특집

미세먼지 저감/대응을 위한 섬유기술 : Bag Filter

김종훈

- 1990–1996. 한양대학교 섬유공학 학사
- 1996–1998. 한양대학교 섬유공학 석사
- 2005–2011. 한양대학교 섬유고분자공학 박사
- 2014–2019. FITI시험연구원
- 2019–현재. 한국섬유소재연구원

이호영

- 2012–2018. 단국대학교 파이버시스템공학 학사
- 2018–2020. 단국대학교 파이버시스템공학 석사
- 2020–2021. 한국전자기술연구원(KETI)
- 2021–현재. 한국섬유소재연구원

김연주

- 2012–2016. 단국대학교 파이버시스템공학과 학사
- 2016–2018. 단국대학교 파이버시스템공학과 석사
- 2018–2022. ㈜포레스코
- 2022–2023. 한국섬유스마트공정연구원
- 2023–현재. 한국섬유소재연구원

1. 서 론

먼지란 대기 중에 떠다니거나 흩날려 내려오는 입자상 물질을 말하는데, 화석연료를 태울 때나 공장과 자동차 등의 배출가스에서 많이 발생한다. 먼지는 입자의 크기에 따라 50 μm 이하인 총 먼지(TSP, total suspended particles)와 입자크기가 매우 작은 미세먼지(PM, particulate matter)로 구분한다. 미세먼지는 다시 지름이 10 μm 보다 작은 미세먼지(PM10)와 지름이 2.5 μm 보다 작은 미세먼지(PM2.5)로 나뉜다. PM10이 사람의 머리카락 지름

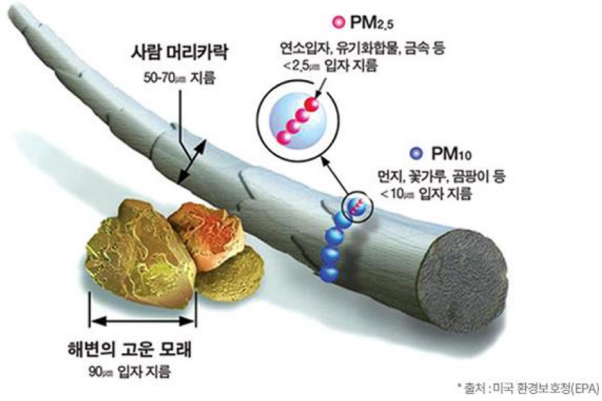


Figure 1. 미세먼지.

(50~70 μm)보다 약 1/5~1/7 정도로 작은 크기라면, PM2.5는 머리카락의 약 1/20~1/30에 불과할 정도로 매우 작다[1-4].

이처럼 미세먼지는 눈에 보이지 않을 만큼 매우 작아서 대기 중에 머물러 있다. 호흡기를 거쳐 폐 등에 침투하거나 혈관을 따라 체내로 이동하여 들어감으로써 건강에 나쁜 영향을 미칠 수도 있다. 세계보건기구(WHO)는 미세먼지(PM10, PM2.5)에 대한 대기질 가이드라인을 1987년부터 제시해 왔고, 2013년에는 세계보건기구 산하의 국제암연구소(IARC, International Agency for Research on Cancer)에서 미세먼지를 사람에게 발암이 확인된 1군 발암물질(Group 1)로 지정하였다 (*Table* 1).

Table 1. 국제암연구소(IARC)의 발암물질 분류

구분	주요내용	대표사례
1군 (Group 1)	인간에서 발암성이 있는 것으로 확인된 물질	석면, Benzene 미세먼지
2A군 (Group 2A)	인간에서 발암성이 있을 가능성이 높은 물질	DDT 무기납화합물
2B군 (Group 2B)	인간에서 발암성이 있을 가능성이 있는 물질	Gasoline Cobalt
3군 (Group 3)	발암성이 불확실하여 인간에서 발암성이 있는지 분류하는 것이 가능하지 않은 물질	Phenol Toluene
4군 (Group 4)	인간에서 발암성이 없을 가능성이 높은 물질	Caprolactam

2. 미세먼지 배출원

미세먼지는 건설 현장, 공장, 자동차 등 배기가스, 산불/쓰레기 등 불법소각, 도로/빈 집터 등의 1차 발생원에서 주로 발생하며, 질산염(NO_3^-), 암모늄 이온(NH_4^+), 황산염(SO_4^{2-}) 등의 이온 성분과 탄소 화합물과 금속 화합물 등으로 이루어져 있다. 미세먼지는 굴뚝 등 발생원에서부터 고체 상태의 미세먼지로 나오는 경우(1차적 발생)와 발생원에서 가스 상태로 나온 물질이 공기 중의 다른 물질과 화학반응을 일으켜 미세먼지가 되는 경우(2차적 발생)로 나누어 질 수 있다[1-4] (*Figure* 2).

