

토양의 물리화학적 특성이 세슘 흡착에 미치는 영향

박상민¹ · 이제신¹ · 김영훈² · 이정선^{1,3} · 백기태^{1*}

¹전북대학교 환경공학과

²안동대학교 환경공학과

³한국환경공단 토양지하수처

Influence of Physicochemical Properties on Cesium Adsorption onto Soil

Sang-Min Park¹ · Jeshin Lee¹ · Young-Hun Kim² · Jeung-Sun Lee^{1,3} · Kitae Baek^{1*}

¹Department of Environmental Engineering, Chonbuk National University

²Department of Environmental Engineering, Andong National University

³Department of Soil and Groundwater, Korea Environment Corporation

ABSTRACT

Cesium (Cs) generated by nuclear accidents is one of the most hazardous radionuclides because of its gamma radiation and long half-life. Especially, when Cs is exposed on the soil environments, Cs is mainly adsorbed on the topsoil and is strongly combined with tiny soil particle including clay minerals. The adsorption of Cs onto soil can vary depending on various physicochemical properties of soil. In this study, the adsorption characteristics between soil and Cs were investigated according to various physicochemical properties of soil including organic matter contents, cation exchange capacity (CEC), soil particle size, and the types of clay minerals. Soil organic matter inhibited the adsorption of Cs onto the soil because organic matter was blocking the soil surface. In addition, it was estimated that the CEC of the soil influenced the adsorption of Cs onto the soil. Moreover, more Cs was adsorbed as the soil particles size decreased. It was estimated that Cs was mostly adsorbed onto the topsoil, this is related to the clay mineral. Therefore, soil organic matter, CEC, soil particle size, and clay minerals are considered the key factors that can influence the adsorption characteristics between soil and Cs.

Key words : Cesium, Organic matter, Cation exchange capacity (CEC), Clay minerals

1. 서 론

전 세계적으로 전기 에너지를 얻기 위해 원자력 발전소가 운영되고 있다. 그러나, 우크라이나의 체르노빌이나 일본의 후쿠시마 원자력 발전소 사고와 같은 일이 발생하면 다량의 방사성 물질이 유출되어 인간을 포함한 주변환경에 지대한 영향을 미친다(Dumat et al., 2000; Stautnton et al., 2002; Saito et al., 2014). 원전사고 발생 시 세슘, 요오드, 스트론튬 등 다양한 방사성 물질들이 유출되는데 그 중 감마선을 내고 반감기가 30년으로 다른 방사성 물질보다 긴 세슘이 가장 위험한 방사성 물질로 보고되었다(Llano et al., 1998; Wang et al., 2010). 세슘은 다른 방사성 물질보다 높은 용해도를 가지고 있어 이동성

이 크지만(Willms et al., 2004), 토양환경에 유출되었을 때 토양과 강하게 결합하여 존재하는 것으로 알려져 있다(Zachara et al., 2002). 또한 낙진이나 빗물에 용해되어 세슘이 토양에 유출되었을 때 대부분의 세슘은 표토에 주로 존재하게 된다(Askbrant et al., 1996; Saito et al., 2014). 이렇게 표토에 축적된 세슘은 자연상태의 칼륨(Potassium, K)과 특성이 유사하여 식물들이 잘 흡수할 수 있다(Gommers et al., 2000; Wendling et al., 2005). 유출된 세슘이 토양에 흡착되는 이유는 점토광물과의 특이적 결합이 원인이다(Zachara et al., 2002).

점토광물은 층상구조에 따라 기본적으로 격자구조가 1:1 격자형 구조인 Kaolinite(Miranda-Trevino and Coles, 2003), 2:1 격자형 구조인 Illite가 있다(Carroll et al.,

