

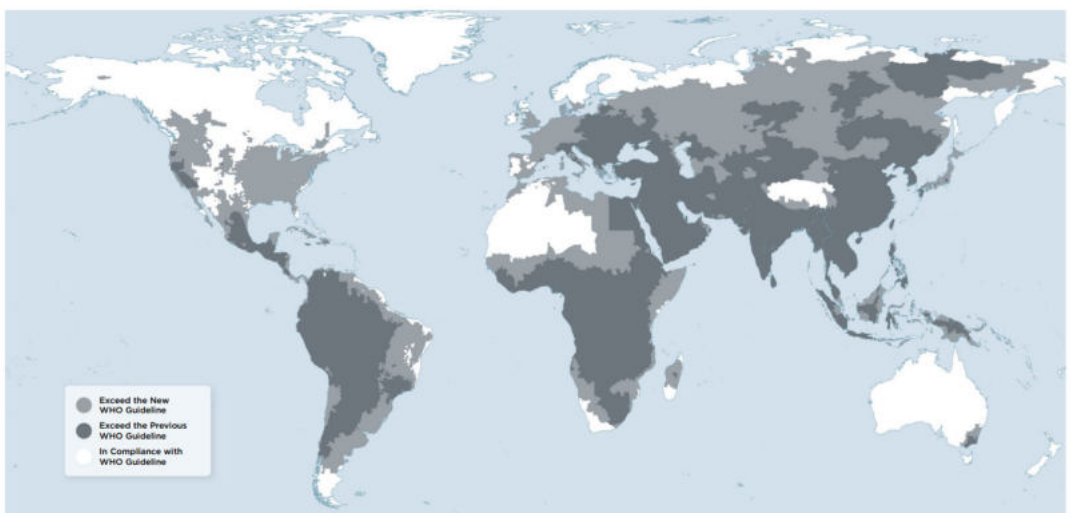
생활공간 미세먼지 피해저감 신기술 소개

○ 권순박 | ㈜나옴
대표
E-mail : ksb@naom.ai

1. 서론

2021년 9월 WHO는 미세먼지에 대해 강화된 권고기준을 발표하였다. 16년만에 조정된 권고기준에 따르면, 미세먼지로 인한 각종 질병에 대한 인과성을 기준으로 질병을 일으키지 않는 최대 허용 농도를 제시한 것으로, 초미세먼지(PM2.5) 연평균 농도를 기존 10에서 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로, 미세먼지(PM10)의 경우

20에서 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 각각 강화하였다(WHO, 2021). 이에 따라 우리나라의 연평균 기준치와 간격이 더 벌어지게 되었다. 참고로 국내 초미세먼지 기준은 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 미세먼지 기준은 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이다. WHO의 강화된 기준에 따르면 전세계 인구의 97%가 기준치 이상의 미세먼지 오염에 노출되어 있으며, 특히 유럽지역의 경우 기존 기준에서는 안전한 곳이었지만 강화된 기준에 따라 유럽 대부분 지역이 미세먼



Note: **White** regions correspond to those places that are in compliance with the WHO guideline. **Dark Grey** regions correspond to those places that were categorized as polluted under the previous WHO guideline. **Light Grey** regions correspond to regions that are newly out of compliance with the updated WHO guideline.

그림 1. 강화된 WHO 가이드라인에 따른 전세계 오염지역 현황, WHO 2021



그림 2. 미세먼지 노출피해 저감방안 (좌)개인차원, (우)시설물차원

지에 오염된 곳으로 바뀌게 되었다(그림 1). 그림에서 하얀색 지역만이 권고기준을 만족하고 있고, 연한 짙은 회색지역은 강화이전 권고기준을 초과하는 지역이며, 연한 회색지역은 강화된 기준에 따라 새롭게 오염지역으로 선정된 곳이다.

