

# 탄소 섬유 강화 고분자 복합재의 연삭마모 특성에 관한 연구

## Study on Abrasive Wear Behaviour of a Carbon Fiber Composites

고성위 · 양병춘 · 김형진 · 김재동

S. W. Koh, B. C. Yang, H. J. Kim and J. D. Kim

**Key Words :** Friction(마찰), Abrasive Wear(연삭마모), Composites(복합재), SiC Paper(연마지), SEM(주사전자현미경)

**Abstract :** Present study was investigated the effect of the particle of the counterface of unidirectional carbon fiber reinforced composite. The friction coefficient of composite and the specific wear rate different sliding velocity were measured for this materials. The friction track of counterface was observed by an optical microscope and scanning electron microscope. There were insignificant effects of the specific wear rate under lower Sic abrasive particle, however it showed high effect on 30 $\mu\text{m}$  abrasive particle size. There were significant effects of friction and wear behavior of the fiber direction under 0.3m/s sliding speed. Major failure mechanisms can be classified such as microfracture, plowing, microcutting, cutting and cracking.

### 기호설명

$\Delta m$	: $\Delta t$ 에서 손실 질량
$v$	: 미끄럼 속도
$\rho$	: 시편의 밀도
$F_n$	: 수직하중
$\Delta h$	: $\Delta t$ 동안 시편의 손상깊이
A	: 시편의 실접촉면적
$F_f$	: 측정된 마찰력

### 1. 서 론

섬유강화 및 고체 윤활된 고성능 엔지니어링 고분자들은 다양한 산업분야에 폭넓게 이용되고 있다<sup>1),2)</sup>. 고분자들과 복합재들 특히, 섬유강화 복합재들은 tribo-재료의 대단히 중요한 부분을 차지하고 있으며 어떠한 외부적 윤활제를 사용하지 못하는 부분의 구성품으로 사용되고 있다.

그렇지만 구성품의 성능은 일반적인 사용조건에 민감하다. 그것은 모든 형태의 마모에 대하여 일반적으로 약한 재료라는 사실을 인식해야 한다. 그러

므로 대표적인 tribo-작용시 재료를 선정할 때 다양한 마모상황에서의 거동을 완전하게 이해하는 것이 필요하게 되었으며, 다양한 종류의 마모상황과 작동조건에서 재료의 마모거동에 대한 체계적인 연구를 한 것이 거의 없다. Anderson과 Williamson<sup>3)</sup>은 7가지 고분자들을 4가지 마모조건 즉 응착, 연삭, 부식 및 왕복과 고분자들의 여러 가지 특성에 대한 성능 순위를 관찰하여 평가하였다. 이러한 마모상황에서 가장 뛰어나거나 가장 나쁘게 평가된 단일 고분자는 없었으며, 왕복과 부식마모 조건의 미끄럼 운동에서는 같고, 고분자들의 성능 순위는 달랐다. 그것은 섬유강화, 고체윤활 또는 양쪽 모두인 경우 사실이다. 고분자들의 성능향상은 매우 중요하나, 이것은 항상 필요하지는 않다. 동시에 순수 고분자의 마모성능은 나쁠 것이다. 그것은 충진재들이 대부분의 마모조건에서 우수하다는 사실을 감안한다면 다른 마모상황에서는 우수하지 않거나 순수 고분자의 마찰과 마모 양쪽을 개선하지 못할 수도 있다<sup>4),5)</sup>. 이것은 복합재의 tribo-특성이 실험실에서 평가되고 연역학적으로 예측할 수 없다는 것을 명확하게 보여주고 있다.

