creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

의류학석사 학위논문

필터 웹의 기하학적 구조 및 다층 구조가 필터 성능과 차압에 미치는 영향

2021년 2월

서울대학교 대학원

의류학과

노 상 현

필터 웹의 기하학적 구조 및 다층 구조가 필터 성능과 차압에 미치는 영향

지도교수 김 주 연

이 논문을 의류학석사 학위논문으로 제출함
2020년 10월

서울대학교 대학원
의류학과
노 상 현

노상현의 의류학석사 학위논문을 인준함
2021년 1월

위 원 장 차 경 애 (인)

부위원장 김 성 민 (인)

위 원 김 주 연 (인)

초 록

지속적인 입자 포집 과정에서 필터에 발생하는 차압은 호흡 보호구 착용자의 호흡 용이성을 저하시킬 뿐 아니라, HVAC (heating, ventilation, air-conditioning) system의 에너지 소모를 증가시킨다. 이러한 이유로, 낮은 차압을 유지하며 사용 수명이 개선된 필터의 개발이 요구된다. 본 연구에서는 지속적인 입자 포집 과정에 있어서 필터 웹의 기공과 레이어 구조가 차압에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

전기방사 공정을 이용하여 microfiber, nanofiber, microbead-on-string 을 방사하였고 nanofiber을 다른 두 섬유와 동시에 방사하여 intermingled 된 섬유 웹을 제작하였다. 다양한 섬유로 구성된 총 14 종의 전기방사 웹 레이어 구조를 제작하였다. 이후, 상업용 멜트블로운 필터에 일정한 간극을 부여한 다층 레이어 구조를 제작하였다.

단일 레이어 구조의 전기방사 웹의 차압은 공극률 (porosity)보다 기공 (pore) 크기가 미치는 영향이 큰 것으로 보였다. 가장 작은 기공 크기를 지닌 나노섬유 웹이 초기 차압이 다른 웹이 비해 높았으며, 포집된 입자의 거동을 분석한 결과, 작은 기공 크기로 인하여 입자들이 웹 내부로 침투하지 못하고 표면에서 포집되어 공기의 흐름을 막아 차압이 빠르게 상승하였다. 반면, microbead-on-string 웹은 나노섬유 웹에 비해 낮은 초기 차압과 차압 상승률로 인하여 긴 사용 수명을 보였다. 이는 섬유 사이에 존재하는 큰 직경의 microbead로 인하여 기공 크기가 증가해 포집된 입자가 웹의 표면이 아닌 내부에 포집되어 depth filtration이 가능했기 때문으로 사료된다. 이에 따라, 다층 레이어 구조는 배치 순서에 따라 지속적인 입자 포집 과정에서 차압과 로딩 거동이 상이하게 나타남을 확인하였다. 전기방사 웹 두 장으로 구성된 구조는 레이어 사이에 존재하는 미세한 간극에서 공기의 수평 방향 이동으로 인해 전체적인 압력이 감소하는 효과가 발생함을 확인하였다.

상업용 멜트블로운 필터의 레이어 사이에 부여된 간극에 의한 차압 감소 효과는 레이어 수가 많고, 유속이 빠를수록 효과가 뚜렷하게 나타

났다. 첫 번째 레이어를 투과하는 공기가 두 번째 레이어로 유입되는 과정에서 레이어 사이 간극은 차압이 낮은 방향으로 효율적으로 분배되어, 간극이 부여되지 않은 구조와 비교했을 때 낮은 차압과 depth filtration에 의한 차압감소가 관찰되었다. 본 연구의 결과는 지속적으로 입자를 포집하는 과정에서 낮은 차압과 긴 사용 수명을 지닌 필터를 디자인하기 위한 시사점을 제안한다.

주요어 : 기공, 레이어 구조, 차압, 사용 수명, depth filtration
학 번 : 2019-26586

목 차

제 1 장 서 론 ····· 1

제 1 절 연구의 필요성 및 목적 ····· 1

제 2 절 이론적 배경 ····· 4

2.1 전기방사 ····· 4

2.2 여과 메커니즘 ····· 5

2.3 유속과 차압에 관계 대한 이론 ····· 8

2.4 입자 종류에 따른 투과율 및 차압 거동 ····· 10

2.5 섬유 형태와 기공에 따른 차압 효과 ····· 14

제 2 장 실 험 ····· 19

제 1 절 시료 및 시약 ····· 19

제 2 절 전기방사 웹 제작 ····· 20

2.1 전기방사 용액 제조 ····· 20

2.2 전기방사 섬유 제조 ····· 20

제 3 절 멜트블로운 필터 레이어 구조 ····· 23

제 4 절 웹 특성 및 여과 성능 평가 ····· 25

4.1 섬유 웹 특성 분석 ····· 25

4.2 필터 여과 성능 평가 ····· 26

4.2.1 입자 분사량 ····· 26

4.2.2 여과 테스트 조건 ····· 27

제 5 절 3D modeling & simulation ····· 28

제 3 장 결과 및 고찰 ····· 30

제 1 절 섬유 형태 및 구조에 의한 웹 성능 변화 ····· 30

1.1 섬유 형태에 따른 기공 분포 ····· 30
1.2 전기방사 웹 구조 분석 ····· 33
1.2.1 웹 레이어 설정 ····· 33
1.2.2 섬유 형태에 따른 웹 내부 구조 ····· 35
1.3 섬유 형태 및 레이어 구조에 따른 필터 성능 ····· 37
1.3.1 입자 투과율 ····· 37
1.3.2 입자 로딩과 차압 변화 ····· 39
1.3.3 차압 대비 여과 성능 분석 ····· 42
1.4 기공 크기와 차압 관계 ····· 44
1.5 섬유 형태와 입자 포집 거동 ····· 45
1.6 유속에 따른 차압 변화 ····· 47
1.7 레이어 사이 미세 간극에 의한 차압 영향 ····· 49
1.7.1 차압 감소 원인 추론 ····· 49
1.7.2 Simulation 분석 ····· 50

제 2 절 필터 레이어 간극 의한 차압 감소 효과 ·····53
2.1 레이어 구조에 따른 여과 성능 ····· 53
2.1.1 2-Layer 구조 ····· 53
2.1.2 4-Layer 구조 ····· 55
2.2 입자 로딩과 필터 사용 수명 관계 ····· 57
2.2.1 Clogging point ····· 57
2.2.2 Loading capacity ····· 59
2.3 레이어 간극에 의한 depth filtration ····· 60
제 4 장 결론 ·····64

참고문헌 ·····67
Abstract ·····78

List of tables

Table 1. Morphology of electrospun web with varied electrospinning conditions ····· 22
Table 2. Characteristics of meltblown filter ····· 23
Table 3. Test variables ····· 23
Table 4. Physical characteristics of modeling constructions ····· 29
Table 5. Physical characteristics and schematic images of electrospun webs. ····· 34
Table 6. Summary of loading performance of different filter constructions ····· 58
Table 7. Loaded mass for each layer for 4-layer constructions · 63

List of figures

Figure 1. Illustration of the particle capture mechanism ····· 7
Figure 2. Two examples of linear increase of pressure drop by face velocity ····· 9
Figure 3. Schematic image of pressure drop and penetration ····· 12
Figure 4. Different tendency of pressure drop and penetration according to aerosol types. ····· 13
Figure 5. Schematic pore size images of nanofiber, microfiber and bead-on-string webs ····· 17
Figure 6. The previous studies of electrospun web with low filtration resistance ····· 18
Figure 7. Morphological characterization of electrospun webs ···· 21
Figure 8. Experimental set-up for layer construction ····· 24
Figure 9. Fiber morphology and size distribution of electrospun fibers ····· 32
Figure 10. Cross-sections of the single layer (5 g/m^2) and the dual layer (2.5 g/m^2) webs ····· 36
Figure 11. Penetration of NaCl particles during 20 mg of challenged mass ····· 38
Figure 12. Build-up of pressure drop during 20 mg of NaCl mass loading ····· 41
Figure 13. Quality factor of different filter constructions ····· 43
Figure 14. Particle loading after 10 mg NaCl challenged mass ·· 46
Figure 15. Pressure drop of n-Fiber, m-Bead, and Fiber-mix webs

at different face velocities ····· 48
Figure 16. Simulated penetration and pressure drop for the virtual filter models with continued mass loading ····· 51
Figure 17. Pressure drop contour plots for three virtual models 52
Figure 18. Pressure drop and penetration development for 2-layer constructions during 30 mg of NaCl loading ····· 54
Figure 19. Pressure drop and penetration development for 4-layer constructions during 30 mg of NaCl loading ····· 56
Figure 20. SEM images of 2-layer construction after 30 mg loading (15 cm/s) ····· 61
Figure 21. SEM images of 4-Layer construction after 30 mg loading (15 cm/s) ····· 62

제 1 장 서 론

제 1 절 연구의 필요성 및 목적

대기오염으로 인한 미세먼지 및 COVID-19, MERS 등 호흡기 감염질환의 확산으로 인하여 개인용 호흡 보호장비, HVAC (heating, ventilation, air-conditioning) system의 필요성이 점차 강조되고 있다. 미세먼지 (particulate matter, PM)는 인체에 유해한 고체 입자, 유성 에어로졸, 가스 등의 혼합물로 구성되어 있으며, 직경에 의해 PM 10 (aerodynamic diameter ≤10 ㎛), PM 2.5 (aerodynamic diameter ≤2.5 ㎛)로 명칭이 구분된다[1-3]. 대기중 부유하는 미세먼지는 호흡 계통을 거쳐 체내에 유입된다. 특히, 작은 직경으로 인하여 폐 내부까지 도달하는 PM 2.5는 혈관 속에 침투해 체내에서 순환하며 호흡 계통 및 심혈관계 질병을 유발 할 수 있다[4-7]. 세계보건기구 (WHO)에 따르면 2016년 기준, 미세먼지로 인한 호흡기 질환 사망자가 420만 명에 준하는 것으로 보고되었다[8]. 이처럼, 대기오염 물질로 인한 보건위생 상의 위험으로부터 해결책이 요구되고 있다.

섬유기반 필터 (fiber-based filter)는 대기 중에 부유하는 미세먼지를 여과하는 수단 중 하나로 널리 사용되고 있다[9-12]. 일반적으로 상업용 필터는 인체 유해성이 낮은 폴리프로필렌 (polypropylene) 고분자를 이용하여 멜트블로운 공정을 통해 제작된 10㎛ 이하의 마이크로섬유 웹으로 구성된다[13]. 점차 심해지는 대기오염으로 인하여 높은 여과 성능을 지닌 필터가 요구됨에 따라, 최근 전기방사 공정을 통한 나노섬유 개발이 활발하게 진행되고 있다. 전기방사 공정으로 생산된 나노섬유는 얇은 섬유 직경으로 인해 부피 대비 넓은 표면적과 작은 크기의 기공(pore)을 지니고, 추가적인 공정 없이 방사 과정에서 섬유에 정전기가 부여 될 수 있어 높은 여과 성능을 지닌다[14-25]. 그러나, 나노섬유로 제작된 웹의

높은 섬유밀도 (high pacing density)와 작은 기공 크기 (pore size)는 웹에 포집된 고체 입자로 인한 막힘 (clogging)을 발생시켜 빠른 차압 상승과 함께 필터 사용 수명 (service life)를 단축하는 결과를 초래한다[26-28].

필터의 여과 효율을 높이고 차압을 낮추기 위한 필터 디자인 연구가 활발하게 진행되고 있다[29, 30]. Fan et al. [31]는 일반적인 원통형의 섬유와 달리 전기방사 공정으로 제작된 회전이 있는 납작한 형태의 이형 단면 섬유로 높은 porosity를 지닌 웹을 구성하여, 높아진 공기 투과도로 인해 차압 감소에 유리한 결과를 보였다. 최근 연구 중, 각기 다른 형태의 섬유로 구성된 여러 필터 웹을 조합하여 제작한 다층 구조 필터에서 fluffy한 웹이 입자가 유입되는 표면층에 배치되면 입자가 필터 내부로 깊게 침투하여 여과되는 depth filtration이 발생해 차압을 낮출 수 있음을 보이고 있다[32-39]. 다층 레이어 구조에서 레이어 사이에 미세한 간극이 존재하는 경우 미세 간극에서 공기가 원활하게 분배되어 차압을 낮출 수 있다는 연구 결과가 보고되었다[40, 41]. 이처럼, 다양한 방법을 이용하여 필터에 발생하는 높은 차압 문제를 해결하기 위한 연구가 진행되고 있으며, 필터는 오염 물질을 여과하는 여과 효율과 더불어 차압 또한 중요한 성능 인자임을 시사한다. 섬유에 포집된 고체 입자에 의해 clogging된 필터의 기공 (pore)은 차압 상승을 유발하여 호흡 보호구 착용자의 호흡 저항 증가 및 생리적 부담을 증가시키고[42], HVAC (heating, ventilation, air-conditioning) system을 가동하기 위해 초기보다 더 많은 에너지 소모를 필요로 하는 문제점을 발생시킨다[43-45]. 앞서 언급된 필터의 차압을 감소시키기 위한 많은 연구들은 대부분 초기 차압을 중심으로 연구가 진행되었고, 초기 이후 입자가 지속적으로 포집됨에 따라 상승하는 차압의 감소를 위한 연구는 미비한 실정이다[46, 47]. 또한, 차압에 영향을 미치는 여러 요소들이 개별적으로 연구되었으며 이러한 요소를 통합적으로 적용한 연구는 부족한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 섬유의 형태, 레이어 구조를 통합적으로 적용하여 초기

차압과 지속적인 입자 포집에 따른 차압 상승이 낮은 필터 웹을 디자인하여 높은 차압에 의한 호흡 보호구 착용자의 호흡 용이성, HVAC system의 에너지 소모 문제를 개선하고자 한다.

본 연구에서는 전기방사 공정을 통하여 nanofiber, microbeads-on-string, microfiber 섬유 웹을 제작하였다. 레이어 사이 미세 간극에 의한 차압 감소 효과를 확인하기 위하여 동일한 섬유 웹 5 g/m^2 단일 레이어와 2.5 g/m^2 2장을 겹친 dual layer 구조를 제작하였고, 서로 다른 섬유 웹 2종을 겹친 다층 레이어 구조를 제작하였다. 이후, 레이어 사이 간극에 의한 차압 감소 효과를 상업용 멜트 블로운 필터에 적용한 구조를 제작하였다. 제작된 웹에 NaCl 입자를 로딩하여 지속적인 여과 환경 조건에서 입자 투과율과 차압 상승 경향성을 비교 분석하였고, 3D modeling & simulation을 통하여 레이어 사이 간극에 의한 효과를 확인하였다. 차압에 영향을 주는 여러 요소를 통합적으로 적용하여 지속적인 여과 과정에서 낮은 차압을 유지하는 필터 디자인을 위한 연구를 수행하였다.

제 2 절 이론적 배경

2.1 전기방사

상업용 필터는 일반적으로 멜트블로운 공정[13]을 통하여 생산되며, 열가소성 고분자를 용융하여 방사 노즐을 통해 압출 방사되는 섬유에 고온, 고압의 공기로 연신 후 고화하는 방법으로 제조한다. 전기방사는 물리적 힘으로 섬유를 제작하는 기존 방식과 달리, 고분자 용매에 전압을 인가하여 섬유 직경이 나노미터에서 마이크로미터의 초극세 섬유를 제작할 수 있는 공정이다[48].

표면장력으로 인하여 방사구 끝에 반구형 액체 방울을 형성한 고분자 용액은 인가된 높은 전압으로 인해 용액이 하전되어 발생하는 전기적 반발력이 표면장력을 넘어서는 경우 Taylor cone과 함께 형성된 jet에서 용매는 증발하고 고분자가 섬유 형태로 방사된다[49]. 방사된 섬유는 ground 상태의 collector에 쌓이게 된다. 따라서, 다수의 방사구에서 토출된 섬유를 동시에 collector에 포집하여 각기 다른 형태의 섬유가 intermingled 웹 형성이 가능하다. 전기방사 공정은 강한 전기적 환경 속에서 섬유가 방사되기에 멜트블로운 공정으로 생산된 필터에 정전기를 부여하기 위한 코로나 차징[50], 하이드로 차징과 같은 추가적인 공정 없이 섬유에 정전기를 부여 할 수 있는 특징을 지닌다[51]. 전기방사 공정은 환경온습도, 고분자 종류, 용액의 농도, 전압, 용액 토출량, 노즐과 콜렉터 거리 등 여러 요소에 의하여 방사되는 섬유의 직경, 형태가 결정된다[52-54].

본 연구에서는 섬유 직경과 형태에 따른 여과성능 및 차압 변화를 확인하기 위하여 전기방사 공정 중 고분자 종류, 농도, 전압 니들 게이지 등 방사 조건을 달리하여 형태가 각기 다른 섬유를 방사하여 웹을 제작하였다.

2.2 여과 메커니즘

섬유기반 필터 (fiber-based filter)는 외부에서 유입되는 오염 물질을 물리적 메커니즘과 정전기적 인력으로 포집한다. 입자 크기에 따른 물리적 여과 메커니즘은 Figure 1과 같이 나타난다.

필터를 통과하는 공기의 유선(air streamline)을 벗어난 큰 크기와 질량을 지닌 입자 (직경 10 ㎛ 이상)는 중력에 의해 가라 앉아 섬유에 포집되는 현상을 중력침강 (gravity settling)이라 한다. 직경 0.5 ㎛ 이하의 미세 입자는 중력침강의 영향을 거의 받지 않는다[14]. 직경 0.6 ㎛ 이하의 작고 무거운 입자는 입자는 유선을 따라 직선으로 이동하는 과정에서 섬유 근처에서 곡선으로 변화하는 유선에서 벗어나 관성에 의해 직진하여 섬유에 충돌하여 포집되는 관성충돌 (inertial impaction)의 영향을 받는다[55, 56]. 유속이 높은 환경에서 이동하는 입자는 관성충돌 메커니즘이 활발하게 발생한다[57]. 유선을 따라 이동하더라도 입자 직경 반경 내에 섬유가 존재하여 포집되는 차단 (interception) 메커니즘의 영향을 받는다. 초미세 입자 (직경 0.1 ㎛)는 유선과 관계없이 공기 분자와 무작위적으로 충돌하며 랜덤하게 움직이는 브라운 운동 (Brownian motion)을 보이는 중 섬유와 부딪혀 포집되는 분산 (diffusion) 메커니즘을 겪는다[58-60]. 입자의 크기가 작을수록 브라운 운동이 활발하게 발생하여 분산 메커니즘에 의해 포집되며, 분산 메커니즘은 느린 유속에서 이동하는 입자에 효과적으로 발생한다[55].

물리적 여과 메커니즘 원리에 의해 입자의 크기가 작을수록 여과가 어려운 것이라고 보기에는 무리가 있다. 직경 0.1 ㎛의 입자는 분산 메커니즘에 의해 포집되며, 직경 0.4 ㎛ 이상의 입자는 관성충돌, 차단 메커니즘에 의해 포집된다. 분산 메커니즘에 의해 포집되는 입자보다 크고 관성충돌, 차단에 영향을 받는 범위보다 작은 크기(0.1~0.4 ㎛)의 입자는 combined effect로 인해 투과율이 가장 높게 나타나며, 이를 MPPS (most penetrating particle size)라 한다[61].

정전 섬유는 물리적 여과 메커니즘으로 포집하기 어려운 MPPS 입자

를 포집하는데 효과적이다. 전기방사 공정 또는 코로나 차징으로 처리된 섬유 표면에 양전하, 음전하가 동시에 공존할 수 있고 이때 반대 전하를 가진 입자는 coulombic attraction에 의해, 중성 입자는 유도분극(induced polarization)에 의하여 차압 증가 없이 입자를 효율적으로 포집할 수 있다[59, 62-65].

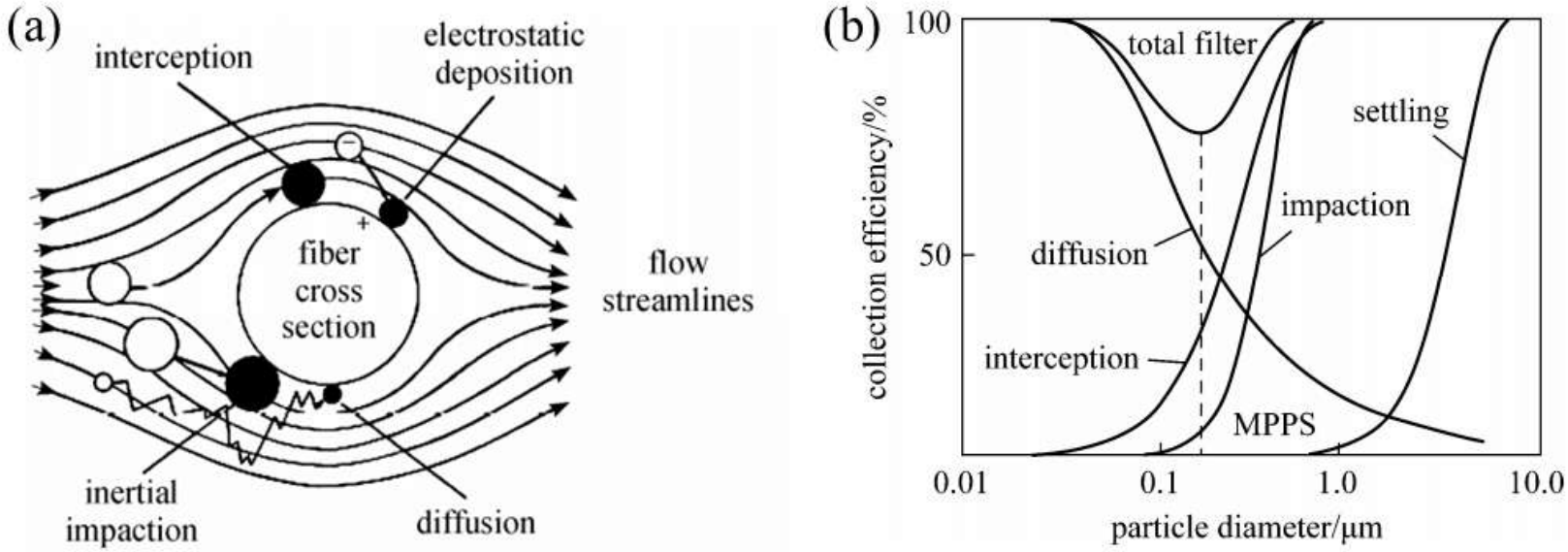


Figure 1. Illustration of the particle capture mechanism[66]. (a) Mechanical and electrostatic capture of particles by a single fiber; (b) Filter efficiency for individual single-fiber mechanisms and total efficiency

2.3 유속과 차압 관계에 대한 이론

필터를 투과하는 공기는 공기의 점성력, 섬유와의 마찰 등 여러 요소에 의해 공기가 유입되는 위치와 배출되는 위치 사이에 압력 손실이 발생하며 이러한 압력 차이를 차압이라 한다. 차압은 호흡 보호구 착용자의 호흡 용이성과 HVAC (heating, ventilation, air-conditioning) system의 에너지 소모를 결정짓는 중요한 요소[42-45]이기에 차압은 입자 포집 효율과 더불어 중요한 성능 인자이다. 유속은 차압을 결정하는 여러 요인 중 하나이며 높은 상관관계를 지닌다. 일반적으로 필터로 유입되는 공기의 유속이 높을수록 차압이 증가하는 경향성이 나타난다 (Figure 2). 이는 다공성 매질을 투과하는 유체의 흐름에 관한 Darcy's law에 의해 설명된다.

