

## An Analysis of the Influence of Nuclear Accident in Neighboring Country Using G-CIEMs Model

- Focused on the River Stream from Chungju Dam to Ipo Weir -

Dae Min Oh<sup>1#</sup>, Young Sug Kim<sup>1</sup>, Sung Won Kang<sup>1</sup>, Seung Kwon Jung<sup>2</sup>, Ji Won Jung<sup>2+</sup>

<sup>1</sup> KICT, 283 Goyangdae-ro, Ilsanseo-gu, Goyang, Gyeonggi, Korea

<sup>2</sup> INNONENT Co.,Ltd, 30 SongdoMirae-ro, Yeonsu-gu, Incheon, Korea

### Abstract

The M 5.8 earthquake occurred in Gyeong-ju in September 2016 and the M 5.4 earthquake occurred in Pohang in November 2017. After these earthquakes, aftershocks were occurred constantly. Korea is a highly dangerous area for a nuclear accident not only in its own country but also in neighboring countries. When a nuclear accident occurs, radioactive materials are diffused in the surroundings by wind and deposited in the soil and the river, which leads to the contamination of drinking water. In this study, we analyzed the effect of cesium diffusion on river, in case of a nuclear accident in neighboring countries using the environmental multimedia fate model (G-CIEMs). Nuclear concentration of radioactivity was observed in Chung-ju dam and Ipo weir, along with the changes in sediment adsorption and dissolved matters in water and the concentration of Cs-137 in dam/weir.

**Key words:** nuclear accident, Cesium, fallout, river, crisis management

### 1. 서론

현재 우리는 원자력발전을 통하여 전기를 생산하고 안정적으로 공급을 받고 있다. 2016년 9월 경주에서 규모 5.8의 지진이 발생한 이후 지속적으로 여진이 발생되고 있다. 지진으로 인하여 결코 안전하다고 확신할 수 없는 상황으로 대규모 지진이 발생한다면 일본의 후쿠시마 원전사고와 유사한 재앙이 발생할 수 있는 상황이다. 방사능 사고가 발생하면, 다량의 방사성물질이

원자력발전소 내부의 공기를 오염시키고 그 오염된 공기가 배기구를 통해 외부로 방출되게 된다. 이 때, 이 방사능은 바람을 타고 주변지역으로 퍼져 나가는데 퍼지는 동안 땅과 목초, 농작물을 오염시키며, 배수를 통해 방출된 방사능은 해양과 하천을 오염시켜 결국 우리가 마시는 식수까지 오염시키는 결과를 초래하게 된다 (Jung, *et. al.*, 2017).

대한민국은 국내 원전사고뿐만 아니라 주변 국가들의 방사능 사고 발생 시 피해 위험도가 매우 큰 지역의

<sup>#</sup> The 1st author: Dae Min Oh, Tel. +82-32-833-1211, Fax. +82-31-995-0867, e-mail. daeminoh@kict.re.kr

<sup>+</sup> Corresponding author: Ji Won Jung, Tel. +82-32-720-5654, e-mail. zzangdol-7@hanmail.net

로 안전지대라 할 수는 없는 상황이다. 현재 중국은 37기의 원전을 가동 중이며, 중국의 원전은 모두 경제의 중심지인 동남 해안지대에 집중되어 있다. 건설 중인 원전은 20기로 현재 전 세계에서 건설 중인 원전의 41%를 차지한다(Newsje, 2017. 4. 26). 또한, 한국원자력안전기술원에서 중국 중서부에서 방사능이 방출될 경우 방사성 물질이 한반도로 이동하는 모의 상황을 시뮬레이션 한 결과, 원전 사고 발생 시 사흘 만에 제주도를 포함한 우리나라 전역이 방사성 물질로 뒤덮이는 것으로 분석되었다. 방사성물질이 국내로 유입될 경우 대기 오염뿐만 아니라 하천, 호수 등 국내 상수원의 오염으로 취수가 불가능한 상황이 발생할 가능성이 충분히 있다.

이처럼 우리나라는 인접국 원전 방사능 사고 발생으로 인한 국내 상수원 오염에 대한 매우 취약한 구조를 가지고 있다. 우리가 매일 마시고 사용하는 수도물은 하천, 댐을 통해 취수를 하며, 지표수에 편중된 수자원으로 인하여 방사능 누출사고 발생시 방사성물질 낙진 확산으로 인한 취약한 수자원을 가지고 있다. 수계로 방사성물질 유입시 식수원 오염 등으로 인한 국민의 물 복지를 위협하고 있기에 인접국의 방사능 사고에 대한 위협 예측이 필요한 시점이다.

방사성물질에 대한 주요 연구 사례를 살펴보면 Kim & Song(2003)은 국내외 3개국의 현업용 기상 예측모델과 라그랑지 입자확산모델을 결합시켜 1999년 일본의 방사능 유출사태에 적용하였으며, 모의된 방사능 오염물질의 이동 및 농도분포 양상을 비교 분석하였다. Suh(2011) 연구에 의하면, 일본의 후쿠시마 원전 사고 초기부터 한국원자력연구원은 LADAS를 운영하여 대기 중 방출된 방사성물질의 확산 및 이동경로를 예측하여 우리나라에 미칠 수 있는 영향을 평가하였다고 한다. Kim, *et. al.*(2016)은 남한강 수계 하천 퇴적물 중 Cs-137의 방사능 농도 분포 실태를 조사하고, 국외 연구사례와 비교하여 국내 하천퇴적물 중 Cs-137의 농도 수준을 평가하였다.

