

## 입자의 실시간 관측이 가능한 임팩터의 설계 및 성능해석 Real-time Observation on Airborne Particles with Visual Impactor

육 세 진 · 안 강 호\*

한양대학교 기계공학과

(2002년 1월 24일 접수, 2002년 12월 16일 채택)

Se-Jin Yook and Kang-Ho Ahn\*

Department of Mechanical Engineering, Hanyang University

(Received 24 January 2002, accepted 16 December 2002)

### Abstract

Recently consideration of health and interest on bio aerosols have been growing steadily. In this study, inertial impactor, which can be used to collect airborne particles and bio aerosols, was newly devised for real-time observation on the particles collected on impaction plate, and named Visual Impactor. Flow field and particle trajectory in the space between nozzle and impaction plate was analyzed numerically, and the collection efficiencies were calculated. Calibration and performance evaluation of the Visual Impactor was conducted with polydisperse aerosols generated from 0.1% sodium chloride solution. Cut-off diameter from numerical simulation was in good agreement with that from experimental results. Because of particle bounce and particle deposition on nozzle tip due to short jet-to-plate distance, the collection efficiencies from numerical and experimental analyses were different slightly. Visual Impactor was used to collect airborne particles, and the features of collected particles could be seen in real-time. Airborne particles in different weather conditions (fine, cloudy, and rainy) were sampled and compared one another. The features of collected airborne particles were dependent strongly upon relative humidity. In addition, with hours elapsing, shapes and colors of collected particles were changed by evaporation and surface tension, etc.

**Key words :** Visual Impactor, Collection efficiency, Airborne particles, Heterogeneous nucleation, Humidity

### 1. 서 론

관성임팩터 (inertial impactor)는 공기와 함께 이동하는 입자의 관성을 이용하여 입자를 포집하는 장치이며, 작동이 간단하여 널리 사용된다. 에어로졸을

노즐을 통해 가속시켜서 충돌판에 충돌시키면, 관성이 작은 입자는 유선을 따라 배출되지만 관성이 큰 입자는 유선에서 벗어나 충돌판에 포집된다. 관성임팩터를 사용하면 목표한 직경보다 큰 것들과 작은 것들로 비교적 정확하게 분리할 수 있기 때문에, 작은 입자를 사용하는 실험의 전(前) 과정으로 사용되기도 한다. 입자의 크기는 공기역학적 직경 (aerodynamic diameter)에 의해 분리되기 때문에, 관성임

\* Corresponding author

Tel : +82-(0)31-400-5284, E-mail : khahn@hanyang.ac.kr

팩터의 활용가치는 더욱 높다.

관성임팩터의 입자 포집 특성은 충돌판의 재질 및 표면상태, 입자의 재질, 유입 유량, 노즐 형상 및 노즐과 충돌판 사이의 거리 등에 따라서 달라진다. 임팩터의 이론과 설계 방법에 대해서는 잘 알려져 있고 (Rader and Marple, 1985; Marple, 1970), 널리 사용되는 상용화된 임팩터의 성능 특성에 대해서도 많은 연구가 이루어졌다 (Howell *et al.*, 1998; Marple and Willeke, 1991; Rader *et al.*, 1991; Knuth, 1984). 대기 에어로졸의 입경별 질량 농도 분포 측정에 다단임팩터 (cascade impactor)가 많이 사용되고 있으며 (Bae *et al.*, 1999; Dias da Cunha *et al.*, 1998; Howell *et al.*, 1998), 최근 들어 생화학분야에 대한 관심이 높아지면서 바이오 에어로졸에 관한 연구에도 임팩터가 사용되기 시작하였다 (Trunov *et al.*, 2001; Li and Lin, 1999; Rubel, 1997).

대부분의 임팩터는 구형의 매끄러운 표면을 갖는 입자의 포집을 가정하여 설계되고, 이미 특성과 형상이 잘 알려진 샘플 입자를 사용하여 임팩터의 성능을 평가하게 된다. 그러나 대부분의 응용에 있어서 포집되는 입자가 모두 구형인 것은 아니며, 단지 공기역학적 직경에 의해 분리되므로 입자의 크기 및 농도에 관한 정보만을 얻게 된다. 입자가 어떻게 포집되고, 포집된 입자의 형상은 어떠한가에 대한 연구가 이루어졌지만, 포집되는 상황의 관측이 불가능하여 포집이 다 끝나고 충돌판을 분리해 낸 후에 관측해야 하는 한계를 보여왔다. 이런 경우에는 포집되는 입자에 따라서 일정 시간이 지나고 나면 변해버리게 되고, 미생물 입자의 경우에는 그 경우가 더 심각할 수도 있다.

한편, 입자가 포집되는 순간의 정보를 알아낼 수 있다면, 임팩터가 단순히 크기 분류 및 포집에만 사용되는 것이 아니라 그 이상의 목적으로도 사용되어지게 될 것이다. 이에 이번 연구를 통하여 충돌판에 입자가 포집되는 형상을 실시간으로 관측할 수 있도록 임팩터를 설계하고 성능을 평가하며, 향후 임팩터의 새로운 효용에 대하여 제시하고자 한다.

