

남한 지역에서 여름철 맑은 날의 대기 오염물 확산에 대한 수치적 연구

이태영 · 김승범
연세대학교 천문대기학과
(1996년 1월 17일 접수)

A Numerical Study of Atmospheric Pollutant Dispersion over South Korea on Sunny Summer Days

Tae-Young LEE and Seung-Bum KIM

Department of Astronomy and Atmospheric Sciences Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

(Manuscript received 17 January 1996)

A Lagrangian dispersion model has been developed to study the transport of atmospheric pollutants over the southern Korean peninsula on sunny summer days. A mesoscale atmospheric model has been employed to provide the wind fields and information for turbulent diffusion for the calculation of trajectories using a conditioned particle technique. The model has been applied to the simulation of the transport of atmospheric pollutants emitted from five sources in the coastal locations under various synoptic scale winds.

Under calm synoptic scale condition, the particles emitted during daytime are mixed vertically and transported toward inland by sea-breeze, according to the model simulation. The particles are then transported upward at the sea-breeze front or by the upward motion over the mountain, and some particles show tendency of returning toward the coast by the return flow of the sea-breeze circulation. The particles are found to remain over the peninsula throughout the integration period under calm synoptic scale condition. When there is westerly synoptic scale wind, the particles emitted in the west coast can reach the east coast within a day or faster depending on the speed. With a synoptic scale southerly wind of 5 m/s, most of the particles from the five sources are advected toward inland during daytime. During nighttime, significant portion of particles released in the west coast remains over the land, while most particles released in the east coast move toward the sea to the east of the middle peninsula.

Key words :

1. 서 론

한국의 주요 도시들과 산업 시설들 중 상당수가 해안 지역에 위치하고 있으며, 이들 지역에서 배출된 대기 오염물들은 그 주위 지역들 뿐만 아니라 바람을 타고 수송되어 타 지역에서의 대기질에도

문제를 일으킬 수 있다. 지금까지의 대기질 문제는 주로 도시와 공단 지역 대기질에만 국한되어 논의되어 온 편이나, 이들 지점에서 배출된 오염물의 타 지역에 대한 영향도 중요한 문제가 될 수 있다. 한반도에서의 여름철 평균적 지상풍 구조 중 가장 중요한 특징은 전 해안에서 뚜렷이 나타나고

있는 해풍의 존재이다. 한반도에서의 여름철 순환에 대해서는 이미 많은 연구가 이루어진 바 있다. 이태영 등 (1989)은 남한 전역의 59개 지상 관측소에서의 5개년 관측 자료를 이용하여 여름철 평균적 지상풍 구조와 해·륙풍의 발달을 밝힌 바 있다 (Fig. 1). 이 연구에 따르면 종관 바람이 약할 때 서해안에서는 12~13시경 그리고 동해안에서는 09~10시경에 해풍이 시작되며, 육풍은 동해안에서 뚜렷이 나타나며 20~22시경에 시작되어 07~08시경까지 지속된다. 수치 모형을 이용하여 한반도의 여름철 대기 순환을 수치 모사한 연구도 다수가 있다 (이태영과 신동빈, 1989).

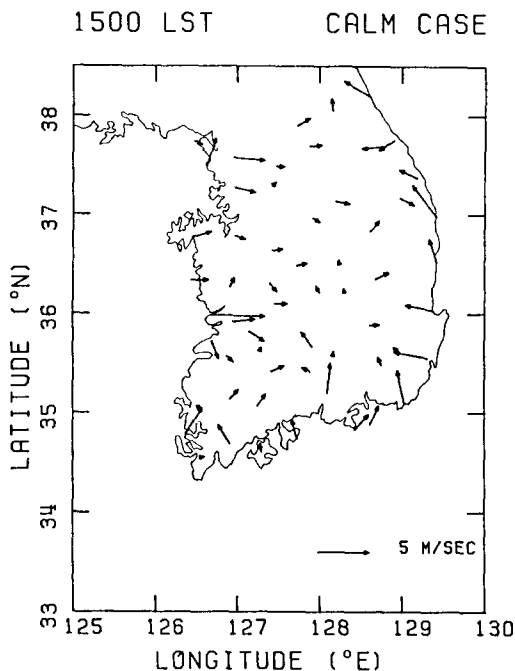


Fig. 1. Observed summertime mean surface wind vectors at 15 LST for days with weak synoptic scale flow (1982~1986) (이태영 등, 1989).

해안 지역에서 배출된 오염물의 난류 확산과 수송에 대해서는 tetroon이나 추적물 (tracer) 등을 이용하는 관측 연구와 수치방법을 이용하는 모형 연구가 많이 수행되어 오고 있다. Pack and Angell (1963), Angell et al. (1972) 그리고 Lyons and Ols-

son (1973)은 tetroon을 이용한 궤적을 보임으로써 해안 지역에서 대기 오염물 수송에 대한 중규모 순환의 역할을 보였다. 수치 모형에 의한 확산 연구는 크게 두가지로 구분된다. 첫째는 직접적으로 이류와 확산을 수치 방법에 의해 계산하는 방법으로서 이 방법을 이용한 모형들이 매우 많이 개발되었고 연구에 사용되어 오고 있다 (Segal et al., 1980; McRae et al., 1982; Lee et al., 1991). 이 방법은 먼 오염원들에 대해 적절한 방법이다. 둘째 방법은 통계적 방법을 이용하여 오염 입자의 수송과 확산을 다루는 라그랑지 방법인데 점 오염원으로부터 배출된 대기 오염물의 확산 처리에 흔히 쓰이고 있다 (McNider, 1981).

국내에서 해풍에 의한 대기 오염물의 수송은 여러 조사에서 언급된 바 있다. 이영복 (1984)은 혼합층 모형을 이용하여 경인 지역에서 대기 오염물 확산 예측을 시도하였고, Park and Lee (1995)는 서울 지역의 대기질을 그리고 Lee et al. (1994)는 부산 지역에서의 대기 순환과 대기 오염 확산을 3차원 대기 모형과 오염물 확산 모형을 이용하여 수치 모사한 바 있다. 윤일희 (1990)는 라그랑지 모형을 이용하여 군산 지역에서 배출된 오염물이 수송되는 과정을 보인 바 있다.

경인 지역, 포항, 울산 등 한국의 주요 오염 배출 지역에서 배출된 오염물의 수송 경로를 이해하는 것은 한반도 대기질에 대한 이들 주요 배출원의 영향을 이해하는데 매우 중요한것이다. 그 같은 오염물의 수송 경로를 파악하는데는 라그랑지 방법이 더 적절한 것으로 평가된다. 이 연구에서는 경인 지역, 군산, 여천 공단, 울산 공단 그리고 강릉 등지에서 배출되는 대기 오염물의 확산 경로를 이해하기 위해 중규모 대기 모형을 이용하여 한반도에서의 여름철 대기 순환을 모사하고, 모사된 기상장과 라그랑지 확산 모형을 이용하여 이들 주요 배출원에서 배출된 대기 오염물의 확산 경로를 조사하였다. 종관 바람장의 영향도 아울러 조사하였다. 제2장에서는 중규모 대기 모형과 확산 모형을 소개한 후 제3장에서는 결과와 논의를 그리고 제4장에서 결론을 제시하였다.

2. 모 형

이 연구에서 사용한 모형은 중규모 대기 모형과 입자들의 확산을 다루는 라그랑지 입자 확산 모형으로 구성되어 있다.

2.1 중규모 대기 모형

중규모 대기 모형으로는 콜로라도 주립대의 Regional Atmospheric Modeling System (CSU RAMS) (Tripoli and Cotton, 1982; Tremback, 1990)를 사용하였다. 본 연구에 이용한 모형은 비탄성 조건을 고려한 3차원 정수계 모형을 사용하였으며, 수평과 연직 격자계는 모두 staggered 격자계를 사용하였고 연직 좌표로는 임의로 변화하는 지형의 영향을 고려하기 위해 sigma-z 좌표계를 사용하였다.

2.1.1 지배 방정식

Sigma-z 좌표에서의 운동 방정식은 다음과 같다:

$$\frac{\partial \bar{u}_1}{\partial t} + \bar{\theta} \frac{1}{a} \left[\frac{\partial(ab^b \bar{\Pi})}{\partial x_j^*} \right] = ADV(\bar{u}_1) + TURB(\bar{u}_1) + f \bar{u}_2 \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_2}{\partial t} + \bar{\theta} \frac{1}{a} \left[\frac{\partial(ab^b \bar{\Pi})}{\partial x_j^*} \right] = ADV(\bar{u}_2) + TURB(\bar{u}_2) - f \bar{u}_1 \quad \dots \dots \dots (2)$$

여기서 \bar{u}_1 과 \bar{u}_2 는 각 동서와 남북 방향의 풍속을 나타낸다. $\bar{\theta}$ 는 온위, $a=1-\frac{z_0}{H}$ 로 정의되며, 여기서 z_0 는 지표 고도, H 는 모형 상한 고도, b^b 는 좌표 변환 텐서이며 f 는 코리올리 모수, $\bar{\Pi}$ 는 Exner 함수 ($=c_p(\frac{p}{p_0})^{c_p}$), c_p 는 정압 비열, p 는 압력, p_0 는 기준 압력으로 1000 hPa를 의미하며, R_d 는 건조 기체 상수이다. 그리고, x_j^* 는 sigma-z 좌표계로서 $x_1^*=x$, $x_2^*=y$, $x_3^*=[(z-z_0)/(H-z_0)]$ 로 표현된다. ADV와 TURB는 각각 이류와 난류 확산에 대한 연산자로서 다음과 같이 정의된다:

$$ADV(\bar{A}) = - \frac{1}{\rho_0 a}$$

$$\left[\frac{\partial(ab^b \rho_0 \bar{u}_i \bar{A})}{\partial x_j^*} - \bar{A} \frac{\partial(ab^b \rho_0 \bar{u}_i)}{\partial x_j^*} \right],$$

i and j=1,2,3 (3)

$$TURB(\bar{A}) = - \frac{1}{a} \frac{\partial[ab^b(\overline{A'' u_j''})]}{\partial x_j^*},$$

i and j=1,2,3 (4)

여기서 ρ_0 는 기준 상태의 밀도이고 \bar{u}_3 는 연직 속도를 말한다.

