

원전 사고시 대기 중 방사성물질의 확산 평가

○ 서경석 | 한국원자력연구원 원자력환경안전연구부
책임연구원
E-mail : kssuh@kaeri.re.kr

1. 서론

1986년 4월 26일 구 소련의 체르노빌과 2011년 3월 11일 일본 후쿠시마의 원자력발전소 사고로 인하여 방사성물질은 대기 중으로 방출되어 인간과 환경에 심각한 영향을 주었다. 체르노빌 원전 사고는 원전 냉각펌프에 전력 공급 시험중 원자로의 급격한 과열로 폭발과 화재가 발생하여 사고 직후 10일간 많은 양의 방사성물질이 환경으로 누출되었다. 후쿠시마 원전 사고는 동북(도호쿠)지방의 해저 지진에 의한 쓰나미로 인하여 비상냉각기능이 상실되어 원자로 내에서 과열된 핵연료봉 피복관이 물과 반응하여 생성된 수소가 폭발하면서 대기 중으로 많은 방사성물질이 누출되었다.

대기 중으로 방출된 오염물질의 장거리 이동·확산에 대한 연구는 1970년도부터 중금속 이동 및 산성비 영향평가의 관점에서 시작되었다. 산업화의 발달에 따른 대규모 공장에서의 황산화물과 질소산화물의 방출은 산성비의 발생을 증가시키고, 중금속 방출과 더불어 인접 국가의 환경에 심각한 영향을 주게 된다. 동북 아시아권에서는 봄철 중국 고비 사막에서 이동되는 황사의 영향을 평가하기 위해 장거리 대기 확산모델의 적용이 활발히 이루어

지고 있다(Lee et al, 1993). 원자력 산업측면에서 체르노빌 원전 사고이후 각국에서는 자국민과 환경을 보호하기 위하여 방사선 비상대응 차원의 장거리 확산모델을 개발하고, 개발된 모델을 보완·검증하고 있다(Klug et al, 1992). 우리나라도 주변의 러시아, 중국, 대만, 일본 등의 원전 사고를 대비한 동북 아시아권을 대상으로 하는 장거리 대기 확산모델 LADAS(Long-range Accident Dose Assessment System)가 2006년에 한국원자력연구원에서 개발되어 검증을 통하여 현재 운영 중에 있다(Suh et al, 2006). 이번 일본의 후쿠시마 원전 사고 초기부터 한국원자력연구원은 LADAS를 운영하여 대기로 방출된 방사성물질의 확산 및 이동경로를 예측하였고, 이를 통하여 우리나라에 미칠 수 있는 영향을 평가하였다. 사고 후 초기에 방사성물질은 일본 중부 및 동쪽 지방에 영향을 미치고 대부분 태평양 방향으로 이동하여 방사성물질이 우리나라로 직접 유입되지는 않는 것으로 평가되었다. 그러나 사고 초기에 태평양으로 이동한 방사성물질은 편서풍에 의해 지구를 한 바퀴 돌아 우리나라에 유입되지만 북반구를 이동하면서 넓은 지역으로 확산되고, 강우에 의해 방사성물질이 지표로 떨어짐으로써 그 영향은 적은 것으로 생각된다.

