

나노섬유 필터의 개발 동향

김 영 진* · 강 인 규***.† · 변 홍 식***

*(재)대구테크노파크 나노부품실용화센터, **경북대학교 고분자공학과, ***계명대학교 화학시스템공학과
(2006년 2월 19일 접수, 2006년 3월 13일 채택)

Development Trend of Nanofiber Filter

Young-Jin Kim*, Inn-Kyu Kang***.†, and Hong-Sik Byun***

*Nano Practical Application Center, Daegu Techno Park, Daegu 704-230, Korea

**Department of Polymer Science, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

***Department of Chemical System Engineering, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea

(Received February 19, 2006, Accepted March 13, 2006)

요 약: 나노섬유란 1 μm 이하의 섬유를 의미하며 멜트블로운(Melt blown), 복합방사, 분할방사, 전기방사 등의 방법으로 제조된다. 나노섬유는 초극세 섬유로서 섬유의 생성과 동시에 3차원의 네트워크로 융착되어 적층된 형태의 다공성 웹은 초박막, 초경량이며 기존 섬유에 비해 부피 대비 표면적비가 지극히 높고, 높은 기공도를 지니고 있다. 이러한 특성으로 인해 가스나 액체로부터 미세입자를 분리하는 고효율 초기능성 필터 소재로 활용될 수 있으며, 나노섬유로 구성된 필터는 여과 효율이 높고 공극율이 매우 높아 필터에서 발생하는 압력강하가 적다. 또한 공정의 적용이 용이하여 기존의 부직포 등의 소재에 코팅이 가능하므로, 나노섬유 필터는 기존 부직포 필터 시장의 대부분을 대체할 것으로 기대되어 진다. 본 총설에서는 나노섬유 필터의 연구개발 동향과 공업적 제조기술의 문제점 및 향후 시장성에 대해서 고찰하였다.

Abstract: Nanofiber is a broad phrase generally referring to a fiber with diameter less than 1 micron. Various polymers have been successfully electrospun into nanofibers in recent years. These nanofibers, due to their high surface area and porosity, have a great potential for use as filter medium, adsorption layers in protective clothing, etc. Nanofiber filters will enable new levels of filtration performance in the field of air filtration. In particular, nanofibers provide marked increases in filtration efficiency at relatively small pressure drop in permeability. Therefore, nanofiber filters could be substituted for conventional filter market due to the easy application of process and the possibility of coating to micron-sized non-woven sheets. This review is discussed on the trend of research and development related to nanofiber filter including future marketability.

Keywords: nanofiber, electrospinning, air filter

1. 서 론

나노기술(NT)은 나노미터(1 nm = 10억분의 1미터) 크기의 수준에서 물질과 소자를 다루는 기술로서 정보 기술(IT), 생명공학기술(BT) 등과 함께 21세기 신산업 혁명을 주도할 핵심기술이며 IT, BT, ET (환경기술)의 발전을 받쳐주는 핵심요소 기술로 기대되고 있다. 특히 1990년대에 들어 나노기술의 급격한 부각과 함께

섬유분야에도 나노섬유 기술이 등장하였다. 섬유산업 분야에서의 나노섬유란 1 μm 이하의 섬유를 의미하며 멜트블로운(Melt blown), 복합방사, 분할방사, 전기방사(electrospinning) 등의 방법으로 제조된다. 이들 방법 중 멜트블로운, 복합방사 및 분할방사 기술은 이미 1970년대에 개발되어 상당부분 실용화되어 있으며 이를 기본으로 제조되는 나노섬유 제품이 시판되고 있다.

섬유의 인장강도는 섬유의 길이와 굵기에 좌우되며 인장강도는 섬유가 가늘수록 강해지므로 세섬유화는 고강도가 요구되는 산업용 섬유류의 제조에 있어 중요

†주저자(e-mail : ikkang@knu.ac.kr)

한 요소로 작용한다. 섬유 직경을 가늘게 하면 고분자 사슬이 이상적으로 완전히 펼쳐져 이상적인 물성을 발현할 수 있는 초고성능 섬유를 제조하는 것이 가능할 것으로 예측된다. 이러한 관점에서 100 nm 이하의 섬유 직경을 지니면서 배향된 구조를 갖는 섬유가 산업적 및 과학적 측면에서 매우 큰 관심의 대상이 되고 있다.

