

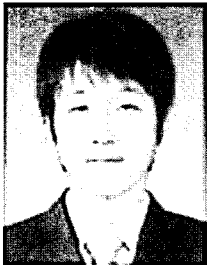
탄소나노튜브 연속섬유 및 섬유화 기술 개발동향

박기룡 · 정영진 · 백두현 · 이건웅

1. 서론

탄소나노튜브(Carbon Nanotubes, CNTs)는 나노기술의 빌딩블럭으로 주목받으며 물리적, 화학적 특성 규명 및 다양한 응용분야에 관한 연구가 수행되고 있다. CNT는 완벽한 구조와 기계적, 물리적, 전기적 및 열적 특성을 갖고 있으며, 전기전자, 정보통신, 에너지, 바이오, 우주항공, 스포츠, 국방 등 폭넓은 분야에서 응용가능성이 제시되고 있다. CNT는 튜브형상을 이루는 벽의 수에 따라 단일벽(Single-walled, SWNT), 이중벽(Double-walled, DWNT), 다중벽(Multi-walled, MWNT)으로 구분할 수 있으며 튜브 축에 대해 감긴 형태(chirality)에 따라 금속성과 반도체성으로 구분할 수 있다. CNT는 아크방전법, 레이저증발법, 화학기상증착법 등 여러 방법에 의해 합성되

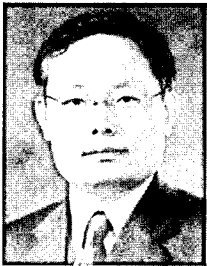
어지는데, 합성 기술의 향상과 다양한 CNT 응용 제품의 상업화의 도입으로 가격이 급속도로 낮아지고 있다. SWNT의 경우 직경이 1 nm 수준에 불과한 반면 길이는 수 μm 에서 수 mm에 이르는 구조이고 SWNT 사이의 큰 van der Waals 인력($10^3 \sim 10^6$ eV)에 의한 응집 현상이 발생하여 합성 시 단독으로 존재하지 못하고 수십~수백 nm의 번들 형상으로 존재한다. MWNT의 경우 상대적으로 큰 직경으로 인해 직진성이 증가하여 응집현상보다는 고분자 사슬의 엉킴현상과 유사한 특성을 보여준다. DWNT의 경우 직경이 작은 일부는 SWNT와 유사한 특성을, 직경이 큰 일부는 MWNT와 유사한 특성을 보여준다. 탄소나노튜브를 섬유소재로 응용하기 위해서는 번들형상 또는 엉킴현상 등의 응집특성을 해석하고 분산을 통한 분리-재정렬 과정을 반드시 해결해야 한다. 나노튜브의 응집현상은 물리, 화학적으로 다루



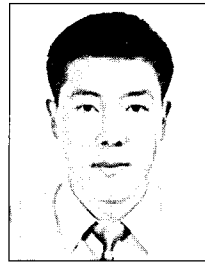
박기룡
2007 숭실대학교 유기신소재파이버공학과(학사)
2010 숭실대학교 유기신소재파이버공학과(석사)
2010~ 한국전기연구원 연구원
현재



백두현
1981 서울대학교 섬유공학과(공학사)
1984 서울대학교 섬유공학과(공학석사)
1987 서울대학교 섬유공학과(공학박사)
1988~ (주)SK케미칼 연구소 선임연구원
1992~ 1992 PSE, U. Mass at Amherst 방문교수
1998
2006~ Nanotech Institute, U. Texas at Dallas
2007 방문교수
1992~ 충남대학교 공과대학 유기소재섬유
현재 시스템공학과 교수



정영진
1987 서울대학교 섬유공학과(학사)
1989 서울대학교 섬유고분자공학과(석사)
1995 서울대학교 섬유고분자공학과(박사)
1995~ 호주 CSIRO(Post-Doc)
1998
1998~ 금오공과대학교 부교수
2005
2003~ Georgia Institute of Technology
2004 (Visiting Scholar)
2005~ 숭실대학교 유기신소재파이버공학과
현재 교수



이건웅
1992 전남대학교 고분자공학과(학사)
1994 서울대학교 화학공학과(석사)
1999 서울대학교 화학공학과(박사)
2000~ 한국과학기술연구원 연구원
2003
2003~ Georgia Institute of Technology
2005 (Post-Doc)
2006~ 한국전기연구원 혁신소재연구센터 센터장
현재

Development of Multi-Functional Continuous CNT Fibers

숭실대학교 유기신소재파이버공학과 (Kiryong Park and Youngjin Jeong, Department of Organic Materials and Fiber Engineering, Soongsil University, Sangdo 1-dong, Dongjak-gu, Seoul 156-743, Korea)

충남대학교 유기소재섬유시스템공학과 (Doo-Hyun Baik, Advanced Organic Materials and Textile System Engineering, Chungnam National University, Gung-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-764, Korea)

한국전기연구원 혁신소재연구센터 (Geon-Woong Lee, Innovation Materials/Device Research Center, Korea Electrotechnology Research Institute(KERI), 70 Boolmosangil, Changwon 641-120, Korea) e-mail: gwleephd@keri.re.kr

기에 매우 어려운 상황이며 나노튜브 응용에 있어 큰 걸림돌이 되고 있다. 따라서, 나노튜브 응용에 있어 분산기술은¹⁻³ 반드시 극복해야 할 요소기술이라 할 수 있다.

탄소나노튜브는 그 독특한 성질로 인하여 액츄에이터(Actuator), 전기 화학적 에너지 저장재료, 분자전자재료, 센서재료, 구조재료 등 다양한 분야에서 응용이 가능할 것으로 제안되어 왔다. 특히, 탄소나노튜브는 기계적 성질이 매우 우수하기 때문에 탄소나노튜브로 섬유를 제조하게 되면 아라미드섬유, 탄소섬유와 같은 기존의 고성능 섬유재료를 능가하는 섬유재료의 탄생이 가능할 것으로 예상된다.⁴ 탄소나노튜브의 인장강도는 35 GPa(속이 빈 것을 고려했을 때의 강도는 200 GPa), 인장탄성률은 1,000 GPa에 육박한다. 하지만, 이러한 특성들은 개별 튜브들로만 제한되어 있어 같은 특성의 큰 물질을 제작하기란 쉽지 않다. 만일, 단일 탄소나노튜브의 물성을 그대로 유지시키면서 섬유를 제조할 수 있다면 세상에서 가장 큰 강도와 탄성률을 갖는 섬유가 될 것이다. 이 정도의 강도가 실현된다면 지구와 달을 연결하는 우주 엘리베이터 로프에 적용 가능한 유일한 재료가 될 것이다. 그러나 이렇게 우수한 물성을 갖는 재료임에도 불구하고 탄소나노튜브를 섬유로 만드는 기술은 아직 확립되지 않은 상황이며, 각 선진국에서는 다양한 방법으로 섬유제조기술 확보를 위해 노력하고 있는 실정이다. 따라서, 우리나라도 탄소나노튜브 섬유제조의 원천기술 확보에 힘을 모은다면 이 분야에서 유리한 고지를 선점할 수 있을 것이다. 이상과 같이 고성능 섬유소재로 각광받고 있는 탄소나노튜브의 섬유화 기술동향을 살펴보고자 한다.

