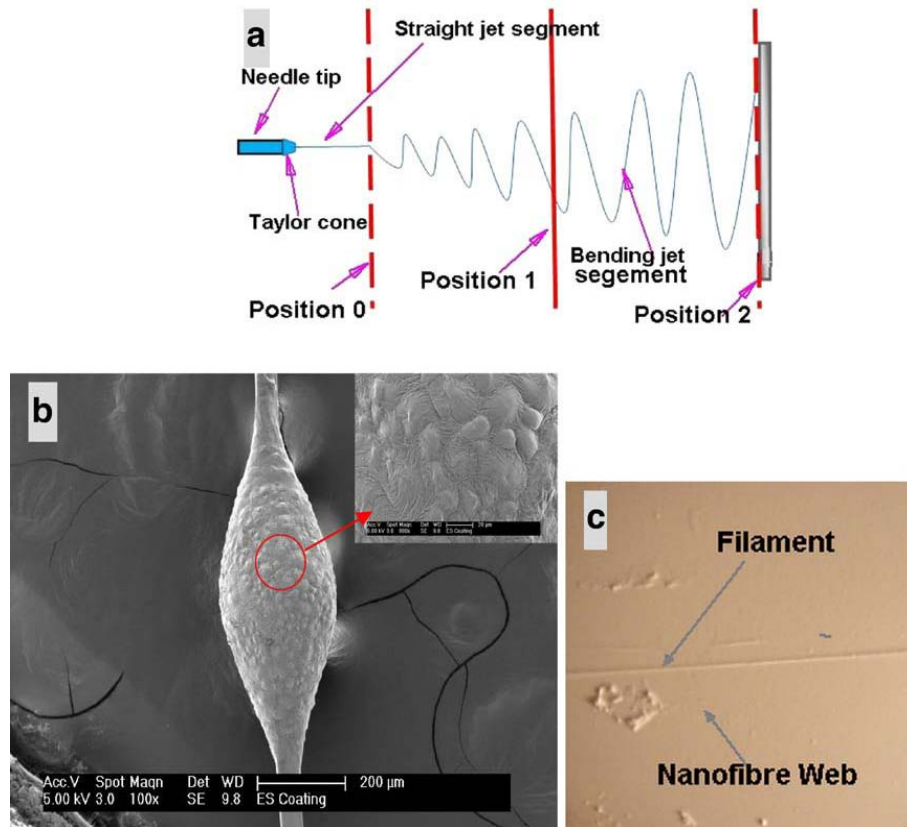


전기 방사를 활용한 필라멘트용 나노 코팅(2)

