

탄소 섬유 복합재의 마찰 및 마모 특성에 미치는 속도 효과*

고성위 · 양병춘[†]

부경대학교

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

Sung-Wi KOH and Byeong-Chun YANG[†]

Pukyong National University

Abstract

This paper presents an experimental study of friction and wear properties of a unidirectional oriented continuous carbon-fiber reinforced epoxy composite at the ambient temperature. Friction and wear experiments were conducted in the three principal sliding direction of the fiber orientation in the composite were selected against the stainless steel counterpart specularly processed were using a pin-on-disc apparatus. Friction coefficient and specific wear rate at various normal loads and sliding velocities were determined. When sliding took place against smooth and hard counterpart, the highest wear resistance and the lowest friction coefficient were observed in the anti-parallel direction. The wear track of the worn specimens was examined with a scanning electron microscope(SEM) to observe the damaged fibers on the surface. In addition, SEM observations of the worn surfaces allowed to identify the involved different wear mechanisms.

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

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

서론

복합재료는 2개 이상의 물리적으로 서로 다른 구성요소가 그 자체의 원래 구조와 특성을 유지한 채 결합하여 만들어지며, 복합재료는 최근 다양한 산업 분야에서 크게 의존하게 되었다. 이러한 복합재료 중에서 신소재로서 새로운 강화재료와 매트릭스(matrix)가 개발되어 가고 있는 섬유강화 복합재료(fiber reinforced plastics, FRP)¹⁾의 분야는 차세대 첨단 공업재료로서 점점 더 주목받고 있다.

FRP의 중요한 특성으로는 경량성, 성형성, 내식성, 내충격성, 높은 비강도 및 피로강도, 이방성 등

* 이 논문은 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

[†] Corresponding author : ds5nhz@yahoo.co.kr

을 들 수 있다. 또한 강화섬유와 수지의 조합에 따라 종류가 다양하며, 우주 항공, 통신, 선박, 자동차, 스포츠용품, 전자제품, 건축과 토목 분야 등 그 응용분야가 폭넓고 다양하다²⁾³⁾.

섬유강화 복합재료의 기계적인 특성 및 마찰, 마멸특성에 대한 여러 연구결과에서 그 특성들이 강화섬유의 재질, 구성, 함유량, 섬유 방향 및 수지의 종류, 환경조건, 표면거칠기, 윤활여부, 미끄럼속도, 미끄럼 거리 등 여러 복잡한 인자들에 좌우됨을 보이고 있다⁴⁾. 이러한 연구결과들은 다음과 같다. Giltrow와 Lancaster⁵⁾는 탄소섬유강화 복합재료와 상대재에서 섬유방향이나 매트릭스는 마모에 어떠한 영향을 주지 않는다고 주장하였고, Bonfield 등⁶⁾은 광학현미경과 TEM으로 마모막의 형성에 대하여 연구하였다. Tsukizoe와 Ohmae⁷⁾ 그리고 Sung과 Suh⁸⁾는 탄소섬유 강화 에폭시기지 복합재료의 미끄럼 마모시 섬유 방향의 영향과 섬유방향에 대한 마찰계수의 변화를 연구하였다. Suh⁹⁾는 마모의 박리이론에 대한 미끄럼 속도, 윤활제, 하중 조건에 대한 연구결과 들을 종합적으로 검토하였고, Suh와 Sin¹⁰⁾은 마찰계수의 차이가 마모의 환경을 지배한다는 새로운 마찰이론을 발표하였고, 심 등¹¹⁾은 탄소섬유강화 복합재료에서 마찰 및 마모 거동은 마찰조건과 섬유방향에 따라 변한다고 하였다. Friedrich¹²⁾ 다양한 폴리머 복합재의 연삭마모가 일어나는 동안 지배적인 미소 마모 메커니즘을 분류하였다.

