

SST 효과를 고려한 계절별 NO₂ 농도 수치모의

원 경 미 · 이 화 운 · 김 유 근
부산대학교 대기과학과
(2000년 11월 27일 접수)

Numerical Simulation of NO₂ Concentration considering SST Effects

Gyeong-Mee Won, Hwa-Woon Lee and Yoo-Keun Kim
Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Pusan, Korea
(Manuscript received 27 November, 2000)

For the purpose of predicting air pollutants concentration in Pusan coastal urban, we used an Eulerian model of flow and dispersion/chemistry/deposition process considering SST effects which estimate through POM. The results of air quality model including emission from various sources show that the seasonal variation pattern of respective pollutants was affected by the seasonal SST fields and local circulation. Horizontal deviation of diurnal SST was 2.5~4K, especially large gradients in coastal region. Through numerical simulation of wind fields we predicted that local circulation prevailed during daytime in summer and nighttime in winter. So high concentration distribution showed toward inland in spring and summer seasons, while high concentration distribution showed at inland near coast in autumn and winter.

Key words : Eulerian model, SST effects, POM, seasonal variation, SST fields, wind fields, local circulation, high concentration distribution

1. 서 론

연안도시인 부산광역시의 대기오염도 예측에 대한 수치실험은 여러 선행연구들을 통해 행해져 왔다. 해륙풍 순환과 같은 국지풍계의 영향을 지배적으로 받아 연안 지역에 위치한 산업시설이나 선박으로부터 배출된 대기 오염물질들이 내륙지역까지 운송되는 것이 예측되어^{1)~4)} 선박배출 오염물질의 양을 산정하는 방법을 제시하고 실제 배출량을 산정하였으며,^{5)~6)} 이를 대기질 예측모델의 입력자료로 사용하여 대기오염의 농도를 예측한 바 있다.^{7)~8)} 이러한 결과들은 이전의 연구결과들에 비해 실제 대기환경을 보다 더 정확하게 예측하는데 크게 기여하였다.⁹⁾

특히 대부분의 중규모 수치실험에서 하층의 경계조건으로 주어지는 해수면 온도를 일정하게 가정하거나 기후학적 평균값을 사용함으로써 해양의 영향을 정확히 계산하지 못하였는데, 본 연구의 선행연구¹⁰⁾에서는 보다 정확한 해류간의 온도변화를 얻기 위해 해양모델을 통해 계산된 SST(Sea Surface Temperature)를 대기유동장모델에 결합시켰다. 이를 통해 해륙풍순환에 따른 대기확산의 수치모의에서 SST의 효과가 중요한 인자임을 확인할 수 있었다.

따라서 본 연구에서는 연안도시인 부산지역의 실제 지형조건이나 배출조건 및 기상조건에 적합한 NO₂ 농

도 예측모델을 개발하고자 내륙 뿐만 아니라 연안의 선박배출량을 입력자료로 하여 대기/해양 접합 모델을 통해 계산된 대기유동장모델에 광화학반응과 건성침적을 고려할 수 있도록 하였다. 또한 개발된 모델은 공단 및 선박배출 오염물질 확산과 국지기상 변조실험 등과 같은 대기환경에 미치는 여러 영향들을 수치실험하는데 응용되어질 수 있다.

2. SST를 고려한 NO₂ 농도 3차원 수치예측 모델

도시의 기본적인 기상현상을 표현하는 기상모델과 지표면 상태의 열적 영향을 표현하는 지표면 열수지모델 및 해양의 온도변화를 표현하는 해양모델을 결합하여 도시 대기유동장 모델을 구성하고, 다음으로 대기유동장 모델에 부산지역의 연안과 내륙에서 배출되는 오염원의 영향이 고려된 배출원과 대기오염물질의 움직임을 예측하기 위한 대기오염물질의 이류·확산모델, 대기중에서 화학반응을 고려하기 위한 광화학 반응모델 및 대기오염물질의 지표면으로의 침적을 계산하기 위한 침적모델 부분으로 나누어 대기오염물질의 농도를 예측할 수 있는 대기질 모델을 구성하였다.

대기질 예측모델은 오일러인 연속방정식계에 기초를 두며, 대기오염물질의 배출과 반응을 생성형에 포함시킨 이류·확산방정식은 지형을 고려한 z^* 좌표계에서 다음

과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -u \frac{\partial C_i}{\partial x} - v \frac{\partial C_i}{\partial y} - w^* \frac{\partial C_i}{\partial z^*} + \left(\frac{-\bar{s}}{s - z_G} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_V^{(i)} \frac{\partial C_i}{\partial z^*} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H^{(i)} \frac{\partial C_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_H^{(i)} \frac{\partial C_i}{\partial y} \right) + q_{sm} + R, \quad (1)$$

여기서 C_i 는 오염물질의 농도, i 는 오염물질의 종류, $K_V^{(i)}$, $K_H^{(i)}$ 는 각각 오염물질의 수직, 수평 확산계수, q_{sm} 는 배출량, R 는 반응항에 의한 생성과 소멸율을 표현한다.

지형을 고려한 좌표계에서 수직 고도 z^* 는

$$z^* = \frac{z - z_G(x, y)}{s(x, y, t) - z_G(x, y)} \quad (2)$$

이고, 여기서 z 는 고도, z_G 는 지형고도, \bar{s} 는 계산 영역 상면의 고도, s 는 질량보존을 고려하여 상면의 경계높이가 시간과 장소에 대해 변하는 물질표면이다.

