

Validation of the Long-Range Atmospheric Dispersion Model

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

장거리 대기 확산모델 검증

서경석 · 김은한 · 황원태 · 정효준 · 한문희
한국원자력연구소 원자력환경연구부

(2005년 8월 18일 접수, 2006년 1월 4일 채택)

Abstract - A long-range atmospheric dispersion model named LADAS has been developed to understand the characteristics of the transport and diffusion of radioactive materials released into atmosphere. The developed numerical model for validation was compared with the results of the ETEX which is the long-range field tracer experiment. As a comparative study, the calculated concentration distributions agreed well in the case of the usage of the mixing heights calculated by the Richardson number than the usage of the constant mixing heights in LADAS model. Also, the calculated concentrations agreed with the time series of the measured ones at some sampling points.

Key words : long-range dispersion model, LADAS, field tracer experiment, ETEX

요약 - 대기 중으로 방출된 방사성 물질의 이동·확산 현상을 이해하기 위하여 장거리 대기 확산 모델 LADAS가 개발되었다. 개발된 수치모델의 검증을 위하여 ETEX 장거리 확산실험 결과와 비교하였다. 비교결과 LADAS모델 내 혼합층 높이를 일정하게 준 경우보다 Richardson number를 이용하여 혼합층 높이를 계산한 결과가 관측 값에 가장 근접함을 알 수 있었다. 또한 일부 포집 지점에서 관측된 농도의 시계열 자료와 비교한 바 계산 값은 어느 정도 일치하고 있었다.

중심어 : 장거리 확산모델, LADAS, 확산실험, ETEX

서 론

구 소련의 체르노빌 사고[1] 이후 원전 사고시 대기로 방출되는 방사성 물질로부터 주변 주민 및 환경을 보호하고 방사선 피해를 최소화할 수 있는 비상대응 시스템의 개발이 필요하게 되었다. 우리나라도 1995년부터 방사선 비상대응 시스템 개발에 착수하여 현재 4개의 상업용 원전을 대상으로 국지규모(local-scale)의 CARE 시스템[2]이 운영 중에 있으며, 인접 국가의 원전 사고를 대비한 장거리 대기 확산 모델 LADAS(Long-Range

Accident Dose Assesment System)가 개발되어 동북 아시아권을 대상으로 시험 운영 중에 있다.

개발된 장거리 대기 확산 모델의 검증을 위하여 1994년 10월 유럽에서 수행된 대규모 야외 추적자 실험 ETEX(European Tracer Experiment)[3] 자료와 비교·검증하였다. ETEX 실험은 장거리 대기 확산모델의 비교 연구인 ATMES (Atmospheric Transport Model Evaluation Study)[4] 프로젝트의 불확성과 모델 결과간의 차이를 최소화하기 위하여 IAEA(International Atomic Energy Agency), WMO(World Meteorological Organization), 유럽

EC(European Commission) 미국 DOE(Department of Energy)의 지원하에 수행된 장거리 대기 확산 실험이다. 실험의 목적은 비상 사태시 대응능력의 확보, 공기중 추적자 농도자료의 DB화, 대기 중으로 방출된 오염물의 장거리 확산특성 평가 및 장거리 확산모델의 검증용 자료를 제공하기 위한 것이었다. 본 연구에서 개발된 LADAS와 ETEX 실험결과와 비교는 모델의 주요 입력자료 중 하나인 혼합고(mixing height)의 변화 따른 결과를 통계자료에 의해 상호 비교하였다.