미세먼지 발생원을 관리하는 현재의 미세먼지 관리정책은 어느 정도 효과를 거두고 있지만, WHO의 권고기준을 만족시키는 것은 현실적으로 매우 어려운 상황이다. 따라서, 미세먼지 발생원을 관리하는 것 만으로는 인체의 건강위험을 해소하기 어렵고 개인 차원에서 피해저감을 최소화하는 노력이 필요하다. 최근 글로벌기업 다이슨(dyson)은 도시생활의 두 가지 주요 오염원으로 미세먼지와 소음을 지목하고, 이를 대응할 수 있는 새로운 제품을 발표하였다. 다이슨의 공기정화 헤드폰은 공기 오염과 소음 공해라는 도시 주요문제를 한번에 해결하는 개인차원의 웨어러블 기술이라 할 수 있다.

한편, 덴마크 에어랩(Airlab)사는 street furniture 개념에서 도로 시설물 등을 이용한 청정공기 공급방안에 대한 컨셉을 공개하였다(그림 2). 개인차원에서의 미세먼지 노출피해 저감 또는 시설물 차원에서 불특정 다수의 미세먼지 노출피해 저감 모두 궁극적으로 미세먼지로 인한 건강피해를 최소화할 수 있는 방안이며, 향후 관련분야에서 새로운 기술과 제품이 등장할 것으로 예상된다.

본고에서는 실내의 공간 미세먼지 피해노출 저감

을 위한 기존 여과집진 기술의 문제점을 분석하고, 다양한 공간에서 사용 가능한 새로운 집진기술을 소개하며, 이를 활용한 저감시스템의 스마트 운영방안을 소개하고자 한다.

2. 본론

2.1 여과(필터) 집진기술의 한계점

HEPA(high efficiency particulate air) 필터 기술은 이미 1950년대에 등장하였으며, 섬유(필터 여재)층으로 오염된 공기를 통과시켜 먼지를 잡는 전통적인 방식으로 필터의 종류와 크기 그리고 정전기 인가 방식을 통해 높은 집진효율을 가지는 필터의 대명사로 사용되고 있다. 다만, 크기가 큰 먼지가 유입되거나, 먼지를 포집하는 양이 증가하면서 공기의 통과가 어려워지는 막힘 현상이 발생하게 되며 이때 재생하거나 교체해야 한다. 또한, 섬유 자체의 친수성 특성으로 인해 습도가 높아지면 막힘 현상이 악화되고 정전기 효과는 감소하게 된다. 테플론 소재와 같은 특수물질로 여재를 코팅하여 습도에 의한 막힘과 정전기 효과를 유지할 수 있으나, 코팅이 벗겨지게 되면 효과는 감소할 수 밖에 없다. 최근 ESG 경영과 지속가능성에 대한 사회적 화두가 대두되면서 필터의 제조, 유통, 폐기 전과정에서 발생하는 환경오염에 대한 우려가 높아지고 있다.



그림 3. 실외에 설치된 여재방식 필터의 막힘 현상

HEPA필터는 가정의 거의 모든 공기청정기에 포함되어 사용되며, 클린룸 등 산업공정 전반에 필수적인 미세먼지 저감장치로 활용되고 있다. 특히, 미세먼지 저감에 대한 수요가 실내공간을 벗어나 실외 공간으로 확대되면서, 버스정류장 등 주요 시설물 내 미세먼지 저감을 위해 HEPA필터, 미디엄 필터 등 여재필터가 사용되면서 실외공간에서 습도와 다양한 크기의 먼지에 노출되는 문제로 필터막힘현상이 크게 발생하여, 유지관리에 어려움을 겪고 있는 것도 사실이다. 그림 3은 실외공간에 설치되어 운영 중인 시설물의 흡입구의 모습과 중앙부(S)를 확대한 사진이다. 여과집진 방식의 필터를 사용하고 있고, 그림에서와 같이 더스트케이크(dust cake) 형태로 심하게 막혀 있는 모습을 확인할 수 있다. 이는 도로변에서 발생하는 다양한 크기의 먼지와 수분이 결합되어 나타나는 현상으로 볼 수 있다.

