

## 論文

## 2차원 구조탄소/탄소 복합재의 마찰 및 마모특성

오인석\* · 최돈묵\* · 주혁중\*

## Friction and Wear Characteristics of 2D-Carbon/Carbon Composites

In-Seok Oh\*, Don-Mook Choi\* and Hyeok-Jong Joo\*

## ABSTRACT

Since C/C composites consist of the carbon fiber and carbon matrix, they have excellent thermal stability and are widely used in the advanced field of industries such as space and aviation. Aircraft brakes made of CFRCs show excellent friction and wear properties compared to the conventional steel brakes, and also are known to have high absorption energy and excellent high temperature properties in braking. In order to endow friction and wear stability to the 8H/satin carbon fiber phenolic resin prepreg, inorganic powder such as  $ZrO_2$ , TiN were filled with 2, 4, and 6 volume% respectively, and then 80 plies prepreps were laminated to give 2D CFRPs. 2D CFRCs were made by impregnation and recarbonization from CFRPs, and their friction, wear and mechanical properties were observed. The density of CFRCs was decreased enormously at 1<sup>st</sup> carbonization step but increased continuously according to the repetition of impregnation and recarbonization cycles. The flexural strength, flexural modulus and ILSS of CFRCs were increased according to the impregnation and recarbonation cycles. In the case of the CFRCs unfilled with inorganic powder, friction coefficient(0.3) and wear volume( $0.25-0.39\text{cm}^3$ ) were very high. Friction coefficient and wear volume were decreased according to the increased filling of inorganic powder. Meanwhile, the CFRCs filled with TiN showed higher friction coefficient and wear volume than that of  $ZrO_2$ , the wear volume of CFRCs was proportionally increased according to the increased sliding distance. The wear mechanism of CFRCs showed adhesive wear, abrasive wear and surface fatigue wear.

\* 정회원, 충남대학교 고분자공학과

## 초 록

탄소/탄소 복합체는 탄소섬유와 탄소기질로 이루어져 있기 때문에 열에 대한 안정성이 뛰어나므로 첨단산업인 우주, 항공분야에 널리 이용되고 있다.

항공기 브레이크의 경우 기존 금속 브레이크에 비하여 마찰 마모특성이 우수하며 제동시 흡수에너지가 크고 고온특성이 우수한 재료로 알려져 있다.

탄소섬유에 페놀수지를 침윤시킨 8H/Satin 프리프레그에 마찰 및 마모의 안정성을 부여하기 위하여 무기물( $ZrO_2$ , TiN)을 각각 2, 4, 6vol. % 충전한 후에 프리프레그 80장을 적층 성형하여 2차원 구조 CFRP를 제조하였다. 이 CFRP를 함침 및 재탄화공정을 반복하여 탄소/탄소 복합체(CFRC)를 제조하였으며 마찰, 마모 및 기계적 특성을 관찰하였다.

CFRC의 밀도는 1차 탄화시 급격히 감소하였으나 함침 및 재탄화 공정을 반복함에 따라 현저히 증가하는 양상을 보였다. CFRC의 굴곡강도, 굴곡 탄성률 및 층간 전단강도는 함침 및 재탄화 공정을 반복함에 따라 현저히 증가하였다. 무기물을 첨가하지 않은 CFRC의 경우 마찰계수는 0.3 정도였으며, 마모 부피는  $0.25-0.39cm^3$ 로 가장 높게 나타났으며 무기물 충전량이 증가함에 따라 마찰계수와 마모 부피는 감소하는 경향을 보였다. 한편 TiN을 충전한 CFRC는  $ZrO_2$ 를 충전한 CFRC보다 마찰계수와 마모 부피가 높게 나타났다. CFRC의 마모 부피는 미끄럼 거리를 증가시킴에 따라 선형적으로 증가하였으며 CFRC의 마모 메카니즘은 응착마모, 연삭마모와 표면 피로 마모임을 알 수 있었다.

## 1. 서 론

고분자 복합재료는 고분자 기질에 섬유를 보강하거나 무기물 입자 등을 충전하여 물리적, 화학적 물성을 개량할 목적으로 제조되며 기존의 금속을 대체할 수 있을 정도의 대단히 매력적인 첨단 복합재료이다. 보강섬유로는 탄소섬유, 유리섬유, 보론섬유, 아라미드 섬유 등이 사용되고 있으며, 이중 탄소섬유를 고분자 기질에 보강한 복합재료를 탄소섬유강화 플라스틱(Carbon Fiber Reinforced Plastics; CFRP)이라고 부르며 이는 종래의 금속 재료 보다 비강도, 비탄성률 등의 기계적 성질이 우수할 뿐만 아니라 치수안정성, 전기전도성, 전파차폐성, 내부식성, 내약품성, X선 투과성 등 여러가지 장점을 갖고 있다. 따라서 이와 같은 특성으로 인하여 스포츠레저용품, 우주, 항공장비의 구조재 및 자동차 분야에 대한 응용면이 계속 개발되고 있다[1]. 그러나 CFRP 및 금속재료는 사용온도가 낮으므로 고온용 재료로서는 부적당하다. 그러므로 이와 같은 단점을 보완하여 사

용하기 위하여 탄소/탄소 복합재료(Carbon Fiber Reinforced Carbon; CFRC)를 제조하는 연구가 진행되고 있다[2].

