

Numerical Simulation for the Field Tracer Experiment over the Kori Nuclear Power Plant

Kyung-Suk Suh · Eun-Han Kim · Won-Tae Whang ·
Hyo-Joon Jeong · Moon-Hee Han
Korea Atomic Energy Research Institute

고리 원전주변에서 야외 확산실험 모사

서경석 · 김은한 · 황원태 · 정효준 · 한문희
한국원자력연구소

(2004년 6월 15일 접수, 2004년 9월 7일 채택)

Abstract - Three-dimensional wind field and atmospheric dispersion models have been developed for estimating the concentration distributions of radioactive materials released into atmosphere. The field tracer experiment near the Kori nuclear power plant located over complex terrain was carried out for validating the atmospheric dispersion model. The wind fields were one of the most important factors for calculating the concentration. Therefore, several numerical simulations using the measured wind data were performed to get more accurate concentration distributions compared with the analyzed values of the tracer gas. The calculated concentration distributions agreed well in the case of the usage of the more measured wind data in wind field model.

Key words : wind fields, radioactive materials, dispersion model, field tracer experiment

요약 - 대기중으로 방출된 방사성물질의 농도분포를 예측하기 위하여 3차원 바람장 및 확산모델을 개발하였다. 대기 확산모델의 검증에 위하여 복잡한 지형에 위치한 고리 원전 주변에서 야외 확산실험을 수행하였다. 확산모델의 계산 값에 가장 중요한 영향을 주는 것은 바람장의 분포이다. 따라서 관측된 바람자료를 이용하여 여러 경우에 대한 수치실험을 수행하여 계산 값이 관측 농도 값에 좀더 유사하게 접근하는 가를 살펴보았다. 비교결과 바람장 모델내 많은 관측 바람장을 이용한 경우에 관측 농도 값에 가장 근접함을 알 수 있었다.

중심어 : 바람장, 방사성물질, 확산모델, 야외확산실험

서 론

Chernobyl 사고[1] 이후 원전 사고 시 대기로 방출되는 방사성 물질로부터 주변 주민 및 환경을 보호하고 방사선 피해를 최소화할 수 있는 비상대응 체제를 개발·개선하기 위한 연구가 전세계적으로 활발히 진행되어 왔다[2,3,4]. 우리나라도 1995년부터 방사선 비상대응 시스템의 개발에 착수하여 완성된 CARE 시스템[5]을 현재 4개의 상업용 원전을 대상으로 운영 중에 있다. 이 시스템의 가장 중요한 요소는 신속하고 정확한

바람 분포 및 오염물의 농도 분포 계산이다. 한국 원자력연구소에서는 개발된 대기 확산모델의 실증 규모 검증을 위하여 1996년부터 영광 원전을 시작으로 4개의 상업용 원전 부근에서 대규모 야외 확산실험을 수행하였다.[6]

본 연구에서는 2001년 5월에 고리 원전에서 수행된 야외 확산실험 자료를 기초로 개발된 대기 확산모델을 검증하였다. 고리 원전은 남해 및 동해의 해안을 따라 위치하고 있어 뚜렷한 해륙풍 현상을 보이며, 또한 주변의 복잡한 지형에 의해 복잡한 바람형태를 보이고 있다. 확산 모사를 위

하여 여러 지점에서 관측된 바람자료를 이용하여 바람장을 생성하고 이에 따른 농도분포를 여러 수치실험을 통하여 계산하여 관측 값과 비교하였다. 또한 확산모델의 난류 항을 고전적 방법의 Briggs 식을 이용한 것과 현장에서 관측한 자료로부터 플룸의 표준편차를 직접 구한 값을 이용하여 계산을 수행하여 관측 값과 비교하였다.

