

# 분리여과용 나노섬유 소재

양성철, 김 찬 · 주식회사 아모텍

## 1. 서 론

나노기술(nanotechnology, NT)은 10억분의 1 m의 단위에서 원자, 분자를 조절함으로써 새로운 극미세 소재, 신소재를 창출할 수 있는 기술로 전기·전자, 기계, 화학, 생명, 신의약, 환경 등 산업 전반에 걸쳐 성장 원동력이 될 것으로 전망하고 있다. 이러한 나노기술을 섬유에 적용시키기 위한 연구가 섬유산업 전반에 걸쳐 활발하게 진행되고 있으며, 나노섬유 기술(nanofiber technology)은 기존 의류나 협소한 영역의 산업용에 한정된 용도를 “정보기술(information technology, IT), 생명공학(bio technology, BT), 에너지(energy), 환경(environment), 실버복지(protection, silver society)” 등 전 산업분야로 넓히는 계기가 되고 있다.

본 고에서는 전기방사기법에 의해 제조된 나노섬유의 다양한 용도 중 분리여과용 나노섬유에 초점을 맞추어 최신 연구 개발 동향과 배경, 그리고 몇몇 연구개발 사례를 간단히 소개하고자 한다.

## 2. 나노섬유의 효과와 용도[1]

1990년대 이후 여러 산업분야에서 나노기술의 급격한 부각과 함께 섬유분야에서도 나노섬유에 대한 관심이 폭발적인 붐을 형성하였다. 섬유공학 분야에서 나노섬유는 주로 직경 1 $\mu$ m 미만의 섬유를 의미하고 있다. 고분자를 이용하는 나노섬유는 다양한 방법으로 접근을 시도하고 있지만, 기술적으로는 아직 초기단계에 머물고 있으며, 단성분 내지는 다성분 방식에 의한 극세사 내지는 초극세사의 경우도 섬유의 직경이 대부분 1 $\mu$ m 이상의 것이 제조되어, 현재 1 $\mu$ m를 방사 최소한계점으로 인식하고 있다. 1 $\mu$ m 미만의 섬유제조 방법 중 전기방사(electrospinning)에 의한 기법이 나노섬유를 제조하는데 가장 효과적인 방법으로 알려져 있다.

나노섬유 1가닥의 용도는 극히 한정되어 있다. 이것을 집합화, 계층화하여 구조제어를 행하고, 1차원(사, 線狀물질), 2차원

(포, 평면화), 3차원(입체)화하면, 다양한 효과가 출현하고, 기능이 현저하게 향상되어 용도는 비약적으로 확대된다. 나노섬유가 갖는 기본적인 3대 효과를 다음과 같이 요약할 수 있다.

- ① 초고비표면적 효과
- ② 나노사이즈 효과
- ③ 초분자 배열 효과

이와 같은 나노섬유의 기본적인 효과로부터 다음과 같은 나노섬유의 각종 특성과 응용영역이 생긴다(Figure 1)[1,2].

### 2.1. 초고비표면적 효과

#### ① 흡착특성

통상섬유에 비해 비표면적이 1,000배 이상 커, 흡착성능이 현저하게 증가한다.

- 용도: 흡착재, 바이오케이컬 방지재, 이온교환체, 촉매담지재, 반응기재, 센서, 전극, 슈퍼캐퍼시터

#### ② 공극특성

작은 공극이 생겨 분자의 필터링이 가능하게 된다.

- 용도: 각종분리용 재료, 센서

#### ③ 보이드 특성

파이버에 나노보이드를 부여한다.

- 용도: 보온성 섬유, 파우링(fouling) 방지재

#### ④ 세포생체재료 인식특성

세포가 인식해 결합하는 특이구조를 갖는다.

- 용도: 재생의료, 바이오칩, 바이오센서, 테라메드 의료

### 2.2. 나노사이즈 효과

#### ① 슬립(slip)특성

분자의 흐름이 나노파이버 부근에서 슬립을 일으키고 압력 손실이 극히 저하된다.

- 용도: 에어필터, 바이오케이컬 방지복, 각종 분리재료

#### ② 광(光)특성

직경은 광파장보다 짧고, 투명성이 높으며, 구조발색이 가

능하게 된다.

- 용도: 유기 EL, 센서, 전자종이, 도료대체품, 패션소재, 편광판

### ③ 표면장력특성

표면장력이 낮고, 친수성 고분자도 발수성이 생긴다.

- 용도: 코팅재료, 도료

### ④ 융합특성

나노오더에서 융합이 가능하게 된다.

- 용도: 금속이나 무기재료와 유기재료와의 복합재료, 전자파 차폐재, 고강도 구조재, 건축자재, 자동차, 항공기, 선박, 우주선

### ⑤ 3차원 특성

나노파이버 부직포에 의한 각종 세포의 3차원 성장이 가능하게 된다.

