탄소 섬유 복합재의 마찰 및 마모 특성에 미치는 하중 효과*

고성위 · 양병춘† · 김형진** · 김재동**

부경대학교 · **경상대학교

Effect of load on the wear and friction characteristics of a carbon fiber composites

Sung-Wi KOH, Byeong-Chun YANG†, Hyung-Jin KIM** and Jae-Dong KIM**

Pukyong National University · **Gyeongsang National University

Abstract

This is the study on dry sliding wear behavior of unidirectional carbon fiber reinforced epoxy matrix composite at ambient temperature. The wear rates and friction coefficients against the stainless steel counterpart specularly processed were experimentally determined and the resulting wear mechanisms were microscopically observed. Three principal sliding directions relative to the dominant fiber orientation in the composite were selected. When sliding took place against smooth and hard counterpart, the highest wear resistance and the lowest friction coefficient were observed in the antiparallel direction. When the velocity between the composite and the counterpart went up, the wear rate increased. The fiber destruction and cracking caused fiber bending on the contact surface, which was discovered to be dominant wear mechanism.

Key words : wear(마모), friction(마찰), dry sliding wear(건조 미끄럼 마모), specular(경면), SEM (주사전자현미경), FRP(섬유강화 복합재료)

기호설명

Δm : Δt에서 손실 질량

v : 미끄럼 속도

ρ : 시편의 밀도

F_n : 수직하중

Δh : Δt동안 시편의 손상깊이

A : 시편의 실접촉면적

F_f : 측정된 마찰력

서 론

최근 산업사회에서는 플라스틱과 섬유강화 폴리머 기지 복합재의 응용이 크게 늘고 있다. 산업과 공학재료로서 사용이 증가하는 복합재의 특징은 높은 비강도(strength/density), 높은 비강성(modulus/density)과 섬유와 기지의 조성 및 섬유방향을 제어하는 공정기술들을 통한 재료특성을 조절할 수 있기 때문이다. 더하여, 이들 재료로 부품을 만들면 충격과 진동을 흡수할 수 있고, 내부식성이 우수하며 사용시 유지 보수가 필요 없거나 작기 때문에 항공우주산업, 화학산업, 자동차산업, 조선산업 등에

* 이 논문은 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

† Corresponding author : ds5nhz@yahoo.co.kr

서 매우 우수한 재료이다. 또한 고분자 복합재의 응용은 기계부품 즉 기어, 캠, 휠(wheel), 임펠러(impeller), 브레이크와 베어링 등에서 찾을 수 있다. 화학 플랜트 및 조선산업에서 강화플라스틱은 배관, 덕트(duct) 작업, 펌프, 혼합용기, 분리기(separator) 및 열압축기 등의 여러 분야에 사용된다. 다른 주요 응용분야는 농업, 광업, 건설기계와 석탄, 코크스, 광석과 유리 제조 산업의 컨베이어 부품 및 운송장치의 라이너(liner)로 사용된다.

이들 재료에 대하여 많은 연구가 이루어졌고, 대부분 기계적 거동에 주목하였다. 다양한 조건들에서 섬유강화 복합재료들의 마모거동에 대하여 실험적 그리고 이론적인 연구가 보고되었다[1]. Tsukizoe와 Ohmae[2] 그리고 Sung과 Suh[3]는 탄소섬유 강화 에폭시기지 복합재료의 미끄럼 마모시 섬유방향의 영향에 대하여 연구를 하였다. Giltrow와 Lancaster[4]는 상대 마찰면에서의 마모막 형성, 복합재료 중의 섬유형태, 상대 마찰면 물질의 구성과 강도 등에 대하여 연구하였다. Suh와 Sin[5]은 마찰력의 성분과 동일하게 마모입자의 역할에 대한 연구를 하였다. Friedrich[6] 다양한 폴리머 복합재의 연삭마모가 일어나는 동안 지배적인 미소 마모 메카니즘을 분류하였다.

본 논문은 마찰방향에 따른 복합재료의 마모 메커니즘을 규명하기 위하여 일방향 탄소섬유강화 복합재료에서 섬유방향에 수직, 평행, 직각 방향의 시험편을 준비하여 실험하였다.상대재는 경면 가공한 스테인리스 스틸을 사용하였고, 세가지 하중 조건에서 비마모율과 마찰계수를 실험적으로 결정하였다. 마모 메카니즘은 광학현미경 및 주사식전자현미경(SEM) 관찰을 통하여 비교검토하여 마찰 및 마모 특성을 고찰하였다.

