한국환경과학회지 제7권(제4호), 511~521, 1998
J. of the Korean Environmental Sciences Society

국지풍모델을 이용한 연안지역 거대 점오염원의 이류확산 수치모의

전 병 일
신라대학교 환경학과
(1997년 12월 31일 접수)

Numerical Simulation of Dispersion of a Vast Point Source in Coastal Area using the Local Wind Model

Byung-Il Jeon
Dept. of Environmental Sciences, Silla University, Pusan, Korea
(Manuscript received 31 December 1997)

The two-stage numerical model was used to study the relation between three-dimensional local wind model, advection/diffusion model of random walk method and second moment method in western coastal area for Korean peninsula. The first stage is three dimensional time-dependent local wind model which gives the wind field and vertical diffusion coefficient. The second stage is advection/diffusion model which uses the results of the first stage as input data.

First, wind fields on Korean peninsula for none synoptic scale wind showed typical land and sea breeze circulation, and the emitted particles were transported by sea breeze for daytime, emissions return to sea by land breeze for nighttime.

Key words : three-dimensional local wind model, advection and diffusion model, random walk method, second moment method

1. 서 론

대기오염물질을 대기 유동을 따라 흐르는 추적자라고 할 수 있기 때문에 대기 중의 오염물질의 거동을 연구·조사하는 것은 기상학적측면으로 보아 매우 의미있는 것이라 할 수 있다. 대기오염농도는 수평풍외에 연직풍이나 난류확산의 영향을 받고 있으며, 항공기 등에 의한 입체적인 오염관측은 국지풍의 연직구조에 관한 유익한 정보를 제공하고 있으며, 현실적으로 오염물질은 방출 후 다른 물질과의 반응과 변질이 있을 수 있고 또, 배출원이 정확하게 파악되지 않는 것 등 여러 가지 어려운 문제가 있기 때문에 대기오염연구에서의 국지풍의 중요성은 매우 크다고 할 수 있다(MRI, 1984). 연안지역에 위치한 대부분의 대도시는 주요한 인공오염원과 인구밀집지역이 연안지역에 집중되어 있는 추세이며, 특히 연안지역은 주위의 산들에 의해 발생하는 산곡풍과 해륙풍에 의해 오염물질이 정체·수렴되어 특정지역에 오염농도를 증가시키기도 한다 (Robinsohn *et al.*, 1992; Papageorgiou, 1988).

우리 나라의 연안지역에는 화력발전소와 원자력발전소와 같은 점오염원이 산재해 있는 실정이다. 먼저, 화력발전소는 우리 나라 대기오염배출량 중에서 절대적으로 높은 비중을 차지하고 있으며, 계속 증설되고 있는 추세이다. 특히 서해안의 영흥도에는 연료의 다변화차원에서 대기오염배출농도가 LNG보다 8배이상 높고 오염방지시설이 100% 가동된다하더라도 불가피하게 이황산가스의 20%는 배출될 수 밖에 없는 대형화력발전소가 건설될 계획이다. 그리고 원자력 발전은 우리 나라 주요전력 수급원으로 그 비율을 높이려는 것이 정부의 의도로서, 특히 두 차례의 유류파동 이후 연료를 대체할 만한 것이 없는 시점에서 큰 각광을 받고 있는 상황이다. 그러나 1979년 3월 28일의 미국 드리마일 섬 원자력발전소 사고와 1986년 4월 26일의 구 소련의 체르노빌사고를 계기로 원자력 발전에 대한 인식은 크게 달라지면서 안전에 대한 의문이 급속히 증가되고 있는 추세임에 틀림 없다 (Kimura and Yoshikawa, 1988; Yoshikawa, *et al.*, 1990). 우리 나라는 이러한 발전소의 대부분이 도시 인근의 연안 지역에 위치함으로 해서 화력발전소에 의한 대기오염방출과 원자력발전소의 방사능오염물질의 유출사고에 의해 오염물질이 얼마든지 도시와 내륙으로 배출되어 인체와 동·식물에 심각한 피해를 발생시킬 수 있는 상황에 있다고 할 수 있겠다.

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 미국

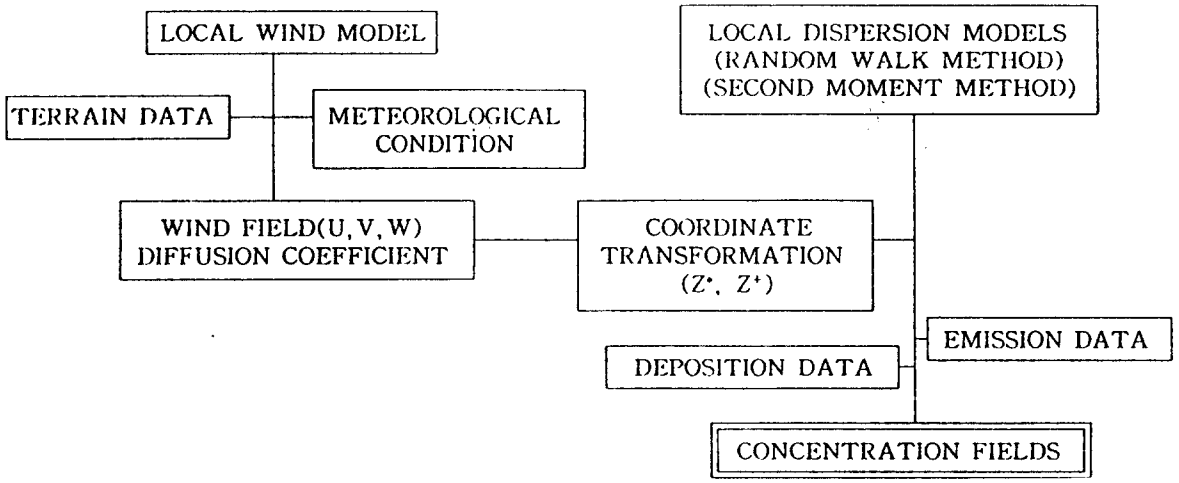

Fig. 1. The numerical prediction system of local pollution model.