- 용도: 재생의료

### ⑥ Slide 특성

재료간 slide가 증대한다

- 용도: 복합재료, 항공기

### ⑦ Sub-micron 포집특성

Submicron 크기의 입자를 포집할 수 있다.

- 용도: 바이오케미컬 방지복, 엔진필터, 보일러, 공기청정기, 에어컨

## 2.3. 초분자 배열효과

### ① 고강도 특성

분자를 규칙적으로 바르게 배열하고 자기조직화를 행한다.

- 용도: 고강도 구조재료, 건축자재, 자동차, 항공기, 선박, 우주선, 디스플레이

### ② 계층구조특성

분자쇄 레벨에서 나노계층구조에 의한 특성 발현

- 용도: 흡착재, 고기능 의류, 복합재료, 고강도 구조재료

### ③ 전기적 특성

전도성이 극히 높아진다.

- 용도: 전기전자재료, wearable electronics

### ④ 열적특성

하이브리드(hybrid)화를 통해 내열성이 향상된다.

- 용도: super 안전복, 각종 공업재료

나노섬유의 섬유직경이나 구조제어에는 고도의 프로세스 기술이나 가공기술 뿐만 아니라, 우수한 계층기술을 필요로 하기 때문에 MEMS, 나노가공, 마이크로 반응기, 나노계측 및 평가 관련의 선진 과학기술과 신산업이 창출되고 발전할

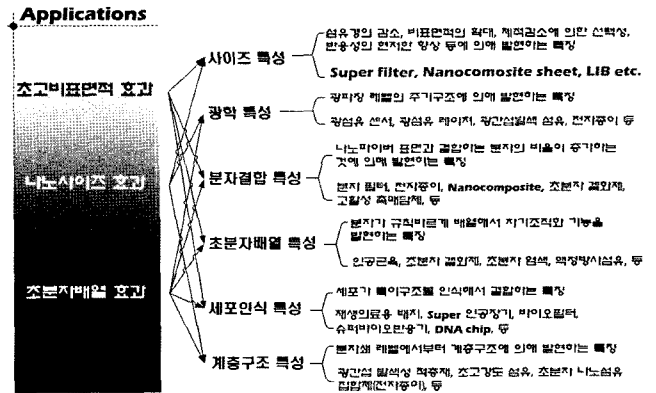


Figure 1. 나노섬유가 갖는 3대 효과와 특성 및 응용분야.

것으로 기대된다. 즉, 나노섬유는 바이오, 의료, 건강, 복지, 안전, 환경, 에너지, IT 등 새로운 산업분야에 대응해서 다양한 전개가 이루어질 것으로 전망된다.

## 3. 나노섬유 필터 특징 및 시장규모

Table 1에는 2010년 예상되는 필터의 세계 시장규모를 나타냈다[3,4]. 2010년 예상되는 필터시장은 3조 2천억원 규모로 자동차용 필터가 2조원, 일반용도가 1조 2천억으로 예상된다. 자동차용 필터로는 엔진용 에어크리너, 오일필터, 외부가스용 필터, 차내 공기청정용 필터, 그 외 산업용 필터로서는 에어필터(4천억), 수처리 필터(4천억), 백필터(1천억) 등이 있으며, 필터산업은 환경용, 군사용, 의료용 등 고령화 사회에서 의료 수준의 고도화에 따른 높은 성장이 예측되는 시장분야중의 하나이다.

전기방사(electrospinning)법은 1934년 기본원리와 방법이 개발된 나노섬유 필터제작기술의 하나이다[5]. 공업적으로는 1970년대 후반부터 전기방사에 의한 부직포 에어필터의 공업적 제조는 시도되어왔지만[6], 일반적으로 지금까지 광범위한 실용성이 있는 기술로써는 인식되지는 않았다. 1990년대 들어

Table 1. 2010년 나노섬유 필터대상 시장규모[3]

구분	세부내용	규모(억원/년)	소계(억원)
자동차용	에어크리너, 오일 필터	20,000	20,000
	배가스용 필터, 연료용 필터, 공기청정용 필터		
	대기용 에어 필터		
일반용	수처리 필터	4,000	12,000
	백 필터	1,000	
	기타	3,000	
	계	32,000	

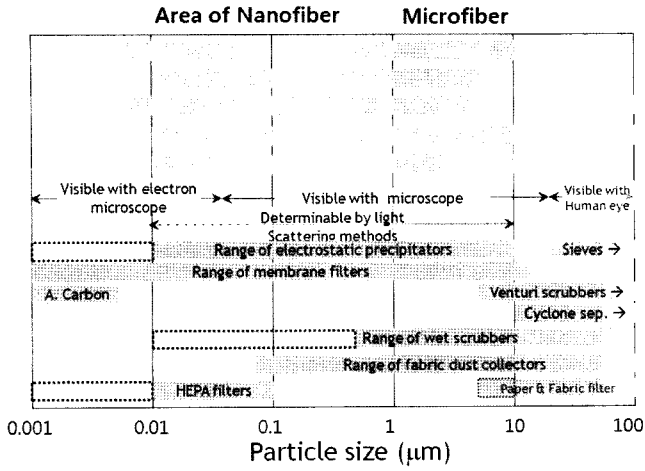


Figure 2. 나노파이버 기술을 사용한 분리대상과 분리막의 관계.