*Corresponding author : kbaek@jbnu.ac.kr

Received : 2017. 1. 23 Reviewed : 2017. 2. 2 Accepted : 2017. 2. 7

Discussion until : 2017. 4. 30

2005). 이 외에도 Montmorillonite와 Hydrobiotite 등과 같이 다양한 점토광물이 존재하며, 세습과 다양한 점토광물의 상관관계에 대하여 많은 연구가 진행되었다(Hou et al., 2003; McKinley et al., 2004; Mon et al., 2005; Qin et al., 2012; Mukai et al., 2016). 점토광물에서 세습이 흡착할 수 있는 부분은 크게 Planer site와 Interlayer, 그리고 Frayed edge site(FES), 이렇게 세 부분으로 나눌 수 있으며 이 흡착부분은 점토광물에 따라 달라질 수 있다(Ohnuki and Kozai, 1994; Kim et al., 1996; Bostick et al., 2002). 토양을 구성하는 점토광물은 지역의 기후 특성 및 주변 환경에 달라지며, 점토광물의 차이는 세습의 흡착에 영향을 미치게 된다. 토양 유기물 및 양이온 교환 능력(Cation exchange capacity, CEC) 등은 토양 내 세습의 흡착에 영향을 미치는 주요 요인이라 보고되었다(Hsu and Chang, 1994; Rigol et al., 1999; Dumat et al., 2000; Stautnton et al., 2002). Dumat, Stautnton와 Hsu의 연구팀은 다양한 유기물을 이용한 점토광물과 세습의 흡착 및 탈착에 대한 영향을 연구하였으며, Rigol의 연구진은 다양한 Illite와 유기물 함량을 가진 점토질 토양에 대하여 CEC와 세습의 흡착 및 탈착 연구를 수행하였다. 하지만 실제 다양한 입경분포를 가진 토양에서 세습의 흡착에 대한 연구는 부족한 실정이다. 또한 점토광물과 세습의 관계에 대한 연구는 수행되었지만 실제 토양에는 유기물 함량과 토양을 구성하는 점토광물, 그리고 각 토양이 가지고 있는 CEC가 다르기 때문에, 이러한 특성은 세습의 흡착반응에 영향을 미치게 된다. 따라서, 본 연구에서는 세습으로 인공오염된 토양을 대상으로 하여 토양 유기물 함량, CEC, 점토광물의 구성 등 다양한 토양 특성에 따른 세습의 흡착 특성에 대하여 연구하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험재료

실험에 사용된 토양은 각기 다른 위치에서 채취된 3가지 시료로서 Sample-1, 2, 3은 각각 충남 서천 장항의 농경지, 전북대학교 공과대학 인근, 전북대학교 인근의 야산에서 채취하여 실험에 사용하였다. 본 연구에서는 방사

성 세습(137-Cs)과 물리/화학적 특성이 매우 흡사한 비방사성 세습(133-Cs)을 실험에 CsCl 형태로 Sigma Aldrich (USA)에서 구입하여 사용하였다.

2.2. 실험방법

토양의 물리화학적 특성을 확인하기 위하여 토양의 유기물 함량, 양이온 교환 능력(Cation exchange capacity, CEC), pH, 전기전도도(Electric conductivity, EC)를 측정하였다(Table 1). 또한 세습의 흡착에 영향을 미칠 수 있는 양이온의 함량을 전함량 분석법(Aqua-resia extraction method)을 통하여 확인하였으며 분석은 Inductively coupled plasma optical emission spectrometry(ICP-OES 720, Agilent, USA)를 이용하였다. 또한, 각 토양에 포함된 점토광물을 확인하기 위하여 X-ray diffractometer (XRD, D/MAX 2500, Rigaku Instrument, Japan)을 이용하였다. XRD 분석조건은 $\text{CuK}\alpha(\lambda=1.5406 \text{ nm})$ 파장을 이용하였고 40 kV, 30 mA로 설정하여 0.4 degree/min의 속도로 5~20 degree까지 분석하였다.

