Journal of Radiation Industry 15(1) : 71~78(2021)

Technical Paper

원자력사고에 대비한 방사선대응시스템의 국·내외 개발 현황

서경석[1,*] · 박기현[1] · 민병일[1] · 김소라[1] · 김지윤[1]

[1]한국원자력연구원 환경·재해평가연구부

Development Status of Radiological Preparedness System in Korea and Foreign Countries against a Nuclear Accident

Kyung-Suk Suh[1,*], Kihyun Park[1], Byung-Il Min[1], Sora Kim[1] and Jiyoon Kim[1]

[1]*Environment and Disaster Assessment Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 34057, Republic of Korea*

Abstract - Radiological emergency preparedness systems around the world have been developed to protect human and environment after the Chernobyl and Fukushima accidents. RAPS-K (Radiological Accident Preparedness System in Korea) has been also developed and constructed to evaluate the behavior of radionuclides released into atmosphere and ocean, and to estimate the following dose assessment. The system is composed of atmospheric dispersion, marine dispersion and dose assessment models, and GUI (Graphic User Interface) module. This study was introduced the characteristics of the radiological preparedness systems developed in some countries including Korea and presented the broad functions of the numerical models in RAPS-K. RAPS-K is constructed on the web to access it through an username and password. The described system is now in operation for government and nuclear-related organizations in Korea in preparation for a nuclear accident.

Key words : Radiological preparedness, Atmopsheric and marine dispersion, Dose Assessment, RAPS-K

서 론

1986년 구 소련의 체르노빌 원전 사고 후 세계 각국은 환경으로 누출된 방사성물질의 이동과 이에 따른 인간에 미치는 방사선영향 평가를 위하여 방사선비상대응 시스템을 개발하였다. 대표적인 시스템으로는 미국의 NRAC (National Atmospheric Release Advisory Center) (Nasstrom *et al*. 2007), 유럽공동체의 RODOS (Real-time On-line DecisiOn Support System) (Rojas-Palma *et al*. 2003) 및 일본의 WSPEEDI-II (Worldwide version of the System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information) (Terada and Chino 2008) 등이 있다. 우리나라에서는 방사선비상대응 시스템인 AtomCARE (Atom Computerized technical Advisory system for Radiological Emergency) (김 등 2008)와 대기로 누출된 방사성물질의 확산을 평가하는 LADAS (Lagrangican Atmospheric Dose Assessment System) (Suh *et al*. 2006)가 개발되었다.

2011년 일본 후쿠시마 사고 후 미국 국립대기해양국에서 개발한 HYSPLIT (HYbrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory) (Draxler 2003) 모델이 후쿠시마 사고로 대기로 누출된 방사성물질의 거동을 평가하기 위해 많

* Corresponding author: Kyung-Suk Suh, Tel. +82-42-868-4788, Fax. +82-42-868-8943, E-mail. kssuh@kaeri.re.kr

이 활용되었다(Kim *et al*. 2012; Li *et al*. 2015; Mészáros *et al*. 2016). 후쿠시마 원전사고 시 다량의 방사성물질이 대기와 해양으로 누출되었고, 특히 해양으로 직접 누출과 대기로부터 해수면에 침적된 방사성물질에 의해 일본 근해 및 태평양의 일부 해역이 오염되었다(UNSCEAR 2014). 당시 방사성물질의 대기와 해양 거동을 동시에 평가할 수 있는 시스템은 유럽에서 개발한 RODOS (Nanba *et al*. 2016)가 유일한 시스템이었고, 일본도 기존 개발된 해양확산모델(Kobayashi *et al*. 2007)과 연계하여 WSPEEDI-II에 대기 및 해양 확산을 동시에 평가할 수 있는 기능을 확장하였다(Kobayashi *et al*. 2017). 우리나라도 후쿠시마 사고 후 해양으로 누출된 방사성물질에 의해 우리나라 해역에 미치는 영향 평가가 중요한 문제로 대두됨에 따라 한국원자력연구원에서는 1단계 해양확산모델 LORAS (Lagrangian Oceanic Radiological Assessment System)를 개발하였다(Min *et al*. 2014). 이후 한국원자력연구원에서는 원자력사고 시 대기 및 해양으로 누출된 방사성물질의 거동 예측과 인체에 미치는 방사선영향을 평가하는 방사선방호 시스템 RAPS-K (Radiological Accident Preparedness System in Korea)를 구축하였다(서 등 2020).

본 연구에서는 각국에서 개발한 방사선 비상대응 시스템을 간략히 소개하고, 한국원자력연구원에서 개발한 방사선방호시스템의 주요 모델과 그 결과에 대하여 기술하였다.

재료 및 방법

체르노빌 및 후쿠시마 원전사고 후 외국 및 우리나라에서 개발한 대표적인 방사선비상대응 시스템에 관하여 간략히 그 특징을 기술하였다.

