

## 부산연안역에서 국지풍모델을 이용한 오존농도의 수치모의

전 병 일\* · 김 유 근 · 이 화 운  
\*부산여자대학교 환경학과 · 부산대학교 대기과학과  
(1997년 4월 19일 접수)

### Numerical Simulation of Ozone Concentration using the Local Wind Model in Pusan Coastal Area, Korea

Byung-Il Jeon\*, Yoo-Keun Kim, and Hwa-Woon Lee  
\*Department of Environmental Sciences, Pusan Women's University  
Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University  
(Manuscript received 19 April 1997)

Numerical simulations of photochemical air pollution (CBM: Carbon-Bond Mechanism) under a theoretical three-dimensional local wind system are carried to clarify the fundamental characteristics of the effects of local wind on photochemical air pollution.

According to the AWS data of Pusan coastal area and KMA, the surface wind of Pusan during summertime showed a very remarkable land and sea breeze circulation. The ozone concentration distribution using local wind model showed that high ozone concentration zone near coastal area moved toward inland in the afternoon. This change implies a sea breeze increases the ozone concentration, but a land breeze decreases it in Pusan coastal area

Key words : Photochemical air pollution model, CBM, sea breeze, three-dimensional local wind model

#### 1. 서 론

대기오염문제는 과거에는 아황산가스(SO<sub>2</sub>)와 분진 등의 주로 1차 오염 물질이 주요 관심사가 되어 왔다. 그러나 이러한 종류의 오염물질은 최근 저유황 연료유의 공급 확대와 청정 연료의 사용 의무화로 인해 점차 오염도가 줄어드는 추세에 있는 반면, 급속한 산업화와 소득의 증대로 기하급수적으로 늘어나는 자동차와 산업 시설에서 배출되는 질소산화물(NO<sub>x</sub>)과 탄화수소류(HC<sub>s</sub>) 그리고 휘발성 유기화합물(VOC) 등이 태양광과 반응(광화학반응)하여 생성된 오존 등 2차 오염물질에 의한 대기오염문

제가 심각해지고 있다. 특히 오존은 그 자체가 환경기준의 주요항목으로 주요 환경오염물질인 것은 물론, 이산화질소, 부유분진, 산성안개, 산성비 등의 2차 생성에 의한 대기오염 현상에도 깊이 관여하고 있다(Ohara *et al.*, 1995).

최근 부산의 일부 지역에서는 오존 농도가 환경기준치를 초과하는 사례가 발생하고 있으며(전병일 등, 1994), 차량의 급속한 증가와 아황산가스(SO<sub>2</sub>) 등의 오염도를 감축시키기 위한 연료 전환 등의 에너지 정책의 변화로 인하여, 오존 오염도는 크게 증가할 가능성이 매우 높

다. 실제로 자동차 배출가스가 주 오염원이고 연료가 석탄류보다도 청정연료를 많이 사용하는 지역이 광화학 오염이 높고, 1차오염물질의 오염도가 심한 지역의 오존 농도가 오히려 낮게 나타난다는 여러 연구조사 결과를 고려할 때 부산지역을 비롯한 대도시에서의 광화학 오염도가 장래에 매우 높아질 가능성이 많다고 할 수 있다(전병일 등, 1995).

국지풍 수치모델에 대한 전반적인 내용은 Atkinson(1981)과 Pielke(1981)에 의해 개괄적으로 다루어진 바 있다. 이에 대한 초기의 연구는 매우 이상적인 평원에서의 해륙풍 연구에 의해 시작되었는데(Estoque, 1961; Neumann and Mahrer, 1971), Pielke(1974)는 미국의 남부 플로리다를 완전히 평지라고 가정하고 해륙풍을 수치모의하였다. 또한 Mahrer와 Pielke(1977)는 2차원 산악에서, Kikuchi et al.(1981)은 산이 있는 일본 관동 평야에서 국지풍을 수치모의하였으며, 이들의 연구경향은 해륙풍과 산곡풍뿐만 아니라 열섬 효과(Hjelmfelt, 1982)와 호수효과(Hjelmfelt and Braham, 1983) 그리고 저층제트(McNider and Pielke, 1981; Kimura and Arakawa, 1983)를 포함한 국지풍 수치모의와, 이러한 국지풍을 이용한 대기오염물질의 수송에 관한 수치모의(Segal et al., 1982; Pielke et al., 1983; Ozoe et al., 1983) 쪽으로 연구가 진행되고 있다.

우리 나라의 경우, 대체로 국지풍의 연구는 대부분이 해륙풍에 관한 연구이었다. 김유근(1988)은 제주도 지방에서 한라산 지형을 고려하여 해륙풍을 수치모의하였으며, 박순웅과 윤일희(1989)는 종관 바람장의 변화를 고려하여 2차원적으로 해륙풍을 수치모의하였고, 신동빈과 이태영(1989)은 한반도 중부 지방에서 지형이 해륙풍 순환에 어떠한 영향을 미치는가를 고찰하였다. 그리고 문승의 등(1990)과 장광미 등(1993)은 지표면 온도, 대기 확산 계수 등을 달리하여 부산연안의 해륙풍을 각각 2차원적으로 모델링하고 수치모의하였고, 국지풍의 3차원적 수치모의로서는 이태영과 신동빈(1989)이 중규모 모델을 이용해 남한 지역에서 종관 규모의 기상 현상이 없는 맑은 여름날의 대기 순환을 연구하였고, 박순웅(1990)은 지표면 열수지와 장파 및 단파에너

지를 매개 변수화한 해륙풍 모델을 개발하여 한반도의 중규모 대기순환을 연구하였다. 그리고 현종훈과 이동규(1990), 임승욱과 이동규(1994)는 Anthes와 Warner(1978)가 개발한 PSU/NCAR 중규모 모델을 이용해 제주도 지방의 해륙풍을 모의한 바 있다.

한편, 광화학 반응모델에 관한 연구는 1970년대 이후 왕성하게 진행되어 현재까지 다수의 모델이 제안되어 왔는데, 그 연구의 흐름은 크게 2종류로 구별될 수 있다. 하나는 대기화학적인 연구로서 완전한 형태의 素반응식이 포함된 모델을 구축하고 스모그챔버실험의 재현을 시도하려는 것이며, 나머지 하나는 광화학 대기오염 예측모델을 이용하기 위한 반응모델을 작성하려는 흐름이다. 이 두가지 종류의 연구 모두가 관련 화학종에 관한 반응과정을 정확하게 재현하기 위해서는 많은 노력과 시간이 요구되는데, 대기오염예측을 위한 실용적인 모델이 되기 위해서는 어느 정도의 간략화가 필요하다(Ohara et al., 1991).

초기의 광화학 대기오염 예측모델은 상당히 간략화된 것이 많고 반응수가 10~20개인 것이 대부분을 차지하며(Hecht and Seinfeld, 1972), 현상을 정확하게 파악할 수 없다는 단점을 가지고 있었다. 따라서 최근에는 반응식이 50~100개정도, 성분수가 수십 개로 구성된 반응계가 많이 제안되고 있다. 즉, 대기 중에서 일어날 가능성이 있는 반응은 상당수가 있으나, 그 중에서도 극히 중요하다고 생각되는 것을 선택해 반응식계를 구성한 것이 광화학 반응모델이다. 따라서 각각의 반응의 동역학에 관하여 알고 있는 것으로 실제 현상을 표현하는 것은 매우 복잡하고 반응속도상수와 모델 중에 많은 불확정요소가 포함되어 있기 때문에 너무 상세하게 나타내려고 하는 것은 오히려 실제 현상을 정확하게 기술할 수 없을 수도 있다(李和云, 1988).

최근 연안지역의 해륙풍과 광화학 대기오염간의 관측 및 수치적 조사와 연구가 많이 진행되고 있으나(Moussopoulos et al., 1995; Nester, 1995; Dayan and Koch, 1996), 그들 사이의 복잡한 상호작용때문에 많은 연구과제를 남기고 있다. 부산 연안지형의 영향이 고려되고, 국지적인 효과가 비교적 정확하게 표현될 3차원 해륙풍 모델에 관한 연구는 다소 있

으나(장광미 등, 1993; 전병일, 1993; 오은주, 1995; Kondo et al., 1996), 우리 나라의 연안역이나 내륙에서 지형의 영향이 고려된 국지풍을 이용하여 광화학 대기오염에 대한 수치모의를 한 연구는 거의 없다.

따라서 본 연구에서는 부산연안역에서의 하계 지상풍의 특성을 관측자료를 이용하여 분석하였으며, 복잡한 지형의 효과와 지표면의 상태가 고려되는 3차원 국지풍모델을 이용한 광화학 대기오염 수치모델을 부산연안역에 적용시켜 국지풍에 의한 오존농도의 시·공간적 변화 및 수송과 확산을 수치모의하여 부산연안역의 광화학 대기오염물질에 대한 효율적인 대기질 관리방안과 대책수립에 기여하고자 하였다.

## 2. 하계 부산연안역의 지상풍특성

연안 공업도시에서는 오염물질의 주요발생원이 대부분 해안에 위치하기 때문에 도시의 오염농도 분포가 해풍과 같은 국지풍의 영향으로 복잡한 양상을 나타낸다(河村 武, 1979). 특히 부산 지역의 경우, 해안이 한반도의 남해와 동해에 접하여 있고, 공업 지대가 연안에 인접해 있기 때문에 대기오염물질이 해풍에 의해 영향을 받을 수 있는 상태에 있다고 할 수 있으며, 이미 여러 연구자(최길수 등, 1982; 전병일 등, 1994b)들에 의해 부산 도심지는 해풍의 발생 빈도가 높고 해풍의 영향이 큰 지역이라고 조사된 바 있다. 광화학반응을 거쳐 생성된 오존은 대기의 이류운동으로 이동하기 때문에 그 이동방향과 확산정도 그리고 농도분포는 지표부근의 대기운동에 의한 바람장과 밀접한 관계가 있다. 따라서 또한 고농도오존의 발생기구를 명확하게 하기 위해서는 그 기초조사로서 이류를 바탕으로 한 연구대상지역의 지표부근의 대기상태 즉 지상풍을 정확하고 능동적으로 파악·분석하여야만 한다.

