

論文

2-D 탄소-탄소 복합 재료의 마찰, 마모 특성

신현규* · 오익현* · 이홍범* · 박종현* · 박현철* · 최우철* · 김광수*

The friction and wear properties of 2-D Carbon-Carbon Composites

Hyun-kyu Shin*, Ik-Hyun Oh*, Hong-Bum Lee*,
Jeong-Hyun Park*, Hyun-cheol Park*, Woo-Cheol Choi*, and Kwang-Soo Kim

ABSTRACT

This present paper reports the tribological properties of two dimensional carbon-carbon(C-C) composites, reinforced by PAN fiber, 8 H/S carbon fabric, and densified by pitch derived carbon. An experimental investigation was made of the effects of carbon fiber pregraphitization temperature, densification process parameters, kinetic energy loading, and friction surface morphology on the tribological properties of C-C composites. Experimental results indicate that graphitization temperature of carbon fiber, pressure application during densification process, fabric exposure on the frictional surface, and kinetic energy loading strongly affect both coefficient of friction and wear rate. It was also found that the friction coefficient decreases but wear rate increases with increasing kinetic energy loading. Furthermore, the wear rate and friction coefficient are strongly dependent not only on the PV(P:pressure, V:sliding speed) value but also on the kinetic energy loading. The influence of fabric filler exposed on the frictional surface was found to have a dominant effect on the coefficient of friction and wear rate.

초 록

본 연구에서는 석탄계 핏치에서 유도된 기지 탄소에 2차원 형태로 무질서하게 배열된 PAN계 탄소 섬유 및 탄소 직물이 보강된 탄소-탄소 복합 재료의 마찰, 마모 특성을 연구하였다. 연구의 목적은 탄소-탄소 복합 재료의 마찰, 마모 특성에 탄소 섬유의 흑연화 온도, 밀도화 공정 변수, 운동 에너지 및 마찰 면의 형태가 어떤 영향을 미치는지를 실험적으로 규명하는데 있다. 실험 결과 탄소 섬유의 흑연화 온도, 밀도화 공정 중 압력의 크기, 마찰 표면의 탄소 직물 노출과 운동 에너지는 마찰, 마모 특성에 큰 영향을 미치며, 특히 평균 마찰계수는 운동에너지 값이 증가할수록 감소한 반면, 평균 마찰계수 및 마모량은 PV(P는 마찰 면 압력, V는 상대 미끄럼 속도)값 및 운동에너지의 증가에 비례하여 증가하였다. 또한 마찰 면에 있어서 섬유 직물의 노출 면적이 증가할수록 마찰계수와 마모량은 증가하였다.

1. 서 론

탄소-탄소 복합 재료(Carbon-Carbon Compos-

ites)는 지속적으로 고온 내열성이 요구되는 첨단산업 분야의 필수적인 신 소재로서 그 제조 및 응용 기술은 일찍이 '60년대 말부터 미 공군과 미국 항공 우주국

(NASA)이 공동으로 우주개발용 내열 재료로 개발에 착수한 이래 우주, 항공, 및 방위 산업계에서 활발한 응용 및 연구가 진행 중이다. 특히 이 소재는 마찰 및 마모 특성과 열 충격 저항성이 탁월하여 이미 '70년대부터 전투기 및 대형 여객기 등의 탄소 브레이크에 장착 사용되어 오고 있을 뿐 아니라 발사체 분야의 로케 노즐 및 우주선의 고온 구조물, 제트 엔진 부품 등에 응용되고 있다[1].

탄소-탄소 복합 재료를 응용한 브레이크 디스크는 기존의 금속계 브레이크 디스크 보다 가벼우며 내산화성, 고온에서의 강도, 내 마모성등이 우수하며 브레이크 재료로서 가장 중요하다고 할 수 있는 마찰, 마모 특성이 우수하다는 장점을 가지고 있다.

일반적으로 마찰 재료(friction material)는 마찰 중에 발생하는 국부적인 높은 열로 인하여 구조 변화뿐만 아니라 물리 화학적 변화를 유발한다. 탄소-탄소 복합 재료의 마찰, 마모 과정은 Fig. 1에 표시한 바와 같이 제동이 시작 할 초기에(1~2초) 마모 조각이 마찰면 전체에 걸쳐 분포되며 국부적으로는 균일한 마모 필름(wear film)이 형성되며, 마찰이 계속 진행되면 물리적-열적 하중이 부가되어 마찰면의 마모 부서리기(wear debris)를 증가시키고 이 마모 입자의 용착으

로 인하여 마찰면에 균일한 필름이 형성된다[2]. 이러한 마찰 필름의 면적 및 두께는 제동 시간이 증가할수록 증가한다.

마찰, 마모 과정에서 가장 중요한 요소는 마모 입자에 의한 필름의 형성이며 이것은 마찰계수 및 마모 량의 감소에 중요한 역할을 한다. 또한 필름의 형성은 모재의 층구조에 의존하며, 접촉면에 계속적인 하중으로 인한 결함(crack), 구멍(pits)등과 소성변형 및 탄성 변형의 반복으로 필름의 층간 분리가 발생하게 되어 최종적으로 마모가 일어나게 된다. 이러한 일련의 과정은 탄소-탄소 복합 재료의 제조에 있어서 공정 변수의 차이에 기인한 물리/기계적 성질의 변화 및 제동 에너지 조건에 따라 매우 다른 경향을 보이기 때문에 아직까지도 탄소복합재의 마찰, 마모 거동을 체계적으로 설명할 수 있는 이론이 잘 정립되어 있지 않은 실정이다.

따라서 본 연구의 목적은 탄소 섬유가 2차원 형상으로 보강된 고밀도 탄소-탄소 복합 재료의 마찰, 마모 특성에 영향을 미치는 요소들; 즉, 밀도화 공정의 공정 변수(온도, 압력), 마찰면에 노출되는 탄소 섬유의 흑연화 온도 및 마찰 표면의 섬유 직물 노출 정도가 제동 에너지 크기 및 제동 조건 변화에 따라 어떠한 관계가 있는가를 규명하는데 있다.

