

실외공간 적용 청정공기 공급장치 성능평가

오동규¹, 김세영^{2*}, 권순박², 정양훈²
¹한국철도기술연구원, ²(주)나옴

Performance Evaluation of Clean-Air Supply Device for Outdoor

Dongkyu Oh¹, Seyoung Kim^{2*}, Sun-Bark Kwon², Yanghoon Chung²
¹Korea Railroad Research Institute
²Naom Inc.

요약 본 연구에서는 실외 환경에 적합한 새로운 방식의 미세먼지 저감 기술인 DEMC(De-dusting, Ever-lasting efficiency, Maintenance-free Custom-fit filter) 기술을 활용하여 버스정류장 내부의 미세먼지 저감 성능을 평가하였다. DEMC 기술의 가장 큰 특징은 일반적인 필터 여재 방식과 달리 장시간 사용하여도 초기 압력 손실과 입자 제거 성능을 유지할 수 있고, 재질 특성상 세척이 가능하기 때문에 필터 교체 없이 반영구적으로 사용이 가능하다. 이는 일반적인 필터 여재 방식을 사용하였을 때 발생하는 필터 교체 문제를 해결할 수 있으며, 이로 인해 유지보수 비용을 절감할 수 있다. DEMC 기술이 적용된 청정공기 공급장치의 미세먼지 저감 성능은 공인시험기관을 통해 검증하였으며, 실제 운영 중인 폐쇄형과 반개방형 BRT 버스정류장 내부에 설치하여 정류장 내부의 미세먼지 저감 성능 평가를 수행하였다. 현장 성능평가 결과, 청정공기 공급장치를 가동하였을 때 폐쇄형 버스정류장은 외기 PM10 농도보다 약 40% 낮게 유지되었으며, 반개방형 버스정류장은 외기 PM10 농도보다 약 18% 낮게 유지되는 것을 확인하였다.

Abstract A novel particulate matter(PM) outdoor reduction technology was developed, which we refer to as DEMC (De-dusting, Ever-lasting efficiency, Maintenance-free Custom-fit filter) technology. The most impressive feature of this technology is that its performance is maintained even after use for prolonged periods outdoors, which dramatically reduces filter replacement costs. An authorized testing institute confirmed the particle removal performance of DEMC technology. To evaluate the particulate matter removal efficiency of DEMC in an outdoor environment, a device was installed in open and closed areas of a BRT bus station. PM10 concentrations at these stations during DEMC operation were 40 % and 18 % lower, respectively, than outdoor PM10 concentrations.

Keywords : Particulate Matter, Outdoor, DEMC, Consistence Performance, Clean-Air Supply Device

1. 서론

최근 국제보건기구(WHO)는 미세먼지로 인한 각종 질병에 대한 인과성을 기준으로 질병을 일으키지 않는 최대 허용 농도를 제시하기 위해, 초미세먼지(PM2.5 이하) 연평균 농도를 기존 10에서 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로, 미세먼지(PM10

이하)의 경우 20에서 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 각각 강화하였다. 이에 따라 우리나라의 연평균 초미세먼지 기준은 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 미세먼지 기준은 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과의 간격이 더 벌어지게 되었다. WHO의 강화된 기준에 따르면 전세계 인구의 97%가 기준치 이상의 미세먼지 오염에 노출되어 있으며, 특히 유럽지역의 경우 기존 기준에서는 안전한 곳이

본 논문은 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 21SBRT-C158063-02).

*Corresponding Author : Seyoung Kim(Naom Inc.)

email: ksy@naom.ai

Received October 21, 2022

Revised November 30, 2022

Accepted January 6, 2023

Published January 31, 2023

었지만 강화된 기준에 따라 유럽 대부분 지역이 미세먼지에 오염된 곳으로 바뀌게 될 것으로 보인다.

실외 미세먼지의 심각성이 고조되어 감에 따라 실내뿐만 아니라 실외 공간에서의 미세먼지 농도를 줄이기 위한 노력들이 활발히 진행중에 있으며, 중국 시안에 설치된 Giant Tower를 대표적인 사례로 볼 수 있다. 독일의 MANN+HUMMEL 社は Filter Cube라는 제품을 출시하였으며, 이 제품은 도로변에서의 미세먼지 저감을 위해 독일 슈투트가르트 거리에 설치하여 시범운행을 하였다. Filter Cube의 성능은 미세먼지 농도별로 저감효율은 다르게 나오지만 평균적으로 PM10의 경우 10.4%, PM2.5의 경우 5.1% 저감성능이 있다고 보고하였다[1].

