인접국 원전사고로 인한 국내 방사능 영향특성 - 하천, 댐 유역을 중심으로 - Characteristics of Influence of Domestic Radioactivity due to the Accident in a Nuclear Power Plant in a Neighboring Country - Focus on river and dam basin -

김 솔** · 오대민* · 김영석* · 김복성* · 강성원*,***,†

Sol Kim** · Dae-min Oh* · Youngsug Kim* · Bok-seong Kim* · Sung-won Kang*,***,†

*한국건설기술연구원 · **한국과학기술연합대학원대학교 환경공학과

*Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

**Department of Environmental Engineering, University of Science & Technology

(Received January 15, 2018; Revised February 19, 2018; Accepted March 28, 2018)

Abstract : In the event of nuclear accident in neighboring countries, radioactive materials may enter the country due to the effect of wind. In order to analyze the impact of nuclear accident in neighboring countries, we simulate model about Tianwan nuclear power plant accident in China. The ^{137}Cs was selected as the target radionuclides and The HYSPLIT 4 model of the NOAA and meteorological data which provided by NOAA/ARL were used to analyze the diffusion effect of ^{137}Cs and the effect of radionuclide fallout. 6 scenarios were developed to examine the effect of emission time of ^{137}Cs at a nuclear power plant accident and the effect of rainfall. As the simulation results showed that the higher the emission time, the higher was the concentration of ^{137}Cs present in the atmosphere and on the ground. Based on the calculation of the ^{137}Cs deposition rate (%) from Scenario I and Scenario II, it was found that the rainy season during the simulation period was deposited at a higher rate than during the dry season.

Key Words : ^{137}Cs , HYSPLIT, Fallout, Nuclear Powerplant Accident

요약 : 인접국의 원전사고 발생시 바람의 영향으로 국내에 방사성물질이 유입될 수 있다. 이에 인접국의 원전사고가 국내에 미치는 영향을 분석하기 위하여 중국의 텐완 원전사고를 가정하여 모델링을 실시하였다. 대상 핵종으로 인공 방사성 핵종인 ^{137}Cs 을 선정하였으며 ^{137}Cs 의 대기를 통한 확산과 낙진에 의한 국내 영향을 분석하기 위하여 미국 해양대기청(NOAA)의 HYSPLIT 4 모델과 NOAA/ARL에서 제공하는 기상자료를 이용하였다. 가상원전사고의 발생 Scenario에 따른 ^{137}Cs 의 배출량과 배출조건 및 강우 유무에 따른 영향을 살펴보기 위해 6가지의 시나리오를 작성하였다. 시나리오별 모의 결과 방출시간이 증가할수록 대기과 지면에 존재하는 ^{137}Cs 의 농도가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 Scenario I과 Scenario II의 ^{137}Cs 침적률(%) 산정을 통하여 시뮬레이션 기간 중 ^{137}Cs 이 강우가 발생한 우기가 건기에 비하여 높은 비율로 침적되는 것을 확인할 수 있었다.

주제어 : ^{137}Cs , HYSPLIT, 낙진, 원전사고

1. 서론

2011년 3월 11일 도호쿠 지방 인근 태평양 앞바다에서 발생한 지진의 여파로 초대형 쓰나미가 발생하여 수많은 재산 및 인명피해가 발생하였고 해안지역에 위치한 원자력발전소가 침수되었다. 특히, 후쿠시마 제1원자력발전소의 경우 쓰나미로 인한 침수로 모든 전원이 상실되어 원자로의 냉각기능이 장시간동안 정지되었다. 이로 인해 후쿠시마 제1발전소 1, 2, 3호기의 노심에서 냉각수가 증발하고 수소가 발생하여 격납용기 내부압력이 증가하게 되었다. 그 결과 1, 2, 3호기가 수소폭발을 일으켜 원자로건물이 파손되었으며 4호기에서도 핵연료의 용융 및 수소폭발이 발생하였다. 이 사고로 일본정부 추산 1.6×10^{17} Bq의 ^{131}I 과 1.5×10^{16} Bq의 ^{137}Cs 이 방출되는 등 국제 원자력 사건등급(INES) 7등급에 해당하는 대량의 방사성물질이 대기 중으로 유출되는 피해가 발생하였다.¹⁾

