

나노섬유소재의 제품화 동향

김용민 · (주)나노테크닉스

1. 서론

나노섬유(nanofiber)란 마이크로섬유와 차별을 두기위한 용어로서 1 μm 이하 굵기를 지닌 섬유를 말한다. 나노기술(NT, nanotechnology)을 연구하는 학자들의 엄정한 의미로 보면 나노섬유는 100 nm 이하의 굵기를 지닌 섬유상 물질로 정의되어야 한다. 그러나 섬유산업에 있어서 1 μm 이하 굵기의 섬유 제조기술이 극히 제한적이고 이로 인해 제품의 용도 또한 한정적이기 때문에 한 분야에서 일정기술의 한계를 극복한 혁신적인 기술과 제품을 의미하는 용어로 “나노”를 1 μm 이하 굵기의 섬유에 사용하고 있다. 나노섬유는 전기방사법을 이용하여 용이하게 제조할 수 있고, 제조된 나노섬유는 섬유의 형태와 제품의 구조를 미세하게 제어할 수 있다. 또한 섬유직경, 직경분포, 표면물성, 기공구조, 기공분포, 제품기공도, 제품의 균제도, 단면구조 등의 성능을 쉽게 설계할 수 있어 고품질 고성능을 구현하는 섬유제품으로 크게 각광받고 있는 소재이다.

Figure 1은 다양한 섬유제품의 제조기술과 이의 생산성을 그래프로 나타낸 것이다. 전기방사법을 이용한 나노섬유의 제조는 기술의 긴 역사에 비해 양산화 기술의 수준이 너무 낮았고 이로 인해 섬유시장에 진입하지 못하고 전략적 소재라는 한계만을 지니고 있었다. 하지만 최근에 양산화기술이 확립되어 충분한 생산량을 가진 나노섬유는 활발하게 시장에 진입하고 있다. 특히 나노테크닉스에서 개발하고 Dupont에서 제품화를 진행하고 있는 전기분사방사법을 이용한 나노섬유의 양산화 제조기술은 일반 섬유 제품과 비슷한 수준인 라인당 500 kg/day의 나노섬유 생산량에 도달함에 따라 나노섬유의 시장진입을 더욱 가속화시키고 있다.

나노섬유의 제품화 기술은 국내외 많은 연구기관과 학자들에 의해 다양한 분야에서 적용가능성평가나 더 나아가 제품화 가능성 평가 등이 연구되고 있고 이러한 연구동향은 나노섬유 관련자료에 많이 소개되고 있다. 본 문에서는 상품화가 완료되어 매출이 발생하는 기술을 소개할 것이며, 특히 필터

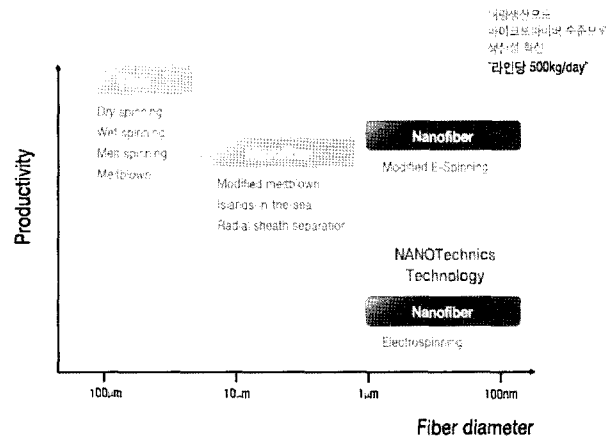


Figure 1. 섬유의 다양한 제조기술과 생산량.

섬유소재와 기능성 섬유소재에 관한 내용을 제한적으로 기술하고자 한다.