도심지역 내 미세먼지 발생원인과 장소는 매우 다양하며, 외부 활동 중 이동 정체 구역인 버스정류장과 도로변 인근 보행로 등은 미세먼지에 노출될 위험이 크고, 국제암연구소(International Agency for Research on Cancer, IARC)에서 2012년 디젤차량에서 배출되는 배기가스 중 입자상 오염물질(Particulate Matter, PM)을 발암물질로 규정하면서 차량에서 배출되는 대기오염물질의 규제 필요성이 제기되고 있다[2]. 도심지역의 경우 자동차 운행과 같은 이동오염원에서 기원(도로변 비산먼지, 브레이크 분진, 배기가스 등)하는 것이 많은 부분을 차지하고[3,4], PM 뿐만 아니라 SO_x, NO_x, HC, CO 등 다양한 가스상 오염물질이 배출되며, 이들 대기오염물질은 지역 대기질 악화에 영향을 미친다[5,6]. 한국건설기술연구원에서는 도심 대기과 도로변의 미세먼지 농도를 측정 한 연구 결과를 보면, 도시 대기보다 도로변의 PM10 농도가 평균 4~11 μg/m³ 높게 나타나는 것으로 보고하였으며, 2018년부터 “도로변 유동인구 밀집지역 미세먼지 저감 및 실증 기술 개발”을 통해 식물과 필터 여재 방식을 이용한 미세먼지 저감 기능을 가지는 버스정류장을 개발하고 있다[7]. 그 외에도 필터와 공기밀도 제어를 통한 미세먼지 저감 셀터, 에어커튼과 실내공기청정기(필터)를 이용한 버스정류장, pole-type 전기집진방식의 미세먼지 저감장치 등 실외 공간에서 미세먼지 저감을 위해 다양한 형태의 제품 개발이 진행되고 있다[8,9].

이처럼 실외공간에서 사용되는 대부분의 공기정화기술은 필터 여재 방식인 HEPA (High Efficiency Particulate Air) 필터가 가장 많이 사용되고 있다. 하지만 실외라는 야외환경 특성상 필터 여재 방식은 오염된 공기를 유입함으로써 필터 표면이 막히게 되고, 습도가 높은 환경에서는 막히는 속도가 빨라져 필터 교체주기가 급격하게 짧아지기 때문에 유지보수 비용이 증가하는 문

제가 발생한다.

본 연구에서는 기존에 사용되고 있는 필터 여재 방식과 전기집진방식을 사용하지 않고 실외 공간에서 미세먼지를 저감할 수 있는 DEMC 기술을 활용하였으며, DEMC 기술의 기본 성능평가와 실제 운영 중인 버스정류장을 대상으로 DEMC 기술의 미세먼지 저감 성능을 평가하였다.

2. 본론

2.1 기존 여과집진 기술의 실외 적용시 한계점

HEPA 필터 기술은 이미 1950년대에 등장하였으며, 섬유(필터 여재)층에 오염된 공기를 통과시켜 먼지를 포집하는 전통적인 방식으로 필터의 종류와 크기 그리고 정전기 인가 방식을 통해 높은 집진효율을 가지는 집진 기술이다. 입자크기가 큰 먼지가 유입되거나, 먼지를 포집하는 양이 증가하면 필터 여재를 통과하는데 저항이 높아져 막힘 현상이 발생하게 되고 필터의 기능을 상실하기 때문에 일정기간 사용함에 따라 교체해야 한다. 또한, 섬유 자체의 친수성 특성으로 인해 습도가 높아지면 막힘 현상이 악화되고 정전기 효과는 감소하기 때문에 습도가 높은 환경에서 사용이 제한적이다. 특히, 미세먼지 저감에 대한 수요가 실내공간을 벗어나 실외공간으로 확대되면서, 버스정류장 등 주요 시설물내 미세먼지 저감을 위해 HEPA 필터, 미디엄 필터 등 필터 여재의 사용 빈도가 증가되고 실외공간 특성상 고습도 환경과 다양한 크기의 먼지에 노출되어 필터의 기존 수명보다 일찍 필터가 막히는 문제가 발생되고 있다. Fig. 1은 실외공간에 설치되어 운영 중인 시설물의 흡입구의 모습과 중앙부(S)를 확대한 사진으로 그림에서 보는 바와 같이 더스트케이크(dust cake) 형태로 심하게 막혀 필터로서의 기능을 상실한 채 사용되고 있는 상황을 나타낸다.

