

전기 방사를 활용한 필라멘트용 나노 코팅(1)

1. 서 언

섬유 제품에 내구성, 내마모성, 내화학적, 매끈한 표면, 색 및 디자인 효과 등과 같은 특정 성능을 부여하기 위한 목적으로 필라멘트 섬유에 기능성 코팅을 하는 방법이 있다. 전도성 직물을 만들기 위해 직물에 직접 전도성 코팅하는 대신 코팅 필라멘트를 사용하여 직물을 제조하는 것을 예로 들 수 있다. 코팅 필라멘트로 직물을 제조하는 것은 일반적인 직물 코팅법보다 더 균일하고 연속적인 코팅 효과를 얻을 수 있고, 한 소재 안에 다른 섬유를 사용할 수 있는 이점을 가진다. 필라멘트 코팅에는 액적 코팅(drop coating), 용융 코팅(melting coating), 화학적 기상 증착법(CVD)과 딥코팅(dip coating) 같은 기술이 활용되어 왔다. 그러나 부착 및 성분 조절의 어려움, 엄격한 공정 조건, 긴 반응시간 등으로 인해 널리 사용되지는 못하였다.

최근 금속이나 실리콘 등의 다양한 기질 위에 균일한 나노 입자 코팅을 하기 위한 방법으로 전기동역학적 코팅(electrodynamic)법, 주로 전기분무(electrospraying)법을 활용한 방법이 개발되었다. 전기분무와 유사한 메커니즘으로, 전기방사(electrospinning)법을 활용해 섬유 소재나 임플란트용 스텐트 위에 나노 섬유를 코팅할 수 있다. 다층 구조 필터 제조를 목적으로 스펀본드 부직포 위에 전기방사 나노 섬유를 코팅하는 것, 전기 방사 폴리아마이드-66이나 폴리우레탄 나노 섬유를 폴리우레탄 폼이나 부직포, 직물 또는 편물에 직접 방사하여 보호복 소재나 마스크 등에 적용한 예를 들 수 있다. 더 나아가 인체 피부 모델에 거대 단백질을 전달하는 목적으로 전기방사 고친수성 나노 섬유(enzyme-polymer) 멤브레인을 마이크로 실리콘 바늘 위에 부착한 예도 있다. 최근 전기 방사법은 폴리우레탄 나노 섬유를 임플란트 스텐트

위에 부착하는데 활용되고 있다. 또한 고분자-나노입자 복합 나노섬유는 전기방사법을 통해 금속, 실리콘, 컴퓨터 칩, 유리 슬라이드 등과 같은 다양한 기질 위에 성공적으로 부착될 수 있다. 신경 미소전극(neural microelectrodes)의 표면을 약을 함유하고 있는 생분해성 고분자로 코팅한 예 등이 있다.

