

모멘트법을 이용한 AC 전기장 내의 단극성 입자의 전기응집 해석

지 준 호* · 황 정 호**
(1999년 9월 16일 접수)

Analysis of Electrical Coagulation of Unipolar Charged Particles in an Alternating Electric Field Using Moment Method

Jun-Ho Ji and Jung-Ho Hwang

Key Words: Alternating Electric Field(AC 전기장), Moment Method(모멘트법), Unipolar Charged Particle(단극성 하전 입자), Coagulation(응집), Collision Efficiency(충돌효율)

Abstract

A numerical study has been carried out on the evolution of the particle size distribution for unipolar charged particles that experience coagulation in an alternating electric field. The collision frequency function of charged particles was analytically derived. The log-normal size distribution function is utilized for representing a poly-disperse size distribution and the moments of the particle size distribution are used to solve the general dynamic equation considering only AC electric force effect. The results are compared with the effects of brownian coagulation.

1. 서 론

입자의 크기는 입자의 여러 물리, 화학적 특성과 밀접한 관계가 있다. 특히 $1\ \mu\text{m}$ 이하의 미세 입자들은 환경 분야에서 관심의 대상이 되고 있는데, 대기 중 장시간 부유하여 시정을 감소시키거나 중금속이나 다른 유해한 기체상 성분들과 화학 반응을 통해 2차 오염원으로 작용하기도 한다. 또, 인체에 유입되는 경우 폐 깊숙이 침투해 폐포에 장기간 머물러 발암성이나 돌연변이의 원인이 될 수 있다고 알려져 있다. 최근에는 이런 유해한 미세 입자들을 좀 더 엄격히 규제하려는 움직임들이 나타나고 있다. 미세 입자의 유해성에 대한 인식을 보여주는 예로, 직경 $10\ \mu\text{m}$ 이하의 분진 총량을 규

제하는 PM10이나 $2.5\ \mu\text{m}$ 이하를 대상으로 하는 PM2.5의 대기 규제는 더 작은 입자 크기를 대상으로 이동하고 있다. 또 이런 추세는 미세 입자의 정량화에 용이한 방법인 수농도 기준 규제의 움직임으로 나타나고 있다.

미세 입자는 주로 연소 생성물에서 기인하고, 대기로 배출되기 전에 정전 집진기나 백필터 등의 입자포집장치를 통해 걸러진다. 정전 집진기는 주로 화력 발전소의 배출 가스를 집진하는데, 총 질량 집진 효율은 99% 이상인 반면 미세입자 ($0.1\sim 1\ \mu\text{m}$)의 경우는 85%로 상대적으로 효율이 낮다.⁽¹⁾ $1\ \mu\text{m}$ 이하 입자들의 집진 효율이 상대적으로 낮은 이유는 집진 효율을 결정하는 지배적 인자인 포화화전량이 입자 표면에 비해하기 때문이다. 이런 문제점을 해결하기 위한 방법으로 최근에는 배출 입자들을 포함하는 유동에 AC 전기장을 인가하여 미세 입자를 제거가 용이한 큰 입자로 성장시키려는 연구가 진행되고 있다.

AC 전기장 내에서 입자 응집 과정을 살펴보면

* 연세대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 연세대학교 기계공학과

E-mail : hwangjh@yonsei.ac.kr

TEL : (02)2123-2821 FAX : (02)312-2159

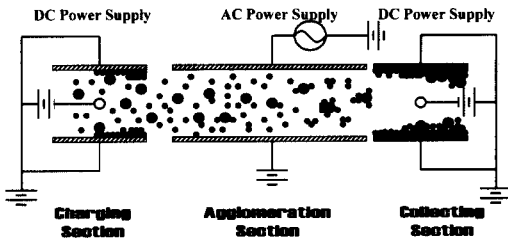


Fig. 1 Schematics of agglomerator

다음과 같다. 하전부에서 코로나 방전을 통해 포화 하전된 입자는 AC 전기장으로 유입된 후, 교류 주파수와 입자 하전량에 따라, 진행방향에 수직으로 진동하며 전장을 빠져나간다. 포화하전량은 입자의 표면적에 비례하므로 하전량이 많은 큰 입자는 진행 축에 수직으로 빠른 속도로 먼 거리를 왕복해서 이동하고, 작은 입자는 상대적으로 느린 속도를 갖고 짧은 거리를 이동한다. 이 과정에서 입자들 간에 상대적인 속도 차이가 발생하고 충돌과 부착이 일어난다. 결국 입자 크기분포는 큰 입자들의 비율이 증가하는 방향으로 이동하게 되고 반대로 미세 입자의 수농도는 감소한다(Fig. 1 참조).

