

## 전기방사 조건에 따른 나노섬유상의 구조 및 응용

유호석 · 박진수<sup>†</sup>

경운대학교 항공신소재공학과

## Effects of Electrospinning Parameters on the Fiber Formation and Application

HO SUK RYU, JIN SOO PARK<sup>†</sup>

Department Advanced Aerospace Materials Engineering, Kyungwoon Aeronautical Institute of Technology (KAI-TECH), Kyungwoon University, 730 Gangdong-ro, Sandong-myeon, Gumi 39160, Korea

<sup>†</sup>Corresponding author :  
[jsp@ikw.ac.kr](mailto:jsp@ikw.ac.kr)

Received 30 November, 2017  
Revised 26 January, 2018  
Accepted 28 February, 2018

**Abstract >>** Electrospinning is a versatile technique that utilizes electrostatic forces to produce very thin and fine fibers of polymer ranging from submicron to nanometer scale. The technique can be applied to fibers of a various polymer types. Working parameters in the electrospinning are very important to understand not only the nature of electrospinning but also the conversion of polymer solutions into nanofibers through electrospinning. Those parameters in the electrospinning can be broadly divided into three parts. The first parameter is solution parameters such as molecular weight of polymer, concentration, viscosity, surface tension and conductivity/surface charge density of solution. The second parameter is process such as voltage, distance between the collector and the tip of the syringe, shape of collectors, flow rate. The third parameter is ambient parameters such as humidity and temperature. Fibers which made by electrospinning with working parameters are applied for various fields according to shape such as medical, cloth, photodiode, a sensor technology, catalyst, filtration, battery etc.

**Key words :** Electrospinning(전기방사), Solution parameter(용액조건), Process parameter(작동조건), Ambient parameters(환경조건), Fiber formation(섬유상 구조), Fiber application(섬유상 응용)

### 1. 서론

전기방사(electrospinning)는 전기장 내에서 용해된 고분자 용액을 분사함으로써 인하여 수나노(nm)에서

수마이크로( $\mu\text{m}$ ) 스케일의 직경을 가지는 실험태의 섬유상을 제조하는 방법이다. 이러한 연속상의 섬유 제작은 기존에 알려진 다양한 제작방법(주형 합성, 자기조립, 상분리 등)보다 간단하고 재료에 제한이

적다. 전기방사 기술은 다양한 고분자가 가능하며, 이러한 다양한 고분자의 용융 및 혼합에 의하여 의학 분야, 전기화학 분야, 약학 분야 등 다양한 응용 분야에 적용이 가능하다.

1934년 정전기력을 이용하여 고분자 필라멘트를 제작하는 기술을 가지고 있었던 Anton과 Formhals들에 의하여 전기방사 아이디어가 제시되었다<sup>1)</sup>.

이러한 기술을 바탕으로 1966년에 Simons<sup>2)</sup>는 고분자 용액의 점도에 따라 섬유의 형상이 변하는 것을 발견하였으며, 1969년에 Taylor<sup>3)</sup>에 의해 전기장과 고분자 용액의 방울의 표면장력과 원형을 이루는 깔때기 형상(테일러 콘 형상)에 대하여 정의하였으며, 이러한 깔때기 형상에 따른 섬유상의 물성에 대한 연구를 발표하였다.

이 시점을 기반으로 이후 많은 연구자들에 의해 전기방사에 대한 연구가 지속적으로 진행되었다.

## 2. 전기방사 장치와 프로세스

### 2.1 전기방사 장치와 프로세스

전기방사 장치의 구조는 Fig. 1처럼 나타낼 수 있다. 크게 그 구조를 보면 고전압을 걸어줄 수 있는 장치(gigh voltage power supply)와 고분자를 공급해 줄 수 있는 부분(syringer driver), 고분자가 토출되는 부분인 토출부(needle)와 토출된 고분자섬유상을 모으는 부분인 수집기(collector)로 나눌 수 있다. 고

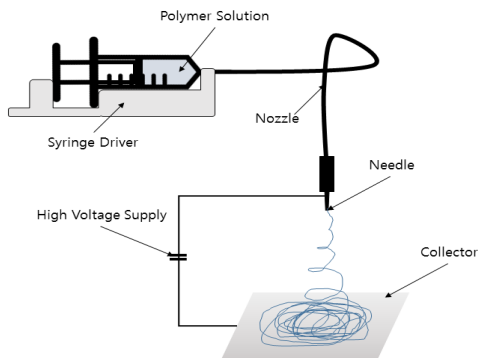


Fig. 1. Schematic diagram of electrospinning

전압을 토출부와 수집기(대개 지면에 접지) 사이에 걸어주게 되며, 토출부와 수집기 사이에는 일정한 간격을 두고 배치한다.

일반적으로 0-30 kV의 고전압을 바늘 끝에 인가해주게 되면 토출된 고분자가 표면장력에 의하여 노즐 끝에서 반구형을 이루고 있다가 표면전하 사이의 상호 정전기적 반발력과 외부전기장(쿨롱)에 의하여 테일러 콘 형상으로 변하게 된다. 특정 세기의 전기장이 인가가 되면 한 쪽 전하가 축적되고 반발력에 의하여 방사하게 되는데, 이때 반대쪽 전하로 하전되었거나 접지된 수집기 방향으로 섬유상들이 모이게 된다.

방사 중에 분사된 액상의 용매는 휘발이 일어나면서 집전판에 무작위의 섬유상이 배열된다. 일반적으로는 평판에 할 경우 이러한 무작위의 섬유상이 쌓이게 된다. 다양한 형태(실, 섬유다발 등)의 섬유상을 제조하기 위해서는 둥근 모양의 회전형 집전체를 사용하기도 한다.

