

## 대기에어로졸 입자의 이론적 강수세정에 관한 연구

### A Theoretical Study on Wet Scavenging of Atmospheric Aerosols by Rain Drops

박 정 호 · 최 금 찬\*

진주산업대학교 환경공학과

\*동아대학교 환경공학과

(1998년 5월 25일 접수, 1999년 1월 13일 채택)

Jeong-Ho Park and Kum-Chan Choi<sup>1)</sup>

*Department of Environmental Engineering, Chinju National University*

<sup>1)</sup>*Department of Environmental Engineering, Dong-A University*

(Received 25 May 1998; accepted 13 January 1999)

#### Abstract

In this work, a theoretical model has been formulated which allows the study of the scavenging efficiencies of aerosol particles by the rain drops. Aerosol particles are scavenged by the simultaneous brownian diffusion, interception and inertial impaction force. In addition the calculations based on the collision efficiency model are carried out for the collision of aerosol particles with diameter range 0.01 ~ 30  $\mu\text{m}$  and rain drops with diameter 0.02  $\times 2^{n/3}$  ( $n=1, 2, \dots, 17$ ) cm. The results indicate that: (1) the below-cloud scavenging affects mainly the coarse particles ( $> 3 \mu\text{m}$ ), the fine particles remaining almost unchanged; (2) the scavenging efficiencies by below-cloud in the heavy rain (rain intensity, 10 mm/hr) surpass the efficiency found in the drizzle rain (rain intensity, 1 mm/hr).

**Key words** : Wet scavenging, atmospheric aerosol, rain drop, collision efficiency, rain intensity

#### 1. 서 론

강수에 의한 대기오염물질의 습성침적은 중요한 자연 대기정화 작용중의 하나이면서, 한편으로는 인위적으로 배출된 대기오염물질이 강수에 흡수·흡착되어 최종적으로는 지표면에 침착하여 오히려 토양·수면환경을 오염시키는 등 생태계의 파괴 원인으로도 작용하고 있다. 강수의 습성침적에 관한 종래의 국외 연구에는 크게  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  등의 산성원인

물질의 기상 및 액상중에서 산화과정을 통해 산성비 생성 메카니즘을 규명한 Hegg (1985), Saltzman *et al.* (1983), McMurry and Wilson (1983) 등의 보고와 습성침착 속도 및 산화반응과정을 모델화한 Berkowitz *et al.* (1989), Chang *et al.* (1987), Carmichel *et al.* (1986) 등의 보고가 있으며, 요즘에도 습성침적에 관한 연구가 지속적이고 다양하게 진행되고 있는 것을 볼 수 있다. 한편, 최근 국내 습성침적 연구의 대부분은 강수 중 각종 오염물질의 농도 파악, 강수 pH 저하 원인의 해명 또는 산성비가 농작물

생육에 미치는 영향 등으로 이루어져 왔다(허홍욱 등, 1998; 나춘기 등 1997; 이승일 등, 1996). 그러나 최근 중국으로부터 유입되는 산성오염물질로 인한 산성비 문제가 현실적으로 나타나고 있는 배경 하에 보다 상세한 습성침적 특성의 해명이 요구되고 있으며, 이를 위해서는 다양한 실험적 방법이나 특히 합리적이고 간단한 세정모형을 통한 이론적 해석방법의 개발 등이 필요하다.

한편, 본 연구에서는 대기 에어로졸 입자의 강수 세정 특성을 이론적으로 검토하였는데, 입자상물질의 세정모형에 관한 기존의 연구에는 Wurzler *et al.* (1995), Nieto *et al.* (1994), McGann and Jennings (1991), Altwicker and Mahar (1984)의 보고가 있으나, 실제 대기 에어로졸 입자의 입경분포를 고려한 세정특성을 나타내고 있지 않거나, 단지 지표면 부근에서의 세정특성만을 고려하고 있다. 따라서 본 연구에서는 대기 에어로졸 입자의 세정특성을 이론적으로 설명하기 위해 강수에 의한 습성침적 모형을 작성하고 특히 대기 에어로졸 입자의 입경별 세정특성 변화를 강수시간, 강수강도, 고도별에 따른 강수나 대기 중의 농도변화 특성을 검토하였다.

## 2. 대기 에어로졸 입자의 세정모형

### 2.1 입자상물질의 세정계수

구름과 지표면 사이의 대기 중에 존재하는 입자상 물질의 washout 현상은 간단하게 빗방울의 낙하 경로 내에 포함된 균일 입경의 에어로졸입자를 그 포집대상으로 생각하면, 강수시간에 따른 대기 중 에어로졸입자의 농도  $C_g$ 의 변화는 (1)식으로 표시할 수 있다(Davenport *et al.*, 1978; Pruppacher *et al.*, 1978).

$$\frac{dC_g}{dt} = -\Lambda \cdot C_g \quad (1)$$

여기서,  $\Lambda$ 은 단분산 에어로졸입자에 대한 세정계수(scavenging coefficient,  $s^{-1}$ )이며, 다시  $\Lambda$ 는 (2)식처럼 반경  $R$ 인 빗방울과 반경  $a$ 인 입자와의 전체 충돌 포집효율  $E_{all}(a, R)$ , 빗방울의 침강속도  $U(R)$  그리고 빗방울의 입경분포  $N(R)$ 을 이용해서 표시하는 것이 가능하다.

$$\Lambda = \pi \int_{\min}^{\max} R^2 \cdot E_{all}(a, R) \cdot N(R) \cdot U(R) dR \quad (2)$$

### 2.2 충돌 포집효율

통상, 대기 에어로졸의 입경은  $0.001 \sim 100 \mu m$  정도의 범위에 걸쳐 존재하므로 빗방울에 의한 입자 포집 메카니즘도 입경별로 차이가 난다. 빗방울과 입자 사이의 충돌 메카니즘에는 주로 입경  $0.1 \mu m$  이하의 입자에 대해서는 ① 확산력(Brownian diffusion),  $1 \mu m$  이상의 입자에 대해서는 ② 차단력(interception), ③ 관성력(inertial impaction)이 크게 작용하며, 이외에도 ④ 확산영동(diffusiophoresis), ⑤ 정전력(electrostatic force), ⑥ 열영동(thermophoresis) 등이 빗방울과 입자 사이의 충돌효율에 관여하고 있다(Davenport *et al.*, 1978; Wang *et al.*, 1978; Grover *et al.*, 1977). 여기서, 빗방울과 에어로졸입자 사이의 충돌 메카니즘에 지배적으로 작용하는 브라운확산  $E_{dif}$ , 차단력  $E_{ict}$ , 관성력  $E_{imp}$ 만을 고려할 경우(Altwicker *et al.*, 1984; Slinn, 1977; Dana *et al.*, 1976) 전체 충돌포집효율(collection efficiency)  $E_{all}$ 은 (3)식으로 표시할 수 있다(Strauss, 1975).

