

<論 文>

탄소 섬유/에폭시 복합 재료의 마찰 및 마멸 성질에 미치는 습도 및 구조의 영향

심현해* · 권오관* · 윤재륜**

*한국과학기술연구원

**한국과학기술원

Effects of Humidity and Structure on Friction and Wear Properties of Carbon Fiber/Epoxy Composites

Hyun Hae Shim*, Oh Kwan Kwon*, Jae Ryoun Youn**

**Korea Institute of Science and Technology*

***Korea Advanced Institute of Science and Technology*

Abstract—Friction and wear behavior of a unidirectional high modulus carbon fiber reinforced epoxy composite exposed to high and low humidity was experimentally examined with various sliding speeds.

The results show that the moisture at the sliding surface greatly influences friction and wear properties of the composite. It is also discovered that the difference in friction and wear behavior between samples with different fiber orientations is mainly due to the anisotropic properties caused by the microstructure of oriented graphite crystals in the carbon fibers and the macrostructure of fiber orientation in the matrix.

1. 서 론

탄소 섬유/고분자 복합 재료의 마찰 및 마멸에 대한 여러 연구들이 발표되어 있다<1-6>. 이들 중, 일방향 고탄성계수 탄소 섬유(high modulus, type I)/에폭시 복합 재료의 마찰 및 마멸 특성에 관한 본 저자들의 연구도 윤활 학회지에 게재된 바 있다<6>. 고탄성계수 탄소 섬유는 섭씨 2500도 이상에서 제조되는데 이때에 탄소 원소들이 흑연 결정 구조로 배열되는 것으로 알려져 있으며, 흑연 성분을 가지므로 흑연 섬유라고도 불리운다. 그때의 실험들은 실내 공기 중에서 시행되었는데, 마찰 및 마멸 성질들이 다소 큰 편차를

나타내었다. Savage의 연구에 의하면<7>, 흑연의 좋은 내마멸성은 흑연에 존재하는 미량의 수분에 의존하는 것으로 알려져 있다. J.P. Giltrow<5>은 온도의 영향에 대한 연구를 보고하였는데, 0.5 m/s의 비교적 저속에서 실험한 결과, 상대 마찰면 재료의 전체 온도(bulk temperature)가 100°C 이상일 경우 고탄성계수 탄소 섬유 복합 재료의 마멸율이 급격히 증가하여 고강도 탄소 섬유(high strength, type II) 복합 재료에 비해 우월한 내마멸성이 사라졌다. 이러한 결과에 대하여, 그는 고탄성계수 탄소 섬유 내의 수분이 온도의 증가에 따라 점차 증발되기 때문인 것으로 결론짓고 있다. 마찬가지로, 본 저자들에 의한 앞서의 연구에서 사용된 고탄성계수 탄소 섬유의 마찰 및 마멸 성질들이 다소 큰 편차를 나타낸 것은 날씨에 따른 습도의 변화에 상당히 큰 영향을 받은 것으로 사료되었으며, 이에 따라, 본 연구에서는 극단적인 두 경우의 습도와

이 연구는 한국과학재단 연구비 지원 및 한국과학기술연구원의 연구지원에 의해 수행되었으며, 이에 관해서 관계자 제위께 깊은 감사를 드린다.

변화된 마찰 속도 하에서의 고탄성계수 탄소 섬유/에폭시 복합 재료의 마찰 및 마멸 성질을 조사하고 고찰하였다.

2. 실험

2-1. 재료

탄소 섬유/에폭시 복합 재료는 프리프레그(prepreg)의 섬유들이 일방향으로 되도록 여러 겹 적층한 후 이를 가압 가열 경화하여 제작하였다. 이 판재는 4.5 mm × 5.5 mm × 10 mm의 직육면체 핀들로 기계 가공되었으며, 이들은 섬유의 마찰면과 마찰 방향에 대한 위치에 따라 세 가지로 구분되었다. Fig. 1과 같이 섬유들이 마찰면과 마찰 방향에 평행이면 길이 방향(Longitudinal), 섬유들이 마찰면과 평행이나 마찰 방향과 직각이면 횡단 방향(Transverse), 섬유들이 마찰면과 수직이면 수직 방향(Normal)이다.

