

# 부산 연안역에서의 국지풍모델을 이용한 이류확산 수치모의 Numerical Simulation of Advection and Diffusion using the Local Wind Model in Pusan Coastal Area, Korea

김 유 근 · 이 화 운 · 전 병 일

부산대학교 대기과학과

(1995년 6월 30일 접수, 1996년 2월 10일 채택)

Yoo-Keun Kim, Hwa-Woon Lee, Byung-Il Jeon

*Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University*

## Abstract

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 on Pusan coastal area. 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 Pusan coastal area for none synoptic scale wind showed typical land and sea breeze circulation, and convergence zone occurred at 1200LST in northern of domain, in succession, moved northward of domain. Emissions from Sinpyeong industrial district were transported toward the inland by sea breeze during daytime, and reached the end part of domain about 1800LST. During nighttime, emissions return to sea by land breeze and vertical diffusion also contributes to upward transport.

In order to use this model for forecast of air pollution concentration on the Pusan coastal area, it is necessary that computed value must be compared with measured value and wind fields model must also be dealt in detail.

## 1. 서 론

대기오염 수치시뮬레이션은 오염농도와 배출원과의 인과관계를 정량적으로 명확화할 수 있으며, 배출량의 삭감계획이나 새로운 시설을 계획할 때의 사전평가에도 필요하다. 특히 자동차나 공장으로부터 대기중으로 배출된 오염물질은 바람에 의해 운반되며, 오염농도와 배출원과의 인과 관계를 명확히 파악하기 위해서는 먼저 바람의 움직임을 정확하게 추정할 필요가 있다.

풍하 수 km 정도의 소규모 오염에서는 바람은 대부분의 경우 수평방향으로 일정하다고 할 수 있으나, 오염의 범위가 수십 km 이상이 되는 경우는 그렇지 않다. 특히

우리 나라에 자주 볼 수 있는 도시와 같이 오염원이 바다와 산으로 둘러싸여 있을 경우의 대기 흐름은 국지풍의 영향을 강하게 받아 아주 복잡하게 나타나며, 대기오염 확산 시뮬레이션에서는 지상풍 뿐만 아니고 상층풍도 중요한 요소인 것으로 민감도 해석에 의해 밝혀진 바 있다 (Seigneur et al., 1981).

오염물질을 대기 흐름을 따라 흐르는 추적자라고 할 수 있기 때문에 대기 중의 오염물질의 거동을 조사하는 것은 기상학적 입장으로 보아 중요한 것이라 할 수 있다. 오염농도는 수평풍외에 연직풍이나 난류확산의 영향을 받고 있으며, 항공기 등에 의한 입체적인 오염관측은 국지풍의 연직구조에 관한 유익한 정보를 제공하고 있으며, 현실적으로 오염물질은 방출 후 다른 물질과의 반응

과 변질이 있을 수 있고 또, 배출원이 정확하게 파악되지 않는 것 등 여러가지 어려운 문제가 있기 때문에 대기오염연구에서의 국지풍의 중요성은 매우 크다고 할 수 있다 (MRI, 1984). 연안지역에 위치한 대부분의 대도시는 주요한 인공오염원과 인구밀집 지역이 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).

본 연구 지역인 부산 연안에서의 국지풍인 해륙풍의 수치 모의에 대한 연구로는 장광미 등 (1993)에 의해 지형을 고려한 2차원 해륙풍을 수치 모의한 바 있고, 부산 연안 지형의 영향이 고려되고, 국지적인 효과가 비교적 정확하게 표현될 수 있는 3차원 해륙풍 모델을 개발하여, 실제로 부산 연안에서 관측한 바람과 비교한 전병일 (1993)의 연구가 있다. 그러나 대기오염 이류확산과 관련된 해륙풍모델은 아직 적용된 바 없다.

대기확산의 예측 방법은 다음과 같이 크게 3가지로 대별할 수 있다. 첫째, 단순한 조건을 설정하여 확산방정식을 해석적으로 풀어서 지수형의 농도분포를 사용하는 경우와 둘째, 입자 (기괴)의 움직임을 확률적인 방법으로 추적하여 각각의 입자로부터 농도분포를 추정하는 Lagrange 적인 방법과 마지막으로, 이류확산에 대한 미분방정식을 차분화하고 농도분포를 오일러적인 수법으로 예측하는 방법이 있다.

첫번째 방법은 해석해에 의한 방법으로써 지표면상태가 일정한 평탄지라는 단순한 조건에서만 적용할 수가 있으므로, 복잡한 지형조건과 단기간의 확산예측을 위해

서는 다양한 보정항을 첨가해야만 하는 불편함이 있으나, 계산이 비교적 단순하기 때문에 환경영향평가에 광범위하게 사용되고 있다. 두번째의 방법은 농도분포를 구하기 위해서 대량 (1만개 이상)의 입자를 방출시키기 때문에 계산시간이 많이 걸린다는 단점이 있으나, 최근의 컴퓨터 능력의 현저한 향상과 난류 closure 모델을 조합한 기류 시뮬레이션모델의 개발의 진전으로 이제는 별로 장애가 되지 않게 되었다. 마지막 방법은 공간을 소영역으로 분할하고 각 소영역에서의 평균농도를 구하는 것이기 때문에 단시간의 확산에는 유효한 수법의 하나라고 할 수 있으나, 차분법의 성질로부터 농도분포가 평활화되기 쉽고 연기류와 같이 주변과 농도구배가 큰 곳에서는 실측분포와의 차가 약간 크게 나타나는 경향이 있다.

