

# CFRP 복합재의 적층방향에 대한 마찰 및 마모 특성<sup>†</sup> Friction and Wear Characteristics of Carbon Fiber Reinforced Composites against Lay-up Orientation

고성위 · 최영근  
S. W. Koh and Y. K. Choi

**Key Words** : Wear(마모), Friction(마찰), Lay up Orientation(적층 방향), Friction Coefficient(마찰계수), SEM(주사전자현미경), Fracture Analysis(파면해석), Specific Wear Rate(비마모율)

**Abstract** : This paper is the study on dry sliding wear behavior of carbon fiber reinforced epoxy matrix composites against lay-up orientation. Tests were investigated on the effect of the lay-up orientation, fiber sliding direction, load and sliding velocity when circumstance keep continuously at 21 °C, 60%RH. Pin-on-disk dry sliding wear tests for each experimental condition were carried out with a carbon fiber reinforced plastic pin on stainless steel disk in order to search the friction and wear characteristics. The wear rates and friction coefficients against the stainless steel counterpart were experimentally determined and the wear mechanisms were microscopically observed. The effect on friction and wear behavior are observed differently, according to various conditions. When sliding took place against counterpart, the highest wear resistance and the lowest friction coefficient were observed in the [0]<sub>24s</sub> lay-up orientation at anti-parallel direction.

## 1. 서 론

최근 급속한 과학 및 기술의 발전에 따라 산업전반의 기계설비와 자동차, 선박, 항공기 등의 작동조건이 고속화, 고하중화 되고 있으며 에너지 절약 및 신소재 개발의 일환으로 재료의 강도, 경량성, 내열화 등의 고기능성을 갖춘 재료의 개발이 추진되고 있다. 이러한 새로운 특성을 개발하는 면에서 복합재료가 관심을 받고 있으며 이 복합재료 중 섬유강화 복합재료는 높은 비강도, 비강성, 경량성, 내식성 등의 특성으로 인해 크게 각광을 받고 있고 그 응용분야 또한 늘고 있다. 복합재료는 두 가지 이상의 서로 다른 성질이 거시적으로 혼합된 유용한 재료를 말한다. 두 가지 이상의 다른 물질을 혼합하는 방법에는 원자와 원자가 합쳐져서 화합물로 되는 경우가 있는데 이런 경우에는 복합재료라고 하지 않는다.

복합재료는 혼합되어 있는 상태에서도 각 성분이 원래의 성질을 지니고 있어 미시적으로 보면 비균

질한 상태로 존재하고 있다. 복합재료의 또 다른 큰 장점은 원하는 방향으로 강성과 강도를 조절할 수 있다는 점이다. 기존의 금속재료는 등방성 재료이기 때문에 모든 방향으로 강성과 강도가 같으나, 복합재료는 필요한 방향으로만 강성과 강도를 조절하여 재료의 낭비를 막을 수 있다. 또한 복합재료는 제조방법이 용이하다. 그리고 탄소섬유는 열팽창계수가 거의 0에 가깝기 때문에, 이러한 재료로서 구조물이나 부품 등을 제조하면 온도의 변화에 따라 크기가 변화하지 않는 구조물이나 부품을 제조할 수가 있다.

복합재료는 대부분 서로 다른 플라이(ply)와 플라이가 기지에 의하여 결합되는 적층판 형태로 많이 제조되며 사용시 각 층의 상호작용으로 인하여 마찰 및 마모특성도 단일층보다는 복잡하게 나타난다. 복합재료의 적층판에는 모든 층이 같은 적층각으로만 이루어져 있는 동일 적층판, 중간면을 중심으로 적층각 및 두께가 서로 대칭인 대칭 적층판, 중간면을 중심으로 층두께는 같고 적층각의 절대값은 같으나 부호가 반대인 역대칭 적층판 및 대칭성이 전혀 없는 비대칭 적층판 등의 4가지로 구분된다. 그 중에서도 대칭 적층판은 중간면을 중심으로 기하학적으로 재료의 물성값이 대칭이 되는 적층판으로써 다른 적층판에 비하여 두 가지 장점이 있다. 첫째

접수일 : 2005년 2월 21일  
최영근 (책임저자) : 부경대학교 대학원  
E-mail : wargod@dreamwiz.com, Tel : 051-620-1579  
고성위 : 부경대학교 기계공학부

로, 복합재료로 성형할 때 열변형에 의한 비틀림을 방지할 수 있고, 둘째로 응력해석 및 구조설계가 간단하다는 점이다. 이러한 장점으로 인해 그동안 대충적층판 복합재료들에 대해 많은 연구들이 이루어져 왔으며 대부분 기계적 거동에 주목하였다.