전기장 응집을 이용해 입자 크기를 조절하는 연구는 AC와 DC 전기장을 이용하는 여러 방식으로 진행되고 있는데, 아직까지는 실험실에서 수행하는 수준에 머물러있다. Kobashi⁽²⁾는 AC 전기장 내의 입자 거동에 대한 이론과 실험적 연구를 수행했다. 충돌 빈도함수의 결정을 위해 하전입자 간의 충돌 효율을 계산한 후, 비대칭(asymmetric) 양극성(bipolar) 분포의 입자들을 대상으로 응집 효율을 이론적으로 계산했고, 1 ~ 10 μ m 입자들은 양으로, 상대적으로 큰 10 ~ 100 μ m 입자들은 음으로 하전시켜 실험을 수행했다. Lehtinen 등⁽³⁾은 충돌빈도함수를 결정하기 위해 전기력, 항력, 쿨롱력을 고려해 충돌 효율을 계산했고 작은 입자와 큰 액적 입자가 다른 극성으로 하전된 경우의 입자 크기 분포 변화를 예측했다. 또 0.3 ~ 10 μ m의 양극성 비산재 입자를 대상으로 한 Mitchner와 Self,⁽⁴⁾ 평균지름이 4 μ m이고 표준편차가 약 2.8인 입자를 대상으로 실험한 Hautanen 등⁽⁵⁾의 연구, 석회분말을 양극성으로 대전시킨 후 실험한 Kildeso 등⁽⁶⁾이 있다. 특히 Laitinen 등⁽⁷⁾은 양극성 응집의 효과

를 증대시키기 위해서 하전부와 응집부 사이에 혼합부를 설치하여 극성이 다른 입자들이 충분히 섞일 수 있는 구조를 만들었다. DC 전기장을 이용한 연구로 와이어-와이어 형상의 하전부와 응집부를 통합한 구조에 NaCl 입자를 대상으로 실험한 Gutsch 등⁽⁸⁾과 4개의 전극봉을 가진 응집기를 이용해 응집 실험을 수행한 Watanabe 등⁽⁹⁾이 있다. 국내에서는 박종인 등⁽¹⁰⁾의 화염에서 생성된 매연에 AC 전기장을 적용한 실험과 김연승 등⁽¹¹⁾의 상온에서 NaCl을 대상으로 수행한 실험이 있지만 아직은 정성적인 결과를 제시하는데 그치고 있다.

본 논문은 Fig. 1의 시스템 중 AC 입자 응집부를 대상으로 한 이론적 연구 결과이다. 응집부로 들어가는 입자들은 포화 하전되어 있으며 하전 상태는 단극성(Unipolar)으로 가정하였다. AC 전기장 내에서 입자들의 크기분포변화를 예측하기 위해 입자거동방정식(GDE)를 해석했으며 이때 모멘트법을 이용하였고 입자크기분포는 로그정규분포로 가정하였다.

2. 전기장 응집의 충돌빈도함수 유도

다분산 입자의 응집 현상은 비선형 편미적분 방정식으로 표현된다.⁽¹²⁾

$$\frac{\partial n(v, t)}{\partial t} = \frac{1}{2} \int_0^v \beta(v - \tilde{v}, \tilde{v}) n(v - \tilde{v}, t) \times n(\tilde{v}, t) d\tilde{v} - n(v, t) \int_0^\infty \beta(v, \tilde{v}) n(\tilde{v}, t) d\tilde{v} \quad (1)$$

여기서 n 은 입자 크기분포함수이고 β 는 충돌빈도함수, v, \tilde{v} 는 각각 충돌대상 입자의 체적이다. 응집을 해석하려면 충돌 빈도에 의한 두 입자의 응집 효율을 나타내는 충돌빈도함수를 알아야 한다. Kobashi⁽²⁾는 AC 전기장 내의 응집 현상이 중력 침강에 의한 입자 응집과 유사하다고 가정하고, Fuchs가 제시한 중력 응집에 관한 충돌빈도함수 식을 전기장 응집에 적용했다.

$$\beta(r_p, \tilde{r}_p) = Q(r_p, \tilde{r}_p) g(r_p, \tilde{r}_p) \quad (2)$$

여기서 Q 는 충돌 단면적으로 $\theta\pi(r_p + \tilde{r}_p)^2$ 로 정의되고, r_p, \tilde{r}_p 는 충돌입자들의 반경이다 ($v = \frac{4}{3}\pi r_p^3, \tilde{v} = \frac{4}{3}\pi \tilde{r}_p^3$). 충돌단면적은 작은 입자(\tilde{r}_p)가 유동의 상류에서 출발하여 큰 입자(r_p)와 충돌할 수 있는 초기 위치의 단면적을 의미한다(Fig. 2 참조). θ 는 충돌효율이며, 큰 입자가 작은 입자와 충돌할 때 유선을 고려하지 않고 직선 운동 후에 충돌한다고 가정한 충돌단면의 보정치이다. g 는 두 충돌 대상 입자의 종말침착속도 (terminal settling velocity)의 절대값의 차이로 $|u - \tilde{u}|$ 이다.

