

## 입자상 물질의 습성 침적에 관한 수치 모의

### The Numerical Simulation on the Wet Deposition of Particles

김 유 근 · 이 화 운 · 홍 정 혜

부산대학교 대기과학과

(1996년 10월 19일 접수, 1998년 10월 20일 채택)

Yoo-Keun Kim, Hwa-Woon Lee and Jung-Hye Hong

*Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Pusan, Korea*

(Received 19 October 1996; accepted 20 October 1998)

#### Abstract

The removal procedure of particles in the atmosphere was simulated in the saturated and dry conditions to know the effect of the saturated atmosphere on the size distributions of particles. The particles were divided into 5 ranges,  $0.0\mu\text{m}$ ,  $0.0\sim 0.65\mu\text{m}$ ,  $0.65\sim 2\mu\text{m}$ ,  $2\sim 10\mu\text{m}$  and more than  $10\mu\text{m}$ , and the gases were classified into the smallest range for calculation. At the dry condition, particles grew only by the collision-coalescence and were removed by gravitation. The particles in the range of  $2.0\sim 10\mu\text{m}$  fell mostly at the 30 km distance from the pollutant source because of gravitation. The particles larger than  $10\mu\text{m}$  were removed at the 10 km distance from the pollutant source because of their gravity. But the particles larger than  $10\mu\text{m}$  appeared again at more than 30 km distance. It is considered that they have been grown during the smaller particles had been advected and diffused at that distance, and it needed about 1 hour from the moment of release. At the saturated condition, particles grew by both the collision-coalescence and condensation. The model showed that the condensation makes more number of particles larger than  $10\mu\text{m}$  and then the particles were removed due to their large gravity. Only a few particles existed at the range of  $0.65\sim 10\mu\text{m}$  and larger than  $10\mu\text{m}$ . It is concluded that the saturated atmosphere is effective on removing PM-10.

**Key words** : wet deposition, collision-coalescence, condensation

#### 1. 서 론

산업화, 공업화에 따라 대기오염 물질의 방출은 필연적이었다. 그러므로 대기질의 보전과 관리는 생활권의 당면과제로 대두되었고, 이러한 문제해결의 측면에서 대기중의 오염농도 분포 및 제거과정에 대한 연구가 다방면에서 이루어져 왔다.

대기 중에 방출되는 오염 물질은 크게 기체상 물질과 입자상 물질로 나눌 수 있는데 이는 대기 중에서 이류, 확산과정을 거치는 동안 기온, 기압, 습도 등의 물리적 환경에 의해 다른 상으로 변화하기도 하고 복사에 의해 화학반응을 일으키기도 하므로 방출된 대기 오염물질의 농도 분포를 명확히 해석하는 것은 대단히 복잡하다.

대기오염 물질은 이렇게 화학반응으로 다른 종류

로 변환되는 것 외에, 건성침적과 습성침적등의 과정을 통해 제거되기도 한다. 따라서 대기오염 물질의 농도분포를 정확히 예측하기 위해서 침적과정을 정확히 묘사해야 한다. 문난경(1995)은 대기오염 물질의 건성침적에 영향을 주는 각 요소들과의 관계를 모형화 시켜서 관측값과 비교하였고, 박순웅(1995)은 건성침적이 고려된 경우 지상 오염물질이 완전 반사되는 경우와 비교하여 지상 최대 농도가 10% 이상 감소함을 수치모형을 이용해 주장한 바 있다. 또한 온난한 지역에서의 강수는 대류권에서 제거되어지는 에어로졸의 70%~80%를 설명할 수 있다고 예측되어졌고(SMIC, 1971), Okada(1990)의 일본 쓰쿠바 산에서 관측된 결과는 직경 0.028~0.28  $\mu\text{m}$ 의 입자인 경우 과포화도 0.25%의 대기는 0.81, 과포화도 1.04%의 대기는 0.93의 입자 제거 효율이 있음을 보였다. 이것은 대기의 미립자가 강수의 핵이 되어 제거되거나(Daum *et al.*, 1987; ten Brink *et al.*, 1987; Hegg *et al.*, 1984; Seivering *et al.*, 1984) 빗물에 씻겨 제거되는 것(Lawrence *et al.*, 1980; Lai, 1978)을 설명하는 것으로 습성침적이 대기중의 미립자 제거과정에 중요한 역할을 한다는 것을 나타낸다.

습윤상태의 대기에 방출된 오염물질은 그 자체의 성질보다는 대기의 상태 즉, 기온, 기압 그리고 습도에 따라 기체 상태로 방출되었지만 응결할 수 있고, 입자 상태로 방출되어서 수증기가 응결할 수도 있다. 이러한 응결과정은 오염물질의 흡습성에 의존하게 되지만 습도가 포화 부근에서 과포화에 도달하는 범위에서는 물질에 의한 차이가 작아 응결효율은 일정하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 수분 응결효율이 일정하다고 할 수 있는 포화 부근에서 과포화에 이르는 범위에서의 대기오염 물질의 침적과정이 대기오염 농도 분포에 미치는 영향을 고찰하는 것을 목적으로 한다. 이를 위하여 대기를 우선 습윤 상태와 건조 상태의 대기로 나누고 각각의 상태에서 입자상물질과 동시에 기체 상태의 오염 물질을 방출하였다. 그리고 기체상태의 오염물질은 일정 비율 미립자화 하였다. 그 다음 미립자에 수증기가 확산 보급되고 이때 입자가 수증기와 응결, 충돌 및 병합에 의해 성장하고, 중력낙하 과정에 의해 제거되어지는 입자의 이류 확산 과정을 대기의 습윤 상태와 건조 상태에

따라서 입자의 크기를 분류하여 모의하였다.