고분자와 고분자 기지 복합재들의 연삭마모는 문헌의 많은 부분을 차지하고 있으며, 시험법의 대부분은 two-body와 three-body 연삭마모시험법이 적용된다. 대부분의 시험 프로그램은 two-body 연삭 시험법으로 실시되지만 실제 적용에서는 three-

접수일 : 2005년 7월 13일

고성위(책임저자) : 부경대학교 기계공학부

E-mail : [swkoh@pknu.ac.kr](mailto:swkoh@pknu.ac.kr), Tel : 051-620-1579

양병춘 : 부경대학교 대학원

김형진, 김재동 : 경상대학교 해양산업연구소

body 연삭이 더 유용하다<sup>6)</sup>. 그것은 고분자의 마모 공정이 충분하게 이해되지 못한 점이 널리 인식되어 있다<sup>7)</sup>. 고분자들의 연삭마모에 대한 앞선 문헌들 중 Evans와 Lancaster<sup>8)</sup>는 18가지의 고분자 형태, 저밀도 폴리에틸렌은 거친 연강에 대하여 낮은 연삭마모율을 나타내었다. 그러나 거친 SiC 연마지에 대한 연삭에서는 높은 연삭 마모율을 보였다. 실제 Budinski<sup>9)</sup>는 플라스틱의 연삭마모 저항에 대한 연구의 대부분이 결론에 이르지 못하고 더한 연구가 필요하다는 것에 주목하였다.

다른 기계적 성질에 대하여 고분자들의 연삭마모 저항과의 관계를 수식화하는 몇 가지 모델이 제안되었다. 이들 중 하나는 일반적으로 Ratner-Lancaster 인수로 알고 있다<sup>10)</sup>. 고분자의 마모율을 예측하기 위하여  $w$ 가 다음과 같이 주어졌다.

$$w = \frac{k\mu}{H\sigma_b \epsilon_b} \quad (1)$$

여기서,  $\mu$  : 마찰계수,  $H$  : 경도,  $\sigma_b$ 와  $\epsilon_b$  : 인장과 괴시 응력과 변형률이다. 그럼에도 Lancaster는 고분자들의 마모율 범위는  $\sigma_b$ 와  $\epsilon_b$ 의 곱에 반비례한다는 실험식을 만들었다. Budinski<sup>9)</sup>는 그러한 5가지 모델에 대한 실험으로 다른 모델을 제안하였다. 그는 연삭마모 거동과 21가지 고분자 재료의 특성 사이에는 연관성이 희박하다는 것을 모든 관계 모델에 대하여 나타내었다. 다른 연구자들은 실험적 data와 모델 중 하나 또는 그 이상의 사이에 상관관계가 거의 없다고 하였다<sup>11),12)</sup>. Larsen-Basse<sup>13)</sup>는 마모 mechanism은 고분자 형태에 대한 의존성이 다르다는 것을 주장했다.

이 분야의 발표된 문헌의 대부분은 입자 연삭에 대한 것으로 입자 크기 100 $\mu\text{m}$  이상에서 입자들의 연삭마모 거동에 대하여 실험하였다. 그렇지만 Roberts와 Chang<sup>13)</sup>은 거의 10 $\mu\text{m}$  이하의 연삭입자 크기의 변화에 대한 연구로 고분자의 마모 mechanism을 실험하였다.

본 논문은 일방향 탄소섬유 강화 에폭시 기지 복합재의 연삭마모거동에 대한 연구로 SiC 연마지에 대한 복합재의 비마모율과 마찰계수를 SiC 연마지의 입자 크기변화와 속도변화에 대하여 결정하였으며, 탄소섬유 강화 에폭시 기지 복합재의 마모 메카니즘에 대하여 광학현미경 및 주사식전자현미경(SEM) 관찰을 통하여 연삭마모 특성을 비교하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 실험재료

실험에 사용한 재료는 일방향 탄소섬유 강화 에폭시기지 복합재 프리프레그(HCU 100NS, 한국카본)를 적층하여 자체 제작한 hot press에서 가열·가압하여 경화시켜 4.5mm 두께의 판으로 제조하였다. 복합재의 특성과 구성 재료는 Table 1에 나타내었다. 복합재 판은 다이아몬드 톱으로 조심스럽게 절단한 후, 이것을 입자가 작은 고운 연마지(15 $\mu\text{m}$ )를 사용하여 시편에 크랙이 보이지 않게 가로단면이 45×5.5mm, 길이 15mm로 연마하여 연삭마모 시험의 시편으로 사용하였다.

