

탄소 섬유 복합재료의 마찰 및 마모 특성

Friction and Wear Characteristics of Graphite Fiber Composites

심현해*, 권오관*, 윤재훈**

* 한국과학기술원 기계공학부

** 한국과학기술원 생산공학과

서 론

고분자 복합재료들은 오늘날 광범위하게 마찰 부위들에 응용되고 있다. 다양한 첨가제와 보강재들이 고분자 물질들에 넣어져 강도와 마모 특성들을 향상 시키고 있다. 예를 들어, 다양한 복합재료들로서 현재 입수 가능한 것에 베어링 재료들이 있으며 이에 포함되는 것이 자체 윤활 보강 플라스틱들이며 이들에는 고체 윤활제, 즉, 테플론, MoS₂, 혹은 흑연가루들이 첨가된다. 실험적 그리고 이론적인 연구들이 여러 조건들에서의 섬유 보강 복합재료들의 마모 거동에 대하여 보고되었다(예를 들어, 미끄럼 마모, 연마 마모, 입자 충격 마모, 비닐 마모). Tsukizoe와 Ohmae 그리고 Sung과 Suh는 탄소 섬유 복합재료들의 미끄럼 마모에 대한 섬유 방향의 영향에 대한 연구를 하였다. Tsukizoe와 Ohmae의 보고에 의하면 고 탄성계수 탄소 섬유 복합재료는 가장 적은 마모가 횡단 방향(Transverse)에서 있고, 고 강도 탄소 섬유 복합재료는 길이 방향(Longitudinal)에서 있다. 가장 많은 마모는, 고 탄성계수 복합재료는 길이 방향에서, 고 강도 섬유 복합재료는 횡단 방향에서 있다. 그들이 또한 발표한 것은 양쪽의 고 탄성계수와 고 강도 섬유 복합재료들이 수직 방향(Normal)에서 눌러 붙음(Seizure)가 일어났다고 한다. Sung과 Suh에 의하면, 흑연섬유 복합재료의 최소 마모는 수직 마찰 방향에서 얻어졌고 최대 마모는 횡단 방향에서이었다. 어떠한 눌러붙음도

수직 방향에서 있었다고 보고되지 않았다. Tsukizoe와 Ohmae가 선택한 상대 마찰면 재료는 완전 풀립된 0.25% 탄소강(AISI 1025와 같음)이었고 Sung과 Suh가 선택한 것은 AISI 52100 베어링 강이었다. 추측컨대 수직 방향에서의 다른 거동 원인은 다른 상대 마찰면인 것 같다. 비록 그 논문에서 언급되지 않았지만, Sung과 Suh는 고 강도 탄소 섬유를 사용했던 것으로 추측되는데 그 이유는 가장 큰 마모가 횡단 방향에서이었고, 그것의 인장 탄성계수가 124 GPa (18E6 psi)로 보고되었기 때문이다.

마찰 방향에 대한 복합재료의 섬유 방향이 다른 때의 마모 메커니즘이 잘 이해되어야만 특정한 마찰 응용들을 위한 좋은 내마모성 복합재료 구조를 설계 할 수 있다. 고 탄성계수 탄소 섬유 복합재료들이 좋은 내마모성을 보인 이유는 흑연화된 고 탄성계수 복합재료가 표면에 마모막을 생성시키고 이것이 흑연 가루들의 자체 윤활성에 의하여 마찰과 마모를 줄이기 때문이다. 일방향 탄소 섬유 복합재료들의 미끄럼 마모에 대한 섬유 방향의 영향들은 보강 섬유, 상대면 재료, 마찰 조건에 따라 변한다. 고 탄성계수 탄소 섬유 복합재료들이, 다른 마찰 조건들에서의 마모 거동을 조사 연구하기 위하여 선택된 이유는 그들이 마찰 응용들에 가장 적합하기 때문이다.

