

# 초고온용 복합재료 개발 현황

전략기획팀

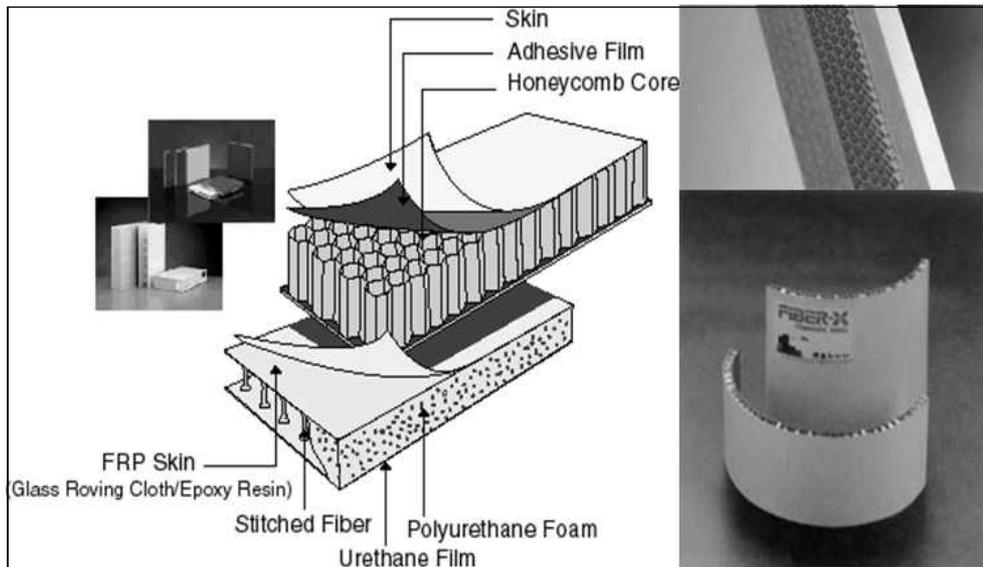


**ECO융합섬유연구원**  
Korea Institute of Convergence Textile

# 초고온용 복합재료 개발 현황

## 1. 복합재료

- 현대과학 기술의 발달로 자동차 부품을 비롯한 운송분야에서는 금속, 세라믹, 고분자 재료들의 단독으로는 얻을 수 없는 강하고 강성이 뛰어나며 가벼운 재질이 필요하게 되었음
- 단순히 성능이 좋으면서도 값이 저렴한 제품이 아니라, 에너지 소비 및 환경보호 차원까지 대응하기 위한 다양한 요건을 충족시킬 수 있는 소재개발이 요구됨
- 복합재료란 특수한 기능향상을 위해 2개 이상의 물질을 물리적, 화학적으로 혼합한 재료로서 단일소재에서는 볼 수 없는 복수의 기능 및 목적에 적합한 특성을 실현한 재료임