전기방사로 만들어진 나노섬유는 기존의 다른 형태의 섬유에 비하여 직경이 작고 비표면적이 높으며, 3차원적인 웹 형태로 얻을 수 있어 나노 복합소재, 의료소재, 인공혈관, 초기능성 분리기능 소재 등 다양한 분야에 응용이 가능하다.

전기방사로 만들어진 나노섬유 제조에는 전기역학, 유체 역학 등의 매우 복잡한 시스템이 적용되어 이들 상호 간의 관계에 따른 다양한 형태의 섬유형상이 제조될 수 있다.

### 2.2 전기방사를 위한 전기역학적인 특성

일반적으로 전기장 내의 전기장의 세기는 단위 양전하가 받는 힘의 세기이다. 즉 전기장의 세기(E)를 양전하(q)에 작용하는 힘(F)으로 나타내면 다음과 같다.

$$E = F/q$$

Deitzel 등<sup>4)</sup>은 전기방사에서 섬유 직경(d)은 용액의 점도( $\eta$ )와 관련이 있다고 하였으며, 이들 사이의

관계를 다음과 같이 나타내었다.

$$d \approx k\eta^{1/2}$$

또한 이러한 전기역학적인 관계를 다양한 연구자들이 보고하였다<sup>5,6)</sup>. Reneker와 Chun<sup>7)</sup>, Deitzel 등<sup>8)</sup>은 임계전기장의 세기와 고분자 용액의 표면장력과 유전율, 콘 말단부의 곡률 반경과의 관계를 유도하였으며, Wamer 등<sup>9)</sup>은 이 유도식을 바탕으로 고분자 용액의 표면장력과 임계전기장의 세기가 평형을 이룰 때의 임계 전압( $V_c$ )은 방사변수인 캐필러리의 길이(L), 캐필러리 반경(R), 액체의 표면 장력( $\gamma$ ) 및 방사거리로(H)부터 다음 식을 이끌어 내었다.

$$V_c^2 = 4 H^2/L^2 [\ln 2L/R-3/2] (0.117\pi\gamma R)$$

위와 같이 이러한 시스템에 영향을 미치는 변수는 다양하다. 이러한 변수는 크게 외부 환경적인 요건과 내부적인 변수 등으로 나눌 수 있으며, 외부 환경적인 요건은 작동되는 기기의 주변 온도와 습도 등이며, 내부적인 변수는 방사되어지는 고분자 용액의 특성(농도 또는 점도, 표면장력 등)과 전기방사 프로세스와 관련된 물성(인가전압, 토출부와 수집기 간의 거리 그리고 고분자 용액의 토출 속도 등)이 있다.

본 논문에서는 이들과 전기방사로 인하여 제조되어

지는 고분자 섬유상의 물성과의 관계를 설명하였다.

### 3. 방사용액과 물성

#### 3.1 농도

고분자 용액의 농도는 전기방사를 하는 동안의 섬유 형성에 매우 중요한 역할을 한다. 낮은 농도로부터 높은 농도까지 4가지 단계(매우 낮은 농도, 적합한 농도, 약간 높은 농도, 매우 높은 농도)에 따라 설명을 하면 Table 1과 같다.

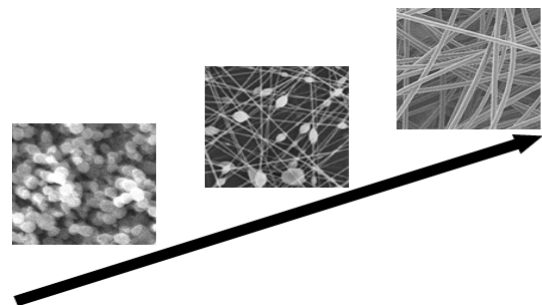
농도에 따른 현상을 전기방사된 고분자 이미지로 보면 Fig. 2와 같다. 일반적으로 농도가 낮을 때에는 분말 형태의 입자가 분포하게 될 것이며, 전기방사가 가능할 정도의 농도 이후에는 고분자 용액의 농도가 증가함에 따라 생성되어지는 섬유지름은 증가한다. 이는 용액의 농도는 같은 고분자의 경우 용매의 비율에 따라 다르며, 같은 용매의 경우 고분자의 분자량 등과 관련이 있다.

#### 3.2 점도

앞서 이야기하였듯이 용액의 점도는 전기방사에 있어서 섬유상의 형태를 결정하는 중대한 요소이다. 일반적으로, 용액 점도는 용액의 고분자 농도의 조절에 의하여 바뀔 수 있다. 농도를 조정하는 것으로부터 점도가 조율될 수 있다. 하지만 전기방사에 사용되는 폴리머 또는 올리고머 용액의 점도는 그 범

**Table 1.** Result of electrospinning with concentration of polymer solution

Concentration	Characteristic(Shape)	Literature
Very low	Creation of polymeric micro or nano-particles by low viscosity and high surface tensions of the solution (similar to electrospray)	43
Suitable	Shape of smooth nanofibers	5-9, 20, 43-46
Little higher	Mixture shape of beads and fibers (Creation of bead type by high concentration part and fibers by some parts)	5-9, 43-46
Very high	Helix-shaped microribbons by low volatility	20



**Fig. 2.** SEM images of the electrospinning products with concentrations of solution

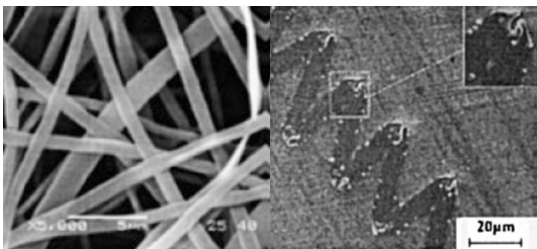
위들이 종류에 따라 다르게 나타난다.