2. 나노섬유의 제품화 기술

나노섬유를 제조하는 기술은 여러 가지가 알려져 있지만 그 중 전기방사법(electro-spinning)이 가장 용이하게 나노섬유를 형성할 수 있는 기술로 연구되어 왔다. 최근에는 제품의 생산량을 충분하게 만족시키는 제품화기술이 확립되어 혁신적인 기술로 평가받고 있는 나노섬유 제조 기술이다. 전기방사법의 원리는 토출되는 고분자용액에 높은 전압을 인가하여 정전기적인 반발력을 부여하고 이를 통하여 가늘고 긴 나노섬유를 형성하는 기술이다. 전기방사법은 나노섬유 형성원리가 간단하기 때문에 연구를 위한 접근은 매우 쉽지만 최적 조건을 벗어나거나 생산량을 증가시킬 때에는 노즐오염과 비드(bead)가 발생하여 생산량의 한계를 지니고 있는 기술이다. 노즐오염은 생성된 일부 나노섬유가 콜렉터가 아닌 노즐방향으로 의도하지 않게 부착되어 오염시키는 현상으로 생산량을 증가시킬수록 빈번하게 발생하고 심해지는 경향을 지니고 있다. 비드는 형성 조건에 따라 두 가지로 구분할 수 있는데 나

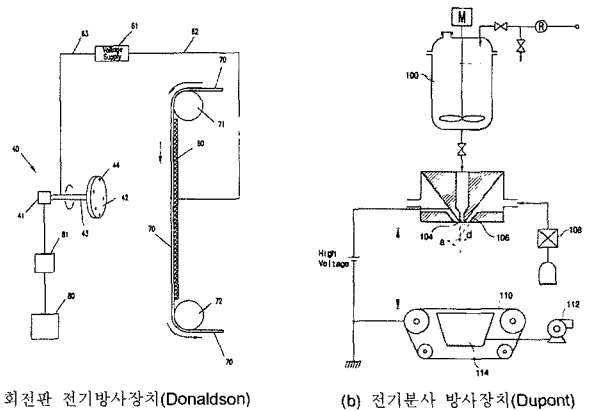
노섬유가 제조되는 동안 높은 전기장 안에서 섬유상으로 전환되지 못하고 제품(web)에 쌓이는 고분자 덩어리 상태 물질과 용매(solvent) 휘발 지연으로 인해 컬렉터(collector) 상에서 나노섬유끼리 재용해되어 형성된 고분자 덩어리 상태 물질을 가리킨다. 이렇게 형성된 비드는 생산된 제품의 품질인 제품균일성과 제품 성능에 영향을 미친다. 따라서 노즐오염 문제의 해결과 비드의 제어가 나노섬유 대량생산의 핵심적인 요소 기술로서, 이 기술의 확립을 통하여 높은 생산량과 동시에 깨끗한 제품을 만족시켜주는 제조 기술이 오랜 동안 다양하게 연구되어 왔다.

최근들어, 나노섬유 제품화 기술이 확립되어 생산되고 있는데 나노섬유의 대량생산기술과 나노섬유를 이용하여 제품 전개를 하고 있는 제조회사를 Table 1에 정리하였다. Donaldson의 나노섬유 제조기술은 Figure 2의 (a)와 같이 회전하는 원판형 노즐을 이용하여 나노섬유를 제조하는 기술로 나노섬유를 기존에 사용하는 필터미디어소재에 매우 얇은 층으로도 포하듯 적층시켜 필터효율을 개선한 Spider-web[®]과 Ultra-web[®] 제품을 제조하여 판매하고 있다. Dupont은 나노테크닉스에서 개발한 전기분사방사법(Figure 2-(b))을 이용하여 HMT[™] 제품을 필터분야의 기초소재로서 제공하고 있다. 이 기술은 나노섬유 방사 시 노즐부에서 토출되는 고분자 용액에 온도와 습도가 제어된 고속의 바람을 분사하여 노즐 오염과 비드를 효과적으로 해결하고 이를 통해 생산성까지 확보한 기술이다. 나노섬유 제조기술에서 가장 진보된 기술로 평가받고 있으며 나노섬유의 시장진입을 본격적으로 가시화 시킨 기술이다. 이앤이시스템은 전북대 김학용 교수가 개발한 상향식 전기방사장치(Figure 2-(c))를 이용하여 나노섬유를 제조하고 제품화를 위해 준비 중이다. 상향식 전기방사장치는 나노섬유가 상부의 컬렉터에 집적되도록 구성되었고, 고분자 용액 표면에서 고전압에 의해 충분한 에너지를 공급받은 부분에서 나노섬유가 형성되고 이를 상부로 집적되게 하였고, 노즐오염과 제품 불균일의 원인인 비드는 용액 드롭식 시스템으로 효과적으로 제어한 기술이다.

