

산성우모델에 의한 산성강하물의 수송에 관한 연구
- 동아시아 및 우리나라 중부지방의 대기오염물질 시공간분포 -

이종범 · 조창래 · 변대원*

강원대학교 환경학과

*미국해양대기청

**A Modeling Study on the Transport of Acid Pollutant
by Regional Acid Deposition Model**

**-Spatial Pattern and Variation of Air Pollutants on Eastern Asia
and Central Part of Korea-**

Lee, Chong Bum · Cho, Chang Rae · Byun, Dae Won*

Department of Environmental Science, Kangwon National University Chunchon 200-701, Korea

*Atmospheric Science Modeling Division, Air Resources Laboratory National Oceanic
and Atmospheric Administration Research Triangle Park, NC 27711

Abstract

The acid deposition and photochemical modeling study was performed on the Eastern Asia using Regional Acid Deposition Model(RADM).

The results of this study show that horizontal distribution of SO₂ concentration and dry deposition flux was higher in Beking, Shanghai and central part of Korea. However distribution pattern of sulfate and O₃ concentration calculated by RADM were not similar to emission pattern. In daytime, SO₂, sulfate and O₃ were mixed to whole PBL but in nighttime because of inversion layer these pollutants were suppressed to lower level.

keywords : RADM, regional acid deposition model, dry deposition

* 본 연구는 1994년부터 3년간(1994년~1997년) 한국학술진흥재단의 대학부설연구소 지원과제의 연구비지원으로 수행되었음.

I. 서론

산업화가 가속화되어감에 따라 발생한 환경문제 중의 하나인 산성강하물은 그 원인이 되는 오염물질의 발생지역과 피해지역이 다르게 나타남에 따라 많은 국가간의 분쟁을 유발시키고 있다. 우리나라와 일본을 포함하는 동아시아 지역의 대기질은 자국내의 오염물질 배출에 의한 영향뿐만 아니라 중국의 급속한 산업화에 의한 영향으로 과거와 다른 양상으로 변해가고 있으며, 미국-캐나다간의 산성비 논쟁과 같은 국가간 피해 보상 및 대기오염물질의 배출규제를 간섭하는 국면으로 접어들고 있다. 특히, 산성우에 의한 토양의 산성화는 농작물과 수목의 고사, 수확량 감소 등 경제적으로 많은 피해를 주며(김갑태, 1987)¹⁾, 건물, 문화재 등의 부식 및 생태계 파괴로 인간 생존에 큰 위협을 주므로 대기오염물질의 장거리 이동에 의한 산성강하물의 침착량에 관한 이론적 및 실험적 연구가 시급한 실정이다.

산성침착모델은 산성강우를 예측할 수 있어 대기질 개선을 위한 도구로서 연구, 개발되어 왔다. 최근 미국과 캐나다는 인공위성의 화상처리기술 및 분석기술을 이용하여 대기오염물질의 장거리 이동에 대한 연구를 활발하게 진행하고 있다. 이미 캐나다 과학자들은 미국에서 배출된 대기오염물질이 캐나다로 이동한 것을 증명하였으며, 막대한 예산을 투자하여 대기오염물질 장거리 이동과 산성오염물질 강하에 관한 모델을 개발하였다. 일본의 경우 국립환경연구소, 환경자원연구소, 일본전력연구소, 큐수대학 등 여러 관계 연구원에서 일본전역에 걸쳐 산성우 측정망을 설치하여 운영하고 있는 실정이다. 특히, 일본 열도의 서해안에 집중적으로 산성우 측정소를 설치, 운영하여 풍상측의 중국과 우리나라로부터 배출되는 대기오염물질의 이동경로 및 오염물질의 유입량 추정 등에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다. 한편 정용승 등(1991)²⁾은 우리나라 서해안에 대한 산성우 측정자료와 유적선 분석을 통하여 우리나라의 산성우에 대한 중국의 기여도가 50% 정도임을 밝힌 바 있다.

산성침착(acidic deposition)은 건성침착(dry deposition)과 습성침착(wet deposition)으로 구분할

수 있으며, 이중 습성침착의 경우는 우리나라에서도 환경부 등에서 측정망을 구성하여 운영 중에 있으며 대체적인 실태가 파악되고 있다. 그러나 건성침착은 측정이 매우 어려우며 실태파악이 부족한 상태이다.

본 연구에서는 산성침착모델인 RADM에 의하여 우리나라를 포함한 동아시아 지역의 대기오염농도와 건성침착량을 시물레이션하여 공간분포 특징과 시간변화를 파악하는 것을 목적으로 하였다.

특히, 우리나라의 수도권과 서부 강원도 지역의 SO₂, sulfate, O₃의 공간분포와 시간변화 특징을 파악하고 실측치와 비교하였으며 또한 건성침착량의 시공간분포 특징을 조사하였다.

II. RADM 모델 개요

산성강하를 모사할 수 있는 3차원 수치모델로는 미국 EPA의 지원으로 개발된(Chang et al.1984)³⁾ RADM과 STEMI(Carmichael et al., 1991)⁴⁾가 있다. 미국과 캐나다는 국경선을 넘어오는 산성강하물로 인한 분쟁을 해결하기 위하여 양국이 공동으로 조사를 진행하였으며, 이 조사의 일환으로 미국 EPA에서 중규모 대기오염 모델인 Regional Acid Deposition Model (RADM : 지역규모 산성우 침착모델)을 개발하였다. 이 모델은 이전의 대기질모델에서 포함되지 않았거나 매우 단순화했던 많은 과정들이 고려되었으며, 미국의 중부 및 동부와 캐나다의 남동부까지를 포함하는 지역의 산성우와 광화학오염을 계산하는 3차원 오일러리안 격자모델로서 수평거리가 수천km 정도의 넓은 지역에 걸친 대기오염물질의 이동과 변질을 계산하기에 적당하다(Chang et al. 1987)⁵⁾.

미국 동부지역의 산성우 연구를 위한 RADM 모델의 영역은 수평으로는 동서방향 35격자, 남북방향 38격자이고, 연직으로는 지형을 따라가는 σ -좌표계를 사용하여 지상으로부터 100 hPa까지 15층으로 이루어져 있다(NAPAP, 1990)⁶⁾.

RADM의 수평격자 크기는 80km×80km로서 넓으므로, 배출원이 좁은 지역에 집중되어 있거나 대규모의 발

전소와 같은 점오염원이 존재하는 경우에는, 같은 격자내 일지라도 지역에 따라 1차 오염물질의 농도차이가 크며, 따라서 2차 오염물질의 농도도 지역에 따라 크게 다르게 나타나게 된다(Jang, 1992)⁷⁾. 또한, RADM은 배출된 오염물질이 하나의 격자 내에서 곧 혼합되어 농도가 균일하게 되는 것으로 가정하므로 계산결과는 실제와 큰 차이를 초래하게 된다. 그러므로 이러한 오차를 줄이기 위하여서는 수평격자 크기를 작게(해상도를 증가)하여야 한다.

따라서 본 연구에서 사용된 모델의 version은 HR-RADM2.6(high resolution RADM version 2.6)으로서 oneway nesting 기법을 적용하여 전체 모델영역에

비하여 계산량을 줄이도록 window 영역을 설정하고 특정 대상지역의 대기오염물질의 더욱 구체적인 지역분포를 산출할 수 있도록 격자간격을 80km에서 정수배로 세분하는 고해상도(high resolution)화가 가능하다.

