Electrospining 및 유무기 혼성기술을 이용한 산업용섬유 제조기술 개발

김 병 철
한양대학교 응용화공 · 생명공학부

1. 연구제안의 배경

21세기를 선도할 첨단산업에서는 환경친화성, 초경량성, 극한기능성, 복합기능성 등과 같은 다기능이 복합된 새로운 개념의 소재가 요구될 것이 자명한 사실이다. 이미 소재분야에서는 지금까지의 전통적인 소재기술로는 얻을 수 없는 극한적인 물성 및 성능의 새로운 기준을 제시하고 국제 규격화함으로써 세계시장을 선점하려는 시도가 몇몇 선진국에 의해서 이루어지고 있다. 자국의 첨단기술을 이용하여 독점적 경쟁력을 높이려는 눈에 보이지 않는 전쟁은 장래 국가발전의 새로운 도약을 선도할 IT, BT, ET, ST 등 21세기형 고도 기술 집약적 첨단산업에서 더욱 치열할 것으로 판단된다. 주지하는 바와 같이 산업용섬유는 이러한 첨단산업의 필수 부품소재로서 그 용도가 나날이 확대되고 있다. 따라서 국가 경쟁력을 높이기 위해서는 이들 첨단산업 발전의 견인차 역할을 할 복합기능의 고성능 산업용섬유 재료에 대한 연구개발이 매우 중요하며, 선진국에 대한 기술선점을 확보하기 위해서는 독자적인 기술개발을 통한 산업용섬유 물성의 quantum jump를 얻을 수 있는 새로운 개념의 기술개발이 반드시 필요한 시점에 있다.

본 연구는 이러한 새로운 개념의 기술에 의한 차세대 산업용섬유를 제조하기 위하여 기존의 섬유제조기술에 nano기술(nanotechnology)을 접목한다. 이러한 신기술 개발의 일환으로 기존의 섬유기술의 주종을 이루고 있는 micron 또는 submicron단위의 구조제어 기술을 nano단위의 구조제어 기술로 심화시키는 한편 유기 섬유소재만으로는 결코 얻을 수 없는 다양한 기능성과 특성을 다양한 무기 nano소재와 유기 섬유소재와 혼성(hybridization)으로 설계하고 창출한다. 특히, 유무기 혼성기술이 섬유 제조기술에 도입되면 타 첨단산업에서 요구하는 다양한 특성과 기능성을 설계할 수 있음에도 불구하고 현재까지 섬유산업에서 상품화되어 있는 무기 nano입자를 이용하여 기존섬유의 기능을 단순 개질하려는

Figure 1. 단계별 기술개발 추진 계통도.

시도는 많았으나 전 세계적으로 무기소재분야와 유기섬유분야의 공동연구에 의한 기존의 섬유특성과는 전혀 다른 기능성을 갖는 새로운 세대의 섬유창출에 대한 시도는 거의 없었다.

이러한 새로운 개념의 산업용섬유 개발을 목표로 지금까지 국내외에 시장이 형성되어 있지 않거나 초기 형성단계로서 미래의 기술가치가 클 것으로 예측되는 분야를 집중적으로 선정하여 중소 또는 venture 기업위주로 과제를 기획하여 기초기술과 이에 대한 feasibility test과정의 1단계 연구를 진행하였으며 현재는 구체적인 제품을 선정하여 실용화를 목표로 2단계 연구가 진행 중에 있다. 과제의 연구 개발을 위한 전체적인 연구 진행도는 *Figure* 1과 같다.

1.1. 연구개발 기간

- 전체: 2001. 10. 01 ~ 2010. 7. 31(106개월) / 3단계
- 1단계: 2001. 10. 01 ~ 2004. 07. 31(34개월)
- 2단계: 2004. 08. 01 ~ 2007. 07. 31(36개월)

1.2. 연구개발 사업비

- 전 체: 17,255(백만원), 정부출연금: 12,524(백만원), 민간부담: 4,731(백만원)
- 1단계: 8,360(백만원), 정부출연금: 6,413(백만원), 민간부담: 1,947(백만원)
- 2단계: 8,895(백만원), 정부출연금: 6,111(백만원), 민간부담: 2,784(백만원)

1.3. 주요 연구개발 내용

- Nano 섬유의 양산화공정 개발 및 응용제품 개발
- Nano 섬유의 탄화 및 후처리공정 개발 및 응용 제품 개발
- 섬유용 기능성 nano입자의 양산화공정 개발 및 응용 개발

