

## 퍼프 유적선모델에 의한 대기오염물질의 장거리수송량의 평가

### Assessment of Long-Range Transport of Atmospheric Pollutants using a Trajectory Model with the Puff Concept

정 관 영\*

서울대학교 대기과학과

(1996년 1월 16일 접수, 1996년 3월 28일 채택)

Kwan-Young Chung

Dept. of Atmospheric Sciences, Seoul National University

(Received 16 January 1996; accepted 28 March 1996)

#### Abstract

To investigate the source-receptor relationships aerosol model has been used to simulate the distribution behavior of the yellow sand. Data for meteorological fields were obtained by Meso-scale Analysis and Prediction Model System/Seoul National University (MAPMS/SNU) for five days (10~14 April 1988). To obtain the distributions of concentration of yellow sand, the aerosol model has been modified to allow quantifications of relative concentration distributions of yellow sand. Source regions of yellow sand were delineated by soil maps of China and emission rate as a function of wind stress (Westphal *et al.*, 1987).

Using 3-dimensional wind fields the backward trajectories from 3 receptor grids at the layer of  $\sigma=0.95, 0.9, 0.85, 0.8$  were calculated. In order to facilitate quantitative assessment of source-receptor relationships, it was assumed that the perturbations in along-trajectory and cross-trajectory proceed linearly with time, in accord with Gaussian distribution characteristics. On the basis of this assumption, the probability fields were calculated from every grid point with source strength 1. Using these probability fields and emission rates, the potential contributions of upstream sources along the trajectories were estimated. The results of this study indicate that the application of trajectory modeling is useful in investigating the quantitative relationship between source and receptor regions.

#### 1. 서 론

어느 지점에서 관측된 오염물질의 발원지를 규명하는 것은 대기질의 진단 및 예측에 매우 중요한 일이다. 오염원과 착지점의 관계를 (source-receptor relation-

ship) 정성적으로 이해하기 위한 가장 간단한 방법은 3차원 대기운동을 2차원으로 가정하고 공기괴가 같은 면을 따라 이동한다고 가정하는 것이다. 이러한 방법으로 서 주로 등압면 궤적분석 (강동근 *et al.*, 1994; 전영신 *et al.*, 1994; 정용승과 김태근, 1991)과 등온위면 궤적분석 (윤순창과 박경선, 1991)이 있다. 이중 등압면 분석은 대기의 상하운동을 제대로 반영하지 못하기 때문에 이보다는 단열상승 또는 하강에 의한 상하운동이 포함

\* 현소속 : 한국과학기술연구원 환경연구센터

할 수 있는 등온위면 분석방법이 많이 행해지고 있다 (Merill *et al.*, 1985).

그러나 대기오염물질의 발원지는 비단열과정이 탁월한 대기경계층내에 위치하고 있으며 오염물이 주로 대기경계층내에서 이동하기 때문에 등온위면분석 또한 많은 오차를 포함 할 수 있다. 따라서, 2차원의 가정보다는 3차원 바람장을 이용한 공기과의 궤적분석이 오차를 줄일 수 있는 방법이 될 수 있다 (Kuo *et al.*, 1985). 그러나 이러한 방법들은 발원지와 착지점 사이의 정성적 관계만을 나타낼 뿐 정량적 관계를 보여주지는 못한다. 그러므로 어느 착지점에 도착할 가능성이 있는 공기과의 궤적을 확률장으로 나타냄으로써 하나의 유적선보다는 정성적으로 개선된 궤적을 구할 수 있을 뿐만 아니라 정량적으로도 발원지와 착지점의 관계를 쉽게 진단할 수 있는 장점이 있다.

따라서 본 연구는 각각의 착지점의 4개층에서 3차원 기상장을 이용하여 궤적을 구한 다음, 착지점에서 배출량이 1인 puff가 풍상측의 궤적을 따라 이동하며 puff의 오염농도는 가우스 확률분포를 하고 있는 것으로 가정하여 4개층의 확률분포를 앙상블 평균하여 정성적 궤적을 추정하였을 뿐만 아니라, 혼합층내에 오염물이 고르게 분포하고 있다는 가정하에 각 발원지에 의한 착지점의 정량적인 농도를 추정하였다 (Samson *et al.*, 1980).

이를 위해 한반도로 장거리 수송되는 오염물의 대표적인 예인 황사를 선택하였으며, 서울대학교 중규모 모델 (이동규, 1994)에서 산출된 기상장과 본 연구에서 개발한 에어로졸 모델에서 구한 오염농도 (정관영, 1996)를 관측값이라고 가정하였고 몇개의 착지점에서 궤적분석, 발원지분석, 그리고 그 발원지와 착지점과의 관계를 살펴보았다.

## 2. 분석 방법

### 2.1 확률장 (probability fields)

착지점에서  $\sigma=0.95$ ,  $\sigma=0.9$ ,  $\sigma=0.85$ 와  $\sigma=0.80$ 의 4개 고도에서 3차원 기상장을 이용하여 후진 궤적 (backward trajectory)을 계산하였다. 이 각각의 궤적은 주어진 착지점에 도착하는 최대 가능성이 있는 경로이므로, 배출율을 1인 착지점으로부터 후진궤적으로 이동하는 puff라고 생각했을 때, 각 4개의 고도에서의 확률분포는

$$p_i(x, y; t)$$

$$= \frac{1}{2\pi\sigma_x(t)\sigma_y(t)} \exp\left(-\frac{(x'-x)^2}{2\sigma_x(t)^2} - \frac{(y'-y)^2}{2\sigma_y(t)^2}\right) \delta x \delta y \quad (1)$$

이다. 여기서  $p_i(x, y; t)$ 는  $i$ -고도에서 출발한 puff에 대하여 puff의 고도면에서 지점  $(x, y)$ 에서의 확률값이며,  $(x'-x)$ 와  $(y'-y)$ 는  $t$ 시간에서 puff의 중심위치와 각 지점의 위치와의 거리 (km),  $\sigma_x$ 와  $\sigma_y$ 는 각각  $x$ 와  $y$ 방향 확산거리의 표준편차이며, Samson *et al.* (1980)에 따라  $\sigma_x=\sigma_y=5.4t$ 로 가정했고, 단위는 km, 시간  $t$ 는 hour이고,  $\delta x \delta y$ 는 격자의 면적 (km<sup>2</sup>)이다.