특히 나노섬유의 경우 기존 초극세 섬유보다 훨씬 넓은 표면적을 지니고 단위 면적당 중량이 적어 기존 소재 성능의 한계성을 극복할 수 있을 것으로 기대된다. 나노크기의 직경을 지닌 섬유로 구성된 다공성 쉬트 패브릭은 매우 높은 기공도를 지니고 대단히 작은 기공크기를 지닐 것으로 기대되며, 범용 또는 기존 초극세 섬유로 이루어진 다공성 쉬트 패브릭과는 달리 나노섬유 다공성 쉬트 패브릭은 우수한 기계적 특성과 수증기의 이송능, 지극히 낮은 공기투과도, 우수한 에어로졸 입자 통과 억제능 등 거의 멤브레인 특성을 갖는 구조를 지닐 수 있다. 이러한 장점은 나노섬유를 필터용으로 사용할 수 있게 하는 제질로서 효과를 갖게 한다. 따라서, 나노섬유 소재기술은 기존 범용섬유 소재의 성능 한계성을 극복하는 신기술 및 신소재 창출에 크게 기여할 것으로 기대되고 있다. 본 총설에서는 나노섬유 제조기술과 필터에의 용도 전개를 위한 기술개발 동향에 대해서 고찰하고자 한다.

2. 나노섬유 제조기술 및 응용

2.1. 전기방사법

전기방사는 1934년에 Formhals가 정전기력을 이용한 고분자 필라멘트 생산기술에 관한 특허를 출원함으로써 처음으로 제안되었으나 공업적으로 크게 주목받지는 못하였고 부직포를 만드는 기술의 하나로써 몇 가지 특허가 등록되었을 뿐이었다[1]. 그러나 1990년대 중반 이후 분자수준의 조절기술을 지향하는 나노기술이 주목을 받기 시작하면서 나노섬유를 제조할 수 있는 기술로서 다시 주목을 받게 되었다. 특히 같은 굵기의 나노섬유라도 전기방사에 의해 제조되면 멜트블로운, 복합방사, 분할방사 등으로 제조된 것과는 상이한 특성을 나타내기 때문에 이 기술은 더욱 중요하게 인식되고 있다.

나노섬유는 수 nm~수천 nm 크기의 초극세 섬유로

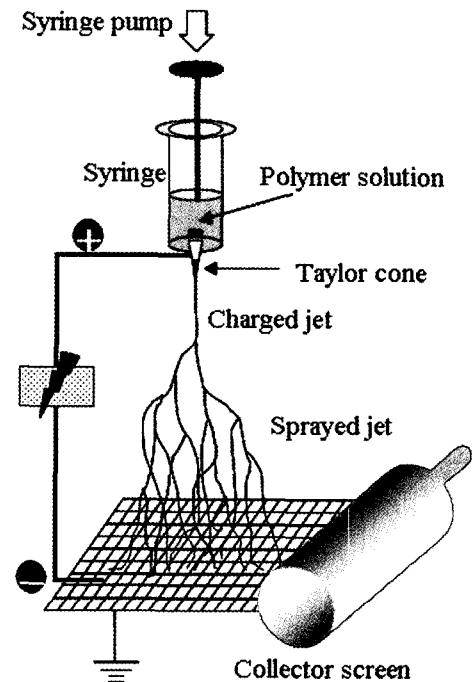


Fig. 1. Schematic diagram of electrospinning process.

서 섬유의 생성과 동시에 3차원의 네트워크로 융착되어 적층된 형태의 다공성 웹은 초박막, 초경량이며 기존 섬유에 비해 부피 대비 표면적 비가 지극히 높고, 높은 기공도를 지니고 있다[2,3]. 따라서, 구조적으로 내부의 땀 등을 배출할 수 있는 호흡성과 방풍성을 가지고 있으며 막의 외부에서 액체가 들어오지 못하도록 하는 특성도 부여할 수 있다[4]. 앞에서 나열한 것처럼 나노섬유를 제조하는 방법에는 여러가지가 있으나, 상용화 가능성, 적용 고분자의 다양성, 제조공정의 단순성, 다양한 제품기술 응용성을 고려할 때 전기방사에 의한 나노섬유 제조가 가장 기대되는 기술이다[5].

2.2. 전기방사법의 원리

전기방사법은 노즐을 통해 밀리미터 직경의 분사물(jet)을 방출시켜 나노섬유로 된 부직포를 생산하는 공정이다(Fig. 1). 전극의 한 극은 고분자 용액 내에, 다른 한 극은 집전판(collector)에 위치한 서로 반대 극성을 가지는 두 전극 사이에서 고분자 용액은 고분자 필라멘트로 생성된다. 고분자용액이 작은 구멍을 가진 금속 방적 돌기(spinnerette)에서 한번 방사되면 용액은 증발되고 집전판에 섬유가 모아진다[6-9]. 전위차는 방사용액의 특성, 고분자 분자량, 점도 등에 따라 달라진