## 2. 습성침적의 수치 모의 과정

### 2.1 기체상 오염물질의 입자화

고정 또는 이동 오염원으로부터의 방출되어진 기체상의  $SO_x$ 가 수증기의 영향을 받아서 미립자화 되는 과정은 다음과 같이 근사하기로 가정한다.

$$SO_x A, [1 - \exp(-\alpha t)] \rightarrow SO_4^{-2} \quad (1)$$

여기서  $A$ ,은 변환 효율이고,  $\alpha$ ,은 변환속도 계수이다. 각각은 실내실험 등에서 다음 값과 같이 주어진다.

$$A, = 4.29 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{ppb} \\ \alpha, = 2.0\%/h$$

초기의 미립자는 입자가 미소하기 때문에 최소의 구간에서 계산되어지며, 그 다음 입자가 수증기를 흡수하면 입자를 계산 추적하는 것이 가능하다.

### 2.2 응결과정

응결과정은 오염물질의 흡습성에 의존하게 되지만 습도가 포화 부근에서 과포화에 도달하는 범위에서는 물질에 의한 차이가 작아 응결효율은 일정하다. 그리고 수적의 질량은 수증기가 확산 보급되어지면 그것이 수적의 표면에 응결해서 질량은 증가한다. 그 증가량은 수적의 반경과 포화 정도에 따라 증가하게 되는데, 수적의 질량을  $M$ 이라고 하면

$$\frac{dM}{dt} = 4\pi r D \rho_v \frac{e - e_s}{e_s} \quad (2)$$

이다. 여기서  $\rho_v$ 는 수증기 밀도,  $r$ 은 수적의 반경,  $e$ 와  $e_s$ 는 각각 수적에 대한 수증기압과 포화 증기압을 나타내고  $D$ 는 수증기 분자의 공기중의 확산계수로 수증기의 확산 속도를 나타내는 값이다. 수적의 밀도가  $\rho_s$ 라하면  $M = \frac{4}{3}\pi r^3 D \rho_s$ ,이므로 수적 반경의 변화량은

$$\frac{dr}{dt} = \frac{D}{r} \frac{\rho_v}{\rho_s} \frac{e - e_s}{e_s} \quad (3)$$

으로 표현된다.

### 2.3 중력낙하

반경  $r$ 의 물체가 유체 내부를 운동할 때 유체의 점성 때문에 받는 저항력  $F$ 는 다음 식과 같이 낙하 물체의 반경과 속도에 비례한다.

$$F = 6\pi\eta rv \tag{4}$$

여기서  $\eta$ 는 유체의 점성계수이고,  $v$ 는 운동하는 물체의 속도이다.

공기 중에 정지하고 있는 물체를 낙하시키면 처음에는 중력 때문에 가속되므로 속도는 증가한다. 하지만 낙하 속도가 증가하면 중력과 역방향을 이루는 저항력도 증가하므로 임의 속도에 도달하면 그 낙하 속도는 일정하게 유지된다. 즉,

$$mg = 6\pi\eta rv \tag{5}$$

가 되고, 이때 낙하하는 물체의 밀도를  $\rho_d$ 라고 할 때, 질량은

$$m = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_d \tag{6}$$

이므로 그 임의 속도는

$$v = \frac{2\rho_d r^2 g}{9\eta} \tag{7}$$

와 같이 표현되는데 이것은 대기의 점성을 고려한 입자의 중력낙하의 속도를 나타낸다. 식 (7)은 Stokes 법칙으로 알려져 있는데 일반적으로 이 식은 직경이  $50\mu\text{m}$  이하인 구형입자에서 상당히 정확하며 입경  $100\mu\text{m}$ 까지도 큰 오차 없이 사용될 수 있다(조광명, 1991). 하지만 직경  $5\mu\text{m}$  이하의 입자는 대기 내의 기체분자들의 평균자유행로(mean free path)에 접근하게 되며 입자는 기체 분자 사이를 빠져나가게 되므로 침전속도는 Stokes 법칙에 의한 값보다 더 크게 된다. 이런 경우 낙하속도에 Cunningham 수정계수,  $Kc$ 를 곱해주어야 하는데

$$Kc = 1 + \frac{\lambda}{r} \left[ 1.26 + 0.4 \exp\left(\frac{-1.1r}{\lambda}\right) \right] \tag{8}$$

여기서  $\lambda$ 는 평균자유행로이며 고도에 따라 변하며,  $20^\circ\text{C}$ , 1기압에서  $0.65 \times 10^{-5}\text{cm}$ 의 값을 가진다. 따라서 Cunningham 수정계수는

$$Kc = 1 + \frac{0.172}{2r} \tag{9}$$

로 표현할 수 있고 반경  $r$ 은  $\mu\text{m}$ 단위로 나타내어야 한다. 이때 낙하속도는

$$v_c = v Kc \tag{10}$$

이다. 한편, 입경이  $100\mu\text{m}$  이상의 입자도 Re수가 커져서 Stokes 법칙에 적용되지 않는데 이때 중력낙하속도는

$$v = \frac{0.2\rho_a^{2/3} g^{2/3} 2r}{(\rho\eta)^{1/3}} \tag{11}$$

을 이용하였고 여기서  $\rho$ 는 공기의 밀도다(조광명, 1991).

