

전자파 반사재료로 사용되는 탄소섬유/에폭시 복합재료의 적층 탄소섬유 방향성이 마찰특성에 미치는 영향

천 상 옥* · 김 윤 명** · 강 호 종†

*단국대학교 화학공학과, **단국대학교 전자공학과, 단국대학교 고분자공학과,
(1999년 6월 1일 접수, 1999년 7월 7일 채택)

Tribological Properties of Laminated Fiber Orientation in Carbon Fiber/Epoxy Composites for Reflecting Material of the Electromagnetic Wave

Sang-Wook Chun*, You'n-M'young Gimm**, and Ho-Jong Kang†

*Department of Chemical Engineering, **Electronic Engineering, Department of Polymer Science & Engineering,
Dankook University, Seoul 140-714, Korea
(Received June 1, 1999; accepted July 7, 1999)

요약: 전자파 반사재료로 사용되는 탄소섬유/에폭시 복합재료의 탄소섬유 배향이 마찰특성에 미치는 영향을 살펴보았다. 마찰 시, 상대 마찰 면과 탄소섬유/에폭시 복합재료의 적층 방향이 수직인 경우가 수평인 경우에 비해 우수한 마찰특성을 나타내었다. 이는 마찰 면과 복합재료의 적층 방향이 수평인 경우, 에폭시와 탄소섬유의 delamination이 상대적으로 많이 일어나기 때문이다. 탄소섬유 배향에 따른 마찰특성은 마찰 면과 복합재료의 적층 방향이 수직인 경우, 탄소 섬유가 단일 방향으로 배향된 0/0°의 복합재료가 다방향 배향인 0/45/90/-45° 및 0/90° 복합재료에 비해 상대적으로 뛰어난 마찰특성을 나타내었다. 이는 탄소섬유의 배향 방향에 따라 마찰 면에 접촉하는 탄소섬유의 접촉면적이 변화되고 그 결과, 마찰에 의한 탄소섬유와 에폭시의 debonding 정도가 변화되기 때문이다. 이와는 달리 마찰 면과 적층 방향이 수평인 경우 탄소섬유에 가해지는 응력의 종류에 따라 다른 마찰특성을 나타내며 인장응력이 작용하는 0/90°로 탄소섬유가 배향된 복합재료가 가장 우수한 마찰특성을 갖는다. 마찰면과 탄소섬유 배향에 따라 마찰계수는 마찰계수에 영향을 미치지 못하는 반면 마멸지수와는 비례관계가 있음을 확인할 수 있었다.

Abstract: The effect of carbon fiber orientation on the tribological properties of carbon fiber/epoxy composites used as a reflecting material for the electromagnetic wave has been investigated. It was found that the carbon fiber/epoxy composite which slides normal to prepreg lay-up direction had less friction and wear than those slides parallel to prepreg fiber lay-up direction due to the increase of delamination between carbon fiber and epoxy. Composite with unidirectional orientation(0/0°) had higher tribological properties than those with multidirectional orientation(0/45/90/-45° and 0/90°) when the sliding direction was normal to prepreg lay-up direction. This was caused by the debonding between carbon fiber and epoxy which is proportional to contact area between the sliding surface and carbon fiber. Opposite results have been found when the sliding direction was parallel to prepreg lay-up direction due to the tensile force applied on carbon fiber. In addition, it was shown that wear factor increased with increasing sliding velocity but the friction coefficient did not depend upon the sliding velocity.

Keywords: Lay-up orientation, Tribological properties, Carbon fiber/epoxy composites, Electromagnetic wave reflection material, Delamination, Debonding

1. 서 론

탄소섬유/에폭시 복합재료는 탄소섬유의 전기 전도성 때문에 전자파 반사특성이 우수하여 다층구조를 갖는 전자파 차폐재 흡수층의 배면 구조재료로서의 응용에 대한 관심이 차츰 증가되고 있다[1]. 특히 우수한 전자파 차폐특성과 내마멸성 및 내마모성으로 인하여 미국 스텔스 전투기의 배면 구조재료로 사용되고 있다[2]. 탄소섬유/에폭시 복합재료의 탄소섬유의 배향은 전자파 반사특성에 직접적인 영향을 주는 전기 전도성에 지대한 영향을 미치며[3], 아울러 탄소섬유/에폭시 복합재료가 다층구조 전자파 차폐재의 반사 구조재료로 사용되는 보다 중요한 이유인 기계적 특성과의 밀접한 관계를 갖는다.