종말침착속도는 입자운동방정식을 통해 결정해야 한다. 단일 입자에 대한 해석이 전체 입자들의 거동을 대표하고 입자의 운동이 유선에서 벗어나지 않는다고 가정하면, 전하 q 를 띤 반경 r_p , 질량 m_p 인 입자가 교류 전기장 $E(t)$ 내에 존재하는 경우 운동방정식은 다음과 같다.

$$m_p \frac{du}{dt} = qE(t) - \frac{6\pi\mu r_p u}{C_c} \quad (3)$$

AC 전기장 세기 $E(t) = E_0 e^{i\omega t}$ (E_0 는 최대 전기장 세기, ω 는 주파수 각속도)를 위 식에 대입하면,

$$u = u_0 e^{i(\omega t - \phi)} \quad (4)$$

이때

$$u_0 = \frac{qE_0 C_c}{6\pi\mu r_p [1 + \omega^2 \tau^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (5)$$

이고, $\phi = \tan^{-1} \omega\tau$ 이다. 여기서 ϕ 는 AC 전기장과 위상차를 의미하고, u_0 는 한 주기에서 입자의 최대속도 즉, 정현파의 진폭을 의미한다. τ 는 멈춤시간(relaxation time 또는 stopping time)으로 $m_p C_c / 6\pi\mu r_p$ 이다. $u = dx/dt$ 이므로 입자의 변

위는 다음과 같다.

$$x = x_0 e^{i[\omega t - (\frac{\pi}{2} + \phi)]} \quad (6)$$

이 때

$$x_0 = \frac{u_0}{\omega} = \frac{qE_0 C_c}{6\pi\mu r_p \omega [1 + \omega^2 \tau^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (7)$$

이고, x_0 는 한 주기당 진행되는 최대 거리를 의미한다. 주파수가 10^4 이하이면 $\omega\tau \ll 1$ 이므로, $(1 + \omega^2 \tau^2) \sim 1$ 이고 입자의 속도 u 는 다음과 같이 나타난다.

$$u = \frac{qE_0 C_c \sin \omega t}{6\pi\mu r_p} \quad (8)$$

따라서 입자충돌의 상대속도는

$$|u - \tilde{u}| = g_0 \sin \omega t \quad (9)$$

이며, 이때 $g_0 = \frac{E_0}{6\pi\mu} \left| \frac{C_c q}{r_p} - \frac{\tilde{C}_c \tilde{q}}{\tilde{r}_p} \right|$ 이다.

만약 AC 전기장의 주파수가 충분히 커서 전기장의 반주기 변화시간 보다 입자들간의 응집(충돌) 특성시간이 훨씬 크다면 식 (9)는 절대값의 형태이므로 다음과 같이 반주기의 평균치로 표시할 수 있다.⁽²⁾

$$|u - \tilde{u}| = \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} g_0 \sin \omega t = \frac{2}{\pi} g_0 \quad (10)$$

이 때 T_p 는 AC 전기장의 반주기이다. 따라서 최종적으로 충돌빈도함수는 다음과 같다.

$$\beta(r_p, \tilde{r}_p) = \frac{E_0 \theta}{3\pi\mu} \left| \frac{q}{r_p} C_c - \frac{\tilde{q}}{\tilde{r}_p} \tilde{C}_c \right| (r_p + \tilde{r}_p)^2 \quad (11)$$

여기서 C_c 는 커닝햄 미끄럼보정계수로 $1 + Br_p^{-1}$ ($B = 1.257\lambda$, λ 는 평균자유행정)이다. 입자가 포화 하전된 경우라면 MKS 단위로 $q = 12\pi\epsilon_0 \left(\frac{x}{x+2}\right) E_s r_p^2$ (ϵ_0 는 진공의 유전율로 $8.85 \times 10^{-12} F/m$, x 은 입자의 유전상수, E_s 는 하전부의 전기장 세기)이므로 다음과 같은 충돌빈도함수를 얻을 수 있다.

$$\beta(r_p, \tilde{r}_p) = \frac{4\theta E_0 E_s}{\mu} \epsilon_0 \left(\frac{x}{x+2}\right) (r_p + \tilde{r}_p)^2 \times |r_p(1 + Br_p^{-1}) - \tilde{r}_p(1 + B\tilde{r}_p^{-1})| \quad (12)$$

3. 충돌 효율에 대한 고려

식 (12)와 같이 충돌빈도함수가 구해지면 이를 식 (1)에 대입해야 한다. 충돌효율 θ 에 대한 고찰이 필요하다. 충돌효율은 1960년대 후반과 1970년대 초반 사이에 기상 물리학자들 사이에 주목받는 연구 주제였다. 이 시기에는 빗방울과 대기 부유입자를 대상으로 하는 연구가 활발히 진행됐는데,⁽¹³⁾ 충돌하는 두 입자 사이의 유동장과 입자 운동 방정식을 연계해서 결과를 얻었다. Fuchs⁽¹⁴⁾와 Pruppacher와 Klett⁽¹⁵⁾는 중력장을 대상으로 충돌 효율에 대한 해석적인 연구를 수행했는데, 충돌효율