2. CNT 섬유화 기술

탄소나노튜브 섬유는 그 최종 상태에 따라 크게 순수한 탄소나노튜브 섬유(Neat CNT Fiber)와 탄소나노튜브 복합체 섬유(CNT Composite Fiber)로 나눌 수 있다. Neat CNT 섬유는 순수한 탄소나노튜브 또는 거의 탄소나노튜브만으로 섬유가 이루어진 경우를 말하고, CNT 복합체 섬유는 탄소나노튜브가 다른 물질과 복합체를 구성하는 것으로서 다시 탄소나노튜브가 주성분인 복합체 섬유(CNT-major Composite Fiber)와 탄소나노튜브가 분산상으로 첨가된 복합체 섬유(CNT-dispersed Composite Fiber)로 나눌 수 있다. 탄소나노튜브가 분산된 복합체 섬유는 탄소나노튜브가 매트릭스 재료의 물성을 개선하는 목적으로 사용된 것이므로 엄밀한 의미에서 CNT 섬유로 보기는 어렵다. 여기에서는 탄소나노튜브가 주성분인 복합체 섬유까지만 CNT 섬유로 보았다.

2.1 CNT 복합체 섬유(CNT-major Composite Fiber)

CNT가 주성분인 복합체 섬유는 2000년 Vigolo⁵ 등이 SWNT/PVA 복합용액에서 SWNT가 잘 배향된 섬유를 제조하여(그림 1) 우수한 인성을 보여주었으며 Dalton⁶ 등은 이 공정을 더욱 개선하였다.

CNT 복합체 섬유는 고분자물질이 바인더 역할을 수행하여 섬유화에 용이한 반면 고분자가 가지고 있는 특성이 결합되어 독특한 특성이 구현된다. 미국 텍사스대학의 Baughman⁶ 등은 SWNT/PVA(60/40)/계면활성제 혼합액으로부터 세계에서 가장 길긴 섬유를 제조하여 네이처에 보고하였다. 제조된 복합섬유는 1.8 GPa의 인장강도와 30%의 신율을 가지고 있어 거미줄과 유사한 특성을 나타내며, 인성은 570 J/g⁷으로서 거미줄의 4배, 케이블의 17배로서 그림 2에서 보

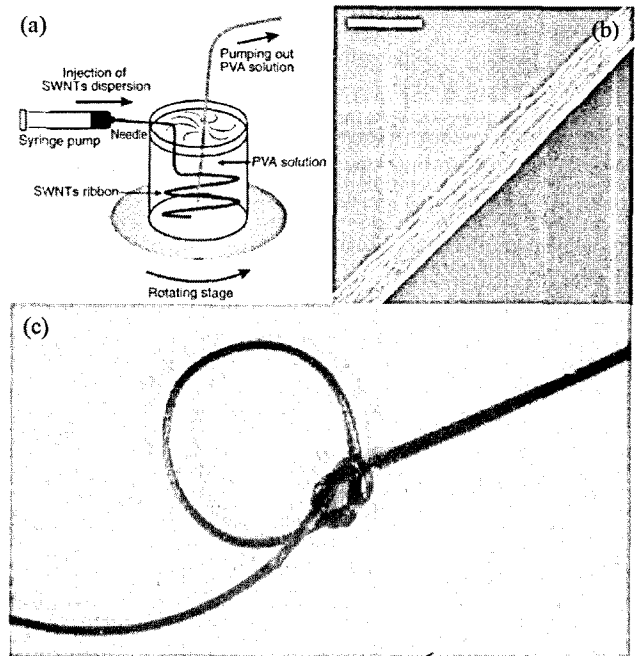


그림 1. (a) Vigolo 등이 개발한 SWNT/PVA 용액으로부터 복합섬유를 제조하는 방법의 개요도, (b) 제조된 CNT 복합섬유의 SEM 사진(scale bar=25 mm), (c) CNT 복합섬유의 인성을 보여주는 사진.

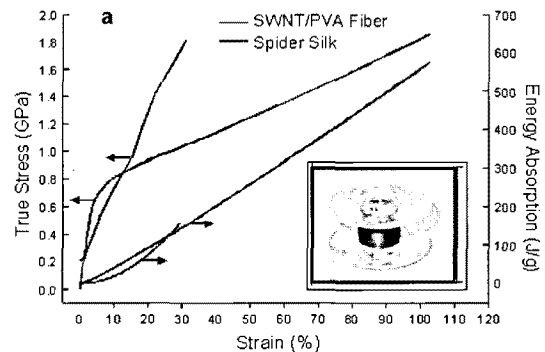


그림 2. Baughman 등이 개발한 super tough CNT 섬유의 인성을 보여주는 그림.

는바와 같이 매우 높은 인성을 보임을 보고하였다.

또 다른 방법으로는 sheath-core 구조를 갖는 CNT 복합체 섬유 제조법이 있다. 그림 3은 sheath-core CNT 섬유제조 공정이다. Sheath의 고분자가 core의 CNT를 압착하는 현상에 의한 CNT 복합체 섬유제조방법이 연구 중에 있다. 이 방법은 core의 CNT가 절연체인 고분자에 의해 전도성 저하가 없어 고전도성을 얻을 것으로 기대된다.

2.2 건식공정 CNT 섬유

순수 CNT 섬유는 크게 건식공정(dry process)과 습식공정(wet process)을 이용해서 제조할 수 있다. 2002년 중국 칭화대학(Tsinghua University)의 Shoushan Fan 교수 연구팀은 건식공정에 의해 제조된 CNT 섬유에 관하여 보고하였다.⁷ Fan 교수 등은 CNT가 지니는 반데르발스력을 이용하여 CNT가 자발적으로 섬유상을 형성하도록 하여 약 수십 cm 길이를 갖는 순수한 CNT섬유를 제조하였다(그림 4).

2004년 영국 캠브리지대(University of Cambridge)의 Windle 교수 연구팀은 기타 매질을 사용하지 않고 CNT 합성과 동시에 이를

연속적으로 방직하는 섬유 형성 원리를 이용하여 순수 CNT 섬유를 제조한 바가 있다.⁸ 그림 5의 공정과 같이 제조되었으며 제조된 섬유는 그림 6처럼 섬유 축 방향으로 배향성을 지니며 기계적 강도는 0.10-

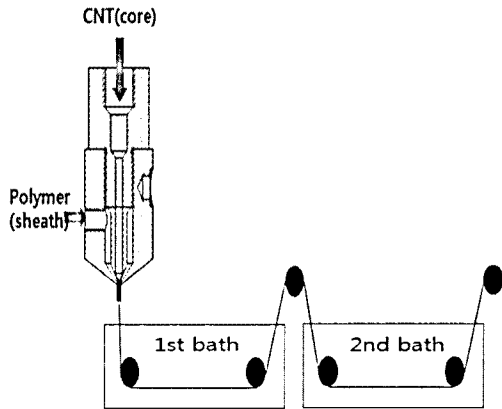


그림 3. Sheath-core CNT 섬유 제조 공정.

