

論文

탄소섬유의 기하학적 형태가 탄소/탄소 복합재료의
미세구조, 물리적 성질 및 마모현상에 미치는 영향

윤병일* · 조동환* · 하현승* · 이진용* · 박인서* · 김동규*

**Effect of Geometrical Types of Carbon Fibers on Microstructures,
Physical Properties and Wear Behaviors of
Carbon/Carbon Composites**Byung-Il Yoon*, Donghwan Cho*, Hun-Seung Ha*,
Jin Yong Lee*, In-Seo Park and Dong-Gyu Kim***ABSTRACT**

Three different geometrical types (random chopped roving, random chopped fabric, and 2-D fabric) of carbon fiber were used as the reinforcement of carbon/carbon composites prepared by a liquid impregnation method using resol-type phenolic resin. The effect of these types on microstructures, physical properties and wear behaviors of carbon/carbon composites was analyzed and compared. It was examined that the type of chopped fabric has more matrix-rich areas and microstructural and physical defects than other two types. The change of the pore size distribution between green and carbonized samples was studied. It was also observed that the type of chopped roving exhibits more wear debris on the friction surface than the types of chopped fabric and 2-D fabric.

초 록

레졸 형태의 페놀수지를 이용하여 액상침투법에 의해 탄소/탄소 복합재료를 제조하는데 세 가지 다른 기하학적 형태(random chopped roving, random chopped fabric, 2-D fabric)가 강화섬유로 사용되었다. 이들 세 형태가 탄소/탄소 복합재료의 미세구조, 물리적 성질 및 마모현상에 미치는 영향을 비교 분석하였다. Chopped fabric 형태가 다른 두 형태보다 매트릭스가 밀집되어 있는 부분이 더 많이 관찰되었으며, 이로 인한 더 많은 미세구조적, 물리적 결함을 보여주었다. Green 성형체와 탄화체 사이의 기공 분포의 변화도 연구되었다. 또한, chopped roving 형태가 chopped fabric과 2-D fabric 형태보다 마모표면에서 더 많은 wear debris가 존재함을 관찰할 수 있었다.

* 정회원, 국방과학연구소 고분자복합재료연구실

1. 서 론

탄소/탄소 복합재료(Carbon/Carbon Composites)는 경량성, 내열성, 고온강성 및 우수한 마찰/마모 특성 때문에 초음속 항공기 brake disk 및 미사일과 유도 발사체용 노즐 및 nose cone 등의 첨단 항공우주 소재로서 이용되고 있다[1]. 또한, 우수한 생체적합성 및 내화학성 때문에 인공치아 및 인공뼈 등의 의료용 재료로서도 응용되고 있다[2]. 탄소/탄소 복합재의 특수성과 높은 단가 때문에 현재 극히 제한된 분야에 이용되고 있지만, 이들의 우수한 열적, 기계적, 물리적 특성에 비추어 우주항공 및 군사용 소재로는 물론, 의료용, 산업용 등 여러 엔지니어링 분야의 첨단 고온용 구조재료로서 이용이 점차 확대되리라 기대된다[3,4].

일반적으로 탄소/탄소 복합재는 연속 필라멘트, 직조(woven fabric), 단섬유 및 3-D woven 형태의 탄소섬유 강화재와 탄소 매트릭스로 구성되어 있다. 탄소섬유 강화재는 사용 목적에 따라서 chopped roving, 또는 chopped fabric의 단섬유형, 일방향 섬유, 2-D fabric, 다차원 weaving 직조물, 그리고 hybrid같은 여러가지 다른 형태의 geometries(혹은 architectures)가 사용되어 진다. 다른 기하학적 형태를 갖는 탄소섬유와 매트릭스 수지의 적절한 조화는 탄소/탄소 복합재의 밀도, 수축률, 기공률 등의 물리적 성질 및 층간전단강도, 굴곡강도 등의 기계적 성질, 마찰/마모 특성 그리고 열적 성질과 미세구조에도 영향을 줄 수 있다[5~8].

탄소 매트릭스를 구성하는 주요 골격인 탄소섬유는 크게 연속섬유와 불연속섬유로 분류된다. 불연속섬유의 제조에는 일반적으로 복합재의 이방성을 줄이기 위한 목적으로 단섬유가 사용된다. 불연속섬유 강화재의 목적은 1) 구조물의 제조성을 증가시키고, 2) 재료를 더욱 등방성화시키고, 3) 층간전단강도를 증가시키며, 4) 복합재 기공을 감소시키는 역할을 하는 nucleation sites를 더 제공함으로써 더욱 강한 복합재를 얻기 위함에 있다. 연속섬유는 고강도의 필라멘트 특성을 이용하고, macroscale상의 배향성을 높이기 위해 사용되어 진다.

Jortner[9]는 탄화시 섬유 bundle의 수축과 기공

률과의 관계를 설명하면서 이들이 microcrack의 발달과 미세구조에 영향을 주며, 결과적으로 복합재의 특성과 손상에도 밀접한 관계가 있다고 기술하고 있다. 탄화시 매트릭스 precursor의 수축이 탄소/탄소 복합재의 기계적 성질에 크게 영향을 주므로 가능한 한 매우 높은 탄화율을 보이는 precursor의 선택이 중요하다고 알려지고 있다[10]. 한편, Stanek et al.[11]은 다른 기하학적 형태를 갖는 탄소 섬유 자체에서도 섬유의 배열방향(예: random, radial, concentric, normal)이 탄소/탄소 복합재의 마찰과 마모에도 영향을 준다고 주장하고 있다. 또한, 섬유배향은 탄화후나 고온열처리후 수축 및 밀도에 영향을 주며, 특히 radial과 concentric 방향의 disk는 normal이나 random 방향 보다 더 밀도가 높다고 보고하고 있다. Irwin[12]에 의하면 CVD를 이용한 탄소/탄소 복합재의 제조에도 섬유배향이 물리적 성질과 열응력에도 중요한 역할을 한다.