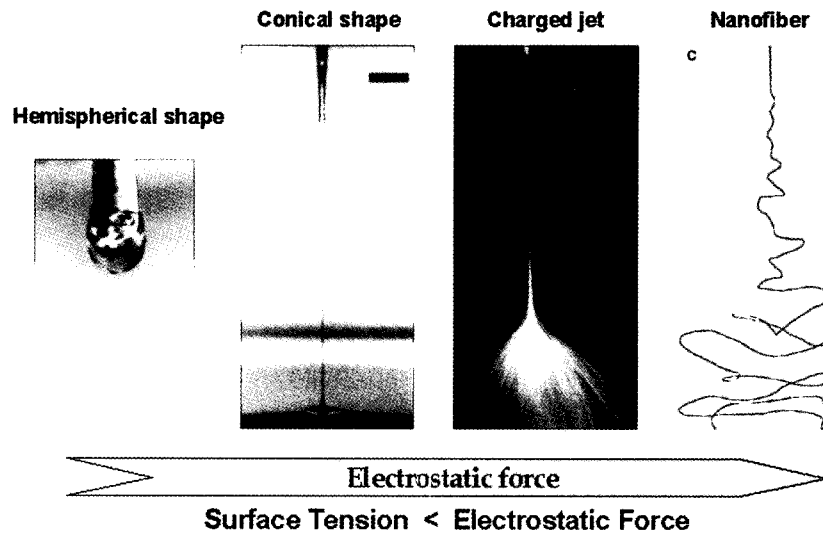


Fig. 2. Fundamental principle of electrospinning of polymer nanofibers.

다. 방적 돌기와 집전판 사이의 거리가 짧아지면 용매의 증발이 충분하지 않기 때문에 방사된 섬유는 집전판에 뿐만 아니라 섬유끼리도 서로 엉키게 된다.

나노섬유가 만들어지는 원리는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 수직으로 위치한 모세관 끝에 고분자 용액은 중력과 표면장력 사이에 평형을 이루며 반구형(hemispherical) 방울을 형성하며 매달려 있게 되는데, 전기장이 부여될 때 이 반구형 방울 표면에 전하 또는 쌍극자 배향이 공기층과 용액의 계면에 유도되고 전하 또는 쌍극자 반발로 표면장력과 반대되는 힘을 발생시킨다. 따라서, 모세관 끝에 매달려 있는 용액의 반구형 표면은 Taylor cone으로 알려진 원추형 모양으로 늘어나게 되고, 특정 임계장 세기에서 이 반발정전기력이 표면장력을 극복하게 되면서 하전된 고분자 용액의 jet가 Taylor cone에서 방출된다. 이 jet는 점도가 낮은 용액의 경우 표면장력 때문에 미세방울로 붕괴되지만 점도가 높은 용액의 경우 jet는 붕괴되지 않고 집전판을 향하여 공기 중을 나아가면서 용매가 증발하게 되고 집전판에는 하전된 연속상의 섬유가 쌓이게 된다.

전기방사에 의해 매우 가는 섬유가 제조되는 원인은 jet가 집전판을 향해 나아가는 과정에서 jet의 신장과 splaying 현상에 의해 가늘어지기 때문이다. 그러나 전기방사에서 작용되는 가장 중요한 원인은 jet의 굽힘과 신장을 야기하는 whipping 불안정성이 급격히 증대되기 때문이다. 낮은 전기장 하에서는 하나의 jet가 형성되어 균일하게 가늘어지면서 모세관 끝에서 집전판으

로 날아간다. 그러나 높은 전기장 하에서 jet는 짧은 거리만 비행한 후 곧 불안정하게 되어서 초기의 하나의 jet가 분열되어 수많은 jet가 형성된 것처럼 보이는 뒤집힌 cone 모양을 보여준다. 이 뒤집힌 cone은 하나의 jet가 매우 빠른 whipping의 결과로 나타나고, 이러한 whipping의 진동수는 너무 빠르기 때문에 하나의 jet가 마치 수많은 필라멘트로 분열된 것처럼 보이는 것이다.

2.3. 섬유형태 및 응용분야

전기방사에서 주 공정변수는 용액의 농도, 점도, 표면장력 및 모세관 끝에서 집전판까지의 거리, 전기장 세기, 방사시간 등이다[10-12]. 이러한 공정변수에 따라 형성된 섬유의 형태가 달라진다. 전기방사에서 용액의 농도가 낮으면 집전판에서 방울 형태로 축적되고, 점차 농도가 증가하면 털이 달린 구슬 형태를 거쳐 안정된 섬유상을 형성한다(Fig. 3). 전기방사와 관련하여 가장 중요한 특성 중의 하나는 나노섬유의 지름이다. 나노섬유가 고분자 용액의 증발이나 고화에 의해 얻어지기 때문에 섬유의 지름은 일차적으로 분출구에서의 고분자 양 뿐만 아니라 분출구의 크기에 의존한다. 나노섬유의 지름 크기를 결정하는 또 하나의 중요한 인자는 용액의 점도로서 농도가 진할수록 큰 지름을 가진 나노섬유가 얻어지며 또한 가해진 전압이 고전압인 경우 분출구에서 보다 많은 용액이 방출하게 되어 지름은 커지게 된다[13].