Larrondo와 St. John Manley<sup>10)</sup>, Sukigara 등<sup>11)</sup>은 지속적인 부드러운 섬유상은 매우 낮은 점도에서는 얻을 수 없으며, 그에 반하여 고점도의 용액은 단단한 분사물을 분사할 수 있기 때문에 전기방사를 위해서는 적당한 점성이 요구된다는 것을 증명하였다.

우선 낮은 점도에서는 표면장력이 지배적인 요인이 되며, 일반적으로 구슬(bead)들 또는 구슬이 달려 있는 섬유(beaded fiber)가 형성되어 진다. 만약 용액이 충분한 점도도가 있으면, 연속적인 섬유상을 얻을 수 있다. 이러한 상호관계에 대하여는 많은 논문<sup>12-16)</sup>들이 있으며, 이는 농도와도 관련이 있다.

### 3.3 고분자 분자량

고분자의 분자량 또한 전기방사 섬유의 형태에 서 중요한 영향을 준다. 원칙적으로, 고분자의 분자량은 고분자 용액에서 고분자 사슬들의 얽힘을 반영하기 때문에 용액의 점도와 관련이 있다. 농도를 고정으로 유지한 상태에서 낮은 분자량의 고분자는 부드러운 섬유상보다는 비드모양의 나타내는 경향을 가진다. 그러므로 점도, 고분자 농도 그리고 고분자 분자량 등은 서로 간에 연관성을 가지고 있다. 고분자의 점도는 일반적으로 고분자의 농도와 같은 계열의 경우 분자량에 비례하는 경향을 가진다. 이와 같이 서로 간에 연관성을 아는 것은 매우 중요하다.



**Fig. 3.** SEM images of the electrospinning products with ultra-high molecular weights of polymer (PVA: 31,000-50,000 g/mol<sup>12)</sup>, PAM:  $9 \times 10^6$  g/mol<sup>13)</sup>)

일반적으로 고분자의 분자량이 증가하면 보다 부드러운 섬유상이 생성된다. 고분자의 분자량이 매우 증가하게 되면, 마이크로 리본형태의 섬유상이 생성된다(Fig. 3). 또한 매우 높은 분자량을 가진 고분자 용액에서는 비록 낮은 농도로 하여도 마이크로 리본 형상이 더 잘 나타난다<sup>17,18)</sup>. 또한 몇 명의 저자들은 분자량이 매우 높을 때, 낮은 농도에서 얻어질 수 있는 몇 개의 무늬가 놓여진 섬유를 발견하였다고 보고하였다.

그러나 McKee 등<sup>19)</sup>은 분자량이 매우 높은 고분자의 경우에도 충분한 분자 간 상호작용들이 울리 고머들에 의하여 공급된다면 전기방사에 의하여 나노섬유상의 제조가 이루어질 수 있다고 보고되었다. 그들은 성공적으로 전기방사를 통하여 레시틴 용액들로부터 올리고머 크기의 인산 지방질 섬유를 얻었다. 또한 인산 지방질의 농도가 35 wt.%보다 더 높을 때 부드러운 섬유를 얻었다.

### 3.4 표면장력

용액의 구성에 따른 특성으로서 표면장력은 전기방사에서 매우 중요한 요소이다. Yang 등<sup>20)</sup>은 2004년에 에탄올, 디메틸포름아미드(DMF)와 메틸렌 크로라이드(MC)를 용매로 하여 폴리비닐피롤리돈(PVP)을 사용하여 전기방사에 의한 제작된 샘플을 기반으로 하여 샘플의 형태에 미치는 표면장력의 영향을 체계적으로 연구하였다. 그들은 용매의 차이에 따라 표면장력이 차이가 나는 것을 관찰하였다. 농도를 고정한 다음 용매의 변화에 따라 용액의 표면장력을 변경하였을 경우, 표면장력이 높은 경우 구슬이 달린 섬유(beaded fiber)를 형성하였으나 표면장력을 감소하였을 경우에는 부드러운 섬유상이 형성된다고 보고하였다. 또한 그들은 표면장력과 용액 점도는 용매의 질량비에 따른 혼합의 변화에 따라 조절 될 수 있고, 섬유상을 변화시킬 수 있는 것을 증명하였다. 일부 연구자들은 모든 다른 상태들이 고정되면, 근본적으로 표면장력은 전기방사의 상부 경계와 하부 경계를 결정하게 된다고 보고하였다<sup>21-23)</sup>.

### 3.5 도전율/표면 대전 밀도

고분자 용액이 가지는 도전율은 고분자의 종류, 용매의 종류 그리고 염에 의하여 주로 정해진다.

Zong 등<sup>24)</sup>은 보통 천연 고분자는 자연계에서는 고분자전해질의 성질을 가지고 있기 때문에 고분자 분자의 능력을 이끌어내는 이온의 양이 더욱더 증가함에 따라 전기장에서 더 높은 장력을 받게 되어 합성 섬유와 대조적으로 섬유 형성 불량을 초래한다.

Huang 등<sup>25)</sup>은 NaCl, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 등의 이온 염을 첨가하여 용액의 전기 전도도를 조정하였다. 또한 이러한 이온 염의 도움으로, 작은 직경의 나노섬유를 얻을 수 있다. 유기산을 용매로 사용함으로써 높은 용액 전도성을 얻을 수 있었다.