상대마찰면(counterface) 재료는 스테인레스강(SUS 304)을 사용하였으며, 외경 70 mm, 두께 7 mm의 원판으로 기계 가공하였다. 마찰면은 600 grit의 실리콘 카바이드(SiC) 연마지를 이용하여 흐르는 물에서 무방향성으로 연마한 후 알코올과 헥산(Hexane)으로써 기름기를 제거하였다. 마찰면의 표면 거칠기는 Ra(center line average) 값이 0.04 μm 정도로 측정되었다.

2-2. 장치 및 조건

이 마찰 마멸 실험에 사용된 실험 장치는 Fig. 2에 나타난 바와 같은 핀-온-디스크(pin-on-disk) 형이었다. 마찰 실험은 공기 중에서 실시되었으며, 실험실 내의 공기 변동, 먼지 등의 영향을 줄이고 특히 상대 습도가 95% 이상과 5% 이하의 극단적인 두 조건으로 유지될 수 있도록 마찰 실험 장치는 아크릴로 만들어진 덮개로 씌워졌다. 95% 이상의 상대 습도는 덮개 안에 물 그릇을 넣어 유지하였으며, 5% 이하의 상대 습도는 건조제인 실리카 겔을 넣어 유지하였다.

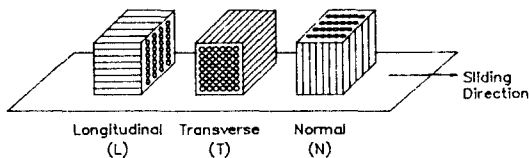


Fig. 1. Three fiber orientations of unidirectional composites with respect to sliding direction.

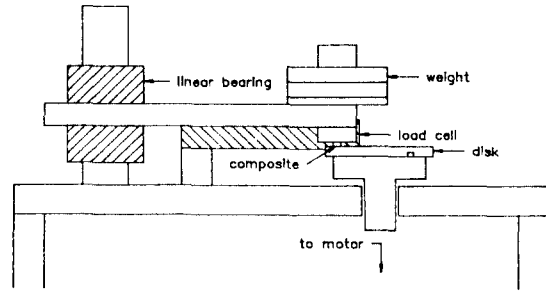


Fig. 2. Schematic diagram of the pin-on-disk set-up used for friction and wear tests in the experiment.

실험 전후의 복합 재료 시편의 무게를 0.01 mg까지의 정밀도를 갖는 전자저울로 측정하여 마멸양을 얻었다. 마찰력은 스트레인 게이지형의 로드 셀과 전압 증폭기, IBM-PC 등에 의하여 계속적으로 기록되었다. 마찰면의 중앙으로부터 1 mm 깊이의 온도를 측정하기 위하여 복합 재료 시편의 옆면으로부터 마찰면에 1 mm 차이로 평행하게 마찰면의 중심축까지 드릴 구멍을 뚫고 열전쌍선(thermocouple wire)을 심었으며, 구멍 내의 잔여 공간은 에폭시로 채웠다. 마찰 실험 부하 조건은 수직 하중을 19.6 N으로 고정하였으며, 마찰 속도는 마찰 계수 측정을 위하여 0.007 m/s, 그리고 마찰 계수와 마멸양을 측정하기 위하여 0.5, 1.25, 2.5, 3.75, 5 m/s로 변화시켰다.

3. 결과 및 고찰

각각의 복합 재료의 섬유 방향과 상대 습도에 대하여, 마찰 속도의 변화에 따르는 정상 상태의 복합 재료의 마멸 지수(wear factor), 마찰 계수, 그리고 마찰 온도는 각각 Fig. 3부터 Fig. 5까지와 같은 결과를 나타내었다. 마멸 지수, K는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$K = \frac{V}{LS}$$

여기서 V는 마멸된 부피, L은 수직 하중, S는 마찰 거리이다.