탄소/탄소 복합재료의 특성은 구성하고 있는 탄소 섬유와 매트릭스 모두에 의존하므로 이들 소재의 적절한 선택은 제조공정 및 최종 물성에도 중요한 역할을 한다. 이러한 관점에서, 본 연구에서는 탄소/탄소 복합재 강화 효과의 주요 골격이라 할 수 있는 기하학적 형태(random chopped roving, random chopped fabric, 2-D fabric)의 탄소섬유와 매트릭스의 상호 관계를 이해하는데 목적을 두고, 탄화 및 함침 공정시 야기되는 여러가지 물리적 변화와 미세구조 및 마모현상을 중점적으로 다루고자 한다.

2. 실험

2-1. 재 료

본 연구에서 사용된 강화섬유로는 태광산업(주)에서 생산된 12,000(12K) 필라멘트수를 갖는 polyacrylonitrile(PAN)계 고강도 탄소섬유로 구성된 roving(ACELAN TZ-307)과 8-H/S 조직을 갖는 2-D woven cloth(ACELAN 12KM-450 8HSW) 형태가 사용되었다. 탄소섬유 single 필라멘트 직경은 6.8 μm 이고, 밀도는 1.8g/cm³이다. 매트릭스 precur-

sor로는 Kolon유화(주)에서 제공된 레졸 형태의 페놀수지가 사용되었다. Brookfield Viscometer를 사용하여 측정된 수지의 점도는 25°C에서 약 450 centipoise이었다.

2-2. 프리프레그 및 Green body 제조

Chopped roving: 드럼형의 자체설계 제작된 프리프레그 장치를 사용하여 wet filament winding 방법에 의해 수지가 함침된 탄소섬유가 준비되었다. 수지가 포함된 섬유 bundle의 용매는 공기중 드럼 상에서 건조된 후, 이들을 B-stage로 만들기 위해 오븐 내에서 건조시킨 후 25mm 길이로 절단하였다.

Chopped fabric과 2-D fabric : 8-H/S carbon cloth에 수지를 hand lay-up식으로 균일하게 도포한 후 공기중에서 건조하였다. 이들은 B-stage화된 후 25mm×25mm의 chopped fabric과 100mm×100mm의 fabric 상태로 절단되었다.

탄소/탄소 복합체를 위한 green body는 MTP-14 Press(Tetrahedron Associates, Inc.)를 사용하여 100mm × 100mm × 5mm의 크기로 압축성형되었다. 이때의 성형조건은 중간온도 110°C와 최종온도 160°C에서 dwell time은 각각 30분과 2시간이었고, 110°C부터 1000psi의 압력이 나머지 경화과정 동안 가해졌다. 승온과 냉각속도는 각각 4°F/min, 압축속도는 1Klb/min이었다. Chopped roving과 chopped fabric용 프리프레그는 금형내에 방향성없이 무질서하게 배열하였으며, 금형크기로 준비된 2-D fabric(15~16 plies)은 금형내에 균일하게 적층되었다. 이렇게 제조된 시편 중 다이아몬드 톱을 사용하여 절단된 가운데 부분이 각 실험에 사용되고, 가장자리 부분은 사용하지 않았다.

2-3. 탄화 및 함침

제조된 green body는 Siliconit Combustion Tube Furnace를 사용하여 질소 가스 분위기하에서 시간당 12°C의 승온속도로 최종 열처리온도 800°C에서 탄화시켰다.

1차 탄화시편은 함침시키기 전에 함침조(impre-

gnation bath) 내부를 진공상태로 한 후 함침조 상단에 위치하고 있는 수지용기내의 수지를 일부만 내부에 주입시킨 후, 상온에서 질소 가압시키면서 수지가 탄화시편에 함침이 되게 하였다. 이때 함침 재료는 페놀수지가 다시 사용되었다. 진공정도는 3시간동안 약 0.1torr이었고, 압력은 5시간 동안 약 500psi 정도이었다. 함침이 완료된 시편은 autoclave 내에서 진공 bag을 사용하여 150psi 정도로 160°C에서 가압 경화시켰다. 함침 후 2차 탄화는 1차 탄화와 같은 공정조건하에서 실시되었다.

2-4. 시편분석

미세구조 Green body와 탄화물의 미세구조 관찰에 사용될 시편은 열경화성 수지로 cold mounting 한 후 0.3μm와 0.05μm 입자크기의 Al₂O₃를 사용하여 연마한 후 광학현미경(Nikon사)을 사용하여 50x~400x에서 관찰하였다. 마모시험 후 표면에서의 마모현상은 주사전자현미경(SEM, 일본 Joel사 제품, JXA-840A)을 사용하여 관찰하였다.

수축율, 밀도, 기공율 탄화 전·후 시편의 치수, 수축률, 무게 변화를 2~3개 시편의 여러 부분에서 3~4회 측정 후 평균값을 취하였다. 탄화 전·후 bulk density와 개기공(open pore)에 대한 apparent porosity는 ASTM C378-88에 의거한 수중치환법을 사용하여 측정되었다.

