Research Paper https://doi.org/10.7733/jnfcwt.2019.17.1.1

Study of Soil Erosion for Evaluation of Long-term Behavior of Radionuclides Deposited on Land

육상 침적 방사성 핵종의 장기 거동 평가를 위한 토사 침식 연구

Byung-Il Min[1], Byung-Mo Yang[1], Jiyoon Kim[1], Kihyun Park[1], Sora Kim[1], Jung Lyul Lee[2], and Kyung-Suk Suh[1,*]
[1]Korea Atomic Energy Research Institute, 111, Daedeok-daero 989beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea
[2]Sungkyunkwan University, 2066, Seobu-ro, Jangan-gu, Suwon, Gyeonggi-do, Republic of Korea

민병일[1], 양병모[1], 김지윤[1], 박기현[1], 김소라[1], 이정렬[2], 서경석[1,*]
[1]한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로989번길 111
[2]성균관대학교, 경기도 수원시 장안구 서부로 2066

(Received September 27, 2018 / Revised November 8, 2018 / Approved December 4, 2018)

The accident at the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant (FDNPP) resulted in the deposition of large quantities of radionuclides over parts of eastern Japan. Radioactive contaminants have been observed over a large area including forests, cities, rivers and lakes. Due to the strong adsorption of radioactive cesium by soil particles, radioactive cesium migrates with the eroded soil, follows the surface flow paths, and is delivered downstream of population-rich regions and eventually to coastal areas. In this study, we developed a model to simulate the transport of contaminated sediment in a watershed hydrological system and this model was compared with observation data from eroded soil observation instruments located at the Korea Atomic Energy Research Institute. Two methods were applied to analyze the soil particle size distribution of the collected soil samples, including standardized sieve analysis and image analysis methods. Numerical models were developed to simulate the movement of soil along with actual rainfall considering initial saturation, rainfall infiltration, multilayer and rain splash. In the 2019 study, a numerical model will be used to add rainfall shield effect by trees, evaporation effect and shield effects of surface water. An eroded soil observation instrument has been installed near the Wolsong nuclear power plant since 2018 and observation data are being continuously collected. Based on these observations data, we will develop the numerical model to analyze long-term behavior of radionuclides on land as they move from land to rivers, lakes and coastal areas.

Keywords: Sediment transport, Soil erosion numerical modeling, Rainfall, Image processing analysis, Sieve analysis

*Corresponding Author.
Kyung-Suk Suh, Korea Atomic Energy Research Institute, E-mail: kssuh@kaeri.re.kr, Tel: +82-42-868-4788

ORCID

Byung-Il Min	http://orcid.org/0000-0002-8518-6275	Byung-Mo Yang	http://orcid.org/0000-0003-1847-4805
Jiyoon Kim	http://orcid.org/0000-0002-7170-1993	Kihyun Park	http://orcid.org/0000-0002-4201-6110
Sora Kim	http://orcid.org/0000-0002-8971-3327	Jung Lyul Lee	http://orcid.org/0000-0001-9410-9725
Kyung-Suk Suh	http://orcid.org/0000-0002-1355-119X		

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

후쿠시마 원자력 발전소의 사고로 인해 일본 동부 지역에 다량의 방사성 핵종이 축적되었다. 이러한 방사성 물질은 숲, 도시, 하천, 호수를 포함한 넓은 범위에서 관측되고 있다. 방사성 세슘의 토양 입자에 강하게 흡착하는 특성 때문에 방사성 세슘은 침식된 토사와 함께 이동하여, 인구가 밀집한 하천 하류지역으로 그리고 연안으로 서서히 이동한다. 본 연구에서는 수생환경의 오염된 토사의 이동을 재현하기 위한 수치모델을 개발하고, 그 성과의 일부를 한국원자력연구원 내에 위치한 침식된 토사 관측 장비에서 관측된 결과와 비교하였다. 수집된 토사 시료의 입경 특성을 분석하기 위해서 표준 체분석과 이미지 분석법을 적용하였다. 수치 모델은 초기 포화도, 강우의 토사 침투율, 멀티 레이어, rain splash 등을 고려하여 현실의 강우에 따른 토사의 이동을 시뮬레이션 할 수 있도록 개발하였다. 2019년 연구에서는 수치모델에 나무에 의한 강우 쉴드 효과, 증발효과, 표면물의 쉴드 효과 등이 추가될 계획이다. 토사 유실 관측 장비를 2018년부터 월성 원전 인근에 설치해 지속적으로 관측 자료를 수집하고 있다. 이러한 관측자료를 기반으로 방사성 핵종의 강우, 하천, 연안으로 이동하는 장기 영향 평가 수치모델을 개발할 계획이다.

중심단어: 토사이송, 토사유실모델, 강우, 이미지분석, 체분석

1. 서론

방사성 핵종의 환경 유출로 인한 사고평가는 크게 초기 평가와 중장기 평가로 나뉠 수 있다. 초기 평가 시에는 정확한 대기, 해양 이송자료를 기반으로 방사성 핵종의 대기, 육상, 해양 등의 확산 범위, 인체 영향을 평가하는 것이 중요하다. 중장기 평가에서는 육상에 침적된 방사성 동위원소가 바람 및 강우와 같은 외력으로 인해 육상, 작은 하천, 호수, 강 그리고 바다로 이동하는 장기적인 거동으로 인한 환경, 먹이사슬 평가, 인체 영향 평가가 중요한 사항이 된다[1].

후쿠시마 사고 이후 다수의 논문에서 방사성 핵종 유출 사고의 중장기 평가를 위해 다음과 같은 물리, 화학적 핵종의 거동을 반영하는 노력이 진행되고 있다. 강우 및 바람에 의한 육상 내 핵종의 거동, 작은 하천 내 핵종의 용존 혹은 입자형태의 거동[2], 댐을 포함한 강 및 호수와 같은 1차원 모델로 설명하기 어려운 거동[3], 하천이 바다의 연안에 연결될 때 핵종과 해수의 이온교환에 따른 입자화 현상 및 장기 거동[4], 그리고 담수와 해수 내 먹이사슬을 평가하는 모델 들이다[5]. 크게 5가지로 나누어 서술할 수 있지만, 각각의 모델에서 필요한 세부 정확도를 요구하는 사항으로는 바닥전단응력 모델, 유속에 의한 입자의 재부유, 침강, 집중 호우로 인한 하천 단면 변화, 범람 및 강변 침적 등 다수의 고려사항이 존재 한다. 이 중 다수는 물리적으로 매우 잘 정립된 수학 모델들이 존재하거나, 신뢰도 높은 기관에서 제공하는 데이터베이스가 존재하는 형태로 해결이 가능한 경우가 있다. 그러나 적용 환경의 특성에 매우 좌우되는 경험식이 주를 이루는 경우에는 변수들을 결정하기 위해 적용 지역의 특성을 포함한 자료 수집 및 직접 관측이 필요하다. 이러한 대표적인 분야가 주로 위도와 기상학적 요인에 따라 큰 변화를 보이는 강우에 의한 토사의 침식 및 이동에 대한 특성 자료다[6].