또한 섬유강화 복합재료는 적층방향과 마찰방향에 따라 다양한 마모환경을 형성할 수 있어 마찰재료의 응용이 크게 기대되고 있으므로 마모거동에 대하여 실험적 그리고 이론적인 연구가 많이 보고되었다<sup>1)</sup>. Tsukizoe와 Ohmae<sup>2)</sup> 그리고 Sung과 Suh<sup>3)</sup>는 탄소섬유 강화 에폭시기지 복합재료의 미끄럼 마모에 대한 섬유 방향의 영향에 대한 연구를 하였다. Bonfield<sup>4)</sup>는 스테인리스강으로 된 마찰 상대면 위에서 탄소섬유/에폭시 수지로 된 편으로 실험을 했을 때 마모는 변형된 막 형성을 야기시킨다고 하였으며, 광학현미경과 전자현미경 검사로 마모막을 관찰하였다. Guicciardi 등<sup>5)</sup>은 마모데이터를 재료 성능에 이용하여 더 높은 신뢰성 요구 충족을 하기 위해 핀온디스크(pin-on-disk) 마모시험에서 데이터 분산에 대한 연구를 하였다. Giltrow와 Lancaster<sup>6)</sup>는 마찰상대면에서의 마모막 형성, 복합재료에서 섬유유형, 마찰상대면 물질의 구성과 강도 등에 대하여 연구하였다. Shim 등<sup>7)</sup>은 다양한 조건하에서 일방향 고탄성 탄소섬유 강화 에폭시 복합재의 마찰 및 마모특성에 관한 연구를 하였다. Suh와 Sin<sup>8)</sup>은 마찰력은 미끄럼 거리와 표면돌기들의 변형, 마모입자들과 단단한 돌기들에 의한 쟁기질, 미끄럼 표면 바닥부분의 응착 등에 의해 영향을 받는다고 하였다. Friedrich 등<sup>9)</sup>은 상온에서 일방향 탄소섬유강화 유리 매트릭스 복합재의 건조미끄럼과 연삭마모에 대하여 연구하였다.

본 논문은 CFRP 복합재료에 대해 적층방향에 따른 건조 미끄럼 마모거동을 실험한 연구로, 상대재(경면 가공한 스테인리스 스틸, STS304)에 대한 마찰계수와 비마모율을 실험을 통해 얻었으며, 실험한 재료의 마모면을 광학현미경 및 주사현미경(SEM)을 통해 관찰하여 마찰(friction) 및 마모(wear) 특성을 비교하였다.

## 2. 재료 및 실험방법

### 2.1 실험재료

본 실험에 사용된 복합재료는 한국카본(주)의 탄소섬유강화 에폭시 기지 프리프레그(HCU 100NS)를 사용하여 제조하였다. 복합재 시편을 제작하기

위하여 프리프레그를 적층방향에 따라 적층시킨 후 자체 제작한 hot press에서 가열가압하여 경화시켜 4.5mm 두께의 판으로 제조한 후 시편크기로 절단하여 가공하였다. 제조과정은 CFRP 프리프레그를 250mm x 250mm의 일정한 크기로 절단 한 후 적층방향에 따라 48플라이(ply)를 적층하였다. 금형은 알콜과 아세톤으로 세척하였으며 이형제를 금형에 골고루 도포하였다(혼합비율 KF96:아세톤=1:100). 그 후 적층된 프리프레그를 금형에 삽입한 후 금형을 프레스 위에 놓은 후 Fig.1과 같이 가열, 가압하여 경화시켰다. 복합재 판은 다이아몬드 톱으로 조심스럽게 절단한 후, 이것을 입자가 작은 고운 연마지(15 $\mu$ m)를 사용하여 시편에 크랙이 보이지 않게 가로 단면이 4.5mm x 5.5mm, 길이 15mm로 연마하여 마찰과 마모시험의 시편으로 사용하였다.

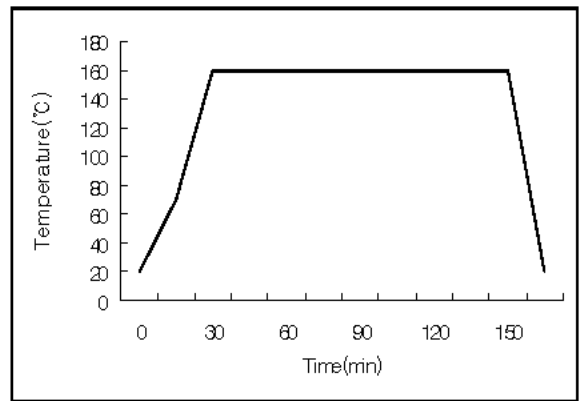


Fig. 1 Cure cycle employed for carbon fiber/epoxy matrix.