비탄성 연속 방정식 (anelastic continuity equation)은 다음과 같다:

$$\frac{1}{a} \frac{\partial(ab^b \rho_0 \bar{u}_i)}{\partial x_j^*} = 0, \quad i \text{ and } j=1,2,3 \quad \dots \dots \dots (5)$$

열역학 방정식은 다음과 같다:

$$\frac{\partial(\bar{\theta})}{\partial t} = ADV(\bar{\theta}) + TURB(\bar{\theta}) \quad \dots \dots \dots (6)$$

정수 방정식(hydrostatic equation)은 다음과 같다:

$$\frac{\partial \bar{\Pi}}{\partial z^*} = -a \frac{g}{\bar{\theta}_v} \quad \dots \dots \dots (7)$$

여기서 g 는 중력 가속도, $\bar{\theta}_v$ 는 가운데위이다.

2.1.2 모수화 (parameterization)

변수 A 에 대한 난류항 ($\overline{A'' u_j''}$)는 교환 계수를 사용하는 1계 완결 방법 (first-order closure method)을 이용하여 다음과 같이 모수화하였다:

$$K_m = \frac{c^2}{\sqrt{2}} |P^2 | D^2 | (1 - \frac{K_h}{K_m} Ri)^{1/2} \quad \dots \dots \dots (8)$$

$$K_h = 3 K_m \quad \dots \dots \dots (9)$$

여기서 K_m 과 K_h 는 운동량과 열 교환 계수이고, 1은

난류 규모 길이, D는 변형 텐서 (deformation tensor)의 크기, c는 상수, Ri는 Richardson 수이다. 지표에서의 온도와 수분의 예측은 Tremback and Kessler (1985)의 방법을 사용하였다.

2.2 라그랑지 입자 확산 모형

라그랑지 입자 확산 모형은 McNider (1981)의 conditioned particle technique 방법을 이용하였다. 이 방법에서 연속적으로 배출되는 입자들의 위치는 다음 식에 의해 계속적으로 결정된다 :

$$\begin{aligned} x(t+\Delta t) &= x(t) + [\overline{u(t)} + u'(t)] \Delta t \\ y(t+\Delta t) &= y(t) + [\overline{v(t)} + v'(t)] \Delta t \quad \dots\dots (10) \\ z^*(t+\Delta t) &= z^*(t) + [\overline{w^*(t)} + w'(t)] \Delta t \end{aligned}$$

여기서 x, y, z*는 지형 좌표계에서의 입자의 동서, 남북, 연직 방향으로의 위치이고, \overline{u} , \overline{v} , $\overline{w^*}$ 는 각 방향으로의 평균 속도이며, u', v', w'는 아격자 규모의 난류 속도 성분이다. 그리고 Δt는 시간 구간을 의미한다. 평균 속도 성분은 중규모 대기 모형에 의해 공급되며 아격자 규모의 난류 속도 성분은 Hanna (1979)와 Smith (1968)의 모수화 방법을 이용하여 다음과 같이 정의하였다 :

$$\begin{aligned} u'(t) &= u'(t-\Delta t)R_u(t) + u''(t-\Delta t) \\ v'(t) &= v'(t-\Delta t)R_v(t) + v''(t-\Delta t) \quad \dots\dots (11) \\ w'(t) &= w'(t-\Delta t)R_w(t) + w''(t-\Delta t) \end{aligned}$$

여기서 R_u , R_v , R_w 는 각 속도 성분에 대한 라그랑지 자기 상관 함수 (Lagrangian autocorrelation)들인데, Δt의 함수로 다음과 같이 모수화할 수 있다 :

$$R_u(t) = \exp(-\Delta t/T_{L_u})$$

$$R_v(t) = \exp(-\Delta t/T_{L_v}) \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$R_w(t) = \exp(-\Delta t/T_{L_w})$$

여기서 T_{L_u} , T_{L_v} , T_{L_w} 는 각 속도 성분별 라그랑지 시간 규모 (Lagrangian time scale)이다 (Pasquill, 1974). 그리고 u'', v'', w''는 각 속도 성분별 무작위 섭동 성분 (random fluctuating component)으로써 Wilson et al. (1981a, 1981b)에 의해 다음과 같이 쓸 수 있다 :

$$\begin{aligned} u'' &= (1-R_u^2)^{\frac{1}{2}} \sigma_u' r_n \\ v'' &= (1-R_v^2)^{\frac{1}{2}} \sigma_v' r_n \quad \dots\dots\dots (13) \\ w'' &= (1-R_w^2)^{\frac{1}{2}} \sigma_w' r_n \end{aligned}$$

여기서 σ_u' , σ_v' , σ_w' 는 각 방향 아격자 규모 속도 성분의 표준 편차이고, r_n 은 평균이 0이고 분산이 1로 정규 분포화한 무작위 수들의 집합에서 추출한 값이다.

3. 수치 실험 결과와 논의

3.1 수치 실험

앞에 제시된 모형을 이용하여 남한 지역의 해륙풍 순환에 의한 오염물 입자의 수송을 수치 모사하였다. 모형 영역은 남한 지역과 그 주변 해역을 포함하기 위해 동서로 42개, 남북 방향으로 37개의 격자 영역을 구성하였다 (Fig. 2). 이 때 수평 격자 간격은 두 방향 모두 20 km로 하였다. 그리고 연직으로는 16개의 격자를 사용하였으며, 모형의 상한 고도는 약 5 km로 하였다. 수치 적분은 08 LST에서 다음날 08 LST까지 24시간을 수행하였으며 적분 시간 간격은 60초로 하였다. 기상 모형의 적분시 초기에 수평적으로 균일한 기상장을 고려하였다.

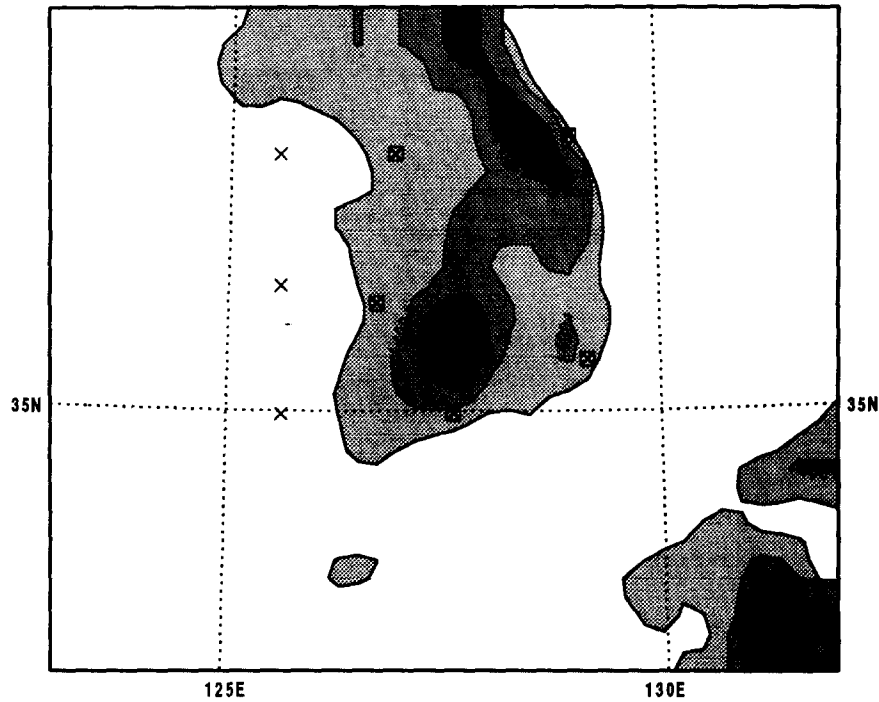


Fig. 2. Smoothed model topography and the locations of emission sources which are marked by \boxtimes (Exp 1, Exp 2, Exp4) and \times (Exp3).

지표에서의 기압과 온위는 1000 hPa, 295 K로 놓았고, 5 K/km의 기온 감율을 가정 하였다.