육상의 강우에 의한 토사 유실에 관한 연구가 주로 경험식을 이루고 있는 것은 국가단위의 장기 농지 유실을 평가 하기 위함이 연구의 주요 목적이였고, 또한 연구자들이 관측 기구를 필요에 의해 직접 제작하여 사용했기 때문이다. 따라서 체계적인 이론이 수립되지 못한 채 과거의 연구결과가 현재까지도 사용되고 있다[7, 8]. 대표적인 예로 Elsevier에 검색된 결과에 따르면 1900년대부터 2017년까지 연구된 강우에 의한 육상의 토사이동 연구 논문은 1,100편이며, 이중 2016년 이후 출판된 논문이 절반인 557편에 이른다[9]. 2016년 이후 많은 출판이 이루어 진 것도 후쿠시마 사고 이후 일본 학자들의 출판물 증가가 매우 큰 역할을 하고 있다고 판단된다. 대표적으로 Japan Atomic Energy Agency (JAEA)에서는 본 연구와 유사한 Long-Term Assessment of Transport of Radioactive Contaminant in the Environment of Fukushima (F-TRACE) 연구프로젝트를 통해 2012년부터 방사성 물질의 중장기 거동 평가 연구를 수행하고 있으며, 사람

및 동식물에게 있어 매우 중요한 담수의 오염에 대해 면밀한 관측과 연구를 수행 중에 있다[10]. 본 논문에서는 육상에 침적된 방사성 핵종의 장기 거동 평가를 위해 강우에 따른 포화도, 침투량, rain splash 등을 고려한 토사이동 수치모델을 개발하였다. 또한 현장실험과 병행하여 토사의 침식량과 강우량의 관계를 분석하였으며, 이를 반영한 수치모델을 소개하고자 한다.

2. 이론적 배경

방사성 핵종이 육상에 침적된 후 표층 토양에서 다양한 형태로 존재하게 된다. 후쿠시마에서 방출된 세슘의 경우 육상에 침적 된지 3년이 경과하면 토사의 미네랄 입자에 강하게 부착되어 더 이상 물에 녹아 분리되기 어려운 형태로 존재하는 비율이 약 97%에 이른다고 한다[11]. 체르노빌의 경우 토사 표층에서 수직 20 m 깊이 내에 침적된 총 방사성 핵종의 90%가 존재한다고 발표된 바 있다[12]. 방사성 핵종의 수직분포는 초반 1~2년은 Exponential 함수로 표현이 가능하지만, 더 장기적으로는 Hyperbolic secant 함수로 표현되는 것이 후쿠시마 인근의 관측 자료에서는 더 신뢰성을 갖는다고 한다[13]. 유사하게 Gauss함수와 유사한 모델을 적용한 연구에서도 Exponential 함수로 표현하는 것에 대한 신뢰성에 의문을 제기된 바 있다[14]. 후쿠시마와 체르노빌 사고 이후 수행된 많은 연구결과를 종합하면 육상에 침적된 세슘의 경우 표층에서 수직 20 cm 까지는 최소한 고려해야 하며, 97%의 세슘이 물에 녹지 않고 토사 입자와 함께 거동 함을 전재 할 수 있다[11, 14].

강우나 바람에 의한 육상의 토사 이동에 대한 연구는 경험적이고 관측자료에 의존한 방정식을 주로 사용하고 있다. 가장 큰 이유로는 관측의 어려움에 있으며, 강우 관측은 시간당 내린 강우의 높이를 누적해서 기록하는 방식인 누적 강우량(mm) 개념을 사용하고 있다. 따라서 빗방울의 크기와 속도, 각도가 중요한 강우 충격력을 고려하는 에너지 방정식을 적용하기란 매우 어려운 일이다. 강우 입자의 충돌에 의한 빗물 튀김과 토사의 면상이동 및 침식 메커니즘을 설명한 연구는 대표적으로 [15], [16], [17] 등이 있다. 이러한 연구를 통해 토사 입자가 강우에 의해 수직으로 약 1.5 m [18], 그리고 수평으로는 5 m 이상 이동할 수 있음이 확인 되었다[19]. 또한 토사의 성분, 입자의 크기, 토사 표면의 식물 비율 그리고 수분을 포함하고 있는 함수율이 이동 거리에 중요한 영향을 준다[18]. 강우가 토사에 충격을 반복적으로 가하면 토사 표면의 흙 입자의 밀도는 증가하게 된다[20]. 흙 입자의 밀도가 변하면 물을 포함할 수 있는 최대 능력이 감소하게 되고 이에 따라 토사 표면에 물이 고이게 되면 이 물은 강우가 토사 표면에 가하는 충격을 감소시키는 역할을 하게 된다[16]. 흙 입자 사이의 마찰력과 빗방울의 충격에너지를 수치화해 연구한 결과가 극소수 있지만[21], 현장에 적용이 어렵다는 결론을 가지고 있다[22]. 후쿠시마의 경우 최근 발표된 논문들 중 일부는 연구, 관측자료의 부족으로 토사 이동을 매우 경험적인 수식으로 사용하는 형태로 초기에 적용하였으나, 현재는 JAEA의 F-TRACE 프로젝트의 경우에는 직접 현장에서 관측한 자료를 활용하려는 형태로 연구가 진행되고 있다[23].

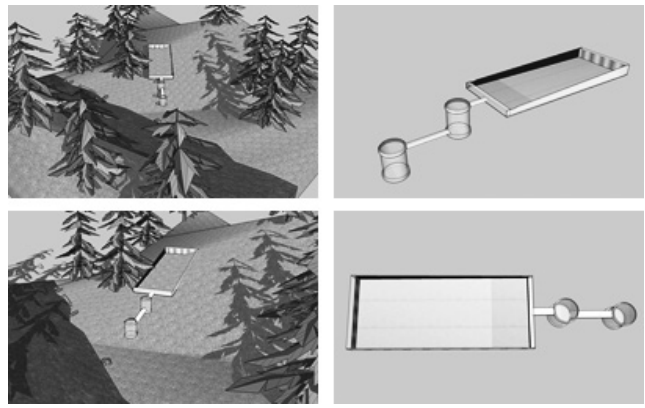


Fig. 1. A design of field experiment.

3. 현장 관측 모형 제작 및 실험 개요

3.1 현장 실험 모식도 및 체분석 실험

강우로 인한 토사의 이동을 살펴보고 이와 관련된 데이터 분석을 수행하기 위하여 실험 장비를 제작하였다. Fig. 1은 사각형 박스 형태로 제작된 토사 유출 실험 장비를의 모식도를 나타낸 것으로, 실험 경계(폭 2.1 m, 길이 3.5 m, 경사도 7°)를 정하고 비가 온 뒤 실험 영역 내 유출되는 토사를 수집하는

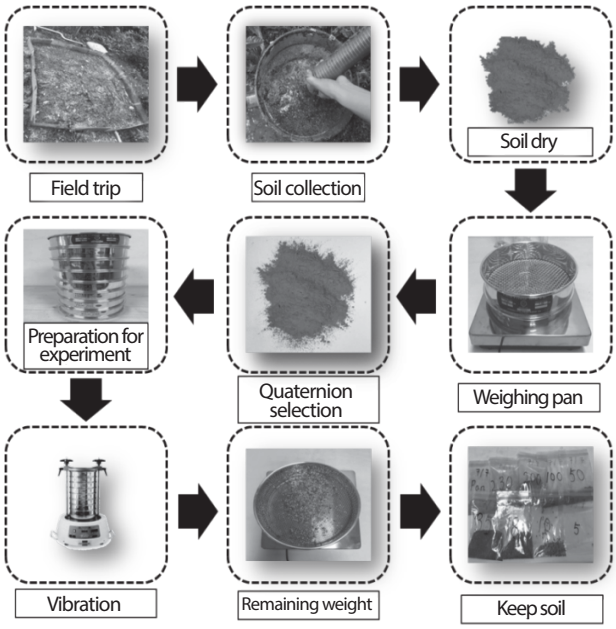


Fig. 2. A procedure of sieve analysis for particle size.

