

연안도시지역의 대기유동장에서 대기오염물질의 확산과 이동에 관한 수치모의

이 화 운 · 김 유 근 · 원 경 미 · 오 은 주
부산대학교 대기과학과
(1997년 5월 10일 접수)

Numerical Simulation for Diffusion and Movement of Air Pollutants in Atmospheric Flow Field of Coastal Urban Region

Hwa-Woon Lee, Yoo-Keun Kim, Gyeong-Mee Won, and Eun-Joo Oh
Dept. of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Pusan, Korea
(Manuscript received 10 May 1997)

To predict diffusion and movement of air pollutants in coastal urban region a numerical simulation should be consider atmospheric flow field with land-sea breeze, mountain-valley wind and urban effects. In this study we used Lagrangian particle dispersion method in the atmospheric flow field of Pusan coastal region to depict diffusion and movement of the pollutants emitted from particular sources and employed two grid system, one for large scale calculating region with the coarse mesh grid (CMG) and the other for the small region with the fine mesh grid (FMG). It was found that the dispersion pattern of the pollutants followed local circulation system in coastal urban area and while air pollutants exhausted from Sasang moved into Baekyang and Jang moutain, air pollutants from Janglim moved into Hwameong-dong region.

Key words : diffusion, movement, coastal urban region, atmospheric flow field, Lagrangian particle dispersion model, particular sources, two grid system

1. 서 론

대기 확산수치모델에서 유체의 수송을 묘사하는 근원적인 방법으로 Lagrangian 방법과 Eulerian 방법이 있다. Lagrangian 식은 특정 오염물질의 이동을 추적하는 것으로 난류흐름장에서 복잡한 유적선을 따르는 유체의 운동을 묘사하는데 적합한 반면, 열전달이나 질량전달 현상을 다루는데 일반적인 방법으로 이용되는 Eulerian 식은 공간내 특정한 위치에서 유체의 특성을 묘사하기 때문에 그 위치를 통과하는 무수

한 입자들과 관련된 특성과는 무관하다. 계산기의 발달과 더불어 대기의 분산을 묘사하던 Gaussian plume model과 Lagrangian puff model은 더욱 더 정확한 3-D Lagrangian Particle Dispersion Model(LPDMs)과 Eulerian advection-diffusion models로 대체될 수 있게 되었다. LPDMs은 수 많은 입자의 운동을 유도하는 평균 바람과 난류를 따라 방출된 물질의 확산과 수송을 묘사하며, 이러한 모델들은 수만개 혹은 수 십만개 이상의 입자를 수용할 수

있어 긴급한 상황에 적용하는데 유용하다. 그리고 Eulerian advection-diffusion model은 Eulerian계에서 면 혹은 체적(volume) 오염원으로 부터 오염물질의 방출과 분산을 묘사할 수 있어 모델의 계산정도는 방출된 입자의 수보다는 격자 분해능과 영역 크기에 비례한다고 볼 수 있다.

대기오염물질의 이동에 관한 선행연구들을 고찰해 보면, 1985년 Chung et al.은 오산, 광주 등의 고층 기상자료를 4차 다항식법을 이용한 내삽과정으로 격자자료를 만들어 6시간마다 공기의 이동을 추적하고 유적선의 정확도를 평가하였다. 정용승과 김태균(1991)은 2년간 태안에서 관측된 6개의 사례에 대해 기상조건을 분석하고 1000, 850, 700hPa 면의 유적선이 중국, 한국, 일본을 통과해 온 것과 관련한 장거리 수송효과를 언급하였다. 원경미(1991)는 부산지역의 지상풍 자료를 재분석하여 바람장을 계산한 후 backward trajectory를 통해 배출원과 대기질 농도와와의 관계를 설명하였다. 윤순창과 박경선(1991)은 1988년 4월 황사에 대해 등온위면상의 바람으로 유적선을 계산하였으며, 김정수 등(1992)은 1989년 9월부터 1990년 6월 사이에 서울, 강화, 태안에서 부유분진, 산성비가 동시에 관측된 사례 5가지를 세정이론을 이용하여 오염물질별 이동범위를 평가하고, 상층 일기도를 통한 유적선 분석을 실시하였다. 또한 강동근 등(1993)은 1년간의 850hPa면의 바람자료를 이용하여 서울, 부산, 북경, 상해, 오사카를 기점으로 하는 월별 유적선을 분석하였다. 또한 박순웅(1992)은 Lagrangian 입자확산 모델이 기존의 가우스형 확산모델에서 다룰 수 없는 시·공간상의 기상장의 변화와 오염원으로부터 상당히 멀리 떨어져 있는 곳까지의 확산을 쉽게 다룰 수 있으나, 계산시간이 많이 소요되는 단점이 있음을 지적했다. 그리고 김상현과 박순웅(1993)은 배출원의 특성이 지상오염농도에 미치는 영향을 Lagrangian 입자확산모델을 이용하여 연구하였는데, 연기 상승고를 고려하면 고려하지 않은 경우 보다 오염원으로 부터 풍하측으로 비교적 멀리 떨어진 거리의 지상 평균 오염농도를 증가시킬 수는 있지만, 최대 오염농도가 감소됨을 밝혔다. 이상인 등(1995)은 전형적인 3차원 Eulerian 대기확산모델인 STEM II를 이용하여

한국과 중국 동부지역 대기오염물질의 이동과 화학, 침착을 고려한 수치모의를 하였다. 정관영(1996)은 대기오염물질의 장거리 수송의 대표적인 예인 황사의 이동경로를 추적하기 위해 착지점의 4개 층에서 3차원 기상장을 이용하여 후진 유적선을 구한 다음, 착지점의 농도에 대한 각각 발원지에서의 기여도를 추정하였다.

또한 Lyons and Cole(1976)은 도시지역으로 수송되어 오는 오염물질의 양을 중규모 lake breeze와 종관적 측면에서 연구하였으며, Wolff et al.(1977), Hidemi Kurita et al.(1985)은 오존의 장거리 수송에 대해 연구하였다. Lindsay와 Chameides(1988)는 backward trajectory분석을 행하여 고농도일과 저농도일 기과의 전형적인 이동을 비교하였으며, Heidorn과 Yap(1986)은 고농도와 관련된 추적 가능한 주 오염원에 대해 논의하였다. Segal et al.(1988)은 기상 예측모델에서 얻은 바람장과 난류장에 의하여 해안가에 위치한 가상의 오염원에서 배출된 오염물질이 어떻게 수송 및 확산되는가를 Lagrangian 방법으로 계산하여 내륙에 위치한 국립공원에 미치는 영향을 조사한 바 있다.

따라서 본 연구에서는 부산연안 도시의 특정 배출원에서 배출되어진 대기오염물질의 확산과 수송 특성에 관해 연구하기 위하여 실제지형을 고려한 대기유동장에서 대기오염물질의 수송과정을 잘 묘사할 수 있는 Lagrangian particle dispersion model을 사용하여 고찰하였다. 여기서 특정 배출원은 부산지역에서 배출강도의 대부분을 차지하는 사상과 장림공단지역 두 곳으로 하였다.

2. 대기유동장 모델

2.1 기초방정식

지형좌표계에 의한 3차원 중규모 대기유동의 기초방정식은 다음과 같다.