CFRC는 CFRP의 탄화공정을 거치게 되며 이때 CFRC내에 많은 기공이 존재하여 물성저하를 초래하게 되므로 고밀도화 공정을 반드시 거쳐야 한다. 고밀도화 방법은 액체함침법(LI), 화학증기함침법(CVI) 및 병용법 등이 있다[3]. CFRC는 탄소섬유와 탄소기질로 이루어져 있기 때문에 열에 대한 안정성이 뛰어나므로 고온에서 비강도 및 비탄성률이 대단히 우수하고 생체와의 상용성, 내마모성이 우수하여 고온재료, 대기권 비행체의 열차단 구조물, 핵반응기, 생체접합재료 등으로 각광을 받고 있다[4-5]. 또한 경주용 자동차와 항공기의 브레이크 재료로도 사용되고 있으며 제동시 흡수에너지가 크고 고온 저항특성이 우수하므로 안정된 제동효과를 나타내는 재료로 알려지고 있다[6]. 특히 최근들어 석면 마찰제가 암을 유발한다는 임상보고가 발표됨에 따라 선진 각국에서는 법으로 석면의 사용을 제한하고 있는 실정이다[7]. 그러

므로 본 실험에서는 열적, 기계적 성질이 대단히 우수한 탄소섬유에 페놀수지를 침윤시킨 8H/Satin woven fabric 프리프레그에 마모 및 마찰 안정성을 부여하기 위하여 ZrO<sub>2</sub>, TiN 분말을 충전하여 CFRP를 적층 성형한 다음 함침 및 재탄화를 실시하여 CFRC를 제조하고 이들의 마찰계수 및 마모 부피 그리고 밀도변화 및 기계적 강도를 측정하였으며 주사 전자현미경 관찰을 통하여 마모 메커니즘을 고찰하였다.

### 2. 트라이볼로지(Tribology) 이론

트라이볼로지(Tribology)란 상대운동을 하면서 서로가 영향을 미치는 표면 및 이와 관련된 제반 문제와 실제 응용면에 관한 과학기술이다[8]. 다시

말해서 마찰, 마모 및 윤활과 관계있는 학문이다.

Fig. 1에 트라이보 시스템에서 상대운동을 하는 접촉부위의 모형을 나타냈다. 접촉부위는 하중에 의하여 변형이 되고 표면은 상대운동으로 인하여 운동에 저항하려는 방향으로 마찰력이 존재하게 되며, 이 결과 열이 발생하게 된다. 이때 윤활제는 두 표면을 유막으로 분리시켜 마찰력과 마찰열의 발생을 억제시키며, 대류에 의한 냉각효과를 부여해 준다. 온도가 상승하게 됨에 따라 재료 내부의 기공이나 결함부위에 변형이 일어난다. 또한 운동 표면은 표면간의 미세 돌출부(asperity)의 접촉 및 마모입자와의 접촉으로 인하여 표면입자가 이탈되고 소성변형이 생기며 표면의 미세변화가 일어난다.

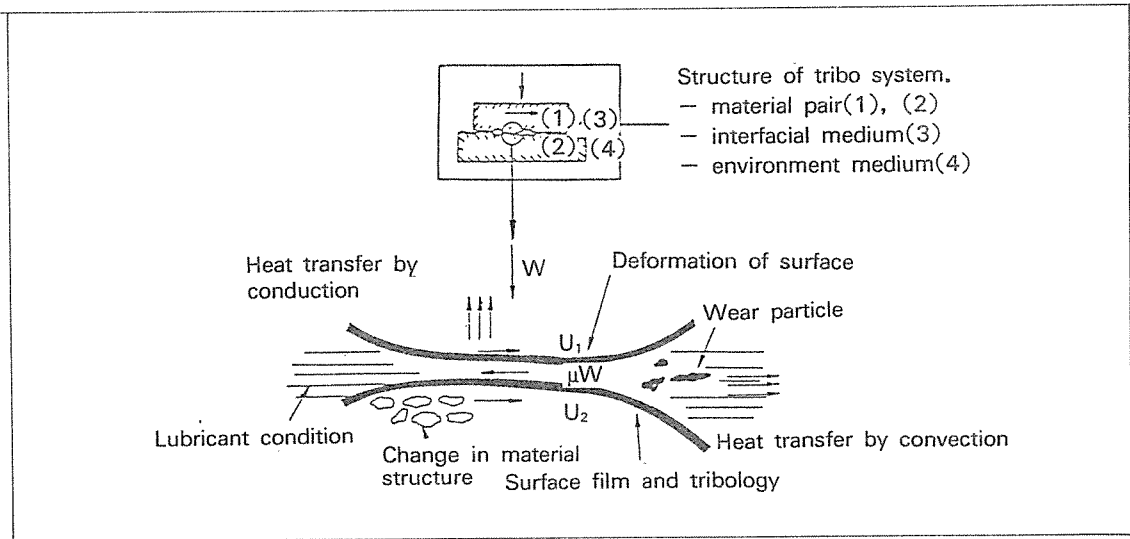


Fig. 1 Schematic diagram of contact region of the sliding interface at a tribosystem.

### 3. 실험

#### 3-1. 실험재료

2D-탄소/탄소 복합재 제조에 사용된 탄소섬유는 일본 Toray사의 PAN계 고강도 섬유이며 섬유의 물성은 Table 1에 나타내었으며, Matrix 수지는 국내 강남화성(주)의 분말상 novolac형 페놀수지

이며 이의 물성은 Table 2에 나타낸 바와 같다. 프리프레그는 국내 선경(주)에서 제조한 것이며 이것의 기초 물성은 Table 3에 나타내었다. 마찰 및 마모 안정성을 부여하기 위하여 충전한 TiN은 일본 고순도회사(주)의 제품이며, ZrO<sub>2</sub>는 미국의 METCO 143으로 각 물성은 Table 4와 5에 나타내었다.

