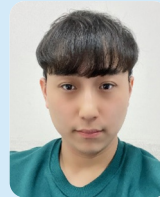


용융 전기방사 공정 및 공기 중 미세유해입자 포집 응용 연구 동향



이병선

- 2013-2016, 삼성종합기술원 연구위원
- 2016-2018, University of California, San Diego 박사후 연구원
- 2018-2019, 서울대학교 연구조교수
- 2019, LG화학
- 2019-2020, 한국생산기술연구원 선임연구원
- 2020-현재, 단국대학교 고분자시스템공학부 부교수



박민규

- 2023 - 현재, 단국대학교 파이버융합소재 공학전공 석사과정



홍석원

- 2022 - 현재, 단국대학교 파이버융합소재 공학전공 석사과정



구은모

- 2023 - 현재, 단국대학교 파이버융합소재 공학전공 석사과정



홍성웅

- 2023 - 현재, 단국대학교 파이버융합소재 공학전공 석사과정

1. 서 론

2010년대 중반부터 우리 사회는 미세먼지 및 초미세먼지 등 공기 중 유해입자에 의한 대기오염 및 환경문제에 노출되어 있고[1], 2020년대 초반 전세계에 수많은 사망자를 발생시킨 코로나바이러스(COVID-19)는 공기 중 병원균 및 바이러스의 위험성을 사회 일반으로 확산시켰다[2]. 이와 같은 공기 중 미세유해입자는 직경이 작고 가벼워 반응성이 높으며 대기 중에 장시간 표류하는 특성을 가지고 있기 때문에 호흡기 질환과 같은 건강 문제를 야기한다[3]. 따라서, 이를 효과적으로 제거하여 대기질을 안정시키고 건강 문제를 예방하는 것이 사회적으로도 매우 중요한 문제이다.

공기 중 유해미세입자를 제거하기 위해서 기존에는 멜트블로운 공정이 활용되어 왔다. 멜트블로운된 부직포는 대량 생산이 용이한 장점을 바탕으로 여과 소재 제조 방법으로 사용되었지만, 섬유 직경 제어가 쉽지 않고 부직포 제조 후 정전처리 공정이 추가적으로 필요하기 때문에 개선이 필요하다[4,5]. 전기방사 공정은 섬유 직경 제어가 용이하고 세섬도 섬유 형성이 가능하며 추가적인 정전처리가 필요하지 않아 전기방사를 통해 제

조한 여과 소재는 여과 효율이 우수한 것으로 보고되었다[6,7]. 현재 주류를 이루는 전기방사 공정은 고분자를 용매에 녹여 용액 상태의 고분자를 나노섬유화하는 과정으로 잔류 용매에 대한 위험성이 대두되고 있다. 반면, 용융 전기방사 공정은 오랜 역사와 용매를 활용하지 않아 친환경적이고 안전한 장점에 도 불구하고 많은 연구가 이루어지지 않고 있다[8]. 용융 전기방사 공정을 통해 submicron 정도의 세섬도 섬유를 가진 부직포 형성 시 우수한 유해미세입자 저감 소재로의 활용이 기대된다. 이 총설에서는 이와 같은 기대를 실현시키기 위해 그동안 구축된 기본 장치의 구성, 개선을 위한 노력과 용융 전기방사된 여러 여과 소재 후보군의 사례를 짚어보고, 이를 공기 중 미세유해입자 저감용 여과소재로 적용하기 위한 노력과 전략을 논하고자 한다.

2. 본 론

2.1. 용융 전기방사 장치의 구성

용융 전기방사의 원리는 용액 전기방사 공정과 동일하게 1) 전도도가 매우 낮은 액체 상태의 고점도 유체에 고전압을 인가하거나 고밀도 전기장을 형성함으로써 유체 표면에 전하를 부여하고, 2) 표면에 분포된 전하의 밀도가 증가함에 따라 전하에 의한 힘이 유체의 표면장력을 극복하여, 3) Taylor cone 및 젯을 형성하며 전하 상호간 전기적 척력에 의해 연신 및 고화 되어 섬유가 형성되는 것이다. 이를 구현하기 위해 용액 전기방사와 동일하게 젯 형성을 위해 고전압 인가장치가 필요하고, 고화된 고분자 섬유를 집속할 수 있는 집속 장치가 필요하다. 용액 전기방사 장치와 구분되는 특징은 고분자를 용융 상태로 유지 공급하기 위한 가열부가 포함된 용융 고분자 공급장치를 공통적으로 포함하는 것이다(Figure 1)[9].

전술한 장치의 구성을 기본으로 용융 전기방사 공정을 개선하기 위한 여러 방향의 연구가 진행되었다. 대표적인 연구 방향은 1) 섬유 직경 감소, 2) 생산량 증대, 3) 젯 길들이기 등 세 가지 목적에 집중되어 있다.