### 2.4 입자의 병합

입자상 물질은 대기 중에서 수적과 병합하여 성장하게 되는데, 성장한 입자는 낙하속도가 커져 작은 입자나 수적과 충돌하여 병합함으로써 한층 더 커진다. 이때 입자의 반경은 가속적으로 성장한다. 단위 체적의 공간 내에서 병합되어지는 작은 입자의 체적을  $q_i$ 이라 하면 큰 입자의 질량 증가량은 다음 식과 같이 큰 입자의 반경과 두 입자의 낙하속도차에 비례한다.

$$\frac{dM}{dt} = E\pi r_1^2 (v_1 - v_2) q_i \tag{12}$$

여기서  $E$ 는 충돌확률,  $r_1$ 는 큰 입자의 반경,  $v_1$ 과  $v_2$ 는 각각 큰 입자와 작은 입자의 낙하속도이다.

작은 입자의 낙하 속도는 무시 가능하다고 가정하고,  $M = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_w$ 을 식 (12)에 대입하면 충돌 병합에 의한 큰 입자의 반경은

$$\frac{dr_1}{dt} = E \frac{v_1}{4\rho_w} q_i \tag{13}$$

와 같다. 물론 큰 입자의 반경내의 모든 작은 입자가 수적과 충돌하는 것이 아니고, 또한 충돌이 일정한 비율로 일어 나는 것도 아니다. 그리고 충돌한 입자가 모두 병합한다고 볼 수도 없고 입자가 단지 낙하 속도뿐 아니라 상승 속도에 의해서도 결정된

다. 하지만 본 연구에서는 위의 과정을 단순화하여 식 (13)에 의해서만 총돌·병합과정을 설명한다.

### 2.5 입자의 이류·확산

대기 중에 방출된 입자의 거동은 바람에 의한 이류, 난류에 의한 확산, 그리고 중력에 의해서 결정된다. 본 연구에서 고려하고 있는 습윤 대기에서의 입자의 거동을 표현하기 위해서 입자의 위치를 추적하는 Lagrangian 방법을 선택하였다.

$$X_i(t+\Delta t) = X_i(t) + (U_i + S_{wi})\Delta t \quad (14)$$

$$Z_i(t+\Delta t) = Z_i(t) + (W_i + S_{wi})\Delta t - \frac{2\rho r^2 g}{9\eta} \Delta t \quad (15)$$

이다. (15)식의 마지막 항은 낙하 속도를 나타낸다. 여기서  $U_i, W_i$ 는 각각 X, Z방향의 이류성분이고, 난류 변동 성분은 다음과 같은 식으로 표현 가능하다.

$$S_{wi}(t+\Delta t) = \alpha S_{wi}(t) + \beta S_{wi}(t)\xi + (1-\alpha)T_L \frac{d}{dx} S_{wi}(t) \quad (16)$$

$$S_{wi}(t+\Delta t) = \alpha S_{wi}(t) + \beta S_{wi}(t)\xi + (1-\alpha)T_L \frac{d}{dx} S_{wi}(t) \quad (17)$$

여기서  $\alpha = \exp(-\Delta t/T_L)$ ,  $\beta = (1-\alpha^2)$ ,  $\xi$ 는 평균은 0이고 표준편차가 1인 정규분포함수 그리고  $T_L$ 은 Lagrangian time scale이다. Lagrangian time scale은 Euler time scale,  $T_E$ 로 표현할 수 있으며

$$T_L = \omega T_E \quad (18)$$

Euler time scale,  $T_E$ 와  $\omega$ 는

$$T_E = 0.2\lambda/(\bar{u}^2 + \bar{v}^2 + \bar{w}^2)^{1/2} \quad (19)$$

$$\omega = 0.6(u^2 + \bar{v}^2 + \bar{w}^2)^{1/2}/\sigma_u \quad (20)$$

이고, 여기서  $\lambda$ 는

$$\lambda = 1.5Z_i \quad (21)$$

이다. 여기서  $u, v, w$ 는 x, y, z방향의 바람성분이고  $\sigma_u$ 는 바람의 표준편차,  $Z_i$ 는 혼합고이다 (Roger A. Pielke, 1984).

수평 성분의 풍속은 평지에서 다음과 같이 표현하며, 풍속의 연직성분은 없는 것으로 가정한다.

$$U_z = U_s (Z/Z_s)^p \quad (22)$$

여기서  $Z_s$ 는 10m,  $Z$ 는 고도,  $U_s$ 는  $Z_s$ 에서의 풍속이고  $U_z$ 는  $Z$ 에서의 풍속이다. 그리고  $p$ 는 안정도에 따라서 결정되는 값으로 중립 대기 상태에서는 0.25의 값을 갖는다 (Iwrin, 1965).

## 3. 실험방법 및 결과

### 3.1 실험방법

포화 부근에서 과포화에 이르는 범위에서의 대기 오염 물질의 침적과정이 대기오염 농도 분포에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 먼저 대기의 상태를 습윤상태 (과포화상태)와 건조상태로 나누었다. 그리고 습윤상태에서, 첫 번째는 이류·확산과정만 있는 경우, 두 번째는 첫 번째 경우에 응결과정이 포함된 경우, 세 번째는 첫 번째에 중력낙하와 총돌 병합과정이 포함된 경우 그리고 네 번째는 위의 모든 과정이 포함된 경우에 대해서 입자의 크기별 공간분포를 모의하였고, 건조상태에서도 첫 번째는 이류·확산과정만 있는 경우, 두 번째는 첫 번째 경우에 응결과정이 포함된 경우 그리고 세 번째는 이류, 확산, 중력낙하, 총돌·병합, 응결과정 모두를 포함하여 모의하였다.

