

미세 격자 대기 확산 모델링을 통한 안산지역 PM10 고농도 사례 분석

송 동 웅 · 송 창 근*

상지대학교 환경공학과 · 서울대학교 지구환경과학부
(2003년 5월 19일 접수; 2003년 9월 23일 채택)

An Analysis of the Case related with High PM10 Concentrations Using a Fine Grid Air Dispersion Modeling in Ansan Area

Dong-Woong Song and Chang-Kuen Song*

Department of Environmental Engineering, Sangji University, Wonju 220-702, Korea
*School of Earth and Environmental Science, Seoul National University, Seoul 151-742
(Manuscript received 19 May, 2003; accepted 23 September, 2003)

In this study, the scenario for a numerical modeling of the fine grid scale air dispersion phenomena was proposed and an analysis of the special event which was occurred on September 3, 2002 was performed using by a coarse grid prognostic meteorological model, a fine grid diagnostic meteorological model and a fine grid air dispersion model.

Based on the results, we found that the local circulations, like as land-sea breeze, should be seriously considered for evaluating the high PM10 concentration event and for making the reduction policy of the major air pollutant emissions in Ansan area.

Key words : Coarse grid prognostic meteorological model, Fine grid diagnostic meteorological model, Fine grid air dispersion model, Local circulations, land-sea breeze

1. 서 론

최근 환경오염원이 주로 위치하는 연안지역에 대한 환경영향평가 및 대기질 관리 대책 수립에 대한 관심이 부각됨에 따라 지역규모의 국지풍 순환과 관계된 대기질 모델링의 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 국지순환이 탁월한 연안지역의 경우, 오염 물질의 단기 대기확산은 지표면의 불균질성으로 인해 일반적으로 확산모델로 널리 쓰이는 가우시안 단기 모델로서는 그 평가 체제 구축이 불가능하게 된다. 이는 해안가 부근에 산악이 위치하면 해륙풍 뿐 만 아니라 산곡풍이 겹쳐져 나타나기 때문에 국지 순환 양상이 아주 복잡하게 나타나게 되기 때문이다¹⁻³⁾. 따라서 이에 따른 대기 확산 양상

이 평평한 지역과는 아주 판이하게 나타나므로 국지 순환의 영향을 충분히 반영 및 모사 할 수 있는 대기 확산 평가 모델이 구축되어야 한다⁴⁻⁶⁾.

한편, 대기 확산 평가 모델은 오염원에서 배출된 특정 오염물이 지역 기상조건에 따라 확산되는 현상을 합리적으로 분석함으로써 피해지점을 정확히 도출하고 지점별 출현 농도를 정확히 평가하는 것과 더불어 오염원과 피해 가능지역의 지역특성에 대한 합리적 영향 평가를 위한 기초자료 제공 등의 역할을 하고 있다⁷⁾.

특히 대기오염 관련 민원이 끊이지 않는 안산 지역의 경우, 직접적인 영향을 미치는 대표적 공업단지 중 하나인 반월, 시화 공업단지는 4,000여 중소기업이 입주해 있으며 염색, 기계, 전자 및 도금 산업 등 연간 21조의 공산품을 생산하는 국가경제의 기반이 되고 있으나 각종 환경오염을 유발하여 오염물 생산단지라는 비난을 함께 받고 있으며, 공장과 주거지역이 인접하여 공단에서 발생하는 악취

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

및 부유 물질로 인한 인근 주민들로부터의 민원이 끊이지 않고 있다. 이와 함께 안산시 신길 지구의 경우 택지개발이 2003년 현재 진행 중이며, 고잔 지구의 경우는 아파트 단지가 건설되면서 인근 반월공단으로부터의 대기오염물질의 수송 및 확산으로 인해 시민의 건강과 생활에 막대한 지장이 예상되어 이에 대한 오염물질의 확산연구가 시급한 실정이다.^{8,9)}

따라서 본 연구에서는 안산지역에 대하여 특히 민원이 자주 제기되는 부유 물질(PM10)에 대하여 매우 복잡한 국지 순환 양상을 모의하는 데 적합한 미세 국지 규모(수평 격자 간격 100 m)의 대기확산 모델링 시나리오를 제시하고, 수치 모의한 결과와 관측된 자료를 바탕으로 안산지역의 국지순환과 미세 부유 물질의 분포 특성을 분석하고자 한다.

2. 연구 결과

2.1. 미세 국지 규모 대기확산 모델링 시나리오

미세 국지 규모 대기확산 모델링을 위한 시나리오를 Fig. 1에 제시하였다. 시나리오를 살펴보면, 기상장 모델 수행 부분과 확산모델 수행 부분으로 크게 두 부분으로 나눌 수 있다.

기상장 모델 수행은 성긴 격자 예단(3 km 격자, 수도권 영역) 모델링(Course Grid Prognostic Modeling)^{1,10,11)}과 미세 격자 진단(100 m 격자, 분석 영역) 모델링(Fine Grid Diagnostic Modeling)¹²⁾으로 나누어 수행하였다. 여기서 기상청 지상 및 상층관측자료와 지형 및 지표 이용도 자료를 이용하여 미세 격자 진단 모델링을 바로 수행 할 수도 있지만 앞서 언급한 분석 영역내의 국지 순환 특히, 해륙풍 순환의 중요성 때문에 국지 순환의 3차원 구조를 잘 모의 할 수 있는 3차원 해륙풍 모델을 성긴 격자에 대해 수행하고 이 결과를 이용하여 3차원 미세 격자

진단 모델링을 수행하여 분석 영역에 대한 확산 모델링의 입력자료 중 하나인 기상장을 산출하였다.