내륙지역에서의 대기유동장을 표현하는 기초방정식계는 지형의 기복에 관계없이 계산할 수 있는 지형좌표계 (z^* 좌표계)를 사용한 운동방정식, 온도방정식, 비습방정식, 연속방정식, 정역학방정식, 지중온도방정식으로 구성된 3차원 해류풍 모델로서 지표면의 온도는 지표면 열수지방정식을 사용하여 계산하였다.¹¹⁾

연안에서의 SST 변화를 모사하는 해양모델은 Princeton Ocean Model(POM)로 시그마 좌표계의 원시방정식을 기초로 하는 3차원 free-surface model로서, turbulence sub-model을 포함한다.¹²⁾

시그마좌표계의 유도를 위해 다음과 같이 둔다.

$$x^* = x, \quad y^* = y, \quad \sigma = \frac{z - \eta}{H + \eta}, \quad t^* = t \quad (3)$$

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

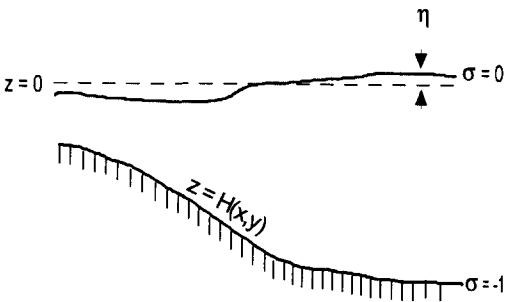


Fig. 1. The sigma coordinate system.

기초방정식계는 다음과 같다.

연속방정식은

$$\frac{\partial DU}{\partial x} + \frac{\partial DV}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} + \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

운동방정식은

$$\frac{\partial UD}{\partial t} + \frac{\partial U^2 D}{\partial x} + \frac{\partial UV D}{\partial y} + \frac{\partial U \omega}{\partial \sigma} - fVD + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial \sigma D^2}{\partial \rho_0} \int_{\sigma}^{\sigma'} \left[\frac{\partial \rho'}{\partial x} - \frac{\sigma'}{D} \frac{\partial D}{\partial x} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma'} \right] d\sigma' = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_M}{D} \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right] + F_x, \quad (5)$$

$$\frac{\partial VD}{\partial t} + \frac{\partial UV D}{\partial x} + \frac{\partial V^2 D}{\partial y} + \frac{\partial V \omega}{\partial \sigma} + fUD + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial \sigma D^2}{\partial \rho_0} \int_{\sigma}^{\sigma'} \left[\frac{\partial \rho'}{\partial y} - \frac{\sigma'}{D} \frac{\partial D}{\partial y} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma'} \right] d\sigma' = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_M}{D} \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right] + F_y, \quad (6)$$

온위 방정식과 염분도 방정식은

$$\frac{\partial \theta D}{\partial t} + \frac{\partial \theta UD}{\partial x} + \frac{\partial \theta VD}{\partial y} + \frac{\partial \theta \omega}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_H}{D} \frac{\partial \theta}{\partial \sigma} \right] + F_T - \frac{\partial R}{\partial z} \quad (7)$$

$$\frac{\partial SD}{\partial t} + \frac{\partial SUD}{\partial x} + \frac{\partial SVD}{\partial y} + \frac{\partial S \omega}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_H}{D} \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right] + F_S \quad (8)$$

난류운동에너지 방정식은

$$\frac{\partial q^2 D}{\partial t} + \frac{\partial U q^2 D}{\partial x} + \frac{\partial V q^2 D}{\partial y} + \frac{\partial \omega q^2}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_q}{D} \frac{\partial q^2}{\partial \sigma} \right] + \frac{2K_M}{D} \left[\left(\frac{\partial U}{\partial \sigma} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \sigma} \right)^2 \right] + \frac{2g}{\rho_0} K_H \partial \rho - \frac{2D q^3}{B_1 l} + F_q \quad (9)$$

$$\frac{\partial q^2 \ell D}{\partial t} + \frac{\partial U q^2 \ell D}{\partial x} + \frac{\partial V q^2 \ell D}{\partial y} + \frac{\partial \omega q^2 \ell}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_q}{D} \frac{\partial q^2 \ell}{\partial \sigma} \right] + E_1 \ell \left(\frac{2K_M}{D} \left[\left(\frac{\partial U}{\partial \sigma} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \sigma} \right)^2 \right] + E_2 \frac{g}{\rho_0} K_H \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \right) \bar{W} + F_\ell \quad (10)$$

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.

$$F_x = \frac{\partial}{\partial x} (H \tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (H \tau_{xy}) \quad (11)$$

$$F_y = \frac{\partial}{\partial x} (H \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (H \tau_{yy}) \quad (12)$$

여기서

$$\tau_{xx} = 2A_M \frac{\partial U}{\partial x}, \quad \tau_{yy} = \tau_{xx} = A_M \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right), \quad \tau_{xy} = 2A_M \frac{\partial V}{\partial y} \quad (13)$$

이며, 또한

$$F_s = \frac{\partial}{\partial x} (H q_x) + \frac{\partial}{\partial y} (H q_y) \quad (14)$$

이다. 여기서

$$q_x = A_H \frac{\partial \phi}{\partial x}, \quad q_y = A_H \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad (15)$$

이며, ϕ 는 $\theta, S, q^2, q^2 \ell$ 을 나타내고, A_M 은 수평운동 점성계수($m^2 s^{-1}$), A_H 는 수평열확산 계수($m^2 s^{-1}$)이다.

광화학반응은 이화운¹³⁾의 연구에서 사용한 광화학반응 모델로서, 1차 대기오염물질을 중심으로 2차 대기오염물질과의 화학반응을 설명해 줄 수 있는 화학메카니즘으로 구성되어 있으며 반응속도를 지배하는 반응속도상수와 일사조건 등을 고려하여 각 오염물질의 농도를 계산하였다. 이는 선행연구¹⁴⁾에서 계산상의 안정성을 검토한 바 있다.