을 입자 크기의 함수로 나타냈다. AC 전기장 응집에서 충돌효율에 대한 연구는 이들 중력장을 대상으로 하는 연구를 기반으로 시작됐다. Kobashi⁽²⁾는 AC 전기력과 항력, 중력을 고려해 입자 크기에 따라 충돌효율을 계산했지만, 전체 입자들로 확장시킨 경우에는 양극성은 1을 단극성은 0을 충돌빈도 함수에 적용했다. Lehtinen 등⁽³⁾은 AC 전기력, 항력, 쿨롱력을 고려해 충돌효율을 계산했는데, 중성인 경우 Fuchs의 식과 일치하는 결과를 보였고 양극성인 경우는 입자 크기에 관한 함수를 제시했지만 단극성의 경우는 충돌이 발생하지 않는다는 결과를 제시했다.

충돌이 간신히 발생하는 초기 위치를 y_{0c} 라 할 때 충돌효율은 정의에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$\theta = \frac{\pi y_{0c}^2}{\pi(\tilde{r}_p + r_p)^2} \quad (13)$$

y_{0c} 를 결정하려면 충돌 대상인 두 입자에 대한 운동 방정식을 유동장과 연계하여 계산해야 한다. 실제로 중력 침강의 경우 큰 입자들이 빠른 속도로 움직이므로 큰 입자들을 고정 좌표계의 중심으로 가정하면 작은 입자들이 큰 입자로 다가가는 유동으로 해석할 수 있다. Fig. 2에서와 같이 종단 속도로 강하하는 큰 입자와 상대적으로 공기 중에 부유하는 작은 입자를 대상으로 하는 중력 응집과는 달리, AC 전기 응집의 경우는 외력으로 작용하는 AC 전기장이 상대적으로 짧은 시간에 변화하기 때문에 실질적으로 평균 전기장의 영향보다는 전기장의 세기가 변하는 과정이나 극성이 바뀌는 순간 입자에 상대 운동 효과가 클 것으로 생각된다. 실제적으로 단극성 전기 응집에서는 입자 농도가 입자간의 평균 거리와 관계되므로 AC 전기장이 변하는 반주기동안 전기장의 세기를 일정하다는 가정을 두 입자의 충돌 해석에 적용하는 것은 적합하지 않다. 예를 들면, 입자 농도가 10^{12} particles/m³ 일 때 입자 크기가 $1 \mu m$ 라면 AC 전기장에 의해 움직이는 입자의 이동 폭이 입자간의 평균거리에도 미치지 못하는 결과가 일어난다. 충돌효율을 구하기 위해 AC 전기장의 변화를 고려하는 것은 매우 어렵기 때문에, 본 연구에서는 실험에 의한 데이터를 통해 충돌 효율을 적용하는

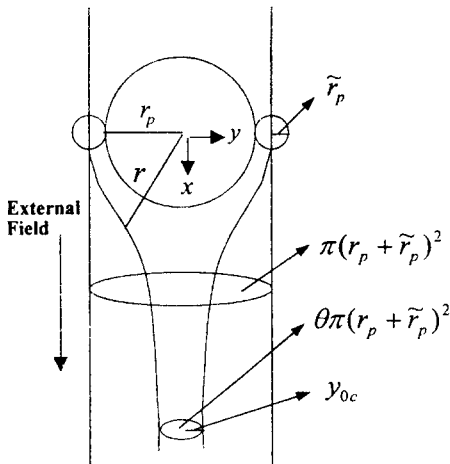


Fig. 2 Concept of collision efficiency

방법을 이용했다. Hautanen 등⁽⁵⁾이 수행한 단극성 응집에 대한 실험 연구는 AC 전기장을 통과한 입자의 크기분포가 입자의 평균 크기의 증가하는 방향으로 변화한다고 보고하고 있다. 그들은 실험 결과를 통해 계산한 충돌 효율 θ 가 0.3이라고 했다. 전기장 응집 또한 중력 응집의 경우와 마찬가지로 $y_{0c}^2 = A \tilde{r}_p^2$ 이 가정된다면

$$\theta = A \frac{\tilde{r}_p^2}{(\tilde{r}_p + r_p)^2} \quad (14)$$

이 얻어지고, 이 때 상수 A 를 구하기 위해 다음과 같이 양변을 증적분한다.

$$\begin{aligned} & \int_0^\infty \int_0^\infty \theta n(r_p) n(\tilde{r}_p) \\ &= \int_0^\infty \int_0^\infty A \frac{\tilde{r}_p^2}{(\tilde{r}_p + r_p)^2} n(r_p) n(\tilde{r}_p) \end{aligned} \quad (15)$$