탄소섬유/에폭시 복합소재의 기계적 특성 중 내마모 특성은 열악한 환경조건에서 사용되는 복합재료의 특성상 그 중요성이 부각되어 이에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다[4-7]. 그러나 복합재료의 탄소섬유 배향이 마찰(friction)과 마멸(wear)에 미치는 영향에 대한 mechanism은 현재까지 명확하게 밝혀지지 않고 있는 실정이다. Sung과 Shu는 탄소섬유복합재료의 상대 마찰 면이 강철링인 pin-on-disk형을 이용한 마찰특성 연구를 통하여 탄소섬유/에폭시 복합재료, Kevlar/에폭시 복합재료 및 유리섬유/MoS₂/PTFE 복합재료에서 강화섬유의 재질과 섬유방향성에 따른 마찰특성을 보고하였으며[8], 강화섬유재질에 따른 마멸지수(wear rate)와 마찰계수(friction coefficient)에는 물질의 고유특성에 따라 차이를 나타내며 강화섬유의 방향이 상대 마찰 면에 normal 방향이 longitudinal과 transverse 방향에 비해 상대적으로 낮은 마멸지수와 마찰계수를 나타내어 우수한 마찰특성을 나타냄을 확인하였다. 반면 Giltrow와 Lancaster[9]는 탄소섬유의 방향성과 상대 마찰 면의 재

† 주 저자 (e-mail: hjkang@dankook.ac.kr)

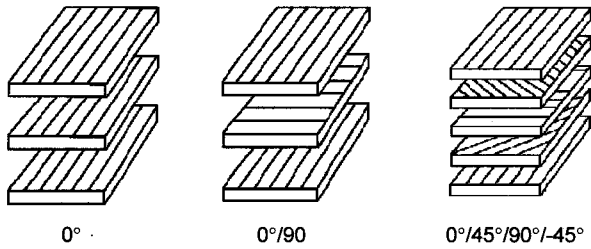


Figure 1. Schematic of prepreg lay-up method.

질이 마찰특성에 미치는 효과를 확인한 결과 Sung과 Suh의 연구 결과와는 달리 탄소의 섬유방향성과 기지재료가 마찰특성에 미치는 영향은 아주 미약하며, 상대 마찰 면의 재질과 강도 등이 마찰특성에 더 큰 영향을 미친다고 발표하였다. 이러한 연구들은 단일 방향의 탄소섬유/에폭시 복합재료를 사용하여 이들이 마찰 면과 접하는 방향을 다르게 함으로써 탄소섬유의 방향성이 마찰특성에 미치는 영향을 확인한 연구로서 프리프레그의 적층 방향을 다르게 하여 제조된 다방향 탄소섬유/에폭시 복합재료에 있어서 탄소섬유의 방향성이 마찰특성에 미치는 연구는 진행된 바가 없다.

따라서 본 연구에서는 다양한 전기적 특성을 갖게 하기 위하여 탄소섬유/에폭시 프리프레그를 이용한 복합재료 제조시 적층 탄소섬유의 방향성을 변화시켜 제조된 다방향 탄소섬유/에폭시 복합재료에 있어서 탄소섬유의 배향이 마찰특성에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다.

2. 실험

2.1. 재 료

본 연구에서 사용한 탄소섬유 프리프레그는 한국파이버사의 250 °F Carbon UD(HT145/RS1222)를 사용하였으며 프리프레그의 적층은 Figure 1에서 보는 바와 같이 각각의 prepreg를 적층시킬 때 각을 0/0°, 0/45/90/-45° 및 0/90°로 변화시켜 서로 다른 탄소섬유의 방향성을 갖게 적층한 후 autoclave를 사용하여 경화시켜 탄소섬유/에폭시 복합재료를 성형하였다. 이때의 경화조건은 진공상태에서 3기압으로 분당 2 °C로 승온을 하여 60 °C에서 진공을 제거하고 이를 130 °C까지 올려 1시간 30분간 유지한 후 냉각시켜 라미네이트를 제조하였다. 제조된 라미네이트는 Struers사의 다이아몬드 톱을 이용하여 4.5×5.0×10.0 mm의 치수를 갖는 마찰 실험 시편으로 가공하였다.

