

MESOPUFF II 모델을 이용한 서울시 SO₂ 배출량이 주변지역 대기질에 미치는 영향 분석

Effects of Emission from Seoul Metropolitan Area on Air Quality of Surrounding Area Using MESOPUFF II Model

조 창 래 · 이 종 범

강원대학교 환경학과

(1998년 5월 25일 접수, 1998년 10월 23일 채택)

Chang Rae Cho and Chong Bum Lee

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

(Received 25 May 1998; Accepted 23 October 1998)

Abstract

To study the influences of the emission sources during June 13 ~ 15 1997 in Seoul, MESOPUFF II model has been used. The MESOPUFF II model includes terrain effects, chemical transformation and removal processes. Data of 20 surface meteorological stations and the upper air station on mid-west area in Korea were used as a DWM (Diagnostic Wind Model) input data.

This model is likely to be applicable because the predicted SO₂ concentration was well matched with measured SO₂ concentration in Seoul and Kyonggido. In generally air pollutants in Seoul have major influence on the other cities but the result of modeling appeared also air pollutants of the other cities influence on Seoul.

Finally, in the case of calculating the air quality by diffusion model, the influences of air pollutants emitted in metropolitan area as well as the emission rate in modeling area should be considered.

Key words : puff model, air quality modeling

1. 서 론

우리나라의 중서부지방에는 인구 1000만명이 넘는 거대도시 서울이 위치하고 있으며 이 거대도시에서 배출되는 오염물질이 주변지역으로 확산되므로 이 거대도시의 주변에 위치한 소도시에서는 그 영향을 받을 수 있다. 그리고 소도시 자체의 배출량이 커지고 기상조건이 악화되는 경우 자체 배출에

의한 오염물질과 대도시에서 배출된 오염물질이 더해져 고농도 오염이 발생될 가능성이 있다. 또한 자체 배출원이 적은 시골지역에서도 대도시에서 배출된 오염물질의 영향으로 인해 높은 대기오염물질농도를 나타낼 수 있다(Meagher *et al.*, 1986). 따라서 거대도시에서 발생된 오염물질이 주변지역에 미치는 영향을 파악하는 것은 매우 중요하다.

한편, 우리나라와 같이 지형이 복잡한 경우 바람장(wind field) 작성에 있어 지형을 고려하지 못하는

모델을 이용하는 것에는 문제점이 많으며 지형의 의하여 발생할 수 있는 여러 가지 효과를 고려하는 모델을 적용하는 것이 바람직하다. 또한 장거리 수송시 발생하는 오염물질의 화학적 변환(chemical transformation) 및 제거메커니즘(removal mechanism) 등도 고려할 수 있는 모델이 필요하며 범위가 넓고 시간규모가 커지는 경우 시간에 따른 기상 변화와 지역에 따른 기상조건의 차이 등으로 정상상태(steady state)를 가정하는 모델보다는 비정상상태(nonsteady state)를 고려하는 모델이 적절하다. 이러한 요구조건을 만족하는 모델로서는 퍼프(puff) 모델이 적절하다(이종범, 1995).

미국 EPA에서 개발한 MESOPUFF II는 지역에 따른 풍향, 풍속의 차이를 고려하는 바람장을 사용하며 SO₂의 대기 중에서의 화학변환이나 침착과정도 고려하며 또한 기상조건과 배출량이 시간에 따라 변화하는 비정상상태에서도 적용할 수 있으므로 본 연구에 적합한 모델이다.

MESOPUFF II 모델을 이용하여 대상기간 동안의 SO₂ 농도를 계산하고 환경부에서 측정한 실측농도와 비교를 통하여 모델의 적용 가능성을 검토하였다. 또한 서울특별시 지역의 오염원에서 배출된 오염물질이 주변지역에 미치는 기여도 및 주변지역에서의 오염물질 배출이 서울특별시의 대기질에 미치는 기여도를 파악하였다.

2. 모델개요

2.1 MESOPUFF II 모델의 개요

2.1.1 모델의 특성

현재 널리 사용되고 있는 가우시안플룸모델(Gaussian plume model)은 기상조건이 시간에 따라서 변화되지 않는 정상상태를 가정하는 모델이므로 해륙풍과 같이 급격한 풍향변화를 나타내는 지역을 모사하기에는 부적합하며 오염물질이 수백 km까지 장거리 수송되는 경우에는 지역간의 기상요소 차이가 크므로 적용할 수 없다. MESOPUFF II 모델(Scire *et al.*, 1984)은 가우시안퍼프식(Gaussian puff equation)을 사용하는 모델로 해륙풍 순환과 같은 급격한 풍향변화를 나타내는 지역에 적용할 수 있으며 대상지역을 격자로 나누어 격자점별로 기상요소를

산출하여 PUFF계산을 행하므로 중규모(mesoscale)를 대상지역으로 할 수 있다. 오염물질이 장거리로 수송되는데 수십 시간이 소요되므로 이에 따른 오염물질의 화학적 변형과 건·습성침적(dry·wet deposition)을 고려할 수 있어 연안 도시에서 배출된 오염물질이 해륙풍 순환의 영향을 받는 풍하지역에 미치는 영향을 예측하기에 적합한 모델이다. MESOPUFF II 모델의 계산과정은 조창래(1993)에 자세히 기술되어 있으며 기본적인 개념을 간략히 기술하면 다음과 같다.

2.1.2 확산 및 수송과정

MESOPUFF II는 Gaussian Variable Trajectory Puff Superposition Model로 연속적인 플룸을 분리된 퍼프(puff)의 연속적인 배출로 모사한다.

MESOPUFF II 모델에서 오염물질 농도의 계산에 이용되는 식은 다음과 같다.

$$C(s) = \frac{Q(s)}{2\pi\sigma_y^2(s)} g(s) \times \exp\left[-\frac{r^2(s)}{2\sigma_z^2(s)}\right] \quad (1)$$

$$g(s) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(H_e + 2nz_i)^2}{\sigma_z^2(s)}\right] \quad (2)$$

여기에서 C(s)는 지표면 농도, Q(s)는 오염물질 배출량, σ_y 는 오염물질의 수평적인 확산폭, σ_z 는 오염물질의 수직적인 확산폭, r(s)는 퍼프의 반지름, z_i 는 혼합층 고도, H_e 는 퍼프의 유효고도이다.

이때 100 km 이내의 거리에서 사용되는 σ_y , σ_z 는 Turner(1970) 곡선에 의해 나타나는 되는 플룸성장함수(plume growth function)로 다음 식에 의해 계산된다.

$$\sigma = ax^b \quad (3)$$

여기에서 a, b는 안정도에 따른 함수이며, x는 이동거리이다. 그러나 이 식은 퍼프가 이동하는 동안 대기 안정도의 변화가 없는 경우에 성립하며 안정도가 변하는 경우에는 x 대신 가거리(virtual distance (x_v))를 사용하는 아래의 Ludwig *et al.*(1977)의 식을 사용한다.

$$(\sigma_y)_t = a_y [(x_v)_y + \delta X] b_y \quad (4)$$

$$(\sigma_z)_t = a_z [(x_v)_z + \delta X] b_z \quad (5)$$

$$(x_v)_y = \left[\frac{(\sigma_y)_{t-1}}{a_y} \right]^{1/b} \quad (6)$$

$$(x_v)_z = \left[\frac{(\sigma_z)_{t-1}}{a_z} \right]^{1/b} \quad (7)$$

여기에서 $(\sigma_y)_{t-1}$, $(\sigma_z)_{t-1}$ 는 이전 시간단계에서의 σ_y 와 σ_z 값이며 a_y , a_z , b_y , b_z 는 퍼프 성장률계수 (growth rate coefficients)이다.

