Journal of Radiation Industry 14(3) : 227~232(2020)

방사성핵종의 토양 및 수계 내 거동 평가 모델 구축

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

[1]한국원자력연구원 환경안전평가연구부

Construction of Radionuclide Transport Model in Soil and Watershed

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

[1]*Environmental Safety Assessment Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 34057, Republic of Korea*

Abstract - Radioactive materials released into the air from the Fukushima nuclear accident were deposited on the surface by the dry and wet processes. The deposited radionuclides on the soil surface were adsorbed with soil particles and they infiltrated below the soil surface or transported near the watershed by rainfall. In this study, RUSLE, Kinematic models and advection dispersion equation have been constructed to evaluate the behavior of radioactive material by soil erosion, hydrodynamics and transport in soil and river environment. The computed results were compared with measurements near the soil and river of the Fukushima area after the nuclear accident. The comparative results showed good agreements between simulations and measurements.

Key words : Radioactive material, Soil erosion, Hydrodynamics, Transport

서 론

2011년 후쿠시마 원전사고 시 많은 양의 방사성물질이 환경으로 방출되었다(UNSCEAR 2014). 대기로 누출된 방사성물질은 편서풍에 의해 주로 태평양 방향으로 이동하였지만, 일부 방사성 핵종은 일본의 내륙지방으로 이동하면서 건식 및 습식 침적에 의하여 지표면에 떨어져 지표 토양, 산림 및 지표수계를 오염시켰다(Chino *et al*. 2016; Hirose 2016; Mishira *et al*. 2016)

지표면에 침적된 방사성물질은 강우에 의하여 지표 토양 아래로 이동하거나, 그 일부는 침식된 토양과 함께 인근 하천으로 이동하여 지표수계를 오염시켰다(Mastuda *et al*. 2015). 토양 침식에 의한 오염물 이동 및 유실 정도의 평가는 여러 모델 가운데 강우에 의한 토양 유실을 예측하는 USLE (Universal Soil Loss Equation) (Wischmeier and Smith 1978)이 많이 활용되고 있는데, 식생의 계절적 피복변화를 반영하고 개별 강우에 대한 토양 유실량을 산정할 수 있도록 수정 보완된 RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) 모델이 국내·외에서 활용되고 있다(Renard *et al*. 1997; 박지상 등 2006; 공효영 등 2012).

지표 토양 유실에 의하여 인근 하천으로 유입된 오염물의 거동해석은 일반적으로 St. Venant 방정식을 이용하여 하천 유속을 구하고(Hodegs 2019), 평가된 하천 유속을 기본 입력자료로 이류·확산 방정식을 이용하여 하천 내 오염물의 농도를 평가하게 된다(Singh 2002). St Venant 방정식에서 압력항을 무시하고, 마찰항과 중력항이 서로 평형을 이룬다는 가정 하에 Kinematic wave 모델로 변환하여 하류 경계조건이 없는 상황에서 상대적으로 쉽게 해석이 가능하다

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

(Roohi *et al*. 2020).

본 연구에서는 RULSE 모델, Kinematic wave 모델 및 이류·확산 방정식을 이용하여 토양에 침적되어 토양 내 흡착된 ^{137}Cs과 하천내 유입된 ^{137}Cs의 거동을 해석하고 계산결과를 후쿠시마 사고 시 측정된 관측자료(Laceby *et al*. 2016; Nakanishi and Sakuma 2019)와 비교하였다.

재료 및 방법

토양 내 흡착된 ^{137}Cs의 강우에 의한 토양 유실은 RUSLE 모델을, 인근 하천으로 유입되어 하천 내 존재하는 ^{137}Cs의 거동은 Kinematic wave 모델과 이류·확산 방정식을 사용하여 평가하였다.

1. RUSLE 모델

현재 국내·외에서 RUSLE 모델이 토양 유실 평가 방식으로 많이 활용되는데, 후쿠시마 사고 후 일본 원자력연구개발기구에서는 세슘과 토양의 이동 평가에 이 모델을 활용하고 있으며(JAEA 2015), 모델의 기본 방정식은 다음과 같다(Wischmeier and Smith 1978).

