

방사능 누출 사례일의 국내·외 라그랑지안 입자확산 모델링 결과 비교

Lagrangian Particle Dispersion Modeling Intercomparison : Internal Versus Foreign Modeling Results on the Nuclear Spill Event

김 철 회* · 송 창 근¹⁾

국립환경연구원 화학물질안전관리센터, ¹⁾서울대학교 지구환경과학부
(2002년 9월 13일 접수, 2003년 5월 14일 채택)

Cheol-Hee Kim* and Chang-Keun Song¹⁾

National Institute of Environmental Research

¹⁾*School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University*

(Received 13 September 2002, accepted 14 May 2003)

Abstract

A three-dimensional mesoscale atmospheric dispersion modeling system consisting of the Lagrangian particle dispersion model (LPDM) and the meteorological mesoscale model (MM5) was employed to simulate the transport and dispersion of non-reactive pollutant during the nuclear spill event occurred from Sep. 31 to Oct. 3, 1999 in Tokaimura city, Japan. For the comparative analysis of numerical experiment, two more sets of foreign mesoscale modeling system; NCEP (National Centers for Environmental Prediction) and DWD (Deutscher Wetter Dienst) were also applied to address the applicability of air pollution dispersion predictions.

We noticed that the simulated results of horizontal wind direction and wind velocity from three meteorological modeling showed remarkably different spatial variations, mainly due to the different horizontal resolutions. However, the dispersion process by LPDM was well characterized by meteorological wind fields, and the time-dependent dilution factors (χ/Q) were found to be qualitatively simulated in accordance with each mesoscale meteorological wind field, suggesting that LPDM has the potential for the use of the real time control at optimization of the urban air pollution provided detailed meteorological wind fields. This paper mainly pertains to the mesoscale modeling approaches, but the results imply that the resolution of meteorological model and the implementation of the relevant scale of air quality model lead to better prediction capabilities in local or urban scale air pollution modeling.

Key words : Intercomparison of atmospheric modeling system, Lagrangian particle dispersion model, Nuclear spill event

* Corresponding author

Tel : +82-(0)32-560-7344, E-mail : chkim@me.go.kr

1. 서 론

최근 컴퓨터 기술의 발달로 실시간 개념이 도입된 환경관리시스템이 많이 거론되고 있다. 외국의 경우 대기오염 측정망과 실시간 확산 모델링을 결합한 이러한 대기오염 종합관리 시스템의 연구는 매우 활발하며 (Peton *et al.*, 2000; Rauch and Harremoes, 1999) 그 활용 분야도 다양하여 각종 사업장에서의 대기 오염 예측 (Sharma and Khare, 2001, 2000; Vautard *et al.*, 2001) 뿐만 아니라, 유류 누출과 같은 해양오염 관리 (Elliott and Jones, 2000; Mooers, 1997), 그리고 각종 국가적 차원의 테러 및 재난방제 (Glaab *et al.*, 1998; Fay *et al.*, 1995) 등 매우 폭넓게 활용되고 있다. 이러한 실시간 모델링 시스템의 주요 목적은 예컨대 오염물질이 비정상적으로 배출되었거나 국가적인 비상사태가 발생할 때 실시간 모델링을 이용하여 신속히 이를 예측하여 그 피해를 최소화하는 데 있다 (Annika *et al.*, 2001; Brandt *et al.*, 2001). 국내에도 환경 문제를 실시간으로 확인, 감시할 수 있는 환경관리시스템에 대한 요구가 증가되고 있는 바, 이는 과거의 측정 자료를 통한 현황분석의 차원에서 벗어나 현재의 환경 변화를 실시간으로 파악하고 예측하는 미래지향적이고 능동적인 방향으로 그 대처 방법이 바뀌고 있음을 의미한다.

특히 방사능 누출사고는 생태계 등의 환경에 대한 피해뿐만 아니라 인체에 직접적인 피해를 끼치므로 외국에서는 특별한 감시 및 예측을 목적으로 비상대응모델링 시스템이 운영되고 있으며 (Galmarini *et al.*, 2001; Boreman, 2000; Saltbones *et al.*, 1998), 국내에서도 CARE (Computerized Technical Advisory System for the Radiological Emergency)를 구축, 비상사고에 대비를 하고 있다. 방사능 누출은 사고 후 인근 주민들의 대피로를 설정해 주어야 한다는 측면에서 3차원 바람장 모델 및 대기확산 모델이 그 핵심이 될 수 있다. 특히 지난 1999년 발생한 일본의 방사능 유출 사건은 대기 확산 모델의 실시간 운영의 중요성과 그 연구의 필요성이 제기된 중요한 사례로 보고되고 있으나 국내에서는 아직 비상대응을 위한 국지 기상모델과 대기확산 모델을 결합한 형태의 연구는 극히 드물어 향후 많은 연구와 투자가 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 실시간으로 운영이 가능하다고 판단되는 국내·외 3개국의 현업용 기상 예측모델과 라그랑지안 입자확산모델 (Lagrangian Particle Dispersion Model)을 결합시켜 1999년 일본의 방사능 유출 사례에 적용하였으며, 모의된 방사능 오염물질의 이동 및 농도분포 양상을 비교, 분석하였고 특히 국내 모델링 시스템의 향후 구축 방향에 필요한 사항들을 논하였다.

2. 사고의 개요 및 대기확산 모델

2.1 사고 개요

1999년 9월 30일 오전 10시 35분 일본에서의 첫 번째 임계사고 (Criticality Accident)가 이바라키현 토키이무라의 제이시오 (JCO)사의 토키이 공장의 핵연료 전환시설에서 발생하였다 (그림 1). 방사능 누출 규모 및 영향 범위 등은 정확히 알려지지 않았으나 사고 직후 JCO 직원들에 의해 측정된 전환시설 주변의 방사선 준위는 시간당 0.84 밀리시버트 (0.84 mSv/h)가 기록되었다. 이에 따라 시설 주변에 거주하던 150명 이상의 주민이 공공 건물로 대피하였으며, 일본 정부는 사고발생지점 (140.6°E, 36.5°N)으로부터 반경 10km 이내에 있는 9개 도시의 약 31만 주민들에게 옥내에 머무르도록 조치하

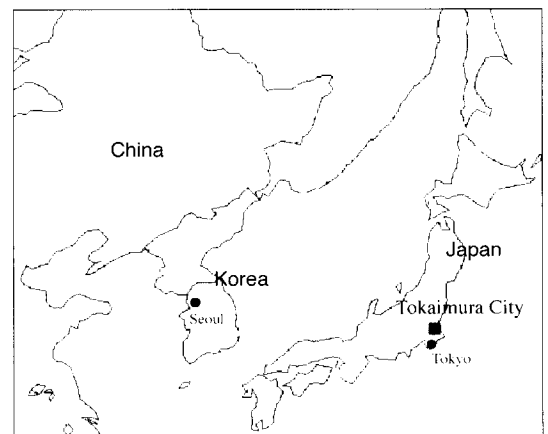


Fig. 1. The location of Tokaimura City, the place of a nuclear spill accident occurred on 30 September in 1999, Japan.

었다. 실제 방사능으로 피폭된 인명피해는 14명으로 알려져 있으며, 시설 외부의 반경 200 m 이내에 주민의 출입이 금지된 사건으로서 일본 뿐 아니라 국제적으로도 핵 안전에 대한 경각심을 불러 일으킨 사건으로 보고되었다(Imanaka, 2000; STA, 1999).

