

# 해수면온도와 식생효과를 고려한 연안도시지역의 대기환경예측

지효은 · 이화운 · 원경미

부산대학교 대기과학과

(2008년 7월 9일 접수; 2008년 12월 1일 수정; 2009년 2월 23일 채택)

## Atmospheric Environment Prediction to Consider SST and Vegetation Effect in Coastal Urban Region

Hyo Eun Ji, Hwa Woon Lee and Gyeong Mee Won

*Department of Atmospheric Science, Graduate School, Pusan National University, Busan 609-735, Korea*

(Manuscript received 9 July, 2008; revised 1 December, 2008; accepted 23 February, 2009)

### Abstract

Numerical simulation is essential to indicate the flow of the atmosphere in the region with a complicated topography which consists of many mountains in the inland while it is neighboring the seashore. Such complicated topography produces land and sea breeze as the mesoscale phenomenon of meteorology which results from the effect of the sea and inland. In the mesoscale simulation examines, the change of the temperature in relation to the one of the sea surface for the boundary condition and, in the inland, the interaction between the atmosphere and land surface reflecting the characteristic of the land surface. This research developed and simulated PNULSM to reflect both the SST and vegetation effect as a bottom boundary for detailed meteorological numerical simulation in coastal urban area. The result from four experiments performed according to this protocol revealed the change of temperature field and wind field depending on each effect. Therefore, the lower level of establishment of bottom boundary suitable for the characteristic of the region is necessary to figure out the atmospheric flow more precisely, and if the characteristic of the surface is improved to more realistic conditions, it will facilitate the simulation of regional environment.

**Key Words :** Atmospheric and ocean model, Dispersion model, SST, Landuse

### 1. 서 론

한 지역의 대기의 흐름을 연구하기 위해서는 대기와 접해 있는 지표면의 상세한 하부경계조건이 필요하다. 특히 연안 도시지역인 부산광역시와 경

우 해양과 내륙 모두 영향을 받고 있으며, 내륙의 지형이 복잡하여 그 경계조건 설정은 꼭 필요하다. 예전부터 중규모 기상현상에 관한 연구들 중 지표면 특성이 대기의 온도분포에 영향을 미치고 있음을 보고하는 사례가 많으며, 이에 따라 오염물질의 농도 분포 또한 영향을 받게 된다는 보고가 있어 왔다.

Mahrer와 Pielke<sup>1,2)</sup>는 지표면 열수지와 복사 flux를 고려하여 산악지형을 가진 해안가에서 해풍과

Corresponding Author : Hwa-Woon Lee, Department of Atmospheric science, Pusan National University, Busan 609-735, Korea  
Phone: +82-51-510-2291  
E-mail: hwlee@pusan.ac.kr

산풍이 혼합되어 더 강한 바람이 발달할 수 있다는 것을 보였다. Segal 등<sup>3)</sup>은 식생의 효과로 인한 해풍의 변화된 모습과 나지지표면과 식생으로 된 지표면을 서로 비교하여 식생지역으로 된 지표면 조건이 국지 순환을 약하게 만든다는 결론을 내렸다. Kando와 Watanabe<sup>4)</sup>는 지표조건이 나지인 경우 토양의 종류, 수분함량에 따라 에너지 교환이 달라지며, 식생으로 덮여 있는 경우 수평적, 수직적 식생의 종류에 따라서도 에너지 교환이 달라진다고 보고하였다. Incinose와 Shimodozono<sup>5)</sup>는 토지분류를 10가지로 구분하여 열전도율, 알베도, 증발효율, 토양의 밀도 등 지표면 특성을 세분화하여 도시의 기온을 연구하였다. Segal<sup>6)</sup> 등은 기상장 모델을 통하여 해안에 위치해 있는 오염원에서 배출된 오염물질의 확산과 수송 메커니즘을 라그랑지(Lagrangian) 방법으로 예측하였고, 조 등<sup>7)</sup>이 기존에는 해수면 온도(Sea Surface Temperature)를 일정하게 하거나 기후학적 평균값을 사용하던 것을 SST를 고려하여 연안 도시지역의 오염물질의 특성을 조사, 분석하였다.

이 연구는 중규모대기 순환에 미치는 하부경계조건의 설정으로 해양에서는 해양 모델을 통해 계산된 SST로 해양과 대기간의 물질교환을 고려하였고, 내륙에서는 복잡한 지형과 지표면 상태가 대기와의 상호작용이 고려되도록 식생모델을 사용하여 보다 상세한 지표면 특성이 반영 되도록 하였다. 이런 경계조건으로 기상장과 해륙풍 순환에 의한 오염물질의 수송·확산을 연구해 보았다.

## 2. 자료 및 방법

### 2.1. 대기유동장 모델

PNULSM((Pusan National University Land and Sea breeze Model)의 기초방정식들은 운동량, 질량, 열에너지 등 보존식에 기초한 운동방정식, 온도방정식, 비습방정식, 연속방정식, 정역학방정식 및 지중온도방정식으로 구성되어 있으며 좌표계는 지형에 상관없이 계산할 수 있는 지형좌표계를 사용하였다.

운동방정식은

$$\frac{du}{dt} = f - c_p \theta \frac{\partial \Pi}{\partial x} + g \frac{z^* - \bar{s}}{s} \left( \frac{\partial z_G}{\partial x} \right) - g \frac{z^*}{s} \frac{\partial s}{\partial x} + \left( \frac{\bar{s}}{s - z_G} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left( K_V^{(m)} \frac{\partial u}{\partial z^*} \right)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left( K_H \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_H \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (1)$$

온위방정식은

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

비습방정식은

$$\frac{dq_v}{dt} = \left( \frac{\bar{s}}{s - z_G} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left( K_V^{(q)} \frac{\partial q_v}{\partial z^*} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_H \frac{\partial q_v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_H \frac{\partial q_v}{\partial y} \right) \quad (3)$$

연속방정식은

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w^*}{\partial z^*} - \frac{1}{s - z_G} \left( u \frac{\partial z_G}{\partial x} + v \frac{\partial z_G}{\partial y} \right) + \frac{1}{s - z_G} \left( \frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial s}{\partial x} + v \frac{\partial s}{\partial y} \right) = 0 \quad (4)$$

정역학 방정식은

$$\frac{\partial \Pi}{\partial z^*} = \frac{s - z_G}{s} \frac{g}{c_p \theta} \quad (5)$$

이다. 여기서  $u$ ,  $v$ ,  $w$ 는 각각  $x$ ,  $y$ ,  $z$  방향의 속도 성분(m/s),  $w^*$ 는 지형좌표계에 의한 연직방향의 속도 성분(m/s),  $t$ 는 시간(s),  $\theta$ 는 온도(K),  $q_v$ 는 비습(g/kg),  $T$ 는 지중온도(K),  $K_s$ 는 토양의 열확산계수(m<sup>2</sup>/sec),  $g$ 는 중력가속도(m/s<sup>2</sup>),  $K_H$ 는 수평방향 확산계수(m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>), 그리고  $K_V^{(m)}$ ,  $K_V^{(\theta)}$ ,  $K_V^{(q)}$ 는 각각 운동량, 열, 비습의 연직방향의 확산계수(m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>)이다. 대기 경계층은 지상에서 50 m까지를 접지층으로, 그 위를 에크만층으로 나누어 계산하였고 접지층내에서의 수송저항은 Businger 등<sup>8)</sup>의 무차원 풍속, 온위식을 이용하여 운동량과 열 플럭스 및 연직방향 확산계수를 구하였다. 에크만 층은 난류효과를 잘 표현한다고 생각되는 Yamada<sup>9)</sup>에 의한 종결모델(Closure model)을 사용하여 난류확산계수를 계산하였다. 성긴격자 영역(CMG)에서 상세격자 영역(FMG)의 경계조건의 설정방법은 계산정밀도가 높은 Clark와

Rarley<sup>10)</sup>의 방법을 사용하였고, 상면 경계조건은 지표면 가열에 의해 일어나는 일변화가 상면에 영향을 미치지 않는다고 가정하였고 수평풍속의 법선성분에 대해서 다음의 Klemp와 Wilhelmson<sup>11)</sup>의 경계조건을 사용하였다.