Darcy's law에 따르면, 층류 (laminar flow) 상태의 유체가 다공성 매질을 투과하는 경우 차압은 면속도 (face velocity)에 따라 일정하게 증가한다[67]. 섬유로 구성된 필터는 많은 수의 pore가 존재하기에 다공성 매질의 특성과 함께 유입되는 공기의 레이놀즈 수(Reynolds number)[1)]는 대체적으로 층류의 범위에 속하여 필터에 발생하는 차압은 유입되는 공기의 유속 (면속도)에 따라 linear 한 상승 경향성을 보인다[68]. 따라서, 두 유속에서 발생하는 차압을 확인하여 기울기를 구하면 유속에 따른 차압 예측식을 구하는 것이 가능하다. 다만, 필터를 구성하는 pore의 크기 및 수는 각기 다르기 때문에 유속에 따른 차압의 증가 기울기는 필터마다 다를 수 있다. 또한, 고체 입자를 장시간 여과한 필터는 입자에 의해 pore가 clogging이 되어 초기와 다른 다공성 매질의 특성을 지니게 된다. 본 연구에서는 다양한 유속에서 발생하는 필터의 차압을 초기 차압에 한정하여 확인하였다.

---

1) Reynolds number (Re)=Inertial force (관성력)/Viscous force (점성력)
유체의 관성력과 점성력의 상대적인 비중을 나타내는 무차원 수 (단위가 존재하지 않는 물리량)이다. 층류 (laminar flow)는 유체의 점성력이 지배적이며, 난류 (turbulent flow)는 유체의 관성력이 지배적인 상태를 의미한다.

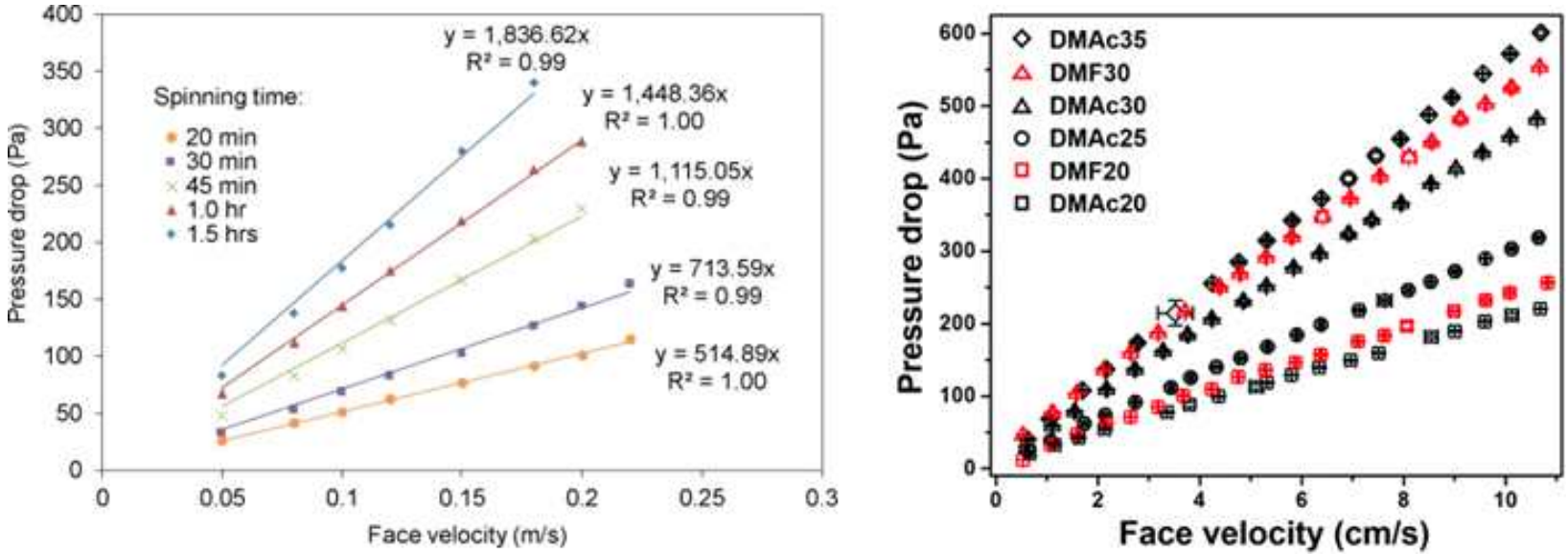


Figure 2. Two examples of linear increase of pressure drop by face velocity[69.70].

2.4 입자 종류에 따른 투과율 및 차압 거동

일반적으로 필터의 성능은 필터 내부로 유입되는 전체 입자량에서 투과하는 양을 비율로 나타낸 투과율(% penetration) 또는 여과 효율(100%-% penetration)과 공기가 유입되는 위치의 압력 (P_1)과 배출되는 위치의 압력 (P_2) 차이인 차압 (Pressure drop=P_1-P_2)으로 나타난다(Figure 3). 지속적인 여과 과정에서 입자의 종류에 따라 투과율과 차압의 거동은 다르게 발생한다.

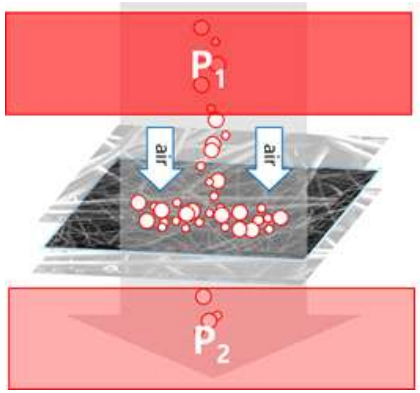
유성 에어로졸이 필터에 포집되는 경우, 섬유 표면에서 유성 에어로졸이 점차 spreading 되어 pore을 지나 투과율이 상승하는 경향성을 보인다. 섬유 표면에 소수처리를 하여 표면 에너지를 낮추면, 유성 에어로졸의 spreading을 낮춰 장시간 낮은 투과율을 유지할 수 있다는 장점을 지닌다[71]. 필터의 pore가 막히지 않고 spreading된 유성 에어로졸이 투과하기 때문에, 장시간 여과 후 차압은 초기 차압과 비교하여 크게 변하지 않는다는 특징을 보인다[72, 73].

정전처리된 필터에 포집되는 고체 입자는 입자가 섬유 표면을 덮어 정전기적 인력을 감소시키기 때문에, 투과율이 점차 상승한다. 최대 투과율 (maximum penetration)에 도달한 이후, 포집된 입자는 필터의 pore을 clogging하여 입자가 투과할 수 있는 공간이 감소하여 투과율이 감소한다. 물리적 여과 메커니즘으로 입자를 포집하는 필터의 경우, 초기부터 clogging이 발생하여 차압이 빠르게 상승한다. 공기가 투과할 수 있는 pore의 공간이 줄어들기 때문에 최대 투과율이 발생하는 clogging point에서 차압이 급속도로 상승하는 경향성을 보인다[71]. 입자 종류에 따른 투과율, 차압 변화에 대한 비교 그래프는 Figure 4과 같다.

위와 같은 이유로, 필터의 사용 수명은 입자 종류에 따라 다른 인자로 결정 할 수 있다. 유성 에어로졸의 경우 차압은 낮게 유지되기에 투과율이 일정 수치 이상 상승하는 시점을 필터의 사용 수명으로 볼 수 있다. 고체 입자는 투과율이 점차 낮아지면서 여과 효율은 상승하기 때문에, 차압을 필터 사용 수명의 기준으로 보는 것이 적절하다.

고체 입자를 여과하는 필터의 사용 수명을 증가시키기 위해서는 차압 증가를 늦추는 것이 필요하다. 동일한 양의 입자가 분사되었더라도, 포집된 입자의 거동 형태에 따라 차압 결과에 상이한 차이를 보인다. 고체 입자가 필터 표면에서 여과되는 surface filtration 현상이 발생하는 경우, 유입되는 공기의 흐름을 방해하여 차압이 빠르게 상승하는 반면, 입자가 필터 내부로 유입되어 고르게 분포되어 여과되는 depth filtration 현상이 나타나는 경우 차압의 증가가 천천히 발생한다[74]. 나노 섬유로 구성된 웹은 높은 여과 성능을 보이는 장점이 있다. 그러나, 필터의 pore가 작아 공기의 흐름에 부정적인 영향을 줄 뿐만 아니라 입자가 표면의 pore을 투과하지 못하고 surface filtration이 발생하여 차압이 빠르게 상승 할 수 있다는 단점이 존재한다.

따라서, 본 연구에서는 전기방사 웹과 상업용 필터의 depth filtration으로 고체 입자 여과에 대한 차압 증가를 낮춰 장시간 사용이 가능한 고효율 저차압 필터를 디자인 하고자 한다.



차압 *(Pressure drop)*

$= Pressure\ of\ P_1 - Pressure\ of\ P_2$

투과율 *(Penetration)*

$$= \frac{\text{Amount of penetrating particles}}{\text{Amount of loading particles}} \times 100(\%)$$

Figure 3. Schematic image of pressure drop and penetration.

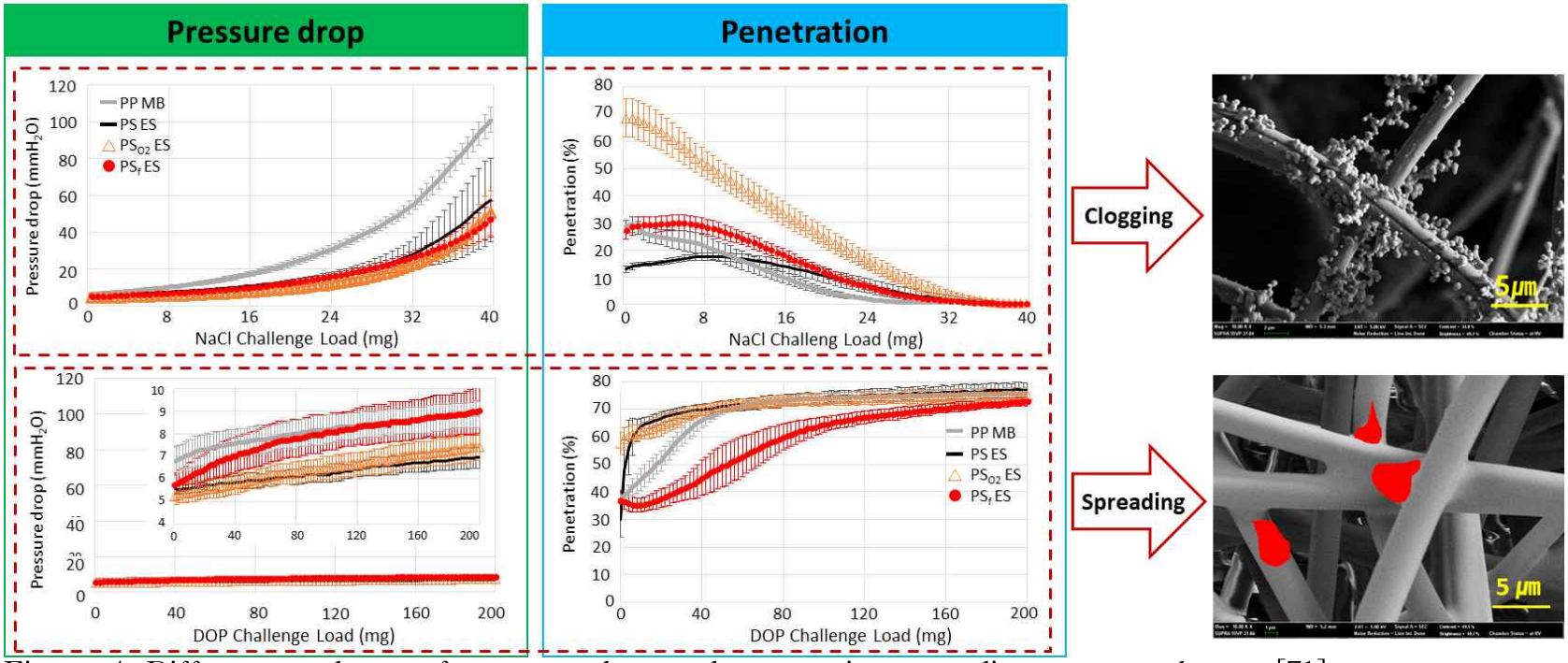


Figure 4. Different tendency of pressure drop and penetration according to aerosol types[71].

2.5 섬유 형태와 기공에 따른 차압 효과

웹을 구성하는 섬유 형태는 웹의 인장강도, 표면 거칠기, 두께 등 물리적인 특성에 영향을 미친다[70]. 특히, 다공성 매질의 성질을 결정하는 웹의 기공 크기는 섬유 직경과 형태에 영향을 받는다. 일반적으로 나노섬유는 작은 섬유 직경으로 인하여 일정 평량에서 섬유 사이 간격이 좁아지는 경향이 있다. 따라서 웹 내부에서 섬유가 차지하는 비율(packing density)이 높고 작은 크기의 기공을 형성하기 쉬워 HEPA (high efficiency particulate air) filter에 적합하지만, 공기의 유입과 흐름이 원활하게 이루어지지 않아 높은 압력이 발생한다는 단점이 존재한다[76]. 마이크로섬유는 같은 평량의 나노섬유와 비교하여 섬유 사이 간격이 넓어 비교적 큰 기공을 형성할 수 있으며, 이는 필터로 적용할 경우 공기 흐름을 원활이 하여 차압을 감소시키는 효과가 있으나, 투과율 또한 높아 질 수 있다는 단점이 존재한다 (Figure 5).

이론적으로, 나노섬유의 직경이 공기 분자의 평균 자유 경로[2] (Mean free path molecules) 65.3 nm (25 ℃, 1 atm 기준)와 근접할수록 섬유와 공기 사이의 압력이 감소하는 현상이 발생하며 이를 slip effect라 한다[32]. 직경 60~100 nm 크기의 나노섬유를 지나는 공기는 무작위 운동(random motion)에 의하여 점성력이 감소한다. 이로 인하여, 공기의 유동 방향과 섬유에 발생하는 항력 (drag force)이 낮아져 마찰에 의한 운동 에너지 손실이 줄어들어 공기의 속도가 증가하고 압력이 낮아지는 결과를 보인다 [77]. 그러나, 이러한 현상은 단일 섬유 또는 인접한 섬유와

---

2) 기체 분자가 다른 분자와 충돌하기 전까지 이동하는 평균 거리를 의미한다. 공기 분자의 평균 자유 경로는 다음 식을 통해 계산된다.

Mean free path = $(K \times T)/(\sqrt{2} \times \pi \times d^2 \times P)$

K=Boltzmann constant

d=Signifies the feective diameter of air molecules

T=Temperautre of air

P=Standard atmospheric pressure

충분한 거리 (>3.5 ㎛)가 존재하는 경우에 발생한다. 실제 나노섬유로 구성된 웹은 섬유들이 밀집되어 있기에 slip effect가 발생하기에는 어려움이 있다. 나노섬유 웹에서 형성된 작은 기공은 큰 기공에 비해 동일한 유량에서 공기가 높은 유속으로 이동하며[3] 이로 인하여 필터에 높은 압력을 초래한다. 따라서, 웹에 발생하는 차압은 기공 크기에 영향을 받으며 웹의 기공 크기는 섬유 형태에 따라 상이한 차이를 보인다.

직경이 큰 마이크로섬유는 면적 당 섬유 수 (number of fibers per unit area)가 나노섬유에 비해 적은 경향을 보인다[78]. 섬유 간 간격이 가까운 나노섬유는 마이크로섬유에 비해 높은 packing density와 작은 크기의 기공을 형성한다. 이로 인하여, 나노섬유로 구성된 웹은 마이크로섬유 웹에 비해 높은 차압이 발생할 가능성이 높다.

Gao et al. [36]의 연구에서는 PAN 나노섬유 (fiber diameter ~139 nm)와 microsphere (diameter ~658 nm)을 여러 비율로 동시에 방사하여 intermingled 된 웹을 제작하였다. 나노섬유로만 구성된 웹은 작은 기공 (1.17 ㎛)을 형성하였으며, 동시 방사된 microsphere의 비율이 높아짐에 따라 기공 크기 (1.69 ㎛)가 증가하였고 공극률 (porosity) 또한 높아진 결과를 보였다. 나노섬유는 웹의 골격을 구성하여 높은 여과 효율을 보였으며, 나노섬유 대비 직경이 큰 microsphere의 나노섬유 사이에 위치하여 빽빽하게 밀집된 섬유 사이 간격을 늘리는 역할을 수행하여 기공와 공극률을 늘려 단일 나노섬유 웹에 비해 차압을 감소시키는 결과를 보였다 (Figure 6a).

낮은 농도의 용액은 분자간 힘 (intermolecualr force)가 충분하지 않아 전기방사 과정에서 전기적 반발력에 의한 Coulombic stretching force와 고분자 사슬간의 얽힘 (macromelecualr entanglement)에 의한 retractive force의 불균형으로 인하여 직쇄상의 섬유가 구 형태의 비드 (bead)와 공존하는 bead-on-string의 이형섬유가 방사된다[18]. Bead-on

---

3) Bernoulli's equation

Q (유량)=V (속도)×A (면적)

유체의 유속을 기공 크기에 비례한다.

-string에 존재하는 비드는 섬유에 비해 직경이 큰 구 형태를 보이는 특성 때문에, 웹 내부에서 인접한 섬유 사이의 간격을 유지하는 역할을 수행하여 기공 크기와 porosity를 증가시켜 공기의 흐름이 원활하게 이루어져 차압을 낮추는 결과를 보였다[25].

Fan et al.[31]의 연구에서 여러 종류의 용매를 혼합한 용액을 전기방사한 연구에서 용매 별 증발 속도가 다르기 때문에, 일반적인 원통형의 섬유와 달리 납작하고 회전이 있는 형태의 섬유 (ribbon morphology)가 제작되었다. Self-curved ribbon morphology 형태의 섬유로 제작된 웹은 일반적인 섬유 웹과 비교하여 porous한 기공 특성을 지녔으며 이로 인하여 차압 감소에 긍정적인 결과를 보였다 (Figure 6b).

위와 같은 선행 연구 결과를 바탕으로 공기가 투과하는 통로 역할을 수행하는 기공은 섬유 형태에 따라 다양하게 변화하며 차압에 영향을 주는 것을 확인 할 수 있다. 또한, 기공의 크기는 웹에 유입되는 입자의 포집 거동에 영향을 주어 막힘 (clogging)에 의한 차압 증가를 결정짓는 중요한 요소로 작용한다.

웹의 기공이 작을 경우, 입자는 웹 표면에 포집되는 surface filtration 형태를 보이며, 입자가 표면에 쌓여 clogging이 발생해 공기의 유입을 막아 빠른 차압 상승을 발생시킨다. 적정 크기의 기공을 지닌 웹은 입자가 웹 내부로 침투하여 포집되는 depth filtration 형태를 보이며 surface filtration에 비해 입자에 의한 기공의 막힘이 늦게 발생하여 차압 상승이 느리게 발생한다. 섬유 직경과 기공 크기가 상이한 여러 종류의 웹을 함께 사용하여 다층 필터를 제작하는 경우[34, 80], 기공이 큰 순서로 웹을 배치하여 유입되는 입자를 크기에 따라 순차적으로 여과하여 surface filration 대신 depth filation을 효율적으로 발생시켜 빠른 차압 상승을 방지 할 수 있다 (Figure 6c).

다양한 형태의 섬유와 기공구조를 이용하여 필터소재의 차압을 낮추고자 하는 연구들이 진행되어 왔다. 본 연구에서는 필터의 차압에 영향을 주는 요소들을 통합적으로 적용하여 지속적인 입자 포집 과정에서 낮은 차압을 유지하는 필터 디자인을 제작하고자 한다.

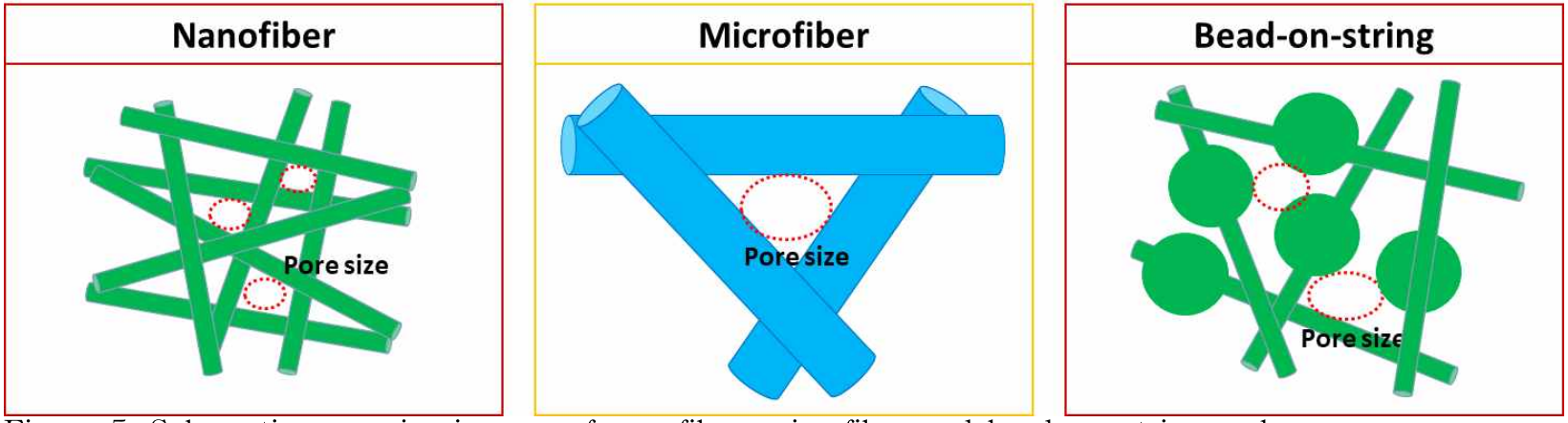


Figure 5. Schematic pore size images of nanofiber, microfiber and bead-on-string webs.

