

### 3차원 오일러리안 확산모델을 이용한 경인산단권역의 대기거동 해석

송 동 웅

상지대학교 환경공학과

(2005년 10월 13일 접수; 2006년 4월 10일 채택)

## Atmospheric Studies Using a Three-Dimensional Eulerian Model in Kyongin Region

Dong-Woong Song

Department of Environmental Engineering, Sangji University, Wonju 220-702, Korea

(Manuscript received 13 October, 2005; accepted 10 April, 2006)

The numerical modeling and comparison with observations are performed to find out the detailed structure of meteorology and the characteristic of related dispersion phenomena of the non-reactive air pollutant at Kyongin region, South Korea, where several industrial complex including Siwha, Banwol and Namdong is located. MM5 (Fifth Generation NCAR/Penn State Mesoscale Model), 3-D Land/Sea breeze model and 3-D diagnostic meteorological model have been utilized for the meteorological simulation for September, 2002 with each different spatial resolution, while 3-D Eulerian air dispersion model for the air quality study. We can see the simulated wind field shows the very local circulation quite well compared with *in-site* observations in shoreline area with complex terrains, at which the circulation of Land/Sea breeze has developed and merged with the mountain and valley breeze eventually. Also it is shown in the result of the dispersion model that the diurnal variation and absolute value of daily mean SO<sub>2</sub> concentrations have good agreement with observations, even though the instant concentration of SO<sub>2</sub> simulated overestimates around 1.5 times rather than that of observation due to neglecting the deposition process and roughly estimated emission rate. This results may indicate that it is important for the air quality study at shoreline region with the complex terrain to implement the high resolution meteorological model which is able to handle with the complicate local circulation.

Key Words : 3-D Land/Sea breeze model, 3-D diagnostic meteorological model, 3-D Eulerian air dispersion model, Complex terrains, Local circulation, MM5, Shoreline region

#### 1. 서 론

1980년대 이후 경기도는 급속한 산업화와 도시화의 과정을 거치게 되었으며 이에 따라 대기오염도의 양상은 지역적인 특성이 두드러지게 되었다. 특히 경인산업단지권역에 위치한 인천광역시일원에는 인천의 남동공단, LNG기지, 종합폐기물시설 그리고 송도 신도시 등이 조성되거나 운영되고 있으며, 시흥시, 안산시에는 시화, 반월공단 및 확장단지를 비롯하여 주변 택지개발등이 조성 및 개발이 계획되

어 있는바 시화호 남 북단을 비롯하여 인천광역시 남단까지 연결하는 통합적인 대기관리 세부계획 수립 방안을 마련하여 관리할 필요성이 증대되고 있다<sup>1)</sup>.

광범위한 지역의 대기질 관리에 있어서 대기오염물질의 발생은 물론 발생된 오염물질이 바람의 변화에 따라 이동 및 확산이 중요한 부분이나, 본 연구대상지역의 기본적인 기상장에 대한 모의가 정확히 이루어지지 않고 있다. 또한 경인산업단지권역은 지형학적으로 서해안에 위치하고 있어 국지규모의 기상순환인 해륙풍 (Sea/land breeze)에 영향을 받고 있는 것으로 보고 되고 있다. 따라서 내륙에 위치한 도시지역보다 대기오염물질의 이동 및 확산에 의한 변화가 클 것이다.

Corresponding Author : Dong-Woong Song, Department of Environmental Engineering, Sangji University, Wonju 220-702, Korea  
Phone: +82-33-730-0442  
E-mail: dwsong@sangji.ac.kr

이에 본 연구에서는 대기오염물질 거동의 중요한 변수인 지표 기상 및 고공 기상을 관측, 분석하였으며 이를 바탕으로 기상장을 모의하여 본 연구대상 지역의 기상특성을 평가하였다. 또한, 대기확산을 평가하기 위하여 시화, 반월, 남동공단을 포함한 경인산업단지권역의 배출량을 산정하였으며, 선행된 기상장 모의결과를 바탕으로 대기확산 모의를 수행, 경인산업단지권역에 위치한 공단지역의 오염물질이 주변지역에 미치는 영향과 관련된 기여도를 구체화시킬 수 있는 기초 자료를 확보하고자 하였다.

## 2. 대기확산모델의 구성

대기확산예측 모델링을 위한 시나리오를 Fig. 1에 제시하였다. 시나리오를 살펴보면, 기상장모델 수행 부분과 확산모델 수행 부분으로 크게 2부분으로 나눌 수 있다.

### 2.1. 기상장 모델

국지규모 대기오염 수치모의를 위한 기상장은 지형 및 지표면 특성을 반영하여 지면부근의 바람장을 상세하게 표현할 수 있어야 한다. 한편, 국지규모의 기상장은 중관규모 (수백 km~수천 km) 기상장에 의하여 결정될 수 있기 때문에 중관 규모의 기상장에 대한 정확한 모의가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 중관규모 기상장을 생성하기 위하여 US National Center for Environmental Prediction (NCEP) Reanalysis Meteorological Field, The World Meteorological Organization (WMO) 관측자

료 (Global Telecommunication System data) 그리고 15 km 격자규모의 기상장을 생성하기 위하여 MM5 (Fifth Generation NCAR (National for Atmospheric Research)/Penn State Mesoscale Model)<sup>2)</sup>을 도입하여 한반도에 대해 적용하였다. 여기서 생성된 중관규모 기상장과 기상청 지상 관측 자료를 이용하여 3차원 해륙풍 모델<sup>3,4)</sup>을 수행하여 격자규모 3 km 에 해당하는 기상장을 생성한 후 다시 1 km 격자규모의 진단 기상장 모델<sup>5)</sup>을 사용하여 확산 모델의 입력자료로서의 국지 기상장을 생성하였다

### 2.1.1. 3차원 해륙풍 모델

#### ■ 모델 방정식

운동방정식은

$$\frac{du}{dt} = fv - fV_g - \theta \frac{\partial \pi}{\partial x} + g \frac{z^* - \bar{S}}{S} \frac{\partial z_g}{\partial x} - g \frac{z^*}{S} \frac{\partial S}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_H \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_H \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \left( \frac{\bar{S}}{S - z_g} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left( K_z \frac{\partial u}{\partial z^*} \right) \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} = -fu - fU_g - \theta \frac{\partial \pi}{\partial y} + g \frac{z^* - \bar{S}}{S} \frac{\partial z_g}{\partial y} - g \frac{z^*}{S} \frac{\partial S}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_H \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_H \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \left( \frac{\bar{S}}{S - z_g} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left( K_z \frac{\partial v}{\partial z^*} \right) \quad (2)$$