습도가 높거나 속도가 낮을 때에는 복합 재료 마찰면으로부터 마멸된 입자들이 상대마찰면에서 이전 되어 붙은 얇은 막(물질 이착막 : wear transfer film)이 형성되었으나, 습도가 낮고 마찰 속도가 높아짐에

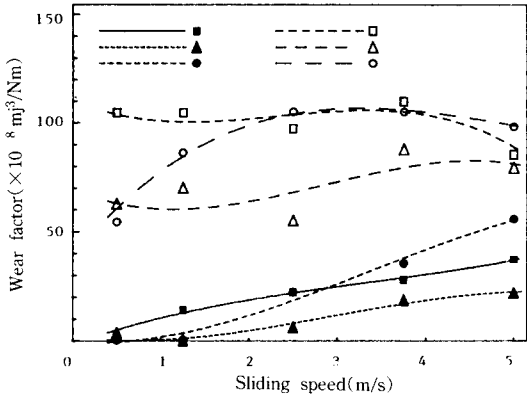


Fig. 3. Wear factors of the composite varying with sliding speed for each humidity and fiber orientation. (■ high hum. and longi., ▲ high hum. and transv., ● high hum. and normal., □ low hum. and longi., △ low hum. and transv., ○ low hum. and normal)

따라 수직 방향의 경우는 상대마찰면 마찰 트랙의 거의 전체면이 마찰 방향으로 흠들이 파이며 심한 손상을 받았으며, 속도가 더 높아짐에 따라 길이 방향, 횡단 방향의 경우도 상대마찰면이 부분적으로 손상을 받았다.

Fig. 3의 마멸 지수 결과에 보면, 습도가 낮을 때의 마멸 지수들은 습도가 높을 때보다 뚜렷하게 높은 값을 보이고 있으며, 이는 마찰 접촉부에서의 복합 재료의 마멸 현상에 수분이 크게 영향을 미치고 있음을 말해준다. 이는 서론에서 언급된 흑연의 수분에 의존하는 내마멸 특성이 흑연 결정 구조를 갖는 탄소 섬유를 보강재로 갖는 복합 재료에서도 지배적으로 작용하였음을 의미한다.

또한, Fig. 3에서 습도가 높을 때에도 마찰 속도가 증가함에 따라 마멸 지수가 증가하였다. 이 현상을 설명하기 위하여, 마찰면에서의 마찰 온도 상승에 대하여 언급하는 것이 도움이 될 것이다. Fig. 5는 마찰 속도의 상승에 따르는 복합 재료 시편 마찰면의 중심으로부터 깊이 1 mm 정도에서 측정된 시편의 온도 상승을 나타내고 있다. 마찰 온도 이론(8~9)에 의하면, 실접촉 마찰면에서의 온도 상승은 Fig. 5의 온도 증가와 같은 경향이며 증폭된 모습으로 나타날 것이다. 그러므로, 마찰 속도가 증가함에 따라 마찰면에서 온도의 증가와 함께 수분의 증발로 인하여 낮은 습도 때와 같은 효과를 나타내어 마멸 지수가 증가한다고

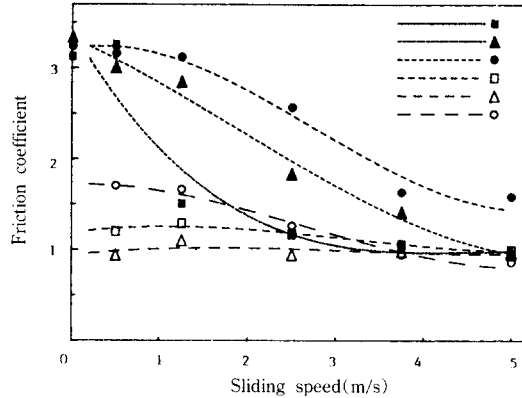


Fig. 4. Friction coefficients of the composite varying with sliding speed for each humidity and fiber orientation. (■ high hum. and longi., ▲ high hum. and transv., ● high hum. and normal., □ low hum. and longi., △ low hu. and transv., ○ low hum. and normal)