이를 이용하여 각 고도에서 구한 확률분포를 평면에 mapping하여 각 격자점에서 4개의 궤적에 대한 확률분포를 산술 평균 ( $\bar{p}(x, y; t)$ )하고, 그 지점에서 착지점까지 걸린 시간 ( $\tau$ )만큼 평균하여 평균확률 분포  $P_{i,j}$ 를 다음과 같이 구한다. 즉,

$$P_{i,j} = \frac{\int_0^\tau \bar{p}(x, y; t) dt}{\int_0^\tau dt} \quad (2)$$

이다. 그러므로 이  $P_{i,j}$ 의 최대축을 따라  $xy$ 평면에서 착지점으로 유입되는 공기의 평균 후진궤적을 구할 수 있다.

착지점의 4개 고도로 유입되는 공기가 풍상측의 발원지를 통과하면서 puff로 유입되는 양에 식(1)의 확률분포를 곱하면, 착지점의 각 고도에서 나타나는 농도에 그 발원지에서 기여한 양이 된다. 즉, 착지점의 각 고도에서 농도값은 다음과 같다.

$$C_i = \sum_t \sum_x \sum_y Q(x, y; t) p_i(x, y; t) \beta \quad (3)$$

여기서  $Q(x, y; t)$ 는 발원지에서 배출양이다. 발원지에서 농도는 혼합층까지 고루 섞여 있다고 가정하여, puff가 발원지를 통과할 때 puff의 고도가 혼합층내에 있으면  $\beta$ 는 1, 혼합층 밖에 있으면,  $\beta$ 는 0으로 한다.

위 방법은 Lagrangian 입자 확산 모델 중 puff 모델과 같은 형태이며, 단지 풍하측이 아니라 풍상측의 발원지에 의하여 착지점에 영향을 미치는 발원지와 그 발원지의 영향을 정량적으로 간단하게 계산할 수 있는 장점이 있다. 여기서 주의할 점은 건성 및 습성침착 등의 제거과정이 고려되지 않았기 때문에 잠재적으로 착지점에서 나타날 수 있는 최대 농도로 이해 할 수 있다.

### 2.2 기상장 및 이에 따른 가상 농도분포

이 연구에서 발원지와 그 외의 지역과의 관계를 고려

하기 위하여 오염물의 장거리수송의 대표적인 예인 황사의 경우를 설정하였다. 이는 다른 오염물질에 비해 발원지가 비교적 잘 알려져 있으며 또한 화학 반응이 거의 일어나지 않아 본 연구에 적합하기 때문이다. 이를 위해서 1988년 4월 13일 한반도에 황사가 관측되었던 사례를 선정하여 1988년 4월 10일 00UTC부터 15일 00UTC까지 서울대학교 중규모모델(MAPMS/SNU)을 5일간 수행을 했으며 이 자료가 실제 기상장이라고 가정하였다. 그리고 몇 개의 착지점을 택하여 그 지점으로부터 4개층에서 후진방향의 궤적을 구하였고, 또한 각 시간대별 확률장(식(1))과 평균확률장(식(2))을 계산하였다. 그리고 가상농도 분포를 구하기 위하여 황사의 발원지는 중국토양지도에 따라 사막과 황토지역으로 가정하였으며, 그지역에서 마찰속도에 비례하도록 배출율을 가정한 다음(Westphal *et al.*, 1988; 1987), 제거과정을 고려하지 않은 질량연속방정식(에어로졸 모델)을 풀어 가상농도를 계산하였다. 그리고 확률장과 발원지에서 배출량에 근거하여 착지점에서 농도를 평가하였다.

2.3 모델

이 연구의 모델영역을 그림 1에 나타내었다. 이 그림에서 음영된 곳은 가정한 발원지를 나타낸다. 모델의 수평격자거리는 60 km×60 km이고 동서로 81, 남북으로 64개의 격자로 구성된다. 에어로졸모델의 수평격자구성은 Arakawa-B grid, 램버트공형도법이 사용된다.

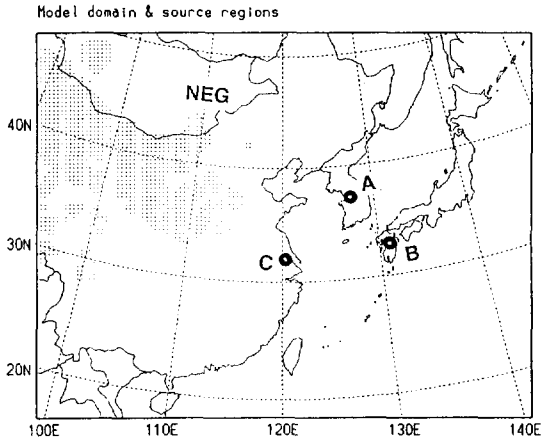


Fig. 1. Model domain and Source regions (shaded area). The receptor points of A, B and C represent Seoul, Hukuoka, and Shanghai, respectively. NEG is the area of North-Eastern Gobi desert.

연직으로는 19층의 차격자체계이며, 좌표계는 시그마좌표계이다.

기상장은 서울대 중규모모델인 MAPMS/SNU에서 제공되며(이동규, 1994), 3시간 간격으로  $u, v, T, q, rain, p_s, T_g$  등이 에어로졸모델로 입력된다. 중규모모델과 에어로졸모델과는 one-way, 즉 에어로졸의 복사수지에 의한 가열/냉각과 구름내에서 CCN의 역할 등으로 기상장에 영향을 미치지 않는다.

에어로졸모델의 좌표계는  $\sigma$ -좌표계로서 아래와 같이 정의된다.

$$\sigma \equiv (P - P_i) / (P_{sc} - P_i) \tag{4}$$

여기서  $P_{sc}$ 는 지상기압  $P_i$ 는 모델 상한의 기압(100 mb)이며  $P$ 는 기압을 나타낸다.

에어로졸모델은 source, 이류, 확산 등이 포함되며, 이 연속방정식을 시그마좌표계에서 램버트 공형도법으로 표현하면(정관영, 1996),

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_s C(r)}{\partial t} = & -m^2 \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{u p_s C(r)}{m} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{v p_s C(r)}{m} \right) \right\} \\ & - \frac{\partial C(r) \bar{\sigma} p_s}{\partial \sigma} + m \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left( m K_h \frac{\partial p_s C(r)}{\partial x} \right) \right. \\ & \left. + \frac{\partial}{\partial y} \left( m K_h \frac{\partial p_s C(r)}{\partial y} \right) \right\} \\ & + \left( \frac{g}{p_s} \right)^2 \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \rho^2 K_z \frac{\partial p_s C(r)}{\partial \sigma} \right) + E \tag{5} \end{aligned}$$

이다. 여기서  $C(r)$ 은 반경이  $r$ 인 입자의 농도이며,  $p_s$ 는  $P_{sc} - P_i$ 이고,  $m$ 은 램버트 공형도법에서의 지도인자( $m$ =격자상의 거리/실제 지표면에서의 거리)이다.  $\bar{\sigma}$ 은 시그마 좌표계에서의 연직속도( $\equiv d\sigma/dt$ )이고,  $g$ 는 중력가속도,  $\rho$ 는 공기밀도,  $K_z$ 와  $K_h$ 는 각각 수직, 수평의 확산 계수,  $E$ 는 배출율이다.