운동방정식은

$$\begin{aligned} \frac{du}{dt} = & f v - c_p \theta \frac{\partial \Pi}{\partial x} + g \frac{z^* - s}{s} \left(\frac{\partial z_G}{\partial x} \right) - g \frac{z^*}{s} \frac{\partial s}{\partial x} \\ & + \left(\frac{\bar{s}}{s - z_G} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} (K_V^{(m)} \frac{\partial u}{\partial z^*}) \\ & + \frac{\partial}{\partial x} (K_H \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_H \frac{\partial u}{\partial y}) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} = -f u - c_p \theta \frac{\partial \Pi}{\partial y} + g \frac{z^* - s}{s} \left(\frac{\partial z_G}{\partial y} \right) - g \frac{z^*}{s} \frac{\partial s}{\partial y}$$

$$\begin{aligned}
 & + \left(\frac{\bar{s}}{s-z_G}\right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} (K_V^{(m)} \frac{\partial v}{\partial z^*}) \\
 & + \frac{\partial}{\partial x} (K_H \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_H \frac{\partial v}{\partial y}) \quad (2)
 \end{aligned}$$

온위방정식은

$$\begin{aligned}
 \frac{d\theta}{dt} & = \left(\frac{\bar{s}}{s-z_G}\right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} (K_V^{(\theta)} \frac{\partial \theta}{\partial z^*}) \\
 & + \frac{\partial}{\partial x} (K_H \frac{\partial \theta}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_H \frac{\partial \theta}{\partial y}) \quad (3)
 \end{aligned}$$

비습방정식은

$$\begin{aligned}
 \frac{dq_v}{dt} & = \left(\frac{\bar{s}}{s-z_G}\right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} (K_V^{(q)} \frac{\partial q_v}{\partial z^*}) \\
 & + \frac{\partial}{\partial x} (K_H \frac{\partial q_v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_H \frac{\partial q_v}{\partial y}) \quad (4)
 \end{aligned}$$

연속방정식은

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w^*}{\partial z^*} - \frac{1}{s-z_G} (u \frac{\partial z_G}{\partial x} + v \frac{\partial z_G}{\partial y}) \\
 + \frac{1}{s-z_G} (\frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial s}{\partial x} + v \frac{\partial s}{\partial y}) = 0 \quad (5)
 \end{aligned}$$

정역학방정식은

$$\frac{\partial \Pi}{\partial z^*} = -\frac{s-z_G}{s} \frac{g}{c_p \theta} \quad (6)$$

지중 온도 방정식은

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} (K_s \frac{\partial T_s}{\partial z}) \quad (7)$$

이다. 여기서 u, v, w 는 각각 x, y, z 방향의 속도 성분(m/s), w^* 는 지형좌표계에 의한 연직방향의 속도성분(m/s), t 는 시간(s), θ 는 온위(K), q_v 는 비습(kg/kg), T_s 는 온도(K), T_s 는 지중온도(K), K_s 는 토양의 열확산계수(m²/sec), g 는 중력가속도(m/s²), K_H 는 수평방향 확산계수(m/s²), 그리고 $K_V^{(m)}, K_V^{(\theta)}, K_V^{(q)}$ 는 각각 운동량, 열, 비습의 연직방향의 확산계수(m/s²)이다.

2.2 연직방향의 확산계수

대기경계층을 지상으로 부터 50m까지를 접지층, 그 위를 에크만층으로 나누어 각각 다른 모델화를 행하였다.

접지층내에서의 수송저항은 Monin-Obukhov의 상사이론을 풍속 및 온위의 연직분포에 적용한 Businger et al.(1971)의 무차원 풍속, 온위표현식을 이용하여 운동량과 열플럭스 및 연직방향 확산계수를 구하였다. 접지층은 정상적으로 수평방향으로 균일하다는 조건하에서, 풍속 및 온위의 연직경도는 보편함수에 의해

음과 같이 표현하였다.

$$\phi_m(\zeta) \equiv \frac{xz}{u_*} \frac{\partial U}{\partial z} \quad (8)$$

$$\phi_h(\zeta) \equiv \frac{xz}{\theta_*} \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (9)$$

여기서 u_* 는 마찰속도, θ_* 는 마찰온위, x 는 karman상수, $U = (u^2+v^2)^{1/2}$, $\zeta = z/L$ 이다.

운동량과 열의 연직방향 확산계수는 식(8)과 (9)를 이용하면

$$K_V^{(m)} = \frac{u_*^2}{\partial u / \partial z} = \frac{xu_*z}{\phi_m} \quad (10)$$

$$K_V^{(\theta)} = \frac{u_* \theta_*}{\partial \theta / \partial z} = \frac{xu_*z}{\phi_h} \quad (11)$$

으로 나타낼 수 있다. 따라서 $u_*, \theta_*, \phi_m, \phi_h$ 등이 결정되면 연직방향의 확산계수를 구할 수 있다. 비습의 연직방향 확산계수는 열확산계수와 같다 ($K_V^{(q)} = K_V^{(\theta)}$)고 가정하였다.

에크만 층은 대기상태에 따른 난류효과를 잘 표현한다고 생각되는 Yamada(1975)에 의한 종결모델(Closure model)을 사용하여 난류확산계수를 계산하였다.

운동량, 열, 비습의 확산계수는 다음과 같이 표현된다.

$$K_V^{(m)} = q S_M \quad (12)$$

$$K_V^{(\theta)} = K_V^{(q)} = q l S_H \quad (13)$$

여기서

$$S_M = C_M \frac{(Ri_{fc} - Ri_f)(R_{f1} - Ri_f)}{(1 - Ri_f)(R_{f2} - Ri_f)} \quad (14)$$

$$S_H = C_H \frac{Ri_{fc} - Ri_f}{1 - Ri_f} \quad (15)$$

이고, C, C_H, R_{f1}, R_{f2} 는 실험상수($C_{sub M} = 1.4326, C_{sub H} = 1.9527, R_{sub f1} = 0.3257, R_{sub f2} = 0.3161$), Ri_f 는 Flux Richardson 수, Ri_{fc} 는 임계 Flux Richardson 수(=0.2748189)이며, q^2 은 속도 변동에너지, l 은 혼합길이이다.

2.3 지표면 열수지 방정식

지표면 열수지방정식은

$$Q_R + Q_C - Q_G + Q_A = 0 \quad (16)$$

이고, 이 식은 또한 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_S + R_L + H + LE - Q_G + Q_A = 0 \quad (17)$$

여기서 Q_R 은 복사열로 태양복사플럭스인 R_S 와

장파복사플럭스인 R_L 로 나타내며, Q_C 는 대류 열로 현열플럭스인 H 와 잠열플럭스 LE 로 나눌 수 있고, Q_G 는 지중열플럭스, Q_A 는 인공열을 나타낸다.

지중에서는 열전도만을 고려하고 대기 중에서는 열전도를 무시하여 난류확산만을 생각하면, 태양복사 flux R_S 는

$$R_S = (1-A)T_s R_0 \cos Z \quad (18)$$

$$\cos Z = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos h \quad (19)$$

이고, 여기서 A 는 지표면 알베도, T_s 는 대기의 투과율, R_0 는 태양상수($323.3 \text{ cal/m}^2 \text{ s}$), Z 는 천정각, ϕ 는 위도, δ 는 적위(deg), h 는 태양시각(deg)을 나타낸다.