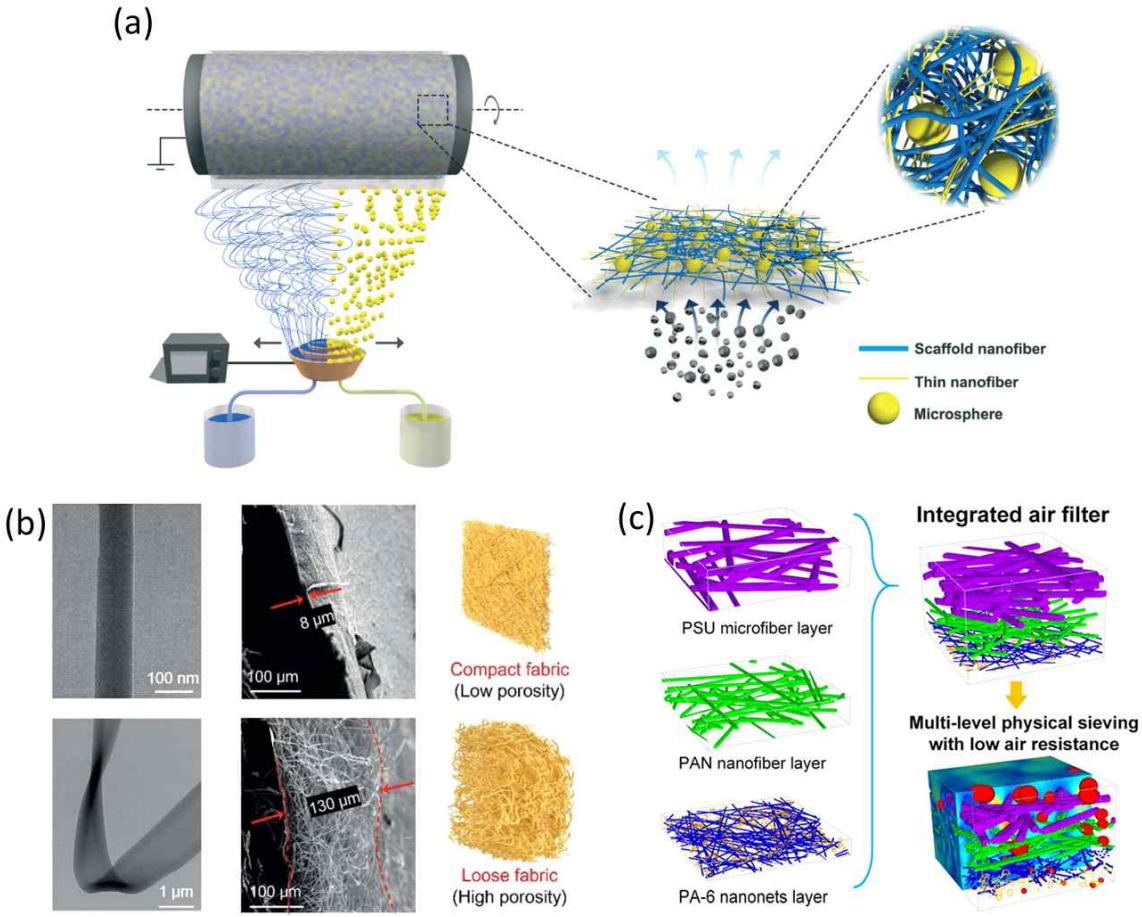


Figure 6. The previous studies of electrospun web with low filtration resistance (a) 3D composite membrane with nanofiber and microsphere[36] (b) Ribbon-like fiber[31] (c) Multilevel air filter[34]

제 2 장 실 험

제 1 절 시료 및 시약

전기방사 용액 제조를 위해 polystyrene (PS), polyacrylonitrile (PAN) 고분자를 사용하였다 (Sigma-Aldrich, U.S.A). 고분자를 용해시키기 위한 유기용매는 N,N-dimethylformamide (DMF, Fisher Scientific, U.S.A)와 tetrahydrofuran (THF, Daejung, Korea)를 사용하였다. Sodium chloride (NaCl, Daejung, Korea)은 여과 성능 테스트에 사용되는 2% NaCl 용액 제조에 사용하였다. 폴리프로필렌 (PP) 스펀본드 부직포 (Gaurdman, Korea)는 전기방사 웹의 여과 성능 테스트를 위한 커버웹으로 사용하였다.

상업용 필터로 polypropylene (PP) 멜트블로운 (MB) 정전필터를 사용하였다. 상업용 필터 사이에 일정한 간격의 공기층을 유지하기 위하여 두께 5 mm, 직경 71.4 mm 원형 구멍 (surface area 40 cm^2)을 뚫은 아크릴 플레이트를 제작하였다.

제 2 절 전기방사 웹 제작

1.1 전기방사 용액 제조

용액 농도는 전기방사 공정에서 섬유 형태에 영향을 미치는 요소이기 때문에 PS, PAN 고분자를 다양한 농도의 용액으로 준비하였다. PS 고분자는 DMF와 THF를 1:1 비율로 혼합한 용매에 10, 12, 14, 16 w/v % 농도로 용해하였다. PAN 고분자는 DMF 용매에 8, 9, 10, 11 w/v % 농도로 용해하였다. 모든 용액은 상온에서 최소 24시간 이상 용해하여 준비하였다.

2.2 전기방사 섬유 제조

준비된 PS, PAN 용액은 각각 22 게이지 (외경 0.72 mm, 내경 0.41 mm), 25 게이지 (외경 0.51 mm, 내경 0.26 mm) 금속 노즐 시린지에 주입되어 22±2 °C, 23±3 %RH 환경온습도 조건에서 전기방사 장비 (ESR200D, NanoNC, Korea)에 장착하였다. 고분자 용액 토출량은 3 mL/h로 설정되었다. 노즐과 콜렉터의 간격은 8 cm로 고정하고 콜렉터는 PP 스펀본드 커버웹으로 감싼 후 100rpm으로 회전하였다. 전기방사 섬유의 약한 강도를 보강하기 위하여 PP 스펀본드 커버웹 위에 적층하여 방사하였다. 고전압 발생 장치는 노즐에 직접 연결되어 전압은 섬유 직경 및 형태를 일정하게 방사하기 위하여 조절되었다. PS 용액은 각 농도 마다 15 kV, 20 kV 전압이 일정하게 부가되었다. PAN 용액은 농도에 따라 8, 9 w/v %는 18 kV, 10 w/v %는 16 kV, 11 w/v %는 14 kV 전압을 가하여 섬유를 방사하였다. 제작된 전기방사 웹은 잔류하는 용매를 증발시키기 위하여 상온에서 24시간 동안 자연건조되었다. 방사된 전기방사 섬유의 형태와 직경은 다음과 같다 (Figure 7, Table 1).

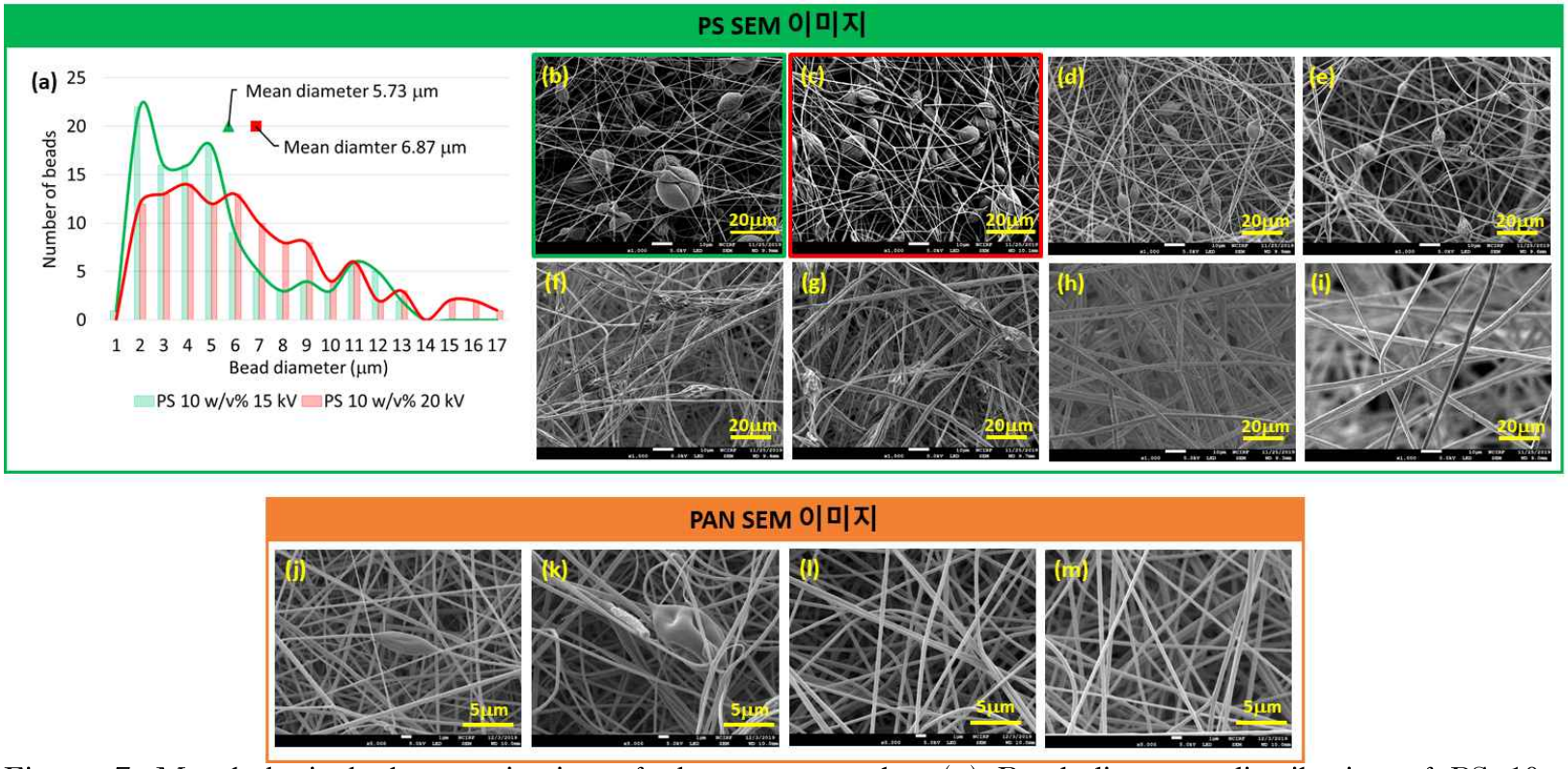


Figure 7. Morphological characterization of electrospun webs. (a) Bead diameter distribution of PS 10 w/v % 15 kV and 20 kV, (b~i) PS electrospun webs produced by (b) 10 w/v % 15 kV, (c) 10 w/v % 20 kV, (d) 12 w/v % 15 kV, (e) 12 w/v % 20 kV, (f) 14 w/v % 15 kV, (g) 14 w/v % 20 kV, (h) 16 w/v % 15 kV, (i) 16 w/v % 20 kV. (j~m) PAN electrospun webs produced by (j) 8 w/v % 18 kV, (k) 9 w/v % 18 kV, (l) 10 w/v % 16 kV, (m) 11 w/v % 14 kV

Table 1. Morphology of electrospun web with varied electrospinning conditions

	Conc. (w/v%)	10		12		14		16	
PS	Applied voltage (kV)	15	20	15	20	15	20	15	20
	Fiber diameter (㎛)	0.43 (±0.07)	0.46 (±0.06)	0.65 (±0.09)	0.83 (±0.12)	1.05 (±0.15)	1.24 (±0.24)	2.21 (±0.27)	2.92 (±0.29)
	Bead diameter (㎛)	5.73 (±3.10)	6.87 (±3.53)	4.64 (±1.53)	5.60 (±1.63)	4.45 (±0.76)	5.54 (±0.76)	-	
PAN	Conc. (w/v%)	8		9		10		11	
	Applied voltage (kV)	18		18		16		14	
	Fiber diameter (㎛)	0.24 (±0.03)		0.31 (±0.03)		0.36 (±0.03)		0.40 (±0.04)	
	Bead diameter (㎛)	4.54 (±2.54)		3.61 (±1.36)		-			

Note. The process conditions that produce microbeads, microfibers and nanofibers were highlighted and those morphological features were chosen for further investigation.

제 3 절 멜트블로운 필터 레이어 구조

본 실험에서 사용된 상업용 MB 필터의 특성은 다음과 같다 (Table 2). 다층 구조는 필터 레이어 수, 레이어 사이 간격을 달리하여 실험하였다 (Table 3). 필터 구조는 control 조건으로 단일 레이어 (1-Layer)를 설정하였다. MB 필터 2장 (2-Layer), 4장 (4-Layer)을 별도의 구조물 없이 겹쳐서 사용한 조건을 각 레이어 사이 간격 0 mm gap으로 설정하였다. 두께 5 mm의 아크릴 플레이트 구조물을 레이어 사이에 삽입하여 5 mm의 공기층을 띄운 구조를 제작하였다 (Figure 8).

Table 2. Characteristics of meltblown filter

	Meltblown filter web (MB)
Material	Polypropylene
Basis weight (g/m^2)	34 (±3)
Thickness (mm)	0.28 (±0.03)
Solidity (unitless)	0.133
Porosity (%)	86.7
Mean fiber diameter (㎛)	2.6 (±1.1)

Table 3. Test variables

		0 mm gap		Air gap (5 mm)	
Face velocity (cm/s)		15	20	15	20
No. MB layers	1-Layer (control)	O	O	-	-
	2-Layer	O	O	O	O
	4-Layer	O	O	O	O

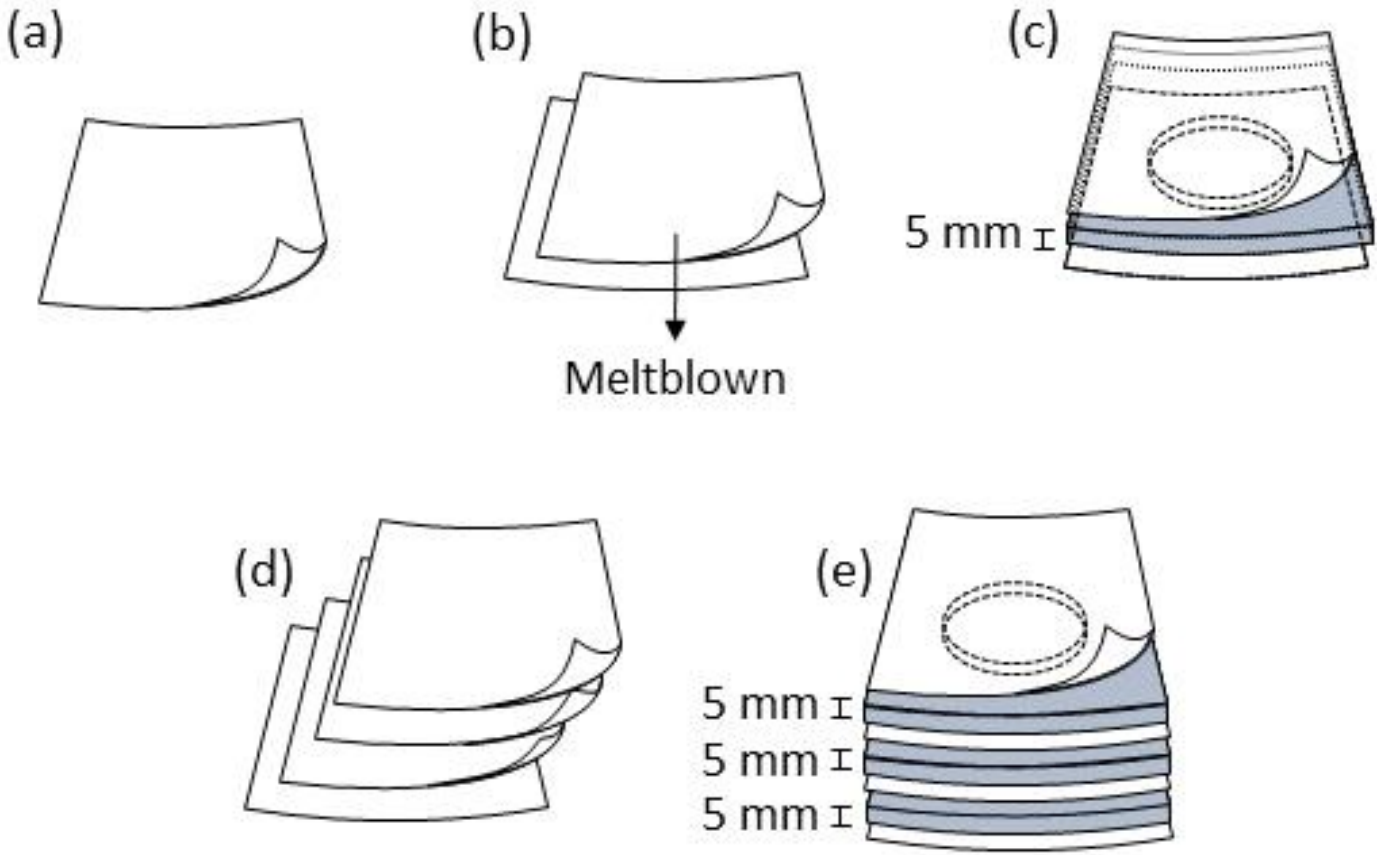


Figure 8. Experimental set-up for layer construction (a) 1-Layer (control) (b) 2-Layer (0 mm gap) (c) 2-Layer (Air gap) (d) 4-Layer (0 mm gap) (e) 4-Layer (Air gap)

제 4 절 웹 특성 및 여과 성능 평가

4.1 섬유 웹 특성 분석

백금 코팅기 (108auto, Gressington Scientific Inc., U.K)를 이용하여 20 mA, 120초 동안 웹 표면을 백금 코팅 후, 주사전자현미경 (FE-SEM, JSM-7800F, JEOL Ltd., Japan)을 통해 섬유의 형태를 분석하였다. 섬유 및 비드 직경은 촬영된 SEM 이미지를 ImageJ 프로그램을 이용하여 측정하였다. 전기방사 웹 두께와 레이어 사이의 미세한 간격은 제작된 웹을 단면으로 잘라 SEM 이미지를 촬영하여 측정되었다. 전기방사 웹은 capillary flow porometer (CFP-1500AE, Porous Materials Inc., U.S.A)를 이용하여 기공 크기 분포도를 측정하였다. 상업용 필터 단일 레이어 두께는 다이얼 인디케이터 (2046F, Mitutoyo, Japan)으로 측정하였다. 식 (1)과 (2)를 통하여 전기방사 웹과 상업용 필터의 solidity, porosity가 계산되었다.

$$\text{Solidity} = m/(a \times t \times d) \quad (1)$$

$$\text{Porosity}(\%) = (1 - \text{solidity}) \times 100(\%) \quad (2)$$

m (g): 웹 무게

a (cm^2): 웹 면적

t (mm): 웹 두께

d (g/cm^3): 고분자 밀도 (PS-1.04 g/cm^3, PAN-1.184 g/cm^3, PP-0.91g/cm^3)

4.2 필터 여과 성능 평가

4.2.1 입자 분사량

여과 성능 평가에 사용된 NaCl 입자 직경은 count median diamter (CMD)~ 0.075 μm, mass mean diameter (MMD)~ 0.26 μm으로 MPPS (most penetrating particle size)에 속하는 크기가 사용되었다. 단위 부피당 입자 질량 농도 (mass concentration)은 25±1 mg/m^3 로 생성되었으며, aerosol neutralizer을 거쳐 중성 입자로 분사되었다. US National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) 42CFR part 84 테스트 방법에 따라 입자를 지속적으로 분사하는 로딩 테스트 (loading test)를 진행하였다. 분사된 입자의 양 (loading mass, mg)는 테스트 시간 (T, min), 입자 질량 농도 (Mass concentration, mg/m^3), 유량 (L/min)을 통하여 계산되었다 (식 3). 필터 사용 환경 조건에 따라, 시간당 분사되는 입자의 양이 다르기 때문에 본 연구에서는 테스트 시간 대신 분사된 입자의 양에 따른 필터의 성능 변화를 나타내었다.

Loading mass (mg)

$$= \text{T (min)} \times \text{Mass concentration (mg/m}^3) \times \left(\frac{Flow\ rate\ (L/\min)}{1000} \right) \qquad (3)$$

4.2.2 여과 테스트 조건

필터 웹이 지니는 여과 성능을 파악하기 위하여 TSI 8130 (TSI Inc., U.S.A)을 이용해 NaCl 입자에 대한 입자 투과율 (%)과 차압 (Pa)을 측정하였다. 차압은 기기 측정 한계 상 최대 1471 Pa 까지 측정되었다. 전기방사 웹은 유효표면적 (effective surface area) 40 cm^2,로 고정되어 NaCl 입자에 대한 여과 테스트가 진행되었으며, 유량 (Flow rate) 34 L\min, 면속도 (face velocity) 14.2 cm/s 조건에서 입자를 최대 20 mg 로딩하였다. 멜트블로운 필터는 유효표면적 (effective surface area) 40 cm^2, 유량 (Flow rate)은 36, 48 LPM 조건으로 실험이 진행되었으며 각각의 면속도 (face velocity)는 15 cm/s, 20 cm/s에서 입자를 최대 30 mg 로딩하였다. 각 필터의 quality factor (QF)을 식 (4)를 통해 계산하여 차압 당 투과율을 비교분석 하였다.

$$\text{Quality factor } (\text{Pa}^{-1}) = \frac{-\ln(\%\,Penetration/100\%)}{Pessuredrop(Pa)} \qquad (4)$$

제 5 절 3D modeling & simulation

레이어 사이 미세 간극에 의한 차압 감소 효과를 확인하기 위하여 3D 모델링과 여과 시뮬레이션을 수행하였다 (Geodict software package, Math2Market GmbH, Germany)[4]. 실제 실험에서 제작된 마이크로섬유 전기방사 웹 (m-Fiber)을 기본 형태로 모델링을 진행하였으며 실제 섬유 직경, 웹 두께를 반영하여 단일레이어와 레이어 사이 간극이 존재하는 모델을 제작하였다. 섬유는 hexahedral voxel (voxel length 0.2 ㎛)로 구성하였으며, 1000×1000×42 $㎛^3$ 크기의 단일 레이어 마이크로섬유 웹 (m-Fiber) 1종, 해당 웹을 1/2 두께로 잘라 레이어 사이에 1.6 ㎛, 5.0 ㎛, 10.0 ㎛ 간극을 부여한 3종 모델을 제작하였다. 3D 모델링을 통해 제작된 웹의 섬유 직경, 두께, 간극을 포함한 porosity 등 웹의 특성은 Table 4에 표기하였다.