연직확산계수는, 혼합층에서는 대기가 안정할 때, 불안정할 때, 그리고 자유대류의 3가지 경우를 나누어서 고려하며, 혼합층 밖의 자유대기에서는 두 층의 바람의 shear, 기온경도에 의해서 매개변수화 된다(Stull, 1988).

수치방법은 여러 trace gas 모델이나 화학과정이 포함된 산성우모델에서 사용되는 연산자 분리방법(operator-splitting technique)을 사용하였다. 연산자 분리방법은 stiff 방정식을 효과적으로 해결할 수 있고, 각 항등을 개별적으로 동시에 해결 할 수 있으므로 능률적이며,

각 연산의 결과가 쉽게 다른 연산에 새로이 사용할 수 있어 계산의 안정성을 높이며, 3차원문제를 1차원의 연속적인 문제로 풀 수 있는 장점이 있다.

또한 오일러방정식에서의 가장 큰 문제점은 이류항의 계산이다. 특히 대기오염물질의 농도에 대하여 발생하는 두가지 문제는 음의 농도가 나타나는 경우와 농도의 경도(gradient)가 아주 크게 나타나는 경우이다. 그러므로 이를 해결하기 위하여 본 연구에서는 두 단계 반복적 전방차분법을 사용하였다(Smolarkiewicz, 1983). 연직확산항은 Crank-Nicolson의 암시적 유한차분법(implicit finite differencing)으로 계산하였다.

발원지에서 부유량을 추정하기 위하여 Westphal *et al.*(1988; 1987)에 따라 다음과 같이 매개변수화 하였다. 즉, 건조한 토양이 바람의 응력을 받아 공중에 부유하기 시작하는 풍속을 임계마찰속도( $u_{*c}$ )라고 부른다. 보통 이 임계마찰속도는 토양의 성질, 건조도에 따라 결정되나 Westphal *et al.*(1988)과 같이 임계마찰속도를 60 cm/sec로 가정하였고, 건조지역에서 바람에 의해 지면에서 대기로 부유하는 분진의 플럭스는 마찰속도 함수로서 다음과 같이 가정하였다(정관영, 1996).

$$F_o = 0, \text{ if } u_* < u_{*c}$$

$$F_o = Cu_*^4 \text{ if } u_* > u_{*c} \quad (6)$$

### 3. 결 과

#### 3.1 경계층내 연직평균농도

그림 2는 1988년 4월 10일 03UTC에서 4월 14일 03UTC까지 12시간 간격으로 모델의 19층 중에서  $\sigma=0.8$  이하층에 대한 평균농도

$$\left( \bar{C} = \int_{\sigma=1}^{\sigma=0.8} C d\sigma \left( \int_{\sigma=1}^{\sigma=0.8} d\sigma \right)^{-1} \right) \text{를 보여준다.}$$

여기에서 농도의 단위는 임의로 설정하였다(서울에서 모의된 가상농도의 최대값은 약 11, 관측된 최대 TSP 농도는 약  $450 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

10일 03UTC(그림 2a)에서 고비사막 부근에서 먼지보라가 발생하여 대기 중의 먼지농도가 증가하고 있음을 볼 수 있고, 10일 15UTC(그림 2b)에는 고비사막에 계속 농도가 증가하였고, 최대농도 지역이 약간 남쪽으로 이동하였으며, 전 시간부터 고비사막의 북동쪽 끝부분에서 발생한 먼지보라(그림 1에서 NEG로 표시)는 발원지를 떠나 중심이 103E, 41N에 또 다른 최대농도 지역이 나타나고 있다. 11일 03UTC(그림 2c)에서는 최대농도지역이 황토고원으로 이동하였으나 이 기간중

농도는 증가하고 있지는 않다. 한편 NEG지역에 또다시 먼지보라가 발생하면서 농도가 증가하고 있고 그전에 그 지역에서 발생했던 먼지는 북동방향으로 길게 뻗어 만주까지 확장하고 있다. 11일 15UTC(그림 2d)에서는 황토고원에서도 발생한 먼지보라에 의해 더욱 농도가 증가하였고, 시계방향의 회전을 하면서 최대농도지역이 발원지를 벗어나 있으며, 전 시간에 만주까지 확장되었던 부분이 이시간에는 황해도까지 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 12일 03UTC(그림 2e)에서는 전체적으로 시계방향의 회전이 더붙어 남서기류의 영향으로 황해도에 있었던 황사가 중부지방까지 이동하여 한반도에 유입이 되고 있다. 12일 15UTC(그림 2f)에서는 중국대륙의 대부분이 황사의 영향하에 놓였으며, 그 중 11일 03UTC에 발생했던 먼지보라의 일부분이 회전하면서 북동방향으로 길게 확장하면서 발해만을 거쳐 황해도까지 진출해 있으며, 그전에 한반도로 유입되었던 황사는 남해상으로 이동했다. 13일 03UTC(그림 2g) 발원지에서 더 이상의 먼지보라는 발생하고 있지 않으나 한반도 중부지방을 지나 동해까지 황사가 확장해 있고 점차 시계방향으로 남쪽으로 이동하면서 한반도는 황사의 영향에서 벗어나면서 일본에 영향을 미치고 있다(그림 2h와 i). 한편 14일 03UTC에서는 고비사막의 서쪽부근에 다시 먼지보라가 발생하고 있음을 알 수 있다(그림 2i).