2.2 기상 모델 및 라그랑지안 대기확산 모델

방사능 물질과 같은 비반응 대기오염 물질을 모의하고자 할 때 3차원 바람장 및 난류장은 매우 중요하다. 즉 풍향은 오염물질이 어느 방향으로, 풍속은 얼마만큼 빨리 수송시킬 것인지를 척도가 되며 대기 경계층 내의 난류특성은 연직으로 얼마만큼 확산시키는지의 정도를 결정한다. 특히 대부분이 산악지역인 우리나라에서는 바람장의 구조 및 국지기상이 매우 복잡하므로 3차원 바람장 및 난류장의 정확성 여부는 확산 모델의 성능에 결정적 요인이 된다.

3차원 바람장은 관측 자료를 어떻게 이용하느냐에 따라 크게 진단적(Diagnostic) 방법과 예측적(Prognostic) 방법으로 구분되며 그 방법적 차이에 따라 모의되는 오염물질의 시간별 분포 양상도 현저히 다르게 나타날 수 있다(Giovannoni and Russell, 1995). 또 동일한 진단적 방법을 이용하더라도 수평적·직각적·어떻게 설정하느냐의 차이에 따라 혹은 분해능의 차이에 따라 모의되는 오염 농도의 분포도 크게 달라질 수 있으며(Kim and Ghim, 2002) 최근에는 보다 정확한 바람장의 생산을 위한 4차원 자료 동화 기법(Stauffer and Searman, 1990; Yamada et al., 1989)이 활용되어 예측 기술이 많이 향상되고 있다. 그러나 과거의 관측된 자료만을 이용하는 순수한 진단적 방법으로는 현재 및 미래까지 오염물질의 이동 및 확산을 파악할 수 없기 때문에, 양질의 관측자료로 적절한 자료동화 기법을 이용하여 정확한 초기 기상장을 산출, 기상 모델의 입력자료로 활용하는 예측적 방법이 방사능과 같은 유해물질의 확산 예측에 적합할 것이다.

대기 확산 모델은 크게 라그랑지안(Lagrangian) 방법과 오일러리안(Eulerian)방법으로 나눌 수 있는데 라그랑지안 방법은 오일러리안 방법의 단점, 특히 이류 방정식에서의 여러 문제점(심상규와 박영산, 1992)을 해결할 수 있을 뿐만 아니라 점 오염원에 대한 취급이 매우 편리하여 여러 배출된 오염물질이 격자 내에서 즉시 완전 혼합을 가정하는 오일

리리안 모델과는 달리 오염물질의 초기 확산을 실제와 가깝게 재현할 수 있는 장점이 있다(이종범, 1995). 라그랑지안 방법 중에서 특히 라그랑지안 입자확산 모델(Lagrangian Particle Dispersion Model: LPDM)은 대기오염물질을 연속적으로 배출되는 입자로 표현하며 각 배출된 입자들의 위치를 다음과 같이 결정한다(Park, 1994; Arritt, 1985; McNider, 1981).

$$X_i(t + \Delta t) = X_i(t) + (\bar{U}_i + u_i') \Delta t, (i = 1, 2, 3)$$

여기서 X_i 는 한 입자의 공간 위치, 즉 $(X_1, X_2, X_3) = (X, Y, Z)$ 를 나타내며, U_i 는 입자가 위치한 곳에서의 바람성분($U_1, U_2, U_3 = (u, v, w)$)을, u_i' 는 입자가 위치한 지역에서의 난류성분을, 그리고 Δt 는 시간 t 에서의 시간 변화 단계를 표시한다. \bar{U}_i 는 기상 모델에서 얻어지는 i 성분의 평균바람이고, u_i' 는 Markov 과정을 이용하여 계산하는 난류성분으로서 다음과 같이 주어진다.

$$u_i'(t + \Delta t) = R_{L,i}(\Delta t) \cdot u_i'(t) + (1 - R_{L,i}^2(\Delta t))^{1/2} \cdot u_i''(t)$$

여기서 $R_{L,i}$ 는 라그랑지안 i 바람 성분의 자기상관 함수로서 각 난류특성의 매개변수화를 통해 구해지며 $u_i''(t)$ 는 i 방향의 무작위 바람성분으로서 $u_i''(t) = N \cdot \sigma_{v,i}$ 로 계산된다. 이때 N 은 평균이 0이고 편차가 1인 정규분포의 무작위 수를, 그리고 $\sigma_{v,i}$ 는 i 바람 성분의 표준편차를 나타낸다. 그 외에도 연직 난류성분의 왜도(skewness) 등을 고려하는 모듈을 포함할 수 있다(Park, 1994).

라그랑지안 입자 모델은 먼 오염원의 처리 혹은 화학 반응을 적용하기 어렵다는 단점이 있으나 방사능 사고의 경우 발전소 주변을 점오염원으로 취급할 수 있고 화학 반응을 고려하지 않는 비반응 1차 오염물로 간주할 수 있어 라그랑지안 모델이 오일러리안 모델보다 정확도 면에서 더 우수하다고 할 수 있으므로 본 연구의 대기 확산 모델은 국내·외적으로 사용되는 라그랑지안 입자확산 모델을 선정, 일본의 토카이무라 지역을 대상으로 모델을 수행하였다. 특히 3차원 기상장은 실시간이라는 측면을 고려하여 주로 현업에 이용되는 국내·외 중규모 예측모델을 선정, 라그랑지안 입자확산 모델과 연동시켰다.

3. 모델의 선정 및 수행

3.1 국내모델

현재 국내의 중규모 기상 모델은 기상청의 자료 동화 체계를 갖춘 전구예보시스템(GDAPS; Global Data Analysis and Prediction System)과 MM5(Meso-scale Model Version 5)를 근간으로 하는 지역예보시스템(RDAPS; Regional Data Analysis and Prediction System)이 현업에 이용되고 있다(기상청, 1997). 그러나 GDAPS는 RDAPS의 초기 및 경계 조건을 제공하며 격자 간격도 110 km(혹은 55 km)로 성기계 구성되어 있다. 반면 RDAPS는 수평 격자 30 km로서 하루 두번(12시간 간격)의 자료 동화가 이루어지는 국내 유일의 지역규모 실시간 바람장 모델이다. RDAPS에서 채택한 MM5는 전 세계적으로 많이 사용되는 보편적인 수치예보 모델로서 AWS(Automatic Weather Station), 기상레이더 등 지역적 관측자료를 이용한 자료 동화기법이 가능하며 동지격자(nested grid)로 그 해상도를 높일 수 있는 비정역학(non-hydrostatic) 모델이다. 따라서 본 연구에서는 해륙풍 순환, 태풍의 강도, 산성비 예측 및 국지 규모 오염물질 수송 및 확산 예측에 필요한 meso β -규모의 기상 현상을 적절히 모의할 수 있는 기상청 RDAPS의 MM5 모델을 국내 기상장 모델로 사용하였다.

라그랑지안 대기 확산 모델은 서울대학교 대기경제층 실험실에서 개발한 LPDM(Park, 1994)이 본 연구에 사용되었다. 이 모델의 연직 좌표체계는 지형좌표(terrain following coordinate)이므로 MM5의 결과를 지형 좌표로 전환하여 사용하였으며 그 입력 변수로는 3차원 바람성분, 온도 성분 그리고 경계층 및 난류 관련 변수(대기 경계층 높이, 마찰 속도, 마찰 온도)가 사용되었다.

