

## 침적 모형에 의한 습성침적 플럭스 수치모의

이 화 운 · 문 난 경 · 임 주 연  
부산대학교 대기과학과

(2002년 1월 2일 접수; 2002년 12월 13일 채택)

### Numerical simulation of wet deposition flux by the deposition model

Hwa-Woon Lee, Nan-Kyoung Moon and Ju-Yeon Lim

Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan 617-736, Korea

(Manuscript received 2 January, 2002; accepted 13 December, 2002)

The purpose of this study is to estimate wet deposition flux and to investigate wet deposition characteristics by using the ADOM model. Wet deposition flux of highly reactive SO<sub>2</sub> is estimated by applying observed meteorological parameters and concentrations of chemical species to the ADOM model. Wet deposition is largely dependent on large scale precipitation and cloud thickness. Wet deposition flux of sulfate depends on SO<sub>2</sub> oxidation in clouds. When large amount of SO<sub>2</sub> is converted to sulfate, deposition flux of sulfate increases, but wet deposition flux of SO<sub>2</sub> is small. On the whole, the pattern of sulfate wet deposition flux agrees with the typical pattern of sulfate wet deposition that is high in the summer(July) and low in the winter(January).

Key words : Acid deposition model, Wet deposition flux, Precipitation, Cloud thickness, SO<sub>2</sub> Oxidation

#### 1. 서 론

대기오염은 산업화와 도시의 발달로 그 심각성을 더해가고 있다. 대기오염 현상이 도시 및 자연 환경에 미치는 영향과 오염물질의 장거리 수송 및 화학변환 등을 고려한다면, 대기오염 현상은 한 국가의 사회적 문제에서 나아가 전지구적인 문제로 확장되며, 따라서 이에 대한 문제 해결 방안의 모색이 절실히 요구된다.

대기오염 문제와 관련하여 관심의 대상이 되고 있는 침적 현상은 대기 정화에 중요한 역할을 담당하고 있으며, 크게 건성침적(dry deposition)과 습성침적(wet deposition)으로 구분된다. 건성침적은 대기의 오염물질이 중력이나 분자 확산에 의해 지표면이나 수면으로 침강·흡착되는 현상이며, 습성침적은 구름 내에서 오염물질이 응결핵이 되어 제거되는 성우 제거(rainout)와 구름보다 낮은 고도에서 강수에 의해 제거되는 세척 제거(washout)를 포함

한다. 대기에서의 오염물질 제거과정 뿐만 아니라 침적 현상에 의해 심각한 피해가 발생할 수 있는 지역의 환경보호를 위해서도 침적 현상에 대한 연구는 필수적이다.

이와 관련하여 국외에서는 산성 침적 모형을 사용한 연구가 활발하게 이루어지고 있는데, 미국의 RADM(Regional Acid Deposition Model)과 캐나다의 ADOM(Acid Deposition Oxidants Model) 등이 대표적인 산성 침적 모형이다. 모형을 사용한 선행 연구를 살펴보면, Karamchandani와 Venkatram<sup>1)</sup>이 여름철 황산염(sulfate)을 생성하는 비강수 구름의 역할 연구를 위하여 ADOM 시뮬레이션 결과를 사용하였다. 모형은 실제 관측치와 모형의 결과치를 비교·분석하여 평가되는데, Venkatram과 Karamchandani, Misra<sup>2)</sup>이 ADOM의 평가를 위하여 OSCAR(Oxidation and Scavenging Characteristics of April Rain, 1981) 현장연구 기간동안 수집된 관측 자료를 사용하였고, Macdonald *et al.*<sup>3)</sup>은 1988년 여름의 항공기 관측 자료를 사용하였으며, Glazer와 Leighton<sup>4)</sup>은 ADOM 구름모듈(Cloud Module)의 평가를 위해 동일한 조건에 대한 시뮬레이션 결과를

Corresponding Author : Hwa Woon Lee, Dept. of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan 617-736, Korea  
Phone : +82-51-510-2291  
E-mail : hwlee@pusan.ac.kr

3차원 운동학적 구름 화학모델(Dynamic Cloud Chemistry Model)의 결과와 비교 연구하였다.

본 연구에서는 실제 관측 자료를 침적 모형에 적용하여 실제 지역에 대한 습성침적 플럭스를 수치 모의 하였으며, 이를 통해 습성침적에 영향을 미치는 기상 요소의 분석 및 기상 요소에 따른 습성침적 특성에 관하여 살펴보았다.

## 2. ADOM 습성침적 모형의 구조

ADOM(Acid Deposition Oxidants Model)은 산성 침적 시스템에 대한 이해를 돕기 위해, 캐나다 환경부와 온타리오 환경부 등의 후원 하에, ERT와 MEP Co.에 의해 개발되고 있는 모형이다. 본 연구에서 사용된 모형은 ADOM 액체상 모듈(aqueous-phase module)의 1차원 칼럼 버전으로, 13개 화학종 사이에서의 25개 화학반응으로 구성되며, 여기에는 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>(hydrogen peroxides)와 O<sub>3</sub>(ozone), 그리고 Fe와 Mn 존재 시 O<sub>2</sub>에 의한 산화반응이 포함된다.

