

탄소섬유 제조방법 및 응용분야

서민강 · 박수진

1. 서론

탄소섬유란 탄소원소의 질량 함유율이 90% 이상으로 이루어진 섬유상의 탄소재료로서 폴리아크릴로니트릴(Polyacrylonitrile, 이하 PAN), 석유계·석탄계 탄화수소잔류물인 피치(Pitch, 아스팔트) 또는 레이온으로부터 제조된 섬유형태의 유기 전구체물질(Precursor, 탄화시키기 전의 물질)을 불활성분위기에서 열분해하여 얻어지는 섬유를 의미한다.¹⁻⁵

탄소섬유는 구성원소에 있는 탄소재료로서의 구조 및 조직특성과 섬유형태 특성을 합친 재료로서 내열성, 화학적 안정성, 전기 열전도성, 저열팽창성에 따른 치수안정성, 저밀도, 마찰 마모특성, X선 투과성, 전자차폐성, 생체친화성, 유연성 등의 우수한 특징을 지니고 있으며, 활성화(activation) 조건에 따라서는 매우 우수한 흡착특성 부여도 가능하다.⁶⁻¹⁰ 탄소섬유를 특성과 제조법으로 분류하면, 고성능 탄소섬유는 인장강도 및 인장탄성률과 같은 재료의 역학적 특성을 중시한 선진 복합재료 강화용 섬유이며, 특히 인장탄성률이 300 GPa 이상의 섬유를 흔히 Type I의 고탄성률(HM, 탄소원소 함량 99% 이상) 탄소섬유라 하고, 인장강도가 4.0 GPa 이상의 섬유를 Type II의 고강도(HT, 탄소원소 함량 92% 이상) 탄소섬유로도 불리며, 그 차이는 열처리 온도 등과 같은 제조방법에 따라 달라질 수 있다.¹¹⁻²⁰

1950년대 미국과 구 소련의 우주 개발 경쟁에 힘입어 본격적으로 개발되기 시작한 탄소섬유는 철보다 1/5 가볍고 강도는 10배 강하며 내충격성 및 내열성이 뛰어난 고강도/고탄성 첨단소재로서 항공·우주, 방산 및 반도체 등 고부가가치 복합재료 핵심소재로 사용되어 왔다. 하지만, 탄소섬유는 1990년대에 들어와서 세계 정치의 냉전체제가 종료됨에 따라 군사, 항공·우주 용도에 있어서 첨단 복합재료의 수요 정체가 발생하여 침체기를 겪었으며, 섬유산업에서 차지하는 비중 또한 유리섬유에 비해 매우 작아 그 용도에 있어서도 스포츠·레저산업 등과 같은 2차 소재로서만 사용되어왔다. 그러나, 최근에는 탄소섬유의 경량, 고강도, 고내열성 특성 등을 살릴 수 있는 착실한 용도 개발의 노력에 힘입어서 건축, 콘크리트 구조물·내진 보강 등의 토목·건축 분야, CNG 탱크, 풍력 발전용 블레이드, 원심 분리 로터, 플라이 호일 등의 대체 에너지·클린 에너지 분야, 선박, 차량 등의 고속 운송 기기분야, 해양 개

발·심해저 유전 채굴 분야, 기기의 고성능화, 의료 복지 기기, 전기 전도 용도, 초내열 용도 등 우주·항공분야에서부터 건설산업에 이르기까지 다양한 산업 분야에 대한 적용분야의 폭넓은 확대 및 성장 가능성이 높아지고 있는 상황에서 탄소섬유 그 자체가 가지고 있는 독보적인 특징을 살려 철, 알루미늄 등을 대체 가능한 제3의 범용재료로서 새로운 시대의 기반을 만드는 재료로 성장하고 있다.²¹⁻²⁵

하지만, 국내의 탄소섬유 시장은 대부분 스포츠 용품 분야에 치중되어 있으며, 일부 PAN계 탄소섬유 프리프레그 생산을 제외한 국내 수요의 탄소섬유 전량을 일본에서 수입하여 사용하고 있는 실정이다. 따라서, 탄소섬유의 국내 생산 기술 확보와 함께 다양한 산업 분야, 특히 앞으로 시장 확대가 커질 것으로 예상되는 토목·산업 분야에 적용할 수 있는 기술 개발에 대한 노력과 중국을 비롯한 세계 여러 나라와의 경쟁에서 살아남기 위한 원가 절감, 영업력 강화 등의 노력이 요구된다.

이러한 국내 탄소섬유 시장의 개선과 기술 개발에 대한 노력이 효율적으로 이루어지도록 하기 위하여, 본 특집에서는 탄소섬유에 대한 전



서민강

1997 전북대학교 섬유공학과(학사)
2003 전북대학교 섬유공학과(박사)
2008~2010 인하대학교 화학과 연구교수
2010~ 현재 전주기계대학교 탄소섬유개발팀장



박수진

1986 아주대학교 화학공학과(학사)
1992 프랑스국립과학연구원(박사)
1995 삼성전기(주) 선임연구원
2005 한국화학연구원 책임연구원
2006~ 현재 인하대학교 화학과 교수

Manufacturing Method of Carbon Fibers and Their Application Fields

전주기계대학교 (Min-Kang Seo, Jeonju Institutes of Machinery and Carbon Composites, 750-1, Palbok-dong, Deok-jin-gu, Jeonju 561-844, Korea)

인하대학교 화학과 (Soo-Jin Park, Department of Chemistry, Inha University, 253, Yonghyun-Dong, Nam-gu, Incheon 402-751, Korea) e-mail: sjpark@inha.ac.kr

반적인 이해와 제조방법, 그리고 이를 이용한 용도 개발 및 앞으로의 시장전망에 대해 간략하게 기술하고자 하였으며, 또한 탄소섬유와 관련된 특허 정보를 중심으로 1974년부터 2007년까지 지난 30여년간의 국가 및 기술 분야별 기술 흐름의 추이와 최근의 기술 개발 동향을 파악하고자 하였다.

2. 탄소섬유

2.1 탄소재료 정의

탄소재료란 탄소 육각면체가 적층체 결정자로 이루어져 있는 다결정체를 말하며, 탄소재료에 있어서 구조란 적층의 방향과 완전성에 관하여 결정자의 크기가 정해지는 것을 의미한다. 일반적인 탄소재료에 있어서 탄소원자는 sp , sp^2 , sp^3 의 혼성궤도로 결합상태를 이루고 있다. 결정은 **그림 1**에서 보이는 흑연과 같은 구조로 면과 면간에는 van der Waals와 같은 물리적으로 약한 힘이 작용하며, 한 면상에서의 상호 탄소원자간에 강한 2차원적 화학적 공유결합을 형성하거나, sp^3 구조의 다이아몬드에서는 3차원적 공유결합을 형성한다. 따라서, 적층 및 난층 구조(turbostatic structure), 결정자의 방향성, 면방향 조직, 축배향 조직, 점배향 조직, 무배향 조직 등에 따라서 여러 가지 탄소재료의 구조와 특성의 변화가 나타난다.²⁶⁻²⁸

2.2 탄소섬유 정의

탄소섬유는 거의 100% 탄소원자로 구성된 무기섬유로 「미세한 흑연 결정 구조를 가진 섬유상의 탄소 물질」을 말한다. 즉, 프리커서(pre-cursor)라 불리는 전 단계 섬유를 소성하여 탄소만을 남기는 방식으로 공업화를 하며, 프리커서의 종류에 따라, 레이온계, 피치계, PAN계로 분류되고, 그 중 PAN계가 압도적으로 많이 사용된다.^{1-4,29}

탄소섬유가 최초로 문헌에서 정의된 것은 1969년 미국의 R. Bacon과 W. A. Schlamon에 의해서이며, 이들은 “탄소섬유는 최고 1,000~1,500 °C의 온도에서 열처리한 섬유로서 전구체의 많은 잔류물을 가지고 있으나, 흑연섬유는 2,500 °C 이상으로 가열한 것으로 99% 이상의 탄소함량으로 되어 있다”고 정의하였다.

2.3 탄소섬유 분류

2.3.1 배경

탄소섬유에는 성능, 형태, 제조 방법 및 출발 원료에 따라서 다양한 제품이 있다. 따라서, 탄소섬유 제품도 공업 규모로 생산되고 있는 것에서부터 실험실 단계의 장래를 예측하기 어려운 것에 이르기까지 매우

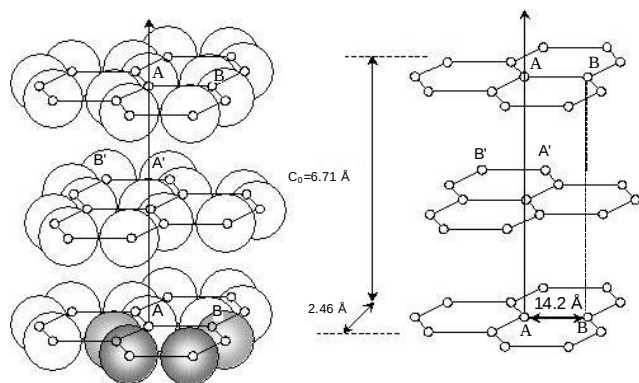


그림 1. 육각면체 흑연 구조도.

다양하다. 또한, 고성능 탄소섬유의 섬유 다발 굵기에 대해서도 과거에는 필라멘트 수가 1,000~12,000개인 스몰 토우(Small Tow, 혹은 Regular Tow)가 주류를 이루었으나, 최근에는 48,000~320,000인 라지 토우(Large Tow)의 중요성이 증대되고 있다.

이와 같이 다양하게 호칭, 분류되고 있는데 탄소섬유가 복합재료의 보강섬유로서 주목받아 발전해 왔기 때문에 탄소섬유의 기계적 성질, 특히 인장강도, 인장 탄성률을 이용하여 분류하는 경우가 많다. 일반적으로는 역학 특성에 기초한 분류와 원료에 기초한 분류가 병용되고 있다. 또한, 관용적인 호칭으로서의 범용 그레이드, 고성능 그레이드가 많이 애용되고 있다.