### 2.2. 실험장치 및 실험 절차

섬유방향에 대하여 Fig. 1과 같이 3가지 주 미끄럼방향을 구별하였다. 실험은 복합재 시험편의 섬유방향에 평행(parallel, P), 직각(anti-parallel, AP)과 수직(normal, N)방향으로 SiC 연마지에 대하여 실시하였다.

Table 1 Properties of unidirectional continuous carbon fiber reinforced epoxy matrix composite

Material	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Elastic modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Fiber content (vol.%)
Comp.	1.70	195	3,525	60

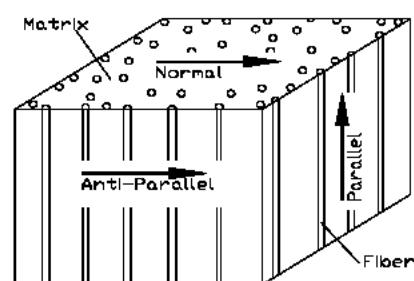


Fig. 1 Relative sliding direction with respect to fiber orientation of the composite.

수직(normal, N)방향으로 SiC 연마지에 대하여 실시하였다.

연삭마모시험은 Fig. 2와 같이 자체 제작한 펀온 디스크(pin-on-disc)형 시험기를 사용하여 실시하였다<sup>14)</sup>.

시험 시 환경조건은 온도(20°C)와 습도(60%RH)의 조절이 가능한 환경챔버를 제작하여 온도와 습도를 일정하게 유지시켰다. 시편의 마찰은 실시간으로 측정을 하며 시험을 실시하였고, 마모손실은 실험전후의 시편의 질량을 측정하였다. 상대재인 SiC 연마지(3M)는 지름 80mm × 두께 1.5mm인 디스크의 표면에 접착제를 사용하여 부착하고 전조로에서 7일간 완전히 경화 시킨 후 연삭마모시험을 실시하였으며, 본 연구에 사용한 SiC 연마지의 평균입도는 9~30μm이었다. 시험장치는 서로 다른 미끄럼 속도로 동작하게끔 조정되었다. 수직하중(p) 19.6N에서 서로 다른 속도(v)인 0.1~0.6ms<sup>-1</sup>를 유지시키며 미끄럼 거리 500~2000m에서 연삭마모시험을 실시하였다.

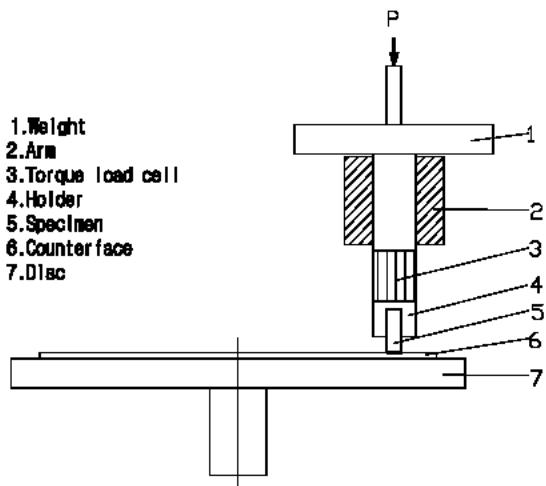


Fig. 2 Schematic diagram of pin-on-disc test apparatus.

동일한 시험조건에서 3개의 시험편을 각각의 시험거리에 대하여 연삭마모시험을 실시하였으며, 시험 후 시편의 질량변화는 3번 이상 측정하여 평균값을 구하였다. 펀온디스크(pin-on-disc)형 시험기에서 복합재 시험편은 SiC 연마지에 대하여 미끄러졌다. 로드셀을 통하여 마찰력을 실시간으로 원격 측정하여 마찰계수( $\mu$ )를 얻었다. 이 방법으로 마찰계 초기의 정적 안정상태 및 다양한 미끄럼 조건 하에서 마모율이 안정(평형) 수준에 도달하므로 마모율 변화를 구분할 수 있었다.

미끄럼 방향과 시험조건이 연삭마모에 미치는 영향의 비교는 단지 초기마모상태 구간에서만 비교하였고, 계의 연삭마모수명은 지배적인 구간에 대하여 고려하였다. 비마모율의 계산은 시험시간과 초

기마모상태 구간에서 손실된 무게를 사용하였다. 각 슬라이딩 방향에 3개의 시편을 사용하였고 각 시편은 새로운 SiC 연마지 위에서 실시되었다.