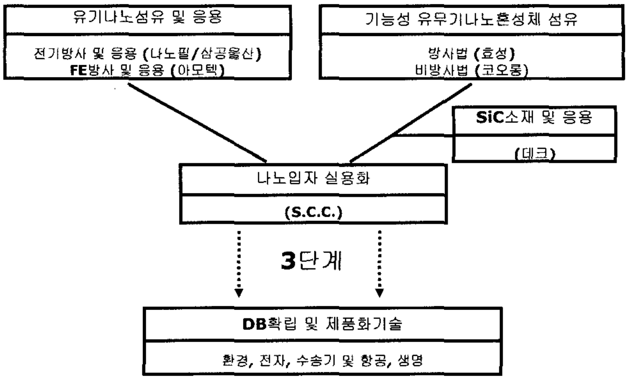


Figure 2. 2단계 연구개발 추진도.

- 유무기 nano혼성체 제조 및 섬유화 기술 개발
- 고성능 SiC섬유 및 고성능 SiC복합체 제조기술 개발

2. 연구개발의 개요

연구과제는 *Figure* 2에 도시된 것과 같이 크게 세 분야로 이루어져 있다. 첫 번째 분야인 nano섬유 web의 제조기술과 응용기술 분야는 nano차원의 구조제어로 다양한 기능과 성능을 갖는 산업용 nano섬유의 실용화 기술개발이 주 목적이며 두 번째 분야인 유무기 nano소재의 혼성화와 섬유화 분야는 다양한 소재의 개질과 조합에 의한 복합기능의 산업용섬유의 설계와 개발이 주 목적이다. 세 번째 분야에서는 SiC섬유 제조를 위한 precursor소재 및 precursor섬유의 제조공정 개발과 이 방법으로 제조된 precursor섬유의 nano domain을 제어하여 고성능 SiC섬유를 제조하는 기술도 개발한다. 연구개발을 수행하는 세부주관기관과 참여기업, 그리고 위탁기관의 현황은 *Figure* 3에 도시된 것과 같다.

Electrospinning은 고분자 용액이나 용융체에 표면장력 이상의 높은 전기장을 가하면 고분자 용액은 방사구의 끝에서 taylor cone으로 알려진 방추형을 형성하게 되고 그 이상의 전기장이 가해지면 용액이 섬유의 형태로 분출되게 되는 원리를 이용한 것이다.

이와 같이 강한 전기장을 이용하여 고분자 용액(또는 용융체)를 분사시켜 단섬유를 제조하는 원리는 이미 1세기전인 1914년 Zeley에 의해 발견되었다. 그 뒤로 지속적인 연구가 이루어지지 못하다가 최근 들어 nano섬유를 제조할 수 있다는 사실이 알려지면서 각광을 받고 많은 연구가 이루어지고 있다.

그러나 일반인들의 상식적 판단과는 달리 섬유산업에서의 nano섬유는 이미 오래전에 개발되었다. 혼합 또는 복합 방사에 의해 얻어지는 0.0001 denier 섬유는 그 굵기가 40-60 nano meter로서 현재 electrospinning에 의해 얻어지는 수백 nano meter 굵기의 섬유보다는 월등히 가늘다. 결론적으로 electrospinning에 의해 얻어지는 nano섬유는 그 굵기가 가늘기 때문에 중요한 것이 아니라 이로부터 얻어지는 호흡성(breathability)등과 같은 섬유의 특성이 기존의 melt-blown이나 복합방사로 얻어지는 섬유와 다르기 때문에 중요하다. 특히, electrospinning에 의해 nano수준에서 미세하게 구조가 제어된 단섬유로 이루어진 부직포 형상의 web은 섬유의 직경 및 직경분포, 섬유의 표면 및 기계적 물성, 부직포내의 기공(pore)의 구조와 분포, 기공률(porosity), 제품의 두께 균일성 및 단면구조 등을 정교하고 손쉽게 설계, 제조할 수 있어 고품질, 고성능을 요구하는 고부가가치의 섬유제품을 설계할 수 있는 장점이 있다.

Electrospinning공정은 기존의 복합 또는 혼합방사로는 불가능한 다양한 기능을 가진 고분자 재료를 nano섬유화할 수 있어 다양한 기능을 갖는 섬유 소재를 개발할 수 있기 때문에 중요하다. 특히, electrospinning에 의해 얻어지는 nano섬유는 지금까지 약 30여종의 합성섬유 및 천연섬유를 재료로, electrospinning의 원리 및 제조된 섬유의 형태와 구조에 대한 연구가 이루어지고 있으며 앞으로 거의 모든 합성성유 및 천연 섬유에 대한 연구와 이를 이용한 응용분야의 연구가 지속적으로 이루어 질것으로 기대된다. 또한, electrospinning법에 의하면 유기 nano섬유 뿐만 아니라 무기 및 금속으로 된 nano섬유도 제조할 수 있어 향후 용도개발 가능성이 무