미립자화된 크기가 공기 역학적 직경 기준 10  $\mu\text{m}$  미만인 PM-10은 부유 기간이 길고 호흡기 질환자의 구강 호흡시 치명적인 영향을 줄 수 있어 환경부에서는 1995년부터 이에 대한 환경 기준치를 마련, 운용하고 있다. 따라서 본 연구에서는 직경 10  $\mu\text{m}$ 를 기준으로 가스상태인 0.0  $\mu\text{m}$ 와 0.0  $\mu\text{m}$  이상 0.65  $\mu\text{m}$  미만, 0.65  $\mu\text{m}$  이상 2.0  $\mu\text{m}$  미만, 2.0  $\mu\text{m}$  이상 10  $\mu\text{m}$  미만, 그리고 10  $\mu\text{m}$  이상의 입경 구간을 나누어 구간별 입자 분포를 살펴보았다. 방출 오염물은 기체상태와 직경이 0.65  $\mu\text{m}$ , 2.0  $\mu\text{m}$ , 10  $\mu\text{m}$ 인 입자가 각각 80%, 10%, 5%, 5% 방출되는 것으로 하였고 기체상으로 방출된 오염물의 입자화된 미립자는 0.325  $\mu\text{m}$ 의 최소 구간에 포함하여 계산하였다.

오염물은 250m의 높이에서 시간당 6000개의 입자가 방출되는 것으로 하였고 초기 입자는 없는 것으로 하였다. 적분 시간간격은 60초이고 적분 시간 2시간 이후의 입자 분포를 고찰하였다. 그리고 오염 물질은 화학반응을 하지 않고 지표에 도달한 오염

물은 반사하지 않는 것으로 가정하였다. 습윤상태는 과포화도 0.1%, 건조상태는 상대습도 70%의 대기 상태를 고려하였고 그 외 기상조건으로 지표로부터 10m 높이에서 풍속은 5 m/s이고 기온은 20°C, 안정도는 중립의 대기를 그리고 혼합고는 1000 m로 가정하였다. 계산 결과는 입자의 크기에 따라 0.0µm와 0.0µm 이상 0.65µm 이하, 0.65µm 이상 2.0µm 이하, 2.0µm 이상 10µm 이하, 그리고 10µm 이상으로 나누어 도식화하였다.

### 3.2 습윤 상태의 입자 분포 결과

Fig. 1은 과포화 상태에서 중력낙하와 응결·병합 과정을 제거한 입자의 분포도로 방출된 입자는 단지 이류와 확산에 의해서만 위치가 결정되었다. 0.0µm 구간은 오염원으로부터 10 km에서 70 km 사이에서 입자가 지표면에 도달하고 있고 입자 직경 0.0µm에서 2.0µm의 구간은 20 km에서 70 km 사이에서 지표와 접하고 있는 분포를 보인다. 4가지 범위의 입자의 분포가 풍하측에서 모두 상향하고 있는데 이것은 바람의 고도에 따른 증가 때문으로 해석된다.

Fig. 2는 과포화 상태에서 이류, 확산과정과 함께 응결과정을 고려하여 나타낸 입자분포도이다. 0.0µm 구간의 입자는 이류, 확산만 고려한 경우와 유사한 모습을 나타내었다. 하지만 0.0µm에서 2.0µm의 입경구간은 약간의 입자만 남아 있을 뿐이며, 입자 직경 0.65µm 이상 2.0µm 이하 그리고 2.0µm 이상 10µm 이하의 구간은 입자가 존재하고 있지 않아 그림에서 생략하였다. 과포화상태의 대기조건은 응결과정을 통해 입자성장에 기여하여 입자 직경 0.65µm 이상 10µm 이하의 입자는 10µm 이상의 입자로 성장하였다고 사료된다. 10µm 이상의 입경구간에서 Fig. 1에서는 입자가 없는 것에 비교하여 Fig. 2에서는 다량의 입자가 분포되어 있는 것으로 보아 입자들이 응결과정을 통하여 성장하였음을 알 수 있다.

Fig. 3은 과포화 상태에서 이류, 확산, 중력낙하 및 충돌·병합 과정을 고려하고 응결과정은 제거하였을때의 입자의 분포도이다. Fig. 1의 경우와 비교할 때 입자 크기별 전구간에서 입자수가 감소한 것을 볼 수 있다. 특히 직경 2.0µm 이상 10µm 이하의 구간은 방출원으로부터 40 km 이상의 풍하거리에서는

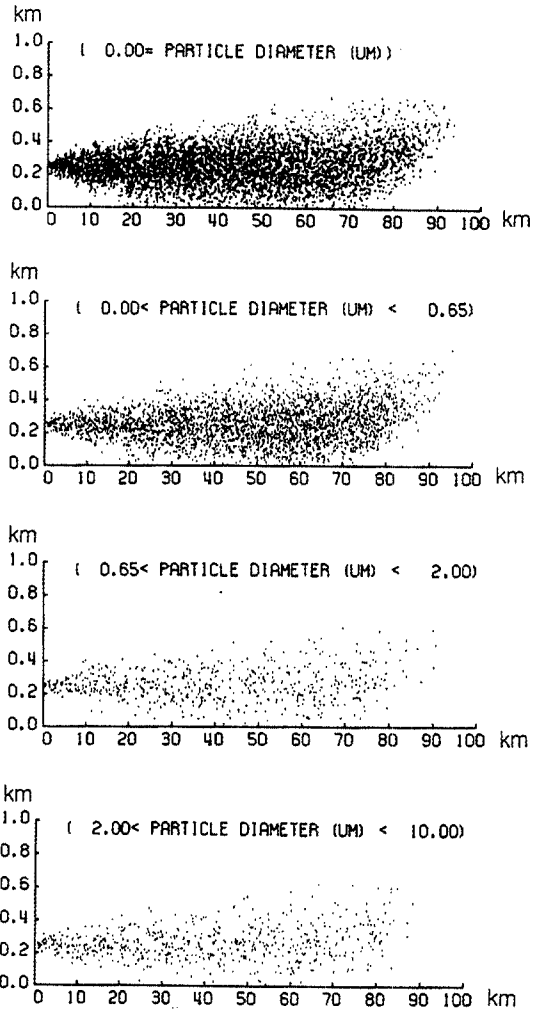


Fig. 1. The distribution of particle by the advection and diffusion at the saturated condition.