모형은 지표에서 10km까지 연속으로 간격이 일정치 않은 12개의 레벨로 구성되며, 2km 이하에 8개의 레벨이 존재한다. ADOM의 구름 시스템은 층운형(stratiform)과 적운형(cumulus-type)으로 구성되어 있다. 층운형 구름의 미물리적 인자는 지표 강수율(surface precipitation rate)에 의해 유도되며, 적운형 구름의 경우는 연속 기온자료(vertical soundings)에 의해 유도되는 the Raymond-Blyth stochastic model(Raymond and Blyth<sup>5)</sup>)에 의해 계산된다.

### 2.1. 층운형 구름 모형 (stratiform cloud model)

층운형 구름 모형은 운수(cloud water), 우수(rain water), 강설(snow)에 대한 보존 방정식을 해결한다.

$$\frac{\partial q_c}{\partial t} = -\frac{\omega}{\rho_a} \frac{\partial}{\partial z} (\rho_a q_c) + F_{01} - (F_{12} + F_{13}) \quad (1)$$

$$\frac{\partial q_r}{\partial t} = -\frac{(\omega + V_r)}{\rho_a} \cdot \frac{\partial}{\partial z} (\rho_a q_r) - q_r \frac{\partial V_r}{\partial z} + (F_{12} + F_{32}) - F_{20} \quad (2)$$

$$\frac{\partial q_s}{\partial t} = -\frac{(\omega + V_s)}{\rho_a} \cdot \frac{\partial}{\partial z} (\rho_a q_s) - q_s \frac{\partial V_s}{\partial z} + (F_{13} + F_{03}) - (F_{32} + F_{30}) \quad (3)$$

여기서,  $q_c, q_r, q_s$ 는 운수, 우수, 눈의 혼합비,  $\omega$ 는 상승 속도(updraft velocity),  $V_r, V_s$ 는 비와 눈의 침강속도(fallspeeds),  $\rho_a$ 는 공기 밀도,  $F_{ij}$ 는

미물리 과정을 나타낸다. 아래 첨자  $i$ 와  $j$ 는 각각 소멸항(sink term)과 생성항(source term)을 나타내며, 0에서 3까지의 범위를 갖는다. 0은 vapor, 1은 운수, 2는 우수, 3은 눈을 의미한다. 모형에 포함되는 미물리 과정 다음의 7가지로 요약할 수 있다.

- 운수로의 수증기 응결(vapor condensation)
- 운수에서 비로 자동전환(autoconversion)
- 비에 의한 운수의 채집(collection)
- 눈으로의 수증기 침적(vapor deposition)
- 눈에 의한 운수의 채집(collection)
- 운저고도 이하에서 우수의 증발
- 운저고도 이하에서 눈의 승화(sublimation)

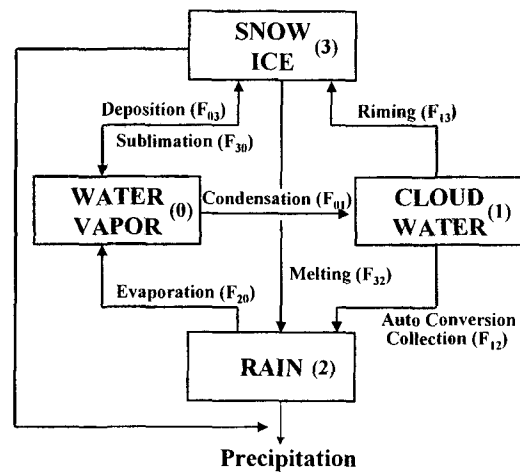


Fig. 1. Schematic of microphysical processes included in stratiform cloud model.

모형의 입력 자료는 기온, 기압, 노점 편차의 연속적 프로파일, 운저고도(cloud base)와 운정고도(cloud top), 운저고도 이하의 상대습도이다. 모형의 결과는 운수, 우수, 눈의 혼합비 프로파일, 미물리 과정, 에어로졸 제거율(aerosol scavenging rates), 빗방울(raindrops)과 눈(snow)의 평균크기로 구성되며, 이는 액체상 화학(aqueous-phase chemistry)과 습성침적(wet deposition)의 계산에 사용된다.

### 2.2. 적운형 구름 모형 (cumulus cloud model)

적운형 구름(cumulus cloud)의 일생은 3단계로 구성된다.

- ① 활성 구역(active region)은 구름 주변으로부터의 공기 유입(ingestion)으로 형성된다.
- ② 활성 구역에서 형성된 운수에서 화학반응이 발생한다. 이 단계를 'dwell phase'라 언급하며, 이 단계의 마지막에 제거(scavenging)가 발생한다.

③ 구름의 소멸단계로, 남아있는 오염물질이 구름 구역(cloud region)으로 방출된다. 오염물질의 재분배는 구름의 형성, 소멸단계 동안에 발생한다.

구름의 활성 구역에서 난류혼합과정은 RB 구름 혼합 모형(cloud-mixing model)을 사용하여 모형화된다. 구름 활성 구역은 운저고도 아래에서 상승된 공기의 혼합과 운저고도와 운정고도 사이의 레벨에서 구름으로 끌려 들어가는 공기로 구성된다.