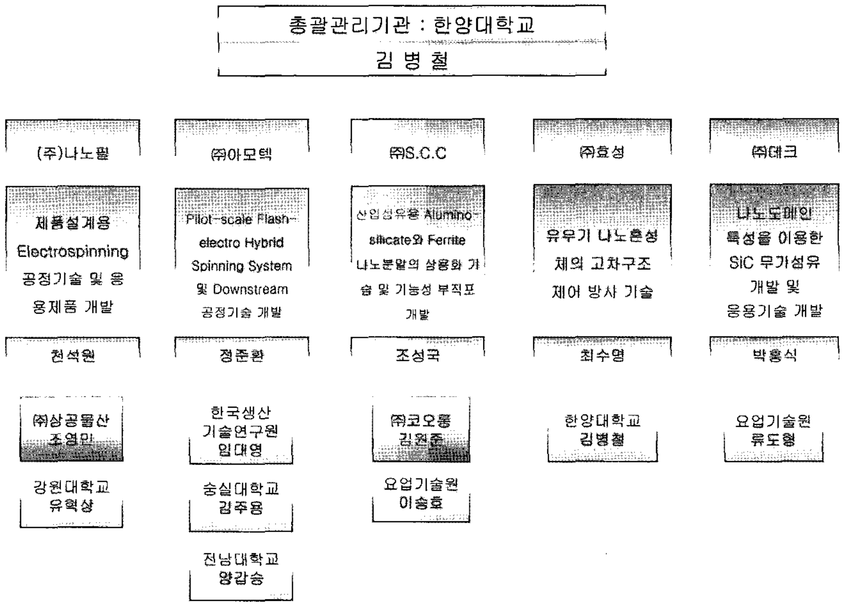


Figure 3. 2단계 연구개발 주체 구성도.

한하며 미래 소재로서 매우 중요하다. 그러나 이러한 특성을 구현하면서 양산화 시키는 기술개발이 매우 어려워 상업생산에 이르는 기술적 성취도는 매우 낮으며 이 결과 제품개발의 주기상 태동기 단계에 있다. 현재 nano섬유 부직포는 고효율 필터분야를 비롯하여 분리막(separator) 및 전극과 같은 이차전지분야, 인조피부, 인공장기 등과 같은 의료분야, solar sail, light sail 등과 같은 우주항공분야에 대한 용도개발도 활발하게 진행되고 있다.

본 연구에서는 순수한 electrospinning에 의해 경제성이 있는 규모의 nano섬유 web 제조 공정을 개발하고 이를 활용한 새로운 용도의 제품을 창출한다. 또한, 순수한 electrospinning공정의 단점인 낮은 생산성을 개선하기 위하여 섬도와 web의 균일성은 약간 저하하더라도 생산성을 크게 향상시킬 수 있는 flash-electro hybrid spinning공정을 개발하고 이로부터 얻어지는 nano섬유 web을 탄화시켜 탄소 nano섬유 web을 제조하거나 이를 분쇄하여 EDLC 등과 같은 다양한 용도의 전자 제품의 소재도 개발한다.

Nano입자는 현재 섬유산업에서 보편적으로 사용되고 있는 micro입자에 비하여 낮은 충전량에 의해서도 높은 기능성을 얻을 수 있고, 넓은 표면적에 의하여 흡착성 등 표면활성이 높아 다른 섬유소재와의 혼화성이 우수하여 여러 가지 종류의 기능성 nano소재를 한가지의 유기섬유 내에 도입시켜 지금까지의 기술로는 나쁜 방사성(spinnability) 및 높은 절사(fiber breakage)율 때문에 거의 불가능한 고성능의 복합기능 섬유소재 창출이 가능하나 현재까지 기능성 nano입자를 섬유에 적용하기 위해 성상을 제어하는 연구는 이루어진 적이 거의 없다. 무기 nano입자가 섬유산업에 적용되면 nano입자의 양산화가 가능하며 이러한 대량생산 기술로 복합성능의 섬유제품을 제조하면 가격-성능의 균형을 맞출 수 있을 것으로 예상된다.

본 연구에서는 염가로 기능성 무기 nano입자를 대량 생산하는 공정과 이러한 무기 nano입자를 활용하여 다양한 기능성 부직포와 고성능의 tire cord용 섬유를 제조하는 기술을 개발한다. 또한, 미래 우주항공이나 수송기 산업에서 초고내열성과 초고강도를 겸비한 SiC섬유와 이를 활용한 복합재료의 개발이 매우 중요하므로 본 연구에서는 이에 대한 연구개발도 수행한다.