로 주어지며 정역학 방정식은

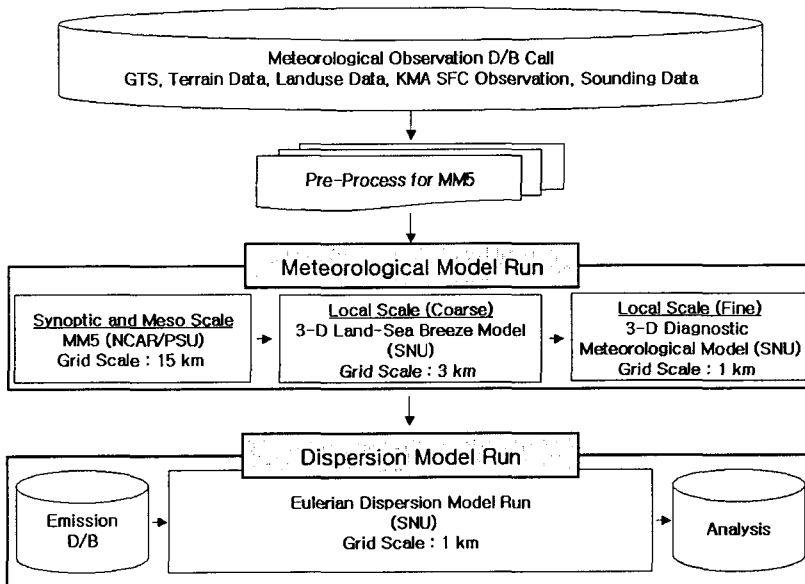


Fig. 1. Diagram of the dispersion modeling procedure.

$$\frac{d\pi}{dz^*} = -\frac{(S-z_g)g}{S} \theta \quad (3)$$

열역학 방정식은

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_H \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_H \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \left( \frac{\bar{S}}{S-z_g} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left( K_z^{(\theta)} \frac{\partial \theta}{\partial z^*} \right) \quad (4)$$

비습 방정식은

$$\frac{dq}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_H \frac{\partial q}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_H \frac{\partial q}{\partial y} \right) + \left( \frac{\bar{S}}{S-z_g} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left( K_z^{(q)} \frac{\partial q}{\partial z^*} \right) \quad (5)$$

연속 방정식은

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w^*}{\partial z^*} + \frac{1}{S-z_g} \left( \frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} \right) - \frac{1}{S-z_g} \left( u \frac{\partial z_g}{\partial x} + v \frac{\partial z_g}{\partial y} \right) = 0 \quad (6)$$

로 주어진다.

여기서,

지형좌표계  $z^*$ 는

$$z^* = \bar{S} (z - z_g / S - z_g) \text{ 로 주어지며}$$

전미분연산자는

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w^* \frac{\partial}{\partial z^*} \text{ 로}$$

그리고 Exner 함수인  $\pi$  는

$$\pi = C_p \left( \frac{p}{p_0} \right)^k \text{ 로 표시된다.}$$

물질면은 다음과 같이 계산된다.

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{1}{S} \int_0^{S'} \left( \frac{\partial}{\partial x} (u(S-z_g)) + \frac{\partial}{\partial y} (v(S-z_g)) \right) dz^* \quad (7)$$

지형좌표계에서의 연직속도  $w^*$ 는

$$w^* = \frac{\bar{S}}{S-z_g} w - \frac{z^*}{S-z_g} \left( \frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \frac{z^* - \bar{S}}{S-z_g} \left( u \frac{\partial z_g}{\partial x} + v \frac{\partial z_g}{\partial y} \right) \quad (8)$$

로 주어진다.

이상에서  $u, v$  는 각각  $x, y$  방향의 수평바람성분이며  $t$  는 시간,  $\theta$  는 온위를 나타내며  $q$  는 비습,  $S$  는 물질면까지의 높이,  $\bar{S}$  는 모델 상단의 높이,  $z_g$  는 지형의 높이,  $f$  는 전향인자,  $U_x, V_y$  는 각각  $x, y$  방향의

지균풍을 나타낸다. 그리고  $K_H$  는 수평확산계수,  $K_z, K_z^{(\theta)}, K_z^{(q)}$  는 각각 운동량, 온위, 비습에 대한 수직확산계수를 나타낸다.

### 2.1.2. 3차원 진단 모델

지상 관측 자료를 이용한 3차원 바람 및 기온장의 도출 방법은 문헌<sup>5,6)</sup>에 자세히 설명되어 있으며 간단하게 요약하면 다음과 같다.

바람은 오염 물질이 어느 방향으로 얼마나 빨리 이동할 수 있는지를 추정할 수 있게 하며 바람의 난류는 확산 정도를 결정할 수 있게 한다. 지금까지 오염 확산에 주로 사용되어온 바람의 연직 구조는 한 층에서 관측한 바람을 Power법칙을 사용하여 계산하여 사용되어 왔다. 그러나 이 power 법칙은 고도에 따른 풍향 변화를 고려할 수 없는 단점을 가지고 있어서 실제 바람과는 차이가 크다<sup>7)</sup>.

국지 규모의 대기오염 물질의 수송 및 난류 확산 과정은 중규모 3차원 기상장이 요구된다. 그러나 3차원 기상장을 쉽게 얻을 수 없는 어려움이 있다. 지금까지 두가지의 수치적 방법으로 중규모 기상장을 구하여 왔는데 그 하나는 상세 물리 과정을 포함하여 기상장을 시뮬레이션하는 Mellor and Yamada<sup>8)</sup>가 사용한 방법이고 그 나머지는 물리적 제한조건을 주어 관측자료를 객관분석하는 Sherman<sup>9)</sup>이나 Dickerson<sup>10)</sup>의 진단적 방법이다. 전자의 경우는 물리적으로는 타당할지 모르지만 계산시간이 너무 많이 소요되기 때문에 실용화하기 어려운 단점이 있는 반면에 후자의 경우는 Power법칙을 사용하여 연직 바람 구조를 구하기 때문에 고도에 따른 풍향 변화를 고려할 수 없는 단점이 있다.

