

# 전기방사 나노섬유와 응용

천석원\*

## Electrospun Nanofiber and its Applications

Chun Suk-Won

### Abstract

최근 나노기술에 대한 폭발적인 관심과 함께 전기방사기술은 나노섬유를 제조할 수 있는 강력한 수단을 평가되고 있으며, 지금까지 거의 30 종류 이상의 고분자들에 대한 나노섬유가 제조되었다. 또한, 나노섬유기술은 전통적인 섬유분야를 초월하여 매우 다양한 산업분야에 응용가능성이 있다. 따라서 다양한 분야에서 나노섬유를 활용하는 응용연구가 보다 활성화 되어야 할 것이다.

**Key Words:** nanofiber, electrospinning, electrospun, nanofiber web

### 1. 서 론

1990년대 들어 여러 첨단 산업분야에서 나노기술의 급격한 부가과 함께 섬유분야에도 나노섬유기술이 등장하였다.

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 기대된다. 그리고, 범용 또는 기존 초극세 섬유로 이루어진 다공성 쉬트 패브릭과는 달리 나노섬유 다공성 쉬트 패브릭은 우수한 기계적 특성과 수증기의 이송능, 지극히 낮은 공기투과도 그리고 우수한 에어

로졸 입자 통과 억제능 등 거의 멤브레인 특성을 갖는 구조를 지닐 수 있다. 따라서, 나노섬유소재기술은 기존 범용섬유소재 성능 한계성을 극복하는 신기술 및 신소재 창출에 크게 기여할 것으로 기대되고 있다.

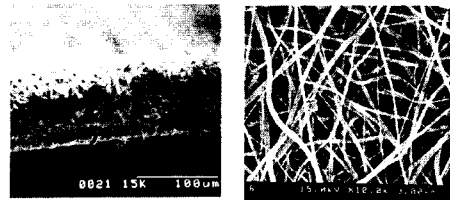


Fig. PVDF nanofibers obtained *via*. electrospinning process(from KIST).

### 2. 전기방사(Electrospinning)

나노섬유를 제조할 수 있는 여러 방법들이

\* 나노섬유연구소, (주)삼신크리에이션  
02-3443-9796, cswfiber@samshincr.com

있으나, 상용화 가능성, 적용 고분자의 다양성, 제조공정의 단순성, 다양한 제품기술 응용성을 고려할 때 전기방사에 의한 나노섬유제조가 가장 기대되는 기술로 예상된다. 고분자 용액의 전기방사(electrospinning)는 수nm~수천 nm 크기 초극세 섬유의 제조가 가능하고 섬유의 생성과 동시에 3차원의 네트워크 구조로 융착되어 적층된 형태의 다공성 웹형태로 제조가 가능하다. 따라서, 이 나노섬유 웹은 초박막, 초경량이며, 기존 섬유에 비해 부피 대비 표면적 비가 지극히 높고, 높은 기공도를 지니고 있다. 따라서, 구조적으로 내부의 땀 등을 배출할 수 있는 호흡성과 방풍성을 가지고 있으며, 막의 외부에서 액체가 들어오지 못하도록 제조가 가능하다.

## 2.1 전기방사의 원리

충분한 점도(약 1-200 poise)를 지닌 고분자용액이나 용융체가 정전기력을 부여 받을 때 섬유가 형성되는 현상(electrostatic spinning or electrospinning)은 100년 전부터 알려져 왔다. 그러나, 전기방사 기술은 새로운 기술이 아닐지라도 최근 과학기술계 전반에 걸쳐 큰 이슈가 되고 있는 나노기술의 대두와 함께 수 nm ~ 수  $\mu$ m의 섬유를 제조할 수 있는 방법으로 매우 큰 관심을 모으고 있다.

수직으로 위치한 모세관 끝에 고분자 용액은 중력과 표면장력 사이에 평형을 이루며 반구형 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, 어떤 임계 전기장세기( $V_c$ )에서 이 반발정전기력이 표면장력을 극복하게되면서 하전된 고분자 용액의 jet가 Taylor cone 끝에서 방출된다. 이 jet는 점도가 낮은 용액의 경우 표면장력 때문에 미세 방울로 붕괴된다. 그러나, 점도가 높은 용액의 경우 jet는