2.3.2 탄소화 온도에 의한 분류

(1) 방염섬유: 안정화 공정은 산화 또는 공기 분위기에서 일정한 장력을 가하면서 약 300~400 °C 내외의 온도 범위에서 행해지는 열처리 과정을 의미하는 것으로, 이와 같이 안정화 단계에서 얻어지는 불용 불용의 열경화성 섬유를 산화반응시켜 얻어지는 섬유를 방염섬유라 하며, 섬유의 구조를 안정화시킨다는 측면에서 안정화 PAN 섬유라고도 한다.

(2) 탄소섬유: 탄소섬유는 탄소화 온도 800~1,500 °C 부근의 온도에서 유기물질의 열분해에 의해 탄소만으로 구성된 직경 5~15 μm의 가열 처리한 섬유로서 $10^{-1} \sim 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$ 의 전기 비저항을 갖는다.

(3) 흑연섬유: 2,000 °C 이상의 온도에서 가열 처리하여 흑연화한 탄소섬유로서 $10^{-3} \sim 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 부근의 전기 비저항을 갖는다.

2.3.3 원료에 의한 분류

탄소섬유의 종류를 탄소섬유의 원료 물질, 즉 전구체의 종류에 따라 분류하여 보면 크게 네 종류로 나눌 수 있다.¹⁴

(1) 레이온계 탄소섬유(Rayon based carbon fibers)

(2) PAN계 탄소섬유(PAN based carbon fibers)

(3) 피치계 탄소섬유(Pitch based carbon fibers)

① 등방성 피치계 탄소섬유(Isotropic pitch based carbon fibers)

② 이방성 피치계 탄소섬유(Mesophase pitch based carbon fibers)

(4) 기상성장 탄소섬유(Gas phase grown carbon fibers or Vapor grown carbon fibers)

2.3.4 탄소섬유의 관용적 분류

(1) 범용 탄소섬유(General Purpose Grade CFs: GPCFs): 이 분류에 속하는 탄소섬유는 인장강도 1,000 MPa, 인장탄성률 100 GPa 전후의 기계적 성질을 가지며 저탄성률형(Low Modulus Type, LM형) 탄소섬유라고도 불리며 고성능 그레이드에 비해 저렴한 가격이라는 장점이 있다.

(2) 고성능 탄소섬유(High Performance Grade CFs: HPCFs): 고성능 탄소섬유는 범용 탄소섬유와 구별하여 고강도(High Tensile, HT), 중탄성률·고강도(Intermediate Modulus, IM), 고탄성률형(High Modulus, HM) 탄소섬유를 통틀어서 말하는 것으로, 기계적 특성이 고성능이라는 의미로 붙여진 이름이다(**그림 2**). 이 HPCFs는 항공기용 CFRPs의 강화재로 많이 쓰이고 있다.

① 고탄성률형 탄소섬유(High Modulus Type CFs, HM형): 인장탄성률 350 GPa 이상의 탄소섬유를 의미한다. 한편, 고탄성률형 탄소섬유보다 탄성률이 더 높은 섬유를 초고탄성률형 탄소섬유(Ultra High Modulus Type CFs, UHM형))라고 하며 일반적으로 인장탄성률이 600 GPa 이상인 탄소섬유를 말한다.

② 고강도형 탄소섬유(High Tensile Type CFs, HT형): 인장탄

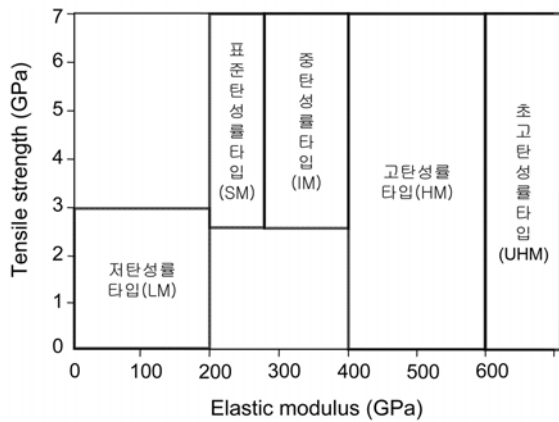


그림 2. 탄소섬유의 기능적 분류.

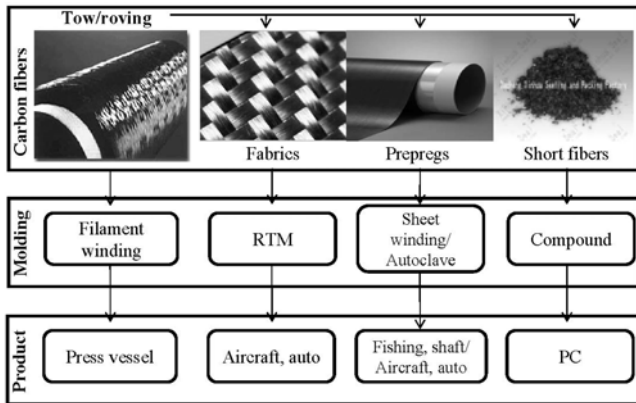


그림 3. 탄소섬유의 제품 형태 및 이에 따른 용도.

성률 220~260 GPa, 인장강도 3,000 MPa 이상인 탄소섬유를 말한다. 이 HT형 탄소섬유는 PAN 전구체를 가열·탄소화하여 만든 것으로 CFRP의 강화재로 많이 쓰이고 있다. 한편, 인장강도가 6,000 MPa 이상인 탄소섬유를 초고강도형 탄소섬유(Ultra High Tensile Type CFs, UHT형)라고 부른다.

③ 중탄성률형 탄소섬유: 일반적으로 인장탄성률 300 GPa, 인장강도 5,000 MPa 이상인 탄소섬유를 말한다.

2.4 탄소섬유의 형태

일반적으로 탄소섬유의 직경은 5~7 μm 로, 탄소섬유를 실제로 사용하는데 있어서 가공 방법이나 최종 제품의 모양 등의 이유로 여러 가지 형태가 요구된다. 그림 3에 탄소섬유의 제품 형태 및 이에 따른 용도를 나타내었다.

2.4.1 연속섬유

(1) 필라멘트사(Filament Yarn): 다수의 필라멘트로 구성된 실로서 꼬거나 꼬지 않은 실, 꼬았다가 풀 실 등이 있다. 특히, 많은 필라멘트로 구성된 섬유 다발로서 꼬지 않은 것을 토우(Tow)라고 한다.

(2) 스몰 토우(레귤러 토우) 및 라지 토우: 꼬지 않은 연속 필라멘트 다발을 토우라 하는데, 탄소섬유는 개발 초기부터 필라멘트 수가 1,000~12,000인 것이 상품화되었다. 그 후, 탄소섬유의 비용 감소와 후 가공의 생산성 향상을 목표로 필라멘트 수가 48,000~320,000으로 대폭 확대된 필라멘트 다발의 생산이 주로 구미에서 이루어지고 있다. 이와 같이 큰 필라멘트 수의 다발을 통틀어 라지 토우라 하고, 종래의 생산품인 필라멘트 다발을 스몰 토우 혹은 레귤러 토우라 부르고

있다.

2.4.2 스테이플 섬유(Staple Fibers)

(1) 찹섬유(Chopped Fibers): 필라멘트사 또는 토우를 일정 길이로 절단한 형태의 탄소섬유를 찹섬유 또는 간단히 찹이라고 부른다. 이 찹섬유의 길이는 그 용도에 따라서 다르지만 일반적으로 100~1 mm 정도의 길이를 갖는 것이 표준이다.

(2) 분쇄섬유(Milled Fibers): 찹섬유 또는 필라멘트사를 분쇄하여 만든 분말상의 제품이다. 찹섬유보다 더 짧은 길이의 섬유가 필요할 때 수십에서 수백 μm 의 분말상인 분쇄섬유가 이용된다. 일반적으로 탄소섬유의 절단 길이는 1 mm 정도가 한계이기 때문에 이와 같이 분쇄하여 사용되고 있다.

2.4.3 직물류(Fabric)

(1) 직물(Woven Fabric, Cloth): 탄소섬유 필라멘트사 또는 스테이플사를 이용해서 제작한 것으로서, 보통의 섬유 직물과 마찬가지로 탄소섬유 직물을 제조할 수 있으며, 미리 제작한 전구체를 소성·탄소화하여 만들 수도 있다.

(2) 편조물(Braid): 편조물은 필라멘트사, 스테이플사를 관모양으로 짠 것이다.

(3) 펠트(Felt): 찹섬유를 초지법 또는 건식법으로 가공한 부직의 무방향성 펠트와 미리 펠트화한 유기질 전구체를 소성·탄소화한 펠트의 두 종류가 있다. 두 종류 모두 섬유 자신이 서로 뒤얹혀서 펠트 모양을 유지하고 있는 탄소섬유 100%의 제품으로 각각 다른 외관을 갖고 있다.

(4) 매트, 페이퍼(Mat, Paper): 펠트보다 더 얇은 것으로서 매트 및 종이 있다. 매트와 페이퍼는 찹섬유를 건식법으로 얇게 2차원으로 한 후 유기질 바인더를 이용해서 섬유를 가깝게 접착시킨 것으로 페이퍼와 유사한 외관을 갖는 제품이다. 페이퍼는 찹섬유와 유기질 바인더를 함께 사용하여 습식법으로 만든다.