RADM의 계산과정은 그림 1에 보인 바와 같이, 기상자료와 대기오염물질의 초기조건과 경계조건 그리고 배출량이 주어지면 물리적, 화학적 과정들에 의하여 시간별로 기체상 오염물질들의 농도 및 습성침착과 건성침착을 계산하여 구한다. RADM의 기본식은, 대기에서 화학물질의 농도를 조절하는 화학적, 기상학적 과정들을 수치적으로 기술한 질량보존식으로 다음과 같다.

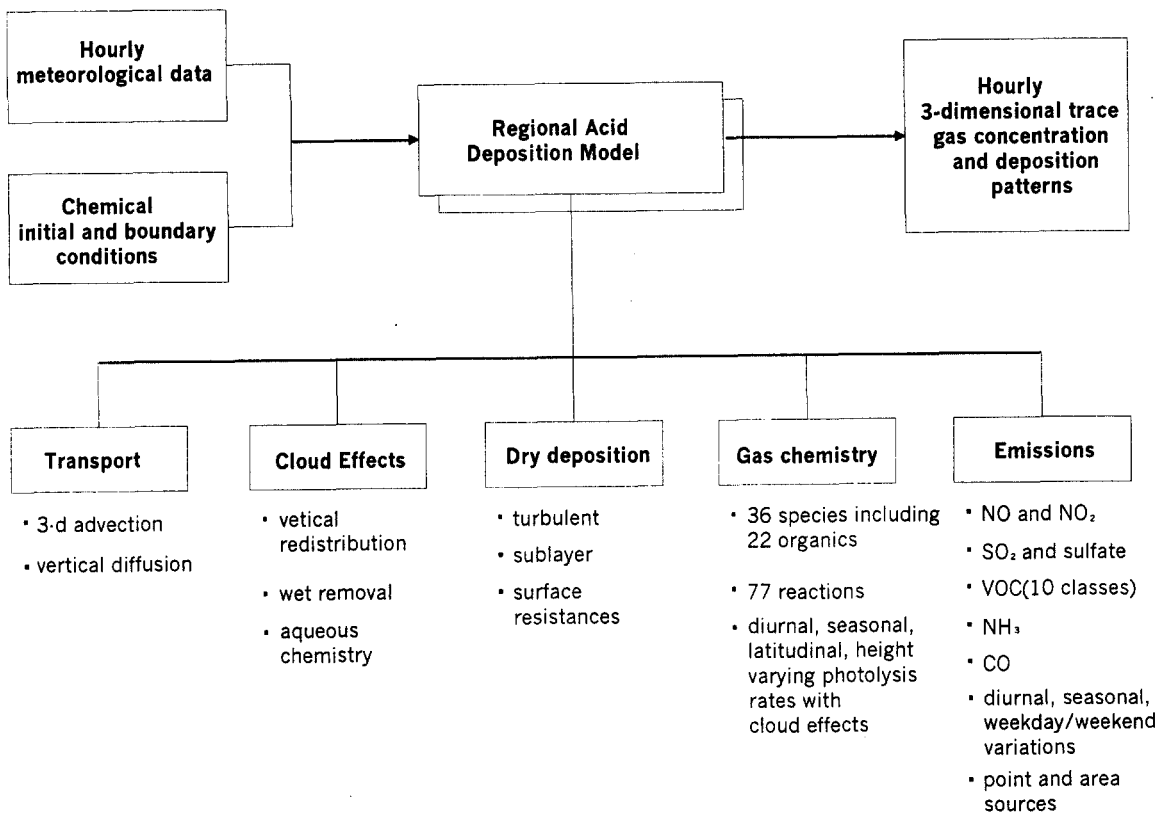


Fig. 1. Overview of Regional Acid Deposition Model(RADM)

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot (VC) + \nabla \cdot (K_e \nabla C) + P_{\text{chem}} - L_{\text{chem}} + E + \left(\frac{\partial C}{\partial t} \right)_{\text{clouds}} + \left(\frac{\partial C}{\partial t} \right)_{\text{dry}}$$

여기에서, C는 오염물질의 농도이고, V는 모델 영역내의 각 격자에서의 3차원 속도장, K_e 는 난류확산계수, P_{chem} 과 L_{chem} 은 각각 기체화학 반응에 의한 생성과 소멸을 나타내고, E는 배출량을 나타내며, $\left(\frac{\partial C}{\partial t} \right)_{\text{clouds}}$ 는 구름과정에 의한 농도 변화율, $\left(\frac{\partial C}{\partial t} \right)_{\text{dry}}$ 는 건성침착으로 인한 농도의 변화율을 나타낸다. 기타, 모델의 계산과정에 대한 상세한 내용은 Chang et al.(1987)⁵⁾에 기술되어 있다.

III. 연구방법

1. 모델링시스템 개발

가. RADM의 개신

EPA version은 HR-RADM 2.6으로서 수평격자수 35×38이고 연직격자 15층으로 고정되어 있다. 그러나 모델링영역이 우리나라 및 주변지역인 점과 계산량 그리고 기억용량 등을 고려하여 수평격자수를 30×24로 줄였으며, 기상모델인 RDAPS의 연직층수와 일치시키기 위하여 연직격자는 22층으로 하였다.

나. 배출량 프로그램

산성우모델을 실행하는 데 사용되는 배출량 입력자료로는 모델의 각 격자에 대한 자료가 필요하다. 그러나 현재 우리가 사용할 수 있는 자료는 지역별 평균배출량으로 이들 자료를 모델의 격자별 배출량으로 나타낼 수 있도록 처리하는 프로그램이다.

다. 기상입력 프로그램

RADM의 실행에 필요한 기상입력자료로 사용되는 RDAPS(Regional Data Assimilation and Prediction System)의 실행결과로부터 마찰속도, 현열, Monin-Obukhov length, 혼합층고도 등의 경계층 기상 요소와 광해리 상수, 건성침착속도 등을 산출하고, Arakawa C격자로 좌표를 변환하여 RADM의 기상자료 입력형태에 맞추도록 처리하는 프로그램이다.

라. Window용 자료생산을 위한 전처리 프로그램

대상지역 전체의 기상자료 및 배출량자료 중 windowing할 지역만의 자료를 추출하여 모델의 입력자료로 사용할 수 있도록 처리하는 프로그램이다. 분해능(resolution)에 있어서 차이가 나는 두 격자체계에서 서로간의 자료를 이용하기 위해서는 내삽(interpolation) 또는 평균화 작업이 필요하다. 예를 들어, 저해상도 격자체계의 계산결과를 고해상도에서의 초기농도 자료로 이용할 경우는 저해상도의 격자체계의 결과를 내삽하여 고해상도의 격자체계에 맞추도록 처리하는 과정이 필요한데 이를 처리할 수 있는 프로그램이다.

마. 후처리 프로그램

RADM의 계산결과는 매우 방대한 량이므로 이들 결과를 목적에 따라 가시화하는 후처리 프로그램이 필요하다. 현재의 3차원 격자점의 기상조건과 대기오염농도를 계산한 결과 파일로부터 임의의 영역과 임의의 시간동안의 수평 및 수직단면의 2차원 분포도를 산출하거나, 3차원 격자 중 특정격자에서 지정한 물질의 시계열 농도자료를 산출하는 프로그램이다.

2. 모델영역 설정

본 연구의 주 대상지역은 우리나라의 중부지방이므로 모델링 대상지역은 우리나라를 중심으로 하고 우리나라에 영향을 미칠 가능성이 있는 주변지역의 주 배출원을 포함하여야 한다. 그러나 이와 같이 격자가 많아지면 입출력자료의 크기가 커지고 컴퓨터의 실행시간이 오래 걸리므로 실행하기에 어려움이 따른다. 따라서, 본 연구에서 동서방향 및 남북방향의 격자수를 결정하는 데 있어 주배출원을 포함하는 최소한의 격자수를 사용하도록 하였다.