2.2. 장치 및 마찰특성 측정

탄소섬유복합재료의 마찰특성을 관찰하기 위한 장치로는 Figure 2의 개략도에 나타낸 자체 제작한 pin-on-disk형 wear tester를 이용하였다. 상대 마찰 면으로는 스테인레스 강(SUS 304)을 표면 거칠기 Ra(center line average)값이 0.10 μm가 되도록 연마한 후 사용하였으며 수직하중은 20 N으로 고정하고 마찰속도를 2.5 m/s와 5.0 m/s로 변화시키면서 Figure 2와 같이 sliding 방향을 프리프레그의 적층 방향과 수직 그리고 수평으로 하여 아래의 식에 의해 마찰계수와 마멸지수를 구하였다.

$$\text{마찰계수} = \frac{\text{미는 힘}}{\text{수직하중}} \quad (1)$$

$$\text{마멸지수} = \frac{\text{마멸된 부피}}{\text{수직하중} \times \text{마찰거리}} \quad (2)$$

습도에 따른 마찰특성의 영향을 최소화하기 위하여 pin-on-disk형

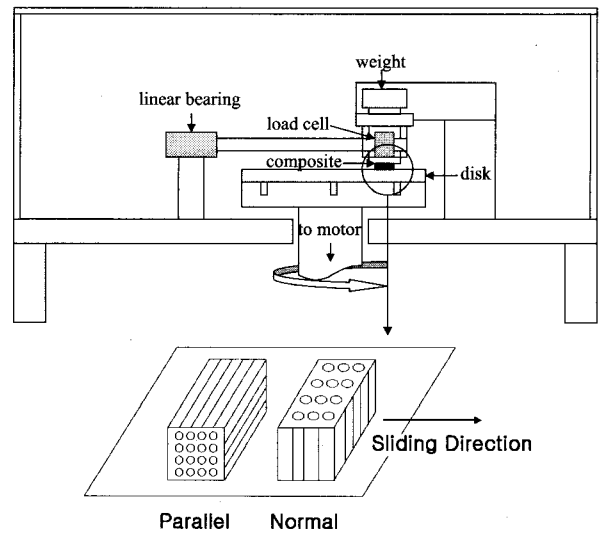


Figure 2. Schematic of wear tester and sliding direction of unidirectional carbon fiber/epoxy composite.

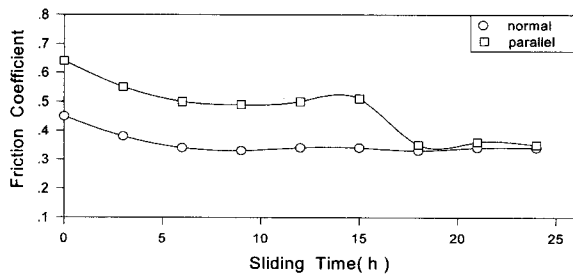
장치의 회전 디스크 부분에 항습 챔버를 장착하여 상대습도를 일정하게 유지시켰다. 이와 함께 Topcon사 SX-30의 SEM(scanning electron microscope)을 이용한 복합재료의 마모면과 파손된 탄소섬유를 관찰하였다. 이때 배율은 500배와 1000배로 하였다.