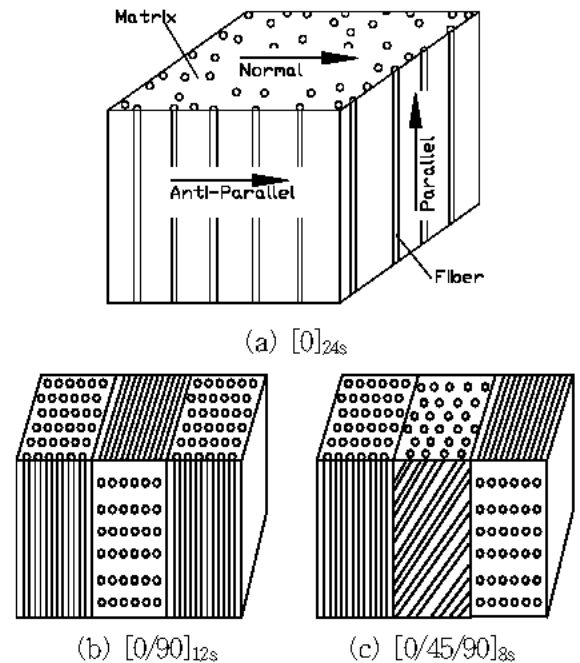


Fig. 2 A part of specimen of CFRP composites.

적층방향은 일방향([0]<sub>24s</sub>), [0/90]<sub>12s</sub>, [0/45/90]<sub>8s</sub> 3 종류를 사용하였다. 각 방향에서 시편은 [0]<sub>24s</sub>인 경우에는 미끄럼 방향을 평행, 직각, 수직 3가지로 채취하여 실험하였고, [0/90]<sub>12s</sub> 와 [0/45/90]<sub>8s</sub>의 경우에는 각각 한 방향으로만 실험하였다. Fig.2는 시편의 부분 형상을 나타낸 것이다.

3.2 실험장치 및 실험방법

건조 미끄럼 마모시험은 Fig.3과 같이 자체 제작한 핀온디스크(pin-on-disc)형 시험기를 사용하여 실시하였다<sup>11)</sup>.

Fig. 4는 본 실험에 사용된 상대재인 스테인리스강(STS 304)의 모양과 치수를 나타낸 것이고 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1과 같다. 스테인리스강이 상대 마찰면으로 채택된 이유는 가장 적은 마모를 위한 상대재 재료로 보고되었기 때문이다.

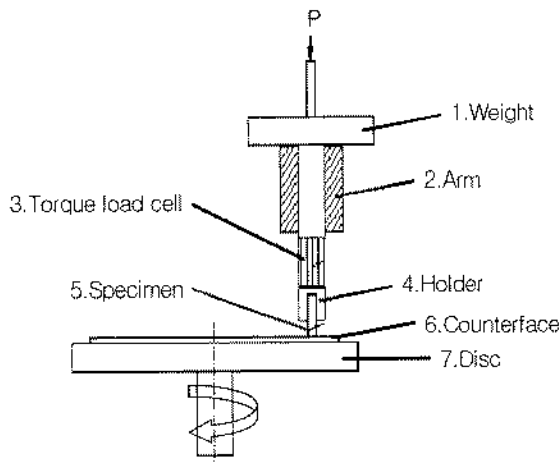


Fig. 3 Schematic diagram of pin-on-disc test apparatus.

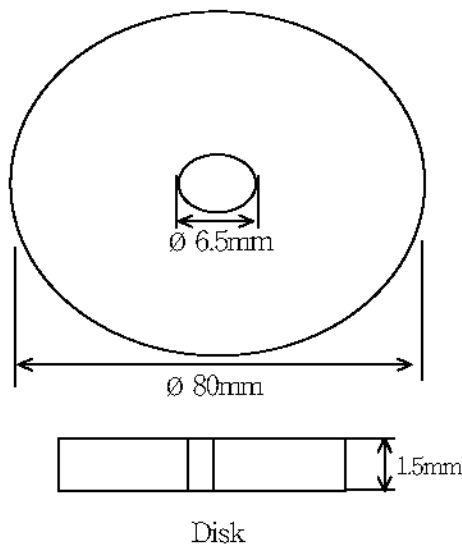


Fig. 4 Dimensions of the disk.

시험 시 환경조건은 온도(21℃)와 습도(60%RH)의 조절이 가능한 환경 챔버를 제작하여 온도와 습도를 일정하게 유지시켰다. 마모손실은 실험전후의 시편과 상대재의 무게를 측정하였다.

수직하중(p)의 변화는 12N~36N 사이이며, 속도(v)는 0.6m/s~1.9m/s사이로 각각 조건에 맞게 유지시키며 시험을 실시하였다. 동일한 시험조건에서 5개의 시험편을 4시간씩 마모시험을 실시하였으며, 시편과 상대재의 질량변화는 3번 이상 측정하여 평균값을 구하였다. 비마모율의 계산은 시험시간과 초기마모상태 구간에서 손실된 무게를 사용하여 구하였다. 실제 마모시험에 앞서 핀의 경우, 연마지(입도 15μm)를 사용하여 예비 마모를 시킨 후 아세톤으로 깨끗이 세척하고 건조로에서 약 60분간 건조시킨 후 시험하였는데, 이것은 시험 전에 시편의 표면거칠기를 항상 같게 조정함으로써 디스크와 접촉면적이 일정하게 하여 두 접촉면 사이의 접촉을 더 양호한 상태로 만들기 위해서다. 각 시편은 새로운 디스크 위에서 실험하였으며, 시험 전후 시편과 상대재의 질량손실은 Mettler 분석천칭(감도 0.01mg)으로 측정하였다.