미세먼지 1차 발생원은 다음과 같이 구분할 수 있다.

- (자연적 발생원) 흙먼지, 바닷물에서 생기는 소금, 식물의 꽃가루 등
- (인위적 발생원) 보일러나 발전시설 등에서 석탄·석유 등 화석연료를 태울 때 생기는 매연, 자동차 배기가스, 건설현장 등에서 발생하는 날림먼지, 공장 내 분말형태의 원자재, 부자재 취급공정에서의 가루성분, 소각장 연기 등

미세먼지 2차 발생원은 휘발성 유기화합물(VOCs), 질소산화물(NOx), 황산화물(SOx) 등의 대기오염물질이 반응성이 강한 물질(OH^-, O_3 등)과 화학반응을 통해 2차적 미세먼지를 생성하게 된다.

- 석탄 · 석유 등 화석연료가 연소되는 과정에서 배출되는 황산화물이 대기 중 의 수증기, 암모니아(NH_3)와 결합하여 황산암모늄($(NH_4)_2SO_4$) 등의 미세먼지 입자 생성
- 자동차 배기가스에서 나오는 휘발성 유기화합물(VOCs), 질소산화물이 대기 중의 수증기, 오존, 암모니아 등과 결합하는 화학반응을 통해 질산암모늄(NH_4NO_3) 등의 미세먼지 생성

Figure 2. 미세먼지의 발생원.

3. 미세먼지가 건강에 미치는 영향

먼지는 대부분 코털이나 기관지 점막에서 걸러져 배출되지만 미세먼지는 매우 작아 코, 구강, 기관지에서 걸러지지 않고 우리 몸 속까지 스며든다. 전술한 바와 같이 세계보건기구(WHO) 산하 국제암연구소는 미세먼지를 사람에게 발암이 확인된 1군 발암물질(Group 1)로 지정하였다. 미세먼지로 인해 발생할 수 있는 주요 질환에는 호흡기 질환, 심혈관 질환, 천식 등이 있으며, 노인, 유아, 임산부, 심장 및 순환기 질환자들에게 일반인보다 더 많은 영향을 미칠 수 있으므로 각별히 주의가 필요하다[1-4].

미세먼지(PM10)는 입자의 지름이 사람 머리카락 굵기의 1/5

~ 1/7 정도인 10 μm 이하로 매우 작아 코, 구강, 기관지에서 걸러지지 않고 우리 몸속까지 스며든다. 일단 미세먼지가 우리 몸속으로 들어오면 면역을 담당하는 세포가 먼지를 제거하여 우리 몸을 지키도록 작용하는데, 이때 우리 몸의 각 기관에서 염증반응이 발생하면 천식, 호흡기, 심혈관계 질환 등이 유발될 수 있다(*Figure* 3).

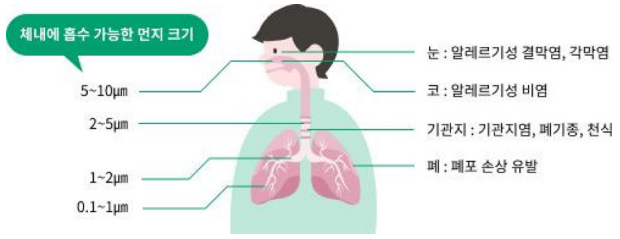


Figure 3. 미세먼지가 건강에 미치는 영향.

3.1. 호흡기 질환

기관지에 미세먼지가 쌓이게 되면 가래가 생기고, 기침이 잦아지며 기관지 점막이 건조해지면서 세균이 쉽게 침투할 수 있어, 만성 폐질환이 있는 사람은 폐렴과 같은 감염성 질환의 발병률이 증가될 수 있다.