이 논문은 일방향 탄소섬유 강화 에폭시 기지 복합재의 건조 미끄럼 마모거동에 대한 종합적인 연구의 일환으로 경면 가공한 스테인리스 스틸 상대재에 대한 복합재의 비마모율과 마찰계수를 다섯 가지의 미끄럼 속도 조건하에서 결정하였으며, 탄소 섬유 강화 에폭시 기지 복합재의 마모 메커니즘에 대하여 광학현미경 및 주사전자현미경(SEM) 관찰을 통하여 마찰특성을 비교하였다.

실험방법

1. 실험재료

실험에 사용한 재료는 일방향 탄소섬유 강화 에폭시기지 복합재 프리프레그(HCU 100NS, 한국카본)를 적층하여 자체 제작한 hot press에서 가열가압하여 경화시켜 4.5mm 두께의 판으로 제조하였

다. 복합재의 특성과 구성 재료는 Table 1에 나타내었다. 복합재 판은 다이아몬드 톱으로 조심스럽게 절단한 후, 이것을 입자가 작은 고운 SiC 연마지(15 μ m)를 사용하여 시편에 크랙이 보이지 않게 가로 단면이 4.5 \times 5.5mm, 길이 15mm로 연마하여 마찰과 마모시험의 시편으로 사용하였다.

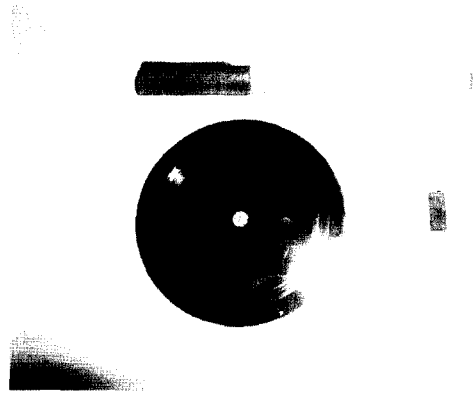


Fig. 1. Picture of composite specimen and stainless steel disc.

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 |

2. 실험장치 및 실험 절차

실험에 사용한 복합재 시험편은 섬유방향에 대하여 3가지 주 미끄럼방향을 구별하였다¹³⁾. 섬유 방향에 평행(parallel), 직각(antiparallel)과 수직(normal)방향으로 상대면에 대하여 실시하였다.

건조 미끄럼 마모시험은 Fig. 2와 같이 자체 제작한 핀온디스크(pin-on-disc)형 시험기를 사용하여 실시하였다¹⁴⁾. 시험 시 환경조건은 온도와 습도의 조절이 가능한 환경 챔버를 제작하여 온도(21 $^{\circ}$ C)와 습도(60%RH)를 일정하게 유지시켰다. 시편의 마찰력은 실시간으로 측정을 하며 시험을 실시하였고, 마모손실은 실험전후의 시편과 상대재의



Fig. 2. Pin-on-disc test apparatus used for friction and wear tests in the experiment.

무게를 측정하였다. 상대 마찰재는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 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 동작하게끔 조정되었다. 수직하중의 변화는 19.6N로 서로 다른 속도(v)인 0.6~3.1ms⁻¹를 유지시키며 시험을 실시하였다.

동일한 시험조건에서 3개의 시험편을 3시간씩 마모시험을 실시하였으며, 시험 후 상대재에 생긴 마모 트랙은 접촉식 표면거칠기 시험기로 측정되었으며, 시험편과 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 고려하였

다. 비마모율의 계산은 시험시간과 초기마모상태 구간에서 손실된 무게를 사용하였다. 실제 마모시험에 앞서 예비시험을 실시하여 핀의 경우, 핀온디스크 시험기에 SiC연마지(입도 15 μ m)를 사용하여 예비마모를 시킨 후 아세톤으로 깨끗이 세척하고 건조로에서 약 60분간 건조시킨 후 시험하였는데 이것은 시험 전에 시험편의 표면거칠기를 항상 같게 조정하여 디스크와 접촉면적이 일정하게 하여 두 접촉면 사이의 접촉이 더 좋은 상태로 되기 때문이다. 동일 시험 조건하에서 3개의 시험편을 사용하였으며 각 시험편은 새로운 디스크 위에서 실시하였다.