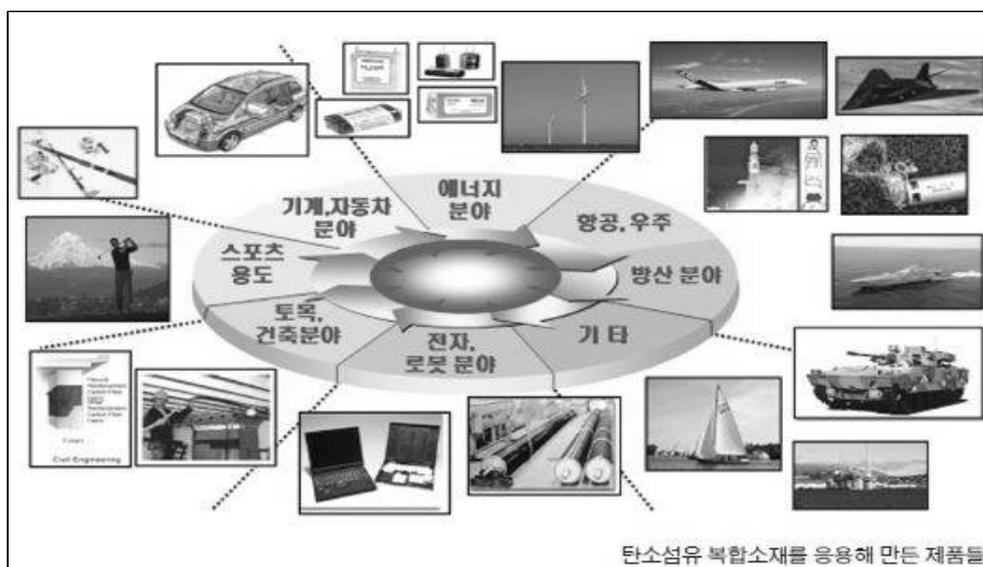


<경량구조용 복합재료>

- 이러한 복합재료는 여러 가지 기준으로 분류될 수 있는데, 기지재의 종류에 따라 고분자 복합재료(polymer matrix composites, PMC), 금속 복합재료(metal matrix composites, MMC), 세라믹 복합재료(ceramic matrix composites), 및 고무 복합재료(rubber matrix composites, RMC), 시멘트 복합재료(cement matrix composites, CMC) 등으로, 강화재의 형상에 따라 입자 강화 복합재료

(particle reinforced composites), 단섬유 강화 복합재료(short-fiber reinforced composites) 및 장섬유 강화복합재료(continuous fiber reinforced composites) 등으로 분류됨

- 강화재의 종류에 따라서 탄소섬유강화 복합재료(carbon fiber reinforced composites, CFRC), 유리섬유강화 복합재료(glass fiber reinforced composites, GFRC), 세라믹섬유강화 복합재료(ceramic fiber reinforced composites, CFRC) 및 금속섬유강화 복합재료(metal fiber reinforced composites, MFRC) 등으로 분류됨
- 강화재에 모재까지 포함시켜 조합하면 탄소섬유강화 플라스틱(carbon fiber reinforced plastics, CFRO), 유리섬유강화 플라스틱(glass fiber reinforced plastics, GFRP), 아라미드 섬유강화 플라스틱(aramid fiber reinforced plastic, AFRP), 금속섬유강화 플라스틱(metal fiber reinforced plastics, MFRP) 등과 같이 다양한 이름으로 분류됨
- 가장 널리 이용되는 복합재료는 강도가 높고 고탄성률의 연속섬유를 보강재로 이용한 것으로 열경화성 수지(에폭시, 불포화 폴리에스터, 페놀포름알데히드, 폴리이미드 등)나 열가소성 수지(폴리에스터, 나일론, 폴리프로필렌, 폴리에틸렌 등)에 유리섬유와 탄소섬유, 유기섬유, 세라믹섬유 및 금속섬유를 보강한 고분자 복합재료임