이러한 가상농도장을 관측값으로 가정하고, 착지점에서 확률장을 계산하기 위하여 그림 1에 표시된 3개의 지역, 즉 서울(A), 후쿠오카(B)와 상하이(C)를 선정하였다. 그러면 이 3개 지역에서 관측된 농도(가상농도장)의 시계열은 그림 3과 같다. 그림 3a는 서울에서의 농도를 나타내며 12일과 13일에 황사에 의한 농도증가가 나타나고 있으며, 최대농도가 나타난 시각은 13일 03UTC시에 약 11 정도의 값을 보이고 있다. 후쿠오카에서는 13일과 14일에 황사가 관측되고 있고, 14일 03UTC에 10 정도의 최대값을(그림 3b), 상하이에서는 12일과 13일에 황사가 관측되고 있고 13일 15시에 최대농도 34정도가 나타나고 있다. 그러므로 각각의 착지점에서 후진 궤적을 구하는 시작시간은 각지점에서 최대농도가 나타난 시간으로 정했으며, 그 때 나타난 농도의 진단과 어느 지점의 발원지가 각각의 착지점에 어느 정도 영향을 주었는가를 살펴보도록 한다.

#### 3.2 확률장(probability fields)

확률장을 계산하기 위해서 먼저 착지점에서 후진 궤적을 각각 4개층에서 3차원 바람장( $u, v, \sigma$ )을 이용하여 구하였다(그림 4). 각각의 경로 중에서 입자의 높이가

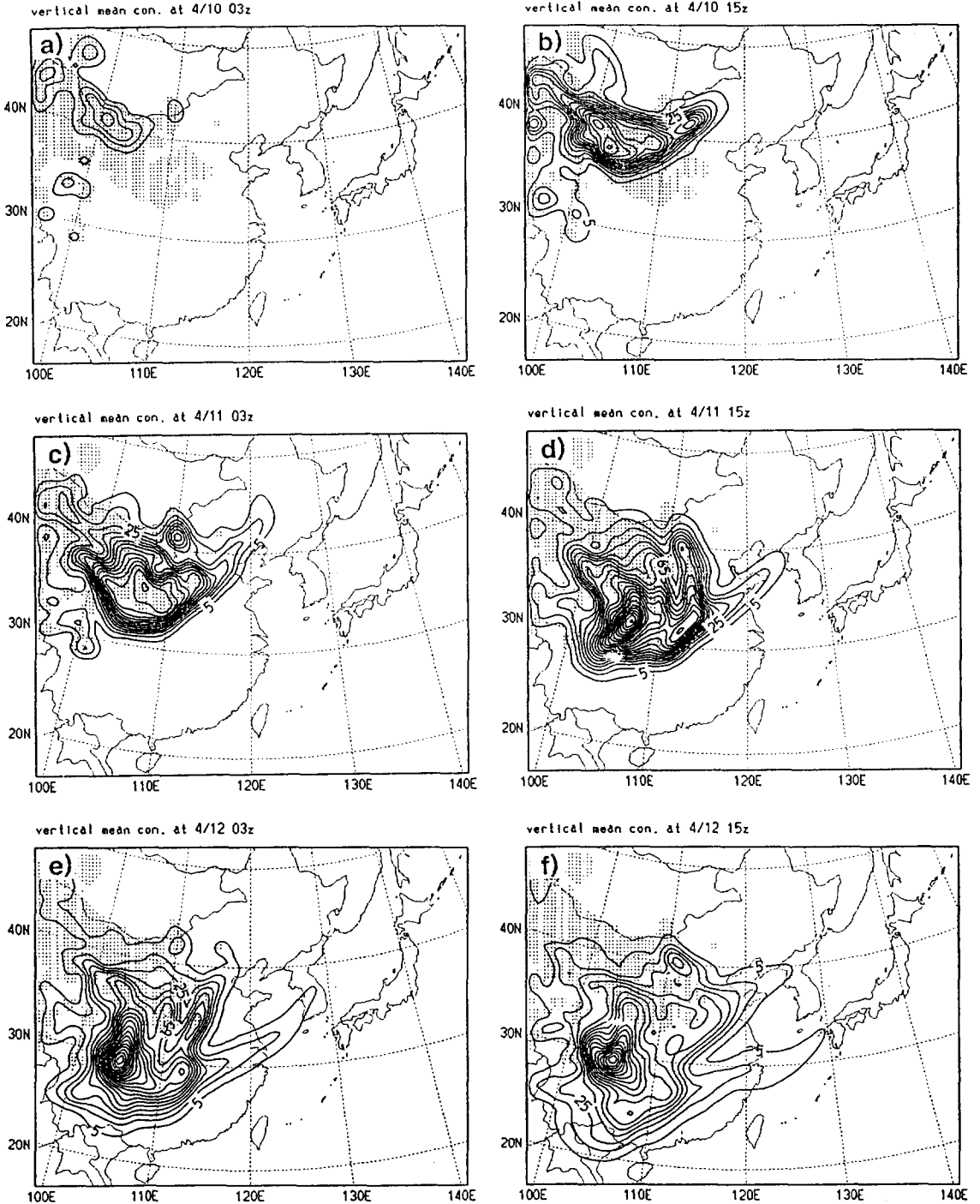
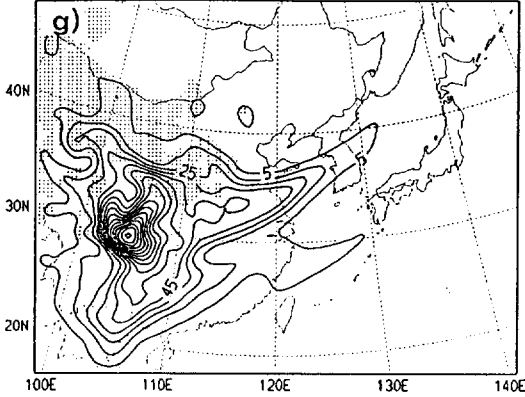
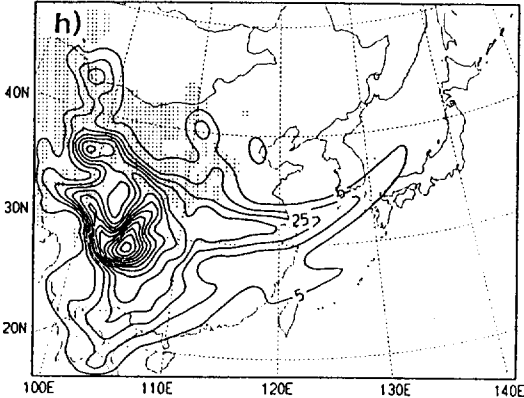


Fig. 2. The spatial distributions of the calculated concentration of yellow sand at a) 1003UTC, b) 1015UTC, c) 1103UTC, d) 1115UTC, e) 1203UTC, f) 1215UTC, g) 1303UTC, h) 1315 UTC and d) 1403UTC, April 1988.

vertical mean con. at 4/13 03z



vertical mean con. at 4/13 15z



vertical mean con. at 4/14 03z

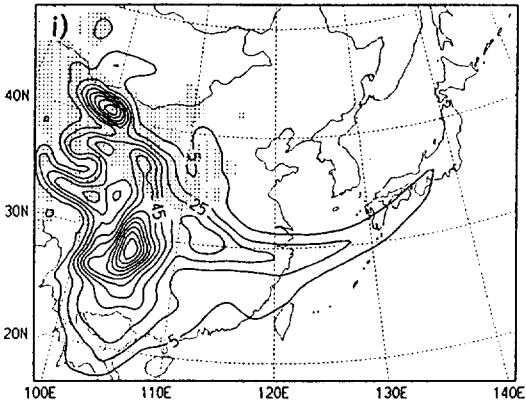


Fig. 2. Continued.