실제 실험에서 진행된 유동 조건의 레이놀즈 수 (Reynolds number)을 고려한 Stoke's equation에서 계산된 유동 조건을 여과 시뮬레이션에 사용하였다. 유입되는 공기의 속도는 전기방사 웹 여과 테스트와 동일한 유속 14.2 cm/s으로 설정되었으며, 유입부에서 발생하는 압력과 배출부에서 발생하는 압력의 차이를 계산하여 차압 결과를 도출하였다. 시뮬레이션에 사용된 NaCl particle은 MMD ~0.5㎛, mass concentration 25 mg/m^3으로 제작되었으며 시간 당 실제 실험과 동일한 양의 입자를 분사하였다. 분사된 입자의 움직임은 Brownian motion에 따라 운동하도록 설정하였다.

섬유 직경, 웹 두께, 유속, 입자 농도, 시간 당 분사된 입자량 등 실제 실험 조건을 최대한 반영하여 시뮬레이션을 진행하였으며, 초기 차압이 동일한 값을 보임을 확인한 이후 로딩 테스트를 진행하였다.

---

4) 시험은 FITI시험연구원의 도움을 받아 진행되었다.

Table 4. Physical characteristics of modeling constructions

	m-Fiber single layer	m-Fiber dual layer 1.6 ㎛ gap	m-Fiber dual layer 5.0 ㎛ gap	m-Fiber dual layer 10.0 ㎛ gap
Fiber diameter (㎛)	2.28 (±0.37)	2.20 (±0.45)	2.20 (±0.45)	2.20 (±0.45)
Thickness (㎛)	10.0	11.6	15.0	20.0
Porosity (%)	71.0	75.1	80.8	85.7

제 3 장 결과 및 고찰

제 1 절 섬유 형태 및 구조에 의한 웹 성능 변화

1.1 섬유 형태에 따른 기공 분포

전기방사 웹을 구성하는 섬유는 전기방사 용액의 농도와 전압에 따라 다양하게 제작되었다 (Table 1). 농도와 전압에 따른 섬유 형태는 SEM 이미지를 통해 관찰되었다(Figure 6). 낮은 농도의 용액으로 방사된 섬유는 비드가 함께 형성된 bead on string의 형태를 보였다. 농도가 올라가면서 점차 비드의 수가 감소하고 섬유 두께가 증가하였다. PS 10 w/v %에서 가장 많은 수의 비드와 나노섬유가 발견되었으며 PS 16 w/v % 에서 비드가 없는 마이크로섬유가 형성되었다. PAN 10 w/v % 용액은 비드가 없는 나노섬유가 일정하게 방사되었다.

이후 실험을 위해 선정된 농도, 전압 조건의 PS와 PAN 전기방사 섬유, 비드 직경 분포 및 전기방사 웹의 pore size distribution을 분석하였다 (Figure 9). PAN 10 w/v % 16 kV 조건에서 방사된 섬유는 비드가 없는 나노섬유 (~0.36 ㎛) 형태를 지니고 있었으며 웹의 pore size는 1.27 ㎛로 나타났다 (n-Fiber). PS 16 w/v % 15 kV 조건에서 방사된 섬유는 비드가 없고 직경이 ~2.21㎛ 인 마이크로섬유이다 (m-Fiber). PS 마이크로섬유 웹은 50% 이상의 pore가 8.04 ㎛ 크기로 다른 웹에 비해 비교적 큰 pore size가 형성되었다. PS 10 w/v % 20 kV 조건에서 방사된 웹은 나노섬유(~0.46 ㎛)와 함께 직경이 큰 비드(~6.87 ㎛)가 함께 형성된 bead on string 구조를 보였다 (m-Bead). PS bead on string 웹의 pore size는 2.05 ㎛로 이는 직경이 큰 비드가 나노섬유 사이의 간격을 넓히는 역할을 수행하여 PAN 나노섬유 웹보다 큰 pore을 형성한 것으로 보인다. PAN 나노섬유 (n-Fiber), PS 마이크로섬유 (m-Fiber), PS bead on string (m-Bead)는 각각 섬유 직경과 형태의 차이로 pore structure가

상이한 필터 웹을 형성하였다.

전기방사 과정에서 다른 두 섬유를 1:1 비율로 동시에 방사하여 혼방된 웹을 제작하였다. 첫째, m-Fiber과 n-Fiber을 동시 방사한 섬유 웹(Fiber-mix)과 둘째, m-Bead와 n-Fiber을 동시 방사한 섬유 웹(Bead-mix)를 구성하였다. Fiber-mix과 Bead-mix의 pore size는 각각 2.6 ㎛, 1.95 ㎛이며 n-Fiber에 비해 큰 pore size를 형성하였다. 5 종류 섬유 웹은 모두 동일한 5 (±0.12) g/m^2 평량으로 제작되었다.

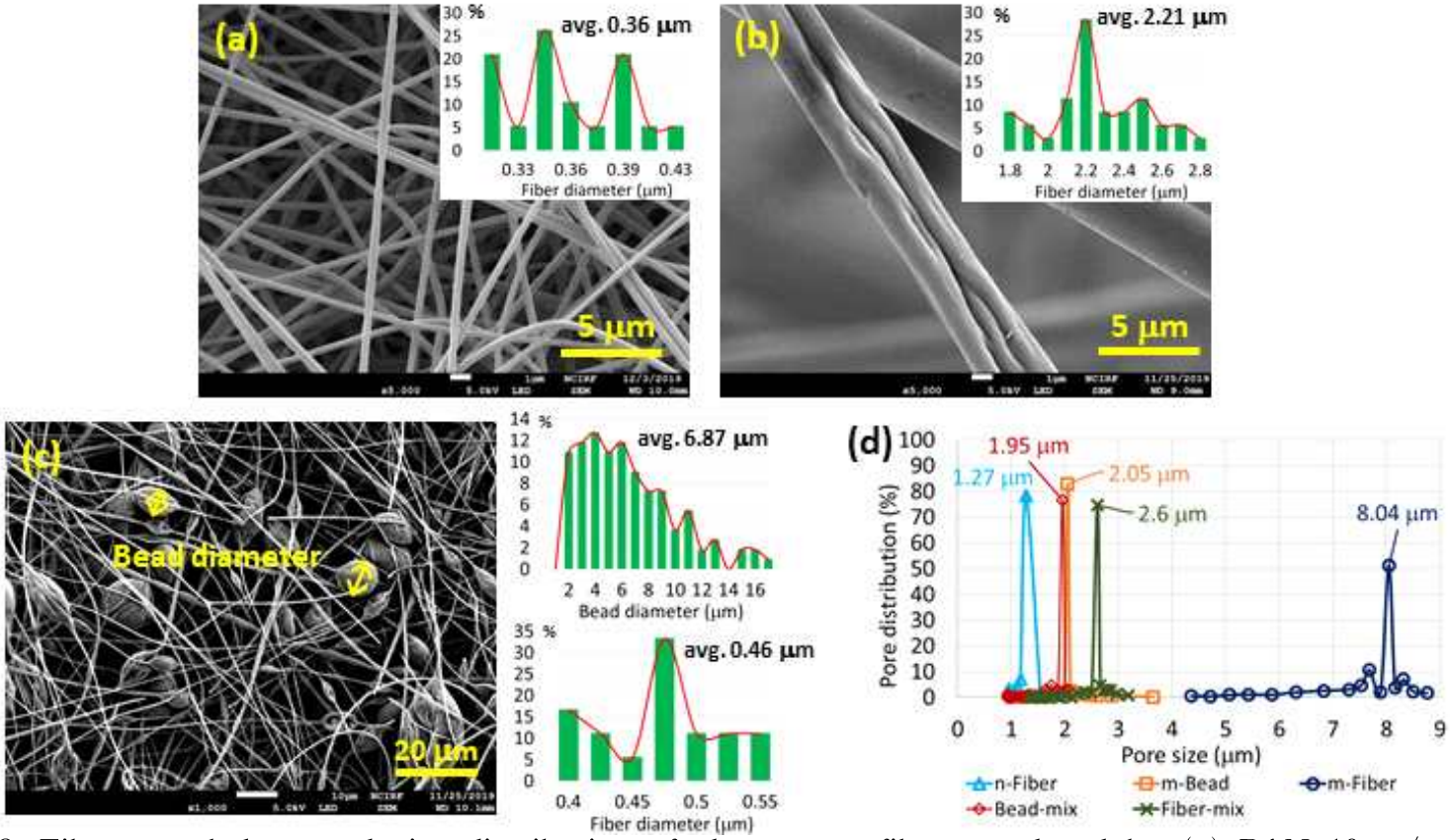


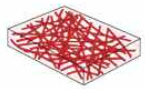
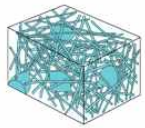
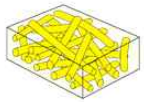
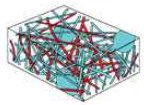
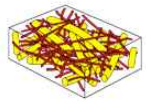
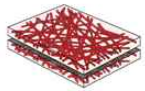
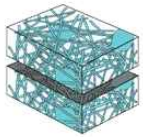
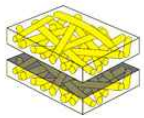
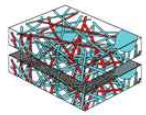
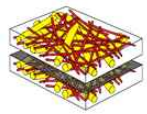
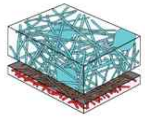
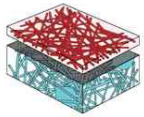
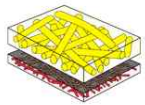
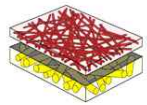
Figure 9. Fiber morphology and size distribution of electrospun fibers produced by (a) PAN 10 w/v % 16 kV, (b) PS 16 w/v % 15 kV, (c) PS 10 w/v % 20 kV, and (d) pore size distribution of a single layer web

1.2 전기방사 웹 구조 분석

1.2.1 웹 레이어 설정

5종의 섬유 웹 n-Fiber, m-Bead, m-Fiber, Bead-mix, Fiber-mix는 2.5 g/m^2 또는 5 g/m^2 평량으로 제작되었다. 평량 5 g/m^2 웹은 단일 레이어로 사용되었으며, 평량 2.5 g/m^2 웹은 두 장을 겹쳐 전체 평량이 5 g/m^2인 웹 구조로 사용하였다. 평량 2.5 g/m^2인 다른 두 웹을 함께 사용하여 다층 레이어 구조를 제작하였으며, n-Fiber과 m-Bead 웹의 배치 순서를 달리하여 (Up)m-Bead/(Down)n-Fiber, (Up)n-Fiber/(Down)m-Bead 두 구조를 제작하였다. n-Fiber과 m-Fiber 두 종류의 웹을 사용하여 (Up)m-Fiber/(Down)n-Fiber, (Up)n-Fiber/(Down)m-Fiber 구조를 제작하였다. 본 실험에서 제작된 14종의 웹 레이어의 특성은 Table 5에 나타내었다.

Table 5. Physical characteristics and schematic images of electrospun webs.

	n-Fiber	m-Bead	m-Fiber	Bead-mix	Fiber-mix
Web image					
Fiber diameter (㎛)	0.36	0.46	2.21	0.36/0.46	0.36/2.21
Bead diameter (㎛)	-	6.87	-	-	-
Basis weight (g/m^2)	5	5	5	5	5
Thickness (㎛)	5.46	18.54	10.94	10.96	10.00
Porosity (%)	22.7	74.1	56.06	59.0	55.0
	n-Fiber×2	m-Bead×2	m-Fiber×2	Bead-mix×2	Fiber-mix×2
Web image					
Basis weight (g/m^2)	2.5×2	2.5×2	2.5×2	2.5×2	2.5×2
Thickness (㎛)	2.73×2	9.27×2	5.47×2	5.48×2	5.00×2
	(Up)m-Bead (Down)n-Fiber	(Up)n-Fiber (Down)m-Bead	(Up)m-Fiber (Down)n-Fiber	(Up)n-Fiber (Down)m-Fiber	
Web image					
Basis weight (g/m^2)	2.5×2	2.5×2	2.5×2	2.5×2	
Thickness (㎛)	12.00	12.00	8.20	8.20	

1.2.2 섬유 형태에 따른 웹 내부 구조

단일 레이어 필터 중 m-Bead의 두께 (18.54 ㎛)는 동일한 평량인 n-Fiber의 두께 (5.46 ㎛)와 비교하여 3.4배 높은 가장 porous한 구조를 형성하였다. m-Bead 웹 단면 SEM 이미지를 통하여 마이크로크기의 비드가 나노섬유 사이 간격을 유지하는 구조물의 역할을 수행하여 웹의 두께가 증가해 porous한 구조를 형성함을 확인하였다 (Figure 10c). 반면, n-Fiber 웹은 나노섬유들이 빽빽하게 밀집하여 가장 낮은 두께와 porosity를 지니고 있었다 (Figure 10a). 마이크로섬유로 구성된 m-Fiber은 큰 섬유 직경으로 인하여 n-Fiber에 비해 약 2배 두꺼운 두께 (10.94 ㎛)를 형성하였다.

섬유 웹의 porosity는 마이크로비드가 존재하는 m-Bead가 75.1%로 가장 높았으며 n-Fiber와 m-Bead가 1:1 비율로 혼합된 Bead-mix가 59.0%로 두 번째로 높았다. 마이크로섬유로 구성된 m-Fiber는 56.06%, n-Fiber과 m-Fiber이 혼합된 Fiber-mix는 55.0%를 보였다. 나노섬유로 구성된 n-Fiber은 22.7%로 가장 낮은 porosity를 보였다 (Table 5). Bead-mix와 Fiber-mix는 나노섬유 (0.36 ㎛)가 상대적으로 직경이 큰 마이크로비드 (6.87 ㎛), 마이크로섬유 (2.21 ㎛)와 혼합되어 섬유 사이 간격이 증가해 porosity와 pore size가 커지는 효과가 나타났다.

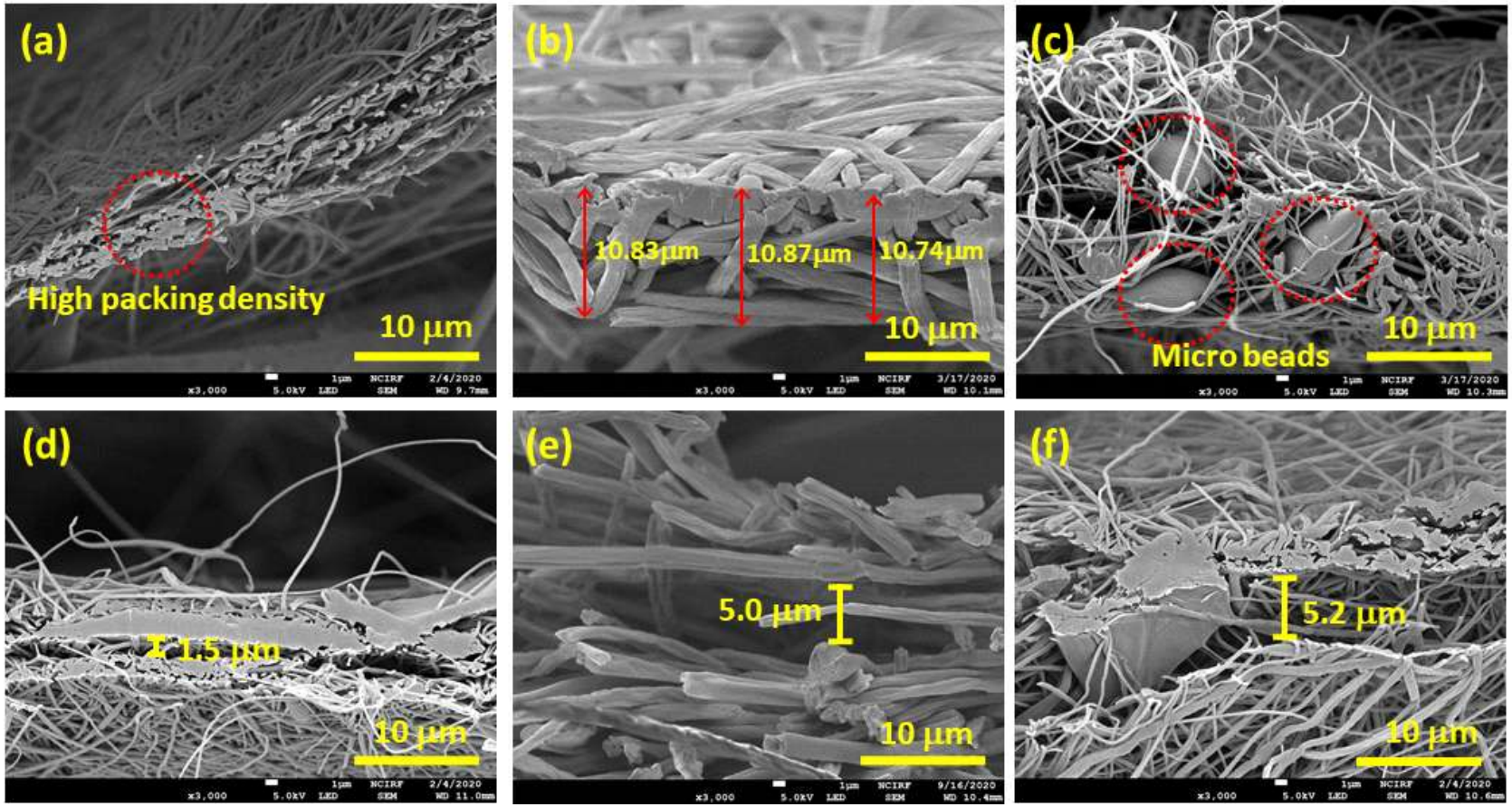


Figure 10. Cross-sections of the single layer (5 g/m^2) and the dual layer (2.5 g/m^2) webs. (a) n-Fiber, (b) m-Fiber, (c) m-Bead, (d) n-Fiber×2, (e) m-Fiber×2, (f) m-Bead×2

1.3 섬유 형태 및 레이어 구조에 따른 필터 성능

1.3.1 입자 투과율

Table 5에 제시된 14가지 전기방사 필터에 대한 여과 성능을 테스트하였다. 전기방사 웹의 약한 강성을 보안하기 위하여 양면에 PP 스펀본드 커버웹을 겹쳐 사용하였다. 커버웹은 투과율 99% 이상 차압 1 Pa 이하로 테스트 결과에 거의 영향을 미치지 않는 웹을 사용하였다. 여과 성능 테스트는 전기방사 필터에 NaCl 입자를 최대 20 mg 로딩하는 동안 발생하는 입자 투과율 (penetration), 차압 (pressure drop)을 기록하였다.

m-Fiber과 m-Fiber×2를 제외한 모든 전기방사 필터는 최대 입자 투과율이 3% 이하로 높은 여과 효율을 보였다 (Figure 11). 웹으로 유입된 입자와 공기는 웹의 기공을 통해 내부에서 이동하며, 입자는 섬유에 충돌하여 포집된다. 따라서, 기공이 큰 경우 입자가 섬유와 충돌하지 않고 웹 내부에서 이동할 수 있기 때문에, 일반적으로 기공이 작은 웹은 낮은 입자 투과율을 보인다.

n-Fiber은 최대 투과율이 0.01% 이하로 가장 높은 여과 효율을 보였으며, 이는 나노섬유로 인해 가장 작은 기공 크기 (1.27㎛)를 지닌 것으로부터 기인하였다. n-Fiber보다 기공 크기가 약간 큰 m-Bead, Bead-mix와 Fiber-mix는 입자 투과율이 조금씩 상승하였으나, 최대 투과율이 3% 이하로 우수한 여과 성능을 보였다. 반면, 마이크로섬유로 이루어진 m-Fiber과 m-Fiber×2 웹은 각각 최대 투과율이 22.13%, 14.06%로 다른 웹들에 비해 높은 초기 투과율은 보였으며, 입자들이 지속적으로 분사됨 따른 전체적인 투과율도 높은 값을 보이며 여과 효율이 다른 웹에 비해 낮은 결과가 나타났다. 이는 기공의 크기가 1~3 ㎛ 사이에 분포하여 낮은 투과율을 보이는 다른 섬유 웹이 비해 많은 양의 입자들이 통과하기 쉬운 약 3~6배 큰 기공에 의한 결과로 확인되었다.

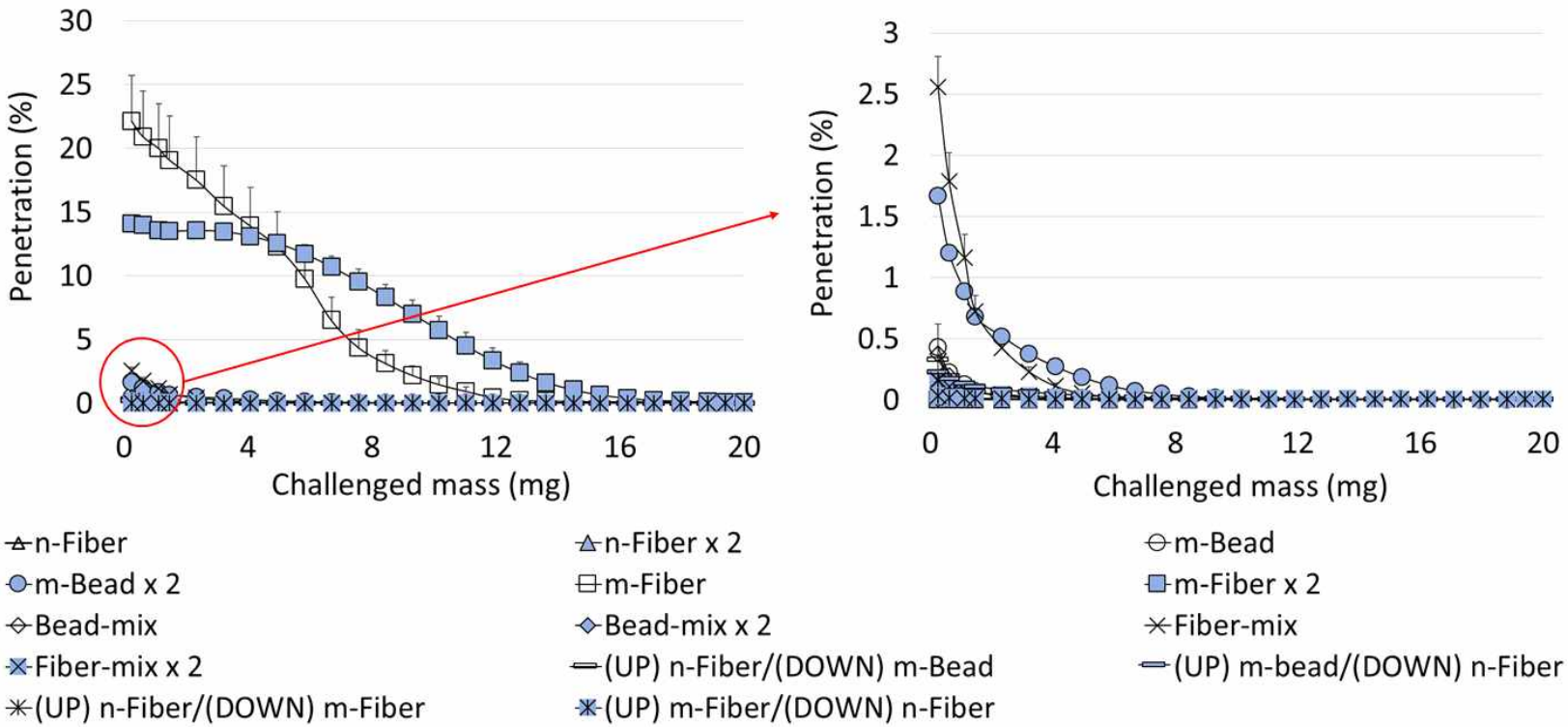


Figure 11. Penetration of NaCl particles during 20 mg of challenged mass. Left, penetration of all filter media, and right, enlarged for the circled area.