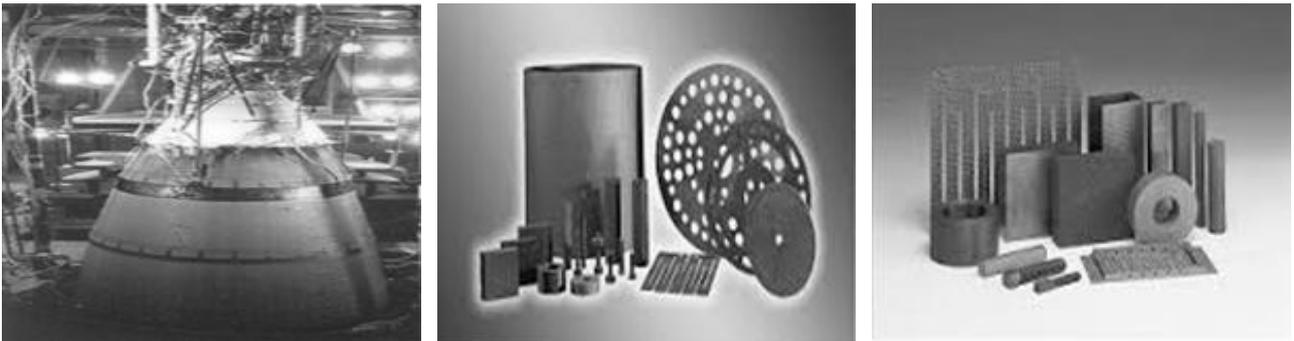


<복합소재의 다양한 응용 분야>

- 이러한 복합재료는 원료 섬유의 가격이 높고 제조공정이 복잡하여 제조비용이 높은 단점이 있어 응용분야가 우주항공용, 국방용 등으로 극히 제한적이었으나 최근에는 원료소재 가격의 하락과 더불어 응용분야가 확대되어 우주항공, 운송 분야뿐만 아니라 스키보드, 골프채, 테니스 라켓과 같은 레포츠 용품까지 많이 이용되고 있음

## 2. 극한환경에서의 복합재료

- 극한환경에서의 섬유강화 복합재료의 시장방향은 전구체 섬유의 개발속도와 고기능화 그리고 경제적인 제조기술의 개발과 밀접하게 관련됨. 2000년대까지는 1200 °C 이상의 고온용 섬유의 상업적 적용이 어려웠으나 1600 °C 이상의 고온용 섬유들이 개발되고 상업화되며 복합재료의 제조방법 및 공정상의 문제점들이 해결됨. 섬유강화 복합재료는 2000 °C 이상의 고온에서 지속적으로 내열성 및 내산화성이 요구되는 우주항공 분야, 초고온에서 고순도 및 내삭마성이 요구되는 원자로/핵융합로 분야, 고순도 및 고온열처리가 요구되는 반도체 제조 및 진공 열처리로 분야에서 기존 재료로는 한계에 도달한 성능을 획기적으로 향상시킬 수 있는 재료임.



<로켓발사에 이용되는 초고내열성 탄소 복합재료와 브레이크 디스크>

- 극저온과 관련된 재료 기술로는 질소, 수소, 헬륨 등의 가스를 수송, 저장, 액화 하는데 주로 이용되었으나, 최근에는 그 응용분야가 확대되어 초전도 산업에 필수적일 뿐만 아니라 군사, 우주, 항공, 의료, 진공, 에너지, 전자, 수송, LNG 관련 분야 등에서 널리 활용되고 있다. 그중 극저온에 노출되어 구조 및 기능적 역할 수행이 필요한 응용분야에서는 섬유강화 복합재료의 사용이 가능성이 있음



