

탄소 섬유 복합재의 경면 상대제에 대한 마찰 및 마모 특성

양병춘*, 고성위**

*부경대학교 대학원, **부경대학교

Wear and friction characteristics of a carbon fiber composite against specular counterpart

BYEONG-CHUN YANG* and SUNG-WI KOH**

*Graduate School, Pukyong National University, **Pukyong National University

KEY WORDS: Wear(마모), Friction(마찰), Dry sliding wear(건조 미끄럼 마모), Specular(경면), SEM(주사전자현미경)

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.

기호설명

Δm : Δt 에서 손실 질량

v : 미끄럼 속도

ρ : 시편의 밀도

F_n : 수직하중

Δh : Δt 동안 시편의 손상깊이

A : 시편의 실접촉면적

F_f : 측정된 마찰력

1. 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 섬유 방향을 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 등에서 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 보고되었다¹⁾. Tsukizoe와 Ohmae²⁾ 그리고 Sung과 Suh³⁾는 탄소 섬유 강화 에폭시기지 복합재료의 미끄럼 마모에 대한 섬유 방향의 영향에 대한 연구를 하였다. Giltrow와 Lancaster⁴⁾는 상대 마찰면에서의 마모막 형성, 복합재료 중의 섬유형태, 상대 마찰면 물질의 구성과 강도 등에 대하여 연구하였다. Suh와 Sin⁵⁾은 마찰력의 성분과 동일하게 마모입자의 역할에 대한 연구를 하였다. Friedrich⁶⁾ 다양한 폴리머 복합재의 연삭 마모가 일어나는 동안 지배적인 미소 마모 메커니즘을 분류하였다.

본 논문은 일방향 탄소섬유 강화 에폭시 기지 복합재의 건조 미끄럼 마모거동에 대한 연구로 경면 가공한 스테인리스

* 부경대학교 대학원

E-mail : ds5nhz@orgio.net

Tel : (051)607-7405 FAX : (051)802-2093

** 부경대학교

스틸 상대재에 대한 복합재의 비마모율과 마찰계수를 다양한 실험조건 하에서 결정하였으며, 탄소섬유 강화 에폭시 기지 복합재의 마모 메커니즘에 대하여 광학현미경 및 주사식전 자현미경(SEM) 관찰을 통하여 마찰특성을 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 μ m)를 사용하여 시편에 크랙이 보이지 않게 가로단면이 4.5 \times 5.5mm, 길이

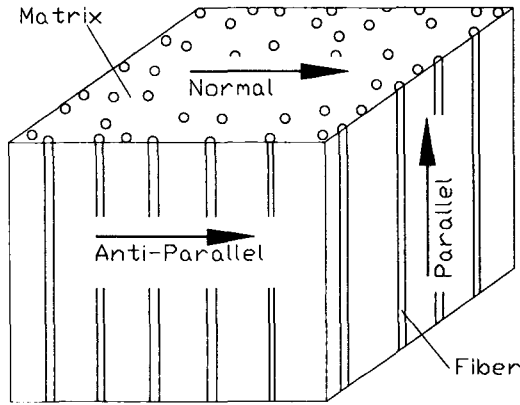


Fig. 1 Relative sliding direction with respect to fiber orientation of the composite.

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

Material	Density (gcm ⁻³)	Elastic modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Fiber content (vol.%)
Comp.	1.70	195	3,525	60

15mm로 연마하여 마찰과 마모시험의 시편으로 사용하였다.

2.2. 실험장치 및 실험 절차

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

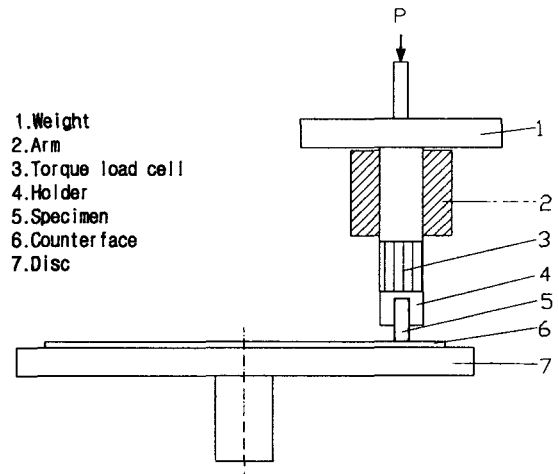


Fig. 2 Schematic diagram of pin-on-disc test apparatus.

