

표면 요철을 가지는 탄소 섬유/에폭시 복합재료의 마찰 및 마모 특성

김성수* · 이대길**

Tribological Behaviors of Carbon-Epoxy Composite with surface grooves

Seong Su Kim, Dai Gil Lee

Abstract

The tribological behavior of carbon epoxy composites whose surfaces have many small grooves of 100 μm width was experimentally investigated with respect to the sliding direction against groove orientation, surface pressure (P) and velocity (V). The wear mechanism of the composites was observed to calculate the wear volume with respect to the friction coefficient using scanning electron microscopic (SEM). Experimental results show that the abrasive wear is dominant wear mechanism for the grooved composite surface and the friction and wear are greatly reduced when the sliding direction is parallel to the axis of groove because abrasive particles are removed through the grooves effectively.

Key Words: Carbon-epoxy composite, Surface-grooved specimen, Abrasive particle.

1. 서론

마모는 두 물체의 상대 운동 결과 접촉면에서 부터 점차적으로 재료의 일부가 떨어져 나가는 현상을 말한다. 마모 유형은 피로 마모, 연삭 마모, 응착 마모, 그리고 화학적 마모 등으로 크게 나눌 수 있다. 표면에 마찰 하중이 반복적으로 가해지면 표면 피로가 일어나 마모 입자가 발생한다. 피로 마모의 한 예로 저널과 베어링이 유막에 의해 충분히 분리된 저널베어링에서의 피로 현상에 의한 마모를 들 수 있다.

마찰면 사이의 경도가 큰 입자들에 의해 마모가 발생하거나, 연한 표면을 경하고 거친 표면으로 마찰할 경우를 연삭 마모라 한다. 경도가 큰

입자나 표면 돌기들은 표면을 긁어 심한 소성 변형을 일으키고, 표면 하부(Subsurface)에 손상을 입혀 칩(Chip) 형태의 마모 입자들을 생성시킨다.

응착 마모는 박리 마모 이론이 제시되기 전 연삭 마모를 제외한 많은 마모들의 기구로 인식되었다. 응착 마모가 진행되는 과정들을 살펴보면, 먼저 표면 돌기들이 접촉 변형을 일으키면서 표면 막들이 제거된다. 이어서 응착 접합부들이 형성되고 마찰력에 의한 전단에 의해 접합부의 파단이 발생한다. 최종적으로 접합부 파단으로 형성된 파편들(Debris)이 제거되면서 응착 마모가 발생하는 것이다.

응력 작용과 그에 따른 변형으로 설명되는 피로, 연삭 마모와는 달리 화학적 마찰 마모는 환경과 재질 성분들 사이의 상호 작용으로 설명될 수 있다. 먼저 재료 표면들이 주위 환경과 반응하면서 반응 생성물들이 재료의 표면 위에 형성된다. 반응 생성물들은 재료들의 접촉 과정 중

* 한국과학기술원 기계공학과 대학원

** 한국과학기술원 기계공학과 교수

상호 작용에 의해 균열(Crack)이 형성되고, 연삭으로 인해 마모되며 이러한 과정이 되풀이 되면서 화학적 마찰 마모가 진행된다.

탄소 섬유는 비강성, 비강도 뿐만 아니라 판상 구조로 이루어져 있기 때문에 마찰 및 마모 특성이 매우 우수하여 베어링, 브레이크 패드 등과 같은 다양한 분야에 적용되어왔다. 따라서 탄소 섬유를 보강재로 하는 고분자 복합재료의 마찰 및 마모 거동에 대해서는 많은 연구가 진행되어왔다. Gopal은 단위 하중과 마모 거리에 대한 탄소/에폭시 복합재료의 마모율이 하중이 증가함에 따라 감소하고, 마찰 온도의 상승에 따른 고분자 재료의 물성 저하로 인해 마모 속도가 증가함에 따라 증가한다고 밝혔다 [1]. Tsukizoe는 섬유의 물성 및 미끄럼 방향에 따른 섬유 보강 고분자 복합재료의 마모 특성에 대해 연구하였다.

섬유 강화 복합재료의 표면 처리를 통해 마찰 및 마모 특성을 증가시키기 위한 다양한 연구 또한 진행되어왔다. Voevodin은 미끄럼 면에 Ti20%-DLC (Diamond-like carbon)와 Ti35%-DLC를 도포하는 방식으로 마찰 및 마모 특성을 향상시키는 방법에 대해 연구하였다 [2]. Zhang은 PTFE에 금속 황화물 또는 흑연등을 첨가하여 PTFE의 강도와 마찰 및 마모 특성을 향상시켰다 [3].