먼저, 토양 입도분포에 따른 세습의 흡착 특성을 확인하였다. 세습 오염은 토양 500 g과 1000 mg/L 세습용액 1 L를 48시간 동안 교반하였다. 세습으로 오염된 토양은 2~0.5 mm, 0.5~0.15 mm, 0.15~0.075 mm, 0.075~0.038 mm, <0.038 mm로 습식 입도분리 하여 토양 입자에 따라 세습의 농도를 분석하였다. 토양 유기물의 존재에 따른 세습의 흡착특성을 확인하기 위하여 초기 토양과 450°C에서 24시간 동안 열처리된 2가지 토양에 세습을 인공오염 시켜 흡착되는 양을 비교하였다. 실험은 토양 3 g에 30 mL 세습용액을 24시간 동안 교반 하였으며 교반 후 9000 rpm에서 10분동안 원심분리를 통해 고액 분리하여 용액과 토양을 분석하였다. 또한, 세습이 토양에 오염되었을 때 토양 중에서 이동성을 확인하기 위하여 컬럼 실험을 진행하였다. 실험에 사용된 컬럼은 길이 20 cm, 내경 2 cm의 유리관을 사용하였으며 용액의 유입구와 유출구에는 토양의 유실을 방지하기 위해 유리섬유를 이용하여 마감하였다. 컬럼에 충전된 토양 시료의 길이는 약 7 cm로 적용하였으며 펌프(Cole Parmer 7524-45, Masterflex, USA)를 이용하여 약 27 mL/h의 유속으로 100 ug/L

Table 1. Initial properties, soil organic matter, CEC, pH, and EC, of the soil samples

	Soil organic matter (%)	CEC (cmol/kg)	pH	EC ($\mu\text{S/cm}$)
Sample-1	8.6	29.1	6.7	152.0
Sample-2	6.0	35.2	8.3	147.0
Sample-3	6.3	23.9	4.2	150.2

Table 2. Concentrations of the cations, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, and Na⁺, in the soil samples (mg/kg)

	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺
Sample-1	2719.7	2162.7	795.1	135.0
Sample-2	5873.7	9077.9	1836.3	190.0
Sample-3	277.8	1628.9	756.6	79.0

의 세습용액을 상향류로 주입하였다. 실험이 진행되는 동안 유출된 용액을 채취하여 분석하였고 실험 종료 후 토양은 세 등분으로 나누어 세습의 농도를 분석하였다. 단, Sample-1의 경우, 미세토 함량이 높아 실험에 사용한 펌프로는 흐름을 야기할 수 없어 컬럼 실험을 수행하지 못하였다. 본 연구에서 세습의 농도는 ICP-MS(Agilent 7500 ICP-MS, USA)를 이용하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 토양 특성에 따른 세습 흡착

토양의 물리화학적 특성을 확인하기 위하여 유기물 함량, CEC, pH, EC를 측정하였다(Table 1). 유기물 함량은 Sample-1이 8.6%로 가장 높았으며 CEC는 Sample-2가 35.2 cmol/kg으로 가장 높았고 Sample-3이 23.9 cmol/kg으로 가장 낮게 분석되었다. 토양의 pH는 Sample-3이 4.2로 가장 낮게 분석되었으며 Sample-2가 8.3로 가장 높게 분석되었다. 3가지 Sample의 EC는 약 150 µS/cm로 거의 동일하게 측정되었다. 다양한 토양 특성 중에서 세습의 흡착에 가장 많은 영향을 미치는 것은 토양 유기물 함량과 CEC라고 알려져 있다(Stautnton et al., 2002). 토양의 유기물은 세습의 흡착을 방해하는 요인이며 CEC가 높을수록 세습은 양이온과 이온교환 할 수 있는 가능성이 높기때문에 세습의 흡착량이 증가할 것으로 예상되었다(Cremers et al., 1988; Dumat et al., 2000).

3가지 Sample을 구성하고 있는 점토광물의 종류를 알아보기 위하여 XRD를 이용해 분석하였다(Fig. 1). 각 Sample은 Illite, Kaolinite, Vermiculite의 표준 XRD pattern과 비교하여 분석하였다. Sample-1과 3은 거의 비슷한 형태의 결과를 얻었다. 이 2가지 Sample은 점토광물 중 많은 부분이 Illite로 구성되어 있으며 Kaolinite도 일부 함유하고 있었다. Sample-2의 경우, Sample-1과 3과는 달리 Illite가 관찰되지 않았으며, 주로 Vermiculite로 구성되어 있는 것을 확인 할 수 있었다. Vermiculite와 Illite, 그리고 Kaolinite의 CEC는 Vermiculite > Illite > Kaolinite 순서로 Vermiculite가 가장 높다고 보고되었다(Sikalidis et al., 1988; Murray, 2000; Grim et al.,