또한 국지 순환이 탁월한 지역에서 오염물질의 수송 및 확산 현상을 수치 해석을 위하여, 복잡한 지형과 기상장을 잘 고려할 수 있는 오일러리안 대기 확산 모델¹³⁾을 사용하였다. 그러나 일반적으로 오일러리안 모델의 경우, 고정된 격자를 가정하고 오염물질의 수송 및 확산 방정식을 일반적으로 유한 차분법(FDM, Finite Difference Method)을 이용하여 그 해를 구하기 때문에 수치 계산에 따른 안정성 문제와 수치 해석 과정에서 인위적인 확산(e.g. numerical diffusion, overshooting problem and spurious oscillations)과 같은 수치 오차를 유발시킬 뿐만 아니라, 각 격자 내의 오염 물질의 농도를 일정하게 취급하기 때문에 수평 격자 간격이 각 배출원 간의 거리보다 큰 경우에 배출원과 인접한 지역의 경우 많은 오차가 발생하는 것으로 알려져 있다.^{14,15)} 따라서 본 연구에서 사용한 오일러리안 모델에서는 수치오차 문제를 최대한 피하기 위하여 유한요소법(FEM, Finite Element Method)을 이용하여 수송 및 확산 방정식의 해를 구하고 있다.

2.2. 오일러리안 대기 확산 모델

2.2.1. 질량 보존 방정식

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

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x}(uC) - \frac{\partial}{\partial y}(vC) - \frac{\partial}{\partial z}(wC) + \frac{\partial}{\partial x}\left(K_H \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_H \frac{\partial C}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_z \frac{\partial C}{\partial z}\right) + (P - L) \tag{1}$$

여기서

- [1] 항 : 화학 종의 농도의 시간적 변화량
- [2] 항 : 수평 바람성분(u, v)에 의한 이류항
- [3] 항 : 연직 바람성분(w)에 의한 이류항
- [4] 항 : 수평 확산항
- [5] 항 : 연직 확산항
- [6] 항 : 배출량에 의해 생성되는 과정
- [7] 항 : 침착 과정에 의한 소멸되는 과정을 각각 나타낸다.

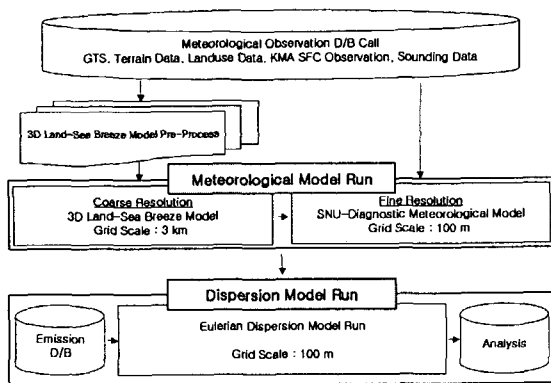


Fig. 1. Scenario for dispersion modeling.

2.2.2 수송 및 확산 계산

질량보존 방정식의 해를 구하는데 가장 어려운 점은 이류항의 계산이다. 이류 방정식은 그 수치 해법에 따라 종종 계산된 최고 농도의 위치가 실제의 위치에서 벗어나는 위상 오차나 최고 농도의 감소를 가져오는 수치적 확산이 문제시된다. 계산 방법에 따라서는 오염물의 수치 해가 음의 농도로 나타나는 경우가 있고 또 농도의 경도(gradient)가 아주 큰 경우에는 오차가 크게 될 수 있는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 여러 가지 방법이 연구되고 있는데 특히, 전방차분법의 문제점인 인위적 확산을 반복적으로 보정하는 방법^{16,17)}, Chapeau function을 이용한 유한 요소법¹⁸⁾으로 이류항을 수치적으로 계산하는 방법이 제시되었다¹⁹⁾. 또 의사 스펙트럼 방법을 이용하는 방법²⁰⁾과 중앙차분법을 변형하여 음의 수치해를 보정하는 방법²¹⁾ 등 여러 가지가 연구되어 왔다.

여기서 반복적 전방 차분법은 계산 시간이 빠른 반면 여전히 수치적 확산이 일어나는 단점이 있고 의사 스펙트럼 방법은 수치적 확산이 적고 정밀도는 높으나 계산 시간이 많이 소요되는 것이 단점으로 지적되고 있다. 따라서 본 연구에서는 약한 음의 경도가 나타나는 단점을 보완한 유한 요소법을 이용하였으며 계산의 효율성과 수치 잡음이 적게 3차원 방정식을 일차원적으로 나누어 푸는 시간 분리(time splitting) 방법²²⁾을 사용하였다. 유한 요소법과 시간 분리 해법의 자세한 설명은 Park 과 Kim¹³⁾에 주어져 있다.

연직 확산항은 Crank-Nicolson의 암시적 유한차분법(implicit finite differencing)으로 계산하였으며, 수평 확산항은 Mahrer 와 Pielke²³⁾의 다음과 같은 경험식을 이용하였다.

$$K_H = 0.36(\Delta x \Delta y) \left[\left(\frac{du}{dx} \right)^2 + \left(\frac{dv}{dy} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

여기서 Δx 와 Δy 는 각각 x 와 y 방향으로의 격자 거리이다.

