

Development of Electrokinetic-Flushing Equipment for a Remediation of Soil Contaminated with Radionuclides

방사성오염토양 제염을 위한 동전기세정장치 개발

Gye-Nam Kim, Yun-Ho Jung, Jung-Joon Lee, Jei-Kwon Moon,
Chong-Hun Jung and Un-Soo Chung

Korea Atomic Energy Research Institute, 1045 Daedeokdaero, Youseong-gu, Daejeon

kimsum@kaeri.re.kr

김계남, 정윤희, 이정준, 문제권, 정종현, 정운수
한국원자력연구원, 대전시 유성구 덕진동 대덕대로 1045

(Received October 2, 2007 / Approved November 10, 2007)

Abstract

This study examined the effect of an electrokinetic-flushing remediation for a soil of a high permeability. The soil was sampled from the site around a research atomic reactor which had high hydro-conductivities due to a high content of sand in the soil. The flow rate of the washing reagent was fast at the beginning but it was reduced as time lapsed. In the case of using citric acid as a washing reagent, the flow rate was fastest, 78.7 ml/day. The removal efficiencies of Co^{2+} and Cs^+ from a soil cell with acetic acid were the highest, which were 95.2% and 84.2% respectively. The soil waste-solution volume generated from the electrokinetic remediation was reduced to about 1/20 of that from the soil washing remediation. Meanwhile, the electrokinetic-flushing method enhanced the removal efficiencies of Co^{2+} and Cs^+ from the soil by about 6% and 2% respectively, compared to those by the electrokinetic method. Consequently, it was found that the electrokinetic-flushing method was more effective for the remediation of a soil with a high permeability.

Key words : Electrokinetic-flushing, Cobalt, Cesium, High permeability soil, Removal efficiency

요 약

투수성이 높은 토양에 대한 동전기세정 제염의 영향을 평가했다. 실험토양은 많은 모래를 함유하여 수리전도도가 높은 연구 원자로 주변부지로부터 채취했다. 세정용액의 방출속도는 제염 시간 경과와 함께 감소했다. 시트릭산을 사용했을 때, 세정용액의 방출속도는 78.7 ml/day로 가

장 빨랐다. 세정용액으로 초산을 사용하였을 때, 토양으로부터 코발트와 세슘의 제거효율은 가장 높은 값인 95.2%와 84.2%를 나타냈다. 동전기제염 시 발생된 토양 폐액부피는 토양세척제염 시보다 1/20으로 감소했다. 반면에 동전기세정방법은 토양으로부터 코발트와 세슘 제거효율을 동전기방법 보다 각각 6%와 2%로 향상시켰다. 그러므로 동전기세정방법은 투수성이 높은 토양 제염 시 좀 더 효과적이다.

중심단어 : 동전기세정, 코발트, 세슘, 높은 투수성 토양, 제거효율

I. 서론

원자력시설 주변 지하에 매설된 폐액저장 탱크들과 연결 관들이 장기간 가동으로 인해 콘크리트와 관의 부식으로 인한 방사성폐액의 누출로 인해 주변 부지가 방사성 핵종으로 오염 가능하며, 장기간 원자력 시설 운영 중 방사성 오염물의 유실과 때때로 발생하는 오염사고로 인해 각 원자력 시설마다 매년 일정량의 방사성 오염토양이 발생되고 있다. 이 오염토양을 방사성 폐기물처분장에 처분 시 처분비용이 매우 고가이므로 제염 가능한 토양에 대해서 제염시켜 처분비용을 절감하는 것이 필요하다. 그러나 기존의 개발된 토양 제염기술로는 방사성핵종 제거효율이 매우 낮으므로 국내 원자력시설 부지 오염특성에 적합하고 방사성핵종 제거효율이 높은 오염토양 제염기술의 개발이 필요하다.

국내 오염토양제염기술은 주로 주유소, 유류저장시설, 화학공장 주변의 유류 및 유기물 오염토양기술을 개발해왔고, 중금속 및 방사성핵종 오염토양 제염기술은 매우 미비한 상태이며, 한편, 기존의 유류 및 유기물오염토양 제염기술로는 방사성핵종 제거효율이 낮다. 최근 휴·폐광산, 기차정비창, 군부대 등의 중금속 오염으로 인해 인근지역에 막대한 피해를 주므로 중금속 오염토양제염 기술을 개발하기 시작하는 단계이며, 향후 본 기술의 수요가 급증할 것으로 예측된다. 미국, 유럽, 일본 등 선진외국에서는 핵실험부지, 우라늄광산, 그리고 원자력 해체부지 등의 오염부지에서의 방사성핵종 제거를 위한 동전기, magnetic separation, heap leaching, aqueous biphasic extraction 등 신기술을 활발히 개발 중이고 미국에서는 DOE, ORNL을 중

심으로 Fernald, Hanford, Nevada 방사성핵종 오염지역을 제염시키기 위한 기술을 개발 중에 있다.

