

섬유보강 복합재의 마찰 및 마모특성

주혁중 · 최돈목 · 오인석 · 홍명호

충남대학교 공과대학 고분자공학과

Friction and Wear Properties of Fiber Reinforced Composite

H. J. Joo, D. M. Choi, I. S. Oh, M. H. Hong

Dept. of Polymer Science & Engineering, Chungnam National University

초 록 페놀수지 결합재에 보강섬유의 종류에 따라서 내열섬유 보강 복합재(OFRP), 탄소섬유 보강 복합재(CFRP), 유리섬유 보강 복합재(GFRP), 아라미드 섬유 보강 복합재(AFRP)를 제조하였다. 각 보강섬유의 분율을 달리함에 따라 마찰계수 및 마모율을 측정하여 각 보강섬유의 특성이 미치는 영향을 관찰하였다.

아라미드의 섬유량이 45wt%일 때 평균 마찰계수가 0.353~0.383으로 가장 높게 나타난 반면에 찻치계 탄소섬유를 45wt% 보강한 경우는 0.164~0.190으로 가장 낮게 나타났다.

AFRP와 CFRP의 마모율은 낮게 나타났으며, GFRP와 OFRP는 섬유분율이 증가함에 따라 급격히 증가하는 양상을 보였다.

OFRP는 마모 diagram이 불안정하였으며 CFRP와 AFRP는 대체적으로 안정한 형태를 나타내었다. GFRP는 상당히 불안정한 마모 diagram을 나타낸 것으로 보아 마찰 안정성이 가장 떨어짐을 알 수 있었다.

Abstract Oxidized-PAN fiber reinforced composite(OFRP), carbon fiber reinforced composite(CFRP), aramid fiber reinforced composite(AFRP), and glass fiber reinforced composite(GFRP) were fabricated with phenolic resin matrix by hot press molding.

We tested the friction coefficient and wear rate varying with fiber weight fraction and observed the effect of fibers according to characteristics of individual reinforcement.

When the amount of aramid fiber was 45wt%, average friction coefficient was maximum value of 0.353~0.383, where as, when the amount of pitch based carbon fiber was 45wt%, average friction coefficient was the lowest value of 0.164~0.190.

The wear rate of AFRP and CFRP was low, but that of GFRP and OFRP increases drastically in the case of increasing of fiber weight fraction.

Wear diagram of OFRP was unstable, but that of CFRP and AFRP was a bit stable.

Through very unstable diagram of GFRP, we found that friction stability of GFRP was the lowest.

I. 서 론

섬유보강 고분자 복합재료(FRP)는 보다 우수한 물리적, 화학적 물성을 얻기 위해서 고분자 기질(matrix)에 섬유를 보강 하거나, 무기물, 휘스커(whisker) 등을 충전하여 제조되어진다. 이것은 경량, 고강도, 고탄성률, 내마모성, 내식성 등의 우수한 성질을 지니고 있어 기존의 금속재료 등을 대체할 수 있는

대단히 매력적인 첨단복합재료(advanced composite materials; ACM)이다.

보강섬유로는 탄소섬유, 유리섬유, 아라미드 섬유, 보론섬유, 석면섬유 등이 사용되고 있으며, 이들 섬유를 보강한 복합재에 여러 종류의 마찰 및 마모 특성을 나타내는 충전물을 첨가하여 제동장치와 같은 새로운 특수 용도 복합재를 제조하는 연구가 진행되고 있다.

특히 현재 사용되고 있는 대부분의 제동장

치는 보강재로 석면을 사용하고 있는데, 석면은 폐질환, 발암성 등 인간에게 결정적인 위험물질로 판명되어 많은 나라에서 이의 사용을 법으로 제한하게 되면서 대체재료 개발의 필요성이 절실하게 되었다¹⁻³⁾.

제동장치로서 요구되는 성질은 적당히 높은 마찰계수와 높은 온도에서의 마찰계수의 저하가 일어나지 않아야 하며, 높은 열안전성, 높은 강도, 약간의 탄력성, 낮은 마모성, 유체의 흐름에 대한 저항성 그리고 제동시 소음이 없어야 한다⁴⁻⁷⁾.

