다<sup>9)</sup>.

최근 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 우수한 트라이볼로지 특성을 갖는 섬유가 개발되고 있으며, 이들 대체섬유를 보강하여 제

작한 고분자 복합재료와 탄소/탄소 복합재는 제동장치가 갖추어야 할 요구사항에 잘 부합되는 재료로서 최근들어 관심의 대상이 되고 있다.

따라서 본 연구에서는 내열성이 우수하고 기계적 강도가 큰 페놀수지를 결합재로 사용하였으며 보강재로 PAN섬유와 탄소섬유 그리고 아라미드섬유를 사용하였다. 이들 보강재의 보강분율을 20~45wt%로 하여 단일섬유 보강복합재를 제조하였고, 각 각 두종류의 섬유를 30wt%가 되도록 혼성 보강하여 혼성 섬유 보강복합재를 제조하였다.

Krauss 마찰시험기로 보강섬유의 종류 및 함유량에 따른 마찰 및 마모 특성을 시험했으며 주사 전자 현미경을 이용하여 복합재의 마찰 및 마모 메카니즘을 관찰하였다.

## II. 실 험

### 1. 실험재료

#### 1-1. 보강재

경제성이 있으면서 낮은 밀도를 갖는 PAN (polyacrylonitrile)섬유, 1400~1500°C까지 탄화처리하여 내열성과 윤활성 및 강도가 우수한 PAN계 탄소섬유와 내열성 및 기계적물성이 우수한 강직한 액정구조로 된 고탄성섬유인 아라미드섬유를 3-5mm의 단섬유 형태로 사용하였으며, 각 보강재의 물성은 Table 1과 같다.

Table 1. Characteristics of the reinforced fibers

Types of Fibers	Diameter [μm]	Density [g/cm <sup>3</sup> ]	Tensile Strength [MPa]	Tensile Modulus [GPa]
PAN Fiber	11.5	1.185	695.4	12.7
PAN based CF	7	1.75	3530	230
Aramid Fiber (Kevlar~49)	12	1.45	2900	134

Table 2. Characteristics of phenolic resin

Melting point [°C]	Fluidity at 125°C [mm]	Humidity [%]	200mesh pass [%]
75~80	30~40	0.8	96

## 1-2. 결합재

### 1-2-1. 페놀수지

결합재 수지로 사용된 수지는 비닐 변성 페놀-포름알데하이드 수지로서 경화제로 헥사메틸렌 테트라민을 첨가한 노블락형 분말상 페놀수지를 사용했으며 수지의 물성은 Table 2와 같다.

### 1-2-2. 고무

복합재에 내충격성 향상과 제동시 소음을 적게하기 위하여 고 acrylonitrile계 공중합체(고무)를 사용하였다.

### 1-3. 충전재

복합재의 마찰 및 마모특성을 향상시키기 위하여 Cashew dust, BaSO<sub>4</sub>, SiO<sub>2</sub>, Graphite, MoS<sub>2</sub>, Fe powder, Cu powder, Brass chip, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> 등의 충전재를 사용하였다.

## 2. 실험방법

단일섬유 보강복합재 제조시 결합재의 양을 20wt%로 고정하고 보강재인 PAN 섬유(PF), PAN계 탄소섬유(CF) 및 아라미드섬유(AF)의 보강분율은 20~45wt%로 하였으며, 마찰 및 마모의 안정성등에 영향을 주는 충전재의 충전율은 35~60wt%가 되도록 혼합하였다. 이렇게 혼합한 보강섬유, 결합재 수지 및 충전재가 균일하게 혼합되도록 다용도 분쇄기에서 1분 동안 3회 고속 회전시켜 성형을 위한 혼합물(molding compound)을 만들었다. 열성형시 20kgf/cm<sup>2</sup>의 압력을 가한 후 서서히 승온시켜 70°C 부근에서 250kgf/cm<sup>2</sup>의 압력을 가한 다음, 결합재 수지가 경화가 시작되는 온도인 130°C에서 1시간, 경화반응이 끝나는 온도인 170°C에서 3시간 동안 충분히 경화시켜 마찰재 시편을 제조하였다.<sup>(10)</sup>

