

〈논 문〉

## Differential Mobility Analyzer (DMA)내의 입자운동 및 특성 분석

안강호\* · 김남효\*\* · 이종호\*\*\* · 배귀남\*\*\*\*

(1995년 8월 11일 접수)

### Particle Path and Performance Evaluation of Differential Mobility Analyzer

Kang-Ho Ahn, Nam-hyo Kim, Jong-ho Lee and Gwi-Nam Bae

**Key Words :** Differential Mobility Analyzer (DMA, 단분산 초미세입자 분리기), Numerical Analysis (수치해석), Particle Path (입자의 운동궤적), Monodisperse Particle (단분산 입자), Sub-Micron Particle(미세입자), Tandem Differential Mobility Analyzer (TDMA, 2단 단분산 초미세입자 분리기)

#### Abstract

Particle paths and flow fields in a prototype differential mobility analyzer (DMA) were numerically analyzed solving Navier-Stokes equation, electric field equation and particle motion considering viscous drag force, Coulomb force and polarization force. Analytically predicted particle diameters for the prototype DMA are in good agreement with the measured particle diameters within  $\pm 1$  %. And the analytically predicted particle diameters are also in good agreement with numerical results for the prototype DMA.

기 호 설 명		
$C_c$	: Cunningham 미끄럼보정계수 (Cunningham slip correction factor)	$F_p, F_{px}, F_{py}$ : 분극에 의한 정전기력, x- 및 y-방향 정전기력 (Polarization force)
$C_d$	: 항력계수	$L$ : 길이
$D_p$	: 입자의 직경	$Q_{sh}, Q_{ex}$ : Sheath air flow 및 Excess air flow
$E$	: 전기장	$Q_{po}, Q_{mo}$ : Polydisperse air flow 및 Monodisperse air flow
$F_d, F_{dx}, F_{dy}$	: 유체저항력, x- 및 y-방향 유체저항력	$Q_e$ : $= n_e e$
$F_c, F_{cx}, F_{cy}$	: 정전기력, x- 및 y-방향 정전기력	$Re_p$ : 입자 Reynolds 수
		$V$ : 전압
		$Z_p$ : Electrical mobility
		$e$ : 전자의 전하량
		$m$ : 입자의 질량
		$n_e$ : 입자의 전하수

\*회원, 한양대학교 기계공학과

\*\*생산기술연구원 생산설비개발센터

\*\*\*회원, 생산기술연구원 생산설비개발센터

\*\*\*\*회원, 한국과학기술연구원 기전연구부

- $d$  : 압력
- $r_1, r_2$  : 내부 및 외부원통의 반경
- $t$  : 시간
- $u, v$  : x- 및 y- 방향 유체속도
- $u_p, v_p$  : x- 및 y- 방향 입자속도
- $x, y$  : Cartesian 좌표
- $x_p, y_p$  : 입자의 x- 및 y- 위치
- $\varepsilon$  : 유전상수
- $\varepsilon_p$  : 입자의 유전상수
- $\varepsilon_0$  : 진공중의 유전상수
- $\lambda$  : 유체의 평균자유행로
- $\mu$  : 유체의 점성계수
- $\nu$  : 유체의 동점성계수
- $\rho$  : 유체의 밀도

### 1. 서 론

환경 및 산업용 입자계측장비의 검교정, 미세입자의 계측, 그리고 최근 관심이 증대되고 있는 초미세입자의 연구 등에 꼭 필요한 장비로 Differential Mobility Analyzer (DMA)를 들 수 있다. 이 장비는 Hewitt<sup>(1)</sup>가 처음 그 개념을 소개한 후, Bademosi<sup>(2)</sup>에 의해 개량되었으며 Liu 와 Pui<sup>(3)</sup>에 의해 개조되어 지금의 연구용 장비로 사용되고 있다. 이 장비는 에어로졸 분야 연구의 필수 장비라 할 수 있겠다. 그 기능은 다분산(polydisperse) 입자들 중에서 필요한 크기의 단분산(monodisperse) 입자만을 골라내며, 작동범위는 일반적으로 0.005 $\mu\text{m}$ 에서 1.0 $\mu\text{m}$  정도의 입자를 만들어낼 수 있다. 국내에서도 최근 에어로졸 및 입자공학, 환경공학 분야 등에서의 연구가 활발히 진행되고 있어 이 장비의 수요는 급격히 증가하고 있으나 전량 수입에 의존하고 있다.

이 장치에 대한 이론적 연구는 주로 유선함수(stream function)에 기초한 해석적 방법을 사용하였다.<sup>(4-6)</sup> 즉, DMA 내의 전달함수(transfer function) 개념을 도입하여 입자의 전기적 유동성(electric mobility)을 유량과 전압의 함수로 표시되는 에어로졸 분류(aerosol classification) 이론을 개발하였다. 그러나 본 연구에서는 DMA 내 입자의 운동을 보다 정확히 분석하기 위하여 유동장 및 전기장을 수치 해석적 방법으로 구하였다. 아울러 이 유동장 및 전기장내에서 하전된 입자의 운동궤적도 수치 해석적으로 분석하였다.

