

'99 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

야외 확산실험 결과를 이용한 대기확산모형(K-LADP)의 검증

The Validation of Atmospheric Dispersion Model(K-LADP) Using Field Tracer Experiment

이갑복, 송영일, 정양근, 이숙경, 홍승열

한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

삼차원 해륙풍 모델과 라그랑지안 입자확산모델을 이용하여 원전 주변의 국지적인 대기순환을 고려할 수 있는 방사성물질의 대기확산 평가 전산체제(K-LADP)를 개발하였다. 개발된 K-LADP의 정확도를 검증하기 위해, 한국원자력연구소에서 1997년 5월 27일 실시한 울진원전 부지 야외 확산실험 결과와 K-LADP의 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 비교 결과, K-LADP는 플룸(plume)의 폭, 확산방향 및 지상농도 분포를 잘 모사하였다. 따라서 원전 방사선 비상대응시 K-LADP는 원전주변의 국지적인 대기순환을 반영하여 보다 정확하게 방사성물질의 대기확산을 예측할 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract

A **L**agrangian **A**tmospheric **D**ispersion modeling computer **P**rogram(K-LADP) combining a three dimensional sea-land breeze model and Lagrangian particle dispersion model has been developed. The validation of K-LADP were carried out by comparing with field tracer experiment around Ulchin nuclear power plant site. The simulation results of K-LADP agreed well with the measured data through tracer experiment. Therefore, in general, this K-LADP is thought to be a practical tool in evaluating atmospheric dispersions of radionuclides for the radiological emergency preparedness around nuclear power plant sites in coastal region.

1. 서 론

우리나라의 원전에서는 원전의 방사선 비상시 주변주민을 방사선으로부터 보호하기 위해 피폭선량을 신속히 예측하여 주민을 대피 또는 소개시키는 비상대응 체제를 운영하고 있다.

대기중으로 방출된 방사성 핵종은 물리·화학적 및 생물학적 이동과정을 거치면서 희석 또는 농축되는 등 매우 복잡한 과정을 통해 환경중에 존재하게 되나, 일차적으로는 바람을 매개로 확산되기 때문에, 각 환경 매질중의 농도 분포는 대기중 농도분포에 의해 크게 영향을 받는다.

우리나라 원전은 모두 해안지역에 위치하고 있어 방사성 물질의 대기확산은 해안지역에서 빈번히 발생하는 해륙풍 등과 같은 국지풍계의 영향을 받고 있다.

따라서 전력연구원에서는 삼차원 해륙풍 모델과 라그랑지안 입자확산모델을 이용하여 원전 주변의 국지적인 대기순환을 고려할 수 있는 방사성물질의 대기확산 평가체제(K-LADP)를 개발하였다[1,2].

K-LADP에 대한 신뢰성은 한국원자력연구소에서 1997년 5월 27일 울진원전 부지에서 실시한 야외 확산실험 결과를 이용하여 대기확산 모사 정확도를 검증하였다.

2. K-LADP 개요

그림 1은 원전으로부터 대기중으로 방출된 방사성 물질의 대기확산인자를 계산하는 라그랑지안 대기확산 모델링 전산체제(K-LADP : **L**agrangian **A**tmospheric **D**ispersion modeling computer **P**rogram)의 흐름도이다.