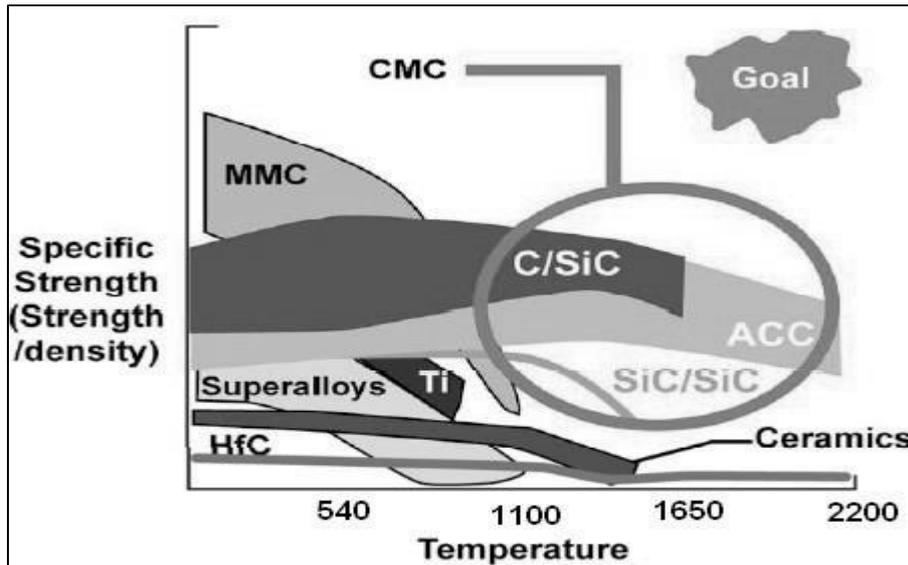
<극저온용 복합재료로 만들어진 액화산소저장용기>

- 이러한 초고성능 섬유복합재료들은 일반 산업 분야에서의 수요 또한 빠르게 증가하고 있을 뿐만 아니라 자동차나 선박부품, 전기, 전자, 스포츠·레저 분야까지도 그 범위를 넓히고 있음
- 이러한 복합재료는 경제, 산업적 파급효과와 그 중요성이 매우 크며, 그 적용분야 또한 향후 더욱 확대될 것으로 예상되지만, 국내에서의 기술기반은 특정분야에 치우쳐져 있을 뿐만 아니라, 이와 관련된 시장규모 또한 매우 취약하여 향후 소재분야에서의 경쟁력 확보를 위한 연구개발이 시급한 상황이다. 이를 위해서는 이미 확보된 전문 인력 및 기초기술을 이용하여 상용화 및 응용기술 개발에 필요한 적극적인 연구 지원과 더불어 산업계와의 협력이 필요할 것으로 판단됨

## 2-1. 초고온용 섬유 강화 복합재료

- 최근 세라믹 복합재료를 사용하여 내열성은 물론 50% 정도의 경량화를 이루어냄.
- 일반적인 세라믹 소재는 고온내열성 재료로서 고강도, 저밀도, 내마모성을 비롯해 화학적 안정성 등을 지닌 장점이 있으나, 결함에 취약하고 특히 취성 파괴가 일어나기 쉬워 직접적인 사용이 어렵다는 단점이 있으며, 이러한 소재는 사용온도의 한계를 가짐

- 이러한 단점을 극복하기 위해 세라믹 매트릭스에 고강도의 탄소섬유나 실리콘카바이드(SiC) 섬유를 강화재로 하는 섬유 복합재료 개발이 이루어짐



<여러 재료의 온도에 따른 비강도>

- 민간항공기, 전투기와 더불어 고속전철에 있어서도 고온내열성과 함께 추가로 내마찰성을 갖춘 소재의 개발이 이루어지고 있고, 상당 부분은 실용화가 되어 적용이 되고 있음. 항공기의 경우에 있어서 가장 중요한 것은 비상 착륙으로 인한 급제동이나, 이륙 시 엔진을 최대로 가동하는 동안에 이륙을 포기하는 즉, Rejected Take-Off (RTO)의 비상사태가 발생하는 경우에 항공기를 안전하게 정지하는 경우에 다판으로 구성되는 브레이크는 고온 마찰로 인하여 디스크 판 계면의 온도는 3000 °C까지, 디스크 자체는 1400 °C 이상으로 상승하게 되는데, 이와 같은 극한 온도에 견디면서 마찰력을 유지할 수 있는 고온용 내열 내마찰성의 소재가 대단히 중요함
- 고온용 섬유강화 세라믹 복합재료가 개발되기 전에는 항공기의 브레이크 소재는 모두 주철계를 사용하였으나, 이 소재는 낮은 사용온도와 고온에서의 불안정한 마찰거동을 나타내어, 오늘날 항공기의 브레이크디스크는 세라믹 복합재료가 적용됨
- 이와 같이 고온 내열성 소재는 우주항공에서부터 고속전철 등 모든 분야에서 요구되는 핵심소재가 되었으며, 미국과 유럽에서는 1960년대부터 국방분야에 적용