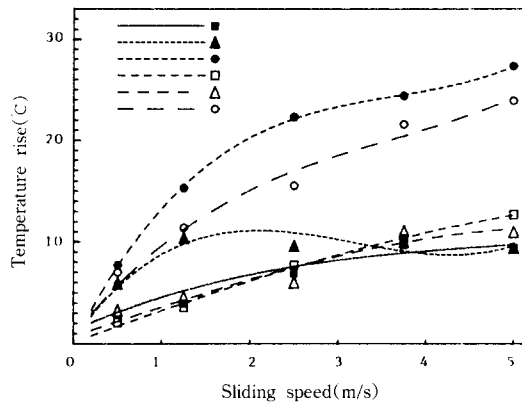


Fig. 5. Temperatures rise 1 mm beneath the center of composite friction surface varying with sliding speed for each humidity and fiber orientation. (■ high hum. and longi., ▲ high hum. and transv., ● high hum. and normal., □ low hum. and longi., △ low hum. and transv., ○ low hum. and normal)

볼 수 있다.

Fig. 3과 Fig. 4에 나타나 있듯이, 섬유 방향에 따른 마찰 및 마멸 성질에 차이가 나는 주된 원인들 중의 하나는 고탄성계수 탄소 섬유 내의 흑연 결정 배열에 따르는 기계적 성질들의 이방성에서 찾을 수 있을 것이다(10~11). 흑연 결정은 육각형의 단위면들이

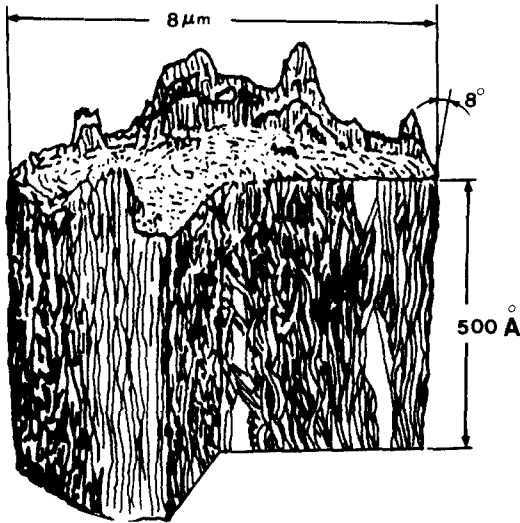


Fig. 6. Schematic three-dimensional structure of carbon fiber.

평행으로 놓여 있다. 이 결정면에 평행한 방향으로의 전단 탄성계수는 4.5 GPa인 반면 인장 탄성계수는 1060 GPa이다. 고탄성계수 탄소 섬유 내의 흑연 결정면들은 Fig. 6에 나타난 바와 같이 대체로 섬유의 중심선에 평행하고 원주 방향으로 동심원을 그리듯 배열되어 있다. 한편, Feng(10) 등에 의하면 흑연이나 이황화 몰리브데늄과 같은 판상의 고체들은 마찰을 받으면서 그들의 결정면들이 마찰면에 평행하게 마찰 방향으로 선택적 배열된다고 하며, 이 실험에서의 상대마찰면에 생성된 물질이착막 표면에 있는 흑연 결정면들도 마찰면에 평행하게 배열되어 있을 것이다. 이에 따라, 횡단 방향과 길이 방향의 경우 탄소 섬유 내의 흑연 결정면들이 마찰면에 평행으로 놓이기 쉬우므로, 마찰 계수와 마멸 지수도 비교적 낮게 나타날 것이 기대된다. 이는 길이 방향의 마멸에 대한 다음 단락에서 설명될 또다른 이유로 인한 예외를 제외하고는 Fig. 3과 Fig. 4의 마멸 지수와 마찰 계수의 결과에 잘 일치한다. 수직 방향의 경우 섬유 내의 흑연 결정면들이 마찰면과 수직으로 놓여 있어 마찰할 때 쉽게 전단되지 않을 뿐만 아니라 매우 경하게 작용할 것이므로 상대마찰면에 형성된 물질이착막을 긁어내기도 하고 나아가서 앞서 설명되었듯이 상대마찰면에 손상을 입힐 것이다. 그 예로서, Fig. 7의 현미경 사진은 수직 방향의 경우의 상대마찰면에 형성된 물질이착막이 섬유들의 모서리에 의해 굽힌 홈들이 굽고 많음을 볼 수 있으며, 이들로부터 떨어져 나온, Fig. 8의 현미경 사