부산연안역의 하계(6, 7, 8월)의 지상풍 특성을 고찰하기 위해서 부산지방기상청(1991~1994)의 시간별 바람자료와 각 지역에서 관측한 AWS로 부터 측정한 자료(1995)를 이용하였다. 각 풍향의 풍속 등급별 발생빈도를 풍향 16등급, 풍속 5등급으로 각각 구별하여 나타낸 바람장미는 Figs. 1~2와 같다. 먼저 부산

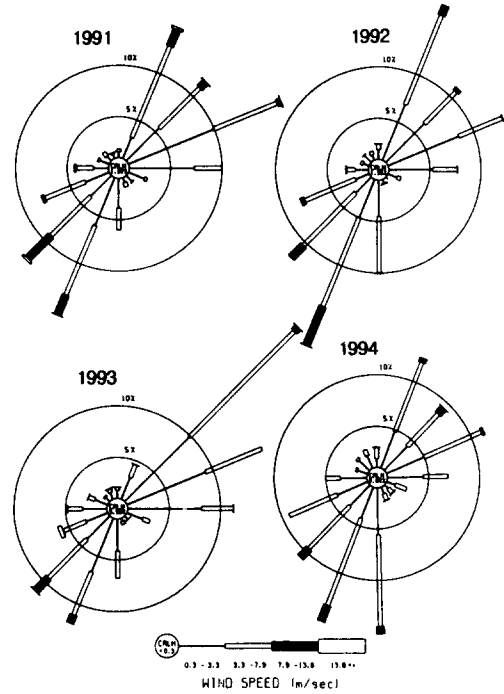


Fig. 1. Summer wind rose with the use of the data measured in Pusan Meteorological Office(1991~1994).

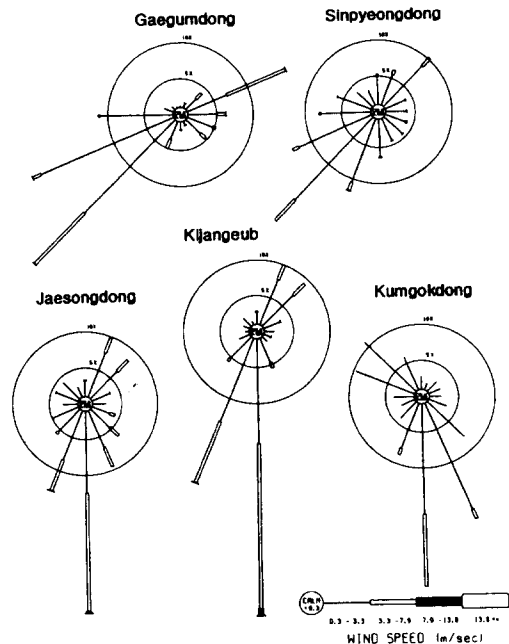


Fig. 2. Summer wind rose with the use of the data measured from AWS in Pusan metropolitan city(1995).

지방기상청의 최근 4년동안 하계의 바람장미를 보면, 4년 모두 북동풍계열(북북동풍, 북동풍, 동북동풍)과 남서풍계열(남풍, 남남서풍, 남서풍, 서남서풍)의 바람이 탁월하게 나타나며, 북서풍계열과 남동풍계열은 앞의 두계열의 바람보다 훨씬 낮은 발생빈도를 나타내었다.

그리고 부산광역에 설치된 AWS를 통해 5개 지역(개금동, 신평동, 재송동, 기장읍, 금곡동)에서 측정된 하계(6월~8월)의 바람장미를 보면, 5개 지점 모두 북동풍계열(기장읍:북서풍)과 남풍 내지 남서풍계열의 바람이 탁월하게 나타나고 있다. 이는 육지와 해양의 비열차에 의한 주간 해양에서 내륙으로 부는 해풍(남서풍계열)과 야간의 육풍(북동풍계열)이 매우 뚜렷하게 나타나는 것을 강하게 시사해 주고 있다. 특히 개금동은 부산의 서부지역인 사상, 낙동강 주변지역과 서면을 중심으로 한 도심지를 연결시켜주는 길목에 위치하고 남쪽에 고원전산(503m), 북쪽에 백양산(641m)이 있어 부산지역의 서쪽과 동쪽을 연결시키는 길목으로서 배수풍의 형태로 공기의 유동이 매우 빈번한 지역이라 할 수 있으며, 북동풍계열과 남서풍계열이 어느 풍향보다 탁월하게 발생하는 것으로 이를 증명한다고 볼 수 있다. 따라서 부산지역의 하계는 해풍인 남서풍계열과 육풍인 북동풍계열의 바람이 우세하게 나타나는 전형적인 해륙풍 발생특성을 나타낸다고 볼 수 있는 바, 대기오염물질의 수송과 확산도 이 풍향에 의해 매우 큰 영향을 받을 것은 자명한 일이다.

### 3. 국지풍모델

본 연구에서 사용한 국지풍 모델과 광화학 대기오염 모델의 계통을 보면, 두단계로 나눌 수 있다. 제1단계는 국지풍모델에 지형, 지표의 상태와 기상조건 등을 입력하고 바람장과 확산계수의 입체분포의 시간변화를 매시간마다 출력하며, 이들 자료는 광화학 대기오염 모델의 입력자료가 된다. 제2단계는 이류확산모델과 광화학 반응 모델의 2개의 부모모델로 구성되어 있는데, 제1단계의 계산결과에 오염원 자료와 침적자료를 첨가하여 이류확산과 광화학반응의 수치적분을 행하고 2차오염물질인 오존의 농도를 매시간 출력한다.

본 연구에서 사용한 국지풍모델의 기초방정

식은 Boussinesq 근사와 정역학평형 근사를 가정한 기상역학 방정식계로서 비직교좌표계인  $z'$  좌표계를 사용하였다(Kimura, 1983; Kimura and Takahashi, 1991).

운동방정식은

$$\begin{aligned} & \frac{\partial hu}{\partial t} + u \frac{\partial hu}{\partial x} + v \frac{\partial hu}{\partial y} + w \frac{\partial hu}{\partial z} \\ & = fhv - h \Theta \frac{\partial \pi}{\partial x} + \Theta(z_T - z^*) \\ & \frac{\partial z_G}{\partial x} \frac{\partial \pi}{\partial z} + \frac{z_T^2}{h} \frac{\partial}{\partial z} (K_m \frac{\partial u}{\partial z}) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial hv}{\partial t} + u \frac{\partial hv}{\partial x} + v \frac{\partial hv}{\partial y} + w \frac{\partial hv}{\partial z} \\ & = -fhu - h \Theta \frac{\partial \pi}{\partial y} + \Theta(z_T - z^*) \\ & \frac{\partial z_G}{\partial y} \frac{\partial \pi}{\partial z} + \frac{z_T^2}{h} \frac{\partial}{\partial z} (K_m \frac{\partial v}{\partial z}) \end{aligned} \quad (2)$$

이다. 그리고 대상으로 하는 현상의 수평규모가 연직규모에 비교하여 order가 크기 때문에, 식(3)과 같은 정역학 평형 방정식을 이용하면 좋은 근사가 성립하여 해법이 간단해진다.

$$\frac{\partial \pi}{\partial z} = \frac{hg\theta}{z_T \Theta^2} \quad (3)$$

여기서  $u, v, w$ 는 각각  $x, y, z$ 방향의 속도성분이며, 식(1), (2)의 우변 제1항은 전향력을, 제2항과 제3항은 각각 기압경도력과 지형에 의한 보정항, 그리고 제4항은 연직확산을 나타낸다.

열역학 방정식 및 수증기 보존 방정식은

$$\begin{aligned} & \frac{\partial h\theta}{\partial t} + u \frac{\partial h\theta}{\partial x} + v \frac{\partial h\theta}{\partial y} + w \frac{\partial h\theta}{\partial z} \\ & = \frac{Z_f^2}{h} \frac{\partial}{\partial z} (K_h \frac{\partial \theta}{\partial z}) + hQ_r \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial hq}{\partial t} + u \frac{\partial hq}{\partial x} + v \frac{\partial hq}{\partial y} + w \frac{\partial hq}{\partial z} \\ & = \frac{Z_f^2}{h} \frac{\partial}{\partial z} (K_h \frac{\partial q}{\partial z}) \end{aligned} \quad (5)$$

이다. 여기서  $\theta$ 와  $q$ 는 각각 온위와 비습을 나타내며, 식(4)의 우변 제2항은 복사에 의한 가열 및 냉각을 나타낸다. 이 모델에서는 수증기의 응결과정은 고려하지 않았다.