하기 위하여 개발이 이루어지고, 개발된 기술은 민수분야에까지 적용이 이루어지고 있음

- 앞에서 언급한 고온내열성 소재는 무엇보다도 1000 °C~3000 °C까지의 초고온 환경에서 불활성·산화성 분위기에서 장, 단시간 사용을 할 수 있어야 하며, 또한 이 소재는 경량성이 요구되며 초고온도에서도 높은 기계적 물성을 유지하는 구조성도 갖추어야 함. 이러한 요구특성을 만족하는 소재로써 오늘날 개발이 진행되거나 이미 실용화가 이루어진 소재로는 첫째 앞서 언급한 C/C(Carbon fiber reinforced Carbon)복합재료, 둘째로는 탄소섬유강화재에 SiC를 매트릭스로 하는 C/SiC (Carbon fiber reinforced Silicon carbide) 복합재료, 마지막으로 SiC 섬유 강화재에 SiC를 매트릭스로 한 SiC/SiC (Silicon carbide fiber reinforced Silicon carbide)복합재료의 3종류가 있음
- 탄소기지에 탄소섬유가 보강된 탄소-탄소(C/C) 복합재료는 2000 °C 이상의 비산화성 환경에서 고내열성·고강도·내열 충격성을 보여주며, 비강성이 높아서 경량화 측면에서도 우수한 재료이고 고온 산화분위기에서 사용하기 위하여 C/C 복합재료 표면에 산소와 접촉을 차단할 수 있도록 내산화 코팅기술과 내산화성이 우수한 SiC로 탄소 기지재를 대체하기 위한 SiC 복합재료 제조기술 등이 중요한 연구개발 분야임
- C/C 복합재료의 주요 물성은 강도, 강성, 파괴인성, 마찰특성, 열전도도, 그리고 고온에서의 산화저항성으로써, 이러한 기계적 성질은 사용하는 탄소섬유와 매트릭스의 종류, 부피함유율, 접착력과 크랙 전파기구에 의존하며, 열적 성질은 열 전달현상에 의해서 지배받으며, 강력한 결합력을 갖는 복합재료는 섬유의 인발 (pull-out) 없이 급격하게 파손이 일어나며, 계면이 조절되는 경우에는 고강도의 물성을 보여주는 인장과 전단 혼합모드로 파단이 일어남
- C/C 복합재료는 무엇보다도 우주항공 및 국방 분야에서 매우 중요한 역할을 하고 있으며, 특히 추진기관 내열부품으로써 개발이 이루어져 이 분야에 큰 기여를 하고 있고, 이외에도 C/C 복합재료는 우주왕복선 및 미사일 분야에서 leading edge, 극초음속 비행체의 구조부품, 연소실 라이너, 노즐 목 및 exit-cone, 제트 엔진 부품, 베인(Vane), 일반산업 분야에서는 발열체, 금속성형용 금형, 고온용

볼트 및 너트, 내연 기관의 피스톤연결 로드, 고온용 용기, 경주용 차 및 고속전철의 브레이크디스크, 전극, 그리고 의료 및 원자력 분야에서는 인공 뼈, 인공심장 밸브와 핵 반응로의 열교환 튜브 등에 적용됨