의 남부 플로리다주를 완전히 평지라고 가정하고 해륙풍을 수치모의하였다. 또한 Mahrer와 Pielke (1977)는 2차원 산악에서, Kikuchi *et al.*(1981)은 산이 있는 일본 관동평야에서 국지풍을 수치모의하였으며, 이들의 연구경향은 해륙풍과 산곡풍뿐만 아니라 열섬효과 (Hjelmfelt, 1982)와 저층제트 (McNider and Pielke, 1981)를 포함한 국지풍 수치모의와, 이러한 국지풍을 이용한 대기오염물질의 수송에 관한 수치모의 (Segal *et al.*, 1982; Pielke *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 온위, 대기 확산 계수 등을 달리하여 부산 연안의 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 단파에너지를 매개 변수화한 해륙풍 모델을 개발하여 한반도의 중규모 대기순환을 연구하였으며, 전병일 (1993, 1997)은 부산 연안에서 지형이 고려된 3차원모델을 수치모의하여 매우 유효한 결과를 얻었 바 있다. 그리고 현종훈과 이동규 (1990), 임승욱과 이동규 (1994)는 PSU/NCAR 중규모 모델을 이용해 제주도 지방의 해륙풍을 모의한 바 있다.

random walk 법은 화력발전소와 같은 점오염원에서 방출된 비반응성 오염물질 이류에 대한 연구(Diehl *et al.*, 1982; Robinsohn *et al.*, 1992)와 원자력발전소에서 방사능 오염물질이 유출되었을 때 방사능 입자의 추적에 많이 이용되고 있다 (Kimura and Yoshikawa, 1988). 입자법에 대한 국내의 연구로는 박순웅 (1994a)이 라그랑지 입자확산모델을 이용해 비반응성 오염물질의 농도를 추정한 연구가 있으며, 지상관측자료를 이용해 같은 입자확산모델에 적용시켜 서해안가에 위치한 오염원에서 배출되는 오염물질이 어떻게 확산, 수송되는지를 살펴본 바 있으나(박순웅, 1994b), 국지풍모델과 결합하여 얻어진 결과는 아직 없는 실정이다.

2차 모멘트법은 Eagan과 Mahoney (1972)에 의해 처음으로 개발되었고, Pederson과 Prahm (1974)에 의해 수정 · 보완되었다. 이 방법은 준 라그랑지적이고 전체 질량이 보존되며, 다른 수치 scheme에 존재하는 wake나 plague가 없는 것이 특징이다. 2차모멘트법의 정확성은 Pederson과 Prahm (1974)에 제기된 width-correction 기법으로 분포폭을 재수정함으로써 향상시킬 수 있었고, 계산적으로 편리하며, fully implicit, Crank-Nicholson cubic spline, chapeau-function 기법을 사용할 때 나타나는 tri-diagonal system을 피할 수 있는 장점이 있다. 또, Christensen과 Prahm (1976)은 수치 scheme의 정확성을 다른 수치 방법과 비교하여 우수함을 증명한 바 있다. 그리고 2차 모멘트법은 Kerr과 Blumberg (1979)에 의해 분석된 바 있고, Long과 Pepper (1981)가 스칼라 이류 계산을 다른 여러 수치 scheme과 비교하여 우수성을 증명한 연구가 있다.

따라서 본 연구에서는 발전소와 같은 점오염원에서 이러한 오염물질이 연안지역에 배출되었을 때 국지풍에 의해 오염물질의 이류확산이 어떠한 양상으로 전개될 것인지를 국지풍 수치모델 및 random walk 법 그리고 2차 모멘트법을 이용하여 오염물질의 이동과 배출농도 분포의 특성을 고찰 · 예측하는데 그 목적이 있다.

2. 수치모델

2.1 국지풍모델

본 연구에서 사용한 국지대기오염모델의 계통을 살펴보면, Fig. 1에서 보는 바와 같이 국지풍모델과 국지확산모델로 나눌 수 있고, 국지확산모델은 다시 random

Table 1. Input parameters used to initialize the model

Horizontal grid interval	20 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^2/s
Maximum value of vertical diffusion coefficient	500 m^2/s
Horizontal diffusivity	1500 m^2/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^{-1})
Initial value of land surface temperature at sea level	298 K
Albedo(on land)	0.12
Initial surface pressure	1000hPa

walk 법을 이용한 입자모델과 2차 모멘트법을 이용한 격자모델로 나눌 수 있다. 대기오염 수치모델의 제 1단계인 국지풍모델에서는 지형, 지표의 상태와 기상조건 등이 입력되고 바람장과 확산계수의 입체분포와 시간변화가 매시간마다 출력되며, 이들 자료는 지형의 좌표변환과 함께 국지확산모델에 입력된다. 제 2단계의 국지확산모델에서는 오염원 자료와 침적자료가 추가되어, 이류확산의 수치적분이 행해져서 오염물질의 농도가 매시간 출력되는 형태를 취하고 있다.

본 연구에서 사용한 국지풍모델의 기초방정식은 Boussinesq 근사와 비정역학평형 근사를 가정한 방정식계로서 비직교좌표계인 z^*좌표계를 사용하였다 (Kimura, 1983; Kimura and Takahashi, 1991).

운동방정식은

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

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

$$\frac{\partial hw}{\partial t}+u\frac{\partial hw}{\partial x}+v\frac{\partial hw}{\partial y}+w\frac{\partial hw}{\partial z}=$$
$$-z_T\Theta\frac{\partial \pi}{\partial z}+gh\frac{\theta}{\Theta} \quad (3)$$

이다. 여기서 u,v,w는 각각 x,y,z방향의 속도성분이며, 식(1), (2)의 우변 제1항은 전향력을 나타내고, 제2항과 제3항은 기압경도력과 지형에 의한 보정항, 제4항은 연직확산을 나타낸다. 또한, 식(3)의 우변 제1항과 제2항은 연직기압경도와 부력을 나타낸다.

열역학 방정식 및 수증기 보존 방정식은

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

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

이다. 여기서 θ, q는 각각 온위, 수증기 비습이며, 식(4)의 우변 제2항은 복사에 의한 가열 및 냉각를 나타낸다. 그리고 이 모델에서는 수증기의 응결과정은 고려하지 않았다.

연속방정식은

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

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

여기서

$$h=z_T-z_G \quad (7)$$

$$\frac{d}{dt}=\frac{\partial}{\partial t}+u\frac{\partial}{\partial x}+v\frac{\partial}{\partial y}+w^*\frac{\partial}{\partial z} \quad (8)$$

$$hw^*=z_Tw+(z^*-z_T)(u\frac{\partial z_G}{\partial x}+v\frac{\partial z_G}{\partial y}) \quad (9)$$

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

본 연구에서 사용한 계산영역은 한반도를 중심으로 하여 수평방향이 각각 (x와 y) 820km를 선택하고, 격자간격은 20km로 42×42격자점을 이용한다. 연직방향으로는 15, 50, 120, 235, 350, 500, 700, 900, 1100, 1400, 1800, 2200, 2800, 3600, 4400, 6000m의 16층으로 나누어서 계산하며, 적분시간간격은 15sec이며, 0600LST부터 48시간동안 적분하여 2일째의 값을 취하였다. 국지풍모델 수행에 사용된 매개변수들은 Table 1과 같이 에어로솔이나 구름에 의한 흡수, 그리고 미산란이 없는 맑고 깨끗한 날과 종관바람이 없는 전형적인 하계의 날을 대상으로 선정하여 수치모의하였다.

2.2 random walk 법

대기 중에 방출된 대기오염물질은 대기의 평균적인

흐름을 타고 풍하방향으로 운반되면서 그때 그때의 기류의 난류에 의해 상하, 전후 좌우로 불규칙하게 움직인다. 이러한 난류성분을 Markov-chain scheme과 random walk scheme으로 매개변수화할 수 있고 (Uliasz, 1993), 본 연구에서 사용한 입자법은 오염원에서 방출된 라그랑지안 입자를 random walk scheme으로 계산하는 random walk 법이다.

