

대기확산의 수치모의에서 SST 효과 SST Effect upon Numerical Simulation of Atmospheric Dispersion

이 화 운·원 경 미·조 인 숙¹⁾

부산대학교 대기과학과 ·¹⁾환경시스템학과

(1999년 5월 12일 접수, 1999년 7월 14일 채택)

Hwa-Woon Lee, Gyeong-Mee Won and In-Suk Cho¹⁾

Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Pusan, Korea

¹⁾Department of Environmental System, Pusan National University, Pusan, Korea

(Received 12 May 1999; accepted 14 July 1999)

Abstract

In the coastal region air flow changes due to the abrupt change of surface temperature between land and sea. So a numerical simulation for atmospheric flow fields must be considered the correct fields of sea surface temperature (SST). In this study, we used variables such as latent heat flux, sensible heat flux, short and long wave radiation of ocean and atmosphere which exchanged across the sea surface between atmosphere and ocean model. We found that this consideration simulated the more precise SST fields by comparing with those of the observed results. Simulated horizontal SST differences in season were 2.5~4°C. Therefore we simulated the more precise atmospheric flow fields and the movement and dispersion of the pollutants with the Lagrangian particle dispersion model. In the daytime dispersion pattern of the pollutants emitted from ship sources moved toward inland in the night time moved toward sea by land/sea breeze circulation. But air pollutants dispersion can be affected by inland topography, especially Yangsan and coastal area because of nocturnal wind speed decrease.

Key words : SST, Pusan, atmosphere and ocean model, atmospheric flow fields, Lagrangian particle dispersion model

1. 서 론

현대는 과학기술이 비약적으로 진보되어 대량생산과 대량소비가 가능해졌으며, 대규모 공업지역이 건설되고 도시는 급속히 거대해졌다. 그 결과 물질 풍부해졌지만 환경에 대한 악영향은 점차 현저해지면서 환경오염은 큰 사회문제로 대두되었다.

특히, 나날이 증가하는 차량이나 선박 등에 의한 수송부문에서의 배출이 증가하고 있어 대기의 오염은 더 가중되고 있는 실정이다.

이러한 대기오염의 농도를 예측하기 위해서는 대기 오염물질의 수송, 확산 및 침착에 큰 영향을 미치는 대기 유동장을 표현할 수 있는 수치모델이 필요하다. 특히 부산과 같은 연안 지역의 대기 흐름은 육지와 바다사이의 온도차, 거칠기의 급격한 변화

등에 기인하는 해류풍의 영향을 받아 오염물질이 순환하여 체류하거나 수렴하여 대기오염 농도가 극지적으로 높게 나타날 수 있다(이화운 등, 1998).

3차원 해류풍의 수치모델에 관해서는 초기에 Pielke(1974)가 남부 Florida에서 해풍만을 수치모의하여 개발한 모델에 해류의 지형적 분포를 도입 시켜 Florida위의 복잡한 바람장의 형태를 재구성하였고, 해풍에서의 일반풍 영향과 함께 중규모의 수렴과 발산도 논의하였다. 지형의 영향과 지표면 열수지를 포함한 3차원 해류풍 모델은 Pielke(1974)에 의해 개발되었으며, 실제 지형을 포함한 3차원 모델은 Abbs(1986)에 의해 실행되었다. 또한 국내에서는 박순웅(1992)이 3차원 해류풍 모델에서 구한 바람장을 이용하여 경계층내의 바람분산을 구하는 방법을 기술하였다.

이러한 해류풍순환이 고려되어진 대기확산의 수치모의에서 해류풍은 해류의 열적인 차에 의해 발생되며 그 발생과 강도에 의해 크게 영향을 받으므로 옥지와 해양간의 정확한 온도장의 모사는 가장 중요한 역할을 한다. 그러나 대부분의 중규모 수치실험은 하층의 경계조건으로 주어지는 해수면 온도를 일정하게 가정하거나 기후학적 평균값을 사용함으로써 해양의 영향을 정확히 계산하지 못하였다. 대기와 해수온도와의 관계는 여러면에서 연구가 이루어졌는데, 한영호(1991)는 해수온도가 우리나라 서해안 지방의 기온 및 습도에 미치는 영향을 알아보기 위해 해안지방과 내륙지방을 선정하여 각각의 기상요소인 기온, 습도, 풍속을 조사·분석한 바 있었다. 조병길(1994)은 1차원 대기-해양 혼합 모델을 이용하여 황해 남동해역에서의 열수지를 계산하여 각 플렉스의 계절적 변화를 살펴보았다. 또한 1985년 Kang이 동해상 해면 열 교환의 각 성분과 기온의 변화에 대해 모델을 통해 알아본 결과, 수온이 1°C 증가하면 해상기온이 1.2°C 증가하는 효과가 있다고 조사되어 해수면 온도의 대기모델에의 영향을 예측하였다.

따라서 본 연구에서는 연안도시인 부산지역의 대기유동장의 수치모의에서 보다 정확한 해수면 온도장을 얻기 위해 혜양모델을 통해 계산된 SST(Sea Surface Temperature)의 효과를 고찰해 보고, 이를 대기모델과 결합시켜 대기유동장의 변화를 살펴보자 한다. 또한 SST 효과가 고려된 대기유동장 모

델을 통해 대기경계층에서 모의되는 바람장으로 부산지역 해상의 가상적인 오염원에서의 오염물질 라그란지(Lagrangian) 수송을 통해 선박으로 인한 부두나 항로 등의 해상오염원에서 발생한 오염물질의 이동 및 확산과 육상으로의 영향을 예측하고자 한다.

2. 대기확산의 수치모의를 위한 모델

부산지역의 대기 확산현상에 대한 수치모의를 위해 3차원 해류풍 모델인 대기유동장모델과 해양모델인 Princeton Ocean Model(POM)을 사용하였으며, 대기유동장을 따라 입자의 확산을 예측하기 위해 라그란지 입자 확산모델을 사용하였다.

