

진공열처리 분야의 혁신적인 신소재: 탄소-탄소 복합재료의 응용 현황

김 광 수

첨단 복합재 센터, 한국항공우주산업(주)

Application of High Temperature Carbon-Carbon Composite Materials in Heat Treatment Industry

Kwang-Soo Kim

Advanced Composites Center, Korea Aerospace Industries, Ltd.

머리말

21세기 항공 우주 수송 수단으로 부각 되고 있는 극 초음속기, 우주 왕복선, 대형 로켓트등 일련의 혁신적인 항공우주 기술의 출현은 전통적인 항공기술의 발전과 더불어 초경량 및 초내열 재료, 특히 탄소섬유가 보강된 복합재료라는 신소재의 출현에 힘입은 바가 크다고 하겠다. 항공우주 분야에서 잉태된 첨단 복합재기술은 스포츠-레저, 자동차 산업, 일반 산업분야로 급속히 spin-off 되고 있으며 오는 21 세기에는 기존의 알루미늄 구조재를 대체할 대규모의 경량 복합재료 시장 출현을 예측하고 있으며, 고온 열처리 산업분야에서도 기존의 내열금속, 세라믹, 흑연을 대체할 탄소-탄소 복합재료(Carbon Fiber Reinforced Carbon Composite : CFRC) 가 새롭게 기술혁신을 선도해 가고 있는데, 본고에서는 초고온용으로 최근 활발히 상용화가 추진되고 있는 탄소-탄소 복합재료의 기술개발 및 주요 응용 현황을 살펴 보고자 한다.

1. 탄소재료란?

탄소(carbon)는 석탄을 뜻하는 라틴어인 카르보(carbo)에서 유래한 까닭에 대부분의 사람들이 탄소하면 석탄을 떠올리는 것은 어쩌면 당연하다 하겠지만 석탄은 탄소덩어리의 가장 초보적인 모습에 불과하다. 탄소는 지구상에서 가장 흔히 발견될수 있는 원소중의 하나로서 원소주기율표 제 4B 족에 속하며 녹는점은 3550 °C, 홑원소 물질로는 탄소의 외곽전자가 어떻게 결합하느냐에 따라 비결정성 탄소, 흑연, 다이아몬드 라는 세 가지의 동소체로서 산출되며 각각의 물리 및 화학적

성질은 매우 다른데 그 차이는 각각의 원자결합구조의 차이에 기인하고 있다.

탄소재료는 열처리 온도에 따라 무질서한 결정구조가 1700°C 이상의 열처리를 받게 되면 흑연구조로 변환이 되면서 각종 특성이 변하게된다 (그림1 참조). 이렇게 고온 처리된 흑연은 2000°C의 열에도 끄덕 없으며, 기계적 강도가 보이는 가장 현저한 특성으로는 2500°C 까지 온도와 더불어 강도가 증가하며 상온에서의 강도보다 약 2배의 값을 보이는데 이는 다른 공업용재료에서는 발견되지 않는 독특한 성질로 초고온 용도에는 최적의 재료임을 알 수 있다.

또한, 특유의 윤활성, 내열성, 내식성, 전기및 열전도도, 가공성 등 여타의 재료에서 얻을 수 없는 특성을 지니고 있어 철강재료와 함께 산업의 쌀이라 불릴 만큼 중요한 소재로 인식되어 오고 있다.