섬유강화 복합재료의 마찰 및 마모 특성에 대한 이전까지의 연구는 실험 환경 및 첨가제의 영향에 대한 분석 위주로 이루어졌다. 이러한 연구로부터 마찰면에서 발생한 마모 입자가 마찰 및 마모에 가장 큰 영향을 미치는 인자 중 하나임이 밝혀졌다. 따라서 본 연구에서는 탄소 섬유/에폭시 복합재료의 마찰 및 마모 거동에서 마모 입자의 영향을 최소화하기 위해 시편 표면에 요철을 성형하였으며, 요철의 방향과 마찰면에 작용하는 하중, 그리고 속도에 따른 영향에 대해 연구하였다.

2. 요철 표면을 가지는 마모 시편의 제작

마모 시편은 탄소 섬유/에폭시 복합재료 (SK Chemical, KOR)를 사용하였으며 시편 표면에 요철을 성형하기 위해 Fig. 1(a)와 같이 요철면을 가지는 금형을 제작하였다. 금형은 두께가 각각 100 μm , 200 μm 인 금속 박판을 높이 차이가 100 μm 가 나도록 지그재그로 배열한 후 볼트로 고정하는 방법으로 제작되었다.

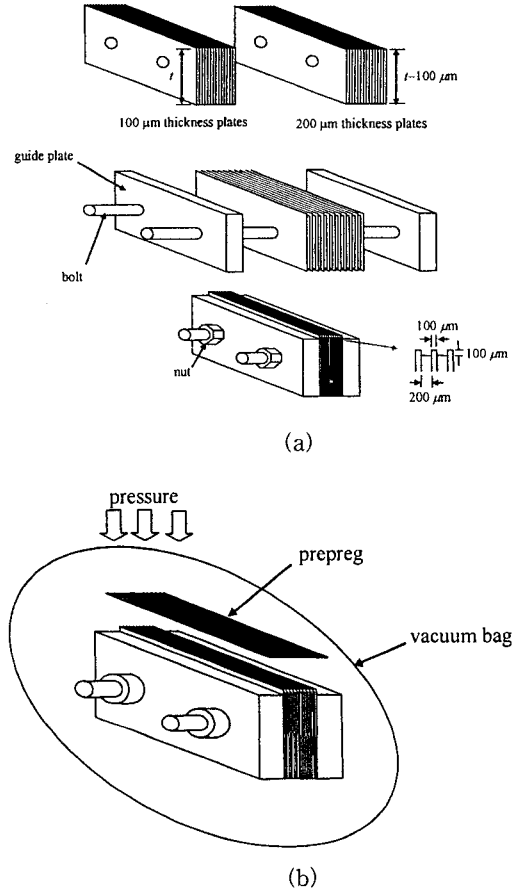


Fig. 1 Fabricating process of the concave mold and specimens (patent pending); (a) mold fabrication method, (b) molding process for the composite with many small grooves.

제작된 요철 금형 위에 Fig. 1(b)와 같이 탄소 섬유/에폭시 복합재료 프리프레그를 섬유 방향과 요철 방향이 나란하도록 적층한 후 적당한 경화 과정 (125 °C, 0.6 MPa)을 통해 Fig. 2와 같은 요철 표면을 갖는 마모 시편을 제작하였다.

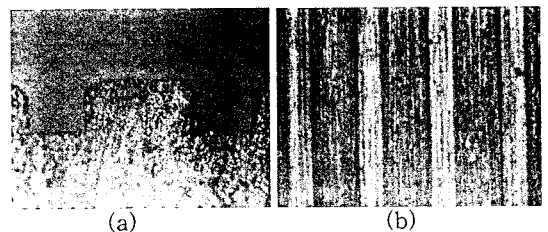


Fig. 2 Grooved specimen; (a) side, (b) plane

3. 마모 시험

시험에 쓰인 시편의 형상은 Fig. 3과 같다.

