

特輯

초고온 탄소복합재료의 현황과 전망

(주) 데크(DACC)
대표이사 김광수

1. 서론

21세기 항공우주 수송수단으로 부각되고 있는 극초음속 기, 우주 왕복선, 초 고효율화로 대량 장거리 수송을 가능케 하는 고아음속 항공기 또는 수직 이착륙이 가능한 고정익 항공기등 일련의 혁신적인 항공기의 출현은 전통적인 항공기술의 발전과 더불어 초경량 및 초내열 재료 특히 탄소섬유복합재료 라는 신소재의 출현에 힘입은바가 크다 (Fig. 1).

초고온 탄소 복합재료는 1,500℃ 이상의 고온에서 내열성 및 내산화성이 요구되는 우주항공의 고속 비행체(Hyper-Sonic Transport: HST) 및 엔진의 내열구조 분야에서 그 우수성을 이미 입증한바 있으며 이러한 경험의 spin-off를 통하여 자동차 및 산업용 엔진의 hot section 부품, 초고온에서 고순도, 고열전도도 및 내삭마성 등이 요구되는 원자로/핵융합의 내열구조, 고온 열처리시 고순도 분위기가 요구되는 반도체용 crystal growing furnace 및 고온 진공 열처리爐 분야등에서도 기존의 내열합금 또는 세라믹 재료로는 한계에 도달한 성능부분을 획기적으로 해결할 수 있는 차세대 재료로서 주목을 받고있다. 또한 내약품성, 화학적 불활성 및 생체 친화성이 우수하여 각종 화학플랜트의 고온

부품과 생체용 재료로도 그 응용분야가 확대되고 있다.

그러나 탄소 복합재료의 우수성은 어디까지나 비산화 환경에 한정되며, 산소분위기 하에서는 약 400℃부터 탄소가 산소와 반응하여 산화되는 문제 때문에, 이를 해결하고자 하는 내산화성 향상기술이 low cost 제조기술과 함께 가장 중요한 기술적 현안이 되고 있다.

본고에서는 초고온용으로 중점 개발 추진되고 있는 탄소섬유가 보강된 탄소 및 탄화규소계 복합재의 기술 및 주요 응용현황을 살펴보고자 한다.

2. 본론

2.1 탄소 및 탄소섬유

탄소는 지구상에서 가장 흔히 발견될 수 있는 원소중의 하나로서 녹는점은 3550℃, 흡원소 물질로는 탄소의 외곽 전자가 어떻게 결합하느냐에 따라 비결정성 탄소, 흑연, 다이아몬드라는 세 가지의 동소체로서 산출되며 각각의 물리 및 화학적 성질은 매우다른데 그 차이는 각각의 원자결합

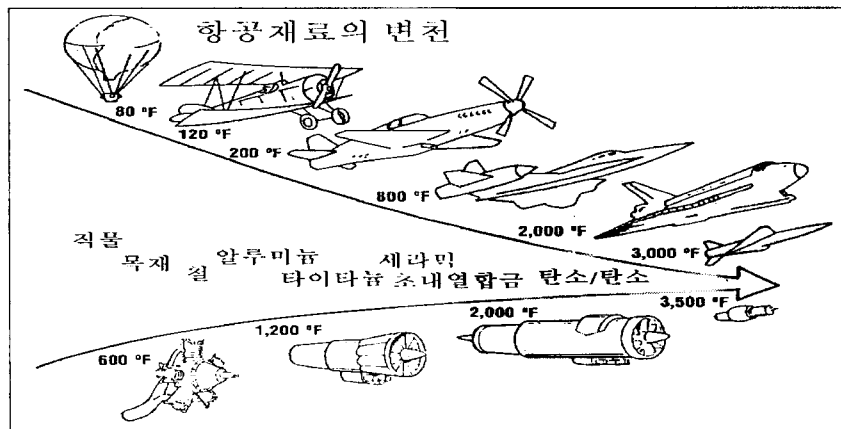


Fig. 1 사용온도에 의한 항공재료의 발전 추세.

구조의 차이에 기인하고 있다.

탄소재료는 열처리 온도에 따라 무질서한 결정구조가 1700℃ 이상의 열처리를 받게 되면 흑연구조로 변환이 되면서 각종 특성이 변화된다(Fig. 2). 고온 처리된 흑연은 2000℃의 열에도 끄덕 없으며, 기계적 강도가 보이는 가장 현저한 특성으로는 2500℃까지 온도와 더불어 강도가 증가하며 상온에서 강도의 약 2배 값을 보이는데 이는 여타의 공업용 재료에서는 발견되지 않는 독특한 성질로 초고온 용도에는 최적의 재료임을 알 수 있다. 또한, 특유의 윤활성, 내열성, 내식성, 전기 및 열전도도, 가공성등 여타의 재료에서 얻을 수 없는 특성을 지니고 있어 철강재료와 함께 산업의 쌀이라 불릴 만큼 중요한 소재로 인식되어오고 있다.

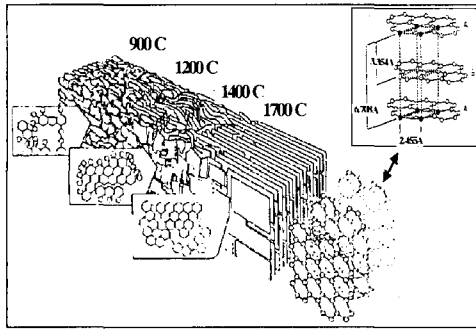


Fig. 2 열처리 온도에 따른 탄소 미세 구조의 변화.