모델실행에 필요한 기상입력자료는 기상청에서 일기예보에 활용하고 있는 중규모 기상예보모델(RDAPS)의 실행결과를 활용하여야 하므로, 모델영역은 RDAPS의 격자체계(영역중심 125E, 35N, 동서방향 121격자, 남북방향 105격자, 격자간격 40km)에 맞추어져야 한다. 이

러한 조건을 고려하고 이 지역이 편서풍지역임을 고려하여 우리나라의 풍상측에 해당하는 중국지역을 가급적 넓게 포함하도록 그림 2에 보인 바와 같이 모델링 영역을 설정하였다. 그림 2의 격자번호는 기상청 MM4 모델영역으로서 RDAPS는 그림보다 서쪽 경계가 서쪽으로 240km 확장되었다. 이 영역은 RDAPS 격자체계에 맞추었으며 RDAPS로 실행된 40km격자 자료로부터 한 격자 건너씩의 자료를 취하여 동서방향 30격자, 남북방향 24격자, 격자간격 80km로 설정하였다.

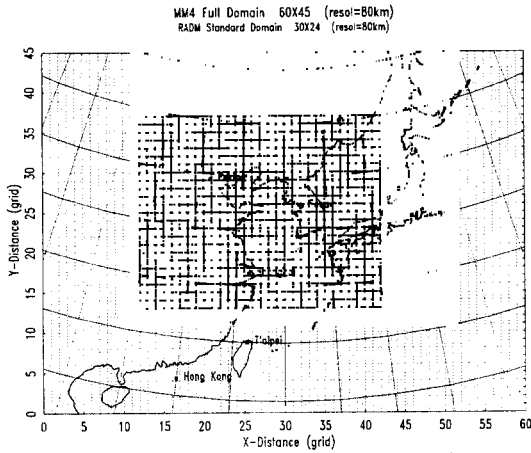


Fig. 2. Typical geographical domains of simulation for MM4 and RADM.

3. 기상입력자료의 작성과정

가. 중규모 기상모델

본 연구에서 사용하는 산성우모델인 RADM에 필요한 기상입력자료는 미국에서 개발된 중규모 기상모델인 MM4(Mesoscale Model 4)를 우리나라 기상청에서 일기예보를 위하여 개량한 RDAPS를 이용하여 작성하였다. 본 연구에서 사용하고 있는 RDAPS의 영역은 125E, 35N에 중심을 두고 격자간격 40km로 동서방향 121격자, 남북방향 105격자점과 22층의 연직층으로 구성된다. 수평격자체계는 Arakawa B 격자로서 벡터값은

격자의 구석점(dot point)에서 그리고 이외의 스칼라값은 격자중심(cross point)에서 정의된다. RADM의 격자체계는 Arakawa C 격자로서 벡터 값인 u(풍속의 동서성분)은 격자의 동쪽변의 중간점과 서쪽변의 중간점에서의 값이며 v(풍속의 남북성분)은 격자의 북쪽변의 중간점과 남쪽변의 중간점에서의 값이다. 그리고 이외의 스칼라 값은 격자중심에서 정의된다

한편, 연직격자는 격자로서 표 1과 같이 22개 층으로 나누고 수평격자와 같이 정수면(full - levels)에 톨, 반정수면(half - levels)에 그 외의 기상변수가 정의되는 차격화(staggered)된 격자 체계이다. RADM의 격자체계는 RDAPS와 동일하나 연직층의 번호만 상하반대이다.

나. 기상 전처리 과정

RDAPS에서 얻어진 기상자료는 40km 격자이므로 80km 격자에 사용하기 위하여 한 격자씩 걸러서 사용하였다. RADM에서 필요로 하는 기상요소를 산출하고 RADM의 기상 입력 형태(format)에 맞도록 변환하기 위하여 전처리 프로그램을 사용하였으며 이 프로그램에 의하여 경계층 기상요소와 광해리 상수, 건조침착속도 등이 계산된다.

4. 배출량 자료 작성과정

가. RADM 실행을 위한 배출량 자료의 작성

아시아 지역의 배출량 자료는 Akimoto(1994)³⁾의 동아시아 지역의 배출량을 기본자료로 사용하였다. 이 자료는 1987년의 1°×1°격자에 대한 탄소(C), 질소(N), 황(S)상당량의 자료로 비교적 신뢰할 수 있는 배출량 자료이므로 본 연구에서는 이 자료를 기본으로 하여 RADM에서 필요한 배출량 입력자료를 작성하였다.

1) 격자체계 변환

Akimoto(1994)³⁾의 배출량 자료는 1°×1°의 자료이고 RADM은 80km×80km격자에 대한 배출량 자료를 필요로 하므로 자료의 공간적인 내삽이 필요하다. 특히 경도 1도 간격의 거리는 북쪽으로 갈수록 점차 좁아지므로 이를 고려하여 수평면 2차원 내삽을 하였다.

Table 1. Vertical layer and σ Value of RADM

Level Index	Full σ -level			Half σ -level		
	σ	Pressure (hPa)	Height (m)	σ	Pressure (hPa)	Height (m)
Upper boundary of 22	0.000	100	16069			
Bottom of 22	0.050	145	13883	0.025	123	14870
Bottom of 21	0.100	190	12134	0.075	168	12947
Bottom of 20	0.156	240	10541	0.128	215	11297
Bottom of 19	0.212	291	9209	0.184	266	9830
Bottom of 18	0.268	341	8116	0.240	316	8640
Bottom of 17	0.322	390	7194	0.295	366	7630
Bottom of 16	0.384	446	6270	0.353	418	6718
Bottom of 15	0.444	500	5468	0.414	473	5860
Bottom of 14	0.506	555	4713	0.475	528	5077
Bottom of 13	0.568	611	3991	0.537	583	4347
Bottom of 12	0.628	665	3331	0.598	638	3657
Bottom of 11	0.690	721	2682	0.659	693	3002
Bottom of 10	0.750	775	2091	0.720	748	2382
Bottom of 9	0.800	820	1627	0.775	798	1851
Bottom of 8	0.844	860	1236	0.822	840	1429
Bottom of 7	0.884	896	901	0.864	878	1067
Bottom of 6	0.916	924	652	0.900	910	776
Bottom of 5	0.946	951	417	0.931	938	530
Bottom of 4	0.966	969	265	0.956	960	341
Bottom of 3	0.984	986	122	0.975	978	189
Bottom of 2	0.994	995	47	0.989	990	89
Bottom of 1	1.000	1000	0	0.997	997	31

2) RADM 화학종(chemical species)추정법

RADM에서는 21개 화학종에 대한 격자별 배출량 자료가 요구된다. 그러나 본 연구에서 사용하는 배출량자료는 C, N, S상당량의 3가지 자료로 한정되므로 이 3가지 자료로부터 21가지 화학종에 대한 배출량을 산출하였다. RADM의 배출량 산출을 위하여 미국 EPA(1986)⁶⁾ NAPAP 보고서의 배출량 자료를 이용하였다. S에 기인한 물질인 SO₂와 sulfate의 경우 미국의 SO₂와 sulfate의 자료에서 각각 S의 량을 구하고 두 가지를 더하여 S의 총량을 산출하였다.