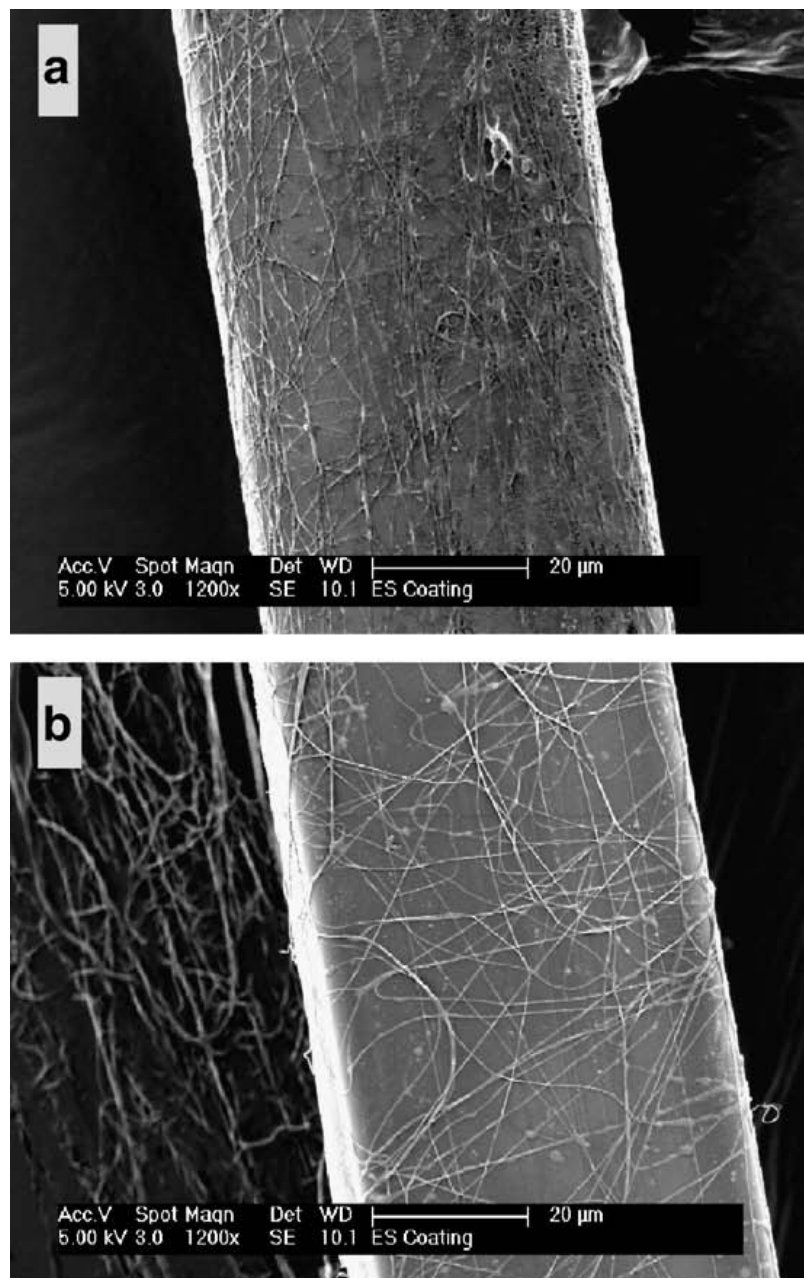
3.3 코팅 거리

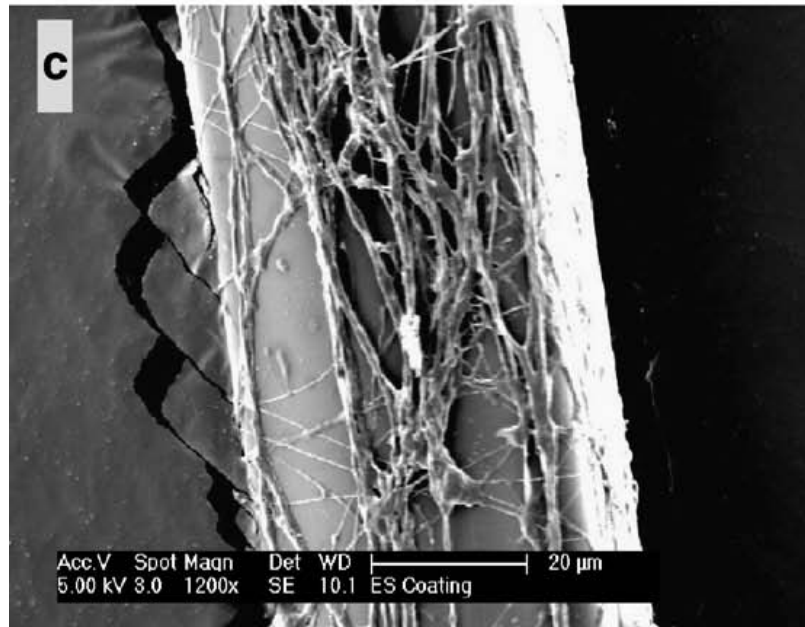


<그림 6> (a)전기 방사 시 필라멘트의 위치를 나타낸 이미지;
(b) 위치 0 코팅의 SEM 이미지; (c) 위치 2 코팅의 SEM 이미지

코팅 거리는 작업 거리와는 확연히 구분되는 것으로, 시린지 바늘과 필라멘트 사이의 거리를 코팅 거리라고 정의하였다<그림 2a>. 코팅 거리는 시린지 바늘을 기준으로 필라멘트의 상대적인 위치로 결정되며, 이것은 코팅의 밀도와 길이에 영향을 미칠 것이다. <그림 6a>에 나타내었듯이 바늘의 끝을 기준으로 필라멘트의 위치를 0, 1, 2의 세 위치로 지정하였다. 위치 0에서는

