

혼합효과가 DMA 와 CPC 를 이용한 입자분포 측정에 미치는 영향에 관한 연구

이윤수* · 안강호** · 김상수†

(2002 년 8 월 5 일 접수, 2003 년 2 월 8 일 심사완료)

Study on the Influence of Mixing Effect to the Measurement of Particle Size Distribution using DMA and CPC

Younsoo Lee, Kang-Ho Ahn and Sangsoo Kim

Key Words : Differential Mobility Analyzer(DMA, 단분산 초미세입자 분리기), Condensation Particle Counter (CPC, 응축핵 계수기), Particle Size Distribution(입자 크기 분포), Mixing Effect (혼합 효과), Accelerated Measurement (가속화된 측정법)

Abstract

In the measurement using DMA and CPC in series, there is some time delay for particles classified in DMA to detect in CPC. During this time, the DMA time-response changes due to the velocity profile of sampling tube and the diffusion of particles in the volume that exists between the DMA exit and the detector of ultra-fine CPC. This is called mixing effect. In the accelerated measurement methods like the TSI-SMPS, the size distribution is obtained from the correlation between the time-varying electrical potential of the DMA and the corresponding particle concentrations sampled in DMA. If the DMA time-response changes during this delay time, this can cause the error of a size distribution measured by this accelerated technique. The kernel function considering this mixing effect using the residence time distribution is proposed by Russell et al. In this study, we obtained a size distribution using this kernel to compare to the result obtained by the commercial accelerated measurement system, TSI-SMPS for verification and considered the errors that result from the mixing effect with the geometric mean diameters of originally sampled particles, using virtually calculated responses obtained with this kernel as input data.

기호설명

s : 입자 한 개의 Detector 에서의 신호
 t_c : 한 채널의 계수시간
 t_d : 응답지연 시간
 t_f : 입자의 DMA 내 체류 시간
 t_m : DMA 에서 분리되는 시간
 C_c : 입자의 미끄럼 보정 계수
 D_g : 입자의 기하 평균 입경
 D_p : 입자의 직경

I^{cum} : 순간 전달함수 \tilde{Q} 의 누적 함수
 M : 체류시간 분포 함수(RTD)
 Q_a : DMA 로 유입되는 aerosol 의 유량
 Q_m : DMA 에서 버려지는 유량
 Q_s : DMA 에서 분리되는 aerosol 의 유량
 Q_{sh} : DMA 로 유입되는 청정공기의 유량
 S : Detector 의 신호
 Z_p : 입자의 전기적 유동성

그리스문자

σ_g : 기하 표준 편차
 τ_s : 혼합효과에 의한 시간 상수
 τ_r : DMA 전압 변화의 시간 상수
 ζ_0 : 부차원화 된 입자의 초기 전기적 유동성

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과
 E-mail : sskim@kaist.ac.kr

TEL : 042-869-3021 FAX : 042-869-8207

* 회원, 한국과학기술원 기계공학과 입자공학연구소

** 회원, 한양대학교 기계공학과

- ξ : 무자원화 된 입자의 전기적 유동성
- Γ : 시스템의 커널 함수
- Φ : 동 크기 입자의 전하당 하전율
- Ω : DMA 의 전달함수
- $\tilde{\Omega}$: 혼합효과 고려한 DMA 의 순간 전달함수
- $\bar{\Omega}$: $\tilde{\Omega}$ 의 한 채널의 평균 전달함수

1. 서 론

입자의 크기분포를 측정하는 방법에는 여러 가지가 있으나, 광학적으로 측정하기 어려운 작은 크기의 입자는 전기적 입자 분리기인 DMA 로 분리해 응축 입자 계수기인 CPC 로 계수를 측정하는 방법이 많이 사용되고 있다. Fissan⁽¹⁾ 등이 PC interface 를 통해 자동화한 방법은 입자 분포를 측정하기 위해 매우 많은 시간이 필요 했지만 Wang 과 Flagan⁽²⁾ 등이 제안한 가속화된 방법을 사용하여 그 시간이 매우 단축되었다. 하지만 이 가속화된 측정방법에서는 시간에 따른 CPC 의 계수 데이터를 이용해 입자분포를 측정하는데, 같은 시간에 DMA 에서 샘플된 입자들이라 하더라도 CPC 의 Optics 부분에 이르기까지의 경로에 따라 그 도달 시간이 달라지기 때문에 DMA 의 시간 응답과 CPC 에서 측정된 시간 응답이 서로 달라지게 되며 이는 측정 오차의 원인이 된다. 이러한 현상은 서로 다른 시간에 샘플된 입자들이 혼합되어 CPC 에서 측정되는 결과를 낳는다. Russell⁽³⁾ 등은 입자들의 도달시간이 체류시간 분포 (Residence time distribution, Levenspiel 1972)의 형태라고 가정하여 이 혼합효과가 입자분포 측정에 미치는 영향에 대해 고찰했다. 본 연구에서는 Russell 등이 제안한 혼합효과를 고려한 전달함수를 이용해 입자의 크기 분포를 측정하고 이를 TSI 사의 SMPS(Scanning Mobility Particle Sizer)를 이용해 측정한 결과와 비교했으며, 혼합효과가 있는 경우의 가상적인 CPC 응답을 구해 이로부터 입자 분포를 얻어 혼합효과에 따른 입자분포의 변화를 고찰했다.