마모된 시편의 마찰특성 비교 및 마모기구 조사를 위한 표면 관찰은 광학현미경과 주사전자현미경(SEM)을 사용하였다.

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of counterpart material.

	STS 304							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Fe
Chemical composition (wt. %)	0.08	1.00	2.00	0.05	0.03	18.0~20.0	8.0~10.5	remain
Mechanical properties	Tensile strength (Mpa)		Elongation (%)		Hardness (Hv)		Roughness (Ra)	
	520		39		196		0.05μm	

마모 결과는 비마모율<sup>10)</sup>의 향으로 주어졌으며 계산은 다음과 같다.

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

비마모율의 물리적 의미는 임의의 입력에너지에 대한 재료의 파괴손실이다.

여기에서  $\dot{w}_s$ 는 비마모율,  $v$ 는 미끄럼 속도,  $\rho$ 는 시편의 밀도,  $\Delta t$ 는 시험시간,  $\Delta m$ 은  $\Delta t$ 에서 손실

질량,  $F_n$ 은 수직하중을 나타낸다.

핀온디스크 시험기에서  $\Delta m^{(10)}$ 은 다음과 같다.

$$\Delta m = \Delta h A \rho \quad (2)$$

여기에서  $\Delta h$ 는  $\Delta t$ 동안 시편의 손상깊이,  $A$ 는 시편의 실접촉면적,  $\rho$ 는 시편의 밀도를 나타낸다. 건조마찰에 Amonton-Coulomb 법칙을 적용하면 마찰계수<sup>(10)</sup>는 다음과 같이 계산된다.

$$\mu = \frac{F_f}{F_n} \quad (3)$$

여기서  $\mu$ 는 마찰계수,  $F_n$ 은 수직하중,  $F_f$ 는 측정된 마찰력을 나타낸다.

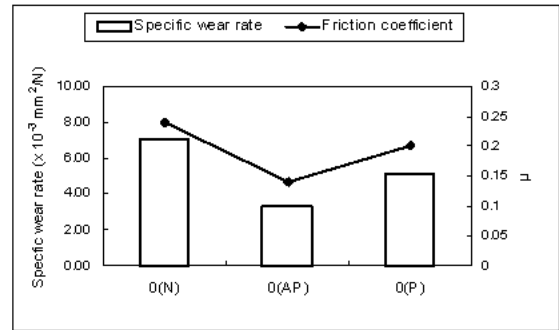
### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 마찰계수와 비마모율

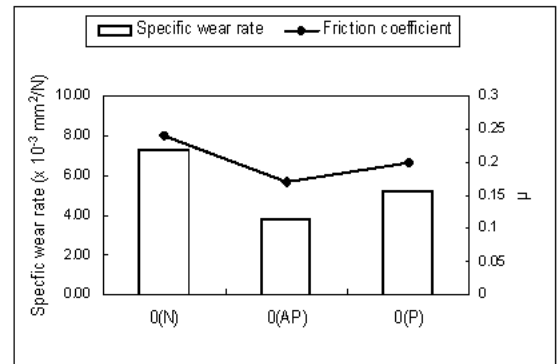
##### 3.1.1 일방향 적층재의 경우

Fig. 6은 각각의 조건에서  $[0]_{24s}$  적층 복합재의 3가지 섬유방향에 대하여 재료의 평균 마찰계수와 비마모율을 그래프로 나타내고 있다. 각각의 미끄럼속도와 하중의 조건에서 평균 마찰계수와 비마모율 값은 마찰방향이 AP, P, N 방향 순으로 낮았다. 특히 AP방향일 때 평균 마찰계수와 비마모율의 값이 매우 낮았다. 이것은 Shim 등<sup>(12)</sup>이 찾은 결과와 유사한 것으로 에폭시 기지속의 섬유방향이 재료의 마찰계수에 영향을 미칠 수 있다는 것을 보여준다.

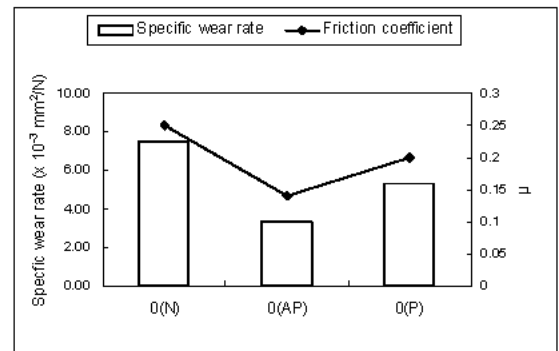
일방향 복합재료에서 마찰방향을 섬유방향에 따라 달리 했을 경우 즉 N방향, P방향, AP방향으로 하였을 경우, 비마모율의 차이가 발생하는 것은 실접촉점이 다르기 때문이라 할 수 있다. N방향의 경우 섬유의 길이 방향에서 수직되도록 상대마찰면에 접촉하게 되므로 실제의 접촉점이 작게 된다고 볼 수 있다. 또한 P방향에서 실접촉이 많으므로 하중분산 효과를 유발하게 되므로 P방향의 비마모율이 N방향의 그것보다 낮게 나타난다. 한편 AP방향의 비마모율을 P방향의 그것과 비교하여 보면 P방향과 AP방향의 실접촉점은 비슷하다고 생각되지만 P방향의 경우에 미끄럼 마찰을 하면 파단된 섬유가 모재에서 분리되어 탈락되므로 마모가 가속화되고 이것이 비마모율을 높게 나타낸다고 생각된다. 이러한 결과는 Tuskizoe와 Ohmae<sup>(13)</sup>의 결과와도 유사한 경향이다.



