



탄소/탄소 복합재료 기술 동향

변준형 | 재료연구소

박홍식 | (주)씨엠알

[요약문]

탄소/탄소 복합재료는 해외에서의 기술/부품 도입 자체부터 엄격히 통제되는 국가의 미래 전략산업의 핵심소재로서 2,000°C 이상의 고온에서 지속적으로 내열성 및 내산화성이 요구되는 우주항공 분야, 초고온에서 고순도 및 내식마성 등이 요구되는 원자로/핵융합로 분야, 고순도 및 고온 열처리가 요구되는 반도체 제조 및 진공 열처리로 분야에서 기존의 내열합금 또는 세라믹 재료로는 한계에 도달한 성능을 획기적으로 향상시킬 수 있는 재료이다. 본고에서는 탄소/탄소 복합재료의 구성재료, 제조방법, 기본적인 물성치 등에 대한 기술적 내용을 소개하고, 현재 및 미래의 응용분야에 대하여 알아보았다. 또한, 국내외 기술동향 분석을 통하여 국가의 전략 소재의 독자적인 개발과 일반산업으로의 상용화에 대하여 탄소/탄소 복합재료가 나아가야 할 방향을 제시하고자 하였다.

1. 서론

탄소/탄소 복합재료는 카본 혹은 흑연 모재에 카본 혹은 흑연 섬유가 보강된 재료로서 섬유 보강으로 인하여 기존의 흑연 재료에 비하여 강도와 인성이 높고 열충격이 더 우수한 특성을 가진다. 탄소/탄소 복합재료의 장점은 경량, 높은 강도와 탄성계수, 높은 열전도도, 낮은 열팽창계수, 높은 파괴인성치, 높은 피로특성 및 크리프 저항 특성 등이다. 낮은 열팽창계수와 높은 열전도도는 탄소/탄소 복합재료의 우수한 열충격 저항 특성을 가지게 한다. 더욱이, 매우 특이한 것은 탄소/탄소 복합재료의 강도는 2000°C 이상의 온도까지 온도가 증가함에 따라 강도가 증가한다는 점이다. 또한, 탄소/탄소 복합재료는 불활성 환경에서 높은 열전도도 및 화학적 안정성을 가지고 있다. 그러나, 다른 재료들과 마찬가지로 탄소/탄소 복합재료는 공기 중에서 500°C 이상, 스팀에서 700°C 이상의 비교적 높은 온도에서 산화된다. 따라서, 탄소/탄소 복합재료를 산화 분위기에서 사용하기 위해서는 표면 코팅이나 sealant 로 보호해야 한다. 또 다른 단점은 제조비용이 높기 때문에 사용 범위가 제한되고 있다는 점이다. 높은 비용은 카본섬유 비용뿐만 아니라 그 이후에 일어나는 제조 방법에 관계없이 반복공정(싸이클)을 거쳐야 하기 때문이다.

카본에는 결정화의 완벽 정도에 따라 여러 형태의 구조가 있을 수 있다. 고흡 카본은 탄화(carbonization)라고 하는 열분해(pyrolysis)에 의해 유기 전구체(precursor)로부터 보통 얻어지며 흑연 또는 비흑연 형태로 존재할 수 있다. 카본 형태와 공정에 대한 정의를 하면 다음과 같다.

- (i) 탄화(carbonization) : 열분해에 의해 재료의 카본 포함량이 점차 증가되는 과정이며 1200°C 이상의 온도에서 거의 대부분 순수한 카본이 남게 됨.
- (ii) 흑연화(graphitization) : 준안정 비흑연 카본이 열 및/혹은 압력 작용에 의해 흑연으로되는 고상 변화 과정 (solid state transformation).

비규칙적 구조에서 흑연화된 카본으로 변해가는 모식도가 그림 1에 나타나 있다. 제조 과정 중에 카본의 매우 다

양한 결정학적 형태가 일어날 수 있는데 흑연의 비등방성, 구조형태의 다양성, 결정체의 방향성 등으로 인하여 카본 재료의 다양한 특성이 나타나게 된다. 탄소/탄소 복합재료에서는 이러한 다양한 특성이 섬유와 모재 모두에 나타나게 된다. 이러한 구성 재료의 다양한 특성과 탄소/탄소 복합재료 제조기술의 차이, 섬유 배열의 다양성 등으로 인하여 탄소/탄소 복합재료는 설계 유연성이 매우 높고 그에 따라 매우 다양한 특성을 가진다.

