

論文

흑연분말을 첨가한 탄소/탄소
복합재의 기계적 물성에 대한 연구

주혁중* · 김용근*

**A Study on the Mechanical Properties of the Carbon/Carbon
Composite Filled with Graphite Powder**

Hyeok-Jong Joo* and Yong-Keun Kim*

ABSTRACT

In order to fabricate the Carbon/Carbon composites, first of all green bodies were made of PAN(Polyacrylonitrile) fiber and phenolic resin containing graphite powder (0-6.6vol%) and these were heat-treated up to 1000°C at a heating rate of 12°C/hr. And then they were impregnated and carbonized from one to five times. The shrinkage, density, impact strength, flexural strength and modulus of Carbon/Carbon composites were examined. Volume shrinkage of sample(V_f : 60%) was increased according to the containing amounts of graphite powder, but it was almost constant more than 1.9vol%.

The mechanical properties of sample(V_f :60%) linearly increased according to the increase of the density. In the case of CFRCI(V_f :60%), the mechanical properties of the uncontained graphite powder samples were decreased because of the servere shrinkage during the carbonization process and the formation of crack. But the mechanical properties of the excessively containing graphite powder samples were decreased because of the interlaminar debonding. Accordingly, the mechanical properties of 1.9vol% containing graphite powder samples(V_f :60%) were best.

초 록

탄소/탄소 복합재를 제조하기 위하여 PAN 계 탄소섬유와 흑연분말을 첨가(0-6.6vol%)한 페놀 수지로 green body 를 만들었으며, 이것을 12°C/hr 의 가열속도로 1,000°C까지 열처리시키고 나서 1-5회 함침 및 탄화시킨후 시편들의 수축률, 밀도, 충격강도, 굴곡강도, 굴곡 탄성률을 조사하였다. 시편 (V_f : 60%)의 부피수축은 흑연분말의 함량이 증가함에 따라 감소하다가 1.9vol% 이상에서는 거의 일정하였다.

* 정희원, 충남대 공과대학 고분자공학과

시편 ($V_f: 60\%$)의 기계적 물성은 밀도가 증가함에 따라 직선적으로 증가하였다. CFRCl($V_f: 60\%$)의 경우에 흑연분말이 첨가되지 않은 시편(CFRCl-1)의 기계적 물성은 탄화시 심한 수축으로 생긴 시편 내부의 크랙 때문에 떨어졌으며, 흑연분말이 많이 첨가된 시편(CFRCl-4, 5)의 기계적 물성은 탄화과정에서의 층간분리 파괴때문에 낮았다. 따라서 탄화시의 수축이 적게 나타난 1.9vol%의 흑연분말이 첨가된 시편 ($V_f: 60\%$)의 기계적 물성이 가장 우수하였다.

1. 서 론

복합재료는 두종류 이상의 성질이 서로 다른 소재를 조합하여 물리적·화학적 성질을 개량할 목적으로 만든 것이고, 단일재료로서는 얻을수 없는 뛰어난 특성을 갖는 인공재료이며, 그중 탄소섬유를 보강제로 한 플라스틱계 복합재를 탄소섬유 강화 플라스틱(CFRP: Carbon Fiber Reinforced Plastics)이라고 부른다.

탄소섬유는 우주개발과 로켓 모터브레이드와 노즐에 필요한 내열재료의 개발요구에 따라서 만들어지고 있다. 우주용 장비와 항공기 분야에서 기본적으로 요구되는 경량, 고강성 재료에 대한 연구는 1950년대부터 미국에서 시작되었으며, 탄소섬유의 초경량성 때문에 에너지 측면에서 항공 우주개발에 지배적인 역할을 하게 될 것이라는 기대속에 연구개발이 적극적으로 추진되고 있다[1].

탄소섬유와 탄소재료는 종래의 재료와 비교해 볼 때 비강도, 비탄성률 등 기계적 성질과 내피로성, 치수 안정성이 우수하고 전기 전도성, 전파 차폐성도 뛰어나고 내식성, 내약품성, X선 투과성이 좋으며, 마찰계수가 작고, 금속보다 진동 감쇠성이 우수하며, 그밖에 수많은 장점을 가지고 있다[2].

탄소/탄소 복합재(CFRC: Carbon Fiber Reinforced Carbon)는 탄소섬유로 보강되어 있기 때문에 비강도, 비탄성률이 높고, 매트릭스 또한 탄소물질이므로 승화(sublimation) 온도와 용발(ablation)에 대한 저항성이 높으며, 마찰 및 마모특성이 우수하고, 화학적으로 대단히 안정하다[3].

고온재료로 알려진 Al/Al₂O₃나 super alloy는 1,000°C에서, SiC는 1,500°C에서 강도가 갑자기 떨어지지만 탄소재료는 저온에서의 강도를 고온에서도 그대로 유지하는 특성을 가지고 있다[4, 5]. 이러한 특징때문에 CFRC는 로켓 노즐, 재돌입 비행

체의 ablation 재료, 노스 콘, 노스 팀 등의 우주 항공분야의 내열재료, 항공기와 경주용 차량의 브레이크 마찰재료, 고온 전해용기, 화학반응기, 고온 원자로의 내장재료 등과 같은 고온재료로 이용된다.

또한 고체 탄소(solid carbon)는 생체(blood, soft tissue, bone)와 친화성이 우수하므로 탄소섬유와 CFRP는 골격 접합부, 인대, 의치 및 의족 기술에 사용되고 있다[2, 6-10]. 따라서 고온에서의 CFRC의 응용면을 고려해 볼때 대단히 매력있는 첨단복합재이다.

탄소/탄소 복합재 제조시 페놀수지가 매트릭스 precursor로 사용될 경우, 탄화과정에서 큰 수축이 일어나게 된다. 이러한 현상으로 보강된 탄소섬유가 손상되어 탄소/탄소 복합재의 물성이 저하된다. 그러므로 탄화과정에서의 수축을 줄이기 위하여 열적으로 매우 안정한 흑연분말을 첨가하면 수축이 작아질 뿐만 아니라, 크랙의 성장도 어느 정도 억제할 수 있어서 CFRC의 물성 저하를 방지할 수 있을 것으로 예상된다.