또한 침적모델은 대기 안정도와 가스의 종류, 침적대상면의 재질 및 상태를 고려할 수 있는 것으로, 대기중에서 지표면으로의 침적과정을 난류경계층내의 난류확산에 의한 수송과정과 점성 경계층내의 분자확산에 의한 수송과정, 지표면 아래의 표면반응에 의한 수송과정 3가지로 구분하여 고려하였다. 특히 canopy층으로의 침적을 포함하였으며, 이는 식물의 기공저항과 옆육저항, 건조한 표피저항, 습한 표피저항, 지표면 저항으로 세분화하여 canopy층의 특성을 충분히 고려해 주었다. 침적현상에 관한 대기수치 실험 결과는 원경미 등¹⁵⁾,¹⁶⁾의 연구에 수록되어 있다.

그리고 배출원의 설정은 연안도시지역의 배출특성을

반영할 수 있도록 내륙지역과 부산항을 포함하는 연안 지역 모두에 대해 산정하였다. 내륙지역의 배출원은 부산광역시내에 존재하는 각 오염원을 점, 선, 면 오염원으로 구분하여, 공해배출업소(1, 2, 3, 4, 5종) 자료와 각 지역의 주택현황자료, 연료 사용량, 각 지점별 교통량 자료, 격자별 도로길이율 등의 자료를 이용하여 1km × 1km 격자 간격으로 산정한 배출량을 사용하였다. 연안 지역의 배출원은 크게 선박의 정박시와 항행시로 나누었으며, 정박시는 하역시와 비하역시를 고려하여 설정하였고, 톤수등급별로 선박 1척마다의 배출량 원단위를 선박의 연료사용량과 기관부하율, 항행모드, 항행속도, 체제시간 등을 고려하여 1km × 1km 격자 간격으로 산정하였다.⁽⁶⁾

3. 계산영역과 계산방법

3.1 계산영역

본 연구의 계산영역은 부산광역시와 부산항을 포함하는 총 110×110km의 성긴격자영역으로 수평방향 각각 110km, 격자간격 5km의 23×23 격자점을 이용하였다 (Fig.2(a)). Fig. 2(a)에서 점으로 표시된 지점(s-1~s-9)은 정선해양 관측지점으로 대상영역내에 9개 지점이 있으며, 사각형으로 표시된 영역(Fig. 2(b))은 부산광역시의 중심지역과 연안지역을 나타내는 상세격자영역이다.

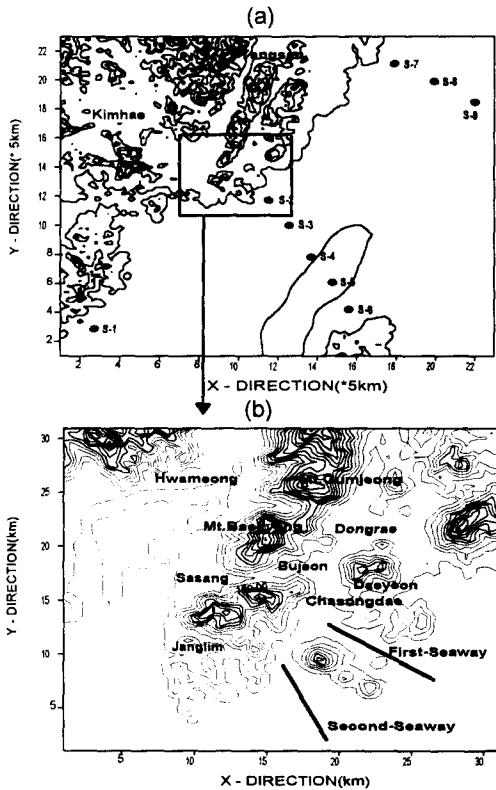


Fig. 2. Calculation region for numerical simulation of Pusan coastal area.

3.2 계산방법

해양모델을 통해 대기유동장에 SST가 고려되기 위해 대기모델의 적분간격은 1분, 해양모델의 적분간격은 5분으로 하여 대기모델의 매 5 time step마다 해수면을 통해 복사와 현열속, 잠열속, 그리고 해수면 온도가 교환되도록 하였다.

그리고 연안의 순환역학을 지배하는 방정식은 빠르게 움직이는 외부 중력과 천천히 움직이는 내부 중력과 들을 포함한다. 연직구조식(내부 모드)으로부터 연직적으로 적분된 식(외부 모드)를 분리해내는 것은 계산시간의 절약측면에서 바람직하다. 속도수송 즉, 외부 모드식은 깊이에 대해 내부 모드식을 적분하므로써 모든 연직구조를 제거하여 얻어지기 때문에 내부 모드의 식들을 $\sigma = -1$ 에서 $\sigma = 0$ 까지 적분하고 경계조건을 이용하면 지표고도에 대해 각각의 방정식을 구할 수 있다. 3차원(내부 모드)변수의 계산은 연직확산 time step과 이류가 합해진 수평확산 time step으로 세분된다. time step을 한정하기 위해 연직적으로 적분된 외부 모드에 대해서는 CFL(Courant-Freidrichs-Levy) 계산상 안정도 조건에 의해 다음과 같이 한정하였다.

$$\Delta t_L \leq \frac{1}{C_L} \left| \frac{1}{\delta x^2} + \frac{1}{\delta y^2} \right|^{-1/2} \quad (16)$$

여기서 $C_L = 2(gH)^{1/2} + U_{max}$ 이고, U_{max} 는 예상되어지는 최대속도이다. 모델의 time step은 대개 이 경계값의 90%로 하는데, 내부 모드에 대한 time step의 한계는

$$\Delta t_L \leq \frac{1}{C_T} \left| \frac{1}{\delta x^2} + \frac{1}{\delta y^2} \right|^{-1/2} \quad (17)$$

로 하였고, 여기서 $C_T = 2C + U_{max}$ 이다.

