

# 전기방사에 의한 나노섬유 제조 및 응용

김동복, 박정호 / 고려대학교 전기공학과

## 서 론

나노(nano)란 10억분의 1을 나타내는 단위로, 고대 그리스에서 난쟁이를 뜻하는 나노스(nanos)란 말에서 유래했다. 1나노미터(nm)라고 하면 10억분의 1m의 길이 즉, 머리카락의 1만분의 1이 되는 초미세 세계가 된다. 이를테면 원자 3~4개가 들어갈 정도의 크기다. 이처럼 나노기술(nanotechnology)이란 나노미터 정도로 아주 작은 크기의 소자를 만들고 제어하는 기술로 분자와 원자를 다루는 초미세 기술이다. 나노기술은 1990년대 들어 현 마이크로(100만분의 1) 수준의 반도체 미세기술을 극복하는 대안으로 연구가 시작되었다. 현재 자기기록이나 광기록 기술로 실현 가능한 마이크로 크기의 메모리소자는 아무리 줄여도 어느 단계에 이르면 기억매체로 쓸 수 없다. 선풍을 줄이는 데 한계가 있기 때문이다. 현재 반도체 칩을 제작하는 도구는 자외선이다. 그런데 빛이 그려내는 선풍의 한계가 0.1마이크로미터( $\mu\text{m}$ )라는 게 기술적 한계다. 이러한 물리적 한계를 극복하기 위해 제시된 방법의 하나가 나노미터 크기의 회로에서도 자성을 갖는 소자를 개발하는 것이다. 눈에 보이지도 않는 나노미터 크기의 선풍을 이용해 기억소자를 만든다면 현재의 기가(G=10억)비트보다 1000배 빠른 속도와 용량을 자랑하는 테라(T=1조)비트급 집적도의 반도체 칩을 만드는 것이 가능해진다. 나노기술은 전자와 정보통

신은 물론 기계·화학·바이오·에너지 등 거의 모든 산업에 응용할 수 있어 인류 문명을 혁명적으로 바꿀 기술로 대두되고 있다. 이 기술이 발전되면 환경 의료 생명공학 신소재 등에서 상상을 초월한 변화가 예상된다.

본고는 화학·바이오 분야와 접목된 나노기술에 대한 연구로 전기방사에 의한 나노섬유 제조 및 응용에 대한 연구 동향에 대하여 고찰하고자 한다. 기존의 범용 합성섬유는 용융방사, 습식방사, 건식방사, 건습식 방사법에 의해 주로 압력으로 고분자 용액이나 용액을 노즐을 통해 압출시킨 후, 응고 혹은 고화과정을 거쳐 제조되며, 일반적으로 수~수백 $\mu\text{m}$  직경의 섬유제조가 가능하다. 그리고, 멜트블로우 및 플래쉬 방사기술에 의해 수~수십 $\mu\text{m}$  직경을 갖는 섬유로 구성된 부직포 및 필터가 제조되기도 한다. 세섬유의 필라멘트 사는 직접방사나 복합방사에 의해 제조되며, 스테이플 사의 경우 멜트블로우, 젯방사, 원심방사, 고분자 혼합방사, 피브릴화, 플래쉬 방사 등에 의해 제조된다.

초극세사는 인공피혁, 스웨이드 조직편물, 고밀도 직물, 반도체 표면 연마제, 고성능 에어 필터(반도체, 원자력 공장, 무균·무진실용), 250~4000 Hz 소음흡수용 흡음재 등에 활용되고 있다. 초극세사의 제조는 단성분 방사나 다성분 방사법에 의해 제조되는데, 한가지의 고분자를 사용하는 직접 방사법은 세섬유화 정도가 낮고 생산성이 낮다. 두가지 이

상의 성분을 서로 다른 노즐을 통해 방사하여 합치는 복합방사법은 방사팩 장치의 한계로 인해 실질적으로 초극세사의 제조가 어렵고, 두가지 이상의 성분을 용융상태에서 혼합하여 하나의 노즐에서 방사하는 혼합방사법으로는 1 μm 이하의 초극세사 제조가 가능하나 서로 다른 성분이 상호간에 상용성이 없어야 하며, 두성분이 각각 다른 용제에 대한 추출성이 달라야만 세섬유화가 가능하기 때문에 대상 물질의 선정이 어려운 단점이 있다.

따라서, 위와 같이 기존의 방사기술로는 초극세사의 제조에 한계가 있으므로 현재 기술수준의 장벽을 넘을 수 있는 기술적 돌파구로서 전기방사에 의한 나노섬유에 대한 연구가 연구계 및 학계에서 수행되고 있다. 1990년대 들어 여러 첨단 산업분야에서 나노기술의 급격한 부각과 함께 섬유 분야에도 나노섬유 기술이 등장하였다. 섬유의 인장강도는 섬유의 길이와 굵기에 좌우된다. 인장강도는 섬유가 가늘수록 강해지므로 세섬유화는 고강도가 요구되는 산업용 섬유류의 제조에 있어 중요한 요소로 작용한다. 섬유의 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 섬유직경을 지니면서 배향된 구조를 갖는 섬유가 산업적 측면 및 과학적 측면에서 매우 큰 관심의 대상이 되고 있다.