2. 이 론

2.1 DMA 와 CPC 를 이용한 입자 측정 원리

DMA 를 이용해 분포 측정을 하려는 다분산 입자로부터 같은 전기적 유동성을 갖는 입자만을 분리하고 이를 CPC 를 이용해 계수하면 그 분포를 측정할 수 있다. Wang 과 Flagan⁽²⁾ 등에 의해 제안

된 가속화된 측정법은 DMA 의 전압을 시간에 대해 지수적으로 변화시키면서 입자 분포를 측정하는데 이는 DMA 내 전기장의 상대적인 변화를 같게 하여 DMA 내에서의 입자 체류시간을 같게 하기 위해서 이다. 이렇게 시간에 따라 DMA 의 전압을 변화시키면서 측정을 할 때 시간에 따른 CPC 에서의 신호는 다음과 같다.

$$S(t) = \int_0^\infty n(D_p) \Gamma(D_p, t_m, \tau_c) dD_p \tag{1}$$

여기서,

$$\Gamma(D_p, t_m, \tau_c) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} s(D_p, n) \times \Phi(D_p, n) \bar{\Omega}(Z_p(D_p, n), t_m, \tau_c) \tag{2}$$

$$t = t_m + t_d$$

$s(D_p, n)$ 은 직경이 D_p 인 n 개의 전하를 갖는 입자 한 개를 측정했을 때의 Detector 에서의 신호이며 CPC 의 경우 1 이 된다. $\Phi(D_p, n)$ 은 직경이 D_p 인 입자중 n 개의 전하를 갖는 입자의 비율(Charge Fraction) 이고 $\bar{\Omega}$ 는 한 채널의 평균 전달함수이며 식 (8)과 같다. t 는 CPC 에서 계수 되는 시간, t_m 은 DMA 에서 샘플된 시간 t_d 는 DMA 에서 샘플된 입자가 CPC 에서 계수 되기 까지 지연된 시간이며 τ_c 는 한 채널의 계수시간 이다. 위의 식 (1)은 다음과 같이 이산화 할 수 있으며 행렬식으로 표현이 가능하다.

$$S_i = \Delta \sum_{k=1}^J w_k \Gamma_{ik} n_k \tag{3}$$

i : sampling channel index (time interval)

k : integration point index (diameter)

$$w_k = \begin{cases} 0.5 & (j=1, J) \\ 1 & \text{others} \end{cases}$$

S_i 는 시간구간 $(t_m - \tau_c, t_m)_i$ 동안 측정된 CPC 의 신호이며, Γ_{ik} 는 작동조건에 의해 결정되므로 식 (3)을 행렬식으로 변환하여 역산을 하면 입경 분포인 n_k 를 구할 수 있다. 적당한 구속조건을 준 최소제거법을 이용하거나 Twomey 에 의해 제안된 비선형 반복법(Nonlinear Iterative Algorithm, NLIA)등을 이용해 근사해를 구할 수 있으며 본 연구에서는 Twomey 의 비선형 반복법을 사용하였다.

2.2 전달함수

전기장 내에 있는 n 개의 기본전하로 하전된 직경이 D_p 인 입자는 다음과 같은 전기적 유동성(Electrical Mobility)을 갖는다.

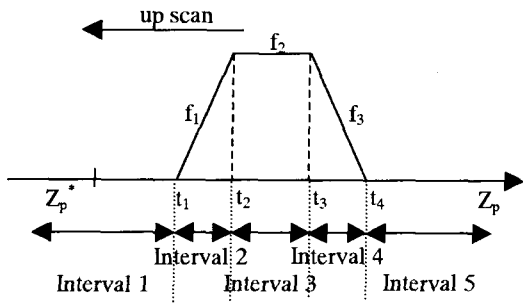


Fig. 1 Movement of Transfer Function when the DMA Voltage is rising up exponentially

$$Z_p = \frac{v}{E} = \frac{neC_c}{3\pi\mu D_p} \quad (4)$$

여기서 v 는 이송유체에 대한 입자의 상대속도를 말하며, E 는 전기장, e 는 기본 전하, μ 는 이송유체의 점성을 말한다. C_c 는 입자의 미끄럼 보정계수로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$C_c = 1 + \frac{2\lambda}{D_p} \left(A + Q \exp\left(-\frac{bD_p}{2\lambda}\right) \right) \quad (5)$$

상수는 Jennings(1998)가 구한 값을 사용했으며, 그 값은 $A=1.252$, $Q=0.399$, $b=1.100$ 이다. 전달함수는 전기적 유동성에 따른 입자의 채취율을 말하며 Russell⁽³⁾ 등은 DMA 의 전압이 시간에 대해 지수적으로 변할 때의 전달함수를 식 (6)과 같이 표현했으며 이 전달함수에 체류시간분포(RTD)를 가정한 혼합효과를 고려해서 식 (7)와 같이 표현했다.