(a) P=12N, v=0.6m/s



(b) P=24N, v=1.3m/s



(c) P=36N, v=1.9m/s

Fig. 6 Specific wear rates and friction coefficient of the carbon composite at the lay-up orientation of  $[0]_{24s}$

N과 P방향의 경우에 하중이 12N에서 36N까지 증가하고, 미끄럼속도가 0.6m/s~1.9m/s까지 증가함에 따라 비마모율은 증가함을 알 수 있다. 반면에 AP방향의 비마모율은 마찰조건이 가혹해짐에도 불구하고 증가하다가 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이것은 N방향의 경우 섬유들이 마모막으로 덮혀지지 않는 상태로 표면에 노출되어 있으므로 일부의 섬유들이 상대면과의 상호작용으로 인하여 떨어져 나가기 때문에 비마모율이 증가한다고 생각할 수 있

다. 반면에 AP방향의 경우에는 마찰방향으로 섬유와 매트릭스가 교대로 배열되어 있으므로 마찰로 인해 생성된 마모입자가 잘 혼합되어 움푹파인 부분들을 메우고 또한 하중의 증가에 따라 마찰면 전체에 고르게 분포된 흑연성분을 가지게 되므로 내마모성이 변하기 때문이라 생각할 수 있으며 이에 대한 상세한 연구가 필요하다.

한편 마찰계수는 마찰조건이 가혹해짐에 따라 N 방향의 그것은 다소 증가함을 알 수 있다. 그러나 AP방향에서는 마찰계수가 증가하다가 감소하고 P 방향에서의 마찰계수는 거의 일정함을 알 수 있다.

### 3.1.2 사교적층판의 경우

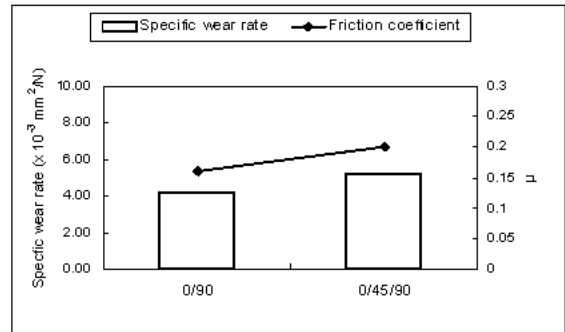
Fig.7(a)는 P=12N, v=0.6m/s의 조건에서 적층방향 [0/90]<sub>12s</sub>와 [0/45/90]<sub>3s</sub>의 복합재 시험편을 시험한 결과를 나타내었다. [0/45/90]<sub>3s</sub> 적층시 보다 [0/90]<sub>12s</sub>적층한 복합재의 시험편이 비마모율과 마찰계수가 낮게 나타났다. [0/90]<sub>12s</sub> 적층시는 [0]<sub>24s</sub> 적층시 AP방향의 실험결과와 유사하였다. 이는 초기 마모시 탈락한 섬유와 마멸입자들이 마모막 형성에 영향을 미쳤음을 알 수 있으며 경면상대재와 복합재 간에 윤활제와 같은 역할을 할 수 있음을 나타낸다.

Fig.7(b)는 적층방향 [0/90]<sub>12s</sub>와 [0/45/90]<sub>3s</sub>의 복합재 시험편을 P=24N, v=1.3m/s의 조건에서 실험한 결과이다. 전체적인 경향은 Fig. 7(a)와 유사하게 나타났다.

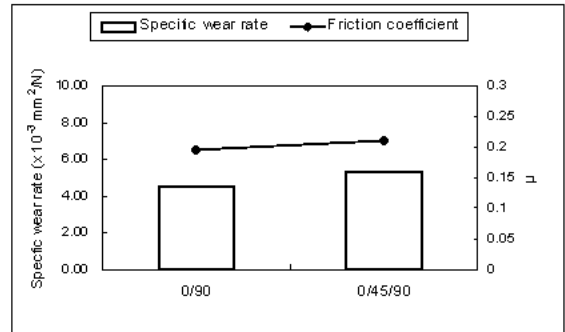
Fig.7(c)는 적층방향 [0/90]<sub>12s</sub>와 [0/45/90]<sub>3s</sub>의 복합재 시험편을 P=36N, v=1.9m/s의 조건에서 실험한 결과이다. 비마모율과 마찰계수는 Fig. 7(a) 및 (b)보다 조금씩 증가하였으나 초기마모시 탈락한 섬유와 마멸입자들이 마모막을 형성한 후에는 값이 안정상태를 나타내었다.

