

미세먼지의 집진효율 향상을 위한 전기집진기의 자계인가특성에 대한 연구

(A Study on the Effect of Magnetic Field in Electrostatic Precipitator for Improving
Precipitation Efficiency of Particulate Matter)

박재윤 · 한상보* · 박상현

(Jae-Youn Park · Sang-Bo Han · Sang-Hyun Park)

요 약

본 논문은 실내에 잔존하는 직경 $1[\mu\text{m}]$ 이하의 미세먼지들을 집진하기 위하여 전기집진기를 설계하였으며, 이때 집진 효율의 극대화를 위하여 전계와 동시에 자계를 수직 및 수평으로 배치함에 따른 실험실 공기중에 포함된 미세먼지의 집진특성에 대하여 논하였다. 전계에 수평으로 자계를 인가한 경우는 자계의 유무 및 자석의 수량에 관계없이 집진효율이 거의 일정하게 나타났으며, 자석을 수평으로 배치하여 전계에 수직으로 인가한 경우는 비자화 페라이트 막대를 부착한 경우보다 약 5[%] 이상 집진효율이 향상되었다. 또한, 자계를 전계에 수직으로 인가하는 방법에 있어서, 자석을 접지전극의 가운데 정렬한 경우는 인가전압 5[kV]에서의 집진효율이 17~32[%]로서 자석을 앞쪽에 설치한 경우와 유사하였으며, 지그재그 및 안쪽 끝에 정렬시킨 경우는 집진효율이 17~38[%]로서 향상되었으며, 특히 0.7 및 $1[\mu\text{m}]$ 의 굵은 입자들에 대한 집진특성이 양호하였다. 따라서, 전기집진기의 집진특성을 향상시키기 위해서는 자계를 전계에 수직으로 접지전극의 중간 또는 지그재그 식으로 배치하는 것이 가장 적절한 것으로 판단된다.

Abstract

This paper gives the experimental results for the effective precipitation of particulated matter(PM) below $1[\mu\text{m}]$ of diameter using the electrostatic precipitator, which is designed by ourselves. In order to improve the precipitation efficiency, the vertical and parallel magnetic field to the electric field is applied simultaneously by arranging ferrite magnets. When the parallel magnetic field is applied, the precipitation efficiency does not improve in comparison with non-magnets. However, when the vertical magnetic field is applied, it is improved about 5[%] more than the case of non-magnetized ferrite plate used. In addition, when the magnets are installed at the center of ground plate electrodes, the precipitation efficiency is ranged from 17 to 32[%] under the applied voltage of 5[kV]. It is similar to the case of the magnet arrangement at the front part of ground electrode. Also, the precipitation efficiency is more improved by arranging magnets as the inside part and zigzag on the electrodes. Especially, large particles of 0.7 and $1[\mu\text{m}]$ is more easily captured by electrostatic precipitator. Consequently, it is convinced that the vertical magnetic field is more desirable than parallel magnetic field on the electric field for the effective treatment of particulated matter.

Key Words : Electrostatic Precipitator, Electric Field, Magnetic Field, Particulated Matter

* 주저자 : 경남대학교 전기공학과 교수

Tel : 055-249-2635, Fax : 055-249-2839, E-mail : hansangbo@kyungnam.ac.kr
접수일자 : 2008년 9월 17일, 1차심사 : 2008년 9월 24일, 심사완료 : 2008년 10월 20일

1. 서 론

대기 환경오염의 심각성을 인식하면서도 우리 인체에 호흡기 질환 및 각종 질병을 유발하는 실내 공기오염에 대한 대책마련은 매우 미흡한 것으로 생각된다. 특히, 실내에 사용되는 각종 건축 기자재, 유기 재료, 탄화수소계 연료 등의 사용량 증가에 따라 휘발성유기화합물(VOCs), NOx, SOx, CO, SOx, 오존, 미세먼지 등과 같은 다양한 실내오염물질들이 증가되고 있다. 특히, 대도시 및 공간 지역은 인구가 매우 밀집되어 있으며, 자동차 사용량 및 각종 공장들이 증가함에 따라 대기 환경오염에 따른 실내 공기오염을 방지할 수 있는 환기시스템과 같은 설비의 보강 및 새로운 제거장치를 시급히 개발하여 보급해야만 한다.

대기 중 미세먼지인 경우, 직경 10[μm]이상의 큰 먼지는 대부분 호흡기내로 흡입되기 이전에 걸러지기 때문에 직경 10[μm] 이하의 미세먼지가 인체에 매우 유해한 것으로 알려져 있다. 2006년 미국 환경보호청은 24시간 기준 65에서 35[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]으로 PM2.5의 대기환경기준을 강화하였다. 하지만, 국내의 대기환경기준에서 미세먼지는 PM10을 24시간 기준 100[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]이하로 유지하도록 규정되어 있다[1].