기공크기분포도 (pore size distribution) 기공크기 분포도는 mercury porosimeter(Poresizer 9310, Micromeritics Instrument Corporation)를 사용하여 측정하였다. 이 장치는 시편에 대하여 1psi부터 30,000psi까지 가해진 압력에 대해 변화되는 기공의 부피 및 표면적을 기공크기의 함수로 나타낸다. 사용된 시편용량은 3cc였다.

마모시험 마모시험은 pin-on-disk type의 장치를 사용하여 행하였다. 먼저 시편 holder에 준비된 탄소/탄소 복합재료 시편을 pin용으로 고정하고, 그 하부에는 상대재로서 같은 재료의 탄소/탄소 복합재료 시편을 disk용으로 위치하였으며, 모터에 의해 상대재 disk를 회전축을 중심으로 회전시켜 마모가 일어나도록 하였다. 이때 하중은 상부의 하중용 추를

이용하여 6.06Kg/m^2 의 수직하중(normal load)을 주고, 미끄러짐 속도(sliding speed)는 0.29m/sec 로 유지시켰다. 마모시간은 2시간 이었다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 미세구조 관찰

Green body 먼저 탄소섬유의 기하학적인 형태가 green body제조시 그 형상에 미치는 영향을 미세 구조적 측면에서 살펴보면, Fig.1에 보여지는것 처럼 도식적으로 표시할 수 있다. Fig.1(A)의 왼쪽은 chopped molding compound가 금형 위에 무질서하게 임의대로 배열된 모양을, 오른쪽은 일정 조건 하에서 성형 후 길이방향으로의 단면을 위에서 아래로 내려다 보고 가정된 모델이다. Chopped roving에서는 섬유가 방향성 없이 무질서하지만, uniform하게 배열되어 있는 밀집된 roving과 roving 사이에 수지가 흘러들어갈 수 있는 아주 균일하고 작은 공간(matrix pocket)이 다른 두 geometry와 비교하여 많이 분포되어 있을 확률이 크다. Fig.1(B)는 금형내에 $25\text{mm} \times 25\text{mm}$ 크기의 chopped fabric이 역시 무질서하게 놓여졌을 때를 가정하여 세운 모델로 우측의 그림은 그 green body 두께방향으로의 단면을 나타낸다. chopped fabric 경우는 크게 chop과 chop이 겹치는 영역과 겹치지 않는 영역으로 구분되는데, 일정한 성형압력이 주어졌을 때 전자 영역은 후자에 비하여 일정한 두께에 대해 보다 많은 압력을 받으므로 이때 수지가 후자 영역으로 더 용이하게 흘러 들어가게 되어, 비교적 큰 매트릭스 부분의 형성을 초래하며, 이들의 존재는 광학현미경으로 분명히 관찰할 수 있다. Fig.1(C)의 2-D fabric은 상기 두 경우와는 달리 일정한 두께의 ply로 적층됨으로써 ply와 ply 사이에 비교적 균일한 압력을 받게되어 가장 적은 양의 수지가 각층 전반에 걸쳐 균일하게 분포되어 있고, 매트릭스가 밀집된 영역은 비교적 드물게 보인다. Fig.1에서 제시된 모델들은 Fig.2의 사진에서 보여주는 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

Chopped roving은 일정방향 없이 무질서하게 배열된 roving과 roving 사이에 전반적으로 수지가 비

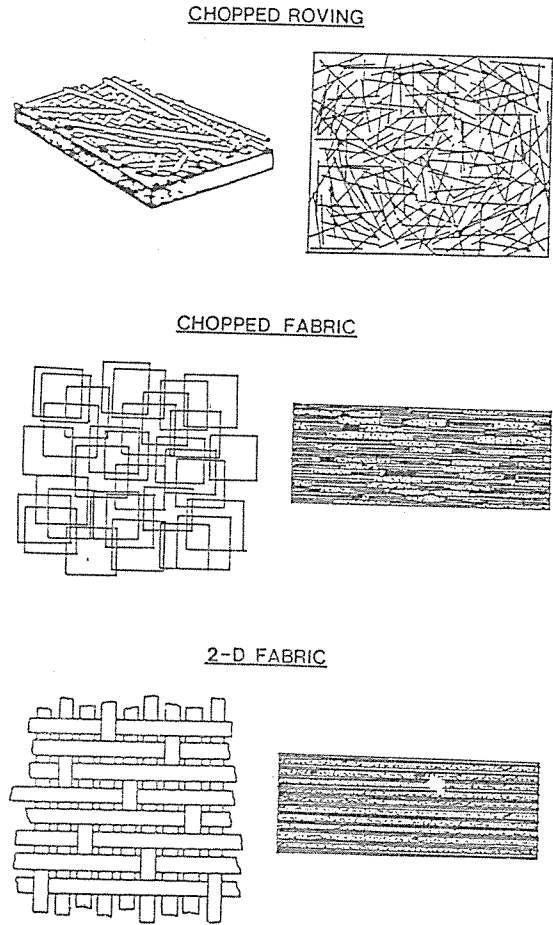


Fig. 1. Illustrations of Microstructural Models of the Green Body with Different Geometrical Types of Carbon Fibers.

교적 균일하게 분포되어 있었지만, Fig.2(A)와 같이 수지의 불충분한 흐름 때문에 생긴 매트릭스내의 보이드들도 일부 관찰되었다. 반면에 chopped fabric은 chop과 chop이 겹치는 부분이 겹치지 않는 부분보다 매트릭스가 밀집된 부분이 많이 분포하여 있었고 Fig.2(B)에서와 같이 수직방향의 섬유들 사이에 크랙들이 일부 산재하여 있다.