한편, 여재 필터는 미세먼지를 고효율로 포집할 수 있는 장점이 있지만, 사용시간이 늘어나면서 급격하게 증가하는 막힘현상으로 그만큼 자주 교체해야 하며, 이는 제품의 생산-폐기 전과정에서 발생하는 환경오염 부하를 일으키는 악순환을 가져오게 된다. 현재까지 HEPA필터를 그대로 대체할 수 있는 집진기술을 찾기는 매우 어려운 상황이다. 1910년대에 개념이 최초로 등장한 전기집진(electrostatic

precipitation; ESP) 방식이 높은 집진효율을 가지며, HEPA 필터의 최대 단점인 막힘현상이 발생하지 않는 기술이지만, 대상 미세먼지의 전기적 특성에 따라 집진효율이 변화할 수 있는 가능성이 있으며 설비의 운용 측면에서도 HEPA필터 방식대비 비용이 크게 발생하는 단점이 있다. 그 외 HEPA필터의 성능을 능가하는 집진 방식은 알려져 있지 않으며, 다만 먼지의 크기가 큰 필터를 사전에 걸러 HEPA필터에 직접 포집되어 발생하는 막힘 현상을 지연시켜 줄 수 있는 프리(pre) 필터, 원심집진기, 임팩터 등이 함께 활용되는데 그치고 있다.

먼지의 크기는 발생원에 따라 크게 달라지게 된다. 주로 화석연료의 연소로 발생하는 미세먼지와 물리적 마모로 발생하는 마모먼지, 담배연기, 비산먼지, 꽃가루, 곰팡이 등과 같은 바이오에어로졸 등 생활속에 접할 수 있는 먼지를 대략적인 크기에 따라 함께 표기하였다(그림 4). 먼지의 크기가 집진과정에서 중요한 이유는 여과집진 방식의 경우, 큰 먼지로 인하여 쉽게 막힘현상이 발생할 수 있기 때문이다. 큰 먼지를 사전에 저감하기 위하여 프리(pre) 필터 및 전처리 장치(임팩터, 사이클론 등)가 사용되고 있으나, 프리필터의 경우에도 쉽게 막혀 차압 증가의 원인이 되고 있으며, 잦은 교체나 세척이 요구된다.