이 방법에서의 입자 운동은 3차원 바람장과 난류확산에 관련된 random한 연직속도로부터 계산되며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x(t+\triangle t)=x(t)+U\triangle t+\sqrt{2\triangle tK_H}\cdot RND$$
$$y(t+\triangle t)=y(t)+V\triangle t+\sqrt{2\triangle tK_H}\cdot RND \quad (10)$$
$$z(t+\triangle t)=z(t)+W\triangle t+\sqrt{2\triangle tK_z}\cdot RND$$

여기서 좌변은 △t후의 입자의 새로운 위치, 우변 제 1항은 입자의 현 위치, 제 2항은 평균류에 의한 이류, 제 3항은 난류에 의한 확산을 나타내는 random한 이류이며, RND는 난수(random number)이고, -0.5에서 0.5까지이다. 그리고 K_H, K_z는 각각 수평확산계수와 연직확산계수이다.

입자의 지표면의 침적은 reference level (z=△z)이하인 개개의 입자에 대해 다음과 같이 확률 P로 입자를 침적시키며,

$$P=\frac{\Delta M}{M}=v_d\frac{\Delta t}{\Delta z} \quad (11)$$

여기서 v_d는 침적속도(deposition velocity)로 대기안정도나 바람 그리고 오염물질형태 그리고 지표면 상태에 따라 달라지지만 본 연구에서는 상수로 취급하여 0.01 m/s로 하였다. 일반적으로 침적속도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_d=\frac{F}{C} \quad (12)$$

여기서 F는 오염물질 침적플럭스 ($gm^{-2}s^{-1}$), C는 오염농도 (gm^{-3})이며, M은 물질의 질량이며, 그 외의 입자에 대해서는 지면에서 반사조건을 적용한다.

2.3 2차 모멘트법

격자법(grid model)에서 물질의 이류확산을 계산하면 이른바 의사확산(artificial diffusion)에 의해 계산결과가 차이가 나타나게 된다. 특히 점오염원에서는 발생원 근방에서 음의 농도와 위(僞)파동요란(ripple)이 생기기 때문에 격자법의 적용은 어렵다고 생각된다. 한편, 입자법(particle method)은 의사확산이 없고 점오염원문제에 광범위하게 적용되고 있지만, 안정한 농도해를 얻기 위해서는 상당히 많은 양의 입자를 발생시키지 않으면 안되는 결점이 있다. 위와 같은 단점을 없애기 위해서 본 연구에서는 2차모멘트법을 도입하였다.

2차 모멘트법은 격자에 의해 분할된 격자의 내부에서 물질의 농도분포형은 임의의 폭을 가지고 일정한 분포(장방형)를 가지며, 격자의 폭은 △x의 격자간격으로 정규화하고 단위길이라고 한다. 그리고 이 분포는 다음과 같은 0, 1, 2차 모멘트(평균농도:C, 질량중심위치:F, 분포폭:R)에 의해 다음과 같이 일의적으로 정해지며, 적분구간은 (-1/2, 1/2)이고 c'는 물질농도, ξ는 어떤 격자에서 물질의 상대적인 변위를 나타낸다.

$$C=\int c'd\xi$$
$$C\cdot F=\int c'\xi d\xi \quad (13)$$
$$C\cdot R^2=12\int c'(\xi-F)^2d\xi$$

일반류에 의한 이동 즉, 이류는 1차 모멘트만으로

$$F'^{+1}=F'+o \quad (14)$$

$$\sigma=U\frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (15)$$

변화하며, 여기서 U는 일반풍속이다.

분포의 폭은 확산과정(diffusion process)에 의해

$$(R'^{+1})^2=(R')^2+\gamma^2 \quad (16)$$

$$\gamma^2=24K\frac{\Delta t}{\Delta x^2} \quad (17)$$

로 넓어지며, 여기서 K는 확산계수이다.

이류 혹은 확산에 의한 경계를 초월하여 변화한 경우에는 각각의 격자에 존재하는 물질에 새롭게 분포를 하게 된다. 그리고 한개의 격자에 복수개의 물질(C_i, F_i, R_i)이 존재하는 경우에는 다음과 같이 전체의 0, 1, 2차 모멘트를 보존하는 것과 같은 일정한 분포로 다시 구성되며, 간단한 직교 농도분포는 일정한 바람장에서는 이래와 같은 scheme에 의해 변형없이 이류되고 모든 경우에 대해서 분포폭도 유지될 것이다. 그러나 바람장이 변할 때의 정확성은 이류단계의 시작점과 끝점에서 바람벡터의 내삽에 의해 다음과 같이 유지할 수 있다.

$$C=\Sigma C_i$$
$$C\cdot F=\Sigma C_i\cdot F_i \quad (18)$$
$$C\cdot R^2=\Sigma C_i\cdot(R_i^2+12F_i^2)-12C\cdot F^2$$

2차 모멘트법은 개념적으로 입자법과 격자법의 중간에 위치하고 작은 의사확산과 농도환산의 용이함을 함께 가지고 있다는 장점이 있다. 그리고 어떤 하나의 점오염원의 농도 즉 초기농도가 현격하게 높을 때도 무리없이 사용 가능하다.

3. 수치모의 결과

3.1 국지풍모델에 의한 바람장의 계산 결과

국지풍모델에서 얻어진 지상 15 m고도에서의 바람장의 공간분포를 3시간 간격으로 Fig. 2에 나타내었다. 0900 LST경에 태백산맥의 동쪽경사면을 비롯하여 부산동해안까지 약한 동풍계열의 바람이 불고 있으며, 지리산을 중심으로 곡풍 형태의 바람이 정상을 향해서 불어 올라가고 있다. 그 밖의 지역에서의 바람은 아주 미약하거나 거의 없는 무풍상태를 나타내고 있다. 이 시각은 일반적으로 해풍이 내륙으로 깊게 진입하지 않을 시각이나, 곡풍이 먼저 발달하고 그 후에 해풍이 곡풍과 합쳐져 결과적으로 해풍이 내륙까지 침투한 것으로 해석되어 진다. 1200 LST가 되면서 지면온도가 0900 LST에 비해 상승하면서 산악의 영향이 거의 없는 내륙 평탄지역에서도 수평온도경사가 발생하여 한반도 모든 지역에서 해풍이 강화 발달하여 내륙으로 진입하는 모양을 볼 수 있다. 특히 태백산맥 동쪽 산악지역 부근에서는 이미 발생한 국지순환과 해풍이 합쳐져 0900 LST보다 더 강한 국지순환이 매우 뚜렷하게 나타나고 있다. 특히 지리산 부근에서는 0900 LST보다 강한 수