공업적인 제조기술은 이미 1800년대 중반에 러시아의

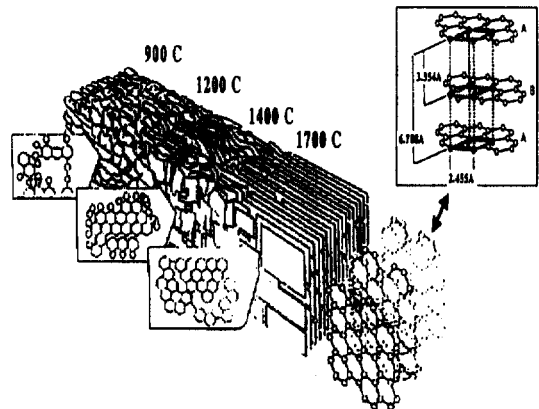


그림 1. 열처리 온도에 따른 탄소구조의 변화

A. Bucksmaster, 미국의 E. Acheson & G. Kastner 등에 의해서 개발되어 근 100여년에 걸쳐 지속적인 기술개발로 이미 성숙기에 접어들었으며, 현재 전세계적으로 생산되고 있는 탄소 및 흑연소재는 연간 수백만톤에 달하고 있다. 이는 연간 생산되는 전세계의 모든 금속의 총합과 (체적기준에서) 대등한 수준으로서 \$3/kg 수준의 전극용 흑연에서부터 \$40-200/kg 수준의 특수용도 까지 다양한 제품이 상용화 되었으나, 여전히 내충격성, 파괴인성치, 고온 치수안정성에 있어서 개선의 여지가 많은 것 또한 사실이다.

탄소의 또다른 동소체인 다이아몬드는 모든 광물중 가장 단단한 재료로서 내마모성이 탁월하며, 부도체이나 열을 잘 전달하는 특징을 갖고 있다. 실제로 비디오 플레이어의 다이아몬드 헤드란 이러한 다이아몬드 구조를 한 탄소결정체의 막을 입힌 것으로 탄소재료의 내마모성을 활용한 좋은 예라 할 수 있다. 흑연과 다이아몬드와 같이 자연에 존재하는 탄소의 동소체 외에 최근에 인위적으로 합성한 새로운 형태의 동소체로 탄소원자 60개로 만들어진 분자인 축구공모양의 풀러렌(C₆₀)과 육각형의 탄소고리로 이루어진 속이 빈 탄소나노튜브가 나노테크놀러지의 선두주자로서 초전도체나 집적도가 어마어마한 반도체 분야에서 현대 과학자들의 각광을 받고 있다. 최근에는 기술의 고도화, 자원절약 및 에너지 절약에 대한 사회적 요청에 따라 초고온 내열재료, 고성능 내식재료 및 전자재료, 고성능 촉매 등 고도의 기능을 지닌 탄소재료 개발에 대한 관심이 지속적으로 높아지리라 예상된다.

2. 탄소-탄소 복합재료

두가지 이상의 재료가 보강재와 기지재로 결합해서

각각의 장점을 활용하며 단점을 상호 보완할 수 있는 재료로서 복합재료가 근래에 와서 다양하게 연구개발되고 있는데, 복합재료 분야에서도 탄소섬유가 출현함으로써 비약적인 발전을 하고 있다.

탄소섬유란 합성 또는 자연산의 유기섬유나 수지핏치 등의 유기원료로부터 뽑은 섬유를 1600°C 이상에서 열분해 탄화하거나 2000°C 이상의 열처리를 하여 얻은 비흑연질 탄소로 구성된 섬유를 말하며, 약 4,000K의 고온에서도 고체상태를 그대로 유지하면서, 비강도, 비탄성율 등의 기계적 성질과 치수안정성이 우수하며, 열적 성질, 내식성, 내약품성 등의 화학적 성질 및 전자기적 성질 등의 여러가지 면에서 유용한 성질을 겸비하고 있다. 그러나 섬유 자체만으로 사용하는 경우는 드물고 보통 고분자수지, 금속 또는 세라믹기지 복합재의 보강재로서 사용되고 있으며, 우리주변에서 흔히볼 수 있는 테니스라켓, 낚시대, 골프채와 같은

그림 2. 초고온비행을 하는 우주왕복선

그림 3. CFRC의 제조개념 및 탄소섬유와 탄소기지 결합상태를 보여주는 전자현미경(SEM)사진

스포츠 용품에서부터 항공기 날개, 스페이스 셔틀의 구조물 등에 이르기까지 매우 다양하게 이용되고 있다.