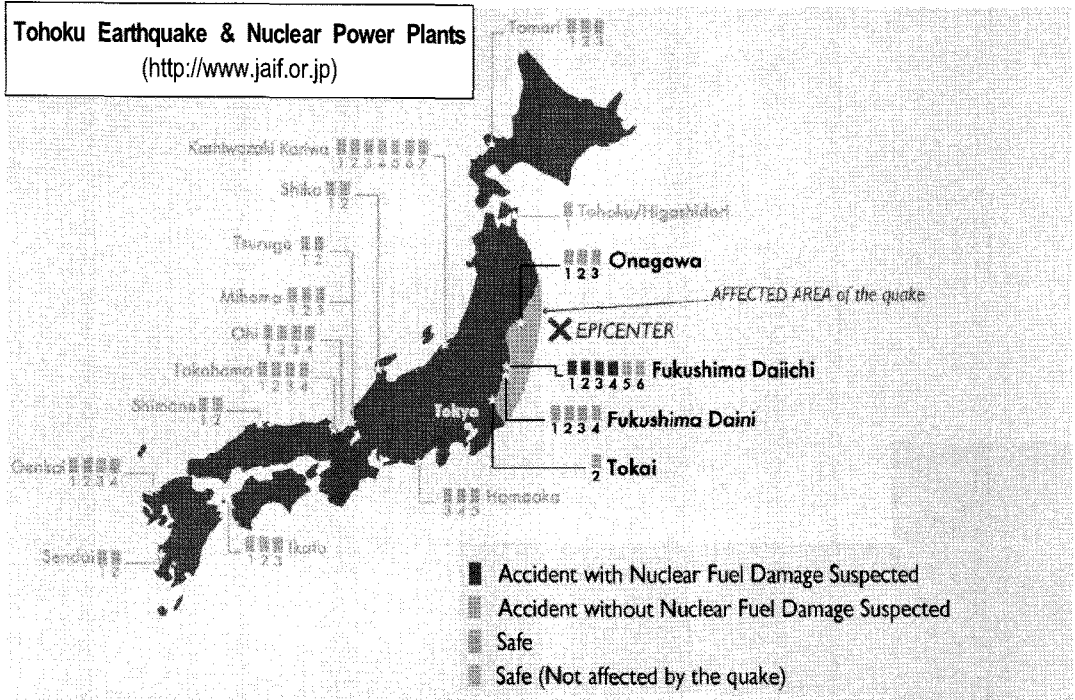


그림 1. 도호쿠 지진 및 쓰나미가 일본 원전에 미친 영향

2. 일본 후쿠시마 원전사고 개요

2011년 3월 11일 14:46분에 일본 동북(東北, 도호쿠)지방의 미야기현 동쪽 해저에서 발생한 규모 9.0의 대지진과 뒤이은 높이 14 m 이상의 초대형 쓰나미로 인해, 후쿠시마 제1원전(진앙에서 약 150 km 남서쪽에 위치)의 소내의 전원과 비상전원이 동시에 상실되어 비상 냉각 기능을 상실하고 대형 원전 사고로 전개되었다.

지진 발생 직후 진앙과 가까운 미야기현(오나가와 원전), 후쿠시마현(후쿠시마 제 1, 2 원전), 이바라키현(토카이 원전)에서 가동 중이던 11기의 원자로가 자동시스템에 의해 안전하게 정지되었다. 지진 직후 소내 및 외부 전원이 상실되었음에도 불구하고 비상 디젤발전기와 축전기가 정상 작동하여 원자로 냉각 등 필수적인 안전기능이 유지되었으

나, 이후 15:20경에 후쿠시마 제 1원전에 밀어닥친 높이 14 m 이상의 대형 쓰나미로 인하여 비상 디젤발전기가 해수에 침수되어 그 기능을 상실하고 수 시간 후 축전지도 고갈되었다. 따라서 후쿠시마 제 1원전의 1, 2, 3, 4, 5호기의 비상 디젤발전기 전체가 기능을 상실하고 외부 전원의 복구가 초기에 신속히 이루어지지 않아 일부 원자로와 사용후 핵연료 저장수조에서 핵연료봉의 붕괴열 냉각이 실패하였다. 이에 따라 자동적으로 운전이 정지된 원전의 비상시 노심 냉각용 냉각수 공급이 중단되어 원자로 격납용기의 내부압력이 상승하고 노심안의 붕괴열(원자로가 정지되어 핵분열반응이 멈추더라도 이전에 만들어진 핵분열생성물이 방사성붕괴를 하면서 그로 인하여 발생하는 열)이 계속 발생하여 핵연료봉 피복관의 지르코늄이 증기와 반응하여 생성된 수소가 폭발하는 사고가 발생하였다. 예를 들어 설

