

일방향섬유 복합재료의 마찰 및 마모 특성에 관한 연구

정 형범 윤 재륜
서울대학교 섬유고분자공학과

초록

본 연구에서는 다양한 종류의 섬유를 일방향으로 배향시켜 제작한 복합재료의 트라이볼로지 연구를 수행하였으며 특히 섬유의 배향과 활주속도가 트라이볼로지 성질에 미치는 영향을 연구하였다. 실험에 쓰인 시편은 유리 섬유, 아라미드 섬유, 그리고, 고탄성 탄소 섬유를 보강재료로 에폭시 수지를 모재로 사용한 일방향섬유 복합재료이며 각각의 시편을 스테인레스 강 상대 마찰면에 마찰시켜 마모량과 마찰 계수를 구하였다. 실험조건으로 사용한 여러 활주속도에서 탄소섬유복합재료가 모든 섬유배열방향에서 아라미드섬유복합재료와 유리섬유 복합재료보다 마모율과 마찰계수가 낮은 경향을 보였으며 특히 높은 속도에서는 탄소섬유복합재료의 특성이 뛰어난 것을 알 수 있었다.

서론

높은 부피 분율과 완전한 배향을 갖는 장 섬유 강화 고분자 복합재료는 매우 높은 비강도(specific strength)와 비강성(specific stiffness)을 갖는 것으로 알려져 있으며, 또한 이러한 재료로 만들어진 구조 요소는 외부에서 작용하는 하중계(load system)에 따라 섬유의 부피 분율, 섬유의 배향, 섬유의 선택 등을 조합함으로써 복합재료의 성질을 재단(tailoring)할 수 있다. 이러한 장점 외에도 섬유와 모재의 다양성은 여러 종류의 응용 분야에 따라 독특한 성질을 갖는 복합재료의 설계를 가능하게 한다. 특히 여러 종류의 섬유들을 특별한 하이브리드 복합재료의 미시구조를 개발하기 위하여 같이 사용하면 더욱 더 요구조건에 부합되는 복합재료의 성질을 설계하고 얻을 수 있다.

본 연구에서는 모재로는 열경화성 수지인 에폭시를 사용하였는데, 그 이유는 열경화성 수지는 가교 결합으로 인해 강성이 크고,

열가소성 수지보다 높은 연화점과 보다 좋은 크립(creep) 성질을 가지므로 높은 온도에서도 사용될 수 있으며, 또한 열경화성 수지는 화학적 안정성도 뛰어나기 때문이다. 특히 열경화성 수지 중에서도 에폭시는 다른 열경화성 수지에 비해 여러 성질이 뛰어나므로 본 연구에서는 에폭시를 복합재료 시편의 모재로 사용하였다.

보강재료는 유리 섬유, 아라미드 섬유, 그리고, 고탄성 탄소 섬유를 사용하였으며 마찰 방향과 복합 재료의 섬유 배열 방향과의 각도 변화에 따른 마찰 및 마모 메커니즘의 변화를 알기 위하여 길이 방향(longitudinal), 수직 방향(normal), 그리고, 횡단 방향(transverse) 시편을 준비하여 활주속도(sliding velocity)를 3가지로 변화시키면서 마모량과 마찰 계수를 구하였다. 본 연구의 결과는 내마모성과 윤활 마찰계수를 가지는 하이브리드 복합재료의 설계와 제작 및 평가에 응용할 예정이다.

실험

트라이볼로지 특성을 측정하기 위하여 선반을 변형하여 핀 온 링(pin-on-ring) 형태의 마찰 및 마모실험기를 설계하여 Fig 1에 보인 바와 같이 제작하였다.

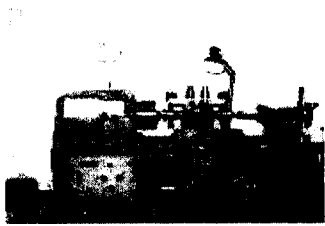


Fig 1 실험에 이용된 마모실험기

마찰 실험은 공기 중에서 실행되었고, 온도는 19~24°C로 유지되었으며, 상대 습도는 20~35%였다. 트라이볼로지 실험은 온도와 습도에 크게 영향을 받지만 이와 같은 작은 변동은 실험 결과에 영향을 끼치지 않을 것으로 예상된다. 수직 하중은 2 kgf(19.N)으로 고정하였고, 마찰 속력은 1.04 m/s (110 rpm), 4.09 m/s (433 rpm), 16.5 m/s (1745 rpm)의 3가지 속력으로 실험을 하였다. 단, 전체 마찰 거리는 89.9 km가 되도록 마찰 시간을 변화시켰다.