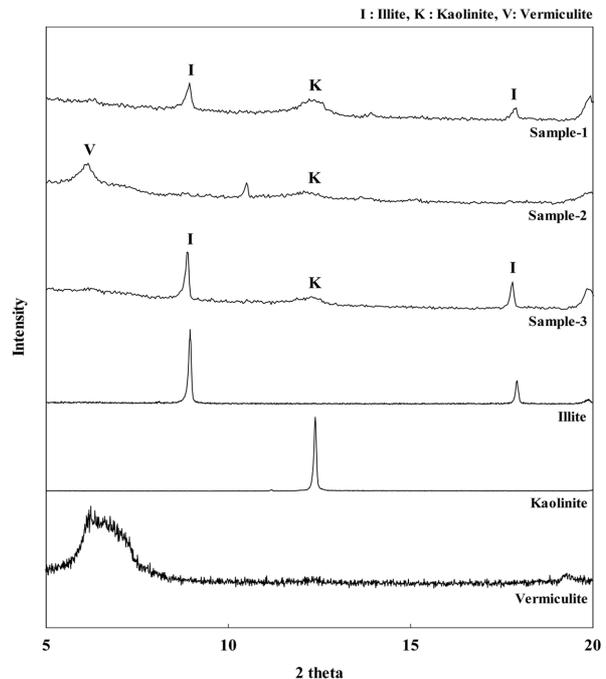


Fig. 1. XRD patterns of soil samples-1, 2, and 3. I: illite, K: kaolinite, V: vermiculite.

2013). 이러한 이유로 Vermiculite가 구성된 Sample-2가 Sample-1이나 3보다 더 많은 세습이 흡착되는 경향을 보이는 것으로 사료된다. 이 결과를 통해 Sample-1과 3은 세습 흡착에 많은 영향을 미치는 점토광물이 거의 비슷하게 구성되어 있기 때문에 토양에 흡착되는 세습의 흡착특성이 비슷할 것으로 판단된다.

3.2. 토양 입자에 따른 세습 흡착

토양 입자 크기에 따른 세습의 흡착 특성을 확인하기 위하여 토양에 세습을 오염 시킨 후 습식 입도분리를 통해 입도 분리하고 입경 별 세습의 농도를 분석하였다. 3가지 토양 시료에 대한 입도 분포는 Fig. 2에 나타내었다. Sample-1, 2, 3에서 0.075 mm 이하의 토양이 각각 63, 59, 80%를 차지하고 있었으며 0.038 mm 이하의 토양은 각각 55, 43, 71%를 차지하고 있었다. 각 토양에서 세습은 0.038 mm 이하의 토양에 가장 많이 흡착되어 존재하였다(Fig. 3). Sample-2의 경우, 토양 입자의 크기가 감소

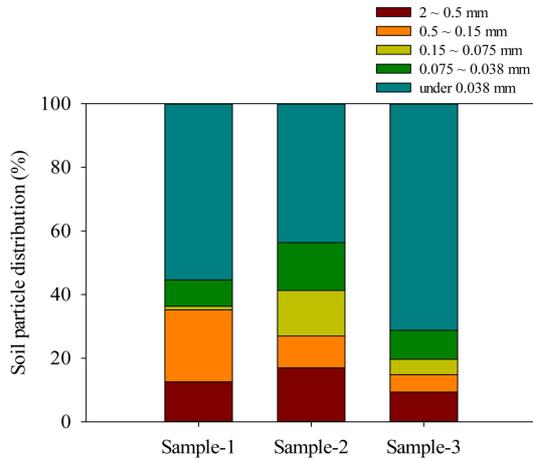


Fig. 2. Particle size distribution of soil samples.