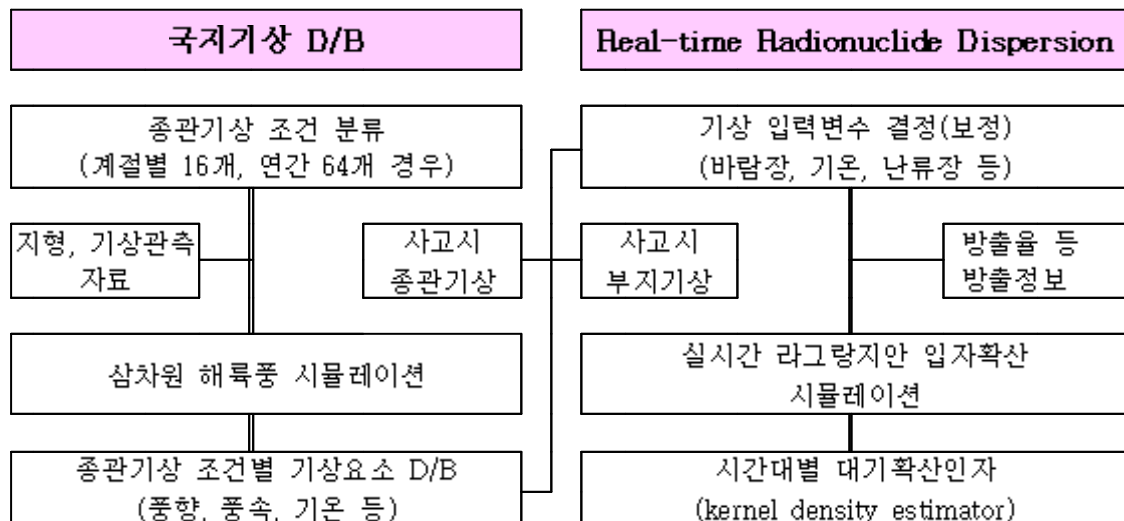


그림 1. K-LADP의 체계

K-LADP에서는 대기확산 시뮬레이션 계산시간을 줄이기 위해 미리 종관기상 상태별로 기상장 데이터베이스를 구축하여 유사시 실시간 대기확산 시뮬레이션 입력자료로 이용할 수 있도록 하였다.

종관기상 상태는 계절별로 850hPa의 지균풍을 풍향 4방위, 풍속 2등급, 그리고, 부지지역의 일평균 운량을 2 등급으로 모두 16가지 경우(연간 64개 경우)로 분류하였다(표 1).

표 1. 종관기상 조건 분류

index	wind direction	wind speed	cloud amount
1	북풍 (315° ~ 45°)	≤ 5m/sec (약풍)	≤ 5/10 (맑음)
2	동풍 (45° ~ 135°)	> 5m/sec (강풍)	> 5/10 (흐림)
3	남풍 (135° ~ 225°)		
4	서풍 (225° ~ 315°)		

예) Case 212 : 종관기상 상태가 약한 동풍의 지균풍이 부는 흐린 날

계절별로 분류된 각 종관기상 조건에 대해 삼차원 해륙풍 모델을 이용하여 풍향, 풍속, 기온 등과 같은 기상요소에 대해 시간대별로 각 격자점에서의 데이터베이스를 구축하였다.

방사선 비상대응을 위한 실시간 방사성물질 대기확산 시뮬레이션 수행시는, 그 때의 종관기상 조건에 해당되는 기상장을 데이터베이스로부터 추출하여 부지 기상탑의 기상자료로 보정하고, 보정된 바람장을 라그랑지안 입자확산 시뮬레이션 입력자료로 사용한다.

방사성 물질의 입자확산은 연속적으로 배출되는 방사성 물질 입자들을 시간에 따라 계속적으로 추적하여 원하는 시각에서의 각 입자들의 위치를 결정하여 농도분포를 계산하는 라그랑지안 입자확산모델을 사용하였다. 방사성 입자의 위치는 다음과 같이 결정된다.

$$X_i(t + \Delta t) = X_i(t) + (\overline{U}_i + u_i) \Delta t$$

여기서 X_i 는 한 입자의 좌표계상에서의 공간상 위치를 나타내고, \overline{U}_i 는 입자가 위치한 곳에서의 중규모 바람성분을, u_i 는 입자가 위치한 지점의 난류성분을, 그리고 Δt 는 시간 변화 즉 적분시간간격을, i 는 좌표계의 x, y, z 성분을 나타낸다. 중규모 바람성분 \overline{U}_i 는 삼차원 미세 격자계 해륙풍 모델로 얻어지는 i 성분의 바람이고, 난류성분 u_i 는 Markov 과정[3]을 이용하여 매개변수화할 수 있다. 어느 주어진 시간의 대기확산인자는 배출입자의 수가 많지 않아도 적용가능한 kernel density 방법[4]으로 농도를 계산한다.

3. K-LADP 수치해 검증

3.1 야외 대기확산 실험

K-LADP의 검증에는 한국원자력연구소에서 울진원전 부지에서 실시한 야외 확산실험 결과를 이용하였다.

확산실험에서 추적자 가스는 1997년 5월 27일 11시 30분부터 13시까지 SF₆ 가스를 울진원전 기상탑 상부(지상 58m)에서 일정한 양(181.43 kg/hour)으로 약 90분간 지속적으로 방출하였고, 12시부터 배출이 완료되는 13시까지 10분 간격으로 포집하였다.