이상에서 소개한 나노섬유 제조기술은 모두 양산화를 위해 개발된 기술이지만 제품화에 있어서 약간의 차이점이 존재한다. Donaldson 기술은 나노섬유를 적용한 필터소재개발에 특화된 기술로 나노섬유를 매우 얇은 하나의 층으로 흩뿌린 나노섬유 도포제품을 생산하고, 이앤이시스템 기술은 제품의 품질을 유지하며 생산량을 높이기 위해 노즐의 수를 수 만개에 이르도록 블록을 구성한 설비기술로서 블록 수를 조절하여 나노섬유 단독제품이나 도포제품을 생산한다. 이와는 다르게

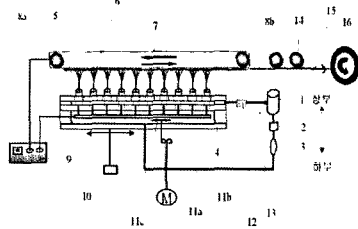
Table 1. 전기방사를 이용한 나노섬유 양산화 기술

항목	Donaldson	Dupont	E&E system
관계사	-	나노테크닉스	FineTex Technology 에프티 테크놀로지
제조방법	electro-spinning	electro-Blowing spinning	electro-spinning
노즐블럭 (hole 배열)	회전원판형 노즐블럭 (원형)	분사형 노즐블럭 (직선형)	용액 드롭식 노즐블럭 (multi 배열)
생산량 (단위토출량)	대량 (소량)	대량 (대량)	대량 (소량)
제품화 단계	시장 안정	시장 진입	진입 준비



(a) 회전판 전기방사장치(Donaldson)

(b) 전기분사 방사장치(Dupont)



(c) 상향식 전기방사장치(이앤이시스템)

Figure 2. 나노섬유를 제조하기 위한 전기방사장치.

Dupont 기술은 나노섬유의 생산량을 극대화시키기 위해 blowing 시스템을 적용하여 제조설비를 최적화한 기술로 단일 노즐 블록으로 나노섬유 단독제품이나 도포제품을 모두 생산한다. 세 기술 중 Dupont 기술만이 나노섬유의 대량생산 기술이라 평할 수 있는데, 이는 기존 전기방사법의 가장 큰 문제점인 생산량의 한계를 제조설비의 단순한 확대를 통한 생산량 증대가 아닌 섬유 제조 시 생산량의 가장 기초단위인 노즐 hole 당 토출량의 극대화, 즉 단위생산량의 획기적인 증대를 통하여 문제를 해결했다는 점이 그 이유이다.

최근 국내에서 flash-electrospinning 방사법을 이용한 나노



섬유의 제조에 관한 연구를 2001년도부터 기초연구와 pilot 설비를 이용한 연구 등을 수행하였고, 현재 제품화를 위한 투자 및 연구가 진행되고 있는 중이다. 이와 같이 나노섬유 양산화를 위한 요소기술은 우리나라에서 개발하여 완성되었고, 이를 보완하는 개선된 기술과 다른 형태의 나노섬유 양산기술 또한 꾸준히 진행되고 있다. 세계의 기술력을 기준으로 살펴보면 대한민국의 나노섬유 기술은 선두그룹에서도 리더의 위치를 차지하고 있으며 매우 높게 인정받고 있다.