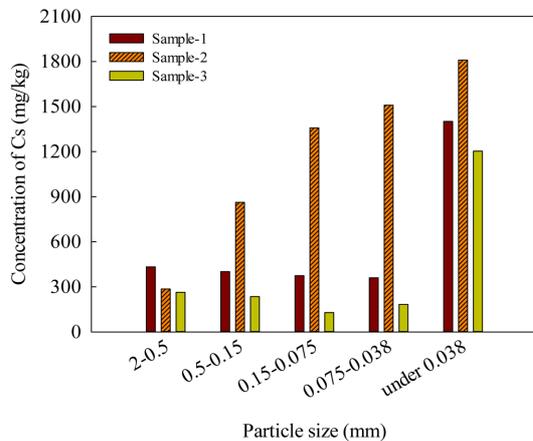


Fig. 3. Concentration of Cs on soil samples by particle size.

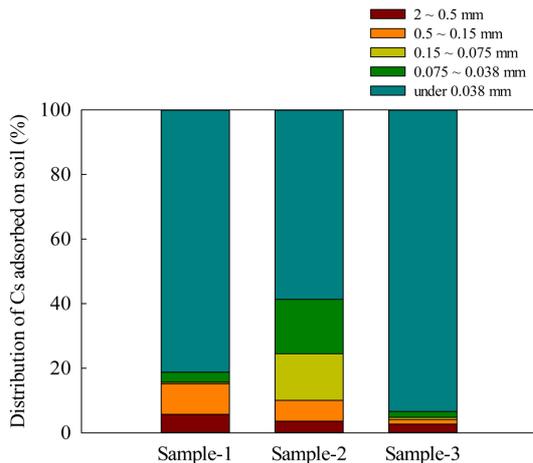


Fig. 4. Distribution of Cs mass adsorbed on soil by soil particle size.

할수록 세슘의 농도가 비례하여 증가하는 것을 확인하였다. Sample-1과 3은 XRD pattern 결과에서 예상한 것과

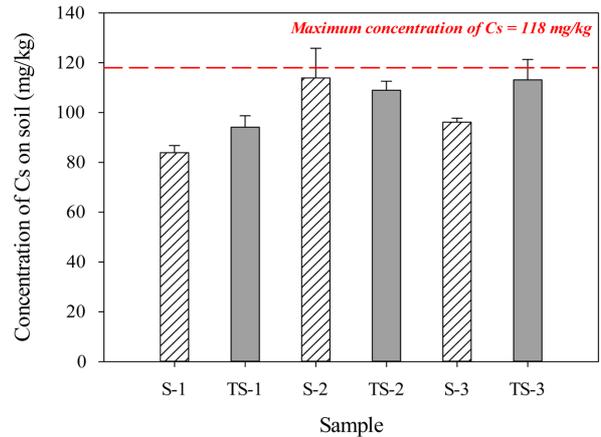


Fig. 5. Influence of soil organic matter on concentration of Cs mass adsorbed onto soil. S is original sample and TS is thermally treated soil (450°C for 24 hours). The maximum concentration of Cs is 118 mg/kg.

같이 세슘이 비슷한 경향으로 토양에 흡착되는 것을 확인할 수 있었다. 0.038 mm 이하의 토양에 흡착된 세슘은 각 시료에서 각각 80, 60, 90%가 흡착되어 존재하였다 (Fig. 4). 토양에서 세슘의 흡착은 점토광물에 따라서 많은 차이가 있다. 일반적으로 세슘은 토양 입자가 작을수록 분배계수(K_d)가 증가하며, 특히 규산염 광물 중의 하나인 운모를 함유한 점토광물과 밀접한 관계를 가지고 있어 토양 내 운모를 함유한 점토광물 함량이 증가함에 따라 세슘의 흡착량이 증가한다고 연구되었다(Saito et al., 2014). 따라서 본 실험에서 많은 세슘이 0.038 mm 이하의 토양 입자에 흡착되어 존재하는 것은 토양에 존재하는 점토광물이 세슘의 흡착에 영향을 미친 것으로 추측되었다.