표 1. 후쿠시마 원전 시간별 주요 상황

일시	시간	사건 전개
3월 11일	14:46	지진 발생으로 후쿠시마 제 1, 제 2 원전 정지
	15:42	지진에 이은 해일로 인하여 모든 후쿠시마 제 1 원전 1,2,3 호기 모든 교류전력 상실
	21:23	원자력재해특별조치법에다른 소개 범위 확대 1호기 반경 3KM 이내 대피 지시 1호기 반경 10KM 옥내 대피지시
3월 12일	09:07	후쿠시마 제 1 원전 1호기 Pressure Vessel 김입밸브 개방
	14:49	후쿠시마 제 1 원전 1호기 주변에서 세슘 (Cs) 검출
	15:36 20:20	후쿠시마 제 1 원전 1호기 수소 폭발 후쿠시마 제 1 원전 1호기 해수주입 시작
3월 13일	13:15	후쿠시마 제 1 원전 3호기 해수주입 시작
3월 14일	11:01 16:34	후쿠시마 제 1 원전 3호기 수소폭발 후쿠시마 제 1 원전 2호기 해수주입
	3월 15일	06:20 09:38 12:29
3월 16일		08:37
3월 17일	09:48	후쿠시마 제 1 원전 3호기에 냉각수 투하
3월 18일		고압 소방차를 이용한 사용후 핵연료 저장조 냉각수 공급 전력복구 중
3월 19일		후쿠시마 제 1 원전 5, 6호기 냉각회복
		후쿠시마 제 1 원전 1, 2호기 전력복구

명하자면 주전자에 물을 가열하여 물이 충분히 끓고 난후 가스렌지를 끄고 난 후에도 주전자내 물은 뜨거운 상태로 남아 있다. 주전자내 물을 냉각수를 이용하여 빨리 식히기 위해 싱크대에 차가운 물을 받아 놓고 그 안에 주전자를 담가두면 주전자 안에 뜨거운 열이 싱크대내 차가운 물로 열이 전달되어 주전자 안의 온도는 떨어지고, 싱크대내 물의 온도는 올라간다. 계속하여 주전자 안의 물의 온도를 낮

추기 위해 싱크대내 물을 차가운 것으로 계속하여 바꾸어주면서 주전자내 물의 온도를 낮출 수 있다.

이와 같이 원전이 정상적으로 정지된 후에도 원자로내 남아 있는 잔열(붕괴열)을 냉각장치 가동을 통하여 그 열을 식혀야 하는데 전원장치의 고장으로 냉각수가 공급되지 못하여 잔열이 남아서 핵연료봉의 온도가 증가하면서 피복관이 주변 증기와 반응하여 수소를 발생시켰고 원자로 건물 상부에 축적된 수소가 폭발하면서 다량의 방사성물질이 환경으로 누출되었다. 후쿠시마 원전의 주요 사건 상황을 표 1에 나타내었다.

3. 방사성물질의 대기 확산 시뮬레이션

한국원자력연구원은 2011년 3월 11일 오후에 발생한 일본 동북지방의 지진에 의한 주변 원자력발전소의 피해 상황을 주시하면서 3월 12일 오전 9시경 후쿠시마 제 1 원전 1 호기의 증기 방출 시점으로 부터 장거리 대기확산모델인 LADAS (Long-range Accident Dose Assessment System)를 운영하기 시작하였다. 초기에는 후쿠시마 원전에서 방출된 방사성 물질과 그 양을 정확히 알 수 없어서 체르노빌 사고에서 사용한 요오드(I-131)와 세슘(Cs-137) 두 개의 방사성핵종에 대하여 체르노빌 사고시의 1/10, 1/50, 1/100 정도의 방출량을 가정하고 계산을 수행하였다. 일본 정부는 사고 초기부터 3월 18일 이전까지의 환경 방사선 관측결과를 기준으로 사고등급을 국제원자력사고등급(INES : International Nuclear and Radiological Event Scale) 5등급으로 잠정 추정하였으나(IAEA, 2008) 4월 12일 일본 원자력안전보안원과 일본 원자력안전위원회는 방사성물질 누적총량 산정 자료를 근거로 사고를 7등급으로 상향 조정하였다. 국제원자력사고 7등급은 방사성물질이 환경으로 대량 유출된 것으로 I-131 기준으로 1016 Bq 이상 환경으로 누출되어 생태계에 심각한 영향을 초래하는 대형사고로 구 소련의 체르노빌 사고

