



pISSN 0253-4231

eISSN 2466-2461

<http://dx.doi.org/10.14407/jrpr.2016.41.1.031>

Journal of Radiation Protection and Research

Paper

Received November 23, 2015 / 1st Revised January 27, 2016 / Accepted February 25, 2016

Development of Three-Dimensional Trajectory Model for Detecting Source Region of the Radioactive Materials Released into the Atmosphere

Kyung-Suk Suh, Kihyun Park, Byung-II Min, Sora Kim, and Byung-Mo Yang
Nuclear Environmental Safety Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon, Republic of Korea

ABSTRACT

Background: It is necessary to consider the overall countermeasure for analysis of nuclear activities according to the increase of the nuclear facilities like nuclear power and reprocessing plants in the neighboring countries including China, Taiwan, North Korea, Japan and South Korea. South Korea and comprehensive nuclear-test-ban treaty organization (CTBTO) are now operating the monitoring instruments to detect radionuclides released into the air. It is important to estimate the origin of radionuclides measured using the detection technology as well as the monitoring analysis in aspects of investigation and security of the nuclear activities in neighboring countries.

Materials and methods: A three-dimensional forward/backward trajectory model has been developed to estimate the origin of radionuclides for a covert nuclear activity. The developed trajectory model was composed of forward and backward modules to track the particle positions using finite difference method.

Results and discussion: A three-dimensional trajectory model was validated using the measured data at Chernobyl accident. The calculated results showed a good agreement by using the high concentration measurements and the locations where was near a release point. The three-dimensional trajectory model had some uncertainty according to the release time, release height and time interval of the trajectory at each release points. An atmospheric dispersion model called long-range accident dose assessment system (LADAS), based on the fields of regards (FOR) technique, was applied to reduce the uncertainties of the trajectory model and to improve the detective technology for estimating the radioisotopes emission area.

Conclusion: The detective technology developed in this study can evaluate in release area and origin for covert nuclear activities based on measured radioisotopes at monitoring stations, and it might play critical tool to improve the ability of the nuclear safety field.

Correspondence to Kyung-Suk Suh
kssuh@kaeri.re.kr

Keywords: Nuclear activities, Detection technology, Trajectory model, Atmospheric dispersion model

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non- Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

대기 누출 방사성물질 선원 위치 추적을 위한 3차원 궤적모델 개발

서경석, 박기현, 민병일, 김소라, 양병모
한국원자력연구원

2015년 11월 23일 접수 / 2016년 1월 27일 1차 수정 / 2016년 2월 25일 채택

연구배경: 우리나라를 포함한 중국, 대만, 북한, 일본 등에서 원전, 재처리시설과 같은 원자력시설의 증가에 따라 주변국 핵활동 분석의 종합적 대책이 필요하다. 우리나라와 포괄적핵실험금지조약기구(Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization, CTBTO)는 동북아시아 지역에서 핵종 탐지소를 운영 중으로, 핵종탐지 장비에서 특이 값 측정시 모니터링 자료의 분석과 더불어 배출원 탐색모델을 이용하여 핵종의 기원이 어디인지 추정하고 평가하는 것은 주변국 핵활동에 대한 감시 및 안전성 확보 측면에서 중요하다.

재료 및 방법: 주변국의 은밀한 핵활동 시 방사성핵종의 기원을 추정하기 위하여 3차원 전진/후진형 궤적모델을 개발하였다. 개발된 궤적모델은 궤적 미분방정식을 유한차분법을 이용한 방법으로 주어진 바람자료를 이용하여 방사성핵종의 방출지점으로부터 입자의 궤적을 순차적으로 찾아가는 전진형 모델과 시간 역산으로 방출기원을 추정하는 후진형 모델로 구성되었다.

결과 및 논의: 개발된 궤적모델의 검증을 위하여 체르노빌 사고 당시 측정된 농도자료를 이용하였다. 검증결과 관측지점의 농도가 높게 측정된 지점과 방출기원에서 가까운 지역으로부터 시간 역산의 방출지점을 추정한 결과의 정확도가 높았다. 3차원 궤적모델은 방출시간, 방출높이, 방출간격 등의 변수에 의해 계산결과가 달라지는 불확도를 내포하고 있는데, 이러한 궤적모델의 불확도를 최소화하기 위해 한국원자력연구원에서 개발한 대기확산모델(long-range accident dose assessment system, LADAS)를 이용하여 fields of regards (FOR) 기법에 의해 오염물 방출영역을 추정한바 신뢰성 있는 결과를 얻었다.

결론: 본 연구를 통하여 개발된 배출원 탐색모델은 주변국의 은밀한 핵활동 시 핵종 탐지장비와 연계하여 방사성핵종의 방출지역과 기원을 파악하여 우리나라의 핵종탐지 능력을 향상하고 핵활동 및 방사선 안전 분야에서 주도적 역할을 할 수 있을 것으로 생각된다.

중심어 : 핵활동, 배출원 탐색, 궤적모델, 대기확산모델

1. 서론

중국, 일본, 대만, 북한 및 우리나라를 포함하여 주변국에는 많은 원자력시설이 운영 중에 있다. 이러한 시설에서 사소한 사고나 은밀한 핵활동에 의하여 대기로 누출된 방사성핵종은 한국원자력안전기술원과 포괄적핵실험금지조약기구(Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization, CTBTO)에서 운영 중인 핵종탐지 장비에서 검출될 수 있다. 핵종탐지 장비에 특이 값이 검출될 시 이 핵종의 방출기원을 역 추정하여 주변국에서 수행된 은밀한 핵활동을 파악하는 것은 국가적 차원에서 매우 중요한 일이다. 특히 북한은 1~3차 핵실험을 통하여 핵무기를 보유하고, 핵무기의 소형화 및 개량화를 위