바람장 모델

변분법 원리[7]에 기초한 diagnostic 바람장 모델은 일부 지점에서 관측된 바람장을 이용하여 질량보전 방정식을 만족하는 함수가 최소 값을 갖도록 하여 계산의 전 영역에서 바람장을 구하는 방법이다. 본 연구에서는 지표면 부근에서의 바람장 분포의 오차를 최소화하고 바람장을 좀더 정확하게 산정하기 위하여 지형을 따르는 좌표계(terrain-following coordinates or sigma coordinates)에 대한 바람장 모델을 개발하였다. Lagrange multiplier 이론을 이용하여 연속방정식은 변분원리(variational techniques)에 의해 적분 함수를 최소화하도록 구성되어져 있는데 수학적으로 최소화 함수는 다음과 같다.

$$E(u, v, \bar{w}, \lambda) = \int \int \int [\alpha_1^2 (u - u^0)^2 + \alpha_1^2 (v - v^0)^2 + \alpha_2^2 (\pi \bar{w} - \pi \bar{w}^0)^2 + \lambda (\frac{\partial \pi u}{\partial x} + \frac{\partial \pi v}{\partial y} + \frac{\partial \pi \bar{w}}{\partial z})] dV \quad (1)$$

$$\sigma(x, y) = \frac{H - z}{H - h(x, y)} = \frac{H - z}{\pi} \quad (2)$$

윗 식에서 α_1 및 α_2 는 Gauss precision moduli로 수평 및 수직성분의 상대적 크기를 규정하는 변수이고, 지형을 따르는 좌표계의 $\sigma=1$ 은 지표면을, $\sigma=0$ 는 계산영역의 최상층을 의미한다. $h(x, y)$ 는 지형의 높이, H 는 계산영역의 최상층 수직높이, u^0, v^0, \bar{w}^0 는 초기 바람장 성분이고, u, v, \bar{w} 는 최종 보정된 바람장 성분, λ 는 Lagrange multiplier이다. 식 (1)의 함수 E를 최소화하면 다음과 같은 Euler-Lagrange 방정식 및 연속 방정식을 얻을 수 있다.

$$u = u^0 + \frac{1}{2\alpha_1^2} [\frac{\partial \lambda}{\partial x} + \frac{\sigma}{\pi} \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\partial \lambda}{\partial \sigma}]$$

$$v = v^0 + \frac{1}{2\alpha_1^2} [\frac{\partial \lambda}{\partial y} + \frac{\sigma}{\pi} \frac{\partial h}{\partial y} \frac{\partial \lambda}{\partial \sigma}] \quad (3)$$

$$\bar{w} = \bar{w}^0 - \frac{1}{2\alpha_2^2} [\frac{1}{\pi} \frac{\partial \lambda}{\partial \sigma}]$$

$$\frac{\partial(\pi u)}{\partial x} + \frac{\partial(\pi v)}{\partial y} + \frac{\partial(\pi \bar{w})}{\partial \sigma} = 0 \quad (4)$$

식(3)을 식(4)에 대입하면 λ 에 대한 Poisson 방정식을 얻을 수 있다. λ 에 대한 편미분 방정식을 풀기 위한 경계조건으로 측면 경계는 개방경계로 흐름이 통과하는 것으로 상층 및 지표면은 경계의 수직인 면으로 흐름이 통과하지 않는 폐쇄 경계조건을 주어 λ 를 구한 후 최종적으로 식 (3)에 대입하여 지형을 따르는 좌표계상에서 보정된 바람장을 계산한다.

확산 모델

확산 모델은 random walk 방법을 이용하여 방사성물질의 대기중 농도분포를 계산하는 것으로, 3차원 공간에서 입자는 평균풍에 의한 이류(advection)와 난류에 의한 확산(diffusion)으로 주어진 시간간격 동안에 초기 위치에서 다음 위치로 이동한다. 따라서 공간에 대한 변위는 이류와 난류에 의한 변위의 합으로써 표시된다. 임의시간에서 어떤 시간간격 동안에 x, y, z 축에 대한 변위는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(x_{t+\Delta t}, y_{t+\Delta t}, z_{t+\Delta t}) = [x_t + (u + 2\mu U)\Delta t, y_t + (v + 2\nu V)\Delta t, z_t + (w + 2\xi W)\Delta t] \quad (5)$$

