

Development of Long-Range Atmospheric Dispersion Model against a Nuclear Accident

Kyung-Suk Suh · Eun-Han Kim and Moon-Hee Han

Korea Atomic Energy Research Institute

원전 사고를 대비한 장거리 대기 확산모델 개발

서경석 · 김은한 · 한문희

한국원자력연구소 원자력환경연구팀

(2002년 7월 18일 접수, 2002년 8월 7일 채택)

Abstract - The three-dimensional long-range dispersion model has been developed to understand the characteristics of the transport and diffusion of radioactive materials released into atmosphere. The model is designed to compute air concentration and ground deposition at distances up to some thousands of kilometers from the source point in horizontal direction. The vertical turbulent motion is considered separately within the mixing layer and above the mixing layer. The test simulation was performed in the area of Northeast Asia. The release point was assumed in the east part of China. The calculated concentration distributions are mainly advected toward the southeast part of release point by the wind fields. The developed model will be used to estimate the radiological consequences against a nuclear accident. The model will be supplemented by the comparative study using the data of the long-range field experiments.

Key words : long-range dispersion model, transport and diffusion, mixing layer, radiological consequences

요약 - 대기 중으로 방출된 방사성물질의 이동·확산 현상을 이해하기 위하여 3차원 장거리 확산 모델이 개발되었다. 모델은 수평방향으로 방출점으로부터 수천 키로 미터의 거리까지 공기중 농도와 지표면 침적을 계산하도록 설계되었다. 수직 난류운동은 혼합층 내와 혼합층 위로 분리하도록 고려하였다. 시험계산은 동북 아시아권의 영역을 고려하였고, 방출점은 중국의 동쪽 지점을 가정하였다. 계산된 농도분포는 바람장에 의해 방출점의 남동방향을 향해 주로 이동되었다. 개발된 모델은 원전 사고시 방사선 피해를 추정하기 위하여 이용될 것이며, 모델은 장거리 야외 확산실험의 자료를 이용하여 비교·검증 연구를 통하여 보완될 것이다.

중심어 : 장거리 확산모델, 이동·확산, 혼합층, 방사선 피해

서 론

대기 중으로 방출된 오염물질의 장거리 이동·확산에 대한 연구는 1970년도부터 중급속 이동 및 산성비 영향평가의 관점에서 시작되었다. 산업화의 발달에 따른 대규모 공장에서의 황산화물과 질소 산화물의 방출은 산성비의 발생을 증가시키고, 중급속 방출과 더불어 인접 국가의 환경에 심

각한 영향을 주게 된다. 방출된 화학물질은 장거리 이동시 화학반응을 통해 다른 유해한 성분으로 변화되어 이동한 후 지표에 침적되어 환경생태계에 영향을 미친다[1,2]. 또한 동북 아시아권에서는 봄철 중국 고비 사막에서 이동되는 황사의 영향을 평가하기 위해 장거리 대기 확산모델의 적용이 활발히 이루어지고 있다[3,4]. 최근에는 1986년의 구 소련의 Chernobyl 원전 사고이후 각

국에서는 방사선 비상대응 차원에서 장거리 확산 모델을 개발중이거나 개발된 모델을 보완·검증하고 있다[5,6].

국지규모의 확산모델이 수평규모로 수십 키로미터, 수직규모로 혼합층까지만 고려하는데 비해, 장거리 확산모델의 수평규모는 수백에서 수천킬로미터의 종관규모(synoptic scale)로, 수직규모로는 지표상 수십키로의 대류권(troposphere)까지 고려되어야 한다. 현재 우리나라에서는 총 16개의 원자력발전소를 운영중에 있으며 국내 원전 사고를 대비한 국지규모의 국가 방사선 비상대응 시스템인 CARE(Computerized technical Advisory system for Radiological Emergency preparedness)가[7] 개발되어 운영중에 있다. 이 시스템의 3차원 바람장 및 농도분포 계산모델에 한국원자력연구소에서 개발한 FADAS(Following Accident Dose Assessment System)가[8] 채택되어 방사선 장애에 대한 주변 환경에 주는 영향을 평가하기 위해 운영중에 있다. 그러나 이 시스템은 국지 규모(수평규모 100 Km 이내, 수직규모 1 Km 이내)로 장거리 대기 확산평가 시스템은 아니다. 우리나라의 주변에 러시아, 중국, 대만, 일본 등의 국가들에서 현재 원자력발전소를 가동하고 있다. 따라서 우리나라도 주변 국가들에서 발생할 수 있는 원전 사고를 대비하여 동북 아시아권을 대상으로 하는 장거리 대기확산 시스템을 구축하여 우리나라의 국민을 보호하고 주변 환경에 미치는 영향을 최소화하여야 한다.