표 2. 후쿠시마 원전 사고로 인한 대기로 방출된 방사성핵종 누적 총량

	대기 중으로 방출된 방사성핵종 누적 총량	
	일본안전보안원 자료	일본원자력 위원회 자료
I-131 (a)	1.3x10 ¹⁷ Bq	1.5x10 ¹⁷ Bq
Cs-137	6.1x10 ¹⁵ Bq	1.2x10 ¹⁶ Bq
다른 방사성핵종을 I-131로 환산한 양(b)	2.4x10 ¹⁷ Bq	4.8x10 ¹⁷ Bq
(a) + (b)	3.7x10 ¹⁷ Bq	6.3x10 ¹⁷ Bq

도 이에 해당한다. 4월 12일 일본 정부가 후쿠시마 원전 사고를 level 7 로 상향 조정하면서 발표한 사고 초기부터 4월 12일까지 대기로 누출된 방사성핵종의 누적총량을 표 2에 나타내었다. 표 2에서 베크렐(Bq)은 방사능의 세기를 표시하는 단위로 1초간 원자핵이 붕괴하는 숫자를 의미한다.

한국원자력연구원에서 개발한 장거리 대기확산 모델 LADAS는 방출 지점 부근에서 오염물질로 취급하는 입자를 대기로 방출하여 바람과 여러 기상 물리현상 등에 의해 이동하는 입자의 궤적을 추적함으로써 오염물질의 농도 분포를 계산하는 수치모델이다. 모델은 3차원의 시·공간적 농도를 계산할 수 있으며 또한 방사성물질이 대기 중에서 이동하면서 자연스럽게 아래방향으로 떨어지는 건식 침적과 강수에 의해 지표면으로 떨어지는 습식 침적 및 방사성 붕괴항 등이 포함되어 있다. 또한 인체에 미치는 영향을 평가하는 피폭선량 모듈이 포함되어 있는데, 공기 중에 떠있는 방사성물질의 직접적 영향에 의한 외부피폭, 공기 중에 포함된 방사성물질을 인간이 호흡함으로써 영향을 받는 내부피폭, 지표면에 침적된 방사성물질에 의해 영향을 받는 침적 외부피폭 등을 계산 할 수 있다. LADAS 운영에 중요한 요소 중 하나는 기상자료이다. 현재 LADAS는 동북 아시아권을 대상으로 만들어진 시

스템으로 기상청의 지역 UM(Unified Model)모델의 수치예보 자료와 연계되어 대기 중 오염물질의 확산 경로를 평가하도록 구축되었다. 계산 영역은 동북 아시아권을 대상으로 북위 12° ~ 15°N, 동경 102° ~ 107°E 범위로 해당 지역에 대한 기상 수치예보자료를 수신하여 필요한 기상자료를 추출하여 모델내 이용할 수 있도록 하는 전처리 기능이 포함되어 있다. LADAS는 2006년 개발 및 검증이 완료되었는데, 1994년 유럽에서 수행한 대규모 장거리 대기확산 실험인 ETEX(European Tracer Experiment)의 실측자료와 1986년 체르노빌 사고시 유럽 각국에서 측정된 방사성물질 농도 자료를 이용하여 검증을 완료하였다. 또한 개발된 장거리 대기 확산모델의 불확실성 평가를 위하여 인터넷 web을 통하여 가상의 시나리오 대해 각국 모델의 계산결과를 상호 비교하는 ENSEMBLE 프로젝트에 국가번호 KR1, 모델번호 53번으로 참가하여 모델의 검증과 불확실성 검사를 수행하였다.

후쿠시마 원전 사고로 인해 대기중으로 방출된 방사성물질의 확산 평가를 위하여 LADAS 시스템을 이용하였는데, 후쿠시마 원전에서 방사성물질의 누출은 2011년 3월 12일 오전 9시로 가정하였다. 이는 동 기간에 후쿠시마 제 1원전 1호기에서 대기중으로 증기 방출을 시작한 시점이고, 몇 시간 후 원전 주변에서 세슘이 검출된 기간이다. 요오드(I-131)와 세슘(Cs-137) 두 개의 방사성 핵종에 대해 초기에는 방출량을 정확히 알 수 없어서 체르노빌 사고시의 1/10, 1/50, 1/100 정도의 방출량을 가정하고 계산을 수행하였다. 이후 4월 12일 일본 원자력안전위원회의 두 개 방사성물질에 대해 대기중으로 방출된 누적 총량에 대한 발표가 있어(표 2 참고), 이들 자료를 이용하여 다시 계산을 수행하였다. 후쿠시마 원전에서 방사성물질은 지표면 10 m에서 3월 12일 오전 9시부터 연속적으로 방출한다고 가정하고 3월 21일 오전 10시 까지 10일 간 계산을 수행하였다. 체르노빌이나 후쿠시마 원전 사고시 초기에 비활성 기체(제논, 크립톤) 등이 대기

