

미소채널 구조를 이용한 탄소 섬유 복합재료 면의 마찰 및 마모 감소

이학구*(KAIST 기계공학과), 이대길(KAIST 기계공학과)

Reducing the friction and the wear of carbon fiber composites with micro-grooves

H. G. Lee (Mecha. Eng. Dept. KAIST), D. G. Lee (Mecha. Eng. Dept., KAIST)

ABSTRACT

Carbon fiber polymeric composites have been widely used in bearing materials under high pressure without oil-lubrication due to their self-lubricating characteristics. However, the severe wear of carbon composite surface occurs due to the generation of wear debris when the pressure applied on the composite surface is higher than the critical value of composite surface. In this work, in order to remove wear debris continuously during sliding operation, composite specimens with many micro-grooves on their sliding surfaces were devised. To investigate the effect of wear debris on the tribological behavior of carbon/epoxy composites, dry sliding tests were performed with respect to applied pressure using the composite specimens with and without micro-grooves. From the measurement of friction coefficients and wear rates, a model for the effect of wear debris on the friction and wear of composites was proposed.

Key Words : Composite (복합재료), friction (마찰), wear (마모), micro-grooves (미소채널)

1. 서론

그래파이트 (Graphite)의 적층 구조로 이루어진 탄소섬유 (Carbon fiber)는 자체윤활특성(Self-lubricating characteristics)을 갖기 때문에 경계윤활 (Boundary lubrication) 또는 무윤활 (Unlubrication) 조건의 베어링 (Bearing)에 많이 사용되고 있다 [1]. 열경화성 고분자 (Thermoset polymer)는 열가소성 고분자 (Thermoplastic polymer)에 비해서 마찰 (Friction)이 크지만 기계적 물성이 좋기 때문에 지지하중이 높은 베어링에는 탄소섬유/열경화성 고분자 복합재료가 많이 사용되고 있다.

무윤활 조건에서 복합재료의 마찰 및 마모에 대하여 기존의 수행된 연구는 다음과 같다. Sung [2] 등은 섬유 방향에 따른 탄소섬유/폴리머 복합재료의 마찰 및 마모 특성에 대하여 연구를 수행하였다. 탄소섬유는 섬유 방향과 평행한 그래파이트 적층 구조를 가지기 때문에 표면력 (Traction)이 섬유방향으로 작용했을 때 마찰이 가장 작아야 한다. 하지만 Sung [2] 등의 연구결과에서는 탄소 섬유 방향이 미끄러짐 면에 대하여 수직일 때 마찰 및 마모가

최소였다. 이러한 마찰 및 마모 특성은 미끄러짐 면 내에 존재하는 마모 잔해 (Wear debris)의 영향일 것이다. Suh [3] 등은 마모 잔해의 긁힘 깊이 (Plowing depth)가 증가함에 따라 마찰이 급격히 증가하는 것을 보였다. Sin [4] 등의 연구에서는 조립 직경 (Abrasive grit diameter)이 감소함에 따라 긁힘 마모 상수 (Abrasive wear coefficient)가 감소하였으며, 직경 1 μm 이하에서는 미끄러짐 마모 상수 (Sliding wear coefficient)에 수렴하였다. 따라서 마이크로미터 이하의 마모 잔해는 복합재료 면의 마찰 및 마모를 충분히 증가시키지 못하는 것을 알 수 있다.

기존 문헌에서는 마모 잔해가 복합재료의 마찰 및 마모에 미치는 영향을 마모 잔해의 긁힘 마모 메커니즘 (Mechanism)으로 설명하고 있다 [5]. 하지만, 복합재료의 미끄러짐 마모에서는 마이크로 미터보다 작은 마모 잔해가 생성되므로 기존의 마모 메커니즘으로는 방향에 따른 복합재료 면의 마찰 및 마모 증가를 설명할 수 없다.

본 연구에서는 미끄러짐 마모 실험 중 마모 잔해를 지속적으로 제거하기 위하여 복합재료 면에 미소 채널을 성형하였으며, 핀 온 디스크 (Pin-on-

disk) 마모 시험기를 이용하여 미소채널이 성형된 복합재료와 평판 복합재료의 마찰 및 마모를 측정 비교하였다. 또한 마모면 관찰을 통하여 복합재료의 마찰 및 마모에 미치는 마모 잔해의 영향에 대한 메커니즘 모델을 제시하였다.

