

## 부산지역에서의 대기흐름과 관련된 SO<sub>2</sub>농도 3차원 수치모의

장은숙·이화운  
부산대학교 대기과학과  
(1997년 6월 5일 접수)

### A Three Dimensional Numerical Simulation of SO<sub>2</sub> Concentration in Relation with Atmospheric Flow in Pusan Area, Korea

Eun-Suk Jang and Hwa-Woon Lee

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

*(Manuscript received 5 June 1997)*

The Characteristics of atmospheric flow and dispersion of air pollutants in the mountainous coastal area were studied using three-dimensional model by the combination of land/sea breezes and transport. It was then applied to Pusan city. As the urban area considered in this study is located in a mountainous coastal area, the atmospheric flow is strongly affected by the land/sea breezes and mountain/valley winds. The typical effects of land/sea breezes on the dispersion and the characteristics of pollutants movement in the region were analysed. The model has been proved to be an useful tool to predict real time air pollutants transport as shown by the results of application studies in Pusan, Korea which is an urbanized coastal area with mountainous topography.

It was found that the pollutants are differently transported and concentrated as going inland by the influence of the sea breeze with topographic changes. By comparing the pollutants concentrations of the simulated results with those of the observational results, it is shown that simulated results in this study are in qualitative agreement with observational ones.

Key words : Atmospheric flow, air pollutants, land/sea breezes, mountainous topography

#### 1. 서 론

산악과 해양의 복잡한 지형으로 형성되어 있는 한반도는 지형에 의하여 형성되는 국지적 대기 순환의 특징이 뚜렷할 뿐아니라 도시의 발달과 더불어 지표면의 지역적 특성에 의하여 형성되는 대기순환계를 포함하여 복잡한 대기 순환계를 나타내고 있다.

최근 산업의 발달, 경제의 발전, 교통량의 급증등으로 인한 대기오염이 점점 심각한 문제로 대두되고 있다. 대기오염은 오염원의 위치, 배

출 시간대, 배출량 및 대상 지역의 특수한 지형적 특성에 좌우되며, 오염물질이 대기중으로 이류, 확산될때 그 당시의 기상학적 조건 및 반응 침적으로 인한 농도의 변화를 수반하게 되므로 이들 모든 상황들을 적절히 모수화 할 필요가 있다.

Pielke(1974)는 미국의 Florida남부에서 해풍의 영향에 의한 오염의 확산 및 농도에 관하여 조사한 바 있으며, Kondo와 Gambo(1979)는 오염원이 연안 가까이에 위치할 때, 해륙풍에

의한 오염물질의 확산과 수송을 연구하였다. 阿部信男과 楠田 信(1982)는 大分시에서의 해풍과 SO<sub>2</sub>농도분포와의 관계를 조사하여 농도의 일변화 경향이 해풍과 밀접한 관련이 있음을 지적하였다. 또한 Kurita와 Ueda(1986)는 일본 동경만에서 발달하는 해륙풍과 관동지역에서의 산곡풍의 상호 작용에 의한 오염물질의 수송을 수치모의 한 바 있다. 요즈음 국내에서도 효율적인 대기질 관리 정책 수립의 일환으로 대기 확산 모델에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 국지 규모의 해륙풍에 대한 수치모의 및 대기오염물질의 농도 예측에 관한 연구가 보고된 바 있다. 국지적인 대기 오염물질 이동을 예측하기 위한 수치모델로서 박순웅(1992), 이화운 등(1996)이 오염원에서 방출되는 오염 물질의 이류, 확산에 미치는 영향에 대하여 연구한 바 있다. 그러나 복잡한 지형적 특성을 가지고 있는 대규모의 도시 지역에서 중규모 국지 순환계내에서의 오염물질의 수송 및 확산현상을 고려한 경우의 농도 예측이 수치모의되어진 경우는 거의 없는 형편이다. 따라서 본 연구에서는 복잡한 산악지형을 하고 있는 연안지역인 부산을 연구 대상지역으로 선정하여 산악 해안지역에서의 중규모 흐름장을 파악하고 그 흐름장 속으로 방출되어진 이산화황의 대기중 확산효과를 고려한 농도 예측모델을 개발하고자 한다.

## 2. 모델의 개요

대기중에서 오염물질의 이동 현상을 파악하기 위한 수치시뮬레이션은 크게 대상지역의 바람장을 구하는 부분과 확산장을 구하는 부분으로 나눌 수 있으며 지형이 복잡한 곳에서의 중규모 국지순환을 나타내는 바람장은 대기오염 농도 분포를 결정하는 매우 중요한 요소이다. 따라서 본 연구에서는 대기 유동장 예측 모델과 오염 물질 농도 예측 모델을 결합하여 대기중으로 배출되어진 대기오염물질들이 확산한 후의 농도를 예측하여 보았다.