장파복사플럭스 R_L 은 Idso와 Jackson (1960)에 의해 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$R_L = \sigma [E_a (1 - C_{cloud}) + C_{cloud} T_a^4] - \sigma T_G^4 \quad (20)$$

$$E_a = 1 - 0.261 \exp[-7.77 \times 10^{-4} (273 - T_G)^2] \quad (21)$$

여기서 σ 는 Stefan-Boltzman 상수($=5.796 \times 10^{-8} \text{ J/m}^2 \text{ s}$), T_G 는 Stevensen screen 고도($=1.5 \text{ m}$)의 기온, T_G 는 지표면 온도, C_{cloud} 는 운량을 나타낸다. 또한 현열과 잠열 flux는 각각 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$H = -\rho C_p \overline{w'\theta'} = \rho C_p K_y^{(\theta)} \frac{\partial \theta}{\partial z} = \rho C_p u_* \theta_* \quad (22)$$

$$LE = -\rho L_w \overline{w'q_v'} = \rho L_w K_y^{(q)} \frac{\partial q_v}{\partial z} = \rho L_w u_* q_{v*} \quad (23)$$

위 식에서 ρ 는 대기밀도($=1.226 \text{ kg/m}^3$, 15° C), L_w 는 잠열($=2.46 \text{ J/kg}$, 15° C), w' , θ' , q_v' 는 각각 w , θ , q_v 의 변동량이다.

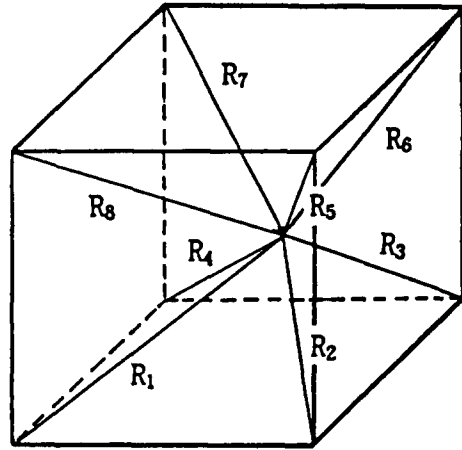
또한 토양으로의 열플럭스 Q_G 는 다음과 같이 표현되어진다.

$$Q_G = \rho_s C_s \int_{-Z_{G0}}^0 \frac{\partial T_s}{\partial t} dz \quad (24)$$

로 표현된다. T_s 는 토양온도(K), ρ 는 토양의 밀도(kg/m^3), C_s 는 토양의 비열(kg/kg), v_s 는 토양의 열전도율($\text{J/m} \cdot \text{kg}$), Z_{G0} 는 지중경계의 깊이($=1 \text{ m}$)이다.

따라서 수식화한 식 (17)의 각각의 항에 식 (18), (20), (22), (23), (24)를 대입하면,

$$\begin{aligned} & (1-A)T_s R_0 \cos Z + \sigma [E_a (1 - C_{cloud}) + C_{cloud} T_a^4] \\ & - \sigma T_G^4 + \rho C_p u_* \theta_* + \rho L_w u_* q_{v*} \\ & - \rho_s C_s \int_{-Z_{G0}}^0 \frac{\partial T_s}{\partial t} dz + Q_A = 0 \end{aligned} \quad (25)$$



(I, J, K)

Fig. 1. Schematic picture of distance between each grid point and a pollutant position in three dimension.

로 표현된다. 또한 지표면온도 T_G 는 식 (25)를 Newton-Raphson법으로 풀어서 구한다.

경사면에 대해 태양복사와 장파복사 식(18)과 (20)은

$$R_S | sl = R_S \frac{\cos i}{\cos Z} \quad (26)$$

$$R_L | sl = R_L \cos \alpha \quad (27)$$

으로 수정될 수 있다. 여기서 i 는 경사면에 대한 입사각이고, α 는 경사면의 경사각이다.

2.4 Lagrangian Particle Dispersion 모델

연속적으로 배출되는 입자들의 위치를 계속적으로 결정하는 방법은 다음과 같은 식으로 나타낸다. 즉, 운동량의 영향을 고려하여 배출된 입자의 3차원적 위치는

$$X_i(t+dt) = X_i(t) + \frac{1}{2} \left[\frac{du_i}{dt} \right] dt^2 \quad (28)$$

이다. 만약, $\frac{du_i}{dt} = \text{constant}$ 이면, 위 식은 다음과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$X_i(t+dt) = X_i(t) + [u_i(t)] dt \quad (29)$$

여기서 $X_i(t)$ 는 오염물질의 현재의 위치를 나타내고, $X_i(t+dt)$ 는 dt 후의 오염물질의 새로운 위치를 나타내며, dt 는 시간변화를 표시하고, u_i 는 입자가 위치한 곳에서의 종관바람의 중규모 바람

성분과 난류성분을 합한 바람성분으로 다음과 같이 나타낸다.

$$u_i = \alpha_1 u_i(l, m, n) + \alpha_2 u_i(l+1, m, n) + \alpha_3 u_i(l+1, m+1, n) + \alpha_4 u_i(l, m+1, n) + \alpha_5 u_i(l, m, n+1) + \alpha_6 u_i(l+1, m, n+1) + \alpha_7 u_i(l+1, m+1, n) + \alpha_8 u_i(l, m, n+1) \quad (30)$$

여기서 첨자 i 는 1일 때 x 방향, 2일 때 y 방향, 3일 때 z 방향을 표시한다.

위 식(30)에서 α_5 는 가중치로 다음과 같다.

$$\alpha_5 = \frac{\sum_{i=1}^8 R_i - R_s}{7 \times \sum_{i=1}^8 R_i} \quad (31)$$

여기서 s 는 1에서 8까지 변하고, R 은 각 격자점과 오염물질 위치 X 사이의 거리로 Fig. 1에 잘 표현되어 있다.

2.5 계산영역과 계산방법

계산영역은 한국의 남동 지역에 위치한 부산과 그 주위 지역으로 제 1의 항구도시인 연안도시지역이다. 수치모의의 실행은 대규모영역(Coarse Mesh Grid, CMG, Fig. 2(a))과 소규모영역(Fine Mesh Grid, FMG, Fig. 2(b))으로 나누어 실행하는 nesting 방법을 사용하였고, 경계조건은 설정은 Clark와 Rarley(1984)의 수치실험에 의해 계산정밀도가 높은 2차 삼입식을 사용하였다. CMG영역은 부산과 그 주위 지역을 표현한 것으로 수평방향(x 와 y)은 각각 80km, 격자간격은 5km로 하여 17×17 격자점을 이용했다. FMG영역은 부산지역만을 이용한 것으로 북북동과 남남서를 잇는 높은 지형이 발달해 있고, 동쪽과 남쪽에는 해양을 접하고 있음을 볼 수 있으며, 수평방향으로 각각 30km, 격자간격은 1km로 31×31 격자점을 이용했다. CMG와 FMG 영역에서 연직방향으로는 2450m까지 10층으로 나누었고, 각 층 두께는 동일하지 않으며, 지표근처에서는 얇게 설정했다. u 와 v 의 두 번째 격자점이 있는 높이 50m를 접지층이라 가정했고, 지층은 1m까지를 14층으로 나누었다. 실제 지형은 계산상 다음과 같은 평활화를 하였고, 평활화 후 50m이 하는 평지로 보았다.