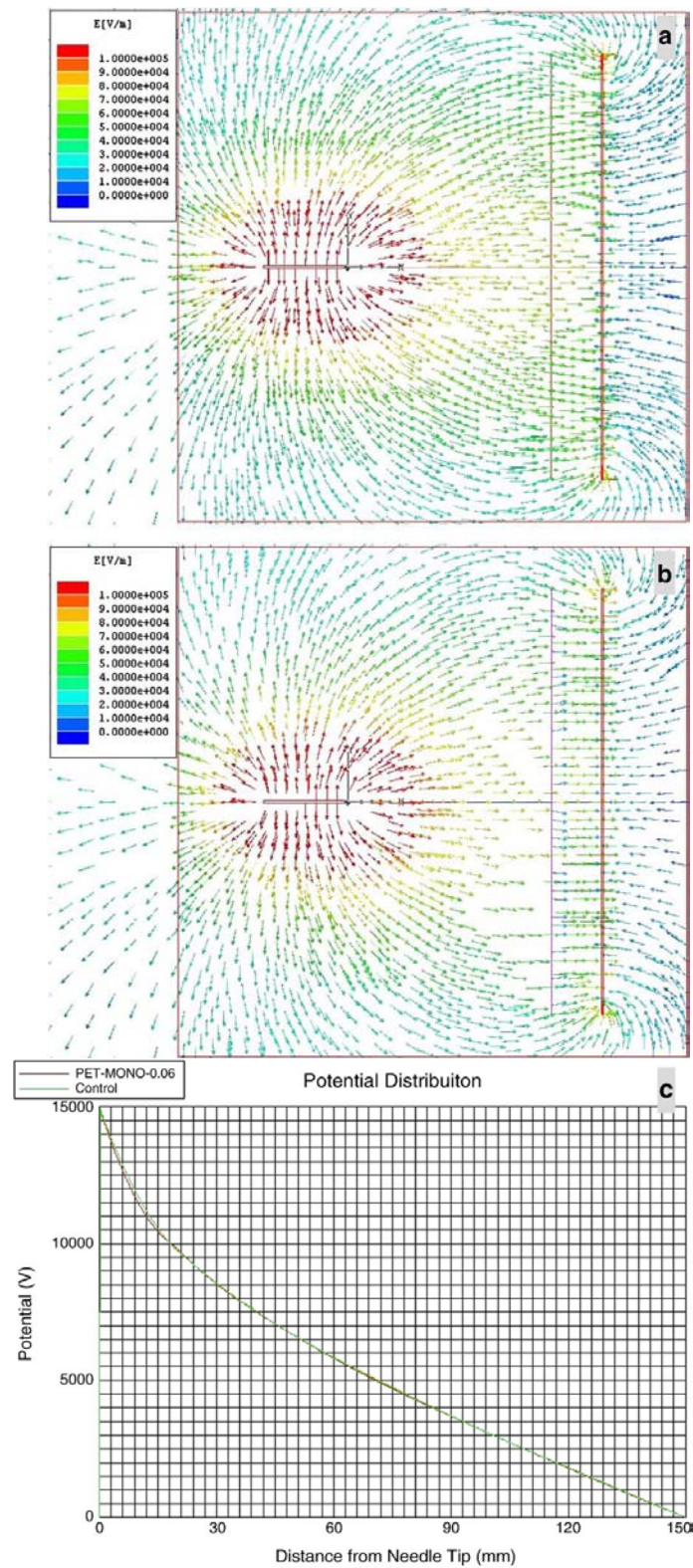
코팅 거리가 충분하지 못했기 때문에 나노웹 대신 비드가 형성되었다<그림 6b>. 위치 2에서는 필라멘트 위에 나노웹이 완벽하게 코팅되었으나 필라멘트가 콜렉터에 강하게 부착되었다. 필라멘트와 콜렉터 간의 간격이 좁았기 때문에 나노 섬유웹이 필라멘트와 콜렉터를 연결시켜 콜렉터 표면에서 필라멘트의 분리가 이루어지기 힘들었다. 결론적으로 코팅 거리는 위치 1일 때 가장 적절한 것으로 나타났다.