본 연구에서는 동북 아시아권의 원전 사고를

대비한 장거리 확산모델 LADAS (Long-range Atmospheric Dispersion Assessment System)를 개발하여, 동북 아시아권을 대상으로 시험 계산을 수행하여 방사성 물질의 시·공간적 농도분포를 산정하였다.

장거리 대기 확산모델

대기 확산모델은 수평 및 수직규모로 분류할 경우 크게 국지규모와 광역규모로 나눌 수 있으며, 대기중 오염물의 농도를 계산하는 수치기법 상으로는 Eulerian형태 모델과 Lagrangian형태 모델로 구별된다. 장거리 모델은 국지모델과는 달리 넓은 계산영역을 대상으로 하기에 지구곡률이 반영되어야 하고 혼합층의 높이가 정확히 계산되어야 한다. 또한 수평 및 수직 확산의 처리도 혼합층내와 혼합층위로 분류하여 난류운동을 모수화해야 한다[9]. 광역모델에서도 국지모델과 마찬가지로 3차원 바람장의 시·공간적 분포가 중요한 요소이며 특히 지표면으로 떨어지는 오염물의 건·습 침적의 계산을 위하여 보다 정확한 바람의 수직성분과 강수량 자료가 필요하다.

Eulerian형태의 수치모델은 대기중 오염물의 이동 역학을 나타내는 이류·확산방정식을 유한차분법(Finite Difference Method)이나 유한요소법(Finite Element Method) 등의 수치기법을 이용하여 고정 좌표계상에서 방정식의 해를 직접 구하는 방법이다. 이러한 형태의 모델은 3차원 바람장 모델과 동일한 격자체계를 유지함으로써 바람

Table 1. Characteristics of Eulerian and Lagrangian models

	장	점	단	점
Eulerian model	<ul style="list-style-type: none"> • 3차원 바람장 모델과 쉽게 연계할 수 있음. • 확산계수를 대기 안정도와는 독립적으로 결정할 수 있음. 		<ul style="list-style-type: none"> • 방출점 부근의 농도 구배가 급하여 수치 분산을 유발할 수 있음. • 방정식을 풀기 위한 적절한 경계 조건의 설정이 어려움. • 3차원 이류·확산 방정식을 해석 하는데 오랜 계산시간이 필요함. 	
Lagrangian model		<ul style="list-style-type: none"> • 방출점 부근의 급격한 농도 구배를 쉽게 처리할 수 있음 • 수치분산을 유발하지 않고, 입자의 궤적과 농도를 빠르게 계산함. 	<ul style="list-style-type: none"> • 장거리 계산시 불확실성을 최소화 하기 위해 많은 수의 입자를 발생 시켜야 함. • puff mode'을 이용할 경우 방출점 부근에서 연속적 plume의 형태를 재현하기 위해 많은 수의 puff를 발생시켜야 하므로 오랜 계산 시간이 필요함. 	

장 모델과의 연계가 용이하고, 수평·수직 확산계수를 대기 안정도와 관계없이 독립적으로 결정할 수 있는 장점이 있다. 그러나 방출점 부근의 농도 구배가 급격한 경우에 수치분산을 유발할 수 있고, 방정식을 풀기 위한 경계조건의 설정이 어려우며 많은 계산시간을 요구한다[10]. Lagrangian 형태의 수치모델은 대기중 오염물의 이동·확산을 모사하기 위해 방출점 부근에서 오염물로 취급된 입자를 방출하여 그 궤적을 추적함으로써 농도분포를 계산하는 방법이다. 이 형태의 모델은 방출점 부근의 시간에 따른 급격한 농도구배를 쉽게 처리할 수 있고 수치분산을 유발하지 않는 장점을 갖고 있다. 그러나 입자의 궤적을 추적하는데 불확성을 최소화하기 위해 많은 수의 입자를 방출해야 하는 문제가 있다[10]. 이들 Eulerian과 Lagrangian 모델의 장·단점을 Table 1에 나타내었다.

본 연구에서는 원전 사고시 신속한 계산과 이에 따른 비상 대응책 수립을 위하여 입자(particle)를 방출하여 그 궤적을 추적함으로써 농도분포를 계산하는 Lagrangian 모델의 이론을 근간으로 하는 장거리 확산모델을 개발하였다. 이러한 Lagrangian 형태의 모델은 IAEA/WMO의 주관하에 ATMES (Atmospheric Transport Model Evaluation Study) 장거리 대기 확산연구[6]에 참여한 미국의 ARAC, 이태리의 APOLLO, 핀란드의 TRADOS, 영국의 NAME 및 일본의 WSPEEDI 등의 코드에서도 이용되고 있다.