2.3. 습성 제거(wet scavenging)와 화학(chemistry)

층운형 구름 모형과 적운형 구름 모형의 습성 제거와 화학은 용해성 기체(SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, organic peroxides, HNO<sub>3</sub>, NH<sub>3</sub>, O<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>)의 운수로의 질량수송과 얼음(ice)에 의한 용해성 기체의 제거, 운수와 얼음에 의한 입자 제거를 다룬다. 층운형 구름과 적운형 구름에서의 제거는 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 유기 과산화물, O<sub>3</sub>, 그리고 미량 금속(Fe, Mn) 존재 시 O<sub>2</sub>에 의한 S(IV)에서 S(VI)로의 산화를 포함한다.

Kunen *et al.*<sup>6)</sup>의 비율 상수(rate constant)는 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>에 의한 S(IV)의 액체상 산화에 사용되며, O<sub>3</sub>에 의한 S(IV)의 산화에 대한 비율 상수는 Maahs<sup>7)</sup>로부터 결정된다. 유기 과산화물에 의한 S(IV)의 산화에 대한 비율 상수는 Lind<sup>8)</sup>에 의해 사용된 값의 1/2이다. Ibusuki와 Takeuchi<sup>9)</sup>의 비율 상수는 미량 금속(trace metal) 존재 시 O<sub>2</sub>에 의한 S(IV)의 촉매적 산화에 사용된다.

액체상(aqueous-phase) 과정이 구름의 일생에 대해 수치모의된 후에, 운수내의 오염물질은 습성 침적을 통해 제거된다. 비 속의 미량기체(trace gas) 농도(C<sub>r</sub>)는 운수와 얼음 반응체내의 수분 가

중농도로 가정된다.

침적량은,

$$D = C_r \cdot P_r \cdot \tau_{cloud} \tag{4}$$

로 표현되며, 여기서 P<sub>r</sub>은 격자 평균 강수량, τ<sub>cloud</sub>는 구름 내에서 공기의 지속시간으로, 10min에서 1h사이의 범위를 갖는다.

3. 실측치를 적용한 습성침적 수치모의

3.1. 자료 및 모의 방법

습성침적 플럭스의 산정을 위해 계절별로 2일씩, 총 8일을 선정하였다. 선정된 날짜는 1997년의 1월 5일과 23일, 4월 2일과 6일, 7월 6일과 16일, 그리고 11월 12일과 14일이다. 대상일은 수치모의를 위해 입력 자료로 요구되는 모든 관측 자료, 즉 강수량, 전운량, 운형, 지표 온도 및 연직 기온 자료 등의 기상 자료가 유용한 날이다. 모의 대상 지점은 남한 지역에서 지상 및 상층 기상 자료가 모두 유용한 포항, 제주, 광주, 오산의 4 지점이다. 사용된 자료는 선정된 1997년의 계절별 8일간과 상층 관측이 이루어지고 있는 4개 지점에서의 기상 자료와 4개 모의 대상 지점에서 선정된 8일 동안에 실측된 오염물질 농도 자료이다. 단, 오산 지점에서는 지상 관측 자료가 유용하지 않으므로 수원 지역의 자료를 대신 사용하였다.

ADOM에서는 모형의 수행을 위해 필요한 3개의 입력 파일 중 첫 번째 입력 파일에서 요구되는 지표 온도와 운량은 지상 관측 자료로부터 얻을 수 있다. 강수량은 습성침적 플럭스에 가장 중요한 영향을 미치는 기상 인자로서, 대규모 강수량과 소규모 강수량 값을 정확히 결정하는 것이 중요하다. 그러나, 모형에서 요구하는 대규모 강수량과 소규모 강수량은 실제 측정되지 않기 때문에, 3가지로 방법을 달리하여 두 강수량 값을 산정하였고 3가지 중 가장 적절한 방법을 선택하여 강수량 값을 결정하였다. 다음으로 중요한 기상 인자는 구름의 두께로, 이는 운정고도와 운저고도의 차로 결정된다. 그러나, 현재 기상관측에서는 운저고도만 측정되고 있으므로, 운정고도와 운저고도를 산정하기 위해 2가지 방법을 사용하였다. 두 번째 입력 파일은 기압, 기온, 노점 편차의 연직 프로파일이며, 상층 기상 관측 자료와 단열선도를 사용하여 ADOM의 12개 층에 대한 프로파일을 생성하였다. 세 번째 입력 파일은 오염물질 농도의 연직 프로파일로써, 지점별로 각 대상일에 관측된 농도 자료를 사용하였다. 그러나, 오염물질 농도가 연직 레벨별로 관측되고 있는 예가 없기 때문에, 지표에서의 관측

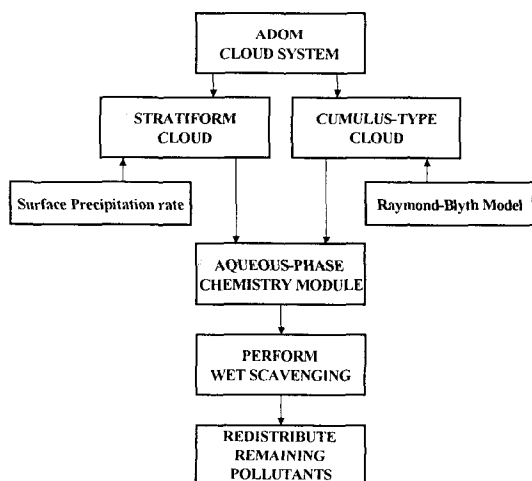


Fig. 2. Simplified steps in wet scavenging calculation.