## 2. 실시간 관측 및 포집용 임팩터 설계

### 2.1 이론적 배경

관성임팩터는 공기 중에 부유해 있는 입자를 공

기역학적 직경에 근거하여 크기별로 분리하는 장치이다. 에어로졸을 노즐을 통해 가속시켜서 충돌판에 충돌시키면, 입자가 갖는 관성에 따라 관성이 작은 입자는 급격한 유동의 변화에도 잘 적응하여 충돌판에 충돌하지 않지만, 큰 관성을 가진 입자는 유선에서 이탈하여 충돌판에 부딪혀서 포집된다. 관성임팩터는 이처럼 간단한 원리를 이용하여 입자를 분리하기 때문에 공기청정이나 입자포집의 용도로 널리 사용되고 있다.

임팩터를 설계할 때에는 식 (1)에 나타난 Stokes number와 같은 무차원화된 개념을 사용하며, 여기서  $C_c$ 는 식 (2)와 같은 Cunningham 미끄럼 보정 계수이다.

$$\sqrt{\text{Stk}} = \sqrt{\frac{\rho_p d_p^2 u C_c}{9\mu W}} \quad (1)$$

$$C_c = 1 + \frac{2\lambda}{d_p} \left[ 1.252 + 0.399 \exp\left(-1.1 \frac{d_p}{2\lambda}\right) \right] \quad (2)$$

포집효율을 입자의 직경에 관한 함수로 표현하는 것은 임팩터의 특성을 나타내는데 필수적이며, 임팩터 효율곡선의 전형적인 모습은 S자의 형태를 보인다. 대개의 경우, 50%의 포집효율을 나타내는 입경은 이론값과 실험값이 잘 일치하는 결과를 보인다. 이 때 50%의 포집효율을 나타내는 입경 ( $d_{p50}$ )을 절단직경 (cut-off diameter)이라고 하며, 임팩터를 설계할 때 목표로 하는 값이 된다. 또한, 포집효율을 식 (1)과 같은 Stokes number의 함수로 나타낼 수 있다. Marple (1970)은 노즐의 형상, 노즐과 충돌판 사이의 거리 및 Reynolds수의 변화에 따른 임팩터 효율을 구하였는데, 원형단면 노즐에 대하여  $S/W = 1/2$ 일 때의  $\sqrt{\text{Stk}_{50}}$ 의 값으로 0.47을 임팩터 설계에 최적의 값으로 제시하였다.

### 2.2 실시간 관측용 Visual Impactor의 설계

본 연구에서 목표한 절단직경은  $1\mu\text{m}$ 이고 원형 노즐단면을 설정하였으며,  $\sqrt{\text{Stk}_{50}}$ 의 값은 0.47을 사용하였다. 한편, 노즐목 (throat)에서의 평균 유속인  $u_0$ 에 관해 식 (1)을 변형하면 다음과 같다.

$$u_0 = \frac{9\mu W \text{Stk}_{50}}{\rho_p d_p^2 C_c} \quad (3)$$

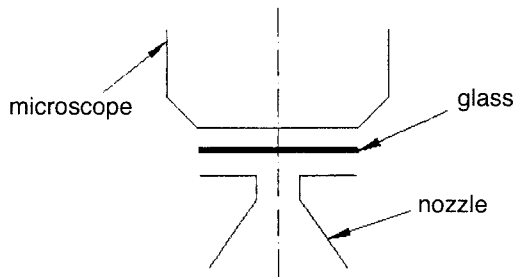
**Table 1. Impactor design factors.**

Nozzle type	Circular opening
Cut-off diameter	1.0 μm
Jet-to-plate distance (S)	0.6 mm
Nozzle throat length (T)	0.4 mm
Throat diameter (W)	1.4 mm
Flow rate (Q)	4.0 lpm

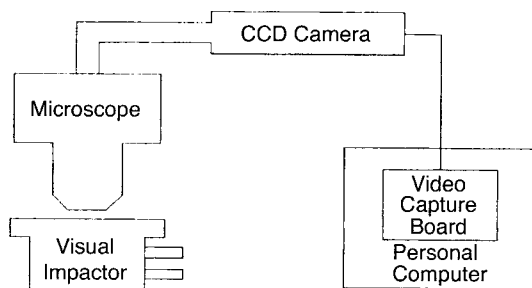
노즐목에서의 평균유속 ( $u_0$ )과 노즐목의 직경 (W) 으로부터 식 (4)와 같이 임팩터의 내부로 유입되는 유량을 구할 수 있다. 본 연구에서 제작된 임팩터의 설계 인자를 표 1에 정리하였다.

$$Q = Au_0 = \frac{\pi}{4} W^2 u_0 \quad (4)$$

본 연구의 주된 목표는 입자의 포집 상황을 실시간으로 관찰할 수 있도록 하는 것이다. 이에 그림 1에서와 같이 충돌판으로 유리를 사용하는 새로운 형태의 임팩터를 개발하였다. 입자는 유리판에 포집되므로 입자가 유리판에 맞닿는 면을 현미경으로



**Fig. 1. Schematic diagram of the Visual Impactor.**



**Fig. 2. Experimental setup for real-time observation of impacted particles.**

관찰할 수 있다. 또한, 그림 2는 Visual Impactor를 사용하여 입자의 포집을 실시간으로 관찰할 수 있도록 꾸민 실험장치의 개략도이다.