우선 섬유 직경 감소 연구의 필요성은 다음과 같다. 기존의 연구에서는 섬유의 직경이 수 μm 에서 수십 μm 에 이르는 섬유가 다수 보고되었다[10-12]. 대체로 용융 상태의 고분자가 고분자 용액에 비해 점도가 높고, 용융 온도가 증가함에 따라 점도가 감소하는 경향을 보이지만 일정 온도 이상에서 고분자가 열분해 되는 거동으로 전이되기 때문에 점도를 낮추는데 한계

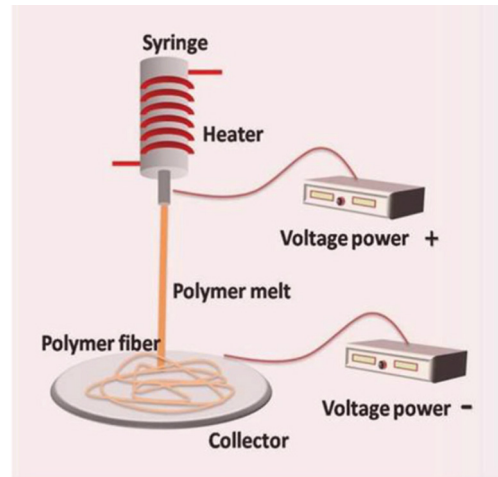


Figure 1. 용융 전기방사 장치 모식도[9].

가 있다[10]. 그럼에도 불구하고 대표적 경쟁기술로서 멜트블로운 공정을 통해 제조되는 섬유의 직경은 1에서 10 μm 범위 내에 분포하고 평균 직경이 1에서 2 μm 내외[13]로 상용 부직포를 대량생산하는데 활용됨을 감안하면 섬유의 직경을 줄여 섬도를 낮추는 것이 용융 전기방사 공정의 차별적 우수성을 부각시킬 수 있는 방법이다.

섬유의 직경을 줄이기 위해 용법 공정 변수를 조절한다. 용융 및 공급 온도 증대, 작은 내경의 노즐 사용, 인가 전압 증대 통한 전기장 강화, 공급 속도 감소 등의 변수 조절을 통한 직경 감소방법이 보고되고 있다[8]. 그러나 이와 같은 공정 변수 조절만으로 submicron 정도의 섬유 직경을 얻기는 어렵다. 보다 극대화된 직경 감소를 위해서는 공정을 발전시켜 동일한 점도에서도 젯 형성 이후 연신을 도울 수 있는 공정의 설계가

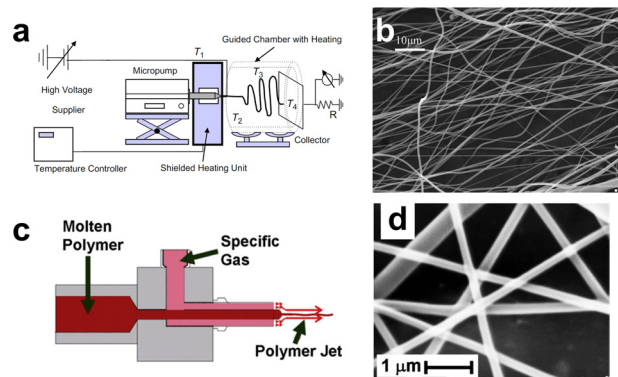


Figure 2. 섬유 직경 감소 전략: a) 가열 챔버 설계 모식도 및 b) 이를 활용하여 제조한 PLA 섬유[14], c) 기체 보조 노즐 설계 모식도 및 d) 이를 활용하여 제조한 PLA 섬유[15].

필요하다. Cornell University의 주용락 교수팀은 Figure 2a와 같이 젯 형성 이후 유리전이 온도 이상에서 젯이 연신되어 고화를 지연시킬 수 있는 가열 챔버를 설계하여 점도를 낮추어 Figure 2b의 평균 직경 800 nm 내외의 polylactic acid(PLA) 섬유를 제조하였고[14], 추가적인 연구를 통해 Figure 2c)와 같이 멜트블로우의 고압 기체를 활용한 세섬화 과정을 차용하여 기계 보조 노즐을 제작하여 연신을 가속화시킴으로써 Figure 2d)의 평균 직경 180 nm PLA 섬유 직경을 구현했다[15].