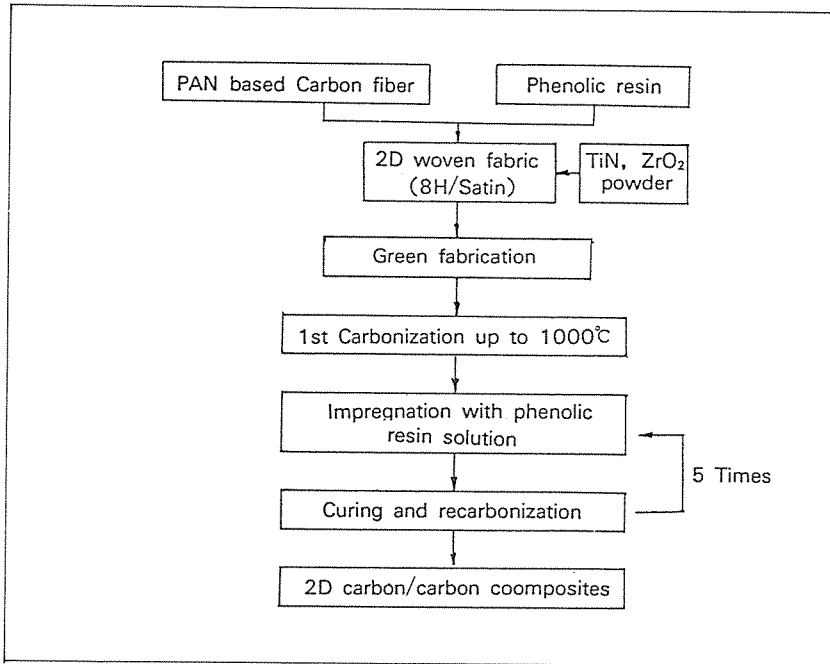


Fig. 2 Flow chart for the preparation of 2D carbon/carbon composites.

Table 1. Characteristics of carbon fiber used for carbon/carbon composites

Fiber Type	Filament No	T.S	T.M	U.E	Yield (g/1000m)	Density (g/cm <sup>3</sup> )
T 300	3,000	3,530	230	1.5	198	1.75

\* T.S : Tensile strength(MN/m<sup>2</sup>) \* T.M : Tensile modulus(GN/m<sup>2</sup>)

\* U.E : Ultimate elongation(%)

Table 2. Characteristics of phenolic resin

Phenolic resin type	Melting point (°C)	Curing temperature (°C)	Fixed carbon (%)
Novolac	76-86	120-160	59±2

Table 3. Characteristics of 2D-woven fabric prepreg used for carbon/carbon composites

Fiber type	Filament No.	Woven type	Used Resin	Resin contents
T-300	3,000	8H/S	Novolac type phenolic resin	37wt. %

Table 4. Characteristics of TiN powder

P.S( $\mu\text{m}$ )	M.P( $^{\circ}\text{C}$ )	D( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
0.66	2930	5.2

Table 5. Characteristic of  $\text{ZrO}_2$  powder

P.S( $\mu\text{m}$ )	M.P( $^{\circ}\text{C}$ )	D( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	F.C
27	2535	5.1	0.13

P.S: Particle size M.P: Melting point  
D: Density F.C: Friction coeff.

### 3-2. 실험방법

#### 3-2-1. 탄소섬유 강화 복합재(CFRP)의 제조공정

2D-탄소/탄소 복합재의 제조공정은 Fig. 2와 같으며, 본 실험의 목적에 따라 마모, 마찰 안정성을 부여하기 위하여  $\text{ZrO}_2$ , TiN 분말을 각각 2, 4, 6vol. %를 프리프레그에 충전하였으며, 프리프레그는 목적에 맞도록 150mm×50mm로 절단한 다음 몰드에 넣고 적절한 온도와 압력 profile로 80장을 적층 성형하여 만들어졌다. 이때 몰드내에 있는 프리프레그 사이의 공기를 최소화시킬 프리프레그들이 잘 접촉될 수 있도록 15kgf/cm<sup>2</sup>의 압력을 일차적으로 가한 후 온도를 서서히 올려 매트릭스 수지의 점도가 가장 낮은 80°C 부근에서 75kgf/cm<sup>2</sup>의 압력을 가했다. 이때 섬유의 흐트러짐과 기공의 형성을 억제해 주기 위하여 압력을 서서히 가해야 한다. 또한 너무 높은 압력을 가하면 섬유에 손상을 입힐 우려가 있으므로 섬유의 강도를 충분히 유지할 수 있도록 적당한 압력을 가해야 한다. 페놀수지의 경화반응이 시작되는 120°C에서 1시간 그리고 경화반응이 끝나는 160°C에서 2시간 동안 후경화를 시켰다.

#### 3-3. 탄소/탄소 복합재(CFRC)의 제조공정

탄소/탄소 복합재는 적층 성형된 CFRP의 매트릭스

페놀수지가 탄화되어 만들어지며, 탄화된 CFRC는 탄소수율이 높으며 polymeric carbon 구조를 갖게 된다. 본 실험에서는 시편이 탄화되는 동안 공기와의 접촉으로 인한 CFRC의 산화를 방지하기 위하여 탄화로 내부를 3시간 동안 진공을 유지시키면서 공기를 완전히 제거한 후 질소를 100 cc/min의 유량으로 유입시키면서 12°C/hr의 가열 속도로 1000°C까지 탄화시켰다.

페놀수지는 탄화 후의 탄소수율이 60% 정도이기 때문에 1000°C까지 열처리 시키고 나면 물과 같은 저비점 물질들이 휘발하면서 많은 기공이 생기며, 이 기공은 CFRC의 기계적 물성을 저하시키는 원인이 되므로 함침제로 반드시 채워야 한다. 그러므로 탄화후 함침조에 시편을 넣고 CFRC내의 기공에 존재하는 공기를 최소화 하기 위하여 진공상태를 3시간 동안 유지한 후 페놀수지를 주입하고, 수지용액이 기공에 잘 침투하도록 질소로 20kgf/cm<sup>2</sup>의 압력으로 3시간 동안 가압하여 함침을 시켰다. 함침후 함침조에서 복합재를 꺼내어 autoclave에 넣고 20kgf/cm<sup>2</sup>의 압력을 가하여 경화를 시킨 후 Fig. 2와 같은 반복공정을 통하여 CFRC를 제조하였다.

#### 3-4. 탄소/탄소 복합재의 기계적 물성평가

탄소/탄소 복합재의 굴곡강도 및 굴곡탄성률은 ASTM D 790에 의하여 three point bending법으로 측정하였으며, 층간 전단강도(ILSS)는 ASTM D 2344에 의하여 short beam test 방법으로 측정하였다.

