

첨가제에 의한 저밀도 2-D 탄소/탄소 복합재의 층간전단강도 개선

손종석 · 정구훈 · 주혁중[†]

충남대학교 고분자공학과

(2000년 6월 23일 접수)

The Improvement of Interlaminar Shear Strength for Low Density 2-D Carbon/Carbon Composites by Additives

Jong-Seok Son, Ku-Hun Chung, and Hyeok-Jong Joo[†]

Department of Polymer Engineering, Chungnam National University, Taejeon 305-764, Korea

[†]e-mail : joohj@cwic.cnu.ac.kr

(Received June 23, 2000)

요약: DSC와 TGA 분석으로 탄소섬유/페놀수지 복합재의 최적 경화조건과, 탄화조건을 선정하고 핫프레스 몰딩 방법으로 복합재를 제조한 후 1400 °C까지 탄화하였다. 또한 층간전단강도의 개선에 효과적이라 생각되는 흑연분말, 카본블랙, 분쇄된 탄소섬유 및 탄소섬유 매트를 첨가하여 이러한 첨가제가 밀도 및 기공도에 미치는 영향과 ILSS, 굽힘강도와 같은 기계적 물성과의 상관관계에 대하여 연구하였다. 흑연분말을 약 9 vol% 첨가한 경우 가장 큰 ILSS 값과 굽힘강도 값을 나타내었고 카본블랙의 경우, 약 3 vol%에서 ILSS 값이 약간 증가하였으나 굽힘강도는 감소하였다. 분쇄된 탄소섬유와 탄소섬유 매트 첨가시 수지부족과 열수축에 의한 층간분리가 발생하여 밀도와 ILSS 및 굽힘강도를 감소시키는 결과를 나타내었다.

ABSTRACT: The optimum cure cycle and carbonization condition were selected by the DSC and TGA analysis and green bodies were prepared by the method of hot press molding and then carbonized up to 1400 °C. Additives such as graphite powder, carbon black, milled carbon fiber and carbon fiber mat, which were considered to be effective in improving the interlaminar shear strength, were also added to check their effects on the density and porosity of products. Then, their relations with mechanical properties such as ILSS and flexural strength were investigated. The composites added 9 vol% of graphite powder showed the greatest values of ILSS and flexural strength. Otherwise, in case of adding carbon black, the composites showed the slight improvement of ILSS at its contents of 3 vol% but the flexural strength was decreased. When milled carbon fiber and carbon fiber mat were added, the lack of resin and the heat shrinkage during the carbonization caused the delamination, resulting in decreasing the density, ILSS and flexural strength.

Keywords: carbon/carbon composites, interlaminar shear strength, additives.

서 론

탄소/탄소 복합재료는 초고온에서 열 안정성과 삭마특성이 우수하여 우주 왕복선의 leading edge, 항공기용 브레이크 디스크, 로켓트 노즐, 핵융합로의

플라스마 facing component 등에 사용되고 있다. 최근에는 전자파 차폐용 군용 항공기 등 우주항공산업과 그 밖에 일반 산업분야에서도 서서히 응용면이 확대되고 있다. 특히 저밀도 2D-탄소/탄소 복합재료는 공정이 간단하고 가격이 저렴하여 범용 탄소/탄

소 복합재료로 널리 사용되고 있다.¹⁻⁴

탄소/탄소 복합재료(carbon fiber reinforced carbon, CFRC)의 기지 전구체로 널리 사용되는 페놀수지는 가공성이 우수하고, 탄화후의 높은 탄소 수율을 보여준다. 그러나 페놀수지 기지 전구체는 열분해 과정에서 무정형 탄소로 전환될 때, 생성되는 많은 분해기체에 의해 복합재의 내부에 큰 용력이 발생하여 CFRC의 기계적 물성을 저하시킨다.⁵⁻⁷ 특히 이러한 내부용력에 의해 CFRC의 층간전단강도(interlaminar shear strength, ILSS)는 인장강도와 비교해 볼 때 매우 낮은 값을 갖는다.⁸ 이러한 낮은 ILSS 값을 개선하는데 있어 그 동안 많은 연구가 이루어져 왔으며, 현재에도 탄소 매트릭스의 강인화 개질에 많은 관심을 갖고 있다.⁹⁻¹² Sandhu 등은 페놀/탄소 복합재의 승온속도를 천천히 하여 가스발생속도를 조절하는 열분해 반응의 속도 모델을 제안함으로써 이러한 열용력에 대응하기도 하였으며,⁵ Y. Tanabe 등은 높은 전단강도를 갖는 CFRC를 얻기 위한 중요한 인자로 첫째, 매트릭스의 흑연화 진행을 억제시키고, 둘째, 매트릭스에서 흑연구조단위로의 배향을 막아야 한다고 제안하였다.¹⁰ 또한 열경화성 수지에 의한 CFRC 복합재에서 매트릭스 탄소의 미세구조는 복합재의 열처리, 섬유와 매트릭스간의 접착력조절, 미세한 분말첨가에 의한 기지의 개질에 의해 주로 변화될 수 있는데, 특히 흑연분말의 첨가는 수지의 중합을 지연시키고, 탄화 공정 중 수축에 의한 열린기공도를 감소시킨다고 하였다.¹¹