토양으로부터 오염된 물질을 제거하기 위한 기술을 개발하기 위해 많은 노력을 해왔으며, 여러 기술 중에 토양을 굴착 없이 현장에서 제염하는 방법에 대한 관심이 고조되어 왔다. 동전기 방법은 투수계수가 낮은 토양에서 높은 제거효율을 나타내므로 오염토양 제염 방법으로 기대를 모으고 있다. 동전기방법은 주로 무기물과 핵종을 토양으로부터 제거하기 위해 사용할 수 있다[1]. 동전기기술에 있어서 오염물을 이동시키는 주요 원인은 이온물질의 전기이동과 전기삼투이며 전기이동은 투수계수가 큰 토양이나 이온물질의 농도가 높은 경우에 효과적이다[2]. 음극은 비극성 화하여 수산화물의 형성을 방지해야한다. 선정된 세정용액은 토양 내에서 유리한 pH를 유도하고 중금속이동이 원활하도록 중금속과 반응 할 수 있는 것이어야 한다[3]. 전기이동과 전기삼투에 의한 이동속도의 크기는 전위구배에 비례한다. 그러므로 제염효율은 양수에 의한 전위구배의 증가를 통해 향상될 수 있다. 최근 이 방법을 지중오염물질을 제거할 때 적용할 수 있는 지에 관해 연구되어왔고 미세토양을 동전기제염 할 때의 문제점에 대해 논의해 왔다[4-6].

한편, 최근 토양내의 오염물질이 탈착과 용해에 의해 액체 상태로 제거되는 토양세정기술이 개발되어 왔다. 물, 산, 염기, 킬레이트제, 알코올, 다른 첨가제가 세정용액으로 고려되어 왔다[7-8]. 실제로 산이나 킬레이트제를 이용한 세정방법이 가장 효율적이며[9-10], 최근에는 동전기 제염 시 토양내의 금속제거효율을 높이기 위해 전해용액으로 초산[11] 이나 sodium dodecyl sulfate[12]를 사용했다.

국내 원자력발전소는 대부분 단단한 사암 위에 건설되었기 때문에, 원자력발전소 주변 오염토양은 많은 모래를 포함하여 투수계수가 높다. 그러므로 국내 원자력시설 주변 오염 토양에 적합한 제염방법으로는 동전기방법과 토양세정방법의 장점을 살린 동전기세정방법이 이 토양의 특성에 적합한 기술이라고 사료된다.

이 연구의 목적은 수리전도도가 다소 높은 원자력 시설 주변 토양으로부터 코발트와 세슘을 좀 더 효율적으로 제거하기 위한 동전기세정 기술을 개발하는 것이다. 펌프가 달린 동전기세정장치와 펌프가 없는 동전기장치가 제작되었다. 우선, 토양특성에 적합한 최적 화학제를 선정하기 위하여, 펌프가 없는 장치를 이용하여 네 가지의 다른 화학제로 네 번의 실험을 수행했다. 다섯 번째 실험에서는 비 포화된 오염토양을 선정된 화학제를 전극 간에 넣어 실험했다. 여섯 번째 실험에서는 동전기 제염 시 펌프에 의한 세정의 효과를 분석하기 위하여 포화된 오염토양을 선정된 화학제로 제염실험을 수행했다.

II. 토양특성조사 및 제염실험

가. 원자력시설 주변 토양특성조사

실험토양은 원자력시설 주변 부지에서 채취한 토양을 사용했다. 이 토양은 오염되지 않은 토양이므로 0.01 M의 Co^{2+} 와 Cs^{+} 을 인공적으로 오염시켰다. 한국은 국내에 약 20개의 원자력발전소를 가동 중이다. 그들은 대부분 단단한 사암층에 위치하므로 주변토양의 수리전도도는 높다. 실험에 사용된 토양의 성분과 특성에 대한 측정결과는 Table 1과 같고 Fig 1은

Table 1. Mineralogical composition and properties of the soil near nuclear facility.

Soil components and properties	Value
Moisture content(pH)	
Surface	12.5% (7.7)
10cm depth	11.4% (7.5)
30cm depth	10.6% (7.1)
40cm depth	10.2% (6.9)
50cm depth	10.4% (6.9)
Porosity	0.42
Bulk density	1.58 g/cm ³
Hydraulic conductivity	4.3x10 ⁻⁶ m/sec

토양입자크기 분포를 보여준다.