3.2 독일 기상청 모델

체르노빌 사고 이후, 독일 기상청(Deutscher Wetter Dienst; DWD)은 법령에 의하여 독일 비상대응 및 관리의 일환으로 방사능 물질의 수송, 확산 및 침적량을 예측하도록 하였다. 이를 위해 개발된 모델이 DWD 제척모델과 라그랑지안 입자확산모델(LPDM)이다(Fay *et al.*, 1995). 독일 DWD의 3차원 바람장

예측모델로는 전구모델인 GM(Global-Modell)을 비롯하여, 유럽 지역 대상인 EM(Europa-Modell) 그리고 독일 및 그 주변 영역만을 대상으로 하는 DM(Deutschland-Modell)이 현업에 사용되고 있다(Glaab *et al.*, 1998). EM은 정역학 중규모 모델(meso- α)인 기상 예측 모델로서 유럽과 북대서양을 주 대상으로 하며 초기 및 경계조건은 GM의 결과가 이용된다. 본 연구에서는 6시간 간격으로 자료 동화가 이루어지는 EM(수평격자간격 55 km, 20층)을 동아시아 영역으로 옮겨 수행하였다.

독일의 LPDM은 실시간 바람장을 이용하여 점오염원으로부터 배출된 10만개의 입자의 경로를 계산하여 방사능 오염물의 시간에 따른 농도 분포, 건설 및 습성 침적량을 계산한다(Glaab *et al.*, 1998; Fay *et al.*, 1995).

3.3 미국의 NCEP과 HYSPLIT_4

본 연구에 선정된 미국의 기상 모델은 NCEP에서 개발 운영하는 중규모 모델이다. 이 모델은 극평좌표(Polar Stereographic Grid)로 되어 있으며, 수평격자 분해능은 북위 60도에서 약 190.5 km 정도이며 연직으로는 13층의 등압면 좌표계로 구성되어 있다.

대기 확산 모델은 현재 미국 및 여러 국가에서 대기오염물질 방출 시 그 예측 및 평가에 널리 활용되고있는 모델인 NOAA/ARL(National Ocean and Atmospheric Administration/Air Resources Laboratory)의 HYSPLIT_4(HYbrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory model version 4) 모델이다. 이 모델은 NOAA/ARL에서 1980년 초반부터 개발을 시작하여 몇 차례 수정, 보완을 거쳐 현재 RSMC Washington, RSMC Melbourne의 비상 대응 모델로 이용되고 있다(Draxler, 1999, 1989, 1987). HYSPLIT_4는 입자의 이동 제척모형을 포함하고 있을 뿐만 아니라 라그랑지안 모델이면서 화학 반응도 고려할 수 있도록 설계된 것이 그 특징이다. 즉 라그랑지안 방법에 기초하여 수송·확산의 모든 과정을 계산한 후 오일러리안 프레임으로 전환하여 화학반응을 계산한 다음 다시 라그랑지안 프레임으로 환원하는 이른바 혼합형 모델이다(Draxler, 1999). 본 연구에서는 화학반응이 없는 비반응성 방사능 오염물을 다룬다는 측면에서 HYSPLIT_4 모델도 라그랑지안

모델로 간주할 수 있어 본 연구에 포함시켰다.

3.4 모델의 수행

이상의 국내·외 모델링 시스템은 위·경도, 126°E, 38°N을 중심으로 사고 지점(140.6°E, 36.5°N)이 충분히 포함되도록 그 영역을 설정하였다. 각 국내·외 기상모델의 격자 간격 및 물리 역학적 과정은 그대로 유지하였으며 모델 수행 기간은 1999년 9월 29일 12:00 LST부터 60시간 계산하였다. 시간적분 간격은 5초로 설정하였고 오염원의 배출은 1999년 9월 30일 10:35 LST 이후부터 배출하도록

하였다. 그러나 배출량에 대한 정량적 정보가 알려지지 않았기 때문에 누출 사고 이후 1단위의 방사성물질(가스상 물질)이 5초 간격으로 1시간동안 배출된 후 정지한 것으로 가정하였다.

4. 국내·외 모델링 결과 비교

4.1 국내 모델 결과

그림 2는 사고발생(9월 30일) 다음날인 10월 1일과 10월 3일의 지상 일기도이다. 일본열도 북쪽으로 처음 1일째에는 고기압대가, 2~3일째에는 저기압대가 자리잡고 있어서 사고 지점에서의 풍향은 약 3일 동안 북동풍 계열에서 남서풍 계열로 바뀌었다. 그림 3은 국내 중규모 모델인 MM5에서 예측한 지상 바람장을 나타낸 것이다. 지상 일기도와 비교하여 사고 당일 우세한 북동풍의 바람이 모의되었고 다음날 풍향이 순전(veering)하여 남서풍으로 바뀌고 있어 지상 일기도의 풍향 패턴(그림 2)과 유

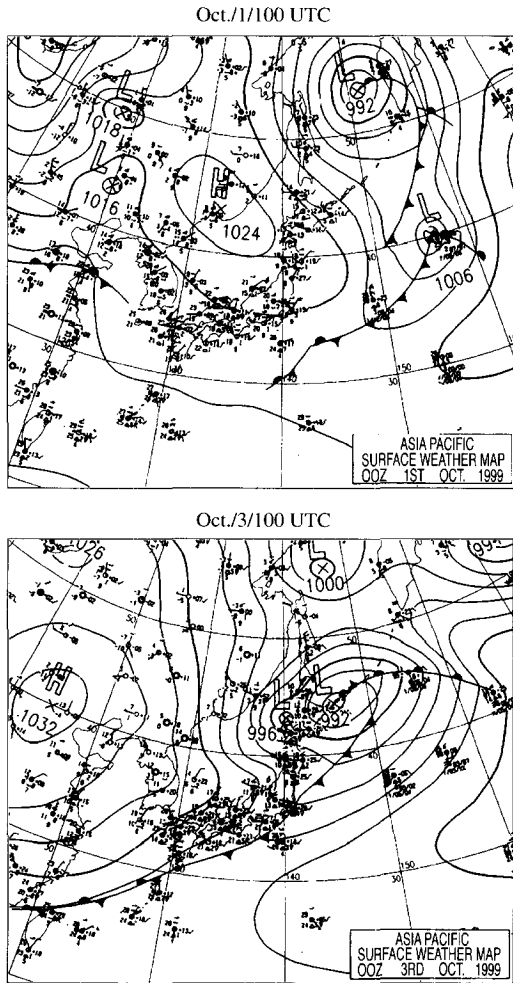


Fig. 2. The surface weather maps on 1 and 3 October, 1999.