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

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

비마모율의 차원은 mm³/N/m이며, 비마모율의 물리적 의미는 임의의 입력에너지에 대한 재료의 부피손실이다.

핀온디스크 시험기에서 Δm 은 다음과 같다.

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

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

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

3. 미서파면해석

마모된 시험편의 마찰특성 비교 및 마모기구 조사

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 μ m |

를 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.

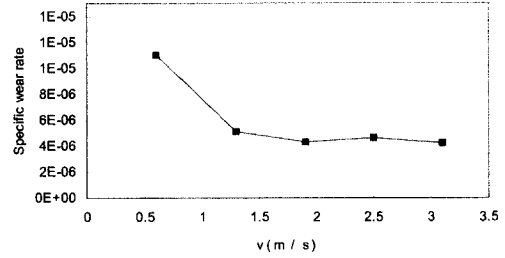
결과 및 고찰

탄소섬유강화 에폭시기지 복합재의 마찰과 마모 성능을 경면 가공한 스테인리스 강 상대재에 대하여 pin-on-disc형 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) 및 돌기변형 등으로 인하여 마모가 많이 일어나고 마찰계수가 떨어져 안정상태가 되면 마모가 현저하게 줄어들었다.

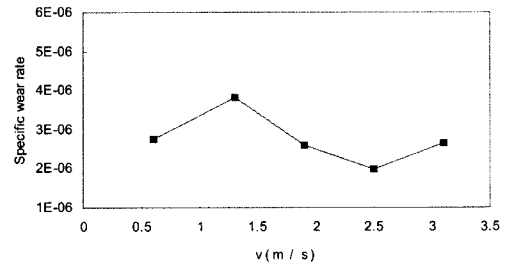
Fig. 3은 하중 19.6N에서 시험한 결과를 각각의 미끄럼 속도에 대한 재료의 평균 비마모율과의 관계를 도시하였다. Fig. 3(a)는 섬유방향은 Normal 방향으로 속도의 증가에 따라 비마모율은 감소하며 1.3(m/s)에서 3.1(m/s)까지 거의 일정한 값을 유지함을 알 수 있다. 그렇지만 다른 섬유방향에 비하여 비마모율의 값이 크게 나타나는 것은 기지 속의 섬유방향에 재료의 비마모율에 영향을 미칠 수 있다는 것을 명확하게 나타내고 있다. 섬유방향이 Anti-Parallel인 Fig. 3(b)에서는 속도의 변화에 따라 비마모율은 약간 증가되었다가 미끄럼 속도 1.9(m/s)에서부터 거의 일정한 값을 나타낸다. Fig. 3(c)는 섬유방향이 Parallel로 미끄럼 속도 1.9m/s까지 서서히 감소하다가 일정하게 유지됨을 보여주고 있다.

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 못하기 때문에 고탄성계수 탄소 섬유 복합재가 이러한 조건에 이용된다면 매우 우수한 내마모 물질이 될 수 있다는 것을 의미한다.

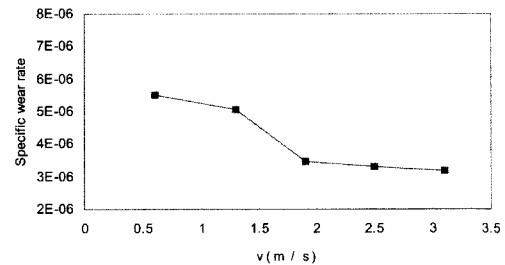
Fig. 3에서 평균 비마모율은 Normal방향이 가장 높고 Parallel방향에서는 비슷한 경향을 나타냈고 Anti-Parallel방향에서 가장 낮게 나타났다. 따라서 마모는 각각의 조건에서 알 수 있듯이 초반에 생성된 마모막이 복합재료 시편과 상대재 표면에 형성



