한국군사과학기술학회지 제15권 제4호, pp. 492~501, 2012년 8월

학술논문 소재·공정 부문

탄소섬유의 최신 응용 동향

Status of the Recent Applications of Carbon Fiber

이 태 호* 길 상 철**
Tae-Ho Lee Sang-Cheol Kil

Abstract

In this paper, the status of the recent applications of carbon fiber was investigated through the published papers, informations or data of the internet etc. The production cost of the carbon fiber will be lowered and in the other hand the quality would be upgraded. Therefore in the automobile area, the use of the carbon fiber will be increased, specially for the high quality cars and the sports cars. Also the structures, wings and many secondary parts of the commercial airplanes will be made of carbon fibers more and more. The carbon fiber applications are extended to many fields including ship buildings like as boats, canoes and retrofitting in civil engineering, sporting goods, instruments etc.

Keywords : Carbon Fiber(탄소섬유), Reinforcement Plastics(강화 플라스틱), Prepreg(프리프레그), Ablation(삭마), Retrofit(리트로피트)

1. 서 론

현재 우리가 살고 있는 21세기는 다양한 분야의 첨단 기술이 활성화되고 있고 하루하루가 새로워지는 나날을 지내고 있다. 그 중에 하나로 인간의 생활에 사용하는 소재는, 무겁고, 약하고, 쉬 부서지는 것보다는 가벼우면서도 질기고 강한 쪽으로 눈부시게 발전되고 있다. 특히 자동차, 선박, 철도, 항공 우주 등 다양한 분야의 운송 시스템에는 오래 동안 철강, 알루미늄 등의 금속 소재가 주를 이루어 왔는데, 새로이 가볍고 강도가 높은 복합재료가 등장하기 시작하였다.

이러한 복합재료 중에도 대표적인 것이 탄소섬유이고, 탄소섬유는 언급한 상기 분야 외에도 강도와 탄성에서 특출한 우수성을 나타내어 모든 분야로 사용 범위가 확대되고 있다. 청동기, 철기 시대부터 발달되어 온 금속재료에 대한 기술 개발은 성숙기를 넘은 것으로 인식되고 있는 반면에, 탄소섬유를 포함한 복합재료의 발전은 이제 한창 전개 중인 것으로 판단되고 있다.

또 탄소섬유는 고강도 고인성의 특성 외에도 융삭재료로서의 특성도 갖고 있다. 즉 고온 하에서 탄소섬유가 화학반응을 하게 되면, 자체적으로 열을 흡열하여, 전달되는 열을 차단하는 내열재 역할을 한다. 동시에 고온 고속의 유체 흐름으로 인한 표면 삭마 방지에도 매우 효능이 좋아, 로켓 노즐에 효과적으로 적

† 2011년 12월 19일 접수~2012년 6월 15일 게재승인
* 한국과학기술정보연구원(KISTI) ReSEAT 프로그램
** 한국과학기술정보연구원(KISTI) 기술정보분석실
책임저자 : 이태호(ltaeho0547@reseat.re.kr)

용되고 있으며, 디스크 재료, 노의 내화벽 재료로도 사용이 증가하고 있다.

본 조사는 이러한 탄소섬유에 대하여 세계 여러 나라의 개발과 응용 현황, 그리고 추세 및 동향을 파악하여 산업 현장의 종사자들을 포함한 관련자들의 참고자료가 되고, 또 관련 분야의 학술 활동 현황을 조사하여 학문적 연구 개발에 대한 참고 지표가 되도록 하였다.

2. 탄소섬유의 분류

가. 탄소섬유의 개발 개괄

탄소섬유는 미국의 Roger Bacon이 1958년 Union Carbide 회사에서 레이온(Rayon)으로부터 탄소섬유를 만들어 낸 것이 시작이라고 할 수 있으며, 곧이어 60년대에 들어서서는 영국에서 탄소섬유에 대한 연구 개발이 매우 활발하였다[1]. 같은 무렵인 60년대 초 일본에서는 폴리아크릴로니트릴(PAN : Polyacrylonitrile)로부터 탄소섬유를 개발하기 시작하였고, 일본 도레이(Toray)에서 고탄성, 고강도 탄소섬유를 개발하였다[2]. 그리고 1970년 대 초에는 T300 탄소섬유의 양산 체제가 시작되어 낚시 대, 골프채에 사용하기 시작하였고, 1976년에는 기름 값의 급등으로 B727, B737, DC9, DC10 등 비행기에도 가벼운 소재의 필요성이 증대되면서 T300이 사용되기 시작하였다. 1982년에는 B757, B767, Airbus A310에도 적용하였고, 우주왕복선 Columbia호에도 T300을 사용하기 시작하였으며, 1990년대 들어서는 새로 개발된 탄소섬유인 T800을 B777에 적용하기 시작하였다[3]. 또 T800보다 상위의 질인 T1000도 1986년 개발되었다고 도레이 회사에서 발표하고 있으나, 이의 용처는 자체 홍보 자료에도 언급되지 않고 있어[3], 대외비로 분류된 비밀 보안적인 분야에 적용되는 것으로 추정할 수 있다.

나. 탄소섬유의 구분

탄소섬유는 원료에 따르는 구분도 있으나 실제 응용면에서는 탄소섬유가 가지고 있는 특성이 중요하여 이러한 성능을 기준으로 구별하여 적용하는 것이 통례이다. 이러한 구분을 Fig. 1에 도표로서 표시하였는데 일본 탄소협회의 자료를 인용한 것이다[5].