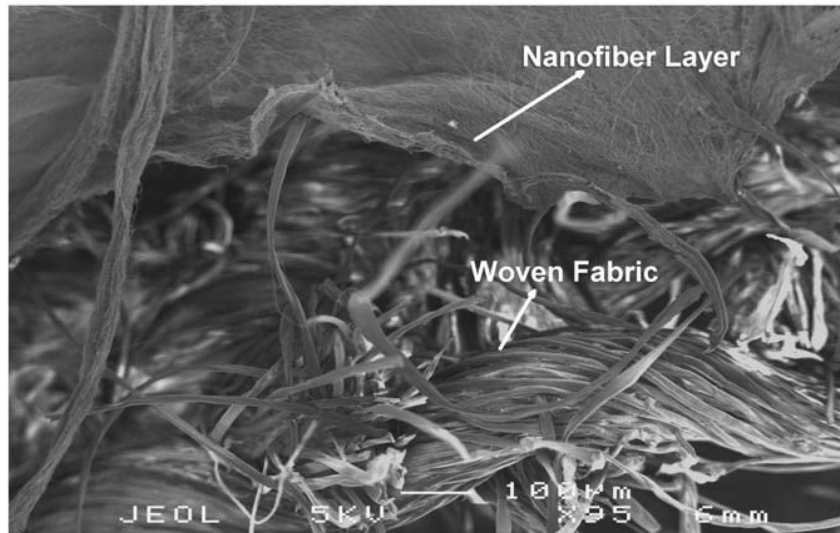
그러나 이러한 나노섬유 코팅법은 나노 섬유가 기계적 강도나 신도가 낮기 때문에 섬유 기재 위에 코팅한 나노 섬유층이 쉽게 손상되고 떨어져 나가기 쉬워 내구성이 상당히 낮은 것이 단점으로 지적되고 있다. 전기방사 나노웹은 서브마이크론 단위의 매우 얇은 두께를 가진다. 이것 또한 기계적 강도를 약하게 만든다. 두꺼운 나노 섬유층을 사용할 때는 섬유와 분리되는 문제가 발생한다. 코팅의 기재가 되는 직물 혹은 편물 내의 섬유의 움직임 또한 나노 섬유층을 손상시킬 수 있다. 이들 섬유의 움직임이 나노 섬유의 신축성보다 상대적으로 크기 때문에, 나노 섬유층이 손상되는 원인이 된다. <그림 1>의 전기방사 PEO 섬유로 코팅한 직물의 주사전자현미경 사진에서 나노 섬유층이 분리된 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 나노 섬유 코팅의 단점을 해결하기 위해 지금까지는 구성 요소를 다양화하여 조직하는 방법이 사용되어왔다.

본 고에서는 전기방사를 활용해 필라멘트에 나노 코팅을 실시하여 이전의 나노 코팅 방법의 단점을 극복한 새로운 코팅 방법을 제시하고자 한다. 전기방사법을 활용해 나노 섬유를 필라멘트에 코팅하는 연구는 지금까지 거의 이루어지지 않았으며 전기방사 코팅 공정 또한 현재까지 잘 활용되지 않은 기술이다. 본 고에서는 폴리에틸렌테레프탈레이트(PET) 필라멘트 섬유 위에 전기방사법을 활용하여 나노 섬유를 코팅하고, 다양한 방사조건에 따른 표면 효과와 내구성을 평가하였다.

2. 실험 재료 및 실험 방법

2.1. 실험 재료

폴리에틸렌 옥사이드(PEO, Sigma-Aldrich, 9000,000g/mol) 수용액을 다양한 농도로 (4.0, 6.0, 8.0 wt.%) 준비했다. PET 필라멘트 섬유는 멀티 필라멘트(직경 0.3mm)과 모노 필라멘트(직경 0.05mm)를 사용했다.