2. 시편

본 연구에서는 탄소 섬유/에폭시 복합재료 (USN 150, SK Chemicals)를 이용하여 평판 마모 시편 및 미소 채널 마모 시편을 제조하였다. 시편은 진공이 가해진 압력 조건 0.7 MPa 의 오토클레이브 (Autoclave) 및 압력 조건 20 MPa 의 핫 프레스 (Hot press)를 사용하여 Fig. 1 의 경화사이클 (Curing cycle)로 제조하였다. 제조된 시편의 섬유부피 분율 (Fiber volume fraction), V_f 은 각각 0.67 및 0.82 였다. 제조된 시편은 핀 온 디스크 마모 시험기 (Pin-on-disk type wear tester)를 사용하여 마찰 계수 및 마모량을 측정하였다. 시험 압력 및 속도는 각각 3.4-13.4 MPa 및 0.06 m/s 였다. 스틸 디스크 (Steel disk)는 매 시험마다 표면조도 $0.2 \mu\text{m}$ 로 연마한 후, 측정하였다.

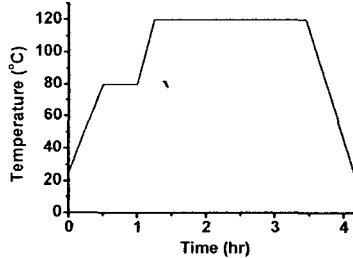


Fig. 1 Curing cycle for fabricating composite specimens.

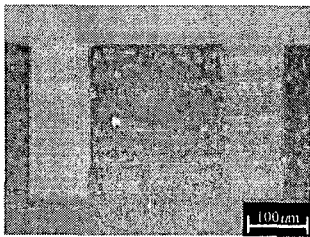


Fig. 2 Cross-sectional view of grooved wear specimen.

3. 마모량

Fig. 3 은 미끄러짐 면에 가해지는 평균 면압에 따른 $6 \times 10^4 \text{ s}$ 동안의 평균 마모량을 나타낸다. 평판 시편은 면압 3.4 MPa 일 때 $10^{-15} \text{ m}^3/\text{s}$ 차수의 마모량

을 가졌으며, 면압이 증가할수록 마모량이 급격히 증가하였다. 미소 채널 시편은 면압 8.0 MPa 까지도 $10^{-15} \text{ m}^3/\text{s}$ 차수의 낮은 마모량을 가졌으며, 이보다 큰 면압에서는 평판 시편과 마찬가지로 마모량이 급격히 증가하였다.

이러한 압력에 따른 마모량 변화의 원인을 찾기 위하여 SEM (Scanning electron microscope)과 광학현미경을 사용하여 마모면을 관찰하였다. Fig. 4 는 평판 시편의 마모면을 촬영한 SEM 사진이다. 3.4 MPa 의 낮은 면압에서는 굽힘 마모에 의해서 탄소섬유에 평탄한 면이 생성되었지만, 10.7 MPa 의 높은 면압에서는 충분한 굽힘 마모가 발생되기 이전에 섬유 파손이 발생하여 대부분의 탄소섬유가 본래의 둥근 형태를 가졌다. Figs. 5 와 6 은 면압에 따른 평판 시편 및 미소 채널 시편의 마모면 사진이다. 마모된 섬유는 평탄한 면을 가지기 때문에 빛을 반사해서 밝은 색으로 나타나며, 파손된 섬유는 둥근 형태를 가지기 때문에 어두운 색으로 나타난다. 사진으로부터 압력이 증가할수록 마모 메커니즘이 섬유의 굽힘 마모에서 섬유의 파손으로 변해가는 것을 알 수 있다.

섬유파손의 원인을 찾기 위하여 마모 시험 후 광학현미경을 사용하여 Fig. 7 과 같이 마모면을 관찰하였다. 굽힘 마모에 의해 생성된 마모잔해가 압 밀되면서 섬유 박리(debonding)에 의해 생성된 공간으로 침투해 들어갔으며, 이로 인하여 섬유의 굽힘 (Bending)이 발생하였다. 섬유 파손은 과도한 섬유 굽힘이 원인이었다.

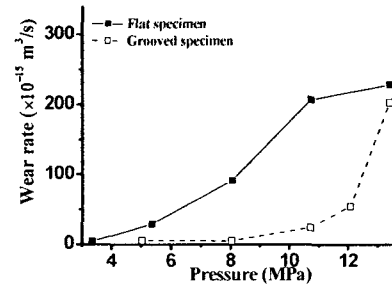


Fig. 3(a) Wear rate of composite specimens with respect to applied pressure when $V_f = 0.67$.

