韓國環境科學會誌 第3卷(第1號), 39~47, 1994

중규모 국지 순환에서 대기 오염 물질의 확산에 관한 연구

이 화 운 · 오 은 주

부산대학교 대기과학과
(1994년 1월 10일 접수)

A Study on the Dispersion of Air Pollutants in Local Circulation of Mesoscale

Hwa-Woon Lee* and Eun-Joo Oh**

Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Pusan, Korea
(Manuscript received 10 January 1994)

Abstract

Dispersion characteristics of air pollutants in the mountainous coastal area are investigated in considering with the mesoscale local circulations using a two dimensional numerical model with two kinds of topograpy of 500m and 300m. In the model, land-sea breezes and mountain-valley wind are mainly considered under the condition of the absence of large scale prevailing flow in the circulation analysis, and the pollutants dispersion is traced by the Lagrangian methods.

According to the results, the wind velocity is affected by topography and is stronger in the case of 500m height mountain than that of 300m, the pollutants that source is near the coast transported over the mountain and dispersed to behind inland area.

It is classified that the topography change control affects the wind velocity and the circulations. The pollutants that source is different transported and concentrated to behind inland and/or diffused to the sea area by the combination of the wind system with topographic changes.

The results can be applied to the air pollution control with the arrangement design of industrial area and the planning of coastal developments.

Key Words : local circulation of mesoscale, dispersion of air pollutants, land-sea breezes, mountain-valley wind, Lagrangian methods

1. 서 론

경제개발이 시작되면서 급속한 공업화와 산업활동의 증가로 대기는 해마다 오염도가 증가되어 왔으며, 최근에는 그 정도가 매우 심각한 상태에 이르게 되었다. 대기의 오염도는 오염원과 오염 물질의 종류와 특성에 따라 좌우되지만, 오염원의 위치 및 오염 물질의 배출시간, 그리고 지형에 큰 영향을 받는다. 특히 우리 나라는 삼면이 바다이고, 70%가 산지이므로 해륙풍과 산곡풍 등과 같은 국지 순환과 관련하여 오염 물질의 이동과 확산은 더욱 중요하게 되었다.

Kondo와 Gambo(1979)는 오염원이 연안 가까이에 위치할때 해륙풍에 의한 오염 물질의 확산과 수송을 연구하고, 그 오염 물질과 혼합층 사이 관계를 보여주었다. 그 결과 해풍이 내륙으로 진입

하게 되면 혼합층이 성장하지 못하여 오염원이 혼합층보다 높게 위치하고 있는 경우, 혼합층에서의 오염 농도가 낮게 나타나는 것을 밝혔다. Oke (1978), Yoshikado와 Kondo(1989) 그리고 Yoshikado (1992)는 해풍으로 인하여 해안 지역에 위치한 대도시 지역으로 오염 물질이 수송될 때, 해풍 구조에 큰 영향을 미치는 도시 열섬에 의해 오염 물질의 수직적 팽창이 일어난다는 결과를 얻었다. 또한 Kimura(1988)와 Yamazawa(1992)는 Tsukuba 산 주변에서 혼합층이 발달한 경우와 안정성층의 경우에 실시한 실험과 수치 모델을 사용하여 안정성층일 때의 확산이 지형에 크게 영향을 받는다는 결론을 얻었다. 또한 박순웅(1992)은 Lagrangian 입자 확산 모델은 기존의 가우스형 확산모델이 다룰 수 없는 시공간상의 기상장의 변화와 오염원으로부터 상당히 멀리 떨어져 있는 곳까지의 확산을 쉽게 다룰 수 있었으나, 계산시간이 많이 소요되는 단점이 있다는 결론을 얻었다. 그리고 김상헌과 박순웅(1993)은 배출원의 특성이 지상 오염 농도에 미치는 영향을 Lagrangian 입자 확산 모델을 이용하여 연구하였으며, 연기 상승고를 고려하면 고려하지 않은 경우보다 오염원으로부터 풍하측으로 비교적 멀리 떨어진 거리의 지상 평균 오염 농도를 증가 시킬수 있지만, 최대 오염 농도를 감소시킬 수 있다는 결론을 얻었다.

본 연구에서는 지형의 영향이 고려되고 국지적인 효과를 정확하게 표현될수 있는 2차원, 기초 방정식을 사용하여 해륙풍, 산곡풍 및 해륙풍과 산곡풍이 합쳐져 나타나는 순환 등이 지형의 높이에 따라 오염원에서 방출되는 오염 물질의 이류 확산에 미치는 영향에 대하여 Largrangian 방법으로 비교, 고찰 연구하고자 한다. 단, 여기서 오염 물질의 화학적 변화는 무시한다.

2. 수치 모델

2.1 기초 방정식

기초 방정식계는 운동량, 질량, 열에너지 등의 보존식에 기초한 운동 방정식, 온위방정식, 비습 방정식, 연속 방정식, 정역학 방정식이다.

본 연구에서는 지형의 기복에 관계없이 계산할 수 있는 지형 좌표계를 사용하였다.

연직 좌표로 지형 좌표계로의 변환식은

$$z^* = \bar{s}\,\frac{z - z_G}{s - z_G} \tag{1}$$

을 이용한다. 여기서 z는 높이, z_G는 지형고도, $\bar{s}$는 계산 영역 상면의 고도, s는 $\bar{s}$를 고정시켜 질량보존을 고려하여 시간과 장소에 따라 변하는 물질표면으로 s(x,z,t)이다.