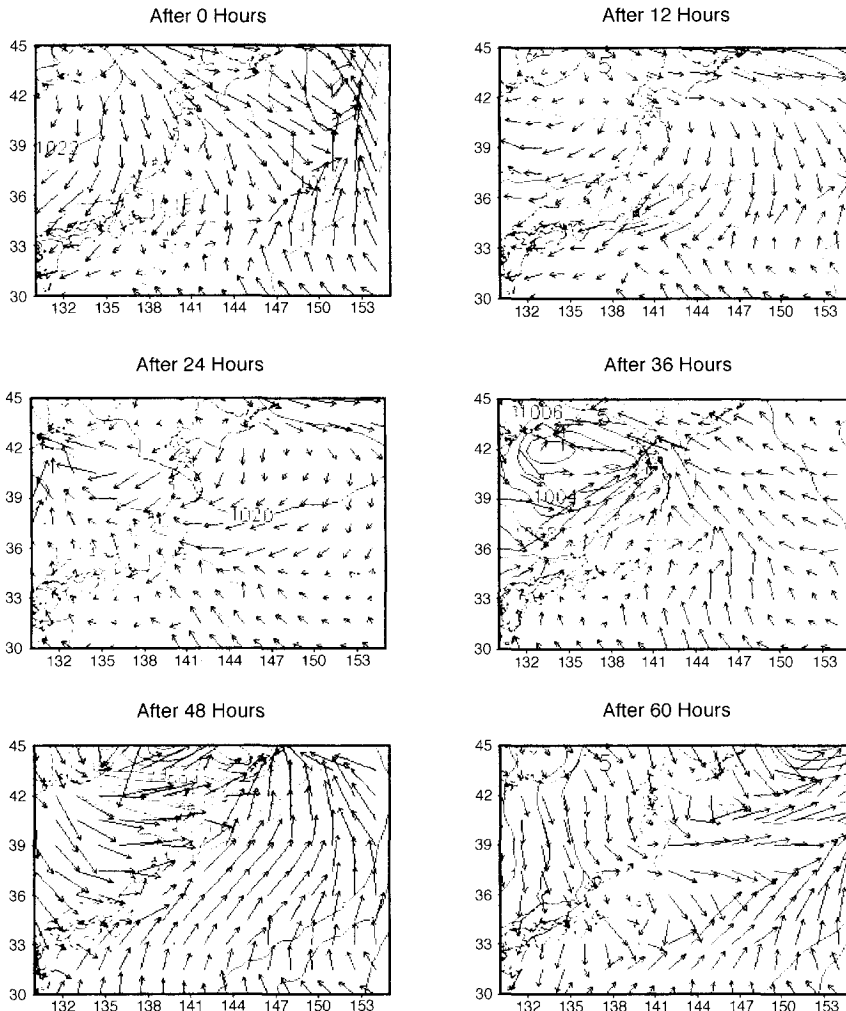
Table 1. Time variations of the maximum value of dilution factor (λ/Q) and its locations from the location of an accident.

Time (LST)	Max. λ/Q (sec/m ³)	x distance (km)	y distance (km)	Displacement from the source (km)
1.5	2.25×10^{-9}	6	-88	88
4.5	1.39×10^{-9}	-24	-208	210
7.5	3.69×10^{-10}	-114	-298	319
10.5	3.29×10^{-10}	-204	-358	412
13.5	4.18×10^{-10}	-264	-388	469
16.5	1.94×10^{-10}	-294	-418	511
19.5	1.30×10^{-10}	-414	-418	588
22.5	2.84×10^{-10}	-414	-448	610
25.5	3.57×10^{-10}	-414	-448	610
28.5	5.28×10^{-10}	-444	-448	631
31.5	7.17×10^{-10}	-444	-448	631
34.5	4.36×10^{-10}	-444	-418	610
37.5	1.90×10^{-10}	-444	-388	589
40.5	1.25×10^{-10}	-414	-328	528
43.5	2.32×10^{-10}	-354	-268	444
46.5	7.32×10^{-11}	-174	-178	249
49.5	8.67×10^{-11}	-84	-88	121
52.5	7.35×10^{-11}	6	32	32
55.5	5.44×10^{-11}	156	92	181
58.5	4.32×10^{-11}	306	122	330
61.5	2.79×10^{-11}	456	152	481
64.5	2.51×10^{-11}	546	152	567
67.5	1.68×10^{-11}	666	182	691

사하였다. 그러나 지상 일기도에 비해 평균 풍속이 상대적으로 강하게 모의되었음이 확인되었다.

그림 4는 국내 LPDM에 의해 모의된 지표면 상대 농도 (χ/Q ; concentration normalized by emission rate, sec/m^3)를 나타낸 것이다. 여기서 χ 는 지상 농도, Q 는 배출율을 의미한다. 사고 지점에서 방출된 플룸은 일본열도 남쪽 해안선을 따라 남서진 하다가 사고 시점 2일째부터 북동진하여 3일째에는 일

본열도 동쪽 태평양으로 빠져나가고 있으며, 이 결과는 그림 3의 바람 패턴으로부터 잘 설명된다. 확산의 효과는 플룸의 형태가 1~2일째에는 동서남북 4 방위로 확산이 원활히 이루어졌으나 3일째부터는 플룸의 남북방향 확산이 제한되어 그 형태가 띠 모양으로 나타났는데 이는 평균풍을 따라 북서진하는 플룸이 해안지역의 바람 수렴대 (convergence zone)에 위치하게 되어 북동-남서 방향으로만 길게 나



5

Fig. 3. Time variations of horizontal patterns of surface wind and pressure fields at the ground level from September 30 to October 3, 1999.