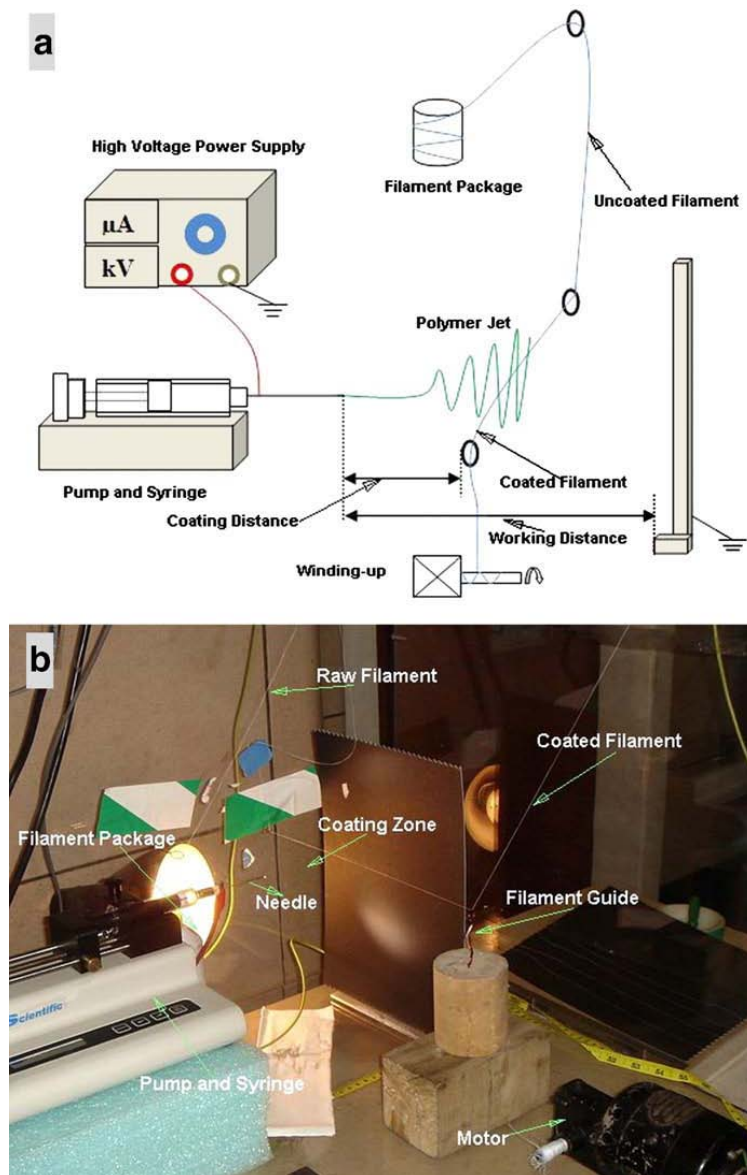


<그림 1> 직물 위에 코팅한 나노 섬유의 SEM 이미지,
나노 섬유층이 직물층에서 분리된 것을 확인할 수 있음.

2.2. 전기 방사

<그림 2>에 전기 방사 장치와 관련 장비를 설치한 도식화와 실제 사진을 제시하였다. 전기 방사 장치는 고전압 전원 공급장치, 시린지 펌프 시스템, 접지된 금속 플레이트와 코팅된 실을 감는 목적으로 사용되는 모터로 이루어진다. 고분자 공급 시린지의 바늘과 플레이트 사이에 고전압을 걸어 전기장이 형성되는데 이것을 코팅존(coating zone)이라고 정의하였다. 필라멘트는 바늘과 적절한 거리를 두고 코팅존을 통과하도록 수평으로 공급된다. 필라멘트의 방향은 바늘과 콜렉터 사이의 방사 라인에 직각 방향이 된다. PEO 용액은 시린지를 통해 적절한 속도로 천천히 사출된 후, 시린지 바늘과 콜렉터 사이의 고전압에 의해 전기적으로 대전되어 방사되면서 크게 신장하고 고형화되어 나노 섬유웹의 형태로 필라멘트 표면에 안착한다. 전기 방사는 필라

멘트 샘플이 보빈에서 공급되어 코팅존을 지날 때부터 시작되어 필라멘트 표면을 나노 섬유로 덮는다. 코팅된 필라멘트는 건조 장치(heat gun)을 통해 건조하고, 일정 속도로 보빈에 감는다. 본 연구에서 모든 실험은 폴리카보네이트 챔버 안에서 진행되었고, 코팅된 필라멘트는 수거 후 건조 처리 없이 챔버 안에 저장하였다.



<그림 2> 필라멘트에 나노 섬유를 코팅하기 위한 전기 방사 장치
도식화(a)와 실제 사진(b)

2.3 전기방사 조건

전압은 10.0~20.0 kV, 바늘과 접지 콜렉터 사이의 작업 거리는 12.0 ~ 20.0cm 사이에서 조절하였다. 바늘과 필라멘트 사이의 코팅 거리는 7.5~13.5cm 사이로 균일한 나노 섬유 코팅을 얻을 수 있도록 조절하였다<그림 2a>. PEO 용액은 시린지 바늘을 통해 0.5~1.5ml/h의 속도로 공급되었다. 기준 방사 조건을 <표 1>에 나타내었다. 한 가지 변수를 변화시킬 때 나머지 변수는 기준 조건으로 고정하여 실험하였다.