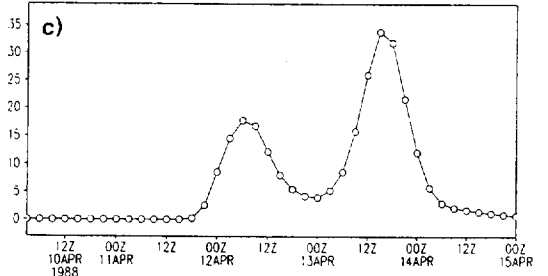
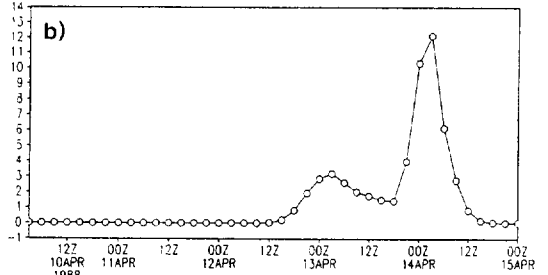
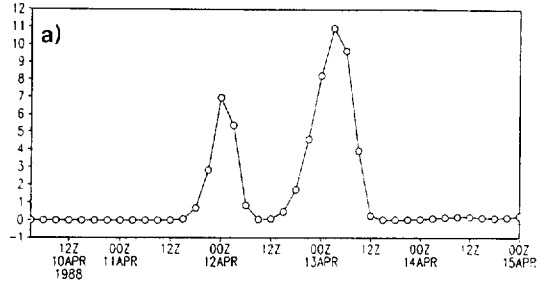


Fig. 3. Temporal distributions of calculated concentration within receptor grids of a) Seoul, b) Hukuoka, and c) Shanghai.

지형의 높이보다 작으면 그 궤적은 그 지점에서 끝나는 것으로 하였으며, 시간간격은 30분으로 하여 계산하였다.

서울에서 구한 후진궤적을 살펴보면 (그림 4a와 4b), 대체적으로 몽고에서부터 고원지대를 넘을 때까지는 계속적으로 하강하다가 고원을 넘어 상승하면서 한반도까지 도달하고 있음을 알 수 있다. 또한 하층 ( $\sigma=0.95$  와  $0.90$ )에서 풍상측을 따라가면 서울에서 남쪽으로 이동하여 산동반도 남쪽에 도달한 다음 북으로 그리고 북서쪽으로 이동하고 있다. 이 하층의 경로는 몽고에서는 높이가 상층 ( $\sigma=0.85$ 와  $0.80$ )과 비슷했으나, 다른 두층에 비해 급격한 하강을 보이고 있다. 후쿠오카에서 구한 후진 궤적은 (그림 4c, 4d) 대체적으로  $\sigma=0.90$ ,