Fig.8(a)는 적층방향에 따라 복합재 시험편을 P=12N, v=0.6m/s의 조건에서 실험한 결과이다. 마찰계수와 비마모율의 값은 [0]<sub>24s</sub>(N), [0/45/90]<sub>3s</sub>, [0/90]<sub>12s</sub>, [0]<sub>24s</sub>(AP), 의 순서로 높았다. [0]<sub>24s</sub>(AP), [0/90]<sub>12s</sub>의 값은 차이가 별로 나지 않았다.

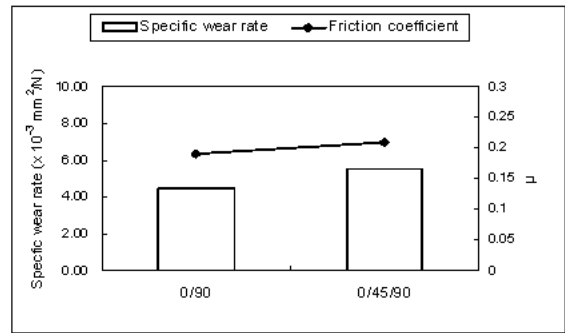
Fig.8(b)는 적층방향에 따라 복합재 시험편을 P=24N, v=1.3m/s의 조건에서 실험한 결과이다. 결과 값은 전체적으로 조건이 P=12N, v=0.6m/s일 때와 유사하나 앞의 조건보다 마찰계수와 비마모율의 값이 전체적으로 증가하였다.



(a) P=12N, v=0.6m/s



(b) P=24N, v=1.3m/s

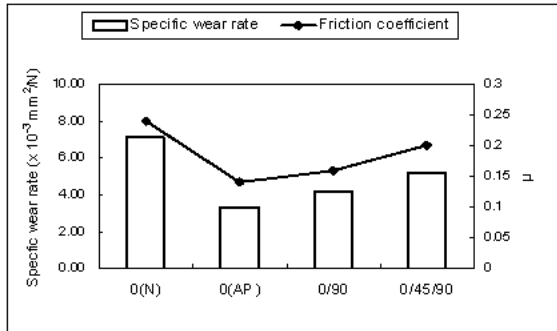


(c) P=36N, v=1.9m/s

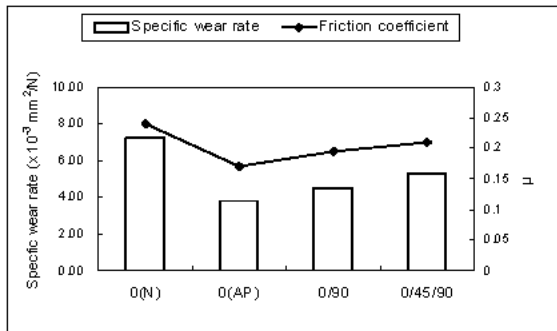
Fig. 7 Specific wear rates and friction coefficient of the carbon composite at the lay-up orientation(of) [0/90]<sub>12s</sub> and [0/45/90]<sub>3s</sub>.

Fig.8(c)는 적층방향에 따라 복합재 시험편을 P=36N, v=1.9m/s의 조건에서 실험한 결과이다. 이 조건에서도 역시 앞의 두 그림과 전체적인 경향은 유사하게 나타나며, 앞의 그래프들의 값보다 약간씩 전체적으로 증가함을 볼 수 있다. 약간의 차이점은 [0]<sub>24s</sub>의 (N)방향으로 실험하였을 때의 마찰계수와 비마모율 값이 앞의 두 그래프의 결과 값보다 높게 나타남을 알 수 있는데, 이는 초기에 하중과 속도의 조건이 앞의 조건보다 높게 시작하지만 초기 마모시에 마모막 형성이 일어나지 않아 마찰계수가 더

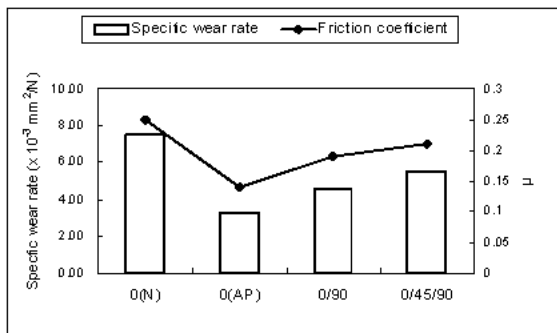
크게 나타났다.  $[0]_{24s}$  (AP)방향과  $[0/90]_{12s}$ 의 마찰계수와 비마모율 값은 앞의 두 결과들 보다 낮게 나타나는데 이는 초기 마모시에 앞의 두 조건들보다 마모막의 형성이 잘 일어나 경면상대재와 복합재 사이의 윤활작용이 더 잘 일어났기 때문이다.