## 본 론

### 전기 방사 (electrospinning)

나노섬유는 수 nm~수천 nm 크기의 초극세 섬유로서 섬유의 생성과 동시에 3차원의 네트워크로 융착되어 적층된 형태의 다공성 웹 형태로 제조된다. 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 가지

고 있으며 막의 외부에서 액체가 들어오지 못하도록 하는 특성도 부여할 수 있다. 이러한 나노섬유를 제조할 수 있는 여러 방법들이 있으나, 상용화 가능성, 적용 고분자의 다양성, 제조공정의 단순성, 다양한 제품기술 응용성을 고려할 때 전기방사에 의한 나노섬유 제조가 가장 기대되는 기술이다.

원리: 전기방사는 표면장력에 의해 모세관 끝에 매달려 있는 물방울에 고전압을 부여할 때 물방울 표면에서 미세 필라멘트가 방출되는 현상으로부터 최초로 Bose에 의해 착안되었다. 1914년 Zeleny는 고전압장 하에서 액체 방울은 불안정해져 cone을 형성하게 되고 임계전압 이상에서는 방울의 여러 곳에서 스프레이 되는 현상을 발견하였다. 이러한 정전 스프레이는 좁은 크기 분포의 서브마이크론 방울로 이루어진 에어로졸을 얻을 수 있으므로 많은 관심의 대상이 되어 왔다. 따라서 현재, 정전 스프레이는 액상 에어로졸, 잉크젯 프린팅, 페인팅, 금속입자 제조 등 산업현장에서 사용되고 있다.

위와 같은 정전 스프레이 과정의 변형으로 충분한 점도(약 1~200 poise)를 지닌 고분자 용액이나 용융체가 정전기력을 부여받을 때 액상 에어로졸이 아닌 연속상의 섬유가 형성되어 공기 중으로 비행하게 된다. 그림 1은 정전 스프레이와 전기방사의 차이를 보여주고 있다.

그림 2(a)에서 보듯이 수직으로 위치한 모세관 끝에 고분자 용액은 중력과 표면장력 사이에 평형을

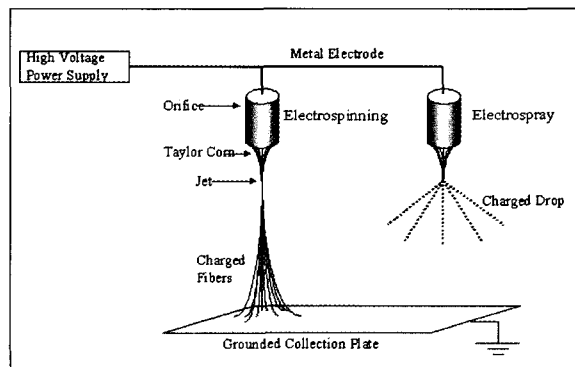


그림 1 전기방사법과 정전스프레이법의 모식도.

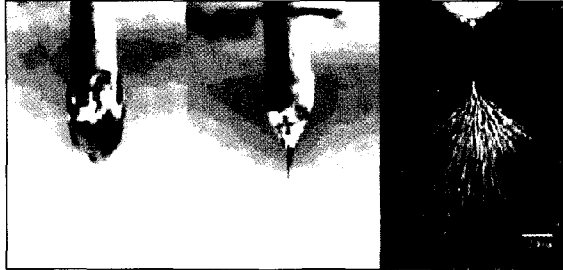
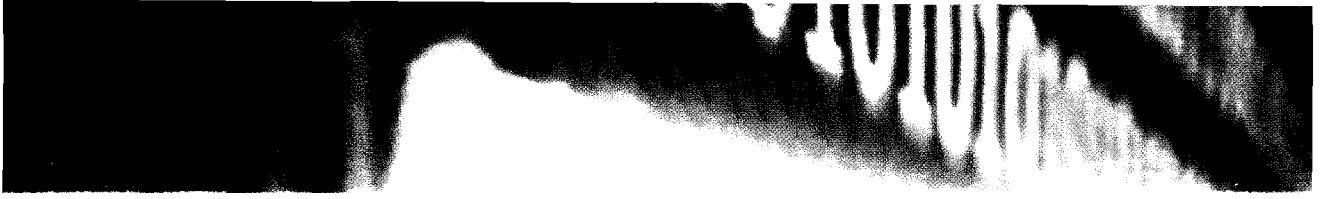


그림 2 (a) 모세관 끝에 매달린 반구형 물방울, (b) 공기층으로 유도되는 상태, 및 (c) 전기방사되는 모습.