또한 100 km 이상의 거리에서는 시간종속 퍼프식 (time-dependent puff growth equation)을 사용한다.

한편 퍼프의 연기상승은 Briggs(1975)의 식을 사용하며 퍼프 중심이 지표 경계층위의 안정층 높이 안으로 투과될 경우는 Briggs(1975)의 부분투과플룸상승식 (partial penetration plume rise equation)을 사용한다.

퍼프의 trajectory는 Lagrangian trajectory 함수에 의해 채취시간 동안 이루어지며 시간간격 (time interval) Δt 후의 퍼프의 위치는 현재 퍼프 중심의 X, Y 좌표에 벡터풍에 의해 증가된 거리의 증가분 ΔX 와 ΔY 를 더하는 방법으로 계산한다. 그리고 바람요소 (wind component) u , v 는 각 격자점에서 1시간 간격의 값만 계산되므로 퍼프 중심에서의 바람요소는 bilinear interpolation scheme에 의해 계산한다.

2.1.3 화학적인 변질과정 및 제거과정

MESOPUFF II 모델에서 고려하는 화학적 변환과정은 SO₂ (sulfur dioxide)에서 sulfate (SO₄²⁻)로의 변환과 nitrogen oxides (NO_x = NO + NO₂)에서 nitrate (NO₃⁻)로의 변환 등을 포함한다. 오염물질의 화학반응은 PBM (Photochemical Box Model)에 의하여 생성된 시간별 변형률을 통계분석하고, 이로부터 MESOPUFF II용 변형률을 개발하여 고려하고 있으며, Atkinson *et al.* (1982)의 RHC/NO_x/SO_x의 화학메커니즘을 사용한다. 이들 화학적 변환과정을 계산하는 식은 다음과 같다.

$$K_1 = 36 R^{0.55} [O_3]^{0.71} S^{-1.29} + 3 \times 10^{-8} RH^2 \quad (8)$$

$$K_2 = 1206 [O_3]^{1.5} S^{-1.41} [NO_x]^{-0.33} \quad (9)$$

$$K_3 = 1261 [O_3]^{1.45} S^{-1.34} [NO_x]^{-0.12} \quad (10)$$

여기에서 K_1 은 SO₂에서 SO₄²⁻로의 변환률, K_2 는 NO_x에서 HNO₃과 PAN으로의 변환률, K_3 는 NO_x에

서 HNO₃으로의 변환률, R은 총 태양복사량, S는 2~6의 범위를 갖는 안정도 지표 (PGT 계급 A, B=2, C=3, D=4, E=5, F=6)이다.

대기 중 오염물질의 제거과정은 건성침적과 습성 침적으로 나눌 수 있으며 MESOPUFF II에서의 건성침적 계산은 저항모델 (resistance model)을 사용하여 침적의 시·공간적 변동을 설명한다. 침적속도 (deposition velocity)는 오염물질이 대기로부터 지면으로 수송되는 것에 대한 저항의 합의 역수로 다음과 같이 표현한다.

$$V_d = (r_a + r_s + r_c)^{-1} \quad (11)$$

여기에서 V_d 는 침강속도, r_a 는 역학적인 저항, r_s 는 표면 저항, r_c 는 식물체 저항 (canopy resistance)이며 r_a 와 r_s 는 Wesely and Hicks (1977) 그리고 r_c 는 Shieh *et al.* (1979)에 의해 제시된 식을 사용한다.

2.2 MESOPUFF II 모델의 개선

2.2.1 MESOPAC II 모델의 개선점

MESOPUFF II 모델은 바람장 산출 전처리 시스템인 MESOPACII, PUFF 모델 본체인 MESOPUFF II와 농도산출결과의 후처리 해석 시스템인 MESO-FILE II로 구성되어 있다. MESOPACII는 지상기상 관측자료와 상층기상 관측자료로부터 공간 내삽방법에 의하여 3차원 격자상의 풍향 및 풍속과 안정도, 마찰속도, 혼합층고도 등 퍼프모델 실행에 필요한 기상요소들을 계산한다. 풍향과 풍속은 산악 등 지형의 영향을 많이 받으나 산악지역에 기상관측소가 충분치 않은 경우에는 측정자료만으로 내삽하여 풍향, 풍속을 구하는 MESOPUFF II 모델은 지형이 바람장에 미치는 효과를 반영하지 못하는 단점이 있다.

본 연구에서는 MESOPAC II 모델의 바람장 계산 부분을 개선하기 위하여 지형효과에 의한 바람을 고려할 수 있는 DWM (Diagnostic Wind Model)의 바람장을 이용할 수 있도록 모델을 개선하고, 개선된 MESOPAC II을 이용하여 중부지방의 바람장 및 기상요소들을 구성하였다. DWM 모델은 원래 UAM (Urban Airshed Model) 모델에 포함되어 있는 바람장 산출모델이다. DWM의 구조는 지표와 상층의 기상자료를 처리하는 PRESFC와 PREUPR의 전처

리 시스템과 이를 이용하여 바람장을 작성하는 DWM으로 구성되어 있다. 이 두 가지 전처리 시스템에서는 수평, 연직방향의 바람성분이 계산되고, DWM에서는 전처리 시스템에서 출력된 자료를 이용하여 사용자가 원하는 층에 대하여 시, 공간적인 내삽과정을 거쳐 바람의 동서성분(u), 남북성분(v), 연직성분(w)을 계산한다. DWM에서 작성하는 바람장은 다음의 2단계 과정을 거쳐 작성된다. 첫번째 단계는 지형의 영향에 의해서 발생하는 지형의 운동학적인 영향(kinematic effects of terrain), 열역학적으로 발생된 사면흐름(slope flow), 장애물에 의한 영향(blocking effects) 등을 고려하고 두 번째 단계에서는 기상관측소에서 측정된 지상기상자료와 상층기상자료를 이용하여 첫 번째 단계에서 작성된 바람장을 추가한다. 그리고 내삽과정에서 발생할 수 있는 오차를 방지하기 위한 smoothing과정, 연직방향의 속도(w)를 계산하는 과정, 3차원적인 발산을 최소화하기 위한 과정 등이 포함된다. 3차원적인 바람장을 작성하는데 고려되는 지형적인 영향을 분석하는 과정들은 Sharon 등(1990)과 같다.

DWM 모델은 24시간씩 실행하도록 되어있으나 24시간 이상 임의의 시간동안 연속적으로 실행할 수 있도록 모델을 수정하였다.

2.2.2 MESOPUFF II 모델의 개선점

MESOPUFF II는 점오염원과 면오염원을 모두 고려할 수 있으나 각각 20개, 5개의 오염원에 대하여만 고려할 수 있도록 되어있다. 본 연구에서는 점오염원 및 면오염원의 개수를 컴퓨터에서 실행 가능한 한도 내에서 사용자가 지정할 수 있도록 모델을 수정하였으며 계산시에는 점오염원 50개, 면오염원 300개까지 실행되도록 하였다.

