

중규모 국지순환에서 이산화황의 농도예측에 관한 연구

이화운 · 김유근 · 장은숙

(1996년 3월 7일 접수)

A Study on the Prediction of SO₂ Concentration in Local Circulation of Mesoscale

Hwa-Woon LEE, Yoo-Keun KIM and Eun-Suk JANG

Dept. of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

(Manuscript received 7 March 1996)

The Characteristics of atmospheric flow and dispersion of air pollutants in the mountainous coastal area were studied using two-dimensional model by the combination of land-sea breezes and transport.

The pollutants emitted into the simulated wind field in considering with the mesoscale local circulations. The typical effects of land-sea breezes and topography of coastal area on the dispersion are discussed in detail, and the model is proved as an useful tool to predict real time pollutant transport by the results of application studies in Pusan, Korea where the urbanized coastal area with mountainous topography.

It was found that sulfur dioxide (SO₂) are differently transported and concentrated as going inland by the influence of the sea breeze with topographic changes.

Key words : land-sea breezes, sulfur dioxide, dispersion, coastal area.

1. 서 론

연안 해안 지역에서 오염물의 대발생원인 도시 혹은 공업 지대의 대다수가 임해 지역에 집중적으로 위치하고 있고 내륙 지역의 지형이 복잡할 때, 이러한 지역에서의 대기 오염 물질의 광역 운송은 해륙풍, 산곡풍등의 중규모의 대기 운동과 도시 지역의 열원 배출, 즉 Heat island 현상으로 인한 도시 scale의 대기 운동이 중요하게 된다. 중규모 국지순환의 대표적인 풍계라고 할 수 있는 해륙풍장내에서의 대기 오염 물질에 대한 확산 및 수송에 관

한 연구는 실제 관측 및 수치 실험등을 통하여 많은 연구가 있어 왔다 (Keen and Lyons, 1978; Ozoe et al., 1983; Kimura, 1988). Kondo와 Gambo (1979)는 오염원이 연안 가까이에 위치할 때, 해륙풍에 의한 오염 물질의 확산과 수송을 연구하였다. 또한 Kurita와 Ueda (1986)는 일본 동경만에서 발달하는 해륙풍과 관동지역에서의 산곡풍의 상호 작용에 의한 오염 물질의 수송을 수치 모의 한 바 있다. 국내에서는 국지적인 대기 오염 물질 이동을 예측하기위한 수치 모델로서 박순웅 (1992), 이화운 등 (1994)이 오염원에서 방출되는 오염 물질의 이류

확산에 미치는 영향에 대하여 Lagrangian 방법으로 연구한 바 있다. 본 연구에서는 복잡한 지형을 하고 있는 산악 해안 지역인 부산에서 바람장 및 대기 오염 물질의 확산 특성을 해륙풍 모델을 사용하여 수치적으로 예측하여 보고자 한다.

2. 바람장의 수치 모델

2.1 기초 방정식

기초 방정식계는 운동 방정식, 온도 방정식, 비습 방정식, 연속 방정식, 정역학 방정식이며, 지형의 기복에 관계없이 계산할 수 있는 지형 좌표계로 변환시킨 방정식을 사용하였다. 지형좌표계에 의한 2차원 중규모 대기 운동의 기초 방정식은 다음과 같다.

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

$$\begin{aligned} \bullet \frac{dv}{dt} = & -f u + \frac{\partial}{\partial x} (K_H \frac{\partial v}{\partial x}) \\ & + \left(\frac{s}{s - z_G} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} (K_V^{(m)} \frac{\partial v}{\partial z^*}) \end{aligned} \quad (2)$$

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

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

$$\bullet \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w^*}{\partial z^*} - \frac{1}{s - z_G} \left(u \frac{\partial z_G}{\partial x} \right) = 0 \quad (5)$$

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

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

여기서

$$w^* = w \frac{s}{s - z_G} + \frac{z^* - s}{s - z_G} \left(u \frac{\partial z_G}{\partial x} \right) \quad (8)$$

$$\Pi = \left(\frac{P}{P_{00}} \right)^{R_d / c_p} \quad (9)$$

$$\theta = T \left(\frac{P_{00}}{P} \right)^{R_d / c_p} \quad (10)$$

$$f = 2 \Omega \sin \phi \quad (11)$$

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + w^* \frac{\partial}{\partial z^*} \quad (12)$$