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \tag{1}$$

식 (1)에서 A는 토양 유실량($Mg \cdot ha^{-1}yr^{-1}$), R은 강우침식인자($MJ.mm.ha^{-1}.yr^{-1} \cdot hr^{-1}$), K는 토양침식인자($Mg \cdot hr \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$), LS는 지형인자(경사도-경사길이), C는 토양피복인자, P는 침식조절 인자이다. 강우침식인자 R은 연평균 강우의 침식능력으로서 강우의 시간적 분포와 특성으로부터 얻어진다. 강우에 의한 토양 유실은 총 강우량과 강우강도로 표시되며, 특히 강우강도에 보다 많은 영향을 받는다. R값은 연평균 침식도에 근거하여 계산되며, 토양침식인자 K는 토양침식에 영향을 주는 토양의 고유한 특성 인자로서 토양층의 미사, 모래함량, 토양 구조, 유기물 함량, 투수성 등과 관련이 있다. 일반적으로 K값은 0~0.6 범위를 가지게 되는데, 그 값이 낮을수록 토양에 사질토 성분이 많고 투수성이 높다는 것을 의미한다. 지형인자 LS는 경사길이 L과 경사도 S가 토양 유실에 미치는 영향을 설명하는 인자로 LS에 따른 단위 구획당 예상되는 토양 유실량의 비를 의미한다. 식생피복인자 C는 강우, 토양, 지형조건이 동일할 때 식생의 피복 상태에 따른 토양 유실량 비를 말하며, 일반적으로 식생은 강우의 충격으로부터 토양표면을 보호하고 강우에 의한 토양 유출을 감소시킬 수 있다. 침식조절인자 P는 지형조건에 따른 경작지의 형태가 토양 유실에 미치는 영향인자로 경작지 형태는 주로 등고선 경작, 등고선 대상 경작, 계단식으로 구분되고, 상향 경사에서의 토양 유실량을 1로 하였을 때 토양보전농법을 적용하여 감소되는 토양 유실량의 비율을 의미한다(Renard *et al*. 1997).

2. Kinematic Wave 모델

토양에 침적된 방사성핵종은 토양에 흡착하게 되고, 강우에 의하여 인근 하천으로 유입되게 된다. 하천에서 방사성핵종의 농도를 구하기 위해서는 하천의 유속을 먼저 구한 후, 핵종의 거동을 표현하는 이류·확산방정식의 입력자료로 연계하여 핵종 농도를 구하게 된다. 하천에서 유속을 구하기 위하여 본 연구에서는 Kinematic Wave 모델을 사용하였고, 모델의 기본 방정식은 다음과 같다(Singh 2002; Roohi *et al*. 2020).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \alpha n h^{n-1} \frac{\partial h}{\partial x} = q \tag{2}$$

식 (2)에서 h는 수심(L), t는 시간(T), x는 흐름의 수평거리(L), $u = \alpha h^{n-1}$로 유속($L \cdot T^{-1}$), $c = \alpha n h^{n-1}$로 파속($L \cdot T^{-1}$), n은 지수, q는 강우강도($L \cdot T^{-1}$), α는 kinematic wave 저항계수이다.

Kinematic Wave 모델은 항상 비가 오기 전 육상은 건조한(수위 = 0) 상태에서 시작해 상류단 경계조건은 어떠한 유입도 없다는 가정 하에 해석하게 된다. 토양을 충분히 포화시키면 수위가 발생하며, 경사를 따라 물이 흘러간다. 비가 오기전의 초기조건은 수위와 유량이 0이고, 상류단의 경계조건은 강우 발생 시에도 0으로 고정된다. 지류 등의 합류로 인한 특정 조건상에서 수치적인 정확한 계산의 한계가 존재하지만, 장기간 계산에 적합한 빠른 계산이 장점이다.

