

2단 정전식 세정집진기의 집진 및 가스제거 특성

여 국 현, 유 경 훈[†], 손 승 우^{*}, 김 윤 신^{**}

한국생산기술연구원 에어로졸·오염제어연구실, ^{*}(주)성림피에스 연구개발부, ^{**}한양대학교 산업의학교실

An Experiment on Particle Collection and Gas Removal in a 2-Stage Electrostatic Wet Scrubber

Kuk-Hyun Yeo, Kyung-Hoon Yoo[†], Seung-Woo Son^{*}, Yoon-Shin Kim^{**}

Aerosol & Contamination Control Laboratory, Korea Institute of Industrial Technology (KETECH), Cheonan-Si 330-825, Korea

^{*}R&D Group, Sunghim Plant System Co., Seoul 150-103, Korea

^{**}Department of Occupational & Environmental Medicine, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received March 20, 2006; revision received August 11, 2006)

ABSTRACT: DOS and NaCl aerosol particles were used to determine collection efficiencies of a 2-stage electrostatic wet scrubber with respect to particle size. The DOS and NaCl aerosols have geometric mean diameters of 0.1~3.0 μm, geometric standard deviations of 1.1~1.8 and total number concentrations of 450~2,400 particles/cm³. The tested operating variables for the electrostatic wet scrubber included air velocity and water injection rate. It was shown from the experimental results that particle collection efficiencies increased in the submicron particle size range when different polarities were applied on the water nozzle and corona wire, respectively. This increase in the collection efficiency is attributed to strong electrostatic attraction between the negative water droplets and positive submicron particles. The collection efficiencies also increased when water injection rate was increased or air velocity was decreased. Meanwhile, the pressure drop across the wet scrubber decreased by 90% compared with the existing mechanical wet scrubber. Finally, ammonia gas was used to determine gas removal efficiencies. It was observed that the gas removal efficiencies increased when the air velocity was decreased or the water injection rate was increased.

Key words: 2-stage electrostatic wet scrubber(2단 정전식 세정집진기), DOS particle(DOS 입자), NaCl particle(NaCl 입자), Pressure drop(압력강하), Collection efficiency(집진 효율), Gas removal(가스제거)

기 호 설 명

C_{inlet} : 세정집진기 입구에서의 총 입자수 농도

[particles/m³] 또는 암모니아 농도 [ppm]
 C_{outlet} : 세정집진기 출구에서의 총 입자수 농도
[particles/m³] 또는 암모니아 농도 [ppm]

U : 세정집진기 입구 공기속도 [m/s]

V : 인가전압 [kV]

[†] Corresponding author

Tel.: +82-41-589-8354; fax: +82-41-589-8634

E-mail address: khyoo@kitech.re.kr

그리스 문자

η : 입자수농도 기준 집진효율 또는 가스제거율

1. 서 론

액체에 압력을 가하여 노즐을 통해 분사시킴으로써 액적을 만들고 이 액적을 분진이 부유된 기체유동과 충돌 및 접촉시켜 부유분진을 포집하고 동시에 유해가스도 제거할 수 있는 장치가 세정집진기(wet scrubber)이다. 세정집진기는 여재필터나 전기집진기와 같은 건식 에어필터와는 달리 분진과 가스를 동시에 제거할 수 있고, 고온다습한 가스 중의 분진에 대해서는 온도를 내림과 동시에 입자를 응집시켜 분진의 분리를 용이하게 하는 등의 이점이 있다. 그러나 기존의 기계식 세정집진기는 분진제거 메커니즘이 관성충돌(inertial impaction)에 크게 의존하기 때문에 입자크기가 1 μm 에 근접하게 되면 집진효율이 급격히 감소하여 서브마이크론(submicron) 입자를 거의 제거하지 못하는 단점을 가지고 있다.⁽¹⁻⁴⁾