건조 미끄럼 마모시험은 Fig. 2와 같이 자체 제작한 핀온디스크(pin-on-disc)형 시험기를 사용하여 실시하였다⁷⁾. 시험 시 환경조건은 온도(21 $^{\circ}$ C)와 습도(60%RH)의 조절이 가능한 환경 챔버를 제작하여 온도와 습도를 일정하게 유지시켰다. 시편의 마찰력 측정은 연속적으로 원격조정을 하며 시험을 실시하였고, 마모손실은 실험전후의 시편과 상대재의 무게를 측정하였다. 상대 마찰재는 지름 80mm \times 두께 1.5mm의 디스크형으로 표면을 경면 가공한 스테인리스 강(STS304, INI스틸)을 사용하였으며, Table 2에 그 특성이 나타나 있다. 시험장치는 서로 다른 미끄럼 속도로 동작하게끔 조정되었다. 수직하중의 변화는 19.8~64N 사이로 서로 다른 하중-속도(pv)인 0.5~1.5MPams⁻¹를 유지시키며 시험을 실시하였다.

동일한 시험조건에서 3개의 시험편을 3시간씩 마모시험을 실시하였으며, 시험 후 상대재에 생긴 마모 트랙은 접촉식 표면거칠기 시험기로 측정되었으며, 시편과 상대재의 질량변화

Table 3 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 \leq	40 \leq	≤ 200	0.005 μ m

는 3번 이상 측정하여 평균값을 구하였다.

핀온디스크(Pin-on-disc) 시험기에서 복합재 핀은 스테인리스 강 상대재인 디스크에 대하여 미끄러졌다. 로드셀을 통한 마찰력의 연속 원격조정(monitors)을 실시하여 마찰계수(μ)를 얻었다. 이 방법으로 마찰계 초기의 정적 안정상태 및 다양한 미끄러짐 조건에서 마모율이 안정(평형) 수준에 도달하므로 마모율 변화를 구분할 수 있었다.

다른 미끄러짐 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 연마지(입도 15 μ m)를 사용하여 예비 마모를 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. 각 슬라이딩 방향에 3개의 시편을 사용하였다. 각 시편은 새로운 디스크 위에서 실시하였다.

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

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

비마모율의 차원은 $\text{mm}^3/\text{N}/\text{m}$ 이며, 비마모율의 물리적인 의미는 임의의 입력에너지에 대한 재료의 파괴손실이다.

핀온디스크 시험기에서 Δm 은 다음과 같다.

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

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

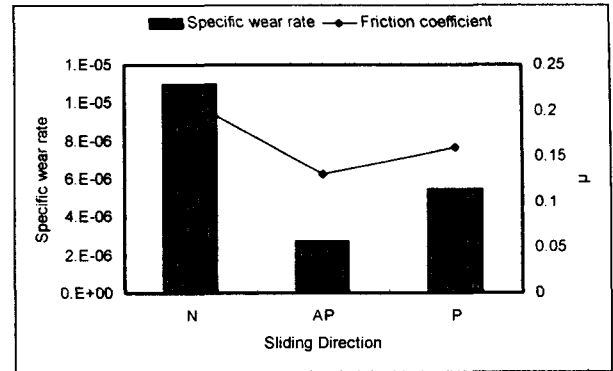
$$\mu = \frac{F_f}{F_n} \quad (3)$$

2.3. 미시파면해석

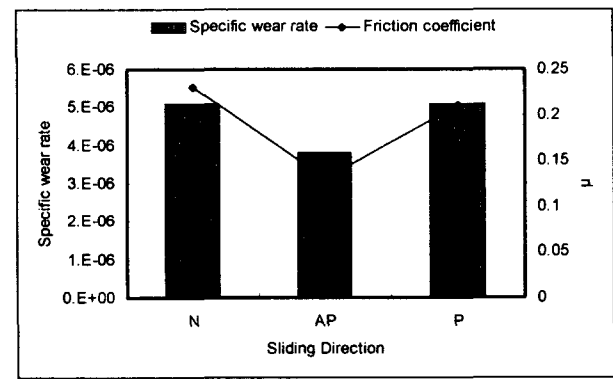
마모된 시편의 마찰특성 비교 및 마모기구 조사를 위한 표면 관찰은 대부분은 광학현미경과 주사식전자현미경(SEM)으로 실시되었다. 경면 가공한 스테인리스 강 상대재 위의 마모막의 형성과 흠의 생성도 광학현미경과 SEM으로 조사되었으며, 마모 track의 가로 단면형상은 접촉식 표면 거칠기 시험기를 사용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