$$\Omega_j^e(\xi, t_m) = \begin{cases} 0 & t_m < \pm\tau_r \ln \frac{\xi_0 \mp 1}{\xi} \\ f_1 & \pm\tau_r \ln \frac{\xi_0 \mp 1}{\xi} \leq t_m \leq \pm\tau_r \ln \frac{\xi_0 \mp \beta}{\xi} \\ f_2 & \pm\tau_r \ln \frac{\xi_0 \mp \beta}{\xi} \leq t_m \leq \pm\tau_r \ln \frac{\xi_0 \pm \beta}{\xi} \\ f_3 & \pm\tau_r \ln \frac{\xi_0 \pm \beta}{\xi} \leq t_m \leq \pm\tau_r \ln \frac{\xi_0 \pm 1}{\xi} \\ 0 & \pm\tau_r \ln \frac{\xi_0 \pm 1}{\xi} < t_m \end{cases} \quad (6)$$

$$f_1 = \frac{\gamma+1}{2} \left(1 \mp \xi_0 \pm \xi e^{\pm \frac{t}{\tau_r}} \right)$$

$$f_2 = \frac{\gamma+1}{2} (1 - \beta)$$

$$f_3 = \frac{\gamma+1}{2} \left(1 \pm \xi_0 \mp \xi e^{\pm \frac{t}{\tau_r}} \right)$$

$$\gamma \equiv \frac{Q_s}{Q_a} \quad \beta \equiv \frac{|1-\gamma|}{1+\gamma} \quad \xi_0 = \frac{Z_0}{\Delta_0}$$

$$\Delta_0 = \frac{\Delta Z_p}{e^{\pm t/\tau_r}}$$

$$\tilde{\Omega}_j(\xi, t_m) \equiv \int_{t_j}^{t_m} \Omega_j^e(\xi, \hat{t} - t_j) \times M(t_m - \hat{t}) d\hat{t} \quad (7)$$

$$M(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ \frac{1}{\tau_s} \exp\left(-\frac{t}{\tau_s}\right) & t \geq 0 \end{cases}$$

여기서, t_j 는 DMA 전압 변화의 시작시간 이며, $\xi = Z_p / \Delta_0$ 이며 Δ_0 는 최초 전달함수의 반폭(half-width)이고 τ_s 는 체류시간분포(RTD)의 시간 상수이다. Ω_j^e 가 식 (6)에서와 같이 구간에 따라 다른 함수이기 때문에 구간에 따른 구간적분이 필요하다. DMA 전압을 지수적으로 증가시키면 Fig. 1 에서와 같이 전달함수가 이동하게 된다. 여기서 t_1 은 구간 2 에 접어들기 시작하는 시간이며, t_2 는 구간 3, t_3 는 구간 4, t_4 는 구간 5 에 접어들기 시작하는 시간이다. 이는 입자의 전기적 유동성의 함수이며 다음과 같이 식 (6)의 구간 구분 시간이다.

$$t_1 = \pm\tau_r \ln \frac{\xi_0 \mp 1}{\xi} \quad t_2 = \pm\tau_r \ln \frac{\xi_0 \mp \beta}{\xi}$$

$$t_3 = \pm\tau_r \ln \frac{\xi_0 \pm \beta}{\xi} \quad t_4 = \pm\tau_r \ln \frac{\xi_0 \pm 1}{\xi}$$

이와 같이 움직이는 전달함수에 시간에 따라 지수적으로 감소하는 함수를 곱했기 때문에 구간 이후의 값에도 영향을 주므로 앞 구간 함수 값을 더해줘야 한다. 그러므로 각 구간에 대한 구간적분의 값은 다음과 같다.

구간 1: $\tilde{\Omega}_{j,1} = 0$

구간 2: $\tilde{\Omega}_{j,2} = \int_{t_1}^{t_m} f_1 \times M d\hat{t}$

구간 3: $\tilde{\Omega}_{j,3} = \int_{t_1}^{t_2} f_1 \times M d\hat{t} + \int_{t_2}^{t_m} f_2 \times M d\hat{t}$

구간 4:

$$\tilde{\Omega}_{j,4} = \int_{t_1}^{t_2} f_1 \times M d\hat{t} + \int_{t_2}^{t_3} f_2 \times M d\hat{t} + \int_{t_3}^{t_m} f_3 \times M d\hat{t}$$

구간 5:

$$\tilde{\Omega}_{j,5} = \int_{t_1}^{t_2} f_1 \times M d\hat{t} + \int_{t_2}^{t_3} f_2 \times M d\hat{t} + \int_{t_3}^{t_4} f_3 \times M d\hat{t}$$

위 식을 그대로 사용하면 $t_i(i=1,2,3,4) < t_j$ 인 경우까지 고려가 되므로 적분 하한이 달라지게 된다. 본 연구에서는 부정적분을 이용해 구간적분을 행했으며 이는 $t_i(i=1,2,3,4) < t_j$ 인 경우의 적분 값을 제거할 수 있게 했다. 식 (6)의 중복부호 중 아래 것은 DMA 전압을 지수적으로 감소시킬 경우이며, Fig. 1 경우와 완전히 반대의 경우가 된다.

한 채널에서의 평균 전달함수는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\bar{Q}_j = \frac{1}{\tau_c} \int_{t_m - \tau_c}^{t_m} \tilde{Q}_j(\xi, \hat{t}) d\hat{t} \quad (8)$$

이는 다음에 정의된 순간적 전달함수의 누적합수를 이용해 표현이 가능하다.

$$I_j^{cum}(\xi, t) = \int_{t_j}^t \tilde{Q}_j(\xi, \hat{t}) d\hat{t} \quad (9)$$

$$\bar{Q}_j = \frac{1}{\tau_c} [I_j^{cum}(\xi, t_m) - I_j^{cum}(\xi, t_m - \tau_c)] \quad (10)$$

위의 구간적분에 의해 구한 혼합효과를 고려한 순간적인 전달함수를 적분해 누적함수를 구하고 이를 이용해 식 (10)과 같이 평균 전달 함수를 구할 수 있다.