후쿠시마 원전사고 이후, 국내외에서 원전사고가 발생할 경우 원전사고가 국내에 미칠 수 있는 영향에 대한 관심이 증대되었다.²⁾ 이에 따라 최근에는 국내외에서 대기확산모델을 이용하여 대기 중의 방사성물질의 거동을 수치적으로 모의하는 연구가 다양하게 진행되어졌다.³⁾ Koraskissok 등⁴⁾은 가우시안 퍼프모델, pX모델을 이용하여 후쿠시마 원전을 대상으로 방사성핵종 모델링을 수행하였으며 방사성 원향과 풍향 등에 대한 모델의 민감도를 평가하였다. 또한 Connan 등⁸⁾은 RIMPUFF, HYSPLIT, ADMS 모델을 이용하여 ^{85}Kr 에 대한 대기확산 및 침적량을 모의하였고⁷⁾ Stohl 등⁵⁾은 라그랑지안 입자확산 모델 FLEXPART를 통해 ^{133}Xe 과 ^{137}Cs 의 대기확산 및 침적량을 모의하여 실측자료와 비교·검증하였다.³⁾ 이와 같은 방사성물질의 거동을 모의하는 연구는 후쿠시마 원전사고 이전에도 이루어져 왔다. 라그랑지안 퍼프모델 ATSTEP와 가우시안 퍼프모델 RIMPUFF, 라그랑지안 입자확산모델 DIPLOT를 이용하여 배출고도, 기

† Corresponding author E-mail: kangsw93@kict.re.kr Tel: 031-910-0773 Fax: 031-910-0291

상조건, 토지피복도 등에 따른 방사성물질의 확산을 연구한 Päsler-Sauer의 연구가 대표적이다.⁶⁾ 국내의 경우, Suh 등⁹⁾은 MM5 기상모델과 라그랑지안 입자추적 모델을 통해 중국 동부 진산(Qinshan) 원전의 원전사고를 가정하여 모델링을 수행하였으며,⁸⁾ Kim 등은 MM5 기상모델과 라그랑지안 입자확산모델을 이용하여 일본의 방사능누출사고(1999년)와 북한의 핵실험 사례를 분석하는 등 대기확산모델을 이용하여 방사성 물질에 대한 거동을 모의하는 연구가 진행되어왔다.⁹⁾

그러나 인접국에서 원전사고가 발생하였을 때, 국내 주요 하천과 댐 유역의 대기와 토양에 미치는 영향을 분석한 연구는 부족한 실정이다. 이에 따라 본 연구에서는 우리나라와 인접한 중국 동부해안지역에서 원전사고 발생시 국내 주요 하천과 댐 유역의 대기와 토양에 미치는 영향에 대해 분석하고자 HYbrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory model version 4 (HYSPLIT_4)를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 발생하는 방사성물질은 ¹³⁷Cs으로 가정하였으며 시뮬레이션은 강우가 거의 발생하지 않은 평상시(건기)와 장마기간(우기)을 대상으로 최대 12일까지 수행하여 기후특성에 따라 중국의 댐 원전사고가 발생할 경우 국내 주요 하천 및 댐 유역의 대기 및 토양에 미치는 영향을 파악하였다.

2. 연구방법

2.1. HYSPLIT_4 모형

HYSPLIT_4는 미국 National Oceanic and Atmospheric Administration Air Resources Laboratory (NOAA/ARL)에서 개발된 입자확산모델로서 라그랑지안 방법에 기초한 대기 확산모델이다. HYSPLIT_4를 이용하여 하나 이상의 배출원에서 배출되는 대상물질의 수송·확산 과정을 계산하고 오염물질의 정방향 및 역방향 궤적 추적이 가능하다. 또한 방사성 물질의 대농도와 확산거동을 시뮬레이션할 수 있

고 건·습식 침적량을 계산함으로써 방사성 물질의 피폭량과 농도를 예측할 수 있다. 이 외에 HYSPLIT_4는 다른 대기확산모델과 비교하여 계산용량과 모델링 시간이 적게 소요된다는 장점을 가진다.¹¹⁾

2.2. 연구 대상 지역

가상의 원전사고 지역은 중국 동해안에 위치하며 우리나라와의 거리가 가까워 원전사고 발생시 큰 영향을 줄 것으로 예상되는 장쑤성 댜원강 시의 댜원 원전(34.70°N 119.48°E)을 선택하였다. 시뮬레이션을 통해 방사능을 관측할 범위로 위도 35.88° 경도 127.5°를 중심으로 동서 방향으로 400 km, 남북방향으로 670 km에 해당하여 우리나라 전역을 포함하는 영역을 대상 지역(400 km × 670 km)으로 선택하였다. 또한 주요 하천과 댐 유역의 대기 중 방사성물질의 농도와 침적에 대하여 파악하기 위해 국내 주요 하천 유역의 영역을 한강 유역 I, 한강 유역 II, 낙동강 유역 I, 낙동강 유역 II, 영산강 유역 I, 영산강 유역 II으로 나누어 분석하였다. 각 하천의 유역의 범위는 Table 1에 나타내었다.

2.3. 모형 구축

HYSPLIT_4의 기상입력자료는 NOAA/ARL에서 제공하는 0.5° × 0.5° 간격의 GDAS 자료(풍향, 풍속 등)를 사용하였고 시뮬레이션 기간 동안 발생한 강우자료를 기상청의 기상자료개방포털로부터 제공받아 이용하였다.