국내 방사능관련 연구사례를 종합하면, 후쿠시마 원전 사고 발생으로 대기중 세슘농도 분석에 대한 관심이

증대된 것으로 확인가능하다. 하천의 경우 국립환경과학원에서 수계 하천 퇴적물에 대한 실제 농도 분포를 조사하였으나, 원전사고 발생으로 인한 대기중의 방사성물질이 지표면, 하천 또는 댐의 낙진확산으로 인한 영향 분석이나 평가는 사례가 없는 것으로 분석되었다.

본 연구에서는 인접국 방사능 사고를 가정하여 세슘 낙진확산으로 인한 수계에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 본 연구에 이용한 모형은 화학물질의 이동경로 모의와 공기, 물, 토양, 지표 등 공간상의 이동·분배 모의뿐만 아니라 지표면에 침착한 물질이 수계를 통해 하류로 이송되는 수계확산분석까지 가능한 대기-수리-수질 통합모의가 가능한 G-CIEMs 모형을 선정하였다. 본 연구는 인접국에서 원전사고로 인해 세슘이 누출되었을 경우를 가정하였으며, 환경다매체모형을 이용하여 세슘이 대기를 통해 국내로 유입하여 낙진침적을 통해 하천 및 댐에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 충주댐에서 이포보 하류까지 하천 구간별, 댐/보별 세슘농도 변화 분석을 통해 수도물 음용기준 200 Bq/L를 초과하여 취수에 취약한 하천구간 분석과 초동대응을 위한 신속한 제염제 살포가 요구되는 하천구간을 분석하고자 한다.

## II. 환경다매체모형 기본이론

본 연구에 활용한 G-CIEMs(Grid-Catchment Integrated Environmental Modeling System)모형은 다매체 환경분석

연구 목표	• 인접국 원전사고시 G-CIEMs 모형을 이용한 오염 확산 영향 분석
방사능 사고 시나리오 구축	• 인접국(중국 뎬완) 방사능 누출사고 시나리오 구성 • 발생원(뎬원원전)-대기확산-국내 낙진영향 분석 시나리오 구성 • 사고 위치에 따른 모의 범위(연구대상지) 및 모의기간 선정
방사성물질 확산 시뮬레이션	• 북한강 수계 지형 자료 및 인근 기상관측소 기상데이터 수집 • 수계영향 분석을 위한 -대기-유역-하천/댐/보 입력자료 구축 • 방사능 누출에 의한 방사성물질 낙진확산 수계영향 시뮬레이션
수계영향 분석	• 방사성물질 낙진확산 모의 및 결과 데이터 추출(Excel) • 충주댐-이포보 구간 하천 농도 변화 분석
결과	• 사고발생 가정 후 7일간 남한강 수계의 Cs-137 취약지역 분석

Figure 1. Research goals and methodologies

을 위해 Mackay의 fugacity formulation와 SimpleBox의 기본 공식을 활용하여 일본 국립환경연구소에서 개발한 모형이다. G-CIEMs모형은 공간분해능력을 가진 지리 정보시스템(GIS: Geographic Information System) 기반의 환경다매체 모델이다(Suzuki, *et. al.*, 2004; Imaizumi, *et. al.*, 2016).

주변 환경에서 방출되는 화학물질의 대기, 물, 토양, 저질 등 매체 간 분석 기능을 가지고 있다. 즉, 원전사고로 인하여 방출된 방사성물질이 대기 중 확산을 통해 지표면에 침착하거나, 강의 흐름을 타고 하류로 이동하며, 또 다른 유역에서 합류하여 희석되기도 한다. 본 모형은 GIS 지리정보 데이터를 이용하여 이러한 여러 매체 간 이동과 대기, 하천 등으로의 이송을 동시에 계산하여 매체 간 이송과 분배, 그리고 지점간의 이동을 동시에 추정이 가능하다. 또한, 기존 수리수문 예측모델에서 유역유출 혹은 하천흐름을 모의하는 것과는 달리 본 모형은 대기인자를 고려하기 때문에 대기-유역-수계에 대한 연계모의 및 분석이 가능하다(Suzuki, *et. al.*, 2004; Imaizumi, *et. al.*, 2016)

G-CIEMs 다매체 모델의 기본적인 환경 매체는 공기과 물(강, 호수), 강이나 호수의 침전물, 토지이용(논, 밭, 임야 등) 그리고 바닷물과 해양 침전물이다. G-CIEMs 모형은 다음의 식(1)과 같이 선형미분방정식으로 계산된다.

$$df/dt = Af + E \quad (1)$$

여기서,  $f$ 는 fugacity 변수의 벡터,  $A$ 는  $D$  value를 구성하는 행렬,  $E$ 는 배출항의 벡터,  $t$ 는 시간을 나타낸다. 위의 미분방정식을 활용하여 dynamic solution을 얻을 수 있다(Suzuki, *et. al.*, 2004). 또한 모델은 배출 벡터  $E$ 와 행렬  $A$ 의 변수가 충분히 작은 시간구배에서  $\Delta f/\Delta t$ 는 일정하다는 가정 하에 같은 미분방정식을 풀어 정상상태 level3 output을 정상상태 level4의 solution으로서 산출해낸다. Fugacity Level3과 Level4는 유역-대기-수계에 유입과 유출이 발생하여 서로 교

환이 가능하다는 공통점을 가지고 있으며, level3는 비평형 정상 상태에서 오염물질의 분해가 포함되지 않으며, level4는 평형상태이지만 불안정한 상태에서 오염물질의 분해과정을 포함하는 것이 차이점이다(Mackay, 2001).