지형 좌표계에 의한 2차원 해륙풍 모델의 기초 방정식은 다음과 같다.

먼저 운동 방정식은

$$\frac{du}{dt} = fv - C_p\theta\frac{\partial \Pi}{\partial x} + g\frac{z^* - \bar{s}}{\bar{s}}\left(\frac{\partial z_G}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(K_H\frac{\partial u}{\partial x}\right) + \left(\frac{\bar{s}}{s - z_G}\right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*}\left(K_V^{(m)}\frac{\partial u}{\partial z^*}\right) - g\frac{z^*}{\bar{s}}\frac{\partial s}{\partial x} \tag{2}$$

$$\frac{dv}{dt} = -fu + \left(\frac{\bar{s}}{s - z_G}\right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*}\left(K_V^{(m)}\frac{\partial v}{\partial z^*}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(K_H\frac{\partial v}{\partial x}\right) \tag{3}$$

으로 표시된다. 온위 방정식과 비습 방정식은 각각

$$\frac{d\theta}{dt} = \left(\frac{\bar{s}}{s - z_G}\right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*}\left(K_V^{(\theta)}\frac{\partial \theta}{\partial z^*}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(K_H\frac{\partial \theta}{\partial x}\right) \tag{4}$$

$$\frac{dq_v}{dt} = \left(\frac{\bar{s}}{s - z_G}\right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*}\left(K_V^{(q)}\frac{\partial q_v}{\partial z^*}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(K_H\frac{\partial q_v}{\partial x}\right) \tag{5}$$

이고, 연속 방정식은

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w^*}{\partial z^*} - \frac{1}{s - z_G}\left(u\frac{\partial z_G}{\partial x}\right) + \frac{1}{s - z_G}\left(\frac{\partial s}{\partial t} + u\frac{\partial s}{\partial x}\right) = 0 \tag{6}$$

이고, 정역학 방정식은

$$\frac{\partial \Pi}{\partial z^*} = -\frac{s - z_G}{\bar{s}}\frac{g}{C_P\theta} \tag{7}$$

이다. 또한 지중 온도 방정식은

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(K_s \frac{\partial T_s}{\partial z} \right) \quad (8)$$

으로, 여기서

$$\frac{\partial \bar{s}}{\partial t} = -\frac{1}{\bar{s}} \int_0^{\bar{s}} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} [\, u(s - z_G) \,] \right\} dz^* \quad (9)$$

$$w^* = w \frac{\bar{s}}{s - z_G} + \frac{z^* - \bar{s}}{s - z_G} \left(u \frac{\partial z_G}{\partial x} \right) - \frac{z^*}{s - z_G} \left(\frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial s}{\partial x} \right) \quad (10)$$

$$\Pi = \left(\frac{P}{P_{00}} \right)^{R_d / C_p} \quad (11)$$

$$\theta = T \left(\frac{P_{00}}{P} \right)^{R_d / C_p} \quad (12)$$

$$f = 2\Omega \sin\varphi \quad (13)$$

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + w^* \frac{\partial}{\partial z^*} \quad (14)$$

이다. u, v, w는 각각 x, y, z 방향의 속도 성분(m/s), w*는 지형 좌표계에 의한 연직 방향의 속도 성분(m/s), t는 시간(s), θ는 온위(K), q_v는 비습(g/kg), T는 온도(K), T_s는 지중의 온도(K), K_s는 토양의 열 확산 계수(m^2/s), R_d는 공기의 기체상수(J/gK), P는 기압(mb), C_p는 정압비열(J/kgK), P_{00}는 기준 level의 기압(mb), f는 Coriolis parameter (s^{-1}), φ는 위도(deg), Ω는 지구의 회전각속도 (rad/s), g는 중력가속도(m/s^2), K_H는 수평 방향 확산 계수(m^2/s) 그리고 $K_v^{(m)}$, $K_v^{(\theta)}$, $K_v^{(q)}$는 각각 운동량, 열, 비습의 연직 방향의 확산 계수(m^2/s)이다.

2.2 연직 방향과 수평 방향 확산 계수

대기 경계층은 지상으로부터 30m까지를 접지층, 그 위를 Ekman층으로 구분하여 각각에 적합한 모델화를 행하였다.

Ekman층은 대기 상태에 따른 난류 효과를 잘 표현한다고 생각되는 Yamada(1975)에 의한 종결 모델을 사용하여 난류 확산 계수를 표현하였다. 그 식은 다음과 같이 나타낸다.

$$\overline{\theta'^2} = B_2 \, \ell^2 \, S_H \left(\frac{\partial \theta}{\partial z} \right)^2 \quad (15)$$

$$S_M = C_M \frac{(R_{ifc} - R_{if})(R_{f1} - R_{if})}{(1 - R_{if})(R_{f2} - R_{if})} \quad (16)$$

$$S_H = C_H \frac{R_{ifc} - R_{if}}{1 - R_{if}} \quad (17)$$

$$K_v^{(m)} = q \, \ell \, S_M \quad (18)$$

$$K_v^{(\theta)} = K_v^{(q)} = q \, \ell \, S_H \quad (19)$$

여기서 C_M = 1.4326687, C_H = 1.9527037, R_{f1} = 0.3257390, R_{f2} = 0.3161959이고, R_{if}은 flux Richardson수, R_{ifc}은 임계 flux Richardson수 (=0.2748189), q^2은 속도 변동 에너지, ℓ은 혼합 길이 그리고 u', v', θ'은 u, v, θ의 변동량이다. 실험 상수의 값은 A_1 = 0.78, A_2 = 0.78, B_1 = 15.0, B_2 = 8.0, C_1 = 0.3을 사용하였다.