2.1 대기유동장 모델

지형좌표계에 의한 3차원 중규모 대기유동의 기본 방정식은 다음과 같다. 운동방정식은

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

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

온도방정식은

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

비습방정식은

$$\frac{dq_V}{dt} = \left(\frac{\bar{s}}{s - z_G} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_V^{(m)} \frac{\partial q_V}{\partial z^*} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial q_V}{\partial x} \right)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial y} \left(K_H \frac{\partial q_V}{\partial y} \right) \quad (4)$$

연속방정식은

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

정역학방정식은

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

지증 온도 방정식은

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (7)$$

이다. 여기서 u, v, w 는 각각 x, y, z 방향의 속도성분 (m/s), w' 는 지형좌표계 (z)에 의한 연직방향의 속도성분 (m/s), t 는 시간 (s), θ 는 온위 (K), q_V 는 비습 (kg/kg), T 는 온도 (K), T_s 는 지증온도 (K), K 는 토양의 열확산계수 (m^2/sec), g 는 중력가속도 (m/s^2), K_H 는 수평방향 확산계수 (m^2/s), 그리고 $K_V^{(m)}, K_V^{(\theta)}, K_V^{(q)}$ 는 각각 운동량, 온, 비습의 연직방향의 확산계수 (m^2/s)이다.

연직방향의 확산계수는 대기경계층을 지상으로부터 50m까지를 접지층, 그 위를 에크만층으로 나누어 각각 달리 계산하였다. 접지층내에서의 수송저항은 Monin-Obukhov의 상사이론을 풍속 및 온위의 연직분포에 적용한 Businger et al. (1971)의 무차원 풍속, 온위표현식을 이용하여 운동량과 온속 및 연직방향 확산계수를 구하였다. 에크만층은 대기상태에 따른 난류효과를 잘 표현한다고 생각되는 Yamada (1975)에 의한 종결보렐 (Closure model)을 사용하여 난류확산계수를 계산하였다.

지표면 온수지방정식은 복사열로 태양복사속과 장파복사속, 대류열로 현열속과 잡열속 그리고 지증 온속, 인공열로 구성된다.

3차원 중규모 대기유동을 나타내는 방정식의 차분식은 explicit method로, 이류형에는 풍상차분법, 확산함은 Mahrer와 Pielke (1975)의 DuFort-Frankel 법, 시간에 대해서는 전진차분법을 사용하고, 나머지 항들은 중앙차분법을 사용하였다. 각 변수에 대한

격자망은 변수의 정의점이 다른 불균등 격자망을 이용하였다.

계산의 초기조건과 경계조건 및 대기유동장에 대한 자세한 내용은 이화운 등 (1997)의 연구에 잘 나타나 있다.

2.2 해양모델

해양모델인 POM은 시그마좌표계의 원시방정식을 기초로 하는 3차원, free-surface 모델로서 turbulence sub-model을 포함한다 (Mellor, 1996).

시그마좌표계의 유도를 위해 다음과 같이 둔다.

$$x^* = x, \quad y^* = y, \quad \sigma = \frac{z - \eta}{H + \eta}, \quad t^* = t \quad (8)$$

여기서 $D = H + \eta$, $H(x, y)$ 는 해저 지형, $\eta(x, y, z)$ 는 해수면 고도로 그림 1에 나타내었다.

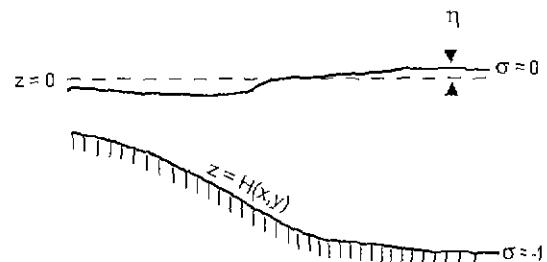


Fig. 1. The sigma coordinate system.

기초방정식계는 다음과 같다.

연속방정식은

$$\frac{\partial DU}{\partial x} + \frac{\partial DV}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} + \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \quad (9)$$

운동방정식은

$$\begin{aligned} \frac{\partial UD}{\partial t} + \frac{\partial U^2 D}{\partial x} + \frac{\partial UVD}{\partial y} + \frac{\partial U\omega}{\partial \sigma} - fVD + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ + \frac{\partial gD^2}{\partial \rho_0} \int_{\sigma}^0 \left[\frac{\partial \rho'}{\partial x} - \frac{\sigma'}{D} \frac{\partial D}{\partial x} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma'} \right] d\sigma' \\ = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_m}{D} \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right] + F \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial VD}{\partial t} + \frac{\partial UV D}{\partial x} + \frac{\partial V^2 D}{\partial y} + \frac{\partial V \omega}{\partial \sigma} fUD + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} \\ + \frac{\partial g D^2}{\partial \rho_0} \int_{\sigma}^0 \left[\frac{\partial \rho'}{\partial y} - \frac{\sigma'}{D} \frac{\partial D}{\partial y} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma'} \right] d\sigma' \\ = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_M}{D} \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right] + F_v \end{aligned} \quad (11)$$

은위 방정식과 염분도 방정식은

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta D}{\partial t} + \frac{\partial \theta U D}{\partial x} + \frac{\partial \theta V D}{\partial y} + \frac{\partial \theta \omega}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_H}{D} \frac{\partial \theta}{\partial \sigma} \right] \\ + F_T - \frac{\partial R}{\partial z} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\frac{\partial S D}{\partial t} + \frac{\partial S U D}{\partial x} + \frac{\partial S V D}{\partial y} + \frac{\partial S \omega}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_H}{D} \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right] + F_S \quad (13)$$