방사성물질의 낙진현상을 예측하기 위해서 대기-유역-하천을 포함하는 매체간 이동에 대한 분석이 필요하다. 대기에 대해서는 대기격자간의 이동과 침착, 분해 및 지표면과의 교환 과정에 대한 모의를 하며, 하천에 대해서는 하천 흐름에 따라 유하와 하천 내에서의 분해, 하상 퇴적물에 대한 침강, 대기와의 교환과정을 모의하게 된다. 토양에 대해서는 유역과 대응할 하천으로의 유출, 토양 내에서의 분해 및 대기와의 교환과정을 통해 모의가 되도록 구성되어 있으며, 해저물질에 대해서는 강이나 호소수와의 교환과정을 수행하게 된다. 이러한 모의를 통해 대기격자마다 대기중 방사성물질의 농도와 유역별 토양, 퇴적물 농도 및 하천 농도를 분석할 수 있다.

### III. 연구 대상지역 및 입력자료 구축

#### 1. 연구대상 지역

인접국 원전 사고발생을 가정하여 방사성물질로 인한 수계영향분석을 위하여 남한강 수계를 연구 대상지역으로 선정하였다. 남한강 수계는 팔당호에서 북한강 수계와 합류되는 하천으로 팔당호로 유입되는 유량이 많고, 국가관리 하천으로 관리되고 있으며, 하천구간, 댐구간, 보구간 등을 다양하게 포함하고 있다. 하천구간에 대한 구분이 비교적 용이한 편으로 본 연구목적에 맞는 하천, 댐 및 보를 중심으로 낙진확산 모의가 가능한 지역으로 평가되었다. 남한강 수계에 유입되는 국가 하천을 모두 포함 하도록 연구범위를 선정하였으며, 단순히 남한강뿐만 아니라 상류의 충주댐과 하류에 설치된 보에 대한 영향 분석이 가능하도록 연구대상지를 선정하였다. 한강 상류에는 북한강과 남한강이 팔당호에서 합류하므로 본 연구 대상지는 남한강 수계에서 팔당

댐 유입 직전까지로 한정하였다. 따라서, 상류의 충주 댐부터 이포보 하류의 팔당댐 유입지점까지를 낙진확산 영향분석을 위한 분석 대상지역으로 선정하여 분석을 수행하였다.

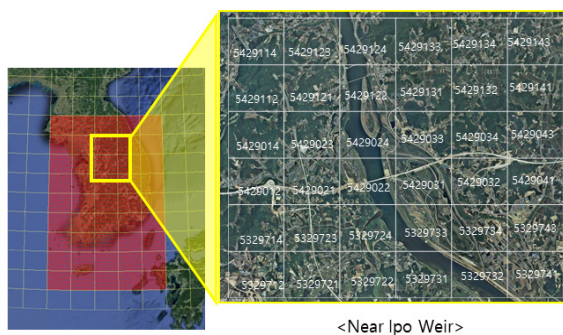
## 2. 입력자료 구축

방사성물질 낙진확산 분석을 위하여 대기격자 구성, 중권역 단위의 유역 구성 및 하천을 구성하였으며, 대기, 하천의 입력자료는 일본 후쿠시마 원전사고 발생일(2011.04.01. ~ 2011.04.07.)을 기준으로 7일간 기온, 풍향, 풍속, 유량, 강수량 등 입력자료를 구축하였다. 상세 입력자료 구축은 대기, 유역, 하천 및 세습매개변수로 구분하여 아래와 같이 구축하였다.

### 1) 대기 격자 및 입력자료 구축

방사성물질 낙진확산 모형(G-CIEMs)의 대기격자 구성은 남한강에 해당되는 지역으로 한정하여 구축하면 바람의 이동에 의한 대기 중 확산결과가 정확하게 분석되지 않을 수 있다. 따라서, 본 연구의 대기격자는 남한 전 지역에 대한 대기분석이 가능하도록 대기격자를 구축하였다(Figure 2).

전국기반 대기격자 구축은 방사성물질 낙진확산 모형의 중요 입력자료이며, 각 대기격자별 수문, 기상 자료가 입력된다. 또한, 방사성물질의 대기 중 확산 및 낙진 분석을 위하여 매우 중요한 부분이다. 대기격자는 남한 전역을 포함할 수 있도록 5km X 5km 격자 10,720개로 구성하여 각 격자별 코드체계를 부여하였다. 격자



<5Km X 5Km Air Mesh>

Figure 2. Create of GIS-based airmesh

의 입력자료는 강우, 풍향, 풍속으로 일본 후쿠시마 원전사고 발생 당시의 2011.04.01. ~ 2011.04.07.(7일간)간의 홍천, 문경, 원주, 제천, 충주, 양평기상청에서 공개하는 자료를 공간보간하여 입력자료로 구축하였다.