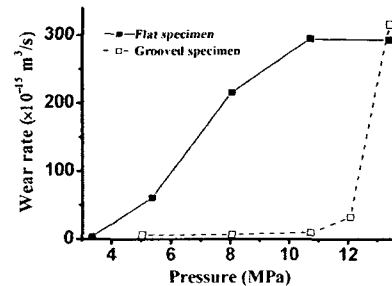


Fig. 3(b) Wear rate of composite specimens with respect to applied pressure when $V_f = 0.82$.

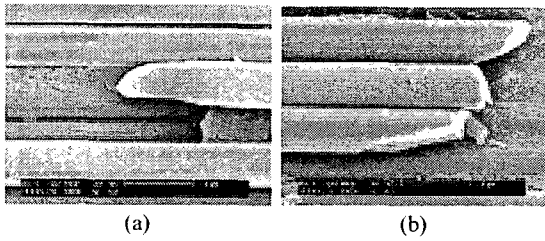


Fig. 4(a) SEM photographs of worn out flat carbon fibers on the worn out surface of flat composite specimens when $P = 3.4$ MPa ($V_f = 0.67$).

Fig. 4(b) SEM photographs of broken round carbon fibers on the worn out surface of flat composite specimens when $P = 10.7$ MPa ($V_f = 0.67$).

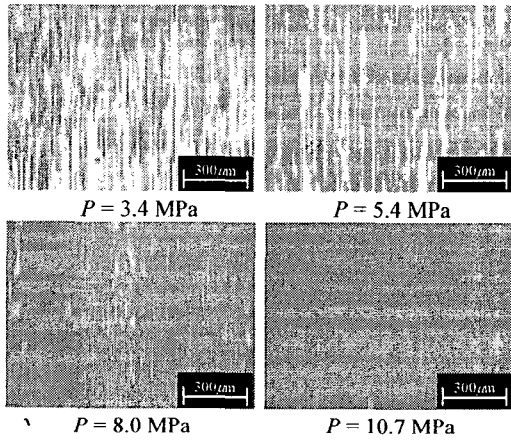


Fig. 5 Worn out surface of flat specimen with respect to applied pressure.

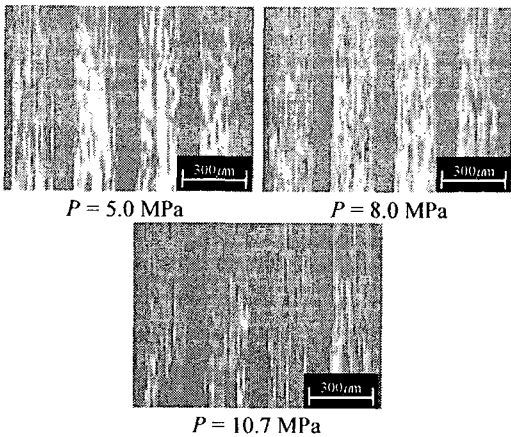


Fig. 6 Worn out surface of grooved specimen with respect to applied pressure.

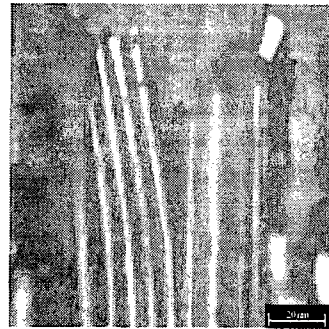


Fig. 7 Penetration of wear debris into debonding space between fibers ($V_f = 0.67$ and $P = 12.1$ MPa).

4. 마찰계수

Fig. 8 은 시간에 따른 복합재료 시편의 마찰계수를 나타내며, 마찰계수는 초기 10^4 s 동안 증가한 후, 수렴하였다. 섬유 파손이 발생하기 전에는 안정적인 마찰계수가 측정되었으나, 섬유 파손이 발생하면 마찰계수가 요동하였다.

Fig. 9 는 면압에 따른 6×10^4 s 동안의 평균 마찰계수를 나타낸다. 섬유부피분율 0.67의 평판 시편의 경우 평균 마찰계수는 면압 증가에 따라 거의 선형으로 감소하였다. 하지만 섬유부피분율 0.82의 평판 시편의 경우 면압 8.0 MPa 을 까지는 평균 마찰계수가 증가한 후, 이후에는 감소하였다. 미소채널 시편의 경우 면압 8.0 MPa 까지는 평균 마찰계수가 감소하였으며, 이후에는 급격히 증가하였다.

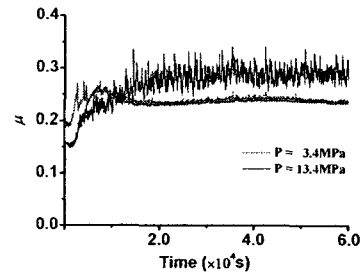


Fig. 8(a) Friction coefficient, μ , of flat composite specimens with respect to sliding time ($V_f = 0.82$).