장거리 대기 확산 모델

LADAS는 원전 사고시 신속한 계산을 위하여 가상의 입자(particle)를 대기중으로 방출하여 그 궤적을 추적함으로써 농도분포를 계산하는 Lagrangian 모델의 이론을 근간으로 하고 있다. Lagrangian 입자추적 모델을 이용한 3차원 공간에서 입자는 평균풍에 의한 이류(advection)와 난류에 의한 확산(turbulence)으로 주어진 시간 간격 동안에 초기위치에서 다음 위치로 이동한다. 따라서 공간에 대한 변위는 이류와 난류에 의한 변위의 합으로써 표시된다. 초기시간에서 어떤 시간간격 동안에 입자의 변위 $X_j(j=x,y,z)$ 는 다음과 같다.

$$X_j(t + \Delta t) = X_j(t) + v_j(t)\Delta t + \tilde{v}_j(t)\Delta t \quad (1)$$

윗 식에서 v_j 는 평균 바람장($j=x,y,z$) \tilde{v}_j 는 바람의 난류성분이다. 식 (1)에서 바람의 난류성분은 주로 바람의 전단응력에 의해 발생하는 것으로 대기 확산 모델내 이 값을 모수화하는 기법에는 여러 가지 방법이 있으나 본 연구에서는 Monte Carlo 기법[5]을 이용하였다. Monte Carlo 기법을 이용한 장거리 확산모델에서는 난류성분의 모수화를 계산영역의 전체 수직 높이에 대하여 동일하게 취하거나 혼합층(mixing layer)내와 혼합층 위로 나누어 다른 계산식을 이용한다. 식(1)에서 바람의 수평 난류성분은 다음과 같이 표시된다.

$$\tilde{v}_j(t)\Delta t = \sqrt{2K_z \Delta t} R \quad (2)$$

윗 식에서 $\tilde{v}_j(j=x,y)$ 는 바람의 수평 난류성분, K_j 는 수평 확산계수이고 R 은 Gaussian 분포를 갖는 random number로 0에서 1사이의 값을 갖는다.

수직 확산의 경우는 혼합층 내와 혼합층 위로 나누어 다음과 같이 표시된다[5].

$$\begin{aligned} \tilde{v}_z(t)\Delta t &= \sqrt{2K_z \Delta t} R && \text{(혼합층 위)} \\ \tilde{v}_z(t)\Delta t &= (h_{pbl} - Z_g) R && \text{(혼합층 내)} \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)에서 \tilde{v}_z 는 바람의 수직 난류성분, K_z 는 수직 확산계수, h_{pbl} 은 혼합층의 높이, Z_g 는 지형 고도이다. 식(2) 및 (3)에 나타난 수평 및 수직 확산계수 값의 선정은 일정한 상수 값을 취하기도 하고, 바람 난류성분의 표준편차로부터도 구할 수도 있다[6].

Lagrangian 입자추적 모델로부터 대기중 농도를 계산하는 방법은 계산영역에 대해 구성된 격자망내의 입자의 수로써 구할 수 있는데, 각 입자는 질량이나 특정 오염물 단위를 갖고 있다.

$$C(x, y, z) = \frac{N_p}{\Delta x \Delta y \Delta z} \quad (4)$$

윗 식에서 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 는 x,y,z 방향의 격자 크기, N_p 는 격자내 들어온 전체 입자의 개수이다. 대기 중에서 제거 과정은 건·습식 침적 및 방사성 붕괴를 고려할 수 있는데, 건침적 속도에 의해 공기 중에서 지표면으로 침적되는 농도는 다음과 같다.

$$C(t + \Delta t)_{dry} = C(t) [1 - \exp(-\frac{v_d \Delta t}{h_{pbl}})] \quad (5)$$

습 침적은 강우율에 좌우되며 건 침적에 비하여 단순하게 모사가 가능하며 Scavenging 상수 Λ 를 이용하는 방법이 널리 활용된다. Λ 는 강우율에 따라 다음과 같은 식으로 표시할 수 있다.

$$\Lambda = CR^a \quad (6)$$

여기서 a 는 상수 값이고, 상수 C 는 기상조건이 안정한 경우에는 10⁻⁴ 불안정한 경우에는 10⁻³ 값을 갖고, R 은 강우율 [mm/hr]을 나타낸다. 습 침적에 의해 공기 중에서 지표면으로 침적되는 농도는 다음과 같다.

$$C(t + \Delta t)_{wet} = C(t) [1 - \exp(-\Lambda \Delta t)] \quad (7)$$

대기로 방출된 오염물질이 방사성 물질이라면 대

기중 오염물 제거 항으로 다음과 같은 방사성물 질의 붕괴항을 고려하여야 한다.