본 연구에서의 이류확산모델은 Random Walk 법에 의한 단순한 입자법과 2차 모멘트에 의한 격자법을 제안하고자 하며, Random Walk법은 화력발전소와 같은 거대한 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; Yoshikawa, 1994). 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 있다 (박순웅, 1994b). 2차 모멘트법은 개념적으로 이들 입자법과 격자법의 중간에 위치하고 작은 의사확산

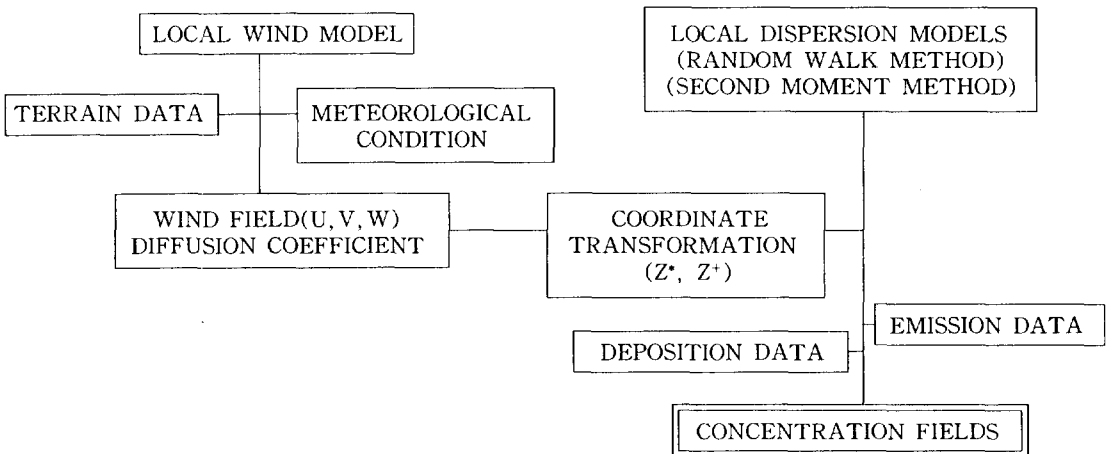


Fig. 1. The numerical prediction system of local pollution model.

과 농도환산의 용이함을 함께 가지고 있다는 장점이 있다. 그리고 어떤 하나의 점오염원의 농도 즉 초기농도가 현격하게 높을 때도 무리없이 사용 가능하다.

본 연구에서 사용한 국지대기오염모델의 계통을 살펴보면 그림 1에서 보는 바와 같이 국지풍모델과 국지확산모델로 나눌 수 있고, 국지확산모델은 다시 random walk법을 이용한 입자모델과 2차 모멘트법을 이용한 격자모델로 나눌 수 있다. 대기오염 수치모델의 제1 단계인 국지풍모델에서는 지형, 지표의 상태와 기상조건 등이 입력되고 바람장과 확산계수의 입체분포와 시간변화가 매시간마다 출력되며, 이들 자료는 지형의 좌표변환과 함께 국지확산모델에 입력된다. 제2 단계의 국지확산모델에서는 오염원 자료와 침적자료가 추가되어, 이류확산의 수치적 분이 행해져서 오염물질의 농도가 매시간 출력되는 형태를 취하고 있다.

## 2. 수치모델

### 2.1 국지풍모델

본 연구에서 사용한 국지풍모델의 기초방정식은 Boussinesq 근사, anelastic 근사를 가정한 기상역학방정식계로서 비직교좌표계인  $z^*$ 좌표계를 사용하였다.

운동방정식은

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

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

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

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

식(3)의 우변 제1항과 제2항은 연직기압경도와 부력을 나타낸다.

열역학 방정식 및 수증기 보존 방정식은

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

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

이다. 여기서  $\theta, q$ 는 각각 온도, 수증기비습을 나타내며, 식(4)의 제2항은 복사가열의 기여를 나타낸다. 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  $z_G, z_T$ 는 지형의 표고와 모델의 상한고도를 나타내며,

여기서

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

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

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

이다.

지표면 온도  $\theta_s$ 를 결정하기 위해서는 다음과 같이 간편하고 정확도가 좋은 Force Restore Method (Deardorff, 1978)를 사용하였다.

$$\frac{\partial \theta_s}{\partial t} = (S_g + R_g - H - IE) / C_1 - (\theta_s - \theta_o) / C_2 \quad (10)$$

여기서  $S_g$ 는 태양에너지 ( $\text{calm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ),  $R_g$ 는 하향 장파복사에너지,  $H$ 와  $IE$ 는 상향현열과 잠열플럭스,  $\theta_o$ 는 평균지중온도,  $C_1, C_2$ 는 일주기  $\tau_d$ 와 지중열용량  $c_g$  그

Table 1. Input parameters were used to initialize the model.

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 ° N
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
Horizontal diffusivity	1500 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
Initial value of land surface temperature at sea level	298 K

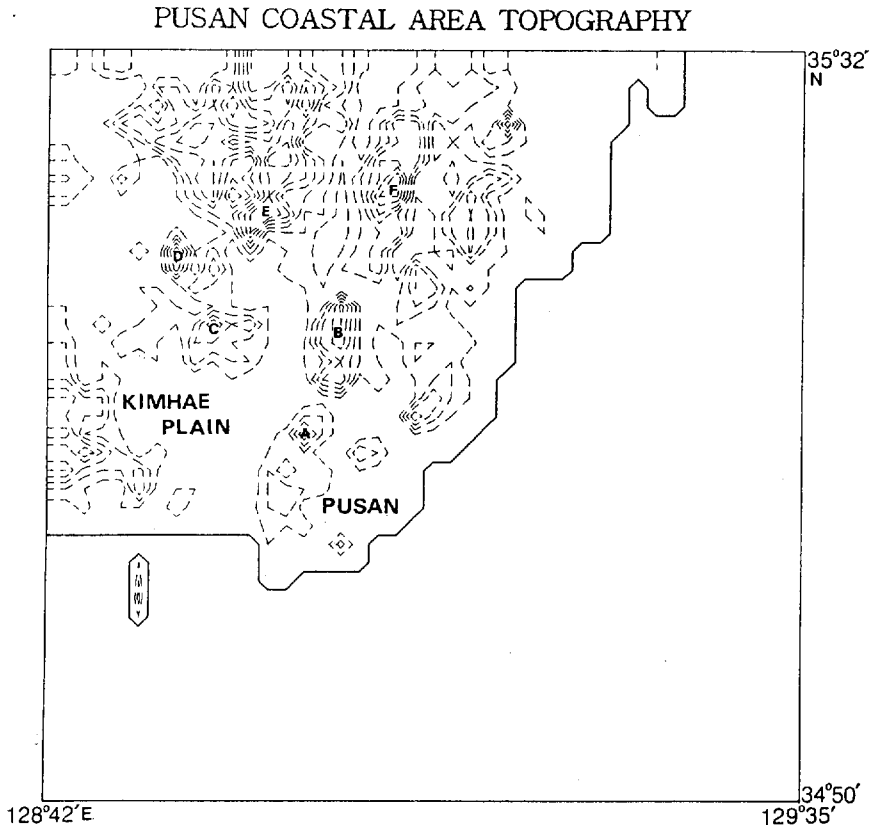


Fig. 2. Topography of Pusan coastal area was used in the model. Terrain is contoured by dot lines with an increment of 100 m (A: Gudeoc Mountain, B: Gumjeong Mountain, C: Sineo Mountain, D: Muccheok Mountain, E: Togok Mountain, F: Wonhyo Mountain).