이루며 반구형 방울을 형성하며 매달려 있게 되는데, 전기장이 부여될 때 이 반구형 방울 표면에 전하 또는 쌍극자 배향이 공기층과 용액의 계면에 유도되고 전하 또는 쌍극자의 반발로 표면장력과 반대되는 힘을 발생시킨다.

따라서 모세관 끝에 매달려 있는 용액의 반구형 표면은 Taylor cone으로 알려진 원추형 모양으로 늘어나게 되고, 임계 전기장 세기( $V_c$ )에서 이 반발 정전기력이 표면장력을 극복하게 되면서 하전된 고분자 용액의 jet가 Taylor cone 끝에서 방출된다(그림 2(b)). 이때 용액의 점도가 낮으면 표면장력 때문에 미세방울로 붕괴된다. 그러나 점도가 높은 용액의 경우, jet는 붕괴되지 않고 집전판을 향하여 날아가면서 용액에 포함된 용매가 증발하게 되고 집전판에는 하전된 연속상의 나노섬유가 쌓이게 된다. 그림 2(c)는 하전된 고분자 나노섬유상이 공기중으로 비행하는 것을 보여준다. 또한 jet는 비행중에 가늘어지게 되고 표면에 전하가 밀집되면서 전하반발력에 의해 초기 하나의 jet가 더욱 작은 여러 필라멘트로 분열된다. 이러한 과정을 splaying이라 한다.

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. 낮은 전기장 하에서는 하나의 jet가 형성되어 균일하게 가늘어지면서 모세관 끝에서 집전판으로 날아간다. 그러나 높은 전기

장 하에서 jet는 짧은 거리만 비행한 후 곧 불안정하게 되는데, 1 ms의 노출시간으로 촬영한 jet의 불안정 영역은 초기 하나의 jet가 분열되어 수많은 jet가 형성된 것처럼 보이는 뒤집힌 cone 모양을 보여주고 있다(그림 3(b)). 그러나 그림 3(b)의 불안정 영역을 고속 촬영한 결과 뒤집힌 cone은 하나의 jet가 매우 빠른 whipping의 결과로 나타났다(그림 3(c)). 이러한 whipping의 진동수는 너무 빠르기 때문에 정전 스프레이에서 관찰되는 현상처럼 하나의 jet가 마치 수많은 필라멘트로 분열된 것처럼 보이는 것이다.

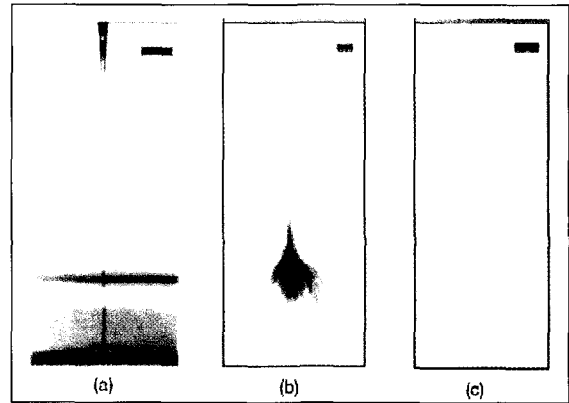


그림 3 2 중량% 폴리에틸렌/물 용액의 전기방사 사진. (a) 안정한 jet, (b) 불안정한 영역(1 ms 노출), 및 (c) 불안정한 영역에서의 근접 순간 촬영사진(18 ns 노출). 눈금자=1 mm.

섬유형태: 전기방사에서 주 공정변수는 용액의 농도, 점도, 표면장력 및 모세관 끝에서 집전판까지의 거리, 전기장 세기, 방사시간 등이다. 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. 용액의 점도가 높아질수록 고분자 사슬의 얽힘 정도는 증가되어 jet의 붕괴를 방해하므로 jet는 섬유상으로 늘어나게 된다. 그림 4는 전기방사 과정에서 나타나는 공정변수 중 농도에 따른 섬유형태를 나타낸 것이다. 섬유 형태의 변화는 농도 감소에 따라 방울 형태가 된다.

한편, 모세관 끝에서 집전판까지의 거리가 너무

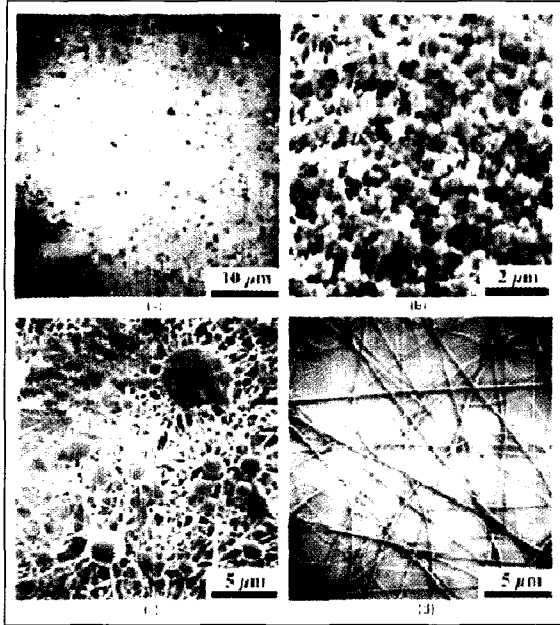


그림 4 고분자 용액의 농도에 따른 섬유 형성 사진.  
(a) 0.8 중량%, (b) 4.1 중량%, (c) 8.1 중량%, 및 (d) 12.1 중량%.