지표층에서의 연직 확산 계수는 Monin-Obukhov 상사이론(similarity theory)을 사용하여

$$K_z = \frac{kz u_*}{\phi_h \left(\frac{z}{L} \right)} \quad (3)$$

로 계산하였다. 여기서 k 는 Von-Karman constant 이고 L 은 MoninObukhov length scale 이고 u_* 는 마찰 속도 그리고 $\phi_h \left(\frac{z}{L} \right)$ 는 무차원 연직구조 함수로서 다음과 같이 계산된다²⁴⁾.

$$\begin{aligned} \phi_h &= 0.74 + 4.7 \frac{z}{L} && \text{for } \frac{z}{L} > 0 \\ \phi_h &= 0.74 && \text{for } \frac{z}{L} = 0 \\ \phi_h &= 0.74 \left(1 - 9 \frac{z}{L} \right)^{-1/2} && \text{for } \frac{z}{L} < 0 \end{aligned} \quad (4)$$

지표층 위에서 대기 혼합층까지는 대기 안정도가 안정한 경우 ($\frac{z}{L} \geq 0$) 지표층의 연직 확산 계수를 연장하여 사용할 수 있다²⁵⁾. 즉

$$K_z = \frac{kz u_* \left(1 - \frac{z}{z_i} \right)^{3/2}}{\phi_h \left(\frac{z}{L} \right)} \quad (5)$$

여기서 z_i 는 혼합층의 높이이다.

대기가 안정한 경우 지표층 위의 대류 경계층에서는 다음과 같이 계산하였다. 즉

$$K_z = kw_* z \left(1 - \frac{z}{z_i} \right) \quad (6)$$

여기서 w_* 는 대류 속도를 나타낸다.

대기 경계층 위의 연직 확산 계수는 연직 바람 쉼어와 리처드슨 수(R_i)를 이용한 다음과 같은 결과식²⁶⁾을 이용하였다.

$$K_z = K_0 + S (k - l)^2 \frac{R_c - R_i}{R_c} \quad (7)$$

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

2.2.3. 경계조건

경계 조건은 모델 경계에서 오염물질이 자유로이 빠져나가고 들어 올 수 있는 다음의 조건을 이용하였다¹⁹⁾.

$$\begin{aligned} \left(u_1 + \frac{K_1}{dx_2} \right) (C'_1 + C_1^{'+1}) &\text{ in the first boundary} \\ \left(u_N + \frac{K_N}{dx_N} \right) (C'_N + C_N^{'+1}) &\text{ in the } N^{\text{th}} \text{ boundary.} \end{aligned} \quad (8)$$

2.3. 연구 대상 영역의 지형과 기상 관측망

Fig. 2는 분석 영역 지형과 기상 관측망을 나타낸 것이다. 분석 영역의 북쪽과 북동쪽으로 100 ~ 300 m의 고도를 갖는 상대적으로 높은 산악지역이 위치하고 서쪽과 남서쪽으로는 서해에 인접해 있으며 특히, 서쪽에서부터 시흥시 소재 시화공단이 위치하며 그 남동쪽으로는 반월 공단이 그리고 동쪽으로는 안산 시가지가 연속하여 위치하고 있다.

분석 영역내의 행정구역으로는 안산시와 시흥시

가 포함되어 있다. 먼저, 안산시의 면적은 145 km²이며 평균고도가 50 m, 고도가 높은 지역이 260 m 정도의 고도를 갖으며 서해안과 접해있는 특성 때문에 최저고도는 0 m로 나타났다. 시 북부로는 시흥시가 인접하고, 동부에는 군포시가 인접하고 있는데, 분석 영역 밖으로 시의 동북부에 해발 429 m 수리산(修理山)이 위치해 군포시와 인접한 시 경계의 고도가 다른 지역에 비해 상대적으로 조금 높고 그 외에 시흥시와 인접한 북쪽지역이나 수원시와 경계하고 있는 남쪽지역은 평탄한 지형으로 확인되었다. 한편, 시흥시의 전체 면적은 30 km²이며 전체의 지형고도가 200 m를 넘는 지역이 없고, 평균고도는 40 m 내외, 높은 지역은 170 m 정도, 가장 낮은 고도는 0 m로 나타났다. 시흥시를 중심으로 시화공단 남서쪽은 서해와 접해 있으며 동쪽으로는 인천, 부천시, 광명시, 안양시 안산시 등의 도시들이 경계하고 있는데, 그 중 안산시와 인접한 도시 남서쪽의 고도가 높으며, 또한 안양시와 경계에서도 다른 지역에 비해 높은 고도를 갖는다. 그 외의 지역은 평균 고도가 20 m 정도로 그리 높지 않은 것을 알 수 있다.

그리고 A 지점은 신길지구로서 택지개발사업이 예정되어 있으며, B 지점은 택지 개발사업이 완료되어 고잔 신시가지가 조성되어 대규모 아파트단지가 위치하여 있다. 분석 영역 내의 기상청 산하 기상관측소(Table 1)를 살펴보면 무인자동관측소로 분석 영역내의 시흥AWS(지점번호 : KMA(565)) 그리고 안산AWS(지점번호 : KMA(545))를 들 수 있다.

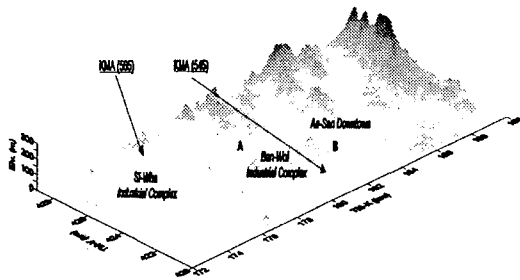


Fig. 2. Topography and KMA observation network of modeling region.

Table 1. Informations of KMA observation site

Site #	Lat. (N)	Lon. (E)	Location
KMA (545)	37.300	126.800	Ansan
KMA (565)	37.350	126.780	Siheung

2.4. Worst Case Day 선정

2002년 안산 지역의 환경부 대기오염 자동모니터링 자료 중 PM10의 경우에 24시간 평균 환경기준치(Table 2)인 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하는 날을 Table 3에 나타내었다. 여기서 황사 현상이 빈번한 겨울철과 봄철의 경우를 제외하고 4개의 측정소 중 모두 그 기준을 초과하는 날은 9월 3일로 나타났으며 그 값은 고잔동, 원시동, 본오동 그리고 분석지구인 A 지점에 가장 근접한 원곡동 측정소에 대해 각각 180, 333, 293 그리고 255 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 나타내고 있다. 따라서 PM10의 경우 본 연구에서는 Worst Case Day를 9월 3일로 채택하여 미세 격자 대기 확산 모델링을 수행하고자 한다.