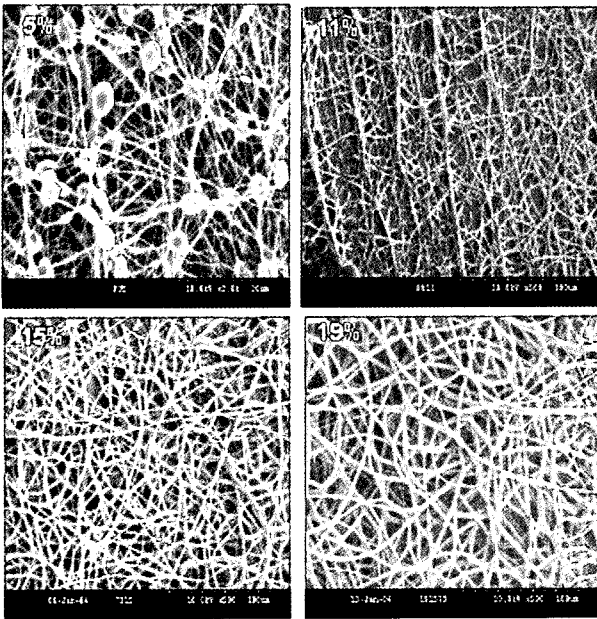


Fig. 3. SEM photographs of electrospun nanofibers from different concentration of polymer solutions[18].

전기방사는 나노섬유를 간단하고 경제적으로 제조할 수 있으므로 여러 첨단 제품에 응용될 수 있다. 이러한 고분자 나노섬유는 작은 기공 크기, 높은 표면적을 지니므로 필터소재, 생체조직 배양, 상처보호치유 및 피부조직의 균일 재생, 인공혈관, 약물전달시스템,

복합재료 보강재 등 다양한 분야에 사용될 수 있으며 현재까지 알려진 고분자 나노섬유의 응용분야를 Fig. 4에 나타내었다. 그 중 의료용 재료 및 필터미디어에 대한 용도전개가 최근 연구의 주요 관심대상이 되고 있다[14-16].

3. 나노섬유 필터

필터에서 작은 입자를 여과하는 여과효율을 높이는 한가지 방법은 필터매체 중에 적절한 직경의 섬유를 사용하는 것으로, 나노섬유는 이러한 용도에 최적이다. 전기방사된 나노섬유는 무게대비 지극히 넓은 표면적을 갖는 특성이 있으므로 가스나 액체로부터 미세 입자를 분리하는 고효율 초기능성 필터 소재로 활용될 수 있다. 이러한 특성으로 인해 나노섬유로 구성된 필터는 여과 효율이 높고 공극율이 매우 높아 필터에서 발생하는 압력강하가 적다. 또한 공정의 적용이 용이하여 기존의 부직포 등의 소재에 코팅이 가능하다.

3.1. 나노섬유 필터의 시장 동향

에어필터와 수처리 필터를 포함한 세계의 필터 시장은 2020년 750억달러를 형성할 것으로 추정되고 있고, 일본에서도 2010년 전체 필터 시장의 규모는 32억달

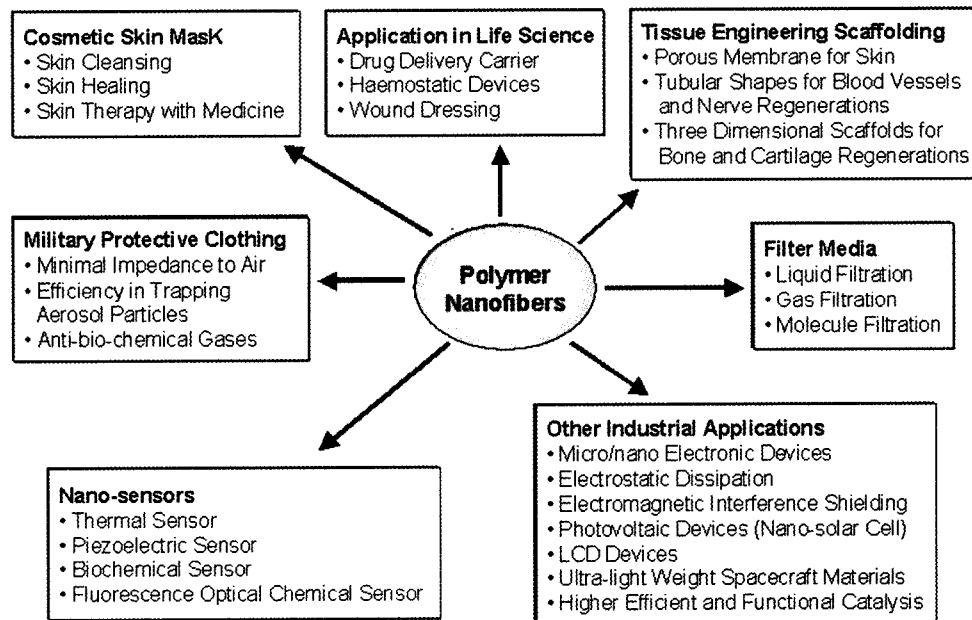


Fig. 4. Potential applications of electrospun polymer nanofibers[16].