하여 은밀한 핵활동을 지속적으로 수행하는 것으로 추정된다. 2012년 Geer는 2010년 5월 13-23일 사이에 우리나라와 주변국의 핵종 탐지장비에서 검출된 방사성 제논과 방사성바륨의 측정 자료로부터 북한이 2010년 5월 11일 경 함경북도 길주군 풍계리 만담산에서 저위력 지하 핵실험(low-yield nuclear test)을 수행하였고 방사성 제논 및 바륨은 이들 지역에서 기원되었다고 분석하였다 [1]. 당시 우리나라는 측정된 방사성핵종의 기원 추정을 위하여 외국의 모델[2]을 이용하여 핵종기원을 추정하였지만, 정밀한 방출영역과 종합적인 핵활동 분석을 수행하지 못하였다. 따라서 우리나라와 동북아에서 운영 중인 핵종탐지 장비에서 특이 값 검출 시 방사성핵종의 기원 및 은밀한 핵활동 여부의 파악을 위해서 우리나라 고유의 배출원 탐색시스템의 개발이 필요하다.

주변국의 은밀한 핵활동 분석을 위하여 배출정보를

책임저자 : 서경석, kssuh@kaeri.re.kr
대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111 한국원자력연구원(34057)

분석하는 방법으로 오염물의 이동경로를 추정하는 궤적 모델[2], 대기확산모델과 결합하여 Fields of Regards (FOR) 기법을 이용하여 방출영역을 추정하는 방법[3], 자료동화기법인 Bayesian 방법을 이용하여 방출지역, 기간 및 방출량을 추정하는 방법[4, 5] 등이 현재 폭 넓게 이용되고 있다. 그 중 Bayesian 기법은 관측 농도를 기반으로 하여 오염물의 방출지역, 기간 및 방출량을 산정할 수 있는 최신의 기법 중 하나이나, 이러한 방출정보 추정을 위하여 복잡한 수치모델과 많은 컴퓨터의 계산시간을 요구한다. 핵종 모니터링 장비에서 특이 값 검출 시 1차적으로 신속한 정보 분석을 위하여 오염물의 이동경로를 역으로 추정하는 궤적모델과 FOR기법이 본 연구에서 이용되었다.

본 연구에서는 핵종탐지 장비의 특이 값 검출 시 핵종의 방출위치를 역으로 추정할 수 있는 3차원 궤적모델을 개발하였고, 개발된 모델의 검증을 위하여 체르노빌 사고 시 관측된 측정자료와 비교를 수행하였다. 개발된 궤적모델의 검증 결과 후진 궤적경로산정에 불확도가 내재해 있음이 파악되었다. 따라서 배출원 탐색 시스템의 정확도 향상을 위하여 궤적모델과 병행하여 대기확산모델을 이용하여 방출영역을 역으로 추정하는 FOR 기법[3]을 도입하여 배출원 탐색 시스템의 불확도를 최소화하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 국·내외 모델개발 현황

전 세계적으로 오염물과 방사성물질의 대기확산 평가에 많이 이용되고 있는 모델은 미국 National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)에서 개발한 HYSPLIT [2]로 일반 오염물과 방사성물질의 대기확산을 평가할 수 있을 뿐 아니라 오염물의 궤적을 추적하는 전진/후진 궤적모델을 포함하고 있다. 체르노빌 원전 사고 이후 선진 각국에서는 원자력 시설의 사고 시 국민과 환경을 보호하기 위하여 자국 실정에 적합한 대기 확산모델을 개발하여 운영 중에 있다. 대표적인 모델로 미국 NARAC [6], 일본 WSPEEDI [7], 유럽공동체 RODOS [8] 시스템이 있으나, 대부분 모델은 원자력시설의 사고 후 대기 중으로 방출된 방사성물질의 농도를 산정하는 기술이다. CTBTO에서는 전 세계 핵종 모니터링 포스트를 운영하며, 모니터링 포스트에서 특이 값이 검출될 시 이들 핵종의 기원 추적을 위하여 WebGrape 모델을 구축하여 운영하고 있다[9]. WebGrape 모델은 유럽의 중기 예보센터의 기상자료와 연계하여 전진/후진 궤적을 추정할 수 있는 궤적모델과 FOR 기법을 이용한 전진/후진 대기확산모델이 포함되어 있어 전 세계 모니터링 포스트의 이상 값 측정 시 관측된 핵종의 방출영역과 기원을 분석하고 있다. 특히 북한의 1~3차 핵실험 시 동북아시아에서 관측된 방사성 제논의 동위원소비와 WebGrape를 이용하여 방출기원을 추정함으로써 북한 핵실험 지역

과 핵실험 규모를 추정할 바 있다[3].

또한 대기내 관측된 오염물의 방출 기원과 방출정보 파악을 위하여 Bayesian 방법을 이용하여 방출기간 및 방출량을 산정하는 방법이 이용되고 있는데, 특히 지구 온난화에 의한 대기중 CO₂의 발생기원 및 정보 파악을 위하여 많이 이용되고 있다[4, 5]. Bayesian 기법은 관측 농도를 기반으로 하여 오염물의 방출지역, 기간 및 방출량을 산정할 수 있는 기법 중 하나이나, 이러한 방출정보 추정을 위하여 복잡한 수치모델과 많은 컴퓨터의 계산시간을 요구한다.