일반 범용 탄소섬유는 저탄성률의 탄소섬유를 말하며 탄성률 200GPa 이하에 인장강도 3500MPa 이하의 것으로서 상대적으로 가격은 저렴하다. 고성능 탄소섬유는 고강도(HT : High Tensile), 중 탄성률(IM : Intermediate Modulus), 고탄성률(HM : High Modulus) 탄소섬유를 통틀어 말하며, 특히 인장 탄성률이 600GPa 이상인 것을 초고탄성률 섬유라 부른다. 탄성률 기준에 대하여 인장강도를 기준으로 구분하는 경우도 있는데, 보통 인장강도 3000MPa 이상에 인장 탄성률은 220～260GPa 이상인 것을 고강도 탄소섬유라 말한다. 또 인장강도가 6000MPa 이상인 것을 초고강도(UHT : Ultra High Tensile) 탄소섬유라고 부르기도 한다[5].

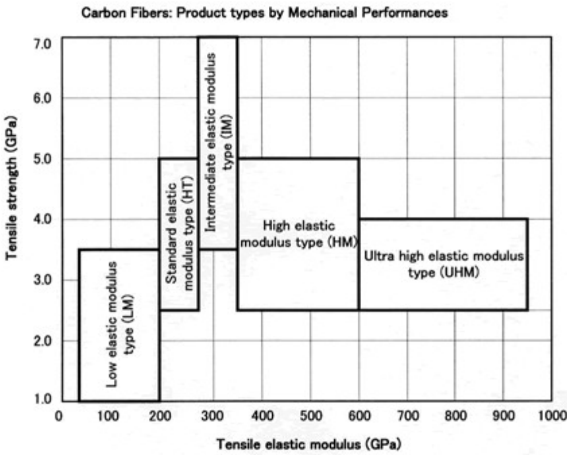

Fig. 1. Mechanical performance characters of carbon fiber[5]

최근에는 초기의 탄소섬유보다 물성이 더 좋은 탄소섬유들이 개발되어 나오고 있으며, 기존의 T300(저급) 이외에도 T700(중급), T800(고급) 및 T1000도 나오고 있다. T800 급 이상의 고급 탄소섬유, 고탄성(HM) 이상, 또는 고강도 이상의 탄소섬유를 일반적으로 첨단급으로 보기도 한다. 빈스켈리 탄소섬유 기술(Vince Kelly Carbon Fiber Technology) 회사에서 사용한 첨단급(Advanced Grade) 탄소섬유 개념도 위에서 언급한 내용과 유사한 탄성률을 갖고 있으며, 인장강도는 조금 높게 잡고 있으나 초고강도 보다는 훨씬 낮은 범주에 속하고 있다[6].

탄소섬유가 가지고 있는 가장 매력적인 특성은 고강도 섬유라는 것은 이미 언급된 것이다. 그러나 탄소섬유의 실 가닥은 수천 개의 정교한(5～7 마이크론) 직경의 필라멘트로 구성되어 있어, 탄소섬유 자체의 인장강도를 이야기 하는 것은 실제적인 의미가 떨어진

다. 대부분의 탄소섬유는 강화 탄소섬유 복합재료로 사용되기 때문이기도 하다[4]. 즉 탄소섬유는 탄소섬유-에폭시 수지 및 탄소섬유를 강화재로 하는 탄소섬유 강화 플라스틱 등의 복합재료로서 응용이 다양하여, 탄소섬유의 적용과 사용은 자연스럽게 탄소섬유 강화 복합재료로서의 용도를 의미하게 된다. 다음 절에서는 이러한 탄소섬유에 대하여 구조 재료용과 내열 삭마형으로 구분하여 응용 면을 살펴보았다.

3. 구조 재료용 탄소섬유

탄소섬유 강화 플라스틱(CFRP : Carbon Fiber Reinforcement Plastics)은 이미 언급한 바대로 매우 강하고 가볍다. 그리고 PAN 계로 만들어진 CFRP는 비교적 고가이다. 지금까지 이러한 고가의 탄소섬유 복합재료는 주로 우주 항공용과, 고급 자동차에 사용되어 왔다. 또 무게 대비 강도가 큰 것이 요구되는 모터사이클이나 자전거, 보트용으로도 각광을 받기 시작하였다[7].

탄소섬유 복합재료의 또 다른 용도는 시설 보강재로서의 역할이다. 지난 20여 년 동안 건설 공사 적용에 눈부시게 증가되어 왔으며 콘크리트 구조물, 목재 건축 분야에도 활용되고 있다. 기존 구조물의 강도 증가를 위한 리트로피트(Retrofit)나, 철강 구조 대신에 사용하는 보강 재료로 대체 사용이 증가하고 있는 것이다[7].

이들 탄소섬유 복합재료의 응용 분야에 대하여 자동차, 항공우주, 선박 등의 분야로 나누어 살펴보면 다음과 같다.

가. 자동차 분야에 적용

탄소섬유 복합재료가 자동차에 적용되기 전에 유리섬유 복합재료가 먼저 자동차에 적용되어 왔다. 그러나 이것은 유리섬유의 특성이 갖는 장점이라기보다는 상대적으로 저가이었기 때문이다. 탄소섬유가 더 가볍고 개발 기술의 발달로 가격도 경쟁할 만하여 탄소섬유의 사용이 확대되고 있다. 탄소섬유 복합재료의 자동차 분야 적용은 아직까지는 스포츠카 등 고급 차종에 한정되어 사용되어 왔다. 그리고 부품으로는 프로펠러 샤프트 등에 사용되어 왔으나, 자동차 분야의 탄소섬유는 자동차 수요의 증가와 함께 가장 수요가 증가할 분야로 보인다.

