

# A Study on the Decontamination Performance of Cesium by Soil Washing Process With Flocculating Agent

## 응집제를 적용한 토양세척 공정에서의 세슘 제염 성능 평가 연구

Jong Soon Song and Sun Il Kim\*

*Chosun University, 309 Pilmun-Daero, Dong-Gu, Gwangju, Republic of Korea*

송종순, 김선일\*

*조선대학교, 광주광역시 동구 필문대로 309번지*

(Received July 20, 2017 / Revised October 31, 2017 / Approved January 3, 2018)

---

Radioactive substances, especially  $^{137}\text{Cs}$  discharged in the course of Nuclear Power Plant Accident or maintenance of power plants, cause contamination of the soil. For habitation of residents and reuse of industrial land, it is inevitably necessary to decontaminate the soil. This study examines a soil washing process that has actually been used for washing of radioactive-contaminated soil. The soil washing process uses a washing agent to weaken surface tension of the soil and cesium, separating cesium from the soil. In this study, in order to raise the efficiency of the process, a flocculating agent was added to the washing water to remove fine soil and cesium. The cesium concentrations before and after applying the flocculating agent to cesium solution were measured through ICP-OES. When using 0.1 g of J-AF flocculating agent in the experiment, the maximum Cs removal performance was approximately 88%; the minimum value was 67%. Species combinations between cesium and soil were predicted using Visual MINTEQ Code; the ability to reuse the washing water or not, and the removal rate of the fine soil, determined via measurement of the turbidity after applying the flocculating agent, were determined.

Keywords: Soil decontamination, Cesium, Soil washing, Visual MINTEQ

---

\*Corresponding Author.

Sun Il Kim, Chosun University, E-mail: [kingdom17c@naver.com](mailto:kingdom17c@naver.com), Tel: +82-62-230-7744

### ORCID

Jong Soon Song <http://orcid.org/0000-0001-9162-7631>

Sun Il Kim <http://orcid.org/0000-0002-8742-7925>

원전사고 및 시설보수 과정에서 방출되는 방사성물질 중  $^{137}\text{Cs}$ 은 토양의 주 오염원 중 하나이다. 세슘으로 인한 토양오염은 주민의 거주 및 농업용지로의 재사용을 위해 제염이 불가피하다. 본 연구에서는 다양한 토양복원 기술 중 국내·외에서 실제 방사성물질로 오염된 토양에 적용한 사례가 있는 토양세척 기술을 선정하였다. 토양세척 공정은 세척제를 사용하여 토양과 세슘의 표면장력을 약화시켜 토양과 세슘을 분리하는 원리이다. 이러한 토양세척 공정의 세척수 재사용을 통해 공정효율을 높이고자 세척수에 응집제를 적용하여 미세토양 및 세슘의 제거 성능 실험을 수행하였다. ICP-OES를 통해 세슘 수용액에 토양을 첨가하여 세슘을 흡착시킨 후 응집제를 첨가하여 세슘의 농도를 측정하였으며 응집제 적용시 최대 세슘 제거율은 약 88%, 최소는 67%였다. Visual MINTEQ Code를 통한 세슘과 토양과의 종결합을 예측하였으며 탁도 측정을 통해 응집제 투여 후 탁도를 측정하여 세척수의 재사용 여부 및 미세토양 제거율을 분석하였다.

중심단어: 토양제염, 세슘, 토양세척, Visual MINTEQ

## 1. 서론

원전사고 및 시설보수 과정에서 방사성물질이 방출된다. 방출되는 방사성물질 중 토양에 오염되어 제염을 고려해야 할 물질로는 대표적으로  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{131}\text{I}$ 등이 있다. 그 중 가장 고려해야 할 핵종은 세슘-137인데, 이는 후쿠시마와 같은 중대 사고시의 경우 광역의 토양오염을 발생시킨다. 또한 원전 해체 시에도 방사성물질로 토양오염이 발생할 수 있다. 사례로는 Connecticut Yankee 원전의 해체가 있다. 해체 중 예기치 못하게 토양이 방사성 물질로 오염되어 있어 해체 공정이 지연된 사례가 있다. 이러한 세슘 및 방사성물질을 제거하기 위해 실제 토양복원에 적용되었던 기술은 토양세척, 토양세정, 동전기 등의 기술이 있으며, 단시간 내에 광역의 토양을 제염하고 제염효율이 비교적 높은 기술은 토양세척 공정이다[1, 2].