리고 열전도율  $k_g$ 로 부터 다음과 같이 구한다.

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= 0.5(\tau_d c_g k_g / \pi)^{1/2} \\ C_2 &= \tau_d / 2\pi \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

그림 2와 같이 부산 연안역을 중심으로 2 km 간격의 42×42 격자점을 가지며 X, Y방향으로 84 km의 계산 영역을 가지며, 적분시간간격은 15 sec이며, 오전 6부터 48시간 적분하여 초기치의 영향이 거의 없어진 상태의 2일째 값을 취하였다. 국지풍모델 수행에 사용된 매개변수들은 표 1과 같다.

**2.2 Random Walk법**

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 매개변수화 할 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.

$$\begin{aligned} x(t + \Delta t) &= x(t) + U\Delta t + \sqrt{2\Delta t K_H} \cdot \text{RND} \\ y(t + \Delta t) &= y(t) + V\Delta t + \sqrt{2\Delta t K_H} \cdot \text{RND} \\ z(t + \Delta t) &= z(t) + W\Delta t + \sqrt{2\Delta t K_z} \cdot \text{RND} \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 좌변은  $\Delta t$ 후의 입자의 새로운 위치, 우변 제 1항은 입자의 현 위치, 제2항은 평균류에 의한 이류, 제3항은 난류에 의한 확산을 나타내는 random한 이류이며, RND는 난수(random number)이고, -0.5에서 0.5까지이다. 그리고  $K_H$ ,  $K_z$ 는 각각 수평확산계수와 연직확산계수이다.

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

$$P = \frac{\Delta M}{M} = v_d \frac{\Delta t}{\Delta z} \quad (13)$$

여기서  $v_d$ 는 deposition velocity로 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.

$$v_d = \frac{F}{C} \quad (14)$$

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

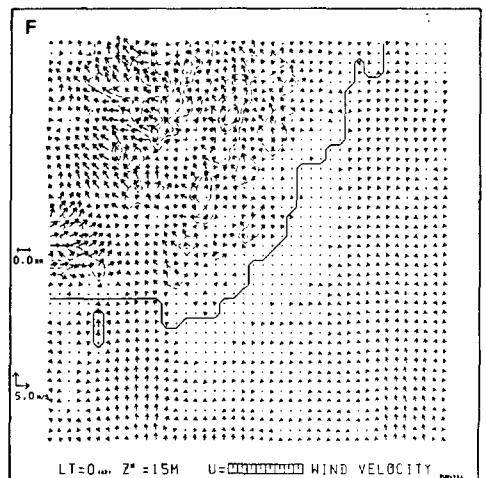
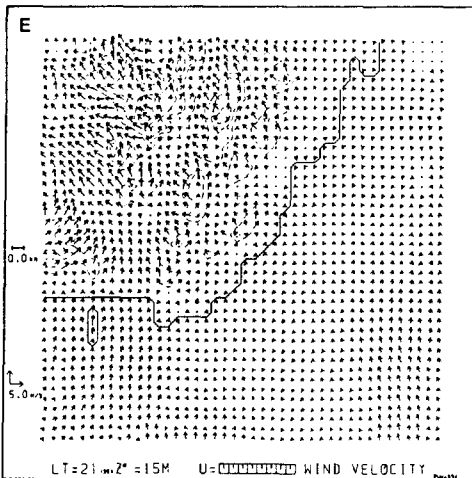
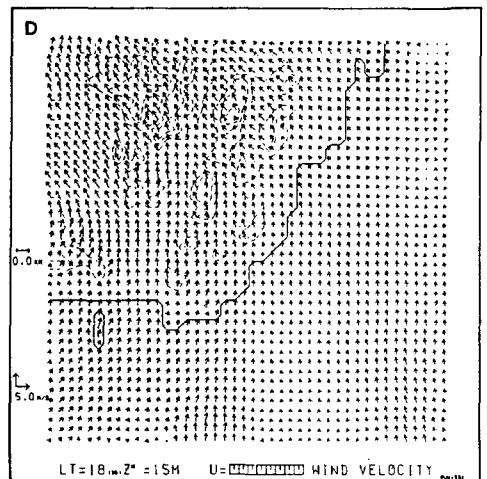
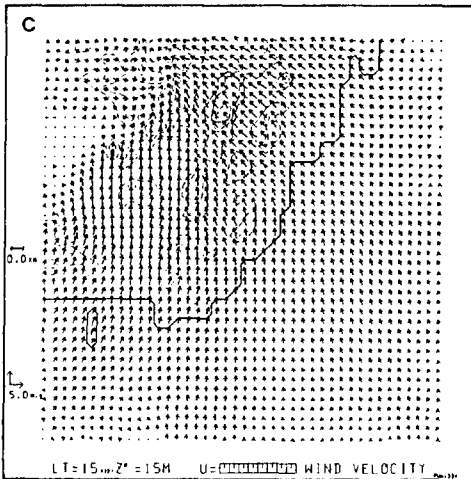
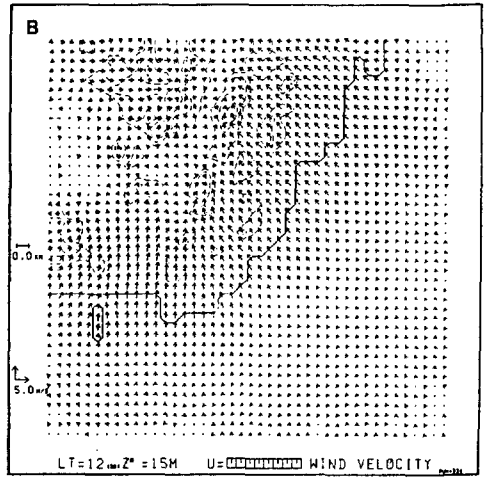
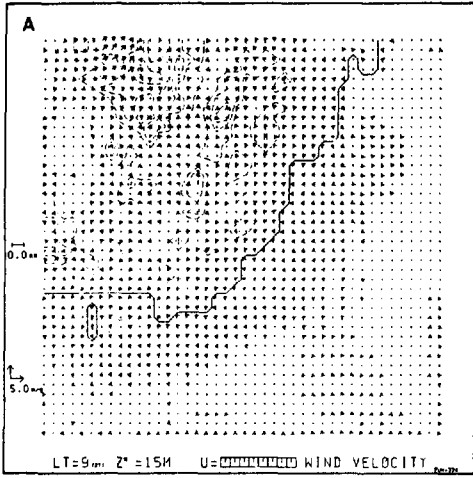
**2.3 2차 모멘트법**

격자법(grid model, Euler method)에서 물질의 이류확산을 계산하면 이른바 의사확산(artificial diffusion, numerical diffusion)에 의해 계산결과가 차이가 나타나게 된다. 특히 점오염원에서는 발생원근방에서 음의 농도와 위(偽) 파동요란(ripple)이 생기기 때문에 격자법의 적용은 어렵다고 생각된다. 한편, 입자법(particle method, Lagrangian 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 2차 모멘트법을 도입하였다.

