

## 지하철 공기질 개선을 위한 분리형 2단 전기집진기의 집진 특성 분석

김 예 슬<sup>1),2)</sup> · 이 예 완<sup>1)</sup> · 김 용 진<sup>1)</sup> · 한 방 우<sup>1),2)</sup> · 김 학 준<sup>1),2),\*</sup>

<sup>1)</sup>한국기계연구원 환경시스템연구본부

<sup>2)</sup>과학기술연합대학원대학교(UST) 환경에너지기계공학

(2020년 11월 30일 투고, 2020년 12월 23일 수정, 2020년 12월 23일 게재확정)

## Particle collection performance of a separated two-stage electrostatic precipitator for subway air purification

Ye-Sle Kim<sup>1),2)</sup> · Yeawan Lee<sup>1)</sup> · Yong-Jin Kim<sup>1)</sup> · Bangwoo Han<sup>1),2)</sup> · Hak-Joon Kim<sup>1),2),\*</sup>

<sup>1)</sup>*Environmental System Research Division, Korea Institute of Machinery & Materials (KIMM), Daejeon, Republic of Korea*

<sup>2)</sup>*Environmental & Energy Mechanical Engineering, University of Science and Technology (UST), Korea*

(Received 30 Nov 2020; Revised 23 Dec 2020; Accepted 23 Dec 2020)

### Abstract

In this study, we developed a separated two-stage electrostatic precipitator applicable in a subway air conditioning system. We studied the characteristics of collection efficiency of 0.3  $\mu\text{m}$  particle and ozone generation at different charger sizes and gaps of collector plates. Also, we compared the performance of the two-stage ESP to the MERV 10 filter with the removal efficiency of 10% used in actual subway air conditioning system. The maximum collection efficiency of 0.3  $\mu\text{m}$  particle was 93% at A charger (600 mm  $\times$  250 mm  $\times$  600 mm) and 84% at B charger (330 mm  $\times$  280 mm  $\times$  330 mm). Especially, with voltages applied to chargers with collection efficiency of about 80% or more, the ozone concentration of two different chargers was 5 ppb to 35 ppb. Finally, the filter quality of the collector developed in this study was 400 times higher than that of the MERV 10 filter. Therefore, it was concluded that the two-stage ESP could be a promising PM removal device suitable for subway air conditioning system.

**Keywords:** Electrostatic precipitator, Charger, Collector, Subway, Ozone

---

\*Corresponding Author  
Tel : +82-42-868-7775  
E-mail : diayolk@kimm.re.kr

## 1. Introduction

지하철은 사람들이 많이 이용하는 대중교통 수단이며 우리나라의 지하철 이용률은 2014년 전체 대중교통의 48%를 차지하고 2017년에는 59.66%까지 증가했다(Seoul Metropolitan Government, 2019). Lee et al. (2017)에 따르면 서울시 지하철 역사 내부의 미세먼지는 일부 구간에서  $PM_{10}$  및  $PM_{2.5}$  농도가 관련법 기준 농도를 초과한다. 세계보건기구(WHO) 산하의 국제 암 연구소는 미세먼지(Particulate Matter, PM)을 1등급 발암물질로 분류했으며 미세먼지가 호흡기 질환(Zhao et al., 2017), 임신 중 당뇨병(Melody et al., 2019), 심부전(Zhang et al., 2019), 일시적 기억 상실(Petkus et al., 2020)을 유발시킨다는 다양한 연구결과가 있다. 따라서 지하철 역사 내 인체에 유해한 미세먼지 노출을 줄이기 위해서는 지하철역 실내 공기관리가 필요하다.

지하철역에서 공기 질을 관리하는 방법에는 자연 환기와 기계 환기가 있다. Kim et al.(2010)에 의하면 자연 환기는 지하철이 이동하며 터널 내 공기를 외부로 배출시키는 방법으로 별도의 장치가 요구되지 않아 비용을 발생시키지 않지만 지속적인 환기 효과를 보기 힘들다. 기계 환기는 공기 조화설비를 이용하여 강제적으로 환기를 시키는 것으로 송풍기와 입자 제거 기술을 함께 사용한다. 입자 제거 방법 중 하나인 필터는 외기를 정화하여 역사에 공급하며 입자의 높은 제거 효율을 보인다. 하지만 필터에 분진 부하가 높아지면 압력 손실 증가와 입자 제거 효율 감소를 일으킨다(Kim et al., 2008). 또한 주기적인 교체를 필요로 하여 사용자의 비용 부담을 야기시킨다(Noh et al., 2013). 입자 제거의 또 다른 방법인 전기집진기는 높은 집진 효율과 낮은 압력 손실을 발생시킨다는 장점이 있지만(Kyung, 2019) 인체에 유해한 오존을 발생시켜 지하터널, 실내 공조 내부 시설 등에 사용할 경우 어려움이 따른다(Kim et al., 2010).

전기집진기가 인체에 유해한 오존을 발생시킴에 따라 전기집진기를 실내에 적용하기 위한 많은 연구결과가 있다. Kim et al. (2016)은 탄소 및 각종 금속 섬유 방전 및 오존 발생 특성을 연구하였고 탄소 섬유 브러쉬는 전극의 직경이 작아 플라즈마 부피가 작고 전극의 개수가 많아 전기적 간

섭이 일어나며 이에 따라 오존 발생량이 적다는 특징을 가진다.

필터와 전기집진 방식은 전반적인 미세먼지 제거 효율은 모두 높지만 특정  $0.1\sim 1\ \mu\text{m}$  구간의 입자가 제거되기 힘들다는 특징을 가진다(Hinds, 1999). 따라서 필터와 전기집진기의 실내 공기 정화 능력을 평가할 때  $0.1\sim 1\ \mu\text{m}$  구간의 초미세먼지 입자 제거 효율은 반드시 고려되어야 한다.