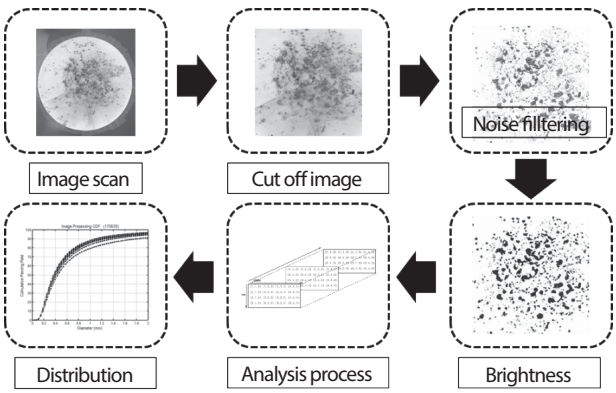


Fig. 3. Analyze of soil size distribution by digital images processing.

방법으로 실험을 진행하였다. 본 실험 방법은 후쿠시마 원전 사고 이후 방사성 오염 물질의 장기거동 평가 및 모니터링 연구의 일환인 F-TRACE의 실험 방법 중 하나로 일본의 실험을 벤치마킹하여 본 연구에 적용하였다[24].

실험 위치는 식생환경, 경사지, 그리고 토양특성으로 구분하여 선정하였다. 식생환경은 계절적인 변화에 따라서 표층 피복의 식생변화를 유발한다. 특히, 활엽수림의 경우 가을철 낙엽이 지표면으로 쌓이게 되면 표토의 침식이 상대적으로 줄어드는 특성을 보인다. 또한 경사도는 토양의 유실을 증가 또는 감소시키는 역할을 한다. 마지막으로 토양 특성은 자갈, 모래, 실트, 점토의 입자 크기에 따라 분류된 토양의 일반적 특성을 고려해야 한다[25]. 본 실험의 토양 특성을 농업진흥청 국립농업과학원의 GIS 조사내용을 바탕으로 살펴보면, 임지의 토질 특성은 양토로써 자갈함량이 매우 없는 토질 특성을 보이며 배수가 양호한 토양 조건이라 말할 수 있다[26]. 본 연구에서는 한국원자력연구원 내에서 관측한 실험결과를 제시하고 있으며, 2018년 현재는 월성원자력발전소 인근지역과 한국원자력연구원 내에서 실험이 진행 중이다.

토사의 물성치를 확인하기 위하여 전통적으로 조립 입자의 입도 분석은 표준체를 이용해 왔으며, 세립 입자는 스토크의 법칙을 이용한 침강법 또는 피펫법 등이 이용되어 왔다[27, 28]. 특히, 입도 분석을 수행하기 위한 방법으로는 일반적으로 장비의 가격이 저렴하고 규격화된 체를 사용한 체가름 시험이 보편적으로 많이 활용되고 있다. 하지만 체가름에 사용되는 체의 규격이 다양하지 않아 균일한 모래 또는 미세한 입자인 점토나 실트의 경우 입도 분포를 정확하게 파악하는데 한계가 있다.

토양에 침적된 방사성 핵종은 토사 입자 외에 토양에 있는 유기물과도 흡착하며, 일반적으로 유기물 함량이 높은 토사의 핵종 흡착률이 높아진다[29]. 토양에 침적된 핵종은 토사 입자 외에 토양에 있는 유기물과도 흡착하며, 일반적으로 유기물 함량이 높은 토사의 핵종 흡착률이 높아진다[29]. 또한 토양의 유기물은 강우 환경적인 요건으로 표층토사의 지속 유실로 인해 표층토사 내 함유량이 낮아지면, 나무, 풀 등의 식생의 생육에 지장을 초래하기도 하며[1], 유기물과 결합한 핵종은 일부 박테리아에 의해 분해되어 가스화되기도 한다[30]. 토양 내의 방사성 핵종은 식물과 곡물의 뿌리로 흡수되어 잎과 열매로 이동해, 겨울철 다시 토양에 떨어져 유기물에 결합된 형태로 토양에 축척된다[1]. 토양에 포함된 유기물은 상기와 같이 매우 중요한 역할을 한다. 그러나 이번 초기 연구 단계에서는 유기물의 영향을 제외한 토사에 흡착된 핵종만 고려하며, 단계적으로 모델의 현실 반영성을 높이기 위해 다양한 물리 과정을 포함할 계획이다.

본 실험의 경우 강우로 인한 토사의 유출을 파악하기 위한 입도 분포 분석의 경우 실트질 이하의 입경 분포가 주요 입자 분포이므로 체가름 실험을 적용하기에는 한계점이 존재하였다. 따라서 체분석과 이미지 분석을 병행하여 입도 분석을

수행하였으며, Fig. 2에는 본 실험에서 수행한 체분석의 실험 과정의 순서를 도식화 하였다. 본 체가름 분석에서는 유기물에 대한 영향은 고려하지 않았으며, 토사 입경의 분포를 구하기 위한 목적으로 분석이 수행되었다.

3.2 이미지 기법을 활용한 입도 분석

최근에는 컴퓨터와 광학장비가 발전함에 따라 체가름 시험 법 대신 이미지를 이용한 흙의 입도분석에 대한 다양한 접근이 연구되어 왔으며 직접적인 디지털 이미지 촬영과 이의 처리를 통해 조립 입자에 대한 입도분석 방법도 고안되어 이미 여러 분야에서 활용되고 있다[31]. 이미지를 활용한 분석은 특정 대상의 이미지를 획득하고 이로부터 실험을 결과를 컴퓨터를 통해 얻는 일련의 과정을 말한다. 이미지를 통한 입도 분석 방법은 이미지를 취득하는 광학장비의 선정[32, 33]과 광학 장비로부터 취득한 이미지를 이용해 실제 모래로 변환하는 과정의 정확성을 확보하는 것으로 나눌 수 있다[34, 35]. 입도분석에 사용된 광학장비로는 디지털 카메라, 현미경, 입체스캐너 등이 있으며, 각각의 장비에 최적화된 분석 방법을 제안해 높은 정확성을 확보하고 있다.

본 이미지 분석 실험은 HP사의 Officejet Pro 8600 스캐너를 통해 고해상도 이미지를 취득하고 입자들의 위치, 형태, 크기를 수치적 기법을 통해 입도 분석 하는 방법으로 진행하였다. 영국 플리머스 대학교의 Daniel Buscombe가 개발한 소스 코드를 활용하여 입도 분석을 수행하였으며, 본 기법은 이미지를 활용한 자갈 및 모래 입경 분포 분석, 비점섬토 및 입경이 불규칙적인 입도 분포 분석에서 성공적으로 적용되었다[36-38]. 이미지를 활용한 입도분석 과정은 대상 시료의 이미지를 획득 이후 좌표 값, 명암 정도, 밝기 등의 변수를 변화를 통해 이미지를 재구성하고, 최종적으로 디지털 이미지를 코드화하여 분석 하는 방법으로 분석과정 모식도는 Fig. 3과 같다.

4. 유출 토사 실험 결과 분석

4.1 체분석을 활용한 입도 분석 연구 방법

입도 분석을 위한 체 분석법은 체의 망 크기에 따라서 정확도가 좌우된다는 문제점을 가지고 있으며, 체가름에 사용되는 체의 규격이 세밀하지 않아 입경이 작은 미세 입자의 경우 입도 분포를 정확하게 파악하는데 한계가 있다. 또한 일반적인 강우에 의해 침식된 토사가 흐르는 빗물에 의해 이동하는 경우 저지대에서 토사 입자의 분포는 0.5 mm 이하가 90% 이상을 차지하며, 침식된 토사의 입경 분포는 강우량에 의한 유속과 매우 상관관계가 높아, 강우가 강할수록 입경이 큰 토사가 침식된다[39]. 본 연구에서 수집된 관측 결과는 Fig. 4에서 보이는 바와 같이 0.5 mm 이하의 미립 토사가 각각 68%, 51%, 48%의 비율로 존재했다. 기존 연구는 하천의 하류에서 측정하였기 때문에 침강속도가 매우 작은 입자들이 주로 관측되었으며, 본 연구에서는 하천이송과정이 없는 직접 유실된 토사를 분석했기 때문에 토사 입경 분포 차이를 보이는 것으로, 이러한 차이점은 하천 모델에서 토사 이송시 입경의 크기에 따른 침강속도를 고려해야 함을 보여준다[39]. 본 연구에서는 이러한 세립질 토사의 상세한 분석을 위해 체분석(체의 직경: 0.064, 0.075, 0.15, 0.3, 0.5 mm)보다 더 상세한 분석이 가능한 이미지 분석 기법을 활용해 입도분포곡선을 분석하였다.