### 2.1 대기 유동장 모델

#### 2.1.1 기초방정식

기초방정식은 운동량, 질량, 열에너지등의 보존에 기초를 둔 운동방정식, 온도방정식, 비습방정식, 연속방정식, 정역학 방정식이다. 본

연구에서는 지형의 영향을 고려하기 위하여 임의로 변화하는 지표면을 표현하기 위하여 지형좌표계를 사용하였으며, 지형좌표계에 의한 3차원 중규모 대기운동의 기초방정식은 다음과 같다.

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

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

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

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

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

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

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial s}{\partial t} = & - \frac{1}{s} \int_0^{\bar{s}} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} [u(s - z_G)] \right. \\ & \left. + \frac{\partial}{\partial y} [v(s - z_G)] \right\} dz^* \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} w^* = & w \frac{\bar{s}}{s - z_G} + \frac{z^* - \bar{s}}{s - z_G} \left( u \frac{\partial z_G}{\partial x} + v \frac{\partial z_G}{\partial y} \right) \\ & - \frac{z^*}{s - z_G} \left( \frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial s}{\partial x} + v \frac{\partial s}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\Pi = \left( \frac{P}{P_{00}} \right)^{R/c} \quad (10)$$

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w^* \frac{\partial}{\partial z^*} \quad (11)$$

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

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

### 2.1.2 지표면 열수지 모델

지표면에서 열의 축적을 무시한 경우 지표면 열수지 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_S + R_L + H + L E - Q_G + Q_A = 0 \quad (14)$$

$$R_S = (1 - A) T_r R_0 \cos Z \quad (15)$$

$$\cos Z = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos h \quad (16)$$

$$h = 15 (t - 12) + \phi_{lon} - 135 + e/4 \quad (17)$$

$$R_L = \sigma [ \{ E_a (1 - C_{cloud}) + C_{cloud} \} T_a^4 ] - \sigma T_G^4 \quad (18)$$

$$E_a = 1 - 0.261 \exp \{ -7.77 \times 10^{-4} (273 - T_a)^2 \} \quad (19)$$

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

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

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

여기서  $R_S$ 는 태양 복사 flux( $J/m^2 \cdot s$ ),  $R_L$ 와 장파 복사 flux( $J/m^2 \cdot s$ ),  $H$ 는 현열 flux( $J/m^2 \cdot s$ ),  $LH$ 는 잠열 flux( $J/m^2 \cdot s$ ),  $Q_G$ 는 지중열 flux( $J/m^2 \cdot s$ ),  $Q_A$ 는 인공열( $J/m^2 \cdot s$ )을 나타낸다.  $A$ 는 지표면 알베도,  $T_r$ 는 대기의 투과율,  $R_0$ 는 태양 상수( $=1358 J/m^2 \cdot s$ ),  $Z$ 는 천정각(deg),  $\sigma$ 는 Stefan-Boltzmann 상수( $=5.79610^{-8} J/m^2 \cdot s \cdot k^4$ ),  $T_a$ 는 Stevensen screen 고도( $=1.5m$ )의 기온,  $T_G$ 는 지표면 온도,  $C_{cloud}$ 는 운량이다.  $\rho$ 는 대기 밀도( $=1.226 kg/m^3, 15^\circ C$ ),  $L_w$ 는 잠열( $=2.46 J/kg, 15^\circ C$ ),  $w', \theta', q_V'$ 는 각각  $w, \theta, q_V$ 의 변동량이다.  $C_s$ 는 토양의 비습( $kg/kg$ ),  $v$ 는 토양의 열전도율( $J/m \cdot kg$ ),  $Z$ 는 지중 경계의 깊이(m)이다.

### 2.1.3 연직 방향과 수평 방향 확산 계수

본 연구에서는 대기 경계층을 지상으로부터 30m까지를 접지층, 그 위를 Ekman 층으로 나누어 각각 다른 모델화를 행하였다. 난류 효과는 여러가지 모델화가 되어 있지만, 본 연구에서는 대기 상태에 따른 난류 효과를 잘 표현한다고 생각되는 Yamada(1975)에 의한 종결

모델을 사용하여 Ekman층의 난류 확산 계수를 표현하였고, 접지층내에서의 수송 저항은 Monin-Obukhov의 상사이론에 기초한 Businger et al.(1971)의 무차원 풍속, 온위 표현식을 이용하여 운동량과 열 flux 및 연직 방향 확산 계수를 나타내었다.