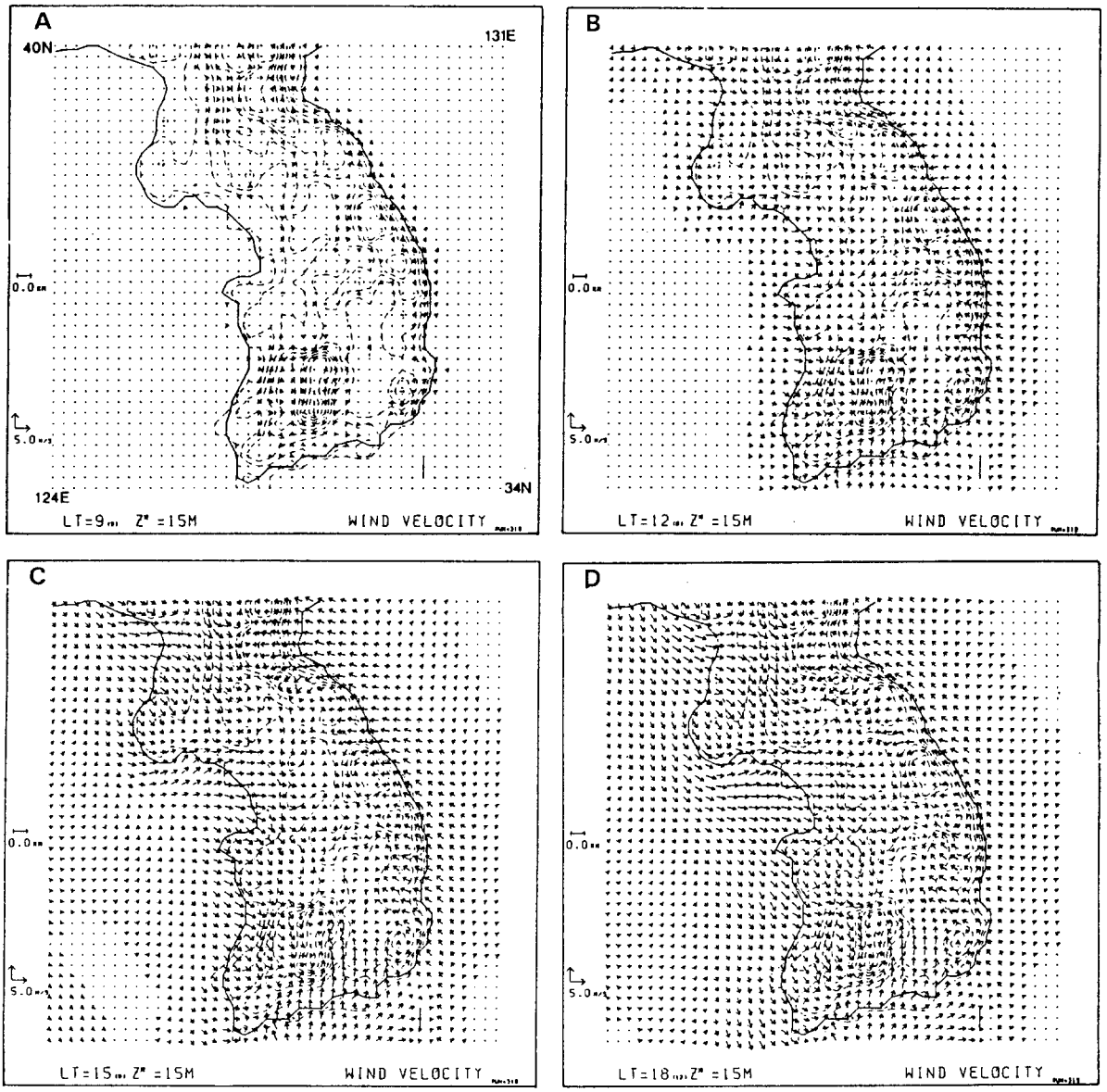

Fig. 2. Variation of the horizontal wind distributions at the height of 15m calculated from the three-dimensional local wind model. (A)0900LST (B)1200LST (C)1500LST (D)1800LST (E)2100LST (F) 0000LST (G)0300LST (H)0600LST

렴대가 형성되어, 강한 저기압성 소용돌이 형태를 취하고 있으며, 본 연구의 관심지역인 서해안에도 서풍계열의 바람이 약하게 나타나고 있다.

1500 LST경에는 1200 LST보다 한반도 모든 지역에서 바람의 세기가 강해진 것을 알 수 있으며, 지리산부근에서는 저기압성 소용돌이가 매우 강하게 발생하고 있다. 또한 인천 서해안에서부터 경기내륙지역으로 서풍계열의 해풍이 강하게 불고 있으며, 충청 서해안에서는 북서풍계열의 해풍이 충청도 내륙으로 깊숙이 진입하고 있는 것을 알 수 있다. 1800 LST경에는 태양복사에너지의 감소로 서서히 해풍의 강도가 약화되어 가는 시각으로 1500 LST보다 산악지역부근에서 바람의 강도가 약해졌으나, 여전히 해안지역을 중심으로 해풍이 나타나고 있다. 2100 LST경에는 지표면온도의 감소로 서해안 일부지역을 제외하고 전 연안역에서 해풍의 성분은 사라지고 태백산맥과 지리산부근에서는 산풍이 나타나 육풍으로 되어 있으며, 동해안에서는 서풍이 불고 있다. 0000LST경에는 전 해안에서 육풍이 불고 있으며 지리산부근에서는 산정상을 중심으로 산풍의 형태로 발산하는 양상을 보이고 있다. 서해안 지역에서는 눈에 띄게 우세한 바람성분이 없는 상태를 나타내고 있다. 0300 LST와 0600 LST에는 0000 LST보다 산풍과 육