1.3.2 입자 로딩과 차압 변화

NaCl 입자를 최대 20 mg 로딩하는 동안 웹에 따라 차압거동은 상이하였다 (Figure 12). n-Fiber과 n-Fiber×2는 초기 차압이 각각 762 Pa, 726 Pa로 다른 웹에 비해 높은 값을 보였으며, NaCl 입자가 7.5 mg, 8.5 mg 분사된 이후 최대 차압인 1471 Pa에 도달하였다 (Figure 12a). n-Fiber은 나노섬유로 구성되어, 작은 크기의 기공을 지녀 낮은 투과율과 높은 여과 성능을 보였다. 다만, n-Fiber과 마찬가지로 낮은 투과율을 보인 m-Bead와 m-Bead×2의 초기 차압은 202 Pa, 171 Pa로 훨씬 낮은 값과 느린 차압 증가속도를 보였으며, 이는 증가된 기공 크기에 의한 것으로 보인다. 입자를 20 mg 로딩하는 동안 m-Bead가 n-Fiber에 비하여 최대 73.5% 낮은 값을 보였고, m-Bead×2 또한, n-Fiber×2에 비하여 ~76.5% 낮은 차압 값을 보였다. Figure 12에서 기공 크기가 큰 웹이 차압이 낮은 경향성이 확인되었다. 기공 크기가 가장 큰 m-Fiber, m-Fiber×2는 가장 낮은 초기 차압 (72 Pa, 64 Pa)을 보였으나, 투과율 또한 높은 결과를 보였다.

Bead-mix, Fiber-mix는 웹을 구성하는 두 종류의 웹의 평균 차압 보다 낮은 결과를 보였다. 예를 들어, Bead-mix의 초기 차압은 웹을 구성하는 m-Bead와 n-Fiber의 초기차압 (202 Pa, 762 Pa)의 평균인 482 Pa 보다 낮은 367 Pa로 나타났다 (Figure 12d). Fiber-mix 또한 마찬가지로 m-Fiber과 n-Fiber의 초기차압 (72 Pa, 762 Pa)의 평균인 417 Pa 보다 낮은 261 Pa을 보였다 (Figure 12e).

다른 두 종류의 필터를 겹쳐서 구조를 형성하는 경우, 공기가 들어오는 첫 번째 레이어의 pore size가 클 때 차압 감소 효과가 나타났다 (Figure 12f). 초기 차압은 레이어 구조와 상관없이 비슷한 값을 보였으나, 지속적으로 입자가 여과되는 과정에서 기공 크기가 큰 m-Bead, m-Fiber가 첫 번째 레이어로 사용될 때, n-Fiber이 첫 번째 레이어로 위치한 구조와 비교하여 차압 증가 속도가 낮은 것을 확인되었다. (UP) m-Bead/(DOWN) n-Fiber, (UP) m-Fiber/(DOWN) n-Fiber은 (UP)

n-Fiber/(DOWN) m-Bead, (UP) n-Fiber/(DOWN) m-Bead 보다 각각 최대 51.0%, 34.5% 낮은 차압 결과를 보였다. 이는 입자 포집 거동에 의한 clogging 발생 차이로 추측되었으며, 이후 웹의 기공 특성에 따른 입자 포집 거동을 분석하였다.

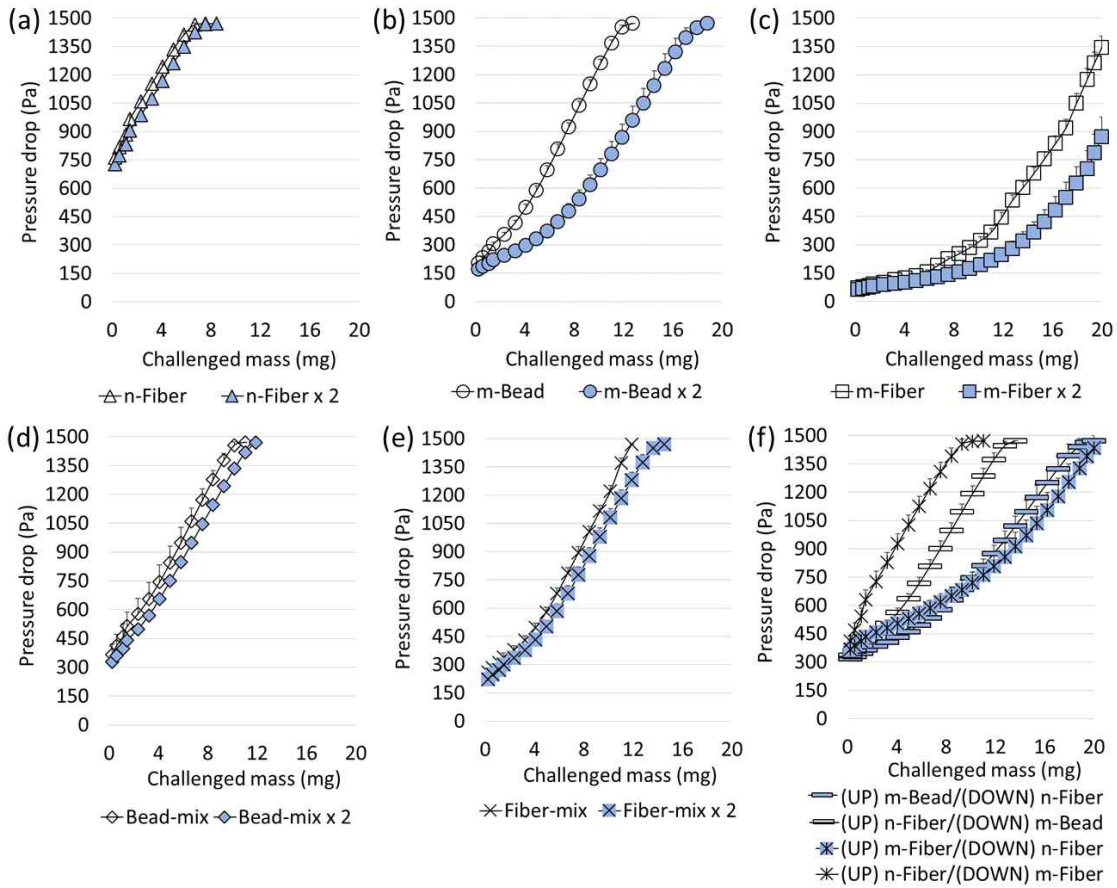


Figure 12. Build-up of pressure drop during 20 mg of NaCl mass loading. A single and a dual layer of (a) n-Fiber, (b) m-Bead, (c) m-Fiber, (d) Bead-mix, (e) Fiber-mix, (f) a dual layer consisting of different kind webs. Note. The maximum detection limit of pressure drop is 1471 Pa

1.3.3 차압 대비 여과 성능 분석

지속적인 입자 로딩에 따른 차압 대비 여과 성능을 비교 분석하기 위하여 quality factor (QF) 값을 계산하였다 (Figure 13). 입자가 지속적으로 로딩됨에 따라, 투과율은 하락하여 여과 효율은 상승하였으나 차압은 상승하여 모든 필터가 동일하게 QF 값이 낮아지는 경향성을 보였다.

n-Fiber는 여과 효율이 99.99% 이상으로 우수한 성능을 지녔음에도 불구하고 높은 차압으로 인해 가장 낮은 QF 결과가 나타났다. m-Bead는 단일 레이어 중 가장 높은 초기 QF (0.027 Pa^{-1})값을 보였으며 n-Fiber의 QF (0.012 Pa^{-1})보다 2배 이상 높은 수치가 확인되었다. m-Fiber 초기 QF는 0.021 Pa^{-1}로 차압은 가장 낮으나 높은 투과율로 인해 m-Bead에 비해 낮은 초기 QF 값을 보였다. 그러나, 입자가 5 mg 분사된 이후 낮은 차압으로 인해 m-Fiber과 m-Bead의 QF가 역전되는 결과가 나타났다. Bead-mix와 Fiber-mix는 n-Fiber에 비하여 전체적으로 높은 QF를 보였다. 2장이 겹쳐진 dual layer 구조는 단일 레이어 구조 보다 낮은 차압 결과를 보였으며, 이로 인하여 전체적인 QF가 단일레이어 구조에 비해 증가한 결과가 나타났다 (Figure 13b). 다른 두 종류의 웹이 겹쳐진 구조에서는 초기에 유사한 투과율과 차압을 보여 구조 별 QF가 비슷한 값을 보였으나, n-Fiber가 하부 레이어에 위치하고 m-Fiber, m-Bead가 상부 레이어에 위치하는 경우, 반대 구조에 비해 입자가 로딩됨에 따라 QF가 높은 결과를 보였다.

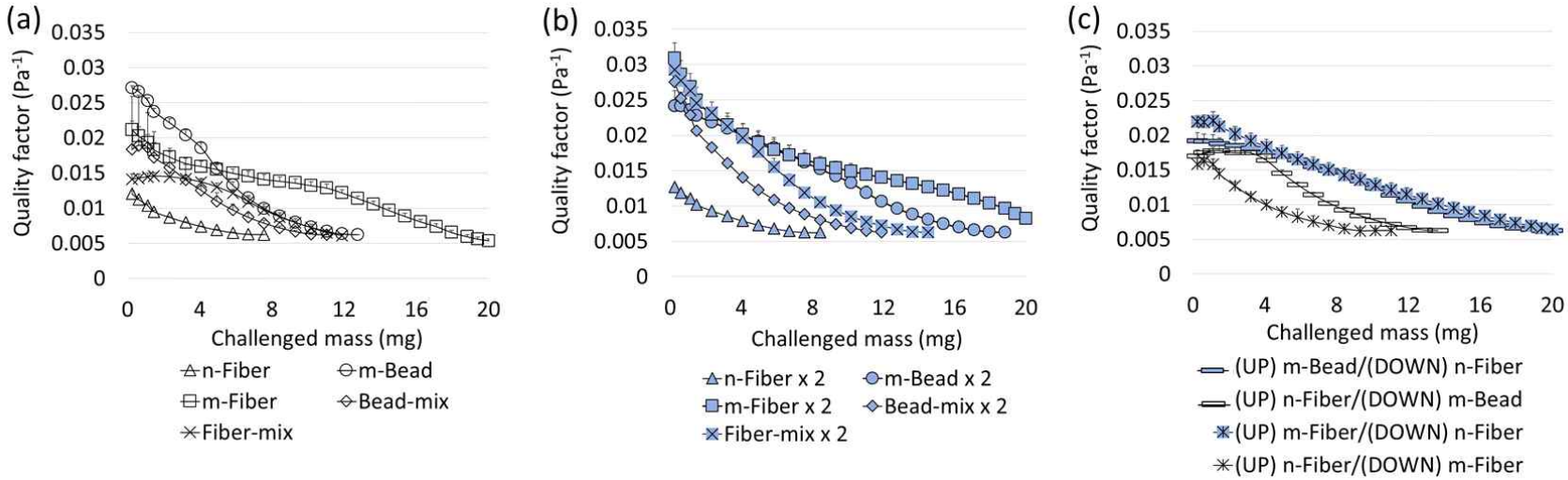


Figure 13. Quality factor of different filter constructions. (a) Single layer filter media with different fiber morphologies, (b) dual layer constructions consisting of the same kind webs, (c) dual layer constructions consisting of different kind webs

1.4 기공 크기와 차압 관계

웹 내부의 pore은 유입된 공기가 이동하는 통로 역할로 작용하기에 pore size는 차압에 직접적인 영향을 미치게 된다. 나노섬유는 부피 대비 넓은 표면적을 지니는 특징으로 인해 입자를 포집하기에 용이한 장점이 있다. 반면, 나노섬유 사이 공간이 좁은 밀집된 필터 구조를 이루며 작은 pore size로 인하여 차압이 높은 단점이 존재한다. n-Fiber은 섬유 직경 360 nm, 78%의 pore 가 1.27㎛로 가장 높은 여과 효율과 차압을 보였다 (Figure 9d). m-Bead는 pore의 80%가 2.05 ㎛이며, 이는 마이크로 직경의 비드 (6.86 ㎛)가 나노섬유 (460 nm) 사이에 간격을 늘리는 역할을 하여 높은 여과 효율과 낮은 차압을 보였다. 섬유 직경이 큰 m-Fiber (2.21 ㎛)는 pore size가 5-9 ㎛ 범위에 위치하며 8.04 ㎛ 크기의 pore을 50% 이상 지닌다. Bead-mix와 Fiber-mix는 n-Fiber에 m-Bead와 m-Fiber이 혼합되어 n-Fiber 대비 차압이 감소한 긍정적인 결과를 보였다 (Figure 12d, e). Bead-mix와 Fiber-mix는 80% 이상의 pore가 각각 1.95 ㎛, 2.6 ㎛이며 n-Fiber (1.27 ㎛)에 비해 pore size가 증가하였다.

1.5 섬유 형태와 입자 포집 거동

분사된 NaCl 입자가 전기방사 웹 내에서 포집된 거동을 확인하기 위하여 입자 로딩 전, 후 웹 단면 SEM 이미지를 촬영하였다 (Figure 14). n-Fiber은 작은 pore size로 인하여 대부분의 NaCl 입자가 웹 표면에 쌓여 있었다. 웹 내부로 침투하지 못한 입자는 웹 표면을 덮고 있으며 내부 pore는 막힘 없이 비교적 깨끗한 모습을 보였다. 웹 표면에 적층된 NaCl 입자로 인해 유입되는 공기의 흐름이 원활하게 이루어지지 않아 여과 시간이 길어질수록 차압 상승이 빠르게 발생한다. 따라서, n-Fiber은 다른 웹에 비해 높은 차압을 보이고 있다. 반면, m-Bead와 Fiber-mix는 포집된 입자들이 웹 내부에 위치함을 확인하였다. 마이크로비드와 마이크로섬유에 의해 증가된 pore size가 depth filtration을 효율적으로 발생시켜 dust holding capacity를 증가시켰다. 따라서, m-Bead와 Fiber-mix는 n-Fiber에 비해 입자로 인한 clogging이 지연되어 차압 상승 속도가 뒤늦게 발생함을 확인하였다.

Pore size가 다른 다층 구조로 제작되는 웹은 depth filtration 효과를 이용하여 필터 사용 수명을 증가시킬 수 있다. Pore size가 큰 웹을 상부에 위치시키고 pore size가 작은 웹을 하부에 위치시켜, 직경이 작은 미세 입자는 첫 번째 레이어를 투과하여 두 번째 레이어에서 여과됨에 따라 필터의 clogging을 늦춰 차압 감소 효과를 볼 수 있다 (Figure 12f). 입자 크기가 다양할 경우 위 효과는 더욱 크게 발생할 수 있을 것으로 보는데, 이 때에는 입자 직경에 따라 단계적인 여과가 이루어지기에 많은 입자를 포집하면서 낮은 차압을 유지할 수 있기 때문이다.

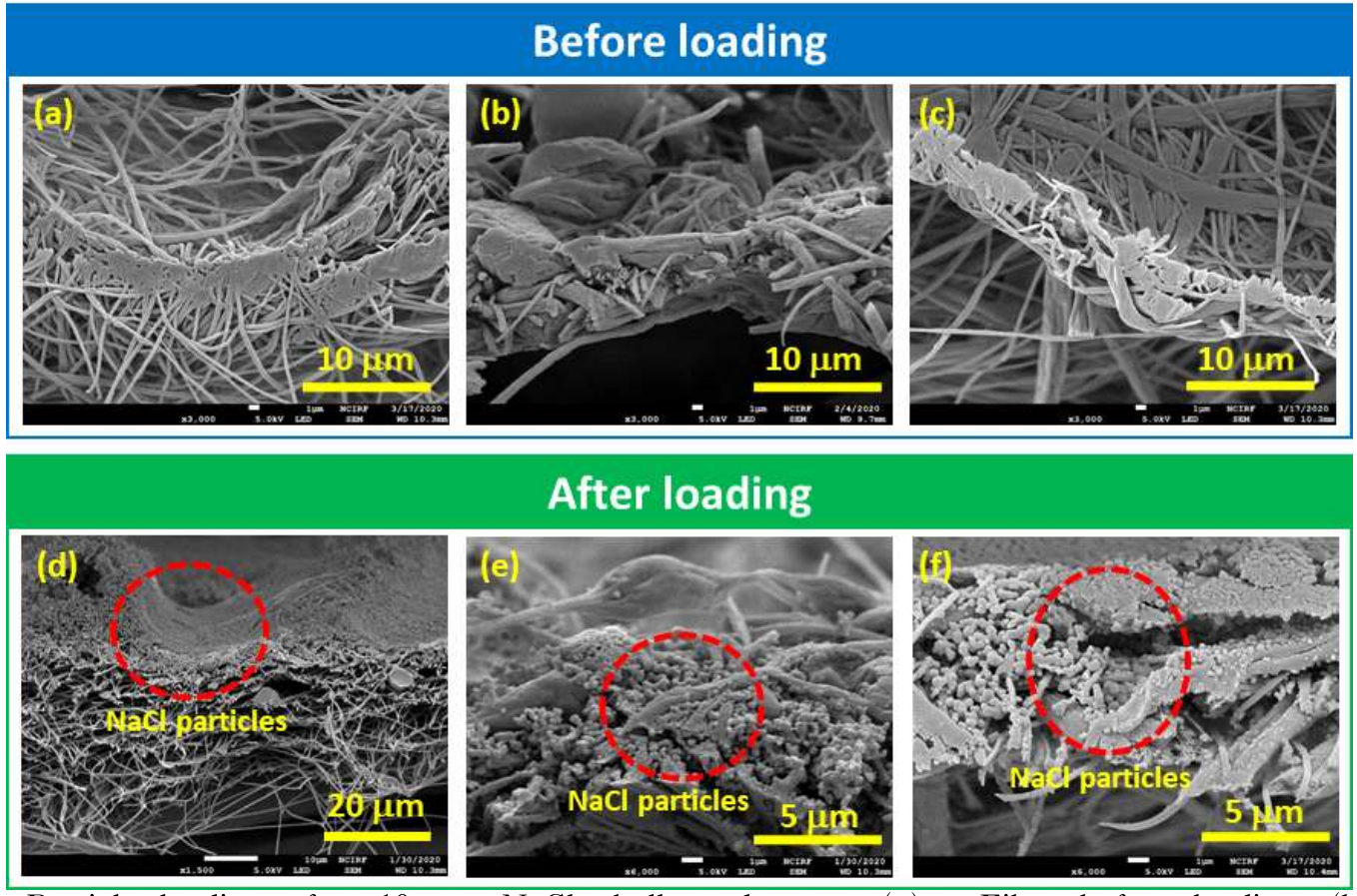


Figure 14. Particle loading after 10 mg NaCl challenged mass. (a) n-Fiber before loading, (b) m-Bead before loading, (c) Fiber-mix before loading, (d) n-Fiber after 10 mg loading with different magnifications, (e) m-Bead after 10 mg loading, (f) Fiber-mix after loading.

1.6 유속에 따른 차압 변화

단일 레이어 웹 3종 (n-Fiber, m-Bead, Fiber-mix)의 초기 차압을 10, 15, 20, 25, 30, 35 LPM (유속 4.2, 6.25, 8.3, 10.42, 12.5, 14.6 cm/s)에서 측정하였다 (Figure 15a). 유속이 증가함에 따라 3종 웹 모두 차압이 정량적으로 증가하는 결과를 보였다. 이는 다공성 매질을 투과하는 유체의 속도와 차압의 정량적 상관성 이론인 Darcy's law와 일치함을 확인하였다.

유속은 유량을 면적으로 나눈 값으로, 이 관계식을 고려하여 여러 유속에서 측정한 40 cm^2 면적 웹의 차압 값 (Figure 15a)을 유량 85 LPM에서 여러 면적의 웹을 측정하였을 때 값으로 환산하였다 (Figure 15b). 동일한 유량 조건에서, 차압은 면적이 커짐에 따라 감소하는 경향성이 나타났다.

호흡 보호구 N-type 필터 테스트 규정인 US National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) 42CFR part 84에 따르면 N95 호흡 보호구 기준은 85 LPM 유량에서 NaCl 입자 투과율 <5%, 흡기저항 <35 mmH_2O (343 Pa), 배기저항 <25 mmH_2O (245 Pa)이다. 일반적으로 시중에서 판매되는 접이식 마스크 면적은 210~240 cm^2 사이에 존재한다. Fiber-mix와 m-Bead는 낮은 입자 투과율(>3%, Figure 11)과 면적 227 cm^2에서 흡기, 배기저항 기준보다 현저히 낮은 차압 값을 보였다 (Figure 15b). 본 실험 결과로, 위 두 형태의 섬유 웹은 NIOSH 방진 마스크 N95 규격을 만족하는 고효율 저차압 필터 제작에 적용될 가능성을 보이고 있다.