또한 본 연구를 통하여 DMA를 제작하였으며, 이의 작동 특성에 대해 수치 해석적으로 분석한 결과와 제작된 DMA의 실험결과를 비교하였다.

### 2. 이론적 배경

#### 2.1 해석적 모델

이 모델은 DMA 에서 발생시키는 입자 크기와 전압과의 관계를 계산하는 식으로서 가장 많이 사용되고 있다. 이의 유도과정을 살펴보면 다음과 같다.

Fig. 1 은 DMA 의 내부 구조를 개략적으로 보여주고 있다. 이의 작동원리는 내부 원통 주위로 입자가 없는 깨끗한 공기를 보내주고( $Q_{sh}$ ), 외부원통의 안쪽으로는 전기적으로 중화된 다분산(polydisperse) 입자가 들어 있는 공기를( $Q_{po}$ ) 흘려 보낸다. 이때 내부와 외부의 원통에 전기장을 걸어준다. 일반적으로 외부 원통은 접지시켜 주고 내부 원통은 음극을 가하여 양전하를 띤 입자를 골라내거나, 혹은 양극의 전압을 가하여 음전하를 띤 입자를 골라낸다. 내부 원통과 외부 원통 사이에 작용하는 전기장에 의하여 전기를 띤 입자는 전기력을 받아 입자의 전기 극성에 따라 원통의 내부 방향 또는 외부 방향으로 움직이게 된다. 동시에 유체의 흐름에 의해 입자는 하류 측으로 움직이게 된다. 이때 입자에 작용하는 힘은 크게 두가지이며 전기장에 의한 정전기력과 입자와 유체의 상대속도에 의한 유체 저항력이 있다. 이렇게 하여 전기적으로 동일한 유동성(electrical mobility)을 갖는 입자만을 추출해내게 된다. 여기서 정전기력과 유체에 의한 저항력은 다음과 같이 표시된다.

$$F_c = neE \tag{1}$$

$$F_d = 3\pi\mu D_p \frac{v_p}{C_c} \tag{2}$$

여기서 Cunningham 미끄럼 보정계수  $C_c = 1 + 2.5 \frac{\lambda}{D_p} \left[ 1.252 + 0.399 \exp\left(-1.1 \frac{D_p}{2\lambda}\right) \right]$ 이며, 이는 기

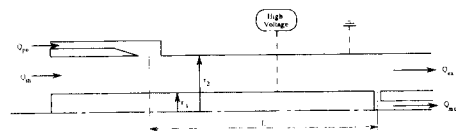


Fig. 1 Schematic diagram of Differential Mobility Analyzer(DMA)

체분자의 평균 자유행로와 입자 크기에 따른 기체의 입자 표면에서의 미끄럼 현상에 대한 수정계수다. 입자에 미치는 힘은 균형을 이루므로 식 (1)과 (2)에서 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$n_e e E = 3\pi\mu D_p \frac{v_p}{C_c} \quad (3)$$

여기서 전기적 유동성을 다음과 같이 정의하면,  $Z_p = \frac{v_p}{E}$ 이며, 식 (3)은 아래와 같이 표시할 수 있다.

$$Z_p = n_e e \frac{C_c}{3\pi\mu D_p} \quad (4)$$

Fig. 1의 DMA 내 입자 mobility 를 구하면 다음과 같이 나타난다.<sup>(4,5)</sup>

$$Z_p = \frac{\left[ Q_{sh} + \frac{1}{2}(Q_{po} - Q_{mo}) \right] \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi VL} \quad (5)$$

식 (4)와 (5)에서 입자직경  $D_p$ 를 아래와 같이 구할 수 있다.

$$D_p = \frac{2n_e e C_c VL}{3\mu \left[ Q_{sh} + \frac{1}{2}(Q_{po} - Q_{mo}) \right] \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (6)$$

이  $D_p$ 는 DMA의 유량조건과 전압의 변화에 의해 발생시킬 수 있는 입자 크기를 말하며, DMA의 작동범위내 입자 크기에서는 일반적으로 입자의 전하수 ( $n_e$ )는 1이다.

## 2.2 수치해석

유동장 및 전기장내 입자의 운동궤적을 해석하기 위하여 유동장 속도 분포와 전기장 분포는 입자의 존재 및 운동에 의해 전혀 영향을 받지 않으며, 단지 공간좌표의 함수로 가정하였다. 이 장치의 작동범위 특성상 최대 입자 크기는  $1.0\mu\text{m}$ 이며, 입자의 최대 농도는  $10^6\text{개}/\text{cm}^3$  이하이므로 입자의 유동이 유동장에 미치는 영향은 매우 작아 이러한 가정을 설정하였다. 이때 유동장의 속도분포  $\vec{u}$ 는 아래 Navier-Stokes 방정식의 해로서 주어진다.