와 나일론, 아라미드, 폴리에스터, PAN 등의 각종 폴리머 용액으로부터 나노섬유가 3차원 부직포 상으로 제조되고, 다양한 응용 영역이 서서히 나타나게 되었다. 특히, 2000년 이후 미국정부나 군 관련 연구예산이 급증하면서 나노섬유 필터 관련 연구가 크게 가속화 되었다. Figure 2에는 나노파이버 기술을 사용한 분리대상과 분리막의 관계를 나타냈다.

전기방사에 의해 얻어지는 나노섬유 필터는 기존의 부직포 필터에서는 보이지 않는 다음과 같은 특징을 갖고 있다.

- ① 방사와 동시에 나노섬유 부직포가 성형가능하게 되고, 3차원 물체에 직접 방사 가능
- ② 단위 용적당 표면적이 종래 마이크로 섬유에 비해 비약적으로 증대
- ③ 마이크로 입자의 여과효율이 비약적으로 향상
- ④ 필터의 내구수명이 향상
- ⑤ 필터의 재료에 의해 수증기 투과성은 양호하나 수적이 나 에어로졸은 투과하지 못함
- ⑥ 열에 불안정한 단백질이나 약물을 상온상압에서 방사 가능

지금까지 가장 먼저 실용화된 것이 나노섬유 에어필터이다. 셀룰로스 부직포상에 나일론 66을 전기방사하여 적절한 구조로 섬유경이 250 nm 인 나노섬유가 4~5층 적층된 형태로 두께가 대략 1 µm 정도로 매우 얇다. 그렇기 때문에 통상 강도보강을 위해 마이크로 섬유로 된 기재상에 적층해서 사용하고 있다. Figure 3에는 나노섬유와 마이크로 섬유를 적층한 구조의 전자현미경 사진을 나타냈다.

일반적으로 나노섬유의 직경이 작아 질수록 필터를 통과하는 최적의 입자크기는 감소하게 되며, 동일 압력손실 조건하

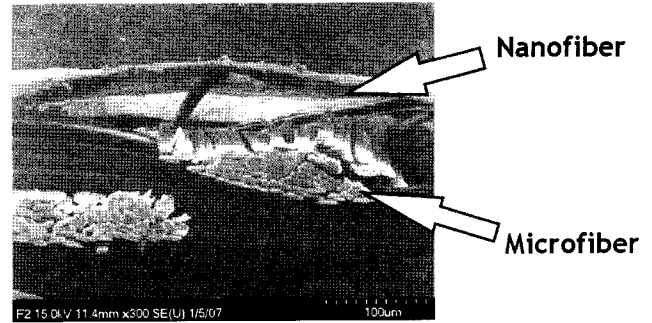
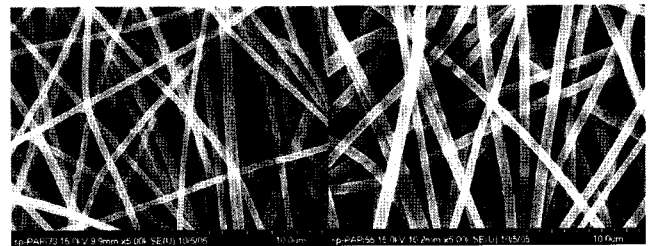


Figure 3. 마이크로 섬유 기재상에 전기방사된 나노섬유 부직포의 단면사진.



(a) 평균섬유직경 400 nm (b) 평균섬유직경 800 nm

Figure 4. 직경분포가 서로다른 나노섬유의 주사전자 현미경 사진.

에서 여과효율은 향상하게 된다.

Figure 4에는 나노섬유의 직경분포가 서로 다른 2종류 나노섬유의 주사전자 현미경 사진을 나타냈으며, 그것의 필터 성능을 Table 2에 나타냈다. 섬유의 직경분포가 좁을수록 필터효율은 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 공기분자와 나노섬유 표면과의 계면에서 상호작용에 기초한 slip flow 효과(공기가 미끄러지기 쉬운 현상)에 의해 나노섬유의 직경이 작을수록 효율은 향상하는 것으로 판단된다[3].