2.3 혼합효과에 따른 기하평균입경의 변화

DMA 와 CPC 를 이용해 가속화된 측정을 할 때 DMA 전압을 다음과 같이 시간에 대해 지수적으로 변화시킨다.

$$V = V_0 e^{\pm \frac{t}{\tau_r}} \quad (11)$$

여기서 V_0 는 DMA 의 초기 전압이고 τ_r 은 지수적 전압 변화의 시간상수 이다. 입자가 DMA 를 통과하는 동안에도 DMA 의 전압이 변하므로 입자가 DMA 내부를 통과하는 동안 다음과 같은 평균 전기장을 받는다고 할 수 있다.

$$\bar{V} = \frac{1}{t_f} \int_{t_m - t_f}^{t_m} V dt = \pm \frac{\tau_r}{t_f} \left(1 - e^{\mp \frac{t_f}{\tau_r}} \right) V_0 e^{\pm \frac{t}{\tau_r}} \quad (12)$$

여기서, t_f 는 입자가 DMA 내에 머무는 체류시간(residence time) 이다. 또한, DMA 에서 분리되는 입자의 전기적 유동성은 유입되는 다분산 입자의 유량과 샘플링 되는 유량이 같다면 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$Z_p = \frac{Q_{sh} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi\bar{V}L} \quad (13)$$

여기서, Q_{sh} 는 DMA 내로 유입되는 정정공기의 유량이다. 또한, 입자의 전기적 유동성은 식 (4)처럼 표현될 수 있다. 식 (4)와 식 (13)를 같다고 놓

으면 다음과 같이 시간에 따라 분리되는 입자의 크기를 구할 수 있다.

$$D_p = \frac{neC_c}{3\pi\mu} \frac{2\pi\bar{V}L}{Q_{sh} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} = \pm \frac{2}{3} \frac{neC_c L}{Q_{sh} u \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \frac{\tau_r}{t_f} \left(1 - e^{\mp \frac{t_f}{\tau_r}} \right) V_0 e^{\pm \frac{t}{\tau_r}} \quad (14)$$

입자의 시간 t_0 에 DMA 에서 샘플링 된 직경이 D_{p0} 인 입자가 체류시간분포(RTD)를 떠며 계측된다고 가정하면 다음과 같은 기하 평균 입경 D_g 를 갖는 입경분포로 측정 된다.

$$\ln D_g = \int_{t_0}^t \frac{1}{\tau_s} e^{-\frac{t-t_0}{\tau_s}} \ln D_p dt \quad (15)$$

t 를 무한대로 하여 적분을 하면 다음과 같이 표현 될 수 있다.

$$\ln D_g = \ln \left(D_{p0} \frac{C_{cg}}{C_{c0}} \right) \pm \frac{\tau_s}{\tau_r} \quad (16)$$

여기서, C_{c0} 는 입경 D_{p0} 입자의 미끄럼 보정계수(Slip Correction Factor) 이고, 기하 평균 미끄럼 보정계수 C_{cg} 는 다음과 같이 정의했다.

$$\ln C_{cg} = \int_{t_0}^{\infty} \frac{1}{\tau_s} e^{-\frac{t-t_0}{\tau_s}} \ln C_c dt \quad (17)$$

식 (15)로 부터 기하 평균 입경 D_g 는 기하 평균 미끄럼 계수 C_{cg} 와 미끄럼 보정 계수 C_{c0} 의 비의 함수이고 혼합효과에 대한 무차원수 $\tau_s/\tau_r (= \theta_s)$ 의 함수임을 알 수 있다. 무차원수 θ_s 는 혼합효과를 나타내는 척도로 값이 커질수록 혼합의 효과가