짧을 경우, 용매가 함유된 섬유가 집전판에 도달되기 때문에 그림 5(b)와 같은 형태가 얻어진다. 즉, 모세관 끝에서 집전판까지의 거리가 짧아질수록 구형 방울 형태는 코인 형태로, 실린더 형상은 리본 상으로 집전판에 축적되며, 집전판 표면에서 건조되는 과정에서 서로 밀착이 일어난다. 이러한 효과는 부직포의 열 또는 용제결합 효과와 비슷하므로 전기방사에 의해 제조된 웹에서 섬유간 결합력을 강화시키

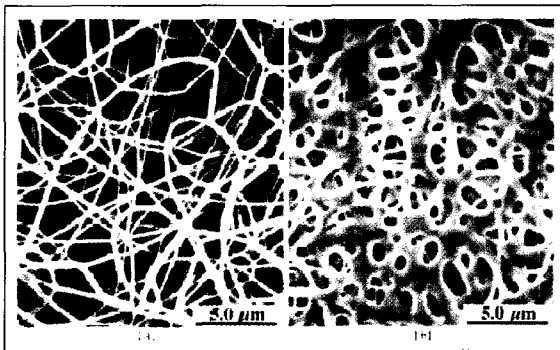


그림 5 집전판까지의 거리에 따른 형태 변화: (a) 집전판까지의 거리 2.0 cm, 원형 섬유 및 (b) 집전판까지의 거리 0.5 cm, 납작한 형태의 섬유.

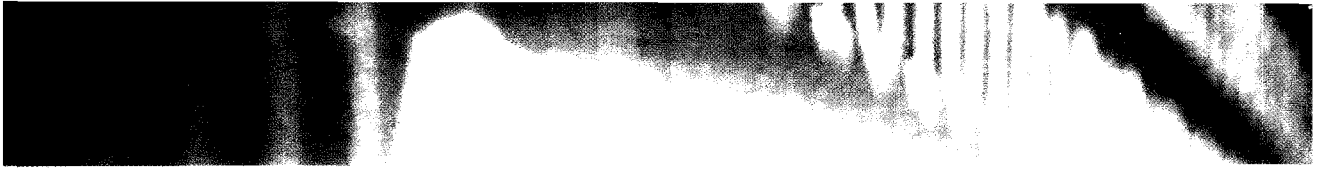
는 역할을 한다.

또한, 전기장의 세기를 증대시키면 jet의 전체 전하 밀도가 증가하게 되어 가는 섬유가 얻어지게 된다. 이와 같은 전기방사 과정에서 주요 공정변수의 변화에 따른 섬유 형태 변화를 그림 6에 나타내었다.

Parameter	Normalized Magnitude		
	Low	Average	High
Solution Concentration top view	 Beads	 Average	 Filaments
Deposition Distance side view	 Flat	 Average	 Round
Applied Field Strength top view	 Wide	 Average	 Narrow
Deposition Time side view	 Thin	 Average	 Thick

그림 6 섬유 형태에 영향을 미치는 공정 인자들.

위와 같은 공정변수 이외에 용액에 염을 첨가하면 전체 전하량이 증가되어 점도 증가의 효과를 보인 연구가 진행된 바 있다. 한편, Chaikof 등은 전기방사에 의해 새로운 형태를 갖는 elastin 유사형 단백질 나노섬유를 제조하였다. elastin 모방 펩타이드 섬유의 형태를 결정하는 주 인자는 용액농도와 토출 속도인데, 5 wt% 용액의 전기방사에서 삼각형 또는 방추형의 형태를 보고하였고 10 wt% 이상의 농도 (25 cP)에서는 형태변화 없이 300~400 nm의 섬유가 제조되었다. 그러나 15~25 wt%에서는 250~600 nm의 가는 섬유와 함께 폭이 3 μm 정도인 리본 모양의 섬유가 제조됨을 보고하였는데, 이러한 현상은 펩타이드 고분자의 분자 자기조립 현상과 관련이 있는



것으로 추정되고 있다.

Renecker 등은 일반 방사법으로 비스코스 레이온 섬유 제조시 발현하는 스킨구조가 전기방사과정에서도 액상 jet에 얇게 발달될 수 있다고 보고하였다. 그림 7에서 보듯이 jet에 스킨구조가 형성된 후 내부의 용매가 빠져나가면 대기압력에 의해 튜브형 구조는 붕괴되어 평평한 구조를 형성하거나 그림 7(c) 구조에서 대기압이 양방향에서 가운데로 작용한 그림 8(e) 구조와 같이 hollow 형 구조 또는 리본 구조를 형성한다. 이러한 구조로부터 불안정한 jet가 전기장 하에서 방사할 때 더 작은 jet로 분열이 일어나며, 전기방사 과정에서 whipping 불안정성과 함께 나노섬유가 형성되는 원인이 된다.