1. 미국 NRAC

NRAC 시스템은 원자력시설 사고 시 대기로 누출된 방사성물질의 거동 및 인체 위해도 평가를 위하여 미국 로렌스 리버모어 연구소에서 1996년 개발되었고, 이후 사용자 편의성을 위해 web상에서 시스템을 구현하도록 개선되었다(Bradley 2007). 대기확산의 평가 영역은 지역규모(100 km 내), 장거리(10,000 km 내) 및 지구규모에 대하여 평가가 가능하고, 기상자료는 자체적으로 생성할 수 있는 기상모델을 운영하거나 미국 국립해양대기국의 수치예보자료를 활용할 수 있다.

인체 위해도 평가를 통하여 원전사고 시 주변 주민의 대피, 소개 및 이주 등의 비상대응 행위를 결정할 수 있는 기능이 있고 선량평가에 기본 입력자료는 미국 환경보호청의 FGR (Fedral Guidance Report) 11과 12의 선량환산인자 자료를 활용한다.

2. 미국 HYSPLIT

HYSPLIT 모델은 미국 국립해양대기국에서 초기에는 황사, 일반 오염물, 중금속의 대기 환경 내 확산평가를 위하여 개발되었으며(Draxler 2003), 이후 방사성물질의 확산경로 평가가 포함되었고 2011년 후쿠시마 원전 사고 후 방사성물질의 대기확산평가 기능이 강화되었다. 이 시스템은 크게 대기누출 오염물의 궤적 추적, 공기 및 지표 침적 농도, 기상자료 연계모듈 및 GUI 모듈로 구성되었고, web 기반으로 시스템이 구성되어 사용자 등록 후 누구나 시스템을 이용할 수 있다. 시스템은 대기확산만 평가할 수 있는데, 기상수치예보자료는 미국 국립해양대기국에서 예보하는 전 지구 0.5도, 1도 자료와 미국지역에 해당하는 40 km 분해능의 자료와 연계되어 있다. 용자는 등록 후 사이트에서 접속하여 web 기반의 GUI로 구성되어 있는 메뉴를 선택하여 입력하고, 계산 수행 명령을 내리면 미국 국립해양대기국에서 운영 중인 서버에서 연산을 수행한 후 그 결과를 그래픽 형태로 볼 수 있도록 구성되어져 있다.

3. 유럽공동체 RODOS

체르노빌 원전 사고 후 유럽 각국은 자국의 국민과 환경을 보호하기 위하여 독일, 프랑스, 덴마크, 네덜란드, 러시아를 중심으로 비상대응시스템 RODOS를 개발하였다(Rojas-Palma *et al*. 2003). 지역규모(100 km 내) 대기확산모델은 덴마크, 장거리 대기확산모델(10,000 km 내)은 프랑스, 하천 및 호수 모델은 네덜란드, 연안 및 해양모델은 우크라이나가 개발하고, 기상 및 사회·환경자료와 피폭선량 평가는 독일이 담당하여 RODOS 시스템을 개발하였다. 현재 RODOS 시스템은 독일 칼스루헤 연구소에 설치하여 운영 중으로 시스템 활용을 원하는 유럽 국가는 web을 통하여 접속하여 시스템을 활용하고 있다.

4. 일본 WSPEEDI-II

일본은 체르노빌 원전 사고 후 자국민과 환경을 보호하기 위하여 대기확산 및 방사선 영향평가 모델 WSPEEDI를 개발하였다. 초기에는 장거리(10,000 km 내) 평가에 주안점을 두어 원전 사고 시 대기확산 평가를 수행하는 모델을 개발하고 이후 지구규모의 WSPEEDI-II를 개발하였다(Terada and Chino 2008). WSPEEDI-II의 초기 모델은 대기확산만을 평가할 수 있는 모델로 구성되었으나, 후쿠시마 사고 후 해양확산을 평가할 수 있는 기능이 추가되었다. WSPEEDI-II는 미국의 국립해양대기국의 초기 바람장을 이용하여 3차원 바람장을 재현하는 기상모델이 포함되어 있고, 해양순

Table 1. Functions of radiological emergency system (O: include, X: not include)

Function	USA	USA	EU	Japan	Korea (KINS)	Korea (KAERI)
Name	NRAC	HYSPLIT	RODOS	WSPEEDI-II	AtomCARE	RAPS-K
Air dispersion	O	O	O	O	O	O
Marine dispersion	X	X	O	O	X	O
Dose assessment	X	X	O	O	O	O
Trajectory	X	O	X	X	X	O
Waeather data	NOAA	NOAA	ECMWF	JMA	KMA	KMA
Oceanic current data	X	X	Mecartor, HYCOM	POM	X	KIOST, HYCOM
Mathematical formulation	Lagrangian/ Puff	Lagrangian/ Puff	Lagrangian	Lagrangian	Lagrangian	Lagrangian
Web open	O	O	X	X	X	O
Purchase	X	X	X	X	X	X

NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration
ECMWF: European Center for Medium-range Weather Forecasts
JMA: Japan Meterological Agency
KMA: Korea Meterological Administration
HYCOM: HYbrid Coordinate Ocean Model
POM: Princeton Ocean Model
KIOST: Korea Institute of Ocean Science and Technology

환자료는 교토대에서 개발한 해양모델을 이용하여 순환자료를 생산하여 비상대응 시스템에 연계하였다. 이 시스템은 현재 GUI로 구성되어져 있지 않고 단독 모델로 연산을 수행하도록 되어 있는데, 사용자 편의를 위하여 GUI 시스템으로 변환하여 구축 중이다(Kobayashi *et al*. 2017).