한편 MESOPUFF II의 격자체계(grid system)는 바람 및 각종 기상학적 자료를 처리하는 영역인 기상격자(meteorological grid), 퍼프의 이동과 확산을 계산하는 영역을 지정하는 계산격자(computational grid), receptor 영역을 결정하는 포집격자(sampling grid)의 3가지로 구분하여 사용하도록 되어있다. 여기에서 계산격자를 벗어난 퍼프는 농도계산에서 제외되므로 이 영역을 충분히 크게 할 필요가 있다. 기상격자 영역은 계산격자의 영역과 같거나 계산격자 영역을 포함하여야 한다. 이 계산격자를 크게 하

여 영역내의 퍼프의 개수가 많아지면 컴퓨터의 저장용량과 계산 시간의 문제로 인하여 퍼프를 모두 추적할 수 없으므로 원래의 모델에서는 퍼프의 개수를 500개로 제한하였으나 최근 계산기의 저장용량과 빠른 계산속도로 인하여 이러한 문제가 해결되었다. 따라서 본 연구에서는 오염원의 개수 증가와 아울러 계산영역 내의 퍼프의 개수도 사용자가 지정하도록 모델을 수정하였으며 최대 사용 가능한 총 퍼프의 개수는 105,000개로 하였다.

3. 연구방법

3.1 대상영역 및 적용기간

본 연구에서 설정한 중부지방의 모델 격자체계는 그림 1과 같이 TM좌표(120,380)을 남·서 기준점으로 하여 기상격자, 계산격자, 포집격자 모두 동일하게 160 km × 160 km 범위로 하였다. 그리고 이 영역을 동서, 남북방향으로 각각 40개의 격자로 나누었으며 각 격자간의 간격은 4km로 하였다. 대상지역의 오염원은 격자좌표계상에 위치하여야 하나 기상 관측소는 격자좌표계의 외부에 존재하는 경우에도 이용할 수 있으므로 격자좌표계의 밖에 위치하

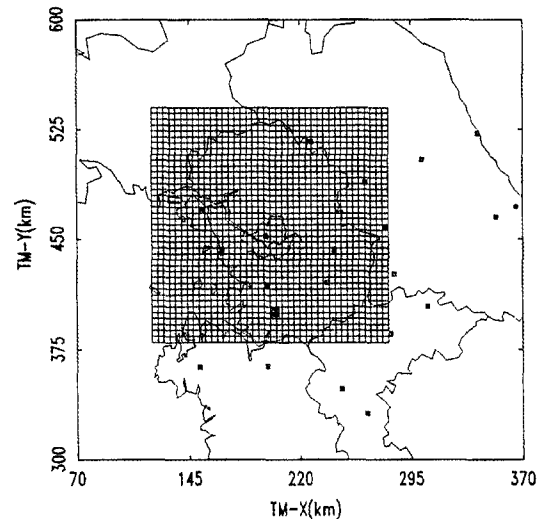


Fig. 1. Modeling domain. Filled squares represent surface meteorological stations and filled circle represent Osan upper air observation station.

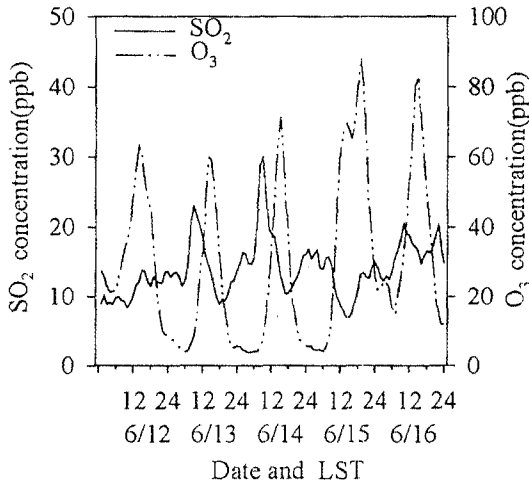


Fig. 2. Average concentration O₃ (ppb) and SO₂ (ppb) in June 12~16 1997 at Seoul Metropolitan Area (35 stations).

는 측정소의 자료도 이용하였다.

대상영역을 넓게 결정한 이유는 계산격자의 영역을 벗어나는 퍼프는 농도계산에서 삭제되므로 receptor에 영향을 미치는 퍼프가 영역 내에 존재할 수 있도록 하기 위하여 기상격자 및 계산격자의 영역을 충분히 크게 결정하였다.

한편 대상일은 1997년 6월중 오존경보가 발령되었으며 오존 등의 2차 오염물질의 농도 뿐만 아니라 1차 오염물질의 농도도 높았던 13(julian days 164)~15일(julian days 166)을 대상기간으로 선정하였다. 그림 2는 대상기간 및 대상기간을 전후한 기간에 대하여 서울특별시 및 인천광역시에 위치한 35개의 자동측정망에서 실측한 자료 중 매시간별 SO₂와 O₃의 농도를 각각 평균하여 나타낸 것으로 6월 15일의 오존 농도의 경우 1시간 평균농도가 환경기준치인 100 ppb를 초과하는 시간이 많았으며 하계임에도 불구하고 이산화황의 농도도 높게 나타났다.

3.2 입력자료

3.2.1 기상자료

모델 실행에 필요한 지상 기상자료는 지면기압, 상대습도, 기온, 운량, 풍향, 풍속자료 등으로 표 1과

같이 대상지역 및 대상지역주변에 위치한 20개의 기상청 및 측후소자료 중 1997년도 6월의 매시간 지면기압, 상대습도, 기온, 운량, 풍향, 풍속자료를 이용하였다.

상층 기상자료는 1997년 6월의 오산 00Z와 12Z의 기압, 기온, 풍향, 풍속자료를 이용하였다.

3.2.2 배출량 자료

본 연구의 대상오염물질은 SO₂로 하였고 격자별 배출량은 행정구역별 연료 사용량 자료로부터 배출량을 산출한 이종범 등(1997)의 방법(이하 "기본자료"로 칭함)을 이용하여 대상영역 전체에 대한 4 km×4 km 격자별 배출량을 산출하였다. 그리고 산출한 배출량 결과를 다시 8 km×8 km의 격자별 배출량으로 하였으며, TM좌표(152, 412)를 남서 기준점으로 하여 동서방향 9개, 남북방향 7개, 총 63개 격자의 지역에서만 오염물질이 배출되는 것으로 하였다.

MESOPUFF II에 입력될 배출량은 면오염원과 점오염원으로 분리해 입력할 수 있으나 모든 오염물질의 배출은 면오염원에서 배출되는 것으로 간주하였다.

한편 여기에서 산출한 서울, 인천 및 경기도의 배출량은 정일래(1997, 개인통신)의 자료(이하 "비교자료"로 칭함)를 참고로 하여 보정치를 구하여 다시 산출하였다. 이 배출량자료는 우리나라 서해안지역(서울, 경기포함)의 점, 선, 면오염원에 대하여 상세하게 배출량을 산출한 자료로 비교적 신뢰성 있는 자료로 사료된다.

경기도 배출량의 경우 기본자료에서 산출한 경기도의 총 배출량은 1077.7(g/sec)이며 이중 본 연구의 대상지역에 포함되는 경기도지역의 배출량은 679.8(g/sec)로 경기도 총배출량의 63.1%이다. 한편, 비교자료에서 산출한 경기도 총배출량은 4943.0(g/sec)이다. 따라서 본 연구의 대상지역중 경기도에 포함되는 지역에서의 배출량만을 구하기 위하여 위에서 구한 비율(63.1%)을 적용하면 3119.0(g/sec)이 된다. 이 값은 기본자료에서 산출한 대상지역내 경기도 배출량인 679.8(g/sec)의 4.6배이므로 기본자료의 경기도의 배출량에 4.6배하여 격자별 경기도 배출량으로 하였다. 인천광역시 및 서울특별시의 경우는 기본자료와 비교자료에서 배출량 산출을 위한

Table 1. Surface meteorological observation stations used in the present study.