탄소의 공업적인 제조기술은 이미 1800년대 중반에 러시아와 미국에서 개발되어 근 100여년에 걸쳐 지속적인 기술 개발로 이미 성숙기에 접어들었으며, 현재 전 세계적으로 생산되고 있는 탄소 및 흑연소재는 연간 수백만 톤에 달하고 있다. 이는 연간 생산되는 전 세계의 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.

최근에는 두 가지 이상의 재료를 결합해서 각각의 장점을 활용하는 복합재료 분야에서도 이러한 탄소재료의 특성을 살린 탄소섬유가 개발됨으로서 비약적인 발전을 하고 있다. 탄소섬유란 합성 또는 자연산의 유기섬유나 수지핏치등의 유기원료로부터 뽑은 섬유를 1600℃ 이상에서 열분해 탄화하거나 2000℃ 이상의 열처리를 하여 얻은 비흑연질 탄소로 구성된 섬유를 말하며 이를 활용한 복합재료로는 우리 주변에서 흔히 볼 수 있는 테니스라켓, 낫시대, 골프채와 같은 스포츠 용품에서부터 항공기 날개, 스페이스 셔플

의 구조물 등에 이르기까지 매우 다양하게 사용되고 있다 [1-7].

탄소섬유의 역사는 19세기말 T. A. Edison이 천연의 나무섬유로부터 제조한 백열전구용 탄소섬유 필라멘트까지 소급할 수 있으나, 실제적으로는 1960년대초 미국의 Union Carbide 사의 레이온을 원료로 한 탄소섬유의 공업화로부터 시작된다고 할 수 있다. 그 후 1966년 Watt 등이 고성능 PAN(Polyacrylonitrile)계 탄소섬유를 제조하는데 성공하면서 부터 일본, 미국, 영국등 선진각국에서 본격적으로 연구가 진행되고 있으며, 최근 들어와서는 보다 고강성을 얻기 위한 핏치계(Pitch-based) 탄소섬유가 개발되어 실용화되고 있다. 위 두 가지의 탄소섬유 모두 유사한 공정으로 제조되는데 탄소섬유는 약 4,000K의 고온에서도 고체상태를 그대로 유지하면서, 비강도, 비탄성율등의 기계적 성질과 치수안정성이 우수하며, 열적 성질, 내식성, 내약품성등의 화학적 성질 및 전자기적 성질 등의 여러 가지 면에서 유용한 성질을 겸비하고 있다. 그러나 섬유 자체만으로 사용하는 경우는 드물고 보통 고분자수지, 금속 또는 세라믹까지의 보강재로서 복합재료 형태로 널리 사용되고 있다.

2.2 초고온용 탄소복합재료

항공우주분야에서 실용화되어 있는 초고온용 3대 세라믹 복합재료로는 탄소재료에 탄소섬유가 보강된 복합재료(C-C), 탄화규소에 탄소섬유가 보강된 복합재료(C-SiC) 및 탄화규소 섬유가 보강된 탄화규소 세라믹 복합재료(SiC-SiC)를 들 수 있다. 이중 보강재로 탄소섬유를 사용한 앞의 C-C 및 C-SiC를 통칭하여 초고온용 탄소복합재료라 할 수 있다[1].

부산소 분위기 및 2,000℃ 이상의 고온에서 주로 사용되는 C-C 복합재료는 주로 고체로켓의 엔진부품, 대기권 재진입 비행체의 열 차폐 구조, 항공기 추진기관의 hot section, 항공기 및 고속차량의 브레이크, 생체재료 등에 적용되고 있으며, 내산화성이 비교적 향상된 C-SiC 복합재료는 1,500℃ 영역에서 비교적 short life 요하는 미사일, Ram jet, Turbo jet의 Hot section 부위에, SiC-SiC 복합재료는 1200℃ 부근에서 비교적 장기간 사용되는 항공기 및 우주 비행체의 엔진부품, 자동차/산업용 엔진 부품 등에 적용되어 오고 있다.

그러나 탄소복합재의 경우 장시간 고온 산화환경 및 급격한 온도변화 조건에서 탄소재료를 산화로부터 보호할 수 있는 코팅기술, 탄소섬유와 매트릭스의 결합력을 조절시켜 열응력에 의한 크랙 발생을 억제시킬 수 있는 프리폼설계 기술, 탄소섬유 프리폼 내부로 C 또는 SiC 기지를 신속히 침투하여 증착시킬 수 있는 고속 밀도화 공정 기술 등이 핵심 기술로 여겨지고 있다[1-3].

2.2.1 탄소-탄소 복합재료

탄소섬유를 탄소재료에 보강한 재료를 통칭하여 탄소-탄소 복합재료 (C-C)라고 하는데 보강되는 탄소섬유의 배치 형태에 따라 Fig. 3에서 보듯이 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.

