

2D3) 에어로졸의 크기분포가 입자 소산계수에 미치는 영향모사

The Effect of Aerosol Size Distribution on Particle Extinction Coefficient

정창훈·김용표¹⁾

경인여자대학 환경보건과, ¹⁾이화여자대학교 환경학과

1. 서론

입자의 산란에 의한 소산계수의 변화 및 대기 시정의 감소 등 많은 광학적 현상은 입자의 크기 분포와 밀접한 관련을 갖고 있다. 지금까지 이들 소산계수 및 시정의 변화 등의 연구에 입자의 각 화학 성분의 농도와 그 종의 농도로부터 총 소산계수(total extinction coefficient, b_{ext})를 통계적으로 구하는 방법이 많이 적용되었으나, 이들 연구는 입자의 굴절율과 크기분포에 대한 관계를 정량적으로 밝혀내지 못하는 단점을 가지고 있다. 본 연구에서는 조화 평균을 이용하여 구한 간략화 된 총 소산계수를 이용하여 다분산 에어로졸 입자의 크기 분포와 소산계수와의 관계를 해석적인 방법으로 구하였다. 또한 이들 소산계수가 입자의 응집(coagulation), 응축(condensation)등의 과정에 따라 어떻게 변화하는지에 대한 해를 구하였다.

2. 총 소산계수의 간략화

단일입자 소산효율(single particle extinction efficiency, Q_{ext})은 입자의 크기모수(size parameter, p)에 따라 Rayleigh 영역(Rayleigh region, Q_{ext_Ray})과 기하영역(geometric region, Q_{ext_Geo})으로 구분한다. Jung and Kim (2006)은 전 구간 입자크기의 산란효율 및 총 입자 산란계수를 다음과 같은 조화평균 식으로 구하였다. 여기서 d_p 는 입자의 직경, λ 는 파장이다.

$$Q_{ext}(m, p) = \frac{Q_{ext_Geo} \cdot Q_{ext_Ray}}{Q_{ext_Geo} + Q_{ext_Ray}}, \quad b_{ext} \cong \frac{b_{ext_Geo} \cdot b_{ext_Ray}}{b_{ext_Geo} + b_{ext_Ray}} \quad (1)$$

총 입자 산란계수(b_{ext})는 단일입자 산란효율과 입자 크기분포($n(d_p)$)의 함수로 표현된다.

$$b_{ext} = \int_0^{d_p^{max}} \frac{\pi d_p^2}{4} Q_{ext}(m, p) n(d_p) dd_p \quad (2)$$

여기서 주어진 기하학적 표준편차(σ_g)와 기하학적 평균직경(d_g)에서의 입자 대수 정규분포를 가정한 k 차의 모멘트 형식(M_k)으로 전환하면 다음과 같은 해를 구할 수 있다.

$$b_{ext} \cong \frac{b_{ext_Geo} \cdot b_{ext_Ray}}{b_{ext_Geo} + b_{ext_Ray}} = \frac{(\xi_1 M_3 + \xi_2 M_6)(\zeta_1 M_2 + \zeta_2 M_{4/3})}{\xi_1 M_3 + \xi_2 M_6 + \zeta_1 M_2 + \zeta_2 M_{4/3}} \quad (3)$$

식(3)을 입자의 질량과 관계된 다음의 3차 모멘트(M_3)로 바꾸면, 동일한 질량($= (\pi \rho_p / 6) M_3$)을 가지고 있는 입자의 소산계수가 크기 분포에 따라 어떠한 변화를 보이는지를 해석적으로 구할 수 있다.

$$b_{ext} \cong \frac{\left(\xi_1 + \xi_2 d_g^3 \exp\left[\frac{27}{2}(\ln \sigma_g)^2\right] \right) \left(\zeta_1 d_g^{-1} \exp\left[\frac{-5}{2}(\ln \sigma_g)^2\right] + \zeta_2 d_g^{-5/3} \exp\left[\frac{-65}{18}(\ln \sigma_g)^2\right] \right)}{\xi_1 + \xi_2 d_g^3 \exp\left[\frac{27}{2}(\ln \sigma_g)^2\right] + \zeta_1 d_g^{-1} \exp\left[\frac{-5}{2}(\ln \sigma_g)^2\right] + \zeta_2 d_g^{-5/3} \exp\left[\frac{-65}{18}(\ln \sigma_g)^2\right]} M_3 \quad (4)$$

여기서, ξ_i 와 ζ_i 는 소산계수를 정의하는 i 번째 상수이다. 또한 이식을 Koschmeider의 시정식에 대입하면, 입자의 크기 분포 변화에 따른 시정의 변화를 해석적으로 구할 수 있다.