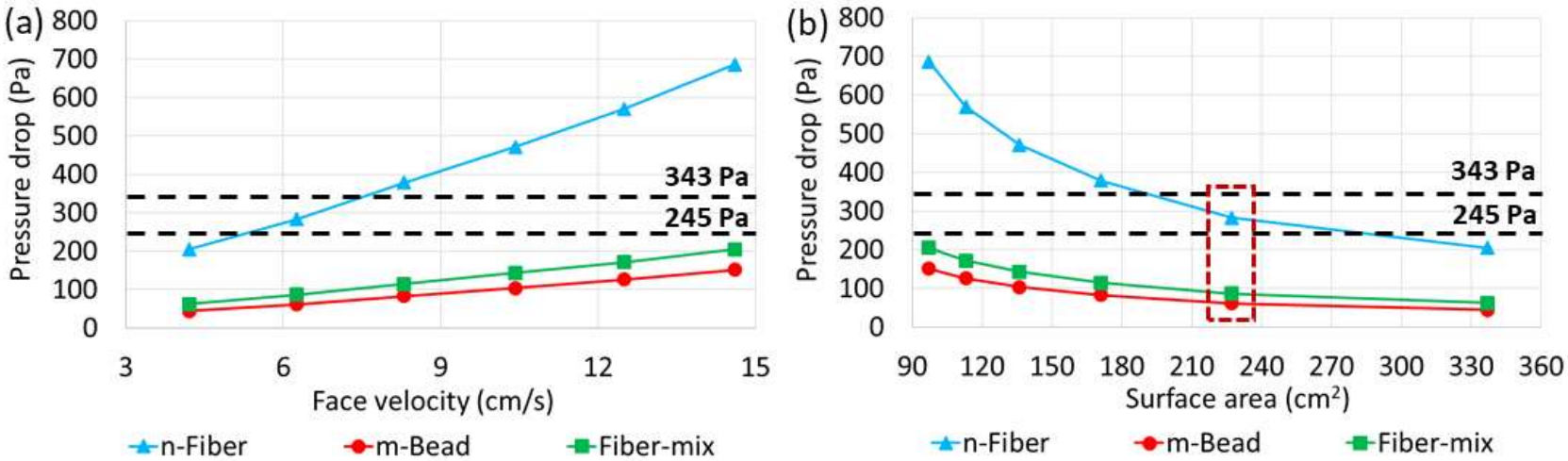


Figure 15. Pressure drop of n-Fiber, m-Bead, and Fiber-mix webs at different face velocities. (a) Pressure drop tested at different face velocities, (b) pressure drop with different surface area.

1.7 레이어 사이 미세 간극에 의한 차압 영향

1.7.1 차압 감소 원인 추론

전기방사 웹은 5 g/m^2 단일 레이어에 비해 2.5 g/m^2×2 레이어 구조에서 차압이 감소하는 경향성을 보였다. m-Bead, m-Bead×2와 m-Fiber, m-Fiber×2에서 가장 두드러지게 나타났으며, 단일 레이어에 비해 차압이 48% 감소한 결과를 확인하였다 (Figure 12b, c). n-Fiber×2는 n-Fiber에 비하여 차압이 6.8% 정도 감소하며 2.5 g/m^2×2 레이어 구조로 인한 차압 감소 효과가 가장 적었다.

필터 웹 단면 SEM 이미지에서 단일 레이어와 달리 2장이 겹쳐진 구조는 레이어 사이에 1.5-5.2 ㎛의 미세한 틈이 존재하는 것을 확인하였다 (Figure 10). 레이어 사이의 미세한 틈은 레이어를 통과하는 공기가 다음 레이어로 유입될 때, 이동 방향을 차압이 낮은 곳으로 유도하여 단일 레이어에 비해 낮은 차압 결과에 영향을 준 것으로 추측된다. SEM 이미지 분석을 통해 발견한 레이어 사이에 존재하는 미세한 틈이 차압 감소에 미친 영향을 확인하기 위하여 제작된 전기방사 웹을 3D 모델링하여 시뮬레이션을 수행하였다.

1.7.2 Simulation 분석

전기방사 웹 레이어 사이의 미세 간극에 의한 차압 감소 현상을 분석하기 위하여 FiberGeo module of Geodict를 사용하여 차압 감소가 크게 발생한 m-Fiber의 3D 모델을 제작하였다. m-Fiber 단일 레이어 모델과 레이어 사이에 각각 1.6 ㎛, 5.0 ㎛, 10.0 ㎛ 간극이 존재하는 3종의 모델을 제작하였다. 1.6 ㎛, 5.0 ㎛ 크기의 간극은 실제 제작된 n-Fiber×2 (1.5 ㎛)과 m-Fiber×2 (5.0 ㎛) 웹을 반영하여 선정되었으며, voxel의 최소 단위가 0.2 ㎛인 점을 감안하여 1.5 ㎛은 1.6 ㎛으로 대체되었다. 추가적으로 10.0 ㎛을 테스트하여 레이어 간극의 크기가 차압 변화에 미치는 영향을 확인하였다. 실제 실험과 동일하게 시뮬레이션에서 입자를 최대 20 mg 분사하는 동안 웹에 발생하는 투과율 (penetration)과 차압 (pressure drop)을 확인하였다 (Figure 16). 초기 투과율과 차압은 m-Fiber×2 (Sim.), m-Fiber×2 (1.6 ㎛, 5.0 ㎛, 10.0 ㎛) (Sim.) 4종 모두 유사한 값을 보였다. 레이어 간극에 의한 차압 감소 효과는 분사된 입자의 양이 증가할수록 명확하게 나타났으며, 간극이 클수록 입자 분사에 따른 차압 증가 속도가 낮음이 확인되었다. 입자 투과율은 구조 간 크게 차이를 보이지 않았으며, 레이어 사이의 간극은 여과 효율의 변화 없이 차압 감소에 긍정적인 효과를 보였고 간극의 크기가 클수록 효과가 크게 발생함을 확인하였다.

레이어 사이에 존재하는 간극이 공기의 흐름에 미치는 영향은 시뮬레이션 contour plot을 통하여 분석되었다 (Figure 17)[5]. 웹으로 유입된 공기는 레이어 사이 간극에서 수평 방향으로 이동하여 압력이 고르게 분배되어 웹에 발생하는 전체적인 차압이 감소하는 경향성을 보였으며, 이는 간극의 크기가 클수록 강하게 나타났다. 이러한 이유로 입자가 지속적으로 분사됨에 따라 레이어 사이에 미세한 간극이 존재하는 경우 차압의 감소에 효과가 있음을 확인하였다.

---

5) 입자를 10~12 mg 분사한 이후의 contour plot이며, 회색은 웹의 섬유, 파란색 도트는 입자이다.

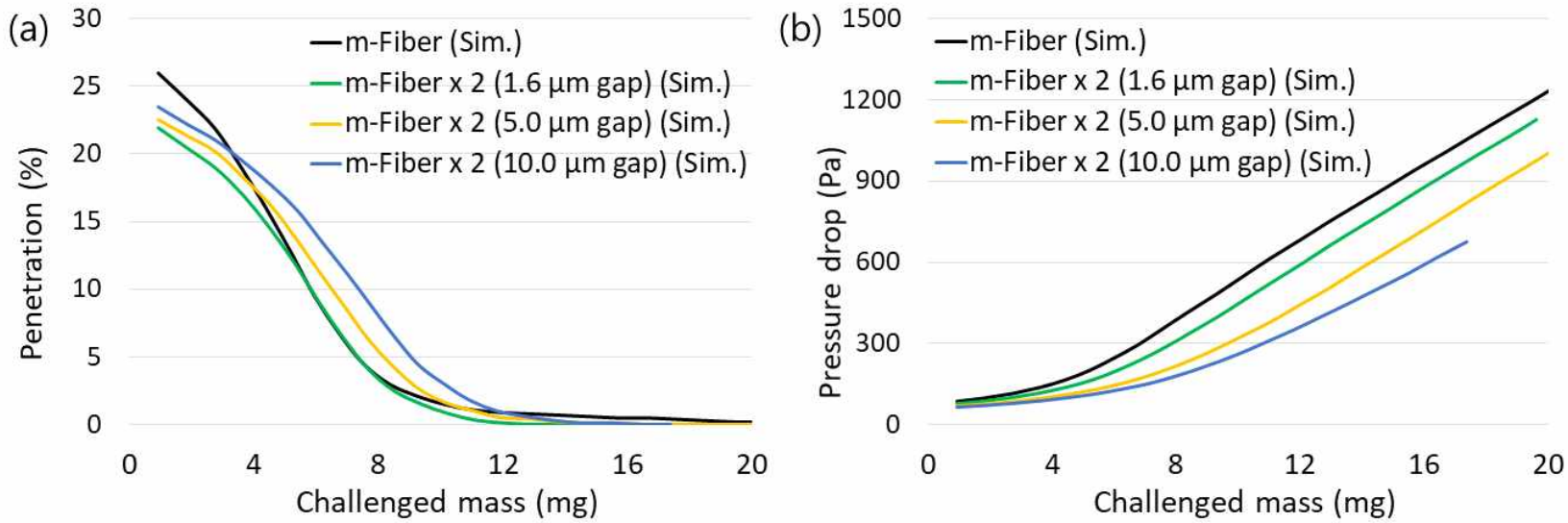


Figure 16. Simulated penetration and pressure drop for the virtual filter models with continued mass loading. (a) Penetration and (b) pressure drop for the virtual filters with different gaps[81].

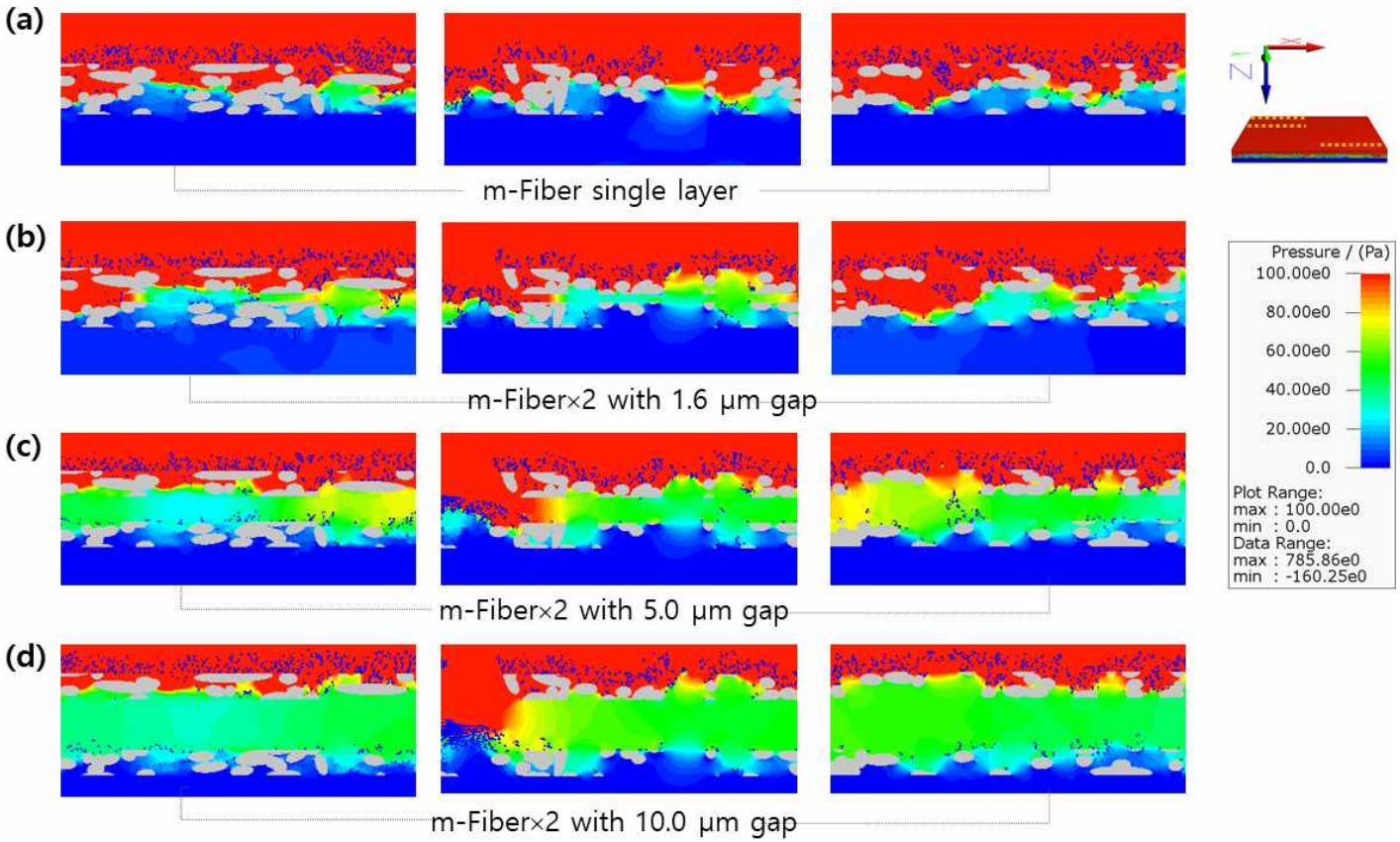


Figure 17. Pressure drop contour plots for three virtual models. (a) a single-layer of m-Fiber, (b) m-Fiber ×2 with 1.6 μm gap, (c) m-Fiber ×2 with 5.0 μm gap, and (d) m-Fiber ×2 with 10.0 μm gap[81].

제 2 절 필터 레이어 간극에 의한 차압 감소 효과

2.1 레이어 구조에 따른 여과 성능

2.1.1 2-Layer 구조

유속 15 cm/s에서 멜트블로운 단일 레이어 필터(MB control)의 초기 투과율은 3.62%로 나타났다. MB 필터 2장을 추가 구조물 없이 겹친 2L-0 gap의 초기 투과율은 0.12%로 MB control 투과율에서 예측되는 값과 거의 유사한 결과가 발견되었다 (3.62%×3.62%=0.13%). 동일한 유속에서 MB control의 초기 차압은 67.7 Pa이며, 2장이 사용될 경우 예측되는 값은 67.7 Pa×2=135.4 Pa이다. 2L-0 gap의 초기 차압 실험값은 118.7 Pa로 예측값에 비해 낮은 결과가 발견되었다.

필터 레이어 사이에 두께 5 mm 아크릴 플레이트를 삽입하여 일정한 간극을 형성한 구조(2L-air gap)는 초기 투과율, 차압이 2L-0 gap과 동일한 결과를 보였다. 유속 15 cm/s에서 초기 차압은 MB control과 비교하여 2 layer 구조 (0 gap, Air gap)이 높은 수치를 보였으나, 입자가 지속적으로 로딩됨에 따라 차압 값이 역전되는 결과를 보였다 (Figure 18a). 최대 입자 투과율은 MB control (11.77%)에 비하여 2L-0 gap, 2L-Air gap이 각각 0.83%, 0.95% 로 높은 입자 포집 효율을 지녔다 (Figure 18b). 유속 20 cm/s에서 2L-0 gap과 2L-Air gap은 초기 차압은 비슷하지만, Air gap의 차압 증가 속도가 느린 경향성이 나타났다 (Figure 18c).

전기방사 웹 실험 결과와 마찬가지로 레이어 사이에 존재하는 간극에 의해 차압 감소 효과가 발생하였고, 높은 유속에서 효과가 크게 발생함을 확인하였다.

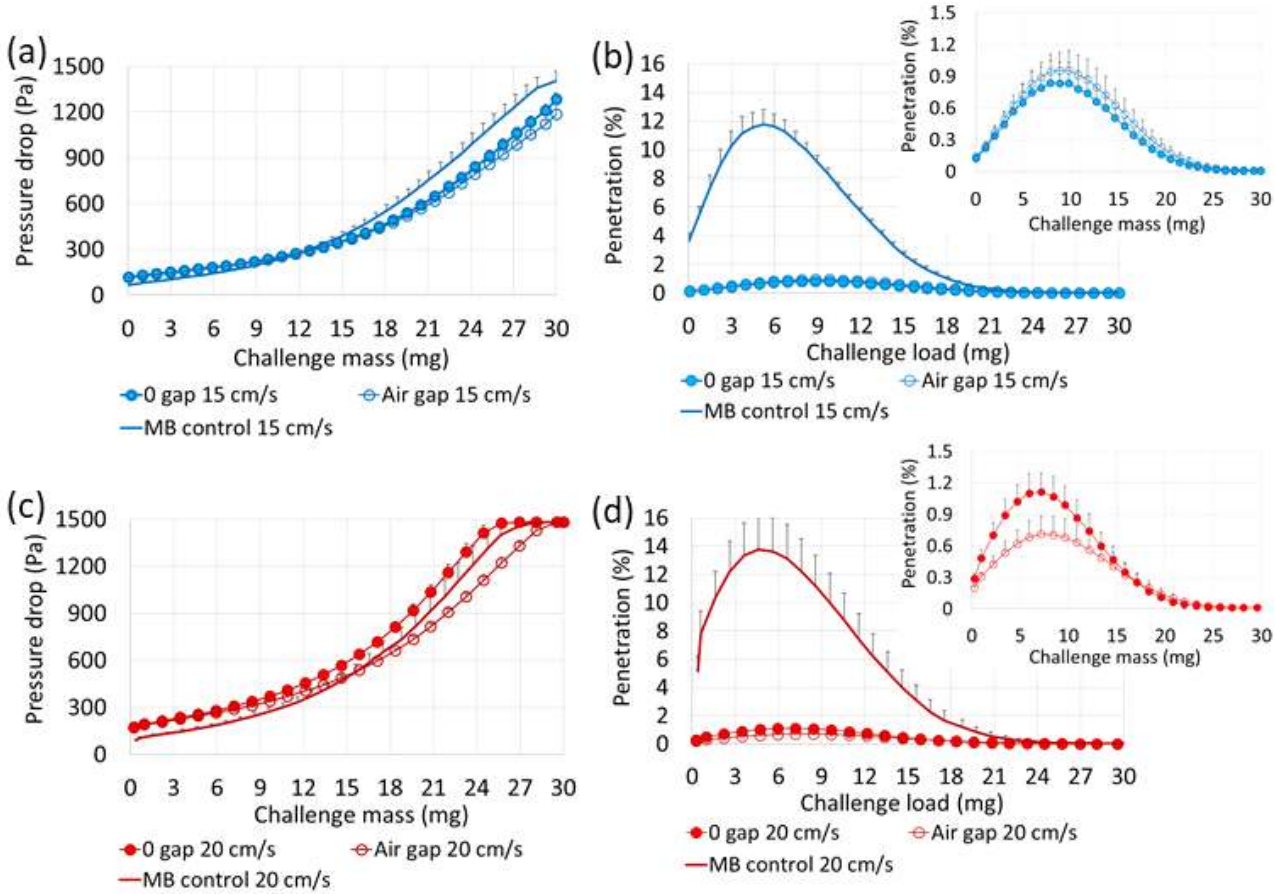


Figure 18. Pressure drop and penetration development for 2-layer constructions during 30 mg of NaCl loading. (a) Pressure drop at 15 cm/s (b) Penetration at 15 cm/s (c) Pressure drop at 20 cm/s, (d) Penetration at 20 cm/s.

2.1.2 4-Layer 구조

4-Layer 구조에서도 레이어 사이 간극으로 인한 차압 감소가 발생하였으며, 높은 유속에서 효과가 증가하였다 (Figure 19). 유속 15 cm/s에서 입자가 20 mg 로딩된 후 4L-Air gap은 4L-0 gap 보다 차압이 17.6% 감소하였다. 유속 20 cm/s에서 입자가 20 mg 로딩된 후 차압은 4L-Air gap이 4L-0 gap과 비교하여 21.9% 낮은 결과값을 보였다. 2-Layer, 4-Layer 모두 높은 유속에서 Air gap의 차압 감소 효과가 두드러지게 발생하는 것을 확인하였다.

최대 입자 투과율은 4-Layer 구조에서 0.01% 이하로, MB control과 비교하여 높은 여과 성능을 보였다 (Figure 19b, d). 4L-Air gap의 초기 차압은 222.4 Pa으로 예측 (67.7 Pa×4=270.8 Pa)보다 낮은 값을 보였다. 유속 15 cm/s에서 4L-Air gap은 레이어 사이 간극에 의한 차압 증가 속도가 감소하여 18 mg 입자 로딩 이후 MB control에 보다 낮은 차압 값을 보였다.

4L-Air gap은 단일 레이어인 MB control에 비해 초기 차압은 높지만 지속적인 여과 과정에서 차압 증가 속도가 낮고 높은 여과 효율을 지니는 결과를 보였다. 따라서, 다층 레이어 사이에 일정한 간극을 부여하는 것이 차압 감소에 긍정적인 효과를 줄 수 있음을 확인하였다.

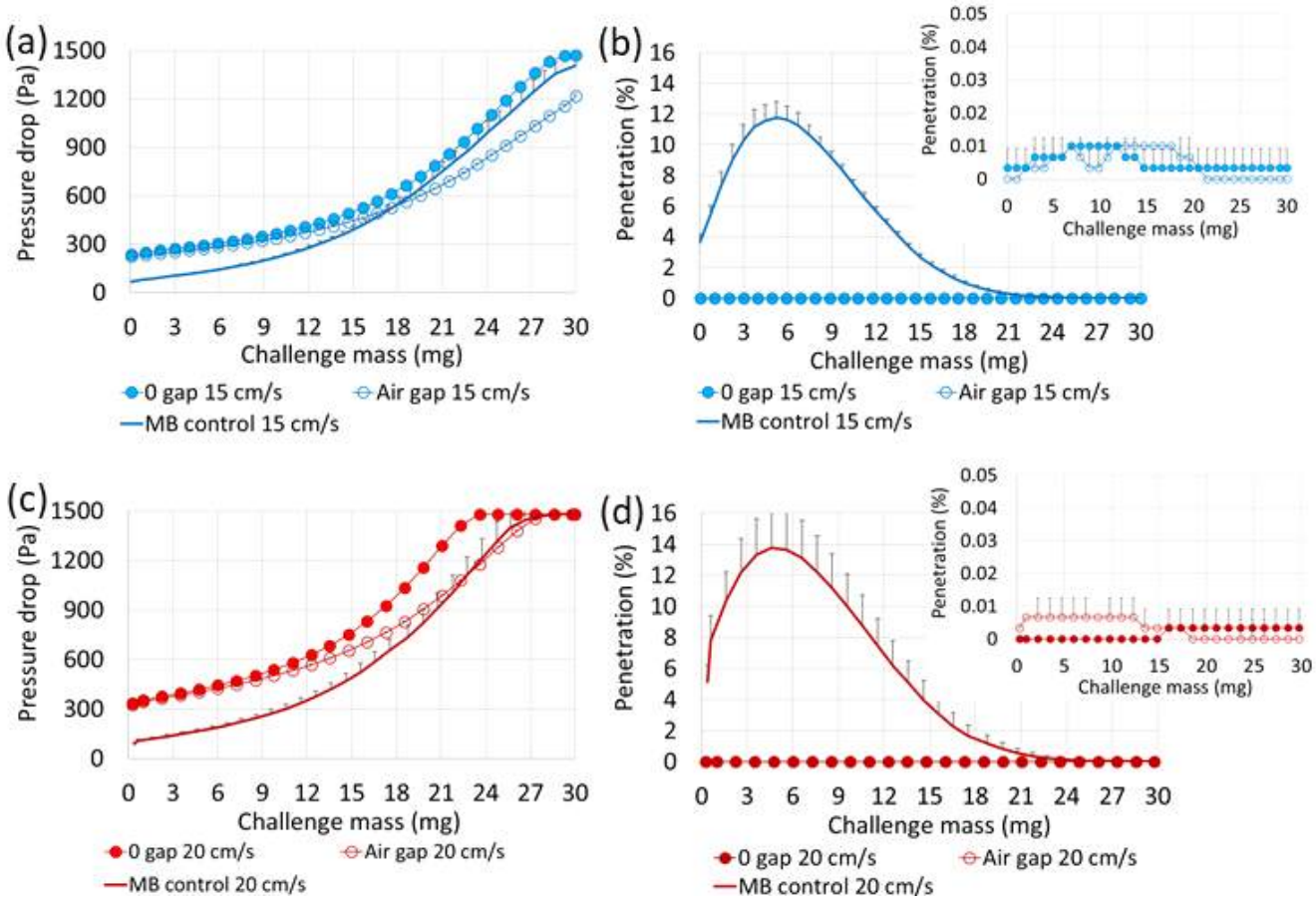


Figure 19. Pressure drop and penetration development for 4-layer constructions during 30 mg of NaCl loading. (a) Pressure drop for 15 cm/s (b) Penetration for 15 cm/s (c) Pressure drop for 20 cm/s (d) Penetration for 20 cm/s.