NO₂ 농도 예측모델의 수치모의 실행은 부산광역시를 포함하는 성긴격자영역의 계산을 먼저 수행하고, 이를 경계치로 하여 상세격자영역을 계산하는 nesting 방법을 사용하였다. 경계조건의 설정방법은 Clark와 Rarley⁽⁷⁾의 수치실험에 의해 계산정밀도가 높은 2차 삼입식을 사용하였다.

계산대상으로 하는 오염물질은 SO₂, NO₂, HC, CO, O₃ 등과 같은 주요 오염물질에 대해서이지만 본 연구에서는 선박배출에 기인된 NO₂를 중심으로 계절별 분포 특성을 수치모의하였다. 수치모의를 위한 지표면에서의 초기농도는 각 오염물질에 대하여 1995년 각 계절의 평균 농도를 입력하였으며, 이들 값들은 지표면 부근에서 측정된 값으로, 연직방향으로의 농도분포는 높이 100m까지는 같은 값으로 두었고, 100m이상에서는 계산영역 상한에서 1/10이 되게 선형적으로 감소하도록 모델화하였다. 또한 내륙지역의 차량이나 해안의 선박과 같은 이동발생원과 공장이나 가정 등의 고정발생원에 대해서는 부산지역 교통량의 시간변화에 따른 배출강도를 고려하여 배출비율을 설정하였다.

상면 경계조건으로는 계산영역 상면에서 처음 설정한 초기 농도 값을 가지도록 하였고, 지표면에서는 침적현상을 고려하여 계산되어진 침적속 F_d 와 지상배출량 q_d 를 이용하여 다음 식과 같이 두었다.

$$K^{(c)} \frac{\partial C}{\partial z} = F_d - q_d \quad (18)$$

측면 경계조건으로는 유입측에서

$$\frac{\partial C}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial C}{\partial y} = 0 \quad (19)$$

로 하였고, 유출측에서는 경계에서 내측의 2점 값으로부터 선형의삽하였다.

4. 해수면 온도장 수치모의

본 연구에서 구성한 모델을 통해 계절별 해수면 온도를 수치모의하였는데(Fig. 3), 각 계절 평균 수평분포는 4계절 모두 연안지역에서 해양쪽으로 갈수록 온도가 높아지고, 해륙간의 경계가 되는 해안선 부근에서 온도의 gradient가 크게 나타나는 것을 볼 수 있었다. 대상영역 내의 평균 해수면 온도는 봄의 경우 286.5K, 여름 298.6K, 가을 293.8K, 겨울 284.8K이었으며, 여름과 겨울의 평균 온도차는 13.8K 이었다. 계절별로 영역내의 수평적 해수면 온도의 차는 2.5~4K 정도로서 SST효과를 모델의 각 time step 마다 고려해 주는 것이 보다 더 정확한 대기유동장을 계산할 수 있음을 알 수 있었다. 특히 해륙풍순환이 탁월한 여름의 경우 내륙쪽의 가열과 냉각이 해양보다 빠르게 되는데, 낮시간 해륙간의 수평 온도차는 5K 정도로 컸고 밤시간에는 2K 정도로서 낮시간에 해풍의 발달이 잘 나타날 것으로 예측되어진다. 상대적으로 겨울의 경우는 오전시간에 내륙의 온도가 해양보다 낮고 1300LST이후에 높아져 낮동안 해륙간의 온도차가 3.5K 정도로 여름보다 낮으나, 밤시간에는 최대 10K 까지 온도차가 있어 강한 육풍의 발달을 예측할 수 있다. 이러한 수치모델을 통해 얻어진 계절별 해수면 온도분포는 국립수산 진흥원의 정선해양 관측자료와 비교해 보았을 때 관측값과 모델값이 전체적으로 유사한 경향을 보였다.¹⁰⁾

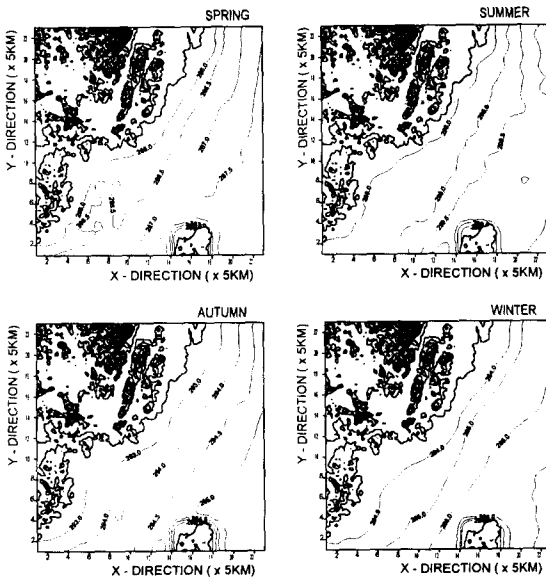


Fig. 3. Horizontal distributions of SST for four seasons. (unit : K)

4. 계절별 대기유동장 수치모의

본 연구에서 구성한 대기유동장 모델을 통해 계절별 바람장을 분석하였다.

