

Improvement of Pilot-scale Electrokinetic Remediation Technology for Uranium Removal

우라늄 제거를 위한 실험실 규모 동전기 장치의 개선 방안

Hye-Min Park, Gye-Nam Kim*, Seung-Soo Kim, Wan-Suk Kim, Uk-Ryang Park and Jei-Kwon Moon
Korea Atomic Energy Research Institute, 989-111 Daedeokdaero, Yuseong-gu, Daejeon, Korea

박혜민, 김계남*, 김승수, 김완석, 박옥량, 문제권
한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

(Received January 25, 2013 / Revised March 14, 2013 / Approved April 22, 2013)

The original pilot-scale electrokinetic equipment suitable to soil contamination characteristics of Korean nuclear facility sites was manufactured for the remediation of soil contaminated with uranium. During the experiment with the original electrokinetic equipment, many metal oxides were generated and were stuck on the cathode plate. The uranium removal capability of the original electrokinetic equipment was almost exhausted because the cathode plate covered with metal oxides did not conduct electricity in the original electrokinetic equipment. Therefore, the original electrokinetic equipment was improved. After the remediation experience for 25 days using the improved electrokinetic remediation equipment, the removal efficiency of uranium from the soil was 96.8% and its residual uranium concentration was 0.81 Bq/g. When the initial uranium concentration of soil was about 50 Bq/g, the electrokinetic remediation time required to remediate the uranium concentration below clearance concentration of 1.0 Bq/g was about 34 days. When the initial uranium concentration of soil was about 75 Bq/g, the electrokinetic remediation time required to remediate below 1.0 Bq/g was about 42 days. When the initial uranium concentration of soil was about 100 Bq/g, the electrokinetic remediation time required to remediate below 1.0 Bq/g was about 49 days.

Key words: Pilot-scale Electrokinetic Remediation Equipment, Uranium, Contaminated soil, Remediation, Metal oxide

방사능 오염 토양 복원을 위해 실험실 규모의 동전기 복원장치를 제작하여 가동 하던 중 토양 내 존재하던 금속이온의 용출로 금속 산화물이 발생하여 음극의 전류 흐름을 차단하는 문제가 발생하였다. 전류의 차단으로 토양 내 우라늄 제거 능력이 상실되어 이러한 문제를 해결하는 해결 방안을 모색하여 개선된 동전기 복원 장치를 제작하였다. 개선된 실험실 규모 동전기 복원 장치를 이용하여 토양복원 실험을 25 일간 수행 하였을 때 우라늄 잔류 농도는 0.81 Bq/g으로 약 96.8%의 제거 효율을 보였으며, 초기 우라늄 농도 50 Bq/g 일 때 우라늄 규제 해제 농도인 1 Bq/g 이하로 제거 되기까지는 34 일의 복원 기간이 필요하고, 초기 우라늄 농도 75 Bq/g, 100 Bq/g 일 때 각 42 일, 49 일이 필요한 것으로 나타났다.

중심단어 : 실험실 규모 동전기 복원 장치, 우라늄, 오염 토양, 복원, 금속 산화물

*Corresponding Author. E-mail: kimsum@kaeri.re.kr, Tel: +82.42.868.4957

1. 서론

방사성오염토양은 원자력 시설 주변 지하에 매설된 폐액 저장 탱크 및 연결 관들의 노화로 인한 방사성 폐액의 누출과 예기치 못하게 발생하는 오염 사고로 인해 발생된다. 오염토양 복원공정으로는 토양세척 (soil washing) 기법이 효과적인 정화방법으로 제시되었으나[1], 이는 복원 효율이 낮을 뿐만 아니라 세척 폐액과 같은 2차 오염 물질을 발생하고, 투수성이 좋은 사질 토양에는 적용이 용이하나 투수성이 낮고 표면전하가 높은 점토질 토양에는 적용이 어려운 한계를 지니고 있다. 대부분의 중금속류는 점토질 토양에 고농도로 존재하기 때문에 토양세척 기법을 적용 시 복원 효율이 낮은 문제점이 있어 최근에는 오염토양 복원 기술로서 동전기 복원 기술 (electrokinetic method) 기법에 대한 연구가 진행되었다[2,3].