#### 1) 접지층의 연직 방향 확산 계수

접지층은 정상적으로 수평 방향으로는 균일하다는 전제 조건하에서 풍속 및 온위의 연직 기울기를 나타낸 보편함수에 의하여 운동량과 열의 연직 방향 확산 계수는 다음과 같이 계산되어졌다.

$$K_V^{(m)}(z) = \frac{u_*^2}{\partial u / \partial z} = \frac{x u_* z}{\phi_m(\zeta)} \quad (23)$$

$$K_V^{(\theta)}(z) = \frac{u_* \theta_*}{\partial \theta / \partial z} = \frac{x u_* z}{\phi_h(\zeta)} \quad (24)$$

$$\phi_m(\zeta) \equiv \frac{x z}{u_*} \frac{\partial U}{\partial z} \quad (25)$$

$$\phi_h(\zeta) \equiv \frac{x z}{\theta_*} \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (26)$$

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

#### 2) Ekman 층의 연직 방향 확산 계수

Ekman층의 연직 방향의 확산계수는 Yamada(1975)의 종결 모델에 의해 다음과 같이 구할 수 있다.

$$q^2 = B_1 l^2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] (1 - Ri_f) S_M \quad (27)$$

$$\overline{w'^2} = \left[ \frac{1}{3} - 2 \frac{A_1}{B_1} - 6 \frac{A_1}{B_1} \left( 1 - \frac{2}{3} C_1 \right) \frac{Ri_f}{1 - Ri_f} \right] q^2 \quad (28)$$

$$-\overline{u'w'} = l q S_M \frac{\partial u}{\partial z} \quad (29)$$

$$-\overline{w'\theta'} = l q S_H \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (30)$$

$$-\overline{u'\theta'} = -3 A_2 l^2 (S_M + S_H) \frac{\partial \theta}{\partial z} \frac{\partial u}{\partial z} \quad (31)$$

$$\overline{\theta'^2} = B_2 l^2 S_H \left( \frac{\partial \theta}{\partial z} \right)^2 \quad (32)$$

$$S_M = C_M \frac{(Ri_{fc} - Ri_f)(R_f 1 - Ri_f)}{(1 - Ri_f)(R_f 2 - Ri_f)} \quad (33)$$

$$S_H = C_H \frac{Ri_{fc} - Ri_f}{1 - Ri_f} \quad (34)$$

여기서  $q^2$ 은 속도 변동 에너지,  $l$ 은 혼합 길이,  $Ri_r$ 는 flux Richardson수,  $Ri_{fc}$ 는 임계 flux Richardson수(=0.2748189),  $C_M=1.4326687$ ,  $C_H=1.9527037$ ,  $R_{f1}=0.3257390$ ,  $R_{f2}=0.3161959$ ,  $u', v', \theta'$ 는 각각  $u, v, \theta$ 의 변동량이고, 실험상수는  $A_1=A_2=0.78$ ,  $B_1=15.0$ ,  $B_2=8.0$ ,  $C_1=0.3$ 이다.

운동량, 열, 비습의 확산 계수는

$$K_V^{(m)} = q \cdot l \cdot S_M \quad (35)$$

$$K_V^{(q)} = K_V^{(q)} = q \cdot l \cdot S_H \quad (36)$$

이다.

### 3) 수평 방향 확산 계수

해류풍 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 충분히 큰 값인  $10000 \text{ (m}^2/\text{s)}$ 으로 두었다.

#### 2.1.4 초기 조건 및 경계 조건

초기 조건으로는 계산 대상 전 영역이 정상 상태에 있다고 가정하였다. 연직 방향의 풍속 성분은 전 영역에서 0으로 두었고, 수평방향 풍속 성분  $u, v$ 는 지균풍이 없는 경우를 가정해서 계산하였으므로,  $u=v=0$ 으로 하였다.

온위는

$$\theta = \theta_{sea} + \Gamma \{ z^* [\bar{s} - z_G(x, y)] \bar{s}^{-1} + z_G(x, y) \} \quad (37)$$

을 사용했으며, 여기서  $\Gamma$ 는 온위의 연직방향 감률(K/m)이다.

비습은 온위와 같은 방법으로 구하였다.

지중온도는

$$T_s = \theta_G = \theta_{sea} \quad (38)$$

과 같이 두었으며, 여기서  $\theta_G$ 는 지표면에서의 온위(K)이다.

