

탄소섬유복합재의 표면개질에 따른 트라이볼로지 특성에 관한 연구

전승홍 · 양준호 · 오성모* · 이봉구*

원광대학교 대학원 기계공학과

*원광대학교 기계공학과

Tribological Characteristics of Carbon Fiber Reinforced Plastics by Surface modification

Seung-Hong Jeon · Jun-Ho Yang · Seong-Mo Oh* · Bong-Goo Rhee*

Graduate School Wonkwang University

*Department of Mechanical Engineering, Wonkwang University

Abstract - This investigation has been studied about friction and wear properties which were important problem, when carbon fiber reinforced plastic(CFRP) was used practically. Unidirection carbon fiber reinforced composites was fabricated with epoxy resin matrix and carbon fiber as a reinforced, and its surface was modified by the ion-assisted reaction. And then we tested the their friction and wear properties according to the ion-irradiation. when the amount of ion-irradiation was 1×10^{16} ions/cm², the friction coefficient values were about 0.1, where as, the friction coefficient values of non-treatment composites were about 0.16. The former was the stablest in wear mode. We know that ion-irradiation was not proportioned to the friction coefficient, so we found the optimal conditions of the friction and wear according to the ion-irradiation.

Key Words : Carbon Fiber Reinforced Plastics(CFRP). Ion-Assisted Reaction. Surface Modification. Wear Mode.

1. 서론

최근 여러산업에 쓰이는 기계요소들의 경량화가 요구되면서 각 소재의 특성을 살리면서 필요한 용도에 요구되는 특성을 지닌 첨단복합재료(Advanced Composite Materials)가 등장하였다. 이러한 복합재료는 고분자 기지(matrix)에 섬유를 보강하거나, 무기물 입자들을 충전하여 물리적, 화학적 물성을 개량할 목적으로 제조되며, 경량성, 성형성, 내식성, 내충격성, 내열성, 높은 비강도 및 피로

강도, 전기절연성, 이방성등의 중요한 특징을 지니고 있어 첨단산업인 우주항공분야, 선박, 자동차, 스포츠 용품, 전자제품, 통신분야, 의공학분야에 이르기까지 그 응용분야는 매우 다양하다[1-4].

첨단복합재료중 탄소섬유를 플라스틱 기지에 보강한 복합재료를 탄소섬유강화 복합재(Carbon Fiber Reinforced Plastics; CFRP)라고 하며, 이러한 CFRP의 기계적인 특성 및 마찰, 마모특성은 강화섬유의 재질, 구성, 함유량, 섬유방향(fiber orientation) 및 수지의 종류, 환경조건, 표면거칠기, 윤활여부,

미끄럼속도, 미끄럼거리 등 여러 복잡한 인자들에 의해서 그 특성이 좌우됨을 여러연구 결과에서 보이고 있다[2-5].

탄소섬유강화복합재(CFRP)의 일반적인 마찰계수는 약 0.16~0.21로 비교적 낮은 편이고, 섬유의 함유량이 증가함에 따라 마찰계수는 오히려 감소하고 마모선도도 비교적 안정되어 있으며, 마모 메카니즘에서 보면, 활주마멸(sliding wear)이 일어나 다량의 섬유의 절단현상과 이탈현상이 일어난다[5-6].

CFRP의 마찰특성은 상대마찰면으로의 침투성, 마찰면에 잔존하는 마모입자들의 수, 모재의 기계적 특성들에 의해서 좌우된다고 하였다. 그리고, 고분자재료들(polymeric materials)의 마찰계수는 수직 하중(normal load)과 미끄럼속도(sliding velocity)의 함수로서, 하중이 증가하면 열가소성(thermoplastic), 열경화성(thermosetting)에 관계없이 대부분 낮은 미끄럼속도에서도 낮은 마찰계수를 나타내고, 속도가 증가하면 마찰계수는 증가하나 오히려 어느 값 이상의 매우 큰 속도에서는 마찰계수가 속도증가와 함께 감소한다고 하였다. 또한 연속섬유(continuous fiber)로 이루어진 복합재의 마모특성은 주로 섬유의 마모율에 좌우된다는 연구결과와 함께, 이러한 복합재의 마찰거동은 일반적인 금속의 경우와 같이 표면갈림(plowing), 응착(adhesion), 돌기변형(asperity deformation)으로 설명할 수 있다고 하였다[8].