그리고 S의 총량에 대한 SO₂, sulfate의 비를 구하여 SO₂와 sulfate의 산출계수로 하였다. N에 기인한 물질인 NO, NO₂, NH₃의 경우 NAPAP의 NO, NO₂, NH₃

의 자료로부터 각각의 N량을 구하고 세 가지를 더하여 N의 총량을 산출하였다. 그리고 N의 총량과 NO, NO₂, NH₃ 각각의 비로부터 NO, NO₂, NH₃의 산출계수를 구하였다. 또한 THC(total hydrocarbon)와 CO의 배출은 위에서 산출한 N의 총량에 대한 THC, CO와의 각각의 비를 이용하여 THC와 CO에 대한 산출계수를 구하였다.

한편, HC류의 배출량은 NAPAP 보고서에서 제시한 미국의 THC에 대한 각 화학종의 질량분율을 이용하였다. 즉, 위에서 구한 THC에 대한 각 화학종의 비를 곱하여 HC류의 산출계수로 하였다. 이상과 같은 방법에 의하여 산출한 21개 화학종에 대한 추정식을 표 2에 나타내었다.

Table 2. Estimated equation of 21 chemical species.

Species	Equation
Sulfur dioxide	$S \times 1.95$
Sulfate	$S \times 0.07$
Nitrogen dioxide	$N \times 0.14$
Nitrogen oxide	$N \times 1.92$
Acetaldehyde	$THC \times 0.007$
Formaldehyde	$THC \times 0.017$
Acetic acid	$THC \times 0.010$
Ammonia	$N \times 0.030$
C3-C5 alkanes	$THC \times 0.030$
C6-C8 alkanes	$THC \times 0.018$
C9 & higher alkanes	$THC \times 0.000$
Ethane	$THC \times 0.132$
Carbon monoxide	$N \times 1.92 \times 4.76$
Ethene	$THC \times 0.216$
Propene	$THC \times 0.090$
Butene	$THC \times 0.130$
Toluene	$THC \times 0.041$
Xylene	$THC \times 0.013$
Acetone high ketones	$THC \times 0.014$
Cresol & ArOH	$THC \times 0.020$
Isoprene	$THC \times 0.008$

5. 모델실행

RADM을 실행시키기 위하여 필요한 자료에는 기상자료, 배출량자료, 초기농도자료(initial condition)와 경계조건(boundary condition) 등이 있다. RADM의 실행과정을 그림 3에 나타내었다.

기상자료는 기상청에서 운영중인 RDAPS를 실행하여 계산된 결과 중 3차원 공간상의 바람의 수평성분(u), 남

북성분(v)과 기온, 비습에 대한 자료와 토지이용도(landuse)자료 등을 RADM의 기상입력자료로 사용한다. 그러나 RDAPS에서 생성된 자료는 RADM에서 필요로 하는 기상입력자료의 종류와 형태를 맞추기 위하여 전처리 프로그램이 필요한데 이것이 H54이다. 한편 PREH54는 RDAPS에서 작성된 기상자료로부터 H54를 실행에 필요한 자료를 생성하는 전처리 프로그램이다.

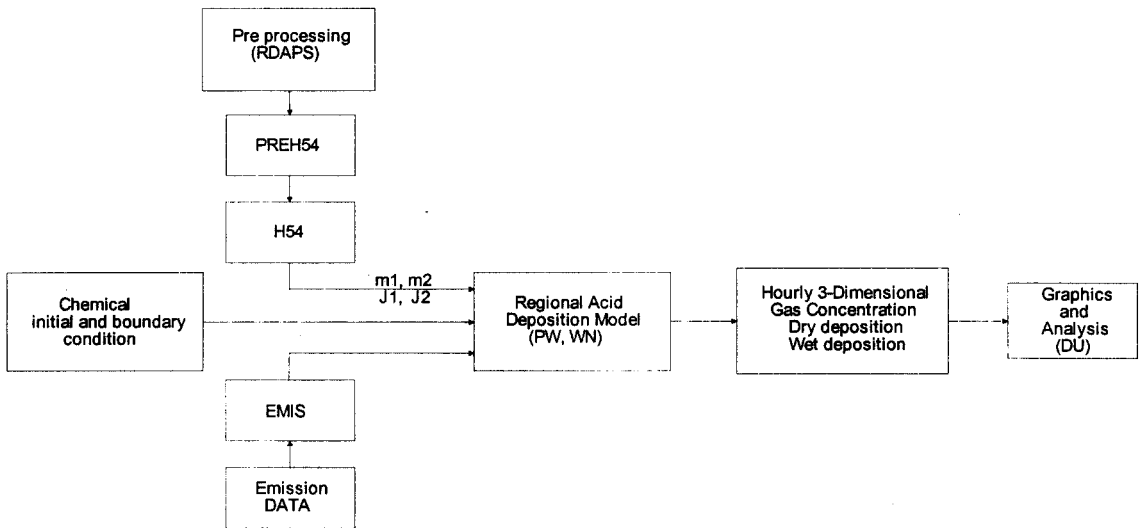


Fig. 3. Overview of RADM and preprocessor simulation procedures.

본 연구대상지역에 대해 적용할 수 있는 배출량자료는 위도, 경도 $1^\circ \times 1^\circ$ 의 자료이고 또한 배출물질의 종류도 3가지에 한정되어 있다. 따라서, 이 자료를 RADM의 배출량 자료로 사용하기 위하여서는 $80 \times 80\text{km}$ 의 자료로 내삽하는 과정이 필요하고, 또한 21가지 종류에 대한 배출량을 작성해야 한다. 이러한 과정을 수행하는 프로그램이 EMIS이다. 본 연구에서는 우리나라 중부지방에 강우가 없는 날을 대상기간으로 하였다. 모델실행 시간은 2차 대기오염물질의 농도가 높았고 몇 차례에 걸쳐 오존주의보가 있었으며 1차 대기오염물질의 농도도 높았던 1997년 6월 15일의 에피소드 기간을 전후한 12일 20GMT부터 16일 16GMT까지의 92시간이다.

3차원 이류확산모델인 RADM을 실행시키기 위하여서는 자료중 초기의 오염농도 분포자료(초기조건)와 모델

영역의 경계지역에서의 매 시간의 오염농도자료(경계조건)가 필요하다. 경계조건은 항공기 측정 등 직접관측에 의해서도 작성할 수 있겠으나 시공간적으로 연속적인 측정자료는 현실적으로 거의 불가능하다. 모델영역의 경계지역 주변의 배출원을 무시할 수 있는 경우에는 대류권의 배경농도 값을 사용하는 방법도 있으나, 본 연구의 경우와 같이 광역모델영역 외부에도 매우 많은 배출원이 존재하는 경우 경계조건을 위하여서는 이들 배출원을 포함하는 모델실행이 필요하다. 즉, 이러한 모델실행을 위한 모델영역은 우리나라에 영향을 미칠 가능성이 있는 주변지역을 폭넓게 포함하여야 한다.

초기조건은 모델 실행을 시작하는 시간에 각 격자에 존재하는 오염물질의 농도로 모델실행 초기의 오염물질 예측농도에 큰 영향을 미친다. 보통 초기조건은 지상 대

기오염농도 측정망이 충실한 경우 측정자료로부터 작성할 수 있으나 본 연구의 경우 해상 및 외국지역을 포함하고 있으므로 측정자료에 의존하기는 곤란하다. 본 연구에서는 3차원 격자별 초기 농도조건을 0으로 하고 모델을 92시간 실행한 후 마지막 시간의 농도결과를 초기농도로 하여 모델을 재실행하였다. 그리고 모델의 계산결과는 초기조건에 의존하지만 그 의존도는 시간의 경과에 따라서 감소하므로 선행실행시간(pre-run)을 28시간으로 설정하고 6월 14일 00GMT부터 6월 16일 16GMT까지의 64시간의 결과를 분석대상으로 함으로써 선행초기조건에 부정확성의 영향이 크지 않도록 하였다.