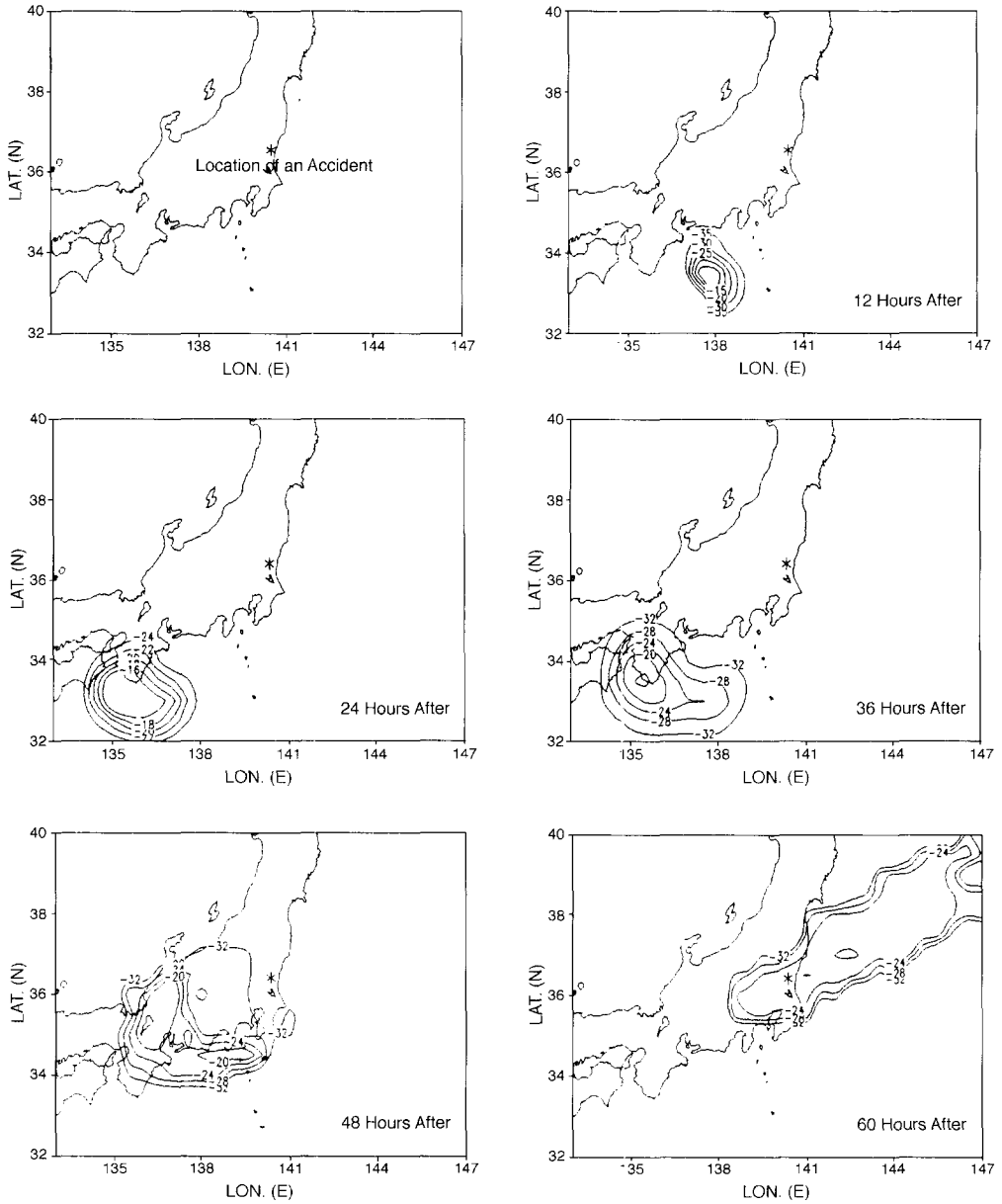


Fig. 4. Time variations of the simulated horizontal distributions of dilution factors (X/Q : surface concentrations normalized by emission rate) at the ground level.

타나는 형태를 보였다(그림 3).

표 1은 국내 모델에 의해 모의된 지상 상대 농도 (X/Q)의 최대 값과 그 위치를 배출원에서의 변위 (displacement)로 나타낸 것이다. 지상 최대농도(X/Q)

는 24시간 후에는 약 $3 \sim 8 \times 10^{-10} \text{sec/m}^3$ 의 농도를, 그리고 48시간 이후부터는 이보다 약 10배 가량 더 낮게 모의되었고 그 위치는 남서쪽 최대 631km까지 이동한 후 방향을 바꾸어 최대 691km까지 북동

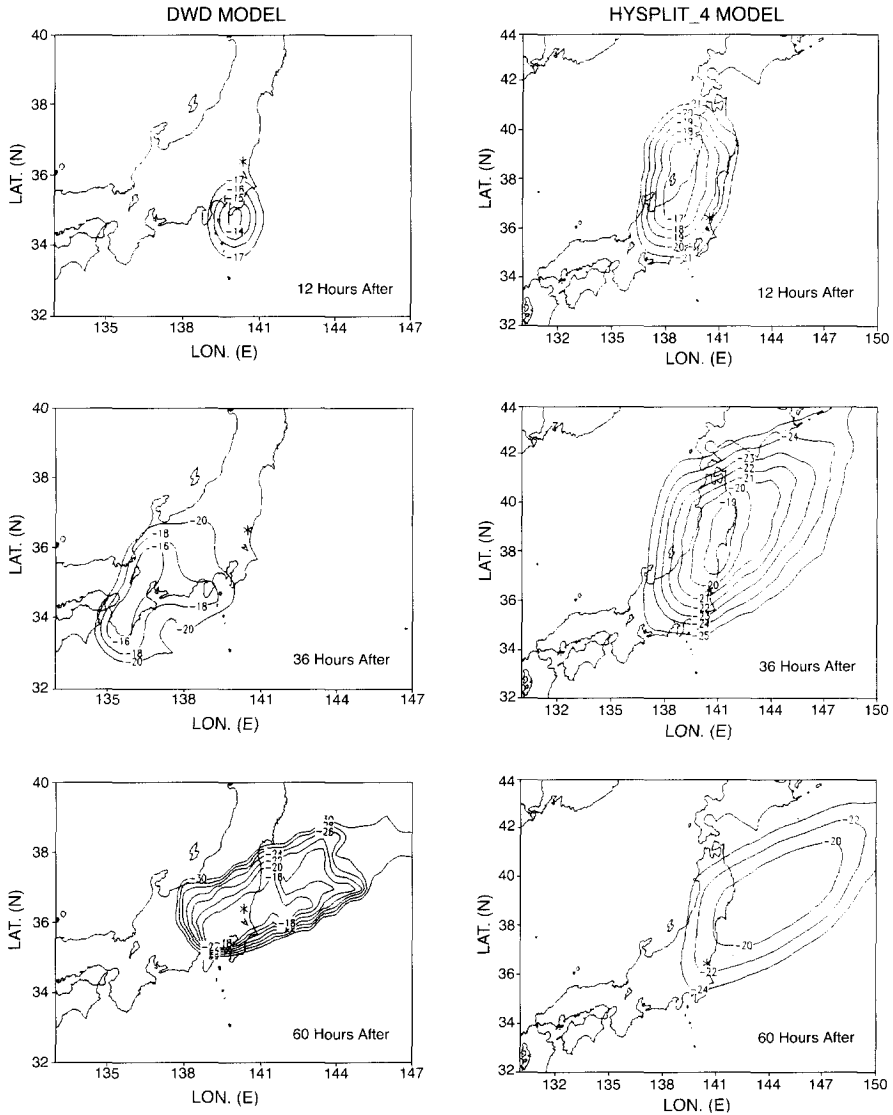


Fig. 5. Time variations of the simulated horizontal distributions of dilution factors (λ/Q : surface concentrations normalized by emission rate) at the ground level simulated by DWD model (left) and HYSPLIT_4 (right).

진하였다.

4.2 국내·외 모델링 결과 비교

독일 모델에 의해 예측된 바람장 역시 국내와 비슷하게 일본을 중심으로 북동풍 후 남서풍으로 전환되는 패턴이 모의되었으나 평균 풍속을 포함한 국지 순환의 강도는 국내 모델에 비해 약하게 모의

되었다. 반면 NCEP 모델에서는 이러한 대기 순환이 아예 모의되지 않았으며 전체적인 공간 패턴도 국내 및 독일의 모델과 비교하여 현저히 다르게 나타났다. 이는 국내 및 독일의 기상장 모델이 상대적으로 높은 공간해상도(국내: 30 km, 독일: 55 km)를 가지고 있으며 초기 입력자료 또한 국내 모델의 경우 상대적으로 더 상세하여 우리나라를 포함한 일본

전역의 시·공간적인 중규모 바람패턴의 변화를 보다 잘 모의하였음을 시사한다. 반면 NCEP 모델은 자료 동화에 있어 종관 기상 관측망으로만 이루어질 뿐만 아니라 격자 간격도 커서 한반도와 같은 시간 및 공간적 규모가 작은 기상 현상을 모의하기에는 매우 부적절하였다.

그림 5에 독일의 LPDM 및 NCEP의 HYSPLIT_4에 의해 모의된 지표면 상대농도(χ/Q) 패턴을 도시하였다. 독일 모델은 사고 지점에서 배출된 플룸이 남서쪽으로 이동한 후 다시 북동쪽으로 전향하는 등 그 진행방향이 국내 LPDM과 유사하였고 전체적인 플룸의 확산 형태도 시간에 따라 남북방향으로 제한되는 등 그 특징이 비슷하였다. 그러나 플룸의 이동 속도는 국내 모델에 비해 느리게 나타났는데 이는 독일의 EM모델이 지표면 부근의 풍속을 계산할 때 산악 지형에서의 Blocking이라 부르는 감속과정을 고려하는 물리과정이 포함하고 있기 때문으로 분석된다. 최근 독일 DWD에서는 모델의 민감도 실험을 통해 Blocking에 의한 감속 과정이 지나치게 과장되어 있음을 밝혀내었고 이를 개선하여 운영하고 있음이 보고되고 있다(Jacobsen, 2002).