두 번째로 생산량 증대에 대한 필요성은 다음과 같다. 일반적인 전기방사 공정은 낮은 생산량의 문제가 지적된다[16]. 용액 전기방사의 낮은 농도를 고려하면 용융 전기방사는 용액 전기방사 대비 5-10배 이상 생산속도가 높아 유리하지만, 온도를 올리는데 공정비용이 발생하는 것은 용액 전기방사 대비 불리하다. 경쟁 기술인 멜트블로우와 비교하면 생산속도는 수십-수백 배가 차이날 정도로 생산속도가 열위에 놓여있고[13], 젯을 형성시키기 위한 고전압 인가에 추가적인 공정비용이 발생하기 때문에 경제적 측면에서도 불리하다. 따라서, 생산량 증대를 통해 용액 전기방사 및 멜트블로우 등 유관 기술 대비 경쟁력을 확보하는 것이 중요하다.

생산량 증대를 위한 방법으로는 노즐 개수 확대와 needleless 공정 설계 등 두 가지가 대표적이다. 우선 Figure 3a와 같은 노즐 개수 확대는 단일 노즐 대비 속도에서 확연한 개선을 기대

할 수 있다[17]. 기존 설계를 최소한으로 변경하여 적용이 가능한 장점이 있으나 노즐 개수에 한정되어 생산량이 확대되는 것이 단점이다. Figure 3b와 같이 고분자를 용융조에 배치하여 용융시키고 고분자 용융액이 회전하는 디스크를 따라 이동하며 섬유가 형성되는 형태도 고려할 수 있다[18]. 그러나 섬유의 직경이 불균일하고 인가해야 하는 전압이 일반 용융 전기방사 대비 매우 크기 때문에 한계도 명확한 방법이다. Beijing University of Chemical Technology의 Weimin Yang 교수 그룹에 의해 설계된 Figure 3c)의 우산형태 needleless 노즐은 고전압을 직접 용융 상태의 고분자에 인가하지 않고 집속 장치에 인가하여 전기장을 형성함으로써 다중 젯을 형성시키는 원리이다[19]. 이 기술의 경우 2019년 기준 폭 1.6 m의 멤브레인을 시간당 300 - 600 g 수준의 생산량으로 양산에 성공한 것으로 보고하고 있다[20].

마지막으로 젯 길들이기 연구의 목적은 타겟 응용을 위한 성능 개선에 두고 있다. University of Würzburg의 Paul D. Dalton 교수 그룹에서는 Figure 4a에 도시된 바와 같이 용융 상태의 고분자가 높은 점도를 보이며, 하전 거동이 상대적으로 억제되어 용융 전기방사 중 테일러 콘 및 젯 형성 이후 직진 구간이 용액 전기방사에 비해 길고 whipping 현상을 억제하기 때문에 젯의 거동 제어가 상대적으로 용이한 점에 주목하여 많은 연구를 진행해왔다[21]. 학계에서는 이를 melt

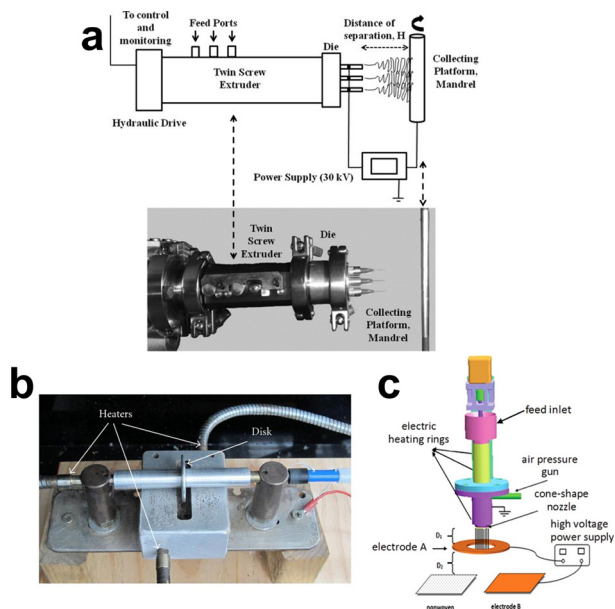


Figure 3. 생산량 확대를 위한 용융 전기방사 설계 예: a) 다중 노즐 전략[17], b) 용융조와 디스크 기반 needleless 전기방사 전략[18], c) 우산 형태 needleless 노즐 전략[19].