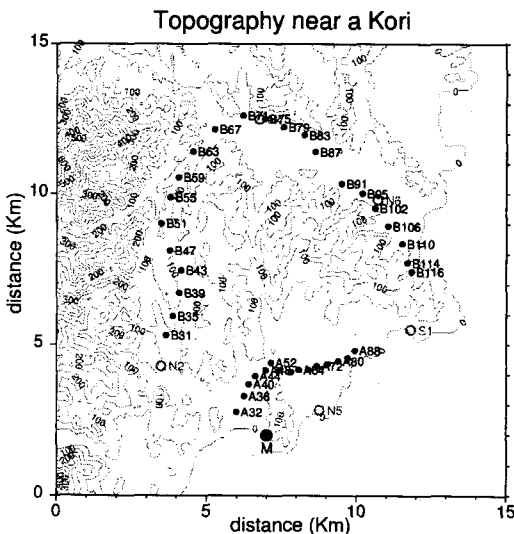
여기서, μ, ν, ξ 는 각 방향에 대한 등가난수(uniform random number)로 -0.5에서 0.5의 값을 갖는다. u, v, w 는 평균풍에 의한 이류 유속, U, V, W 는 난류에 의한 확산 유속이다. 식 (7)에서 난류에 의한 확산 유속 U, V, W 는 아래의 식들로 계산된다.

$$U = \sqrt{\frac{6 k_x}{\Delta t}}, \quad V = \sqrt{\frac{6 k_y}{\Delta t}}, \quad W = \sqrt{\frac{6 k_z}{\Delta t}} \quad (6)$$

여기서, k_x, k_y, k_z 는 각 방향의 확산계수, Δt 는 시간증분이다. 따라서 확산계수 k 를 구함으로써 3차원 공간에 대한 입자의 변위를 구할 수 있다. 각 방향에 대한 k_j ($j=x,y,z$)는 플룸의 표준편차로부터 구할 수 있는데, 플룸의 표준편차는 풍하거리와 대기안정도 등급의 함수로 주어진다. 이는 일반적으로 Pasquill-Gifford나 Briggs[8]의 곡선으로부터 구할 수 있는데 본 연구에서는 고전적인 Briggs chart로부터 구한 것과 야의 확산실험을 통하여 얻어진 마찰속도로부터 직접 각 방향의 확산계수 k_j 를 구하여 관측된 농도 값과 상호 비교하였다.

야의 확산실험

대기 확산모델의 검증을 위하여 부산광역시 기장군 장안읍에 위치한 고리 원전 주변에서 2001년 5월 31일에 야의 확산실험을 수행하였다. 고리 원전은 남동 해안가에 위치하여 낮동안에는 해륙풍의 영향으로 동풍 및 남풍이 내륙지방으로 불어오며 주변의 복잡한 지형에 의해 복잡한 바람 형태를 나타내는 지역이다. 실험을 위해 SF₆ 가스를 추적자로 이용하여 원전 부지내 기상탑 58m의 높이에서 가스를 방출하였다. 가스의 포집은 자체 제작된 가스 포집기를 이용하여 지정된 지점에서 10분씩 6회 포집하였다. 포집점은 가스 방출점을 중심으로 반경 3 km(A line)에 57개와 12



및 Lagrangian time scale를 이용한 플룸의 표준편차 σ_j 와 확산계수 k_j 를 구하였다[10].

$$\sigma_j^2 = 2\sigma_{vk}^2 T_{Lk}^2 \left[\frac{t}{T_{Lk}} - 1 + \exp\left(-\frac{t}{T_{Lk}}\right) \right] \tag{7}$$

$$k_j = \frac{1}{2} \frac{d\sigma_j^2}{dt} = \sigma_{vk}^2 T_{Lk} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{T_{Lk}}\right) \right] \tag{8}$$

윗 식에서 각 방향 풍속의 표준편차 σ_{vk} ($k=x,y,z$), 및 Lagrangian time scale은 T_{Lk} 는 다음 식으로부터 구해진다[10].

$$\begin{aligned} \sigma_u &= \sigma_v = u_* (12 - 0.5 z_i/L), \\ \sigma_w &= 0.96 u_* (3z/z_i - L/z_i)^{1/3} \\ T_{Lu} &= T_{Lv} = 0.15/(\sigma_w/z_i), \\ T_{Lw} &= 0.1(z/\sigma_w)/[0.55 + 0.38((z-z_o)/L)] \end{aligned} \tag{9}$$

윗 식에서 u_*, w_* 는 마찰속도, L 은 Monin-obukhov length, z_i 는 혼합층 높이, z_o 는 roughness height이다.