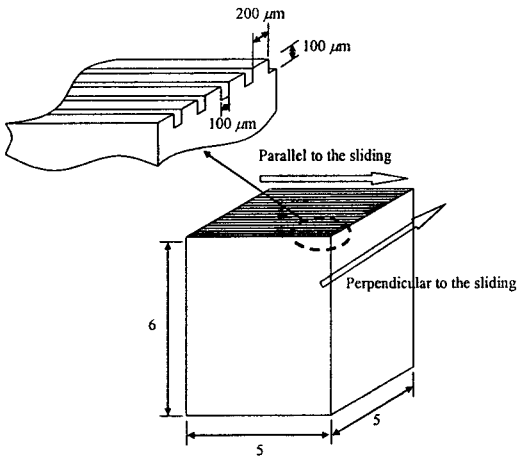


Fig. 3 Grooved specimen and sliding direction.

실험 장치는 핀 온 디스크 형태 (Pin on disk type) 로써 디스크의 재질은 베어링강 (AISI-E52100)이며 직경과 두께는 각각 240mm, 12mm이다. 주파수 변환기를 사용하여 원판의 회전 속도를 제어하였고 시편 지그의 양면에 부착된 스트레인 게이지 (Strain gauge)로 마찰력을 측정하였다. 마모로 인한 질량 손실은 0.1mg의 정밀도를 가진 저울 (Microbalance) 을 사용하여 측정하였다. 마모 시험에 있어 재료의 마모 특성을 나타내는 대표적인 값이 하중과 속도의 곱으로 나타내는 PV 한계 (PV limit)이다. 이 값에 따르면 주어진 하중 값에 따라 허용 속도가 결정되며 반대로 주어진 속도에 따라 허용 하중이 결정된다. 본 연구에서는 PV 값에 따른 마찰 및 마모 거동을 살펴 보기 위해 PV 값이 각각 0.8 MPa·m/s, 0.4 MPa·m/s일 경우에 실험하였다. 이 때 하중과 속도를 Case 1 (13.4 MPa, 0.06 m/s), Case 2 (6.7 MPa, 0.06 m/s), Case 3 (13.4 MPa, 0.03 m/s)의 조합으로

Table 1. Wear volume and depth of the specimen

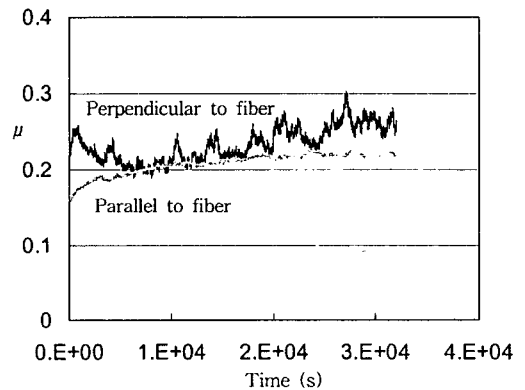
Specimen type	Sliding direction	Wear volume (mm ³)	Wear depth (mm)
Specimen without groove	Perpendicular	4.13	0.17
	Parallel	3.74	0.15
Specimen with groove	Perpendicular	4.68	0.22
	Parallel	0.61	0.04

하여 측정하였다.

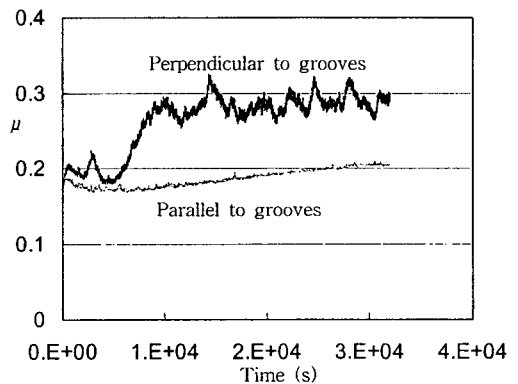
Table 2 Mean friction coefficients of the specimen

Specimen type	Sliding direction	Friction coefficient
Specimen without groove	Perpendicular	0.25
	Parallel	0.22
Specimen with groove	Perpendicular	0.29
	Parallel	0.20

Case 1의 경우 미끄럼 방향에 따른 마모 부피 및 마찰 계수는 Tables 1~2와 같다. 실험 결과에 따르면, 요철 방향에 대해 미끄럼 방향이 나란할 경우에는 요철이 없는 시편에 비해 마모 부피 및 마찰 계수가 낮았지만, 수직일 경우에는 반대의 경향을 보였다. 원인을 분석하기 위해 Fig. 4와 같이 시간에 따른 마찰계수의 추이를 관찰하였다.