가상원전사고의 발생 Scenario에 따른 HYSPLIT_4에 입력되는 배출량과 배출조건, 침적과정 옵션을 Table 2에 제시하였다. 본 연구의 목적인 댜원 원전사고가 국내 하천과 댐 유역에 미치는 영향을 확인하기 위해 입자성 방사성 물질인 ¹³⁷Cs의 방출 시간과 가상의 사고가 발생한 기간(건기, 우기)을 제외한 모델 내 파라미터들을 최대한 같게 선택하였고 원전사고시 ¹³⁷Cs(반감기 30년)^{12,13)}이 1시간, 7일, 12일 동안 댜원 원전 지상 50 m 고도에서 방출되는 조건으로 시뮬레이션을 수행하였다. 배출량은 1.05 × 10¹⁵ Bq/h으로 가정하였고 지상 200 m 고도에서의 ¹³⁷Cs 농도를 24시간 간

Table 1. Latitude and longitude range of major river basin (unit : degree)

River basin	Han River I	Han River II	Nakdong River I	Nakdong River II	Yongsan River I	Yongsan River II
Latitude	37.44-37.68	37.68-38.04	35.00-35.30	35.60-36.00	34.76-34.84	35.08-35.24
Longitude	126.78-127.14	127.50-127.98	128.82-129.30	128.40-128.70	126.30-126.42	126.66-126.96

Table 2. Scenario of nuclear power plant accident

Scenario	Release condition				Simulation time	Fallout deposition analysis period	Remarks
	Release area	Release rate	Release height	Release time			
I	Tianwan	1.05 × 10 ¹⁵ Bq/h	50 m	1 hr	7 days	March 29, 2011-April 04, 2011	Dry period
II	Tianwan	1.05 × 10 ¹⁵ Bq/h	50 m	1 hr	7 days	June 22, 2011-June 28, 2011	Rainy period
III	Tianwan	1.05 × 10 ¹⁵ Bq/h	50 m	7 days	7 days	March 29, 2011-April 04, 2011	Dry period
IV	Tianwan	1.05 × 10 ¹⁵ Bq/h	50 m	7 days	7 days	June 22, 2011-June 28, 2011	Rainy period
V	Tianwan	1.05 × 10 ¹⁵ Bq/h	50 m	12 days	12 days	March 29, 2011-April 09, 2011	Dry period
VI	Tianwan	1.05 × 10 ¹⁵ Bq/h	50 m	12 days	12 days	June 22, 2011-July 03, 2011	Rainy period

적으로 최대 12일까지 분석하였다. ^{137}Cs 의 공기 역학적 평균 직경은 $0.4\ \mu\text{m}$ 로 설정하였고, 침적과정은 선행연구^{4,5)}를 참고하여 particle density는 $1.9\ \text{g cc}^{-1}$, 건성침적속도는 $0.002\ \text{m/s}$, 구름 아래 세정 계수(Below-cloud scavenging coefficient)를 $5.0 \times 10^{-5}\ \text{s}^{-1}$ 로 적용하였다.

^{137}Cs 의 가상 배출지점은 TENW 원전이 위치한 34.70°N 119.48°E 로 설정하였으며 모델링 영역은 한반도를 포함하도록 위도 35.88° , 경도 127.5° 를 중심으로 위도, 경도가 각각 5.36° , 4.8° 의 범위에 해당하는 모의격자를 구축했다.

HYSPLIT_4 모델의 기상자료는 NOAA/ARL에서 제공하는 기온, 바람(u, v 성분), 지상기압, 대기경계층 고도, 등을 사용하였으며, 시뮬레이션을 위해 기존 HYSPLIT_4에서 제공하는 ARL-map을 이용하였다.

2.4. 모형 해석

우리나라의 지리적 위치와 기후적 특성으로 인하여 중국 동부 해안지역에서, 원전사고가 발생할 경우 방사성물질이 기류를 통해 한반도로 이송·확산될 것으로 분석되었다. 이에 따라 본 연구에서는 강우가 발생하지 않은 2011년 3-4월의 바람장과 장마가 발생한 2011년 6-7월의 바람장을 분석하여 ^{137}Cs 의 이동궤적과 비교하였다. 또한 건기와 우기에 발생하는 ^{137}Cs 의 침적에 대하여 분석하기 위하여 시뮬레이션 기간의 강우에 대하여 기상청의 자료를 이용하여 분석하였다.