농도를 기준으로 하여, ADOM의 12개 층에 적절한 가중치(weights)를 주는 방법으로 연직 프로파일을 작성하였다.

3.2. 주요 기상 요소 및 오염물질 농도 프로파일 생성

3.2.1. 운정고도와 운저고도 산정

운정고도와 운저고도는 2가지 방법으로 산정되었다. 첫 번째 산정 방법은 운저고도를 상승응결고도(Lifting Condensation Level, LCL)로 산정하고, 운정고도는 격자 평균 상대습도가 60%보다 낮아지는 지점의 고도로 산정하는 방법으로, 단열선도(Skew T-Log P diagram)와 기온과 노점 온도의 연직 프로파일을 사용하였다(Table 1).

두 번째 산정 방법은 적운형 구름과 층운형 구름을 구분하여 운정고도와 운저고도를 산정하는 방법이다. 층운형 구름의 산정 방법은 기온과 노점 온도의 차이가 작은 구간에 구름이 존재한다는 사실을 근거로 한다. 따라서, 단열선도(Skew T-Log P diagram)를 이용하여 기온과 노점 온도의 차가 4°C 이하인 구간을 구름이 존재하는 구역으로 정하였으며, 이 구역의 상한 고도와 하한 고도를 각각 운정고도와 운저고도로서 산정하였다. 적운형 구름의 경우에는 공기괴법(parcel method)을 사용하는데 운저고도는 상승응결고도로 산정하되, 상승응결고도가 대기 온도 곡선의 우측에 위치하는 경우에만 운저고도로 결정된다.

그리고, 운정고도는 상승응결고도에서 습윤 단열 곡선을 따라 상승하여 대기 온도 곡선과 만나는 지점의 고도(평형고도, EL) 또는 그보다 높은 고도로 결정된다<sup>10)</sup>. 그러나, 적운형 구름의 산정법은 유용하지 못하였는데, 그 이유는 모든 경우에 상승응결고도가 대기 온도 곡선의 좌측에 위치하여 운저고도로 사용될 수 있는 조건을 만족하지 못하였고, 평형고도 또한 산정할 수 없었기 때문이다. 따라서,

Table 1. Estimated cloud top and base heights(m) by 1<sup>st</sup> method

sites	Pohang		Jeju		Gwangju		Osan	
	base	top	base	top	base	top	base	top
1/5	600	1800	1950	2650	400	2450	550	2850
1/23	1300	3800	700	8550	380	8300	600	1000
4/2	600	8600	350	1900	300	8400	500	2050
4/6	300	3400	600	3300	900	1800	450	3400
7/6	600	5450	400	9100	300	1500	350	1850
7/16	500	4600	300	4200	300	3000	400	1400
11/12	300	6850	350	2800	290	4000	300	2150
11/14	500	4050	500	3850	550	2500	550	1600

층운형 구름의 산정법만으로 운정고도와 운저고도를 산정하였다(Table 2). 노점 편차가 4°C 이하인 구간의 하한 고도가 250m보다 낮게 산정된 경우로, ADOM의 실행 조건을 충족시키기 위하여 250m로 임의 조정하였다.

습성침적 플럭스의 산정에 필요한 값의 결정에 있어, 운저고도는 첫 번째 방법으로 산정된 고도값을, 운정고도는 기온 및 노점 온도 프로파일로부터 나타나는 습윤 구역으로써 구름의 존재 구간을 결정하는 두 번째 방법을 선택하였다(Table 3).

3.2.2. 대규모 강수량 및 소규모 강수량 산정

습성침적 플럭스에 가장 큰 영향을 미치는 강수량은 3가지 방법으로 산정되었다.

첫 번째 방법은 4개 대상지점에 대한 1월, 4월, 7월, 11월의 강수량 자료와 운형 자료의 분석으로 산정되었다. 대상일이 속한 1월, 4월, 7월, 11월의 강수량 자료와 운형 자료를 분석하였다. 분석된 자료는 1997년의 결측일을 제외한 지상 관측 자료로서, 1년 중 포항은 73일, 제주는 77일, 광주는 95일, 그리고 수원(오산)은 78일의 자료를 사용하였다. 강

Table 2. Estimated cloud top and base heights(m) by 2<sup>nd</sup> method

sites	Pohang		Jeju		Gwangju		Osan	
	base	top	base	top	base	top	base	top
1/5	400	1700	1550	2550	250	2400	250	2350
1/23	1000	2850	600	8400	250	6100	250	850
4/2	250	7450	250	1600	250	7500	250	1200
4/6	250	3200	250	3050	250	500	250	3200
7/6	250	5550	250	8700	250	1450	250	700
7/16	250	3950	250	3600	250	2050	250	1750
11/12	250	6500	250	2550	250	3500	250	1800
11/14	250	4300	250	3700	250	2350	250	1500