적용한 대표적인 예를 보면, 2003년에 Dodge Viper Convertible에 탄소섬유 SMC(CFSMC : Carbon Fiber Sheet Molded Composite)가 사용되었으며 Fig. 2에 표시하였다. 탄소섬유 SMC의 기본적인 장점은 유리섬유보다 높은 탄성률과 낮은 비중이었다.

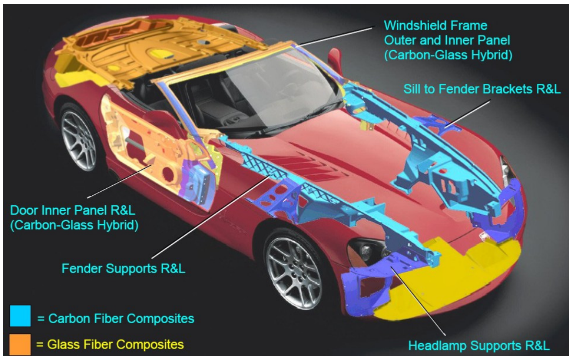

Fig. 2. Viper 2003[8]

사용한 상용 탄소섬유는 탄성률이 대략 230GPa로 E-유리섬유 보다 3배 정도 높고 탄소섬유 비중은 1.8로 유리섬유의 약 70% 정도이었다. 그래서 이 복합재료를 사용한 구조물은 얇고 가볍게 되었다.

이 자동차에 사용한 탄소섬유 복합 재료는 Quantum Composites 회사의 AM C8590과 8595인데, 그 특성을 Table 1에 표시하였다[8].

Table 1. Properties of carbon fibers Viper 2003

Property	Method	Specimen Cut from Panel, Machine/Fiber Dierction
Fiber Content	Solvent Wash	55
Specific Gravity	ISO 1183	1.49
Tensile St(MPa)	ASTM D 3039	1200
Tensile Md(GPa)	ASTM D 3039	120
CTLE	ASTM D 696	9.47×10^{7}
Heat Def Tem.	ISO 75	>260

일본 도요타 자동차 회사는 2010년 12월 고성능 스포츠카에 처음으로 탄소섬유 강화 수지(CFRP : Carbon Fiber Reinforced Plastics)를 사용한 자동차를 생산 판매

하였다. 차체 구조의 65%를 차지하고 있어 종래 알루미늄 차체와 비교하면 100kg이 가벼워진 것으로 발표되었다[9].

2011년 판매하기 시작한 후지 중공업 스포츠카는 도레이와 공동 개발한 CFRP 루프를 채택하였다. 중량이 20% 정도 감소되었고, 루프가 가벼워짐에 따라 차체 중심이 낮아져 운전성이 향상되었다[7].

독일의 다임러 자동차 회사에서도 2010년 4월 도레이 회사와 CFRP 자동차 부품 공동 개발 계약을 체결하였고, 2013년에는 메르세데스 벤츠 승용차 차체를 RTM(Resin Transfer Moulding)공법을 사용하여 생산할 것이라 한다. 이를 통하여 전체 공정 주기를 단축하려고 노력하고 있다[10].

독일의 BMW도 2015년 판매를 목표로 전기 자동차를 개발 중인데, 이 자동차의 부품에 탄소섬유를 원료로 하는 아크릴 섬유를 일본의 미쯔비시 레이욘과 합병한 독일의 CFRP 제조회사 SGL이 공급하기로 하였다[11]. 메가시티(Megacity)라 불리는 BMW 자동차는 배터리를 사용하는 전기 자동차로 경량화가 더욱 요구되고, 이에 탄소섬유 복합재료가 매우 효과적일 뿐만 아니라 진동도 줄여 주어 안락함을 더해주게 될 것이다[11,12].

2011년 2월 16일자로 일본 경제신문에 보도된 일본 탄소섬유 협회의 발표에 의하면 평균적인 보통 승용차에, 사용 가능한 기술을 적용하면 차체 중량의 17%를 CFRP로 대체가 가능하고, 중량은 30% 줄일 수 있다고 발표하였다[5].

세계적으로 자동차의 연비 규제가 엄격해지고 있기 때문에 자동차 경량화의 필요성이 더욱 증가하고 있다. 따라서 자동차에 적용하려고 시도하는 탄소섬유는, 경량화로 에너지 절감을 목적으로 하는 것을 감안하면, 고급 탄소섬유가 더 효율적일 것으로 보인다. 일본에서 생산하는 자동차에는 일부 차종에서 이미 CFRP 프로펠러 샤프트가 사용되고 있으며 고탄성의 탄소섬유가 사용되고 있다[6].

또 탄소섬유로 만든 연료 탱크도 자동차 경량화에 일조를 하고 있다[7]. 천연가스 차의 CNG 탱크에도 탄소섬유의 소요가 점차 확대되고 있으며, 고속 철도 프레임에도 사용이 되고 있는데, 일본에서는 고급 탄소섬유의 차체를 고성능 철도에도 이용하고 있다[5].

살펴본 바와 같이 미국, 일본과 독일 등의 여러 나라에서 탄소섬유 복합재료를 자동차에 활용하기 시작하고 있다. 아직은 초기 단계이나, 고급 탄소섬유의 적용과 함께 신기술로서 이에 대한 발전 전망은 밝아 보이고 선진국에서는 전술한 것처럼 깊은 관심을 갖고 개발 적용중이다.

나. 항공 우주 분야에 적용

탄소섬유 복합재료가 많이 소요되는 분야 중에 하나가 항공기 분야이다. 항공기는 하늘을 날아야 하는 원초적인 성능을 위하여 가벼우면서 강한 재료가 필요하고, 이에 합당한 재료가 탄소섬유가 될 것이다. 일본 탄소섬유 협회의 발표에 의하면 비행기 기체 구조 50%에 탄소섬유를 적용하면 20% 경량화가 가능하며, 이렇게 하면 일본 내 전 여객기의 탄산가스 배출량을 연간 120만 톤 줄일 수 있다고 한다. 이것은 곧 연료 사용의 감소이고 동시에 곧 친환경적인 효과를 얻을 수 있게 된다[5].