$$E_{all} = 1 - (1 - E_{dif}) \cdot (1 - E_{ict}) \cdot (1 - E_{imp}) \quad (3)$$

한편, 세가지 제거기구의 충돌포집효율  $E$ 를 이론적으로 구하기 위해서는 빗방울 주위의 기체 흐름에 대하여 Navier-Stokes식과 입자 운동방정식으로 풀어야하지만, washout 모델화를 고려할 경우 비효율적이기 때문에 차원해석을 기초로 무차원 파라메타를 이용해서 이론적 포집효율을 구하는 방법이 모색되어야 한다. 이 때문에 실내 실험 등을 통한 다양한 이론적 포집효율식이 제안되어져 왔는데, 그 대표적인 것을 표 1에 정리하였다.

본 연구에서는 각 제거기구의 충돌포집 효율식을 Seinfeld(1986) 및 Slinn(1977) 등이 제안하고 일반적으로 널리 쓰이고 있는 (4)식을 이용하였으며, 이때 빗방울과 입자의 입경별에 따른 충돌 포집효율의 계산결과를 그림 1에 표시하였다. 입경별 충돌포집효율은 입경 약  $0.1 \mu m$  이하의 범위에서는  $E_{dif}$ , 입경 약  $2 \sim 5 \mu m$ 의 범위에서는  $E_{ict}$  그리고 입경  $5 \mu m$  이상에서는  $E_{imp}$ 에 의한 포집효과가 큰 것으로 나타났다.

Table 1. Collection efficiencies used in washout coefficient calculations.

Mechanism	Equation	Ref.
Diffusion, $E_{dif}$	$E_{dif1} = \frac{4}{Re \cdot Sc} \cdot [1 + 0.4Re^{1/2} \cdot Sc^{1/3}]$	Slinn (1977)
	$E_{dif2} = (0.65 \times 10^{-12}) \cdot \left[ \frac{10^{-7}}{a^2 \cdot R^2} + \frac{1}{a^{4/3} \cdot R} \right]$	Dana (1976)
	$E_{dif3} = \frac{3.8}{Re^{1/2} \cdot Sc^{2/3}}$	Fuchs (1964)
Interception, $E_{ict}$	$E_{ict1} = \frac{4a}{R} \cdot \left[ \left( \frac{\mu_w}{\mu_a} \right)^{-1} + (1 + 2Re^{1/2}) \cdot \frac{a}{R} \right]$	Slinn (1974)
	$E_{ict2} = 3 \frac{a}{R}$	Fuchs (1964)
Impaction, $E_{imp}$	$E_{imp1} = \left[ \frac{St - St^*}{St + (2/3 - St^*)} \right]$	Slinn (1977)
	$E_{imp2} = \left[ \frac{St - 1/12}{St + 7/12} \right]^{3/2}$	Dana (1976)
	$E_{imp3} = \frac{1}{(1 + 0.7/St)^2}$	Walton (1960)
$Re = \frac{\rho_a \cdot R \cdot U}{\mu_a}, Sc = \frac{\mu_a}{\rho_a \cdot D_{BR}}, St = \frac{2C_C \cdot \rho_p \cdot a^2 \cdot U}{9\mu_a \cdot R}, St^* = \frac{1.2 + (1/2) \cdot \ln(1 + Re)}{1 + \ln(1 + Re)}$		
$E_{all} = 1 - (1 - E_{dif1}) \cdot (1 - E_{ict1}) \cdot (1 - E_{imp1})$		(4) Seinfeld (1986), Slinn (1977)
$E_{all} = 1 - (1 - E_{dif2}) \cdot (1 - E_{ict2}) \cdot (1 - E_{imp2})$		(5) Dana (1976)

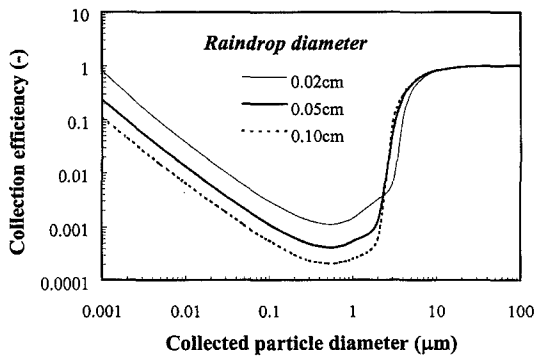


Fig. 1. Theoretical collection efficiency of three drops.

2.3 빗방울의 입경분포와 종말침강속도

빗방울 입경분포  $N(R)$ 의 이론식에는 일반적으로 Seknon *et al.* (1971), Best (1950), Marshall *et al.* (1948), 등이 제안한 식이 있는데, 본 연구에서는 실제 빗방울의 입경분포와 거의 일치하고 일반적으로 널리 이용되고 있는 Marshall *et al.* (1948)이 제안한 (6)식을 이용하였다.

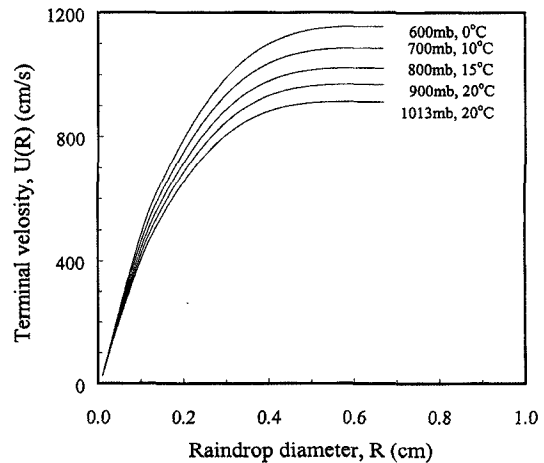


Fig. 2. Terminal velocity of raindrops at five pressure levels.

$$\frac{dN(R)}{dR} = 0.08 \exp[-41R \cdot I^{0.21}] \quad (6)$$

여기서,  $R$ 은 빗방울의 반경 ( $\mu\text{m}$ ),  $I$ 는 강수강도 (rain intensity,  $\text{mm/hr}$ )이며, 빗방울의 입경분포 범위는 실

제 빗방울의 크기를 고려하여 약 0.02~0.8 cm를 고려하였다(Levine *et al.*, 1982; Best, 1950).