지표면에서의 경계조건은 연직방향 풍속에 대해서  $w=0$ 으로 하였고, 수평방향 풍속  $u, v$ 에 대해서는 지표면에 격자점이 없기 때문에 지표면에 최대로 가까운 점의 값  $u_{i,j,k}$  및  $v_{i,j,k}$ 를 지표층 마찰속도로부터 구해 그 값을 경계치로 하였다. 온위는 바다와 육지로 분리하여 해면을

$$\theta = \theta_{sea} = const \quad (39)$$

로 두고, 육지표면은 지표면 열수지 모델을 이용해서 결정된  $T_G$ 를 경계치로 사용했다.

비습은 지표면의 습윤도와 온도 등의 함수로 나타내는

$$q_{VG} = F_w q_{VG \cdot sat} + (1 - F_w) q_V(z_2) \quad (40)$$

를 사용하였다. 여기서  $F_w$ 는 지표면의 습도,  $q_V(z_2)$ 는 높이  $z_2$ 의 비습,  $q_{VG \cdot sat}$ 는 지표의 포화 비습(kg/kg)이다.

지중온도에 대해서는  $z_{GO} = 100m$ 에서

$$\frac{\partial T_s}{\partial z} = 0 \quad (41)$$

하였다.

상면에서의 경계조건은 지표면 가열에 의해 일어나는 일변화는 상면에 영향을 미치지 않는다고 가정하여

$$\frac{u_{i,j,k \max} + u_{i,j,k \max-1}}{2} = U_g \quad (42)$$

$$\frac{v_{i,j,k \max} + v_{i,j,k \max-1}}{2} = V_g \quad (43)$$

로 정하였고, 또 전 변수에 대해서는

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

로 하였다.

측면에서의 경계조건으로는 유입측에서는

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

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial \theta}{\partial y} = \frac{\partial q_V}{\partial y} = \frac{\partial \Pi}{\partial y} = 0 \quad (46)$$

로 하고, 유출측에서는 vector량( $u, v$ )과 scalar량( $\theta, q_V$ )으로 나누고 각각 다음과 같이 하였다. 수평풍속의 법선 성분에 대해서는 Klemp와 Wilhelmson(1978)의 경계조건

$$\frac{\partial V_n}{\partial t} + c \frac{\partial V_n}{\partial n} = 0 \quad (47)$$

을 사용하였다.

## 2.2 오염 질의 이류 확산 수치 모델

### 2.2.1 이류 확산 방정식

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

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -u \frac{\partial C_i}{\partial x} - v \frac{\partial C_i}{\partial y} - w \frac{\partial C_i}{\partial z} + \left(\frac{\bar{s}}{s-z_G}\right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} (K_V^{(c)} \frac{\partial C_i}{\partial z^*}) + \frac{\partial}{\partial x} (K_H^{(c)} \frac{\partial C_i}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_H^{(c)} \frac{\partial C_i}{\partial y}) + q_i \quad (48)$$

유출측 ;  $\frac{\partial C_i}{\partial x} = const$  (51)

여기서 C는 오염 물질의 농도, i는 오염 물질의 종류, q<sub>i</sub>는 배출량을 나타낸다.

2.2.2 초기 조건 및 경계 조건

상면에서는 처음 설정한 초기 농도값을 가지도록 하였고, 지표면에서는 다음과 같이 침적을 고려하지 않은 완전 반사의 조건을 사용하였다.

$$K_V^{(c)} \frac{\partial C}{\partial z} = -Q_{SF} \quad (49)$$

이때 Q<sub>SF</sub>는 지상에 있는 배출원으로부터의 오염물질의 flux를 나타낸다.

측면에서의 경계조건은 다음과 같이 두고 계산하였다.

유입측 ;  $\frac{\partial C_i}{\partial x} = 0, \frac{\partial C_i}{\partial y} = 0, \frac{\partial C_i}{\partial z} = 0$  (50)

3. 계산 영역 및 격자 간격

바람장의 계산 대상 영역은 부산지역을 포함하고 있는 경남지역으로 지형적 특성을 잘 묘사한 3차원 지형을 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 부산시는 북북동으로부터 남남동으로 뻗은 2개의 선형모양을 한 구릉에 싸여져 있으며 남쪽 및 동쪽이 바다에 접해있는 해안 도시이다. 수치모의시 부산시의 바람장 및 농도장의 분석을 위한 계산영역은 Fig. 2에 묘사된 바와 같이 부산시의 주요지점을 포함하고 있는 수평방향으로 30km 이내의 정사각형 영역을 대상으로 하였다. 이 때 등고선의 간격은 100m이며 주요지점들이 명시되어져 있다.