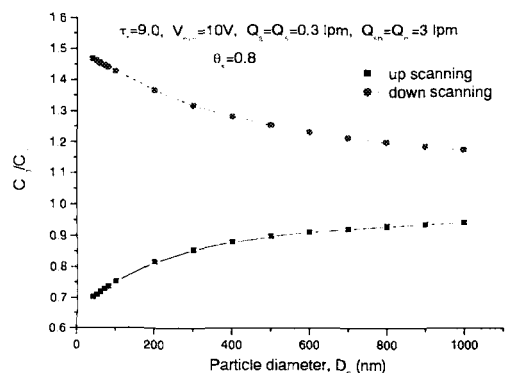


Fig. 2 Change of the Value C_{cg}/C_{c0}

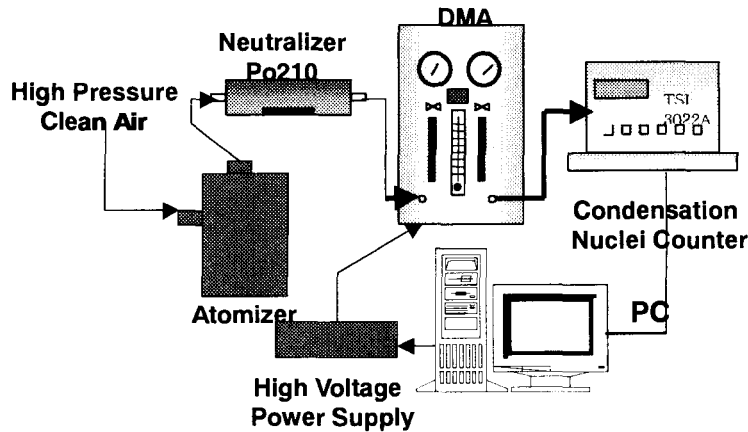


Fig. 3 Schematic of Experimental System

증가하고 $|D_{p0}-D_g|$ 의 변화도 커진다. DMA 전압을 지속적으로 증가시키는 경우 미끄럼 수정 계수는 입경이 증가하면 감소하기 때문에 C_{cg}/C_{c0} 의 값은 1 보다는 작으며 입경이 커질수록 1에 접근한다. DMA 전압을 지속적으로 감소시키는 경우 C_{cg}/C_{c0} 의 값은 1 보다 크며 입경이 작아질수록 점점 커진다. Fig. 2은 수치적 적분에 의해 구한 C_{cg}/C_{c0} 의 값을 나타낸 것이다. 이와 같이 미끄럼 수정 계수가 혼합효과에 기인한 측정 오차에 기여하는 것을 알 수 있다.

D_{p0} 에 실제 다분산입자의 기하평균입경을 대입하여 구한 D_g 는 모든 크기의 입경에 대해 고려하여 얻은 결과와 거의 같은 값을 갖을 것이라 예상할 수 있다.

3. 장치 설명

입경 분포를 측정하기 위해 Fig. 3에서 보는 바와 같이 실험 장치를 구성했다. 0.1%의 염화나트륨(NaCl) 수용액을 분무미립화장치(Atomizer)로 분무해 입자를 발생시켰고, 이를 DMA를 이용해 분리했다. DMA에서 분리된 입자는 입자계수기인 CPC에서 계수되었고 이 데이터를 컴퓨터로 받아들이 입자분포 측정 계산을 행했다. 다분산입자의 유량은 원관과 압력게이지와 밸브를 이용한 층류 흐름 측정기를 이용해 조절했고, 클린어는 Dwyer의 Rotormeter 형태의 유량계를 이용해 조절했다. Spellman사의 모델명 CZE1000R인 고전압발생기와 16비트 해상도의 Voltage Output Card를 이용해 DMA의 전압을 컴퓨터로 제어했다. DMA는 직접 제작한 long type DMA⁽⁴⁾를 사용했으며, CPC는 TSI사의 3022A를 사용했고, SMPS

Firmware를 이용해 0.1초 간격으로 입자계수 데이터를 받아들였다. Overpressure mode로 DMA를 작동시켰다.

4. 결과 및 고찰

4.1 양극 확산 하전 장치와 DMA에 의한 커널

DMA에 가하는 전위차에 따라 전기적 유동성에 대한 전달율이 달라진다. 전기적 유동성은 식(4), 식(13)에서와 같이 작동 조건과 작동 유체가 같다면 입자의 입경과 전하수의 함수인 것을 알 수 있다. 즉, 입자의 크기가 다르더라도 하전된 전하수에 따라 같은 전기적 유동성을 갖을 수 있다. 같은 전기적 유동성을 갖는 모든 크기의 입자에 대해 DMA 전달율이 동일하게 적용된다면 식(1)과 같이 Detector의 응답은 어떤 한 크기의 총 입자수와 이중 같은 전기적 유동성을 갖는 입자수의 비율, 그리고 이 전기적 유동성에 대한 DMA 전달함수의 곱으로 표현된다. 측정하려는 입자들의 전하 분포를 실험을 통해 알려진 분포로 만들기 위해 방사성 동위원소 Po^{210} 을 이용한 양극 확산 하전(bipolar diffusion charging) 장치에 통과시켰고 Long-type의 DMA⁽⁴⁾를 사용했다. Fig. 4는 DMA의 전압을 증가시킬 경우(up scan)의 5번째 채널을 Fig. 5는 DMA의 전압을 감소시킬 경우(down scan)의 20번째 커널을 나타낸다. $\tau_r=5.0$ s, $\tau_c=1.0$ s 이고 $Q_a=Q_s=5$ cm³s⁻¹ $Q_{sh}=Q_m=50$ cm³s⁻¹이며, DMA의 최소전압 V_{min} 은 15 V이다. 양극 확산 하전 장치를 통과하면 한 개의 기본전하로 하

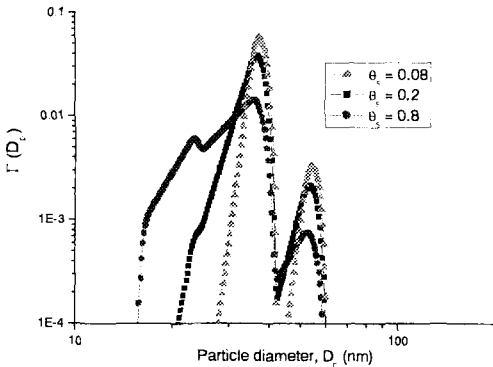


Fig. 4 Kernel Functions for Channel 5 of Up Scanning Measurement (with $\tau_i=5.0s$, $\tau_c=1.0s$, $V_{min} = 15V$, $Q_a=Q_s=5 \text{ cm}^3$, and $Q_c=Q_m=50\text{cm}^3\text{s}^{-1}$) with Three Different Values of τ_s