여기서 $n(r)$ 은 입자 크기분포함수이고 대수정규 분포라고 가정한다. 충돌효율 θ 가 0.3이고, A 를 상수로 가정하여 계산하면, A 는 0.98이 얻어진다. 식 (13), (14)를 식 (12)에 대입하면 AC 전기장 내의 단극성 포화 하전입자들 간의 충돌빈도함수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \beta(r_p, \tilde{r}_p) &= \frac{4E_0 E_s}{\mu} \frac{\epsilon_0 x}{x+2} \left[A \left(\frac{r_p}{r_p + \tilde{r}_p} \right)^2 \right. \\ & \quad \left. \times (r_p + \tilde{r}_p)^2 |r_p - \tilde{r}_p| \right] \end{aligned} \quad (16)$$

4. AC 전기장 응집의 모멘트 표현

식 (1)의 양변에 v^k 을 곱하면 다음과 같이 모멘트 형식으로 표현되는 k 개의 상미분 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{dM_k(t)}{dt} &= \frac{1}{2} \int_0^\infty n(v, t) \beta(v, \tilde{v}) \times \\ & \quad ((v + \tilde{v})^k - v^k - \tilde{v}^k) dx \int_0^\infty n(\tilde{v}, t) d\tilde{v} \end{aligned} \quad (17)$$

여기서

$$M_k(t) = \int_0^\infty v^k n(v, t) dv \quad (18)$$

인 관계를 갖는다. 입자의 크기분포는 다음과 같은 기하평균 부피를 사용한 대수정규 형태로 가정한다.

$$n(v, t) = \frac{N}{3\sqrt{2\pi \ln \sigma_g}} \exp \left[-\frac{\ln^2(v/v_g)}{18 \ln^2 \sigma_g} \right] \frac{1}{v} \quad (19)$$

여기서 N 는 입자 수농도, v_g 는 기하 평균 부피, σ_g 는 기하 표준편차이다. 모멘트식을 적용하기 위해 다음과 같은 $J_E(j)$ 라는 함수를 사용하면⁽¹⁵⁾

$$\begin{aligned} J_E(j) &= A \left(\frac{3}{4\pi} \right)^{2/3} \int_0^\infty v^j n(v, t) dv \\ & \quad \times \int_0^v \tilde{v}^{(j+2/3)} n(\tilde{v}, t) (r_p - \tilde{r}_p) d\tilde{v} \end{aligned} \quad (20)$$

여기서 r_p 과 \tilde{r}_p 은 각각 체적이 v 와 \tilde{v} 인 입자의 반경이다. 식 (19)을 식 (20)에 대입해 정리하면 $J_E(j)$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} J_E(j) &= \frac{A}{2} \left(\frac{3}{4\pi} \right) N^2 \\ & \quad \times \exp \left((2j+1) \ln v_g + (j^2 + j + \frac{1}{2}) 9 \ln^2 \sigma_g \right) \\ & \quad \times \left(\exp(-2 \ln^2 \sigma_g) \operatorname{erfc} \left(\frac{\ln \sigma_g}{2} \right) - \operatorname{erfc} \left(\frac{3 \ln \sigma_g}{2} \right) \right) \end{aligned} \quad (21)$$

erfc 은 상보적 오차함수(complementary error function)이다. 식 (16)을 식 (17)에 대입하여 정리하면, 다음과 같은 1차 상미분 연립방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{dM_0}{dt} &= -K_E J_E(0) \\ \frac{dM_1}{dt} &= 0 \\ \frac{dM_2}{dt} &= 2K_E J_E(1) \end{aligned} \quad (22)$$

여기서 K_E 는 $\frac{4E_0E_s\epsilon_0}{\mu} \left(\frac{x}{x+2}\right)$ 이다. 위의 모멘트법으로 전개된 연립 상미분 방정식의 해를 구하기 위해 필요한 세 개의 초기값은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} M_0(0) &= N_0 \\ M_1(0) &= N_0 v_{g0} \exp[4.5 \ln^2 \sigma_{g0}] \\ M_2(0) &= N_0 v_{g0}^2 \exp[18 \ln^2 \sigma_{g0}] \end{aligned} \quad (23)$$

여기서 하첨자 0는 초기값을 나타낸다. 식(22)를 무차원화하기 위해 다음과 같은 무차원 변수들을 도입할 수 있다.

$$t^* = \frac{t}{t_0} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} M_0^* &= \frac{M_0}{N_0} = 1 \\ M_1^* &= \frac{M_1}{v_{g0} N_0} \\ M_2^* &= \frac{M_2}{v_{g0}^2 N_0} \end{aligned} \quad (25)$$

여기서 t_0 는 무차원 시간 상수이다. 식의 단순화를 위해 $t_0 = 1/K_E N_0 v_{g0}$ 로 설정하면 식(22)는 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} \frac{dM_0^*}{dt^*} &= -J_E^*(0) \\ \frac{dM_1^*}{dt^*} &= 0 \\ \frac{dM_2^*}{dt^*} &= 2J_E^*(1) \end{aligned} \quad (26)$$

이 때 필요한 초기값은 각각 $M_0^*(0) = 1.0$,

$$M_1^*(0) = \exp\left[\frac{9}{2} \ln^2 \sigma_{g0}\right], \quad M_2^*(0) = \exp[18 \ln^2 \sigma_{g0}]$$

이 된다. 계산은 상미분 방정식의 초기치 문제를 풀 수 있는 Fortran IMSL subroutine 중 IVPAG 코드를 이용했다.