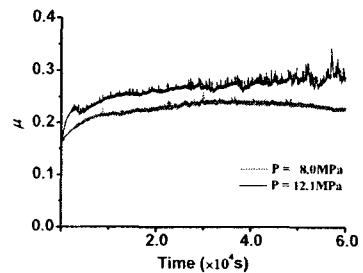


Fig. 8(b) Friction coefficient, μ , of grooved composite specimens with respect to sliding time ($V_f = 0.82$).

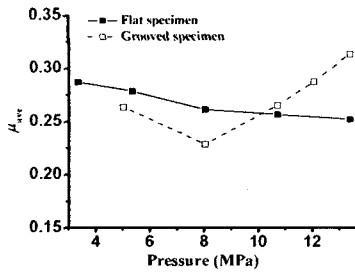


Fig. 9(a) Average friction coefficient, μ_{ave} , of composite specimens for 6×10^4 s with respect to applied pressure when $V_f = 0.67$.

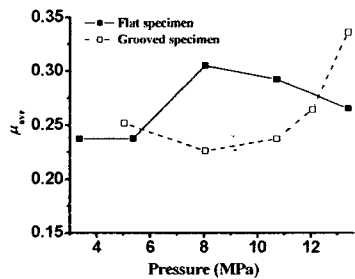


Fig. 9(b) Average friction coefficient, μ_{ave} , of composite specimens for 6×10^4 s with respect to applied pressure when $V_f = 0.82$.

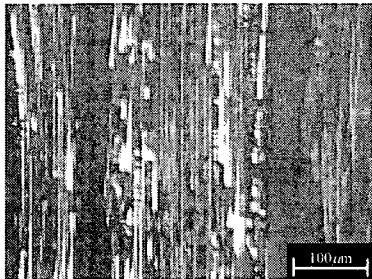


Fig. 10 Narrowed grooves due to squeezed out fibers on the edge of ridges ($V_f = 0.67$ and $P = 12.1$ MPa).

5. 마모 및 마찰 모델

5.1 마모 잔해에 의한 마모 증가

복합재료 면이 미끄러질 때 디스크 면에 의해 탄소 섬유와 노출된 에폭시 모재에 마모가 발생한다. 마모의 주된 메커니즘이 굽힘 마모이기 때문에 마이크로미터 이하의 크기를 갖는 마모잔해들이 주로 생성된다. 또한 복합재료 면은 이송되는 디스크 면에 의하여 반복하중을 받기 때문에 피로(Fatigue)에 의한 섬유와 모재 사이의 박리가 발생된다 [2]. 생성된 마모 잔해들은 접촉부의 후면으로 이송되는

과정에서 응집되고 박리공간으로 침투해 들어간다. 이러한 과정에 의해서 섬유의 굽힘이 발생하며, 과도한 굽힘으로 인하여 섬유의 파손이 발생한다. 즉, 피로에 의한 섬유와 모재 사이의 박리와 응집된 마모 잔해에 의한 과도한 섬유 굽힘이 섬유 파손의 원인이다.

면압은 피로응력에 비례하고, 피로응력의 크기는 박리발생까지의 미끄러짐 시간에 비례하므로, 높은 면압에서는 섬유파손이 쉽게 일어나며, 낮은 면압에서는 섬유파손보다는 굽힘 마모가 주된 마모 메커니즘이 된다.

위의 마모 모델을 사용하여 측정결과를 설명하면 다음과 같다. 섬유 파손에 의해서 제거되는 복합재료의 부피는 굽힘 마모에 의하여 제거되는 부피보다 매우 크기 때문에 복합재료는 일반적인 단일재료와 달리 면압 증가에 따라 마모율이 급격히 증가하게 된다. 또한 높은 섬유부피 분율에서는 디스크 면과 접촉하는 섬유의 수가 증가하기 때문에 보다 많은 부분에서 박리가 발생하게 된다. 따라서 Fig. 3에서 보는 바와 같이 섬유부피 분율이 높을수록 마모율이 높아진다.