본 연구에서는 이상의 난류종결모델이론<sup>8)</sup>과 복잡한 지형에서의 질량보존이론<sup>9,10)</sup>을 잘 고려하게끔 개발된 진단기상장모델<sup>5)</sup>을 사용하였다. 우선 지상관측 자료 및 3차원 해륙풍모델 결과값을 시간별 평균하여 기본 자료 및 각종 난류변수를 만들고, 이 자료로부터 지표층에서는 Monin -Obukohov 상사 이론과 대기경계층에서는 Rossby상사 이론으로 연직 구조를 구한 후 질량이 보존되게 바람장을 보정하여 연직 기상장을 얻었다. 이렇게 계산한 바람은 지상 관측 바람의 풍향, 풍속과 일치할 뿐만 아니라 경계층 꼭대기의 지균풍의 풍향, 풍속과도 일치하게 된다.

### 2.2. 확산 모델

어떤 오염물질의 농도  $C$  를 시간  $t$  에서 수평 및 연직 바람성분( $u, v, w$ )에 의해 이루어지고 수평 확산계수  $K_H$  와 연직 확산 계수  $K_z$  에 의해 혼합된다면 오일러리안 계에서의 질량 보존 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(uC) - \frac{\partial}{\partial y}(vC) - \frac{\partial}{\partial z}(wC) + \frac{\partial}{\partial x}\left(K_H \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_H \frac{\partial C}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_z \frac{\partial C}{\partial z}\right) + (P - L) \quad (9)$$

여기서 P는 배출량에 의해 생성되는 과정 그리고 L은 침적 과정에 의한 소멸되는 과정을 각각 나타낸다.

본 연구에서는 이류 과정의 수치 해를 구하기 위하여 약한 음의 경도가 나타나는 단점을 보완한 유한 요소 법 (finite element method)<sup>11)</sup>을 이용하였으며 계산의 효율성과 수치 잡음이 적게 3 차원 방정식을 일차원적으로 나누어 푸는 시간 분리(time splitting) 방법을 사용하였다<sup>12,13)</sup>. 그리고 확산 과정의 수치 해는 Crank-Nicolson의 암시적 유한 차분법 (implicit finite difference method)으로, 지표층에서의 연직 확산 계수  $K_z$ 는 Monin-Obukhov 상사이론(similarity theory)<sup>14)</sup>을 사용하여 계산하였으며, 지표층 위에서 대기 혼합 층까지는 대기 안정도가 안정한 경우에 지표층의 연직 확산 계수를 연장하여 사용하였으며 지표층 위의 대류 경계층에서는 대류 속도 스케일을 이용하여 매개 변수화 하였다<sup>15)</sup>. 한편, 대기 경계층 위의 연직 확산 계수는 연직 바람 쉼어와 리처드슨 수(Ri)를 이용한 Blackadar<sup>16)</sup>의 다음과 같은 결과식을 이용하였다.

$$K_z = K_0 + S(k-l)^2 \frac{R_c - R_i}{R_c} \quad (10)$$

여기서  $K_0 = 1.0 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ,  $l = 100 \text{ m}$ ,  $R_c$ 는 임계 리처드슨수로서 0.25의 값이고 S는 연직 바람 쉼어,  $R_i = \frac{g}{\theta S^2} \frac{d\theta}{dz}$  로서  $\bar{\theta}$ 는 온위를 그리고  $g$ 는 중력 가속도를 나타낸다.

### 3. 모델링 결과

#### 3.1. 상세 기상장 모의 결과

##### 3.1.1. 종관 규모 모의 결과

Fig. 2에 2002년 9월 5일, 15일 그리고 25일 0900 LST에 대하여 MM5에서 도출된 종관 규모 기상장 중 지상 기압장과 10 m 고도 바람장을 나타내었다.

먼저 전반적인 기상청 공식발표 일기 개황을 살펴보면, 2002년 9월은 고기압 가장자리에 들어 구름 끼는 날이 많았으나 중서부 지방을 중심으로 대부분 지방에서 건조한 상태를 보였으며, 강원도 영동 지방을 비롯한 동해안 지방에서는 저온 현상을 보였다. 상순에는 8월 31일 많은 피해를 주었던 제15호 태풍 "루사(Rusa)"가 9월 1일 우리나라 동해상으로 빠져나갔으며, 이후 북쪽에 중심을 둔 고기압의

가장자리에 드는 날이 많았다. 중순에는 중부지방을 중심으로 고기압의 영향을 주로 받아 건조한 날이 지속되었으나, 남부지방에서는 15~16일에 남쪽을 지나는 기압골의 영향으로 제주 137 mm, 남해 122 mm, 광주 103 mm 등 전라남도, 경상남도, 제주도 지방을 중심으로 100 mm 이상의 많은 비가 왔다. 하순에는 고기압 가장자리에 들어 구름 끼는 날이 많았으며, 28~29일에는 북쪽을 지나는 기압골의 영향으로 중부지방을 중심으로 비가 왔다. 이러한 일기 개황과 맞물려, 많은 강수가 있어 한반도가 저기압의 영향에 있었던 9월 15일에 전형적인 가을철 맑은 날로서 남한지역이 이동성 고기압의 영향권에 있었던 9월 25일 의 경우를 제외하면, 한반도는 이동성 고기압과 저기압이 3~5일의 주기로 통과하지만 아직 북태평양 고기압의 세력이 일본열도 동쪽에 그 강도를 유지하고 있는 상태를 보이고 있다. 이에 따라서 지상 바람은 남서풍 계열이 우세함을 확인 할 수 있다.

종관 기상장에서 도출된 기상변수, 즉 3차원 기상 변수로 바람, 기온, 기압 그리고 2차원 기상변수로 일사, 경계층 높이, 안정도 변수 (Monin-Obukhov Length Scale) 그리고 마찰속도 등은 국지 기상 모델인 3차원 해륙풍 모델의 입력 자료로 사용되었다.