2.2. 해양모델

해양모델 POM(Princeton Ocean Model)은 시그마 좌표계의 원시방정식을 기초로 하는 3차원 free-surface 모델로서 turbulence sub-model을 포함한다. 그리고 연속방정식, 운동방정식, 염분도방정식, 운위 방정식, 난류운동에너지방정식으로 구성되어 있으며, 모드분리를 통해 시간과 비용을 절약하고 있다. 그리고 수평적으로 Arakawa C 격자체계를 사용하며, 수직적으로는 정해진 비율에 따라 격자 두께가 정해지는 시그마 좌표를 사용하여 지형이 완만하게 표현하도록 하였다. 이에 대한 그림을 Fig. 1에 나타내었으며, H(x,y)는 해저지형, η(x,y,z)는 해수면고도이다. 따라서 σ는 z = η 인 곳에서 σ=0이고, η = H인 곳에서 σ=-1이다.

모델의 외부 모드 부분은 2차원이며 CFL(Courant-Friedrichs-Levy)조건과 외부파 속도에 기초한 short time step을 사용하고, 내부 모드부분은 3차원으로 CFL 조건과 내부파 속도에 기초한 long time step을 사용한다. 또한 time step은 계산상 안정을 두기 위해 short time step은 Δt<sub>E</sub> long time step은 Δt<sub>L</sub>로 두어 계산하였다. C<sub>i</sub> = 2(gH)<sup>1/2</sup> + U<sub>max</sub> 이고, U<sub>max</sub>는 예상되어지는 최대속도 이고, C<sub>T</sub> = 2C + U<sub>max</sub> 이고, C는 2 m/s의 크기를 가지는 최대 속력이다.

$$\Delta t_E \leq \frac{1}{C_i} \left| \frac{1}{\delta x^2} + \frac{1}{\delta y^2} \right|^{-1/2} \tag{6}$$

$$\Delta t_L \leq \frac{1}{C_T} \left| \frac{1}{\delta x^2} + \frac{1}{\delta y^2} \right|^{-1/2} \tag{7}$$

연안의 순환 역학을 지배하는 방정식은 빠르게 움직이는 외부 중력파와 천천히 움직이는 내부 중력파들을 포함한다. 3차원(내부 모드)변수의 계산은 연직 확산과 이류가 합해진 수평확산으로 세분된다. 이러한 해양모델을 통한 SST가 대기유동장에 고려되기 위해서는 온도, wind shear, 복사, diffusivity와 같은 물질 교환이 이루어져야 한다. 대기

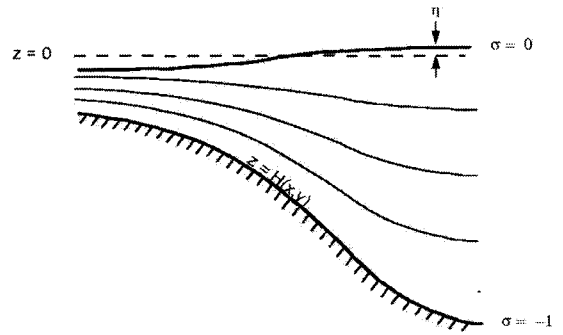


Fig. 1. The Sigma Coordinate System.

모델의 적분간격은 1분이며, 해양모델의 적분간격은 5분으로 대기모델의 매 5 time step마다 해수면을 통해 복사와 현열속, 잠열속, 그리고 SST가 교환되어진다.

2.3. 식생-대기 전달모델

식생-대기 전달모델인 BATS(Biosphere Atmospheric Transfer Scheme)은 한 지점에서 지표 및 식생의 특징이 결정되면 지표층 및 식생의 온도, 수분함량, 그리고 대기로의 현열 및 잠열 플럭스를 계산하도록 설계되어 있다. 이러한 계산을 수행하기 위해서는 이전에 각 지면 격자지점에서의 상세한 식생 피복 분류가 필요하다. 본 연구대상 지역에 해당하는 식생분류를 Table 1에 나타내었고, 그 그림을 Fig. 2에 나타내었다.

지표온도 모델의 기본은 Deardorff<sup>12)</sup>의 force restore 방법으로 일반화된 Dickinson<sup>13)</sup>으로 설명하였다. 식생층의 열용량을 없다고 가정하면, 식생층에서의 열수지식은

$$R_n(T_f) = LE(T_f) + H_f(T_f) \tag{8}$$

이며, 여기서 R<sub>n</sub>(T<sub>f</sub>)는 식생층에서 흡수되는 순 복사량이고, LE(T<sub>f</sub>)는 잠열 플럭스이고, H<sub>f</sub>(T<sub>f</sub>)는 현열 플럭스이고, T<sub>f</sub>는 식생층의 온도이다. 식생층

Table 1. Vegetation and Land-cover type used in BATS

1. Short grass	2. Desert
3. Irrigated crop	4. Semi-desert
5. Bog or marsh	6. Inland water
7. Ocean	8. Evergreen shrub

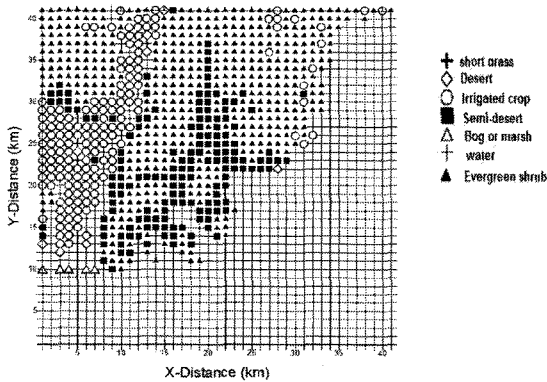


Fig. 2. Distributions of land type in Busan.

의 온도  $T_f$ 는 식 (8)을 Newton-Raphson 법으로 풀어서 구한다.

### 2.4. 대기오염 농도 모델

연안 도시지역의 대기질을 모사하기 위한 대기질 예측 모델은 대기유동장 모델에 대기오염농도 예측과 광화학 반응, 건성 침적과정을 고려한 오일리안, 이류확산모델이다. 오일리안 농도예측 모델의 일반적 구조는 연속방정식계에 기초를 두며, 대기오염물질의 배출과 반응을 생성항에 포함시킨 이류, 확산방정식은  $z^*$  좌표계에서 다음과 같다.

$$\frac{\partial C_i}{\partial x} = -u \frac{\partial C_i}{\partial x} - v \frac{\partial C_i}{\partial y} - w^* \frac{\partial C_i}{\partial z^*} + \left( \frac{-s}{s-z_G} \right)^2 + \frac{\partial}{\partial z^*} \left( K_V^{(c)} \frac{\partial C_i}{\partial z^*} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_H^{(c)} \frac{\partial C_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_H^{(c)} \frac{\partial C_i}{\partial y} \right) + q_{spi} + R_i \quad (9)$$

여기서  $C_i$ 는 오염물질의 농도,  $i$ 는 오염물질의 종류,  $K_V^{(c)}$ 는 오염물질의 확산계수,  $q_{spi}$ 는 배출량,  $R_i$ 는 반응항에 의한 생성 소멸율을 나타낸다.

광화학반응 모델에서 사용한 반응 메카니즘은 이<sup>14)</sup>의 연구에서 사용한 PRM(Photochemical Reaction Model)이며, 본 연구에서 주요물질( $NO_2$ ,  $SO_2$ ,  $O_3$ ) 농도의 시간변화는 1차 선형미분방정식의 해를 구하는 지수함수근사법을 사용하였으며, 침적모델은 대기안정도와 가스의 종류, 침적 대상면의 재질 및 상태를 고려하였다.

배출량은 환경부 2001년 CAPSS(Clean Air Policy Support System)<sup>15)</sup>자료를 이용하여 점, 선, 면 오염원으로 구분하여 산정하였으며, 또한 내륙지점의 차

량이나 해안의 선박과 같은 이동발생원의 자료도 선 오염원으로 포함시켜 사용하였다. 계산하는 오염물질은  $SO_2$ ,  $NO_2$ ,  $NO$ ,  $HC$ 이고, 이들 값들은 지표면 부근에서 측정된 값으로 연직방향으로의 농도 분포는 높이 100 m까지는 같은 값으로 두었고, 100 m 이상에서는 계산영역 상한에서 1/10이 되게 선형적으로 감소하도록 모델화 하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 계산영역

부산광역시에는 남동연안에 위치한 대표적인 항구 도시로 복잡한 산악지형으로 이루어져 있어 중규모 기상학적으로 지표면의 물리적 성질과 다양한 물질 교환이 이루어지는 특성을 가지고 있다. 그리고 내륙으로는 산과 산 사이에 시가지가 조성되어 있고, 서쪽에 낙동강이 흐르고 그 밑으로 넓은 평야지대로 구성되어 있는 등, 지표면 특성이 다양하여 중규모 순환인 해륙풍과 산곡풍이 동시에 나타나 복잡한 물리적 특색을 가지고 있는 지역이라 할 수 있다.