기상자료

기상모델의 수평 분해능은 일반적으로 확산모델의 수평분해능과 일치하지 않고, 또한 수직 좌표계 시스템도 국가마다 서로 다른 좌표계를 이용하며, 방대한 기상자료를 압축한 바이너리 형태(binary format)의 자료로써 제공된다. 따라서 기상모델의 계산결과는 전처리 과정 없이 장거리 확산모델에 바로 연계할 수 없다.

우리나라는 현재 기상청에서 수치예보를 위하여 중규모 기상예보 모델인 MM5를[11] 이용하여 동북 아시아권에 대한 기상자료를 산정하고 있다. 모델의 계산영역은 북위 38도와 동경 126도를 기준으로 하고 북위 30도와 60도를 접하는 평면에 북반구를 투영한 Lambert 투영 좌표계를 사용한다. 계산 영역의 남서쪽 시작지점은 북위 12.26875도 동경 102.4697도 이고, 계산영역을 30

x 30km의 해상도로 동쪽으로 190, 북쪽으로 170개의 격자로 나누어 계산한다. 수직 격자체계로는 지표면에서 50 hPa까지 25개의 높이에서 1일 2회씩 3시간 간격의 수평·수직 바람성분, 지오폠텐셜 높이, 온도, 습도, 잠열 플럭스, 해면기압, 지표면 기압 및 강수량 자료 등을 2일 예보로 산정하고 있다. 이러한 자료 외에도 LADAS의 입력자료 제공을 위하여 1차 생성된 MM5 자료와 지형고도, 지면사용도 등의 자료를 사용하여 마찰속도 u^* , 지상 10 m 높이에서의 바람(u, v), 지상 2 m 높이에서의 온도, 각 지점의 행성 경계층 높이(Planetary Boundary Layer), 대기 안정도 등을 계산하여 제공하고 있다[12].

기상 예보자료는 방대한 기상자료를 압축한 바이너리 형태(binary format)의 자료로써 제공되기에 확산모델에 필요한 자료만을 추출하는 전처리 모듈을 작성하였다. 또한, 전 처리 모듈에는 기상자료의 확산모델내 입력을 위하여 연직면상 기압 좌표계(pressure coordinate)로 주어지는 자료를 직각 좌표계로 변환하고, 혼합율을 비습자료로 변환하는 등의 처리 과정이 포함되어 있다.

확산모델

Lagrangian 입자추적 모델을 이용한 3차원 공간에서 입자는 평균풍에 의한 이류(advection)와 난류에 의한 확산(turbulence)으로 주어진 시간간격 동안에 초기위치에서 다음 위치로 이동한다. 따라서 공간에 대한 변위는 이류와 난류에 의한 변위의 합으로써 표시된다. 초기시간에서 어떤 시간간격 동안에 입자의 변위 $X_j(j=1,2,3)$ 는 다음과 같다.

$$X_j(t + \Delta t) = X_j(t) + v_j(t) \Delta t + v'_j(t) \Delta t \quad (1)$$

윗 식에서 v_j 는 평균 바람장($j=1,2,3$) v'_j 는 바람의 난류성분이다. 이러한 방법은 방출점으로 방출된 각 입자들이 3차원 공간상에서 독립적으로 확산되므로 계산 시간간격마다 농도를 구할 필요가 없다. 따라서 컴퓨터의 기억용량과 계산시간을 줄일 수 있으며 계산과정이 Eulerian 모델보다 간단하다.

식 (1)에서 바람의 난류성분은 주로 바람의 전단응력에 의해 발생하는 것으로 대기확산 모델내

이 값을 모수화하는 기법에는 여러 가지 방법이 있으나 본 연구에서는 Monte Carlo 기법[13]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 난류 성분은 다음과 같이 표시된다.

$$v_j(t) \Delta t = \sqrt{2K_j \Delta t} R \quad (2)$$

윗 식에서 $v_j(j=1,2)$ 는 바람의 수평 난류 성분, 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[13].

$$v_k(t) \Delta t = \sqrt{2K_k \Delta t} R \quad (\text{혼합층 위})$$

$$v_k(t) \Delta t = (h_{pbl} - Z_g) R \quad (\text{혼합층내}) \quad (3)$$

식 (3)에서 v_k 는 바람의 수직 난류 성분, K_k 는 수직 확산계수이고, h_{pbl} 은 혼합층의 높이, Z_g 는 지형고도이다. 식(2) 및 (3)에 나타난 수평 및 수직 확산계수 값의 선정은 일정한 상수 값을 취하기도 하고, 바람 난류성분의 표준편차로부터도 구할 수도 있는데 표준편차로부터 수평 확산계수를 결정하는 식은 다음과 같다[14].