전기방사에 의한 나노 섬유는 사용된 용매의 휘발도에 따라 내부에 기공구조를 형성할 수 있다. 즉, 용매의 빠른 휘발과 빠른 상분리 그리고 이어지는 빠른 섬유의 고화 과정은 무게대비 매우 높은 표면적을 지닌 나노섬유를 제조할 수 있으므로 센서나 필터 소재, 섬유 템플레이트에 의한 기능성 나노튜브 제조 및 흡착과정을 제어하는데 활용될 수 있다.

### 응용분야

전기방사는 3 nm~1µm의 섬유를 간단하고 경제적으로 제조할 수 있으므로 여러 첨단 제품에 응용될 수 있다. 이러한 고분자 나노섬유는 작은 기공 크기, 높은 표면적을 지니므로 균인들의 방호복이나 필터 소재, 생체조직 배양, 상처보호치유 및 피부조직의 균일 재생, 인공 혈관, 약물전달시스템, 강화복합재 등에 활용될 수 있다. 유연성을 갖는 섬유는

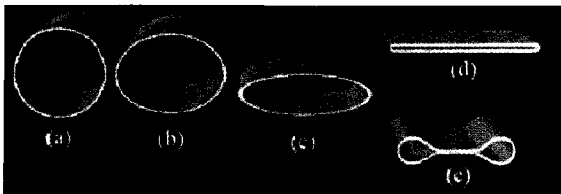


그림 7 Jet의 스킨구조 변화. (d)는 (c)가 납작하게 된 구조임. (e)는 (d)에서 선택적으로 두 개의 튜브가 발현된 것임.

micro 또는 nanoelectronic mechanical system (MEMS 또는 NEMS) 또는 광학시스템에 필요하다. 나노섬유의 경우, MEMS에서 구동벨트와 극히 얇고 우수한 성능의 강화네트로 사용될 수 있다. 고온 초전도체로 만들어진 나노섬유 또는 나노전선은 MEMS나 마이크로일렉트로닉스에서, 그리고 나노광학 분야에서 많은 새로운 소자를 창출시킬 수 있으며 전도성 나노섬유는 micro-thermocouple에 활용될 수 있다. 다음에서 대표적인 응용분야에 대해 구체적으로 고찰하고자 하였다.

**생체모방형 단백질 섬유 :** 전기방사는 상온과 상압 하에서 방사하는 과정에서 섬유가 부피에 비하여 넓은 표면적을 지니게 되어 용매의 휘발이 잘 일어나므로 묽은 단백질 용액으로부터 생체 모방성 나노섬유를 제조할 수 있는 효율적인 방법이다. 실크와 같은 단백질 섬유는 고형 지지체에 생체 셀의 접착력을 증가시킬 수 있으므로, DNA 섬유 및 실크 나노섬유와 더불어 최근 많은 연구가 진행되고 있다. 그림 8은 중앙신경계(central nervous system, CNS)에 주입되도록 설계된 치과의 의치용 디바이스 및 피브로블린 작용기를 갖는 실크와 같은 고분자를 표면에 박막 코팅을 한 것이다. 또한, 인체의 혈관중 동맥의 혈관조직은 단백질 섬유의 섬유강화 복합체 구조로 되어있다. 이러한 동맥혈관 조직을 인공적으로

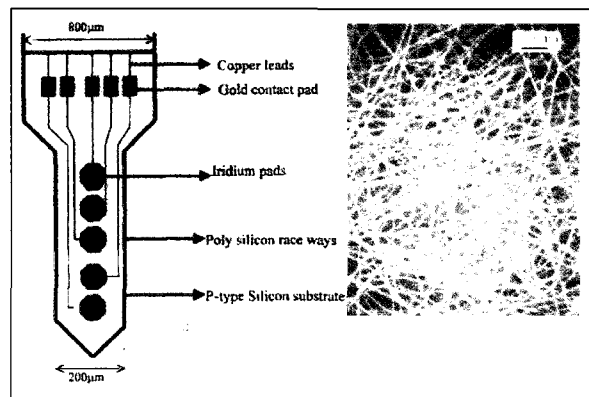


그림 8 중앙신경계 장치 및 실리콘 웨이퍼 상에 전기방사된 실크 나노섬유.