실험은 초기 바람장의 세기와 오염물 배출원의 위치를 달리한 네개의 실험 (EXP 1, EXP 2, EXP 3 그리고 EXP 4)을 수행하였다. EXP 1, EXP 2, 그리고 EXP 4는 남한 지역내 다섯 곳의 주요 해안 공단에서 $z^*=50$ m인 고도에서 오염물 입자 배출을 수행한 실험들이다. 이 실험들에서 중관 바람장의 차이에 의한 오염물 확산의 영향을 보기 위해 EXP 1에서는 초기 바람장을 0으로 하였고, EXP 2에서는 3 m/s의 서풍을 사용하였다. EXP 3은 황해상 3개 지점의 $z^*=150$ m와 750 m 고도에서 입자 배출을 시킨 실험이다. 이 실험은 황해상을 통과해 남한 지역으로 유입되는 장거리 수송에 의한 오염 입자들의 확산을 보기 위한 실험이다. 이 경우 초기 바람은 5 m/s의 서풍을 사용하였다. EXP 4 실험에서는 배출원의 위치는 EXP 1과 같이 놓고 초기 바람장으로는 5 m/s의 남풍을 사용하였다. 윤일희 (1991)에 의하면 1983년에서 1988년까지 5년 동안

의 기상청 산하 46개 지상 관측소에서의 바람 자료를 분석한 결과 우리나라 여름철에는 서풍계열이 탁월하였으나, 다른 계절과는 다르게 남풍계열이 상대적으로 높은 빈도를 보여 줌을 밝혔다. 따라서 남한 지역의 여름철의 경우 남풍계열의 중관풍이 불 때 해륙풍 구조와 오염 입자들의 확산에 대한 연구도 중요한 의미를 가지게 된다. 그리고 각 실험들에서 오염 입자의 배출율은 분당 1개의 입자가 방출되는 것으로 하였고, 배출원은 다섯군데, 각 배출원마다 1000개의 입자가 방출된다고 가정하였다. 실제 상황에서는 각 배출원마다 배출 규모가 다르나 본 연구에서는 오염 현상의 정량적 분석보다는 오염물의 이동 경로 분석에 초점을 맞추기 위하여 배출 규모에 대해서는 따로 구분하지 않았다. 그리고 오염물은 화학적으로 불활성이며 자유 낙하를 하지 않는다고 가정하였다.

3.2 모사된 기상장

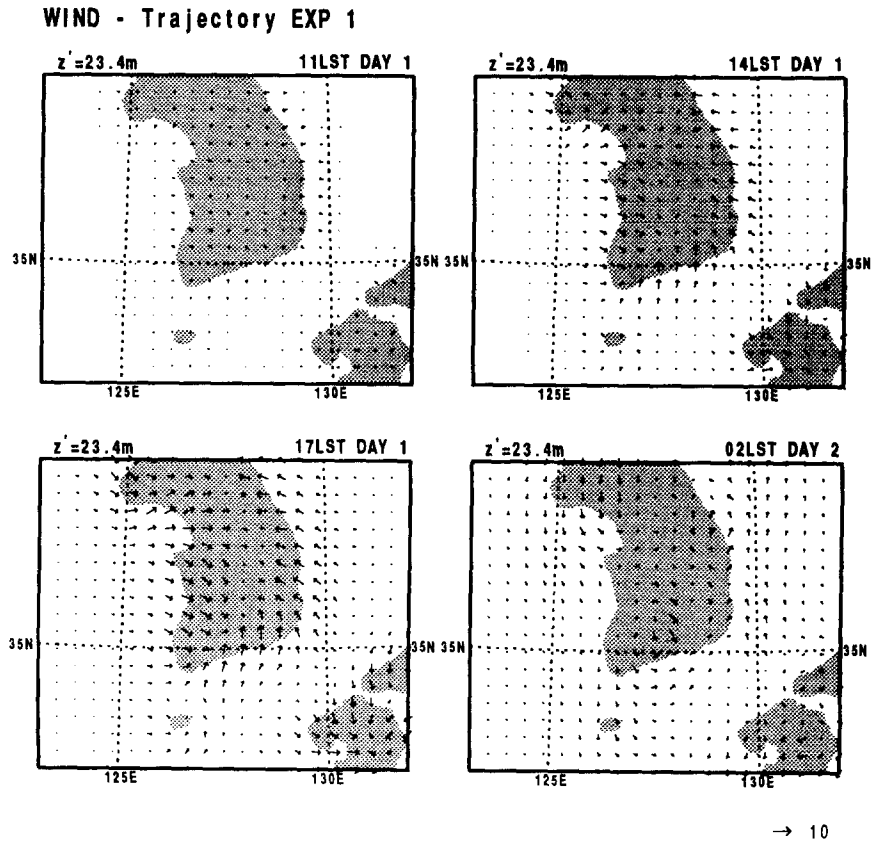


Fig. 3. Simulated wind vectors for case with zero synoptic scale winds.

종관 규모의 바람이 없다고 가정했을 때 중규모 대기 모형에 의해 수치 모사된 바람장의 수평 분포를 Fig. 3에 제시하였다. 11 LST에는 비교적 약한 해풍이 각 해안에서 발달하고 있으며, 14 LST에는 강한 해풍이 전 해안에서 나타나고 있다. 소백산맥의 남쪽 부근에서 바람의 수렴이 나타나고 있으며 그 외의 내륙 지역에서는 아직 바람이 약하다. 제주도에서도 해풍이 나타나고 있다. 17 LST에는 해풍이 내륙까지 진입하였고 중부 이남 지역에서는 소백산맥의 주변으로 구풍 순환의 모습을 보이고 있다. 중부 지방에서는 양쪽 해안에서 진입한 바람이 중간 지역에서 수렴하고 있다. 이 결과를 Fig. 1의 관측 바람장과 비교한 결과 낮 시간동안에 모형에서 예측된 바람장은 관측장과 유사함을 알 수 있었다. 이러한 지상풍의 구조는 야간이 되면서 완

전히 달라지는데 전체적으로는 낮시간에 비해 바람의 강도가 약하다. 내륙 지역 특히 서해안 지역의 바람은 거의 무풍에 가까워 육풍의 발달이 뚜렷하지 않다. 이는 지면 냉각으로 발생하는 온도 구배가 지면 가열로 인한 것보다 작기 때문에 이 지역들에서 육풍의 강도가 해풍에 비해 상당히 약하게 나타난다고 보아진다. 야간의 경우 산악이 있는 지역의 바람이 산풍의 강화로 인하여 관측에 비해 비교적 강하게 나타나고 있다.

서울을 포함하는 동서-연직 단면에서의 바람의 분포를 Fig. 4에 제시하였다. 11 LST경 양쪽 해안에서 약한 해풍이 발달하기 시작하여 14 LST에는 잘 발달한 해풍과 곡풍이 나타나고 있으며, 산 정상 동쪽에서는 곡풍과 해풍이 하나의 순환을 형성하는 모습을 보이고 있다. 17 LST에는 30~70

남한 지역에서 여름철 맑은 날의 대기 오염물 확산에 대한 수치적 연구

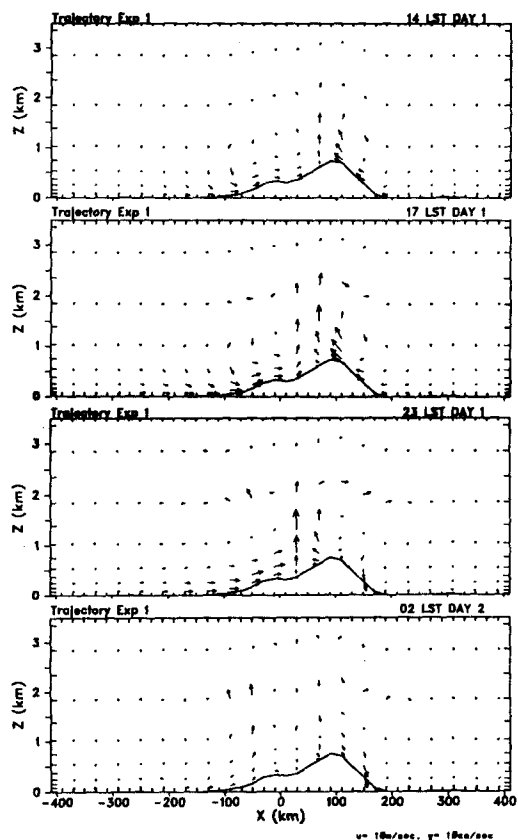


Fig. 4. Simulated wind vectors in the x-z cross section which contains Seoul.

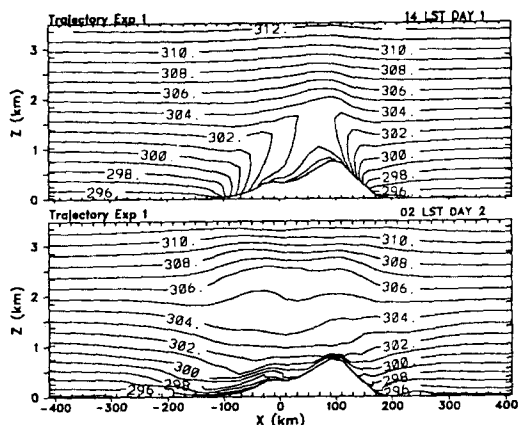


Fig. 5. Same as Fig. 4, except for potential temperature.

km 지점을 중심으로 두개의 순환이 공존하고 있다. 야간이 되면서 이 순환들은 소멸하면서 동해안에

WIND - Trajectory EXP 2

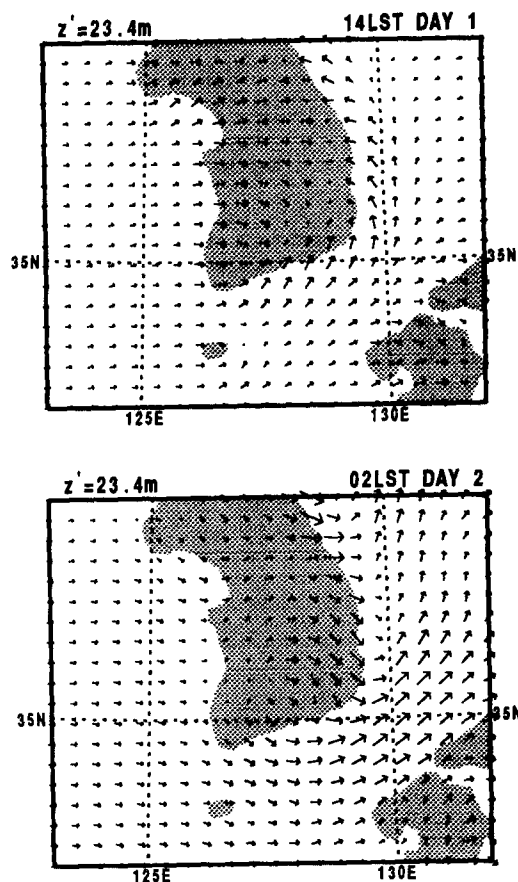


Fig. 6. Same as Fig. 3, except for EXP 2.