또한 2단 전기집진기가 지하철 공조기에 상용화되기 위해서는 역사 별로 상이한 내부 공간이 고려되어야 한다. 2단 전기집진기 제작 시 내부 공간의 활용도를 높이는 방안으로 장치의 설계 수치가 선정되어야 하며 하전부와 집진부의 분리를 필요로 할 수 있다. 실제 4호선 인덕역의 공조기는 공기 조화 댐퍼와 급기 댐퍼를 통해 공기가 유입되고 이때 댐퍼의 면적은 공조기 단면에 비해 약 2배 작다. 댐퍼에 2단 전기집진기의 하전부를 부착한다면 기존 구조에 추가적인 설비를 필요로 하지 않고 내부 공간을 그대로 활용할 수 있지만 특정 댐퍼의 수치에 맞춰 하전부를 제작해야 한다. 급기 댐퍼에 비해 공기 조화 댐퍼 전단에서는 약  $2\ \text{m/s}$ 의 유속이 지나가지만 내부에서는 약  $6\ \text{m/s}$  이상의 유속이 예측된다. 또한 댐퍼 후단에서는 다시 약  $2\ \text{m/s}$ 의 유속이 지나간다는 특징을 가진다. 실제로 2단 전기집진기를 적용할 때 공기 조화 댐퍼의 면적에 맞추어 2단 전기집진기의 하전부 크기를 제작하고 집진부는 상대적으로 낮은 유속에서 가동될 수 있도록 분리하면 전체적인 공간의 효율성을 높일 수 있다. 따라서 효율적인 공간 활용을 위해 하전부의 면적을 집진부 보다 작게 제작했을 때 발생하는 하전부 내부 고유속의 조건과 하전부와 집진부가 분리된 조건에서의 집진 효율이 충분하다면 공조기 내부 공간의 제약을 받지 않고 2단 전기집진기를 적용할 수 있을 것으로 예상된다.

따라서 본 연구에서는 실제 지하철 공조기 내부에 적용 시 공조기 내부 공간의 활용도를 높이기 위하여 전기집진기의 설계 수치를 선정하였다. 탄소 섬유 브러쉬를 이오나이저로 사용한 하전부와 평판형 집진부로 구성된 2단 전기집진기를 설계 수치에 따라 연구하였고 극조미세먼지에 해당하는  $0.3\ \mu\text{m}$  입자에 대한 집진 효율 특성과 오존 발생량을 연구하였다. 또한 실제 지하철 공조기 내부에

상용화 되어있는 **MERV 10** 필터와 본 연구의 2단 전기집진기의 성능을 비교하였다.

## 2. Experimental setup and method

본 연구에서는 2단 전기집진기의 성능 평가와 **MERV 10** 필터의 성능평가를 실행하였다. 분리된 2단 전기집진기의 성능 평가 실험에서 시험 덕트는 **600 mm × 600 mm** 의 면적으로 덕트 내부 유속은 **vane** 타입의 유속계(**TESTO 480**, **TESTO**, **Germany**)로 측정하였다. 유속 측정 위치는 샘플링 프로브 후단의 **200 mm** 직경의 원형 덕트이다. Fig. 1에서 **position 1**은 하전부, **position 2**는 집진부, **position 3**은 원형 덕트의 위치를 나타내며 실험 유량은 **43.2 m<sup>3</sup>/min**으로 고정하였고 하전부와 집진부의 분리 거리를 약 **1 m**로 고정하였다. 성능 평가 실험은 분리된 2단 전기 집진기의 집진 효율과 오존 발생량, 압력 손실 측정으로 집진 효율과 오존 발생량 측정 위치는 동일하였다. 시험 입자는 대기진으로 성능평가를 진행하였다. 인가전압은 하전부에 **-3 ~ -20 kV**, 집진부에는 **-5 kV**를 고정하여 인가하였다.

본 실험에서는 두 가지 하전부에 대한 오존 발생량을 오존 측정기(**O<sub>3</sub> Analyzer T400**, **TELEDYNE**, **USA**)로 측정하였다. 오존 발생량은 하전부 작동 시 측정된 오존 농도와 하전부 작동 전의 오존 농도와의 차로 계산되었다. 또한 두 가지 집진부에 대한 압력 손실을 **TESTO** 압력계를 사용하여 측정하였다(**TESTO 480**, **TESTO**, **Germany**).

대기진에 대한 집진 효율은 전기집진기의 후단에서 집진기를 작동하지 않았을 때와 작동했을 때의 입자 농도를 **Aerosol Spectrometer (Model 1.109**, **Grimm**, **Germany**)으로 측정하고 다음 식으로 산출하였다.

$$\eta(\%) = \left(1 - \frac{n_2}{n_1}\right) \times 100 \quad \text{식 (1)}$$

$\eta$ 는 전기집진기의 집진 효율(%)이며  $n_1$ 은 집진기 가동 전 대기진의 개수 농도(L),  $n_2$ 는 집진기 가동 후 대기진의 개수 농도(L)이다. 또한 본 2단 전기집진기의 집진 성능 평가에서 다루진 입경 크기는 **0.3 μm**이다.

미세먼지 포집 장치로는 탄소 브러쉬 하전부와 평판형 집진부의 2단 전기집진기를 사용하였다. 탄

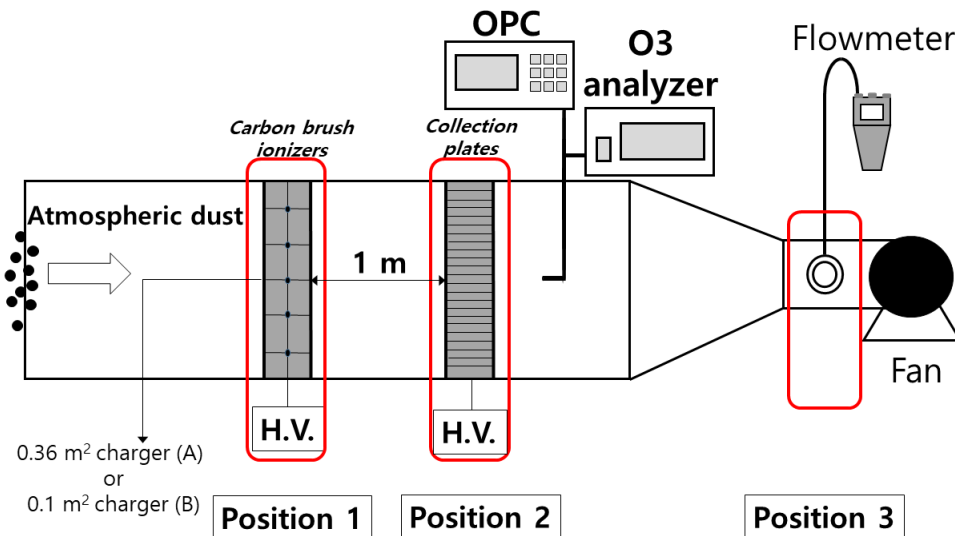


Figure 1. Schematic of a separated two-stage electrostatic precipitator performance evaluation experiment.