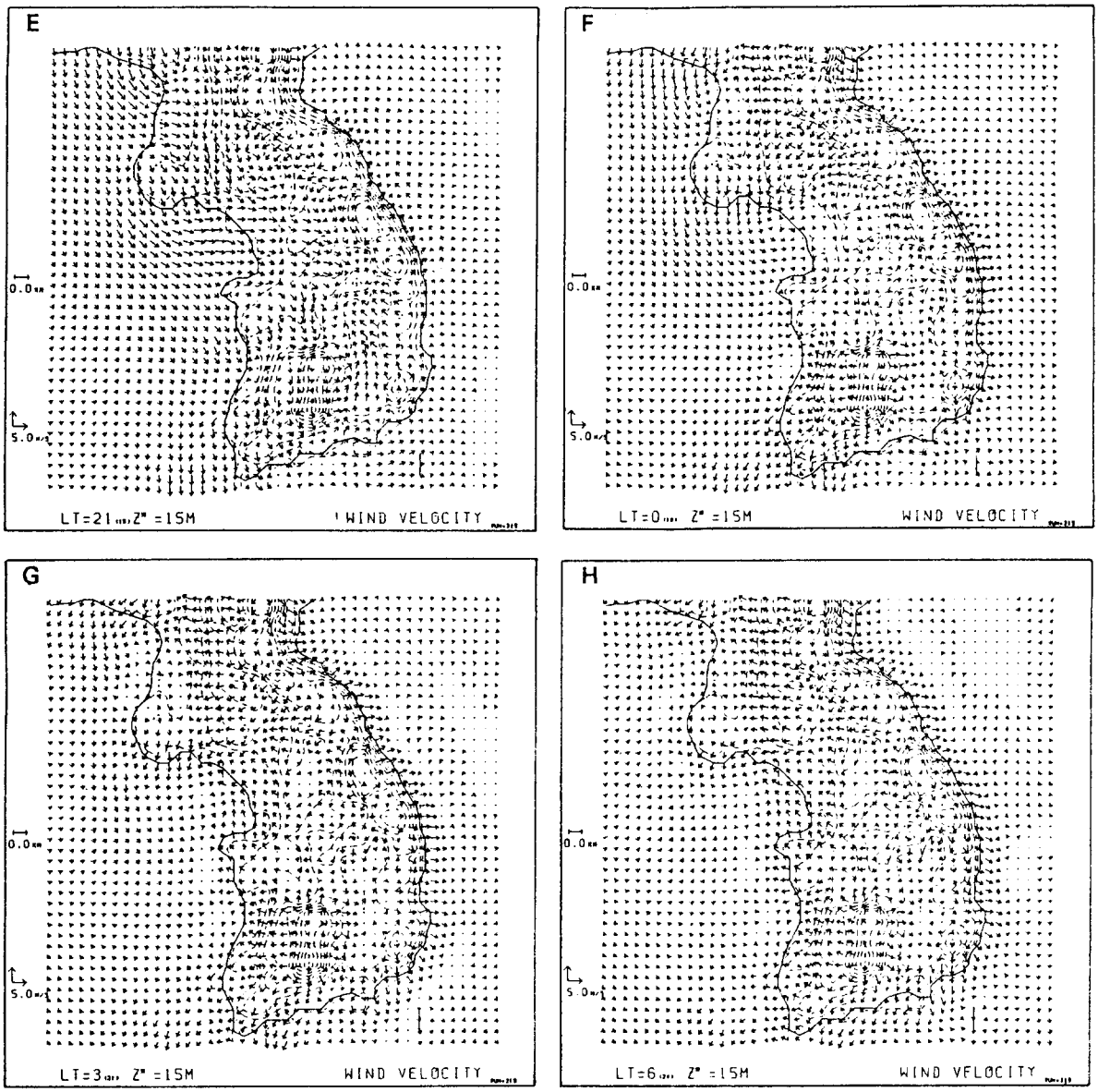

Fig. 2. Continued.

풍이 합쳐서 강한 바람이 나타나고 있으며, 서해안에는 육풍인 동풍계열의 바람이 비교적 강하게 불고 있다. 한반도의 바람장을 중규모 국지풍모델에 의해 수치모의한 결과, 산악지역과 해안지역에서 지형적인 특성이 잘 나타나 주었으며, 여러 다른 연구자의 계산결과와 거의 일치하였다 (신동빈과 이태영, 1989; 박순웅, 1990)

3.2 random walk법에 의한 확산 실험 결과

수치계산 대상영역은 국지풍모델과 같이 20 km간격으로 42×42의 격자를 가지고 있으며, 입자의 방출지점은 한반도 서해안의 가상 거대점오염원으로 격자지점은 (18, 18)이고, 방출고도는 지상 100 m이다. 수평확산계수는 100 m^2/s, 침적속도는 0.02 m/s이며, 0600 LST부터 1분에 1개씩의 입자를 배출시켜 24시간 수치모의하여 1시간마다의 결과를 얻어 3시간 간격으로 입자의 위치를 투사시킨 것이 Fig. 3이다.

0900 LST경에는 아직 해풍이 발달하지 않은 관계로 입자방출지점주위에 모여 있는 형태를 취하고 있으나, 1200 LST경에는 해풍의 발달로 입자가 내륙쪽으로 동진한 것을 알 수 있으며, 1500 LST경에는 해풍이 더욱 발달한 결과로 내륙 남동쪽으로 60 km정도 진입한 것을 알 수 있다. 그리고 상층까지 도달한 입자는 상층의 반환류인 육풍에 의해 서해의 해안선가까이에도 입자가 도달하고 있다. 1800 LST경에는 입자들의 분포가 방출지점으로부터 남동쪽으로 많이 흩어져 있으며, 상층의 반환류에 의해 서해까지 되돌아간 입자도 보인다. 2100