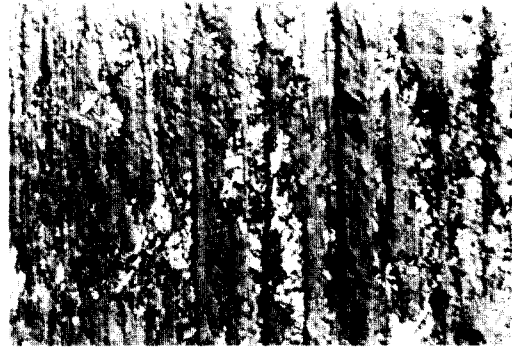


Fig. 7. Micrograph of the abrasion of transfer film on the counterface (disk) by the sliding contact with fibers orientated in normal direction.

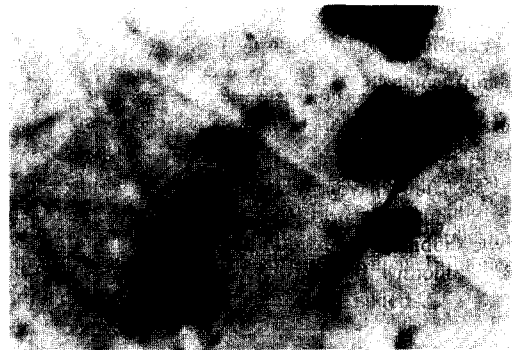


Fig. 8. Micrograph of cutting wear type wear debris, formed from the transfer film on the counterface, cut by fibers on the pin.

진에 나타난 바와 같은, 칩(chip) 형상의 마멸 입자들이 많이 생성된다. 따라서, 마찰 계수와 마멸 지수가 비교적 높게 나타날 것이 기대되며 여기에서도 저속에서의 마멸에 대한 예외를 제외하고는 실험 결과와 일치한다. 이 저속의 경우는 마찰 온도가 낮아 마찰면에 윤활에 필요한 최소한의 수분과 얇은 물질이착막을 유지할 수 있기 때문인 것으로 사료되며, 또한 이러한 결과들로부터, 흑연 결정면들이 마찰면에 수직으로 놓인 경우에 이들이 상대 마찰면에 대하여 경하게 작용하는 것은 수분이 윤활 작용을 할 만큼 충분하지 않을 때에 한함을 알 수 있다. 달리 말하면, 수직 방향 복합 재료일지라도 수분이 충분하면, 앞서 인용되었듯이 마찰면 위의 흑연 결정면들이 마찰면에 평행하도록 선

택적 배열을 할 수 있음을 알 수 있다.