### ● 연속 방정식

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (7)$$

### ● Navier-Stokes 방정식

$$\rho(\vec{u} \cdot \nabla \vec{u}) = -\nabla \bar{p} + \mu \nabla^2 \vec{u} \quad (8)$$

DMA 내 전기장 분포는 보존형으로서 아래와 같다.

$$\nabla \cdot (\epsilon \nabla V) = 0 \quad (9a)$$

$$\vec{E} = -\nabla V \quad (9b)$$

$\epsilon$ 는 물질의 유전상수이며,  $V$ 는 전압을 나타낸다.

이들 유동장 및 전기장내에서 움직이는 입자는 구의 형태를 가지고 있으며, 강체운동(rigid body motion) 효과를 무시한다고 할 때, 입자의 질량중심(centroid)의 선 운동에 대하여 Lagrangian 시각으로 아래의 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$m \frac{d\vec{v}_p}{dt} = \vec{F}_a + \vec{F}_c + \vec{F}_p \quad (10)$$

여기서  $m$ 은 입자의 질량,  $\vec{v}_p$ 는 입자의 속도이며  $t$ 는 시간이다. 본 계산에서 중력에 의한 입자의 침강 효과는  $\sim O(10^{-9})$ 이며, 입자의 하전에 의한 image force는 입자가 내부 원통면 근처에 매우 근접하였을 때 나타나므로 고려하지 않았다. 또한 입자의 농도가  $10^6\text{개}/\text{cm}^3$  이하이므로 공간전하 효과를 고려해야하는  $10^7\text{개}/\text{cm}^3$ 보다 매우 작아 고려하지 않았다. 식 (10)의 힘의 성분은 아래와 같다.

### ● 유체저항력

$$\vec{F}_a = \frac{1}{2} C_d \rho C_c^{-1} (\vec{u} - \vec{v}_p) |\vec{u} - \vec{v}_p| \frac{\pi}{4} D_p^2 \quad (11a)$$

### ● 정전기력

$$\vec{F}_c = Q_e \vec{E} \quad (11b)$$

### ● Polarization force

$$\vec{F}_p = \frac{\pi}{4} \left( \frac{\epsilon_p - 1}{\epsilon_p + 2} \right) \epsilon_0 D_p^3 \nabla (\vec{E} \cdot \vec{E}) \quad (11c)$$

여기서  $C_d$ 는 입자와 기체간의 상대속도에 따라 발생하는 항력계수로서 입자의 상대  $\text{Re}$ 수 ( $\text{Re}_p = |\vec{u} - \vec{v}_p| D_p / \nu$ )가 1보다 작은 경우  $C_d = 24 / \text{Re}_p$  정도이며 이 범위를 벗어나는 경우에는 다른 연구 결과를 참조할 수 있다.<sup>(7)</sup>  $Q_e = n_e e$ 이며,  $\epsilon_p$ 는 입자의 유전상수를 나타낸다.

식 (10)은 입자의 운동 및 궤적을 Lagrangian 시각에서 표현한 것이며, 수치해를 얻기 위하여 아래와 같이 네 개의 상미분 방정식계(system of ordinary differential equations)로 재정립할 수 있다.

$$\frac{dx_p}{dt} = u_p \quad (12a)$$

$$\frac{dy_p}{dt} = v_p \quad (12b)$$

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{1}{m}(F_{ax} + F_{cx} + F_{px}) \quad (12c)$$

$$\frac{dv_p}{dt} = \frac{1}{m}(F_{ay} + F_{cy} + F_{py}) \quad (12d)$$

식 (11)과 식 (12)를 연결하여 고려할 때, 식 (12)의 해는  $e^{-at}$ 항이 포함되게 되며, 보통 입자의 직경이 수  $\mu\text{m}$  이하인 경우  $a \sim O(10^5)$  이상으로 매우 크게 나타나게 된다. 따라서 수치해를 구하는 경우 매우 심각한 stiffness 문제가 발생하게 되고, 상미분 방정식의 해에 일반적으로 사용되는 Runge-Kutta 방법 등의 explicit 형을 사용하는 경우 안정적이고 수렴성이 좋은 해를 얻을 수 없다. 따라서 식 (12)를 적분하기 위하여 implicit 방법이 사용되었으며, 특히 stiff 상미분 방정식을 위하여 제안된 Gear<sup>(8)</sup>의 방법을 사용함으로써 수렴성이 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

DMA 내 유동장 및 전기장은 2-D 원통 좌표를 사용하여 축대칭으로 계산하였으며, 본 수치해석에는 SIMPLE code<sup>(9)</sup>를 사용하였다. 유동장의 입구 경계조건은 plug flow로 가정하였다.  $r_1$  및  $r_2$ , 즉 내부원통 및 외부원통의 반경은 각각 0.953cm와 1.905cm이며, 입자 유입간극 (particle entrance slit) 중앙에서 입자 샘플링간극 (particle sampling slit) 중앙까지의 거리  $L$ 은 44.422cm로 하였다. 또한 다분산 입자 유입간극과 단분산 입자 샘플링간극은 각각 5.7mm와 1.6mm로 하였다. 이들 치수는 시험용으로 제작한 DMA의 실제 값으로 수치계산시 이와 동일한 치수를 사용하였다. sheath air ( $Q_{sh}$ ) 및 excess air ( $Q_{ex}$ )의 유량은 각각 3 lpm이고 입자 유입간극을 통과하는 에어로졸 유량 ( $Q_{po}$ ) 및 입자 샘플링간극을 통과하는 sample 유량 ( $Q_{mo}$ )이 각각 0.3lpm일 경우의 유선을 Fig. 2에 표시하였다. Fig. 2의 A는 입자 유입간극의 중