현재까지 HEPA필터의 단점인 막힘현상이 발생하지 않고 높은 집진효율을 대체할 수 있는 집진기술은 전기집진(electrostatic precipitation; ESP) 방식이지만, 대상 미세먼지의 전기적 특성에 따라 집진효율이 변화할 수 있는 가능성이 있으며 설비의 운용 측면에서도 HEPA 필터 방식대비 비용이 크게 발생하는 단점이 있다. 그 외 HEPA 필터의 성능을 대체할 수 있는 집진 방식은 알려져 있지 않지만, HEPA 필터의 막힘 현상을 지연시키기 위해 필터 앞단에서 큰 먼지 포집용으로 프리 필터, 원심 집진기, 임팩터 등이 활용되고 있다.



Fig. 1. Blockage of media filter type installed outdoors

2.2 신개념 집진기술, DEMC

2.2.1 원천기술 소개

Fig. 2는 DEMC(De-dusting, Ever-lasting efficiency, Maintenance-free Custom-fit filter) 모듈의 미세먼지 저감 원리에 대한 설명을 나타낸다. DEMC 모듈 내부는 나일론 재질의 미세먼지 저감모듈이 PVC 재질의 외벽과 맞닿은 상태에서 회전을 하는데, 이때 마찰로 인해 발생하는 마찰정전기력(Frictional electrostatic force)에 의해 외벽은 (-)의 극성을 저감모듈의 표면은 (+)의 극성을 띄게 되어 주변을 통과하는 먼지 중에 극성을 가지는 입자가 이동하여 포집하게 된다. 또한 나선형태의 저감 모듈을 통과하면서 발생하는 원심력(Centrifugal force)과 상대적으로 작은 크기의 입자가 가지는 브라운운동(Brownian motion)으로 불규칙한 임직임을 보이며, 이에 따라 표면에 부착되는 확산력(Diffusional force)에 의하여 먼지를 저감한다. 이러한 미세먼지 저감원리를 활용하여 다양한 크기의 먼지를 동시에 저감하면서 원활한 공기흐름을 이용하여 압력 증가를 줄이면서 지속적으로 먼지를 포집하는 방식이다. 필터 여재 방식의 최대 단점인 사용시간 증가에 따른 막힘으로 필터의 압력손실이 증가하는 현상을 Fig. 3에 표시하였다.

DEMC 모듈의 내부 구조상 필터 여재 방식보다 초기 압력이 다소 높더라도 사용시간동안 일정한 차압을 유지할 수 있는 특징이 있으며, 이는 유지보수 측면에서 확실한 장점이 될 수 있고, 전력 과부하와 유량 저하로 인한 성능저하를 방지하여 시스템 안정성 향상 시킬 수 있는 기술이다. 초기 차압 측면에서 일정시간 필터 여재 방식이 유리한 측면이 있지만, 사용시간이 경과하여 브레이크포인트(B)를 지나게 되면, HEPA필터의 막힘이 급격하게 증가하는 현상을 나타내게 되는 반면 DEMC 모듈은 거의 일정한 수준의 차압을 유지하게 된다. DEMC 모듈의 이러한 특징을 확인하기 위하여 공인시험기관인 FITI 시험연구원의 시험장치에서 필터 성능변화를 확인하였다.

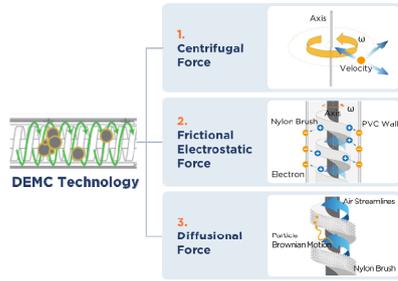


Fig. 2. Particulate Matter removal principle of DEMC technology.

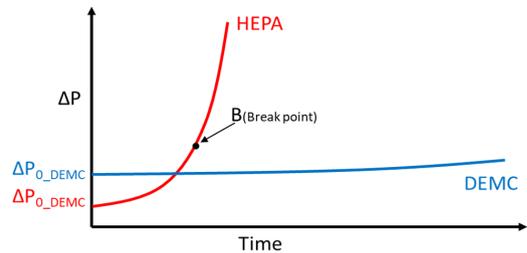


Fig. 3. Filter performance curve of DEMC comparing with high efficiency particulate filter

일반적으로 필터 여재 방식의 경우, 시험분진을 수 g 투입하게 되면 말기 압력손실(초기 압력손실의 약 2배 ~2.5배)에 도달하여 막히는 현상이 발생하지만, DEMC 모듈의 경우 초기 압력손실이 64 Pa 인 조건에서 시험분진을 약 100 g 투입하여도 압력손실은 80 Pa로 초기 압력손실보다 약 25% 증가에 그치는 것으로 확인되었다.

