

# 전기집진기형 공기청정기의 미세 먼지 저감 특성에 관한 연구 Characteristics of the Reduction of Fine Particles in an Indoor Air Cleaner Using Electrostatic Precipitation Technique

목영선\*, 이호원\*\*

Young-Sun Mok\*, Ho-Won Lee\*\*

## <Abstract>

An indoor air cleaner consisting of a dielectric barrier discharge system and an electrostatic precipitator (ESP) was experimentally investigated. The function of the dielectric barrier discharge is to precharge particles by producing nonthermal plasma before indoor air enters ESP, leading to an enhancement in dust collection efficiency. The dependence of particle size distribution on the plasma discharge was examined to understand the mechanism of the particle precharging. The plasma discharge was found to increase the electrical force of the particles, rather than agglomerate them. Coarse particles in the range of 0.5 to 5.0  $\mu\text{m}$  were observed to be easily collected by this indoor air cleaner, and the present study laid emphasis on the removal of fine particles of 0.3  $\mu\text{m}$ . The collection efficiency of the fine particles was largely enhanced by the plasma discharge.

**Key words:** indoor air cleaner, dielectric barrier discharge, electrostatic precipitator, particle precharging

## 1. 서 론

최근 들어, 일반 가정이나 사무실, 각종 작업장, 그리고 백화점, 체육관 등 공공건물의 공기질에 대한 관심이 높아지고 있다. 현대 도시인의 생활은 대부분 실내 환경에서 이루어지고 있는데, 실내는 야외 환경과는 달리 폐쇄되어 있어 외부와의 공기 유통이 거의 없고 최근에는 경제적인 온도 및 습도 조절을 위해

실내가 외부와 차단된 밀폐 공간으로 유지되고 있어 많은 사람들이 실내 공기에 혼합되어 있는 먼지, 휘발성유기화합물, 담배연기 등 여러 유해물질에 노출되고 있다.

실내 공기청정기는 위생적인 실내 환경 유지를 위해 공기 속의 먼지나 기체상 오염물질을 제거하는 장치로서, 여과재를 이용하여 먼지를 제거하는 방법, 고전압을 인가하여 먼지를 대전시킨 후 전극 판에 부착시키는 전기집

\* 정회원, 제주대학교 청정화학공학과, 조교수  
KAIST, Ph.D / smokie@cheju.ac.kr (교신처자)  
690-756 제주도 제주시 아라1동 1번지

\*\* 제주대학교 청정화학공학과, 교수  
연세대학교, Ph.D

\*Assistant Prof., Dept. of Chemical Engineering,  
Cheju National University/ smokie@cheju.ac.kr  
(corresponding author)

\*\*Professor, Dept. of Chemical Engineering,  
Cheju National University



진 기술, 기체상 물질의 흡착 제거를 위해 활성탄을 이용하는 방법들이 공기청정기에 적용되고 있다<sup>1)</sup>.

전기집진기술과 여과집진기술은 빌딩의 공기정화, 실내공기처리, 연소공정 배기가스 처리, 고속도로 터널 정화 등 광범위하게 이용되어 왔으며, 최근에는 미세 먼지 제거 및 제거효율의 향상을 위해 새로운 기술들이 적용되고 있다. Mizuno<sup>2)</sup>는 전기집진기형 공기청정기의 성능향상 및 유기물의 동시제거를 위해 기존의 직류 고전압을 사용하는 대신 직류/펄스 고전압을 사용하였는데, 이 방법은 낮은 직류 전압에 펄스 고전압을 동시에 인가하여 먼지의 대전 및 포집이 한 단계로 일어나도록 하는 것이다. 여과집진기의 경우는 먼지가 여과재에 도입되기 전에 고전압 방전을 이용하여 먼지를 대전시켜 제거효율 향상 및 압력손실을 저감시킨 사례들이 보고 되고 있다<sup>3-5)</sup>.

본 연구에서는 플라즈마 방전에 의해 먼지가 예비하전되는 전기집진기를 공기청정기로 사용하였다. 선행연구에서 플라즈마 방전을 이용한 먼지의 예비하전시 전기집진기의 먼지저감 성능이 향상되는 것을 확인한 바 있으며<sup>6)</sup>, 예비하전방식을 도입했을 때의 또 다른 장점은 유기물이나 미생물이 플라즈마 방전에 의해 동시에 제거될 수 있다는 점이다<sup>7-10)</sup>. 그러나 어떤 기구에 의해 플라즈마 방전에 의한 예비하전이 전기집진기의 성능을 향상시키는지가 불분명하였다. 즉, 플라즈마 방전에 의한 예비하전이 단지 먼지들의 대전 정도를 증가시키는 것인지 혹은 쉽게 포집될 수 있도록 미세 먼지의 합체를 일으키는 것인지가 분명하지 않았다.

본 연구의 목적은 플라즈마 방전에 의한 예비하전이 전기집진기의 먼지 저감 성능에 미치는 영향을 정량적으로 파악하고, 예비하전에 따른 먼지저감 효율 향상의 원인을 규명하는 것이다. 전기집진 성능 향상문제는 예비하전 전후의 먼지 입경 분포 측정 및 먼지의 입경별 저감효율 측정을 통해 규명될 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 실질적으로 인체에 유해한 것은 큰 먼지가 아닌 미세 먼지이므로 단순히 질량농도 관점의 먼지 저감율이 아닌 미세 먼지의 저감율이 공기청정기의 성능 평가에 있어서 중요하게 고려되어야 할 것으로 판

단되며, 예비하전이 미세먼지의 저감에 미치는 영향에 대해서 살펴보았다. 본 연구에 사용된 플라즈마 방전 장치는 평판형 전극구조의 교류 유전체 방전 방식을 이용하여 압력손실을 최소화하고, 실내공기의 흐름이 용이하도록 제작되었다. 전기집진기도 압력손실을 줄이기 위해 선-평판형 구조로 설계되었으며 직류 고전압을 사용하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 본 연구에 사용된 공기청정기의 개략도를 나타낸다. 공기청정기는 먼지의 예비하전을 위한 유전체 방전 플라즈마 반응기와 먼지의 하전 및 포집을 위한 전기집진기로 구성되어 있다. 플라즈마 반응기에는 교류 (60 Hz) 고전압이 인가되며, 전기집진기는 (-) 직류 고전압으로 운전된다. 전기집진기는 Fig. 1과 같이 동일한 두 개의 모듈로 구성되어 있어 두 개의 모듈을 각각 독립적으로 운전할 수도 있고 동시에 운전할 수도 있다.