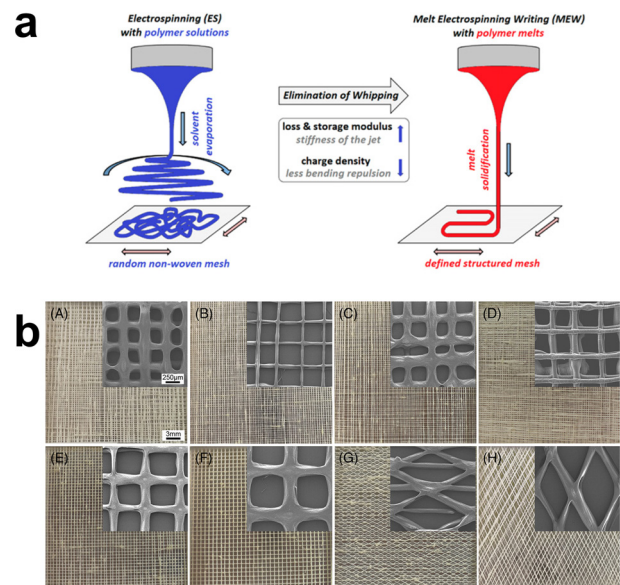


Figure 4. Melt electrospinning writing(용융 전기방사 쓰기) 공정: a) 고분자 용액 및 용융 전기방사 시 젯 거동 비교 모식도[21] 및 b) 이 공정을 활용하여 제조한 다양한 pattern[22].

electrospinning writing(용융 전기방사 쓰기) 혹은 direct-writing electrospinning 등으로 명명하고 있는데, 정밀도 높게 패턴을 구현할 수 있다는 점에서 writing이라는 표현을 사용하고 있다. Northwestern Polytechnical University의 Da-Chuan Yin 교수 그룹에서는 이 기술을 활용해서 Figure 4b와 같은 다양한 형태의 패턴을 만들었다[22]. 이 기술은 더욱 발전하여 최근 2차원 대면적 그림을 완성하거나[23], 적층하여 3차원 형태의 패턴을 구현하여 조직 공학에 활용하는 연구도 진행되고 있다[24].

2.2. 여과 소재 후보군 용융 전기방사 공정 기반 섬유 제조 사례

이론적으로 용액 전기방사와 마찬가지로 용융 전기방사 공정을 통해 전기 전도도가 매우 작은 열가소성 고분자는 섬유 형성이 가능하다. 여러 열가소성 고분자 중 일반적인 유기 용매에 용해되지 않지만 용융 공정을 통해 성형되어 많이 활용되는 polypropylene(PP)이나 polyethylene terephthalate(PET) 등 소재를 submicron 정도의 섬유를 형성하는데 이 공정의 활용 가치가 높은 것으로 볼 수 있다. 1981년에 McGill University에서 가장 먼저 용융 전기방사 공정을 통해 제조된 소재는 주요 여과소재인 PP이다(Figure 5a)[25]. 이 연구에서 사용된 PP는 isotactic 구조를 가진 Shell 5220으로 용융 흐름 지수(melt flow index, MI)가 0.5로 PP의 용점이 159 °C에서 163 °C임을 고려하여 220 – 240 °C에서 방사가 진행되었다. MI 값이 작은 것으로 보아 분자량이 높은 것으로 판단되며, 제조된 섬유의 직경은 50 μm 이상으로 매우 크게 형성되었다. 2004년에 진행된 연구에서는 질량평균분자량 12,000의 저분자량 isotactic PP를 200 °C에서 방사하여 submicron 섬유를 형성함을 보고했다(Figure 5b)[26]. 부산대학교 김한성 교수 그룹은 MI값이 증가하고 방사 온도가 증가함에 따라 용융 전기방사된 PP 섬유의 직경이 감소함을 보고했다[27].

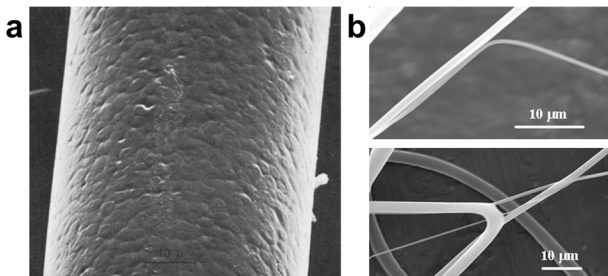


Figure 5. 용융 전기방사된 polypropylene (PP): a) melt flow index 0.5 Shell 5220 PP [25], b) 질량 평균 분자량 12,000 Sigma-Aldrich Isotactic PP [26].

최근 주목받는 재생 PET의 활용 관련하여 용융 전기방사 공정을 통해 부직포를 형성하면 여과 소재 뿐만 아니라 자동차 흡음재 등 신규 응용 분야를 제시할 수 있다. 용융 온도가 260 °C 정도로 높은 PET는 용융 공정을 위해 고온 가열이 필요하다. 전북대학교 이대수 교수 그룹은 270 °C에서 용융하여 전기방사를 수행했고[28], University of Fukui의 Nobuo Ogata 교수 그룹은 가열하지 않고 막대 형태의 PET 고분자 덩어리에 세방향에서 레이저 빔을 조사하여 용융시켜 방사하여 평균 직경 1.7 μm 의 섬유를 제조했다[29]. Beijing Institute of Fashion Technology의 Conju Li 교수 팀은 University of Fukui와 같은 설비를 구축해 SiO₂ 나노입자가 포함된 직경 분포 500 nm – 7 μm 의 SiO₂/PET 복합섬유를 제조했다[30]. 고분자 덩어리에 레이저 빔을 조사하여 용융 시키는 공정은 연속 공정의 구현이 용이하지 않아 이를 대체할 수 있는 가열 공정 개발이 필요한 실정이다.