트라이볼로지(tribology)란 상대운동을 하면서 서로가 영향을 미치는 표면 및 이와 관련된 제반문제와 실제 응용면에 관한 과학기술이다⁸⁾. 다시 말해서 운동체의 마찰, 마모 및 윤활과 관계 있는 학문이다.*

트라이볼로지에 대한 연구는 신소재 및 내마모성재료를 대상으로 활발히 연구가 진행되고 있다. 결합재에 섬유 및 무기입자를 충전하여 제조한 재료를 트라이보 복합재라 칭하며, 이 재료는 비윤활 베어링, 기어, 클러치, 연삭공구, 브레이크 등에 사용되고 있다⁹⁾.

ASLE는 마찰과 마모에 영향을 주는 인자는 대단히 많으며 대체적으로 다음과 같다고 발표하였다¹⁰⁾.

a) 온도, b) 하중, c) 속도, d) 접촉면적, e) 미끄럼 거리, f) 기하학적 구조, g) 환경, h) 재료의 특성, i) 표면 거칠기, j) 진동, k) 윤활재의 종류

Lancaster등은 여러 종류의 수지에 탄소섬유를 보강하여 마모율을 조사하였으며, 이들은 수지의 충전재로 고체 윤활제인 흑연 또는 황화 몰리브덴(molybdenum sulfide) 등이 첨가되었을 때 마찰이 일어나는 동안 상대마찰면의 계면으로 옮겨가서 마찰과 마모를 감소시키는 결과를 얻은 바 있다¹¹⁾.

본 연구에서는 내열성이 우수하고 기계적 강도가 큰 페놀수지를 결합재로 사용하였으며, 탄소섬유 중간물질인 내염(oxidized) PAN섬유, 등방성 핏치계 탄소섬유, 유리섬유, 아라미드섬유를 보강재로 사용하였다. 이들의 기하학적 형태는 모두 단섬유 형태였다. 여기에 마찰 및 마모 특성을 나타내는 유기, 무기 및 금속계 분말을 충전하여 압축 열성형하였다. 또한 Krauss 마찰시험기를 사용하여 보강

섬유의 종류 및 함유량에 따른 트라이볼로지적인 특성을 고찰하였으며 주사 전자 현미경을 사용하여 마찰재의 마찰 및 마모 메커니즘을 관찰하였다.

II. 실험

1. 실험재료

1-1. 보강재

섬유보강 복합재를 제조하기 위하여 3~5mm의 단섬유 형태의 Oxidized PAN 섬유, 핏치계 탄소섬유 및 아라미드섬유 그리고 유리섬유를 보강섬유로 사용하였다. 각 보강섬유의 물성을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Characteristics of the reinforced fibers.

Types of fibers	Density [g/cm ³]	Tensile strength [MPa]	Tensile Modulus [GPa]
Isotropic pitch based CF	1.65	720	32
Oxi-PAN fiber	1.36	90-110	0.2-0.4
Aramid fiber (Kevlar-49)	1.45	2900	134
Glass Fiber	2.55	3500	70

1-1-1. 내염 PAN섬유

내염 PAN섬유는 영국 Hysol Grafil Ltd.에서 생산한 SAF라는 상품명으로서 Acrylonitrile 93%, Methylacrylate 6%, 그리고 Itaconic acid 1%인 삼원 공중합체이다. 공기중 230°C에서 2시간 산화시킨 것을 사용하였다.

1-1-2. 탄소섬유

핏치계 탄소섬유는 등방성 탄소섬유의 단섬유 형태로 생산된 것을 사용하였다.

1-1-3. 아라미드섬유

아라미드(케블라)섬유는 미국 Dupont사에서 개발된 강직한 액정구조를 갖는 섬유로서 배양, 결정화시킨 고탄성 섬유를 사용하였다.

1-1-4. 유리섬유

한국 화이바(주)의 제품으로 RCS-E형이며 섬유의 표면을 실란계 coupling agent로 처리한 단섬유를 사용하였다.

1-2. 결합재

1-2-1. 페놀수지

비닐 변성 페놀-포름알데하이드 수지에 경

화제로 헥사메틸렌 테트라아민이 첨가된 노블락 형태의 분말상 페놀수지를 사용했으며, 수지의 물성은 Table 2와 같다.

Table 2. Characteristics of phenolic resin

Melting point(°C)	Fluidity at 125°C(mm)	Humidity (%)	200mesh pass(%)
75-85	30-40	0.8	96

1-2-2. 고무

복합재에 내충격성을 부여하고 재동을 부드럽게 해줌으로서 재동시 소음을 적게 하기 위하여 하이카-1411의 상품명인 고 acrylonitrile 계 공중합체(고무)를 사용하였으며 밀도는 $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ 이다.