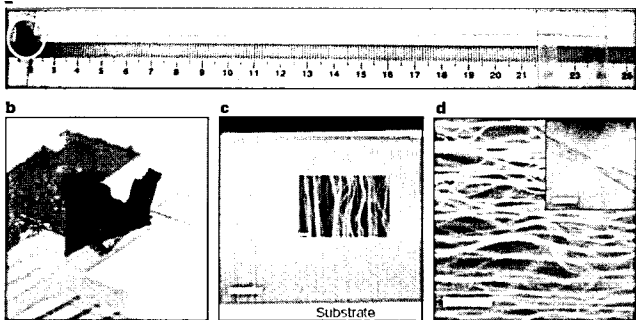


그림 4. 건식공정을 이용하여 제조된 중국 칭화대 Shoushan Fan 교수 연구팀의 CNT 섬유.

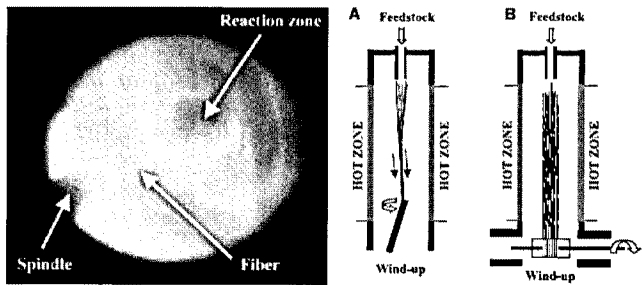


그림 5. 영국 케임브리지대에서 개발한 건식 CNT 섬유제조 공정.

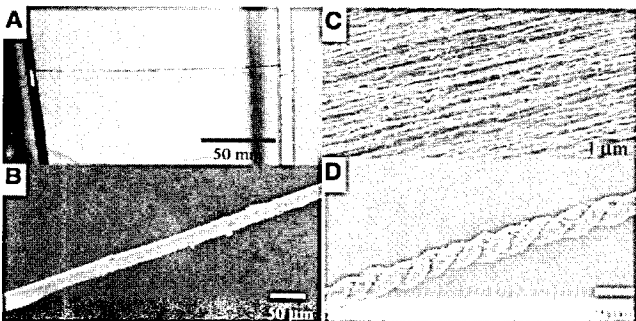


그림 6. 영국 케임브리지대에서 건식공정을 이용해 제조한 순수 CNT 섬유.

1.0 GPa 수준으로 낮은 편이지만 전기전도도는 8.3×10^5 S/m로 높은 수치를 보여주었다.

같은 시기인 2004년 미국 텍사스대(University of Texas at Dallas)의 Baughman 교수팀에 의해서 개발된 방법은 CNT Forest로부터 섬유를 인출하는 방법으로 전통적인 방직 공정과 유사하다(그림 7).⁹ 그림 8은 이렇게 제조한 섬유가 다양한 꼬임과 매듭이 가능함을 보여주는 SEM 사진이다.

건식공정을 이용해 순수 CNT 섬유를 제조하는 연구가 활발해 짐에

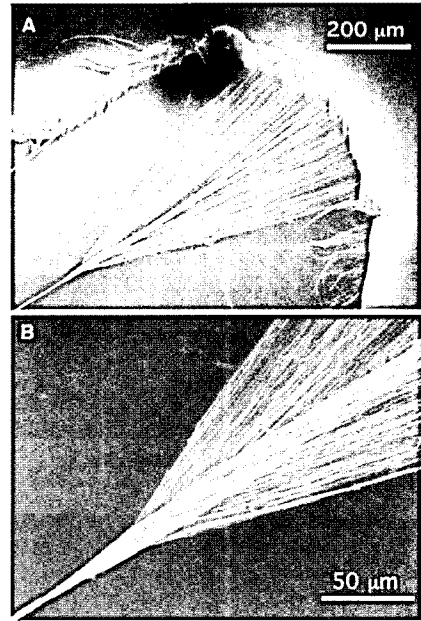


그림 7. 미국 텍사스대 Baughman 교수팀에 의해 개발된 탄소나노튜브 건식 제조법.

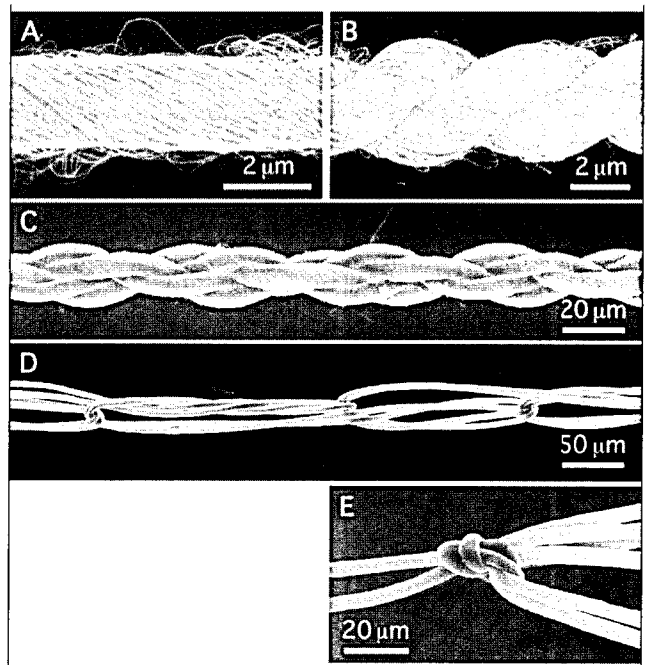


그림 8. 미국 텍사스대의 건식법으로 제조한 다중벽 탄소나노튜브(MWNT) 섬유의 다양한 형태 (A) single-ply yarn, (B) two-ply yarn, (C) four-ply yarn, (D) knitted yarn, (E) knotted yarn.

따라 2007년 미국 로스 알라모스 국립연구소(Los Alamos National Lab.)의 Yuntian Zhu 등은 더욱 개선된 방법으로 superthread 섬유(그림 9)를 제조하였고 이 섬유는 약 50 GPa 정도의 강도를 지니며 같은 무게의 강철에 비해 약 100배 정도 높은 강도 값을 보이고 있다고 보고하였다.¹⁰ 연구진에 따르면 섬유는 이중벽을 지니는 CNT를 이용해 제조되었으며 경량의 초고강도 소재이기 때문에 향후 우주항공 분야, 수송기기, 방탄복, 스포츠분야 등 다양한 분야에서 적용이 가능할 것이라고 예상하였다.

2007년 미국 텍사스대의 Baughman 교수팀은 호주의 산업섬유

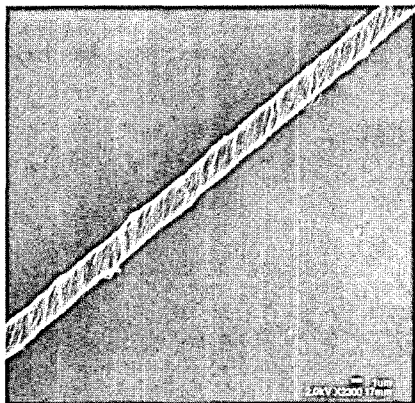


그림 9. 로스 알라모스 국립연구소의 superthread 섬유.