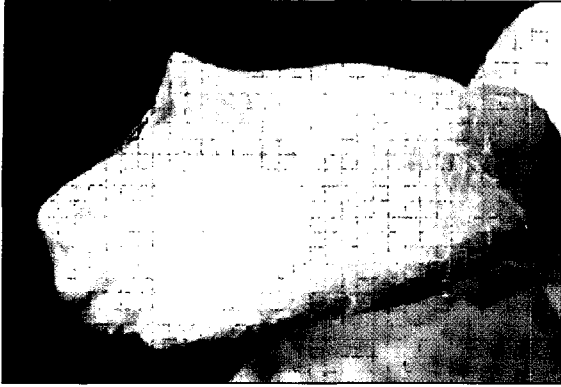


그림 9 폴리에틸렌-폴리비닐알콜 공중합체 나노섬유

로 설계하기 위해서 합성 엘라스틴-모방 섬유를 전기방사에 의하여 제조하는 연구가 시도되고 있다.

조직공학(Tissue Engineering): 인공피부, 인대 등 현재의 피하삽입용 생체 적합물은 최종적으로 삽입물이 상처조직을 덮어버린다. 즉, 벽을 둘러싸서 천연조직과의 생리활성 작용을 제한하고 있다. 이러한 봉합물은 강도, 생체적합성, 유연성, 멸균성, 생분해성 등의 물성이 요구된다. 특히 생물학적, 생화학적인 혈관이식 등과 같은 분야에서 기존의 물성 이외에 기공도를 가져 봉합물의 외부표면을 확장시키고 조직의 내부확장을 촉진시켜 내피 세포화를 용

이하게 해주어야 한다. 또한 신체조직과 다공성 물체간의 접합을 위해 조직 배양이 필요한데 전기방사 기술의 활용은 매우 매력적인 것으로 알려지고 있다. 따라서, 이러한 연구를 목적으로 전기방사에 의해 폴리락틱-글리콜릭 산, 폴리글리콜릭 산, 콜라겐, 및 엘라스틴 등의 생분해성 고분자들의 나노섬유들이 제조되었으며, 이들에 대한 세포배양 실험이 진행중이다. 그림 9는 폴리에틸렌-폴리비닐알콜 공중합체로부터 전기방사된 나노섬유이다. 이러한 나노섬유는 인공피부 등에 이용이 시도되고 있다.

고효율 필터: 필터에서 작은 입자를 여과하는 여과효율을 높이는 한가지 방법은 필터매체 중에 적절한 직경의 섬유를 사용하는 것이다. 나노섬유는 무게 대비 지극히 넓은 표면을 갖는 특성이 있으므로 이를 기체나 액체 중의 입자를 분리하는데 사용할 수 있다. 전기방사로 제조된 나노섬유로 구성된 필터는 표면적이 넓어 여과효율이 높고 공극률이 매우 높아 필터내에 발생하는 압력강하가 적다. 한편, 그림 10에 나타난 것과 같이 전극 설계를 한 후 전압을 인가하여 폐수 중에 포함된 중금속 이온을 분리하려는 연구가 진행중에 있다.

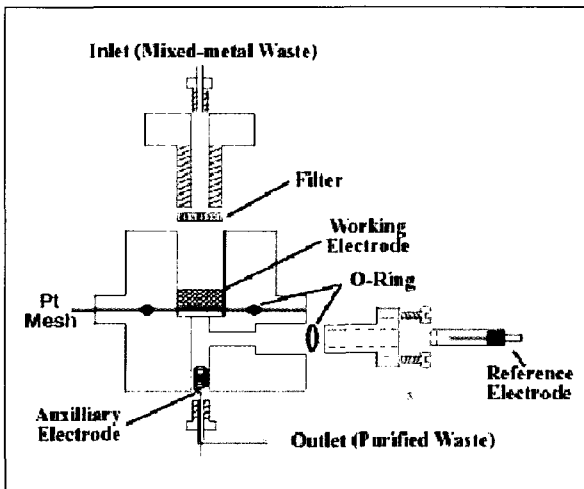
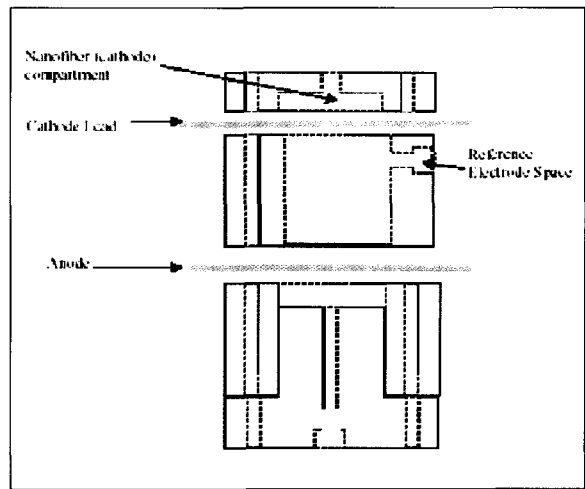


그림 10 무거운 이온 분리를 위한 필터 시스템.