### 2) 유역구성 및 입력자료 구축

유역구성은 국가 표준 공통유역도인 수자원단위지로 제공되는 중권역을 중심으로 구축하였다. 중권역은 국내 물관련 기관간 자료를 공동으로 활용하기 위한 기준 유역경계인 공통유역이며, 유역을 평가, 관리하는 차원에서 용도가 목적별로 다양하고 활용도가 가장 많으므로 낙진확산 모의체계 구축에 활용하는데 적합한 공간 분포이다. 본 연구에서는 일본 국립환경연구소에서 제시하고 있는 유역코드를 국내에 실정에 맞게 변경하여 중권역별로 생성하여 입력하였으며, 입력자료는 한강수계의 46개의 중권역을 대상으로 코드를 부여하였다.

유역 구성의 주요 입력자료는 유역면적과 토양타입, 토양의 단위중량 및 공극률이며, 유역면적은 GIS를 통한 유역도의 속성을 추출하여 각 유역의 면적을 산출하였다. 또한, 토양의 단위중량과 공극률의 경우 방대한 유역의 데이터 취득의 어려움이 있어 모형에서 제공하는 기본 값을 사용하였다. 토양타입은 국토지리정보원에서 제공하는 토지피복도를 활용하여 각 유역별 Type 0~6으로 구분하여 각 타입별 면적비율을 산정하여 적용하였다.

### 3) 하천구성 및 입력자료 구축

하도자료 구축은 하천구성과 하천노드를 이용한 하천의 네트워크를 구축하는 것으로 하천 구성은 유역체와 연관성이 있으며, 하나의 유역에 하나의 하천이 매칭이 되도록 구성하였다. 남한강 본류, 평창강, 달천, 섬강 등 지류하천을 포함하였으며, 광동댐, 충주댐 등

Table 1. The composition of a river

River	Sub River	Dam	Weir
Han River	46	8	3

한강수계 8개 댐과 강천보, 여주보, 이포보를 하천 입력자료로 구축하였다. 또한, 하도 코드를 GIS 체계로 구축하여 모형의 입력값 생성과 결과값 표출에 활용한다. 한강수계의 수계별 하천, 댐, 보는 <Table 1>과 같이 적용되었다.

하천네트워크는 노드를 통해 각 하천을 연결시킨다. 하천노드는 각 하천을 네트워크로 연결하는 매우 중요한 요소이며, 하천을 상류와 하류로 구분하는 기능을 가지고 있다. 각각의 하도 상류와 하류에 노드를 구성하여 노드 코드를 부여하고 부여된 노드코드를 연결하면 하도 네트워크가 구성된다.

하천구성의 주요 입력데이터는 하천연장, 하천경사 및 하천유량이며, 하천 길이는 GIS를 통해 추출하였으며, 하천경사와 하천유량의 경우 하천정비기본계획, 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS) 제공 유역별 유황 자료를 활용하였다. 하천유량 초기데이터의 경우 풍수량, 저수량, 갈수량 및 평수량 정보를 추출하여 적용하였다. 하천의 초기농도는 방사성물질 낙진으로 인한 영향을 분석하고자 [0]에서 시작되어 모의가 진행되도록 구성하였다.

4) 방사성물질(세슘-137) 매개변수 구축

방사성물질 낙진확산 예측을 위한 가장 중요한 요소는 방사성물질인 Cs-137의 물성과 Cs-137의 기작이 반영된 결과를 도출하는 것이 목적이다. 화학물질 데이터 입력시 필요한 기초 자료는 표준분자량, 녹는점, 끓는점, 밀도, 증발열 등 Cs-137의 물리화학적 특징들이다. 미국화학회(IFA)와 국제원자력기구(IAEA)에서 기

준으로 제공하는 물질특성자료를 활용하였으며, 일부 계수와 상수의 경우 일본국립환경연구소에서 연구를 바탕으로 적용하는 Default값을 활용하였다. 본 연구에서는 녹는점과 끓는점을 추가하여 모형의 화학물질 입력자료를 구축하였다.

IV. 결과 및 고찰

1. 수체내 방사능 농도변화 분석

<Figure 3>은 남한강 수계의 충주댐~이포보하류 구간을 확대한 하천 구성도이다. 본 연구에서는 대상 구간을 중심으로 하천에서의 세슘-137 농도변화분석을 수행하였다.

방사능 사고 시나리오에 의한 사고발생후 7일간의 한강수계 충주댐~이포보 하류 구간에 대한 수체내 방사능 농도변화 분석을 통해 방사성물질 낙진확산에 의한 수계내 오염농도를 분석하였다. 인접국가 방사능 누출사고 위기대응 실무매뉴얼(2012, 환경부)을 살펴보면 세슘-137의 수돗물 음용기준은 200 Bq/L로 제시되었다. 충주댐하류를 제외하고 대부분의 하천에서 3일차에 수돗물 음용기준 200 Bq/L를 초과하는 것으로 나타났다. 충주댐 하류와 남한강은 7일차까지 지속적으로 농도가 증가하는 것으로 나타났다. 강천보 상류~이포보 하류구간에 5일차까지 지속적으로 Cs-137 농도가 증가 후 최대농도를 나타내는 것으로 예측되었으며, 6일차부터는 점차 감소하는 것으로 분석되었다(<Table 2>).