최근, 황을 포함한 탄화수소계 연료를 연소할 때 실내에 발생하는 SO₂, CO 등의 유해성분들을 bio-mass법에 의한 제거 연구[2], 실내 대기중에 포함된 박테리아와 CO₂ 농도와의 상관관계 관련 연구[3], PM2.5를 효율적으로 제어하기 위한 가열, 환기, 에어컨 시스템의 대기질 관리 모델연구[4], 실내 대기중의 톨루엔을 제거하기 위한 연구[5-6] 등 실내 공기질을 개선하기 위한 다양한 연구들이 진행되고 있다. 그리고, 학교 실내·외의 PM10과 PM2.5의 분포현황 및 입자 형상에 대한 연구결과에서, 칼슘에 대한 비율이 각각 1.4 및 1.6으로 외부에 비해 내부에서 보다 많이 검출됨을 보였으며, 황산염 성분이 PM2.5의 43[%], PM10의 24[%]를 차지하는 것으로 나타났다[7].

또한, 석탄을 원료로 하는 화력발전소에서의 먼지 입자를 포집하기 위한 전기집진기(Electrostatic precipitators, ESPs)의 집진효율은 약 99[%] 이상에

이르지만, 1[μm] 미만의 작은 입자의 포집에는 큰 효과가 없는 것으로 알려져 있다[8]. 이러한 미세입자들을 효율적으로 집진하기 위하여 전기집진기에서의 입자들의 공간분포 특성에 대한 연구도 진행되고 있다[9]. 아울러, 정전스프레이 이온화법을 이용한 전기집진기에 있어서, 에어 유량, 전계 강도, 입자사이즈에 따른 이온화 및 집진 효율에 관한 연구도 진행되었다[10].

본 연구에서는 실내의 쾌적한 환경을 조성하기 위하여 직경 1[μm] 이하의 입자들을 집진하기 위하여 전기집진기를 설계하였으며, 이때 집진 효율의 극대화를 위하여 전계와 동시에 자계를 수직 및 수평으로 배치함에 따른 실험실 공기중에 포함된 미세먼지의 집진특성에 대하여 논하였다.

2. 본 론

2.1 실험 방법

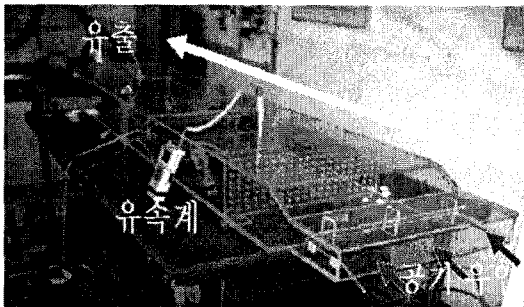
그림 1 (a)는 본 연구에 사용된 실험장치를 보인 것으로서 가스 압력손실이 없도록 아크릴을 이용하여 2,700×520×220[m] 크기의 실험장치를 제작하였으며, 미세먼지를 집진하기 위한전기집진기의 탈착이 용이하도록 그림 1 (b)에서와 같이 실험장치의 중앙부에 슬롯을 설치하였다. 실험 장치의 출구에는 송풍기를 설치하여 유량을 최대 2,700[ℓ/min]까지 조절될 수 있도록 하였고, 본 실험에서는 유량을 1,500[ℓ/min]로서 유속이 0.75[m/sec]가 되도록 고정하여 진행하였다. 미세먼지의 농도를 측정하기 위하여 파티클카운터(Metone, 3313)을 이용하였으며, 분석장치 내의 유속은 유속계(KANOMAX, MODEL 6511)를 사용하여 측정하였고, 부산물인 오존농도는 오존 분석기(Monitor Labs Inc. Model 8810)를 사용하여 측정하였다.

본 연구에서 사용된 전기집진기는 선대평판형(Wire-Plate) 전극으로 구성되어 있으며, 선 전극은 직경 0.1[mm]인 텅스텐 와이어를 이용하였으며, 접지전극은 400[mm]×18[mm]인 스테인레스 판을 사용하였다. 평행 접지전극 사이의 간격을 20[mm]로 고정하여 3단 구성하였으며, 선 전극을 각 평행접지