한편, 빗방울의 종말 침강속도  $U(R)$ 는 빗방울이 구형이라 가정하고 Stokes의 종말침강속도식을 이용할 수 있지만 입경이 커질수록 침강속도 또한 한 없이 커지는 문제가 있다. 따라서 본 연구에서는 빗방울 입경 또는 Reynold수가 커질수록 종말침강속도를 무차원의 함수로서 실제값에 급수전개해서 표시하는 Beard (1976)가 제안한 빗방울의 종말침강속도의 수치 모델을 이용하였으며, 이 식은 공기밀도의 차이에 의해 다소의 오차가 생기지만 실측값과 거의 일치한다고 보고하고 있다(Beard, 1976). 그림 2에는 Beard의 식을 이용하여 계산한 빗방울의 종말침강속도로써 기압, 온도별로 나타냈다.

2. 4 대기 에어로졸의 입경별 세정효율

(2)식에서 표시한  $\Lambda$ 는 단분산 에어로졸입자에 대

한 washout 계수로써, 실제 대기 중의 입자는 다분산으로 존재하기 때문에 입자의 입경별로 세정특성을 파악할 필요가 있다. 대기 에어로졸 입자의 세정효율은 강수강도에 따라 크게 달라지므로 여기에서

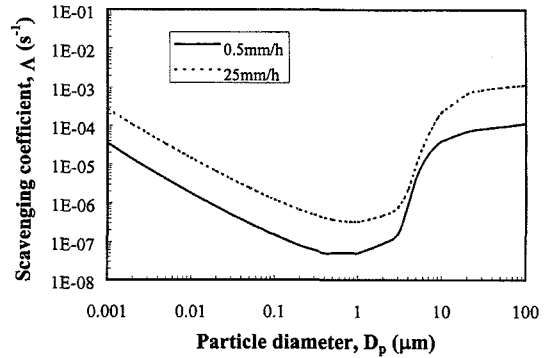


Fig. 3. Scavenging coefficient vs particle diameter.

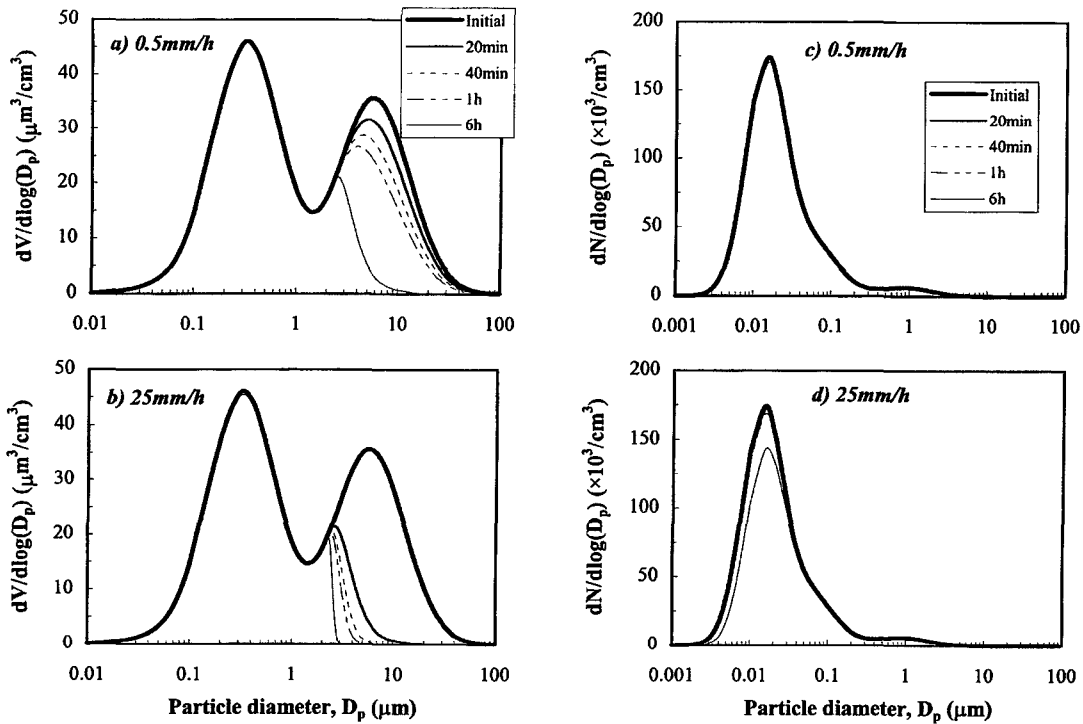


Fig. 4. Evolutions of volume and number size distributions of model particles for drizzle and heavy rain at various times.

- a)  $l = 0.5 \text{ mm/h}$ , volume size distribution,    c)  $l = 0.5 \text{ mm/h}$ , number size distribution,
- b)  $l = 25 \text{ mm/h}$ , volume size distribution,    d)  $l = 25 \text{ mm/h}$ , number size distribution.

는 강수강도 0.5 mm/hr의 약한 비 (drizzle rain)와 25 mm/hr의 강한 비 (heavy rain)에 대한 입자의 입경별 세정계수를 비교한 결과를 그림 3에 표시하였다. 입경별 세정계수의 특성을 보면, 입경 약 0.1 μm 이하, 약 2~5 μm의 범위, 입경 5 μm 이상의 범위에서는 각각 확산력, 차단력, 관성충돌의 포집효과가 강하게 작용하고 있는 것을 확인되었으며, 또한 강수강도가 클수록 입자의 전체 입경에 걸쳐 세정계수가 커지는 것을 알 수 있었다.