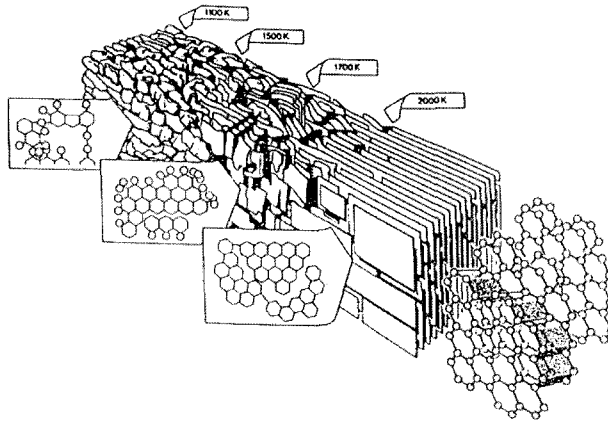


그림 1. Schematic model of the change in lamellar structure of a graphitizing carbon with increase in heat treatment temperature^[1]

2. 구성재료 및 복합재료 제조공정

2.1 카본섬유

카본섬유는 유기 전구체 종류 및 제조공정에 따라 광범위한 특성을 가진다. 전구체 종류는 세 가지로서, 레이온, PAN(polyacrylonitrile), 석유피치(petroleum pitch)이다. 비교적 낮은 탄성계수(27.6 GPa)를 가지는 섬유는 일련의 열처리에 의해 화학적으로 전처리된 레이온 전구체로부터 만들어진다. 먼저, 섬유는 400°C 이상에서 열처리되어 셀룰로스가 열분해되고 1000°C 이상에서 급격하게 탄화가 완성된다. 탄화된 후에는 2000°C 이상의 온도에서 흑연화가 필요로써 완전한 카본섬유가 된다. 레이온 섬유로부터 얻어지는 고탄성 카본 섬유는 마지막 열처리 온도에서 섬유를 신장시키는 추가 공정으로 제조된다.

고탄성(344 GPa), 고강도(2.07 GPa) 카본섬유는 PAN 혹은 mesophase 피치 전구체로부터 얻어진다. 보통 세 단계를 거치는데, 먼저 PAN 섬유는 5배 내지 15배로 신장되고 나서 인장이 가해진 상태에서 200–280°C 온도의 산소 분위기에서 안정화(가교, crosslink)된다. 그 다음 1000–1600°C에서 탄화가 되며 최종적으로 2500°C 이상에서 흑연화된다. Mesophase 피치섬유는 PAN 섬유와 같은 공정을 거치나 결정체를 정렬시키는 데 필요한 고가의 열처리 중의 신장 과정을 거치지 않는다.

탄소/탄소 복합재료에 사용되는 섬유 형태는 불연속(discontinuous) 섬유와 연속(continuous) 섬유이나 대부분 연속 섬유 형태가 사용된다. 불연속 섬유 복합재료 제조는 단섬유와 열분해된 카본이나 열분해된 유기 모재를 함께 사용한다. 이러한 방법은 일반적으로는 높은 섬유 보강을 주지는 않지만 다음과 같은 목적으로 사용된다. 즉, (i) 대형 구조물 제조 (ii) 등방재료 특성 구현, (iii) 층간탄성계수 및 강도 향상, (iv) 연속섬유와 함께 사용하여 결정핵 형성 지점을 제공함으로써 복합재료의 기공 감소를 통한 복합재료 강도 향상.

연속섬유 형태를 사용하는 섬유구조(architecture)는 일방향 및 2방향 적층 구조 및 3차원 직조 구조(textile)가 있

다. 섬유구조는 탄소/탄소 복합재료의 요구 특성을 만족시킬 수 있도록 선정되어야 한다. 탄소/탄소 복합재료를 제조하기 위한 이러한 다양한 섬유구조로 구성된 섬유 보강체를 프리폼(preform)이라고 한다. 일방향 섬유보강 복합재료는 섬유 방향으로는 매우 높은 강도와 파괴인성치를 가지나 다른 방향으로는 특성이 떨어진다. 반면에, 3차원 보강 구조는 모든 방향으로 우수한 특성을 제공하기 때문에 다양한 하중이 작용되는 부품의 경우 구조물의 요구 조건을 만족시킬 수 있다. 그러나 3차원 구조는 다층 결속을 위하여 복잡한 직조 패턴을 통하여 이루어지기 때문에 제조하는 데 시간이 많이 걸린다. 일반적으로 일방향 복합재료의 섬유체적율은 최대 65% 정도이고 2D weave 의 경우는 50-60%, 3D 구조의 경우는 40-55% 수준이다. 그림 2는 복합재료에 사용되는 섬유 프리폼 구조의 종류를 보인 것이다.

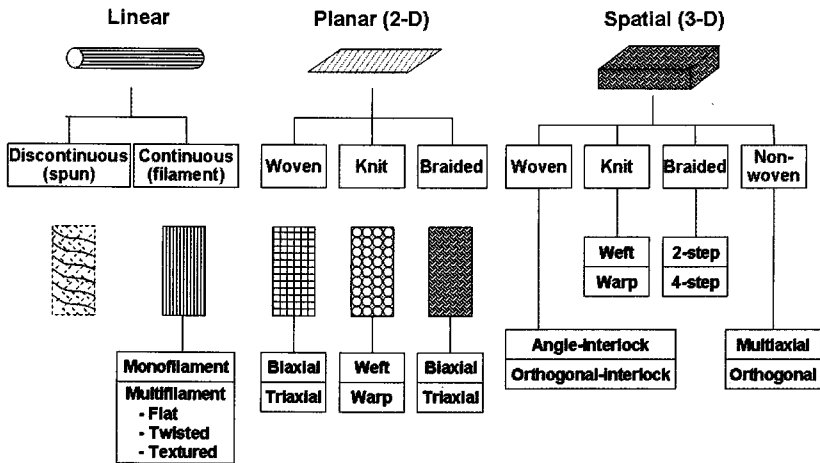


그림 2. Fiber architectures of textile preforms²⁾

2.2 모재 (matrix)