본 연구에 사용된 수평 격자 간격은 1km로 두었으며 연직 방향으로는 2240m까지 10층으로, 격자 간격은 지표부근에서 조밀하게 불균등 격자로 나누었다. 지중은 1m까지를 14층으로 구분하였으며, 실제 지형은 식(52)과 같이 평활화를 하였고, 평활화 후 50m이하는 평지

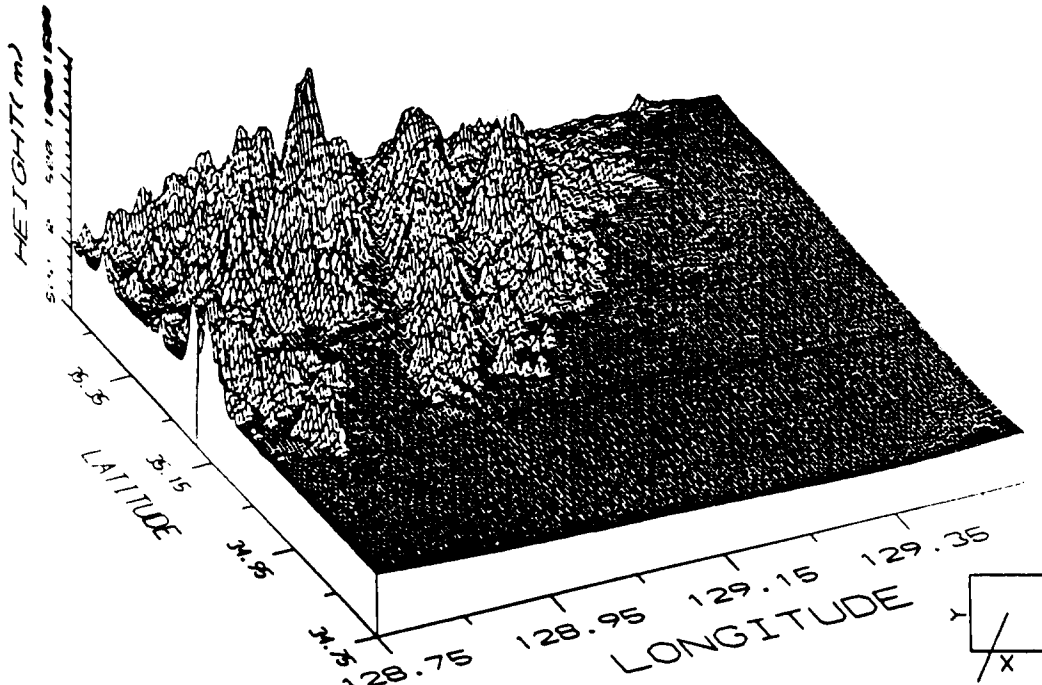


Fig. 1. 3-Dimensional topography of Pusan city and its neighboring area.

로 보았다.

$$z_{G_i,j} = 0.15 [z_{G_{i+1,j}} + z_{G_{i-1,j}} + z_{G_{i,j-1}} + z_{G_{i,j+1}}] + 0.4z_{G_i,j} \quad (52)$$

4. 초기 농도와 배출원의 설정

이산화황의 지표면에서의 초기 농도는 8월 평균 농도인 15 ppb로 두었으며, 높이 100m까지는 같은 값으로 두고, 100m 이상에서는 계산 영역의 상한에서 1/10로 되도록 선형적으로 감소하게 하였다. 배출량은 배출원의 종류에 따라 점, 선, 면오염원으로 나누었으며 부산지역의 다양한 배출원으로부터 발생하는 이산화황의 연간 배출량을 Fig. 3에 나타내었

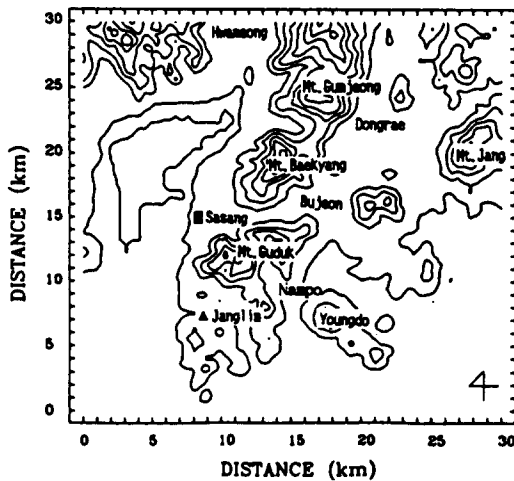


Fig. 2. Main computational area of Pusan city (Interval of contour is 100m). (■, ▲; Industrial area of Sasang, Janglim)