실 험

일방향 탄소 섬유 복합재료 판재가 제작된 방법은 프리프레그(Prepreg)를 적층하여이었다. 그 프리프레그는 고 탄성계수 탄소 섬유들을 함유하며 이들의 인장 탄성계수는 392GPa이다. 적층된 복합재료는 압력 용기(Autoclave) 안에서 외부 가압, 내부 진공으로 경화되었다. 그 판재는 기계 가공에 의하여 직육면체의 핀 크기 4.5mmX5.5mmX10mm에 세 가지의 섬유 방향들, 즉, 수직 방향(Normal), 길이 방향(Longitudinal), 횡단 방향(Trnsverse)으로 만들어졌다. 마찰면들은 연삭과 연마로 준비되었고, 세척은 물과 메틸 알콜과 헥세인 (Hexane)으로 하였다. Pin-on-Disk형 실험 장치가 fig.1과 같이 제작되었다. 마찰력 측정은 토드셀트 감지하여 1000배 증폭하여 AD 변환기를 통하여 개인용 컴퓨터 (IBM-PC/AT)에 기록하였다. 상대 마찰면인 스테인레스 강(SUS 304) 원판면은 연삭된 후 연마는 사포에 의하여 흐르는 물에서 되었으며, 표면 거칠기는 중심선 평균값 (Center Line Average)이 0.03 내지 0.04 μm 이었다. 마모 실험 조건은 세 가지가 채택되었다. 조건I은 마찰 속도 0.5m/s과 수직 하중 2kgf (19.6N) 이었고, 조건II는 0.5m/s과 5kgf(49N) 이었고, 조건III은 2.5m/s과 2kgf(19,6N) 이었다. 마찰과 마모 실험은 24 시간과 48 시간동안 각 시편, 각 조건들에서 행하여졌다. 마찰력 측정은 계속적으로 되었고, 마모 손실 측정은 실험 전과 후의 무게를 재었다. 마모된 시편의 마모면은 SEM과 광학 현미경으로써 조사되어 마모막과 파손된 섬유들 등이 관찰되었다. 상대면도 현미경과 육안으로 조사되어 마모막 형성과 흠의 생성이 관찰되었다. 스테인레스 강의 마찰면의 경도 측정은 비커스 경도 시험기로 하였다.

결과 및 고찰

시험편들이 조건I에서 실험되었을때에, 24 시간 동안의 마모량은 측정할 수 없을 정도로 작았다.

이것이 의미하는 것은 마찰면에 가해진 응력이 충분히 크지 않아서 섬유에 뚜렷한 손상을 입히지 않는 것이다. 마찰 계수가 가장 큰 것은 수직 방향이었고 (0.27), 가장 작은 것은 길이 방향이었고 (0.18), 중간은 횡단 방향이었다 (0.23).

조건II에서, 즉, 수직 하중이 49N(5kgf)으로 증가되었을 때에, 마찰 계수의 시간에 따른 변화는 fig.2 부터 4까지 보이는 바와 같이 각 방향들에 대하여 나타났다. 마찰 계수는 전체적으로 커다란 차이가 없었다. 길이 방향에서는 초기에 점차 증가하였다가 후반에는 서서히 감소하여 48 시간의 시점에는 0.26 정도로 되었다. 횡단 방향에서는 초기에 증가하여 안정한 값이 된 후 그 값이 계속 유지되었다. 수직 방향에서도 초기에 증가하여 안정한 값이 된 후 그 값이 계속 유지되었다(0.29).

마모는 fig. 2부터 4까지에서 보이듯이 가장 큰 것은 길이 방향과 수직 방향에서 대체로 비슷하게 나타났고, 최소값은 횡단 방향에서 나타났다. 전체적으로 정도의 차이는 있으나 초반 24 시간의 마모량이 후반 24 시간의 마모량보다 많았다. 이로부터 알 수 있는 것은 마모막이 복합재료 시편과 상대표면에 형성되는 것이 마모에 크게 영향을 준다는 것이다. 세 방향들 중에서도 특히 횡단 방향에서는 초기의 마모막 형성시에 마모가되고 후반부에는 거의 마모량이 없었다.