<표 1> 전기 방사 기준 조건

전기 방사 조건	기준 조건
코팅 기재	PET 멀티필라멘트
코팅 물질	6.0 wt.% PEO 수용액
코팅 시간(min)	5.0
코팅 거리(cm)	12.0
전압(kV)	15.0
작업 거리(cm)	15.0
용액 공급 속도(ml/h)	1.0

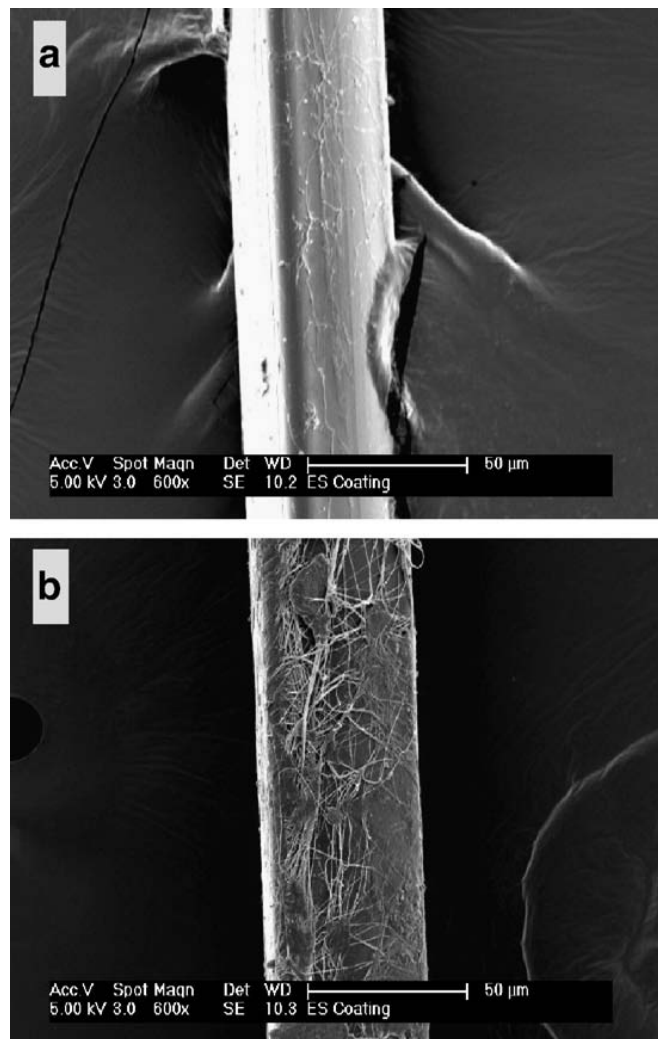
2.4. 특성 평가

코팅 유무에 따른 필라멘트의 표면 형상은 주사전자현미경(Phillips XL-30 ESEM)을 사용해 관찰하였다. 각 섬유의 내마모성(DELTA 100, Lenzing Technik Instruments)을 측정하여, 이를 나노 섬유 코팅의 내구성으로 평가하였다.