5. 한국 AtomCARE

한국원자력안전기술원에서는 국내 사고를 대비한 방사선평가 시스템 AtomCARE를 개발하여 운영 중이나(김 등 2008), 이 시스템은 대기확산 평가만 가능하고 해양 확산평가 모델이 포함되어 있지 않아 해양으로 방출된 방사성물질의 확산평가는 수행할 수 없다. AtomCARE는 주로 국내 원자력발전소를 대상으로 원전정보, 기상자료를 실시간으로 수집하고, 사고 시 원전 주변 반경 40 km 내 방사성물질의 공기 중 농도와 피폭선량을 계산하는 모듈을 포함하여 비상대응행위를 지원하는 모듈이 포함되어 있다. 현재는 동북아 규모로 평가영역을 넓혀 주변국 원전 사고 시 우리나라에 미치는 방사선영향을 평가할 수 있도록 개선되었다.

6. 한국 RAPS-K

한국원자력연구원에서 개발한 방사선방호시스템 RAPS-K는 크게 대기확산모델, 해양확산모델, 먹이사슬 모델과 피폭선량 평가모델 및 사용자 GUI로 구성되어져 있다(서 등 2020). 대기 및 해양 확산모델은 지역규모(100 km 내), 동북아시아 및 지구규모 영역을 평가할 수 있고, 대기모델에는 우리나라 기상청의 실시간 수치예보자료가 연계되어 있고, 해양확산모델은 한국해양연구원의 해양순환자료가 연계되어 있다. 환경으로 누출된 방사성물질에 의한 내부 및 외부 방사선량 평가모듈과 오염된 농수산물 섭취에 따른 섭취선량 평가모듈을 시스템내 구축하여, 방사성물질의 대기 및 해양 환경내로 확산 이후 인체 피폭선량 평가와 오염된 음식물의 섭취에 따른 위해도를 평가하는 모듈을 구축하였다. 현재는 web을 통하여 허가된 사용자만이 접속하여 계산을 수행한 후 계산결과를 직접 web상에서 보거나 그 결과를 다운로드할 수 있도록 구성되어져 있다.

이상 간략히 살펴본 각국의 대표적인 비상대응시스템내 포함되어 있는 기능에 관하여 Table 1에 나타내었다.

결과 및 논의

본 연구에서는 한국원자력연구원에서 개발하여 구축한 방사선방호시스템의 개요, 구성된 모델 및 검증결과에 대하여 간략히 서술하였다. Web 기반의 방사선방호시스템은 크게 대기확산, 해양확산, 피폭선량 모델 및 사용자 편의를 위한 GUI로 구성되었다(서 등 2020). 전반적인 시스템 구성도를 Fig. 1에 나타내었다.

1. 대기확산모델

지역규모(100 km 내), 동북아시아 및 지구규모 3차원 대기확산모델 LADAS (Lagrangian Atmospheric Dose Assess-

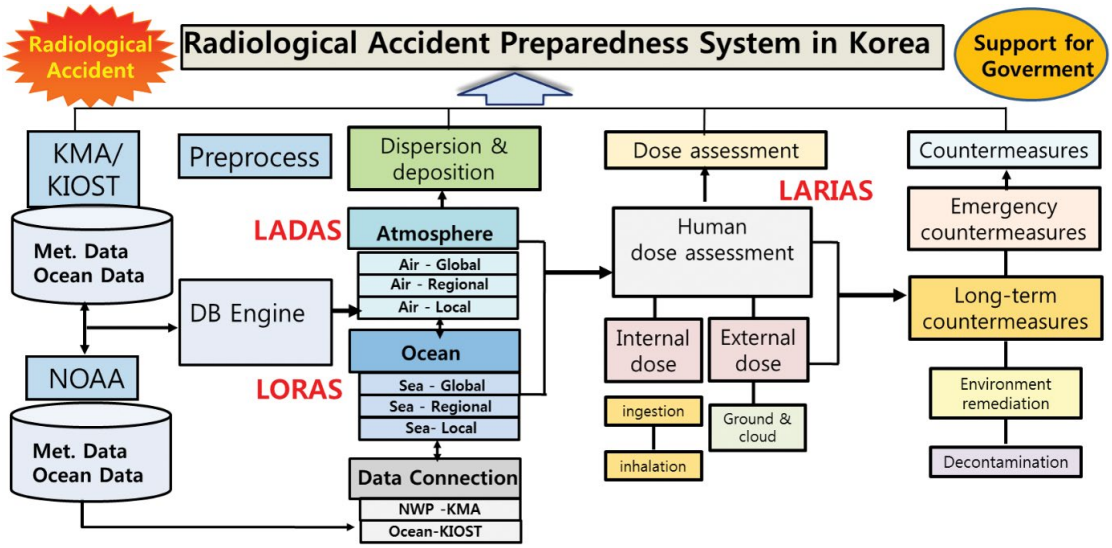

Fig. 1. Schematic diagram of RAPS-K.