매트릭스의 파괴는 복합재 파괴의 원인으로 작용한다. 이때 흑연분말의 첨가로 매트릭스에 연성(ductility)을 부여하고 크랙 끝에서의 용력을 분산시켜 용력의 집중에 의한 크랙 형성을 막을 수 있다. 이러한 흑연의 첨가는 섬유 용력전달, 인장신율, 전단강도와 같은 기계적 성질 향상에 기여하며, 미세결정구조 형성을 방해함으로써 결정구조에 의한 큰 크랙을 미세 크랙으로 전환할 수 있다.⁹

이 밖에도 핏치에 의한 CFRC의 제조에 있어 카본블랙이 핏치의 저분자 물질을 유지시켜 탄소수율을 증가시키고 핏치의 물성을 향상시킴이 알려져 있으며,¹² 단섬유(chopped fiber)를 보강재로 한 CFRC는 온도가 증가함에 따라 ILSS가 증가됨이 보고되기도 하였다.⁸

본 연구에서는 저밀도 2-D 탄소/탄소 복합재료의 층간 성질에 영향을 끼칠 수 있는 밀도, 기공도 및 매트릭스의 개질 등을 향상시키기 위하여 흑연분말, 카본블랙, 분쇄된 탄소섬유와 탄소섬유 매트릭스를 각각 첨가하여 이로 인한 층간전단강도(ILSS) 및 굽힘강도에 미치는 영향과 밀도, 기공도 등의 변화를 살펴보고 첨가제에 따른 시편의 파괴거동을 알아보았다.

실 험

실험재료. 탄소/탄소 복합재를 제조하기 위해, 기지전구체로 코오롱유화(주)의 레졸형 페놀수지를 사용하였으며 TGA 분석에 의한 페놀수지의 고형분은 55.8 wt %이었고, 비활성 분위기에서 1000 °C까지 승온한 후 38.3 wt % 탄소물질이 남아있었다. 매트릭스로 사용된 페놀수지의 자세한 사항은 Table 1에 나타내었다.

보강재인 탄소섬유는 태광산업(주)에서 생산되는 고강도 PAN계 탄소섬유로, 2-D woven fabric을 사용하였으며 섬유의 특성은 Table 2와 같다.

층간전단강도(ILSS)를 향상시키는데 효과적이라고 생각되는 첨가제로 흑연분말, 카본블랙, 탄소섬유 매트릭스 및 분쇄된 탄소섬유를 선택하였으며 Table 3은 각 첨가제의 특성을 나타내었다. 분쇄된 탄소섬유와 탄소섬유 매트릭스의 밀도는 액체비중방법(density gradient column)으로 측정된 값이며 분쇄된 탄소섬유의 평균입자크기는 화상분석기(image analyzer) 관찰을 통해 확인하였다. 또한 흑연분말의 입자크기는 multisizer AccuComp 1.19를 이용한 coulter 방법

Table 1. Specification of Matrix Precursor

resin type	resin contents (%)	viscosity (cps)	density (g/cm ³)	color (GA)
KRD-HM2	58~60	160~200	1.4	6

Table 2. Specification of 2-D Woven Carbon Fabric

fiber type	woven type	mass/area (g/cm ²)	thickness (mm/ply)	remark
TZ-307	8H/satin	0.045	0.35	12K

Table 3. Typical Properties of Additives

additives	properties
graphite	type : artificial graphite particle size : 3, 5, 6 μm density : 2.1 g/cm ³
carbon black	particle size : 40 nm density : 1.43 g/cm ³ DBP absorption : 7 mL/100 g volatile contents : 0.6%
carbon fiber mat	areal weight : 10 g/m ² density : 1.45 g/cm ³
milled carbon fiber	type : TZ-307 HTT : 2200 $^{\circ}\text{C}$ density : 1.8 g/cm ³ size : 120 μm

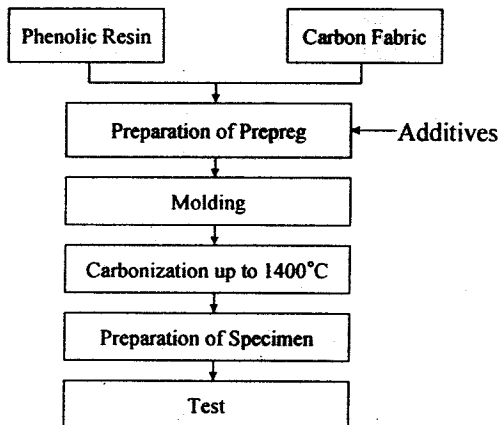


Figure 1. Flow diagram of preparation of carbon/carbon composites.

으로 측정된 값이다.

시편제조 및 시험. 물성측정에 필요한 시편 제조 및 시험은 Figure 1의 순서로 시행되었으며 시편시험은 ASTM에 의거하였다.