붕괴되지 않고 집전판을 향하여 공기 중을 날아가면서 용매가 증발하게 되고 집전판에는 하전된 고분자 연속상 섬유가 쌓이게 된다. jet가 집전판을 향해 날아가는 과정에서 jet의 탄도는 굽어지거나 방향이 바뀌기도 한다. 또한, jet는 비행중에 가늘어지게 되고 표면에 전하가 밀집되면서 전하반발력에 의해 초기 하나의 jet는 더욱 작은 여러 필라멘트로 분열된다. 이러한 과정을 "splaying"이라 불리운다. 전기방사에 의해 매우 가는 섬유가 제조되는 원인은 jet가 집전판을 향해 날아가는 과정에서 jet의 신장과 "splaying" 현상에 의해 가늘어지기 때문이다. 그러나, 전기방사에서 작용되는 가장 중요한 요인은 jet의 굽힘과 신장을 야기하는 "whipping" 불안정성이 급격히 증대되기 때문이다. 낮은전기장에서는 하나의 jet가 형성되어 균일하게 가늘어지면서 모세관 끝에서 집전판으로 날아간다. 그러나, 높은 전기장에서 jet는 짧은 거리만 비행한 후 곧 불안정하게 되는데, 1 ms의 노출시간으로 촬영한 jet의 불안정 영역은 초기 하나의 jet이 분열되어 수많은 jet가 형성된 것처럼 보여 준다. 그러나, 불안정 영역을 고속 촬영한 결과 뒤집힌 cone은 하나의 jet가 매우 빠른 "whipping"의 결과로 나타났다. 이러한 "whipping"의 진동수가 너무 빠르기 때문에 정전스프레이에서 관찰된 현상처럼 하나의 jet이 마치 수많은 필라멘트로 분열된 것처럼 보이는 것이다.

## 2.2 섬유형태

전기방사에서 주 공정변수는 용액특성(농도, 점도, 표면장력 등), 모세관 끝에서 집전판까지의 거리, 전기장세기, 방사시간, 방사환경 등이다. 이러한 공정변수의 변화에 따라 형성된 섬유의 형태가 달라진다.

전기방사에서 용액의 농도가 낮으면 고분자는 방울형태(bead)로 축적되고, 점차 농도가 높아짐에 따라 털이 달린 구슬형태를 거쳐 안정된 섬유상을 형성한다. 용액의 점도가 높아질수록 고분자 사슬의 얽힘 정도는 증가되어 jet의 붕괴를

방해하므로 jet는 섬유상으로 늘어나게 된다. 글리세롤같이 높은 점성을 지닌 유체의 경우도 jet는 길게 늘어나지만 고분자 용액과 달리 고체상 섬유를 생성시키지는 못한다. 또한, 전기장의 세기를 증대시키면 jet의 전체 전하밀도가 증대하게 되어 가는 섬유가 얻어진다.

### 3. 응용분야

전기방사는 수십 nm ~1 μm 이상의 섬유를 간단하고 경제적으로 제조할 수 있으므로 여러 첨단 제품에 응용될 수 있다. 이러한 고분자 나노섬유는 작은 기공크기, 높은 표면적을 지니므로 균인들의 방호복이나 필터소재, 생체조직배양, 상처보호치유 및 피부조직의 균일 재생, 인공혈관, 약물전달시스템, 태양돛, 우주용 거울, 식물살충제, 강화복합재 등에 활용될 수 있다. 유연성을 갖는 섬유는 micro 또는 nanoelectrical mechanical system(MEMS, NEMS) 또는 광학시스템에 필요하다. 나노섬유의 경우 MEMS에서 구동벨트와 지극히 얇고 우수한 성능의 강화네트로 사용될 수 있다. 고온 초전도체로 만들어진 나노섬유 또는 나노전선은 MEMS나 마이크로일렉트로닉스에서 그리고 나노광학 분야에서 많은 새로운 소자를 창출시킬 수 있다. 그리고, 전도성 나노섬유는 micro-thermocouple에 활용될 수 있다.

#### 3.1 생체 모방성 단백질 섬유

일반적으로 동맥혈관 벽 및 생체조직은 단백질섬유의 3차원 구조물로 형성된 섬유강화 복합물 구조이며, 동물세포는 대체로 마이크로 크기이나 생체단백질 섬유는 나노 크기의 섬유들이다. 흡식방사나 건식방사 모두 단백질섬유의 직경은 매우 굵고 천연 단백질 섬유의 형태적 특성을 지니지 못하므로 생체조직에 친화성을 갖지 못한다. 전기방사는 상온과 상압하에서 방사하는 과정에서 섬유가 부피에 비하여 넓은 표면적을 지니게 되어 용매의 휘발이 잘 일어나므로 묽은 용액으로부터 생체모방성 나노섬유를 제조할

수 있는 효율적인 방법이다. 동맥과 같은 혈관의 조직은 단백질 섬유의 섬유강화복합체 구조이다.

#### 3.2 조직공학(Tissue Engineering) 기술

생물학적, 화학적, 혹은 생합성적인 혈관이식 등과 같은 특별한 복합물에 요망되는 물성은 기존의 물성 외에 기공도를 가져 복합물의 외부표면을 확장시키고 조직의 내부확장을 촉진시켜 내피세포화를 용이하게 해주어야 한다. 조직배양을 위한 scaffolds에 전기방사 기술의 활용은 매우 매력적인 것으로 알려지고 있다. 따라서, 이러한 연구를 목적으로 전기방사에 의해 poly(lactic-co-glycolic acid), poly-(glycolic acid) (PGA), collagen, elastin 등의 생분해성 고분자들의 나노섬유들이 제조되었으며, 이들에 대한 세포 배양실험이 진행 중이다.

또한 전기방사에 의한 나노섬유는 매우 작은 직경을 가지며 작은 기공을 갖고 높은 비표면적을 갖는 매트이므로 수분 및 통기성이 좋고, 세균으로부터 상처를 보호하고 체액이 스며들지 않기 때문에 제거가 용이하므로 wound dress로의 응용이 기대된다.