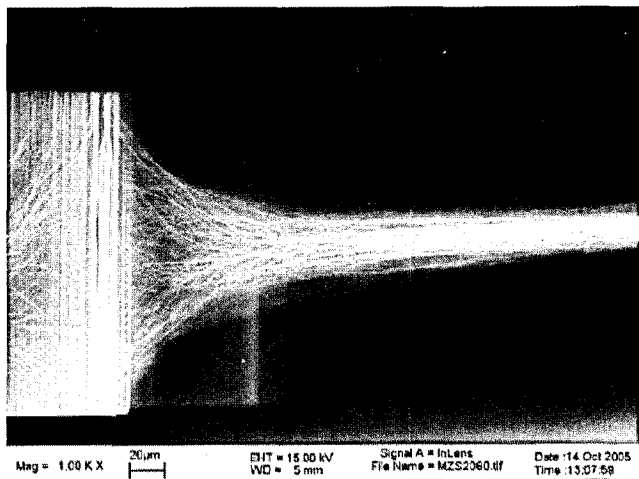


그림 10. 미국 텍사스대 Baughman 교수팀과 호주 CSIRO가 공동으로 연구한 MWNT 부직포형 시트.

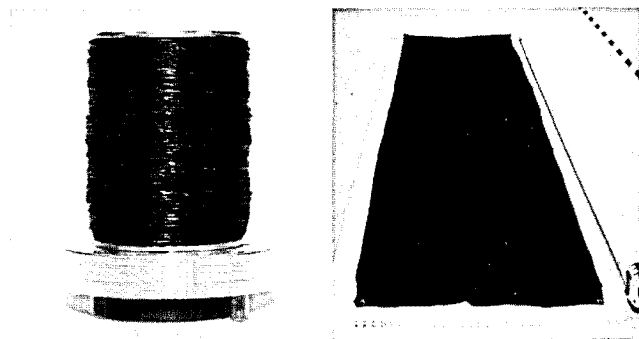


그림 11. Nanocomp Technologies 사의 순수 CNT 섬유와 직물 제품.

기술연구소(CSIRO, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization Textile and Fibre Technology, Australia)와 공동으로 투명하면서 강도가 우수한 MWNT 부직포형 시트를 제조하였는데(그림 10), 이 시트는 CNT forest로부터 섬유안을 추출하는 방법과 유사하게 시트를 제조할 수 있으며 유연성과 전기전도성 및 내열성이 우수하기 때문에 다양한 분야에 적용 가능할 것이라고 예상하였다.¹¹

최근에는 미국의 Nanocomp Technology 사에서 연속상의 CNT 섬유를 상업적으로 생산할 수 있는 기술을 개발하였는데 이 섬유는 강도가 강철보다 약 100배 정도 높고 전기전도성과 내열성이 우수하기 때문에 향후 고성능 경량섬유로 각광받을 것으로 기대하고 있다. 현재 섬유와 이를 이용한 직물 제품이 생산되고 있다(그림 11).¹²

2.3 습식 공정 CNT 섬유

고강도 및 고탄성률의 CNT 섬유를 제조하기 위해서는 섬유 내에서 탄소나노튜브가 섬유축을 따라 나란히 배향되어 있어야 하고 탄소나노튜브 상호간에 물리적 또는 화학적으로 충분히 결합되어 있어야 한다. 습식 공정은 건식 공정과 달리 랜덤하게 배향된 용액으로부터 섬유를 만들어야 하기 때문에 CNT를 배향시키기 어려운 단점이 있다. 그러나 2004년 미국 Rice 대학의 Smalley 교수 연구팀은 SWNT를 super acid에 4-10 wt% 농도로 용해시켜 높은 농도의 SWNT 용액을 제조하였으며, CNT가 super acid안에서 액정성을 갖는다는 연구에 기초하여 강직쇄 고분자인 poly(*p*-phenylene benzobisoxazole(PBO)와 같은 액정방사로 탄소나노튜브의 배향성이 우수한 SWNT 섬유를 제조하는데 성공하였다(그림 12).¹³ 섬유의 인장탄성률

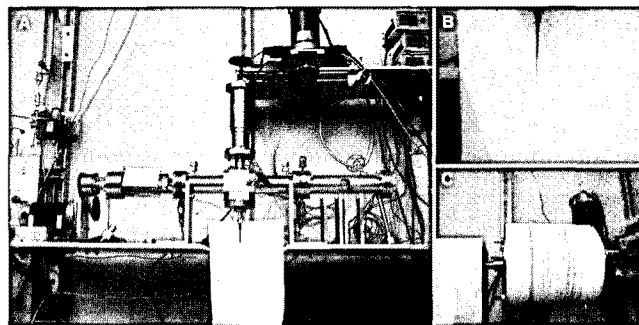


그림 12. 미국 Smalley 교수 연구팀에 의해 만들어진 액정형 SWNT 섬유.

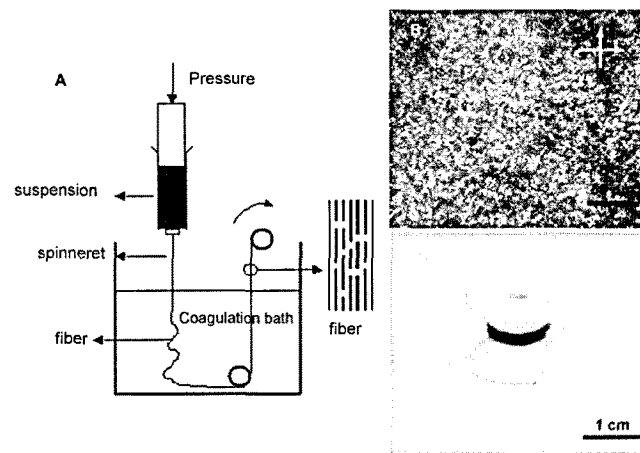


그림 13. Windle연구팀에 의해 제조된 배향성과 액정성을 지니는 MWNT 섬유.

은 120 GPa로 높은 값을 보여주었으나 섬유 내에 존재하는 기포나 결합 등으로 인해 인장강도는 120 MPa이라는 낮은 값을 보였다.

2008년 Windle 연구팀은 질산을 이용하여 섬유축 방향으로 높은 배향성을 지니는 섬유를 제조하였다(그림 13).¹⁴ 질산 dope에 의해 MWNT가 더욱 굳은 상태를 갖게 되는 것을 확인하였으며(그림 14), MWNT의 배향성이 우수한 것을 확인하였다(그림 15). 섬유의 기계적 강도는 0.17 ± 0.07 GPa이라는 낮은 수치를 보였으나 전기전도도는 3×10^4 S/m이라는 높은 수준의 값을 보여주고 있다.