Kimura 등은 소량의 흑연분말을 첨가한 CFRC의 경우 수축이 감소하고 굴곡강도도 약간 증가했다고 발표했다[11, 12].

본 연구에서는 탄화시의 matrix precursor인 페놀수지의 열수축을 줄이기 위하여 흑연분말을 첨가하여 그에 따른 탄소/탄소 복합재의 수축과 기계적 물성을 알아보려고 했다.

2. 실험

2-1. 실험재료

탄소/탄소 복합재 제조에 사용된 탄소섬유는 일본 Toray사의 PAN계 고강도 섬유이며, 섬유의 물성은 Table 1에 나타낸 바와 같다.

Matrix 수지는 국내 강남화성(주)의 분말상 novolac 형 페놀수지이며, 이의 기초 물성은 Table 2에 나타낸 바와 같다.

충진재로 사용된 천연 흑연분말은 일본의 Nippon graphite 사의 제품으로 물성은 Table 3에 나타낸 바와 같다.

Table 1. Properties of carbon fiber

Fiber type	Filament no.	T.S	T.M	U.E	Density (g/cm ³)
T 300	6,000	3,530	230	1:5	1.76

- * T.S : Tensile strength (MN/m²)
- * T.M : Tensile modulus (GN/m²)
- * U.E : Ultimate elongation (%)

Table 2. Properties of phenolic resin

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

Table 3. Properties of natural graphite powder

P.S (μm)	S.P (°C)	Density (g/cm ³)	C.Y (%)	V.C (%)	Q.I (%)
5	3,990	2.26	97.46	0.63	1.90

- * P.S : Particle size
- * S.P : Sublimation point
- * C.Y : Carbon yield
- * V.C : Volatile component
- * Q.I : Quinoline insoluble

2-2. 실험방법

탄소/탄소 복합재의 제조공정은 Fig. 1에 도시하였다.

2-2-1. 탄소섬유 강화 복합재의 제조공정

Prepreg 제조시 사용한 수지용액은 메탄올과 페놀수지를 60 : 40의 무게비로 용해시킨 용액에 흑연분말을 첨가하여 만들었다. 이때 prepreg의 조성은 Table 4에 나타냈다.

Prepreg는 본 실험실에서 제작한 prepreg 제조 장치의 resin bath에 수지 용액을 붓고, 흑연분말

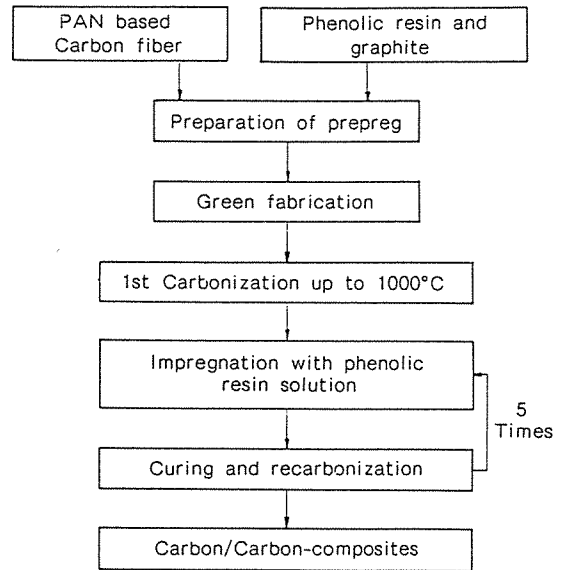


Fig. 1 Flow chart for the preparation of carbon/carbon composites.

Table 4. Recipe of prepreg (unit: vol%)

		Carbon fiber	Phenolic resin	Graphite powder
CFRC 1	1	60	40.0	0(0)
	2	60	39.0	1(5)
	3	60	38.1	1.9(10)
	4	60	36.3	3.7(20)
	5	60	34.7	5.3(30)
CFRC 2	1	50	50.0	0(0)
	2	50	48.7	1.3(5)
	3	50	47.6	2.4(10)
	4	50	45.4	4.6(20)
	5	50	43.4	6.6(30)
CFRC 3	1	70	30.0	0(0)
	2	70	29.2	0.8(5)
	3	70	28.5	1.5(10)
	4	70	27.2	2.8(20)
	5	70	26.0	4.0(30)

() : Graphite powder weight ratio of phenolic resin

이 침전되지 않도록 교반하여 resin bath를 통과한 섬유가 wetting이 잘되고, 섬유 사이의 틈이 없는 단일층이 되도록 mandrel과 guider의 속도를 조절하여 제조하였다. 이 prepreg는 24시간 동안 건조시켜 메탄올이 완전히 휘발된후 150mm×40mm의 크기로 절단하여 밀봉한 상태로 냉동실에 보관하

였다.

CFRP는 일방향으로 절단한 6장의 prepreg를 mold에 넣고 Fig. 2에 나타낸 것과 같은 온도와 압력 profile로 적층 성형하여 만들어졌다.

수지의 점도가 낮을때 일시에 압력을 가하면 prepreg 사이에 잔존하는 공기가 빠져 나오면서 일 방향으로 배열된 섬유가 흩어지므로 일차적으로 15 kgf/cm²의 압력을 가한 후에 온도를 서서히 올려 매트릭스 수지의 점도가 최저인 80°C 부근에서 50 kgf/cm²의 압력을 가했다.

페놀수지의 경화반응이 시작되는 120°C에서 1시간, 그리고 경화반응이 끝나는 160°C에서 2시간 동안 최종 경화시켰다.

2-2-2. 탄소/탄소 복합재의 제조공정

탄소/탄소 복합재는 적층 성형된 CFRP의 매트릭스 페놀수지가 탄화되어 만들어지며, 시편이 탄화되는 동안 공기와의 접촉으로 인한 CFRC의 산화를 방지하기 위하여 탄화로 내부를 진공으로 하여 공기를 완전히 제거한 후, 내부를 질소로 채우고 질소를 100cc/min의 유량으로 유입시키면서 12°C/hr의 가열속도로 1,000°C까지 탄화시켰다.