Fig. 4는 C-C 복합재가 내열세라믹 또는 Superalloy 등 고온 금속 소재에 비하여 저 비중으로 경량일 뿐 아니라 고온에서 比強度 (specific strength : 강도/밀도) 및 比剛性 (specific stiffness : 강성/밀도)이 월등히 우수하여 경량화 측면에서 매우 뛰어난 모습을 보여주고 있다. C-C 는 또한 흑연 및 탄소소재의 장점을 그대로 살리면서도 열전도도 특성은 보강된 탄소섬유 방향을 따라서는 구리 이상의 값을, 섬유에 수직인 방향으로서는 단열성을 갖도록하는 등 다양한 열설계가 가능함을 보여주고 있다(Fig. 5참조). 특히 흥미로운 점은 기존의 흑연 및 세라믹 소재와는 달리 금속의 소성변형과 같은 파괴거동을 보이는데 전형적인 탄소섬유 직물이 보강된 2-D C-C 경우 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 못을 박았는데도 취성파괴가 일어나지 않고 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.

이러한 특성을 살려서 1960년대 말부터 주로 미국에서 항공우주용 내열 구조재료로 연구개발이 시작되었으며 1970년대 말부터 로켓의 노즐이나 미사일의 노즈콘, 대기권 재진입 우주선의 열 차단 구조물(Nose cap, Leading edge) 등 우주·항공기의 소재로서 광범위하게 적용되어오고 있다.[3-5]

우주비행을 위한 로켓의 경우 대기권을 뚫고 우주로 비행하기 위하여는 로켓엔진의 경우 최고 3000℃의 화염을 탄소복합재 노즐을 통하여 분출하게되며, 이때 27,000km/hr 이상의 속도로 날아오르는 고속의 비행체는 공기와의 마찰에 의한 온도가 기체의 선단부위에서 최고 1400℃ 이상으로 오르게 되며(Fig. 7참조), 특히 대기권을 재돌입 시에는 일반 공업용 금속재료로는 견딜 수 없는 1700℃ 이상으로 올라갈 뿐만 아니라, -160℃의 차가운 우주공간에서 대기권으로 재진입시 순식간에 1700℃의 고온으로의 급격한 열 충격을 수반하는 까닭에 현재로서는 유일하게 C-C 복합재료가 해결책을 제시해주고 있다. 이러한 우주왕복선의 열 차단구조재료의 응용이외에 실제로 군수분야에서는 선진 강대국의 대륙간 탄도미사일의 내열구조 부품에도 적용되고 있다.

반도체 분야에서도 실리콘웨이퍼 제조용 결정 성장爐의 핵심 부품인 고순도 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 위하여는 결정 성장로의 핵

심부품인 도가니 등을 일체형 C-C 복합재료 제조하여야 한다는데 는 이견이 없는 실정이다. 또한 엔진의 운용온도가 높아질수록 엔진의 효율은 급격히 향상될 수 있기에 터빈 및 가솔린 엔진의 고온부위의 적용도 적극적으로 진행되고 있으며 고온용 열선, 단열재 및 금형 그리고 원자로와 핵융합로의 초고온 및 극심한 환경용 재료로도 그 적용범위가 점차 확대되고 있다.[6,7] 더욱 흥미로운 용도로는 생체 구성물의 기본 골격이 탄소로 이루어져 있는 까닭에 탄소재료 고유의 생체 친화성으로 인하여 탄소복합재료가 인공심장 판막이나 인공 뼈와 같은 생체재료로 적용되고 있음을 들 수 있다.(Fig. 8참조) 그러나 C-C 복합재료의 용도로서 가장 대표적인 것은 Fig. 9와 같은 고부하 브레이크용 마찰재료를 들 수 있으며 현재 전 세계적으로 생산되는 C-C 복합재의 약 70% 이상이 항공기, 고속전철 및 경주용 자동차의 브레이크소재로 적용되고 있다.

그러나 탄소-탄소 복합재가 위에서 언급한 우수한 특성을 발휘할 수 있는 것은 어디까지나 비산화의 환경에 한정되며, Fig. 10에서 보듯이 산소 분위기 하에서는 약 400℃ 부터는 탄소가 산소와 반응하여 CO 및 CO₂ 날아가기 때문에 이를 해결하고자 하는 내산화성의 부여 역시 실용화의 가장 중요한 과제의 하나로 여겨지고 있다.

2.2.2 탄소-탄화규소 복합재료

고온에서 C-C의 낮은 산화저항성 때문에 탄소기지를 SiC로 일부 또는 전부를 대체한 C-C+SiC 또는 C-SiC 가 산화분위기에서 C-C의 역할을 대체해 가고 있다. C-SiC 복합재는 C-C와 매우 유사한 구조를 갖고있으며 지지체인 SiC는 통상 1회에 약 300-600 시간의 공정시간이 소요되는 화학증착법(CVI), 용융 Si용액의 함침후 SiC로 변환되는 공정, 또는 Polycarbosilane 등과 같은 고분자를 함침 탄화시켜 SiC를 제조하는 수지함침법등을 사용하여 탄소섬유 프리폼 내부를 충전하게된다.

C-SiC의 가장 큰 장점으로는 SiC 기지의 본질적인 내산화성을 들 수 있으며 산화분위기 에서도 최고 1650℃까지는 제한된 시간동안 사용이 가능하다. 산화분위기에서의 사용수명은 탄소섬유와 SiC의 열팽창계수 차이에 의해 발생하는 매우큰 열응력이 섬유와 기지의 경계면을 따라 균열을 발생시키는데 이를 통하여 침투 확산된 산소가 탄소섬유를 산화 손상시키는 속도에 좌우되며 이를 지연시키는 방안으로 탄소섬유 표면에 새로운 코팅 층을 추가하여 열응력을 감쇄시키며 동시에 탄소섬유와 산소의 직접 접촉을 방지하는 기술 등이 개발되고 있다.