$$K_{hor} = \frac{1}{2} \frac{d\sigma^2_{hor}}{dt}$$

$$\sigma^2_{hor} = 2K_L t + \frac{V_o^2}{\beta^2} (1 - e^{-\beta t}) + \frac{K_L}{\beta} (-3 + 4e^{-\beta t} - e^{-2\beta t}) \quad (4)$$

윗 식에서 t 는 입자의 이동시간, K_L 은 대규모 와류확산도로 $10^4 \text{ m}^2/\text{s}$, V_o 는 입자의 초기속도로 0.15 m/s , β 는 시간규모의 역수로 10^{-4} s^{-1} 의 값을 갖는다.

Lagrangian 입자추적 모델로부터 대기중 농도를 계산하는 방법은 계산영역에 대해 구성된 격자망내의 입자의 수를 세므로써 구할 수 있는데, 각 입자는 질량이나 특정 오염물 단위를 갖고 있다. 어떤 시간에서 격자내 오염물 농도는 격자내 들어온 입자의 수를 합산한 것을 격자의 체적으로 나누어 구하는 것으로 다음과 같이 표시된다.

$$C(x, y, z) = \frac{N_p}{\Delta x \Delta y \Delta z} \quad (5)$$

윗 식에서 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 는 x,y,z 방향의 격자 크기, N_p 는 격자내 들어온 전체 입자의 개수이다.

대기로 방출된 오염물질은 이류와 확산 과정을 거치면서 침적과정을 통해 지표로 떨어진다. 침적 과정은 중력과 Brownian 운동 등에 영향을 받는 건침적(dry deposition)과 강우에 의한 습침적(wet deposition)으로 구분된다. 건침적 과정을 해석하기 위해 건침적 속도(v_d) 개념이 일반적으로 사용된다. 건침적 속도개념은 입자와 가스에 대하여 침적속(deposition flux) F 와 공기중 오염원의 농도 χ 의 비로 아래와 같이 정의된다[15].

$$v_d = \frac{-F}{\chi} \quad (6)$$

건침적 속도가 결정되면 건침적에 의해 공기 중 에서 지표면으로 침적되는 농도는 다음과 같다.

$$C(t + \Delta t)_{dry} = C(t) [1 - \exp(-\frac{v_d \Delta t}{h_{pbl}})] \quad (7)$$

윗 식에서 $C(t)$ 는 어떤 시간에서 격자내 입자의 개수로 질량이나 특정오염물의 농도 단위를 갖고, h_{pbl} 은 혼합층 높이이다. 습침적은 강우에 좌우되며 건침적에 비하여 단순하게 모사가 가능하며 Scavenging 상수 Λ 를 이용하는 방법이 널리 활용된다. Λ 는 강우에 따라 다음과 같은 식으로 표시할 수 있다[5].

$$\Lambda = CR^a \quad (8)$$

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. 습침적에 의해 공기 중에서 지표면으로 침적되는 농도는 다음과 같다.

$$C(t + \Delta t)_{wet} = C(t) [1 - \exp(-\Lambda \Delta t)] \quad (9)$$

대기로 방출된 오염물질이 방사성 물질이라면 대기중 오염물 제거 향으로 다음과 같은 방사성물질의 붕괴항을 고려하여야 한다.

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

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \quad (10)$$

윗 식에서 $T_{1/2}$ 는 방사성 물질의 반감기이다.

계산 결과

개발된 장거리 확산모델의 시험계산을 동북 아시아권을 대상으로 2002년 1월 5일 0시부터 2002년 1월9일 0시까지 4일간 수행하였다. 동북 아시아권의 계산영역을 그림 1에 나타내었다. 이 기간의 기상자료는 기상청의 MM5모델의 3시간 예보 자료를 이용하였는데, 모델 계산을 위한 기본 입력자료는 지형자료, 토지 이용도 자료, 수평 및 수직 바람성분, 온도, 비습, 지오폠펜설 고도, 행성 경계층 높이, 지표면 기압 및 강수량 등이다. 그림 2에 행성 경계층 높이, 그림 3에 수평 바람장을 나타내었다. 계산은 866MHz의 CPU를 갖고, Windows 98 O/S를 사용하는 PC상에서 4일간 계산은 약 15분 정도 소요되었다.