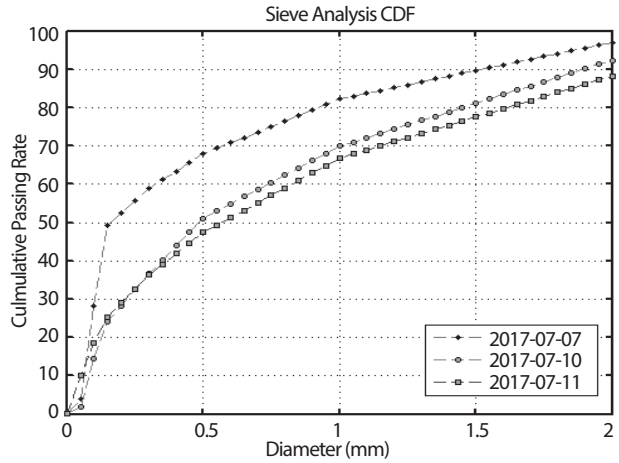
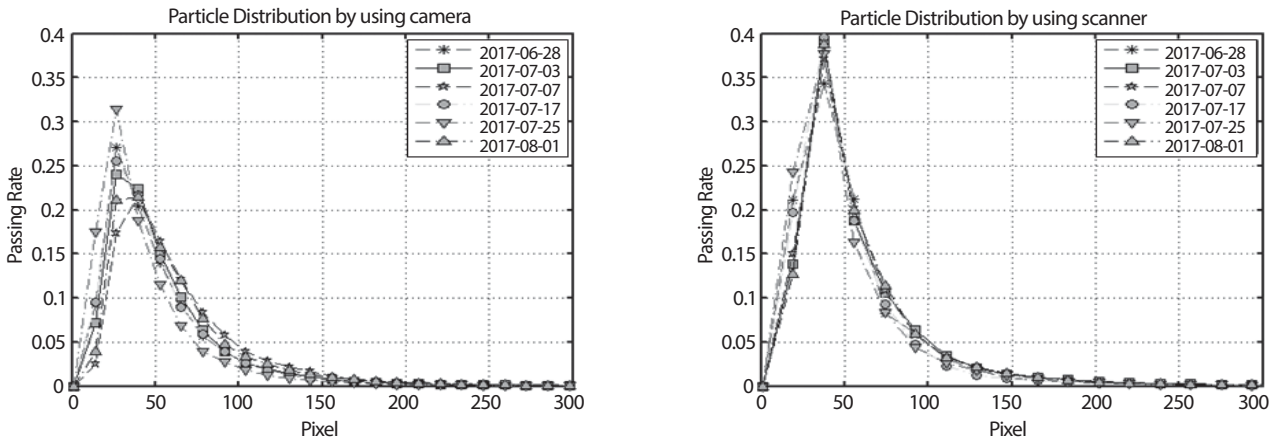


Fig. 4. Soil size distribution by using sieve analysis.

4.2 이미지 처리를 활용한 입도 분석 연구 방법

스캐너를 통해 입자를 이미지화 하고 이로부터 입도 분포를 얻는 과정에는 오차의 가능성이 존재하게 된다. 즉 정확한 이미지 입도 분석을 수행하기 위한 이들 오차의 가능성을



(a) Image processing by using camera (b) Image processing by using scanner

Fig. 5. Particle size distribution for different equipment (a) camera (b) scanner.

검증하고 발생하는 오차에 대한 보정이 필요하다. 본 연구를 통해 수행한 입도를 분석하는 과정 중 발생할 수 있는 오차 검증과 분석 정확도 향상 방법을 다음과 같다. 저 해상도에 의한 이미지 정보 누락 및 카메라 촬영에서 발생하는 왜곡에 의한 오차, 스캔을 수행하기 전 샘플 처리과정 오차, 이미지 분석 프로그램에서 발생하는 공간 계산 방법에 의한 분석 정확도 향상이 있다. 본 실험을 통해 각각의 오차 발생 가능성에 대한 검증 작업을 수행하였으며 발생 오차를 줄이기 위한 개선책 및 분석정확도 향상은 아래와 같다.

카메라 촬영에서 발생할 수 있는 해상도 이미지 정보 누락 및 촬영 시 발생하는 왜곡에 의한 오차 발생을 확인하고 이를 최소화하기 위한 작업을 수행하였다. 카메라를 통해 이미지 분석을 하였을 때 카메라 화소수에 의해 최소 측정 가능 입자 크기는 제한적이며, 촬영된 이미지는 실험자의 촬영 각도, 거리에 의하여 입자 크기 오차가 발생함을 확인 할 수 있었다. 따라서 상기와 같은 오차를 원천 배제하기 위하여 고해상도 스캐너 분석을 활용하였다. Canon사의 EOS 100D의 18-55 mm 렌즈 카메라를 사용해 이미지를 취득한 경우 반복 촬영시 미세한 촬영위치, 각도의 차이에 의해서 이미지 왜곡에 의한 오차와, 시료의 기준점 변경 오차가 발생한다. 그러나 스캐너 장비를 이용할 경우 피사체와의 상대 위치, 각도가 매번 동일한 이미지를 획득할 수 있어 이미지 분석의 정확도를 높일 수 있었다. Fig. 5(a)는 카메라 이미지에 의한 토사 입도 분포를 나타내는 그림으로 상기 언급한 매우 미세한 오차가 누적되어 입도분포 곡선의 그래프의 편차가 나타났다. Fig. 5(b)는 스캐너 이미지를 이용한 입도분석 그래프로 분석 결과의 편차가 작은 것을 보이고 있다. 현재 완성된 토양 분석 제품으로 판매되고 있는 독일의 Camsizer 는 약 1%의 오차로 평판 스캐닝 방식을 택하고 있다[40]. 본 연구에서는 가급적 이미지 취득시 발생하는 기하적 오차가 적은 scanner 방식으로 분석했다.

현장에서 채집된 시료를 스캐너에 도포하는 과정에서 입자의 편향 및 뭉침에 의해 발생하는 오차 가능성이 있다. 이러한 오차 요인을 줄이기 위해 비커 용기에 수집된 입자를 교반기를 활용하여 입자들이 균질하게 섞어진 조건에서 스포이트를 활용하여 다수의 시료를 채취하여 이미지 촬영 전처리를 하였다. 또한 스캐너의 상판 유리에 흡착된 먼지나 얼룩에 의해서 또는 스캔 유리 상판에 얼룩이나 먼지에 의해서 발생하는 오류는 이미지 처리 프로그램을 통해 충분히 제거 할 수 있으나, 사전에 이미지 상의 얼룩이 발생하지 않도록 매번 이미지 획득시 평판 스캐너의 표면을 에탄올을 사용해 미세한 먼지 등을 제거하였다.