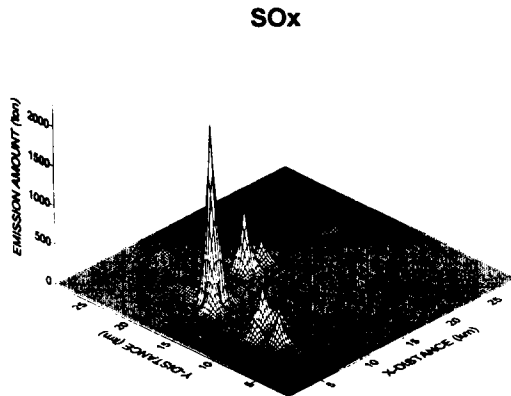


Fig. 3. The emission amount of SO<sub>2</sub> in Pusan city (ton/year).

다. 그림에서 볼수 있는 바와 같이 부산 지역의 산업 시설이 밀집되어 있는 Fig. 2의 지형도에 표시된 장림(Janglim), 신평(Sinpyeong) 및 사상(Sasang)지역에 있는 밀집해 있는 점오염원으로부터 연간 다량의 이산화황이 배출되고 있음을 알 수 있다.

5. 결 과

부산 지역에서 다양한 배출원으로부터 배출된 이산화황을 부산 지역의 바람장을 고려할때 확산되어 일어나는 농도장의 변화를 수치모의 하여 보았다. 2장에서 기상장 수치 모델에 3장의 오염물질의 이류 확산식을 첨가하여 이산화황 농도의 예측 계산을 행하였다. 대상일은 일반류가 약하고 일사에 의한 해륙풍이 잘 발달할 수 있는 여름철 맑은날을 선정하여 연구 대상 지역의 3차원 바람장 및 오염물질의 농도를 수치모의하였고, 이때 오염물질의 확산장의 역할을 하는 해륙풍계를 Fig. 4에 나타내었다.

농도 계산은 새벽 4시부터 시작하여 이틀동안을 행하였다. Fig. 4는 5시간 간격으로 10, 15, 20시의 수평적인 기류장을 보이고 있으며, Fig. 5는 그 기류장에서의 수평적인 SO<sub>2</sub>의 농도 분포를 나타내고 있다. Fig. 4의 (a)그림을 보면 밤동안의 육풍은 거의 사라지고 남서쪽의 낙동강을 따라 바다로부터 약한 해풍이 불기 시작했음을 알 수 있다. 이때 Fig.5의 (a)에서의 농도 분포를 보면 연안 지역에 위치한 신평, 장림 공업 단지로부터 발생되는 오염 물질들이 멀리 확산되지 못하고 해안선 부근인 지표면으로부터 가까운 곳에 분포하고 있으며, 부산 지역의 지형적 특징이라 할 수 있는 계곡을 따라 오전중 공장들의 작업개시로 배출되어지기 시작한 오염물질들이 해안선으로부터 떨어진 내륙쪽으로 확산 되고 있음을 알 수 있다. Fig. 4의 (b)는 오후 15시의 바람장으로 오전중 바다로부터 해풍이 시작된 이후 낮동안 강한 일사량으로 인하여 낮동안 발달된 해풍이 내륙을 향하여 불어 들어가고 있으며, 산 정상상을 향하여 불어 올라가는 곡풍의 효과도 뚜렷히 관측되어 진다. 동시에 지속적인 공장의 가동에 의하여 대기중으로 배출되어지는 이산화황은 대기가 불안정해지고 두꺼운 혼합층의 형성으로 오전중에 형성된 고농도는 약