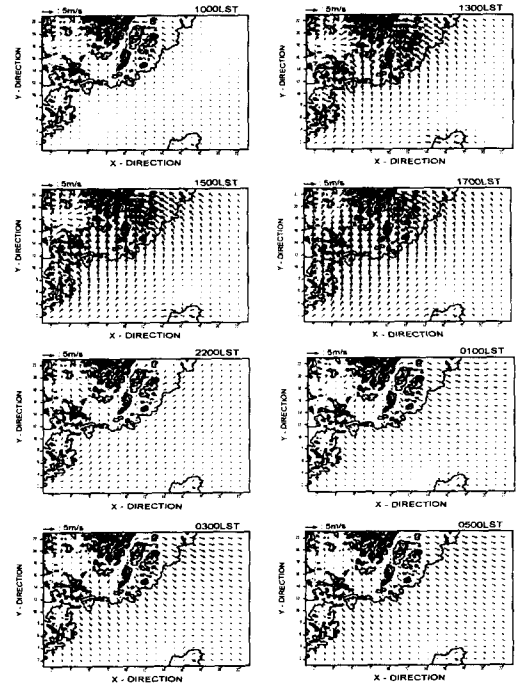


Fig. 4. Horizontal wind fields at $z^*=50m$ during the spring in the coarse mesh region.

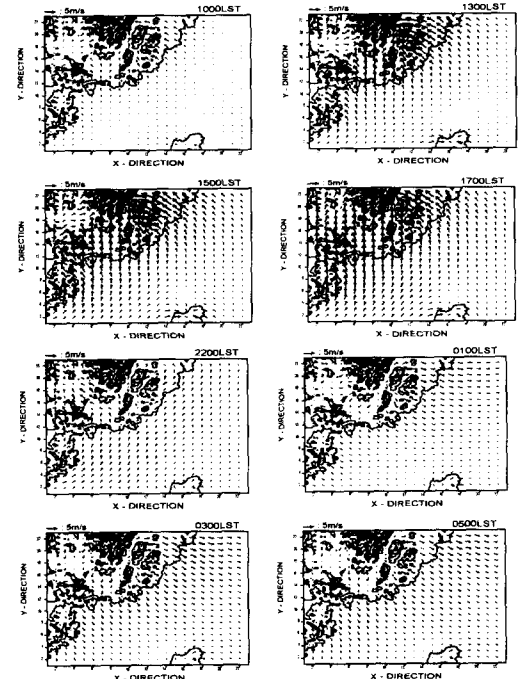


Fig. 5. Same as Fig. 4 but for summer.

해륙풍순환이 비교적 뚜렷하게 나타나는 봄과 여름의 대기유동장 분포(Figs. 4~5)를 보면, 1000LST에 해풍이 발달하기 시작하며 1300LST~1700LST에는 낮은 지형에 의한 지형류는 거의 나타나지 않고, 곡풍에 해풍이 합세하여 전체적으로 남풍이 우세하게 나타나고 있으며, 통도사 주변의 높은 지형으로 수렴대가 형성된다. 밤에는 육풍이 불고 있으나 낮시간대에 비해 해륙의 온도차가 적어 그 풍속은 작게 나타난다. 봄의 대기유동장 분포(Fig. 4)는 여름과 대체로 유사하나 1000LST~2200LST에는 여름에 비해 풍속이 작고, 0100LST~0500LST에는 더 크게 나타났다. 따라서 대상지역에서의 해륙풍순환은 여름철에 더욱 뚜렷이 나타남을 알 수 있다.

가을의 대기유동장(Fig. 6)은 1300LST에 해풍이 발달하기 시작하여 1700LST에는 해풍의 발달을 볼 수 있으나, 봄과 여름에 비해서 낮동안에 해륙간의 온도차가 적어 그 풍속이 작게 나타나고 있으며, 2200LST~0500LST에는 봄, 여름과는 달리 큰 해륙간의 온도차로 인해 강한 육풍이 형성되고 있다. 특히 연안부근의 해상에서 풍속이 큰 바람장을 보이고 있다.

겨울(Fig. 7)은 대체로 가을과 비슷하나, 낮동안에 해풍이 잘 발달하지 못하고 있으며 육상에서는 곡풍에 의해 수렴대가 형성되고 해상에서는 북서풍 계열의 바람이 바다쪽으로 불어나가고 있다. 밤시간대에는 해륙간의 큰 온도차로 가을보다 더 강한 육풍이 형성되고 있음을 볼 수 있다.

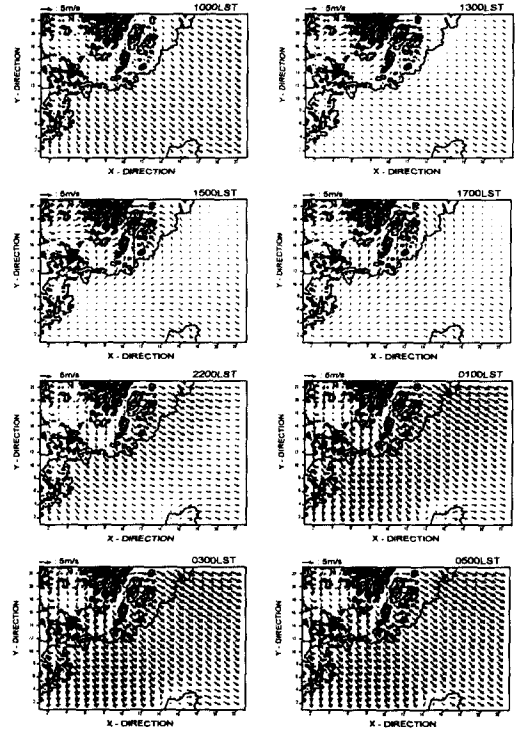


Fig. 7. Same as Fig. 4 but for winter.