그리고 연속방정식은

$$\frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} + \frac{\partial hw}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

이다. 식(1)~(6)에서  $z_G, z_T$ 는 지형의 고도와 모델의 상한고도를 나타내며,

Table 1. Input parameters for the initial condition

Horizontal grid interval	2 km
Horizontal grid size(x,y)	42×42
Vertical levels	16
Time step	15 sec
Integral initialization	0600 LST
Mean latitude	35(deg)
Solar declination	0.24 radian
Geostrophic wind component(U, V)	0 m/s
Minimum value of vertical diffusion coefficient	0.1 m <sup>2</sup> /s
Maximum value of vertical diffusion coefficient	500 m <sup>2</sup> /s
Initial vertical gradient of potential temperature	4 K/km
Land surface wetness	0.1
Initial relative humidity	60 %
Coriolis force parameter	1.0E-4(s <sup>-1</sup> )
Initial value of land surface temperature at sea level	298 K
Albedo(on land)	0.12
Albedo(on sea)	- 0.05
Initial surface pressure	1000hPa
Von Karman constant	0.4
Air density	1.226kg/m <sup>3</sup>
Gravitational acceleration	9.81m/s <sup>2</sup>

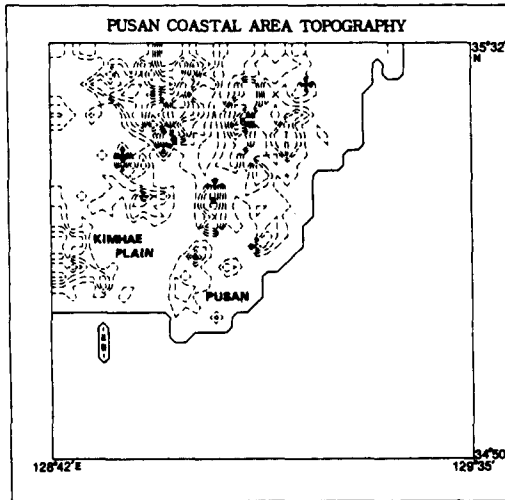


Fig. 3. Topography of Pusan coastal area used in this model. Terrain is contoured by dot lines with an increment of 100m(A: Gudeoc Mountain, B: Gumjeong Mountain, C: Sineo Mountain, D: Mucheok Mountain, E: Togok Mountain, F: Wonhyo Mountain, G: Deokcheondong).

여기서

$$z^* = z_T \frac{z - z_G}{h} \quad (7)$$

$$h = z_T - z_G \quad (8)$$

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w^* \frac{\partial}{\partial z} \quad (9)$$

$$hw^* = z_T w + (z^* - z_T) \left( u \frac{\partial z_G}{\partial x} + v \frac{\partial z_G}{\partial y} \right) \quad (10)$$

이다. 그리고 난류과정과 지표면 열수지식은 Kimura와 Takahashi(1991)에 의해 제시된 것을 사용하였다.

본 연구에서 사용한 계산영역은 부산 연안을 중심으로 Fig. 3과 같이 수평방향으로 각각 84km를 선택하였고, 격자간격은 2km로 42×42격자점을 이용하였다. 그리고 연직방향으로는 15, 50, 120, 235, 350, 500, 700, 900, 1100, 1400, 1800, 2200, 2800, 3600, 4400, 6000m의 16층으로 나누어서 계산하였다. 적분시간간격은 15초이며, 0600LST부터 48시간동안 적분하여 2일째의 값을 취하였다. 국지풍모델 수행에 사용된 매개변수들은 Table 1과 같이 에어로졸이나 구름에 의한 흡수, 그리고 미산란이 없는 맑고 깨끗한 날과 중관바람이 없는 전형적인 하계의 날을 대상으로 선정하여 수치모의하였다.

#### 4. 광화학 대기오염 모델

##### 4.1 광화학반응모델

본 연구에서 사용한 광화학반응 모델은 미국의 S.A.I.(System Application International)에서 개발한 CBM(Carbon-Bond Mechanism, Whitten et al., 1980)인데, 탄화수소분자를 그룹화하지 않고 비슷한 화학결합을 가진 탄소원자를 그룹화(lumped structure)하는 것이 CBM의 개념이다. CBM은 다양한 비메탄탄화수소(NMHC)를 탄소결합 형태에 따라 4종류의

Table 2. Chemical species in the CBM

Species Name	Representation
Nitric oxide	NO
Hydroperoxy radical	HO <sub>2</sub>
Oxygen atom	O
Hydroxyl radical	OH
Olefinic carbon bond	OLE
Nitrogen dioxide	NO <sub>2</sub>
Hydrogen peroxide	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
Ozone	O <sub>3</sub>
Peroxyacyl nitrate	PAN
Aromatic carbon bond	ARO
Nitrogen trioxide	NO <sub>3</sub>
Carbonic acid	HCO <sub>3</sub>
Carbon monoxide	CO
Paraffin carbon bond	PAR
Carbonyl carbon bond	CAR
Nitrous acid	HNO <sub>2</sub>
Methyl peroxide radical	CH <sub>3</sub> O <sub>2</sub>

그룹으로 탄소 환산하고 개개의 반응종에 의한 반응속도의 차를 동일한 기준으로 취급한다. 또한, 이 모델에서 취급하는 NMHC의 반응종으로서는 단일결합 탄소원자(PAR), 반응성이 높은 이중결합 탄소원자(OLE), 반응성이 낮은 이중탄소원자(ARO), 그리고 카르보닐결합 탄소원자(CAR) 등 4가지 형태가 있다.

본 연구에서 사용한 CBM의 반응종은 Table 2와 같이 17개이고, Table 3과 같이

32개의 반응식을 포함하고 있다. 광화학 반응 계수 k는 자외선강도에 의존하게 되며, a는 0.5, γ는 0.67로 하였다. 그리고 광화학 스모그에서 에어로졸의 생성과 그것의 황산화물과의 반응 및 대기 중에서의 거동은 중요한 역할을 하지만, 주로 본 연구에서는 구름이 없는 맑은 날을 대상으로 하였기 때문에 에어로졸과 황산화물은 취급하지 않았다.

#### 4.2 제거과정과 발생원

본 연구에서는 제거과정으로 진성침적만을 고려, NO<sub>2</sub>를 0.1cm/s, NO와 O<sub>3</sub>은 0.5cm/s 그리고 그 외는 모두 0.1cm/s로 일정한 침적속도를 주어 계산한다. 도시와 같은 광화학 대기오염과 관련된 오염농도를 수치모의하기 위해서는 NO<sub>x</sub>나 HCs 등 광화학반응에 관련된 오염물질의 배출량자료를 입력해야 하므로 이에 대한 정확한 배출량 산정이 필요하다. 본 연구에서는 NO<sub>x</sub>배출량의 비로 다른 오염물질의 방출량을 결정하였으며, NO<sub>x</sub>의 NO<sub>2</sub>와 NO의 비는 0.1 : 0.9로 하였다. Fig. 4는 방종선(1996)에 의해서 산정된 부산 지역의 연간 NO<sub>x</sub>배출량 분

Table 3. Carbon Bond Mechanism

No.	Reaction	Rate constant	unit
1	NO <sub>2</sub> + hν → NO + O	k <sub>1</sub>	min <sup>-1</sup>
2	O + O <sub>2</sub> + M → O <sub>3</sub> + M	k <sub>2</sub> = 2.08E-5	ppm <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup>
3	O <sub>3</sub> + NO → NO <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	k <sub>3</sub> = 2.52E 1	ppm <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup>
4	O + NO <sub>2</sub> → NO + O <sub>2</sub>	k <sub>4</sub> = 1.34E 4	ppm <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup>
5	O <sub>3</sub> + NO <sub>2</sub> → NO <sub>3</sub> + O <sub>2</sub>	k <sub>5</sub> = 5.0 E-2	ppm <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup>
6	NO <sub>3</sub> + NO → NO <sub>2</sub> + NO <sub>2</sub>	k <sub>6</sub> = 1.3 E 4	ppm <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup>
7	NO <sub>3</sub> + NO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O → 2HNO <sub>3</sub>	k <sub>7</sub> = 2.0 E-3	ppm <sup>-2</sup> min <sup>-1</sup>
8	HO <sub>2</sub> · + NO <sub>2</sub> → HNO <sub>2</sub>	k <sub>8</sub> = 2.0 E 1	ppm <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup>
9	NO <sub>2</sub> + OH· → HNO <sub>3</sub>	k <sub>9</sub> = 9.0 E 3	ppm <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup>
10	HNO <sub>2</sub> + hν → NO + OH·	k <sub>10</sub> = 1.9 E-1 × k <sub>1</sub>	ppm <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup>
11	NO + OH· → HNO <sub>2</sub>	k <sub>11</sub> = 9.0 E 3	ppm <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup>
12	CO + OH· → CO <sub>2</sub> + HO <sub>2</sub> ·	k <sub>12</sub> = 2.06E 2	ppm <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup>
13	HO <sub>2</sub> · + NO → NO <sub>2</sub> + OH·	k <sub>13</sub> = 2.0 E 3	ppm <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup>
14	HO <sub>2</sub> · + HO <sub>2</sub> · → H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	k <sub>14</sub> = 4.0 E 3	ppm <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup>
15	PAN → HCO <sub>3</sub> · + NO <sub>2</sub>	k <sub>15</sub> = 2.0 E-2	min <sup>-1</sup>
16	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + hν → OH· + OH·	k <sub>16</sub> = 7.0 E-4 × k <sub>1</sub>	ppm <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup>
17	OLE + OH· → CAR + CH <sub>3</sub> O <sub>2</sub> ·	k <sub>17</sub> = 3.8 E 4	ppm <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup>
18	OLE + O → HCO <sub>3</sub> · + CH <sub>3</sub> O <sub>2</sub> ·	k <sub>18</sub> = 5.3 E 3	ppm <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup>
19	OLE + O <sub>3</sub> → γ(HCO <sub>3</sub> · + HCHO + OH·)	k <sub>19</sub> = 1.5 E-2	ppm <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup>
20	PAR + OH· → CH <sub>3</sub> O <sub>2</sub> · + H <sub>2</sub> O	k <sub>20</sub> = 1.3 E 3	ppm <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup>
21	PAR + O → CH <sub>3</sub> O <sub>2</sub> · + OH·	k <sub>21</sub> = 2.0 E 1	ppm <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup>
22	CAR + OH· → HCO <sub>3</sub> · + H <sub>2</sub> O	k <sub>22</sub> = 1.0 E 4	ppm <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup>
23	CAR + hν → α(HCO <sub>3</sub> · + HO <sub>2</sub> ·) + (1-α)CO	k <sub>23</sub> = 6.0 E-3 × k <sub>1</sub>	ppm <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup>
24	ARO + OH· → CAR + CH <sub>3</sub> O <sub>2</sub> ·	k <sub>24</sub> = 8.0 E 3	ppm <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup>
25	ARO + O → HCO <sub>3</sub> · + CH <sub>3</sub> O <sub>2</sub> ·	k <sub>25</sub> = 3.7 E 1	ppm <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup>
26	ARO + O <sub>3</sub> → HCO <sub>3</sub> · + CAR + OH·	k <sub>26</sub> = 2.0 E-3	ppm <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup>
27	ARO + NO <sub>3</sub> → products(aerosols)	k <sub>27</sub> = 5.0 E 1	ppm <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup>
28	CH <sub>3</sub> O <sub>2</sub> · + NO → NO <sub>2</sub> + CAR + HO <sub>2</sub> ·	k <sub>28</sub> = 2.0 E 3	ppm <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup>
29	HCO <sub>3</sub> · + NO → NO <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> + HO <sub>2</sub> ·	k <sub>29</sub> = 2.0 E 3	ppm <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup>
30	HCO <sub>3</sub> · + NO <sub>2</sub> → PAN	k <sub>30</sub> = 1.5 E 2	ppm <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup>
31	CH <sub>3</sub> O <sub>2</sub> · + HO <sub>2</sub> · → CH <sub>3</sub> OOH + O <sub>2</sub>	k <sub>31</sub> = 4.0 E 3	ppm <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup>
32	HCO <sub>3</sub> · + HO <sub>2</sub> · → HCO <sub>3</sub> H + O <sub>2</sub>	k <sub>32</sub> = 4.0 E 3	ppm <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup>