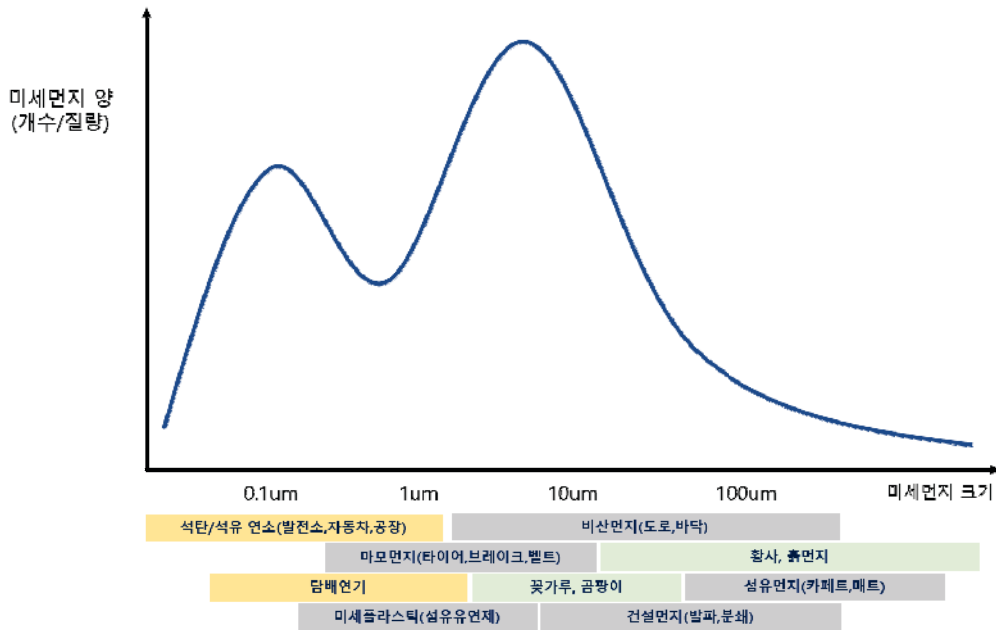


그림 4. 미세먼지의 종류와 크기별 분포 특성

2.2 새로운 미세먼지 저감기술

먼지를 저감하는 원리는 입자의 운동특성에 따라 몇 가지로 정의된다. 입자의 운동특성은 주로 크기 (또는 질량)에 따라 크게 달라지게 되는데, 상대적으로 작은 크기의 입자는 브라운운동(Brownian motion)으로 불규칙한 움직임을 보이며 이에 따라 표면에 부착되는 확산력(diffusional force)을 이용한 집진원리이다. 상대적으로 큰 입자의 경우 입자의 관성(inertia)에 따라 공기의 유동이 급격히 변화하거나 선회하는 경우 입자가 흐름에서 벗어나 벽면에 충돌하여 부착되는 원리가 있으며 주로 관성충돌(inertial impaction)과 원심력분리(centrifugal force separation)이 주요한 집진원리이다. 또 다른 집진 원리로 하전된 입자가 전기장(electric field)에 존재할 경우 극성에 따라 입자가 이동하여 부착되는 방

식이 있다. 전기장의 형성은 고전압 발생부와 접지(ground)를 형성하는 전기집진 방식이 대표적이며, 외부의 고전압을 인가하는 대신 정전기 발생특성이 상이한 재료의 마찰로 인해 발생하는 마찰정전기력(frictional electrostatic force)을 활용할 수도 있다.

DEMC(De-dusting Ever-lasting efficiency Maintenance-free Custom-fit filter) 기술은 입자의 원심력, 마찰 정전기력, 확산력을 동시에 이용하는 새로운 집진기술이다. 이 기술을 활용하여 다양한 크기의 먼지를 동시에 저감하면서 원활한 공기흐름을 이용하여 압력 증가없이 지속적으로 먼지를 포집하는 방식이다. 그림 5에 관련 원리를 소개하였다.