탄소/탄소 복합재료의 모재는 카본이며 미세구조 특성이나 물리적 특성은 사용되는 시작재료 및 복합재료 제조 방법에 따라 매우 다르다. 예를 들어, 모재 카본은 작고 방향성이 없이 배열된 결정체로 이루어져서 대략적인 등방성질을 가지거나 아니면 고도로 흑연화된 카본의 비교적 큰 결정체로 구성된 높은 비등방 성질을 가질 수도 있다. 그러나, 대부분 모재의 미세구조는 이러한 두 상반된 구조의 혼합체이며 기공이나 미세 크랙을 포함하고 있다. 기공 정도는 제조 방법에 의해 결정되는 반면에 모재 미세 크랙은 열팽창 시 카본의 높은 비등방성으로부터 발생한다. 모재의 특성은 섬유가 배열되지 않은 방향에서의 복합재료 특성을 좌우한다. 이러한 특성들이란, 섬유 폭 방향 강도 및 탄성계수, 층간전단 강도, 폭 방향의 열팽창계수 및 열 · 전기전도도이다.

탄소/탄소 복합재료에서는 모재의 파손 변형율은 보강섬유보다 훨씬 낮다. 그 이유는 복합재료 제조 중에 일어나는 열팽창 차이로 인해 모재에 미세 크랙이 발생하기 때문이다. 따라서, 섬유와 모재 간의 계면특성에 따라 복합재료의 기계적 특성이 좌우된다. 섬유와 모재 간의 결합력이 강할 때는 모재에 생긴 크랙이 섬유-모재 간 계면을 통하여 전파되어 섬유가 파손된다. 이런 경우, 복합재료의 최대강도는 모재의 파손 변형율에 의해 지배 받는 취성파괴가 된다. 이와 반대로 섬유-기시간의 약한 계면은 섬유를 통하여 크랙이 전파되지 않고 모재 크랙이 일어나게 한다. 섬유는 모재 크랙 사이를 연결시켜주며, 하중이 점차 증가하면서 최종적으로 섬유 파괴와 파손이 일어날 때까지 지속적으로 하중을 견딘다. 이런 과정을 통하여 복합재료의 인성은 크게 증가된다. 비록 최고의 기계적인 성능은 약한 섬유-모재 계면 때문이지만 다른 물리적 특성은 강한 계면에 의해 증가된다. 따라서, 섬유 표면처리와 제조 방법을 변화시켜서 특별한 용도에 맞는 탄소/탄소 복합재료의 계면 특성을 조절할 수 있다.

2.3 제조 방법

일반적으로 카본/카본 복합재료는 다음 세 가지 방법 중 하나 혹은 둘을 병행하여 밀도화 된다(densification). 즉,

- (i) 화학기상증착/침투법(chemical vapor deposition/infiltration, CVD/CVI)
- (ii) 수지전구체를 이용한 함침/열분해법
- (iii) 피치 전구체를 이용한 함침/열분해법

위의 (ii)와 (iii)을 함께 액상함침법(liquid impregnation)이라고도 한다. 액상함침법은 섬유 프리폼에 유기 전구체로 함침, 경화한 후 800°C 이상의 온도에서 탄화 혹은 열분해된다. 1000°C 이상의 고온에서 열분해될 때 메탄이나 프로판과 같은 탄화수소 가스로부터 카본이 여러 층으로 증착되어 모재를 형성한다. 이러한 함침/탄화 공정은 요구되는 밀도를 얻을 때까지 수차례 반복된다. 제조된 복합재는 2200–2800°C의 온도에서 흑연화 처리를 한다.

화학기상 증착법은 기공이 있는 프리폼 내부로 탄화수소를 통과시키면서 열분해된 탄소가 섬유 표면에 증착되도록 하여 모재를 형성하는 방법으로서, 액상함침법에 비하여 비교적 더 치밀화된 모재를 형성할 수 있다. 화학기상증착법에는 열분해 탄소를 증착할 때 프리폼을 균일한 온도로 유지하든지, 온도와 압력 구배를 가지게 하든지 또는 반응가스가 프리폼을 통하여 흐르게 하는지에 따라, 각각 등온법(Isothermal method), 열구배법(Thermal gradient method), 온도 및 압력 구배법(Temperature and pressure gradient method), 펄스법 등 다양한 방법이 있다.³⁾

위의 세 가지 공정에 따라 복합재료의 미세구조가 매우 다른데, 그 이유는 우선, 카본을 생성하는 방법이 다르기는 하나 더 중요한 차이는 사용하는 전구체가 서로 다른 카본 상을 만들기 때문이다. 즉, 화학기상증착법은 카본을 직접적으로 섬유 위에 층상으로 부착시키는 반면에, 액상함침법은 열처리 후 카본이 섬유 사이의 빈 공간에 형성되기 때문에 체적수축으로 인하여 모재에 기공이나 공극이 생기고 수축 크랙이 발생한다.