2. 실험

2.1 탄소-탄소 복합 재료 시편 제조

본 실험에서 사용한 탄소-탄소 복합 재료는 보강재로 8 H/S PAN계 탄소 직물과 흑연화처리를 거친 PAN계 섬유 그리고 이들 섬유를 둘러싸고 있는 석탄계 피치로부터 유도된 탄소 기지로 구성되어 있으며, Fig.2의 공정흐름도에서와 같이 Green Body의 탄화 열처리 후 밀도화 공정 변수 중 압력의 영향을 규명하고자 진공함침 상압탄화공정(이하 VIAC 공정)과 가압함침탄화공정(이하 PIC 공정)의 밀도화 공정을 적용하여 시편을 제조하였다.

VIAC 공정은 진공상태(100mtorr 이하)에서 350℃까지 100℃/hr의 속도로 승온한 후 일정 시간 유지시킨 후, 상압의 질소 분위기에서 같은 승온속도로 1,000℃까지 승온한 후 일정 시간 유지하는 공정이다.

PIC 공정은 Green Body의 1차탄화체와 피치를 금속계 용기에 함께 넣고 가압탄화로(pressure carbonization furnace)에 장입한 다음 질소 가스를 수회

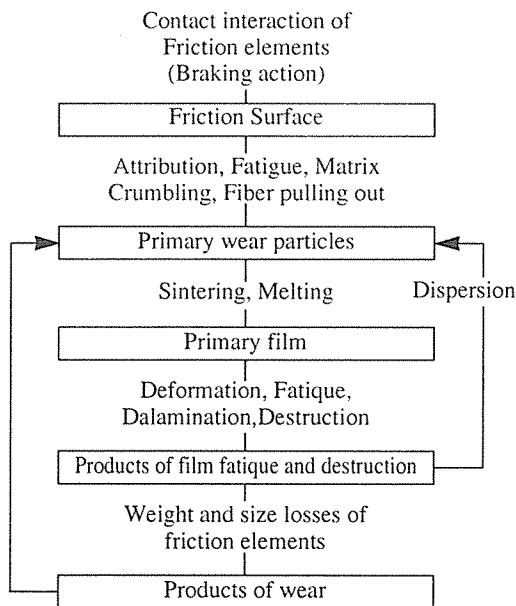


Fig. 1. Scheme of the processes taking place during friction of C-C composites.

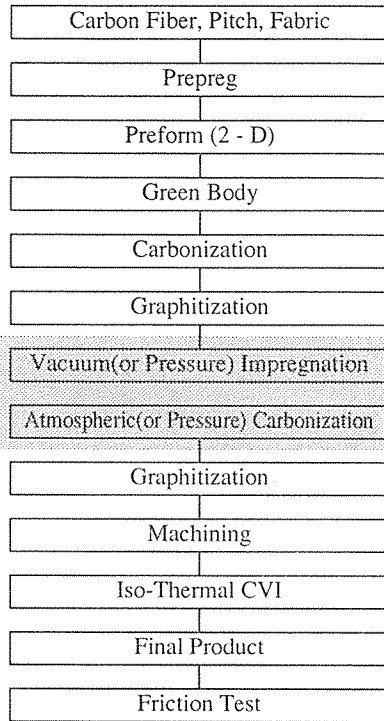


Fig. 2. The manufacturing process of C-C Composites.

주입한 뒤에 200℃ 까지 승온 후 질소 가스로 50기압 까지 가압한 상태에서 다시 600℃까지 승온한 뒤 600℃에서 1시간 유지시킨 후 상온으로 냉각 시켰다. 이때 반응이 진행되는 동안 온도 증가에 대한 가스의 부피 팽창 및 찢기의 휘발 성분의 발생으로 인해 가압탄화로 내부의 압력은 110기압까지 가압되었다.

Table 1. The different fiber graphitization temperature, densification process technique and fabric exposure on the friction surface of specimens

Type Process Technique	Sample						
	Type I	Type II-a	Type II-b	Type III-a	Type III-b	Type IV	Type V
Fiber graphitization Temp.(℃)	2000	2400	2400	2800	2800	2400	2400
The No. of C/C Composites Graphitization	2	4	2	4	2	3	3
The expose of fabric on the friction surface(%)	0	0	0	0	0	0	20-40
Manufacturing Process	VIAC	PIC	VIAC	PIC	VIAC	VIAC	VIAC

600℃까지의 PIC 공정 후 상압탄화 공정을 1,000℃에서 수행하였으며, 각각의 탄화 공정 후 2,000℃에서 흑연화 공정을 수행하였다. 이와 같이 제조된 시편의 종류를 Table 1에 나타내었다.

2.2 마찰, 마모 특성 평가

본 시험에서 사용된 마찰 마모 시험 기는 실제 항공기의 이/착륙시 하중 조건을 모사 할 수 있는 연구 시험용 소형 관성동력계(inertia dynamometer)로서 시험 조건은 축회전 속도, 마찰 압력, 브레이크 토크에 의해서 결정되며 마찰 시간(braking time)에 대한 마찰 토크(friction torque)의 특성, 마찰계수 및 안정성(stability), 제동 거리를 측정할 수 있으며, 실험의 에너지 조건은 Table 2에 나타내었다.

Fig. 3은 본 실험에 사용된 관성동력계 및 시편(ring-on-ring configuration)을 나타낸 것이며 시험 후 마찰계수는 다음 식에 의하여 구할 수 있으며, 시험 전 후의 두께 변화를 측정하여 마모 량을 구할 수 있다.

$$F = \frac{60 \times Abnch \times Kloss \times Knl}{\pi \times Pax \times Ravg \times Tavg \times Jin} \dots\dots\dots(1)$$

- where: $Abnch$: kinetic energy of test bench flyweights (designed friction work)
- $Kloss$: energy loss factor
- knl : coefficient of non-linearity of bench shaft rotation velocity alteration during braking
- Pax : axial load
- $Ravg$: average radius of friction
- $Tavg$: average times of braking for volume of testing
- Jin : bench shaft rotation speed when braking starts, rpm

$$Abnch = \frac{J \times (W)^2}{2} \dots\dots\dots(2)$$

where: J : moment of inertia of flyweights mounted on bench shaft

5종류의 시편(type I ~ V)을 각각 다른 에너지 조건에서 시험을 수행하였으며, type IV 시편의 경우는 Table 2의 모든 에너지 조건에서 시험을 수행하였다.