지금까지의 이러한 연구들은 대부분 CFRP 소재나 복합재료의 특성에 대한 연구였으나, 본 연구에서는 CFRP를 이온도움반응법(Ion-Assisted Reaction)으로 표면개질하여 실제 제품화 하여 사용할 때 문제가 되는 CFRP의 마찰·마모특성을 고찰하고자 하였다.

2. 실험방법 및 조건

2.1 실험시편

본 실험에 사용된 시편은 탄소섬유/에폭시 복합재료 (주)SK케미칼의 USN 150B형의 프리프레그(prepreg)를 핸드 레이업(Hand Lay-up)방법으로 적층하여 제작하였으며, 탄소섬유/에폭시 복합재료의 물리적성질은 Table 1과 같다. 탄소섬유/에폭시 복합재료 시편은 두께 2mm의 0° 일방향 시편으로 성형하였고, 시편제작에 이용된 오토클레이브(Autoclave)는 내용적이 600mm×800mm로, 압력을 가할 수 있으며, 2°C/min의 온도상승이 가능한 열제어식장치가 부착되어 있다. Fig.1은 오토클레이브(Autoclave)내의 온도와 압력, 시간을 나타내는 큐어링 사이클(Curing Cycle)이다.

성형한 복합재료는 다이아몬드 톱으로 잘라서 58mm×38mm×2mm의 크기로 제작하였고, 제작이 끝난 시편에 이온도움반응법을 이용하여 표면처리하였다. 처리시 질량유량 조절기(Mass flow controller)를 이용하여 복합재 표면에 4sccm의 산소를 흘려주고, 입사되는 Ar⁺ 이온은 중공 음극형 이온건(Hollow cathode type ion gun)을 이용하여 발생시켰으며, 이때 이온의 에너지는 1keV로 하였다. 표면에 도달하는 이온빔의 전류량은 페러데이 컵(Faraday cup)을 이용하여 측정 하였다.

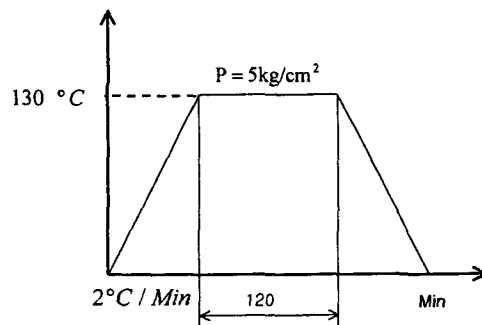


Fig. 1 Illustration of consolidation cycle.

Fig. 2는 본 연구에 사용된 이온도움반응법의 개략도이다. 시험편에 도달한 전체 이온량은 5×10^{15} ions/cm², 1×10^{16} ions/cm², 5×10^{16} ions/cm²로 각각 처리 하였다.

복합재의 상대마찰재로 SUJ-2(고탄소 크롬 베어링강)를 선정 한 이유는 스틸의 경도가 HRC가 65로 FRP보다 매우 높아 마모량이 적기 때문에 상대마찰재로는 적합하기 때문이다. pin의 한쪽 끝은 반구형태로 지름이 8mm이고, 길이는 58mm이며, 표면거칠기는 약 0.08 μ m이다.

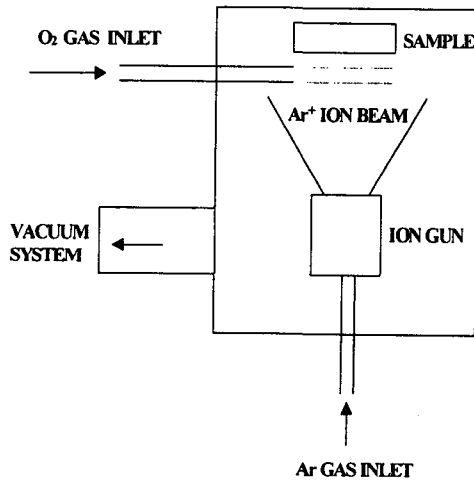


Fig.2 Schematic diagram for an ion irradiation.