3. 연구개발의 목표

3.1. 최종목표

- 섬도 수십 nm의 고효율 환경용 및 energy 저장 기능 nano섬유 및 web의 실용화
- EDLC electrode용 nano 활성탄소섬유 web 제조를 위한 pilot-scale flash-electro hybrid spinning system 및 downstream 공정기술 개발
- 200 L 급 항균, 소취, VOC 제거, 전자파 차폐 흡수기능의 nano 분말 pilot 제조 공정 기술 개발과 인공피혁 및 스펀본드 부직포 제조 적용 기술 개발
- 기계적 물성, 내열성이 우수하고 고탄성율, 저수축율의 산업용 polyester nano복합체 섬유 개발
- SiC fiber의 pilot-scale 연속공정개발 및 CFCC 응용제품 개발

3.2. 단계별 개발목표

3.2.1. 1단계 개발목표

- 유기 및 무기재료의 nano화 기술
- Nano 복합분말 합성기술
- 입도, 입도 분포 및 성상(표면, 모양, 밀도 등) 제어기술 개발
- Nano 분산계의 유변학적 특성 규명
- Nano 분산계의 구조-물성간의 관계 규명
- Nano 단/장 섬유시제품 설계
- 기능성 nano 부직포 제조

3.2.2. 2단계 개발목표

- 제품설계용 electrospinning 공정기술 및 응용제품

개발
- Pilot-scale flash-electro hybrid spinning system 구축
- 섬유용 항균, 소취, VOC 제거 기능의 pilot 급(200 L) nano 분말 제조 공정 기술 확립
- 기계적 물성, 내열성이 우수하고 고탄성율, 저수축율의 산업용 polyester nano복합체 섬유 개발
- SiC섬유 제조공정 최적화 및 CFCC 제조기술개발

3.2.3. 3단계 개발목표
- 기능 복합화 기술
- 성능 극한화 기술
- 실용화 기술개발
- 제품 설계를 위한 DB 구축 및 응용기술 개발
- SiC섬유의 pilot-scale 연속공정개발 및 CFCC 응용제품 개발

4. 연구개발의 진행상황

4.1. (주)나노필 (구(주)삼신크리에이션)
"제품설계용 Electrospinning 공정기술 및 응용제품 개발"을 수행 중인 (주)나노필은 세계 최초로 제품 맞춤형 순수 electrospinning 양산공정 기술의 개발에 성공하여 현재 2차전지, 초고효율 필터(HEPA 급) 및 의료용 등의 소재로서 상용화 연구가 진행 중에 있다.

4.2. (주)아모텍

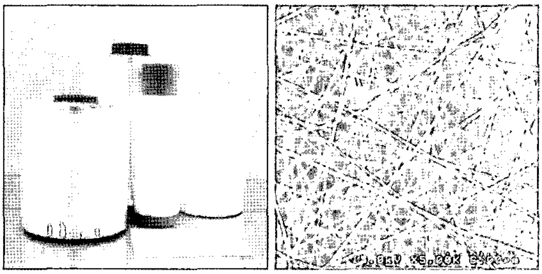


Figure 4. Electrospun web 시료.

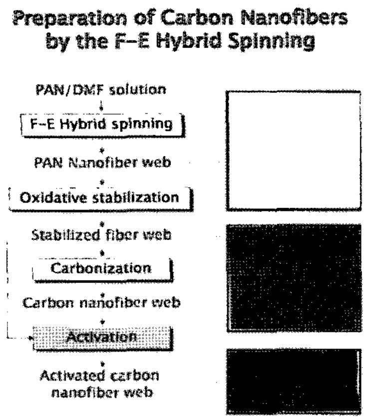
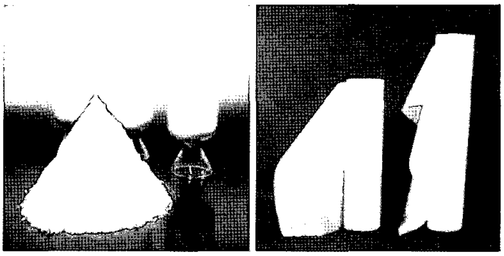


Figure 5. Activated nano carbon fiber web 제조 공정도.

"Pilot-scale Flash-electro Hybrid Spinning System 및 Downstream 공정기술 개발"을 수행 중인 (주)아모텍은 flash-electro hybrid spinning공정을 이용하여 nano섬유 web의 양산화 기술을 개발하였으며 이로부터 얻어진 web을 탄화 및 활성화하는 공정도 개발하여 현재 EDLC 전극 및 기타 전자부품으로의 응용기술을 개발하고 있다.