리를 형성할 것으로 추정하고 있다. 추정되는 일본 필터 시장의 내용을 보면 자동차용 필터 20억달러, 에어 필터 4억달러, 수처리 필터 4억달러 등으로 부직포 소재를 이용하는 필터가 큰 시장을 형성할 것으로 기대되고 있다[17]. 이렇게 부직포 소재를 이용하는 필터 시장이 나노섬유 필터의 아주 큰 대상시장으로 여겨지고 있고, 향후에도 군사용도 및 고령화사회에서의 고도의료의 발전에 병행하여 큰 시장 성장이 예측된다.

부직포 필터미디어는 여과 효율성, 편리한 사용방법, 작동비용 등을 고려할 때 가장 적절한 필터용 재료이며, 다른 필터미디어 범주와 비교하여 큰 여과 효율성을 제공하기 때문에 상대적으로 빠른 성장을 누리고 있다. 그러나 현재 사용되고 있는 부직포 필터미디어의 문제점을 해결하기 위해 ① 필터 미디어 제조공정의 개선과 더 미세한 섬유의 사용, ② 압력강하를 최소화하기 위한 필터미디어 재료의 설계, ③ 기공의 형태와 분포를 조절함으로써 인한 여과 효율성의 개선, ④ 유용한 여과 면적을 극대화하기 위한 필터 형태의 개선, ⑤ 내구성 및 성능 개선 등과 같은 기술개발이 활발히 진행되고 있다. 이러한 문제점은 나노섬유 필터를 통해서 대부분 해결될 수 있으므로 현재 24억달러 이상을 점유하고 있는 부직포 필터미디어 시장(스펀본드 필터미디어 31%, 펠트블로운 필터미디어 29%, 웹레이드 필터미디어 25% 등)은 상당부분 나노섬유 필터로 대체될 것으로 기대된다.

3.2. 나노섬유 필터의 용도전개

전기방사에 의해 얻어지는 나노섬유 필터는 기존의 부직포 필터에서는 볼 수 없었던 특징을 가지고 있다[17]. 즉, ① 방사와 동시에 나노섬유 부직포가 성형 가능하고 3차원 구조의 물체에 직접가공이 가능, ② 단위용적 대비 표면적이 종래의 마이크로섬유에 비해서 아주 큼, ③ 마이크로 입자의 여과효율이 비약적으로 향상됨, ④ 필터의 내구수명이 향상 됨, ⑤ 필터의 재료에 따라서 수증기 투과성은 양호하지만 수적이나 에어로졸은 대부분 투과하지 않음 등의 많은 특징을 가지고 있으며, 현재 나노섬유를 이용한 에어필터가 실용화되어 있다.

3.2.1. 에어필터의 종류 및 용도

산업화가 고도화 되어감에 따라 대기오염이 증가하고 따라서 대기오염중의 유해입자 제거 및 청정환경의

Table 1. Various Applications of Air Filters[17]

분 야	용 도
건 축	건축내 공조(체육관, 백화점, 콘서트 홀 등), 일반가정용 공조, 주방배기·공조
공 장·연 구 소	공장·연구소내 공조, 클린룸, 유해물 제거·방호
의 료	병원내 공조, 진료실·수술실내 공조, 바이러스와 박테리아의 방호
수 송	자동차·전철·비행기·선박 등의 실내 공조, 엔진용 필터
군 수	생물·세균병기 방호, 화학병기 방호, 전투기·전차 등의 분진 방호, 전함·잠수함 등의 실내 공조
우주산업	우주선이나 우주정거장 등의 실내 공조

요구로 입자제거 필터의 사용은 산업체 뿐만 아니라 일반 가정용품에서도 그 수요가 매우 높아지고 있다. 특히 마이크론 이하 크기의 입자제거를 위한 고품질 필터재의 사용이 증가되고 있다. 공기청정에 사용되는 에어필터란 분리막의 한 종류로 공기와 그 외의 물질을 분리하기 위한 필터이다. 분리대상물질로는 공기의 주성분인 산소분자와 질소분자보다도 큰 입자의 고체분자 또는 고비점 액체이다. 종래에는 캐빈필터, 정전필터, 오존필터가 많이 사용되었으나 1 μm 이하의 미세먼지나 알레르기를 일으키는 물질들을 제거하기에는 힘든 단점을 갖고 있어 이를 극복하기 위해 고성능 필터인 HEPA (High Efficiency Particulate Air) 필터와 ULPA (Ultra Low Penetration Air) 필터가 제조되었다. Table 1에서 볼 수 있는 것처럼 에어필터의 응용분야는 아주 다양하고, 최근에는 급성호흡기증후군(SARS)이나 생물병기의 방호용 등으로 응용분야가 확대되고 있다.