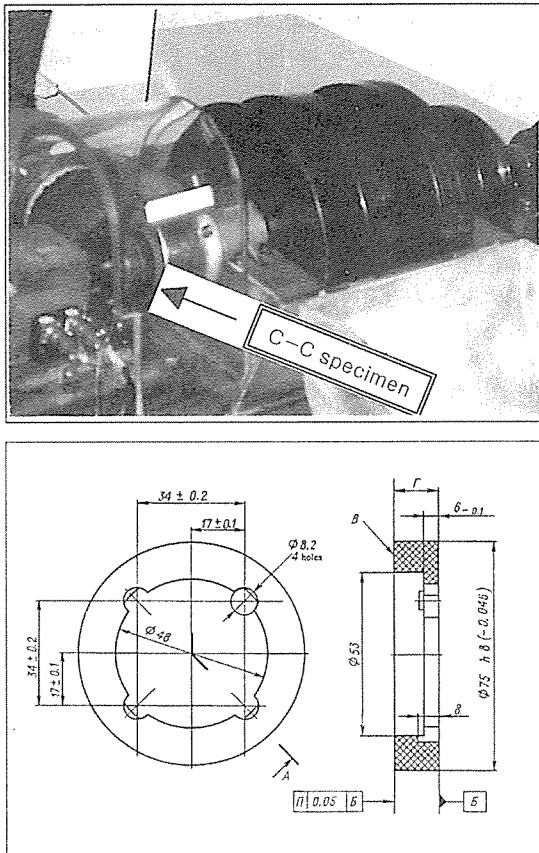


Fig. 3. Small friction dynamometer and schematic drawing of test sample

Table 2. Dynamometer test conditions

Relative Energy	Sample No.				
	Mode I	Mode II	Mode III	Mode IV	Mode V
Initial rpm(at zero time)	7000	6000	5000	4500	4000
Disk Interface Pressure(Kg/cm ²)	8.0	13.0	7.2	7.2	7.2
Kinetic Energy(KJ)	110	101	73.2	61.1	46.8
PV Value(×10 ⁴ Kgm ⁻¹ s ⁻¹)	188	261	120.7	108	96.5
Stop No.	50	50	50	50	50

2.3 미세구조 관찰

마찰 전후의 미세구조 관찰을 위하여 Nikon사의 HFX-DX 광학현미경(optical microscope)과 Hitachi사의 S-2150 주사 전자현미경(scanning electron microscope)을 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

각각 다른 공정으로 제조한 탄소-탄소 복합 재료의 밀도화 공정에 따른 밀도 증가율을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에 나타난 결과와 같이 밀도화 공정, 흑연화 처리 시점 및 횟수는 탄소-탄소 복합 재료의 밀도화에 중요한 역할을 함을 보여 주고 있다.

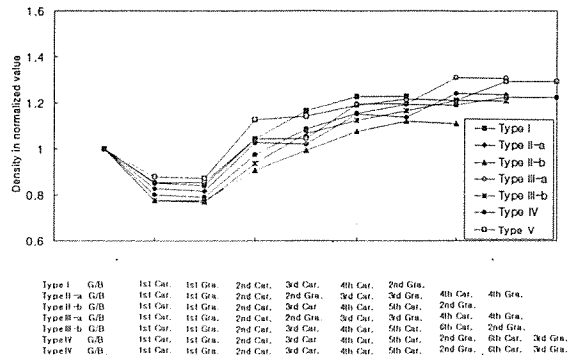


Fig. 4. The density change in normalized value of Type I ~ V according to densification process

각 시편에 대한 겉보기 밀도와 열전도도 값을 Table 3에 나타내었다. 흑연화 횟수가 증가할수록 열전도도는 비례적으로 증가하며 마지막 흑연화 처리는 열전도도에 큰 영향을 미침을 알 수 있다[3]. 또한 PIC 공정으로 밀도화 시킨 Type II-a, III-a는 다른 시편에 비해 수직과 수평 방향으로의 높은 열전도도 값을 가짐을 알 수 있다. VIAC 공정의 반복으로 밀도화 시켜 제조한 Type I, II-b, III-b, IV, V 시편의 경우는 상대적으로 낮은 열전도도 값을 보였으며, 특히 밀도가 감소할수록(Type II-b, V) 낮은 열전도도 값을 보인다.

Fig. 5는 시편의 마찰면에 수직인 방향으로 관찰한 광학현미경 사진으로 PIC 공정의 (b), (c) 경우는 10 ~ 50μm 정도 범위의 미세한 기공들이 일정하게 분포되어 있고 VIAC 공정으로 제조된 (a), (d), (e), (f)는 상대적으로 큰 기공들이 국부적으로 집중되어 있다.

Fig. 6은 각 시편 종류에 대한 마찰 마모 시험에서 전형적으로 볼 수 있는 마찰토크의 시간에 따른 그래프로 전반적으로 초기의 토크의 증가를 제외하고는 제동 시까지 안정한 마찰계수를 나타냄을 알 수 있다. 마찰계수의 안정성은 마찰 토크와 최대 마찰토크의 비로서 정의되며 그 값이 1에 가까울수록 안정

