PD5) 다분산 에어로졸에 대한 전기집진 효율의 해석해
Analytic Solution of Electrostatic Precipitator's Collection Efficiency for Polydisperse Aerosol

1)정창훈, 2)박현설, 3)이규원
1)경인여자대학 산업환경공학부, 2)한국에너지기술연구원,
3)광주과학기술원 환경공학과

1. 서론

전기집진기(ESP)는 보일러, 소각로등 많은 산업 공정에서 발생되는 입자상 물질을 제거하는데 일반적으로 사용되어 왔다. 가장 널리 쓰이는 ESP의 집진효율을 예측하기 위한 수식으로는 Deutsch-Anderson 식으로 다음과 같다.

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{A_c V_e}{Q}\right) \tag{1}$$

여기서 η는 포집효율, A_c는 집진판의 표면적(surface area), V_e는 전기집진기 내 입자의 유효 이동속도(effective migration velocity), 그리고 Q는 단위면적을 통과하는 가스의 부피 유량이다. 비록 Deutsch-Anderson식이 ESP의 설계에 있어 많이 이용되고 있으나 이 식은 입자의 크기가 단분산이라는 가정하에 사용되고 있다(Bai et al., 1995).

Bai et al.(1995)는 다분산 에어로졸의 포집효율을 예측할 수 있는 수치적인 모델을 개발하였다. 본 연구에서는 커닝햄 보정계수와 입자 하전식을 간단화(simplify)하여 다분산 에어로졸의 전기집진기에 의한 포집 효율 및 제거되는 입자의 분포를 해석적으로 구하고 그 결과를 수치적인 결과와 비교하였다.

2. 연구 방법

평판-평판 혹은 와이어-평판형 전기집진기에서의 물질 평형식(mass balance equation)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$U_{av}\frac{d(v)}{dx} = -2\frac{V_e\, n(v)}{w} \tag{1}$$

여기서 U_{av}는 평균 먼지흐름 속도, v는 입자의 부피, x는 수평거리(axial distance), $n(v)$는 입자의 개수농도, w는 평판사이의 거리, V_e는 대전된 입자가 집진극을 향하여 이동해 가는 유효 이동속도(effective migration velocity)를 각각 나타낸다. 이동속도 V_e는 입자의 전하량 계산식인 Cochet의 식에 의해 다음과 같이 표시된다.

$$V_e = \frac{qE_cC_c}{3\pi\mu d_p} = \left[(1+2\lambda_i/d_p)^2 + \frac{2}{1+2\lambda_i/d_p}\,\frac{\chi-1}{\chi+2}\right]\frac{\varepsilon_0 E_c E_\infty C_c d_p}{3\mu} \tag{2}$$

여기서 q는 입자의 전하량, ε_0는 투과율(permitivity of free space), E_c는 대전부의 전기장 세기, E_∞는 집진극부의 전기장 세기, μ는 유체의 점성계수, λ_i는 이온의 자유 평균 경로(mean free path), χ는 입자의 유전상수, 그리고 C_c는 커닝햄 입자 보정계수이다.

본 연구에서는 커닝햄 보정계수와 입자의 전하량을 입자의 크기 구간에 따라 다음과 같이 간략화하였다. 여기서 λ는 공기의 자유 평균 경로이다.

$$V_e = \frac{4(3.288)\varepsilon_0 E_c E_\infty \lambda_i^2 \lambda}{3\mu d_p^2} \qquad \text{for} \quad d_p < 0.05\ \mu\text{m} \tag{3}$$

$$V_e = \frac{\varepsilon_0 E_c E_\infty x d_p}{(x+2)\mu} \qquad \text{for } d_p > 1.0\ \mu\text{m} \qquad (4)$$

$$V_e = \frac{3(2.609)\sqrt{2\lambda}\, x \varepsilon_0 E_c E_\infty d_p^{0.5}}{3\mu(x+2)} \qquad \text{for intermediate region} \qquad (5)$$

Fig.1은 식(2)에 의한 이동속도(V_e)와 본 가정을 이용한 구간별 이동속도 값을 비교한 것이다. Fig.1에서 볼 수 있듯이 각 구간에서 근사된 이동속도값과 실제 이동속도 값이 잘 일치하는 것을 알 수 있다.
입자의 크기분포가 대수 정규분포를 갖는다는 가정 하에 구해진 식을 정리하면 각 구간에 대하여 모멘트 관계식을 유도할 수 있다(Lee et al., 1984). 이 모멘트 관계식을 정리하면 다음과 같은 형태의 해석적인 식을 구할 수 있다.

$$\frac{N}{N_0} = \exp\left[\frac{1-\sqrt{2\zeta a_0 b_0 t(b_0^2-1)+1}}{b_0^2-1}\right]$$

$$\sigma_g = \exp\sqrt{\frac{2}{\alpha^2}\ln b}, \qquad d_g = a^{1/\alpha} \qquad (6)$$

여기서 α, ζ는 입자 구간에 따라 계산되어지는 계수, d_g는 기하학적 평균직경, σ_g 는 기하학적 표준편차, 그리고 a와 b는 각각 입자의 기하학적 평균직경, 기하학적 표준편차의 함수이다. 식(6)으로부터 시간에 따른 입자의 크기분포변화를 해석적으로 구할 수 있다. Fig.2는 전기집진기를 통과하면서 제거되는 입자의 개수 농도 변화를 본 연구에서 구한 해석적인 식과 Bai et al.(1995)에 의해 구한 수치적인 결과와 비교한 것이다. Fig.2에서 보듯이 해석적인 결과와 수치적인 결과가 서로 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 평행 평판 전기집진기를 통과하는 다분산 에어로졸의 크기 분포 변화를 해석적으로 구하였다. 구하여진 해석해는 수치적인 방법에 의해 구해진 해와 비교하여 보았고 두 결과가 서로 잘 일치함을 알 수 있었다.

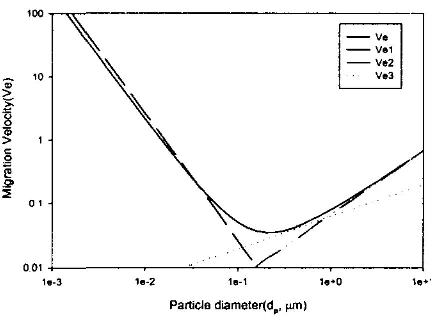

Fig.1. The comparison of the migration velocity between original and approximated formula.

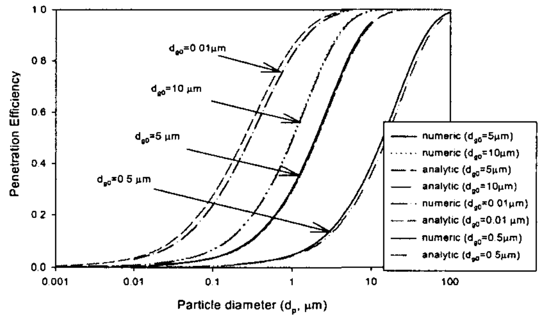

Fig.2. The comparison of the analytic and numerical solution for ESP.

참고문헌

Bai, H., Lu, C., and Chang, C.L.(1995) A Model to Predict the System Performance of an Electrostatic Precipitator for Collecting Polydisperse Particles., J. Air Waste Management Assoc., 45, 908-916.

Lee, K.W., Chen, H., and Gieseke, J.A.(1984) Log-normally preserving size distribution for Brownian coagulation in the free-molecular regime., Aerosol Sci. Technol., 3, 53-62.