난류운동에너지 방정식은

$$\begin{aligned} \frac{\partial q^2 D}{\partial t} + \frac{\partial U q^2 D}{\partial x} + \frac{\partial V q^2 D}{\partial y} + \frac{\partial \omega q^2}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_q}{D} \frac{\partial q^2}{\partial \sigma} \right] \\ + \frac{2K_M}{D} \left[\left(\frac{\partial U}{\partial \sigma} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \sigma} \right)^2 \right] + \frac{2g}{\rho_0} K_H \partial \tilde{p} \\ - \frac{2Dq^3}{B_l l} + F_q \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q^2 l D}{\partial t} + \frac{\partial U q^2 l D}{\partial x} + \frac{\partial V q^2 l D}{\partial y} + \frac{\partial \omega q^2 l}{\partial \sigma} \\ = \frac{\partial}{\partial s} \left[\frac{K_q}{D} \frac{\partial q^2 l}{\partial \sigma} \right] + E_l l \left(\frac{2K_M}{D} \left[\left(\frac{\partial U}{\partial \sigma} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \sigma} \right)^2 \right] \right. \\ \left. + E_3 \frac{g}{\rho_0} K_H \frac{\partial \tilde{p}}{\partial \sigma} \right) \tilde{W} + F_l \end{aligned} \quad (15)$$

이다. 여기서 q 는 난류운동 에너지, l 은 turbulence length scale, ω 는 변환된 연직속도이며, S 는 염분도 (psu). K_M 은 연직 운동 점성 계수($m^2 s^{-1}$), K_H 는 연직 확산계수($m^2 s^{-1}$), R 은 단파 복사속($ms^{-1} K$)이다.

수평점성과 확산항은 다음과 같이 정의된다.

$$F_v = \frac{\partial}{\partial x} (H\tau_{vv}) + \frac{\partial}{\partial y} (H\tau_{vv}) \quad (16)$$

$$F_v = \frac{\partial}{\partial x} (H\tau_{vv}) + \frac{\partial}{\partial y} (H\tau_{vv}) \quad (17)$$

여기서

$$\tau_{vv} = 2A_M \frac{\partial U}{\partial x}, \tau_{vv} = \tau_{vv} = A_M \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right), \tau_{vv} = 2A_M \frac{\partial V}{\partial y} \quad (18)$$

이며, 또한

$$F_v = \frac{\partial}{\partial x} (Hq_v) + \frac{\partial}{\partial y} (Hq_v) \quad (19)$$

이다. 여기서

$$q_v = A_H \frac{\partial \phi}{\partial x}, q_v = A_H \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad (20)$$

이며, ϕ 는 $\theta, S, q2, q2$ 를 나타내고, A_H 는 수평운동 점성 계수($m^2 s^{-1}$), A_H 는 수평열확산 계수($m^2 s^{-1}$)이다.

그리고 A_H 를 구하기 위해 Smagorinsky 식을 사용하는데 다음과 같다.

$$A_H = C \Delta x \Delta y \frac{1}{2} |\Delta V + (\Delta V)^T| \quad (21)$$

2.3 라그란지 입자 확산모델

배출된 입자의 연속적인 3차원 위치를 결정하는 방법으로 다음과 같은 라그란지 입자 확산식을 사용하였다.

$$X_i(t+dt) = X_i(t) + \frac{1}{2} \left[\frac{du_i}{dt} \right] dt^2 \quad (22)$$

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

$$X_i(t+dt) = X_i(t) + [u_i(t)] dt \quad (23)$$

여기서 $X_i(t)$ 는 오염물질의 현재의 위치를 나타내고, $X_i(t+dt)$ 는 dt 후의 오염물질의 새로운 위치를 나타내며, dt 는 시간변화, u_i 는 입자가 위치한 곳에서의 난류성분을 포함한 종관바람의 중규모 바람성분으로 다음과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} u_i = \alpha_1 u_i(l, m, n) + \alpha_2 u_i(l+1, m, n) + \alpha_3 u_i(l+1, m \\ + 1, n) + \alpha_4 u_i(l, m+1, n) + \alpha_5 u_i(l, m, n+1) \\ + \alpha_6 u_i(l+1, m, n+1) + \alpha_7 u_i(l+1, m+1, n) \\ + \alpha_8 u_i(l, m, n+1) \end{aligned} \quad (24)$$

여기서 첨자 i 는 1일 때 x 방향, 2일 때 y 방향, 3일

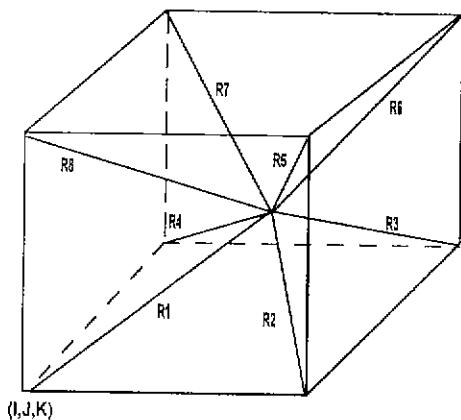


Fig. 2. Schematic picture of distance between each grid point and a pollutant position in three dimension.

매 z 방향을 표시한다.

위 식 (24)에서 α_s 는 가중치로 다음과 같다.

$$\alpha_s = \frac{\sum_{i=1}^8 R_i - R_s}{7 \times \sum_{i=1}^8 R_i} \quad (25)$$

여기서 s 는 1에서 8까지 변하고, R 은 각 격자점과 오염물질 위치 X_s 사이의 거리로 그림 2에 나타내었다.