$$C(t + \Delta t)_{decay} = C(t)[1 - \exp(-\lambda\Delta t)]$$

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \quad (8)$$

윗 식에서 $T_{1/2}$ 는 방사성 물질의 반감기이다. 모델 계산에 중요한 영향을 주는 변수중 하나인 혼합층의 산정은 마찰속도와 온도자료를 이용하여 Monin-Obukhov 특성길이를 산정하고 이를 이용하여 Richardson number를 계산하여 이 기준에 따라 혼합층 높이를 계산하도록 모듈을 설계하였다. Vogelesang and Holtslag[7]이 제안한 다음의 Richardson number가 0.25를 넘지 않는 높이를 혼합층의 높이로 산정하였다.

$$R_{ih} = \frac{(g/\theta_{vs})(\theta_{vh} - \theta_{vs})(h - z_s)}{(u_h - u_s)^2 + (v_h - v_s)^2 + 100u_s^2} \quad (9)$$

윗 식에서 θ_{vs} 및 θ_{vh} 는 표면 및 어떤 높이에

서의 가상 온도(virtual potential temperature), u_s, u_h, v_s, v_h 는 표면 및 어떤 높이에서의 수평 풍속, u_* 는 마찰속도이다.

ETEX 장거리 야의 확산 실험

1992년에 장거리 확산모델의 상호비교 연구인 ATMES[4] 프로젝트를 보완하기 위하여 장거리 야의 확산실험인 ETEX(European Tracer Experiment) [3]가 계획되었다. 실험의 목적은 비상 사태시 대응능력의 확보, 공기중 추적자 농도자료의 DB화, 대기중으로 방출된 오염물의 장거리 확산특성 평가 및 장거리 확산모델의 검증용 자료를 제공하기 위한 것이었다.

실험은 총 2회에 걸쳐 수행되었는데, 1회 실험은 1994년 10월 23일에 2회 실험은 1994년 11월 14일 수행되었다. 그러나 2회 실험시 풍향의 급격한 변화로 인하여 지상점에서 추적자의 포집이 제대로 이루어지지 않아 장거리 확산모델의 검증