<그림 7> PET 모노 필라멘트에 나노섬유 코팅시 코팅 거리가 미치는 영향,
(a) 7.5cm; (b) 10.5cm; (c) 12.0cm

<그림 7>은 코팅 거리 7.5, 10.0과 12.0cm에서의 나노 코팅된 PET 모노 필라멘트의 SEM 이미지이다. 코팅 거리 7.5cm는 나노 섬유 코팅의 밀도가 가장 높지만 코팅 길이는 가장 짧았다<그림 7a>. 전기 방사 시 용액이 방사될 때 초기 몇 cm는 직선으로 방사된 후 휘어지고 감겨 소용돌이 형상을 이루면서 콜렉터에 도달하게 된다. 코팅 거리 7.5cm는 거리가 짧아 용액의 젯이 직선으로 필라멘트 표면에 부착하여, 상대적으로 코팅 밀도는 크지만 코팅 길이는 짧게 나타난 것으로 판단된다. 코팅 거리가 10.5cm에서 12cm로 증가하면, 나노 섬유의 형상은 매끈한 형태에서 비드가 형성되는 구조로 변화한다<그림 7b와 c>. 코팅거리가 7.5~13cm일 때 필라멘트 표면의 나노 섬유의 직경은 134.6~178.6nm로 측정되었다. 이것은 일반적인 전기 방사시 평균 직경인 177.0nm와 비교해 큰 차이가 없었다. 코팅 거리 13.5cm에서는 나노 섬유가 뭉치는 형상이 나타나 코팅 형상이 가장 나빴다.



<그림 8> PET 모노 필라멘트의 유무에 따른 전기장의 변화(화살표는 전기장의 방향과 세기를 나타냄), (a) 모노 필라멘트 존재 하의 전기장; (b) 모노

