

# A Study on Mesoscale Atmospheric Dispersion of Radioactive Particles Released from Nuclear Power Plants

Gab-Bock Lee, Myung-Chan Lee and Young-Il Song

*Korea Electric Power Research Institute*

*103-16 Munji-dong Yusung-gu, Taejon 305-380 Korea*

## 원전부지 주변 국지순환에 따른 방사성 물질의 대기확산 특성 연구

이갑복 · 이명찬 · 송영일

한국전력공사 전력연구원

**Abstract** - A three dimensional sea-land breeze model and Lagrangian particle dispersion model have been employed for the study on the mesoscale atmospheric dispersion of radioactive materials released from Wolsung NPPs. In this study, atmospheric dispersion simulations are carried out under two synoptic weather conditions : the geostrophic flow is a weak northerly wind(CASE 1) and a strong northerly wind(CASE 2) on a clear day in spring. The results show that atmospheric dispersion is affected by sea-land breeze and the recirculation of particles by the change of wind direction between sea breeze and land breeze plays an important role in atmospheric concentration distribution of radioactive materials.

*Key Words* : Sea-land breeze, Mesoscale circulation, Atmospheric dispersion, 3-D sea-land breeze model, Lagrangian particle dispersion model

**요약** - 우리나라 원전이 위치하고 있는 해안지역에서 빈번히 발생하는 해륙풍 등과 같은 국지순환에 따른 방사성 물질의 대기확산 특성을 알아보기 위해 월성원전 주변지역을 대상으로 삼차원 해륙풍 모델과 라그랑지안 입자확산모델을 이용하여 봄철 약한 북풍이 부는 맑은 날과 강한 북풍이 부는 맑은 날에 대해 방사성 물질 확산에 관한 삼차원 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과, 해륙풍과 같은 국지순환의 발달여부에 따라 방사성 입자의 대기확산이 서로 다르게 나타남을 알 수 있었다. 또한 해륙풍의 해풍과 육풍의 풍향교체에 따른 입자의 재순환 현상이 대기 중 농도분포에 중요한 역할을 하는 것을 확인할 수 있었다.

중심어 : 해륙풍, 국지순환, 대기확산, 삼차원 해륙풍 모델, 라그랑지안 입자확산모델

## 서론

원전의 환경 안전성을 확인하는 수단으로 우리나라 각 원전에서는 정상운전시 환경중으로 방출되는 극미량의 방사성 물질로 인해 주변주민이 받는 피폭선량을 평가하고 있으며, 또한 사고시 주민 대피 또는 소개 등 주변주민을 방사선으로부터 보호하기 위해 피폭선량을 신속히 예측하는 비상대응체제를 운영하고 있다.

원전에서 대기로 방출된 방사성 핵종은 물리·화학적 및 생물학적 전이과정을 거치면서 희석 또는 침적되는 등 매우 복잡한 과정을 통해 환경에 존재하게 되나, 일차적으로는 바람 또는 강수 등과 같은 기상현상을 매개로 확산 및 이동하기 때문에 정확한 대기확산 평가가 매우 중요하다.

최근들어 삼차원 대기확산 수치 시뮬레이션을 통해 복잡한 지형조건 또는 해안지역에서 국지규모의 대기순환에 따른 오염물질의 확산에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다[1-5]. 그러나 우리나라에서는 문종이 등이 월성원전을 대상으로 삼차원 라그랑지안 입자확산 수치 시뮬레이션을 수행한 연구결과[5]를 제외하고는 대부분이 일반 산업시설 부지를 대상으로 연구되고 있다.

본 연구에서는 월성원전을 대상으로 원시방정식계를 사용한 삼차원 해륙풍 모델과 라그랑지안 입자확산모델을 이용하여 봄철 약한 북풍이 부는 맑은 날과 강한 북풍이 부는 맑은 날에 대해 방사성 물질의 삼차원 대기확산 시뮬레이션을 수행하여 해륙풍과 같은 국지순환이 원전으로부터 대기중으로 방출된 방사성 물질의 대기 이동에 어떤 영향을 미치는 지를 고찰하였다.

## 대기확산 수치 계산식

### 삼차원 해륙풍 수치 모델

원시방정식계의 삼차원 해륙풍 수치 모델을 이용하여 월성원전 주변지역의 국지순환을 재현하여 대기확산 시뮬레이션에 이용하였다. 연직좌표계는 복잡한 지형 위의 행성경계층 수치해석에 일반적으로 이용되고 있는 지형좌표계( $z^*$ -좌표계)를 사용하였고, 수치해석시 발생할 수 있는 불

확실성을 가능한한 줄이기 위해 수치계산을 통해 구해진 바람장에 관측자료를 동화(Nudging)시켰다.

### 모델 방정식

본 연구에서 사용된 삼차원 해륙풍 수치 모델 [3]은 지형좌표계로서 연직축  $z^*$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$z^* = \frac{-z - z_G}{s - z_G} \quad (1)$$

$z^*$  좌표계에서의 운동방정식, 열역학방정식, 비습방정식, 연속방정식, 열확산 방정식 등은 다음과 같다.

- 운동방정식 :

$$\begin{aligned} \frac{du}{dt} = & fu - fV_g - \theta \frac{\partial \pi}{\partial x} + g \frac{z^* - \bar{s}}{s} \frac{\partial z_g}{\partial x} - g \frac{z^*}{s} \\ & \frac{\partial s}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_H \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_H \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \left( \frac{\bar{s}}{s - z_g} \right)^2 \\ & \frac{\partial}{\partial z^*} \left( K_z \frac{\partial u}{\partial z^*} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{dv}{dt} = & -fu - fU_g - \theta \frac{\partial \pi}{\partial y} + g \frac{z^* - \bar{s}}{s} \frac{\partial z_G}{\partial y} - g \frac{z^*}{s} \\ & \frac{\partial s}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_H \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_H \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \left( \frac{\bar{s}}{s - z_G} \right)^2 \\ & \frac{\partial}{\partial z^*} \left( K_z \frac{\partial v}{\partial z^*} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \pi}{\partial z^*} = - \frac{(s - z_G)}{s} \frac{g}{\theta} \quad (4)$$

- 열역학 방정식 :

$$\begin{aligned} \frac{d\theta}{dt} = & \frac{\partial}{\partial x} \left( K_H \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_H \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \left( \frac{\bar{s}}{s - z_G} \right)^2 \\ & \frac{\partial}{\partial z^*} \left( K_z^{(\theta)} \frac{\partial \theta}{\partial z^*} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

- 비습방정식 :

$$\frac{dq}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_H \frac{\partial q}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_H \frac{\partial q}{\partial y} \right) + \left( \frac{\bar{s}}{s-z_G} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left( K_z^{(q)} \frac{\partial q}{\partial z^*} \right) \quad (6)$$

- 연속 방정식 :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w^*}{\partial z^*} + \frac{1}{s-z_G} \left( \frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial s}{\partial x} + v \frac{\partial s}{\partial y} \right) - \frac{1}{s-z_G} \left( u \frac{\partial z_G}{\partial x} + v \frac{\partial z_G}{\partial y} \right) = 0 \quad (7)$$

- 지표면 온도(  $T_s$  )를 구하기 위한 열 확산 방정식:

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_s \frac{\partial T_s}{\partial z} \right) \quad (8)$$

- Exner 함수로 정의되는 지형좌표계에서의 기압 계산식 :

$$\pi = C_p \left( \frac{p}{p_0} \right)^k \quad (9)$$

- 모델에서의 대기상한 높이인 물질면 계산식 :

$$\frac{\partial s}{\partial t} = \frac{1}{s} \int_0^{\bar{s}} \left( \frac{\partial}{\partial x} (u(s-z_G)) + \frac{\partial}{\partial y} (v(s-z_G)) \right) dz^* \quad (10)$$

- 고도  $z$  에서의 기압 :

$$\pi(z^*) = \pi(TOP) + g \int_0^s \frac{1}{\theta} dz^* \quad (11)$$

- 연직 바람 속도 :

$$w^* = \frac{\bar{s}}{s-z_G} w - \frac{z^*}{s-z_G} \left( \frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial s}{\partial x} + v \frac{\partial s}{\partial y} \right) + \frac{z^* - \bar{s}}{s-z_G} \left( u \frac{\partial z_G}{\partial x} + v \frac{\partial z_G}{\partial y} \right) \quad (12)$$

관측자료 nudging 방법

수치모델이 내포하고 있는 오차를 최소화하기 위해, 수치적분을 수행하면서 사차원 자료동화기법의 하나인 nudging 방법을 이용하여 모델결과를 실측자료에 동화시켰다[6]. 격자점에서의 변수  $u$ 에 대한 예단방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = F + G \left[ \sum_{n=1}^N W_n \gamma_n (u_n - \hat{u}_n) \right] / \sum_{n=1}^N W_n \quad (13)$$

여기서,  $W_n = W_{Hn} W_{on} W_{tn}$  은 가중 함수 항이며,  $W_{Hn}$ ,  $W_{on}$ ,  $W_{tn}$ 은 각각 수평 방향, 연직 방향, 그리고 시간에 대한 가중치를 나타낸다.