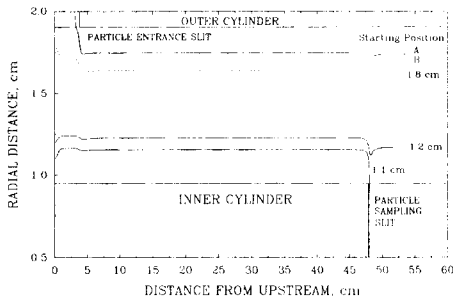


Fig. 2 Stream lines in the DMA

간지점을 통과하는 유선을 나타내며, B는 입자 유입간극의 상부측을 통과하는 유선을 나타낸다. 이 그림에서 y-축 스케일이 매우 확대되었으므로 해석시 주의를 요한다. 이들 유선은 입자 유입간극에서 급격히 원주방향으로 유입되어 원통면과 평행하게 후류로 진행하며, 입자 샘플링간극에서 약간 튀는 경향을 볼 수 있다. 한편 원통 중심선에서 1.8 cm 떨어진 곳에서 유입된 유선은 입구부분에서 경계층을 형성하며 곧 발달된 유동으로 되지만 입자 유입간극에서 유입되는 유량에 의해 휘게 되는 것을 볼 수 있다. 원통 중심선에서 1.2cm 떨어진 곳에서 유입된 유선은 경계층이 급격히 형성되면서 원통중심선에서 멀어지나 입자 유입간극에서 들어오는 유량에 의해 원통중심선 쪽으로 움직이는 것을 알 수 있다. 그러나 입자 샘플링간극 부분에 이르러서는 급격히 원통 중심선 쪽으로 오다 경계층이 다시 성장하면서 바깥쪽으로 움직이는 것을 볼 수 있다. 한편 원통 중심선에서 1.1cm 떨어진 곳에서 유입된 유선은 입자 샘플링간극을 따라 흡입되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 3, Fig. 4, 및 Fig. 5는  $Q_{sh} = Q_{ex} = 3\text{lpm}$ ,  $Q_{po} = Q_{mo} = 0.3\text{lpm}$ 의 유량이 흐르며, 양 전극에 걸리는 전압은 500 volts일 때 입자 유입간극의 상부측, 가운데, 그리고 하부측에서 각각 유입되었을 경우 입자의 움직이는 경로를 수치 해석적으로 예측한 것이나 확산에 의한 경로변경은 고려하지 않았다. Fig. 3는 직경  $0.1007\mu\text{m}$ , 밀도  $1\text{g/cm}^3$ 인 입자가 입자 유입간극의 유입위치에 따라 움직이는 경로를 예측한 것이다. 입자 유입간극의 상부측과 가운데에서 유입된 입자는 입자 샘플링간극에 포집되지 않았으나 입자 유입간극의 하부측에 유입된 입

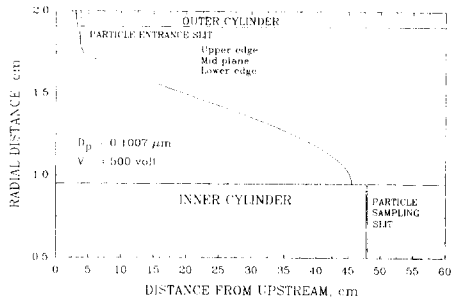


Fig. 3 Particle paths in the DMA at  $Q_{sh} = Q_{ex} = 3\text{lpm}$ ,  $Q_{po} = Q_{mo} = 0.3\text{lpm}$ , and applied voltage = 500 volts for  $D_p = 0.1007\mu\text{m}$

자는 입자 샘플링간극으로 포집되는 것을 볼 수 있다. 이로 미루어 입자 유입간극에서 유입된 0.1007  $\mu\text{m}$  입자의 일부만이 입자 샘플링간극에 포집되는 것을 알 수 있다. 그러나 Fig. 4를 보면, 직경 0.1059  $\mu\text{m}$  입자의 경우 입자 유입간극에 유입된 모든 입자는 입자 샘플링간극으로 모두 포집되는 것을 알 수 있다. 이때 입자의 직경 0.1059  $\mu\text{m}$ 은 식 (6)에서 구한 값이다. 그러므로 전압이 500 volts인 경우 해석적인 방법으로 구한 입자의 직경이 수치해석적으로 분석한 결과와 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 한편 계산값 0.1059  $\mu\text{m}$ 보다 약간 큰 직경 0.1109  $\mu\text{m}$  입자의 이동 경로는 Fig. 5에 보여주고 있다. 입자 유입간극 상부측과 가운데에서 유입된 입자는 모두 입자 샘플링간극으로 포집되었지만 입자 유입간극의 하부측에 유입된 입자는 입자 샘플링간극의 하부측에 포집되는 것을 볼 수 있다. Fig. 5의 A는 중심선에서 1.2cm 떨어진 곳