<Figure 4>는 사고발생 1일차부터 100 Bq/L를 초과

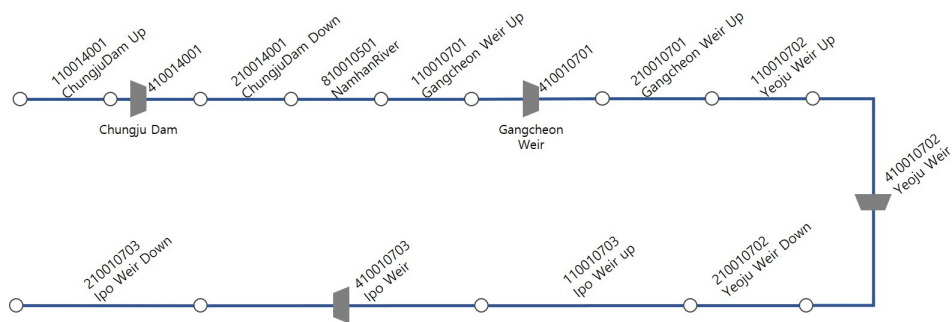


Figure 3. From Chungju dam to Ippo weir in the Namhan river

Table 2. Concentration change of CS-137 in the river (Unit: Bq/L)

River	Day1	Day2	Day3	Day4	Day5	Day6	Day7
Chungju Dam Downstream	29.8	32.1	34.4	37.9	42.2	47.3	53.0
Namhangang	116.9	135.6	157.5	166.1	168.4	169.2	169.5
Gangcheon Weir Upstream	146.5	187.0	213.1	220.2	220.2	218.4	215.6
Gangcheon Weir Downstream	91.0	176.7	228.6	245.4	246.9	244.6	241.1
Yeoju Weir Upstream	92.1	178.7	230.9	247.8	249.3	247.0	243.3
Yeoju Weir Downstream	55.0	140.8	227.7	267.3	274.7	272.8	268.5
Ipo Weir Upstream	56.3	142.1	229.4	269.3	276.8	274.8	270.5
Ipo Weir Downstream	151.7	184.4	274.0	339.8	355.1	352.3	345.5

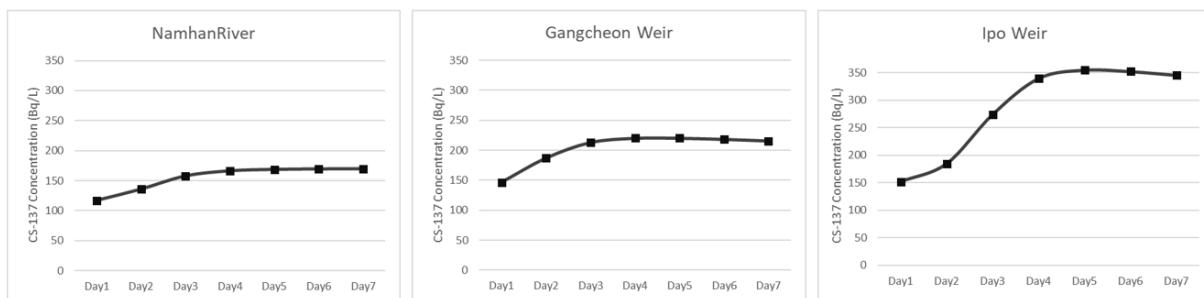


Figure 4. Concentration change of CS-137 in the river

하는 하천으로 인접국 방사능 사고로 인해 남한강 수계 중 가장 취약한 지역으로 판단할 수 있다. 사고 발생 1일차부터 높은 농도를 나타내고 있으므로 사고발생시 초동대응이 가장 먼저 이루어져야 할 하천으로 선정이 가능할 것이다.

남한강 하천수계를 대상으로 보면 사고 3일차부터 대부분의 하천에서 세슘농도가 200 Bq/L를 초과하는 것으로 분석되었으므로 해당 하천에 지하채 또는 광역 취수장이 설치되어 있는 경우, 원수를 취수하여 정수처리과정에서 기준치에 부합되지 않는 정수장이 있다면 적절한 대책이 필요할 것으로 판단된다. 또한, 취수장이 위치한 하천에는 사고발생시 집중적인 제염제 살포 등 방사능 피해저감을 위한 초동대응이 필요한 지역으로 관리가 필요할 것으로 판단된다.

2. 매체별 방사성물질의 변화 분석

방사성물질의 매체별 변화량 분석은 유역내 Soil(토양), 하천내 Water Soluble(수용용해물질)과 Sediment(하천퇴적물)를 대상으로 하였으며, 남한강 이포보 하류

를 대상으로 사고발생후 시간변화에 따른 물질 변화를 분석하였다.

사고발생 후 세슘-137은 대기확산을 통해 이동하고 낙진을 통해 유역과 수계로 유입된다. 1일차 결과를 보면 약 0.17%가 수계로 유입되는 것으로 분석되었다. 2일차부터 7일차까지의 양상을 살펴보면 토양의 세슘-137 비율이 감소하는 것으로 분석되었으며, River와 Sediment는 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다. 또한, Sediment는 1일차에 12.0%에서 7일차에는 20.0%로 약 2배가 증가되는 것으로 분석되었다.