현미경으로 본 복합재료 시편의 마모면은 fig.5와 같다. 연마된 섬유들의 단면들이 수직 방향 마모면에서 관찰되었다. 횡단 방향에서는, 마모막이 표면에 붙어 있고, 섬유들이 상대면 돌기들의 운동으로 인하여 부러진 모습들이 마모면 위에서 발견되었다(fig.5(b)). 길이 방향의 경우는, 탄소 섬유들이 연마되어 평평하여진 옆면을 보이고, 일부의 섬유들이 상대면과의 상호작용으로 인하여 떨어져 나갔다.

마찰 조건III은 가장 심한 마모 조건인데 이 때에

마찰 거동은 현저하게 달라진다. 초기에는 마찰 계수가 크고 마모막이 형성됨에 따라 서서히 감소하여 안정된 값이 유지되었다. 마찰 계수가 가장 작은 것은 횡단 방향이었고(0.13), 가장 큰 것은 수직 방향에서이었고(0.18), 중간 것은 길이 방향이었다(0.17).

가장 적은 마모를 나타낸 것은 횡단 방향에서 이었다. 지적되어야 할 것은 마모는 마찰 초반에 많이 일어나고 마찰 계수가 떨어져 안정된 값이 되면 마모가 줄어드는 것이다. 수직 방향에서는 48 시간 동안 대체로 마모율이 일정하게 유지되었으며 가장 큰 마모가 일어났다. 수직 방향 마찰시에는 항상 상대 마찰면에 심한 쟁기질(Ploughing)의 손상이 일어났으며 마모막도 거의 형성되지 않았다. 현미경 관찰을 마찰 조건III의 실험 후의 횡단 방향 마모 표면에 대하여 하니, fig.9에 보이듯이 마모막이 복합재료 표면을 덮고 있는 것이 보였다. 길이 방향으로 마찰된 시편들의 경우는, 섬유들이 떨어져 나간 흔적과 연마되어 옆면이 평평하게된 것이 관찰되었다. 조건II의 경우와 같이, 섬유들이 수직으로 배열된 시편들의 마모면에는 연마된 섬유들의 단면들이 fig.9와 같이 보였다. 지적되어야 할것은 심하게 손상된 마모 홈들이 수직으로 배열된 복합재료의 마모면에 형성된 것이다. 대개 이러한 커다란 파손 영역들이 생성될 때에는 마찰 계수가 갑자기 감소하고 큰 소음이 나며, 상대면 또한 심한 쟁기질 파손이 일어난다. 그 갑작스런 마찰계수의 감소는 fig.8에 보이고있다.

재료들의 마찰 특성들의 설명은 Suh와 Sin에[5] 의하여 잘 되어 있다. 그들이 제안한 것은 마찰 계수의 구성이 세 가지들, 즉, 하나는 돌기들의 변형에 기인하는 것, 다른 하나는 마찰 표면들 상에 끼인 마모 입자들 혹은 경한 돌기들에 의한 쟁기질에 기인하는 것, 나머지 하나는 용착에 기인하는