동전기 복원기술은 토양 내에 직류 전기를 사용하여 토양으로부터 오염물질을 추출하는 방법으로 투수계수가 낮은 토양에서 이온물질, 방사성원소, 유기 오염물질과 같은 다양한 오염물질에 적용가능하며, 오염물질의 이동, 추출, 분리에 대해 전류공급에 따른 전기전도현상을 이용한다. 주요 기작은 전기삼투 (electroosmosis), 전기이동 (electromigration)과 같은 동전기 현상으로 오염물질이 이동, 제거된다. 전기삼투는 토양 입자 표면의 전기 이중층을 구성하는 고정 표면 전하층에 대해 그와 반대 전하를 띠는 유동 유체 전하층의 이온들이 수화된 물 분자들과 함께 세공 (pore) 내에서 이동하는 현상을 말한다. 자연 상태의 토양 입자 표면은 일반적으로 음전하로 대전되어 있으므로 세공내의 유동 유체층은 양전하를 띠게 되어 전기장이 존재하면 전기삼투에 의한 세공 유체는 음극 쪽으로 흐르게 되는데, 이와 같이 전기삼투에 의해 유체가 흐를 때 세공 내에 존재하는 오염 물질들은 정도의 차이는 있지만 전하의 유무에 관계없이 유체와 함께 음극 방향으로 이동하여 음극 근처에 농축된다. 전기 이동은 토양 내에 전류 공급 시 전기 경사가 형성되어 각 이온들은 자신의 전하 특성에 따라 이온이 반대 극성의 전극으로 이동되는 것을 말하는데 일반적으로 중금속, 질산염, 인산염과 같은 이온성 오염물질이 이와 같은 이동수단에 의해 제거되며, 동전기 복원기술은 비균질성 혹은 저투수성 토양에서 높은 정화 효율을 보인다. 공극수에 존재하거나 토양입자 표면에서 탈착된 물질들은 전하특성에 따라 양극 또는 음극 방향으로 이동하게 된다. 오염물질의 기본 이동 메커니즘은 산 또는 염기의 이동 메커니즘과 동일하여 이온이동, 이류, 확산에 의하여 이온물질이 이동한다[4-6].

이러한 동전기적 기법을 이용하여 방사능 오염 토양복원에 적용하기 위하여 50 L 실험실 규모 동전기 장치를 제작하였고, 오염 토양 복원실험 수행 중 토양 내 존재하는 금속산화물이 용출되어 음극 전극 표면에 부착되어 전류를 차단하는 문제가 발생하였다. 따라서 본 연구에서는 실험실 규모 동전기 장치 운영 시 발생된 문제점의 해결 방안을 모색하여 개선 장치를 제작하였으며, 개선된 장치를 이용하여 방사능 오염토양 복원에 적용하였다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1 실험재료

실험에 사용된 방사능 오염토양은 한국원자력연구원 우라늄 변환시설 부근에서 채취한 토양으로 연구원 저장고 내 200 L 드럼에 보관된 토양을 사용하였다. 오염토양 복원 실험을 위해 제작된 50 L 실험실 규모의 동전기 복원 장치는 전해액 저장조(50x30x25 cm), 양극실 (50x50x10 cm), 동전기 토양 셀 (50x50x20 cm), 음극실 (50x50x12 cm), 장치 지지대, power supply, pH controller, 전극 등으로 구성되었다. 전극의 재질은 양극의 경우 불용성 전극인 DSA(Dimensionally stable anode)로 Ti에 IrO₂를 코팅한 것을 사용하였고, 음극에는 Ti 전극을 사용하였다. 전극의 크기는 각 40x40 cm 로 하였다. 전해액의 주입은 양극실과 음극실의 수두차이를 이용하여 제어되고, 전해액은 질산 (HNO₃, Ducksan chemicals, 66%)을 0.01 M로 조제하여 사용하였다.