$$z_{Gi,j} = 0.15[z_{Gi+1,j} + z_{Gi-1,j} + z_{Gi,j-1} + z_{Gi+1,j}] + 0.4z_{Gi,j} \quad (33)$$

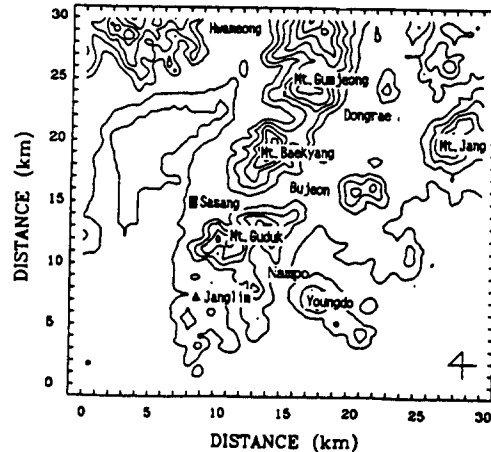
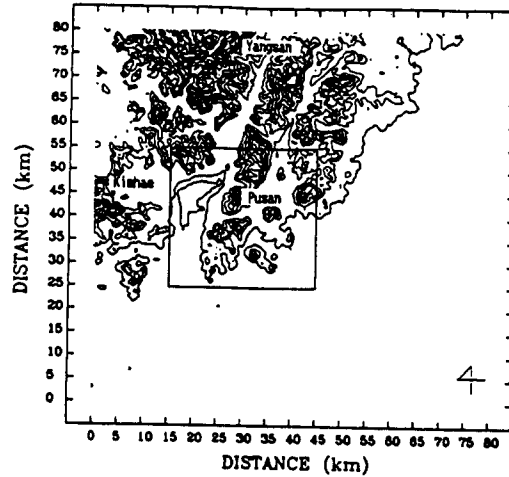


Fig. 2. Calculation region of the coarse mesh grid (CMG, Fig. 2(a)) and fine mesh grid (FMG, Fig. 2(b)) domain in Pusan coastal area. (contour interval : 100m)

3차원 중규모 대기유동을 나타내는 방정식의 차분식은 explicit method로 이루어지는 풍상차분법, 확산항은 Mahrer와 Pielke(1975)의 Dufort-Frankel법, 시간에 대해서는 전진차분법을 사용하고, 나머지항들은 중앙차분법을 사용하였다. 각 변수에 대한 격자망은 변수의 정의점이 다른 불균등 격자망을 이용하였다.

2.6 초기조건 및 경계조건

계산의 초기조건으로 계산대상 전 영역이 정상상태에 있다고 가정하였다. 연직방향의 풍속

성분은 전 영역에서 $u = v = w = 0$ 으로 하였다. 온위는

$$\theta = \theta_{sea} + \Gamma \{ z^* [\bar{s} - z_G(x, y)] \bar{s}^{-1} + z_G(x, y) \} \quad (34)$$

을 사용했으며, 여기서 Γ 는 온위의 연직방향 감률(K/m)이다.

기압 Π 는 좌표 원점에서의 값을 1013hPa로 가정하고 온위 초기조건을 이용하여

$$\Pi_{i,j,k}^n = \Pi_{i,j,k+1}^n + \frac{s_{i,j}^n - Z_{G,i,j}}{s} \frac{g \Delta z_{i,j,k}}{c_p \theta_{i,j,k+1}^n} \quad (35)$$

에서 측면 상단의 값을 정하였다. 비습도 온위의 경우와 마찬가지로

$$q_v = q_{vG0} + \Gamma_g \{ z^* [\bar{s} - z_G(x, y)] \bar{s}^{-1} + z_G(x, y) \} \quad (36)$$

에서 추정하였으며, q_{vG0} 는 지표면의 초기비습(kg/kg), Γ_g 는 비습의 연직방향 감률(kg/kg)이다. 지중온도는

$$T_s = \theta_G = \theta_{sea} \quad (37)$$

로 하였다. 여기서 θ_G 는 지표면에서의 온위(K)이다.

지표면에서의 경계조건은 연직방향 풍속에 대해서 $w=0$ 으로 두었고, 수평방향 풍속 u, v 는 지표면에서 격자점이 없기 때문에 지표면에 가장 가까운 점의 값 $u_{i,j,k}$ 와 $v_{i,j,k}$ 를 지표층 마찰 속도로부터 구해 그 값을 경계치로 하였다. 온위는 바다와 육지로 분리하여 해면을

$$\theta = \theta_{sea} = const. \quad (38)$$

로 두고, 육지표면은 지표면 열수지모형을 이용해서 결정된 T_G 를 경계치로 사용했다. 비습은 지면의 습윤도와 온도 등의 함수로 나타내는

$$q_{vG} = F_w q_{vG,sat} + (1 - F_w) q_v(z_2) \quad (39)$$

를 사용하였다. 여기서 F_w 는 지표면의 습도, $q_v(z_2)$ 는 높이 z_2 에서의 비습, $q_{vG,sat}$ 는 지표면에서의 포화비습(kg/kg)이다.

지중온도에 대해서는 $z_{G0} = 100m$ 에서

$$\frac{\partial T_s}{\partial z} = 0 \quad (40)$$

로 하였다.

상면경계조건은 지표면 가열에 의해 일어나는 일변화가 상면에 영향을 미치지 않는다고 가정하여

$$\frac{u_{i,j,k} + u_{i,j,k-1}}{2} = U_g \quad (41)$$

$$\frac{v_{i,j,k} + v_{i,j,k-1}}{2} = V_g \quad (42)$$

로 정의하였고, 전 변수에 대해서는

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial q_v}{\partial t} = \frac{\partial \Pi}{\partial t} = 0 \quad (43)$$

로 하였다.

측면 경계조건은 유입측(inflow)에서는

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{\partial q_v}{\partial x} = \frac{\partial \Pi}{\partial x} = 0 \quad (44)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial \theta}{\partial y} = \frac{\partial q_v}{\partial y} = \frac{\partial \Pi}{\partial y} = 0 \quad (45)$$

로 하고, 유출측(outflow)에서는 vector량 (u, v)와 scalar량 (θ, q_v)로 나누고, 수평풍속의 법선 성분에 대해서는 Klemp와 Wilhelmson(1978)의 경계조건을 사용하였다.

4. 계산결과

4.1 대기유동장 모델의 수치모의 결과

연안도시인 부산의 실제 지형을 고려한 대기 유동장을 대규모 영역(Fig. 3)과 소규모 영역(Fig. 4)에 각각 나타내었다.

Fig. 3에서 1000LST의 바람은 바다와 육지의 비열차에 의해 발생하는 해풍이 발달하기 시작하며, 지형에 의한 곡풍도 존재하지만 주로 해풍과 풍향이 같은 남풍계열 바람이 발달함을 보여 준다(Fig. 3(a)). 1400LST에서는 해풍이 가장 강하기 때문에 낮은 지형에 의한 지형류는 거의 나타나지 않으며, 특히 지형주위에는 해풍과 결합하여 더 강한 남풍계열의 바람이 나타났다(Fig. 3(b)). 1800LST에는 태양 복사에너지의 감소로 바람이 조금 약하기는 하나 아직 해풍이 뚜렷이 나타나며, 1400LST에 나타난 곡풍은 거의 나타나지 않았다(Fig. 3(c)). 2200LST에는 지표면 온도의 감소로 약하게 육풍이 발달하기 시작하며, 산주위로 산풍이 발달하기 시작한다(Fig. 3(d)). 다음날 새벽 0200LST에는 산풍과 함께 육풍이 더 강하게 발달하기 시작하였고(Fig. 3(e)), 0800LST에는 해륙과 지형에 의한 온도차가 뚜렷하지 않기 때문에 새벽에 나타난 육풍과 곡풍은 소멸되고 곡풍의 발달이 시작됨을 보여준다(Fig. 3(f)).