ment System)는 라그란지안 입자추적모델에 기초한다(Suh *et al*. 2006). 대기확산모델은 전 세계 원자력시설 사고 시 신속한 계산을 위하여 가상의 입자(particle)를 대기 중으로 방출하여 그 궤적을 추적함으로써 농도분포를 계산하는 라그란지안 모델의 이론을 근간으로 하고 있다. 라그란지안 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. 자세한 수학적 표현은 기존 참고문헌에 기술하였다(Suh *et al*. 2006; Suh *et al*. 2009).

개발된 대기확산모델은 유럽의 장거리 대기확산실험 ETEX (European Tracer EXperiment)와 체르노빌 사고 시 유럽에서 관측된 자료와 비교하여 검증을 완료하였다(Suh *et al*. 2006; Suh *et al*. 2009). 또한, 후쿠시마 사고 시 대기로 누출된 방사성물질의 지구규모 확산평가를 수행하고 전 세계 일부 지역에서 관측한 방사성핵종의 농도 자료와도 비교·검증을 수행하였다(Suh *et al*. 2017). 후쿠시마 사고 시 대기로 누출된 방사성핵종의 관측자료와 계산값의 비교결과를 Fig. 2에 나타내었다(Suh *et al*. 2017). 대기확산모델은 우리나라 기상청에서 예보하는 지구규모 실시간 기상자료와 연계되어 전 세계 원자력시설의 비상상황 시 우리나라에 미치는 영향을 실시간으로 평가하도록 구성되어져 있다.

2. 해양확산모델

지역규모(100 km 내), 동북 아시아 및 지구규모 3차원 해양확산모델 LORAS (Lagrangian Oceanic Radiological Assessment System)은 라그란지언 입자추적모델에 기초한다(Min *et al*. 2014). 라그란지안 입자추적 모델을 이용한 3차원 공간에서 입자는 해류에 의한 이류와 난류에 의한 확산으로 주어진 시간간격 동안에 초기위치에서 다음 위치로 이동하는 것으로 기본적인 수학적 식은 대기확산모델과 유사하다. 자세한 수학적 표현은 기존 참고문헌에 기술하였다(Min *et al*. 2014). 개발된 해양확산 모델은 대기로부터 해수면의 침적, 해수내 부유사와의 흡착 및 탈착, 해저바닥으로의 침강 등의 물리현상이 고려되었다.

해양확산모델 LORAS는 2012년부터 2019년까지 IAEA의 방사선영향평가 국제모델링연구(MODARIA: Model and Data for Radiological Impact Assessment)에 참여하여 다른 국가들의 모델과 동일 조건에서 비교·검증을 수행하면서 지속적으로 모델을 보완하여 모델의 완성도를 높였다. 모델의 완성도를 높이기 위하여 확산계수의 선정을 다른 참여모델과 유사한 상수 값을 입력하고 해저 침강항을 해저바닥의 토사의 입경, 밀도 등의 물리적 특성을 반영하는 모수화 기법을 사용하였다. 비교결과 다른 참여국들의 모델과 동등한 수준이거나 후쿠시마 사고 자료와 비교 결과 관측자료와 더 잘 일치하는 결과를 보여주었다(IAEA 2019). Fig. 3에 후쿠시마 사고 후 원전 반경 4 km 근해에서(T1, T2, T3, T4는 관측지점) 관측한 해수 중 ^{137}Cs 농도 자료와 IAEA MODARIA 참여 모델 간의 비교결과를 나타내었다(IAEA 2019). 해양확산모델은 우리나라 해양연구원의 해류자료 및 일본 해양연구원의 해류자료와 연계하여 해양누출 방사성물질의 거동을 평가하도록 설계되었다.