3. 결과 및 고찰

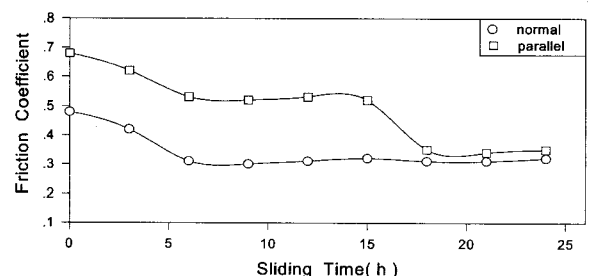
Figures 3과 4는 Figure 1에서와 같이 각기 다른 탄소섬유 배향성을 갖는 탄소섬유/에폭시 복합재료를 상대 마찰 면인 스테인레스강에 프리프레그 적층 방향과 수평 및 수직으로 마찰시켜 마찰 시간에 따른 마찰계수 변화를 나타낸 것이다. 이와 함께 각 조건에서 계산된 마멸지수, 마찰계수를 Table 1에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 프리프레그의 적층 방향이 미끄럼 방향과 수평인 경우, 0/90°, 0/45/90/-45°와 같이 다방향 탄소섬유 배향을 갖는 탄소섬유/에폭시 복합재료는 초반의 마찰계수(μ_1)와 중반의 마찰계수(μ_{s1}) 그리고 후반의 마찰계수(μ_{s2})를 나타내었다. μ_1 는 접촉된 마찰면들 간에 마찰이 시작될 때의 마찰계수로 시간이 경과함에 따라 다소 낮아지는 경향을 나타낸다. 이는 상대 마찰면인 스테인레스강이 회전함으로써 마찰재료의 탄소섬유 복합재료의 접촉표면에서 delamination이 일어나 상대마찰면에 물질이착막(wear transfer film)이 생성되는 과정으로 이 막이 완전히 이착되게 되면 큰 마찰계수 변화는 일어나지 않고, 이후에는 큰 변화 없이 안정된 마찰계수를 나타내기 때문이며, 이때의 마찰계수를 μ_{s1} 이라 한다. 적층된 탄소섬유의 한 layer가 완전히 마멸된 후 방향이 다르게 적층되어 있는 두 번째 layer의 탄소섬유로부터 마찰이 발현되고 앞에서 언급한 것과 같은 이유로서 마찰계수가 감소되며 또 다른 물질이착막이 형성되면 마찰계수의 감소가 둔화되어 안정된 마찰계수 μ_{s2} 를 갖게 된다. 하지만 Figures 3a와 4a에서 보는 바와 같이 0/0° 단일방향 탄소섬유/ 에폭시 탄소섬유의 경우 한 layer가 완전히 마멸된 후에도 후반의 마찰계수 μ_{s2} 를 갖지 못함을 알 수 있다. 이는 다방향 복합재료와는 달리 탄소섬유가 같은 방향으로 배향되어 있어 layer와 layer간의 불연속이 존재하지 않고 그 결과 layer가 변화되어도 중반 마찰계수 μ_{s1} 를 유지하는 것으로 생각된다. 프리프레그의 적층 방향이 미끄럼 방향과 수직인 경우 서로 다른 layer가 함께 마찰됨에 따라 0/0° 단일방향 탄소섬유/에폭시 탄소섬유를 수평으로 마찰한 것과 같이 초기 마찰계수 μ_1 후 지속적인 감소에 의

Table 1. Friction Coefficients and Wear Factors for Carbon Fiber/Epoxy Composites

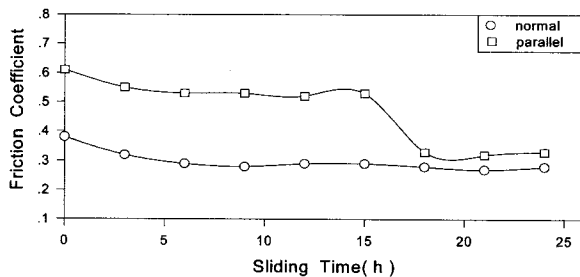
sliding speed	carbon fiber orientation	angle of composite and friction surface	wear factor ($\times 10^{-16}$ g/Nm)	μ_i	μ_{sl}	μ_{s2}
2.5 m/s	0°	normal	3.42	0.35	0.25	0.25
		parallel	4.16	0.63	0.52	0.52
	0°/45°/90°	normal	3.48	0.38	0.29	0.29
		parallel	4.08	0.61	0.53	0.35
	0°/90°	normal	3.52	0.45	0.34	0.34
		parallel	3.91	0.64	0.50	0.33
5.0 m/s	0°	normal	5.30	0.37	0.24	0.24
		parallel	7.24	0.62	0.53	0.53
	0°/45°/90°	normal	5.97	0.42	0.31	0.31
		parallel	7.52	0.59	0.55	0.34
	0°/90°	normal	6.28	0.48	0.31	0.31
		parallel	7.52	0.68	0.53	0.35



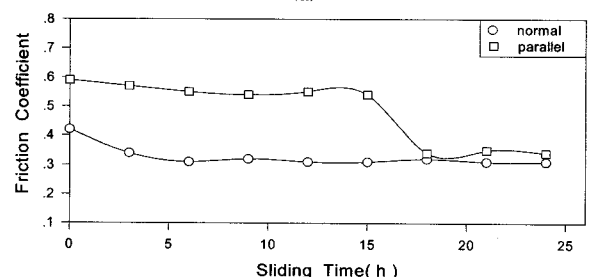
(a)



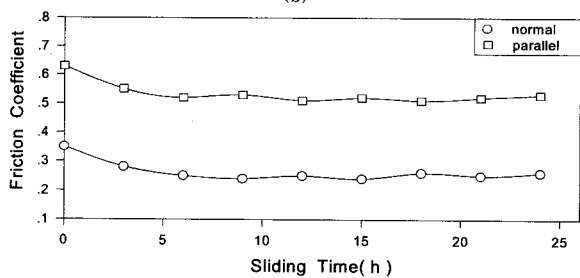
(a)