이러한 토양세척 공정의 원리는 적절한 세척제를 사용하여 토양과 세슘의 표면장력을 약화시켜 토양과 세슘을 분리하는 원리이다. 제염의 효율을 결정하는 주요 인자는 세척수 선정에 있다. 산(Acid) 세척수를 이용한 제염 공정은 물을 이용할 때 보다 표면장력을 더욱 더 약화시켜 세슘과 토양을 고효율로 분리시킬 수 있는 장점이 있으나 산폐액(Acid Effluent)이 많이 발생한다는 단점이 있다. 다량의 폐액을 발생시키는 산(Acid) 세척수 대신 물을 이용하고, 또한 응집제를 이용한 세척수 재사용을 통해 보다 경제적이고 효율적인 공정이 이루어질 수 있을 것이다. 본 논문에서는 세척수를 물로 사용하는 토양세척 공정에서 세척수의 재활용을 통한 공정효율을

높이기 위해 응집제를 적용하여 세척수 내에 포함되어있는 미세토양과 세슘을 침전하여 제거하는 환경을 가정하여 실험을 수행하였다. 수용액에 토양을 첨가하여 세슘을 흡착시킨 후 응집제를 첨가하여 ICP-OES를 통해 잔여 세슘의 농도를 측정하였다. 또한 응집제를 투여 후 탁도를 측정하여 세척수의 재사용 가능여부를 파악하였으며, Visual MINTEQ Code를 통해 토양과 세슘의 종결합을 농도별로 예측해 보았다.

## 2. 토양제염 방법

### 2.1 토양 제염 기술의 종류

일반적으로 토양복원 기술에는 크게 물리·화학적, 생물학적, 열적 공정 등이 있다. 토양 복원 기술 중 방사성물질로 오염이 된 경우에는 시간이 오래 소요되는 생물학적 공정과 방사성물질의 제거 효율이 떨어지는 열적 처리공정은 적용하기 적절하지 못하다. 따라서 방사능 물질을 제거 할 수 있는 토양 복원 기술에는 토양세척, 동전기, 퇴적침출과 같은 중금속을 처리가 가능한 물리·화학적 공정 방법이 사용될 수 있다[3].

### 2.2 국내·외 토양세척 적용사례

물리·화학적 토양복원 기술 중 토양세척 공정은 타 기술에 비해 비교적 짧은 시간 내에 제염효율이 높아 방사능물질로

Table 1. Application case of soil washing (Korea)

Soil Washing process (0.05 mR·h <sup>-1</sup> )	<sup>60</sup> Co (Removal rate)	<sup>137</sup> Cs (Removal rate)
Citric Acid 0.05 M, 3 times repeated decontamination (0.063~1.0 mm)	62.1%	13.8%
Citric 0.05 M+Ammonium sulfate 0.2 M, 3 times repeated decontamination (0.063~1.0 mm)	61.8%	40.6%
Citric 0.05 M+Ammonium Nitrate 0.2 M, 3 times repeated decontamination (0.063~1.0 mm)	60.7%	38.8%
Citric 0.05 M+Ammonium Potassium Oxalate 0.2 M, 3 times repeated decontamination (0.063~1.0 mm)	35.8%	3.1%

Table 2. Application case of soil washing (USA)

Site	Radionuclide	Pre-Treatment activity	Post-Treatment activity	Amount of Soil Treatment	Volume Reduction
Montclair-West Orange, New Jersey, 1996	<sup>226</sup> Ra <sup>235</sup> U <sup>238</sup> U <sup>230</sup> Th	40 pCi/g	11 pCi/g	323,000 yd <sup>3</sup>	54%
Oak Ridge National Lab.	<sup>137</sup> Cs	Not available	Not available	25.5 tons	70%
Brunei Site, Texas	U, Ra	70 ppm (U)	20.7(U)	22,800 tons	99%
Maywood, Superfund Site, New Jersey	<sup>232</sup> Th <sup>226</sup> Ra <sup>238</sup> U	34 pCi/g (Th) 8 pCi/g (Ra) 7 pCi/g (U)	1 pCi/g (Th) 1 pCi/g (Ra) 1 pCi/g (U)	8,000 tons	Not Available
Newpark Environment, Texas	<sup>226</sup> Ra	100-700 pCi/g	< 5 pCi/g	2,700 drums	95%