경계조건은 대상영역 외부에서 유입되는 각종 오염물질의 농도를 말하는 것으로 RADM에서는 constant boundary condition과 dynamic boundary condition을 고려할 수 있다. 본 연구에서는 대상영역 외부의 지역은 오염농도가 작은 것으로 가정하고 대류권 평균 오염물질농도를 경계조건으로 사용할 수도 있으나 다음과 같이 모델을 2회 실행하여 해결하였다. 모델영역에 대하여 경계농도를 모두 0으로 입력하여 모델실행 시작시간(1997년 162일 20GMT)에서 92시간(1997년 166일 16GMT)실행(선행실행)시키고 그 결과중 0시부터 92시간에 대하여 매 시간의 농도를 경계조건으로 이용하여 재실행하였다. 한편, 선행실행에 필요한 경계조건으로 대류권 배경농도 값을 사용할 수도 있다.

이상의 자료들을 입력자료로 하여 RADM을 실행할 수 있으며, 모델링으로 3차원 공간상의 오염물질의 농도 분포를 예측하고 이밖에도 건성침착(dry deposition)과 습성침착(wet deposition)량을 예측할 수 있다. 또한, RADM을 실행하여 얻어진 결과 중 필요한 변수의 수평 및 연직방향의 결과는 후처리 프로그램을 이용하여 출력할 수 있다.

IV. 결과

1. 대상기간의 종관기상 및 바람장 특징

그림 4는 대상기간중 1997년 6월 14일 06GMT~

1997년 6월 16일 15GMT까지 12시간 간격의 바람장을 나타낸 것이다. 14일의 경우 지상기상일기도에 의하면 우리나라 북부지역에는 고기압, 북서 및 북동부에는 저기압이 위치하고 있는 것으로 나타났으며, 이에 따라 중부지방의 경우는 북서풍이 약하게 부는 것으로 나타났다. 15일의 경우도 14일과 유사하나 고기압이 우리나라의 동쪽으로 이동하면서 점차 세력이 약화되었으며 일본 규슈남해상에 중심을 둔 저기압이 동서로 전선을 형성하여서 우리나라 남해상의 풍속이 다소 강해지는 것으로 나타났다. 16일의 경우는 고기압이 동쪽으로 물러나고 저기압이 우리나라 부근으로 다가오면서 풍향이 남동풍 계열로 바뀌는 것으로 나타났다.

2. 대기오염물질 농도의 시공간 분포

가. 수평분포 특징

우리나라 중부지방 및 주변지역을 대상으로 RADM모델을 실행하여 오염물질의 수평, 연직분포, 그리고 시간변화 특성을 분석하였다. 그림 5는 대상기간중 1997년 6월 15일 06GMT(15KST)와 18GMT(16일 03KST)의 SO₂, sulfate, O₃농도의 수평 분포를 나타낸 것이다. a)와 b)는 SO₂농도 분포로서 서울, 부산, 북경, 상해를 중심으로 한 대도시 주변에 높은 농도가 나타났으며, 야간에 해당되는 18GMT의 농도 분포가 주간 경우보다 높은 농도 분포를 나타내었다. c)와 d)는 sulfate의 분포로서 SO₂의 농도에 비하여 배출지역보다는 주변지역에 넓게 확산되어 분포함을 알 수 있으며 오염원이 없는 서해상의 농도는 낮게 나타났다.

한편, e)와 f)은 O₃ 농도를 모사한 결과로 06GMT에는 중국의 북경지역과 황해연안의 공업지역보다는 풍하지역으로 나타난 중국내륙지역에 고농도를 나타내었다. 그리고 우리나라의 경우도 수도권지역의 풍하지역에 위치한 남서부 지역에 고농도 분포를 나타내었다. 야간에 해당하는 f)의 경우는 중국의 북경과 상해 그리고 우리나라 수도권지역의 농도가 오히려 낮았으며 오염물질 배출이 없는 서해상은 비교적 높은 농도를 나타내었다.

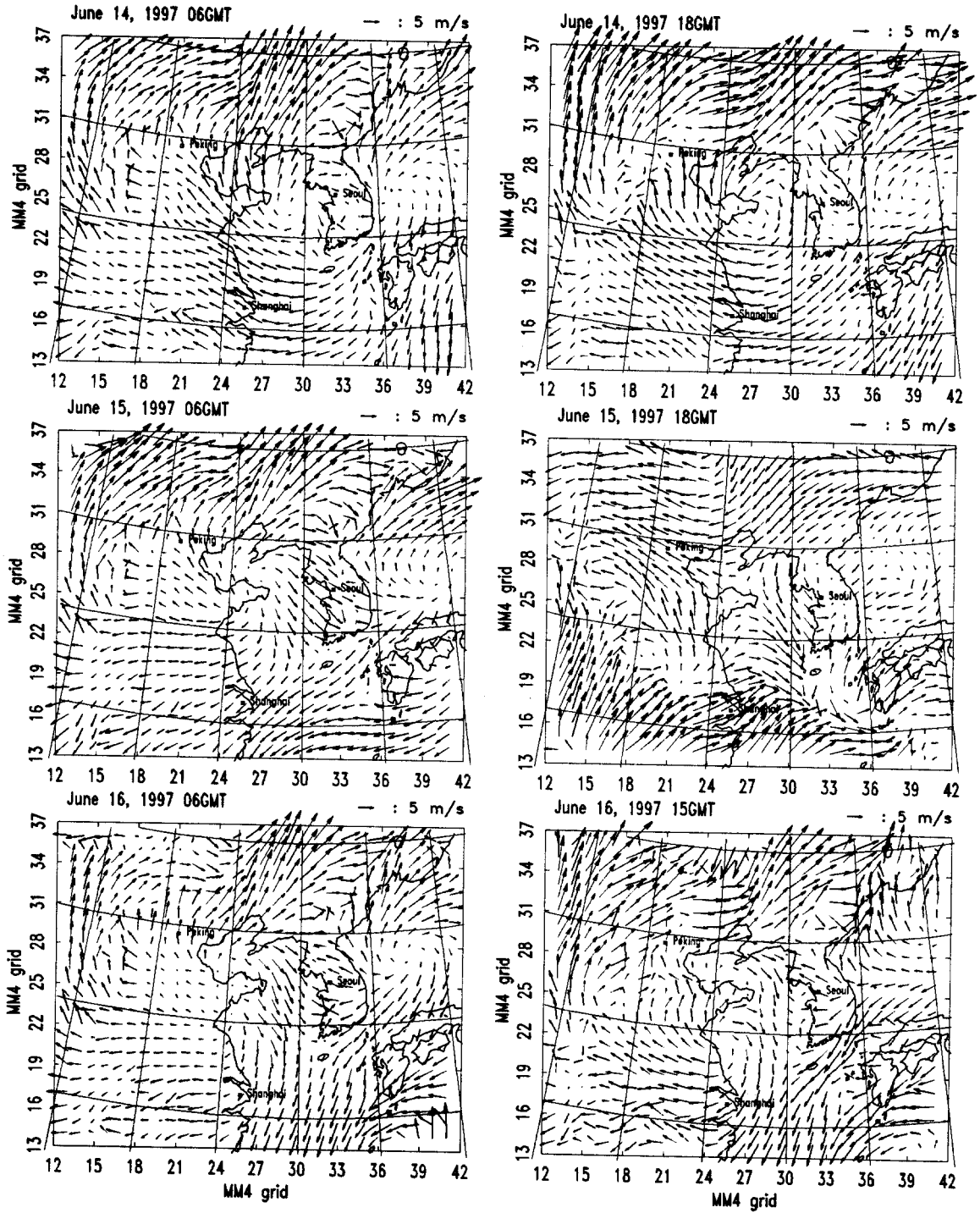


Fig. 4. Surface wind field from the MM4 (06, 18GMT, June 14-16, 1997).

