

방사성 토양 및 콘크리트 제염을 위한 pilot규모
전기화학세정장치 개발

Development of a pilot size of electrochemical
flushing equipment for radioactive soil and concrete

KAERI

제 출 문

한국원자력연구원장 귀하

본 보고서를 2009 연도 “방사성 토양 및 콘크리트 제염을 위한 pilot규모 전기화학세정장치 개발에 관한 연구” 과제의 연구보고서로 제출합니다.

2010 . 1 .

과 제 명 : 방사성 토양 및 콘크리트 제염을 위한 pilot규모 전기화학세정장치 개발

과제책임자 : 김 계 남

참 여 자 : 문 제 권
최 왕 규
손 종 식
홍 대 석

요 약 문

I. 제 목

방사성 토양 및 콘크리트 제염을 위한 pilot규모 전기화학세정장치 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

1) 연구개발 목적

원자력연구원에 보관중인 방사성 토양 및 콘크리트를 제염하기 위해 단기간에 방사성핵종 제거효율이 높고 폐액 발생량이 적은 최적 제염조건 도출하고 오염특성에 적합한 pilot규모 전기화학세정장치를 제작함.

2) 연구개발 필요성

- 기술적 측면

원자력시설 주변 토양의 지질은 주로 실트 층으로 구성되어 있고 오염지역은 대부분 지표면에서부터 약 깊이 2 m 미만 내의 비 포화지역에 분포함. 이들에 대한 복원방법으로 국내에서는 주로 Soil washing방법과 Agglomeration 방법을 사용하여 왔음. 국내 방사성핵종 오염토양은 수리전도도는 큰 편이지만 점토, 실트, 모래가 섞여있어서 Soil washing 적용 시 방사성핵종 제거효율이 낮고 다량의 폐액이 발생됨. 한편, Agglomeration 방법은 광범위하게 오염된 토양 표면에 고착제를 살포하여 토양으로부터 방사성핵종 침출을 저감시키는 방법으로 일시적인 처리 방법에 불과한 형편임. 본 연구에서는 원연에서 보관하고 있는 방사성핵종 오염토양의 오염특성에 적합한 pilot규모 전기화학세정장치를 제작하고 단기간에 방사성핵종 제거효율이 높고 폐액발생량이 적은 최적제염용액 및 최적제염조건을 도출하고자 함. 즉 토양제염실험을 통해 제염용액 농도 및 주입량, 전압, 포화도, 제염기간, 전극 재질, 음극 pH 조절방법, 발생 기체 방출방법 등을 결정함. 국내 오염토양에 적합한 pilot규모 방사성핵종 오염토양 복원공정을 개발함으로 최근 증가하는 국내 원자력시설 주변에서 발생된 방사성핵종 오염토양들을 복원하기 위한 기술수준 향상에 기여할 것으로 예측됨.

- 경제·산업적 측면

미국 DOE에 따르면, 미국 내에 방사능으로 오염된 부지를 제염하기 위해 매년 4조원씩 지출하고 있음. 국내에서도 원자력시설 주변에서 발생된 방사성핵

중 오염토양 부피가 증가하는 형편임. 기존의 토양세척이나 토양침출 기술 보다 본 과제에서 개발할 전기화학세정기술은 방사성핵종 오염토양에 대한 복원효율이 매우 높고 폐액 발생량이 극히 적은 기술로 토양복원 비용절감의 경제적 효과를 얻을 수 있음. 또한, 토양으로부터 방사성핵종 제거효율의 향상으로 발생된 토양 폐기물의 양을 크게 줄일 수 있어 처분 비용의 50% 이상의 절감 효과를 가져옴. 선진외국의 경우 핵실험 토양, 원자력시설 주변 토양, 휴·폐 광산, 기차정비창, 군부대 부근의 방사성핵종 및 중금속 오염토양에 대한 복원사업으로 장래의 시장규모는 약 800조 원이며 국내도 수 천 억 원으로 이 분야에 대한 시장 규모가 증가되는 점을 감안하면 본 기술의 연구개발이 경제적인 면에 큰 영향을 미치리라 예측되며, 개발된 고효율의 복원기술을 사용함으로써 외국으로부터의 기술 도입 비용을 절감할 수 있고, 중국 및 동남아에 수출하고 유럽 및 미국의 환경복원 프로젝트에 참여하여 외화 획득을 가져올 수 있음.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