2.2.2 단품 기본성능 평가

DEMC 모듈의 필터 성능을 평가하기 위해서 압력손실과 집진효율을 측정하였다. DEMC 모듈의 압력손실과 집진효율을 측정하기 위한 시험장치는 입자발생부, 시험체 장착부, 압력손실 및 입자측정부로 구성되어 있다. 시험입자는 Arizona dust(A1)를 사용하였으며, TOPAS(model SAG410) 입자발생기를 통해 공급시켰다. 시험체 장착구 입구와 출구부에 샘플링 관을 설치하여 시험입자의 농도를 측정하였으며, 샘플링 관에서의 손실을 최소화 하기 위해 Isokinetic sampling 방식을 도입하였다. 압력손실은 manometer (Setra, model 267)를 이용하여 측정하였다. 입자측정은 Optical Particle Counter(Grimm, model 11-A)를 이용하여 DEMC 모듈 입구와 출구에서 시험입자의 농도를 측정하였다. 측정된 시험입자의 농도를 가지고 Eq. (1)을 통해 저감효율, E 를 산출하였다.

Fig. 4는 DEMC 모듈의 두 가지 타입에 대한 입경별 저감효율을 나타낸 그래프이다. 마찰정전기가 발생하지 않는 재질로 집진부를 구성할 경우와 마찰정전기가 크게 발생하는 서로 다른 재질을 적용하여 구성할 경우, 마찰정전기로 인해 저감효율이 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 입자의 크기가 작을수록 효과가 크다는 것을 알 수 있다.

$$E(\%) = \frac{C_I - C_O}{C_I} \times 100 \quad (1)$$

Where, C_I and C_O denote test particle concentration at upstream and downstream respectively.

DEMC 모듈의 최대 장점은 사용시간이 증가하여도 초기 성능이 일정하게 유지되는 특징이다. 이를 확인하기 위하여 분진 유지 용량 실험을 진행하였다. DEMC 모듈에 시험입자를 일정량 투입시켜 입자 부하량을 증가시켜가면서 압력손실과 입자 포집효율 변화를 측정하였다.

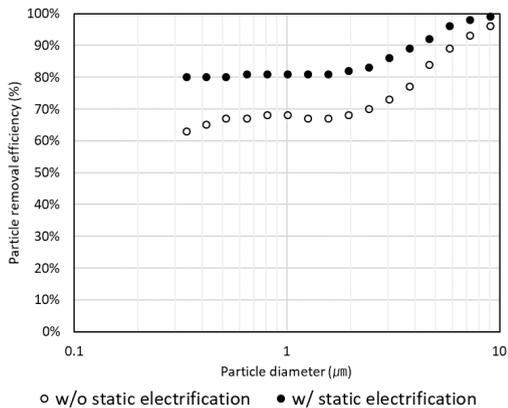


Fig. 4. Particle removal efficiency with a particle diameter

Table 1은 투입분진량을 증가시켰을 때 압력손실과 입자 포집효율의 변화를 나타낸다. DEMC 모듈의 초기 압력손실과 입자 포집효율은 190 Pa, 92.3% (PM10 기준)이었으며, 시험입자를 일정량 연속적으로 투입하여 최대 160 g까지 투입한 결과 입자 포집효율은 83.8%까지 다소 낮아졌지만, 앞서 DEMC 모듈의 원천기술 소개에 언급한 것과 같이 초기 압력손실이 유지되는 것을 확인하였다.