Table 1. Material properties of carbon fiber/epoxy composites.

| | |
|------------------------------|------------|
| Tensile strength (GPa) | 1.61 |
| Tensile modulus (GPa) | 124 |
| Poisson ratio (ν) | 0.28 |
| Fiber content (Volume %) | 65 \pm 2 |
| Density (g/cm ³) | 1.59 |

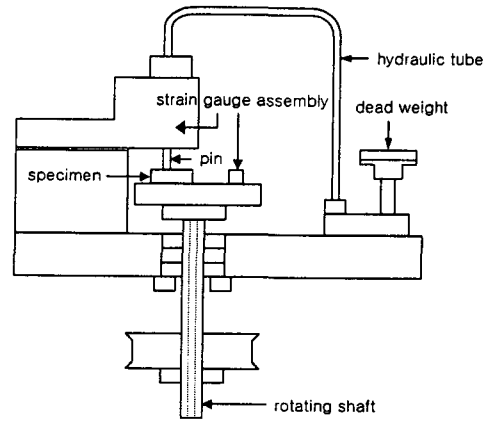


Fig. 3 Schematic diagram of test machine.

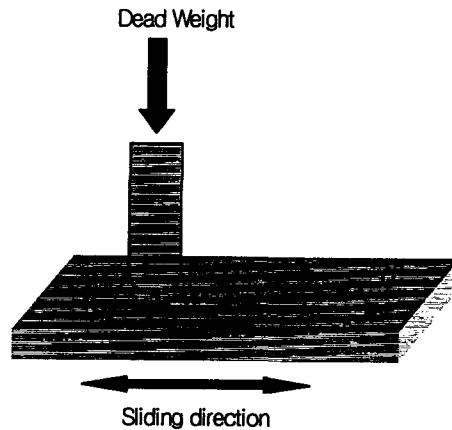


Fig. 4 Exploded view of Pin and Composites flat.

2.2 실험장치

본 연구에 사용한 실험장치는 변형된 핀은 플랫폼 마찰·마모시험장치로 시험부의 개략도를 Fig. 3에 나타내었으며, Fig.4에 핀과 복합재료판을 확대 도시하였다. 위의 핀시편(고정부)은 스틸볼(Steel-ball)이고 아래 플랫폼(왕복운동부)시편은 복합재이다. 마찰력과 마모깊이가 스트레인게이지(strain gage)와 선형위치미터(linear potentiometer)에 의해서 측정되며, 자중은 유압튜브를 통하여 압력으로 전달된다.

2.3 실험방법

실험은 건조상태에서 하였으며, 탄소섬유강화복합재의 각 코팅조건에 따라서 하중조건을 바꾸어 실험하였다. 미끄럼속도는 26cm/sec로 일정하게 하였고, 하중은 2bar와 2.5bar이며, 환경조건은 온도 26~36°C, 습도 30~45%로 유지하였다.

미끄럼방향은 섬유배열(0° 일방향)과 동일할 때 마찰·마모특성이 가장 우수한 결과를 보이므로[5], Fig. 4에 나타난 것과 같이 일방향시편과 같게 하였다.

실험시간은 미끄럼거리 500m까지를 기준으로 설정하였으며, 이것은 500m 이후의 마찰계수가 변동없이 일정한 정상상태(steady - state)를 유지하기 때문이다.

이와 같이 각 복합재료의 코팅조건과 하중변화에 대한 실험을 통하여 마찰·마모특성을 살펴보았다. 마찰특성은 마찰계수를 측정함으로써 나타내었으나, 마모특성은 탄소섬유강화 복합재의 경도가 압입시간(indentation time)의 함수이므로, 경도와 관련있는 마모계수로는 나타낼수 없다[8]. 따라서 마모계수 대신 미끄럼 접촉후 주사전자현미경을 사용하여 시편 표면의 마모경향을 분석하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 미끄럼거리에 따른 마찰·마모특성

동일하중(2bar)하에서 마찰·마모 실험을 한 결과, 미끄럼거리가 100m일때의 평균마찰계수를 Fig. 5에 나타내었다. 이온량이 1×10^{16} ions/cm²인 복합재료의 마찰계수가 가장 낮게 나타났으며, 실험초기의 시운전(break-in) 구간에서 다른조건 of 복합재료보다 마찰계수가 매우 안정적인 곡선을 그리며 낮아졌다.