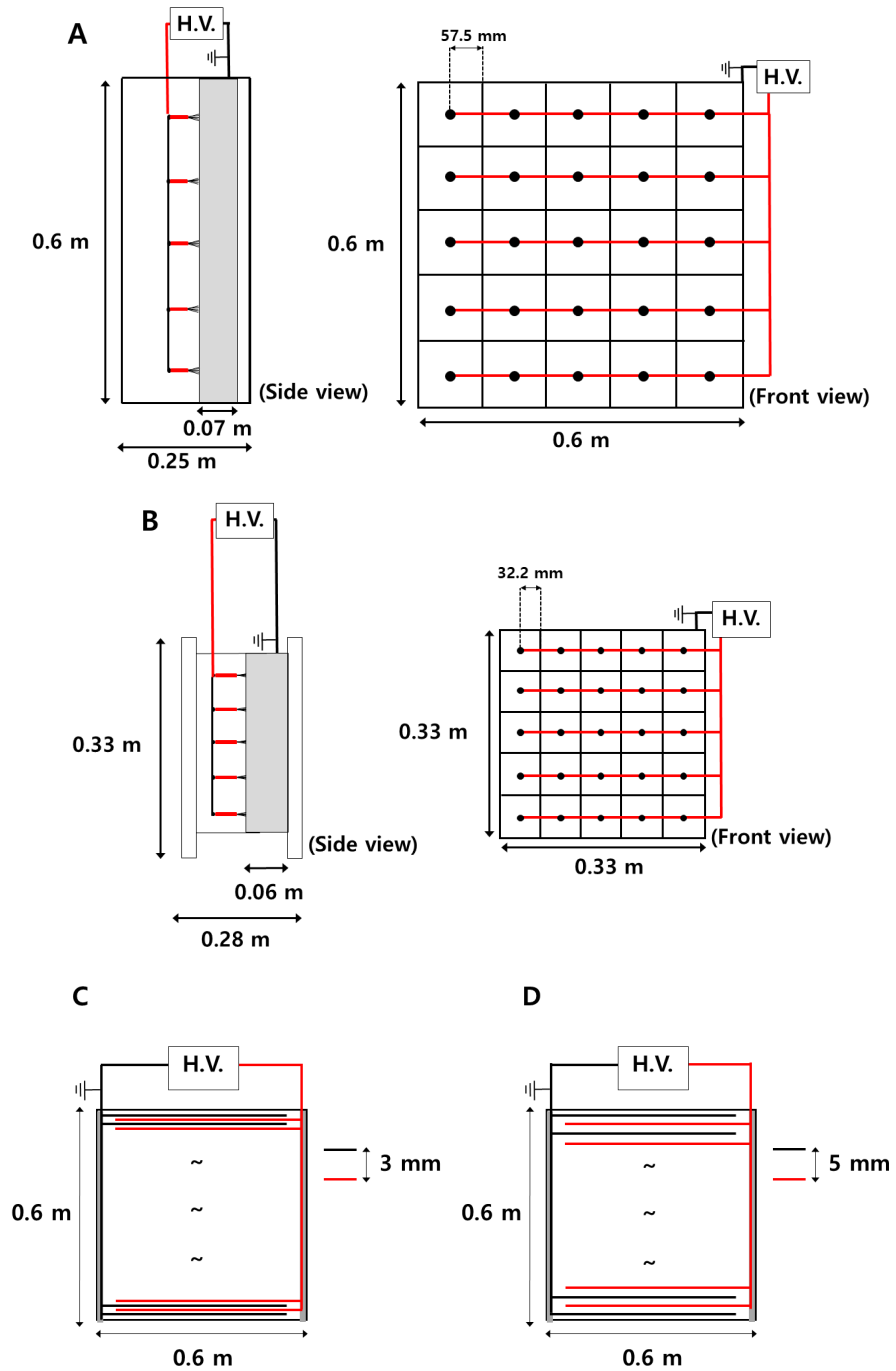


Figure 2. Two types of charger and collector developed in this study.  
 A) A charger (600 mm × 250 mm × 600 mm), B) B charger (330 mm × 280 mm × 330 mm),  
 C) C collector (600 mm × 110 mm × 600 mm), D) D collector (600 mm × 110 mm × 600 mm)

소 브러쉬 하전부는 공조기 내부 구조에 적용 가능한 설계 조건에서 두 가지로 구성하였다. A 하전부는 가로 600 mm × 세로 250 mm × 높이 600 mm의 크기로 단면적은 0.36 m<sup>2</sup>이며, 25 개의 탄소 브러쉬 방전극이 5 × 5 채널로 이루어진 사각 접지극의 중간에 배치되어있다(Fig. 2A). 접지판의 폭은 70 mm이며 총 면적은 0.575 m<sup>2</sup>이고 재질은 stainless steel이다. 또한 방전극과 접지판의 간격은 57.5mm 이다. B 하전부는 가로 330 mm × 세로 280 mm × 높이 330 mm의 크기로 단면적은 0.1 m<sup>2</sup>이며, A 하전부와 동일한 구조이다(Fig. 2B) 접지판의 폭은 60 mm이며 접지판으로 사용된 금속판의 총 면적은 0.386 m<sup>2</sup>이다. 또한 방전극과 접지판의 간격은 32.2 mm이다. A 하전부는 B 하전부에 비해 약 3.6배의 더 넓은 단면적을 가지며 고정된 유량에서 A 하전부의 내부 유속은 2 m/s이며 B 하전부의 내부 유속은 6.6 m/s이다.