실험방법

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 SiC 연마지(15㎛)를 사용하여 시편에 크랙이 보이지 않게 가로 단면이 4.5×5.5mm, 길이 15mm로 연마하여

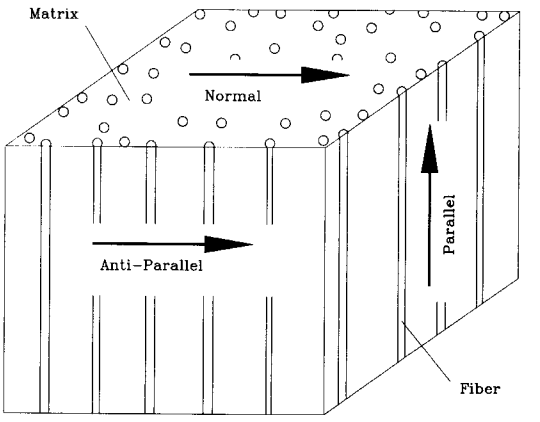


Fig. 1. relative sliding direction with respect to fiber orientation of the composite.

Table 1. Properties of undirectional continuous carbon fiber reinforced epoxy matrix composite

Material	Density (gcm^{-3})	Elastic modolus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Fiber content (vol.%)
Comp.	1.70	195	3,525	60

마찰과 마모시험의 시편으로 사용하였다.

2. 실험장치 및 실험 절차

섬유방향에 대하여 Fig. 1과 같이 3가지 주 미끄럼방향을 구별하였다. 실험은 섬유방향에 평행(parallel), 직각(anti-parallel)과 수직(normal)방향으로 상대면에 대하여 실시하였다.

건조 미끄럼 마모시험은 Fig. 2와 같이 자체 제작한 핀온디스크(pin-on-disc)형 시험기를 사용하여 실시하였다[7]. 시험 시 환경조건은 온도와 습도의 조절이 가능한 환경 챔버를 제작하여 온도(21℃)와 습도(60%RH)를 일정하게 유지시켰다. 시편의 마찰력은 실시간으로 측정을 하며 시험을 실시하였고, 마모손실은 실험전후의 시편과 상대재의 무게를 측정하였다. 상대 마찰재는 지름 80mm×두께 1.5mm의 디스크형으로 표면을 경면 가공한 스테인리스 강(STS304, INI스틸)을 사용하였으며, Table 2에 그 특성이 나타나 있다. 시험장치는 서로 다른 미끄럼 속도로 동작하게 끔 조정되었다. 수직하중(p)의 변화는 19.6~58.8N로 속도(v)는 0.6~

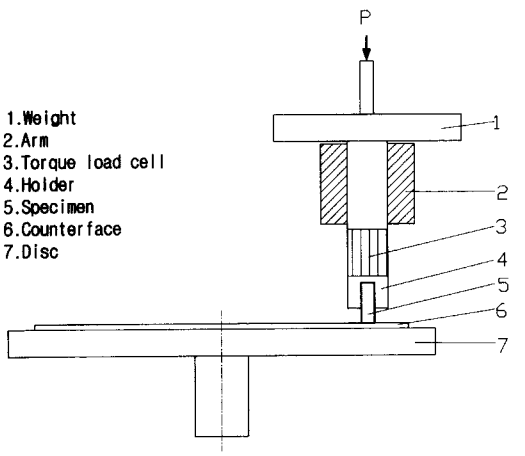


Fig. 2. Schematic diagram of pin-on-disc test apparatus.

3.1ms^{-1}를 유지시키며 시험을 실시하였다.

동일한 시험조건에서 3개의 시험편을 3시간씩 마찰 및 마모시험을 실시하였으며, 시험 후 상대재에 생긴 마모 트랙은 접촉식 표면거칠기 시험기로 측정되었으며, 시편과 상대재의 질량변화는 3번 이상 측정하여 평균값을 구하였다.