탄화규소(SiC)는 C-C 외표면의 내산화도포 시스템으로도 주목을 받고 있는데 이는 탄화규소가 용점과 인성이 높으며 내마모성, 내약품성이 우수하고 무엇보다도 C-C와 열팽창계수가 유사하여 열충격저항성이 비교적 우수하기 때문이다. 특히 pack cementation 공정으로 도포된 SiC는 탄소기

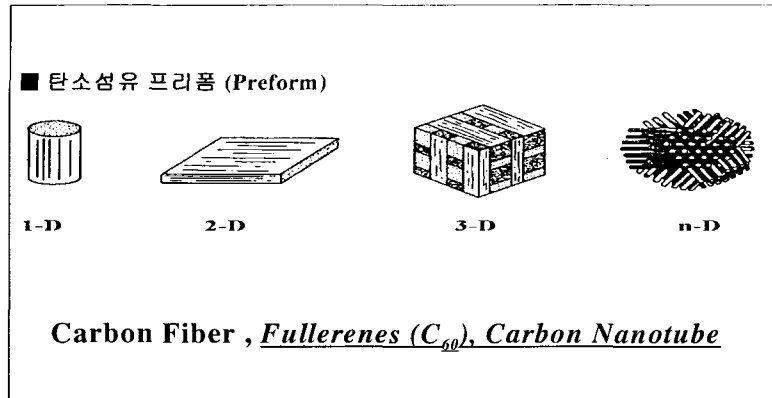


Fig. 3 탄소섬유 프리폼의 종류.

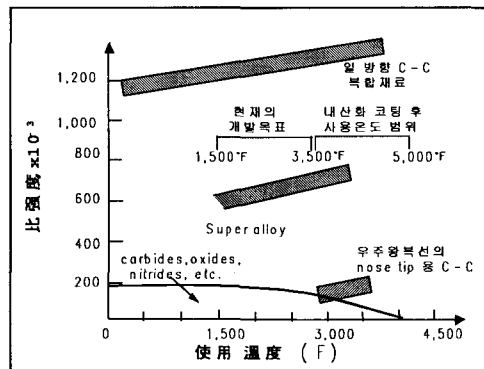


Fig. 4 사용온도에 따른 고온재료의 비강도 비교.

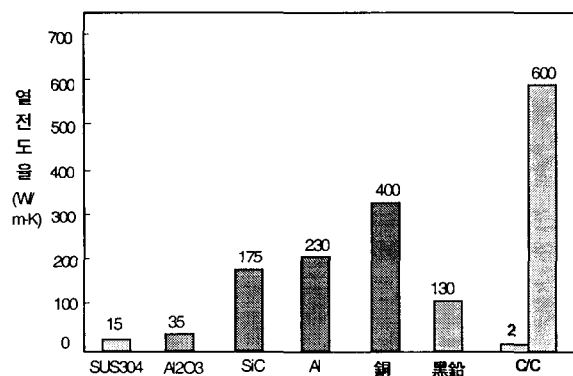


Fig. 5 각종 구조재의 열전도도 비교.

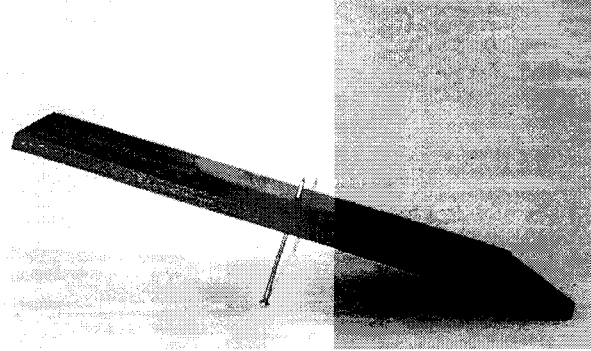


Fig. 6 전형적인 C-C 의 super plastic 파피거동.

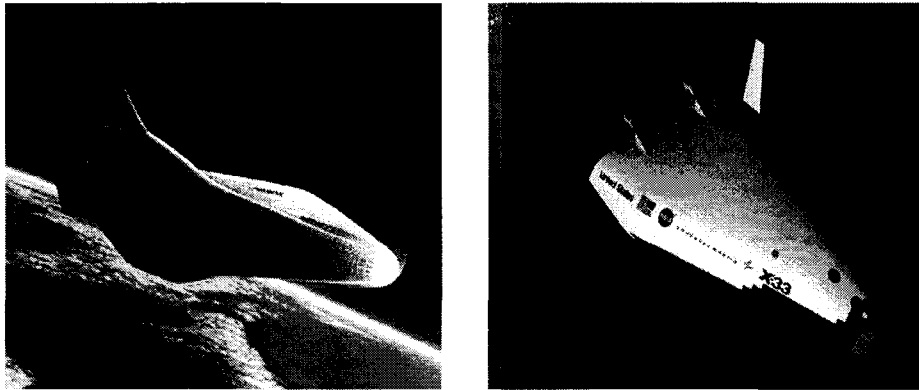


Fig. 7 조고온 비행을 하는 Space Shuttle.