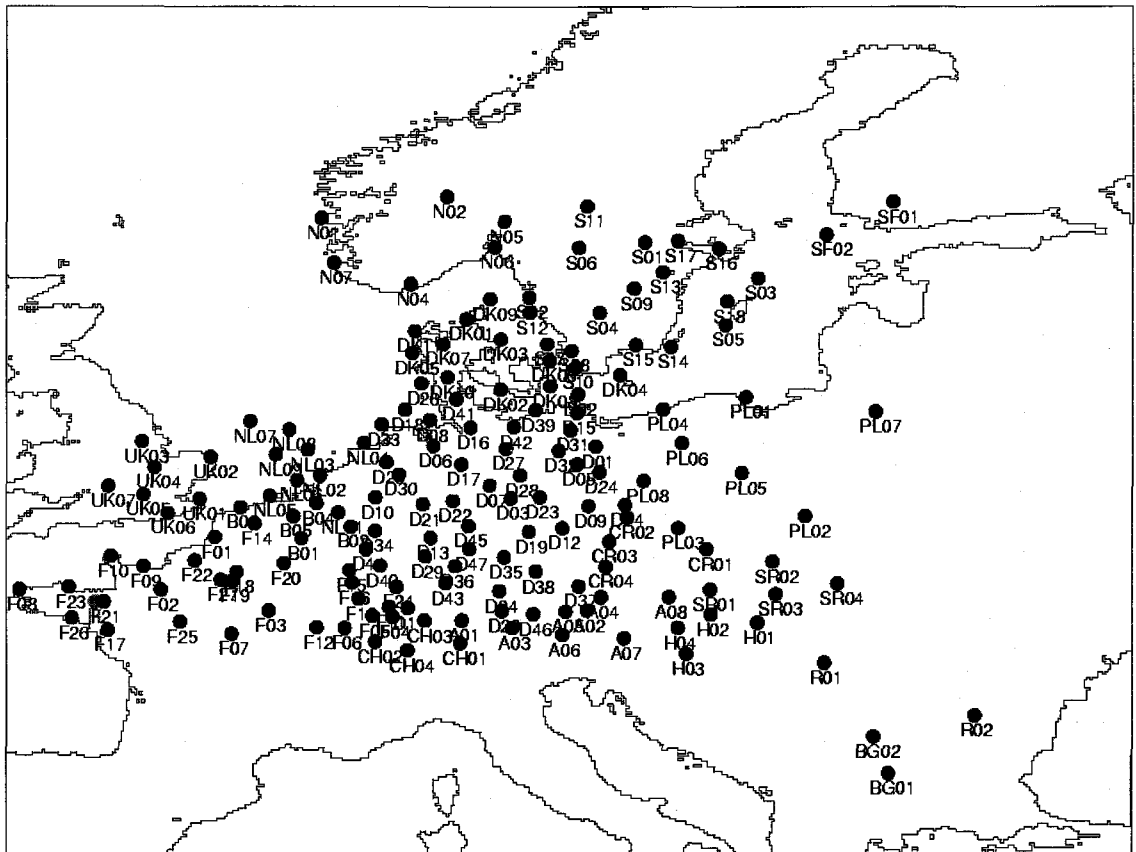


Fig. 1. Position of the sampling network.

용으로 부족하므로 주로 1회 실험의 결과를 이용하기를 권장하고 있다[3]. 1994년 10월 15일부터 수치 기상 예보자료를 검토하여 서풍이 되기를 기다렸다 서풍이 불어 포집지점으로 추적자가 확산되리라 기대되는 10월 23일 1차 확산실험이 수행되었다. 1회 실험에서 추적자 가스는 1994년 10월 23일 16:00시부터 10월 24일 3:50분까지 11시간 50분 동안 방출되었다. 추적자 가스로는 PMCH (Perfluoromethylcyclohexane)가 이용되었고, 방출지점은 프랑스 동부의 Monterfil(2 o W, 48o03' N)로 지표상 8 m높이에서 총 340 kg이 방출되었다. 지상의 포집점은 유럽의 17개국에 걸쳐 총 168개 지점이 선정되었고, 지상 포집점에서 추적자 가스가 포집되었다. 포집기는 3시간간격으로 총 72시간 동안 추적자를 자동으로 포집할 수 있는 연속 자동식 포집기였다. 대부분의 포집기는 기상 측정소가 있는 곳에 배치하여 포집기간동안의 기상조건을 알 수 있도록 하였고, 비행기를 이용한 공기중 추적자 농도도 함께 포집하였다. 방출 초기에 추적자는 서풍을 타고 프랑스로부터 독일까지 이동되었고, 48시간 동안은 서남풍이 약 60o 정도로 불어와 추적자 구름이 북쪽으로 이동되고, 72시간 후에는 노르웨이와 루마니아까지 광범위하게 이동·확산되었다. ETEX 1차 실험기간 중의 포집기 위치를 Fig. 1에 나타내었다. 가스는 포집기의 흡착물질로 구성된 금속 튜브내로 포집되어 가스 크로마토그래피에 의해 분석되었다. 지상에서 채집된 약 4000개의 추적자 튜브에서 32%에 해당하는 약 1300개 샘플튜브에서 추적자 농도가 검출되었다. 46%에 해당하는 약 1900개 샘플 튜브에서는 background 농도 정도가 검출되어 추적자 농도지도 작성시 영의 값으로 처리되었다.