전기방사방법에 의해 제조된 나노섬유 부직포의 용도로써 에어필터용도가 압도적으로 많지만, 입체성형가공성을 향상시킨 인공혈관[7]이나 생분해성 소재를 이용한 재생의료용 배지(scaffold)[8], 약물방출용 나노섬유(DDS, drug delivery system)[9], 투습 통기성이 우수한 군복용 항공 보호복[10], 전도성 부직포[11], 이차전지용 분리막[12] 등 다양한 형태의 응

Table 2. 직경분포가 서로다른 나노섬유의 필터시험결과

Samples	(a)	(b)
Average diameter [nm]	400	800
Resistance [mmH <sub>2</sub> O]	11.503	8.106
Penetration [%]	0.00071	2.7
Efficiency [%]	99.99929	97.30000
D (µm)	0.30000	0.30000

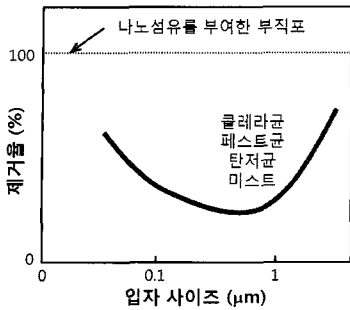


Figure 5. 나노파이버 필터의 효과[2].

용이 기대되고 있다. 통상 부직포 필터는 0.1  $\mu\text{m}$ ~2.0  $\mu\text{m}$  입자크기를 갖는 콜레라균, 페스트균, 탄저균, 미스트 등이 충분히 제거되지 않았으나 나노섬유를 부여한 부직포의 경우는 Figure 5에 서와 같이 완전히 제거하는 것이 가능하게 되었다.

Figure 6에는 필터레이션 기구로써 차폐효과, 확산효과, 관성중첩 효과를 모델화하여 나타냈으며, Figure 7에는 나노섬유 필터효율의 유지에 관한 내용을 나타냈다. 나노섬유에서 중요한 특징 중 하나는 표면에 부착한 미세한 먼지를 반대측에서 공기를 불어넣음으로써 완전히 제거하는 것이 가능하며, 유지 관리하는데 기존의 부직포 필터에 비해 매우 효과적인 것으로 알려져 있다[2,13].

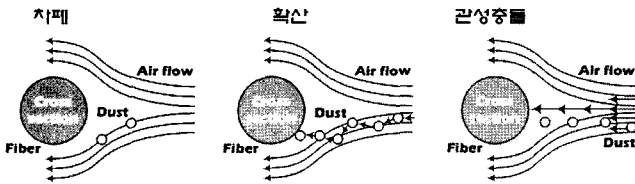


Figure 6. 필터레이션 기구.

## 4. 에어필터용 나노섬유[3]

Figure 8에 에어필터의 분리개념도를 나타냈다. 필터를 통

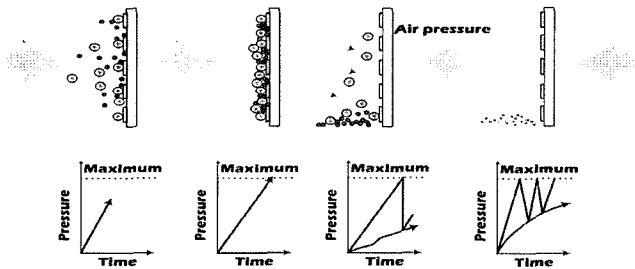


Figure 7. 나노섬유 필터효율의 유지[13].

해서 공기만을 선택적으로 통과시켜 깨끗한 공기를 제공하는 것이다. 에어필터의 규격은 JIS B9908 등에 규정되어 있으며, 주요한 평가항목으로는 입자포집율, 압력손실, 분진보유용량

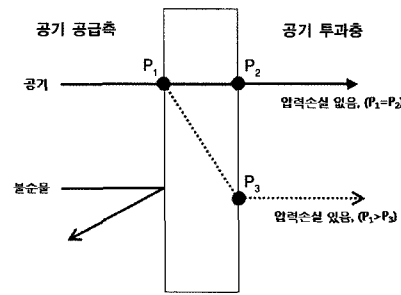


Figure 8. 에어필터의 개념과 공기투과전후의 공기압의 변화.

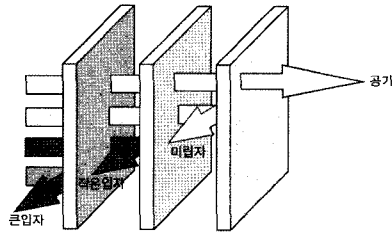


Figure 9. 복합형 에어필터의 예.

등의다. 입자포집율은 공급된 분진이 포집된 비율, 압력손실은 필터통과시 저항에 의한 공급공기압력의 저하율, 그리고 분진보유용량은 단위필터 면적당 유지할 수 있는 분진의 양이다. 에어필터에서는 입자포집율과 분진보유용량이 높고 압력손실이 낮은 특성이 요구된다. 일반적으로 필터에 포집되는 불순물에 의해 필터공간이 막히는 현상 때문에 시간의 증가함에 따라 압력손실도 증가하기 쉽다. 그렇기 때문에 간격이 작은 주 필터에 공기를 통과하기 전 반드시 큰 입자를 제거하기 위해 전처리필터(pre-filter)를 이용하는 경우가 많다. Figure 9과 같이 세공크기가 다른 복합형 필터의 구조 예를 나타냈다. 필터의 노화는 불순물의 흡착이나 필터공간의 막힘 등에 의한 물리적 요인이 주원인이 된다. 따라서 수세나 먼지 털이 등의 세정에 의해 초기기능을 복원시키는 것도 가능하다.