ID	Station	TM(X) (km)	TM(Y) (km)	Grid(X) (grid unit)	Grid(Y) (grid unit)
090	Sogcho	339.65	522.25	47.93	38.45
095	Chulwon	227.63	516.80	25.53	37.67
100	Daegwanryong	352.35	464.90	50.47	26.98
101	Chunchon	264.38	489.00	32.88	31.80
105	Gangleung	365.50	472.30	53.10	28.46
108	Seoul	196.80	451.95	19.36	24.39
112	Inchon	167.35	442.80	13.47	22.56
114	Wonju	284.00	426.25	36.80	19.25
119	Suwon	198.25	418.63	19.65	17.73
129	Seosan	152.10	363.40	10.42	6.68
131	Chongju	238.60	348.50	27.72	3.70
201	Ganghwa	154.00	470.50	10.80	28.10
202	Yangpyong	243.30	442.80	28.66	22.56
203	Ichon	238.60	420.45	27.72	18.09
211	Inje	302.60	504.60	40.52	34.92
212	Hongchon	277.90	457.60	35.58	25.52
221	Jechon	306.60	404.40	41.32	14.88
223	Chungju	281.60	385.70	36.32	11.14
226	Boeun	265.50	331.85	33.10	0.37
232	Onyang	198.25	364.00	19.65	6.80
122	Osan	202.75	400.15	20.55	14.03

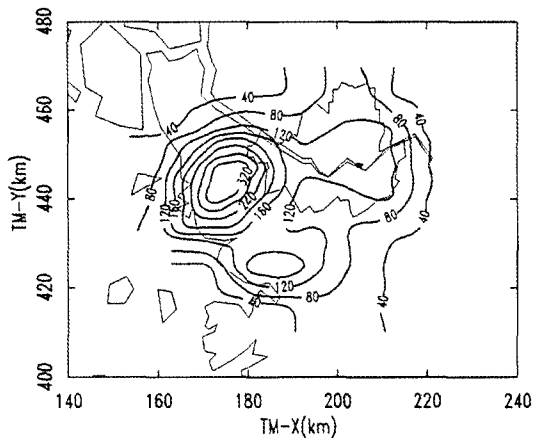


Fig. 3. Spatial distribution of SO₂ emission (g/sec).

지역이 같으므로 면적에 대한 보정은 하지 않고 배출량에 대한 보정만을 하여 사용하였다.

여기에서 산출한 배출량은 모델실행시 주간(07시에서 17시)은 상기 배출량의 1.8, 야간(19시에서 익일 05시)은 0.2 그리고 06시와 18시는 1.0의 시간대별 SO₂ 배출량의 가중치를 주었다.

대상지역내의 배출량 분포를 보면 그림 3에 나타난 바와 같이 인천직할시의 배출량이 가장 많았고 다음으로 안산시 지역, 그리고 서울특별시의 중심부 근 순서로 배출량이 많은 것으로 나타났다.

3. 3 모델의 실행방법

3. 3. 1 기상자료 처리모델의 실행

1997년 6월의 지상 및 상층기상자료 중 대상일의 24시간 전일인 163일(6월 12일)부터 166일(6월 15일)까지 총 96시간의 자료를 DWM의 입력자료로 하여 바람장을 작성하였으며, DWM에 의한 바람장결과 및 기상자료로 MESOPAC II를 실행하여 MESOPUFF II의 기상입력 자료로 하였다.

3. 3. 2 MESOPUFF II의 실행

오염물질의 확산 및 오염물질의 농도를 계산하기 위하여 MESOPUFF II를 실행하였다. 8 km × 8 km의 넓은 면오염원을 고려하기 위하여 배출조건 중 초기 σ_y 및 σ_z 는 각각 6000 m, 300 m, 배출고도는 20 m로 하였으며, 3.2.2에서 구한 배출량에 시간대별 SO₂ 배출량의 가중치를 고려하여 시간별 배출량자료로 하였다.

MESOPUFF II의 실행을 위한 입력자료중 농도 평균화 시간은 1시간으로 하였으며 퍼프의 배출속도는 시간당 6개의 퍼프가 배출되는 것으로 하였고 각 격자점에서의 농도계산을 위한 최소 채취량은 시간당 6회 그리고 채취될 퍼프의 최소시간은 1800 초로 하였다.

MESOPUFF II에서 SO₂의 화학적 변형을 고려하는 방법은 여러 가지가 있으나 본 연구에서는 태양 복사량, O₃ 배경농도, 대기 안정도, 상대습도 등을 고려하는 SO₂의 변형률을 이용하였다.

한편 대상지역에는 대상일의 전시간에 배출된 오염물질로 인하여 배경농도가 존재하는데 이를 고려하기 위하여 대상일의 24시간 전부터 대상일과 같은 배출조건 및 입력자료로써 모델을 실행하여 대상지역 내에 배경농도가 존재하도록 하였다. 그리고 모델링영역 이외에서의 배출에 의한 기여 농도를 배경농도로 간주할 경우 이것은 우리나라의 주요 오염원인 서울, 인천, 경기도 이외의 지역에서의 배출, 즉 중국에 의한 영향으로 보는 것이 타당하다고 사료된다. 이러한 배경농도를 측정하고 있는 안면도