서는 바람이 약해지다가 자정 전 부터 산풍과 육풍이 동해안에서 나타난다.

온위의 동서-연직 단면 분포에 따르면 (Fig. 5) 주간인 경우 혼합층의 고도는 내륙으로 가면서 높아지는데, 내륙에서의 두께는 약 1.3 km까지 나타난다. 야간이 되면서 지표 부근의 대기는 안정화되어지고 지표 부근에 역전층이 형성 되어 있다.

종관 규모의 서풍이 3m/s로 분다고 가정했을 때의 바람장 수치 모사 결과를 Fig. 6에 보였다. 14 LST의 바람에 따르면 서해안으로 부터의 바람이 내륙 깊숙이 까지 나타나고 있고 동해안에서는 해풍이 발달하고 있으나 내륙 진입이 종관 바람이

없다고 가정한 EXP 1에서 보다 약하다. 남해안에서도 이와 유사한 결과를 얻었다. EXP 1의 경우 중부 지방에서는 양쪽 해안에서 진입한 바람이 중앙에서 수렴하였으나 이 경우에는 수렴 구역이 동해안을 따라 거의 인접하여 나타나고 있으며, 중부 이남지역에서는 EXP1에 비해 14 LST에서도 구풍 순환의 중심이 뚜렷하고 그 위치도 동남쪽으로 이동한 모습을 보여 주고 있다. 야간 (02 LST DAY 2)의 바람도 EXP 1과 차이가 크다. 서해안 지역을 제외한 육지 전체에서 서풍 계열의 바람이 나타나고 있으며 동해에서의 바람은 비교적 강한 남풍 계열의 바람이 불고 있다. 중부 지방의 경우 태백산맥을 경계로 그 동쪽에 더 강한 서풍 계열의 바람이 불고 있는데 이것은 종관 규모 서풍과 이에 더불어 야간에 유도된 육풍, 이에 중첩된 산악의 영향으로 보인다.

서울을 포함한 동서-연직 단면에서의 바람 분포도 EXP 1과 적지 않은 차이를 보이고 있다. 14 LST DAY 1의 결과를 보면 양쪽으로 부터 발달한 순환이 만나는 것은 EXP 1과 마찬가지로 이 둘이 만나 상승을 이루는 곳은 EXP 1에 비해 동쪽으로 더 이동하여 산 정상 부근에서 나타나고 있다 (Fig. 7). EXP 1에서 보여졌던 산 정상 서쪽의 순환의 모습은 종관 규모 서풍의 영향으로 return flow의 약화가 초래되어 뚜렷하지 않고, 이와 반대로 동쪽의 순환은 종관 규모 서풍의 영향으로 return flow가 강화되므로써 좀 더 뚜렷한 모습을 보이고 있다. 그리고 산 정상의 서쪽에서 inflow의 강도와 깊이가 EXP 2에서 더 강하고 두꺼운 것으로 나타나고 있다. 02 LST DAY 2를 살펴 보면 EXP 1에 비해 산 정상 동쪽의 하강운동이 훨씬 뚜렷한데, 이는 산악파에 의한 바람의 섭동으로 인해 산 정상 동쪽 (풍하측)에서 강한 바람과 하강 운동이 있는 것으로 해석된다. 전체적으로 살펴보면 하층에서 비교적 강한 서풍이 서해안으로 부터 동해까지 이어지고 있다.

EXP 2에서의 온위의 동서-연직 단면 (Fig. 8)을 보면 14 LST DAY 1의 경우는 EXP 1과 거의 유사하나, 야간의 경우 (02 LST DAY 2)는 산의 동쪽에

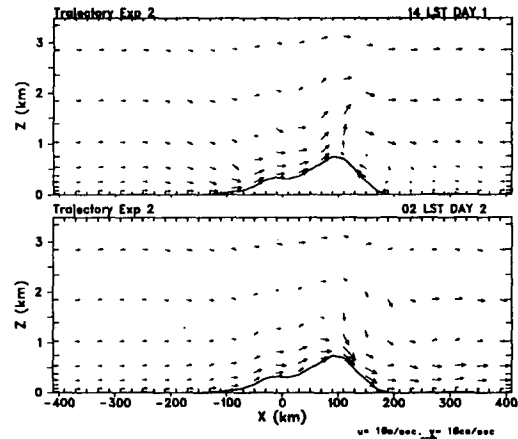


Fig. 7. Same as Fig. 4, except for EXP 2.

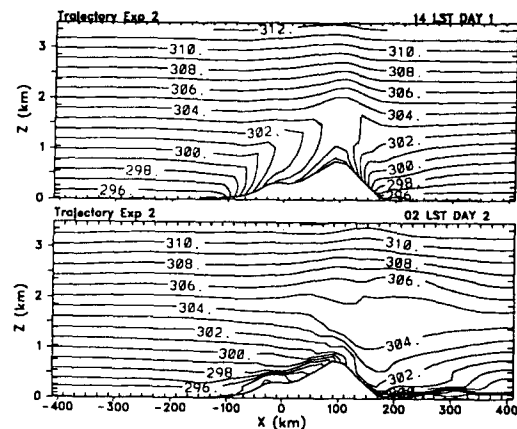


Fig. 8. Same as Fig. 5, except for EXP 2.

서 큰 차이를 보인다. 산 정상 동쪽에서는 상대적으로 불안정한 기층이 1~2 km 고도에서 나타나고 있으며 하층에서는 산 서쪽에 비해 높은 온도가 나타나고 있다. 이들은 산악파의 영향으로 보이며 산 동쪽의 높은 온도는 산악파에 관련하여 산 정상 위의 공기가 하강하였기 때문으로 보인다.

5 m/s의 종관 규모 서풍이 분다고 가정 했을 때 (EXP 3)의 결과를 Fig. 9에 제시하였다. 14 LST DAY 1의 바람을 보면 동해안을 제외한 전 영역에서 서풍이 불고 있으며 동해안에서 해풍이 발달하고 있으나 EXP 2에 비해 내륙 진입이 더욱 제한적이다. 해안선에 인접한 동해상에서는 남풍 계열의 바람이 불고 있다. 02 LST DAY 2에는 EXP 2

WIND - Trajectory EXP 3

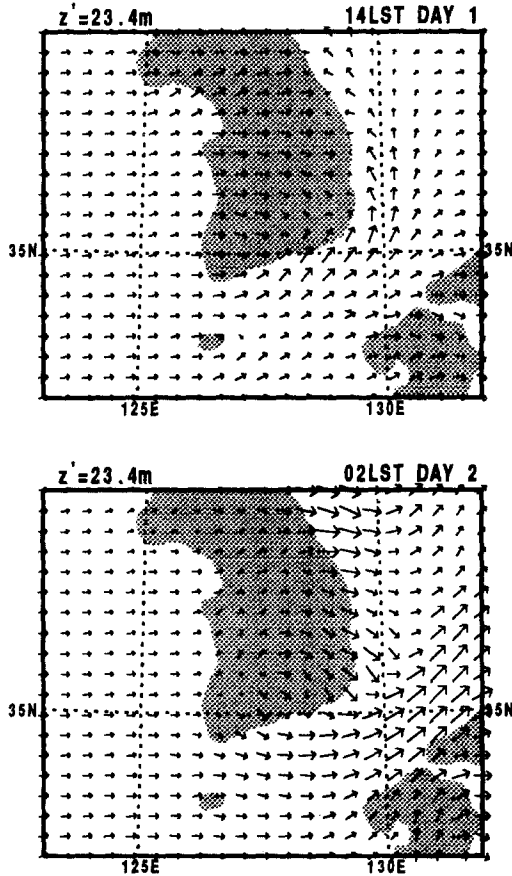


Fig. 9. Same as Fig. 3, except for EXP 3

에서와 같이 서해안 지역을 제외한 모형 전 영역에서 서풍 계열의 바람이 불고 있으나 동해상에서는 비교적 강한 서풍 또는 남서풍 계열의 바람이 주류를 이루고 있다.