입도 분석 코드는 스캔된 모래 이미지로부터 입도 분석을 수행 할 수 있는 영국 플리머스 대학교의 Daniel Buscombe가 개발한 소스 코드를 활용하여 입도 분석을 수행한다[41]. 프로그램의 기본 설정은 입도 분포를 수행 시 25 픽셀 단위로 결과를 산출하기 때문에 우리가 원하는 미세입자 분석 결과를 보기 위한 정밀도에서 한계를 보이게 되었다. 따라서 이를

Table 1. Result of soil classification due to rainfall by analyzing image and sieve

	Date (2017)	D_{10}	D_{30}	D_{60}	C_u	C_g	Rainfall (mm)	Gradation	Soil Type
Image	07-25	0.0490	0.1082	0.2238	4.57	1.07	9.90	Bad	Clay
	06-28	0.0497	0.0992	0.2192	4.41	0.90	14.00	Bad	Clay
	07-17	0.0488	0.1148	0.2574	5.27	1.05	27.30	Bad	Clay
	07-03	0.0462	0.1093	0.2471	5.35	1.05	54.20	Bad	Clay
	08-01	0.0483	0.1090	0.2348	4.86	1.05	69.60	Bad	Clay
	07-07	0.0444	0.1132	0.2934	6.61	0.98	75.20	Bad	Clay
Sieve	07-07	0.0680	0.1050	0.3240	4.75	0.52	75.20	Bad	Clay
	07-10	0.0770	0.2210	0.7370	9.56	0.86	93.70	Bad	Clay
	07-11	0.0500	0.2140	0.8260	16.51	1.11	35.00	Good	Clay

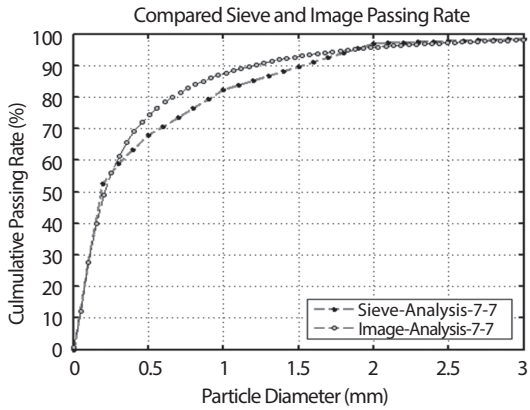


Fig. 6. Comparison between image and sieve analysis results.

개선하기 위해서는 스캔의 해상도를 높이거나 계산 행렬의 간격을 세분화하여 분석을 수행하면 보다 세밀한 결과 값을 보여 주게 된다. 본 코드에서는 2 픽셀 단위 이하도 계산 수행은 가능 했지만 계산 소모 시간이 증가 하였고 2 픽셀 계산 결과값에 수렴하였다. 따라서 본 연구에서 격자 간격은 2 픽셀 단위로 채택하여 분석을 수행하여 체가름 시험의 결과와 비교 검토 하였다.

4.3 이미지 분석 결과와 체가름 실험 검토

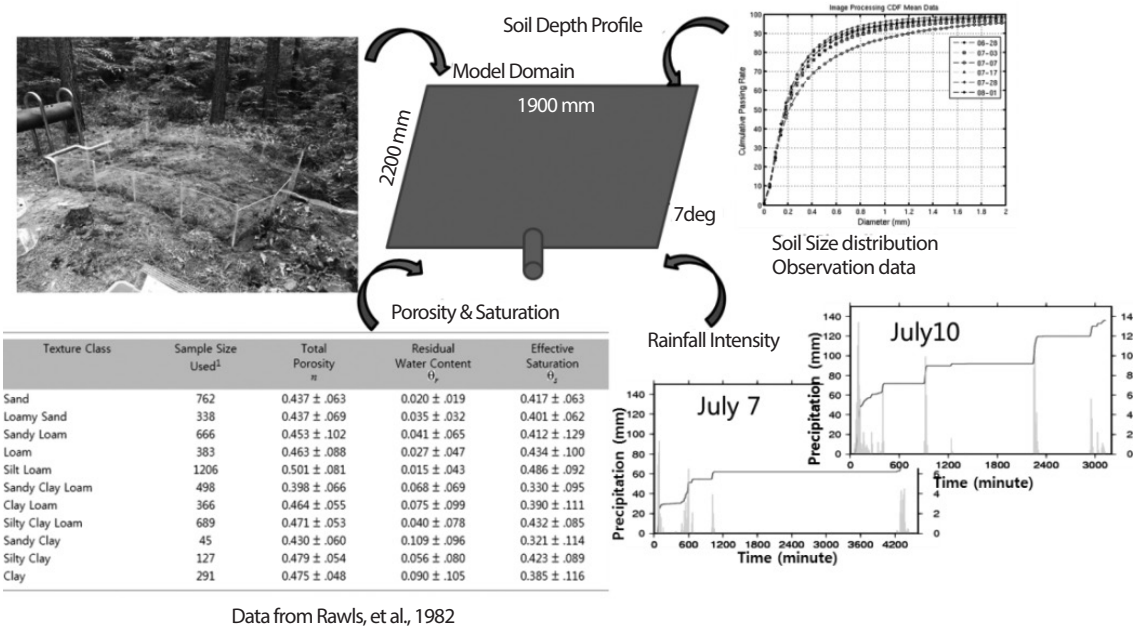
본 연구에서 제안한 이미지 분석법을 적용하기 위해 체가름 시험에 사용한 직경 3 mm 이하의 시료를 사용 하였으며, 이미지의 스캔 해상도는 600 ppi로 통일하였다. 이미지 분석 입도분포 분석과 체가름 실험의 비교 결과는 Fig. 6과 같이 나타났다. 이미지 분석 결과가 체가름 실험과 비교하여 입도분포 곡선의 기울기가 고르게 분포되어 있으며, 앞서 오차 개선방법과 수정된 이미지 프로그램을 기반으로 흙의 입도분석에서 중요하게 이용되는 균등계수, 곡률계수 등도 함께 산출하여 결과를 정리하였다. 입도 분석 프로그램을 통해 D_{10}, D_{30}, D_{60}을 산출하였으며 토사의 크기 분포 변화 경향을 파악하였다. Table 1에서 총 강우량에 따라 유출된 입자의 분포 크기가 D_{10}, D_{30}에서의 각 입경 별 크기 비율의 변화는 강우에 따라 상관성을 보이지는 않으나 강우가 증가하면 입자의 분포도를 나타내는 균등계수의 크기가 증가하는 관계를 보이고 있다. 현 단계의 실험 결과는 관측의 결과가 대표성을 나타낼 수는 없지만 추후 누적된 실험 결과를 통해 보다 신뢰도 있는 강우와 토질 특성을 연구하고자 한다.

5. 토사 유출 모델링

수치모델의 도메인은 평면 구역 1개와 작은 개수로 1개로 가정하고 수치적 결과를 도출하였으며, 수치 실험의 조건은 현장 실험의 조건과 정확히 일치하도록 구성했다. 기상자료(강우)는 한국원자력연구원 내 기상탑의 자료를 바탕으로 하였으며, 깊이에 따른 토양 입경 분포는 관측 장소의 입경 분포를 적용했다. 입경의 특성(공극률, 포화도)은 현재 다양한

Table 2. Combination of input source by case of experiment

Experiment case	Input source	Considering soil erosion layer
EXP1	Kinematic Wave Equation	1 Layer soil erosion
EXP2	EXP1 + saturation + porosity	1 Layer soil erosion
EXP3	EXP1 + saturation + porosity	Multiple Layers soil erosion
EXP4	EXP1 + saturation + porosity + erosion parameter	Multiple Layers soil erosion



Texture Class	Sample Size Used[1]	Total Porosity n	Residual Water Content θ_r	Effective Saturation θ_e
Sand	762	0.437 ± .063	0.020 ± .019	0.417 ± .063
Loamy Sand	338	0.437 ± .069	0.035 ± .032	0.401 ± .062
Sandy Loam	666	0.453 ± .102	0.041 ± .065	0.412 ± .129
Loam	383	0.463 ± .088	0.027 ± .047	0.434 ± .100
Silt Loam	1206	0.501 ± .081	0.015 ± .043	0.486 ± .092
Sandy Clay Loam	498	0.398 ± .066	0.068 ± .069	0.330 ± .095
Clay Loam	366	0.464 ± .055	0.075 ± .099	0.390 ± .111
Silty Clay Loam	689	0.471 ± .053	0.040 ± .078	0.432 ± .085
Sandy Clay	45	0.430 ± .060	0.109 ± .096	0.321 ± .114
Silty Clay	127	0.479 ± .054	0.056 ± .080	0.423 ± .089
Clay	291	0.475 ± .048	0.090 ± .105	0.385 ± .116

Fig. 7. Diagram of numerical model for rain erosion simulation.