2.2 입자 로딩과 필터 사용 수명 관계

2.2.1 Clogging point

일반적으로 유성 에어로졸보다 고체 입자를 여과하는 과정에서 필터 차압의 상승이 빠르게 발생한다. 고체 입자는 필터 섬유에 포집되어 점차 쌓여가며 pore을 빠르게 막아 공기 흐름을 방해하는 반면, 유성 에어로졸은 섬유 표면에 빠르게 spreading 되어 표면전하를 masking하면서 효율이 급격히 저하되는 반면, 차압이 급격히 증가하지 않는 편이다. 본 실험에서 사용된 MB 정전 필터는 물리적 여과 메커니즘과 함께 정전기적 인력에 의해 입자를 포집한다. 초기에 포집된 고체(NaCl) 입자는 섬유 표면에 포집되면서 표면전위를 약화시키고 정전기적 인력에 의한 포집력을 점차 약화시켜 투과율이 점차 상승하는 경향성을 보였다 (Figure 18b). 최대 투과율 (Max. Pn)에 도달한 후, 포집된 고체 입자가 pore를 막기 시작하면서 투과율이 감소하기 시작한다. Pore의 막힘으로 인해 투과율은 감소하고 차압은 급격하게 상승하게 되는데 이 지점을 clogging point로 볼 수 있다.

2-Layer 구조는 단일 레이어에 비하여 clogging이 늦게 발생하였다. 두 조건의 유속에서 2-Layer 구조 (0 gap, Air gap)의 최대 투과율이 발생한 시점은 입자가 9.8 mg, 7.2 mg 분사된 직후이며, 단일 레이어(MB)는 입자가 5.2 mg, 3.7 mg 분사된 시점이다 (Table 6). 2L-0 gap, 2L-Air gap은 동일한 시점에서 clogging이 발생하였으며, 높은 유속에서 clogging이 먼저 시작하였다. 4-Layer 구조는 실험 전반에서 입자 투과율이 0.01% 이하로 유지되어 최대 투과율 시점을 특정할 수 없었다.

Table 6. Summary of loading performance of different filter constructions.

Face vel.	Constr.	In. pn (%)	Max. pn (%)	In. dP (Pa)	dP at max. pn (Pa)	Challenge load at max. pn (mg)	Challenge at 490 Pa (mg)
15 cm/s	1L-MB	3.62	11.77	67.7	132.4	5.2	17.0
	2L-0 gap	0.12	0.83	118.7	235.4	9.8	18.6
	2L-air gap	0.14	0.95	116.7	234.4	9.8	18.8
	4L-0 gap	≤0.01	≤0.01	237.3	N.D.	N.D.	14.7
	4L-air gap	≤0.01	≤0.01	222.6	N.D.	N.D.	16.6
20 cm/s	1L-MB	5.2	13.77	89.2	164.8	3.7	11.6
	2L-0 gap	0.3	1.11	172.6	306.9	7.2	13.0
	2L-air gap	0.2	0.71	171.6	288.3	7.2	13.4
	4L-0 gap	≤0.01	≤0.01	334.4	N.D.	N.D.	8.1
	4L-air gap	≤0.01	≤0.01	325.6	N.D.	N.D.	8.9

2.2.2 Loading capacity

공기 정화 필터 제품의 수명은 주로 차압의 상승이나 효율의 저하에 의해 영향을 받게 된다. 마스크 필터의 경우, 일정 이상의 차압에 도달하면 사용자가 호흡저항을 크게 느껴 교체하는 방식으로도 이루어진다. 본 실험에서 사용된 필터 구조에 따른 차압거동과 사용 수명을 비교하기 위하여 임의로 NaCl 입자에 대한 여과 차압이 490 Pa에 도달하는 지점을 기준으로 선정하고, 이에 도달하기까지 분사한 고체입자의 중량을 비교하였다 (Table 6).

기준 차압 490 Pa에 도달하기까지 입자가 2-Layer 0 gap, Air gap 각각 유속 15 cm/s에서 18.6 mg, 18.8 mg, 유속 20 cm/s에서 13.0 mg, 13.4 mg 분사되었다. Air gap이 0 gap에 비하여 분사된 입자 양이 1.1% (15 cm/s), 3.1% (20 cm/s) 증가하였으며 구조 간 필터 사용 수명은 거의 유사한 결과를 보였다.

4-Layer 0 gap, Air gap 구조는 차압 490 Pa을 기준으로 입자가 유속 15 cm/s에서 14.7 mg, 16.6 mg, 유속 20 cm/s에서 8.1 mg, 8.9 mg 분사되었다. Air gap은 0 gap보다 동일한 차압에 도달하기까지 12.9% (15 cm/s), 9.9% (20 cm/s) 많은 입자를 포집 할 수 있었다. 따라서, 레이어 간극에 의한 사용 수명 증가는 레이어 수가 많은 경우 효과가 크게 나타남을 확인하였다.

2.3 레이어 간극에 의한 depth filtration

각 레이어 별 입자가 포집된 형태를 분석하기 위하여 NaCl 30 mg 로딩 이후 SEM을 촬영하였다. 유속 15 cm/s에서 입자를 분사한 2-Layer SEM 이미지에서 0 gap과 Air gap은 각 레이어 별 포집 형태가 유사한 모습을 보였다 (Figure 20). 차압 실험 결과 (Figure 18a)와 service life도 마찬가지로 구조에 따라 큰 차이를 보이지 않으며 유사한 결과를 보였다.

4-Layer SEM 이미지에서 0 gap의 첫 번째 레이어는 Air gap의 첫 번째 레이어와 비교하여 NaCl 입자들이 빽빽하게 밀집되어 있는 형태를 보였다 (Figure 21). Air gap의 두 번째 레이어는 첫 번째 레이어를 투과한 입자들이 포집되어 0 gap에 비해 depth filtration이 효과적으로 발생하였다.

차압 감소 효과를 보인 4-Layer 구조의 각 레이어 별 로딩 전, 후 무게를 측정하여 NaCl 입자가 분배된 비율을 비교하였다. SEM 이미지에서는 4L-0 gap, 4L-Air gap의 1~3번째 레이어에 입자가 포집된 모습이 확인되었으나, SEM 이미지와 달리 미세 저울의 detection limit에 의하여 3번째 레이어의 무게 변화는 나타나지 않았다.

NaCl 입자가 최대 30 mg 로딩되는 동안 4L-0 gap, 4L-Air gap의 최대 투과율은 0.01% 이하로 거의 모든 입자를 포집한 것으로 보인다 (Figure 19b, d). 4L-0 gap은 분사된 NaCl 30 mg 입자가 첫 번째 레이어와 두 번째 레이어에 각각 29.3 mg (97.8%), 0.7 mg (2.2%) 포집되었다. 4L-Air gap은 첫 번째 레이어와 두 번째 레이어에 각각 28.3 mg (94.3%), 1.3 mg (4.3%)가 포집되었으며 0.4 mg은 3, 4번째 레이어에 포집된 것으로 보인다 (Table 7). 레이어 사이에 일정한 간격 부여된 4L-Air gap은 필터를 투과하는 공기 흐름이 적절히 분배되어 입자가 하부 레이어까지 분포하는 것을 확인하였다. 이러한 depth filtration의 발생은 차압 감소를 지연시켜 일정 차압에 이를 때까지의 사용시간을 증가시키는 효과로 이어질 수 있다.

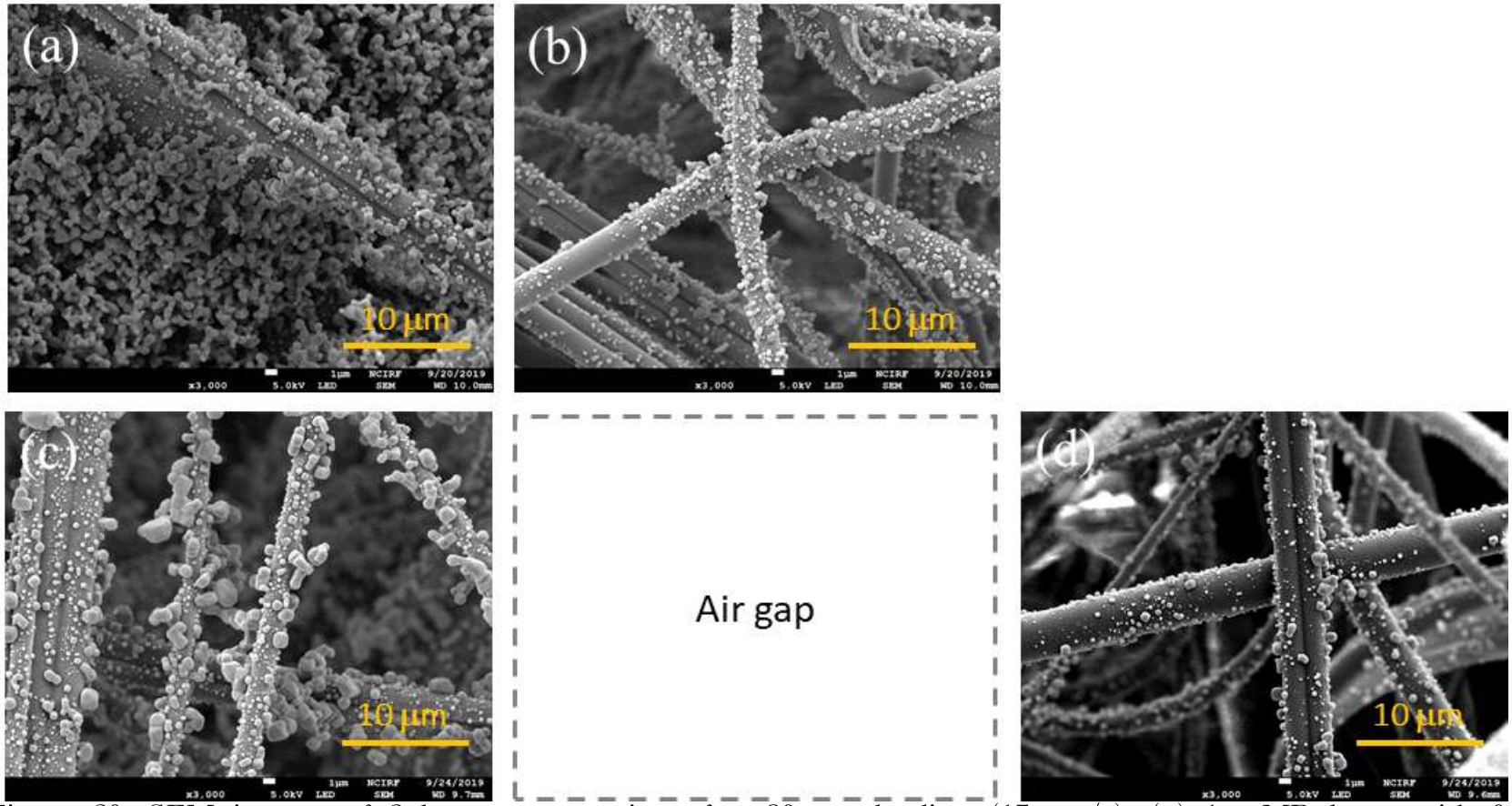


Figure 20. SEM images of 2-layer construction after 30 mg loading (15 cm/s). (a) 1st MB layer with 0 gap, (b) 2nd MB layer with 0 gap, (c) 1st MB layer with air gap, (d) 2nd MB layer with air gap

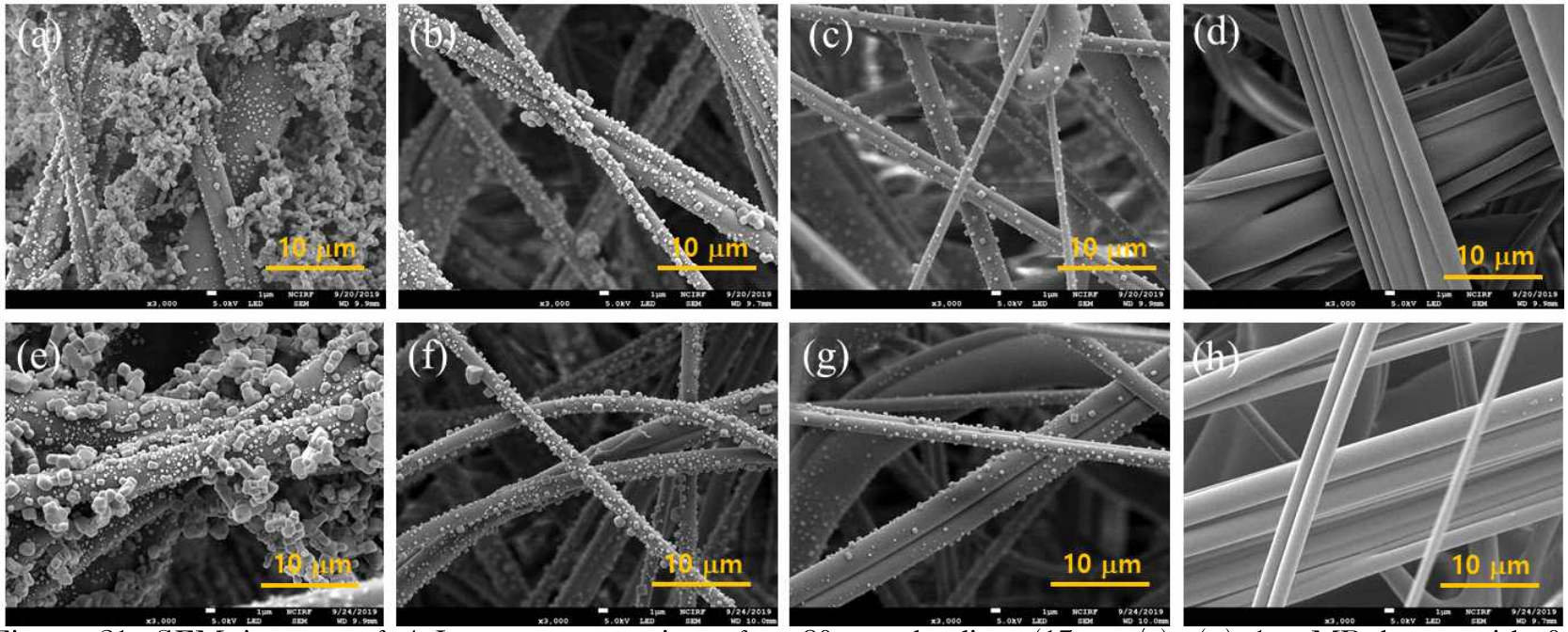


Figure 21. SEM images of 4-Layer construction after 30 mg loading (15 cm/s). (a) 1st MB layer with 0 gap, (b) 2nd MB layer with 0 gap, (c) 3rd MB layer with 0 gap, (d) 4th MB layer with 0 gap. (e) 1st MB layer with air gap, (f) 2nd MB layer with air gap, (g) 3rd MB layer with air gap, (h) 4th MB layer with air gap.

Table 7. Loaded mass for each layer for 4-layer constructions.

Gap	0 mm gap		Air gap	
Layer tested	Mass loaded (mg)	Load share (%)	Mass loaded (mg)	Load share (%)
1st layer MB	29.3 (± 0.6)	97.8 (± 1.9)	28.3 (± 1.2)	94.3 (± 0.1)
2nd layer MB	0.7 (± 0.6)	2.2 (± 1.9)	1.3 (± 0.6)	4.3 (± 1.9)
3rd layer MB	-	-	0.4 (prediction value)	1.4 (prediction value)
4th layer MB	-	-		

Note: The lowest detection limit of balance was 1 mg. The lower mass was not measurable.

제 4 장 결 론

본 연구는 섬유 형태 및 레이어 구조를 조절하여 지속적인 여과 과정에서 높은 여과 효율과 낮은 차압을 유지하는 필터를 개발함을 목표로 하였다. 이를 위하여 전기방사 공정을 통하여 웹의 섬유 및 비드 형태, 섬유 직경, 기공 크기를 달리하였고, 다층 레이어 웹을 제작하여 입자 로딩에 따른 투과율, 차압 변화를 분석하였다. 또한, 3D modeling과 simulation을 통해 레이어 사이 간극에 의한 차압 감소 효과를 분석하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

1. 섬유 및 비드 형태와 직경에 따른 전기방사 웹의 기공은 n-Fiber (Fiber diameter 0.36 ㎛) 1.27 ㎛, m-Bead (Fiber diameter 0.46 ㎛, Bead diameter 6.87 ㎛) 2.05 ㎛, m-Fiber (Fiber diameter 2.21 ㎛) 8.04 ㎛, Bead-mix 1.95 ㎛, Fiber-mix 2.6 ㎛로 확인되었다. 나노섬유 웹은 마이크로 섬유 웹에 비해 작은 기공을 형성하였으며, 마이크로비드는 섬유 사이 간격을 넓혀 기공을 증가시키는 결과를 보였다..

2. 전기방사 웹 중 가장 큰 기공 (8.04 ㎛)을 지닌 m-Fiber의 낮은 여과 효율과 차압 결과를 보였으며, 가장 작은 기공 (1.27 ㎛)을 지닌 n-Fiber은 높은 여과 효율과 차압 성능을 지닌 것으로 확인되었다. 이를 통하여 웹의 기공은 입자의 투과율과 웹에 발생하는 차압을 결정하는 중요한 요소임이 확인되었다.

3. NaCl 입자 로딩 후 입자 포집 형태를 SEM 이미지 분석 결과, 나노섬유로 구성된 n-Fiber은 입자가 웹 내부로 침투하지 못하고 표면에 clogging 된 surface filtration이 나타났다. n-Fiber 보다 큰 기공을 지닌 m-Bead와 Fiber-mix는 NaCl 입자가 웹 내부에 포집된 depth filtration의 포집 거동을 보였다. 표면에 입자가 쌓여 공기 유입이 원

활히 이루어지지 못한 n-Fiber의 차압은 빠르게 상승한 반면, m-Bead와 Fiber-mix는 입자가 필터 내부와 표면에 균일하게 분포되어 n-Fiber에 비해 clogging이 지연되어 차압이 천천히 상승한 경향을 보였다.

4. 서로 다른 두 웹 (n-Fiber/m-Fiber, n-Fiber/m-Bead)을 겹쳐 사용한 경우, 입자가 유입되는 첫 번째 레이어에 기공이 작은 웹(m-Fiber, m-Bead)을 위치시키는 구조는 n-Fiber을 첫 번째 레이에 위치시키는 구조와 초기 차압은 유사하였으나 지속적인 여과 과정에서 차압이 느리게 증가하였으며 최대 ~51%, ~34.5% 낮은 결과를 보였다. 이는 SEM 이미지 분석을 통한 분석에서 기공 크기에 따른 clogging 차이로 확인되었다. 실제 사용 환경에서는 입자 크기 순으로 단계적으로 여과되어, 차압 증가 속도를 감소시키는 효과가 더욱 커질 것으로 추측된다.

5. 2.5 g/m^2 2장을 겹친 웹은 5 g/m^2 단일 레이어 웹과 비교하여 초기 차압이 5~10% 감소하였으며, 입자를 지속적으로 로딩함에 따라 차압 차이가 점차 증가하여 m-Bead×2, m-Fiber×2은 m-Bead, m-Fiber 보다 최대 48% 낮은 차압 결과를 보였다. SEM 이미지 분석 결과, 2장의 2.5 g/m^2 레이어 사이에 1.5~5.2 ㎛ 크기의 간격이 존재함을 확인하였다. Simulation 분석 결과, 웹으로 유입되는 공기는 레이어 사이 미세 공간에서 수평 방향으로 이동하여 압력이 고르게 분산되어 전체적인 차압이 감소하는 효과를 보였다.

6. 상업용 멜트블로운 (MB) 필터는 레이어 수가 많고 유속이 빠를수록, 다층 레이어 간 간극에 의한 차압 감소 효과가 증가하는 것을 확인하였다. 4L-Air gap은 4L-0 gap과 초기 차압은 유사하였으나, 입자 로딩에 따른 차압 증가가 낮았다. 또한, 단일 레이어 (MB control)과 비교하여 높은 입자 포집 효율과 초기 차압은 높지만, 입자 로딩 이후

낮은 차압을 보였다.

7. 레이어 별 MB 필터가 입자를 포집한 양을 측정하기 위해 입자 분사 전, 후 무게를 측정한 결과 4L-0 gap은 1st layer 97.8%, 2nd layer 2.2%로 확인되었다. 4L-Air gap은 1st layer 94.3%, 2nd layer 4.3% 포집되었으며 나머지 1.4% 입자는 3rd layer, 4th layer에서 여과된 것으로 보인다. 레이어 사이에 5 mm air gap이 존재하는 경우, 유입되는 공기의 적절한 분배와 함께 depth filtration이 발생하여 clogging을 늦추는 효과를 보였다.