시험 전후 시편의 질량손실은 Mettler 분석천칭(감도 0.01mg)으로 측정하여 같은 환경조건에서 시험을 실시하였다. 연삭마모 결과는 비마모율의 항으로 주어졌으며 계산은 다음과 같다.

$$\dot{w}_s = \frac{\Delta m}{\Delta t} \frac{1}{v_0 F_n} \quad (2)$$

비마모율의 차원은 mm<sup>3</sup>/N/m이며, 비마모율의 물리적 의미는 임의의 입력에너지에 대한 재료의 부피손실이다. 펀온디스크 시험기에서  $\Delta m$ 은 다음과 같다.

$$\Delta m = \Delta h A \rho \quad (3)$$

펀온디스크형 시험기의 시편과 상대재 접촉면 사이의 마찰력은 토크-로드셀(torque-loadcell)을 이용하여 실시간으로 원격측정이 이루어졌다. 전조마찰에 Amonton-Coulomb 법칙을 적용하면 마찰계수는 다음과 같이 계산된다.

$$\mu = \frac{F_f}{F_n} \quad (4)$$

### 2.3 미시파면해석

연삭마모된 시편의 마찰특성 비교 및 마모기구 조사를 위한 표면 관찰은 대부분은 광학현미경과 주사식전자현미경(SEM)으로 실시되었다.

### 3. 결과 및 고찰

탄소섬유 강화 복합재의 연삭마모 특성을 입자크기가 다른 3종류의 SiC 연마지를 마찰상대재로 하여 마찰상대면의 거칠기에 따른 마모특성을 조사하였다.

실험한 결과는 초기 마모가 일어나는 시간이 대체적으로 약 2분정도 소요되었으며, 초기 마모 동안 복합재 시편과 마찰상대재 사이에는 단단한 SiC 입자들에 의한 연삭과 쟁기질 등으로 인하여 마모가 많이 일어났으며, 마찰계수가 떨어져 안정상태로 되면 마모가 현저하게 줄어들었다.

연삭마모 조건에서는 미끄럼마모 조건보다 낮은 속도에서 비마모율은 훨씬 크게 나타났다.

Fig. 3은 세 종류 입자크기의 SiC 연마지에 대하

여 복합재 시편을 연삭마모 시켰을 때, 복합재의 섬유방향에 따른 비마모율의 변화를 나타내고 있다.

경면 가공한 STS 304 마찰상대재에 비하여 비교적 큰 비마모율이 측정되었으며, SiC 연마지의 입도가  $15\mu\text{m}$ 작을 때는 마찰방향의 효과가 크게 나타나지 않았으나, 마찰상대재 입자가 상대적으로 큰  $30\mu\text{m}$ 의 경우 AP 방향, N방향 및 P방향의 순으로 비마모율이 나타났으며, P방향 시편의 경우 상대재의 입자크기 변화에 비마모율의 변화가 비교적 크게 나타났으며, 실험에서와 같은 연삭마모 조건에 응용할 경우 가장 바람직한 방향이라 생각된다.

연삭마모 조건에서는 미끄럼 마모보다 미끄럼 속도는 크게 낮았지만 비마모율은  $10^4$ 배 이상 높게 나타났다. 마찰계수는 N방향이 가장 높게 나타났으며, AP방향과 P방향의 순으로 나타났다.

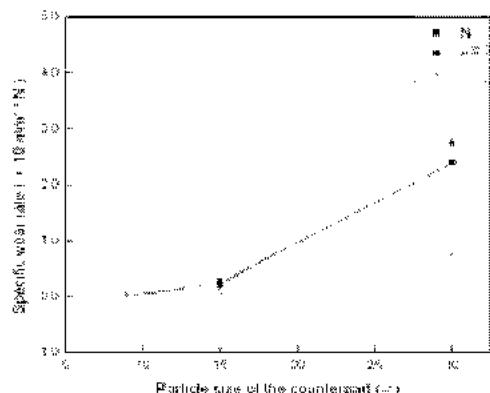


Fig. 3 Specific wear rates as a function of the particle size of the counterpart at  $P=19.6$  N, and  $v=0.3$  m/s.