##### 3.1.2. 국지 규모 모의 결과

Fig. 3에 국지 규모의 모델링 영역 (TM 좌표; X 160~190, Y 418~445 km)과 그 지형 및 모델 수행 기간인 2002년 9월 1일부터 9월 30일 중, 가을철 전형적으로 나타나는 종관풍인 남서풍의 경우와 그 반대로 간헐적으로 이동성 고기압이 한반도에 통과할 때 나타나는 남동풍의 경우인 9월 5일의 경우와 9월 25일의 경우에 대해 모의된 지상 10 m 수평 바람장을 6시간 간격으로 나타내었다. 그 지형을 살펴보면 모델 영역 남서쪽에 해양이 위치하여 영역의 북서에서 남동으로 해안선이 위치하고 있음을 알 수 있다. 안산, 시흥 그리고 인천지역이 포함되도록 모델 영역을 선택하였으며 지형은 영역의 북쪽 지역과 동쪽지역에 100~200 m 고도의 산이 위치하며 상대적으로 고도가 낮은 지역은 모델 영역 중앙에서 모델 영역 북동쪽으로 이르는 지역으로 나타나고 있다.

여기서, 9월 5일의 경우, 해양에는 종관풍의 영향이 직접적으로 나타남을 알 수 있으며, 내륙의 경우는 지표층의 마찰로 인하여 그 풍속이 조금 약해지며 또한 주간인 1200 LST에 서풍 계열의 바람이 강해지며, 일몰 시간대인 1800 LST에 이르러 해안가 근처에서 서풍 계열의 바람이 현저히 약해짐을 알 수 있다. 이는 종관풍이 서풍 계열의 경우에 국지 순환인 해륙풍 순환이 종관풍과 합하여져 주간

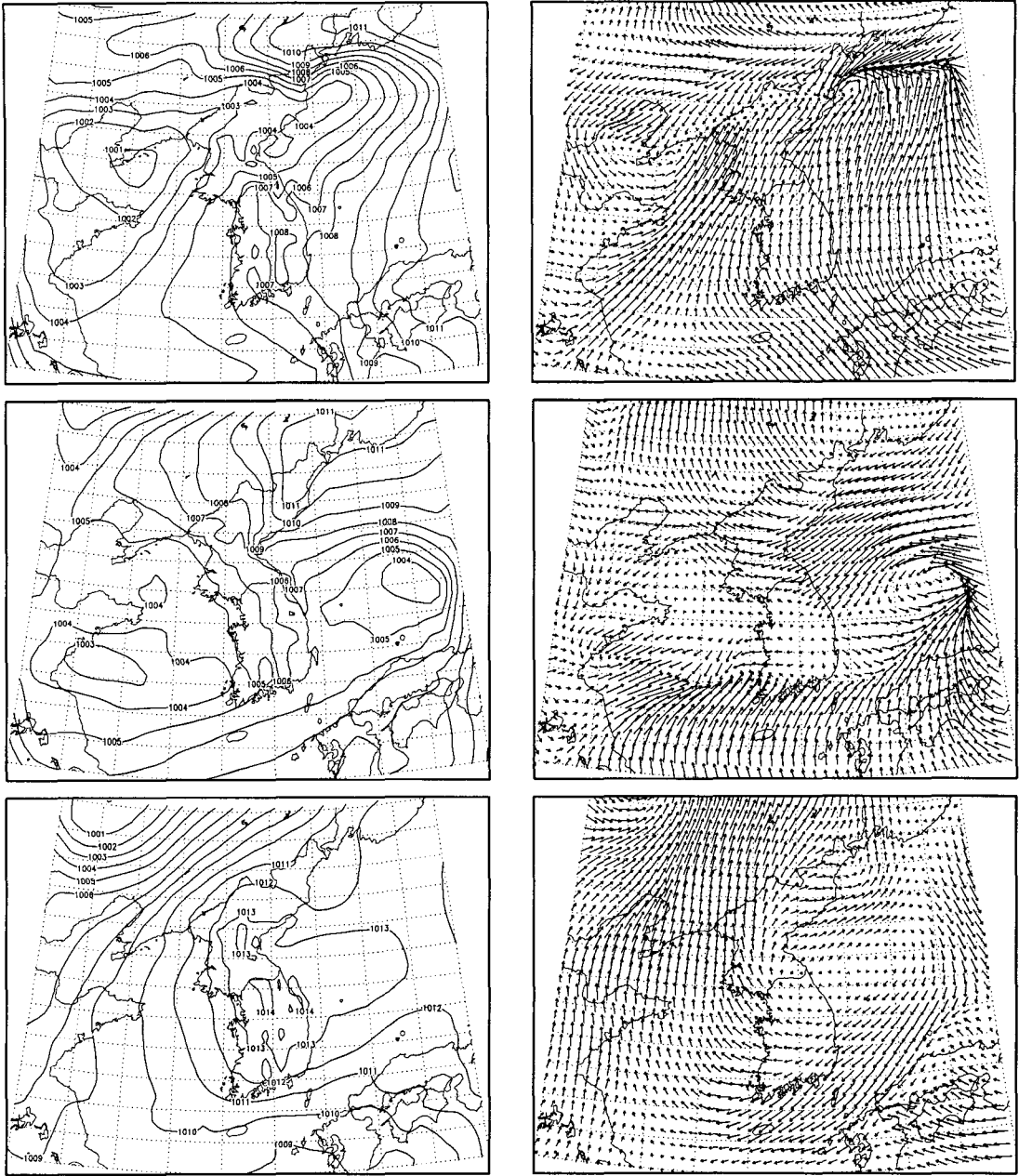


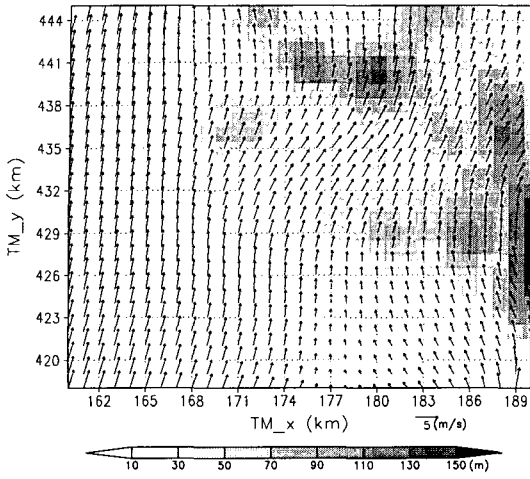
Fig. 2. Horizontal surface pressure field (left panel) and wind field (right panel) generated from MM5 on September 5 (upper panel), 15 (middle panel) and, 25 (lower panel), 2002.