Fig. 4는 Fig. 3안의 작은 사각형을 확대한 소규모 계산영역 FMG 영역을 나타낸다. 이것은 부산지역만을 세밀히 나타내는 바람장으로 대규모 계산영역에서는 볼 수 없는 지형사이클을 흐르는 배수류 등의 지역풍들이 잘 나타나고 있다.

1000LST에 해안을 주위로 해풍이 나타나기

연안도시지역의 대기유동장에서 대기오염물질의 확산과 이동에 관한 수치모의

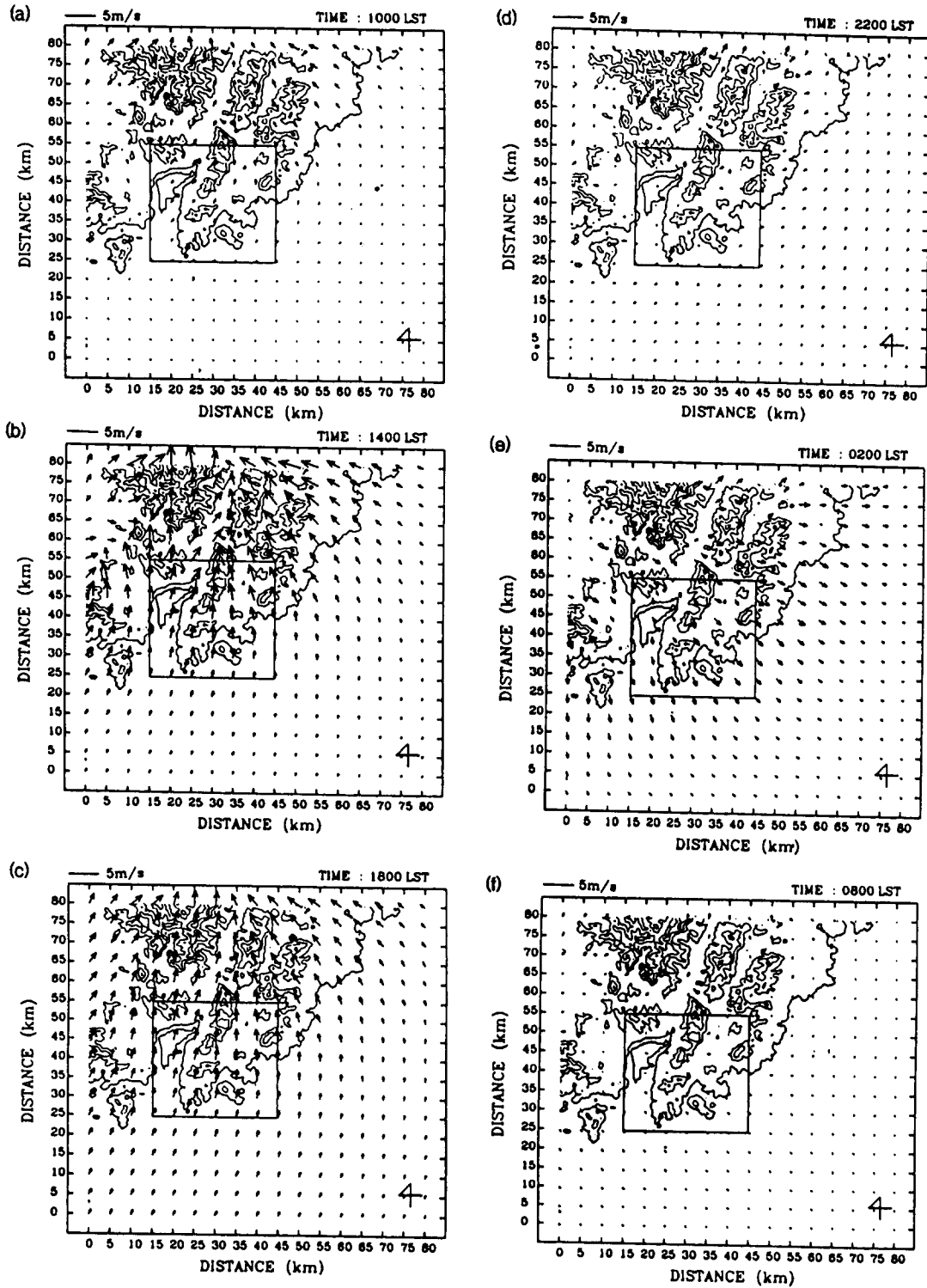


Fig. 3. Horizontal wind fields at $z=50\text{m}$ in the CMG region.

((a)1000LST, (b)1400LST, (c)1800LST, (d)2200LST, (e)0200LST, (f)0800LST)