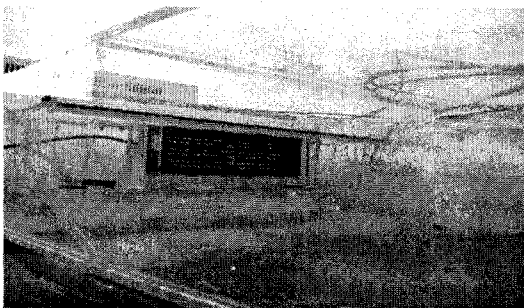
미세먼지의 집진효율 향상을 위한 전기집진기의 자계인가특성에 대한 연구

전극 중심에 평행하게 설치하여 집진 전극과의 간격이 10[mm]로 유지되도록 하였다. 선 전극에 (+) 직류 고전압을 직류전원공급기(SHV-120, Max. 25 [kV], 4.5[mA])를 이용하여 4~6.5[kV]까지 가변하면서 코로나 방전을 발생시켜 방전공간을 통과하는 입자들을 대전시키고, 대전된 입자들이 집진전극에 포집되도록 구성하였다.

또한, 코로나 방전에 의한 집진효율을 향상시키기 위하여 잔류자속밀도가 3,900[Gauss]인 페라이트 자석(T=25[mm])을 방전공간에 수직 및 수평으로 배치하여 자계인가에 따른 집진특성을 조사하였다. 페라이트 자석은 전기저항이 104[Ω]이상이므로 매우 높고 절연이 용이하지만, 수직형 배치에서는 그림 2(a)에서와 같이 자석과 고전압 전극 사이에 고무를 삽입하여 절연을 강화시킴으로서 방전이 자석설치부 끝단 부분에 집중되지 않도록 하였다.



(a) 실험장치도



(b) 전기집진기의 설치상태

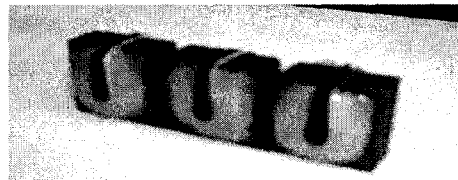
그림 1. 실험장치 개략도 및 전기집진기의 설치상태
Fig. 1. Experimental set-up and the installation of electrostatic precipitator

자석을 수평 및 수직 배치에 따른 전기집진기의 외관을 그림 3에 나타내었다. 본 실험에서의 모든 결과는 실험실 공기 중에 존재하는 미세먼지의 집진특성을 아래의 식 1을 이용하여 3회 측정에 대한 평균값을 사용하였다.

$$\text{집진효율[\%]} = \frac{N_1 - N_2}{N_1} \times 100 \quad (1)$$

여기서, N_1 : 파티클 사이즈에 따른 초기의 파티클 개수

N_2 : 집진기 동작에 따른 최종 파티클 개수



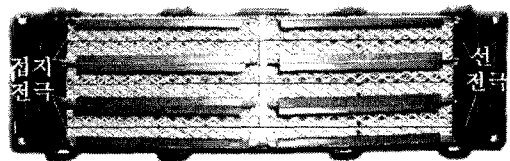
(a) 수직 배치형 자석

(b) 수평 배치형 자석
(70(가로)*3(세로)*3(두께)(mm))

그림 2. 실험에 사용된 자석의 형태
Fig. 2. Magnets used in this work



(a) 자석을 수직으로 배치한 경우



(b) 자석을 수평으로 배치한 경우

그림 3. 자석 배치방법에 따른 전기집진기의 종류
Fig. 3. Electrostatic precipitators on magnets installation

그림 4는 그림 2 (a)의 자석 5개를 수직으로 배치한 경우의 전기집진기의 전류 및 전압 특성을 보인 것으로서, 동일한 인가전압에서 자석을 설치한 경우가 방전전류가 약간 감소하고, 인가전압이 증가함에 따라 방전전류가 선형적으로 증가됨을 알 수 있다. 자석을 부착함에 따라 방전전류가 감소하는 것은 자석 사용에 따른 방전 방전면적이 감소되기 때문으로 사료된다. 또한, 그림 2 (b)의 자석을 사용하여 전계에 자계를 수직으로 인가한 경우에도 전류 및 전압 특성은 자석을 수직으로 인가한 경우와 거의 비슷한 경향을 보였다.

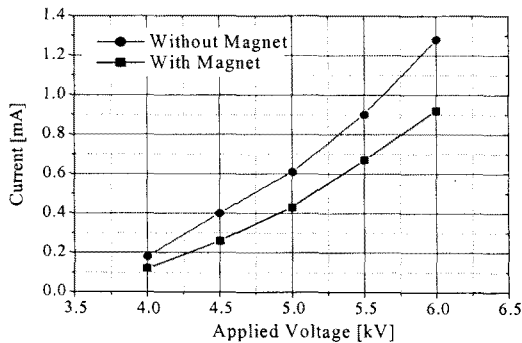


그림 4. 인가전압에 따른 방전전류의 크기 분포
Fig. 4. Characteristics of applied voltage and current

2.2 결과 및 고찰

2.2.1 자계를 전계에 수평으로 인가한 경우

그림 5는 전기집진기에 자석을 부착하지 않은 경우의 집진효율을 나타낸 것으로서, 모든 입자들의 집진효율이 인가전압을 증가시킴에 따라서 선형적으로 증가됨을 알 수 있다. 상용화 에어컨에 사용되고 있는 집진기 운전전압에 가까운 5[kV]에서 입자의 크기에 따른 집진효율은 15~18[%] 사이에 분포하였다.