그림 2와 같이 초고온 상태의 비행을 하는 우주왕복선의 앞부분과 주날개부위 등은 탄소 또는 흑연재료에 탄소섬유가 보강된 탄소-탄소 복합재료(carbon fiber rein-forced carbon composites: CFRC 혹은 C-C라고도 불린다)가 쓰이고 있는데 이재료는 수천도의 온도에서도 강도가 떨어지지 않는 탄소재료의 장점을 그대로 살리면서 동시에 내열 충격성, 치수 안정성, 내식성 등을 획기적으로 개선 시켰으며 탄소섬유의 고강도/강성에 의하여 기체의 경량화에도 크게 기여를 하고있다. [1]

이와 같이 탄소섬유를 탄소 또는 흑연재료에 보강한 재료를 통칭하여 탄소-탄소 복합재료 (CFRC)라고 부르는데, 세계시장 규모는 2000년도에 743백만달러, 생산

표 1. CFRC 재료의 주요 특성

* 저비중으로 경량화 가능 (그림 5참조)
* 고온 파괴 인성치가 높다
* 급가열/급냉각등 열충격에 내성이 강하다.
* 피로에 대한 저항성우수 : 사용수명 향상
* 열팽창 계수가 적다 : 고온 치수안정성 우수
* 내식성 우수 : 화학적으로 안정
* 전기 및 열전도성 우수 : 가열로 부품, 전극, 발열체 등에 다양하게 적용 가능 (그림 6 참조)

량으로는 연간 500 톤 규모로 예상되고 있으며 사용된 탄소섬유의 종류, 열처리온도, 순도, CFRC의 밀도에 따라서 2-D CFRC의 경우 \$110-2900/kg, 3차원상으로 섬유가 보강된 고풍도 CFRC의 경우는 \$1000-3300/kg 수준의 가격대가 형성되었다. 가장 대표적인 용도로는 고부하 브레이크용 마찰재료를 들 수 있는데 현재 전세계적으로 생산되는 탄소-탄소 복합재의 약 80% 이상이 항공기, 고속전철 및 경주용 자동차 등의 브레이크소재로 적용되고 있으며 약 15%가 우주로켓/미사일 분야, 그리고 기타 5%로 구성되었다. 향후는 기타로 분류되어 있는 일반산업용, 특히, 고온 열처리분야에서 괄목할만한 성장이 예상되고 있다.

2.1. 탄소-탄소 복합재료의 주요 특성

탄소섬유를 탄소재료에 보강한 재료(그림3 참조)를 통칭하여 탄소-탄소 복합재료(CFRC)라고 하는데 보강되는 탄소섬유의 구조형태에 따라 1방향 섬유보강 구조부터 2, 3 차원 공간상에서 다방향으로(multi-directional) 보강된 탄소섬유의 방향 및 형상에 따라 다양한 열/기계/전기적 특성 등을 재단할 수 있다. 그림 4와 5에서 보듯이 내열세라믹 또는 Superalloy등 고온 금속 소재에 비하여 저비중으로경량일뿐 아니라 고온에서 比強度 (specific strength: 강도/밀도) 및 比剛性 (specific stiffness: 강성/밀도)이 월등히 우수하여 경량화 측면에서 매우 뛰어날뿐 아니라 기존의 흑연 및 탄소소재의 장점을 그대로 살리면서 표 1과 같이 다양한 장점을 갖고 있다. 또한 열전도도(그림 6참조)에서 보듯이 섬유방향을 따라서는 구리 이상의 값을, 섬유에 수직인 방향으로서는 단열성을 갖도록 재단도 가능하다.