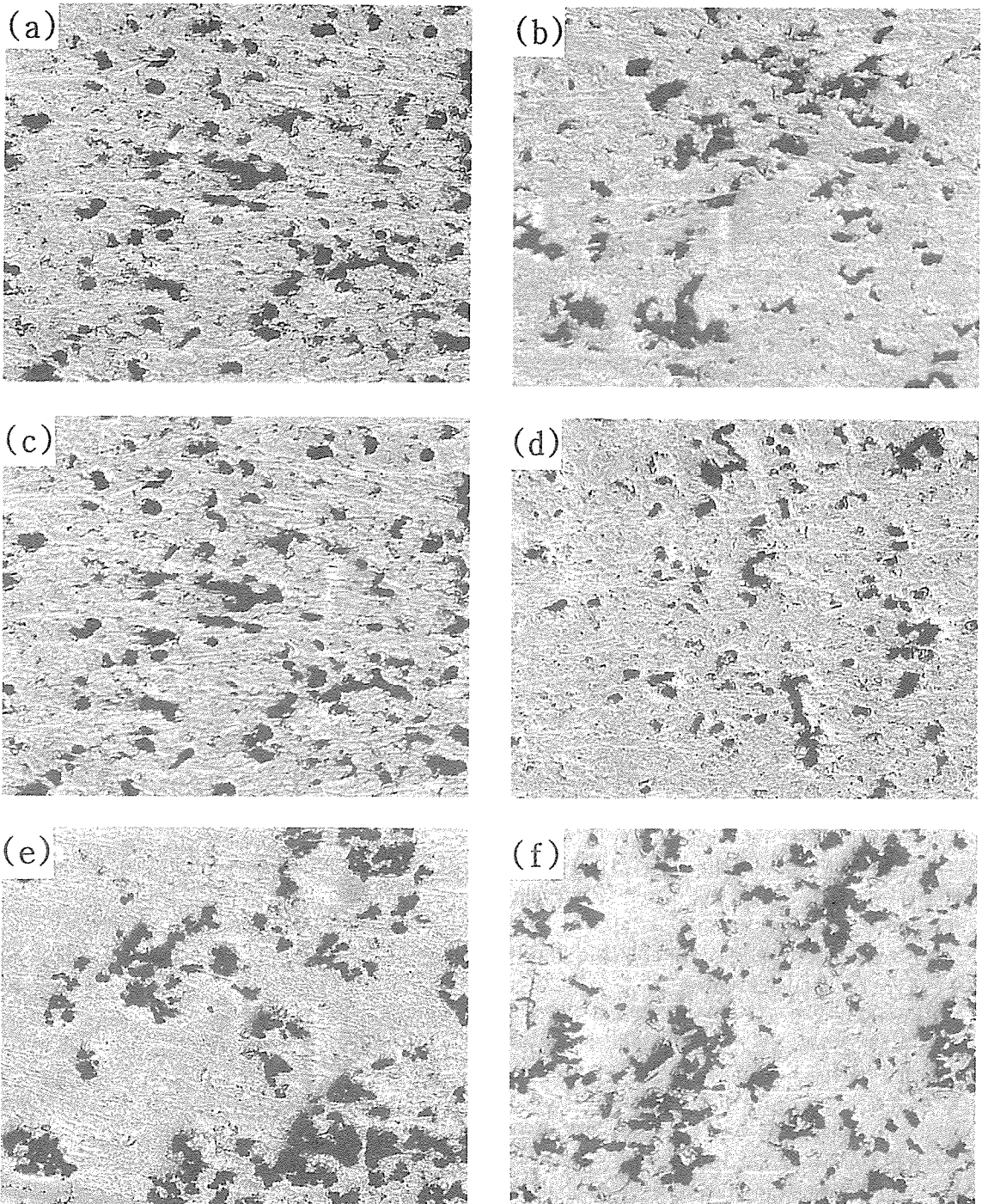


Fig. 5. Microstructure of C-C composites in cross sectional area (a) Type I , (b) Type II -a, (c) Type II -b, (d) Type III -a, (e) Type III -b, (f) Type IV

Table 3. Density and thermal conductivity of C-C specimens

	Type I	Type II-a	Type II-b	Type III-a	Type III-b	Type IV	Type V
Density(g/cc)	1.76	1.83	1.65	1.87	1.78	1.70	1.84
Thermal Conductivity(w/m.k)							
Normal to friction							
surface	24	29	17	29	27	20	31
Parallel to friction	84	95	60	97	91	69	74

성이 우수함을 의미한다.

Fig. 6에서는 PIC 공정으로 제조된 시편의 경우가 우수한 마찰 안정성을 보인다.

Fig. 7은 시편의 열전도도 값에 따른 마찰 특성을 나타낸 결과로서 시편의 흑연화 처리 횟수가 많을수록, 밀도 및 탄소 함유의 흑연화 온도가 높을수록 흑연화

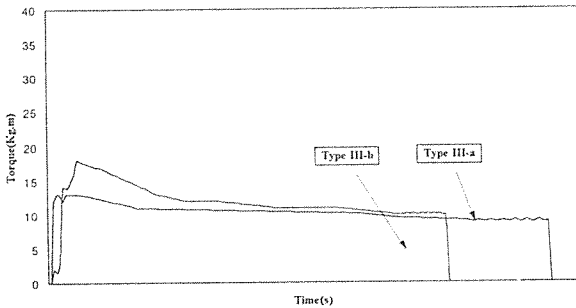


Fig. 6. The friction torque curve of Type III specimens

도와 crystallite의 크기가 증가하여 높은 열 전도도를 나타내므로 마찰 중 마찰면의 흑연 필름(graphite film)이 생성되어 흑연 층간의 미끄럼 효과(sliding effect)의 증가로 마찰계수가 감소한다[4].

Fig. 8-a는 VIAC 공정(Type I, II-b, III-b)과 PIC 공정(Type II-a, III-a)으로 제조된 시

편을 마찰, 마모 실험을 수행한 결과로서 PIC 공정으로 제조된 경우가 전반적으로 마찰계수 및 마모율이 작은 값을 보이며, 특히 섬유의 흑연화 온도가 높을수록 그 효과가 큼을 알 수 있다. Fig. 8-b는 시편의 밀도화 공정 차이에 대한 마찰 마모 특성과 PV 값과의 관계성을 보여주는 결과로 PIC 공정으로 제조된 시편의 경우 PV 값의 증가에 대하여 마찰계수 및 마모율은 거의 일정함을 보여주는 반면에 VIAC 공정으로 제조된 시편의 경우 마찰계수는 변화가 적으나 마모

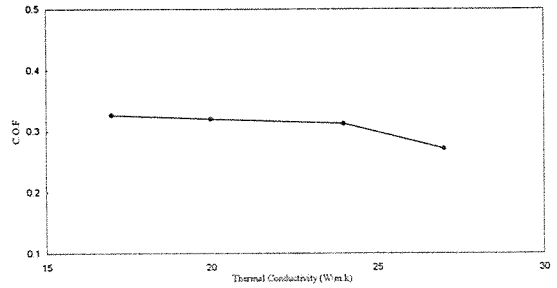


Fig. 7. Coefficient of friction and wear rate as a function of thermal conductivity

량이 크게 증가함을 알 수 있다. 이 결과는 Fig. 9의 마찰 시험 후 마찰 면의 미세구조 사진으로부터 관찰할 수 있는 바와 같이 PIC 공정으로 제조된 시편의 경우, VIAC 공정에 의한 시편에서 관찰되는 분말 형태의 마모 입자(particulated debris)와는 달리, 안정한 마찰 필름 형성에 유리한 판형의 마모 입자(plate-like debris)가 형성된 것에 기인한 것으로 이는 PIC 공정 중에 탄소의 구조적 배향성이 좋은 메조 페이스 핏치의 형성 때문이라고 생각된다.