평판형 집진부는 평판 사이의 간격에 의해 전기장의 세기, 집진 면적 등이 바뀌며 이에 따라 두 가지로 구성하였다. C 집진부는 가로 600 mm × 세로 110 mm × 높이 600 mm의 외형 크기로 이루어져 있다(Fig. 2C). 내부에 510 mm × 100 mm의 크기를 가지는 탄소 필름으로 구성된 평판형 고전압 전극과 금속 접지 전극이 3 mm 간격으로 각각 84개, 85개가 배열되어 있으며 약 8.6 m<sup>2</sup>의 집진판 유효면적을 가진다. D 집진부는 C 집진부와 같은 외형 크기로 이루어져 있다(Fig. 2D). 내부에 탄소

필름 고전압 전극과 금속 접지 전극이 C 집진부와 같은 크기로 구성되어 있으며 5 mm 간격으로 각각 50개, 51개가 배열되어 있고 약 5.2 m<sup>2</sup>의 집진판 유효면적을 가진다. 또한 두 가지 집진부의 집진 면적 차이는 약 3 m<sup>2</sup>이며 고정된 유량에서 C 집진부와 D 집진부의 내부 유속은 2 m/s이다.

MERV 10 필터의 성능평가 실험은 대전광역시 유성온천역 공조기 내부에서 수행하였다. MERV 10 필터가 공조기 내부에 설치되어 있으며 필터의 입자 제거효율은 필터의 전단과 후단에서 입자 농도를 Aerosol Spectrometer (Model 1.109, Grimm, Germany)으로 측정하고 식 (1)을 사용하여 산출하였다(Fig. 3).

### 3. Experimental results

#### 3.1 두 가지 하전부의 전류 및 오존 발생량 특성 비교

Fig. 4는 본 실험의 두 가지 하전부에 대하여 하전부 인가전압에 따른 코로나 방전 전류를 비교한 그래프이다. A 하전부에 -1.8 kV 인가 시 코로나 방전이 시작되고, B 하전부는 -1.9 kV에서 시작됨을 확인하였다. 하전부 전압은 모두 -10 kV 까지 인가하였으며 B 하전부에서는 최대 인가전압에서 최대 전류 -0.6 mA, A 하전부에서는 약 -0.37 mA 로 B 하전부에서 더 높은 코로나 전류 특성을 확

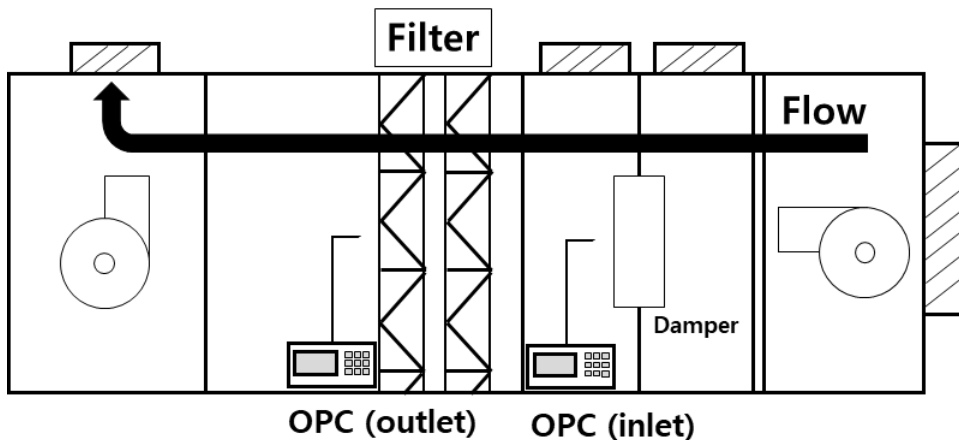


Figure 3. Schematic of MERV 10 filter performance evaluation experiment.

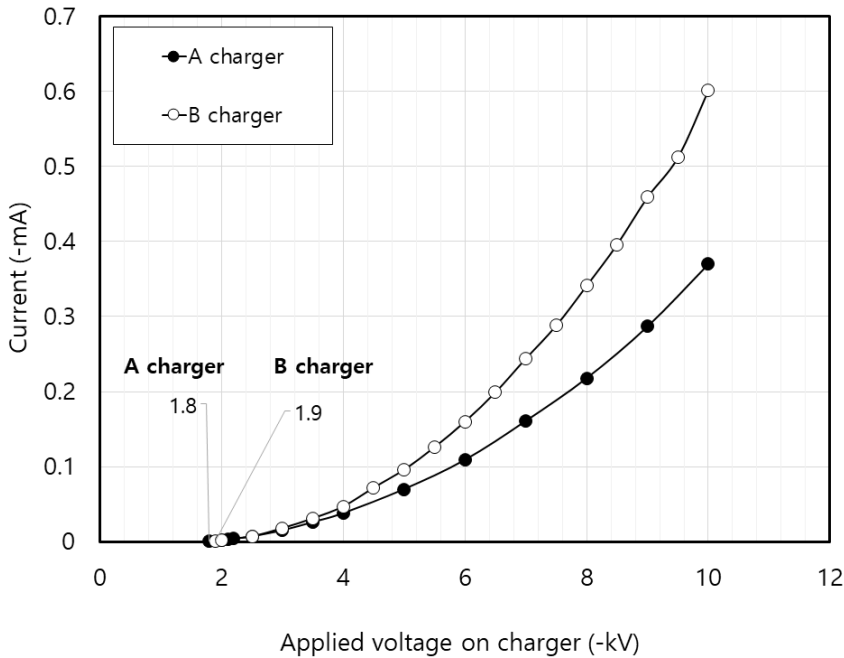


Figure 4. Corona current according to applied voltage of two different chargers.

인하였다. 이는 두 하전부가 같은 방전극 개수를 가지지만 B 하전부의 면적이 A 하전부보다 작음에 따라 방전극과 접지판의 거리가 짧기 때문이다.

Fig. 5는 본 실험 장치의 오존 발생량을 비교한 그래프이다. 오존 발생량을 비교하기 위해서 A, B 하전부에 0 ~ -20 kV의 전압을 인가하였다. A, B 하전부는 최대 인가전압 -20 kV에서 최대 오존 발생량은 각각 8 ppb, 35 ppb로 A 하전부에서는 B 하전부보다 매우 낮은 수준의 오존을 발생시킴을 확인하였다. 본 실험의 모든 인가전압에서 B 하전부는 A 하전부에 비하여 높은 오존 발생량을 나타내었으며 이는 전류가 증가할수록 코로나 방전으로 인해 발생하는 오존의 양이 증가하기 때문이다 (Noh et al., 2003).