항공기용 탄소섬유는 일반적으로 프리프레그를 사용하여 부품을 성형한다. 즉 프리프레그를 여러 장 쌓아 압력과 열을 가해 매트릭스 수지를 경화시켜 성형하고 있다. 최근에는 VaRTM(Vacuum assisted RTM) 공법이 사용되기도 하는데, 이 방법은 탄소섬유 기지에 수지를 함침하지 않은 상태로 적층하고, 진공 상태로 만들어 액상 수지를 주입하여 오븐에서 가열하여 경화시키는 공법이다. VaRTM 공법을 사용한 탄소섬유를 개발하여 일본 국내 소형 비행기의 뒷날개에 사용하고 있다[5].

1976년에 보잉 항공회사에서 비행기에 T300을 사용하기 시작하였고, 1982년 B757, B767, Airbus A310에도 적용하였다[3]. Airbus 회사의 초대형 비행기 A380은 2007년 10월 Singapore Airline에서 상용 운행을 개시하였는데, 중심 날개, 동체 등에 CFRP 35 톤을 사용하였다. 유리섬유를 포함하여, 탄소섬유 등 복합재료가 22% 사용되었다[3,13].

근년에 B777이 개발되었는데 1994년 첫 비행을 하였고, 사용한 탄소섬유는 T800이다[3,7]. 비행기 마루 빔(Floor Beam)과 수직, 수평 미익(Stabilizer)에 적용하였으며, 그 외에도 엔진 낙셀(Engine Nacelle), 랜딩기어 도어, Aileron 등의 2차 구조물에도 사용하였다. 고급 탄소섬유를 T800급 이상으로 간주하면 이후의 새로운 비행기에는 고급 탄소섬유를 사용한다고 보아도 큰 무리는 없을 것으로 보인다. 새로운 중형기로 A350을 개발 중인데, 2011년 최종 설계 확정을 하였고 2013년 납품 계획으로 되어 있다. 동체, 날개 등에 CFRP를 사용하며, 구조 부품에서 CFRP의 비율은 53%로 될 것으

로 예상하고 있다. 또 전체 날개 구조를 탄소섬유 강화재로 사용하는 것으로 되어 있다[5,6].

보잉 회사에서는 주 날개, 동체, 중앙 날개 등 구조 부품의 50%에 프리프레그 탄소섬유 복합재료를 사용한 Dream Liner B787을 2007년 8월 공개하였고, 2009년 최초비행을 성공리에 마쳤다. Fig. 3은 B787의 구성 성분의 분포를 나타낸 것으로 복합재료가 50%, 알루미늄 20%, 티타늄 15% 등으로 구성되어 있음을 보여주고 있다.

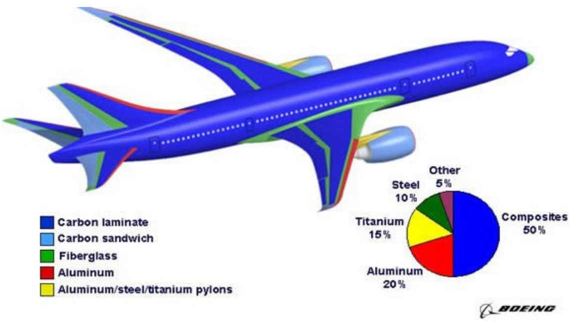

Fig. 3. CFRP usages for Dream Liner B787 parts[5]

이러한 탄소섬유 복합재료를 사용하는 비행기는 이외에도 러시아, 중국, 브라질, 캐나다 등에서 2013, 2014년을 목표로 각각 개발 중이다. 캐나다의 Bombardia Learjet 85는 구조 부품을 모두 복합재료를 사용할 계획인데, 미루어 보아 고급 탄소섬유를 사용할 것으로 추정되며, 2013년 납품을 개시할 예정이다[14].

항공기외에 우주용으로도 탄소섬유는 매우 훌륭한 특성을 나타내고 있다. 고압에 견디어야 하며 무게는 가벼워야 하는 발사체 로켓에 탄소섬유는 이상적인 재료이다. 때문에 금속재료에서 탄소섬유 복합재료로 바뀌는 추세이다[15]. 특히 로켓 모터 케이스에 초기에는 유리섬유를 사용하였으며. 그 후 아리미드계의 케블라가 사용되었고, 최근에는 탄소섬유가 주를 이루고 있다. 주요 국가의 로드맵 상에도 탄소섬유의 사용을 예고하고 있다[16~32].

일본의 대표적인 항공 우주 발사체에 사용한 탄소섬유를 살펴보면, 즉 H-IIA 로켓의 맨 위 상단은 CFRP가 사용되었으며, 몸체 중간 위쪽 부분은 샌드위치 CFRP로 그리고 하부의 로켓 부스터의 모터 케이스는 모두 CFRP로 만들었다.

탄소섬유 복합재료 연소관을 사용한 대표적인 대형 발사체를 보면, DELTA 2, TITAN, H-II, 그리고 상업용에는 EELV ATLAS 5, DELTA 4 발사체 등이 있고 유럽의 Ares 5가 있다[15~32].

우주 발사체 추진기관의 최근 로드맵 상에 나타난 첨단 고체 추진기관의 기술의 하나로 필라멘트 와인딩 모터 케이스가 포함되어 있음을 볼 때 탄소섬유를 이용한 추진기관은 점차로 증가할 것이다. 금속재 케이스에 비하여 압력과 내부 부피의 곱으로 표시되는 모터케이스 효율 값이 5배에 달하여, 자연적으로 고강도의 탄소섬유 복합재료로 이동할 것이라 밝히고 있다.