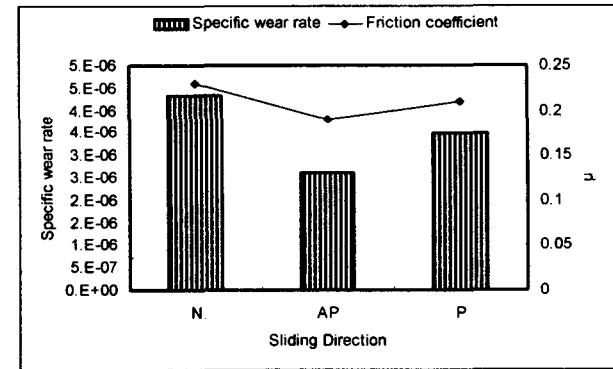
탄소섬유강화 에폭시기지 복합재의 마찰과 마모성능을 경



(a) $p=0.5\text{Mpa}$ and $v=0.6\text{m/s}$



(b) $p=1.0\text{Mpa}$ and $v=1.3\text{m/s}$



(c) $p=1.5\text{Mpa}$ and $v=1.9\text{m/s}$

Fig. 3. Specific wear rates and friction coefficient of the carbon composite as a function of the sliding direction and counterpart material tested on a pin-on-disc apparatus.

면 가공한 스테인리스 강 상대재에 대하여 핀온디스크형 시험기로 각각의 조건에서 실험한 결과는 초기마모가 일어나고 안정상태에 이르는 시간이 대체적으로 약 30분 정도 걸렸으

며, 초기 시간동안 시편과 상대재 사이의 마모 메카니즘은 쟁기질(plowing), 응착(adhesion) 및 돌기변형 등으로 인하여 마모가 많이 일어나고 마찰계수가 떨어져 안정상태가 되면 마모가 현저하게 줄어들었다.

Fig. 3은 각 실험조건에서 3가지 주 섬유방향에 대한 비마모율과 마찰계수의 관계를 도시한 것이다. Fig. 3(a)는 $pv=0.5MPams^{-1}$ 의 조건에서 시험한 결과를 3가지 섬유방향에 대하여 재료의 평균 비마모율과 마찰계수와의 관계를 도시하였다. Fig. 3에서 에폭시 기지 속의 섬유방향이 재료의 마찰계수에 영향을 미칠 수 있다는 것을 명백하게 보여주고 있다. 또한 여기에 Shim 등²⁹⁾이 찾은 것과 유사하게 AP방향은 P 또는 N방향 보다 매우 낮은 마찰계수의 값을 나타

냈다. 이 조건에서 3시간 동안 실험되었을 때는 마모량은 측정할 수 없을 정도로 작았다. 이것이 의미하는 것은 이 마모조건에서는 마찰면에 가해진 압력이 충분히 크지 않아서 섬유에 뚜렷한 손상을 입히지 않기 때문에 고탄성계수 탄소 섬유 복합재가 이러한 조건에 이용된다면 매우 우수한 내마모 물질이 될 수 있다는 것을 의미한다. Fig. 3(b)는

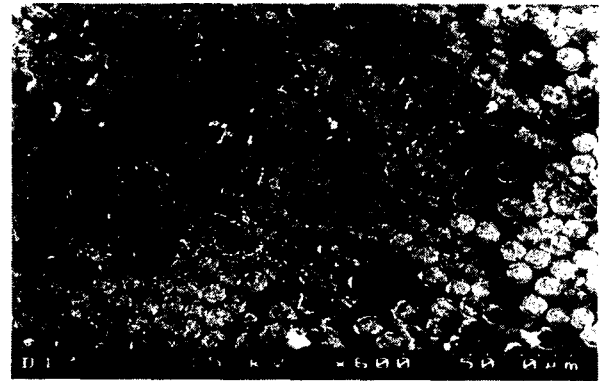
$pv=1.0MPams^{-1}$ 의 조건에서 시험한 결과를 나타내었다. 평균 비마모율은 N방향과 P방향에서 비슷하게 나타났고 AP방향에서 가장 낮게 나타났다. Fig. 3(c)는

$pv=1.5MPams^{-1}$ 의 조건에서 시험한 결과이다. 따라서 마모는 각각의 조건에서 알 수 있듯이 초반에 생성된 마모막이 복합재료 시편과 상대재 표면에 형성되는 것이 마모에 큰 영향을 준다. 3가지 섬유 방향 중 특히 AP방향에서는 초기 마모막 형성시 마모가 되고 후반부에는 거의 마모량이 없었다. 그것은 마모막 속에 포함된 탄소섬유가 내부적으로 윤활제와 같은 역할을 할 수 있다는 것을 나타낸다.