3. 결과 및 토의

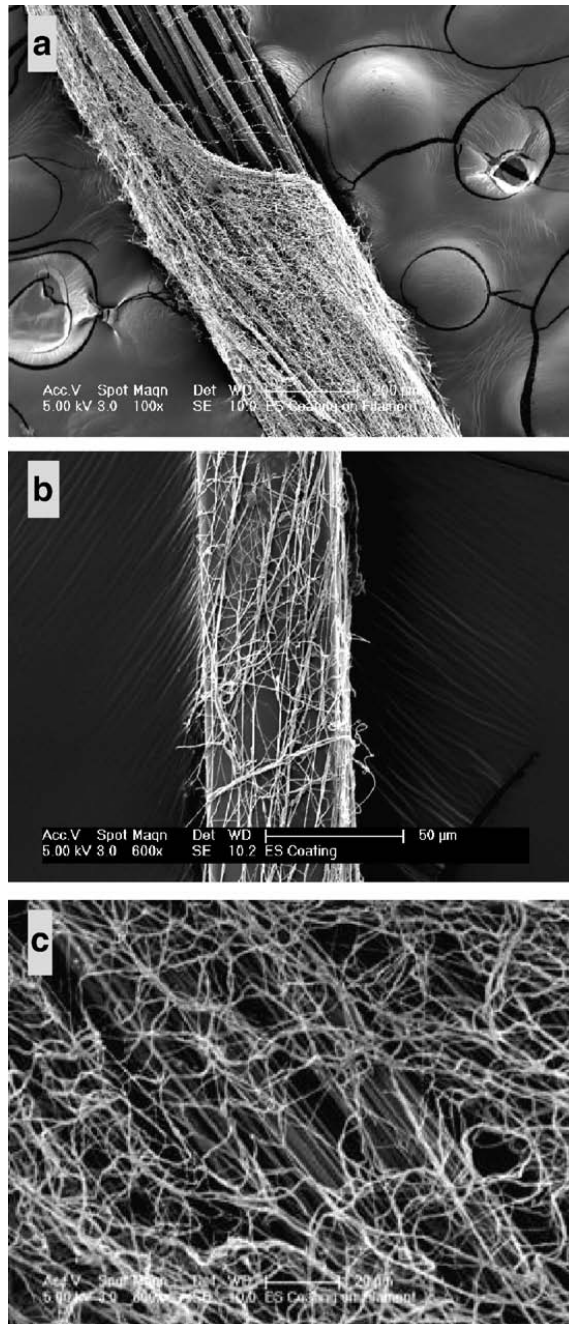
전기 방사에서 가장 큰 영향을 주는 요소 중의 하나는 PEO 용액의 농도이

다. PEO 농도를 변화시켜 가며 실험한 결과 6.0 wt.%일 때 가장 잘 방사되는 것으로 나타나<그림 3> 이후 실험에서는 PEO 용액 농도를 6.0 wt.%로 고정하고 다른 요소들을 변화시켜가며 실험하였다. 그림 4는 나노 코팅한 PET 모노 필라멘트와 멀티 필라멘트의 SEM 이미지이다. 필라멘트 표면 위에 PEO 나노 섬유가 여기 저기 얹혀 있고 일부는 필라멘트 바깥으로 빠져나온 것을 확인할 수 있다. 나노 섬유들은 불규칙적으로 구부러지고 얹힌 형태로 나타났다<그림 4c>.