우주용으로 사용하는 강화 탄소섬유는 탑재물에도 사용되고 있다. 특히 우주용 카메라는 당연히 가볍고 견고해야 하며 안정성이 필요한데, 이러한 측면에서 카메라 틀에 새로이 적용되기 시작하였다[33]. 또 원격 측정 장치 프레임 등에도 계속적으로 사용 용도가 늘어날 것이다.

이상 간단히 살펴본 우주용에 적용되는 탄소섬유는 구체적으로 표시되고 있지 않으나, 특성상 T800은 물론이려니와 개발되고 있는 최고급, 최상의 탄성률과 인장강도 등을 갖고 있는 탄소섬유를 필요로 하는 분야일 것이다.

다. 선박에 적용

선박에는 2차 세계 이후부터 단단하고, 강하며 내구성이 있고 수리가 쉬워 군용 보트에 복합재료를 적용하기 시작하였다. 1960년대 베트남 전쟁 때까지 약 3000대의 소형 군용 보트 등에 이를 적용하였는데, 유리섬유 복합재료가 주로 사용되었다[34].

미 해군은 소형 선박의 갑판, 돛대, 구축함의 파이프라인, 잠수함의 수로(Fairwaters)와 케이스 등에도 복합재료를 사용하였다. 그 외에도 프랑스 해군, 노르웨이, 스웨덴, 네덜란드 해군 등에서도 복합 재를 사용하였는데, 이것은 특히 녹 등 부식에 좋은 특성을 갖고 있는 것도 큰 이유이었다.

초계정(Patrol Boat)에 탄소섬유가 사용되기 시작하였는데, Royal Norwegian 해군에서는 처음으로 대형 해군 초계정을 전부 복합재료로 만든 Skjold를 구축하였다. 전체를 유리섬유와 탄소섬유 샌드위치 복합재료로 만들었고, 1999년 임무를 시작하였다. 특히 탄소섬유는 전기 자장 차폐 효과를 주어 상부 구조물에 효과적으로 사용하였다[34].

스웨덴의 Royal Swedish Navy에서도 1980년대 후반에 30m 길이의 대형 초계정을 구축하였고, 초고속 호위함으로 알려진 Visby Corvette는 길이 72m로, 탄소섬

유와 유리섬유 혼합으로 구축되었다. Visby가 선체에 탄소섬유를 많이 사용한 최초의 해군 배로 알려졌으며, 2000년에 진수되었다.

선박에 사용하는 부품에도 탄소섬유 복합재료를 사용하는 곳이 점차 확대되고 있다, 프로펠러 블레이드, 샤프트 등 프로펠러 시스템과, 선박의 격벽, 문 등 구조물 전체가 용처가 되고 있다.

미 해군의 Navy Newsstand 2007년 2월 7일자로 공표된 자료에 의하면 미 국방성의 OFT(Office of Force Transformation)가 설계하고 조립한 Stiletto가 강변과 얕은 물에서 운용하도록 한 미국 내 최초의 대형 탄소섬유 배라고 한다. Fig. 4에 나타나 있듯이 m자 형태를 갖고 있는데, 캘리포니아 연안의 합동군사 훈련에 투입되었다[35].

Stiletto Experimental ship with carbon fiber M-hull design tops 50 knots (60mph)

Fig. 4. Stiletto of USA Navy[35]

이외에 최근에는 레저 산업용 보트나 선박에도 탄소섬유의 사용은 가볍고 좋은 탄성과 함께 좋은 비 강도로 인하여 많이 적용되고 있다. 즉 카누(Canoe)에서 요트, 범선에 이르기까지 모든 보트 종류에 적용되고 있다. 특히 이러한 배들이 고급화 되면서 고급 탄소섬유의 사용은 증가될 것으로 보인다.

라. 시설 및 기타 분야

부하 증대가 요구되는 오래된 건설물의 리트로피트에 탄소섬유 강화 플라스틱이 사용되고 있다. 특히 오늘의 부하를 예상하지 않고 설계되었던 교량 등이 이에 해당되며, 손상된 구조물이나 지진에 손상을 입은 것들을 보강하는데 쓰인다[7,36]. '지진 리트로피트(Seismic Retrofit)'가 지진 발생 빈도가 높은 지역에는 적용되는 방안으로 CFRP는 전단력 강도를 증가시켜 주고, 단면을 쌓아줌으로서 연성(Ductility)이 증대되어 지진으로 부터 오는 붕괴에 견디는 힘을 크게 증가 시키고 있다.

또 최근 용도가 증가되는 분야 중에 하나는 풍력 발전용 블레이드이다. 블레이드가 대형화되고 회전이 클수록 CFRP의 사용이 바람직하여, 철제 블레이드에서 탄소섬유 블레이드로 대체되고 있다. 이와 함께 해양 석유 시추 작업에도 적용하고 있어 에너지 산업 분야에도 활용이 증대되고 있다. 즉 심해 해저의 고 압력에 견뎌야 하는 유전용 송유관, 로드, 로프 등이 기존의 철제 제품에서 고강도 고탄성의 탄소섬유 제품으로 대체되어 사용되고 있다[7].그 밖에 운동기구와 음악에 사용하는 악기에도 탄소섬유가 사용되고 있다. 아이스 학키의 스틱, 테니스 라켓, 낚시 대, 골프 클럽 등은 고급 제품일수록 탄소섬유 사용이 늘어나고 있고, 이와 함께 크게 사용도가 늘고 있는 분야가 자전거이다. T800급 이상의 탄소섬유로 만들고 있는 자전거 프레임에서부터 디스크 휠도 탄소섬유 제품으로 만들고 있다.