(a) Normal



(b) Anti-Parallel



(c) Parallel

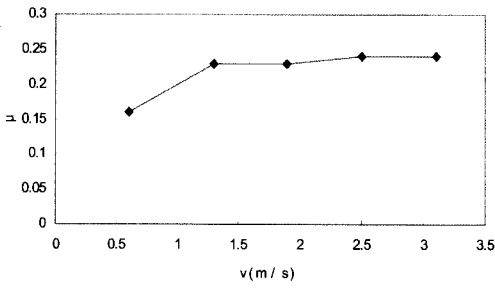
Fig. 3. Specific wear rates of the specimen as a function of the sliding velocity tested on a pin-on-disc apparatus at $p=19.6N$:

되는 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 탄소섬유가 내부적으로 윤활제와 같은 역할을 할 수 있다는 것을 나타낸다.

Fig. 4는 복합재 속의 섬유방향에 대한 각 미끄럼 속도에서의 마찰계수 값을 나타낸 것으로 마찰계수의 값은 Anti-Parallel방향이 Normal방향 또는 Parallel방향보다 매우 낮은 마찰계수의 값을 나타내었다.

타내었다.

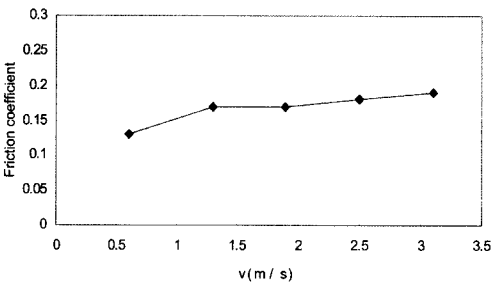
Pin-on-disc 시험기에서 섬유방향에 따라 시험된 시편의 대표적인 마모면의 SEM사진은 Fig. 5에서 마모 메카니즘의 다양한 종류를 보여주고 있다.



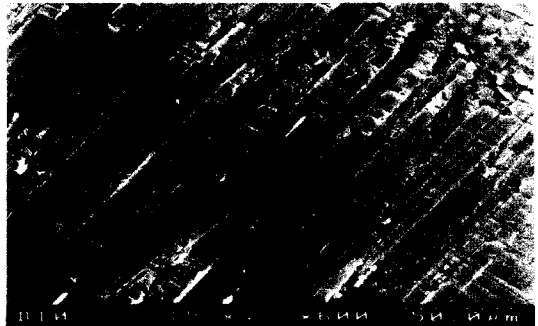
(a) Normal



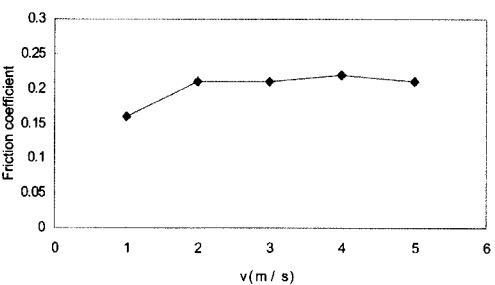
(a) Normal



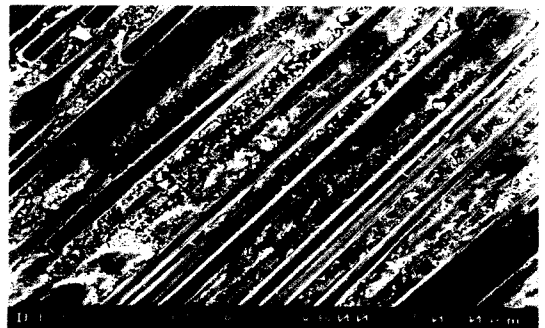
(b) Anti-Parallel



(b) Anti-Parallel



(c) Parallel



(c) Parallel

Fig. 4. Friction coefficients as a function of the sliding velocity tested on a pin-on-disc apparatus at $p=19.6\text{N}$.