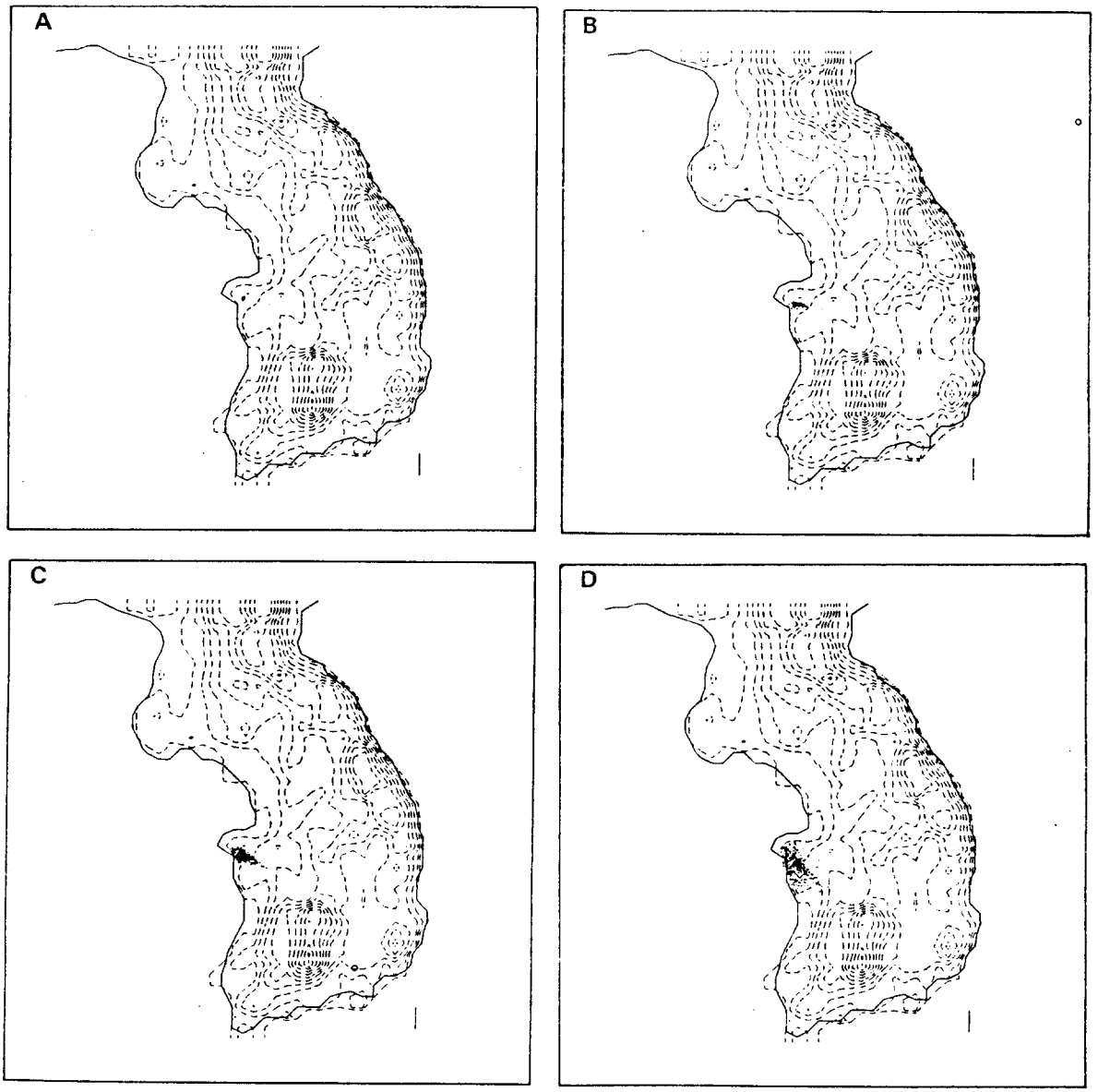

Fig. 3. The XY projection the simulated Lagrangian particle distribution for particle emitted continuously from vast point source in the western seashore for Korean peninsula. (A)0900LST (B)1200LST (C) 1500LST (D)1800LST (E)2100LST (F)0000LST (G)0300LST (H)0600LST

LST경에는 방출지점로부터 동쪽내륙보다는 남쪽내륙으로 입자가 치우쳐 분포하고 있으며, 0000 LST경에는 2100 LST보다 넓게 분포하고 상층의 반환류에 의해 방출지점의 북쪽으로도 다량 흩여져 있는 것을 알 수 있다. 0300 LST와 0600 LST경에는 육풍에 의해 서해상으로 입자가 많이 치우쳐 나타나고 있으며, 가장 남쪽으로 날아간 입자는 180 km정도 된다. 국지풍모델과 randon walk법에 의해 수치모의된 입자는 국지풍 즉 해륙풍과 산곡풍에 의해 그 양상이 결정된 것을 알 수 있었다.

3.3 2차 모멘트법에 의한 확산 실험 결과

수치계산 대상영역은 국지풍모델과 같이 20 km간격으로 42×42의 격자를 가지고 있으며, 한반도 서해안의 가상 거대점오염원으로부터 비반응성의 대기오염물질이 방출된다고 가정하여 수치모의하였다. 오염물질 방출지점의 격자점은 (18, 18)이고 방출시작시각은 0600 LST이고 24시간동안 수치모의하였다. Fig. 4는 2차 모멘트법을 이용한 한반도 서해안에서의 대기오염물질분포이며, 농도등치선은 상대적인 농도값으로 절대적인 농도값은 아니다.

0900 LST경에는 해풍이 아직 발달하지 않은 관계로

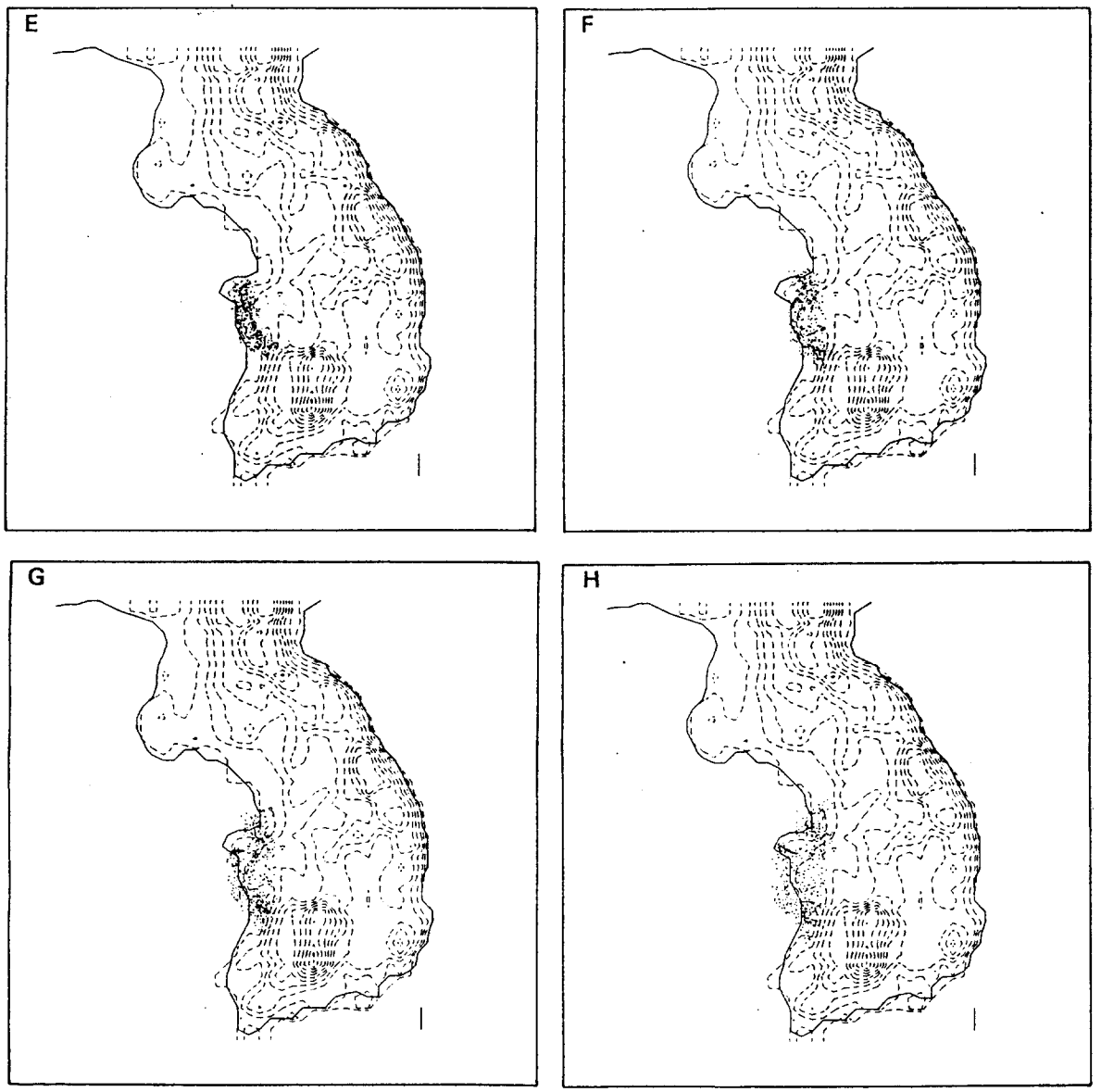

Fig. 3. Continued.

방출지점주위에 오염물질이 모여 있으며, 1200 LST경에도 0900 LST와 비슷한 오염물질 분포를 나타내고 있다. 1500 LST경에는 해풍의 영향으로 오염분포역이 동쪽내륙으로의 진행이 있었다는 것을 볼 수 있으며, 1800 LST경에는 더욱 더 남동내륙으로 확장하였으며, 2100 LST경에는 1800 LST보다 오염역이 동쪽과 남쪽으로 더욱 확산되어 최대 200 km까지 날아갔다. 0000 LST경에는 육풍의 영향으로 서해상으로 오염역이 수송되었으며, 0300 LST와 0600 LST에는 오염역이 육풍의 영향으로 서해상으로 60 km정도 수송한 것을 알 수 있으며, 상대적으로 내륙의 오염농도는 상당히 낮게 나타났다. 2차모멘트법에 의한 오염물질분포는 국지풍에 의한 바람장 수치모의 형태와 매우 잘 일치하여 나타났다.