프리프레그 제조. 탄소섬유-페놀수지의 프리프레그를 제조하기 위해 페놀수지의 고형분에 대하여 흑연분말을 0, 3, 6, 9 및 12 vol%를 첨가하였으며 카본블랙과 분쇄된 탄소섬유는 0, 1, 3, 6, 9 vol%로 첨가하였다. 또한 탄소섬유 매트는 프리프레그 층과 층사이에 한장씩 넣어주었다. 제조된 프리프레그는 90 $^{\circ}\text{C}$ 에서 약 15분 가량 건조하여 휘발성분을 제거하였다.

경화. DSC 분석을 통해 얻어진 최적의 경화사이클

에 따라 제조된 프리프레그로 초벌체 (green body)를 성형하였다. 이때 성형체의 섬유함량을 50 vol%로 맞추기 위해 프리프레그를 11장 적층하였으며 핫프레스몰딩의 방법으로 500 psi의 압력을 가해주면서 stopper로 5 mm의 두께를 유지하였다.

탄화. 성형된 초벌체는 질소분위기로 상온에서 1400 $^{\circ}\text{C}$ 까지 20 $^{\circ}\text{C/hr}$ 의 승온속도로 탄화시켰으며 1400 $^{\circ}\text{C}$ 에서 1시간 유지하였다.

층간전단강도 (ILSS) 및 굽힘강도 시험. 첨가제의 도입에 따른 CFRC의 층간접착력 향상과 강도 등에 미치는 영향을 알아보기 위해 LLOYD사의 만능시험기 (UTM)인 LR30K를 이용하여 3-점 굽힘에 의한 방법으로 시험하였다. ILSS 측정은 ASTM D2344-84에 의거한 short beam 시험 방법으로 스펠 대 두께의 비는 4, 시편길이 대 두께의 비를 6으로 하여, 1.33 mm/min의 cross head 속도로 힘을 가하였다. 또한 굽힘강도의 시험은 ASTM D790의 방법으로 시편두께 5 mm를 기준으로 폭 10 mm, 길이 100 mm의 시편을 준비하였고, 스펠 길이는 80 mm로 선택하였다. 이때 사용된 cross head 속도는 2.1 mm/min였다.¹³

밀도 및 열리기공도 (Open Porosity) 측정. 첨가제에 따른 시편의 벌크 밀도와 기공도는 ASTM C373-88에 의한 수중침법으로 측정하였으며 사용된 계산식은 다음과 같다.

$$\text{Bulk Density } (B) = \frac{D}{M-S}$$

$$\text{Open Porosity } (P) = \frac{M-D}{M-S} \times 100$$

D: 시료를 150 $^{\circ}\text{C}$ 에서 건조 후 상온 무게

S: 시료를 증류수에 5시간 끓인 후 상온까지 냉각 후의 수중무게

M: 포수된 시료 표면의 수분 제거 후 측정된 무게

또한 흑연분말이 첨가된 시편의 기공크기 분포를 확인하기 위해 수은 기공 측정기 (porosimeter)인 poresizer 9320을 사용하였다. 이때 수은의 밀도는 13.55 g/mL, 표면장력은 485 dyn/cm이며, 4.45 psi

의 maximum head pressure를 가하였다.

SEM 분석. ILSS 시험후에 층간분리된 층간접착면과 굽힘강도 시험후 파괴단면의 모습을 관찰하기 위해 일본 Toplon사의 SM-500 주사전자 현미경을 이용하였다.

결과 및 고찰

밀도 변화. 초벌제가 탄화될 때 페놀수지가 열분해하여 분해 기체가 방출하게 되고 이로 인해 중량의 감소와 수축이 일어난다. Figure 2는 ASTM에 의거하여 측정된 CFRC의 벌크밀도를 첨가제의 양에 따라 도시하였다.

흑연분말을 첨가한 경우 첨가량에 따라 직선적으로 증가하면서 9 vol%일 때 최고치의 밀도 값을 보였으며, 카본블랙의 경우 3 vol%일 때 밀도 값이 가장 높았다. 또한 분쇄된 탄소섬유가 첨가된 경우 초기에는 밀도 값의 변화가 없다가 첨가량이 증가함에 따라 밀도의 감소를 나타내었다. 흑연의 첨가 시 9 vol%까지 밀도가 증가하는데, 이는 밀도가 큰 흑연 분말의 첨가와 층과 층 사이에 존재하는 페놀수지가 탄화되어 수축이 두께방향으로 크게 일어나게 될 때, 흑연분말에 의해 기지의 개질과 분자간의 상호작용이 증가됨에 따라 수지의 수축에 의한 크랙 또는 층간분리의 진행을 억제한 결과이다. 또한 분쇄된 탄소섬유가 첨가된 경우, 프리프레그의 제조 시, 미세한 분말 형태의 흑연과 카본블랙과는 달리 탄소 섬유 분말이 서로 엉키어 불규칙하게 배합되는데, 이러한 분쇄 탄

소섬유의 불규칙한 배합과 배향으로 섬유 과량 부분에서 수지의 양이 상대적으로 부족하게 된다. 계면에서의 수지의 양 부족은 계면에서의 접착력 감소를 가져와 층간 분리가 발생하는데, 이로 인해 복합재의 탄화 시 부피가 증가하였다고 해석할 수 있다.