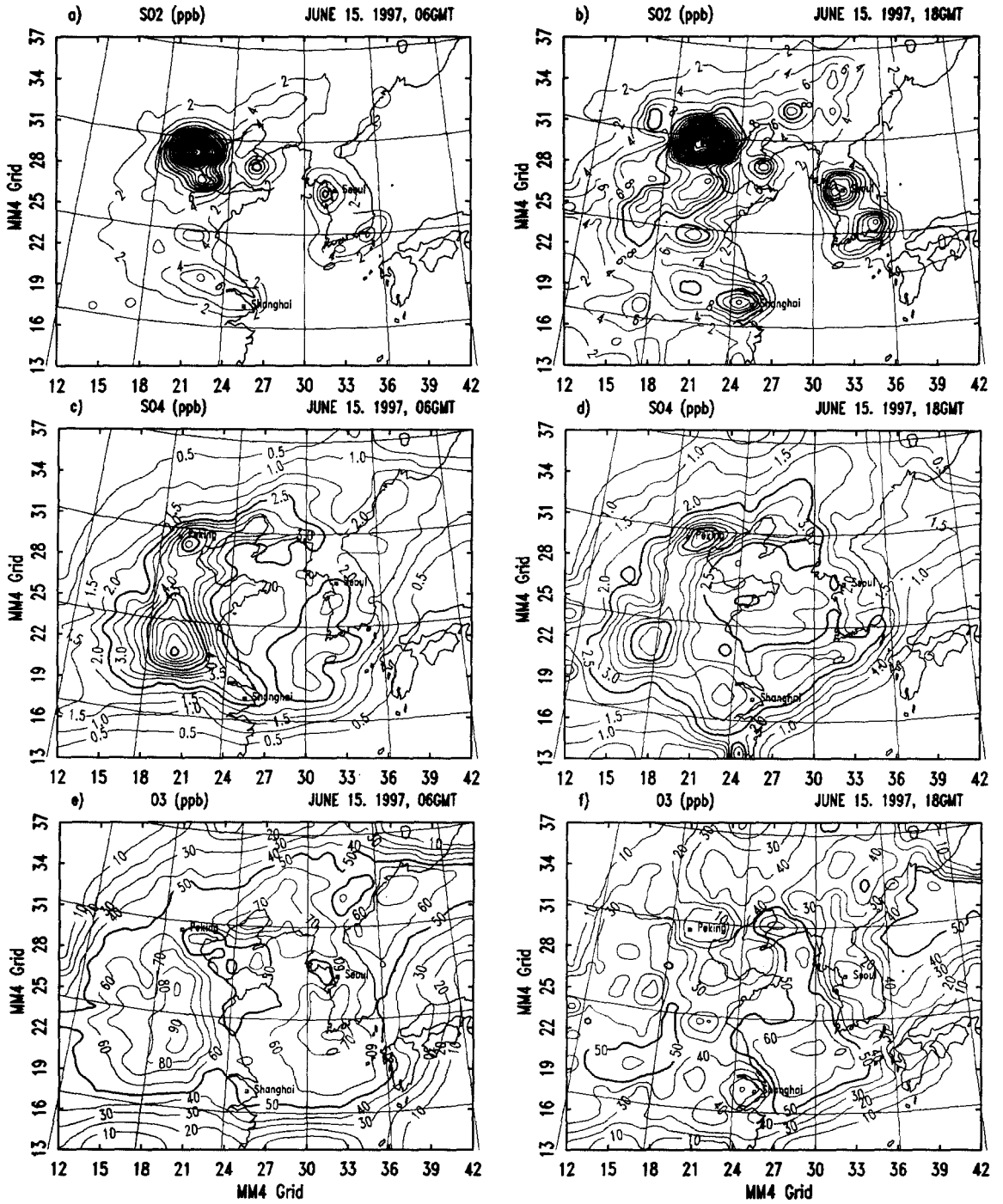


Fig. 5. Horizontal distributions of calculated SO₂, sulfate and O₃ concentration(ppb) at 06, 18GMT, June 15, 1997.

나. 연직분포 특징

그림 6은 6월 15일 06GMT와 18GMT의 결과로서, 서울이 포함된 격자(이하 서울중심격자)를 기준으로 동서방향의 연직단면에 대한 SO₂, sulfate 그리고 O₃의 농도분포를 나타낸 것이다. 종축은 연직격자 번호를 나타내며 상층으로 갈수록 고도 간격이 커진다. 여기에서 서울중심격자는 80×80km의 크기로 행정구역상 서울 중심부근부터 동쪽으로는 경기도 동쪽 경계 부근까지 남쪽으로는 충청남도 북부 일부 지역까지를 포함하는 지역이 된다. 한편, 서울중심격자의 동쪽에 접한 격자로서 서울중심격자의 풍하지역에 위치하며 시골지역을 대표하는 격자(이하 서울동쪽격자)는 충청북도의 북쪽과 강원도의 남부지역을 포함하는 지역이다.

그림 6 a)와 b)의 SO₂ 분포를 보면, 중국의 산둥반도

지역과 우리나라 서울의 서쪽부근에 높은 농도분포를 나타내며, 낮 시간대인 06GMT에는 혼합층의 발달과 더불어 비교적 높은 고도까지 농도가 높게 나타났으며 야간에는 고농도를 나타나는 고도가 낮아지는 것을 보여주고 있다. c)와 d)에 제시한 sulfate의 분포도 SO₂의 분포와 유사하게 나타났다.

e)와 f)에 나타낸 O₃의 농도분포를 보면 06GMT에 중국반도 부근과 서울주변 지역에 높은 농도를 나타내며 18GMT에는 이 지역의 지표면 부근의 농도가 낮게 나타났는데, 이는 낮에 발달된 혼합층이 낮아지면서 상층에는 낮에 생성된 오존이 높은 농도로 존재하고 있으나 지표면 부근에는 오존 소멸반응에 관여하는 물질을 배출로 인하여 오존의 농도가 낮아지는 것으로 사료된다.