(a)



(b)

Fig. 4 Friction coefficients of the grooved and ordinary specimens w.r.t. sliding direction; (a) ordinary specimens, (b) grooved specimens.

Fig. 4(b)를 보면 미끄럼 방향이 요철의 방향에 대해 수직 방향일 때 어느 시점에서 마찰 계수가 급격히 증가함을 알 수 있다. 그러나 요철의 방향과 나란할 경우에는 이러한 급격한 변화가 관찰되지 않았으며 전반적으로 마찰계수가 상당히 낮음을 알 수 있다. 또한 미끄럼 방향이 수직일 경우 마찰 계수가 증가하기 이전의 시점에서는 그 값이 미끄럼 방향이 나란할 경우의 값과 거의 유사함을 볼 수 있다. 이로부터 요철의 수명과 마찰 계수는 밀접한 관계를 가짐을 유추할 수 있다. 즉, 마찰 계수가 급격히 증가하는 시점이 곧 요철의 완전히 닳아 없어지는 시점이라는 것이 예측 가능하다. 수명이 다한 이후의 마찰 계수가 요철이 없는 경우보다 큰 이유는 요철의 파손으로 인해 생성된 마모 입자의 양이 급격히 증가했기 때문이라 판단된다. 위와 같은 현상을 증명하기 위해 마모 표면을 SEM을 이용하여 분석하였으며 그 결과는 Fig. 5와 같다.

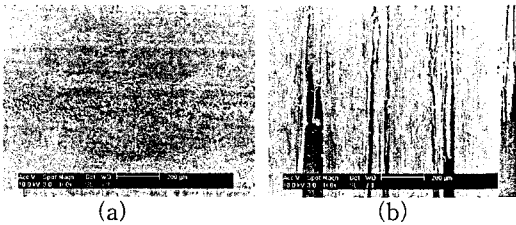


Fig. 5 Scanning electron micrographs (SEM) of worn surfaces ($P=13.4$ MPa, $V=0.06$ m/s); (a) grooved specimen under perpendicular sliding, (b) grooved specimen under parallel sliding.

마모 표면을 살펴보면 미끄럼 방향이 요철에 수직일 경우 Fig. 5(a)처럼 요철이 완전히 닳아 없어졌음을 볼 수 있고, 미끄럼 방향이 나란할 경우에는 Fig. 5(b)와 같이 요철의 일부분이 존재함을 알 수 있다.

PV 값에 따른 요철 표면의 마찰 및 마모 거동을 살피기 위한 Case 2 (6.7 MPa, 0.06 m/s), Case 3 (13.4 MPa, 0.03 m/s)의 마모 부피 및 시간에 따른 마찰 계수의 변화는 각각 Table 3, Fig. 6와 같다.

Table 3 Wear volume of the grooved specimen

	Wear volume(mm ³)	
	6.7 MPa, 0.06 m/s	13.4 MPa, 0.03m/s
Perpendicular	0.13	0.32
Parallel	0.06	0.19

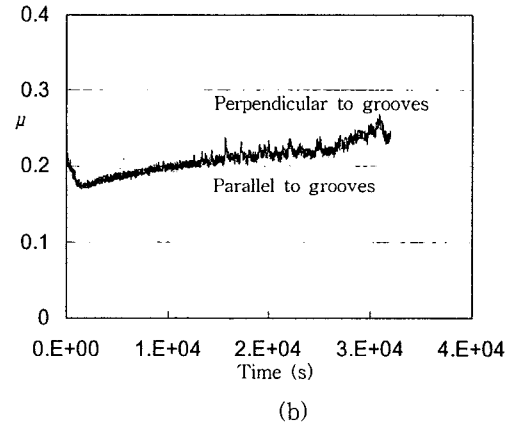
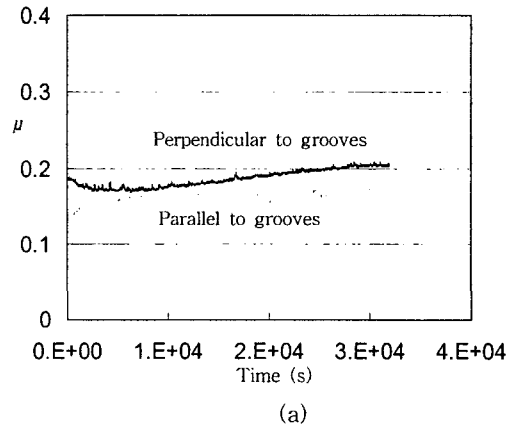


Fig. 6 Friction coefficients of the grooved specimen; (a) Case 1 ($PV=0.4$ MPa·m/s; $P=6.7$ MPa, $V=0.06$ m/s), (b) Case 2 ($PV=0.4$ MPa·m/s; $P=13.4$ MPa, $V=0.03$ m/s).