한편 NCEP모델에 의해 모의된 상대 농도 패턴의 특징은 모든 방향으로 확산이 고르게 일어났으며 국지풍에 의하여 플룸의 확산이 남북으로 제한되는 현상 등은 모의되지 않았고, 독일 및 국내 모델에 비해 그 플룸의 이동 및 공간 분포가 현저히 다르게 모의되었다(그림 5).

플룸의 이동 경로를 비교하기 위해 국내·외 모델을 통해 지표면에서 방출된 입자의 전방궤적을 계산하였다(그림 6). 그 결과 국내 모델에서는, MM5를 통해 모의되는 풍속이 상대적으로 강하여 일본 오사카 근해까지 남하하였고 이 후 약하게 동진한 다음 다시 남서풍의 강한 국지풍에 의해 빠르게 북동진하였다. 반면 독일 모델에서는, 입자 방출 후 초기에 모의되는 북동풍의 풍속이 상대적으로 약하여 남하 거리가 상대적으로 짧게 나타났으며 그 후 동풍 계열의 바람에 의해 서진하다가 36시간 이후 남서풍의 바람에 의해 북동진하였다. 그러나 그 이동 속도는 국내 모델에 비해 약 1.5배 정도 느리게 나타났다. 반면 HYSPLIT_4에서 계산된 궤적은 일본 열도를 따라 계속 북진 혹은 북동진하여 독일 및 국내 모델의 결과와 현저한 차이를 보였다(그림 6).

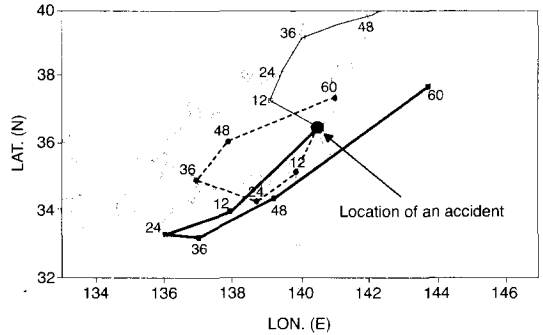


Fig. 6. The results of forward trajectory analysis from the Internal modeling system (heavy solid line), DWD modeling system (dotted line), and HYSPLIT_4 (solid line).

이상을 요약하면 국내 및 독일 모델 결과는 플룸의 수송 및 확산 양상이 서로 유사하였으나 플룸의 최고 이동 거리 및 전향점에서의 동서방향의 이동은 다르게 모의되었다. 즉 독일모델은 느리게 남진한 후 24시간 이후에 서진, 그 후 북동진한 반면 국내 모델은 빠르게 남진, 그 후 약하게 동진, 그리고 북동진하는 이동경로의 차이를 보였다(그림 6). 그러나 국지적 대기의 순환 패턴을 모의하지 못하는 기상장이 사용된 HYSPLIT_4 모델 결과는 그 분해능의 차이로 인해 플룸의 이동 형태가 국내 및 독일의 모델과 현저히 다른 결과를 초래하였다.

5. 모델의 검증 및 토의

현실적으로 3차원 기상장이 얼마나 정확한지를 평가하기 위해서는 사고 지점을 중심으로 관측된 바람장과 기상 모델에서 모의되는 바람장을 비교하여 한다. 사고 이후부터 약 일주일동안 토카이무라(사고지점)에서 관측된 풍향·풍속(70 m 고도)과, 사고지점으로부터 남서쪽 약 60 km 떨어진 Tsukuba에 소재한 일본 기상연구소(MRI: Meteorological Research Institute)에서 한시간 간격으로 관측된 풍향·풍속(100 m 고도)이 보고되었다(그림 7) (Igarashi *et al.*, 2000). 그림 7에서 알수 있듯이 사고 시점(9월 30일 10시)에서는 북서풍 계열이 우세하나 이후 북동풍 계열로 순전하였다. 그러나 사고 후 약 36시간

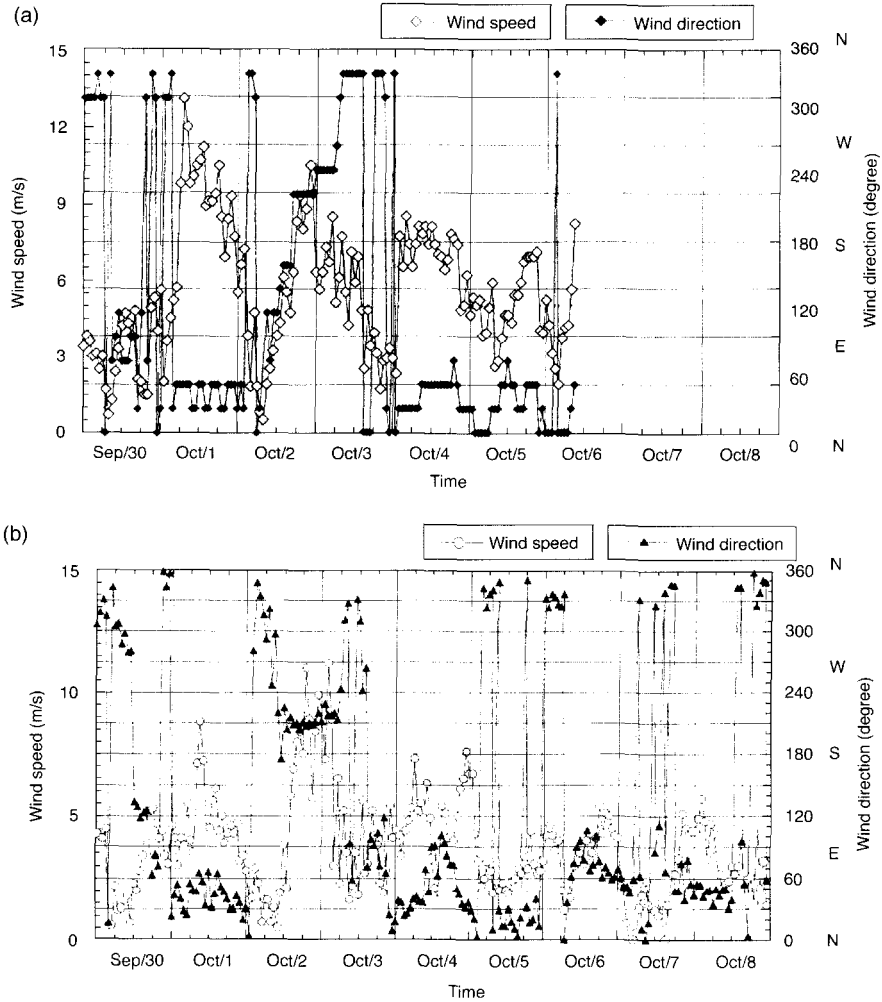


Fig. 7. a) Wind speed and direction observed at the meteorological observation tower a) at the JNC, Tokaimura city (hourly average at 70 m height) and b) at the MRI, Tsukuba (hourly average at 100 m height) (Igarashi et al., 2000).

이후인 10월 2일부터는 서풍 계열로 바뀌어 플룸의 이동 방향이 반전되었음을 알 수 있고, 이러한 풍향의 특징은 그림 6에 제시된 국내 및 독일 모델의 궤적 분석 결과와 대략 일치하고 있다.