에는 서풍계열의 바람이 강해지며 야간에는 서풍계열의 바람이 현저히 약해지거나 약한 동풍 계열의 바람으로 바뀌는 특징을 잘 보여주는 모의 결과이다. 그리고 산악과 산악사이인 모델 영역 중앙에서 북동쪽에 이르는 지역의 경우 channel flow가 잘 나타나고 있어 확산 및 수송의 모의에서 산악의 영향이 잘 고려됨으로서 그 모의 결과의 정확도를 높일

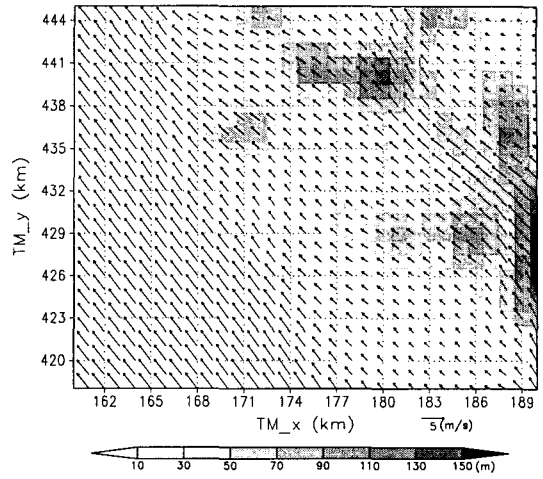
수 있을 것이다.

한편, 중관 바람이 동풍 계열인 9월 25일의 경우, 0600 LST의 연안지역의 비교적 강한 남동풍이 일출 후 지면의 가열에 의한 서풍 계열의 해풍 순환이 발달한 1200 LST에는 그 풍속이 약해짐을 확인할 수 있다. 그리고 1800 LST에는 전체적인 중관풍의 풍속이 매우 약해짐을 알 수 있다.

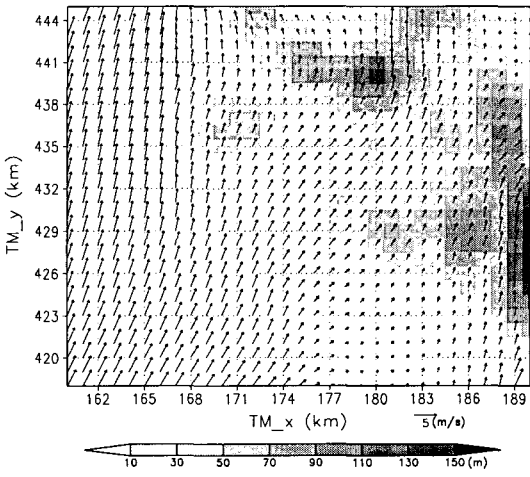
a) 06 LST, September 05, 2002



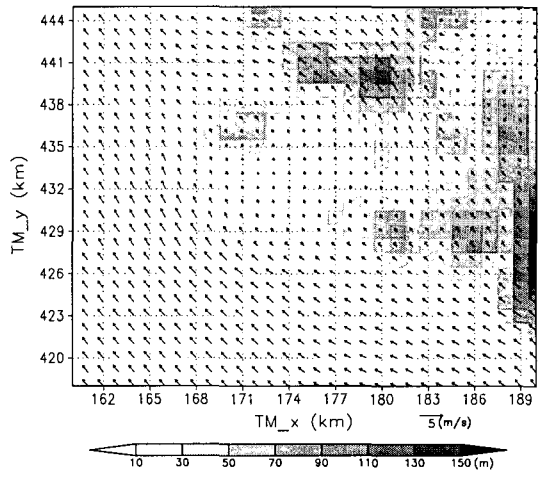
d) 06 LST, September 25, 2002



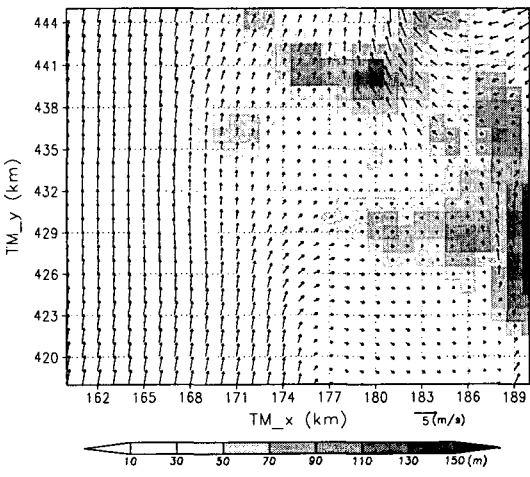
b) 12 LST, September 05, 2002



e) 12 LST, September 25, 2002



c) 18 LST, September 05, 2002



f) 18 LST, September 25, 2002

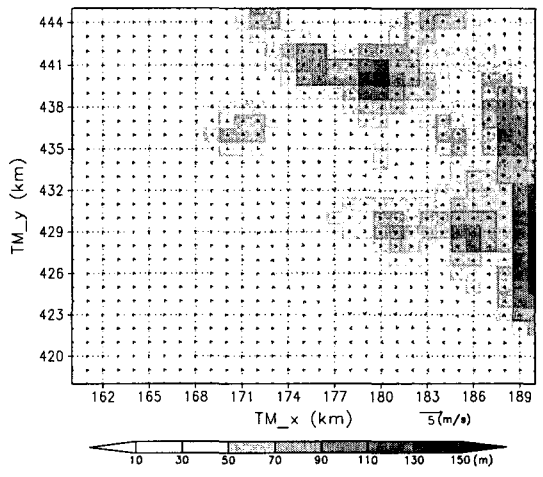


Fig. 3. Horizontal pattern of modeled surface wind field and used topography by 3-D diagnostic meteorological model.