생분해성 고분자 polylactic acid(PLA) 역시 최근 친환경적인 여과 소재로 각광받고 있다. 앞서 PET의 용융 전기방사를 수행한 University of Fukui의 Nobuo Ogata 교수 그룹은 마찬가지로 레이저 빔을 조사하여 PLA 용융 전기방사를 수행하여 평균 직경 1 μm 이하 submicron 수준의 PLA 섬유를 제조했다[31]. 그러나 PET 경우와 달리 PLA의 용점은 170 °C 정도로 낮기 때문에 레이저를 조사하지 않고도 용융 전기방사

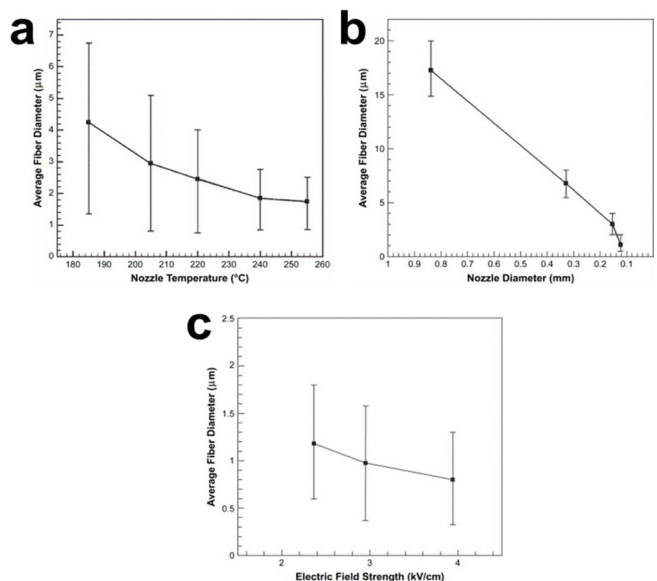


Figure 6. 공정 변수 변화에 따른 polylactic acid (PLA) 직경 변화: a) 용융 온도, b) 노즐 직경, c) 전기장 세기[14].

의 적용이 가능하다. 앞서 2.1.에서도 기술한 바 있는 Cornell University의 주용락 교수 그룹 결과에 따르면 PLA는 Figure 6a와 같이 180 °C 이상에서 용융 전기방사 공정 적용이 가능하고, 용융 온도가 증가함에 따라 직경 및 직경 편차가 감소하는 경향을 보인다[14]. Figure 6b에서 보이는 바와 같이 노즐 직경이 감소함에 따라 평균 직경이 감소하고, Figure 6c와 같이 전기장장의 세기가 강해짐에 따라 직경은 감소한다. 공정 변수 조절에 더해 멜트블로운과 유사하게 기체 보조 노즐을 설계하고 기체를 통한 압력을 부여함에 따라 평균 직경은 기체 미주입 조건 대비 20분의 1 수준인 180 nm로 감소한다[15]. 따라서 기체 보조 용융 전기방사 공정을 활용한 PLA 섬유 제조의 경우 멜트블로운 대비 세섬도 섬유 구현이 가능하기 때문에 여과소재의 성능을 개선시키는 데 활용될 수 있다.

2.3. 공기 중 미세유해입자 포집 응용

용융 전기방사 공정을 통해 여과 소재를 설계할 때 멜트블로운 대비 장점은 1) 고전압을 인가하기 때문에 추가적인 정전 처리가 필요 없고, 2) 세섬화가 가능하기 때문에 같은 평량의 멜트블로운 부직포 대비 여과 효율을 높일 수 있으며, 3) 젯의 제어가 용이하여 부직포 형태가 아닌 배열된 여과 소재의 구현이 가능한 점을 꼽을 수 있다.

우선 정전처리하는 여과 효율을 높일 수 있는 효과적인 방법으로 알려져 있다[32]. 고전압 인가를 통해 제조된 부직포는 전하를 배출하지 않은 경우 대전된 상태로 존재한다고 가정할

수 있다. 따라서 추가적인 방전 처리를 통해 대전 효과를 검증할 수 있다. 리투아니아 Kaunas University of Technology의 Linas Kliucininkas 교수 그룹의 연구 결과에 따르면 polyamide12를 용융 전기방사하고, polyamide6/6를 formic acid에 용해하여 전기방사하는 경우 일부를 제외하고 방전처리 시 여과 효율이 감소하는 것으로 나타났다[33].