수평 가중치  $W_{Hn}$  은 다음과 같이 계산된다.

$$W_{Hn} = \begin{cases} (R_n^2 - D_n^2) / (R_n^2 + D_n^2), & D_n \leq R_n \\ 0, & D_n > R_n \end{cases} \quad (14)$$

여기서  $R_n$ 은 관측 지점으로부터의 수평 방향 영향 반경이고  $D_n$ 은 격자점에서 관측 지점까지의 거리를 나타낸다.

연직 방향 가중치  $W_{on}$ 은 관측 고도에서 1의 값에서 고도에 따라 선형으로 줄어들어 다음 관측 고도에서 0이 되게 만든 값이고, 시간 가중치  $W_{tn}$ 은 시간차에 따라 선형으로 줄어들게 하여 주어진 시간이 경과되면 0이 되게 한 값이다.

$u_n$ 은 관측 지점에서의  $u$ 의 값이고  $\hat{u}_n$ 은 관측지점에서 모델로 내삽하여 구한 값이며  $\gamma_n$ 은 자료 신빙도 계수이고  $G$ 는 nudging 계수 (relaxation 시간 스케일)를, 그리고  $N$ 은 관측소 수를 나타낸다.

### 라그랑지안 입자 확산 모델

라그랑지안 입자확산 방정식

방사성 입자들을 시간에 따라 계속적으로 추적하여 원하는 시각에서의 각 입자들의 위치를 계산하여 농도분포를 결정하는 Lagrangian 입자 확산 모델[4]을 사용하였다.

방사성 입자의 위치는 다음과 같이 결정된다.

$$X_i(t + \Delta t) = X_i(t) + (\bar{U}_i + u_i') \Delta t \quad (15)$$

여기서  $X_i$ 는 한 입자의 좌표계상에서의 공간 상 위치로 연직고도  $z$ 는 지표면으로부터의 연직 거리를 나타낸다.  $\bar{U}_i$ 는 삼차원 미세격자계 해륙 풍 모델로 얻어지는, 입자가 위치한 곳에서의 종관 및 중간규모의 바람성분을,  $u_i'$ 는 입자가 위치한 지점의 난류성분을, 그리고  $\Delta t$ 는 시간변화 즉 적분 시간간격을,  $i$ 는 좌표계의  $x, y, z$  성분을 나타낸다. 종관 및 중간규모의 바람은 해륙 풍 시뮬레이션 결과를 이용하며, 난류성분  $u_i'$ 는 Markov 과정을 이용하여 다음과 같이 매개 변수화할 수 있다.

$$u_i'(t + \Delta t) = R_{L,i}(\Delta t)u_i'(t) + (1 - R_{L,i}(\Delta t))^{1/2}u_i''(t) + \delta_{i,3}(1 - R_{L,3}(\Delta t))W_d \quad (16)$$

여기서  $\delta_{i,3}$ 는 Kronecker delta를 나타내며,  $R_{L,i}$ 는 Lagrangian  $i$  바람 성분의 자기상관 함수이며, 이는 다음과 같이 매개 변수화할 수 있다.

$$R_{L,i}(\Delta t) = \exp(-\Delta t/T_{L,i}) \quad (17)$$

여기서  $T_{L,i}$ 는  $i$ 쪽 방향의 Lagrangian 적분 시간 스케일이며, 이는 Eulerian 적분 시간 스케일,  $T_{E,i}$ 와 다음과 같은 관계가 있다.

$$T_{L,i} = \beta T_{E,i} \quad (18)$$

Eulerian 적분 시간 스케일,  $T_{E,i}$ 는 다음과 같다.

$$T_{E,i} = 0.2\lambda_i / (\bar{U}^2 + \bar{V}^2 + \bar{W}^2)^{1/2} \quad (19)$$

여기서  $\lambda_i$ 는  $i$ 쪽 방향의 특성 길이 스케일로서,  $i$ 쪽 방향 난류 스펙트럼의 최대 파장이다. Lagrangian 적분 시간 스케일과 Eulerian 적분 시간 스케일의 비인  $\beta$ 는 McNider et al[7]에 의해

$$\beta = 0.6 (\bar{U}^2 + \bar{V}^2 + \bar{W}^2)^{1/2} / \sigma_w \quad (20)$$

로 주어지며 제한 조건으로  $\beta$  값이 10을 넘을 수 없다 ( $\beta \leq 10$ ). 여기서  $\sigma_w$ 는 연직 방향 바람의 표준편차를 나타낸다.

$T_{E,i}$ 를 계산하기 위해서는  $\lambda_i$ 가 필요하며, 이 값은 Kaimal et al.의 결과[8]에 의하면 대기 안정도에 따라서 변화하게 된다. 대기가 중립 및 불안정 할 때  $\lambda_z$ 는 대기 경계층의 높이  $Z_i$ 와  $z/L$ 로부터 추정할 수 있다.

$$\lambda_z = \begin{cases} z / (0.55 - 0.38 |z/L|), & 0 < z < |L| \\ 5.9z, & |L| < z < 0.1Z_i \\ 1.8Z_i(1 - \exp(-4z/Z_i) - 0.0003 \exp(8z/Z_i)), & 0.1Z_i < z < Z_i \end{cases} \quad (21)$$

여기서  $L$ 은 Monin-Obukhov 길이 스케일을 나타낸다. 대기가 안정할 때는 다음과 같이 표현된다.

$$\lambda_z = z / (0.55 + 0.8z/L) \quad (22)$$

수평 방향의 특성길이 스케일은 대기 안정도에 상관없이 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda_x = \lambda_y = 1.5Z_i \quad (23)$$

식 (16)에서  $u_i''(t)$ 는  $i$ 쪽 방향 무작위 바람 성분으로서 다음과 같이 주어진다.

$$u_i''(t) = \gamma \sigma_{v,i} \quad (24)$$

여기서  $\gamma$ 는 평균이 0이고 편차가 1인 정규 무작위 변량을 나타내며  $\sigma_{v,i}$ 는  $i$ 성분 바람의 표준편차를,  $W_d$ 는 표류 연직 바람 성분의 보정값으로서 아래와 같이 계산할 수 있다[9].

$$W_d = T_{L,3} \frac{\partial \sigma_w^2}{\partial X_3} \quad (25)$$

무작위 연직 난류성분 ( $W''$ )의 분포는 정규분포를 하지않고 왜도(skewness)되어 나타난다. 이

왜도는 대기의 안정도에 따라서 다르게 나타난다. 즉 양의 왜도는 대기가 불안정 할 때, 그리고 음의 왜도는 안정할 때 나타난다. 이 왜도를 취급하기 위해서 무작위 난류속도 연직성분( $W''$ )을 다음과 같이 보정한다[10].

$$W'' = FG_+ + (1/F)G_- - N, \text{ skewness} > 0 \quad (26)$$

$$W'' = (1/F)G_+ + FG_- + N, \text{ skewness} < 0$$

여기서  $G_+$  와  $G_-$  는 각각 평균이 0이고 표준편차가 1인 정규분포에서 얻은 양과 음의 무작위 성분이다. 그리고  $F$ 와  $N$  은 각각 다음과 같이 주어진다.

$$F = -0.028 + 0.6|S| \quad (27-1)$$

$$N = 0.54|S| \quad (27-2)$$

여기서  $S$ 는 왜도함수로서 아래와 같이 표시된다.

$$S = \begin{cases} \frac{0.6}{0.68(1-15z/L)^{-1/4}(25-1.8z/L)} + 0.1, & z/L < 0 \\ 0.2(z/L)^{0.2} + 0.1, & z/L > 0 \end{cases} \quad (28)$$

따라서 표류식 (26)과 왜도식 (27)의 보정을 고려하면 연직 방향의 입자의 위치는

$$z(t+\Delta t) = z(t) + (\overline{W}(t) + W''(t) + W_d) \Delta t \quad (29)$$

로 주어진다.