이상의 결과로 미루어 보아, 큰 규모의 중관풍과 국지 규모의 해륙풍 순환이 서로 영향을 미치며 국지 순환을 생성하는 것을 알 수 있으며, 이러한 모의 결과는 확산 및 수송 모델의 입력 자료로 사용되었다.

그리고 Fig. 4에는 모델 모의 결과의 관측 자료와의 비교 및 자세한 분석을 위하여 기상청 자동기상 관측소인 안산 관측소 (KMA 545)에 해당하는 지점에서의 동-서 바람성분 (U component), 온도 그리고 경계층 높이를 1시간 간격으로 각각 9월 1일부터 9월 30일까지의 시계열을 나타내었다. 모델의 모의 결과에서 온도 및 경계층 높이의 일변화가 잘 나타남을 확인할 수 있다. 그리고 해륙풍 순환을 나타내는 동서 바람성분의 모의 결과 역시, 주간에 서풍계열의 해풍과 중관풍이 합하여져 (+) 값 (서풍)이 커짐을 확인할 수 있으며 야간에는 동풍계열의 육풍과 서풍계열의 중관풍이 합하여져 서풍이 약해지거

나 동풍계열 (-) 값의 바람이 나타남을 확인할 수 있다.

### 3.2. 대기확산 모델링 결과

Fig. 5에 확산 모델의 입력자료로 활용하기 위하여 1 km 격자간격으로 격자화 한 2002년 9월의 SO<sub>2</sub> 배출량을 나타내었다. 인천, 부천 및 안산의 공단지역에 그 배출량의 집중된 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 안산지역의 환경부 모니터링 자료 중 2002년 9월의 SO<sub>2</sub> 관측자료를 나타낸 것이다. 전반적인 특징을 살펴보면 5-7일, 15-16일 그리고 21-23일에 네 관측소 모두 낮은 농도를 보이고 있는데 이는 Fig. 4에 나타난 당일 동서 바람장 ((-)의 값; 해풍 발달 못함), 온도의 일변화 폭 (낮음; 강수 또는 구름) 그리고 경계층 높이 (매우 낮음; 약한 복사량)과 매우 높은 상관을 보이고 있다. 이러한 관측적 특성으로 미루어 보아 안산지역의 대기 질은 중관 기상 적 특성 (강수 및 복사량)에 기인한 국지 순환 (해풍 발달 정도)에 매우 밀접히 연관되어있음

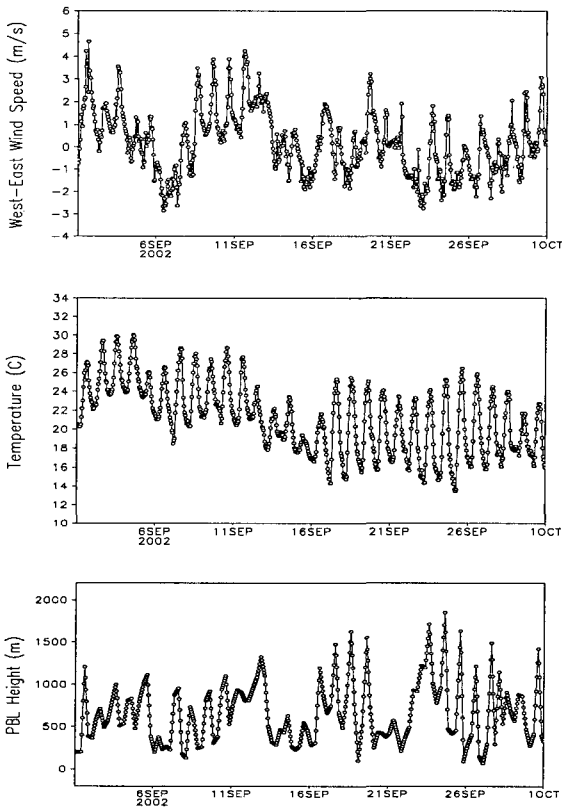


Fig. 4. Time series of surface east-west wind, (upper panel; m s<sup>-1</sup>), temperature (middle panel; K) and PBL height (low panel; m) from September 1 to 30, 2002 which are extracted from 3-D diagnostic meteorological model to be represented on the location of Ansan observation site of Korea Meteorological Administration (KMA 545).

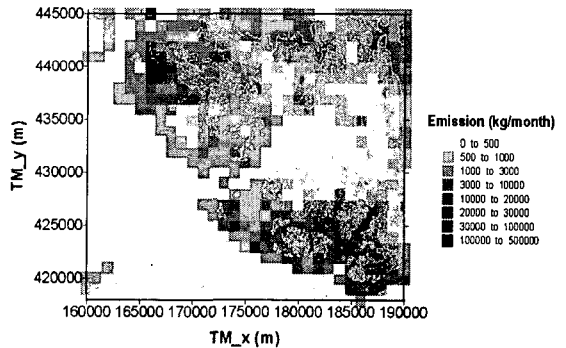


Fig. 5. Gridded emission rate as the input data of 3-D dispersion model for September, 2002.

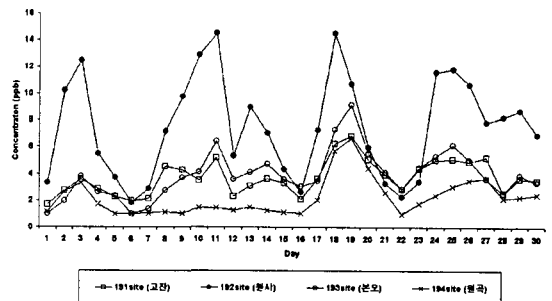


Fig. 6. SO<sub>2</sub> concentrations measured from the automatic air quality monitoring site (operated by Korean Ministry of Environment) in Ansan city for September, 2002.