접지층내에서는 Monin-Obukhov의 상사 이론에 기초한 Businger *et al.*(1971)의 무차원 풍속, 온위의 표현식을 이용하여 운동량 플럭스와 열 플럭스 및 연직 확산 계수를 나타내었으며, 그 식은 다음과 같다.

$$\varphi_m(\zeta) \equiv \frac{\kappa z}{u_*} \frac{\partial U}{\partial z} \quad (20)$$

$$\varphi_h(\zeta) \equiv \frac{\kappa z}{\theta_*} \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (21)$$

$$K_v^{(m)} = \frac{u_*^2}{\partial u / \partial z} = \frac{\kappa \, u_* \, z}{\varphi_m} \quad (22)$$

$$K_v^{(\theta)} = \frac{u_* \, \theta_*}{\partial \theta / \partial z} = \frac{\kappa \, u_* \, z}{\varphi_h} \quad (23)$$

여기서 u_*는 마찰 속도, θ_*는 마찰 온위, κ는 Karman상수, $U = (u^2+v^2)^{1/2}$, $\zeta = z/L$를 나타내며, L는 Monin-Obukhov의 길이이다.

수평 방향의 확산 계수는 계산이 불안정하게 하지 않을 정도의 충분히 큰 값인 10000 m^2/s로 하였다.

2.3 지표면 열수지 방정식

지표면에 열축척이 없다면, 지표면에서의 열수

지 방정식은

$$Q_R + Q_C - Q_G + Q_A = 0 \quad (24)$$

이다. 이 식은 또한 다음과 같이 나타내어진다.

$$R_S + R_L + H + LE - Q_G + Q_A = 0 \quad (25)$$

여기서 R_S는 태양복사 플럭스(cal/m^{2}s), R_L는 장파복사 플럭스(cal/m^{2}s), H는 현열 플럭스(cal/m^{2}s), LE는 잠열 플럭스(cal/m^{2}s), Q_G는 토양으로의 전도열(cal/m^{2}s), Q_A는 인공열(cal/m^{2}s)를 나타낸다. 위 식을 수식화하여 나타내면

$$(1-A)\,T_r\,R_0\cos Z + \sigma[\{E_a(1-C_{cloud}) + C_{cloud}\}T_a^4] - \sigma T_G^4 + \rho C_p\,u_*\,\theta_* + \rho L_w\,u_*\,q_{v*} - \rho_s C_s\int_{-z_{G0}}^{0}\frac{\partial T_s}{\partial t}\,dz + Q_A = 0 \quad (26)$$

여기서 Ea는 $[1-0.261\exp\{-7.77\times10^{-4}(273-T_a)^2\}]$, A는 지표면 albedo, T_r은 대기의 투과율, R_0는 태양상수(=323.3cal/m^{2}s), Z는 천정각 (deg), σ는 Stefan-Boltzman 상수(=1.38×10^{-8} cal/m^{2}sK^4), T_a는 Stevenson screen 고도(~1.5m), C_{cloud}는 운량, ρ는 대기밀도(=1226g/m^3, 15℃), L_w는 잠열(=588.7cal/g, 15℃), ν_s는 토양의 열전도율(cal/mKs), w′, q_v′는 각각 w, q_v의 변동량, T_s는 토양의 온도(K), ρ_s는 토양의 밀도(g/m^3), C_s는 토양의 비습(cal/kgK), z_{G0}는 지중 경계의 깊이(=1m)를 나타낸다.

지표면 온도 T_G는 식 (26)을 Newton-Raphson 법으로 풀어서 구한다.

식(26)의 좌변은 T_G의 함수($F(T_G)$)로 둘수 있기 때문에

$$T_G^{n+1} = T_G^n - F(T_G) / F'(T_G) \quad (27)$$

에 의해 T_G의 수렴치가 얻어진다.

이때 수렴조건은

$$| F(T_G) | \le \varepsilon \ (\varepsilon = 10^{-5}) \quad (28)$$

을 이용한다.

여기서 $F'(T_G)$는 $F(T_G)$를 T_G에 대해서 미분한 값이다.

2.4 Lagrangian 방법

Lagrangian 입자 확산 모델은 연속적으로 배출되는 입자들의 위치를 계속적으로 결정하는 것이다.(McNider, 1981 ; Arritt, 1985)

즉, 운동량의 영향을 고려한 배출된 입자의 위치는

$$\begin{bmatrix} X_{n+1} \\ Z_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_n \\ Z_n \end{bmatrix} + \frac{1}{2}\begin{bmatrix} du/dt \\ dw/dt \end{bmatrix}\Delta t^2 \quad (29)$$

이다.