2.2 실험방법

방사능 오염토양 복원을 위하여 제작된 50 L 실험실 규모의 동전기 장치를 이용하여 실험을 수행하였다. 동전기 장치의 토양 셀에 오염토양을 충전하고, 0.01 M의 질산을 전해질로 사용하였다. 이때, 동전기 토양 셀의 두께는 선행연구를 통해 도출된 결과를 바탕으로 15~20 cm 범위로 선정되었다 [7-8]. Power supply를 통해 전압 10~30 V, 전류밀도 10~15 mA/cm² 로 하여 복원 실험 수행 중 7 일 경과 후 토양 내 존재하던 금속산화물이 용출되어 음극 전극 표면에 부착되었다. 이에 전극에서의 전류 흐름이 차단되어 복원 실험을 중지하였으며, 문제점을 극복 할 수 있는 개선 장치를 제작하여 오염토양 복원 효율을 분석하였다.

방사능 오염 토양의 초기 농도는 토양 셀 12지점을 채

취하여 평균값을 사용하였고, 복원 수행 후 토양의 농도는 토양을 세 개의 층으로 나누어 한층 당 각 12 지점씩 총 36 곳의 토양을 채취하여 농도 분석 하였다.

2.3 분석 방법

우라늄 농도는 MCA (Multi-Channel Analyzer)에 KRIS (Korea Reach Institute Standards and Sciences) 에서 제작한 50 cc의 QCY48 표준용기를 사용하여 측정 하였다. 측정은 pulse height analyzer mode로 하였으며, sintillation 카운터에서 gamma ray source의 펄스 분포를 측정하고 들어오는 펄스 파고를 디지털 신호로 전환시키는 아날로그 디지털 변환기 (Analog-to-Digital Converter: ADC)와 이 디지털 신호에 의하여 구분된 신호의 수를 기억하는 메모리 부로 구성된 통계 분석장치로 펄스를 파고 치에 따라 채널로 구분하여 각 채널에 대한 히스토그램을 취한다. 방사능 농도 분석을 위한 측정 시간은 오염 농도에 따라 달리하며 약 4~8 시간 측정하였다. 또한, 음극실에서 발생된 금속 산화물의 종류와 농도 측정은 ICP-AES를 통해 분석하였다. 산화물의 분석을 위하여 분석 시료를 110°C 에서 2 시간 건조 후 건조한 시료를 약 0.5 g 칭량하여 PFA 비이커에 담아 증류수 약 5 ml를 주입하였다. HNO₃ 6 ml를 넣고 반응 시킨 후 HCl 6 ml를 넣고, H₂O₂ 0.5 ml를 넣고 반응 시킨다. 실온에서 식힌 뒤 HF 0.5 ml를 넣고 하루 간 방치한 후 완전히 용해된 것을 확인하여 50 ml volume flask에 증류수로 make-up 하여 분석용 시료로 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 방사능 오염 토양 특성

방사능 오염 토양의 특성을 파악 하였으며, 토양의 오염 물질은 우라늄으로 오염되어 있다. Table 1에 오염토양

Table 1. Hydraulic parameter of a soil contaminated with uranium

Parameter	Value
Bulk density (g/cm ³)	1.52
Porosity (%)	41.4
Hydraulic conductivity (cm/sec)	2.3×10 ⁻⁸
Water content (%)	27.5
pH	6.2

의 특성을 나타내었다. 오염 토양은 수리전도도가 작고 포화도는 27-28% 인 것으로 나타났다. 오염토양의 입도분포를 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 오염 토양의 평균 입도는 0.6 mm로 미세 입자를 많이 포함하고 있다. 방사능 오염 토양 입도 사이즈에 따른 우라늄 오염 농도는 (Fig. 2) 토양의 입도가 작을수록 비표면적이 넓어 오염 농도가 높아지는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 우라늄 오염 토양의 평균 농도 25.1 Bq/g, 50.2 Bq/g, 74.7 Bq/g, 100.2 Bq/g의 토양을 각각 채취하여 사용하였다.