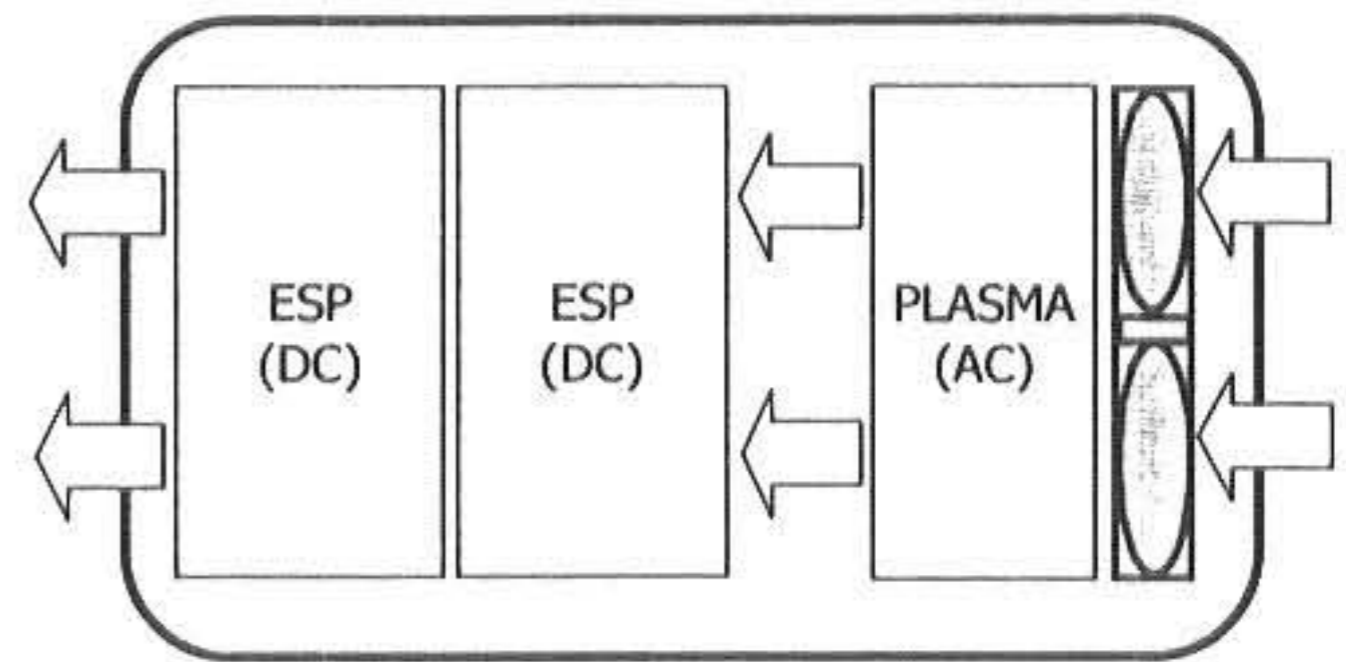


Fig. 1. Schematic of the indoor air cleaner.

플라즈마 발생을 위해 사용된 유전체 방전 장치의 전극구조는 Fig. 2와 같다. 각 전극은 0.5 mm 두께의 동판을 2 mm 두께의 유전체 (유리판)로 감싸고 있는 구조이며, 동판의 폭은 40 mm, 동판을 감싸고 있는 유리판의 폭은 60 mm, 그리고 높이는 430 mm이다. 플라즈마 반응기에는 이러한 전극이 48개 설치되어 있고, 방전 간격 (discharge gap), 즉 전극간 거리는 3.9 mm로 일정하게 유지되었다. 플라즈마 반응기의 전극에는 교대로 0-10 kV의 교류 고전압이 인가되며, 교류 고전압이 인가되지 않는 나머지 전극들은 접지되었다.