#### 3-5. 탄소/탄소 복합재의 마찰계수 및 마모부피 평가

Krauss사 RW-DS 3099/87 장비를 사용하여 ATE N 54327(disk on disk method)에 의하여 실험을 하였으며 상대 마찰면은 FC. MP 55(pearlite)를 사용하였다.

시험조건

i) 제동판의 속도:  $660 \pm 10 \text{rpm}$  (7.5m/sec)

ii) 제동시 압력: 14bar

iii) 시편 크기:  $25\text{mm} \times 25\text{mm} \times 5\text{mm}$

$$\mu = F_f / F_N$$

$\mu$ : 마찰계수  $F_f$ : 마찰력  $F_N$ : 가해진 하중

$$W_v = W_L / D$$

$W_v$ : 마모부피 ( $\text{cm}^3$ )  $W_L$ : 무게손실 (g)

D: 시편의 밀도 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

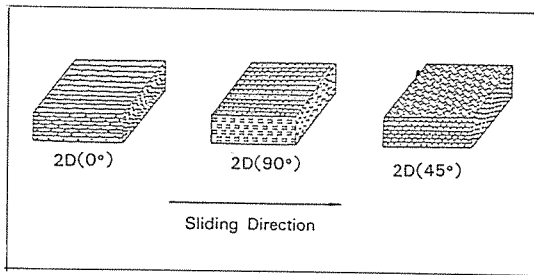


Fig. 3 Schematic illustration against the interface of C/C composites.

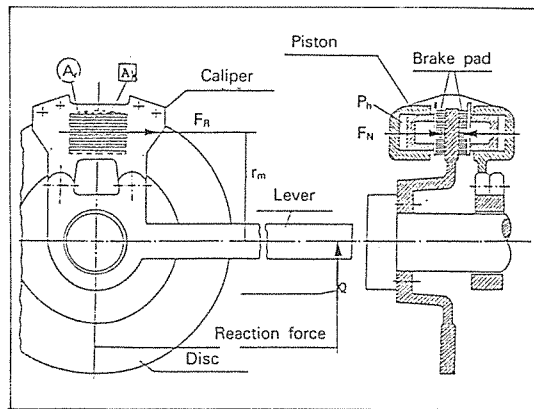


Fig. 4 Schematic diagram of the determination of coefficient of friction  $\mu$ .

CFRP를 탄화시키면 결합제는 많은 기공을 형성하게 되며 이러한 기공들은 외력을 받았을 때 응력이 집중되어 crack의 원인이 되어 물성을 저하시키는 요인으로 작용하므로 함침에 의하여 탄소물질로 채워주어야 한다[9].

Fig. 5의 5회 함침/탄화된 CFRC의 밀도증가를 보면 1차 탄화시 부피수축이 적은 반면 매트릭스 내의 저비점 물질 등이 과량 방출됨으로써 밀도가 급격히 감소하였으며 함침/탄화과정을 거듭으로써 지속적인 밀도증가 양상을 볼 수 있었다. 5차 함침/탄화 후 무기물이 충전되지 않은 시편의 밀도는  $1.515 \text{g}/\text{cm}^3$ 로 가장 낮았으며, 무기물을 충전한 모든 시편의 밀도가 증가되었다. 특히 TiN 6vol. %를 충전한 시편은 무기물이 과량 충전됨으로써 함침이 잘 되었다기 보다는 무기물 자체의 밀도가 높음으로써 가장 높게 나타났다.

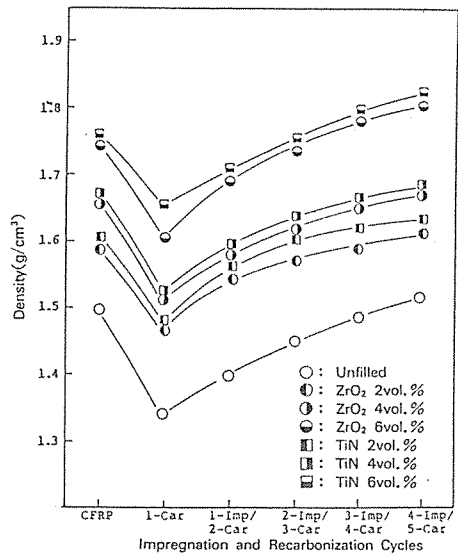


Fig. 5 Density variation according to the impregnation and recarbonization cycles.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4-1. 함침 및 재탄화 공정에 따른 CFRC의 고밀도화

##### 4-2. 함침 및 재탄화 공정에 따른 CFRC의 기계적 물성

고밀도화에 의하여 새로운 함침 매트릭스는 탄소섬유들 사이를 물리적으로 채워주고 탄소섬유들

사이에서 가교와 같은 역할을 해주게 된다. 그 결과 고밀도화된 복합재는 섬유에서 발생하는 응력을 적절히 분산시켜 준다. 고밀도화에 의한 강도증가는 이러한 이유 때문일 것이다. 기계적 물성은 함침/탄화의 반복 즉, 고밀도화에 의하여 계속적인 강도의 증가양상을 볼 수 있었다. Fig. 6에 나타난 굴곡강도를 보면 TiN 2vol. %를 충전했을 경우 약

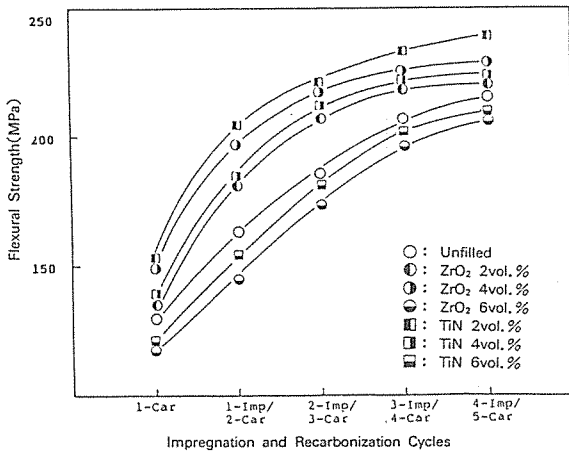


Fig. 6 Flexural strength of carbon/carbon composites impregnation and recarbonization cycles.