수치 모사

LADAS를 이용하여 ETEX 실험모사를 위하여 ECMWF의 기상자료를 전 처리하여 기본 입력자료로 사용하였다. 유럽의 ECMWF(European Center for Medium-Range Weather Forecast)는 영국, 독일, 프랑스 등 유럽 17개국이 유럽의 중기 기상예보를 위하여 1973년 설립한 이후 1979년부터 10일 간격의 기상예보를 수행하여 telecommunication network을 이용하여 참여국들에게 기상자료를 제공하고 있다. ECMWF는 기상자료를 GRIB의 형태로 제공하는데 GRIB는 자료의 저장공간을 효율적으로 형태로 제공하는 WMO의 표준 자료 형식이다. GRIB는 자료의 저장공간을 효율적으로 관리할 수 있는 binary 형태이며 모든 종류의 컴퓨터와 O/S에서 decoding하여 사용할 수 있다. 현재 ECMWF에서는 operational model, ERA-15 및 ERA-40의 3개의 모델로부터 기상자료를 산출하여 제공하고 있다. ETEX 실험모사를 위하여 GRIB의 형태로 된 ECMWF의 ERA-40의 수치 기상예보 자료와 decoding software인 GRIBEX decoding software를 이용하여 GRIB 형태의 기상자료를 ASCII 형태의 자료 변환하였다. ETEX 실험기간 중 ECMWF GRIB 형태의 기상자료로부터 지표면 압력분포, 10m 유속분포, 2m 온도분포 및 4개 level (1000 hPa, 850 hPa, 700 hPa, 500 hPa)에서의 수평·수직 유속성분 및 온도자료 등을 추출하여 LADAS의 기본 입력자료로 이용하였다.

확산실험 모사를 위하여 수평방향으로 0.5o x 0.5o 간격으로 73 x 55개의 격자망을 형성하고 수직방향으로 5개 수직 level을 구성하였다. 입자

Table 1. Several numerical simulations.

| Run No. | Conditions of the variation of the mixing height |
|---------|---|
| 1 | constant mixing height, h=1500 m |
| 2 | constant mixing height, h=1000 m |
| 3 | calculation of the mixing height using Richardson no. |

Table 2. Statistical results.

| Run No. | NMSE | Bias | RMSE | FB | FA2 | FA5 |
|---------|------|-------|------|------|------|------|
| 1 | 8.6 | -0.18 | 0.7 | -0.7 | 30.0 | 57.2 |
| 2 | 7.6 | -0.16 | 0.7 | -0.6 | 29.8 | 59.7 |
| 3 | 7.6 | -0.14 | 0.7 | -0.5 | 30.2 | 60.5 |

는 방출점에서 1초당 1.17개를 방출하였다. 혼합층 높이 변화에 대한 농도분포의 변화를 알아보기 위해 Table 1과 같은 3개 조건에 대하여 수치 계산을 수행하였다. Table 1의 run 1은 계산의 전 영역에서 혼합층의 높이를 1500 m로, run 2는 계산의 전 영역에서 혼합층의 높이를 1000 m로 일정하게 준 경우 이고, run 3는 식 (9)에 의해 Richardson 수에 의해 계산 영역에서 혼합층의 높이를 산정하여 이용한 경우이다. 3개 계산조건에서 수평 확산계수 $K_h = 2.5 \times 10^4 \text{ m}^2/\text{s}$ 로 수직 확산계수 $K_v = 1.0 \text{ m}^2/\text{s}$ 로 일정하게 주었다. Table 1에 제시된 조건에 따라 계산된 농도 값을 ETEX의 관측 값과 비교하기 위하여 통계분석을 이용하였다. 통계분석에 이용된 자료는 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[8].

$$\begin{aligned}
 NMSE &= \frac{1}{N} \sum \frac{(C_i - O_i)^2}{\bar{C} - \bar{O}}, & RMSE &= \sqrt{\frac{1}{N} \sum (C_i - O_i)^2}, \\
 Bias &= \frac{1}{N} \sum (C_i - O_i), & FB &= \frac{1}{2} \frac{(\bar{C} - \bar{O})}{(\bar{C} + \bar{O})}, \\
 \bar{C} &= \frac{1}{N} \sum C_i, & \bar{O} &= \frac{1}{N} \sum O_i \\
 FA2 &= \frac{No. of FAA2}{N} \times 100 \quad \left(\frac{1}{2} \leq FAA2 (= \frac{O}{C}) \leq 2 \right) \\
 FA5 &= \frac{No. of FAA5}{N} \times 100 \quad \left(\frac{1}{5} \leq FAA5 (= \frac{O}{C}) \leq 5 \right)
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

윗 식에서 N은 자료의 개수, C는 계산 값, O는 관측 값이다.