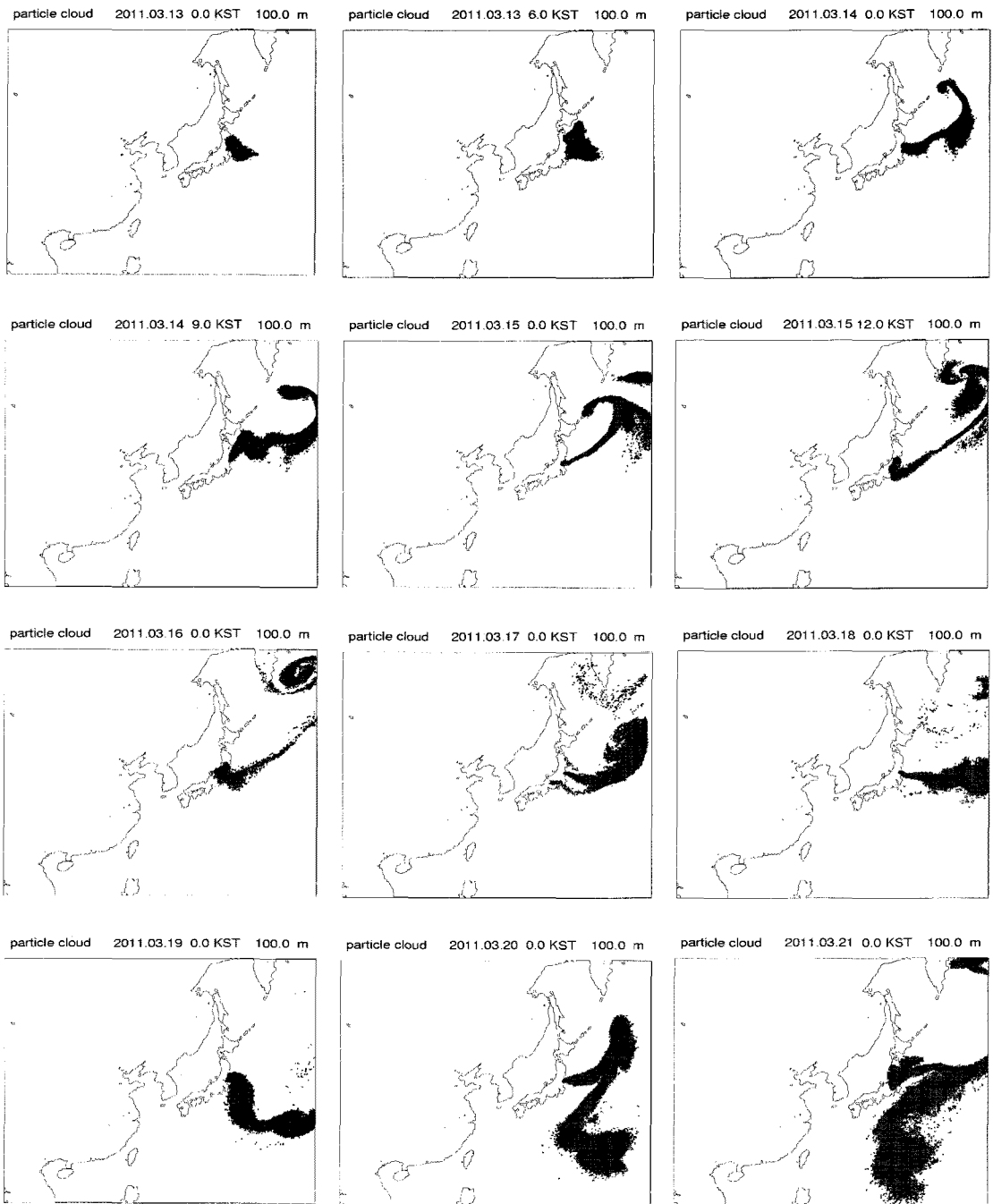


그림 2. LADAS 계산결과 : 지상 0~100 m에서 시간별 방사성구름 이동·확산

중으로 많이 방출되고, 요오드와 세슘 등의 방사성물질이 다량 누출된다. 특히 요오드는 인체에 흡수되면 갑상선에 누적되어 인체에 위한 영향 줄 수 있고 세슘은 근육에 흡수되어 다양한 종양을 유발할 수 있는 방사성핵종이기에 원전 사고시 이들 방사성핵종의 확산 평가와 측정/분석이 중요시 된다.

LADAS의 계산결과 지상에서 100 m 까지 지표면 부근에서 계산된 방사성물질의 확산 범위를 그림 2에 나타내었다. 방사성물질은 초기에 후쿠시마 원전의 동쪽 및 북쪽 방향으로 이동하여 태평양과 캄차카 반도 방향으로 흘러가고, 3월 15일 오전 3시 이후에 원전의 남쪽과 서쪽 방향으로 일부 방사성물질이 이동하면서 전반적인 주 흐름 방향은 태평양 쪽으로 이동하고 있다. 이후 방사성물질은 후쿠시마 원전의 남, 북 방향으로 조금씩 이동하면서 전부 태평양 방향으로 흘러가고 있어 동 기간에 후쿠시마로부터 방출된 방사성물질의 우리나라에 직접적인 유입은 없는 것으로 나타났다. 방사성물질의 방출시점인 3월 12일부터 3월 15일 오전 0시까지 방사성물질은 북쪽 방향으로 이동하여 센다이 부근에 영향을 주었고 이후 3월 15일 오전 3시부터 ~ 3월 17일 오후 3시 까지 방사성물질이 원전의 서쪽 및 남쪽방향으로 일부 이동하여 일본의 미토, 동경, 요코하마 등의 주요 도시에 영향을 주었다. 우리나라는 일본 대지진 후 구조대원을 3월 15일에 파견하여 센다이 지역에서 구조 활동을 펼치다 3월 19일 철수하였는데, LADAS 계산에 의하면 동 기간에 센다이에 방사성물질이 많이 유입되지 않아 파견된 우리나라 구조대원들의 방사선 피폭은 미미한 것으로 계산되었다.