또한 나일론을 용해하는 용매로 포름산을 사용하여 초미세(3 nm) 비드가 달려 있는 전기방사 나일론 섬유를 얻었고, 비드를 제거하기 위해 용액에 소량의 피리딘(pyridine)을 첨가하여 용액의 전도성을 높였다.

이전의 연구 결과에서 보면 전도성의 증가가 보다 얇은 섬유의 형성에 도움이 된다는 것을 나타내고 있다.

## 4. 전기방사 프로세스와 물성

### 4.1 전압

전기방사 프로세스 내에서 인가되는 전압은 중요한 요소이며, 인가되는 전압이 테일러 콘(taylor cone)에서부터 대전되어 분출할 수 있는 한계 전압 보다는 높아야 발생한다. 그러나 방출된 전기방사 섬유의 직경과 인가전압과의 관계에서는 약간의 다양한 결과물을 나타내고 있다.

Reneker와 Chun<sup>7)</sup>은 전기전도도가 전기방사에 의해 생성된 폴리에틸렌(PEO) 나노섬유의 직경에 큰 영향을 미치지 않는다고 보고하였으며, Yuan 등<sup>26)</sup>은 더 높은 전압이 대전된 분사체에 정전기적 반발력의 증가시켜 섬유의 지름이 좁아지는 데에 도움이

될 수 있다고 제시하였다. 이러한 결과로서 폴리설폰(PSF)을 아세톤(acetone)과 디메틸아세트아미드(DMAC)를 혼합한 용매에 녹여 사용하여 섬유의 형상과 직선도에 전압이 영향을 미친다고 발표하였다. Zhang 등<sup>21)</sup>은 폴리비닐 알코올(PVA) 수용액을 이용하여 더 높은 전압에서 큰 직경의 섬유를 형성하였다고 보고하였다.

이러한 현상 외에도, 일부 그룹은 더 높은 전압에서 비드가 형성될 가능성이 높은 확률을 가질 수 있다고 보고하였다<sup>27,28)</sup>.

그러므로 이러한 논문들의 결과로부터 몇몇의 학자들은 전압이 섬유 직경에 영향을 미치지만, 고분자 용액의 농도와 실린저의 팁(tip)과 수집기(collector) 사이의 거리에 따라 달라지는 것을 발견하였다<sup>29)</sup>.

### 4.2 방출 속도

주사기 내의 고분자 용액의 방출 속도는 또 다른 중요한 프로세스 중의 파라미터이다. 일반적으로 최소의 방출 속도는 고분자 용액이 분극화를 위하여 충분한 시간을 가질 수 있는 정도로 권장된다.

만약 방출 속도가 매우 빠른 경우, 수집기에 도착하기 전 짧은 건조시간과 낮은 분사력 때문에 얇은 직경을 가지는 매끄러운 섬유가 아니라 두꺼운 직경을 가지는 비드 섬유가 형성될 것이다.

Yuan 등<sup>26)</sup>은 20% (wt/v) PSF/DMAC 용액을 이용하여 방전전압을 10 kV로 하여 PSF 섬유를 제조하였을 때 섬유의 모양에 미치는 방출 속도의 효과에 대하여 연구 보고하였다. 방출 속도가 낮은 경우 분말의 형태로 나타나며, 높을 경우 비드 형태로 나타나는 것을 관찰하였다.

### 4.3 수집기(collector)

전기방사 프로세스 중에는 수집기는 일반적으로 대전된 섬유상을 모으기 위해 전도성을 기질로 작용한다. 일반적으로 알루미늄(Al)호일이 수집기로 사용되지만, 수집된 섬유상을 다양한 용도로 사용하

기 위하여 다른 기관으로 옮기는 것은 어렵다.

섬유를 다른 기관 등으로 옮길 필요가 있는 경우 평행 또는 격자형태의 바<sup>30)</sup>, 회전식 막대 또는 휠<sup>30)</sup>, 핀<sup>31)</sup>, 와이어메시<sup>32)</sup>, 그리드<sup>33)</sup>, 액체 수조<sup>34)</sup> 등이 개발되었다.

#### 4.4 실린저의 팁과 수집기 사이의 거리

수집기와 실린저의 팁 사이의 거리는 섬유의 직경의 크기와 형태에 영향을 미칠 수 있는 것이 증명되었다<sup>14)</sup>. 간단히 말해서, 거리가 너무 짧으면 섬유가 얻기 전에 충분한 시간을 확보할 수 없고, 거리가 너무 길면 비드 섬유를 형성할 수 있다. 전기방사된 섬유의 한 가지 중요한 물리적 측면은 용제로 인한 건조물이므로 최적의 거리가 존재한다는 것이 잘 알려져 있다. Yuan 등<sup>26)</sup>은 약간 긴 거리가 더 얇은 섬유를 얻는 데 유리하다고 보고하였다.

#### 4.5 주위 환경(온도, 습도)

방사장치 주위의 온도, 습도 등의 주변 환경변수는 섬유의 직경, 형태에 커다란 영향을 미친다. Mit-upatham 등<sup>35)</sup>은 폴리아미드-6 섬유를 가지고 용액 점도와 온도 사이의 반비례 관계를 가지므로 온도가 증가하였을 때보다 더 얇은 직경의 섬유를 가진다고 증명하였다.