그림 6은 그림 5와 동일한 실험조건에서 그림 2 (a)의 수직형 자석을 집진전극에 설치한 수직형 전기 집진기에서 집진효율을 나타내었다. 이는 자계를 전계에 수평으로 인가한 것을 의미한다. 그림 6 (a)는 자석 5개를 수직으로 설치한 경우의 집진효율을

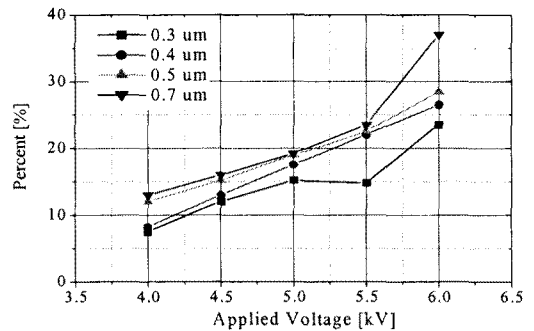
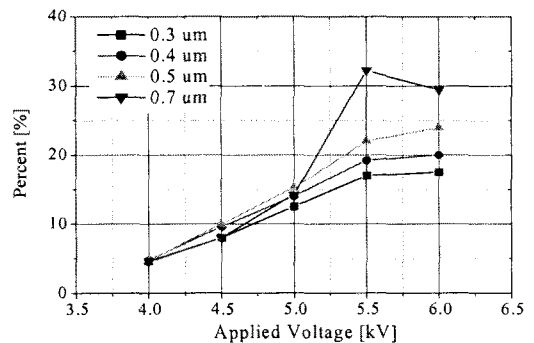
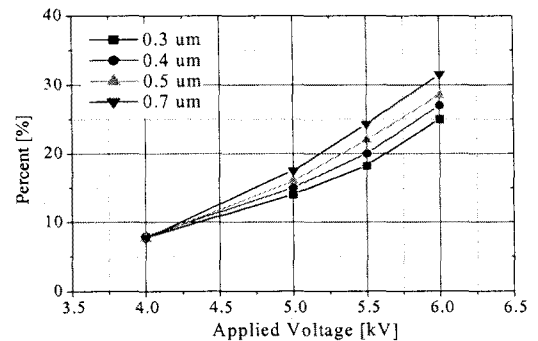


그림 5. 자석을 사용하지 않은 경우의 집진효율
Fig. 5. Precipitation efficiency without magnets



(a) 자석을 수직으로 5개 배치한 경우



(b) 자석을 수직으로 7개 배치한 경우

그림 6. 자석을 수직으로 배치한 경우의 집진효율
Fig. 6. Precipitation efficiency according to the installation of vertical magnets

나타낸 것으로서, 전체적인 집진특성의 경향은 그림 5와 비슷하지만, 오히려 자석을 설치함에 의하여 6[kV]에서의 집진효율이 감소됨을 알 수 있다. 자석

을 설치한 경우에 있어서 5.5[kV]에서 0.7[μm] 입자에 대한 집진효율이 갑자기 상승하였으며, 0.7[μm] 입자를 제외한 다른 입자들의 집진효율이 증가되지 않고 다소 완화된 경향을 알 수 있다. 0.7[μm] 입자인 경우만 5.5[kV]에서 급격히 증가하여 6[kV]에서 감소됨을 알 수 있다. 이렇게 집진효율이 급격히 상승하여 감소하는 현상은 자석과 고전압 전극간의 절연이 불균일하여 방전이 국부적으로 심한 편중현상이 발생했기 때문으로 사료된다.

또한, 그림 6 (b)는 자석 7개를 수직으로 설치한 경우의 집진효율을 나타낸 것으로서, 입자 크기별 집진특성이 인가전압에 따라 유사하게 증가됨을 알 수 있으며, 5[kV]에서 약 14~18[%] 집진효율이 나타남을 알 수 있다.