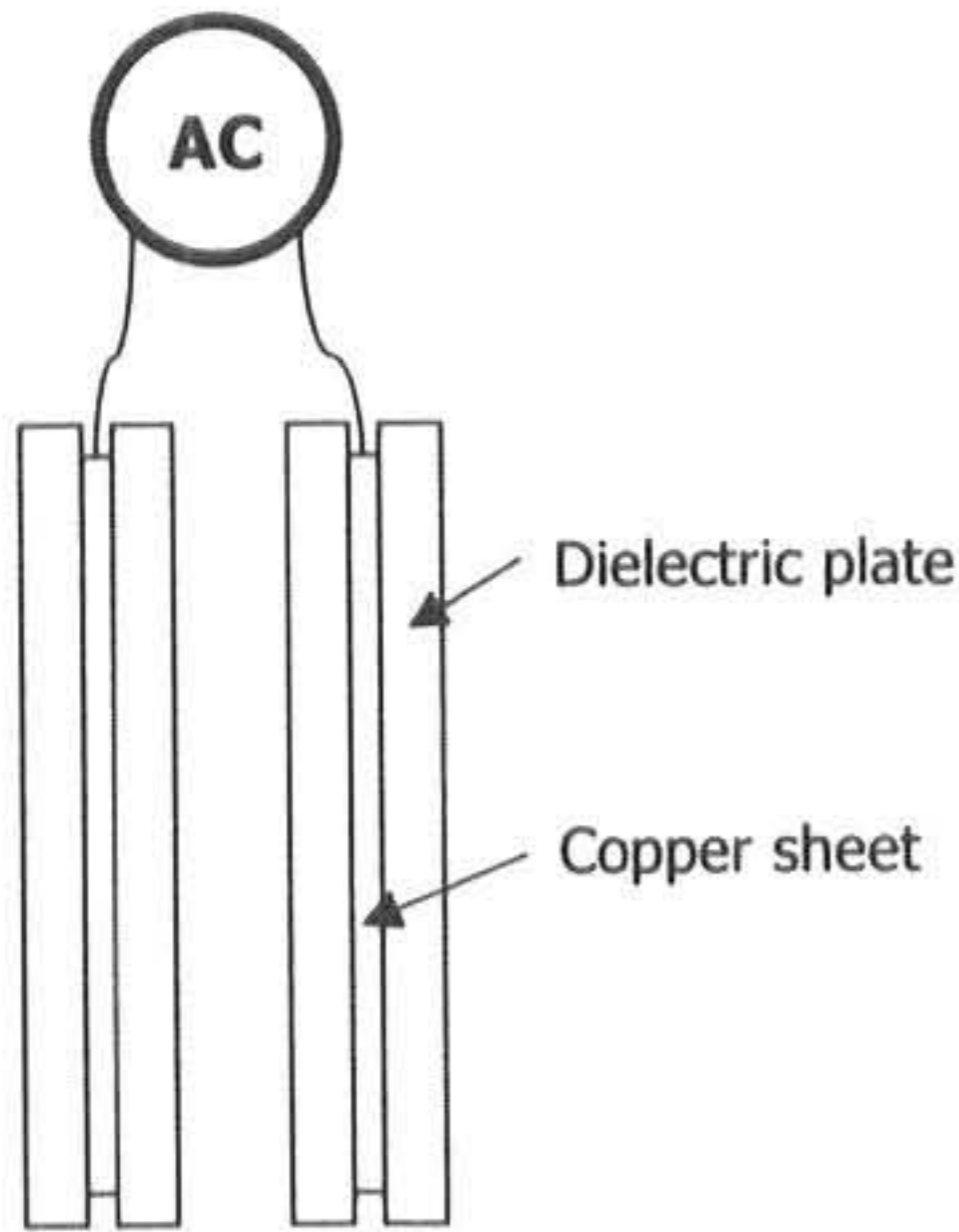


Fig. 2. Electrode structure of the dielectric barrier discharge reactor.

Fig. 3은 전기집진기의 전극 구조를 나타낸다. 전기집진기는 내부적으로 두 개의 모듈로 구성되어 있다. 전기집진기 각 모듈의 집진판은 두께 1.5 mm 스테인레스 스틸 재질의 420 mm (H)×282 mm (L) 평판으로써 접지되어 있으며, 직류고전압이 인가되는 방전극은 스테인레스 스틸 재질의 직경 6 mm 볼트이다. 볼트형의 방전극을 사용한 것은 날카로운 부분에서 쉽게 코로나 방전이 일어날 수 있도록 유도하기 위함이다. 방전극 중심과 접지판(스테인레스 스틸 평판)의 간격은 15 mm, 그리고 방전극 중심과 이웃한 방전극 중심 사이의 간격은 18 mm이다. 방전극에는 0-11 kV의 직류고전압이 인가된다. 직류고전압의 극성은 마이너스이다. 전기집진기 각 모듈의 집진판 수는 14개이며 공기가 흐르는 유로(gas passage)의 수는 총 13개이다. 따라서 전기집진기의 유효 폭은 390 mm가 된다. 한 유로당 방전극의 개수는 11개이며, 전기집진기에는 총 143개의 방전극이 설치되어 있다. 전기집진기 각 모듈은 별도로 직류 고전압을 인가할 수 있도록 설계하여, 각 모듈을 개별적으로 운전할 수도 있고 동시에 운전할 수도 있도록 하였다.

공기청정기의 성능은 실험실내에서 운전조건을 변경하며 입자수 측정기(Model GT521, Sibata)를 이용하여 평가되었다. 이 측정기는 0.3-5.0 μm 범위의 입자를 선택적으로 측정할 수 있으며, 공기정화기 입·출구의 입자 크기

분포로부터 입자 크기별 집진 효율 및 플라즈마 방전에 따른 예비하전 효과가 파악될 수 있다. 공기청정기를 일정 전압 이상에서 운전하면 오존이 발생될 수 있으므로 운전 가능한 최대 전압을 결정하기 위하여 오존 측정기(Porta Sens II, ATI Analytical Technology, Inc.)를 사용하여 오존농도를 측정하였다. 이 오존측정기는 0-5 ppm 범위의 저 농도 오존을 측정할 수 있다.