것이다. 조건I의 경우는 세 가지 조건들 중 가장 가벼운 것인데, 섬유의 부러짐으로 인한 마모는 작을 것임에 틀림없고, 마모 입자들의 쟁기질이 마찰 계수에 기여하는 것은 작을 것이다. 길이 방향 미끄럼에서는, 상대면은 계속적으로 낮은 마찰을 갖는 흑연 섬유들 위를 미끄러질 것이다. 섬유 파편들이 마모면들 사이에 없으므로 마찰 계수가 길이 방향에서 가장 작을 것이다. 심한 마모 조건들에서는 수직방향으로 배열된 섬유들이 상대면을 쟁기질한다. 스테인레스 강의 경도는 측정에 의하면 2.29GPa(234kgf/mm²)이었고, 흑연 섬유의 인장 강도는 2.25GPa(230kgf/mm²)로 기록되었다. 그러므로 섬유의 경도가 금속 상대면보다 더 높을 것이다. 수직 방향 섬유 배열의 경우 상대면에 홈들이 발견되는 것처럼 쟁기질이 수직 방향에서 마찰이 가장 큰 원인 일 것이다. 마찰 속도 혹은 수직 하중이 증가하여 섬유 파편들이 생성되고 접촉면들 사이에 끼이게되면 마찰 계수는 증가할 것이다. 길이 방향마찰에서는 마찰 계수가 조건 II와 III에서 0.36까지 올라 갔다가 줄어들어 각각 안정된 값들 0.26과 0.17로 되었다. 일단 마모막이 상대면에 형성되면 마찰 계수는 용착 성분으로써 결정된다. 횡단 방향 마찰의 경우는, 마찰 계수가 0.30으로 증가된 후 0.13으로 떨어지는 것이 fig.8에 보이고 있다. 마모막이 시편에 용착하는 것이 특히 중요한 것이 횡단 방향인 이유는 마모막이 섬유들 사이의 홈들을 채우고 있는 것이 fig. 9에 보이고 있기 때문이다. 흑연 섬유 대 금속의 마찰이 마모막 대 마모막의 마찰로 변하여 가장 낮은 마찰로 된다.

조건I의 마모 실험에서는 측정할 수 있을 만큼의 마모 손실이 없었다. 이로부터 추정할 수 있는 것은 가해진 수직과 마찰 응력들이 섬유들에 의해 지지되며 섬유의 부러짐이나 연마됨이 무시할 만한 것이다. 더 거친 마모 조건들에서는, 길이 방향과 횡단 방향

배열들이 상대면의 돌기들과의 상호작용으로 파손되어 상당한 양의 마모막이 표면에 형성될 것임에 틀림없다. 길이 방향 마찰에서, 섬유들이 파손되는 유형은 굽힘, 좌굴, 또는 잡아 당김들임을 현미경을 통한 마모면의 관찰로부터 추측할 수 있다. SEM 사진이 암시하는 것은 섬유들이 얇게 연마되고 상대면 돌기들의 운동으로 인하여 표면으로부터 부러져 나가는 것이다. 횡단 방향의 경우, 섬유들이 파손되는 유형은 굽힘이지만 섬유의 부러짐이 그렇게 심하지 않을 것인 이유는 빨리 마모막 형성이 표면에 되기 때문이다. 일단 안정된 마모막 형성이 상대면에 되면 섬유 손상은 최소화할 것이다. 조건III의 마찰에서 수직 방향 섬유 배열의 경우 항상 상대면에 심하게 원주 방향으로 흠들이 형성되었다. 깊은 흠들이 형성된 곳은 복합재료 시편과 금속 상대면 모두에 같은 위치이었다. 수직 마찰 방향에서 흠형성이 일어나는 메커니즘으로서 제안된 것은 다음과 같다. 경한 흑연 섬유들이 상대면을 쟁기질하여 표면에 큰 변형을 일으킨다. 변형된 상대면이, 그 다음, 복합재료 시편을 손상시켜 섬유 파편을 생성시키며, 그것들이 마찰면들 사이에 갇혀서 흠들을 암 표면에 연삭 작용으로써 생성시킨다. 수직 방향으로 배열된 섬유들과 섬유 파편들이 비교적 연한 상대면으로 침입할 때에 눌러붙음(Seizure)가 일어날 것이며 이는 Tsukizoe와 Ohmae가 관찰하였다. 수직 섬유 배열의 경우 대규모 파손 영역이 일어나는 현상은 이 실험의 경우 그 눌러붙음 대신에 발생한 것으로 믿어진다. 대규모 파손이 일어나기 직전에 마찰이 증가하고 대규모 파손 영역이 생성된 직후에 갑자기 떨어진다. 이 원인은 박막 분리 형태의 마모(Delamination wear) 혹은 마찰열로 인하여 생긴 열 점(Hot spot)으로 인한 것일지도 모른다. 더 많은 실험과 이론적 조사 연구가 되어야 이 특별한 현상을 더 잘 설명할 수 있을 것이다.