산소분자와 질소분자의 직경은 대략 0.3~0.4 nm 정도이다. 공기중의 불순물은 1 nm 보다도 큰 입자로 그 크기는 대기분진, 금속흡, 바이러스, 박테리아, 곰팡이, 화분·포자의 순이다. 여과하려는 공기의 크기가 가장 작기 때문에 필터 공극이 1 nm 인 필터를 설계한다면 분자체 작용에 의해 공기와 불순물 등의 분리를 완전하게 하는 것이 가능하다. 그러나 현재의 기술로 공극의 크기가 1 nm 인 필터를 제조하는 것은 불가능하다. 시판되고 있는 고성능 에어필터는 0.1~0.2  $\mu\text{m}$  (100~200 nm)의 미립자에 대해서 99.997%이상의 포집효율을 가지고 있다. 이것이 반도체 산업의 공업용 크린룸에 이용되는 타입의 에어필터이다. 현재 0.1  $\mu\text{m}$  보다 작은 바이러스나 대기분진을 완전히 제거, 방호할 수 있는 에어필터는 없는 실정이다. 0.1  $\mu\text{m}$  보다 작은 미립자를 포집할 경우, 에어필터 단독으로 사용하지 않고 활성탄 등에 의한 흡착제거가 병용되는 것이 현실이다.

에어필터 재질로서 나노섬유가 주목받는 주된 이유는 다음과 같다.

- ① 일반적인 범용섬유와 비교해서 직경이 가늘기 때문에 보다 치밀하게 보다 얇게 섬유를 구성할 수 있다. 즉, 이상적인 나노오더의 균일한 세공분포를 가지는 초박막 필터가 제조하는 것이 가능하다.
- ② 에어필터의 단위 체적당 섬유의 표면적이 일반 섬유와 비교해서 나노섬유쪽이 월등히 큰 점이다. 이것은 큰 분진포집용량이 가능하다는 장점이 있다.

에어필터의 형태로는 규칙적으로 직조된 섬유상 필터, 부직포 필터 등이 있으며, 포집효율은 필터의 평균세공경보다도 큰 세공과 그 분포에 의존한다. 규칙적으로 직조된 섬유상 필터는 다른 형태의 필터와 비교해서 세공분포가 매우 협소하다. 그러나 일반적인 범용섬유는 직경이 수  $\mu\text{m}$  이상으로 제조되어 있기 때문에 섬유와 섬유사이가 만드는 공극도 크게 된다(Figure 10). 따라서 나노오더로 제어된 작은 공극을 제조하는 것은 어렵다. 또한 섬유경이 크다는 것은 공기가 섬유와 섬유사이를 통과할 때 저항도 크다는 것을 의미하고 있다. 따라서 필터의 공간을 작게 하는 것은 압력손실이 크게 되는 문제점을 가지고 있다. 따라서, 박막의 필터를 제조하는 것은 어렵다. 필터의 두께도 압력손실의 저하를 가져오는 원인이 되기도 한다.

Figure 10에는 나노섬유와 마이크로 섬유의 단위면적당 최종 밀도를 도식적으로 나타냈다. Figure 10에서와 같이 직경  $20\ \mu\text{m}$ 의 마이크로섬유(범용섬유)와 직경  $200\ \text{nm}(0.2\ \mu\text{m})$ 의 나노섬유를 각각  $1\ \text{cm}^2$ 의 면적에 충전시켰을 경우 나노섬유의 경우  $2.5 \times 10^9$ 개(25억개), 범용섬유의 경우  $2.5 \times 10^5$ 개(25만개)가 충전 되어 나노섬유가 범용섬유에 비해 약 10,000배 정도 더 많은 섬유가 충전 되는 것을 알 수 있다. 이것은 나노섬유로 구성되었을 경우 초박막의 필터가 가능한 것을 의미

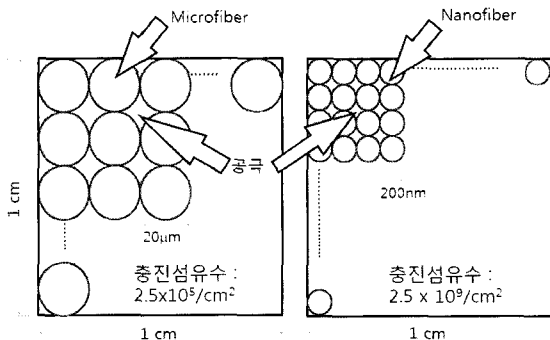


Figure 10. 나노섬유와 마이크로 섬유의 단위면적당 최종진 상태.