2.5 탄소섬유의 제조

탄소섬유는 그림 4(a)처럼 polyacrylonitrile(PAN, (1))을 가열하여 제조한다. 먼저 PAN을 175 $^{\circ}\text{C}$ 정도까지 가열하면 (2)와 같이 고리구조를 형성하면서 까맣게 변하는데, 이 구조는 사다리 형태의 고분자(ladder polymer)라고 볼 수 있다. (2)를 더 가열하면, 산화반응에 의해서 방향족 고리 구조를 가진 고분자, 폴리퀴나자린(polyquinizarine) (3)으로 변환하며 이 고분자를 1,000~3,000 $^{\circ}\text{C}$ 까지 가열하면 흑연구조를 가진 탄소섬유(carbon fibers)가 만들어진다. 그림 4(b)에 탄소섬유를 제조하는 방법을 도식적으로 나타내었다.³⁰⁾

2.5.1 PAN계 탄소섬유

PAN계 탄소섬유는 그림 5에 나타난 프로세스와 같이 PAN계 섬유에 내염화 처리를 하여 안정화시킨 후, 불활성 분위기 하에서 탄화 소성 또는 흑연화 처리하는 방법으로 만들어진다.

PAN계 탄소섬유의 제조에 있어서 가장 중요한 공정은 내염화 공정이며, 이 공정에서 PAN 분자는 탄소화 반응을 제어하기 쉬운 피리미딘 고리를 주성분으로 하는 래더형 고분자로 된다. 내염화 섬유는 이 공정까지만 거친 섬유이다. 의복용 등에 이용되는 보통의 PAN 섬유는 그 자체로는 바람직한 래더형 분자 구조가 형성되기 어렵기 때문에 공중합 등의 수단으로 전구체 원료를 개질하여 사용한다. 이에 따라 섬유 성능이나 생산성도 향상된다. PAN 섬유는 보통 습식 또는 건식 방식으로 제조된다. 제법에 따라서 용제나 응고액 등은 달라지지만 이에 따른 특성의 차이는 거의 없다. 이어지는 탄소화 공정이나 흑연화

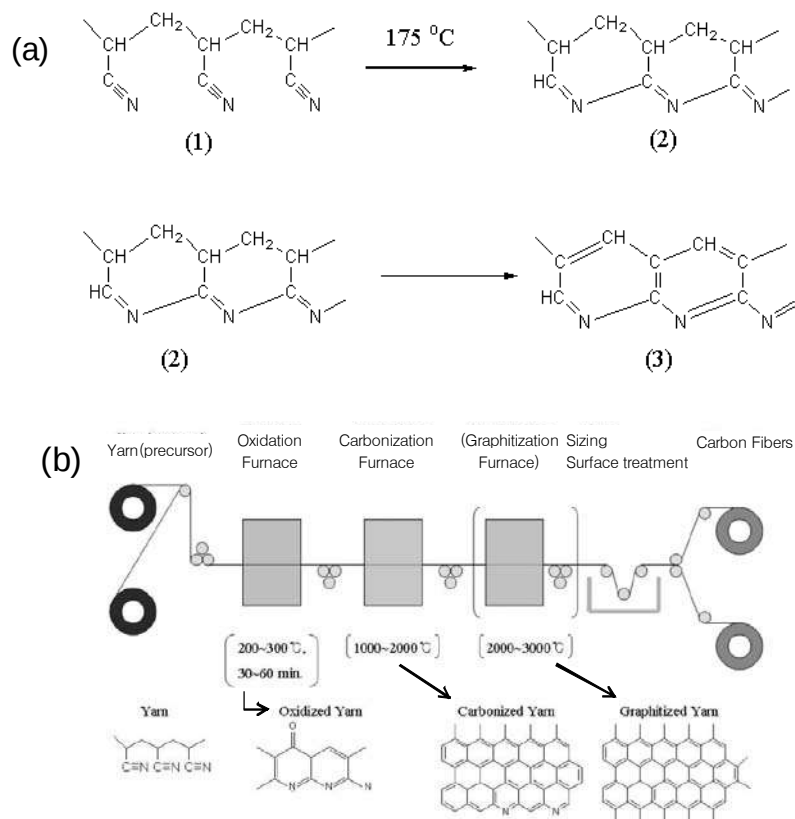


그림 4. 탄소섬유 화학반응 (a) 및 제조공정 개략도 (b).

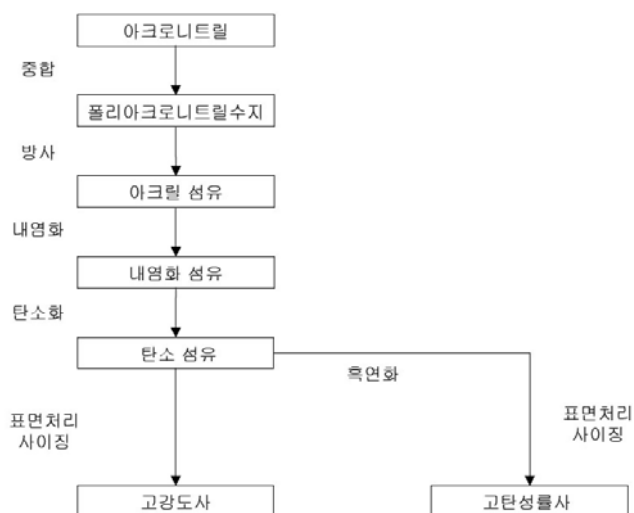


그림 5. PAN계 탄소섬유의 제조 공정.

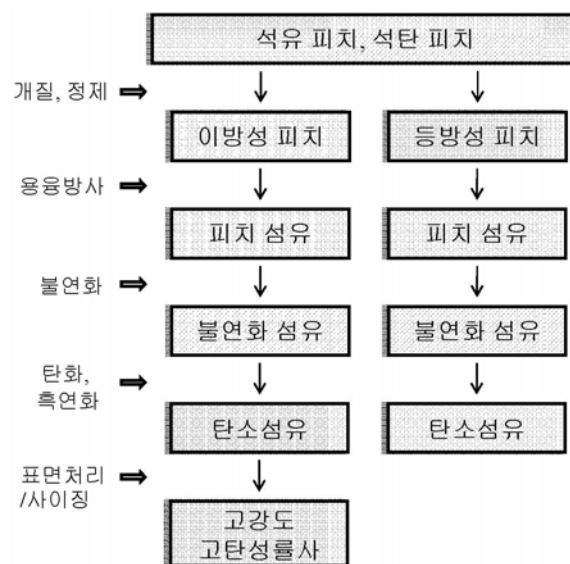


그림 6. 피치계 탄소섬유의 제조 공정.

공정에서 그 성질 (특히 강도, 탄성률)을 상당한 범위로 변화시킬 수 있기 때문에 용도에 따라서 각종 타입의 제품을 얻기 위한 다양한 연구가 이루어지고 있으며, 이것은 탄소섬유 제조업체의 노하우로 작용한다.

2.5.2 피치계 탄소섬유

피치계 탄소섬유의 제조 프로세스도 PAN계 탄소섬유 제조 프로세스와 유사하지만 PAN계와는 다른 면도 있다(그림 6). 축합 다환 방향족 탄화수소의 혼합물인 피치는 일반적으로 무정형이고 광학적으로 등방성이다. 일정 성상의 등방성 피치를 불활성 가스 분위기 하에서

적당한 온도(350~500 °C)로 가열하면 다양한 경로를 거쳐서 최종적으로는 광학적으로 이방성을 보여서 네마틱상의 피치 액정을 포함한 메소페이즈 피치 (이방성 피치 A)로 전환된다. 이방성 피치 A는 등방성 피치에 비해서 고분자량이고 연화 온도도 높기 때문에, 일반적으로 방사 온도를 높게 할 필요가 있다. PAN계에서는 공정을 변화시켜서 범용 탄소섬유와 고성능 탄소섬유를 제조할 수 있으나 피치계의 경우에는 전구체에 따라서 정해지며, 등방성 피치로부터는 범용 탄소섬유가, 이

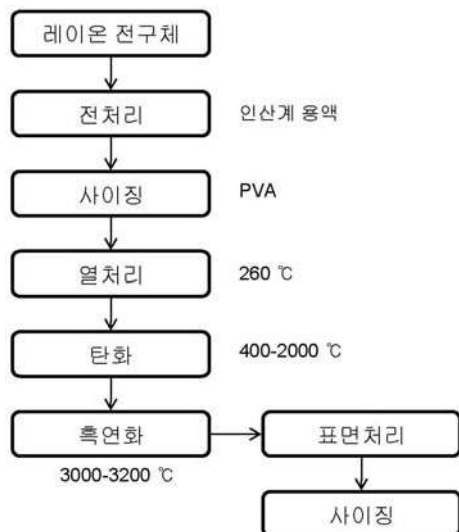


그림 7. 레이온계 탄소섬유의 제조 공정.

방성 피치(A 및 B)를 사용하면 고성능 탄소섬유가 얻어진다. 피치계 탄소섬유의 탄성률은 방향축 축합 고리 정도와 결정화 정도에 따라서 결정된다. 메소페이즈 피치계 탄소섬유는 원료 단계에서 결정성이 높고 흑연으로 되기 쉬운 구조를 갖고 있기 때문에 비교적 저온에서 단시간에 탄성률이 향상된다. 따라서, PAN계 탄소섬유에 비해 비교적 저가로 고탄성률 탄소섬유를 제조할 수 있다.

2.5.3 레이온계 탄소섬유

미국 유니온 카바이드는 1959년에 직물 모양의 탄소섬유를 상품화했지만, 그 제조법은 직물 모양 또는 펠트 모양의 레이온을 약 900 °C 까지 천천히 회분 방식으로 태운 다음 최고 2,500 °C 이상의 온도까지 가열하여 흑연화하는 방법이었다. 그러나, 레이온을 미리 인산 유도체나 질산염 등에 침지하여 팽윤시키는 화학처리를 한 후에 탄화시킴으로써 탄화에 필요한 시간을 단축시켜서 연속 프로세스가 가능해졌다(그림 7). 초기의 연속 섬유는 강도, 탄성률 모두가 낮았지만 2,500 °C 이상의 온도에서 연신시킴으로써 고탄성률(500 GPa)의 탄소섬유를 얻을 수 있게 되었다. 그러나, 프로세스가 고가이기 때문에, 그 후 PAN이나 피치를 원료로 하는 고탄성률 탄소섬유로 대체됨에 따라 생산이 중지되었다.