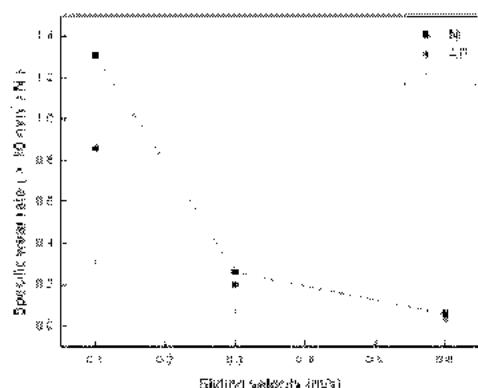


Fig. 4 Specific wear rates as a function of the sliding velocity at  $P=19.6$  N.

Fig. 4는  $30\mu\text{m}$  SiC 사포에 대한 각 미끄럼속도에 대한 비마모율의 변화를 나타내고 있으며, 동일한 연삭마모 조건하에서 속도의 증가에 따라 비마모율

은 낮아지고 있음을 알 수 있다. 이는 속도의 증가로 인하여 복합재 속의 탄소섬유 파괴와 파괴된 탄소가 분쇄되어 마찰상대재의 거친 입자 사이를 메워 표면 거칠기가 둔화되며 이 섬유분이 고체 유통제의 역할을 하기 때문이다.

SiC연마지를 마찰상대재로 한 복합재의 연삭마모 시험에서 마찰 방향에 따른 마모면 사진은 Fig. 5~7에 나타낸 바와 같이 다양한 마모 메카니즘을 보여주고 있다.

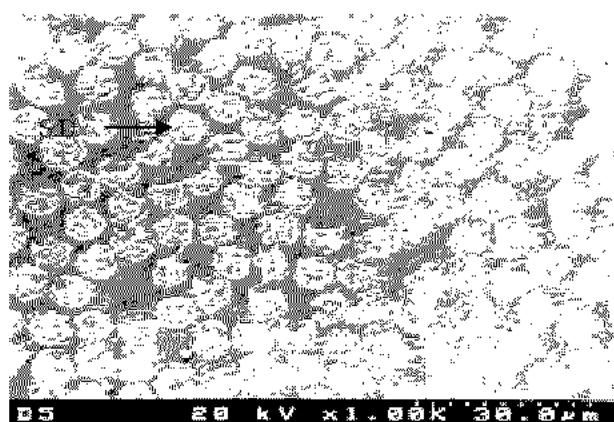


Fig. 5 SEM image of worn surface of the composite tested on  $30\mu\text{m}$  SiC paper at  $P=19.6$  N and  $v=0.1$  m/s in the  $N$  direction

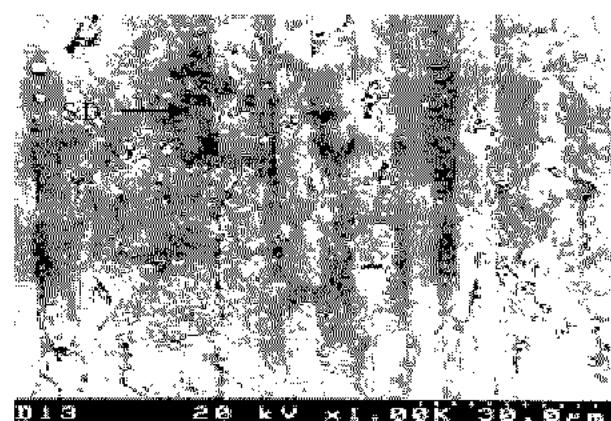


Fig. 6 SEM image of worn surface of the composite tested on  $30\mu\text{m}$  SiC paper at  $P=19.6$  N,  $v=0.3$  m/s in the  $AP$  direction.