혼합층 높이의 변화에 대한 관측 값과 계산 값의 비교 결과를 Table 2에 나타내었다.

Table 2에 나타난 바와 같이 3개의 다른 조건의 계산결과는 큰 차이를 보이고 있지 않으나, 혼합층 높이를 Richardson 수에 의해 계산한 run 3에서 다른 계산결과보다 관측 값과 비교하여 더 좋은 결과를 나타내고 있다. 이는 시·공간적으로 변화하는 혼합층 높이가 실제 현상을 좀 더 잘 반영한 결과라 생각된다. 이러한 통계결과는 이태리에서 개발된 APOLLO 나 MILORD 코드의 ETEX 실험 결과와의 비교 값과 유사한 결과를 나타내고 있다[9]. run 3의 조건하에서 계산된 농도 값과 관측된 농도 값의 시·공간적 분포를 Fig. 2에서 Fig 4에 나타내었다. LADAS 계산결과에 의하면 방출 후 서풍의 영향에 의해 주로 유럽의 동쪽지역으로 이동하던 입자가 36시간 후에는 남서풍의 영향으로 북동쪽으로 이동하고 있고, 이후 48시간이후에는 강한 남서풍에 의해 동쪽으로 이동되었던 입자가 유럽의 북쪽방향으로 주로 이동되고 있음이 나타나고 있다. 비교 결과 전반적으로 LADAS의 계산결과가 ETEX 실험을 잘 모사하는 것으로 나타났다. 또한 일부 지점에서 시간에 따른 관측 값과 계산 값을 비교하여 Fig. 5에 나타내었다.

결 론

대기중으로 방출된 오염물질의 장거리 이동·확산 평가를 위하여 장거리 대기 확산 수치모델 LADAS를 개발하였다. 개발된 확산모델은 3차원

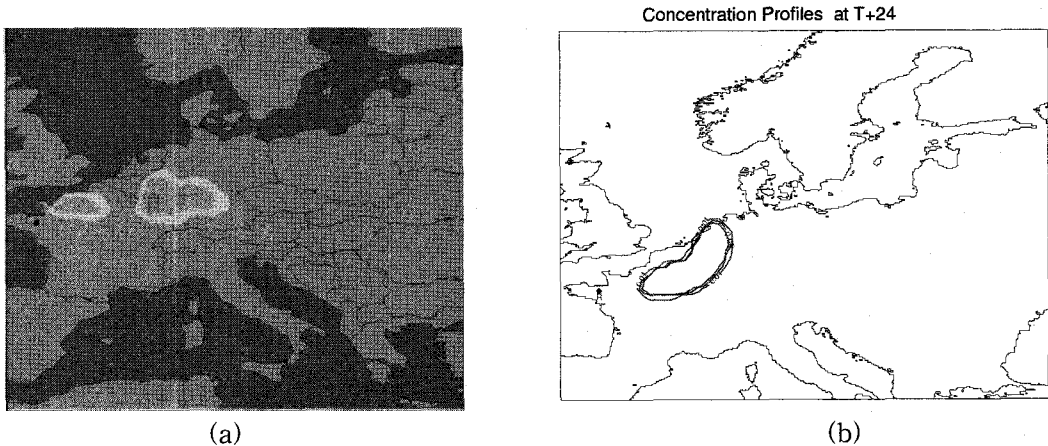


Fig. 2. Comparison of measured(a) and calculated(b) concentration profiles at T+24.