우리나라는 한국원자력안전기술원에서 전국 환경방사선량을 실시간으로 관측하고 있는데, 후쿠시마 원전 사고 이후 전국 지방 측정소에서 관측/분석한 공기, 빗물 시료 중의 방사성물질 농도 자료를 일일 분석 자료로 홈페이지를 통해 공개하고 있다 (한국원자력안전기술원, 2011). 한국원자력안전기술원의 분석자료에 의하면 우리나라는 2011년 3월

23일부터 강원도 지역에서 방사성제논이 검출되기 시작하여 4월 5일에 최고치를 나타낸 후 감소하는 추세로 현재는 거의 전 국토에서 방사성물질이 검출되고 있지 않다. 이는 사고 초기에 후쿠시마에서 방출된 방사성물질의 일부가 북쪽방향으로 이동하여 캄차카 반도를 거쳐 이동한 후 시베리아를 거쳐 우리나라로 유입된 것으로 한국원자력안전기술원은 발표하였다. 물론 4월 5일에 측정된 방사성제논의 최고 값을 선량으로 환산하여도 극히 적은 양으로 인체와 환경에는 아무 영향이 없다.

LADAS 계산결과 후쿠시마 원전 사고로 대기 중으로 방출된 방사성물질은 우리나라로 직접 유입되지 않고 대부분 편서풍에 의해 태평양 방향으로 이동한 것으로 산정되었다. 그러나 LADAS는 동북아시아권만을 대상으로 구축한 시스템으로 이번 후쿠시마 사고와 같이 편서풍에 의해 지구를 한 바퀴 돌아 우리나라에 유입되는 것에 대해서는 시뮬레이션을 하지 못하였다. 향후 한국원자력연구원은 LADAS를 전 지구 규모(global scale)로 확장할 예정이며, 이 프로젝트가 종료된 후에는 전 세계에서 발생할 수 있는 원전 사고로 인해 대기로 누출된 방사성물질의 확산 경로를 평가하는 시스템으로 구축될 예정이다.