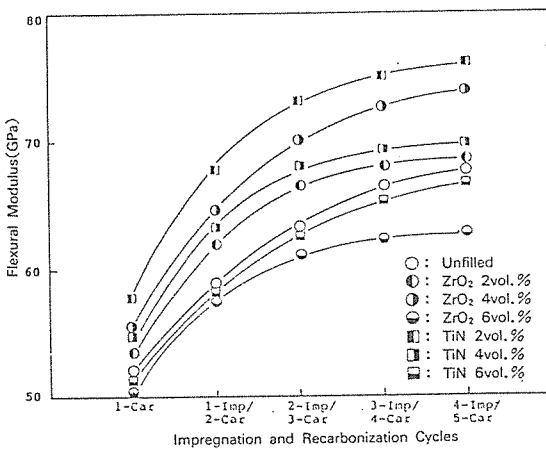


Fig. 7 Flexural modulus of carbon/carbon composites according to the impregnation and recarbonization cycle.

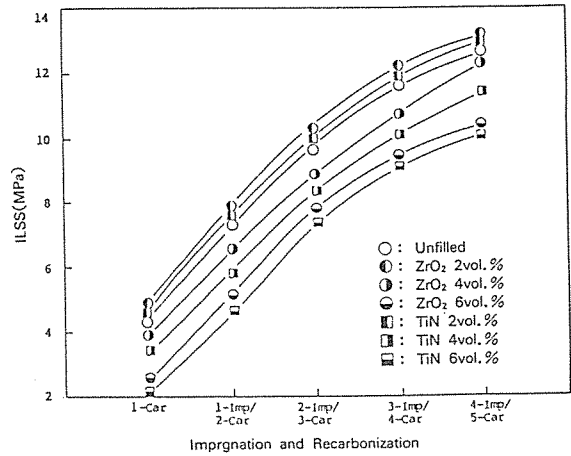


Fig. 8 ILSS of carbon/carbon composites according to the impregnation and recarbonization cycles.

240MPa로 가장 높았으며, 전혀 충전하지 않은 경우는 약 215MPa 정도였다. 반면 과량(6vol. %)을 첨가하였을 경우는 매트릭스와 섬유간의 결합력의 약화로 강도가 감소됨을 볼 수 있었다. 즉 적절한 양의 무기물을 충전함으로써 물성이 증가됨을 알 수 있었다. Fig. 7에서의 굴곡탄성률 역시 TiN 2 vol. % 충전한 경우가 76GPa 정도로 가장 높게 나타났다. Fig. 8에 나타난 중간 전단강도(ILSS)의 경우를 보면 역시 고밀도화됨에 따라서 강도가 증가되었다. 전반적으로 TiN을 충전한 복합재가 ZrO<sub>2</sub>를 충전한 복합재보다 강도가 높게 나타났는데 이는 수지와의 침윤이 잘 되어서 결합력이 호전되어 크랙성장을 저하시키기 때문인 것으로 판단된다.

### 4-3. 무기물 충전량에 따른 CFRC의 마찰 및 마모

ZrO<sub>2</sub>, TiN, TiC, ZrC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 같은 무기물은 일반적으로 안정하며 내마모성이 뛰어난 재료로 알려져 있다. 섬유와 함께 사용되는 무기물의 적절한 입도와 양은 복합재의 마찰과 마모특성에 지대한 영향을 주게 된다[10]. Fig. 9에 무기물 충전량에 따른 각 미끄럼 마찰면(0°, 90°, 45°)에

대하여 복합재의 마찰계수를 나타내었다. 전반적으로 TiN을 충전하였을 경우(0.2-0.3)가 ZrO<sub>2</sub>를 충전하였을 경우(0.1-0.2) 보다 마찰계수가 높게 나타났으며, 무기물을 충전하지 않은 복합재는 약 0.3 정도로 무기물 충전한 복합재보다 높게 나타났다.

무기물이 충전됨으로써 탄소/탄소 복합재 자체의

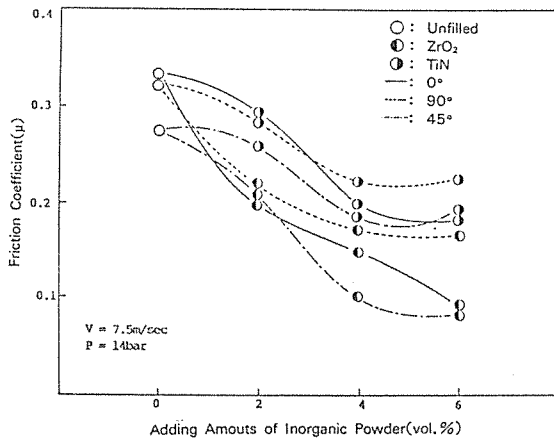


Fig. 9 Friction coefficient of the 2D woven fabric carbon/carbon composites according to the adding amounts of the inorganic powder.

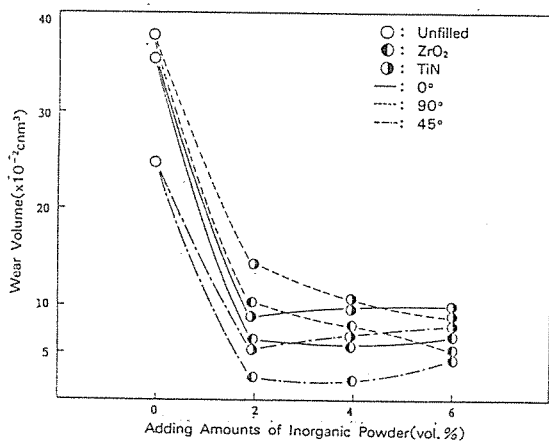


Fig. 10 Wear volume of 2D woven fabric carbon/carbon composites adding amounts of inorganic powder.