섬유 자체의 미시적 구조에서 보면, 흑연 결정면과 마찰면이 평행이기 쉬운 점에서 길이 방향이나 횡단 방향이 크게 다를 바가 없을 것이다. 더욱이, 섬유 자체의 거시적인 기계적 성질에서 보더라도, 섬유의 인장 강도가 높으므로 길이 방향의 마찰로 인한 섬유의 인장 또는 좌굴 파단이 횡단 방향의 마찰로 인한 섬유의 굽힘 파단보다 잘 일어나지 않을 것이므로 마멸 지수도 낮아야 할 것이다. 실제로, Tsukizoe와 Ohmae의 보고(3)에 의하면, 고강도 탄소 섬유 복합 재료의 경우는 길이 방향이 횡단 방향보다 낮은 마멸 지수를 나타내었다. 이러한 독립된 관점들로부터는, 실제로의 실험 결과에 나타난 바와 같이 길이 방향이 횡단 방향보다 항상 높은 마멸 지수를 나타낸 사실이 설명되어지지 않는다. 이를 설명할 수 있는 논거는 마찰 온도, 흑연의 내마멸성 뿐만이 아니라 섬유 배열의 마찰 방향에 대한 이방성 등이 복합적으로 연계된 바탕에서 찾을 수 있다. 마찰 온도 이론에 의하면, 실접촉 마찰 길이가 길수록 실접촉부의 마찰 온도가 증가한다. 이 점에서 보면, 길이 방향의 경우는 섬유들과 마찰 방향이 같아서 횡단 방향보다 실접촉 마찰 길이가 길 가능성이 높으므로 실접촉부의 마찰 온도가 높아지고, 앞서 언급되었듯이 흑연의 내마멸 성능이 떨어진다. 따라서, 전체적으로 마멸 지수가 증가한다. 반면, 횡단 방향의 경우는 마찰 방향으로 섬유와 매트릭스가 교대로 있어 횡단 방향보다 실접촉 마찰 길이가 짧아 실접촉부의 마찰 온도가 길이 방향보다 낮으며 비교적 흑연의 내마멸 성능이 높다. 게다가, 마찰 방향으로 섬유와 매트릭스가 교대로 있어 이들의 마멸 입자들이 잘 섞이고, 이것이 움푹한 부분들을 메우며 전체 마찰면에 고르게 분포된 흑연 성분을 가지므로 전체 마찰면이 내마멸성을 갖는다.

따라서, 전체적으로 마멸 지수가 낮아진다. 이러한 설명은 수직 방향의 저속의 경우에도 적용될 수 있다. 즉, 수직 방향의 경우 마찰 방향으로 섬유들과 매트릭스가 교대로 배열되어 있는 점에서 횡단 방향과 같다.

Fig. 4의 마찰 계수 결과에서 보이듯이, 높은 습도일 때에 마찰 계수가 낮은 습도일 때보다 높다. 이는 양쪽 마찰면에 형성된 물질이착막에 함유된 수분에 의한 흡착 마찰 성분(adhesive component of friction)이 크게 작용하기 때문으로 사료된다. 게다가 습도가 낮을 때는 높은 마멸 지수에 비례하여 마멸 입자들이 발생하고, 이들은 흑연 성분을 가지므로 쉽게 전단하

며, 두 마찰면들의 직접 접촉의 기회를 줄여 마찰 계수를 줄이기 때문인 것으로 사료된다. 또한 Fig. 4에 의하면, 마찰 속도가 높아짐에 따라 마찰 계수가 낮아지고 섬유의 방향에 따르는 차이들도 줄어들며 습도의 영향도 줄어들어 거의 하나의 값으로 수렴한다. 이에 대한 가장 지배적인 이유는 마찰 속도와 함께 마찰 온도가 증가함에 따라 마찰면에서의 수분이 감소하여지고, 이에 따라 앞서 언급되었듯이 물질이착막의 응착 마찰 성분이 줄어들기 때문인 것으로 사료된다.