2004년에 이어 2009년 미국 Rice 대학 연구팀은 super acid를 사용하여 분산용액 내에서 CNT가 액정성을 지녀 CNT의 배향성을 높일 수 있는 용액을 제조하였고(그림 16) coagulant를 이용한 간단한 습식 공정을 이용하여 섬유를 제조할 수 있음을 보고하였다(그림 17).¹⁵

2010년에 칭화 대학의 Kaili Jiang 교수와 Shoushan Fan 교수 연구팀은 습식법과 건식법을 혼합하는 방법을 발표하였다. 기존의 건식법의 꼬임을 주는 방법과 습식법에서 용매에 의해 수축시키는 방법으로는 균일한 고강도 섬유를 만들 수 없다는 단점을 보완하기 위해

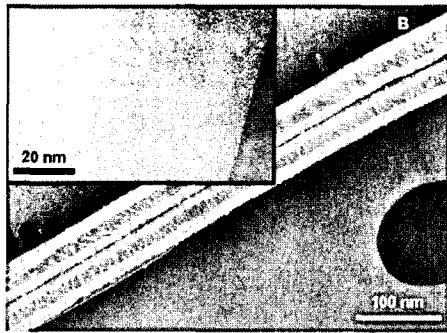


그림 14. 질산에서 굳은 구조를 갖는 MWNT.

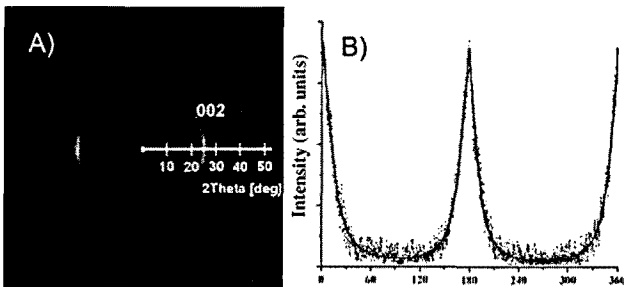


그림 15. (A) 습식법으로 제조된 섬유의 2D WAXRD 패턴, (B) (002)면의 azimuthal intensity 변화.



그림 16. Super acid 안에서 액정성을 지니는 CNT의 모습.

두 가지 공정을 결합한 그림 18과 같은 공정방법을 통해 균일한 고강도 섬유 제조가 가능함을 보고하였다.¹⁶

습식공정으로 순수한 CNT 섬유를 제조하는 기술은 액정 방식이 가장 앞선 것이 사실이지만 아직 기술적으로 개선의 여지가 많다. 그러나 습식공정은 기존의 습식방사 공정을 토대로 한 것으로써 다양한 종류의 탄소나노튜브를 사용할 수 있다는 장점이 있으며 건식공정보다 용이하게 상업화가 가능할 것으로 기대된다.

2.4 거대 탄소튜브의 섬유화

탄소나노튜브의 형상을 가지고 있으나 그 크기가 거대하여 마이크로 크기를 갖는 '거대 탄소튜브'의 합성이 소개되면서 그 자체로서 섬유 역할이 가능한 새로운 탄소계 섬유소재로 기대되고 있다. 2008년 미국과 중국 연구진에 의해 나노크기의 탄소튜브가 아니라 육안으로

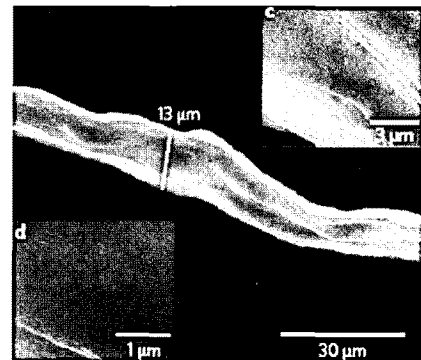
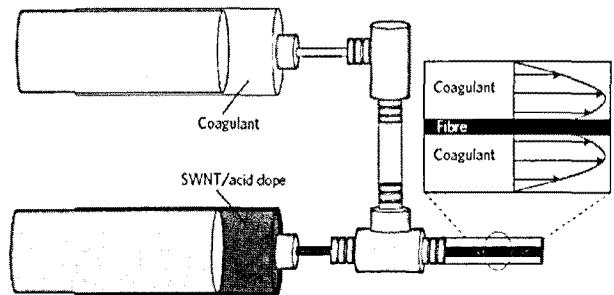


그림 17. Coagulant를 이용해 섬유를 제조하는 장치와 제조된 섬유의 SEM 사진.

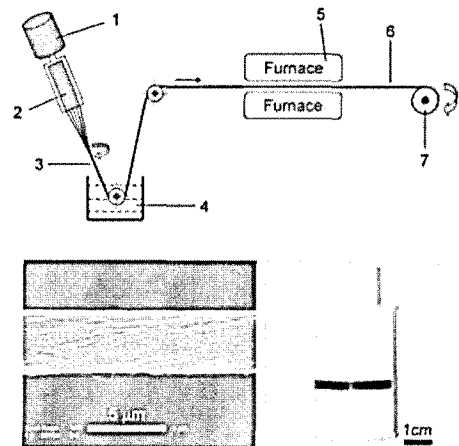


그림 18. 칭화 대학의 Kaili Jiang 교수와 Shoushan Fan 교수팀에 의해 개발된 공정 구조도와 섬유 사진.

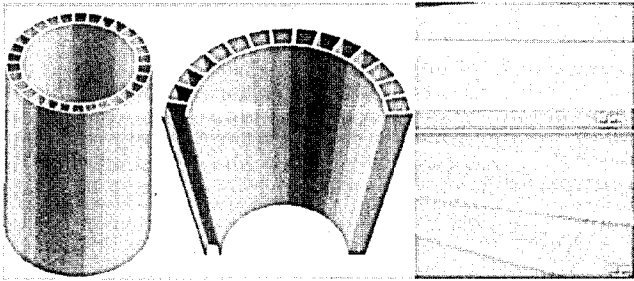


그림 19. 거대 탄소튜브의 구조도와 SEM 사진.

보일 정도로 거대한 탄소튜브가 처음으로 보고되었다(그림 19).¹⁷ 이 거대한 탄소튜브는 나노 크기의 탄소튜브에 비해서 수천 배 더 크고 특별한 기계적 성질과 전기적 성질을 가지고 있다. 이 거대 탄소튜브는 석영튜브(quartz tube furnace)에서 850 °C까지 에틸렌과 파라핀 오일의 혼합물을 가열하는 화학기상증착법(chemical vapour deposition process)으로 합성되었으며 지름이 40~100 μm이고 길이가 수 센티미터에 달해 육안으로 식별이 가능하다.