중국 동부 해안지역에서 발생한 원전사고가 방출시간에 따라 국내 주요 하천 유역에 미치는 영향을 파악하기 위하여 ^{137}Cs 의 방출시간을 다르게 설정하여 모델링 결과를 비교하였다. 또한 대기의 ^{137}Cs 최고 농도와 침적된 ^{137}Cs 의 최고 농도를 건기와 우기로 나누어 비교하여 중국 동부 해안지역의 원전사고가 국내 주요 하천 유역에 미치는 영향을 분석하였으며 하천 및 댐 유역으로 침적된 비율을 강우와 함께 비교함으로써 ^{137}Cs 의 침적과 강우의 연관관계에 대하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 바람장 및 강우 분석

건기와 우기별 대기 및 주요 하천 유역의 ^{137}Cs 의 농도 변화와 Scenario별 ^{137}Cs 확산과 침적에 대하여 분석하기 위해 시뮬레이션 대상 기간의 바람패턴과 강우를 분석하였다. Fig. 1은 건기의 사고발생 가정일(2011년 3월 29일)로부터 12일간의 바람패턴을 나타낸 자료이다. 사고발생일인 3월 29일에는 TENW 지역에 북서풍이 발생하여 바람의 방향이 중국 동부해안에서 한반도 쪽으로 불어오는 것을 확인할 수 있다. 4월 2일에는 서해안 상에서 북풍이 부는 것을 확인할 수 있으며, 한반도 상에서는 북서풍과 북동풍이 만나는 것을 확인할 수 있다. 4월 4일에는 한반도의 서해안에

Fig. 1. Analysis of wind field on (a) 29 March, (b) 2 April, (c) 4 April, and (d) 8 April in 2011.

Fig. 2. Analysis of wind field on (a) 22 Jun, (b) 25 Jun, (c) 27 Jun, (d) 30 Jun in 2011.

서서풍과 동풍이 수렴하며 남북방향으로 불어나가고 4월 8일에는 북풍의 영향이 우세함을 확인할 수 있다. 이를 통해 시간 경과에 따라 한반도를 기준으로 서풍, 북서풍, 북동풍, 서풍과 동풍, 북풍 등으로 바람이 변화하는 것으로 분석되었다.

Fig. 2는 2011년 장마기간의 사고발생 가정일(2011년 6월 22일)로부터의 12일간의 바람패턴을 나타낸 자료이다. 6월 22일 서해상에서 북쪽으로 부는 바람이 관찰되었으며 한반도를 기준으로 서풍이 관찰되었다. 6월 25일에는 한반도와

서해상에서 동풍이 발생한 것을 확인할 수 있으며, 6월 27일에는 서해상에서 서풍이 발생하며 한반도를 기준으로 서쪽과 남동쪽과 북동쪽에서 바람이 불어오는 것을 확인할 수 있다. 이후 6월 30일에는 서해상에서 남서풍이 발생하였고 한반도를 기준으로 남서풍이 발생한 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 우기 중 시간이 경과함에 따라 한반도를 기준으로 서풍, 동풍, 서풍 및 남동쪽과 북동쪽으로부터의 바람의 수렴을 거쳐 최종적으로 남서풍이 발생한 것으로 분석되었다.

Fig. 3은 2011년 3월과 6월의 시뮬레이션 기간에 발생한

Fig. 3. Analysis of precipitation on (a) dry season 2011 and (b) rainy season 2011.

강우를 나타낸다. Fig. 3(a)는 2011년 3월 29일부터 4월 9일까지의 주요 하천 유역의 강우량을 나타내며, 4월 3일 일부 하천 유역에서 소량의 강우가 발생한 것을 확인할 수 있다. 또한 4월 7일과 8일 각 하천 유역에서 10-30 mm의 강우가 발생한 것을 확인할 수 있다. Fig. 3(b)는 2011년 6월 22일부터 2011년 7월 3일까지 각 주요 하천 유역의 강우량을 나타낸다. 이를 통해 주요 하천 유역에서 0-200 mm의 강우가 발생한 것을 확인할 수 있으며, 6월 24-27일과 6월 28일부터 7월 1일 사이 각 주요 하천 유역에서 공통적으로 강우가 발생하였음을 확인할 수 있다.

3.2. 건기·우기별 방사성물질 대기확산 특성

건기에 태완 원전사고가 발생한 경우 국내에 미치는 영향을 파악하기 위하여 바람패턴에 따른 ^{137}Cs 의 궤적을 Fig. 4(a)에 나타내었다. 사고 발생 후, 방출된 ^{137}Cs 은 기류를 통해, 사고 2일 경과 후에 한반도의 서해 지역에 도달한다. 이후 사고발생 3일이 경과했을 때, ^{137}Cs 은 북동방향으로 이동한 후 4일째에 동쪽과 서쪽을 거쳐 한반도 지역에 위치

하는 것을 볼 수 있다. 이후 5일째 되는 날 ^{137}Cs 은 남동방향으로 통해 우리나라에서 벗어나게 된다. 장마로 인하여 강우가 많이 발생하는 우기에 태완 원전사고가 발생하는 경우 ^{137}Cs 의 궤적을 Fig. 4(b)에 나타내었다. ^{137}Cs 은 사고발생 후, 기류를 통해 서해안으로부터 한반도로 유입되어 우리나라의 대기에 존재하게 되며 사고경과 7일 후부터 동쪽방향과 동북방향으로 이동하여 한반도를 벗어나게 된다. 건기와 우기시 원전사고로부터 발생한 ^{137}Cs 은 Fig. 1과 Fig. 2에서 다른 한반도의 바람장과 일치하는 궤적을 보이는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 중국에서 원자력발전소 사고가 발생할 경우 서풍에 의해 한반도로 ^{137}Cs 이 유입될 수 있음을 확인할 수 있다.