3.2 동전기 복원 장치 개선 및 토양 복원

앞서 기술한 바와 같이 동전기 장치를 가동하는 동안 토양에 함유된 금속 이온이 용출되어 음극 전극실 전극 표면에 부착되었다. 금속 산화물의 전극 표면 부착으로 전류의 흐름을 차단하여 오염 이온의 탈착 및 이동이 어려워져 이러한 문제를 해결하기 위하여 개선된 동전기 제염장치

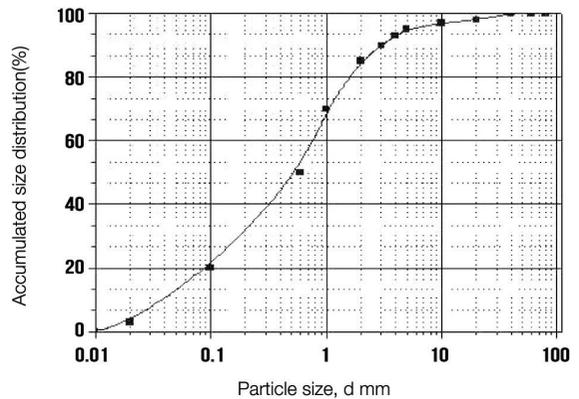


Fig. 1. Accumulated size distribution versus particle size of a soil contaminated with uranium.

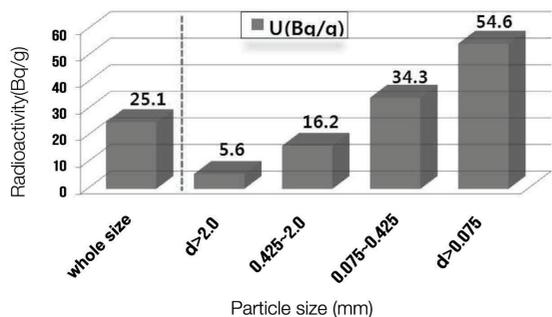


Fig. 2. Radioactivity versus size of a soil contaminated with uranium.

를 제작하였다. Table 2에 음극실 전극에 부착된 금속산화물의 종류와 ICP-AES를 이용하여 농도 분석한 결과를 나타내었다. 분석 결과 토양에서 용출되어 음극 전극 표면에 부착된 금속의 주종은 Fe, Al, Ca, Mg 등이며 이중 U도 상당량 포함하고 있는 것으로 나타났다.

전극 세척장치를 제작하여 주기적으로 음극의 전극 판을 분리하여 표면에 붙어 있는 금속 산화물을 3 M의 질산용액에 3 시간 동안 담근 후 제거해 주었다 (Fig. 3). 또한 Filter box를 제작하여 순환하는 토양 폐액 내의 0.075 mm 이상의 금속 산화물 입자를 제거하였고, 음극실 내의 폐액의 pH를 1~2로 유지시켜 줌으로 pH 상승으로 인한 금속 산화물의 발생을 억제하였고 토양 폐액을 순환시켜 주었다 (Fig. 4). 이러한 방법을 적용한 개선된 파일럿 스케일의 동전기 장치를 Fig. 5에 나타내었으며 개선 장치를 이용하여 방사능 오염토양의 복원 실험을 수행하였다. Table 3에 초기 우라늄 오염 농도 25.1 Bq/g인 방사능 오염 토양의 시간 별 토양 복원 효율을 나타내었다. 방사능 오염 토양에서의 우라늄(UO_2^{2+}) 제거 반응식은 다음과 같다.

$$j = [(k_0 + k_m)R\nabla I + k_h\nabla p]C - \frac{D}{\tau^2} \nabla C \quad (1)$$

Table 2. Types and concentrations of metal oxides stuck on cathode plate

Type of metal ion	%	Type of metal ion	%
Zn	0.26	Ni	0.5
Mn	0.96	Cu	0.23
Cr	1.33	Ca	17.3
Ba	0.4	Si	3.27
Mg	8.18	Fe	37.41
Al	23.38	U	6.78