SEM 측정 결과 그림 19와 같이 약 1 마이크로미터 두께를 가진 튜브의 벽들 속에 수백 나노미터에서 몇 마이크로미터 정도의 크기를 가진 직사각형 기공이 존재한다는 사실이 확인되었다. 고해상도 투과전자현미경으로 튜브 벽들이 그래파이트 결정 구조와 같은 층으로 구성되어 있고, X선 회절 실험으로 내부 층간 거리가 그래파이트와 동일한 0.34 nm라는 사실이 밝혀졌다. 거대 탄소튜브는 매우 가볍고 탄소나노튜브와 동일한 밀도인 10 mg/cm³, 최대 인장강도 7 GPa이 측정되었다. 이는 CNT 섬유보다 더 높은 값이며 케블라보다 30배, 면(cotton)보다 224배 강한 수치이다. 거대 탄소튜브는 연성이 좋고 신축성이 우수하여 높은 연성이 요구되는 곳에 응용가능성이 기대된다. 또한, 전기전도성을 비교해 보면 다중벽 탄소나노튜브(MWNT) 섬유가 10² S/cm인데 비해서 거대 탄소튜브는 상온에서 약 10³ S/cm의 높은 전기전도성을 보여주었고, 온도에 따라서 전도성이 증가하는 것으로부터 탄소튜브가 반도체 성질을 가지고 있음이 예측되었다.

탄소나노튜브의 기계적인 물성과 전기적 물성을 가진 거대한 크기의 경량 탄소튜브는 나노튜브보다 쉽게 상업적으로 유용할 것으로 기대된다. 거대 탄소튜브의 우수한 특성들은 방탄조끼와 같은 경량 방호복, 고성능 경량 차량에 사용되는 고강도 복합물 부품 그리고 전자장치 시스템과 기계, 초강도 의복 등에 사용될 수 있을 것이다.

3. CNT 섬유의 응용분야

기존 CNT 복합섬유는 낮은 나노튜브 함량으로 인하여 CNT 본연의 물성을 나타내기 힘들었다. 하지만, 최근 고함량 또는 순수 CNT 섬유의 개발에 따라 그것의 우수한 전기적, 기계적 성질을 이용한 응용분야 적용이 활발히 진행 중이다. CNT 섬유의 주요 응용분야를 CNT의 전기적 특성을 이용한 분야와 초고강성을 이용한 분야로 구분하여 기술하였다.

텍사스대학의 Baughman 교수 등은 CNT 용액을 PVA 용액에 방사함으로써 인성이 570 J/g으로 매우 길긴 CNT 섬유(super tough fiber)를 개발하였다. 이들은 고인성 CNT 섬유를 직물 속에 넣어줌으로써 직경이 100 μm인 직물형 슈퍼커패시터를 제조하였고 5 F/g의

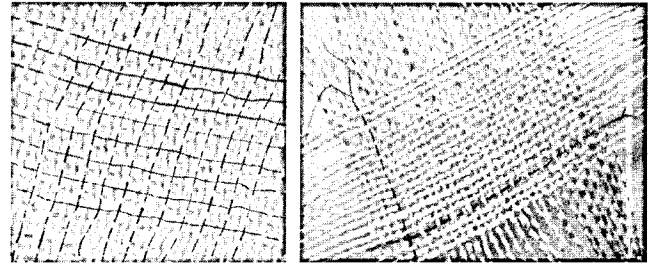


그림 20. Super tough CNT 섬유를 이용한 직조형 슈퍼커패시터 적용 예.



그림 21. CNT 섬유를 활용한 인공근육의 응용 개념도.

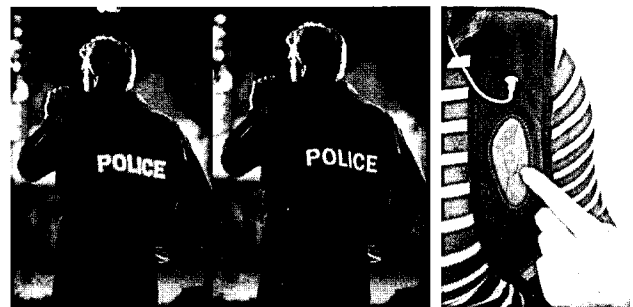


그림 22. 전기적 특성을 지닌 스마트의류.

정전용량, 0.6 Wh/kg(1 V charge)의 energy storage density가 측정되었다(그림 20).⁶

또한, 2004년에 Baughman 교수팀은 CNT forest에서 인출된 전식법에 의한 순수 CNT 섬유로 액츄에이터에 응용하였다.⁹ 액츄에이터는 인공근육으로 제작되었는데 자연 근육의 100배로 증가시킬 수 있다고 한다. 개발된 인공근육중 CNT 섬유 인공근육은 최고로 평가되어지고 있다(그림 21).

CNT 섬유는 우수한 전기적 성질을 이용하여 슈퍼커패시터와 액츄에이터의 응용뿐만 아니라 CNT 섬유로 형성된 직물로 제작하였을 때 두 직물 사이의 거리의 변화에 따른 정전용량 변화에 의한 센서 혹은 CNT 섬유 직물을 터치하였을 때 전기 신호변화에 의한 센서로 이용될 수 있다. 또한, CNT 섬유를 의류에 삽입하여 그림 22와 같이 의류에서 전기적 신호를 보내 여러 용도의 스마트의류 시장에도 많이 응용될 것으로 기대된다.

섬유를 고강도화하기 위한 노력은 오래전부터 이루어져 왔다. 강도를 증가시키기 위해 다양한 고분자들의 섬유화가 시도되었고 그 고분자에 충전제를 넣음으로써 강도증가가 행해져 왔다. 그중 가장 대표적인 섬유가 고분자 사슬이 곧고 액정방사가 가능한 PBO 섬유와 고분자

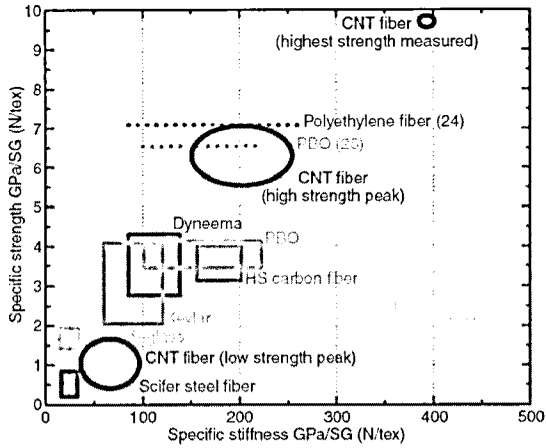


그림 23. CNT 섬유와 다른 고강도 섬유들과의 강도비교.