나. 실험 준비

두개의 장치가 실험을 위해 제작되었고, 첫 번째 장치는 아크릴 토양셀, 두개의 전극간, 두개의 전해조와 전원장치로 구성된다(Fig. 2). 오염토양이 차 있는 아크릴 토양셀의 크기는 5.7×4.4×14.3 cm이다. 여과막이 전극간과 오염토양 사이에 위치하여 오염토양으로부터 이동하는 공극수에 포함된 토양입자의 방출을 방지한다. 전해조는 화학용액을 토양셀로 공급한다. 전극간은 여과막에 의해 토양으로부터 분리되고, 티타늄으로 만들어진 전극은 전극간에 위치한다. 전극간의 위쪽 구멍은 강산을 첨가하거나 생성된 가스를 방출시키기 위해 사용된다. 두 번째 장치는 아크릴 토양셀, 두개의 전극간, 두개의 전해조, 전원장치 그리고 펌프로 구성된다(Fig. 3). 펌프는 토양

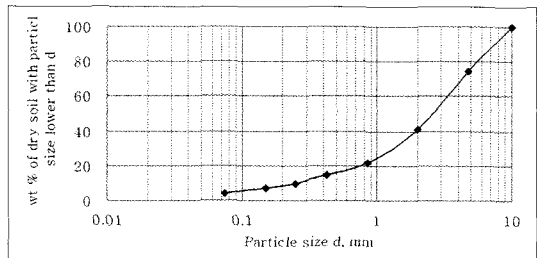


Fig. 1. Particle size distribution curve of soil near nuclear facility.

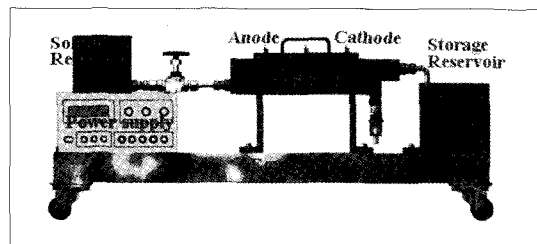


Fig. 2. Design diagram of the electrokinetic remediation equipment.

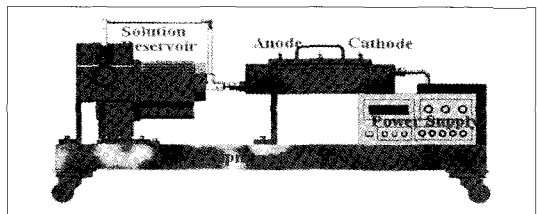


Fig. 3. Design diagram of the electrokinetic-flushing remediation equipment.

공극내의 화학용액을 압력 이동시키기 위해 사용된다. 펌프는 아래 방정식과 같이 토양을 통과하는 세정용액의 양을 증가시킨다.

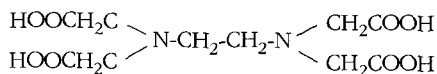
$$j = [(k_o + k_m)\nabla\phi + k_h\nabla p]C - \frac{D}{\tau} \nabla C$$

여기서 j 는 단위토양공극면적당 molar flux of species이고, k_o 는 electroosmotic permeability 이며, k_m 은 electromigration coefficient이고, k_h 는 hydraulic permeability이며, p 는 압력이고, C 는 molar concentration이며, D 는 diffusion coefficient 이고, 그리고 τ 는 non-dimensional tortuosity이다.

여러 실험 시 사용하는 토양시료의 동등성을 유지시키기 위해 토양을 No. 200 sieve(75 μ m)와 No. 10 sieve(2000 μ m)로 체분리하여 75~2000 μ m 크기의 토양을 사용하였다.

다. 제염실험

EDTA는 비교적 비싸며 제염해야할 토양이 수 백 톤이나 되므로 흔히 제염비용이 비싸다[13]. EDTA는 다음과 같은 구조를 갖고 있으며, 사염기산이므로 H_4Y 로 표시되며 4-6자리 배위자이다. EDTA는 6개 구역으로 금속에 접근할 수 있다. 각 아세테이트 그룹과 두개의 질소는 동등결합에 필요한 자유전자쌍을 가진다. 이 성분의 용해와 착화 능력은 여러 연구에서 보고되었다. 특히, 다양한 중금속에 대해 강한 킬레이트 능력을 보인다[14].



또한, citric acid는 비교적 값싸고 취급하기 쉽고 알칼린 토양금속(Ca, K, Mg)과 친화력이 작기 때문에, 토양세정을 위한 최적후보이다[15]. 질산과 염소는 토양에서 금속이온을 추출하기 위한 상당한 능력을 보인다. 그러나 이들의 사용은 토양의 물리, 화학, 그리고 생물학적 특성을 교란시킨다[16]. 토양의 수리전도도가 10^{-6} m/s 보다 작을 때 in-situ에 의한 토양세정방법은 부적절하며, 오히려 오염토양을 굴착하여 세정하는 방법이 가능한 대안이다[17]. 착화물