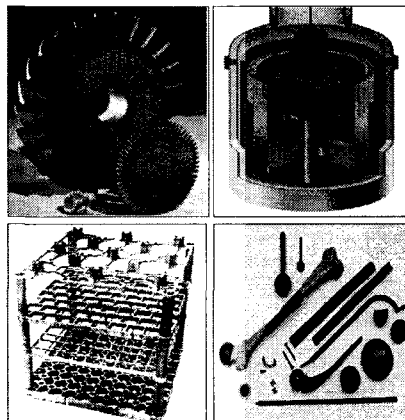


Fig. 8 C-C 의 응용사례 (좌측 상단에서 시계방향: 터빈엔진, 단결정성장로, 고온열처리 치구, 생체재료).

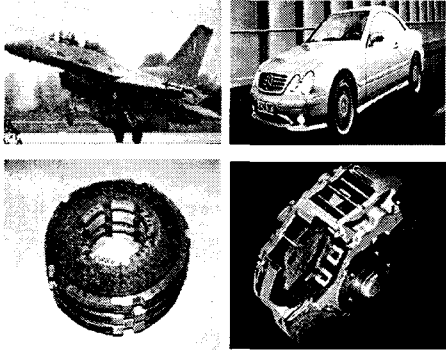


Fig. 9 항공기 및 자동차용 brake 응용사례 (F-16 C-C brake & C-SiC brake of Benz Formula 1).

지 내부로부터 gradient 한 분포를 갖게되어 열팽창계수 차이에 의한 열응력의 최소화가 가능하며 이러한 장점으로 인하여 Zr, Hf, B4C, Si3N4 등과 다층코팅층을 적용시 C-C 모재와 이들 코팅재료의 중간 매개체로도 널리 적용되고 있다(Fig. 11 참조).

2.3 기술개발 동향

2.3.1 제조공정기술

1970년대 중반부터 미국, 프랑스, 러시아 등의 국가연구소 및 관련업체에서 비밀리에 연구개발을 수행에 오고 있으며 기초소재, 관련 설계 및 제조기술은 MTCR (Missile Technology Control Regulations) 의 규제 하에 철저히 통제되어 오고 있다. 특히, 초고온 구조 및 열 차폐용 탄소복합재 제조기술은 프랑스의 SEP사, 미국의 SGL, Allied Signal, 러시아의 KOMPOZIT, 일본 우주산업의 희망이라고 하는 우주왕복선 HOPE-X 및 H-II Rocket 용 C-C 복합재 부품을

개발하고 있는 Mitsubishi 등이 현재 대표적인 기술 보유 및 생산 업체로 알려져 있다[5].

현재까지 개발된 C-C 및 C-SiC 복합재료의 제조방법은 동서냉전이 극렬한 상태에서 각국이 자존심을 걸고 개발한 것으로써, 제조원가의 절감 또는 공정의 단축 등에 관한 노력보다는 보다 우수한 특성을 갖는 제품을 제조하기 위하여 노력하여 왔기 때문에 제조원가가 매우 높으며 설비 투자도 대규모로 이루어져 왔다. 그러나 최근의 동서화해 무드에 따라 군사적 목적뿐만 아니라 일반 산업용으로의 용도확대를 추구함에 따라 제조원가의 절감 및 제조공정의 단순화에 지대한 관심이 집중되고 있다.

C-C 제조공정의 가장 큰 특징은, Fig. 12에서 보듯이, 일차 예비성형체인 다공성의 프리폼 내부에 고분자 수지를 탄화시켜 얻을 수 있는 resin-char, 메탄과 프로판과 같은 hydro-carbon가스를 고온/저압 하에서 열분해시 생성되는 pyro-carbon, 또는 이들 두종류가 혼합된 탄소기지를 기공 내부로 침투 증착시켜 밀도를 증가시키는데 있다. 통상 밀도화 및 흑연화 처리 공정은 1000-3000℃ 온도 분위기 하에서 3-5회 반복되면서 수개월이 소요되는 장시간 프로세스로서 C-C가 고가에 판매되는 주원인이 되고 있다. 향후 가격 혁신의 관건은 어떻게 이러한 밀도화 공정을 단축하느냐에 달려있다고 할 수 있다. 최근의 동서화해무드에 따라 군사적 목적뿐만 아니라 일반산업용으로의 용도확대가 적극 요구됨에 따라 기존의 수개월 소요되는 공정에서 2-3 일 내에 밀도화를 완료하는 혁신적인 공정들이 속속 발표되고 있어 제조원가의 절감 및 제조공정의 단순화 가능성 또한 구체화 되가고 있다[11,12].

Table 1은 현재 진행중인 탄소 복합재관련 주요 개발 프로젝트 현황이다. 지난 20여년간 막대한 연구개발 투자에도 불구하고 C-C 및 C-SiC 복합재료에 대한 지속적인 내열성 향상 및 혁신적인 cost down을 위한 생산기술 연구가