열리기공도 측정. 흑연의 첨가에 의해 기공도는 감소하였으며 카본블랙과 분쇄된 탄소섬유의 첨가시에도 특정량에서 기공도 감소효과를 나타내었다 (Figure 3). 이는 앞에서의 밀도 경향과 유사한 연관성을 보여준다. 즉, 밀도 값이 큰 시편일수록 기공이 작았으며, 밀도 값이 작은 시편의 경우 수지의 수축에 의한 크랙 및 거대기공이 발달하였음을 예상할 수 있다.

Figure 4는 흑연의 첨가에 따른 기공도를 자세히 살펴보기 위한 수은 기공측정기 측정 결과로 기공의 크기에 따른 분포를 나타내고 있다. 약 2 μm 의 기공 분포를 보면 흑연이 첨가된 시편과 첨가제가 첨가되지 않은 시편에서 기공이 공통적으로 다량 존재함을 확인할 수 있었으나 첨가제가 없는 시편에서 약 2배 많은 양이 존재하였다. 약 50 μm 의 큰 기공들이 양 쪽 시편에서 거의 같은 양으로 발견되었으며, 특히 120 μm 이상의 거대기공은 흑연 첨가 시편에서 전혀 발견되지 않았다.

미세한 기공들은 크랙성장을 분산시키는 역할을 함으로써 CFRC의 인성을 향상시키는 역할을 하지만,² 약 100 μm 이상의 거대기공들은 크랙 그 자체 또는 크랙발생의 시발점으로 작용하기 때문에 이러한 현상은 굽힘강도와 ILSS와 같은 기계적 물성을 크게 저하시킬 것으로 생각된다.

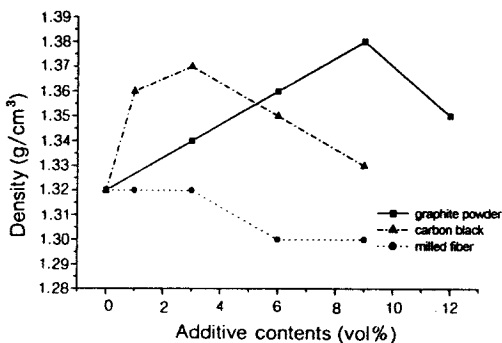


Figure 2. Density change of various specimens after carbonization.

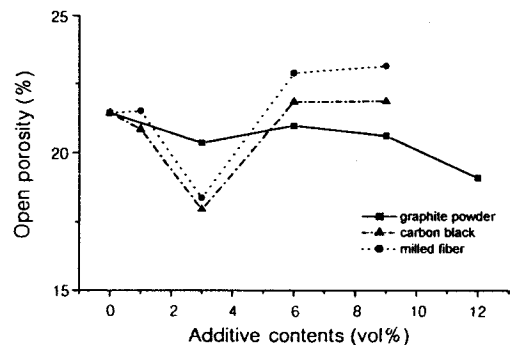
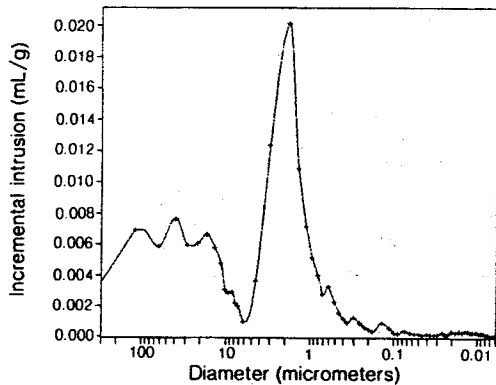
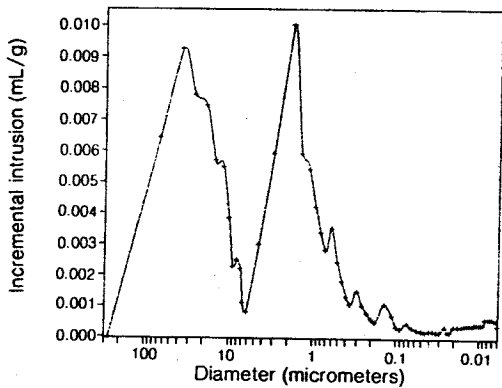


Figure 3. The effects of various additives on open porosity of carbon/carbon composites.



(a)



(b)

Figure 4. Distribution of pore size of carbon/carbon composites. (a) no additives and (b) graphite powder added(9 vol%).

층간전단강도 (ILSS) 및 굽힘강도. Figure 5와 6은 각 첨가제의 첨가량에 따른 ILSS와 굽힘강도의 변화를 나타내고 있다. 앞에서의 밀도변화와 거의 같은 경향성을 보이고 있으며, 기공도 측정 결과 또한 이러한 현상을 잘 설명할 수 있다. Figure 7은 첨가제들의 첨가량에 따른 굽힘탄성률을 나타내었다. 흑연, 카본블랙, 분쇄된 탄소섬유의 함량이 증가함에 따라, 일반적으로 탄성율은 감소하였다.