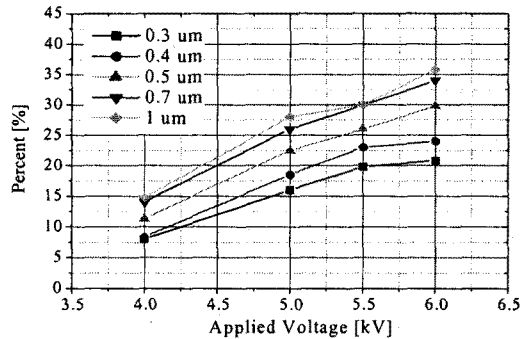
결론적으로, 자계를 전계에 수평으로 인가한 경우는 자석사용 유무 및 자석 수량에 관계없이 집진효율이 거의 일정하게 나타남을 알 수 있다. 따라서 자계를 전계에 수평으로 인가함에 의하여 자계의 영향이 방전공간내의 자석 배치부분에만 한정될 뿐만 아니라, 전계와 수평이므로 큰 영향이 없는 것으로 사료된다.

2.2.2 자계를 전계에 수직으로 인가한 경우

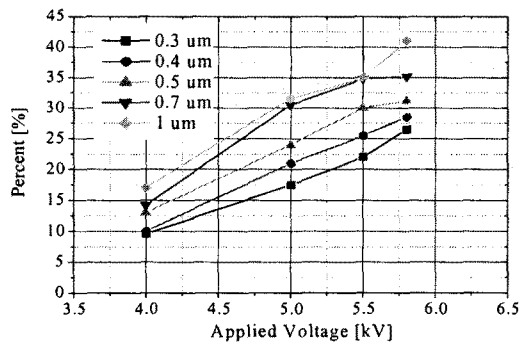
본 절에서는 페라이트 자석을 접지전극 양쪽으로 수평 부착하는 방법에 따라 방전공간 내부 미세먼지들의 집진특성에 대하여 조사하였다.

우선, 방전공간 내에 페라이트 자석을 부착함에 따라 방전공간의 전계 분포 변화를 초래하여 집진특성의 변화 가능성이 있으므로, 자석과 동일크기의 비자화된 페라이트 막대를 접지전극에 부착했을 때의 집진특성을 자석을 사용했을 경우와 비교하여 그림 7에 나타내었다. 이때 그림 3 (b)에서와 같이 접지전극 양쪽에 자석을 부착하지만, 앞에서 보이는 곳에 비자화된 페라이트 막대 및 자석을 설치하였다.

양쪽 모두 인가전압을 증가함에 따라 모든 입자에 대한 집진효율이 선형적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 그리고, 동일 전압에서 입자의 크기가 증가할수록 집진 효율이 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 미세먼지 입자의 반경이 클수록 전자와의 충돌 확률이 증가하여 집진효율이 향상된다고 사료된다.



(a) 비자화 페라이트를 접지전극 앞 끝에 정렬한 경우



(b) 자석을 접지전극 앞 끝에 정렬한 경우

그림 7. 비자화 페라이트 및 자석을 접지전극 앞쪽에 배치한 경우의 집진효율 비교

Fig. 7. Comparison of precipitation efficiency between non-magnetized ferrite and magnet installation at the front part using vertical ESP

또한, 인가전압이 4[kV]인 경우는 양쪽 모두 0.3~1[μm] 입자들에 대한 집진효율이 7~15[%] 내외로 비슷한 경향을 보였지만, 5.5[kV]에서는 자석을 부착한 경우가 비자화 페라이트 막대를 부착한 경우보다 약 5[%] 이상 집진효율이 향상됨을 알 수 있다. 이는 고전계에 의해 발생된 방전 공간 내부의 전자들이 자계에 의해 회전반경이 넓어짐에 따라 미세먼지와 충돌횟수가 증가되고, 이에 따라 이온 생성량이 증가되어 집진효율이 향상되는 것으로 사료된다.

그림 7의 결과로부터 자석을 사용함에 따라 집진효율이 향상되므로, 접지전극에 자석 부착 위치에 따른 집진특성을 그림 8과 같이 추가적으로 조사하였다.

그림 8 (a)는 자석을 접지전극의 가운데 정렬한 경우를 나타낸 것으로서, 집진효율이 약 5[kV]에서 17~32[%]로서 자석을 앞쪽에 설치한 그림 7(b)의 결과와 유사함을 알 수 있다.

그림 8 (b)는 집진 전극의 안쪽 끝에 정렬시킨 경우로서, 5[kV]에서의 집진효율이 17~38[%]로서 0.7 및 1[μ m] 입자의 집진특성이 우수함을 알 수 있다. 또한, 그림 8 (c)는 자석을 앞뒤로 지그재그 설치한 경우의 결과로서, 22~35[%]로서 모든 입자들에 대한 집진특성이 우수함을 알 수 있다.