혼성섬유 보강복합재는 단일섬유 보강복합재의 마찰 및 마모 특성을 예비실험을 통하여 시험한 결과를 토대로 결합재의 양은 20wt%로 고정시키고, CF/PF, PF/AF 및 AF/CF 등 보강재의 총 보강분율은 30wt%, 이들의 혼성비는 각각 무게분율로 15/15, 10/20, 20/10으로 하였다. 그리고 모든 경우에 있어서 충전재의 충전율은 50wt%로 고정시켰으며 위의 단일섬유 보강복합재의 제조시와 동일한 방법으로 성형하였다.

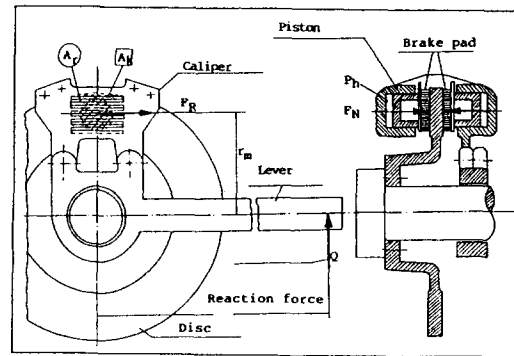


Fig. 1. Schematic diagram of the KRAUSS friction tester.

## 3. 마찰성능시험

복합재의 마찰성능 시험은 독일 KRAUSS사의 RW-DS 3099/87로, Fig. 1과 같은 시험장비를 사용하여 ATE N 54327(disk on disk method)의 시험방법으로 마찰 및 마모 시험을 통하여 동마찰계수를 측정하였다. 상대 마찰면은 FC. MP 55(pearlite)를 사용하였고 시편의 크기는 60mm×40mm×10mm (L×W×H)로 하였다. 이때의 시험조건은 다음과 같다.

- i) 제동관속도 : 660±10rpm (7.5m/sec)
- ii) 제동압력 : 20bar
- iii) 총 제동시간 : 700sec

## 4. 주사전자현미경 관찰

마찰시험 전, 후 복합재의 형태변화 및 마찰, 마모 메카니즘을 규명하기 위하여 일본 아카시사의 DS-130 주사전자현미경을 사용하여 관찰하였다.

## III. 결과 및 고찰

### 1. 단일섬유 보강 복합재의 마찰 및 마모 특성

결합재 페놀수지를 20wt%로 고정시키고 보강재인 PAN 섬유(PF), PAN계 탄소섬유(CF) 및 아라미드섬유(AF)의 보강분율을 다르게하여 마찰과 마모특성에 각 섬유 특성이 미치는 영향에 대하여 관찰하였다.

Fig. 2는 각 보강섬유의 종류별 보강분율에 따른 마찰계수와 마모량을 나타낸 것으로 탄소섬유를 보강한 복합재(CFRP)가 마찰계수와 마모량이 가장 낮게 나타났으며 PAN섬유

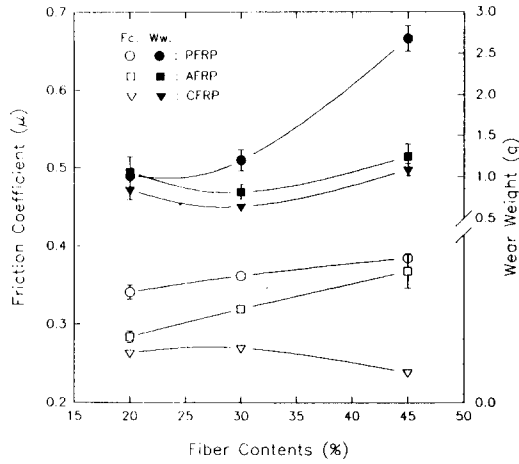


Fig. 2. Mean friction coefficient and wear weight as a function of fiber content in fiber reinforced composites.