Table 1. Statistics for hourly SO<sub>2</sub> concentrations observed and modeled on 192 Site, Wonsi-Dong at September, 2002

SO <sub>2</sub> (ppb)	OBS.		MODEL		Regression			Bias	IOA	RMSE	Sys. RMSE	Unsys. RMSE	Skill_e	Skill_v	Skill_r
	AVG	SD	AVG	SD	b	a	r <sup>2</sup>								
STN # 192	8.95	7.76	11.45	9.32	1.20	0.70	0.43	2.50	0.66	9.56	9.97	2.94	1.29	1.20	1.23

Note: AVG=arithmetic average; SD=standard deviation; b=slope; a=intercept; IOA=index of agreement (close to 1 shows skill); Sys. RMSEs=systematic root mean square error; Unsys. RMSEu = unsystematic root mean square error; Skill\_e = Unsys.RMSEu /observed SD (<1 shows skill); Skill\_v = model SD/observed SD (close to 1 shows skill); Skill\_r = RMSE/observed SD (<1 shows skill).

을 알 수 있다. 한편 9월 중 3일, 10일 그리고 18일의 경우 반월 공단 내에 위치한 원시동 site에서 12 ppb이상의 일평균 농도가 관측되었으며 거의 9월 한 달 동안 다른 세 관측소 (본오, 고잔, 원곡동)에 비해 현저히 높은 농도가 관측되었다. 본 연구에서는 원시동 관측소 지점에 대한 자세한 분석이 수행되었다.

Fig. 7과 Table 1에 원시동 관측소 지점에서 모의된 SO<sub>2</sub> 농도와 관측 값의 산포도, 회귀선 그리고 통계 분석을 제시하였다. 전체적으로 모델이 관측에 비해 20 % (회귀선의 기울기) 정도 그리고 농도의 절대값 (bias value)으로는 2.5 ppb 정도 높게 모의하는 것으로 나타났다. 그리고 모델의 정확도를 나타내는 상관계수 (r)와 일치도 (IOA)는 각각 0.427과 0.66을 보이고 있다. 모델의 부정확성은 배출량 산정에서의 시간적 분해능이 낮음과 모델의 특성에 기인한 것으로, 이는 배출량의 자료를 월 누적 배출량을 사용하여 일별로 환산하였기 때문에 실제 배출된 일별 배출량과는 약간의 차이가 있어 모델에서 모의된 농도의 절대값에 차이가 있을 수 있으며, 본 연구에서 사용된 모델에는 침적과정이 제외되어 있어 관측보다 조금 높게 모의한 것으로 사료된다.

모델에서 모의된 원시동 site 지점의 9월 한 달간 일평균 농도를 Fig. 8에 나타내었다. 전체적인 평균 농도 패턴은 5일~7일 사이, 15일~17일 그리고 21일~23일의 저 농도를 나타내는 날과 이상에서 언급한 고 농도를 나타내는 날을 유사하게 모의하고 있음을 확인할 수 있는데 이는 상세하게 잘 모의된 기상장을 이용하였기 때문으로 사료된다.

그리고 Fig. 9에 원시동 site에서의 관측 그리고 모의된 농도의 9월 3일, 10일 그리고 18일의 경우에 대하여 그 일 변화를 나타내었다. 9월 3일의 경우는 주간예 서풍계열의 동서 바람성분의 값이 4 m/s에 이르며 야간에는 1 m/s 이하로 약해지는 등의 해륙풍 순환을 보이고 있으며, 경계층의 높이는 1,000m에 이르고 있는 기상 조건을 가지며, 그 농도는 출

퇴근 시간인 0600~1000 LST와 1500~2100 LST에 고 농도 현상이 나타나는데 모델에서는 0700~1200 LST와 1600~1900 LST에 고 농도 현상이 나타나

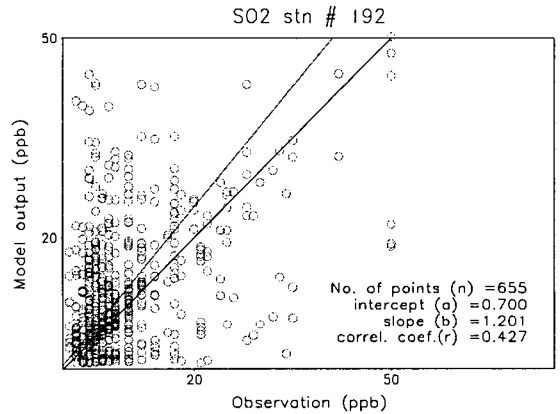


Fig. 7. Scatter diagram and regression line of hourly SO<sub>2</sub> concentrations observed and simulated by 3-D dispersion model at 192 site, which is located on Wonsi-Dong of Ansan city for September, 2002.

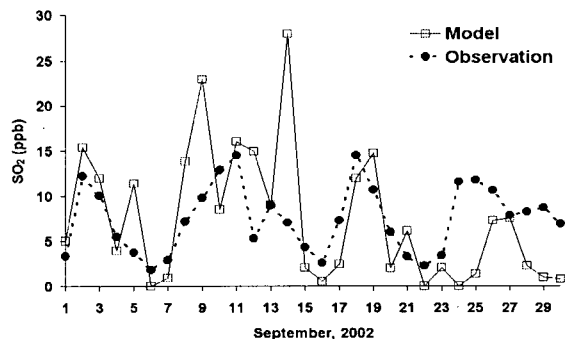
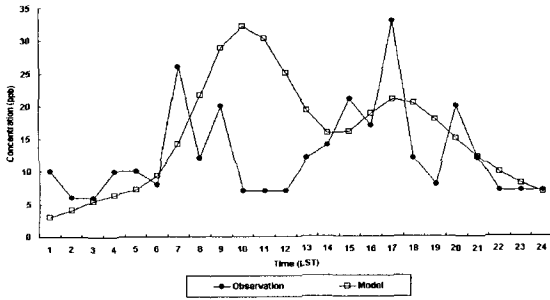


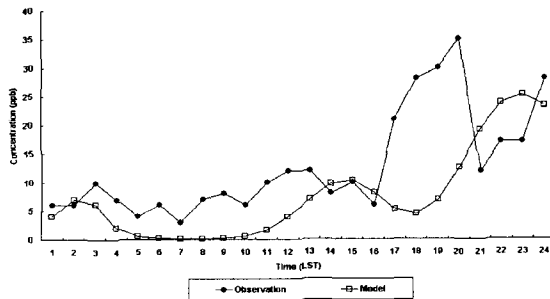
Fig. 8. Daily mean SO<sub>2</sub> concentrations observed and simulated by 3-D dispersion model at 192 site, which is located on Wonsi-Dong of Ansan city for September, 2002.



a) September 3, 2002



b) September 10, 2002



c) September 18, 2002

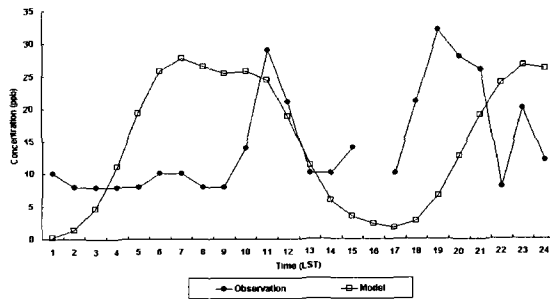


Fig. 9. Time series of measured and simulated SO<sub>2</sub> concentrations at 192 site, Wonsi-Dong.