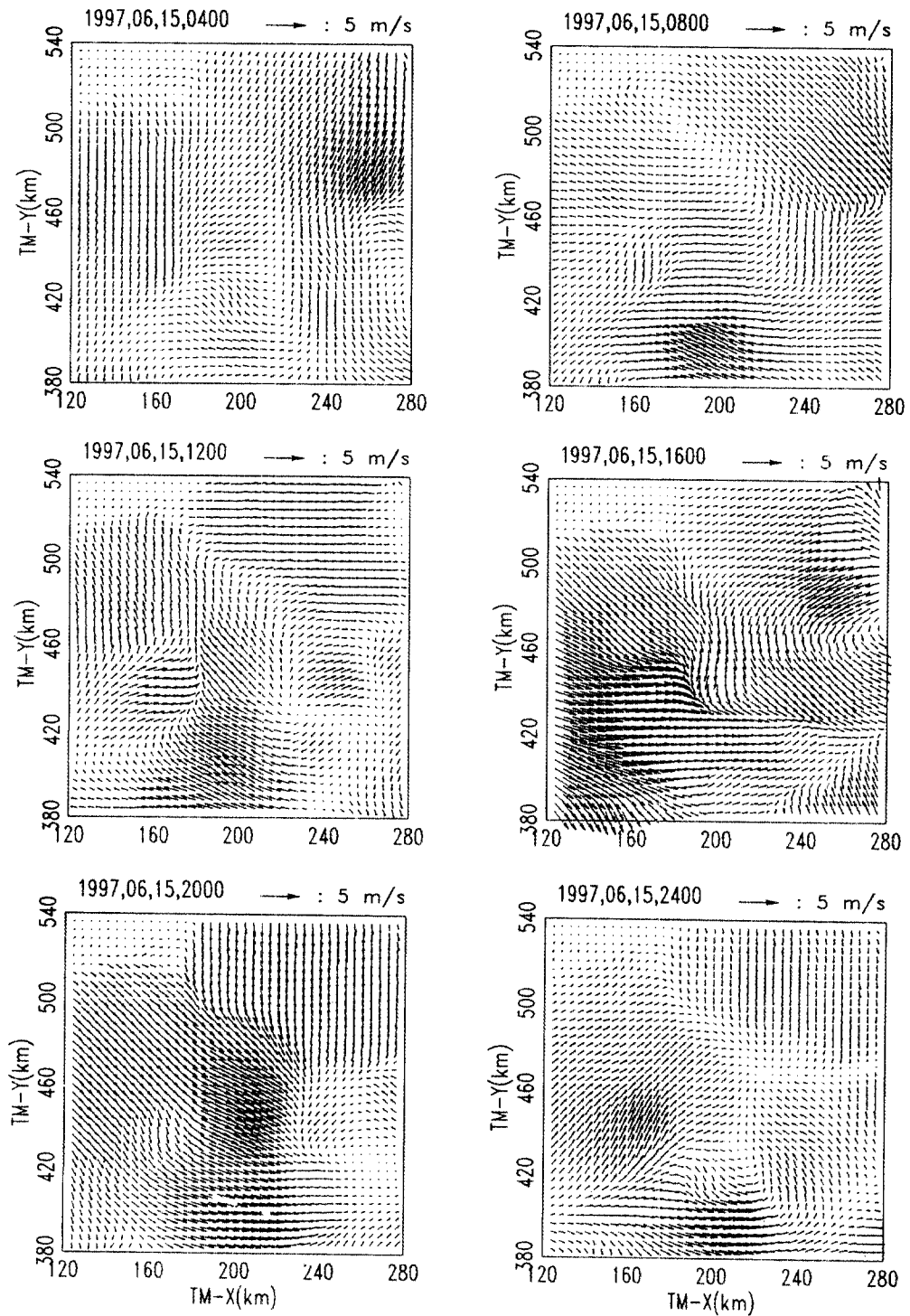


Fig. 4. Surface wind field obtained using the DWM at June 13 - 15 1997.

배경대기관측소의 최근 3개월(1998년 4, 5, 6월)간의 SO₂농도를 조사한 결과 산술평균은 2.1 ppb, 최고농도 26.1 ppb, 최저농도 0.0 ppb 그리고 표준편차는 2.9 ppb으로 나타났다. 따라서 본 연구의 대상기간은 비록 계절적으로는 하계에 해당하지만 1차 및 2차 오염물질의 농도가 비교적 높았던 기간이므로 8 ppb의 배경농도가 있는 것으로 간주하여 대상기간 동안 대상지역에서의 시간별 오염농도를 계산하였다. 본 모델의 계산은 워크스테이션인 DEC3000 모델로 실행하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 대상지역 기상조건의 시·공간적 변화 특징

대상기간의 1시간 평균 기상자료를 입력자료로 하여 DWM모델에서 작성한 중부지방에 대한 바람장을 그림 4에 나타내었다.

6월 13일의 경우 일출 전까지는 대상영역 전반에 걸쳐 북풍, 북서풍계열의 바람이 부는 것으로 나타났으며 일출 후부터 일몰 후까지 서울을 중심으로 한 수도권지역에 서풍계열의 바람이 부는 것을 보여주고 있다. 그리고 22시 이후에는 풍향이 바다 및 해안 지역은 서풍계열이나 내륙지역은 북풍 및 남서풍계열의 바람으로 바뀌었는데 이러한 바람의 시

간변화는 14일의 야간에 내륙지방의 풍향이 동풍계열로 나타난 것을 제외하고는 15일까지 유사한 형태를 나타내었다. 그림 5는 대상기간 동안 09LST의 온위, 비습, 풍속, 풍향의 연직분포를 나타낸 그림이다.

한편 대상영역의 내외에는 바람장 작성에 사용되는 기상청 및 측후소의 자료가 비교적 많아 이들 자료의 내삽을 통한 바람장 작성이 가능하나 북서부 지역에는 철원 측후소를 제외하고는 이용할 자료가 부족한 편이다. 그리고 이 지역은 고도가 높고 지형이 복잡한 이유로 일출 후부터는 DWM 모델의 특징인 지형효과에 의한 바람이 측후소 자료들의 내삽을 통한 바람에 비하여 바람장 작성에 큰 영향을 미친 것으로 사료된다. 따라서 이 지역은 지형의 효과로 인한 복잡한 형태의 바람 형태를 타나내고 있는 것으로 생각된다.

4.2 실측농도자료에 의한 모델의 검증

서울특별시의 20개 지점과 인천광역시 및 경기도의 15개 지점에 위치한 오염물질 자동측정망 자료의 SO₂에 대한 매시간별 평균자료 중 1997년 6월 13일, 14일과 15일의 자료를 매 시간별로 평균하여 서울특별시, 인천광역시 및 경기도의 실측농도자료로 하였다. 그리고 오염물질 자동 측정망이 위치한 곳의 TM좌표를 receptor좌표로 모델에 입력하여 계

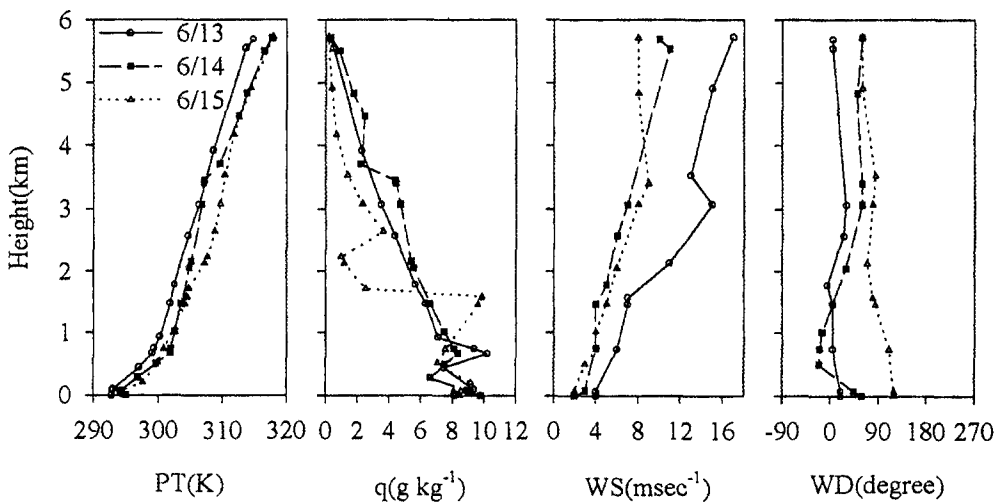


Fig. 5. Vertical distributions of T, q, WS, WD at Osan upper air station in 09LST June 13~15 1997.