오염물질이 존재하지 않음을 볼 수 있는데 이것은 충돌·병합에 의해 입자가 성장하고 성장한 입자는 자유낙하에 의해서 제거되어 40 km 이상에서는 그 구간의 입자가 존재하지 않는 것으로 해석될 수 있다. 하지만 직경 10µm 이상의 구간은 오염원으로부터 약 10 km까지, 그리고 30 km에서 50 km 사이의 영역에서 입자가 존재함을 나타내는데 입자가 존재하지 않는 영역은 성장한 입자가 이미 지표에 도달한 것으로 추정된다. 방출원으로부터 10 km까지의 입자들은 방출시 그 상태가 큰 입자들이고, 30 km에

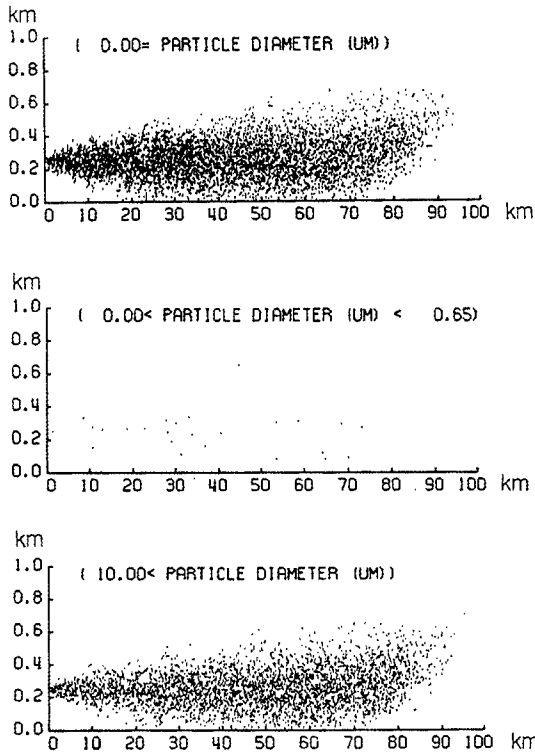


Fig. 2. The distribution of particle by the advection and diffusion including condensation procedure at the saturated condition.

서 50km사이의 입자들은 작은 입자들이 이류, 확산되어 가면서 충돌·병합과정에 의해 성장하여 나타난 것으로 해석된다.

Fig. 4는 과포화 상태에서 이류, 확산, 응결, 중력낙하 및 충돌·병합 과정을 고려하였을 때 나타난 입자의 분포도이다. 응결과정을 무시한 경우(Fig. 3)보다 10 $\mu\text{m}$  이상의 입자가 보다 성장하여 제거되었다고 할 수 있다. 응결과정과 충돌·병합과정에 의해 직경 0.65 $\mu\text{m}$  이상 2.0 $\mu\text{m}$  이하 그리고 2.0 $\mu\text{m}$  이상 10.0 $\mu\text{m}$  이하의 입자구간은 입자가 남아 있지 않았고, Fig. 2와 비교해 볼 때 직경 10 $\mu\text{m}$  이상의 구간의 입자도 상당수 제거되어 약간의 입자만이 존재함을 볼 수 있다. 이것은 충돌·병합과정이 직경 10.0 $\mu\text{m}$  이상의 입자를 성장시키는데 기여, 제거하는데 효율적이었음을 보여준다.

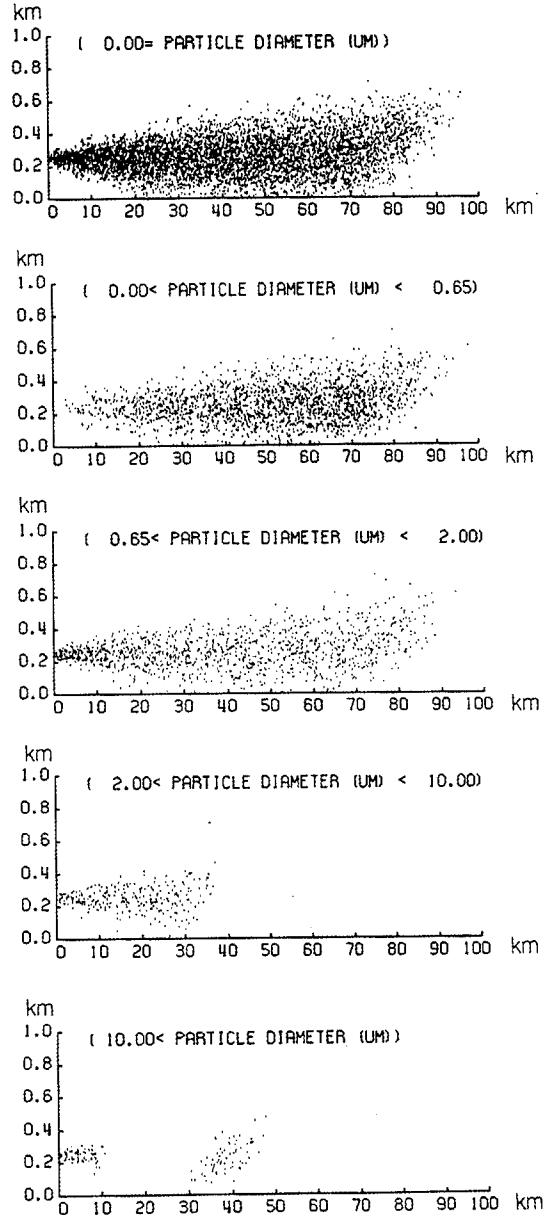


Fig. 3. The distribution of particle by the advection and diffusion including gravitation and collision-coalescence procedure at the saturated condition.