4. 결 론

한반도 서해안지역의 점오염원에서의 국지풍과 대기오염물질의 이류확산과의 관계를 조사하기 위해 바람장과 연직확산계수가 계산되는 국지풍모델과 random walk법 및 2차 모멘트법의 이류확산모델을 이용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 먼저, 일반풍이 없는 상태의 한반도에서의 바람장은 전형적인 해륙풍과 산곡풍이 발생하였으며, 방출된 입자는 국지풍 즉 해륙풍에 의해 낮에는 해풍의 영향으로 내륙쪽으로 깊숙히 수송하였으며, 야간에는 육풍의 영향으로 서해상으로 되돌아가는 경향을 나타내었다. 특히 해풍에 의해 내륙으로 200

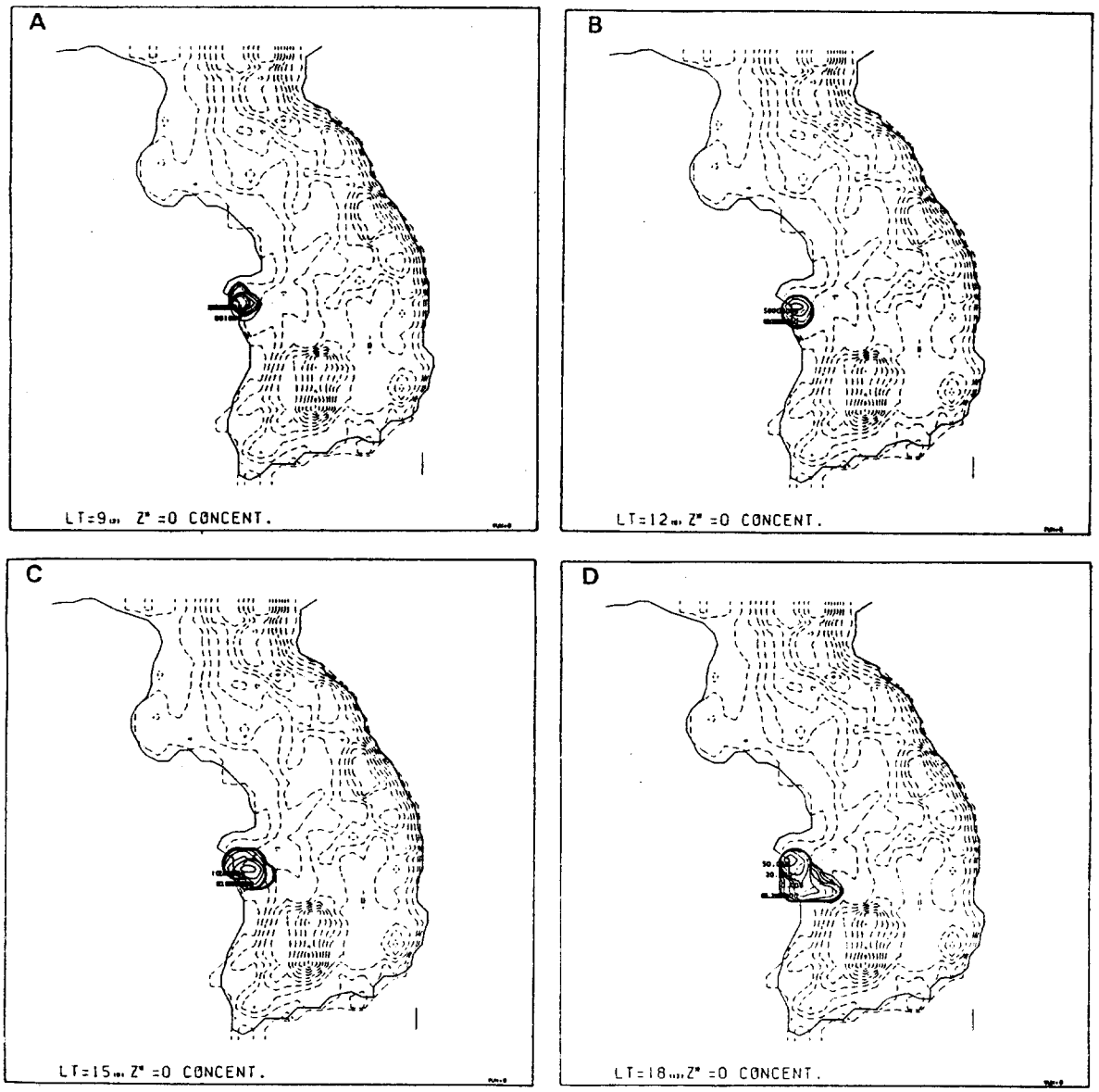

Fig. 4. Air pollution concentration distribution was simulated by second moment method of source emitted continuously from vast point source in the western seashore for Korean peninsula. (A) 0900LST (B)1200LST (C)1500LST (D)1800LST (E)2100LST (F)0000LST (G)0300LST (H)0600LST

km, 육풍에 의해 해상으로 60 km 정도 수송되는 것으로 수치모의 되었다. 앞으로 본 모델이 연안역에서 대기오염농도예측에 사용되기 위해서는 실측치와의 비교와 바람장 모델의 정교화가 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

이 연구는 1997년도 신라대학교 학술연구비에 의해 이루어 졌음.

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), 67-77(1990).

박순웅, 한반도에서 3차원 해륙풍 수치 모델의 결과, 한국기상학회지, 26(2), 67 -77(1990).

박순웅, 윤일회, 종관바람장의 변화를 고려한 이차원 해륙풍 수치 모델링, 한국기상학회지, 25(2), 80-93(1989).