실험 전후의 복합재료의 시편의 무게는 0.01 mg 크기까지의 정밀도를 갖는 전자 저울인 Sartorius사의 BP210D를 이용하여 측정하였고, 마찰 계수를 구하기 위하여 스트레인 게이지식의 굽힘보형의 로드 셀을 설치하고, A/D 변환기를 사용하여 마찰력을 컴퓨터에 저장한 후 평균값을 계산하였다.

결과 및 고찰

실험결과를 Fig 2~Fig 7에 제시하였다.

Fig 2와 Fig 3에서는 저속의 활주속도조건에서의 실험결과를 도시하였다. 탄소섬유복

합재료의 경우 섬유배향에 관계없이 비마모율과 마찰계수가 작으며 상대적으로 유리섬유복합재료의 경우 비마모율이 다른 두 종류의 섬유에 비해 큰 경향을 보인다.

Fig 1. specific wear rate at low sliding velocity (1.04 m/s)

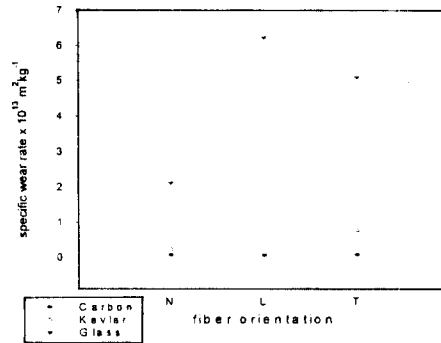


Fig 2 friction coefficient at low sliding velocity (1.04 m/s)

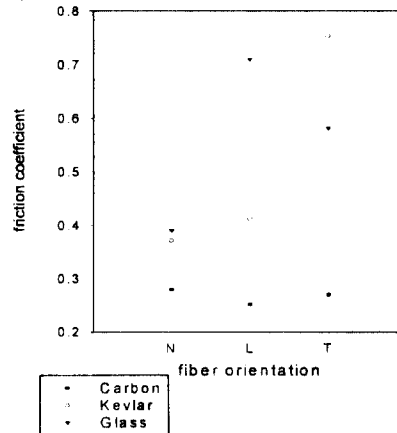


Fig 4와 Fig 5에서는 중속의 활주속도조건에서의 실험결과를 도시하였다. 여기서도 탄소섬유복합재료와 아라미드섬유복합재료가 유리섬유복합재료에 비해 비마모율과 마찰계수가 작은 경향을 보여 주고 있다.

Fig 3. specific wear rate at medium sliding velocity (4.09 m/s)

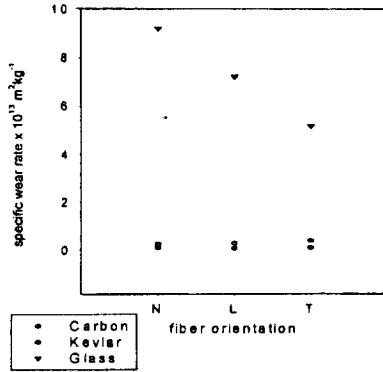


Fig 5. specific wear rate at high sliding velocity (16.5 m/s)

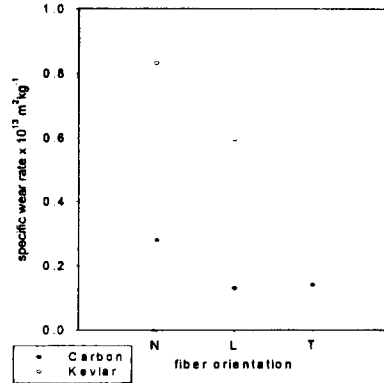


Fig 4. friction coefficient at medium sliding velocity (4.09 m/s)

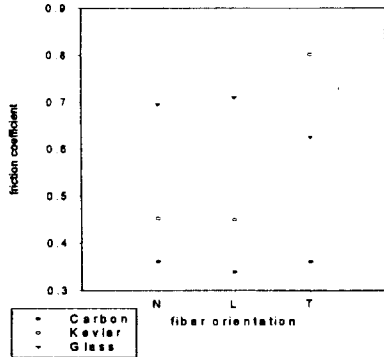


Fig 6. friction coefficient at high sliding velocity (16.5 m/s)