제조되는 부품의 형상에 따라 밀도화 제조 공정이 달라지는데, 화학기상증착법은 제품의 표면 근처 지역에 주로 증착되기 때문에 두께가 얇은 부품 제조에 주로 사용되며, 두꺼운 제품은 액상함침법이 사용된다. 제조 방법에 관계없이 복합재료의 밀도를 높이고 최적의 특성을 얻기 위해서는 반복 공정이 필요하다.

2.4 기계적/열적 특성

섬유 프리폼 구조, 섬유 종류, 모재 전구체 및 제조 공정 모두는 카본/카본 복합재료의 물리적 특성을 좌우한다. 따라서, 이러한 다양한 변수에 따라 카본/카본 복합재료는 광범위한 특성을 가지도록 제조될 수 있다. 그럼에도 불구하고, 카본/카본 복합재료는 다음과 같은 공통적인 특성을 가진다. 즉, 온도가 증가함에 따라 열팽창과 열전도도가 낮아지며, 불활성 환경에서는 온도가 증가함에 따라 강도가 증가한다.

카본섬유의 보강 효과와 프리폼 구조에 따른 카본/카본 복합재료의 특성 변화가 표 1에 나타나 있다. 카본 섬유를 보강함으로써 복합재료의 특성이 크게 향상되는 것을 볼 수 있으며 일방향 섬유 보강은 섬유 방향으로 큰 강도 값을 보이는 반면에 3D 섬유 구조의 경우는 파괴인성치의 큰 증가를 볼 수 있다. 표 2는 서로 다른 프리폼 구조를 가진 복합재료의 기계적/열적 특성을 보인 것이다. 일방향 및 2D 직조 섬유 구조의 경우, 섬유 방향으로 물성치가 높으며 3D 직조 섬유 구조의 경우에는 더 등방적인 특성을 보이고 있다.

표 1. Room temperature mechanical properties of graphite and C/C composites⁴⁾

	Elastic modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Compressive strength (MPa)	Fracture energy (KJ/m ²)
Graphite	10–15	40–60	110–200	0.01
Unidirectional C/C composites	120–150	600–700	500–800	1.4–2.0
3D C/C composites	40–100	200–350	150–200	5–10

표 2. Room temperature mechanical properties of C/C composites^[5]

	Fiber volume fraction			Tensile strength (MPa)		Tensile modulus (GPa)		Compressive strength (MPa)		Compressive modulus (GPa)	
	x	y	z	x	z	x	z	x	z	x	z
UD	0.65	0	0	1000	2.0	260	3.4	620	-	250	-
2D	0.31	0.3	0	350	5.0	115	4.1	150	-	100	-
3D	0.13	0.13	0.21	170	300	55	96	-	140	-	90

표 3. Thermal properties of C/C composites^[5]

	Fiber volume fraction			Coefficient of thermal expansion (10 ⁻⁶ /K)		Thermal conductivity, (W/mK)	
	x	y	z	x	z	x	z
UD	0.65	0	0	1.1	10.1	125	10
2D	0.31	0.3	0	1.3	6.1	95	4
3D	0.13	0.13	0.21	1.3	1.3	57	80

(Note) Thermal expansion measured from room temperature to 1650°C, and thermal conductivity measured at 800°C

그림 3은 고온재료에 대한 인장 비강도(강도/밀도)의 관계를 보인 것이다. 고온재료로서의 카본/카본 복합재료의 장점은 사용 온도의 증가에 따라 강도가 저하되지 않는다는 점이다. 이 특성은 초내열합금이나 세라믹 재료와는 크게 다르다. 이 그림에서, 세 가지 급의 카본/카본 복합재료의 강도 효율성을 보여주고 있는데, 먼저, Space Shuttle 재료라고 표시된 것은 Space Shuttle의 열보호 시스템에 사용되는 재사용 가능한(re-usable) 카본/카본 복합재료(RCC)의 강도 수준이다. 이 재료는 비록 낮은 강도의 카본섬유로 이루어져 있으나 강도 효율은 1000°C 이상의 온도에서 초내열 합금이나 세라믹 보다 뛰어나다. 첨단(Advanced) 카본/카본 복합재료(ACC)는 2D 직조 프리폼을 사용한 것으로 RCC 재료보다 2배의 강도를 가진 재료이다. 일방향 섬유를 2D 직조 패브릭 사이에 적층시킨 하이브리드 ACC 재료의 경우, 강도는 345MPa 이상으로 증가한다. 첨단 카본/카본 복합재료의 열·기계적 및 열·화학적 최근 기술 발전과 구성재료, 내산화, 제조, 결합 및 섬유구조 등에 대한 새로운 기술 적용으로 카본/카본 복합재료 및 구조물의 현저한 성능 증가를 보여 주고 있다.