1-3. 충전재

복합재의 마찰 및 마모특성을 보다 양호하게 하기 위하여 Cashew dust, BaSO_4 , SiO_2 , Graphite, MoS_2 , Fe powder, Cu powder, Brass chip, Al_2O_3 , TiO_2 등의 충전재를 사용하였다.

2. 실험방법

섬유강화 복합재에 대한 배합설계는 결합재 수지를 20wt%, 각각 보강섬유의 분율을 18-45wt%, 그리고 충전재는 35-62wt%로 계량하여 다용도 분쇄기에서 1분 동안 3회 고속 혼합시켜 균일한 혼합물을 만들었다. 그 혼합물의 일정량을 성형틀에 넣고 열성형하였다. 열성형 온도와 압력 profile은 Fig.1과 같다. $20\text{kgf}/\text{cm}^2$ 의 압력을 일차적으로 가한 후 온도를 서서히 올려 용융점인 80°C 부근에서 $250\text{kgf}/\text{cm}^2$ 의 압력을 가했다. 경화는 최초 경화가 시작되는 온도 130°C 에서 1시간, 그리고 경화반응이 끝나는 170°C 에서 3시간 동안시

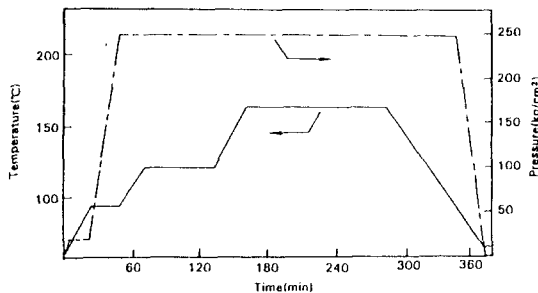


Fig. 1. Profile of the temperature and pressure of hot press molding for the fiber reinforced composites.

켰다.

3. 마찰성능시험

복합재의 마찰 성능 시험은 KRAUSS사의 RW-DS 3099/87을 사용하여 행하였으며, 시험방법은 ATE N 54327(disk on disk method)에 의거 하였으며 상대 마찰면은 FC. MP 55 (pearlite)를 사용하였다. 시편의 크기는 $60\text{mm} \times 40\text{mm} \times 10\text{mm}$ (L×W×H)로 하였으며 이때의 시험조건은 다음과 같다.

i) 재동판 속도 : $660 \pm 10\text{rpm}$ (7.5m/sec)

ii) 재동 압력 : 20bar

iii) 총 재동시간 : 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. 보강섬유의 종류와 섬유분율에 따른 마찰 및 마모 특성

복합재의 트라이볼로지적인 특성에 영향을 미치는 요소는 상당히 많으나, 복합재내의 보강재, 결합재 및 충전재 등에 따라서 상당한 영향을 받게 된다.

따라서 각 보강섬유의 분율을 달리하여 마찰계수 및 마모량을 측정하고 각 섬유의 특성이 미치는 영향을 관찰하였다.

Fig. 2는 각 보강섬유의 분율에 따른 평균 마찰계수를 나타낸 것으로서 아라미드 섬유보강 복합재(AFRP)가 섬유분율이 증가함에 따라서 마찰계수가 선형적으로 증가하였으나 등방성 핏치계 섬유보강 복합재(CFRP)는 섬유분율이 증가함에 따라 오히려 감소하는 경향을 나타내었다.

아라미드의 섬유량이 45wt%일 때 평균마찰계수가 0.353~0.383으로 가장 높게 나타난 반면에 등방성 핏치계 섬유를 45wt% 보강하였을 경우는 0.164~0.190으로 가장 낮게 나타났다. 한편 유리섬유 보강 복합재(GFRP)와 Oxi-PAN섬유 보강 복합재(OFRP)는 AFRP와 CFRP의 중간값을 나타내었다. 아라미드섬유는 분자의 배향이 섬유축방향으로 발달되었으며 이로 인한 이방성 특성으로 상대면과의 마찰시 상당한 마찰력이 요구되어 마찰계수가