은 보통 하나 이상의 주요원자나 금속과 그들을 둘러싼 리간드 즉 많은 이온과 분자로 구성된다. 어떤 리간드들은 하나의 금속에 서너 개의 결합을 형성한다. 이 착화물을 킬레이트라고 부르며, 이것은 단일결합을 가진 금속-리간드보다 좀 더 안정하다[18]. 이것은 동전기 처리 시에 좀 더 적합한 킬레이트를 만든다. 옥살산은 생분해가능하고, 저렴하며, 안정한 금속 착화합물을 형성하기 때문에 토양으로부터 금속 추출제로 고려되고 있다 [19]. 더욱이 옥살산은 강한 유기산이기 때문에 수산화물을 용해할 수 있다[20]. Citric acid는 Tri-carboxylic acid 그룹을 가지며, 취급이 용이하며, 비교적 저렴하고 환경 친화적이므로 토양내의 금속제거시 사용되어왔다[21]. Shiao 등은 citric acid는 오염된 목재폐기물로부터 구리를 80%까지 제거할 수 있음을 보였다[22]. 초산은 탄소원자 2개 산소원자 2개, 수소원자 4개가 결합하여 이루어진 알갱이이며, 생화학적으로 토양내에서 분해되기 쉽다. 동전기세정실험에 적합한 최적세정제를 선정하기 위해 12개의 세정제를 각각 0.01 M 농도로 모사 오염토양에 대한 토양세정실험을 수행하여 4개의 후보 세정제 즉 EDTA, oxalic acid, citric acid, 그리고 acetic acid를 선정했다(Fig. 4).

Co^{2+} 와 Cs^+ 제거 시 펌프에 의한 flushing 및 토양 포화도의 영향을 평가하기 위해 6개의 실험을 수행했다. 기존장치와 같은 구조인 첫 번째 장치(Fig. 2)로 최적세정제 선정 실험을 수행했다. 즉, 건조한 모사오염토양은 물과 함께 오염시켰고, 4개의 다른 산

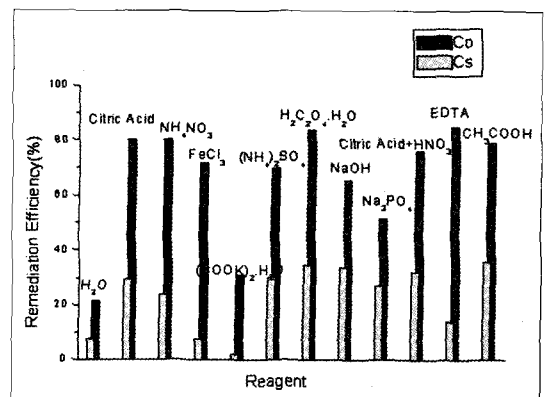


Fig.4. Remediation efficiency for 1 day by soil washing versus each chemical reagent.

이 전극간 내의 정화용액으로 사용되었다. 최적 세정제는 제거효율에 의해 결정된다. 5번째 실험에서 오염토양은 물로 비 포화시키며 앞의 실험에서 선정된 산성용액이 정화용액으로 사용된다. 6번째 실험에서 오염토양은 선정된 세정제로 포화시키며 선정된 세정제가 정화용액으로 사용되며 두 번째 장치(Fig. 3)를 사용되고, 이 장치의 펌프는 토양 내의 세정용액의 이동속도를 증가시키기 위해 사용된다.

Table 2는 각 실험 조건 및 결과로 Co^{2+} 와 Cs^{+} 제거효율, 제염시간, 세정제유출량, 토양포화도 등을 나타낸다. Test I에서 전원장치로부터 30V의 전압이 가해졌고, 전류는 시간경과와 함께 증가했다. 정화용액인 EDTA, oxalic acid, citric acid, 그리고 acetic acid의 농도는 1×10^{-2} M 이므로, 양쪽 전극간의 pH는 3부근이었다. 전극에서 전해반응 즉 양극에서는 H^{+} 가 음극에서는 OH^{-} 가 생성되므로, 음극간 용액의 pH는 12까지 증가했다. 양쪽 전극간에서 용액의 높이는 수두경사의 형성을 피하기 위해 같은 높이를 유지하여 세정용액은 전기삼투와 양수에 의해 토양셀 내에서 이동하도록 하였다. 603 g의 건조토양을 물로 포화시킨 후 약 360 cm^3 토양셀 내부에 채워넣었다. 실험기간 동안 전류, 용액 이동속도, 용액내의 핵종농도, pH 등이 측정된다. 만일 음극에서의 pH가 상승하면 토양의 제타 포텐셜이 증가하여 전기삼투의 흐름방향이 바뀔 수 있고 코발트와 세슘에 대한

탈착 능력이 감소하기 때문에, 주기적으로 H_2SO_4 을 넣어 음극간에서의 pH를 6이하로 조정했다. 또한, 15일간의 실험이 끝난 후 동전기 제염실험에 의한 토양내의 코발트와 세슘 제거효율을 측정하기 위해, 토양셀 내의 토양을 6등분하고 3일 이상 건조시켰다. 각 건조토양 5 g과 질산 원액 약 10 ml을 섞어 150 °C로 Hot plate에서 3일간 가열시킨 후 0.2 μm 로 여과 및 회석하여 50 ml로 만들어 AA (AAAnalyst 300)로 회석용액내의 코발트와 세슘의 농도를 측정했다.