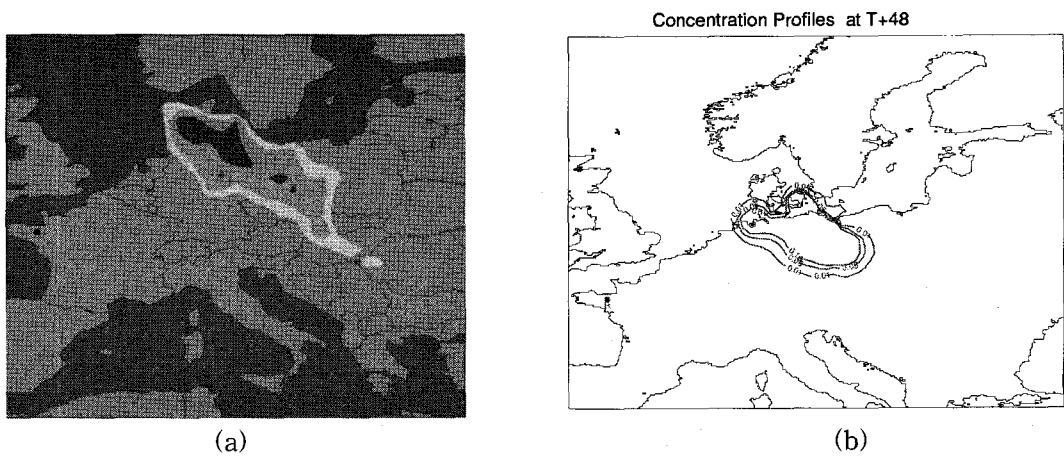


Fig. 3. Comparison of measured(a) and calculated(b) concentration profiles at T+48.

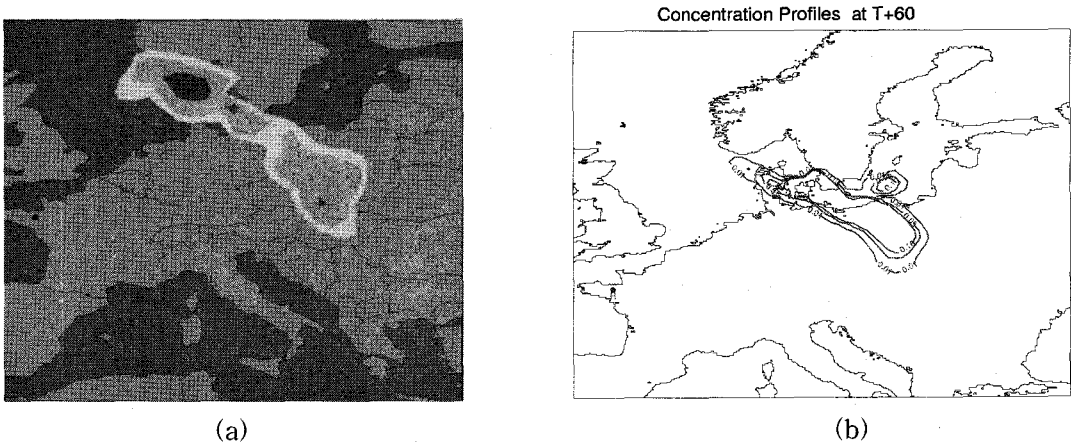


Fig. 4. Comparison of measured(a) and calculated(b) concentration profiles at T+60.

Lagrangian 입자 추적모델로 원전 사고를 대비하여 신속한 계산을 수행하여 주변 환경 및 국가에 미치는 방사선 영향을 정량적으로 평가할 수 있도록 구성되었다. LADAS의 검증에 위하여 유럽에서 수행된 야외확산실험 ETEX의 관측 결과와 비교하였다. 비교결과 혼합층의 높이를 Richardson 수에 의해 산정한 결과가 관측 결과에 가장 근접하였고, 또한 통계분석 결과도 다른 국가에서 개발한 Lagrangian 모델[9]과 비슷한 결과를 나타내었다. 일부 포집지점에서 농도의 시계열 관측 자료와 비교한 결과도 좋은 일치를 보이고 있었다. 개발된 LADAS는 앞으로 ATMES 프로젝트[4]와 ENSEMBLE 프로젝트[10]에 참여하여 불확실성에 대한 비교·검증을 거친 후 비상시를 대비한 방사선비상 대응시스템 CARE[2]에 연계하여 광역 대기 확산평가에 활용될 예정이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 지원한 원자력중장기과제 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. 한국원자력안전기술원, 원자력 안전성 확보를 위한 네트워크 구성·운영, KINS/AR-704, 한국원자력안전기술원(1999).
3. European Commission, The European Tracer Experiment, Joint Rese. Center, EUR 18143