3. 필터 소재 제품화 기술

3.1. 필터소재로서 나노섬유 특성

공조용 필터 소재로 많이 사용되고 있는 유리섬유의 굵기는 0.5~5 μm 정도이며, 멜트블로우(melt-blown) 방법으로 제조되고 있는 극세 섬유는 이제 막 1 μm 의 벽을 넘기 시작하고 있는 반면에, 전기방사에 의해 제조되고 있는 나노

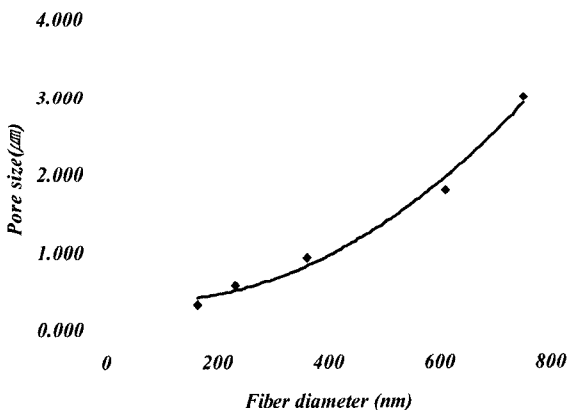


Figure 3. 나노섬유 제품의 섬유경에 따른 평균기공크기.

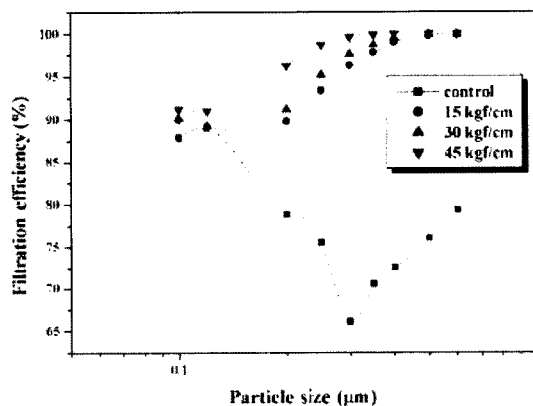


Figure 4. 나노섬유 제품의 카렌더링 가공 후 필터효율 변화.

섬유는 0.1~1 μm 의 굵기를 보여준다. 따라서 나노섬유는 섬유의 굵기만으로도 필터성능의 한계를 쉽게 극복할 수 있을 것으로 기대되며 고기능성 필터제품에 적절한 필터미디어소재로서 기공의 크기 및 구조 제어 등 다양한 연구 및 제품 출시가 활발하게 진행되고 있다.

Figure 3은 나노섬유의 직경에 따른 평균기공크기를 나타낸 그래프로 전기방사를 통하여 얻는 나노섬유 제품의 평균기공크기는 0.6 μm ~3 μm 임을 확인할 수 있다. 상대적으로 기공성 막(porous membrane)은 1 μm 이하, melt-blown 법으로 제조한 초극세섬유는 3 μm 이상의 평균기공크기를 지니고 있어 두 제품군과 구별되는 기공특성을 지닌 나노섬유는 기존 제품의 대체와 신제품의 전개 등 다양하게 시장을 공략할 수 있는 유망한 제품이다. 또한 Figure 4와 같이 카렌더링과 같은 간단한 후가공을 이용하여 기공의 크기와 형태를 용이하게 조절할 수 있기 때문에 필터성능 제어 범위가 넓은 소재로서 다양한 제품전개가 가능하다.

필터 소재는 중간제품과 완제품 모두에서 필터효율, 압력손실과 공기투과도를 평가한다. 일반적으로 고급 필터제품은 우선 섬유제품의 직경과 밀도를 제어하여 기공의 크기를 최적화한 후 최종적으로 정전효과를 부여하여 원하는 성능을 발현한다. 하지만 나노섬유 필터제품의 경우 정전효과 없이 필터효율이 우수하기 때문에 정전 처리된 필터에서 발생하는 필터수명의 한계를 피할 수 있으며 장기간 일정하게 유지되는 필터효율로 최적의 고성능필터미디어 소재로 사용된다. Table 2는 전기방사를 이용한 나노섬유 고급필터와 melt-blown 방사 후 코로나 대전처리를 한 초극세섬유 정전필터의 필터효과를 비교한 표이다. 필터효율이 나노섬유와 초극세섬유가 각각 99%와 70%를 보여주는 것처럼 나노섬유의 필터효율이 매우 우수한 것을 확인할 수 있고 또한 코로나 대전에 의해 부여된 정전효과가 점점 사라지는 문제점을 고려한다면 필터시장에서 나노섬유의 필터소재로의 적용이 다른 고급 필터소재와 비교하여 우수한 경쟁력을 지니고 있음을 알 수 있다.