평균 풍속은 사고 지점에서 10월 1일 10 m/s가 넘는 강한 풍속이 현지에서 관측되었고 일본 MRI에서도 주간의 최고 풍속이 약 5 m/s를 상회하였다. 이를 그림 3의 지상의 바람장과 비교해 볼 때 국내 기상 모델의 풍속은 그림 7의 관측치보다 확실히 높게 모의되었음을 알 수 있다. 그 결과 국내 모델

에 의해 모의된 플룸의 이동거리는 사고 지점으로부터 최대 약 500~600 km로서, 독일 모델인 약 300~400 km에 비해 약 1.5배 정도 더 남하하여 나타났다(그림 6). 이 거리는 평균 5 m/s의 속도로 대략 30시간동안 이동한 거리(≈ 540 km)에 해당하므로 현지에서 관측된 그림 7의 풍속(5~10 m/s)만으로 평가해 볼 때 독일모델보다는 국내 모델이 더 설득력있는 결과가 될 수 있다. 그러나 NCEP모델에서는 격자 간격(190 km)이 너무 소하여 이러한 국지적 바람 구조를 재현하지 못하였고 대규모 시

시스템에 의한 주풍 패턴만 나타낼 뿐 지역적 특성이 나 국지풍의 영향을 고려할 수 없었다.

일반적으로 국지규모 기상 현상을 모델을 통해 재현하고자 할 때 그 수평 분해능과 관련하여 격자 간격이 매우 큰 경우 실제 대기의 파동의 전파속도가 편미분 방정식의 해법에 의해 실제보다 느리게 진행되는 현상, 즉 상 오차(Phase error)를 유발하게 된다. 이 경우 설정된 적분시간간격(Integral time scale)에 비해 그 수평 분해능이 높을수록 실제에 가까운 대기의 파동 속도를 재현할 수 있다. 이러한 상 오차를 극복하고 대기의 파동을 실제에 가깝게 재현하기 위해서는 최소 8개 이상의 격자로 대기의 파장을 기술하여야 한다(Washington and Parkinson, 1986). 따라서 수평 분해능의 크기가 약 190 km인 NCEP 모델을 이용할 경우, 플룸의 전향점까지의 거리인 약 500 km 내외의 파장에 대한 국지적인 현상을 모의하는 데는 한계를 가질 수밖에 없음을 확인할 수 있다.

한편 확산 모델의 검증은 위해서는 사고 시 정확한 배출량이 확인되어야 하는데, 본 연구에서는 Mitsugashira *et al.* (2000), Imanaka (2000)에 의해 보고된 사고 지점에서의 방사능 배출량(Q) 추정값을 토대로 라그랑지안 확산 모델을 검증하였다. 즉 라그랑지안 입자확산모델에 의해 계산된 지표면 상대 농도(χ/Q)와 보고된 배출량 자료를 이용하여 정량적인 대기중 농도값을 산출하고 그 결과를 Tsukuba에서 측정된 방사능 물질의 농도와 비교하였다.

공식적으로 보고된 누출량은 반감기가 긴 방사능 물질인 ^{85}Kr (반감기: 11년)의 경우 1.48×10^7 Bq로 추정되었다(Imanaka, 2000; Mitsugashira *et al.*, 2000). 이 배출량과 사고 지점의 국지 기상 입력자료를 토대로 간단한 가우시안 확산 모델을 적용하여 사고지점에서 약 60 km 남서쪽에 위치한 Tsukuba에서의 추정된 ^{85}Kr 의 농도는 1 mBq/m^3 이하이며(Igarashi, 2000) 실제 Tsukuba에서 측정된 ^{85}Kr 농도는 평균의 배경농도($1.3 \sim 1.4 \text{ Bq/m}^3$)의 약 10%에 해당하는 100 mBq/m^3 의 초과 농도가 측정되었다(Igarashi, 2000; Imanaka, 2000; Mitsugashira *et al.*, 2000). 이 초과 농도를 모두 토카이푸라 사고에 의한 것으로 단정하기는 어려우나 현재로서는 모델의 결과를 평가할 수 있는 유일한 자료이므로 이상의 보고된 현지 관측자료와 본 연구의 모델결과를 서로 비교할 수

있다.

표 1에 의하면 국내 모델에 의해 모의된 사고지점에서 남서쪽 500 km 이상(약 588~631 km) 떨어진 지점에서 상대 농도(χ/Q)의 최대값은 약 $1.30 \times 10^{-10} \sim 7.17 \times 10^{-10} \text{ sec/m}^3$ 로 나타났다. 이때 공식 보고된 ^{85}Kr 의 누출량(매초 1.48×10^7 Bq)을 이용, 실제 농도(χ)를 산정해 보면 약 $2.0 \sim 10.6 \text{ mBq/m}^3$ 의 농도가 산출된다. 이 값은 사고지점에서 Tsukuba에 소재한 일본 MRI에서의 가우시안 모델로 추정(Igarashi, 2000)한 결과($\leq 1 \text{ mBq/m}^3$ 이하)와 실제 측정된 농도(100 mBq/m^3)사이의 범위에 모두 놓이게 된다. 따라서 비록 정량적인 검증은 아니지만 라그랑지안 입자 모델에 의해 모의된 농도는 측정된 농도와 충분히 비교할만한 결과를 보였으며 이를 통해 현 연동된 기상 모델 및 라그랑지안 입자 확산 모델의 정확성을 간접적으로 확인할 수 있었다.

6. 요약 및 결론

일본의 방사능 누출 사고 지점을 대상으로 현업으로 실시간 모델링이 가능하다고 판단되는 국내·외의 3국가의 모델링 시스템(실시간 기상장 모델과 라그랑지안 입자확산 모델을 연동)을 적용, 그 결과를 서로 비교 분석하였다. 선정된 현업용 기상모델은 국내 모델은 기상청 중규모 MM5를, 국외 모델로는 미국 NCEP의 중규모 기상 모델과 독일 기상청에서 운영되는 실시간 중규모 예보 모델(EM)이다.

먼저, 국내·외 중규모 기상 모델의 결과는 각 모델의 수평 분해능의 차이에 따라 국지순환의 패턴이 현저히 다르게 나타났으며 그 중 공간 분해능이 상대적으로 좋은 국내의 MM5와 독일의 결과가 NCEP 모델보다 훨씬 상세히 가솔철 이동성 고저기압의 패턴을 모의하였다.

대기확산 모델링 결과는 국내·외 모델 모두 모의된 바람장에 의해 크게 좌우되었음을 확인하였다. 국내 및 독일의 모델링 결과는 사고 당일부터 1~2일째까지는 방사능 플룸의 모양이 대체로 동서남북 모두 확산이 원활하였고 3일째부터는 바람의 방향이 순전하여 남서풍의 방향으로 전환, 북동진하였다. 이 때 북동진하는 플룸이 바람의 수렴지역을

통과하면서 동서방향의 확산으로만 제한되는 양상을 확인할 수 있었다. 그러나 국내 모델의 경우 풍속이 다른 모델에 비해 상대적으로 강하게 모의되어 플룸의 이동 속도가 독일에 비해 빠르게 나타났다. 또 추정된 방사능 배출량(Q)을 토대로 모델에 의해 계산되는 지표 농도값을 일본 MRI에서 측정된 ⁸⁵Kr의 정량적인 농도와 비교해 본 결과 매우 유사한 결과를 보여 국내 모델링 시스템의 정확성을 어느 정도 확인할 수 있었다.