오염된 토양에 실제 적용된 사례가 있다. 대표적 국내 적용 사례로는 한국원자력연구원(KAERI)에서 TRIGA Mark-II & III 인근 부지의 <sup>60</sup>Co과 <sup>137</sup>Cs이 포함되어 있는 토양에 적용된 사례가 있다[4]. 국외사례로는 Oak Ridge National Lab에서 <sup>137</sup>Cs에 대해 토양세척을 적용한 사례가 있다[5]. 국내 토양세척 적용사례를 Table 1, 미국에서의 토양세척 사례를 Table 2에 나타내었다.

### 3. 세척 제거 실험 및 종결합 예측

#### 3.1 응집제 선정

본 실험에서는 세척수로 물을 사용한 공정을 가정하여 실험 세척수를 지하수로 사용하였으며, 토양세척 공정의

효율성을 높이기 위해 세척수에 응집제(J-AF)를 적용하여 토양세척 공정에서의 응집제 성능을 평가를 수행하였다.

토양세척 공정중 세척수와 토양은 세척수 내에서 표면장력이 약화되어 주변수(Surround Water)에 콜로이드 상태로 있게 된다. 일반적으로 콜로이드는 입자의 단위체적당 아주 큰 비표면적으로 인해 물 분자와 이온과 같은 물질을 흡착하는 경향이 있고, 콜로이드입자 표면에 있는 기의 이온화와 주위용액으로부터의 이온 흡착 때문에 정전기적 전하를 띠거나, 점토와 같은 콜로이드상 미립자는 미립자 격자내부의 이온 부족으로 정전기적전하를 띠는 경향이 있다.

따라서, 이와 같은 콜로이드상 폐수에 응집제가 가해지면 콜로이드 입자가 불안정하게 되고 서로 응집하여 플록(Floc)을 형성하게 된다[6]. 이러한 응집의 대표적인 메커니즘으로는 전기 이중층의 감소(Double-layer compression), 흡착과 충전 전하중화(Adsorption and Charge neutralization),

Table 3. Components of flocculating agent

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Cl	OH
21.74	0.12	18.75	18.01	8.13	2.12	11.62	6.29	0.13	13.08

체거름 응집(Enmeshment in a precipitate), 흡착과 입자 상호간의 교각형성과 같은 4 가지의 형태를 들 수 있다. 토양 세척 공정은 세척수 내에 콜로이드 상태 및 미세토양에 결합되어 있는 방사성 물질의 제거효율을 높이기 위해 통상적으로 흡착제를 사용하며 또한 선택적 흡착제를 적용하여 보다 효율을 높이게 된다. 하지만 이러한 흡착제는 방사성 물질을 제거 하거나 흡착된 방사성 물질을 흡착제로부터 분리하기 위해 많은 시간이 필요로 하게 된다. 이러한 단점을 보완하기 위해 Floc 형성 시간이 짧아 공정시간을 줄일 수 있는 필라이트(Phyllite) 기반의 응집제(J-AF)를 선택하여 세척 제거 실험을 수행하였다. J-AF는 광역의 토양제염을 위해 정부과제의 일환으로 전테크(Jeon Tech.Co.,Ltd)에서 개발한 응집제이다.

이러한 응집제의 성분을 알아보기 위해 MSDS (Material Safety Data Sheets)분석을 수행하였으며 성분은 Table 3과 같다. 또한 응집제의 입자 크기를 알아보기 위해 PSA (Particle Size Analysis)분석을 수행하였으며 결과는 Fig. 1과 같다.

### 3.2 세습 제거 실험

세습은 자연환경에서 일반적으로 입자 미세토양(Silt+ Clay)에 강하게 결합되어 있다. 따라서 입자가 작은 토양을 추출하기 위해 학교 부지의 잔디밭에서 토양을 채취한 후, 약 38 μm로 체분리를 수행하였다. 체분리한 토양은 진공건조기를 통해 20분 건조시켰다. 다음 CsNO<sub>3</sub> (99%, Sigma-Aldrich, USA)로 제조한 10 mmol·L<sup>-1</sup> 세습 용액 100 mL (pH 6.5)에 학교 부지의 잔디밭에서 채취하여 38 μm 이하로 체분리하여 건조시킨 토양 1 g을 투여 후 25℃에서 250 rpm으로 24시간 동안 교반하여 세습으로 오염된 모의 토양을 제조하였다.