4. 결론

2011년 3월 11일 일본 동북(도호쿠)지방의 미야기현 동쪽 해저에서 발생한 규모 9.0의 대지진과 뒤이은 초대형 쓰나미로 인하여 센다이를 포함한 일본 동부 지방에 막대한 인명과 재산 피해가 발생하였다. 특히 진앙지와 가까운 후쿠시마 원전에서 비상냉각 기능의 상실로 인한 원전 사고로 인하여 다량의 방사성물질이 대기로 방출되어 인간과 환경에 심각한 영향을 주었다.

후쿠시마 원전 사고는 지진 발생에 따라 원자로 정지는 안전하게 이루어 졌으나, 비상 전력 기능의 상실에 따른 일부 원자로와 사용후 핵연료 저장수

조의 핵연료 잔열(붕괴열) 냉각 실패로 인하여 발생한 사고이다.

한국원자력연구원은 사고 초기부터 장거리 대기 확산모델 LADAS를 운영하여 사고 지역에서 대기로 방출된 방사성물질의 확산 평가를 수행하였다. 산정 결과 후쿠시마 원전에서 방출된 방사성물질은 우리나라로 직접 유입되지 않고 일본의 동쪽 태평양 방향으로 이동하여 우리나라에 미치는 직접적 영향은 없는 것으로 나타났다. 다만, 사고 초기에 방사성물질이 사고 지역의 북쪽 및 남쪽 지역으로 이동하면서 이 지역의 위치한 일본의 주요 도시에 어느 정도의 영향을 준 것으로 나타났다. 현재 후쿠시마 원전의 복구가 상당히 이루어지고 있는 시점에서 대기 중으로 다량의 방사성물질의 누출은 없는 것으로 판단된다. 이는 4월말 이후 한국원자력안전기술원에서 측정하고 있는 대기 부유진의 요오드와 세슘의 분석결과에서도 이들 방사성핵종이 거의 검출되고 있지 않아 많은 양의 방사성물질 누출은 없는 것으로 생각된다. 후쿠시마 원전 사고 초기에는 대기로 누출된 방사성물질에 의해 인간과 환경에 영향을 주었고, 현재 초기 평가는 지나갔고, 해양으로 방출된 방사성물질, 주변 토양에 침적된 방사성물질에 의한 농작물 오염, 축산물 오염 및 식품 오염 등의 중·장기 측면에서의 평가가 이루어져야 한다.

이번 후쿠시마 원전 사고시 초기에 대기로 방출된 방사성물질의 확산범위를 예측하는 LADAS는 향후 전 지구 규모의 방사성물질 확산 평가를 위하여 시스템을 확장할 예정이며, 전 지구규모의 시스템이 완성되면 인접국을 포함한 세계 어느 나라에서 발생할 수 있는 원전 사고에 대해 우리나라 국민과 환경을 보호하기 위한 시스템이 구축될 것이다.

※ 한국원자력연구원에서 개발한 LADAS는 교육과학기술부에서 시행하는 원자력연구개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

- 참고문헌 -

1. Lee, J.G., Kim, Y.H. and Kim, J.S., 1993, "A case study of the yellow sand phenomenon observed over the Korean peninsula for 1-3 April 1993", J. Atmospheric Res., Vol. 10, No. 1, pp. 51-73.
2. Klug, W., Graziani, G., Grippa, G., Pierce, D. and Tassone, C., 1992, "Evaluation of Long Range Atmospheric Transport Models using Environmental Radioactivity Data from the Chernobyl Accident", Elsevier Applied Science, London and New York, pp. 1-353.
3. Suh, K.S., Kim, E.H., Jeong, H.J., Hwang, W.T. and Han, M.H., 2006, "Verification of the Lagrangian particle model using ETEX experiment", Annals of Nuclear Energy, Vol. 33, pp. 1159-1163.
4. IAEA, 2008, "INES user's manual 2008 edition", International Atomic Energy Agency, pp. 1-201.
5. 한국원자력안전기술원, 2011, <http://www.kins.re.kr>