5. 계산 결과 및 고찰

5.1 초기 기하표준편차에 따른 변화

응집 전 입자 크기분포가 응집 과정에서 입자 분포에 미치는 영향을 살펴보았다. Fig. 3, 4, 5는 초기 기하표준편차가 1.2, 1.5, 2.0인 경우에 대한 입자 크기분포 예측 결과이다(그래프에서 SIG는 초기 기하표준 편차로 σ_{g0} 를 의미한다). Fig. 5는 시간에 따른 수농도 변화를 나타내는데, 초기의 입자 크기 편차가 클수록 수농도는 빨리 감소한다. Fig. 6은 입자의 기하평균직경의 증가 추세를 보여 주는데, σ_{g0} 가 큰 경우에 입자 크기는 빨리 증가한다. 이는 σ_{g0} 에 따른 입자 수농도와 크기 변화 경향은 중력응집이나 브라운 응집 등과 같이 일반적인 응집 과정에서도 같은 추세로 나타난다. Fig. 7은 응집 과정에서 입자 크기 편차의 변화를 보여 주는데, 시간이 지남에 따라 계속 증가하는 경향을 나타낸다. 모멘트 방법을 통한 예측은 크기 분포가 대수 정규 분포로 유지된다는 가정에서 출발하기 때문에 시간이 지남에 따라 크기 분포의 특성을 왜곡시키는 경향이 있다. 그렇지만 전기집진기의 경우 입자의 집진기 내 체류시간은 10초 이하이고, AC 전기장 내의 전기 응집의 경우 또한 같은 조건이라면 입자의 분포가 크게 변하지 않기 때문에 대수 정규 분포를 유지한다는 가정은 타당하다고 생각된다.

5.2 브라운 응집과 비교

AC 전기장이 외력으로 작용하는 경우 입자 크기 분포 변화를 브라운 응집의 경우와 비교했다. 계산에 사용한 변수는 기본적으로 Kobashi⁽³⁾의 경우를 따랐고, 단극성 전기장 응집의 시스템 특성상 고농도를 적용했다. 또 비교 대상이 되는 브라운 응집 계산은 편의상 중성 입자들의 응집을 대상으로 했다.⁽¹⁶⁾