대전 효과에 더해 세섬화를 통해 추가적인 여과 성능의 개선이 가능하다. Qingdao University의 Xin Ning 교수 그룹은 멜트블로운 PP와 용융 전기방사 공정을 통해 제조한 PP 부직포의 여과 성능을 직접 비교했다(Figure 7) [13]. 그림 7a와 b의 비교에서 보이는 바와 같이 용융 전기방사 공정 최적화를 우선 수행 후 여과 소재 제조를 통해 평균 직경 0.96 μm 의 부직포를 제조하여 직경을 약 40% 감소시켰고, 그로 인해 섬유 간 형성된 공극은 평균 10% 정도 감소했다. 그 결과 Figure 7c와 같이 입자 크기 2.5 μm 의 입자 여과 시 효율이 3% 이상, 0.3 μm 의 입자 여과 시 10% 이상 개선됨을 보였다. 이와 같은 효과는 내열성이 우수해서 고온 조건에서 연도 가스 등을 여과할 때 활용되는 polyphenylene sulfide(PPS)를 용융 전기방사하여 얻은 부직포의 경우에도 확인할 수 있다[34]. 같은 평량 조건인 186 g/m²에서 상용 PPS 여과는 0.3에서 10 μm 직경의 연도 가스 제거 효율이 87.03%이나, 용융 전기방사 된 PPS 여과는 99.96%로 12% 이상 향상된 결과를 보였다. 이와 같은 반복적인 여과 성능 개선 결과는 전술한 대전 효과와 세섬화 효과가 복합적으로 작용했기 때문이다.

마지막으로 용융 전기방사 공정 특유의 긴 직진 구간이 나타나는 현상을 활용하여 배열된 형태의 섬유를 제조할 수 있다. 배열된 형태의 섬유를 하나의 층으로 여러 층을 적층하면 여과 효율을 효과적으로 개선시킬 수 있다. 2.1.에서 생산량 확대와 관련하여 상술한 Beijing University of Chemical Technology의 Weimin Yang 교수 그룹에서는 종류수에 분산된 0.1 μm , 0.5 μm 및 5 μm 정도 크기의 입자가 무작위로 배열된 부직포에 비해 정렬된 섬유를 60° 각도 편차를 두고 적층한 구조에서 여과 효율이 개선됨을 Figure 8과 같이 보였다[35]. 이와 같은 전략은 공기중 미세유해 입자의 제거에도 효과적일 것으로 전망된다.

3. 결론 및 전망

1981년 첫 PP 용융 전기방사 이래 44년 간의 연구를 통해 장치의 발전, 소재의 검토 등이 이루어져 왔다. 용융 전기방

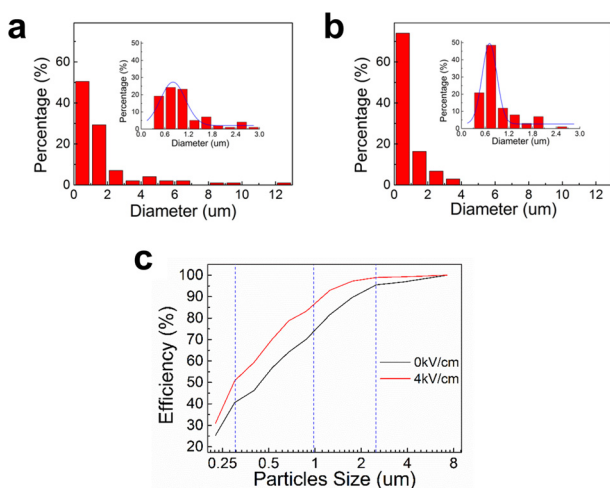


Figure 7. 멜트블로운 및 용융 전기방사 PP 부직포 직경 및 여과성능 비교: a) 멜트블로운 부직포 직경 분포, b) 용융 전기방사 부직포 직경 분포, c) 입경에 따른 여과성능 비교[13].