2.2 연직 방향과 수평 방향 확산 계수

본 연구는 대기 경계층 중 지상으로부터 30 m까지를 접지층, 그 위를 Ekman층이라 하고 각각 적합한 모델화를 행하였다. Ekman층에서의 난류 효과는 여러가지 모델화가 되어 있지만, 본 연구에서는 대기 상태에 따른 난류 효과를 잘 표현한다고 생각되는 Yamada (1975)에 의한 종결 모델을 사용하여 난류 확산 계수를 표현하였고, 접지층내에서의 수송 저항은 Monin-Obukhov의 상사 이론에 기초한 Businger et al. (1971)의 무차원 풍속, 온도 표현식을 이용하여 운동량과 열 flux 및 연직 방향 확산 계수를 구하였다. 접지층은 정상적으로 수평 방향으로는 균일하다는 전제 조건하에서 풍속 및 온도의 연직 기울기는 보편 함수에 의해 다음과 같이 계산되어졌다.

$$K_V^{(m)}(z) = \frac{u_*^2}{\partial u / \partial z} = \frac{x u_* z}{\phi_m(\zeta)} \quad (13)$$

$$K_V^{(o)}(z) = \frac{u_* \theta_*}{\partial \theta / \partial z} = \frac{x u_* z}{\phi_\theta(\zeta)} \quad (14)$$

여기서 ϕ_m, ϕ_θ 는 다음과 같이 표현되어진다.

$$\phi_m(\zeta) \equiv \frac{x z}{u_*} \frac{\partial U}{\partial z} \quad (15)$$

$$\phi_\theta(\zeta) \equiv \frac{x z}{\theta_*} \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (16)$$

여기서 u_* 는 마찰 속도, θ_* 는 마찰 온도, x 는 von Karman 상수, $U = (u^2 + v^2)^{1/2}$, $\zeta = z/L$ 이다.

해륙풍 계산에서 수평 방향 확산 계수는 대기 상태에 의해서 결정되는 연직 방향 확산 계수와는 달리 주로 계산을 안정하게 하는 목적으로 많이 사용된다. 이 때문에 수평 방향 확산 계수에 대해서는 계산이 불안정하게 되지 않을 정도의 충분한 큰 값인 $10000 \text{ (m}^2/\text{s)}$ 으로 두었다.

2.3 지표면 열수지 모델

지표면 열수지 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

이때 각 플럭스는 다음과 같이 표현되어진다.

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

$$R_L = \sigma [E_a(1 - C_{cloud}) + C_{cloud}] T_a^4 - \sigma T_c^4 \quad (19)$$

$$H = -\rho c_p \overline{w' \theta'} = \rho c_p K_V^{(H)} \frac{\partial \theta}{\partial z} = \rho c_p u_* \theta_* \quad (20)$$

$$LE = -\rho L_w \overline{w' q_v'} = \rho L_w K_V^{(q)} \frac{\partial q_v}{\partial z} = \rho L_w u_* q_{v*} \quad (21)$$

$$Q_G = \rho_s C_s \int_{-Z_{GO}}^0 \frac{\partial T_s}{\partial z} dz \quad (22)$$

여기서 R_s 는 태양 복사 flux ($\text{J/m}^2 \cdot \text{s}$), R_L 와 장파 복사 flux ($\text{J/m}^2 \cdot \text{s}$), H 는 현열 flux ($\text{J/m}^2 \cdot \text{s}$), LE 는 잠열 flux ($\text{J/m}^2 \cdot \text{s}$), Q_G 는 지중열 flux ($\text{J/m}^2 \cdot \text{s}$), Q_A 는 인공열 ($\text{J/m}^2 \cdot \text{s}$)을 나타낸다. A 는 지표면 알베도, T_s 는 대기의 투과율, R_0 는 태양 상수 ($= 1358 \text{ m}^2/\text{s}$), Z 는 천정각 (deg) σ 는 Stefan-Boltzman 상수 ($= 5.796 \times 10^{-8} \text{ J/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{k}^4$), T_a 는 Stevensen sc-

reen 고도 ($= 1.5 \text{ m}$)의 기온, T_c 는 지표면 온도, C_{cloud} 는 운량이다. ρ 는 대기 밀도 ($= 1.226 \text{ kg/m}^3$, 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. C_s 는 토양의 비습 (kg/kg), v 는 토양의 열전도율 (J/mkg), Z_{GO} 는 지중 경계의 깊이 (m)이다.