2.6 탄소섬유의 특성

2.6.1 탄소섬유 구조

그림 1에 나타난 흑연구조의 개략도에서는 탄소원자가 육각형의 꼭지점에 위치하면서 탄소의 기본층(base plane)을 형성하고 이것이 c-축 방향으로 ABA 형태로 적층되면서 육방정계의 결정계를 형성한다. 그러나, 탄소섬유의 경우에는 흑연과 달리 탄소층이 ABA 형태로 규칙적으로 적층되는 것이 아니라 c-축 방향으로 보면 일정한 규칙성을 찾기 어려운 난층구조(turbostratic structure)(그림 8)를 가지기 때문에 탄소층간의 거리는 흑연보다 클 수 있으나, 이와 같은 구조 이방성은 흑연의 역학적 성질이 그대로 반영되어 탄성률은 c-축 방향보다 a-축 방향에서 약 20배가 높다. 따라서, 탄소섬유 경우에도 섬유축 방향으로 평행하게 배열된다면 길이방향으로 뛰어난 역학적 성질을 보이며, 고탄성률 탄소섬유의 생산공정에서 반드시 기본층을 섬유축 방향으로 배향시키는 과정이 반드시 포함되어야 한다.¹

2.6.2 탄소섬유의 화학 조성

탄소섬유의 주성분은 탄소이며, 화학 조성은 PAN계, 피치계, 레이

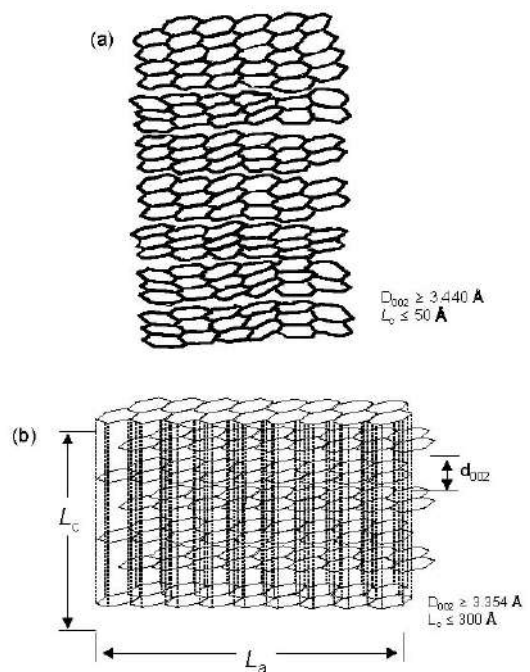


그림 8. Carbon turbostratic 구조 (a)와 3-D graphite lattice (b).

온계 등의 프리커서의 종류, 열처리 온도 등에 의해 크게 다르다. PAN계 탄소섬유의 경우, 프리커서의 공중합상태, 방사 시 용매 등의 조건에 의해 변하게 된다. 즉, 화학적 조성은 전구체 물질의 종류와 소성 조건에 따라서 변화하며, PAN계인 경우 탄소섬유는 탄소 함유율이 93~98%, 흑연섬유는 99% 이상이다. 탄소섬유의 제 2 성분은 질소이며, 4~7%가 피리미딘 고리 구조로 존재한다. 질소 함유율은 소성도가 높아질수록 낮고, 흑연섬유는 0.5% 이하이다. 피치계는 전구체 물질인 피치섬유 자체의 탄소 함유율이 90% 이상이며, 탄소섬유, 흑연섬유 모두 99% 이상 탄소로 구성된다. 레이온계인 경우에는 고강도, 고탄성률을 얻기 위해 2,000 °C 이상에서 연신하면서 열처리하여 흑연화하기 때문에 탄소 함유율이 99% 이상이다.

2.6.3 탄소섬유의 수분

고성능 탄소섬유의 수분은 0.05% 이하이기 때문에 수분의 영향을 받지 않아 안정하며, 유리섬유나 아라미드 섬유를 사용하는 경우보다 뛰어난 내수성을 나타낸다.

2.6.4 탄소섬유의 내약품성

탄소섬유의 내약품성은 일반 탄소재료와 거의 같으며, 대부분의 약품에 견디고 매우 안정한 재료이다.

2.6.5 기계적 특성

탄소섬유의 대표적인 특성은 가볍고 강하며 높은 탄성률에 있다. 최근 수년간에 걸쳐서 기계적 물성의 향상이 이루어졌는데 인장강도로는 대략 5,600 MPa, 인장탄성률은 500 GPa를 지닌 탄소섬유가 판매가 되고 있다. 이렇게 뛰어난 기계적 특성의 원인으로는 탄소섬유의 기본적인 구조인 리본상의 미세구조에 기인한다.

2.6.6 열적 특성

탄소섬유의 열적 특성 중에 가장 뛰어난 것으로는 선팽창계수를 들 수 있다. 대략 $-0.7 \sim -1.2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 로서 음의 값을 보이면서 온도 상승에 따라 수축하며, 섬유직경방향으로는 $5.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 로 보고되고 있다. 탄소섬유의 비열은 약 0.7 kJ/kg로서 고강도, 고탄성률간의

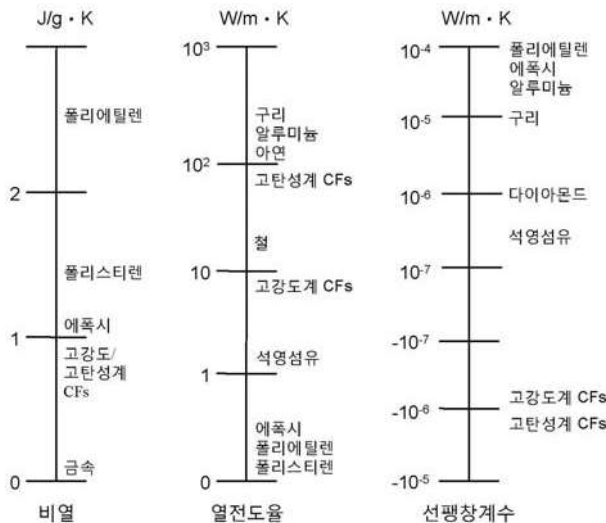


그림 9. 탄소섬유의 열적 특성.

표 1. 탄소섬유의 특성

분류	탄소섬유 특성
형태적 성질	가늘고 길며 잘 구부러진다. 다양한 형태 가공성 우수하다. 매트릭스와 조합한 섬유 보강재 제작 가능하다. 섬유축 방향과 직각 방향은 이방성을 가진다.
화학·물리적 성질	대부분 탄소원소로 구성되었다. 불연성이다. 화학적으로 안정, 산·염기 용매에 강하다. 산화에 의해 열화된다. 고온의 공기, 산화성 산에 대해 약하다. 고온 하에서 금속 탄화물 형성한다. 다공성이며, 표면 활성화에 의해 흡착 성능을 나타낸다.
기계적 성질	밀도가 금속보다 작다. 인장 강도, 인장 탄성률이 크다. 내마모성, 윤활성이 우수하다.
열적 성질	선 팽창률 계수가 작고, 치수 안정성 우수하다. 고온 하에서도 기계적 특성이 저하되지 않는다. 극저온 영역에서의 열전도성이 작다.
전기·전자적 성질	전도성이 우수하다. 전파를 반사하며, 전파 시일성이 우수하다 X선 투과성 양호하다.

차이는 별로 없으며, 금속과 비슷한 수치를 보이며 수치보다는 약간 작은 수치를 가진다. 탄소섬유의 열전도율을 직접 측정하는 예는 극히 드물며, 대부분 복합재료의 열전도율을 측정한 값으로부터 추정한다. 고탄성률의 경우, 85 W/mK으로 금속에 비견되는 값을 보인다. 탄소섬유의 열적특성을 여러 종류의 재료와 비교하여 정리한 것을 **그림 9**에 나타내었다.

2.6.7 전기적 특성

탄소섬유는 일반적으로 소성온도가 1,000 °C 이상일 때 전기전도성이 양호해지며 결정성에 의존을 하므로 흑연화 섬유가 탄소섬유보다 높은 전기전도율을 보이는데, 전자의 경우가 $1.5 \sim 3.0 \times 10^{-3} \Omega\text{cm}$, 후자의 경우가 $0.5 \sim 0.8 \times 10^{-3} \Omega\text{cm}$ 의 전기저항 값을 보인다.⁸ 표 1에 탄소섬유를 각각의 특성별로 분류하여 정리하였다.

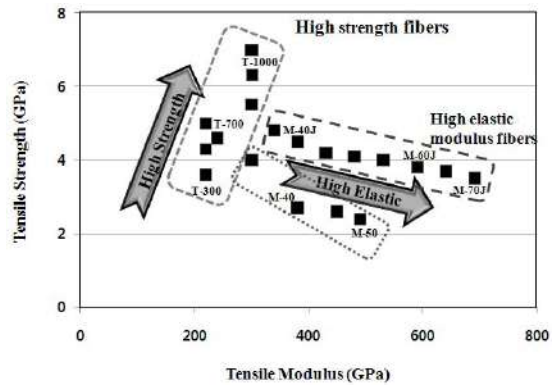


그림 10. Toray사의 고성능 탄소섬유 개발 계통도.

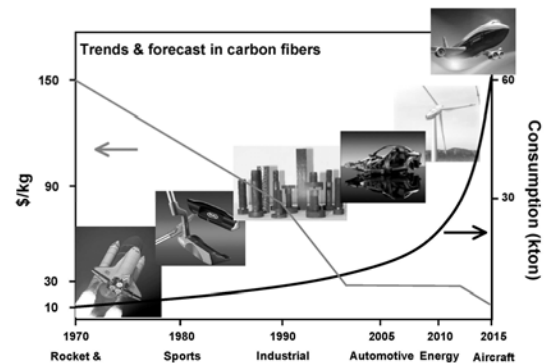


그림 11. 탄소섬유의 가격인하에 따른 수요 증대 및 용도 변화.