Fig. 4에 나타난 바와 같이, 수직 방향의 마찰 계수가 더 높은 이유는, 앞서서도 언급되었듯이 탄소 섬유 내의 흑연 결정면들이 상대마찰면에 수직으로 놓이게 되어 이들의 전단 저항이 클 것이고, 상대마찰면에 형성된 물질이착막이 수직으로 놓인 흑연 결정면들을 갖는 섬유들의 모서리에 의해 긁혀 떨어져 나가기 쉽기 때문에 이러한 일종의 쟁기질 마찰 성분(ploughing component of friction)도 더 크게 나타나기 때문일 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는, 일방향 탄소 섬유 에폭시 복합 재료의 마찰 및 마멸 성질에 미치는 습도 및 구조의 영향을 실험적으로 조사하였다. 그 결과와 섬유의 미세조직 및 복합 재료의 섬유 배열 등을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

일방향 고탄성계수 탄소 섬유의 마찰 및 마멸 특성은 :

1. 양 마찰면 내의 수분의 영향을 크게 받는다. 그리고, 마찰면 내의 수분 감소는 습도가 낮거나, 또는 마찰 속도와 함께 증가하는 마찰 온도 상승으로 인한 증발로 일어난다.

2. 탄소 섬유 내의 흑연 결정의 방향성에 따른 탄소 섬유의 미세구조적 이방성에 크게 영향을 받는다. 예를 들어, 섬유 내의 흑연 결정면들과 마찰면이 평행이기 쉬운 횡단 방향의 경우는 마찰 계수가 낮고, 섬유 내의 흑연 결정면들과 마찰면이 수직인 수직 방향의 경우는 전단 저항이 크므로 마찰 계수가 높다.

3. 마찰 방향에 대한 섬유 배열에 따른 거시구조적 이방성의 영향을 받는다. 예를 들어, 길이 방향의 경우는 섬유들과 마찰 방향이 같아 실접촉 마찰 길이가 횡단 방향보다 길 가능성이 높으므로 실접촉부의 마찰 온도도 더 높아지고 흑연의 내마멸 성능이 떨어져 마멸

지수가 높게 나타난다.

참 고 문 헌

1. Lancaster, J.K., "The Effect of Carbon Fibre Reinforcement on the Friction and Wear of Polymers", Brit. J. Appl. Phys., SER.2, Vol.1, 1968, pp.549-559.
2. Giltrow, J.P., "The Role of the Counterface in the Friction and Wear of Carbon Fibre Reinforced Thermosetting Resins", Wear, Vol.16, 1970, pp.359-374.
3. Tsukizoe, T. and Ohmae, N., "Friction and Wear of Advanced Composite Materials", Fibre Sci. Tech., 18, 1983, pp.265-286.
4. Sung, N. and Suh, N.P., "Effect of Fiber Orientation on Friction and Wear of Fiber Reinforced Polymeric Composites", Wear, Vol. 53, 1979, pp.129-141.
5. Giltrow, J.P., "The Influence of Temperature on the Wear of Carbon Fiber Reinforced Resins", ASLE Transactions, Vol. 16, pp.83-90.
6. 심현해, 권오관, 윤재분, "탄소 섬유 복합 재료의 마찰 및 마모 특성", 한국윤활학회지, Vol. 5, No. 2, 1989, pp.94~100.
7. Savage, R.H., "Carbon-Brush Contact Films", Gen. Elect. Rev. Vol. 48, 1945, pp.13-19.
8. Carslaw, H.S. and Jaeger, J.C., Conduction of Heat in Solids, 2 ed., Oxford University Press 1959.
9. Cook, N.H. and Bhushan, B., "Sliding surface Interface Temperatures", Journal of Lubrication Technology, Vol. 95, No. 1, 1973, pp.59-64.
10. Donnet, J.B. and Bansal, R.C., Carbon Fibers, Marcel Dekker, Inc., New York and Basel, 1984.
11. Fitzer, E., Carbon Fibers and Their Composites, Springer-Verlag, 1985.
12. Feng, I.M., "Lubricating properties of Molybdenum Disulfide", Lubr. Eng., Vol. 8, 1951, p.285.