2.4 초기 조건 및 경계 조건

초기 조건으로는 계산 대상 전 영역이 정상 상태에 있다고 가정하였다. 연직 방향의 풍속 성분은 전 영역에서 0으로 두었고, 수평 방향 풍속 성분 u , v 에 대해서는 지표면에 격자점이 없기 때문에 지표면에 최대한 가까운 점의 값을 지표층의 마찰 속도로부터 구해 그 값을 경계치로 한다. 온위에 대해서는 바다와 육지로 분리하여, 해면은

$$\theta = \theta_{sea} \quad (23)$$

으로 하고 육지표면은 2.3절에 나타낸 지표면 열수지 모델을 이용해서 결정된 T_c 를 경계치로 사용한다. 비습은 온위와 같은 방법으로 구한다. 상면 경계 조건은 지표면 가열에 의해서 일어나는 일변화가 상면에서는 일어나지 않는다고 가정하여 다음과 같이 하였다.

$$u_{i,kmax} = U_g \quad (24)$$

$$v_{i,kmax} = V_g \quad (25)$$

으로 정하였고, 전 변수에 대해서

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{\partial q_v}{\partial x} = \frac{\partial \Pi}{\partial x} = 0 \quad (26)$$

로 하였다. 측면 경계 조건은

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{\partial q_v}{\partial x} = \frac{\partial \Pi}{\partial x} = 0 \quad (27)$$

로 하였다.

2.5 계산 지역 및 격자 간격

부산시는 북북동으로부터 남남동으로 뻗은 2개의 구릉에 싸여져 있으며, 도시 형태는 Fig. 1과 같이 북북동에서 남남서로 선형을 이루고 있다. 이 때 등고선의 간격은 100 m이다. 본 연구에서 선정한 계산 대상 지역은 Fig. 1에 북북동 방향으로 그어진 직선 \overline{AB} 를 따라 잘랐으며, 이 지역의 토지 이용에 따른 수직적인 구조도는 Fig. 2에 나타낸 바와 같다. 모델에서의 내륙 부분의 경계 부분에 있는 산의 최대 높이는 230 m이다.

본 연구에 사용된 2차원 계산 영역은 수평 방향을 100 km로 하고, 수평 격자 간격은 5 km로 하였으며, 연직 방향으로는 2240 m까지 30층으로 나누었다. 지중은 1 m까지를 14층으로 나누고 지중 1 m에서의 경계 조건은 flux를 0으로 하였다.

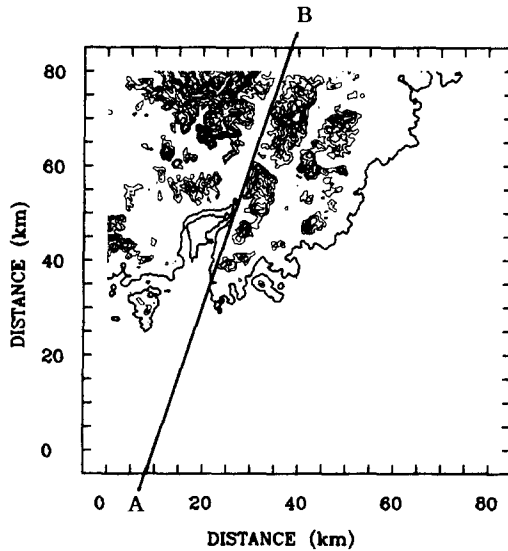


Fig. 1. Topography of Pusan coastal area

3. 대기 오염 물질의 이류 확산 수치 모델

3.1 이류 확산 방정식

대기 오염 물질의 이류 확산 현상은 기본적으로 기상 현상과 밀접한 관계가 있기 때문에 일반적인 기상 현상을 모수화한 바람장에 이류 확산 방정식을 결합하여 대기 오염 물질의 농도를 예측하고자 하였다. 오염 물질의 배출과 반응을 생성항에 포함시킨 대기 오염 물질의 이류 확산 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_i}{\partial t} = & -u \frac{\partial C_i}{\partial x} - w^* \frac{\partial C_i}{\partial z} \\ & + \left(\frac{s}{s - z_G} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_V^{(i)} \frac{\partial C_i}{\partial z^*} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H^{(i)} \frac{\partial C_i}{\partial x} \right) + q_i \end{aligned} \quad (28)$$

여기서 C 는 오염 물질의 농도, i 는 오염 물질의 종류, q_i 는 배출량을 나타낸다.