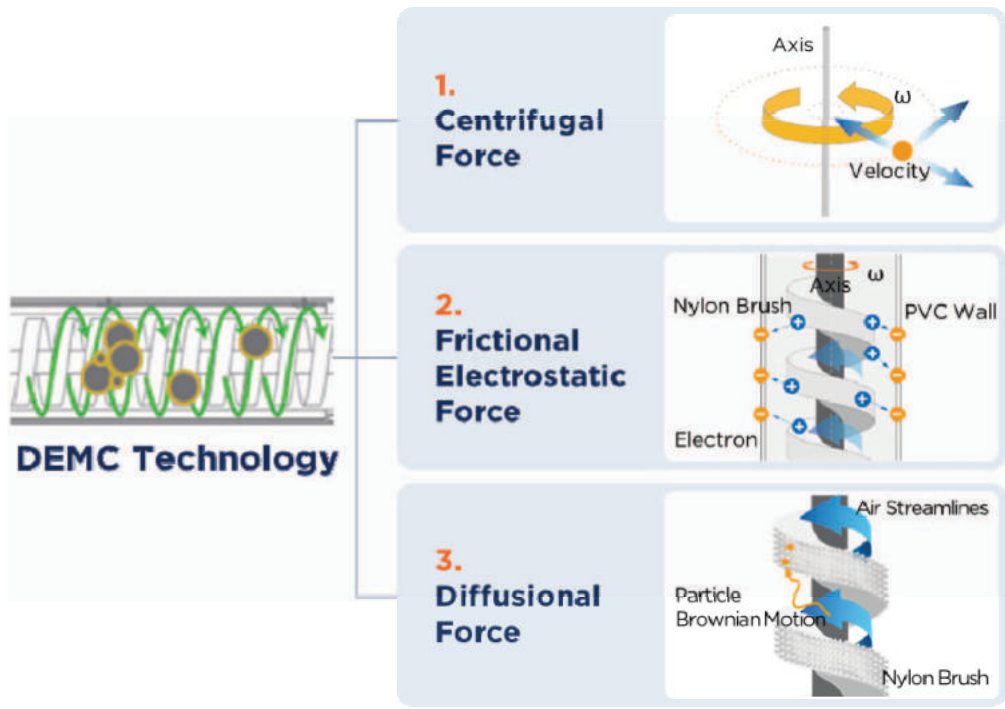


그림 5. 원심력, 정전기력, 확산력을 활용한 미세먼지 저감 DEMC 기술

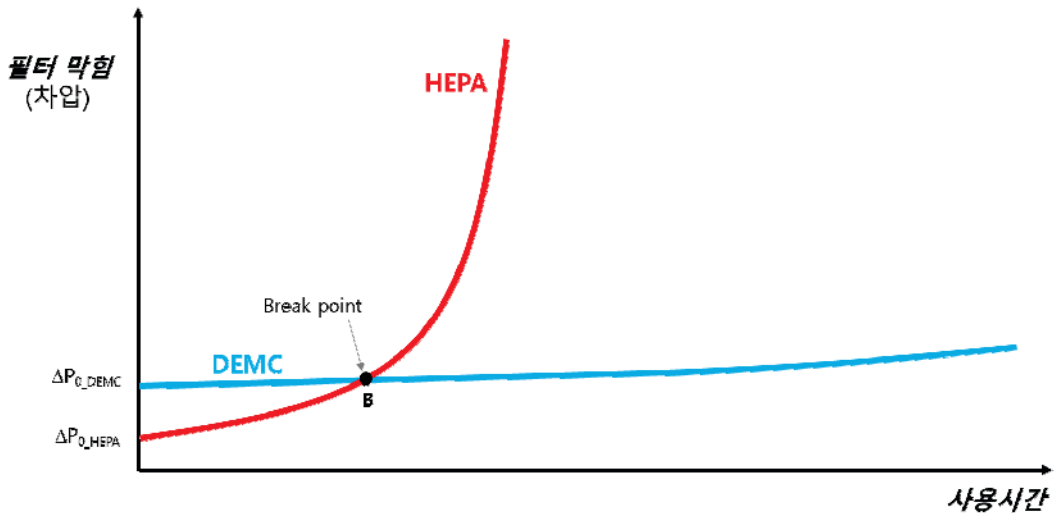


그림 6. HEPA와 DEMC의 사용시간에 따른 필터막힘 현상

여재방식 필터의 최대단점인 사용시간 증가에 따른 막힘으로 필터차압(정압)이 증가하는 현상을 그림 6에 표시하였다. 초기 압력이 다소 높더라도 사용시간동안 일정한 차압을 유지할 수 있는 DEMC 기술은 유지보수 측면에서 확실한 장점이 될 수 있을 것이며, 시스템 안정성 측면(전력 과부하, 유량저하 등)에서도 유리한 기술이다. 초기 차압 측면에서 얼마간 HEPA 필터가 유리한 측면이 있지만, 사용시간이 경과하면서 브레이크포인트(B)를 지나게 되면, HEPA필터의 막힘이 급격하게 증가하는 현상을 나타내게 되는 반면 DEMC는 거의 일정한 수준의 차압을 유지하게 된다.

먼지를 저감하는 장치의 성능은 저감효율과 처리풍량의 곱으로 표현되며, 이를 CADR(clean air delivery rate)이라고 표현한다. 그림 7에는 HEPA필터와 DEMC기술이 적용된 필터의 성능을 나타내었다. HEPA필터의 경우 사용 직후 먼지가 포집되기 시작하면서 포집된 먼지로 인하여 일정 부분 효율 증가가 나타나게 되며, 이 지점을 최적 저감성능지점(A)로 표기하였다. 이후, 필터 막힘현상으로 급격한 처리풍량 저하가 발생하게 되고, 브레이크 지점(B)를 지나면서 막힘현상으로 기능을 상실하게 된다. 반면, DEMC기술은 초기 저감성능은 다소 낮지만 사용기간 중 거의 일정한 성능을 가지게 된다.