9월 3일의 종관 규모의 일기 개황을 살펴보기 위하여 기상청 발표 00 UTC (0900 LST) 지상 일기도를 Fig. 3에 제시하였다. 9월 3일의 경우는 우리나라가 가을철의 전형적인 종관 상태인 이동성 고기압(중국 북부와 몽고지방에 위치한 고기압 대 그리고 일본 동쪽에 태평양 상에 위치한 고기압)의 사이에 위치하고 있어 바람이 매우 약하며 대부분의 지역이 맑은 날씨를 보이고 있다. 따라서 대기는 매우 안정한 상태임을 추정할 수 있다.

한편 Fig. 4는 분석 영역 내에 위치한 기상청 AWS(안산(545), 시흥(565))의 풍향과 풍속을 나타내었다. 주간에는 약한 서풍(해풍 계열)이 두드러지며 야간에는 남동풍에서 동풍(육풍 계열)의 약한 바람을 나타내고 있다. 특이한 점은 분석 지역과 가장 인접한 기상청 정규 기상관측소인 인천(지점번호 :

Table 2. National ambient air quality standards

Pollutant	Averaging Period	National ambient air quality standards
Sulfur Dioxide (SO ₂)	1-hr	0.15 ppm
	24-hr	0.05 ppm
	Annual	0.02 ppm
Carbon Monoxide (CO)	1-hr	25.00 ppm
	8-hr	9.00 ppm
Nitrogen Dioxide (NO ₂)	1-hr	0.15 ppm
	24-hr	0.08 ppm
	1-hr	0.05 ppm
Particulate Matter (10 microns or less) (PM10)	24-hr	150.00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	Annual	70.00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Ozone (O ₃)	1-hr	0.10 ppm
	8-hr	0.06 ppm
Lead (Pb)	Annual	0.50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

KMA(112))의 9월의 30년 평균 풍속이 2.6m/s인 것을 감안하면 하루 중일 매우 약한 바람(평균풍속 : 안산 - 0.8m/s, 시흥 - 0.5m/s)을 나타낸다는 점이다. 두 관측소 자료 중 최대 풍속은 주간 해풍이 탁월할 시점(1300 ~ 1800 LST)에 1 ~ 3m/s를 나타내고 있다. 이러한 약한 풍속과 안정한 대기 상태 등의 특징은 수송 및 확산이 효율적으로 이루어

지지 못함으로 인하여 배출 원에 근접한 지역의 오염 농도가 매우 높게 나타날 수 있음을 암시하고 있다.

2.5. 대기 확산 모델링

2.5.1. 배출량 자료

모델의 주요 입력 변수인 배출량 자료(Fig. 5)는 2002년 9월의 PM10 점/면 오염원 자료를 이용하였다.

Table 3. Date reported above national ambient air quality standards and the concentrations at automatic air quality monitoring network for PM10

Site #	year	month	dat	concent-ration	Site #	year	month	dat	concent-ration
131191	2002	1	12	179.2	131192	2002	6	5	167.2
131191	2002	1	13	162.2	131192	2002	6	6	188.7
131191	2002	2	4	165.4	131192	2002	9	2	160.2
131191	2002	3	17	294.6	131192	2002	9	3	333.0
131191	2002	3	18	210.3	131192	2002	9	4	169.9
131191	2002	3	19	153.9	131192	2002	9	11	150.5
131191	2002	3	21	353.0	131192	2002	9	19	159.3
131191	2002	3	22	431.1	131192	2002	10	10	152.5
131191	2002	4	8	671.1	131192	2002	10	17	270.7
131191	2002	4	9	481.2	131192	2002	10	18	218.4
131191	2002	4	10	157.3	131193	2002	1	11	191.0
131191	2002	4	17	187.8	131193	2002	1	12	172.4
131191	2002	9	3	179.5	131193	2002	1	13	177.2
131192	2002	1	4	150.6	131193	2002	2	4	210.5
131192	2002	1	11	194.8	131193	2002	2	5	188.9
131192	2002	1	12	206.2	131193	2002	3	1	221.7
131192	2002	1	13	203.1	131193	2002	3	2	185.5
131192	2002	2	4	185.2	131193	2002	3	17	278.0
131192	2002	2	5	199.8	131193	2002	3	18	200.4
131192	2002	2	7	161.0	131193	2002	3	20	163.9
131192	2002	3	1	189.0	131193	2002	3	21	388.6
131192	2002	3	2	193.5	131193	2002	3	22	369.5
131192	2002	3	17	346.7	131193	2002	3	26	164.8
131192	2002	3	18	254.9	131193	2002	4	8	490.7
131192	2002	3	19	181.7	131193	2002	4	9	367.1
131192	2002	3	20	187.0	131193	2002	6	6	168.0
131192	2002	3	21	599.6	131193	2002	9	3	293.3
131192	2002	3	22	478.7	131194	2002	2	4	165.2
131192	2002	3	26	164.8	131194	2002	3	17	199.6
131192	2002	4	2	213.0	131194	2002	3	18	158.0
131192	2002	4	8	665.1	131194	2002	3	21	425.0
131192	2002	4	9	424.3	131194	2002	3	22	317.5
131192	2002	4	10	202.0	131194	2002	4	8	508.2
131192	2002	4	12	173.9	131194	2002	4	9	366.4
131192	2002	4	17	240.5	131194	2002	6	6	158.4
131192	2002	4	19	170.3	131194	2002	9	3	255.4
131192	2002	4	20	168.9	131194	2002	10	18	159.5

모델의 입력 배출량은 100 m x 100 m 격자 내에 포함되는 점 오염원의 월별 배출량을 모두 합하여 격자 면적 ($10^4 m^2$)으로 나누어 각 격자별로 할당 한 후, 그 격자의 면 오염원의 월별 배출량과 합산 한 후 한 달에 해당하는 날 수로 나누어 일별 총 배출량을 산출하였다.