추적자 가스는 그림 2와 같이 배출지점(발전소 기상탑)에서 두 개의 동심원열(안쪽 A열은 배출지점에서 약 3~5 km, 바깥쪽 B열은 약 8 km 떨어진 지점) 상에 한국원자력연구소에서 자체 제작한 자동 연속식 포집기를 설치하여 포집하였다.

포집된 추적자 가스는 가스크로마토그래피로 분석하여 농도를 구하였다(야외 확산실험에 대한 자세한 내용은 한국원자력연구소에서 학술지에 발표한 논문[5,6]을 참조하기 바람).



그림 2. 추적자 가스(SF₆) 포집지점

3.2 대기확산 시뮬레이션

야외 확산실험이 실시된 1997년 5월 27일의 종관기상 상태는 한반도 주변의 기압경도가 매우 약하여 09 LST(Local Standard Time)의 850hPa의 지균풍은 $U_g = -1.4\text{m/s}$, $V_g = -2.1\text{m/s}$ 인 약한 동풍이었으며, 운량은 약 6/10 이었다. 그러나 700hPa에서의 지균풍은 약한 북서풍(지균풍속 4.6m/s, 풍향 312도)이 불어 바람의 수직편차가 매우 심한 불안정한 대기상태를 보였다.

해륙풍 시뮬레이션을 위한 종관기상 상태는 850hPa의 바람에 따라 약한 동풍이 부는 흐린 날(봄철 212 경우)로 결정하고, 실제 방사선 비상시에 사용되는 국지기상 데이터베이스 구축시와 동일한 과정을 거쳐 삼차원 해륙풍 모델로 기상장을 생산하였다. 모델 영역내의 기상청 정규관측소와 자동기상관측소에 관측된 기상자료(1990-1994년) 중 봄철 212의 경우에 해당되는 기상자료를 시간대별로 평균하여 모델 초기조건과 nudging 자료로 이용하였고, 06시를 초기시간으로 하여 해륙풍 시뮬레이션을 수행하였다.

라그랑지안 입자확산 시뮬레이션은 SF₆ 배출조건과 동일하게 지상 58m 고도에서 11시 30분부터 13시까지 5초에 한 개씩 입자를 배출시켰다. 이 때, 입자 하나의 가상적인 질량은 SF₆ 배출량과 동일하게 252g으로 하였으며, SF₆ 추적자 가스의 포집시간과 동일한 시간에 지상 농도를 계산하였다.

3.3 결과 비교

그림 3은 SF₆를 포집한 A 열에서의 SF₆ 관측 농도와 K-LADP 계산 농도를 비교한 것이다. A 열에서는 12:20 ~ 12:30 LST(Local Standard Time) 경우를 제외하고 관측값의 최대값이 계산값 보다 약 1.3 ~ 1.5 배 가량 높게 나타나고 있으며, 최대값이 나타나는 방위각이 약 30° 가량 다르게 나타나고 있다.

그림으로 제시하지는 않았지만, 이러한 경향은 B 열에서도 유사하게 나타나고 있다. 최대값이 나타나는 방위각이 A 열에서와 마찬가지로 계산값과 관측값 사이에 약 30° 정도의 차이가 있으며, 농도의 최대값은 계산값이 관측값의 약 1/3 정도로 낮게 나타났다.

그러나 A와 B 열 모두, 최대값이 나타나는 방위각과 최대값이 실험결과와 계산값 사이에 차이가 나고 있지만, 관측값과 계산값 사이의 오차는 일정한 경향성을 보여 주었다. 최대값이 나타나는 방위각 차는 시간 및 풍하거리에 관계없이 약 30° 정도로 일정하게 유지하고 있으며, 최대값은 계산값이 관측값보다 약간 작게 나타나고 있다.

이러한 오차는 해륙풍 시뮬레이션 결과와 야외 확산실험 기간 부지기상탑에서 관측된 바람의 차이에 기인한 것으로 판단된다. 시뮬레이션 결과의 풍하방향이 약 30° 정도 북쪽으로 치우치고, 풍속은 관측값보다 약 0.5m/s 작게 모사되었다.