이를 통해 유역에 낙진하는 세슘-137 입자가 사고발생 1일차, 2일차에 발생한 강우에 의해 지표면유출이 되는 것으로 분석할 수 있으며, 모의 7일차까지 지속적으로 수체내로 유입되는 것으로 예측되었다. 아울러 Cs-137이 수체로 흘러들어가 Sediment에 흡착되는 비율이 점차 증가되는 것으로 분석되었다. <Figure 5>는 이포보하류 Soil, Water Soluble 및 Sediment에 대한 물질 수지 변화를 나타내는 그림으로 사고 1일차부터 7일차까지의 방사성물질의 매체별 물질변화에 대해 분석하였다.

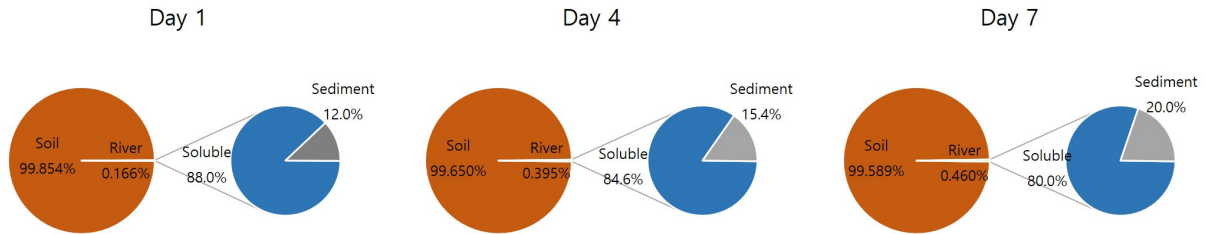


Figure 5. Ratio of soil, water-soluble and sediment

### 3. 댐과 보의 세슘 농도분석

사고발생후 7일간 남한강에 위치한 댐과 보에서의 세슘-137 최대, 평균 및 최소 농도를 분석하였으며, 세슘-137의 최대 농도가 나타나는 댐과 보의 위치를 분석하고자 하였다. <Figure 6>과 같이 남한강 수계의 충주댐~이포보 하류구간의 세슘-137 최대, 평균, 최소 농도에 대하여 한눈에 파악할 수 있도록 그래프를 통해 나타내었다. 아래 그림을 통해 전체적으로 이포보에서 Cs-137 농도가 높게 나타나는 경향을 보였으며, 최대 농도 역시 이포보에서 발생되는 것으로 분석되었다. 한강수계에서 높은 농도가 분포되는 것은 대기중 Cs-137 농도와 연관이 있는 것으로 판단되며, 사고발생 2~3일 차에 한강수계가 포함된 중서부 지방이 동남부 지역보다 높은 대기농도가 나타나기 때문일 것으로 추측이 가능하다.

충주댐의 경우 가장 낮은 농도가 나타나는 것으로 분석되었으며, 충주댐은 최상류에 위치해 있으며, 세슘

-137의 유입량 대비 담수량이 많기 때문에 낮은 농도가 나타나는 것으로 판단된다.

남한강 하류에 위치한 강천보, 여주보 및 이포보 모두 3일차에는 음용수기준을 초과하는 것으로 분석되었으며, 하류로 내려갈수록 세슘-137 농도가 높게 나타나는 것으로 예측되었다. 여주보의 경우 평균 농도와 최대농도가 강천보 보다 높게 나타나는 것으로 분석되었지만, 최소농도의 경우는 강천보 보다 낮게 나타나는 것으로 분석되었다. 또한, 인접국 방사능 누출사고 발생시 사고발생 후 7일간의 모의결과 이포보 구간이 방사성물질 낙진확산에 대한 가장 취약한 것으로 분석되었다(<Table 3>).

## V. 결론

본 연구는 인접국 방사능 사고에 의해 방사성물질이 한반도에 도달할 경우를 가정하여 북한강 수계에 미치

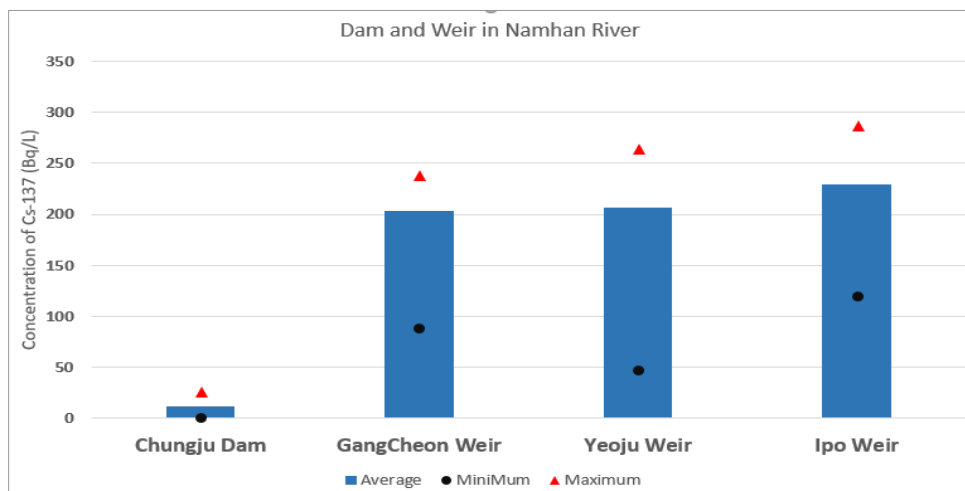


Figure 6. Cs-137 concentrations for average, minimum and maximum in the dam, weir