흑연분말 9 vol% 첨가 시 ILSS와 굽힘강도 값이 가장 증가하였고, 보다 높은 흑연함량에서의 강도의 감소는 과량의 흑연분말로 인한 수지양의 감소와 강도가 크지 않은 흑연분말 그 자체에 의한 결함으로 작용하기 때문이다.⁶ 초벌제의 탄화시 매트릭스에서

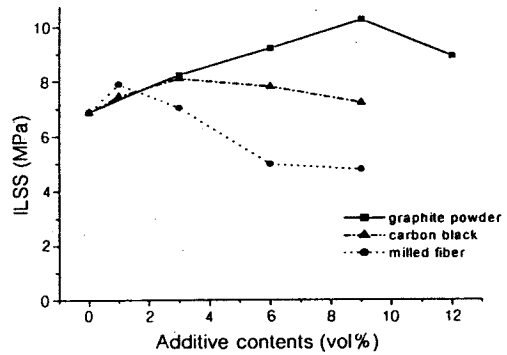


Figure 5. Interlaminar shear strength (ILSS) of carbon/carbon composites according to additive contents.

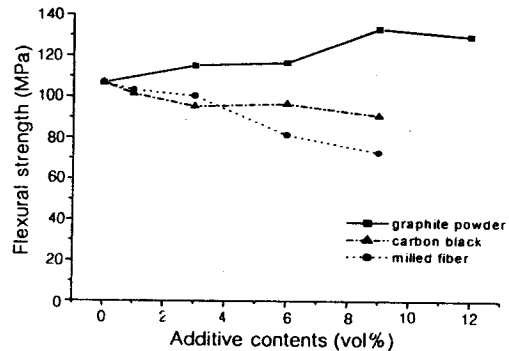


Figure 6. Flexural strength of carbon/carbon composites according to additive contents.

쉽게 결합이 형성되고, 이러한 결합의 형성으로 복합재의 강도저하를 가져온다. 탄화 과정에서 매트릭스 내부에서는 분자들의 배향에 의한 결정화가 이루어지는데, 이러한 결정화가 크게 진행되면 복합재에 취성이 생긴다. 이때 흑연 분말이 첨가되어 이러한 매트릭스 분자들의 배향을 막아 미세결정구조로의 전환을 억제함으로써 매트릭스에 인성을 부여한다.⁹ 또한 열적으로 안정한 흑연분말 입자에 의해 초벌제의 탄화 수축을 줄여 수축시 발생하는 탄소섬유의 절단을 막고, 충격 시 크랙의 진행경로를 지연시켜 응력의 집중을 막아줌으로써 강도를 향상시킨다.¹⁰

흑연 첨가 시 ILSS가 최고 49.2%의 개선효과를 보이는 반면, 카본블랙 첨가의 경우 약간의 증가(17.5%)를 보였으나 흑연분말에 비해 큰 효과를 나타내지 못하였다. 구상으로 존재하는 카본블랙의 입자크기는 약 24 nm 정도로 매우 미세한 크기로 존재

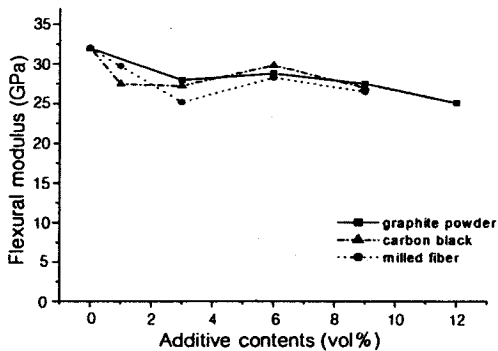


Figure 7. Change in modulus of carbon/carbon composites according to additive contents.

한다. 이들은 정전기적 인력에 기인하여 카본블랙 입자들이 덩어리 상으로 존재하고 이러한 입자들간의 응집에 의해 균일한 분산이 이루어지지 않아 복합재의 층간강도 증진에 효과를 나타내지 못한다.

분쇄된 탄소섬유가 첨가된 경우에는 1 vol% 첨가의 경우에 약간의 층간강도 증가를 보였으나, 3 vol% 이상의 경우에는 층간강도를 저하시키는 경향이 뚜렷하였다. 이러한 분쇄된 탄소섬유의 첨가는 결과적으로 탄소 매트릭스를 개질하지 못한 것으로 판단되며 수지의 부족 부분에서 섬유-매트릭스와의 젖음성이 떨어져 많은 기공과 크랙이 발생된 것으로 판단된다.