5. 계절별 대기오염 농도의 수치모의

연안지역 선박배출의 주요 오염물질인 NO₂의 일변화 농도분포를 4계절에 대해 수치모의하였다. NO₂의 농도 수치모의에 사용되어진 배출분포는 Fig. 8과 같다. NO₂ 배출의 경우 선오염원이 탁월하기 때문에 전반적으로 오염원이 넓게 분포하고 있으며 특히, 차량교통이 많은 서부 시외버스터미널 부근과 남포동 일대 그리고 선박배출에 의한 부산항에서 배출비율이 높게 나타난 것을 볼 수 있다.

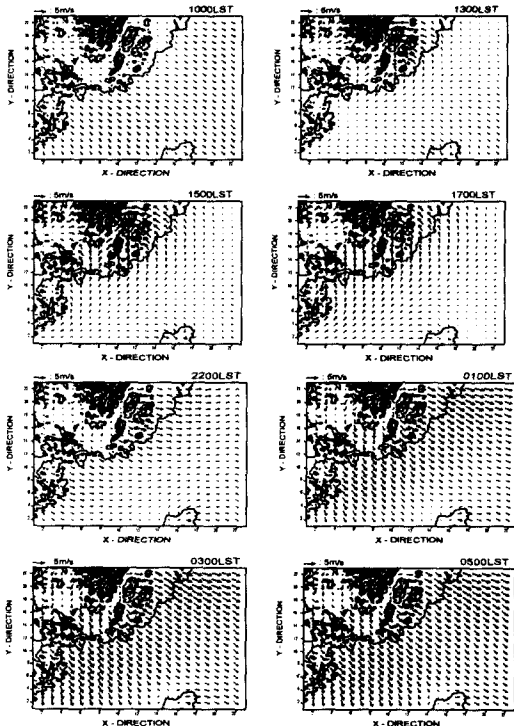


Fig. 6. Same as Fig. 4 but for autumn.

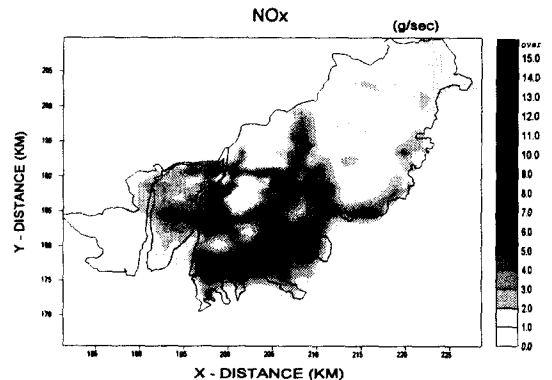


Fig. 8. Distribution of NO_x emitted from total sources.

계절별 농도분포(Figs. 9~12)는 대체로 배출비율이 높은 사상·장림공단과 선박배출원인 부산항의 연안지

역 주위에서 고농도를 나타내었으며, 국지순환에 따라 이류·확산하는 일변화 형태를 나타내었다. 계절에 따른 농도차이는 크게 나지 않았는데, 이는 도심에 넓게 분포되어 있는 선오염원의 영향으로 보인다.^{6),18)} 또한 전반적으로 낮시간대에 농도가 높게 나타나고 밤시간대는 낮아지는 전형적인 분포를 보였다. 봄과 여름의 경우, 1000LST에는 고배출원지점에서 배출된 NO₂가 발달하기 시작하는 해풍과 곡풍으로 인해 금정산, 백양산 주위와 부산항의 부두들을 중심으로 고농도를 보이고 있고, 낮시간대가 되면서 부전동, 동래, 대연동 순으로 고농도 지점이 내륙쪽으로 확산되고 있다. 밤시간대에는 육풍으로 인해 오염물질이 해상으로 빠져나가고 있으나 동래 주변과 연안지역은 상대적으로 농도가 높았으며, 새벽으로 갈수록 빠르게 감소했다.

가을의 경우는 오전시간 3m/s 이하의 약한 육풍의 영향으로 연안근방의 고배출원에서 방출된 NO₂는 내륙으로 이동하지 못하였으며, 1500LST, 1700LST에는 기류의 방향이 바뀌어 해안으로부터의 다소 약한 바람이 불어 1700LST에는 1300LST 보다 내륙쪽에 영향을 주었지만 다시 밤시간으로 갈수록 강해지는 육풍의 영향으로 연안쪽으로 이동하면서 희석이 원활하게 되어 낮시간과의 농도차이가 많이 낮다. 더욱이 겨울에는 가을과 대기유동장이 유사하지만 풍속이 강화되어 있어 가을보다 대기확산이 원활하게 일어나 고배출원을 제외한 내륙지역의 농도가 낮게 예측되었다.

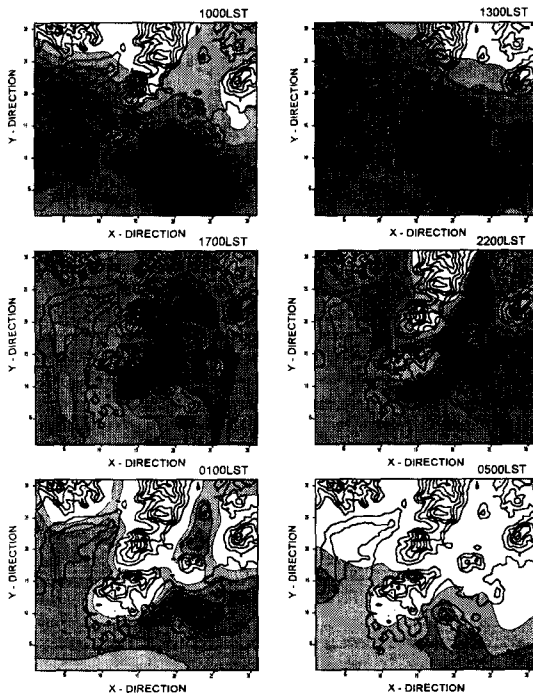


Fig. 9. Concentration distributions of NO₂ simulated from air quality modeling during the spring in the fine mesh region.