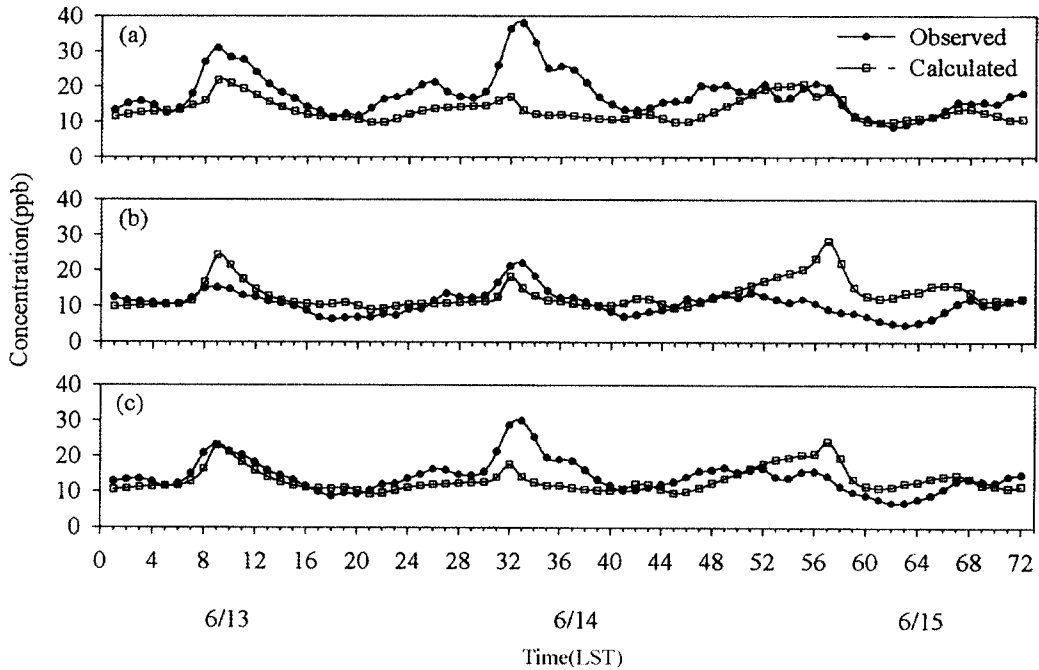


Fig. 6. Comparisons of observed and calculated SO₂ concentrations for June 13~15 1997. Averages at 15 monitoring station in Kyonggido (a), 20 monitoring station in Seoul (b) and 35 monitoring station (c) in Seoul metropolitan area.

산한 결과를 서울, 인천 및 경기도의 계산농도로 하여 일변화를 그림 6에 나타내었다.

그림 6의 (a)는 경기도 지역에 위치한 15개의 측정지점별 실측치와 모델에측치를 시간별로 평균한 결과이며, (b)는 서울시의 20개 지점에 대한 결과이다. 그리고 (c)는 경기도와 서울시에 위치한 35개 측정소 전체에 대하여 평균한 결과이다. 6월 13일의 경기도와 서울에서의 SO₂에 대한 일변화 경향을 보면 09시를 전후하여 농도가 가장 높고 낮에 일 중 가장 낮은 농도를 나타내며 17시경부터 다시 농도가 높아지는 경향을 보이고 있다. 실측농도와 계산농도 사이의 시간별 경향은 대체로 유사하나 경기도의 경우 계산농도가 실측농도에 비하여 낮게 나타났으며 서울시의 경우는 계산농도가 실측농도에 비하여 높게 나타났다.

14일의 경우도 서울시의 경우 오전 8시경에 최고치를 나타내는 15시경에 최저치를 나타내는 경향은 유사하였으나 경기도의 경우 실측치에 비하여 낮게 나타났다. 이는 모델에서 이 시간에 실제의 대기 상

태보다 더욱 불안정한 것으로 계산하여 오염물질의 농도를 낮게 계산한 것으로 사료된다. 15일의 경기도의 경우는 시간에 따른 농도변화 경향은 대체로 유사한 것으로 나타났으나 서울시의 경우는 전반적으로 낮게 나타났다. 이것은 중국이나 인근 지역으로부터 발생된 오염물질의 이동에 의한 배경농도는 날에 따라 동일하지 않으나 측정자료가 없어 대체적인 추정치로 3일간 동일한 값인 8 ppb를 적용하였는데 6월 13일 경우는 이 값이 대체로 타당했으나 6월 14일과 6월 15일의 경우에는 이 값이 다소 작게 추정된 것으로 사료된다.

그림 6의 (c)에 나타낸 6월 13일, 14일 및 15일의 서울과 경기도에 있어서의 실측농도와 계산농도 사이의 RMSE 값은 각각 1.92 ppb, 6.22 ppb, 4.29 ppb이고 실측농도의 평균치가 각각 12.92 ppb, 11.99 ppb, 15.14 ppb로 절대값으로서도 대체로 만족스러운 것으로 나타났다.

한편 그림 6에 제시한 것과 동일한 방법으로 산출한 평균농도의 수평분포를 그림 7에 나타내었다.

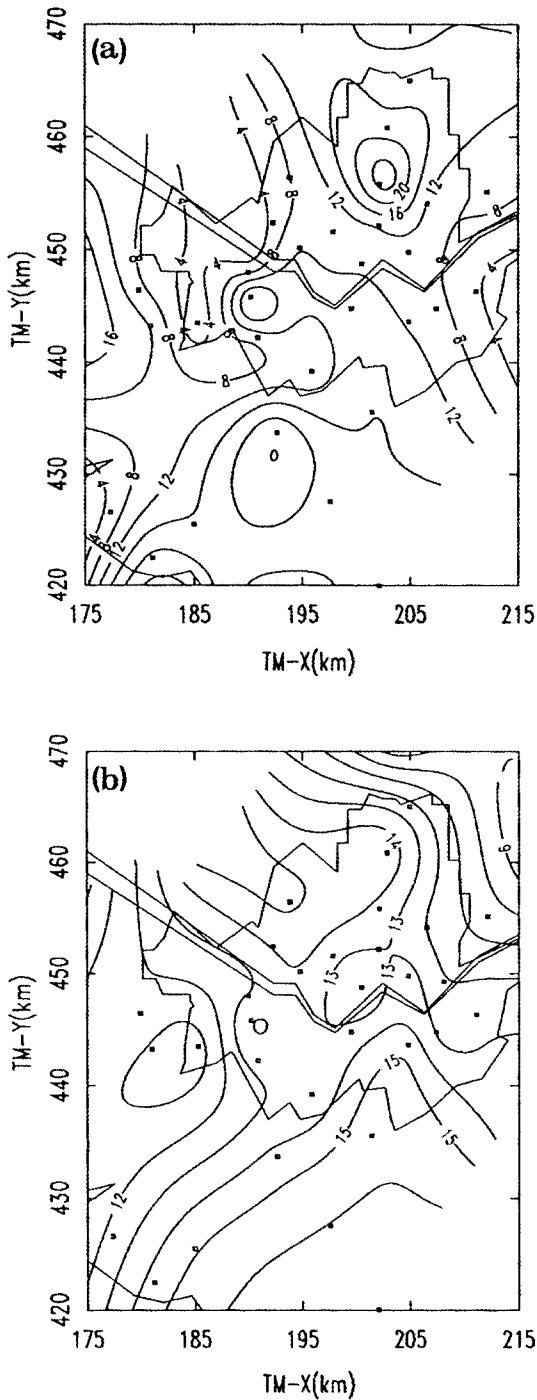


Fig. 7. Distribution of observed SO₂ concentration (a) and calculated SO₂ concentration (b) averaged for June 13~15 (72 hours) 1997.

그림 7(a)에 나타낸 실측치의 경우 서울시의 북부 지역과 서부지역에 고농도를 나타내고 있으며 경기도의 안양을 중심으로 한 지역에서 고농도를 나타내고 있음을 보인다. 모델 예측치의 경우 그림 7(b)에 나타낸 바와 같이 실측치의 농도분포에서 나타난 것과 대체로 유사한 지역에서 고농도를 나타내어 모델결과가 대상기간 동안 대상지역의 오염물질 농도분포를 잘 묘사하는 것으로 나타났다.