3. 피폭선량모델

환경내 누출된 방사성물질에 의해 인체에 미치는 방사선

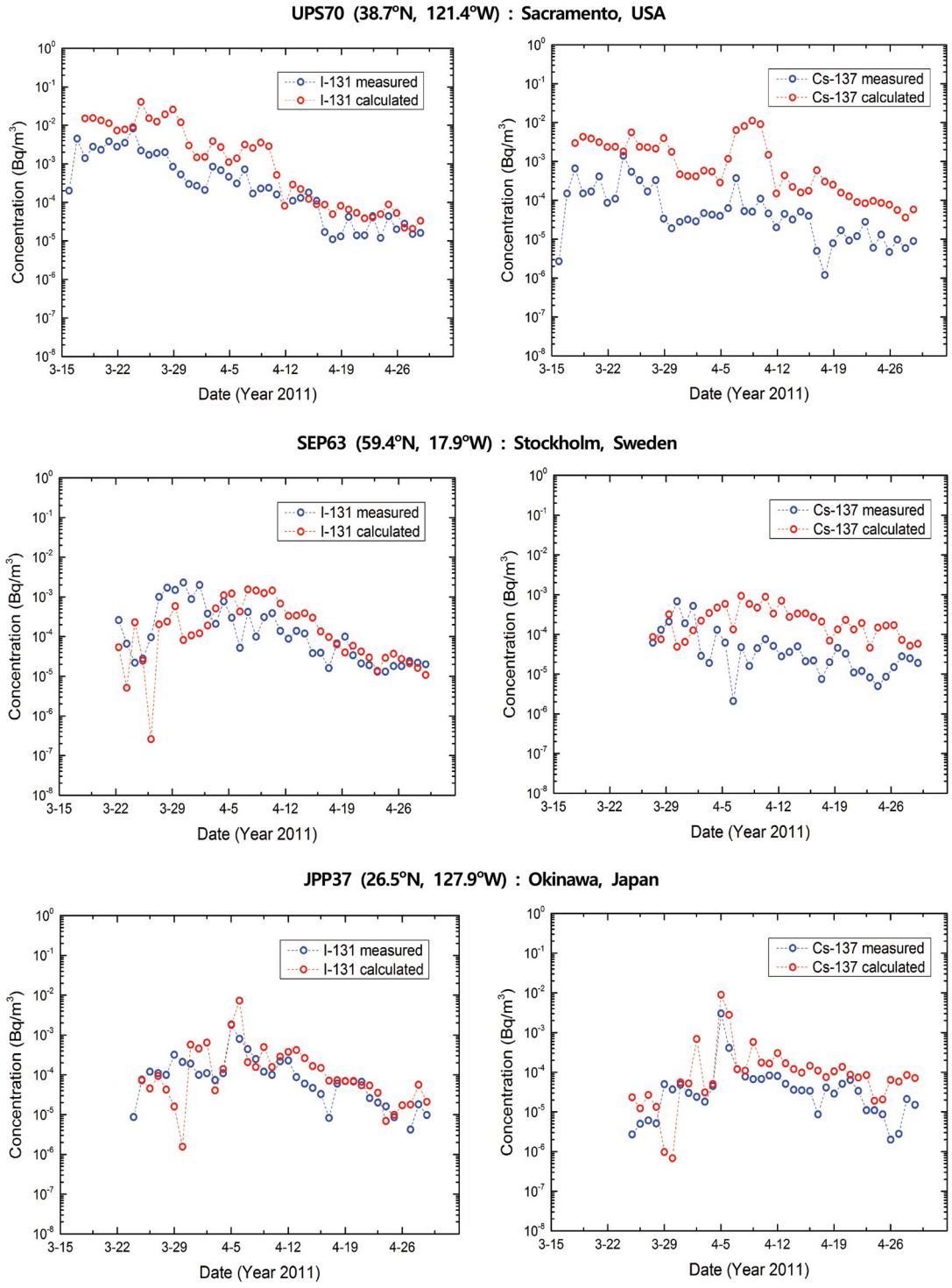

Fig. 2. Comparative results of simulated and observed air concentrations for ^{131}I and ^{137}Cs (Suh *et al*. 2017).

영향 평가를 위한 피폭선량 모델은 6개의 피폭경로 즉, 방사성 구름으로부터의 외부피폭, 오염된 지표면으로부터의 외부피폭, 방사성 구름으로부터 호흡에 의한 내부피폭, 재부유된 핵종의 흡입에 의한 내부피폭, 음용수에 의한 내부피폭, 그리고 음식(농·축산물) 섭취에 의한 내부피폭 등에 대한 사항을 고려하고 있다. 특히 오염된 육상 및 수생 환경내 식품의 방사성 핵종의 농도와 섭취선량을 평가하기 위해 LARIAS (Land and Aquatic Radionuclide transport and Ingestion dose Assessment System) (Kim *et al*. 2018)가 개발되어 방사선방호시스템내 탑재되었다. 환경내 핵종농도로