국내의 경우 대기과학 분야를 중심으로 대기 중 황사 농도나 중금속 농도를 계산하는 장거리 확산모델을 활용 중이나, 오염물 위치 산정을 위한 역추적 모델은 개발된 바가 없다. 한국원자력안전기술원에서는 주변국 핵 탐지 관측/분석을 위한 제논 분석 장비를 운영 중이고, 대기 확산 및 궤적모델링을 위해 미국 NOAA에서 개발한 HYSPLIT [2]를 이용하고 있다. 또한 한국원자력안전기술원에서는 국내 사고를 대비한 사고 시 방사선확산평가 시스템 AtomCARE를 개발하여 운영 중이나, 이 시스템은 국내 원전만을 대상으로 하여 평가영역이 원전 주변 80 km로 사고 후 대기로 누출된 방사성물질의 확산을 평가할 뿐 궤적경로 추적이나 방출량을 결정하는 기능은 갖고 있지 않다[10]. 한국원자력연구원에서는 주변국 원전 사고를 대비한 광역 대기확산모델을 개발하였으나, 이는 시간에 따른 대기 중 농도를 계산하고, 선원의 위치와 방출량을 결정하는 역추적 기능은 없다[11]. 국내·외에서 개발되어 활용되고 있는 방사성물질의 대기확산 및 궤적모델에 관하여 Table 1에 나타내었다. Table 1에 나타낸 바와 같이 미국, 유럽, 일본, 우리나라에서는 대기확산모델을 개발·완료하였으나, 배출원 탐색의 핵심 기술인 선원위치 결정 및 핵종 방출량 산정 기능을 모두 갖고 있는 시스템은 현재 CTBTO의 WebGrape [9]가 유일하다.

2.2 3차원 궤적모델 개발

대기 환경내에서 방사성물질 방출원을 추적하는 기술은 일반적으로 대기 흐름을 모사하는 바람 자료를 근간으로 한 궤적 모델(trajjectory model)을 이용하는데, 궤적 모델은 오염물을 한 개의 단일 입자의 움직임으로 가정하고 바람장을 이용하여 입자의 궤적을 추적하는 것이다. 입자의 궤적을 추적하는 궤적방정식은 다음과 같이 정의된다[12].

$$\frac{dX}{dt} = V[X(t)] \quad (1)$$

식(1)에서 X는 위치 벡터, t는 시간, V는 유속 벡터이다. 식(1)을 시간 $t=t_0$ 및 $t_1=t_0+\Delta t$ 의 전진형 방법에 대해 Taylor 급수전개를 이용하면 다음과 같다.

$$X(t_1) = X(t_0) + (\Delta t) \frac{dX}{dt} \Big|_{t_1} + \frac{1}{2} (\Delta t)^2 \frac{d^2X}{dt^2} \Big|_{t_1} + \dots \quad (2)$$

Table 1. Status of Atmospheric Dispersion Models (O: include function, X: not include function)

| Function | USA[2] | Japan[6] | EU[8] | CTBTO[9] | Korea[10] | Korea[11] |
|---------------------|----------|----------|----------|----------|-----------------|---------------|
| Model name | HYSPPLIT | WSPEEDI | RODOS | WebGrape | AtmoCARE (KINS) | LADAS (KAERI) |
| Development status | Complete | Complete | Complete | Complete | Complete | Complete |
| Weather data | NOAA | JMA | ECMWF | ECMWF | KMA | KMA |
| Concentrations | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Forward trajectory | ○ | × | × | ○ | × | × |
| Backward trajectory | ○ | × | × | ○ | × | × |
| Source region | ○ | × | × | ○ | × | × |
| Source term rates | × | ○ | × | ○ | × | × |
| Source open | × | × | × | × | × | × |
| Commercial code | × | × | × | × | × | × |

식(1)을 시간 $t_0 \sim t_1 - \Delta t$ 의 후진형 방법에 대해 Taylor 급수전개를 이용하면 다음과 같다.

$$X(t_0) = X(t_1) - (\Delta t) \frac{dX}{dt} \Big|_{t_1} + \frac{1}{2} (\Delta t)^2 \frac{d^2 X}{dt^2} \Big|_{t_1} - \dots \quad (3)$$

식(2)와 식(3)을 더하면 임의의 시간 t_1 및 t_0 에 대한 궤적 방정식을 구할 수 있고, 이는 식(1)에 대한 constant acceleration solution으로 다음과 같다 [12].

$$X(t_1) \approx X(t_0) + \frac{1}{2} (\Delta t) [V(t_0) + V(t_1)] \quad (4)$$

식(4)에서 $t=t_1$ 에 대한 입자의 궤적을 구하면 전진방향의 입자 궤적을 추정하는 것이고, $t=t_0$ 에 대한 입자의 궤적은 후진방향(역방향)의 궤적을 추정하는 식이 된다. 식(4)에서 $V(t_1)$ 에 대한 값은 미지이므로 임의의 시간에서의 입자의 위치를 구하기 위해서는 식(5)와 같은 반복계산에 의해 그 위치를 결정하게 된다.

$$\begin{aligned} X^1(t_1) &\approx X(t_0) + (\Delta t) V(t_0) \\ X^2(t_1) &\approx X(t_0) + \frac{1}{2} (\Delta t) [V(t_0) + V^1(t_1)] \\ &\vdots \\ X^i(t_1) &\approx X(t_0) + \frac{1}{2} (\Delta t) [V(t_0) + V^{i-1}(t_1)] \end{aligned} \quad (5)$$

3. 결과 및 논의

3.1 관측자료 연계 궤적모델 검증

본 연구에서 개발된 전진형/후진형 궤적모델의 검증을 위하여 1986년 체르노빌 사고 당시 유럽에서 관측한 자료를 이용하였다[13]. 체르노빌 사고 모사를 위하여 1986년 4월 26일 0시부터 1986년 5월 11일 0시까지 유럽중기예보센터의 기상자료로부터 지표면 압력분포, 10

m 유속분포, 2 m 온도분포 및 6개 level (1000 hPa, 925 hPa, 850 hPa, 700 hPa, 600 hPa, 500 hPa)에서의 수평 및 수직 유속성분 등을 추출하여 궤적모델의 기본 입력자료로 이용하였다. 체르노빌 사고 시 방사성물질은 1986년 4월 26일 0시(UTC 기준)부터 5월 7일 0시까지 대기로 누출되었다. 체르노빌 사고 시 대기로 누출된 방