핀온디스크(pin-on-disc)형 시험기에서 복합재 핀은 스테인리스 강 상대재인 디스크에 대하여 미끄러졌다. 토크 로드셀을 통한 마찰력을 실시간으로 측정을 실시하여 마찰계수(μ)를 얻었다. 이 방법으로 마찰계 초기의 정적 안정상태 및 다양한 미끄럼 조건에서 마모율이 안정(평형) 상태에 도달하므로 마모율 변화를 구분할 수 있었다.

미끄럼 방향과 시험조건이 마모에 미치는 영향의 비교는 단지 초기마모상태 구간에서만 비교하였고, 계의 마모수명은 지배적인 구간에 대하여 고려하였다. 비마모율의 계산은 시험시간과 초기마모상태 구간에서 손실된 무게를 사용하였다. 실제 마모시험에 앞서 예비시험을 실시하여 핀의 경우, 핀온디스크 시험기에 SiC 연마지(입도 15㎛)를 사용하여 예비마모를 시킨 후 아세톤으로 깨끗이 세척하고 건조로에서 약 60분간 건조시킨 후 시험하였는데 이것은 시험 전에 시편의 표면거칠기를 항상 같게 조정하여 디스크와 접촉면적이 일정하게 하여 두 접촉면 사이의 접촉이 더 좋은 상태로 되기 때문이다. 동일 시험 조건하에서 3개의 시편을 사용하여 시험하였으며, 각 시편은 새로운 디스크 위에서 시험을 실시하였다.

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

$$\tilde{w}_s = \frac{\Delta m}{\Delta t}\frac{1}{v\rho F_n} \tag{1}$$

비마모율의 차원은 mm^3/N/m이며, 비마모율의 물리적 의미는 임의의 입력에너지에 대한 재료의 부피손실이다.

핀온디스크 시험기에서 Δm은 다음과 같다.

$$\Delta m = \Delta h A \rho \tag{2}$$

핀온디스크 시험기의 시편과 상대재의 접촉면 사이의 마찰력은 토크-로드셀(torque-loadcell)로 원격조정 되었다. 건조마찰에 Amonton- Coulomb 법칙을 적용하면 마찰계수는 다음과 같이 계산된다.

$$\mu = \frac{F_f}{F_n} \tag{3}$$

3. 미시파면해석

마모된 시편의 마찰특성 비교 및 마모기구 조사를 위한 표면 관찰은 대부분은 광학현미경과 주사식전자현미경(SEM)으로 실시되었다. 경면 가공한 스테인리스 강 상대재 위의 마모막의 형성과 홈의 생성도 광학현미경과 SEM으로 조사되었으며, 마모 track의 가로 단면형상은 접촉식 표면 거칠기 시험

Table 2. Chemical compositions and mechanical properties of used counterface material

Material	Chemical composition(wt.%)						Mechanical properties			Roughness (Ra)
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (Hv)	
STS304	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.02	≤0.03	8.00~10.50	520≤	40≤	≤200	0.005㎛

기를 사용하여 측정하였다.

결과 및 고찰

탄소섬유강화 에폭시기지 복합재의 마찰과 마모 성능을 경면 가공한 스테인리스 강 상대재에 대하여 핀온디스크형 시험기로 각각의 조건에서 실험한 결과는 초기마모가 일어나고 안정상태에 이르는 시간이 대체적으로 약 30분 정도 걸렸으며, 초기 시간동안 시편과 상대재 사이의 마모 메카니즘은 쟁기질(plowing), 응착(adhesion), 미소크랙(microcracking)과 돌기변형 등으로 인하여 마모가 많이 일어나고 마찰계수가 떨어져 안정상태가 되면 마모가 현저하게 줄어들었다.

Fig. 3은 미끄럼 속도 1.9m/s에서 시험한 결과를 각 하중에 대한 재료의 평균 비마모율과 마찰계수와의 관계를 도시하였다. Fig. 3(a)는 섬유방향은 Normal 방향으로 하중의 증가에 따라 비마모율은 점차 증가하고 마찰계수는 하중의 증가에 따라 증가하다가 약간 감소하며 마찰계수의 값은 0.2~2.5로서 다른 섬유방향에 비하여 비마모율과 마찰계수의 값이 크게 나타나는 것은 기지 속의 섬유방향이 재료의 비마모율에 영향을 미칠 수 있다는 것을 명확하게 나타내고 있다. 섬유방향이 Anti-Parallel인 Fig. 3(b)에서는 하중의 변화에 따라 비마모율은 크게 감소하며 마찰계수의 값은 약간 증가하는 것을 알수있으며 3가지 섬유방향 중 비마모율과 마찰계수의 값이 가장 낮다는 것을 알 수 있다. 이는 섬유의 방향이 마모막이 형성되어 복합재 시편의 표면에 부착되어 마모 이착막 속의 탄소섬유 가루가 윤활제의 역할을 한 것으로 생각된다. Fig. 3(c)는 섬유방향이 Parallel로 하중의 증가에 따라 비마모율은 서서히 증가하며 마찰계수는 증가하다가 감소하며 3가지 섬유방향 중 중간 정도의 값을 가짐을 보여주고 있다.