Fig. 5는 N방향 복합재료의 연삭 마모면을 나타낸 SEM 사진으로 화살표는 미끄럼 방향(sliding direction ; S,D,)을 나타낸다. 마모면은 전체적으로 평평하지 않고, 섬유단면이 연삭에 의해 끝 부분이 조각난 채 잘리거나 파괴된 모습을 볼 수 있다. 그림에서 섬유의 끝부분이 파괴되어 기지면 보다 더

깊숙한 위치에 있음을 알 수 있는데, 이것은 탄소 섬유가 취성의 성질을 갖고 있으므로 마모시에 미소파괴(microfracture)되면서 분리되기 때문이라 생각한다. 미소파괴에 의해 분리된 섬유의 조각들이 마찰면에 거의 존재하지 않고 윤활작용을 할 수 없기 때문에 Fig. 4에 나타난 바와 같이 마찰계수가 다른 섬유방향보다 높게 나타난 것으로 사료된다. 따라서 지배적인 마모 메카니즘은 미소파괴라 할 수 있다.

Fig. 6은 AP방향 연삭마모면의 SEM 사진을 나타낸 것으로 으로 미끄럼은 좌에서 우측방향이다. 마모면은 다른 방향의 마모면과는 다르게 상대적으로 평평하며, 접촉면의 아래 부분은 물론이고 접촉 영역에서 섬유의 파괴가 일어났는데, 이 때의 마모 메카니즘은 쟁기질, 미소절단 및 균열(cracking) 효과가 높아졌기 때문이다. AP방향의 경우 응착에 의한 마모가 부분적으로 나타나 마찰계수도 증가하지만 비마모율이 Fig. 3과 4에서 보는 바와 같이 다른 섬유방향에 비하여 높게 나타났다.

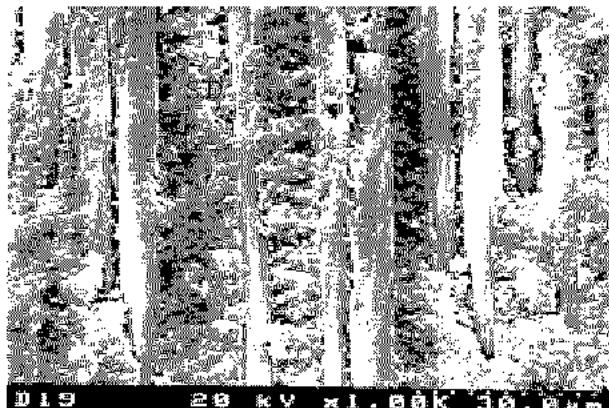


Fig. 7 SEM image of worn surface of the composite tested on  $30\mu\text{m}$  SiC paper at  $P=19.6\text{ N}$ ,  $v=0.3\text{ m/s}$  in the  $P$  direction.

Fig. 7은  $P$ 방향 연삭 마모면의 SEM 사진으로 미끄럼방향은 위에서 밑으로 이다. 마모면은 상당히 울퉁불퉁하게 나타나 AP방향과는 상당히 다르게 나타났다. 섬유의 배열방향이 마찰방향과 동일한 방향이기 때문에 마찰에 약한 기지면이 많이 이탈되었음을 알 수 있다. 이것은 접촉면에서 마찰에 의하여 기지덩어리와 섬유분의 이탈이 신속하게 이루어졌고, 이 때의 마모 메카니즘은 쟁기질(plowing), 절단(cutting) 및 균열(cracking) 등이

며 결과적으로 기지의 이동에 의하여 섬유가 드러났으며, 상대재와의 직접적인 접촉으로 인하여 섬유덩어리의 탈락이 쉽게 이루어졌고, 탈락된 자리를 탄소섬유분이 혼합된 기지가 배움으로써 기지에서 드러난 탄소섬유와 상대재와의 직접접촉에 의한 마찰로 마찰계수와 비마모율은 다른 섬유방향에 비하여 낮게 나타난다고 할 수 있다.

따라서 연삭마모 시험에서 섬유파괴 주메카니즘은 N방향은 미소파괴(microfracture), AP방향은 연삭 입자에 의한 쟁기질(plowing)과 미소절단(micro-cutting), P방향은 쟁기질(plowing), 절단(cutting) 및 균열(cracking) 등이라 생각한다.