### 3. 수치 해석

#### 3.1 계산영역 및 격자생성

노즐과 충돌판 사이에서의 유동 해석을 위하여 그림 3과 같이 계산영역을 단순화하였고, 축대칭 계산방법으로 유동장을 해석하였다. 격자생성은 그림 4에서처럼 벽면으로 갈수록 조밀하게 하였고, 유동이 급변하는 구간에서 더욱 조밀하게 구성하였다. 한편, 노즐 반경을 고려하여 입자가 충돌판에 포집되는 충분한 범위를 반경 2mm라고 할 때, 그 이후의 유동이 입자의 포집에 미치는 영향은 거의 없다. 따라서, 계산의 수렴성을 높이기 위해 출구 부분에서의 격자를 그림 4에서와 같이 세로방향의 가상의 벽이 있는 것으로 설정하여, 강제로 재순환(recirculation)이 생기도록 하였다.

#### 3.2 유동장의 계산

2차원 정상상태 축 대칭 유동으로 가정하였고, 유동에 대한 지배방정식으로 식 (5)의 연속 방정식과 식 (6)의 2차원 운동량방정식을 사용하였다.

$$u \frac{\partial(\rho u)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r v) = 0 \quad (5)$$

$$u \frac{\partial(\rho u)}{\partial z} + v \frac{\partial(\rho u)}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial u}{\partial r} \right) \right] \quad (6a)$$

$$u \frac{\partial(\rho v)}{\partial z} + v \frac{\partial(\rho v)}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left[ \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial v}{\partial r} \right) - \frac{v}{r^2} \right] \quad (6b)$$

노즐목으로 유입되는 공기속도는 식 (3)에서 구한 평균 면속도를 대입하였다. 이때, 원형 노즐목에서의 유동에 대한 레이놀즈 수가 대략 2400이므로, 계산의 단순화를 위하여 난류의 영향은 무시하였다. 임팩터의 작동이 실내에서 이루어지므로, 노즐단면과 유입공기의 온도는 20°C로 가정하였다. 유동장의 계산을 위하여 GP2D코드를 사용하였고, 속도장과

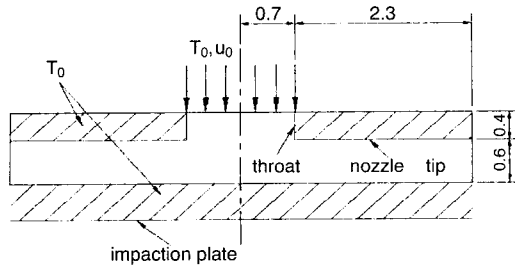


Fig. 3. Calculation domain (unit: mm).

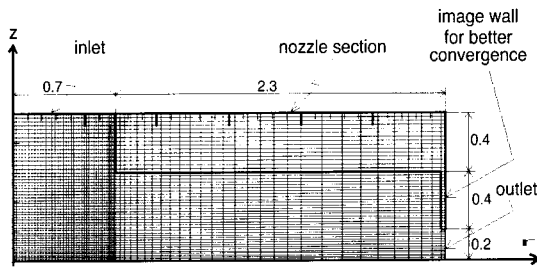


Fig. 4. 70 × 50 grid system (unit: mm).

압력장의 결합은 Patankar (1980)가 제시한 SIMPLE 알고리즘을 사용하였다.

### 3.3 입자의 궤적 (trajectory) 해석

개개 입자의 거동 해석을 위하여 Lagrangian적 관점에서 입자의 궤적을 해석하였다. 입자는 구형으로 가정하였고, Brownian 운동의 효과는 무시하였다. 입자간의 충돌이나 입자가 유동에 미치는 영향은 없다고 가정하였고, 중력의 영향은 배제하였다. 따라서 입자에 작용하는 외력은 유체와의 상대속도로 인해 발생하는 점성항력 (viscous drag force) 이고, 이에 대한 지배방정식은 다음과 같다.

$$m_p \frac{d\vec{V}_p}{dt} = \frac{1}{2} C_D \rho_f (\vec{V}_f - \vec{V}_p) |\vec{V}_f - \vec{V}_p| \frac{\pi}{4} d_p^2 \quad (7)$$

여기서  $m_p$ ,  $\vec{V}_p$ ,  $d_p$ 는 각각 입자의 질량, 속도 및 직경이고,  $\rho_f$ 와  $\vec{V}_f$ 는 각각 공기의 밀도와 속도를 나타낸다. 또한,  $C_D$ 는 주위유체와 입자의 상대속도에 의해 발생하는 구형 입자에 작용하는 항력 계수로써 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} C_D &= \frac{24}{Re_p} & (Re_p \leq 0.1) \\ &= \frac{24}{Re_p} (1 + 0.0916 Re_p) & (0.1 < Re_p \leq 5) \\ &= \frac{24}{Re_p} (1 + 0.158 Re_p^{2/3}) & (5 < Re_p \leq 1000) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서  $Re_p$ 는 국소 입자 레이놀즈 수이고, 다음과 같다.

$$Re_p = \frac{\rho d_p |\vec{V}_f - \vec{V}_p|}{\mu} \quad (9)$$

국소 입자 레이놀즈 수가 0.1보다 큰 범위를 ultra-Stokesian 영역이라고 하며, 이때 입자의 거동을 지배하는 미분방정식은 Friedlander (1977, pp. 106)가 제안하였고 이를 수치해석에 적용할 수 있도록 Rader and Marple (1985)이 변형한 식 (10)과 같다. 한편, 식 (12)는 식 (9)를 변형한 식이다.

$$\frac{Stk}{2} \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{C_D Re_p}{24} \left( V_x - \frac{dx}{dt} \right) \quad (10a)$$

$$\frac{Stk}{2} \frac{d^2y}{dt^2} = \frac{C_D Re_p}{24} \left( V_y - \frac{dy}{dt} \right) \quad (10b)$$

$$Stk = \frac{\rho_p d_p^2 u_0 C_c}{9\mu W} \quad (11)$$

$$Re_p = \frac{\rho d_p u_0}{\mu} \left[ \left( V_x - \frac{dx}{dt} \right)^2 + \left( V_y - \frac{dy}{dt} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (12)$$