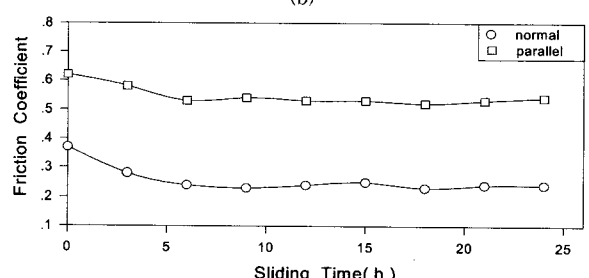
(b)



(b)



(c)



(c)

Figure 3. The effect of carbon fiber orientation on the friction coefficient of various carbon fiber/epoxy composite. Sliding velocity is 2.5 m/s; (a) 0/90° lay-up carbon fiber/epoxy composite, (b) 0/45/90/-45° lay-up carbon fiber/epoxy composite, (c) 0/0° lay-up carbon fiber/epoxy composite.

Figure 4. The effect of carbon fiber orientation on the friction coefficient of various carbon fiber/epoxy composite. Sliding velocity is 5.0 m/s; (a) 0/90° lay-up carbon fiber/epoxy composite, (b) 0/45/90/-45° lay-up carbon fiber/epoxy composite, (c) 0/0° lay-up carbon fiber/epoxy composite.

하여 중기 마찰계수 μ_{sl} 를 갖게됨을 알 수 있다.

Figure 4에서 보는 바와 같이 상대 마찰 면의 회전수를 높여 마

찰속도를 증가시켰을 경우 마멸지수에는 직접적으로 영향을 미쳐 복합재료의 마멸지수가 크게 증가한 반면 마찰계수는 큰 변화를 나

타내지 않았으며 탄소섬유의 적층 방향과 상대 마찰 면과의 각에 따른 마찰계수는 낮은 마찰속도에서와 유사한 경향을 나타내었다.

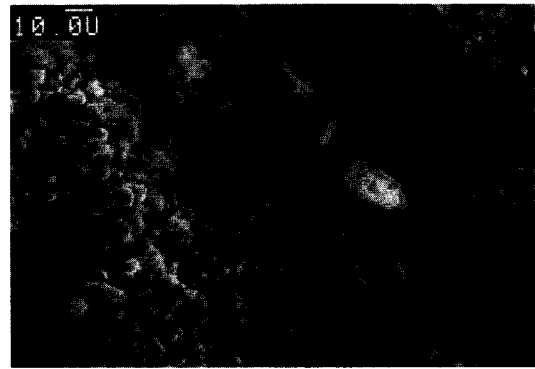
3.1. 프리프레그 적층 방향과 마찰방향의 관계가 마찰거동에 미치는 영향

적층 방향과 마찰면을 수평과 수직으로 달리 하였을 경우 Table 1에서 보는 바와 같이 탄소섬유의 배향에 관계없이 수평방향에 의한 마찰계수가 수직방향에 비해 상대적으로 높은 값을 나타냄을 알 수 있었다. 또한 탄소섬유의 배향에 따른 마찰계수의 변화는 확인한 차이를 나타내지 않았지만 전반적으로 보았을 때 상대 마찰면에 수평인 경우 0/0°, 0/45/90/-45° 및 0/90°의 순으로 높은 마찰계수를 나타내었으며, 수직인 경우는 0/90°, 0/45/90/-45° 및 0/0° 순으로 높은 마찰계수를 나타냄을 확인할 수 있었다. 또한 상대 마찰 면과 적층 방향이 마멸지수에 미치는 영향은 마찰계수와 동일한 경향을 나타냄을 알 수 있었다. 복합재료의 마찰현상은 adhesion theory[10]와 delamination theory[11]로 해석 가능한데 강화섬유복합재료의 경우, 섬유의 방향성이 존재하기 때문에 두 마찰면이 접촉되어 동적 거동을 하고 있을 때 접촉표면 근 역장에서의 역학적 거동을 근거로 마찰현상을 해석한 delamination theory가 폭 넓게 인용되어지고 있다.