만약, du/dt = constant이고, dw/dt = constant 이면, 위 식은 다음과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} X_{n+1} \\ Z_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_n \\ Z_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_n \\ w_n \end{bmatrix}\Delta t \quad (30)$$

여기서 X_n, Z_n는 오염 물질의 현재의 위치를 나타내고, X_{n+1}, Z_{n+1}는 Δt후의 오염물질의 새로운 위치를 나타내며, Δt는 시간 변화를 표시하고, u_n와 w_n는 입자가 위치한 곳에서의 종관 바람의 중규모 바람 성분과 난류 성분을 합한 바람 성분으로 다음과 같이 나타낸다.

$$u_n=\alpha_1 \cdot u_{i,k}+\alpha_2 \cdot u_{i+1,k}+\alpha_3 \cdot u_{i+1,k+1}+\alpha_4 \cdot u_{i,k+1} \quad (31)$$

$$w_n=\alpha_1 \cdot w_{i,k}+\alpha_2 \cdot w_{i+1,k}+\alpha_3 \cdot w_{i+1,k+1}+\alpha_4 \cdot w_{i,k+1} \quad (32)$$

위 두식에서 α_N은 가중치로 다음과 같다.

$$\alpha_N = \frac{\sum_{n=1}^{4} R_n - R_N}{(2^D-1)\times\sum_{n=1}^{4} R_n} \quad (33)$$

위 식에서 N은 1에서 4까지 변하고, R은 각 격자점과 오염 물질의 위치(X_n, Z_n)사이의 거리로 Fig. 1에 잘 표현되어 있다. D는 차원을 의미하며, 여기서는 2차원이므로 2이다.

2.5 계산 영역과 격자 간격

본 연구에서 사용된 계산 영역은 수평 방향을 100km로 하고, 격자 간격은 5km로 하였다. 연직 방향으로는 4800m까지 50층으로 나누어, u와 w의 두번째의 격자점이 있는 높이 30m를 접지층이라고 가정한다. 지중은 1m까지를 14층으로 나누고 지중 1m에서의 경계 조건은 플럭스를 0으로 했다.

지형은 산의 높이를 300m와 500m의 2가지 경우로 나누어 생각하고, 산의 half-width는 20km로 두었다.

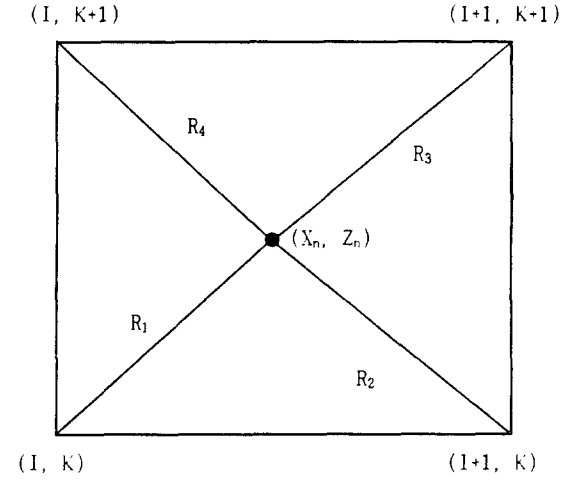

Fig.1. Schematic picture of distances between each grid print and a pollutant position

2.6 초기 조건과 경계 조건

본 모델에 사용한 계산의 초기 조건으로 먼저 전 영역이 정상 상태에 있다고 가정한다. 지표면의 경계 조건으로는 연직 방향의 풍속에 대해서는 w = 0으로 하였고, 수평 방향 풍속에 대해서는 지표면에 격자점이 없기 때문에 지표면에 최대로 가까운 점의 값을 지표층의 마찰 속도로부터 구해 그 값을 경계치로 한다. 온위에 대해서는 바다와 육지로 분리하여, 해면은

$$\theta = \theta_{sea} \qquad (34)$$

으로 하고, 육지 표면은 2.3절에 나타낸 지표면 열수지 모델을 이용해서 결정된 T_G를 경계치로 사용한다. 비습은 온위와 같은 방법으로 구한다.