3.2 계산 방법

대기는 일사를 받으면 따뜻해진 지표면으로부터 현열, 잠열의 영향을 받아 운동량, 열, 수증기 등의 운송 과정인 난류 확산 현상이 일어나게 된다. 본 연구에서는 대기의 안정도의 상태에 따라 운동량 및 열수송이 기체 성분의 수송과 상사하므로, 연직 방향 확산계수 $K_V^{(i)}$ 를 기체 성분의 종류에 의존하지 않는다고 가정하고, 기체 수송과 열운송의 상사성으로부터 다음과 같이 두고 계산하였다.

$$K_V^{(i)} = K_V^{(0)} \quad (29)$$

수평 확산 계수는 식 (30)과 같이 대기 안정도를 고려한 수평 방향 확산 계수를 이용하였다.

$$K_H^{(i)} = 13 K_V^{(0)} \quad (30)$$

3.3 경계 조건

상면에서는 처음 설정한 초기 농도값을 가지도

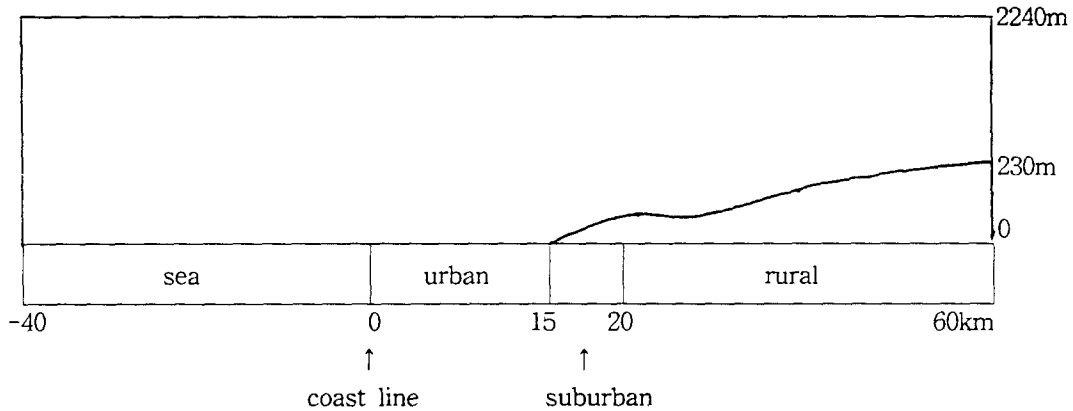


Fig. 2. 2-Dimensional shape and surface condition of computational area.

록 하였고, 지표면에서는 다음과 같이 침적을 고려하지 않은 완전 반사의 조건을 사용하였다.

$$K_V^{(c)} \frac{\partial c}{\partial z} = -Q_{SF} \quad (31)$$

이때 Q_{SF} 는 지상에 있는 배출원으로부터의 오염물질의 flux를 나타낸다.

측면에서는 경계조건은 다음과 같이 두고 계산하였다.

- 유입측 : $\frac{\partial c_i}{\partial x} = 0$ (32)

- 유출측 : $\frac{\partial c_i}{\partial x} = const$ (33)

로 두고 계산하였다.

3.4 초기 농도와 배출원의 설정

이산화황의 지표면에서의 초기 농도는 8월 평균 농도인 15 ppb로 두었으며, 높이 100 m까지는 같

은 값으로 두고, 100 m 이상에서는 계산 영역의 상한에서 0으로 되도록 선형적으로 감소하게 하였다. 배출량은 배출원의 종류에 따라 점, 선, 면오염원으로 나누었으며 각각의 배출원에 따른 배출량은 Table 1과 같다.