Fig. 5. SEM image of worn surface of the composite tested on a pin-on-disc device at $v=1.9\text{m/s}$ and $p=19.6\text{N}$.

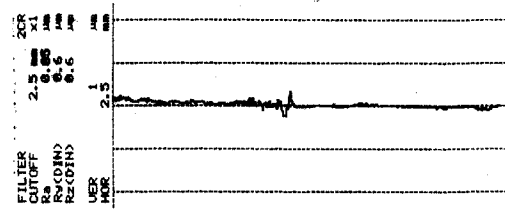
경면 가공된 상대재에 대한 복합재의 마모면은 Fig. 5(a)의 Normal방향에서는 섬유단면의 연마와 plowing이 나타났으며, 복합재와 상대재의 마모량과 마찰계수가 가장 높게 나타났다. 이는 마모막의 생성이 거의 없고 섬유의 절단이나 이탈현상이 일어나기가 가장 어렵기 때문이라 생각된다.

Fig. 5(b)의 Anti-Parallel방향에서는 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.

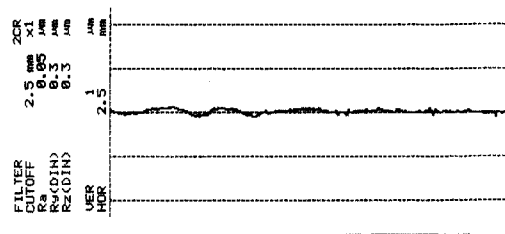
Fig. 5(c)의 Parallel방향에서는 미소 연삭마모 메카니즘(쟁기질, 섬유 절단과 균열)의 결과로 탄소 섬유들이 연마되어 평평하여진 옆면을 보이고 있으며, 일부의 섬유들이 상대면과의 상호작용으로 인하여 떨어져 나가고 그 자리는 마모분으로 채워진 모습을 뚜렷하게 나타내고 있으며 약간의 마모막이 생성된 것을 알 수 있다.

마찰조건에서 초기에 마찰계수가 크고 돌기변형(asperity deformation)과 마모막이 형성됨에 따라 서서히 감소하여 안정상태의 값을 유지하게 되며, 접촉면에서의 섬유 굽힘과 미소균열이 섬유 파괴와 균열의 원인이며, 지배적인 주 마모기구로 밝혀졌다.

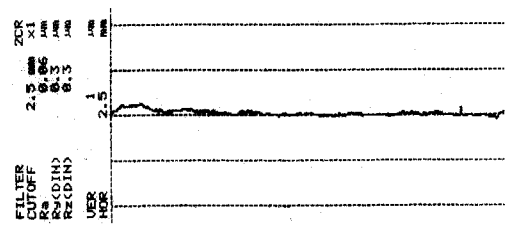
Fig. 6은 경면가공한 스테인레스강 상대재와 탄소 섬유강화 복합재의 마모트랙을 휴대형 표면거칠기 시험기(ERC229)로 측정한 표면거칠기 선도이다. 3방향 모두 중심선 평균 거칠기 값(Ra)으로 0.05 μ m의 표면거칠기 값을 나타내고 있는 것으로 보아 경면 가공한 상대재의 마찰트랙은 본 실험의 조건에서는 마모 흔적만 나타날 뿐 거의 마모가 되지 않았다는 것을 알 수 있다. 특히, N방향의 경우는 AP와 P방향에 비하여 마모면의 표면거칠기가 전반적으로 거칠다는 것을 Fig. 6(a)에서 알 수 있고 이것은 복합재 속의 섬유배열이 N방향에서는 구조적으로 섬유의 탈락이 어렵고 마모면에 마모 이착막의 부착이 어렵기 때문이라 생각된다.