5m/s의 중관 규모 남풍이 불 때 (EXP 4)의 지표 부근의 수평 바람장을 Fig. 10에 제시하였다. 14 LST DAY 1에서 보면 남해안 지역에 해풍이 발달하여 내륙 깊숙이 진입해 있음을 알 수 있고, 서해안 지역에서는 남서풍 계열의 해풍이 내륙쪽으로 진입하고 있으나 동해안에서는 남동풍 계열의 해풍이 해안선을 따라서 제한적으로 나타나고 있다. EXP 2와 EXP 3의 경우 대한해협 사이에 남서풍

WIND - Trajectory EXP 4

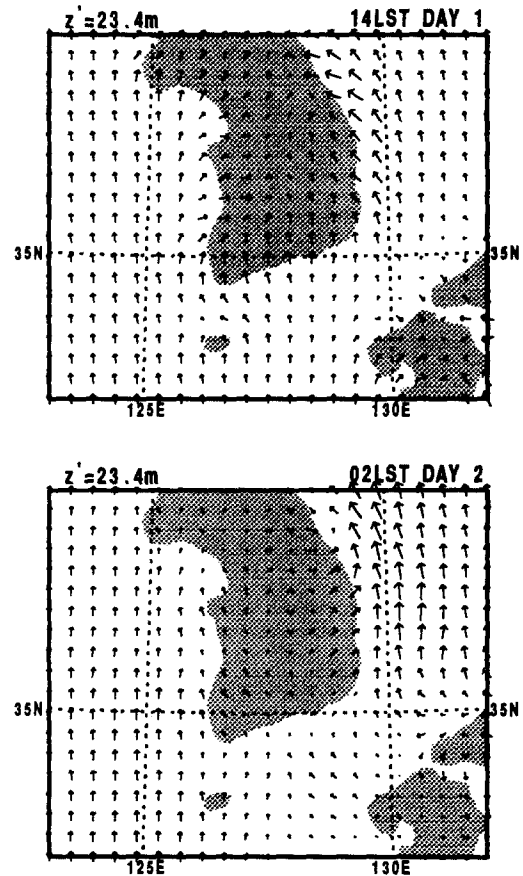


Fig. 10. Same as Fig. 3, except for EXP 4

계열의 바람이 비교적 강하게 나타나고 있으나 EXP 4에서는 나타나지 않고 있으며 동해에서도 남풍내지 남동풍이 불고 있다. 풍향과 풍속에 있어서는 차이가 있으나 중관 규모 남풍이 불 때 주간경의 경우 남한 내륙의 지표 부근 바람 구조는 중관풍이 없다고 가정한 EXP 1의 결과와 유사한 점을 보이고 있다. 야간의 경우 (02 LST DAY 2)는 다른 실험들과의 유사성을 찾지 못하였다. 주요 특징을 보면 주간에 비해 남한 내륙의 바람이 전체적으로 약해져 있으며 서해안을 따라서는 남풍내지 남동풍이 불고 있고 중부 지방 동해안에서는 서풍이 비교적 강하게 불고 있다. 경상도 지역에는 EXP 2

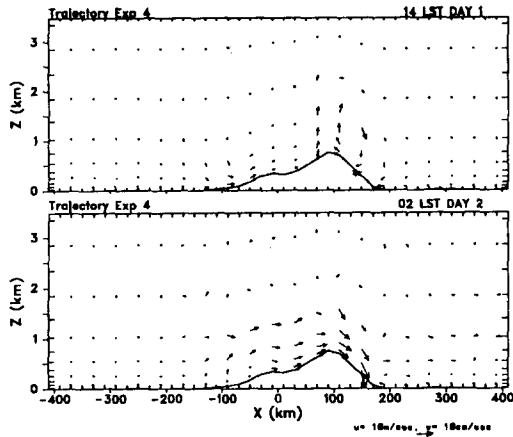


Fig. 11. Same as Fig. 4, except for EXP 4.

와 EXP 3과는 달리 남서풍 계열의 바람이 불고 있다. 동해 지역에는 남풍내지 남동풍 계열의 바람이 발달한 모습을 보여 주고 있다. 그리고 주간 소백산맥 주위로 바람의 수렴이 약하나 존재하

고 있고, 야간이 되면서는 소백산맥 옆으로 흘러 나가는 바람 구조가 발생하고 있다. 동서-연직 단면에서의 바람을 살펴보면 (Fig. 11) 주간의 경우 (14 LST DAY 1) 종관 바람이 없다고 가정한 EXP 1에서의 결과와 유사하나 02 LST DAY 2의 바람은 EXP 1에서의 그것과 달리 서풍 계열 바람이 육지 전체에서 불고 있으며 산 동쪽에서 특히 강하게 불고 있다.

3.3 입자 확산의 수치 모사

종관 규모 바람이 없다고 가정했을 때의 대기 오염 입자 확산의 수치 모사 결과를 Fig. 12에 보였다. 14 LST에 각 배출원에서 나온 오염물들은 해풍을 타고 약 30~40 km 내륙으로 이동한 모습을 보여 주고 있으며, 20 LST DAY 1의 그림에 따르면 울산, 여천, 군산 등지에서 배출된 오염 입자는 최

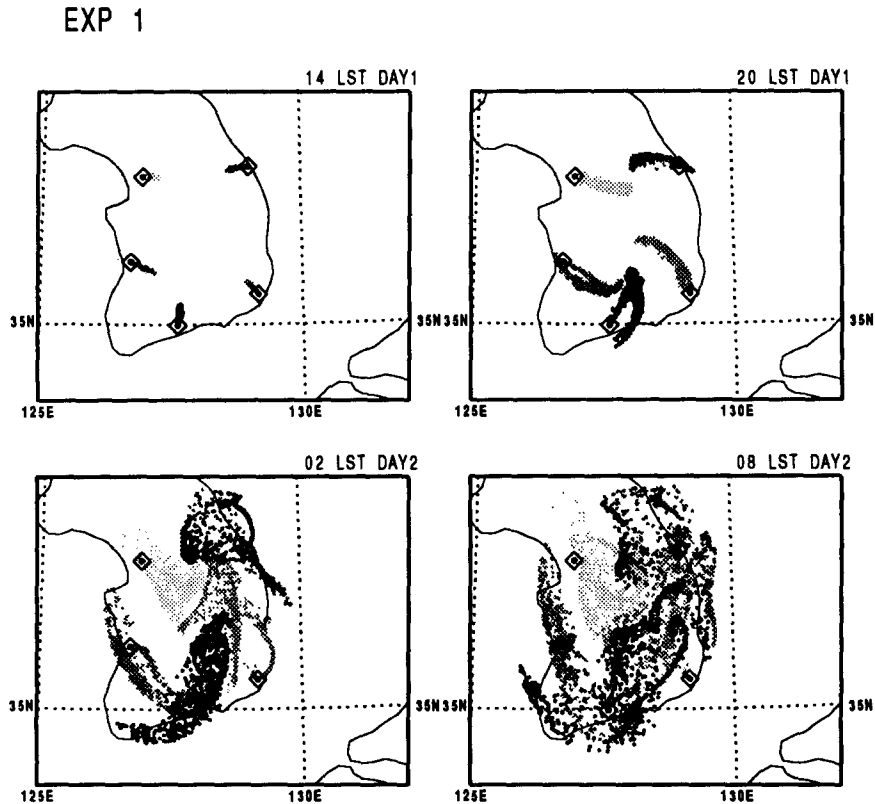


Fig. 12. Horizontal view of dispersed particles' location for EXP 1.

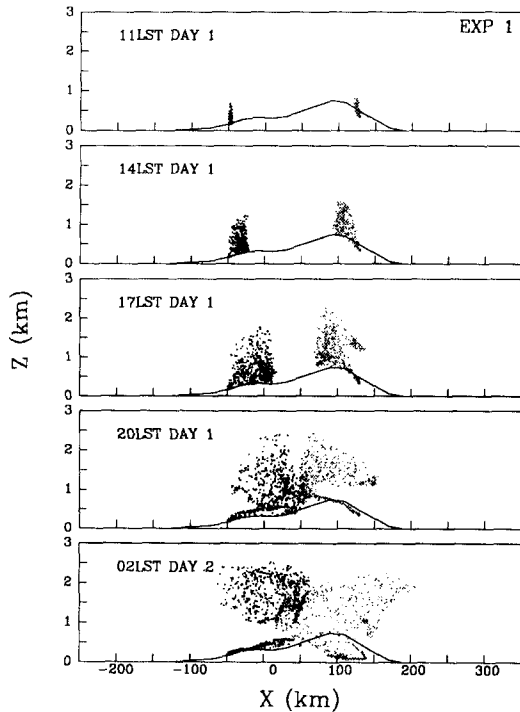


Fig. 13. Dispersed particles in x-z cross section for EXP 1.

대 약 130 km 내륙까지 진입하는 것으로 나타났으며, 경인 지역의 것은 100 km 그리고 동해안의 것은 약 80 km 까지 내륙으로 진입하였다. 이 오염 입자들중 초기에 방출된 입자들은 이렇게 내륙으로 진입하면서 상승 기류를 타고 상승하여 상층 고도에서 다시 해안 쪽으로 되돌아 가는 경로를 보이고 있다. 한편 나중에 배출된 오염 입자들은 비교적 안정한 대기 조건하에서 방출되기 때문에 약한 확산을 보인다. 02 LST DAY 2의 그림에 따르면 오염 입자들의 분포는 복잡한 모습을 보이고 있으나 대부분 육지에 머무르고 있다. 동해안에서 배출된 입자들은 상대적으로 강한 육풍에 의해 동해안으로 밀려 나가 있는 모습을 보이고 있다.