Table 2. 정전필터와 전기방사된 나노섬유의 필터효율

Sample	FE(%)	FE(%) normalized to 10 g/m ²
Melt-blown (35 g/m ²), Corona-charged	98.6	70.5
Felt (100 g/m ²), Corona-charged	75.7	13.2
Electro-spun PEO (3 g/m ²) Uncharged	78	99.8

3.2. 시장현황

필터 시스템과 대체품의 세계 선두업체인 Donaldson은 나노섬유를 이용하여 Spider-web[®]과 Ultra-web[®]의 제품을 판매하고 있다. Spider-web[®]은 가스터빈 필터의 입구 필터소재로 적용하고 있고, Ultra-web[®]은 엔진과 차량의 기상필터에 적용하고 있다. 필터 시스템에 나노섬유를 적용하면 나노섬유의 자기정화(self-cleaning) 특성에 의해 필터의 수명이 장기화 될 수 있고 이를 통하여 필터시스템의 유지보수 용이 및 경제성을 부여할 수 있는 점을 상기제품에서 강조하고 있다. 기본적으로 나노섬유를 이용한 Ultra-web[®]의 필터효율 우수성은 그림과 같이 일반 셀룰로스 필터에 비해 매우 큰 차이점을 보여준다.

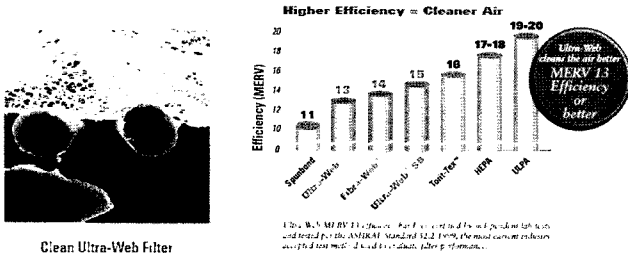


Figure 5. Donaldson에서 제조 판매하는 Ultra-web[®]의 미세사진과 필터효율.

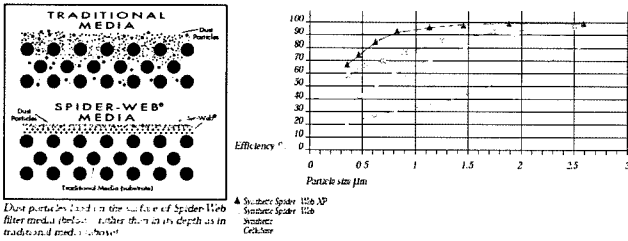


Figure 6. Donaldson에서 제조 판매하는 Spider-web[®]의 필터 형태와 필터효율.

Dupont은 나노테크닉스가 연구개발한 전기분사방사법을 이용한 나노섬유 제조기술을 HMT[™](hybrid membrane technology) 사업으로 전개하고 있다. Dupont은 나노섬유의 제품화를 성공적으로 진행하여 Figure 7과 같이 섬유직경에 따른 생산제품과 제조기술 모두 수직계열화를 이룩하였다. 이와 같이 Dupont은 섬유제품 전 영역에서 solution을 제공할 수 있는 기본적인 전략을 바탕으로 나노섬유의 제조 판매를 차세대 사업으로 선정하여 공격적으로 진행하고 있고 2006년 BariFlux[™]를 상품화하여 separation solution으로 제공하고 있다. Figure 8은 HMT[™] 제품의 단면구조를 주사전자현