### 3.4 임팩터 포집효율 (collection efficiency) 계산

주어진 입경에 대한 임팩터 포집효율은 그림 5에 서와 같이 노즐목으로 유입된 입자가 충돌판에 충돌하는 위치와 충돌하지 않고 배출되는 위치를 수치 해석하여 구하였고, 충돌판에 부딪힌 입자는 무조건 포집된다고 가정하였다. 그러므로, 주어진 입경에 대한 포집효율은 충돌이 일어나는 위치를 모두 포함하는 면적을 노즐목의 단면적으로 나누어 다음과 같이 구하였다.

$$E = \frac{\pi r_c^2}{\pi (W/2)^2} = \frac{4r_c^2}{W^2} \quad (13)$$

여기서  $r_c$ 는 그림 5에 나타난 것처럼, 충돌판에

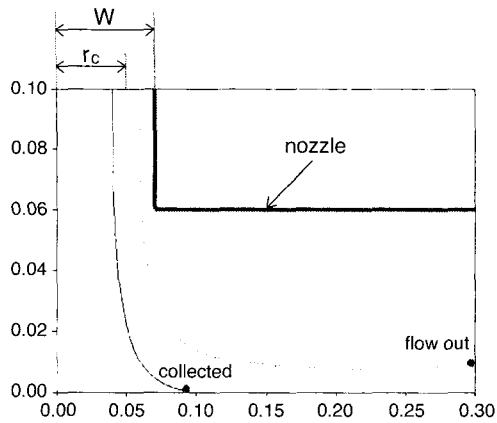


Fig. 5. Schematic diagram of explaining how to calculate collection efficiency (unit: cm).

충돌되어 포집되는지 충돌되지 않아서 포집되지 않는지를 구분하는 위치의 중심선으로부터의 거리를 의미한다. 또한 충돌판에 입자가 포집되는 것은 입자의 직경을 고려하여 입자의 표면이 충돌판에 닿으면 포집되는 것으로 가정하였다.

#### 4. 임팩터의 성능평가 실험

##### 4.1 실험장치 및 실험조건

본 연구에서 개발한 Visual Impactor의 성능 해석을 하기 위한 실험장치의 개략도를 그림 6에 나타내었고, 입자를 발생하기 위해 0.1% 염화나트륨 용액을 사용하였다. Clean air supplier에서 HEPA 필터로 여과된 압축공기는 atomizer로 주입되며, atomizer에서 내부압력과 용액의 농도에 따라 수십 nm부터 수  $\mu\text{m}$  크기의 다분산성 (polydisperse) 에어로졸이 발생된다. 발생된 에어로졸은 diffusion dryer를 거치면서 수분이 제거되도록 하였고, 필터와 밸브장치를 이용하여 발생된 염화나트륨 입자의 수농도를 조절할 수 있게 하였다. 수농도가 조절된 에어로졸을 희석하기 위해 유량계3을 통하여 청정공기를 불어넣어서 총 유량이 5.0 lpm이 되도록 하였다. 여기서 사용된 유량계는 모두 Dwyer RMA-26-SSV 모델이다.

한편, aerosizer는 초음속으로 가속된 에어로졸에

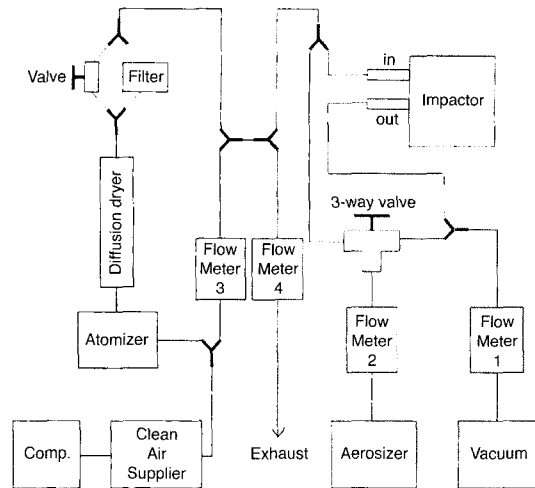


Fig. 6. Schematic diagram of experimental apparatus.

laser beam을 지나게 하여, laser beam이 입자에 충돌하면 강도가 변하고 회절되는 성질을 이용하여 입자의 크기분포와 각 크기구간에 대한 입자 개수를 동시에 측정할 수 있는 장비이다. 임팩터에 유입되기 전과 임팩터에서 포집된 이후의 수농도 분포를 비교하기 위하여 aerosizer로 유입되는 유량은 항상 1.5 lpm이 되도록 하였고, 3-way-valve 장치로 임팩터 전과 후의 수농도를 실험장치를 변경하지 않고 간단하게 측정할 수 있도록 하였다. 수분이 제거된 염화나트륨은 고체이기 때문에 충돌판에 충돌된 후에 포집되지 않고 다시 튀겨져 나가는 현상으로 인해 포집 효율이 저하될 수 있으므로, 이를 방지하기 위하여 충돌판에 vacuum grease를 발라주었다.