1차 탄화 후 Fig.3은 800°C 에서 1차 탄화 후의 미세구조를 나타내는 것으로서 chopped roving은

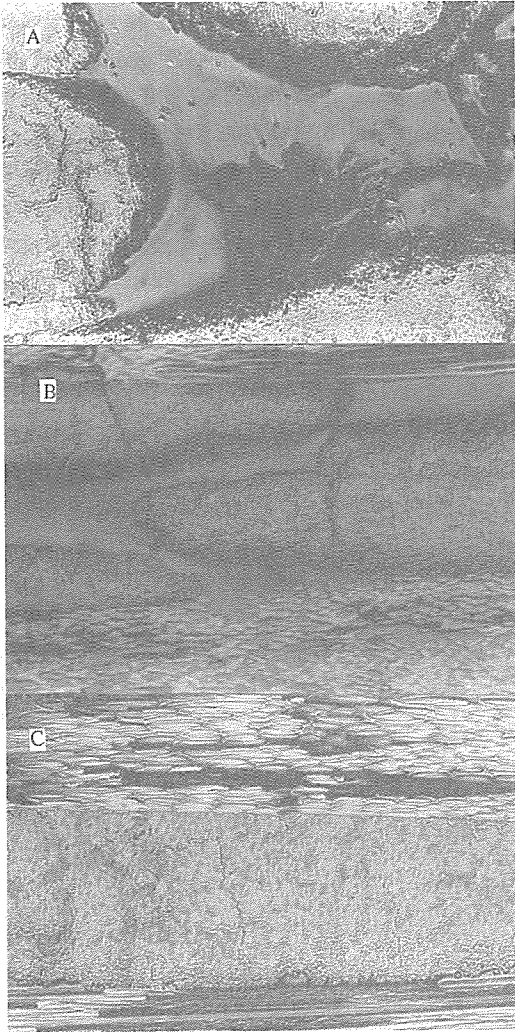


Fig.2. Optical Micrographs of the Green Body of Chopped Roving(A), Chopped Fabric (B), and 2-D Fabric(C).

수지가 다소 많이 분포된 영역에서 기공과 크랙이 생성되었고, chopped fabric과 2-D fabric 경우에는 층과 층 사이의 수지가 모여있는 부분에서 시작하여 수직으로 놓여진 섬유방향을 따라 수평하게 놓여진 섬유에 거의 수직방향으로 기공이나 크랙이 생성되었음을 알 수 있다. 특히 chopped fabric은 층간에 수지가 더 많이 존재하며 단위 면적당 더 많은 기공이 형성되었다. 이들 중 어느 정도는 탄화 공정시 수축과 팽창 과정을 통해 폐기공(closed pore)으로 존재할

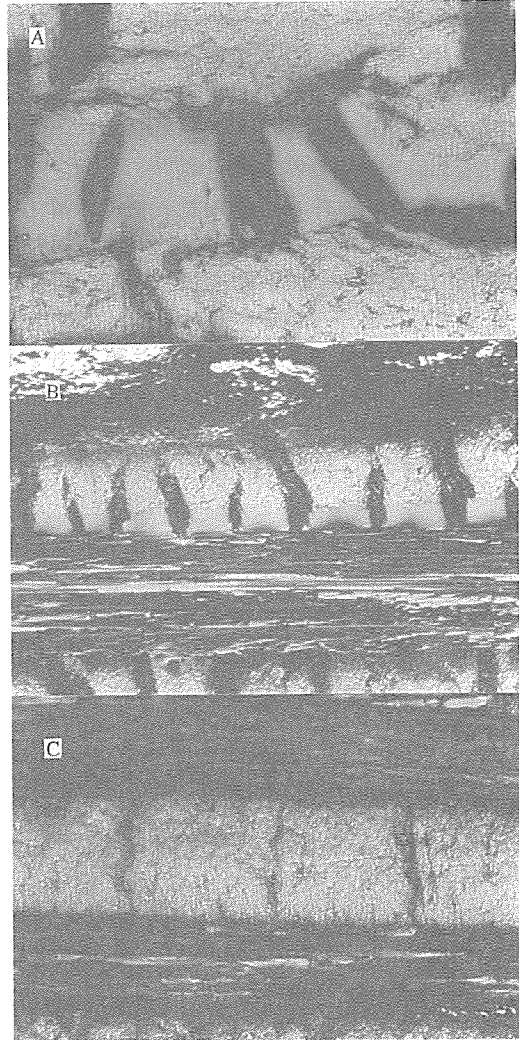


Fig.3. Optical Micrographs after the First Carbonization for Chopped Roving(A), Chopped Fabric (B), and 2-D Fabric (C).

확률이 다른 두 탄화된 시편 보다 더 많을 수 있다. 같은 방향으로 놓여 있는 섬유의 밀집 정도는 세 경우 거의 비슷하였다.

함침/재탄화 후 1차 탄화를 거친 시편을 다시 페놀수지로 함침시킨 후 경화한 시편에 대해 관찰해 본 결과, 10~20 μ m 정도의 기공(때로는 탄화시 반응가스 발생으로 인해 생긴 경로)은 함침이 되었지만

그 이상의 아주 큰 기공이나 보이드는 채워지지 않았다. 이는 함침과정 후 시편을 진공상태에서 상압으로 노출시킨 후 경화하기 위해 시편을 autoclave로 옮기는 과정에서 함침조내에서는 채워졌던 수지가 다시 밖으로 빠져나왔기 때문이다.