본 연구는 개별 요소로 연구되었던 웹의 차압에 미치는 요소를 통합적으로 적용하였으며, 시뮬레이션을 통해 레이어 사이 간극에 의한 차압 감소 효과를 분석하였다는 점에서 의의를 지닌다. 전기방사 공정으로 다양한 형태의 섬유와 레이어 구조를 제작하여 형성된 웹의 기공 특성에 따른 투과율, 차압 거동을 파악하였다. 또한, 상업용 멜트블로운 필터를 이용하여 레이어 간극에 따른 차압 감소 효과를 확인하였다. 본 연구는 차압을 낮추기 위하여 실용적으로 적용 가능한 디자인을 제안하였으며, 궁극적으로 호흡 보호구 착용자의 생리적 부담을 완화하고 HVAC system에 필요한 에너지 소모를 줄이며 필터 사용 수명을 연장시켜 환경 지속가능성에 기여할 수 있다고 사료된다.

참 고 문 헌

[1] Harrison, R.M.; Hester, R.E.; Querol, X. Airborne Particulate Matter: Sources, Atmospheric Processes and Health, 1st ed.; Royal Society of Chemistry: Cambridge, Canbrudgesgurem, England, 2016.

[2] Schauer, J.J.; Rogge, W.F.; Hildemann, L.M.; Mazurek, M.A.; Cass, G.R.; Simoneit, B.R. Source apportionment of airborne particulate matter using organic compounds as tracers. Atmos. Environ. 1996, 30, 3837 - 3855.

[3] Harrison, R.M.; Yin, J. Particulate matter in the atmosphere: which particle properties are important for its effects on health? Sci. Total Environ. 2000, 249, 85 - 101.

[4] Zereini, F.; Alt, F.; Messerschmidt, J.; Wiseman, C.; Feldmann, I.; von Bohlen, A.; Muller, J.; Liebl, K.; Puttmann, W. Concentration and Distribution of Heavy Metals in Urban Airborne Particulate Matter in Frankfurt am Main, Germany. Environ. Sci. Technol. 2005, 39, 2983－2989.

[5] Lou, L.; Osemwegie, O.; Ramkumar, S. S. Functional Nanofibers and Their Applications. Ind. Eng. Chem. Res. 2020, 59, 5439－5455.

[6] Lee, C. J.; Martin, R. V.; Henze, D. K.; Brauer, M.; Cohen, A.; Donkelaar, A. V. Response of Global Particulate-Matter-Related Mortality to Changes in Local Precursor Emissions. Environ. Sci. Technol. 2015, 49, 4335－4344.

[7] Peng, R. D.; Bell, M. L.; Geyh, A. S.; McDermott, A.; Zeger, S. L.; Samet, J. M.; Dominici, F. Emergency Admissions for Cardiovascular and Respiratory Diseases and the Chemical Composition of Fine Particle Air Pollution. Environ. Health

Perspect. 2009, 117, 957−963.
[8] World Health Organization (W.H.O). Available online: https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health (accessed on 2 May 2018).
[9] Jung, S.; An, J.; Na, H.; Kim, J. Surface energy of filtration media influencing the filtration performance against solid particles, oily aerosol, and bacterial aerosol. Polymers 2019, 11, 935.
[10] Tang, M.; Chen, S.C.; Chang, D.Q.; Xie, X.; Sun, J.; Pui, D.Y.H. Filtration efficiency and loading characteristics of PM2.5 through composite filter media consisting of commercial HVAC electret media and nanofiber layer. Sep. Purif. Technol. 2018, 198, 137 - 145.
[11] Podgórski, A.; Bałazy, A.; Grado ´n, L. Application of nanofibers to improve the filtration efficiency of the most penetrating aerosol particles in fibrous filters. Chem. Eng. Sci. 2006, 61, 6804 - 6815.
[12] Zhang, S.; Shim, W.S.; Kim, J. Design of ultra-fine nonwovens via electrospinning of Nylon 6: Spinning parameters and filtration efficiency. Mater. Des. 2009, 30, 3659 - 3666.
[13] Lee, Y.C.; Wadsworth, L.C. Structure and filtration properties of melt blown polypropylene webs. Polym. Eng. Sci. 1990, 30, 1413 - 1419.
[14] Zhu, M.M.; Han, J.Q.; Wang, F.; Shao, W.; Xiong, R.H.; Zhang, Q.L.; Pan, H.; Yang, Y.; Samal, S.K.; Zhang, F.; et al. Electrospun Nanofibers Membranes for Effective Air Filtration. Macromol. Mater. Eng. 2017, 302.
[15] Souzandeh, H.; Scudiero, L.; Wang, Y.; Zhong, W.H. A

Disposable Multi-Functional Air Filter: Paper Towel/Protein Nanofibers with Gradient Porous Structures for Capturing Pollutants of Broad Species and Sizes. ACS Sustain. Chem. Eng. 2017, 5, 6209 - 6217.

[16] Choi, J.; Yang, B.J.; Bae, G.N.; Jung, J.H. Herbal Extract Incorporated Nanofiber Fabricated by an Electrospinning Technique and its Application to Antimicrobial Air Filtration. ACS Appl. Mater. Inter. 2015, 7, 25313 - 25320.

[17] Kim, J.; Hong, S.C.; Bae, G.N.; Jung, J.H. Electrospun Magnetic Nanoparticle-Decorated Nanofiber Filter and Its Applications to High-Efficiency Air Filtration. Environ. Sci. Technol. 2017, 51, 11967 - 11975.

[18] Huang, X.X.; Jiao, T.F.; Liu, Q.Q.; Zhang, L.X.; Zhou, J.X.; Li, B.B.; Peng, Q.M. Hierarchical electrospun nanofibers treated by solvent vapor annealing as air filtration mat for high-efficiency PM2.5 capture. Sci. China Mater. 2019, 62, 423 - 436.

[19] Lubasova, D.; Netravali, A.; Parker, J.; Ingel, B. Bacterial filtration efficiency of green soy protein based nanofiber air filter. J. Nanosci. Nanotechnol. 2014, 14, 4891 - 4898.

[20] Joe, Y.H.; Woo, K.; Hwang, J. Fabrication of an anti-viral air filter with SiO2 - Ag nanoparticles and performance evaluation in a continuous airflow condition. J. Hazard. Mater. 2014, 280, 356 - 363.

[21] Liu, X.B.; Souzandeh, H.; Zheng, Y.D.; Xie, Y.J.; Zhong, W.H.; Wang, C. Soy protein isolate/bacterial cellulose composite membranes for high efficiency particulate air filtration. Compos. Sci. Technol. 2017, 138, 124 - 133.

[22] Souzandeh, H.; Johnson, K.S.; Wang, Y.; Bhamidipaty, K.;

Zhong, W.H. Soy-Protein-Based Nanofabrics for Highly Efficient and Multifunctional Air Filtration. ACS Appl. Mater. Inter. 2016, 8, 20023 - 20031.

[23] Wang, C.Y.; Wu, S.Y.; Jian, M.Q.; Xie, J.R.; Xu, L.P.; Yang, X.D.; Zheng, Q.S.; Zhang, Y.Y. Silk nanofibers as high efficient and lightweight air filter. Nano Res. 2016, 9, 2590 - 2597.

[24] Wang, Y.; Li, W.; Xia, Y.; Jiao, X.; Chen, D. Electrospun flexible self-standing γ-alumina fibrous membranes and their potential as high-efficiency fine particulate filtration media. J. Mater. Chem. A 2014, 2, 15124 - 15131.

[25] Wang, Z.; Zhao, C.C.; Pan, Z.J. Porous bead-on-string poly(lactic acid) fibrous membranes for air filtration. J. Colloid Interf. Sci. 2015, 441, 121 - 129.

[26] Bourrous, S.; Bouilloux, L.; Ouf, F.X.; Lemaitre, P.; Nerisson, P.; Thomas, D.; Appert-Collin, J.C. Measurement and modeling of pressure drop of HEPA filters clogged with ultrafine particles. Powder Technol. 2016, 289, 109 - 117.

[27] Gao, X.C.; Gou, J.; Zhang, L.; Duan, S.S.; Li, C.Z. A silk fibroin based green nano-filter for air filtration. RSC Adv. 2018, 8, 8181 - 8189.

[28] Sun, Z.; Tang, M.; Song, Q.; Yu, J.; Liang, Y.; Hu, J.; Wang, J. Filtration performance of air filter paper containing kapok fibers against oil aerosols. Cellulose 2018, 25, 6719 - 6729.

[29] Liu, C.; Hsu, P. C.; Lee, H. W.; Ye, M.; Zheng, G.; Liu, N.; Li, W.; Cui, Y. Transparent Air Filter for High-Efficiency PM2.5 Capture. Nat. Commun. 2015, 6, 1－9.

[30] Zhang, R.; Liu, C.; Hsu, P. C.; Zhang, C.; Liu, N.; Zhang, J.; Lee, H. R.; Lu, Y.; Qiu, Y.; Chu, S.; Cui, Y. Nanofiber Air

Filters with HighTemperature Stability for Efficient PM2.5 Removal from the Pollution Sources. Nano Lett. 2016, 16, 3642－3649.

[31] Fan, X.; Wang, Y.; Zheng, M.; Dunne, F.; Liu, T.; Fu, X.; Kong, L.; Pan, S.; Zhong, W. H. Morphology Engineering of Protein Fabrics for Advanced and Sustainable Filtration. J. Mater. Chem. A 2018, 6, 21585－21595. 36-38 41-43

[32] Liu, J.; Zhang, X.; Zhang, H.; Zheng, L.; Huang, C.; Wu, H.; Wang, R.; Jin, X. Low Resistance Bicomponent Spunbond Materials for Fresh Air Filtration with Ultra-High Dust Holding Capacity. RSC Adv. 2017, 7, 43879－43887.

[33] Yang, Y.; Zhang, S.; Zhao, X.; Yu, J.; Ding, B. Sandwich Structured Polyamide-6/Polyacrylonitrile Nanonets/Bead-On-String Composite Membrane for Effective Air Filtration. Sep. Purif. Technol. 2015, 152, 14－22.

[34] Zhang, S.; Tang, N.; Cao, L.; Yin, X.; Yu, J.; Ding, B. Highly Integrated Polysulfone/Polyacrylonitrile/Polyamide-6 Air Filter for Multilevel Physical Sieving Airborne Particles. ACS Appl. Mater. Interfaces 2016, 8, 29062－29072.

[35] Zhang, S.; Liu, H.; Yin, X.; Yu, J.; Ding, B. Anti-Deformed Polyacrylonitrile/Polysulfone Composite Membrane with Binary Structures for Effective Air Filtration. ACS Appl. Mater. Interfaces 2016, 8, 8086－8095.

[36] Gao, H.; Yang, Y.; Akampumuza, O.; Hou, J.; Zhang, H.; Qin, X. A Low Filtration Resistance Three-Dimensional Composite Membrane Fabricated via Free Surface Electrospinning for Effective PM2.5 Capture. Environ. Sci.: Nano 2017, 4, 864－875.

[37] Yuan, Y.; Zhao, J.; Dong, C.; Shao, Y.; Liu, Y.; Li, J.; Zhong,

C.; Ye, L.; Song, R.; Zhang, H.; Zhang, Z. Improved Electret Properties of Poly (Vinylidene Fluoride)/Lithium Niobate Nanocomposites for Applications in Air Filters. Macromol. Mater. Eng. 2019, 304, 1900003.

[38] Wang, Z.; Pan, Z. Preparation of Hierarchical Structured NanoSized/Porous Poly (Lactic Acid) Composite Fibrous Membranes for Air Filtration. Appl. Surf. Sci. 2015, 356, 1168−1179.

[39] Long, J.; Tang, M.; Sun, Z.; Liang, Y.; Hu, J. Dust Loading Performance of a Novel Submicro-Fiber Composite Filter Medium for Engine. Materials 2018, 11, 2038.

[40] Zhang, Q.; Welch, J.; Park, H.; Wu, C. Y.; Sigmund, W.; Marijnissen, J. C. M. Improvement in Nanofiber Filtration by Multiple Thin Layers of Nanofiber Mats. J. Aerosol Sci. 2010, 41, 230−236.

[41] Onur, A.; Ng, A.; Batchelor, W.; Garnier, G. Multi-Layer Filters: Adsorption and Filtration Mechanisms for Improved Separation. Front. Chem. 2018, 6, 417

[42] Li, Y.; Tokura, H.; Guo, Y.; Wong, A.; Wong, T.; Chung, J.; Newton, E. Effects of Wearing N95 and Surgical Facemasks on Heart Rate, Thermal Stress and Subjective Sensations. Int. Arch. Occup. Environ. Health 2005, 78, 501−509.

[43] Zaatari, M.; Novoselac, A.; Siegel, J. The Relationship Between Filter Pressure Drop, Indoor Air Quality, and Energy Consumption in Rooftop HVAC Units. Build. Environ. 2014, 73, 151−161.

[44] Azimi, P.; Stephens, B. HVAC filtration for Controlling Infectious Airborne Disease Transmission in Indoor Environments: Predicting Risk Reductions and Operational

Costs. Build. Environ. 2013, 70, 150－160.
[45] Tian, E.; Gao, Y.; Mo, J. Electrostatically Assisted Air Coarse Filtration for Energy Efficient Ambient Particles Removal: Long-Term Performance in Real Environment and Influencing Factors. Build. Environ. 2019, 164, 106348.
[46] Jung, S.; An, J.; Na, H.; Kim, J. Surface Energy of Filtration Media Influencing the Filtration Performance against Solid Particles, Oily Aerosol, and Bacterial Aerosol. Polymers 2019, 11, 935.
[47] Liu, Y.; Qian, X.; Wang, L.; Qian, Y.; Bai, H.; Wang, X. Hierarchical Micro/Nanofibrous Filter for Effective Fine-Particle Capture. Powder Technol. 2020, 360, 1192－1199
[48] Ahn YC, Park SK, Kim GT, Hwang YJ, Lee CG, Shin HS, et al. Development of high efficiency nanofilters made of nanofibers. Curr Appl Phys 2006, 6, 1030 - 1035.
[49] Taylor GI. Electrically Driven Jets. Proc R Soc Lond, A Math Phys Sci, (1934 - 1990), 1969, 313, 453-75.
[50] Jung, J. S.; Moon, J. D. Corona Discharge and Ozone GenerationCharacteristics of a Wire-Plate Discharge System with a Glass-Fiber Layer. J. Electrost. 2008, 66, 335－341.
[51] Reneker DH, Yarin AL. Electrospinning jets and polymer nanofibers. Polymer 2008, 49, 2387 - 2425.
[52] Ki CS, Baek DH, Gang KD, Lee KH, Um IC, Park YH. Characterization of gelatin nanofiber prepared from gelatin-formic acid solution. Polymer 2005, 46, 5094 - 102
[53] Haghi AK, Akbari M. Trends in electrospinning of natural nanofibers. Phys Status Solidi 2007;204:1830 - 4.
[54] Zhang C, Yuan X, Wu L, Han Y, Sheng J. Study on morphology of electrospun poly (vinyl alcohol) mats. Eur

Polym J 2005, 41, 423 - 32.

[55] Schiller, S.; Schmid, H. J. Highly Efficient Filtration of Ultrafine Dust in Baghouse Filters Using Precoat Materials. Powder Technol. 2015, 279, 96－105.

[56] Heikkinen, M.S.A.; Harley, N.H. Experimental Investigation of Sintered Porous Metal Filters. J. Aerosol Sci. 2000, 31, 721 - 738.

[57] Lee, K.W.; Liu, B.Y.H. Theoretical Study of Aerosol Filtration by Fibrous Filters. Aerosol Sci. Technol. 1982, 1, 147 - 161.

[58] Chen, C.C.; Lehtimäki, M.; Willeke, K. Aerosol Penetration through Filtering Facepieces and Respirator Cartridges. Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 1992, 53, 566 - 574.

[59] Park, K. T.; Hwang, J. Filtration and Inactivation of Aerosolized Bacteriophage MS2 by a CNT Air Filter Fabricated Using ElectroAerodynamic Deposition. Carbon 2014, 75, 401－410.

[60] Maze, B.; Tafreshi, H. V.; Wang, Q.; Pourdeyhimi, B. A Simulation of Unsteady-State Filtration via Nanofiber Media at Reduced Operating Pressures. J. Aerosol Sci. 2007, 38, 550－571.

[61] Lee, KW and BYH Liu. On the Minimum Efficiency and the Most Penetrating Particle Size for Fibrous Filters. Air Pollution Control Association Journal 1972, 30, 337-381.

[62] Kravtsov, A.; Brünig, H.; Zhandarov, S.; Beyreuther, R. The Electret Effect in Polypropylene Fibers Treated in a Corona Discharge. Adv. Polym. Technol. 2000, 19, 312－316.

[63] Lee, J.; Kim, J. Material Properties Influencing the Charge Decay of Electret Filters and their Impact on Filtration Performance. Polymers 2020, 12, 721.

[64] Jeong, S.; Cho, H.; Han, S.; Won, P.; Lee, H.; Hong, S.; Yeo, J.; Kwon, J.; Ko, S. H. High Efficiency, Transparent, Reusable, and Active PM2.5 Filters by Hierarchical Ag Nanowire Percolation Network. Nano Lett. 2017, 17, 4339−4346.

[65] Wang, S.; Zhao, X.; Yin, X.; Yu, J.; Ding, B. Electret Polyvinylidene Fluoride Nanofibers Hybridized by Polytetrafluoroethylene Nanoparticles for High-Efficiency Air Filtration. ACS Appl. Mater. Interfaces. 2016, 8, 23985−23994.

[66] Yang, C. Aerosol Filtration Application Using Fibrous Media-An Industrial Perspective. Chin. J. Chem. Eng, 2012, 20, 1-9.

[67] Hung, C. H.; Leung, W. W. F. Filtration of Nano-Aerosol Using Nanofiber Filter under Low Peclet Number and Transitional Flow Regime. Sep. Purif. Technol. 2011, 79, 34-42.

[68] Whitaker, S. Flow in Porous Media I: A Theoretical Derivation of Darcy's Law. Transport Porous Med. 1986, 1, 3-25.

[69] Xia, T.; Bian, Y.; Zhang, L.; Chen, C. Relationship between pressure drop and face velocity for electrospun nanofiber filters. Energy and Buildings. 2018, 158, 987-999.

[70] Zulfi, A.; Hapidin, D. A.; Munir, M. M.; Iskandar, F.; Khairurrijal, K. The Synthesis of Nanofiber Membranes from Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) Waste Using Electrospinning for Use as Air Filtration Media. RSC Adv. 2019, 9, 30741−30751.

[71] Roh, S.; Kim, S.; Kim, J. Facile functionalization via plasma-enhanced chemical vapor deposition for the effective

filtration of oily aerosol. Polymers 2019, 11, 1490.

[72] Barrett, L.W.; Rousseau, A.D. Aerosol Loading Performance of Electret Filter Media. Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 1998, 59, 532 - 539.

[73] Plebani, C.; Listrani, S.; Di Luigi, M. Filtering Facepieces: Effect of Oily Aerosol Load on Penetration Through the Filtering Material. Med. Lav. 2010, 101, 293 - 302.

[74] Thomas, D.; Penicot, P.; Contal, P.; Leclerc, D.; Vendel, J. Clogging of Fibrous Filters by Solid Aerosol Particles Experimental and Modelling Study. Chem. Eng. Sci. 2001, 56, 3549 - 3561.

[75] Barhate, R. S., & Ramakrishna, S. (2007). Nanofibrous filtering media: Filtration problems and solutions from tiny materials. Journal of Membrane Science, 296, 1 - 8

[76] Qin, X. H.; Wang, S. Y. Filtration Properties of Electrospinning Nanofibers. J. Appl. Polym. Sci. 2006, 102, 1285－1290.

[77] Maze, B.; Tafreshi, H.V.; Wang, Q.; Pourdeyhimi, B. A Simulation of Unsteady-State Filtration via Nanofiber Media at Reduced Operating Pressures. J. Aerosol Sci. 2007, 38, 550 - 571.

[78] Kadam, V.; Kyratzis, I. L.; Truong, Y. B.; Schutz, J.; Wang, L.; Padhye, R. Electrospun Bilayer Nanomembrane with Hierarchical Placement of Bead-on-string and Fibers for Low Resistance Respiratory Air Filtration. Sep. Purif. Technol. 2019, 224, 247－254

[79] Huang, J. J.; Tian, Y.; Wang, R.; Tian, M.; Liao, Y. Fabrication of Bead-On-String Polyacrylonitrile Nanofibrous Air Filters with Superior Filtration Efficiency and Ultralow

Pressure Drop. Sep. Purif. Technol. 2020, 237, 116377.
[80] Wang, J.; Zhao, W.; Wang, B.; Pei, G.; Li, C. Multilevel-LayerStructured Polyamide 6/Poly (Trimethylene Terephthalate) Nanofibrous Membranes for Low-Pressure Air Filtration. J. Appl. Polym. Sci. 2017, 134, 44716.
[81] Roh, S.; Song, M.; Lee, K.; Park, K.; Kim, J. Experimental and Computational Investigation of Intra- and Interlayer Space for Enhanced Depth Filtration and Reduced Pressure Drop. ACS Appl. Mater. Interfaces, 2020, 12, 46804-46815.

Abstract

The effect of geometric and multi-layer structures on filtration efficiency and pressure drop of filter web

SANG HYUN ROH
Department of Textiles, Merchandising and Fashion Design
The Graduate School
Seoul National University

The build-up of pressure drop with mass loading of particles aggravates the breathing resistance and energy consumption of HVAC (heating, ventilation, air-conditioning) system. Lowering the pressure drop and extending the service life is the significant requirement for above reasons. This study investigated the role of pore and layer construction of filter media on the pressure drop development with continued particle loading.

Five basic morphologies, including microfiber, nanofiber, microbead-on-string, and a mix of those morphologies were fabricated via electrospinning. Then the variations of layered constructions were made, to include a total 14 different filter

structures. For the conventional meltblown filter, the web-to-web space was implemented by inserting a bulk air gap between the filter webs.

For a single layer electrospun web, the pore size rather than the percent porosity had a major impact on the pressure drop. Nanofiber electrospun web which had most small pore size showed high initial pressure drop. Also, the pressure drop increased more quickly than other webs, because small surface pores were quickly clogged by the collected particles. The web with microbead on string showed a low initial pressure drop. Microbead sustained space between nanofiber, helping the depth filtration through the inner pores. For dual layers, the space between the layers and the placement order of webs were important factors affecting the pressure drop and depth loading of particles.

For the layered constructions with conventional meltblown webs, the effect of air gap on the reduced pressure drop was greater at the higher face velocity. The inserted air gap was more effective than the 0 gap in reducing the pressure drop, because the air space between filter layers acted as an effective air flow channel between the compact filter layers. The loading capacity also increased with the air gap implementation, effectively delaying the clogging and extending the service life. The results of this study can be used as a practical design guide to reduce pressure drop and to promote depth filtration.

keywords : Pore, Layer construction, Pressure drop, Service life, Depth filtration

Student Number : 2019-26586