### 경계층 내의 바람 분산 추정

라그랑지안 입자확산 모델에서의 확산계수는 바람분산으로 결정된다. 그러나 바람 분산은 대기 난류 성분으로 쉽게 얻어질 수 없으므로 매개 변수화하여 추정할 수 밖에 없다. 매개 변수화는 주로 상사법에 따라 이루어지는데 혼합층 고도  $h$  와 대기안정도에 따라 계산된다.[11].

안정 지표층에서는 Monin-Obukhov의 상사법에 따라  $\sigma_u, \sigma_v, \sigma_w$ 를 식(30)으로 구할 수 있으며, 안정 대기경계층(지표층 위의 대기경계층)에서는 식(31)과 같이  $x, y, z$  축 방향의 바람분산을 추정할 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma_u &= \sigma_v, \quad \sigma_u^2 + \sigma_v^2 = 8.5u_*^2, \\ \sigma_w^2 &= 2.5u_*^2 \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} \sigma_u^2 = \sigma_v^2 &= 6u_*^2 \left[ 1 - \left( \frac{z}{h} \right)^{1/2} \right] \\ \sigma_w^2 &= 2.5u_*^2 \left[ 1 - \left( \frac{z}{h} \right)^{0.6} \right] \end{aligned} \quad (31)$$

중립 대기 안정도인 지표층에서는 식(32), 대기 경계층에서는 식(33)과 같이 바람분산을 추정할 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma_u^2 &= 6.2u_*^2, \quad \sigma_v^2 = 3.0u_*^2, \\ \sigma_w^2 &= 1.7u_*^2 \end{aligned} \quad (32)$$

$$\sigma_u^2 = 6u_*^2 \left( 1 - \frac{z}{h} \right)^2 + \frac{z}{h} \sigma_{u \text{ top}}^2 \quad (33-1)$$

$$\sigma_v^2 = 3u_*^2 \left( 1 - \frac{z}{h} \right)^2 + \frac{z}{h} \sigma_{v \text{ top}}^2 \quad (33-2)$$

$$\sigma_w^2 = u_*^2 \left( 1 - \frac{z}{h} \right)^{1/2} \quad (33-3)$$

식(33)에서  $\sigma_{u \text{ top}}^2$  과  $\sigma_{v \text{ top}}^2$ 은 대기 경계층 꼭 대기에서의  $x$ 와  $y$  방향 쪽의 바람 분산 값으로, 이들 값은  $\sigma_{u \text{ top}}^2 = \sigma_{v \text{ top}}^2 = 2u_*^2$ 로 주어진다 [12].

불안정 대기 안정도인 지표층에서 바람 shear가 0이 아닐 때는 식(34-1), 풍속이 0일 때는 식(34-2)로 연직바람분산을 구하고, 수평바람분산을 식(35)으로 계산한다[13].

$$\sigma_w = 1.9u_* \left( -\frac{z}{L} \right)^{1/3} \quad (34-1)$$

$$\sigma_w = 1.6 \left[ \frac{g}{T} (\overline{w'\theta'}) h \right]^{2/3} \quad (34-2)$$

$$\sigma_u^2 = \sigma_v^2 = cu_*^4/w_*^2 = cu_*^4 / \left[ \frac{g}{T} (\overline{w'\theta'}) h \right]^{2/3} \quad (35)$$

여기서  $\overline{w'\theta'}$ 는 지표에서의 열 flux이다.

**방사성 물질 농도분포 계산식**

어느 주어진 시간의 방사성 물질 농도는 격자 체적내에 존재하는 입자들의 수에 따라 계산되나, 정확한 농도를 계산하기 위해서는 가능한 많은 입자들을 배출하여야 하는 어려움이 있기 때문에 배출입자의 수가 작아도 적용할 수 있는 kernel density 방법으로 농도를 계산하였다. 이 방법은 각 입자가 puff의 중심에 위치하고 있고 이 puff의 농도분포는 정규분포를 한 것으로 가정하여 농도를 계산하는 방법이다. 이 때 필요한 각 방향별 확산거리는 puff가 경과해온 경로에서의 바람의 표준편차를 시간적분하여 구하며, 어느 주어진 시공간에서의 농도는 각 puff에 의하여 기여한 농도를 모두 합하면 된다.

따라서 방사성 입자의 농도  $\chi$ 와 방출을  $Q$ 의 비로 나타내는 대기확산인자  $\chi/Q(x, y, z)$ 는 입자가 지표면에서 완전 반사된다고 가정하면 다음과 같이 구할 수 있다[14].

$$\chi/Q = \frac{2\Delta t}{(2\pi)^{2/3}} \sum_{k=1}^N \frac{1}{\sigma_{xk} \sigma_{yk} \sigma_{zk}} \exp \left[ -\frac{(x_k - x)^2}{2 \sigma_{xk}^2} - \frac{(y_k - y)^2}{2 \sigma_{yk}^2} - \frac{(z_k - z)^2}{2 \sigma_{zk}^2} \right] \quad (36)$$

여기서  $(x_k, y_k, z_k)$ 는  $k$ 번 입자의 위치이고,  $\sigma_{xk}, \sigma_{yk}, \sigma_{zk}$ 는  $k$ 번 입자의  $x, y, z$ 쪽 방향의 확산 표준편차 거리이고,  $Q$ 는 오염 배출율을 나타낸다. Taylor의 가정에 의하면 각 방향의 확산 표준편차거리 ( $\sigma_i$ )는 다음과 같이 계산된다.

$$\sigma_i(t+\Delta t) = \sigma_i(t) + \sigma_{v,i} \Delta t \quad \text{for } t \leq 2T_{Li} \quad (37-1)$$

$$\sigma_i^2(t+\Delta t) = \sigma_i^2(t) + \sigma_{v,i}^2 T_{Li} \Delta t \quad \text{for } t > 2T_{Li} \quad (37-2)$$

**시뮬레이션 방법**

**시뮬레이션 사례**

850 hPa의 지균풍향, 풍속 및 운량을 이용, Park과 Yoon의 방법[15]으로 각 계절별로 16개 범주의 종관기상장을 분류하여, 해륙풍이 잘 발달할 수 있는 기상조건으로 봄철 약한 북풍의 지균풍이 부는 맑은 날의 경우(사례 1)를, 해륙풍이 잘 발달하지 못하는 기상조건으로는 봄철 강한 북풍의 지균풍이 부는 맑은 날의 경우(사례 2)를 시뮬레이션 사례로 선정하였다. 지균풍이 북풍이 부는 경우를 사례로 선정한 이유는 주풍향이 해륙풍의 방향(동서방향)과 직각을 이루어 해륙풍의 영향을 쉽게 구별할 수 있기 때문이다.

풍이 부는 맑은 날의 경우(사례 1)를, 해륙풍이 잘 발달하지 못하는 기상조건으로는 봄철 강한 북풍의 지균풍이 부는 맑은 날의 경우(사례 2)를 시뮬레이션 사례로 선정하였다. 지균풍이 북풍이 부는 경우를 사례로 선정한 이유는 주풍향이 해륙풍의 방향(동서방향)과 직각을 이루어 해륙풍의 영향을 쉽게 구별할 수 있기 때문이다.

**해륙풍 시뮬레이션**

**시뮬레이션 영역 및 격자 구성**

시뮬레이션 영역은 그림 1과 같고, 수평 격자 간격은 동서방향, 남북방향 모두 3 km, 수평 격자수는 31 x 46 이며, 연직적으로는 모델상한을 5 km로 하였고, 연직 격자수는 지표면에서 조밀하고 고도에 따라 간격이 커지도록 하여 14개 층으로 구성하였다.

수치적분 방식은 semi-implicit forward-upstream 차분방식을 사용하였으며, 각 변수에 대한 격자망은 그림 2와 같이 구성하였다.