### 3.2 실제 지하역사 내 미세먼지 분포와 공조기 내 MERV 10 필터의 성능 평가

대전광역시의 유성온천역 내부의 공조기에 설치되어 있는 MERV 10 필터의 입경별 입자 제거 효율을 측정하였고, 동시에 미세먼지의 입경에 따른

질량 농도 분포를 측정하였다(Fig. 6). 입경 분포를 측정한 결과로, 실제 역사 내에 1  $\mu\text{m}$  이하의 입자들의 질량 농도는 전체 질량 농도의 약 80%, 0.3  $\mu\text{m}$  이하의 입자들은 약 55%를 차지함을 확인하였다. 1  $\mu\text{m}$  이하의 입자의 제거 효율은 평균 약 23%, 0.3  $\mu\text{m}$  이하의 입자의 제거 효율은 평균 약 10%로 기존 지하철 역사 내 부착되어 있는 필터의 1  $\mu\text{m}$  이하 먼지에 대한 제거 성능이 좋지 못한 것을 확인하였다. 비록 지하역사 공조기 내부 MERV 10 필터의 3.5  $\mu\text{m}$  이상의 입자의 제거 효율은 90% 이상으로 높지만 실내 유입 먼지의 80%를 차지하는 인체에 유해한 PM1.0에 대해서는 약 20~30% 수준의 제거효율 밖에 나타내지 못하였다.

### 3.3 분리형 2단 전기집진기의 설계수치에 따른 입자 제거효율 특성

본 연구에서 개발한 2단 전기집진기의 하전부 크기 차이와 집진부의 고전압부와 접지부의 거리 차이에 따른 집진 효율을 평가하기 위하여 인가전압에 따른 대기진 제거 효율을 측정하였다. 첫 번

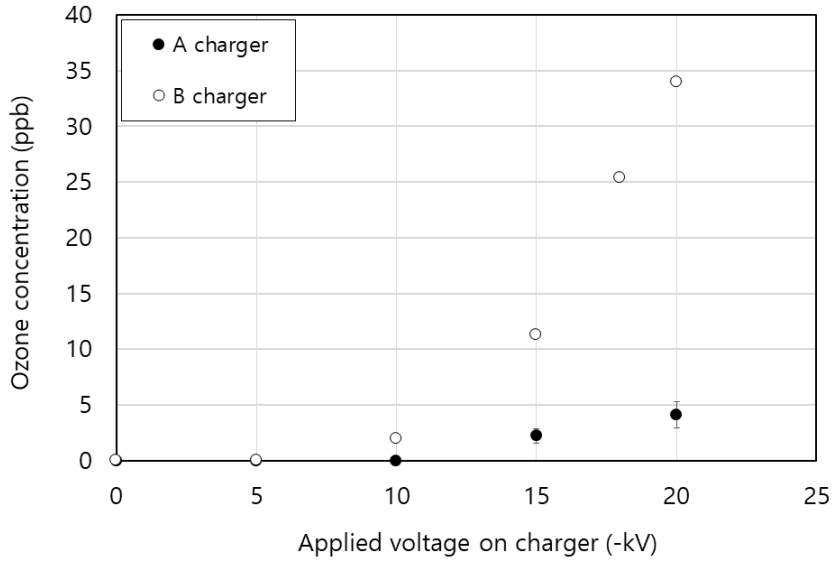


Figure 5. Ozone concentration characteristics according to applied voltage of two different chargers.

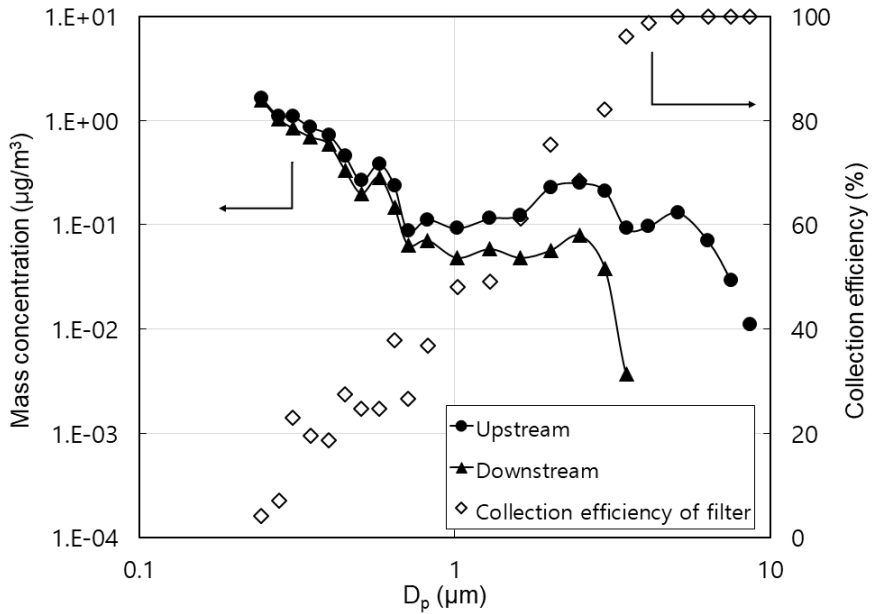


Figure 6. Particle distribution of atmospheric dust in the subway station air handling unit and collection efficiency of filter.