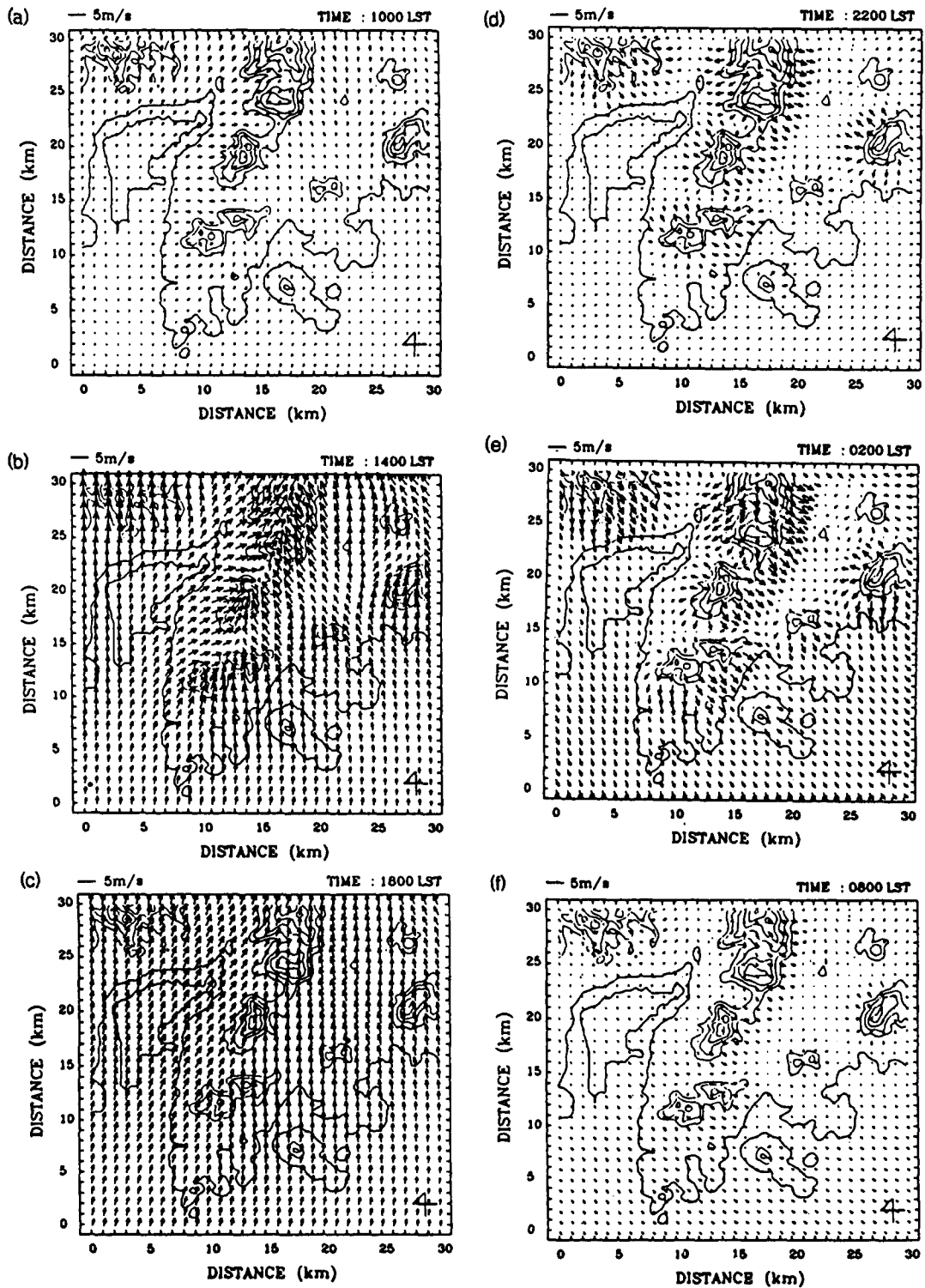


Fig. 4. Same as Fig. 3 except for FMG region.

시작하며, 지형 주위에서는 곡풍이 더 강하게 발달함을 알 수 있다. 특히 낙동강 삼각주 주위는 지형의 영향으로 더 강한 바람이 나타나고, CMG 영역에서 나타나지 않은 백양산과 구덕산 사이에서 서풍이 나타났다(Fig. 4(a)). 1400 LST에는 금정산, 백양산을 중심으로 바람장의 수렴대가 조성되고, 해안선 주위에서는 아주 뚜렷한 해풍이 불고 있다. 특히 산주위에는 해풍과 곡풍의 합쳐진 지역풍으로 바람이 더 강하게 불고 있으며, 백양산과 구덕산 사이 골을 흐르는 배수류가 발생하였다. 또한 사상에서 부전동

으로 부는 서풍과 부전동에서 사상으로 부는 동풍이 서로 부딪혀 두 산의 골에서 바람이 약해졌다(Fig. 4(b)). 1800LST에는 지형에 의한 지역풍들이 거의 소멸되고, 남풍인 해풍이 아주 우세하게 바람장을 지배하였다(Fig. 4(c)). 2200LST는 바람이 약한 안정한 상태이므로 해륙풍은 나타나지 않지만, 지형에 의한 약한 산풍이 서서히 불기 시작하였고(Fig. 4(d)), 지형이 없는 평지에서는 바람이 거의 나타나지 않았다. 0200LST는 해안에서 육풍과 산풍이 합성되어 더 강하게 나타나며, 특히 해안에 위치한 지역인 남포동, 장

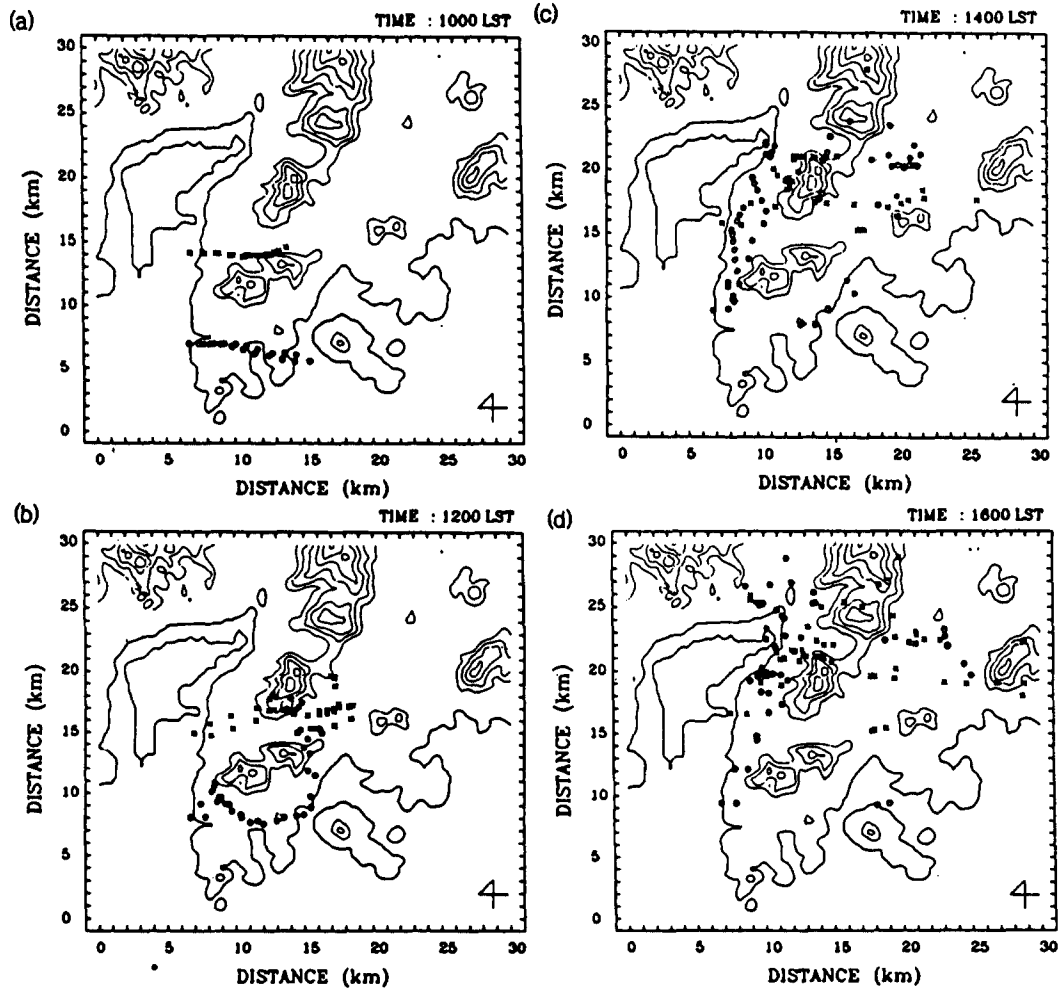


Fig. 5. Dispersion pattern of the pollutants at (a)1000LST, (b)1200LST, (c)1400LST, (d) 1600LST, (e)1800LST, (f)2200LST, (g)0600LST, (h)0800LST in the FMG region. (pollutants exhausted from Sasang(★), Janglim industrial complexity(◎))

산과 낙동강 주위에는 더 강한 바람이 발생하였다(Fig. 4(e)). 0800LST에서는 서서히 해륙의 온도차가 줄어들므로 해서 해륙분포 차이에 의한 해륙풍은 나타나지 않고, 지형에 의한 산풍이 각 산 주위에서 발달하고 있다(Fig. 4(f)).