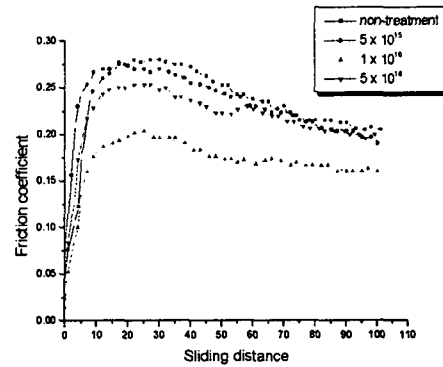


Fig. 5 Friction coefficient of carbon composites. (100m, 2bar, 26cm/sec)

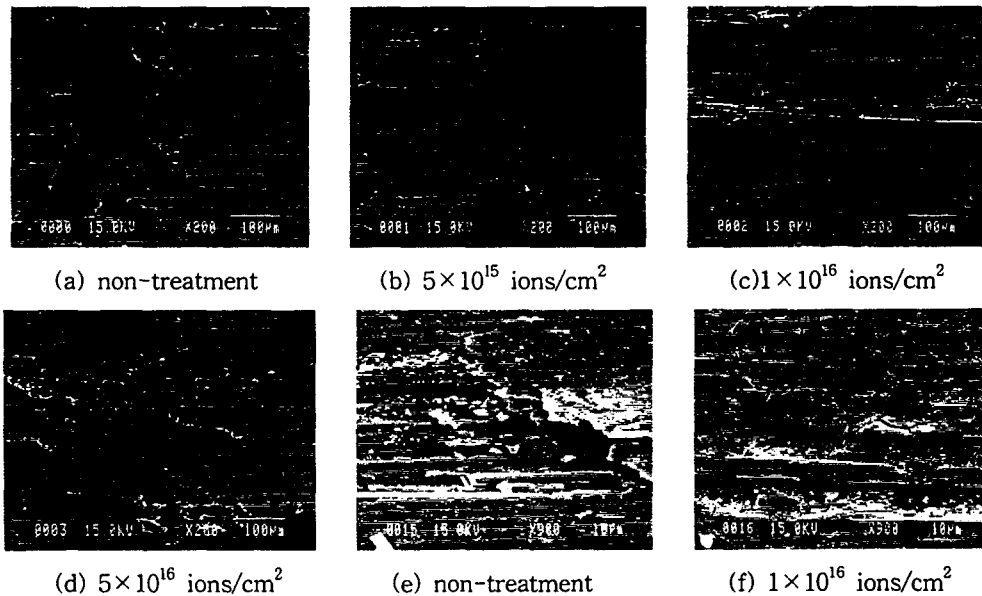


Fig. 6 SEM photographs of worn surface. (100m, 2bar, 26cm/sec)

이온량이 5×10^{16} ions/cm²인 복합재료의 마찰계수는 시운전 구간 초반에 5×10^{15} ions/cm²인 복합재료와 표면처리하지 않은 복합재료보다 조금낮지만 시운전 구간 후반에 가서는 거의 차이를 나타내지 않았다. 미끄럼거리 100m일때의 마모트랙 표면사진을 Fig. 6에 나타내었고, 마찰계수가 가장 낮은 1×10^{16} ions/cm²의 복합재료는 섬유부분이 거의 적출되지 않고 기지재로 대부분 덮혀있는 것처럼 마모의 정도가 가장 작았으며, 나머지 복합재료들은 거의 차이를 나타내지 않았다. Fig. 6(f)는 900배로 확대한 마모면으로 탄소섬유가 마모분으로 미세하게 덮혀있는데 반해서 Fig. 6(e)는 섬유의 이탈현상과 불안정한 마찰면이 관찰되어 마모의 정도가 상당함을 알 수 있다.

미끄럼거리 300m까지의 평균마찰계수를 Fig. 7에 나타내었으며, 마찰계수가 시운전 구간을 지나고 점차적으로 감소하여 정상상태로 가고 있음을 알 수 있었다.

Fig. 8의 마모사진에서도 마찰계수와 비례하여 이온양이 1×10^{16} ions/cm²인 복합재료가 섬유적출부분이 가장 작았고, 표면처리하지 않은 복합재료가 가장 심하게 마모되었으며, 5×10^{15} ions/cm²인 복합재료와 5×10^{16} ions/cm²인 복합재료는 마모의 정도가 비슷하였다.