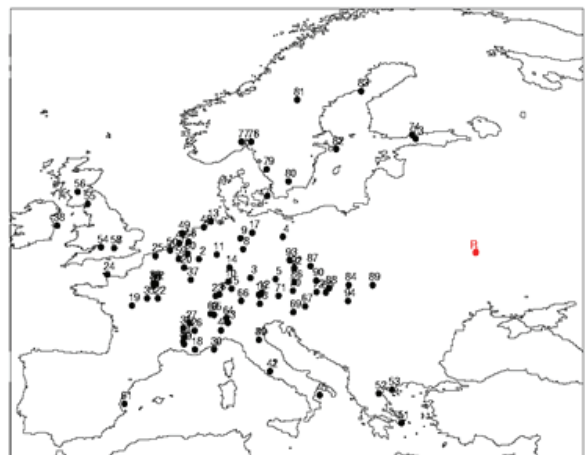


Fig. 1. Measured locations of the concentration at Chernobyl accident.

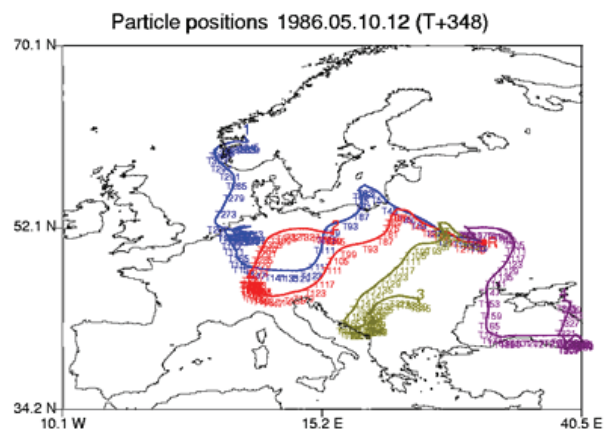


Fig. 2. Calculated forward trajectories for Chernobyl accident.

Table 2. Locations of Measured Concentration for Validations of Backward Trajectory Model

| Positions | Longitude | Latitude | Release height (meter) | Measured period (1986 year) |
|-----------|-----------|----------|------------------------|-----------------------------|
| Fribourg | 7.12 E | 46.49 N | 50 | 5.01.00-5.07.07 UTC |
| Stockholm | 18.08 E | 59.33 N | 50 | 4.28.06-5.10.18 UTC |
| Linz | 14.30 E | 48.13 N | 50 | 4.30.06-5.10.18 UTC |

사성물질은 초기에 서쪽 및 북쪽 방향으로 이동하여 스칸디나비아 반도에서 핵종이 검출되고, 4월 28일 이후 동풍 및 북풍에 의해 유럽의 동쪽 지역으로 이동한다. 5월 1일 이후에는 바람의 복잡한 변화에 의해 체르노빌의 북쪽, 동쪽, 남쪽 및 서쪽으로 다양한 방향으로 방사성물질이 확산됨을 알 수 있다. 또한 유럽의 동쪽지역으로 이동한 방사성물질은 프랑스 북쪽지역에서 형성된 상대적으로 강한 남동풍에 의하여 영국과 아이슬란드 방향으로도 이동됨이 분석되었다[13]. 동 기간 유럽 radioactivity environmental monitoring (REM)의 농도 관측 지점을 Fig. 1에 나타내었다.

궤적모델의 검증은 위하여 체르노빌 사고지점에서 12 시간 간격으로 입자를 방출시켜 4개 궤적의 전진 이동 궤적경로를 평가하였다. Fig. 2에 1986년 4월 26일 0시 방출궤적을 1번, 4월 26일 12시 방출궤적을 2번, 4월 27일 0시 방출궤적을 3번, 4월 27일 12시 방출궤적을 4번으로 표시하였다. 1, 2번 궤적은 방출 후 남서풍에 의해 주로 유럽의 북동쪽지역으로 이동하고, 45시간 후에는 북동풍의 영향으로 남서 방향으로 이동하고 있음이 잘 나타나고 있다. 3번 궤적은 유럽의 남쪽방향으로 이동한 후 170시간 이후에는 동풍에 의해 서쪽 지역으로 이동하고 있고, 4번 궤적은 방출 당시의 풍향에 의해 동쪽지역으로만 이동하는 것을 알 수 있다. 1986년 체르노빌 사고 당시 풍향의 변화가 심해 대기 중 누출된 방사성물질이 유럽의 전 지역으로 확산되었음을 알 수 있다.

체르노빌 사고 당시 유럽의 여러 지점에서 방사성핵종의 농도가 관측되었지만, 상대적으로 큰 농도가 관측된 독일 Fribourg, 스웨덴 Stockholm 및 오스트리아 Linz 지점을 선정하여 개발된 궤적모델의 검증자료로 활용하였다. 3개 지점의 위치와 농도가 관측된 기간을 Table 2에 나타내었다.

체르노빌 사고 당시 농도가 상대적으로 크게 관측된 3개 지점에서 후진형 궤적을 산정한 결과를 Fig. 3부터 Fig. 5에 나타내었다. 후진형 궤적 계산결과 방출지점이 Fribourg (Fig. 3)에서 입자가 방출되는 경우 체르노빌 사고 지점을 근사하게 산정하였다. 그러나 Stockholm (Fig. 4)과 Linz (Fig. 5)의 경우 일부 궤적만이 체르노빌 방향을 향하고 있어 후진 궤적의 불확도가 많이 내포하고 있음을 알 수 있다. 이는 후진형 궤적 계산에서 입자의 방출시간이 바람장과 함께 가장 민감한 변수임을 알 수 있고, 분해능이 높은 바람장과 농도의 최고 관측 시간을 조금 더 정확히 측정하면 시간 역산 궤적을 산정하는데 정확도를 향상시킬 수 있을 것으로 추정된다.