합침은 합침조에 시편을 넣고 10⁻³torr에서 3시간 동안 유지한 후 페놀수지를 주입하고, 수지용액

이 기공에 잘 침투하도록 불활성 가스(질소)로 20 kgf/cm²의 압력으로 3시간 동안 가압하여 합침을 시켰다. 합침이 끝난 시편을 autoclave에 넣고 20 kgf/cm²의 압력으로 재 경화시켰으며, 재탄화는 18°C/hr의 가열속도로 실시하였다.

2-3. CFRC의 물성평가

탄소/탄소 복합재의 충격강도는 ASTM-256에 의거하여 노치를 내지 않는 시편에 pendrum-type hammer를 낙하시켜 이때의 에너지와 시편의 폭과 두께로부터 계산하였다.

탄소/탄소 복합재의 굴곡 강도와 굴곡 탄성률은 ASTM-790에 의거하여 three point bending법으로 시험하였으며, 이때의 cross head speed는 2mm/min이었다. 시편의 두께와 지지대 거리(support span)와의 비는 1 : 32로써 측정하였다.

CFRC의 etching은 polyester로 mounting한 시편을 sand paper 및 20.3, 0.05μm의 alumina powder로 polishing하여 초음파 세척기로 세척한 후 orthophosphoric acid 50ml와 K₂Cr₂O₇ 10g의 혼합용액으로 150°C에서 30분간 실시하였다.

CFRC의 SEM(Scanning Electron Microscopy) 사진은 에칭된 시편을 gold coating하여 일본 아카시사 DS-130으로 촬영하였다.

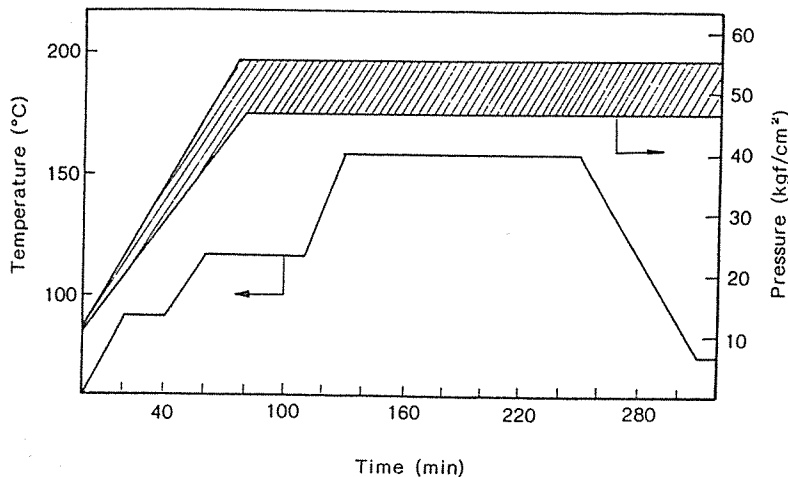


Fig. 2 Temperature and pressure profile of laminating molding process.

3. 결과 및 고찰

3-1. 탄화에 의한 탄소/탄소 복합재의 수축

약하게 가교결합한 매트릭스 수지를 서서히 가열하면 저분자량 물질, 미반응 물질과 물은 100°C와 350°C에서 방출되며, 500°C 이상에서는 약간의 CO, CH₄가 방출된다. 그러나 고도로 가교결합된 매트릭스 수지에서의 물은 400°C 이상에서 방출된다 [12]. 이러한 휘발성 가스의 방출로 탄화과정에서 수축이 발생하게 된다.

Fig. 3은 보강재인 탄소섬유와 흑연분말의 첨가량을 달리한 페놀수지로 만든 일방향성 탄소/탄소 복합재의 부피 수축률을 나타낸 것이다.

흑연분말을 첨가하지 않은 CFRC1-1(V_f: 60%)의 부피 수축률은 14.5%이지만 1.9vol%의 흑연분말이 첨가된 CFRC1-3의 수축률은 12.2%로 다소 떨어졌다. 흑연분말 첨가량의 증가에 따라 CFRC의 수축이 감소하다가 1.9vol%에서부터는 큰 변화가 없이 거의 일정하게 유지되었다.

3.7, 5.3vol%의 흑연분말이 첨가된 시편(CFRC1-4, 5)들은 충전재가 차지하는 부피 분율이 큰 반면에 수지의 양은 상대적으로 적어서 열분해 반응이 충분히 일어나지 못하여 휘발성 물질이 적었기 때문에 수축이 작았다.

3-2. 함침공정에 따른 탄소/탄소 복합재의 고밀도화

Green body(CFRP)를 탄화시키면 matrix precursor가 탄화 mechanism에 따라 polymeric carbon 구조를 형성하면서 많은 기공이 생긴다. 이러한 기공은 재료의 가연성(inflammability)의 증가, 열팽창 계수의 증가 또는 재료에 외력을 받았을 때, 이 기공에 응력이 집중되어 crack의 원인이 될 수 있다. 그러므로 앞서 설명된 함침방법으로 함침 물질을 채워 주어야 한다.

Fig. 4는 페놀수지 용액으로 5회 함침/탄화된 CFRC(V_f: 60%)의 밀도증가를 나타낸 것이다. 함침공정을 거치지 않은 CFRC의 겉보기 밀도는 흑연분말이 첨가되지 않은 CFRC1-1이 1.565g/cm³로 가장 작았으며, 5.3vol% 첨가된 CFRC1-5가

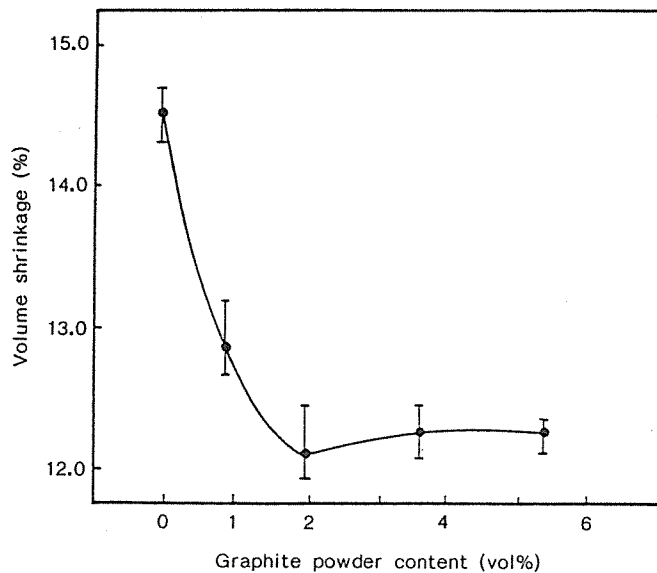


Fig. 3 Volume shrinkage of CFRC (V_f: 60%) according to the addition of graphite powder.