3.2. 심혈관 질환

미세먼지가 폐포를 통해서 혈관으로 침투해 염증을 일으키고 이 과정에서 혈관에 손상을 주어 협심증, 뇌졸중으로 이어질 수 있으며, 특히 심혈관 질환을 앓고 있는 노인은 미세먼지가 쌓이면 산소 교환이 원활하지 못해 병이 악화 될 수 있다.

3.3. 천식

미세먼지는 기도에 염증을 일으켜 천식을 유발하거나 악화시킬 수 있으며, 장기간 노출될 경우 폐 기능을 떨어뜨리고 천식 조절에 부정적 영향을 미치며, 심한 경우에는 천식 발작으로 이어질 수도 있다.

4. 미세먼지 저감/대응 기술

우리나라 미세먼지 발생 현황을 보면, 초미세먼지(PM2.5)와 황산화물(SOx)은 산업 부문(각 42.1%, 56.1%), 질소산화물(NOx)은 수송 부문(61.1%)에서 주로 배출되고, 수도권의 경우 질소산화물(NOx) 중 수송 부문이 전체의 76%를 차지하는 것으로 보고되고 있어(*Figure* 4) 미세먼지 배출량을 줄이기 위해서는 가장 높은 비율을 차지하는 산업 부문에서 발생하는 미세먼지를 저감하는 것이 중요하다[5].

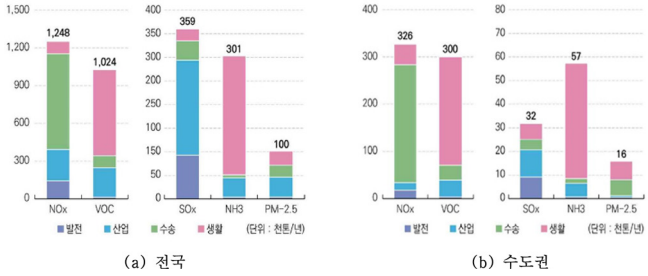


Figure 4. 대기오염물질 배출원.

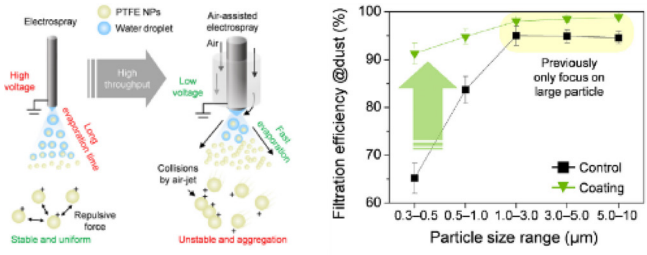
미세먼지 저감기술은 크게 1차 생성 미세먼지를 제거하는 집진기술과 2차 생성 미세먼지 전구물질을 제거하는 탈질기술과 탈황기술로 구분할 수 있다. 1차 생성 미세먼지를 저감하는 대표적인 기술은 ❶ 원심력집진기(cyclone), ❷ 여과집진기(bag filter), ❸ 전기집진기(electrostatic precipitator), ❹ 습식 세정장치(scrubber) 등이 있다.

섬유소재 측면에서는 여과집진기에 사용되는 집진필터(Bag Filter) 관련 기술이 깊은 관련이 있으며, 집진필터를 구성하는 여과포는 직물 타입과 니들펀칭 부직포 타입이 있으며, 일반적으로 PET 소재가 많이 사용되나, 각 산업 공정별 화학적 상태와 온도 특성에 따라 아라미드, PPS(polypropylene sulfide), 유리섬유 및 PTFE(polytetrafluoroethylene) 멤브레인을 복합화한 부직포 기재가 사용되고 있다[6].