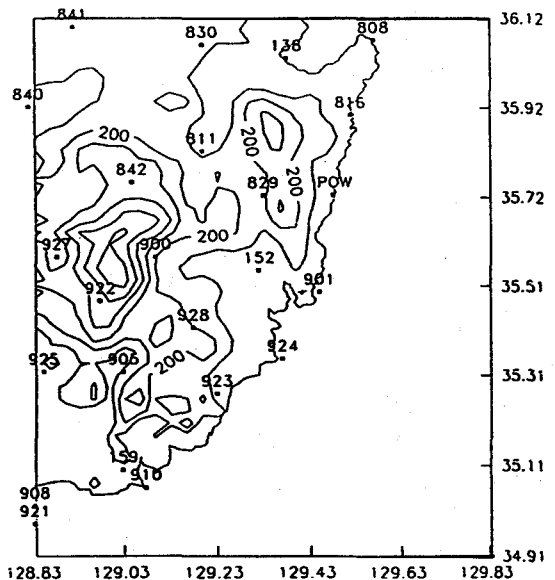


Fig. 1. 삼차원 해륙풍 수치 시뮬레이션 영역 및 지형, 영역의 x 축은 경도, y 축은 위도이며, 지형의 등고선은 100m 간격으로 표시하였다. 그림에서 ■ 기호와 함께 표시된 숫자는 시뮬레이션 초기조건 및 관측자료 nudging에 사용된 기상자료를 얻은 기상청 정규관측소 및 자동기상관측소(AWS)의 지점 번호이고, POW는 월성원전을 나타낸다.

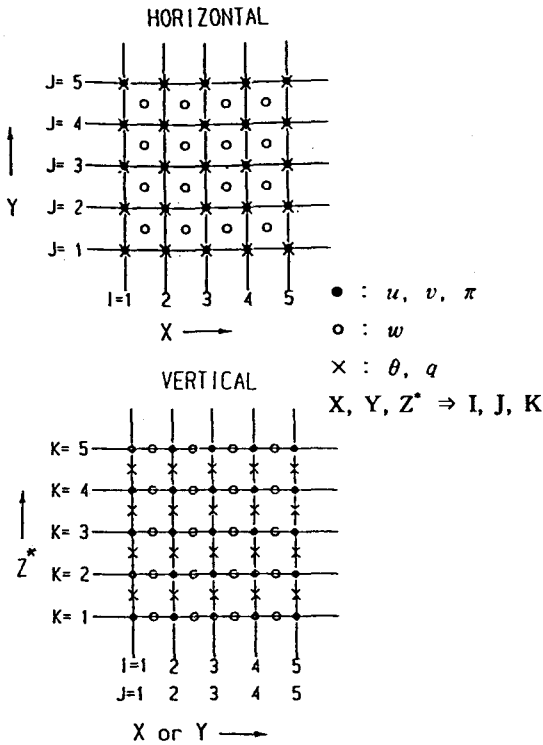


Fig. 2. 각 변수에 대한 격자망 구성

수평 격자 구성은 옆 경계 조건의 영향을 줄이기 위해 다음과 같이 구성하였다.

$$x(i) = \begin{cases} x(i-1) + 12km - (i-2) \times 3km & 2 \leq i \leq 4 \\ x(i-1) + 3km & 5 \leq i \leq M-3 \\ x(i-1) + 12km - (M-i) \times 3km & M-2 \leq i \leq M \end{cases} \quad (38)$$

$$y(i) = \begin{cases} y(i-1) + 12km - (i-2) \times 3km & 2 \leq i \leq 4 \\ y(i-1) + 3km & 5 \leq i \leq N-3 \\ y(i-1) + 12km - (N-i) \times 3km & N-2 \leq i \leq N \end{cases} \quad (39)$$

여기서 M과 N은 x와 y 방향의 격자 수를 나타낸다. 계산된 격자 값을 평활시키기 위해 다음과 같은 필터를 사용한다.

$$\overline{\phi(I, J)} = 0.5\phi(I, J) + 0.25[\phi(I+1, J) + \phi(I-1, J)] \quad (40)$$

여기서  $\phi$ 는  $u, v, \theta$  와  $q$ 이다.

### 초기 및 경계조건

바람장 초기조건은 태양에너지가 지표면으로 입사되기 시작하는 06시의 기상조건으로 사례 1 과 사례 2에 해당되는 경우의 날에 대해 월성주변 기상청 관측소, AWS 및 부지기상탑에서 지난 5년간(1990-1994년) 관측된 자료를 평균하여 사용하였다.

온위, 혼합비의 초기연직분포는 지난 5년간 (1990-1994년)의 광주, 포항 그리고 오산 상층기상관측 자료를 고도별로 평균하여 그림 3에 제시하였다. 기타 모델 초기화를 위한 초기조건은 표 1과 같다.

경계조건은 지표면 ( $z^* = 0$ ) 에서는  $u = v = w^* = 0$ , 그리고  $\theta = \theta_s$ 로 가정하였고, 또한 대기상한에서는 다음과 같이 가정하였다.

$$\frac{\partial u}{\partial z^*} = \frac{\partial v}{\partial z^*} = w^* = 0 \quad (41)$$

$$q(\bar{s}) = const., \quad \theta(\bar{s}) = const.$$

### 라그랑지안 입자 확산 시뮬레이션

입자 방출은 발전소의 10 m 고도에서 1분에 한 개씩의 가상입자가 연속적으로 방출된다고 가정하였으며, 일주기적 해륙풍 순환의 영향을 알아보기 위해 먼저 가상입자를 06시부터 24시간 동안 연속 방출시켜 평형상태에 도달시킨 후, 이때의 방사성 입자의 분포를 초기조건으로 삼아 06시부터 다시 1분에 한 개씩 가상입자를 방출시키면서 대기확산 시뮬레이션을 수행하였다. 농도계산의 단순화를 위해 모델 수행시 입자의 방사성 붕괴와 지표면 침적은 일어나지 않는다고 가정하였다.

라그랑지안 입자확산 시뮬레이션을 위한 종관 및 중간규모의 기상자료는 해륙풍 시뮬레이션 결과를 사용하였으며, 좌표변환 없이 해륙풍 시뮬레이션 결과를 그대로 이용하기 위해 해륙풍 수치모델과 동일한 격자점에서 입자확산 계산을 수행하며, 대기확산 수치식에 사용되는 변수는 직각좌표계로 환산하여 계산하였다.

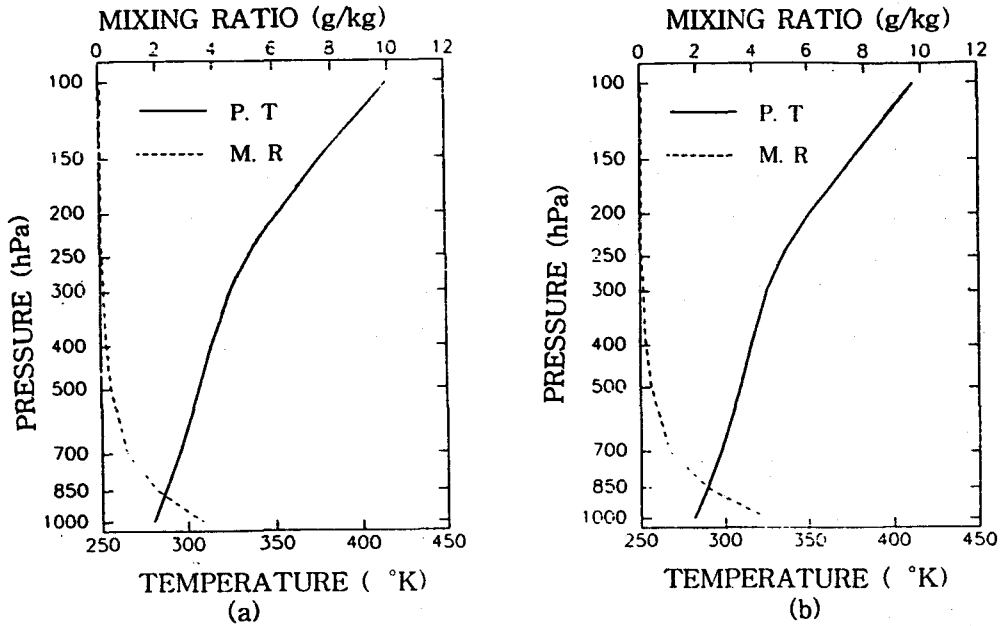


Fig. 3. 온위(——), 혼합비(---)의 초기 연직분포, 5년간 (1990-1994년)의 광주, 포항 그리고 오산 상층기상관측 자료를 고도별로 평균하였다. (a) 사례 1 : 봄철 약한 북풍이 부는 날, (b) 사례 2 : 봄철 강한 북풍이 부는 맑은 날의 경우