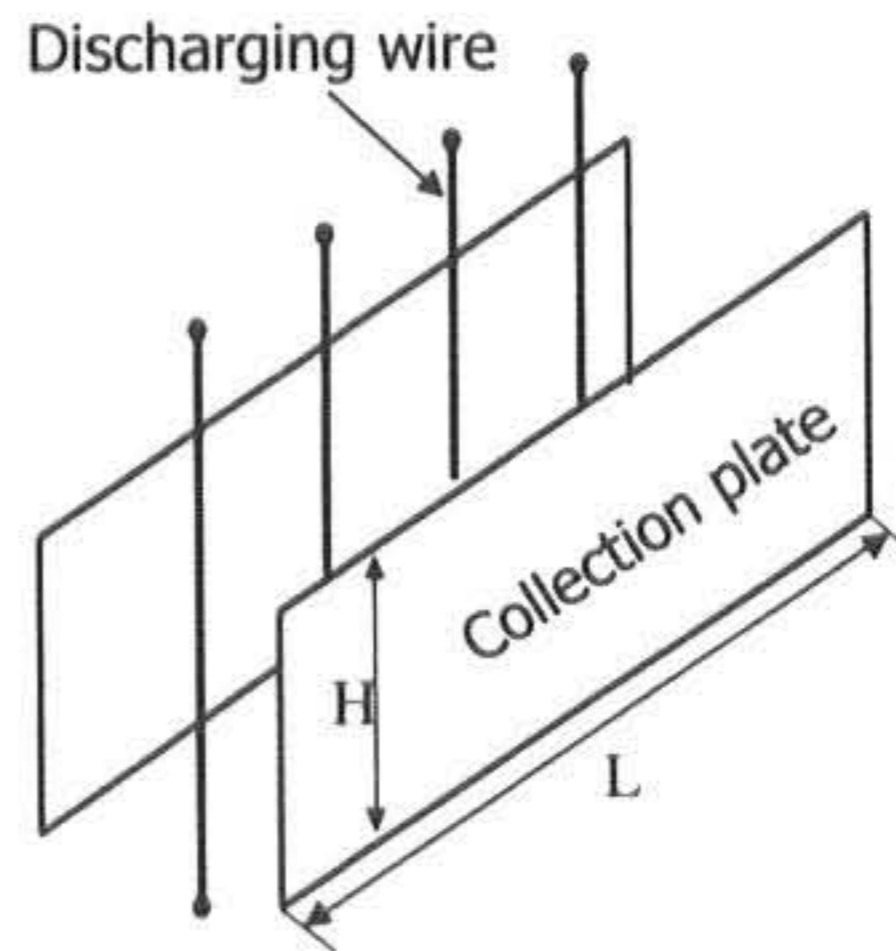


Fig. 3. Electrode structure of the electrostatic precipitator.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 4는 플라즈마 발생을 위한 유전체 방전 장치만을 가동하였을 때 공기청정기 입·출구의 먼지 입경 별 분포를 나타낸다. 이 실험을 수행한 이유는 예비하전에 따른 전기집진기 성능향상 관점에서 유전체 방전 장치의 가동에 따라 먼지가 단순히 예비하전만 되는지 혹은 미세입자가 합체되어 포집이 쉬운 큰 입자로 변화되는지를 확인하기 위함이다. 유전체 방전 장치의 운전전압은 교류 5.5 kV였다. 선행 연구에서는 단순히 먼지의 질량농도만을 측정하였기 때문에 플라즈마 방전에 따른 전기집진기의 효율 향상 효과가 먼지의 예비하전 때문인지 혹은 미세입자의 합체 때문인지, 아니면 두 가지 영향이 모두 작용하는지 불분명하였다<sup>6)</sup>. Fig. 4에서 알 수 있듯이 유전체 방전 장치만을 가동하였을 때, 먼지의 입경 분포는 변화하지 않았고 입자의 수는 조금 감소되었다. 유전체 방전 장치만을 가동하여도 먼



지 농도가 조금 감소하는 것은 정전기력을 지니게 된 먼지가 공기청정기를 통과하며 여기저기 부착되기 때문으로 해석된다. Fig. 4의 결과로부터 실내 먼지의 경우는 유전체방전장치의 가동에 따라 미세입자가 합체되는 효과보다는 단순히 예비하전되어 강한 정전기력을 갖게 되어 후단 전기집진기의 효율이 향상된다고 결론지을 수 있다.

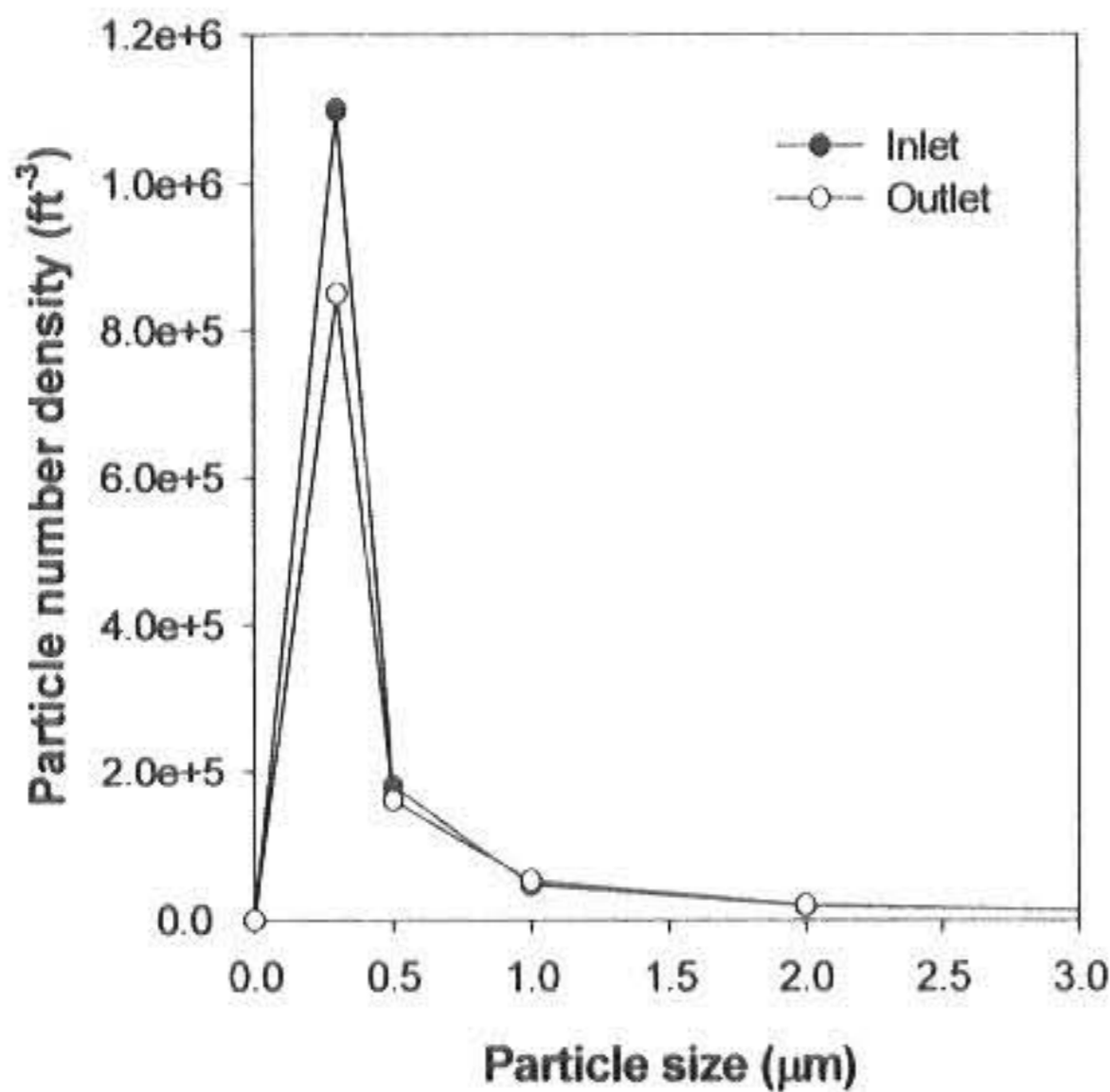


Fig. 4 Effect of plasma discharge on particle size distribution (AC voltage of plasma reactor: 5.5 kV, gas flow: 10 m<sup>3</sup>/min).