^{137}Cs 이 기류를 통해 확산됨에 따라 건기시 3월 31일에 ^{137}Cs 의 농도가 최대값을 나타내었으며 이를 Fig. 5에 나타내었다. Scenario I의 경우 ^{137}Cs 은 서남쪽에서 높은 농도를 나타내며 우리나라 전 지역에 걸쳐 존재한다. 주요 유역의 대기에서 ^{137}Cs 의 농도는 $1.8 - 8.2 \text{ Bq/m}^3$ 의 농도로 분포한다. Scenario III의 경우 우리나라의 북단과 남부지역에 ^{137}Cs

Fig. 4. Analysis of trajectories of ^{137}Cs on (a) dry season 2011 and (b) rainy season 2011.

Fig. 5. Atmospheric diffusion of ^{137}Cs in dry season; (a) Scenario I, 31 March, 2011, (b) Scenario III, 31 March, 2011, and (c) Scenario V, 31 March, 2011.

Fig. 6. Atmospheric diffusion of ^{137}Cs in rainy season; (a) Scenario II, 27 June, 2011, (b) Scenario IV, 27 June, 2011, and (c) Scenario VI, 27 June, 2011.

이 밀집되어 있고 중부지역에 넓게 분포하는 것을 확인할 수 있다. 이때 방출시간이 증가함에 따라 ^{137}Cs 의 농도는 $3.0 \times 10^2 - 6.6 \times 10^2 \text{ Bq/m}^3$ 로 증가한 것을 확인할 수 있다. Scenario V의 경우 4월 7일에 ^{137}Cs 이 서해와 남해 및 우리나라의 북단에 분포하는 것을 확인할 수 있다. ^{137}Cs 은 $5.0 \times 10^2 - 1.1 \times 10^3 \text{ Bq/m}^3$ 의 농도로 분포하며 서해상과 우리나라의 북단에 남해상에 존재하는 ^{137}Cs 보다 농도가 높은 것을 확인할 수 있다.

우기시 대기중 ^{137}Cs 의 농도는 6월 27일에 최대치를 나타내었고 이를 Fig. 6에 나타내었다. Scenario II의 경우 우리나라의 전 지역에 걸쳐 국소 지역에 $1.0 \times 10^3 \text{ Bq/m}^3$ 미만의 낮은 농도로 분포하는 것을 확인할 수 있다. Scenario IV의 경우 우리나라의 중부지방을 영향범위 안에 두며 남서방향에서 북동방향 분포한다. ^{137}Cs 은 주요 하천 유역의 대기 중 $1.1 \times 10^2 - 3.0 \times 10^2 \text{ Bq/m}^3$ 의 농도로 분포하는 것을 확인할 수 있다. Scenario VI도 남서방향에서 북동방향으로 ^{137}Cs 이 분포하는 양상을 보이며 Scenario IV와 비교하여 $1.4 \times 10^2 - 3.8 \times 10^2 \text{ Bq/m}^3$ 에 달하는 농도로 넓게 분포하는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 ^{137}Cs 의 방출시간이 증가함에 따라 시뮬레이션 기간 중 ^{137}Cs 이 국내의 대기에 미치는 영향이 커진다고 판단된다.

간·우기에 따른 대기 중 ^{137}Cs 의 농도를 비교하기 위하여 Scenario별로 각 주요 도시에서의 ^{137}Cs 의 최대농도를 분석한 결과를 Table 3에 나타내었다. Scenario I의 경우 3월 31일에 최대값을 가지며, 한강 유역 I과 한강 유역 II에서 7.2 Bq/m^3 , 8.2 Bq/m^3 로 높은 농도를 보였다. 또한 방사성 핵종의 방출시간이 168 시간인 경우를 나타낸 Scenario III의 경우 한강 유역 I과 영산강 유역 II에서 각각 $6.4 \times 10^2 \text{ Bq/m}^3$, $6.6 \times 10^2 \text{ Bq/m}^3$ 로 높은 ^{137}Cs 농도를 보였으며 방사성 핵종의 방출시간이 288시간인 Scenario V의 경우 영산강 유역 I $9.8 \times 10^2 \text{ Bq/m}^3$, 영산강 유역 II $9.0 \times 10^2 \text{ Bq/m}^3$ 으로 다른 하천 유역에 비하여 높은 ^{137}Cs 농도를 보였다. 원전사고가 우기에 발생한 경우, 방사성 핵종의 방출시간을 1시간으로 가정한 Scenario II의 경우, 6월 27일 낙동강