3. 이류·확산 방정식

토양에 침적된 방사성핵종은 토양에 흡착하게 되고 강우에 의하여 토양과 함께 이동하여 인근 하천으로 유입하게 된다. 유입된 방사성핵종은 하천흐름에 의하여 이동 확산하며, 하천을 오염시키기도 하는데, 하천 내 유입된 방사성물질의 거동을 묘사하는 이류·확산 방정식은 다음과 같다(Singh 2002).

$$\frac{\partial (Ch)}{\partial t} + \frac{\partial (CQ)}{\partial x} = w\delta(t) \tag{3}$$

식 (3)에서 오염물의 농도($M \cdot L^{-3}$), Q는 단위 폭당 유량($L^2 \cdot T^{-1}$), w는 오염물 질량, $\delta(t)$는 오염물의 순간 단위유량($L^{-2}T^{-1}$) 이다.

결과 및 고찰

본 연구에서 구축된 RUSLE 모델과 Kinematic wave 모

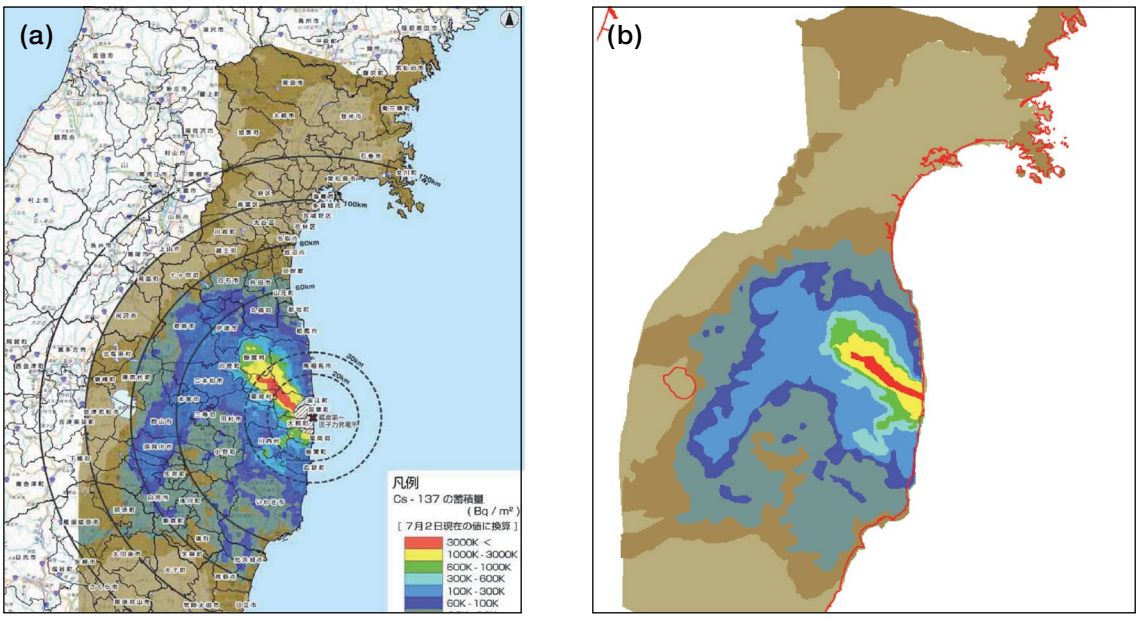

Fig. 1. Concentration distributions of ^{137}Cs on the soil (a) PDF form, (b) NETCDF form.