1차 탄화/함침/경화 과정을 거친 시편에 대해 1차 탄화시와 같은 조건하에서 재탄화시 1차때와 비슷한 탄화거동을 보이면서 기존에 있거나, 또는 미세기공에 함침되었던 수지영역에서의 재탄화 가스 발생 또는 열응력에 의해 기공의 경로가 다소 커진 현상이 관찰되었다.

3-2. 치수, 무게 및 밀도 변화율

Table 1은 앞에서 언급한 세 형태의 복합체에 대하여 green body와 800°C에서 1차, 2차 탄화를 거친 시편의 각 방향에 대한 치수 및 무게 변화와 수축률을 나타낸다. 두께방향(ΔT)의 수축이 길이방향(ΔL)이나 넓이방향(ΔW)의 것 보다 더 많이 일어남을 알 수 있다. 이는 길이나 넓이방향 보다 두께방향에서 순수한 수지에 의한 수축이 더 크기 때문이다. 2-D Fabric의 경우에는 이러한 현상이 더 현저하였다. 이는 fabric의 층과 층 사이에 수지가 비교적 균일하고 얇게 분포되어 있기 때문이다. 또한, 길이방향이나 두께방향으로의 변화율은 거의 무시할 정도의 아주 작은 수축을 보여주었다. 그러나 전체 부피변화(ΔV)는 5~7%를 나타냈다. 무게변화율은 1차 탄화 후 ($\Delta WT_{g \rightarrow 1}$) 16~19 wt%의 감소를, 함침과 2차 탄화 후에는 2~5 wt% 증가를 보여준다.

특히 chopped fabric의 경우에 가장 낮은 부피변

화율과 가장 큰 무게감소를 나타내는데, 이는 앞에서 언급하였듯이, 탄화과정 동안 다른 geometry에 비하여 상대적으로 보강섬유에 영향을 줄 수 있는 chop과 chop 사이에 많이 분포되어 있는 매트릭스에 가해진 열응력에 의한 수축응력이 심각하게 작용할 수 있음을 예측할 수 있다. 이는 물론 열처리과정 동안 가스발생이나 수축등에 의해 보이드나 크랙의 발생을 야기시킬 수 있음을 나타낸다.

2차 탄화후 무게변화를 보면, chopped fabric인 경우 가장 큰 증가율을 보여주었다. 그 이유는 1차 탄화후 매트릭스가 모여있는 부분에서 무게감소로 생긴 공간이 많아 결과적으로 가장 많은 양의 수지가 함침되었으리라 사료된다. 이는 앞에 설명한 미세 구조 현상에 비추어 볼 때 일치하는 결과라 볼 수 있다.

Fig.4는 green body와 1, 2차 탄화 후의 bulk density의 변화를 나타낸다. Green body의 밀도는

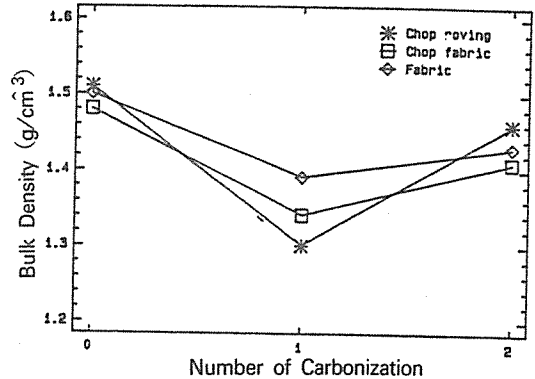


Fig. 4. Changes in the Bulk Density upon the 1st and 2nd Carbonization of the Green Body with Different Geometries.

Table 1. Dimensional and Weight Changes Before and After Carbonization of the Specimen with Different Geometries.

Geometry	ΔL	ΔW	ΔT	ΔV	$\Delta WT_{g \rightarrow 1}$	$\Delta WT_{1 \rightarrow 2}$
Chopped roving	-2.15	0	-4.08	-6.15	-16.34	+2.10
Chopped fabric	-0.20	-0.78	-4.17	-4.70	-18.97	+4.53
2-D Fabric	-0.10	-0.59	-7.14	-6.50	-16.03	+2.46

* $\Delta WT_{g \rightarrow 1}$ 는 green body와 1차 탄화물의 무게 변화비를 나타내며, $\Delta WT_{1 \rightarrow 2}$ 는 1차 탄화물과 2차 탄화물의 무게 변화비를 나타낸다.

geometry에 상관없이 약 1.5g/cm³의 균일한 값을 보여주었다. 1차 탄화후 chopped roving은 가장 심한 밀도 감소율(14%)을 보여주나, 2차 탄화후에는 가장 높은 증가율(12.4%)을 나타내었다. 이는 chopped roving의 경우 roving과 roving 사이에 비교적 균일한 수지분포 때문에 함침후 재탄화의 효율이 가장 좋았음을 나타낸다.

Chopped fabric은 복합재 표면 부근에서의 함침 상태는 양호하였으나, 내부에서는 섬유구조와 층과 층 사이에 기공분포 형태상 함침이 가장 안되었다.

3-3. 기공률과 기공크기분포도

기공률 변화 Fig.5는 이미 언급된 세 종류 시편들의 탄화 전·후 기공률의 변화를 나타낸다. 본 연구에서 기공크기분포도를 관찰하기 위해 사용된 mercury porosimeter는 300 μ m이상의 크기를 갖는 기공들에 대한 실험적인 제한 때문에 전체 존재하고 있는 개기공률(open porosity)에 대한 절대치를 측정하기 어려우므로, 이들 기공률은 실험에 언급한 바와 같이 수중치환법에 의해 측정하였다.