Fig. 10-a는 탄소 함유의 열처리 온도에 따른 탄성 계수(elastic modulus)를 나타낸 것으로 열처리 온도가 2,000℃에서 2,800℃로 변함에 따라 234GPa에서

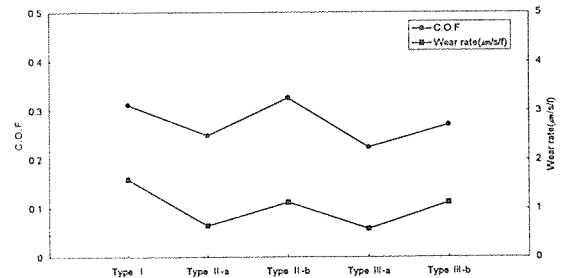


Fig. 8-a. Coefficient of friction and wear rate of Type I, II, and III

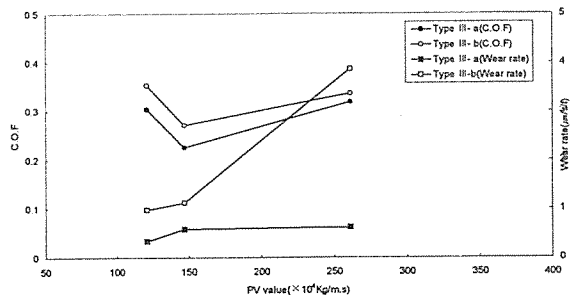


Fig. 8-b. Coefficient of friction and wear rate of C-C specimens as a function of PV value

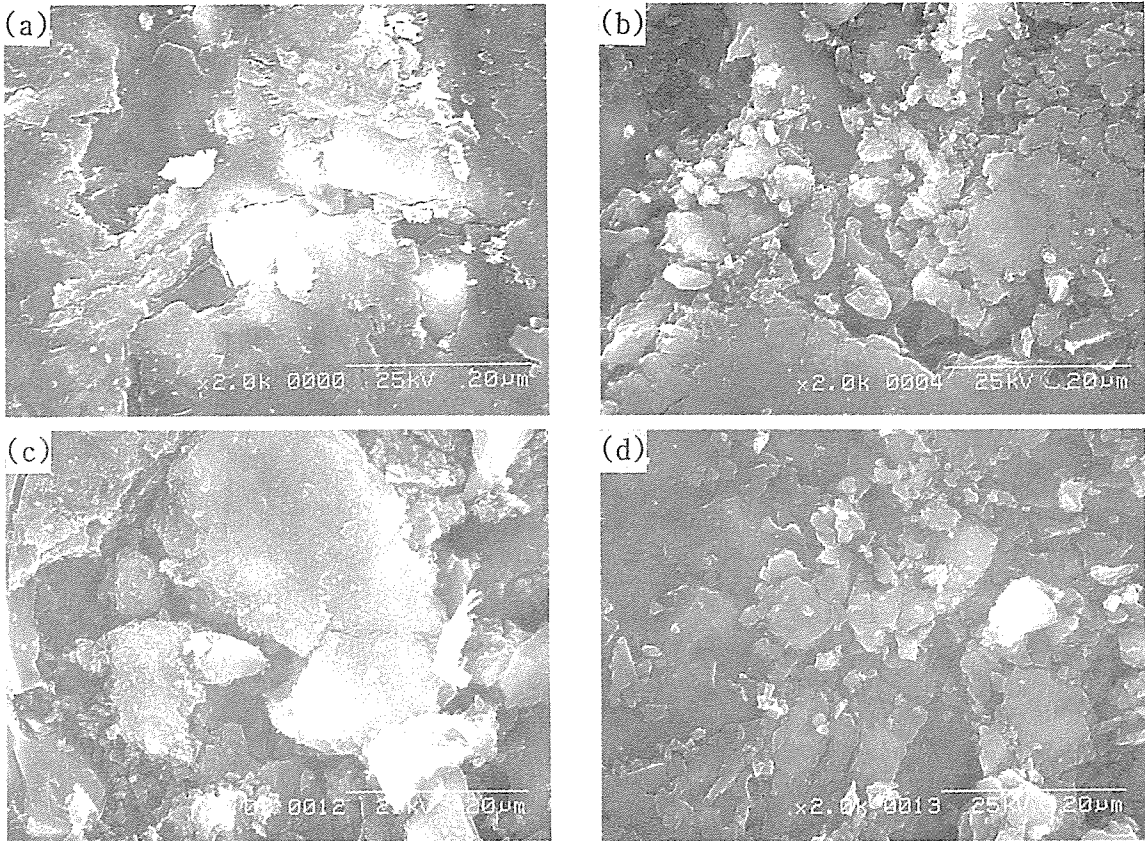


Fig. 9. SEM micrograph of friction surface (a) Type II -a, (b) Type II -b, (c) Type III -a, (d) Type III -b

280GPa로 탄성계수가 증가하였다. Fig. 10-b는 이러한 탄성계수의 변화에 따른 마찰계수와 마모율의 변화 그래프로서 탄성계수가 증가하면 마찰계수와 마모율이 감소하는 경향을 보인다. 이는 탄성계수가 증가함에 따라 제동 시 마찰압 및 마찰력에 대한 변형이 적을 뿐 아니라, 탄소 섬유 함유의 강도가 열처리 전에 비하여 상대

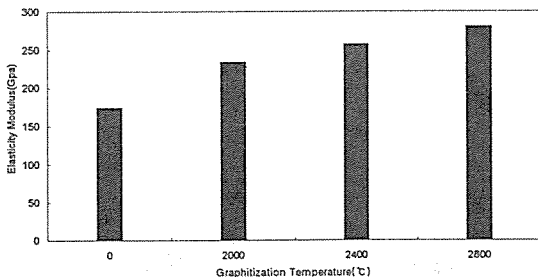


Fig. 10-a. The elastic modulus of carbon fiber as a function of graphitization temperature(°C)

적으로 감소하여 쉽게 마찰 필름을 형성하기 때문에 마모율이 감소한 것으로 생각된다.