$$E_0 = 10^6 \quad [V/m]$$

$$E_s = 8 \times 10^5 \quad [V/m]$$

$$x = 2$$

$$\mu = 1.73 \times 10^{-5} \quad [kg/m \cdot s]$$

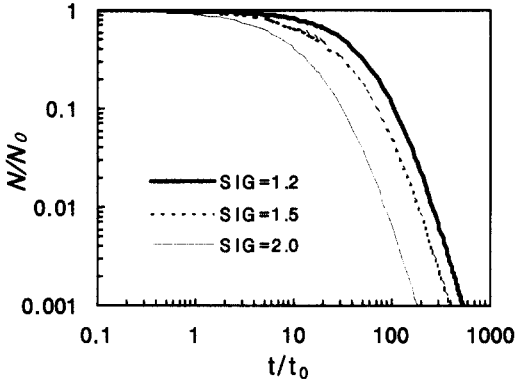


Fig. 3 Decrease of number density

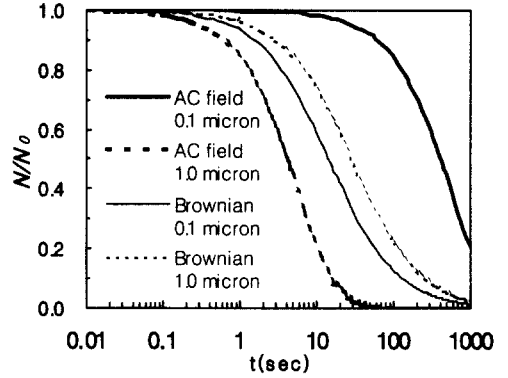


Fig. 6 Decrease of number density

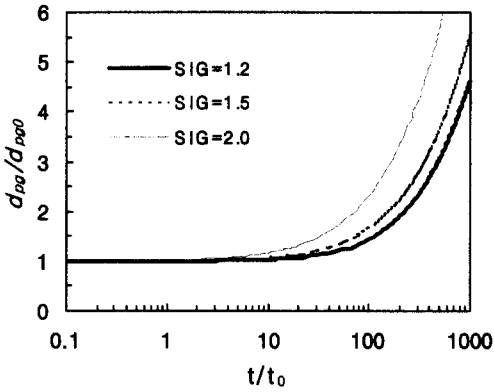


Fig. 4 Change of the ratio of geometric mean diameter

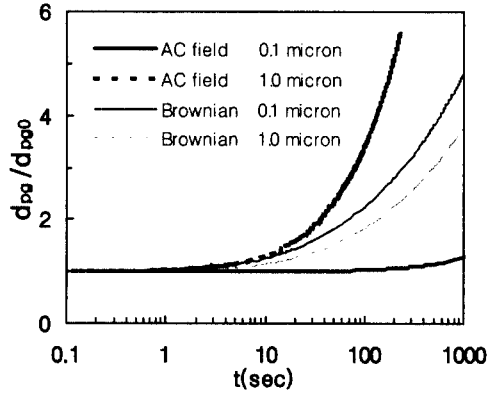


Fig. 7 Change of the ratio of geometric mean diameter

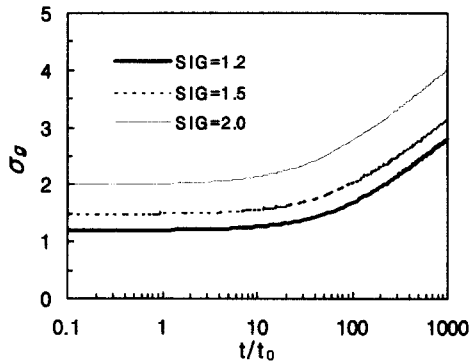


Fig. 5 Change of geometric standard deviation

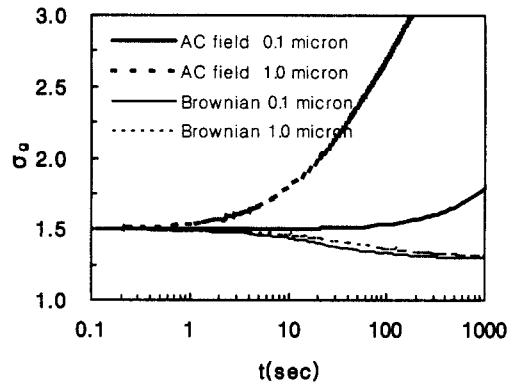


Fig. 8 Change of geometric standard deviation

$$\begin{aligned}\rho_p &= 2.5 \times 10^3 & [\text{kg/m}^3] \\ N_0 &= 10^{14} & [\text{particles/m}^3] \\ \sigma_{g0} &= 1.5 \\ d_{pg0} &= 0.1 \text{과 } 1 & [\mu\text{m}] \\ A &= 0.98\end{aligned}$$

Fig. 6~8는 중성 입자간의 브라운 응집과 AC 전기장 내에서의 응집에 대해 초기 기하 표준편차는 1.5이고, 초기 기하 평균직경이 0.1과 1 μm 인 경우이다 Fig. 8과 9를 살펴보면 입자 크기가 증가할수록 브라운 응집 효과는 감소하는 반면 AC 전기장 내에서의 응집은 증가하는 것을 알 수 있다. 예를 들면, AC 전기장 내에서의 입자 응집의 경우는 입자 크기가 10배 증가하게 되면 같은 응집 효과를 얻는데 걸리는 시간은 1/1000로 단축되기 때문에, 입자 크기에 따른 변화가 크지 않은 브라운 응집에 비해 입자 크기에 대해 훨씬 민감한 변화를 보인다. 실제로 AC 전기장 응집이 초기 수농도와 입자 크기의 세제곱의 곱에 비례하므로($\sim N_0 v_{g0}$) 초기 기하평균직경이 0.1 μm 이고 초기 수농도가 10^{14} particles/ m^3 인 경우는 초기 기하평균직경이 1 μm 이고 초기 수농도가 10^{11} particles/ m^3 인 경우와 같은 결과를 나타낸다. Fig. 10은 시간에 따른 기하 표준편차의 변화 추세를 보여주는데, 브라운 응집이 일정한 기하표준편차로 접근하는데 반해 AC 전기장 응집의 경우는 계속해서 증가하는 경향을 나타낸다. 이는 브라운 응집이 작은 입자와의 충돌이 지배적으로 일어나기 때문에 입자의 편차가 일정한 자기 보존 편차를 찾아가는 경향을 보이는 반면, AC 전기장 응집은 큰 입자와의 충돌이 지배적이라는 차이에서 기인하는 것으로 보인다.

6. 결론 및 향후계획

- (1) 모멘트 방법을 이용해 AC 전기장 내를 이동하는 단극성 포화하전 입자의 크기 분포 변화를 예측하였다.
- (2) AC 전기장을 이동하는 단극성 포화 하전 입자는 평균 크기가 클수록 응집 효과가 크고 수농

도의 감소가 빠르게 진행된다.