4.3 농도분포의 변화특성

본 연구의 주요 관심지역은 서울 및 수도권지역이므로 이 지역의 오염물질 분포를 상세히 파악하기 위하여 기상학적 영역의 일부지역 즉, TM좌표 (160,400)를 기준으로 동서, 남북 방향으로 각각 80 km×80 km 지역에 대하여 분석하였다.

6월 13일, 14일 및 15일에 대한 서울의 실측오염농도 및 모델계산농도의 일변화 경향 및 수평분포가 대체로 유사함에 따라 서울을 포함한 수도권지역에서 배출된 오염물질의 시간별 농도분포 변화 중 15일의 분포를 그림 8에 제시하였다.

그림 8의 04시의 결과를 보면 배출량이 많은 인천 및 서울 남부지역에 인접한 경기도 지역이 고농도를 나타내고 있으며, 일출 후 혼합층 고도는 아직 높지 않으나 배출량이 증가하는 08시를 전후한 시간에는 서울 서부지역을 중심으로 하여 고농도 지역이 나타났다. 이 시간 이후 혼합층 고도의 발달 등의 확산조건의 호전으로 전반적인 SO₂의 농도는 낮아졌으며, 16시까지 서울 서부지역을 중심으로 고농도가 나타났다. 20시경부터는 고농도지역이 서울 남부에 인접한 경기도지역 즉, 안양 및 수원을 중심으로 나타났고 24시경에는 경기도의 남동부지역에 고농도가 나타났다.

4.4 주변지역에 미치는 영향 분석

서울지역에서 배출된 오염물질이 주변지역에 미치는 영향 및 수도권지역 도시가 서울시 지역의 대기질에 미치는 기여도를 파악하기 위하여 모든 배출량을 이용하여 모델에서 계산한 결과와 행정구역상 서울특별시의 배출량만을 이용하여 계산한 격자별 농도결과의 비를 산출하였다.

그림 9(a)는 대상지역내의 3일간 평균 SO₂농도의 분포를 나타낸 것이다. 경기도 남서부지역의 농도가

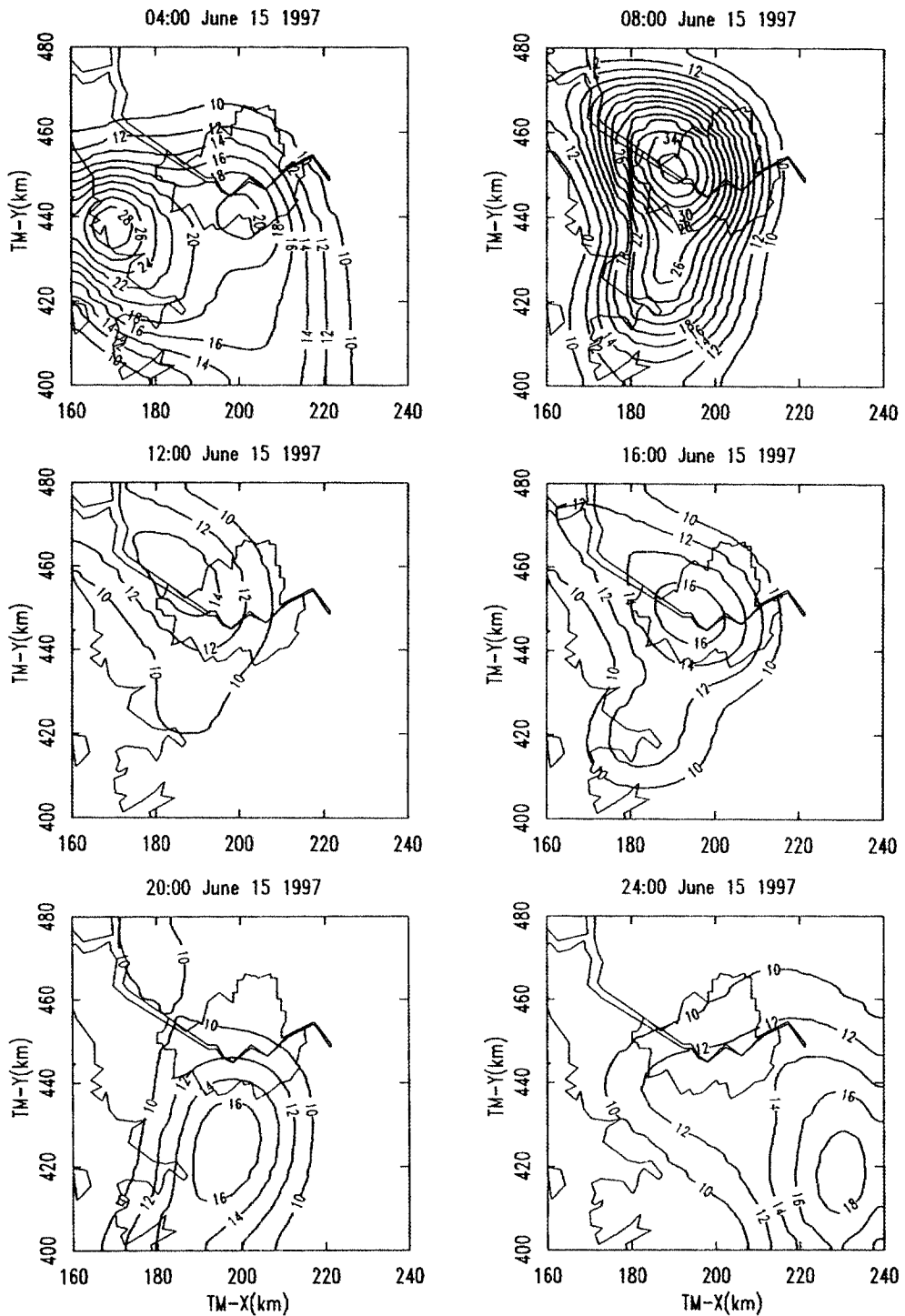


Fig. 8. Distribution of SO₂ concentration (ppb) calculated using MESOPUFF II model at June 15 1997.

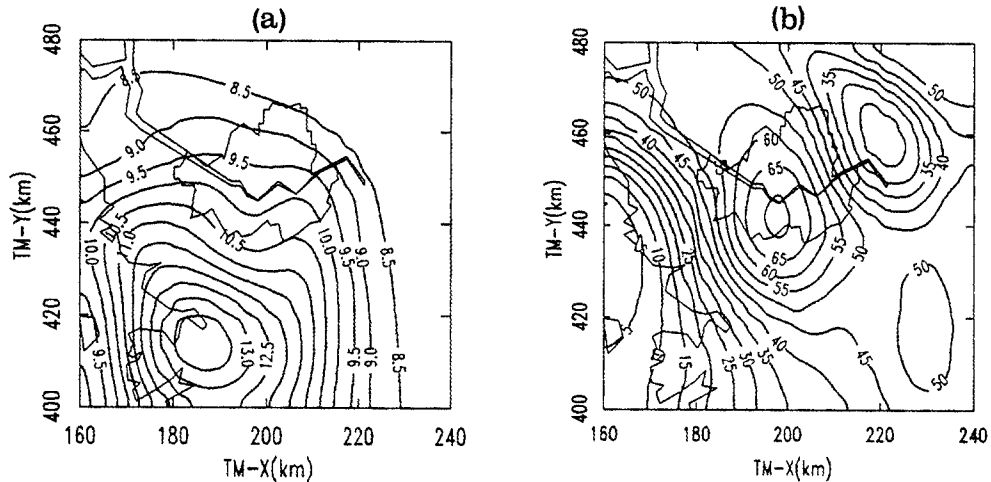


Fig. 9. Distribution of calculated SO₂ (ppb) concentration averaged for 3days (June 13~15 1997)(a) and contribution rate (%) of Seoul emission to SO₂ concentration (b).