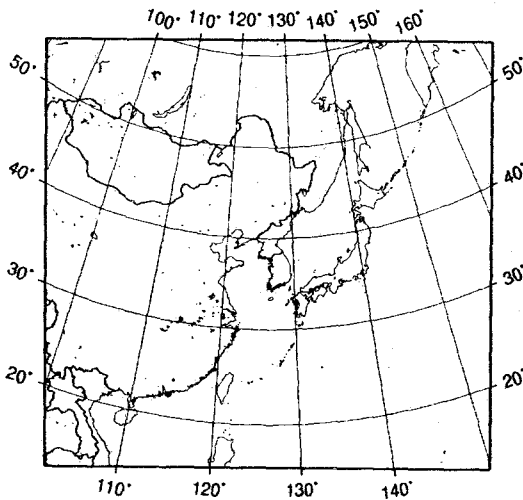


Fig. 1. Computational domain in Northeast Asia region.

그림 2에서 2002년 1월 6일 6시의 행성 경계층의 분포를 살펴보면 한반도 영역 및 중국의 동쪽 지역에서 0.5 ~ 1 km의 분포를 보이고 있으며 낮은 북쪽 지역에서는 약 0.2 ~ 0.5 km의 분포를 또 기온이 높은 일본의 남쪽 바다지역에서

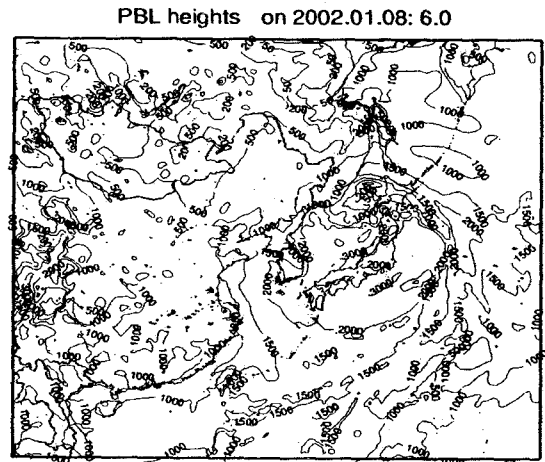
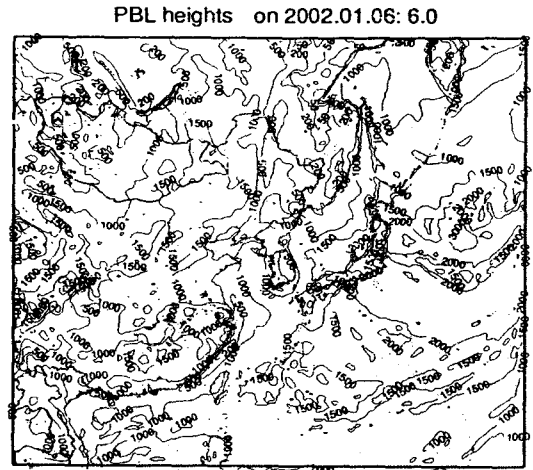


Fig. 2. The predicted PBL heights from MM5 model.

는 1.5 ~ 2.0 km의 분포를 나타내고 있다. 그림 3의 2002년 1월 6일 6시의 지표면 부근의 수평 바람장 분포를 살펴보면 한반도 영역에서는 남서계열의 바람이 중국의 동쪽 연안에서는 강한 북서계열의 바람이 그리고 대만의 남동방향에서는 북서계열의 바람이 서풍으로 바뀌면서 와류가 형성되고 있다. 2002년 1월 8일 6시의 바람장 분포를 살펴보면 계산영역의 북쪽에서 강한 북동풍의 바람이 한반도 영역을 향하고 있으며 한반도의 서해안을 따라 북동풍이 북서풍으로 변화되고 있다. 한반도의 동쪽을 따라서 강한 북동풍이 북서 및 서풍으로 바뀌어 일본 쪽으로 불어나고 있고, 일본의 남동쪽에서는 강한 남동계열의 바람이 불고, 더 남쪽 방향에서는 반시계방향의 강한 와류

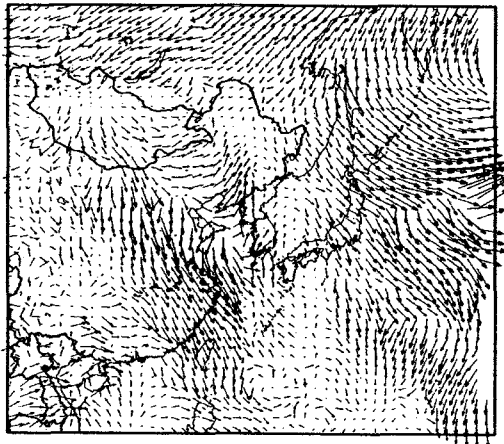
가 형성되는 복잡한 양상을 보이고 있다.