을 지나는 유선을 표시한 것으로 입자 유입간극의 하부측에 유입된 입자의 운동 궤적과 비교하기 위하여 표기한 것으로 입자의 운동궤적이 유동장의 영향을 받고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 6, Fig. 7, 그리고 Fig. 8은  $Q_{sh}=Q_{ex}=3\text{lpm}$ ,  $Q_{po}=Q_{mo}=0.3\text{lpm}$ 의 유량이 흐르며, 양 전극에 걸리는 전압이 100volt일 때 입자 유입간극의 상부

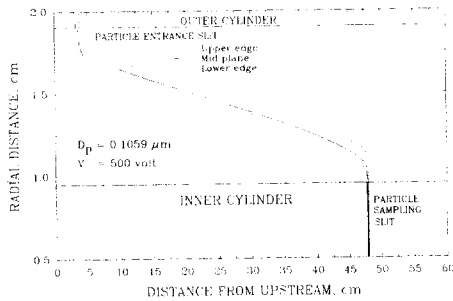


Fig. 4 Particle paths in the DMA at  $Q_{sh}=Q_{ex}=3\text{lpm}$ ,  $Q_{po}=Q_{mo}=0.3\text{lpm}$ , and applied voltage=500 volts for  $D_p=0.1059\mu\text{m}$  which is obtained from Eq. (6)

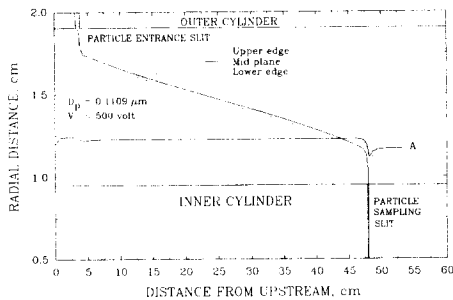


Fig. 5 Particle paths in the DMA at  $Q_{sh}=Q_{ex}=3\text{lpm}$ ,  $Q_{po}=Q_{mo}=0.3\text{lpm}$ , and applied voltage=500 volts for  $D_p=0.1109\mu\text{m}$ . A : Stream line starting at radius=1.2cm and upstream

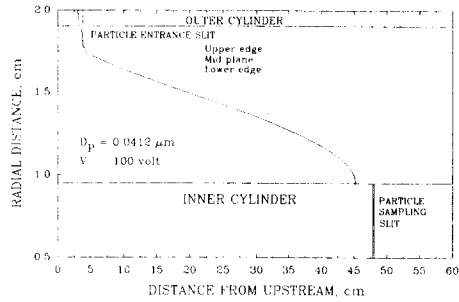


Fig. 6 Particle paths in the DMA at  $Q_{sh}=Q_{ex}=3\text{lpm}$ ,  $Q_{po}=Q_{mo}=0.3\text{lpm}$ , and applied voltage=100 volt for  $D_p=0.0412\mu\text{m}$

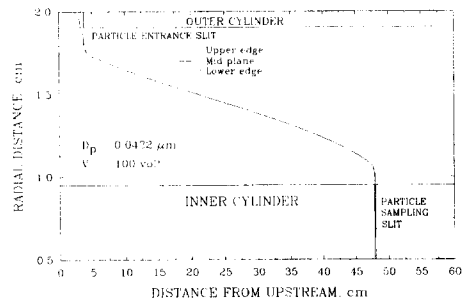


Fig. 7 Particle paths in the DMA at  $Q_{sh}=Q_{ex}=3\text{lpm}$ ,  $Q_{po}=Q_{mo}=0.3\text{lpm}$ , and applied voltage=100 volt for  $D_p=0.0432\mu\text{m}$  which is obtained from Eq. (6)

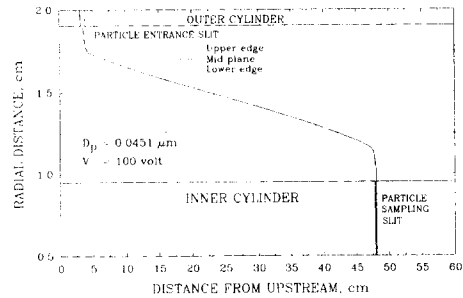
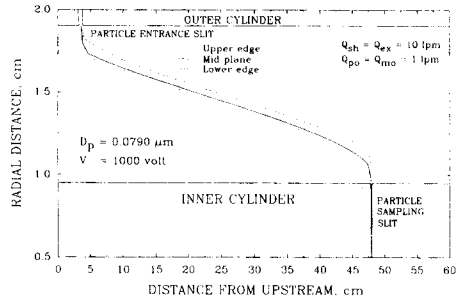
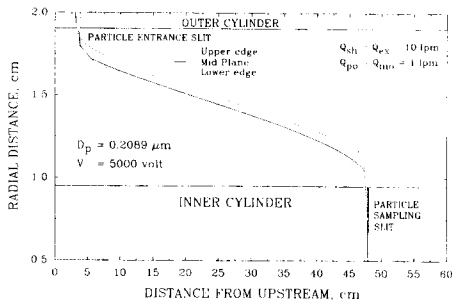