4. 내열 삭마(Ablation)용 탄소섬유

탄소섬유 복합재료가 주로 구조적 보강 기능을 가지고 활용되는 것이 일반적이지만 내열 재료로도 그 활용성이 다양하다. 특히 로켓 모터의 노즐에는 탄소섬유를 이용하여 열을 차단하고 있는데, 노즐 부위에는 고온 고압 고속의 가스가 흐르고 있어, 그 접촉면이 고온이 되면서 동시에 고속 유동에 의한 기계적 마손이 발생한다. 이때 소량의 표면 물질을 소모해 가면서 유입되는 많은 열에너지를 소산시키고 표면 형상을 유지해야 하는 역할이 필요한데, 탄소섬유 복합재료가 이에 적합한 소재 중의 하나 로 많이 사용되고 있다. 탄소섬유를 이용한 노즐 부위의 제작은 주로 프리프레그에 의한 테이프를 사용하는 방법이 활성화되어 있으며, 테이프를 감는 형상은 여러 가지가 있으나 가장 성능이 좋게 나타나는 방법은 로제트 패턴으로 알려져 있다.

탄소섬유를 이용한 열 차폐는 우주 비행체 등의 대기권 재진입 시에도 많이 사용되고 있다. 한편 탄소/탄소 복합재료는 항공기, 우주선의 브레이크 디스크로도 개발하여 사용하고 있다[14,37]. 또 산업용으로 진공로(Vacuum Furnace)나 화학 반응기의 내화벽에도 사용되

고 있다[38].

현재의 항공기는 비행속도가 시속 100마일에서 음속 가까이까지 비행하고 있어 이러한 속도에 적응할 수 있는 보조익(Flap)이 필요하고, 이러한 플랩의 구동 장치에 마찰 디스크가 사용되는데, 이 마찰 디스크에도 탄소/탄소 복합재료를 사용하고 있다. 미국의 Newmet Composite 회사에서 비행기 플랩 잼(Flap Jam) 시스템에 탄소/탄소 디스크를 적용하여 생산하고 있다[39].

이와 같이 비행기 브레이크 디스크에도 사용되고, 내 융삭, 내 삭마용으로 쓰이는 탄소섬유와 유도 무기의 추진기관의 모터케이스나 비행체 첨두 부 등에 사용되는 탄소섬유는 방위산업 기술과 직결되는 기술로, 기술 보호 차원에서 협력과 이전이 매우 어려운 분야이다. 최상의 탄소섬유가 적용되는 영역으로 시장 규모가 크지 않지만 기술 개발의 관심과 지원이 필요한 분야이다.

5. 결 론

탄소섬유는 소재가 가져야 할 장점, 즉 가볍고 강하며, 내 침식성과 고탄성률 등을 두루 가지고 있어 그 활용 범위가 최첨단 기술을 요하는 항공우주에서 부터 자동차, 선박, 철도 등 주요 운송기관을 포함한 산업 전반과 고급 스포츠용품, 자전거 등 모든 분야로 용도가 확대되고 있다. 탄소섬유의 시장은 탄소섬유의 새로운 개발과 생산 가격의 현실화로 시장 전망은 더 커질 것이 자명해 보인다. 세계 굴지의 탄소섬유회사인 도레이 회사에서는 탄소섬유 세계 시장 전망을 2011년에 연 6만 톤 소요에서 10년 후인 2020년에는 두 배가 넘는 12만 톤으로 급속한 증가를 예측하고 있다. 경제분석 전문회사인 루신텔에서 발표한 자료에서도 탄소섬유는 제작 기술의 발달로 생산 가격이 낮아지게 되고 따라서 좋은 기계적 특성에도 불구하고 가격으로 인하여 적용하지 못했던 많은 분야의 사용 증가로 수요가 기하급수적으로 증가될 것으로 예상하고 있다. 특히 상질의 탄소섬유가 자동차, 자전거, 선박, 고급 스포츠용품 등으로 사용범위가 늘어날 것이며, 기술 발전과 생산가와 연계되어 시장은 크게 확대될 것으로 보인다. 한편 탄소섬유는 소재의 특성상 미사일과 같은 방위 산업에 적용되고 있어 기술 이전은 물론 제품의 수입 자체도 어려워, 미국, 일본, 유럽 등의 선진국에서 고 품질인 경우, 즉 첨단급 탄소섬유는 수출도 규제하고 있다. 따라서 방위 산업을 포함하여, 항공우주, 잠수정 등의 선박, 극한 조건에 적용할 수 있는 로봇의 개발, LNG 탱크를 포함한 고압 저장용 탱크, 풍력 발전 블레이드 등 21세기의 고 부가가치 산업에 적용할 수 있는 첨단급 탄소섬유의 자체 생산 기반기술이 개발되어야 할 것이다.

학술 동향 분석

추가로 탄소섬유의 응용과 관련된 학술활동을 ISI Web of Knowledge 플랫폼의 Web of Science를 활용하여 비교적 최근 연도인 2000년부터 현재(2011.10)까지 발표된 탄소섬유의 응용에 관한 학술 연구 동향 정보를 조사하였다. “carbon fiber” and “aircraft”와 같이 응용분야를 포함하는 토픽으로 검색하였다. 전체적인 학술 정보 분석은 전술한 것과 같이 탄소섬유와 응용분야를 and로 묶은 항목을 모두 열거한 검색 결과를 모집합으로 하여 조사하였다. 검색 결과 비행기, 항공우주 분야에는 비교적 활발한 학술 활동이 나타나고 있으나, 자전거를 위시하여, 배나 보트 그리고 운동용품과 관련된 낚시 대나 테니스 라켓, 골프 클럽 등의 분야에는 학술적으로는 발표가 드물게 나타나고 있다.그러나 탄소섬유와 콘크리트 관련 논문은 검색 결과 많이 나타나고 있다.