필라멘트 부재 시의 전기장; (c) 바늘 끝과 콜렉터 사이의 거리에 따른 포텐셜 분포

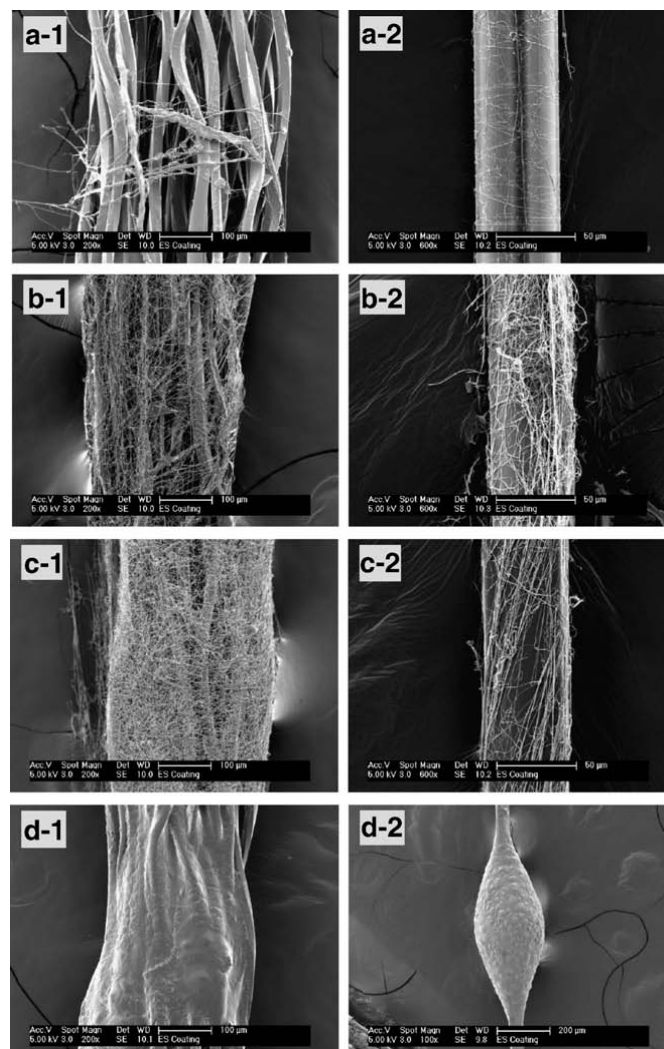
코팅 거리에 따른 형상의 변화는 높은 유전 상수를 가지는 필라멘트가 전기 방사 공정 중에 형성되는 전기장 안에 영향을 가하는 것에 의해 어느 정도 영향을 받는 것으로 예상된다. 필라멘트가 전기장에 미치는 영향을 전기장 분포를 계산하여 확인할 수 있다. Maxwell 9.0 소프트웨어를 사용하여 바늘의 끝에서 콜렉터까지의 코팅존의 전기장과 분포를 계산하였다. 그림 8은 코팅 거리 12.0cm일 때, 필라멘트 유무에 따른 바늘 끝과 콜렉터 사이에 형성되는 전기장과 분포를 나타낸다. <그림 8a와 b>에 따르면, 필라멘트의 유무에 따라 전기장 라인에서 분명한 차이가 나타났으나 포텐셜 분포는 크게 차이가 나지 않았다. 전기장의 세기는 필라멘트가 있을 경우 바늘 끝에서 1mm 이내의 영역에서 상당히 크게 변화하였고, 모노 필라멘트 근방에서 약간 감소하였다. 바늘 끝과 젯 주위의 전기장이 바늘 끝에 형성되는 액적의 형태와 방사되는 젯의 형태에 영향을 준다고 알려져 있다.