운활성과 더불어 미끄럼 마찰면에서 내마모성 무기물이 약간의 윤활작용을 하여 미끄러짐으로써 마모를 감소시켜 주었고 이와 더불어서 마찰계수가 감소하게 된 것으로 판단된다. 한편, Fig. 10에서 무기물을 2vol% 충전했을 경우 마찰계수(0.2-0.3)가 높았음에도 불구하고 미끄럼 마찰면이 90°일 경우를 제외하고 마모량이 0.1cm<sup>3</sup> 이하로 작게 나타났다는데 이는 충전된 적은 양의 무기물이 마모 표면에 필름을 형성해 줌으로써 내마모성과 함께 윤활작용에 기여하였기 때문이며, 반면에 과도한 양(6vol%)을 충전하였을 경우 마모 필름을 형성하여 연삭마모를 일으키고 미끄럼 마찰이 진행됨에 따라서 접착력이 떨어져 마찰면으로부터 쉽게 이탈되기 때문일 것으로 판단된다. 한편 각 미끄럼 마모 방향에 대하여서는 대체적으로 45° 방향에서 보다 낮은 마찰계수와 마모율을 나타내었다.

#### 4-4. 미끄럼 마모 거리에 따른 CFRC의 마찰 및 마모

일반적으로 마모와 마찰계수는 초기에는 비정상

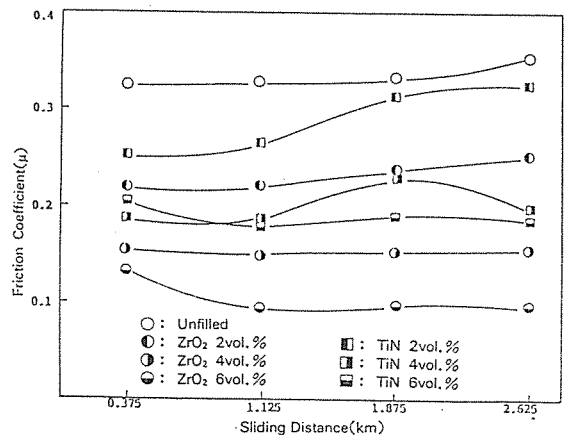


Fig. 11 Friction coefficient of the 2D woven fabric carbon/carbon composites(0°) according to the adding amounts of the inorganic powder and sliding distance.



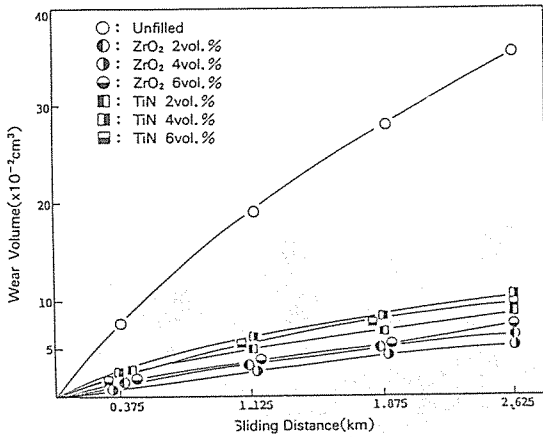


Fig. 12 Wear volume of the 2D woven fabric carbon/carbon composites(0°) according to the sliding distance.

적으로 갑자기 증가하는 것으로 알려져 있으며 미끄럼 마모거리가 증가됨에 따라서 정상상태를 나타내게 된다. 따라서 미끄럼 마모거리 구간에 따른 각 거동을 관찰함으로써 마찰 및 마모거동을 관찰할 수 있다.

Fig. 11에서의 미끄럼 마모거리에 따른 마찰계수를 보면 ZrO<sub>2</sub>를 충전한 복합체 보다 TiN을 충전한 복합체가 높게 나타났으며 대체적으로 1,125km를 지난 후부터 정상상태를 유지함을 알 수 있었다. Fig. 12에 나타낸 미끄럼 마모거리에 따른 마모부피는 미끄럼 마모거리가 증가함에 따라서 거의 직선적으로 증가함을 볼 수 있으며 무기물을 충전하지 않은 시편이 충전한 시편의 경우보다 높은 마모부피를 나타내었다.

#### 4-5. 무기물 충전량에 따른 CFRC의 마찰온도 변이

고온특성이 우수한 탄소/탄소 복합체는 열충격 저항성과 초고온에서의 안정성 및 낮은 열팽창 계수를 갖고 있는 재료로서 마찰시 발생하는 온도에 민감한 금속 대체재료로서 이용될 수 있다. Fig. 13에서는 무기물 첨가량에 따라서 미끄럼 마찰시 복합체 자체에서 관찰되는 마찰온도를 비교하였다.

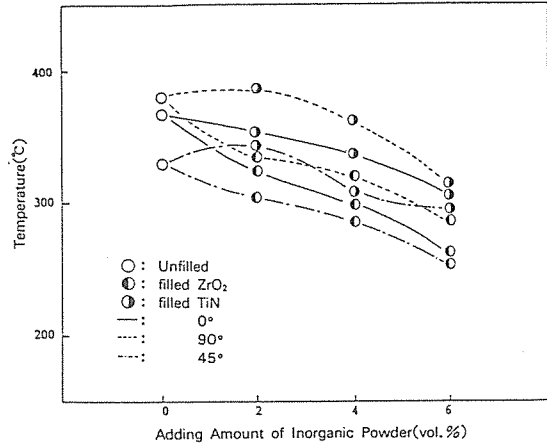


Fig. 13 Contact temperature of the 2D woven fabric carbon/carbon composites according to the adding amounts of inorganic powder.