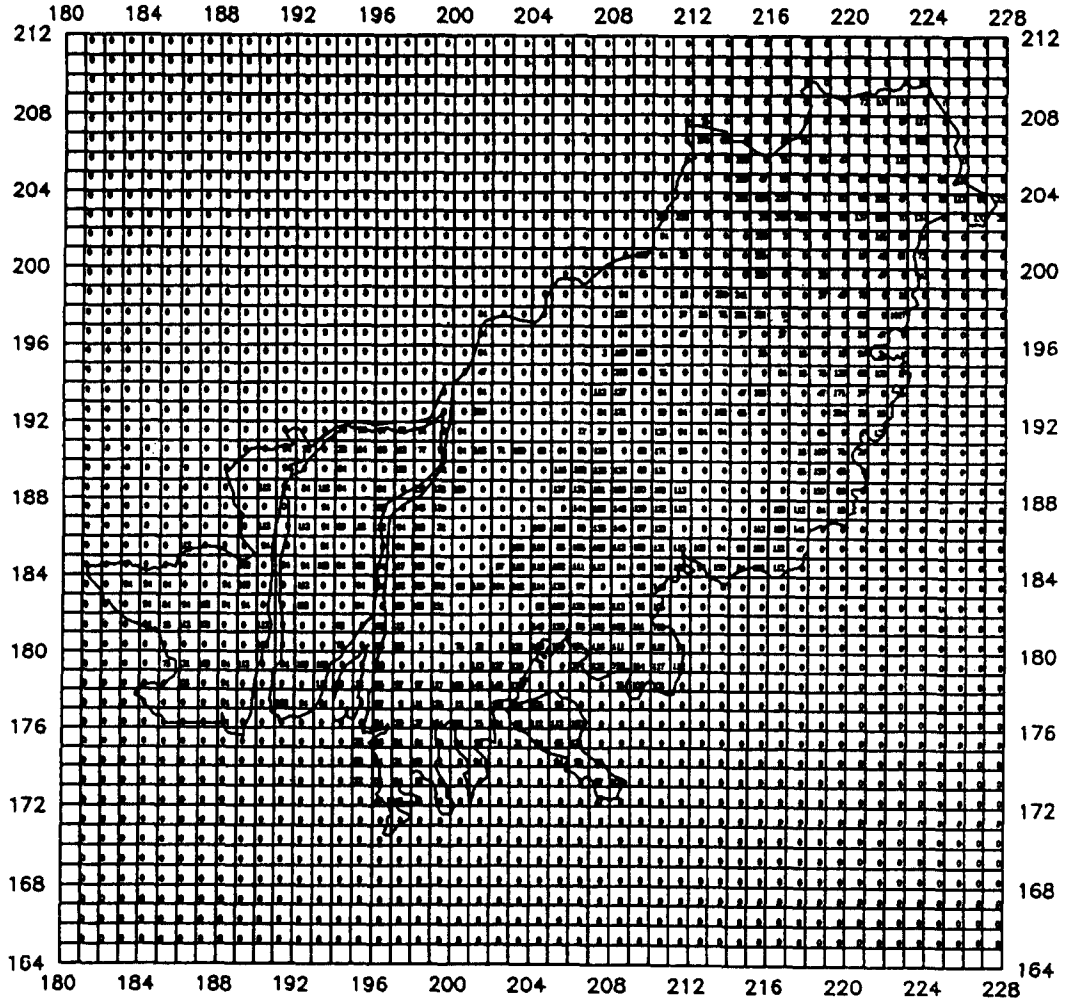


Fig. 4. Distribution of the annual  $\text{NO}_x$  emitted from Pusan area(After Bang, 1996).

포이다. 광화학 대기오염 수치모의를 위해서는  $\text{NO}_x$ 나 HCs 등과 같은 발생원물질의 일변화를 입력해야 하나, 본 연구에서는 배출량산정의 어려움으로 인해 연간 배출량을 사용하였다.

$\text{NO}_x$ 는 자동차, 철도, 항공기 및 선박 등과 같은 이동발생원에 의한 배출, 화석연료를 사용하는 발전소, 보일러, 산업공정과정, 소각로와 같은 점오염원에 의한 배출, 그리고 가정, 산업지역의 난방, 노천소각 및 휘발성 오염물질의 증발 등의 면오염원에 의한 배출이 있으며, 토양과 수중미생물의 작용과 번개, 수목

등 자연적발생원으로 부터도  $\text{NO}_x$ 는 배출된다. 본 연구에서는 자연발생원이 고려되지 않은 모든 선, 점, 면오염원에 대해서  $\text{NO}_x$ 배출량을 산정하였다. 그 결과 부산지역에서는 자동차에 의한 배출과 연료에 의한 배출이 대부분을 차지하였고, 주요 간선도로 주변과 사상공단, 신평·장림공단지역을 중심으로 높은 배출량 분포를 나타내고 있었다.

#### 5. 국지풍과 오존농도의 수치모의 결과

국지풍 모델에서 얻어진 지상 15m고도의 바

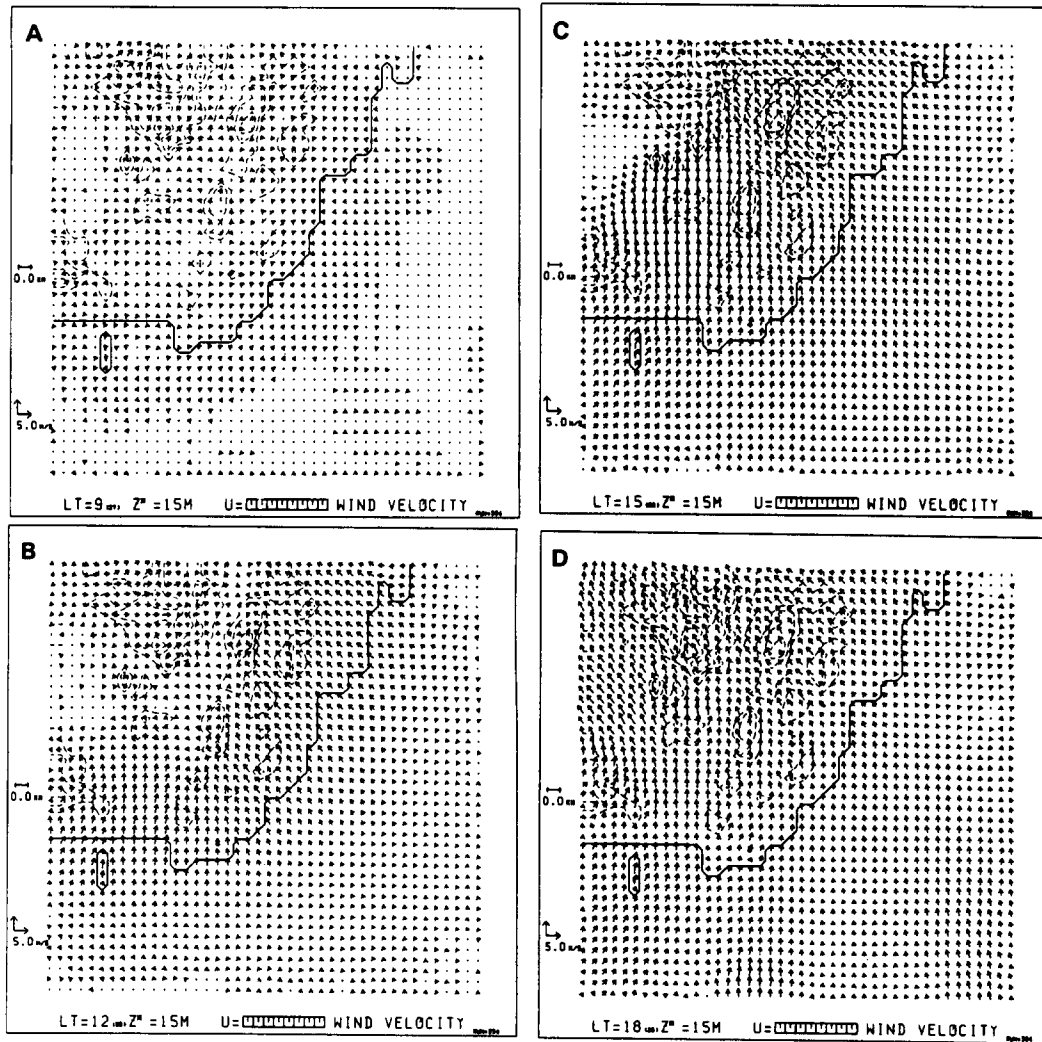


Fig. 5. Variations of the horizontal wind distributions at the height of 15m calculated from the three-dimensional local wind model. (A)0900LST (B)1200LST (C) 1500LST (D)1800LST (E)2100LST (F)0000LST (G)0300LST (H)0600LST.