3.3. 유기물에 따른 세슘 흡착

토양 유기물의 존재에 따라 세슘 흡착의 영향을 확인하기 위하여 초기 Sample과 유기물을 제거한 Sample을 비교하였다(Fig. 5). Sample-2에서는 토양 유기물에 따른 세슘의 흡착 영향을 확인할 수 없었다. 그러나, Sample-1과 Sample-3에서는 토양 유기물이 존재하지 않을 때, 더 많은 세슘이 흡착되는 것으로 나타났다. 즉, 토양 유기물의 존재는 세슘의 흡착에 방해요인으로 확인되었다. 토양 유기물은 토양 내에 존재하면서 세슘이 흡착할 수 있는 점토광물의 표면에 흡착되어 세슘의 흡착을 방해할 수 있기 때문에 판단된다(Livens et al., 1991; Hsu and Chang, 1994; Wang et al., 2000). 따라서, 토양에 함유되어 있는 유기물의 함량에 따라 세슘의 흡착량에 영향을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

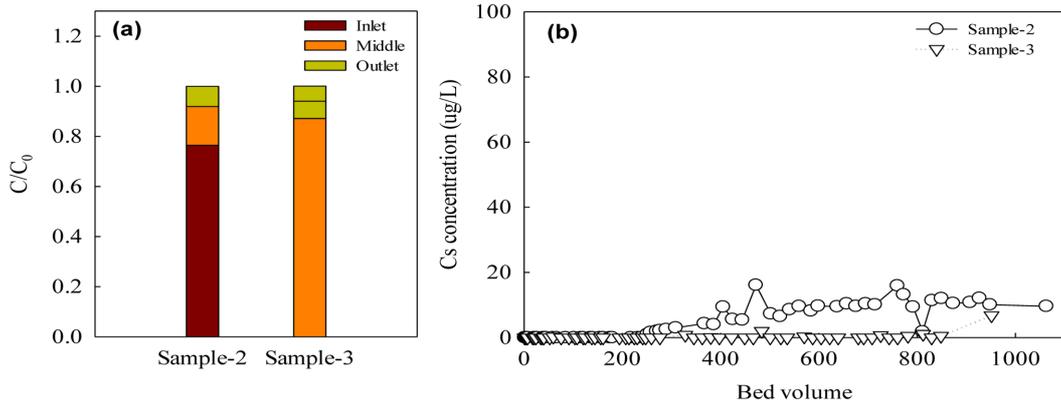


Fig. 6. Distribution of Cs adsorbed on soil in column experiment (a) and concentration of Cs in effluent (b).

3.4. 토양 내 세슘의 이동성

원전사고 발생 시, 방사성 물질에 의한 토양오염은 낙진에 의하여 발생한다. 표토에 낙진된 방사성 오염물질은 우수에 의하여 토양 중으로 이동하게 되는데, 본 실험을 통해 세슘의 이동성을 확인하였다. 전체 토양에 흡착된 세슘 중 약 80% 이상의 세슘이 주입구 부분에 흡착되어 존재하였으며 유출구 부분에 흡착된 세슘은 5% 미만인 것으로 확인되었다. 토양을 통과해 외부로 유출되는 세슘은 초기에는 대부분 토양에 흡착되어 세슘이 유출되지 않았으며 유출되더라도 많은 세슘이 토양에 흡착된 후 약 10%의 세슘만이 유출되는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 약 80% 이상의 세슘이 토양에 흡착되어 이동성이 떨어지며 나머지가 약 20% 이하의 세슘만이 이동성을 가지고 있어 지하수로 이동하게 되며, 또한 토양에 흡착된 세슘은 대부분 토양 표토층에 흡착되어 존재하는 연구결과와 동일하다(Askbrant et al., 1996; Kato et al., 2012). 또한 토양에 흡착될 수 있는 세슘의 최대흡착량이 있다. 일반적으로 토양에 유출되는 세슘 및 다른 방사성 물질은 저농도로 유출되어 최대 흡착량보다 적은 양의 세슘이 토양에 유출되기 때문에 대부분 토양 표토층에 흡착되는 것으로 예상된다. 따라서, 낙진으로 인한 토양의 세슘 오염 발생 시 표토에 약 80%의 Cs이 집적되어, 표토를 수거한다면 처리해야 할 Cs 오염 토양의 양을 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결 론

본 연구에서는 세슘을 인공오염 시킨 실제 토양을 이용하여 다양한 토양 특성에 따른 세슘의 흡착 특성에 대하여 연구하였다. 세슘이 토양에 오염되었을 때 토양 유기물의 함량, 토양이 가지는 양이온 교환 능력(CEC), 토양