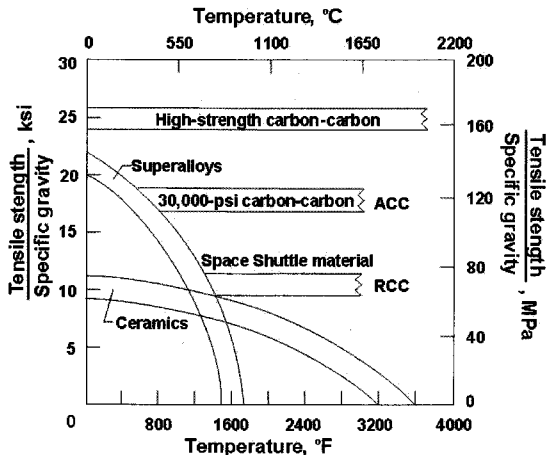


그림 3. Strength to density ratio for several classes of high-temperature materials^[6]

3. 응용분야

탄소/탄소 복합재료는 내열성 및 내산화성이 요구되는 우주항공 분야, 초고온에서 고순도 및 내 삭마성 등이 요구되는 원자로/핵융합로 분야, 고순도 및 고온 열처리기가 요구되는 반도체 제조 및 진공 열처리로 분야에서 기존의 내열 합금 또는 세라믹 재료로는 한계에 도달한 성능을 획기적으로 향상시킬 수 있는 재료이다. 탄소/탄소 복합재료는 그림 4에서 보는 바와 같이 항공기 분야에서 이미 전통적인 금속브레이크를 대체한 첨단 초경량(밀도: 1.7~1.8 g/cm³) 초고온 브레이크 신소재에 대한 기초연구가 1960년대 중반부터 시작되었으며, 응용 연구는 1970년도부터 미 공군과 NASA가 공동으로 우주개발용 내열재료로 개발에 착수한 이래 전 세계적으로 미국, 러시아 및 프랑스 등의 일부 업체들만이 독점생산 공급하고 있는 실정이다. 지금까지의 탄소/탄소 복합재료는 주로 항공기용 Brake Disk, Gas Turbine Blade, Rocket Nozzle, Exit Cone, Re-entry Space Shuttle의 Leading Edge 등(그림 4, 5)과 같은 항공우주산업용에만 주로 응용되어 왔으며, 최근 들어 극심한 제동조건을 요구하는 경주용 차량(F1 Formular)의 브레이크 디스크로 장착 사용되고 있다.



그림 4. Aircraft carbon/carbon brake disk

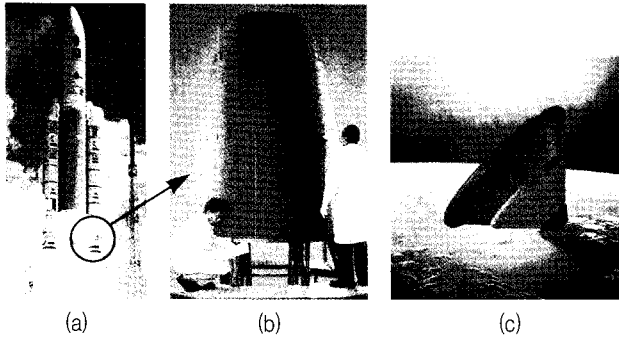


그림 5. (a) Arian 5 launcher; (b) its exit cone; (c) atmospheric reentry

탄소/탄소 복합재료는 반도체 분야에서 실리콘 웨이퍼 제조용 결정 성장로의 핵심 부품인 고 순도 흑연계 도가니, 열선 및 열차폐재(Heat shield)의 열 충격 취약 및 짧은 사용수명의 문제점을 해결할 수 있는 대안으로 급부상하고 있으며, 차세대 대형 웨이퍼(12 inch 이상)를 제조하기 위해서는 결정 성장로의 핵심부품을 모두 탄소/탄소 복합재료로 제조하여야 한다는 데는 이견이 없는 추세이다. 탄소기지를 탄화규소로 대체할 경우 탄화규소의 불활성 및 이산화규소와 탄소와의 반응을 막는 차단막으로 작용함으로써 고 순도를 요구하는 반도체 분야에 있어서 고 순도 흑연의 한계를 극복할 수 있는 유일한 재료로서 각광을 받고 있다. 최근에는 항공우주 분야에서 개발된 이러한 기술의 spin-off를 통하여 자동차용 세라믹 브레이크와 산업용 가솔린/디젤 엔진의 Hot section 분야의 구동부품 경량화 및 고온에서 작동으로 인한 엔진 효율 향상 및 배출 가스의 감소 등을 목표로 세라믹 브레이크 및 실린더 라이너 등에도

적용/실용화 되고 있다.

탄소/탄소 복합재료의 현재 및 미래의 응용 부품을 표 4에 정리하였다.

