고전압 분사시스템의 액적 하전 특성연구

손 승 우† , 유 경 훈*, 김 윤 신**

A Study on Droplet Charging of an High Voltage Spraying System

Seung Woo Son† , Kyoung hoon Yoo* and Yoon Shin Kim**

Key Words: Electrostatic atomization(정전분사), Nozzle(노즐), Water droplet(수액적), Charging(하전)

Abstract

An experiment was conducted to characterize water droplet charging performance of an electrostatic spraying nozzle for an electrostatic wet scrubber. Charge-to-mass ratios, the nozzle currents divided by the mass flow rate of water were obtained with respect to the applied voltage to the ring-electrode for 2 different flow conditions. It was shown that the charge-to-mass ratio increased in proportion to the applied voltage and tended to saturate at a certain higher voltage.

1. 서 론

산업화가 급속히 진행되면서 분진 및 유해가스의 발생량이 더욱더 증가하고 있으며 인체 및 산업공정의 여러 요소에서 부작용에 따른 많은 심각한 문제를 일으키고 있다. 현재 주로 사용되고 있는 오염물질 제거를 위한 공기청정기기는 여재필터와 전기집진기 등의 건식 에어필터들이 있으나 이들의 실제 적용에는 많은 문제점과 한계성이 있다. 전기집진기의 경우는 필터방식에 비해 초기 차압의 감소, 1㎛ 이하의 미세한 입자의 제거에는 우수하나, 초기 약 3개월 이후는 집진 전극판의 오염으로 분진의 흡착력이 저하되어 집진율이 현저히 저하되고 집진 전극판의 오염심화로 저하된 집진성능 회복을 위해 유지보수에 소요되는 비용이 증가하게 되고, 유지보수 후에도 초기 집진성능의 80% 정도의 회복만이 가능하다. 또한 건식이기 때문에 수용성 미스트나 친수성 유해가스(암모니아, SOx, 황화수소 등) 제거가 어렵다는 단점이 있다. 여재필터의 경우는 케미컬필터 등의 도입으로 유해가스를 동시에 처리할 수 있으나 여재의 막힘에 의해 초기 처리풍량의 유지가 어렵고, 진동이 발생하며, 모터의 과부하에 의한 고장의 위험이 높다. 또한 폐기될 여재의 산업폐기물 처리문제 등을 유발시키며 유지관리상의 잦은 교체와 분진 발생 및 높은 압력손실의 문제점이 있어서 제한된 영역에서만 채용되고 있다.

분진을 수반하는 유해가스 혹은 고습가스 등을, 액체에 의해 세정하고 청정하게 하는 것이 세정집진법(wet scrubbing)이다. 즉, 세정집진이란 입자상 및 가스상 오염물질을 분사된 물이나 기타 용해제와 접촉시켜 이 세정액에 부착/용해시켜 공기로부터 분리하는 조작을 말한다. 이 세정집진법은 여재필터나 전기집진기와 같은 건식 에어필터와는 달리 분진과 가스를 동시에 제거할

† (주)이앤에치테크 실내환경 연구소
E-mail : clearman@enhtek.com
TEL : (02)549-7230 FAX : (02)549-7245
* 한국생산기술연구원 에어로졸 · 필터연구실
** 한양대학교 의과대학 산업의학교실

수 있고, 고온 다습한 가스 중의 분진에 대해서는 온도를 내림과 동시에 입자를 응집시켜 분진의 분리를 용이하게 하는 등의 이점이 있다. 그러나, 널리 사용되고 있는 기존의 기계식 세정집진기는 서브마이크론 입자(1㎛ 이하)에 대해서는 10% 미만의 매우 낮은 효율을 보유하고 있어 집진이 거의 이루어지지 못하고 있다. 이는 기계식 세정집진기의 주 분진제거 메카니즘이 액적과 분진간의 관성충돌(inertial impaction)에 크게 의존하고 있기 때문이다. 따라서, 액적과 분진을 반대극성으로 하전(charging)시킴으로써 서브마이크론 입자의 높은 전기이동율을 이용한 정전침착(electrostatic deposition)법을 도입하면 크게 개선될 수 있고 노즐의 분무유량을 저감시킴으로써 기존 세정집진기의 물소모량을 줄일 수 있어 운전비용 및 처리비용의 감소가 예상된다.