3. 탄소섬유 최신 기술 동향

탄소섬유는 제조공정이 다단계이면서 매우 까다로워 미국, 일본, 유럽의 8개 회사 외에는 아직까지 대량생산에 성공한 기업이 없는 실정이며, 게다가 각국 정부는 탄소섬유가 첨단무기 등에 많이 사용되는 것을 감안, 기술 유출에 매우 민감해 하기 때문에 자국 외의 수출을 규제하고 있다. 이러한 세계시장을 고려해 볼 때 우리나라도 수송기산업, 레포츠산업, 군수산업의 발전을 위하여 탄소섬유는 반드시 개발되어야 한다. 고성능 탄소섬유의 개발은 주로 일본 Toray사에 의해 주도되어 왔으며 그 진화과정을 **그림 10**에 나타내었다. 초고강도 등급인 T(Torayca)-1000의 경우 강도가 7 GPa, 탄성률이 300 GPa에 달하며, 이와 같이 탄소섬유의 고성능화가 급진적으로 이루어지면서 그 응용분야도 점차 다양화되고 있다.

3.1 PAN계 탄소섬유

PAN계 탄소섬유는 비강도, 비탄성률이 실용재료 중에서 가장 크다는 특성 때문에 금속을 대체할 수 있는 첨단 복합재료로서 인식되어 항공·우주, 고성능 스포츠 용품 등에 널리 사용되어 왔다.^{31,32} 최근에는 이러한 성능을 살릴 수 있는 용도 개발에 힘입어 일반 공업 용도를 포함한 산업 용도에서의 탄소섬유 이용이 급증하고 있으며, 특히, 토목·건설 용도는 내진 보수·보강의 필요성 때문에 많은 주목을 받고 있다.

3.1.1 최근 용도 개발 동향

그림 11에서처럼 PAN계 탄소섬유는 다른 재료에 비해서 단가가 높아서 초기에는 골프 샤프트, 낚시대 등 스포츠·레저용품 등을 비롯하여 항공기·우주 관련 등의 한정된 분야에서만 사용되어 왔으나

1990년경에 PAN계 탄소섬유의 판매 가격이 8만원/kg 전후이었던 것이 2000년 초반에는 2~3만원/kg 정도까지 하락하여 다른 소재의 대체재로서 그 수요가 늘어났으며, 지구 환경 측면에서는 기술린이 아닌 천연가스나 연료전지를 자동차 연료로 사용하려는 움직임에 힘입어 자동차의 연료탱크에 PAN계 탄소섬유가 사용되기 시작하였다. 최근에는 풍력발전의 발전 효율을 높이기 위한 철제 블레이드를 대체할 소재로 탄소섬유를 사용, 심해 해저의 철제 파이프 대체재로서의 고압력용 해저 유전 송유파이프 및 에너지 효율을 높이기 위한 트럭 차체 등 그 사용 범위가 크게 확대되고 있다. 또한, 미군이 F22 스텔스 전투기, 차세대 주력 전투기, 블랙 호크 헬리콥터 등의 제조 및 무인 비행기, 방탄조끼, 헬멧, 각종 장비 등을 위해서 탄소복합재료를 사용하고 있으며, 보잉사가 새로운 787 드림 라이너기를, 라이벌인 Airbus 사도 탄소복합재료를 대량으로 사용하는 거대한 A380과 A350 모델의 제조를, 그리고 토목·산업 분야에서의 용도 개발로 그 수요가 확대되고 있다. 따라서, 탄소섬유는 철의 대체 소재로서 용도 및 시장이 앞으로 더욱 확대될 것으로 전망되며, 여기에 발맞추어 개발방향이 전개되고 있어 탄소섬유 가격은 공급 증대와 더불어 하향화 추세로 나아갈 것이다.

3.1.2 기술 개발 동향

PAN계 탄소섬유 분야에서의 수요 확대를 위해서는 이를 지원할 수 있는 기술에 대한 기반확립이 필요하며, 현재 진행되고 있는 대표적인 기술 개발 동향을 정리하면 다음과 같다.

(1) 탄소섬유의 성능 향상: PAN계 탄소섬유의 성능 향상 경쟁은 약간 가라앉았지만, 용도에 따른 성능 검토는 활발히 진행되고 있는 것으로 생각되며, 새로운 대형 수요에 대응할 수 있는 탄소섬유는 강도·탄성률의 성능 향상이 필수 조건이다.^{6,7}

① 압축강도 향상: 일반적으로 PAN계 탄소섬유는 고탄성률화가 진행될수록 압축강도는 점차 저하하는 경향을 나타낸다. 따라서, PAN계 탄소섬유에 봉소 이온을 고전압에서 가속 조사하여 결정구조를 미세화시켜 이온 주입 탄소섬유 단섬유의 압축강도를 향상시키는 연구를 진행하고 있다.

② 고탄성률화: PAN계 고탄성률 탄소섬유는 350~400 GPa ($35\sim40\times10^3$ Kgf/mm²)의 생산부터 시작하여 점차 고탄성률화, 고강도화가 진전되어 현재는 탄성률 690 GPa (70×10^3 kgf/mm²), 강도는 4 GPa (350 kgf/mm²)에 이르고 있다.

③ 탄소섬유의 계면제어: 탄소섬유강화 복합재료의 물성은 탄소섬유와 매트릭스 수지의 성능에 의존하지만, 두 가지 모두의 계면성질에도 영향을 받으므로 매트릭스 수지와 접착력을 향상시키기 위해서 탄소섬유에 여러 가지 표면처리를 행하고 있다.

④ 탄소섬유 가격 저하: 토목, 건축 분야에서는 사용량이 막대한 만큼, 가격이 가장 중요한 경쟁력 요인이 될 수 있어 저가의 탄소섬유를 얻기 위해 새로운 프리커서 개발 및 라지 토우를 사용하는 방법이 주목받고 있다.

(2) 매트릭스 수지의 개발: 비행기 부품 등의 제조에는 내열성 열가소성 수지인 PEEK (polyetheretherketone), PEI (Polyetherimide) 등의 사용이 신중하게 검토되어 왔다.^{33,34} 최근에는 독일 폭스바겐이 열 프레스로 자동차 몸체를 만드는 방법을 개량하고, 수지도 PEEK나 PEI가 아닌, Nylon 12나 Nylon 공중합체를 사용한 논문을 발표하였다.³⁵

(3) CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) 성형 기술의 진화:

고속화, 저가격화, 양산 대응형 성형기술, 중간 재료의 개발 노력이 계속되고 있다.

(4) CFRP 제품의 용도 적용 향상

① 차량·건축 용도에서의 난연·불연화: 고속 이동체, 건재 용도에 대해서는 비강도·비탄성률 등 기계강도 성능이 높은 것만으로는 이용할 수 없고, 난연·불연 성능이 요구되므로 페놀수지나 이미드 수지가 매트릭스로서 주목받고 있다.

② 토목 용도: 교량 케이블이나 해저 유전 굴삭기 등의 용도에 맞는 성형 가공법이나 정착 기술에 대한 검토가 진행되고 있다.

③ 건재 용도: 대형 용도의 상업화시 저비용화 및 가공 생산성 향상이 필수이므로 인발 성형법, RTM, 열가소성 프레스 등에 대한 기술개발이 진행되고 있으며, 이 외에도 ④ 토목 보강기술, ⑤ 검사기술 등에 대한 기술개발 및 새로운 것에 대한 기술 제안이 진행되고 있다.

3.2 Pitch계 탄소섬유

범용 타입은 콘크리트 보강재나 단열재, 충전재로서 이용되는 반면에, 고성능 타입은 ACM 분야에서 PAN계 탄소섬유와의 경쟁 분야도 많으나 독자적인 특징을 살려 새로운 시장을 형성하고 있다. 본 특집에서는 주로 Pitch계 탄소섬유의 독특한 특징을 무기로 시장 확대를 꾀하고 있는 고성능 타입의 메소페이즈 Pitch계 탄소섬유(Meso-phase Pitch-based Carbon Fibers, MPCFs)에 초점을 맞춰 최신의 용도 및 기술개발 동향에 대하여 기술하였다.

3.2.1 최근의 용도 및 기술 개발 동향

MPCFs는 극한 상태에서 사용되는 항공·우주 분야의 구조체나 인테나, 전자 기기의 외장재 등에 적합하다. 한편, 비교적 비연속, 저배열의 피브릴 구조를 가진 PAN계 탄소섬유는 고강도를 나타내며 복합체 보강재로 적합한 것으로 알려져 있다. 그런데, 섬유 형성시 분열 분자의 배향에 따라 Pitch계 탄소섬유의 강도 및 열전도율도 향상되므로, 열관리 용도에 있어서는 PAN계 탄소섬유보다 메소페이즈 Pitch계 탄소섬유가 유리할 것이다. 특히, 항공·우주 그레이드용 탄소섬유 토우는 섬유의 탄성률에 따라 33~35 Msi (24톤 표준 타입), 50~70 Msi (40톤 고탄성률 타입), 70~140 Msi (50톤 이상 초고탄성률 타입)로 분리하여 사용하며, 이와 같이 MPCFs는 초고탄성률 타입의 제조가 가능하고, PAN계 탄소섬유보다 비용 상승이 적어서 가격 측면에서도 이점이 있을 뿐만 아니라 항공·우주 용도에서는 구조재로서 저팽창 계수가 요망되는 부분이 많고, 우주 방위 기기에 있어서 경량·컴팩트화가 진행되면 열관리가 필요하게 되어 고열전도성의 MPCFs는 용도 및 기술개발은 더욱 확대될 것으로 예상된다.^{36,37}

4. 탄소섬유 업계 동향

4.1 해외 업계

4.1.1 PAN계 탄소섬유: 스몰 토우(Small Tow)

(1) Toray (일본): 1971년부터 독자적인 기술로 고성능 PAN계 탄소섬유를 생산·판매하고 있으며, 생산 능력은 7,600톤/년 규모로 세계 최대 메이커이다. 주로 항공·우주, 스포츠, 산업용 등에 폭넓게 출시되고 있으며, 보잉사의 항공기용 탄소섬유 부문에 중점을 두고 있다.