한편, 대기에어로졸 입자의 강수시간 t에 대한 입경별 농도변화식을 나타내기 위하여 (1)식을 적분하면 (7)식과 같이 표시된다 (Nieto *et al.*, 1994; Davenport *et al.*, 1977).

$$C_g(a, t) = C_g(a, 0) \exp(-A \cdot t) \quad (7)$$

다음은 (7)식을 이용하여 대기에어로졸 입자의 강수시간 t에 대한 입경별 농도변화를 상세히 알아보기 위하여 이론적 입경별 포집효율식과 Whitby (1978)에 의해 표시된 도시영역의 대기에어로졸 입자의 체적입경분포와 개수입경분포 모델을 이용하였다. 그림 4에는 강수시간, 강수강도를 파라메타로 해서 입경별로 세정계수를 나타내었는데, 강수시간은 20분, 40분, 1시간, 6시간별로 강수강도는 0.5 mm/hr의 약한 비와 25 mm/hr의 강한 비에 대해 검토하였다. 입자의 입경별 세정특성을 체적분포로 평가한 경우 입경별 세정효과는 입경 약 3 μm 이상의 조대입자 영역에서 거의 대부분 일어났으며, 미세입자 영역에서의 세정효과는 거의 나타나지 않았다. 또한, 강수강도가 증가함에 따라 세정효과는 조대입자 영역에서 상승하고 특히, 초기강수시 세정효과가 현저하게 일어나는 것을 알 수 있다. 한편, 강수강도에 따른 강수량의 증가는 강수강도 25 mm/hr의 경우가 0.5 mm/hr에 비해 약 50배 증가한다. 그리고 세정특성을 개수분포로 평가한 경우 강수시간 1시간까지는 뚜렷한 입경별 세정효과는 나타나지 않았으며, 특히 강수강도 25 mm/hr에서 강수시간 6시간 후에는 입경 약 0.03 μm 이하의 미세입자 영역에서만 세정효과가 확인되었다. 한편, 강수강도 0.5 mm/hr와 25 mm/hr의 경우 비가 내리기 시작하여 6시간 후의 세정효율은 입경 0.015 μm을 기준으로 각각 약 2%, 20%로 약 10배의 차이가 확인되었다.

### 3. 강수세정 프로세스의 모델화

#### 3.1 프로세스의 개요

본 연구에서는 그림 5와 같이 구름층의 하부 경계면에서 지상 사이의 대기에어로졸 입자에 대한 washout 모델을 작성하였다. 특히, 산성비 피해가 강수초기에 발생하고 있기 때문에 비가 내리기 시작부터 2시간까지를 대상으로 하였다 (박정호 등, 1996).

강수세정 프로세스의 모델화에서는 입자상물질의 질량입경분포 자료로부터 (박정호 등, 1997) 입경별 세정특성을 고려하기 위하여 다음과 같이 가정하였다. ① 대기에어로졸 입자의 입경별 대표경은 12단 저압 임팩터의 중앙입경인 0.01, 0.085, 0.155, 0.24, 0.38, 0.57, 0.92, 1.61, 2.75, 4.26, 6.36, 9.25, 20.43 μm의 13종류로 하고 빗방울의 대표경은  $0.02 \times 2^{n/3}$  (n = 1, 2, ..., 17) cm의 17종류로 한다. ② 입자농도의 고도분포는 일정한 농도분포를 가진다. ③ 대기는 안정하고 입자는 수직방향 및 수평방향으로 이류·확산은 없다. ④ 빗방울 및 입자는 구형이며, 빗방울은 종말침강속도로써 낙하한다. 단, 종말속도는 습도, 기압의 관계 등에 따라서 각 고도별에 의해 차이가 나며, 증발은 없다고 가정한다.

한편, ③의 가정에서 빗방울의 수직방향에 따른 이류를 고려한다면, 빗방울의 체적농도의 변화는 (8)식과 같이 단순한 이류 방정식으로 푸는 것이 가능하다.

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial fU}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

여기서 f(R, z)는 빗방울의 체적농도이며, z는 지상에서 구름 층까지의 높이이다. 또한, 단위체적당 빗방울 내 입자상물질의 농도 [=빗방울 체적농도 f × 빗방울 중 입자상 물질의 농도  $C_w(R, z)$ ] 변화식을 (9)식과 같이 표시하는 것이 가능하며,

$$\frac{\partial fC_w}{\partial t} + \frac{\partial fC_wU}{\partial z} = \pi \int_{\min}^{\max} R^2 \cdot E_{all}(a, R) \cdot N(R) \cdot C_g dR \quad (9)$$

(8)식과 (9)식에서 강수 중 세정된 입자상물질의 농도를 구하는 것이 가능하다. 또한, 고도 z에 관한 대

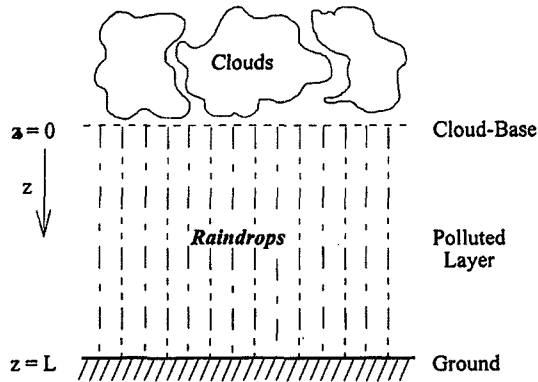


Fig. 5. A schematic diagram of raindrops falling through the polluted layer.

기 중 입자상물질의 농도  $C_g(z)$ 의 변화식도 (10)식으로 표시할 수 있다.

$$\frac{dC_g}{dt} = -\pi \int_{\min}^{\max} R^2 \cdot E_{all}(a, R) \cdot N(R) \cdot U(R) \cdot C_g dR \quad (10)$$

### 3.2 모델의 계산수법

본 연구에서는 세정모델의 미분방정식을 수치적으로 해석하기 위하여 차분법을 이용하였는데, (8)식을 풀 경우 고차 미분스킴에서는 일반적으로 수치적 진동이 발생하는 것으로 알려져 있으며(東野達, 1978), 특히 빗방울 입경에 대해서 (8)식, (9)식을 풀고 이후 강수중 입자상물질의 전량을 빗방울의 체적으로써 나누고 빗방울 내 입자상물질의 농도를 정확하게 구하기 위해서는 수치적 진동이 농도에 큰 영향을 줄 것으로 판단된다. 따라서 각각의 수치적 진동에 의해 위상이 틀러지는 경우 농도 오차는 상승적으로 커지는 것이 예상되므로 이러한 진동을 최소화하기 위해 본 연구에서는 TVD(total variation diminishing) 조건을 가한 2차 정도 차분스킴(Yee-Harten 스킴)을 사용하였다(藤井孝藏, 1995; 大野豊, 1990).