4. 결 과

부산 지역에서의 대기 오염 물질의 농도를 시뮬레이션하기 위하여 2차원에서의 바람장 수치 모델에 3차원의 오염 물질의 이류 확산식을 첨가하여 대기 오염 물질 농도의 예측 계산을 행하였다. 대상일은 일반적으로 약하고 일사에 의한 해륙풍이 잘 발달할 수 있는 여름철의 맑은날에 3.4절의 초기 조건과 배출원의 설정을 기본으로 연구 대상 지역의 2차원 바람장 및 오염 물질의 농도를 시뮬레이션하였고, 이때 오염 물질의 확산장의 역할을 하는 해륙풍계를 Fig. 3에 나타내었다. 농도계산은 새벽 4시부터 시작하여 이틀동안을 행하였다. Fig. 4는 8, 12, 18, 06시의 SO₂의 농도분포를 나타내고 있다. Fig. 3

Table 1. Emission amount of Pusan area (1989).

점오염원 (g/sec)	선오염원 (g/sec)	면오염원 (g/sec)
202.69	2.26	132.27

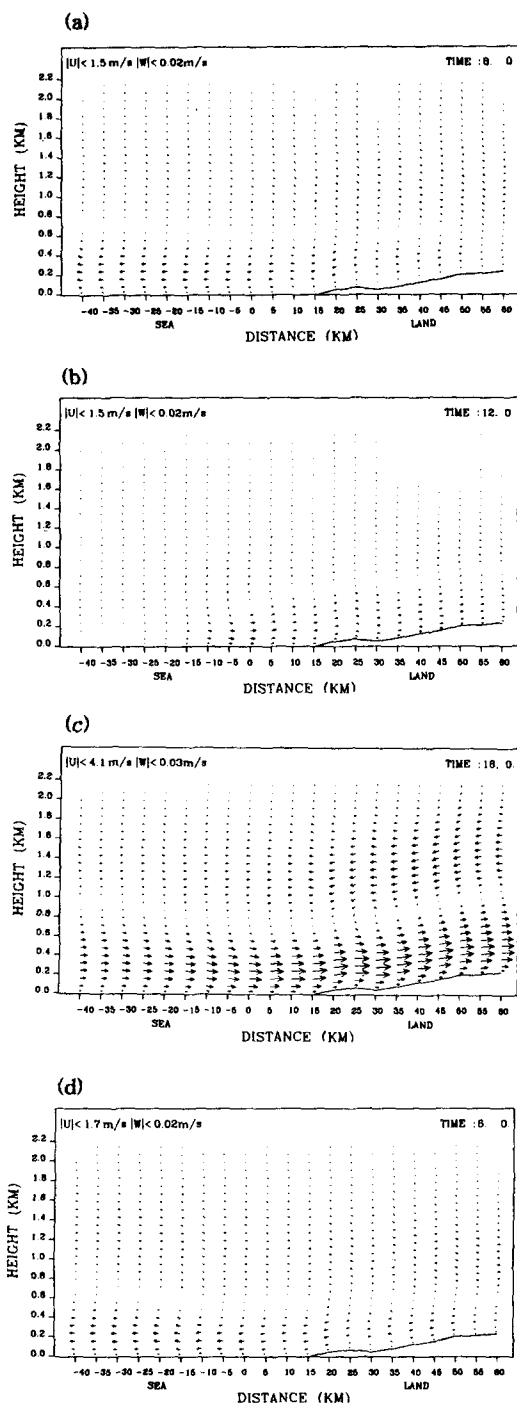


Fig. 3. Vertical wind fields in Pusan area.
 (a) 0800LST (b) 1200 (LST)
 (c) 1800LST (d) 0600LST