5. 집진필터(bag bilter) 관련 최신 연구동향

5.1. 표면개질 기술을 활용한 PTFE bag filter 연구

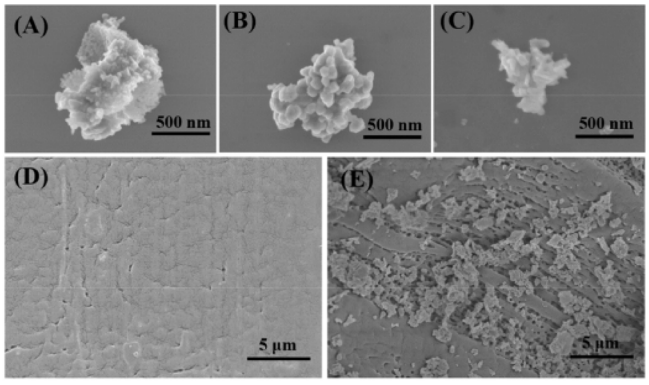
허기준, 오현주 등은 Air-assisted electrospray(AAES) 기술을 활용하여 PTFE 나노 입자 코팅이 된 고효율 Bag Filter에 관한 연구를 진행하였다. PTFE는 고유의 점탄성 및 높은 표면장력으로 섬유화가 어렵고 공정상 높은 처리량을 갖기 어려운 문제점이 있다. 하지만 AAES 기술은 전기분무와 유압식 에어젯 액체 분사 시스템을 통합함으로서 기존 전기분무의 단점을 극복하였다. 별도의 첨가제 없이 높은 처리량 및 필터 매질에 균일한 PTFE 나노입자 3차원 다공성 구조를 형성시킴으로써 표면의 초소수화 및 미세먼지(ISO 12103, A2)의 여과효율이 향상되었다[7](*Figure* 5).



(a) AAES 기술 개략도 (b) A2 미세먼지 여과효율 테스트

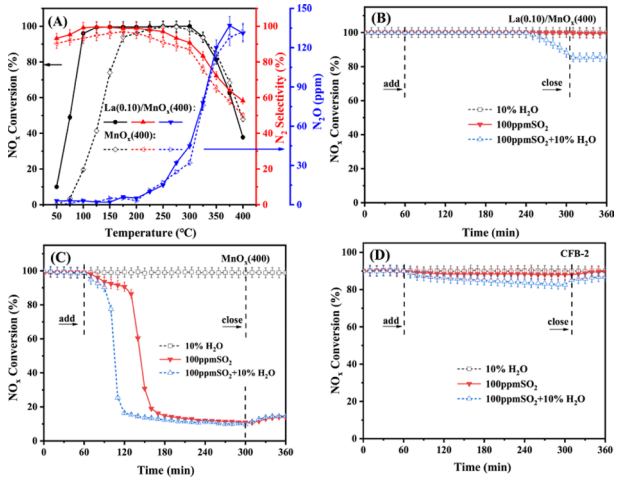
Figure 5. AAES(Air-assisted Electrospray) 공정을 이용한 PTFE 나노입자 코팅 및 코팅된 필터의 미세입자 여과효율.

산업 배출원(예: 시멘트공업로) 중저온 배기가스는 먼지, NOx 그리고 아황산가스(SO_2)를 다량 함유하게 된다. Zhaozhong Jiang, Ting Cheng 등은 NOx 전환율과 황(Sulfur)의 저항성을 높이기 위해 저온에서 선택적 촉매환원(Selective Catalytic Reduction, SCR) 가능한 란타넘(La)을 도핑한 산화망간(MnOx) 촉매를 PTFE 필터 백 내 복합화(CFB-2)하였다(*Figure* 6). La 첨가는 산화망간 결정화를 억제하고 비표면적을 증가시켜 La(0.10)/MnOx(400) 조건에서 빠른 SCR 반응을 촉진함을 확인하였다. 본 복합구조물은 저온탈질효율을 효과적으로 향상시킬 수 있고 La/Mn 몰비 0.10, 소성온도 400 ℃일 때, NOx 전환효율은 125~300 ℃에서 100%에 도달하였다고 보고하고 있다[8](*Figure* 7).



(A) $La(0.10)/MnO_x(400)$
(B) $MnO_x(400)$
(C) $LaO_x(400)$
(D) 기존 PTFE 필터
(E) $La(0.10)/MnO_x$-PTFE 필터(CFB-2)

Figure 6. La 도핑 산화망간 촉매 및 복합 PTFE 필터의 FE-SEM 이미지.