임팩터에 유입되기 전의 수농도 분포를 측정하기 위하여, aerosizer로 흡입되는 유량은 1.5 lpm, vacuum으로 흡입되는 유량은 없게 하였고, 나머지 유량은 배출하였다. 임팩터에서 포집된 후의 수농도를 측정하기 위하여, vacuum으로 흡입되는 유량은 2.5 lpm, aerosizer로 흡입되는 유량은 1.5 lpm이 되도록 하여 임팩터 내부로 유입되는 유량이 작동유량인 4.0 lpm이 되도록 하였고, 나머지 유량은 배출하였다.

##### 4.2 포집효율 실험결과

임팩터 내부로 유입되기 전 에어로졸의 수농도를

$N_{in}$ , 임팩터에서 포집된 후 배출되는 에어로졸의 수 농도를  $N_{out}$ 이라면, 실험을 통한 임팩터의 포집효율은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E = \frac{N_{in} - N_{out}}{N_{in}} \quad (14)$$

Aerosizer에서 설정된 각 크기 구간별 대표 입경은 해당 구간의 양끝 값을 조화 평균하여 구하였고, 식(14)를 사용하여 구한 각 크기 구간의 대표 입경별 포집효율을 수치해석으로 구한 효율곡선과 함께 그림 7에 나타내었는데, 수치해석 및 실험에 의한 절단직경이 잘 일치하는 결과를 얻었다. 절단직경보다 큰 입자는 관성이 커서 염화나트륨과 같은 고체

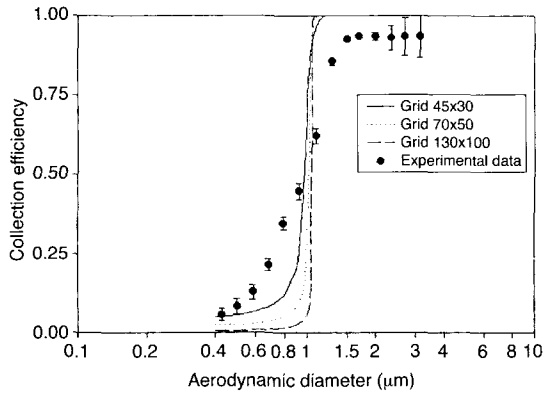


Fig. 7. Comparison of calculated efficiency curves with experimental data.

입자는 충돌판에 충돌된 후 튕겨 나와서 포집되지 않으므로, 충돌판에 닿으면 무조건 포집된다고 가정한 수치해석 결과와 차이를 보였다. 실험을 마친 후 노즐 끝에 염화나트륨 입자가 포집된 것을 관찰할 수 있었는데, 이러한 이유에서도 실험결과와 수치해석에 의한 효율에 있어서 다소 차이가 생긴 것으로 예측된다.

### 5. 대기 중 입자 포집 실험결과

본 연구가 진행된 한양대학교 안산캠퍼스는 해안에서 가깝고 반월공단과 인접해 있어서 해안 및 공단지역의 특성을 나타내는 입자가 모두 존재할 것이 예상된다. 지상에서 10여 미터 높이에 부유해 있는 입자를 포집하였는데, 그림 1에서와 같이 유리판 아래 면에 입자가 포집되므로, 입자가 유리판과 맞닿는 면을 현미경으로 관찰할 수 있다. 대기 중에는 많은 물 분자(water vapor)들이 존재하는데, 그림 8과 같이 여러 가지 핵을 중심으로 불균질 응축(heterogeneous condensation)을 일으킨다. 일반적으로, 용매의 성질이나 용질의 특성 및 농도에 따라 다르지만, 용액 표면에 작용하는 증기압(equilibrium solvent vapor pressure)은 순수한 용매의 표면에 작용하는 경우보다 더욱 낮다(Reist, 1993). 즉, 수용성 입자를 핵으로 하는 경우에는 포화비(saturation ratio)가 1보다 작아도 물 분자가 응축된다. 그러나, 비수용성 입자의 경우에는 대체로 포화비가 1

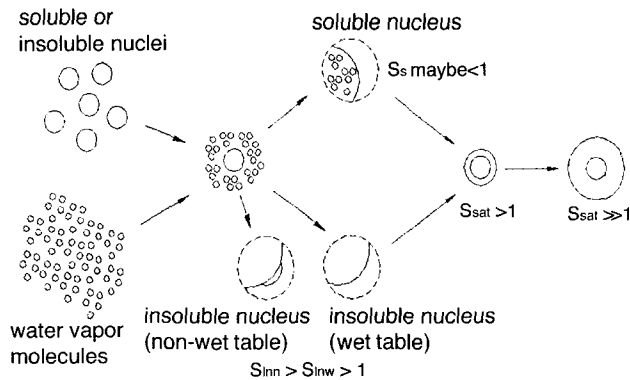


Fig. 8. Particle formation by heterogeneous nucleation (From Reist, 1993).

보다 큰 조건에서 응축이 일어난다. 상대습도에 따라 입자에 응축되는 물분자 수가 달라지고, 충돌판에 포집되는 형태에 차이를 보인다.

**5.1 날씨에 따른 대기 중 입자의 형태**

맑은 날, 흐린 날 및 비오는 날에 각각 대기 중의 입자를 포집하였고, 각각의 경우에 있어서 입자가 충돌판에 포집되는 장면을 실시간으로 관찰하였다. 상대습도가 23%인 맑은 날의 공기 중에 존재하는 입자가 포집되는 순간의 형태를 그림 9에 나타내었는데, 그림 8에서와 같은 원리로 생성된 구형의 형태가 관찰되었다. 포집된 후에도 입자가 구형을 유지하므로 볼록렌즈와 같이 작용하여 입자의 고유색

을 볼 수 있었고, 입자 중심부의 색을 뚜렷하게 관찰할 수 있었다.