마찰 면에 노출된 탄소 직물의 양(면적)에 따른 마찰 마모 특성 영향을 보기 위해 Type V 시편으로 탄소 직물 노출 량을 각각 20%, 30%, 40%(전체 마찰 면에 대한 노출된 탄소 직물의 면적 비율)으로 조절하

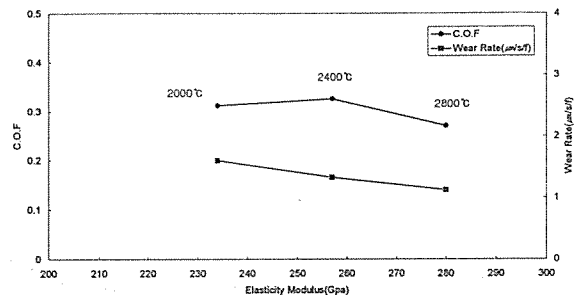


Fig. 10-b. Coefficient of friction and wear rate as a function of elastic modulus of carbon fiber

여 마찰, 마모 시험을 수행하였다. Fig. 11에서와 같이 탄소 직물의 노출 면적이 클수록 마찰계수 및 마모 량의 증가하는데, 이는 탄소-탄소 복합 재료는 마찰이 진행되면 마찰 표면에 미세한 마모 입자가 발생하고 이것이 필름으로 형성되어 마찰계수 및 마모 량이 감소되는데 마찰 표면에 있어서 탄소 직물의 노출 면적이 증가하게 되면 표면의 직물 crimp가 미시적으로 돌출부 역할을 하게 되어 상대 마찰 면에 손상을 주는 골패임(ploughing) 현상을 유발하게 되어 필름형성이 어려워지기 때문이며 이는 Fig. 12에서와 같이 탄소 직물 노출 부위에 필름이 잘 형성되지 않은 것으로부터 확인할 수 있다.

Fig. 13은 Type IV 시편에 대하여 각각 다른 에너지 조건(Mode I, II, III, IV, V)으로 마찰 마모 시험을 수행한 결과이다. Mode I, II의 경우 운동에너지는 거의

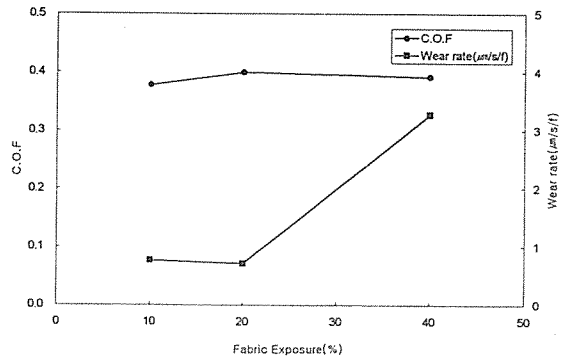


Fig. 11. Coefficient of friction and wear rate variation according to the fabric exposure on the friction surface

비슷하나 PV 값이 Mode II가 상대적으로 큰 값을 가

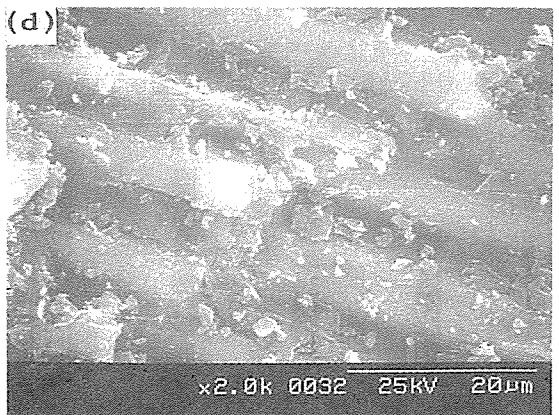
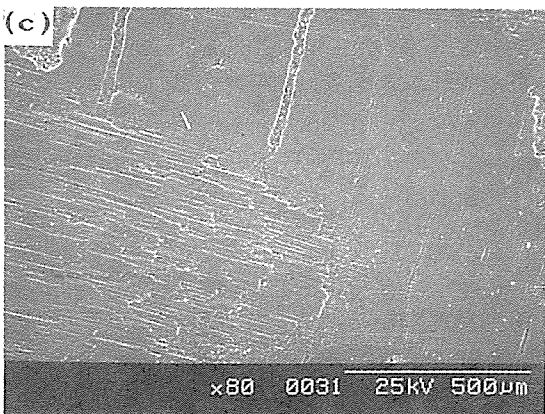
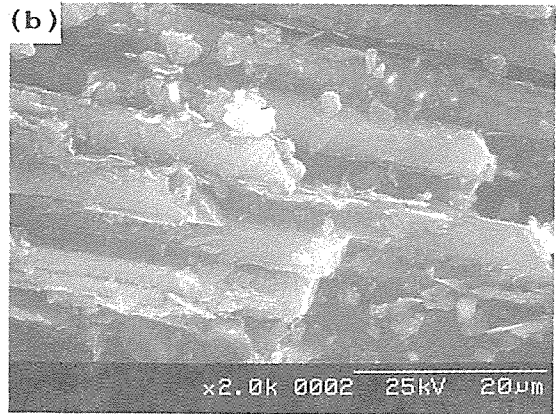
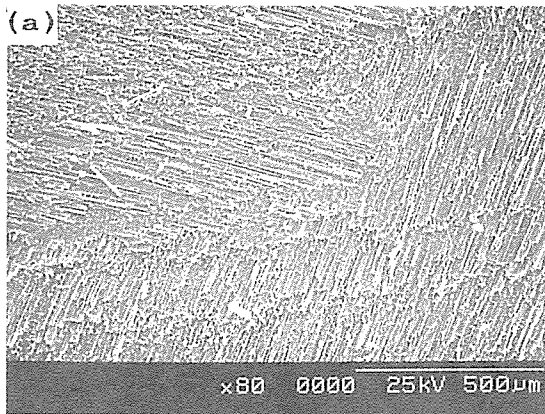


Fig. 12. SEM micrograph of fabric region on the friction surface

진다. 이 경우 그래프의 (a), (b)와 같이 마찰계수는 비슷한 값을 보이지만 마모율이 거의 2배정도 큼을 알 수 있다. 이것은 Mode II의 경우가 Mode I보다 마찰면에 작용하는 압력이 2배정도 높은 것으로 보아 PV 값에서 마모율에 직접적으로 영향을 주는 요소는 마찰면에 작용하는 압력으로 생각된다.