Fig. 5의 결과는 전기집진기 한 개의 모듈만을 가동하여 얻어진 먼지 입경별 공기청정기 입·출구 농도이다. Fig. 5에 따르면 모든 입경의 먼지농도가 출구에서 크게 낮아지며, 특히 0.5 μm 이상의 먼지는 저감되는 양이 매우 크다. Fig. 5의 결과를 입경별 집진효율로 도시한 것이 Fig. 6이다. 그림과 같이 0.3 μm 입경의 먼지는 86% 가량의 저감효율을 보이나, 0.5-5.0 μm 범위의 먼지는 한 개의 전기집진기 모듈만을 가동하여도 고효율로 제거되었다. 대기중에 존재하는 먼지중 PM<sub>2.5</sub> (2.5 μm 이하 먼지)가 특히 인체에 유해한 것으로 알려져 있다. 그러나 Fig. 6과 같이 본 연구의 공기청정기는 한 개의 모듈만을 가동하여도 실내공기 1회 통과 기준 집진효율이 0.5-5.0 μm 범위의 먼지에 대해 98% 이상이었다.

위에서 살펴보았듯이 입경이 0.5-5.0 μm 범위인 먼지의 경우 고효율 집진이 가능하고, 상

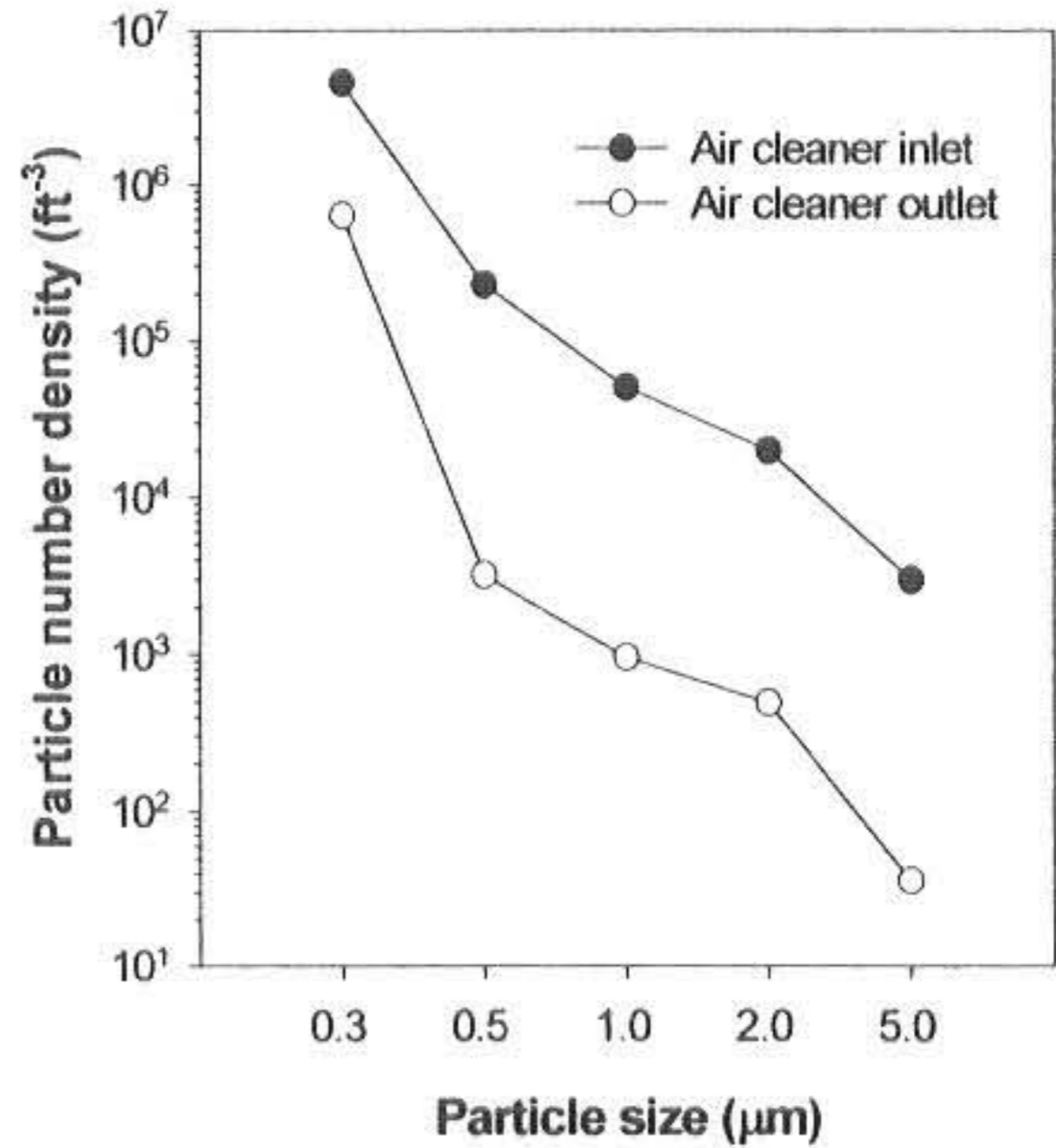


Fig. 5 Particle number densities at the inlet and outlet of the indoor air cleaner (ESP one module, voltage: 7 kV, gas flow: 10 m<sup>3</sup>/min).