3. 부산지역의 대기유동장 수치모의

대기/해양 상호간의 물질교환이 이루어지도록 구성된 수치모델을 통해 부산지역의 계절별 해수면 온도의 분포특성을 분석하고, 대기유동장 수치모의에서 SST의 효과를 보기 위해 여름에 대해 SST가 상수로 주어진 경우와 해양모델을 통해 SST가 고려된 경우 각각의 바람장을 비교·분석하였다. 또한 라그란지 입자 확산을 예측하여 연안오염원의 내륙으로의 영향을 살펴보았다.

3. 1 계산영역과 계산방법

본 연구의 계산영역은 부산광역시와 부산항을 포함하는 총 $110 \times 110 \text{ km}$ 의 영역으로 수평방향 각각 110 km , 격자간격 5 km 의 23×23 격자점을 이용하였다(그림 3(a)). 그림 3(a)에서 점으로 표시된 지점

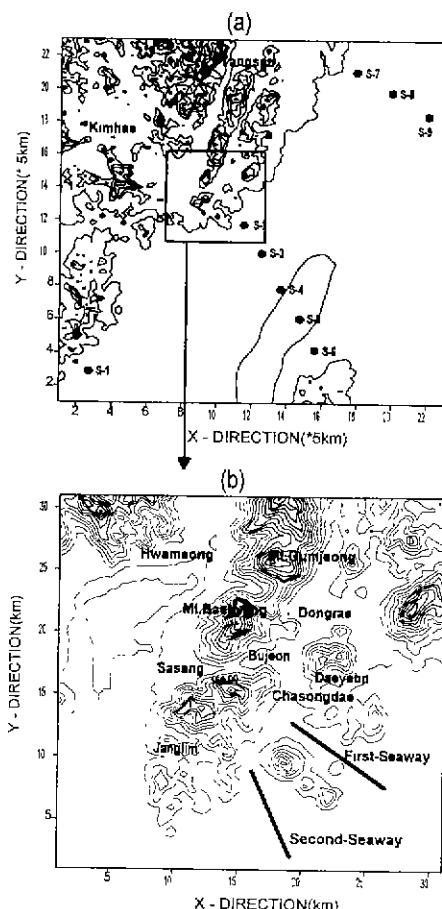


Fig. 3. Calculation region for numerical simulation of Pusan coastal area.

($s-1 \sim s-9$)은 정선해양 관측지점으로 대상영역내에 9개 지점이 있으며, 사각형으로 표시된 영역(그림 3(b))은 부산광역시의 중심지역과 연안지역을 나타낸다. 여기서 라그란지 입자확산의 특정 배출원으로 연안지역에서 부산항의 제 1항로와 2항로 위의 한 곳과 콘테이너 전용부두인 신선대 부두를 설정하여 대기오염물질의 이동 및 확산을 예측하였다.

해양모델을 통해 대기유동장에 SST가 고려되기 위해서는 다음과 같은 물질교환이 이루어지도록 했다. 대기모델의 적분간격은 1분이며, 해양모델의 적분간격은 5분으로 대기모델의 매 5 time step마다 해수면을 통해 복사와 현열속, 잠열속, 그리고 해수면 온도가 교환되도록 하였다.

3. 2 온도장 분석

본 연구에서 구성한 모델을 통해 계절별 해수면 온도를 수치모의하였는데, 수평분포(그림 4)는 사계절 모두 연안지역에서 바다쪽으로 갈수록 온도가 높아지고 있는 것을 볼 수 있었다. 대상영역내의 평균 해수면 온도는 봄의 경우 286.5 K, 여름 298.6 K, 가을 293.8 K, 겨울 284.8 K이었으며, 여름과 겨울의 평균 온도차는 14.1°C 가량이었고, 계절별 영역내의 수평적 해수면 온도의 차는 2.5~4°C였다.

이러한 수치모델을 통해 얻어진 계절별 해수면

온도의 검증을 위해 국립수산 진흥원의 정선해양 관측자료를 이용하였으며, 대상기간은 1966~1995년으로 2, 4, 8, 10월의 자료를 이용하였다 대상 영역 안에 들어가는 9개 지점의 관측값을 24시간 평균하여 모델의 결과값과 비교하였는데(그림 5). 관측값과 모델값이 전체적으로 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있었다. site별 온도차는 봄의 경우 관측값과 모델값이 모두 2°C이고, 여름의 경우는 관측값이 4.19°C, 모델값이 2.7°C, 가을에는 관측값이 2.7°C, 모델값이 2.2°C, 겨울에는 관측값이 2.1°C, 모델값이 3.5°C로 나타났다. 또한 연안지역에 가까운