Table 3. Concentration change of CS-137 in the dam/weir (Unit: Bq/L)

	Day1	Day2	Day3	Day4	Day5	Day6	Day7
Chungju Dam	0,8	2,2	5,0	9,2	14,4	20,5	27,3
Gangcheon Weir	88,7	170,9	220,8	237,0	238,6	236,6	233,3
Yeoju Weir	47,7	133,7	218,8	257,2	264,6	262,9	259,0
Ipo Weir	120,1	129,0	223,5	276,6	288,2	286,6	282,1

는 영향을 분석하고자 대기-유역-하천 연계모의가 가능한 환경다매체모형(G-CIEMs)을 이용하여 Cs-137의 영향을 분석하였다. 인접국에서 방사능 누출사고발생을 가정하여 사고발생후 7일간의 한강수계 충주댐~이포보 하류 구간에 대한 하천, 댐 및 보에서의 세슘-137 농도변화 분석을 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

(1) 인접국 원전사고 발생시 사고 1일차부터 방사성물질(세슘-137)이 하천으로 유입되며, 사고 3일차부터 대부분의 하천에서 세슘농도가 음용수 기준 200 Bq/L를 초과하는 것으로 분석되었다.

(2) 사고발생 후 세슘-137은 대기확산을 통해 이동하고 낙진을 통해 유역과 수계로 유입된다. 2일차부터 7일차까지의 토양의 세슘-137 비율이 감소하고 Water Soluble와 Sediment는 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다. 또한, Sediment는 1일차에 12.0%에서 7일차에는 20.0%로 약 2배가 증가되는 것으로 분석되었다.

(3) 인접국 원전사고 사고발생을 가정하여 7일간의 모의결과 댐과 보에서의 세슘-137 최대, 평균 및 최소 농도 분석을 통해 이포보 구간이 방사성물질 낙진확산에 가장 취약한 것으로 분석되었다.

인접국 원전사고시 방출되는 세슘의 영향을 분석한 결과 충주댐에서 이포보까지의 대부분의 하천 구간에서 Cs-137 수돗물 음용기준 200 Bq/L를 초과하는 것으로 나타났으며, 충주댐하류를 제외한 모든 하천이 세슘에 대하여 취약하다는 것으로 판단할 수 있다. 시간 흐름에 따른 하천 구간의 세슘농도 증가에 의하여 남한강에 위치한 충주, 여주, 이천 및 양평통합 취수장에 영향이 미칠 것으로 예상되므로 해당 원수를 취수하여 정수처리를 하는 수도사업자는 세슘 정수처리가 가능한 비상시 수처리공정 운영방안과 대응매뉴얼을 갖추어야

할 것으로 판단된다.

또한, 본 모의를 통해 세슘농도 최대치가 나타난 곳은 5일차 이포보 하류 하천구간으로 세슘농도가 355.1 Bq/L으로 모의되었다. 인접국 원전사고 발생시 취수장이 위치한 하천구간과 이포보 하류를 중심으로 초동대응 및 방재가 필요할 것으로 판단된다.

본 연구를 통해 현재까지 방사성물질이 낙진하여 하천과 댐에 미치는 영향분석에 대한 선행 연구사례가 없는 것으로 분석되었으며, 분석에 활용된 G-CIEMs 모형은 일본국립환경연구소에서 개발된 모형으로 후쿠시마 원전사고에 대한 영향분석을 통해 보정이 이루어졌다. 본 연구에서는 중국의 원전사고를 가정하여 모형의 매개변수 보정에 한계가 있었으며, 방사성물질인 Cs-137을 대상으로 분석을 수행하여 실제 검증이 불가능한 한계점을 가지고 있다. 중국의 원자력발전소 건설이 증가되고 그로인한 사고 위험성이 높아지고 있기에 인접국 원전사고 발생으로 인한 사회적 혼란 방지를 위해 방사능 물안보 위기관리를 위한 4대강을 중심으로 하천수계에 대한 체계적인 영향분석이 필요하다.

## 감사의 글

이 논문은 국가과학기술연구회의 창의형 융합연구사업 지원에 의해 수행되었음.

## References

- Imaizumi, Y., K. Kuroda, Y. Morino, S. Hayashi, and N. Suzuki. 2016. Temporal-spatial Fate of Cesium-137 in Terrestrial Environment around Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant: A Challenge for Daily Simulation. SETAC Europe