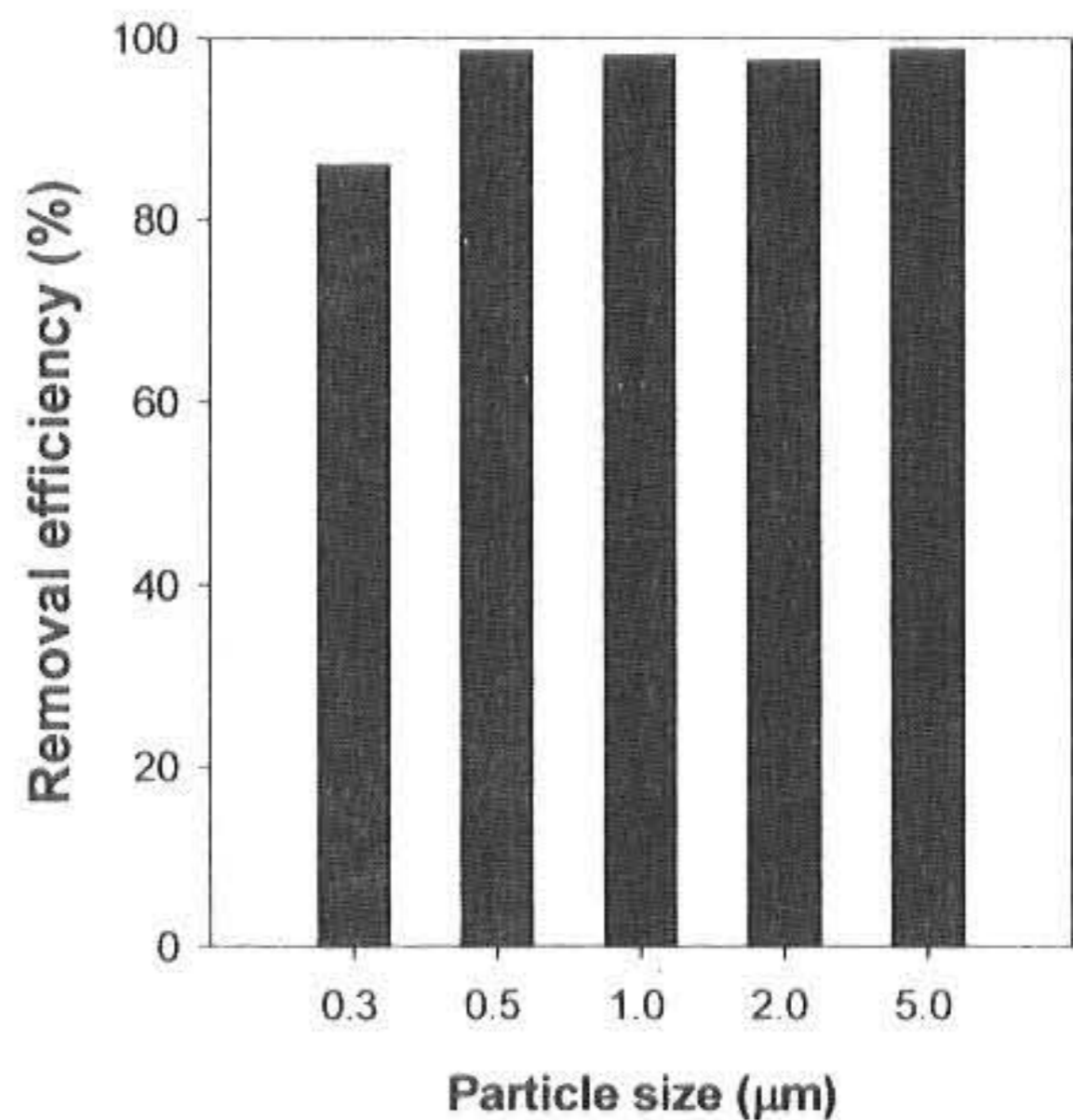


Fig. 6 Dependence of dust removal efficiency on particle size (ESP one module, voltage: 7 kV, gas flow: 10 m<sup>3</sup>/min).

대적으로 집진이 잘 안되는 것은 0.3 μm 크기의 미세한 먼지이므로 0.3 μm 크기의 먼지만을 대상으로 집진성능에 대해 살펴보았다. Fig. 7은 0.3 μm 먼지를 기준으로 한 제거효율



을 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 전기집진기 한 개의 모듈만을 가동하면 0.3  $\mu\text{m}$ 의 먼지가 86% 가량 제거된다. 유전체 방전 장치를 끈 상태에서 전기집진기 두 개의 모듈을 모두 사용하면 제거효율이 92% 내외로 증가된다. 두 개의 전기집진기 모듈을 사용한 경우 반응공간이 2배가되었음에도 불구하고 집진효율 향상 효과가 그다지 크지 않았다.

한편, 전기집진기 1개의 모듈과 예비하전용 유전체 방전 장치를 동시에 가동시키면 집진효율이 95%로 증가되며, 전기집진기 2개의 모듈과 유전체 방전 장치를 동시에 가동시키면 집진효율이 98%로 증가된다. 예비하전을 위한 유전체 방전 장치의 크기는 Fig. 2에 대한 설명에서 알 수 있듯이 전기집진기 단위 모듈에 비해 훨씬 작다. 따라서 이상의 결과를 종합해보면, 장치의 크기를 축소시킨다는 목적과 고효율 집진이라는 목적을 동시에 달성하기 위해서는 전기집진기 한 개의 모듈과 유전체 방전 장치를 사용하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