이 조건에서 3시간 동안 실험되었을 때의 Normal과 Parallel 방향의 마모량은 하중의 증가에 따라 약간씩 증가함을 알 수 있었으며 이것이 의미하는 것은 이 마모조건에서는 마찰면에 가해진 압력에 의해 섬유에 손상이 일어남을 의미하기 때문에 고탄성계수 탄소 섬유 복합재가 이러한 조건에 이용된다면 섬유의 방향을 Anti-Parallel 방향으로 사용한다면다른 방향에 비하여 하중의 증가에 따른 비마모율이 감소하기 때문에 매우 우수한 내마모 물질이 될 수 있다는 것을 의미한다.

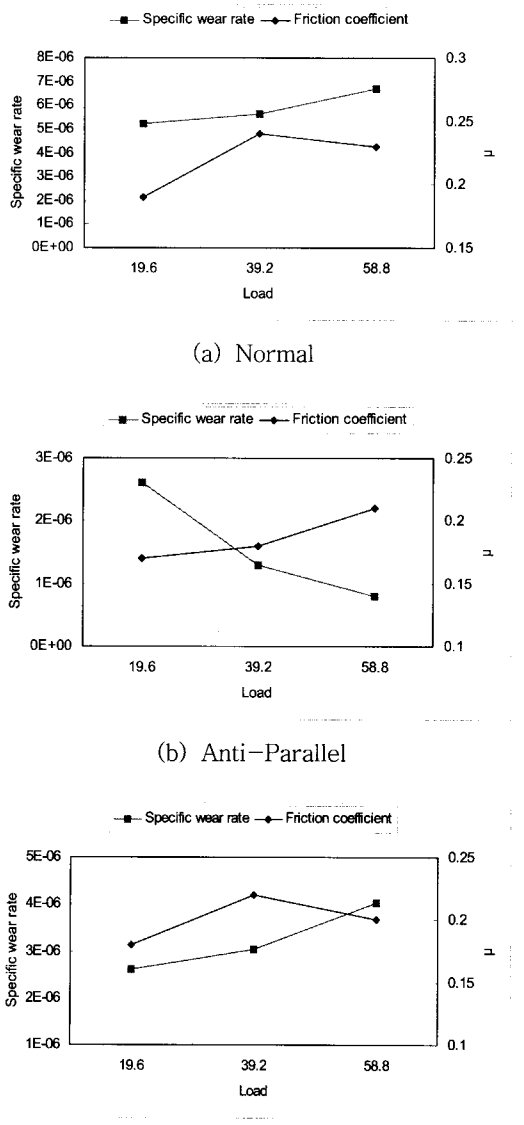


Fig. 3. Specific wear rates and friction coefficient of the specimen as a function of the load tested on a pin-on-disc apparatus at sliding velocity 1.9 m/s.

Fig. 3에서 평균 비마모율은 Normal방향이 가장 높고 Parallel방향에서는 중간정도의 값으로 비슷한 경향을 나타났고 Anti-Parallel방향에서 가장 낮게 나타났다. 따라서 마모는 각각의 조건에서 알 수 있듯이 초반에 생성된 마모막이 복합재료 시편과 상

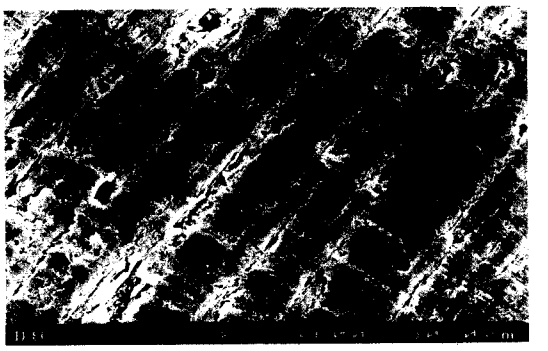
대재 표면에 형성되는 것이 마모에 가장 큰 영향을 미친다는 사실을 알 수 있다. 3가지 섬유 방향 중 특히 Anti-Parallel방향에서는 초기 마모막 형성시 마모가 되고 후반부에는 거의 마모량이 없었다. 그것은 마모막 속에 포함된 탄소섬유 가루가 내부적으로 윤활제와 같은 역할을 할 수 있다는 것을 나타낸다.