결론적으로, 전기집진기에 자석을 이용하여 집진 특성을 향상시키기 위해서는 자석을 접지전극의 가운데 또는 지그재그 식으로 배치하는 것이 가장 바람직한 것으로 나타났다.

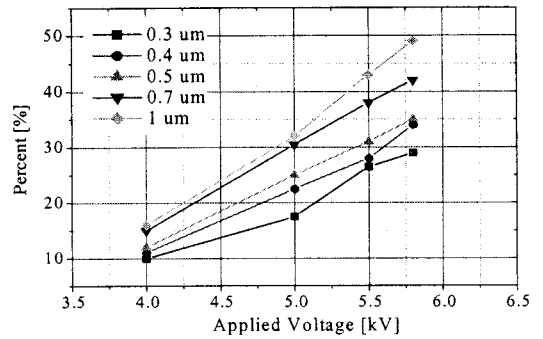
따라서 그림 9는 가정용 에어컨의 일반적 운전전압이 5[kV] 내외이므로, 자석을 접지전극에 지그재그로 배치한 경우, 즉 자계를 전계에 수직으로 배치한 경우에 있어서 인가전압을 5[kV]로 일정하게 고정된 상태에서 운전시간에 따른 집진효율의 변화를 조사하였다.

그림에서 나타난 것과 같이 약 50 min까지는 집진효율이 상승하였으며, 그 이후에는 약 210 min (3.5 hr)까지 약간 감소하면서 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 이때, 0.5~1[μ m] 크기의 입자들의 집진효율은 35[%] 이상으로서 매우 높은 결과를 보였으며, 0.3~0.5[μ m]인 경우는 25~30[%]의 집진효율을 보였다.

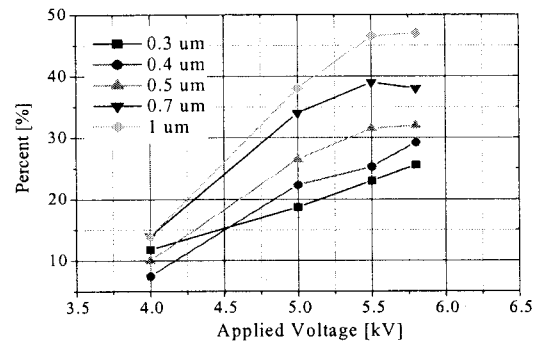
본 연구에서 설계한 전기집진기의 집진특성이 시간에 따라서 입자의 크기별로 다소 집진효율에는 차이가 있지만 긴 시간 안정적으로 동작함을 알 수 있다.

그림 10은 여러 가지의 자석 설치 방법에 따른 집진효율 특성에서 5[kV]에서 최대 집진효율을 나타내는 미세먼지 크기에 대한 집진효율을 비교한 것으로서, 수직으로 자석을 배치한 경우에 비하여 수평으로 자석을 배치한 경우가 좋은 집진특성을 보임을 알 수 있으며, 특히 중앙부 또는 지그재그로 수평배치한 경우가 가장 양호함을 알 수 있다.

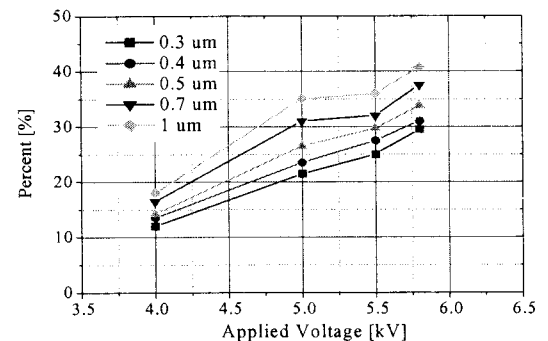
그림 11은 자계를 전계에 수직으로 인가한 경우의 오존 발생 특성을 보인 것으로서, 5[kV]에서 0.08[ppm]으로서 다소 오존농도가 실내 허용기준 (0.05ppm)에 비해 높게 나타남을 알 수 있다. 방전에



(a) 자석을 접지전극의 가운데 정렬한 경우의 집진효율



(b) 자석을 접지전극의 안쪽 끝에 정렬시킨 경우



(c) 자석을 접지전극에 지그재그로 설치한 경우

그림 8. 자계를 전계에 수직으로 인가한 수평형 자석배치에서 자석의 설치 위치에 따른 집진효율 비교

Fig. 8. Comparison of precipitation efficiency in cases of methods on magnet installation using parallel ESP