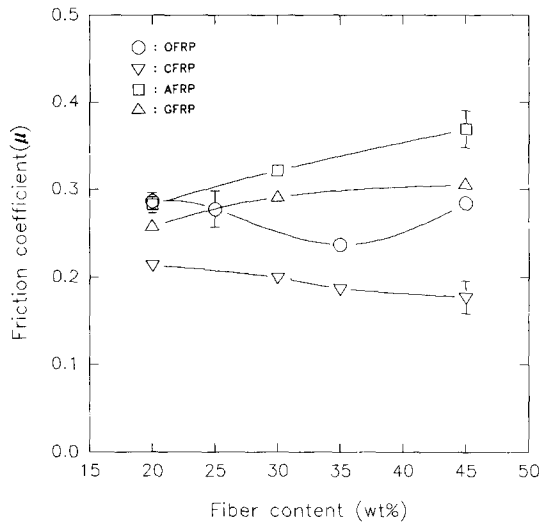


Fig. 2. Mean friction coefficient as a function of fiber content in fiber reinforced composites.

높은 것으로 판단된다. 탄소섬유는 섬유의 배향이 잘 이루어져 있기는 하지만 섬유 자체의 윤활성이 좋은 특성을 갖고 있으므로 상대면과의 미끄러짐이 잘 이루어져 낮은 마찰계수를 나타낸 것으로 판단된다.

Fig. 3은 각 보강섬유의 분율에 따른 마모량을 나타낸 것으로서 마찰계수와는 상이하게 평균 마찰계수가 가장 높게 나타난 AFRP가

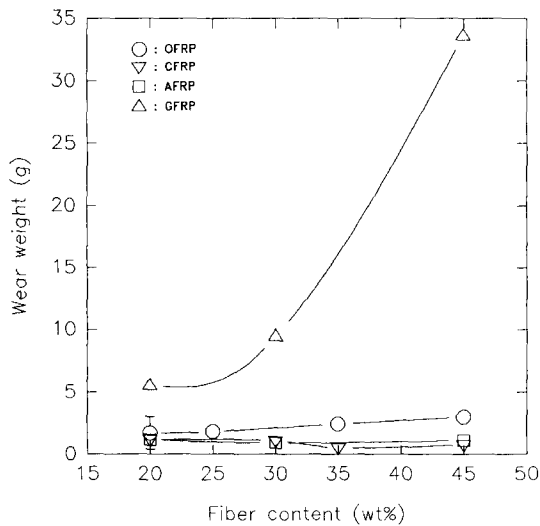


Fig. 3. Wear weight as a function of fiber content in fiber reinforced composites.

CFRP와 비슷한 값으로 낮게 나타내었다. 그러나 평균 마찰계수가 중간값을 나타낸 GFRP는 섬유분율이 증가함에 따라 급격히 증가하는 양상을 보였다. GFRP의 경우 섬유분율이 45wt%일 경우 마모량이 33.645g으로서 같은 분율에서 CFRP에 비해 무려 30배 이상의 마모량을 나타내었다. 마모의 원인은 시험조건과 재료특성에 의하여 많이 좌우되지만, 상대면의 재질특성이나 표면특성에 의해서도 영향을 받게 된다.

유리섬유의 경우 경도가 높아 상대면에 연삭을 일으켜 주브로서 거칠은 접촉면 즉, 돌출부(asperity)에서 응력이 집중되어 마모가 높게 나타났다. 또한 상대면이 거칠어지면 섬유의 파괴원인이 동반되어 대규모의 연삭마모를 일으키므로 대규모의 마모가 일어난 것으로 판단된다.

Fig. 4는 각 섬유분율에 따른 마찰 표면에서 발생하는 최고 마찰온도를 나타낸 것으로서 GFRP와 OFRP가 최대 561°C와 580°C로 상당히 높은 온도를 나타내었다. Fig. 3에서 나타낸 마모 양상과 유사하였으며 윤활특성과 고온특성을 갖고있는 등방성 핏치계 섬유의 경우 최저값을 나타내었다. 이 같은 경향은 Fig. 2, 3에서 언급된 섬유의 특성에 의해서 나타낸 것으로 보여지며 최대 마찰계수의 값이 상당히 높게 나타낼 수 있는 원인이 되어

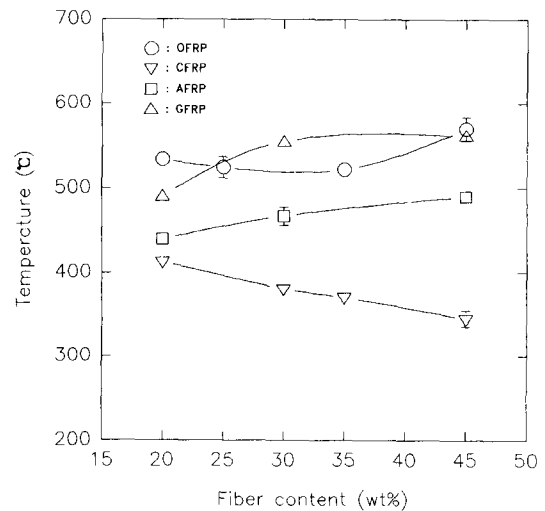


Fig. 4. Maximum contact temperature as a function of fiber content in fiber reinforced composites.