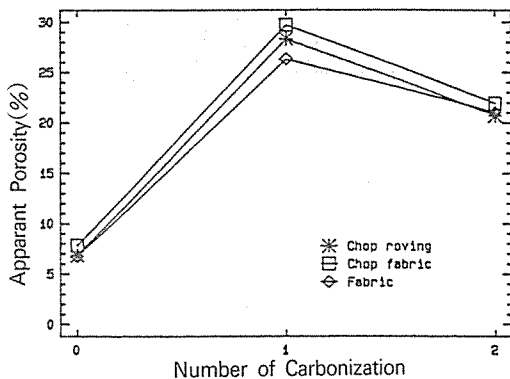


Fig. 5. Changes in the Apparent Porosity upon the 1st and 2nd Carbonization of the Green Body with Different Geometries.

Chopped fabric인 경우 green body는 chopped roving과 fabric의 값에 비해 약 15%의 높은 기공률을 나타내며, 1차 또는 2차 탄화후에도 다른 geometry에 비해 약간 높은 기공률을 보여주고 있다. 이 역시 앞에서 언급하였듯이, 탄화시 random하게 배

열된 chopped fabric 사이의 수지에 의한 내부응력이 비교적 크게 작용하여, 결과적으로 수지가 밀집된 부분에서 더 많은 크랙이나 기공을 초래하리라는 설명과 일치되는 결과라 하겠다. 반면, chopped roving과 fabric green body의 기공률은 유사하며, 1차 탄화후 fabric은 다른 두 geometry에 대한 값에 비해 약 7% 정도의 다소 낮은 기공률을 보여주고, 2차 탄화후는 비슷한 기공률을 나타내고 있다. 이는 fabric 경우 연속하게 놓여 있는 균일한 ply가 이러한 현상들을 보완해주는 작용을 하여, 내부응력을 최소화할 것으로 예상된다. 2차 탄화후 chopped roving의 상대적으로 다소 감소된 기공률은 밀도의 증가폭으로도 예상할 수 있듯이 비교적 효과적인 함침 및 2차 탄화에 의한 가장 적은 물리적 변화에 기인한다고 볼 수 있다. 이상에서 기술된 물리적 변화 현상들은 앞에 언급한 미세구조적인 관찰과도 일치하고 있다.

기공크기 분포 Fig.6은 각 세 종류의 시편에 대해 탄화전과 탄화후 기공크기변화의 함수에 대해 기공 부피 변화의 증가분을 나타내는 기공크기분포도 결과이다. 약 0.4 μ m 크기의 기공이 가장 큰 증가분을 보여주며, 전체적으로 0.2 μ m와 2 μ m 사이의 기공 크기가 현저히 늘어남을 알 수 있다. 이러한 기공 크기의 transition 현상은, 탄화과정시 큰 기공중 일부는 발생가스가 생성되고 주위의 수지 경화물이 탄화되면서 생겨난 보이드나 크랙에 의해 기공의 크기가 더 커지거나 새로운 기공이 생성되며, 일부는 수축응력에 의해 내부수축이 일어나면서 기공이 세분화 되면서 더 많은 수의 작은 크기로 변화하기 때문이라 사료된다. 이러한 거동은 chopped roving과 chopped fabric인 경우 유사하게 나타나며, 그에 비해 fabric은 0.2 μ m~2 μ m 사이의 분포가 다소 단분산적으로 보여주고 있다. 이러한 기공크기분포도는 함침과 탄화의 효과적인 반복과정을 통해 더 작은 크기 영역으로 transition됨이 바람직하다고 본다.