의해 발생된 미량의 잔존 오존은 집진기 후단에 오존 분해용 촉매층(MnO₂)을 설치함에 의하여 제거하

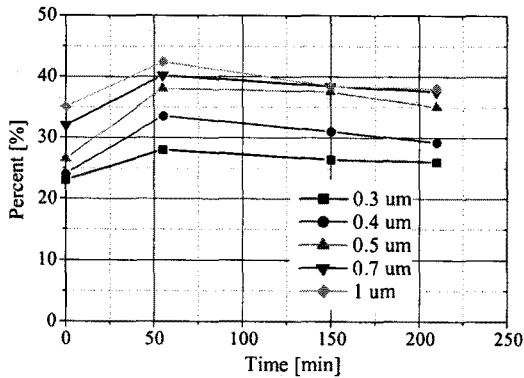


그림 9. 자석을 지그재그로 설치한 경우의 시간에 따른 집진효율

Fig. 9. Precipitation efficiency on the operating time with zig-zag installation of magnet

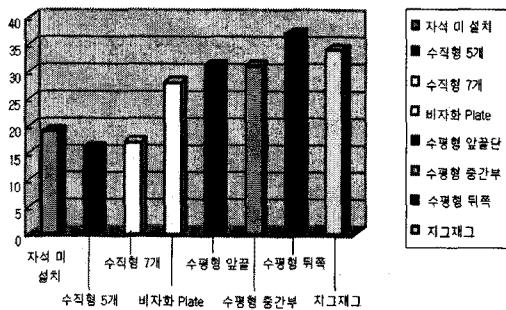


그림 10. 인가전압 5[kV]에서 자석설치 방법에 따른 집진효율 비교 (최대 집진효율)

Fig. 10. Comparison of precipitation efficiency according to magnet installation methods at constant 5[kV]

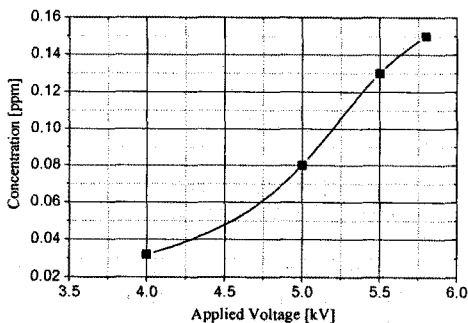


그림 11. 인가전압 변화에 따른 오존 발생 특성

Fig. 11. Ozone generation characteristics according to the applied voltage

는 것이 가능할 것으로 판단되며[11-14], 이에 대한 연구가 추가적으로 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 실내의 미세먼지를 제거하기 위하여 전기집진기를 설계하고, 집진기의 집진효율을 향상시키기 위하여 자계를 수직 및 수평으로 인가한 경우의 집진특성에 대하여 실험을 진행하였다.

- (1) 자계를 전계에 수평으로 인가한 경우는 자석 사용 유무 및 자석 수량에 관계없이 집진효율이 거의 일정하게 나타남을 알 수 있었다. 이는 자계의 영향이 방전공간내의 자석 배치부분에만 한정되어 있으며, 오히려 자석사용에 따른 방전면적 감소되기 때문으로 사료된다.
- (2) 자석을 부착하지 않은 경우의 집진효율은 인가전압이 증가함에 따라 선형적으로 증가하였으며, 미세먼지 입자의 크기가 증가할수록 동일 전압에서 집진 효율이 증가됨을 알 수 있었다. 이는 미세먼지 입자의 반경이 클수록 전자와의 충돌 확률이 증가하여 부이온 생성량이 증가되어, 양극으로의 집진효율이 증가되기 때문으로 사료된다.
- (3) 비자화 페라이트 막대 및 자석을 이용하여 전계에 수직으로 인가한 경우는, 인가전압이 4[kV]인 경우는 양쪽 모두 0.3~1[um] 입자들에 대한 집진효율이 7~15[%] 내외로 비슷한 경향을 보였지만, 5.5[kV]에서는 자석을 부착한 경우가 비자화 페라이트 막대를 부착한 경우보다 약 5[%] 이상 집진효율이 향상됨을 알 수 있다. 이는 고전계에 의해 발생된 방전 공간 내부의 전자들이 자계에 의해 회전반경이 증가됨에 따라 미세먼지와 충돌횟수가 많아지기 때문으로 사료된다.
- (4) 자계를 전계에 수직으로 인가하는 자석배치 위치에 따른 집진효율 비교에서, 인가전압 5[kV]에서 자석을 집진전극의 가운데 정렬한 경우는 집진효율이 17~32[%]로서 자석을 앞쪽에 설치한 경우와 유사하였으며, 안쪽 끝에 정렬시킨 경우는 집진효율이 17~38[%]로서

0.7 및 1[μ m] 입자의 집진특성이 우수함을 알 수 있었다. 또한, 자석을 앞뒤로 지그재그로 설치한 경우는 22~35[%]로서 모든 입자들에 대한 집진특성이 우수하였다.