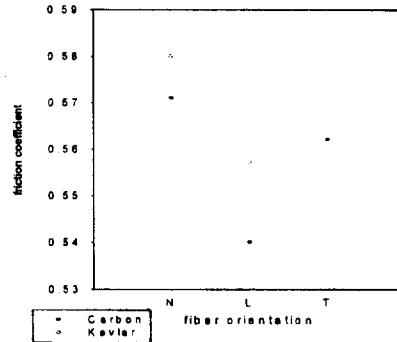


Fig 6 과 Fig 7 에서는 고속의 활주속도조건에서의 실험결과를 도시하였다. 유리섬유의 경우 섬유배향에 관계없이 파괴가 일어났으며 아라미드섬유복합재료의 경우 횡단방향으로 파괴가 일어났다. 탄소섬유복합재료의 경우 비마모율이 다른 속도의 실험조건에서 얻어진 값과 유사한 경향을 보였다.

유리섬유복합재료

본 연구에서 사용된 유리섬유는 Owens Corning Fiberglass Corporation 에서 만든 S-2 유리섬유이다. 사용된 에폭시 수지는 국도 화학에서 YD-128 이라는 상품명으로 만든 diglycidyl ether of bisphenol A(DGEBA)로써 에폭시 등가 질량은 187 이고, 함유량은 5.26~5.43eq/kg 이다. 비중은 20 °C 에서 1.17 이며, 유리전이온도는 156°C 이다. 경화제 (curing agent)로는 aromatic amine 인 4-4' diamino diphenyl methane(DDM)을 사용했으며, 이것은 분자량이 198.8 이며, 용융점은 92°C

이다.

일반적으로 유리섬유는 본 연구의 관심재료인 또 다른 두 종류의 섬유, 즉 아라미드 섬유와 탄소섬유에 비해 내마모성이 떨어진다고 알려져 있으며, 본 실험에서도 그것이 증명되었다. 특히 고속의 활주속도 실험조건에서는 파괴가 일어났다. 하지만 유리섬유는 다른 두 섬유에 비해 가격이 매우 저렴하다는 장점을 가진다. 따라서 아라미드 섬유나 탄소섬유만으로 강화시킨 복합재료를 만들기보다는 값이 저렴한 유리섬유를 함께 사용함으로써 하이브리드화에 의한 상승 작용을 얻을 수 있다. 실제적으로 이에 대한 실험을 Tadazu Tsukizoe 와 Nobuo Ohmae 가 수행하였는데 이들은 40%의 부피분율을 갖는 고탄성 탄소섬유 에폭시 복합재료와 40%의 고탄성 탄소섬유와 약간의 유리섬유가 하이브리드화된 에폭시 복합재료에 대해 마모 실험을 하였는데, 하이브리드 복합재료가 마모 성능이 더 뛰어나다고 밝혀졌다. Fig 8 에 유리섬유복합재료를 실험한 것 중에서 저속의 활주속도 조건에서 수직방향으로 마모된 마모면을 CCD 카메라로 관측한 것을 보였다.

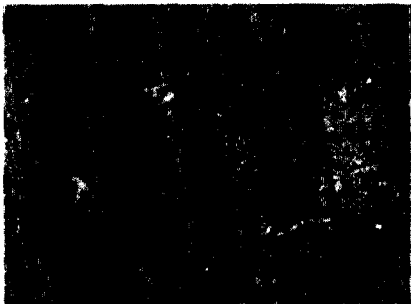


Fig 8. 유리섬유복합재료의 마모면(저속에서 수직방향)

아라미드섬유복합재료

아라미드섬유 강화복합재료를 제조함에 있어 코제는 유리섬유 복합재료 제작시 사용

한 것과 같은 에폭시 수지를 사용하였으며 섬유는 Du Pont사에서 제작한 Kevlar-49를 사용하였다.

일반적으로 아라미드 섬유는 다른 고분자 물질에 비해 높은 온도에서 좋은 물성을 갖는다. 비교적 높은 유리전이온도(약 360°C)를 가지며 잘 타지 않고, 나일론처럼 용융하지도 않는다. 열팽창계수(약 $4 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$) 또한 작아 치수안정성이 좋다.