## 4. washout 모델을 이용한 입자상물질의 세정특성

### 4.1 고도별 빗방울의 입경분포

본 연구의 수치모델에서는 구름에서 지상까지의 고도를 2km로 가정하고 공간 간격을  $\Delta z=100$  m (20개 분할)으로 하였으며, 시간간격  $\Delta t$ 는 가장 큰 빗방울의 종말침강속도 및 연산시간을 고려하여 2초 단위로 계산하였다. 한편, 빗방울의 고도별 입경분포를 나타내기 위하여 다음과 같이 가정하였다. ① 강수강도는 항상 일정하다. ② 지상에서의 온도는 20°C, 기압은 1,000 mbar로서 고도 높이가 100 m 상승할 때마다 온도는 0.65°C, 기압은 10.91 mbar가 감소한다. ③ 빗방울 중의 배경농도는 0으로 하였다. 그리고 강수강도는 통상 1~10 mm/hr의 범위가 대

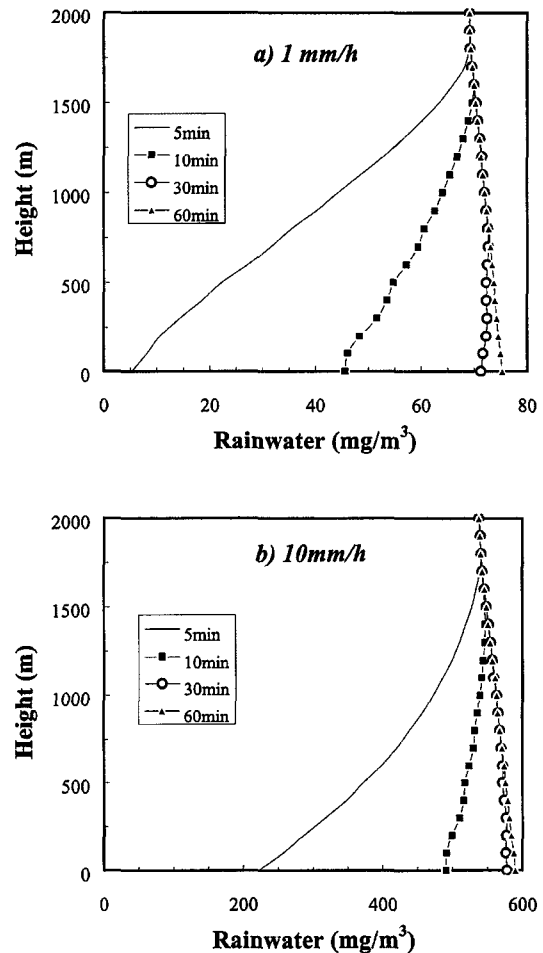


Fig. 6. Vertical profile of rainwater concentration at various times. a)  $I=1$  mm/h b)  $I=10$  mm/h.

Table 2. Number distribution of rain drops at various times. (I=1 mm/h)

Drop diameter (mm)	2 km Initial	Rain intensity, I=1 mm/h											
		1 km						0 km (Ground)					
		5 min	10 min	20 min	30 min	1 hr	2 hr	5 min	10 min	20 min	30 min	1 hr	2 hr
0.20~0.23	358	0	0	89	365	370	370	0	0	0	0	380	382
0.23~0.28	267	0	0	266	277	276	276	0	0	0	0	285	285
0.28~0.36	197	0	1	203	204	204	204	0	0	0	207	211	210
0.36~0.45	141	0	109	146	146	145	146	0	0	101	152	151	151
0.45~0.57	98	0	100	101	101	101	101	0	0	105	105	105	105
0.57~0.72	64	4	67	67	66	67	67	0	0	69	69	69	69
0.72~0.91	39	33	40	41	40	41	41	0	34	43	42	42	42
0.91~1.14	21	21	22	22	22	22	22	0	22	23	22	22	22
1.14~1.44	9	10	10	10	10	10	10	0	10	10	10	10	10
1.44~1.81	3	3	3	3	3	3	3	0	3	3	3	3	3
1.81~2.28	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2.28~2.87	0.082	0.086	0.086	0.086	0.086	0.086	0.086	0.089	0.089	0.090	0.090	0.089	0.090
2.87~3.62	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
3.62~4.56													
4.56~5.74													
5.74~7.23													
7.23~8.06													

Table 3. Number distribution of rain drops at various times. (I=10 mm/h)

Drop diameter (mm)	2 km Initial	Rain intensity, I=10 mm/h											
		1 km						0 km (Ground)					
		5 min	10 min	20 min	30 min	1 hr	2 hr	5 min	10 min	20 min	30 min	1 hr	2 hr
0.20~0.23	1010	0	0	251	1031	1041	1041	0	0	0	0	1072	1070
0.23~0.28	766	0	0	766	794	791	789	0	0	0	1	819	816
0.28~0.36	582	0	2	600	600	606	606	0	0	0	612	624	624
0.36~0.45	433	0	334	448	448	448	448	0	0	310	469	466	463
0.45~0.57	321	0	328	333	331	334	333	0	0	342	345	343	343
0.57~0.72	233	14	242	241	240	241	242	0	0	251	251	257	250
0.72~0.91	164	140	169	170	171	169	169	0	145	178	177	177	177
0.91~1.14	110	113	114	114	114	114	114	0	118	118	118	118	118
1.14~1.44	69	72	72	72	72	72	72	0	76	76	75	75	75
1.44~1.81	39	41	41	41	41	41	41	1	43	43	43	43	43
1.81~2.28	19	20	20	20	20	20	20	17	20	21	21	21	21
2.28~2.87	7	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
2.87~3.62	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3.62~4.56	0.301	0.315	0.312	0.312	0.315	0.315	0.315	0.333	0.330	0.333	0.330	0.330	0.330
4.56~5.74	0.021	0.022	0.022	0.022	0.022	0.023	0.022	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.023
5.74~7.23													
7.23~8.06													

부분임으로 강수강도 1 mm/hr와 10 mm/hr의 두가지 경우를 서로 비교하였다.