Fig. 8 Particle paths in the DMA at  $Q_{sh}=Q_{ex}=3\text{lpm}$ ,  $Q_{po}=Q_{mo}=0.3\text{lpm}$ , and applied voltage=100 volt for  $D_p=0.0451\mu\text{m}$



**Fig. 9** Particle paths in the DMA at  $Q_{sh} = Q_{ex} = 10$  lpm,  $Q_{po} = Q_{mo} = 0.1$  lpm, and applied voltage = 1000 volt for  $D_p = 0.0790 \mu\text{m}$  which is obtained from Eq. (6)



**Fig. 10** Particle paths in the DMA at  $Q_{sh} = Q_{ex} = 10$  lpm,  $Q_{po} = Q_{mo} = 0.1$  lpm, and applied voltage = 5000 volts for  $D_p = 0.2089 \mu\text{m}$  which is obtained from Eq. (6)

측, 가운데, 그리고 하부측에서 입자가 각각 유입 되었을 때 입자의 운동 궤적을 수치 해석적으로 예측한 것이다. Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8 은 입자의 직경이 각각  $0.0412 \mu\text{m}$ ,  $0.0432 \mu\text{m}$ ,  $0.0451 \mu\text{m}$ 인 경우 입자의 운동궤적을 추적한 것이다. 전술한  $V = 500$  volts의 경우처럼  $0.0412 \mu\text{m}$  입자는 입자 유입간극의 하부측에 유입된 입자만이 입자 샘플링간극에 포집되는 것을 볼 수 있다(Fig. 6). 한편 이 보다 약간 큰  $0.0432 \mu\text{m}$  입자는 모두 입자 샘플링간극에 포집되는 것을 볼 수 있다(Fig. 7).  $0.0432 \mu\text{m}$  입자 크기는 식 (6)에서 얻은 값이다. 한편, Fig. 8의  $0.0451 \mu\text{m}$  크기의 입자는 입자 유입간극의 상부 및 가운데로 유입된 입자만이 일부 포집되는 것

을 볼 수 있다. 이로써 Fig. 4의 경우와 마찬가지로 전압이 100 volt인 경우도 해석적으로 구한 입자의 크기가 수치해석적으로 분석한 결과와 일치함을 알 수 있다.

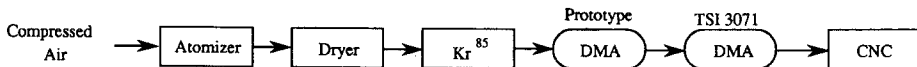
Fig. 9는 유량이  $Q_{sh} = Q_{ex} = 10$  lpm,  $Q_p = Q_{mo} = 1$  lpm이며 전압이 1000volt인 경우 식 (6)에서 구한 입자직경  $0.0790 \mu\text{m}$ 의 운동 궤적을 수치 해석적으로 분석한 것으로 입자 유입간극으로 들어온 입자는 모두 입자 샘플링간극을 통해 포집되는 것을 볼 수 있다. Fig. 9와 같은 유량조건에서 전압을 5000 volts로 하고 식 (6)에서 구한 입자직경  $0.2089 \mu\text{m}$ 의 입자를 입자 유입간극을 통해 유입시켰을 경우 입자의 운동 궤적을 수치계산으로 구한 것을 Fig. 10에 나타내었다. 이 경우도 Fig. 9와 마찬가지로 입자유입면으로 유입된 입자는 입자 샘플링간극으로 모두 포집되는 것을 알 수 있다.

이상의 수치계산 결과를 보면 식 (6)의 계산값  $D_p$ 는 정확히 입자 샘플링간극으로 모두 포집되는 것을 알 수 있다.

### 3. 실험 및 고찰

위의 계산결과를 검증하기 위해 시험용 DMA를 제작하여 상용으로 시판하고 있는 TSI사의 Electrostatic Classifier (Model 3071)로 그 성능을 비교, 평가하였다. Fig. 11은 실험장치를 보여주고 있다.