### 3.3 건조 상태의 입자 분포 결과

전조대기에서 중력낙하, 응결 및 충돌·병합과정을 제거하고 이류 확산만 고려한 입자 분포 모습은

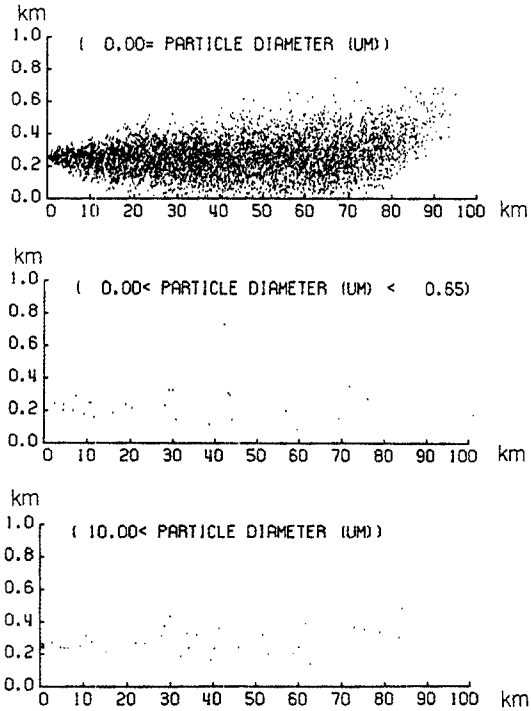


Fig. 4. The distribution of particle by the advection and diffusion including condensation, gravitation and collision-coalescence procedure at the saturated condition.

Fig. 1과 동일하였다. 이것은 Fig. 1에서 수증기 응결과 충돌·병합과정에 의한 성장과정이 제거되었기 때문에 대기의 습윤상태가 입자의 성장과 분포에 어떠한 영향도 주지 못하기 때문이다.

Fig. 5는 건조 대기에서 중력낙하와 충돌·병합과정을 제거한 입자 분포도이다. Fig. 2와 비교해 볼 때, 직경  $0.0\mu\text{m}$  이상  $0.65\mu\text{m}$  이하, 직경  $0.65\mu\text{m}$  이상  $2.0\mu\text{m}$  이하 그리고 직경  $2.0\mu\text{m}$  이상  $10\mu\text{m}$  이하의 입경구간에서 다량의 입자가 존재하고  $10\mu\text{m}$  이상의 구간에서는 입자가 존재하지 않았다. 이것은 건조상태의 대기에서 수증기 응결과정에 의한 입자의 성장이 없기 때문에 비교적 방출되어진 구간내에 입자가 존재하고 있어, Fig. 2와 비교해서 많은 입자가 존재한다. 따라서 Fig. 2와 비교해 볼 때  $10\mu\text{m}$  이상의 구간에는 입자가 존재하지 않은 것이다.

그리고 Fig. 6은 건조상태에서 이류, 확산, 응결과정, 중력낙하 그리고 충돌·병합 과정을 고려하였을

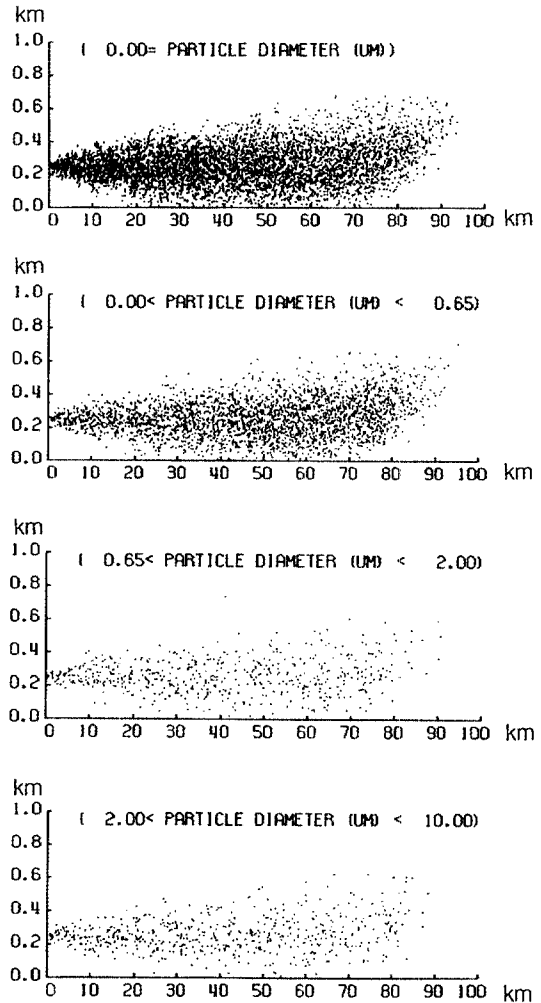


Fig. 5. The distribution of particle by the advection and diffusion including condensation procedure at the dry condition.