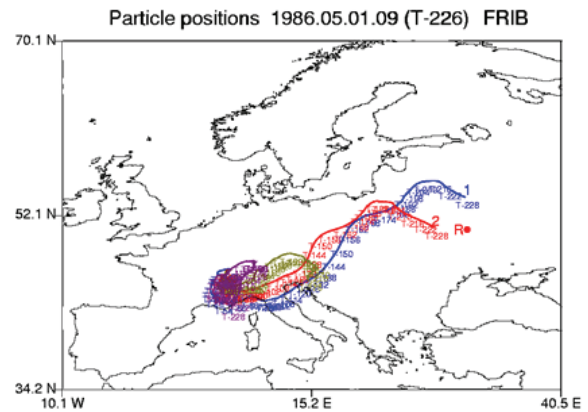


Fig. 3. Calculated backward trajectories in 12 hour time interval release from Fribourg.

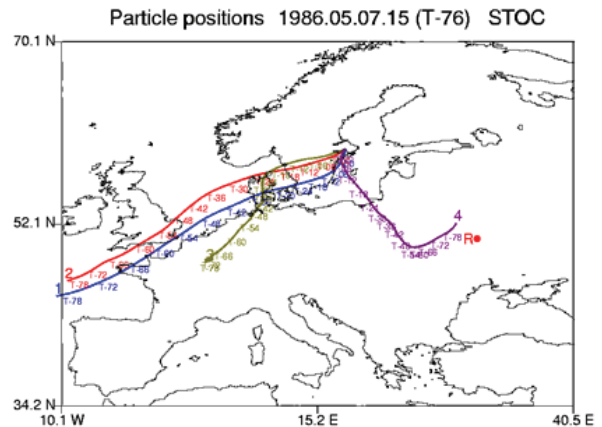


Fig. 4. Calculated backward trajectories in 12 hour time interval release from Stockholm.

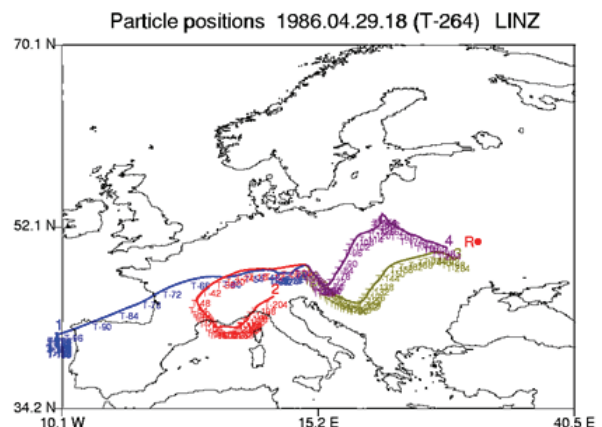


Fig. 5. Calculated backward trajectories in 12 hour time interval release from Linz.

3.2 대기확산모델 연계 검증

체르노빌 사고 당시 농도가 상대적으로 크게 관측된 3개 지점에서 후진형 궤적을 산정한 결과를 어느 정도의 오차를 포함하고 있다. 이는 후진 궤적의 방출지점에서 바람장과 더불어 입자의 방출시간이 후진 궤적모델의 민감한 변수임을 알 수 있고, 단일 후진 궤적모델에 의해서 선원의 위치를 추정하는 경우 불확실성을 내재하고 있음을 알 수 있다. 이러한 후진 궤적모델의 불확실성을 최소화하기 위해 한국원자력연구원에서 개발한 대기확산모델[11]과 연계한 FOR 기법을 이용하여 방사성 핵종의 방출 위치를 선정하는 방법을 통하여 정확도를 향상시켰다.

FOR 기법은 방사성핵종이 관측된 지점을 방출지점으로 가정하고 대기확산모델에 기상자료를 시간 역순으로 입력하여 시간에 따라 시간 역순의 농도 분포를 계산하여 가능한 방출지역과 방출량을 추정하는 방법이다[3, 14]. FOR 기법은 배출원-수용지(source-receptor) 개념을 근간으로 하여 관측지점에서 방사성물질의 특이 값이 검출된 경우 다음 식으로 배출원의 배출량을 계산할 수 있다.

$$S_{0ijn} = \frac{C_0}{M_{ijn}} \quad (6)$$

식(6)에서 S_0 는 방사성물질의 선원항(Bq), C_0 는 관측 지점의 농도(Bq/m³), M 은 확산인자 (m³) 이고, i 는 계산 grid cell, n 은 시간 간격이다. 위 식으로부터 관측지점에서 평상시 보다 높은 농도 값이 관측된 경우 이 농도를 기준으로 배출지점의 방출량을 추정할 수 있다. 본 연구에서는 개발된 궤적모델의 불확실성을 최소화하기 위하여 방출지역을 찾는 FOR 기법을 이용하였고, 방출지역의 방출량 산정하는 방법은 이용하지 않았다.

본 연구에서는 FOR 기법을 이용하여 체르노빌 사고 당시 농도가 상대적으로 크게 측정된 Fribourg, Stockholm, Linz에서 입자를 방출하여 시간 역순의 오염물 확산도를 계산하였다. Fig. 6에 Fribourg에서 방출한 입자를 대기확산모델에서 시간 역순으로 산정한 오염물 확산도를 나타내었다. Fig. 6을 보면 입자 방출후 -96시간에 입자는 북풍에 의하여 유럽의 남쪽 이탈리아 방향으로 이동 한 후, 방출후 -144시간에 입자는 북동방향으로 향하고, -198시간에는 유럽의 동쪽지역으로 많이 확산되며, -252 시간에는 농도가 높은 지역인 체르노빌 지역을 찾아내고 있다. -252 시간은 1986년 4월 26일 18시 체르노빌 사고가 일어난 초기 시간을 잘 재현하고 있다. Fig. 7은 Stockholm에서 입자 방출후 초기 -42시간에 입