본 연구에서는 이러한 기계식 세정집진기의 단점인 서브마이크론 입자에 대한 낮은 집진성능을 효과적으로 개선하기 위하여 기계식 세정집진기의 수액적에 의한 주 입자포집 메커니즘인 관성충돌(inertial impaction) 이외에 정전기력(electrostatic attraction)을 추가한 정전식 세정집진기를 개발하고자 한다. 이 정전식 세정집진기는 일반적인 2단 평행판 전기집진기⁽⁵⁾의 평행판 집진부를 세정집진부로 대체한 2단 정전식 세정집진기이며, 1차로 하

전부에서 입자를 양으로 하전시키고 2차로 세정집진부에서 정전분사노즐에 의해 수액적을 음으로 하전시킴으로써 수액적과 부유입자를 서로 반대극성으로 하전시켜 정전기력을 극대화한 것이다. 한편, 일반적인 동류(co-current)나 향류(counter-current)가 아닌, 공기유동방향에 대해 수액적이 수직으로 분사되는 덕트형 수직류(vertical-current)로 설계하였다.

본 실험에서는 이 2단 정전식 세정집진기에 대해 기하평균지름(GMD)이 0.13 μm , 기하표준편차(GSD)가 약 1.7인 NaCl 에어로졸과 기하 평균지름이 0.78 μm , 1.0 μm , 1.4 μm , 3.0 μm , 기하표준편차가 1.1에서 1.3 사이인 DOS 에어로졸을 사용하여 평균 유속 및 주수량에 따른 입자크기별 집진효율 특성과 암모니아 가스에 대한 가스제거효율 특성, 압력강하 특성을 조사하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구에 사용된 실험장치의 전체적인 개략도이다. 실험장치는 청정풍동,^(5,6) 에어로졸 발생부, 에어로졸 측정부, 2단 정전식 세정집진기로 이루어져 있다. 에어로졸 발생부에서 발생된 에어로졸은 청정풍동 내로 투입되고, 입자하전부(pre-charger)를 지나면서 양으로 하전된 입자는 정전식 세정집진부에서 음으로 하전된 수액적에 의해 집진된 후 에어로졸 측정부에서 입자크기분포가 측정된다.

Fig. 2는 본 실험에서 사용하고 있는 시험 에어로졸의 하나인 DOS 에어로졸 발생장치의 구

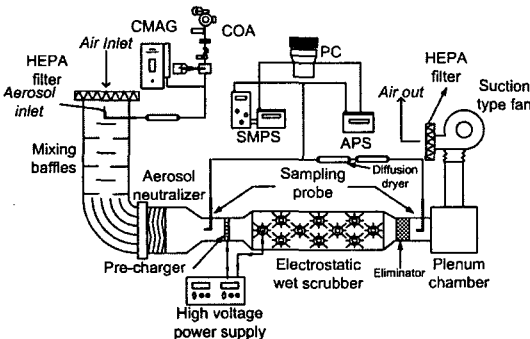


Fig. 1 Schematic diagram of the present experimental apparatus.

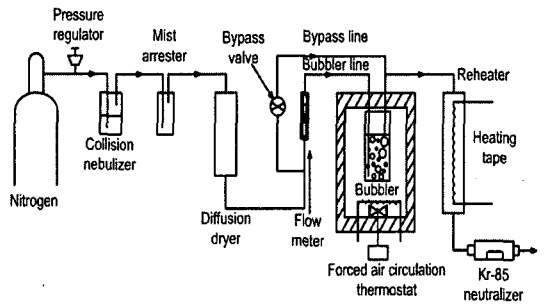


Fig. 2 Schematic diagram of the DOS aerosol generating system.