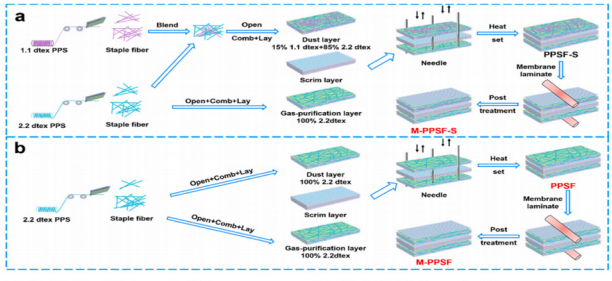
(A) 온도에 따른 N_2 선택성 및 N_2O 농도변화
(B) $La(0.10)/MnO_x(400)$ 사용한 경우의 시간에 따른 H_2O 및 SO_2 저항성
(C) $MnO_x(400)$ 사용한 경우의 시간에 따른 H_2O 및 SO_2 저항성
(D) $La(0.10)/MnO_x(400)$-PTFE 필터(CFB-2)의 시간에 따른 H_2O 및 SO_2 저항성

Figure 7. 란타넘 도핑 산화망간과 CFB-2의 NOx 전환율.

5.2. PPS 소재 기반의 고성능 Bag Filter

Bing, Wei 등은 PPS 소재를 채택하여 종래의 Bag Filter보다 기계적 특성과 필터 효율이 향상된 PPS 복합 Bag Filter를 제조하였고, 이에 대한 연구를 진행하였다. 이들은 다양한 형태의 초극세 PPS 섬유(멀티필라멘트, 스크림층 등)를 2, 3 Layer로 적층하여 다층 복합 PPS Bag Filter를 제조하고, 최외각 층에 PTFE 멤브레인 소재를 라미네이팅하였다[9].

Bag Filter의 각 Layer는 PPS 섬유가 무작위로 얽혀 3차원 구조를 형성하는데, 이러한 특성으로 인해 발생하는 차단, 확산, 관성 등과 같은 상호작용으로 섬유 기공보다 작은 크기의 먼지 입자도 포집할 수 있게 된다. 또한 이러한 3차원 형태는 필터 내부가 조밀한 구조를 갖게 만들어 결과적으로 필터의 기계적 강도가 향상되는 효과를 보여주었다(*Figure* 8).



(a) M-PPSF-S(3 layers) 제조 (b) M-PPSF(2 layers) 제조

Figure 8. PPS 다층 복합 Bag Filter 제조 방법.

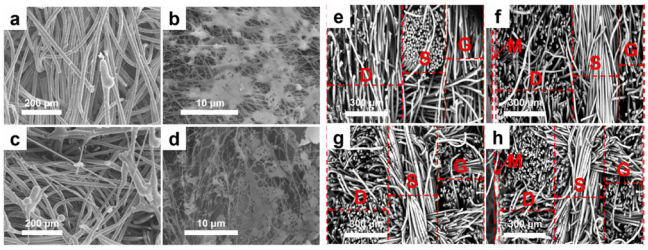


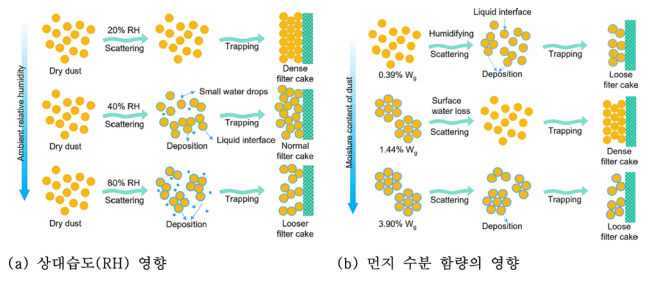
Figure 9. PPS 다층 복합 소재의 SEM 표면/단면 이미지.

PPS 다층 복합 소재의 경우 내부의 복잡한 구조적 특성으로 포집된 먼지 입자가 필터 내부 깊숙이 침투가 어렵고, 침투한 먼지 입자의 경우도 역세정 효과를 통해 제거되어 결과적으로 필터의 여과 효율이 향상된다. 결과적으로 사이클 시간 대비 가장 좋은 효율을 보인 필터는 M-PPSF-S(Membrane-PPS multi filament-Scrim)였고, 클리닝 측면에서도 먼지에 대한 가장 낮은 저항 값을 가져 3가지 다층 복합 필터 중 가장 좋은 효과를 보였다(*Figure* 9).