핀온디스크 시험기에서 섬유방향에 따라 시험된 시편의 대표적인 마모면은 Fig. 4에서 마모 메카니즘의 다양한 종류를 보여주고 있다. 경면 가공된 상대재에 대한 복합재의 마모면은 수직(normal)방향에서는 섬유단면의 연마와 쟁기질(plowing)이 나타났으며, 복합재와 상대재의 마모량과 마찰계수가 가장 높게 나타났으며, 이는 마모막의 생성이 거의 없고 섬유의 절단이나 이탈현상이 일어나기가 가장 어렵기 때문이라 생각된다.

직각(antiparallel)방향에서는 섬유들이 상대면과의 접촉으로 약간의 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 굽힘이 일어날 때는 수직 방향의 섬유 위치가 더 유리할 것이다.

평행(parallel)방향에서는 미소 연삭마모 메카니즘(쟁기질, 절단과 균열)의 결과로 탄소섬유들이 연마되어 평평하여진



(a) N



(b) AP



(c) P

Fig. 4. Micrographs of the worn surface of the composite tested on a pin-on-disc device at $p=0.8MPa$ and $v=1.3m/s$.

옆면을 보이고 있으며 일부의 섬유들이 상대면과의 상호작용으로 인하여 떨어져 나가고 그 자리는 마모분으로 채워진 모습을 뚜렷하게 나타내고 있으며 마모막은 생성되지 않았다. 실제에 있어서 마모막의 생성은 2가지 다른 방향에 비하여

AP방향에서 매우 명확해 보인다. 마찰조건에서 초기에 마찰 계수가 크고 돌기변형(asperity deformation)과 마모막이 형성됨에 따라 서서히 감소하여 안정상태의 값을 유지하게 되며, 접촉면에서의 섬유 굽힘이 섬유 파괴와 균열의 원인이며, 지배적인 주 마모기구로 밝혀졌다.

4. 결 론

탄소 섬유강화 에폭시기지 복합재의 마찰과 마모에 바탕을 둔 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 일방향 탄소섬유 강화 복합재의 마모 거동에 미치는 미끄럼방향의 효과는 다르며 작용하는 마모 메커니즘의 형태에 의존한다.

(2) 상온에서 경면 가공한 스테인리스 강 상대재에 대하여 미끄럼이 일어나면 AP 방향에서 높은 마모 저항과 낮은 마찰계수가 관찰되었다.

(3) 복합재의 마모율은 모든 미끄럼방향에 대한 상대마찰재의 마모율보다 약 1또는 2배 이상 높았다. 이것은 지배적인 마모 메커니즘이 섬유의 평면 굽힘에 의한 대부분의 경우 섬유의 파괴와 접촉면으로부터 전체 섬유 덩어리의 떨어져 나감 때문이다.

결론적으로 본 연구에서 경면 가공한 스테인리스 상대재에 대하여 이들 재료의 미끄럼 마모에 응용시에는 다음의 조건들이 가장 tribological한 특성을 얻기 위하여 미끄럼은 섬유 방향에 직각 방향으로 일어나게 해야 할 것이다.

참고문헌

- 1) Scott D. Henry, (Ed.) in "Materials for friction and wear applications", ASM Handbook, ASM International, Materials Park, Pa., U.S.A. 18 (1992) 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., "Effect of Fiber Orientation in Friction and Wear of Fiber Reinforced Polymer Composites," (1979). Wear Vol. 53,
- 4) Giltrow J.P. and Lancaster J.K., "The Role of the Counterface in the Friction and Wear of Carbon Fiber Reinforced Thermosetting Resins," (1970), Wear, Vol 16, pp. 359-374.
- 5) Suh N.P. and Sin H.C., "The Genesis of Friction," (1981), Wear, Vol. 69, pp. 91-114.
- 6) Friedrich K., "Friction and WEar of Polymer Composites", (1986), Composite Materials Series, Vol 1. Elsevier, Amsterdam, pp. 233-287
- 7) 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.
- 8) H. H. Shim, O. K. Kwon and J. R. Youn, (1991). "Effects of structure and humidity on friction and wear properties of carbon fiber reinforced epoxy composites", Proc. SPE ANTEC'91, p. 1997.