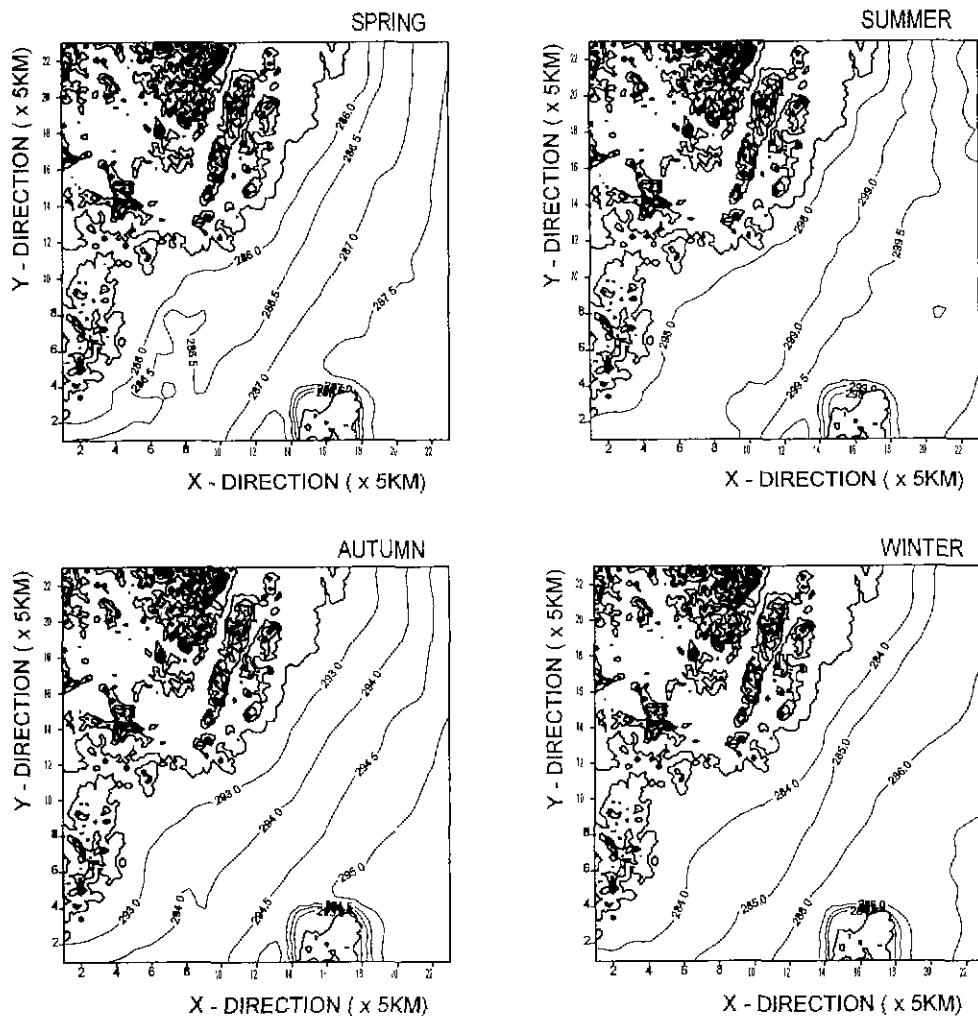


Fig. 4. Horizontal distribution of SST for four seasons.

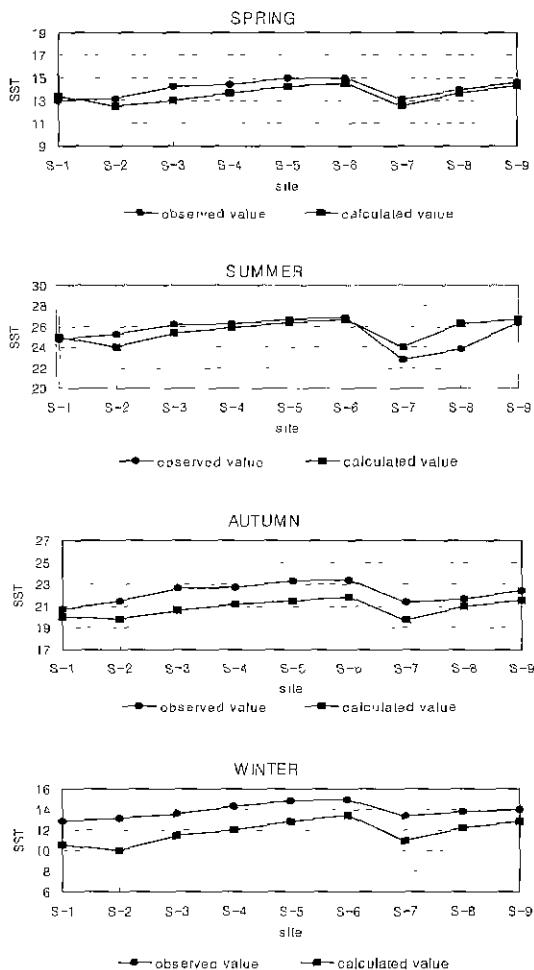


Fig. 5. Comparison of the simulated SST values with observed values for four seasons.

곳일수록 온도경사는 컸다.

따라서 본 연구에서 구성한 수치모델은 부산항을 포함하는 주변 해역의 계절별 해수면 온도장을 잘 표현하고 있었으며, 해류풍순환을 고려한 대기확산의 수치모의에서 SST효과가 잘 반영될 것으로 생각된다. 이러한 해수면 온도의 수평적 분포를 고려한 대기유동장의 수치 시뮬레이션은 정확한 대기유동장의 모사를 가능하게 할 것이다.

3.3 바람장의 비교 분석

본 연구에서 구성한 대기유동장 모델(case 1)을

통해 여름의 바람장 패턴을 살펴보았으며, 기존의 부산지역에 대한 모델링에서 해수면 온도를 상수(300 K)로 둔 경우(case 2)의 결과와 비교·분석하였다.

case 1에서 대기유동장 패턴을 보면(그림 6), 1000 LST에 해풍이 발달하기 시작하여 1300 LST~1700 LST에는 낮은 지형에 의한 저형류는 거의 나타나지 않고, 곡풍에 해류간의 큰 온도차로 인한 해풍이 합세하여 전체적으로 남풍이 우세하게 나타나고 있으며, 통도사 우변의 높은 지형(그림 3(a)의 좌표(8, 22))으로 수렴대가 형성된다. 2200 LST에는 뚜렷한 해풍의 발달을 보기 어렵고 0100 LST~0500 LST에는 유풍이 불고 있으나 낮시간대에 비해 해류의 온도차가 적어 그 풍속은 작게 나타났다.