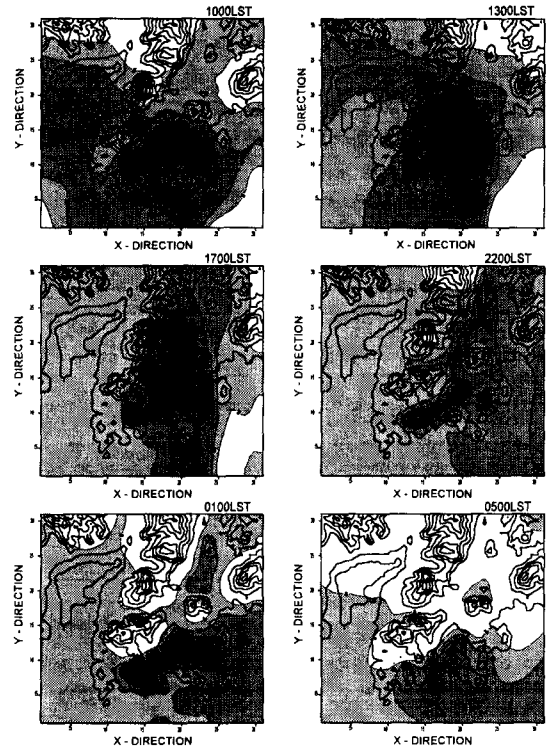


Fig. 10. Same as Fig. 9 but for summer.

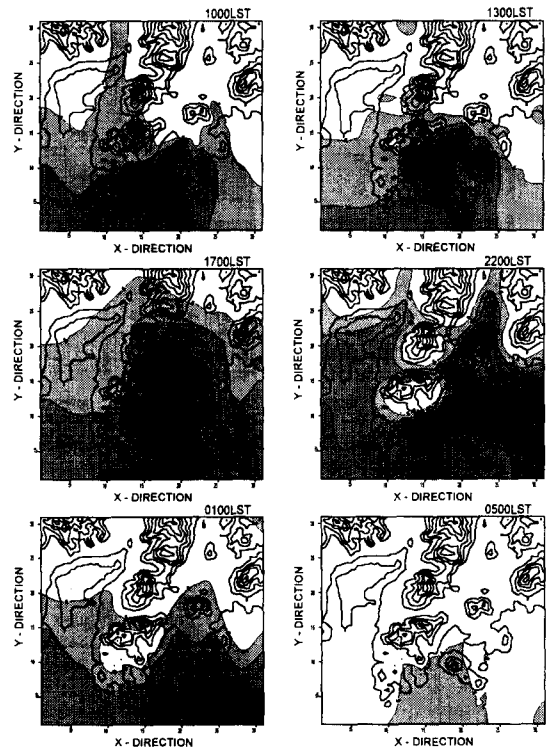


Fig. 10. Same as Fig. 9 but for summer.

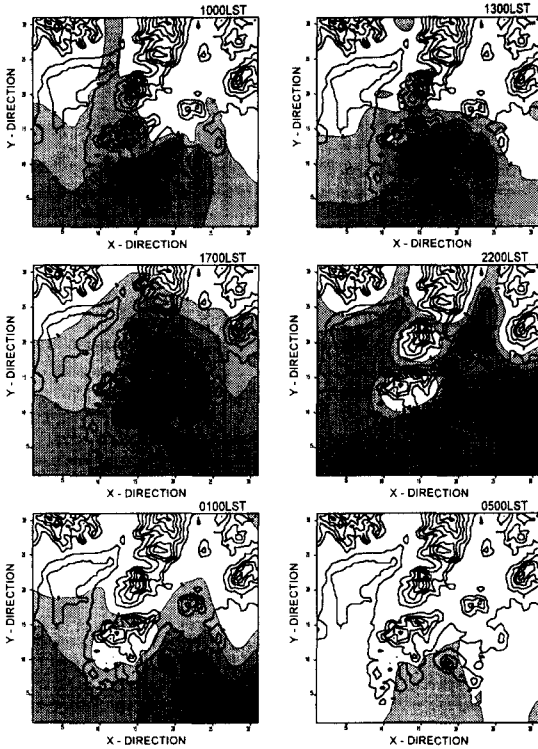


Fig. 11 Same as Fig. 9 but for autumn.

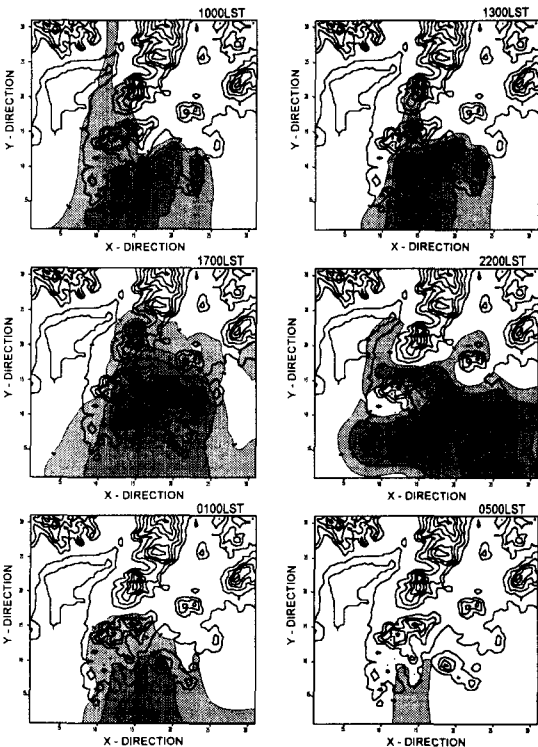


Fig. 12. Same as Fig. 9 but for winter.