해풍에 의한 오염물의 수송과 확산을 보기 위해 서울을 포함하는 동서-연직 단면에서의 오염 입자 분포를 Fig. 13에 보였다. 동해안에 위치한 오염

배출원은 이 단면에 포함되지 않으며, 이 단면 보다 20 km 북쪽에 위치하고 있다. 이 그림에 따르면 초기에는 난류 확산에 의해 연직 혼합된 모습을 보이며 차츰 해풍에 의해 내륙으로 수송되는 모습을 보이고 있다. 내륙으로 가면서 혼합층의 깊이가 증가하여 입자 농도가 차츰 낮아진다. 17 LST DAY 1에는 서울에서 배출된 입자는 약 70 km 정도 내륙으로 수송되었고, 동해안에서 배출된 입자는 산 정상상을 지나 내륙으로 진입하였다. 상부에서는 해풍 순환의 위 부분의 흐름에 의해 동해안 쪽으로 오염물이 수송되는 모습을 보이고 있다. 양쪽 해안에서 배출된 오염 입자들은 20 LST에 내륙 중심까지 진입하고 있으며, 초기에 배출된 오염 입자들은 약 2.5 km 고도까지 올라가 있다. 이 연직 단면에서는 두 배출원에서 나온 오염 입자들이 만나고 있는 것처럼 제시되어 있으나 각 오염 입자들은 앞의 Fig. 12에서 본바와 같이 각기 다른 방향으로 이동하고 있어 만나고 있는 것은 아니다. 동해안에서 야간에 배출된 입자들은 산풍, 육풍을 타고 해안으로 밀려 내려가고 있는 모습을 보여 주고 있다. 그러나 양쪽 오염 입자들의 상당 부분은 내륙에 머무르고 있는 것으로 나타났다.

3 m/s의 중관 규모 서풍이 부는 것으로 가정된 EXP 2에서는 서해안에서 배출된 오염물은 내륙으로 더 빨리 더 깊이 진입하며, 동해안에서 배출된 오염물은 내륙으로의 진입이 미약함을 보이고 있다 (Fig. 14). 20 LST DAY 1에 서울 지역에서 초기에 배출된 입자들은 내륙으로 170 km 정도 진입했으며, 군산 지역의 입자들도 비슷한 내륙 진입을 보였다. 반면 강릉 지역의 오염물은 내륙으로의 진입이 미약하고 상승한 입자들이 동해 쪽으로 이동하는 양상을 보이고 있다. 울산에서 배출된 입자들은 북쪽으로 이동하다 상부의 흐름을 타고 다시 남동쪽으로 이동하는 모습을 보이고 있다. 여천에서 초기에 방출된 입자들은 북동쪽으로 진입하다 해풍 순환의 상부 흐름을 타고 남진하는 모습을 보이고 있다. 02 LST DAY 2에 오염 입자들은 대체로 남 동해안을 따라 몰려 있는 모습을 보이며, 여천에서 배출된 입자들은 남동 해안 지역 상공에

EXP 2

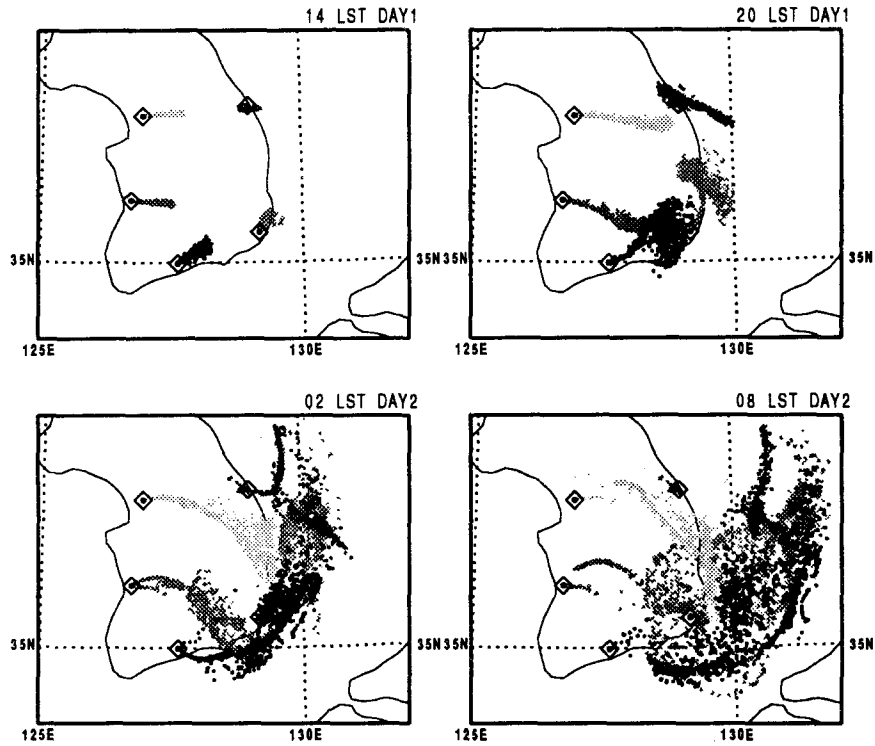


Fig. 14. Same as Fig. 12, except for EXP 2.

그리고 서울과 군산 지역에서 초기에 배출된 입자들은 각각 동해안과 남동해안까지 이동하였다. 입자들은 시간이 지남에 따라 약한 서풍을 타고 동해로 더 이동한 모습을 보이고 있다. 그러나 대한해협과 동해상으로 이동한 오염 입자들은 대한해협 사이의 남서풍과 동해상의 남풍 계열 바람에 의해 일본으로의 이동은 활발하지 않다.

동서-연직 단면에서의 입자 확산 모습을 Fig. 15에 보였다. 입자의 수평 분포에서 이미 언급된 바와 같이 서울 지역에서 배출된 입자들은 EXP 1에서 보다는 더 빠르게 동진하는 모습을 보이며, 강릉 지역에서 배출된 입자들은 연직으로 확산된 후 동해쪽으로 이동해 가는 모습을 잘 볼 수 있다. 이 실험에서는 서울에서 초기에 배출된 오염물이 20 LST DAY 1에 산 정상까지 이동하여 강릉에서 배출된 오염물과 만나게 되는 것으로 나타났다. 서울

에서 초기에 배출된 오염물은 연직으로만 올라갈 뿐 EXP 1에서와 같이 해풍의 상부 흐름에 의해 서해 쪽으로 되돌아가는 움직임은 눈에 띄지 않는다. 야간이 되면서 전체적으로 약한 서풍이 불고 있어 오염물들도 계속 동진하고 있으며, 하층에서는 더 빠른 속도로 동진하는 것으로 나타났다. 강릉에서 배출된 것은 동해로 밀려 나가 있으며 중간에 강릉 지역에서 배출된 오염물들 중 연직 확산으로 인해 경계층 상부로 이동한 것들은 야간에 그 지역에서 배출된 오염물들과 분리되어 동해상으로 더 멀리 이동한 모습을 보여 주고 있다. 이 결과에 따르면 종관 규모의 약한 서풍이 존재할 때 서해안에서 배출된 오염물들은 하루 이내에 동해안에 이를 수 있을 것으로 보인다.

대기 오염물의 장거리 수송을 알아보기 위해 종관 규모 서풍이 5 m/s의 속도로 분다고 가정할

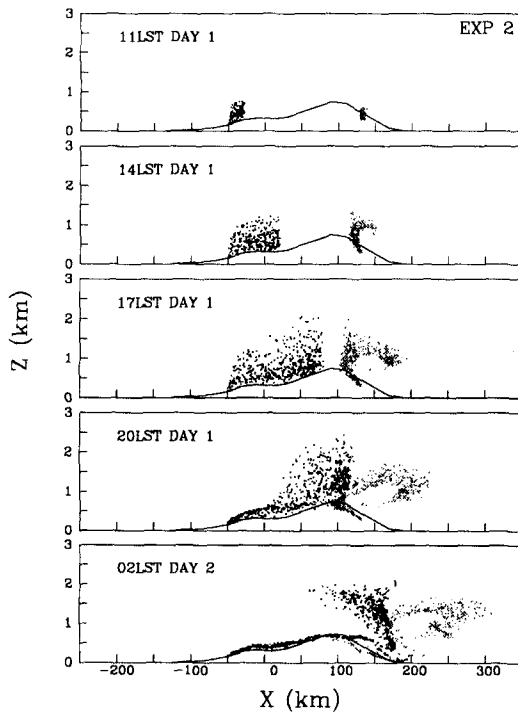


Fig. 15. Same as Fig. 13, except for EXP 2.

EXP 3에서는 오염물 배출원을 서해상의 두개 고도 (150 m와 750 m)에 놓고 입자 확산을 수치 모사하였다. 단 남쪽의 배출원은 750 m 고도에만 배출을 주었다. 이 경우 해상의 대기가 안정하기 때문에 입자의 확산은 매우 미약하여 거의 한개의 선으로 표시될 정도의 입자 분포를 보여 주고 있다 (Fig. 16). 20 LST DAY 1에 이 입자들은 동해안 부근까지 도달하였고 낮에 육지를 통과한 입자들만이 확산된 모습을 보여 주고 있다. 초기에 배출된 입자들은 약 하루만에 일본의 해안 지역에 도달하는 것으로 나타났다. 이 그림에 따르면 입자의 이동 경로가 입자의 고도에 따라 상당히 달라 질 수도 있는 것으로 보인다. 동서-연직 단면에서의 확산 모습에 따르면 (Fig. 17) 150 m 고도에서 배출된 오염 입자들은 해안에 접근하면서 활발한 연직 확산을 보이며 동쪽으로 이동하고 있으나 750 m 고도에서 방출된 오염 입자들은 혼합층 고도가 낮은 해안 부근 지역에서는 혼합층 위의 안정한 대기

조건에서 바람을 타고 동진하다가, 혼합층 고도가 비교적 높은 산 정상 부근에 가면서 혼합층으로 유입되어 연직 확산되는 모습을 보여 주고 있다. 이 그림에 따르면 두개 고도에서 배출된 오염물들은 비슷한 속도로 동진하며, 초기에 배출된 오염물의 14~20 LST 기간 중 이동 속도는 약 8 m/s 정도로 나타나고 있어 종관 규모 풍속 보다 빠른 속도로 이동하고 있음을 알 수 있다. 750 m 고도에서 배출된 입자들 중 야간에 육지를 통과해 오는 입자들은 거의 확산되지 않고 동해에 도달하는 것으로 나타났다.