결론적으로, 전기집진기에 자석을 이용하여 집진 특성을 향상시키기 위해서는 자석을 수평형으로 중간 또는 지그재그 식으로 배치하는 것이 가장 바람직 할 것으로 사료된다.

향후에는 자계를 전계에 수직으로 배치한 경우에 대하여 자석의 잔류자속밀도의 변화 및 전기집진기 후단부에 오존분해 촉매를 배치함에 따른 오존 농도의 변화 특성, 미세먼지 입자로서 담배연기를 이용하여 여러 가지 추가실험을 진행할 계획이다.

감사의 글

이 연구결과물은 2008학년도 경남대학교 학술진흥 연구비 지원에 의하여 이루어졌음.

References

(1) 환경부, <http://www.me.go.kr/> (2008년 8월).
 (2) Kimiko Yamada, Atsuyuki Sorimachi, Qingyue Wang, Jing Yi, Shuqun Cheng, Yanrong Zhou, Kazuhiko Sakamoto, "Abatement of indoor air pollution achieved with coal-biomass household briquettes", Atmospheric Environment, 2008(accepted manuscript).
 (3) L.T. Wong, K.W. Mui, W.Y. Chan, "An energy impact assessment of ventilation for indoor airborne bacteria exposure risk in air-conditioned offices", Building and Environment, Vol. 43, 1939 - 1944, 2008.
 (4) Tom Marsik, Ron Johnsonb, "HVAC air-quality model and its use to test a PM2.5 control strategy", Building and Environment, Vol. 43, 1850 - 1857, 2008.
 (5) J. Van Durme, J. Dewulf, K. Demestere, C. Leys, H. Van Langenhove, "Post plasma catalytic technology for the removal of toluene from indoor air", Applied Catalysis B: Environmental, 2008(accepted manuscript).
 (6) Mohamad Sleiman, Pierre Conchon, Corinne Ferronato, Jean-Marc Chovelon, "Photocatalytic oxidation of toluene at indoor air levels (ppbv): Towards a better assessment of conversion, reaction intermediates and mineralization", Applied Catalysis B: Environmental, 2008(accepted manuscript).
 (7) H. Fromme, J. Diemer, S. Dietrich, J. Cyrys, J. Heinrich, W. Lang, M. Kiranoglu, D. Twardella, "Chemical and morphological properties of particulate matter (PM10, PM2.5) in school classrooms and outdoor air", Atmospheric Environment, Vol. 42, 6597-6605, 2008.
 (8) A. Mizuno, "Electrostatic precipitation", IEEE Trans.

Dielectr. Electr. Insul. Vol. 7, 615-624, 2000.
 (9) J. Podlinski, A. Niewulis, J. Mizeraczyk, P. Atten, "ESP performance for various dust densities", Journal of Electrostatics, Vol. 66, 246 - 253, 2008.
 (10) Cary Tepper, Royal Kessick, "A study of ionization and collection efficiencies in electrospray-based electrostatic precipitators", Aerosol Science, Vol. 39, 609-617, 2008.
 (11) Sang-Bo Han and Tetsuji Oda, "Decomposition mechanism of trichloroethylene based on by-product distribution in the hybrid barrier discharge plasma process", Plasma Sources Sci. Technol. Vol. 16, 413-421, 2007.
 (12) SangBo Han, Tetsuji Oda, and Ryo Ono, "Improvement of the Energy Efficiency in the Decomposition of Dilute Trichloroethylene by the Barrier Discharge Plasma Process", IEEE Trans. IAS, Vol. 41, No. 5, 1343-1349, 2005.
 (13) B. Dhandapani, and S. Ted Oyama, "Gas phase Ozone Decomposition Catalyst", App. Catalyst B, Environment, Vol. 11, 129-166, 1997.
 (14) Seiichiro Imamura, Masaaki Ikebata, T. Ito, and T. Ogita, "Decomposition of Ozone on a Silver Catalyst", Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 30, 217-221, 1991.

◆ **저자소개** ◆

박재윤 (朴在潤)

1960년 4월 15일생. 1986년 경남대 공대 전기공학과 졸업. 1988년 인하대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1996~1997년 캐나다 McMaster University 교환교수. 현재 경남대 공대 전기공학과 교수.

한상보 (韓尙甫)

1972년 9월 22일생. 1998년 경남대 공대 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 일본 동경대학교 전자공학과 졸업(박사). 2005~2008년 한국전기연구원 선임연구원. 현재 경남대 공대 전기공학과 교수.

박상현 (朴相鉉)

1950년 1월 27일생. 1973년 경북대 물리학과 졸업. 1984년 인하대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2003~2004년 미국 휴스턴 대학 방문교수. 현재 경남대 공대 전기공학과 교수.