(3) 초기 기하 표준편차가 클수록 응집 효과는 크고, 기하표준편차는 초기값에 관계없이 증가한다.

(4) 단극성 전기응집기를 적용할 시스템은 AC 전기장에 의한 하전 입자의 운동 폭이 최소한 입자간 거리 이상이 될 수 있는 고농도 시스템이어야 한다.

단극성 하전 입자의 AC 전기장 응집의 적용은 입자들이 고농도로 존재하는 시스템에 적합하다. 상대적으로 농도가 낮은 시스템을 대상으로 한다면 입자들을 다른 극성으로 하전시켜 혼합한 후, AC 전기장을 인가하는 방식인 양극성 AC 전기장 응집이 상대적으로 효과적일 것으로 보인다. 그렇지만 양극성의 경우는 다른 극성의 입자들간의 충돌, 응집에 의한 급격한 하전량 감소를 겪기 때문에 적절한 모델에 의한 예측과 실험에 의한 검증이 필요하리라 생각된다.

향후 연구로는 단극성 전기 응집 실험과 실험 결과를 기초로 충돌 효율 일반식의 설정을 예정하고 있다. 양극성으로 하전된 입자를 대상으로한 전기 응집 실험을 수행하여 상용화에 적합한 모델을 설정하는 작업을 수행하려 한다.

참고문헌

- (1) Mohr, M., Ylatalo, S., Klippel, N., Kauppinen, E. I., Riccius, O. and Burtscher, H., 1996, "Submicron Fly Ash Penetration Through Electrostatic Precipitators at Two Coal Power Plants," *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 24, pp. 191~204.
- (2) Kobashi, M., 1978, Particle Agglomeration Induced by Alternating Electric Fields, Ph.D. Thesis, Stanford University.
- (3) Lehtinen, K., Jokiniemi, J., Kauppinen, E.I. and Hautanen, J., 1995, "Kinematic Coagulation of Charged Droplets in an Alternating Electric Field," *Aerosol. Sci. Technol.*, Vol 23, pp 422~430.
- (4) Mitchner, M. and Self, S., 1983, *Basic Studies to Reduce Electrostatic Precipitator Size and Cost*, EPRI Report CS-3226
- (5) Hautanen, J., Kilpelainen, M., Kauppinen, E.I.,

- Jokiniemi, J. and Lehtinen, K., 1995, "Electrical Agglomeration of Aerosol Particles in an Alternating Electric Field," *Aerosol. Sci. Technol.*, Vol. 22, pp. 181~189.
- (6) Kildeso, J., Bhatia, V. K., Lind, L., Johnson, E. and Johansen, A., 1995, "An Experimental Investigation for Agglomeration of Aerosols in Alternating Electric Fields," *Aerosol. Sci. Technol.*, Vol. 2, pp. 422~430.
- (7) Laitinen, A., Hautanen, J., Keskinen, J., Kauppinen, E., Jokiniemi, J. and Lehtinen, K., 1996, "Bipolar Charged Aerosol Agglomeration with Alternating Electric Field in Laminar Gas Flow," *J. Electrostatics*, Vol. 38, pp. 303~315.
- (8) Gutsch, A. and Loffler, F., 1994, "Electrically Enhanced Agglomeration of Nanosized Aerosols," *J. Electrostatics*, Vol. 25, pp. 307~308.
- (9) Watanabe, T., Tochikubo, F., Koizumi, Y., Tsuchida, T., Hautanen, J. and Kauppinen, E., 1995, "Submicron Particle Agglomeration by an Electrostatic Agglomerator," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 25, pp. s367~383.
- (10) 박종인, 지준호, 황정호, 1997, "LPG 확산화염 내 매연입자의 전기적 특성 및 전기장에 의한 입자 크기 변화," 대한기계학회 논문집(B), 제21권, 제10호, pp. 1326~1338.
- (11) 김연승, 황정호, 1999, "AC 주파수의 변화가 입자의 전기 응집에 미치는 연구," 대한기계학회 논문집(B), 제23권, 제12호, pp. 1527~1534.
- (12) Lee, K. W. and Chen, H., 1984, "Coagulation Rate of Polydisperse Particles," *Aerosol. Sci. Technol.*, Vol. 3, pp. 327~334.
- (13) Pruppacher, H. R., and Klett, J. D., 1978, *Microphysics of Clouds and Precipitation*. D. Reidel, Dordrecht.
- (14) Fuchs, N. A., 1964, *The Mechanics of Aerosols*, Pergamon, New York, pp 319~324.
- (15) Reed, L. D., Lee, K. W. and Gieseke, J. A., 1980, "The Behavior of Contained Radioactive Suspensions," *Nucl. Sci. Eng.*, Vol. 75, pp. 167~180.
- (16) 지준호, 황정호, 이규원, 1999, "모멘트법을 이용한 하전 입자들간의 응집 해석," 대한기계학회 논문집(B), 제23권, 제4호, pp. 431~442.