이 연구에서 수치모의 하기 위한 계산영역은 CMG(Fig. 3a)로 5 km의 분해능으로 격자 간격의  $23 \times 23$ 으로 하였고, FMG(Fig. 3b)는 1 km의 분해능으로  $41 \times 41$ 의 격자간격으로 산정하였다. Fig. 3b에 ▲으로 표시된 지역은 AWS(Auto Weather System)가 설치된 곳이고, Fig. 3c에 ◆으로 표시된 지역은 대기질 자동관측 측정소가 설치된 곳이다.

### 3.2. 기상장 수치모의

본 연구는 여름철 북태평양 고기압이 한반도에 가장자리에 있는 맑고, 대기가 매우 안정적인 날을 대상으로 수치모의 하였다. 대기유동장만 살펴보았을 경우를 Case I, 대기유동장에 해양과 식생효과 모듈을 살펴보았을 경우를 Case II로 두어 지표면의 온도, 바람분포에 대해 알아보았다.

#### 3.2.1. 기온장

Case I의 온도분포는 SST와 지표면 피복상태를 고려하지 않았기 때문에 내륙의 온도변화만 볼 수 있었다. 특히 해안가 근처에서 큰 온도 차이를 보이고 있으며, 시간이 지남에 따라 내륙의 온도는 점차 상승하는 등 일사의 양에 따른 온도의 일변화를 잘 나타내었다. SST와 식생분포를 고려한 Case II에서

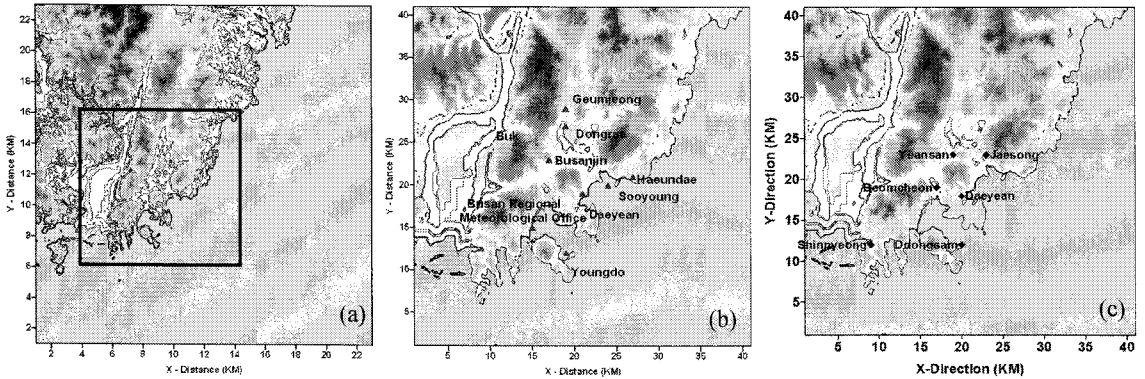


Fig. 3. Calculation region of the coarse mesh(a) and fine mesh(b,c) domain.

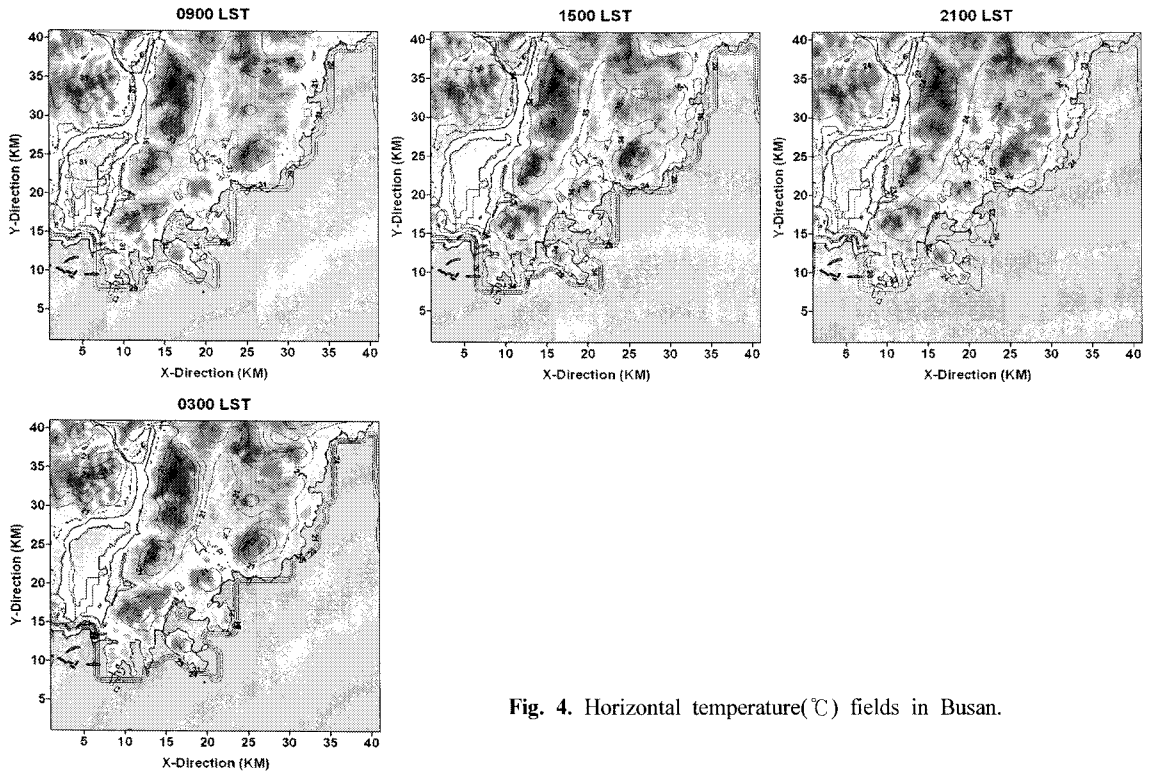


Fig. 4. Horizontal temperature(°C) fields in Busan.

는 식생과 해양의 효과로 해안이 근처 온도경도가 작으며, 식생분포와 지표면 피복상태에 따라 온도 분포가 잘 나타나 있다.

### 3.2.2. 바람장 수치모의

Case I의 경우 0900 LST에 해풍의 유입이 시작 되었으며, 일사가 강한 1500 LST에 풍속이 가장 강하게 모사되었다. 그리고 해양과 내륙의 온도차

이로 인해 해안 주변에 강한 풍속을 나타내었고, 야간에는 육풍으로 전환되는 모습을 확인 할 수 있다. Case II에서는 Case I 보다 수영, 해운대 지점에서 늦게 해풍의 유입이 나타났으며, 야간에는 금정산 위와 양산 쪽으로부터 골을 타고 내려오는 바람이 Case I 보다 강도가 아주 약화된 모습으로 나타났다.

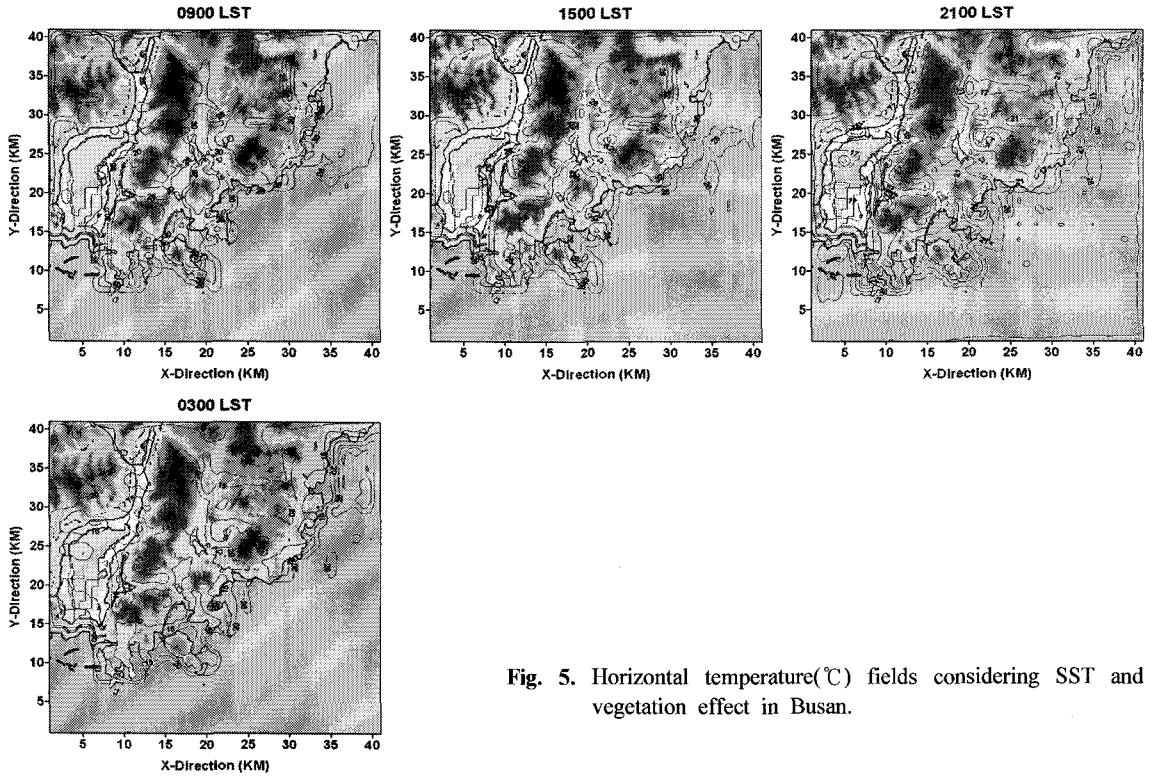


Fig. 5. Horizontal temperature(°C) fields considering SST and vegetation effect in Busan.