3-4. 마모현상 관찰

Fig.7은 2차 탄화를 마친 chopped roving과 chopped fabric 및 fabric 형태를 갖는 탄소/탄소 복합

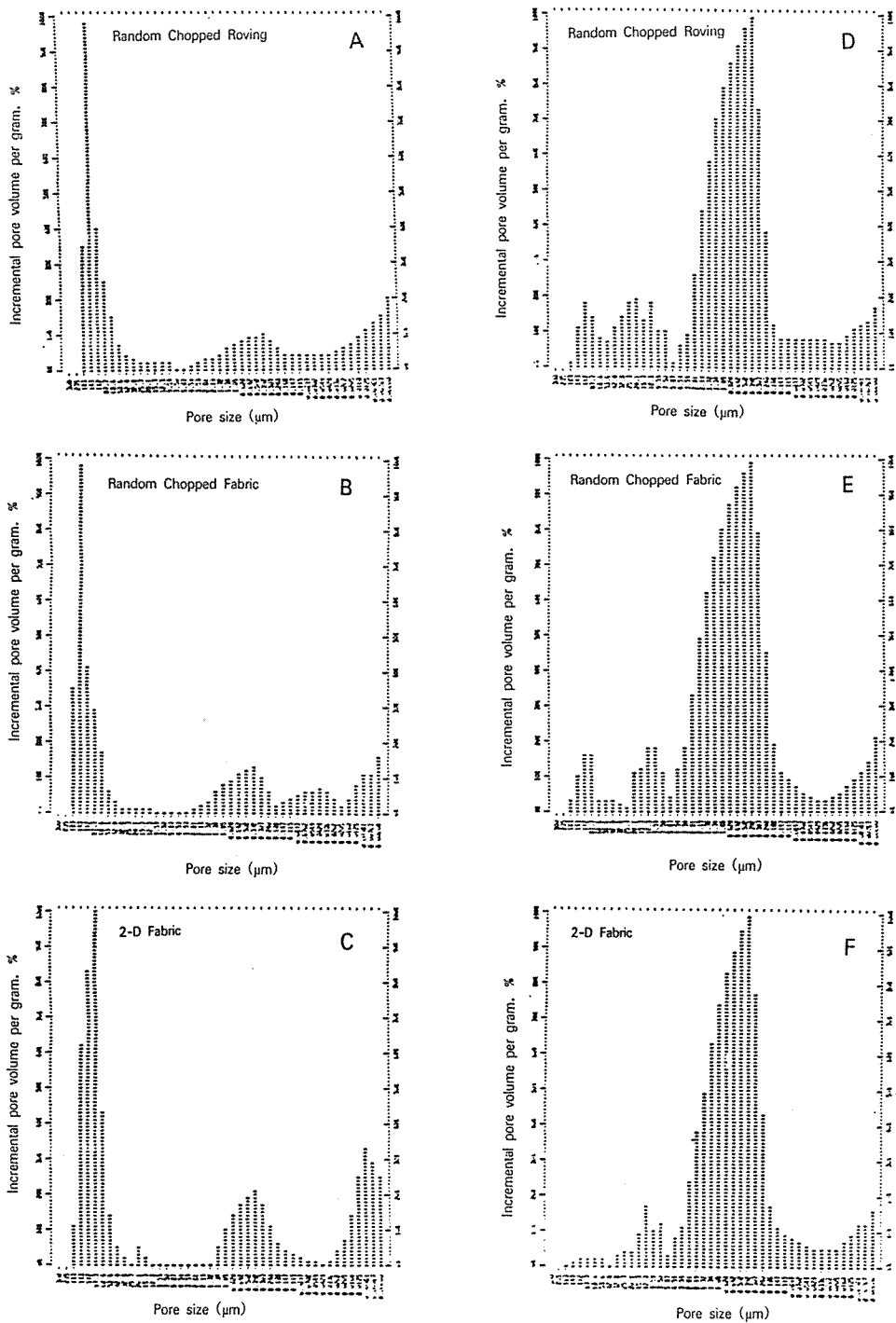


Fig. 6. Distribution Profiles of Incremental Pore Volume against Pore Diameter for Green (left three) and Carbonized (right three) Samples of Chopped Roving (A, D), Chopped Fabric (B, E), and 2-D Fabric (C, F).

재를 pin-on-disk type의 마모시험 장치를 사용하여 마모시험한 후 track 표면의 미세구조를 관찰한 사진이다. Green body와 탄화물의 미세구조 결과와 일치하듯이, chopped fabric은 균데균데 마모에 의해 드러난 chop과 chop 사이에 존재하는 수지가 밀집

되어 있는 부분과 이 부분에서의 크랙을 관찰할 수 있다. 이러한 현상은 다른 두 형태에 비해 chopped fabric의 물리적, 기계적 특성 및 마찰/마모 특성을 저하시키는 요인이 될 수 있다. Chopped roving의 마모면은 섬유와 수지가 불균일한 부분에 다소 크랙들이 보이지만 섬유와 수지의 분포가 비교적 균



Fig. 7. Micrographs Observed by SEM for the Surface Tracked after Wear Tests.
 A. Chopped roving; B. Chopped fabric
 C. 2-D fabric.

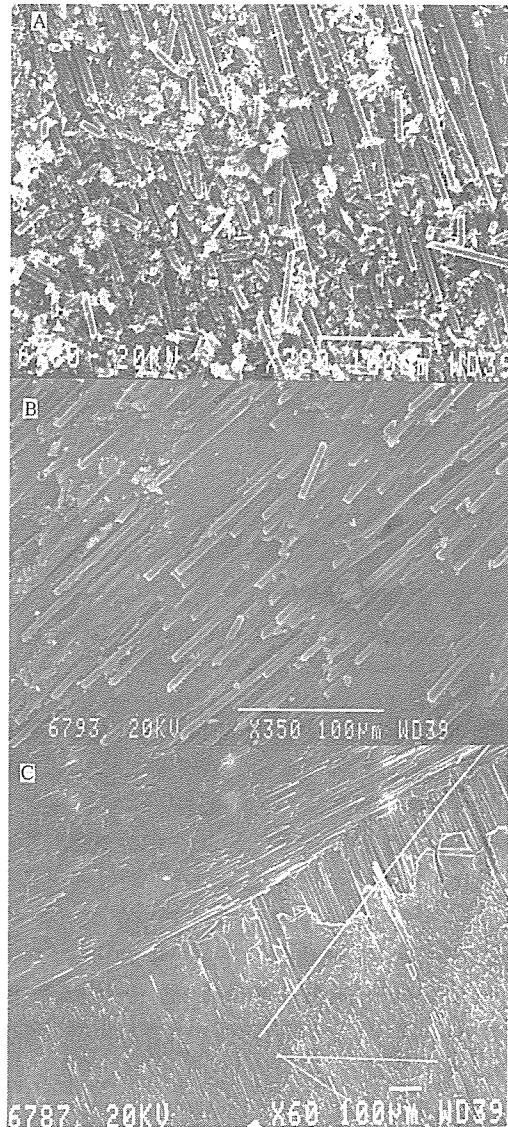


Fig. 8. Close Inspection of the Three Wear Surfaces Shown in Fig. 7.