Figure 8과 9는 다양한 흑연분말과 카본블랙, 분쇄된 탄소섬유 및 탄소섬유 매트를 첨가제로 사용한 탄소/탄소 복합재의 ILSS값과 굽힘강도를 비교한 결과이다. 흑연분말의 경우 입자크기가 다른 세 가지 종류의 흑연이 비슷한 경향성을 보이면서 다른 첨가제들에 비해 우수한 ILSS 및 굽힘강도 효과를 보였으며, 카본블랙이나 분쇄된 탄소섬유 또는 탄소섬유 매트 첨가는 큰 효과를 나타내지 못하거나, 오히려 강도 저하를 초래하였다. 탄소섬유 매트를 프리프레그 사이에 첨가한 경우에 6.35 MPa의 ILSS값을 보이면서 ILSS와 굽힘강도의 향상에 효과를 보이지 못했는데, 이는 탄소섬유 매트가 분쇄된 탄소섬유의 얇은 시트 형태로 비록 분쇄된 탄소섬유의 불규칙한 배합을 어느 정도 해결할 수는 있으나 매트릭스의 개질 효과에 큰 영향을 줄 수 없으며, 50 vol%의 섬유 분율로 설계한 복합재의 제조에 있어 탄소섬유 매트의 층 사이로의 첨가는 섬유 부피 분율을 증가시켰고,

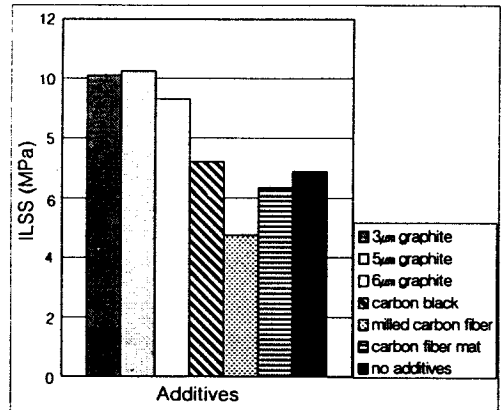


Figure 8. The effects of various additives (9 vol%) on the ILSS of carbon/carbon composites.

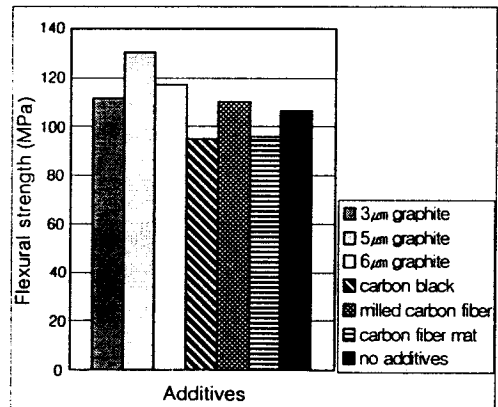


Figure 9. The effects of various additives (9 vol%) on the flexural strength of carbon/carbon composites.

이로 인하여 수지의 부족에 의한 계면 접착력 감소로 층간 분리가 일어났음을 알 수 있다.

미세조직 분석. Figure 10과 11은 첨가제가 첨가되지 않은 시편과 흑연, 카본블랙, 분쇄된 탄소섬유가 첨가된 시편의 층간 파괴면을 나타내고 있다. (a)와 같이 첨가제를 넣지 않은 CFRC의 경우, 탄화시 열수축에 의한 크랙이 크게 발달되었음을 확인할 수 있었으며 매트릭스에서 거대 크랙을 발견할 수 있었다.

흑연분말이 첨가된 (b)의 경우 탄소 매트릭스가 개질되어 전체적으로 수축이 균일하게 일어났으며 큰 크랙이 발견되지 않았다. 또한 계면에서 섬유에 수지가 충분히 젖었고, 이로써 층간의 접착력이 향상되었

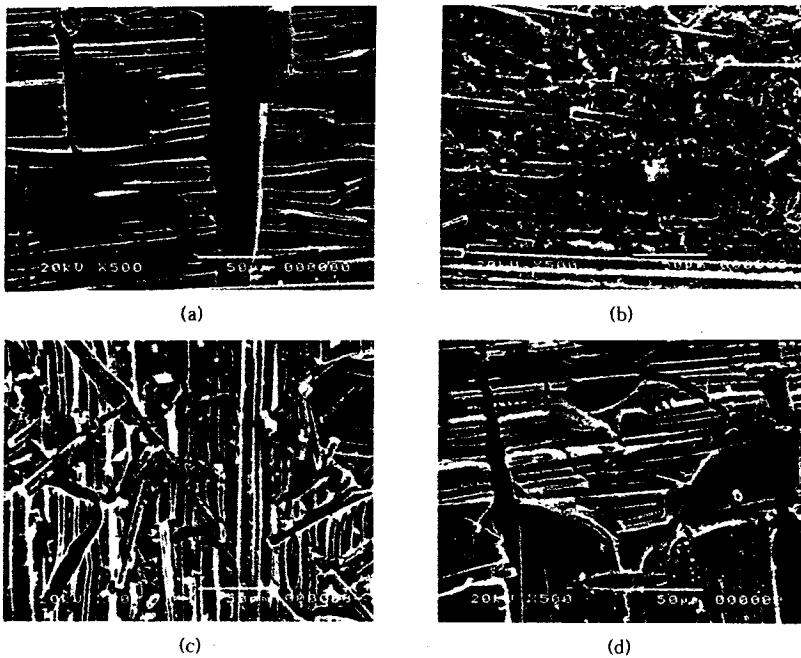


Figure 10. SEM micrograph of the interfaces of carbon/carbon composites with (a) no additives, (b) addition of graphite powder (9 vol%), (c) carbon black (9 vol%), and (d) milled carbon fiber (9 vol%) ($\times 500$).