2. 내용

2.1 입자 반응 매커니즘

세정집진장치는 세정액을 분산하거나 함진가스를 분산시켜 이때 생성된 액적, 액막, 기포 등에 의해서 함진가스 중의 미립자를 분리포집하는 장치이다. 이 세정집진장치내의 수액적과 입자간에 작용하는 힘은 Fig. 1에 도시된 바와 같이 관성력, 정전기력, 확산력, 열영동력, 응집력, 중력 등이 있으며 관성력과 중력은 입자 지름(입경)이 클수록 크며, 정전력과 확산력, 응집력은 입경이 작을수록 큰 집진작용력을 발휘한다.

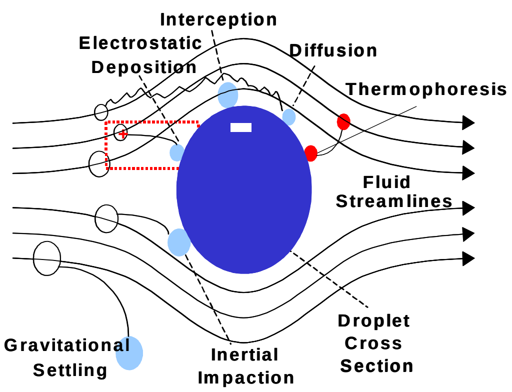

Fig. 1 액적에 의한 분진제거 메커니즘

2.2 관성충돌

세정집진에서는 생성된 물방울(droplet), 액막(Liquid film)과 먼지와의 접촉에 의해 분리가 행해지지만 먼지 입경이 1㎛이상의 경우는 관성충돌이 가장 지배적인 집진작용이다.

실제 액적에 충돌한 먼지입자의 총수와 액적에 충돌 가능한 먼지 입자 총수의 비를 충돌에 의한 집진효율(ηI)이라하며 다음 (2-1)식으로 나타낼 수 있다.

$$\eta_I = \frac{\text{먼지타격면적}}{\text{물방울분사면적}} = \left(\frac{d_p}{d_w}\right)^2 \qquad (2\text{-}1)$$

따라서 먼지의 입경이 커지면 운동량이 커져 높은 관성력을 나타내 유선으로부터 이탈해 장해물에 충돌(impaction)하기 때문에 액적분사면적 중에 청정면적이 넓어져 타격효율(Target efficiency)은 좋아진다. 반면에 입경이 작아지면 관성력이 상대적으로 작아져 유선과 함께 발산됨으로 타격효율이 좋아진다.

2.3 확산작용(diffusion)

함진가스중의 먼지입자농도에 차이가 있으면 입자는 고농도영역에서 저농도 영역으로 확산이동하여 입자농도를 균일화하려고 하는 성질이 있다. 입자가 브라운운동을 하는 정도가 아주 적게 되면, 이 확산작용에 의해 입자는 물방울표면에 접촉 부착하면서 분리된다. 특히 0.1㎛이하의 미세한 입자의 분리시 이용되는 작용은 확산작용에 의한 부착이 지배적이다.

입경 0.5㎜ 이하인 입자는 기체분자와 충돌해 유선과 관계없이, 브라운운동을 불규칙하게 하다가 최후에는 액적에 충돌되어 분리된다. 이때 미세입자의 브라운 운동에 의한 집진효율은 PELECT 변수(Pe)로 나타내고 확산에 의한 집진효율(ηd)은 다음과 같다.

$$P_e = \frac{3\pi\mu V d_p d_w}{C_f K_b T} \qquad (2\text{-}2)$$

$$\eta_d = f\left(\frac{1}{P_e}\right) \qquad (2\text{-}3)$$

먼지의 입자지름에 따른 물방울과의 부착량이 많아질수록 집진율도 높아진다.