성도를 보여주고 있다. DOS 에어로졸을 발생하기 위하여 응축식 단분산 에어로졸 발생기(이하 Condensation Monodisperse Aerosol Generator, CMAG ; Model 3470, TSI, Inc., St. Paul, MN, USA)를 사용하였고, 이 발생기는 LaMer-Sinclair 타입의 응축식 단분산 에어로졸 발생기를 수정한 것이다. 이 발생기는 기하표준편차 1.1 근처의 고체나 액체형태의 입자를 발생시킬 수 있다. 질소 가스는 우선 20 mg/L의 NaCl 수용액이 담겨 있는 분무기(Collison nebulizer)를 통과하고 분무기에서 형성된 액적들은 미스트 제거기(mist arrester)와 확산건조기(diffusion dryer)를 통과하면서 건조되어 NaCl 입자 응축핵들이 생성된다. 이 응축핵 유동은 바이패스 밸브에 의해 두 흐름으로 나뉘게 되는데 한 흐름은 유량계와 가열되는 버블러(bubbler)를 지나 재열관(reheater)으로, 다른 한 흐름은 바이패스관을 통해 바로 재열관으로 간다. 버블러는 입자생성원 물질인 DOS를 포함하고 있고 응축핵 유동이 가열된 버블러를 통과하면서 DOS로부터 증발기체를 얻는다. 이 유동은 재열관을 지나면서 증발이 종료되고 이후에 냉각되어 증발기체는 응축핵 주위에 일정하게 응축되고 단분산 에어로졸이 생성된다. CMAG에서 발생된 입자는 에어로졸 중화기(Kr-85 neutralizer)

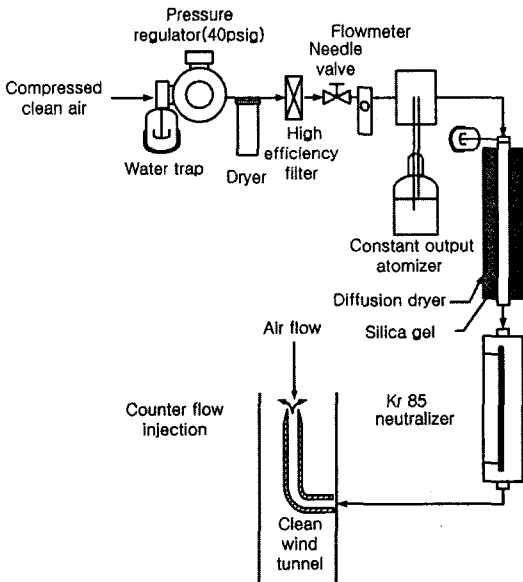


Fig. 3 Schematic diagram of the NaCl aerosol generating system.

를 지나면서 전기적으로 중화되어 청정풍동의 상류로 투입된다. 생성되는 입자크기는 버블러 및 재열관의 온도조절을 통해 각 응축핵에 응축 가능한 증발기체의 양으로 결정된다.

Fig. 3은 본 실험에서 사용하고 있는 2번째 시험 에어로졸인 NaCl 에어로졸의 발생장치에 대한 구성도를 보여주고 있다. 기하표준편차 약 1.7 정도의 NaCl 입자 에어로졸의 발생을 위하여 일정출력 아토마이저(이하 Constant Output Atomizer, COA ; Model 3076, TSI)를 사용하고 있다. 공급된 압축공기는 수분포획기(water trap)와 실리카겔이 담겨 있는 건조기(dryer)에서 수분이 제거되고 압력조절기(pressure regulator)에 의해 40 psi, 1.1 L/min으로 COA에 공급된다. COA에서 발생된 NaCl 입자 에어로졸은 확산건조기에서 수분이 제거되고 중화기를 통과하면서 전기적으로 중화된 후 청정풍동 상류에 투입된다.

Fig. 4는 입자크기분포를 측정하기 위하여 청정풍동 내의 공기유동으로부터 에어로졸 입자들을 흡입하는 샘플링 프로브를 보여주고 있다. 샘플링시 세정집진기 하류에서 난류의 영향을 완화시키기 위하여 Okazaki and Willeke⁽⁷⁾와 Gong et al.⁽⁸⁾의 설계에 근거하여 그림에 도시된 바와 같이 덮개장착 윌리크형 샘플링 프로브(shrouded Willeke-type sampling probe)를 제작하였다.