습도에 대해서는 일반적으로 낮은 습도는 용매를 완전히 건조시키고 용매 증발 속도를 높일 수 있고, 높은 습도는 분사체(Jet)의 대전이 무산되거나 분사력이 감소되기 때문에 두꺼운 섬유직경으로 이어질 수 있다. 또한 일반적으로 습도가 높으면 용매 증발 속도가 감소하며 습도가 낮을 경우 용매 증발 속도가 증가하여 형성된 섬유 표면의 기공 증가율이 증가하지만 Casper 등<sup>36)</sup>은 다양한 습도분위기에서 PSF의 표면 형상에 미치는 영향을 관찰하였다. 상대 습도가 30% 이상으로 높아지면 표면에 기공들이 많이 발생한다고 발표하였다.

## 5. 전기방사의 변화

전기방사는 다양한 응용에 사용되었으며, 이러한 것은 다양한 프로세스를 이용해 나노섬유의 기능 및 특성을 증대시켰기 때문이다. 다음에는 이러한 몇 가지 프로세스와 사용된 예들을 나타내었다.

### 5.1 코어-셸 형(동축형) 전기방사

동축형 전기방사는 서로 다른 고분자 용액을 이용하여 서로 섞이지 않으면서 분사되어 코어-셸 형태(동축형태)의 나노섬유를 얻을 수 있다. 이러한 경우에는 서로 다른 고분자가 서로 섞이지 않아야 하기 때문에 고분자와 용매의 선택이 중요하다. 이러한 구조는 Zhang 등<sup>37)</sup>의 논문에 잘 나타나 있으며, 동축전기방사에 의하여 얻어진 코어-셸 구조의 나노섬유는 코어의 특성이나 셸 내부의 특성을 모두 발휘할 수 있기 때문에 약물 전달체, 생체 활성 조직체, 생화학 센서 등에 사용될 수 있다.

Li와 Xia<sup>38)</sup>은 속이 비어있는 중공티타늄 산화물 나노섬유를 제작하기 위하여 동축전기방사 방법을 사용하였다. 속이 비어 있는 부분(코어부분)을 제조하기 위해서는 미네랄 오일을 사용하였으며, 섬유 부분(셸 부분)은 섬유 형태를 가지기 위해서는 용매로 에탄올을 사용하고 고분자로는 수용성 고분자로

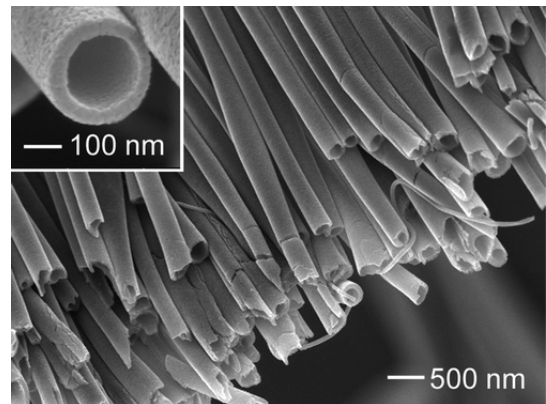


Fig. 4. SEM image of a uniaxially aligned array of anatase hollow fibers that were collected across the gap between a pair of electrodes<sup>37)</sup>

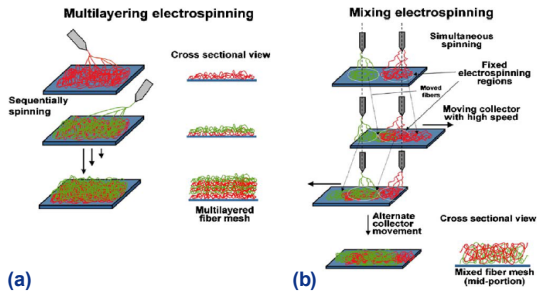


Fig. 5. Scheme of electrospinning techniques: (a) multilayering and (b) mixing<sup>39)</sup>

많이 사용되는 PVP를 사용하였다. 외부노즐에는 티타늄산화물(TiOx) 섬유를 위해서 유도체인 티타늄 이소프로폭시드(Ti(OiPr)<sub>4</sub>)를 고분자에 혼합하여 사용하여 Fig. 4와 같은 속이 비어있는 중공티타늄 산화물 나노섬유를 제작하였다.

### 5.2 다층 또는 혼합 전기방사

다층 또는 혼합 전기방사는 코어-셸형과는 다르게 두 가지 이상의 다른 고분자 용액을 독립적으로 유량을 조절하면서 하나의 노즐을 통해 방사하여 여러 개의 섬유가 다층 또는 혼합되어 나오는 형태를 제조하는 것이다.

이러한 전기방사법은 Kidoaki 등<sup>39)</sup>에 의하여 인공혈관을 제조하기 위한 스캐폴드(scaffold) 제조에 최초로 시도되었다. Fig 5와 같이 집전판에 순차적으로 방사하여 세 층의 고분자로 이루어진 섬유상의 방사 조직을 제조하였다. 이러한 다층 또는 혼합 전기방사법에 의한 섬유상의 방사 조직은 생체기능성을 위한 확보하기 위하여 생체 고분자들을 이용하여 많은 연구가 진행되었다.

McClure 등<sup>40)</sup>은 다층 또는 혼합 전기방사법을 이용하여 폴리카프로락톤(polycaprolactone) 층, 대동맥 벽의 단백질 층(elastin) 그리고 교원질 층(collagen) 순서로 3층의 형상을 가지는 동맥혈관을 제조하였다.