Table 3. Maximum ^{137}Cs activity concentration in the atmosphere of major river basin in 2011 (unit: Bq/m^3)

River basin	Scenario I	Scenario II	Scenario III	Scenario IV	Scenario V	Scenario VI
Han River I	7.2	9.2×10^{-19}	6.4×10^2	3.0×10^2	8.7×10^2	2.1×10^2
Han River II	8.2	2.0×10^{-16}	5.2×10^2	2.7×10^2	7.3×10^2	3.8×10^2
Nakdong River I	1.8	1.1×10^{-13}	3.0×10^2	1.1×10^2	5.0×10^2	1.4×10^2
Nakdong River II	3.2	3.1×10^{-16}	3.3×10^2	3.1×10^2	1.1×10^3	1.9×10^2
Youngsan River I	6.3	6.5×10^{-17}	6.3×10^2	2.1×10^2	9.8×10^2	2.4×10^2
Youngsan River II	6.2	6.8×10^{-15}	6.6×10^2	3.0×10^2	9.0×10^2	1.9×10^2

유역 I과 영산강 유역 II에서 각각 $1.1 \times 10^{-13} \text{ Bq/m}^3$, $2.8 \times 10^{-15} \text{ Bq/m}^3$ 로 다른 하천 유역에 비하여 높은 농도를 보였다. 또한 한강 유역 I과 한강 유역 II의 경우 각각 $9.2 \times 10^{-19} \text{ Bq/m}^3$, $2.0 \times 10^{-16} \text{ Bq/m}^3$ 의 최대값을 가지며, 방사성 핵종의 방출시간이 168시간인 Scenario IV의 경우 한강 유역 I, 낙동강 유역 II, 영산강 유역 II에서 각각 $3.0 \times 10^2 \text{ Bq/m}^3$, $3.1 \times 10^2 \text{ Bq/m}^3$, $3.0 \times 10^2 \text{ Bq/m}^3$ 로 다른 하천 유역에 비하여 높은 ^{137}Cs 농도를 보였다. 방출시간이 288시간인 Scenario VI은 영산강 유역 II와 한강 유역 II에서 각각 $2.4 \times 10^2 \text{ Bq/m}^3$, $3.8 \times 10^2 \text{ Bq/m}^3$ 로 다른 하천 유역에 비하여 높은 ^{137}Cs 농도를 보였으며 영산강 유역 II에서 $1.9 \times 10^2 \text{ Bq/m}^3$ 의 ^{137}Cs 농도를 보였다. 방출시간이 같은 Scenario를 비교한 결과, 대기중 ^{137}Cs 의 농도는 Scenario I의 경우 Scenario II보다 약 10^{15} 배 높은 농도를 보이는 것으로 확인되었으며 Scenario III의 경우 Scenario IV보다 약 2배, Scenario V의 경우 Scenario VI보다 약 4배 높은 농도를 보여 건기시 대기중 방사성 농도가 우기시 대기중 방사성 농도보다 높은 것을 확인할 수 있다.

Table 4. Maximum ^{137}Cs activity concentration in the basin surface of major river basin in 2011 (unit : Bq/m^2)

River basin	Scenario I	Scenario II	Scenario III	Scenario IV	Scenario V	Scenario VI
Han River I	2.3×10^3	2.5×10^{-8}	1.8×10^5	1.4×10^5	4.4×10^5	1.4×10^5
Han River II	1.4×10^3	2.4×10^{-8}	1.4×10^5	1.4×10^5	2.1×10^5	1.3×10^5
Nakdong River I	7.2×10^2	2.5×10^{-3}	7.2×10^4	2.7×10^4	1.5×10^5	5.6×10^4
Nakdong River II	5.8×10^2	1.5×10^{-11}	7.8×10^4	9.0×10^4	2.5×10^5	6.2×10^4
Youngsan River I	1.6×10^3	9.9×10^{-9}	1.4×10^5	1.2×10^5	2.5×10^5	1.2×10^5
Youngsan River II	2.3×10^3	2.8×10^{-8}	1.7×10^5	1.4×10^5	3.8×10^5	1.0×10^5