한편, 세정집진기 하류에서 분사된 액적이 입자크기분포에 미칠 영향을 배제하기 위하여 Fig. 1에 도시된 바와 같이 엘리미네이터(eliminator)를

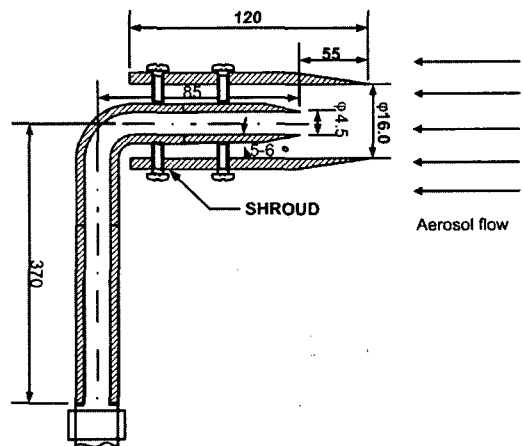


Fig. 4 Schematic diagram of the shrouded Willeke-type sampling probe.

설치하였다. 공기유동 기류를 타고 엘리미네이터를 통과할 가능성이 있는 매우 미세한 액적들은 샘플링 프로브로 샘플링되면 Fig.1에 도시된 샘플링 라인상의 2개의 확산건조기(diffusion dryer) 내의 실리카겔에 의해 흡수되어 입자크기분포 측정장치에서 액적에 의한 입자크기분포 교란효과는 거의 없을 것으로 판단된다. 또한 확산건조기(diffusion dryer) 내부에서의 입자손실은 투입된 2개의 확산건조기의 길이만큼 샘플링 라인(프로브 및 튜브)의 총 길이를 증가시켜 얻게 되는 전달효율을 통해서 보정이 이루어지게 된다. 샘플링된 입자들은 Fig.1에 도시된 바와 같이 APS(Aerodynamic Particle Sizer, Model 3310A, TSI)와 SMPS(Scanning Mobility Particle Sizer, Model 3934, TSI)로 입자크기분포가 측정되고, 측정된 입자크기분포에 대해 샘플링 프로브 및 튜브의 전달효율의 보정이 이루어지게 된다.⁽⁶⁾

Fig.5는 본 연구에서 설계, 제작한 2단 정전식 세정집진기를 보여주고 있다. 먼저 와이어-판형(wire-plate type) 하전부(pre-charger)를 통과하는 입자는 하전부 내의 코로나 와이어에 인가된

양의 고전압에 의해 생성된 양의 공기이온에 의해 양으로 하전된다. 하전된 입자들은 2차로 정전분사노즐이 총 10개가 장착된 세정집진부로 유입되어 반대극성인 음으로 하전된 수액적들에 의해 포획되어 제거된다. 본 2단 정전식 세정집진기의 특징은 하전 입자와 하전 수액적을 서로 반대극성으로 하전시키는 기술을 구현하는 데 있어 추가적인 음의 고전압 파워팩이 필요없이 1개의 양의 고전압 파워팩으로 해결한 것이다. 이는 본 연구에서 설계한, Fig.6에 도시된 정전분사노즐에 의해 실현되었다. 이 정전분사노즐은 링전극(ring electrode)과 노즐 몸체로 구성되어 있다. 노즐 몸체 주위에 위치한 링전극에 양의 고전압을 인가하고 노즐 몸체를 접지시키게 되면 유도전류를 발생시켜 노즐 몸체에 전자들이 맺히게 된다. 이 전자들은 노즐 몸체와 접촉된 물로 흐르게 되고 전자를 지닌 물들은 노즐을 통하여 분사됨으로써 음으로 하전된 수액적들이 된다.⁽⁹⁾ 본 연구에서는 하전부의 코로나 와이어 인가전압은 $V_1=11\text{ kV}$, 정전분사노즐의 링전극 인가전압은 $V_2=0.15\text{ kV}$ 로 하였다. 이때, 수액적들은 노즐당 주수량이 3 L/min일 경우 약 $2.2\text{ }\mu\text{A}$ 의 하전량을 가지고 대략적으로 $100\text{ }\mu\text{m}$ 의 크기를 가진다.

2.2 실험방법

세정집진기의 집진효율을 측정하기 위하여 세정집진기를 통과하기 전과 통과한 후의 입자크기분포를 APS와 SMPS를 사용하여 측정하고 집진 효율 η 를 다음과 같이 산출하였다.

$$\eta = \frac{C_{inlet} - C_{outlet}}{C_{inlet}} \quad (1)$$

여기서 η 는 입자수농도 기준에 의한 집진효율이고, C_{inlet} 는 세정집진기 입구에서의 총 입자수농도이고, C_{outlet} 는 세정집진기 출구에서의 총 입자수농도이다.