결 론

일방향으로 배열된 흑연 섬유 복합재료의 마찰 및 마모 거동은 마찰 조건과 섬유 방향들에 따라 변한다. 가벼운 마찰 조건들에서는 최대 마찰 계수가 수직 방향에서 얻어졌고, 최소는 길이 방향에서이었으며, 마모는 어떠한 방향에서도 24 시간의 무시할 만큼 작았다. 마찰 조건들이 심해짐에 따라 마찰 계수는 수직 방향에서 최대이었고, 횡단 방향에서 최소이었다. 초기의 변화하는 마찰 거동이 강하게 의존하는 것은 섬유 파편의 생성과 돌기들의 상호작용이다. 마모막이 상대면 혹은 복합재료 표면에 존재하는 것이 안정된 마찰 계수를 지배한다. 비교적 심한 마모 조건들에서는 최대 마모가 수직 방향에서 얻어졌고 최소 마모는 횡단 방향에서이었다. 높은 마모가 얻어질 때는 항상 많은 깊은 흠들이 상대면의 마모 트랙과 복합재료 시편의 마모면 양 쪽에서 발견되었다. 지적되어야 할 점은 위의 결론들이 타당한 것은 상대면의 경도가 복합재료에 함유된 흑연 섬유들의 것보다 더 작을 때이다.

참고 문헌들

1. Tsukizoe T. and Ohmae N., "Wear performance of Unidirectionally Oriented Carbon-fiber-reinforced Plastics", Tribol. Int., 1975, 8, pp171-175.
2. Tsukizoe T. and Ohmae N., "Wear Mechanism of Unidirectionally Oriented Fiber-reinforced Plastics", Wear of Materials, S.K. Rhee, et al., ed., ASME, 1977, pp518-525.
3. Tsukizoe T. and Ohmae N., "Friction and Wear of Advanced Composite Materials", Fibre Sci. Tech., 1983, 18, pp265-286.
4. Sung N. and Suh N.P., "Effect of Fiber Orientation on Friction and Wear of Fiber Reinforced Polymer Composites", Wear, 1979, 53, pp129-141.
5. Suh N.P. and Sin H.-C., "The Genesis of Friction", 1981, 69, pp91-114.

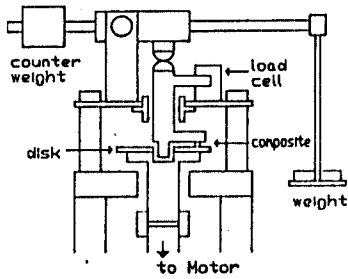


Fig. 1. Schematic diagram of experimental set-up

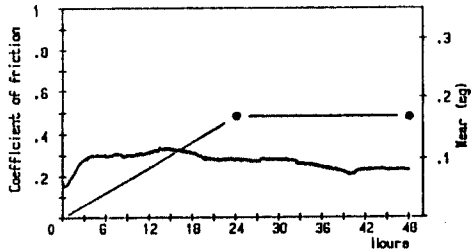


Fig. 2. Friction coefficient and wear of the composite tested in longitudinal direction. (normal load = 49N, sliding speed = 0.5 m/s)

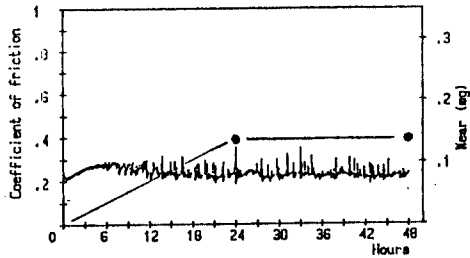


Fig. 3. Friction coefficient and wear of the composite tested in transverse direction. (normal load = 49N, sliding speed = 0.5 m/s)