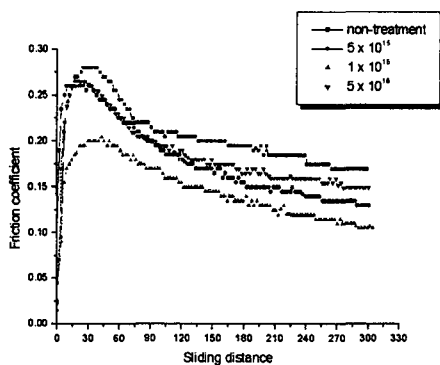
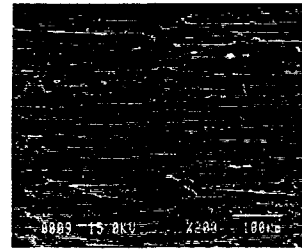
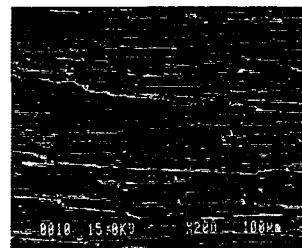


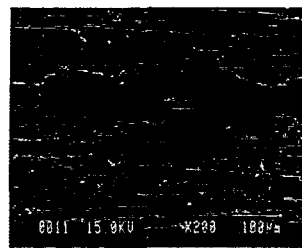
Fig. 7 Friction coefficient of carbon composites. (300m, 2bar, 26cm/sec)



(a) non-treatment



(b) 5×10^{16} ions/cm²



(c) 1×10^{16} ions/cm²

Fig. 8 SEM photographs of worn surface. (300m, 2bar, 26cm/sec)

마찰계수가 일정하게 유지되는 정상상태에서 표면처리한 복합재료와 비교할 때 처리하지 않은 복합재료의 마찰계수가 약 0.04-0.06정도 높게 나타났으며, 마찰계수와 비례하여 표면처리 되지않은 것의 마모정도도 상당하였다. Fig. 9와 Fig. 10은 이를 잘 설명해 준다. Fig. 10(d)에 나타난 바와 같이 탄소섬유가 확연히 보이며, 절단되어있으나, Fig. 10(e)에는 탄소섬유 대부분이 기지재로 덮혀있는 것을 볼 수 있다

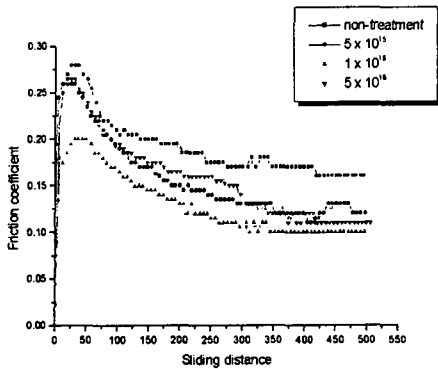


Fig. 9 Friction coefficient of carbon composites. (500m, 2bar, 26cm/sec).

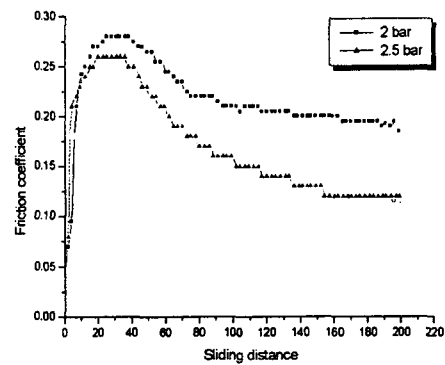


Fig. 11 Friction coefficient of carbon composites. (non-treatment)

3.2 하중변화에 따른 마찰·마모특성

Fig. 11, 12, 13, 14은 하중변화에 따른 마찰계수를 나타낸 것으로, 모두 2bar일 때 보다 2.5bar일 때 마찰계수가 더 작았다. 이러한 경향은 일반적으로 고분자재료가 금속과는 달리 점탄성(viscoelastic) 재료이므로, 미끄럼속도에 따라 특정한 하중조건에서 마찰계

수가 최대값을 나타내는 특성에 부합된다 [7-8].