람장의 공간분포를 시간별로 Fig. 5에 나타내었다. 0900LST경에 해안지역에서 약한 해풍이 불고 있으며, 대상지역의 북서부인 산악지역에서 곡풍이 약하게 발생하고 있다. 이 시각은 일반적으로 해풍이 내륙으로 그렇게 깊게 진입하지 않을 시각이나, 곡풍이 먼저 발달하고 그 후에 해풍이 곡풍과 합쳐져 결과적으로 해풍이 내륙까지 침투한 것으로 해석되어진다. Kikuchi et al.(1981)의 일본 관동지방에서의 해륙풍에 대한 산악효과의 수치모의와 현중훈과 이동규(1990)의 제주도에서의 해륙

풍 수치모의에 대한 연구에서도 이 시각에는 해풍보다 곡풍이 먼저 발달하고 또 곡풍은 해풍의 강도를 증가시킨다고 보고된 바 있다.

1200LST가 되면서 지면온도가 0900LST에 비해 상승하면서 산악의 영향이 거의 없는 내륙평탄지역에서도 수평온도경사가 발생하여 부산 연안의 모든 지역에서 해풍이 강화 발달하여 내륙으로 진입하는 모양을 볼 수 있다. 그리고 산악지역 부근에서는 이미 발생한 국지순환과 해풍이 합쳐져 0900LST보다 더 강한 국지순환이 뚜렷하게 나타나고 있다.



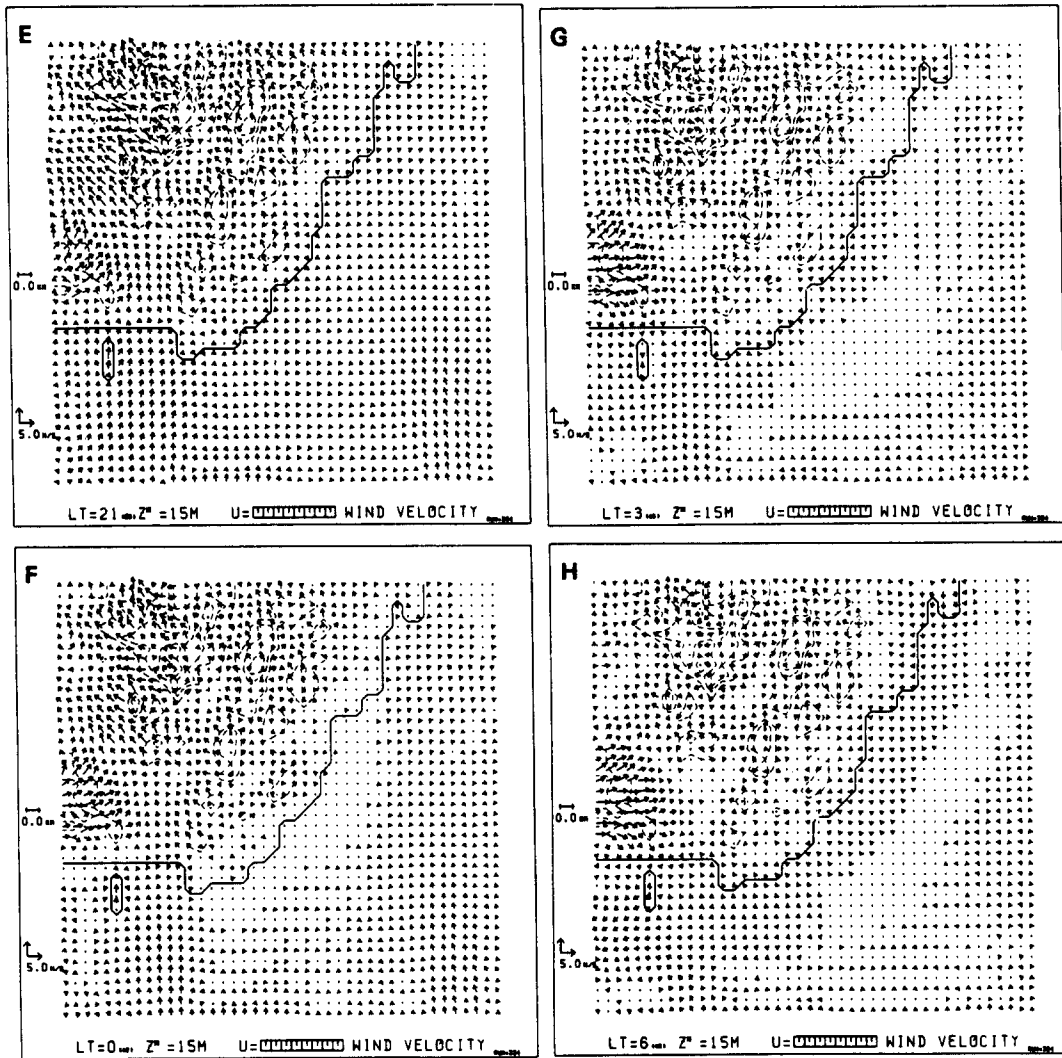


Fig. 5. (Continued)

1500LST경에는 내륙지역에서 해풍과 곡풍이 합쳐져 1200LST보다 더 강한 남풍계열의 해풍이 발생하고 있으며, 특히 낙동강을 따라 강한 흐름이 나타나고 있다. 육풍과 해풍이 만나는 수렴역의 1200LST경에는 내륙 북서부에 약하게 나타났다. 1500LST경에는 수렴역이 보다 강화된 것을 볼 수 있다. 1800LST경에는 태양복사에너지의 감소로 서서히 수렴역이 완전히 사라지고, 전 영역에서 해풍이 나타나고 있으나, 1500LST에 비해서는 해풍의 강도가 상당히 약화되었으며, 영역 동쪽보다는 산악지역이 존재하는 서쪽지역에서 풍속이 강하게 나타나고 있다.

태양복사에너지의 유입이 끝난 2100LST경에는 지표면 온도의 감소로, 해안지역에서는 해풍이 거의 찾아볼 수 없을 정도로 약화되었고, 약한 곡풍만이 높은 산악지형 부근에서 부분적으로 나타났다. 육풍이 서서히 발생하기 시작하여 0000LST경에는 대부분의 육상에서 해수면의 온도보다 낮은 지면온도를 나타내게 됨으로써 대상지역 전역에서 육풍이 나타났고, 산악지역의 경우 산정에서의 온도가 평지보다 빨리 냉각되므로 산정상에서 평지로 부는 산풍이 약하게 발생하였다. 그리고 0300LST경부터 해안지역에서 육풍이 나타나고 있었으나, 북서풍과 북풍이 나타나는 일부 서안 영역을 제외

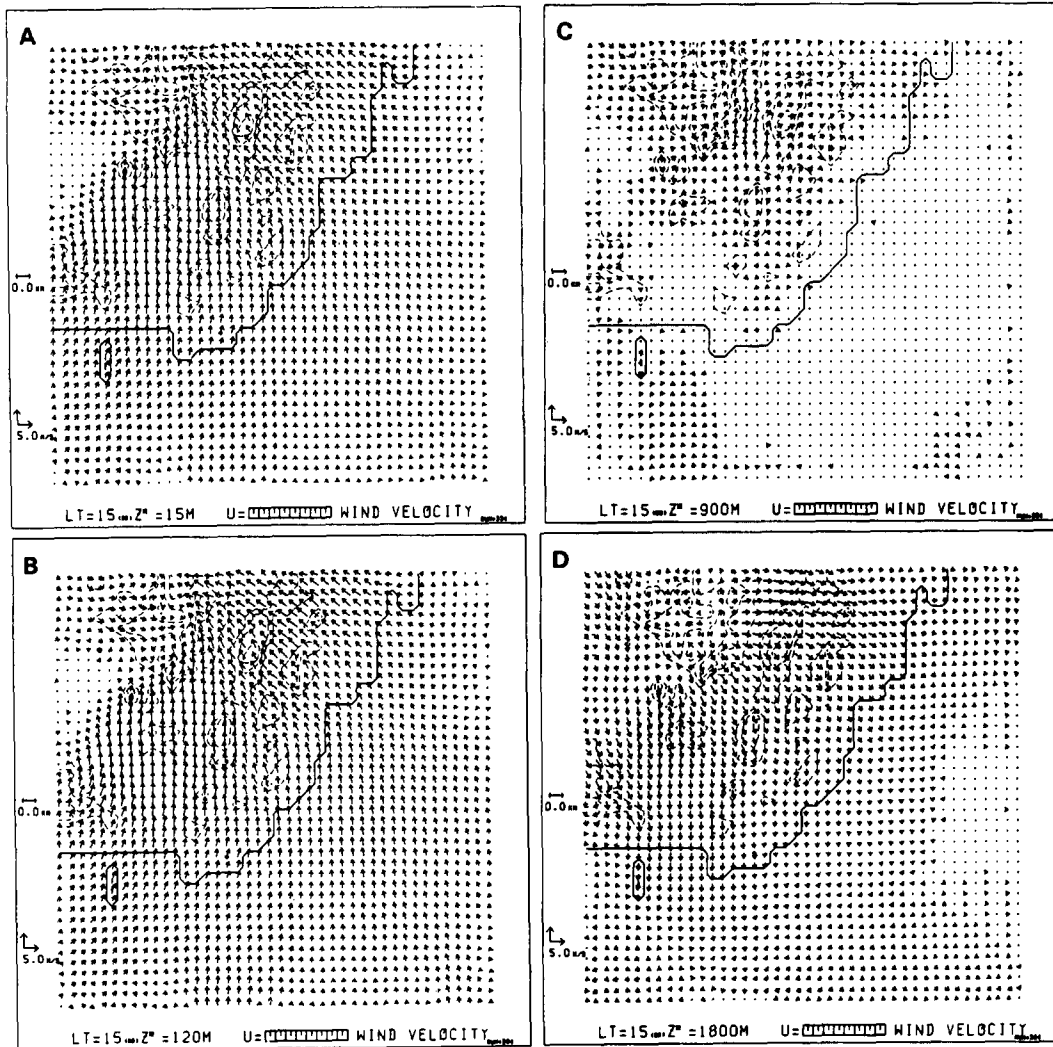


Fig. 6. Horizontal wind distributions calculated from the three-dimensional local wind model at 1500LST. (A)15m (B)120m (C)900m (D)1800m.