2.4 응집작용

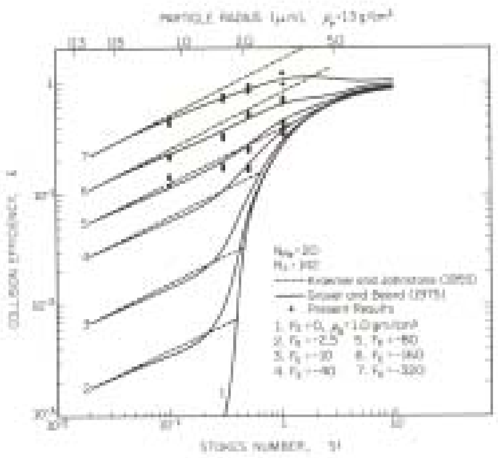

Fig. 2 입자의 하전액적으로의 정전침착효매연율(액적 Reynolds 수 NRe=20).

매연에는 일반적으로 증기, 무수황산, 기타유기물질 등이 함유되어 있으며, 함진가스온도가 내려가면 이들의 응축성분이 먼지 표면에 흡착 및 흡수되며, 먼지 입자는 서로 응집해서 큰 이차입자를 형성한다. 또 함진가스를 세정하면 함진가스 온도는 거의 물노점에 도달하기 때문에 먼지표면은 응축수로 덮여지는 형태로 되어져 응집은 효과적이 된다. 따라서, 세정집진시 함진가스 온도를 될 수 있는대로 낮게하고, 함진가스를 증습한 상태에서 처리하면 높은 집진율을 얻기위한 유효한 수단이 된다.

미세입자는 물방울과 함께 형성되는 유선에 의해 이동하면서 분리되는데 물방울과 미세입자의 중심과 거리(0.5dp)보다 짧게 되면 입자는 물방울과 직접충돌되어 집진되어진다.

2.5 정전 침착

쿨롱력의 크기를 대별하는 무차원 수인 F_E=0인 중성의 경우로부터 F_E가 커져 정전인력이 증가할수록 무차원 입자크기를 대별하는 스톡스수 St가 약 0.2보다 작은 영역에서 크게 증가한다.

3. 실험장치 및 실험

3.1 청정기류공급 풍동장치 구조

본 연구에 개발된 정전식 세정집진기의 성능분석 하드웨어 구성요소인 청정기류 공급 정밀 풍동에 대한 도식은 Fig. 3에 도시되어 있다. 그림에서 ‘Electrostatic wet scrubber' 부분이 정전식 세정집진장치가 들어갈 부분이다. 정전식 세정집진기가 설치된 부분으로부터 먼 하류에 설치된 원심 송풍기에 의해 작동되는 흡입형 풍동이다.