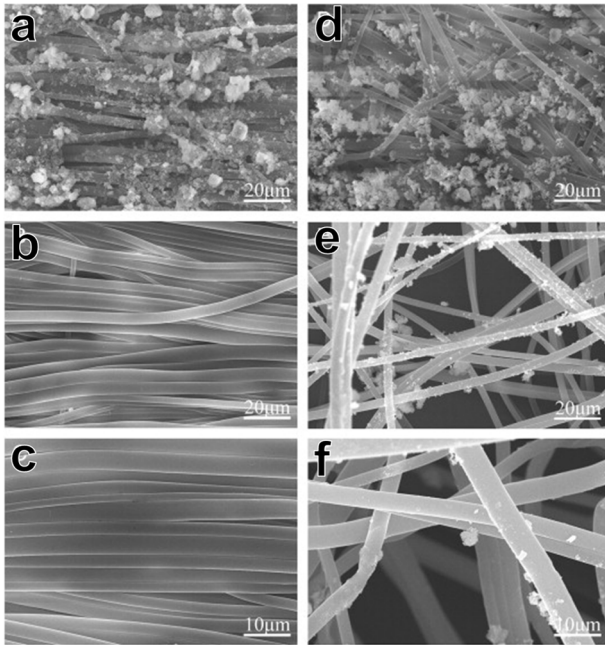


Figure 8. 정렬(좌) 및 무작위 배열된(우) 용융방사 섬유의 수분산 입자 여과 후 SEM image: A, D) 표면층, B, E) 중간층, C, F) 바닥층[35].

사 공정을 활용한 공기 중 유해미세입자 저감 목적의 여과 소재 개발은 잔류 용매 위험이 없고, 세척화가 가능하며, 추가적인 정전처리가 없다는 점에서 용액 전기방사 및 멜트블로운 등 경쟁 기술 대비 장점이 확실하다. 그럼에도 불구하고 장치 설계 시 가열부를 도입해야 하는 높은 난이도로 인해 용액 전기방사 대비 연구 성과의 산출이 미진하다. 국내 연구진에 의한 성과 역시 전북대학교와 부산대학교의 사례를 제외하면 거의 전무한 수준이다. 따라서 여과 소재의 성능을 향상시키기 위한 노력도 잘 이루어지지 않고 있다. 앞서 기술한 바와 같이 여과 효율을 향상시키는 세척화와 대전 효과는 검증되었지만 일반적인 나노섬유 여과 소재에서의 차압이 증가하는 문제는 여전히 해결이 필요하다. 이러한 측면에서 용융 전기방사 공정을 활용한 여과 소재 개발 연구는 장치 구성의 높은 진입장벽을 극복한다면 유해미세입자 저감 분야의 비약적 발전을 앞당길 수 있다. 향후 많은 연구진들이 관심을 가지고 문제를 극복하길 기대한다.

참고문헌

- Lu, T., et al., Multistructured Electrospun Nanofibers for Air Filtration: A Review. *ACS Appl Mater Interfaces*, 13(20), 23293-23313, 2021.
- Collaborators, C.-E.M., Estimating excess mortality due to the COVID-19 pandemic: a systematic analysis of COVID-19-related mortality, 2020-21. *Lancet*, 399(10334), 1513-1536, 2022.
- Donateo, A., et al., Contribution of harbour activities and ship traffic to PM_{2.5}, particle number concentrations and PAHs in a port city of the Mediterranean Sea (Italy). *Environ Sci Pollut Res Int*, 21(15), 9415-29, 2014.
- Podgórski, A., A. Bałazy, and L. Gradoń, Application of nanofibers to improve the filtration efficiency of the most penetrating aerosol particles in fibrous filters. *Chemical Engineering Science*, 61(20), 6804-6815, 2006.
- Wang, S.-X., et al., Electrospinning: a facile technique for fabricating functional nanofibers for environmental applications. *Nanotechnology Reviews*, 5(1), 2016.
- Zhang, L., et al., Multilayer electrospun nanofibrous membranes with antibacterial property for air filtration. *Applied Surface Science*, 515, 2020.
- Muller, A.K., Z.K. Xu, and A. Greiner, Preparation and Performance Assessment of Low-Pressure Affinity Membranes Based on Functionalized, Electrospun Polyacrylates for Gold Nanoparticle Filtration. *ACS Appl Mater Interfaces*, 13(13), 15659-15667, 2021.
- Zhang, L.-H., et al., Recent advances in melt electrospinning. *RSC Advances*, 6(58), 53400-53414, 2016.
- Lian, H. and Z. Meng, Melt electrospinning vs. solution electrospinning: A comparative study of drug-loaded poly(ϵ -caprolactone) fibres. *Materials Science and Engineering: C*, 74, 117-123, 2017.
- Mu, X., et al., Effects of Temperature on Melt Electrospinning: Experiment and Simulation Study. *Fibers and Polymers*, 22(4), 964-971, 2021.
- Nayak, R., et al., Effect of viscosity and electrical conductivity on the morphology and fiber diameter in melt electrospinning of polypropylene. *Textile Research Journal*, 83(6), 606-617, 2013.
- Mazalevska, O., M.H. Struszczyk, and I. Krucinska, Design of vascular prostheses by melt electrospinning—structural characterizations. *Journal of Applied Polymer Science*, 129(2), 779-792, 2013.
- Pu, Y., et al., Preparation of Polypropylene Micro and Nanofibers by Electrostatic-Assisted Melt Blown and Their Application. *Polymers*, 10(9), 959, 2018.
- Zhou, H., T.B. Green, and Y.L. Joo, The thermal effects on electro-