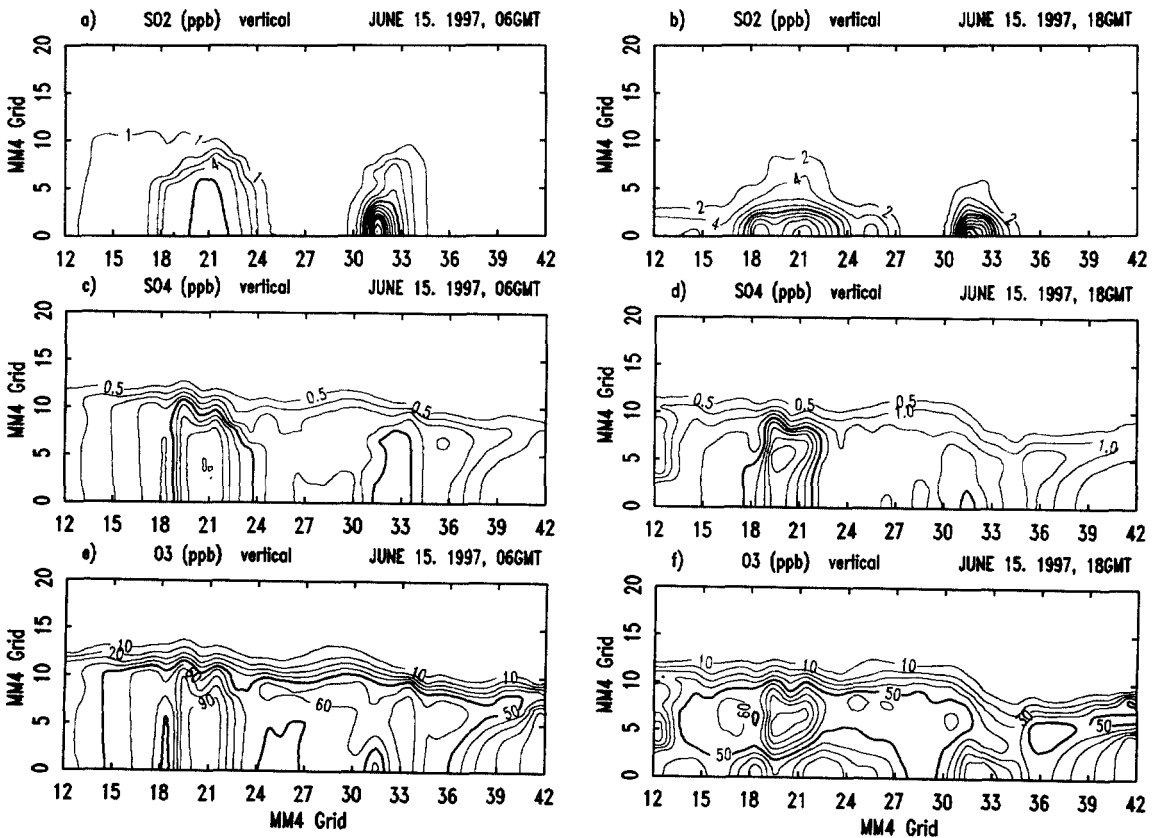


Fig. 6. East-west(passing through Seoul and Shantung peninsula) vertical cross section of SO₂, sulfate and O₃(ppb) distributions at 06, 18GMT, June 15, 1997.

다. 시간변화 특징

그림 7은 각각 서울중심격자와 서울동쪽격자에서의 SO₂, sulfate와 O₃농도의 시간변화를 비교한 것이다. 그리고 서울, 인천을 포함한 수도권지역에 위치한 36개의 대기오염물질 자동측정망에서 측정된 매시간 자료를 평균하여 서울중심격자의 SO₂와 O₃의 농도결과를 비교하였다.

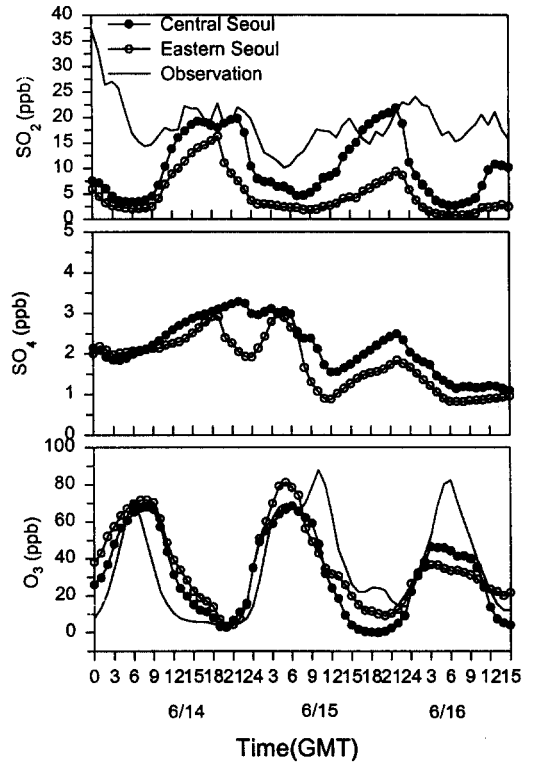
서울중심격자와 서울동쪽격자의 시간에 따른 농도변화 경향은 유사하게 나타났으며 SO₂와 sulfate는 서울중심격자의 농도가 서울동쪽격자의 농도에 비하여 높았다. 오존의 경우는 서울의 풍하지역에 위치하는 서울동쪽격자가 서울중심격자에 비하여 높게 나타났다. 이것은 도시지역에서 생성된 O₃의 수송에 의한 것과 도시지역에서 발생한 1차 오염물질이 수송되는 과정에서 생성된 O₃의 영향으로 사료되나 더 구체적인 분석이 필요하다. 서울중심격자의 농도와 실측농도의 시간변화경향은 대체로 유사하나 최고치를 나타내는 시간에 다소간의 차이를 나타내었다.

Fig. 7. Comparisons of SO₂, sulfate and O₃ concentration(ppb) for June 14-16, 1997 at Central Seoul and Eastern Seoul cell. Solid line represent observed concentration.

3. 건성침착량의 시공간 분포

가. 수평분포 특징

그림 8은 SO₂, sulfate와 O₃의 건성침착량의 수평분포를 나타낸 것이다. SO₂ 건성침착량의 분포는 SO₂의 농도 분포와 유사하게 나타났으나 주간이 야간보다 건성침착량이 많은 것을 보이고 있다. 그리고 18GMT에는 상해와 상해의 북부에 위치한 해안 지대에 높은 침착량을 나타내고 있다. Sulfate와 O₃의 건성침착량 분포도 농도분포 형태와 유사하게 나타났다.