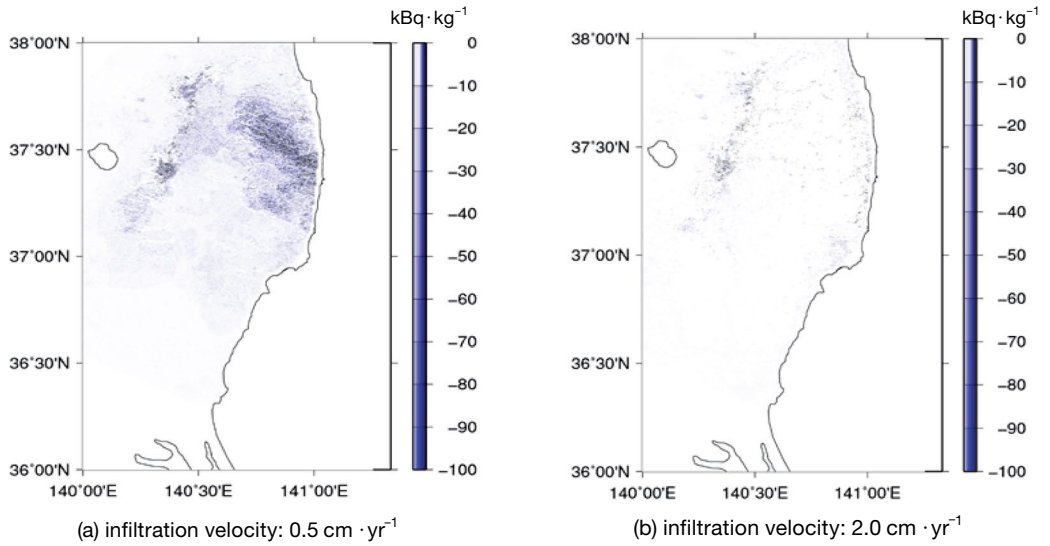

Fig. 2. Decrease rate of ^{137}Cs by soil erosion using RUSLE model: (a) infiltration velocity 0.5 cm·yr^{-1}, (b) infiltration velocity 2.0 cm·yr^{-1}.

델 및 이류·확산 방정식을 이용하여 후쿠시마 사고 이후 지표 토양에 남아있는 ^{137}Cs의 농도와 인근 하천으로 유입된 ^{137}Cs의 농도를 평가하여 관측자료와 비교하였다.

후쿠시마 인근 토양에 남아있는 ^{137}Cs 농도 자료는 일본 문부과학성에서 2013년 3월에 측정한 자료를 인용하였다(MEXT 2013). 자료의 구성은 PDF 파일을 벡터이미지로 변환하고 각 등 농도선의 좌표를 실제 위경도로 변환(PDF 그림 좌표상 Scaling)하여, 자료를 구축하였다. 등 농도선 내측의 값은 공개된 관측자료의 범례에서 중간 값을 사용하였다. 후쿠시마 사고 후 인근 토양에 침적된 ^{137}Cs의 농도를 변환 전 PDF 자료 및 변환 후 NetCDF 데이터파일로 구분하여 Fig. 1에 나타내었다.

^{137}Cs의 침투속도는 Matsuda *et al.*(2014)의 논문에서 제시한 0.5 cm·yr^{-1}~2.0 cm·yr^{-1}까지의 값을 인용하여 침투속도를 변화시켜 관측자료와 비교하였다. Fig. 2에서 침투속도 0.5 cm·yr^{-1}와 2.0 cm·yr^{-1} 경우 지표 토양에 남아있는 ^{137}Cs의 농도 분포를 나타내고 있는데, Fig. 1과 비교하여 보면 침투속도 0.5 cm·yr^{-1}를 사용한 경우 관측자료와 일치하고 있다. 또한 해당 지역의 2011년부터 2013년까지 하천 저면 토사를 샘플링하여 측정한 자료(JAEA 2013)와 비교한 결과를 Fig.