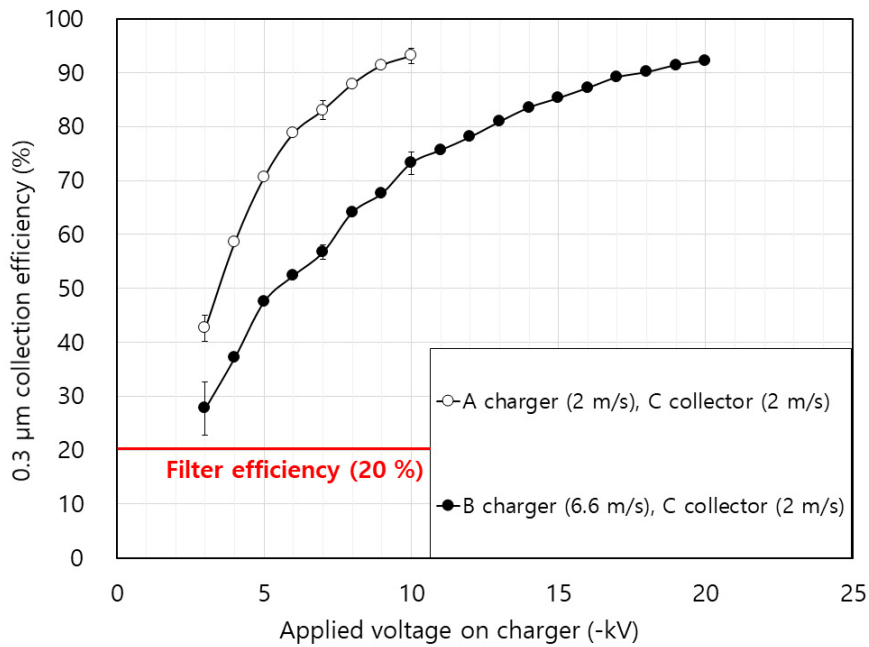


Figure 7. 0.3 μm particle collection efficiency of two-stage ESP according to different chargers.

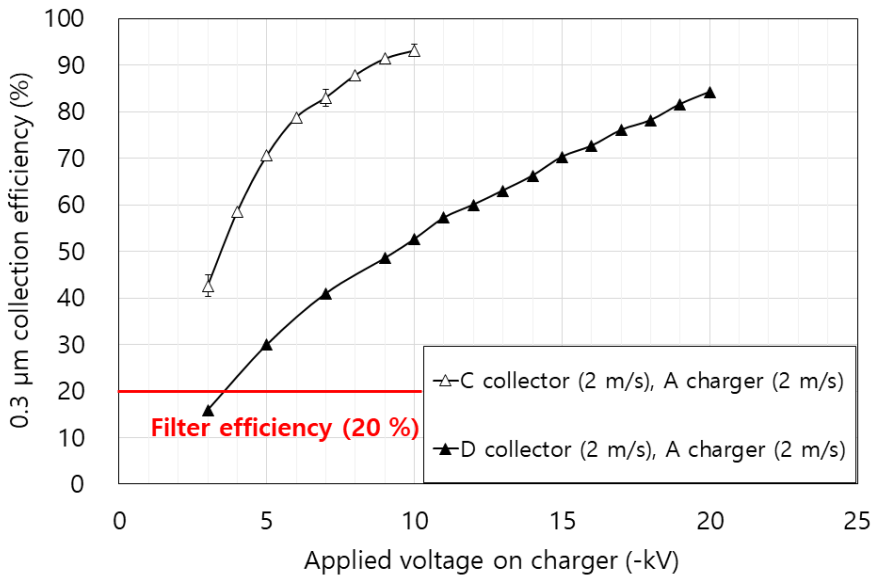


Figure 8. 0.3 μm particle collection efficiency of two-stage ESP according to different collectors.



제로 동일 유량 43.2 m<sup>3</sup>/min에서 하전부 크기에 따른 0.3 μm 입자의 집진 효율을 비교하였다(Fig. 7). 집진 효율 측정 실험 시, 대기진의 배경 농도를 1분 간격으로 측정하였으며 하전부 크기에 따른 0.3 μm 입자의 모든 집진효율 비교 실험에서 대기진 배경 농도는 8~10×10<sup>7</sup> /m<sup>3</sup> 이었다. 실험 도중 대기진 농도 증감은 약 5×10<sup>6</sup> /m<sup>3</sup>로 배경 농도 대비 10% 이내였다.

A, B 하전부에 C 집진부를 사용하여 2단 전기집진기의 집진 효율을 비교하였고 A 하전부에는 -3 ~ -10 kV, B 하전부에는 -3 ~ -20 kV, C 집진부에는 -5 kV를 인가시켰다. 또한 A, B 하전부 인가전압 -3, -7, -10 kV의 조건에서 해당 실험을 3회 반복 수행 하였다. 하전부의 인가전압을 증가시키기에 따라 집진 효율이 증가하였으며 A 하전부와 B 하전부를 사용한 2단 전기집진기 모두 최대 집진 효율이 약 93%임을 확인하였다. 동일 인가전압에서 집진 효율을 비교한 결과 A 하전부에서 B 하전부보다 더 높은 집진 효율을 보였다. A 하전부보다 낮은 효율에도 불구하고 B 하전부의 최고 효율은 MERV 10 필터 대비 최대 70%의 효율 차이를 보였다.

두 번째로 고전압판과 접지면 사이의 간격이 다른 두 가지 집진부 C, D에 따른 집진 효율을 측정하였다(Fig. 8). 대기진 배경 농도는 8~10×10<sup>7</sup> /m<sup>3</sup> 이었고 실험 도중 대기진 농도 증감은 약 6×10<sup>6</sup> /m<sup>3</sup> 으로 배경 농도 대비 10% 이내였다. 동일 유량 43.2 m<sup>3</sup>/min에서 C, D 집진부에는 -5 kV를 인가시켰다. 또한 A 하전부로 2단 전기집진기를 구성하였으며 하전부 인가전압은 C 집진부와 구성될 때 -3 ~ -10 kV, D 집진부와 구성될 때 -3 ~ -20 kV 이었다. 본 실험의 모든 인가전압 조건에서 D 집진부에 비해 C 집진부에서 더 높은 집진 효율을 보였다. 다음 식은 전기집진기의 효율과 집진판 사이의 간격, 집진 면적과의 관계를 나타낸다.

$$\eta = 1 - \exp\left(\frac{-W_m \times A}{Q}\right) \quad \text{식 (2)}$$

$$W_m = \frac{Q_p \times E_c \times Cu}{3\pi\mu D_p} \quad \text{식 (3)}$$

$$E_c = \frac{V}{m} \quad \text{식 (4)}$$

η는 전기집진기의 집진 효율(%), W<sub>m</sub>은 입자가 집진판으로 이동하는 속도(m/s), A는 집진 면적(m<sup>2</sup>), Q는 유량(m<sup>3</sup>/sec), Q<sub>p</sub>는 입자의 하전량(C), E<sub>c</sub>는 집진부의 전기장 세기(V/m), Cu는 Cunningham correction factor, μ는 공기의 점성계수 (Pa·s), D<sub>p</sub>는 입자의 직경(m), V는 집진부 인가전압(V)이며 m는 집진부의 접지 전극과 고전압 전극의 간격(m)이다.