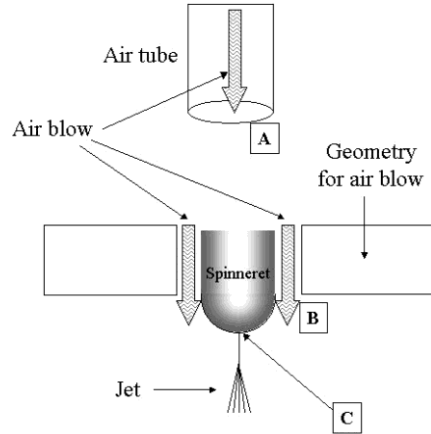


Fig. 6. Temperatures of blown air at different locations of the electro-blowing process

### 5.3 공기제어방식 전기방사

이 방식은 전기방사 장치에 송풍기를 장치하여 공기의 흐름이 집전판으로 향할 수 있도록 해주는 간단한 방법으로 송풍기에 열을 가할 수 있는 장치를 더하여 점도와 용매 증발을 조절하여 섬유의 치수를 제어할 수 있다.

Um 등<sup>41)</sup>은 생체 적합성 및 안정성을 가지는 수용액상의 히알루론산(hyaluronic acid)이 희박한 농도에서 높은 용해점도와 표면장력을 가져 기존의 방법으로 제조하지 못하였지만 Fig. 6과 같이 기존의 전기방사 장치에 고분자 분사 장치인 노즐의 동심원상으로 송풍기를 설치하여 섬유를 제조하였다.

### 5.4 에어갭 전기방사

전기방사에 의해 제조된 나노섬유의 정렬하기 위해서 사용되는 방법으로 고도의 정리된 나노섬유를 얻기 위하여 연구되어 왔다. Jha 등<sup>42)</sup>이 제안한 이 방법은 Fig. 7과 같이 고분자 분사가 일어나는 노즐에서 일정거리를 두고 두 전도성 집전체를 설치하면, 두 집전체의 전기장에 의하여 분사된 고분자가 이들 집전체 사이를 지나면서 방사 및 연신이 일어나 정렬된 나노섬유가 형성된다. 각각의 섬유들의

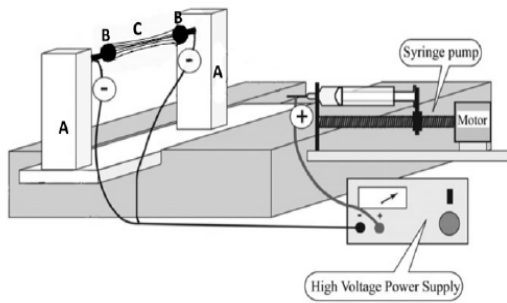


Fig. 7. Schematic of the ground target used in a two pole air gap electrospinning system<sup>42)</sup>

반발력에 의하여 균등한 간격을 가지고 배열이 된 섬유들은 형성 할 수 있다.

## 6. 결론

나노미터 스케일의 물질 및 그의 특성에 대한 관심이 증대함에 따라 최근 몇 년간 전기방사에 관련한 연구들이 급격히 증가하고 있다. 간단한 방사 기술 및 집전판의 개선을 통해 여러 다른 조성 및 복잡한 형상을 갖는 구조나 이에 기인한 개선된 특성들을 얻을 수 있다.

전기방사에 의한 고분자 나노구조는 의약섬유, 광전소자, 센서 기술, 촉매 및 여과 분야에 잠재적인 응용 가능성을 가지지만, 아직은 이러한 실제적인 응용에 있어 여러 가지 제약들이 남아 있다. 매우 가늘면서도 균일한 직경을 갖는 나노섬유(100 nm 이하)의 구현이 어렵다는 점과 전기 광학적 특성을 가지는 공액계고분자 반도체 물질의 경우 전기방사가 어렵다는 것 등의 어려운 문제점을 지니고 있었지만 최근에는 이러한 한계성을 해결하기 위하여 새로운 기술들을 적용되고 있다. 은(Ag) 나노와이어보다 100배 이상 긴 은(Ag) 파이버를 제작하여 발광효율이 획기적으로 향상된 디스플레이용 유연투명전극을 개발하였으며, 흡착성을 높인 다공성 고분자 섬유를 제조하여 폐수 중에 다량 함유된 귀금속 이온을 흡착하여 재활용할 수 있는 기술을 개발하였으며, 동축 전기방사를 통하여 여러 가지 약물을 흡착/배출할 수 있는 나노섬유를 제조하였다.

또한 이러한 기능성 나노섬유의 생산에 있어 실험실 스케일에서 벗어나 상업화에 염두에 둔 대량 생산에 있어서도 아직 많은 개선의 여지가 남아 있다.

## 후 기

본 논문은 경운대학교 연구비 지원으로 제작된 논문이다.

## References

1. F. Anton, "Process and apparatus for preparing artificial threads", US Patent. 1,975,504, 1934.
2. H. L. Simons, "Process and apparatus for producing patterned non-woven fabrics", US Patent. 3,280,229, 1966.
3. G. L. Taylor, "Electrically driven jets", Proc R Soc London, Ser A, Vol. 313, 1969, pp.453-475.
4. J. M. Deitzel, J. Kleinmeyer, D. E. A. Harris, N. B. Tan, "The effect of processing variables on the morphology of electrospun nanofibers and textiles Polymer", Vol. 42, No. 1, 2001, pp. 261-272.
5. R. S. Carson, C. D. Hendricks, J. Hogan, and J. M. Schneider, "Photo-micrography of electrically sprayed heavy particles", AIAA J., Vol. 2, 1964, pp. 733-737.
6. J. G. Cosme, V. M. Silva, R. R. Nunes, and P. H. Picciani, "Development of Biobased Poly (Lactic Acid)/Epoxidized Natural Rubber Blends Processed by Electrospinning", J. Electrostatics, Vol. 35, 1995, pp.151-160.
7. D. H. Reneker and I. Chun, "Nanometre diameter fibres of polymer, produced by electrospinning", Nanotechnology, Vol. 7, 1996, pp. 216-223.
8. J. M. Deitzel, N. C. BeckTan, J. D. Kleinmeyer, J. Rehrmann, and D. Tevault, "Generation of Polymer Nanofibers Through Electro-spinning", Technical Report ARL-TR-1989, U.S. Army Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD, 1999.
9. S. B. Wamer, A. Buer, S. C. Ugbohue, G.C. Rutledge, and M. Y. SHin "A Fundamental Investigation of the Formation and Properties of Electrospun Fibers", National Center Annual Report, M98-D01, 1999.
10. L. Larrondo and R. St. John Manley, "Electrostatic fiber spinning from polymer melts. I. Experimental observations on fiber formation and properties", J. Polym. Sci. Polym. Phys. Ed., Vol. 19, No. 6, 1981, pp. 909-920.
11. S. Sukigara, M. Gandhi, J. Ayutse, M. Micklus, and F. Ko, "Regeneration of Bombyx mori silk by electrospinning—