강수강도가 각각 1 mm/hr, 10 mm/hr 일 때 고도 2 km, 1 km 그리고 지상에 도달하는 빗방울의 개수변화를 표 2, 표 3에 표시하였다. 전반적으로 강수강도

가 강할수록 빗방울의 개수가 증가하고 특히 큰 빗방울의 개수가 증가하였으며, 전체 빗방울이 고도 2 km의 구름높이에서 고도 1 km 및 지상에 도달하는 시간은 비가 내리기 시작하여 약 30분, 1시간 후로 각각 나타났다. 또한, 구름에서 지상으로 향해 떨어

지는 빗방울의 개수는 지상에 가까울수록 증가하였는데, 이것은 빗방울의 침강속도가 구름 높이에서 지상으로 향해 떨어질수록 점점 늦어지기 때문이라고 생각된다.

그림 6에는 강수강도 1 mm/hr, 10 mm/hr에서 고도별 전 강수량을 시간 변화별로 표시하였다. 지상에 도달하는 강수량은 강수강도가 강할수록 많았는데, 비가 내리기 시작하여 5분, 30분, 1시간 후에 지상에 도달하는 강수량은 강수강도 1 mm/hr 일 때 5, 71, 75 mg/m<sup>3</sup>, 강수강도 10 mm/hr 일 때 221, 578, 590 mg/m<sup>3</sup>으로 각각 나타났다.

#### 4.2 저압입팩터 측정자료에 의한 질량 입경분포별 세정특성

실제 대기 에어로졸 입자의 입경분포로부터 세정 특성을 고려하기 위하여 12단 저압 입팩터를 사용하여 측정된 전체 입자의 질량입경분포 자료(박정호 등, 1997)를 이용하여 강수시간, 강수강도, 고도별로 강수 및 대기 중의 에어로졸입자의 농도변화를

검토하였다.

그림 7은 강수강도 1 mm/hr, 10 mm/hr 일 때 수직 고도에 따른 강수 및 대기 중의 에어로졸입자의 질량농도의 변화를 표시하였다. 고도 2km부터 시작하여 대기 중의 입자가 강수중으로 계속 세정되어 결국 지상으로 도달하는 습성침적량의 농도는 강수강도 1 mm/hr의 경우 비가 내리기 시작하여 약 20분 경과 후 27.9 µg/ml로 최고농도를 표시하였으며, 점차 대기 중 입자가 제거되어 최고농도의 절반으로 줄어드는 시간은 총 강수시간 90분 후이었으며, 총 강수시간 2시간 후에는 최고농도의 약 23%로 나타났다. 강수강도 10 mm/hr의 경우 비가 내리기 시작하여 약 10분 경과 후 11.6 µg/ml의 농도를 표시하였으며, 이 농도가 절반으로 낮아지는 시간은 총 강수시간 30분 후 그리고 총 강수시간 2시간 후에는 강수중 농도는 거의 0 µg/ml에 이르렀다. 한편, 대기 중 에어로졸입자의 총 질량농도 변화는 고도별 배경농도 50 µg/m<sup>3</sup>에서 비가 내리기 시작하여 10분→30분→1시간→2시간 경과 후 강수강도 1 mm/hr의

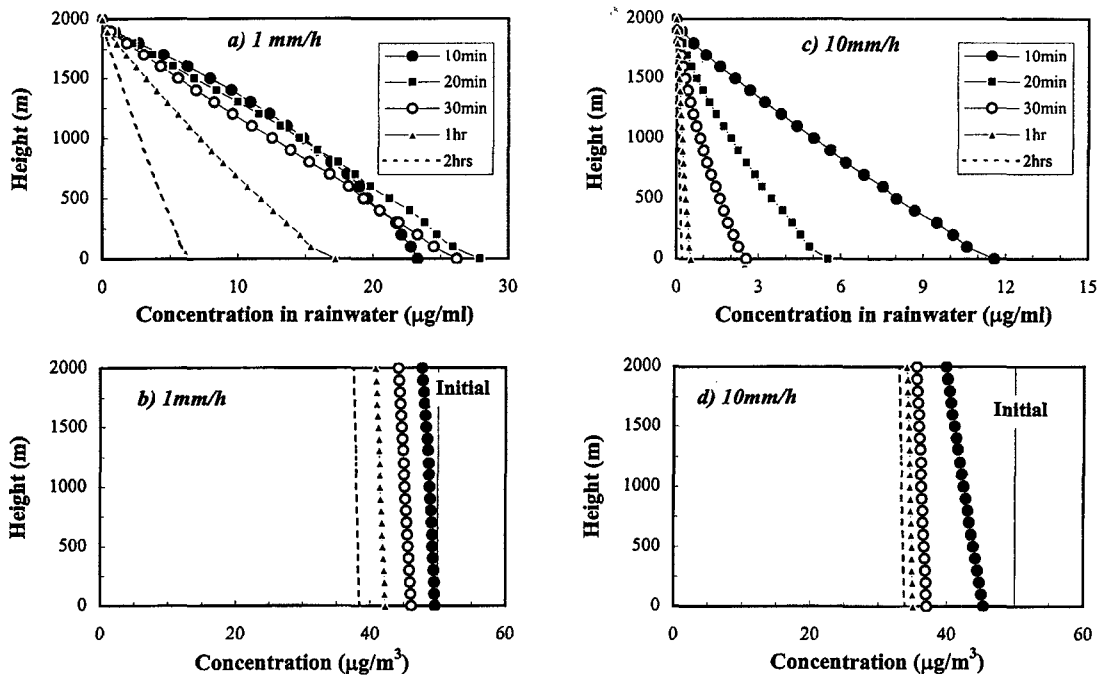


Fig. 7. Vertical profiles of PM concentration in the atmosphere and rainwater.  
 a)  $I=1$  mm/h, PM in the rainwater, c)  $I=10$  mm/h, PM in the atmosphere,  
 b)  $I=1$  mm/h, PM in the atmosphere, d)  $I=10$  mm/h, PM in the rainwater



경우 고도 2 km지점에서는 48.8→44.1→40.7→37.4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 지상에서는 49.6→46.1→42.2→38.4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로

나타났으며, 강수강도 10 mm/hr의 경우 2 km지점에서는 39.9→35.6→34.1→33.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 지상에서는