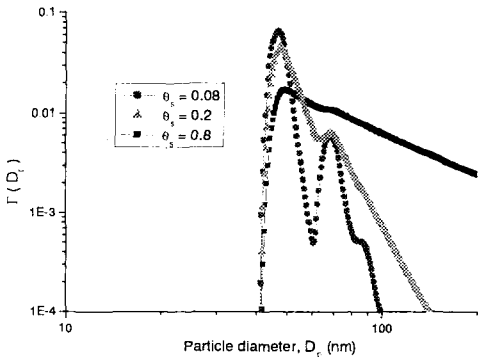


Fig. 5 Kernel Functions for Channel 5 of Down Scanning Measurement (with $\tau_i=5.0s$, $\tau_c=1.0s$, $V_{min} = 15V$, $Q_a=Q_s=5 \text{ cm}^3$, and $Q_c=Q_m=50\text{cm}^3\text{s}^{-1}$) with Three Different Values of τ_s

전된 입자가 두 개의 기본전하로 하전된 입자보다 많으므로 높은 Peak 는 1 개의 기본전하로 하전된 입자에 대한 커널을, 작은 Peak 는 2 개의 기본전하로 하전된 입자에 대한 커널을 나타낸다. 입경의 크기에 대한 전하 분포는 2 개 이하의 기본전하를 갖는 입자에 대해서는 Wiedensholer⁽⁵⁾ 가 제안한 식을 사용했고 3 개 이상의 기본전하를 띤 입자에 대해서는 Gunn 이 제안한 식을 사용했다.

4.2 입자 분포의 측정

입자 분포를 측정하기 위해 입자의 응답지연시간 t_d 와 혼합효과에 대한 시간 상수를 먼저 측정했다. 갑자기 DMA 의 전압을 변화시키고 CPC 의 응답이 갑자기 변화하기 까지 걸린 시간을 측정해서 응답 지연시간을 측정 했고, 마찬가지로 급격하게 농도변화를 주어 CPC 의 농도가 정상상태가 되기

Table 1 GMDs and GSDs of the Three Size Distributions in Fig. 8

	D_g	σ_g
NLIA	39.5 nm	1.679
TSI SMPS	40.6 nm	1.734
Wang and Flagan	44.6 nm	1.706

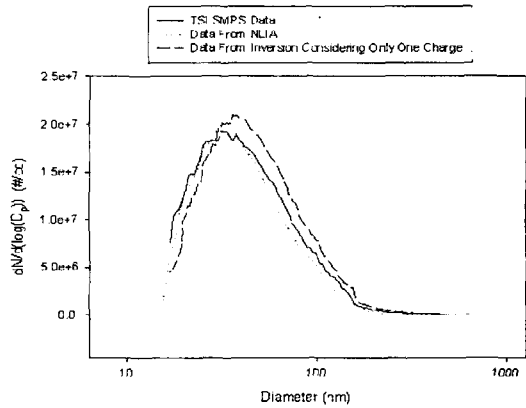


Fig. 6 Size Distributions with Three Different Inversion Kernels (0.1% NaCl Solution Sprayed with Atomizer)

까지의 시간에 따른 농도변화를 측정해 혼합효과에 대한 시간상수를 측정했다. 이렇게 해서 구해진 응답지연시간과 혼합효과에 대한 시간상수를 이용해 식 (4)에서 다른 시스템의 커널 행렬 Γ_{ik} 를 구하고, DMA 의 전압을 시간에 대해 지수적으로 변화시키면서 CPC 응답 S_i 를 구해 원래의 입자 농도의 근사값을 계산하는데 사용했다.

실험은 Q_{sh} 가 3 lpm, Q_a 가 0.3 lpm, Q_s 가 0.3 lpm 의 조건에서 10V 에서 10kV 까지 60 초동안 변화시키면서 이루어졌다. Twomey 의 NLIA(Non Linear Iterative Algorithm)를 이용해 입경분포의 근사해를 구하면 Abde Kapadia⁽⁶⁾의 결과처럼 원래의 분포 주위를 오르내리며 진동하는 근사해를 얻을 수 있으며 이를 스무딩(smoothing)했다. Fig. 6 은 상용 프로그램인 TSI 사의 SMPS 를 이용해 구한 입자의 분포와 본 연구에서 사용된 혼합효과를 고려한 커널을 이용해 얻은 결과 그리고 Wang 과 Flagan⁽⁴⁾ 이 100nm 이하 크기의 입자에 대해 제안한 식에 의한 결과를 비교했다. Wang 과 Flagan 제안한 식에서는 다중전하를 갖는 입자를 무시했으므로 다중전하를 갖는 입자가 같은 전기적 유동성을 갖는 단일전하 입자로 여겨져 수 농도가 높아짐을 알 수 있다. Table 1 에서는 이 세 가지 방법으로 구한 입자분