그러나 case 2와 같이 해수면 온도를 상수로 두었을 경우 대기유동장 패턴을 살펴보면(그림 7), 해류풍과 산곡풍의 결합에 의해 나타나는 시간대별 풍향의 특성은 본 연구에서 구성한 모델과 비슷한 경향을 보이고 있으나, SST를 상수로 두었기 때문에 case 1에서 고려되었던 연안에서 바다쪽으로 높아지는 해수온의 수평적 분포가 고려되지 않아 시간대별 풍속분포의 차이를 보이고 있었다. 1000 LST에는 연안의 해수온이 실제보다 높게 고려되므로 해서 해풍이 발달하기 시작하는 것을 보기 어려웠고, 대체로 낮시간대에는 본연구의 모델에 비해 풍속이 작게 모사되어지고 밤시간대에는 크게 모사되어지고 있는 것을 알 수 있었다.

3.4 라그란지 입자 확산예측

본 연구에서 SST를 고려한 대기유동장 모델을 통해 얻어진 바람장을 토대로 오염물질의 확산과 이동을 예측해 보기위해 라그란지 입자확산모델을 이용하였다. 최근 부산과 같이 큰 항구를 가지고 있는 연안도시에서는 선박에 의한 오염물질의 배출이 내륙지역에까지 큰 영향을 미칠 수 있으므로 그 배출강도와 영향 범위가 중요시되고 있다. 여기서 오염물질의 배출은 오전 8시부터 시작하여 10분마다 연속 방출되어 24시간 동안 계속되도록 하였는데, 이는 선박 배출원은 공장이나 차량 등과 같이 낮 시간이나 출퇴근 시간에만 배출되는 것이 아니라 야간에도 항로의 운항이나 하역 등의 작업이 수행되고 있기 때문이다.

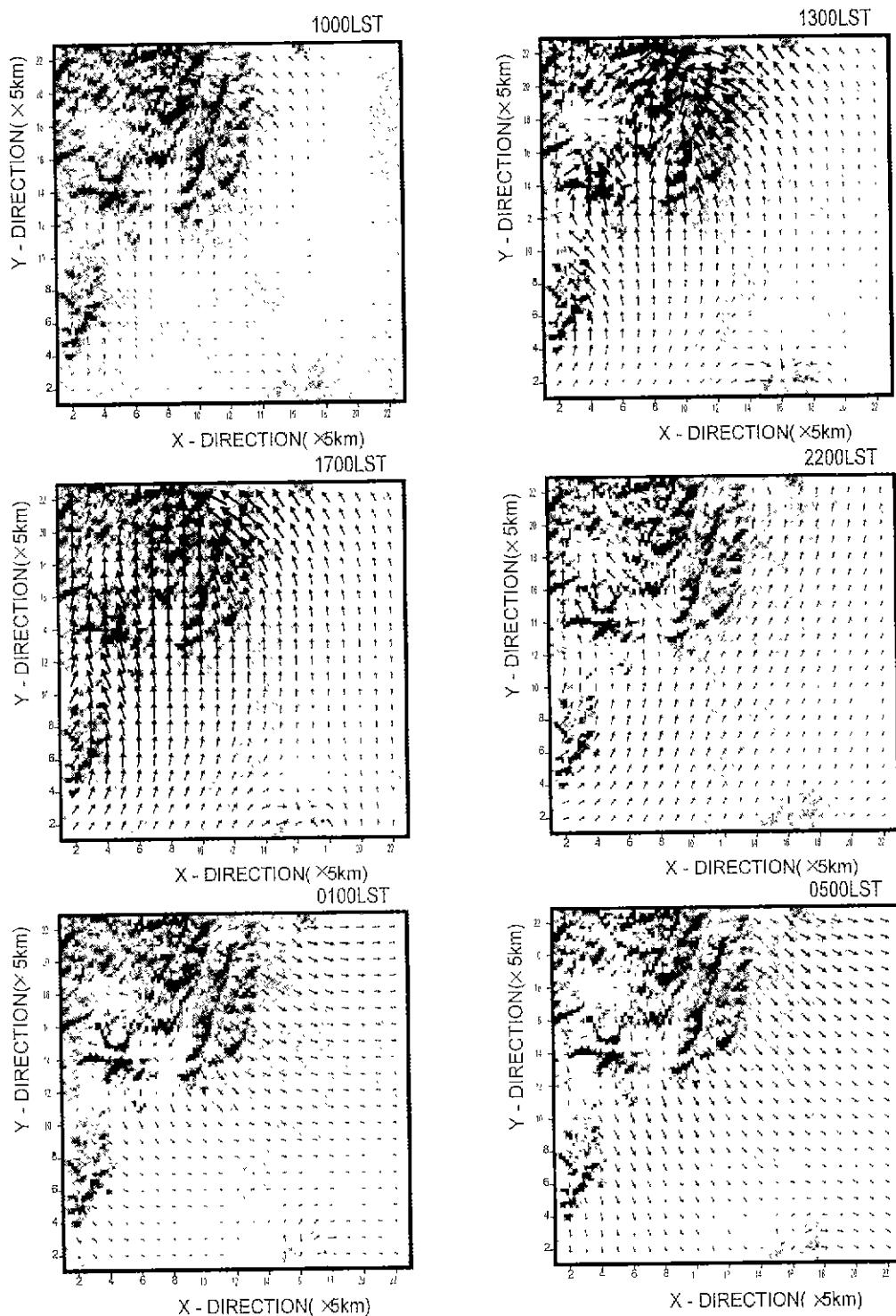


Fig. 6. Horizontal wind fields at $z^*=50$ m in summer (case 1).