(a) Normal



(b) Anti-Parallel



(c) Parallel

Fig. 6. Surface roughness of the worn surface of the counterpart tested on a pin-on-disc device at $v=1.9\text{m/s}$ and $p=19.6\text{N}$.

결론

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

- (1) 일방향 탄소섬유 강화 복합재의 마모 거동에 미치는 미끄럼방향의 효과는 다르며 작용하는 마모 메카니즘의 형태에 의존한다.
- (2) 상온에서 경면 가공한 스테인리스 스틸에 대

- 하여 미끄럼이 일어나면 AP 방향에서 높은 마모 저항과 낮은 마찰계수가 관찰되었다.
- (3) 복합재의 비마모율은 미끄럼 속도가 증가하면 N방향과 P방향에서는 감소하는 경향을 보이며, AP방향에서는 증가하다가 감소한다. 이것은 마모 메커니즘의 영향으로 속도가 증가하면 마모 이착막의 생성이 빨라져 이착막 속의 탄소섬유가 윤활제의 역할을 하기 때문이다.
- (4) 복합재의 마찰계수는 미끄럼 속도가 증가하면 3방향 모두 증가하다가 일정한 값에 수렴하며 N방향이 가장 크며, P방향과 AP방향 순이다. 이는 N방향에서 마찰초반에 발생한 섬유의 쟁기질에 의한 상대재 표면의 손상과 돌기변형에 따른 것이며, AP 방향의 마찰계수가 가장 낮다.

결론적으로 본 연구에서 경면 가공한 스테인리스강상대재에 대하여 이들 재료의 미끄럼 마모에 응용시에는 가장 tribological한 특성을 얻기 위하여 미끄럼은 섬유 방향에 직각(AP)방향으로 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) Chou, Tsu-Wei (1992) : Microstructural Design of Fiber Composites, Cambridge University Press, pp. 1-28, 368-378.
- 3) Bhatiacharya, S. K. (1986) : Metal-filled Polymers, Marcel Dekker INC. NewYork, pp. 1-26, 66-74, 335-347.
- 4) Cahr, Karl-Heinz Zum (1987) : Micro-structure and Wear of Materials, Elsevier science publishers B.V., Amsterdam, pp. 318-328, 461-477.
- 5) Giltrow, J. P. and Lancaster, J. K. (1970) : The role of the counterface in the friction and wear of carbon fibre reinforced thermosetting resins, Wear, Vol.16, pp. 359-374.
- 6) Bonfield, W., Edwards, B. C., Markham, A. J. and White, J. R. (1976) : Wear transfer films formed by carbon fibre reinforced epoxy resin sliding on stainless steel, Wear, Vol.37, pp. 113-121.
- 7) Tsukizoe, T. and Ohmae, N. (1975) : "Wear Performance of Unidirectionally Oriented Carbon-fiber-reinforced Plastics, Tribol. Int., Vol 8, pp. 171-175.
- 8) 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.
- 9) Suh, N. P. (1977) : An overview of the delamination theory of wear, Wear, Vol. 44, pp.1-16.
- 10) Suh, N. P. and Sin, H. C. (1981) : The genesis of friction, Wear, Vol. 69, pp. 91-114.
- 11) 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.
- 12) Friedrich, K.(1986) : Friction and WEar of Polymer Composites, Composite Materials Series, Vol 1. (1986), Elsevier, Amsterdam, pp. 233-287.
- 13) 양병춘, 고성위(2004) : 탄소 섬유 복합재의 경면 상대재에 대한 마찰 및 마모 특성, 한국해양공학회 2004년도 춘계학술대회 논문집, pp. 390-394.
- 14) Robert A. Storer (1977) : (Ed.) in Annual book of ASTM Standards, Sec. 3, 03.02, "Wear testing with a pin-on-disc apparatus" ASTM G99, Pa, U.S.A. p.392.

2004년 8월 17일 접수

2004년 9월 21일 수리