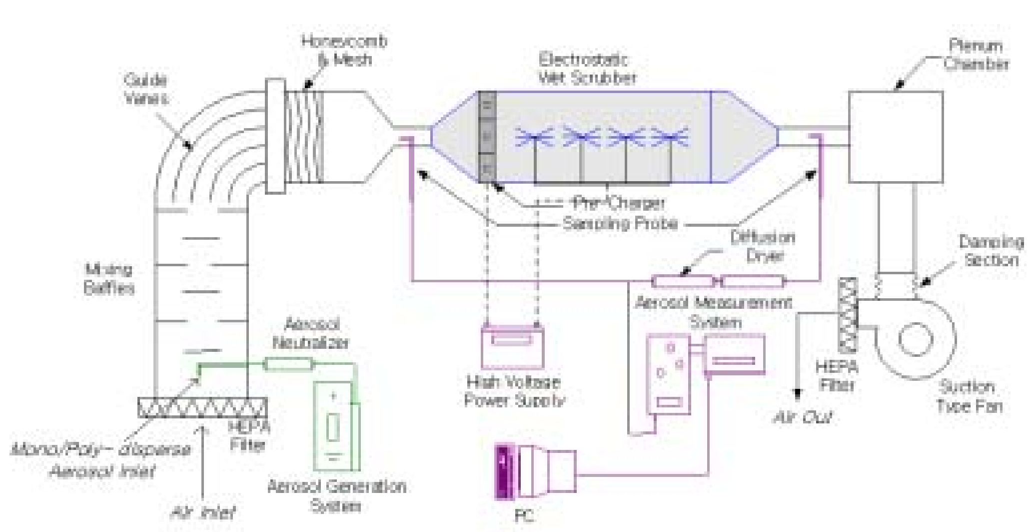

Fig.3 schematic of diagram

원심 송풍기의 팬은 3마력의 전기 모터에 의해 구동된다. 팬에 의한 기계적인 진동 및 유동의 교란들이 상류로 전파되는 것을 최소화하기 위하여 원심 송풍기와 이와 연결된 덕트사이에 완충부를 두고, 원형덕트와 시험부 사이에 플레넘 챔버(plenum chamber)를 설치 하였다.

세정집진기가 설치되지 않은 아크릴 덕트가 설치된 상태에서 집진기를 지나는 평균 공기 속도가 0에서 10㎧사이에서 가변 될 수 있도록 원심 송풍기의 전기모터의 회전속도를 0에서 60㎐사이에서 조절할 수 있도록 인버터를 장착하였다.

대기중의 공기는 풍동으로 흡입되는 순간 15㎝ 두께의 고성능 HEPA필터(High Efficiency Particulate Air 필터 : 제원 610㎜×915㎜×150㎜×, 26㎤/min에서의 0.3㎛ DOP Penetration 0.015%)를 통과하면서 대기중의 입자들이 제거되고 청정상태로 유입된다. 입자 발생시는 필터로부터 하류방향으로 약 30㎝ 떨어진 곳에서 외경 0.5inch의 스테인레스관을 통하여 유동의 역류 방향으로 주입되는 Carnauba wax 에어로졸과 혼합되고 발생지점으로부터 10㎝ 하류에 설치된 차폐판들을 통과하면서 더 좋은 혼합이 발생하도록 하였다. 마지막 차폐판을 지난 뒤에 유동은 90°로 휘어지게 되고 곡부내에서 바깥면으로의 유동의 몰림을 막기 위하여 가이드벤(Guide vane)을 여러개 설치하여 유선의 흐름을 균일하게 하였다. 곡부를 지난 유동은 곧바로 난류 감소부(Turbulence reducing section)를 지나게 된다.

난류 감소부에서는 (1) 차단율 0.34의 #16 메쉬(mesh), (2) 셀지름 9.53㎜, 셀길이 100㎜를 가진 두께가 얇은 하니콤(honeycomb), (3) 차단율 0.34의 #24 메쉬가 유동방향을 따라 구성되어 있고 #16 메쉬와 하니콤은 12.5㎝×53.4㎝의 단면을 가지고 있으며 길이는 0에서 100㎝사이에서 가변될 수 있다.

3. 1 하전셀의 수학적 모델링

하전셀로 유입된 입자들은 코로나와이어에 인가된 고전압에 의해 형성된 전기장(electric field) 내에서 코로나방전에 의해 생성된 단극성 공기이온(unipolar air ion)들에게 노출되어 단극성 확산하전(unipolar diffusion charging)과 단극성 전기장하전(unipolar field charging)이 동시에 발생하는 단극성 복합하전(unipolar combined charging)을 받게 된다. 단극성 확산하전은 외부적으로 인가된 전기장이 0일 경우 적용되고 단극성 이온들의 열적 운동(thermal motion)에 의한 확산에 의하여 이온들이 입자표면에 부착된다. 단극성 전기장하전은 인가된 전기장이 매우 강하여 단극성 이온들의 이동 및 침착이 전기장에 의해 지배될 경우에 적용된다(Liu and Kapadia, 1978).