하중의 변화에 따라서 마찰계수가 가장 크게 차이를 보이는 것은 표면처리하지 않은 복합재료이고, 이온량이 1×10^{16} ions/cm²의 복합재료는 0.02정도의 마찰계수 차이를 보였을 뿐이며, 특이한 것은 다른조건외의 복합재료와

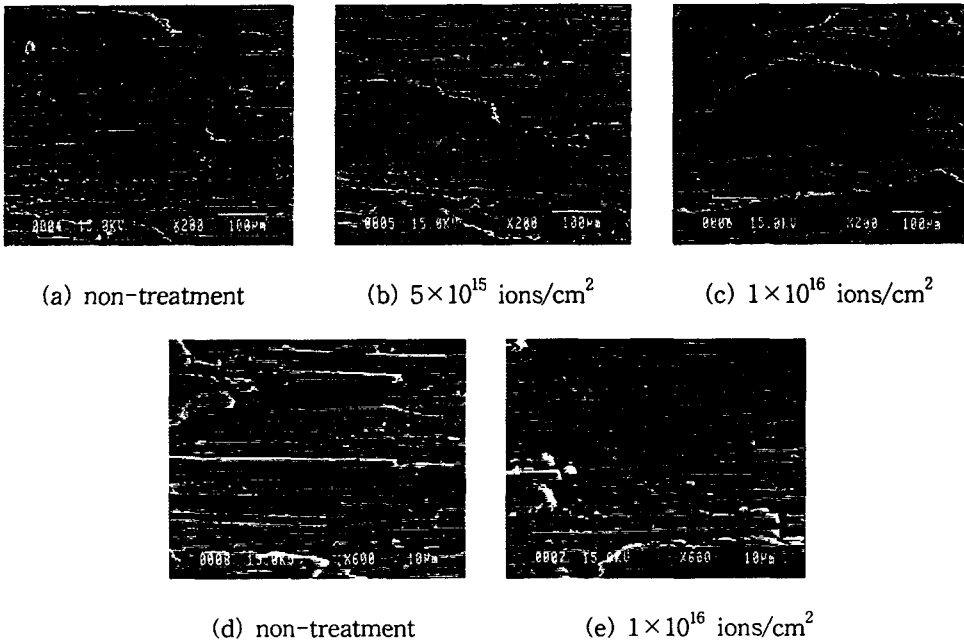


Fig. 10 SEM photographs of worn surface. (500m, 2bar, 26cm/sec)

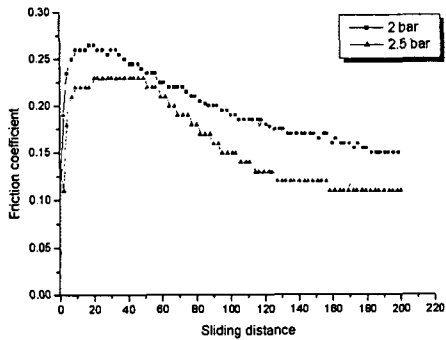


Fig. 12 Friction coefficient of carbon composites. (5×10^{15} ions/cm²)

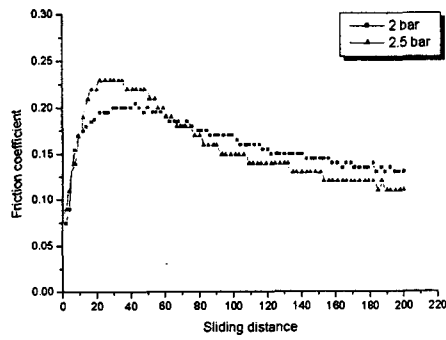


Fig. 13 Friction coefficient of carbon composites. (1×10^{16} ions/cm²)

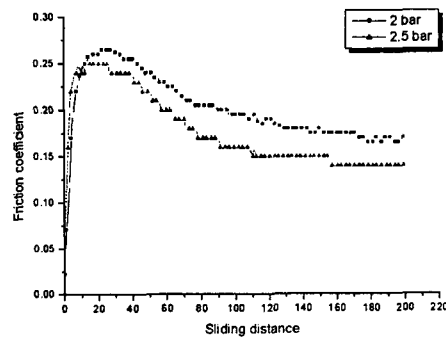
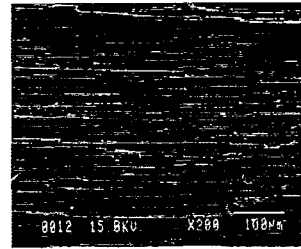
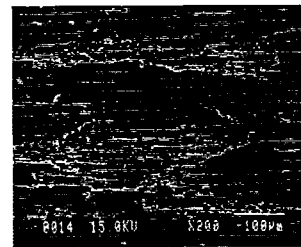