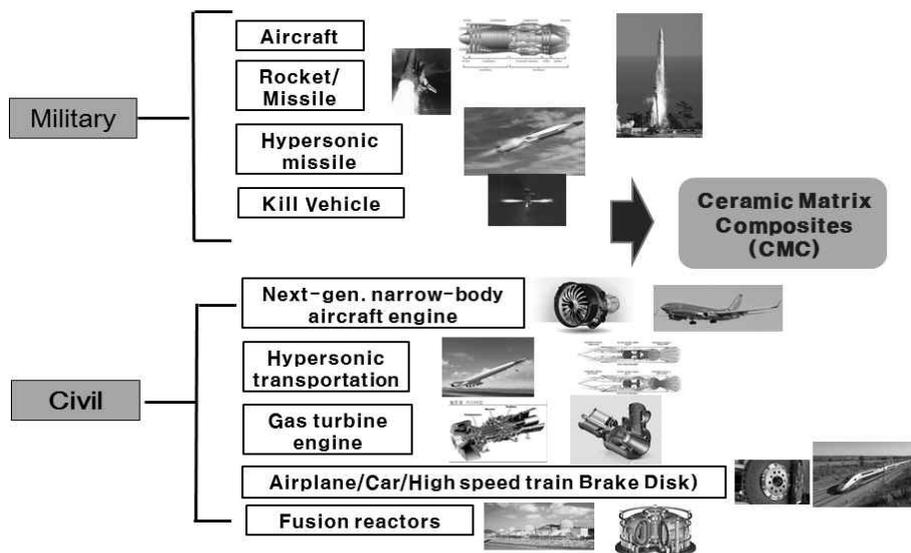
- C/C 복합재료는 공기 중에서 450 °C 이상의 온도에 노출되면 산화가 일어나기 시작하여 강도가 매우 저하되며, 불활성 혹은 진공 분위기에서 매우 높은 내삭마성을 가지며, 2700 °C 이상의 온도에서 높은 기계적 강도, 열 충격 저항성, 인성 파괴성 등 우수한 기계적 손상 저항성을 갖추고 있으나, 400~500 °C의 산화성 분위기에 매우 민감해 산화가 발생하기 때문에 사용에 제한을 받음
- 따라서 산화로부터 탄소섬유와 탄소 매트릭스의 보호를 위해 세라믹으로 표면 코팅을 하며, SiC는 높은 열 안정성, 고온에서의 우수한 강도와 낮은 밀도로 인하여 코팅재로서 최적의 소재라 할 수 있음
- SiC매트릭스를 C/C 복합재료나 탄소섬유에 코팅하기 위한 공정으로 CVI 공정, PIP(Polymer Infiltration and Pyrolysis) 공정, 그리고 LSI (Liquid Silicon Infiltration) 공정이 개발되어 사용되고 있음
- 산화저항성 측면에서 SiC는 우수한 산소 차단제로 C/C-SiC 복합재료에서 SiC는 LSI 공정에 의해서 만들어지는데, 이는 고온산화성 분위기에서 실리콘 침착이 없는 소재에 비하여 비교할 수 없을 정도의 낮은 중량감소 나타내며, 가열과 냉각이 반복되면 횡 방향 크랙이 일어나는데, 이 때 산소는 SiC와 C의 큰 열팽창 차이로 인하여 크랙 사이로 확산하게 됨. 실리콘 침착 시 SiC/C 계면의 내부는 탄소로, 밖은 SiC로 형성되는데, 이는 열팽창 차이를 감소시켜 크랙의 형성을 방지함으로써 산화저항성을 증가시켜주며, C/C-SiC는 열전도도, 비열용량, 분광 방사율과 열팽창계수면에서 열적 물리적 성질이 우수함
- 세라믹 복합재료는 금속이나 탄소섬유 복합재료 보다 원료와 제조비용이 고가이므로, 선택의 여지없이 고온 환경에 노출되어야만 하는 우주항공 분야에 집중적으로 적용됨
- C/SiC 소재는 구소련 Buran우주왕복선의 열 차폐 시스템(TPS:Thermal

Protection System)인 노즈-캡에 최초로 적용되었으며, 오늘날 C/C-SiC는 X-38 시제기의 노즈-캡에 적용되었는데, 대기권 재진입이 일어나는 20여 분 동안 이 부위의 온도는 최대 1800 °C에 달하게 되며, 이 소재는 구조물의 leading-edge는 물론 예리한 형상을 갖는 노즈-팁에도 적용되어 극한 열하중에 견딤