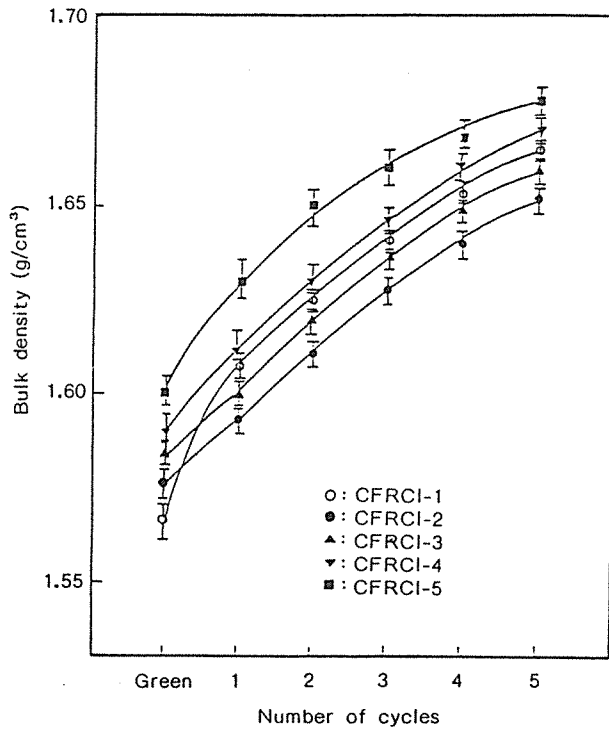


Fig. 4 Densification of CFRC (V_f : 60%) according to the impregnation and carbonization cycles.

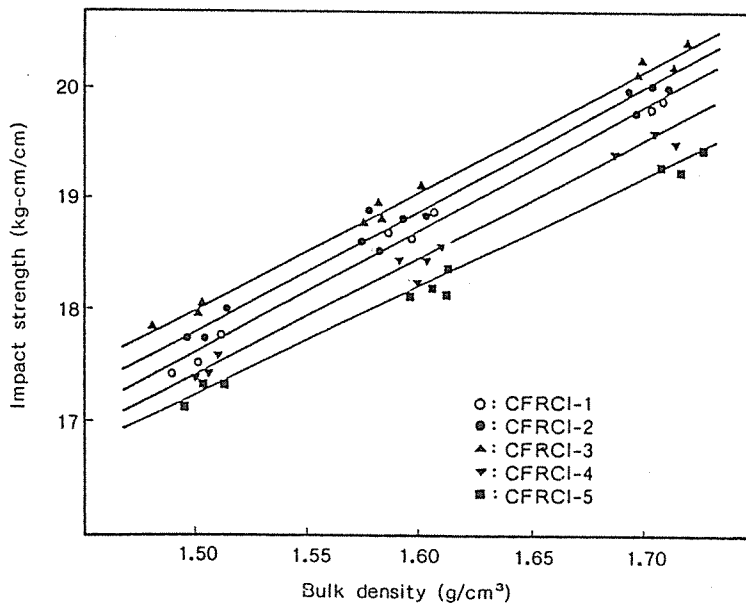


Fig. 5 Bulk density vs impact strength of carbon/carbon composites (V_f : 60%).

1.600g/cm³로 가장 높았다. 5회 함침 및 탄화시켰을 때 1.9vol%의 흑연분말이 첨가된 CFRCI-3의 밀도는 1.575g/cm³에서 1.658g/cm³까지 증가되었다. 특히 CFRCI-5의 밀도가 높은 것은 함침이 잘 되었다기 보다는 흑연분말이 많이 들어가서 탄화과정에서 부피수축이 적었기 때문이다.

한편 3회의 함침까지는 밀도가 크게 증가하다가 4, 5회에서는 완만하게 증가되었는데 이는 blocking 현상으로 내부의 기공이 막혀서 수지용액이 잘 침투하지 못했을 것으로 판단된다.

3-3. 밀도 증가에 따른 탄소/탄소 복합재의 기계적 물성

섬유강화 복합재의 기계적 물성은 복합재를 이루는 성분들의 특수한 성질과 그들의 섬유 용적율에 따라 영향을 받게 된다. 복합재의 크랙개시(crack initiation)는 성분들중의 낮은 파괴변형(strain to failure)을 갖는 성분에 의해서 영향을 받는다.

일반적으로 첨단 복합재료에서 섬유의 파괴변형은 matrix 보다 작다. 따라서 탄소/탄소 복합재의 파괴는 섬유성분의 파괴변형, 즉 섬유의 강도에 의해서 좌우된다. 섬유가 matrix 수지보다 덜 brittle

한 경우, matrix 수지의 파괴변형이 composite의 crack을 일으키게 한다.

Fig. 5, 6, 7은 함침 및 탄화 횟수에 관계없이 단지 밀도만을 고려한 밀도증가에 따른 일방향성 탄소/탄소 복합재의 기계적 물성에 대하여 도시한 것이다.

CFRC의 충격강도, 굴곡강도와 탄성률은 밀도가 증가함에 따라 거의 직선적으로 증가하였다.

Fig. 5는 충격강도와 밀도의 관계를 표시한 것으로서 기울기가 큰 직선으로 나타났으며, 흑연분말 첨가의 영향은 크게 나타나지 않았다. 3.7, 5.3 vol% 첨가된 CFRCl-4, 5의 충격강도는 오히려 순수한 수지로 만든 CFRC-1 보다 낮았고, 1.9vol% 첨가한 CFRCl-3이 가장 우수하였다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 CFRCl-2와 CFRCl-3에 비하여 그의 시편의 굴곡강도는 다소 떨어짐을 볼수 있다.