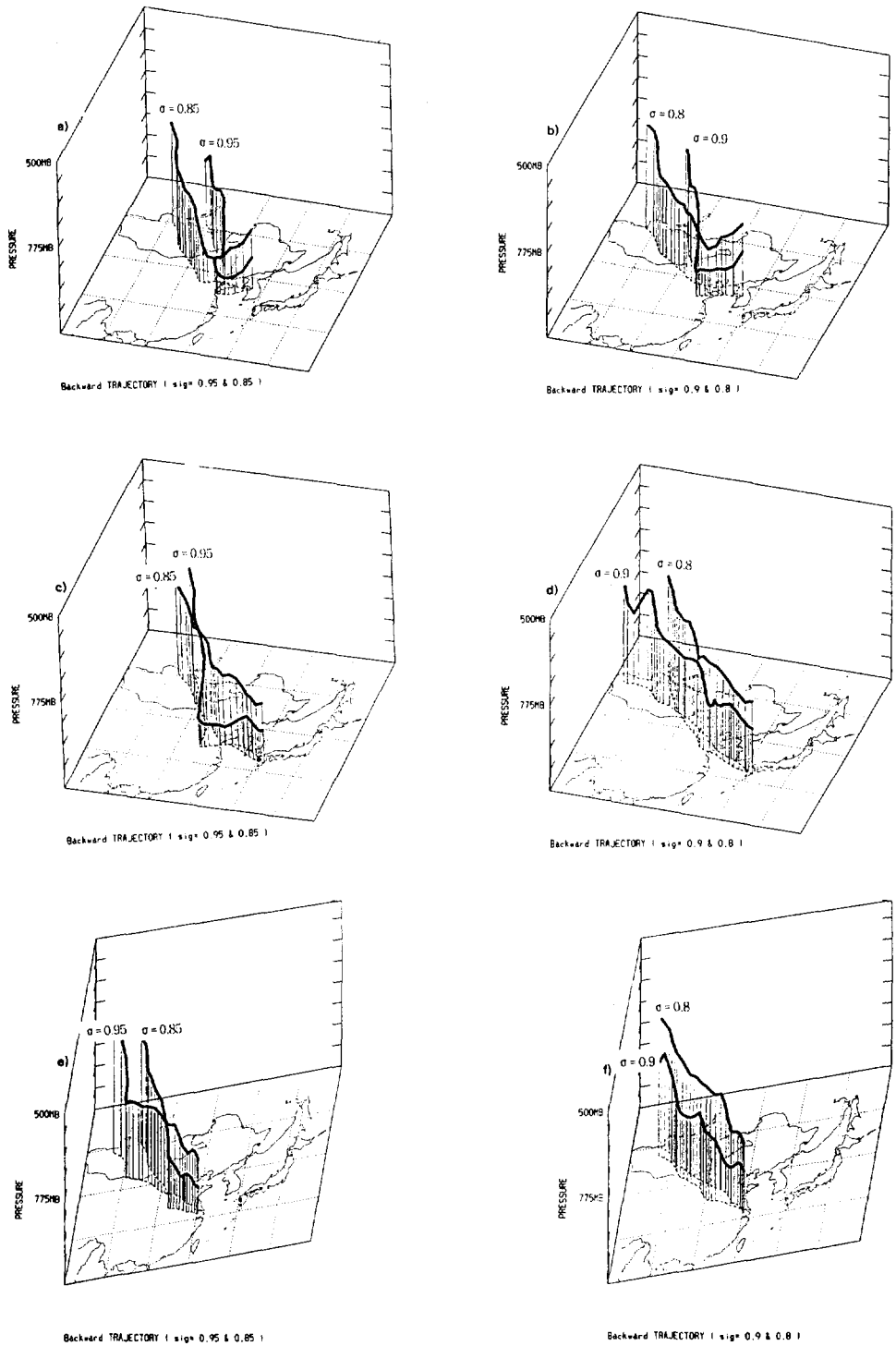


Fig. 4. Backward trajectories from Seoul (a and b), Hukuoka (c and d), and Shanghai (e and f) at the layer of  $\sigma=0.95, 0.90, 0.85, 0.80$ .

0.85와 0.80에서는 유사한 형태를 보이고 있으나  $\sigma=0.95$ 에서는 다른 세경로와 달리 보다 남쪽으로 이동했다가 이 지점으로 이동하고 있으며 또한 고원지대를 넘을 때까지 하강이 매우 강하게 일어나고 있음을 알 수 있다. 상하이에서의 궤적은 그림 4e와 4f에 나타나 있다. 전반적으로 착지점에서 하층은 북북서에서 하강운동이 크게 일어나면서 이동해 온 공기괴이며 상층으로 갈수록 바람이 반전하면서 북서쪽에서 온 공기가 이동해 왔음을 보여준다.

이 궤적들은 공기괴의 이동 경로 중 최대확률을 나타내는 곳으로 가정하여 식(2)의 평균 확률장을 계산하였다(그림 5). 즉, 시간에 따라 각각의 경로는 정규 분포를 하고 있는 확률장이 넓어진다는 가정을 하고, 이를 평면에 mapping시켜 4개 고도의 값의 산술평균하여 구한 값이다. 그러므로 이 2차원 평균확률값의 최대축이 착지점으로 유입되는 평균 궤적을 나타낸다고 볼 수 있다. 또한 만일 발원지에서 어느 고도나 관계없이 배출된 오염물이 고루 분포하고 있고, 배출량 ( $E_{i,j}$ )이 일정하고 연속적인 경우, 그 시각에 착지점에 공헌한 발원지로부터의 대기 오염농도는  $P_{i,j}, E_{i,j}$ 가 될 것이다.

그림 5a에서 보면 서울에 들어오는 주 공기의 흐름 방향은 황사의 발원지의 북쪽 끝으로 이동해 온 것이며, 주로 황사는 이보다는 남쪽에서 서울로 장거리 수송되었다는 것을 알 수 있다. 후쿠오카는 그림 5b, 상하이는 그림 5c에 나타내었다.

착지점의 각 고도에서 오염농도를 진단하기 위해서는 각 시간대별 배출량과 그 시간에서의 확률장(식(1))이 사용된다. 즉, 착지점의 각 고도면으로 유입되는 공기괴(puff)가 풍상측에서 오염원에서 배출되는 시각에 그 혼합층내에 있다면, 배출된 오염물이 오염원의 혼합층내에 고루 분포하고 있다고 가정하여 그 배출량에 확률장을 곱하여 공헌도를 추정할 수 있다(식(3)).

확률장의 시간에 따른 위치는 그림 6에, 발원지를 통과하면서 그 공기괴에 더해진 양과 궤적을 따라 착지점까지 이동했을 때 나타날 수 있는 총량은 표 1에 나타나 있다.

서울의 경우 4월 13일 03UTC에 모델 진단값은 16.277이고, 실제값(가상농도값)은 10.935로서 총량에 있어서는 49% 정도 과대평가하고 있다. 그 양의 발원지별 유입시간과 공헌도를 살펴보면, 4월11일 06UTC에서 15UTC까지 진단된 총량의 79% 정도가 유입되고 있으며, 이 때 발원지는 고비사막의 북동쪽 끝부분(NEG)임을 알 수 있다. 또한 이동하면서 4월12일 06UTC에서 09UTC까지 총량의 18% 정도가 유입되고

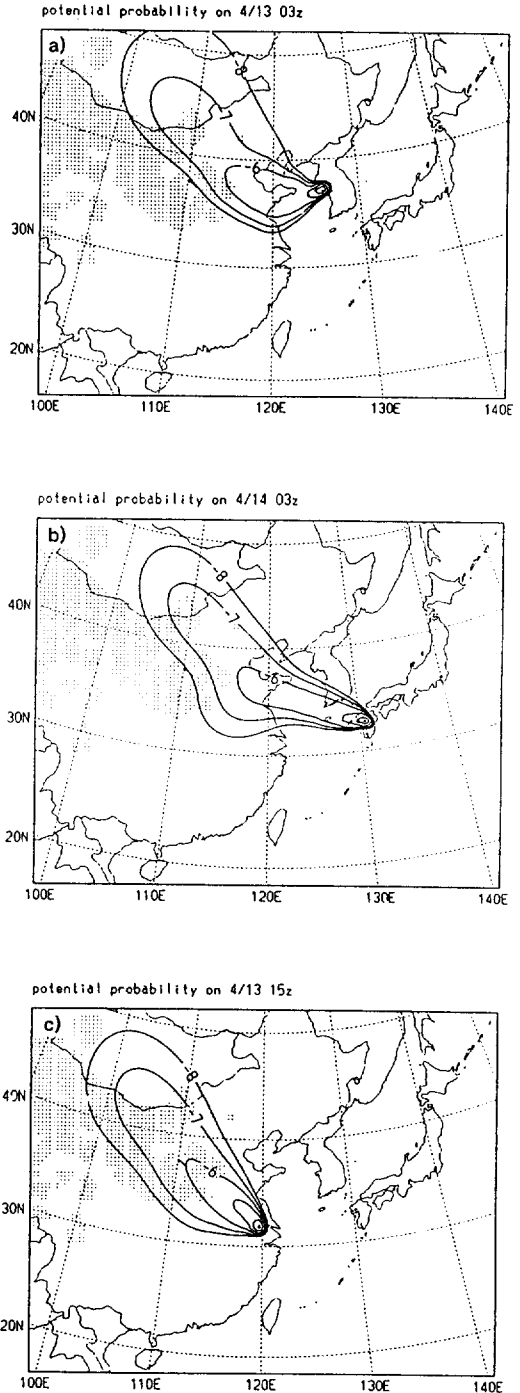


Fig. 5. Time-averaged potential probability fields of a) Seoul, b) Hukuoka, and c) Shanghai. The contour labels are the values of natural log.