Table 1. 삼차원 해륙풍 수치 시뮬레이션 초기화를 위한 입력변수 값

Horizontal grid size	31 x 46
Vertical levels	14
Time step	15 seconds
Integration initialization	0600 LST
Mean latitude	35.5 ° N
Solar declination angle	3.6 °
Geostrophic wind speed (CASE 1)	3.2m/s
Geostrophic wind speed (CASE 2)	8.3m/s
Geostrophic wind direction (CASE 1)	339 °
Geostrophic wind direction (CASE 2)	338 °
Initial atmospheric pressure (CASE 1)	1015.2 hPa
Initial atmospheric pressure (CASE 2)	1014.7 hPa
Initial sea surface temperature	287 °K
<b>Land surface characteristics</b>	
Albedo	0.2
Roughness length	5cm
Free atmospheric potential temperature gradient	4 °K/km
Land surface temperature	281.15 °K
<b>Soil characteristics</b>	
Density	1.21 g/cm <sup>3</sup>
Diffusivity	0.005cm <sup>2</sup> /s
Surface wetness	0.3
Depth of constant soil temperature	20cm
Constant soil temperature	282 °K
Saturation soil moisture	0.5



## 시뮬레이션 결과

### 바람장 분포

#### 사례 1 : 봄철 약한 북풍이 부는 맑은 날

봄철 약한 북풍이 부는 맑은 날의 경우에 대한 해륙풍 시뮬레이션 결과의 지상 10 m 고도에서의 수평바람의 시간에 따른 변화를 그림 4에 제시하였다.

약한 북풍의 종관바람으로 인하여 해안가에서는 09시까지 전영역에서 북서풍이 불다가 - 그림에 제시하지는 않았다 - 일출과 더불어 지면 가열로 해풍이 발달하기 시작하여 12시에는 해풍이 뚜렷이 형성된 것을 볼 수 있다. 그후 해풍이 점점 강화되면서 가지산 동쪽사면의 곡풍과 병합되어 18시에 부지 서쪽 내륙 약 50~60 km 사이에 위치한 울산 북서쪽의 가지산 정상까지 진입하였다. 그후 일몰과 함께 해풍이 약화되면서 21시경부터는 육풍으로 전환되기 시작하여 다음 날 06시에는 다시 초기 기상조건으로 되돌아가는 일주기적 순환을 보이고 있다.

#### 사례 2 : 봄철 강한 북풍이 부는 맑은 날

그림 5는 봄철 지근풍이 강한 날에 대한 해륙풍 시뮬레이션에서 얻은 지상 10m 고도에서의 바람분포를 나타낸 것이다. 12시까지 해풍이 발달하지 못하고 주풍인 북서풍이 지속되다가 15시경에 해안선에 평행하게 바람이 순전되기 시작하여 18시경에는 해안선을 따라 풍속이 현저히 약화되었다. 특히 울산만 지역의 풍속이 현저히 약화되었으나 동풍의 해풍은 발달하지 못하였다. 21시 이후부터는 전 영역에서 주풍의 방향으로 변화하였다.

사례1의 바람이 약한 경우에는 울산 북서쪽의 가지산까지 해풍이 가지산 동쪽사면의 곡풍과 병합되어 가지산 정상까지 진입하는 데 반해 바람이 강한 경우에는 일출 육지의 가열로 인해 형성되는 기압경도력(해풍을 유도하는 기압경도력)으로 인해 해안가에서 약간의 바람장 변화가 있었지만 국지순환은 형성되지 못하고 주풍의 바람이 탁월한 대기흐름을 보이고 있다.

### 방사성 입자의 분포

#### 사례 1 : 봄철 약한 북풍이 부는 맑은 날

그림 6은 사례 1의 경우에 대해 방사성 입자의 지상 농도분포를 알아보기 위해 지상에서의 대기 확산인자  $\chi/Q$ 의 시간에 따른 분포를 나타낸 것이다.

입자들의 분포와 마찬가지로 06시에는 그 최대값이 발전소 부지 동쪽 해상에 위치하고 있으며, 최대축이 발전소에서 남동쪽 해상으로 뻗어 있다. 야간의 육풍에 의해 해양으로 빠져나갔던 입자들이 일출후 해풍이 발달되면서 다시 해안으로 이동되기 시작하나 12시까지는 해풍의 발달이 미약하여 해풍전면의 수렴대가 해안선 부근에 국한되어 나타나고 있다. 시간이 경과함에 따라 입자들이 내륙으로 이동하여 18시에는 대기확산인자가  $10^{-6} \text{ sec/m}^3$  이상인 지역이 내륙 약 10 km 까지 진입하는 것을 볼 수 있으나 해풍전면에 뚜렷한 수렴대가 형성되면서 대기확산인자가  $10^{-8} \text{ sec/m}^3$  이상인 지역은 해풍 영향범위에 국한되어 나타나고 있다. 일몰후 해풍의 에너지원이 소멸되면서 해풍전면의 수렴대도 사라져 내륙의 산곡풍 등 복잡한 국지풍계에 의해 대기확산인자가  $10^{-8} \text{ sec/m}^3$  이상인 지역이 울산 북쪽 지역까지 확장되나  $10^{-6} \text{ sec/m}^3$  이상 지역은 해안지역으로 축소되기 시작한다. 그후 육풍의 발달로 입자들이 해상으로 빠져 나가면서 다음 날 03시 이후에는 입자들이 주로 해상에 분포하게 된다.

#### 사례 2 : 봄철 강한 북풍이 부는 맑은날

그림 7은 사례 2의 경우에 대해 지상에서의 대기중 방사성 물질의 농도분포를 나타내는 대기확산인자( $\chi/Q$ )의 시공간적 분포를 나타낸 것이다. 주풍이 약한 경우와는 달리 대부분의 입자가 발전소로 남동 해상에 분포하고 있으며, 주간 18시에 일부의 입자가 내륙으로 수송되는 것을 제외하고는 내륙의 영향이 거의 없다.