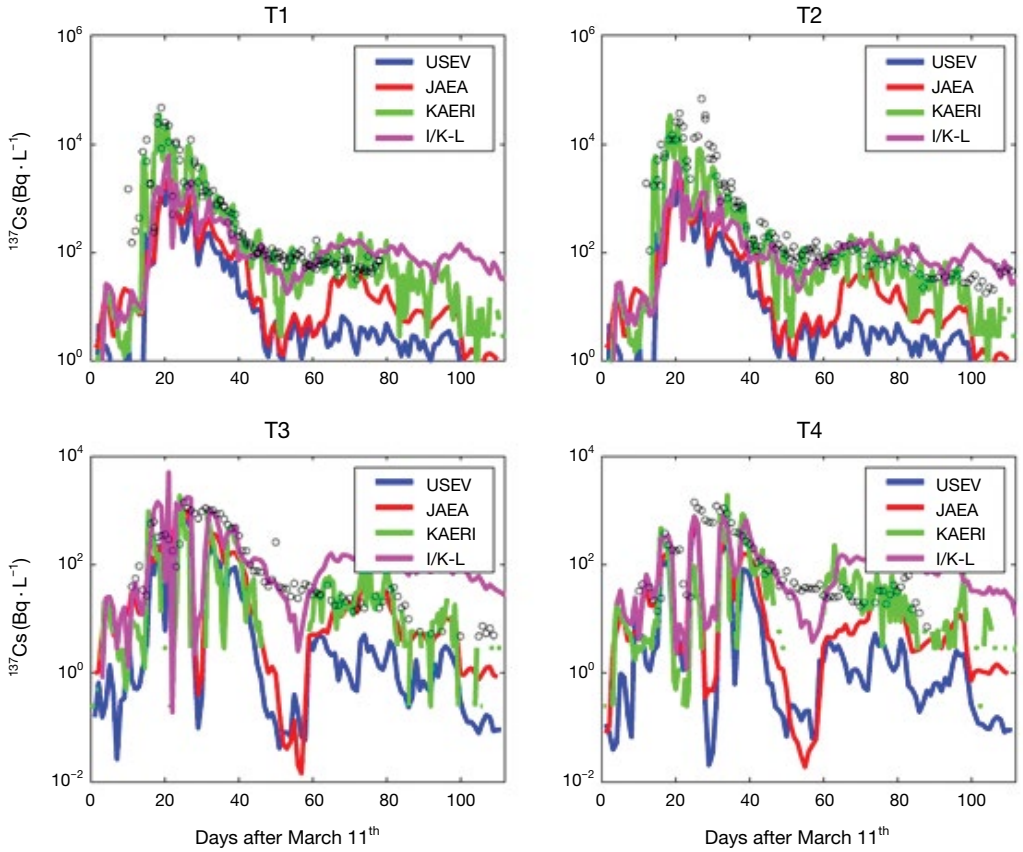

Fig. 3. Calculated and measured ^{137}Cs concentrations in surface water at some points (T1, T2, T3, T4) near a Fukushima site (o: measurements, USEV: Unversity of Seville, JAEA: Japan Atomic Energy Agency, KAERI: Korea Atomic Energy Research Institue, I/K-L: Ukraine Institute of Mathematical Machines and System Problems).

부터 선량평가를 위한 선량환산계수들은 64핵종에 대하여 ICRP (International Commission on Radiological Protection) 60, FGR (Federal Guidance Report) 12 및 13 자료를 사용하여 데이터 베이스화 하였다. Fig. 4에 후쿠시마 사고 시 오염된 음식을 1년, 10년, 그리고 60년 동안 섭취로 인한 후쿠시마 시 주민(성인)들의 피폭 선량을 평가한 결과를 제시하였다 (Kim *et al*. 2018).

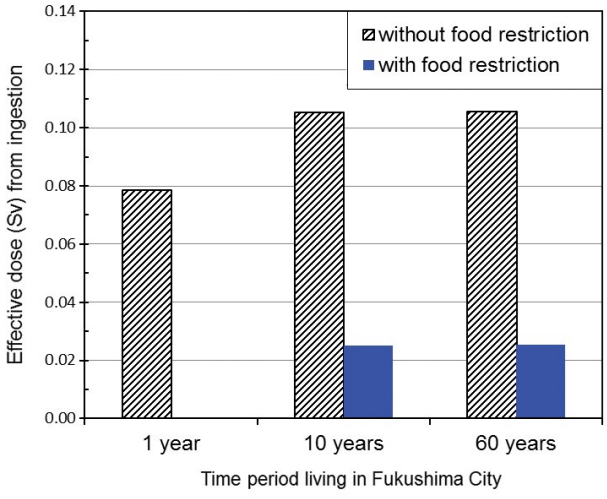

Fig. 4. Effective doses from ingestion to people living in Fukushima City over 1, 10, and 60 years without and with food restrictions (Kim *et al*. 2018).

4. 사용자 GUI

방사선방호시스템은 web을 통하여 오픈하여 사용자가 고유의 아이디와 패스워드를 통하여 시스템에 접속하여 다양한 시나리오를 설정하여 사고 평가를 수행할 수 있도록 구축되었다 (서 등 2020). 시스템의 보안을 위하여 사용자가 접속하는 인터넷 서버와 계산을 위한 고성능 클러스터를 별도로 구성하여 2개의 시스템이 연동하도록 설계하였다.