확산모델의 가장 중요한 입력항 중의 하나는 3차원 바람장 분포이다. 본 연구에서 개발된 3차원 바람장은 일부 지점에서 관측된 바람자료를 이용하여 계산되어지므로 관측된 바람장의 분포가 중요하다. 따라서 여러 지점에서 관측된 바람장 자료를 이용하여 수치모사를 수행하였는데, 여기에 바람장 변화에 따른 확산모델의 계산 농도 값을 관측 값과 비교하기 위하여 통계분석이 이용되었다. 통계분석에 이용된 식은 NMSE(Normalized Mean Square Error), Bias, RMSE(Root Mean Square Error), FB(Fraction Bias), FA2(Factor of two), FA5(Factor of five)로 그 정의는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} NMSE &= \frac{1}{N} \sum_i \frac{(C_i - O_i)^2}{\bar{C} - \bar{O}}, \quad RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i (C_i - O_i)^2}, \\ Bias &= \frac{1}{N} \sum_i (C_i - O_i), \quad FB = \frac{1}{2} \frac{(\bar{C} - \bar{O})}{(\bar{C} + \bar{O})}, \\ \bar{C} &= \frac{1}{N} \sum_i C_i, \quad \bar{O} = \frac{1}{N} \sum_i O_i. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} FA2 &= \frac{No. of FAA2}{N} \times 100 \quad \left(\frac{1}{2} \leq FAA2 (= \frac{O}{C}) \leq 2 \right) \\ FA5 &= \frac{No. of FAA5}{N} \times 100 \quad \left(\frac{1}{5} \leq FAA5 (= \frac{O}{C}) \leq 5 \right) \end{aligned} \tag{11}$$

윗 식에서 N 은 자료의 개수, C 는 계산 값, O 는 관측 값이다.

수치 모사

농도의 계산 값과 관측 값의 비교를 위하여 바람장 모델을 이용하여 바람장을 산정한 후 이를 확산모델의 기본 입력자료로 이용하였다. 바람장 발생을 위한 범위로 방출점을 기준으로 서쪽으로 7 km, 동쪽으로 8 km, 남쪽으로 2 km, 북쪽으로 13 km의 범위로 동서방향 15 km, 남북방향 15 km의 영역을 대상으로 하였다. 3차원 바람장 계산을 위한 x, y 방향의 격자 크기는 500 m로, 수직 방향의 격자 크기는 100 m로 분할하여 지상으로부터 1 km까지 계산하도록 하였다. 계산영역에 대해 x, y, z방향으로 30 x 30 x 10의 격자망을 구성하였다. 바람장 모형에서 가장 중요한 입력변수는 지형자료와 관측된 풍향·풍속자료인데 풍향·풍속자료는 확산실험시 가스 방출시간동안 부지내 기상탑 10 m, 58 m 높이와 반경 3 km 및 12 km에 설치한 간이 풍향·풍속계로부터 관측한 자료를 15분 평균하여 시간의 함수로 입력하였다. 입력된 바람 성분은 주로 지표면에서 관측된 것으로 수직 방향으로는 상사이론(similarity theory) [9]에 의해 외삽하였고, 수평방향으로는 방출점, 반경 3 km 및 8 km에서 관측자료로부터 수직 외삽된 값들을 다시 내삽한 후 최종적으로 변분법에 의해 질량보존식을 만족하는 바람장 값을 계산하였다. 농도분포 모사를 위한 대상범위는 바람장 발생 범위와 동일하게 동서방향 15 km, 남북방향 15 km로 주었고, 농도장 계산을 위한 x, y 방향의 격자 크기는 포집점이 한 개의 계산 격자내로 반영될 수 있도록 50 m로, 수직 방향의 격자 크기는 100 m로 분할하여 1 km까지 계산하도록 하였다. 계산영역에 대해 x, y, z방향으로 300 x 300 x 10의 격자망을 구성하였다. 계산의 가장 중요한 입력변수인 바람분포는 바람장 모형에 의해 계산하여 시간의 함수로 입력하였고, 바람장 모형의 계산시간과 동일하게 계산을 수행하였다. 또한 확산모형에 입력되는 난류장 성분인 확산계수는 통상적으로 Briggs의 식으로써

터 구한 것과, 야의 확산실험을 통하여 관측한 풍속자료를 이용하여 부지 특성이 반영된 확산계수를 구하여 관측 값과 상호 비교하였다.