- 로켓 모터분야에서 가장 극심한 열적 및 기계적 하중에 견디면서 가스의 방향을 바꾸는 역할을 하는 TVC(Thrust Vector Control)의 Jet vane에도 C/C-SiC가 적용되며, 이는 몇 초간의 시간 동안 최대온도 2800 °C까지 도달하는 가열속도를 버티며, 속도 2000 m/s의 알루미늄 입자에 의한 삭마에도 견디며, 금속이나 기타 다른 내화성 소재를 적용하는 것이 비해 중량을 90%까지 경량화 시킬 수 있음
- C/C와 C/SiC 복합재료의 출현에 큰 기여를 한 소재가 탄소섬유라 하면, SiC/SiC 복합재료의 핵심적 역할을 하는 소재는 SiC 섬유로, 탄소섬유가 낮은 온도에서의 산화가 일어나는데 비하여 SiC 섬유는 산화에 강한 저항성을 가짐
- 항공기, 전투기, 로켓 및 미사일, 일반산업 및 미래의 극초음속항공기 분야에서는 지난 수십 년동안 가스터빈을 사용하여 에너지를 생성하거나 추력을 극대화하기 위한 연구개발이 진행됨
- 가스터빈은 고온, 고압의 공기를 흡입하여 연소기에서 분사된 연료와 혼합한 뒤 연소시켜 터빈을 가동하는 Air breathing형의 제트 엔진으로 가스터빈의 성능개선에 있어서 연소 온도를 높이기위한 시도가 추진되고 있는데 이 경우에 연소실이나 터빈블레이드 및 노즐 파트는 산화성이 높은 고온의 연소가스에 노출되어 이에 이용되는 부품들은 장시간 노출 시 변형과 크립 및 피로응력이 발생하며, 고온에서의 산화 또한 가속되며, 다량의 냉각이 필요하므로 터빈의 흡입 온도를 낮추게 되어 열효율이 감소됨
- 이러한 부품에 SiC/SiC 복합재료의 사용은 열효율의 증가시키며 냉각시스템 또한 제거할 수 있게 한다.
- SiC/SiC 복합재료에서 가장 핵심이 되는 소재는 SiC 섬유의 개발임. SiC 섬유는 1975년에 일본 동북대학의 Yajima 교수에 의해서 개발이 되었고, 이후 일본