암모니아에 대한 가스제거율 η 도 식(1)을 사용하여 구하였다. 이때, C_{inlet} 과 C_{outlet} 은 각각 세정집진기 입구와 출구에서의 암모니아 농도이다. 암모니아 농도측정을 위하여 가스텍의 GV-100S형의 가스채취기와 가스텍의 No.3L(감지농도 1~

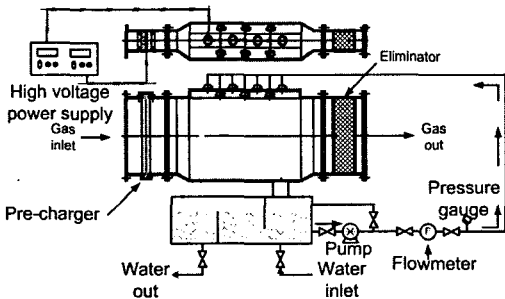


Fig. 5 Schematic diagram of the present electrostatic wet scrubber.

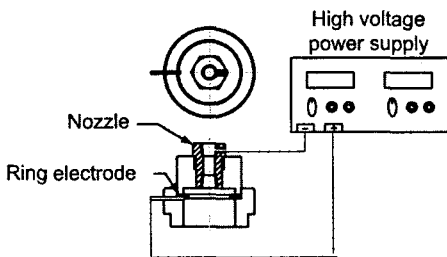


Fig. 6 Schematic diagram of the electrostatic spraying nozzle.

30 ppm) 검지관을 사용하였다. 검지관의 해상도는 0.5 ppm이다. 암모니아 압력용기에 장착된 미세한 압력조절기를 사용하여 세정집진기 입구에서의 암모니아 농도가 30 ppm이 되도록 하였다.

2.3 에어로졸의 발생 특성

Fig. 7은 세정집진기 입구에서 공기속도가 1m/s 일 때 세정집진기 입구에서 측정된 NaCl 및 DOS 에어로졸들의 입자크기 분포를 나타내고 있다. Table 1은 Fig. 7의 경우인 1m/s와 3m/s 대한 입자크기 분포 특성인 기하평균지름(GMD), 총입자수농도(TNC), 기하표준편차(GSD)와 입자발생조건을 각각 수록하고 있다. Table 1에서 T_b 와 T_r 은 각각 CMAG의 버블러(bubbler)와 재열

기(reheater)의 온도이다.

3. 실험결과 및 검토

3.1 압력강하

Fig. 8은 정전식 세정집진기를 청정풍동의 시험부에 장착한 후 양단의 차압을 측정된 값을 도시하고 있다. 그림에서 물을 분사하지 않는 경우, 노즐당 3 L/min을 분사하는 경우, 물을 분사하면서 전압을 인가한 경우(Power on)에 대해 세정집진기 입구에서의 공기속도에 따른 세정집진기의 압력강하 특성을 보여주고 있다. 공기속도가 빨라질수록 물을 분사한 경우와 분사하지 않는 경우에 대한 압력강하 사이의 차가 점점 커지는 경향을 보이나 전 속도에 걸쳐 그 차이는 약 1

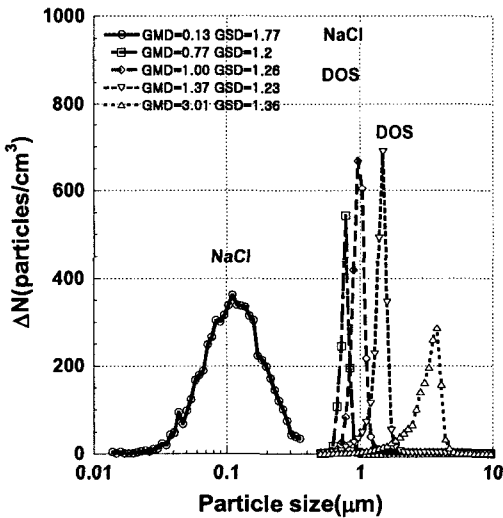


Fig. 7 Particle size distributions for 1 m/s at the inlet of electrostatic wet scrubber.