바람장의 변화에 따른 농도장의 변화를 살펴보기 위해 바람장 모델에 Table 1과 같이 관측된 바람을 이용하여 여러 수치실험을 수행하였다. 야의 확산실험 기간 중 원전 부지내 기상탑 10m와 58 m의 자료와 대상 영역내 5개 지점(N2, N4, N6, S1, N5)에서 간이 풍향·풍속계에 (이후 nova 자료로 명명함)의해 바람을 관측하였다. Fig. 2에서와 같이 관측된 바람장이 위치에 따라 풍향과 풍속이 서로 다르게 나타나고, 또한 Briggs chart로부터 구한 난류항과 관측 바람장으로부터 직접 구한 난류항을 이용한 경우에 계산된 농도 값이 관측된 농도 값과 유사한 형태를 보이는 것을 알아보기 위해 6개 경우에 대한 수치실험을 수행하였고 이들의 결과를 통계 변수 값에 의해 제시하였다 (Table 2).

Table 2에 바람장 모델에 관측 바람자료의 변화를 주어 계산한 run 1에서 4를 비교해 보면 run 3 (기상탑 10 m 자료와 5개 지점에서 관측한 nova의 바람자료를 이용)의 경우에 계산 농도 값과 관측 농도 값이 제일 유사한 형태를 보이고

있다. 이는 10 m 나 58 m의 기상탑의 바람 자료를 이용하여 계산한 경우보다 좀더 많은 관측 바람장을 이용하여 바람장을 재현한 후 계산한 농도 값이 관측 농도 값에 좀더 유사하게 접근함을 알 수 있다. 58 m의 자료와 nova 자료를 이용한 run 4의 경우보다 10 m의 자료와 nova 자료를 이용한 run 3의 결과가 관측 값에 더 접근하는 것은 Fig. 2.에서 보여 주는 바와 같이 10 m의 풍향이 좀더 일정한 남풍으로 확산의 중심선으로 불어 나가기 때문으로 생각된다. 또한 계산 영역내 기상자료를 관측하지 못한 곳에서의 바람 형태, 즉 계산 영역의 전반적인 바람형태가 기상탑의 58 m의 바람자료보다는 기상탑의 10 m의 바람자료의 형태를 더 많이 보인 것으로 생각된다. run 3의 조건을 이용하여 Briggs chart로 난류항을 계산한 run 5와 현장 관측 바람장 자료로부터 난류항을 직접 계산한 run 6의 경우를 비교해 보면 계산 결과에 큰 차이를 보이지는 않지만 run 5의 결과가 관측 농도 값과 좀더 일치함을 알 수 있다. 이는 첫째로 복잡한 지형에 의한 국지적 난류 성분이 강하게 나타나고 바람장을 관측한 지점의 개수가 부족하여 이 지역의 난류 성분을 대표하지 못하는 것으로 생각된다. 둘째는

Table 1. Several numerical simulations.

Run No.	Conditions of wind field and dispersion models
1	only used 10 m wind data at met. tower
2	only used 58 m wind data at met. tower
3	used 10 m dat, portable wind data at A and B line
4	used 58 m dat, portable wind data at A and B line
5	used the condition of run3 with Briggs chart
6	used the condition of run 3 with Lagrangian time scale scheme

Table 2. Statistical results.

Run No.	NMSE	Bias	RMSE	FB	FA2	FA5
1	23.1	6.8	36.8	0.8	8.8	23.1
2	47.8	0.2	35.1	0.1	7.8	20.6
3	24.0	2.6	30.2	0.4	17.2	32.1
4	33.9	2.8	36.4	0.4	11.5	26.9
5	24.0	2.6	30.2	0.4	17.2	32.1
6	33.9	0.4	32.1	0.1	15.4	31.3