흥미로운 점은 기존의 흑연/세라믹 소재와는 달리 금속의 소성변형과 같은 파괴거동을 보이는데 그림 7에

그림 4. 내열재료의 사용온도비강도 관계

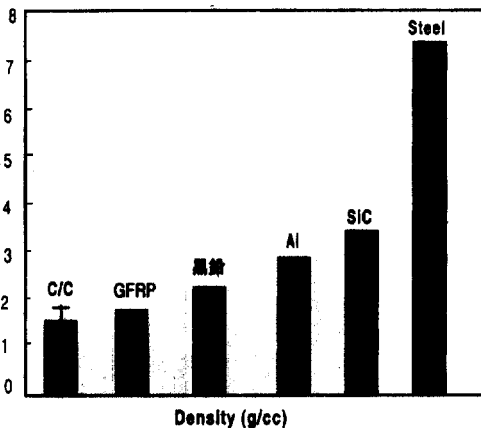


그림 5. 각종재료의 밀도비교

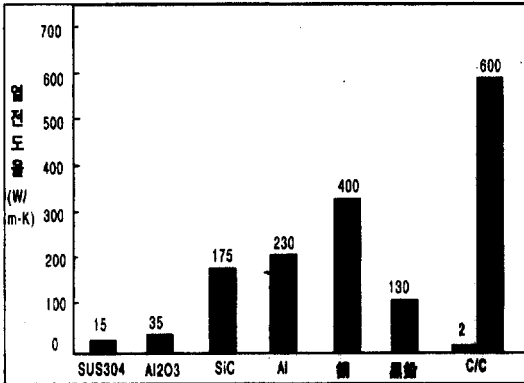


그림 6. 각종재료의 열전도도 비교

취성파괴가 일어나지 않음을 볼수 있다.

이러한 현상은 고온으로 갈수록 현저해 지는데 이는 취급시 혹은 사용중 부주의한 충격하중을 받더라도 기존의 세라믹/흑연 등과는 달리 충격손상에 대한 저항성이 매우 우수함을 보여준다. 그러나 기존의 탄소재와 마찬가지로 고온에서의 낮은 산화저항성, 그리고 상대적으로 높은 가격 등이 시장확대를 위해서는 시급히 해결하여야될 과제로 남아있다.

2.2. 제조기술

제조기술에 관한 연구는 1960년대 중반부터 미국, 프랑스등에서 시작되었으나, 이에 관한 관련기술 및 소재 자체가 미사일관련 기술통제 규정 (Missile Technology Control Regime: MTCR) 하에서 통제되어 오고 있으며, 현재까지 개발된 탄소-탄소 복합재료의 제조방법도(그림 8 참조) 동서냉전이 극열한 상태에서 각국이 자존심을 걸고 개발한 것으로써, 대부분 제조원가의 절감측면보다는 무기의 성능관점에서 노력하여 왔기 때문에 제조원가가 매우 높으며 고가의 설비투자에 의존하여 왔다. 제조공정의 가장 큰 특징은 일차 예비 성형체인 다공성의 프리폼 내부에 고분자 수지를 탄화시켜 얻을수 있는 resin-char, 메탄과 프로판과 같은 hydro-carbon 가스를 고온/저압하에서 열분해시 생성되는 pyro-carbon, 또는 이들 두종류가 혼합된 탄소기지를 기공 내부로 침투 증착시켜 밀도를 증가시키는데 있다. 통상 밀도화 및 흑연화 처리 공정은 1000-3000°C 온도분위기하에서 3-5회 반복되면서 수개월이 소요되는 장시간 프로세스로서 CFRC가 고가에 판매되

그림 7. 전형적인 Toughness 거동

서 보듯이 전형적인 2D CFRC에 못을 박았는데도

그림 8. 다양한 CFRC 복합재료의 제조공정

표 2. 한국항공우주산업(주)에서 생산되는 주요 CFRC Grade 의 제조공정 및 제품형상

Grade	프리폼 제조	탄소 섬유	형상
DAC I	1 & 2-D Lay-up Filament Winding Braiding, etc	Continuous Fiber :Oxi-PAN & Staple fiber	Plate , Cylinder, Tube , Rod, etc
DAC II	2-D Lay-up	Continuous & Chopped fiber	Annular Disk
DAC III	Multi-directional	Continuous fiber Stitched Fabric, etc	Thick Plate, Block

표 3. 다양한 CFRC 의 grade 별 주요 물성비교

Typical Properties		DAC I	DAC II	DAC III
Bulk density (g/cc)		1.40-1.50	1.70-1.80	> 1.80
Open porosity (%)		13-15	8-12	< 5
Bending strength (Mpa)		100-110	120-150	100-200
Interlaminar strength (Mpa)		10-15	8-10	10-15
Thermal conductivity (w/mK) at 20°C	면내평행	10-20	70-100	100-250
	수직방향	2-3	10-50	30-50
Thermal expansion coef. (10 ⁻⁶ /K) (~900°C)	면내평행	0.1-0.5	1-1.5	
	수직방향	4-6	5-10	
Specific electrical resistance (Ωμm) at 20°C		22-32	-	
Specific heat (Cal/g °C) at 20°C		0.15	0.18	
Application		Industrial	Aircraft Brake	Industrial