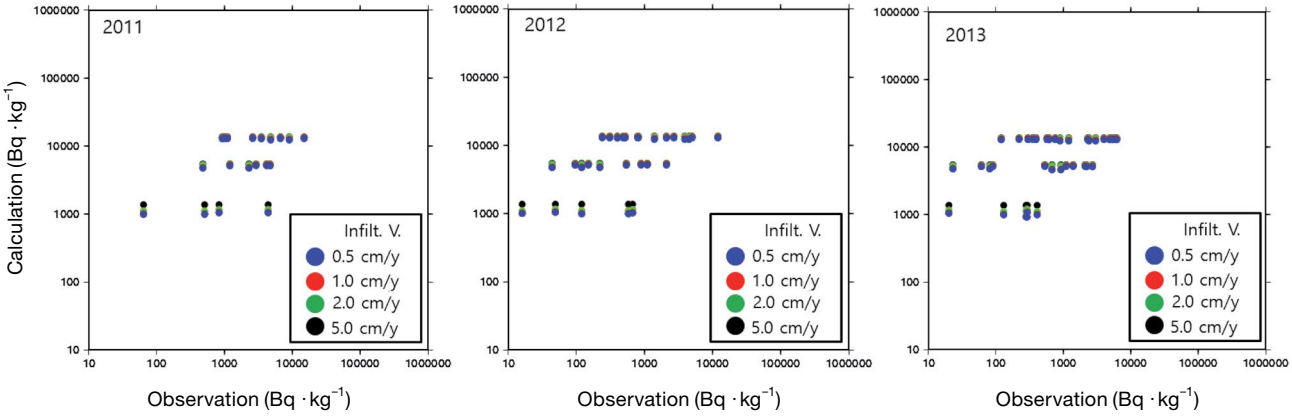

Fig. 3. Comparison of measurements and simulations of ^{137}Cs concentrations on the soil according to the variations of infiltration velocity.

Fig. 4. Automatic river water sampling equipment.

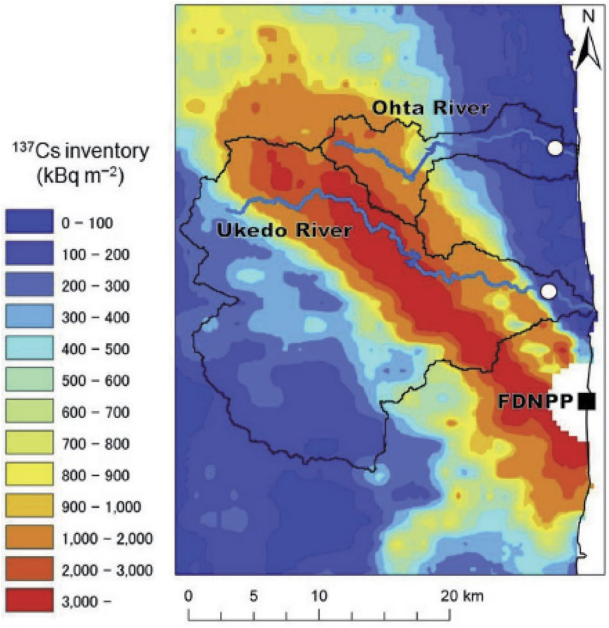

Fig. 5. River systems and distribution of ^{137}Cs inventory based on the measurement in 2011 (Nakanisi and Sakuma 2019).

3에 나타내었는데, 비교 결과 2011년의 관측 결과를 비교적 잘 재현하고 있는 것을 알 수 있으나, 시간이 흐름에 따라 계산치가 상대적으로 큰 값을 보였다. 또한 계산치가 일정한 선 모양을 보이는 것은 초기장의 등 농도선 내에 중앙값을 내삽하였기 때문에 공간적으로 유사한 값을 보인다.

후쿠시마 사고 이후 하천의 방사성물질 관측자료는 2013년까지는 공간적으로 1년에 1지점씩 관측하는 것으로 파악되며, 후쿠시마 관측자료는 일본 원자력연구개발기구에서 제공하는 웹사이트(JAEA 2013)에서 대기(육상 침적된 방사성물질의 선량, 농도 자료) 및 하천 방사능 관측자료 등을 수집하여 활용하였다. 일본 원자력연구개발기구의 F-TRACE 프로젝트가(JAEA 2015) 일본 센다이 지역에서 본격적으로 시행되고 있고, 자동 하천수 샘플링 장비가 설치된 2015년 이후로는 월평균 자료를 활용한 연구 결과가 발표되고 있다(Nakanisi and Sakuma 2019). Fig. 4에 자동 하천수 샘플링 장비를 나타내었다. Ohta 강에서의 ^{137}Cs 농도 관측자료는 출간된 논문에서 독취를 통해 획득하였다(Nakanisi and Sakuma 2019). Fig. 5에 해당 지역을 표시하였고, 2011년부터 2013년까지 관측된 하천수의 ^{137}Cs의 경우 연간 1개의 하천에서 1개의 관측을 수행하였으며, 2016년부터 용존된 방사성물질과 흡착된 방사성물질을 분리할 수 있는 필터를 추가하였다. 따라서 본 연구에서는 2016년과 2017년의 관측자료와 월별로 비교를 수행하였다. 평가결과는 Fig. 6에 나타난 바와 같이 평균 자료와 비교할 경우 계산 결과가 일반적으로 약간 과대평가되는 경향이 있으며, 2016년 2017년 두 경우 모