여기서 j 는 단위 토양 공극 면적 당 핵종 물 유출량이고, k_0 는 전기삼투 투수능, k_m 은 전기이동계수, R 은 전기저항, I

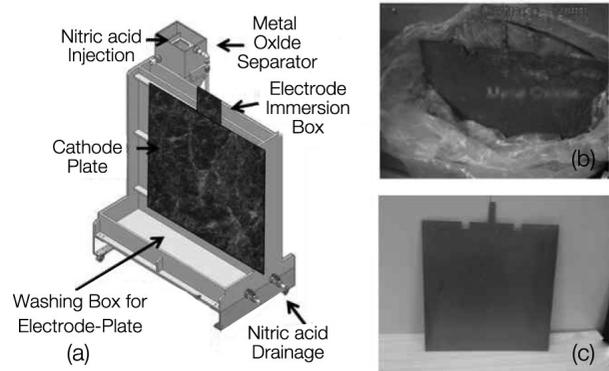


Fig. 3. Immersion-washing equipment for removal of metal oxides from cathode plate; (a) Immersion-washing equipment, (b) Cathode plate covered with metal oxides, (c) Immersion-washing of cathode plate with HNO_3 .

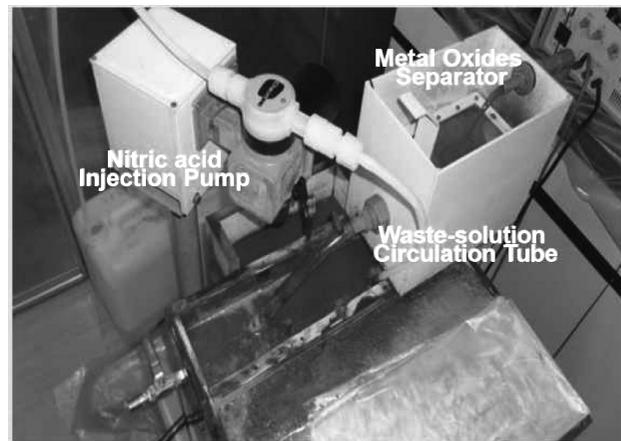


Fig. 4. Circulation system for pH control and waste-solution movement.

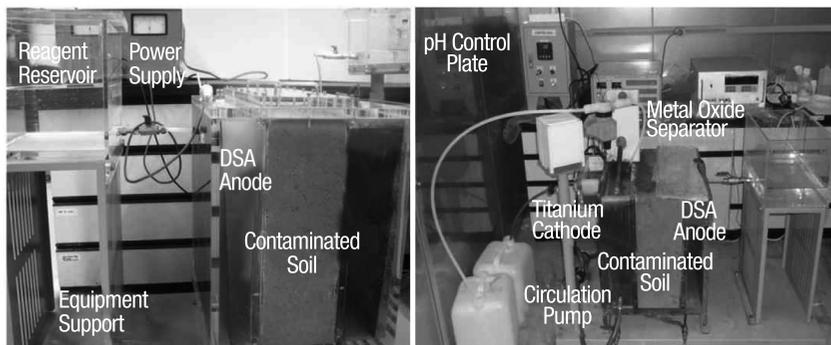


Fig. 5. 50 L pilot scale electrokinetic remediation equipment ; (L) Original equipment, (R) Improved equipment.

는 전류, k_h 는 수리 투수능이며, p 는 압력, C 는 몰 농도이고, D 는 확산계수, τ 는 무차원 비틀림을 나타낸다. 동전기 기술은 mA/cm^2 수준의 직류 전류를 토양 내에 배열된 전극을 통하여 오염 지역 내에 수십 내지 수백 V/m 의 전기장을 형성시킴으로써 토양 입자 사이의 세공 유체 (pore fluid)에 전기 삼투와 전기영동 두 가지 현상을 유도하여 오염원을 제거한다. 포화된 간극 매체에 전위가 가해지면 일정한 방향으로 물의 흐름이 발생하여 이온 및 전하를 띤 입자들의 이동이 수행된다. 개선된 동전기 장치에서는 음극실의 폐액 pH를 1~2 수준으로 맞추어 주어 금속 산화물이 생성되는 것을 방지하였으며, 폐액 내 금속 이온과 함께 우라늄 오염원은 양극에서 음극으로 용액으로 배출되

어 제거된다.