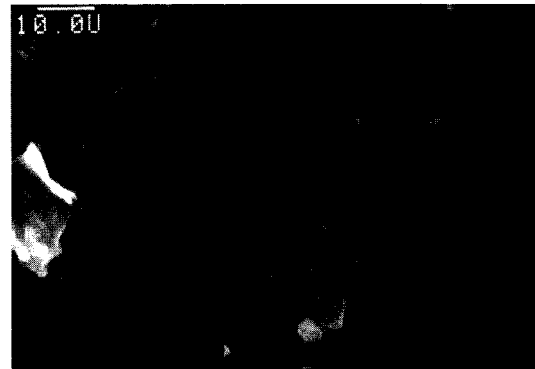
Sung과 Suh에 의하면[8] 마찰하는 두 물체가 서로 접촉되어 동적 마찰이 있을 때 마찰물질에 전달되는 하중은 접촉표면에 직각 방향과 접선방향으로 나누어 생각할 수 있는데, 이때 지속적인 하중전달로 인하여 마찰물질에 플라스틱전단변화가 야기되고 이로부터 표면면에 crack이 생겨 이미 존재하는 빈틈 또는 이웃하는 crack과 합쳐지게 되어 마찰면과 수평방향으로의 crack 성장이 일어나 결국 delamination을 발현시키게 되는 것이다. 하지만 탄소섬유/에폭시 복합재료의 경우 강화재로 들어간 탄소섬유와 매트릭스인 에폭시가 불연속적이기 때문에 이들이 접촉되는 면에서 crack이 우선적으로 일어나 debonding이 발현된다. 상대 마찰 면과 탄소섬유의 방향이 수직인 경우 debonding은 마찰표면에 위치하는 탄소섬유와 에폭시간에 일어나고 이는 섬유 배향 방향으로 전달된다. 하지만 이 경우 탄소섬유의 길이가 마멸에 의해 감소되기 전에는 탄소섬유로의 debonding이 증가하지 못하는 반면 탄소섬유의 방향이 마찰 면에 수평인 경우의 debonding은 수직방향에 비해 마찰면과 탄소섬유의 접촉면적이 상대적으로 크기 때문에 탄소섬유와 에폭시의 접촉면에서 빈번하게 일어나고 이때 일어난 debonding은 순환하중과 수평으로의 debonding 길이가 증가하여 마침내 이웃하는 섬유들과의 분리가 일어나 마찰계수 및 마멸지수는 증가된다. 이러한 실험결과는 Sung과 Suh의 연구와 잘 일치한다.

3.2. 탄소섬유의 배향성이 마찰거동에 미치는 영향

적층 방향과 마찰 면이 수직인 경우 0/90°로 적층된 복합재료의 동적 정상상태 마찰계수(μ_{sl} , μ_{sd})와 마멸지수가 가장 높게 나타남을 알 수 있다. 마찰방향과 수평으로 접촉하고 있는 탄소섬유가 2주기로 존재하는 0/90°의 복합재료가 3주기로 마찰 면에 접촉되어 있는 0/45/90/-45°에 비해 상대 마찰면과 탄소섬유와의 접촉면적이 커 debonding이 일어날 확률이 높고 그 결과, 높은 마찰계수와 마멸지수를 나타낸다. 따라서 마찰 면과 수평인 탄소섬유가 존재하지 않는 0/0°은 상대마찰면과 탄소섬유의 접촉면적이 가장 적어 debonding이 일어날 확률은 극히 낮아져 가장 낮은 마찰계수와 마멸지수를 갖게 되고 따라서 가장 우수한 마찰특성을 나타냄을 알 수 있다. 반면 적층방향과 접촉면이 수평인 경우 상대 마찰면과 탄소섬유의 접촉면적은 동일하지만 적층되어 있는 탄소섬유의 이방성에 따라 인장강도가 굽힘강도에 비해 월등히 높은 값을 가진다 [12]. 이러한 기계적 특성 차이에 의해서 마찰면과 탄소섬유가 이



(a)



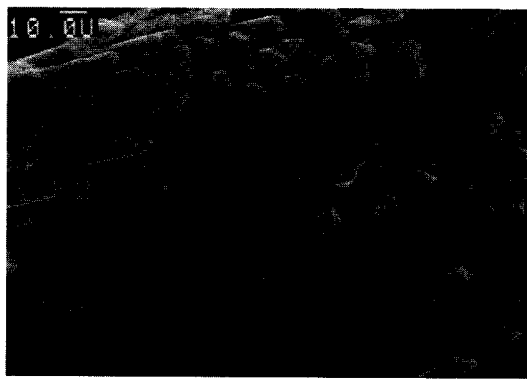
(b)

Figure 5. SEM micrographs of wear track for 0/90° lay-up carbon fiber/epoxy composite; (a) normal, (b) parallel.