그리고 배출량의 일 변화는 PM10의 경우 이동 오염원의 영향이 매우 탁월하기 때문에 NO_x에 대한 발생원 별 조성비 자료를 적용하여 그 배출량의 일변화를 산출한 결과²⁷⁾를 사용하여 적용하였다.

영동고속도로와 서해안 고속도로가 교차하는 지역인 부곡동 일대와 서안산 IC 부근에 5,000 kg/(month · km²) 이상의 가장 높은 배출량을 나타내며 안산시를 관통하는 중앙로를 따라 높은 배출량을 나타내고 있다. 또한 시화 공단 영역에서도 높은 배출량을 나타내고 있다.

2.5.2. 모델링 결과

PM10에 대하여 2002년 9월 3일의 경우, 3차원 해륙풍 모델, 3차원 진단 미세 기상장 모델 그리고 오일러리안 대기 확산 모델을 수행(Table 4)하여

Fig. 6에 모델 영역의 지형 고도와 3차원 진단 미세 기상 모델의 결과 중 지상 바람장 그리고 오일러리안 대기 확산 모델의 결과인 PM10의 지상 농도장을 3시간 간격으로 나타내었다. 여기서 지상 바람장은 표출의 편의를 위하여 6개의 격자 간격 (600 m) 별로 표출하였으며, 농도장은 모든 격자에 대한 값을 이용하여 표출하였다.

바람장의 경우 0900 LST까지는 육풍 계열의 바람이 매우 약하게 나타나며 이 시각 이후부터 1200 ~ 1800 LST에 해풍 계열의 바람이 그 전 시각대의 육풍에 비해 상대적으로 강하게 나타나 내륙으로 진입함을 알 수 있다. 또한 2100 LST에 이르러서는 그 강도가 현저히 약해지면서 육풍 계열의 바람으로 바뀌고 있음을 확인 할 수 있다. 여기서 국지 순환의 패턴이 바뀌는(육풍 계열 → 해풍 계열 그리고 해풍 계열 → 육풍 계열) 0600 ~ 0900 LST와 1800 ~ 2100 LST에는 풍속이 매우 약해짐을 알 수 있다.

그리고 농도장의 경우 전 시간대에 배출량의 패턴(Fig. 5)과 매우 유사한 패턴을 나타내고 있는데

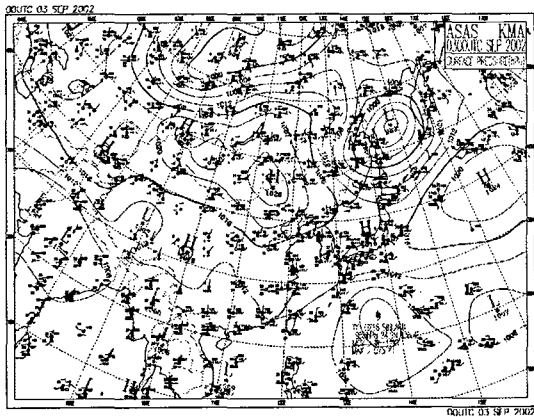


Fig. 3. Surface weather chart (September 3 2002).

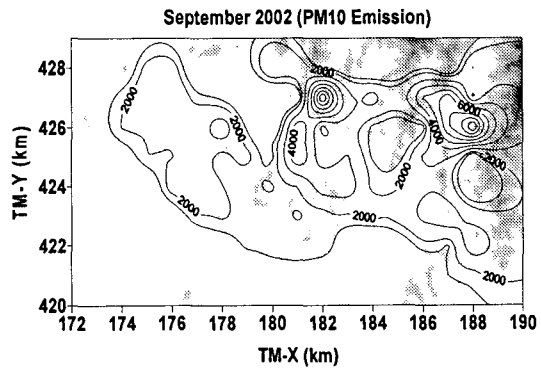


Fig. 5. Monthly emission amounts as a input data of the dispersion modeling (September 3 2002, unit = [kg/ (month · km²)]).

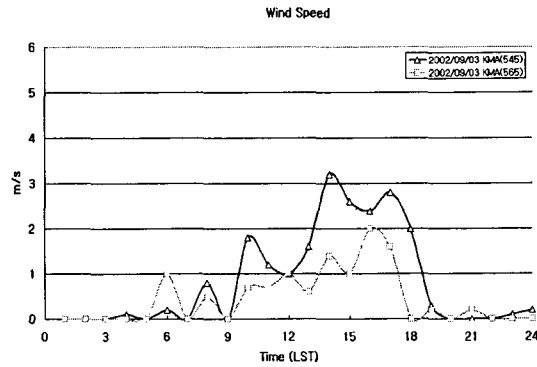
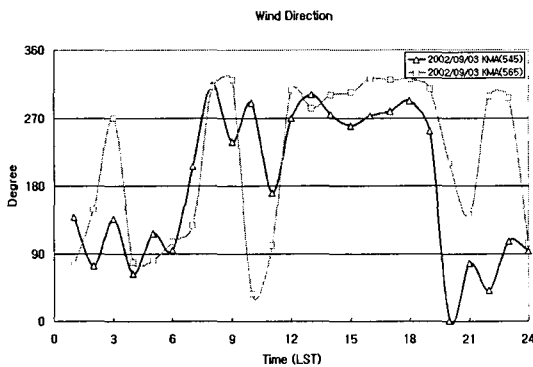


Fig. 4. Diurnal variation of wind direction and speed observed at KMA sites (September 3 2002).