2차 모멘트법의 역사를 살펴보면 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. 2차 모멘트법의 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.

2차 모멘트법은 격자에 의해 분할된 격자의 내부에서 물질의 농도분포형은 임의의 폭을 가지고 일정한 분포(장방형)를 가지며, 격자의 폭은  $\Delta x$ 의 격자간격으로 정규화하고 단위길이라고 한다.

그리고 이 분포는 다음과 같은 0, 1, 2차 모멘트(평균농도: C, 질량중심위치: F, 분포폭: R)에 의해 다



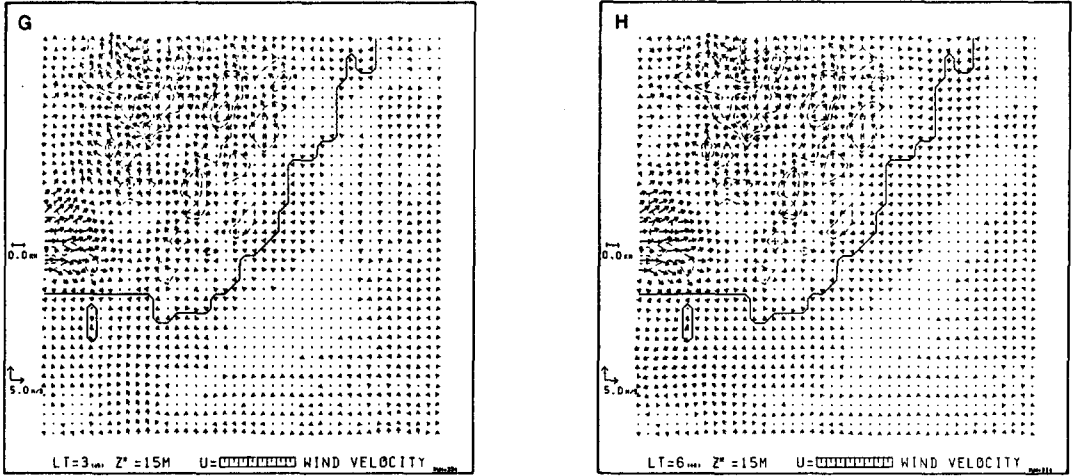


Fig. 3. The variations of the horizontal wind fields at the height of 15m above the ground obtained from the 3-D local wind model at (A) 0900 LST, (B) 1200 LST, (C) 1500 LST, (D) 1800 LST, (E) 2100 LST, (F) 2400 LST, (G) 0300 LST, and (H) 0600 LST.

음과 같이 일의적으로 정해지며, 적분구간은  $(-1/2, 1/2)$ 이고  $c'$ 는 물질농도,  $\xi$ 는 어떤 격자에서 물질의 상대적인 변위를 나타낸다.

$$\left. \begin{aligned} C &= \int c' d\xi \\ C \cdot F &= \int c' \xi d\xi \\ C \cdot R^2 &= 12 \int c' (\xi - F)^2 d\xi \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

일반류에 의한 이동 즉, 이류는 1차 모멘트만으로

$$F^{r+1} = F^r + \sigma \quad (16)$$

$$\sigma = U \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (17)$$

변화하며, 여기서 U는 일반풍속이다.

분포의 폭은 확산과정(diffusion process)에 의해

$$(R^{r+1})^2 = (R^r)^2 + \gamma^2 \quad (18)$$

$$\gamma^2 = 24K \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \quad (19)$$

로 넓어지며, 여기서 K는 확산계수이다.

이류 혹은 확산에 의한 경계를 초월하여 변화한 경우에는 각각의 격자에 존재하는 물질에 새롭게 분포를 하게 된다. 그리고 한 개의 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 이루어지고 모든 경우에 대해서 분포폭도 유지될 것이다. 그러나 바람장이 변할 때의 정확성은 이류단계의 시작점과 끝점에서 바람벡터의 내삽에 의해 다음과 같이 유지할 수 있다.

$$\left. \begin{aligned} C &= \Sigma C_i \\ C \cdot F &= \Sigma C_i \cdot F_i \\ C \cdot R^2 &= \Sigma C_i \cdot (R_i^2 + 12F_i^2) - 12C \cdot F^2 \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

### 3. 계산 결과

#### 3.1 국지풍모델에 의한 바람장의 계산 결과

국지풍 모델에서 얻어진 지상 15m 고도의 바람의 공간분포를 3시간 간격으로 그림 3에 나타내었다.

0900 LST경에 해안지역에서 약한 해풍이 불고 있으며, 대상지역의 북서부인 산악지역에서 약한 곡풍이 발생하고 있다. 1200 LST경에는 부산 연안의 모든 지역에서 해풍이 발달하여 내륙으로 진입하는 모양을 볼 수 있으며, 1500 LST경에는 내륙지역에서 해풍과 곡풍이 합쳐져 있는 모습을 나타내고, 특히, 낙동강을 따라 강한 흐름이 나타나고 있다. 육풍과 해풍이 만나는 약한 수렴역이 1200 LST경에는 내륙북서부에 발생했으며, 1500 LST경에는 더욱 강한 수렴역이 발생한 것을 볼 수 있다. 1800 LST경에는 수렴역이 완전히 사라지고 전 영역에서 해풍이 나타나고 있으며, 영역 동쪽보다는