Pin-on-disc 시험기에서 섬유방향에 따라 시험된 시편의 대표적인 마모면은 Fig. 4에서 마모 메카니즘의 다양한 종류를 보여주고 있다. 경면 가공된 상대재에 대한 복합재의 마모면은 Fig. 4(a)의 Normal방향에서는 섬유 단면의 연마와 약간의 마모막이 생성되었음을 알 수 있으며 복합재와 상대재의 마모량과 마찰계수가 가장 높게 나타났다. 이는 마모막의 생성이 거의 없고 섬유의 절단이나 이탈현상이 일어나기가 가장 어렵우며 상대적으로 무른 기지가 섬유보다 빨리 마모되기 때문이라 생각된다.

Fig. 4(b)의 Anti-Parallel방향에서는 섬유들이 상대면과의 접촉으로 plowing과 섬유 굽힘 및 cracking에 의한 섬유 파단이 발생하여 덩어리들이 떨어져 나가 주변에 흩어져 있음을 볼 수 있고, 표면이 마모막으로 덮여져 있으며, 섬유와 기지가 교대로 놓여있어서 마멸입자들이 잘 섞이고, 이것이 섬유가 탈락한 자리를 메우고 전체 마찰면에 고루 분포된 섬유분을 포함하기 때문에 전체 마찰면이 내마모성을 가지며 마모량과 마찰계수는 가장 작게 나타났으며 연삭마모 조건하에서 즉, 복합재의 표면을 따라 매우 단단한 입자에 의한 긁힘이 일어날 때는 수직 방향의 섬유 위치가 더 유리할 것이다. Fig. 4(c)는 Parallel방향에서 미소 연삭마모 메카니즘(쟁기질, 절단)과 마찰조건에서 초기에 마찰계수가 크고 돌기변형(asperity deformation)과 마모막이 형성됨에 따라 서서히 감소하여 안정상태의 값을 유지하게 되며, 접촉면에서의 섬유 굽힘과 미소크랙이 섬유 파괴와 균열의 원인이며, 지배적인 주 마모기구로 밝혀졌다.

Fig. 5는 경면 가공한 스테인레스강 상대재와 탄소섬유강화 복합재의 마모트랙을 휴대형 표면거칠기 시험기(ERC229)로 측정한 표면거칠기 선도이다. 3방향 모두 중심선 평균 거칠기 값(Ra)으로 0.05㎛의 표면거칠기 값을 나타내고 있는 것으로 보아 경면 가공한 상대재의 가공면은 본 실험의 조건에서는 마모 흔적만 나타날 뿐 거의 마모가 되지 않았다는 것을 알 수 있다. 특히, N방향의 경우는

(a) Normal



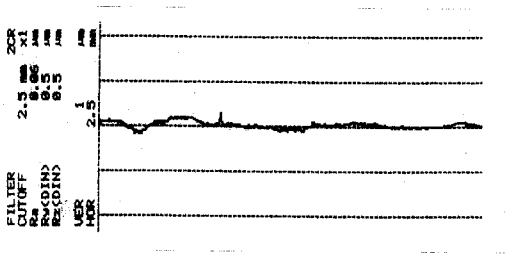
(b) Anti-Parallel

(c) Parallel

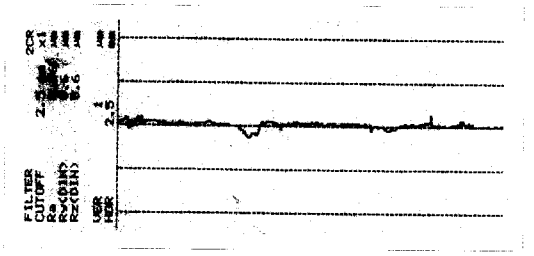
Fig. 4. SEM image of worn surface of the composite tested on a pin-on-disc device at sliding velocity 1.9m/s.