이와 같은 결과로, 부산지역의 바람장은 해륙풍보다 산곡풍이 먼저 발달하며, 해안 근처에 지형이 존재할 경우 해륙풍과 산곡풍이 합성되어 더 강한 흐름장을 나타내었다. 또한 대체로 지형의 동쪽에서 강한 바람의 형태를 보여주었다. FMG 영역의 바람장은 위의 특징 뿐 아니라 지형과 지형사이 배수류와 해안을 따라 CMG 영역에서는 남풍으로만 나타나던 해풍이 낙동

강 삼각주 주위에서는 남서풍으로 나타나며, 금정산과 백양산 그리고 구덕산을 따라 남서풍과 남풍의 수렴대가 형성되는 세밀한 특성을 보였다.

4.2 대기오염물질의 확산 수치모의 결과

수치모의에 사용된 Lagrangian 확산모델은 단지 바람장의 변화에만 기인하므로 FMG의 바람장을 사용하여 실행하였다. 대기오염물질의 배출원은 공단 등이 밀집되어 있는 사상과 장림의 2곳으로 가상하였으며, 각 장소의 굴뚝 높이는 50m로 가정하여 배출하였다. 오염물질의 배출시간은 산업활동이 활발한 아침 8시부터 저녁

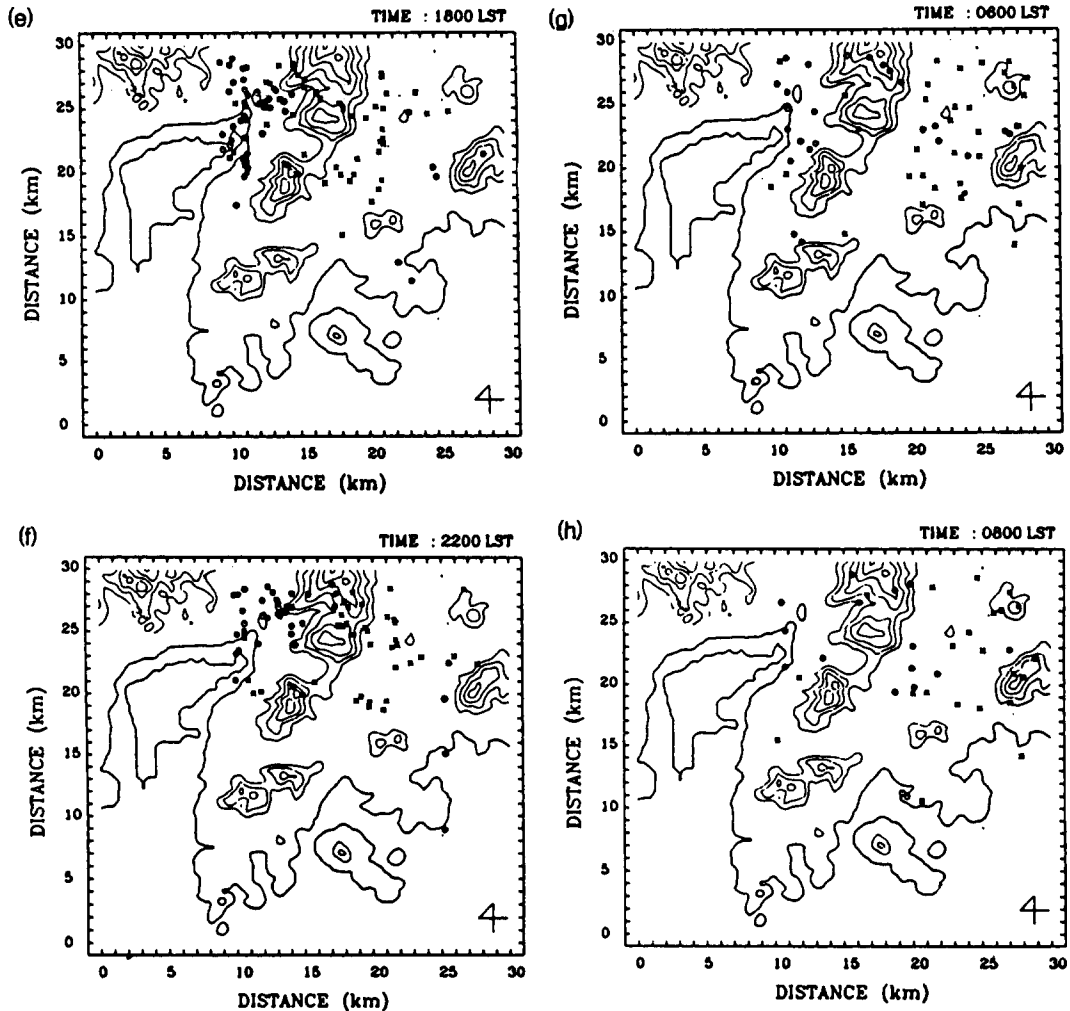


Fig. 5. Continued.

5시까지 10분 간격으로 오염물질을 연속 배출하였다.

Fig. 5는 대기오염물질의 이동을 나타내는 것으로 1000LST에 사상에서 방출된 오염물질은 백양산과 구덕산의 골을 따라 부전동으로 이동하고, 장림에서 방출된 오염물질은 동쪽해안인 남포동으로 이동하였다(Fig. 5(a)). 두 지역 모두 Fig. 4(a)의 서풍계열의 바람장에 영향을 받은 것으로 볼 수 있다. 1200LST는 사상에서 방출된 오염물질이 백양산과 구덕산 사이 골을 따라 부전동으로 이동하고, 장림에서 나온 오염물질은 구덕산을 돌아 남포동으로 이동하며, 아침에 방출된 오염물질은 해풍의 영향으로 부전동 주위로 이동하여 사상에서 나온 오염물질과 부전동 주위에서 합해졌다(Fig. 5(b)). 1400LST에는 강한 곡풍과 해풍의 발달로 사상에서 나온 오염물질은 백양산과 금정산 쪽으로 이동하고, 이미 부전동과 남포동으로 이동한 오염물질은 두시간 전에 방출된 오염물질과 합류하여 금정산을 끼고 계속 내륙으로 이동함을 볼 수 있다(Fig. 5(c)). 특히 해안가 가까이 위치한 장림에서 나온 오염물질은 해풍을 따라 사상쪽으로 이동하였다.