Fig. 7은 밀도와 굴곡탄성률의 관계를 도시한 것으로 1.9vol%의 흑연분말이 첨가된 CFRCl-3에서 가장 높았다. 특히 밀도가 1.65g/cm³ 이상인 모든 CFRC의 굴곡탄성률은 매우 우수하였다. 따라서 밀도가 증가할수록 CFRC의 내부에 기공이 적게 존재하며, 섬유와 수지의 결합력이 우수하여 복합재

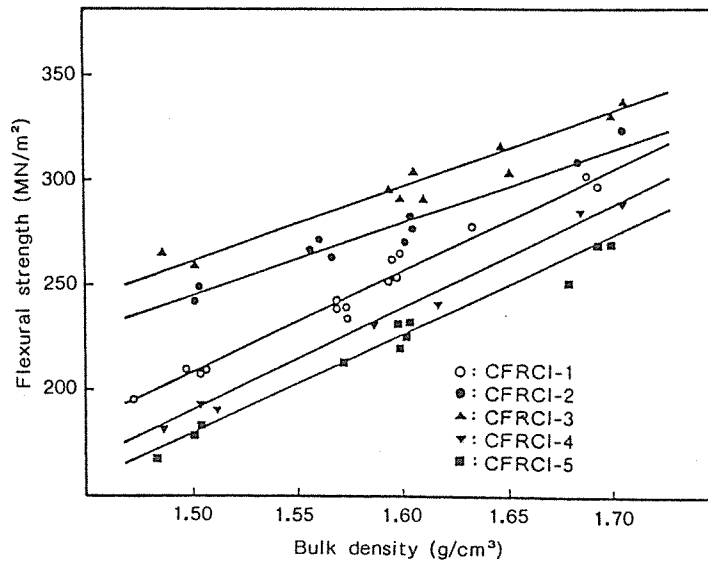


Fig. 6 Bulk density vs flexural strength of carbon/carbon composites (V_f : 60%).

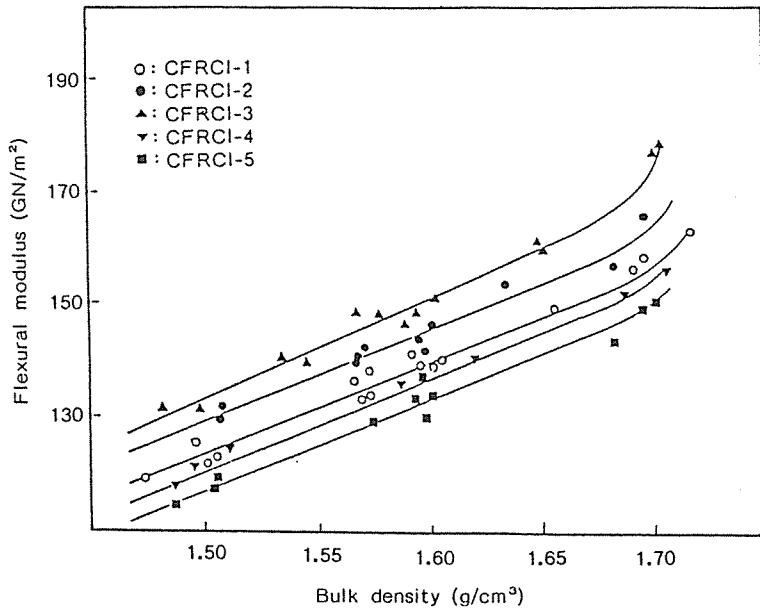


Fig. 7 Bulk density vs flexural modulus of carbon/carbon composites (V_f : 60%).

의 강성이 증가함을 알 수 있다.

CFRC는 일반적으로 밀도가 큰 시편일수록 기계적 강도가 우수하지만, 본 실험에서는 Fig. 5, 6, 7에서 보는 바와 같이 CFRCI-1의 밀도가 CFRCI-2, 3보다 크어도 불구하고 기계적 강도는 CFRCI-1의 경우가 더 낮았다. 이것은 흑연분말이 첨가되지 않은 CFRCI-1은 탄화과정에서 수축이 심하여 시편 내부에 크랙이 많이 발생되었기 때문으로 사료된다.

3-4. 함침 및 탄화공정에 따른 탄소/탄소 복합재의 기계적 물성

함침/탄화 반복 횟수에 따른 탄소/탄소 복합재 (V_f : 60%)의 기계적 물성에 대한 결과를 Fig. 8, 9, 10에 도시하였다.

Fig. 8에 나타낸 바와 같이 충격강도는 흑연분말이 과량첨가(3.7, 5.3vol%) 되었을 때 재함침 및 재탄화공정에도 불구하고 약간 증가했다. 그러나 CFRCI-1, 2, 3의 충격강도는 함침 횟수에 따라 2-5%씩 증가되었다.

Fig. 9에 표시한 굴곡강도는 흑연분말 첨가의 유무에 관계없이 재함침/재탄화에 따라서 모든 시편에

서 일정하게 증가하였다. 5회 함침 및 탄화된 CFRCI-1-3의 굴곡강도가 240mn/m^2 에서 350mn/m^2 까지 증가되었다.

Fig. 10은 CFRC들의 굴곡 탄성률을 나타낸 것이다. CFRCI-2, 3의 굴곡 탄성률은 우수하지만 CFRCI-4, 5는 상대적으로 낮았다.

함침 및 탄화공정이 반복됨에 따라 CFRC의 밀도는 증가하게 되어 섬유와 수지 사이의 debond가 감소하고 matrix 내부의 기공도 줄어든다. 따라서 debond와 기공이 적은 matrix carbon일수록 CFRC 내부의 모든 탄소섬유에 응력을 고르게 분산시키는 작용을 하기 때문에 기계적 물성이 증가하게 된다.

3-5. 흑연분말 첨가량에 따른 탄소/탄소 복합재의 기계적 물성

Fig. 11, 12, 13은 흑연분말 첨가량에 따른 5회 함침 및 탄화된 탄소/탄소 복합재의 충격강도, 굴곡강도, 굴곡탄성률을 나타낸 것이다.