AP와 P방향에 비하여 마모면의 표면거칠기가 전반적으로 거칠다는 것을 Fig. 6(a)에서 알 수 있고 이것은 복합재 속의 섬유배열이 N방향에서는 구조적으로 섬유의 탈락이 어렵고 마모면에 마모 이착

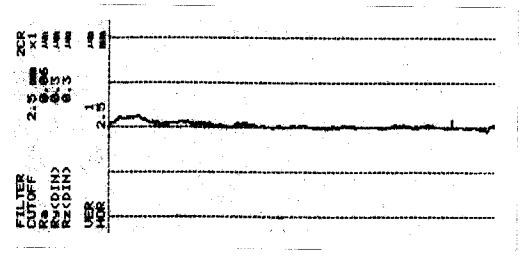
막의 부착이 어렵기 때문이라 생각된다.



(a) Normal



(b) Anti-Parallel



(c) Parallel

Fig. 5. Surface roughness of the worn surface of the counterpart tested on a pin-on-disc device at v=1.9m/s.

결 론

탄소 섬유강화 에폭시기지 복합재의 경면 가공한 스테인리스강 상대재와 마찰과 마모에 바탕을 둔 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 복합재의 비마모율은 하중이 증가하면 N방향과 P방향에서는 증가하는 경향을 보이며, AP방향에서는 감소한다. 이것은 마모 메카니즘의 영향으로 속도가 증가하면 마모 이착막의 생성이 빨라져 이착막 속의 탄소섬유가 윤활제의 역할을 하기 때문이다.

(2) 복합재의 마찰계수는 하중이 증가하면 N방향과 AP방향에서는 하중 39.2N까지 증가하다가 그 이상의 하중에서는 감소되며 AP방향에서는 하중이 증가함에 따라 서서히 증가하며, 또한 그 값은 N방향에서 가장 크고, AP방향이 가장 적다.

(3) 일방향 탄소섬유 강화 복합재의 마모 거동에 미치는 하중의 효과는 다르며 마찰초반에 발생한 섬유에 의한 쟁기질과 섬유 굽힘 및 미소크랙에 의한 섬유 균열과 파괴에 따른 마모 메카니즘의 형태에 의한 것이다.

결론적으로 본 연구에서 경면 가공한 스테인리스강 상대재에 대하여 이들 재료의 미끄럼 마모에 응용시에는 가장 tribological한 특성을 얻기 위하여 미끄럼은 AP방향으로 일어나게 해야 할 것이다.

참고문헌

1) Henry, Scott D. (1992) : (Ed.) in "Materials for friction and wear applications", ASM Handbook, ASM International, Materials Park, Pa., U.S.A. 18 P.820.
2) Tsukizoe, T. and Ohmae, N. (1975) : Wear Performance of Unidirectionally Oriented Carbon-fiber-reinforced Plastics, Tribol. Int., Vol 8, pp. 171-175.
3) Sung, N. and Suh, N. P. (1979) : Effect of Fiber Orientation in Friction and Wear of Fiber Reinforced Polymer Composites, Wear Vol. 53, pp. 129-141.
4) Giltrow, J. P. and Lancaster, J. K. (1970) : The Role of the Counterface in the Friction and Wear of Carbon Fiber Reinforced Thermosetting Resins, Wear, Vol 16, pp. 359-374.
5) Suh, N. P. and Sin, H. C.(1981) : The Genesis of Friction, Wear, Vol. 69, pp. 91-114.
6) Friedrich, K. (1986) : Friction and Wear of Polymer Composites, Composite Materials Series, Vol 1. Elsevier, Amsterdam, pp. 233-287
7) Stores, R. A. (1977) : (Ed.) in "Annual book of ASTM Standards, Sec. 3, 03.02",

"Wear testing with a pin-on-disc apparatus" ASTM G 99, Pa, U.S.A. p. 392.
8) Shim, H. H., Kwon, O. K. and Youn, J. R. (1991). Effects of structure and humidity on friction and wear properties of carbon fiber reinforced epoxy composites, Proc. SPE ANTEC'91, p. 1997.

2004년 8월 17일 접수
2004년 9월 21일 수리