박순웅, 라그랑지 입자 확산모델을 이용한 비반응 오염물질의 농도추정, 한국기상학회지, 30(1), 1-

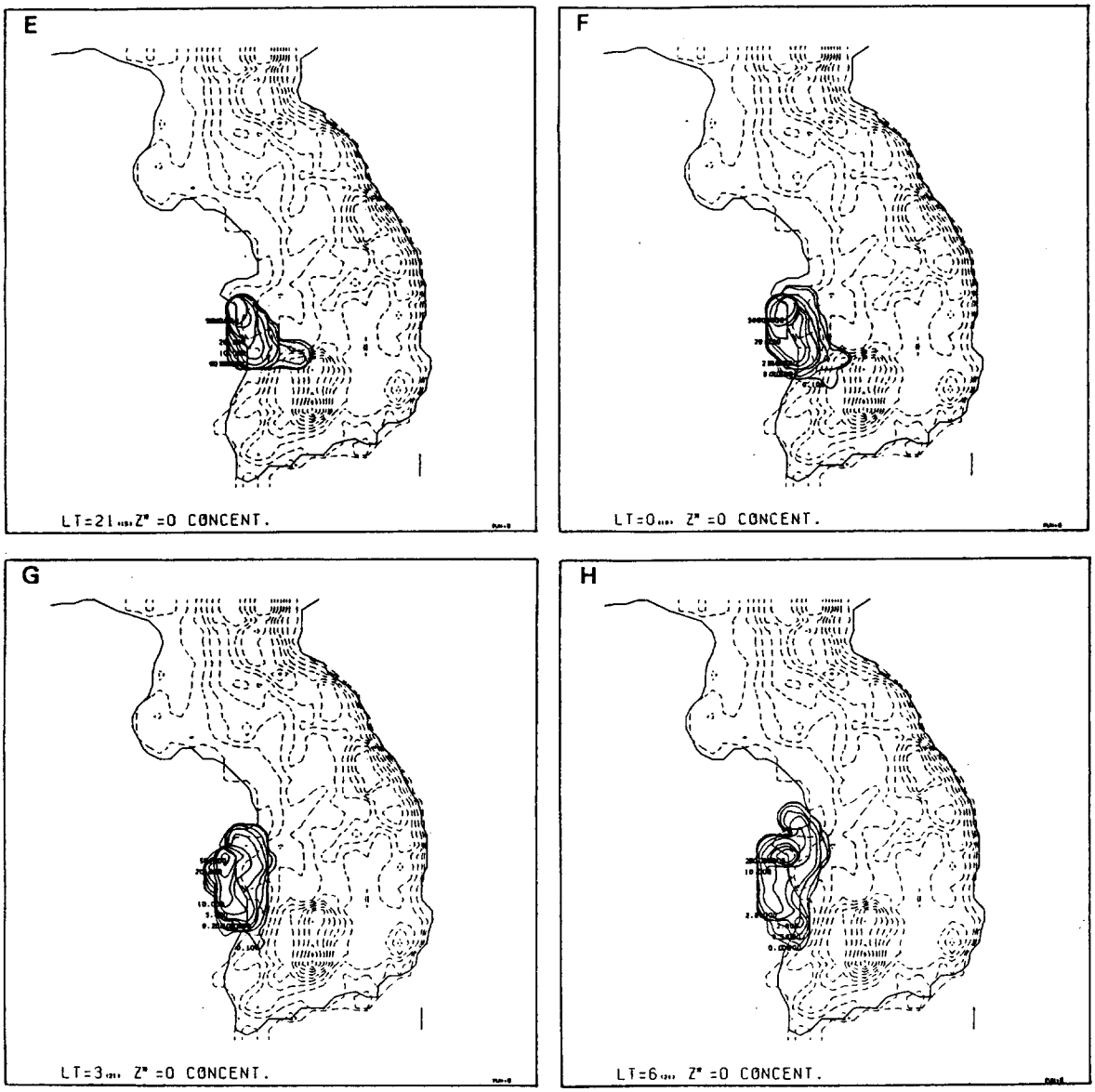

Fig. 4. Continued.

20(1994a).

박순웅, 지상관측자료를 이용한 대기질 시뮬레이션, 한국기상학회지, 30(3), 469-486(1994b).

신동빈, 이태영, 한반도 중부지방에서의 해륙풍순환에 미치는 영향, 한국기상학회지, 25(2), 56-69(1989).

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, 부산지방의 해륙풍에 관한 Simulation, 한국환경과학회지, 2(1), 9-16(1993).

전병일, 부산 연안에서의 바람의 수치시뮬레이션에 관한 연구, 부산대학교 석사학위논문, 65pp(1993).

전병일, 부산연안역의 고농도오존일의 예측기법개발과 오존농도 수치모의, 부산대학교 박사학위논문, 119pp(1997).

현종훈, 이동규, 3차원 중규모 모델을 이용한 제주도에서의 해륙풍 모의, 한국기상학회지, 26(2), 121-136(1990).

Atkinson, B. W., Meso-scale atmospheric circulation, Academic Press, London, 495pp (1981).

Christensen, O. and L. P. Prahm, A pseu-

dospectral model for dispersion of atmospheric pollutant, J. Appl. Meteor., 15, 1284-1294(1976).

Diehl, S. R., D. T. Smith and M. Sydor, Random-walk simulation of gradient-transfer process applies to dispersion of stack emission from coal-fired power plant, J. Appl. Meteor., 21, 69-83(1982).

Egan, B. A. and J. R. Mahoney, Numerical modeling of advection and diffusion of Urban area source pollutants, J. Appl. Meteor., 11, 312-322(1972).

Estoque, M. A., A theoretical investigation of the sea breeze, Q. J. R. Meteorol. Soc., 87, 136-146(1961).

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).

Kerr, C. L. and A. F. Blumberg, An analysis of a local second moment conserving quasi-Lagrangian scheme for solving the advection equation, J. Comput. Phys., 32, 1-9(1979).

Kikuchi, Y., S. Arakawa, F. Kimura, K. Shirasaki and Y. Nagano, Numerical study on the effects of mountains on 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. 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).

Kimura, F. and T. Yoshikawa, Numerical simulation of global dispersion of radioactive pollutants from the accident at the Chernobyl nuclear power plant, J. Meteor. Soc. Japan, 66, 489-495(1988).

Long, P. E. and D. W. Pepper, An examination of some simple numerical schemes for calculating scalar advection, J. Appl. Meteor., 20, 146-156(1981).

Mahrer, Y. and R. A. Pielke, The effect of topography on sea and land breeze in a two-dimensional numerical model, Mon. Wea. Rev., 105, 1151- 1162(1977).

McNider, R. A. and R. A. Pielke, Diurnal boundary-layer development over sloping terrain, J. Atmos. Sci., 38, 2198-2212(1981).

MRI, Observations and numerical experiments on local circulation and medium-range transport of air pollutants, Technical reports of the meteorological research institute, No. 11, 311pp(1984).

Neumann, J. and Y. Mahrer, A theoretical study of the land and sea breeze circulations, J. Atmos. Sci., 28, 532-542(1971).

Papageorgiou, J. G., A 3-D sea breeze model of the PBL including pollutant dispersion, Boundary-Layer Met., 45, 9-29(1988).

Pederson, L. B. and L. P. Prahm, A method for numerical solution of the advection equation, Tellus, 26, 594-602(1974).

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., R. T. McNider, M. Segal 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).

Robinsohn. J., Y. Mahrer and E. Wakshal(1992), The effects of mesoscale circulation on the dispersion of pollutant(SO_2) in the eastern Mediterranean, southern coastal plain of Israel, Atmos. Enviro., 26B(3), 271-277.

Segal, M., R. T. McNider, R. A. Pielke 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).

Uliasz, M., The atmospheric mesoscale dispersion modeling system, J. Appl. Meteor., 32, 139-149(1993).

Yoshikawa, T., F. Kimura, T. Koide and S. Kurita, An emergengy commputation model for the wind field and diffusion during accidental nuclear pollutants releases, Atmos. Environ., 24A(11), 2739-2748(1990).