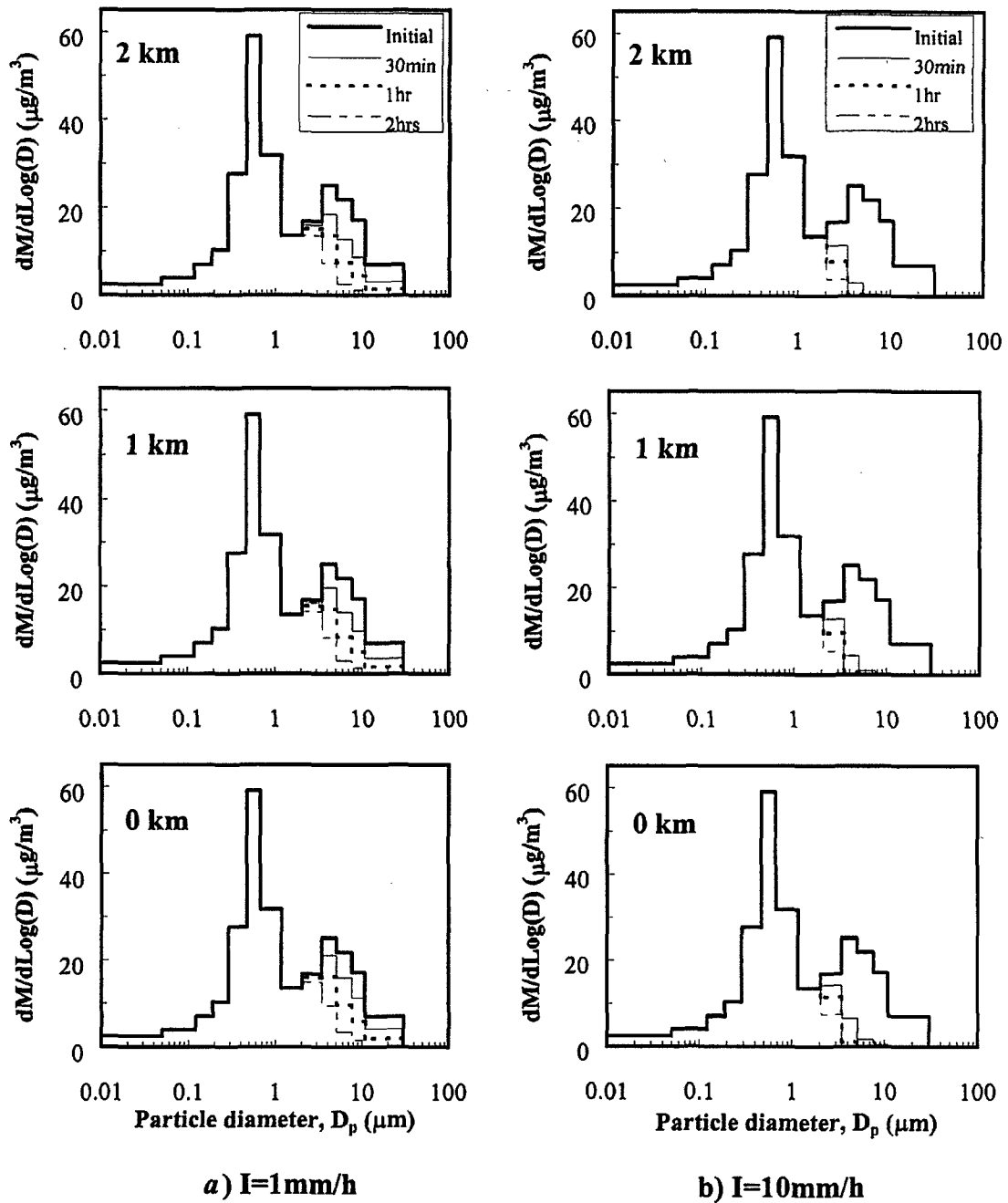


Fig. 8. Evolution of size distribution of PM as a function of rainfall times.  
 a)  $I=1\text{ mm/h}$  b)  $I=10\text{ mm/h}$ .

45.4→37.1→35.1→33.9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타나 전체적으로 강수시간에 따라 점차 감소하고 강수강도가 강할수록 농도감소가 빨랐으며, 특히 초기강수시 급격히 감소하는 것으로 나타났다.

그림 8에는 고도 2 km, 1 km 그리고 지상에서 강수시간에 따른 질량입경분포의 농도변화 특성을 표시하였다. 전체적으로 빗방울에 의한 대기 에어로졸 입자의 입경별 세정특성은 거의 입경  $2\mu\text{m}$  이상의 조대입자 영역에서만 일어났으며, 특히 입경  $2\mu\text{m}$  이하의 미세입자 영역에서는 강수강도가 강하여도 뚜렷한 세정효과는 나타나지 않았다.

이 사실은 최금찬 등(1998)의 부산시 일부지역에서 조사된 초기 및 후속강우 특성에서도 나타나며, 대부분의 산성비가 강우초기에 많은 대기 중의 입자를 세정하여 높은 pH의 값을 나타내며 (pH 6~7), 후속되는 강우는 점점 pH 값이 떨어져 (pH 4~5) 후속강우시도 미세한 입자들이 잘 제거되지 않음을 입증하고 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 대기 에어로졸 입자의 세정특성을 이론적으로 설명하기 위해 강수에 의한 습성침착 모델을 작성하였고, 측정된 대기 에어로졸 입자의 입경별 세정특성 변화를 강수시간, 강수강도, 고도별에 따른 강수 및 대기 중의 농도변화로 검토한 결과 다음과 같이 요약하였다.

1) 빗방울 개수는 강수강도가 강할수록 증가하고 특히 큰 빗방울의 개수가 증가하였으며, 지상에 도달하는 강수량은 강수강도가 강할수록 많았다.

2) 질량입경분포 자료를 이용한 결과 지상으로 도달하는 습성침착량의 농도는 강수강도 1 mm/hr의 경우 총 강수시간 약 20분 경과 후에는  $27.9\mu\text{g}/\text{ml}$ 의 최고농도가 나타났으며, 강수강도 10 mm/hr의 경우 강수시간 10분 경과 후에는  $11.6\mu\text{g}/\text{ml}$ 으로 나타났다.