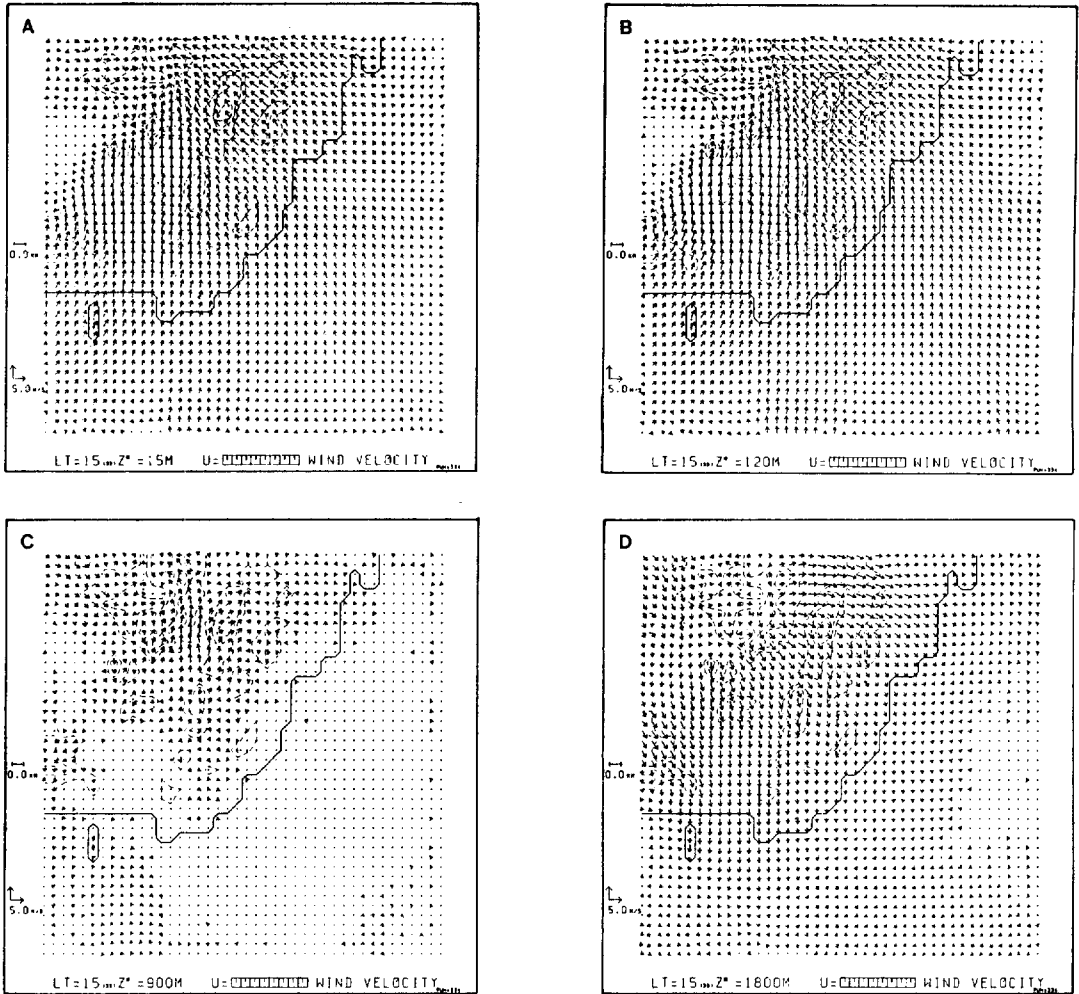


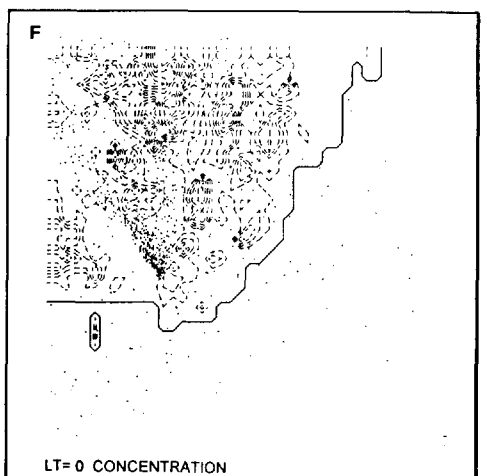
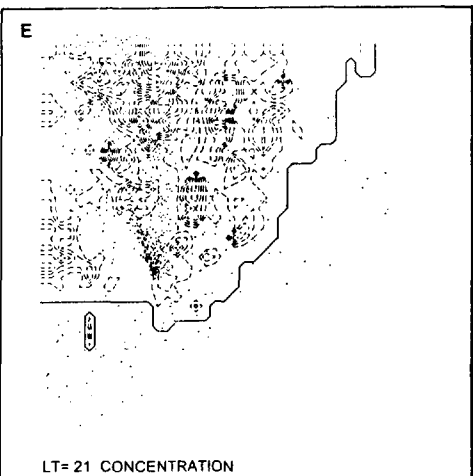
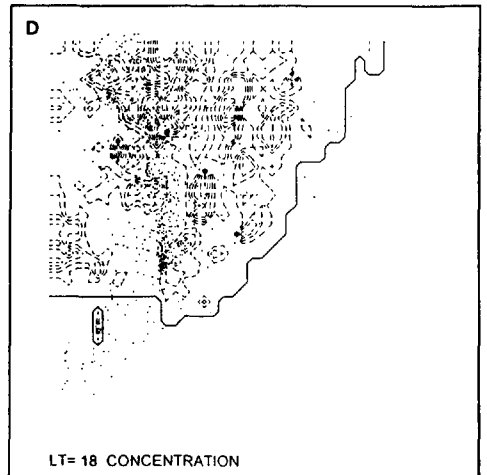
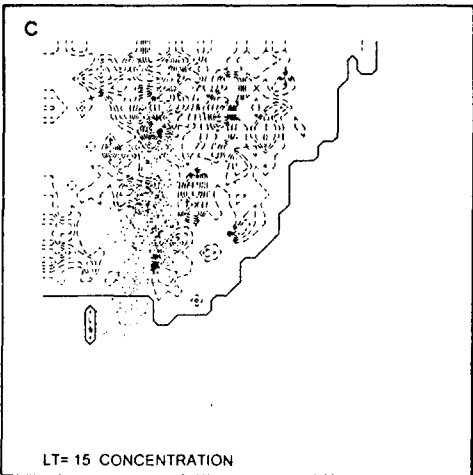
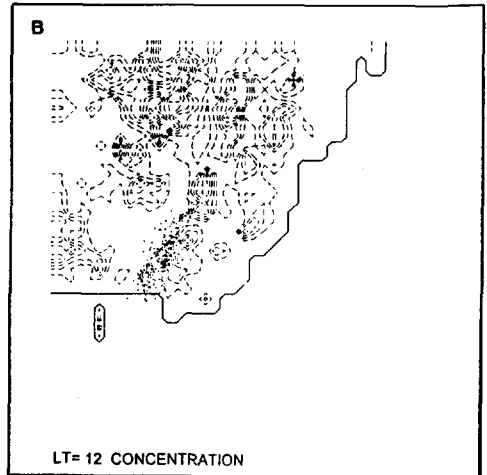
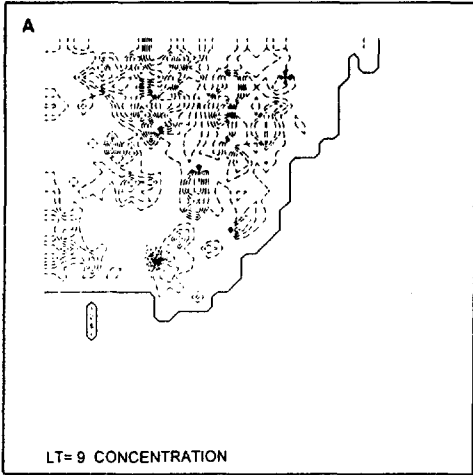
Fig. 4. Horizontal wind fields were obtained from the 3-D land-sea breeze model at (A) 15 m, (B) 120 m, (C) 900 m, and (D) 1800 m at 1500 LST.