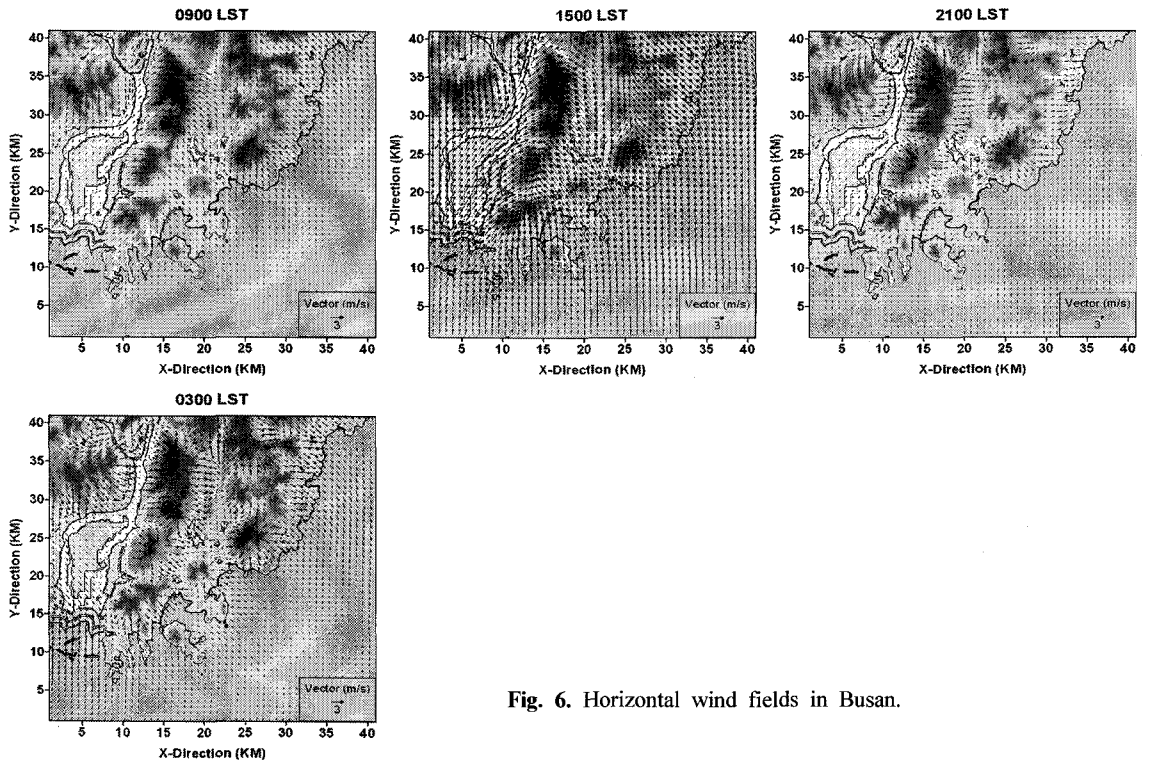


Fig. 6. Horizontal wind fields in Busan.

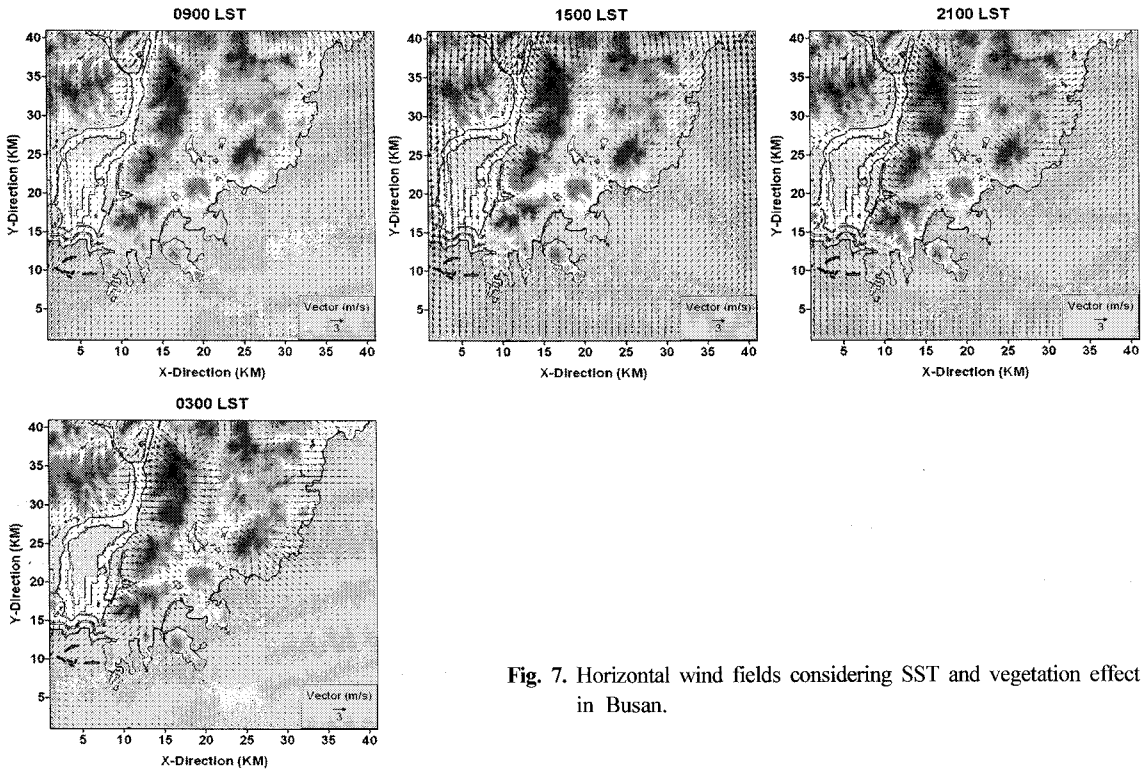


Fig. 7. Horizontal wind fields considering SST and vegetation effect in Busan.