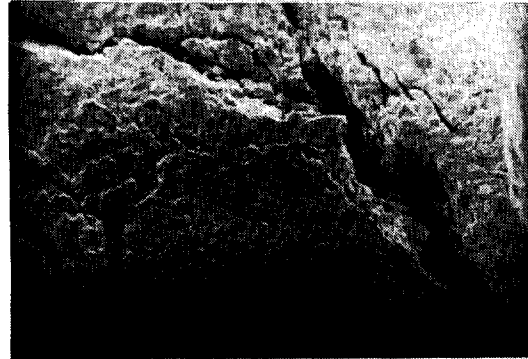
로 보강한 복합재(PFRP)는 가장 높은 마찰계수와 마모량을 나타내었다.

섬유의 보강분율이 증가함에 따라 마찰계수가 아라미드섬유로 보강한 복합재(AFRP)와 PFRP는 증가하였으나 CFRP는 45wt%로 보강한 경우 0.235까지 오히려 감소하는 경향을 보였다.

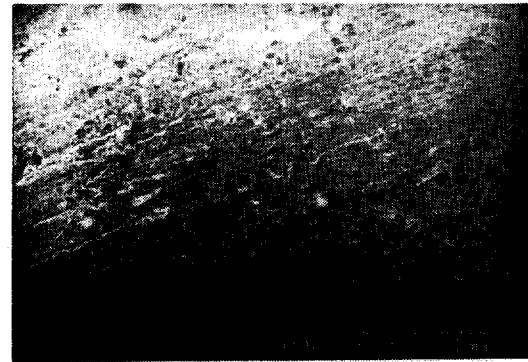
마모량에 있어서 PFRP는 섬유의 보강분율이 증가할수록 계속적으로 증가하였으며 45wt%를 보강한 경우 2.790g으로 가장 높게 나타내었고, CFRP와 AFRP는 섬유분율이 30wt%일 때 가장 낮게 나타났다.

PFRP가 CFRP와 AFRP에 비해 높은 마찰계수와 마모량을 나타낸 이유는 낮은 물성과 함께 보강된 PAN섬유의 밀도가 1.185g/cm<sup>3</sup>로 탄소섬유(1.750g/cm<sup>3</sup>)와 아라미드섬유(1.450g/cm<sup>3</sup>)의 밀도보다 낮기 때문에 복합재내의 보강재의 부피가 상대적으로 크므로써 결합재와의 결합력 약화에 따라 마찰에 의해 쉽게 탈리 되었기 때문으로 판단된다.

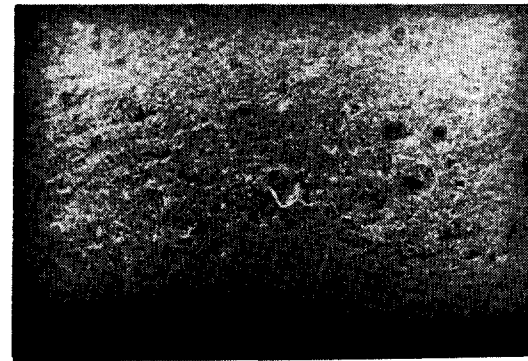
Photo 1은 마찰시험을 마친 후, 각 복합재의 마찰표면을 주사전자현미경 관찰 사진으로서 PFRP는 결합력 약화에 따른 거대한 크랙이 발생하였으며 CFRP와 AFRP의 마찰표면은 대체적으로 양호하게 나타났음을 볼 수 있었다. 이같은 경향은 PAN섬유는 기계적 강도가 낮을 뿐만아니라 내열성이 약하므로써 마찰시 발생하는 높은온도(400~600℃)에 의해



(a)



(b)



(c)

Photo 1. SEM photographs of worn surface of fiber reinforced composites(X20) (a) PFRP, (b) CFRP, (c) AFRP.