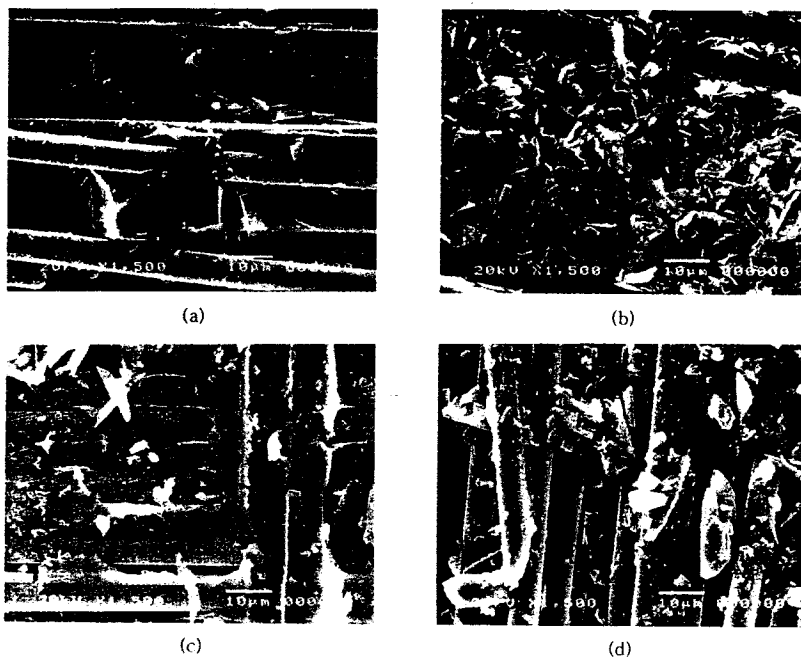


Figure 11. SEM micrograph of interfaces of carbon/carbon composites with (a) no additives, (b) addition of graphite powder (9 vol%), (c) carbon black (9 vol%), and (d) milled carbon fiber (9 vol%) ($\times 1500$).

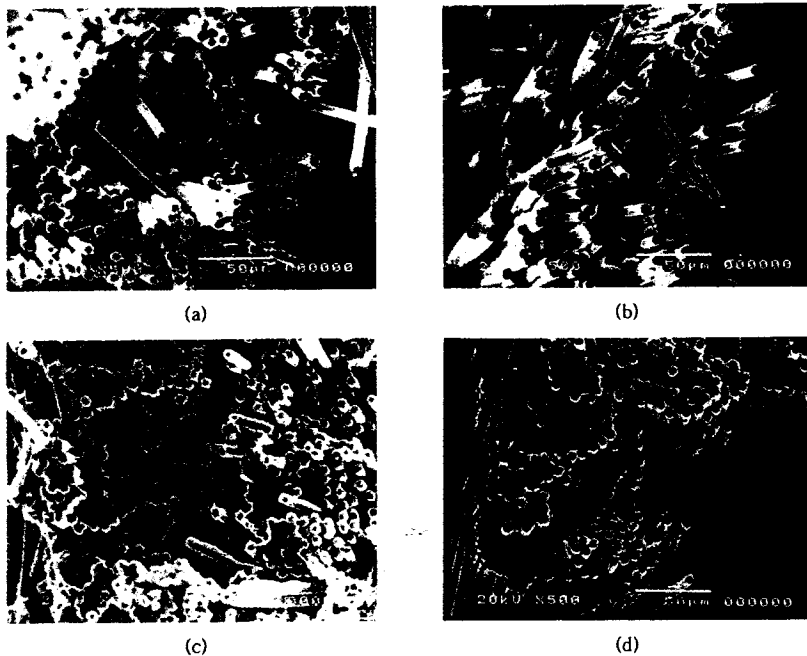


Figure 12. SEM micrograph of fracture surface of carbon/carbon composites with (a) no additives, (b) addition of graphite powder (9 vol%), (c) carbon black (9 vol%), and (d) milled carbon fiber (9 vol%) ($\times 500$).

다고 판단된다. 카본블랙이 첨가된 (c)의 경우 층과 층간에 충분한 함침이 이루어지지 않아 수지가 묻지 않은 섬유의 형태의 dry zone을 발견할 수 있었으며, 매트릭스에서 열수축에 의한 미세한 크랙들이 크게 발달하였다. 분쇄된 탄소섬유가 첨가된 (d)의 경우 분쇄된 탄소섬유가 집중된 부분에 수지의 함침이 이루어지지 않은 dry zone이 발견되었고, 개질되지 못한 매트릭스에서의 큰 크랙을 확인하였다.