Table 3. Finally estimated cloud top and base heights(m) for the ADOM simulation

sites	Pohang		Jeju		Gwangju		Osan	
	base	top	base	top	base	top	base	top
1/5	600	1700	1950	2550	400	2400	550	2350
1/23	1300	2850	700	8400	380	6100	600	850
4/2	600	7450	350	1600	300	7500	500	1200
4/6	300	3200	600	3050	900	500	450	3200
7/6	600	5550	400	8700	300	1450	350	700
7/16	500	3950	300	3600	300	2050	400	1750
11/12	300	6500	350	2550	290	3500	300	1800
11/14	500	4300	500	3700	500	2350	550	1500

침적 모형에 의한 습성침적 플럭스 수치모의

수 발생시, 우리 나라에 빈번히 출현하는 구름의 종류는 층운(St), 난층운(Ns), 층적운(Sc), 고층운(As)의 순이며<sup>11)</sup>, 고층운(As), 층적운(Sc), 층운(St), 난층운(Ns), 적운(Cu), 적난운(Cb)의 6종의 강수운 중에서 고층운, 층적운, 층운, 난층운을 층운형 구름으로, 적운과 적난운을 적운형 구름으로 구분하였다. 강수량과 운형의 관계는 월별로 출현한 운형을 조사하여 운형별 강수량의 합계를 운형 출현 횟수로 나누어, 조사된 운형이 출현하였을 때 해당 운형이 가질 수 있는 강수량을 산정하여 나타내었

다. 분석 결과는 Table 4, 5, 6, 7에 나타내었으며, 첫 번째 방법으로 산정된 대규모 강수량과 소규모 강수량의 값은 Table 8에 나타내었다.

두 번째 방법은 대상일에 관측된 강수 합계를 총 강수량으로 결정하고, 대규모 강수량은 첫 번째 방법에서 강수량과 운형 관계에 대한 분석 결과 산정된 값으로, 소규모 강수량은 총 강수량에서 대규모 강수량을 뺀 값으로 결정하는 방법이다. 이 방법은 강수량 산정에 대상일의 실측 강수량을 사용하고자 고안된 방법으로, 산정 결과는 Table 9에 나타내었

Table 4. The relationship between precipitation and cloud types in Pohang area

Month	Cloud types	Precipitation(mm <sup>h</sup> <sup>-1</sup> )
1	St, Sc, Ac	2.95
	St	0.45
4	St, Sc, Ac	0.704
	St, Ac	0.3
7	St, Sc, Ac	2.69
	St, Ac	0.95
	Cu, Sc, Ac	0.1
11	St, Sc, Ac	3.807
	St, Ac	1.2
	St, Sc, Cu, Ac	13.1

Table 5. The same as Table 4 except in Jeju area

Month	Cloud types	Precipitation(mm <sup>h</sup> <sup>-1</sup> )
1	St, Sc, Ac	1.275
	Cu, Sc	0.229
	Cb, Ac	0.6
4	St, Sc, Ac	1.664
	St, Ac	0.1
7	St, Sc, Ac	1.452
	St, Ac	0.12
11	St, Ac	1.443
	Cu, Sc	0.1
	Cu, Sc, Ac	4.65

Table 6. The same as Table 4 except in Gwangju area

Month	Cloud types	Precipitation(mm <sup>h</sup> <sup>-1</sup> )
1	St, Sc, Ac	3.25
	St, Ac	0.25
4	St, Sc, Ac	0.696
	St, Ac	0.3
7	St, Sc, Ac	1.966
	Cb, Ac	12.533
11	St, Sc, Ac	3.308
	St, Sc, Ac	0.6
	Cb, Ac, Ci, Cs	22.25

Table 7. The same as Table 4 except in Suwon (Osan) area

Month	Cloud types	Precipitation(mm <sup>h</sup> <sup>-1</sup> )
1	St, Ac	1.45
	St	0.433
4	St, Ac	2.05
	St, Sc, Ac, Ci, Cs	2.05
7	St, Sc, Ac, Ci	0.15
	St, Sc, Ac, Ci, Cs	2.855
11	St, Sc, Ac	2.861
	St, Sc, Ac, Ci, Cs	2.82

Table 8. Estimated large scale and small scale precipitation(mm<sup>h</sup><sup>-1</sup>) by 1<sup>st</sup> method

sites	Pohang		Jeju		Gwangju		Osan	
	ls	ss	ls	ss	ls	ss	ls	ss
1/5	2.95	13.1	0.229	1.004	3.25	4.88	0.433	0.55
1/23	0.525	13.1	1.275	1.004	0.25	4.88	1.45	0.55
4/2	0.704	8.7	0.1	7.2	0.696	4.6	2.05	9.5
4/6	0.704	8.7	1.664	7.2	0.2	4.6	2.05	9.5
7/6	0.95	3.8	1.452	10.7	1.966	20.9	2.855	14.2
7/16	0.95	3.8	0.12	10.7	0.8	20.9	2.855	3.52
11/12	1.2	13.1	6.0	4.75	3.308	22.25	2.861	12.3
11/14	3.807	13.1	1.443	4.75	0.6	22.9	2.82	12.3