5.3. 유지관리에 대한 습도의 영향

Guangyu Zhou, Ze-Xian Low 등은 필터 케이크와 필터 케이크 구조 전반에 걸친 압력 강하에 대한 RH 및 먼지 수분 함량의 영향을 조사했는데, Bag Filter 운영 중에 빠르게 형성되는 고밀도의 분진 케이크(덩어리)로 인해 더 청소를 자주해야 하는데 이로 인해 운영비용이 높아지기 때문이다. 결과는 여과에 대한 RH의 영향이 먼지 수분 함량의 영향과 크게 다르다는 것을 나타낸다. RH를 높이면 주로 질량 부하를 줄이고 필터 케이크의 다공성을 증가시켜 필터 케이크의 저항이 감소한다. 이에 비해 먼지 수분 함량은 주로 Bag Filter의 입자 응집체 분산 및 침전을 통해 여과에 영향을 미친다고 설명하고 있다. 그리고 여과 시 먼지 수분 함량에 대한 임계 수분 함량은 1.44%(60% RH)이고, 이 수분 함량에서 가장 높은 질량 부하 및 케이크 두께 값이 발생하여 밀도가 높고 저항성이 높은 필터 케이크가 생성되었다고 보고하고 있다[10] (*Figure* 10).

한편 Rachid Boudhan, Aurélie Joubert 등의 연구는 상대습도보다 절대습도가 Bag Filter 성능에 더 큰 영향 끼치는 변수이며 100 nm 미만의 나노입자 수집 효율에 습도의 영향은 없다고 설명하고 있다[11].



(a) 상대습도(RH) 영향 (b) 먼지 수분 함량의 영향

Figure 10. 입자 간 상호 작용 및 필터 케이크 구조에 대한 영향.

6. 기타 유용한 정보

6.1. 국가통계포털

국가통계포털(KOSIS)은 인구 15건, 보건·복지 13건, 교육·노동 12건, 소득·소비 6건, 여가 7건, 주거·교통 9건, 범죄·안전 5건, 경제일반 14건, 농림수산·제조·서비스 13건 및 환경·에너지 5건을 100대 지표는 엄선하여 추적·관리하고 있는데, 미세먼지 농도는 환경 분야에 포함되어 있다[12].

국가통계포털은 2010년 1월부터 미세먼지(PM10) 대기오염도 관측정보를 제공하고 있고, 초미세먼지(PM2.5) 대기오염도 관측정보는 2015년 1월부터 자료를 제공하고 있다. *Figure* 11은 2010년 1월부터 2023년 11월까지의 미세먼지(PM10) 대기오염도 그래프인데, 주기성을 갖고 있으며, COVID-19 기간 동안 수치가 평균적으로 낮았음을 보여주고 있다.

Figure 12는 2015년 1월부터 2023년 11월까지의 초미세먼지(PM2.5) 대기오염도인데, 미세먼지(PM10) 대기오염도와 마찬가지로 주기성을 갖고 있고 COVID-19 기간 동안 평균적으로 낮은 수치를 선명하게 보여주고 있다. 한편 환경부와 서울특별시는 *Figure* 13과 같이 다양한 대기환경정보를 제공하고 있는 등 시민의 보건안전을 위해 노력하고 있다[13].

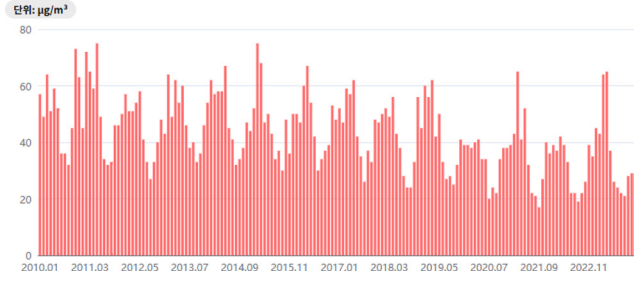


Figure 11. 2010–2022 미세먼지(PM10) 대기오염도.

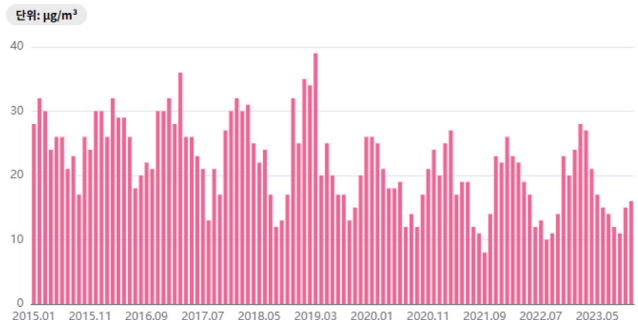


Figure 12. 2015–2023 미세먼지(PM10) 대기오염도.