서 산화와 함께 섬유의 절단현상이 발생하여 보강효과를 발휘하지 못하였기 때문으로 판단된다. 그러나 탄소섬유와 아라미드섬유는 기계적강도와 내열성이 보다 우수하기 때문에 양호한 보강효과와 더불어 안정한 마찰표면을 나타낸 것으로 판단된다.

## 2. 혼성섬유 보강복합재의 마찰 및 마모 특성

단일섬유로 보강한 복합재에서 섬유의 보강

분율이 30wt%일 때 적당한 마찰계수와 낮은 마모량을 나타내었으므로 두 종류 섬유와의 전체 혼성 보강분율을 30wt%가 되도록하고 10/20, 15/15, 20/10의 혼성비율로 보강하여 마찰 및 마모 특성을 관찰하였다.

Fig. 3은 각 혼성섬유 보강 복합재의 혼성비에 따른 마찰계수를 나타낸 것으로서 CF/PF로 보강한 복합재는 두 섬유의 보강비가 30wt%일때 나타난 0.268~0.368의 중간값인 0.322~0.328로 나타났으며 혼성비에 따른 변화가 거의 없었다.

탄소섬유만으로 30wt% 보강하였을 때보다 혼성보강 하였을 경우가 높은 마찰계수를 나타낸 것은 PAN섬유가 마찰열에 따른 산화에 의하여 결합력 약화로 대규모의 마모파편이 방출되고 표면이 거칠어짐으로써 탄소섬유의 유효효과와 내열효과가 반영되지 못하여 마찰계수가 증가한 것으로 보여진다.

PF/AF로 보강한 복합재의 마찰계수는 CF/PF의 마찰계수와 유사하게 나타났으며 아라미드섬유만으로 30wt% 보강하였을 때의 마찰계수와 유사하게 나타난 것을 볼 때 혼성효과가 크지 않음을 알 수 있었다.

AF/CF로 보강한 복합재는 0.264~0.309로 가장 낮은 마찰계수를 나타내었으며 아라미드 섬유의 양이 증가함에 따라 약간 상승하는 양상을 나타내었다.

AF/CF가 가장 낮은 마찰계수를 나타낸 것은 PAN섬유로 혼성한 복합재보다 기계적 강도와 내열성이 우수하고 탄소섬유의 자체 유효성이 뛰어나므로 상대면과의 미끄러짐 현상을 일으켰기 때문으로 판단된다.

Fig. 4는 혼성섬유 보강 복합재의 혼성비에 따른 마모량을 나타낸 것으로서 CF/PF는 10/20에서 높은 마모량을 갖는 PAN섬유의 경향이 반영되어 0.888~0.920g으로 크게 나타났으나, 탄소섬유의 보강비가 증가함에 따라 낮은 마모량을 갖는 탄소섬유의 특성이 잘 반영되어 감소되었음을 알 수 있었다.

PF/AF는 전반적으로 가장 높은 마모량을 나타냈으며 15/15에서 부터 PAN섬유의 특성이 반영되어 급격하게 상승하였다. 특히 PF/AF가 20/10에서는 마모량이 1.260~1.290g으로 PAN섬유를 30wt% 보강하였을 경우의 마모량 1.110~1.290g과 유사하거나 높게 나타

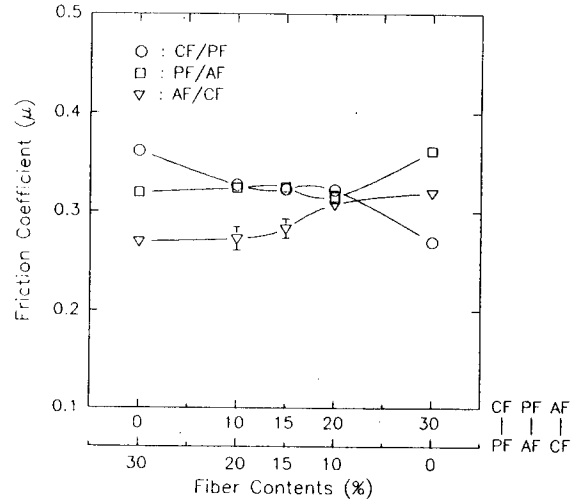


Fig. 3. Mean friction coefficient as a function of fiber content in hybrid fiber reinforced composites.