4.3. (주)S.C.C
"산업섬유용 Alumino-Silicate와 Ferrite Nano분말의 상용화 기술 및 기능성 부직포 개발"을 수행 중인 (주)S.C.C는 최종 목표를 달성한 상태는 아니나, 어느 정도의 상업적 가치를 가지는 제품을 개발한



(a) (b)

Figure 6. (a) 항균 및 소취 nano 분말 및 (b) nano 분말을 함유한 기능성 부직포.

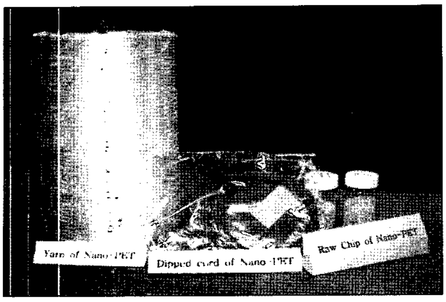


Figure 7. Nano입자를 함유한 PET tire cord 시료.

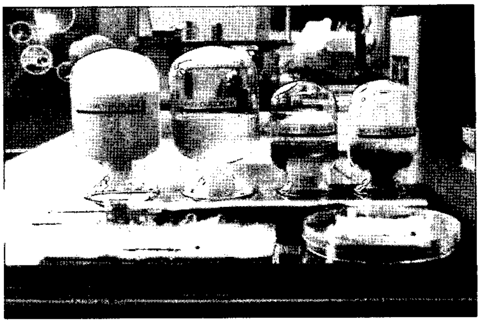


Figure 8. SiC섬유용 전구체 및 SiC섬유 시료.

단계로서 참여기업인 (주)코오롱과 현장 적용을 위한 field test를 진행 중이다. 특히 본 연구에서 실용화기술 개발 중인 소취 분말은 아직까지 섬유방사에 적용된 적이 없는 제품으로 다양한 기능성섬유의 제조에 대한 활용 가능성을 연구하고 있다.

4.4. (주)효성

"유무기 Nano혼성체의 고차구조 제어 방사기술"을 수행 중인 (주)효성은 nano혼성체를 이용한 PET tire cord의 차별화에 중점을 두고 제품을 개발하고 있다. 원사 및 dip cord의 개발에 있어서 nano입자를 첨가하면 nano물질의 종류와 첨가량에 따라 약간의 차이는 있지만 탄성률은 높아지고 수축률은 낮아지므로 dimensional stability가 개선된 PET tire cord의 제조에 유용하므로 이 결과를 이용하여 새로운 고성능 tire cord의 상업화를 위해 pilot 단계의 연구에 집중하고 있다.

4.5. (주)데크

"Nano Domain 특성을 이용한 SiC 무기섬유 개발 및 응용기술개발"을 수행 중인 (주)데크는 SiC 섬유용 고분자전구체 제조기술, 고성능 SiC 섬유 제조공정 기술 및 SiC섬유/탄소/ceramic 복합체 제조기술을 개발하고 있다.

5. 기대효과

Nano섬유의 실용화기술 및 후처리기술 개발의 선도로 섬유제품의 새로운 응용분야 창출에 대한 기술적 선도를 할 수 있다. 무기 분야와 유기섬유 분야의 공동연구로 두 산업 분야의 부가기능/복합기능 부여 기술 등과 같은 원천기술의 축적이 가능해져 상승적 동반 발전을 유도할 수 있고 극한적인 분산기술과 nano입자의 성상제어 기술은 여타 IT(전기 · 전자, 정보), BT 및 ET(의료, 보건, 환경), 및, ST(우주, 항공, 자동차)산업의 요소기술로 활용되어 이들 산업의 기술력 향상과 섬유제품의 고부가가치화에 기여할 수 있다. 또한, 독자적 기술개발로 제조된 새로운 개념의 nano섬유소재, 유무기 nano혼성섬유소재 및 SiC섬유소재의 활성화에 의해 국제경쟁력 우위를 점유할 수도 있다.

저자 프로필

김 병 철

1974-1978. 서울대학교 섬유공학과 졸업
1978-1981. 서울대학교 섬유공학과(석사)
1981-1985. 서울대학교 섬유공학과(박사)
1982-1998. 한국과학기술연구원[KIST)
1989-1990. University of Akron(Postdoc)
1998-현재. 한양대학교 응용화공 · 생명공학부 분자시스템공학과 교수
(133-791)서울 성동구 행당동 산 17
전화: 02-2220-0494, Fax: 02-2297-4941
e-mail : bckim@hanyang.ac.kr