때 나타난 입자 분포도이다. 같은 조건의 Fig. 4와 비교해 볼 때  $0.0\mu\text{m}$  구간을 제외한 전 입경구간에서 보다 많은 수의 입자가 존재하는 것을 볼 수 있다. 입자의 분포가 Fig. 3과 유사한 모습을 나타내는데 이것은 응결과정을 고려한다고 할지라도 상대습도 70%의 대기가 응결과정에 의한 입자의 성장에 아무런 기여를 하지 못한다는 것을 설명한다. 온도 변화나 수분의 공급에 의한 상대습도의 변화가 없는 한 건조상태에서는 응결에 의한 성장도 없다. 따라서 과포화 상태에서 응결과정이 포함되어 있지

않은 Fig. 3과 유사한 분포를 나타내는 것이다. 수증기 응결에 의한 성장 과정이 없기 때문에 방출된 입자는 처음 방출된 입자의 크기 영역을 거의 벗어나지 않는다. 한편 직경  $2.0\mu\text{m}$  이상  $10\mu\text{m}$  이하의

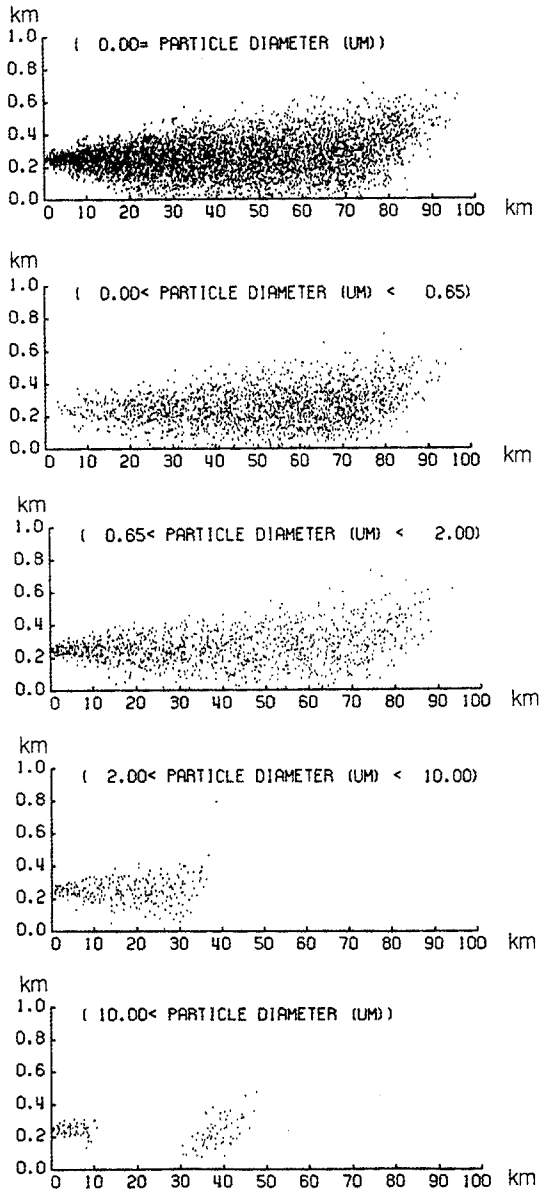


Fig. 6. The distribution of particle by the advection and diffusion including condensation, gravitation and collision-coalescence procedure at the dry condition.

구간에서 입자는 방출원으로 부터  $40\text{ km}$  이상의 거리에서는 존재하지 않는데, 이것은 충돌·병합에 의한 입자 성장과정을 통해  $10\mu\text{m}$  이상의 입자구간에 포함되었거나 중력낙하에 의해 제거된 것으로 해석된다. 직경  $10\mu\text{m}$  이상의 구간에서는 방출원으로 부터  $10\text{ km}$  이상  $30\text{ km}$  이하의 영역에서는 입자가 존재하지 않는데 이것은 성장한 입자가 중력낙하에 의해 제거되었으리라 추측되어 진다. 그리고 방출원으로 부터  $30\text{ km}$  이상  $50\text{ km}$  이내의 영역에 다시 입자가 존재하는데, 이것은 이 구간 보다 작은 입자들이 이류, 확산되어 오면서 성장하였지만 중력 낙하에 의해 제거될 정도로는 성장하지 못한 것으로 해석되어 진다.

과포화 상태에서 모든 과정이 고려된 결과인 Fig. 4와 비교해 볼 때, 기체상태의 분포에는 큰 차이가 없으나, 입경의 크기가  $10\mu\text{m}$  이상의 입자와 이하의 입자 모두 그 개수가 많은 것을 뚜렷이 볼 수 있다.

Fig. 7은 Fig. 6과 동일한 조건에서 30분 적분(Fig. 7a)과 1시간 적분(Fig. 7b)의 분포도인데, 본 연구의 입력 조건은 방출 후 1시간 정도 경과시  $10\mu\text{m}$  이상의 입자가 방출원으로 부터  $30\text{ km}$  이상의 거리에 나타남을 보여주었다. 이것은 이류된 작은 입자가  $30\text{ km}$  정도 거리에서  $10\mu\text{m}$  이상의 입자로 성장한

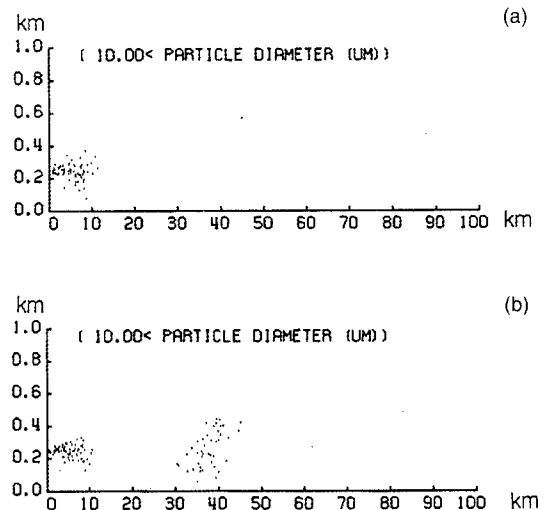


Fig. 7. Same as Figure 6. except for a) 30 minute integration and b) 60 minute integration.