(2) Toho Tenax (일본): 1975년부터 고성능 PAN계 탄소섬유 및 내열섬유를 생산·판매하기 시작하였으며, 생산 능력은 5,600톤/년으

로 세계 2위를 차지하고 있다. 항공기 업계에서 인정을 받고 있으며, 에어버스의 A380에 쓰이는 수직 꼬리 날개 구조재, 바닥재용 탄소섬유를 전량 공급하는 등 이 부분의 70%를 점유하고 있다.

(3) Mitsubishi Rayon(일본): 1983년부터 미 HITCO사와의 기술 제휴를 통해 탄소섬유를 생산하기 시작하였다. 현재의 생산능력은 연간 3,400톤 규모로 세계 3위를 차지하고 있다. 골프 샤프트 등의 스포츠 분야에 중점을 두고 있으나, 산업분야를 강화하고 수요 확대를 위해 항공기용 탄소섬유에도 참여할 계획을 갖고 있다.

(4) Hexcel(미국): Hercules 기술을 계승하여 PAN계 스몰 토우를 생산하고 있으며, 생산능력은 연간 2,000톤 규모이다.

(5) Cytec(전 Amoco)(미국): 1958년부터 탄소섬유를 제조하기 시작하여 현재는 PAN계, Pitch계 탄소섬유를 모두 생산·판매하고 있으며, 생산 규모는 연간 1,800톤에 이른다.

(6) Formosa Plastics(대만): 1995년부터 탄소섬유를 생산·판매하고 있으며, 생산 능력은 연간 1,750톤 규모로 급격하게 성장하였다.

4.1.2 PAN계 탄소섬유 : 라지 토우(Large Tow)

(1) Fortafil Fibers(미국): 영국 Courtaulds사의 전구체를 이용하여 라지 토우를 생산하기 시작하여 현재는 연간 3,500톤 규모의 생산능력을 갖고 있다.

(2) Zoltek Carbon Fibers Inc.(미국): 1988년에 Stackpole Carbon Fiber사를 매수하여, 영국의 Courtaulds사의 전구체를 이용하여 라지 토우를 생산하고 있으며, 생산능력은 현재 1,800톤/년에 이르고 있다.

(3) SGL Carbon(영국, 독일): 영국 Courtaulds사의 전구체를 이용하여 탄소섬유를 생산하고 있으며, 그 규모는 연간 1,950톤이다.

(4) Aldila(미국): 미국 그라파이트 골프 샤프트 메이커로서 그 원료인 탄소섬유를 생산하고 있으며, 생산 능력은 연간 1,000톤 규모이다.

4.1.3 Pitch계 탄소섬유

(1) Mitsubishi Rayon: 석탄 Pitch계를 이용하여 초고탄성을 탄소섬유, 초열전도성 탄소섬유를 생산하고 있으며, 연간 600톤의 생산능력을 갖고 있다.

(2) 일본 그라파이트 파이버: 1995년부터 탄소섬유를 생산하고 있으며, 특히 액정방사법으로 석유/석탄계 MPCF를 제조하고 있다.

(3) Petoca(일본): 1975년부터 석유 Pitch계 탄소섬유를 제조·판매하고 있다. 용융 블로우 방식으로 생산하고 있으며, 생산능력은 연간 1,300톤 규모이다.

(4) Cytec(전 Amoco(미국)): PAN계 탄소섬유와 함께 석유 Pitch계 이방성 장섬유를 생산하고 있으며, 생산능력은 연간 230톤 규모이다.

(5) Kureha(일본): 세계 최초로 Pitch계 탄소섬유를 생산하였으며, 현재 원섬법의 용융 블로우 성형으로 석유계 등방성 Pitch를 이용하여 단섬유 탄소섬유를 생산하고 있다. 생산능력은 연간 600톤이다.

(6) Donac(일본): 석유계 등방성 Pitch를 사용하여 외류 방사법으로 단섬유 탄소섬유를 생산하며, 생산 능력은 연간 300톤 규모이다. 표 2와 표 3에 PAN계 탄소섬유와 Pitch계 탄소섬유의 제조업체 현황을 정리하였다.

4.2 국내 업계

국내에서는 동양제철화학이 연간 150톤 규모의 탄소섬유 제조시설을 가동하고 있었으나 1991년부터 생산을 중단하였다. 그리고,

표 2. 세계 PAN계 탄소섬유 제조업체 현황

분류	제조회사	생산능력	상품명	주력분야	비고
R-tow (Regular)	Toray	7,300	Torayca	항공기(보잉)	세계 1위
	Toho Tenax	5,600	Besflight	항공기(에어버스)	세계 2위
	Mitsubishi Rayon	3,400	Pyrofil	스포츠(골프채 등)	세계 3위
	Hexcel	2,000		항공기	Hercules사 기술
	Cytec	1,800	Thornel	ACM, 열·전기, 마찰용도	전 BP Amoco, Toray 기술
L-tow (Large)	Formosa Plastics	1,700		스포츠 분야	Hitco 기술
	TTA	3,500		라미네이트 우드, 항공기 등	
	Zoltek	1,800	Panex	에어백용, 항공기 C/C 브레이크	
	SGL	1,950	Panox	산화내열섬유·항공기 브레이크용	
	Aldila → CFT	1,000		골프 샤프트용	골프채 메이커
	Toray	300	Torayca		

표 3. 세계 Pitch계 탄소섬유 제조업체 현황

분류	제조회사	생산능력	상품명	원료/형태	주력분야
메조페이스 Pitch계	Mitsubishi Rayon	600	Dialead	석탄계/장섬유	항공·우주, 전자부품, 산업용, 시멘트 강화제
	일본그라파이트파이버	120	Granoc	석탄, 석유계/장섬유, 액정방사	항공·우주, 도목·건축, 스포츠
	Petoca	1,300	Melblown	석유계/단섬유 Meltblow	전지 전극재료, 커패시터, 면상발열체
	Cytec	230	Pitch Thornel	석유계/장섬유	초고열 전도성 재료, 구조재료, 마찰재료
등방성 Pitch계	Kureha	600	Kreca	석유계/단섬유 원섬법	커텐 wall, 단열재, 전자파 차폐재
	Donac	300		석탄계/단섬유 외류방사	전자파 시일재

그 동안 연간 60톤의 탄소섬유를 제조, 생산해 왔던 태광산업도 2001년에 생산을 중단함에 따라서 국내의 PAN계 탄소섬유 제조시설은 전무한 상태이다.

최근에는 전주기계탄소연구원에서 2009년 말부터 탄소섬유 원사를 생산하고자 ‘고기능 복합섬유 원천소재 기반구축 사업’을 위한 장비 도입 모델을 결정하는 등 탄소섬유 원사 생산 로드맵을 확정하였으며, 특히 탄소섬유 공동기술 개발 협약식을 체결한 효성과 탄소섬유 원사 생산에 이어 탄소섬유 생산, 복합재 및 응용재 상품화, 생산단지 조성 등 탄소섬유 양산화 사업과 관련된 산·연 협력체제를 구축하였다.

5. 탄소섬유의 시장 동향 및 전망

탄소섬유의 시장 동향 및 전망은 전체 수요의 90% 이상을 차지하고 있는 PAN계 탄소섬유 시장을 중심으로 분석하였다.

5.1 세계 시장 동향 분석

(1) 생산 동향: 일본 Yutaka Maeda, “The present trends of carbon fibers”의 2007년 자료에 의하면 세계의 PAN계 탄소섬유 생산은 1995년 약 12,000톤에서 2005년 약 34,000톤 규모로 한화 기준 10,200억원(30,000원/kg) 정도의 시장규모로 탄소섬유를

사용하는 최종제품으로 확대할 경우의 시장 규모는 이것의 약 10배, 즉 10조원 규모로까지 확대 가능한 반면에 Pitch계 탄소섬유는 2005년 2,500톤으로 PAN계 탄소섬유 생산량의 약 6% 정도 생산되고 있다. 지역별 생산은 일본이 전체 공급의 40%대로 가장 큰 생산 국가이며 그 뒤로 미국, 유럽이 따르고 있다.

독일의 탄소섬유 제조업체인 SGL 그룹은 2010년까지 세계 탄소섬유 생산량이 현재보다 2/3가량 늘어 총 45,000톤에 달할 것으로 추산하고 있으나, 지금의 급격한 수요폭발에도 불구하고 탄소섬유 공급은 당분간 제한될 수밖에 없어 탄소섬유는 가격 강세를 보일 것으로 예상되고 있다. PAN계 탄소섬유의 생산현황 및 향후 증설계획을 표 4에 나타내었다.

(2) 수요 동향: 탄소섬유의 일본 업체들의 시장점유율은 세계 수요의 80% 정도에 달하고 있으며, 1990년대 한 때 시장규모가 예상했던 수요 확대 전망보다 다소 부진하였지만 최근에는 대형 항공업체의 대형 프로젝트와 토목·산업 분야에서의 용도 개발에 따른 수요 확대로 2004년 수요와 공급이 균형을 이루었으며, 현재는 공급이 부족한 상태이다.