이는 9월 3일의 경우 풍속이 전체적으로 약한 중관 상태 그리고 안정한 대기 상태와 관련이 있다. 0300 ~ 0600 LST에는 주요 배출원 지역을 제외하고는 $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하의 농도를 나타내지만, 0900 LST에는 국지 순환의 패턴이 바뀌는 시간대의 매

우 약한 풍속과 출근 시간대의 많은 교통량에 따른 높은 배출량으로 인하여 배출원 주변 지역을 중심으로 매우 넓게 $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 농도를 나타내고 있음을 확인 할 수 있다. 그리고 1200 ~ 1500 LST에는 오전 시각대의 매우 약한 풍속에 비해 해풍 계열의 상대적으로 강한 풍속과 혼합고가 성장함에 따른 효율적인 수송 및 확산에 의하여 그 농도가 전체적으로 낮아지는 추세를 보이고 있다. 한편 1800 LST ~ 2100 LST에는 오전 시간대와 마찬가지로의 원인으로 그 농도가 높아지고 있지만 2400 LST에 이르러서는 배출량의 감소로 인하여 농도가 낮아지는 경향을 보이고 있다.

Table 4. Conditions for three-dimensional Eulerian air dispersion model simulation

Parameters	Definition
Grid number	244 × 98
Horizontal grid size	100 m
Initial time	2002/09/03 0001 LST
Equation	3-D pollutant mass conservation equation
Vertical coordinate	Terrain-following coordinate
Vertical layers	13 layers (10, 50, 100, 200, 400, 600, 800, 1000, 1500, 2000, 3000, 4000, 5000 m)
Grid structure	Staggered structure
Advection scheme	Finite element Galerkin technique
Numerical technique	Time splitting technique
3-D wind field	3-D land sea breeze model and 3-D diagnostic meteorological model
Observation Site	KMA AWS (2 stations)
Horizontal diffusivity	Maher and Pielk
Dry deposition velocity	Not included
Vertical diffusivity	Brost and Wyngaard
Integral time increment	30 seconds
Initial mixing height	300 m
Spin up times	1 day simulation

Fig. 7에는 안산 신길 지구인 A 지역과 고잔동 신도시 지역인 B 지역에 대해 모델에서 모의된 농도를 시간대 별로 나타내었으며, 이 결과를 비교하기 위하여 Fig. 8에 안산지역 환경부 자동 모니터링 관측자료를 나타내었다. 환경부 관측자료 중 특히 A 지역과 인접한 원곡동 측정소의 자료를 살펴 보면, 1200 ~ 1300 LST를 제외한 전 시간대에 $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 높은 농도를 나타내고 있으며 특히 0900 ~ 1100 LST와 1700 ~ 1800 LST에 거의 $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 이르는 가장 높은 농도를 보이고 있다. 한편 모델 결과에서는 안산 신길 지구인 A 지역에 0800 ~ 1000 LST에 $200 \sim 250 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 가장 높은 농도를 나타내며 1800 ~ 2100 LST에 $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 높은 농도 값을 보이고 있다.

관측자료와 모델 결과를 비교해 보면 최대 값을 나타내는 시간대를 모델이 잘 모의하고 있음을 알 수 있다. 그리고 전체적인 농도 값 역시 대체적으로 잘 모의하고 있다. 그러나 모델 결과의 값이 약간 낮게 모의되고 있음을 확인 할 수 있는데 이는 특정 날에 대한 배출량 자료의 확보가 어렵기 때문에 한 달의 총 배출량 자료를 사용함에 따른 부정

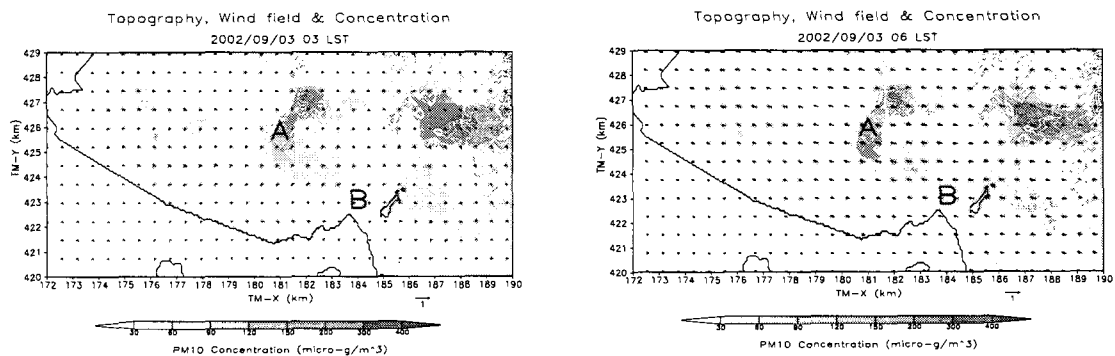


Fig. 6. Topography, Surface Wind Field and Surface Concentration Field of PM10 calculated by Fine Mesh Meteorological Model and Dispersion Model.