실험은 복원 토양의 잔류 우라늄의 농도가 우라늄 규제 농도 해제 기준인 1 Bq/g 이하를 만족하는 시점까지 계속되었으며, 약 25 일 동안 복원실험을 수행하였을 때 초기 농도대비 96.8%를 나타내었으며, 그 때의 토양 내 우라늄 잔류 농도는 0.81 Bq/g 인 것으로 나타났다.

Fig. 6에 복원 25 일 후의 토양 셀의 단면과 평면의 잔류 우라늄 농도 분포를 나타내었다. 토양 셀의 중간 부분이 각 전극과 가까운 부분보다 농도가 높은 것으로 나타났는데, 양극 전극 부분의 농도가 낮은 이유는 토양 셀 내 우라늄의 이동이 전기삼투와 전기이동의 힘으로 양극에서 음극 방향으로 일어나기 때문이고, 음극실의 pH를 1~2로

Table 3. Uranium removal efficiency and waste-solution volume along remediation elapsed time

Rdagent (M)	Initial Concentration (Bq/g)	Remediation time (days)	Residual Concentration (Bq/g)	Removal efficiency of U (%)	Electric Current (mA/cm^2)	Electrolyte: soil ratio (ml/g)
Nitric acid (0.01M)	25.1	3	16.5		10	
		5	12.1		15	
		7	7.4		15	
		10	4.7		15	
		15	1.98		15	
	50.2	22	1.0		15	
		25	0.81	96.8	15	3.1
		31	0.98	98.1	15	3.8
		42	0.98	98.7	15	4.4
		49	0.97	99.0	15	5.0

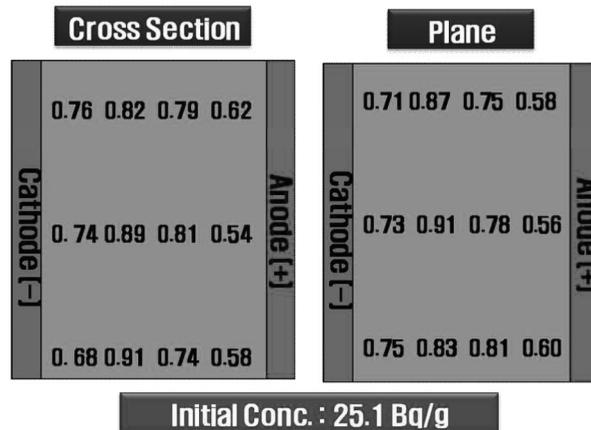


Fig. 6. Distribution of residual uranium concentration in soil cell after 25 days remediation.

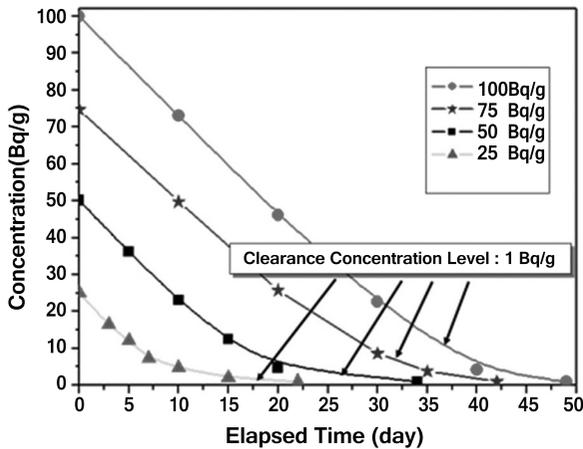


Fig. 7. Uranium radioactivity concentration versus remediation elapsed time per different initial concentration.

조절하기 때문에 음극 전극 주변에서는 토양 내 우라늄의 용출이 더 용이하게 일어나 음극 전극 부분의 오염 농도가 더 낮아진 것으로 사료된다.