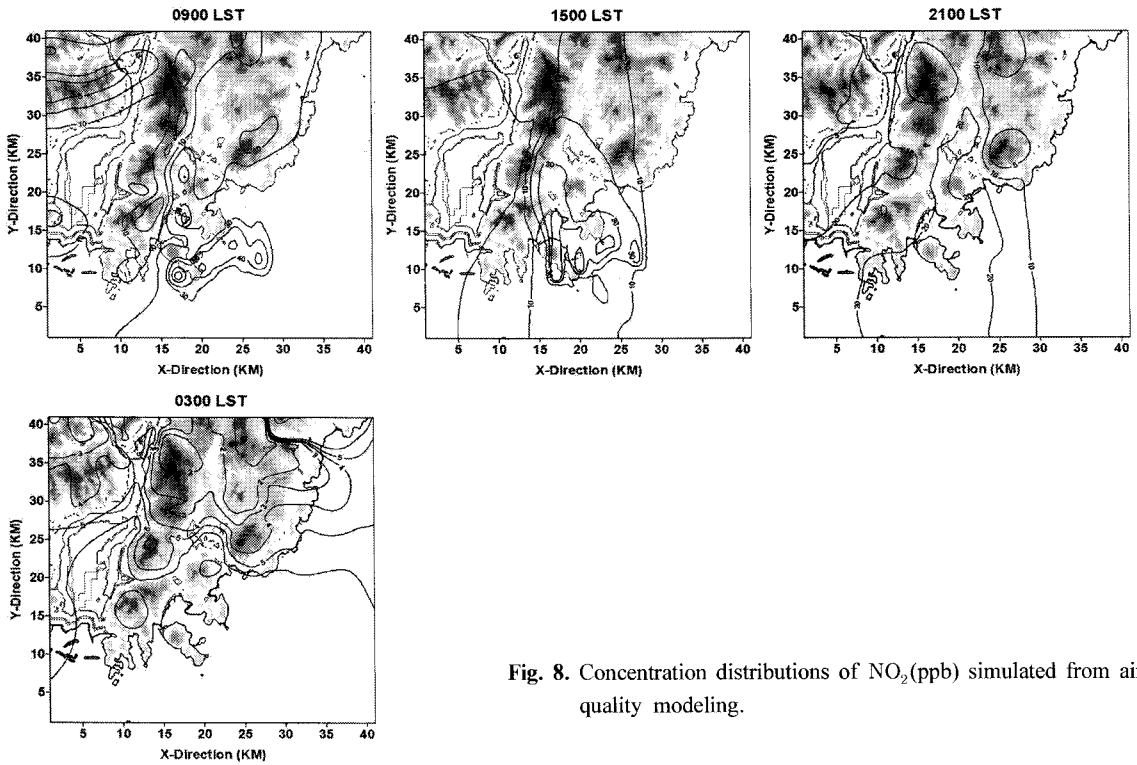


Fig. 8. Concentration distributions of NO<sub>2</sub>(ppb) simulated from air quality modeling.

### 3.3. 대기질 수치모의

식생효과와 해양효과를 고려하였을 때 대기 중의 오염물질 농도 또한 영향을 받게 되므로 경계조건에 따른 오염물질  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ , 그리고  $\text{O}_3$ 의 농도분포와 확산 과정을 대기유동장만 수치모의 한 Case I 과 대기유동장에 해양과 식생효과 모두 고려한 Case II를 통해 살펴보았다. 또한 모델 결과값의 정확도를 살펴보기 위해 2003 ~ 2005년 동안 환경부 대기자동관측 자료 중 대기가 안정되고 맑은 날만 선별하여 오염물질 농도의 관측값과 수치모의결과를 비교하였다.

#### 3.3.1. $\text{NO}_2$ 농도장 비교 · 분석

Fig. 8 ~ Fig. 9는  $\text{NO}_2$ 의 농도분포로 Case I의 경우 오전에 영도에서 50 ppb 이던 농도가 시간이 지남에 따라 북으로 이류, 확산되는 모습을 나타내었다. 하지만 1800 LST에 금정산 중심으로 모여드는 바람으로 내륙에서 농도가 10~20 ppb 더 높게 나타났다. 야간에는 육풍으로 인해 금정산과, 백양산, 황령산에서 농도가 10 ppb 이하로 낮아졌으며,

야간에는  $\text{NO}_2$ 가 거의 해양으로 밀려나가 내륙에서 1 ppb의 낮은 농도를 가지고 있었다. Case II에서는 금정산, 백령산 등 지형이 높은 곳에서 발산하는 바람으로 오염물질이 확산되었다. 2100 LST에는 내륙의 농도가 Case I의 결과와 비슷한 값을 나타내다가 0600 LST에는 수영만 근처 해안가에서 Case II의 농도값이 10~15 ppb 더 높게 수치모의 되었다. 이는 Case I에서 야간에 내륙과 해양의 온도가 비슷해져 바람이 약화되었지만 Case II에서는 지표면 특성과 SST의 영향으로 내륙과 해양의 온도차이가 커서 바람이 강해  $\text{NO}_2$ 의 농도를 바다 쪽으로 이동시켰기 때문이다. 따라서 Case II는 약한 바람으로 Case I보다 낮에는 농도가 높았고 밤에는 높은 경향을 보였다.

#### 3.3.2. $\text{SO}_2$ 농도장 비교 · 분석

Fig. 10 ~ Fig. 11을 보면 Case I 경우, 0900 LST에 내륙의  $\text{SO}_2$  농도는 10 ppb 이하였지만, 시간이 지나면서 해풍의 유입으로 내륙의 농도값이 점차 증가하였다. 2400 LST 이후에는 다시 육풍으로 인

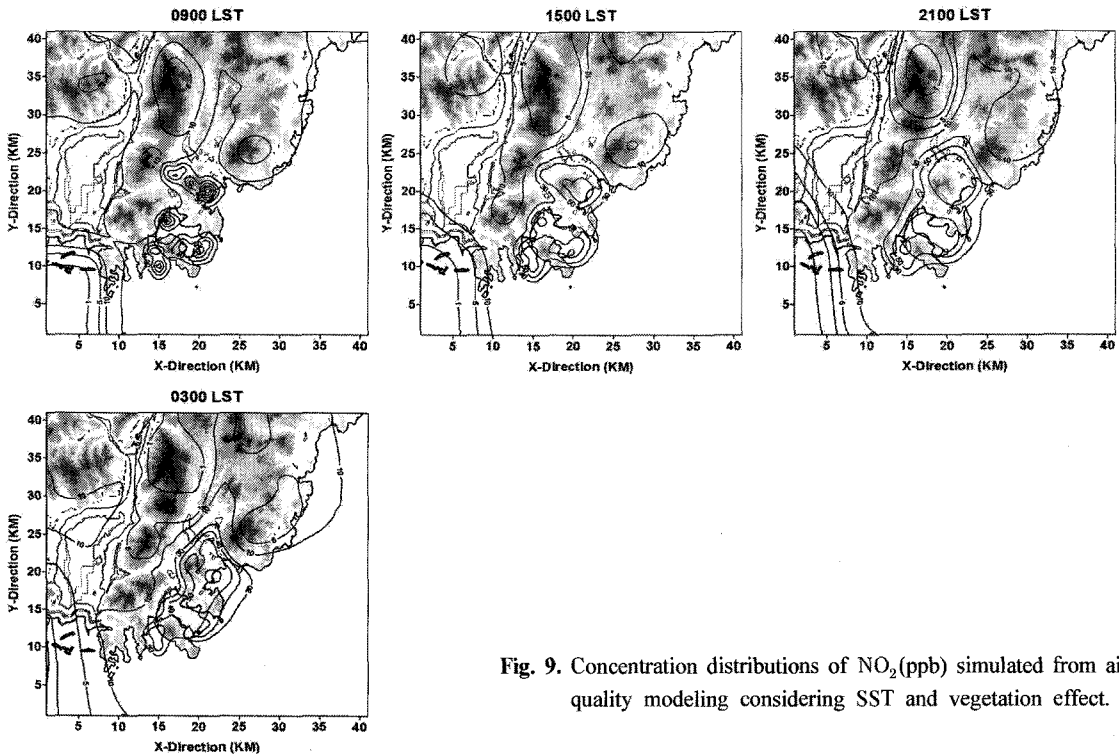


Fig. 9. Concentration distributions of  $\text{NO}_2$ (ppb) simulated from air quality modeling considering SST and vegetation effect.



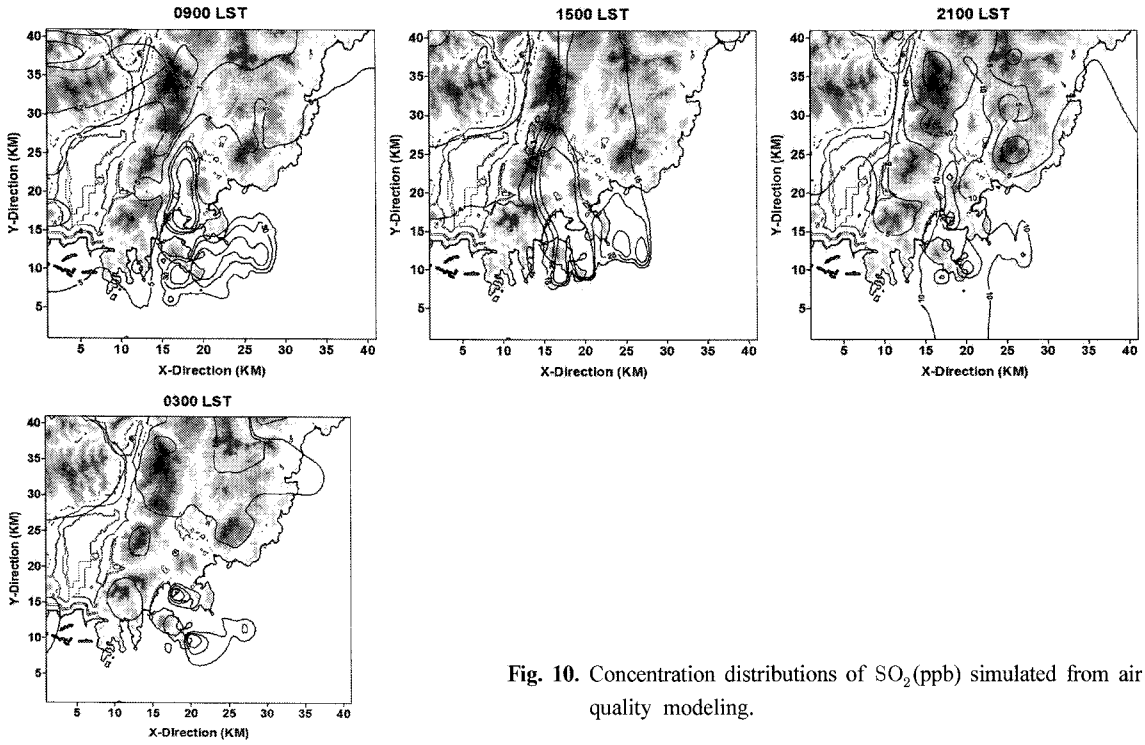


Fig. 10. Concentration distributions of  $\text{SO}_2$ (ppb) simulated from air quality modeling.