본 연구는 특정 기간의 중규모에 현상에 국한된 사례에 불과하지만 이상의 결과로부터 라그랑지안 입자 확산 모델의 유용성과 기상 입력자료의 중요성을 재확인 할 수 있었다. 특히 기상모델은 모의하고자 하는 대기 오염물질의 규모와 특성을 잘 파악하여 이를 분해할 수 있는 적절한 규모의 모델을 선정하는 것이 우선 중요할 것이다. 최근 국내 여러 국지 규모 및 도시 규모(혹은 그 이하의 규모)의 환경오염문제에 적절히 적용할 수 있는 높은 해상도의 예측 기상 모델 및 대기 확산 모델의 중요성이 더욱 커지고 있고 또 최근의 비약적인 컴퓨터의 발달로 병렬 처리 기법을 이용한 컴퓨터가 상용화되는 추세에 힘입어 과거의 관측자료에 의한 진단적 바람장 모형 대신 상세규모 예측 바람장 모델의 상시적 운영이 가능해지고 있다. 따라서 이러한 종합 모델링 시스템의 운영 기술에 대한 연구 및 투자가 앞으로 계속 필요할 것으로 보이며 이 경우 적합한 물리역학과정을 가진 기상 모델의 선정, 규모에 적절한 분해능의 문제가 간과되어서는 안될 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

기상청 (1997) 96년도 기상청 수치예보 검증. 기상청 수치예보과 기술보고서, 97-1.
 심상규, 박영산 (1992) 대기오염 모델에서의 이류 방정식에 대한 수치적 방법의 비교. 한국대기보전학회지, 8(3), 162-168.
 이종범 (1995) 우리나라에 적합한 국지확산 모델의 개발 방향. 한국대기보전학회지, 11(1), 15-28.
 Annika, P., T. George, P. George, N. Konstantinos, D. Costas, and C. Koutitas (2001) The Poseidon operational tool for the prediction of floating pollutant trans-

port. Marine Pollution Bulletin, 43, 270-278.
 Arritt, R.W. (1985) Numerical studies of thermally and mechanically forced circulations over complex terrain. Ph. D. dissertation, Dept. Atmos. Sci., Colorado State University, Fort Collins.
 Boreman, J. (2000) Surplus production, compensation, and impact assessments of power plants, Environmental Sciences & Policy, 3, S445-S449.
 Brandt, O., J.H. Christensen, L.M. Frohn, F. Palmgren, R. Berkowicz, and Z. Zlatev (2001) Operational air pollution forecasts from European to local scale, Atmospheric Environment, 35(1), S91-S98.
 Draxler, R.P. (1987) Sensitivity of a Trajectory model to the spatial and temporal resolution of the meteorological data during CAPTEX, J. of Climate and Applied Meteorology, 26(11), 1577-1588.
 Draxler, R.P. (1989) Overview and preliminary results from the across North America Experiment (ANATEX), 6th Joint Conference on Application of Air Pollution Meteorology.
 Draxler, R.P. (1999) HYSPLIT_4 user's guide, NOAA-Air Resources Laboratory.
 Elliott, A.J. and B. Jones (2000) The need for operational forecasting during oil spill response, Marine Pollution Bulletin, 40(2), 110-121.
 Fay, B., H. Glaab, I. Jacobsen and R. Schrodin (1995) Evaluation of Eulerian and Lagrangian atmospheric transport models at the Deutscher Wetterdienst using ANATEX surface tracer data, Atmospheric Environment, 29, 2485-2497.
 Galmarini, S., R. Bianconi, R. Bellasio, and G. Graziani (2001) Forecasting the consequences of accidental releases of radionuclides in the atmosphere from ensemble dispersion modelling, J. of Environmental Radioactivity, 57, 203-219.
 Giovannoni, J. and A. Russell (1995) Impact of using prognostic and objective wind fields on the photochemical modelling of thens, Greece. Atmospheric Environment, 29(24), 3633-3653.
 Glaab, H., B. Fay, and I. Jacobsen (1998) Evaluation of the emergency dispersion model at the Deutscher Wetterdienst using ETEX data, Atmospheric Environment, 32(24), 4359-4366.
 Igarashi, Y., T. Mivao, M. Aoyama, K. Hirose, H. Sartorius, and W. Weiss (2000) Radioactive noble gases in surface air monitored at MRI, Tsukuba, before and after the JCO accident, Journal of Environmental

- Radioactivity, 50, 107-118.
- Imanaka, T. (2000) Neutron dose and power released by the JCO critically accident in Tokaimura, *Journal of Environmental Radioactivity*, 50, 15-20.
- Jacobsen, I. (2002) Personal communication.
- Kim, J.Y. and Y.S. Ghim (2002) Effects of the density of meteorological observations on the diagnostic wind fields and the performance of photochemical modeling in the greater Seoul area, *Atmospheric Environment*, 36, 201-212.
- Mitsugashira, T., M. Hara, T. Nakanishi, T. Sekine, R. Seki, and S. Kojima (2000) Passive gamma-ray spectrometry for the determination of total fission events in the JCO criticality accident '99 in Tokai, *Journal of Environmental Radioactivity*, 50, 21-26.
- McNider, R.T. (1981) Investigation of the impact of topographical circulations on the transport and dispersion of air pollutants. Ph.D Dissertation, Dept. Envir. Sci., Univ. Virginia Charlottesville.
- Mooers, C.N.K. (1997) South Florida oil spill research center, *Spill Science & Technology Bulletin*, 4(1), 35-44.
- Park, S.-U. (1994) Estimation of non-reactive pollutant concentration using the Lagrangian particle dispersion model, *J. Kor. Meteor. Soc.*, 30(1), 1-20
- Penton, N., G. Dray, D. Pearson, M. Mesbah, and B. Vuillot (2000) Modeling and analysis of ozone episodes, *Environmental Modelling & Software*, 15, 647-652.
- Rauch, W. and P. Harremoes (1999) Genetic algorithms in real time control applied to minimize transient pollution from urban wastewater systems, *Water Res.*, 33, 1265-1277.
- Saltbones, J., A. Fodd, and J. Bartnicki (1998) Norwegian meteorological institute's real-time dispersion model snap (severe nuclear accident program) : Runs for ETEX and ATMES II Experiments with different meteorological input, *Atmospheric Environment*, 32(24), 4277-4283.
- Sharma, P. and M. Khare (2000) Real-time prediction of extreme ambient carbon monoxide concentrations due to vehicular exhaust emissions using univariate linear stochastic model, *Transportation Research Part D*, 5, 59-69.
- Sharma, P. and M. Khare (2001) Short-time, real-time prediction of the extreme ambient carbon monoxide concentrations due to vehicular exhaust emissions using transfer function-noise model, *Transportation Research Part D*, 6, 141-146.
- STA (1999) About the criticality accident of JCO Tokai works. Reference material 1 at the 66th meeting of the Nuclear Safety Commission on November 4, 1999, Science and Technology Agency, Japan.
- Stauffer, D.R. and N.L. Seaman (1990) Use of four dimensional data assimilation in a limited area mesoscale model. Part I: Experiments with synoptic data, *Mon. Wea. Rev.*, 118, 1250-1277.
- Vautard, R., M. Beekmann, J. Roux, and D. Gombert (2001) Validation of a hybrid forecasting system for the ozone concentrations over the Paris area, *Atmospheric Environment*, 32(24), 2449-2461.
- Washington and Parkinson (1986) "An introduction to three-dimensional climate modeling", Oxford University Press, New York.
- Yamada, T.C., C.-Y. J. Kao, and S. Bunker (1989) Airflow and air quality simulations over the western mountainous region with a four dimensional data assimilation technique, *Atmospheric Environment*, 23(3), 539-554.