산악지역이 존재하는 서쪽지역에서 풍속이 강하게 나타나고 있다. 2100 LST경에는 지표면 온도의 감소로 해안지역에서의 해풍은 거의 찾아볼 수 없을 정도로 약화되었고, 곳에 따라 약한 곡풍이 나타나기도 하였다. 0000 LST경에는 일부 산정상에서 산풍이 약하게 발생하고 있으며, 0300 LST경부터 해안지역에서 육풍이 나타나고 있다.

그림 4는 해풍이 잘 발달한 1500 LST의 고도에 따른 수평풍의 분포를 나타낸 것이다. 15 m와 120 m 하층에서는 해양에서 내륙으로 진입하는 해풍이 전 해안과 내륙에서 잘 발달되어 있으며, 육풍과의 수렴역은 내륙의

북서부에서 잘 볼 수 있다. 900 m에서는 해안에서의 해풍은 거의 사라졌으며, 일부 내륙에서 해풍이 약하게 남아 있다. 1800 m에서는 반환류인 육풍이 하층의 해풍보다 강하게 나타나고 있다. 1500 LST경의 바람의 연속 분포로부터 해풍과 육풍의 경계 즉 해풍의 높이는 900 m 정도로 볼 수 있다고 생각된다. 이현수와 손준호(1994)는 김해공군기상대에서 pibal관측에 의한 해풍의 높이는 일반풍이 강한 날은 약 450 m, 일반풍이 없을 때에는 1800 m라고 한 바 있으나, 특별관측을 통한 상세한 분석이 있어야 할 것으로 본다.





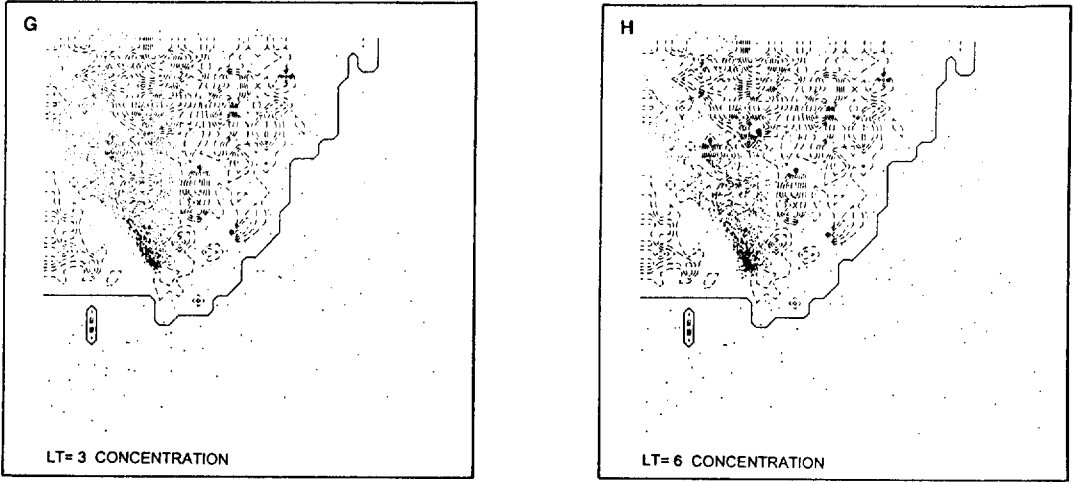


Fig. 5. The XY projection of the simulated Lagrangian particle distribution for particle emitted continuously from Sinpyeong industrial district in Pusan at (A) 0900 LST, (B) 1200 LST, (C) 1500 LST, (D) 1800 LST, (E) 2100 LST, (F) 2400 LST, (G) 0300 LST, and (H) 0600 LST.

**3. 2 Random Walk법에 의한 확산 실험결과**

계산 대상 영역은 국지풍모델과 같이 2 km간격으로 42×42의 격자를 가지고 있으며, 입자의 방출지점은 부산 연안역의 신평동으로 격자지점은 (12, 18)이고 방출고도는 지상 100 m이다. 수평확산계수는 100 m/s<sup>2</sup>, 침적속도는 0.02 m/s이며, 0600 LST부터 1분에 1개씩의 입자를 배출시켜 1분마다 24시간 동안 시뮬레이션하여 1시간마다의 결과를 얻어 3시간 간격으로 입자의 위치를 X-Y평면에 투사시킨 것이 그림 5이다.