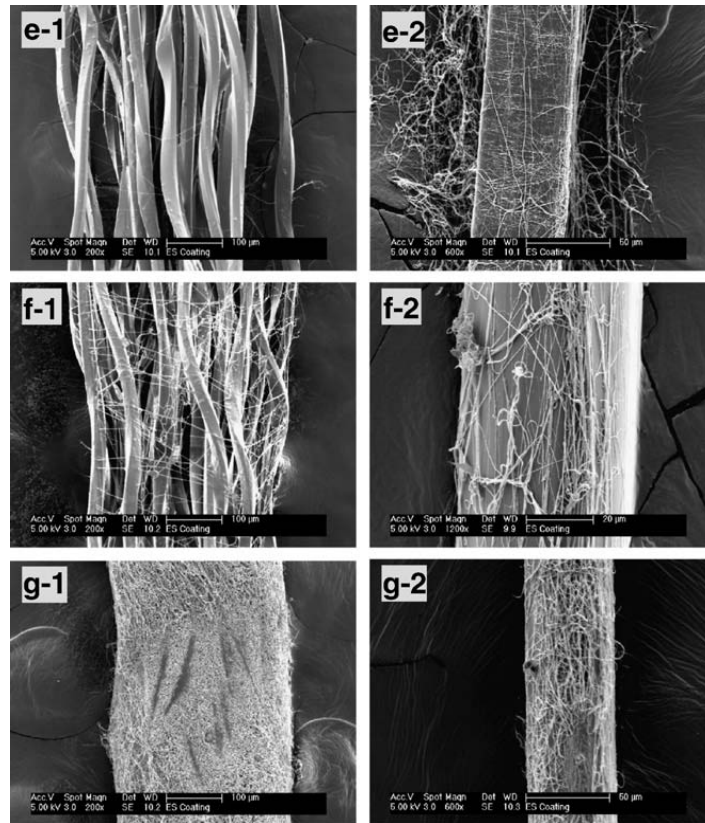
3.3. 전압, 작업 거리와 공급 속도

전압은 12.0, 15.0, 17.1kV로, 작업 거리는 12.0, 15.0, 18.0cm로 변화시켜, 전압과 작업 거리의 영향을 평가하였다. <그림 9>는 전압, 작업 거리와 공급 속도가 나노 섬유 코팅의 형상에 미치는 영향을 나타낸 것이다. <그림 9a에서 c>는 전압 변화에 따른 형상을 나타낸 그림으로, 전압이 높아질수록 나노 섬유 코팅이 조밀하게 이루어진 것을 볼 수 있다. 전기 방사는 전압이 낮거나 작업 거리가 멀수록 필라멘트 표면에 나노 섬유의 코팅이 제대로 이루어지지 않았다. 작업 거리가 짧을 때는 필라멘트 위에 막대 같은 형상의 비드가 형성되었다. 작업 거리가 길어지면 나노 섬유의 형태가 잘 나타나지만 코팅의 밀도는 낮아진다. 이것은 용액 젯의 직선 부분의 길이와 전압 사이의 관

계로 설명할 수 있다. 초기 직선 방사 부분은 바늘과 콜렉터 사이의 전기장에 의해 결정되며, 이 직선 방사 거리는 전기장에 따라 달라지게 된다. 전기 방사에서 직선 방사는 막대 형상의 비드를 만들어낸다.

공급 속도는 0.5~1.5ml/h로 증가할수록 나노 섬유 코팅의 밀도도 증가하였다<그림 9f-g>. 공급 속도가 0.5ml/h일 때는 필라멘트가 완벽하게 덮이지 않았지만, 공급 속도가 증가할수록 점차적으로 필라멘트 표면이 완전히 커버될 때까지 밀도가 증가하였으며, 상대적으로 균일한 코팅을 보여주었다. 이를 통해 빠른 공급 속도가 직접적으로 나노 섬유의 생산을 증가시키는 것을 확인할 수 있었다.