에어필터는 먼지 입자의 집진효율에 따라 전처리필터(Prefilter), 중성능필터, HEPA 필터, ULPA 필터로 분류되며, 각 필터의 용도를 Table 2에 나타내었다. 전처리필터는 외기처리 혹은 중성능필터의 전처리용이고, 중성능필터는 HEPA 필터의 전처리필터로 사용되며 청정도 기준으로 10만 이상의 경우에 주로 사용된다. HEPA 필터는 클래스 100~10만으로 클린룸의 최종 필터로 주로 사용되며, 이보다 고효율의 ULPA 필터가 있으나 청정클래스 유지목적으로서 HEPA 필터의 사용이 급증하는 추세이다. 기존의 HEPA 필터는 유리섬유를 여과재로 사용한 경우와 불소수지나 석영

Table 2. Classification of Air Filters Based on Filtration Efficiency

종 류	적용분진농도 (mg/m ³)	압력손실 (mmAg)	집진효율 (%)	용 도
전처리필터	0.4~7	3~20	70~90 (중량법)	외기처리 중성능필터의 전처리필터
중성능필터 (I)	0.1~0.6	8~25	10~80 (0.3 μm DOP)	HEPA 필터의 전처리필터
중성능필터 (II)	0.3	15~35	80 (0.3 μm DOP)	클래스 10만 이상의 크린룸의 최종필터
HEPA 필터	0.3	8~50	99.97 (0.3 μm DOP)	클래스 10~10만의 크린룸의 최종필터
ULPA 필터	0.3	25~50	99.999 (0.1 μm DOP)	클래스 1~10의 크린룸의 최종필터

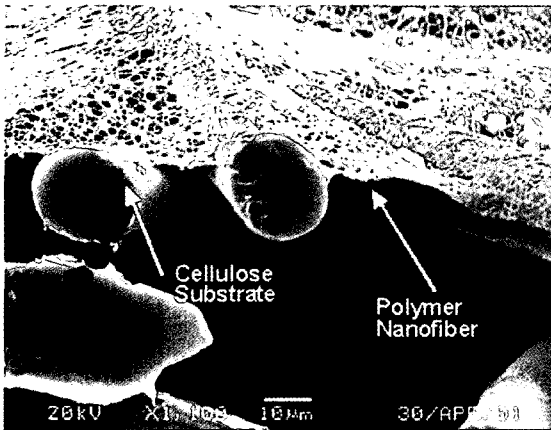


Fig. 5. Cross section view of nanofiber web on spunbond cellulose substrate[19].

계 섬유를 여과제로 사용한 비유리계 필터가 대부분이며, 대개의 경우 굵기가 0.3~0.5 μm, 길이가 2~3 mm인 유리섬유를 수중에 분산시켜 만든 것을 사용한다. 그러나 필터에 사용되는 유리섬유와 바인더는 극도로 적은 수의 입자가 요구되는 경우에 있어서는 주요한 오염원으로 될 수 있고, 고가의 유리섬유를 대체할 수 있는 저가의 HEPA 필터 및 ULPA 필터용 고분자 여과제의 개발이 절실하다. 따라서 나노섬유를 이용한 고성능 필터의 개발이 이러한 문제점을 해결할 수 있는 하나의 방법으로 기대되고 있다.

3.2.2. 나노섬유 에어필터

나노섬유를 이용한 에어필터의 예로는 Fig. 5에서 볼 수 있는 것처럼 셀룰로스 부직포 위에 나일론을 전기방사법으로 적층시킨 것을 들 수 있다. 이 나노섬유 필터는 직경이 250 nm의 나노섬유가 4~5층 중첩되어 있는 구조를 가지고 있고 막 두께가 1 μm로 아주 얇다. 따라서 일반적으로 강도보강을 위해서는 마이크로 섬유로 된 기재 위에 적층시켜서 사용하고, 이 필터를 이용해서 10 μm에서 0.2 μm까지의 미립자를 여

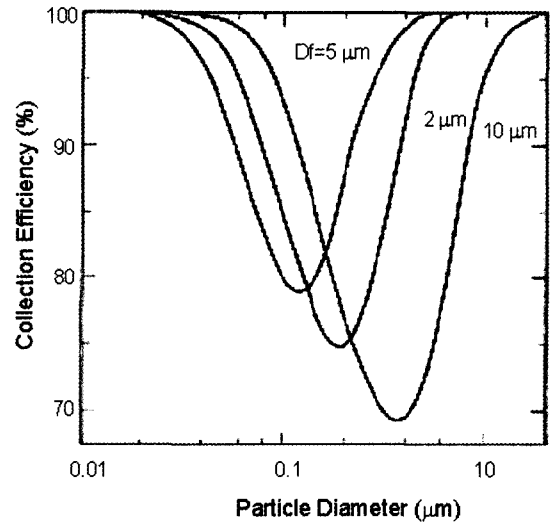


Fig. 6. Fractional efficiency and most penetrating particle size for various filter media constructed with various fiber diameters[20]. Df is the fiber diameter of filter media.