1600LST에는 해풍의 영향으로 각 배출원에서 나온 오염물질은 낙동강을 따라 내륙으로 이동하여 화명동까지 이르며, 동래지역에 모인 오염물질들도 장산주위로 흩어짐을 볼 수 있다(Fig. 5(d)). 두 지역의 오염물질 분포 특징은 먼저 사상에서 나온 오염물질은 사상과 동래 지역에 많이 몰려 있으며 가로분포(백양산-장산)를 보이고, 장림에서 나온 오염물질은 영도에서도 발견되었으며 세로분포(화명동-장림)를 보인다. 1800LST에는 더욱 강해진 해풍으로 오염물질은 내륙(북쪽)으로 몰리게 되어(Fig. 5(e)), 화명동 주위의 농도가 높아짐을 추정할 수 있다. 특히 장림에서 나온 오염물질은 금정산 좌측인 화명동 쪽에 많이 몰려 있고, 금정산 우측인 동래 주위는 사상에서 나온 오염물질이 집중되어 있다. 2200LST에는 앞시간대와 차이는 없으나, 동래 주위의 오염물질은 장산주위로 흩어졌다(Fig. 5(f)). 0600LST에는 새벽에 나타나기 시작한 육풍의 영향으로 금정산 동쪽에 위치했던 오염물질이 장산으로, 금정산 서쪽 화명동에 위치했던 오염물질은 사상까지 이동하게 되고(Fig. 5(g)), 이 때는 낙동강 삼각주 주위와 동쪽

장산 주위의 오염물질이 많이 분포하게 되며, 장림과 사상에서 방출된 오염물질 중 일부분이 다시 사상과 부전동 사이 골로 이동하였다. 다시 오염물질이 배출되기 전, 0800LST에는 오염물질이 다시 내륙으로 밀리게 되었으며, 사상에서 나온 오염물질은 배출지역인 사상으로 다시 이동하였다(Fig. 5(h)). 이렇게 이동한 오염물질은 다음 날 아침 0800LST부터 방출되는 오염물질과 합류하여 Figs. 5(a)-(h)까지의 순환을 되풀이하게 된다.

5. 결 론

부산의 실제지형에 3차원 기초방정식을 사용하여 대기흐름장을 모의실험하고, Lagrangian Particle Dispersion Model을 사용하여 배출원에서 배출된 오염물질이 대기유동장을 따라 어떻게 이동되었는지에 대해 고찰해 보았다. 전체적으로 연안 도시지역에서 나타나는 국지순환인 해륙풍과 산곡풍의 영향을 크게 받는 오염물질의 이동형태를 나타냈다.

아침시간에는 두 곳에서 방출된 오염물질이 모두 산골짜기를 따라 동쪽으로 이동하였으며, 오후에는 해풍과 곡풍의 영향으로 지형을 향한 수렴대가 형성되고 내륙으로 오염물질의 이동이 있었다. 특히 이 시간대에는 내륙지역으로 갈수록 오염도가 심하다는 것을 추정할 수 있었는데, 사상공단에서 나온 오염물질은 사상과 동래지역에 많이 몰려 있으며 가로분포(백양산-장산)를 보였고, 장림공단에서 나온 오염물질은 영도에서도 발견되었으며 세로분포(화명동-장림)를 보였다. 야간에는 약한 산풍과 안정한 상태의 대기 조건으로 인해 오염물질은 정체하게 되어, 금정산 주위 지역의 오염도가 높게 나타났다.

다음날 새벽이 되면, 육풍에 의해 오염물질은 다시 배출원 주위로 모여들지만, 동래지역 주변에는 여전히 전날에 방출된 오염물질이 남아 있었다. 아침이 되면 다시 해풍이 불기 시작하여 되돌아온 오염물질과 새로 방출된 오염물질이 함께 전술한 것과 같은 cycle을 되풀이하였다.

따라서 본 연구에서 nesting 방법을 사용한 3차원 Lagrangian Particle Dispersion Model은 연안도시지역(특히 부산연안)의 대기유동장에서 대기오염물질의 이동과 확산을 예측하는데 아주 유용하게 사용되었으므로 대기질의 모델링에서 오염물질의 이동에 따른 농도를 예측하는

대 기 초 자 료 로 활 용 할 수 있 으 리 라 고 본 다.

참 고 문 헌

- 강동근, 김선태, 김정옥, 1993, 동북아시아 대기 오염물질의 장거리 이동에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 9(4), 329-339
- 김정수, 강인구, 장성기, 1992, 세정이론을 통한 산성비의 평가와 발원지 추적, 한국대기보전학회지, 8(2), 121-127
- 박순웅, 1992, Lagrangian 입자확산 모델링, 한반도의 국지 기상 특징과 대기환경 Workshop, 3-31
- 박순웅, 김상헌, 1993, 연기 상승효과가 지상 오염 농도에 미치는 영향, 한국기상학회지, 29(1), 53-67
- 윤순창, 박경선, 1991, 등엔트로피 궤적에 의한 황사의 장거리 이동 경로 분석, 한국대기보전학회지, 7(2), 89-95
- 이상인, 조석연, 심상규, 1995, STEM II를 이용한 한국과 중국 동부 지역의 대기오염물질 이동/ 화학/ 침착/ 모사에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 11(2), 163-170
- 정관영, 1996, 퍼프 유적선 모델에 의한 대기 오염물질의 장거리 수송량의 평가, 한국대기보전학회지, 12(2), 167-177
- 정용승, 김태근, 1991, 한국 서해안에서 관측된 산성비의 발원지 추적연구, 한국대기보전학회지, 7(3), 203-207
- 원경미, 1991, 국지기상과 대기오염물질의 수송에 관한 연구, 부산대학교 대학원 석사학위논문
- Businger J. A., Wingaard J. C., Izumi Y. and F. Bradley, 1971, Flux - profile relationships in the atmospheric surface layer, J. Atmos., Sciences 28, 181-189
- Chung, H. S., W. J. Lee, H. J. Seang, W. K. Kim, 1985, A Regional Scale Transport Model by Using the Air trajectory method (Part I), Res. Rap. of MRI, 17-24
- Clark, T. L., and R. D. Farely, 1984, Severe downslope windstorm calculations in two and three spatial dimensions using anelastic interactive grid nesting : A possible mechanism for gustiness, J. Atmos. Sci., 41(3), 329-350
- George T. Wolff et al., 1977, An investigation of long range transport of ozone across the midwestern and eastern united states, J. Atmospheric Environment, 11, 797
- Hidemi Kurita et al., 1985, Long range transport of air pollution under light gradient wind conditions, J. Applied Meteor., 24, 425
- Idso, S. D., and R. D. Jackson, 1969, Thermal radiation from the atmosphere, J. Geophys., Res., 74, 5397-5403
- Klemp, J. B., and R. B. Wilhelmson, 1978, The simulation of three - dimension convection storm dynamics, J. Atmos. Sci., 35, 1070-1096
- Keith C. Heidorn and David Yap, 1986, A synoptic climatology for surface ozone concentrations in southern ontario, J. Atmospheric Environment, 20, 695
- Lindsay R. W. and William L. Chameides, 1988, High ozone events in Atlanta, Georgia, in 1983 and 1984, J. Environ. Sci. Technol., 22, 426
- Lyons W. A. and Henry S. Cole, 1976, Photochemical Oxidant Transport ; Mesoscale Lake Breeze and Synoptic - scale Aspects, J. Applied Meteorology, 15, 733
- Mahrer, Y. and R. A. Pielke, 1975, A numerical study of air flow over mountains using the two dimensional version of the university of Virginia mesoscale model, J. Atmos. Sci., 31, 2144-2155
- Segal, M., R. T. McNider, R. A. Pielke, and D. S. McDougal, 1982, A numerical model study of regional air pollution meteorology of the Greater Chesapeake Bay area Summer day case study, Atmos. Environ., 16, 1381-1397
- Yamada, T., 1975, The critical Richardson number and the ratio of the eddy transport coefficients obtained from a tur-

연안도시지역의 대기유동장에서 대기오염물질의 확산과 이동에 관한 수치모의

- bulence closure model, J. Atmos. Sci., 32, 926-933
- Yamada, T. and S. Bunker, 1988, Development of a nested grid, second moment turbulence closure model and application to the 1982 ASCOT Brush Creek data simulation, J. Appl. Meteor., 27, 562-578