Figure 12는 굽힘강도 시험후의 파괴단면을 관찰한 사진으로 흑연이 첨가된 시편에서 섬유의 pull-out 현상이 발견되었는데, 이는 ILSS 결과에서의 섬유와 매트릭스의 우수한 젖음에 관련한 catastrophic 파괴와는 달리 흑연분말의 첨가가 매트릭스의 파괴시 매트릭스의 연성을 부여하여 인성을 향상시킨 결과라고 할 수 있다. 즉 흑연의 첨가는 기공의 성장을 억제하고, 젖음성을 향상시키면서 인성을 부여하고 ILSS 및 굽힘강도와 같은 기계적 강도를 향상시킨다. 반면, 카본블랙과 분쇄된 탄소섬유 첨가 시, 첨가제가 첨가되지 않은 시편과 함께 섬유는 catastrophic 파괴거동을 보였는데, 이는 개질되지 못한 매트릭스

의 취성에 의한 결과이다.

결 론

본 연구에서는 첨가제의 종류와 첨가량에 따른 저밀도 CFRC의 ILSS를 개선하는 방안에 대하여 알아보았다.

흑연분말의 첨가는 매트릭스 수지의 개질로 인한 섬유와의 젖음성이 충분히 이루어지고, 흑연구조로의 결정화를 억제시키는 역할과 응력에 대한 분산 효과를 나타내므로써 fabric 층과 층사이의 층간분리를 막기 때문에 상대적으로 밀도의 증가를 가져온다. 또한 흑연분말의 첨가는 매트릭스내의 큰 기공을 줄이면서도 인성을 향상시키고, 초벌제의 탄화 시 수축에 의한 섬유의 손상을 막아줌으로써 복합재의 강도를 유지시키며, 큰 기공을 충전하는 효과를 보여준다. 큰 기공의 형성은 하나의 결점으로 존재하기 때문에 이들의 성장억제는 층간강도 및 굽힘강도 등의 기계적 물성향상에 필수적이다.

흑연분말이 첨가된 경우 9 vol%의 첨가량에 대하

여 10.25 MPa의 ILSS값을 보이면서 첨가제가 첨가되지 않은 CFRC의 6.87 MPa에 비해 49.2%의 강도개선효과를 보였으며, 굽힘강도는 132.9 MPa로 24.5%의 효과를 나타내었다.

카본블랙의 경우에는 약간의 ILSS 개선을 보였으나 매트릭스의 취성과 횡축으로의 큰 수축에 의해 굽힘강도 저하를 보이고, 분쇄된 탄소섬유 또는 탄소섬유 매트 첨가 시에도 카본블랙과 마찬가지로 섬유와 수지간의 충분한 젖음이 이루어지지 않고 매트릭스를 개질하지 못하여 층간분리가 쉽게 일어났으며 밀도, ILSS 및 굽힘강도는 감소하였다.

저밀도 CFRC의 층간강도 개선을 위해서는 탄화온도, 승온속도 및 최적의 성형조건 등이 필수적이다. 그러나 산업용으로써 사용하기에는 이와 같은 인자들은 제한성을 갖게 되므로 가장 경제적인 작업조건하에서 흑연분말과 같은 충전제를 적당량 첨가함으로써 2-D CFRC의 가장 큰 문제점 중의 하나인 층간분리에 대한 대책을 마련할 수 있다.

감사의 글: 본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(1999-2-30100-012-3) 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. C. Li, B. Ma, X. Huo, and Z. Jin, *24th Biennial Conference on Carbon*, South Carolina, U.S.A., p. 254 (1999).
2. L. A. S. Edwards, L. A. S. Edwards, R. Menendez, B. Rand, S. West, A. J. Hosty, and T. Mays, "Introduction to Carbon Science", ed. by H. Marsh, p. 197, Butterworth, London, 1989.
3. A. Brent Strong, "Fundamentals of Composites Manufacturing", ed. by C. A. Ploskonka, Society of Manufacturing Engineers, Michigan, 1989.
4. R. M. Gill, L. E. Nielson, R. F. Landel, and K. K. Chawla, "Carbon Fibers in Composite Materials", p. 16, Oxford Univ. Press, London, 1972.
5. K. A. Trick, T. E. Saliba, and S. S. Sandhu, *Carbon*, 35 (2), 393 (1997).
6. L. M. Manocha, H. Bhatt, and S. M. Manocha, *Carbon*, 34(7), 841 (1996).
7. Z. Lausevic and S. Marinkovic, *Carbon*, 24(5), 575 (1986).
8. M. Takehara, T. Kingetsu, H. Masumoto, and E. Yasuda, *The European Carbon Conference*, New castle, U.K., p. 705 (1996).
9. H. Deng and B. Ma, *24th Biennial Conference on Carbon*, South Carolina, U.S.A., p. 260 (1999).
10. E. Yasuda, Y. Hotta, S. M. Park, J. Ariyoshi, T. Akatsu, and Y. Tanabe, *22nd Biennial Conference on Carbon*, San Diego, U.S.A., p. 110 (1995).
11. E. Yasuda and Y. Tanabe, *Carbon*, 26(2), 225 (1988).
12. R. Menendez, J. J. Fernandez, A. Figueiras, C. Blanco, J. Bermejo, J. Bonhomme, and J. Belzunce, *22nd Biennial Conference on Carbon*, San Diego, U.S.A., p. 78 (1995).
13. R. Byron Pipes, R. A. Blacke, J. W. Gillespie, and L. A. Carlsson "Test Methods", vol. VI, Technomic, Lancaster, 1990.