과한 경우의 입자크기와 여과효율을 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 것처럼 나노섬유의 직경이 작아질수록 필터를 투과한 입자의 크기는 작아지고 여과효율은 좋아진다. 여과효율 상승의 원인으로서는 종래의 기체여과이론에서는 상정되어 있지 않은 공기분자와 나노섬유 표면과의 계면에서의 상호작용에 기인하는 Slip Flow 효과를 생각할 수 있다.

Fig. 7에서는 서브마이크론의 먼지 입자가 고밀도로 포획되어 있는 나노섬유 필터를 보여 주고 있고, Fig. 8에서는 0.01~0.5 μm 크기의 NaCl이 나노섬유 필터 위에 밀집해서 포획되어 있는 것을 나타내고 있다. 이처럼 나노섬유에 의한 서브마이크론 입자의 높은 집진효과는 향후 차량용이나 산업용 필터의 소형화 뿐만 아니라 경량화에도 공헌을 할 것으로 기대된다. 또한 나노섬유 위에 나노 크기의 촉매 담지 등도 가능할 것으로 생각되어 진다.

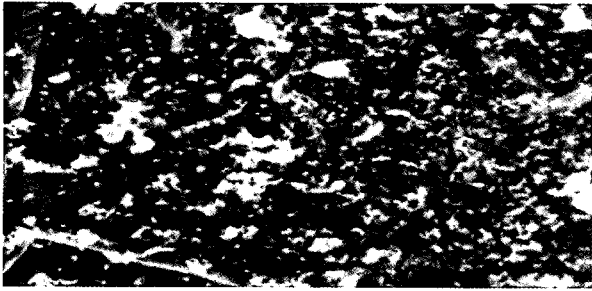


Fig. 7. SEM photograph of nanofiber filter media for air cleaner applications loaded with ISO fine test dust[20].

3.3. 나노섬유 필터의 공업적 제조를 위한 향후 과제

전기방사법을 이용한 나노섬유의 제조는 멜트블로우이나 스펀본드보다는 공업적으로 확립되어 있지 않지만, 최근에 들어서 공업적인 제조기술이 발전하고 있고 나일론을 이용한 나노섬유 필터가 폭 610 mm로 하루에 10,000 m²의 연속생산이 가능해 졌다. 그러나 생산된 나노섬유의 직경의 불균일성이 해결 과제로 남아 있다. 예를 들어, 현재 전기방사법에 의해 생산되는 나노섬유의 직경이 방사조건에 따라 40 nm~1 μm까지 제어가 가능하지만 200 nm의 직경을 만들기 위해 방사를 해도 실제로 얻어 지는 직경은 100 nm~400 nm로서 섬유직경이 아주 큰 분포를 가진다. 그 원인으로서 복수 노즐간의 간섭에 의한 섬유의 불안정화와 두께의 불균일성 등을 생각할 수가 있다. 이를 해결하기 위해서는 고분자용액 점도, 인가전압 제어, 전극간 거리, 지지체의 섬유직경과 공극율, 방사환경조건 등의 최적화를 포함한 새로운 연속방사 제어기술의 개발이 필요하다고 판단되어 진다.

4. 결 론

국민소득의 증대 및 각 개인의 건강에 대한 관심이 증대되면서 또한 환경문제가 크게 부각됨에 따라 오염된 물질을 제거하는 공기청정 필터산업이 주목을 받기 시작하였으며, 필터기능의 고성능화 및 응용에 대한 연구가 매우 활발해 지고 있다. 또한 보다 높은 효율의 필터를 요구하는 산업계의 요망에 따라 유체중의 더 작은 입자를 제거할 수 있는 더 작은 섬유크기를 갖는 섬유매체에 대한 연구가 크게 요구되고 있다. 따라서 나노섬유 소재기술은 초기능성, 고효율 필터 소재 창출에 매우 유망한 기술이므로 개발의 필요성이 매우 크다. 전기방사에 의해 제작한 나노섬유 부직포

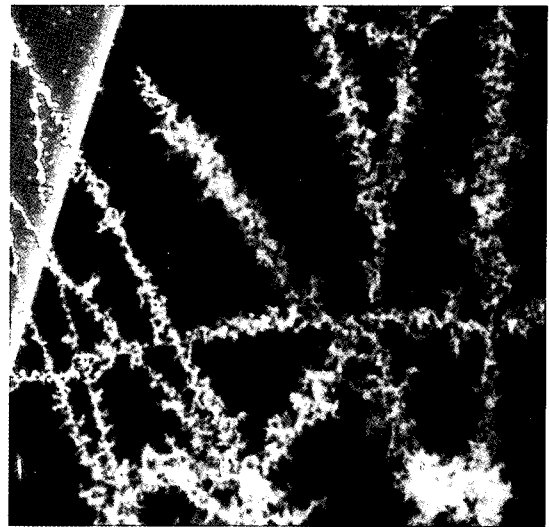


Fig. 8. SEM photograph showing the collection of sodium chloride crystal sized from 0.01 to 0.5 microns collected on sub-half-micron nanofibers[20].