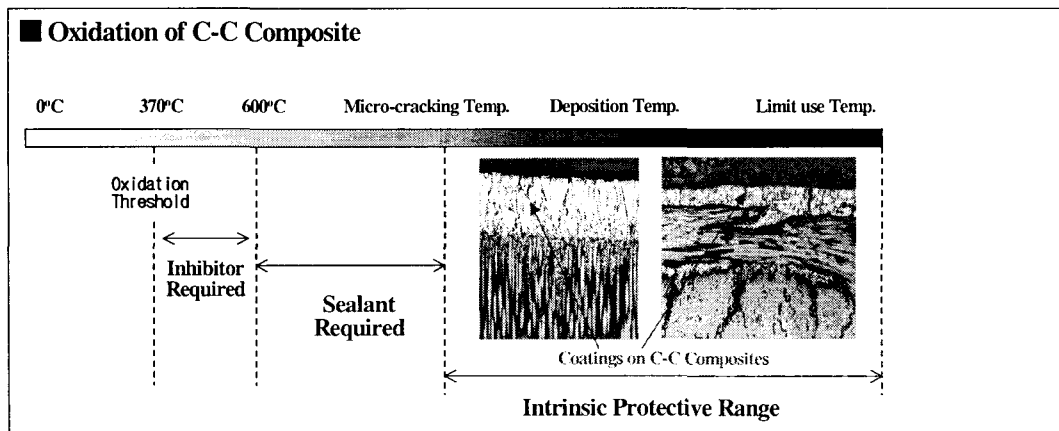


Fig. 10 C-C 복합재의 산화 특성 및 사용온도.

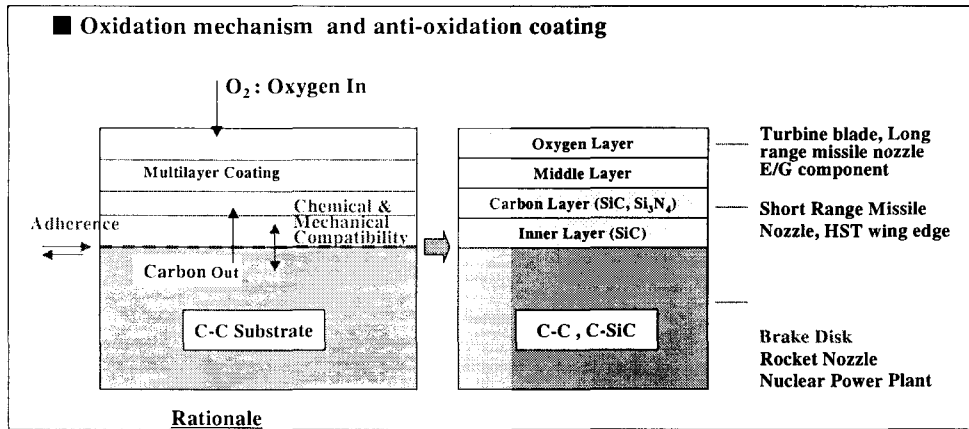


Fig. 11 산화기구 및 내산화 코팅 개념.

진행되고 있는데, 일례로 미국방성은 년 2,000만\$의 연구 개발비를 초고온용 탄소 복합재 분야에 투자하고 있다.

최근의 주요선진국의 기술개발 동향을 보면 유럽연합은 space vehicle program인 HERMES(프), HOTOL(영), SANGER(독)에 적용을 위한 1,300℃ 상용의 초내열 탄소복합재 및 내산화 코팅기술을 개발하고 있으며 이를 이용한 열 구조 설계 및 고온 파괴특성 평가에도 주력하고 있다[4]. 일본은 '02년 비행을 목표로한 HOPE-X에 적용하고자 1,700℃에서 10분간 사용이 가능한 내열-내산화 코팅기술을 개발하고자 정부주도로 매년 수백억의 기술 및 시설 투자를 시행한 결과로 HOPE 및 H-II 프로젝트에 내산화성 탄소복합재료를 양산 적용하는 수준에 도달해 있다.[5] 중국, 인도 등의 후발 우주개발국가들도 이 분야에서 적극적인 연구개발 투자를 한 결과 어느 정도 성과를 보이고 있으나 자세한 성능은 아직 알려져 있지 않다.

대표적인 신속제조공정 연구로는 '93년에 개발에 착수하여 '96년말에 1단계 개발 완료된 미국 Textron사의 RD(Rapid Densification) 기상화학증착공정(CVI)으로, ARPA 프로그램의 일환으로 3.5년간 약 12백만 달러의 개발비가 소요됐으며 기초공정 연구에 MIT 공대를 비롯하여 Williams, Honeywell, Brown 등이 참여하여 기존의 1-2개월 정도 소요되는 제조공정시간을 8시간으로 단축하는 획기적인 기술

개발로 공정의 단순화 및 제조원가의 절감을 기대하고 있으나 상용화에는 아직 많은 문제가 있는 걸로 알려져 있다.[8] Fig. 13에서 볼 수 있듯이 이외에도 펄스 및 압력/열 구배 등과 같은 신속한 CVI 밀도화 공정 기술 개발이 기존의 등온 CVI 밀도화 공정을 대체하고자 경쟁적으로 개발 추진되고 있다.

2.4.2 국내 관련기술현황

국내에서도 이미 '90년도 초부터 국방과학연구소 주관으로 (주)테크(DACC)에서 항공기용 C-C brake disk 국산화를 위한 체계적인 기초기술 및 양산기술 개발을 추진한바 있으며 이를 기반으로 100% 국산소재를 사용하여 C-C를 생산할 수 있는 설계, 제조공정, 그리고 Pilot Plant 설비를 확보 운영하고 있다.