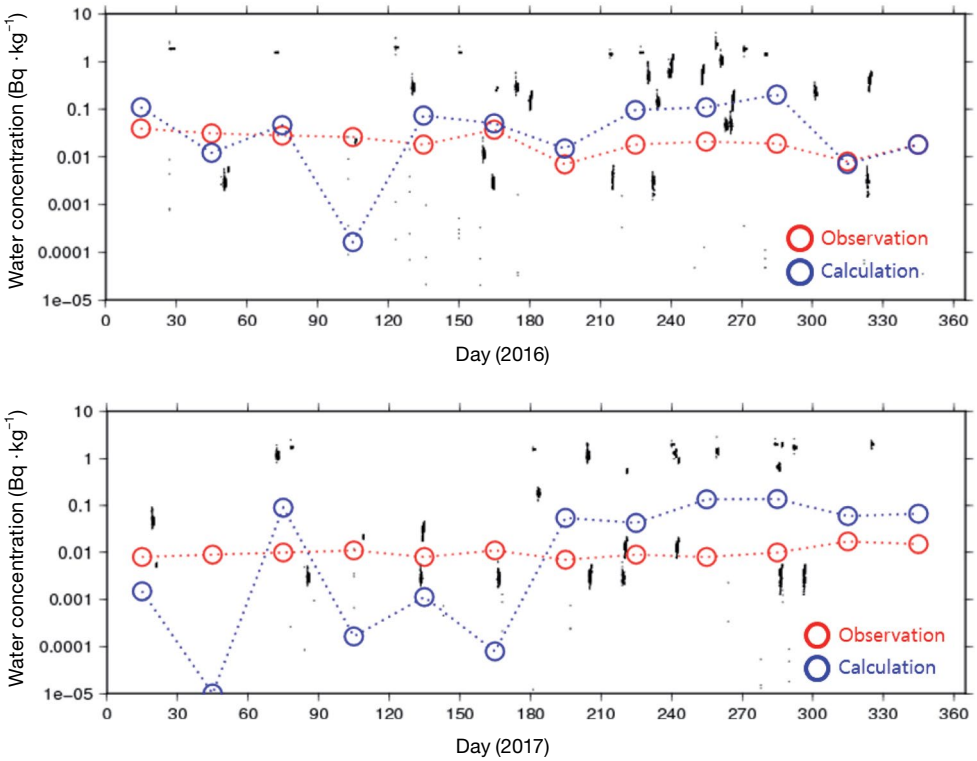

Fig. 6. Comparison of measurements and simulations of ^{137}Cs concentration in water of Ohta river.

두 겨울철, 봄철의 결과가 매우 불규칙했다. 일반적으로 강수량과, 강설량이 구분되어 사용되는 것에 따른 효과로 2017년의 초반 결과는 해석이 가능하며, 2016년의 경우에는 강우 자료가 일부 부정확한(결측으로 인한 처리) 부분을 확인하였다.

결 론

원자력 시설 사고로부터 대기로 누출된 방사성물질이 토양 내에 침적되어 유실되고 강우에 의하여 인근 수계로 유입되었을 때 하천에서의 거동을 평가하는 관련 모델을 구축하였다. 구축된 토양 유실, 하천흐름 및 방사성물질의 거동 평가 모델을 사용하여 후쿠시마 사고 후 인근 토양과 하천에서 관측된 ^{137}Cs 농도와 비교하였다. 비교 결과 ^{137}Cs의 토양 유실 형태와 하천 내 방사성물질의 농도가 어느 정도 일치하였다. 다만, 2019년 후쿠시마 하천 현장관측으로부터 하천 대부분이 갈대와 수풀로 덮여 하천으로서의 역할을 크게 하지 못하고 있는 것으로 파악되었고, 수치 모델에서 나타나는 예측 오차도 이러한 부분을 고려하지 못하는 것이 하나의 원인이라고 생각된다. 향후 일본 원자력연구개발기구과 지속적으로 공동 현장관측을 수행할 예정이고, 추가적으로 후쿠시마 인근 토양 및 수계의 방사성물질 관측자료를 더 확보하여 후쿠시마 토양 침적 ^{137}Cs의 거동을 더 상세히 평가할 예정이다.