상대습도 60%인 습한 날에 공기 중의 입자가 포집되는 순간의 형태를 그림 10에 나타내었다. 이 경우에는, 그림 11에서 볼 수 있듯이, 대기 중에서는 구형의 형태(0.03s)로 존재하지만, 맑은 날에 존재하는 입자가 포집되는 것과는 달리 구형의 형태를 잃고 충돌판에 넓게 퍼지는 것(0.06s 이후)이 관찰되었다. 이와 같이 포집되는 형태가 다른 것은 대기 입자를 이루는 화학성분을 조사하고 상대습도에 따라 입자의 성질이 어떻게 달라지는가 관찰한 이후에 밝힐 수 있을 것이다.

비가 그친 뒤에 대기 중에 존재하는 입자가 포집되는 순간의 형태를 그림 12에 나타내었는데, 이 때의 상대습도는 86%이었고, 수분을 많이 포함한 입자들이 관찰되었다. 이 경우에는 순수한 물방울과 같은 성질을 보이는데, 포집되는 순간에 충돌판에

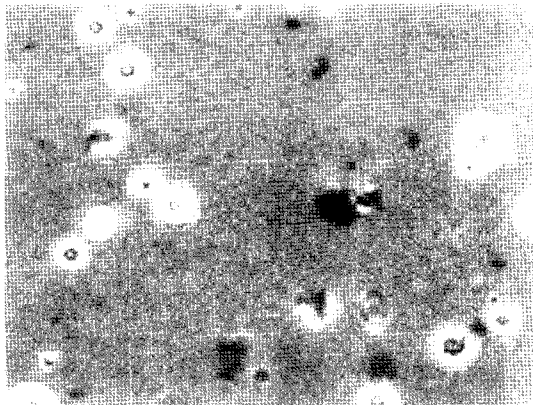


Fig. 9. Airborne particles on a fine day (RH 23%).

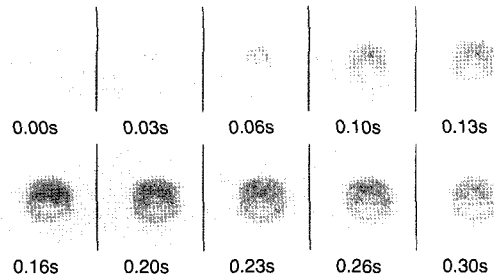


Fig. 11. Impaction of a wetted particle (RH 60%).

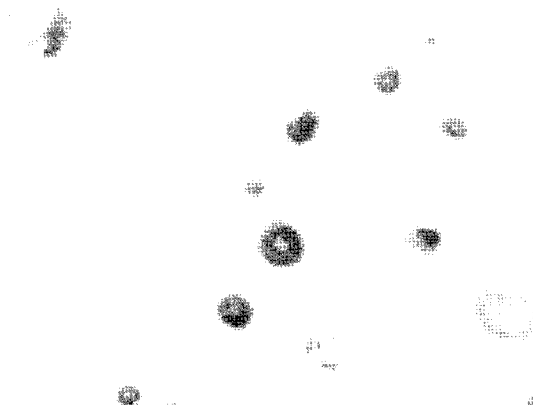


Fig. 10. Airborne particles on a cloudy day (RH 60%).

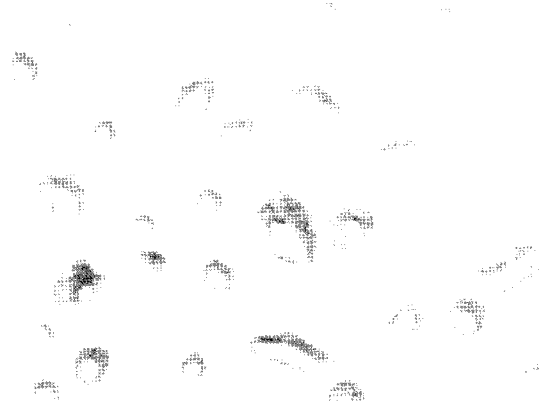


Fig. 12. Airborne particles on a rainy day (RH 86%).

넓게 퍼지므로 입자의 색을 구분할 수 없었다. 또한 고속으로 충돌판 위를 지나는 유동 등의 영향으로 짧은 시간 안에 서로 합쳐지는 것이 관찰되었고, 이 때문에 원형이 아닌 각양각색의 형태로 포집되었다. 이 결과들부터 상대습도에 따라 입자에 응축된 수분의 양이 달라지는 것을 확인하였고, 수분이 응축된 정도에 따라 충돌판에 입자가 포집되는 형태가 다른 것을 알 수 있었다.

### 5.2 포집된 입자의 일정 시간이 지난 후의 변화

대기 중에 존재하는 입자에 관한 정보를 얻기 위해서 임팩터를 사용하여 포집한 후에 충돌판을 분리하여 관찰하게 된다. 그러나, 일정 시간이 흐른 후에 관찰하거나 SEM의 경우처럼 촬영 전에 고온처리를 하면, 대기 입자는 원래 모습과는 다른 형태를 보이게 된다. 이에 대기 중의 입자가 포집되는 순간의 모습과 포집된 후 일정 시간이 지나 변화된 모습을 비교하였다.