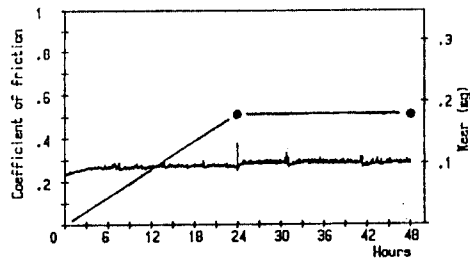


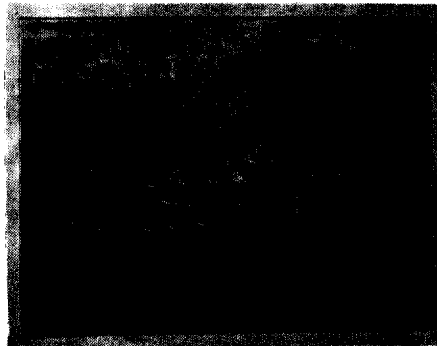
Fig. 4. Friction coefficient and wear of the composite tested in normal direction. (normal load = 49N, sliding speed = 0.5 m/s)



a) Longitudinal



b) Transverse



c) Normal

Fig. 5. Micrographs of the wear surface for different fiber orientations (normal load = 49 N, sliding speed = 0.5 m/s)

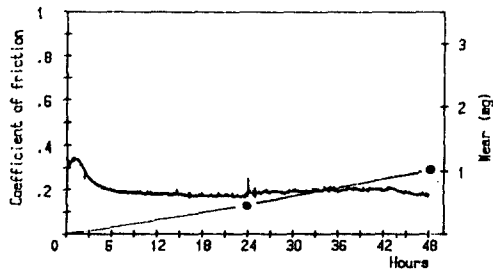
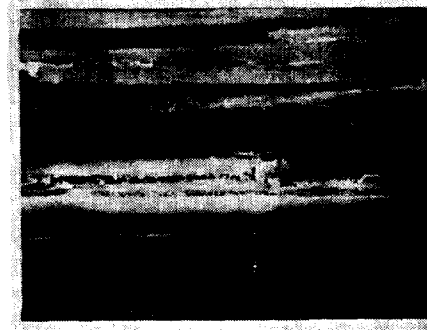


Fig. 6. Friction coefficient and wear of the composite tested in longitudinal direction. (normal load =19.6 N, sliding speed = 2.5 m/s)



a) Longitudinal

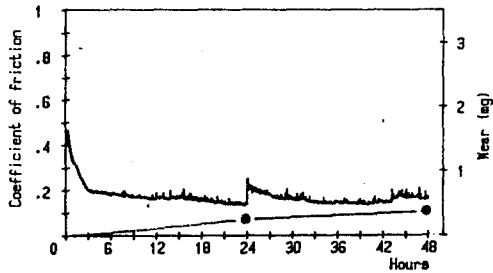


Fig. 7. Friction coefficient and wear of the composite tested in transverse direction. (normal load =19.6 N, sliding speed = 2.5 m/s)



b) Transverse

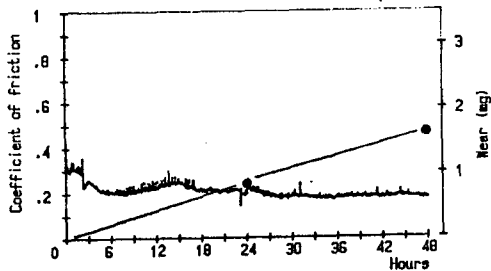


Fig. 8. Friction coefficient and wear of the composite tested in normal direction. (normal load =19.6 N, sliding speed = 2.5 m/s)



c) Normal

Fig. 9. Micrographs of the wear surface for different fiber orientations; (normal load = 19.6 N, sliding speed = 2.5 m/s)