것이다. 따라서 건조상태에서 이류, 확산, 응결과정, 중력낙하 그리고 충돌·병합 과정을 고려하였을 때 방출원에서 10km 이내의 거리에서 10 $\mu\text{m}$  이상 성장한 입자가 존재할 수 있으나 그 이상의 거리에서는 모두 제거되어지고 10 $\mu\text{m}$ 보다 작은 입자가 30 km 이상 이류된 뒤 성장하였다고 할 수 있다.

#### 4. 결 론

수분응결효율이 일정하다고 할 수 있는 포화 부근에서 과포화에 이르는 범위에서의 대기오염 물질의 침적과정이 대기오염 농도 분포에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 대기를 습윤상태와 건조상태의 대기로 나누었다. 그리고 각각의 상태에서 기체상태로 방출된 오염물질을 일정 비율로 미립자화한 후, 미립자에 수증기가 확산 보급되고 이때 입자가 수증기 응결과 충돌·병합에 의하여 성장하고, 중력낙하 과정에 의해 대기 중에서 제거되어지는 과정을 수치모의하였다.

그 결과, 포화상태에서는 응결과정만을 고려했을 때는 직경 0.0 $\mu\text{m}$ 에서 2.0 $\mu\text{m}$ , 0.625 $\mu\text{m}$  이상에서 2.0 $\mu\text{m}$  이하 그리고 2.0 $\mu\text{m}$  이상 10 $\mu\text{m}$  이하의 입경 구간에서는 입자가 존재하지 않았고 10 $\mu\text{m}$  이상의 입자로 성장한 모습을 볼 수 있었다.

포화상태에서 충돌·병합과 중력낙하 과정만 고려한 경우, 직경 0.325 $\mu\text{m}$  이상 2.0 $\mu\text{m}$  이하의 구간에서는 입자의 개수는 줄어들었으나 여전히 상당량 존재하고 있고, 직경 2.0 $\mu\text{m}$  이상 10 $\mu\text{m}$  이하의 구간에서는 방출원으로부터 40 km 부터는 입자가 제거되었고, 직경 10 $\mu\text{m}$  이상의 입자는 오염 방출원으로 부터 10 km 부터는 제거되었으나 30 km 이후부터는 작은 입자로부터 성장한 입자가 나타나기 시작하였다.

포화상태에서 이류, 확산, 응결, 중력낙하 및 충돌·병합의 과정을 모두 고려하였을 때는 직경 0.325 $\mu\text{m}$  이상 0.625 $\mu\text{m}$  이하, 0.625 $\mu\text{m}$  이상 2.0 $\mu\text{m}$  이하, 직경 2.0 $\mu\text{m}$  이상 10 $\mu\text{m}$  이하 구간의 입자들은 수증기 응결과 충돌병합과정에 의해서 직경 10 $\mu\text{m}$  이상의 입자로 성장하고, 성장한 입자들은 중력낙하에 의해서 제거됨을 알 수 있었다.

건조 상태에서는 수증기 응결에 의한 입자의 성장과정이 없기 때문에 포화 상태에 비교하여 입자

의 성장이 매우 적고 제거도 적게 나타났다. 그러나 10 $\mu\text{m}$  이상의 입자수는 더 많이 나타났는데 그 이유는 작은 입자들이 이류, 확산되어 오는 과정에 성장한 입자들이 방출원으로 부터 30 km 이상에서 50 km 이하의 영역에 존재하고 중력낙하에 의해 제거될 정도로는 성장하지 못한 것으로 해석되어진다.

이상에서 건조상태에서 대기중의 부유기간이 긴 PM-10이 과포화상태의 대기에서는 상당량 제거되어짐을 알 수 있었다.

이상의 결과는 관측값과의 비교가 필요한 것으로 생각되며, 대기오염 모델과 결합한다면 더욱 더 정확한 농도 값을 구하는데 도움이 될 것으로 사료된다.

#### 참 고 문 헌

- 조광명 (1991) 대기오염, 청문각, 3-43 - 3-47.
- 문난경 (1995) 중규모에서의 대기 오염 물질 침적에 관한 연구, 부산대학교, 석사학위논문
- 박순웅 (1995) 건성 침착이 지상 오염 농도에 미치는 영향, 한국기상학회지, 31, No2, 97-115
- Daum, P.H., T.J. Kelly, J.W. Strapp, W.R. Leath et al. (1987) Chemistry and physics of a winter stratus cloud layer.: A case study. J. Geophys. Res. 92, 8426-8436.
- Hegg, D.A., P.V. Hobbs, and L.F. Radke (1984) Measurements of the scavenging of sulfate and nitrate in clouds. Atmos. Environ., 18, 1939-1946.
- Iwrin, J.S. (1979) A theoretical variation of the wind profile power-law exponent as a function of surface roughness and stability. Atmos. Environ., 13, 191-194
- Lai, K.Y., N. Dayan and M. Kerker (1978) Scavenging of aerosol particles by a falling raindrop. J. Atmos. Sci., 35, 674-682.
- Okada, K., T. Tanaka, H. Naruse, and T. Yoshikawa (1990) Nucleation scavenging of submicrometer aerosol particles. Tellus, 42B, 463-480.
- Roger A. Pielke (1984) Mesoscale Meteorological Modeling, Academic press, 177-179
- Sievering, H., C.C.V. Valin, E.W. Barrett and R.F. Pueschel (1984) Cloud scavenging of aerosol sulfur: Two case studies. Atmos. Environ. 18, 2685-2690.
- SMIC (1971) Report of the study of man's impact on climate, The MIT Press, 308 ten Brink, H.M., S.E. Schwartz and P.H. Daum (1987) Efficient scavenging of aerosol sulfate by liquid-water clouds. Atmos. Environ., 21, 2035-2052.