상대습도가 30%인 맑은 날, 대기 중 입자가 포집되는 순간의 모습을 그림 13에 나타내었다. 이후에 충돌판에 불순물이 앉지 않도록 하여 대기 중에 보관했는데, 충돌판에 입자가 포집된 면이 위를 향하도록 하여 중력이 작용하게 하였고, 일주일 후 똑같은 위치를 촬영한 결과를 그림 14에 나타내었다. 그림 13을 보면, 습도가 23%인 날에 포집된 그림 9에서와 같이 대개의 입자들의 색과 크기만 다를 뿐 거의 구형을 이루고 있다. 그러나 입자에 중력이 작용하고 시간이 흐를수록 입자에 응축된 수분 양의 변화로 표면장력이 변하므로, 그림 14에서와 같이 대부분의 입자들이 구형의 형태를 잃게 되며 크기가 달라지는 결과를 보였다.

또한, 그림 13의 중앙(A부분)에 아주 가깝게 인접해 있던 두개의 입자들이 그림 14(A'부분)에서는 하나의 입자로 합쳐진 것을 확인하였으며, 이러한 현상은 여러 번 관찰되었다. 이와 같은 사실로부터, 일정 시간이 지난 후에 충돌판에 포집된 정보를 가지고 해석하게 되면 오차가 수반될 수 있음을 확인할 수 있었다.

한편, 그림 9와 그림 13의 경우처럼 습도가 낮은 날 포집된 입자는 대부분 구형이기 때문에 습도가 높은 날에 포집된 입자와는 달리 빛을 잘 반사한다.

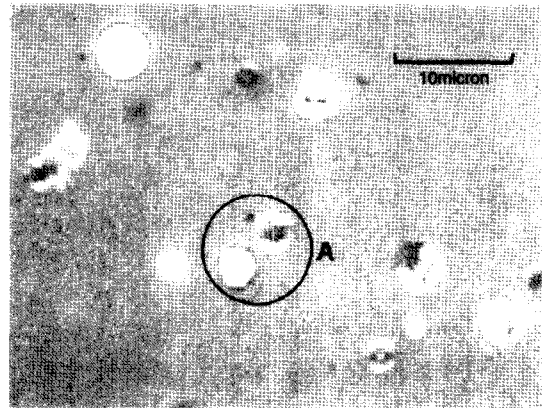


Fig. 13. Airborne particles right after impacted on the impactation plate (RH 30%).

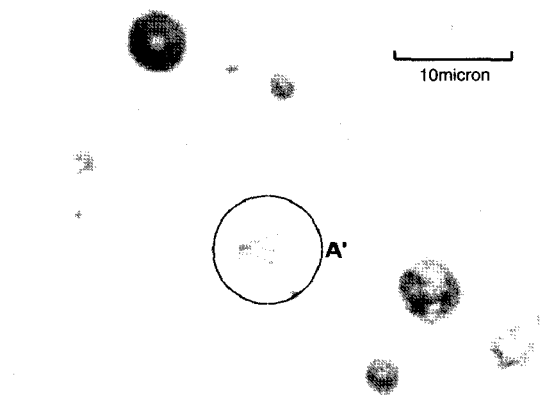


Fig. 14. Impacted particles after one week.

이에 습도가 낮은 날 포집된 입자의 형태를 빛의 번짐이 없이 명확하게 촬영하기 위해서는 다른 경우와는 다르게 광원의 밝기를 약하게 해 주어야 했다. 이러한 이유에서 그림 9와 그림 13의 배경색이 다른 그림들보다 어둡게 촬영되었다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 관성 임팩터를 개량하여 포집되는 입자 형상을 실시간으로 관찰할 수 있도록 고안하였다. 새로이 제작된 Visual Impactor의 성능을 0.1% 염화나트륨 용액을 사용하여 평가하였고, 수치해석



으로 구한 효율과 비교하였다. 그 결과 수치해석과 실험을 통해 각각 구해진 절단입경은 잘 일치하였다. 그러나, 염화나트륨과 같은 고체 입자가 충돌 후 포집되지 않는 bounce 현상이나, 노즐 끝에도 일부 염화나트륨 입자가 포집된 결과로 인하여 실험과 수치해석에 의한 효율에 다소 차이를 보였다.

맑은 날, 흐린 날 및 비오는 날에 대기 중 입자를 포집한 결과, 상대습도에 따라 입자에 응축된 수분의 양이 달라지고, 충돌판에 포집되는 형태가 서로 다른 것을 관찰하였다. 또한, 임팩터에 포집되는 순간과 포집 후 일주일이 지난 후의 입자 형상을 비교하였다. 포집 후 일정 시간이 흐르면 포집된 입자의 수, 형태 및 크기 등이 변하는 것을 관찰하였다. 따라서, 포집 후 시간이 지나 입자의 형상을 해석하게 되면 오차가 수반될 수 있음을 알 수 있었다.

영상을 얻기 위해 일차적으로 광학현미경을 사용하였기 때문에, 분해능의 한계로 인하여 Visual Impactor를 사용한 입자 해석의 범위는 대략 0.5 μm 이상으로 제한된다. 한편, 높은 배율의 렌즈 사용으로 인해 현미경을 통해 실시간으로 볼 수 있는 범위는 충돌판에 포집되는 전체 범위 중에서 일부에 국한되므로, 컴퓨터 화면으로 보여지는 데이터와 실제 포집되는 데이터와의 관계를 정립하기 위한 교정실험이 충분히 이루어져야 할 것이다. 이에 더하여 적절한 영상처리 방법이 개발되면, Visual Impactor 하나의 장치로 입자의 종류, 형태, 크기 및 수농도 분포 등의 다양한 정보를 실시간으로 얻게 될 것이고, 대기오염물질이나 병원균의 해석에 획기적인 발전이 있을 것으로 예상된다.