입자를 포함하지 않은  $2.5 \text{kg/cm}^2$ 의 고압공기를 NaCl이 들어 있는 분무기(Atomizer)<sup>(11)</sup>에 연결하여 NaCl 입자를 분무시킨다. 이들 입자는 확산건조기(Diffusion Dryer)에서 건조되어  $\text{Kr}^{85}$  정전기 중화기(Neutralizer)에 유입된다. 이 과정을 거친 NaCl 입자는 전기적으로 중화되어 Boltzmann 평형 상태에 이른다. 이렇게 발생된 입자는 시험용 DMA에 유입된다. 시험용 DMA에 유입되는 유량은  $Q_{sh} = Q_{ex} = 3$  lpm,  $Q_{po} = Q_{mo} = 0.3$  lpm으로 작동되었으며 이들 유량은 바로 TSI 모델 3071로 연결되어 동일 유량을 두 대의 DMA에 유입되도록 설치하였다. 이렇게 함으로써 유량오차에 의한 실험



**Fig. 11** Schematic diagram of the experimental system

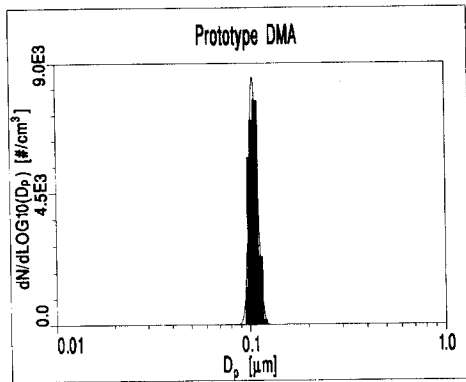


Fig. 12 Prototype DMA generated particle size distribution. DMA applied voltage=500 volts

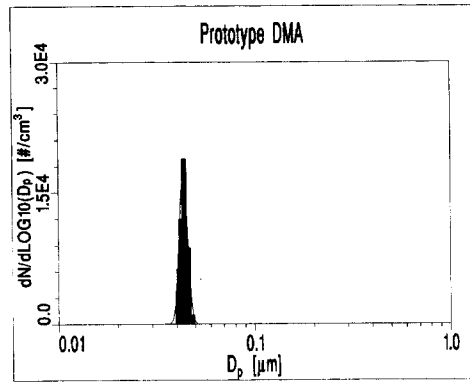


Fig. 13 Prototype DMA generated particle size distribution. DMA applied voltage=100 volt

Table 1 Measured particle concentration and analytical particle concentration of the prototype differential mobility analyzer

Applied Voltage to Prototype DMA : 500 volts

Particle Diameter ( $\mu\text{m}$ )	Measured Particle Concentration ( $\#/\text{cm}^3$ )	Lognormal Data ( $\#/\text{cm}^3$ )
0.0947	17.0	24.34
0.0977	75.0	57.71
0.1007	130.0	141.80
0.1051	180.0	162.20
0.1109	50.0	50.90
0.1165	3.5	6.86

Applied Voltage to Prototype DMA : 100 volt

Particle Diameter ( $\mu\text{m}$ )	Measured Particle Concentration ( $\#/\text{cm}^3$ )	Lognormal Data ( $\#/\text{cm}^3$ )
0.0397	24.0	25.77
0.0403	60.0	67.74
0.0412	210.0	232.90
0.0429	410.0	348.30
0.0451	180.0	169.40
0.0473	20.0	35.06
0.0494	0.0	3.93

**Table 2** Prototype differential mobility analyzer generated number mean diameter (NMD) and geometrical standard deviation ( $\sigma_g$ )

Applied Voltage (volt)	Measured NMD ( $\mu\text{m}$ )	Equation (6) ( $\mu\text{m}$ )	Difference (%)	Geometrical Standard Deviation ( $\sigma_g$ )
500	0.105	0.1059	-0.85	1.05
100	0.0435	0.0432	0.69	1.05

결과의 불확실성을 제거하였다. 이들 두 대의 DMA에는 음(-)전압을 가하였다. 시험용 DMA에서 발생한 단분산 입자는 전기적으로 양(+)전하 성질을 띠고 있으므로 TSI 모델 3071에 내장된  $\text{Kr}^{85}$  정전기 중화기를 통과시켜 다시 Boltzmann 평형 상태를 이루도록 하였다. TSI 모델 3071에서 발생한 입자들 역시 전기적으로 양(+)전하 성질을 띠고 있으므로 샘플링 라인에서 발생하는 정전기에 의한 입자손실을 최소화하기 위하여 시험용 DMA에서 CNC에 이르는 라인 모두 동파이프를 사용하였다. 이렇게 발생한 입자의 개수는 응축핵계수기(Condensation Nuclei Counter, CNC, TSI model 3025)로 계수하였다.

시험용 DMA가 발생시키는 입자분포를 알기 위하여 Tandem Differential Mobility Analyzer (TDMA)<sup>(11)</sup> 방식을 사용하였다. 이 방법은 두 대의 DMA를 사용하여 입자 크기의 변화를 측정하는 방법이다. 시험용 DMA에 일정한 전압을 가한 후 발생한 입자가 Fig. 11과 같이 TSI 모델 3071 유입된다. 이때 TSI 모델 3071은 전압을 가변하여 각 전압마다 TSI 모델 3071을 통과하는 입자의 개수를 CNC로 측정함으로써 시험용 DMA가 발생시키는 입자의 분포를 알 수 있다.