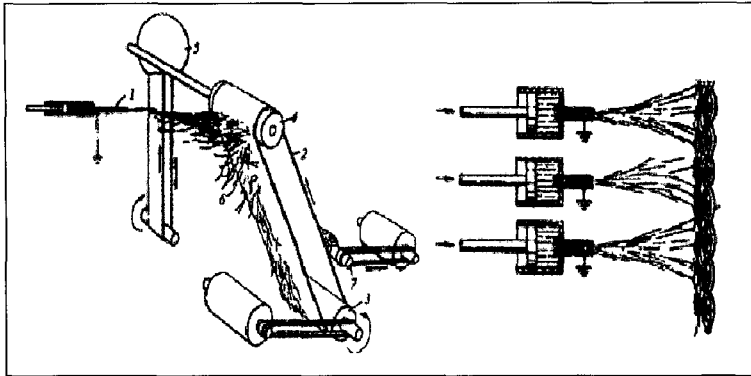
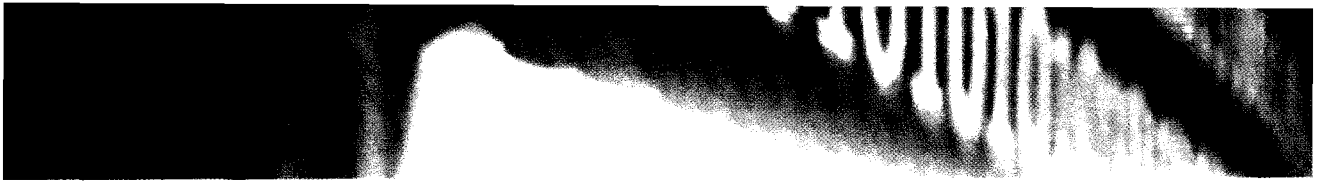


그림 11 다공성 폴리비닐디플로라이드 쉬트 제조 방법.

**고분자 전해질 및 격리막** : 현재, 이차전지 산업은 국내 산업중 세계 시장에서 경쟁우위의 확보가 가능한 품목으로 개발에 박차를 가하고 있다. 리튬 이차전지의 주시장인 리튬이온 전지는 일본에서 개발되어 전 세계 시장의 90%를 장악하고 있으며, 국내에서는 격리막을 비롯한 부품소재 대부분 수입되고 있다. 이차전지 시장은 제품의 디지털화 및 고성능화에 따라 소비자의 요구에 맞춰 경량화 및 고에너지 밀도에 의한 고용량을 지니는 전지가 요구되어 리튬 폴리머 전지가 개발 중에 있다. 따라서 그림 11에 나타낸 바와 같이, 전기방사로 제조된 다공성 쉬트는 고에너지 밀도의 고효율 전지를 위한 고분자 전해질이나 전지의 격리막으로 사용된다.

**전도성 고분자 나노섬유**: 전도성 고분자 또는 전도성 고분자와 범용 고분자 혼합용액의 전기 방사 기술은 미래 첨단 나노 광 및 전자 디바이스에 적용될 수 있다. 이러한 목적으로 사용하기 위해서는 100 nm 이하의 직경을 지닌 전도성 고분자 나노섬유가 요구된다. 물을 용매액으로 사용하는 20 중량% 폴리아닐린/황산 수용액의 전기방사로부터 직경 139 nm의 폴리아닐린 나노섬유가 제조된 바 있고, 이 나노섬유의 전도도는 약 0.1 S/cm를 지니고 있는 것으로 나타났다. 또한 유기섬유의 전도성을 증대시키기 위하여 탄소나노튜브를 함유한 고분자 나노섬유가 제조되었다. 이러한 고분자 중 폴리아

크릴로니트릴 나노섬유를 피롤 모노머 수용액에 침지시켜 20~25 nm 두께로 폴리피롤이 균일하게 코팅된 전도성 나노섬유의 제조에 대한 연구가 진행되었다. 전도성 고분자는 가시광선을 흡수하여 흡광도에 변화가 일어나는 전기 변색 특성을 나타내므로, 전도성 나노섬유 코팅은 태양광의 양을 감지하여 창문의 색조 조절 기능을 부여하는 기능성 창문, 전자파 차폐와 대전방지 코팅에 활용이

기대되고 있다.

한편, 폴리아닐린이나 폴리피롤 같은 전도성 고분자는 대기중의 여러 기체들을 탐지하는 생화학 센서의 전극으로 사용될 수 있는데, 이러한 센서에서 전도성 고분자의 유효면적 증가는 센서감도 증대에 매우 중요하다. 대부분의 전도성 고분자는 용해도가 매우 낮기 때문에 표면적 증대를 위한 전도성 고분자 나노섬유 제조에 있어 전기방사 기술은 잘 활용될 수 있다. 나노섬유로 센서 디바이스를 만들 경우, 탐지감도 저하 없이 신호응답 시간이나 표면 전기 특성을 향상시킬 수 있다.