마찰 안정성이 좋지 못한 경향을 나타낼 수 있음을 알 수 있었다.

Fig. 5, 6은 섬유의 종류별 마찰계수에 따른 마모량과 마찰 표면온도를 나타낸 것으로서 마찰계수가 증가함에 따라서 선형적으로 증가하는 양상을 보여주고 있다.

앞에서 언급 하였듯이 CFRP가 가장 낮은 마찰계수와 마모량 및 표면온도를 나타낸 반

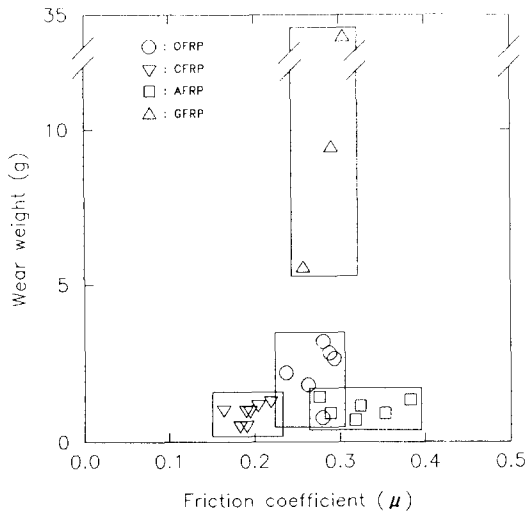


Fig. 5. Wear weight as a function of mean friction coefficient in fiber reinforced composites.

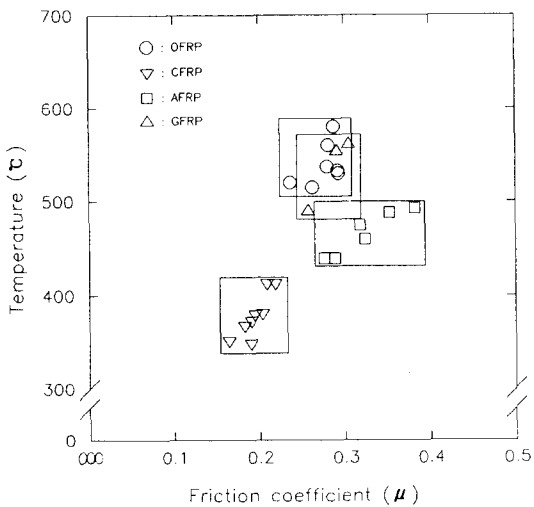


Fig. 6. Maximum contact temperature as a function of mean friction coefficient in fiber reinforced composites.

면, AFRP는 마찰계수가 높은 반면에 낮은 마모량을 보여주고 있으며, GFRP가 마찰계수가 높으면서 가장 많은 마모량을 보여주고 있다.

2. 보강섬유의 종류에 따른 마찰안정성

복합재의 마찰 안정성은 원활한 제동효과와 함께 복합재와 상대 마찰면과의 상호 관계를 이해하는데 중요한 요소가 된다.

보강섬유의 종류에 따른 마찰 안정성은 마모 diagram을 통하여 관찰할 수 있다.

각 복합재의 보강섬유 함유량별로 나타난 전반적인 마모 diagram 양상을 Fig. 7~10에 나타내었다.