(a) P=12N, v=0.6m/s



(b) P=24N, v=1.3m/s



(c) P=36N, v=1.9m/s

Fig. 8 Specific wear rates and friction coefficient of the carbon composite as the lay-up orientation tested on a pin-on-disc device.

복합재를 사교적층 한 경우 즉, 적층방향을  $[0/90]_{12s}$ 와  $[0/45/90]_{8s}$ 로 했을 경우 평균 마찰계수와 비마모율의 값은  $[0]_{24s}$ (N) 방향과  $[0]_{24s}$ (AP) 방향 사이의 값을 나타내고 있다.  $[0/90]_{12s}$ 의 평균 마찰계수와 비마모율의 값은  $[0]_{24s}$ (AP) 방향의 값에 더 가

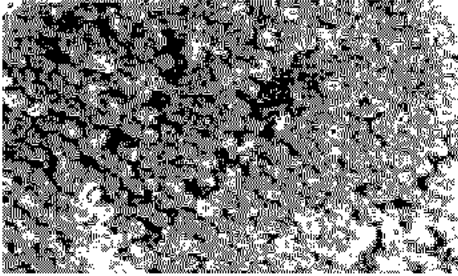
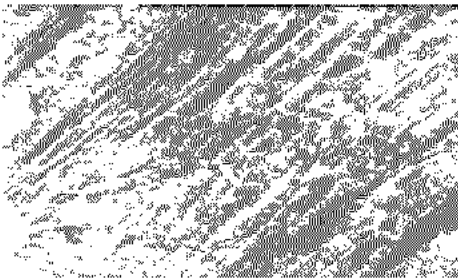
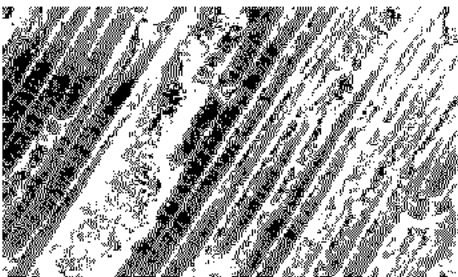
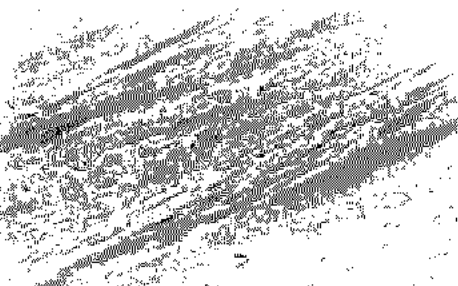
까운 결과를 나타내고 있으며  $[0/45/90]_{8s}$ 의 평균 마찰계수와 비마모율은  $[0/90]_{12s}$ 의 값에 더 가깝게 나타나고 있다. 이것은 복합재를  $[0/90]_{12s}$ 로 했을 경우는  $[0]_{24s}$ (N) 방향과  $[0]_{24s}$ (AP) 방향을 사교적층한 경우라 볼 수 있다. 이것은 일방향일때 가장 낮은 평균 마찰계수와 비마모율을 보이는  $[0]_{24s}$ (AP) 방향이 마모시에 평균 마찰계수와 비마모율을 낮추는데 영향을 미친 결과라 볼 수 있다. 적층방향이  $[0/45/90]_{8s}$ 인 경우에도 역시  $[0/90]_{12s}$ 로 적층한 것에  $[45]$ 적층판을 추가한 것으로 볼 수 있으며 실험데이터 역시 같은 경향으로 나타났다.

### 3.2 파면해석

핀온디스크형 마모시험기에서 섬유방향에 따라 시험된 시편의 마모면은 Fig.9에서 복합적이고 다양한 마모 메카니즘을 나타내고 있다. Fig.9(a)는 적층방향  $[0]_{24s}$ 인 N방향에서의 복합재의 마모면을 나타낸 것으로, 방향에서는 섬유단면의 연마가 일어났으며 약간의 마모막이 생성되었으나 복합재의 마모량과 마찰계수는 가장 크게 나타났다. 이러한 현상은 마모막의 생성이 거의 일어나지 않았고, 섬유의 이탈현상이나 절단이 일어나기가 어려워 미끄럼 마모에서 가장 영향을 미치는 응덩이, 얇은 조각, 재료의 변형 등과 같은 응착마모 메카니즘이 거의 나타나지 않았다.

Fig.9(b)는 적층방향  $[0]_{24s}$ 인 AP방향에서의 복합재의 마모면을 나타낸 것으로, 섬유들이 상대면과의 접촉으로 응착마모가 일어났으며, 피로마모인 균열(cracking)에 의한 섬유파단과 긁힘(scratch), 파랑(furrow), 섬유의 조각박리(chips flake) 등이 발생하여 섬유 덩어리들이 떨어져 나가 흩어져 있음을 볼 수 있다. 표면은 마모막으로 덮여 있으며, 섬유와 기지가 교대로 있어서 마멸입자들이 잘 섞이며 이것이 섬유가 탈락한 자리를 메우고 전체 마찰면에 고루 분포되어 전체 마찰면이 내마모성을 지니며, 마모량과 마찰계수도 마찰방향에 따른 복합재 시편 중 가장 낮게 나타났다.