량의 PE의 배향도를 높인 UHMWPE 그리고 PAN 또는 pitch 등에 의해 만들어지는 탄소섬유가 있다. 기존 CNT 섬유는 섬유화가 용이한 고분자들 사이에 소량 분산시켜 혼합함으로써 강도증가를 시도하였지만 최근에는 순수 CNT 섬유 또는 대부분이 CNT로 이루어진 섬유로 개발이 가능해지면서 고분자로 만들어진 섬유인 PBO, UHMWPE와 탄소섬유의 성능한계를 뛰어 넘고 있다(그림 23).¹⁸

이탈리아 연구진은 탄소나노튜브를 현수교(suspension bridge)에 적용하면 획기적인 중앙 경간장(main span)의 길이 연장이 가능하다는 계산결과를 발표하였다.¹⁹ 현재 전 세계에서 1 km 이상의 경간장을 가진 현수교 다리는 수백개 정도가 있으며 경간장을 연장하기 위해 고장력을 지탱할 수 있는 강한 물질로 만들어질 필요가 있다. CNT 섬유가 이상적인 물질이지만 탄소나노튜브 내부에 많은 결함이 존재하기 때문에 실제 적용에 곤란한 점이 많았다. 우주 엘리베이터(space elevator)는 이론상 100 GPa의 강도와 100,000 km의 탄소나노튜브 다발이 필요한데 반해 현수교 케이블은 단지 10 km의 길이에 10 GPa의 강도만이 요구된다. 연구진은 다리의 구조역학과 탄소나노튜브의 강도를 결합시켜서 만든 결과와 이제까지 만들어진 다리를 토대로 한 통계적인 분석으로부터 결함이 존재하는 탄소나노튜브 다발일지라도 중앙 경간장의 현재의 한계를 3배 이상 증가시킬 수 있음을 증명하였다. 현수교 케이블에 사용되는 탄소나노튜브 섬유는 현재 가격으로는 150 \$/kg이고 향후 45 \$/kg의 매우 저렴한 비용으로 제작될 수 있다. 즉, 1 m의 지름을 가진 10 km 길이의 탄소나노 케이블을 제작하는데 약 10억 달러의 비용이 드는데 현재의 기술과 재료를 사용해서 동일한 크기의 현수교를 제작하는 데는 거의 10배 정도 더 든다.

우주 엘리베이터는 1895년 러시아 과학자 Konstantin Tsiolkovsky가 파리의 에펠탑을 우주 공간으로 향하는 탑에 비유하면서 사용되었다. 이후 2000년 NASA 과학자들에 의해서 적도에 있는 30 마일 높이의 탑에서 지구 궤도까지 올라갈 수 있는 거대한 엘리베이터를 건설하기 위해 수행된 연구에 의해서 구체화되기 시작했다. 이 우주 엘리베이터는 훨씬 적은 비용으로 물품들을 지구궤도에 올려놓을 수 있는 장점이 있으나, 현재의 기술로는 불가능하고 적어도 10년 이상이 지나야 첫 우주 엘리베이터가 건설될 것으로 전망된다(그림 24). 이 우주 엘리베이터의 실현화에 CNT 섬유가 큰 역할을 할 것으로 예상되며 우주왕복선에 비해 운송비용이 1/5 수준으로 감소할 것

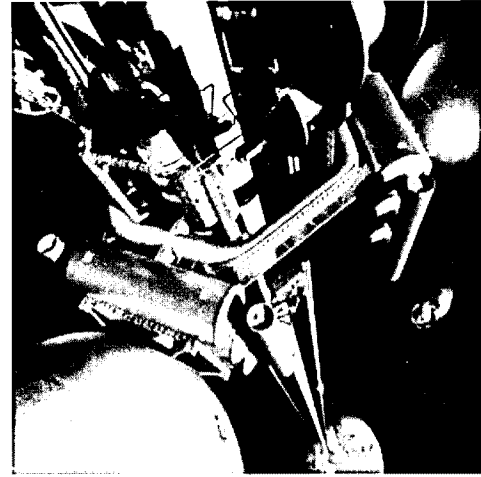


그림 24. 지구와 우주정거장을 연결하는 우주 엘리베이터 가상도.

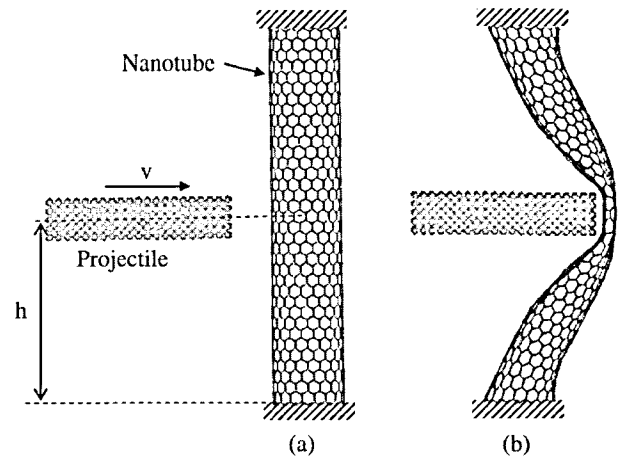


그림 25. 충격을 받은 탄소나노튜브의 분자 역학 시뮬레이션 (a) 초기 모델, (b) 최대 에너지 흡수로 변형된 나노튜브.

으로 기대되고 있다.

가볍고 견고한 방탄복을 개발하기 위한 노력이 세계 각국에서 경쟁적으로 진행되고 있다. 탄소나노튜브는 강하고 경량이며 높은 탄성을 지녔기 때문에 높은 운동 에너지를 흡수할 수 있다. 호주 시드니 대학의 연구팀은 탄소나노튜브가 빠르게 움직이는 탄알의 힘을 되튀게 할 수 있음을 시뮬레이션으로 보여주었다(그림 25). 이들은 나노튜브가 반복되는 충격에 의한 손상에 견딘다는 것을 보여주었는데, 이 특성은 방탄복의 성능으로서 중요한 항목이다. 다이아몬드로 만든 소형 "탄알"에 의해 충격을 받은 단일벽 탄소나노튜브의 거동을 모델링하여 나노튜브의 반경, 실탄을 발사한 위치, 그 속도 및 나노튜브가 흡수한 에너지 사이의 관계를 조사하였다. 이로부터 100 μm 두께의 CNT 섬유 또는 다발 6겹으로 만든, 600 μm 두께의 방탄복을 제조하면 320 J의 에너지를 가진 실탄을 되튀게 할 수 있을 것으로 계산되었다.²⁰ 이상의 결과로부터 CNT 섬유로 제조된 방탄복은 보통 케블라, 트와론 및 다이마 등 여러 섬유 층으로 구성된 기존 방탄복보다 더 나을 것으로 예측되었다. 기존의 방탄복은 실탄이 뚫지는 못하지만 실탄보다 넓은 영역으로 힘을 분산시키므로 심한 명부터 장기 손상에 이르는 외상을 일으킬 가능성이 있지만 탄소나노튜브는 탄성 저장 에너지 수준이 높아 이러한 외상을 방지할 수 있을 것으로도 기대되고 있다.