는 주원인이 되고 있다. 향후 가격 혁신의 주대상 또한 어떻게 이러한 밀도화 공정을 단축하느냐에 달려 있다고 할수 있다. 최근의 동서화해무드에 따라 군사적 목적 뿐만 아니라 일반산업용으로의 용도확대가 적극 요구됨에 따라 기존의 수개월 소요되는 공정에서 2-3일내에 밀도화를 완료하는 혁신적인 공정 [2] 들이

속속 발표되고 있어 제조원가의 절감및 제조공정의 단순화 가능성또한 구체화 되가고 있다. 다음의 표는 한국항공우주산업에서 생산 되는 탄소-탄소 복합재의 종류로서 용도별, 사용재료별로 크게 3가지의 재료들이 연구개발 및 상용화 단계에 있으며 각각의 주요 열/기계적 물성또한 정리되어 있다.

2.3. 응용 분야

응용분야는 제조공정도에도 나타나 있듯이 크게 3가지 용도로 분류할수 있으며 현재까지 전세계적으로 발표된 공식자료에 의하면 약 40여분야에서 125개의 프로토타입이 개발되었다 [3] 이를 정리하여 보면 다음의 표와 같으며, 분야별 응용배경 및 특성은 좀더 자세히 설명 하고자 한다.

- a) 우주/로켓트 분야 : 1960년 대 말부터 주로 미국에서 항공우주용 내열 구조재료로 연구개발이 시작되었으며 1970년대말부터 로켓트의 노즐이나 미사일의 노즈콘, 대기권 재진입 우주선의 열차단 구조물(Nose cap, Leading edge)등 우주·항공기의 소재로서 광범위하게 적용되어 오고 있다. 우주비행을 위한 로켓

의 경우 대기권을 뚫고 우주로 비행을 하기 위하여는

표 4. CFRC 의 응용 분야별 경쟁재료 및 주요 용도

내열재료	내열강(스테인레스강,몰리브덴강등), 흑연재, 세라믹재의 대체재료	- 고온엔진 부품, 열처리 치구, - 고온로의 노재, 전극, 발열체 도가니, 금형, 내화단열재, 등
마찰재료	소결금속, 鋼계 마찰재의 대체재료 (고속/고부하 제동조건)	- 항공기, 고속전철, 자동차등의 브레이크 및 클러치재료, - 공업용 軸등의 濕動材에 적용
특수기능재료	고내식용 재료의 대체 鋼을 능가하는 열전도성 소재 조고온 내식마성 재료	- 전극 및 화학장치 - 核融合爐 融壁/원자로減速材 전자파차폐재, 필터, 축전지 전극 - 고집적 반도체기판 - 로켓트용 노즐, 엑시트론

로켓엔진의 경우 최고 3000°C의 화염을 탄소복합재 노즐을 통하여 분출하게되며, 이 때 27,000 km/hr 이상의 속도로 날아오르는 고속의 비행체는 공기와의 마찰에 의한 온도가 기체의 선단부위에서 최고 1400°C 이상으로 오르게 되며, 특히 대기권을 재돌입시에는 일반 공업용 금속재료로는 견딜 수 없는 1700°C 이상으로 올라갈뿐만 아니라, -160°C의 차거운 우주공간에서 대기권으로 재진입시 순식간에 1700°C의 고온으로의 급격한 열충격을 수반하는 까닭에 현재로서는 탄소-탄소 복합재료만이 유일한 해결책을 제시해주고 있다.

b) 브레이크 및 클러치

: 브레이크 : 탄소-탄소 브레이크 디스크는 기존의 브레이크보다 제동초기에서 제동말기까지의 마찰도오크가 일정할뿐 아니라 1000°C 이상의 고온에서 제동력이 저하되는 fading 현상이 나타나지 않으며 기존의

금속소결계 제품에 비하여 50% 이상의 경량화가 가능, 현재까지 전세계적으로 39개 기종의 민항기(영국과프랑스 합작의 초음속기인 콩코드에 최초 적용)와 21개 기종의 군용기(F-15에 최초 적용)에 채택되어 운용되고 있다. 옆 사진은 한국항공우주산업이 국산개발하여 양산중에 있는 F-16 전투기용 다판 CFRC 브레이크 디스크 (multiple brake disk)로서 단위 디스크는 외경 약 300 mm, 내경은 외경의 약 50% 이며 최대두께 약 20 mm 상당한 크기로서 총 7장의 디스크로 구성된 제품을 보여주고 있다.