한편, Test II에서 오염토양은 물로 TRIGA 부지와 같이 25% 포화시켰다. Test I 실험을 통해 선정된 초산이 정화용액으로 사용되었다. 음극간에서의 pH는 계속적으로 강산을 첨가하여 조절되었다. 음극간에서의 pH는 6이하가 되게 조절했다. 매일 전극간에서의 pH와 전류, 세정용액의 이동속도를 측정했다. 15일간의 실험을 마친 후 토양의 잔류 코발트와 세슘의 농도는 Test I과 같은 방법으로 측정했다.

Test III에서, 오염토양은 초산으로 포화시켰고 선정된 초산이 정화용액으로 사용됐다. 또한, Fig. 3과 같이 세정용액의 이동속도를 증가시키기 위해 하나의 펌프가 사용되었다. 토양셀 내의 pH 분포를 측정하기 위해 6등분된 토양으로부터 각각 10 g을 추출하여 증류수 25 ml과 섞어 교반시키고 일정시간 정지 후 pH를 측정했다. 마지막으로 새로운 동전기세정방법과 기존의 동전기방법의 제거효율 차이는 토

Table 2. Co^{2+} and Cs^{+} removal efficiency and outflow volume for the electrokinetic remediation with different experiment conditions.

Reagent (Experimental condition)	Treatment time(days)	Contaminant	Co^{2+} and Cs^{+} removal efficiency in the soil cell(%)	Outflow solution volume (V/603g)	Saturation degree (%)	test
EDTA (0.01 M)	15	Co(%) Cs(%)	83.5 57.9	871ml (1.4)	100	I(A)
Oxalic acid (0.01 M)	15	Co(%) Cs(%)	90.5 81.9	966ml (1.7)	100	I(B)
Citric acid (0.01 M)	15	Co(%) Cs(%)	86.9 67.1	1181ml (1.7)	100	I(C)
Acetic acid (0.01 M)	15	Co(%) Cs(%)	95.2 84.2	984ml (1.6)	100	I(D)
Electrokinetic	10	Co(%) Cs(%)	91.3 63.5	534ml (0.9)	25	II
Electrokinetic-flushing	10	Co(%) Cs(%)	97.4 65.4	2440ml (4.0)	100	III
Soil washing (2 scrubbing)		Co(%) Cs(%)	83.4 39.6	28400 (47.1)		

양셀 내의 잔존 코발트와 세습 농도를 비교하여 분석했다.

III. 결과 및 고찰

가. 동전기제염에 적합한 세정제의 선정

전극간에 주입한 세정용액의 농도가 0.01 M이므로 초기 전극간에서의 pH는 3 부근이었다. 그러나 시간경과에 따라 전해반응 때문에 양극에서는 H⁺가 생성되어 pH는 2.5 부근으로 떨어졌고, 음극에서는 약 1일 경과 후부터 OH⁻가 생성되어 pH는 상승했다. 음극에서의 pH가 10이상으로 상승하면 토양내부에 수산화물이 생성되어 세정용액의 이동속도가 저감함으로 황산을 음극 전극간에 주기적으로 첨가하여 음극간의 pH를 6이하가 되게 조절했다. 토양셀내의 pH는 2.5-3.5 이고 초산일 때 pH가 가장 낮았다.

Fig. 5는 음극간으로 유출되는 세정용액 이동속도를 시간경과에 따라 측정된 것이다. Test I에서의 세정용액 이동속도는 주로 전기삼투에 기인한다. 세정용액의 일별 이동속도는 초기에는 빨랐지만 제염시간의 경과와 함께 감소했다. 세정제로 EDTA를 사용하였을 때의 평균유출속도는 58.1 ml/day 이며, 옥살산을 사용하였을 때의 평균유출속도는 64.4 ml/day 이며, citric acid를 사용하였을 때의 평균유출속도는 78.7 ml/day 이며, 초산을 사용하였을 때의 평균유출속도는 65.6 ml/day 이다. 또한 Table 2에서 보여주듯이 같은 부피의 토양을 제염할 때 토양폐액 발생량은 soil washing 방법을 사용했을 때 보다 약 1/20이상 감소함을 알 수 있었다.