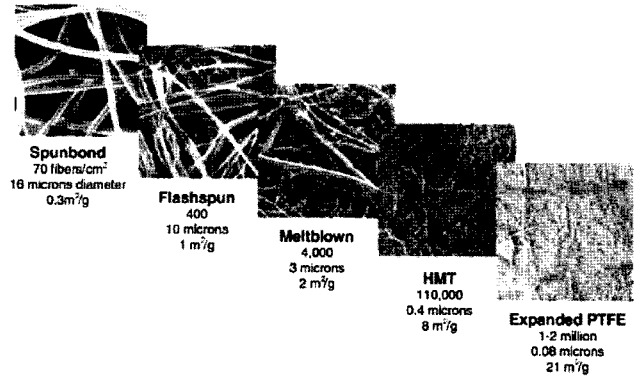


Figure 7. 나노섬유의 섬유경과 표면적 및 다른 섬유상 원료제품과 비교.

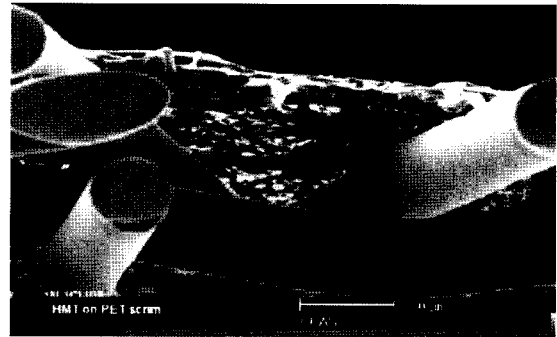


Figure 8. Dupont HMT[™] 제품의 단면 구조.

미경(SEM)으로 관찰한 것으로 일반 PET 제품 위에 나노섬유 층이 일정 두께 이상으로 적층되어 있음을 확인할 수 있다.

이와 같이 Donaldson과 Dupont 두 회사가 전기방사법을 이용한 나노섬유의 제조기술을 특허기술로 스스로 보호하며 나노섬유를 양산화하고 있고, 생산된 나노섬유를 이용하여 필터소재로 제품화하여 판매하고 있다. (주)이앤이시스템, (주)나노필 등 나노섬유 제조업체로 알려진 다른 업체들 또한 전기방사를 이용하여 나노섬유 시제품 제조 및 샘플 공급을 진행하고 있다.

4. 나노섬유 기능성소재(Coated fabrics)의 제품화 기술

4.1. 기능성소재 특성

전기방사를 이용하여 제조한 나노섬유는 다양한 기능성소재로 활용이 가능한데, 투습방수기능성 소재, 생화학 보호 소재 및 기능성 담체소재로의 활용이 대표적이다. Figure 9에서는 전기방사를 이용하여 제조한 나노섬유의 표면적을 나타

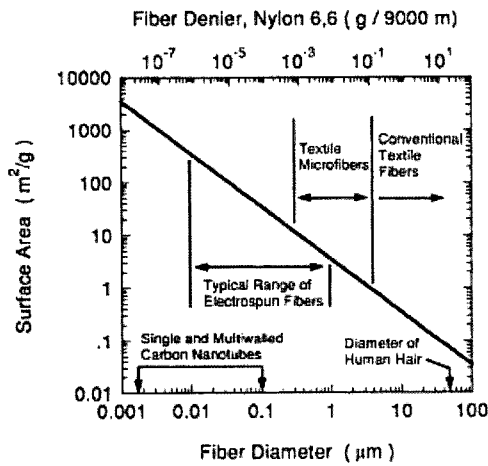


Figure 9. 섬유직경에 따른 표면적 변화.