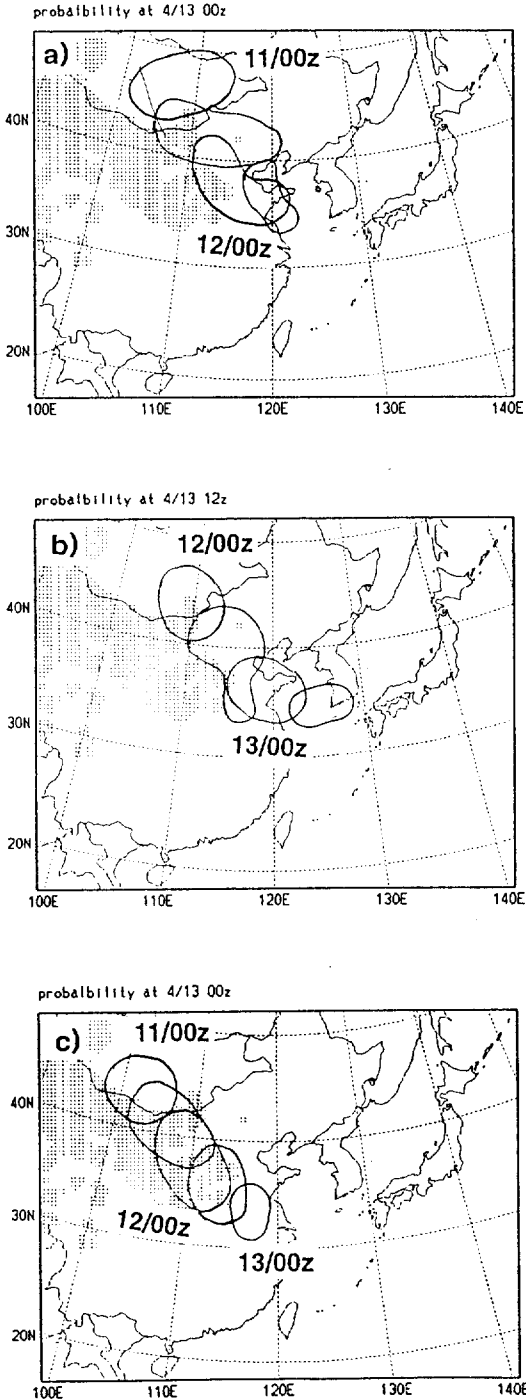


Fig. 6. The vertical average of the puff concentration emitted from a) Seoul, b) Hukuoka, and c) Sanghai. Time interval is 12 hour.

있으며, 발원지는 황토지대의 북동쪽 부근임을 보여준다 (그림 6a와 표 1).

후쿠오카의 경우는 4월 14일 03UTC에 진단된 값은 10.17, 실제값은 12.13로서 16% 정도 과소평가하고 있다. 이의 발원지를 살펴보면, 4월 12일 06UTC에서 12UTC까지 진단총량의 94%정도가 유입이 되고 있고, 발원지는 고비사막의 북동쪽과 황토지대의 북동쪽임을 알 수 있다(그림 6b와 표 1).

상하이의 경우 4월 13일 15시에 진단된 값은 31.49, 실제값은 33.85로서 7% 정도 과소평가하고 있다. 이 경우 고비사막의 중심을 지나면서 진단량의 54% 정도가 4월 11일 06UTC부터 12UTC에 유입되고 있으며, 황토지대를 지나면서 진단량의 41% 정도가 4월12일 06UTC부터 12UTC에 유입이 되고 있음을 볼 수 있다 (그림 6c와 표 1).

위와 같은 결과로부터 확률장에 의한 대기오염의 장거리수송량에 대한 평가는 총량의 문제보다는 발원지의 분

Table 1. Estimated concentration of yellow sand (unitless) along the trajectories in Fig. 6.

TIME	SEOUL		HUKUOKA		SANGHAI	
	Individual	Cumulative	Individual	Cumulative	Individual	Cumulative
4/11 00Z	0.000	0.000			0.0069	0.0069
00Z	0.0641	0.0641			0.2451	0.2520
06Z	1.6760	1.7402			4.2942	4.5462
09Z	5.0608	6.8010			6.5385	11.0847
12Z	5.7064	12.5074			6.0583	17.1431
15Z	0.3221	12.8296			0.4034	17.5465
18Z	0.2145	13.0440	0.0000	0.0000	0.2888	17.8353
21Z	0.1880	13.2320	0.0090	0.0090	0.1604	17.9958
4/12 00Z	0.0809	13.3129	0.0365	0.0455	0.0763	18.0720
03Z	0.0128	13.3257	0.1588	0.2043	0.1089	18.1809
06Z	1.7497	15.0753	2.9528	3.1571	4.1235	22.3045
09Z	1.1984	16.2738	3.9658	7.1229	5.1069	27.4114
12Z	0.0032	16.2770	2.6527	9.7757	3.7337	31.1451
15Z	0.0000	16.2770	0.2079	9.9836	0.2215	31.3666
18Z	0.0000	16.2770	0.1314	10.1150	0.1220	31.4886
21Z	0.0000	16.2770	0.0215	10.1365	0.0000	31.4886
4/13 00Z	0.0000	16.2770	0.0000	10.1365	0.0000	31.4886
03Z	0.0000	16.2770	0.0000	10.1365	0.0000	31.4886
06Z			0.0000	10.1365	0.0000	31.4886
09Z	OBS.	10.935	0.0000	10.1365	0.0000	31.4886
12Z			0.0000	10.1365	0.0000	31.4886
15Z			0.0000	10.1365	0.0000	31.4886
18Z			0.0000	10.1365		
21Z			0.0000	10.1365	OBS.	33.8482
4/14 00Z			0.0000	10.1365		
03Z			0.0000	10.1365		
					OBS.	12.1272

류, 유입시기, 그리고 공현도 등의 발원지와 착지점의 관계에 중점이 주어져야 할 것이다.

#### 4. 토의 및 요약

이 연구에 발원지와 그 외의 지역과의 관계를 고려하기 위하여 오염물의 장거리수송의 대표적인 예인 황사의 경우를 설정하였다. 그리고 서울대 중규모 모델(MAP-MS/SNU)를 5일간 수행하여 기상장을 구한 후 몇 개의 착지점을 택하여 그 지점에서 4개층에서 후진방향 궤적을 구하였고, 각 시간대별 확률장과 평균확률장을 계산하였다. 기상농도 분포는 본 연구에서 개발한 질량 연속방정식(에어로졸 모델)을 풀어 구하였다. 그리고 확률장과 발원지에서 배출량에 근거하여 착지점에서 연직 평균농도를 진단하였다.