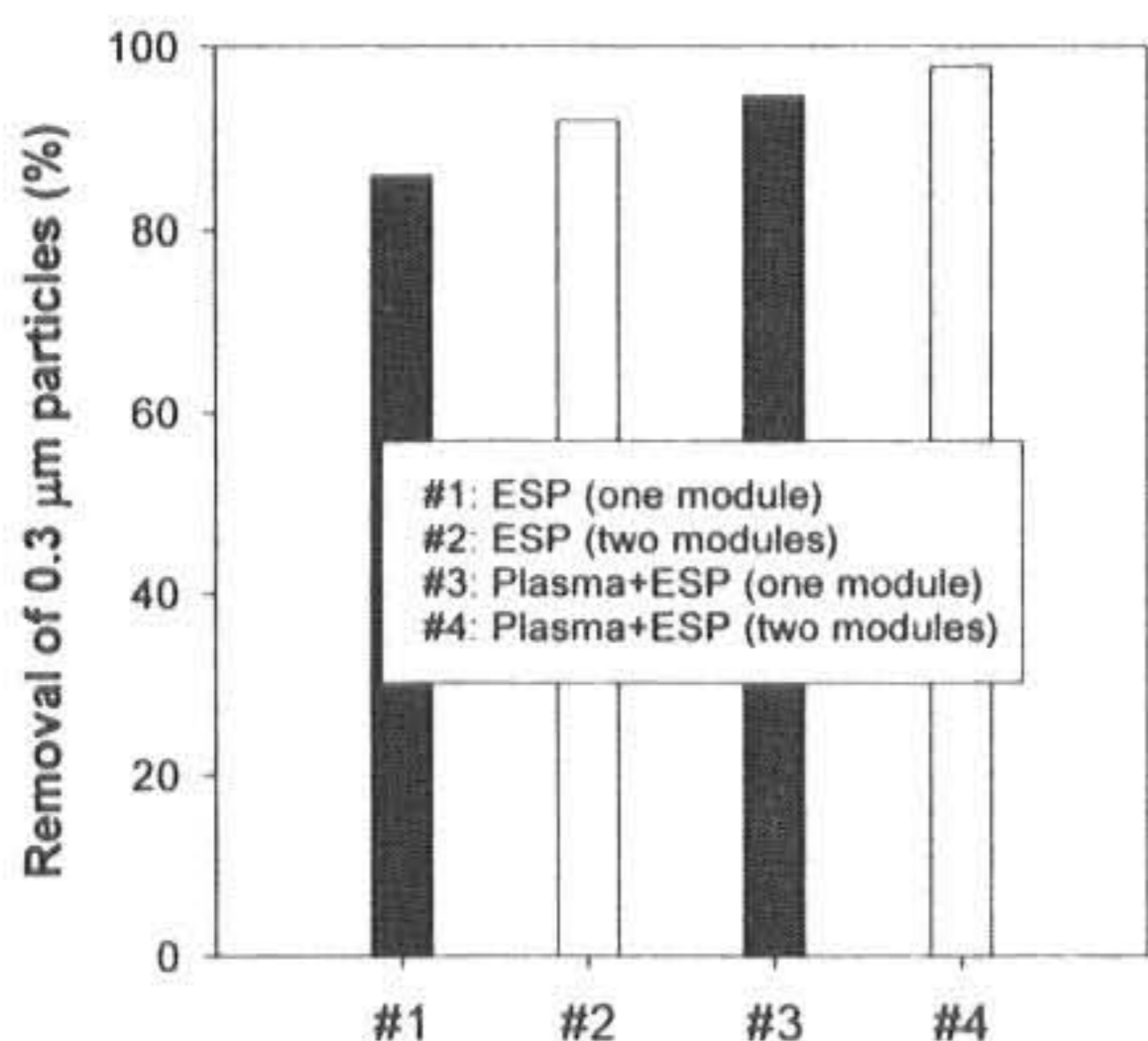


Fig. 7 Dust removal efficiency on the basis of 0.3  $\mu\text{m}$  particles (ESP voltage: 7 kV, AC voltage of plasma reactor: 5.5 kV, gas flow: 10  $\text{m}^3/\text{min}$ ).

전기집진기 전압에 따른 오존 발생 농도가 Fig. 8에 제시되어 있다. Fig. 8의 결과는 전기집진기 두 개의 모듈을 모두 사용했을 때의 결과이다. 오존의 농도는 공기청정기 출구에서 측정되었다. 이와 같은 실험을 수행한 이유는 전기집진기의 최대 운전 전압을 결정하기 위

함이다. 오존은 전기집진기의 코로나 방전에 의해 산소분자가 산소원자로 해리된 다음 산소분자와 결합하는 경로로 발생된다<sup>11)</sup>.

공기중에 오존 농도가 높아지면 기침, 두통, 피로 등의 증상이 나타나고 호흡기 감염에 걸릴 수도 있다. 따라서 전기집진기에서 발생하는 오존을 적절한 운전조건 선정을 통해 최대한 낮추는 것이 매우 중요하다고 할 수 있다.

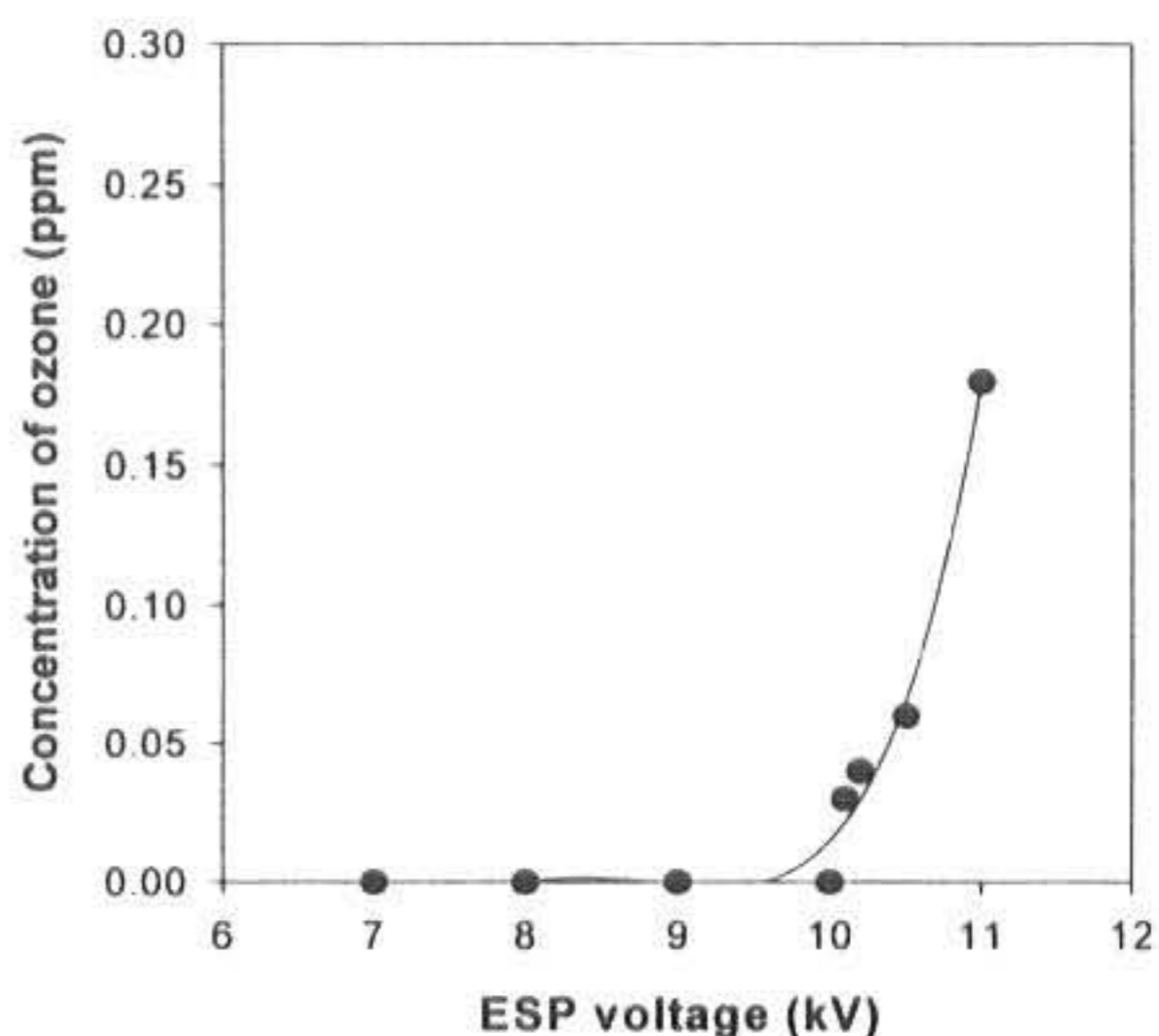


Fig. 8 Effect of ESP voltage on the formation of ozone (ESP two modules, gas flow: 10  $\text{m}^3/\text{min}$ ).