초기 방사능 농도가 복원 효율에 영향을 미치는지 확인 하기 위하여 초기 우라늄 농도를 달리하여 실험을 수행 하였다 (Fig. 7). 우라늄의 초기 오염 농도가 50 Bq/g 일 때 규제해제농도인 1 Bq/g 이하로 복원하기 위해서는 약 34 일간의 복원 기간이 필요한 것으로 나타났으며 초기 오염 농도 대비 약 98.1% 제거된 것으로 나타났다. 또한 초기 우라늄의 농도가 75 Bq/g, 100 Bq/g 이었을 때 약 42 일, 49 일 동안의 복원 실험을 진행할 경우 규제해제 농도인 1 Bq/g 이하 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 각각 반응 종료 후 초기 오염 농도 대비 약 98.7%, 99.0%의 제거된 것으로 확인되었다. 이와 같이 초기 방사능 오염 농도가 복원 효율에 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 방사능 오염 토양의 초기 오염 농도가 높을 경우 규제 해제 농도를 만족하는 수준으로 방사능 오염 물질을 제거하기 위하여 복원 기간이 더욱 길어짐을 알 수 있었다. 이러한 결과로 개선된 파일럿 스케일의 동전기 복원 장치를 이용하여 방사능 오염토양의 농도에 적합한 기간 동안 반응 시킴으로써 자체 처분 기준인 1 Bq/g 이하로 복원 할 수 있음을 확인하였다.

4. 결론

본 연구는 방사능 오염 토양 복원을 위하여 50 L 실험실 규모 동전기 장치를 제작하여 복원 실험을 수행 하던 중 발생된 문제점을 개선하기 위한 방법을 도출하여 복원 실험

을 수행하였다. 동전기 복원장치를 이용하여 복원 실험 하던 중 가동 7 일이 경과하였을 때 토양 내 존재하던 금속의 용출로 많은 양의 금속 산화물이 발생하여 전극 표면에 부착되어 전류 흐름을 차단하였다. 이에 다음과 같은 방법으로 금속 산화물의 생성을 저감하는 방법으로 장치를 개선하여 복원 실험을 수행하였다. 첫째, 전극 세척장치를 제작하여 음극 전극 표면에 부착된 금속 산화물을 제거하였으며, 둘째로 0.075 mm 이상의 금속 산화물 입자를 filter box를 통해 제거하였다. 셋째로 토양 폐액 순환시스템을 통하여 음극실 토양 폐액이 순환하도록 하였고, pH를 강 산성 조건으로 유지시켜 줌으로써 금속산화물의 발생을 억제하였다.

이러한 점을 개선한 장치를 이용하여 방사능 오염 토양 복원 실험을 수행한 결과 복원 시작 25 일 경과 후 토양 중 우라늄의 농도는 초기 농도 대비 약 96.8% 제거되었으며, 이 때 잔류 농도는 0.81 Bq/g으로 규제해제 농도를 만족하는 것을 나타냈다. 또한 초기 방사능 오염 농도가 복원 효율에 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 규제 해제 농도를 만족하는 수준으로 방사능 오염 물질을 제거하기 위하여 오염도가 높을수록 복원 기간이 더욱 길어짐을 알 수 있었다. 초기 토양의 우라늄 농도 50 Bq/g 일 때 규제 해제 기준 농도인 우라늄 1.0 Bq/g 이하로 제거하려면 34 일이 소요되며, 초기 토양 농도 75 Bq/g, 100 Bq/g 일 때 각 42 일, 49 일이 소요되는 것으로 나타났다.

감사의 글

This work was supported by Nuclear Research & Development Program of the Korea Science and Engineering Foundation (KOSEF) grant funded by the Korean government (MEST).

REFERENCES

- [1] G.N. Kim, W.K. Choi, C.H. Bung and J.K. Moon, "Development of a washing system for soil contaminated with radionuclides around Triga reactors", J. Ind. Eng. Chem., 13, pp. 406-413 (2007)
- [2] G.N. Kim, Y.H. Jung, J.J. Lee and J.K. Moon, "Development of electrokinetic flushing technology for remediation of the contaminated site around nuclear facilities", J. Korean Radioact. Waste Soc., 25(2),