확산모델의 계산영역은 기상청에서 운영중인 중규모 기상 예보모델 MM5와 동일한 남서쪽 시작지점을 북위 12.26875도 동경 102.4697도로 주고, 계산영역을 30 x 30km의 해상도로 동쪽으로 190, 북쪽으로 170 개의 격자로 나누어 계산하였다. 기상자료의 수직 격자는 1001, 1000, 975, 950, 925, 900, 875, 850, 800, 750, 700, 650, 600, 550, 500 hPa의 총 15개로 설정하였다. 방출점은 북위 35.45° N 동경 120.93° E로 중국 동부의 Qinshan 원전사고를 가정하였다. 핵종은 Cs-137을 고려하여 Chernobyl사고와 유사한 10⁴ TBq을 방출시켰고 방출고도를 50 m로 가정하였다. 방출은 1월 5일 0시에서 1월 6일 0시까지 24시간 방출된다고

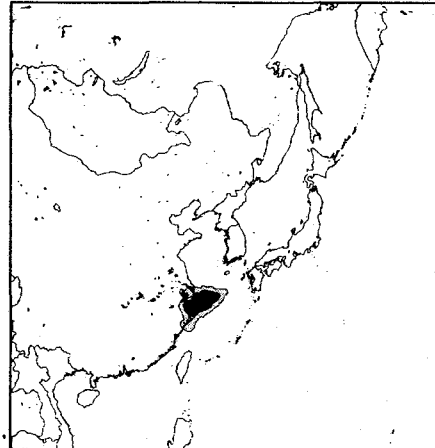
가정하고 계산시간 간격 Δt를 10분으로 주어 총 4일간의 계산을 수행하였다. 이 기간 중에 입자는 5000개를 방출하였고, 수평 확산계수는 4.5 x 10⁴ m²/s, 수직 확산계수는 1.0 m²/s로 전 격자점에 동일하게 입력하였다.

계산된 농도분포를 그림 4에 나타내었다. 이 기간의 지표면 예보 수평 바람장 분포를 살펴보면 방출 후 초기 12시간까지는 방출점을 중심으로 서남서계열의 바람장이 나타나지만, 그 이후는 강한 북서풍이 나타난다. 또한 일본의 남단에서는 1월 6일 18시 이후부터 남서풍이 불고 있어 방출된 핵종이 대만의 남단에서부터 일본의 남쪽해역의 이동될 것이라는 것을 추론할 수 있다. 계산된 농도장의 분포를 보면 초기에는 중국 동쪽

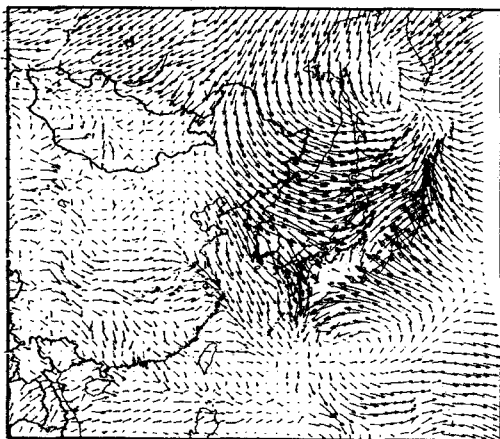
Wind fields on 2002.01.06: 6.0 1001.0 hPa



Concentration profiles on 2002.01.06: 6.0 70.0 m



Wind fields on 2002.01.08: 6.0 1001.0 hPa



Concentration profiles on 2002.01.06: 15.0 70.0 m

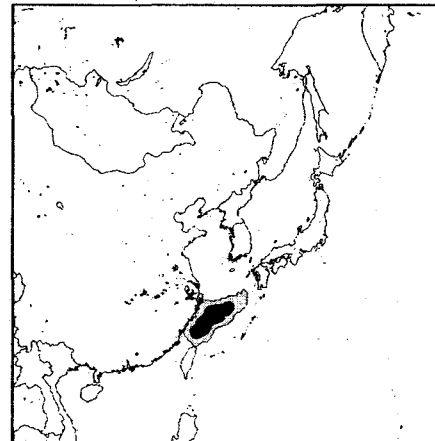


Fig. 3. The predicted wind vector from MM5 model.

Fig. 4. The calculated concentration profiles from dispersion model.

연안을 따라 이동하여 일본의 서쪽연안 까지 퍼져나간다, 이후 강한 북서계열의 바람으로 인해 대만쪽으로 이동한 후 일본 남단의 남서계열 바람을 만난후 점진적으로 일본 남동 근해 방향으로 이동함을 알 수 있다.