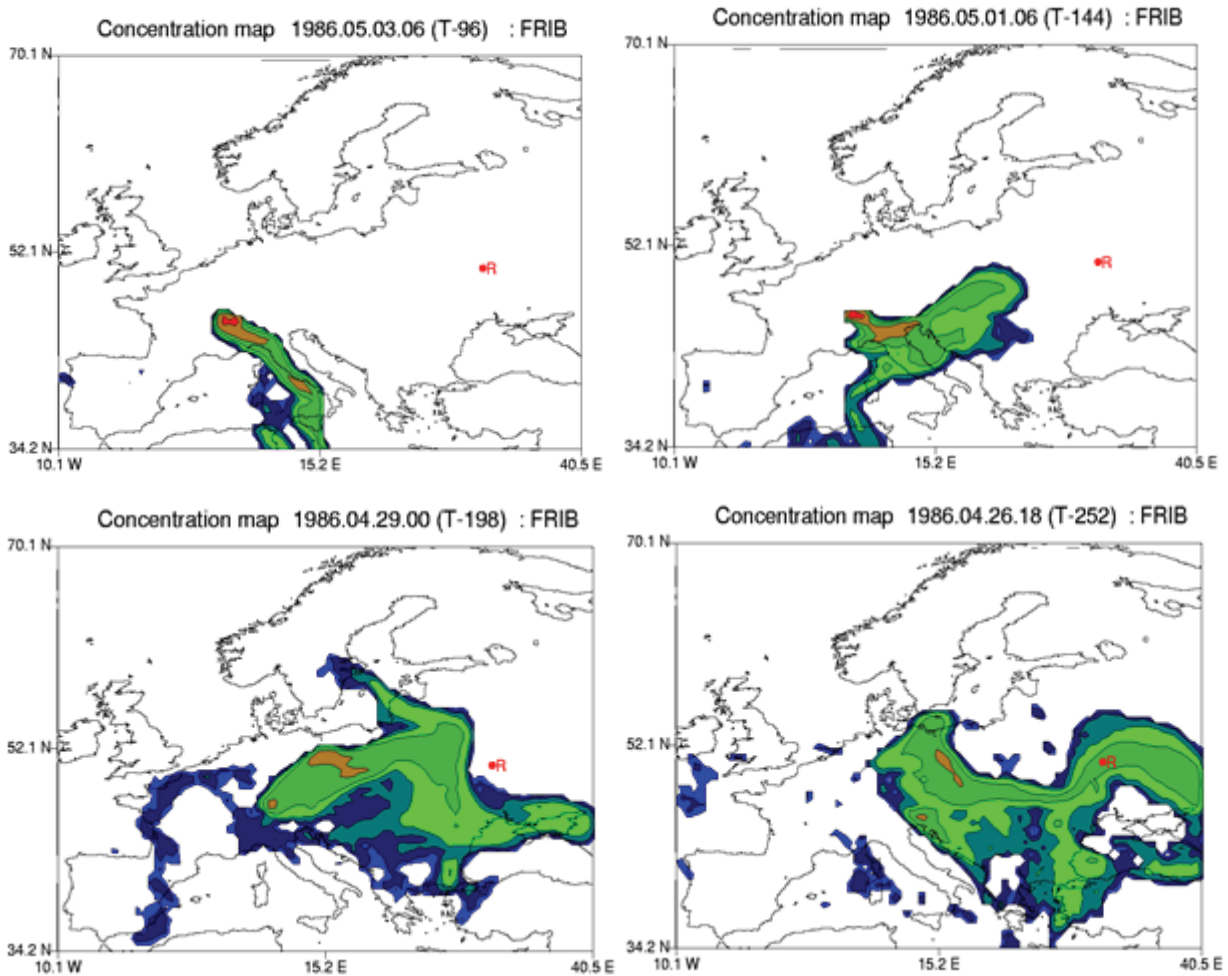


Fig. 6. Backward dispersion calculations from -96 to -252 hours based on release at Fribourg.