표 4. Current and future applications of C/C composites

현재의 용도	미래의 용도
<ul style="list-style-type: none"> - Air craft brake disk - Racing car rotors, clutch plates - Solid rocket motor nozzle throats, ITEs, exit cones, blast tubes - Missile reentry vehicle nosetips - Hypersonic flight vehicle nosecones, leading edges - Space power canisters - Vacuum/inert gas furnace insulating - Hot glass transfer elements - Protective shielding - Furnace structural elements, mufflers - Hot pressing molds - Superplastic metal forming molds - Metal sintering tramp - Electronic circuit board thermal planes - Semiconductor manufacturing components - Foundry molds 	<ul style="list-style-type: none"> - Aerospace (hot flight vehicle surfaces, planetary entry shields) - Liquid propulsion (thrust chambers, nozzle extension skirts and elevons) - Gas turbine engine propulsion (flaps, seals, liners, vanes tail cones, flame holders, ducting) - Space (survivable structures and antennas) - Reentry vehicle heat shields - Friction (high speed train, heavy mass off-road vehicle, wet-lubricated brake systems) - Thermal transport (radiators, heat pipes, circuit board thermal planes) - Power generation (fusion reactor containers, fuel cell parts) - Protective shielding (thermal, x-ray, laser) - Biomedical (prosthetic implants)

4. 기술개발 동향

국내에서 사용하고 있는 고온용 탄소/탄소 복합재료는 대부분 외국에서 수입하고 있으며, 특히 항공산업과 관련된 소재 부품은 ITAR(International Traffic in Arms Regulations) 및 MTCR(Missile Technology Control Regime)에 의하여 기술의 해외유출이 정부의 엄격한 통제 하에 있으며, 또한 전 세계적으로 미국, 러시아 및 프랑스 등의 일부 업체들만이 독점생산 공급하고 있을 뿐만 아니라, 응용분야 및 제조의 특성상 상당히 고가로 판매되는 고부가가치 소재이다. 그리고 탄소복합재의 다양한 고온 구조물에의 적응성에 비추어 볼 때, 또 세계정치 경제 질서의 변환 등 여러 가지 변수를 감안할 때 탄소 복합재의 개발은 정치, 경제 및 산업적 측면으로 매우 중요한 소재임은 분명한 사실이다. 초고온 복합재료의 시장규모는 표 5에서 보듯이 2010년 극한환경용 탄소 복합재 시장의 세계 시장규모는 6,630억/년 이며 국내는 480억/년 규모가 예상된다.

표 5. 극한환경용 탄소/탄소 복합재 시장현황¹⁷⁻¹⁹⁾

(단위 : 억원)

분야	연도		2000	2005	2010	2015
	구분					
항공기용 C/C Brake Disk	세계		5,200	5,500	5,800	6,000
	국내		340	360	380	420
Rocket/Re-entry Vehicle, Hot Structure	세계		420	650	830	1,060
	국내		-	50	100	200
합 계	세계		5,620	6,150	6,630	7,060
	국내		340	410	480	620



4.1 국외 현황

탄소/탄소 복합재의 주요 기술보유국 및 개발국을 살펴보면 제조기술을 갖춘 회사들이 우주항공용 부품개발 후 일반산업용 부품인 고효율 래디언트 튜브 나 고온용 버너노즐, 나아가 자동차의 탄소/세라믹 브레이크 디스크에도 확대 적용하고 있다.

초고온 복합재료는 1970년대 중반부터 미국, 프랑스, 러시아 등의 국가연구소 및 관련업체에서 비밀리에 연구개발을 수행에 오고 있으며 기초소재, 관련 설계 및 제조기술은 MTCR 및 ITAR규제 하에 철저히 통제되어 오고 있다. 특히, 초고온 구조 및 열차폐용 탄소복합재 제조기술은 프랑스의 SEP사, 미국의 SGL, Allied Signal, 러시아의 KOMPOZIT, 일본 우주산업의 희망이라고 하는 우주왕복선 HOPE-X 및 H-II Rocket 용 탄소/탄소 복합재 부품을 개발하고 있는 Mitsubishi 등이 현재 대표적인 기술 보유 및 생산 업체로 알려져 있다. 표 6은 탄소/탄소복합재의 주요 개발 업체를 정리한 것이다.

표 6. 탄소/탄소복합재료의 주요 개발 업체

국가	기관	응용분야
미국	Honeywell	Aerospace, Defence Industry
	General Electric	Aerospace, Industrial
	ORNL	Aerospace, Defence Industry
Europe	SGL Carbon(독)	Aerospace, Engines
	Snecma(프)	Aerospace, Defence Industry
	Aerospatiale(프)	Aerospace, Defence Industry
	KOMPOSIT(러)	Aerospace, Engines
Asia	Mitsubishi Heavy Ind.	Aerospace, Industrial
	Xian Chama Composites	Aerospace, Defence Industry
	Nippon Carbon	Engines, Industrial
	DACC (한국)	Engines, Industrial

지난 20여 년간 막대한 연구개발 투자를 통하여 탄소/탄소 및 탄소/탄화규소 복합재료에 대한 지속적인 내열성 향상 및 혁신적인 제조 가격 절감을 위한 생산기술 연구가 진행되고 있는데, 일례로 미 국방성은 년 2,000 만불의 연구개발비를 초고온용 복합재 분야에 투자하고 있다. 최근의 주요 선진국의 대형 국책 과제 동향을 보면 일본은 HOPE-X 에 적용하고자 1,700°C에서 10분간 사용이 가능한 내열/내산화 코팅기술을 개발하고 있으며, 유럽의 space vehicle 프로그램인 HERMES(프랑스), HOTOL(영국), SANGER(독일) 등에 모두 1,300°C 상용의 초내열 탄소 복합재 및 내산화 코팅기술을 개발하고 있으며 이를 이용한 열 구조 설계 및 고온 파괴특성 평가에도 주력하고 있다.