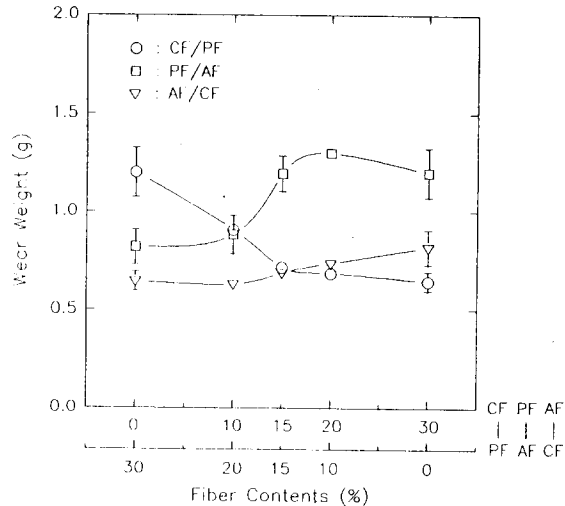


Fig. 4. Wear weight as a function of fiber content in hybrid fiber reinforced composites.

난 것으로 보아 혼성효과가 없었음을 알 수 있었다.

AF/CF에서도 역시 탄소섬유의 특성이 반영되어 낮은 마모량을 나타내었으며 혼성비에 따라서는 큰 영향이 없는 것을 알 수 있었다.

전반적으로 탄소섬유와 아라미드섬유의 양이 증가할 수록 가장 낮은 마모량을 나타내었으며 PAN섬유를 보강한 혼성복합재는 PAN섬유 자체의 기계적강도와 열안정성이 낮으므로 PAN섬유의 양이 증가할수록 결합체와의 결합력 약화에 따른 대규모의 마모가 일어났음을 알 수 있었다.

마찰안정성은 Fig. 5와 같이 마모 diagram

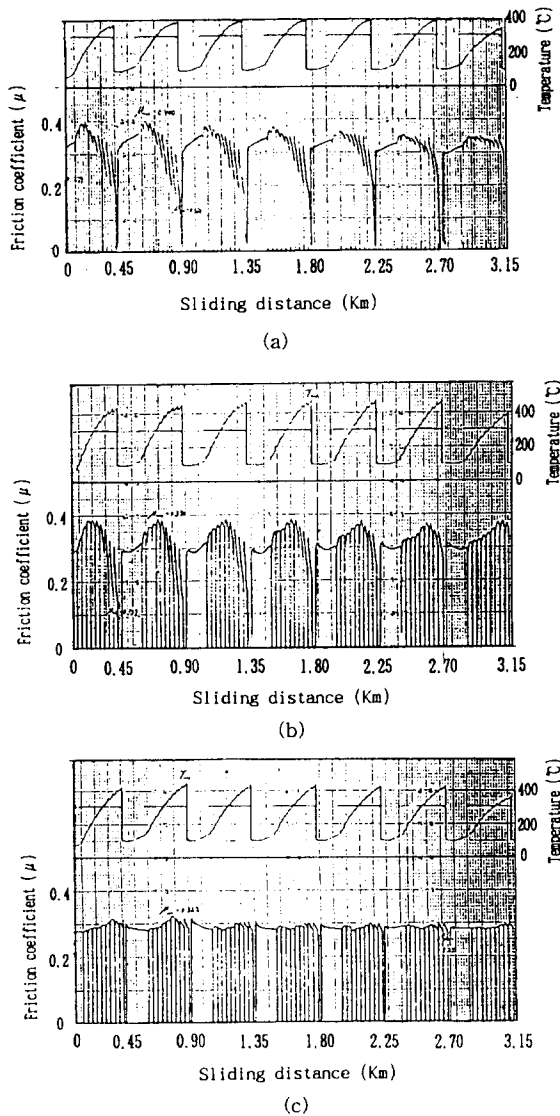


Fig. 5. Wear and friction test diagram of hybrid fiber reinforced composites (a) CF/PF, (b) PF/AF, (c) AF/CF.