- 26th Annual Meeting.
- Jung, Ji Won, Seung Kwon Jung, Dae Min Oh, and Hyun Suk Lee. 2017. Simulation of River Network Effect by Radioactive Material Fallout Using Environment Multi-media Model. *Smart Water Grid International Conference*. 362.
- Kim, Cheol Hee and Chang Keun Song. 2003. Lagrangian Particle Dispersion Modeling Intercomparison: Internal Versus Foreign Modeling Results on the Nuclear Spill Event. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*. 19(3): 249-261.
- Kim, Ji Yu, Tae Woo Kang, Jung Ki Hong, Mi Jeong An, Chae Won Chang, Kyung Hyun Kim, Young Un Han, and Tae Gu Kang. The Distribution of 137Cs Activities in Sediment Samples of South-Han River Basin. *Analytical Science & Technology*. 29(6): 293-299.
- Mackay, D. 2001. Multimedia Environmental Fate Model: The Fugacity Approach(2nd ed). Lewis Publishers.
- Newsje. If You Live in a Nuclear Power Plant in China, the Worst Affected Area is the Korean Peninsula. <http://www.newsje.com/news/articleView.html?idxno=92695>. 2017. 4. 26.
- Suh, Kyung Suk. 2011. Special Issue: Radioactive Contamination and Air Purification: Assessment of Diffusion of Radioactive Materials in the Atmosphere during Nuclear Accident. *Air Cleaning Technology*. 24(2): 10-16.
- Suzuki, N., K. Murasawa, T. Sakurai, K. Nansai, K. Matsuhashi, Y. Moriguchi, K. Tanabe, O. Nakasugi, and M. Morita. 2004. Geo-Referenced Multimedia Environmental Fate Model (G-CIEMS): Model Formulation and Comparison to the Generic Model and Monitoring Approaches. *Environmental Science & Technology*. 38(21):5682-5693.
- Korean References Translated from the English*
- 김지유, 강태우, 홍정기, 안미정, 장채원, 김경현, 한영운, 강태구. 2016. 남한강수계 하천 퇴적물 시료 중 137Cs 분포. *한국분석과학회*. 29(6): 293-299.
- 김철희, 송창근. 2003. 방사능 누출 사례일의 국내·외 라그랑지안 입자확산 모델링 결과 비교. *한국대기환경학회지*. 19(3): 249-261.
- 서경석. 2011. 특집) 방사능 오염과 공기청정: 원전 사고시 대기 중 방사성물질의 확산 평가. *한국공기청정협회*. 24(2): 10-16.
- 정지원, 정승권, 오대민, 이현석. 2017. 환경다매체모형을 이용한 방사성물질 낙진에 의한 수계영향모의. *한국스마트워터그리드학회 정기학술대회*. 362.
- 제주환경일보. 중국 원전에서 사고나면 최대 피해지역은 한반도. <http://www.newsje.com/news/articleView.html?idxno=92695>. 2017년 4월 26일자.

Received: Feb. 26, 2018 / Revised: Apr. 24, 2018 / Accepted: Jun. 25, 2018

## 인접국 원전사고시 G-CIEMs 모형을 이용한 오염 확산 영향 분석

– 충주댐에서 이포보하류 구간을 중심으로 –

**국문초록** 2016년 9월 경주와 2017년 11월 포항에서 규모 5.8, 5.4의 지진이 발생한 이후 지속적으로 여진이 발생되고 있다. 대한민국은 국내 원전사고뿐만 아니라 인접국의 방사능 사고 발생 시 피해 위험도가 매우 큰 지역으로 안전지대라 할 수는 없는 상황이다. 원전사고가 발생하면, 세슘과 요오드 등 방사성 물질이 방출되고 바람에 의해 주변지역으로 확산되며, 토양과 하천에 침착되어 우리가 마시는 식수까지 오염시키는 결과를 초래하게 된다. 이에 본 연구에서는 환경다매체모형(G-CIEMs)을 이용하여 인접국 방사능 사고시 발생하는 세슘이 낙진확산으로 인해 하천에 미치는 영향을 분석하였다. 세슘의 오염 확산 분석을 위하여 인접국 원전사고 발생을 가정하였으며, 사고발생후 7일간의 한강수계 충주댐~이포보 하류 구간에 대한 수체내 방사능 농도변화 분석, 이포보 하류에서의 Sediment 흡착/수중용해의 물질수지 변화와 댐/보의 Cs-137 농도를 분석하였다.

주제어 : 원자력사고, 세슘, 낙진, 하천, 댐, 위기관리

**Profiles** **Dae Min Oh** : He received his B.A., M.A., Ph.D. From Hanseo University, Korea in 2009. He is a Senior Researcher of Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, in which he has taught since 2016. His interesting subject and area of research is radioactive material studies, Water quality management, and wastewater treatment. He has published 17 articles in journals and proceeding 46 paper in academic conferences(daeminoh@kict.re.kr).

**Young Sug Kim** : He received his from Bukyung National University, Korea in 1981 and M.A and Ph.D. from Korea University, Korea in 1995. He is a Research Fellow of Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, in which he has taught since 1985. His interesting subject and area of research is radioactive material studies, Water quality management, and policy implementation. He has published 35 articles in journals and has result of 19 patents(yskim@kict.re.kr).

**Sung Won Kang** : He received his B.A., M.A. from Kunguk University, Korea in 2002 and Ph.D. from University of Seoul, Korea. He is a Research Fellow of Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, in which he has taught since 2004. His interesting subject and area of research is radioactive material studies, Water quality management, and water treatment. He has published 55 articles in journals and has result of 29 patents(kangsw93@kict.re.kr).

**Seung Kwon Jung** : He received his B.A., M.A from Chungbuk National University, Korea in 2000 and Ph.D. from Kangwon National University, Korea in 2015. He is a Director of Researcher of Global Environmental Research Institute at INNONENT, His interesting subject and area of research is radioactive material studies, Smart Cities, and National disaster(skjung6779@gmail.com).

**Ji Won Jung** : He received his B.A. from HanKyong National University, Korea in 2013 and M.A from University of Nice Sophia Antipolis, France in 2016. He is working Researcher of Global Environmental Research Institute at INNONENT (zzangdol-7@hanmail.net).