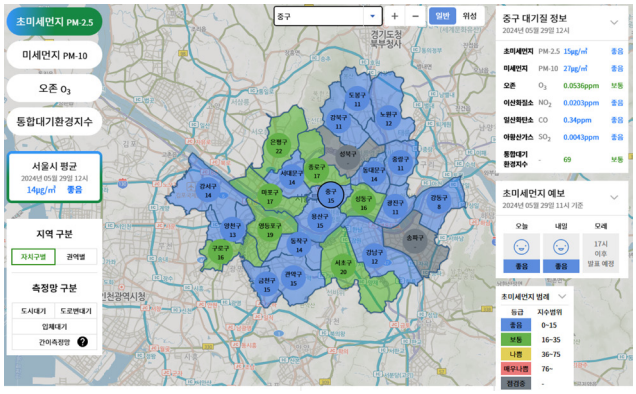


Figure 13. 서울특별시 대기환경정보로 확인해 본 중구 대기질 정보.

6.2. 빅데이터 분석

구글(Google)에서 제공하는 Google Books Ngrams Viewer는 텍스트 마이닝 기법의 빅데이터 분석 도구로 1500년부터 2019년까지 텍스트의 시간 정보를 이용한 시계열 분석과 추적을 통해 트렌드 분석과 기술예측 등 미래전망에 활용되고 있다[14].

Google Books Ngrams Viewer로 집진필터(Bag Filter, blue color)의 1800년~2019년 활용 빈도수를 확인해 보면, 1910년 정도부터 Bag Filter의 활용 빈도수가 증가하는 추세였으며, 1943년 로스앤젤레스 스모그 사건과 1952년 런던 스모그 재앙을 거치면서 1973년에 정점을 찍었다(*Figure* 14). 미세먼지(Fine Dust, red color)의 경우는 영국에서 시작된 산업혁명(1760년~1820년) 이후부터 활용 빈도수가 나타나고 있으며, 어느 정도의 주기성을 보여주고 있는데 산업혁명 과정에서 간과되었던 안전보건에 대한 이슈가 노동자에 의해 점진적으로 커졌다고 추론할 수 있는 자료일 것이다. 초미세먼지(Fine Particulate Matter, green color)는 1990년대부터 관심이 커지다가 21세기에 들어서면서 활용 빈도수가 급격하게 증가하였는데, 안전보건에 대한 대중의 보편타당한 관심이 사회·문화·경제적으로 반영된 것임을 알 수 있다[15].

Fine particulate matter의 빈도수는 1990년 즈음부터 증가하여 21세기 들어서는 Bag Filter의 빈도수를 앞질렀고 2010년 최고점을 기록한 후 감소하고 있는 경향을 나타내고 있다. 이는 1970년 이후 사회활동 및 환경오염에 대한 이슈가 증가하면서 산업적으로 Bag Filter에 관한 관심과 수요가 증가했을 것으로 추정할 수 있으며, 21세기 이후 다시금 초미세먼지가 전 세계적인 관심사로 대두되었다는 과거 기사 등의 결과일 것이다.

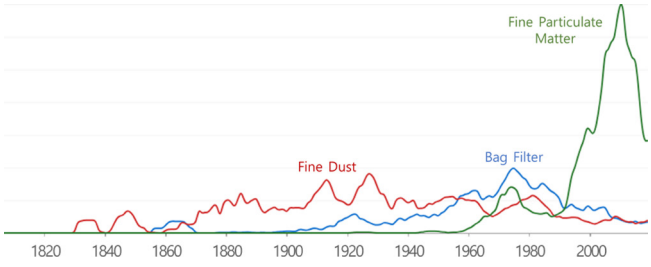


Figure 14. Google Books Ngrams 검색결과.

7. 결 론

미세먼지 저감/대응을 위한 섬유기술로는 아마도 가장 널리 알려진 마스크의 사용일 것이다. 그러나 마스크의 사용은 원인을 찾아 저감을 하는 것이 아닌 수동적인 대응책으로 구분을 해야 한다. 그럼에도 불구하고 마스크에 사용되는 기술을 고려하면 섬유산업 입장에서는 소중한 아이템일 것이다. 본 원고에서는 수동적인 입장의 섬유소재의 활용이 아닌 적극적인 저감 대책에 적용될 수 있는 Bag Filter와 미세먼지에 대한 전반적인 정보를 요약하고 최신 기술 동향을 함께 살펴보았다.