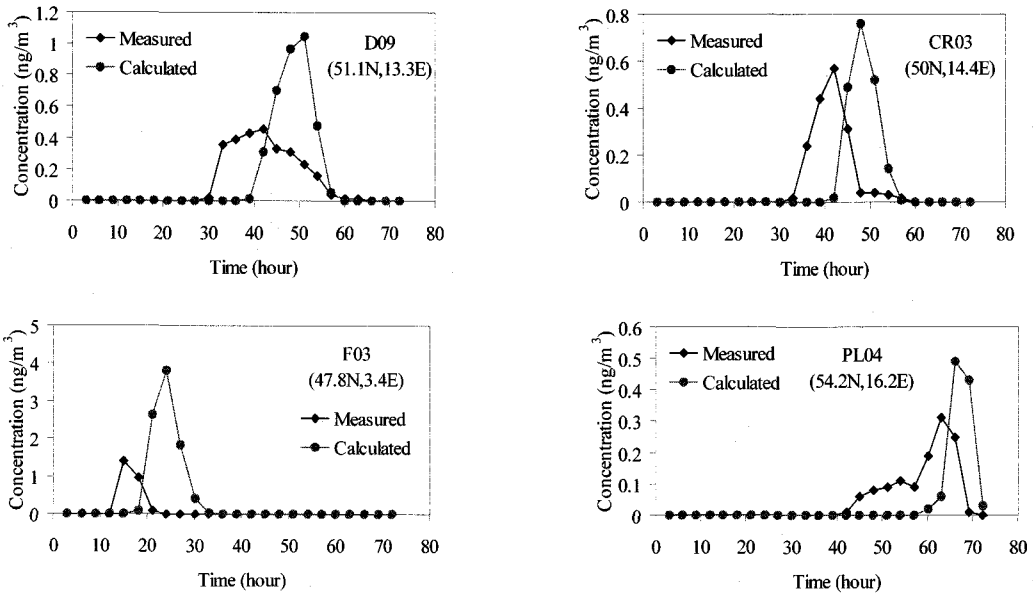


Fig. 5. Some examples of time series of measured and calculated concentrations.

EN(1998).

4. Klug, W., Graziani, G., Grippa, G., Pierce, D. and Tassone, C., Evaluation of long range atmospheric transport models using environmental radioactivity data from the Chernobyl accident, Elsevier Applied Science, London and New York (1992).
5. Anfossi, D., Sacchetti, D. and Catelli, S.T., "Development and sensitivity analysis of a Lagrangian particle model for long range dispersion," *Environmental Software*, 10(4), 263-287(1995).
6. Gifford, F.A., "Horizontal diffusion in the atmosphere: a Lagrangian-dynamical theory," *Atmospheric Environ.*, 16(3), 505- 512(1982).
7. Voegelzang, D.H.P., and Holtslag, A.A.M., "Evaluation and model impacts of alternative boundary-layer height formulation," *Boundary-Layer Meteorol.* 81: 245-269 (1996).
8. 서경석, 김은환, 황원태, 정효준, 한문희, "고리 원전주변에서 야외 확산실험 모사," *대한 방사선방어학회지*, 29(3) : 205-212(2004).
9. Desiato, F., Anfossi, D., Castelli, S.T., Ferrero, E. and Tinarelli, G., "The role of wind field, mixing height and horizontal diffusivity investigated through two Lagrangian particle models," *Atmospheric Environ.*, 32(24), 4157-4165(1998).
10. Carter, E. and French, S., On presenting ENSEMBLE prediction and associated uncertainty to decision makers, ENSEMBLE (WG3)-TN(02)03, 2003.