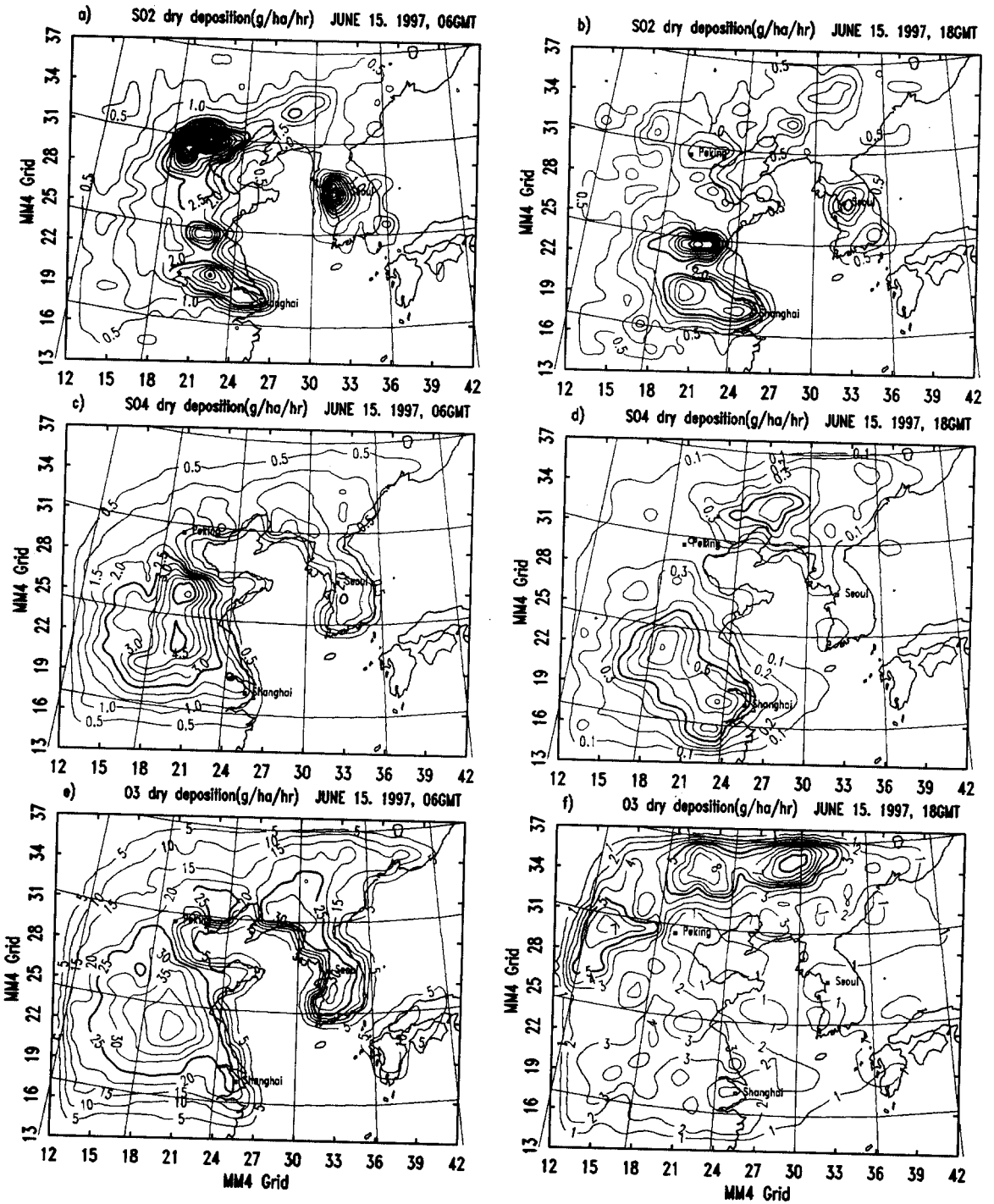


Fig. 8. Horizontal distributions of calculated SO₂, sulfate and O₃ dry deposition flux(g/ha/hr) at 06, 18GMT, June 15, 1997.

나. 시간변화 특징

그림 9는 각각 서울중심격자와 서울동쪽격자에서의 SO₂, sulfate와 O₃의 건성침착량을 비교한 것이다. 시간에 따른 침착량변화 경향은 서울중심격자와 서울동쪽격자에서 유사한 경향을 나타내었다. 1차 오염물질인 SO₂는 서울중심격자의 침착량이 서울동쪽격자에 비하여 크게 나타났으나 sulfate와 O₃의 경우 서울동쪽격자가 서울중심격자의 침착량과 비슷하거나 오히려 큰 경향을 나타내었다.

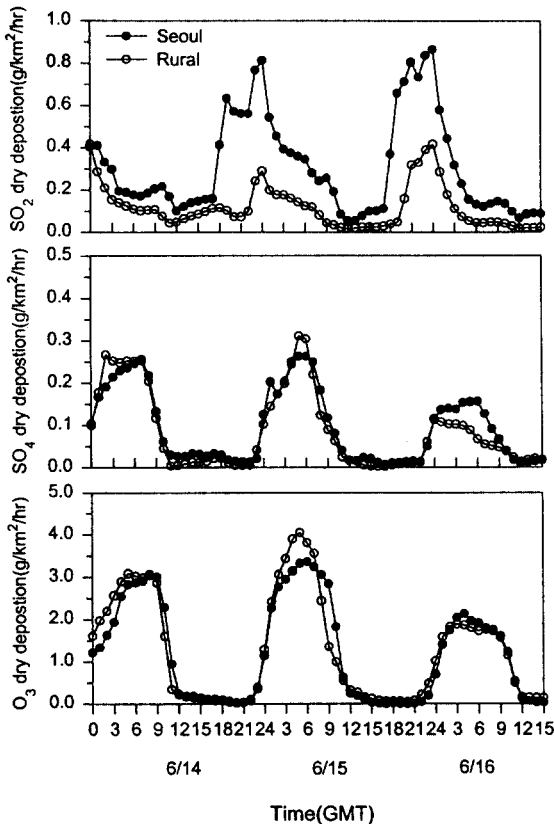


Fig. 9. Comparisons of SO₂, sulfate and O₃ dry deposition flux(g/km²/hr) for June 14-16, 1997 at Seoul and rural.

V. 결론

본 연구에서는 미국에서 개발된 산성우 모델인 RADM을 근간으로 하여 동아시아지역에 적용하는 모델링 시스템을 완성하고 산성강하물의 침착 및 오염물질의 농도분포 현황을 파악하였다.

우리나라, 중국 및 일본을 포함하는 대상지역에 대하여 산성강하모델의 입력자료로 사용되는 여러 가지 대기 오염물질에 대한 배출량산출모델을 작성하였으며 많은 양의 모델결과를 가시화하기 위한 후처리 시스템을 작성하였다. 본 연구에서 사용한 배출량 자료 중 THC에 대한 HC류의 비율은 미국의 자료를 사용하였는데 이 자료는 지역에 따른 차이가 매우 크므로 우리나라에 적절한 배출량 및 THC에 대한 HC비율산정에 관한 연구가 절실히 요구된다.

모델 실행 결과, SO₂의 농도는 배출량 다량 발생지역인 중국의 북경, 상해 그리고 황해 연안지역 및 우리나라의 중부지방에서 높게 나타났으며, 건성 침착량도 유사한 분포를 나타내었다. Sulfate와 O₃ 분포는 배출량 분포와는 상이하게 나타났다. 이는 이들 물질이 배출지역에서 수송되면서 2차적으로 생성되었다는 것을 나타낸다. SO₂와 O₃의 계산농도와 실측농도는 절대치에서 다소간 차이가 있었으나 시간변화 경향은 대체로 잘 묘사하는 것으로 나타났다.

본 연구에서 완성한 산성강하물 모델은 동아시아 지역에 있어서 오염물질의 장거리 수송에 활용될 수 있을 것으로 사료된다. 또한 장래의 산성우의 영향에 관한 대책 수립에 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

1. 김갑태, 1987, 인공산성우가 처리된 분식한 은행나무유근의 생장과 생리적 특성과의 상관, 한국 대기보전학회지, 3(1) : 13-26.
2. 정용승, 김태군, 1991, 한국 서해안에서 관측된 산성비의 발원지 추적연구. 한국대기보전학회지, 7(3) : 203-207.

3. Akimoto, H., 1994, Distribution of SO₂ and CO₂ emissions from fuel combustion and industrial activities in asia with 1° × 1° resolution. *Atmospheric Environment*, 28 : 213-225.
4. Carmichael, G.R., L.K. Peters and R.D. Sayler, 1991 The STEM II regional scale acid deposition and photo chemical model. *Atmospheric Environment*, 25A:2077
5. Chang, J. S., R. A. Brost, I. S. A. Isacsen, S. Madronich, P. Middleton, W. R. Stockwell and C. J. Walcek, 1987, A Three dimensional Eulerian acid deposition model : Physical concepts and formation. *J. Geophysics. Res.*, 92 : 14681-14700.
6. EPA, 1986, Development of the 1980 NAPAP emission inventory. EPA-600/7-86057a, Research Triangle Park, N.C.
7. Jang, J. C., 1992, Sensitivity of ozone to model grid resolution. Ph. D. dissertation, UNC.
8. NAPAP, 1990, Acidic deposition : State of Science and Technology, Vol. 1, Report 4 : The Regional Acid Deposition Model and Engineering Model, U.S. Government Printing Office, Washington, DC, pp130.