전술한 바와 같이 우리나라 미세먼지 발생 현황을 고려하면 산업 부문에서 발생하는 미세먼지를 저감하는 것이 가장 중요할 것이며, 특히 발전소와 같은 대형 공장에서의 1차적인 미세먼지 발생을 억제하는 것이 선결되어야 하는데, 최근에는 국내에서 생산되는 PPS 사용이 조금씩 확대되고 있다고 한다.

한편, "미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법"은 정보수집, 통계관리, 사후조치 및 행정조치에 초점이 맞추어져 있다[16]. 관계법령과 산업 환경 등을 고려하여 아래의 내용을 제안해 본다. 산업군별 미세먼지 및 초미세먼지 발생 원인을 줄이거

나 없애기 위해 최적가용기법(best available technology, BAT)을 적용한 연구를 통해 섬유산업과 환경산업 육성을 함께 도모해 보는 것을 제안한다.

국민의 안전보건 요구에 부응하기 위해 제조업자가 집진필터를 교체할 때 중앙정부(지방정부)의 보조를 확대하는 내용을 "미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법" 조문에 담는 것을 관련 협단체 및 산업계에서 지속적으로 노력하는 것을 제안한다.

참고문헌

1. 국무총리 소속 미세먼지특별대책위원회, https://www.cleanair.go.kr, (accessed June 4, 2024).
2. 국민재난안전포털, https://www.safekorea.go.kr, (accessed June 4, 2024).
3. 에어코리아, https://www.airkorea.or.kr, (accessed June 4, 2024).
4. 환경보건종합정보시스템, https://www.ehtis.or.kr, (accessed June 4, 2024).
5. 최종원, 이강산, "미세먼지 저감기술 및 정책동향", *융합연구리뷰*, 8(10), 2022.
6. 최정락, 최유리, "고효율 집진필터 기술동향 및 실증센터 구축현황", *섬유기술과 산업*, 2022, 26(2), 81-88.
7. Heo KJ, Oh HJ, Eom H, Kim Y, Jung JH. "High-performance bag filter with a super-hydrophobic microporous polytetrafluoroethylene layer fabricated by air-assisted electrospraying", *Sci Total Environ.*, 2021, 783, Article Number: 147043.
8. Zhaozhong Jiang, Ting Cheng, Yuting Hu, Taotao Liu, Kai Qin, Chengzhu Zhu, "Investigation of La-doped MnOx in PTFE filter bag for low-temperature selective catalytic reduction of NOx in cement industry flue gas with NH3", *Molecular Catalysis*, 2024, 556, Article Number: 113940.
9. Bing Zhang, Wei Wang, Hong Cao, Yangfan Fu, Yuping Wang, Yuekun Lai, Yi Zhang, Weilong Cai, "Development of an asymmetric composite PPS-based bag-filter material through membrane laminating and superfine fiber blending: Lab test, field application and development of numerical models", *J. Hazard. Mater.*, 2023, 459, Article Number: 132078.
10. Guangyu Zhou, Ze-Xian Low, Shasha Feng, Feng Zhang, Zhaoxiang Zhong, Weihong Xing, "Effect of relative humidity and dust moisture content on filtration performance of bag filter", *Separation and Purification Technology*, 2023, 308, rticle Number: 122952.
11. Rachid Boudhan, Aurélie Joubert, Sylvain Durécu, Kamal Gueraoui, Laurence Le Coq, "Influence of air humidity on particle filtration performance of a pulse-jet bag filter", *Journal of Aerosol Science*, 2019, 130, 1-9.
12. 국가통계포털, https://kosis.kr, (accessed June 4, 2024).
13. 서울특별시 대기환경정보, https://cleanair.seoul.go.kr, (accessed June 4, 2024).
14. 김종훈. 이은미, 오동기, "애슬레저 산업동향 및 빅데이터 활용사례 – 글로벌 스포츠웨어 산업 동향(2)", 섬유기술과 산업, 2017, 21(4), 247-255.
15. 구글북스엔그램뷰어, https://books.google.com/ngrams (accessed June 4, 2024).
16. 법률 제20117호, "미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법", 2024.01.23.