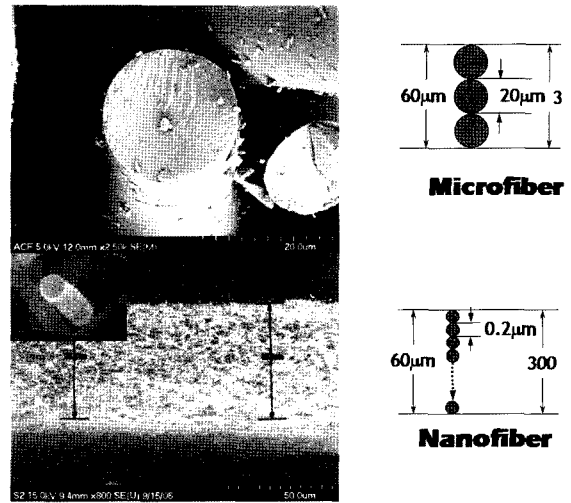


Figure 11. 범용섬유와 나노섬유의 단면비교 예.

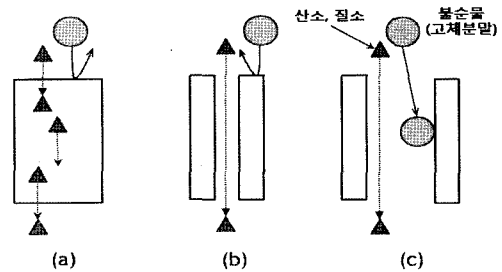


Figure 12. 필터에 의한 공기분리 메커니즘.

하고 있다. Figure 11에는 범용섬유와 나노섬유의 직경에 따른 두께를 나타냈다.

나노섬유를 이용할 경우, 단순히 극세기공에 의한 분자체에 기초한 분리작용뿐만 아니라 나노섬유의 흡착특성을 이용한 분리 메커니즘도 생각할 수 있다. 에어필터 분리의 개념을 Figure 12에 나타냈다. (a)의 경우 용해화산기구, 그리고 (b)는 분자 크기차이에 기인한 분자체 효과에 의한 분리기구의 예이다. (a)는 기체 분리막에 이용되는 고분자 비다공질 필터, (b)는 나노섬유에 의한 에어필터와 같은 다공질 필터에 적용할 수 있다. 나노섬유 필터의 표면적이 크다는 것은 섬유표면의 흡착용량이 큰 것을 의미하고 있다. 그렇기 때문에 (c)와 같이 나노섬유 필터의 공경을 크게해서 통과유속을 증가시키고, 불순물의 제지는 분자체 기구가 아닌 섬유 표면의 흡착에서 행해지는 분리개념도 있다. 이와 같은 경우는 탄소 나노섬유 등의 흡착성이 높은 소재의 응용이 기대되고 있다. 나노섬유의 표면흡착성능의 향상을 위해 나노섬유 표면코팅 등도 행해지고 있다. 표면코팅은 단순히 흡착성능의 제어뿐만 아니라 필터의 가공성을 향상시키려는 목적도 있다.

### 5. 신규활성탄소계 나노섬유

활성탄소섬유는 비표면적이 넓고 세공분포가 균일하여 각종 흡착소재나 에너지 저장용 소재, 각종 고성능 분리막으로 이용되고 있다. 전기방사에 의한 탄소계 나노섬유의 경우, 전기이중층 캐퍼시터용 전극소재, 연료전지용 촉매지지체 및 가스화산층, 각종 탄소섬유 대체용 소재로 이용이 가능하게 된다. Figure 13에는 전기방사에 의한 탄소계 나노섬유의 제조방법과 응용을 나타냈다. 전구체의 종류, 활성화 방법 및 기타 첨가제의 영향 등에 의해 비표면적은 500~3500 m<sup>2</sup>/g 이상의 초고비표면적의 활성화 탄소 나노섬유를 제조하는 것이 가능하게 되었다. 탄소나노섬유의 경우 전구체 재료에 따라 전기방사 공정 및 최종 모폴러지가 다르게 되며 최적공정과 최종응용 제품에 따른 소재의 복합화 및 가공 등이 시도되고 있다[14-17].

Figure 14에는 활성화제인 ZnCl<sub>2</sub>를 방사용액내에 함유하여 방사하고, 안정화, 탄화에 의해 세공구조가 제어 가능한 활성탄소 나노섬유의 주사전자 현미경 사진을 나타냈다. 즉 활성화 공정없이 탄소화에 의해 비표면적을 향상시켜 결과적으로 공정단축과 수율향상 등을 할 수 있어 양산화를 더욱 가속화 시킬 새로운 방법으로 생각된다. 활성화제인 ZnCl<sub>2</sub>의 함유량이 증가할수록 방사용액내 전기전도도가 상승하여 섬유직경은 감소하고, 열처리에 의한 탈수반응 등의 화학반응에 의해 Table 3에서와 같이 비표면적은 증가하는 것을 알 수 있다[18,19].