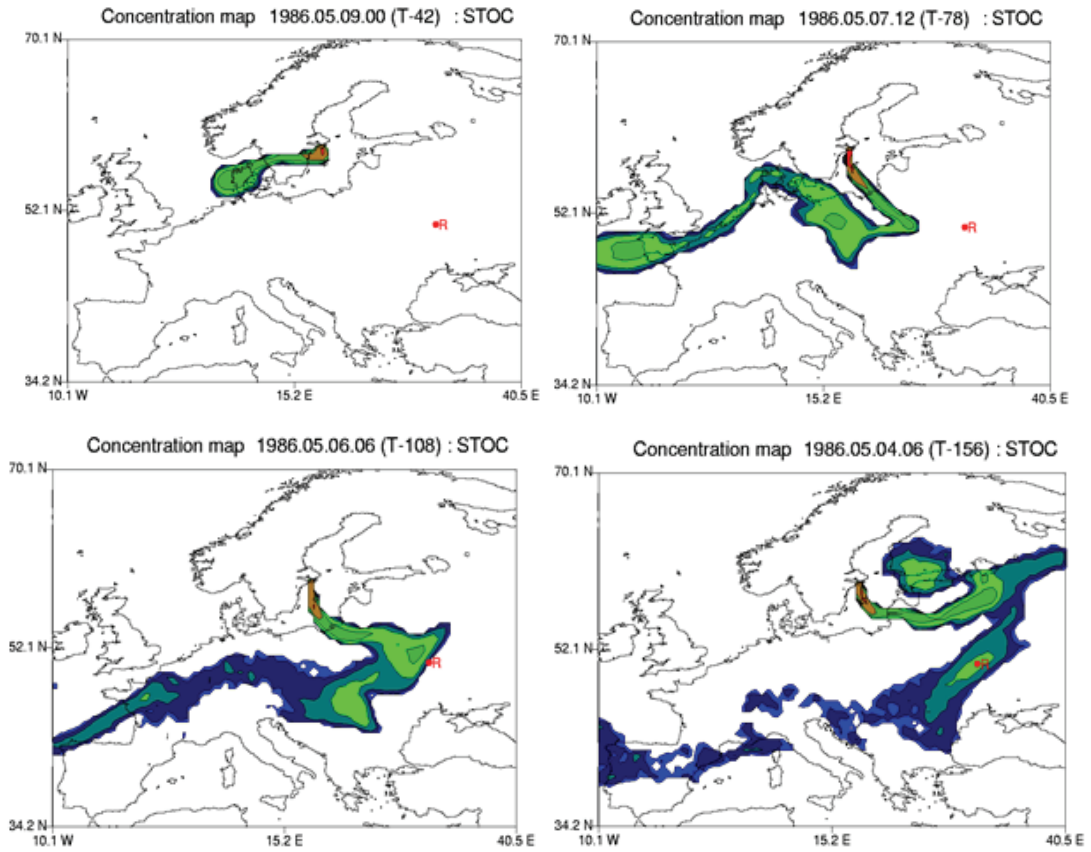


Fig. 7. Backward dispersion calculations from -42 to -156 hours based on release at Stockholm.

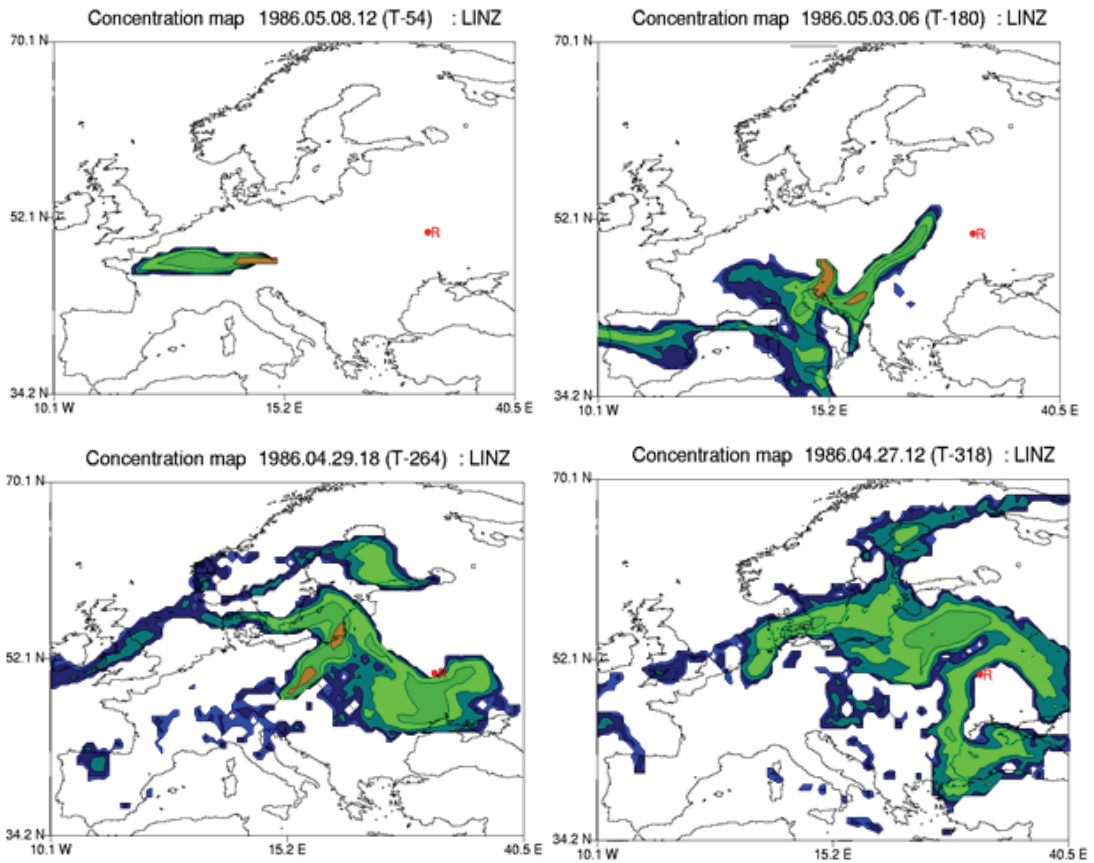


Fig. 8. Backward dispersion calculations from -54 to -318 hours based on release at Linz.

자는 동풍에 의하여 유럽의 서쪽 방향으로 이동 한 후, -78시간에 입자는 서쪽 및 남동방향으로 확산되고, -108 시간에는 체르노빌 근방으로 확산되며, -156 시간에는 농도가 높은 지역인 체르노빌을 지역을 찾아내고 있다. -156 시간은 1986년 5월 4일 6시로 체르노빌 사고로 방사성물질이 대기로 누출되고 있는 시간을 잘 재현하고 있다. Fig. 8은 Linz에서 입자 방출후 초기 -54시간에 입자는 동풍에 의하여 유럽의 서쪽 방향으로 이동 한 후, -180시간에 입자는 방출지점에서 남쪽 및 북동방향으로 확산되고, -180시간에는 체르노빌 근방으로 확산되며, -264 시간에는 농도가 높은 지역인 체르노빌을 지역을 찾아내고 있다. -264 시간은 1986년 4월 29일 18시로 체르노빌 사고로 방사성물질이 대기로 누출되고 있는 시간을 잘 재현하고 있다. 이후 -318시간에는 방사성물질이 주로 유럽의 동쪽 방향에 폭 넓게 확산되며, 체르노빌 사고 지역을 향하고 있는데, -318시간은 1986년 4월 27일 12시로 체르노빌 사고 초기 시간이다.