의 입도 분포는 세슘의 흡착에 많은 영향을 미칠 것으로 예상되었다. 토양 유기물은 세슘이 토양에 흡착될 수 있는 토양표면을 일부 막고 있어 유기물의 함량에 따라 세슘의 흡착량이 달라질 것으로 예상되었으며 CEC가 높을수록 토양의 양이온이 세슘과 이온교환되어 세슘이 토양에 흡착될 기회가 많아질 것으로 예상되었다. 또한, 세슘은 작은 토양입자, 특히 점토광물과 강하게 결합한다고 알려져 있는데 실험을 통해 상당량의 세슘이 작은 입자 사이즈의 토양에 흡착되어 존재하는 것으로 나타났다. 또한, 점토광물의 종류에 따라 세슘의 흡착 특성이 다르기 때문에 토양을 구성하는 점토광물을 확인하는 것이 중요하다. 따라서, 이 네 가지의 요인들이 토양과 세슘의 흡착에 영향을 주는 주요 요인이라 되었다.

사 사

본 연구는 환경산업기술원의 연구비 지원(과제번호: 2015000550008)으로 수행되었다.

References

Askbrant, S., Melin, J., Sandalls, J., Rauret, G., Vallejo, R., Hinton, T., Cremers, A., Vandecastelle, C., Lewyckyj, N., Ivanov, Y.A., Firsakova, S.K., Arkhipov, N.P., and Alexakhin, R.M., 1996, Mobility of radionuclides in undisturbed and cultivated soils in Ukraine, Belarus and Russia six years after the Chernobyl fallout, *J. Environ. Radioact.*, **31**, 287-312.

Bostick, B.C., Vairavamurthy, M.A., Karthikeyan, K.G., and Chorover, J., 2002, Cesium adsorption on clay minerals: An EXAFS spectroscopic investigation, *Environ. Sci. Technol.*, **36**, 2670-2676.