이의 결과를 요약하면,

- 1) 착지점의 4개층에서 3차원 기상장을 이용하여 후진궤적을 구한 다음, 착지점에서 배출량이 1인 puff가 풍상측의 궤적을 따라 이동하며, puff의 오염농도는 가우스 확률분포를 한다는 가정하에 4개층의 값을 평균하여 구한 확률분포를 계산하였다. 이를 이용하여 오염물 장거리수송의 정성적 궤적을 추정할 수 있었으며, 대기혼합층내에 오염물이 고르게 분포하고 있다는 가정하에 착지점의 농도에 대한 각각 발원지에서의 기여도를 추정할 수 있었다.
- 2) 확률장을 근거로 진단한 3개의 착지점에서의 농도는 기상농도의 값과 비교해 볼 때 7~46%의 오차를 보였으며, 대기오염의 양의 진단보다는 발원지의 분류와 유입시간, 공현도 등의 발원지와 착지점의 관계를 파악하는데 유용 가능성을 보여 주었다.

위 결과에 대한 오차의 원인을 살펴보면, 1) 확률장을 구하는데 Gaussian 분포를 가정했기 때문에, 확률장은 표준편차에 매우 민감하게 된다. 따라서 경험적으로 주어진 함수보다는 기상장에 적합하게 구해져야 할 것이며, 2) 4개의 층에서 구한 궤적은 경계층내의 난류에 의한 영향을 배제하기 위하여 잘 혼합되어 있다는 전제하에 각 층 궤적의 가중값을 동일하게 가정하였으나, 장기간 오염물이 수송되면서 이에 대한 오차도 커질 것이므로 이 가중함수의 연직분포 역시 기상장에 근거하여 조절할 필요성이 있다.

또한 실제로 확률장에 의한 대기질을 평가하기 위해서는 소멸항(건성침착, 습성침착, 화학반응 등)을 첨가하

여 이를 포함한 확률장의 계산이 요구된다. 그러므로 이러한 모든 물리적 과정이 포함된 모델에 의한 검증, 관측, 분산실험 등에 의해 이 간단한 궤적분석모델의 검증, 보완등이 계속 이루어져야 할 것이다.

#### 감사의 글

본 논문에 기상장을 제공해 주신 서울대 대기과학과의 이동규 교수님과 장동언님에게 깊은 감사를 드립니다. 논문의 오류를 지적해 주시고 많은 부분을 다듬어 주신 두 심사위원님들께 감사드립니다.

#### 참고 문헌

- 장동근, 김선태, 김정욱 (1993) 동북아시아 대기 오염물질의 장거리 이동에 관한 연구, 대기보전학회지, 9(4), 329-339.
- 윤순창, 박경선 (1991) 등엔트로피 궤적에 의한 황사의 장거리 이동경로 분석, 대기보전학회지, 7(2), 89-95.
- 이동규 (1994) 서울대학교 중규모 분석 및 예보모델 시스템 개요서, pp. 34.
- 전영신, 조하만, 권원태 (1994) 한반도 중부지방에서 관측된 1992~1993년 산성비의 특성과 공기 이동 경로 분석, 대기보전학회지, 10(3), 175-182.
- 정관영, 박순용 (1995) 한반도에 황사 출현시의 종관기상 특징, 기상학회지, 31(1), 45-63.
- 정관영 (1996) 한반도에서 관측된 황사의 수치모의, 서울대학교 박사학위논문, pp. 160.
- 정용승, 김태군 (1991) 대기오염의 장거리 이동사례연구: 황사, TSP, Sulphate의 발원지 추적, 대기보전학회지, 7(3), 197-202.
- Chang, J. S., R. A. Brost, I. S. A. Isaksen, S. Madronich, P. Middleton, W. R. Stockwell and C. J. Walcek (1987) A 3-dimensional Eulerian acid deposition model: Physical concepts and formulation. J. Geophys. Res., 92(D12), 14,681-14,700.
- Chung, K. Y. and S. U. Park (1995) Numerical simulation of a yellow sand event observed in Korea, Proceedings of 1st international joint seminar on the regional deposition processes in the atmosphere. Nov. 20-24, Seoul, Korea, 184-195.
- Hoeker, W. H. (1977) Accuracy of various tech-

- niques for estimating boundary-layer trajectories J. Appl. Meteor., 16, 374-383.
- Kahl, J.D. and P.J. Samson (1986) Uncertainty in trajectory calculations due to low resolution meteorological data. J. Clim. and Appl. Meteor., 25, 1816-1831.
- Kai, K., Y. Okada, O. Uchino, I. Tabata, and H. Nakamura (1988) Lidar observation and numerical simulation of a Kosa (Asian dust) over Tsukuba, Japan during the spring of 1986. J. Meteor. Soc. Japan, 66, 457-472.
- Kuo, Y.H., M. Skumanich, P.L. Haagenson, and J.S. Chang (1985) The accuracy of trajectory models as revealed by the observing system simulation experiments. Mon. Wea. Rev., 113, 1852-1867.
- McRac, G.J., W.R. Goodin, and J.H. Seinfeld (1982) Numerical solution of atmospheric diffusion equation for chemically reacting flows, J. Com. Phys., 45, 1-42.
- Merill, J.T., R. Bleck, and D. Boudra (1985) Techniques of Lagrangian trajectory analysis in isentropic coordinates, Mon. Wea. Rev., 114, 571-581.
- Samson, P.J (1980) Trajectories analysis of summertime sulfate concenaration in the northeastern United States. J. Appl. Meteor., 19, 1382-1394.
- Smolarkiewicz, P.K.(1983) A simple positive definite advection scheme with small implicit diffusion, Mon. Wea. Rev., 111, 479-486.
- Stull, R.B.(1988) *An introduction to boundary layer meteorology*, Kluwer Academic Publishers, pp.666.
- Westphal, D.L., O.B. Toon, and T.N. Carlson (1987) A two-dimensional numerical investigation of the dynamics and microphysics of Sahara dust storms. J. Geophys. Res., 92(D3), 3027-3049.
- Yang, D., X. Xu, and Y. Wen (1991) A case study on sandstorm. Acta Meteorologica Sinica, 5(2), 150-159.