클러치: 1987년에 경주용 자동차의 브레이크와 클러치 플레이트에 적용된 이래 이제는 경주용 차량분야에서는 CFRC 가 표준재료로 채택되고 있으며 고속/대형 기계 및 발전소의 power plant에서도 적용이 점차 확대되고 있다.

c) 가스 터빈 및 가솔린 엔진: 열역학의 관점에서 엔진의 운용 온도가 높아질수록 엔진의 효율은 급격히 향상될 수 있기에 터 어빈 및 가솔린 엔진의 고온부위의 적용도 적극적으로 진행되고 있다. 가스터빈 분

야에서는 화염차단/ 고온 덕트, 노즐, 연소실, 터빈 휠/블레이드, 자체운활성이 요구되는 고온 베어링에 적용되고 있으며 자동차용 가솔린 및 디젤엔진에서도 실린더 블록, 피스톤 등에 적용 상용화 추진중에 있다.

d) 고온 열처리 분야 : 고온 단열재 분야에서는 진공 또는 inert 한 분위기하에서 비교적 저밀도의 CFRC 복합재료가 장점을 발휘하고 있다. 1968년에 최초의 프로토타입을 선보인 이래 성능 및 가격적인 요인으로 용도 확대에

제약이 있었으나 최근들어 비약적인 가격혁신에 힘입어 현재에는 전 CFRC 분야에서 항공기 브레이크에 이어

표 5. 고온 내열강과 CFRC 복합재료의 장단점 비교

항목	내열강	CFRC 복합재
주요특성	<ul style="list-style-type: none"> -무접기 때문에 운반/작업성 불리 -에너지 손실크다 -고온하 열변형/기계적 변형이 크다 -치구 handling 의 자동화 어려움 -열 피로에 대한 저항성 취약 -사용중 변형에 따른 재가공비용 크다 -저가격 (수\$/kg) 	<ul style="list-style-type: none"> -경량화 기능(1/5 ~ 1/10 수준): 생산성 2-5배 향상가능 -2800 C 까지 사용가능 -고열전도도: 에너지 효율 30- 70% 개선 : 생산싸이클 최대 40% 단축 -사용수명 200% 이상 향상

(a) 고온 진공로의 Heater

(b) 진공열처리로 loading jig

(c) Loading jig 용 CFC grate

그림 9. 대우중공업에서 개발한 고온 열처리용 제품 (DAC I grade 제품)

서 제2의 생산량을 차지하고 있는 응용분야이다. 아직 까지도 대부분의 열처리용 치구로는 고온 내열강이 표준 재료로 사용되고 있으나 이들 재료와 CFRC 복합재와의 장단점을 비교해보면 표 5와 같다. 옆 사진은 경화 열처리를 위한 치구의 Grate 에 CFRC를 적용한 사례로서 기존 철제치구에 비해 무게는 1/5로 감소하였으며 열손실 또한 감소, 그리고 고온의 공기 및 oil quenching시 원활한 흐름, 사용수명 관점에서 높은 경제성을 보여준 좋은 사례라 할수 있다. [4]

위와 같은 장점으로 인하여 C-C 복합재료는 sintering, brazing, reactors, crystal growing, spill tray, annealing 분야에서 빠른 속도로 보급되고 있으며, 대표적 적용 부품으로는, 진공 또는 inert 분위기의 고온로에서 tray, basket 및 conveyor의 link belt (1200°C에서 3년이상 사용) 등으로 적용범위를 급속히 넓혀가고 있다.