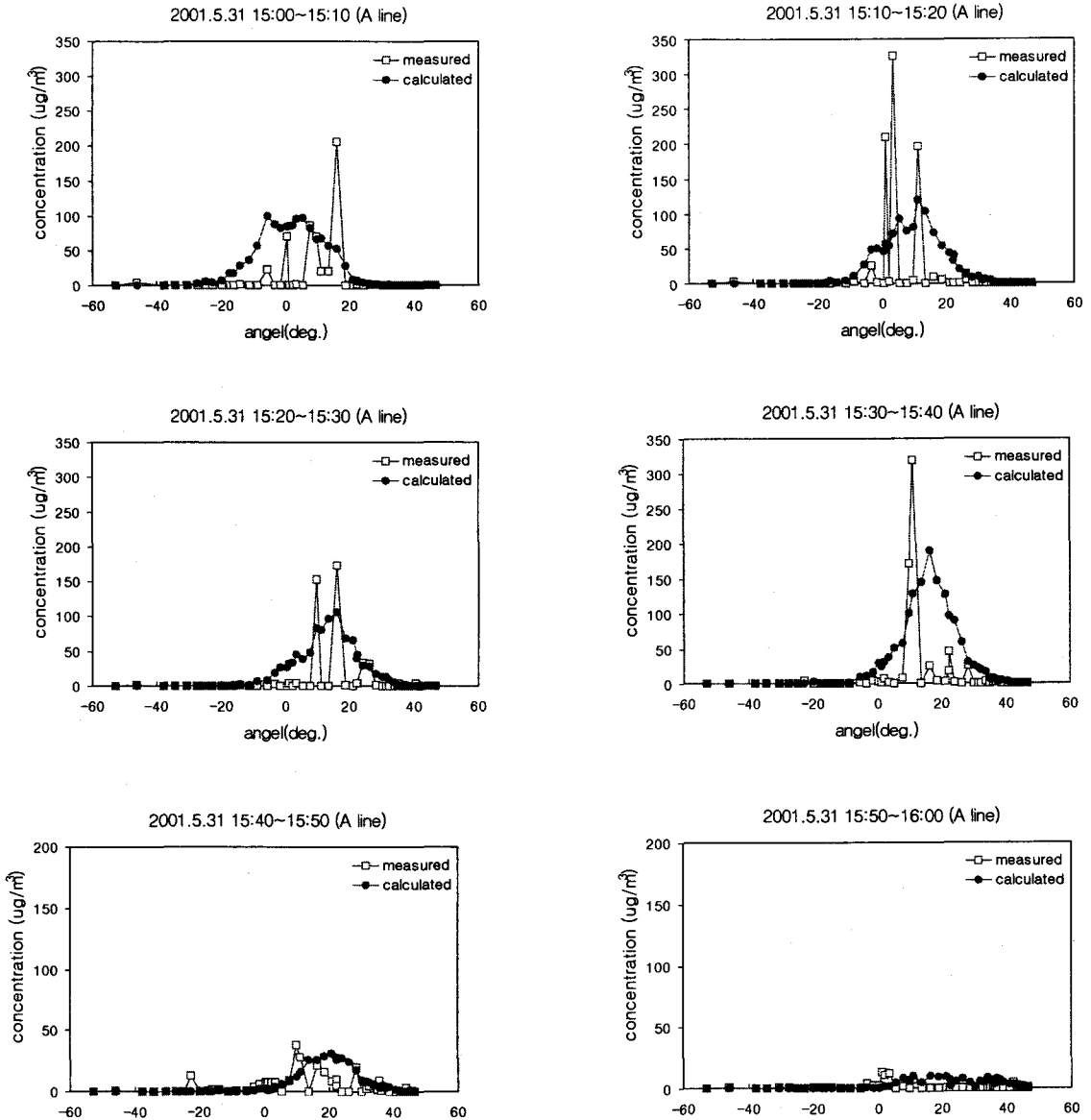


Fig. 3. Comparison of measured and calculated concentrations at A line.