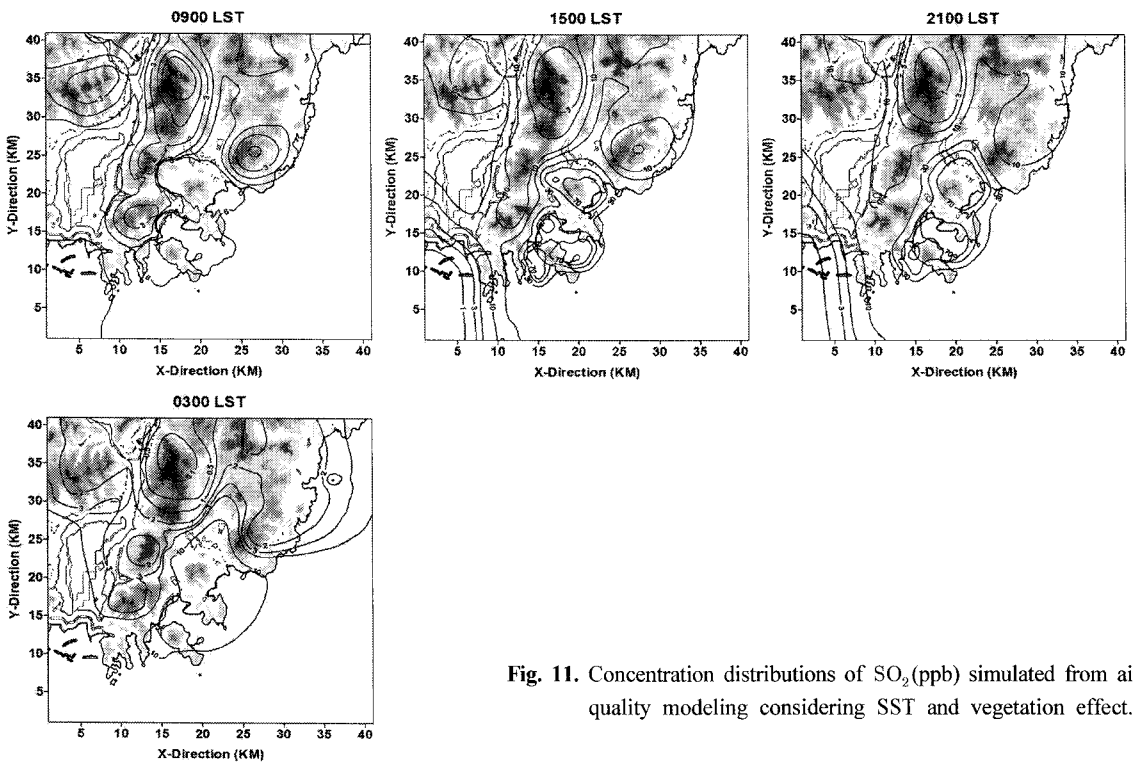


Fig. 11. Concentration distributions of  $\text{SO}_2$ (ppb) simulated from air quality modeling considering SST and vegetation effect.

해 내륙에서 해안으로 오염물질이 확산되어 나가는 형태로, 해륙풍 순환에 의한 오염물질의 확산과 수송을 잘 표현 해 주고 있다. Case II에서는 주간에 5 ~ 10 ppb 더 낮게 수치모의 되었고, 야간에는 Case I 과 Case II의 농도가 1 ~ 5 ppb로 비슷하였다. 이것은 Case I 에서 주간에는 해풍으로 내륙까지 SO<sub>2</sub>가 수송되었고, 야간에는 강한 육풍으로 해양까지 확산되었기 때문이다. 반면 Case II에서는 SST를 고려해 준 결과로 인한 약한 풍속 때문에 내륙의 SO<sub>2</sub>가 크게 확산되지 못하여 낮 시간과 비슷하게 수치모의 된 것으로 생각된다.

3.3.3. O<sub>3</sub> 농도장 비교 · 분석

O<sub>3</sub>농도 분포는 Fig. 12 ~ Fig. 13으로 일사가 강한 1500 LST에 가장 높은 농도를 나타내었다. Case I 은 0900 LST에 내륙을 중심으로 하여 30 ppb 정도였고, 1200 LST에 특히 영도에서 10 ppb로 낮았다. 하지만 곧 O<sub>3</sub>이 내륙으로 확산되어 내륙의 농도가 이전보다 낮아지고 먼 해양으로부터 40 ppb의

O<sub>3</sub>이 이루어지는 특징을 나타내었다. 반면 Case II에서는 식생효과로 금정산에서 농도가 Case I 과 10 ppb 이상 차이가 나타난다. 하지만 Case II는 도심지에서 도시열로 인해 농도가 높게 수치모의 되었다고 사료된다. 해양에서는 Case II에서 풍속이 낮아 기장 앞바다에서의 O<sub>3</sub>농도가 훨씬 더 높았다.

3.3.4. 오염물질의 시계열 비교 · 분석

Fig. 14 ~ Fig. 16은 각각 오염물질의 시간별 농도변화를 나타낸 그림이다. 관측값은 환경부에서 대기자동 관측을 통해 측정된 2001년에서 2004년까지 8월의 맑고 무더운 날의 농도를 평균한 값을 사용하였다. NO<sub>2</sub>는 출퇴근 시간인 아침과 저녁시간에 자동차에 의한 오염물질 배출로 높은 농도를 보여주고 있다. Case II의 경우 특히 연산과 대연에서 시간변화에 따른 농도곡선을 잘 표현하였다. SO<sub>2</sub>의 경우 Case I 보다는 Case II에서 관측과 더 가까운 결과를 가지고 있으며, O<sub>3</sub>의 농도 또한 Case II의 모델 결과가 Case I 보다는 관측과 잘 일치하는 모습을 보여주었다. 또한 주간에 Case I 의 풍속이 Case

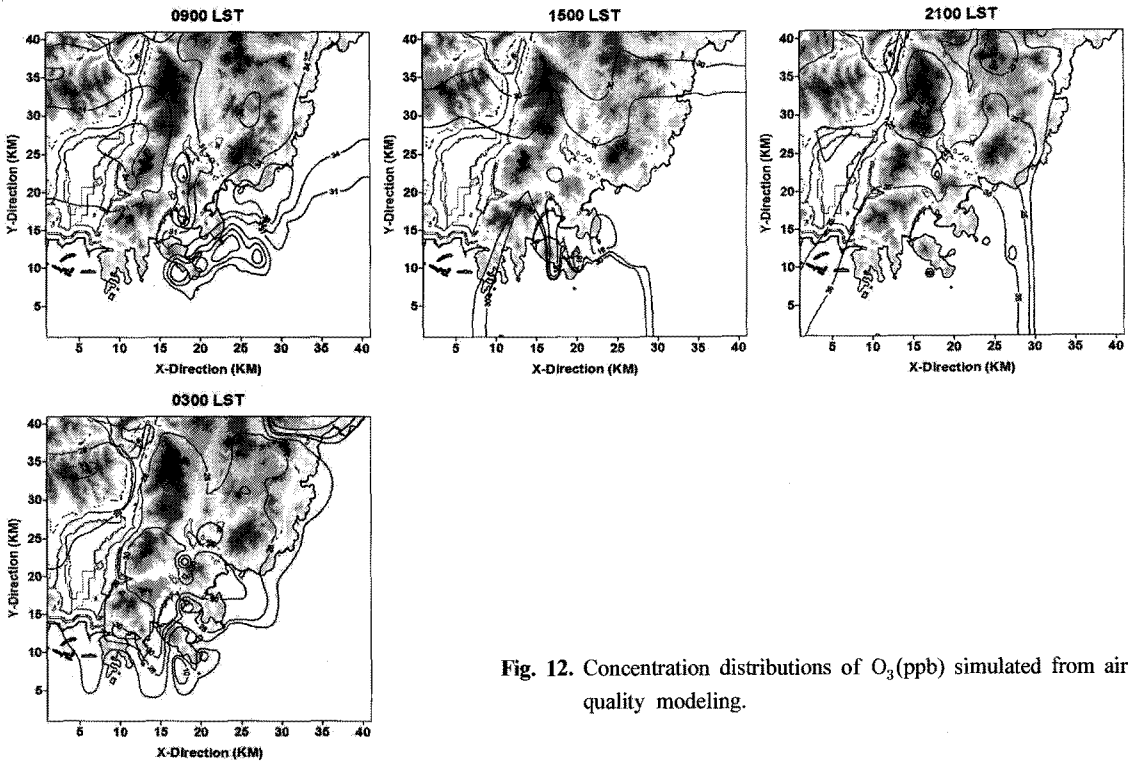


Fig. 12. Concentration distributions of O<sub>3</sub>(ppb) simulated from air quality modeling.