표 4. PAN계 탄소섬유의 생산현황 및 향후 생산계획 (단위: 톤)

분류	제조회사	1999~2000	2003	2005	2007~2010
R-tow (Regular)	Toray	7,300	7,300	8,800	13,600
	Toho Tenax	5,600	5,600	6,300	10,500
	Mitsubishi Rayon	3,400	4,700	4,700	8,150
	Hexcel	2,000	2,000	2,000	3,000
	Cytec	1,800	1,800	1,900	2,400
	Formosa Plastics	1,750	1,850	1,750	3,000
	R-tow 합계	21,850	23,250	25,450	40,650
L-tow (Large)	TTA	3,500	3,500	2,600	1,300
	Zoltek	1,800	1,800	3,160	4,500
	SGL	1,950	1,900	1,900	190
	Aldila→CFT	1,000	1,000	1,000	1,000
	Toray	300	300	300	300
	L-tow 합계	8,550	8,500	8,960	9,000
합계		30,400	31,750	33,710	49,650

표 5. 세계 PAN계 탄소섬유 지역별·분야별 시장 추이

지역	수요 분야	점유율(%)		CAGR(%)
		1997	2004	1999~2004
미국	토목·산업	27	37	7.6
	항공·우주	41	40	2.5
	스포츠·레저	32	23	-1.8
	합계(톤)	6,900	8,400	2.9
유럽	토목·산업	42	52	1.4
	항공·우주	37	35	9.5
	스포츠·레저	21	13	3.1
	합계(톤)	2,600	5,200	10.4
일본	토목·산업	67	52	3.4
	항공·우주	6	35	3.8
	스포츠·레저	27	13	-4.9
	합계(톤)	2,600	5,200	1.5
아시아	토목·산업	75	63	-0.2
	항공·우주	2	4	13.0
	스포츠·레저	23	33	7.7
	합계(톤)	4,600	5,400	-

Carbon fiber overview, SRI consulting, 2005.

① 용도별 수요: PAN계 탄소섬유의 3대 수요 산업은 항공·우주 분야, 스포츠·레저 분야, 토목·산업 분야이며, 그 중, 스포츠 레저용은 연간 약 4,000톤으로 추정되며, 항공·우주 산업용 수요량은 연간 2,400톤 정도의 규모이다. 특히, 토목·산업 분야는 시장 규모의 확대나, CAGR 면에서 가장 두드러진 분야로서, 탄소섬유의 시장 확대를 주도하고 있다.^{38,39} 표 5에 세계 탄소섬유의 지역별·분야별 시장 추이를 나타내었다.

② 지역별 수요: 지역별 수요는 북미 지역이 전체 수요의 40%대로 가장 큰 시장이며 유럽, 일본이 그 뒤를 따르고 있다. 북미와 유럽에서의 수요는 토목·산업 분야와 항공·우주 분야의 수요가 주종을 이루고 있는 반면, 일본의 경우는 항공산업을 보유하고 있지 못해, 초기에는 스포츠·레저 분야의 개발에 주력하였으나, 최근에는 산업용 소재, 자동차 및 에너지 부문 관련 소재의 개발과 더불어 항공기용 구조재 및 기능재료의 개발 및 실용화에 박차를 가하고 있다. 향후 주목받는 지역은, 일본을 제외한 아시아에서는 특히 중국일 것이다. 중국에서는 이미 골프 샤프트를 메인으로 낚시대 등이 만들어지고 있으며, 스포츠·레저 용도에서의 수요가 있다.

5.2 국내 시장 동향 분석

(1) 수요 동향: 국내의 탄소섬유는 낚시대와 골프용으로 두 분야 각기 35~50만 m²(약 50~70톤/월) 규모의 수요가 있으며, 프리프레그용 탄소섬유 시장규모는 연간 800여톤 정도(140~150억원 규모, 20,000원/kg)이며 프리프레그는 600만 m²이다. 따라서, 국내의 시장은 거의 대부분이 PAN계 탄소섬유 프리프레그 제품 시장으로 구성되어 있으며, Pitch계 탄소섬유는 인장강도 등의 물성이 상대적으로 떨어지는 등 PAN계에 비해 경쟁력이 떨어져 국내에서는 거의 사용되지 않고 있다. 현재 국내 수요의 전량을 일본의 Toray사 등을 통해 수입하고 있는 실정이고 PAN계 탄소섬유 프리프레그는 한국카본, SK Chemical, 선우 등에서 생산하고 있으며, 그 규모는 35~50만 m²(약 50~70톤)/월 정도로서 탄소섬유 가공제품이나 복합재료 형태로 매우 적은 양을 수출하고 있다. 그림 12에 2005년 기준 국내 탄소섬유의

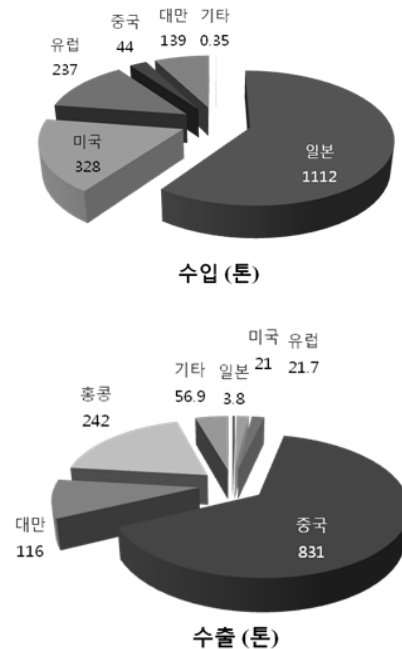


그림 12. 국내 탄소섬유 수입/수출량 국가 비중(2005년).

수입/수출량 국가 비중을 나타내었다.

(2) 수요 예측: 탄소섬유와 그 복합재료는 금속재료를 능가하는 고 비강도, 비탄성률과 우수한 열전도성 등 특수한 성능을 가지고 있다. 재료의 특징을 살리면서 시장을 확대하기 위해서는 가공 공법, 리사이클을 포함한 전체 비용이 기존 경쟁 관계에 있는 소재들에 대한 경쟁력을 확보해야 한다. 즉 생산능력의 비교 우위, 가공기술, 원가, 품질, 유통, 고객을 포함한 전체적인 질적 향상이 수반되어야 한다. 이것들을 전제할 경우 제 3의 기본소재로 비약적인 성장이 가능할 수 있을 것이다.

5.3 향후 전망

탄소섬유·복합재료가 범용재료로서 사용된다면 수만 톤에서 수십만 톤 규모로 성장할 수 있을 것이며, 탄소섬유 10만톤, 10,000원/kg을 전제로 한다면 탄소섬유 시장은 1조원, 복합재료 시장은 10조원 규모가 될 수 있을 것이다. 이처럼 탄소섬유·복합재료가 금속, 기타 경쟁재료 중에서 시장 규모를 더욱 확대하기 위해서는 새로운 용도 개발이 가장 중요하다. 예를 들면, 주 날개를 포함한 동체의 절반 이상을 탄소섬유를 이용해서 만든 가벼우면서도 강한 첨단 복합소재로 제작하고, 새로 개발한 고효율의 엔진을 장착한 “보잉 787”은 동급의 다른 여객기보다 연료를 20% 이상 절감할 수 있고, 운항거리도 16,000 km로 늘어났다. 또한, 1,500장 이상의 알루미늄 판을 리벳으로 이어 붙여 만든 기존의 항공기와 달리 복합소재를 이용하여 제작한 “보잉 787”의 동체는 이음매가 거의 없어 동체나 리벳의 부식문제가 별로 없으며, 혁신적인 자체 모니터링 시스템을 도입해 유지보수 비용 역시 20% 이상 줄일 수 있다고 한다. 기존 비행기의 경우 실내 압력을 고도 2,400 m 수준으로 유지해야 하나 고성능인 탄소섬유 복합체를 사용한 “보잉 787”은 고도 1,800 m 수준으로 유지할 수 있어 지상과의 기압차가 줄어들어 비행기 이착륙 때 생기는 두통과 청각장애를 줄일 수 있다. 뿐만 아니라 기내 습도를 40~60%로 충분히 높일 수 있어 비행 중 산소나 습기 부족으로 시달리는 승객의 고통을 크게 줄일 수 있고 비행기내의 쾌적성을 높일 수 있는 장점이 있다. 이러한 이점 때문에 보잉, 에어버스 등의 항공사가 탄소섬유를 차세대 비행기 제작에 대량으로 투입하고 있다. 실제로 보잉사의 신형 중형기 787은 동체 전체가 탄소섬유로 제작되었으며, 에어버스 역시 787과 겨룰 중형기 A380에 탄소섬유를 적용하였다. 또한, 일부 자동차 제조업체들도 고급 스포츠카에 탄소섬유를 적용할 움직임을 보이고 있다.

6. 탄소섬유 특허 출원 현황

6.1 국가별 특허 출원 동향

탄소섬유의 특허 출원 동향을 국가별로 살펴보면 일본이 1981년부터 2009년까지 출원된 탄소섬유 관련 특허의 전체 건수인 9,954건의 79%(7,863건)를 차지하고 있고, 그 뒤를 이어서 미국, 유럽, 한국이 각각 10%(995건), 7%(698건), 4%(398건)를 차지하고 있다. 이것은 탄소섬유에 있어서 일본이 월등하게 앞서가고 있음을 보여주는 결과이다(그림 13).

6.2 출원 연도별 특허 출원 동향

그림 14는 국내 및 일본, 미국, 유럽에서 출원된 탄소섬유 관련 특허를 출원 연도별로 검토한 결과로서, 1981년 290건을 시작으로 1990년까지는 출원 건수가 꾸준히 증가하였으며, 특히 1990년에는 770건으로 가장 많은 특허가 출원되었다. 그러나, 그 후 특허 건수는 감소

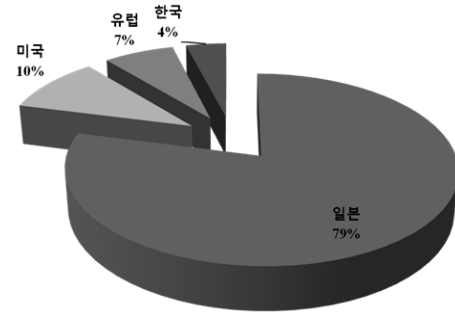


그림 13. 국가별 특허 출원 동향(국내외).