Fig. 11은 흑연분말 첨가량에 따른 CFRC의 충격강도를 도시한 것이다. 탄소/탄소 복합재의 충격

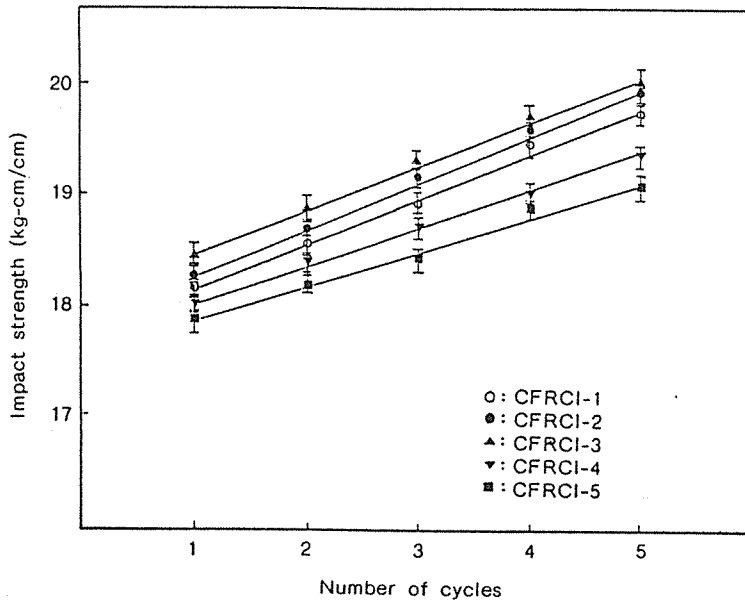


Fig. 8 Impact strength of CFRC (V_f : 60%) according to the impregnation and carbonization cycles.

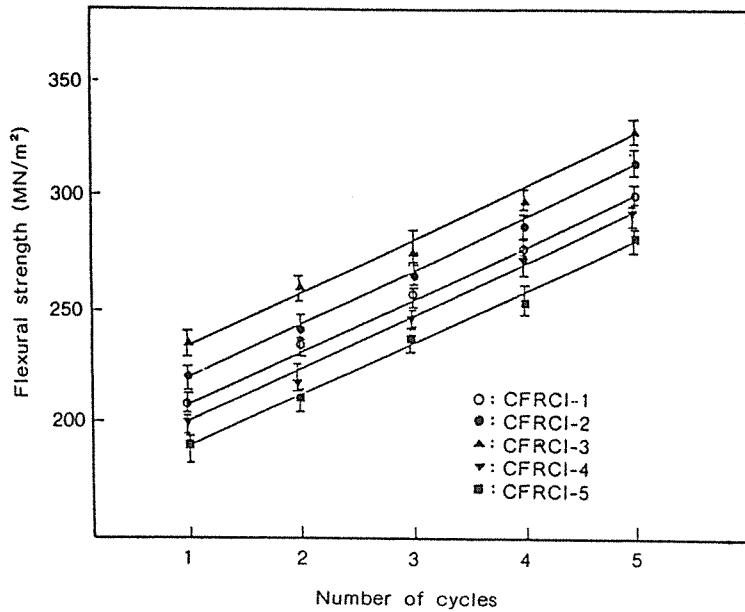


Fig. 9 Flexural strength of CFRC (V_f : 60%) according to the impregnation and carbonization cycles.

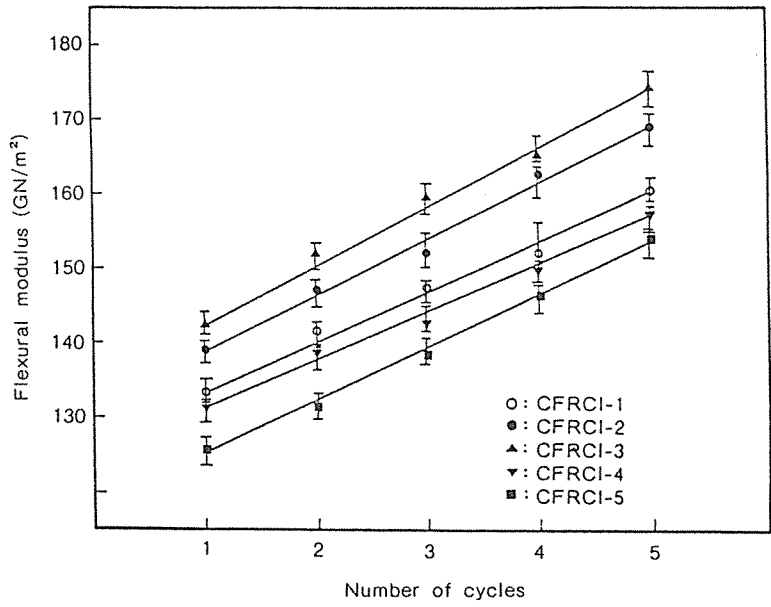


Fig. 10 Flexural modulus of CFRC (V_f : 60%) according to the impregnation and carbonization cycles.

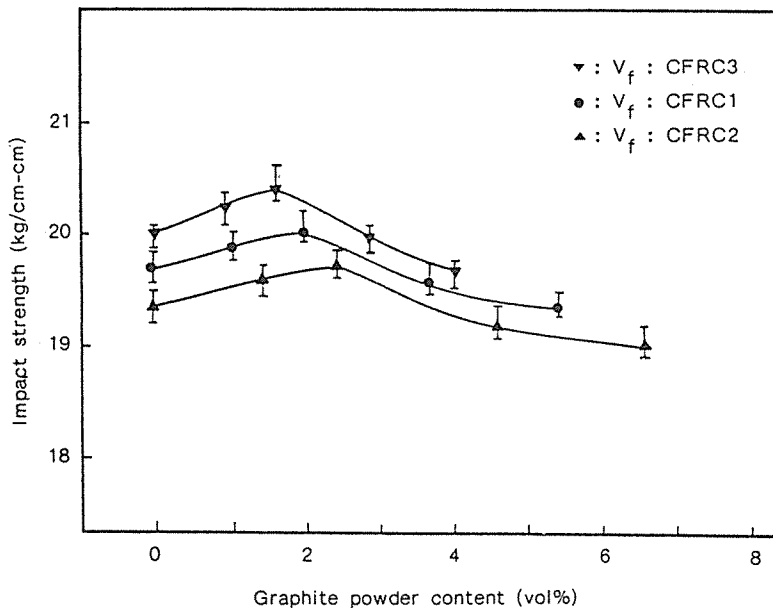


Fig. 11 impact strength of CFRC according to the addition of graphite powder after 5th carbonization.