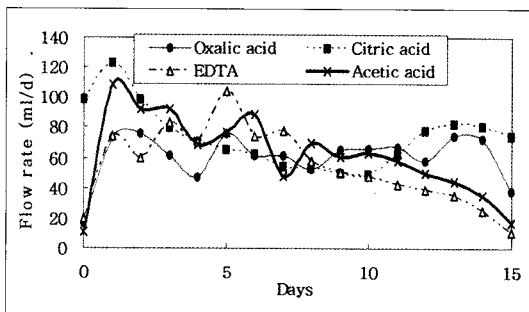


Fig. 5. The solution flow rate variation versus time at the cathode compartment during test I.

Fig. 6에서는 동전기제염 15일 경과후의 토양내의 잔류한 코발트의 농도를 양극에서의 정규거리에 대해 나타내었다. 세정제로 EDTA를 사용하였을 때 코발트의 평균 제거 효율은 83.5%였으며, 옥살산을 사용하였을 때 코발트의 평균 제거 효율은 90.5%였으며, citric acid를 사용하였을 때 코발트의 평균 제거 효율은 86.9%였으며, 초산을 사용하였을 때 코발트의 평균 제거 효율은 95.2%였다. 그러므로 초산을 사용하였을 때 토양내의 코발트 제거 효율이 가장 높은 것으로 나타났다. Fig. 7에서는 동전기제염 15일 경과후의 토양내의 잔류한 세습의 농도를 양극에서의 정규거리에 대해 나타내었다. 세정제로 EDTA를 사용하였을 때 세습의 평균 제거 효율은 57.9%였으며, 옥살산을 사용하였을 때 세습의 평균 제거 효율은 81.9%였으며, citric acid를 사용하였을 때 세습의 평균 제거 효율은 67.1%였으며, 초산을 사용하였을 때 세습의 평균 제거 효율은 84.2%였다. 그러므로 초산

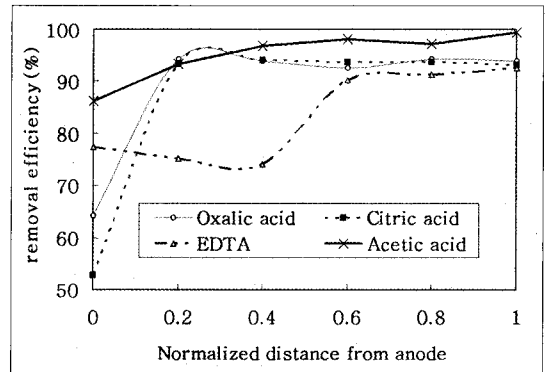


Fig. 6. Co²⁺ distribution vs. normalized distance in soil cell after completion of test I.

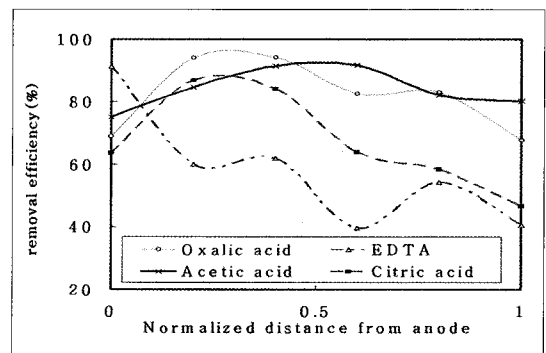


Fig. 7. Cs⁺ distribution vs. normalized distance in soil cell after completion of test I.

을 사용하였을 때 토양내의 Co^{2+} 와 Cs^+ 제거 효율이 가장 높은 것으로 나타났다.

이상과 같이 4가지의 세정제를 사용하여 동일한 조건으로 동전기제염 결과 초산을 사용하였을 때 토양으로부터 코발트와 세슘의 제거효율이 가장 높으므로 동중전기제염을 위한 최적 세정제로 초산을 선정하고 이 세정제를 사용하여 계속 Test II와 Test III의 실험을 수행하였다.

나. 동전기세정방법과 동전기방법의 비교

앞의 실험에서 최적 세정제로 선정된 초산을 사용하여 기존의 동전기방법과 새로 고안한 동전기세정 방법에 의해 토양제염실험을 수행하고, 코발트와 세슘 제거효율 및 세정용액 유출량을 측정하여 동전기세정방법의 장단점을 분석했다. 10일간의 Test II와 Test III 실험 중 황산을 음극 전극간에 주기적으로 첨가하여 음극간의 pH를 6이하가 되게 조절했다. Fig. 8은 음극간으로 유출되는 세정용액 이동속도를 시간 경과에 따라 측정한 것이다. Test II에서의 세정용액 이동속도는 주로 전기삼투에 기인하지만, Test III에서의 세정용액 이동속도는 전기삼투와 양수압력에 기인한다. Test II에서 세정용액 평균유출속도는 53.4 ml/day이며, Test III에서는 평균유출속도는 244.0 ml/day 이었다. Test III 실험시 토양이 초산으로 포화되고 펌프에 의한 압력 때문에 토양셀 내의 세정용액의 유출속도가 빨랐다.