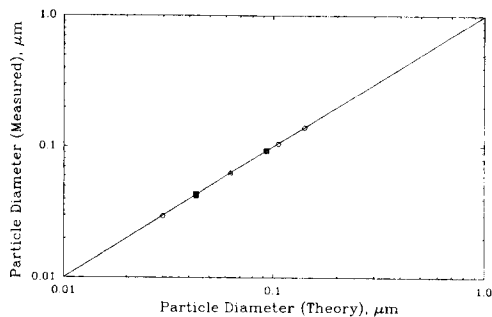
**Fig. 14** Particle size relationship between measured mean sizes and theoretically calculated sizes

Fig. 12와 Fig. 13는 시험용 DMA에 500volt와 100volt 전압을 가하였을 때 시험용 DMA에서 발생한 입자 분포를 TSI 모델 3071로 측정된 것을 각각 나타낸 것이다.

그림상의 실선은 대수정규(lognormal) 분포곡선을 나타낸 것이다. 이들 입자의 실험 값과 대수정규분포 값들은 Table 1에 나타내었으며, 입자 크기 (Number Mean Diameter, NMD)와 기하학적 표준편차 (geometrical standard deviation,  $\sigma_g$ )는 Table 2에 나타내었다.

Table 2에서 보는 바와 같이 식 (6)으로부터 구한 이론적 입자 크기와 측정된 입자 크기의 차이는 각각 -0.85%와 0.69%로 매우 정확한 결과를 보여주고 있다. 특히 DMA가 발생한 입자의 기하학적 표준편차 값도 1.05로 매우 정밀한 단분산(monodisperse) 입자를 만들어내고 있음을 알 수 있다. 식 (6)에서 구한 입자 크기로 수치해석한 Fig. 4와 Fig. 7의 결과와 실험적으로 구한 시험용 DMA의 입자 크기가 모두 정확히 일치하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 14는 측정 입자 크기와 식 (6)에 의한 계산 입자 크기의 상관 관계를 나타낸 것으로 실선은 측정 입자와 계산 입자 크기가 일치할 때를 나타낸다. 그림에서 원, 삼각형, 사각형의 범례는 각각 다른 실험결과를 나타낸 것이다.

그림에서 보는 바와 같이 실험결과가 식 (6)의 계산 값과 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구를 통하여 제작한 시험용 DMA는 매우 정확한 크기의 단분산 입자( $\sigma_g=1.05$ )를 만들어 내는 것이 증명되었으며, 시험용 DMA가 발생시키는 입자 크기 예측 계산식은  $\pm 1\%$  이내의 정확도로 입자 크기를 예측할 수 있음을 증명하였다.



또한 해석적방법으로 구한 입자의 크기가 수치해석적으로 분석한 결과와 일치함을 증명하였다. 이로써 본 연구를 통하여 개발된 수치해석 프로그램은 유동장 및 전기장내에서의 정전입자의 운동궤적 예측이 필요한 여러 연구에 응용할 수 있을 것으로 예측된다.

### 참고문헌

- (1) Hewitt, G. W., 1957, Trans. Am. Inst. Elect. Engrs 76, p 300.
- (2) Bademosi, F., 1971, "Diffusion Charging and Related Transfer Processes in Knudson Aerosols," Ph. D. Thesis, University of Minnesota, Minnesota.
- (3) Liu, B. Y. H. and D. Y. H. Pui, 1974, "A Submicron Aerosol Standard and the Primary, Absolute Calibration of the Condensation Nuclei Counter," *J. Colloid and Interface Sci.*, Vol. 47, No. 1, pp. 155~171
- (4) Knutson, E. O. and K. T. Whitby, 1975, "Aerosol Classification by Electric Mobility : Apparatus, Theory, and Applications," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 6, pp. 443~451.
- (5) Knutson, E. O. and K. T. Whitby, 1975, "Accurate Measurement of Aerosol Electric Mobility Moments," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 6, pp. 453~460.
- (6) Reischl, G. P., 1991, "The Relationship of Input and Output Aerosol Characteristics for an Ideal Differential Mobility Analyser Particle Standard," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 22, No. 3, pp. 297~312.
- (7) Rader, D. J. and Marple, V. A., 1985, "Effect of Ultra-Stokesian Drag and Particle Interception on Impaction Characteristics," *Aerosol Sci. Technology*, Vol. 4, pp. 141~156.
- (8) Gear, C. W., 1971, Numerical Initial Value Problems in Ordinary Differential Equations, Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- (9) Patankar, S. V., 1980, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill.
- (10) 안강호, 배귀남, 1994, "새로 개발한 분무 입자 발생기의 성능평가," 대한기계학회 춘계 학술대회 논문집 (II), pp. 381~384.
- (11) Rader, D. J. and P. H. McMurry, 1986, "Application of the Tandem Differential Mobility Analyzer to Studies of Droplet Growth or Evaporation," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 17, No. 5, pp. 771~787.