Briggs chart가 여러 번의 추적자 실험을 토대로 작성된 실험결과이기에 관측 자료가 충분치 않은 불확실성이 내재된 지역의 경우 난류향을 재현하는데 더 적합한 것으로 생각된다.

run 5에 대한 계산 결과를 관측 값과 비교하여 Fig. 3 및 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 3 및 Fig. 4에서 y축의 농도 단위는 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고, x축의 각도는 포집점의 위치를 표시한 것으로 정북을 0° 로 기준으로 하여 + 각도는 시계방향, - 각도는 반시계방향에 위치함을 의미한다. A line (방출점

기준 반경 3 km)에서는 계산 값과 관측 값의 최대 농도 지점이 어느 정도 일치하나 B line (방출점 기준 반경 12 km)에서는 계산 값이 관측 값에 비해 좀더 동쪽으로 치우쳐 나타남을 알 수 있다. 이는 A line 과 B line 사이에 바람이 남동풍으로 불었을 것이라 추측되는데 이 지역에 복잡한 산악 지형 때문에 풍향·풍속계를 설치할 수 없어 바람자료를 관측하지 못하여 이 자료를 바람장 모델에 입력하지 못하여 발생한 결과이다. 또한 고리 원전 주변이 해륙풍과 복잡한 지형에 의한