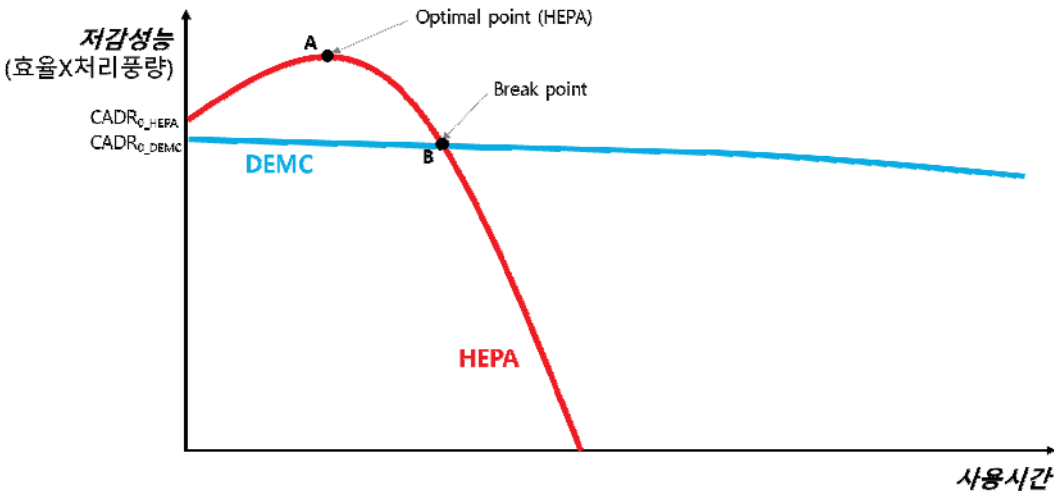


그림 7. HEPA와 DEMC의 사용시간에 따른 저감성능 변화

2.3 DEMC기술의 실외환경 적용

다양한 크기의 먼지를 포집하면서 큰 차압변화가 없는 DEMC기술의 또 다른 특징은 섬유소재의 여재를 사용하지 않기 때문에 수분과 습도에 강하다는 점이다. 이로 인해, DEMC 기술이 적용된 실외공간 미세먼지 저감장치의 경우 외부환경에서 유지보수를 최소화하여 운영할 수 있는 장점이 있다. 그

림 8은 준실외공간이라고 할 수 있는 버스정류장에 설치되어 운영되고 있는 미세먼지 저감장치를 보여주고 있다(철도기술연구원, 2022). 저감장치의 다양한 상태정보와 정류장내 함께 설치된 공기질 정보 수집장치를 통해 수집되는 실시간 미세먼지 농도와 이용객 수 정보등의 데이터가 클라우드서버(cloud server)에 수집되고 분석되어, 저감장치의 지능형 운영이 가능하다.



그림 8. 준실외공간인 버스정류장에 설치된 미세먼지 저감장치와 공기질 정보 수집장치 활용 스마트 제어 사례 - 세종시 BRT정류장

실외환경 적합성을 기존 집진기술(HEPA필터, 전기집진, 식물활용 집진) 기반의 제품과 친환경성 측면에서 비교하였다(그림 9). 친환경성은 제품의 설치, 운영, 폐기 전 단계에서 발생하는 환경오염 영향척도로 운영에 필요한 소비전력, 필터 교체비용, 폐기물 처리비용이 고려된 항목이다. 실외 적합성은 밀집된 도시생활 공간에 설치를 위한 공간제약성과 강우/강설 등 외부 기상환경에 대한 내구성 보유정도 및 인접 시민의 안전성을 고려한 것이다. 모방의 난이도는 집진 기술의 근본 원리에 따라 단위

부품의 조합만으로 모방하기 어려운 기술의 정도(ex. 팬+필터=>공기청정기: 모방난이도 낮음)를 표현한 것으로 정의하였다. 이에 따라, HEPA필터를 사용하고 있는 제품의 경우 가장 낮은 친환경성을 가지며, 전기집진 제품과 식물활용 제품은 DEMC 기술의 제품과 유사한 수준의 친환경성을 나타내는 것을 알 수 있다. 다만, 실외환경의 적합성과 모방의 난이도 측면에서 DEMC기술의 독창성이 다소 높다고 할 수 있다.