<그림 3> PEO 용액 농도가 나노 섬유 코팅에 미치는 영향

(a) 4.0 wt.%; (b) 8.0 wt.%

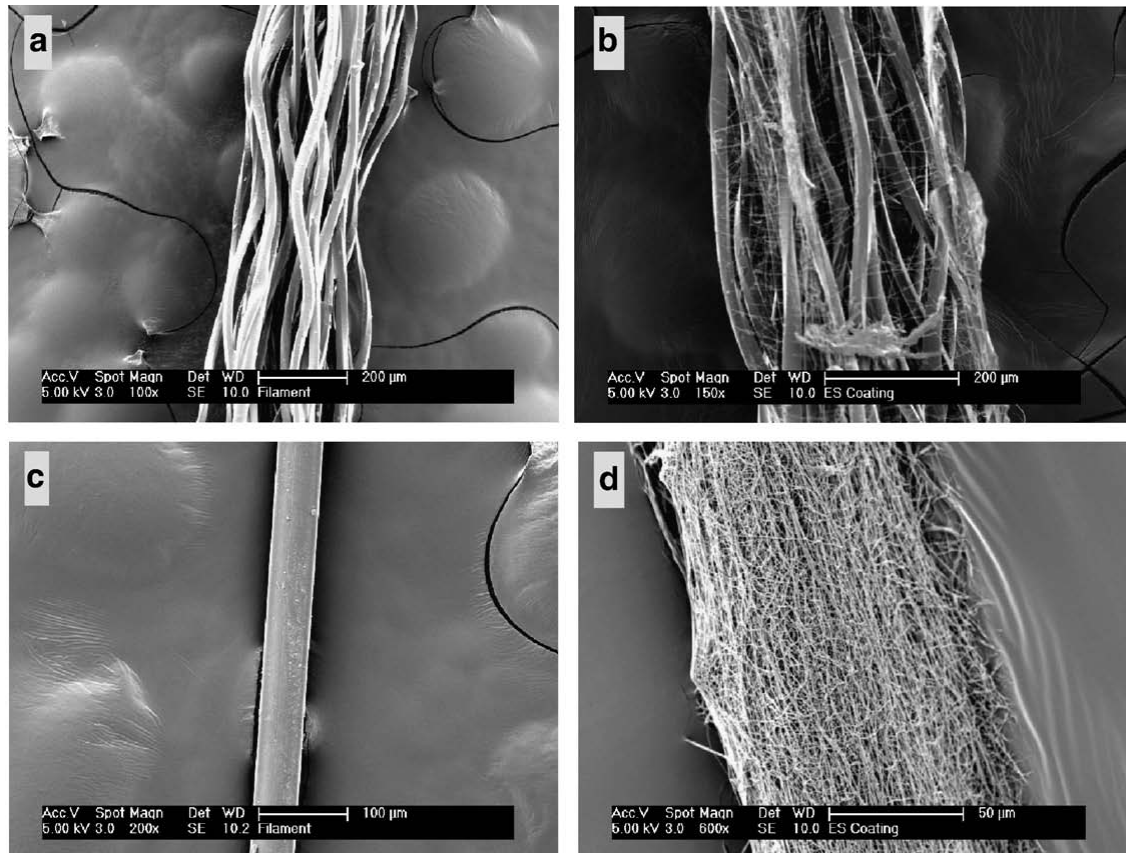


<그림 4> 나노 섬유 코팅한 PET 필라멘트 SEM 이미지
(a)멀티 필라멘트; (b) 모노 필라멘트; (c) (a)의 고배율 이미지

3.1 코팅 시간

코팅 시간이 코팅 형상에 미치는 영향을 확인하기 위해, 다른 조건은 고정시킨 상태로 코팅 시간은 0, 5, 10, 15, 20, 25분으로 변화시켜서 방사하였다. 고

정 방사 조건은 전압 15.0kV, 작업 거리 15.0cm, 용액 공급 속도 1.0ml/h, 코팅 거리 12.0cm, PEO 용액 농도 6.0 wt.% 였다.



<그림 5> 나노 섬유 코팅 시 코팅 시간의 효과

- (a) 코팅전 PET 멀티 필라멘트 (b) 20분 코팅 후 PET 멀티 필라멘트
 (c) 코팅전 PET 모노 필라멘트 (d) 20분 코팅 후 PET 모노 필라멘트

코팅 시간에 따른 표면 형상은 <그림 5>에 나타내었다. 코팅 시간 증가에 따라 멀티 필라멘트와 모노 필라멘트 사이의 코팅 표면 형상의 차이가 나타났다. PET 멀티 필라멘트는 모노 필라멘트에 비해 코팅 표면이 더 느슨한 상태를 보여 모노 필라멘트의 나노 코팅이 더 내구성을 가질 것으로 예상되었다. 멀티 필라멘트는 20분간 코팅 후에도 표면이 완전히 덮이지 않았지만, 모노 필라멘트는 20분 후 촘촘하게 코팅되었다<그림 5b와 d>. 코팅 시간이

증가할수록 나노 섬유는 모노 필라멘트 위를 겹겹이 감싸는 것으로 나타났다. 그러나 코팅 공정 중 나노 섬유의 손실이 랜덤하게 나타나기 때문에 코팅 시간으로 코팅 두께를 측정할 수는 없다.