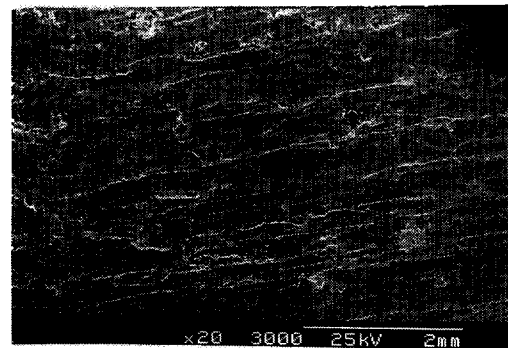
을 통하여 관찰 할 수 있는데 CF/PF는 마찰 표면의 온도가 증가할 수록 마찰계수가 감소하는 fade 현상이 나타났으며 마모거리가 증가할 수록 안정화되는 경향을 보였다. PF/AF는 계속적으로 불안정하였으며 AF/CF가 가장 안정한 마모 diagram을 나타냈다.

### 3. 혼성섬유 보강 복합재의 마모메카니즘 관찰

Photo 2(a)는 CF/PF를 15/15로 혼성한 복합재의 마찰면을 20배로 확대한 사진으로 마

찰 방향으로 크랙 형성과 연삭마모면이 관찰되었으며, Photo 1(a)의 PAN섬유만으로 보강한 복합재의 마찰면에서 볼 수 있었던 대규모의 크랙은 관찰되지 않았다. 이같은 현상은 탄소섬유가 어느정도 열차단 역할과 보강효과를 발휘하였기 때문으로 판단된다. 400배로 확대한 Photo 2(b)에서는 작은 hole과 섬유가 이탈된 자리를 관찰 할 수 있었다. 이 같은 현상은 PAN섬유가 높은 마찰열에 의해서 산화되었으며 마찰이 진행됨에 따라 결합재와의 결합력이 약화되었기 때문으로 보여진다.

Photo 3은 PF/AF를 15/15로 혼성한 복합재의 마찰면을 확대한 사진으로서 역시 PAN섬유의 산화에 따른 결합력 약화와 계속되는 피로에 의해서 대규모적인 이탈현상과 불안정한 마찰면이 관찰되었다. 아라미드섬유의 찢김(tearing)현상을 볼 수 있었으며 아라미드섬유와 PAN 섬유간의 상용성이 떨어짐을 알 수 있었다.

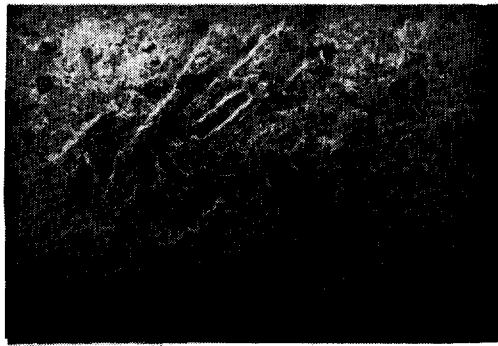


(a)



(b)

Photo 2. SEM photographs of worn surface of hybrid fiber(CF/PF) reinforced composites (a)×20, (b) ×400.



(a)



(b)

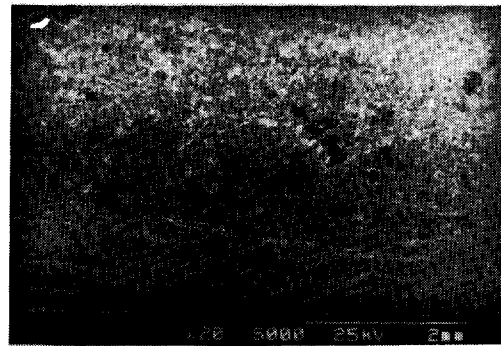
Photo 3. SEM photographs of worn surface of hybrid fiber(PF/AF) reinforced composites (a) $\times$ 20, (b) $\times$ 400.