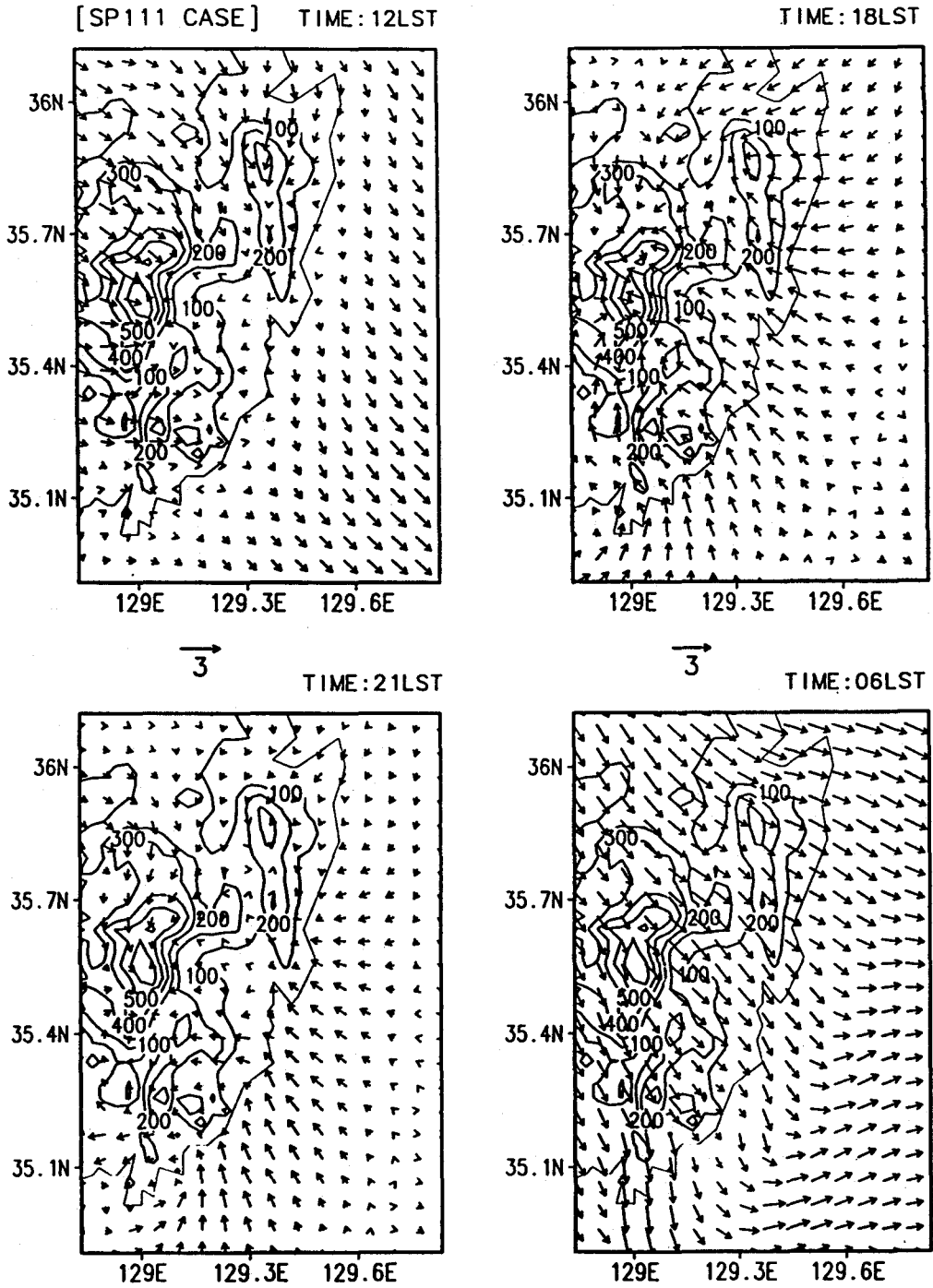


Fig. 4. 봄철 약한 북풍이 부는 맑은 날(사례 1)에 대한 해륙풍 시뮬레이션 결과로 지상고도 10m에서의 수평 바람분포(좌측 상단부터 우측으로 각각 12, 18, 21, 06시)

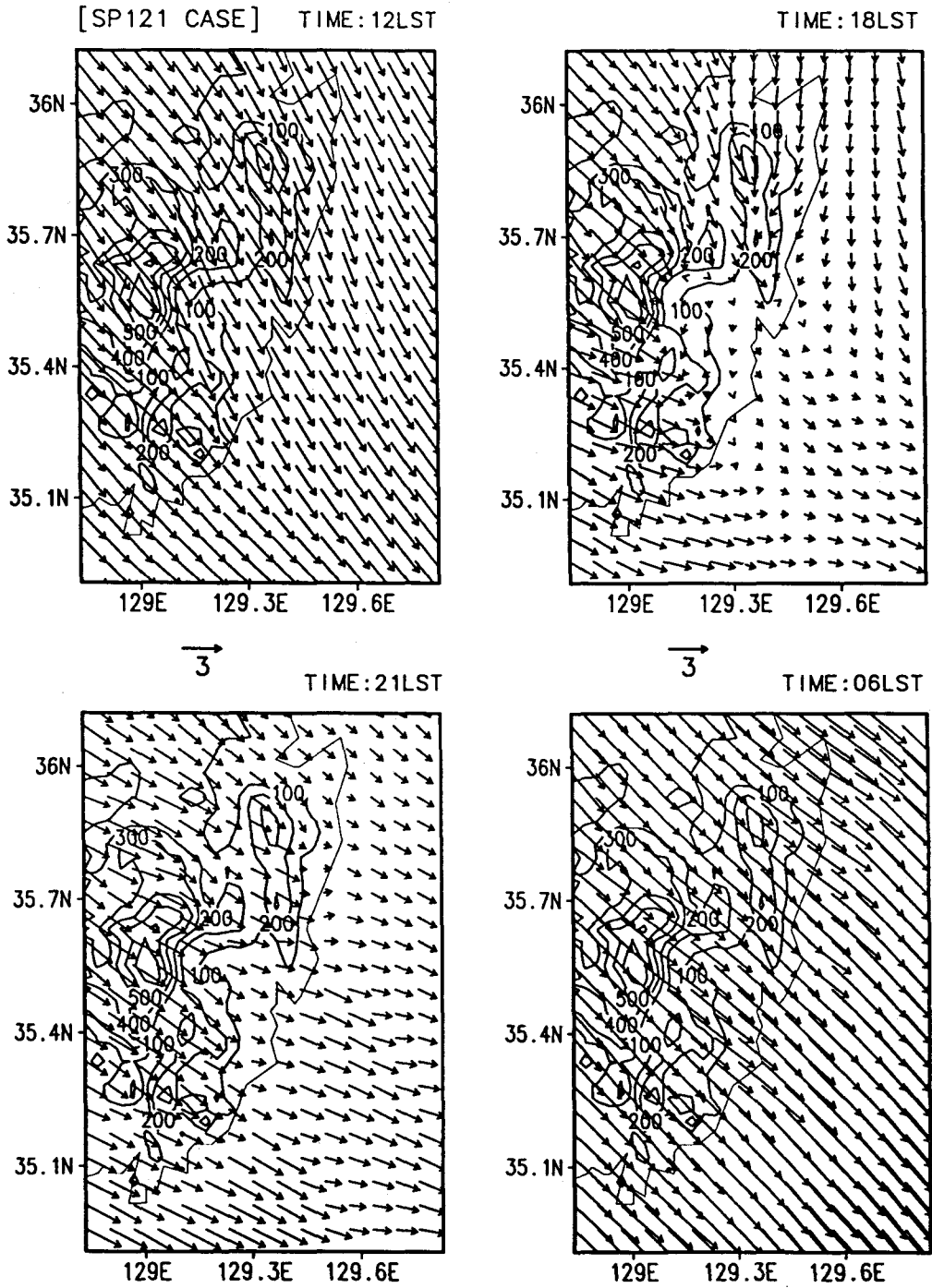


Fig. 5. 봄철 강한 북풍이 부는 맑은 날 (사례 2)에 대한 해륙풍 시뮬레이션 결과로 지상고도 10m에서의 수평바람분포(좌측 상단부터 우측으로 각각 12, 18, 21, 06시)