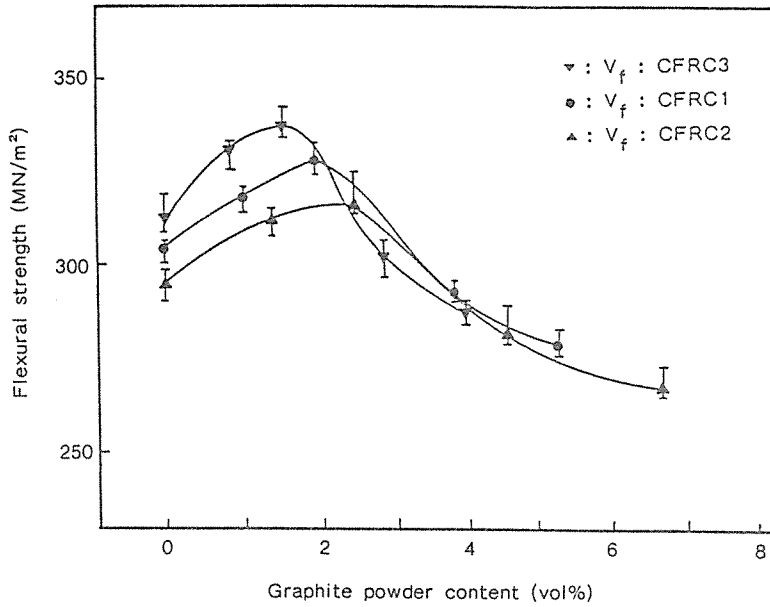


Fig. 12 Flexural strength of CFRC according to the addition of graphite powder after 5th carbonization.

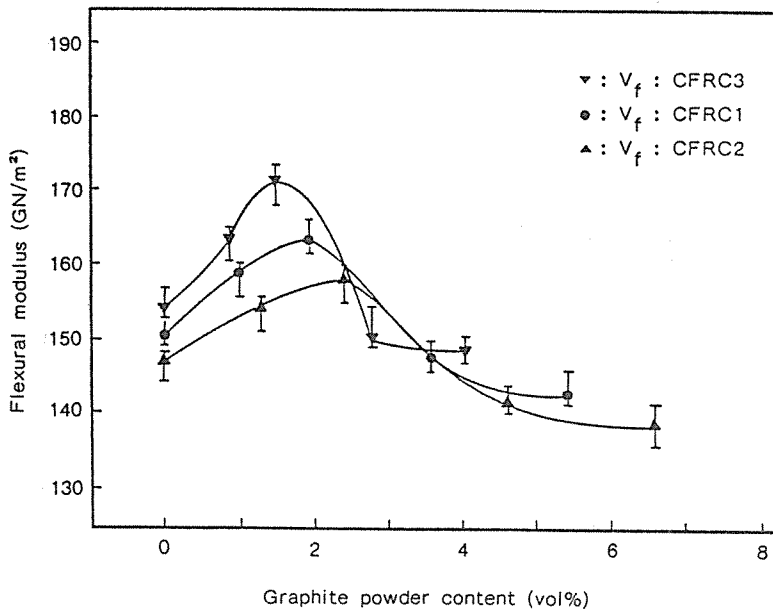


Fig. 13 Flexural modulus of CFRC according to the addition of graphite powder after 5th carbonization.

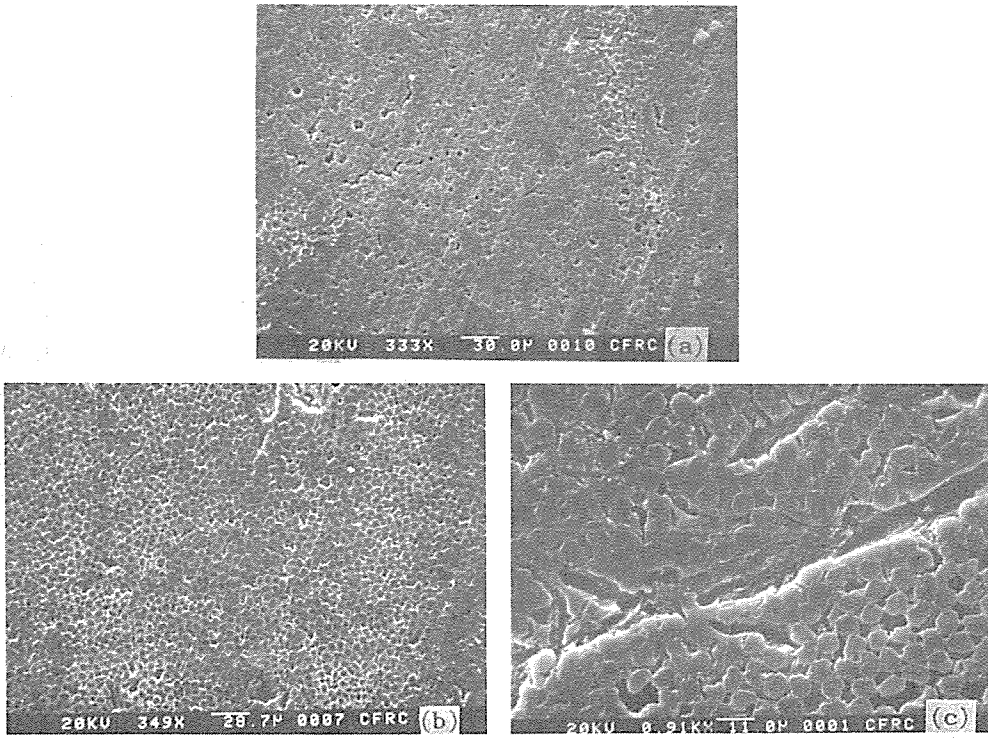


Fig. 14 SEM photographs of CFRC after 1st carbonization.
 (a) CFRC unfilled graphite powder (CFRC1-1)
 (b) CFRC filled 1.9 vol% graphite powder (CFRC1-3)
 (c) CFRC filled 5.3 vol% graphite powder (CFRC1-5)

강도는 흑연분말의 첨가에 따라서 크게 영향을 받지 않았지만 CFRC3(V_f :70%), CFRC1(V_f :60%), CFRC2(V_f :50%) 순으로 나타났다.