- Carroll, D.L., Kemp, T.F., Bastow, T.J., and Smith, M.E., 2005, Solid-state NMR characterisation of the thermal transformation of a Hungarian white illite, *Solid State Nucl. Magn. Reson.*, **28**, 31-43.
- Cremers, A., Elsen, A., Depreter, P., and Maes, A., 1988, Quantitative-analysis of radiocesium retention in soils, *Nature*, **335**, 247-249.
- Dumat, C., Quiquampoix, H., and Staunton, S., 2000, Adsorption of cesium by synthetic clay-organic matter complexes: Effect of the nature of organic polymers, *Environ. Sci. Technol.*, **34**, 2985-2989.
- Gommers, A., Thiry, Y., Vandenhove, H., Vandecasteele, C.M., Smolders, E., and Merckx, R., 2000, Radiocesium uptake by one-year-old willows planted as short rotation coppice, *J. Environ. Qual.*, **29**, 1384-1390.
- Grim, R.E., Bray, R.H., and Bradley, W.F., 2013. The Mica in Argillaceous Sediments: American Mineralogist. Literary Licensing, LLC.
- Hou, X.L., Fogh, C.L., Kucera, J., Andersson, K.G., Dahlgard, H., and Nielsen, S.P., 2003, Iodine-129 and Caesium-137 in Chernobyl contaminated soil and their chemical fractionation, *Sci. Total Environ.*, **308**, 97-109.
- Hsu, C.N. and Chang, K.P., 1994, Sorption and desorption behavior of cesium on soil components, *Appl. Radiat. Isot.*, **45**, 433-437.
- Kato, H., Onda, Y., and Teramage, M., 2012, Depth distribution of Cs-137, Cs-134, and I-131 in soil profile after Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant Accident, *J. Environ. Radioact.*, **111**, 59-64.
- Kim, Y., Cygan, R.T., and Kirkpatrick, R.J., 1996, Cs-133 NMR and XPS investigation of cesium adsorbed on clay minerals and related phases, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **60**, 1041-1052.
- Livens, F.R., Horrill, A.D., and Singleton, D.L., 1991, Distribution of radiocesium in the soil-plant systems of upland areas of Europe, *Health Phys.*, **60**, 539-545.
- Llano, A.Y., Benitez, A.H., and Gutierrez, M.G., 1998, Cesium sorption studies on Spanish clay materials, *Radiochimica Acta*, **82**, 275-278.
- McKinley, J.P., Zachara, J.M., Heald, S.M., Dohnalkova, A., Newville, M.G., and Sutton, S.R., 2004, Microscale distribution of cesium sorbed to biotite and muscovite, *Environ. Sci. Technol.*, **38**, 1017-1023.
- Miranda-Trevino, J.C. and Coles, C.A., 2003, Kaolinite properties, structure and influence of metal retention on pH, *Appl. Clay Sci.*, **23**, 133-139.
- Mon, J., Deng, Y.J., Flury, M., and Harsh, J.B., 2005, Cesium incorporation and diffusion in cancrinite, sodalite, zeolite, and allophane, *Microporous Mesoporous Mater.*, **86**, 277-286.
- Mukai, H., Hirose, A., Motai, S., Kikuchi, R., Tanoi, K., Nakanishi, T.M., Yaita, T., and Kogure, T., 2016, Cesium adsorption/desorption behavior of clay minerals considering actual contamination conditions in Fukushima, *Scientific Reports*, **6**.
- Murray, H.H., 2000, Traditional and new applications for kaolin, smectite, and palygorskite: a general overview, *Appl. Clay Sci.*, **17**, 207-221.
- Ohnuki, T. and Kozai, N., 1994, Sorption characteristics of radioactive Cesium and Strontium on Smectite, *Radiochimica Acta*, **66-7**, 327-331.
- Qin, H.B., Yokoyama, Y., Fan, Q.H., Iwatani, H., Tanaka, K., Sakaguchi, A., Kanai, Y., Zhu, J.M., Onda, Y., and Takahashi, Y., 2012, Investigation of cesium adsorption on soil and sediment samples from Fukushima Prefecture by sequential extraction and EXAFS technique, *Geochem. J.*, **46**, 297-302.
- Rigol, A., Vidal, M., and Rauret, G., 1999, Effect of the ionic status and drying on radiocesium adsorption and desorption in organic soils, *Environ. Sci. Technol.*, **33**, 3788-3794.
- Saito, T., Makino, H., and Tanaka, S., 2014, Geochemical and grain-size distribution of radioactive and stable cesium in Fukushima soils: implications for their long-term behavior, *J. Environ. Radioact.*, **138**, 11-18.
- Sikalidis, C.A., Misaelides, P., and Alexiades, C.A., 1988, Cesium selectivity and fixation by vermiculite in the presence of various competing cations, *Environ. Pollut.*, **52**, 67-79.
- Staunton, S., Dumat, C., and Zsolnay, A., 2002, Possible role of organic matter in radiocaesium adsorption in soils, *J. Environ. Radioact.*, **58**, 163-173.
- Wang, T.H., Li, M.H., Wei, Y.Y., and Teng, S.P., 2010, Desorption of cesium from granite under various aqueous conditions, *Appl. Radiat. Isot.*, **68**, 2140-2146.
- Wang, X.K., Dong, W.M., Li, Z., Du, J.Z., and Tao, Z.Y., 2000, Sorption and desorption of radiocesium on red earth and its solid components: relative contribution and hysteresis, *Appl. Radiat. Isot.*, **52**, 813-819.
- Wendling, L.A., Harsh, J.B., Ward, T.E., Palmer, C.D., Hamilton, M.A., Boyle, J.S., and Flury, M., 2005, Cesium desorption from Illite as affected by exudates from rhizosphere bacteria, *Environ. Sci. Technol.*, **39**, 4505-4512.
- Willms, C., Li, Z.H., Allen, L., and Evans, C.V., 2004, Desorption of cesium from kaolinite and illite using alkylammonium salts, *Appl. Clay Sci.*, **25**, 125-133.
- Zachara, J.M., Smith, S.C., Liu, C.X., McKinley, J.P., Serne, R.J., and Gassman, P.L., 2002, Sorption of Cs+ to micaceous subsurface sediments from the Hanford site, USA, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **66**, 193-211.