제동시 마찰온도는 250-400°C이었으며, 앞절의 Fig. 9, 10에서 무기물 충전량이 증가함에 따라서 마찰계수 및 마모 부피가 감소하였듯이 열에 안정한 무기물의 충전량이 증가할수록 마찰온도가 감소하는 경향을 나타내었다.

ZrO<sub>2</sub>를 충전한 복합체보다 TiN을 충전한 복합체의 마찰온도는 전반적으로 높게 나타났다. 마찰 접촉면이 90° 방향일 경우 섬유표면이 돌출부처럼 작용하여 상대면과 마찰하게 될 때 충격과 피로에 의해서 섬유가 절단 및 파괴를 일으키게 되므로 심한 마모를 일으키게 된다. sliding이 진행됨에 따라 결합제와 보강섬유간의 adhesive bonding에 부분적인 약화를 초래하기 때문에 마모부피가 증가된 것으로 판단되며, 이때 마찰온도가 무려 388°C 이상으로 상승하였는데 이는 보다 높은 마찰에너지가 기계에너지처럼 소비되어 계면온도가 높게 발생한 것으로 판단된다.

한편 마찰 접촉면이 0° 방향일 경우 탄소섬유의 구조가 섬유의 축을 중심으로 흑연 격자층처럼 이루어졌기 때문에 0° 방향에서 윤활효과가 기대되므로 탄소섬유 표면이 매끄러워져서 sliding 마모를 일으켜 마찰에너지가 적게 소비되므로 계면온도가 보다 낮게 발생할 뿐만 아니라 보다 적은 양의 마모가 일어나게 된 것으로 판단된다.

#### 4-6. 주사 전자현미경 관찰 및 CFRC의 마모 메카니즘

E. Fitzer[7]와 E. Minford[11] 등은 복합재에 배향된 섬유 방향이 0°일 경우가 가장 낮은 마모율을 나타냈으며 섬유의 배향이 복합재의 마찰계수와 마모율에 영향을 미치는 것으로 발표한 바 있다. Fig. 14a의 경우 90° 방향의 마모면을 나타냈으며 경도가 높은 섬유가 거칠은 돌출부처럼 작용하여 연삭마모를 일으킨 것으로 예상된다. 마찰면의 seizure 현상과 섬유는 응력을 집중시켜 섬유의 절단 또는 파괴를 일으켰으며 섬유간의 크랙이 성장하여 탈리되었음을 알 수가 있다.

Fig. 14b의 0°방향 마모면은 복합재의 마모표면에서 형성된 입자형태의 마모 파편(wear debris)이 섬유와 매트릭스의 탈리된 부분에 모여 있음이 관찰되었고, 연삭 마모입자(abrasive particle)처럼 제공되어 표면위에서 마모 필름(wear film)을 형성하여 마모를 일으키게 될 것으로 판단된다.

Fig. 14c에서도 같은 현상을 보였으며 무기물을 충전한 Fig. 15ab의 경우, 섬유의 wear-thinning과 함께 충전된 무기입자는 매트릭스와 함께 분쇄되어 마모 필름(wear film)으로 형성되었음이 관찰되었고, 이 마모 필름은 윤활작용을 해줌으로써 마모가 감소될 것으로 보여진다. 한편 미끄럼 현상에 의한 섬유의 wear-thinning은 탄소섬유의 구조가 양과 꺾질처럼 섬유의 축을 중심으로 쌓여있기 때문에 탄소구조에서 c-방향으로 마찰면에 접촉을 하므로 윤활작용과 함께 이러한 현상이 나타나는 것으로 보여진다. 이상을 토대로 하여 관찰된 마모 메카니즘은 초기에는 roughness가 큰 마찰 표면이 존재하므로 표면 돌출부(asperity)의 응착에 의하여 응착마모(adhesive wear)를 일으켜 마모파편(wear debris)을 형성하게 되며 반복되는 sliding에 의하여 이 파편은 compact 되어 점진적으로 마모필름을 형성하여 연삭마모(abrasive wear)를 일으켜 마찰 표면으로부터 이탈하게 된다. 또다시 표면에서 마모파편이 재생되고 응착마모와 연삭마모를 반복하게 되며 미세균열(microcrack)을 형성하게 된다.

결국 반복되는 loading 작용에 의하여 전단응력을 받게 되어 피로에 의해서 균열이 성장하여 보강섬유간의 탈리현상을 일으켜 표면 피로 마모(surface fatigue wear)를 일으키는 종합적인 마모기구를 이루게 되는 것으로 판단된다.

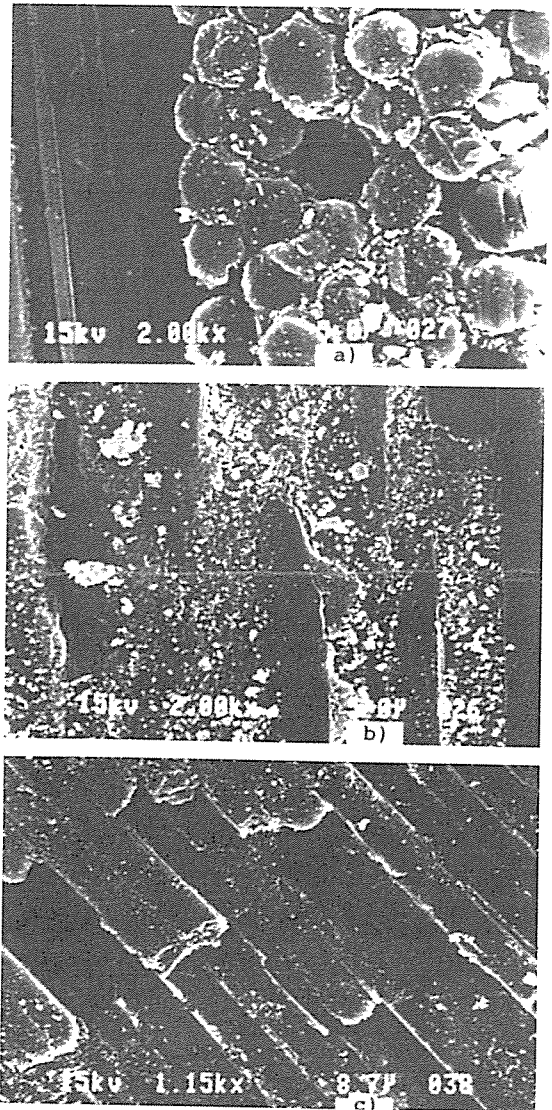


Fig. 14 SEM photographs of the sliding interface of 2D woven fabric C/C composites unfilled with inorganic powder.  
a) sliding surface 90°  
b) sliding surface, 0°  
c) sliding surface, 45°