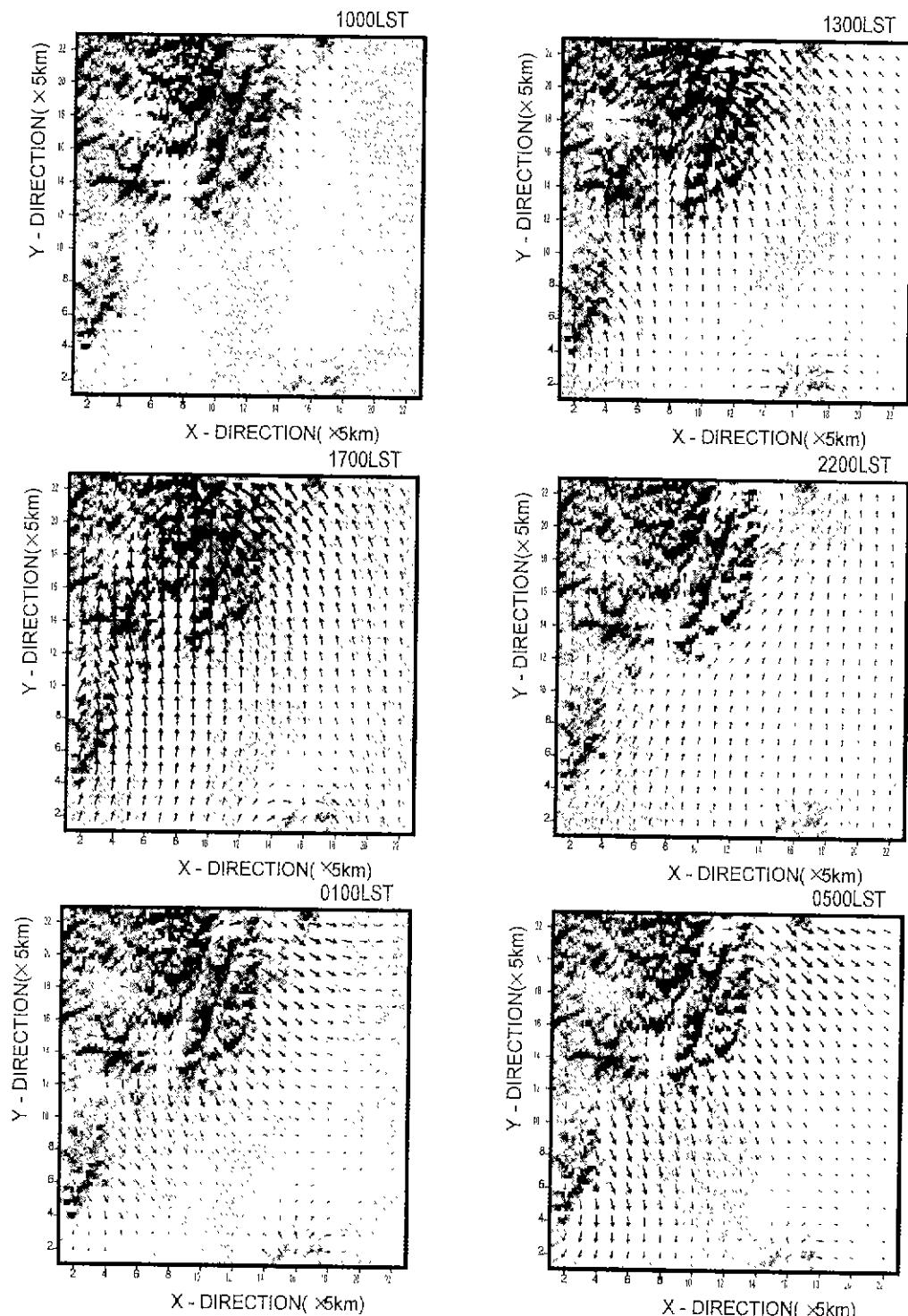


Fig. 7. Same as Fig. 6 but for case 2.