3.3. 건기·우기별 ^{137}Cs 낙진 특성

건기와 우기의 ^{137}Cs 의 침적을 비교하기 위하여 대기 중 ^{137}Cs 농도가 가장 높은 농도를 기록한 날의 HYSPLIT_4 시뮬레이션 결과를 바탕으로 침적된 낙진의 특성을 분석하여 Table 4에 나타내었다. 건기에 발생한 원전사고를 가정한 경우 대기 중 ^{137}Cs 농도가 가장 높은 3월 31일에 발생한 ^{137}Cs 의 침적을 분석한 결과 Scenario I의 경우 한강 유역 I과 영산강 유역 II에서 각각 $2.3 \times 10^3 \text{ Bq/m}^2$, $2.3 \times 10^3 \text{ Bq/m}^2$ 로 주변 지역보다 높은 ^{137}Cs 침적농도를 보였다. Scenario III의 경우 한강 유역 I $1.8 \times 10^5 \text{ Bq/m}^2$, 영산강 유역 II $1.7 \times 10^5 \text{ Bq/m}^2$ 로의 ^{137}Cs 침적농도를 보였으며 Scenario V의 경우 한강 유역 I과 한강 유역 II에서 각각 $4.4 \times 10^5 \text{ Bq/m}^2$, $1.3 \times 10^5 \text{ Bq/m}^2$ 로 다른 하천 유역보다 높은 ^{137}Cs 침적농도를 기록하였다. 우기에 발생한 원전사고를 가정한 경우 대기 중 ^{137}Cs 농도가 가장 높은 6월 27일의 침적농도를 분석하였다. Scenario II의 경우 한강 유역 I $2.5 \times 10^{-8} \text{ Bq/m}^2$, 낙동강 유역 I $2.5 \times 10^{-3} \text{ Bq/m}^2$ 로 다른 하천 유역과 비교하여 가장 높은 ^{137}Cs 침적농도를 기록하였고 영산강 유역 II의 경우 $2.8 \times 10^{-8} \text{ Bq/m}^2$ 를 기록하였다. Scenario IV의 경우 영산강 유역 I과 영산강 유역 II에서 각각 $2.5 \times 10^5 \text{ Bq/m}^2$, $3.8 \times 10^5 \text{ Bq/m}^2$ 로 다른 하천 유역에 비해 높은 ^{137}Cs 침적농도를 기록하였다. 또한 한강 유역 I과 낙동강 유역 I에서 $1.4 \times 10^5 \text{ Bq/m}^2$, $2.7 \times 10^4 \text{ Bq/m}^2$ 의 ^{137}Cs 이 침적되는 것을 확인할 수 있었다. Scenario VI의 경우 한강 유역 I $1.4 \times 10^5 \text{ Bq/m}^2$, 낙동강 유역 I $5.6 \times 10^4 \text{ Bq/m}^2$, 영산강 유역 I $1.2 \times 10^5 \text{ Bq/m}^2$, 영산강 유역 II $1.0 \times 10^5 \text{ Bq/m}^2$ 의 ^{137}Cs 침적농도를 기록하였다. 본 결과를 통하여 방출시간이 길수록 지면에서 높은 농도의 ^{137}Cs 이 침적되며 건기 중 ^{137}Cs 의 침적농도가 우기 중 ^{137}Cs 침적농도보다 높은 것을 확인할 수 있다.

3.4. 강우에 따른 하천 댐 유역의 낙진 특성

강우와 ^{137}Cs 의 침적간의 관계를 분석하기 위하여 Scenario I과 Scenario II의 ^{137}Cs 침적률을 분석하였다. 여기서 침적률(%)은 대기와 토양에 존재하는 ^{137}Cs 의 합을 해당 일자에 유

Fig. 7. Deposition rate of ^{137}Cs in Han river basin I in 2011; (a) Scenario I, dry season (b) Scenario II, rainy season.

입된 ^{137}Cs 의 총량으로 가정하고 총량을 대기에 존재하는 양과 토양에 존재하는 양으로 각각 나누어 산정하였다. Fig. 7(a)에 건기 중 한강 유역 I에 침적하는 ^{137}Cs 의 침적률을 나타내었다. 사고가 발생한 3월 29일에는 대기에서 토양으로 침적된 ^{137}Cs 의 양이 없는 것을 확인할 수 있다. 그러나 사고발생 1일 후인 3월 30일부터 4월 1일까지 47 - 48%의 ^{137}Cs 이 침적된 것을 확인할 수 있으며 4월 2일에 80%로 가장 높은 침적률을 보이는 것을 확인할 수 있다. 강우가 발생하였을 때 한강 유역 I의 ^{137}Cs 침적률을 Fig. 7(b)에 나타내었다. 사고가 발생한 6월 22일부터 한반도로 유입된 ^{137}Cs 의 총량 중 99% 이상이 침적된 것을 확인할 수 있으며 시뮬레이션 기간 중 6월 26일에 97%로 가장 낮은 침적률을 보이는 것을 확인할 수 있다. 본 결과를 통하여 방사능 사고 발생시 강우 발생이 대기 중 ^{137}Cs 의 지면 침적에 큰 영향을 끼치는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 NOAA/ARL 기상장과 라그랑지안 입자확산 모델인 HYSPLIT_4를 이용하여 중국 텐완 원전사고가 발생할 경우, 국내에 방사성물질의 거동 특성에 대하여 연구하였다. 시뮬레이션을 위해 NOAA/ARL에서 제공하는 GDAS 기상장과 ^{137}Cs 의 특징 및 방출조건 등을 입력자료로 이용하였다.