Table 1. Variations of differential pressure drop and particle removal efficiency for a DEMC module by dust loading

Amount of dust (g)	Particle removal efficiency (%)	Differential pressure drop (Pa)
2	92.3%	190
10	90.2%	195
20	89.4%	190
30	90.0%	190
40	86.2%	190
50	86.8%	190
60	85.0%	190
70	86.2%	195
80	84.9%	190
100	85.4%	190
120	85.1%	195
140	80.4%	190
160	83.8%	190

2.3 실증대상 및 현장평가 방법

2.3.1 BRT정류장 개요

본 연구에서는 세종시에 운행중인 간선급행버스체계(BRT) 정류장을 대상으로 정류장 내부의 미세먼지 농도 저감을 위해 DEMC 모듈이 적용된 청정공기 공급장치를 개발하였으며, Fig. 5과 같이 폐쇄형, 반개방형 정류장 두 곳을 선정하여 청정공기 공급장치를 정류장 내부 PSD(Platform Screen Doors) 인근에 설치하였다. BRT 정류장의 크기는 약 40 m(W) x 3.3 m(D) x 4 m(H)로 일반 정류장에 비해 내부면적이 20배 이상 크다. 폐쇄형은 정류장출입구와 승하차시 사용되는 PSD가 열릴때에만 외부 공기가 유입되는 실내형 구조이며, 반개방형 정류장은 출입문과 PSD 부근의 벽이 상시 개방되어 있는 구조이다. 실증대상 정류장은 총 4개 노선의 버스(B0, B2, B4, B5)가 10분에서 40분 간격으로 운행되고 있으며, 폐쇄형 정류장의 경우 평균적으로 약 10분에 1회 PSD가 개폐되고 있다.

2.3.2 청정공기 공급장치 개요

청정공기 공급장치는 먼지저감부(DEMC 모듈), 송풍부와 제어부로 구성되어 있으며, 하부와 상부에서 외부 공기를 흡입하여 청정공기 공급장치 중앙지점의 토출부를 통해 청정공기가 공급된다. Table 2는 청정공기 공급장치의 사양을 나타낸다. 청정공기 공급장치는 둘레가 250 mm, 높이가 약 1.5 m의 원형 실린더 형태로 별도의 제어장치를 이용하여 작동이 가능하며, 외부 미세먼

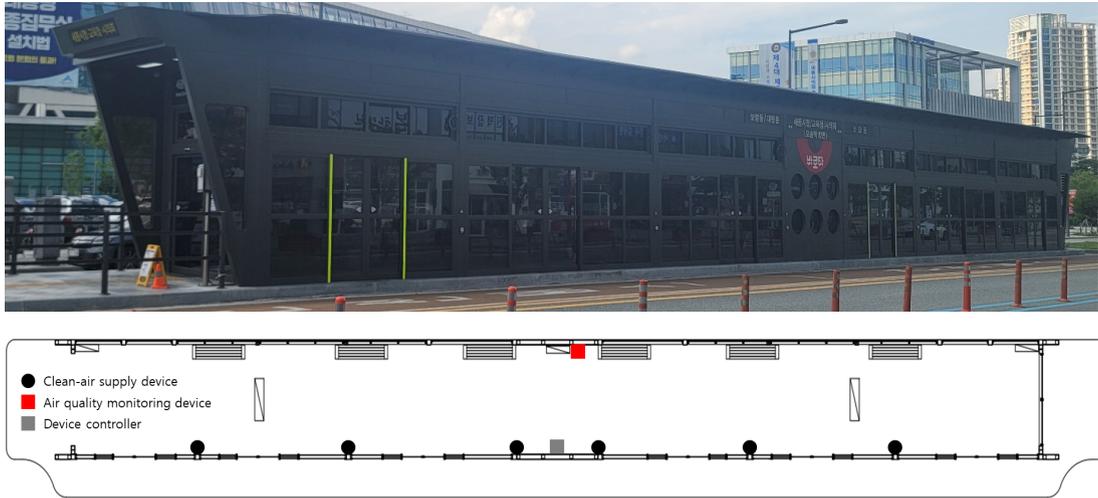


Fig. 5. BRT bus station (top) and schematic of performance evaluation (bottom).

지 농도(에어코리아 데이터)를 활용하여 자동방식으로 제어가 가능하다.

Table 2. Specification of Clean-Air Supply device

Item	Specification
Size	250 ϕ , 1,500 mm(H)
Flow rate	Max. 600 CMH
Efficiency	PM10 90%
Power	220VAC, 60Hz, 2A
Material	Aluminium(housing)
PM removal principle	DEMOC (diffusional force, inertial force, tribological force)
Control	manual and Automatic control



본 연구에서 개발된 청정공기 공급장치의 성능을 Table 3에 정리하였다. 청정공기 공급장치의 주요 기능인 미세먼지 저감 성능을 확인하기 위해 실내용 공기청정기의 시험방법(SPS-KACA 002-132:2018)을 활용하였다. 공인시험기관을 통해 객관적인 성능을 확인한 결과, 입자 저감효율은 90%, 청정화능력(CADR: Clean Air Delivery Rate)은 4.4 m³/min을 가진다.