하고는 풍속이 매우 약하게 나타났다. 이러한 부산연안의 국지풍 모델에 의한 수치모의 결과는 산악지역과 경계부분에서 지형적인 특성이 잘 나타내어 주었으며 전병일(1993)의 계산결과 및 관측결과와 잘 일치하였다.

Fig. 6은 복사에너지가 가장 강한 시간대로 해풍이 가장 잘 발달하는 1500LST의 고도에 따른 수평 바람장의 분포를 나타낸 것이다. 하층인 고도 15m와 고도 120m에서는 해양에서 내륙으로 진입하는 해풍이 전 해안과 내륙에서 잘 발달하였고, 육풍과의 수렴역은 내륙의 북서부에서 잘 나타났으며, 지형의 영향을

덜 받음으로써 지표의 마찰이 적은 고도 120m의 풍속이 15m 고도보다 약간 강하게 나타났다. 고도 900m에서는 일부 내륙에서 아직 해풍이 약하게 남아 있었으며, 대체로 이 고도 내외가 해풍과 반환류의 경계인 관계로 주풍향을 식별할 수 없을 정도로 아주 약한 바람이 나타났다. 그리고 고도 1800m에서는 반환류인 육풍이 하층 15m 고도의 해풍보다 강하게 나타났으나, 고도 120m의 풍속보다는 약하게 불고 있었다.

한편, 오존농도 수치실험의 입력자료는 2km×2km 격자안에 NO<sub>x</sub>배출량을 각 격자에

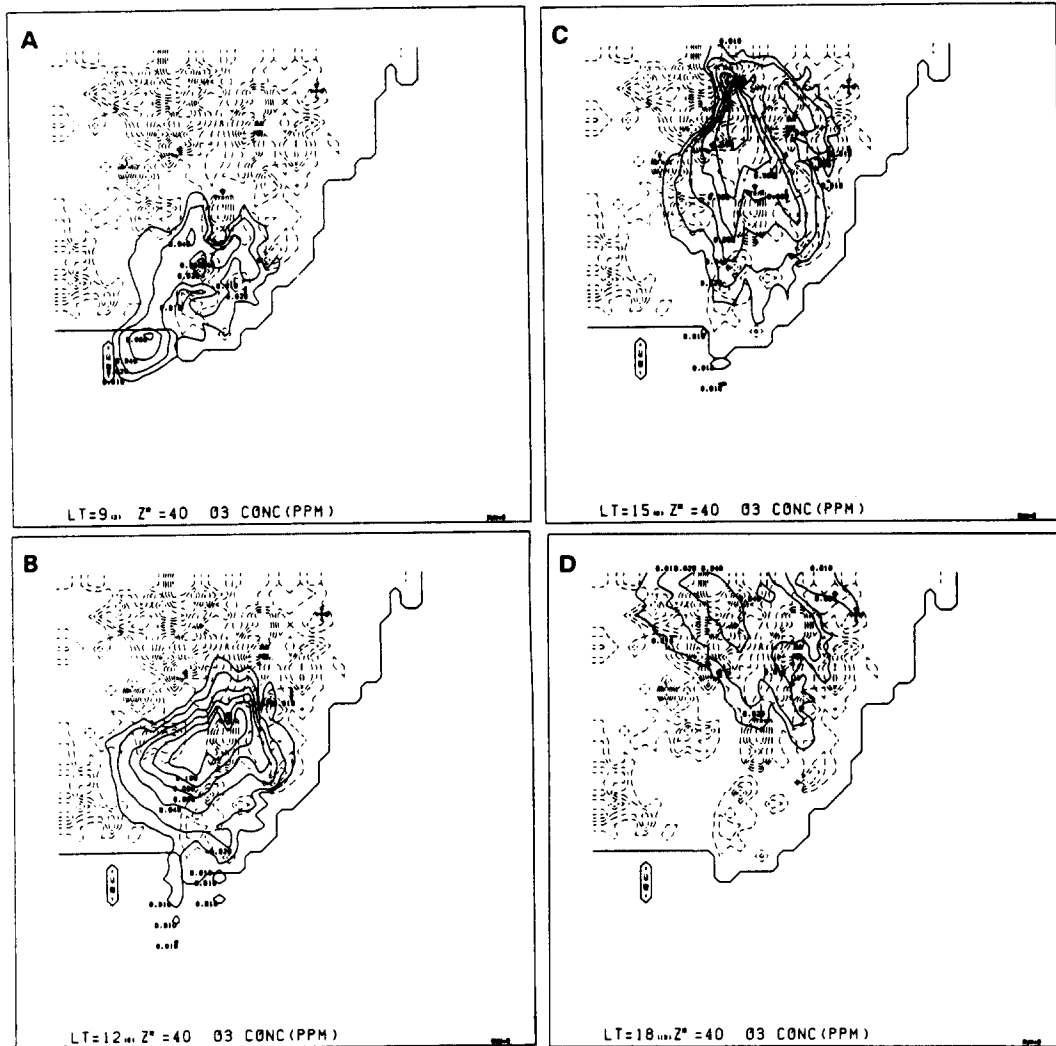


Fig. 7. Distribution of ozone concentration calculated from CBM in Pusan. (A)0900LST (B)1200LST (C)1500LST (D)1800LST (E)2100LST (F)0000LST (G)0300LST (H)0600LST.

입력하였으며, 계산 적분 간격은 15초 간격을 초기치의 영향을 고려하여 48시간 수치적분하여 2일째의 24시간 계산결과를 검토의 대상으로 하였다.

Fig. 7은 CBM모델을 부산연안지역에 적용하여 지상 40m 고도에서의 오존농도분포를 3시간간격으로 나타낸 것이다. 먼저 0900LST경에는 부산도심부를 중심으로 20ppb 정도의 낮은 농도를 나타내고 있었으나, 1200LST경에는 차량의 통행이 많은 도심지역에 일사량의 증가에 의해 오존농도가 증

가하여 120ppb에 달하였다. 또한 해풍과 함께 오존의 기인물질인  $\text{NO}_x$ 나 VOC가 풍하측으로 수송되면서 내륙쪽에서 광화학반응에 의해 고농도 오존이 생성되었으며, 해안지역에서는 강한 해풍에 의해 청정대기가 유입되면서 발생된 지역의 하층에서는 오존농도가 낮게 나타났다.

1500LST경에는 농도 중심이 해안에서 내륙으로 향하는 해풍에 의해 영역 북쪽으로 이동하고 있었으며, 고농도의 분포 면적도 점차 확대되었다. 계산영역을 보다 확장하여 수치모의 한다면, 장거리수송에 의해 영역 북부의 풍하

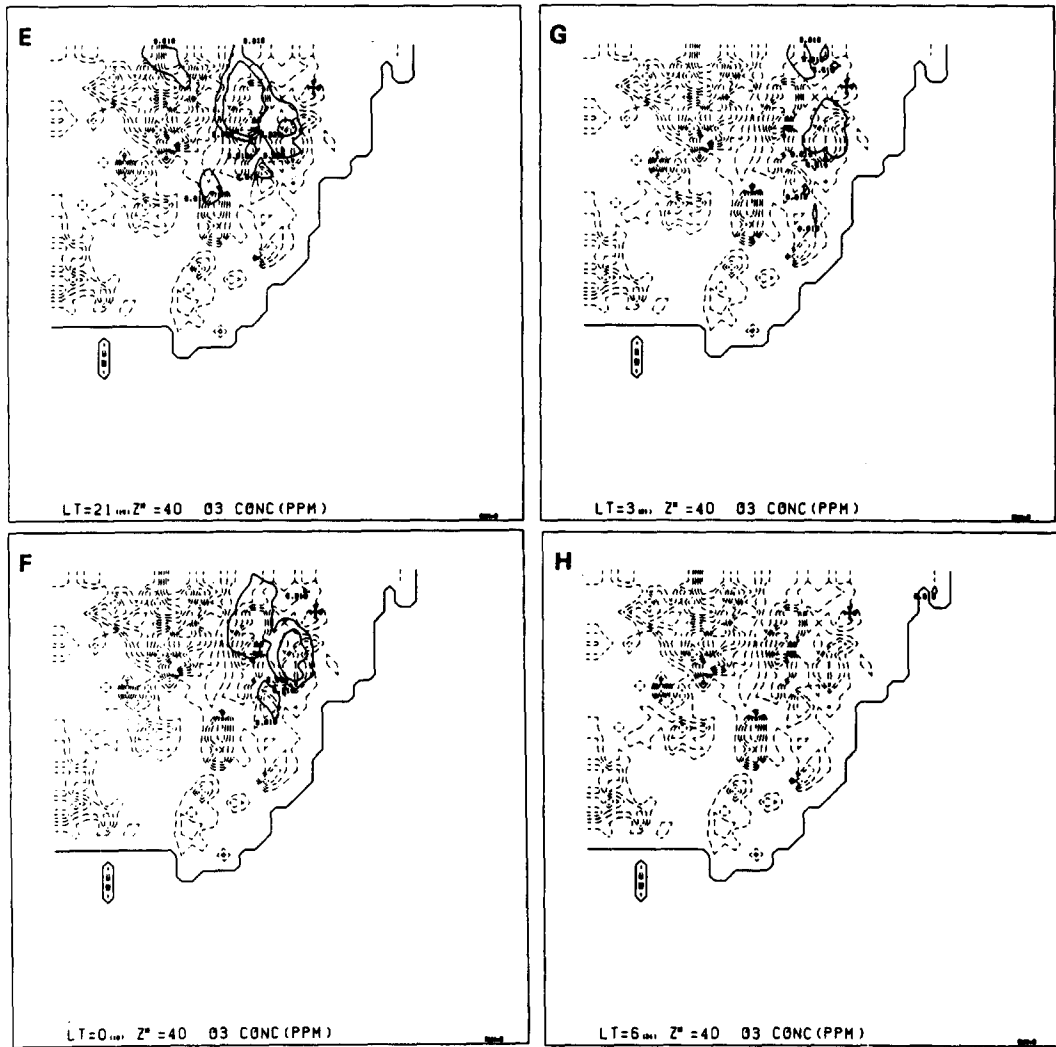


Fig. 7. (Continued)

측에서도 고농도 오존이 발생하리라고 추정된다. 1800LST경에는 일사량의 감소에 의해 농도감소가 매우 빠르게 진행되었으며, 고농도 오존역도 해풍의 영향으로 북쪽으로 많이 편향되어 있다.