3. 2 입자하전율 모델

본 연구에서는 연속체 특성영역의 단극성 복합하전모델인 Fjeld and McFarland(1989)의 모델을 선택하였다. Fjeld and McFarland(1989)는 다음과 같은 무차원 전기장강도 w 와 무차원 입자전하 ν 의 범위에 따라 개별적으로 입자하전모델의 적용을 제안하였다.

$$w = -\frac{q_e d_p E}{2kT}, \qquad \nu = \frac{q_p q_e}{2\pi\varepsilon_0 d_p kT} \qquad (3\text{-}1)$$

여기서 qe는 전자전하 또는 기본전하(elementary charge)(1.6×10-19 C), dp 는 입자지름(m), E는 하전셀내의 국소 전기장강도(V/m), k는 Boltzmann상수(1.38×10-23 J/K), T는 절대온도(K), qp는 입자의 전하량(C), ε_0는 자유공간의 유전율(permittivity) (8.85×10-12 F/m) 이다. 개별적 적용범위 및 해당하는 입자하전모델은 다음과 같다.

$$-\frac{dq_p}{dt} = \left(-\frac{dq_p}{dt}\right)_{Fucks} \quad \text{for } 0 \le \omega \le 0.1 \qquad (3\text{-}2)$$

$$-\frac{dq_p}{dt} = \left(-\frac{dq_p}{dt}\right)_{P-M} \quad \text{for } \omega \ge 10 \qquad (3\text{-}3)$$

$$-\frac{dq_p}{dt} = 2\pi d_p kTKN_i \exp\left(\sum_{ij} a_{ij}\nu^i(\ln\omega)^j\right)$$
$$\text{for } 0.1 \le \omega \le 10 \text{ and } 0 \le \nu \le 20 \qquad (3\text{-}4)$$

$$-\frac{dq_p}{dt} = \left(-\frac{dq_p}{dt}\right)_{Fucks} + \left(-\frac{dq_p}{dt}\right)_{P-M}$$
$$\text{for } 0.1 \le \omega \le 10 \text{ and } \nu \ge 20 \qquad (3\text{-}5)$$

여기서 t 는 시간, dp 는 입자지름, k 는 볼쯔만상수, T 는 절대온도, K 는 양의 공기이온의

전기적 유동율, Ni 는 국소 이온수농도, qe 는 전자전하, E 는 국소 전기장강도, ε_0는 자유공간의 유전율이다.

2. 전기장강도 및 이온수농도

하전셀내의 국소 전기장강도 E 와 이온수농도 Ni 를 구하기 위하여 다음의 정전장 지배방정식을 고려하였다.

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_j^2} = -\frac{q_e N_i}{\varepsilon_0} \quad (3\text{-}5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}\left(q_e N_i K \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} \right) = 0 \quad (3\text{-}7)$$

여기서 Φ는 전기포텐셜이다. 포아송방정식 식 (3-6)에 적용된 유한체적법(Finite volume method)을 제외하면 본 연구에 도입된 경계조건 및 수치해석방법은 근본적으로 McDonald et al.(1977)의 연구와 동일하다. 계산영역은 대칭성으로 인하여 하전셀의 제1사분면을 선택하였고 채택된 격자계는 27(x)×21(y)이다.