또한 고온용 열선에 있어서도 뛰어난 전기적 특성 및 다양한 형태로의 제작 용이성 및 사용수명의 200% 이상 향상 등을 고려시 차세대 열선용 재료로 거론되고 있다. 표 3에서 보듯이 상온 비저항 값도 사용된 탄소 섬유, 열처리온도, 밀도 등에 따라 다양한 값을 설계할 수 있는 장점을 갖고 있다. 한국항공우주산업은 이미 그림 9에 소개된 CFRC 열선 및 열처리 치구 제품을 프랑스 및 미국의 전문업체에 수출을 하고 있으며, 국내에서도 동우열처리에 진공열처리 치구(그림 9-b)

를 공급하여 현재 성공적으로 사용중에 있다.

반도체 wafer crystal 제조용 爐: 열선, heat shield, crucible 등에 적용시 순도가 매우 중요한 변수가 되는데 CFRC 복합재의 경우 2400°C 이상의 할로겐 분위기하에서 열처리를 하게 되면 아래의 표 6과 같이 5 ppm 미만 수준의 순도를 갖게되며 기존의 흑연제품에 비해 높은 열전도도 및 사용수명 향상 등의 장점으로 시장을 대체하여 가고 있으며 특히 차세대 12" wafer 제조를 위하여는 CFRC crucible이 절대적으로 요구되고 있는 실정이다.

각종 볼트, 너트 등도 1963년도에 최초의 시제품이 선보인 이래 오늘날에는 1600°C 이상의 고온로에서는 스테드 및 와셔에 이르기 까지 상용화 및 표준화 단계에 와있다. 옆 사진은 DAC CFRC를 이용하여 가공된 각종 볼트, 너트, stud 등을 보여주고 있다.

분말합금 및 세라믹제조 분야: 1967년도에 최초로

표 6. CFRC 복합재료의 불순물 구성비 (고순화 처리후)

	Al	Ca	Cr	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na	Ni
ppm	<0.08	0.04	0.3	<0.08	0.1	<0.1	<0.02	<0.08	<0.05	<0.1

CFRC hot pressing die 가 선보인 이래, 오늘날에는 선진국에서는 수명이 대폭 향상된 CFRC die (평평한 base plate와 hollow cylinder 형태의 몸체로 구성됨) 가 표준품으로 자리잡아 가고 있다.

옆 사진은 2차원 섬유직물로 제조된 프리폼에 온도구배 CVD 공정으로 비중 1.7 이상으로 급속 밀도화 처리된 DACIII grade의 hollow cylinder die (내경~300 mm)를 보여주고 있다. 기존의 흑연 몰드에 비해 고온강도 및 충격 저항성이 우수하며 50%이상의 두께 감소 및 경량화가 가능하다.

유리제조업: 1980년대 중반부터 부식 및 고온에 대한 저항성이 우수한 CFRC 재료가 자동차제조 라인의 pushout pads, wear transfer pads, machine conveyor wear guides, straight and saw tooth stacker bars 등에 적용되어 오고 있다.

그러나 C-C 복합재는 산소 분위기하에서는 약 400°C 부터는 탄소가 산소와 반응하여 CO 및 CO₂ 날아가는 산화현상이 발생하게 되는데 이를 해결하고자 표면에 SiC 또는 Al₂O₃와 같은 내산화 코팅을 하기도 한다. 또한 이러한 코팅은 열처리 제품 또는 고온상태에서 타 재료와의 직접적인 접촉에 의한 반응을 방지하는 역할을 하기도 한다.

e) 특수 분야: 원자로분야에서는 기존의 고순도 흑연 재료가 주로 사용되어 왔으나 최근들어 방사선조사에 대한 우수한 저항성 등으로 흑연의 대체재료로서, 그리고 nuclear radiation을 차단하는 분야에 적용되고 있으며, 특히 원폭의 환경에서 대규모의 X-ray 에너지와 후폭풍에도 매우 효과적인 차단 재료로서 효능이 밝혀진바 있다. 핵융합로 분야에서도 고온 플라즈마의 대향재료로서 기존의 고순도 흑연을 대체하면서 대규모로 CFRC