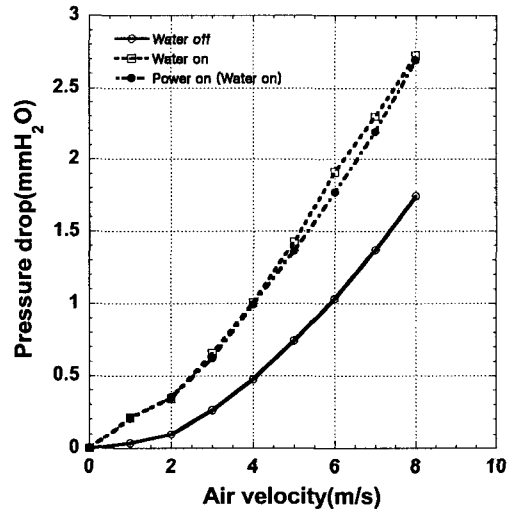


Fig. 8 Pressure drop across the wet scrubber.

Table 1 Geometric mean diameter, total number concentration and geometric standard deviation with bubbler and reheater temperatures

	GMD (μm)		TNC (particles/cm ³)		GSD	
	1 m/s	3 m/s	1 m/s	3 m/s	1 m/s	3 m/s
NaCl, COA, 100 g/L	0.13	0.13	2003	980	1.77	1.75
DOS, CMAG, $T_b=160^{\circ}\text{C}$, $T_r=130^{\circ}\text{C}$	0.78	0.77	1150	462	1.19	1.17
DOS, CMAG, $T_b=180^{\circ}\text{C}$, $T_r=150^{\circ}\text{C}$	1.00	0.99	2350	1150	1.26	1.23
DOS, CMAG, $T_b=200^{\circ}\text{C}$, $T_r=160^{\circ}\text{C}$	1.4	1.35	2200	1130	1.23	1.21
DOS, CMAG, $T_b=250^{\circ}\text{C}$, $T_r=220^{\circ}\text{C}$	3.00	3.03	1710	716	1.36	1.35

mmH₂O 이내로 유지되고 있음을 알 수 있다. 물을 분사한 경우 전압을 인가하더라도 물의 하전으로 인한 압력강화 효과는 거의 없음을 알 수 있다. 최대 8 m/s의 공기속도에 대해 약 2.75 mmH₂O가 얻어지고 있으며 3 m/s의 공기속도에 대해 본 연구진의 이전 충전총식 세정집진기⁽⁴⁾는 12 mmH₂O의 차압이 얻어졌으나 본 연구의 정전식 세정집진기는 1 mmH₂O 이하로 유지되고 있어 90% 이상을 감소시켰음을 알 수 있다.

3.2 주수량에 따른 집진효율

Fig. 9는 기계식과 정전식의 차이를 살펴보기 위하여 전압을 인가하지 않은 경우와 인가한 경우에 대해 세정집진기 입구에서의 공기속도가 3 m/s일 때 주수량에 따른 입자크기별 집진효율의 변화를 보여주고 있다. 그림에서 집진효율 실험 결과의 x축상의 입자크기는 차례로 0.13 μm, 0.77 μm, 0.99 μm, 1.35 μm, 3.03 μm이며 Table 1에 수록한 기하평균지름(GMD)을 나타낸다. 주수량은 노즐당의 주수량이다. 그림으로부터 알 수 있는 것은 전압을 인가하지 않은 경우 입자크기가 감소함에 따라 집진효율이 전반적으로 감소하는 전형적인 세정집진기의 집진효율 특성⁽¹⁰⁾을 보이는 반면에, 전압을 인가하게 되면 서브마이크론

입자크기영역에서 입자와 수액적 간의 정전기력(electrostatic attraction)으로 인해 집진효율이 다시 증가하게 되어 'V'자형 집진효율 특성곡선이 형성됨을 알 수 있다. 또한, 전체 입자크기영역에 걸쳐 동일조건에서 전압을 인가한 경우 집진효율이 증가하게 됨을 알 수 있다.