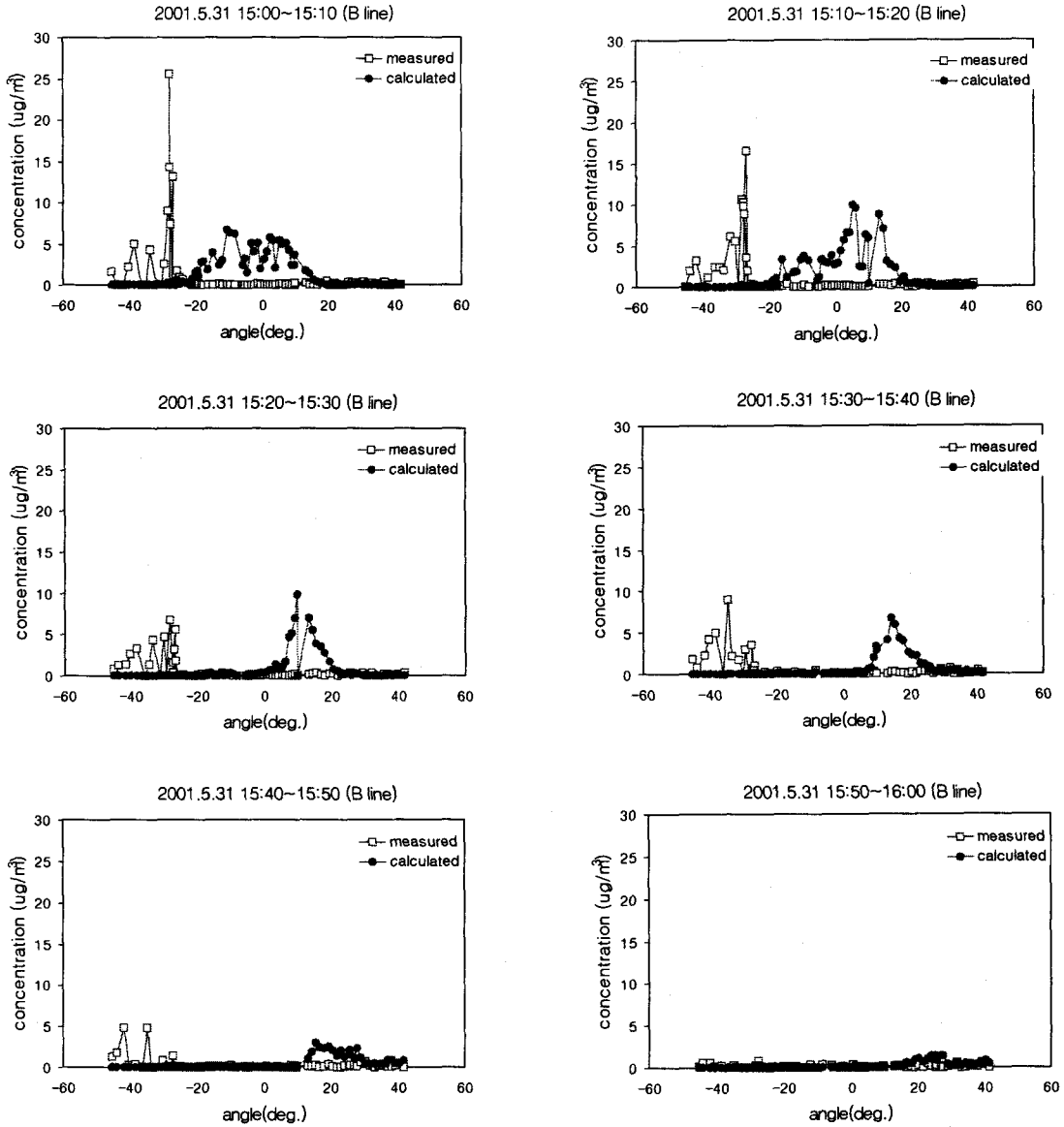


Fig. 4. Comparison of measured and calculated concentrations at B line.

산곡풍의 영향으로 풍향의 변화가 심하여 추적자가 급격히 다른 방향으로 이동되었으리라 추측된다.

결론

대기 중으로 방출된 오염물의 농도분포를 예측하여 주민과 환경에 미치는 피해를 신속히 평가

하기 위하여 바람장 및 확산모델을 개발하였다. 모델의 불확실성을 최소화하고 국내 부지 환경 특성을 고려할 수 있는 대기 확산모형의 검증 및 개선을 위하여 복잡한 지형상인 고리 원전 주변에서 야의 확산실험을 수행하였다. 확산실험을 통하여 관측된 바람자료를 이용하는 바람장 수치모형에 의해 3차원 바람장을 발생하였고, 이들 바람장 자료를 이용하여 확산 수치모델에 의해 오염물의 농도분포를 계산하였다. 계산된 농도 값은

야의 실험을 통하여 얻어진 관측 값과 상호 비교 되었는데, 실험기간 중 관측된 바람자료를 전부 고려하여 계산한 경우(run 5)가 관측 값에 가장 근접하였다. 그러나 전반적으로 계산 값과 관측 값은 어느 정도 차이를 보이고 있는데, 이는 해당 지역의 해륙풍 및 산곡풍 등에 의한 복잡한 바람 변화에 의한 것으로 생각되며, 좀더 정확한 바람 장이 재현되지 못하였기 때문이라고 생각된다. 추후 야외 확산 실험시에는 미시규모 관점에서 좀더 충분한 기상관측이 수행되어야 할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 주관하는 원자력중장기 연구사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Sandalls, F. J., Segal, M. G. and Victorova, N., "Hot particles from Chernobyl: a review," *J. of Environmental Radioactivity*, 18, 5-22(1993)
2. Dickerson, M. H. and Orphan, R. C., "Atmospheric release advisory capability," *Nuclear Safety*, 17, 281-289(1976)
3. Chino, M. and Ishikawa, H., "Experimental verification study for system for prediction of environmental emergency dose information; SPEEDI, (I)," *J. of Nuclear Science and Technology*, 25(9), 721-730(1988)
4. Ehrhardt, J., Sauer, J., Schule, O., Benz, G., Rafat, M. and Richter, J., "Development of RODOS, a comprehensive decision support system for nuclear emergencies in European overview," *Radiation Protection Dosimetry*, 50, 195-203(1993)
5. 한국원자력안전기술원, 원자력 안전성 확보를 위한 네트워크 구성·운영, KINS/AR-704, 한국원자력안전기술원(1999)
6. 한문희, 김은한, 서경석, 황원태, 정효준, 최영길, 방사선환경방호기술개발, KAERI/RR-2325/2002, 한국원자력연구소(2002)
7. Sasaki, Y., "Some basic formalisms in numerical variational analysis." *Mon. Wea. Rev.*, 98, 875-883(1970)
8. Zannetti, P., *Air Pollution Modeling*, Van Nostrand Reinhold, pp. 41-72, New York (1990)
9. Zilitinkevich, S.S., "Velocity profiles, the resistance law and the dissipation rate of mean flow kinetic energy in a neutrally and stably stratified planetary boundary layer," *Boundary Layer Meteorology* 46, 367-387(1989)
10. Weber, A.H., Irwin, J.S., Petersen, W.B., Mathis J.J. and Kahler, J.P., "Spectral scales in the atmospheric boundary layer", *J. of Applied Meteor.*, 21, 1622-1632(1982)