- pp. 146-153 (2008).
- [3] USEPA, In Situ Remediation Technology: Electrokinetics, EPA542-k-94-007, U.S. Environmental protection agency, Office of Solid Waste and Emergency Response, Technology Innovation Office, Washington, DC (1995).
- [4] G.Y. Lee, "A Study on the removal efficiency of arsenic in fine-soil after soil-washing by electrokinetic remediation", A master's thesis, The university of Seoul (2010).
- [5] S. Pamukcu, A. Weeks and J. K. Wittle, "Electrochemical extraction and stabilization of selected inorganic species in porous media", *J. Hazard. Mater.*, 55, pp. 305-318 (1997).
- [6] Y.B. Acar and A.N. Alshawabkeh, "Principles of electrokinetic remediation", *Environ. Sci. Technol.*, 27(13), pp. 2638-2647 (1993).
- [7] G.N. Kim, B.I. Yang, J.K. Moon and K.W. Lee, "Vertical electrokinetic-flushing remediation", *Sep. Sci. Technol.*, 44, pp. 2354-2370 (2009).
- [8] G.N. Kim, B.I. Yang, W.K. Choi and K.W. Lee, "Development of vertical electrokinetic-flushing decontamination technology to remove ^{60}Co and ^{137}Cs from a Korean nuclear facility site" *Sep. Purif. Technol.*, 68, pp. 222-226 (2009).
- [9] L. van Cauwenberghe, *Electrokinetics, GWRTAC Technology overview report, TO-97-03, Ground-Water Remediation Technologies Center, Pittsburg, PA, 1997.*
- [10] E.C. Buck, N.R. Brown and N.L. Dietz, "Contaminant uranium phases and leaching at the Fernald site in Ohio", *Environ. Sci. Technol.*, 30, pp. 80-88 (1996).
- [11] C.W. Francis, A.J. Mattus, M.P. Elless and M. E. Timpson, Carbonate-and citrate-based selective leaching of uranium from uranium-contaminated soils: Part 1. Removal of uranium from uranium-contaminated soils: Phase 1 bench scale testing, Oak Ridge National laboratory, U.S. Department of energy (1993).
- [12] S. Pamukcu and J.K. Wittle, "Electrokinetic removal of selected heavy metals from soil", *Environ. Prog.*, 11(3), pp. 241-250 (1992).
- [13] K. Reddy, C.Y. Xu and S. Chinthamreddy, "Assessment of electrokinetic removal of heavy metals from soil by sequential extraction analysis", *J. Hazard. Mater.*, B84, pp. 279-296 (2001).
- [14] K. Reddy and S. Chinthamreddy, "Sequentially enhanced electrokinetic remediation of heavy metals in low buffering clayey soils", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, March, pp. 263-277 (2003).
- [15] F. Braud, S. Tellier and M. Astruc, "Modelling of decontamination rate in an electrokinetic soil processing", *Int. J. Environ. Anal. Chem.*, 68, pp. 105-121 (1998).
- [16] S.O. Kim, S.H. Moon and K.W. Kim, "Removal of heavy metals from soils using enhanced electrokinetic soil processing", *Water, Air, Soil Pollution*, 125, pp. 259-272 (2001).
- [17] M.M. Page and C.L. Page, "Electroremediation of contaminated soils", *J. Environ. Eng., ASCE* 128, pp. 208-219 (2002).
- [18] M. Macka, P. Nesterenko and P.R. Haddad, "Investigation of solute-wall interaction in separation of uranium(VI) and lanthanides by capillary electrophoresis using on-capillary complexation with arsenazo III", *J. Microcolumn Sep.*, 11, pp. 1-9 (1999).
- [19] S. Scapolan, E. Ansoborlo, C. Moulin and C. Madic, "Uranium speciation in biological medium by means of capillary electrophoresis and time-resolved laser induced fluorescence", *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 226, pp. 145-148 (1997).
- [20] G.E. Collins and Q. Lu, "Microfabricated capillary electrophoresis sensor for uranium (VI)", *Anal. Chim. Acta.*, 436, pp. 181-189 (2001).
- [21] A.P. Shapiro and R.F. Probst, "Removal of contaminants from saturated clay by electro osmosis", *Environ. Sci. Technol.*, 27, pp. 283-291 (1993).
- [22] R. Lageman, W. Pool and G. Seffinga, "Electroreclamation: theory and practice", *Chem. Ind.*, 8, pp. 585-590 (1989).