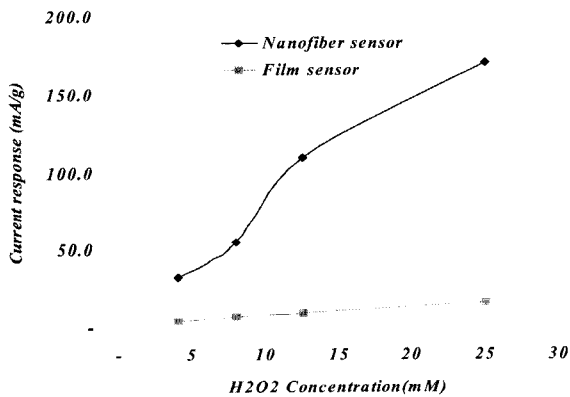


Figure 10. 나노섬유 센서 효과.

낸 그래프로 나노섬유의 직경이 감소함에 따라 표면적이 증가하는 것을 알 수 있다. 다시 말하면 나노섬유를 이용하여 기능성 소재로 적용할 경우 기존에 사용한 초극세 섬유와 비교해서 직경의 차이만큼의 높은 표면적으로 기능성을 극대화시킬 수 있다는 것이다.

Figure 10은 나노섬유 센서와 필름센서를 이용하여 화학물질의 감지능(sensitivity)을 비교하였는데, 필름센서 비해 8배 이상 민감하게 감지하는 결과를 확인할 수 있다. 표면적이 거의 없는 필름제품과 표면적이 매우 큰 나노섬유 제품의 특성을 그대로 나타낸 결과로 나노섬유가 촉매와 같은 기능성 물질의 담체로서 매우 기대되는 소재임을 보여준다.

나노코팅기술은 코팅되는 지지체 소재와 기능성을 구현하는 나노분말소재로 이루어진다. 나노분말소재는 많은 연구가들에 의해 나노가공기술을 통한 분말 크기의 nano-size 화가 성공하였고 다양한 제품에 적용되고 있다. 하지만 나노분말

소재가 코팅되는 지지체 소재는 기존 소재를 그대로 이용하고 있다. 이와 같이 나노코팅기술은 기술개발이 완료되어 있는 나노분말소재와 전혀 개발이 되어 있지 않는 나노분말 지지체 소재에 의해 최상의 기능발현을 못하고 있는 상태로 이를 해결하기 위해 지지체 소재 크기의 nano-size화는 반드시 기술개발이 이루어져야 한다. 양산에 성공한 나노섬유가 나노분말 지지체 소재의 하나로서 적용된다면 최상의 성능을 발현한 고기능성 나노섬유소재로 시장을 주도할 것으로 판단된다.

나노분말 지지체소재로서 나노섬유가 사용될 현시점에서 두 물질의 효과적인 결합을 위하여 나노섬유에 적합한 새로운 나노코팅공정의 연구개발이 필요하다.

4.2. 시장현황

(주)나노테크닉스는 나노섬유 제조 원천기술을 이용하여 나노섬유를 적용한 ANT™ 제품을 시장에 출시 준비 중에 있으며 의류와 산업용의 전 분야에 야심차게 도전하고 있다. Figure 11은 ANT™ 제품의 구성과 발현되는 특성을 확인할 수 있는 그림이다. ANT™ 제품은 나노섬유와 기능성 소재의 결합을 통하여 첨단소재로 사용하는 것을 기본원리로 하고 있으며, 나노섬유의 특성인 표면적 효과, 미세기공 특성 효과와 멤브레인과 비슷한 barrier 특성을 모두 지닌 소재로 개발된 제품이다. 또한 ANT™ 제품의 제조공법을 환경친화적 수류교락법(spunlace)를 이용하여 ANT™ 생지 제품을 만들고 있다. 나노테크닉스는 2008년도 스펀레이스 설비가 본격적으로 가동되면 ANT™ 제품을 양산하여 세계 섬유 시장에 활력을 불어 넣어 줄 것이다.