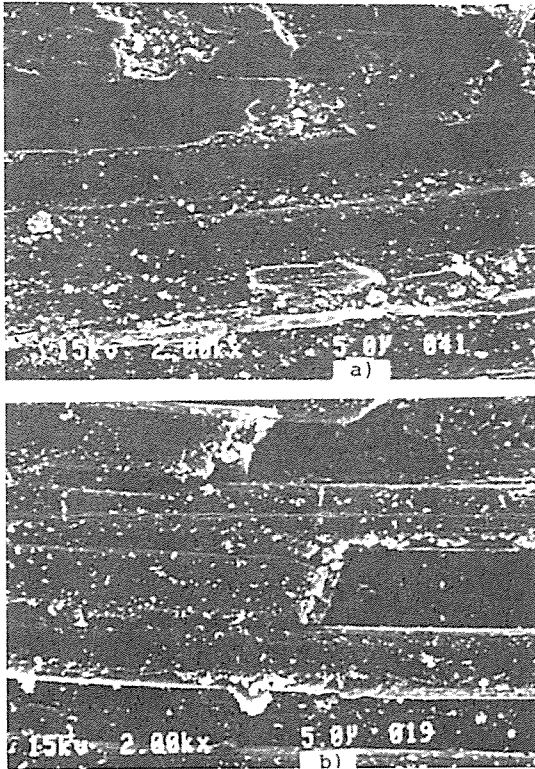


Fig. 15 SEM photographs of sliding interface of 2D woven fabric C/C composites filled with inorganic powder  
 a) ZrO<sub>2</sub> powder  
 b) TiN powder

### 5. 결 론

열적, 기계적 성질이 대단히 우수한 탄소섬유에 페놀수지를 침윤시킨 8H/Satin woven fabric 프리프레그에 마모 및 마찰안정성을 부여하기 위하여 ZrO<sub>2</sub>, TiN 분말을 충전하여 CFRP를 적층성형한 다음 함침 및 재탄화를 실시하여 CFRC를 제조하였으며, CFRC의 기계적 강도 및 마찰계수, 마모부피를 측정해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. CFRC의 굴곡강도, 굴곡탄성률, ILSS는 함침/탄화공정을 반복하므로써 증가양상을 나타내었으며, TiN 2vol. % 충전한 복합재의 굴곡강도가 240

MPa로 가장 높게 나타났다.

2. CFRC의 마찰계수는 무기물을 충전하지 않은 복합재가 가장 높게(0.3) 나타내었고, 마모부피 역시 0.25-0.39cm<sup>3</sup>로 가장 높게 나타났으며 무기물의 충전량이 증가함에 따라서 대체적으로 마찰계수와 마모부피는 감소하는 경향을 나타내었다.

3. TiN을 충전한 복합재가 ZrO<sub>2</sub>를 충전한 복합재보다 대체적으로 높은 마찰계수와 마모부피를 나타내었다. ZrO<sub>2</sub> 2vol. % 충전한 복합재가 우수한 기계적 강도와 적당한 마찰계수, 가장 낮은 마모부피를 나타냈으므로 트라이보 복합재로써 적합할 것으로 판단된다.

4. CFRC의 마모부피는 미끄럼 마모거리가 증가함에 따라서 선형으로 증가함을 볼 수 있었다. 한편 미끄럼 마찰면이 45°인 복합재가 보다 낮은 마찰계수와 마모부피를 나타내었다.

5. CFRC의 마모기구는 응착마모와 연삭마모 및 표면 피로마모의 종합적인 마모기구를 형성하였다.

### 참고문헌

1. 林幹夫外, 炭素纖維의 應用技術, pp.116-131 (1984).
2. M.L. Minges, "Ablation Phenomenology(A Review), High Temp. High Press., Vol. 1, pp. 607-649(1969).
3. E. Fitzer, "Carbon Fibers and Their Composites(A Review)," High Temp. High Press., Vol. 16, pp.363-392(1984).
4. E. Fitzer and Antonios Gkogkidis, "Carbon Fiber Reinforced Carbon Composites Fabricated by Liquid Impregnation, Petroleum-Derived Carbons, ACS Symposium Series 303, pp.346-378(1986).
5. Baojian pu et al., "Tribological Characteristics of Carbon/Carbon Composites, "Nineteenth Biennial Conference on Carbon, pp.352-353(1989).
6. S. Awashi and J.L. Wood, "Carbon/Carbon Composite Materials for Aircraft Brakes," Ceramic, Eng. Sci. Proc., pp.553-556(1988).
7. E. Fitzer et al., "Carbon Fiber Reinforcement in Carbon Rinings of Disc Brakes," Carbon

88, pp.631-633(1988).

8. ASTM G 40, "Standard Terminology Relating to Erosion and Wear."

9. A. Kelly and S.T. Mileiko, "Fabrication of Composites," Handbook of Composites, Elsevier Science Publishers B. V., Vol. 3, pp.132-151 (1983).

10. Kyuichiro Tanaka et al., "Effect of Various Fillers on the Friction and Wear of PTFE Based Composites," Wear 79, pp.221-234(1982).

11. E. Minford, and K. Prewo, "Friction and Wear of Graphite-Fiber-Reinforced Glass Matrix Composites," Wear, 102, pp.253-264(1985).

---