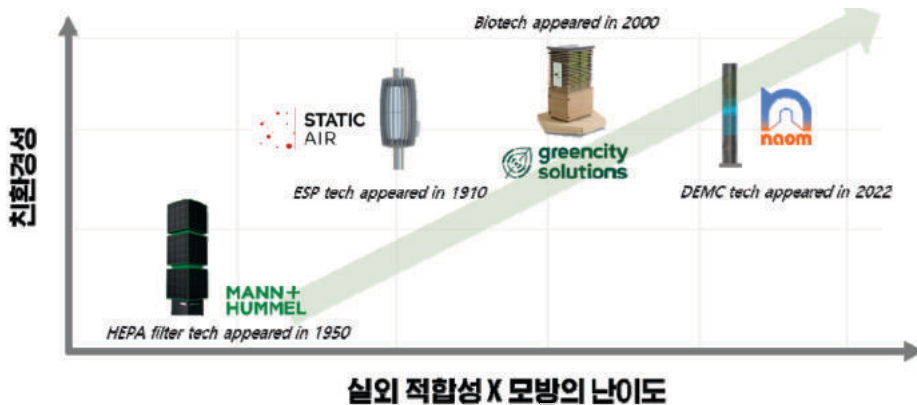


그림 9. 실외환경에 설치가능한 미세먼지 저감방식의 친환경성 분석

2.4 시 기반 미세먼지 관리

미세먼지 노출피해 최소화를 위한 관리는 저감장치 위주의 제품으로만 이루어지기 어렵다. 적절한 성능의 제품과 이를 효율적으로 운영할 수 있는 시스템이 뒷받침 되어야 한다. 세종시 BRT정류장에 설치된 DEMC기반 미세먼지 저감장치는 실외환경에 적합한 성능을 가지고 있지만, 사람이 없는 경우나 많은 경우 그리고 미세먼지 오염정도에 따라 탄력적으로 운영되어야 한다. 이를 달성하기 위한 수단이 데이터 기반 운영이며, 수집된 데이터를 빠르게 분석하여 대응할 수 있도록 하는 방법이 AI기술이라고

할 수 있다. 어떤 종류의 데이터를 수집하고 어떤 분석을 수행하느냐에 따라 미세먼지 노출피해 저감효과를 극대화하고 운영비를 최소화 할 수 있게 된다.

그림 10은 DEMC기술이 적용된 저감장치를 차량이 정체되는 공간, 예를 들어 드라이브스루(Drive Through) 매장에 설치운영하는 방안이다(김준범 등, 2022). 단순히 저감장치를 설치하고 연속가동할 것인지, 간단한 센서를 활용하여 차량이 근접할 경우에만 가동하도록 구현할 것인지, 차량의 종류, 정차시간, 기상조건 등 다양한 데이터를 함께 활용하여 더욱 효율적으로 시스템을 운영할 것인지 경제성과 더불어 노출피해 저감 효율성 측면에서 판단할 수 있어야 한다.