기관(미국 농림부, 한국 국토부 등)에서 표준 자료로 사용되는 데이터를 참조 했다[42]. 수치 모델의 영역 및 크기는 관측 현장의 크기를 적용했으며, 경사도는 현장에 기울기를 다수 측정하여 평균을 취했다. 강우에 의한 토사의 유실량은 식 (1) 같이 표현된다.

$$e_s = C_f\, k(h)\, r^2,\ k(k) = exp(-c_h h) \tag{1}$$

여기서 h는 강우가 지속됨에 따라 수층(water layer)이 토양 위에 생성될 때 적용되며, 층이 형성되면, 침식률이 줄어드는 효과를 반영하기 위해 적용된다. 일반적으로 c_h는 0으로 현존하는 모든 수치 모델 및 미국 EPA에서도 반영하고 있지는 않다. r은 단위시간당 강우 강도이며, 표준 강우 관측에서 쉽게 구할 수 있다. C_f는 침식률 계수에 해당한다. 많은 실험실 관측을 통해 이 계수는 일반적으로 20~500 사이의 값을 보이며[42], 50.0을 사용하기를 권고하고 있다[6]. 이 값은 대체로 지역의 위도와 상관이 있으며, 토양 유실의 전체 방정식은 다음 식 (2)와 같다.

$$\frac{\partial(AC_s)}{\partial t} + \frac{\partial(QC_s)}{\partial x} - e(x,t) = q(x,t) \tag{2}$$

여기서 침식량 e은 상기의 식 (1)에 제시된 splash 침식량과 흐름에 의한 침식량의 합이다. 식 (2)는 수리학 분야에서 전통적으로 육상의 침적과 하천의 이동을 동시에 고려하며,

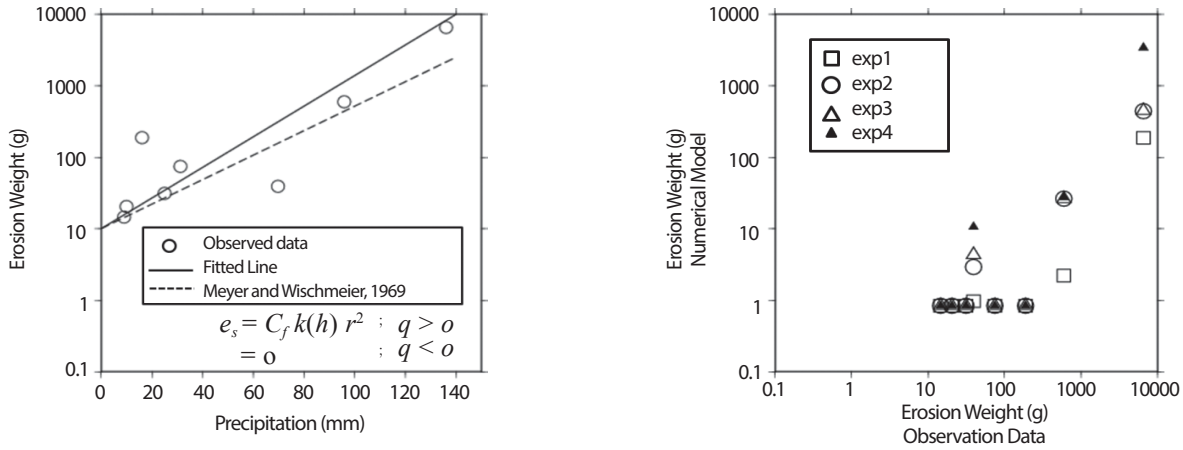


Fig. 8. (a) Relationship between precipitation and soil weight, (b) numerical experimental results.

상류단 경계조건을 0으로 할 수 있는 지배방정식으로 Kinematic Wave Equation이라고 불리운다[43]. Kinematic Wave Equation은 강우에 의한 육상 토사 침식에 미국의 농지관리 및 일본의 F-TRACE 프로젝트 등 매우 광범위하게 현재 적용되고 있다[15, 17, 19].

기상자료는 일별 누적 강수량을 한국원자력연구원 내 기상탑에서 제공하고 있다. 현장 관측은 강우의 시작과 종료 후 시료를 회수해 분석했으므로, 시료 회수를 하나의 이벤트로 보고 기상 자료를 이벤트 누적 강수량으로 변환했다. 이벤트 별로 시료의 회수 시점을 보면 3~4일간 연속적으로 강우가 내리는 조건이 2017년 수 회 연속되었다. 또한, 입경 분포를 보면 시간이 경과함에 따라 (토양이 지속적으로 침식됨) 입경 분포가 나빠지는 것이 특징이다. 이러한 관측 자료를 바탕으로 실제 현상을 반영하기 위한 추가적인 물리현상을 고려 했다.

수치 실험은 총 4가지 경우를로 구분지어 실험 하였다. 각 단계별로 물리과정을 하나씩 추가하는 방식으로 중요도를 체크하며, 실험을 수행하였다. 각 실험 단계는 다음과 같다. 실험 1(EXP1)은 Kinematic Wave Equation을 적용한 경우, 실험 2(EXP2)는 실험 1(EXP1)에 토사중 공극률 및 포화도를 포함하며, 단일층 모델, 실험 3(EXP3)은 깊이에 따라 토사의 입경 분포를 달리하는 다층 모델, 실험 4(EXP4)에서는 본 연구에서 관측된 강우 파라메터 C_f를 내삽해서 적용한 실험 순으로 수행되었다(Table 2). 그 결과는 Fig. 8에서 보여지는 바와 같이 수치 모델에 현실적인 물리조건이 반영되고 현장의 조건이 포함되면 결과치가 향상 되는 것을 알 수 있다.

실험 2(EXP2)에서는 포화도와 공극률에 관해 강우 침수량을 고려했으며 적용된 식은 다음과 같다.

특정한 토양에서 흡수 할 수 있는 능력을 F_c 라고 표기한다. 모든 토양은 초기에 포함하고 있는 수분이 있고 이를 θ_i라고 표기 하면 다음과 같이 식 (3)으로 표기가 가능하다.

$$F_c = f(F, \theta_i) \tag{3}$$

만약 초기 포함 수분량을 균질 하다고 가정하게 되면 이론 해가 매우 쉽게 Darcy의 법칙에 의해 다음과 같이 식 (4)로 구해진다.

$$G = \frac{1}{K_s} \int_{-\infty}^{0} K(\psi)\, d\psi \tag{4}$$

여기서 K_s는 유효포화도 이며, ψ는 토사 층 계수, $K(\psi)$는 수리 전도 계수이며, G는 토양을 특성 별로 정의한 상수에 해당한다. 이를 고려한 실험을 하면, 최초 토사 침식이 포화도가 높은 경우에 발생하게 된다.