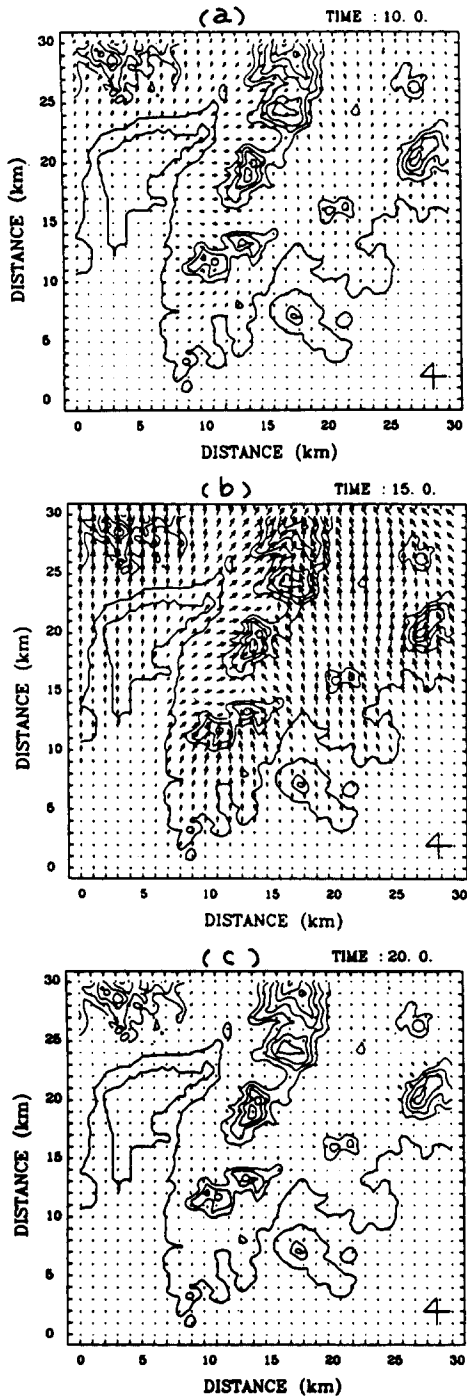


Fig. 4. Simulated results of the wind fields at 30m in Pusan area.  
(a)1000LST (b)1500LST  
(c) 2000LST.

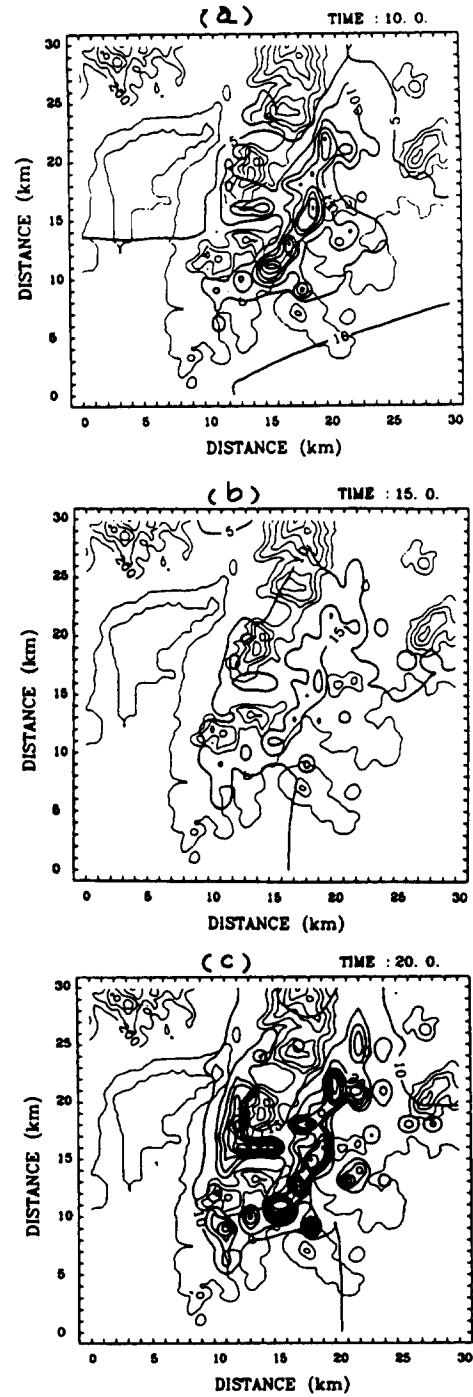


Fig. 5. Horizontal distribution of SO<sub>2</sub> concentration in Pusan area.  
(a)1000LST (b)1500LST  
(c)2000LST

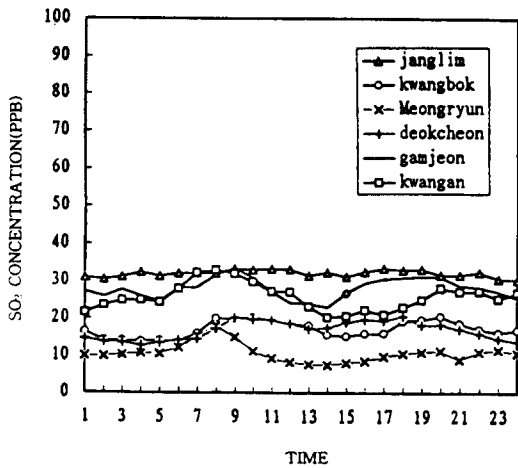


Fig. 6. Observed values of SO<sub>2</sub> concentration in main districts of Pusan area.