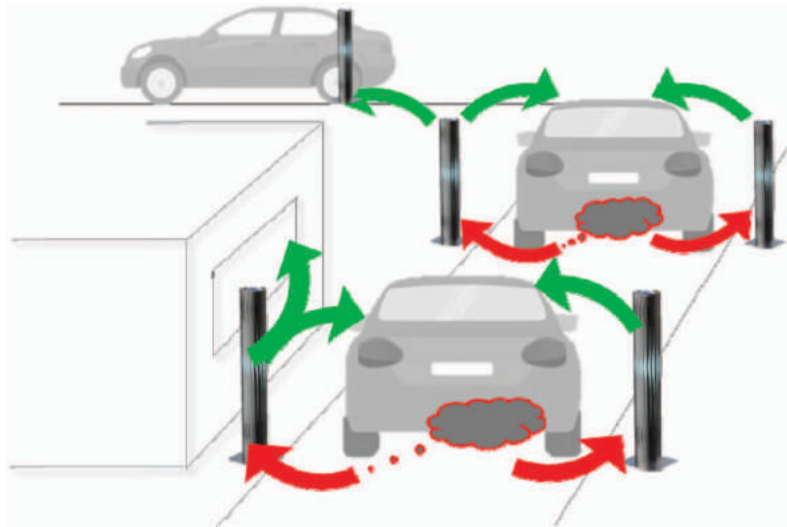


그림 10. 드라이브스루 매장에서 정체된 차량의 오염물질 저감을 위한 스마트 미세먼지 관리시스템 구성

3. 결론

미세먼지 문제를 해결하는 것은 환경부의 기준치를 만족시키기 위한 것이 아니라, WHO에서 경고하듯이 인체의 질병과 건강에 영향을 미치지 않는 수준이하로 관리하는 것이 관건이다. 최근 다양한 연구결과에서 권고기준 이상의 미세먼지 농도가 사

람의 거의 모든 질병에 관여할 수 있다는 것이 밝혀지고 있어, WHO 권고기준 대비 매우 느슨한 국내 환경부 미세먼지 기준치 자체는 크게 관리의 기준값이 될 수 없을 것이다. 미세먼지 발생원을 최소화하는 지금까지의 노력은 분명 효과가 있었으며, 전세계적인 오염물질 저감 및 관리 역시 어느정도의 저감효과가 있다. 다만, 우리가 직접 노출되어 질병

과 유관될 수 있는 미세먼지 관리단계에는 이르지 못한 것도 사실이다. 이에, 개인적으로 또는 사회적으로 노출피해를 저감하려는 노력이 계속되고 있고, 시장에서도 관련 서비스와 상품이 출시되고 있다.

현재까지 미세먼지를 저감하는 가장 확실하고 경제성 있는 방법으로 활용되고 있는 여과집진 방식의 경우, 다양한 크기의 먼지에 대응하기 어려우며 먼지를 포집할수록 차압이 증가하는 한계를 가지고 있어 지속적인 교체가 필요하다. 이를 대체할 수 있는 다양한 집진 방식이 연구되고 개발되고 있지만 아직까지 널리 사용되지 못하고 있다.

본고에서는 초기 성능은 HEPA필터 방식에 미치지 못하지만, 지속적으로 성능을 유지할 수 있는 새로운 집진기술(DEMC)을 소개하고자 하였으며, 이를 활용한 지능형 운영방안에 대해서도 언급하였다. 본 기술지의 특성상 기술의 세부적인 사항을 소개하기 보다는 대략적인 특성을 중심으로 설명하였고 보다 자세한 사항은 연구논문 및 특허를 통해 소개할 수 있을 것으로 기대한다.

일정한 성능을 유지할 수 있는 집진기술과 사람들의 노출피해를 최소화하기 위한 지능형 운영을 통해 비용을 절감하면서 저감효과를 높일 수 있는 실질적인 피해저감기술이 필요한 시점이다.

- 참고문헌 -

1. 김준범 등, 2022. 드라이브 스루 서비스시스템에서 이산화탄소 및 미세먼지 배출분석과 정책제언. J.Korean Soc.Envirion.Eng., 44(7), 242-248.
2. 환경부 대기환경기준 <http://www.me.go.kr/mamo/web/index.do?menuId=586>
3. 철도기술연구원 뉴스, 2022. <https://www.etnews.com/20220616000263>
4. 다이슨 홈페이지 <https://www.dyson.com>
5. 에어랩 소개 홈페이지 <https://www.artformurban.co.uk/news/post/art-form-tackle-london-pollution-through-innovative-bench-design.html>