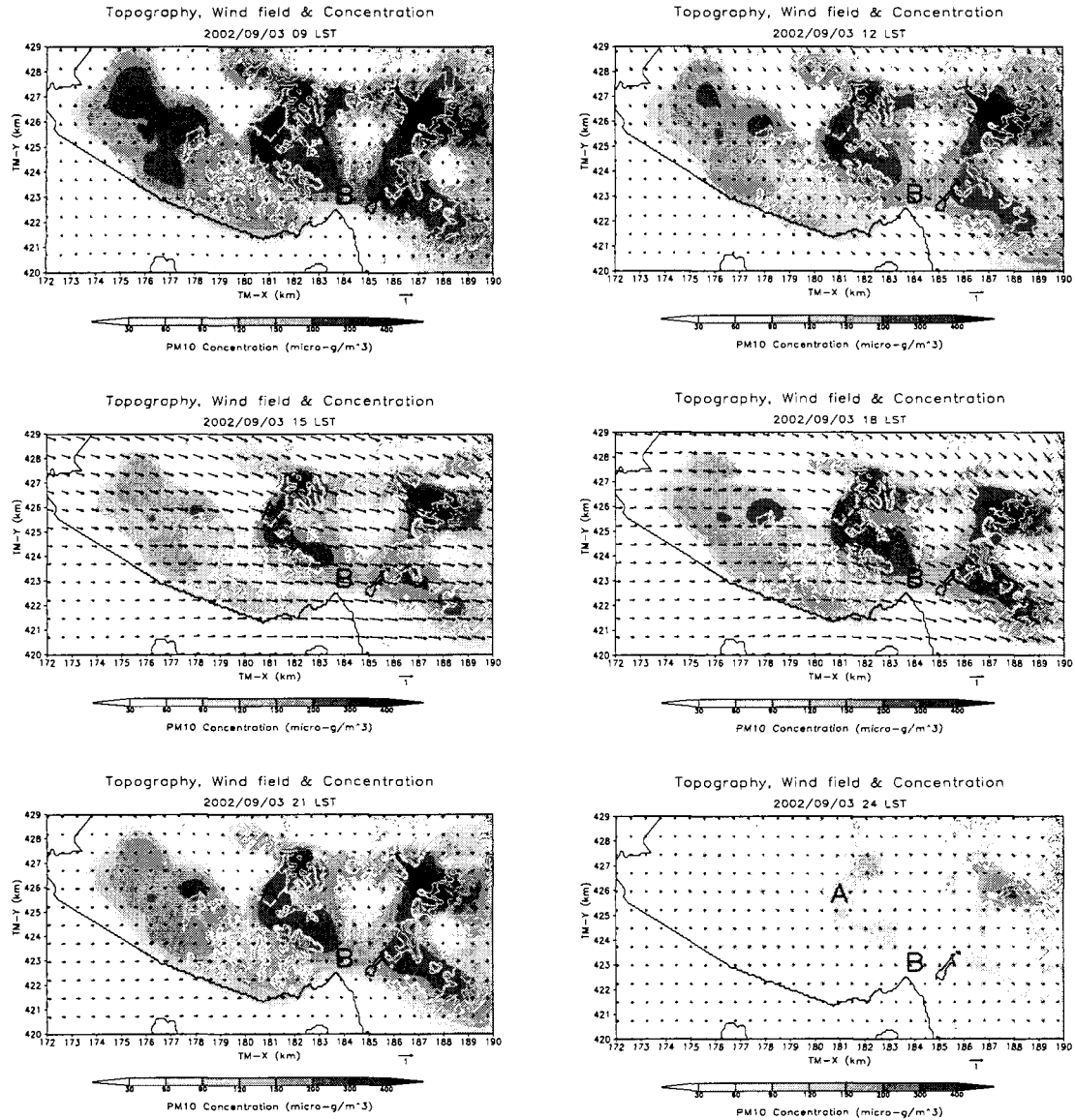


Fig. 6. continued.

확성에 기인한 것으로 사료된다.

결과적으로 2002년 9월 3일의 경우, 효율적인 수송 및 확산이 잘 이루어지지 못하는 중관 상태(약한 풍속, 안정한 대기상태)와 탁월한 해륙풍 순환 때문에 국지순환이 바뀌는 시점(육풍 계열 → 해풍 계열 그리고 해풍 계열 → 육풍 계열)인 0600 ~ 0900 LST와 1800 ~ 2100 LST에는 풍속이 매우 약해지는 효과와 그 시간대에 출퇴근 교통량의 증가로 인한 배출량의 증가 효과가 맞물려 저서 매우 높은 농도 값을 보이는 특징이 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 3차원 성긴 격자 해륙풍 모델, 3차원 미세 격자 진단 모델 그리고 유한 요소법을 채택한 오일러리안 대기 확산 모델을 이용하여, 안산지역에 대하여 부유 물질(PM10)의 미세 국지 규모(수평 격자 간격 100 m)의 대기확산 모델링 시나리오를 제시하고, 2002년 안산 지역의 환경부 대기 오염 자동모니터링 자료 중 PM10의 경우에 24시간 평균 환경기준치인 $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하는 날 중 황사 현상이 빈번한 겨울철과 봄철의 경우를 제외하

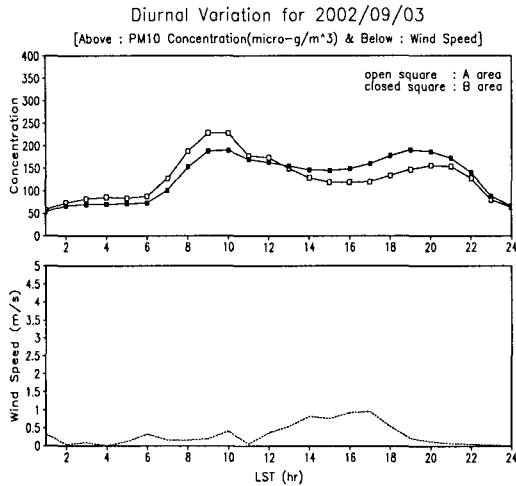


Fig. 7. Diurnal variation of calculated surface concentration of PM10 and wind speed for A and B region.