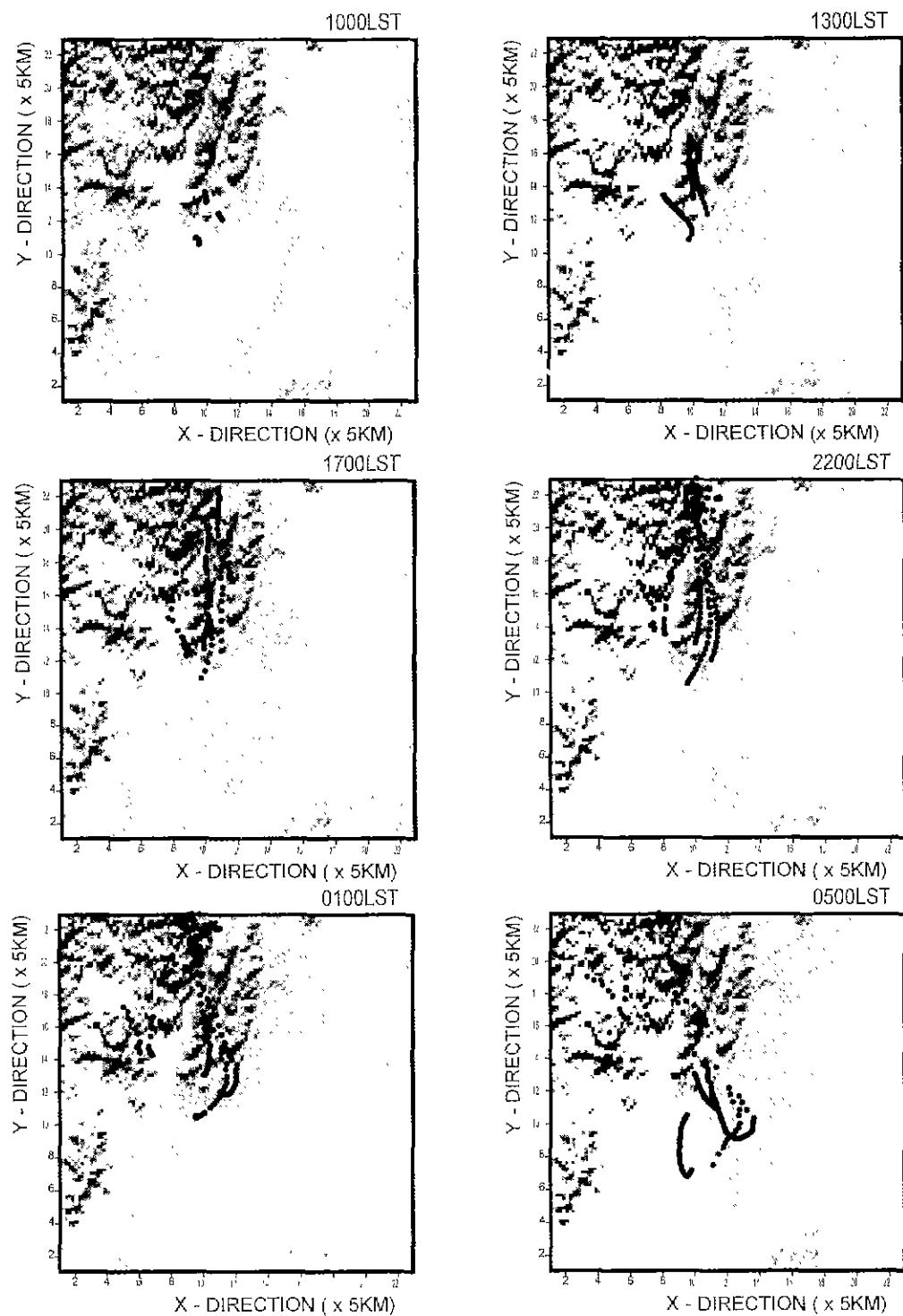


Fig. 8. Dispersion pattern of the pollutants exhausted from characteristic sources in summer.

그림 8에서 보면, 1000 LST에는 방출된 오염물질들이 발달하기 시작한 해풍과 곡풍의 영향으로 북서 내륙지역으로 이동하고 있으며, 1300 LST에는 2항로에서 방출된 오염물질은 구더산의 영향으로 서쪽으로 치우쳐 이동하고 있고, 1항로와 신선대 부두에서 방출된 오염물질은 금정산과 백양산 사이로 이동하고 있다. 1700 LST에는 북쪽으로의 흐름이 강화되어 연안 오염물질이 내륙지역으로 점점 이동하고 있는 것을 볼 수 있었다. 이러한 흐름이 2200 LST에는 내륙으로의 흐름이 둔화되고 0100 LST부터는 육풍이 발달하여 오염물질들이 서서히 바다쪽으로 빠져나가고 있으나, 양산과 김해 그리고 금정산 부근에는 오염물질이 채류하고 있어 선박 배출 오염물질의 영향을 받고 있음을 알 수 있었다.

5. 결 론

해양에 인접해 있는 부산지역과 같은 연안도시지역의 바람장을 유도함에 있어 올바른 해수면 온도를 적용하기 위해 대기모델과 해양모델의 물질교환을 통해 SST의 수평적 분포를 고려한 대기유동장의 수치 모의를 행하였다. 대상영역내에서 해수면 온도는 계절별로 $2.5\sim4^{\circ}\text{C}$ 의 수평적 차를 나타내고 있었으며, 연안지역에 가까울수록 온도경사는 커졌다. 이는 계산영역내 정선해양 관측자료를 통해 SST를 상수로 두었을 경우에 비해 보다 더 정확한 대기유동장의 모사를 검증할 수 있었다. 또한 해륙간의 온도차가 낮은 아침과 밤시간에 대해서도 보다 정확한 바람장의 모사가 가능하였다. 이러한 대기유동장을 통한 선박배출 오염물질의 라그랑지 입자 확산의 예측에서는 각 배출원에서 나온 입자들이 시간별 바람장 패턴을 따라 이동하고 있었으며, 낮동안의 해풍에 의해 내륙으로 운반되었던 오염물질들이 밤에는 서서히 빠져나가고 있으나 내륙 일부지역에 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다.

따라서 본 연구에서 수치모의된 대기유동장을 통한 오염물질의 확산예측은 내륙에의 영향을 잘 파악하게 하여 연안도시지역의 효과적인 대기질 관리

에 기여할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- 박준웅(1992) Lagrangian 입자학산 모델링, 한반도의 국지 기상 특징과 대기 환경 Workshop, 3-31
- 이화운, 김유근, 원정미, 오은주(1997) 연안도시지역의 대기 유동장에서 대기 오염물질의 확산과 이동에 관한 수치모의, 한국환경과학회지, 6(5), 437-449
- 이화운, 이동규, 이태영, 김유근, 원정미, 한한우(1998) 연안 도시 지역의 대기 흐름 시뮬레이션, 한국기상학회지, 34, 1, 75-86.
- 조병길, 문승의, 민경덕(1994) 1차원 대기-해양 혼합 모델을 이용한 황해 남동해역에서의 열수지에 관한 연구, 한국기상학회지, 30 2, 145-154
- 한영호, 정정실(1991) 해수온도가 우리나라 서해안 지방의 기온 및 습도에 미치는 영향, 한국기상학회지, 27, 3, 197-203
- Abbs, D. I. (1986) Sea-breeze interactions along a concave coastline in southern Australia; Observations and numerical modeling study, Mon. Wea. Rev., 114, 831-848.
- Businger, J.A., I.C. Wingard, Y. Izumi, and F. Bradley (1971) Flux - profile relationships in the atmospheric surface layer, J. Atmos. Sci., 28, 181-189.
- George L. Mello(1996) Users guide for a three-dimensional primitive equation, numerical ocean model.
- Kang, Y Q (1985) On Annual Variations of Sea Water and Air Temperature Separation in the East Sea, Bull. Kor. Fish. Soc., 18(4), 374-389
- 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.
- Pielke, R.A. (1974) A three dimensional numerical model of the sea breeze over south Florida, Mon. Weather Rev., 102, 115-139.
- 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.