이상과 같이 극도로 강하면서, 무게는 가벼운 CNT 섬유는 많은 분야에 적용될 수 있으며, 금속에 비해 월등한 소재 특성을 가지고 있다. 이러한 탁월한 소재 특성으로, 상지에서 언급된 응용분야 이외에도 항공기 분야를 비롯해 자동차 산업, 스포츠 용품 등 다양한 분야의 주 소재로 등장할 것으로 기대된다. 마지막으로 텍사스대학의 Baughman 교수가 주장하는 CNT 섬유의 응용분야를 정리하였다.²¹

- 배터리처럼 전기 에너지를 저장할 수 있고 각종 전기 장치에 전원을 공급하는데 사용될 수 있는 섬유로 짠 의류
- 동일한 지름의 근육 보다 100배 더 큰 힘을 낼 수 있는 인공 근육
- 응급상황에서 “초기 조치자”의 움직임과 건강을 모니터링 할 수 있는 섬유 센서
- 나노튜브 섬유를 사용하여 열에너지를 전기 에너지로 전환, 오랜 기간 비행하는 우주선의 전원으로 사용
- 현재 사용되는 것보다 훨씬 더 효과적인 차세대 방탄복
- 군사 정보를 수집하기 위해 현재 사용되는 군사용 비행체를 대체할 수 있는 벌레만한 크기의 소형 비행 체용 다기능 섬유

4. 결론 및 향후 전망

이상의 연구결과를 종합하면 미국 텍사스대의 건식법 또는 칭화대학의 건식과 습식이 결합된 방법이 가장 진보된 CNT 섬유 제조방식으로 평가된다. 그러나 이 방법은 적용 가능한 탄소나노튜브가 제한된다는 단점이 있다. 습식법의 경우 미국 Rice 대학교의 Super Acid 공정을 제외한 나머지 습식공정은 대부분 수분산액을 사용하였고 물에 잘 용해되는 PVA를 바인더로 사용한 것을 알 수 있다. 그러나 PVA를 포함하는 CNT 섬유는 물성이 우수한 반면 PVA의 고유한 단점으로 인하여 사용상의 한계가 분명한 약점이 있다. 반면에 Super Acid를 사용하는 공정은 장비의 부식성 등 문제점에 비해서 얻어진 섬유의 물성이 그다지 높지 않아 아직도 개선의 여지가 큰 것으로 판단된다. 그러나 이러한 여러 가지 문제점에도 불구하고 만일 탄소나노튜브를 섬유로 만들 수 있다면 응용할 수 있는 분야는 매우 많다. 강도 및 탄성률과 같은 기계적 성질은 점차 향상되겠지만 전기전도성, 전기응답성과 같은 성질은 지금 당장이라도 응용 가능한 성질이다. 예를 들어 텍사스 대학교의 Baughman 교수가 그림 7과 같은 방법으로 제조한 CNT 섬유를 이용하여 만든 인공근육은 이제까지 만든 것 중 최고의 것으로 평가되고 있다. 일단 탄소나노튜브를 섬유로 만들기만 해도 다양한 응용이 가능하기 때문에 CNT 섬유의 개발은 매우 매력적인 주제가 아닐 수 없다. 앞으로 수 년 내 상업적인 제품이 나오려면, CNT 복합체 섬유의 경우처럼 연구능력의 개선과 더불어 보다 현실적인 생산수단의 개발과 생산성의 향상이 요구된다. CNT 섬유에 대한 정부와 산업계의 많은 투자와 학계 및 연구계의 많은 관심과 연구열의가 필요한 상황이며 응용 가능성 및 상용화 가능성의 장래는 매우 밝아 보인다.

참고문헌

1. J. L. Bahr, E. T. Michelson, M. J. Bronikowski, R. E. Smally, and J. M. Tour, *Chem. Comm.*, 193 (2001).
2. K. D. Ausman, R. Piner, O. Lourie, and R. S. Ruoff, *J. Phys. Chem. B*, **104**, 8911 (2000).
3. G.-W. Lee and S. Kumar, *J. Phys. Chem. B*, **109**, 17128 (2005).
4. G.-W. Lee, Y.-B. Park, and S. Kumar, “Structure and properties of carbon nanotube-based films and fibers”, in *Functional Nanomaterials*, K. E. Geckeler and E. Rosenberg, Editors, American Scientific Publishers, New York, 2005.
5. B. Vigolo, A. Penica, C. Coulon, C. Sauder, R. Paillet, C. Journet, P. Bernier, and P. Poulin, *Science*, **290**, 1331 (2000).
6. A. B. Dalton, S. Collins, E. Muñoz, J. M. Razal, V. H. Ebron, J. P. Ferraris, J. N. Coleman, B. G. Kim, and R. H. Baughman, *Nature*, **423**, 703 (2003).
7. K. Jiang, Q. Li, and S. Fan, *Nature*, **419**, 801 (2002).
8. Ya-Li Li, I. A. Kinloch, and A. H. Windle, *Science*, **304**, 276 (2004).
9. M. Zhang, K. R. Atkinson, and R. H. Baughman, *Science*, **306**, 1358 (2004).
10. Q. Li, Y. Li, X. Zhang, S. B. Chikkannavar, Y. Zhao, A. M. Dangelewicz, L. Zheng, S. K. Doorn, Q. Jia, D. E. Peterson, P. N. Arendt, and Y. Zhu, *Adv. Mater.*, **19**, 3358 (2007).
11. K. R. Atkinson, S. C. Hawkins, C. Huynh, C. Skourtis, J. Dai, M. Zhang, S. Fang, A. A. Zakhidov, S. B. Lee, A. E. Aliev, C. D. Williams, and R. H. Baughman, *Physica B*, **394**, 339 (2007).
12. <http://www.nanocomptech.com>.
13. L. M. Ericson, H. Fan, H. Peng, V. A. Davis, W. Zhou, J. Sulpizio, Y. Wang, R. Booker, J. Vavro, C. Guthy, A. N. G. Parra-Vasquez, M. J. Kim, S. Ramesh, R. K. Saini, C. Kittrell, G. Lavin, H. Schmidt, W. W. Adams, W. E. Billups, M. Pasquali, Wen-Fang Hwang, R. H. Hauge, J. E. Fischer, and R. E. Smalley, *Science*, **305**, 1447 (2004).
14. S. Zhang, K. K. K. Koziol, I. A. Kinloch, and A. H. Windle, *Small*, **4**, 1217 (2008).
15. V. A. Davis, A. N. G. Parra-Vasquez, M. J. Green, P. K. Rai, N. Behabtu, V. Prieto, R. D. Booker, J. Schmidt, E. Keselman, W. Zhou, H. Fan, W. W. Adams, R. H. Hauge, J. E. Fischer, Y. Cohen, Y. Talmon, R. E. Smalley, and M. Pasquali, *Nature Nanotechnology*, **4**, 830 (2009).
16. K. Liu, Y. Sun, R. Zhou, H. Zhu, J. Wang, L. Liu, S. Fan, and K. Jiang, *Nanotechnology*, **21**, 045708 (2010).
17. H. Peng, D. Chen, J. U. Huang, S. B. Chikkannavar, J. Hanisch, M. Jain, D. E. Peterson, S. K. Doom, Y. Lu, Y. T. Zhu, and Q. X. Jia, *Phys. Rev. Lett.*, **101**, 145501 (2008).
18. K. Koziol, J. Vilatela, A. Moissala, M. Motta, P. Cunniff, M. Sennett, and A. Windle, *Science*, **318**, 1892 (2007).
19. <http://nanotechweb.org/cws/article/tech/34424>.
20. K. Mylvaganam and L. C. Zhang, *Nanotechnology*, **18**, 475701 (2007).
21. <http://www.nanotech-now.com/UTDallas-release-06112003.htm>.