실험 결과 유리강화 섬유재료에 비해 모든 종류의 섬유배향에 대해 우수한 성능을 보였다. 단, 고속의 활주속도 실험조건에서 횡단방향으로 파괴가 일어났는데 이는 일방향 섬유 복합재료에서 가장 외력에 약한 부분이기 때문인 것으로 추측된다. Fig 9 에 아라미드섬유복합재료를 실험한 것 중에서 저속의 활주속도 조건에서 수직방향으로 마모된 마모면을 CCD 카메라로 관측한 것을 보였다.



Fig 9. 아라미드섬유복합재료의 마모면(저속에서 수직방향)

탄소섬유복합재료

본 연구에서 사용된 탄소섬유는 Toray사에서 제조한 Technora 탄소섬유이다. 일반적으로 탄소섬유복합재료의 마찰 및 마모성질은 탄소섬유의 배향과 활주속도 및 상대면에 따라 변화하지만 마모현상의 결과로 상대면에 물질이착면이 형성되어 이 물질이착면의

형성속도와 그 안정성이 마모율에 기여하는 바가 크다.

실험 결과 저속에서는 섬유배향과 비교적 무관한 마모 성질을 보여주었고, 속도가 증가함에 따라 섬유배향에 따른 마모성질의 차이를 보여주었다. 탄소섬유의 경우 상대 마찰면에 윤활작용을 하여 마모율과 마찰계수를 낮추는 것이 Lancaster 등의 연구에 의해 밝혀진 바 있다. Fig 10 에 탄소섬유복합재료를 실험한 것 중에서 저속의 활주속도 조건에서 수직방향으로 마모된 마모면을 CCD 카메라로 관측한 것을 보였다

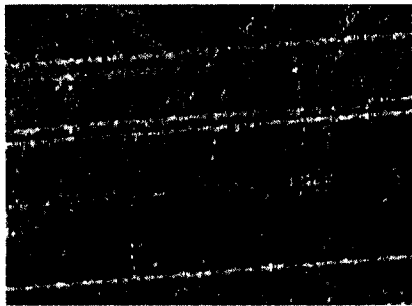


Fig 10. 탄소섬유복합재료의 마모면(저속에서 수직방향)

결론

이상으로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 유리섬유의 경우 다른 두 종류의 섬유에 비해 마모 성질이 떨어진다.
2. 아라미드섬유의 경우 유리섬유에 비해 마모성질이 우수하나 고속의 실험 조건시 횡단방향으로 강성이 떨어진다.
3. 탄소섬유의 경우 마모현상의 결과로 형성되는 물질이착막이 비교적 저속의 실험조건에서 배향에 관계없이 균일한 마모성질을 발현하는데 기여하는 것으로 보이며, 고속에서도 유리섬유나 아라미드섬유복합재료보다 낮은 마모율과 마찰계수를 가졌다.

인용문헌

1. Klaus Friedrich, "Friction and Wear of Polymer Composite" Elsevier, 1986, pp.205-232
2. J. P. Giltrow, J. K. Lancaster., "The role of the counterface in the friction and wear of carbon fiber reinforced thermosetting resins", Wear, 16,1970,pp.359-374
3. W. Bonfield, B.C. Edwards, A.J.Markham, J.R.White, "Wear transfer films formed by carbon fiber reinforced epoxy resin sliding on stainless steel", Wear, 37, 1976, pp.112-121
4. J.K.Lancaster, "The effect of carbon fiber reinforcement on the friction and wear of polymers", Brit.J.Appl.Phys., 1968, ser.2, vol.1, pp.549-559
5. C. L. Hymn, "Effect of normal load on the specific wear rate of fibrous composites", Wear, 120, 1987, 1-27
6. T. Tsukizoe, N. Ohmae, "wear mechanism of unidirectionally oriented fiber reinforced plastics", ASME, 1977
7. Nak-ho Sung, Nam P. Suh, "Effect of fiber orientation on friction and wear of fiber reinforced polymeric composite", Wear, 53, 1979, pp.129-141
8. G. Santhahakrishnan, R. Krishnamurphy, S. K. Malhotra, "High speed steel tool wear studies in machining of glass-fiber-reinforced plastics, Wear, 132, 1989, 327-336