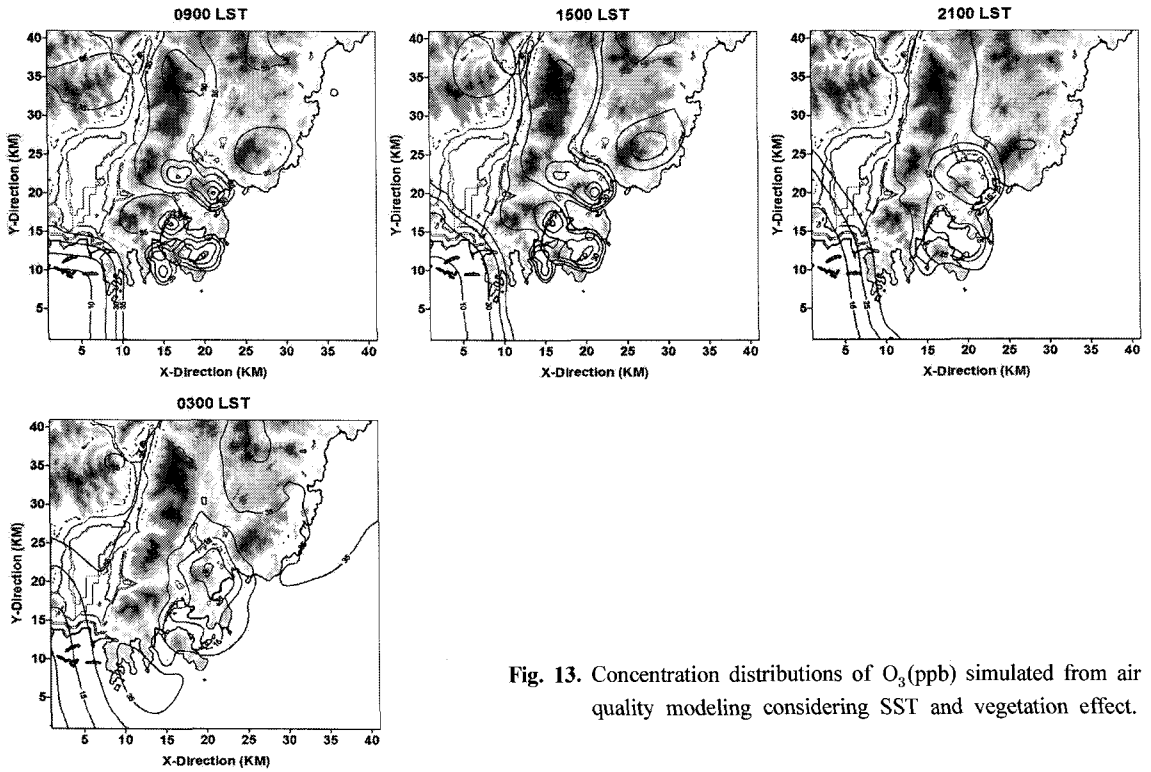


Fig. 13. Concentration distributions of  $O_3$ (ppb) simulated from air quality modeling considering SST and vegetation effect.

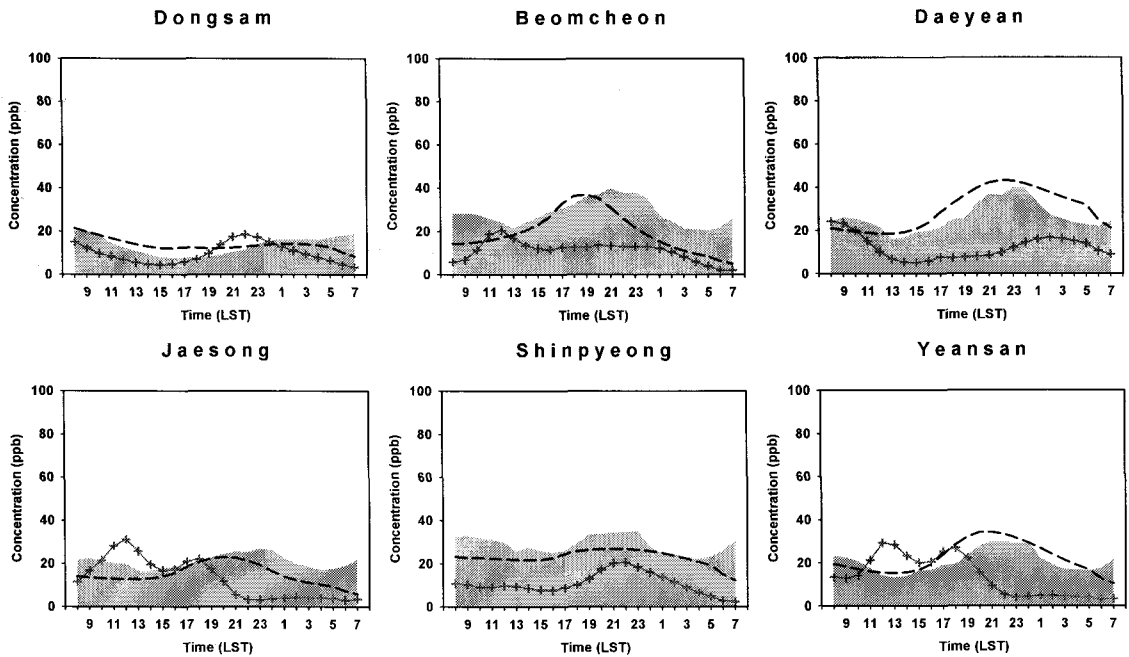


Fig. 14. Diurnal variations of the observed and experimented  $NO_2$  concentration at each station. (shadow area: observed, +: Case I, dash line: Case II)

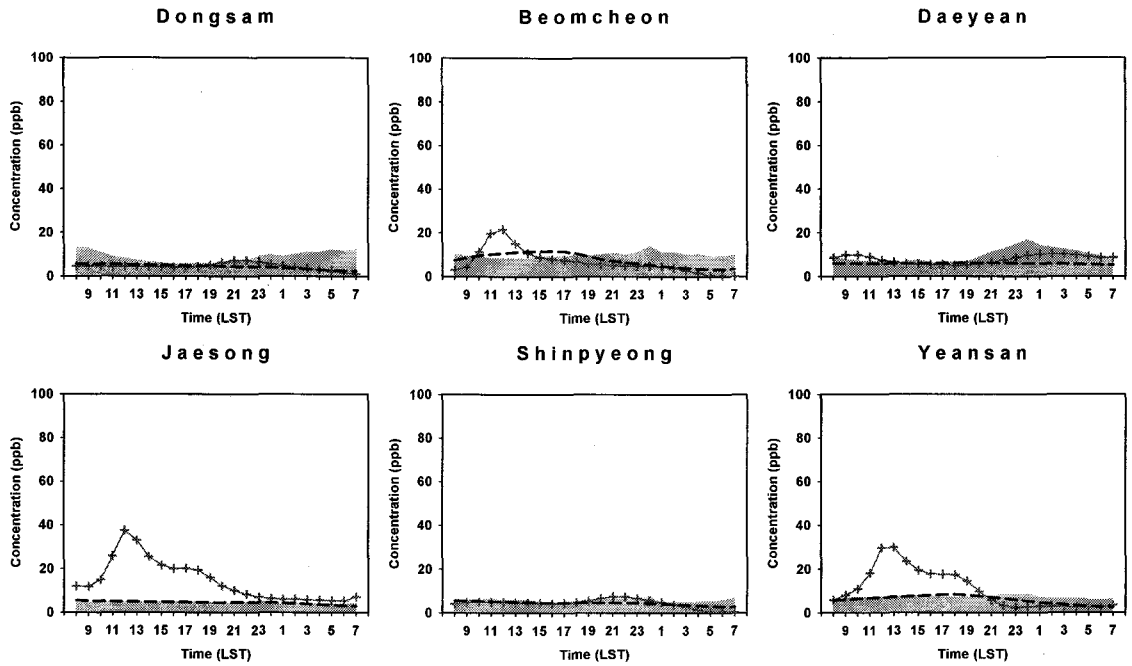


Fig. 15. Diurnal variations of the observed and experimented  $\text{SO}_2$  concentration at each station. (shadow area: observed, +: Case I, dash line: Case II)