Fig. 8(a)에서 보여진 바와 같이 강우에 따른 토양 침식 계산을 위한 경험계수가 과거 연구[43]로부터 제안되는 범위(20~500) 내에 존재하는 190.2로 계산되었으나, 연구[6]에서 권장하는 50.0 보다는 큰 값으로 나타났다. 해당 계수는 관측 지역의 위도와, 경사, 기후, 토사의 특성에 따라 다르며, 대표적인 예로 최근 관측 결과 분석 연구인 [44]에서는 이란에서

매우 완만한 평지와 상대적으로 강우가 적은 기후조건에서 관측결과 약 33~38의 수치를 보였으며, 강우가 하루 200 mm 이상 강한 폭우가 내리는 이탈리아에서 관측된 결과는 시간당 내린 비의 강도에 따라 30배 이상의 편차를 보였다[45]. 경험적인 계수는 해당지역의 많은 관측 자료의 누적을 통해 신뢰도를 확보 할 수 있으며, 관측은 2017년 이후 지속적으로 이루어 지기 때문에 현재 사용된 수치는 최종적으로 다수의 관측자료로 더 정확한 값 혹은 새로운 경험식이 적용 될 것으로 예상된다.

Fig. 8(b)에서 초기포화도를 고려하게 되면 실험 1(EXP1)과 비교해 실험 2(EXP2)에서 침식량이 증가하는 경향을 보였으나, 전체적으로는 관측치에 비해 저 평가되고 있으며, 약 10%정도의 예측력을 보였다. 자연상태에서 표층토사는 입자가 작으며, 토양의 깊어질수록 굵은 입자의 비율이 증가한다. 장기간 강우가 반복될 때 표층 토양이 침식되어 저층 토양이 점점 드러나게 된다. 따라서 토사의 침식 모델을 개발할 때 깊이에 따라 서로 다른 토양 입경 분포를 고려해야 현실적인 계산 결과가 도출된다. 본 연구에서는 표층과 저층이 서로 다른 토양 입경 분포를 갖는 다층 soil layer를 구현했다. 관측 현장의 토사 표층(0 cm)과 중층(5 cm)의 토사시료를 채취해 토사입경분포를 구하여 이를 수치모델에 적용했다. 깊이에 따라 선형으로 입경분포를 보완했으며, 표층 layer가 두께가 0이 되면 수치적인 불안정성을 보이기 때문에 수치 실험 시에는 표층 layer의 두께를 20 cm로 두고 5 cm에서 토양 입경 분포가 관측치와 일치하도록 외삽했다.

6. 결론

본 연구에서는 강우에 의한 토사 침식량을 관측, 분석하고 수치모델을 수립해 강우와 토사 침식 실험을 수행하였으며, 그 결과가 논의 되었다. 강우에 의한 토사 유실 분석은 실트질 이하의 정밀도 높은 분석이 필요하며, 체가름 실험을 적용하기에는 한계점이 존재하였다. 따라서 체분석과 이미지 분석을 병행하여 입도 분석을 수행 하였으며, 입도를 분석하는 과정 중 발생할 수 있는 기하 오차 개선 방법과 이미지 분석 프로그램을 활용한 입도 분석 방법에 대하여 서술하였다. 카메라 영상 반복 촬영에서 발생할 수 있는 기하 왜곡에 의한 오차 발생을 확인하고 이를 최소화하기 위해 스캐너를 사용했다. 또한 Daniel Buscombe가 개발한 입도 분석 소스 코드를 활용하여 알고리즘 개선 및 이를 활용한 이미지 분석을 수행하여 흙의 입도분석에서 중요하게 이용되는 균등계수, 곡률계수 등도 함께 산출하여 결과를 정리하였다.

현장 실험 자료를 기반으로 표층 토사유실 모델을 수립하여 수치적 결과를 도출하였다. 본 연구에서는 다음과 같은 사항에 중점을 두어 수치모델을 개발하였다. 첫째, 강우의 토양 침투 현상을 고려할 수 있도록 토사의 입경에 따른 공극률과 초기포화 함수를 적용해 전체적으로 정확성이 향상되는 경향을 보였다. 둘째, 현장 시료 분석 자료를 기반으로 깊이에 따른 토양의 입자 분포 특성을 반영할 수 있도록 다층 레이어 모델로 개선하였다. 이를 통해 반복적으로 표층토사가 침식되어 입경분포가 다른 저층이 드러나 침식되는 집중호우 기간에 적용할 수 있도록 개선되었다. 셋째, 강우와 토사 침식간의 상관계수를 관측 자료 분석을 통해 반영하였으며, 결과의 정확도를 크게 향상시켰다. 향후 연구에서는 하천을 포함한 실제 지형을 시뮬레이션 할 수 있도록 확장할 계획이며, 이를 위해 경주 일대에 강우에 의한 토사 유실을 관측하는 실험장치를 설치해 2018년 여름부터 관측을 시작하였으며, 향후 지속적인 연구 결과를 발표할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 2017년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호 : NRF-2017M2A8A4015253, NRF-2015M2A2B2034282).

REFERENCES

[1] International Atomic Energy Agency, Guidelines for using Fallout Radionuclides to Assess Erosion and Effectiveness of Soil Conservation Strategies, IAEA-TECDOC-1741, IAEA, Vienna (2014).

[2] M.A. Pratama, M. Yoneda1, Y. Shimada, Y. Matsui, and

Y. Yamashiki, "Future Projection of Radiocesium Flux to the Ocean from the Largest River Impacted by Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant", Sci. Rep., 5, 8408 (2015).

[3] H. Takata, K. Hasegawa, S. Oikawa, N. Kudo, T. Ikenoue, R.S. Isono, and M. Kusakabe, "Remobilization of Radiocesium on Riverine Particles in Seawater: The Contribution of Desorption to the Export Flux to the Marine Environment", Mar. Chem., 176, 51-63 (2015).

[4] H. Yamazaki, M. Ishida, R. Hinokio, Y.A.Yamashiki, and R. Azuma, "Spatiotemporal Distribution and Fluctuation of Radiocesium in Tokyo Bay in the Five Years following the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant (FDNPP) Accident", PLoS ONE, 13(3), e0193414 (2018).

[5] K. Saito, "Features of Exposure Doses to the Public due to the Fukushima Accident", Global Environ. Res., 20, 67-72 (2016).

[6] L.D. Meyer and W.H. Wischmeier, "Mathematical Simulation of the Process of Soil Erosion by Water", Trans. ASAE, 12(6), 754-762 (1969).

[7] N.W. Hudson, Field Measurement of Soil Erosion and Runoff, Issue 68, 121-126, Food and Agriculture Organization of the United Nations (1993).

[8] United States Department of Agriculture - Agricultural Research Service, Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) - Welcome to RUSLE 1 and RUSLE 2 (2014).

[9] M. Fernandez-Raga, C. Palencia, S. Keesstra, A. Jordan, R. Fraile, M. Angulo-Martinez, and A. Cerda, "Splash Erosion : A Review with Unanswered Questions", Earth-Science Reviews, 171, 463-477 (2017).

[10] H. Funaki, H. Hagiwara, and T. Tsuruta, "The Behavior of Radiocaesium Deposited in an Upland Reservoir After the Fukushima Nuclear Power Plant Accident", Materials Research Society Symp. Proc., 1665, 165-170 (2014).

[11] S. Mishra, H. Arae, A. Sorimachi, M. Hosoda, S. Tokonami, T. Ishikawa, and S.K. Sahoo, "Distribution and Retention of Cs Radioisotopes in Soil Affected by Fukushima Nuclear Plant Accident", J. Soil Sediment., 15(2), 374-380 (2014).

[12] International Atomic Energy Agency, Radionuclide Transport Dynamics in Freshwater Resources (Final results of a Co-ordinated Research Project 1997-2000, IAEA-TECDOC-1314), IAEA, Vienna (2002).

[13] N. Matsuda, S. Mikami, S. Shimoura, J. Takahashi, M. Nakano, K. Shimada, K. Uno, S. Hagiwara, and K. Saito, "Depth Profiles of Radioactive Cesium in Soil using A Scraper Plate over a Wide Area Surrounding the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant Japan", J. Environ. Radioact., 139, 427-434 (2015).