마찰 면에 존재하는 마모 조각(wear debris)은 마찰계수 및 마모율과 밀접한 관계를 갖고 있는데, 에너지 조건이 증가할수록 일반적으로 마찰계수는 감소하고 마모 량은 증가하며 윤활 작용을 하는 판상 형태의 마찰 필름이 마찰 면 전체에 균일하게 형성된다[5,6]. 낮은 에너지 조건에서는 미끄러짐에 저항하는 힘이 크게 되는 입자 형태의 마모 조각이 형성되어 마찰계수가 증가할 것으로 생각되는데 이는 Fig. 14에서 가장 높

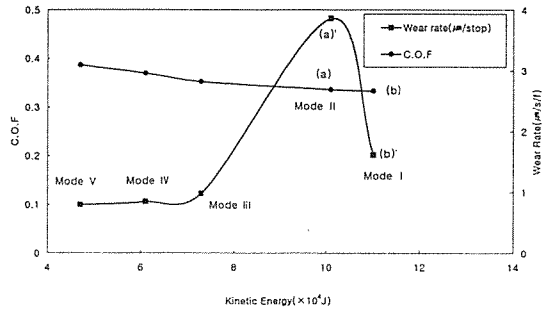


Fig. 13. coefficient of friction and wear rate of Type IV as a function of kinetic energy

은 에너지 조건인 (a)의 경우 형성된 마모 입자가 안정

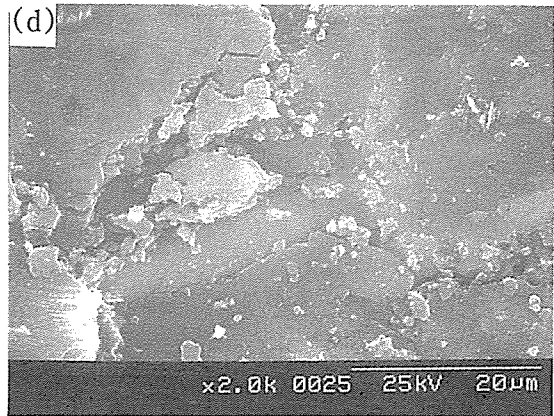
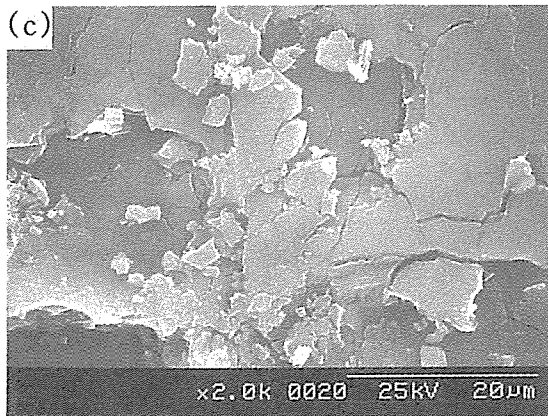
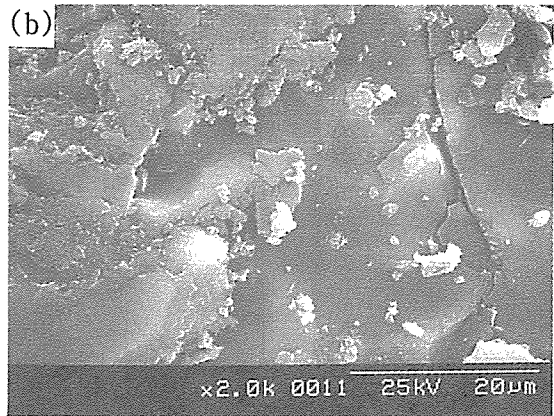
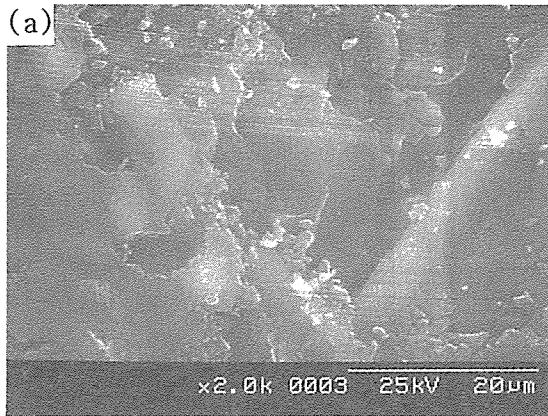


Fig. 14. SEM micrograph of friction surface (a) Mode I (high energy), (b) Mode II (high energy), (c) Mode III (low energy), (d) Mode IV (low energy)

된 판형 상태인 반면에 가장 낮은 에너지 조건인 (c)의 경우는 마모 입자가 잘게 부서진 상태로 마찰 면에서 관찰되는 것으로부터도 알 수 있다.

또한 선 속도(Sliding speed)에 따른 마찰계수의 변화를 살펴보면 동일한 마찰면압 조건에서 선 속도가 증가(Mode III, IV, V)할수록 낮은 마찰계수와 높은 마모율을 보인다[7]. 마찰계수의 감소는 마찰 면에서 필름 형성이 용이하여 마찰계수가 낮아지는 것으로 생각되며, 마모량이 다소 증가하는 것은 높은 에너지 조건에서 마찰 면의 온도 상승에 의한 재료의 산화 효과인 것으로 생각된다. 그리고 Mode I 조건에서 마모량이 급격히 증가하는 것은 PV 값의 증가에 기인한 것이며 비슷한 에너지 조건에서의 마모량은 마찰면압의 증가에 큰 영향을 받음을 알 수 있다. 이것은 탄소-탄소 복합 재료에 있어서 마모율은 PV 값에, 마찰계수는 마찰재가 흡수하는 운동에너지의 크기에 영향을 받음을 보여주는 결과이다.