3. 응축 및 응집 과정에 의한 소산 계수의 변화

입자의 크기분포를 대수 정규분포로 가정하였을 때, 응축과정 동안의 입자의 크기 분포의 변화는 다음과 같이 모수화하여 나타낼 수 있다(Jung et al., 2006).

$$d_g = \left(\frac{6}{\pi}\right)^{1/3} a^{-1/2}, \quad \sigma_g = \exp\left(\sqrt{\frac{\ln b}{2}}\right), \quad a = \frac{a_0 b_0}{b} \sqrt{\frac{b^4 - 1}{b_0^4 - 1}}, \quad b = \left\{1 - \left(\frac{b_0^2}{\sqrt{b_0^4 - 1}} + \frac{2b_0 a_0 C(S-1)t}{3\sqrt{b_0^4 - 1}}\right)^{-2}\right\}^{-1/4} \quad (5)$$

여기서, C, S는 응집 과정을 설명하는 상수이다. 식(5)를 소산계수 식(4)에 대입하면, 응집에 의한 소산계수가 어떠한 변화를 보이는지를 해석적으로 구할 수 있다. 응축과정이 진행되면서 입자의 총 개수 농도는 변화하지 않으면서, 입자의 기하학적 평균 직경은 증가하고, 기하학적 표준편차는 1로 수렴하게 된다. 따라서 소산계수 식(4)는 응축과정 중 다음과 같은 식으로 수렴해 간다고 예측할 수 있다.

$$b_{ext} \cong \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{(\xi_1 + \xi_2 d_g^3)(\zeta_1 d_g^{-1} + \zeta_2 d_g^{-5/3})}{\xi_1 + \xi_2 d_g^3 + \zeta_1 d_g^{-1} + \zeta_2 d_g^{-5/3}} M_3 \quad (6)$$

마찬가지로 응집과정 중에 입자의 총 질량 농도는 변화하지 않으면서, 입자의 기하학적 표준편차는 일정값으로 수렴한다는 선행연구 결과(Lee, 1983)를 적용하면, 소산계수는 다음과 같은 d_g 의 함수로 표현할 수 있다.

$$b_{ext} \cong \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{(\xi_{c1} + \xi_{c2} d_g^3)(\zeta_{c1} d_g^{-1} + \zeta_{c2} d_g^{-5/3})}{\xi_{c1} + \xi_{c2} d_g^3 + \zeta_{c1} d_g^{-1} + \zeta_{c2} d_g^{-5/3}} \quad (7)$$

여기서 첨자 c는 응집과정을 고려한 상수를 의미한다. 그림 1은 입자의 크기를 표현하는 주요 변수인 기하학적 표준편차와 기하학적 평균 직경이 변화함에 따라 소산계수가 어떻게 변화하는지를 보여주고 있다. 그림 1에서 볼 수 있듯이, 주어진 동일한 질량 하에서도 기하학적 표준편차와 기하학적 평균직경에 따라 소산계수가 크게 변화하게 됨을 알 수 있다. 따라서 입자의 소산계수나 시정등을 예측하고 분석하는데 있어 입자 크기 분포에 대한 이해가 매우 필요하다.

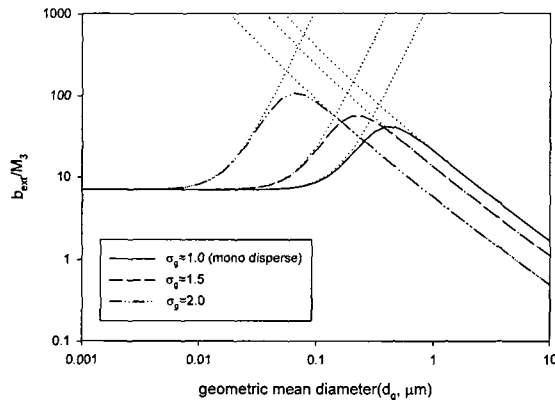


Figure 1. The b_{ext}/M_3 as a function of geometric mean diameter in different geometric standard deviation using the harmonic mean approximation.

참 고 문 헌

- Jung, C.H., and Y.P. Kim (2006) General approximated solution of particle extinction coefficient for simulating aerosol dynamics by the moment method. *J. Aerosol Sci.*, submitted.
- Jung, C.H., S.H. Park, and Y.P. Kim (2006) Size distribution of polydispersed aerosols during condensation in the continuum regime: Analytic approach using the lognormal moment method, *J. Aerosol Sci.*, in press.
- Lee, K.W. (1983) Change of particle size distribution during Brownian coagulation, *J. Colloid Interface Sci.*, 92, 315-325.