Fig. 7은 OFRP의 마모 diagram을 나타낸 것으로 모든 OFRP에서 같은 양상을 보여주고 있으며 섬유 특성상 Oxi-PAN은 최종적으로 저온에서 안정화 단계를 거친 섬유이기 때문에 기계적 특성이 PAN섬유나 탄소섬유에 비해 월등히 낮다. 그러므로 마찰시험시 마찰

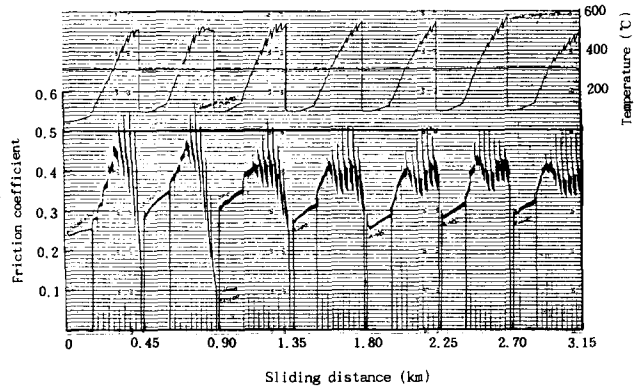


Fig. 7. Wear and friction test diagram of oxi-PAN fiber reinforced composites.

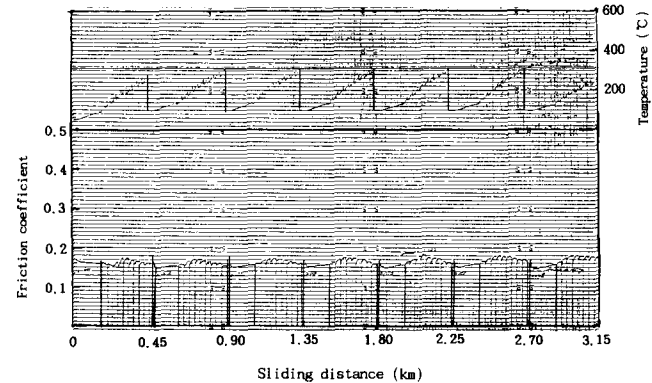


Fig. 8. Wear and friction test diagram of carbon fiber reinforced composites.

온도가 증가함에 따라 fade현상을 나타낸 것으로 생각된다.

Fig. 8에 CFRP의 등방성 핏치섬유를 35% 보강한 복합재의 마모 diagram을 나타냈으며 대체적으로 안정한 형태를 나타내고 있음을 볼 수 있다.

이는 등방성 핏치계 탄소섬유의 탄소격자층이 잘 적층되어 있으며 자체 윤활효과와 함께 적당한 강도를 유지하고 있으므로 다른 보강 섬유보다 낮게 나타난 것으로 판단된다.

Fig. 9는 AFRP의 마모 diagram을 나타낸 것으로 초기 제동시 마찰계수가 급상승 하였다가 표면이 안정화되어 마찰이 진행됨에 따라 대체적으로 안정한 형태를 보여주고 있다.

강직한 액정고분자의 특성이 부여될 뿐만 아니라 결합재와 결합특성이 우수하여 보강효과가 양호하기 때문에 마찰표면에서 마찰력이 많이 발생하지만 마모가 적게 일어나는 것으로 판단된다.

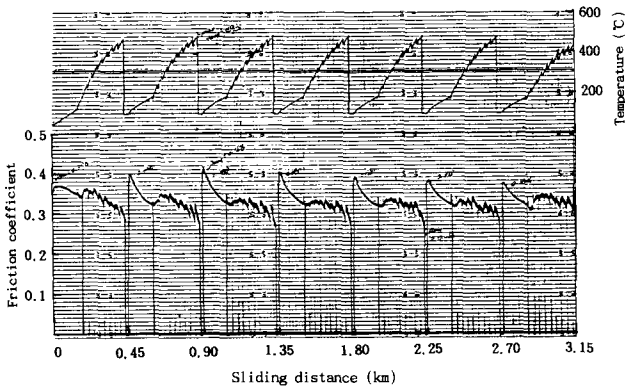


Fig. 9. Wear and friction test diagram of aramid fiber reinforced composites.

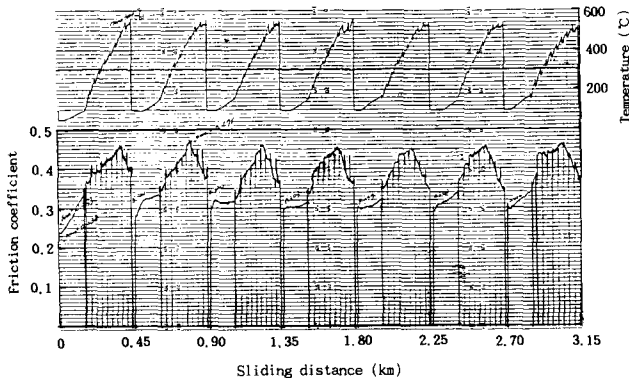


Fig. 10. Wear and friction test diagram of glass fiber reinforced composites.