Table 9. Estimated large scale and small scale precipitation(mm<sup>h</sup><sup>-1</sup>) by 2<sup>nd</sup> method

sites	Pohang		Jeju		Gwangju		Osan	
	ls	ss	ls	ss	ls	ss	ls	ss
1/5	2.95	3.65	0.229	0.229	3.25	5.35	0.433	-0.333
1/23	0.525	-	1.275	3.225	0.25	-0.05	1.45	-1.45
4/2	0.704	30.896	0.1	12.4	0.696	40.004	2.05	26.25
4/6	0.704	13.096	1.664	1.336	0.2	4.0	2.05	17.75
7/6	0.95	57.15	1.452	15.848	1.966	42.134	2.855	8.745
7/16	0.95	45.05	0.12	12.88	0.8	58.0	4.78	3.52
11/12	1.2	31.5	6.0	0.6	25.75	22.25	2.861	13.839
11/14	3.807	9.693	1.443	-0.643	0.6	9.3	2.82	3.98

다. 그러나, 대상일의 운형이 대부분 층운형으로 관측된 점을 고려한다면, 이러한 방법은 순수하게 층운으로부터 얻어진 강수량이 소규모 강수량으로도 분배되어야 하는 모호성이 있다.

세 번째 방법은 강수량의 실측치도 이용하고 강수량과 운형의 관계 분석 결과도 고려할 수 있도록 고안된 방법이다. 대규모 강수량의 값은 대상일의 12h에 관측된 값이고, 소규모 강수량은 대상일이 포함된 달이나 계절에 적운형 구름 출현 시 예상할 수 있는 강수량으로 첫 번째 방법에서 분석된 강수량과 운형의 관계로부터 산정된 값이다. 12h에 적운이 관측된 경우(4회)에 대해서는 관측된 강수량이 소규모 강수량이 되고, 대규모 강수량은 강수량과 운형 관계의 분석 결과를 사용하였다. 총 강수량은 대규모 강수량과 소규모 강수량의 합으로 결정된다(Table 10).

세 번째 산정법은 대상일의 강수 합계를 총 강수량으로 사용한 두 번째 산정법의 모호성을 해결하기 위한 방법으로, 보다 개선된 방법인 것은 분명하나 대상일의 12h 강수량의 결측 횟수가 많아 모형의 입력 자료로서 부적합한 것으로 판단된다.

따라서, 습성침적 플럭스 산정을 위한 대규모 강수량과 소규모 강수량의 값은 4개 지점별로 대상일이 포함된 달 또는 계절의 강수량과 운형의 관계로부터 분석 및 산정되는 첫 번째 방법(Table 8)이 가장 적절할 것으로 생각된다.

3.2.3. 오염물질 농도의 연직 프로파일 작성

오염물질 농도는 각 지점의 지표 관측소에서 측정된 자료를 사용하였다. ADOM을 실행하기 위해서는 12개 층에 대한 오염물질 농도 프로파일이 요구되는데, 이를 위해 지표 관측치를 기준으로 두고 층별로 가중치(%)를 부여하여 연직 프로파일을 작성하였다(Table 11).

Level 1에서 level 3까지는 가중치 20%의 농도값

Table 10. Estimated large scale and small scale precipitation(mmh<sup>-1</sup>) by 3<sup>rd</sup> method

sites	Pohang		Jeju		Gwangju		Osan	
	ls	ss	ls	ss	ls	ss	ls	ss
1/5	1.8	13.1	2.1	1.004	3.4	4.88	-	0.55
1/23	-	13.1	0.7	1.004	0	4.88	-	0.55
4/2	0.1	8.7	-	7.2	0.5	4.6	2.6	9.5
4/6	1.3	8.7	1.664	-	-	4.6	0.1	9.5
7/6	0.2	3.8	0.2	10.7	2.0	20.9	0.8	14.2
7/16	0.1	3.8	0	10.7	-	20.9	2.855	-
11/12	1.2	13.1	6.6	4.75	26.4	22.25	3.9	12.3
11/14	8.0	13.1	-	4.75	0.4	22.9	1.1	12.3

을 동일하게 사용하는데, 이는 지표에서 관측된 오염물질의 농도값으로, 이 값이 층별 가중치를 결정하는 기준치가 되며, 가중치 20%에 해당하는 농도값으로 취급된다. level 4와 level 5에는 각각 가중치 30%와 15%의 농도값이, 그리고 level 6부터 level 12까지는 가중치 35%에 해당하는 농도값이 동일하게 사용된다.

3.3. 수치모의 결과

기상 및 오염물질 농도의 실측 자료를 ADOM에 적용하여 각 오염물질에 대한 습성침적 플럭스를 산정하였다. 수치모의 결과는 반응성이 높은 SO<sub>2</sub>와 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>에 대한 습성침적 플럭스 결과를 사용하여 분석하였다.