최근 들어 중국, 인도 등의 후발 우주개발국가들도 이 분야에서 적극적인 연구개발 투자를 한 결과 어느 정도 성과를 보이고 있으나 자세한 성능은 알려져 있지 않다. 일본은 최근 탄소복합재의 제조 및 내산화성 향상 과제를 위하여 정부주도로 기술개발 및 실험시설에만 수백억/년 투자하고 있는 것으로 알려져 있으며 성공적인 개발 결과로 HOPE 및 H-II 프로젝트에 내산화성 탄소복합재료를 적용하는 수준에 도달해 있다.

일반 산업용으로도 미국의 NASA 및 전문 업체에서 기술의 Spin-off를 주도하면서 다젤/기술린 엔진의 실린더 라이너, 피스톤 및 밸브용 탄소/탄소 복합재의 상용화를 추진하고 있으며 성공의 관건은 신속 제조 공정을 통한 가격혁신 및 내산화성 향상 기술이 핵심이다. 또한 반도체 설비용 고순도 탄소 복합재에 대한 탄화규소 코팅 기술은 일본과 미국이 주도하고 있으며, 흑연 및 탄소/탄소 복합재에 탄화규소를 처리한 제품의 상업화에도 이미 성공한 바 있다. 한국과 일본은 반도체용 설비의 최대 수요처로서 고순도 탄소 복합재 제품의 상당량을 수입하고 있으나, 일본은 이미 TOKAI Carbon Co. 및 NIPPON Carbon Co. 등에서 개발 완료하여 국내 수요의 상당 부분을 충당하고 있는 실정이다.

4.2 국내 현황

국내에서도 이미 '90년도 초부터 국방과학연구소 및 국책연구소에서 관련업체들과 탄소/탄소 복합재의 국산화를 위한 기초소재 연구, 제조공정 등에 대한 연구를 착수하였으며, 2000년도 이를 기반으로 항공기용 탄소/탄소 복합재 브레이크 디스크의 국산화를 완료한 바 있다. 초내열 구조 및 극한환경용 적용을 위한 탄소/탄소 복합재의 경우에는 아직 기반 기술의 일부만 확보되어 있는 실정이다. 표 7은 탄소 복합재 관련 국내기술수준을 보여주고 있는데 탄소/탄소의 경우 마찰재료의 응용을 위한 기술개발은 체계적으로 수행된 바 있으나, 탄소/세라믹 또는 내산화성 향상을 위한 Coating 분야는 기초연구 수준으로 극한환경용 탄소 복합재 개발을 위한 기반기술개발은 매우 미흡한 실정이다.

기초소재의 일부는 국산화 되어 있으나 가장 근본이 되는 탄소섬유 프리폼 기술(Low-cost near-net shape preform), CNT 기술과 접목된 고속 치밀화 탄소/탄소 복합재료 제조기술, 균일한 고밀도 C/SiC의 신속 제조 공정기술, Thermal cracking을 최소화 할 수 있는 내산화 코팅기술, 나아가 상용화를 위한 Scale-up 기술에 있어서도 아직도 선진국과 10여년 이상의 격차를 보이고 있다. 그러나 정부의 우주개발 사업 및 반도체 산업 분야 등의 수요를 볼 때, 그리고 기 확보된 기반시설 및 연구 인력의 효율적인 integration이 추진된다면 소규모의 투자로도 소기의 성과를 올릴 수 있는 기반을 갖고 있다고 판단된다.

표 7. 국내 연구개발 현황

분야	기관	응용분야
C/C	(주)테크	F-16 항공기용 탄소/탄소 브레이크 디스크 국산개발
	국방과학연구소	국방용 탄소/탄소 제조연구
	재료연구소	탄소/탄소 복합재용 프리폼(2D, 3D) 설계/제조
	충남대학교	Pitch계 탄소/탄소 제조공정연구
	산업과학기술연구소	Pitch계 탄소/탄소 제조공정연구
	한국화학연구원	CVI 공정 연구
	한국과학기술원	탄소/탄소 브레이크 디스크의 열탄성해석
SiC Coating	충남대학교	SiC Coating에 의한 탄소/탄소의 내산화 연구
	한양대학교	상압소결법에 의한 SiC 공정연구
	한국과학기술원	Pack Cementation에 의한 내산화성 연구