3. 4 입자운동방정식

하전셀에서의 최종 입자하전량을 얻기 위해서는 입자의 궤적을 추적해야만 한다. 하전셀내의 입자궤적은 코로나풍 효과(corona wind effect)를 받는 것으로 알려져 있다. 아래와 같은 초기조건을 가진 입자운동방정식을 고려하였다.

$$\frac{dx_p}{dt} = U_p, \quad \frac{dy_p}{dt} = V_p \quad (3\text{-}8)$$

$$\frac{dU_p}{dt} = \frac{1}{\tau_p}(U - U_p) + \frac{B q_p E_x}{\tau_p} \quad (3\text{-}9)$$

$$\frac{dV_p}{dt} = \frac{1}{\tau_p}(0 - V_p) + \frac{B q_p E_y}{\tau_p} \quad (3\text{-}10)$$

$$x(0) = -s,\ y(0) = y_0,\ U_p(0) = U,\ V_p(0) = 0,\ q_p(0) = 0 \quad (3\text{-}11)$$

여기서 xp와 yp는 x와 y 방향의 입자위치, Up와 Vp는 입자속도, τ_p는 입자이완시간, B 는 입자의 기계적 유동율, Ex와 Ey는 x와 y방향의 전기장성분, s는 하전셀 폭의 절반, y0는 하전셀 입구에서의 입자의 y 좌표이다.

입자하전율공식, 입자운동방정식을 연립하여 Fourth order adaptive-stepsize Runge-Kutta scheme(Press et al., 1986)을 적용하였다.

본 수치해석에 있어서는 본 연구의 시험입자로 사용되는 DOP 입자를 선택하였으며 수치계산에 사용된 유전상수(dielectric constant)는 5.1이며 밀도는 983 kg/m3이다.

3. 5 수치해석 결과 및 분석

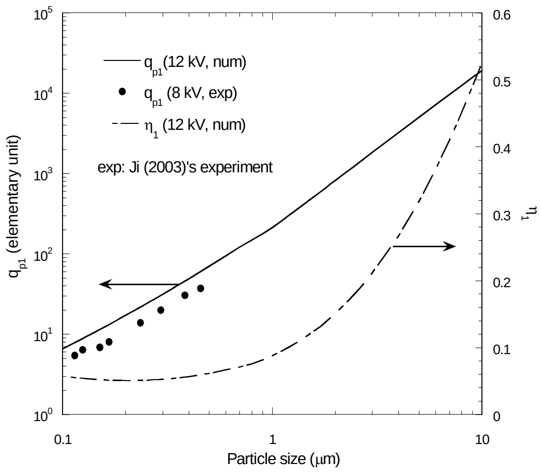

Fig. 4 Variations of the particle charge and collection efficiency of the pre-charger with respect to particle size (U=2.5 m/s)

Fig. 4는 입자크기에 따른 하전셀의 평균 입자하전량 qp1과 하전셀의 집진효율 η_1 을 각각 보여주고 있다. 평균 입자하전량은 하전셀의 출구면을 통과하는 입자들의 전하량들을 앙상블 평균(ensemble average)을 취함으로써 산출하였다. 그림으로부터 0.1 μm 입자의 경우 평균 입자하전량은 6.6 elementary unit, 1 μm 입자의 경우 213.1 elementary unit, 10 μm 입자의 경우 19260 elementary unit로 얻어져서 1가의 양의 공기이온들이 각각 6.6, 213, 19260 개가 평균적으로 부착되고 있음을 알 수 있다. 여기서 1 elementary unit는 전자 한개가 가진 전하량에 해당하며 1.6×10-19 C(쿨롱으로 발음함)이다. 그림에는 수치해석의 검증을 위한 기존의 실험과의 비교를 위하여 지준호(2003)의 실험결과가 함께 도시되어

있다. 여기서, 지준호의 실험조건은 V1=8kV, W1=40mm, L1=30mm이다. 그림으로부터 계산결과들은 입자크기에 따른 입자하전량의 크기 및 변화 경향에 있어 실험결과들과 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