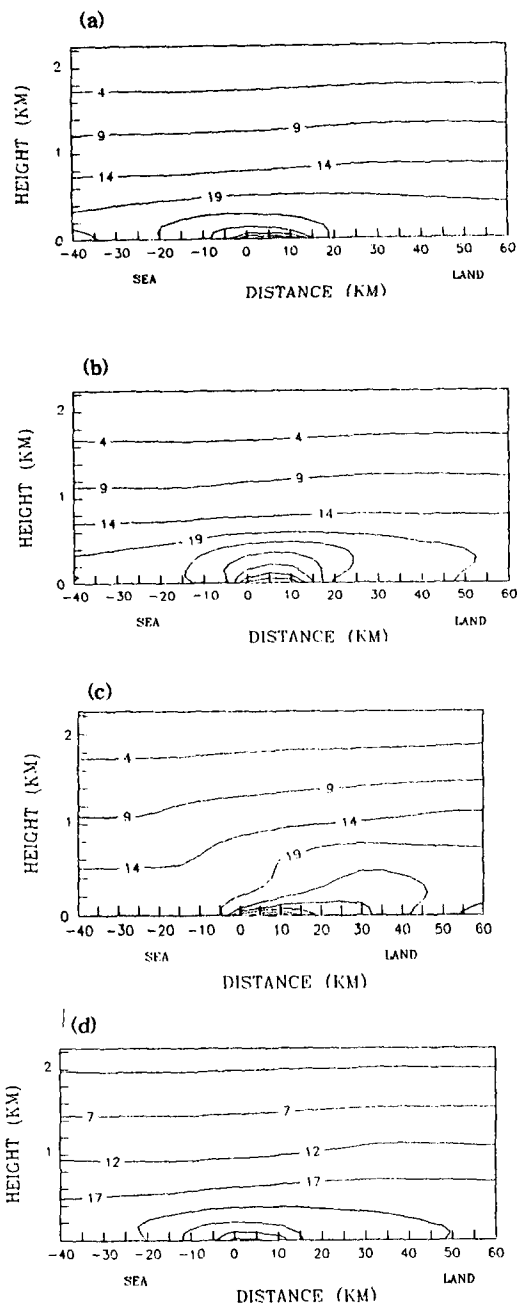


Fig. 4. (a)–(f). The calculated concentration profiles of SO_2 .
 (contour interval is 5 ppb).
 (a) 0800LST (b) 1200 (LST)
 (c) 1800LST (d) 0600LST

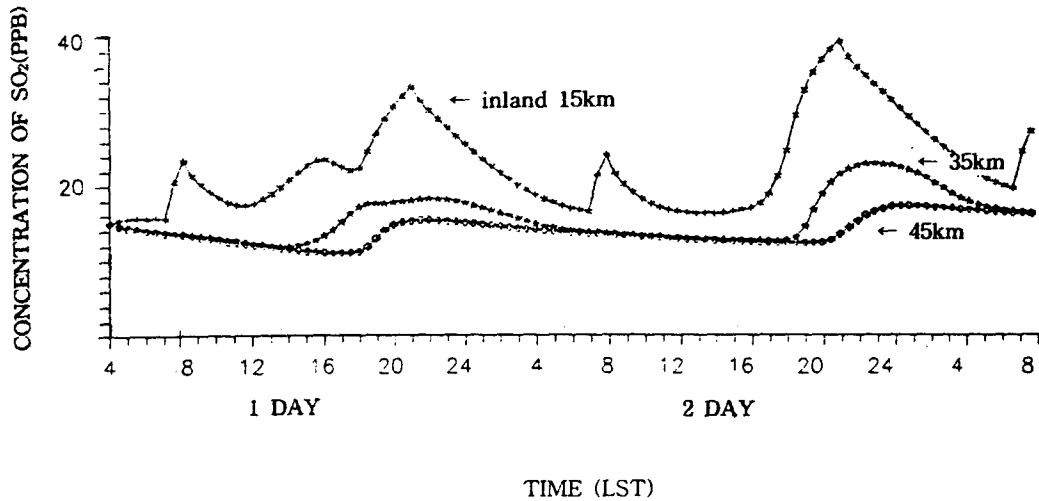


Fig. 5. Time change of SO₂ concentration in according to going to inland.

의 (a) 그림을 보면 아직 육풍이 불고 있지만, 그 풍속이 약하기때문에 8시에는 해안선으로부터 약 5 km 정도에 위치한 신평, 장림 공업 단지와 10 km 정도에 위치하고 있는 사상 공업단지로부터의 점 오염원으로 부터 발생되는 오염 물질들이 멀리 확산되지 못하고 해안선으로부터 10 km이내에 위치하고 있는 배출원 부근인 지표면으로 부터 가까운 저층부분에 분포하고 있음을 알 수 있다 (Fig. 4 (a)). Fig. 3의 (b)와 (c)에서는 오후 12시, 18시에 이르러 해풍이 발달하여 더욱 강한 풍속으로 내륙으로 진입하게 되고, 낮동안의 지표면 가열로 인하여 아침무렵보다 두꺼워진 대기 경계층으로 대기 오염 물질의 고농도역이 점차 내륙쪽으로 확산되어 분포하고 있음을 알 수 있다 (Fig. 4(b), (c)). 이 무렵 시간이 경과함에 따라 이산화황은 강해진 해풍과 함께 내륙으로 깊숙히 운송되어지며 육풍이 불어나오기까지 점점 고농도를 형성하게 된다. Fig. 4의 (d)는 그 다음날 새벽 6시의 이산화황의 농도 분포로서 밤동안의 해안으로 향한 육풍과 지표면 냉각으로 인하여 해안선을 중심으로 낮게 대칭적인 분포를 하고 있다.