높게 나타났으며 안산시 및 수원시를 중심으로 고농도를 나타내었다. 대상기간 동안 서울지역은 12 ppb 내외의 농도분포를 나타내었다.

그림 9(b)는 서울의 오염물질 배출이 주변지역에 미치는 기여률을 나타낸 등기여를 곡선으로 대상기간 동안 서울에서 배출된 오염물질의 50% 가량은 서울 자체와 서울에 인접한 성남시 및 서울의 남동부에 위치한 경기도 지역에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그리고 대상기간 동안의 풍향에 의하여 인천과 안산보다는 성남 및 안양지역에 영향을 미친 것으로 나타났으며, 서울시의 북동부에 위치한 구리 및 남양주시 부근에 약 40% 내외의 영향을 미치는 것으로 나타났다. 서울특별시는 대상기간 동안 서울 자체의 오염원에 의하여 60% 내외의 영향을 받으며 나머지 40% 가량은 경기도 및 인천시를 포함한 주변도시에서 배출된 오염물질의 영향을 받는 것으로 나타났다.

한편 본 연구에서와 같이 대도시 주변지역을 대상으로 하여 국지확산모델(ISC 3, VALLEY)을 적용하는 경우 모델예측의 결과는 주변에 위치한 대도시 오염에 대한 영향을 고려할 수 없으므로 실제 농도결과와는 많은 차이가 발생할 수 있다. 이에 대한 대처방안으로서 국지적인 영역을 대상으로 모델링을 하는 경우 대상지역의 오염원을 제외한 대도시

지역 등의 배출량을 입력자료로 하여 MESOPUFF II를 실행하여 농도를 계산한다. 그리고 이 결과를 그 지역의 주변 대도시 오염에 의한 배경농도로써 간주하고 대상지역의 배출량을 이용하여 국지규모의 확산모델을 대상지역에 대하여 실행한 농도결과에 상기한 배경농도를 가산하여 대상지역의 모델 계산 농도로 하는 것이 바람직하다. MESOPUFF II는 오염원수가 많은 경우 계산량이 막대해져 시뮬레이션 시간이 길어지며, MESOPUFF II는 중규모 모델로 공간상 receptor 배치 등 분해능이 낮으므로 구체적인 분포 파악을 하기에는 어려움이 있다. 따라서 단독으로 사용하는 것보다는 다른 국지모델과 병행하여 사용하는 것이 좋을 것으로 보인다.

5. 결 론

본 연구에서는 수도권지역을 포함한 중부지방을 대상으로 대상지역내 20개 기상청 및 측후소자료로부터 지형효과를 고려할 수 있는 DWM 이용하여 오염물질의 수송에 관여하는 대상지역의 바람장 작성 및 분석을 하였다. 또한 서울시 및 경기도에 위치한 35개의 오염물질 자동측정망자료와 MESOPUFF II 모델의 계산결과로 모델의 중부지방에 대한 적용 가능성을 평가하였으며 이 모델로 수도권 지역에서

배출된 오염물질이 주변지역에 미치는 영향을 알아 보았다.

대상기간 동안 우리나라 중부지방의 바람장를 통해 서울, 인천 및 경기도의 대부분 지역까지도 해륙풍의 영향권내에 들어있으며 일반풍의 풍향이 해륙풍의 풍향과 같을 경우 내륙 깊숙한 곳까지 해륙풍의 영향권내에 들 수 있는 것으로 나타났다. DWM 모델에 의하여 계산한 바람장은 기상관측소가 부족한 곳에서도 지형의 효과 등을 고려하여 그 지역의 바람을 잘 표현해 주는 것으로 생각된다.

한편 MESOPUFF II 모델의 중부지방 적용 가능성에 대한 평가의 결과 날에 따른 정확한 배경농도를 고려하지 못하여 절대값에 있어서 약간의 차이를 나타내었으나 시간에 따른 오염물질의 농도변화를 잘 표현해 주었다. 개선된 MESOPUFF II 모델은 우리나라 대기오염물질의 중·장거리 확산계산에 적용가능 할 것이라 사료된다.

특정지역의 배출이 주변지역에 미치는 기여율이 산출되었으며 이와 같은 방법을 적용함으로써 서울, 인천, 경기도 뿐만 아니라 전국의 지방자치단체간의 대기질에 미치는 영향정도를 파악하는데 유용할 것을 사료된다.

또한 MESOPUFF II 모델을 대도시 주변에 대한 국지적인 대기확산을 계산하는 경우 그 지역의 배출량 자료를 이용한 국지확산모델로 계산한 농도 결과에 MESOPUFF II에 의한 결과를 배경농도로 고려함으로써 대도시 인근 주변지역의 대기오염농도를 실제에 가깝게 계산할 수 있을 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

이종범 (1995) 우리나라에 적합한 국지확산모델의 개발방향, 한국대기보전학회지, 11(1), 15-28.
이종범, 김용국, 김태우, 방소영, 정유정 (1996) 광화학확산 모델 적용을 위한 수도권 지역의 대기오염물질

배출량 산출, 한국대기보전학회지, 13(2), 123-135.

정일래 (1997) 개인통신.

조창래 (1993) MESOPUFF II 모델을 이용한 수도권 대기 오염물질이 주변지역에 미치는 영향 분석, 석사학위논문, 강원대학교.

Atkinson, R., A.C. Lloyd, and L. Wines (1982) A new chemical mechanism for hydrocarbon/NO_x/SO₂ photo-oxidants suitable for inclusion in atmospheric simulation models. Atmospheric Environment, 16, 1341.

Briggs, G.A. (1975) Plume rise predictions. Lectures of air pollution and environmental impact analyses. American Meteorological Society, Boston, Ma, 59-111.

Ludwig, F.L., L.S. Gasidrek, and R.E. Ruff (1977) Simplification of a Gaussian puff model for real-time mini-computer use. Atmospheric Environment, 11, 431-436.

Meagher, J.F., N.T. Lee, R.J. Valente, and W.J. Parkhurst (1986) Rural ozone in the southeastern United States. Atmospheric Environment, 21, 605-615.

Scire, J.S., F.W. Lurmann, A. Bass, and S.R. Hanna (1984) User's guide to the Mesopuff II model and related processor programs. EPA-600/8-84-013, U.S., EPA, Research Triangle Park, NC.

Sharon, G.D., C.K. Robert, and L.D. Edward (1990) User's guide for the urban airshed model. EPA-450/4-90-007C, U.S., EPA, Research Triangle Park, NC.

Shieh, C.M., M.L. Wesely, and B.B. Hicks (1979) Estimated dry deposition velocities of sulfur over the eastern United States and surrounding regions. Atmospheric Environment, 13(10), 1361-1368.

Turner, D.B. (1964) A diffusion stability model for an urban area. J. Climate and Applied Meteorology, 3, 83-91.

Wesely, M.L. and B.B. Hicks (1977) Some factors that affect the deposition rates of sulfur dioxide and similar gases on vegetation. J. air Poll. Assoc. Control Assoc. 27, 1110-1116.