탄소-탄소 복합 재료의 PV값에 따른 마찰, 마모 특성의 변화에서, 낮은 PV값에서는 탄소 섬유가 재료에 가해지는 하중을 지탱해 주기 때문에 효과적으로 기지의 기계적 손실을 막을 수 있어 마모량이 낮거나 거의 변하지 않는다. 그러나 PV 값이 증가하여 마찰력이 탄소 섬유와 기지의 결합력(bond strength)보다 크거나 탄소 섬유의 횡방향 강도(transverse strength)보다 크면 탄소 섬유가 뜯겨지거나 절단되어 발생하는 마모량이 증가하게 된다. Fig. 15는 이와 같은 마찰에 의해 발생하는 탄소 섬유의 형태를 보여준다.

4. 결 론

탄소-탄소 복합 재료의 제조 공정, 탄소 섬유의 흑연화온도 및 제동 시험 조건에 따른 마찰, 마모 특성을 규명한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

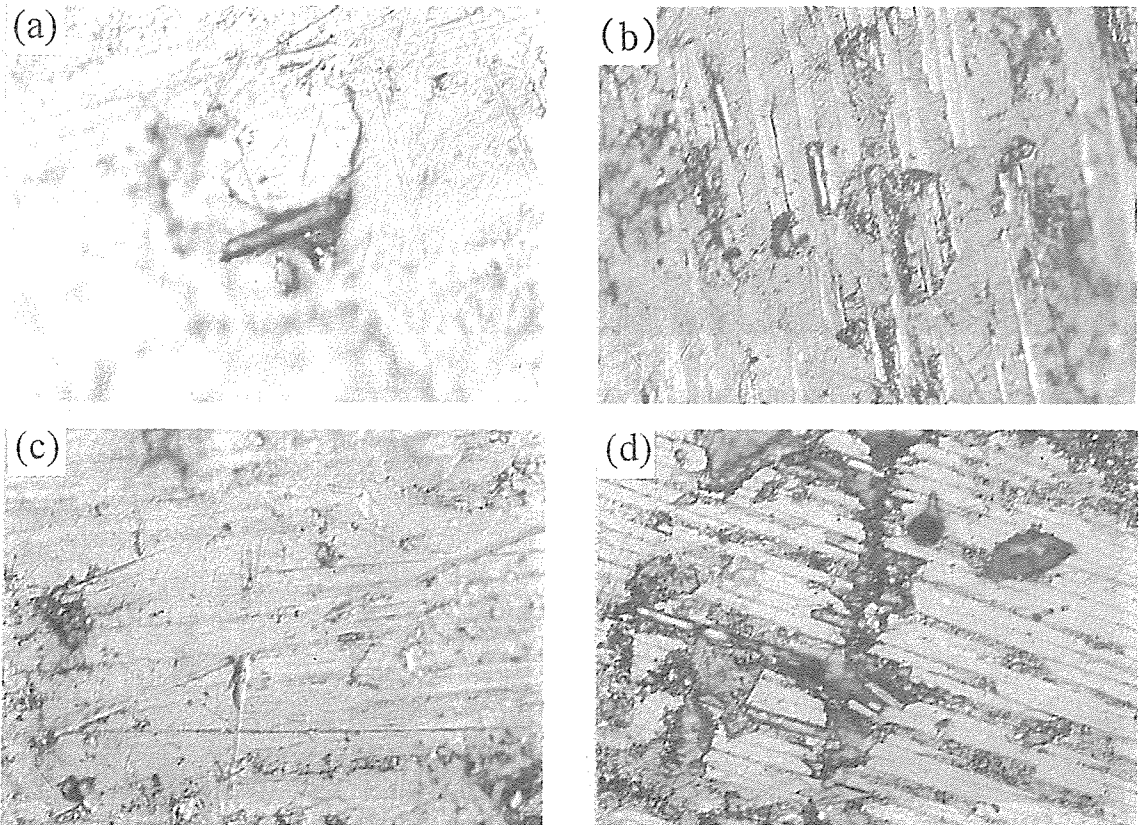


Fig. 15. Microstructure of friction region after friction test (a) fiber pulling-out, (b) fiber braking, (c) fiber loss, (d) fabric wear

탄소-탄소 복합 재료의 마찰계수는 열전도도 값에 영향을 받는다.

마찰 면상에 배열되는 탄소 섬유의 흑연화 온도가 증가할수록 탄성계수는 비례하여 증가하며, 마찰계수와 마모량은 감소한다.

VIAC 공정과 PIC 공정으로 각각 제조된 시편의 마찰 마모 특성에서 PIC 공정의 경우 상대적으로 마찰계수 및 마모량이 낮고 PV 값의 증가에 따라 거의 변화가 없지만, VIAC 공정의 경우 PV 값이 증가할수록 마찰계수는 감소하고 마모량은 증가한다. 특히 마모량의 경우 PV 값에 큰 영향을 받는데 이는 탄소 기지의 미세조직 차이에 기인한다고 여겨진다.

마찰 표면에 노출된 탄소 직물의 면적 비가 증가함에 따라 마찰계수와 마모량은 증가한다.

탄소-탄소 복합 재료의 마모량은 PV 값의 증가에 큰 영향을 받으며 마찰계수는 제동 에너지에 영향을 많이 받는데, 제동 에너지가 증가하면 마찰계수는 감소하고 마모량은 증가한다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 지원에 의해 이루어진 결과의 일부이며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. E.Fitzer, "The future of Carbon/Carbon Composites," Carbon, Vol, 25, No.2, pp.163-190, 1987.
2. A.M.Kenigfest, V.V. Kulakov, "The Study of C/C Composites Friction Surfaces Changes During Braking," Russia Report 4, 1994.
3. N.Narita, K.Kurosaki, and T.Herai, "Friction Mechanism of C/C Composites," Intl Symposium on Carbon, 1990, Tsukuba, Japan, pp. 386-389.
4. E.Fitzer, "Tribological Behavior of C/C Composites," 4th Intl Carbon Conference, pp.867, 1986.
5. N.Murdie, J.Don.C.kochen, R.Liew, and C.P.Ju, "Tribology studies of C/C Composites," 19th Bienn. Conf.on Carbon, pp.496-497, 1989.
6. H.W.Chang and R.M. Rusnak, "Contribution of oxidation to the wear of C/C Composites," Carbon Vol. 16, pp. 309-312, 1978.
7. J.D.Chen and C.P.Ju, "Low Energy Tribological Behavior of C/C Composites," Carbon, Vol.33 No.1, pp.57-62, 1995.