Fig.9(c)는 적층방향  $[0]_{24s}$ 인 P방향에서의 복합재의 마모면을 나타낸 것으로, 연삭마모 메카니즘인 긁힘과 갱기질현상 등이 보이며 균열과 마모입자 등도 나타난다. 또한 섬유의 절단과 균열로 인해 탄소섬유들이 연마되어 평평해진 옆면을 나타내고 있으며, 일부의 섬유들이 상대면과의 상호작용으로 인해 떨어져 나가고 그 자리는 마모분으로 채워진 모습이 나타난다.

(a) P=24N, v=1.3m/s, [0]<sub>24s</sub>, N direction.(b) P=24N, v=1.3m/s, [0]<sub>24s</sub>, AP direction.(c) P=24N, v=1.3m/s, [0]<sub>24s</sub>, P direction.(d) P=24N, v=1.3m/s, ([0/90]<sub>12s</sub>)

(e) P=24N, v=1.3m/s, [0/45/90]

Fig. 9 Micrographs of the worn surface of the composite tested on a pin-on-disc device against lay-up orientation

Fig.9(d)는 적층방향 [0/90]<sub>12s</sub>인 복합재의 마모면을 나타낸 것으로, 상대면과의 응착마모가 나타나며 섬유파단도 볼 수 있다. 또한 피로마모에서 주로 보이는 균열(cracking)과 마멸된 입자들이 마모면 위에 퍼져있는 것을 볼 수 있으며 일부 마모막이 나타난다.

Fig.9(e)는 적층방향 [0/45/90]<sub>3s</sub>인 복합재의 마모면을 나타낸 것으로, 피로마모에 의해 섬유의 균열(cracking)이 발생했으며 고랑, 섬유의 조각박리 등이 나타나며 섬유덩어리들이 떨어져 나가 흩어져 있는 것을 볼 수 있다. 그러나 섬유가 탈락한 자리를 마모입자들이 잘 채우지 못하고 있으며 마모막 또한 거의 보이지 않고 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 탄소 섬유강화 복합재를 경면 가공한 STS 304를 마찰 상대재로 하여 마찰 및 마모에 미치는 섬유방향, 적층방향, 마찰방향, 속도, 하중의 영향에 대하여 실험적으로 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 일방향 CFRP 복합재의 마모거동에 영향을 미치는 섬유방향에 따른 효과는 다르며 작용하는 마모 메커니즘의 형태에 의존한다. N방향의 비마모율과 마찰계수가 가장 높게 나타나고, AP방향의 그것이 가장 낮게 나타났다.
2. N방향과 P방향의 경우에 CFRP 복합재료의 비마모율은 하중과 미끄럼속도가 증가하면 증가하지만 AP방향의 경우에는 증가하다가 감소한다.
3. CFRP 복합재의 적층방향이 [0]<sub>24s</sub>에서는 AP 방향이 가장 마찰계수가 낮았으며 그 값은 복합재 적층방향이 [0/90]<sub>12s</sub>일 때의 값과 유사하였다.

#### 후 기

이 논문은 BK21 사업에 의하여 지원되었음.

#### 참고문헌

1. Scott D. Henry, 1992, "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. Bonfield W., 1976, "Wear Transfer Films Formed by Carbon Fiber Reinforced Epoxy Resin Sliding on Stainless Steel", *Wear*, Vol. 37, pp. 113-121.
5. Guicciardi S., Melandri C., Lucchini F. and de Portu G., 2002, "On data dispersion in pin-on-disk wear tests", *Wear*, Vol. 252, pp. 1001-1006.
6. 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.
7. Shim, H.H., Kwon, O.K. and Youn, J.R., 1992, "Effects of fiber orientation and humidity on friction and wear properties of graphite fiber composites", *Wear*, Vol. 157, pp. 141-149.
8. Suh N. P. and Sin H. C., 1981, "The Genesis of Friction", *Wear*, Vol. 69, pp. 91-114.
9. Lu Z., Friedrich K., Pannhorst W. and Heinz J., 1993, "Wear and friction of a unidirectional carbon fiber-glass matrix composite against various counterparts", *Wear*, Vol. 162-164, pp. 1103-1113.
10. Beanmont W. R., Schultz M. and Friedrich K., 1990, "Delaware composite design encyclopedia", *Technomic*, Vol. 4, pp. 142-153.
11. Robert A. Storer, 1997, "Wear testing with a pin-on-disc apparatus", *ASTM G 99*, Pa, U.S.A. p. 392.
12. 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 SNTEC.*, p. 1997.
13. Tsukizoe T. and Ohmae N., 1977, "Wear mechanism of Unidirectionally Oriented Fiber-Reinforced Plastics", *ASME Trans.*, pp. 403-407.