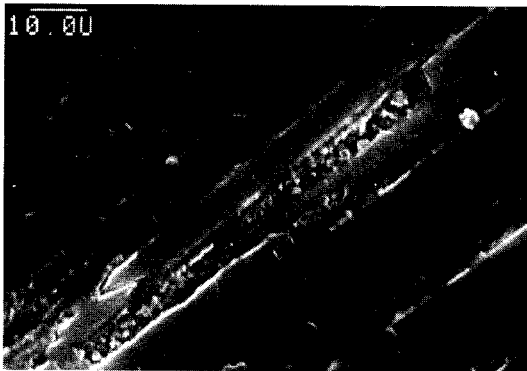
루는 각이 동일하게 수평일지라도 탄소섬유의 배향방향과 마찰방향에 따라 상이한 마찰거동을 나타내는 것으로 사료된다. 0/0°, 0/45/90/-45°, 0/90°로 탄소섬유가 배향된 복합재료는 모두 첫 번째 layer는 0°의 동일방향을 갖기 때문에 마찰계수는 첫 장이 모두 마멸되기 전에는 모두 비슷한 값을 나타내지만 0° 방향의 layer가 완전히 마멸된 후의 다음 layer는 0°, 45° 및 90°로 각기 다른 방향이기 때문에 두 번째 layer부터는 탄소섬유의 이방성에 따른 상이한 기계적 특성에 의하여 다른 마찰특성을 갖는다. 먼저 0/0°의 경우 두 번째 layer도 첫 번째 layer와 동일한 방향인 0°이기 때문에 마찰방향이 탄소섬유에 수직으로 작용하는 굽힘응력 만이 작용하게 되어 마찰속도가 저속인 2.5m/s에서 0.52의 μ_{sd} 를 나타내어 가장 높은 마찰계수와 마멸지수를 나타내는 반면, 0/90°의 경우 두 번째 layer가 마찰방향과 탄소섬유 배향 방향이 동일하기 때문에 탄소섬유에 인장응력이 작용하게 되어 보다 낮은 μ_{sd} 값 0.33를 갖는다. 0/45/90/-45°의 경우 두 번째 layer는 마찰방향과 탄소섬유 배향 방향이 45°를 이루기 때문에 탄소섬유에 인장응력과 굽힘응력이 동시에 작용하게 되어 μ_{sd} 는 0.35을 나타내었으며 마멸지수 또한 0/90°와 큰 차이를 보이지 않았다. 마찰속도가 상대적으로 고속인 5.0 m/s인 경우에도 저속의 경우와 거의 유사한 경향을 나타내었다.

3.3. 탄소섬유/에폭시 복합재료의 마찰 단면 관찰

탄소섬유의 배향 및 적층방향과 마찰 면의 마찰 각에 따른 복합재료의 마찰면을 SEM으로 관찰하여 Figures 5와 6 및 7에 나타내었다. 먼저 적층방향과 상대마찰면이 수직인 경우, 탄소섬유가 0/90°으로 배향된 탄소섬유/에폭시 복합재료 즉, 마찰면에 수평인 탄소섬유가 2주기로 배열되어 있는 복합재료는 탄소섬유와 마찰방



(a)



(b)

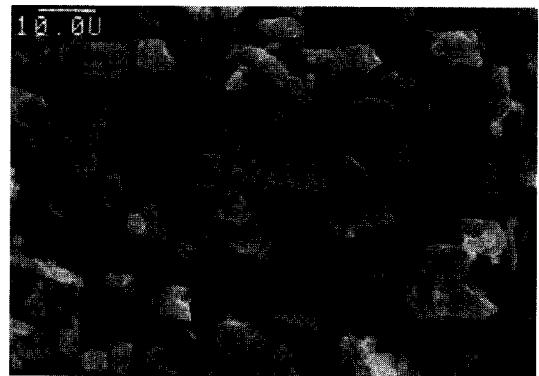
Figure 6. SEM micrographs of wear track for 0/45/90/-45° lay-up carbon fiber/epoxy composites; (a) normal, (b) parallel.