환경부에서 정한 한국의 오존관련 환경기준은 1시간 평균치가 0.1 ppm이하이다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 전압을 10 kV까지 변화시켰을 때는 오존이 검출되지 않았으나, 그 이상 전압을 더 증가시키면 미량의 오존이 검출되었다. 전압을 11 kV로 증가시켰을 때는 약 0.18 ppm의 오존이 검출되었다. Fig. 8의 결과에 의하면 오존의 농도를 환경부 기준이하로 낮추기 위해서는 전기집진기의 운전 전압을 10.5 kV이하로 유지해야 한다. 예비하전이 오존발생에 미치는 정도를 평가하기 위하여 전압을 5.5 kV로 유지하고 오존 농도를 측정할 결과 유전체 방전 장치에서 발생하는 오존은 0.02 ppm 수준임을 알 수 있었다. 한편, 전기집진기를 한 개의 모듈만을 사용했을 때는 전압을 11 kV로 증가시켜도 환경부 기준치인 0.1 ppm 수준의 오존만이 검출되어, 한 개의 모듈만을 사용할 때에는 두 개의 모듈을 모두 사용할 때보다 높은 전압에서 운전 가능함을 알 수 있었다.



#### 4. 결론

유전체 방전 장치에 의해 예비하전되는 전기집진기형 공기청정기에서 실험적 연구를 통해 얻은 주요 결론은 다음과 같다. 공기청정기 입·출구의 먼지 입경 분포를 살펴본 결과, 플라즈마 방전시 전기집진기의 성능이 향상되는 것은 미세 먼지의 합체 때문이라기보다는 먼지의 하전 정도 증가에 기인한 것으로 판단된다. 입경이 0.5-5  $\mu\text{m}$  범위에 있는 먼지는 플라즈마 방전 없이 한 개의 전기집진기 모듈만 사용하더라도 1회 통과 기준으로 98% 이상 제거되었으나, 0.3  $\mu\text{m}$ 의 먼지는 같은 조건에서 상대적으로 낮은 86%의 제거효율을 나타냈다. 플라즈마 방전 없이 두 개의 전기집진기 모듈을 사용하면 0.3  $\mu\text{m}$ 의 먼지 제거효율이 92% 내외로 증가되나 장치의 부피가 너무 커지는 문제가 있는데, 한 개의 전기집진기 모듈과 유전체 방전 장치를 동시에 가동시키면 장치 부피의 큰 증가 없이 집진효율이 95%로 증가된다. 따라서 장치 크기 축소와 고효율 집진 목적을 동시에 달성하기 위해서는 전기집진기 한 개의 모듈과 유전체 방전 장치를 사용하는 것이 바람직하다. 본 연구의 유전체 방전 장치에서 발생하는 오존은 예비하전 전압 5.5 kV에서 0.02 ppm으로 무시할 만 하였다. 전기집진기에서 발생하는 오존의 경우는 운전전압 조절을 통해 기준치 이하로 낮출 수 있었다.

#### 사사

본 연구는 환경부의 차세대핵심환경기술개발사업 (Eco-Technopia 21 Project)으로 지원받아 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- 1) Wadden, R.A. and Scheff, P.A.: Indoor Air Pollution: Characterization, Prediction and Control, John Wiley & Sons, Inc., New York, (1983).
- 2) Mizuno, A.: Industrial applications of non-thermal discharge plasma in environmental technologies, 12th Int. Symp. High Voltage Eng., Bangalore,

- India, pp.48-55, (2001).
- 3) 김정일, 여석준: 방전극 형상 및 여과재 특성에 따른 정전 여과집진장치 특성에 관한 연구, 한국대기환경학회지, **14**, pp.237-250, (1998).
- 4) 김용진, 정상현: 새로운 집진기술 동향, 한국대기환경학회지, **11**, pp.221-231, (1995).
- 5) 천중국, 박출재, 최금찬: 정전형 여과집진 방식에서 여과특성에 관한 연구, 한국대기환경학회지, **11**, pp.361-367, (1995).
- 6) 목영선, 허일정, 이호원, 신상무, 조정국, 남인식: 전기집진기형 실내공기정화기에서 먼지제거에 미치는 예비하전의 영향, 대한환경공학회지, **25**, pp.996-1003, 2003.
- 7) Krasnoperov, L.N., Krishtopa, L.G. and Bozzelli, J.W.: Study of volatile organic compounds destruction by dielectric barrier corona discharge, *J. Adv. Oxid. Technol.*, **2**, pp.248-257, (1997).
- 8) Ogata, A., Shintani, N., Mizuno, K., Kushiyama, S. and Yamamoto, T.: Decomposition of benzene using a nonthermal plasma reactor packed with ferroelectric pellets, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, **35**, pp.753-759, (1999).
- 9) Futamura, S., Zhang, A., Prieto, G. and Yamamoto, T.: Factors and intermediates governing byproduct distribution for decomposition of butane in nonthermal plasma, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, **34**, pp.967-974, (1998).
- 10) Mok, Y.S., Nam, C.M., Cho, M.H. and Nam, I.-S.: Decomposition of volatile organic compounds and nitric oxide by non-thermal plasma discharge processes, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **30**, pp.408-416, (2002).
- 11) Atkinson, R., Baulch, D.L., Cox, R.A., Hampson Jr., R.F., Kerr, J.A. and Troe, J.: Evaluated kinetic and photochemical data for atmospheric chemistry: supplement IV, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, **21**, pp.1125-1568, (1992).

(2003년 11월20일 접수, 2004년 2월20일 채택)