C 집진부의 집진 효율이 D 집진부보다 높은 경향을 보이는 이유는 식 (2)에서와 같이 집진 면적이 클수록 집진 효율이 높아지기 때문이다. 또한 식 (4)에서와 같이 고전압 전극과 접지 전극의 간격이 좁을수록 전기장 세기가 강해져 식 (3)과 같이 입자가 집진판으로 이동하는 속도가 빨라지기 때문이다.

D 집진부에서는 하전부 인가전압을 변경함에 따라 0.3 μm에서 80% 이상의 높은 집진효율을 보였으며 MERV 10 필터 대비 최대 60%의 효율 차이를 보였다.

### 3.4 MERV 10 필터와 분리형 2단 전기집진기의 성능 비교

본 연구에서 개발한 2단 전기집진기와 실제 지하 역사 공조기에서 쓰이고 있는 MERV 10 필터의 성능을 비교하기 위하여 압력 손실을 비교하였다. Joshua et al. (2018)에 따르면 MERV 10 필터의 압력 손실은 약 2 m/s에서 약 23.9 mmAq로 예측된다. 하지만 동일 유속에서 C 집진부와 D 집진부의 압력 손실을 측정된 결과 각각 3 mmAq, 1 mmAq의 낮은 압력 손실을 보였다(Fig. 9). 서로 다른 필터의 성능을 비교할 때 입자 제거 효율과 압력 손실이 모두 고려되어야 하고 성능 비교 기준으로 필터 특성(Filter quality)이 사용된다. Joshua et al. (2018)에 따르면 MERV 10 필터의 0.3 μm 입자 제거효율은 약 10%로 본 연구에서 진행된

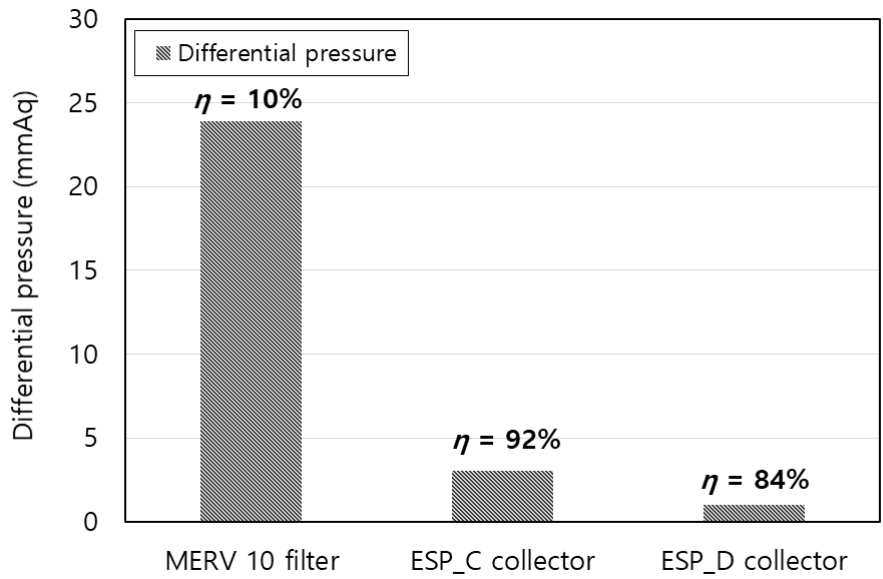


Figure 9. Differential pressure of MERV 10 filter and two different collectors.

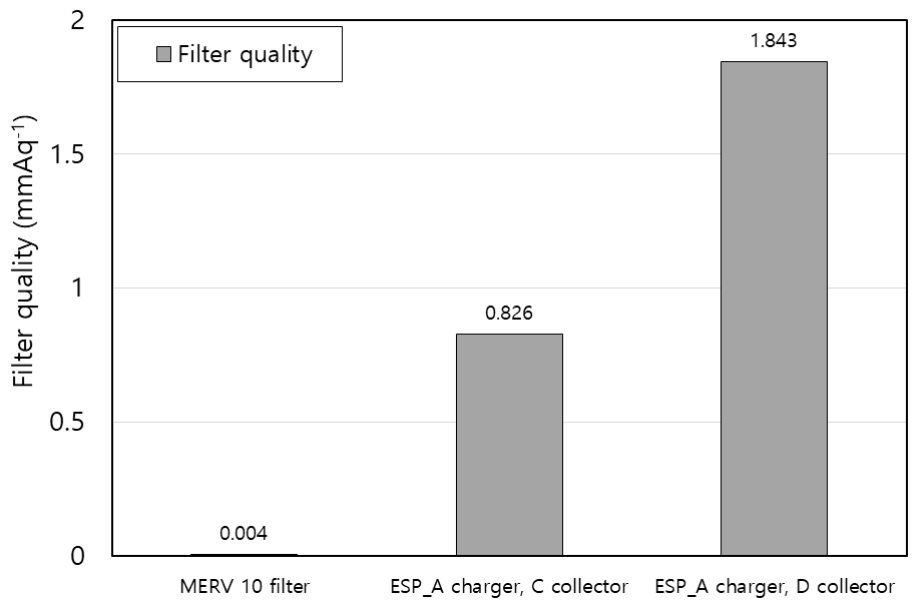


Figure 10. Filter quality of MERV 10 filter and two-stage ESP of two different collectors.

MERV 10 필터의 성능 평가 실험 결과와 유사한 경향을 보인다. 본 연구의 2단 전기집진기에서는 하전부 인가전압 변경에 따라 C 집진부에서 최고 집진 효율 약 92%, D 집진부에서 최고 집진 효율 약 84%를 보였으며 MERV 10 필터 대비 8배 이상의 높은 입자 제거 효율 특성을 확인하였다.