- part 1: processing parameters and geometric properties”, *Polymer*, Vol. 44, No. 19, 2003, pp. 5721-5727.
12. B. Ding, H. Y. Kim, S. C. Lee, C. L. Shao, D. R. Lee, S. J. Park, G. B. Kwag, and K. J. Choi, “Preparation and characterization of a nanoscale poly(vinyl alcohol) fiber aggregate produced by an electrospinning method”, *J. Polym. Sci. B. Polym. Phys.*, Vol. 40, No. 13, 2002, pp. 1261-1268.
  13. J. S. Lee, K. H. Choi, H. D. Ghim, S. S. Kim, D. H. Chun, H. Y. Kim, and W. S. Lyoo, “Role of molecular weight of atactic poly(vinyl alcohol) (PVA) in the structure and properties of PVA nanofabric prepared by electrospinning”, *J. Polym. Sci.*, Vol. 93, No. 4, 2004, pp. 1638-1646.
  14. C. S. Ki, D. H. Baek, K. D. Gang, K. H. Lee, I. C. Um, and Y. H. Park, “Characterization of gelatin nanofiber prepared from gelatin-formic acid solution”, *Polymer*, Vol. 46, No. 14, 2005, pp. 5094-5102.
  15. K. H. Kim, L. Jeong, H. N. Park, S. Y. Shin, W. H. Park, S. C. Lee, T. I. Kim, Y. J. Park, Y. J. Seol, Y. M. Lee, Y. Ku, I. C. Rhyu, S. B. Han, and C. P. Chung, “Biological efficacy of silk fibroin nanofiber membranes for guided bone regeneration”, *J. Biotechnol.*, Vol. 120, No. 3, 2005, pp. 327-339.
  16. Y. Zhang, H. Ouyang, C. T. Lim, S. Ramakrishna, and Z. M. Huang, “Electrospinning of gelatin fibers and gelatin/PCL composite fibrous scaffolds”, *J. Biomed. Mater. Res.*, Vol. 72B, No. 1, 2005, pp. 156-165.
  17. A. Koski, K. Yim, and S. Shivkumar, “Effect of molecular weight on fibrous PVA produced by electrospinning”, *Mater Lett*, Vol. 58, No. 3-4, 2004, pp. 493-497.
  18. Y. Y. Zhao, Q. B. Yang, X. F. Lu, C. Wang, and Y. Wei, “Study on correlation of morphology of electrospun products of polyacrylamide with ultrahigh molecular weight”, *J. Polym. Sci. B. Polym. Phys.*, Vol. 43, No. 16, 2005, pp. 2190-21950.
  19. M. G. McKee, J. M. Layman, M. P. Cashion, and T. E. Long, “Phospholipid nonwoven electro-spun membranes”, *Science*, Vol. 311, No. 5759, 2006, pp. 353-355.
  20. Q. Yang, Z. Li, Y. Hong, Y. Zhao, S. Qiu, C. E. Wang, and Y. Wei, “Influence of solvents on the formation of ultrathin uniform poly (vinyl pyrrolidone) nanofibers with electrospinning”, *J. Polym. Sci. B. Polym. Phys.*, Vol. 42, No. 20, 2004, pp. 3721-3726.
  21. C. Zhang, X. Yuan, L. Wu, Y. Han, and J. Sheng, “Study on morphology of electrospun poly(vinyl alcohol) mats”, *Eur. Polym. J.*, Vol. 41, No. 3, 2005, pp. 423-432.
  22. Q. P. Pham, U. Sharma, and A. G. Mikos, “Electrospun Poly (E-caprolactone) Microfiber and Multilayer Nanofiber/ Microfiber Scaffolds: Characterization of Scaffolds and Measurement of Cellular Infiltration”, *Biomacromolecules*, Vol. 7, No. 10, 2006, pp. 2796-2805.
  23. A. K. Haghi and M. Akbari, “Trends in electrospinning of natural nanofibers”, *Phys. Status Solidi (a)*, Vol. 204, No. 6, 2007, pp. 1830-1834.
  24. X. Zong, K. Kim, D. Fang, S. Ran, B. S. Hsiao, and B. Chu, “Structure and process relation -ship of electrospun bio-absorbable nanofiber membranes”, *Polymer*, Vol. 43, No. 16, 2002, pp. 4403-4412.
  25. C. Huang, S. Chen, C. Lai, D. H. Reneker, H. Qiu, Y. Ye, and H. Hou, “Electrospun polymer nanofibres with small diameters”, *Nanotechnology*, Vol. 17, No. 6, 2006, pp. 1558-1563.
  26. X. Yuan, Y. Zhang, C. Dong, and J. Sheng, “Morphology of ultrafine polysulfone fibers prepared by electrospinning”, *Polym. Int.*, Vol. 53, No. 11, 2004, pp. 1704-1710.
  27. C. J. Buchko, L. C. Chen, Y. Shen, and D. C. Martin, “Processing and microstructural characterization of porous biocompatible protein polymer thin films”, *Polymer*, Vol. 40, No. 26, 1999, pp. 7397-7407.
  28. M. M. Demir, I. Yilgor, E. E. A. Yilgor, B. Erman, “Electrospinning of polyurethane fibers”, *Polymer*, Vol. 43, No. 11, 2002, pp. 3303-3309.
  29. O. S. Yördem, M. Papila, and Y. Z. Menceloğlu, “Effects of electrospinning parameters on polyacrylonitrile nanofiber diameter: An investigation by response surface methodology”, *Mater. Des.*, Vol. 29, No. 1, 2008, pp. 34-44.
  30. C. Y. Xu, R. Inai, M. Kotaki, and S. Ramakrishna, “Aligned biodegradable nanofibrous structure: A potential scaffold for blood vessel engineering”, *Biomaterials*, Vol. 25, No. 5, 2004, pp. 877-886.
  31. B. Sundaray, V. Subramanian, T. S. Natarajan, R. Z. Xiang, C. C. Chang, and W. S. Fann, “Electrospinning of continuous aligned polymer fibers”, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 84, No. 7, 2004, pp. 1222-1224.
  32. X. Wang, I. C. Um, D. Fang, A. Okamoto, B. S. Hsiao, and B. Chu, “Formation of water-resistant hyaluronic acid nanofibers by blowing-assisted electro-spinning and non-toxic post treatments”, *Polymer*, Vol. 46, No. 13, 2005, pp. 4853-4867.
  33. D. Li, Y. Wang, and Y. Xia, “Electrospinning nanofibers as uniaxially aligned arrays and layer-by-layer stacked films”, *Adv. Mater.*, Vol. 16, No. 4, 2004, pp. 361-366.
  34. C. S. Ki, J. W. Kim, J. H. Hyun, K. H. Lee, M. Hattori, D. K. Rah, and Y. H. Park, “Electrospun threedimensional silk fibroin nanofibrous scaffold”, *J. Appl. Polym. Sci.*, Vol. 106, No. 6, 2007, pp. 3922-3928.
  35. C. Mit-uppatham, M. Nithitanakul, and P. Supaphol, “Ultrafine electrospun poly amide-6 fibers: Effect of solution conditions on morphology and average fiber diameter”, *Macromol. Chem. Phys.*, Vol. 205, No. 17, 2004, pp. 2327-2338.
  36. C. L. Casper, J. S. Stephens, N. G. Tassi, D. B. Chase, J. F.