일반적으로 수요를 근거로 한 3개 분야별 예측 전망에는 자동차를 포함한 산업분야가 가장 큰 수요가 되고 항공우주, 운동용품 등으로 예측하고 있는데[40], 학술활동도 이와 같은 경향이지만, 단일 분야로는 토목분야인 콘크리트와 관련된 학술 활동이 제일 활발하였다.

검색 결과 개별 분야별로는 비행기 분야 104건, 우주 분야가 130건이었다. 나머지 분야에서는 자동차, 블레이드, 엔진 등은 20 여건을 전후로 또 자전거, 보트, 낚시대등의 운동용품과 관련한 학술활동은 수건 정도로 나타나고 있다.

검색된 총 논문 수는 2,878편을 한국과학기술정보연구원의 “수요자 맞춤형 연구개발 조기경보체제 구축(K-10-L02-C02-S02)”으로 개발한 정보 분석 시스템을 활용하여 분석하였다. 탄소섬유 관련 논문의 저자 국적을 분석한 결과 세계적으로 75개 국가에서 관련 연구가 수행되는 것으로 나타났다. 이들 국가 중 상위 10개국이 전체의 89%를 차지하며, 10개국의 분포를

Fig. 5에 표시하였다. 미국이 809편의 논문을 발표하여 10개국 중 32%를 점유하며 가장 많은 논문을 발표한 것으로 나났으며, 영국 329편(13%), 중국이 329편(13%)의 논문을 발표하여 공동 2위를 차지하고 있다.

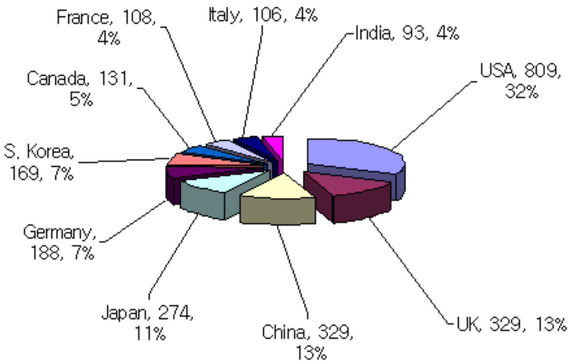

Fig. 5. Top 10 countries which are published papers

우리나라의 발표 현황은 10대 국가 중에 6위에 올라있어, 현재 국내에 탄소섬유 생산 공장도 하나 제대로 갖고 있지 못한 상황을 감안하면 학술활동은 활발한 편이다. 원자재를 수입하여 활용하는 여건에서도 적용성과 관련하여 연구 개발은 나름대로 수행하고 있는 것으로 판단할 수 있고 앞으로 생산 공장의 가동과 함께 탄소섬유에 대한 응용과 학술 활동도 더욱 확대되리라 본다.

Table 2. Paper citation index of the countries

Nation	Paper No.	Citation No./Paper	Index Level
Germany	188	18.676	1.534
USA	809	16.973	1.394
Japan	274	14.803	1.216
Canada	131	14.336	1.178
France	108	14.009	1.151
South Korea	169	12.757	1.048
UK	329	12.018	0.987
China	329	7.824	0.643
India	93	7.312	0.601
Italy	106	6.255	0.514

Table 2는 논문의 인용지수를 나타낸 것이다. 국가별 논문의 수준 지수 분석 결과 독일이 가장 높은 값(1.534)을 보여 논문의 피인용 관점에서 질적 수준이 가장 우수한 것으로 나타났다. 평균 이상의 수준을 보이는 국가는 독일(1.534), 미국(1.394), 일본(1.216), 캐나다(1.178), 프랑스(1.151), 한국(1.048)으로 나타나고 있다.

한국의 수준 지수는 1.048을 기록하였으며, 이는 한국의 질적 수준이 세계 평균 이상임을 의미한다. 수준 지수는 전체논문 피인용수에 대하여 해당국가의 피인용 수의 비로 피인용 수에 기반을 둔 질적 수준 평가이다.

탄소섬유 관련 논문의 저자 소속기관을 분석한 결과 Chinese Academy Science가 39편의 논문을 발표하여 전체 2,878편의 논문 중 1.36%를 점유하며 가장 많은 논문을 발표한 것으로 나타났다. Tokyo Institute Technology는 36편(1.25%), NASA는 34편(1.18%)의 논문을 발표하여 각각 2, 3위를 차지하였다. 한국 기관

Table 3. Paper citation index of the institutes

Institute	Paper No.	Citation No./Paper	Index Level
Korea Advanced Institute Science & Technology	26	53.5	4.395
Univ Bristol	25	37.64	3.092
Univ London Imperial College Science Technology & Med	26	25.038	2.057
NASA	34	23.353	1.918
Tokyo Institute Technology	36	11.639	0.956
Michigan Technology Univ	28	9.607	0.789
Indian Institute Technology	32	7.406	0.608
Chinese Academy Science	39	7.385	0.607
Univ Sheffield	25	6.64	0.545
Harbin Institute Technology	26	3.192	0.262

중 가장 많은 논문을 발표한 기관은 Korea Advanced Institute Science & Technology로 26편(0.9%)의 논문을 발표하여 6위를 차지하였다. 인용 지수 분석 결과 Korea Advanced Institute Science & Technology가 가장 높은 값(4.395)을 보여 논문의 피인용 관점에서 질적 수준이 가장 우수한 것으로 나타났다. 이 분야 평균 이상의 수준을 보이는 기관으로는 Korea Advanced Institute Science & Technology(4.395)를 비롯하여, Univ Bristol(3.092), Univ London Imperial College Science Technology & Med(2.057), NASA(1.918) 등의 순으로 나타났다.