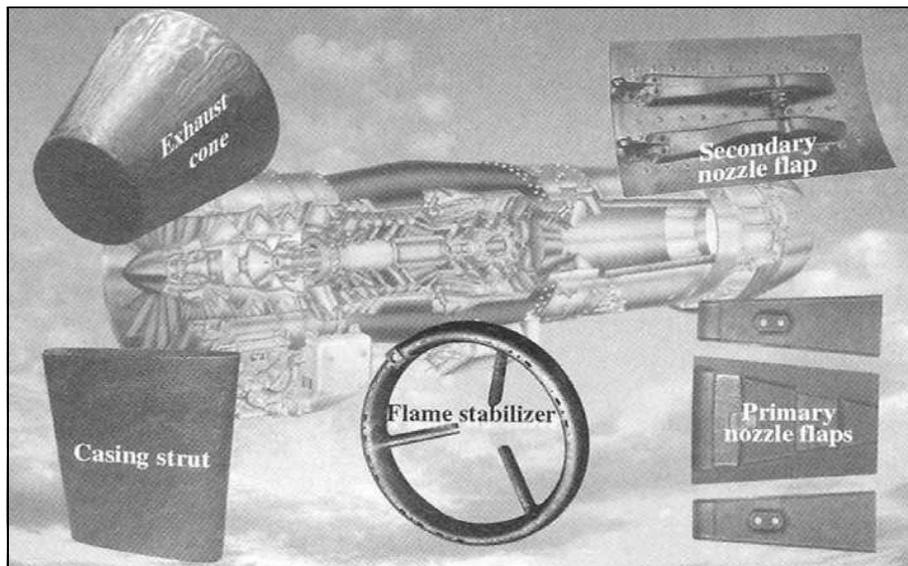
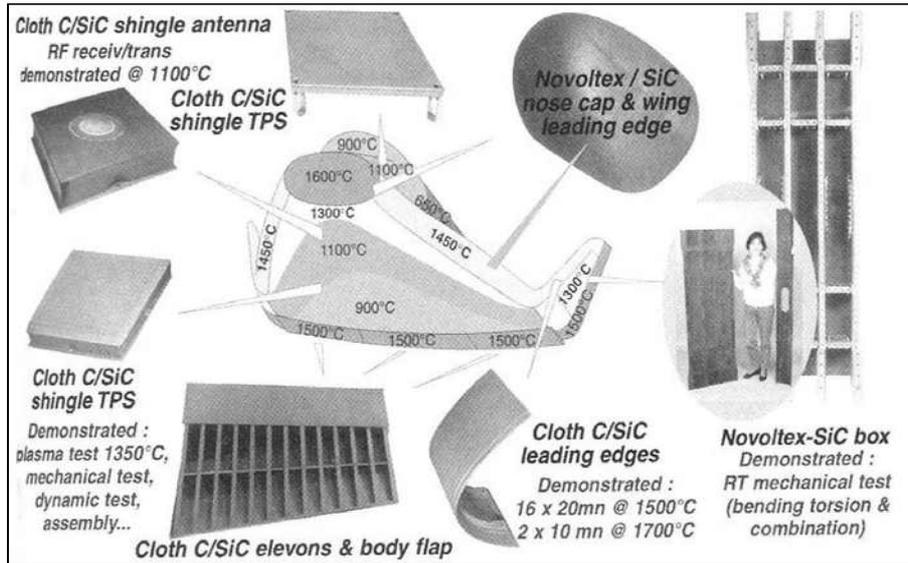
을 중심으로 개발이 되어 오늘날에는 미국, 영국, 중국이 상용화를 하였으며, 독일과 우리나라는 개발 단계에 있음

- SiC 섬유는 기본적으로 PCS를 출발물질로 하여 PCS 섬유를 용융방사하고, 불용화를 위한 가교결합 후 소결을 거치는 공정과, 탄소섬유 혹은 텅스텐 코어에 CVD 공정을 적용하여 SiC 섬유를 얻는 2가지 공정이 있음
- SiC/SiC 복합재료의 제조에는 C/SiC와 동일한 공정을 기본적으로 사용하는 한편, 일본은 CREST-ACE (Core Research for Evolutional Science and Technology, Advanced Composite Systems for EnergyConversion) 프로그램을 통하여 공정시간을 단축한 저가의 공정으로 높은 기계적 물성, 고열전도도, 복잡한 형상 및 얇은 두께를 가지며 내방사성이 우수한 NITE (Nano-Powder Infiltration and Transient Eutectoid) 공정을 개발하여 원자력 발전소에 적용 연구를 하고 있음
- PIP 공정은 가장 높은 섬유분율을 가져 구조적으로 안정한 복합재료를 얻을 수 있으며, 반면에 이 공정으로는 탄성률이나 강도가 다소 다른 공정에 비하여 낮은 단점을 갖고 있음. 열전도도 측면에서는 CVI 혹은 CVI-PIP 혼합공정이 높은 값을 나타냄



<초고온 내열구조성 복합재료의 적용분야>

- 고온 및 초고온내열 구조성 복합재료인 C/C, C/SiC 및 SiC/SiC 복합재료는 우주항공, 국방, 에너지, 수송 분야, 원자력 분야 그리고 일반산업 분야에서 지난 수십 년 동안 핵심 소재로써 적용되어 왔고, 앞으로도 가까운 미래에 이 소재의 중요성은 더욱 증가하리라 예상함



<탄소섬유/탄화규소(Cf/SiC), 탄화규소섬유/탄화규소(SiCf/SiC)복합재료의 적용 사례>

■ 출처

- <https://www.cheric.org/PDF/PIC/PC17/PC17-5-0012.pdf>
- 세라미스트