5. 앞으로의 전망

탄소/탄소 복합재료는 해외에서의 기술/부품 도입 자체부터 엄격히 통제되는 국가의 미래 전략산업의 핵심소재로 국내의 연구개발 프로그램을 통해 독자적으로 기술의 확보하고 원천소재가 개발되어야 한다. 이를 통해 관련 기술 및 재료가 개발될 경우, 해당 산업분야인 항공우주/해양, 방위, 정밀기계, 자동차, 조선, 철강/비철, 에너지 및 환경산업에 사용되는 수입소재의 대체 및 산업의 고도화 실현이 가능하며, 해외로의 소재의 수출을 통한 국가 경쟁력 강화에 일조를 담당할 수 있을 것으로 판단된다. 극한환경용으로의 적용을 위한 초고온 탄소복합재의 기술 수요 중 항공우주산업의 로켓 엔진, 각종 발사체의 내열구조 핵심부품 등의 국내 시장만을 본다면 현재 약 100억 정도 규모의 수준으로 경제적인 시장 규모를 형성할 수 없다. 그러나 해외에서의 기술/부품 도입자체가 MTCR 등에 의해서 엄격히 통제되고 있는 점을 감안한다면 국가의 미래 전략산업의 독자성을 확보하기 위해 반드시 보유해야 할 핵심소재라 판단된다.

한국형 차세대 핵융합로에도 고온/내삭마성이 요구되는 diverter 에는 고밀도의 탄소/탄소 복합재가 요구되고 있으며 시장 규모로는 30억 정도로 평가되고 있으나, 한번 설치되면 5년 이상 사용되기 때문에 1회성 시장의 특징을 갖고

있다. 반도체 산업의 웨이퍼를 제조하기 위한 실리콘 단결정 성장로의 열차폐제 및 각종 부품용 탄소/탄소 복합재 역시 100% 수입에 의존하고 있으며 현재 국내 시장규모는 약 50억 정도이나, 진공열처리로의 각종 열치구, 히터 등과 고온/고압용 프레스 몰드 등의 소요를 모두 감안할 경우 현재의 국내 수요는 약 150억 정도로 예측된다.

현재 전 세계적으로 위 응용분야의 탄소 복합재 시장규모는 연간 13억불 수준이며 불과 몇몇 업체(SGL, Allied-Signal, SNECMA 등)에 의해 과점 상태에 있다. 현재의 성장 추세는 ~10%/년 수준으로 평가되고 있다.

향후 5~10 년 내 우주분야 발사체 시장의 꾸준한 소요 증대는 예상되고, 산업용으로는 자동차의 가솔린/디젤 엔진 분야에 시장 진입이 가능하리라 예상된다. 반도체 산업에 있어서 차세대 12인치 실리콘 웨이퍼가 양산되는 5년 후에는 기존 성장로의 고순도 흑연제품이 탄소 복합재로 전량 대체될 경우 국내 수요가 수백억대로 증가 될 것으로 전망된다. 우리나라 산업을 선도하는 자동차 산업 및 반도체 산업의 필수적인 소재로서 향후 5년 후 국내 시장 규모로는 1,400억 정도, 세계시장 규모로는 40억불 정도로 예상되며, 성장률은 연 10% 이상으로 평가되고 있다.

❁ 참고 문헌

- [1] Griffiths A, Marsh H, Proceedings of 15th Biennial Conference on Carbon, Univ. of Pennsylvania, Philadelphia, USA, 22-26 June, 1981.
- [2] Byun JH, Chou TW. Mechanics of Textile Composites. Comprehensive Composite Materials, editors-in-chief A Kelly, C Zweben, Volume 1, Fiber reinforcements and general theory of composites, volume editor, T-W Chou, Elsevier Science Ltd, Oxford, UK, 2000, pp. 719-761.
- [3] 박수진, 탄소재료 원리 와 응용, 대영사, 2006.
- [4] Windhorst T and Blount G, "Carbon-Carbon Composites: A Summary of recent Developments and Applications," Mater. & Des., Vol 18, 1997, pp. 11-15.
- [5] Sheehan JE, Buesking KW, Sullivan BJ, "Carbon-Carbon Composites", Ann. Rev. Mater. Sci., Vol 24, 1994, pp. 19-44.
- [6] Buckley JD, "Carbon-Carbon Overview," edited by Buckley JD and Edie DD, Carbon-Carbon Materials and Composites, Noyes Publications, USA, pp. 1-17.
- [7] "A global assessment of the carbon-carbon brake disc, components carbon fiber market and its application", Intertech Corporation, 2002.
- [8] "Global Composites Market Guide 2001-2002", Market Research Group, E-Composites.com, 2001.
- [9] SGL Carbon Conference Report, 2002.



변 준 형

· 재료연구소 융합공정연구본부 복합재료연구그룹
책임연구원
· 관심분야 : 탄소/탄소 복합재료 3D 프리폼 설계 및
제조, 나노복합재료
· E-mail : bjh1673@kims.re.kr



박 홍 식

· (주)씨엘알 인수사업담당 상무
· 관심분야 : 탄소/탄소 복합재료 제조
· E-mail : hongsikpark77@gmail.com