- Rabolt, "Controlling surface morphology of electrospun polystyrene fibers: Effect of humidity and molecular weight in the electrospinning process", *Macromolecules*, Vol. 37, No. 2, 2004, pp. 573-578.
37. Y. Zhang, Z. M. Huang, X. Xu, C. T. Lim, and S. Ramakrishna, "Preparation of Core-Shell Structured PCL-r-Gelatin Bi-Component Nanofibers by Coaxial Electro-spinning", *Chem. Mater.*, Vol. 16, No. 18, 2004, pp. 3406-3409.
38. D. Li and Y. Xia, "Direct Fabrication of Composite and Ceramic Hollow Nanofibers by Electrospinning", *Nano Lett.*, Vol. 4, 2004, pp. 933-938.
39. S. Kidoaki, I. K. Kwon, and T. Matsuda, "Mesoscopic spatial designs of nano- and microfiber meshes for tissue-engineering matrix and scaffold based on newly devised multilayering and mixing electrospinning techniques", *Biomaterials*, Vol. 26, No. 1, 2005, pp. 37-46.
40. M. J. McClure, S. A. Sell, D. G. Simpson, B. H. Walpoth, and G. L. Bowlin, "A three-layered electrospun matrix to mimic native arterial architecture using polycaprolactone, elastin, and collagen: A preliminary study", *Acta Biomaterialia*, Vol. 6, No. 7, 2010, pp. 2422-2433.
41. I. C. Um, D. Fang, B. S. Hsiao, A. Okamoto, and B. Chu, "Electro-Spinning and Electro-Blowing of Hyaluronic Acid", *Biomacromolecules*, Vol. 5, No. 4, 2004, pp. 1428-1436.
42. B. S. Jha, R. J. Colello, J. R. Bowman, S. A. Sell, K. D. Lee, J. W. Bigbee, G. L. Bowlin, W. N. Chow, B. E. Mathern, and D. G. Simpson, "Two pole air gap electrospinning: Fabrication of highly aligned, three-dimensional scaffolds for nerve reconstruction", *Acta Biomaterialia*, Vol. 7, No. 1, 2011, pp. 203-215.
43. H. Fong, I. Chun, and D. H. Reneker, "Beaded nanofibers formed during electrospinning", *Polymer*, Vol. 40, No. 16, 1999, pp. 4585-4592.
44. K. H. Lee, H. Y. Kim, H. J. Bang, Y. H. Jung, and S. G. Lee, "The change of bead morphology formed on electrospun polystyrene fibers", *Polymer*, Vol. 44, No. 14, 2003, pp. 4029-4034.
45. G. Eda and S. Shivkumar, "Bead-to-fiber transition in electrospun polystyrene", *J. Appl. Polym. Sci.*, Vol. 106, No. 1, 2007, pp. 475-487.
46. M. Berger, "Electrospinning self-healing polymer coating systems", *Nanowerk*, 2010.