#### 4. 결 론

탄소 섬유강화 에폭시기지 복합재의 연삭마모 시험에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 연삭마모 시험에서 비마모율은 SiC의 입도가 작을 때는 섬유방향의 효과가 크게 나타나지 않았으나, 입도가 큰  $30\mu\text{m}$ 에서는 AP, N 및 P방향의 순으로 낮아졌다.

(2) 연삭마모 시험에서 섬유파괴 메카니즘은 N방향은 미소파괴(microfracture), AP방향은 연삭 입자에 의한 쟁기질(plowing)과 미소절단(microcutting), P방향은 쟁기질(plowing), 절단(cutting) 및 균열(cracking) 등이 섬유파괴의 주 메카니즘이다.

(3) 연삭마모 시험에서 비마모율은 미끄럼 마모보다 미끄럼속도는 크게 낮았지만 모든 미끄럼 방향에 대하여 약  $10^4$ 배 이상 높았다.

(4) 일방향 탄소섬유 강화 복합재의 연삭마모 거동에 미치는 미끄럼방향의 효과는 미끄럼 속도  $0.3\text{m/s}$ 까지는 크게 나타나며, 그 이상의 속도에서는 섬유방향의 효과가 크지 않았다.

#### 후 기

이 연구는 2005년도 두뇌한국21 사업에 지원되었습니다.

#### 참 고 문 헌

1. A.M. Hager, M. Davies, Short fiber-reinforced high temperature resistant polymers for a wide range of tribological application, in: K.

- Friedrich(Eds.), Advances in Composites Tribology, Composite Materials Series, Vol. 8, Elsevier, Amsterdam, 1993(Chapter 4).
2. J. Bijwe, M. Fahim, Tribology of high performance polymers: state of art, in: Handbook of Advanced Functional Molecules and Polymers, Gordon and Breach, London, 2000.
3. J.C. Anderson, P.K. Williamson, Relating laboratory wear testing to the in-service wear of polymers, in: L.H. Lee (Eds.), Polymer Wear and its Control, ACS Symposium Series, Vol. 287, American Chemical Society, Washington, DC, 1985, pp. 315-331.
4. J. Bijwe, J.N. Mathur and U.S. Tewari, Influence of reinforcement and lubrication on abrasive wear performance of polyamide. *J. Synth. Lubric.* 8 3 (1991), pp. 177-195.
5. J. Bijwe, S. Neje, J. Indumathi, M. Fahim, Friction and wear performance evaluation of carbon fiber-reinforced PTFE composite, *J. Mat. Sci.*, submitted for publication.
6. R.I. Trezona and I.M. Hutchings, Three-body abrasive wear testing of soft materials. *Wear* 233-235 (1999), pp. 209-221.
7. B.J. Briscoe, Wear of polymers: an essay on fundamental aspects. *Tribol. Int.* 14 (1981), pp. 231-243.
8. D.C. Evans, J.K. Lancaster, The wear of polymers, in: D. Scott (Ed.), Treatise on Materials Science and Technology, vol. 13, Academic Press, New York, USA, 1979, pp. 85-139.
9. K.G. Budinski, Resistance to particle abrasion of selected plastics. *Wear* 203-204 (1997), pp. 302-309.
10. J.K. Lancaster, Abrasive wear of polymers. *Wear* 14 (1969), pp. 223-239.
11. J. Larsen-Basse, Slurry abrasion of polymers under simulated submarine conditions. *Wear* 122 (1988), pp. 135-149.
12. J. John Rajesh, J. Bijwe and U.S. Tewari, Abrasive wear performance of various polyamides. *Wear* 252 (2002), pp. 769-776.
13. J.C. Roberts and H.W. Chang, Two-body abrasion of some polymers against 6-50  $\mu\text{m}$  SiC abrasives. *Wear* 79 (1982), pp. 363-374.
14. Robert A. Storer, (Ed.) in Annual book of ASTM Standards, Sec. 3, 03.02, (1997). "Wear testing with a pin-on-disc apparatus" ASTM G 99, Pa, U.S.A. p. 392.