첫 번째 실험은 응집제를 적용하여 최대 제거율과 시간별 제거율을 분석하였다. 최대 제거율을 확인하기 위한 실험은 세습 초기농도 0.1, 1, 2, 5, 10 mmol·L<sup>-1</sup> 용액을 제조한 후 50 mL 코니칼튜브에 세습으로 오염된 모의 토양에 응집제를

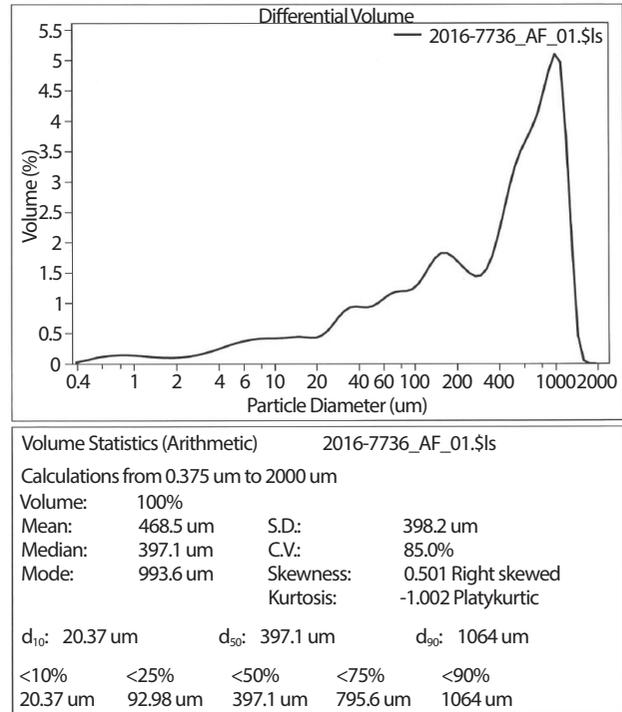


Fig. 1. Particle Size Analysis of flocculating agent (J-AF).

0.1 g씩 투여하였다. 상등수를 추출하여 세습의 입자크기를 고려해 0.2 μm(Cellulose Nitrate Membrane Filter) 필터 사용하여 필터링 후 ICP-OES (Optima 2100 DV, PerkinElmer Co., USA)를 통해 응집제 적용 전, 후의 세습 모의 토양 수용액내의 잔존 세습량을 분석하였다.

또한 시간에 따른 응집제의 세습 제거 성능을 알아보기 위해 최대 제거율을 확인하기 위한 실험과 동일한 조건에서 샘플링 시간만 달리하였다. 샘플은 교반을 시작한 후 1분마다 총 5회 실험용액의 상등액을 추출하여 0.2 μm (Cellulose Nitrate Membrane Filter) 필터를 사용하여 필터링을 거쳐 ICP-OES를 통해 실험용액 내 잔존 세습 양을 분석하였다.

세습 농도별 제거 성능은 Fig. 2, 시간에 따른 응집제의 세습 제거성능은 Fig. 3에 나타내었다.

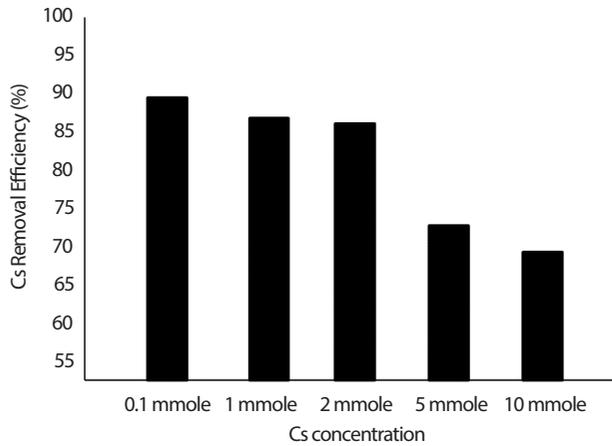


Fig. 2. Flocculating agent removal rate performance for each Cs concentration.