고 4개의 측정소 중 모두 그 기준을 초과하는 날인 2002년 9월 3일을 Worst Case Day로 선정하여 미세 격자 대기 확산 모델링을 수행하였다.

그 결과 안정한 중관 상태와 해륙풍 순환이 바뀌는 시점(육풍 계열 → 해풍 계열 그리고 해풍 계열 → 육풍 계열)에서의 풍속이 매우 약해지는 효과 그리고 출퇴근 교통량의 증가로 인한 배출량의 증가 효과 등이 오염농도를 높이는 역할을 하는 것으로 나타났으며 그 결과는 관측자료와 잘 일치하였다.

따라서 해륙풍이 탁월한 안산 지역과 같은 연안 지역에서는, 배출량이 증가하는 시간대 그리고 약한 풍속을 나타내는 국지 순환이 전환되는 시간대가 서로 겹치지 않도록 배출량 조절이 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 2001년도 상지대학교 교내 연구비 지원과 안산환경기술개발센터의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- 1) 김철희, 송창근, 2002, 4차원 자료동화 기법을 이용한 해안가 대기순환 수치 실험, 한국환경영향평가학회지, 11(2), 79-91.
- 2) Atkinson, B. W., 1981, Mesoscale Atmospheric Circulation. London, Academic Press, 495pp.
- 3) Mahrer, Y. and R. A. Pielke, 1977, The effects of topography on sea and land breezes in two-dimensional numerical model, Mon. Wea.

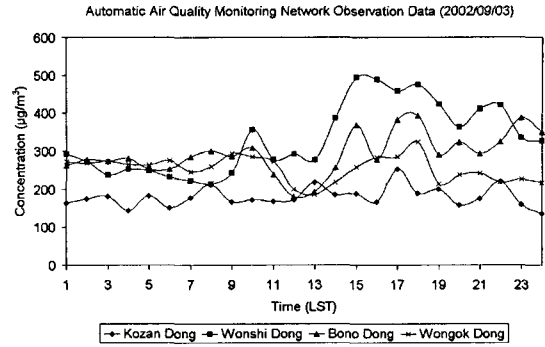


Fig. 8. Diurnal variation of measured surface concentration of PM10 at automatic air quality monitoring network.

Rev., 105, 1151-1162.

- 4) Estoque, M. A., 1961, Theoretical investigation of the sea breeze, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 87, 136-146.
- 5) Park, S. U. and I. H. Yoon, 1989, A Two dimensional numerical modeling of land and sea breezes as a function of prevailing synoptic winds, J. Kor. Meteor. Soc., 25(2), 80-93.
- 6) Park, S. U. and I. H. Yoon, 1991, The characteristic features of local weather phenomena under the various synoptic winds over South Korea, J. Kor. Meteor. Soc., 27(2), 87-118.
- 7) 장영기, 송동웅, 1995, 국내 대기질 모델링의 현황과 발전방향, 한국대기보전학회지, 11(1), 1-14.
- 8) 경기 개발 연구원, 2000, 21C 경기 대기 보전 실천 계획, 621pp.
- 9) 국립환경연구원, 2001, 시화, 반월지역 악취원인 물질 규명을 위한 정밀조사보고서, 142pp.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) Park, S. U. and C. H. Kim, 1998, A numerical model for the simulation of SO₂ concen-

- trations in the Kyongin region, Korea, *Atmos. Environ.* 33, 3119-3132.
- 14) Peters, L. K., C. M. Berkowitz, G. R. Carmichael, R. C. Easter, G. Fairweather, S. J. Ghan, J. M. Hales, L. R. Leung, W. R. Pennell, F. A. Potra, R. D. Saylor and T. T. Tsang, 1995, The current state and future direction of Eulerian models in simulating the tropospheric chemistry and transport of trace species - A review, *Atmos. Environ.*, 29, 189-222.
 - 15) Russel, A. and R. Dennis, 2000, NARSTO critical review of photochemical models and modeling, *Atmos. Environ.* 34, 2283-2324.
 - 16) Smolarkiewicz, P. K., 1983, A simple positive definite advection scheme with small implicit diffusion, *Mon. Wea. Rev.*, 111, 479-486.
 - 17) Smolarkiewicz, P. K., 1984, A fully positive definite advection transport algorithm with small implicit diffusion, *J. Com. Phys.*, 54, 325-362.
 - 18) Haltiner, G. J. and R. T. Williams, 1980, Numerical prediction Dynamic meteorology, Wiley and Sons, 379pp.
 - 19) 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.
 - 20) Bartnicki, J., 1989, A simple filtering procedure for removing negative value from numerical solutions of the advection equation, *Environmental Software*, 34, 187-207.
 - 21) Bott, A., 1989, A positive definite advection scheme obtained by nonlinear renormalization of the advection fluxes, *Mon. Wea. Rev.*, 117, 1006-1015.
 - 22) 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.
 - 23) Mahrer, Y. and R. A. Pielke, 1977, A numerical study of the airflow over irregular terrain, *Beitr Phys. Atmos.*, 50, 96-113.
 - 24) 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.
 - 25) Brost, R. A. and J. C. Wyngaard, 1978, A model study of the stably stratified planetary boundary layer, *J. Atmos. Sci.*, 35, 1427-1440.
 - 26) Blackadar, A. K., 1976, Modeling nocturnal boundary layer. Proc. 3rd Symposium on Atmos. Turbulence, Amer. Meteor. Soc., 46-49
 - 27) 한진석, 김병곤, 김신도, 1996, 오존농도 시뮬레이션과 배출량 변화에 따른 민감도 분석, *한국환경영향평가학회지*, 5(1), 69-77