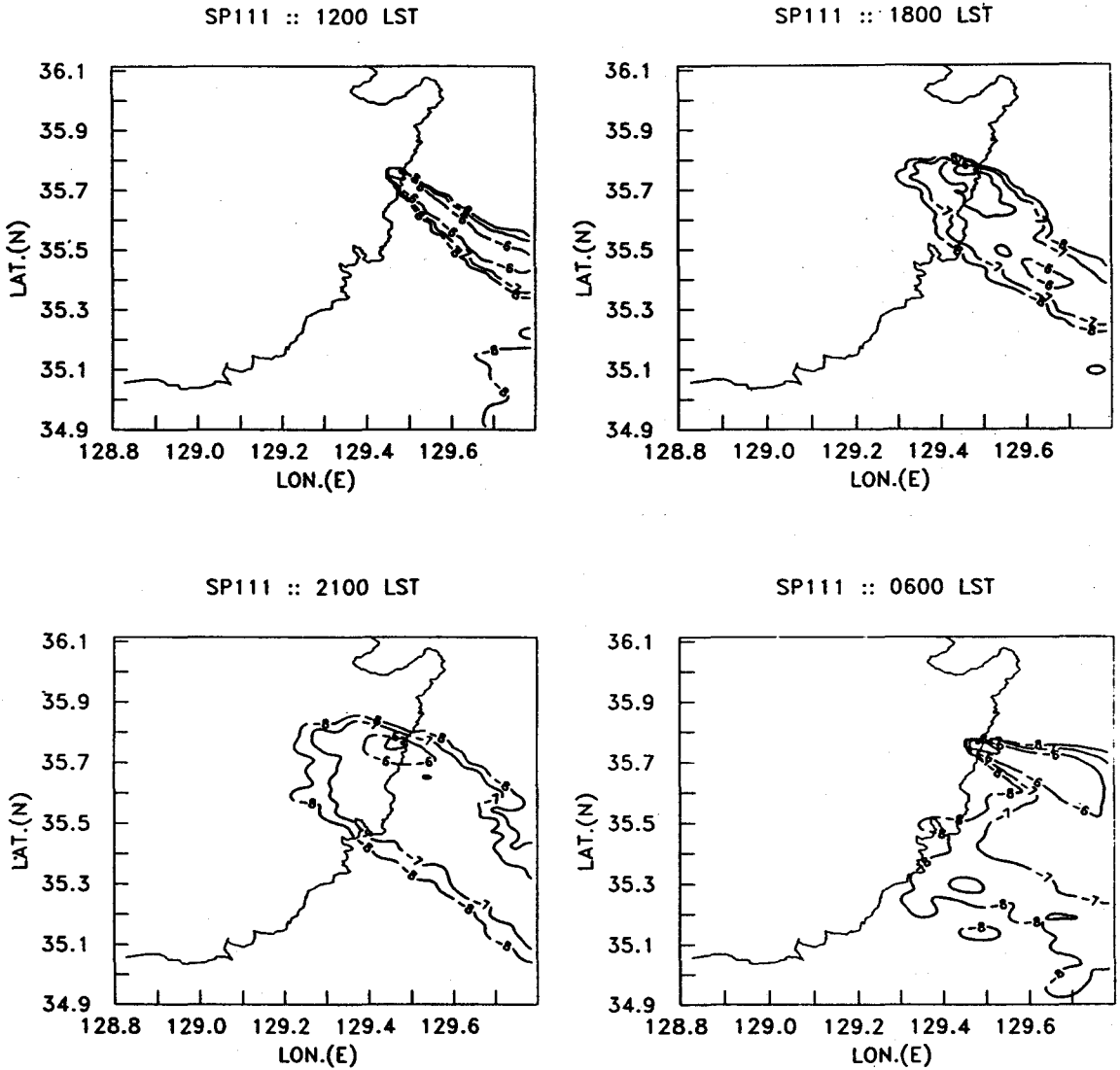


Fig. 6. 봄철 약한 북풍이 부는 맑은 날(사례 1)에 대한 시간대별 지상에서의 대기화산인자, X/Q (sec/m²)의 분포(등치선 값은 상용대수이며, 좌측 상단부터 우측으로 각각 12, 18, 21, 06시)

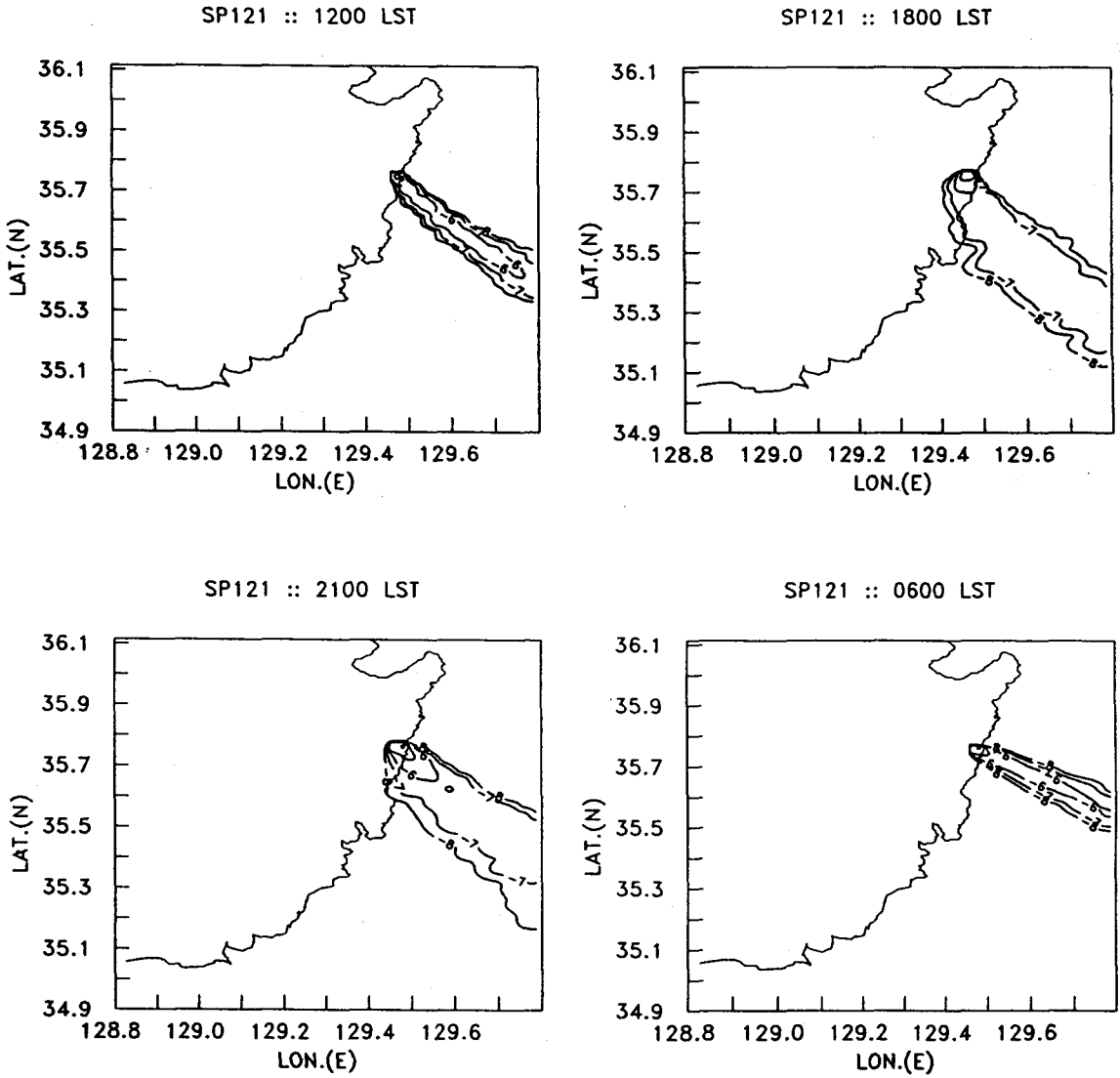


Fig. 7. 봄철 강한 북풍이 부는 맑은 날(사례 2)에 대한 시간대별 지상에서의 대기확산인자  $x/Q$  ( $\text{sec}/\text{m}^2$ )의 분포. (등치선 값은 상용대수이며, 좌측 상단부터 우측으로 각각 12, 18, 21, 06시)

대기확산인자 최대값의 일변화

표 2는 지상에서의 대기확산인자  $x/Q$ 의 시간대별 최대값이 나타난 지점의 방출원으로 부터의 동서방향( $x$ ), 남북방향거리( $y$ )를 나타내고, 그림 8은 최대값을 나타낸다.

해륙풍이 잘 발달한 사례 1의 경우에는 일출 전에는 최대값이 나타나는 지점이 육풍의 영향으로 방출원 남동 해상에 위치하고 있던 것이 해풍이 발달하면서 점차 방출원을 거쳐(12시) 서쪽으로 이동하고 있으며, 일몰후 육풍에 의해 다시 남쪽을 거쳐(00시) 남동쪽 해상으로 되돌아 가는 추세를 보이고 있다.

그러나 해륙풍이 잘 발달하지 못한 사례 2의 경우에는 최대값이 나타나는 지점이 18시경 일시적으로 남서쪽에서 나타나지만 전반적으로는 남동쪽 해상에서 나타나고 있다.

그림 8의 시간대별 지상 대기확산인자의 최대값 변동 추이를 보면 사례 1의 경우에는 해풍과 육풍의 풍향교체로 해안지역에서 일시적으로 풍속이 약해지는 오전 09시에 높은 값을 보이다가, 일출후 해풍이 강화되어 오염물질은 활발히 확산되나 해풍의 발달이 미약하여 해상의 입자를 부지로 수송하지 못하는 15시까지는 최대값이 점차 작아지다가 해풍에 의해 해상에 존재하던 입자가 해안지역까지 유입되는 15시 이후부터는 최대값이 커져 18시에 정점이 나타난다. 이후 해풍에 의한 해상으로부터의 입자 수송이 일어나지 않게 되면서부터 다시 최대값이 작아지기 시작하다 내

륙으로 이동되었던 입자가 야간의 육풍에 의해 해안지역으로 재순환되면서, 자정부터 다시 대기확산인자의 최대값이 커지게 된다.

그러나 사례 2의 경우에는 사례 1과는 달리 지면 가열로 인한 하층대기의 왜곡이 일어나지 않는 18시 이전에는 - 비록 15시에 해상의 북풍과 내륙의 북서풍이 부지 주변에서 수렴되는 기류에 의해 일시적인 소정점이 나타나지만 - 강한 주풍에 의한 역학적 혼합으로 일정한 값을 유지하고 있다. 그러나 18시 이후에는 지면 가열로 인한 하층대기의 왜곡으로 연안에서 약한 수렴대가 형성되면서 최대값이 커져 21시에 정점이 나타나고 이후 야간에는 대기확산인자의 최대값이 감소하는 추세를 보이고 있다.