연간 64 개의 범주로 분류된 기상 데이터베이스로 시·공간적인 변화가 심한 국지 바람장을 모두 재현하는 것은 거의 불가능하다. 따라서, K-LADP에서는 실제적으로 방사선 비상 시 부지 기상탑 관측자료로 바람장을 보정하여 사용하고 있다. 바람장은 국지풍 시뮬레이션에서 얻어진 부지 최인근 네 개 격자점의 평균 바람과 부지 기상탑에서 관측된 바람의 벡터 차를 전 영역의 각 격자점에서의 바람 벡터에 더하여 보정하였다.

그림 4은 보정된 바람장을 이용하여 라그랑지안 입자확산 시뮬레이션한 결과와 야외 확산 실험 결과를 비교한 것으로, B 열에서의 지상농도를 제시하고 있다. 12:20 ~ 12:30 LST에서는 시뮬레이션 결과의 최대값이 실험결과 보다 다소 낮고, 12:50 ~ 13:00 LST에서는 다소 높게 나타나고 있지만, 전반적으로 플룸의 폭, 최대값이 나타나는 방위각, 그리고 농도 분포가 매우 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

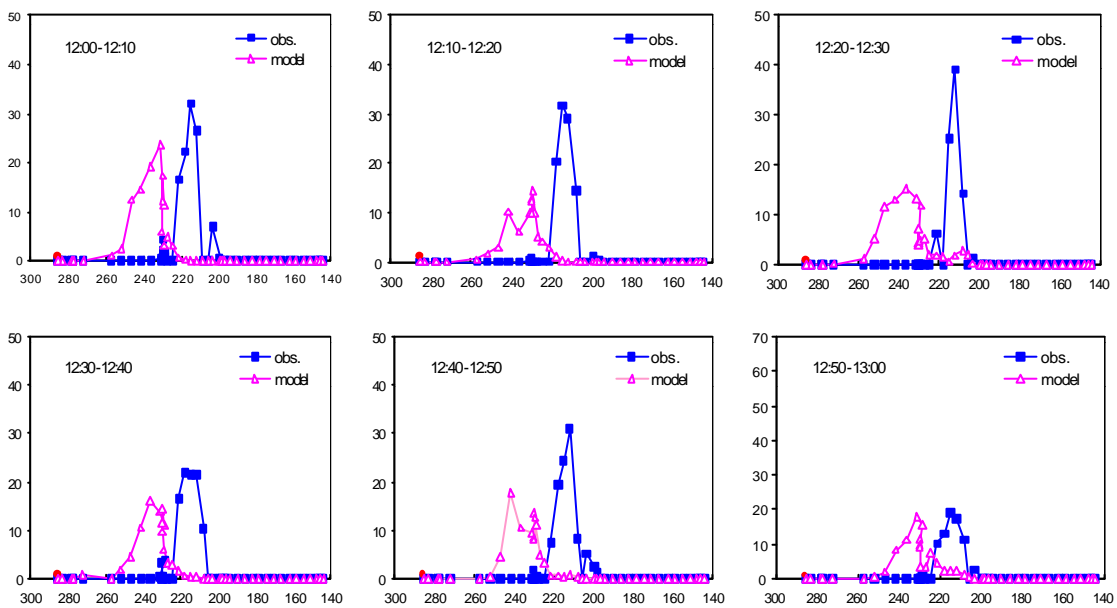


그림 3. A 열의 K-LADP 계산값(model)과 확산실험(obs)의 SF₆ 농도 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 비교