Fig. 12와 13에 나타난 굴곡강도와 탄성률은 흑연분말 첨가량에 따라 크게 변했다. 흑연분말을 넣지 않은 CFRC1-1의 경우 Fig. 14a에서와 같이 matrix 수지로 사용된 페놀수지가 열분해 되면서 휘발성 물질이 방출되어 많은 기공이 생겼으며, 복합재 내부에 delamination의 영향으로 탄소/탄소 복합재의 기계적 강도가 낮아진다.

Fig. 14b에서와 같이 1.9vol%의 흑연분말이 첨가된 CFRC1-3의 경우 섬유와 수지 사이의 탈리현상(debonding)이 줄어들고, 매트릭스 수지 내부에 있는 기공의 크기와 기공의 수가 줄어들어 매트릭스 수지의 인성이 증가하고, 또한 crack tip에서의 응력집중이 쉽게 완화되어 균열분기(crack bra-

ching)가 쉽게 생겨서 강도가 증가하게 된다. 그러나 흑연분말이 5.3vol% 첨가된 CFRC1-5의 경우 탄화과정에서 부피수축이 적었음에도 불구하고 기계적 물성이 떨어진 것은 적층 성형시 matrix 수지의 불완전한 축합반응으로 탄소섬유를 잘 wetting시키지 못하여 prepreg 간의 접착력이 떨어지고, Fig. 14c에서와 같이 탄화과정에서 층간분리(delamination)가 일어나고, 하중을 가했을때 층간분리 파괴(interlaminar crack)가 발생했기 때문이다. 따라서 1.9vol%의 흑연분말이 첨가된 CFRC1-3이 탄화과정에서 수축이 가장 적었으며, 충격강도, 굴곡강도, 굴곡탄성률이 높았다.

탄소/탄소 복합재의 굴곡강도와 굴곡탄성률의 최대값은 탄소섬유의 함량이 클수록 흑연분말 함량이 적은 쪽으로 이동되었다. 이 최대값의 위치를 보면 매트릭스 수지의 함량이 많은 것일수록(탄소섬유의

함량이 적을수록) 흑연분말의 첨가량이 많다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

흑연분말을 첨가한 탄소/탄소 복합재의 기계적 물성에 대해 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 탄소/탄소 복합재($V_f: 60\%$)의 부피수축은 1.9vol%의 흑연분말이 첨가된 시편에서 가장 작게 나타났다.

2. 탄소/탄소 복합재($V_f: 60\%$)의 충격강도, 굴곡강도와 탄성률은 밀도에 따라 거의 직선적으로 증가하였으며, 소량의 흑연분말(1.0, 1.9vol%)이 첨가된 시편에서 우수하였다.

특히 CFRCl-3의 굴곡탄성률은 겉보기 밀도 1.65 g/cm³ 이상에서 급격히 상승하였다.

3. 함침 및 탄화공정의 반복 횟수에 따른 CFRCl($V_f: 60\%$)의 충격강도는 크게 증가하지 않았지만 굴곡강도와 굴곡 탄성률은 10% 이상씩 증가하였다.

4. 흑연분말 첨가량에 따른 5회 함침 및 탄화된 모든 탄소/탄소 복합재의 충격강도, 굴곡강도, 굴곡 탄성률은 포물선형으로 증가하다가 감소되었다. CFRCl의 경우 탄화시 수축이 가장 적게 나타난 1.9vol%의 흑연분말을 첨가한 CFRCl-3의 굴곡강도와 굴곡탄성률이 가장 높았다.

참고문헌

1. E. Fitzer, "Thermal Degradation of Polymers to Polymeric Carbon an Approach to the Synthesis of New Materials", *Angewandte Chemie*, 19, 1980, pp.375-385.

2. 稱恒道夫, "炭素材料 工學", 日刊工業 新聞社 (1985), 56-60.

3. T. Dillon, T. Kasuh and H. Marsh, "Influence of Microstructure on the Mechanical Properties & Reactivity of Carbons & C/C

Composites", 19th Biennial Conf. on Carbon, 1989, pp.16-317.

4. E. Fitzer, "Carbon Fibers-The Miracle Material for Temperatures Between 5 & 3000K", *High Temp. High Press*, 18, 1986, pp. 479-508.

5. G.M. Jenkins and K. Kawamura, *Polymeric Carbons-Carbon Fibre, Glass and Char*, Cambridge Univ. Press, London, 1976, pp.157.

6. J.D. Bacha, J.W. Newman & J.L. White, *Petroleum-Derived Carbons*, ACS, Washington, D.C. 1986, pp.346-394.

7. C.R. Thomas, E.I. Walker, "C/C Composite as High-Strength Refractories", *High temp. High Press.* 10, 1978, pp.79-86.

8. C.G. Goetzel, "High-Temperature Properties of Some Reinforced Phenolic Composite", *High Temp. High Press.* 12, 1980, pp.131-146.

9. B. Pu and Q. Hung, "Tribological Characteristics of C/C Composite", 19th Biennial Conf. on Carbon, 1989, pp.352-353.

10. N. Murdie, J. Don, C. Kocher, R. Liew, "Tribiological Studies of C-C Composites", 19th Biennial Conf. on Carbon, 1989, pp.496-497.

11. E. Yasuda, Y. Tanabe and S. Kimura, "Structural Dependence of Fracture Behavior of C/C Composites", *Carbon* 86, 4th International Carbon Conference, 1986, pp.665-667.

12. E. Yasuda, Y. Tanabe, L.M. Manacha & S. Kimura, "Matrix Modification by Graphite Powder Addition in C/C Composite with Thermosetting Resin Precursor as a Matrix", *Carbon* 26, 1988, pp.225-227.

13. G.M. Gill, *Carbon Fibers on Composite Materials*, The Plastic Institute, London, 1973, pp.22-29.