상면에서의 경계 조건은 지표면 가열에 의해서

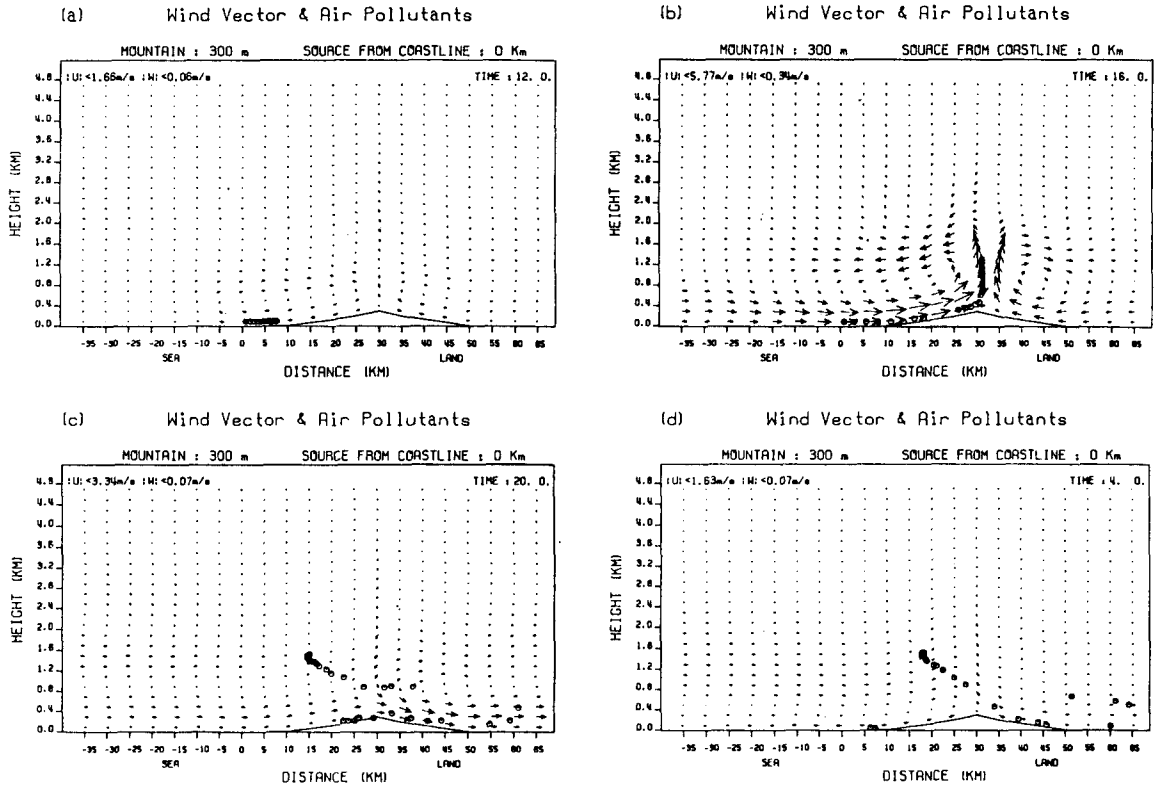

Fig. 2. Distribution of pollutants of hypothetical air parcels calculated by the Lagrangian method at (a) 1200LST, (b) 1600LST, (c) 2000LST, (d) 0400LST in the source of coastline and the case of 300-mountain.

일어나는 일변화가 상면에서는 일어나지 않는다고 가정하여 다음과 같이 하였다. 즉

$$U_{max}=U_g \tag{35}$$

$$V_{max}=V_g \tag{36}$$

로 정하였고, 또 전 변수에 대해서는

$$\frac{\partial u}{\partial t}=\frac{\partial v}{\partial t}=\frac{\partial \theta}{\partial t}=\frac{\partial q_v}{\partial t}=\frac{\partial \Pi}{\partial t}=0 \tag{37}$$

로 하였다.

측면에서 경계 조건으로, 유입(inflow)에서는

$$\frac{\partial u}{\partial t}=\frac{\partial v}{\partial t}=\frac{\partial \theta}{\partial t}=\frac{\partial q_v}{\partial t}=\frac{\partial \Pi}{\partial t}=0 \tag{38}$$

으로 하고, 유출(outflow)에서는 vector양(u, v)과 scalar양(q_v, θ)으로 나누어 경계 조건을 설정하였다.

3. 계산 결과

계산 결과는 배출원이 해안선인 경우와 해안선으로부터 55km인 각각의 경우에 오염물질을 8000 LST부터 1600LST까지 10분 간격으로 연속 방출하여, 그 오염 물질의 이동과 확산을 보게 된다. 각 그림에서 화살표는 바람의 방향과 크기를 나타내며, 둥근 모양의 표시는 오염 물질을 나타낸다.

300m의 지형과 배출원이 해안선인 경우가 Fig. 2에 나타나며, Fig. 2(a)는 1200LST에 오염 물질이 산을 타고 올라가는 것을 보여 준다. Fig. 2(b)에는 1600LST에 해풍과 곡풍이 합쳐져서 곡풍에 의한 바람보다 더 강하게 나타나고, 오염 물질은 이 강한 상승류를 타고 상승하게 된다. Fig. 2(c)에는 2000LST에 해풍이 산을 넘어가며, 이 바람을 타고 오염 물질이 산을 넘어 간다. 그리고 Fig.