Table 3. Specification of Clean-Air Supply device

Item	Testing Institution	Result
Particle removal rate	KCL ¹⁾	PM10 90%
CADR	KIMM ²⁾	4.4 m ³ /min

1) Korea Conformity Laboratories (KCL) : 한국건설생활환경시험연구원
 2) Korea Institute of Machinery and Materials (KIMM) : 한국기계연구원

2.3.3 현장평가 방법

Fig. 5 (bottom)에서 보는 바와 같이 청정공기 공급장치는 외부 공기가 유입되기 쉬운 PSD 인근에 6대 설치하였다. 청정공기 공급장치는 장치제어기를 이용하여 오전 8시부터 오후 10시 사이에 작동하도록 제어하였다. 공기질 모니터링 장치는 폐쇄형 정류장 내부, 반개방형 정류장 내부, 폐쇄형 정류장 입구(외부) 등 총 3개 지점에 설치하여, 1시간 평균 미세먼지 농도 데이터를 수집하였다. 본 시험에 사용된 공기질 모니터링 장치는 미세먼지 간이측정기 성능인증 1등급을 획득한 장비를 사용하였으며, 현장평가는 2022년 9월 8일부터 10월10일까지 약 32일간 수행되었다.

2.4 성능평가 결과

실증기간중 청정공기 공급장치는 1대당 약 6 m³/min의 유량으로 가동되었으며, 청정공기 공급장치를 약 15분 가량 가동하면, 정류장 내부를 1회 정화할 수 있다. 실증대상 정류장은 약 10분에 1대가 도착하고 있었으며, 청정공기 공급장치가 가동되는 조건을 보면 정류장 내부의 약 67%에 해당되는 공기를 정화되었을 때 PSD가 개폐되었다고 볼 수 있다. 현장평가 기간 중 3 지점(폐쇄형 정류장 내부, 개방형 정류장 외부, 외부)에 설치된 공기질 모니터링 장치에서 약 350개의 데이터가 수집되었으며, 이 중 결손된 데이터를 제외하면 폐쇄형은 324개, 반개방형은 246개 데이터를 확보하였다. 해당 기간 중 인근 자동기상관측자료(Automatic Weather System, AWS)에서 제공하는 풍향, 풍속 데이터를 활용하였으며, 평균

풍속은 1.7 m/s로 주풍은 남풍과 남동풍이 주로 이루었다. 폐쇄형 정류장의 경우 PSD가 남서방향, 반개방형 정류장의 PSD는 북서 방향에 설치되어 있다. 청정공기 공급장치 미세먼지 저감 성능은 외부 미세먼지 농도 변화의 변수를 최소화하기 위해 가동조건에서 실외 미세먼지 농도를 기준으로 폐쇄형 정류장 내부와 반개방형 정류장 내부의 미세먼지 농도를 비교하여 저감성을 산출하였다.