5 m/s의 종관 규모 남풍이 부는 것으로 가정한 EXP 4의 결과를 Fig. 18에 제시하였다. 서해안에서 배출된 오염물들은 초기에는 종관 규모 남풍의 영향으로 북진하는 경향을 보이다, 오후에는 해풍의 내륙 진입과 함께 서진하였다. 이때 해풍 전선에서의 상승 기류를 타고 비교적 높은 고도까지 이동한 오염물들은 종관풍의 영향으로 북진을 계속하여 남북으로 넓게 확산되어 있는 모습을 보인다. 야간에도 이러한 경향은 계속 유지되어 내륙 전체에 오염물들이 퍼져있다. 남해안에서 배출된 오염물들은 초기에 타 지역에 비해 내륙으로 더 빨리 더 깊이 진입하고 있다. 여천에서 배출된 오염물은 북동쪽, 울산에서 배출된 것들은 북쪽으로 계속 움직여 가다가 야간에 내륙에 존재하는 서풍의 영향으로 울산 지역 배출 오염물들은 20~02 LST 사이에, 여천에서 배출된 것들은 02~08 LST 사이에 동해상으로 밀려나가 이후 동해 남풍 계열의 바람을 따라 북쪽으로 이동하여 중부 지방 동해안에 집중되어 있다. 강릉에서 배출된 것들은 주간에 해풍의 영향으로 내륙으로 진입하고 있으며 해풍 전선에서 높은 고도로 이동한 것들은 return flow에 의해 동해쪽으로 밀려 나오고 있다. 야간이 되면서 내륙으로 진입했던 오염물들 대부분과 나중에 배출된 오염물들이 산풍과 육풍에 의해 동해안으로 밀려나와 있으나 동해상의 남풍으로 인해 해상으로 진출하지 못하고 강릉 부근의 동해안을 따라 집중되어 있다.

EXP 4 결과들 중 동서-연직 단면에서의 입자

EXP 3

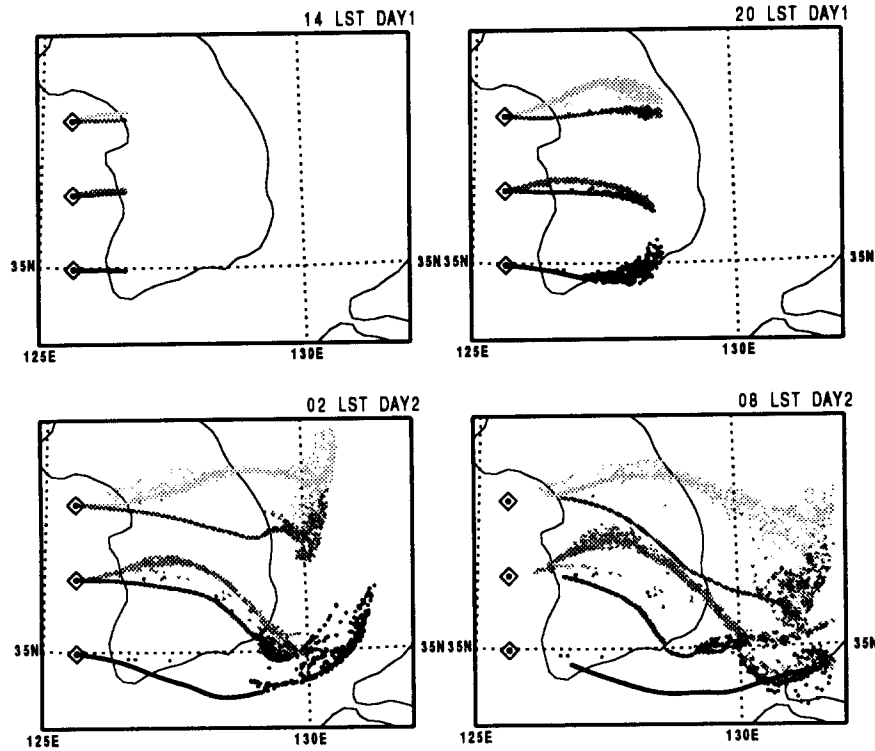


Fig. 16. Same as Fig. 12, except for EXP 3. The particles denoted by lighter dots for the northern and middle sources released at 150-m height and the rest of the particles are released at 750-m height.

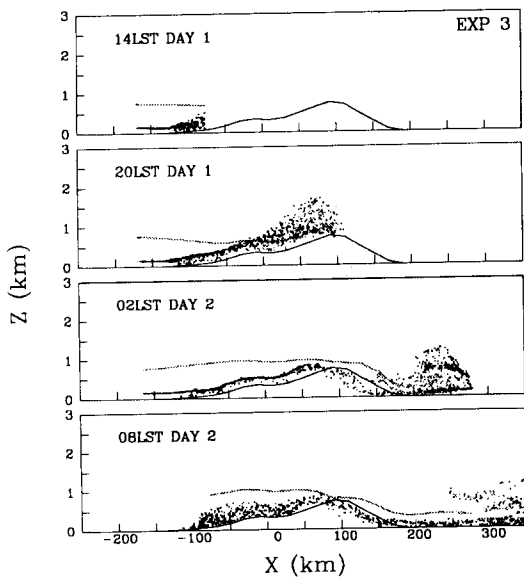


Fig. 17. Same as Fig. 13, except for EXP 3.

확산 모습을 Fig. 19에 보였다. 첫날동안에는 오염물의 확산 분포는 EXP 1과 유사한 모습을 보이고 있다. 이 경우도 20 LST부터 서해안과 동해안에서 배출된 입자들이 만나는 것처럼 보이나 수평 분포에서 보듯이 실제로 만나는 것은 02 LST DAY 2 근방이다. 02 LST DAY 2 이후 부터는 EXP 1과는 완전히 다른 모습의 입자 이동을 보이고 있다. Fig. 11에서 보듯이 종관 규모 남풍이 불 때 야간의 경우 중부 지방에 서풍 구조가 발달하게 되어 이에 따라 높은 고도에 있는 오염물을 제외하고는 동해안 쪽으로 빠르게 이동하고 있다.

4. 결 론

많은 여름날 한국의 해안 지역에 위치한 주요 배출원들에서 방출된 대기 오염물의 이동 및 확

EXP 4

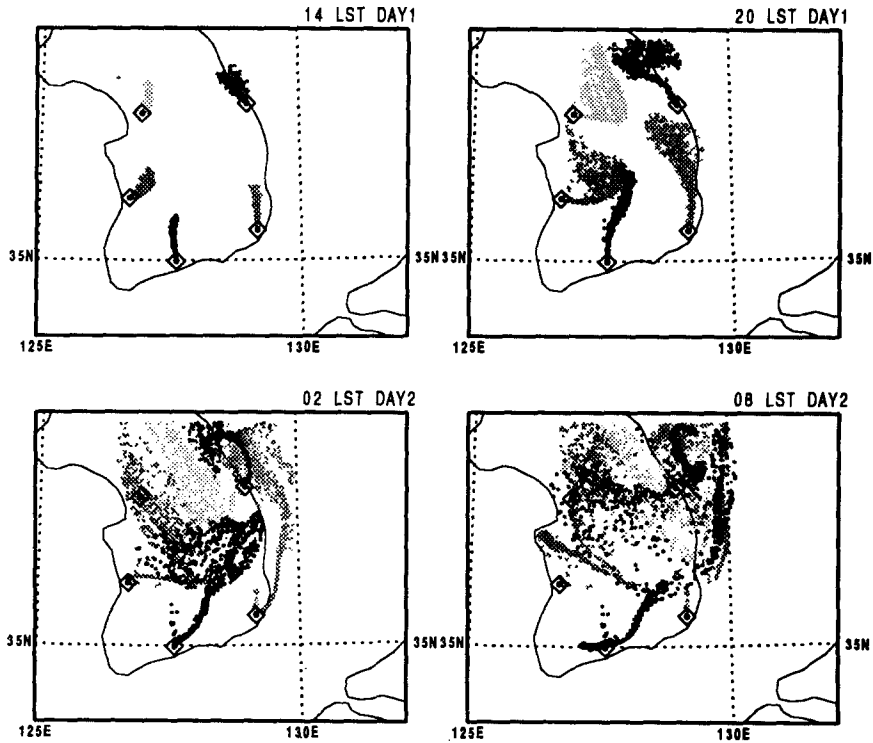


Fig. 18. Same as Fig. 12, except for EXP 4.