Fig. 9는 10일간의 실험 중 토양셀로부터 매일 제거

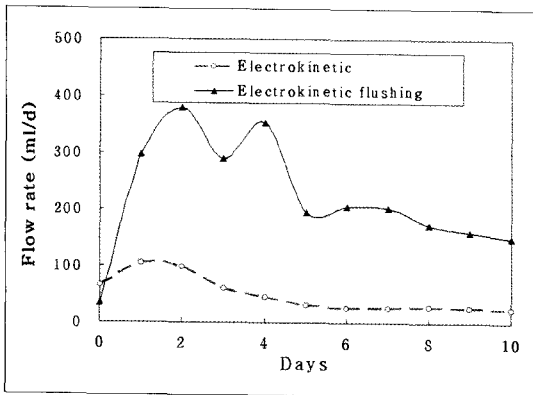


Fig. 8. The solution flow rate variation time at the cathode compartment during test II and test III.

되는 코발트와 세슘의 제거효율을 표시한 것으로 코발트는 초기에 제거효율이 높았고 세슘은 좀 더 천천히 제거되는 것을 알 수 있었다. 그러므로 제염시간을 연장시키면 세슘의 제거효율을 높일 수 있음을 예측할 수 있다.

Fig. 10은 동전기제염 10일 경과후 토양내의 잔류한 코발트와 세슘의 농도를 양극에서의 정규거리에 대해 나타내었다. Test II에서는 코발트의 평균 제거효율은 91.3%였고, 세슘의 평균제거효율은 63.5%였다. Test III에서는 코발트의 평균 제거효율은 97.4%였고, 세슘의 평균제거효율은 65.4%였다.

이상과 같이 기존 동전기 방법과 새로운 동전기세정 방법에 의해 오염토양을 10일 동안 제염시켰을 때, 동전기세정 방법이 기존의 동전기방법 보다 코발트

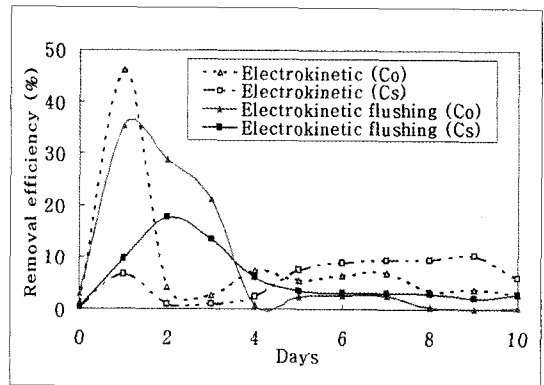


Fig. 9. Co^{2+} and Cs^+ removal efficiency versus the number of remediation days during test II and test III.

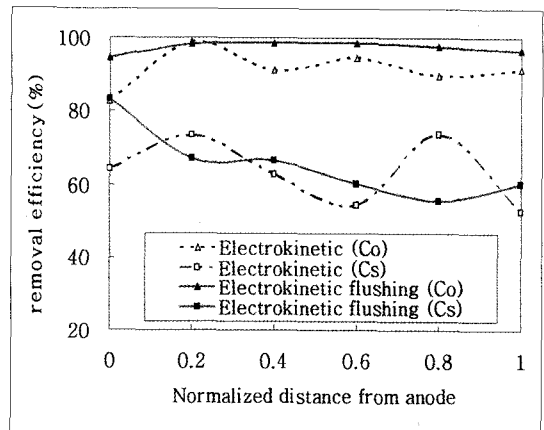


Fig. 10. Co^{2+} and Cs^+ distribution vs. distance in soil cell after completion of test II and test III.

와 세슘의 제거효율을 각각 약 6%와 2% 향상시켰음을 알 수 있었다. 그러므로 투수성이 높은 토양은 동전기세정방법이 효과적임을 알 수 있었다.

IV. 결론

수리전도도가 다소 높은 국내 원자력 시설 주변 토양으로부터 Co^{2+} 와 Cs^+ 을 좀 더 효율적으로 제거하기 위한 동전기세정 제염기술을 개발하였다. 토양 특성에 적합한 최적 세정제를 선정하기위하여, 동전기 장치를 이용하여 네 가지의 다른 세정제로 각각 실험을 수행했다. 동전기 제염시 일별 세정용액 이동속도는 초기에는 빨랐지만 제염시간의 경과와 함께 감소했다. 세정제로 citric acid를 사용하였을 때의 평균유출속도는 78.7 ml/day로 가장 빨랐고, 동전기제염 시 토양폐액 발생량은 soil washing 방법을 사용했을 때 보다 약 1/20 이상 감소함을 알 수 있었다. 세정제로 초산을 사용하였을 때 코발트와 세슘의 평균 제거 효율은 각각 95.2%, 84.2%으로 제거효율이 가장 높으므로 동전기세정 실험에 사용할 최적세정제로 선정했다. 한편, 기존 동전기 방법과 새로운 동전기세정 방법에 의해 오염토양을 10일 동안 제염시켰을 때, 동전기세정 방법이 기존의 동전기방법 보다 코발트와 세슘의 제거효율을 각각 약 6%와 2% 향상시켰고, 투수성이 높은 토양의 경우 동전기세정방법이 효과적임을 알 수 있었다.