한편, 주수량에 따른 입자크기별 집진효율의 변화에 대한 실험결과를 살펴보면 주수량이 증가함에 따라 집진효율이 증가하게 됨을 알 수 있다. 노즐당 주수량이 4 L/min일 경우 GMD 3.0 μm에서 약 89%, 0.13 μm에서 66%의 높은 집진효율을 보여주고 있다.

3.3 공기속도에 따른 집진효율

Fig. 10은 총 주수량이 30 L/min, 즉 노즐당 3 L/min일 때 세정집진기 입구에서의 공기속도에 따른 입자크기별 집진효율의 변화를 보여주고 있다. 주수량에 따른 집진효율 변화 특성과 마찬가지로 전압을 인가하지 않은 경우 입자크기가 감소함에 따라 집진효율이 전반적으로 감소하는 전형적인 세정집진기의 집진효율 특성을 보이는 반면에, 전압을 인가하게 되면 서브마이크론 입자크기영역에서 입자와 수액적 간의 정전기력(electrostatic attraction)으로 인해 집진효율이 다시 증

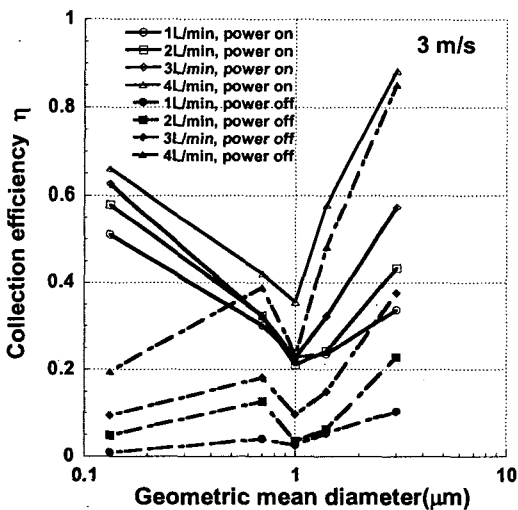


Fig. 9 Variations of the collection efficiencies with respect to particle size for various water injection rates.

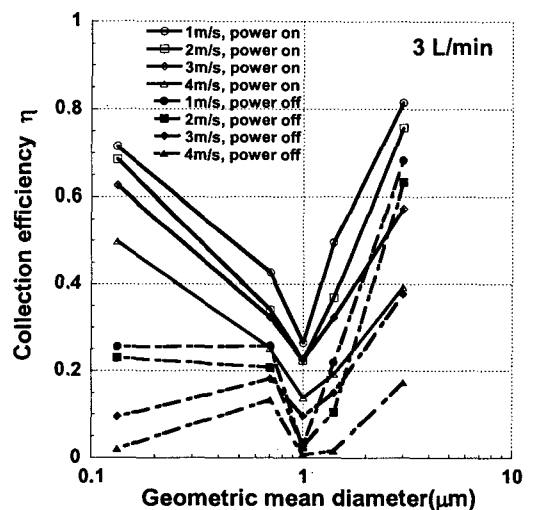


Fig. 10 Variations of the collection efficiencies with respect to particle size for various air velocities.

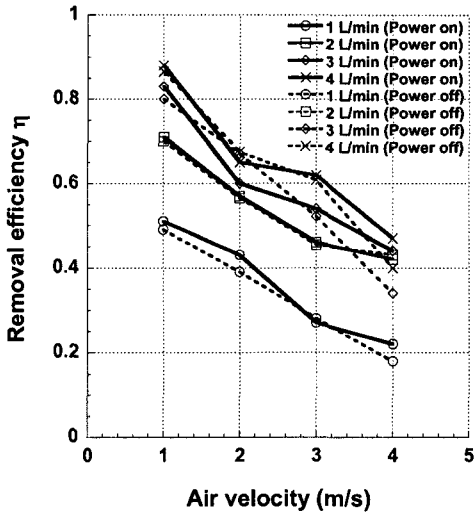


Fig. 11 Variations of the removal efficiencies with respect to air velocity for various water injection rates.