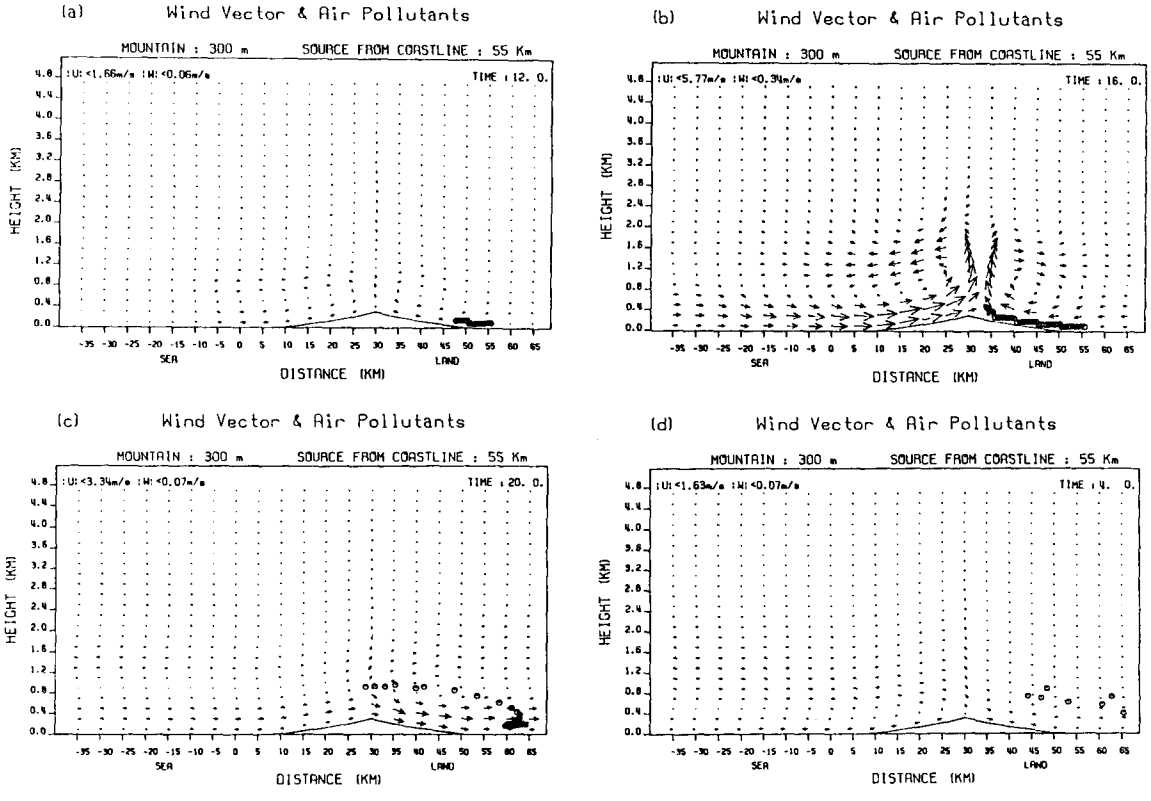

Fig. 3. Same as in the Fig. 2, but for the source of 55km from coastline and the case of 300-mountain.

2(b)의 상승한 오염 물질은 그대로 정체하게 된다. Fig. 2(d)에는 다음날 0400LST에 오염 물질이 내륙(오른쪽 domain밖)으로 이동하고, 오후에 방출된 오염 물질중 소량의 오염 물질만이 배출원 주위인 해안선 근처로 이동하게 된다.

300m의 지형과 배출원이 해안선으로부터 55km인 경우가 Fig. 3에 나타나며, Fig. 3(a)에는 1200 LST에 오염 물질이 산을 타고 서서히 이동하기 시작하며, Fig. 3(b)에는 1600LST에 곡풍에 의해서 오염 물질이 산을 타고 이동하는 것을 보여준다. Fig. 3(c)에는 2000LST에 해풍이 산을 넘어가며, 이 바람에 의해 산을 넘어오던 오염 물질은 다시 배출원 주위로 고농도로 밀려오게 된다. 그리고 Fig. 3(d)에서는 다음날 0400LST에 내륙(오른쪽 domain밖)으로 이동하고 남은 소량의 오염 물질만이 남게 된다.

500m의 지형과 배출원이 해안선인 경우가 Fig. 4에 나타나며, Fig. 4(a)에는 1200LST에 300m의 지형보다 더 빨리 오염 물질이 산을 타고 올라가고, 지형의 영향에 의해 형성된 해풍과 곡풍이 합쳐진 바람은 산 뒷쪽의 곡풍보다 더 강하여 산을 넘어가게 되지만, 산 뒷쪽에서 곡풍에 의해 들어올려진다. Fig. 4(b)에는 1600LST에 Fig. 4(a)에 나타난 순환보다 더 강하게 나타나고, 오염 물질은 이 바람을 타고 산을 넘어 상승하게 된다. Fig. 4(c)에는 2000LST에 산을 넘어오는 해풍과 내륙으로 내려오는 산풍이 합쳐져 산 뒷쪽에서 더 강한 바람이 나타나고, 이 바람을 타고 오염 물질이 내륙으로 이동하게 된다. 그리고 오후에 방출된 오염 물질은 약해진 해풍에 의해 산사면에 머물러 있게 된다. Fig. 4(d)에는 다음날 0400LST에 지표 근처에 있는 오염 물질이 내륙(오른쪽 domain밖)