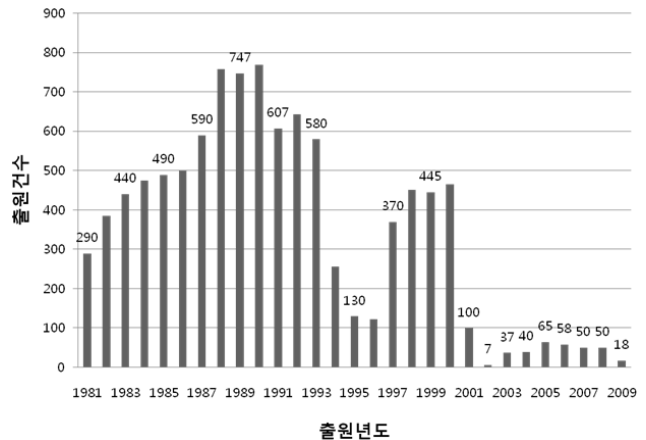


그림 14. 출원 연도별 특허 출원 동향(국내외).

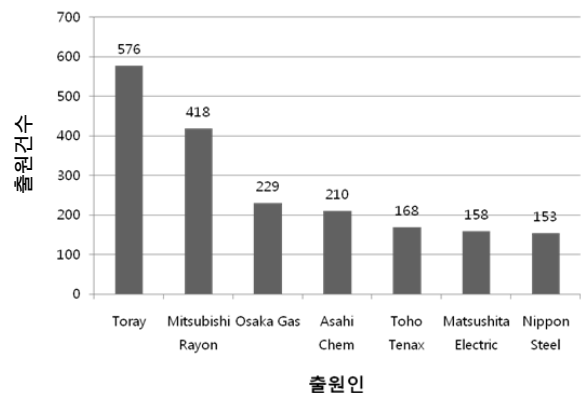


그림 15. 출원인별 특허 출원 동향(국내외).

하기 시작하여 1996년에는 123건의 특허만이 출원되다가 1997년부터 다시 출원 건수가 증가하기 시작하여 2000년에는 465건의 특허가 출원되었으나, 다시 2002년부터 2009년까지 약 310건 정도의 특허만이 출원되었다.

6.3 출원인별 특허 출원 동향

그림 15는 탄소섬유 관련 전체 출원 건수(9,954건)를 출원인별로 분류하여 상위 7위까지만 살펴본 결과로서, 출원인 국적은 모두 일본이었으며, 총 1,912건의 특허를 출원하여 전체 출원 건수의 약 20%를 차지하고 있다. 출원인 중의 1위는 도레이사로서 576건을 출원하였으며, 미쯔비시 레이온 및 오사카 가스가 각각 418건과 229건을 출원하여 2위와 3위를 차지하였다.

6.4 국제 특허 분류(IPC)별 특허 출원 동향

1981년부터 2009년까지 국내와 일본, 미국, 유럽에서 출원된 총 9,954건의 탄소섬유 관련 특허를 국제 특허 분류(IPC)별로 살펴본 결과로서, 전체 출원 건수의 50%에 해당하는 4,977건이 상위 10개의 분류속에 포함되며, 그중 가장 비율을 많이 차지하는 것은 D01F(인조 필라멘트사, 섬유, 강모 또는 리본의 제조에 있어서 화학적 특징을 갖는 것; 탄소 필라멘트 제조에 특히 적합한 장치)로 전체 9,954건 중 1,405건을 차지하였다.

7. 결론

본고에서는 우수한 기계적 특성을 가진 고가재료로서 최근 수년간 그 수요가 예상을 크게 상회하여 첨단재료가 아닌 구조용 범용소재로서도 인지되고 있는 탄소섬유에 대한 전반적인 이해와 제조 기술 및 특징, 국내외 기술수준 및 시장동향, 그리고 특허 관련하여 대략적으로 기술하였다.

탄소섬유는 높은 단가로 인하여 항공, 우주 및 군사 목적으로만 사용되어 그 수요가 1990년대 초 냉전체제의 종식과 함께 감소하였지만, 최근에는 탄소섬유의 경량, 고강도 특성을 살릴 수 있는 착실한 용도 개발의 노력에 힘입어서 건축, 콘크리트 구조물·내진 보강 등의 토목·건축 분야, CNG 탱크, 풍력 발전용 블레이드, 원심분리 로터, 플라이휠 등의 대체 에너지·클린 에너지 분야, 선박, 차량 등의 고속 운송 기기 분야, 해양 개발·심해저 유전 채굴 분야, 기기의 고성능화, 의료 복지 기기, 전기·전도 용도, 초내열 용도 등의 다양한 산업 분야에 대한 적용이 활발히 이루어지고 있다.

이와 같이 탄소섬유는 우주·항공산업을 위한 소재분야뿐만 아니라 자동차, 전자, 광학, 에너지 및 의학 분야 등 거의 모든 산업분야에 응용이 가능하여 국가 경쟁력 또한 향상시킬 수 있으므로 기존산업의 고도화에 따른 차세대 신산업 분야로의 응용 가능성으로 인하여 국가 경제 발전에도 기여할 수 있을 것이라 판단되므로 국내시장 보호는 물론 국제시장에서의 경쟁력 확보를 위해 관련 분야에 대한 기술개발 및 특허 출원이 절실히 요구된다. 따라서, 일본처럼 국내의 메이저급 대기업들 또한 기술개발을 통한 특허확보가 반드시 필요하며, 이에 대한 학계, 연구계 및 정부의 지원이 충분하게 이루어져야 할 것이라 판단된다. 이러한 산학연정 협력체계 구축을 통해 우리나라가 미래 성장을 이룰 꿈의 신소재로 불리며 7조 원대에 이르는 세계 탄소소재 시장에서 탄소산업 강국으로 우뚝 서야 할 것이다.

참고문헌

1. J. B. Donnet and R. C. Bansal, in *Carbon Fibers*, Marcel Dekker, New York, 1984.
2. E. Fitzer, in *Carbon Fibers and Their Composites*, Springer, Berlin, 1985.
3. A. D. Cato and D. D. Edie, *Carbon*, **41**, 1411 (2003).
4. O. P. Bahl and L. M. Manocha, *Carbon*, **12**, 417 (1974).
5. D. J. Johnson and C. N. Tyson, *Brit. J. Appl. Phys.*, **D2**, 787 (1969).
6. L. L. Hong, A. Moshonov, and J. D. Muzzy, *Polym. Compos.*, **12**, 191 (1991).
7. L. T. Drzal and M. Madhukar, *J. Mater. Sci.*, **28**, 569 (1993).
8. M. S. Dresselhaus and G. Dresselhaus, *Adv. Phys.*, **30**, 139 (1981).
9. S. Kim, Y. Jung, and S. J. Park, *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Aspects*, **313-314**, 220 (2008).
10. B. J. Kim, Y. S. Lee, and S. J. Park, *Int. J. Hydrogen*, **33**, 2254 (2008).
11. Toray Industries, Inc., US-04917836.
12. Toray Industries, Inc., JP-005877 (1998).
13. Toray Industries, Inc., US-06638615.
14. Toray Industries, Inc., US-0298581 (1989).
15. Mitsubishi Rayon Co., Ltd., JP-005792 (2002).
16. Mitsubishi Rayon Co., Ltd., US-05124010.
17. Mitsubishi Rayon Co., Ltd., US-05281477.
18. Toho Rayon Co., Ltd., US-05286563.
19. Toho Rayon Co., Ltd., US-04897286.
20. Toho Rayon Co., Ltd., EP-121993 (1991).
21. J. B. Donnet and R. C. Bansal, in *Carbon Fibers*, 2nd ed., Marcel Dekker, New York, 1990.
22. R. M. Jones, in *Mechanics of Composite Materials*, McGraw-Hill, New York, 1975.
23. M. M. Schwartz, in *Composite Materials Handbook*, McGraw-Hill, New York, 1992.
24. G. Lubin, in *Handbook of Composites*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1982.
25. K. Dusek, in *Epoxy Resins and Composites I, II, III*, Springer, New York, 1986.
26. J. B. Donnet and S. J. Park, *Carbon*, **31**, 434 (1991).
27. P. J. Walsh, in *Composites, ASM Handbook*, D. B. Miracle and S. L. Donaldson, Editors, ASM International, Amsterdam, Vol **21**, Section 2 (2001).
28. S. J. Park, in *Carbon Materials*, Daeyoungsa, Seoul, 2006.
29. W. Watt and W. Johnson, *Appl. Polym. Symp.*, **9**, 215 (1969).
30. Z. Wangxi, L. Jie, and W. Gang, *Carbon*, **41**, 2805 (2003).
31. S. J. Park and M. K. Seo, *Carbon*, **39**, 1229 (2001).
32. S. J. Park, M. K. Seo, and J. R. Lee, *Carbon*, **40**, 835 (2002).
33. M. J. Mathews and S. R. Swanson, *Compos. Sci. Technol.*, **67**, 1489 (2007).
34. J. Bijwe and R. Rattan, *Wear*, **263**, 984 (2007).
35. X. Zhang, X. Pei, and Q. Wang, *Eur. Polym. J.*, **44**, 2551 (2008).
36. I. Mochida, S. M. Zeng, Y. Korai, T. Hino, and H. Toshima, *J. Mater. Sci.*, **27**, 1960 (1992).
37. K. Naito, Y. Tanaka, J. M. Yang, and Y. Kagawa, *Carbon*, **46**, 189 (2008).
38. G. Savage, *Eng. Fail. Anal.*, **14**, 321 (2007).
39. A. D. Kelkar, J. S. Tate, and R. Bolick, *Mater. Sci. Eng. B*, **132**, 79 (2006).