4. 결론

주변국의 은밀한 핵활동 시 방사성핵종의 기원을 추정하기 위하여 3차원 전진/후진형 궤적모델을 개발하였다. 개발된 궤적모델은 궤적 미분방정식을 유한차분법을 이용한 방법으로 주어진 바람자료를 이용하여 방사성핵종의 방출지점으로부터 입자의 궤적을 순차적으로 찾아가는 전진형 모델과 시간 역산으로 방출기원을 추정하는 후진형 모델로 구성되었다. 개발된 궤적모델의 검증은 위하여 체르노빌 사고 당시 측정된 농도자료를 이용하였다. 검증결과 관측지점의 농도가 높게 측정된 지점과 방출기원에서 가까운 지역으로부터 시간 역산의 방출지점을 추정된 결과의 정확도가 높았다.

개발된 궤적모델의 정확도 향상을 위하여 대기확산모델을 이용하여 방출영역을 역으로 추정하는 FOR기법을 도입하여 불확도를 최소화하였다. 3차원 궤적모델은 방출시간, 방출높이, 방출간격 등의 변수에 의해 계산결과가 달라지는 불확도를 내포하고 있는데, 이러한 궤적모델의 불확도를 최소화하기 위해 CTBTO에서 이용하는 FOR기법[3]을 도입하여 배출원 탐색 시스템의 정확도를 향상시켰다. 한국원자력연구원에서 개발한 대기확산모델 LADAS를 이용하여 FOR 기법에 의해 오염물 방출영역을 추정한바 신뢰성 있는 결과를 얻었다[11]. 따라서 궤적모델과 함께 FOR 기법에 의한 대기확산모델을 병행하면 오염물의 방출지점을 산정하는데 효과적인 것으로 평가되었다.

본 연구에서는 1단계 개발된 궤적모델의 검증을 위하여 체르노빌 사고시의 자료를 이용하였고, 단일 방출지점만을 고려하여 모델을 관측 값과 비교·검증하였다. 방출지역 추정을 위하여서는 다중 관측지점을 고려하여 방출지역을 찾는 것이 합리적이다. 향후에 1단계 개발된 궤적모델과 FOR 기법을 활용하여 다중소스를 고려한 경우 방출지역을 추정하는 연구가 진행될 예정이다. 또한

좀더 정확한 분석을 위하여 관측 농도를 기반으로 하여 오염물의 방출지역, 기간 및 방출량을 산정할 수 있는 Bayesian 기법을 활용하여 모델을 개선할 예정이다. 이를 통하여 최종적으로 주변국의 은밀한 핵활동 시 방사성핵종의 방출지역과 기원을 파악하여 우리나라의 핵종 탐지 능력을 향상하고 핵활동 및 방사선 안전 분야에서 주도적 역할을 할 수 있을 것으로 생각된다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부, 원자력안전위원회)의 재원으로 한국연구재단과 한국원자력안전재단의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호 : NRF-2012M2A8A4025912, NRF-2015M2A2B2034282, KORSAF-1205014-0415-SB110). 또한, 본 연구는 정부(국민안전처)의 재원으로 자연재해저감기술개발사업단의 지원을 받아 수행된 연구임(MPSS-자연-2015-81).

REFERENCES

1. Geer L. Radionuclide evidence for low-yield nuclear testing in North Korea in April/May 2010. *Science and Global Security*. 2012;20:1-29.
2. Draxler R. Evaluation of an ensemble dispersion calculation. *J. Appl. Meteorol.* 2003;42:308-317.
3. Tinker R, Orr B, Grzechnik M, Hoffma E, Saey P, Solomon S. Evaluation of radionuclide releases in Australia using atmospheric dispersion modelling tools. *J. Environ. Radioact.* 2010; 101(5):353-361.
4. Bocquet M, Wua L, Chevallierc F. Bayesian design of control space for optimal assimilation of observations. Part I: Consistent multiscale formalism. *Q. J. R. Meteorolog. Soc.* 2011;137(658):1340-1356.
5. Mukherjee C, Kasibhatla P. S., West M. Bayesian statistical modeling of spatially correlated error structure in atmospheric tracer inverse analysis. *Atmos. Chem. Phys.* 2011;11:5365-5382.
6. Nasstrom JS, Sugiyama G, Leone JM, Ermak DL. A real-time atmospheric dispersion modeling system. UCRL-JC-135120. Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, 1993; 1-8.
7. Furuno A, Terada H, Chino M, Yamazawa H. Experimental verification for real-time environmental emergency response system; WSPEEDI by European tracer experiment. *Atmos. Environ.* 2004;38:6989-6998.
8. Erhart J, Sauer J, Schule O, Benz G, Rafat M, Richter J. Development of RODOS, a comprehensive decision support system for nuclear emergencies in European overview. *Radiat. Prot. Dosim.* 1993;50:195-203.
9. Wotawa G. Meteorological analysis of the spring-2010 radionuclide measurements in Eastern Asia.

- EGU2012-9463. European Geosciences Union, Vienna, Austria 2012;9463.
10. Korea Institute of Nuclear Safety. Functionality advancement of AtomCARE. KINS/GR-509. Daejeon, Republic of Korea. 2013;2:1-112.
 11. Suh KS, Jeong HJ, Kim EH, Hwang WT, Han MH. Verification of the Lagrangian particle model using the ETEX experiment. *Annals of Nuclear Energy*. 2006;33:1159-1163.
 12. Seibert P. Convergence and accuracy of numerical methods for trajectory calculation. *J. Appl. Meteorol.* 1993;32:558-566.
 13. Klug W, graziani G, Grippa G, Pierece D, Tassone C. Evaluation of long range atmospheric transport models using environmental radioactivity data from the Chernobyl accident. EUR 14148 EN. Luxembourg, Luxembourg. Commission of the European Communities. 1992;1-366.
 14. Wotawa G, et al. Atmospheric transport modelling in support of CTBT verification-overview and basic concepts. *Atmos. Environ.* 2003;37:2529-2537.