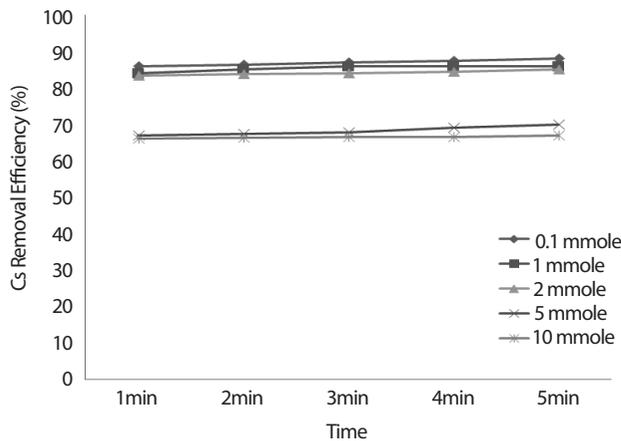


Fig. 3. Flocculating agent removal rate performance over time.

### 3.3 세슘과 토양의 종결합 예측

세슘과 토양에 누출 되었을 때, 토양과 세슘 간의 종결합을 알아보기 위해 Visual MINTEQ Code를 통해 예측해 보았다. Visual MINTEQ Code는 수용액상 내에서 평형, 수착 및 흡착 등의 계산을 위해 개발된 화학평형 모델이다. U.S.EPA의 MINTEQA2 소프트웨어를 기반으로 Visual Basic 인터페이스를 사용한 Code이다[7].

Visual MINTEQ Code에 토양의 성분을 적용하기 위해 국내 충북 보은지역의 대추 과수원 토양의 양·음이온 CEC

Table 4. Soil CEC of Gochang-gun, Jeollabuk-do

Soluble Cation and Anion(Cmole/kg)			
K	Ca	Mg	
0.3	2.4	1.2	
Concentration of Anion(mg/kg)			
Cl	NO <sub>3</sub>	PO <sub>4</sub>	SO <sub>4</sub>
536	374	18.4	1,068

Table 5. Cs and Soil Species combination predict of by Visual MINTEQ

Component	% of total Concentration	Species name
Cs+1 (0.1 mmol)	8.433	Cs+1
	47.877	CsCl
	15.417	CsSO <sub>4</sub>
	28.272	CsNO <sub>3</sub>
Cs+1 (1 mmol)	8.605	Cs+1
	47.946	CsCl
	15.230	CsSO <sub>4</sub>
	28.219	CsNO <sub>3</sub>
Cs+1 (2 mmol)	8.801	Cs+1
	48.014	CsCl
	15.028	CsSO <sub>4</sub>
	28.157	CsNO <sub>3</sub>
	9.431	Cs+1
Cs+1 (5 mmol)	48.172	CsCl
	14.455	CsSO <sub>4</sub>
	27.943	CsNO <sub>3</sub>
	10.633	Cs+1
Cs+1 (10 mmol)	48.271	CsCl
	13.595	CsSO <sub>4</sub>
	27.502	CsNO <sub>3</sub>

(Cation Exchange Capacity)를 ppm 단위로 환산하였다 [8]. 양·음이온의 CEC는 Table 4에 나타내었으며, Visual MINTEQ Code에 Component에 적용하였다. 또한 온도는

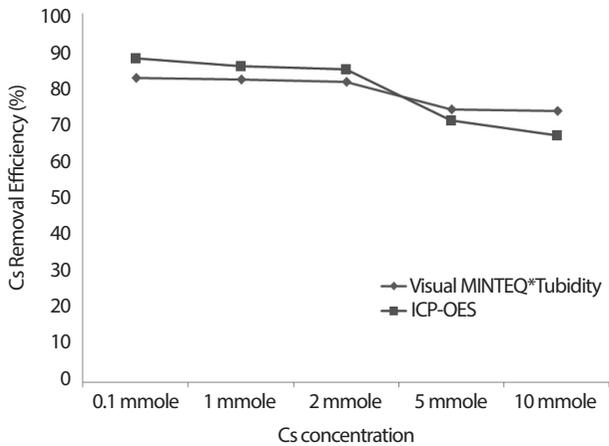


Fig. 4. Comparison of ICP-OES and Visual MINTEQ Code\*Turbitudy.