간 약세를 보이며 점차 발달한 해풍을 따라 내륙으로 이동됨을 알 수 있다(Fig.5, (b)).

Fig.4의 (c)에서는 해가 진 후, 산 정상부분과 지표면의 복사냉각으로 인한 산풍의 효과가 나타나고 있으며 지표면 근처 및 골짜기사이의 풍속이 약해짐으로 인하여 고농도 현상을 보이고 있다.

이상과 같이 이산화황 농도의 하루중 수치모의 결과를 실제 관측치와 비교하기 위하여 1993년 6~8월의 부산 지역의 대기오염 측정망에서 측정된 이산화황 농도의 일변화를 Fig.6에 나타내었다. 대부분의 지역에서 오전 8~9시경과 오후 19~20시경에 최대 농도를 보이고 있으며 수치모의한 결과와 비슷한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

## 6. 결 론

해륙풍계내에서 이산화황의 농도변화를 시뮬레이션하기 위하여 3차원 해륙풍 바람장을 이용하여 농도 예측 계산을 행하였다. 그 결과 해안 근처에 위치한 산업 시설에서 배출되어진 이산화황은 하루중 2번의 최대 농도를 보이고 있으며, 이는 기상장과 밀접한 관계를 가지고 있어 낮동안에는 강한 일사로 인한 대기의 불안정으로 확산, 희석되어 농도가 낮아지고, 오전중 공장이 가동된 후와 지표면 냉각이 시작되는 오후 8시경 최고 농도를 나타낸다고 사료되어진다. 본연구에서는 연안 도시 지역에

해풍이 출현한 날 해풍을 따라 내륙으로 확산되어지는 대기중 비반응 오염물질의 경우 하루중의 대기의 안정상태에 따른 이류, 확산 현상의 강, 약의 정도가 복합적으로 영향을 끼치고 있음을 시사하고 있으며, 앞으로 본 연구에서 개발되어진 대기 오염 농도 예측 모델에 오염물질이 배출원으로부터 대기중으로 배출되었을 때 대기의 안정도 상태에 따라 민감한 차이를 보이는 침적현상과 이산화황은 대기중에 배출되어지는 전체 배출량중 점오염원이 대부분을 차지하고 있는 만큼 배출될 당시의 굴뚝으로부터의 연기 상승 효과가 고려되어진다면 더 정밀한 대기오염물질 농도예측이 이루어 질 것으로 사료된다.

## 감사의 글

이 논문은 부산대학교 정보통신연구소의 지원에 의하여 연구되었습니다. 이에 대하여 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- 박순웅, 1992, Lagrangian 입자 확산 모델링, 한반도의 국지기상 특징과 대기환경 Workshop., 3-31.
- 이화운, 김 유근, 장 은숙, 1996, 중규모 국지순환에서 이산화황의 농도예측에 관한 연구, 한국환경과학회지, 5(3), 277-284.
- 阿部信男, 楠田 信, 大分市における海陸風と二酸化硫黄濃度の關係, 天氣, 29(1), 90pp (1982).
- Businger, J. A. et al., 1971, Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer, J. Atmos. Sci., 28, 181-189.
- Chang, J. S., 1987, R. A. Brost, I. S. A. Isaksen, S. Madronich, P. Middleton, W. R. Stockwell, and C.J. Walcek, A three-dimensional eulerian model: physical concepts and formulation, J. Geophys. Res., Vol. 92, 14681.
- 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 ef-



- fect 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.
- Luria M., Almog H. and M. Peleg, 1984, Transport and Transformation of Air Pollutants from Israel's Coastal Area, *Atmos. Env.*, 18, 2215-2222.
- Ozoe, H., 1983, T. Shibata, H. Sayama and H. Ueda, Characteristics of air pollution in the presence of land sea breeze-A numerical simulation, *Atmos. Environ.*, 17, 35-42.
- Pielke, R. A., 1974, A Three-dimensional numerical model of the sea breeze over south florida, *Mon. Wea. Rev.*, 102, 115-139.
- Pielke, R. A., 1984, Mesoscale meteorological modeling, Academic Press Inc., 612.
- 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 SO<sub>2</sub> concentrations from major elevated sources in southern Florida, *Atmos. Environ.*, 22, 1319-1334.