가 적용되고 있는데 대표적으로 Princeton의 DIII Tokamak, 유럽연합의 Torus Tore Supra & TEXTOR, 일본의 JT-60U 등과 현재 한국에서 건설중인 한국형핵융합로(KSTAR)에도 CFRC가 적용 예상되고 있다. 한국항공우주산업(주)에서 개발한 핵융합로용 CFRC tile (옆 사진참조)은 미국의 Sandia 국립연구소에서 초고온의 플라즈마 조사시험에서 효과적인 열확산 및 고온용삭에 대한 저항성 관점에서 세계 최우수의 평가를 받은바 있으며 KSTAR 의 고온 플라즈마 對向재료로 인증을 받은 바 있다.

f) 생체재료 분야 : 더욱 흥미로운 용도로는 생체 구성물의 기본 골격이 탄소로 이루어져 있는 까닭에 탄소재료 고유의 생체 친화성으로 인하여 탄소복합재료가 인공심장 판막이나 치근, 인공뼈와 같은 생체재료 분야에서 이미 70년대부터 시험 개발되고 있으며 특히 bone implant 분야에서 잠재성이 매우 높다고 판단된다.

3. 맺음말

탄소재료는 여러분야에서 오랜 세월동안 우리가 이용해온 재료이면서 미래첨단 사회에서도 끝없이 변신을 거듭하며 그 쓰임을 확대해가는 재료계의 팔방미인이다. 이는 탄소가 가진 천부적 특성, 즉 다양한 결합이 가능하기 때문에 결합하는 방법에 따라 흑연과 다이아몬드로 그운명을 달리한 탄소가 근래에 들어서는 탄소섬유에 이어 플러렌과 탄소나노 튜브의 출현으로 미래의 나노테크놀러지, 반도체, 에너지, 항공우주 산업에서도 탄소재료는 핵심적 역할을 수행할 것으로 예상된다.

탄소재료의 다양한 형태와 장점들만을 취합한 탄소-탄소 복합재료는 그 기술의 중요성 및 파급효과 관점에서 산업의 쌀이라 할 수 있는 철강이나 흑연재료를 대체할 수 있는 21세기의 신소재로서 향후 응용의 전개 분야는 우리의 상상을 뛰어 넘으리라 예상된다. 또한 시장의 확대 관점에서 가장 저해요인이 되고있는 높은 제조비용도 선진국에서는 이미 현실화되고 있는 혁신적인 공정 단축과 10\$/kg 이하의 저렴한 탄소섬유 개발로 인하여 조만간 수십\$/kg의 CFRC 출현이 예상

되고 있으며 이에 따라 CFRC와 기존의 흑연/세라믹/내열강등의 전통적인 내열재와의 사이에 대대적인 자리 바꿈이 예상되고 있다.

한국항공우주산업(주) 첨단복합재센터는 CFRC 분야에서 10년 이상의 연구 개발 사업을 수행하면서 정부로부터 항공우주분야의 탄소복합재 전문업체로 지정을 받은바 있으며,

99년도에는 과학기술부로부터 "초고온 구조물 및 열차폐용 탄소복합재" 분야의 국가지정연구실(NRL)로 선정되어 21C 탄소복합재 분야의 미래를 개척해나가는데 있어서 산업계의 중추적인 역할을 수행하고자 한다.

참고문헌

1. Erich Fitzer, "The Future of Carbon-Carbon Composites," Carbon, Vol. 25, No 2, 1987, pp. 163-190
2. P. David, B. Narcy, J. D. Lulewicz, and F. Ravel, "Elaboration of Ceramic Composites by Rapid Densification," Proceedings of ICCM-10, Whistler, B. C., Canada, August 1995, Vol. IV, pp. 611-616.
3. Donald L. Schmidt, Kenneth E. Davidson, and L. Scott Theibert, "Application of Carbon-Carbon Composites," 42nd Int'l SAMPE Symposium, May 4-8, 1997, pp. 1482-1493
4. J. Demmel, U. Nagele, "CFC-The Perfect Material for Heat Treatment Fixtures," Eurocarbon 98 : Science and Technology of Carbon, Strasbourg, France, July 5-9, 1998, Vol. 2, pp. 741-742.