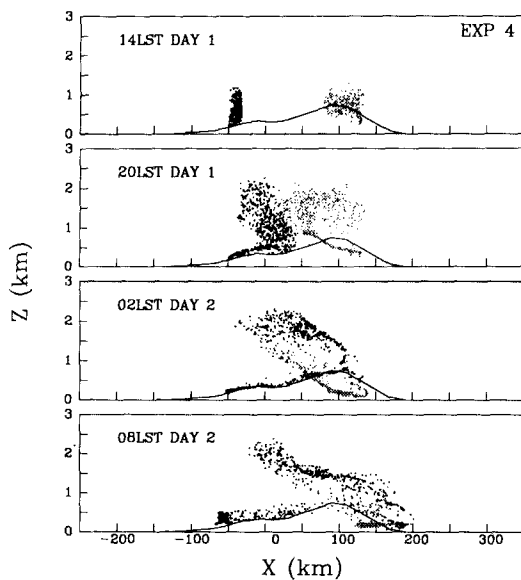


Fig. 19. Same as Fig. 13, except for EXP 4.

산을 이해하기 위하여 conditioned particle technique을 이용한 라그랑지 확산 모형을 개발한 후 중 규모 대기 모형에 연결하였다. 이 모형을 이용하여 종관 규모 바람이 없을 때와 서풍이 불 때, 그리고 남풍이 불 때의 조건하에서 한반도의 여름철 맑은 날의 대기 순환을 수치 모사하였고, 입자의 확산이 함께 모사되었다.

종관 규모의 바람이 없다고 가정했을 때 한반도에서는 전 해안에서 해풍이 발달하고 오후가 되면서 잘 발달한 해풍이 내륙으로 진입하여 저녁에는 내륙 중심에서 수렴이 나타난다. 이때 각 배출원에서 배출된 오염물은 난류 확산에 의해 연직으로 혼합된 상태에서 해풍을 타고 내륙으로 진입한 후 해풍 전선에서의 상승 기류 혹은 산악에 의해 강화된 상승 기류를 타고 상승한 후 해풍 상부 순환에 의해 해안쪽으로 되돌아 가려는 이동 경로를 보이는 것으로 나타났다. 수치 모사된 바람장이 저녁이 되면서 내륙 중앙에서 수렴을 보이고 있는

것에 의해 예상되는 바와 같이 종관 바람이 없을 때 각 해안의 배출원에서 방출된 오염 입자들은 수치 적분 기간 동안 계속 내륙에 머무는 것으로 나타났다.

종관 규모의 바람이 서풍일 때 주간에는 대체적으로 내륙에서의 서풍이 강화되는 것으로 나타났으며 동해안에서는 해풍이 발달하나 내륙으로 진입은 제한되는 것으로 나타났다. 그에 따라 서해안에서 방출된 오염 입자의 동쪽으로는 이동은 더 빨라지나 동해안에서 방출된 오염 입자의 내륙 이동은 제한되는 경향을 보였다. 이 경우 한반도에서 배출된 오염 입자들의 한반도상에서의 체류는 풍속의 크기에 의해 달라지는 것으로 나타났으며, 약한 서풍이 불 때에도 남해안과 동해안에서 배출된 오염 입자들은 두 번째 날 아침(약 24시간 후)에는 대부분 동해로 빠져 나가는 것으로 나타났다. 종관 규모 바람이 5 m/s의 서풍일 때 서해상에서 배출된 오염 입자들은 주간에는 종관 풍속보다 빠른 속도로 동해로 이동하며 만 하루면 일본 해안 지역에 도달할 수 있는 것으로 나타났다. 본 실험 결과에 따르면 입자의 고도에 따라 이동 경로가 상당히 다를 수 있는 것으로 보인다. 야간에 육지를 통과하는 오염 입자들은 거의 확산되지 않고 동해에 도달하는 것으로 나타났다.

종관 규모의 바람이 5 m/s의 남풍인 경우는 주간에 각 배출원으로 부터 나온 오염물질들이 내륙으로 진입하여 저녁이 되면서 내륙 중심으로 수렴하는 형태를 보이고 있으나 그 후 서해안에서 배출된 오염물질들은 내륙 전체에 남북으로 넓게 퍼져 가며 이 중 일부는 동해쪽으로 이동하고 있다. 그리고 남·동해안에서 배출된 오염물질들이 동해안 해안선을 따라 분포하고 특히 중부 지방의 동해안에 집중되는 것으로 나타났다.

이 실험들에 따르면 여름철에 흔히 나타나는 해풍 순환 조건하에서 주요 오염원에서 배출된 오염물질들의 상당량은 저녁이 되면서 내륙 중심으로 수송되어 체류할 가능성이 있으며, 약한 서풍이 있을 때에는 서해안에서 배출된 오염물질이 하루 안에 동해안에 도달할 수 있는 것으로 나타났다. 또 비교적

강한 남풍이 불 때는 남해안 공단 지역에서 배출된 오염물질들이 하루 안에 중부 지방 동해안까지 도달할 가능성이 있어, 한반도에서는 국지 오염 뿐만 아니라 타 도시 또는 타 해안 지역의 공단에서 배출된 오염물질의 수송으로 인한 영향에 대한 연구가 필요할 것으로 보인다.

감사의 글

이 연구는 연세대학교 학술연구비 지원에 의해 이루어진 것이다.

참 고 문 헌

- 이태영, 신동빈, 1989: 남한 지역에서의 대기 순환에 관한 수치적 연구. 한국기상학회지, 25(4), 275~288.
- 이태영, 신동빈, 박영연, 1989: 남한 지역에서 여름철 지상풍의 평균적 구조. 한국기상학회지, 25, 30~42.
- 이영복, 1984: 행성 경계층내 오염 물질의 수평 확산에 관한 수치적 연구. 박사학위 논문, 연세대학교, 148 pp.
- 윤일희, 1991: 지상 관측 자료를 이용한 한반도의 대기질 추정. 박사학위 논문, 서울대학교.
- Angell, J. K., D. H. Pack, L. Machta, C. R. Dickson, and W. H. Hoecker, 1972: Three-Dimensional Air Trajectories Determined From Tetratron Flights in the Planetary Boundary Layer of the Los Angeles Basin. *J. Appl. Meteor.*, 11, 451~471.
- Hanna, S. R., 1979: Some statistics of Lagrangian and Eulerian wind fluctuation. *J. Appl. Meteor.*, 18, 518~531.
- Lee, H.-W., E.-S. Jang, and E.-J. Oh, 1994: Modeling of atmospheric flow and dispersion in the mountainous coastal area. Proceedings

- of the 7th IUAPPA Regional Conference on Air Pollution and Waste Issues. November 2~4, 1994, Taipei, Vol. II, 87~96.
- Lee, T.-Y., J.-W. Kim, S.-U. Park, I.-S. Park, Y.-Y. Park, I.-G. Kang, 1991: Terrain Effects on SO₂ Dispersion over Seoul during Winter. Proceedings of the 2nd IUAPPA Regional Conference on Air Pollution, Seoul, Korea, September 4 to 6, 1991. Volume II, 313~338
- Lyons, W. A., and L. E. Olsson, 1973: Detailed Mesometeorological Studies of Air Pollution Dispersion in the Chicago Lake Breeze. *Mon. Wea. Rev.*, 101, 387~403.
- McNider, R. T., 1981: Investigation of the Impact of Topographic Circulations on the Transport and Dispersion of Air Pollutants. Ph.D. Dissertation, University of Virginia, Dept. of Environmental Sciences, Charlottesville, Va.
- McRae, G. J., Goodin, W. R., and Seinfeld, J. H. 1982: Development of a second-generation mathematical model for urban air pollution-I. Model formulation. *Atmos. Environ.*, 16, 679~696.
- Pack, D. H., and J. K. Angell, 1963: A Preliminary Study of Air Trajectories in the Los Angeles Area from Tetroon Flights. *Mon. Wea. Rev.*, 91, 583~604.
- Park, I. S., and I. Y. Lee, 1995: Studies of Air Quality in Seoul. Proceedings of 1st International Joint Seminar on the Regional Deposition Processes in the Atmosphere, November 20~24, 1995, Seoul, 103~113
- Pasquill, F., 1974: Atmospheric Diffusion. Wiley, New York.
- Segal, M., Pielke, R. A., and Mahrer Y. 1980: Quantitative Assessment of Air Quality in the Greater Chesapeake Bay Area Using a Three-Dimensional Mesoscale Atmospheric Model. Symposium on Intermediate Range Atmospheric Transport Processes and Technology Assessment, October 1~3, Gatlinburg, Tennessee.
- Smith, F. B., 1968: Conditioned particle motion in a homogeneous turbulent field. *Atmos. Environ.*, 2, 491~508.
- Tremback, C. J., and R. Kessler, 1985: A surface temperature and moisture parameterization for use in mesoscale numerical models. Report on 7th conference on numerical prediction, June 17~20, 1985, Montreal, Quebec, Canada, AMS.
- Tremback, C. J., 1990: Numerical simulation of a mesoscale convective complex: Model development and numerical results. Colorado State University, Department of atmospheric science, paper No. 465, 247 pp.
- Tripoli, G. J., and W. R. Cotton, 1982: The Colorado State University three-dimensional cloud/mesoscale model. Part I: General theoretical framework and sensitivity experiments. *J. de Rech. Atmos.*, 16, 185~219.
- Wilson, J. D., G. W. Thurtell, and G. E. Kidd, 1981a: Numerical simulation of particle trajectories in inhomogeneous turbulence, II: Systems with variable turbulent velocity scale. *Bound. Layer Meteor.*, 21, 423~441.
- Wilson, J. D., G. W. Thurtell, and G. E. Kidd, 1981b: Numerical simulation of particle trajectories in inhomogeneous turbulence, III: Comparison of predicting with experimental data for the atmospheric surface layer. *Bound. Layer Meteor.*, 21, 443~463.