한편, 그림 Fig. 4는 하전셀의 집진효율도 도시되어 있는데, 0.22 μm 입자의 경우에 집진효율 0.051을 최소정점으로 하여 0.1 μm 입자의 경우 0.058, 1 μm 입자의 경우 0.088, 10 μm 입자의 경우 0.526를 보여주고 있음을 알 수 있다. 따라서, 10 μm 입자의 경우에는 정전식 세정집진기로 유입되는 입자들의 절반이 세정집진부가 아닌 하전셀, 즉 pre-charger에서 포집될 수 있다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

실험 및 해석 결과에 근거한 입자하전장치 및 정전노즐의 최적 설계조건 도출 결과는 다음과 같다.

(1) 와이어-평판형 pre-charger의 입자하전성능 및 집진효율에 대한 수치해석을 수행하고 그 결과 0.1~10 μm 입자크기에 대한 입자하전량 효과를 알 수 있다.

(2) 크기가 1 μm보다 작은 서브마이크론 입자들은 pre-charger에서 10 % 이하로 집진되어 입자손실이 10 % 이하임을 확인하였다.

(3) 정전분사노즐의 수액적 하전특성 실험을 수행하고 그 결과 정전분사노즐을 설계하는데 필수적인 링전극 인가전압(8KV) 및 주수량에 따른 수액적 하전량(2LPM)을 도출하였다.

(4) 양극으로 하전된 입자와 음으로 하전된 수액적간의 관성충돌 및 정전침착에 따른 집진효율을 알 수 있다.

(5) 실험 및 해석 결과를 바탕으로 입자하전장치와 정전노즐의 최적설계안을 도출하였다.

참고문헌

(1) Bacon GH, Li R & Liang KY, 1997, "Control Particulate and Metal HPAs",Chemical Engineering Science

(2) C. David Cooper, F.C. Alley, 1994, "Air Pollution Control : A Design Approach", Waveland Press, Inc.

(3) Chang, M.B., Leong, K.H. and Stukel, J.J., 1987, "Electrostatic and Inertial Collection of Aerosol Particles by Water Droplets", Aerosol Science and Technology, Vol. 6, pp. 53-61.

(4) Carnahan, B., Luther, H.A. and Wilkes, J.O., 1969, Applied Numerical Methods, John Wiley&Sons, New York.

(5) C. Lanzerstorfers, 2000, "Solid/Liquid - Gas Seperation with Wet Scrubbers and Wet Electrostatic Precipitators" Filtration Separation

(6) Fjeld, R.A. and McFarland, A.R., 1986, "Bipolar Charging in the Transition Regime", J. Aerosol Science, Vol.17, pp.653-667.

(7) Howard E. Hesketh, 1995, "Predict Particle Collection in Spray towers" Chemical Engineering Progress

(8) Liu, B.Y.H. and Kapadia, A., 1978, "Combined Field and Diffusion Charging of Aerosol Particles in the Continuum Regime", J. Aerosol Science, Vol.9, pp.227-242.

(9) McDonald, J.R., Smith, W.B., Spencer III, H.W. and Sparks, L.E., 1977, "A Mathematical Model for Calculating Electrical Conditions in Wire-Duct Electrostatic Precipitation Device", J. Applied Physics, Vol.48, pp.2231-2243.

(10) Martin Crawford, 1976, "Air Pollution Control Theory" McGRAW-Hill, Inc.

(11) Okazaki, K. and Willeke, K., 1987, "Transmission and Deposition Behavior of Aerosols in Sampling Inlets", Aerosol Science and Technology, Vol.7, pp.275-283.

(12) Reist, P. C., 1993, "Aerosol Science and Technology, 2nd ed"

(13) Tue Johannessen, Jan A. Christen, Ole Simonsen, Hans Livbjerg, 1997, "The dynamic of aerosol in condensational scrubber", Chemical Engineering Science

(14) William C. Hinds, 1982, "Aerosol Technology" John Wiley & sons.