25°C, pH 6.5, Concentration unit은 mg·kg<sup>-1</sup>, L/S ratio는 0.01을 적용하였으며 나머지 값은 Code에서 주어진 Default 값을 사용하였다. 이러한 Code의 기능을 통해 세슘과 토양의 종결합을 예측하였다. 일반적으로 중금속이 토양과 결합하는 정도 및 특성을 분석하기 위해서는 양이온 교환능 및 음이온교환능의 이온들을 분석하여 얼마만큼의 중금속 흡,탈착이 이루어지는지 분석한다. 콜로이드 점토입자와 부식토는 표면의 전기적 전하 때문에 이온과 쌍극자 물질을 끌어당기고 가역적으로 그들과 결합한다. 점토 광물과 부식 콜로이드는 음전화를 띠고 있기 때문에 그들은 주로 양이온을 끌어당기고 흡착한다. 본 논문에서 Code에 적용한 양이온은 K, Ca, Mg 이며 음이온은 Cl, NO<sub>3</sub>, PO<sub>4</sub>, SO<sub>4</sub> 이다. 결과는 Table 5와 같다[9, 10]. Table 5를 보면 Cs이 다른 음이온과 결합하지 않고 본 이온상태로 남아 있지 않은 양을 제외 하고는 토양의 음이온들과 결합했음을 추측할 수 있다.

### 3.4 탁도 측정

토양과 세슘이 혼합되어 있는 수용액에 응집제 투입 전, 후 탁도 측정을 통해 세척수의 재이용 가능여부 및 수용액 내에서 미세토양의 제거 정도를 판단하였다. 탁도 측정에는 LAMotte 2020, Turbidity Meter를 이용하였다. 응집제를 투입하기 전에는 47.2 NTU (Nephelometric Turbidity Units) 이었으며, 응집제를 투입한 후에는 4.39 NTU로 세척수가 맑아짐을 알 수 있었다.

## 4. 결과 및 고찰

실험을 통해 응집제 0.1 g을 적용하였을 때 ICP-OES로 측정된 결과 세슘의 농도가 0.1 mmol일 때는 최대 세슘 제거 성능은 약 88%, 1 mmol 일 때는 최대 약 85.8%, 2 mmol 일 때는 최대 약 85%, 5 mmol 일 때는 최대 약 71%, 10 mmol 일 때는 최대 약 67% 제거됨을 알 수 있었다.

또한 응집제의 투입 전후의 탁도값을 비교해 보면 응집제 투입 후에는 탁도가 4.39 NTU로 국내 공업용수 재사용 수질기준인 탁도 10 NTU 이하, pH 5.8~8.5, BOD 6 mg·L<sup>-1</sup> 이하 중 탁도와 pH를 고려했을 때에는 충분히 세척수를 재사용할 수 있을 것으로 판단된다[11].

세슘 제거 실험에서의 세슘과 토양을 교반시키기는 것은 세슘과 토양이 자연환경에서 결합되어 있는 상황과 비슷하게 조성하기 위함이다. 따라서 Code를 통한 토양과 세슘의 종결합 예측은 세슘과 토양이 얼마나 결합 및 흡착되어 있는지를 의미하며, 탁도 측정은 세슘 모의 폐액내에서 세슘과 흡착되어 있는 토양을 응집제가 얼마나 제거할 수 있는지의 값을 의미한다. 실측값과 예측값을 비교해 보기 위해 Code를 통한 종결합 예측값에 탁도를 곱한 값과 ICP-OES를 통한 실측값을 비교해 보았다. 실측값과 예측값의 비교 그래프는 Fig. 4에 나타내었다.

실측값과 예측값의 비교 그래프는 0.1~2 mmol영역에서는 비슷한 추이를 보였으나, 약 2 mmol 이상의 농도가 되면 값의 차이가 현저히 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이는 토양과 세슘의 교반 시간을 본 실험보다 충분히 부여한다면 그래프의 격차를 줄일 수 있을 것으로 사료된다. 또한 원자력 발전소 및 원자력을 이용하는 관계시설의 토양의 CEC를 측정하고 이를 통한 종결합 예측을 통해 토양세척 공정의 효율을 예측 할 수 있을 것으로 사료된다.