Photo 4는 AF/CF를 15/15로 혼성한 복합재의 마찰면은 20배로 확대한 사진으로서 대체적으로 안정한 마찰면을 관찰할 수 있었다. Photo 4(b)에서 보면 전반적인 마찰면이 탄소섬유의 윤활성으로 인하여 연한마모와 미끄러짐 마모가 잘 조화를 이루고 있음이 관찰되었다.

#### IV. 결 론

페놀수지를 결합재로 하고 보강재로 PAN섬유와 탄소섬유 그리고 아라미드섬유를 사용하여 단일섬유보강 복합재를 제조하였고, 두 종류의 섬유를 혼성하여 혼성섬유 보강복합재를 제조하여 보강섬유의 종류 및 함유량에 따른 마찰 및 마모 특성을 관찰하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) CFRP가 마찰계수와 마모량이 각각 0.235~0.268, 0.645~1.083g으로 가장 낮게 나



(a)



(b)

Photo 4. SEM photographs of worn surface of hybrid fiber(AF/CF) reinforced composites (a) $\times$ 20, (b) $\times$ 400.

타냈고 PFRP는 마찰계수가 0.342~0.385, 마모량이 1.013~2.790g으로 가장 높게 나타났으며, CFRP와 AFRP가 대체적으로 안정한 마찰표면을 나타내었다.

2) CF/AF로 보강한 혼성복합재의 마찰계수는 0.311~0.328로 혼성비에 따른 영향은 거의 없었으나 AF/CF는 0.264~0.309로 가장 낮은 마찰계수를 나타내었으며 아라미드섬유의 양이 증가함에 따라 약간 상승하는 양상을 나타내었다.

3) PF/AF가 가장 높은 마모량을 나타냈으며 혼성비가 20/10일때 1.260~1.290g으로 가장 높게 나타났다. 대체적으로 탄소섬유와 아라미드섬유는 이들의 보강분율이 증가함에 따라 마모량이 감소하는데 기여하였으며 PAN섬유가 보강된 혼된 혼성복합재는 PAN섬유의 양이 증가함에 따라 마모량이 증가하는데 기여하였다.

4) CF/PF는 마찰표면의 온도가 증가할 수

록 마찰계수가 감소하는 fade 현상이 나타났으며 마모거리가 증가할 수록 안정화되는 경향을 보였다. PF/AF가 불안정한 마모 diagram과 거친 마찰면을 나타내었으며 AF/CF에서는 가장 안정한 마모 diagram과 연한 마찰면을 나타내었다.

#### REFERENCES

1. Watt, W and Perov, B. V., "Strong Fibres", Elsevier Science Publishers, B.V., Amsterdam(1985).
2. Manocha, L.M. "Development and Characterization of Carbon Fibers", Ph. D. Thesis, Delhi Univ., (1976).
3. John W. Weeton etal., "Engineer's Guide to Composite Materials", ASM 3-3(1986).
4. Tanaka, k., Veda, s. and Nogodu, N., Wear, 23, 349(1973).
5. Klein B. W., Semimetallics: A new type of friction materials, SAE paper 710591, Society of Automotive Engineers, (1971).
6. Heidermans, C. and Schutz, A., Staub-Reinhaltung Luft 35, 433 (1975).
7. Gross, P. and Braun, D.C., Chem. Tech., 436(1980).
8. N. N, Chemical and Engineering News, 9 (1984).
9. Title 49, Code of Federal Regulations, Hydraulic brake systems, Federal Motor Vehicle Safety Standard 105, Ch. V(1975).
10. 주혁종의 3인, "섬유보강 복합재의 마찰 및 마모 특성" 한국재료학회지 4(7), 735 (1994).