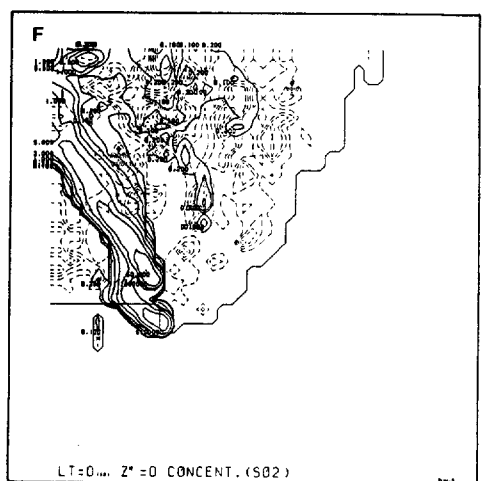
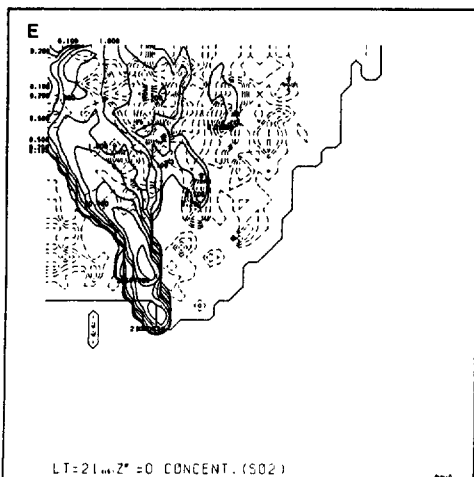
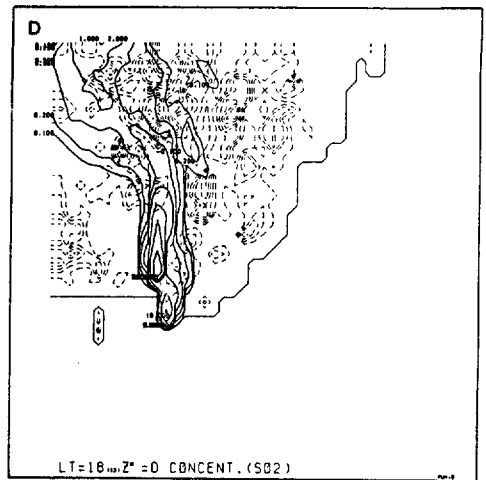
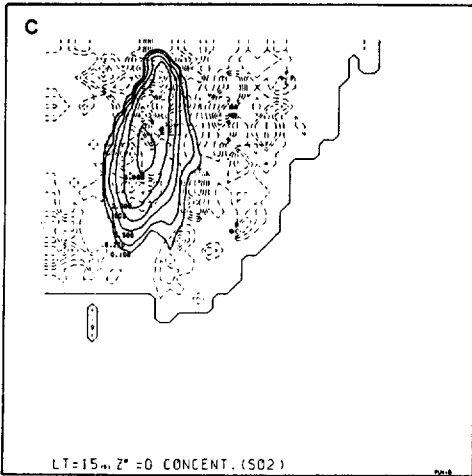
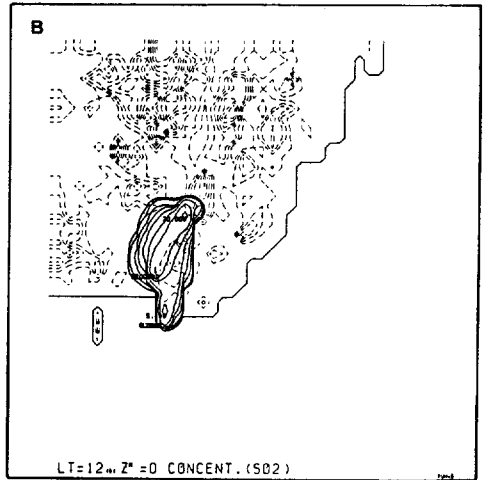
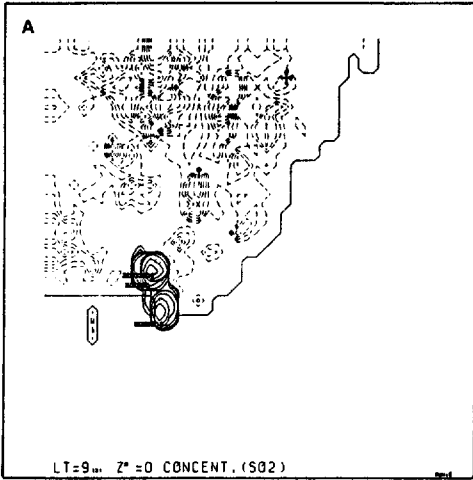
0900 LST경에는 아직 해풍이 발달하지 않은 관계로 입자 방출지점인 신평동 주위에 모여있는 형태를 하고 있으나, 1200 LST경에는 해풍의 발달로 입자가 백양산 근처까지 들어가 있으며, 1500 LST경에는 해풍이 더욱 발달한 결과로 입자가 도곡산을 넘어 대상 영역 북쪽 끝 가까이까지 진입해 있는 것을 알 수 있다. 그리고 상층까지 도달한 입자는 상층의 육풍에 의해 가덕도 가까이에도 입자가 나타나고 있다. 1800 LST경에는 입자들의 분포가 대상 영역 북서부에 광범위하게 흩어져 있으며, 상층의 반환류에 의해 가덕도 남쪽 10 km까지 입자가 도달해 있다. 2100 LST경에는 1800 LST와 비슷한 경향을 나타내고 있으며, 영역 동쪽 해양까지 입자가 보인다. 0000 LST이후에는 육풍의 영향으로 방출된 입자가 남동해양의 깊숙히 들어가 있으며, 0300 LST와 0600 LST경에는 전 영역에 입자가 산포되어 있다.

**3. 3 2차 모멘트법에 의한 확산 실험 결과**

계산 대상 영역은 국지풍모델과 같이 2 km간격으로 42×42의 격자수를 가지고 있으며, 부산 연안의 신평공단에서만 황산화물이 방출된다고 가정하여 시뮬레이션하였다. 오염물질방출지점의 격자점은 (12, 17), (12, 18), (13, 14), (13, 13) 4개지점에서 방출시켰으며, 방출시작시각은 오전 0600 LST시이고 24시간 동안 시뮬레이션하였다. 그림 6은 2차 모멘트법을 이용한 부산 연안에서의 대기오염물질농도분포이다. 0900 LST경에는 해풍이 아직 발달하지 않은 관계로 신평동 주위에 오염물질이 모여 있으며, 1200 LST경에는 해풍의 발달로 백양산근처까지 오염물질이 이동하였다. 1500 LST경에는 해풍의 영향으로 전반적으로 오염분포역이 해안에서 내륙으로의 진행이 빠르게 된 것을 볼 수 있으며, 1800 LST경에는 영역 북서부까지 진출하였으며, 0000 LST경 이후에는 발달한 육풍의 영향으로 해안으로 오염물질이 이동하고 있으며, 0300 LST경과 0600 LST경에는 가덕도 앞바다에 오염물질의 농도가 높은 것을 알 수 있다. 그러나 상대적으로 내륙지역의 농도는 상당히 낮게 나타났다.