SO<sub>2</sub>의 습성침적 플럭스 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 일별로 4개 지점의 결과를 비교하면, SO<sub>2</sub>의 습성침적 플럭스는 대규모 강수량의 값에 크게 의존하였다. 이러한 패턴은 1월, 4월, 7월의 모든 대상일에서 찾아볼 수 있었는데, 대규모 강수량이 많고 운정고도의 높이가 낮아 구름 두께가 가장 얇은 오산 지점에서 1월 23일과 4월 2일에 특히 많은 양의 습성침적 플럭스가 나타났다. 그러나, 11월 12일과 14일의 경우, 광주와 포항에서 각각 가장 큰 대규모 강수량 값을 가짐에도 불구하고, 오산에서의 습성침적 플럭스 값이 높게 산정되었다. 이는 오산에서의 대규모 강수량이 두 번째로 높은 값이며,

Table 11. Vertical intervals and assigned weights(%) in each levels

Vertical intervals	Weights (%)
surface ~ 300m	20
300m ~ 500m	30
500m ~ 700m	15
700m ~	35

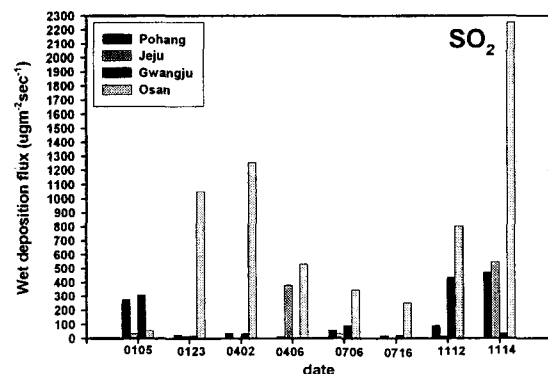


Fig. 3. Simulated wet deposition flux of SO<sub>2</sub> at 4 sites for 8 days.

구름 두께가 가장 얇아 SO<sub>2</sub> 산화에 의한 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>로의 전환이 적게 일어났기 때문에 사료된다.

초기 오염물질의 농도가 습성침적 플럭스에 미치는 영향을 분석하기 위하여 SO<sub>2</sub>의 습성침적 플럭스 결과를 SO<sub>2</sub> 농도 패턴과 비교하였다. 산정된 습성침적 플럭스가 초기 농도 패턴에 크게 의존적일 것으로 예상하였으나, 습성침적 플럭스는 대규모 강수량과 구름 두께 등의 주요 기상 인자를 포함한 기상 상태에 더 크게 좌우되는 것으로 나타났다.

SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 습성침적 플럭스 또한 대규모 강수량과 구름의 두께에 의해서 영향받는다(Fig. 4). SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>의 수치모의 결과를 Fig. 3의 SO<sub>2</sub>에 대한 습성침적 플럭스와 비교하면, SO<sub>2</sub>의 습성침적 플럭스가 많을 때 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>의 습성침적 플럭스는 적게, SO<sub>2</sub>의 습성침적 플럭스가 적은 경우에 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>의 습성침적 플럭스의 값은 높게 나타났다. 이러한 현상은 구름 내부의 SO<sub>2</sub>산화 반응에 의한 것으로, 많은 양의 SO<sub>2</sub>가 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>로 전환되면 SO<sub>2</sub>의 습성침적 플럭스는 적고, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>의 습성침적 플럭스의 양은 많게 나타나는 것이다. 전체적인 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>의 습성침적 플럭스 패턴은 여름(7월)에 높고 겨울(1월)에 낮은 전형적인 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>의 습성침적 패턴을 잘 따르고 있었다.

이상의 결과를 요약하면 2가지 종류의 반응성 물질인, SO<sub>2</sub>와 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>에 대한 습성침적 플럭스는 여러 기상 인자 중 대규모 강수량과 구름 두께에 의해 크게 영향받아, 대규모 강수량이 증가하면 습성침적 플럭스도 증가하고 구름 두께가 증가하면 SO<sub>2</sub>의 침적 플럭스는 감소하고, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>의 침적 플럭스는 증가하는 것으로 나타났다. 특히, SO<sub>2</sub>의 경우 두 가지 주요 기상 인자에 크게 영향을 받으며, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>의 경우에는 구름 내부의 SO<sub>2</sub> 산화반응에 의한 영향이 크게 작용하였다.

#### 4. 결 론

습성침적 현상은 강수현상과 구름 물리 및 산성비 현상과 관련하여 그 중요성이 높게 평가된다. 건성침적 현상과 함께 대기 오염물질의 제거에 중요한 역할을 담당하며, 대기 정화 및 대기질 관리 차원에서 필수적으로 고려되어야 할 사항이므로, 이에 관련된 연구 분석이 절실히 요구된다. 따라서 본 연구에서는 산성 침적 모형, ADOM과 기상 자료와 오염물질 농도 자료의 실측치를 사용하여 실제 지역의 습성침적 플럭스를 산정하였다.