결론

대기중으로 방출된 오염물질의 장거리 이동·확산 평가를 위하여 장거리 대기 확산 수치모델을 개발하였다. 개발된 확산모델은 3차원 Lagrangian 입자 추적모델로 원전 사고를 대비하여 신속한 계산을 수행하여 주변 환경 및 국가에 미치는 방사선 영향을 정량적으로 평가할 수 있도록 구성되었다. 동북 아시아권을 대상으로 가상

의 원전 사고에 대하여 시험계산을 수행하여 주변 국가에 미치는 영향을 평가하여 보았다. 또 확산모델의 운영시 중요한 입력자료인 기상장의 기상 예보자료를 전 처리하여 확산모델에 연계하는 모듈을 작성하였다.

계산된 방사성물질의 농도분포는 바람장 분포에 따라 이동되었는데, 방출후 45시간 이후에 일본의 남쪽 해역에 방사능 운이 도달하였다. 본 연구의 시험계산에 의하면 중국 동쪽 연안의 원전 사고시 바람 분포에 의해 주로 대만과 일본의 남동 해역으로 방사성물질이 이동·확산되었다. 향후 중국에서 우리나라로 향하는 바람장이 나타나는 경우의 계산을 더 수행하여 우리나라에 미치는 영향을 평가하여야 할 것이고, 2주일 이상의 장기간 평가도 필요할 것으로 생각된다. 일차 개발된 장거리 대기 확산모델인 LADAS는 앞으로

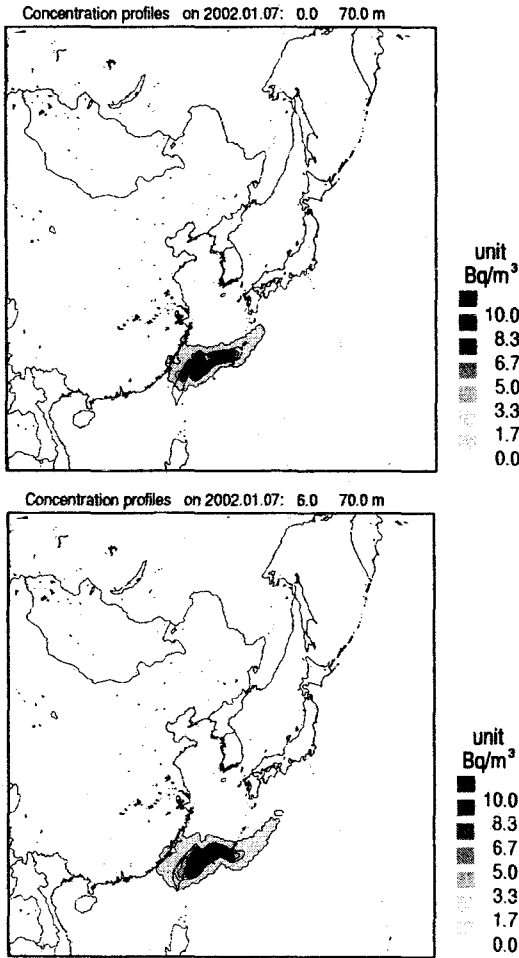


Fig. 4. Continued.

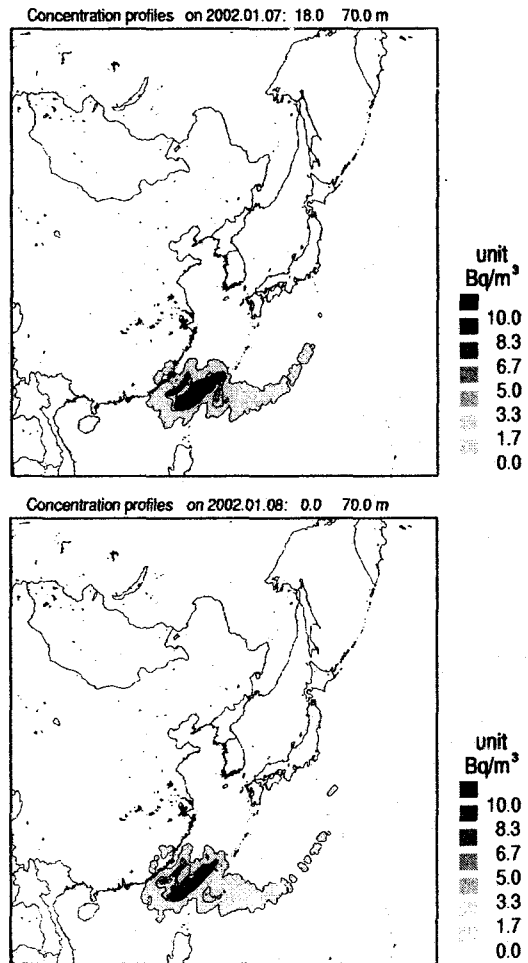


Fig. 4. Continued.