사용자는 웹브라우저를 통해 해당 페이지에 접속하고 로그인을 하게 된다. 1) 웹페이지를 통해 계산하고자 하는 초기 위치, 시간 등을 선택하게 되면, 2) 이러한 조건을 파일로 만들어 고성능 클러스터 서버에 전송하게 되고, 3) 클러스터에서는 전송 받은 파일을 기반으로 기상자료, 해양자

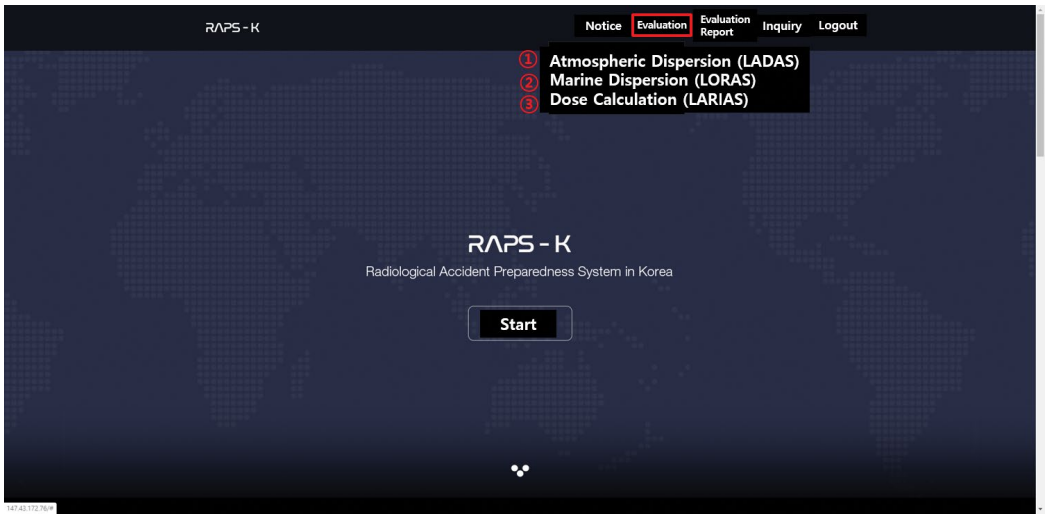

Fig. 5. Main page of radiological accident preparedness system after login.

료 등을 사용자가 할당 받은 클러스터에 연결된 하드디스크에서 검색하고 모델을 계산할 준비를 하게 된다. 4) 이 후 순차적으로 지정된 작업을 수행해 고성능 클러스터가 계산할 수 있는 조건을 설정한다. 5) 포트란 언어로 구성된 모델은 계산을 시작하고, 6) 병렬형 클러스터 쉘은 해당 계산을 다수의 CPU core에 할당하고 계산을 수행하고 다시 취합한다. 7) 최종 계산이 완료된 자료는 데이터 후처리를 수행하며, 그림을 그리기 위한 서버에 전송한다. 8) 이후 서버는 수신된 자료를 이용하여 그림을 그리고 9) 그려진 그림은 최종적으로 유저에게 전송해 계산 결과를 구글 어스상 표기한다. 구성된 방사선방호시스템의 접속 화면을 Fig. 5에 나타내었다. 방사선방호시스템은 대기, 해양확산 평가와 선량평가를 사용자가 순차적으로 진행할 수 있으며, 각 평가모델에 접속하면 평가기간, 누출위치, 핵종 종류, 방출량 등을 사용자가 쉽게 입력할 수 있고, 계산이 종료된 후 결과 값을 그림파일이나 ascii 파일로 download하도록 구성하였다 (서 등 2020).

결 론

원자력시설 사고 시 환경으로 누출된 방사성물질의 거동과 인체 위해도를 평가하기 위하여 각 국에서 개발된 방사선비상대응 시스템의 특징과 한국원자력연구원에서 개발한 방사선방호시스템에 관하여 기술하였다. 우리나라는 원자력시설 사고 시 방사선비상대응책 수립을 지원하는 공식적 기관은 한국원자력안전기술원으로 기술원에서 보유하고 있는 AtomCARE를 활용하여 정부 대응책을 지원한다. 그러나 후쿠시마 사고 후 전 세계적인 추세는 단일 시스템에 의하여 평가하는 방법 대신 2개 이상의 시스템을 활용하여 공통적인 평가결과를 이용하여 대응행위를 수립하는 것이 더 효율적인 것으로 알려져 있다. 따라서 우리나라를 포함한 주변국 원자력시설 사고 시 한국원자력안전기술원에서 개발한 AtomCARE와 한국원자력연구원에서 개발한 RAPS-K를 같이 활용한다면 환경으로 누출된 방사성물질에 의한 우리나라 국민과 환경에 주는 방사선적 피해를 신속·정확히 예측하여, 정부의 비상대응책 수립에 기여할 것이다.

한국원자력연구원에서 구축한 방사선방호시스템 RAPS-K는 정부 관련기관을 포함하여 사용자 그룹을 결성하여 시스템의 사용에 관한 매뉴얼과 교육을 통하여 시스템의 활용도를 지속적으로 향상시킬 예정이며, 주변국 원자력시설 사고나 은밀한 핵활동에 관한 평가를 통하여 정부의 대응책 수립에 활용될 예정이다.

사 사

본 연구는 과학기술정보통신부 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행 되었습니다(과제번호: NRF-2017M2A8A4015253, NRF-2015M2A2B2034282, NRF-2020M2C9A1061641).