Fig. 10은 GFRP의 마모 diagram을 나타낸 것으로 상당히 불안정한 마모 diagram을 보여주고 있으며 유리섬유가 상대면과의 연삭마모를 일으켜 대규모의 마모를 일으킨 것으로 판단된다.

3. 섬유보강 복합재의 마모 메카니즘 관찰

보강섬유의 종류에 따른 마모 메카니즘을 규명하기 위하여 주사 전자 현미경을 사용하여 마찰 시험후 마찰면을 관찰하였다.

Photo. 1(a)는 OFRP의 마찰면을 200배 확대한 주사 전자 현미경 사진으로서 보강된 Oxi-PAN 섬유가 rigidity가 떨어지는 고분자 섬유이기 때문에 섬유간에 뒤엉키는 현상에 의하여 혼합이 잘 이루어지지 않은 것을 관찰할 수 있었다.

거대한 크랙이 형성되었음을 관찰할 수 있었는데 이 같은 현상은 Oxi-PAN섬유가 결합재와의 결합력 저하에 따른 섬유의 이탈현상이 발생될 뿐만 아니라, 특히 보강섬유가 적은 취약한 부분에서 계속되는 피로에 의하여 마찰표면 하부에 까지 응력이 전달되어 크랙이 성장되어 대규모의 마모가 발생하였기 때문으로 판단된다.

Photo. 1(b)는 CFRP의 마찰면을 200배 확대한 사진으로서 등방성 핏치섬유 자체의 윤활성에 의한 미끄러짐 마모(sliding wear)가 일어남으로서 섬유주위의 결합재에 큰 손상을 주지 않았음이 관찰되었다. 마모입자들이 섬유사이에 충전되어 섬유를 보호해 주었으며 연한마모(mild wear)를 일으켜 대체적으로 안정한 형태의 마모표면을 관찰할 수 있었다.

Photo. 1(c)는 AFRP의 마찰면으로서 전반적으로 보강효과가 양호하며 강직하기 때문에 보강섬유의 절단현상보다는 섬유의 찢김(tearing)현상이 이루어진 것을 관찰할 수 있었다.

Photo. 1(d)는 GFRP의 마찰면으로서 대규모의 마모흔적(hole)이 형성되었음이 관찰되었다. 섬유자체의 높은 경도에 따라 상대면을 연삭시켜 상대면을 거칠게 만들어 형성된 돌출부(asperity)에 의한 연삭마모(abrasive waer)가 관찰되었다. 마찰력의 상승에 따른 섬유의 절단현상과 많은 양의 결합재와 섬유가 이탈된 것을 관찰할 수 있었다.