2100LST이후에는 오존농도가 급격히 감소하여 영역의 북부에 저농도의 오존이 조금 잔존해 있는 정도였으며, 0600LST경에는 전 영역에서 오존농도가 거의 존재하지 않는 상태를 나타내었다. 따라서 오존농도는 이른 아침의 자동차의 통행 증가와 산업 시설에서 배출되는  $\text{NO}_x$ 와 HC는 희석되어 농도가 낮아지나 오존 농도는 상대적으로 증가하고 고농도지역

도 확대되는 것을 알 수 있다.

국지풍모델을 이용한 광화학 대기오염 모델을 수치 모의한 결과를 실측 시간별 오존농도 자료(덕천동, 1996. 8. 8)와 비교한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 덕천동은 모델영역 중앙부에 위치하고 있고(Fig. 3참조) 주거지역으로 분류되고 있으며, 해풍의 영향을 직접적으로 받고 있는 지역이라고 할 수 있다.

그리고 비교대상일은 국지풍모델의 초기조건과 가장 유사한 기상상태인 날을 선택하였으며, 이 날의 최고기온은 33.6℃, 최저기온이 23.3℃로 일교차가 비교적 컸고(10.3℃), 일평균상대습도는 71%, 일조시간은 11.5시간 그리

부산연안역에서 국지풍모델을 이용한 오존농도의 수치모의

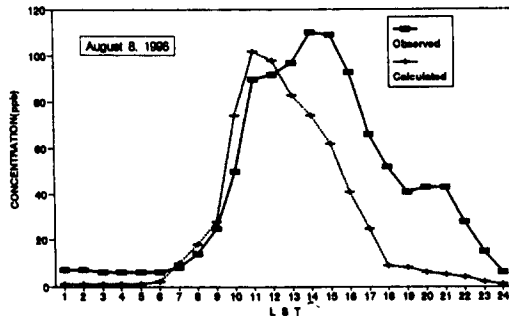


Fig. 8. Comparison of the observed and calculated concentration at Deokcheondong on August 8, 1996.

고 수평면 일사량이 23.33MJ/m<sup>2</sup>로 주간에 남풍계열의 해풍이 발생한 전형적인 고온다습한 여름날씨를 나타내었다. 이 날 부산지역의 오존농도의 최대값과 발생시간대를 보면, 대연동이 14시에 110ppb를 기록하였고, 연산동이 14시에 108ppb, 15시에 103ppb였으며, 범천동이 14시에 102ppb 그리고 신평동은 야간시간대에 고농도 오존을 나타내어, 이 날의 부산지역의 오존농도 분포는 광복동을 제외한 전 지역에서 우리 나라의 1시간당 환경기준치인 100ppb를 초과하였다.

이 날 덕천동에서의 오존농도 측정결과를 보

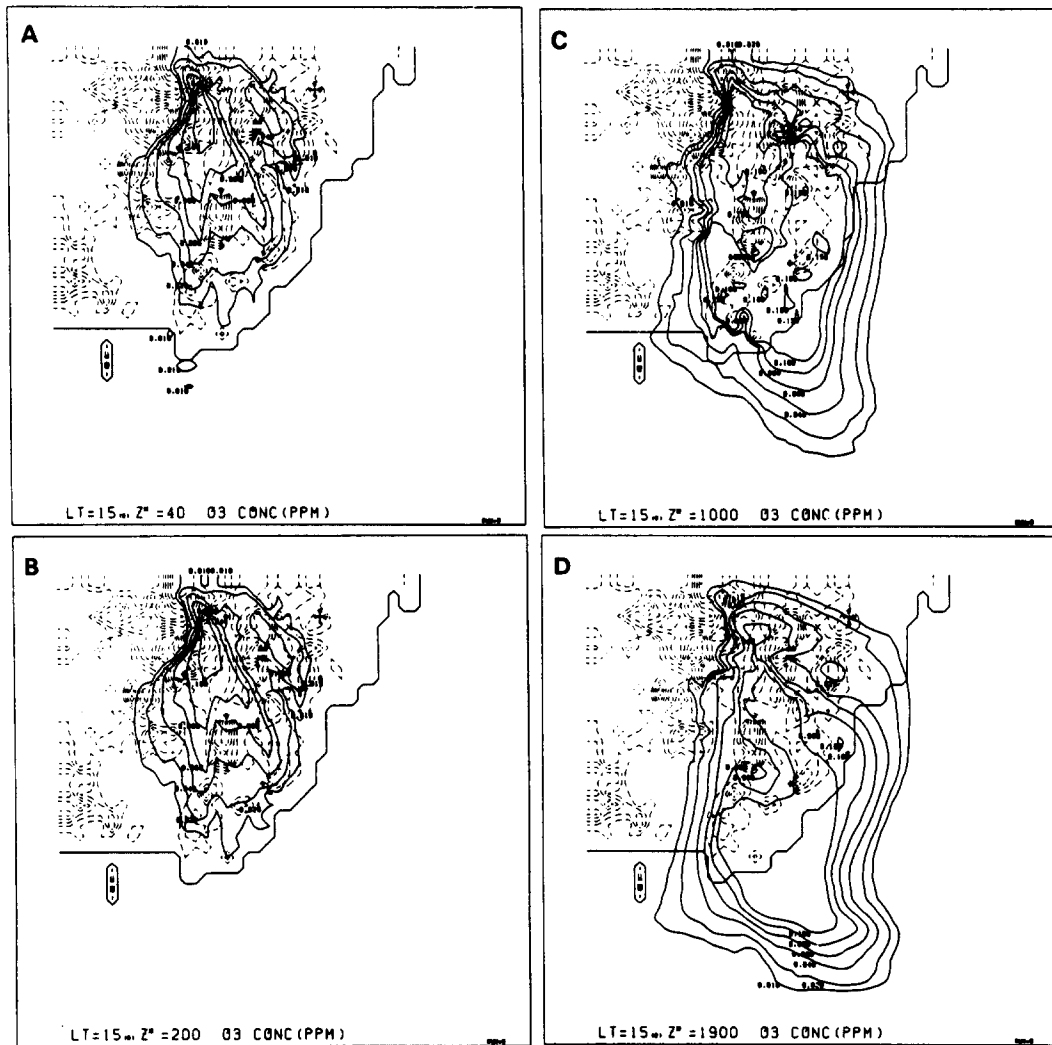


Fig. 9. Same as Fig. 7 but for concentration according to the height at 1500LST. (A)40m (B)200m (C)1000m (D)1900m.

면, 14시에 최대농도인 110ppb를 기록하였고, 60ppb를 초과하는 시간대는 11시부터 17시까지로 7시간동안 지속되는 고농도 오존을 나타내었다. 20시이후에 2차정점이 나타나는 현상이 있었으나, 새벽시간대의 농도값은 6ppb정도로 극히 낮은 값을 나타내었다. 그리고 본 연구의 광화학 대기오염모델을 수치모의한 결과를 보면, 11시에 최대농도인 102ppb를 기록하였고 60ppb를 초과하는 시간대는 10시부터 15시까지로 6시간동안 지속되었다. 또한 수치계산 농도값을 실제 측정된 농도값과 비교해 볼 때, 최대농도의 출현시간이 11시로 3시간정도 빨리 발생하였으며, 오후시간대 이후의 농도값이 실측치에 비해 낮게 계산되는 결과가 나왔으나, 새벽시간대의 농도값은 실측치와 비슷하게 계산되었다. 향후 식생으로부터 배출되는 자연적인 배출량을 포함하는 정확한 배출량자료의 입력과 예측력을 높이기 위한 국지풍모델의 정교화가 이루어진다면 실측 농도값과 수치모의 계산값과의 차이가 좁혀지리라고 판단된다.

Fig. 9는 하루 중에서 일사량이 가장 높고 해풍의 영향을 가장 많이 받는 1500LST의 고도에 따른 오존농도 분포이다. 지상 40m 고도에서 고농도 오존의 분포가 나타났고, 고도 200m에서도 고도 40m의 농도분포와 거의 유사한 분포를 보여주었다. 그리고, 고도 200m에서도 고도 40m의 농도분포와 거의 유사한 분포를 보여주었다. 그리고 고도 1000m에서는 상층에 나타나는 육풍의 영향으로 오존 분포가 해양쪽으로 많이 확산되어 있었으며, 고도 1900m에서도 1000m 고도에서와 같이 상층의 육풍의 영향이 오존농도 분포에서 뚜렷하게 나타났다. 그리고 이러한 상층에서의 오존농도가 지상보다 다소 높은 것은 전날 배출된 오염물질이 상층에 존재하기 때문에 추정되어지는데, 이와 같은 상층에서의 고농도 오존의 존재에 대해서는 여러 관측에 의해 실제로 확인된 바 있다(鶴田治雄, 1983; Lalas et al., 1987; Nester, 1995). 이러한 상층의 오염기체는 육풍의 영향으로 내륙에서 해양으로 이류·확산된 다음, 해수면으로 침강하게 되고 다음날 오전 해풍의 영향에 의해 내륙으로 유입되어 오존농도의 상승을 초래하는, 즉 해륙풍순환에 의해 오염물질이

폐쇄되는 상황이 형성될 수 있으므로 이러한 오염순환은 국지대기환경을 고찰하는데 있어서 대단히 중요하다.