6. 결 론

본 연구에서는 연안도시인 부산지역의 대기유동장의 수치모의에서 보다 정확한 온도장을 얻기 위해 해양모델을 통해 계산된 SST의 효과를 고려하여 대기오염의 농도를 예측하였다.

해수면에서의 물질교환을 통해 얻어진 해양모델에서의 계절별 SST분포를 통해 대상영역내의 수평적 해수면온도의 차는 2.5~4K 이었으며 특히, 연안주변에서의 온도변화가 크게 나타났다. 또한 여름 온도장의 시간변화에서 해륙간의 온도차가 낮시간의 경우 5K, 밤시간 2K 이었으며, 겨울 온도장에서는 낮시간 3.5K, 밤시간 10K 정도였으며, 대기유동장의 수치모의를 통해 여름의 경우 낮시간대에, 겨울의 경우 밤시간대에 국지풍의 발달이 탁월할 것으로 예측되었다.

그리고 부산지역의 내륙과 연안지역에 대해 산정된 배출량을 배출원 자료로 하여 대기질 모델링을 수행하여 얻어진 NO₂의 농도분포는 각각의 오염물질의 고배출원을 중심으로 해서 해륙풍과 산곡풍의 순환에 따라 이류·확산하는 일변화 형태를 보였다. 특히 계절별 농도차는 선오염원의 영향으로 적은 편이었고, 봄, 여름철에는 내륙 깊숙이 유입되어 전지역에 걸쳐 고농도현상을 보인 반면, 풍속이 강화되어 다른 계절에 비해 대기확산이 원활한 겨울철에는 연안과 공단에 가까운 내륙지역에 고농도 현상이 나타나는 편이었다.

참 고 문 헌

- 1) 전병일, 김유근, 이화운, 1994, 해풍이 부산지역의 대기오염 농도에 미치는 영향, 한국환경과학회지, 3(4), 357-365.
- 2) 장은숙, 1997, 연안도시지역의 기류와 대기오염물질 농도예측에 관한 수치모의, 부산대학교 대학원 박사학위 논문.
- 3) 전병일, 1997, 부산연안역의 고농도 오존일의 예측기법 개발과 오존농도 수치모의, 부산대학교 대학원 박사학위 논문.
- 4) 이화운, 김유근, 원경미, 오은주, 1997, 연안도시지역의 대기유동장에서 대기오염물질의 확산과 이동에 관한 수치모의, 한국환경과학회지, 6(5), 437-449.
- 5) 이화운, 김유근, 원경미, 문윤섭, 홍정혜, 장난심, 정우석, 1997, 부산 대기정책 수립을 위한 선박오염 실태조사 및 예측, 부산광역시 과제번호 96-p-01.
- 6) 이화운, 김유근, 원경미, 조인숙, 1999, 연안의 선박오염배출을 포함한 부산지역의 대기오염물질배출량 산정, 한국대기환경학회지, 15(5), 587-598.
- 7) 이화운, 김유근, 원경미, 1999, 선박배출 오염물질의 영향을 고려한 부산지역 대기질 모델의 개발, 한국환경과학회지, 8(1), 135-144.
- 8) 이화운, 김유근, 원경미, 조인숙, 1999, SST효과를 고려한 대기오염의 3차원 수치예측모델링, 한국대기환경학회 춘계학술대회 발표요지집.
- 9) 원경미, 1998, 연안도시지역에서 선박배출원을 고려한 대기질 수치 모델링, 부산대학교 대학원 박사학위

논문.

- 10) 이화운, 원경미, 조인숙, 1999, 대기확산의 수치모의에서 SST효과, 한국대기환경학회지, 15(6), 767-777.
- 11) 이화운, 이동규, 이태영, 김유근, 원경미, 한한우, 1998, 연안 도시 지역의 대기 흐름 시뮬레이션, 한국기상학회지, 34(1), 75-86.
- 12) George L. Mellor, 1996, User's guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model.
- 13) 이화운, 1987, 지역대기환경의 수치예측에 관한 연구, 일본대판대학 박사학위 논문.
- 14) 이화운, 박종길, 1992, 대기오염물질의 광화학 반응 모델에 관한 연구, 한국대기환경학회지, 3(1), 17-29.
- 15) 원경미, 이화운, 1998, 부산의 지형적 특성을 고려한 O₃의 건성침적 속도 시뮬레이션, 한국대기환경학회지, 14(5), 421-431.
- 16) 원경미, 이화운, 1999, 연안도시지역에서 대기오염의 3차원 수치예측모델링 - (I) 침적현상이 대기질에 미치는 영향예측, 한국대기환경학회지, 15(5), 625-638.
- 17) Clark, T. L. and R. D. Rarely, 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.
- 18) 이화운, 김유근, 원경미, 홍정혜, 문윤섭, 장난심, 정우식, 1997, 부산 광역시의 대기질 변화경향 및 특성에 관한 연구, 부산대학교 환경문제연구소 환경연구보, 15, 1-16.