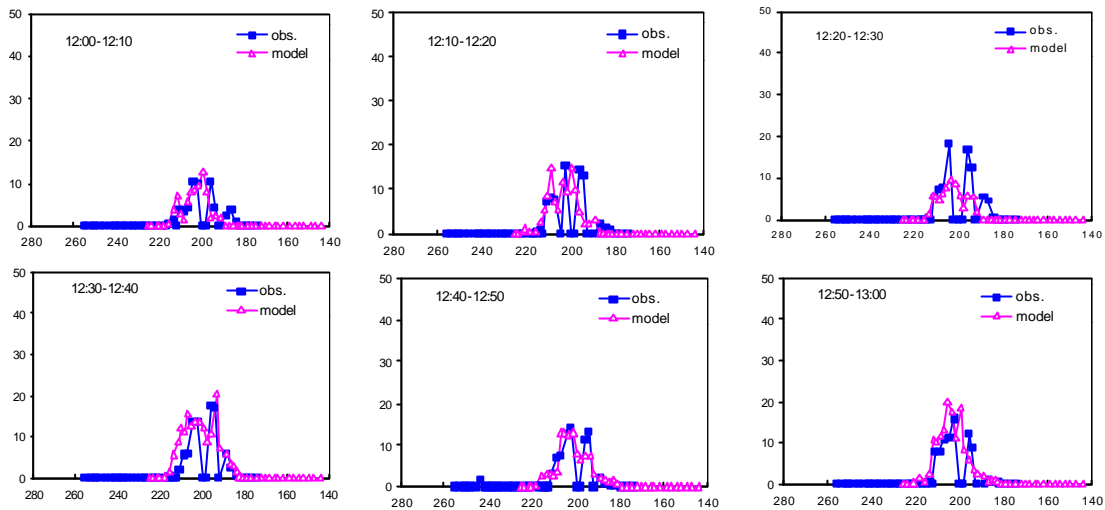


그림 4. B 열의 보정된 K-LADP 계산값(model)과 확산실험(obs)의 SF₆ 농도 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 비교

4. 결 론

원전 방사선 비상대응을 위한 주민 피폭선량 평가에 원전 주변지역의 국지적인 대기순환을 반영하기 위해, 삼차원 해류풍 모델과 라그랑지안 입자확산모델을 이용하여 방사성 물질의 대기확산을 평가할 수 있는 전산체제(K-LADP)를 개발하였다.

K-LADP에서는 계절별 16가지(연간 64)로 범주화된 종관기상 조건별로 사전에 국지풍에 대한 데이터베이스를 구축하고, 방사선 비상시에는 미리 구축된 데이터베이스에서 유사한 기상장을 추출하여 부지기상탑 관측자료로 보정한 후, 실시간 입자확산 시뮬레이션을 수행토록 설계되었다.

본 연구에서는 한국원자력연구소에서 울진원전 부지에 실시한 야외 확산실험 결과를 이용하여 K-LADP의 대기확산 시뮬레이션 모사능력을 검증하였다.

데이터베이스의 국지풍계를 보정하지 않고 대기확산 시뮬레이션을 수행한 결과는 이 확산 실험에 비해 북쪽으로 약 30° 정도 치우쳐 최대값이 나타났고, 그 값도 다소 낮게 나타났으나, 부지기상탑 자료로 바람장 벡터를 보정하여 시뮬레이션을 수행한 결과는 실험결과와 매우 잘 일치하였다.

국내 야외 확산실험 자료가 많이 축적되지 않아 비록 울진부지 1회 실험결과 만을 가지고 K-LADP의 대기확산 모사능력을 평가하였으나, 플룸의 폭, 확산방향 및 지상농도 분포를 매우 잘 모사하고 있다. 따라서 K-LADP는 방사선 비상대응시 원전 주변의 국지적인 대기순환을 반영하여 보다 정확하게 방사성물질의 대기확산을 예측할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구에서는 한국원자력연구소에서 1997년 5월 27일 실시한 울진원전 부지 야외 확산실험 결과를 이용하였으며, 자료 활용에 도움을 주신 한국원자력연구소 한문희 박사님께 감사 드린다.

참 고 문 헌

1. 이갑복, 이명찬, 송명재, "월성원전 부지의 삼차원 미세격자계 해륙풍 모델링," *한국원자력학회 '97 춘계학술발표회논문집(II)*, 457-462, 1997
2. 이갑복, 이명찬, 송명재, "월성원전 부지 주변의 해륙풍을 고려한 방사성 물질의 대기확산 모델링," *한국원자력학회 '97 춘계학술발표회논문집(II)*, 463-468, 1997
3. Legg, B. J. and M. R. Raupach, "Markov-chain simulations of particle dispersion in homogeneous flows : The mean drift velocity induced by a gradient in eulerian velocity variance," *Bound Layer Meteor.*, **24**, 3-13, 1982
4. Yamada, T., C. Y. Kao and S. Bunker, "Airflow and air quality simulation over the western mountainous region with a four dimensional data assimilation technique," *Atmos. Environ.*, **23**, 539-554, 1989.
5. 김은한 등, "평지 야외 대기확산 실험," *대한환경공학회지*, **19**(5), 693-705, 1997
6. 서경석 등, "야외 확산실험을 통한 대기 확산모형 검증," *대한환경공학회지*, **19**(11), 1361-1368, 1997