Table 3은 기관별 수준 분석을 조사하여 나타난 상위 10개 기관을 표시한 것이다.

후 기

본 연구는 한국과학기술정보연구원(KISTI)이 교육과학기술부 과학기술진흥기금으로 수행하는「2011 ReSEAT 프로그램」에 의해 수행되었습니다.

References

[1] http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_(fiber)
[2] http://www.toraycfa.com/manufacturing.html
[3] http://www.torayca.com/history2.html
[4] http://www.torayca.com/techref/index.html
[5] http://www.carbonfiber.gr.jp/english/index.html
[6] http://www.carbon-fiber.com/ (Vince Kelly)
[7] http://www.toraycfa.com/application.html
[8] Mark Bruderick, Douglas Denton and Michael Schnelding, "Carbon Fiber Composit Body Structures for the 2003 Dodge Viper", Daimler Chrysler Cooperation and Michael Kiesel, Quantum Composites Inc.
[9] http://www.reinforcedplastics.com/view/5799/toyotas-lexus-lfa-to-use-toho-tenax-carbon-composites/ (Toyota)
[10] http://www.toray.com/news/carbon/nr100428.html (독일 다임러 자동차)
[11] Amanda Jacob, "BMW Counts on Carbon Fibre for its Megacity Vehicle", Reinforced Plastics, Vol. 54, pp. 38～41, 2010.
[12] http://www.spiegel.de/international/business/0,1518,736296,00.html (BMW)
[13] http://www.airliners.net/aircraft-data/stats.main?id=29 (A380)
[14] http://www.compositesworld.com/articles/learjet-85-composite-pressurized-cabin-a-cost-cutter (Bombardia)
[15] Jean-Francois Guery, "Solid Propulsion for Space Applications : An Updated Roadmap", Acta Astronautica, Vol. 66, pp. 201～219, 2010.
[16] "Scout Launch Program", NASA.
[17] Michael R. Lara, "ATK Space Propulsion Products Catalog", Alliant Techsystems Inc., 2008. 5.
[18] A. A. Vicario, "Composite in Missiles and Launch Vehicles", Alliant Tech System, Comprehensive Composite Materials, Elsevier Sciences Ltd., 2000.
[19] http://www.nasa.gov/centers/langley/news/factsheets/Scout.html
[20] D. Schweikle and J. Simpson, "The Expanded Delta Launch Vehicle Family with a Status on the New Delta IV", Acta Astronautica, Vol. 48, pp. 451～459, 2001.
[21] http://www.voughtaircraft.com/heritage/special/html/sscout1.html
[22] Ed Casillas, "System Engineering & Trades Large SRM Space Launch Booster Applications", AIAA 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Hartford CT, 2008.
[23] M. J. Fisher and T. L. Moore, "Composite Rocket Motor Case Technology for Tactical Missiles", CPTR 77, 2004. 8.
[24] Bob Geisler, "A Comprehensive Introduction to Solid Rockets Overview", AIAA SRTC 2008 Short Course Advanced Solid Rockets, 2008. 7.
[25] B. W. White, "The Polaris Missile", Space Exploration, 2001. 7.
[26] "Polaris : A Further Report on the Fleet Ballistic Missile System", Flight International, pp. 751～757, 1963. 7.
[27] Correll, John T., "How the Air Force Got the ICBM", Air Force, 2005. 7.
[28] "Poseidon C3", Missilethreat. com, Missile of the Home
[29] http://www.ssp.navy.mil/fb101/themissiles.shtml

[30] P. R. Evans, "Composite Motor Case Design", AGARD Lecture Series No. 150, Design Methods in Solid Rocket Motors, 1988

[31] Jim Fleming, "Key Technologies for Future Missile Propulsion Systems", 5th World Missile Summit, London, 2002. 10.

[32] Mark J. Shuart, "Advanced Composite Structures and Materials Technologies for Launch Vehicles", International Eminent Speaker Series(Australian Division), 2011. 3.

[33] Quangfeng Guo and, Wei Lei, "Application of Carbon Fiber Composite in Space Camera Frame", Advanced Material Research Vol. 194～196, pp. 1558～1563, 2011.

[34] A. P. Mouritz and, E. Gilbe, "Review of Composite Structures for Naval Ships and Submarines", Composite Structures, Vol. 53, pp. 21～41, 2001

[35] http://www.globalsecurity.org/military/library/news/2007/02/mil-070207-nns08.htm (stiletto)

[36] Yasmeen Taleb Obaidat, "Structural Retrofitting of Reinforced Concrete Beams using Carbon Fiber Reinforced Polymer", Lund University, Sweden, 2010. 5.

[37] Rob Black and Robert A. Fredrick, "AIAA SRTC 2008 Short Course Advanced Solid Rocket", 2007. 7.

[38] G. A. Kravestikii, V. V. Rodionova, S. A. Kolesnikov and, A. N. Gordeev, "Increase in the Refractoriness of Carbon Composite Materials with Use of Heat-resistant Ceramic Coatings", Refractoriness and Industrial Ceramics, Vol. 49, pp. 309～313, 2008.

[39] W. Buchgraber, "Carbon/carbon Composite Friction Disc for Aerospace", Mat-wiss. Werkstofftech. Vol. 34, pp. 317～3321, 2003.

[40] http://www.toray.com/ir/pdf/lib/lib_a136.pdf (Toray strategy)