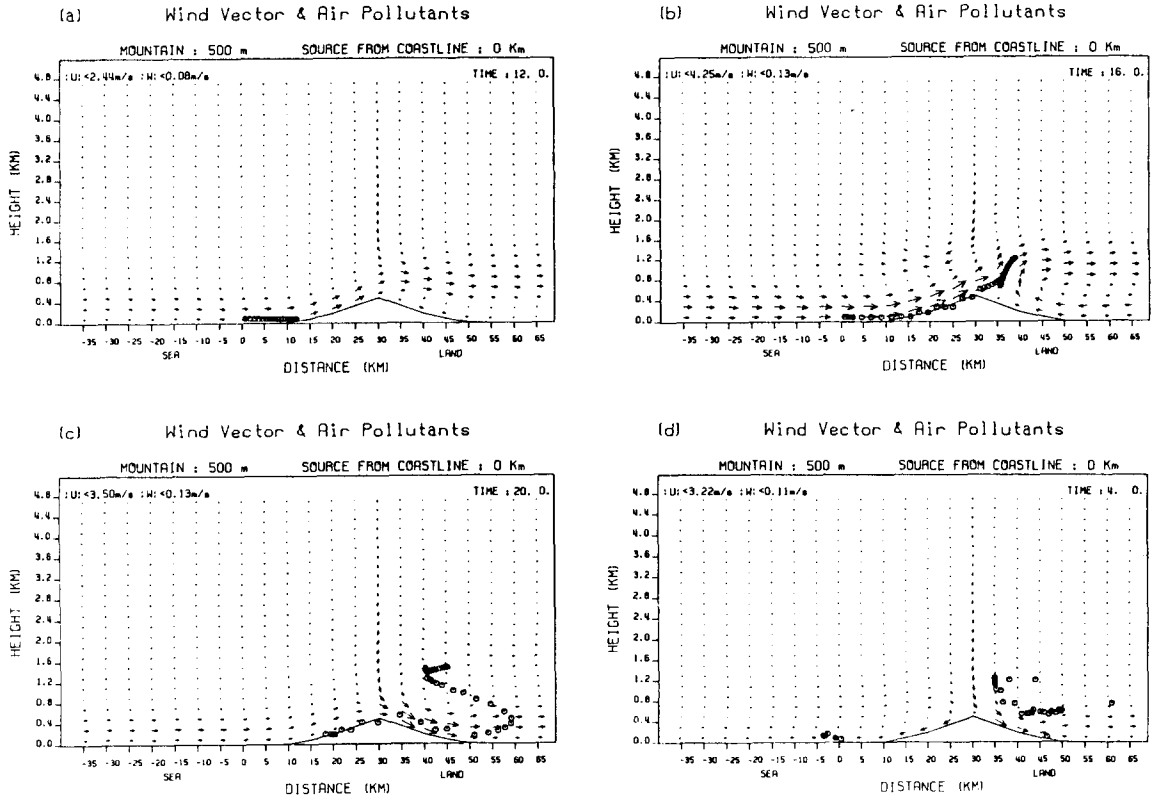

Fig. 4. Same as in the Fig. 2, but for the source of coastline and the case of 500-mountain.

으로 이동하고, 상층에 머물러 있던 오염 물질은 하강류에 의해 차츰 하강하게 된다. Fig. 4(c)의 산사면에 있던 오염 물질은 바다로 이동하게 된다. 즉 오후 늦게 방출된 오염 물질은 산을 넘지 못하고 배출원 지역으로 다시 되돌아 오게 된다.

500m의 지형과 배출원이 해안선으로부터 55km인 경우가 Fig. 5에 나타나며, Fig. 5(a)에는 1200LST에 오염 물질이 배출원 주위에 몰려 있고, Fig. 5(b)에는 1600LST에 곡풍에 의해서 오염 물질이 산을 타고 이동하고 있으며, 산꼭대기 근처에는 산을 넘어오는 강한 해풍을 보여 준다. Fig. 5(c)에는 2000LST에 산풍의 발달로 산사면을 따라 이동하던 오염 물질이 다시 배출원 주위로 고농도로 밀려와 내륙으로 이동하게 되고, FIg.5(b)의 산을 넘어오는 해풍에 의해 상승한 오염 물질은 정체하게 된다. 그리고 Fig. 5(d)에는 다음날 0400LST에 배출원 주위에 고농도로 몰려 있던 오염 물질이 내륙(오른쪽 domain밖)으로 이동하고, Fig. 5(c)에 정체해 있던 소량의 오염 물질만이 남게 된다.

4. 결 론

지형의 기복에 관계없이 자유롭게 계산할 수 있고, 지표면 열수지 모델을 정식화하여 대기의 상태나 지표면 상황 등을 잘 표현할 수 있는 2차원 해륙풍 모델을 이용해서 지형의 유무에 따라 수치모의한 결과를 비교하여 다음과 같은 결론를 얻었다.