[14] S. Mishra, S.K. Sahoo, P. Bossew, A. Sorimachi, and S. Tokonami, "Vertical Migration of Radio-caesium derived from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant Accident in Undisturbed Soils of Grassland and Forest", J. Geochem. Explor., 169, 163-186 (2016).

[15] S. Jomaa, D.A. Barry, A. Brovelli, B.C.P. Heng, G.C. Sander, J.Y. Parlange, and C.W. Rose, "Rain Splash Soil Erosion Estimation in the Presence of Rock Fragments", CATENA, 92, 38-48 (2012).

[16] P.I.A. Kinnell, "Raindrop Impact Induced Erosion Processes and Prediction: A Review", Hydrol. Process., 19(14), 2815-2844 (2005).

[17] R.P.C. Morgan, Soil Erosion and Conservation, 3rd ed., Blackwell Publishing, Oxford (2005).

[18] M. Ryżak, A. Bieganowski, and C. Polakowski, "Effect of Soil Moisture Content on the Splash Phenomenon Reproducibility", PLoS ONE, 10(3), e0119269 (2015).

[19] G. Erpul, D. Gabriels, W.M. Cornelis, H. Samray, and T. Guzelordu, "Average Sand Particle Trajectory examined by the Raindrop Detachment and Wind-Driven Transport (RD-WDT) Process", Earth Surf. Process. Landf., 34(9), 1270-1278 (2009).

[20] J.P. Terry and R.A. Shakesby, "Soil Hydrophobicity Effects on Rainsplash: Simulated Rainfall and Photographic Evidence", Earth Surf. Process. Landf., 18(6), 519-525 (1993).

[21] A. Ghahramani, Y. Ishikawa, and S.M. Mudd, "Field

Experiments Constraining the Probability Distribution of Particle Travel Distances during Natural Rainstorms on Different Slope Gradients", Earth Surf. Process. Landf., 37(5), 473-485 (2012).

[22] T. Scholten, C. Geißler, J. Goc, P. Kühn, and C. Wiegand, "A New Splash Cup to Measure the Kinetic Energy of Rainfall", J. Plant Nutr. Soil. Sci., 174(4), 596-601 (2011).

[23] T. Kinouchi, K. Yoshimura, and T. Omata, "Modeling Radiocesium Transport from a River Catchment based on a Physically-based Distributed Hydrological and Sediment Erosion Model", J. Environ. Radioact., 139, 407-415 (2015).

[24] K. Iijima, T. Niizato, A. Kitamura, H. Sato, and M. Yui, "Present Condition of the Fukushima forest; F-TRACE Project: Accumulation of the Scientific Evidences to Secure the Safety and Reassurances of the People", Japan Atomic Energy Agency. Accessed Aug. 10 2015. Available from: https://fukushima.jaea.go.jp/initiatives/cat01/pdf00/20__Iijima.pdf.

[25] S. Hayashi, "Migration and Accumulation of Radioactive Cesium in the Upstream Region of River Watersheds Affected by the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident: A Review", Global Environ. Res., 20, 45-52 (2016).

[26] National Institute of Agricultural Sciences, "Korean Soil Information System", Korean Soil Information System, Accessed Nov. 1 2018. Available from: http://soil.rda.go.kr/geoweb/soilmain.do.

[27] G.W. Gee and J.W. Bauder, "Particle size analysis" in Methods of Soil Analysis: Part 1- Physical and Mineralogical Methods, 2nd ed., 383-411, American Society of Agronomy, Madison, WI, USA (1986).

[28] S.K. Chough, C.W. Rhee, Y.K. Sohn, and I.G. Hwang, Sedimentology, Woosung Press, Seoul (1995).

[29] International Atomic Energy Agency, Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments, IAEA-TRS-472, IAEA, Vienna (2009).

[30] N. Kamei-Ishikawa, K. Tagami, and S. Uchida, "Effect of Biological Activity due to Different Temperatures on Iodide Partitioning in Solid, Liquid, and Gas Phases in Japanese Agricultural Soils", J. Radioanal. Nucl. Chem., 295(3), 1763-1768 (2013).

[31] S.-H. Cheon, K. Ahn, and K.-D. Suh, "Beach Sand Grain Size Analysis using Commercial Flat-bed Scanner", J. Korean Soc. Coast. Ocean Eng., 25(5), 301-310 (2013).

[32] I. McCave and J.P.M. Syvitski, "Principles and Methods of Geological Particle Size Analysis", in: Principles, Methods and Application of Particle Size Analysis, J.P.M. Syviski ed., 3-21, Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK (1991).

[33] L. Beuselinck, G. Govers, J. Poesen, G. Dregaer, and L. Froyen, "Grain Size Analysis by Laser Diffractometry: Comparison with the Sieve Pipette Method", CATENA, 32, 193-208 (1998).

[34] G. Mertens and J. Elsen, "Use of Computer Assisted Image Analysis for the Determination of the Grain Size Distribution of Sands used in Mortars", Cement Concrete Res., 36(8), 1453-1459 (2006).

[35] J.M.R. Fernlund, R.W. Zimmerman, and D. Kragic, "Influence of Volume Mass on Grain Size Curves and Conversion of Image Analysis Size to Sieve Size", Eng. Geol., 90(3-4), 124-137 (2007).

[36] D.M. Rubin, "A Simple Autocorrelation Algorithm for Determining Grain Size from Digital Images of Sediment", J. Sediment. Res., 74(1), 160-165 (2004).

[37] J.A. Warrick, D.M. Rubin, P. Ruggiero, J.N. Harney, A.E. Draut, and D. Buscombe, "Cobble Cam: Grain-size measurements of Sand to Boulder from Digital Photographs and Autocorrelation Analyses", Earth Surf. Process. Landf., 34(13), 1811-1821 (2009).

[38] D. Buscombe, D.M. Rubin, and J.A. Warrick, "Universal Approximation of Grain Size from Images of Non-Cohesive Sediment", J. Geophys. Res., 115, F02015 (2010).

[39] L. Hejduk and K. Banasik, "Variation in Suspended

Sediment Grain Sizes in Flood Events of a Small Lowland River, Sediment Dynamics for a Changing Future", IAHS Publication, 337, 189-196 (2010).

[40] A.D. Switzer and J. Pile, "Grain size analysis", in: Handbook of Sea Level Research, I. Shennan, A.J. Long, and B.P. Horton eds., 1st ed., 331-346, John Wiley and Sons, Ltd. (2015).

[41] D. Buscombe and D.M. Rubin, "Advances in the Simulation and Automated Measurement of Well-Sorted Granular Material, Part 2: Direct Measures of Particle Properties", J. Geophys. Res., 117, F02002 (2012).

[42] W.J. Rawls, D.L. Brakensiek, and K.E. Saxton, "Estimation of Soil Water Properties", Trans. ASAE, 25(5), 1316-1320 (1982).

[43] M.J. Lighthill and G.B. Whitham, "On Kinematic Waves. I: Flood Movement in Long Rivers. II: A Theory of Traffic Flow on Long Crowded Roads", Proc. of the Royal Society, vol. 229, 281-345, May 10, 1955, London.

[44] M.A. Mohamadi and A. Kaviann, "Effects of Rainfall Patterns on Runoff and Soil Erosion in Field Plots", Int. Soil Water Conserv. Res., 3(4), 273-281 (2015).

[45] T. Piacentini, A. Galli, V. Marsala, and E. Miccadei, "Analysis of Soil Erosion Induced by Heavy Rainfall: A Case Study from the NE Abruzzo Hills Area in Central Italy", Water, 10(10), 1314 (2018).