가하게 되어 'V'자형 집진효율 특성곡선이 형성됨을 알 수 있다. 공기속도가 빨라질수록 집진효율은 감소함을 알 수 있다.

3.4 가스제거율

Fig. 11은 전압을 인가한 경우와 인가하지 않은 경우에 대해 세정집진기 입구에서 공기속도에 대한 암모니아 가스제거율 실험결과를 각각 나타내고 있다. 그림의 주수량은 총 주수량을 의미한다. 그림으로부터 전체적으로 속도가 낮을수록 주수량이 많을수록 암모니아 가스제거율이 높아짐을 알 수 있다. 또한, 전압을 인가한 경우의 가스제거율은 전압을 인가하지 않은 경우의 가스제거율에 비해 큰 변화가 없이 거의 동일함을 알 수 있다.

4. 결 론

기하표준편차가 1.1~1.3인 DOS 에어로졸과 기하표준편차가 1.7 정도인 NaCl 에어로졸을 사용하여 2단 정전식 세정집진기의 입자크기에 따른 집진효율 특성실험을 공기속도 1~4 m/s, 노즐당 주수량 0~4 L/min에 대해 수행하여 다음과 같은 사항을 관찰하였다.

모든 주수량 및 공기속도에 대해 전압을 인가

하면 서브마이크론 입자크기영역에서 입자크기가 감소할 때 집진효율이 증가되어 'V'자형 집진효율 특성곡선이 얻어짐을 확인하였다. 이는 서로 반대극성으로 하전된 서브마이크론 입자와 수액적 간의 정전기력(electrostatic attraction)으로 인해 서브마이크론 영역에서 집진효율이 개선된 것에 기인한 것이다.

운전조건이 동일한 충전층식 세정집진기의 경우보다 압력강하에 있어서 90% 이상의 절감효과를 달성할 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부가 주관하고 에너지관리공단이 지원한 에너지·자원기술개발사업 중대형 과제 '반도체/LCD 클린룸 에너지절약기술 개발'의 세부과제 '열회수식 에어와셔 시스템 개발'의 일환으로 수행되었으며 이에 대해 관계자들에게 감사드립니다.

참고문헌

1. Agranovski, I. E. and Whitcombe, J. M., 2001, Case study of the practical use of wettable filterers in the removal of submicron particles, *Chem. Eng. Technol.*, Vol. 24, pp. 513-517.
2. Lanzerstorfer, C., 2000, Solid/liquid-gas separation with wet scrubbers and wet electrostatic precipitators: A review, *Filtration and Separation*, June, pp. 30-34.
3. Pilat, M. J., 1975, Collection of aerosol particles by electrostatic droplet spray scrubbers, *J. of the Air Pollution Control Association*, Vol. 25, pp. 176-178.
4. Yoo, K. H., Roh, H. H., Choi, E. and Kim, J. K., 2003, An experiment on the particle collection characteristics in a packed wet scrubber, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 305-311.
5. Yoo, K. H., Lee, J. S. and Oh, M. D., 1997, Charging and collection of submicron particles in two-stage parallel-plate electrosta-

- tic precipitators, *Aerosol Science and Technology*, Vol. 27, pp. 308-323.
6. Yoo, K. H., 1996, Study on particle charging and collection in two-stage parallel-plate electrostatic precipitators, Ph.D. Thesis, Seoul National University, Seoul, Korea.
 7. Okazaki, K. and Willeke, K., 1987, Transmission and deposition behavior of aerosols in sampling inlets, *Aerosol Science and Technology*, Vol. 7, pp. 275-283.
 8. Gong, H., Anand, N. K. and McFarland, A. R., 1993, Numerical prediction of the performance of a shrouded probe sampling in turbulent flow, *Aerosol Science and Technology*, pp. 294-304.
 9. Higashiyama, Y., Tanaka, S., Sugimoto, T. and Asano, K., 1999, Size distribution of the charged droplets in an axisymmetric shower, *J. of Electrostatics*, Vol. 47, pp. 183-195.
 10. Crawford, M., 1976, *Air Pollution Control Theory*, McGraw-Hill, New York.