(1) 300m의 지형의 산이 있는 경우에 배출원이 연안에 있으면, 오염 물질은 2000LST에 산을 넘

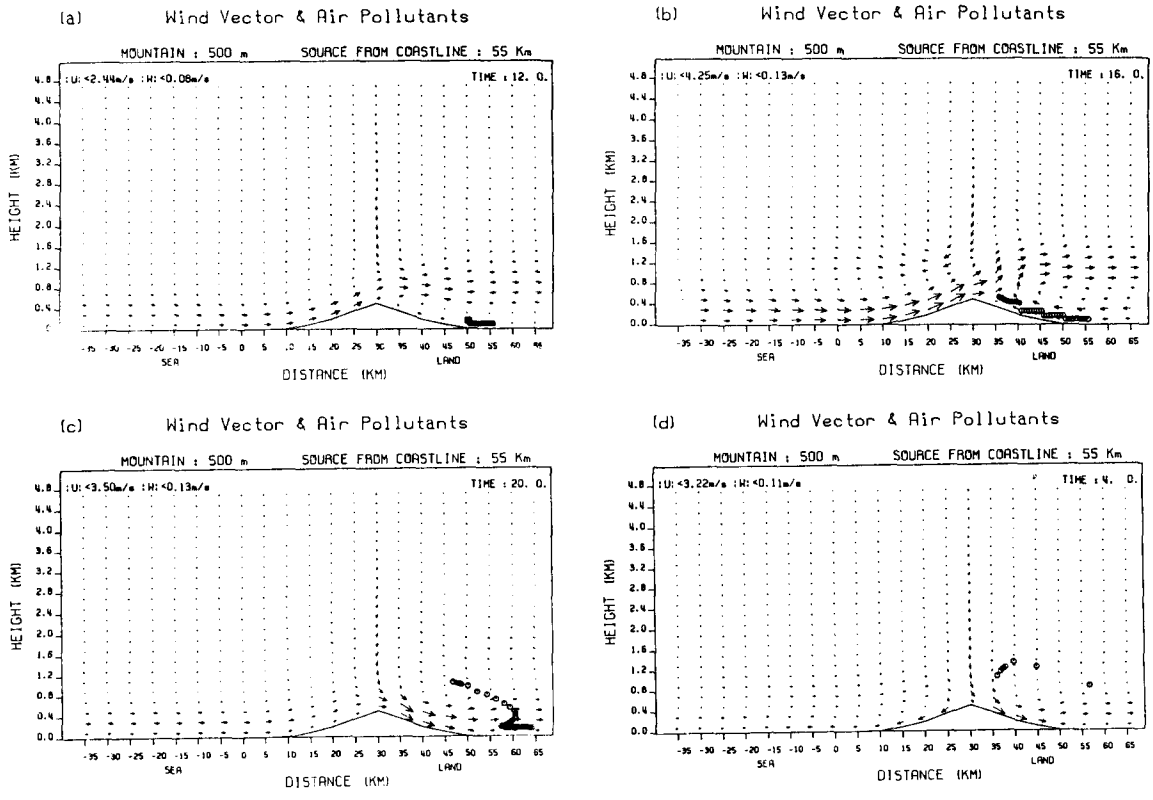

Fig. 5 Same as in the Fig. 2, but for the source of 55Km from coastline and the case of 500-mountain.

어 내륙으로 계속 이동하고, 고도는 1.4km에 이르며, 소량의 오염 물질이 배출원 주위로 이동한다. 배출원이 내륙에 있으면, 오염 물질은 1600LST에 산을 넘어 해안으로 이동하며, 2000LST에는 다시 산을 넘어 내륙으로 침입하게 된다. 고도는 1.6km에 이른다. 이 경우는 바다로 이동하는 오염 물질은 없으며, 해안 지역에는 거의 영향을 미치지 않는다.

(2) 500m의 지형의 산이 있는 경우에 배출원이 연안에 있으면, 오염 물질은 1400LST에 산을 넘어 내륙으로 계속 이동하고, 고도는 1.6km에 이른다. 이 경우는 내륙 지역에도 영향을 미치고, 오후에 방출된 다량의 오염 물질이 배출원 주위로 다시 되돌아 와서 바다로 이동하는 가장 좋은 경우이다. 배출원이 내륙에 있으면, 오염 물질은 1800LST에 산을 넘어 해안으로 이동하며, 2000LST에는 다시 산을 넘어 내륙으로 침입하게 된다. 고도는 1.6km에 이른다. 이 경우는 바다로 이동하는 오염 물질이 없고, 해안 지역에는 전혀 영향이 없으며 가장 고농도의 오염 물질이 형성되어 내륙으로 이동한다.

이와 같은 결과로 배출원의 위치 및 지형 효과가 오염 물질의 농도와 분포에 큰 영향을 미침을 알 수 있었다.

본 연구에서 작성된 모델을 실제 지역에 적용할 경우, 그 지역의 오염 물질의 이동 경로 및 농도 분포를 예측하여 저감 대책에 사용될 수 있을 뿐 아니라, 새로운 배출원을 계획할 경우, 지역의 특성을 고려하여 오염 물질의 농도 분포를 예측함으로써 가장 합리적인 입지 조건을 판단하는데 좋은 자료로 이용되어질 것으로 사료된다.

실제의 정확한 대기 오염 물질 예측에 사용되기 위해서는 대기 오염 물질의 침적 작용과 광화학 반응 과정 등을 포함한 연구가 필요하다고 생각된다.

참고문헌

김상현, 박순웅, 1993, 연기 상승 효과가 지상 오염 농도에 미치는 영향, 한국기상학회지, 29(1), 53-67.

박순웅, 1992, Lagrangian 입자 확산 모델링, 한반도의 국지 기상 특징과 대기환경 Workshop., 3-31.

Arritt, R. W., 1985, Numerical studies of thermally and mechanically forced circulations over complex terrain, Ph. D. dissertation, Dept. Atmos. Sci., Colorado State University, Fort Collins.

Businger, J. A. et al., 1974, Flux-Profile Relationships in the Atmospheric Surface Layer, J. Atmos. Sci., 28, 181-189.

Kimura, F., 1988, A Simulation of Wind and Air Pollution over Complex Terrain using a Hydrostatic Numerical Model, Atmos. Env., 23, 723-730.

Kondo, H. and K. Gambo, 1979, The Effect of the Mixing Layer on the Sea Breeze Circulation and the Diffusion of Pollutants associated with Land-Sea Breezes, J. Meteor. Soc. Japan, 57(6), 360-575.

McNider, R. T., 1981, Investigation of the impact of topographic circulations on the transport and dispersion of air pollutants, Ph. D. dissertation, Dept. Envir. Sci., Univ. Virginia, Charlottesville.

Oke, T. R., 1978, Boundary Layer Climates, 372pp.

Yamada, T., 1975, The Critical Richardson Number and the Ratio of the Eddy Transport Coefficients Obtained from a Turbulence Closure Model, J. Atmos. Sci., 32, 926-933.

Yamazawa, H., 1992, Analysis and numerical simulation of field tracer experiments around Mt. Tsukuba, Tenki, 39(10), 605-613.

Yoshikado, H., 1992, Numerical Study of the Daytime Urban Effect and its Interaction with the Sea Breeze, J. Appl. Meteor., 31, 1146-1164.

Yoshikado, H. and H. Kondo, 1989, Inland Penetration of the Sea Breeze over the Suburban Area of Tokyo, Bound. Layer Meteor., 48, 389-407.