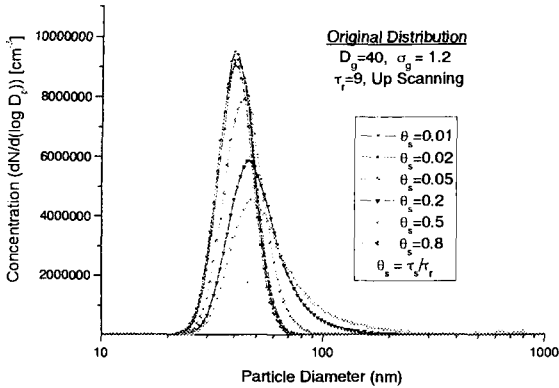


Fig. 7 Change of the Size Distribution (with $D_g=40\text{nm}$, $\sigma_g=1.2$, $\tau_r=9$) with Six Different τ_s (up scan)

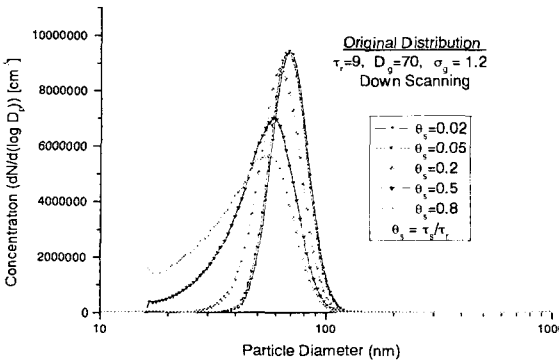


Fig. 8 Change of the Size Distribution (with $D_g=70\text{nm}$, $\sigma_g=1.2$, $\tau_r=9$) with Six Different τ_s (down scan)

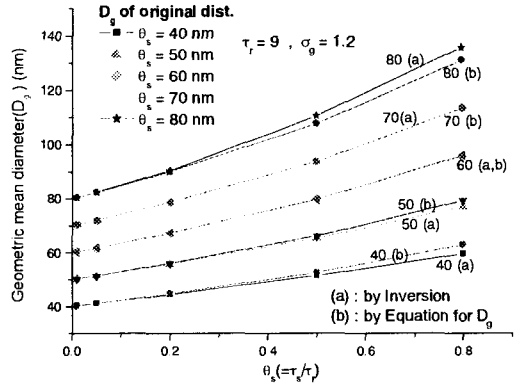


Fig. 9 Change in GMD (with $\sigma_g=1.2$, $\tau_r=9$) with Five Different $\tau_s=9$ (Up Scan)

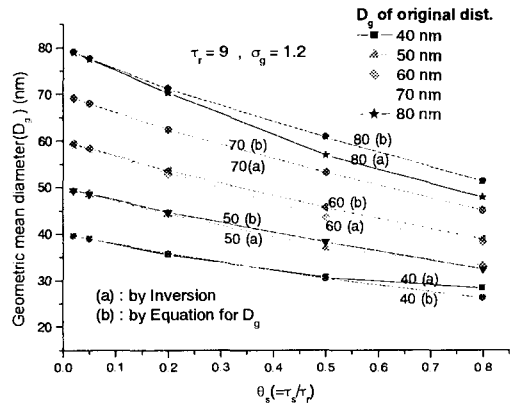


Fig. 10 Change in GMD (with $\sigma_g=1.2$, $\tau_r=9$) with Five Different $\tau_s=9$ (Down Scan)

포 근사값의 기하평균입경(Geometric Mead Diameter, GMD) D_g 와 기하표준편차(Geometric Standard Deviation, GSD) σ_g 를 나타내었다.

4.3 혼합효과에 의한 기하평균입경의 변화

가상의 입자분포를 혼합효과가 있는 커널에 곱해 가상적인 CPC 응답을 얻고 이를 혼합효과가 없는($\theta_s = 0$) 커널에 의해 역산을 하면 혼합효과에 의한 영향을 고려할 수 있다.

Fig. 7 결과는 DMA 의 전압을 지수적으로 증가시킬 때 혼합효과크기에 따른 입자 분포의 변화를 나타낸 것이다. 혼합효과가 커질수록 역산에 의해 구해지는 입자 분포는 넓어지고 그 중심이 큰 쪽으로 변하는 것을 관찰할 수 있다. 이는 혼합효과에 의해 DMA 에서 같은 시간에 분리된 입자가 체류시간분포(RTD)로 CPC 에서 측정되어 DMA 에서 나중에 분리된 입자와 함께 측정되기

때문이다. Fig. 8 은 DMA 전압을 지수적으로 감소시킬 경우의 결과이다. 이 경우 큰 크기의 입자에서 작은 크기의 입자로 분리해 나가므로 입자분포의 중심이 작은 입자쪽으로 이동하는 것을 관찰할 수 있다. Fig. 9 과 Fig. 10 는 가상의 입자분포의 기하평균입경을 변화시키면서 혼합효과에 따른 측정입경분포의 기하평균입경을 구해 이를 앞에서 구한 식(16)에 의한 값과 비교한 것이다. 가상의 입경분포의 기하평균입경의 크기에 따라 혼합효과 때문에 발생하는 기하평균입경의 오차가 달라짐을 알 수 있다. 또한 식 (16)을 통해 얻은 기하평균입경과 가상입경분포로 얻어진 측정입경분포의 기하평균입경을 비교하면 그 경향이 매우 비슷함을 관찰할 수 있다. 식 (16)은 하나의 입경에 대한 식이므로 가상입경분포의 역산으로 얻어진 값과 오차를 보이고 있다. 식 (16)는 기하 평균 미끄럼보정계수와 원래 입경분포의 기하평균입경에 대한 미끄럼 보정 계수의 비의 함수이며 이 비는 Fig. 3