일하였고, 탄소섬유와 매트릭스로 부터 잘려 나간 마모파편(wear debris)이 chopped fabric과 2-D fabric에 비해 상대적으로 많았다(Fig.8). 이들이 표면 마찰현상에 중요한 자체 윤활제(self-lubricant) 역할을 하리라 사료된다. Fabric 경우는 주어진 조건하에서의 마모시험 후 track 표면 상태가 가장 양호하였으며, 섬유가 pull-out되는 현상(Fig.8)이 관찰되었으나 수지가 모여있거나 크랙이 생긴 부분은 극히 드물었으며 주어진 조건하에서 비교적 큰 변화를 보여주지는 않았다.

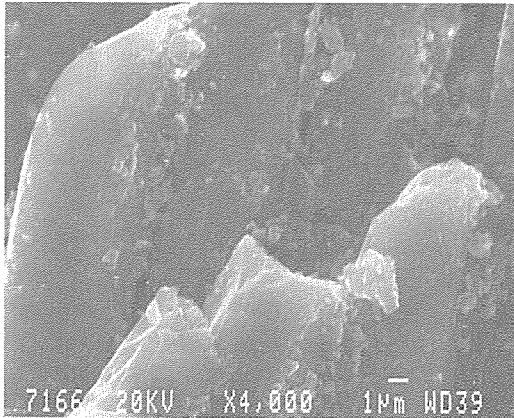


Fig. 9. Formation of Wear Debris on the Frictional Surface Observed by SEM for Carbon/Carbon Composite.

Fig.9는 마모면을 확대한 SEM사진으로 마모 debris가 섬유 자체와 매트릭스 계면에서 생기는 것보다 다른 부위에서 떨어져 나온 debris들이 섬유 부위에 흡착되는 현상을 단면적으로 보여주고 있다. 물론 마찰 방향에 따라 섬유가 shear되거나 약한 부위에서 섬유 일부가 잘려져 나간 부분의 단면을 관찰할 수 있다. 이들 마모파편들은 마모가 진행됨에 따라 더욱 많이 생기고 세분화되어 탄소섬유들 사이, 혹은 비워진 매트릭스 사이에 채워지며 마찰 film을 형성하게 된다.

4. 결 론

1. 탄화시 시편의 두께방향으로 수축이 가장 크게

일어났다. Chopped fabric인 경우 Chopped roving이나 2-D fabric 형태와는 다른 물리적 현상 및 미세구조를 보여주었다. 1차 탄화후 함침된 양은 Chopped fabric이 많았으나 함침후 2차 탄화효율은 chopped roving이 양호하였다. 2차 탄화후 bulk density는 chopped roving, 2-D fabric, chopped fabric 순으로 높았으며, 기공률은 chopped fabric이 다른 두 형태 보다 다소 높게 조사되었다.

2. Chopped fabric 형태를 가질 경우 매트릭스가 밀집된 부분에 국부적인 열응력에 의한 수축 응력이 다른 두 형태에 비해 심각하게 작용하여 더 많은 보이드, 크랙, 혹은 폐기공의 발생을 야기시킬 수 있다고 사료되었다. 이러한 chopped fabric 형태가 상대적으로 많은 미세구조 결함(microstructural defects)을 가진 것으로 조사되었다.
3. 다른 형태와 비교하여, fabric 형태는 탄화 후 기공률이 낮고, chopped fabric은 다소 높게 나타났다. 사용된 탄소섬유의 기하학적 형태에 관계없이 탄화공정중 green body내 기공이 수축과 팽창으로 인한 기공의 거동 변화로 기공 크기의 transition이 관찰되었으며, $0.2\mu\text{m} \sim 2\mu\text{m}$ 사이의 기공들이 가장 많은 증가 분포를 보여주었다.
4. Chopped roving 형태가 chopped fabric이나 2-D fabric 형태에 비해 마모면에서 더 많은 wear debris가 관찰되었다.

참 고 문 헌

1. Buckley, J.D., Ceramic Bulletin, 67(2), 364 (1988).
2. Bokros J.C., Carbon, 15, 355 (1977).
3. Tenney, D.R., Lisagor, W.B., Dixon, S. C., J. Aircraft, 26(11), 953(1989).
4. Fitzer, E., Carbon, 25, 163 (1987).
5. Fitzer, E., Hüttner, W., J. Phys. D.: Appl. Phys., 14, 347(1981).
6. Manocha, L.M., Bahl, O.P., Carbon, 26,

- 13 (1988).
7. Kibler, J.J., "Extended Abstracts", 13th Biennial Conference on Carbon, Irvine, CA, July 18~22, 1977, p.373.
 8. Li, L., Wang, J., Lin, D., "Extended Abstracts", 20th Biennial Conference on Carbon, University of California, Santa Barbara, CA, June 23~28, 1991, p.340.
 9. Jortner, J., "Extended Abstracts", 13th Biennial Conference on Carbon, Irvine, CA, July 18~22, 1977, p.406.
 10. Fitzer, E., Cziollek, J., Jacobsen, G., "Extended Abstracts", 15th Biennial Conference on Carbon, University of Pennsylvania, Philadelphia, PA, June 22~23, 1981, p.280.
 11. Stanek, P., Murdie, N., Hippo, E.J., Howdyshell, B., "Extended Abstracts", 20th Biennial Conference on Carbon, University of Santa Barbara, CA, June 23~29, 1991, p.378.
 12. Irwin, J.L., "Extended Abstracts", 13th Biennial Conference on Carbon, Irvine, CA, July 18~22, 1977, p.15.
-