**탄소 나노섬유**: 탄소 나노섬유 제조 방법은 기존의 탄소 나노튜브나 그래파이트 나노섬유와 같은 휘스커상 나노섬유 제조법, 고분자 블렌드 방사 및 탄화과정을 거쳐 제조된 초극세 탄소섬유 제조법, 전기방사에 의한 나노섬유의 탄화에 의한 방법으로 대별된다. 폴리아크릴로니트릴이나 피치 같은 탄소섬유 전구체 고분자들로부터 제조된 나노섬유는 탄화과정을 거쳐 탄소 나노섬유로 변환시킬 수 있다. 전기방사에 의해 제조된 폴리아크릴로니트릴 나노섬유(직경 750 nm)를 200°C 공기 중에서 약 20분간 가열하여 산화에 의해 가교결합을 형성시킨 후, 800°C의 불활성 가스 분위기 하에서 약 2시간 가열하면 탄소 나노섬유가 제조된다. 또한, 탄소 나노섬유를 수증기가 함유된 질소 분위기 하에서 650°C와 800°C에

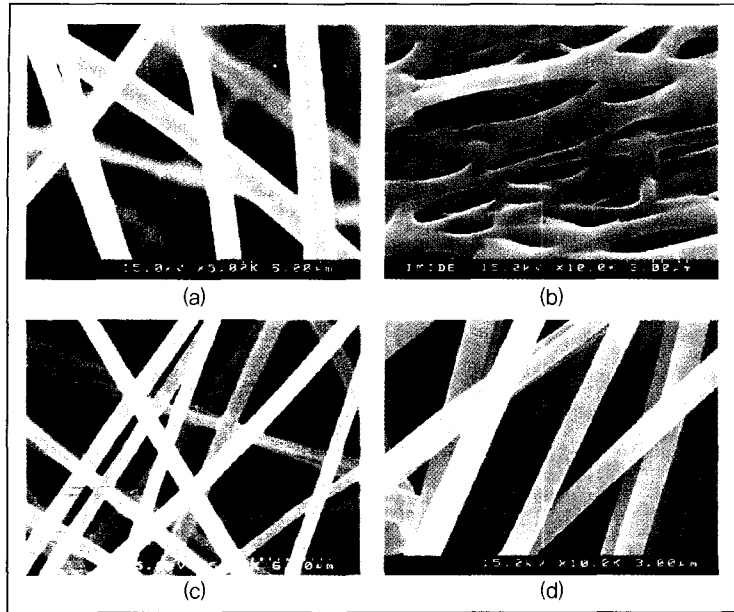


그림 12 (a) 열안정제를 첨가하지 않은 폴리이미드 나노섬유 및 열처리 후(b), (c) 열안정제를 첨가한 폴리이미드 나노섬유 및 열처리 후(d).

너지 함량이 매우 낮기 때문에 자동차의 연료로 이용하기 위해서는 새로운 저장방법의 개발이 필수적으로 요구되고 있다. 그림 12는 폴리이미드를 전기방사하여 나노섬유를 제조하고 이를 고온(1200 °C)에서 열처리하여 탄화시킨 현미경 사진이다. 열처리시 나노섬유의 기공구조가 파괴되므로 이를 해결하기 위해 열안정제를 첨가하면 기공구조가 파괴되지 않아 고밀도 수소 저장 및 고체전해질 등에 사용할 수 있게 된다. 따라서 탄소 나노섬유에 의한 수소 저장의 실용화 기술이 확립되면 수소를 전용하는 연료전지의 시대가 열리게 된다. 따라서, 고밀도 수소저장기술은 미래 자동차 산업발전에 매우 중요한 요소가 될 것으로 기대된다.

서 약 1시간동안 활성화시키면 나노섬유에 기공을 형성시킬 수 있다. 표면에 기공구조를 발현시킨 이러한 탄소 나노섬유는 고밀도 수소 저장이 가능하다.

수소는 모든 재생 가능한 에너지원으로부터 생산될 수 있으며 환경오염을 유발할 수 있는 물질을 방출하지 않는 유일한 에너지 매체이다. 따라서 고밀도로 수소를 저장하여야 그 용도를 다양화시킬 수 있다. 수소 저장시스템은 소형으로 가벼워야 하며, 사용이 편리하고 재생할 필요 없이 재사용이 가능해야 한다. 특히, 수소가 연료전지 등에 활용되기 위해서는 수소의 높은 저장능이 요구되고 있는데, 수소는 그 무게대비 에너지 함량이 높으나 부피대비에

## 결론

최근 나노기술에 대한 폭발적인 관심과 함께 전기방사 기술은 나노섬유를 제조할 수 있는 가장 획기적인 방법이라 할 수 있다. 이 기술을 이용하여 제조된 유기고분자 나노섬유는 이미 국내외적으로 30종류 이상이나 연구된 바 있으며, 기존의 섬유 분야를 초월하여 다양한 산업분야에 응용 가능성이 대두되고 있다. 즉, 나노섬유 기술은 IT(Information Technology) 및 전자산업, ET(Environment Technology), BT(Bio Technology) 분야의 차세대 신기술 및 신소재 창출에 크게 기여할 것이다.