Fig. 5의 이산화황 농도의 시간에 따른 변화를 보면, 내륙일수록 최고 농도의 값이 낮게되고, 최고 농도로 되는 시각이 늦어지고 있음을 알 수 있다.

또한 농도 계산의 1일째에 비해서 2일째의 농도가 증가했음을 알 수 있다. 이는 첫째날에 대기중으로 배출된 이산화황이 해륙풍계하에서 축적되었음을 나타내고 있다고 사료된다.

5. 결 론

해륙풍계내에서의 이산화황의 농도 변화를 시물레이션하기 위하여 해륙풍 바람장을 이용하여 계산을 행하였다. 그 결과 해륙풍에 의한 농도 분포의 일변화가 주기성을 보이며 잘 나타났으며, 또한 연속적으로 해풍이 출현한 날의 경우에 내륙일수록 최고 농도의 값이 낮게 되고, 최고 농도로 되는 시각이 늦어지고 있음을 알 수 있다. 이는 폐쇄된 해륙풍 순환계내에서 오염 물질이 축적됨으로 나타난 현상임을 시사하고 있다. 앞으로 계산 대상 영역을 3차원으로 확대하여 부산 지역 전 범위의 정확한 배출량을 입력한 대기 오염 물질의 오일리안 방법에 의한 농도 예측이 필요할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

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

이화운, 오은주, 1994, 중규모 국지 순환에서 대기 오염물질의 확산에 관한 연구, 한국환경과학회지, 3 (1), 39~47

Businger, J. A. et al., 1971, Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer, J. Atmos. Sci., 28, 181~189

Keen, C. S., and W.A. Lyons, 1978, Lake/land breeze circulations on the western shore of lake Michigan, J. Appl. Meteor., 17, 1843~1855

Kimura, F., 1998, 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

Kurita, H., and H. Ueda, 1986, Meteorological conditions for longrange transport under light gradient winds. Atmos. Environ., 20, 687~694

Ozoe, H., T. Shibata, H. Sayama and H. Ueda, 1983, Characteristics of air pollution in the presence of land sea breeze-A numerical simulation, Atmos. Environ., 17, 35~42

Segal, R. A. Pielke, R. W. Arritt, M. D. Moran, C. H. Yu and D. Henderson, 1988, Application of a mesoscale atmosphere dispersion modeling system to the estimation of SO₂ concentrations from major elevated sources in southern Florida, Atmos. Environ., 22, 1319~1334

부록 : List of Symbols

- u, v, w; x, y, z방향의 속도 성분 (m/s)
 w^* ; 지형 좌표계에 의한 연직방향의 속도 성분 (m/s)
 t; 시간 (s)
 θ ; 온위 (K)
 q_v ; 비습 (kg/kg)
 T; 온도 (K)
 T_s ; 지중 온도 (K)
 K_s ; 토양의 열 확산 계수 (m^2/s)
 R_a ; 공기의 기체상수 (J/kg · K)
 P; 기압 (hPa)
 C_p ; 정압비열 (J/kg · K)
 P_{∞} ; 기준 고도의 기압 (hPa)
 f ; Coriolis parameter (s^{-1})
 ϕ ; 위도 (deg)
 Ω ; 지구의 회전각속도 (rad/s)
 g ; 중력가속도 (m/s^2),
 K_H ; 수평방향 확산계수 (m^2/s)
 $K_v^{(m)}$, $K_v^{(h)}$, $K_v^{(w)}$; 각각 운동량, 열, 비습의 연직 방향의 확산 계수 (m^2/s)