**기호설명**

$C$	Cunningham slip correction factor
$C_D$	Drag coefficient
$d_p$	Particle diameter
$d_{p50}$	Value of $d_p$ at 50% collection efficiency
$E$	Collection efficiency
$m_p$	Particle mass
$N_{in}$	Number concentration at the impactor inlet
$N_{out}$	Number concentration at the impactor outlet
$p$	Pressure

$Q$	Flow rate inside the impactor
$r_c$	Maximum radius of starting position of impacted particles
$Re_p$	Local particle Reynolds number
$S$	Dimensional jet-to-plate distance
$S_s$	Saturation ratio for soluble nucleus
$S_{inn}$	Saturation ratio for insoluble non-wettable nucleus
$S_{inw}$	Saturation ratio for insoluble wettable nucleus
$Stk$	Stokes number
$Stk_{50}$	Value of $Stk$ at 50% collection efficiency
$T$	Dimensional nozzle-throat length
$t$	Time
$u$	Air velocity in the nozzle throat
$u_0$	average air velocity in the nozzle throat
$V_x', V_y'$	$x$ and $y$ components of fluid velocity
$V_x, V_y$	Dimensionless fluid velocity, $V_x'/u_0, V_y'/u_0$
$W$	Throat diameter for circular nozzle
$x', y'$	Coordinates measured from centerline and entrance, respectively
$x, y$	Dimensionless coordinates, $x'/W, y'/W$
$\lambda$	Mean free path of air
$\tau$	Relaxation time
$\mu$	Fluid viscosity
$\rho$	Fluid density
$\rho_p$	Particle density

**감사의 글**

본 연구는 환경부에서 주관하는 차세대 핵심 환경 기술 개발 사업의 일환으로 진행되었으며, 연구에 도움을 주신 (주) 이엔에치테크 관계자 여러분께 감사드립니다.

**참고 문헌**

안진홍(1998) 임계 오리피스를 통과한 입자의 운동특성에 관한 수치적 연구, 한양대학교 석사학위논문.  
 우등우(2000) 단면적이 변하는 단열팽창 모세관 내에서의 입자 응축 성장에 관한 수치적 연구, 한양대학

교 석사학위논문.

- Bae, G.N., J.H. Ji, and K.C. Moon (1999) Collection characteristics of a MOUDI cascade impactor for coarse particles, *J. of Korean Society for Atmospheric Environment*, 15(6), 799-804.
- Dias da Cunha K., J.L. Lipsztein, C.P. Fang, and C.V. Barros Leite (1998) A cascade impactor for mineral particle analysis, *J. of Aerosol Science and Technology*, 29, 126-132.
- Freidlander, S.K. (1977) *Smoke, Dust and Haze*, John Wiley and Sons, New York.
- Howell, S., A.A.P. Pszenny, P. Quinn, and B. Huebert (1998) A field intercomparison of three cascade impactors, *J. of Aerosol Science and Technology*, 22, 475-492.
- Hunter, R.J. (1987) *Foundations of Colloid Science*, Clarendon Press, Oxford.
- Knuth, R.H. (1984) Calibration and field application of a Sierra model 235 cascade impactor, *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, 45(6), 393-398.
- Li, C.S. and Y.C. Lin (1999) Sampling performance of impactors for bacterial bioaerosols, *J. of Aerosol Science and Technology*, 30, 280-287.
- Li, C.S. and Y.C. Lin (1999) Sampling performance of impactors for fungal spores and yeast cells, *J. of Aerosol Science and Technology*, 31, 226-230.
- Marple, V.A. (1970) A fundamental study of inertial impactors, Ph. D. dissertation, University of Minnesota, Particle Technology Laboratory, Publ. 144.
- Marple, V.A. and K. Willeke (1979) In aerosol measurement, D. A., Lundgren *et al.* (Eds.), University Presses of Florida.
- Marple, V.A., K.L. Rubow, and S.M. Behm (1991) A microorifice uniform deposit impactor (MOUDI): description, calibration and use, *J. of Aerosol Science and Technology*, 14, 434-446.
- Patankar, S.V. (1980) *Numerical heat transfer and fluid flow*, Mc-Graw Hill, Inc.
- Rader, D.J. and V.A. Marple (1985) Effect of ultra-Stokesian drag and particle interception on impaction characteristics, *J. of Aerosol Science and Technology*, 4, 141-156.
- Rader, D.J., L.A. Mondy, J.E. Brockmann, D.A. Lucero, and K.L. Rubow (1991) Stage response calibration of the Mark III and Marple personal cascade impactors, *J. of Aerosol Science and Technology*, 14, 365-379.
- Reist, P.C. (1993) *Aerosol Science and Technology*, 2nd Edition, Mc-Graw Hill, Inc.
- Rubel, G.O. (1997) Measurement of water vapor sorption by single biological aerosols, *J. of Aerosol Science and Technology*, 27, 481-490.
- Trunov, M., S. Trakumas, K. Willeke, S.A. Grinshpum, and T. Reponen (2001) Collection of bioaerosol particles by impaction: Effect of fungal spore agglomeration and bounce, *J. of Aerosol Science and Technology*, 34, 490-498.