## 5. 결론

원전해체 및 정비 시, 예기치 못한 사고를 통해 토양으로 노출되는 방사성핵종을 제거하는 방법에는 국내·외 적용사례가 있는 토양세척법이 적용하기 적합하다. 토양세척 공정은 타 공정에 비해 공정시간이 짧지만 비교적 높은 제염효율을 나타낸다. 토양세척 공정에서 가장 고려되어야 할 부분은

토양의 입도분리, 세척수 선정, 효율을 높이기 위한 흡착제 및 응집제의 적용이다. 이러한 점을 고려하였을 때, 방사성 물질이 국소 지역에 오염된 경우에는 동시다발적인 토양제염이 필요하지 않으므로 산세척수와 선택적 흡착제를 적용하여 제염 효율이 높은 토양세척 공정이 적합하다. 하지만 방사성물질이 광역으로 오염되는 경우에는 동시다발적으로 짧은 기간 내에 제염활동이 수행되어야 하므로 세척수로 물을 이용하고 세척수 재사용과 세습 제거율을 보다 높이기 위한 응집제 투여 방법을 적용한 토양세척 공정이 더욱 적합하다. 또한 본 논문에서 실험에 적용한 응집제는 floc 형성시간이 매우 짧아 토양세척 공정의 시간을 더욱 단축시킬 수 있다.

추후 실제 원자력 발전소의 주변의 토양성분을 분석하고 토양에 누출될 세습 및 방사성물질의 양을 예측하여 Code에 적용한다면 해체 시 토양복원률 예측과 원전해체 시 부지개방 기준을 만족하는 제염방법을 선정하는데 있어 주요 자료로서 사용될 수 있을 것으로 사료된다. 또한 본 논문의 후속 연구로써 토양세척 공정의 효율 증진을 위해 응집제의 응집 메커니즘을 분석할 예정이다.

## 감사의 글

본 논문은 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원으로 수행한 연구 과제입니다. (No. 20141510101630)

본 논문은 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다. (No. 2012M2B2B1055501)

## REFERENCE

- [1] J.S. Song and S.I. Kim, "A Study on The Assessment of Treatment Technologies for Efficient Remediation of Radioactively-Contaminated Soil", *J. Nucl. Fuel Cycle Waste Technol.*, 14(3), 245-251 (2016).
- [2] W.S. Kim, S.S. Kim, G.N. Kim, U.R. Park, and J.K. Moon, "Improved Treatment Technique for the Reuse of Waste Solution Generated from a Electrokinetic Decontamination System", *J. Nucl. Fuel Cycle Waste Technol.*, 12(1), 1-6 (2014).
- [3] G.N. Kim, W.K. Choi, C.H. Jung, and J.K. Moon, "Development of a Washing System for Soil Contaminated with Radionuclides Around TRIGA Reactors", *JKSIEC*, 1(3), 406-413 (2007).
- [4] W.J. Oh, H.J. Won, C.H. Jung, W.K. Choi, G.N. Kim, and G.W. Lee, "Decontamination Technology Development for Nuclear Research Facilities", *KAERI Technical Report*, RR-2416 (2003).
- [5] *Technology Reference Guide for Radioactively Contaminated Media*, U.S.EPA, EPA 402-R-07-004 (2007).
- [6] T.J. Casey, "Unit Treatment Process in Water and Wastewater Engineering", *AQUAVARRA RESEARCH LIMITED*, Blackrock Co. Dublin, 39-43, Wiley Press, New York (2006).
- [7] J.P. Gustafsson, "Visual MINTEQ Ver3.1 manual", *Royal Institute of Technology*, Sweden (2000).
- [8] B.Y. Jung, K.S. Lee, M.G. Kim, Y.H. Choi, M.K. Kim, and J.Y. Cho, "Physico-Chemical Properties of Rain-fall Interception Culture and Open Field Culture Soil of of *Rubus sp.* in Gochang-gun, Jeollabuk-do", *Korean J. Soil Sci. Fert.*, 41(5), 303-309 (2008).
- [9] J.S. Yoon, "Absorption Characteristics of heavy metals in soils and their removal efficiency of soil washing technique using EDTA and NTA", *Thesis of Master's degree*, Seoul National University (1999).
- [10] H.S. Lee, Y.H. Choi, H.J. Choi, and H.S. Kang, "Development of Periodic Safety Review Technology for Nuclear Power Plant", *KAERI*, KAERI/RR-2245/2011 (2001).
- [11] K.H. Park, "Based on guidelines for water reuse facility design and maintenance", *Korea Water and Wastewater Works Association*, Ministry of Environment, GSDS Press, Seoul (2007).