- pinning of polylactic acid melts. *Polymer*, 47(21), 7497-7505, 2006.
15. Zhmayev, E., D. Cho, and Y.L. Joo, Nanofibers from gas-assisted polymer melt electrospinning. *Polymer*, 51(18), 4140-4144, 2010.
16. Vass, P., et al., Scale-up of electrospinning technology: Applications in the pharmaceutical industry. *WIREs Nanomedicine and Nanobiotechnology*, 12(4), e1611, 2020.
17. Senturk-Ozer, S., et al., Dynamics of electrospinning of poly(caprolactone) via a multi-nozzle spinneret connected to a twin screw extruder and properties of electrospun fibers. *Polymer Engineering & Science*, 53(7), 1463-1474, 2013.
18. Fang, J., et al., Needleless Melt-Electrospinning of Polypropylene Nanofibres. *Journal of Nanomaterials*, 2012, 382639, 2012.
19. Li, H., et al., Polypropylene fibers fabricated via a needleless melt-electrospinning device for marine oil-spill cleanup. *Journal of Applied Polymer Science*, 131(7), 2014.
20. Mingjun, C., et al., An example of industrialization of melt electrospinning: Polymer melt differential electrospinning. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 2(3), 110-115, 2019.
21. Hochleitner, G., et al., Additive manufacturing of scaffolds with sub-micron filaments via melt electrospinning writing. *Biofabrication*, 7(3), 035002, 2015.
22. He, F.-L., et al., Controlled release of antibiotics from poly-ε-caprolactone/polyethylene glycol wound dressing fabricated by direct-writing melt electrospinning. *Polymers for Advanced Technologies*, 30(2), 425-434, 2019.
23. Jin, Y., et al., Fabrication of heterogeneous scaffolds using melt electrospinning writing: Design and optimization. *Materials & Design*, 185, 108274, 2020.
24. Wang, Z., et al., Fabrication and in vitro evaluation of PCL/gelatin hierarchical scaffolds based on melt electrospinning writing and solution electrospinning for bone regeneration. *Materials Science and Engineering: C*, 128, 112287, 2021.
25. Larrondo, L. and R. St. John Manley, Electrostatic fiber spinning from polymer melts. I. Experimental observations on fiber formation and properties. *Journal of Polymer Science: Polymer Physics Edition*, 19(6), 909-920, 1981.
26. Lyons, J., C. Li, and F. Ko, Melt-electrospinning part I: processing parameters and geometric properties. *Polymer*, 45(22), 7597-7603, 2004.
27. Kong, C.S., et al., Effects of the spin line temperature profile and melt index of poly(propylene) on melt-electrospinning. *Polymer Engineering & Science*, 49(2), 391-396, 2009.
28. Kim, J.-S. and D.S. Lee, Thermal Properties of Electrospun Polyesters. *Polymer Journal*, 32(7), 616-618, 2000.
29. Ogata, N., et al., Melt-electrospinning of poly(ethylene terephthalate) and polyalirite. *Journal of Applied Polymer Science*, 105(3), 1127-1132, 2007.
30. Li, X., et al., Preparation and properties of PET/SiO₂ composite micro/nanofibers by a laser melt-electrospinning system. *Journal of Applied Polymer Science*, 125(3), 2050-2055, 2012.
31. Ogata, N., et al., Poly(lactide) nanofibers produced by a melt-electrospinning system with a laser melting device. *Journal of Applied Polymer Science*, 104(3), 1640-1645, 2007.
32. Lim, T.H., S.Y. Yeo, and S.H. Lee, Multidirectional evaluations of a carbon air filter to verify their lifespan and various performances. *Journal of Aerosol Science*, 126, 205-216, 2018.
33. Buivydiene, D., et al., Composite micro/nano fibrous air filter by simultaneous melt and solution electrospinning. *Journal of Aerosol Science*, 154, 105754, 2021.
34. Chen, Q., et al., Melt differential electrospinning of polyphenylene sulfide nanofibers for flue gas filtration. *Polymer Engineering & Science*, 60(11), 2887-2894, 2020.
35. Li, X., et al., Effect of oriented fiber membrane fabricated via needleless melt electrospinning on water filtration efficiency. *Desalination*, 344, 266-273, 2014.