필터 특성은 값이 클수록 필터의 성능이 좋음을 의미하며 입자 투과율과 압력 손실의 비로 산출할 수 있다(Han et al., 2000).

$$Filter\ quality(q_F) = \frac{\ln(1/P)}{\Delta p} \quad \text{식 (5)}$$

여기서 P는 Penetration,  $\Delta p$ 는 압력손실이다. MERV 10 필터는  $0.004 \text{ mmAq}^{-1}$ 의 필터 특성을 가지고 C 집진부와 D 집진부로 구성된 2단 전기집진기는 각각  $0.826 \text{ mmAq}^{-1}$ ,  $1.84 \text{ mmAq}^{-1}$ 의 필터 특성을 가진다. 필터 특성 비교 결과로는 MERV 10 필터 대비 두 가지 집진부로 구성된 2단 전기집진기의 필터 특성이 C 집진부, D 집진부 각각 약 180배와 약 400배임을 확인하였다(Fig. 10).

#### 4. Conclusion

본 연구에서는 2단 전기집진기의 설계 수치와 유속 변화에 따른 오존 발생량과 집진 효율 특성을 연구하였고 실제 지하 역사 공조기 내부에서 쓰이고 있는 MERV 10 필터와 성능을 비교하였다. 실제 지하역사에 분포하여 있는 입자는  $1 \mu\text{m}$  이하의 작은 입자가 대부분임을 확인 하였고 필터와 2단 전기집진기의 특성 상 제거 효율이 낮은 0.1~1  $\mu\text{m}$  구간에 해당하는 0.3  $\mu\text{m}$  입자의 제거 효율을 비교하였다. 그 결과 MERV 10 필터의 0.3  $\mu\text{m}$  입자 제거 효율은 평균 약 10%로 미미하였고 본 연구에서 개발한 2단 전기집진기는 집진 효율 측면 최적의 조건인 A 하전부와 C 집진부에서 0.3  $\mu\text{m}$  입자에 대해 하전부 -20 kV, 집진부 -5 kV에서 90% 이상의 높은 집진 효율과 5 ppb의 오존 발생량을 보였다. 또한 지하 역사 공조기에 효율적인 적용을 위하여 B 하전부와 C 집진부로 2단 전기집진기를 구성하였을 때 하전부 -18 kV, 집진부 -

5 kV에서 약 80%의 집진 효율과 함께 25 ppb의 오존 발생량을 확인하였다. MERV 10 필터와 본 연구에서 개발한 집진부의 압력 손실 비교 결과로는 D 집진부, C 집진부, MERV 10 필터 각각 1, 3, 23.9 mmAq이었으며 D 집진부 대비 MERV 10 필터는 약 24배의 높은 압력손실을 보임을 확인하였다. MERV 10 필터와 2단 전기집진기의 필터 특성 비교 결과로는 D 집진부로 구성된 2단 전기집진기가 MERV 10 필터 대비 약 400배 높은 필터 특성을 보였다. 본 연구에서 개발한 분리형 2단 전기집진기는 실제 역사 내 공조기 내부 공간과 유속조건을 고려하여 설계되었을 때 상용화된 필터 대비 높은 0.3  $\mu\text{m}$  입자 제거 효율과 압력 손실을 보임에 따라 높은 필터 특성을 가진다. 하지만 실내 공기 정화 장치로 적용되기 위해서는 본 연구에서 개발한 2단 전기집진기의 내구성과 장시간 집진 성능이 분석되어야 한다. 향후 연구가 수행된 후, 필터를 대신하여 2단 전기집진기가 지하철 공조기 등 실내 공기 정화 장치로 적용되기를 기대한다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었고(과제번호 20QPPW-B152306-02) 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- Han, D.H. (2000). Performance of respirator filters using quality factor in Korea, *Industrial Health* 2000, 38, 380-384.
- Hubbard, J.A., Wiemann, D.K., Mackenzie, B.B., and Boldenow, J. (2018). High air-flow aerosol filtration testing, Sandia Report, SAND2018-10748, 668310.
- Kim, H.J., Han, B., Woo, C.G., and Kim, Y.J. (2016). Ozone emission and electrical characteristics of ionizers with different electrode materials, numbers, and diameters, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53, 459-465.

- Kim, J., Noh, H., Lee, J., and Kim, I. (2010). Integrated air quality management system for subway station and main line tunnel, *Air Cleaning Technology*, 23(2), 28-34.
- Kim, Y.S. (2008). A study of improvement on the air filtering system of the subway, *The Korean Society For Railway*, 1075-1082.
- Kyung, D. (2019). Fine dust treatment principle and trend of technology development, *Korea Research Institute for Human Settlements*, 452, 34-41.
- Lee, E.S., Lee, T.J., Park, M.B., Park, D.S., and Kim, D.S. (2017). Characteristics of particulate matter concentration and classification of contamination patterns in the Seoul metropolitan subway tunnels, *Journal of Korean Society for atmospheric Environment*, 33(6), 593-604.
- Melody, S.M., Ford, J.B., Wills, K., Venn, A., and Johnson, F.H. (2019). Maternal exposure to fine particulate matter from a large coal mine fire is associated with gestational diabetes mellitus: A prospective cohort study, *Environmental Research*, 183, 108956.
- Noh, H., Lee, J., and Kim, I. (2013). The real-time air quality control system for subway stations and tunnels, *Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea*, 42(5), 50-54.
- Petkus, A.J., Younan, D., Widaman, K., Gatz, M., Manson, J.E., Wang, X., Serre, M., Vizuete, W., Chui, H., Espeland, M.A., Resnick, S., and Chen, J.C. (2020). Exposure to fine particulate matter and temporal dynamics of episodic memory and depressive symptoms in older women, *Environment International*, 135, 105196.
- Seoul Metropolitan Government. (2020). Status of public transportation use in Seoul. (<http://news.seoul.go.kr/traffic/archives/31616>)
- Hinds, W.C. (1999). *Aerosol Technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles*, 2nd Ed., John Wiley & Sons, p. 330.
- Zhang, Y., Ki, X., Ku, T., Li, B., Li, G., and Sang, N. (2019). Ambient fine particulate matter exposure induces cardiac functional injury and metabolite alterations in middle-aged female mice, *Environmental Pollution*, 248, 121-132.
- Zhao, Y., Wnag, S., Lang, L., Huang, C., Ma, W., and Lin, H. (2017). Ambient fine and coarse particulate matter pollution and respiratory morbidity in Dongguan, China, *Environmental Pollution*, 222, 126-131.