실험 결과에 따르면, PV 값이 절반으로 감소했을 경우 마모 부피가 급격하게 감소하였으며 미끄럼 방향이 요철 방향에 대해 수직일 경우에도 낮은 값을 보였다. 이는 앞서 말한 바와 같이 요철의 수명과 깊은 연관성을 가지고 있다고 판단하여 마찰면을 관찰한 결과 Fig. 7과 같이 미끄럼 방향에 관계없이 실험 종료 후에도 요철이 존재함을 알 수 있었다.

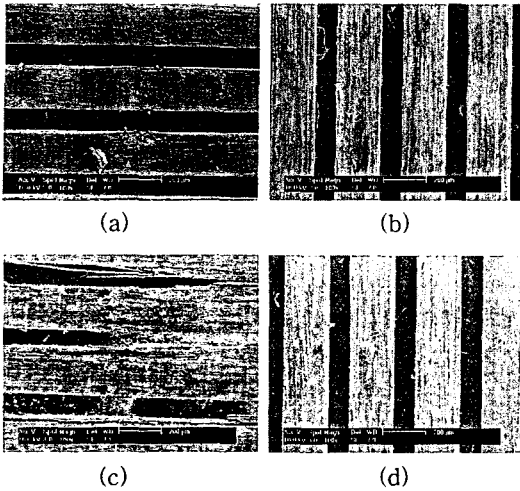


Fig. 7 Scanning electron micrographs (SEM) of the worn grooved surfaces;
 Case 1 ($PV=0.4$ MPa·m/s; $P=6.7$ MPa, $V=0.06$ m/s): (a) perpendicular sliding, (b) parallel sliding
 Case 2 ($PV=0.4$ MPa·m/s; $P=13.4$ MPa, $V=0.03$ m/s): (c) perpendicular sliding, (d) parallel sliding.

4. 결론

본 연구에서는 표면 요철을 가지는 탄소 섬유/에폭시 복합재료의 마찰 및 마모 특성에 대해 실험하였다. PV 값이 0.8 MPa·m/s일 경우, 미끄럼 방향이 요철 방향에 대하여 수직일 때는 상대적으로 높은 하중과 미끄럼 속도로 인해 요철의 수명이 급격히 감소하여 요철이 없는 시편에 비해 마모 부피 및 마찰 계수가 각각 12%, 14%만큼 증가하였다. 그러나 미끄럼 방향이 요철 방향과 나란할 경우에는 실험이 종료된 후에도 요철이 남아 있음을 확인하였으며, 마모 부피 및 마찰 계수는 요철이 없는 경우에 대해 각각 510%, 10%만큼 감소하였다. PV 값이 절반으로 줄어든 경우에는 미끄럼 방향에 관계없이 모든 경우에 대하여 실험 종료 후 요철이 존재하였으며, 마모 부피 및 마찰 계수 또한 미끄럼 방향에 관계없이 PV 값이 0.8 MPa·m/s일 경우에 비해 훨씬 감소했음을 확인하였다. 이러한 결과로부터 요철이 존재할 수 있는 PV 값의 한도 이내에서는 표면에 요철을 성형하는 것이 탄소 섬유/에폭시 복합재료의 마찰 및 마모 특성을 크게 향상시킬 수

있다고 판단된다.

후 기

본 연구를 수행할 수 있도록 지원해 준 국가지정연구실사업(NRL)에 깊은 감사를 표명합니다.

참고문헌

- (1) Gopal P, Dharani LR, Frank DB. Load, speed and temperature sensitivities of a carbon-fiber-reinforced phenolic friction material. *Wear* 1995;181-183:913-9
- (2) Voevodin AA, Schneider JM, Rebholz C, Matthews A. Multilayer composite ceramic-metal-DLC coatings for sliding wear applications. *Tribology International* 1996;29:559-570
- (3) Zhang ZZ, Xue QJ, Liu WM, Shen WC. Friction and wear characteristics of metal sulfides and graphite-filled PTFE composites under dry and oil-lubricated conditions. *Journal of Applied Polymer Science* 1999;72:751-761