- (1) 포항, 제주, 광주, 오산의 4개 지점에서 8일간에 대해, ADOM을 이용한 습성침적 플럭스를 수치모의한 결과, 습성침적은 지점별 오염물질의 초기 농도보다 대규모 강수량과 구름

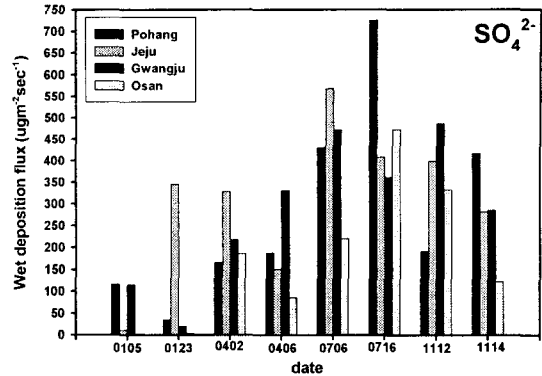


Fig. 4. The same as Fig. 3 except for SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>.

의 두께와 같은 기상인자에 의해 더 큰 영향을 받았다.

- (2) 상층 및 지상의 기상 자료와 오염물질 농도 자료의 실측치를 ADOM에 적용하여 산정된 반응성 물질의 습성침적 플럭스를 분석한 결과, SO<sub>2</sub>의 습성침적 플럭스는 대규모 강수량의 값에 크게 의존하여 강수량의 증가에 따라 습성침적 플럭스도 증가 또는 감소하였다. 구름의 두께에 의한 영향은 강수량과 반대로 나타나, 구름이 두꺼워질수록 습성침적 플럭스는 감소하였다.
- (3) SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>의 습성침적 플럭스는 구름 내부의 SO<sub>2</sub> 산화반응 정도에 의해 크게 좌우되어 많은 양의 SO<sub>2</sub>가 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>로 전환되면 침적되는 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>의 양도 증가하며, 이 경우 SO<sub>2</sub>에 대한 습성침적 플럭스는 적게 나타난다. SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>의 습성침적 플럭스에 대한 전체적인 패턴은 여름(7월)에 그 양이 많고 겨울(1월)에 적은, 전형적인 sulfate의 습성침적 패턴을 잘 따르고 있었다.

#### 참 고 문 헌

- 1) Karamchandani, P. K. and A. Venkatram, 1992, The role of non-precipitating clouds in producing ambient sulfate during summer: results from simulations with the acid deposition and oxidant model(ADOM), Atmospheric Environment 26A, 1041-1051.
- 2) Venkatram, A., P. K. Karamchandani, and P. K. Misra, 1988, Testing a comprehensive acid deposition model, Atmospheric Environment, 22, 737-747.
- 3) Macdonald, A. M., C. M. Banic, W. R. Leitch, and K. J. Puckett, 1993, Evaluation of the

- Acid Deposition and Oxidant Model(ADOM) with summer 1988 aircraft data, *Atmospheric Environment*, 27, 1019-1034.
- 4) Glazer, A. and H. G. Leighton, 1994, An evaluation of the ADOM cloud module, *Atmosphere-Ocean*, 645-662.
  - 5) Raymond, D. J. and A. M. Blyth, 1986, A stochastic mixing modeling for nonprecipitating cumulus clouds, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 43, 2708-2718.
  - 6) Kunen, S. M., A. L. Lazrus, G. L. Kok, and B. G. Heikes, 1983, Aqueous oxidation of SO<sub>2</sub> by hydrogen peroxide, *J. Geophys. Res.*, 88, 3671-3674.
  - 7) Maahs, H. A., 1983, Kinetics and mechanism of the oxidation of S(IV) by ozone in aqueous solution with particular reference to SO<sub>2</sub> conversion in nonurban tropospheric clouds, *J. geophys. Res.*, 88, 10, 721-10, 732.
  - 8) Lind, J. A., A. L. Lazrus, and G. L. Kok, 1987, Aqueous phase oxidation of sulfur(IV) by hydrogen peroxide, methyl-hydroperoxide, and peroxyacetic acid, *J. Geophys. Res.*, 92, 4171-4177.
  - 9) Ibusuki, T. and K. Takeuchi, 1987, Sulfur dioxide oxidation by oxygen catalyzed by mixtures of manganese (II) and iron (III) in aqueous solutions at environmental reaction conditions, *Atmospheric Environment*, 21, 1555-1560.
  - 10) 홍성길, 1983, 기상분석과 일기예보, 교학연구소 397-402pp.
  - 11) 김명수, 홍성길, 1991, 한반도지역 구름의 운형, 운고, 운량별 출현률의 계절변화. *한국 기상학회지*, 27, 353-365.
  - 12) Fung, C. S., P. K. Misra, R. Bloxam, and S. Wong, 1991, A numerical experiment on the relative importance of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> in aqueous conversion of SO<sub>2</sub> to SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, *Atmospheric Environment*, 25A, 411-423.
  - 13) Park, S. U., Y. H. Lee, and H. J. In, 2000a, Estimation of wet deposition of sulfate using routinely available meteorological data and air monitored data in Korea. *Atmospheric Environment*, 34, 3249-3258.