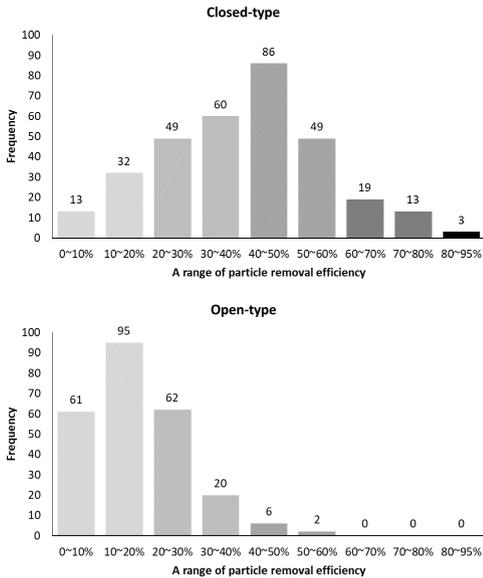


Fig. 6. Frequency of PM10 particle removal efficiency with a constant range

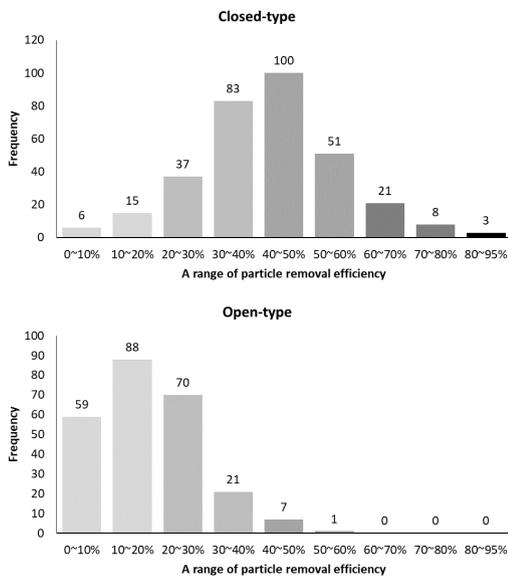


Fig. 7. Frequency of PM2.5 particle removal efficiency with a constant range

Fig. 6은 실외 미세먼지 농도를 기준으로 폐쇄형 정류장과 반개방형 정류장에서 수집된 미세먼지 농도 데이터를 이용하여 산출된 PM10 저감효율의 빈도분포를 나타내는 그래프이다. 미세먼지 저감효율은 식 (1)을 이용하여 산출하였으며, 그래프에서 보는 바와 같이 미세먼지 저감효율이 다양한 분포를 나타내고 있어 저감효율 범위를 10% 범위로 구분하여 빈도분포 효율로 나타내었다. 폐쇄형의 경우 PM10 평균 저감효율은 약 40%이고, 이 중 가장 높은 빈도를 보이고 있는 40%~50%의 미세먼지 저감효율이 86회로 전체 데이터의 약 27%를 차지하였다. 반개방형의 경우 PM10 평균 저감효율은 약 18%이고, 이 중 가장 높은 빈도를 보이고 있는 10%~20% 범위의 데이터는 95회로 전체 데이터의 약 39%를 차지하였다. 두 정류장 내부에서 미세먼지 저감효율 범위가 다양한 분포를 보이고 있는데, 이는 국지적인 기상조건과 주변 교통량에 따라 미세먼지의 발생과 확산 정도가 달라지기 때문으로 생각된다. 특히, 폐쇄형의 경우 출입문과 PSD 개방 횟수와 시간에 따라 외기의 영향도가 크게 달라질 수 있기 때문이다. 또한, 반개방형 정류장은 폐쇄형과 달리 정류장 출입구와 PSD가 상시 개방되어 있어 정류장 내부에 설치된 청정공기 공급장치가 정류장 내부를 정화하지만 외부 미세먼지가 상시 유입으로 인해 저감효율이 낮게 나온 것으로 보인다.

Fig. 7은 폐쇄형 정류장과 반개방형 정류장에서 수집된 데이터중 PM2.5 저감효율의 빈도를 나타낸다. PM2.5의 저감효율은 폐쇄형 정류장의 경우 약 42%, 반개방형 정류장의 경우 약 18%의 저감 성능을 보였다. 이는 PM10과 비슷한 경향을 나타내는데 이는 청정공기 공급장치가 PM10뿐만 아니라 PM2.5의 저감효율에도 효과가 있는 것을 나타낸다.

3. 결론

본 연구에서는 야외 환경에 적용성이 높은 DEMC 기술을 활용하여 청정공기 공급장치를 제작하고, 실제 운행중인 버스정류장에 설치하여 미세먼지 저감 성능 평가를 실시하였다. 수행된 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) DEMC 모듈은 고농도의 입자부하 조건에서도 초기 성능(입자제거효율과 압력손실)이 유지되는 특성을 검증하였으며, 이는 다양한 실외 환경에서 유지보수를 최소화하면서 일정성능을 유지하는 미

세면지 저감 신기술로 활용할 수 있는 것을 검증하였다.

- (2) 폐쇄형과 반개방형 버스정류장에 DEMC 모듈이 적용된 청정공기 공급장치를 적용하여 미세먼지 저감 성능평가를 수행한 결과, PM10의 경우 약 40%(폐쇄형)과 약 18%(반개방형) 저감 성능을 보였으며, PM2.5의 경우 약 42%(폐쇄형)과 약 18%(반개방형)의 저감성능을 검증하였다.
- (3) 폐쇄형 정류장의 경우 청정공기 공급장치를 가동하였을 때, 약 82% 확률로 정류장 내부의 미세먼지를 30~95%까지 감소시킬 수 있다