미소채널 시편의 경우, 박리가 발생한다 할지라도 마모잔해들이 미끄러지는 동안 계속적으로 미소채널을 통해 제거되기 때문에 섬유파손이 거의 발생하지 않는다. 따라서, Fig. 3에서 보는 바와 같이 면압 8.0 MPa 까지도 10^{-15} m³/s 차수의 낮은 마모율을 갖게 된다. 면압 8.0 MPa 이상에서는 Fig. 10에서 보는 바와 같이 미소채널로 탄소 섬유가 뜯겨나 오면서 미소채널의 폭이 좁아지게 된다. 이로 인하여 미소채널의 마모잔해 제거 능력이 감소하게 되며 결국 섬유파손이 발생하게 된다. 따라서 Fig. 3에서 보는 바와 같이 면압 12.1 MPa 이상에서 미소채널 시편의 마모율이 급격히 증가하였다.

5.2 마모 잔해에 의한 마찰 증가

미끄러지는 과정에서 발생하는 마찰은 표면의 굽힘, 변형, 용착에 의하여 발생된다 [3]. 고분자 재료의 경우, 용착이 거의 발생하지 않고, 마모잔해들이 단단한 입자가 아니기 때문에 표면 돌출부(Asperity)에 의한 굽힘 및 표면 돌출부의 변형에 의하여 마찰이 발생한다. 선행된 연구결과에 의하면 고분자 재료의 마찰계수는 압력 증가에 따라 거의 선형으로 감소하는 것을 알 수 있다 [6]. 고분자 모재 복합재료의 경우 용착이 발생하지 않으며, 섬유파손이 발생되지 않는다면 마이크로미터 이하의 마모 입자들이 생성되므로, 표면 돌출부에 의한 굽힘 및 표면 돌출부의 변형이 마찰 발생의 주된 메커니즘이 된다. 따라서, 섬유파손이 발생하지 않을 경우 고분자 모재 복합재료의 마찰계수는 선형으로 감소할 것이다.

Fig. 3 과 Fig. 6에서 보는 바와 같이 미소채널 시편의 경우 면압 8.0 MPa까지는 섬유파손이 발생

하지 않았다. 따라서, Fig. 9 에서 미소채널 시편의 마찰계수는 8.0 MPa 이하에서 면압 증가에 따라 감소하는 경향을 가지었다. 하지만 섬유파손이 발생되는 8.0 MPa 이상의 면압에서는 파손된 섬유와 마모잔해가 마찰면과 미소채널에서 응집되어 실접촉면적(Real contact area)이 증가되므로 마찰계수가 증가하게 된다. 따라서, 복합재료의 미끄러짐 마찰에서 섬유파손이 발생되면 마찰계수가 증가하는 것을 알 수 있다.

평판 시편의 경우, 면압의 증가는 마찰계수를 감소시키기도 하지만 섬유파손을 증가시키므로, 면압에 따른 마찰계수의 변화는 파손된 섬유의 양에 관계된다. Fig. 3(b)에서 보는 바와 같이 면압 5.6 ? 8.0 MPa 사이에서 마모율이 매우 급격히 증가하므로, Fig. 9(b)에서 평판의 마찰계수는 면압 5.6 ? 8.0 MPa 사이에서 증가하였다.

6. 결론

본 연구에서는 미소채널이 성형된 탄소섬유/에폭시 복합재료의 미끄러짐 마찰계수 및 마모율을 면압에 따라 측정하였으며, 마모면 관찰을 통하여 탄소섬유 고분자 복합재료의 마모 및 마찰 메커니즘을 고안하였다. 섬유와 모재의 박리공간으로 침투한 마모잔해들이 섬유파손을 유발하였으며, 섬유파손은 복합재료의 마찰계수 및 마모율을 증가시켰다. 따라서, 낮은 마찰계수 및 낮은 마모율을 얻기 위해서는 지속적인 마모잔해의 제거가 필요하며, 복합재료 면에 성형된 미소채널을 이용하여 마모잔해를 효과적으로 제거할 수 있었다.

참고문헌

1. Soule, D.E., Nezbeda, C.W., Direct basal plane shear in single-crystal graphite, *Journal of applied physics*, Vol. 39, pp. 5122-5139, 1968.
2. Sung, N.H., Suh, N.P., Effect of fiber orientation on friction and wear of fiber reinforced polymeric composites, *Wear*, Vol. 53, pp. 129-141, 1979.
3. Suh, N.P., Sin, H.C., The genesis of friction, *Wear*, Vol. 69, pp. 91-114, 1981.
4. Sin, H.C., Saka, N., Suh, N.P., Abrasive wear mechanism and the grit size effect, *Wear*, Vol. 55, pp. 163-190, 1979.
5. Stachowiak, G.W., Batchelor, A.W., *Engineering tribology*, MA, Butterworth-Heinemann, 2001.
6. Pinchbeck, P.H., A review of plastic bearings, *Wear*, Vol. 5, pp. 85-113, 1962.