Figure 15에는 탄소섬유 전구체 고분자인 PAN과 열분해성 고분자인 PMMA를 혼합 전기방사하여 열처리에 의해 PMMA 성분이 제거되면서 세공구조가 제어된 터널형 탄소나노섬유의 주사전자 현미경 사진과 투과전자현미경 사진을 나타냈다

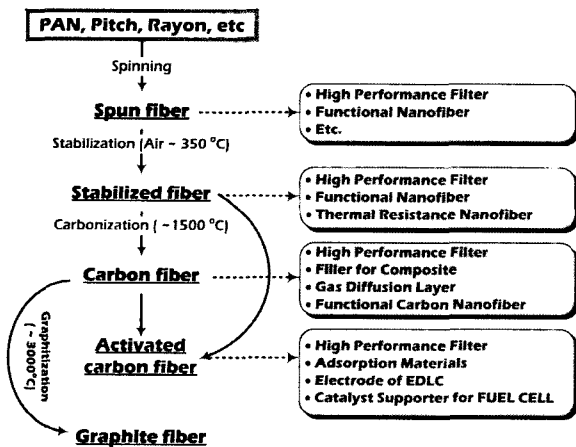


Figure 13. 탄소계 나노섬유의 제조공정 및 응용영역.

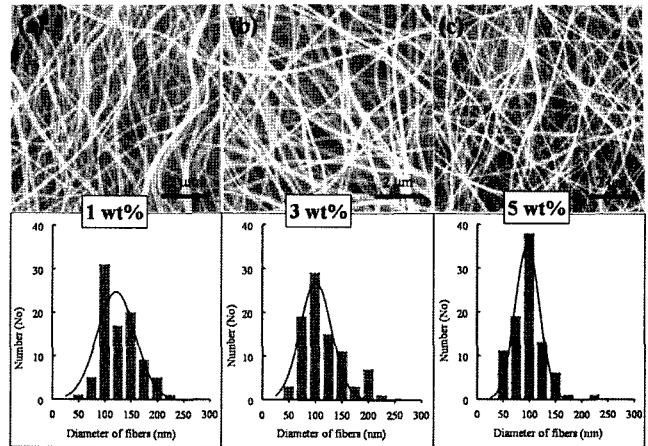


Figure 14. ZnCl<sub>2</sub> 함유 탄소나노섬유의 주사전자현미경 사진과 섬유 직경분포, (a) ZnCl<sub>2</sub> 1%, (b) ZnCl<sub>2</sub> 3%, (c) ZnCl<sub>2</sub> 5%.

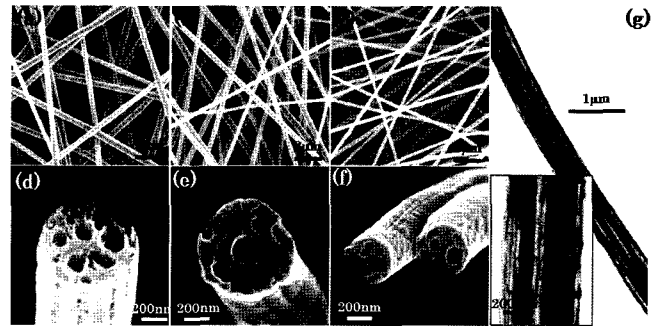


Figure 15. PAN/PMMA 복합 나노섬유로부터 제조된 터널형 탄소 나노섬유의 주사전자현미경 사진과 투과전자 현미경 사진; (a)(d) PAN/PMMA=5/5, (b)(e) PAN/PMMA=7/3, (c)(f) PAN/PMMA=9/1, (g) PAN/PMMA=5/5.

[20]. 이것은 세공구조의 제어를 활성화 공정 없이 방사용액내 첨가물과 방사 전구체의 제어에 따라 열처리에 의해 세공구조를 부여할 수 있는 신규 활성탄소계 나노섬유의 제조방법을 제공하고 있다. 전기방사 기법에 따른 신규 탄소계 나노섬유의 제조는 신재생에너지 분야, 복합소재용 기능성 탄소계 물질, 신기능이 함유된 탄소나노섬유 등 다양한 형태로 출현할 것으로 예상되며, 소재의 융합화, 기술의 융합화를 통한 새로운 기능, 새로운 소재 창출, 그리고 나노소재의 고유 상품화 등으로 이어질 것으로 전망된다.