탄소 복합재료 관련한 국내의 전문인력 및 기술수준은 선진국에 비하여는 아직 미흡한 점이 많으나 주요 제조공정인 수지탄화(Resin Char)공정, CVI 공정, 내산화 공정(Inhibitor 및 Coating 처리) 등에 대한 기본기술은 이미 확보되었을 뿐아니라 열구배 화학증착공정(Thermal gradient CVD)에 의한 신속제조공정, 열탄성학적인 구조해석 및 기계-열-tribology 등의 시험평가에서는 소기의 성과를 보이고 있다.

Table 1 선진국의 초고온 탄소 복합재 관련 주요 프로젝트 현황

개발재료	프로젝트명칭	개발기간	도달목표/특징	국가
C-C, C-SiC	HOPE-X NASA X-33 HERMES HOTOL	'90년대 중반~	- Space Shuttle 용 초고온 탄소복합재 -내열온도1300℃ (상용) -내열온도1700℃ (10분사용)	일본 미국 프랑스 영국
C-C C-SiC	핵융합로 ITER	~2015	- 고열전도도 > 250 W/m-K - High strength >300Mpa - 고순도	미국, 유럽 (G-7)

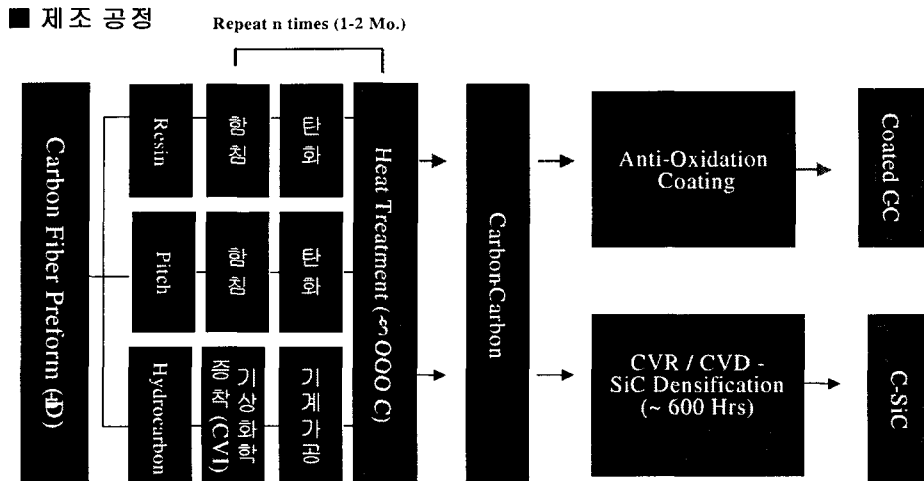


Fig. 12 탄소복합체의 제조공정도.

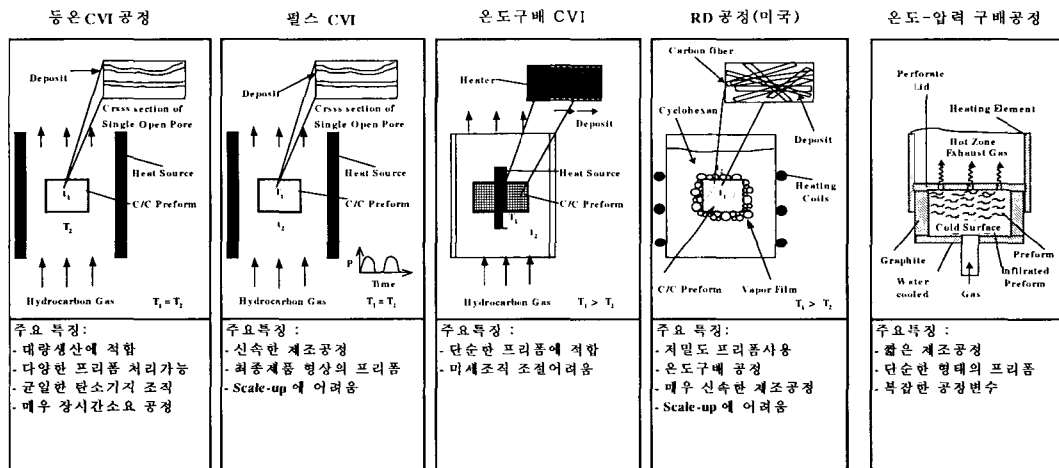


Fig. 13 탄소 복합체의 제조를 위한 다양한 CVI 공정 비교.

Table 2는 (주)테크(DACC)에서 생산 판매되는 C-C 복합재의 종류로서 용도별, 사용재료별로 크게 3가지의 재료들이 연구개발 및 상용화 단계에 와있으며 각각의 주요물성을 보여주고 있다. F-16 항공기용 C-C brake disk는 이미 '99년부터 한국공군에 양산 공급한 이래 최근 들어서는 유럽 및 중동 지역으로의 수출도 시작되었으며, 열처리로의 Jig, heating element 용의 산업용 C-C 역시 유럽 및 미국 등지로 수출되어 기술 및 가격 면에서 우수성을 인정받고 있다.

탄소복합재 제조에 있어서 가장 근본이 되는 탄소섬유 프리폼의 열-기계적 설계 및 제조기술, 그리고 C/SiC의 substrate로서의 C/C 제조기술, 균일한 고밀도의 C-C 및

C-SiC 신속 제조 공정기술, 열응력에 의한 균열을 최소화할 수 있는 내산화 코팅기술, 나아가 상용화를 위한 Scale-up 기술에 있어서는 아직 선진국과 상당한 격차를 보이고 있다고 할 수 있다.