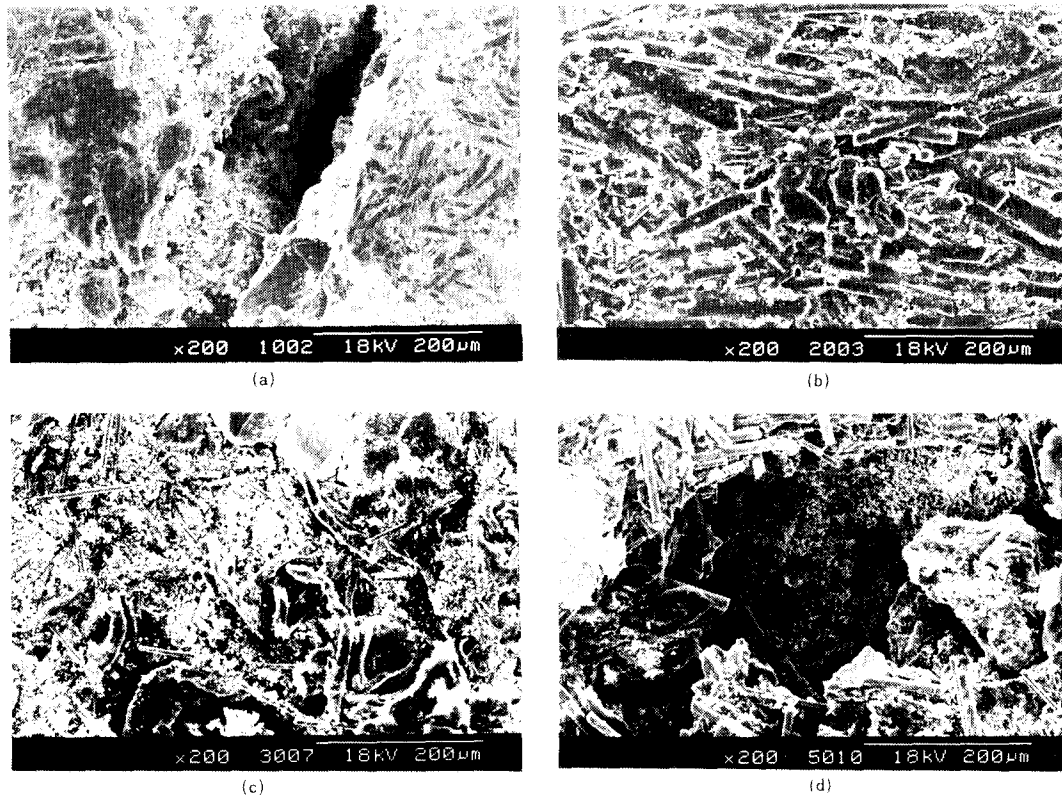


Photo. 1. SEM photographs of worn surface of fiber reinforced composites(X200) (a) OFRP, (b) CFRP, (c) AFRP, (d) GFRP.

IV. 결 론

페놀수지 결합재에 복합재의 물성에 지대한 영향을 미치는 보강섬유의 종류에 따라서 내열섬유 보강 복합재(OFRP), 탄소섬유 보강 복합재(CFRP), 유리섬유 보강 복합재(GFRP), 아라미드 섬유 보강 복합재(AFRP)를 제조하였다. 각 보강섬유의 분율을 달리함에 따라 마찰계수 및 마모량을 측정하여 각 섬유의 특성이 미치는 영향을 관찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 평균 마찰계수는 AFRP가 약 0.27~0.38로 가장 높게 나타난 반면에 CFRP는 약 0.16~0.21로 가장 낮게 나타났다. AFRP는 섬유분율이 증가함에 따라서 마찰계수가 선형적으로 증가하였으나 CFRP는 섬유분율이 증가함에 따라 오히려 감소하는 경향을 나타내었다.

2. 마모율은 AFRP가 CFRP와 비슷한 값으

로 낮게 나타났으나 GFRP는 섬유분율이 증가함에 따라 급격히 증가하는 양상을 보였다. GFRP는 섬유분율이 45%인 경우 마모량이 같은 분율에서 CFRP에 비해 부러 30배 이상의 마모량을 나타내었다.

3. OFRP는 마모 diagram이 불안정하였으며 CFRP와 AFRP는 대체적으로 안정한 형태를 나타내었다. GFRP는 상당히 불안정한 마모 diagram을 보여주고 있으며 마찰 안정성이 가장 떨어지게 나타났다.

4. OFRP는 심한 마모에 따른 섬유의 절단현상과 섬유에서의 크랙이 형성된 것을 관찰할 수 있었으며, CFRP는 미끄러짐 마모가 일어남으로서 대체적으로 안정한 형태의 마모표면을 관찰할 수 있었다. AFRP에서는 섬유의 절단현상보다 찢김현상에 의한 연한마모를 관찰할 수 있었고, GFRP는 연삭마모를 일으켰으며 다량의 섬유 절단현상과 결합재의 이탈 현상을 관찰할 수 있었다.

REFERENCES

1. Heidermans, C. and Schutz, A., Staub-Reinhalung Luft 35, 433(1975) 433.
2. Gross, P. and Braun, D.C., Chem. Tech., (1980) 436.
3. N. N, Chemical and Engineering News, (1984) 9.
4. Lancaster, J. K., Plastics and polymer, (1973) 297.
5. Hodge, J. C., Plastics and polymer, (1973) 297.
6. Cordes, H., "Produktentwicklung am Beispiel Von Bremsbelagen", Dissertation TH Aachen (1983).
7. Tanaka, k., Veda, s. and Nogodu, N., Wear, 23(1973) 349.
8. ASTM G 40, "Standard Terminology relating to Erosion and wear,".
9. Price, H.L., "Polymer Composites for high power density applications," *42nd Annual Conference, SPI, 17-E*, (1987) 1-6.
10. ASLE, "Friction and wear devices", (1976) 1-11.
11. Tanaka, K and Nagai, T., Wear of Materials, ASME, (1985) 397-404.