3) 대기 에어로졸입자의 입경별 세정특성은 거의 입경  $2\mu\text{m}$  이상의 조대입자 영역에서만 일어났으며, 특히 입경  $2\mu\text{m}$  이하의 미세입자 영역에서는 강수강도가 강하여도 뚜렷한 세정효과는 나타나지 않았다.

## 참 고 문 헌

- 나춘기, 정재일 (1997) 전주에서 채수된 강수의 화학적 조성, 한국대기보전학회지, 13(5), 371-381.
- 박정호, 최금찬, 카사하라 미키오 (1996) 강수에 의한 대기 에어로졸 입자의 세정 특성, 한국대기보전학회지, 12(2), 159-165.
- 박정호, 최금찬 (1997) 저압 임팩터를 이용한 대기 에어로졸 입자의 입경분포 측정과 화학조성 자료의 해석, 한국대기보전학회지, 13(6), 475-486.
- 이승일, 김승호, 조기철, 김희강 (1996) 삼척지역 우수의 이온성분농도에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 12(1), 23-28.
- 최금찬, 김창환, 조정구, 박정호 (1998) 부산시 일부지역에 대한 초기 및 후속강우의 이온성분 특성, 한국대기보전학회지, 14(4), 361-368.
- 허홍욱, 허만규 (1998) 인공산성비가 중요 농작물의 생육에 미치는 영향, 한국환경과학회지, 7(2), 123-131.
- 大野 豊 (1990) 新版數値解析ハンドブック, オーム社, pp. 309-320.
- 東野 達 (1978) 大氣中からの汚染物質の除去に関する研究, 京都大學修士論文.
- 藤井孝藏 (1995) 流體力學の數値計算法, 東京大學, pp. 51-60.
- Altwickler, E.R. and J.T. Mahar (1984)  $\text{NH}_4/\text{Ca}$  ratio in different forms of atmospheric deposition: Interpretative potential, Atmos. Environ., 18, 1875-1883.
- Beard, K.V. (1976) Terminal velocity and shape of cloud and precipitation drops aloft, J. Atmos. Sci., 33, 851-864.
- Berkowitz, C.M., R.C. Easter, and B.C. Scott (1989) Theory and results from a quasi-steady-state precipitation-scavenging model, Atmos. Environ., 23, 1555-1571.
- Best, A.C. (1950) The size distribution of raindrop, Q.J.R. Met. Soc., 76, 16-36.
- Carmichel, G.R. L.K. Peters, and T. Kitada (1986) A second generation model for regional-scale transport/chemical/deposition, Atmos. Environ., 20, 173-188.
- Chang, J.S., R.A. Brost, I.S.A. Isaksen, S. Madronich, P. Middleton, W.R. Stockwell and C.J. Walcek (1987) A three dimensional Eulerian acid deposition model; physical concepts and formulations, J. Geophys. Res., 92, 14682-14700.

- Dana, M.T. and J.M. Hales (1976) Statistical aspects of the washout of polydisperse aerosols, *Atmos. Environ.*, 10, 45-50.
- Davenport, H.M. and L.K. Peters (1978) Field studies of atmospheric particulate concentration changes during precipitation, *Atmos. Environ.*, 12, 997-1008.
- Fuchs, N.A. (1964) *The Mechanics of Aerosols*, Macmillan, New York, p. 164.
- Grover, S.N. and H.R. Pruppacher (1977) A numerical determination of the efficiency with which spherical aerosol particles collide with spherical water drops due to inertial impaction and phoretic and electrical forces, *J. Atmos. Sci.*, 34, 1655-1663.
- Hegg, D.A. (1985) The importance of liquid-phase oxidation of SO<sub>2</sub> in the troposphere, *J. Geophys. Res.*, 90, 3773-3779.
- Levine, S.Z. and S.E. Schwartz (1982) In-cloud and below-cloud scavenging of nitric acid vapor, *Atmos. Environ.*, 16, 1725-1734.
- Marshall, J.S. (1948) The distribution of raindrops with size, *J. Met.*, 5, 165-166.
- McMurry, P.H. and J.C. Wilson (1983) Droplet phase (heterogeneous) and gas phase (homogeneous) contributions to secondary ambient formation as functions of relative humidity, *J. Geophys. Res.*, 88, 5101-5108.
- McGann, B. and S.G. Jennings (1991) The efficiency with which drizzle and precipitation sized drops collide with aerosol particle, *Atmos. Environ.*, 25A, 791-799.
- Nieto, P.J.G., B.A. García, J.M.F. Díaz and M.A.R. Braña (1994) Parametric study of selective removal of atmospheric aerosol by below-cloud scavenging, *Atmos. Environ.*, 28, 2335-2342.
- Pruppacher, H.R. and J.D. Klett (1978) *Microphysics of Clouds and Precipitation*, Reidel, Holland, pp. 358-411.
- Saltzman, E.S., G.W. Brass, and D.A. Price (1983) The mechanism of sulfate aerosol formation; Chemical and sulfur isotopic evidence, *Geophys. Res. Lett.*, 10, 513-516.
- Seinfeld, J.H. (1986) *Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution*, John Wiley & Sons, New York, pp. 617-629.
- Sekhon, R.S. and R.C. Srivastava (1971) Doppler radar observations of drop-size distributions in a thunderstorm, *J. Atmos. Sci.*, 28, 983-994.
- Slinn, W.G.N. (1977) Some approximations for the wet and dry removal of particles and gases from the atmosphere, *Water, Air, and Pollution*, 7, 513-543.
- Strauss, W. (1975) *Industrial Gas Cleaning*, Pergamon Press, New York, p. 293.
- Walton, W. and A. Woolcock (1960) *In Aerodynamic Capture of Particles*, Pergamon Press, Oxford, p. 129.
- Wang, P.K., S.N. Grover, and H.R. Pruppacher (1978) On the effect of electric charges on the scavenging of aerosol particles by clouds and small raindrops, *J. Atmos. Sci.*, 35, 1735-1743.
- Whitby, K.T. (1978) The physical characteristics of sulfur aerosols, *Atmos. Environ.*, 12, 135-159.
- Wurzler, S., A.I. Flossmann, H.R. Pruppacher, and S.E. Schwartz (1995) The scavenging of nitrate by clouds and precipitation, *J. Atmos. Chem.*, 20, 259-280.