2.4.3 국내의 수요예상

탄소 복합재료의 세계시장 규모는 2000년도에 743 백만 달러, 생산량으로는 연간 500 톤 규모로 예상되고 있으며 사용된 탄소섬유의 종류, 열처리온도, 순도, 밀도에 따라서 2차원 탄소섬유 보강 C-C의 경우 \$110-2900/Kg, 3차원 상으로 섬유가 보강된 고밀도 C-C의 경우는 \$1000-3300/Kg 수준의 가격대가 형성되었다. 가장 대표적인 용도로는 고

Table 2 (주)테크에서 생산중인 C-C grade 별 물성표

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 (Ω _{1mm}) at 20° C		22-32	-	
Specific heat (Cal/g °C) at 20° C		0.15	0.18	
Application		Industrial-Low Grade	Aircraft Brake	Industrial - High Grade

부하 브레이크용 마찰재료를 들 수 있는데 현재 전 세계적으로 생산되는 C-C 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 분류되는 일반산업용, 특히, 고온 열처리분야에서 괄목할만한 성장이 예상되고 있다.[1,6-7]

국내의 시장 현황으로 우선 우주산업 분야만을 본다면 아직 경제적인 시장 규모를 형성하지 못하고 있다. 그러나 해외에서의 기술 및 관련부품의 도입이 MTCR에 의해서 엄격히 통제되고 있는 점과 정부의 중장기적 독자 위성발사 계획 등을 감안한다면 단순한 상업성보다는 미래 전략산업의 독자성을 확보하기 위하여 반드시 보유해야 할 핵심소재로서 의의가 크다 하겠다.

그러나 항공기 brake disk 시장의 경우 군용기 및 민항기의 after market을 고려할 경우 연간 400억대의 수입대체 효과가 예상되며 매년 10% 정도의 성장률을 보이고 있는 가장 큰 수요처로 평가되고 있다.

반도체 산업의 경우 실리콘 단결정 성장로의 열차폐재 및 각종 부품용 C-C 및 C-SiC 복합재 역시 100% 수입에 의존하고 있으며, 진공열처리, 세라믹 분야에서 기존의 탄소재 및 흑연소재를 대체할 시장 규모를 감안할 경우 연간 100억대 규모로 예측된다.

한국 산업을 선도하는 자동차 및 반도체 산업의 필수적인 소재로서 그리고 전략산업인 항공우주 분야를 고려시 향후 상당한 규모의 성장이 기대되고 있다.

3. 결 론

탄소재료는 여러 분야에서 오랜 세월동안 우리가 이용해 온 재료이면서 미래첨단 사회에서도 끝없이 변신을 거듭하며 그 쓰임을 확대해 가는 재료 계의 팔방미인이다. 이는 탄소가 가진 천부적 특성, 즉 다양한 결합이 가능하기 때문으로 결합하는 방법에 따라 흑연과 다이아몬드로 그 운명을 달리한 탄소가 근래에 들어서는 탄소섬유에 이어 풀러렌과 탄소나노 튜브의 출현으로 미래의 나노테크놀로지, 반도체, 에너지, 항공우주 산업에서도 탄소재료는 핵심적 역할을 수행할 것으로 예상된다. 이러한 탄소재료의 장점만을 취합한 C-C 및 C-SiC 복합재료는 고온 기계적 물성이 우수하여 우주항공, 원자력/핵융합, 반도체분야 및 생체 재료로서 그리고 항공기 및 고속차량의 브레이크 재료로 그 중요성 및 응용범위가 날로 확대되고 있으며 그 기술의 중요성 및 파급효과는 우리의 상상을 뛰어 넘으리라 예상된다. 향후 탄소 복합재료가 인류생활에 어떻게 이바지 할 것인가는 앞으로 과학자들과 공학자들의 끊임없는 연구와 기술개발에 달려 있다고 할 것이다.

참고문헌

- 1) Donald L. Schmidt, Carbon-Carbon Composites (CCC)- A Historical Perspective, WL-TR-96-4107.(1996)
- 2) Erich Fitzer, "The Future of Carbon-Carbon Composites," Carbon, Vol. 25, No. 2, 1987, pp. 163-190.
- 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) D. Chaumette, "Utilization of Composite Materials for the Hermes Space Vehicle," *French Aerospace 90 Aeronautical and Space Conference*, June 12-14, (1990)
- 5) 小林智之 他, 第33回宇宙航空科學技術聯合講演會, 33, (1989), pp. 70-716.
- 6) W. Kowbel, V. Chellappa and J. C. Withers, "Applications of Net-Shape Molded C/C Composites in IC Engine," *Journal of Advanced Mat's*, July (1996), pp. 2-10.
- 7) 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.
- 8) Katsuro Sugawara, Hiroshi Fukuta, 炭素, No. 181(1998), pp. 34-40.
- 9) Advanced Materials Markets, Technical Insights, Inc., Englewood/Fort, U.S.A., 1993.
- 10) The Advanced Composites Industry Worldwide 1998-2003, *Materials Technology Publications*, 1998.
- 11) Ilan Golecki, "Recent Advances in Rapid Vapor-Phase Densification of Refractory Composites," *Electrochemical Society Proceedings*, Vol. 96-5, 1996, pp. 547-554.
- 12) P. David, et.al, "Elaboration of Ceramic Composites by Rapid Densification," *Proceedings of ICCM-10*, 1995, Vol. IV, pp. 611-616.