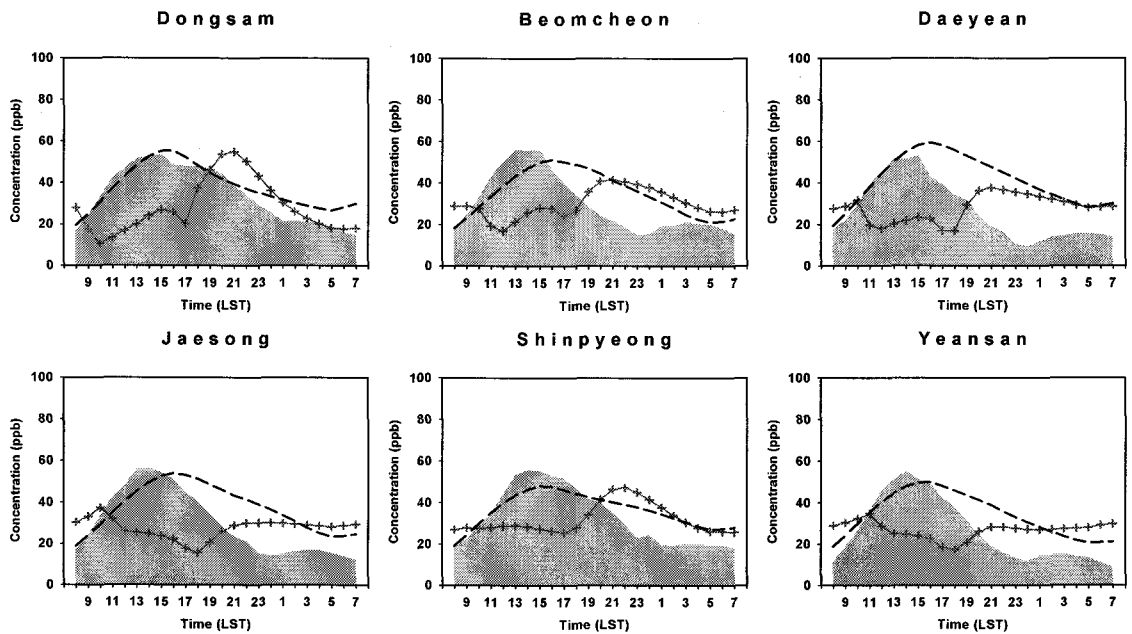


Fig. 16. Diurnal variations of the observed and experimented  $\text{O}_3$  concentration at each station. (shadow area: observed, +: Case I, dash line: Case II)

II보다 높아 오염물질의 확산과 이동으로  $O_3$ 의 농도가 낮았으며, 야간에는 두 Case 모두 비슷한 풍속을 가짐으로 인해 농도도 비슷한 값을 나타내었다.

#### 4. 결론

연안에 위치한 부산광역시의 대기 흐름을 수치모의 하기 위해 경계조건으로 해양에서는 SST를, 내륙에서는 지표면의 식생분류를 고려하였다. SST를 고려하기 위해서 POM을, 지표면의 식생 효과를 위해서 BATS를 LSM과 결합시켜 기상장을 살펴보았으며 또한 대기질을 위해서는 오일리안, 이류확산 모델로써 농도장을 분석하였다.

Case I의 경우, 일정한 SST로 인해 해안가 부근에서 급격한 온도경도를 보였으며, 해륙간의 큰 온도차 의해 강한 바람장을 나타냈다. Case II의 경우, 식생효과에 의해 식생지역에 온도가 낮아지는 모습이 나타나지만, 해양효과로 인해 전체적으로 약화된 바람장을 볼 수 있었다.

Case I에서는 강한 바람으로 내륙까지 오염물질이 수송되었으며 지형이 높은 지역으로 바람이 수렴하여 산 정상 부근에서 농도가 높게 나타났다. 반면 Case II에서는 풍속이 약하여 오염물질이 먼 연안 밖으로 확산되지 못하였고, 이런 원인으로 오염물질이 내륙까지 침투하는 수송, 확산에서도 내륙에서는 전체적으로 낮은 농도분포를 보였다. 또한 선박의 오염물질 배출로 인해 연안지역에 높은 농도분포를 보였으며, 부산항과 부두주변에서 배출된 오염물질들은 연안 주변에 고농도 현상을 보이다가 육풍이 강해지는 늦은 오후시간부터 내륙으로 수송되는 것을 볼 수 있었다.

따라서 식생과 해양효과를 고려한 결과 뚜렷한 해륙풍의 모습을 잘 보여주고 있으며, 이에 따른 오염물질의 이동 상태를 잘 설명하였다. 따라서 해양의 영향을 직접적으로 받으며, 토지 피복상태가 매우 복잡한 부산광역시의 경우 이런 경계조건을 설정해 주었을 때 대기질을 분석하는데 있어 더 적합하였다고 생각된다. 이와 더불어 식생분류를 보다 더 현실적인 상황으로 개선하고 대기질 수치모의시 정확한 배출량이 입력자료로 사용하여 지역 대기환경을 수치모의 한다면 더욱 정확한 분석을 할 수 있을 것이라고 본다.

#### 감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2006-2205)의 지원으로 수행되었습니다.

#### 참고 문헌

- 1) Mahrer Y., Pielke R. A., 1975, A Numerical Study of the Air Flow Over Mountains Using the Two-Dimensional Version of the University of Virginia Mesoscale Model, *J. Atmos. Sci.*, 32, 11, 2144-2155.
- 2) Mahrer Y., Pielke R. A., 1977, The Effect of Topography on Sea and Land Breezes in a Two-Dimensional Numerical Model, *Mon. Wea. Rev.*, 105, 9, 1151-1162.
- 3) Segal M., Avissar R., McCumber M. C., Pielke R. A., 1988, Evaluation of Vegetation Effects on the Generation and Modification of Mesoscale Circulations, *J. Atmos. Sci.*, 45, 16, 2268-2292.
- 4) Kondo J., Watanabe T., 1991, Studies on the Bulk Transfer Coefficients over a Vegetated Surface with a Multilayer Energy Budget Model, *J. Atmos. Sci.*, 49, 23, 2183-2199.
- 5) Ichinose T., Shimodozono K., Hanaki K., 1999, Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo, *Atmos. Envi.*, 33, 24-25, 3897-3909.
- 6) Segal M., McNider R. T., Pielke R. A., McDougal D. S., 1982, A numerical model study of regional air pollution meteorology of the Greater Chesapeake Bay area Summer day case Study, *Atmos. Envi.*, 16, 6, 1381-1397.
- 7) Cho I. S., Won G. M., Lee H. W., 1999, SST Effect upon Numerical Simulation of Atmospheric Dispersion, *J. Kor. Soc. Atmos. Envi.*, 15, 6, 767-777.
- 8) Businger J. A., Wingard J. C., Izumi Y., Bradley E. F., 1971, Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer, *J. Atmos. Sci.*, 28, 2, 181-189.
- 9) 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, 5, 926-933.
- 10) Clark T. L., Rarely R. D., 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.
- 11) Klemp J. B., Wilhelmson R. B., 1978, The simulation of three-dimension convection storm dynamics, *J. Atmos. Sci.*, 35, 1070-1096.
- 12) Deardorff J. W., 1978, Efficient prediction of ground surface temperature and moisture with include of layer of vegetation, *J. Geophys. Res.*, 83, 1988-1903.
- 13) Dickinson R. E., 1988, The force-restore model for

- surface temperature and its generalizations, J. Climate.,  
1, 11, 1086-1097.
- 14) Lee H. W., Park J. G., Moon S. E., 1989, Simulation  
for the Deposition Velocity of the Pollutants, J. Kor.  
Meteo. Soc., 25, 3, 121-128.
- 15) 환경부, 대기환경연보, 2001.