ETEX[16] 실험결과와 비교 및 다른 모델과 상호 비교를 통하여 모델을 검증하고 개선할 예정이다.

참고문헌

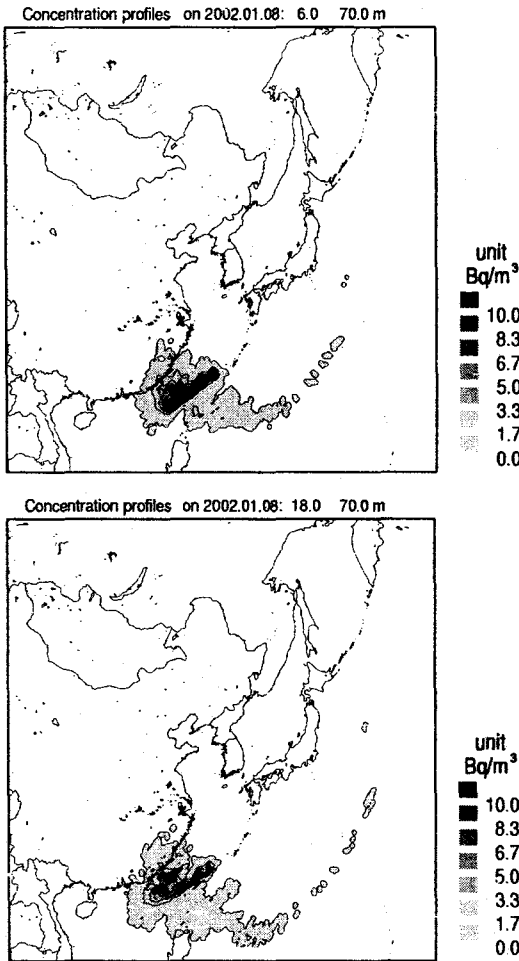


Fig. 4. Continued.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 지원한 원자력중장기과제 연구사업의 일환으로 수행되었습니다.

1. Lurmann, F.W., Lloyd, A.C. and Atkinson, R., "A chemical mechanism for use in long-range transport/acid deposition computer modeling," *J. Geophys. Res.*, 91, 10905-10936(1986).
2. Peters, L.K., Berkowitz, C.M. and Carmichael, G.R., "The current state and future direction of Eulerian models in simulating the tropospheric chemistry and transport of trace species : a review," *Atmospheric Environ.*, 29, 189-222(1995).
3. Veerabhadra, R., Kotamarthi, Gregory, R. and Carmichael, G.R., "A modeling study of the long-range transport of Kosa using particle trajectory methods," *Tellus*, 45B, 426-441(1993).
4. Lee, J.G., Kim, Y.H. and Kim, J.S., "A case study of the yellow sand phenomenon observed over the Korean peninsula for 1-3 April 1993," *J. Atmospheric Res.*, 10(1), 51-73(1993)
5. 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*, pp. 1-353, Elsevier Applied Science, London and New York (1992).
6. Mosca, S., Bianconi, R., Bellasio, R., Graziani, G. and Klug, W., *ATMESII- Evaluation of long-range dispersion models using data of the 1st ETEX release*, pp.1-457, Joint Research Center(1998).
7. 한국원자력안전기술원, 원자력 안전성 확보를 위한 네트워크 구성·운영, 한국원자력안전기술원, KINS/AR-704(1999).
8. 한문희, 김은한, 서경석, 황원태, 최영길, 방사선 비상대응 기술개발, 한국원자력연구소,

KAERI/RR-2034/99(2000).

9. Desiato, F., "A long-range dispersion model evaluation study with Chernobyl data," *Atmospheric Environ.*, 26A(15), 2805-2820(1992).
10. Raza, S.S., Avila, R. and Cervantes, J. "A 3-D Lagrangian stochastic model for the meso-scale atmospheric dispersion applications," *Nuclear Engineering and Design*, 208, 15-28(2001).
11. Grell, G.A., Dudhia, J. and Stauffer, D.R., A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model MM5, NCARTN-398(1995).
12. 정효상, 방사선 비상대응을 대비한 기상장 평가 기술 개발, 기상연구소, pp. 1-69(2000).
13. 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).
14. Gifford, F.A., "Horizontal diffusion in the atmosphere : a Lagrangian-dynamical theory," *Atmospheric Environ.*, 16(3), 505-512(1982).
15. McMahon, T.A. and Denison, P.J., "Empirical atmospheric deposition parameters," *Atmospheric Environ.*, 13, 571~585(1979).
16. European Commission, The *European Tracer Experiment*, Joint Rese. Center, EUR 18143 EN(1998).