#### 3.3 고효율 필터

필터에서 작은 입자를 여과하는 여과효율을 높이는 한가지 방법은 필터매체중에 적절한 직경의 섬유를 사용하는 것으로, 나노섬유는 이러한 용도에 최적이다. 나노섬유는 무게대비 지극히 넓은 표면을 갖는 특성이 있으므로 이를 기체나 액체중의 입자를 분리하는 데 사용할 수 있다. 전기방사는 10~1000 nm의 크기의 섬유를 제조할 수 있다. 전기방사로 제조된 나노섬유로 구성된 필터는 표면적이 넓어 여과 효율이 높고 공극율이 매우 높아 필터중에 발생하는 압력강하가 적다.

#### 3.4 극한환경 방호 소재

나노섬유 패브릭은 미세입자나 박테리아 등은 통과시키지 못하며, 구조적으로 내부의 땀 등을 배출

할 수 있는 호흡성을 가지며, 막의 외부에서 액체가 들어오지 못하도록 제조가 가능하며 방풍성을 가지고 있다. 따라서, 전기방사에 의한 나노섬유를 생화학 물질의 방호기능을 갖는 시스템 구축에 활용될 수 있다. 미국방성에서는 전장에서 병사를 보호하는 방호복 체계에 전자방사기술을 활용하는 연구를 활발히 진행하고 있으며, 현재 시제품이 개발되어 그 성능을 평가중인 것으로 알려지고 있다.

### 3.5 전도성 나노섬유, 탄소나노섬유, 복합소재

고분자 나노섬유는 매우 높은 표면적으로 지니고 있으므로 서로 다른 재료들이 중첩되어 코팅된 나노섬유를 제조하는 데 활용될 수 있다.

전도성 고분자는 가시광선을 흡수하여 흡광도에 변화가 일어나는 전기 변색 특성(electrochromism) 나타내고 있는 바, 전도성 나노섬유 코팅은 태양광의 양을 감지하여 창문의 색조절 기능을 부여하는 기능성 창문, 전자파 차폐와 대전방지 코팅에 활용이 기대되고 있다.

PANI나 폴리피롤 같은 전도성 고분자는 대기중의 여러 기체들을 탐지하는 생화학 센서의 전극으로 활용될 수 있는 데, 이러한 센서에서 전도성 고분자의 유효표면적의 증가는 센서의 감도증대에 매우 중요하다. 전기방사에 의한 나노섬유는 높은 표면적을 지니므로 높은 감도와 빠른 응답시간을 갖는 센서에 응용 가능성이 매우 높다.

PAN이나 피치 같은 탄소섬유 전구체 고분자들로 부터 제조된 나노섬유는 탄화과정을 거쳐 탄소 나노섬유로 변환시킬 수 있다. 탄소나노튜브나 그래파이트 나노섬유와 같은 휘스커상 나노섬유제조기술, 고분자의 블렌드방사와 탄화과정을 거쳐 나노미터 크기의 초극세 탄소섬유를 제조하는 방법과 함께 전기방사기술은 탄소나노섬유를 제조하는 또 다른 경로를 제공하고 있다.

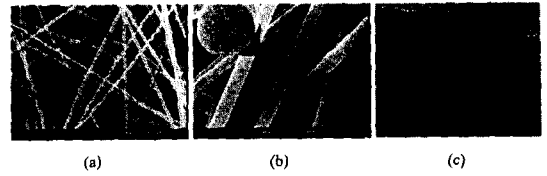


Fig. (a) Electrospun polyimide nanofibers (b) Carbonized polyimide nanofibers, and (c) Graphite structure of Carbonized polyimide nanofibers. (from KIST)

일반적으로 섬유의 강도는 섬유가 가늘수록 증가한다. 또한, 섬유강화 복합체를 제조할 때 섬유와 매트릭스 사이에 굴절률 차이가 있어 제조된 섬유강화복합체는 불투명하게 된다. 그러나, 가시광선 파장보다 작은 직경의 섬유를 사용하면 투명한 복합체를 제조할 수 있다.

## 4. 결론

최근 나노기술에 대한 폭발적인 관심과 함께 전기방사기술은 나노섬유를 제조할 수 있는 강력한 수단을 평가되고 있으며, 지금까지 거의 30 종류 이상의 고분자들에 대한 나노섬유가 제조되었다. 또한, 나노섬유기술은 전통적인 섬유분야를 초월하여 매우 다양한 산업분야에 응용가능성이 있다. 따라서 다양한 분야에서 나노섬유를 활용하는 응용연구가 보다 활성화 되어야 할 것이다.

## 참고문헌

- (1) G. Taylor, *Proc. Roy. Soc. London A*, 313, 453 (1969)
- (2) D. H. Renecker, A. L. Yarine, H. Fong, and S. Koombhongse, *J. Applied Physics*, 876(19), 909 (2000)
- (3) Y.M. Shin, M.M. Hohman, and G.C. Rutledge, *Applied Physic Letters*, 78(8), 149 (2001)