## 5. 결 론

부산연안역에서 하계 지상풍의 특성을 관측 자료를 이용하여 분석하였으며, 3차원 국지풍 모델과 광화학 반응 모델(CBM: Carbon-Bond Mechanism)을 이용, 부산연안역의 국지풍과 광화학 대기오염물질의 이류확산과의 관계를 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

AWS자료를 이용하여 하계의 부산연안역 지상풍을 바람장미를 통해 분석한 결과, 해풍인 남서풍계열과 육풍인 북동풍계열의 바람이 뚜렷하게 나타났다. 그리고 종관바람이 없는 맑고 깨끗한 날을 입력조건으로 한 국지풍의 수치모의 결과, 전형적인 해륙풍순환을 나타내었다. 또한 국지풍을 이용한 부산연안역에서의 광화학 반응모델에 의한 오존농도분포를 보면, 오전에 연안부근에 분포하던 고농도역이 오후가 되면서 내륙 깊숙이 진입하고 있는 것으로 보아, 해풍의 영향을 크게 받고 있는 것으로 나타났다. 또한, 야간의 경우 오염원부근의 상층에 다량의 오존이 남아 있지만, 지상의 오존은 거의 없을 정도로 매우 낮은 농도를 나타내었고, 주간 상층 오존농도는 육풍의 영향에 의해 해양으로 이동하고 수송되고 있었다.

## 감사의 글

이 연구는 1995년도 한국과학재단 핵심전문연구(과제번호: 951-0401-014-2)과제 연구비 지원에 의해 수행된 것입니다.

## 참 고 문 헌

- 김유근, 제주도 지방의 해륙풍의 기후학적 특성과 Simulation에 관한 연구, 부산대학교 박사학위논문, 122pp(1988).  
 문승의, 장광미, 이화운, 해륙풍의 수치 모델에 관한 연구, 한국기상학회지, 26(2), 66-77(1990).  
 박순웅, 한반도에서 3차원 해륙풍 수치 모델의 결과, 한국기상학회지, 26(2), 78-103(1990).  
 박순웅, 윤일희, 종관바람장의 변화를 고려한 이차원 해륙풍 수치 모델링, 한국기상학회

- 지, 25(2), 80-93(1989).
- 방중선, 부산지역에서의 대기확산모델의 적용 및 평가, 부산대학교 석사학위논문, 77pp(1996).
- 신동빈, 이태영, 한반도 중부 지방에서의 해륙풍 순환에 미치는 지형의 영향, 한국기상학회지, 25(2), 56-69(1989).
- 오은주, Mesoscale에서의 대기유동과 확산에 관한 Simulation, 부산대학교 석사학위논문, 123pp(1995).
- 이태영, 신동빈, 남한 지역에서의 대기 순환에 관한 수치적 연구, 한국기상학회지, 25(4), 276-288(1989).
- 임승욱, 이동규, 종관규모 배경에 대한 제주섬에서 대기흐름의 수치실험, 한국기상학회지, 30(3), 377-399(1994).
- 장광미, 문승의, 조병길, 부산지방 해륙풍에 관한 Simulation, 한국환경과학회지, 2(1), 9-16(1993).
- 전병일, 부산 연안에서의 바람의 수치시뮬레이션에 관한 연구, 부산대학교 석사학위논문, 65pp(1993).
- 전병일, 김유근, 이화운, 해풍이 부산지역의 대기오염농도에 미치는 영향, 한국환경과학회지, 3(4), 357-365(1994).
- 전병일, 김유근, 이화운, 부산지역의 오존농도 특성과 기상인자에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 45-56(1995).
- 최길수, 문승의, 양인기, 문영수, 부산 지방의 해륙풍의 특성의 관한 연구, 부산대학교 자연과학논문집, 34집, 411-422(1982).
- 현중훈, 이동규, 3차원 중규모 모델을 이용한 제주도에서의 해륙풍 모의, 한국기상학회지, 26(2), 121-136(1990).
- 河村 武, 都市の大氣環境, 東京大學出版會, 185pp(1979).
- 鶴田治雄, 內陸域における大氣汚染の動態, 環境科學研究報告集, B180-S702, 114pp(1983).
- 李和云, 地域大氣環境の數値豫測モデル關する研究, 日本大阪大學, 博士學位論文, 306pp(1988).
- Anthes, R. A. and T. T. Warner, Development of hydrodynamic models suitable for air pollution and other meso-meteorological studies, Mon. Wea. Rev., 106, 1045-1078(1978).
- Atkinson, B. W., Meso-scale Atmospheric Circulation, Academic Press, London, 495pp(1981).
- Dayan, U. and J. Koch, Ozone concentration profiles in the Los Angeles basin - a possible similarity in the build-up mechanism of inland surface ozone in Israel, J. Appl. Meteor., 35, 1085-1090(1996).
- Estoque, M. A., A theoretical investigation of the sea breeze, Quart. J. R. Met. Soc, 87, 136-146(1961).
- Hecht, T. A. and J. H. Seinfeld, Development and validation of a generalized mechanism for photochemical smog, Environ. Sci. Technol., 6, 47-57(1972).
- Hjelmfelt, M. R., Numerical simulation of the effects of St. Louis on mesoscale boundary layer airflow and vertical air motion: Simulations of urban vs non-urban effects, J. Appl. Meteor., 21, 1239-1257(1982).
- Hjelmfelt, M. R. and R. R. Braham, Numerical simulation of the airflow over Lake Michigan for a major lake-effect snow event, Mon. Wea. Rev., 111, 205-219(1983).
- Kikuchi, Y., Arakawa, S., Kimura, F., Shirasaki, K. and Y. Nagano, Numerical study on the effects of mountains in the land and sea breeze circulation in the Kanto district, J. Meteorol. Soc. Japan, 59, 723-737(1981).
- Kimura, F., A numerical simulation of local winds and photochemical air pollution (I): Two-dimensional land and sea breeze, J. Meteorol. Soc. Japan, 61, 862-878(1983).
- Kimura, F. and S. Arakawa, A numerical experiment of the nocturnal low level jet over the Kanto Plain, J. Meteorol.

- Soc. Japan, 61, 848-861(1983).
- Kimura, F. and S. Takahashi, The effects of land-use and anthropogenic heating on the surface temperature in the Tokyo metropolitan area: numerical experiment, *Atmos. Environ.*, 25, 155-164(1991).
- Kondo, A., Yamaguchi, K. and H. K. Ahn, Simulation of climatic effects by construction of reclaimed island in Pusan, Korea, *Atmos. Environ.*, 30(13), 2437-2448(1996).
- Lalas, D. P., Tsella, M. T., Petrakis, M., Asimakopoulos, D. N. and C. Helmis, An experimental study of the horizontal and vertical distribution of ozone over Athens, *Atmos. Environ.*, 21(12), 2681-2693(1987).
- Mahrer, Y. and R. A. Pielke, The effect of topography on sea and land breeze in a two-dimensional numerical model, *Mon. Wea. Rev.*, 1151-1162(1977).
- McNider, R. A. and R. A. Pielke, Diurnal boundary-layer development over sloping terrain, *J. Atmos. Sci.*, 38, 2198-2212(1981).
- Moussiopoulos, N., Sahm, P. and C. H. Kessler, Numerical simulation of photochemical smog formation in Athens, Greece - A case study, *Atmos. Environ.*, 39(24), 3619-3632(1995).
- Nester, K., Influence of sea breeze flows on air pollution over the Attica Peninsula, *Atmos. Environ.*, 39(24), 3655-3670(1995).
- Neumann, J. and Y. Mahrer, A theoretical study of the land and sea breeze circulation, *J. Atmos. Sci.*, 28, 532-542(1971).
- Ohara, T., Sakamaki, F., Akimoto, H., Ueda, H. and S. Wakamatsu, Comparative analysis of photochemical reaction models based on the smog chamber data, *J. Japan Soc. Air Pollut.*, 25, 246-259(1991).
- Ohara, T., Wakamatsu, S., Uno, I., Ando, T. and S. Izumikawa, An analysis of annual trends of photochemical oxidants in the Kanto and Kansai areas, *J. Japan Soc. Air Pollut.*, 30(2), 137-148(1995).
- Ozoe, H., Shibata, T., Sayama, H. and H. Ueda, Characteristics of air pollution in the presence of land and sea breeze - a numerical simulation, *Atmos. Environ.*, 17, 35-42(1983).
- Pielke, R. A., A three dimensional numerical model of the sea breeze over south Florida, *Mon. Wea. Rev.*, 102, 115-143(1974).
- Pielke, R. A., An overview of our current understanding of the physical interactions between the sea and land breeze and the coastal waters, *Ocean Mgt.*, 6, 87-100(1981).
- Pielke, R. A., McNider, R. T., Segal, M. and Y. Mahrer, The use of a mesoscale numerical model for evaluations of pollutant transport and diffusion in coastal regions and over irregular terrain, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 64, 243-249(1983).
- Segal, M., McNider, R. T., Pielke, R. A. and D. S. McDougal, A numerical model simulation of the regional air pollution meteorology of the Greater Chesapeake Bay area - Summer day case study, *Atmos. Environ.*, 16, 1381-1397(1982).
- Whitten, G. Z., Hogo, H. and J. P. Killus, The carbon-bond mechanism: A condensed kinetic mechanism for photochemical smog, *Environ. Sci. Technol.*, 14, 690-700(1980).