향이 직각이 되어 굽힘파단으로 인하여 심하게 파단된 탄소섬유의 모습과 더불어 물질 이착막이 형성되어 있음을 확인할 수 있었으며, 마찰면에 수평인 탄소섬유가 3주기로 배열되어 있는 0/45/90/-45° 복합재료의 탄소섬유도 0/90°에 비해 상대적으로 파단섬유가 적었지만 유사한 형태의 마모 면을 나타내고 있었다. 반면 0/0°의 경우 탄소섬유와 마찰면과의 각이 수평인 탄소섬유는 존재하지 않기 때문에 굽힘파단에 의해 부러진 탄소섬유가 관찰되지 않았다. 적층방향과 상대 마찰면이 수평인 경우 탄소섬유에 굽힘응력만이 작용하는 0/0°의 경우 굽힘파단이 일어나 심하게 마멸된 파단섬유를 확인할 수 있었다. 반면 0/90°의 경우 탄소섬유에 인장응력이 작용하여 연마된 섬유가 주로 관찰되었으며, 0/45/90/-45°의 경우 굽힘응력과 인장응력이 작용하여 연마된 섬유와 파단섬유를 동시에 확인할 수 있었다.

4. 결 론

탄소섬유/에폭시 복합재료에서 적층 탄소섬유 방향과 마찰 면의 관계 및 이들 탄소섬유의 배향성이 마찰거동에 미치는 영향을 연구한 결과 이들은 탄소섬유/에폭시 복합재료의 마찰특성에 큰 영향을 미침을 확인할 수 있었다.

적층방향과 마찰 면이 수직인 경우 0/90°, 0/45/90/-45° 및 0/0°의 순으로 마찰계수(μ_{s1})와 마멸지수가 높게 나타난 반면 마찰면과 수평인 경우 0/0°과 0/45/90/-45° 및 0/90°의 순으로 마찰계수와 마멸지수가 높은 값을 가짐을 확인할 수 있었다. 이러한 현상은 마찰시 불연속적인 탄소섬유/에폭시의 배향된 탄소섬유와 상대 마찰면이 이루는 각이 수직인 경우가 수평에 비해 delamination이 일어



(a)



(b)

Figure 7. SEM micrographs of wear track for 0/0° lay-up carbon fiber/epoxy composites; (a) normal, (b) parallel.

나기 어렵기 때문이다. 적층방향이 상대 마찰면에 수평인 경우 탄소섬유의 배향 방향과 마찰방향인 힘의 작용방향에 따라 각기 다른 마찰특성을 갖는다. 탄소섬유 배향이 동일한 경우(0°) 탄소섬유에 미치는 힘은 인장력이 작용하며, 동일한 방향이 아닐 경우(45°, 90°) 굽힘응력이 작용하여 0/0°에 비해 작은 마찰계수와 마멸지수를 나타냄을 알 수 있었으며 마찰속도에 따라 마찰계수는 영향을 미치지 못하는 반면 마멸지수는 비례관계가 있음을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 특장기초연구지원(96-01-02-06-01-3)에 의하여 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. M. Mardiguian, Interference Control Technologies Ind. Gainesville, Virginia, (1986).
2. R. A. Stonier, *J. SAMPE*, **27**, 9(1991).
3. D. Ra, B. Yoon and H.J. Kang, *Polymer(Korea)*(in press).
4. Tsukizoe, T. and Ohmae, N., "Friction and wear of advanced composite materials", *Fibre Sc. Tech.*, **18**, 265(1983).
5. J. K. Lancaster, Polymer based bearing materials, the role of fillers and reinforcement, *Tribology*, **5**, 249(1972).
6. M. W. Pascoe, Plain and filled plastics materials in bearings: a review, *Tribology*, **6**, 184(1973).

7. R. P. Steijn, Friction and wear plastics, *Met. Eng. Q.*, **7**, 9 (1967).
8. Sung, N. and Suh, N. P., "Effect of fiber orientation on friction and wear of fiber reinforced polymeric composites", *Wear*, **53**, 129(1979).
9. Giltraw J. P. and Lancaster J. K. "The role of the counterface in the friction and wear of carbon fiber reinforced thermosetting resins", *Wear*, **16**, 359(1970).
10. E. Rabinowicz, Friction and wear of materials, Wiley, New York, (1965).
11. Sung, N. and Suh, N. P., "An overview of the delamination theory of wear," *Wear*, **44**, 1(1977).
12. H. H. Shim, O. K. Kwon, "탄소섬유 복합재료의 마찰 및 마모특성," *J. Society of Lubrication Engineers*, **5**, 95(1989).