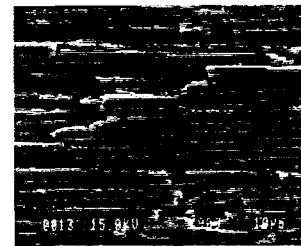
Fig. 14 Friction coefficient of carbon composites. (5×10^{16} ions/cm²)



(a) non-treatment



(b) 1×10^{16} ions/cm²



(c) non-treatment

Fig. 15 SEM photographs of worn surface. (200m, 2.5bar, 26cm/sec)

상이하계 미끄럼거리 약60m까지는 높은 하중에서 마찰계수가 높게 나타났다.

2.5bar하중에서 마찰계수는 미끄럼거리 약 200m일 때 정상상태에 도달하였고, 각 복합재료의 마모는 1×10^{16} ions/cm²의 복합재료만 적었으며, 나머지는 모두 마모의 손상이 심하였다. Fig. 15(c)에서 섬유 파단이 뚜렷이 보이며, 기지재로 덮혀있는 섬유부분이 적음으로 보아 마모가 심하였음을 알 수 있다.

4. 결 론

에폭시를 결합재로 하고 탄소섬유를 보강재로 하여 탄소섬유복합재를 제조하였고, 각 시편에 대하여 이온도음반응법으로 표면개질 하였으며, 각각에 대하여 마찰 및 마모특성을 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 표면처리한 복합재료의 마찰계수가 처리되지 않은 복합재료 보다 약 0.04-0.06정도 낮게 나타났으며, 이 중에서 이온양이 1×10^{16} ions/cm²의 CFRP가 마찰계수 0.1로 가장 낮게 나타났다.
2. 마모는 시운전 구간에는 심하게 일어나지만, 탄소섬유가 박탈과 마모됨으로 인해 탄소마모분이 고체윤활제 역할을 하여 마모가 저하 되었으며, 마찰계수가 낮은 1×10^{16} ions/cm²의 CFRP가 마모정도에서도 가장 작았다.
3. 탄소섬유복합재의 마찰특성과 하중관계는 비례하지 않지만, 2.5bar로 하중을 증가한 경우는 길들임 구간이 단축되어 정상상태에 빨리 됨으로 인해 마찰계수는 저하되었지만, 마모의 정도는 하중에 증가함으로 더욱 가중되었다.
4. 표면의 마모정도에서 이온양이 1×10^{16} ions/cm²인 복합재료는 들출된 탄소섬유의 거의 모든부분이 기지재로 덮혀있지만, 처리되지 않은것의 표면은 탄소섬유가 적출 및 박리되어 마모가 심하게 일어났음을 알 수 있다.

of Fiber Composites, Cambridge University Press, Great Britain, pp. 1-28, 368-373, 1992.

3. Karl-Heinz Zum Gahr, *Microstructure and Wear of Materials*, Elsevier science publishers B.V., Amsterdam, pp. 318-328, 461-477, 1987.

4. Klaus Friedrich, *Friction and Wear of Polymer Composites*, Elsevier science publishers B.V., Amsterdam, pp. 250-221, 241-253, 329-349, 1986.

5. 성인하 외 2명, "섬유강화복합재의 Tribological 특성에 관한 연구," 한국윤활학회지, Vol.12, No.1, pp.6-14, 1996.

6. Tsukizoe, T, and Ohmae, N., "Friction and Wear of Advanced Composite Materials," *Fibre Sci. Tech.*, Vol.18, pp. 205-221, 241-253, 1983.

7. A. D. Sarkar, *Friction and wear*, Academic Press., London, pp. 244-253, 1980.

8. N. P. Suh, *Tribophysics*, Prentice-Hall, INC., pp. 4, 223-257, 1986.

참고문헌

1. J. K. Lancaster, "The Effect of Carbon Fiber Reinforcement on the Friction and Wear of Polymers," *Brit.J.Appl. Phys.*, SER.2, Vol.1, pp. 549-559, 1968.
2. Tsu-Wei Chou, *Microstructural design*