참고문헌

[1] K. Reddy, C.Y. Xu and S. Chinthamreddy, "Assessment of electrokinetic removal of heavy metals from soils by sequential extraction analysis," J. Hazard. Mater., B84, pp 279-296 (2001).
 [2] S. Pamukcu and J.K. Wittle, "Electrokinetic removal of selected heavy metals from soil," Environ. Prog., 11(3), pp. 241-250 (1992).
 [3] 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).

[4] F. Braud, S. Tellier and M. Astruc, "Modeling of decontamination rate in an electrokinetic soil processing," International Journal of Environmental Analytical Chemistry., 68, pp. 105-121 (1998).
 [5] S. O. Kim, S. H. Moon, and K. W. Kim, "Removal of heavy metals from soils using enhanced electrokinetic soil processing." Water, Air, and Soil Pollution., 125, pp. 259-272 (2001).
 [6] M.M. Page, and C. L. Page, "Electroremediation of contaminated soils," Journal of Environmental Engineering., ASCE, 128, pp. 208-219 (2002).
 [7] C. Chaiyaraksa and N. Sriwiriyanuphap, "Bach washing of cadmium, from soil and sludge by mixture of $Na_2S_2O_5$ and Na_2EDTA ," Chemosphere., 546, pp. 129-135 (2004).
 [8] C.G. Rampley and K.L.Ogden, "Preliminary studies for removal of lead from surrogate and real soils using a water soluble chelator, adsorption and batch extraction," Environ. Sci. Technol., 32(7), pp. 987-993 (1988).
 [9] B. Sun, F.J. Zhao, E. Lombi and S.P. McGrath, "Leaching of heavy metals from contaminated soil using EDTA," Environ Pollut., 113, pp. 111-120 (2001).
 [10] R. Abumaizar and L.L. Khan, "Laboratory investigation of heavy metal removal by soil washing," J. Air Waste Manage. Assoc., 46, pp. 765-768 (1996).
 [11] B. Kornilovich, N. Mishchuk, K. Abbruzzese,

- G. Pshinko, and R. Klishchenko. "Enhanced electrokinetic remediation of metals-contaminated clay," *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects.*, 265, pp.114-123 (2005).
- [12] A. Giannis, E. Gidarakos, and A. Skouta, "Application of sodium dodecyl sulfate and humic acid as surfactants on electrokinetic remediation of cadmium-contaminated soil," *Desalination.*, 211, pp. 249-260 (2007).
- [13] A Barona, I. Aranguiz and A. Elias, "Metal associations in soils before and after EDTA extractive decontamination: implications for the effectiveness of further clean-up procedures," *Environ. Pollut.*, 113, pp. 75-85 (2001).
- [14] B. Sun, J. Zhao, E. Lombi and S.P. McGrath, *Environ. Pollut.*, 113(2110) 111.
- [15] R. Bassi, S. O. Prasher and B. K. Simpson, "Extraction of metals from a contaminated sandy soil using citric acid," *Environ. Prog.*, 19(4), pp. 275-282 (2000).
- [16] S. Tampouris, N. Papassiopi and I. Paspaliaris, "Removal of contaminant metals from fine grained soils, using agglomeration, chloride solution and pile leaching techniques," *J. Hazard. Mater.*, B84, pp. 297-319 (2001).
- [17] R.J. Abmaizar and E.H. Smith, "Heavy metal contaminants removal by soil washing," *J. Hazard. Mater.*, B70, pp. 71-76 (1999).
- [18] J.C. Chao, A. Hong and R.W. Peters, *Proceedings of the Conference on Hazardous Wastes Research*, pp.142, UT, USA (1998).
- [19] H.A. Elliot and N.L. Shastri, *Water Air Soil Pollut.*, pp.335, (1999)
- [20] W. Stumm, *Chemistry of the Solid-Water Interface*, pp. 165, Wiley-Interscience, New York (1992).
- [21] G.M. Nystrom, *Investigations of soil solution during enhanced electrodialytic soil remediation*, Report no. BYG-DTU R009, pp.21, Denmark Technical University, (2001).
- [22] R. J. Shiau, R.L. Smith and B. Aveller, *Wood Sci. Technol.*, 34 (2000)377