참 고 문 헌

김완주, 한승제, 김동일, 이두희, 우성명, 이종성, 장재권, 안경일, 이정수. 2008. AtomCARE의 기능 고도화와 광역화 방안 연구. KINS/GR-402. 73pp. 한국원자력안전기술원.

서경석, 민병일, 박기현, 김소라, 김인규, 김지윤. 2020. 웹기

반 방사능오염 예측 시스템 구축. KAERI/RR-4600/2020. 149pp. 한국원자력연구원.

Bradley MM. 2007. NARAC: an emergency response resource for predicting the atmospheric dispersion and assessing the consequences of airborne radionuclides. *J. Environ. Radioact.* **96**:116-121.

Draxler R. 2003. Evaluation of an ensemble dispersion calculation. *J. App. Meteor.* **42**:308-317.

IAEA. 2019. Modelling of Marine Dispersion and Transfer of Radionuclides Accidentally Released from Land Based Facilities. IAEA-TECDOC-1876. 147pp. Vienna, Austria.

Kim CK, Byun JI, Chae JS, Choi HY, Choi SW, Kim DJ, Kim YJ, Lee DM, Park WJ, Yim SA and Yun JY. 2012. Radiological impact in Korea following the Fukushima nuclear accident. *J. Envrin. Radio.* **111**:70-82.

Kim S, Min BI, Park K, Yang BM, Kim J and Suh KS. 2018. Evaluation of radionuclide concentration in agricultural food produced in Fukushima Prefecture following Fukushima accident using a terrestrial food chain model. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **316**:1091-1098.

Kobayashi T, Otosaka S, Togawa O and Hayashi K. 2007. Development of a non-conservative radionuclides dispersion model in the ocean and its application to surface cesium-137 dispersion in the Irish Sea. *J. Nucl. Sci. Technol.* **44**(2):238-247.

Kobayashi T, Kawamura H, Fujii K and Kamidaira Y. 2017. Development of a short-term emergency assessment system of the marine environmental radioactivity around Japan. *J. Nucl. Sci. Technol.* **54**(5):609-616.

Li S, ZhenXin S, JianKai HU, Kai LU and Hua T. 2015. The comparison of ensemble or deterministic dispersion modeling on global dispersion during Fukushima Dai-ichi nuclear accident. *Sci. Chi.* **58**(3):356-370.

Mészáros R, Leelossy A, Kovacs T and Lagzi I. 2016. Predictability of the dispersion of Fukushima-derived radionuclides and their homogenization in the atmosphere. *Sci. Rep.* **6**:1-10.

Min BI, Perianez R, Park K, Kim IG and Suh KS. 2014. Assessment in marine environment for a hypothetic nuclear accident based on the database of tidal harmonic constants. *Mar. Pollut. Bull.* **87**:269-275.

Nanba K, Zheleznyak M, Kivva S, Konoplev A, Maderich V, Koshebutsky V, Gallego E, Papish L and Mikhalskyi O. 2016. Implementation of hydrological dispersion module of JRODOS for the assessment of ^{137}Cs transport and fate in rivers, reservoirs and ponds of the Fukushima prefecture. *Radiopro.* **51**:145-148.

Nasstrom JS, Sugiyama G and Baskett RL. 2007. The National Atmospheric Release Advisory Center (NARAC) Modeling and Decision Support System for Radiological and Nuclear Emergency Preparedness and Response. *Int. J. Emerg. Manag.* **4**(3):1-32.

Rojas-Palma C, Madsen H, Gering F, Puch R, Turcanu C, Astrup P, Muller H, Richter K, Zheleznyak M, Treebushny D, Kolomeev M, Kamaev D and Wynn H. 2003. Data assimilation in the decision support system RODOS. *Radiat. Prot. Dosim.* **104**:31-40.

Suh KS, Jeong HJ, Kim EH, Hwang WT and Han MH. 2006. Verification of the Lagrangian particle model using the ETEX experiment. *Ann. Nucl. Ener.* **33**:1159-1163.

Suh KS, Han MH, Jung SH and Lee CW. 2009. Numerical simulation for a long-range dispersion of a pollutant using Chernobyl data. *Math. Comput. Mod.* **49**:337-343.

Suh KS, Kim S and Min BI. 2017. Atmospheric Dispersion and Sea Surface Deposition of Radionuclides by the Fukushima Nuclear Accident. *J. Coast. Res.* **79**:85-88.

Terada H and Chino M. 2008. Development of an atmospheric dispersion model for accidental discharge of radionuclides with the function of simultaneous prediction for multiple domains and its evaluation by application to the Chernobyl nuclear accident. *J. Nucl. Sci. Technol.* **45**:920-931.

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. 2014. Levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident after the 2011 great east-Japan earthquake and tsunami. UNSCEAR 2013 Report Volume 1. 311pp. UNSCEAR. New York.

Received: 1 February 2021
Revised: 17 February 2021
Revision accepted: 3 March 2021