의 용도로서는 에어필터가 압도적으로 많지만, 최근 입체성형 가공성을 살린 인공혈관이나 생분해성 소재를 이용한 재생의료용 스캐폴드, 서방성 나노섬유 기재를 이용한 약물전달시스템(DDS) 등의 의료분야 뿐만 아니라 투습통기성이 우수한 군복용의 세균침입 방호 코팅재, 전도성 부직포, 이차전지용 세퍼레이터 등 전자재료 분야에의 응용도 확대되고 있다.

감 사

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업(RTI04-03-02) 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

1. J. D. Stizel, G. L. Bowlin, K. Mansfield, G. E. Wnek, and D. G. Simpson, "Electrospraying and electrospinning of polymers for biomedical applications. Poly(lactic-co-glycolic acid) and poly(ethylene-co-vinyl acetate)," *Int. SAMPE Technol. Conf.*, **32**, 205 (2000).
2. H. Fong, I. Chun, and D. H. Reneker, "Beaded nanofibers formed during electrospinning," *Polymer*, **42**, 261 (2001).
3. N. Chanunpanich, Hongsik Byun, and Inn-kyu Kang,

- “Membrane Morphology: Phase Inversion to Electrospinning” *멤브레인*, **15**(2), 85 (2005).
4. 김동복, 박정호, “전기방사에 의한 나노섬유 제조 및 응용,” *전기의 세계*, **52**, 33 (2003).
 5. A. Frenot and I. S. Chronakis. “Polymer nanofibers assembled by electrospinning. Curr. Opinion in Colloid and Interfaces Science,” **8**(1), 64 (2003).
 6. J. M. Deitzel, J. Kleinmeyer, J. K. Hirvonen, and T. N. C. Beck, “Controlled deposition of electrospun poly(ethylene oxide) fibers,” *Polymer*, **42**, 8163 (2001).
 7. H. Fong and D. H. Reneker, “Electrospinning and formation of nanofibers. In: Structure Formation in Polymeric Fibers,” Hanser, Munich (2001).
 8. S. A. Theron, E. Zussman, and A. L. Yarin. “Experimental investigation of the governing parameters in the electrospinning of polymer solutions,” *Polymer*, **45**, 2017 (2004).
 9. A. Koski, K. Yim, and S. Shivkumar. “Effect of molecular weight on fibrous PVA produced by electrospinning,” *Mat. Lett.*, **58**, 493 (2004).
 10. J. Doshi and D. H. Reneker, “Electrospinning process and applications of electrospun fibers,” *J. Electrostatics*, **35**, 151 (1995).
 11. K. J. Pawlowski, H. L. Belvin, D. L. Raney, J. Su, J. S. Harrison, and E. J. Siochi, “Electrospinning of a micro-air vehicle wing skin,” *Polymer*, **44**, 1309 (2003).
 12. J. M. Deitzel, J. Kleinmeyer, D. Harris, and N.C.B. “Tan, The effect of processing variables on the morphology of electrospun nanofibers and textiles,” *Polymer*, **42**, 261 (2001).
 13. H. Fong and D. H. Reneker, “Elastomeric nanofibers of styrenebutadienestyrene triblock copolymer,” *J. Polym. Sci.: Part B Polym. Phys.*, **37**, 3488 (1999).
 14. Z.-M. Huang, Y.-Z. Zhang, M. Kotaki, and S. Ramakrishna, “A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites,” *Composites Science and Technology*, **63**, 2223 (2003).
 15. S. A. Theron, A. L. Yarin, E. Zussman, and E. Kroll, “Multiple jets in electrospinning: experiment and modeling,” *Polymer*, **46**, 2889 (2005).
 16. B. Ding, E. Kimura, T. Sato, S. Fujita, and S. Shiratori, “Fabrication of blend biodegradable nanofibrous nonwoven mats via multi-jet electrospinning,” *Polymer*, **45**, 1895 (2004).
 17. 本宮達也, “ナノファイバーテクノロジーを用いた高度産業発掘戦略”, シーエムシー出版, 東京 (2004).
 18. 김세용, 강인규, 권오형, “A biodegradable nanofiber scaffold by electrospinning and its potential as wound dressing,” *한국고분자학회 연구논문초록*, **29**(2), 350 (2004).
 19. T. Grafe and K. Graham, “Polymeric nanofibers and nanofiber webs: A new class of nonwovens,” *International Nonwovens Technical Conference*, Georgia, Atlanta (2002).
 20. T. Grafe, M. Gogins, M. Barris, J. Schaefer, and R. Canepa, “Nanofibers in filtration applications in transportation,” *International Conference and Exposition of the INDA*, Illinois, Chicago (2001).