- [7] H.M. Park, Development of Proof Technique for Particulate Matters Reduction in Urban Roadside, Report, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Korea, pp.1-111.
- [8] C.H. Park, J. Choi, D. Lee, "Assessing Outdoor Air Purifiers for Reducing Urban Air Pollution in Korea", *KProceedings of Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol.20(1), pp.124-125, May 2020.
- [9] STATAIR Updates, Washington University finds PMX to be most efficient against (ultra) fine dust air pollution in climbing gym. STATAIR. [cited 2020 Nov. 12], Available From: <https://www.staticair.com/en/news/washington-university-Staticair-pmx-climbing-bouldering-gym-efficient-against-air-pollution> (accessed Oct. 10, 2022)

References

- [1] P. Bächler, T.K. Müller, T. Warth, T. Yildiz, A. Dittler, "Impact of ambient air filters on PM concentration levels at an urban traffic hotspot (Stuttgart, Am Neckartor)", *Atmospheric Pollution Research*, Vol.12, Issue 6, pp.1-11, June 2021.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.101059>
- [2] D.T. Silverman, C.M. Samanic, J.H. Lubin, A.E. Blair, P.A. Stewart, R. Vermeulen, J.B. Coble, N. Rothman, P.L. Schleiff, W.D. Travis, R.G. Ziegler, S. Wacholder, M.D. Attfield, "The Diesel Exhaust in Miners Study: A Nested Case-Control Study of Lung Cancer and Diesel Exhaust", *Journal of the National Cancer Institute*, Vol.104, Issue 11, pp.855-868, June 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1093/inci/djs034>
- [3] J.P. Shi, D.E. Evans, A.A. Khan, R.M. Harrison, "Sources and concentration of nanoparticles (<10nm diameter) in the urban atmosphere" *Atmospheric Environment*, Vol.35, Issue 7, pp.1193-1202, Feb. 2001.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(00\)00418-0](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(00)00418-0)
- [4] L. Morawska, Z. Ristovski, E.R. Jayaratne, D.U. Keogh, X. Ling, "Ambient nano and ultrafine particles from motor vehicle emissions: Characteristics, ambient processing and implications on human exposure", *Atmospheric Environment*, Vol.42, Issue 35, pp. 8113-8138. Nov. 2008.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.07.050>
- [5] I.A. Reşitoğlu, K. Altinisik, A. Keskin, "The Pollutant Emissions from Diesel-Engine Vehicles and Exhaust Aftertreatment Systems", *Clean Technologies and Environmental Policy*, Vol.17, pp.15-27, April 2015.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10098-014-0793-9>
- [6] J.S. Kim, Y.J. Choi, K.B. Lee, S.D. Kim, "Relation with Activity of Road Mobile Source and Roadside Nitrogen Oxide Concentration", *Korean Institute of Ecological Architecture and Environment*, Vol.32, pp.9-20, Feb. 2016.
DOI: <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2016.32.1.009>

오 동 규(Dongkyu Oh)

[정회원]



- 2005년 2월 : 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학부 (공학석사)
- 2012년 2월 : 서울대학교 대학원 건설환경공학부 (공학박사)
- 2013년 4월 ~ 2014년 12월 : 한국도로공사 선임연구원
- 2014년 12월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

교통계획, 대중교통

김 세 영(Seyoung Kim)

[정회원]



- 2011년 2월 : 성균관대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2014년 9월 : 일본 가나자와 대학교 물질공학 (공학박사)
- 2014년 10월 ~ 2018년 12월 : 일본 HORIBA R&D 연구원
- 2019년 1월 ~ 현재 : 주식회사 나눔

<관심분야>

대기환경, 미세먼지

권 순 박(Soon-Bark Kwon)

[정회원]



- 1999년 2월 : 광주과학기술원
환경공학과 (공학석사)
- 2003년 2월 : 광주과학기술원
환경공학과 (공학박사)
- 2006년 2월 ~ 2017년 8월 : 한국
철도기술연구원 책임연구원
- 2017년 9월 ~ 현재 : 주식회사 나옴
대표이사

<관심분야>

공기질, 미세먼지, 스마트시티, AI

정 양 훈(Yanghoon Chung)

[정회원]



- 1999년 2월 : 인하대학교 기계공
학과 (공학석사)
- 2021년 2월 : 가톨릭대학교 의물
리공학 (박사수료)
- 2012년 6월 ~ 2019년 12월 :
(주)엔게인 개발이사
- 2021년 8월 ~ 현재 : 주식회사 나옴
부사장

<관심분야>

대기환경, 바이오