고 있어 1~2시간정도의 시간 지연을 보이고 있다. 9월 10일과 18일의 경우에도 모델이 관측농도의 일변화를 패턴은 잘 모의하고 있으나 농도의 절대값은 차이가 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결론

중관규모 기상장을 생성하기 위하여 NCEP Re-analysis Meteorological Field, WMO 관측자료 (GTS data) 그리고 일명 MM5 (Fifth Generation NCAR/Penn State Mesoscale Model)을 도입하여 한반도에 대해 적용하였다. 여기서 생성된 중관규모 기상장과 기상청 지상 관측 자료를 이용하여 3차원

해륙풍 모델을 수행하여 격자간격 3 km 에 해당하는 기상장을 생성한 후 다시 1 km 격자 규모의 진단 기상장 모델을 사용하여 확산 모델의 입력자료로서의 국지 기상장을 생성하였다. 모의된 국지 규모의 바람장은 관측된 결과와 매우 유사한 결과를 나타내었으며, 국지순환의 특징으로는 중관규모의 강제력과 국지규모의 해륙풍 순환이 합하여져 나타나는 경향을 알 수 있었다. 이러한 특징은 연안지역에서의 오염물질의 수송 및 확산에서 매우 중요한 영향을 줄 수 있는 것으로 본 연구에서는 잘 모의된 국지 순환을 이용하여 확산 모델링을 수행하였다.

3차원 오일러리안 확산 모델을 이용하여 2002년 9월의 매일 매일의 SO<sub>2</sub>의 오염 농도를 모의하였으며 모의된 결과는 고농도가 나타나는 9월 3일, 10일 그리고 18일의 관측 결과와 비교하였다. 모델에서 모의된 농도의 일 평균값과 일변화 패턴이 관측된 자료와 유사한 패턴을 나타내었으나, 농도는 12배 정도 높게 모의되는 경향을 보였다. 이러한 모의 결과를 바탕으로 상세한 기상장의 생산이 확산 모델의 결과에 매우 중요한 영향을 미침을 알 수 있었으며, 확산 모델에서 모의된 오염 농도 값의 정확도를 향상시키기 위해서는 배출자료 및 모델 과정 중 하나인 침적 과정이 고려되어야 함을 알 수 있었다.

#### 감사의 글

이 논문은 2004년도 상지대학교 교내 연구비 지원과 안산환경기술개발센터의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고 문헌

- 1) 안산환경기술개발센터, 2004, 경인산업단지권역의 대기거동해석 및 대기오염물질 기여도 평가에 관한 기초 연구.
- 2) Anthes, R. A. and T. T. Warner, 1978, Development of hydrodynamic models suitable for air pollution and other mesometeorological studies, Mon. Wea. Rev., 106, 1045-1078.
- 3) Park, S. U., 1990, Results of a three-dimensional numerical model of land-sea breezes over South Korea, J. Kor. Meteor. Soc., 26(2), 78-103.
- 4) 김철희, 송창근, 2002, 4차원 자료동화 기법을 이용한 해안가 대기순환 수치 실험, 한국환경영향평가학회지, 11(2), 79-91.
- 5) Kim, B. G. and S. U. Park, 1993, Diagnostic modeling of wind and temperature profiles in the boundary layer, J. Kor. Meteor. Soc.,

- 29(4), 281-305.
- 6) Park, S. U., 1992, Estimation of wind variances in the boundary layer with results of the three dimensional land-sea breeze model over South Korea, *J. Kor. Meteor. Soc.*, 28(4), 435-453.
  - 7) Holtslag, A. A. M., 1984, Estimates of diabatic wind speed profiles from near surface eather observations, *Bound-Layer Meteor.*, 29, 225-250.
  - 8) Mellor, G. L. and T. Yamada, 1974, A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers, *J. Atmos. Sci.*, 31, 1791-1806.
  - 9) Sherman, C. A., 1978, A mass consistant model for wind field over complex terrain, *J. Appl. Meteor.*, 17, 312-319.
  - 10) Dickerson, M. K. and P. H. Gudiksen, 1983, Atmospheric studies in complex terrain. Technical progress report FY-1979 through FY-1983, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA.
  - 11) Toon, O. B., R. P. Turco, D. Westphal, R. Malone and M. S. Liu, 1988, A multidimensional model for aerosols: Description of computational analogs, *J. Atmos. Sci.*, 45, 2123-2143.
  - 12) Carmichael, G. R., L. K. Peters and T. Kitada, 1986, A second generation model for regional-scale transport / chemistry / deposition. *Atmos. Envir.*, 20, 173-188.
  - 13) Park, S. U. and C. H. Kim, 1999, A numerical model for the simulation of SO<sub>2</sub> concentrations in the Kyongin Region, Korea. *Atmos. Envir.*, 33, 3119-3132.
  - 14) Businger, J. A., J. C. Wyngaard, Y. Izumi and E. F. Bradley, 1971, Flux profile relationships in the atmospheric surface layer, *J. Atmos. Sci.*, 28, 181-189.
  - 15) Brost, R. A. and J. C. Wyngaard, 1978, A model study of the stably stratified planetary boundary layer, *J. Atmos. Sci.*, 35, 1427-1440.
  - 16) Blackadar, A. K., 1976, Modeling nocturnal boundary layer, *Proc. 3rd Symposium on Atmos. Turbulence, Amer. Meteor. Soc.*, 46-49.