본 연구에서 구축된 토양 유실, 하천흐름 및 오염물 이동평가 모델은 방사선사고 시 환경으로 누출된 방사성물질에 의하여 환경에 미치는 영향을 평가하는 데 활용될 예정이다.

사 사

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

참 고 문 헌

공효영, 이광표, 이종열, 김범준, 이아름, 배범한, 김지연. 2012. RUSLE 모델에 의한 군사격장 피탄지 토양 유실량 평가: 토양 유실과 오염 화약물질 이동 상관성. 지하수토양환경. **17**(6):119-128.

박지상, 김건하. 2006. RUSLE 모델을 이용한 금강유역의 토지 이용별 토사유출량 추정. 한국물환경학회지. **22**(4):619-625.

Chino M, Terada H, Nagai H, Katata G, Mikami S, Torii T, Saito K and Nishizawa Y. 2016. Utilization of ^{134}Cs/^{137}Cs in the

environment to identify the reactor units that caused atmospheric releases during the Fukushima Daiichi accident. *Sci. Rep.* **6**:1-14.

Hirose K. 2016. Fukushima Daiichi Nuclear Plant accident: Atmospheric and oceanic impacts over the five years. *J. Environ. Radioact.* **157**:113-130.

Hodegs BR. 2019. Conservative finite-volume forms of the Saint-Venant equations for hydrology and urban drainage. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **23**: 1281-1304.

Japan Atomic Energy Agency. 2013. https://emdb.jaea.go.jp/emdb/en/portals/b1030115.

Japan Atomic Energy Agency. 2015. Use of Knowledge and Experience Gained from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident to Establish the Technical Basis for Strategic Off-site Response, JAEA-Review 2015-001 91pp JAEA.

Laceby JP, Chartin C, Evrad O, Onda Y, Garcia-Sanchez L and Cerdan O. 2016. Rainfall erosivity in catchments contaminated with fallout from the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **20**:2467-2482.

Matsuda K, Takagi K, Tomiya A, Enomoto M, Tsuboi JI, Kaeriyama H, Ambe D, Fujimoto K, Ono T, Uchida K, Morita T and Yamamoto S. 2015. Comparison of radioactive cesium contamination of lake water, bottom sediment, plankton, and freshwater fish among lakes of Fukushima Prefecture, Japan after the Fukushima fallout. *Fish Sci.* **81**:737-747.

Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology. 2013. https://radioactivity.nsr.go.jp/en/list/307/ list-1.html.

Mishra S, Sahoo SK, Bossew P, Sorimachi A and Tokonami S. 2016. Vertical migration of radio-caesium derived fromthe Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident in undisturbed soils of grassland and forest. *J. Geochem. Explor.* **169**:163-186.

Nakanishi T and Sakuma K. 2019. Trend of ^{137}Cs concentration in river water in the medium term and future following the Fukushima nuclear accident. *Chemosphere* **215**:272-279.

Renard KG, Foste GR, Weesies GA, McCooL DK and Yoder DC. 1997. Predicting Soil Loss by Water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE), Handbook No. 703.

Roohi M, Soleymani K, Salimi M and Heidari M. 2020. Numerical evaluation of the general flow hydraulics and estimation of the river plain by solving the Saint-Venant equation. *Model. Earth Syst. Environ.* **6**: 645-658.

Singh VP. 2002. Kinematic wave solutions for pollutant transport by runoff over an impervious plane, with instantaneous or finite-period mixing. *Hydrol. Process.* **16**:1831-1863.

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.

Wischmeier WH and Smith DD. 1978. Predicting Rainfall Erosion Losses-A Guide to Conservation Planning, US DoA. Agricultural Handbook No. 537.

Received: 12 June 2020
Revised: 24 June 2020
Revision accepted: 6 August 2020