에서와 같은 경향을 보이고 혼합효과무차원수 θ_c 값이 작을수록 1 에 가까워진다. 식 (16) 통해 현상을 설명하면, 입자의 크기가 작을수록 이 보정계수의 비가 1 에서 멀어지고, 멀어질수록 혼합효과에 의해 발생하는 입경오차를 줄인다. 이는 식 (14) 로부터 정리된 다음 식으로부터 설명 될 수 있다.

$$\Delta t = t_1 - t_0 = \pm \tau_r \ln \frac{D_{p0} C_{cl}}{D_{pl} C_{c0}} = const \quad (18)$$

DMA 전압을 증가시키는 경우 D_{p0} 와 C_{c0} 를 상수라고 가정하면 C_{cl} 이 작아질수록 D_{pl} 도 작아지므로 $(D_{pl} - D_{p0})$ 가 줄어들을 알 수 있고 이런 이유로 작은 입경일 경우 혼합효과에 의한 영향이 줄어든다. DMA 전압을 감소시키는 경우 자연로그 안쪽이 역수가 되므로 작은 입경에서 같은 현상이 일어남을 알 수 있다.

5. 결론

Russell 등이 제안한 식을 기초로 부정적분을 통해 얻은 시스템의 커널과, DMA 의 전압을 지수적으로 변화시키면서 얻은 CPC 시간응답 데이터를 이용해 입자분포의 근사값을 구해 그 결과를 비교했다. Up scan 을 해서 입자분포를 얻은 경우 혼합효과가 커질수록 기하평균입경의 크기가 커지고 기하표준편차도 증가했다. Down scan 의 경우 혼합효과가 커질수록 기하 평균입경이 작아지고 기하표준편차는 증가했다. 이는 임의의 시간에 DMA 에서 샘플링 된 입자가 CPC 에서 체류시간 분포를 띠며 측정되기 때문이다. 가상의 입경분포를 혼합효과가 있는 시스템 커널에 곱해 얻어진 가상 CPC 응답을 혼합효과가 없는($\theta_c = 0$) 커널로 역산해 얻은 입경분포로부터 혼합효과의 영향을 관측할 수 있다. 이 결과 입경의 크기가 클수록 측정된 입경분포의 혼합효과에 따른 기하평균입경의 오차가 증가하는 것을 알 수 있었다. 이 결과와 체류시간분포를 적용해 얻은 식 (16)에 의한 결과와 비교하면 아주 비슷한 경향을 보인다. 혼합효과 무차원수 θ_c 가 증가할수록 오차가 커지고 입경의 크기가 커질수록 오차가 증가했다. 입경의 커

질수록 오차가 증가하는 이유는 DMA 의 전압을 지수적으로 변화시킬 경우 같은 시간동안에 DMA 에서 채취하는 입경의 범위 $\Delta \ln D_p$ 가 미끄럼 보정계수의 변화로 인해 변하기 때문이다. 입경이 작을수록 입경변화에 따른 미끄럼 보정계수의 변화가 크기때문에 식 (18)에 따라 동 시간당 채취 입경의 범위가 감소하여 혼합효과에 의한 영향이 줄어든다. 입경이 커질수록 미끄럼 보정계수의 변화가 줄어들어 미끄럼 계수에 의한 영향이 줄어들 것이다. 본 연구에서는 가상의 CPC 응답을 얻어 결과를 도출했으며 이에 대한 실험이 필요할 것 같다.

후 기

본 연구는 국가지정연구소(NRL)사업과 두뇌한국 21(BK21)사업의 연구비 지원을 받아 수행 되었습니다.

참고문헌

- (1) Fissan, H. J., Helsper, C., and Thielsen, H. J.,1983, "Determination of Particle Size Distributions by Means of an Electrostatic Classifier," *Journal of Aerosol Science*, Vol. 14, pp. S354-357
- (2) Shih Chen Wang and Richard C. Flagan, and John H. Seinfeld, 1990, "Scanning Electrical Mobility Spectrometer," *Aersol Science and Technology*, Vol.13, pp.230-240.
- (3) Lynn M. Russell, Richard C. Flagan, and John H. Seinfeld, 1995, "Asymmetric Instrument Response Resulting from Mixing Effects in Accelerated DMA-CPC Measurements," *Aersol Science and Technology*, Vol.23, pp.491-509
- (4) Kang-Ho Ahn, Nam-hyo Kim, Jong-ho Lee, Gwi-Nam Bae, 1996, "Particle Path and Performance Evaluation of Differential Mobility Analyzer," *KSME Journal(B)*, Vol. 20, No.6, pp.2005-2013
- (5) A. Wiedensohler, 1988,"An approximation of the Bipolar Charge Distribution for Particles in the Submicron Size Range," *Journal of Aerosol Science*, Vol. 19, No. 3, pp. 387-389
- (6) Abde Kapadia, 1980,"Data Reduction Techniques for Aerosol Size Distribution Measuring Instruments," Ph.D. Thesis in the University of Minnesota