### 6. 결 론

본 고에서는 지면상 나노섬유의 특징과 이를 이용한 분리막에 초점을 두어 간단한 소개를 하였다. 나노섬유화에 따른 활성증진, 미세입자 포집효율의 향상 등 많은 장점들을 내포

Table 3. ZnCl<sub>2</sub> 함유 탄소나노섬유의 세공구조

ZnCl <sub>2</sub> [wt%]	S.S.A [a] [m <sup>2</sup> g <sup>-1</sup> ]	T.P.V. [b] [cm <sup>3</sup> g <sup>-1</sup> ]	V <sub>meso</sub> [c] [cm <sup>3</sup> g <sup>-1</sup> ]	V <sub>micro</sub> [d] [cm <sup>3</sup> g <sup>-1</sup> ]	W <sub>meso</sub> [e] [nm]	W <sub>micro</sub> [f] [nm]	A.P.S.[g] [nm]
1	310	0.17	0.03	0.15	0.15	5.3	0.54
3	420	0.22	0.03	0.20	0.20	6.5	0.54
5	550	0.34	0.10	0.26	0.26	6.9	0.59

[a] Specific surface area was calculated by BET method. [b] T.P.V indicates total pore volume. [c] V<sub>meso</sub> indicates mesopore (1.7-300 nm) volume calculated with Barret, Joyner and Halenda (BJH) method based on the Kelvin equation. [d] V<sub>micro</sub> indicates micropore volume calculated with Horvath-Kawazoe (HK) method. [e] W<sub>meso</sub>: micropore volume calculated with Horvath-Kawazoe(HK) method. [f] W<sub>meso</sub>: average mesopore width calculated with BJH method. [g] A.P.S.: average pore width calculated with BET method (4V/A by BET).

하고 있으나 아직 개발 초기단계로써 나노섬유의 기본원리 파악, 제조공정의 표준화, 양산화, 평가 및 분석방법의 정립 등 해결해야 할 많은 문제점이 존재하며 이에 대한 추가적인 연구가 폭넓게 진행되어야 할 것으로 생각된다. 나노섬유의 조직화, 집합화, 계층화, 융합화를 통해 나노섬유의 용도를 한층 확대시키고, 분리용도뿐만 아니라 산업 전반에 걸쳐 다양한 형태로 응용이 가능할 것으로 기대된다.

참고문헌

- 堀 照夫 外, "Future textile", 繊維社 企劃出版, 2006.
- 本宮達也, "圖解よくわかるナノファイバー' Nanofiber Technology", 日刊工業新聞社, 2006.
- 本宮達也 外, "ナノファイバーテクノロジーを用いた高度産業發掘戰略, 2004, CMC.
- 富士總合研究所調査 レポート', 2002. 12.
- Doshi, J., et. al., *Journal of Electrostatics*, **35**, pp.151-160, (1995).
- Tsai, P.P., et. al., *Journal of Electrostatics*, **54**, (2002).
- Ehicon, Inc., US Patent 5,311884.
- Yoshimoto, H., et. al., *Biomaterials*, **24**, pp.2077-2082, (2003).
- Kenawy, E.R., et. al., *Polymer Perprints*, **43**(1), pp.457-458, (2002).
- Peter, P.T., *Journal of Advanced Materials*, **34**(3), pp.44-55, (2002).
- MacDiarmid, A.G., *Synthetic Metals*, **119**, pp.27-30, (2001).
- Yun, K., et. al., PCT patent: WO 01/89023.
- Binzer, J.C., Hollingsworth & Vose Gmb H&Co., KG
- Kim, C., Yang, K.S., *Appl. Phys. Lett.* **83**, 1216, (2003).
- Kim, C., et. al., *Solid state communications*, **132**, pp.567-571, (2004).
- Kim, C., *Journal of powersources*, **142**, pp.382-388, (2005).
- Kim, C., et. al., *Adv. Fun. Mat.*, **16**, pp.2393-2397, (2006).
- Kim, C., et. al., *Adv. Mat.*, **19**, pp.2341-2346, (2007).
- Kim, C., et. al., 대한민국 등록특허 10-0605006, (2005).
- Kim, C., et. al., *Small*, **3**, pp.91-95, (2007).



양 성 철

주식회사 아모텍 신소재연구소장

1979. 연세대학교 금속공학과 졸업  
 1985. SIT 공대 금속재료공학과(석사)  
 1989. IIT 공대 금속재료공학과(박사)  
 1989-1991. RPI 공대 금속재료공학과(Post-Doc)  
 1989. PhD in Metallurgical and Materials Engineering, Illinois Institute of Technology, Chicago, Illinois, U.S.A.  
 1985. M.S. in Metallurgical and Materials Engineering, Stevens Institute of Technology, Hoboken, NJ  
 1979. B.S. in Metallurgical Engineering, Yonsei University, Seoul, Korea  
 현재. 주식회사 아모텍 신소재연구소장



김 찬

주식회사 아모텍 아모메디 사업부 연구소장

1993. 전남대학교 섬유공학과 졸업  
 1996. 전남대학교 대학원 섬유공학과(석사)  
 1999. Shinshu 대학교 대학원 재료공학과(박사)  
 1999. PhD in Electrical and Electronic Engineering, Shinshu University, Nagano, Japan  
 1996. M.S. in Textile Engineering, National University, Gwangju, Korea  
 1993. B.S. in Textile Engineering, Chonnam National University, Gwangju, Korea