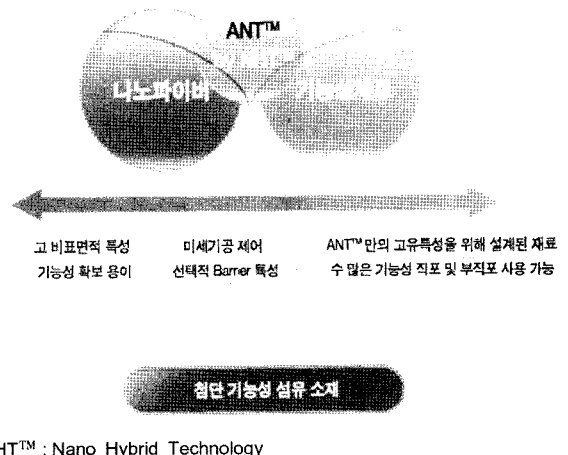


Figure 11. ANT™ 제품의 원리도.

5. 결론

현재 양산기술이 개발된 나노섬유소재는 섬유분야의 미래 성장 동력원으로 많은 관심을 받고 있으며 섬유소재 전반에 고기능성 소재를 공급함으로써 동 산업을 고부가가치 산업으로 전환시켜 섬유분야가 처해있는 어려움을 자체적으로 극복해 나갈 수 있는 원동력을 부여할 것으로 기대된다. 본 문에서 설명한 것과 같이 나노섬유 제품의 현주소 즉, 나노섬유 제품이 연구개발단계가 아닌 실용화단계임은 산업현장에 있는 모든 사람들이 정확하게 파악하고 항상 염두에 두어야 한다. 더 나아가 나노섬유의 활용에 대해 검토하고 이로 인한 시너지 효과를 극대화하기 위해 고민하여 국내에서 보유한 세계 최상의 소재기술력으로 국가경쟁력을 꾸준히 확대해 나가야 한다. 최종적으로는 인류와 가장 가까운 소재로 사용되는 나노섬유제품 관련 기술의 선점을 통하여 세계적으로 발생가능한 모든 블루오션을 같이 향유해야 할 것이다.

참고문헌

1. 한국산업기술평가원(산업자원부), 2006년 산업기술 동향분석-(4)나노섬유 소재, 2006.
2. 정세관, 임대영, 변성원, 정용식, *한국섬유공학회지*, **41**(6), (2004).
3. 대한민국 특허 10-0065799, “상향식 전기방사장치”, 2002.
4. 대한민국 특허 10-0094918, “상향식 전기방사장치 및 이를 이용하여 제조된 나노섬유”, 2004.
5. US 6,743,273 B2 (2004), “Polymer, Polymer microfiber, Polymer nanofiber and Applications including filter structures”, Donaldson Company, Inc., 2001.
6. US 6,955,775 (2005), “Process if Making Fine Fiber Material”, Donaldson Company, Inc., 2003.
7. 대한민국 특허 10-0549140, “일렉트로-브라운 방식법에 의한 초극세 나노섬유 웹제조방법”, 이 아이 듀폰 디 네모아 앤드 캄파니, 2002.
8. Tucker Norton, *Filtration+Separation*, “Hybrid Membrane Technology; A new nanofibre media platform”, pp.28-30, March(2007).
9. D. Aussawasathien, J. H. Dong, L. Dai, *Synthetic Metals*, “Electrospun Polymer Nanofiber Sensors”, pp.37-40, 154, (2005).
10. 박현설, *에너지기술정보서비스 기술분석지(ETIS)*, **17**(4), 2002.
11. Phillip Gibson, Heidi Schreuder-Gibson, Donald Rivin, *Colloids and Surfaces A : hysicochemical and Engineering Aspects*, “Transport properties of porous membranes based on electrospun nanofibers”, pp.469-481, 187-188(2001).



김 용 민

(주)나노테크닉스

1985. 한양대학교 섬유공학과 졸업
 1987. 한양대학교 섬유공학과(석사)
 2002. 전남대학교 섬유공학과(박사)
 1992-1998. 서울시스템 대표
 1998-2000. (주)서울시스템 대표
 2000-현재. (주)나노테크닉스 대표
 (445-812)경기도 화성시 동탄면 목리 245-1
 전화: 031-431-7888 Fax: 031-431-7997
 e-mail: ymkim@nano21c.com
 http://www.nanotechnics.co.kr