**4. 결 론**

부산 연안역의 국지풍과 대기오염물질의 이류확산과의 관계를 조사하기 위해 바람장과 연직확산 계수가 계산되는 3차원 국지풍모델과 RANDOM WALK법 및 2차



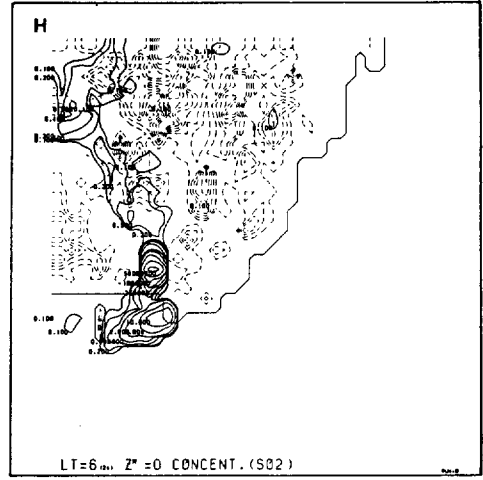
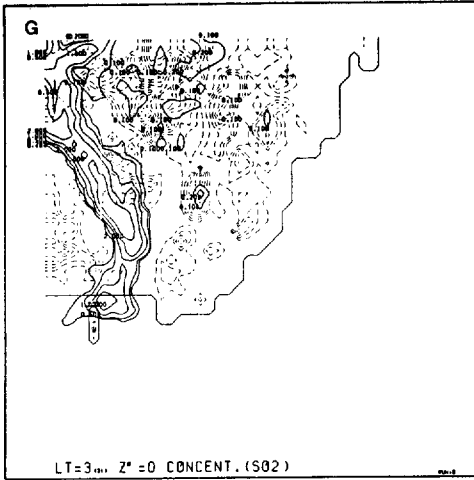


Fig. 6. The SO<sub>2</sub> concentration distribution was simulated by Second Moment Method of sources emitted continuously from Sinpyeong industrial area in Pusan at (A) 0900 LST, (B) 1200 LST, (C) 1500 LST, (D) 1800 LST, (E) 2100 LST, (F) 2400 LST, (G) 0300 LST, and (H) 0600 LST.

모멘트법의 이류확산모델을 이용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

먼저, 일반풍이 없는 상태의 부산 연안역의 바람장은 전형적인 해륙풍 순환을 나타내었으며, 1200 LST부터는 영역북부에서 수렴역이 발생하여 점차로 북쪽으로 이동하였다. 그리고 부산신평공단에서 방출된 대기오염물질은 낮동안의 해풍에 의해서 내륙으로 진입하여, 야간에는 육풍에 의해서 해양으로 되돌아오는 경향을 나타내었고, 연직확산에 의해 상승한 오염물질이 상층에 존재하였다. 앞으로 본 모델이 연안역에서 대기오염농도 예측에 이용되기 위해서는 실측치와의 비교와 바람장모델의 정교화가 이루어져야 할 것이다.

### 감 사

이 논문은 부산대학교 정보통신연구소의 지원에 의하여 이루어진 것이다.

### 참 고 문 헌

박순웅 (1994a) 라그랑지 입자 확산모델을 이용한 비반응 오염물질의 농도추정, 한국기상학회지, 30(1), 1-20.  
 박순웅 (1994b) 지상관측자료를 이용한 대기질 시물레이션, 한국기상학회지, 30(3), 469-486.  
 이현수, 손준호 (1994) 김해기지의 해풍특성에 관한 연

구, 한국기상학회 1994년 가을학술발표회 초록집, 11p.  
 장광미, 문승의, 조병길 (1993) 부산지방의 해륙풍에 관한 Simulation, 한국환경과학회지, 2(1), 9-16.  
 전병일 (1993) 부산 연안에서의 바람의 수치시물레이션에 관한 연구, 부산대학교 석사학위논문, 65 pp.  
 Christensen, O. and L.P. Prahm (1976) A pseudospectral model for dispersion of atmospheric pollutant, J. Appl. Meteor., 15, 1284-1294.  
 Deardorff, J.W. (1978) Efficient prediction of ground surface temperature and moisture, with inclusion of a layer of vegetation, J. Geophys. Res., 83(C4), 1889-1903.  
 Diehl, S.R., D.T., Smith and M. Sydor (1982) Random-walk simulation of gradient-transfer process applies to dispersion of stack emission from coal-fired power plant, J. Appl. Meteor., 21, 69-83.  
 Egan, B.A. and J.R. Mahoney (1972) Numerical modeling of advection and diffusion of Urban area source pollutants, J. Appl. Meteor., 11, 312-322.  
 Kerr, C.L. and A.F. Blumberg (1979) An analysis of a local second moment conserv-

- ing quasi-Lagrangian scheme for solving the advection equation, *J. Comput. Phys.*, 32, 1-9.
- Kimura, F. and T. Yoshikawa (1988) Numerical simulation of global dispersion of radioactive pollutants from the accident at the Chernobyl nuclear power plant, *J. Meteor. Soc. Japan.*, 66, 489-495.
- Long, P.E. and D.W. Pepper (1981) An examination of some simple numerical schemes for calculating scalar advection, *J. Appl. Meteor.*, 20, 146-156.
- MRI (1984) Observations and numerical experiments on local circulation and medium-range transport of air pollutants, Technical reports of the meteorological research institute, No.11, 311pp.
- Papageorgiou, J.G.(1988) A 3-D sea breeze model of the PBL including pollutant dispersion, *Boundary-Layer Met.*, 45, 9-29.
- Pederson, L.B. and L.P. Prahm (1974) A method for numerical solution of the advection equation, *Tellus.*, 26, 594-602.
- Robinson, J., Y. Mahrer and E. Wakshal(1992) The effects of mesoscale circulation on the dispersion of pollutant (SO<sub>2</sub>) in the eastern Mediterranean, southern coastal plain of Israel, *Atmospheric Environment*, Vol.26B, No.3, 271-277.
- Seigneur, C.S., T.W. Tesche, P.M. Roth and L.E. Reid (1981) Sensitivity of a complex urban air quality model to input data, *J. Appl. Meteor.*, 20, 1020-1040.
- Uliasz, M.(1993) The atmospheric mesoscale dispersion modeling system, *J. Appl. Meteor.*, 32, 139-149.
- Yoshikawa, T.(1994) Distribution of snow pollution and numerical computation of the cloud physical mechanism in the northern Kanto mountain area in Japan, proceeding of the 7th IUAPPA, Vol.II, 241-250.