1) 기상장 분석을 통하여 건기 시 한반도를 기준으로 서풍, 북서풍과 북동풍, 서풍과 동풍, 북풍 등으로 바람이 변화하는 것을 확인하였으며 우기 시 한반도를 기준으로 서풍, 동풍, 서풍 및 남동쪽과 북동쪽으로부터의 바람의 수렴을 거쳐 남서풍이 발생하는 것을 확인하였고 이를 토대로 ^{137}Cs 의 확산거동을 시뮬레이션을 수행한 결과 시뮬레이션 기간 중 서쪽에서 동쪽방향으로 ^{137}Cs 이 이동하는 것을 알 수 있다.

2) ^{137}Cs 의 방출시간을 다르게 적용하여 시뮬레이션을 수행한 결과 방출시간이 증가할수록 대기과 지면에 존재하는 ^{137}Cs 의 농도가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

3) Scenario I과 Scenario II의 ^{137}Cs 침적률(%) 산정을 통하여 시뮬레이션 기간 중 ^{137}Cs 이 강우가 발생한 우기가 건기에 비하여 높은 비율로 침적되는 것을 확인할 수 있으며 이를 통해 강우의 발생과 ^{137}Cs 의 침적량 증가는 연관관계가 깊다고 판단할 수 있다.

KSEE

Reference

- Kim, H. J., Hyun, Y. J., Kim, Y. J. and Hwang, S. I., "A Study on Effective Management Scheme for Soil and Groundwater Contaminated by Radioactive Materials Due to Nuclear Accidents," *J. Soil and Groundwater Environ.*, **16**(6), 113~121(2011).
- Nuclear Safety and Security Commission, "Nuclear Safety and Security Commission 2011 Annual Report," (2011).
- An, H. Y., Kang, Y. H., Song, S. K., Bang, J. H. and Kim, Y. K., "Atmospheric Dispersion of Radioactive Material according to the Local Wind Patterns around the Kori Nuclear Power Plant using WRF/HYSPLIT Model," *J. Environ. Sci. Inter.*, **24**(1), 81~96(2015).
- Korsakissok, I., Mathieu, A. and Didier, D., "Atmospheric dispersion and ground deposition induced by the Fukushima Nuclear Power Plant accident: A local-scale simulation and sensitivity study," *Atmos. Environ.*, **70**, 267~279(2013).
- Stohl, A., Seibert, P., Wotawa, G., Arnold, D., Burkhardt, J. F., Eckhardt, S. and Yasunari, T. J., "Xenon-133 and caesium-137 releases into the atmosphere from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant: determination of the source term, atmospheric dispersion, and deposition," *Atmos. Chem. and Phys.*, **12**(5), 2313~2343(2012).
- Raskob, W., Hugon, M. and Päsler-Sauer, J., "Comparison and validation exercises of the three atmospheric dispersion models in RODOS," *Radioprotection*, **45**(5), S89~S96(2010).
- Connan, O., Smith, K., Organo, C., Solier, L., Maro, D. and Hébert, D., "Comparison of RIMPUFF, HYSPLIT, ADMS atmospheric dispersion model outputs, using emergency response procedures, with 85 Kr measurements made in the vicinity of nuclear reprocessing plant," *J. Environ. Radioact.*, **124**, 266~277(2013).
- Suh, K. S., Kim, E. H. and Han, M. H., "Development of long-range atmospheric dispersion model against a nuclear accident," *J. Korean Assoc. Radiat. Protect.*, **27**(3), 171~179 (2002).
- Kim, C. H., Song, C. K., Lee, S. H. and Song, S. K., "Simulating mesoscale transport and diffusion of radioactive noble gases using the Lagrangian particle dispersion model," *J. Environ. Radioact.*, **99**(10), 1644~1652(2008).
- Kim, C. H. and Song, C. K., "Lagrangian particle dispersion modeling intercomparison: Internal versus foreign modeling results on the nuclear spill event," *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **19**(3), 249~261(2003).
- Lee, C.-H. and Lee, M.-G., "Adsorption Characteristics of Radioactive Cs Ion by Zeolite X," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **39**, 2, 66~73(2017).
- Jeong, G. J., Son, B. Y., Ahn, C. H., Lee, S. W., Ahn, J. C., Kim, B. S. and Chung, D. M., "Study on Removal of Cesium in Water Treatment System," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **38**, 1, 8~13(2016).