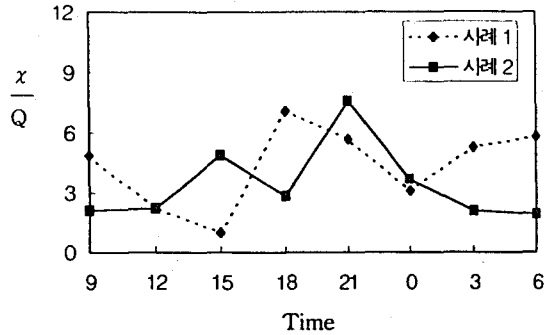


Fig. 8. 사례 1과 사례 2의 지상에서의 대기확산인자  $x/Q(\text{sec/m}^2)$ 의 각 시간대별 최대값.(단위는  $10^{-4} \text{sec/m}^2$ )

Table 2. 사례 1과 사례 2의 각 시간대별 지상에서의 대기확산인자의 최대값이 나타난 지점(x의 -(음) 값은 방출원으로부터 서쪽, y의 -(음) 값은 방출원으로부터 남쪽으로의 거리).

Time	사례 1		사례 2	
	x (m)	y (m)	x (m)	y (m)
09	60	-60	300	-420
12	0	0	120	-300
15	-120	60	0	-120
18	-60	0	-60	-60
21	0	0	0	0
00	0	-60	120	-60
03	60	0	180	-60
06	60	-60	180	-120

## 토의 및 결론

우리나라 원전부지 주변에서 빈번히 발생하는 해륙풍과 같은 국지순환에 따른 방사성 물질의 대기확산 특성을 살펴보기 위해 월성원전 주변지역을 대상으로 봄철 약한 북풍이 부는 맑은 날과 강한 북풍이 부는 맑은 날에 대해 방사성 입자가 1분에 한 개씩 연속방출된다고 가정하여 삼차원 대기확산 시뮬레이션을 수행하였다.

시뮬레이션 결과, 해륙풍의 풍향변화에 따라 입자의 분포도 일주기적으로 변화하는 등 시간별 방사성 입자의 확산 및 수송이 해륙풍에 크게 좌우되어 나타남을 볼 수 있었다.

특히 해륙풍이 뚜렷이 형성되는 바람이 약한 맑은 날의 경우에는 이미 방출되어 방출원으로부터 멀리 떨어진 지역까지 수송되었던 입자들이 풍향교체로 인해 다시 방출원으로 되돌아오는 재순환 현상이 방사성 물질의 대기중 농도 분포에 중요한 역할을 하는 것을 확인할 수 있었다. 해륙풍 순환이 잘 나타나지 않는 강한 북풍이 부는 경우에는 야간에 대기확산인자의 최대값이 감소하는 추세를 보인 반면, 해륙풍이 뚜렷이 형성되는 약한 북풍이 부는 경우에는 낮에 해풍에 의해 내륙으로 수송되었던 입자들이 야간의 육풍에 의해 방출원으로 재순환되면서 일몰후 자정부터 다시 대기확산인자의 최대값이 커지고 있다.

그러나 본 연구에서는 이러한 재순환의 영향을 정량적으로 규명하지 못하였는데, 향후에는 각 입자의 궤적을 추적하여 부지를 포함하는 단위 격자망을 빠져나갔던 입자들이 해풍/육풍의 풍향교체에 의해 다시 부지 격자망 내로 되돌아 오는 비율을 계산하여 재순환에 의한 농도 기여도를 정량화하는 연구를 수행할 것이다.

또한 본 연구에서는 농도 계산의 단순화를 위해 방사성 붕괴를 고려하지 않고 일반적인 입자를 가상하여 연구를 수행하였으나 라그랑지안 입자확산모델에서는 입자의 대기중 체류시간을 계산할 수 있으므로 반감기가 짧은 핵종에 대한 방사성 붕괴 영향을 쉽게 파악할 수 있을 것으로 사료된다.

## Appendix

### List of Symbols

$C_p$  : specific heat of air at constant pressure

- $f$  : Coriolis parameter
- $F$  : fractional coverage of a grid box by land
- $g$  : the gravity
- $K_H$  : horizontal eddy exchange coefficient
- $K_z$  : vertical eddy exchange coefficient of momentum
- $K_z^{(\theta)}$  : vertical eddy exchange coefficient of heat
- $K_z^{(q)}$  : vertical eddy exchange coefficient of moisture
- $K_s$  : soil heat diffusivity
- $p$  : pressure
- $p_0$  : reference pressure
- $q$  : mixing ration
- $S$  : material surface at the top of the model
- $\bar{S}$  : initial height of the material surface
- $t$  : time
- $T_s$  : ground temperature
- $u, v$  : east-west and north-south wind component
- $u_*$  : friction velocity
- $U_g, V_g$  : east-west and north-south geostrophic wind component
- $w$  : vertical component of wind in  $z$  coordinate
- $w^*$  : vertical component of wind in  $z^*$  coordinate
- $x$  : east-west coordinate
- $y$  : north-south coordinate
- $z$  : vertical coordinate
- $z^*$  : terrain-following vertical coordinate
- $z_0$  : surface roughness length
- $z_G$  : ground elevation
- $\theta$  : potential temperature
- $\theta_s$  : potential temperature at the surface
- $\pi$  : Exner function
- $\gamma$  : lapse rate of potential temperature
- $x$  : [ =  $R/C_p$  ]

## 참고 문헌

1. A.L. Walter, R.A. Pielke and M. Uliasz, "New Technologies for Modeling Mesoscale Transport and Diffusion in Coastal Zones and Complex Terrain", in: *Proc. of the Topical Meeting on Environmental Transport and Dosimetry*, pp. 3-6, ANS, South Carolina(1993)
2. M. Uliasz and R.A. Pielke, "Lagrangian - Eulerian Dispersion Modeling System for Real-time Mesoscale Application", in : *proc 3rd. Topical Meeting on Emergency Preparedness and Response*, p. 4 ANS, Chicago(1991)
3. S.U. Park, "Results of a Three-Dimensional Numerical Model of Land-Sea Breezes over South Korea." *J. Kor. Meteor. Soc.*, 26(2), 78-103(1990)
4. S.U. Park, "Air quality Simulations Using near Surface Meteorological Observation s", in : *Proc. of Workshop on the Resional Air Quality*, pp. 93-130, SNU, Seoul(1993)
5. S.U. Park and J.Y. Moon, "An Application of the Lagrangian Particle Dispersion Model for the Estimation of Dilution Factors at the Wolsung Nuclear Power Plant in Korea", in: *Proc. 6th Topical Meeting on Emergency Preparedness and Response*, pp. 229-233, ANS, San Francisco(1997)
6. 송창근, 사차원 자료동화기법을 응용한 국지 순환 수치모의, 서울대학교 석사학위논문 (1997)
7. R.T. McNider, M.D. Moran and R.A. Pielke, Influence of Diurnal and Inertial Boundary-layer Oscillations in Long-range Dispersion. " *Atmos. Environ.*, 22, 2445-2462(1988)
8. J.C. Kaimal, J.C. Wyngaard, D.A. Haugen, O.R. Cote, Y. Izumi, S.J. Caughey, and C.J. Readings, "Turbulence Structure in the Convective Boundary Layer." *J. Atmos. Sci.*, 33, 2152-2168(1976)
9. B.J. Legg and M.R. Raupach, "Markov-Chain Simulations of Particle Dispersion in Homogeneous Fows: The Mean Drift Velocity Induced by a Gradient in Eulerian Velocity Variance." *Bound. Layer Meteor.*, 24, 3-13(1982)
10. O. Chiba, "Stability Dependence of the Vertical Wind Velocity Skewness in the Atmospheric Surface Layer." *J. Meteor. Soc. Japan*, 56, 140-142(1978)
11. R.B. Stull, *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*, Kluwer Acad. Pub., p. 666(1991)
12. A.L.M. Grant, "Observations of Boundary Layer Structure made During the 1981 KONTUR Experiment." *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 112, 825-841(1986)
13. J.C. Wyngaard, O.R. Cote, and Y. Izumi, "Local Free Convection Similarity and the Budgets of Shear Stress and Heat Flux." *J. Atmos. Sci.*, 28, 1171-1182(1971)
14. T. Yamada, C.Y. Kao and S. Bunker, "Airflow and Air Quality Simulation over the Western Mountainous Region with a Four Dimensional Data Assimilation Technique" *Atmos. Envir.*, 23, 539-554(1989)
15. S.U. Park and I.H. Yoon, "The Characteristics Features of Local Weather Phenomena under the Various Synoptic Winds over South Korea." *J. Kor. Meteor. Soc.*, 27(2), 87-118(1991)