<그림 9> 전압, 작업 거리, 용액 공급 속도가 나노 코팅에 미치는 영향

(a-1,2) 전압 12.9 kV 시 PET 멀티 필라멘트와 모노필라멘트의 코팅 형상

(b-1,2) 전압 15.0 kV 시 PET 멀티 필라멘트와 모노필라멘트의 코팅 형상

(c-1,2) 전압 17.1 kV 시 PET 멀티 필라멘트와 모노필라멘트의 코팅 형상

(d-1,2) 작업거리 12.0 cm 시 PET 멀티 필라멘트와 모노필라멘트의 코팅 형상

(e-1,2) 작업거리 18.0 cm 시 PET 멀티 필라멘트와 모노필라멘트의 코팅 형상

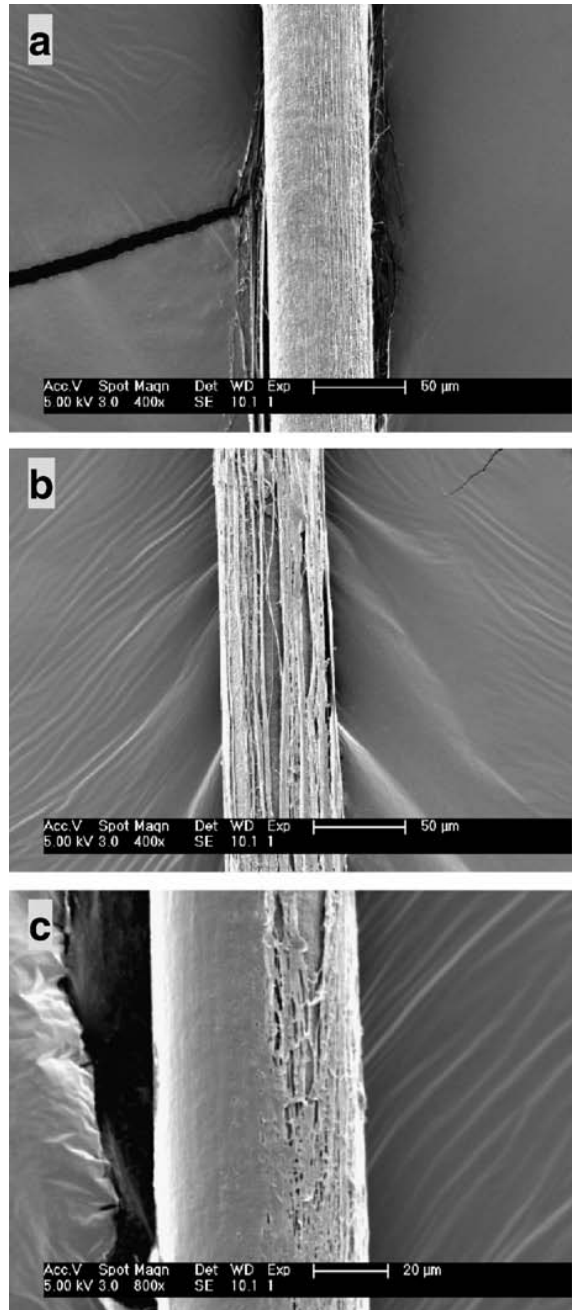
(f-1,2) 공급속도 0.5 ml/h 시 멀티 PET 필라멘트와 모노필라멘트의 코팅 형상

(g-1,2) 공급속도 1.5 ml/l 시 PET 멀티 필라멘트와 모노필라멘트의 코팅 형상

3.4. 나노 섬유로 코팅된 모노 필라멘트의 내마모성

나노 섬유로 코팅된 모노 필라멘트를 300rpm 속도로 2, 4, 6분간 마찰하고 마모성을 평가하였다. <그림 10>에 나타난 바와 같이, 마찰 시간이 증가할수록 나노 섬유의 탈락이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 나노 섬유 코팅은 1,200회 마찰에는 손상이 나타나지 않았고, 1,800회 마찰 후 부분적으로 나노 섬유 코팅에 손상이 일어났다. 섬유 축 방향으로 크랙이 형성되었는데, 이러

한 섬유 축 방향 크랙은 나노 섬유의 파괴에 따라 나노 섬유가 분리되면서 시작되는 것으로 보인다. 따라서 높은 내마모성과 강도를 가지는 나노섬유는 이러한 크랙 등의 형성을 지연시킬 것으로 기대된다.



<그림 10> 마모 시간에 따른 (마모 실험 조건 50mg, 300rpm) 나노 코팅의 손상 정도, (a) 2분; (b) 4분; (c) 6분

4. 결 론

PEO 수용액을 사용하여 전기 방사 방식으로 PET 멀티 필라멘트와 모노 필라멘트에 나노 섬유를 코팅하였다. 코팅 형상은 용액 농도, 코팅 시간, 코팅 거리, 전기장(전압/작업 거리)와 용액 공급 속도와 같은 다양한 요인에 의해 영향을 받았다. 특히, 전기방사 공정 중의 전기장을 시뮬레이션하여 필라멘트 유무에 따라 시린지 바늘 끝 부위와 필라멘트 주위의 전기장이 변화하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 전기장의 변화는 나노 섬유 코팅에 차이를 야기하는 것으로 나타났다. 또한 모노 필라멘트 위에 전기방사 나노 섬유를 코팅하는 것은 일정 수준의 내마모성을 가지는 것을 확인할 수 있었다.

전기 방사법을 통해 나노 섬유를 코팅하는 것은 부착 문제와 같이 여전히 해결해야 하는 문제점들을 가지고 있다. 이를 해결하기 위한 연구가 앞으로도 계속 진행되어야 할 것이다.