원자력연구원에 보관중인 방사성 토양 및 콘크리트를 제염하기 위해 오염특성에 적합하고 방사성핵종 제거효율이 높으며 폐액 발생량이 적은 pilot규모 전기화학세정장치를 제작하며, 최적 제염조건을 도출하고 제염성능을 실증함

Ⅳ. 연구개발결과

원연에서 보관하고 있는 방사성핵종 오염토양의 오염특성에 적합한 Pilot규모 전기화학세정장치를 제작하고 단기간에 방사성핵종 제거효율이 높고 폐액발생량이 적은 최적제염용액 및 최적제염조건을 도출 하였음. 또한 2,000 Bq/kg 농도의 코발트와 세슘으로 오염된 토양의 경우 약 50일 간 전기화학세정에 의해 95%이상 제염하였고, 2,000 Bq/kg 농도의 코발트와 세슘으로 오염된 콘크리트의 경우 약 40일 간 전기화학세정에 의해 95%이상 제염하였으며, 전기화학세정실험을 통해 제염용액 농도 및 주입량, 전압, 포화도, 제염기간, 전극 재질, 음극 pH 조절방법, 발생가스 방출 방안 등 최적 제염조건을 도출하였음

Ⅴ. 연구개발결과의 활용계획 및 건의사항

2010.1.1부터 원자력시설 해체폐기물처리 실용화시설 구축/운영(대과제) 중 신규사업으로 오염토양 콘크리트복원시설 구축/운영사업을 수행하며 원(연)보관 토양 및 콘크리트와 연구로 및 우라늄 변환시설 해체 토양 및 콘크리트를 복원하기 위한 장치개발과 복원작업 수행

시에 본 과제에서 개발된 기술을 활용하고 자 함. 본 과제 연구책임자 신규 오염토양 및 콘크리트 복원시설 구축/운영사업에 80% 이상 참여를 희망함

산업적 활용	후속연구 연계	기 타
<input type="checkbox"/> 사업화추진 (o) <input type="checkbox"/> 기술이전 및 지도 추진() <input type="checkbox"/> 산업적 활용 가능()	<input type="checkbox"/> 결과물(관련 DB등)제공() <input type="checkbox"/> 후속연구추진() <input type="checkbox"/> 교육 및 연구목적으로 활용()	<input type="checkbox"/> 기타 (직접입력) <input type="checkbox"/> 활용계획 없음()
<p>원(연)보관 토양 및 콘크리트와 연구로 및 우라늄 변환시설 해체 토양 및 콘크리트를 복원하기 위한 토양콘크리트 제염장치를 개발하고 제염작업을 수행하고자 함.</p>		
가. 활용개요	<p>신규사업으로 오염토양 콘크리트복원시설 구축/운영사업을 수행하며 원(연)보관 토양 및 콘크리트와 연구로 및 우라늄 변환시설 해체 토양 및 콘크리트를 복원하기 위한 장치개발과 복원작업 수행 시에 본 과제에서 개발된 기술을 활용하고 자 함.</p>	
나. 활용일정	2010.1.1부터 계속	
다. 활용방법	원(연)내에 토양/콘크리트제염시설구축 및 운영	
라. 기대효과	방사성폐기물 처분비용 수 백억 원 절감	
마. 기타		

SUMMARY

I. Project Title

Development of a pilot size of electrochemical flushing equipment for radioactive soil and concrete

II. Objective and Importance of the Project

A pilot size of electrochemical flushing equipment will be manufactured suitable to the contamination characteristics of radioactive soil and concrete stored in KAERI radioactive waste storage. An optimal reagent and an optimal decontamination conditions should be decided through many experiments.

III. Scope and Contents of Project

- Contamination characteristics analysis of TRIGA radioactive soil and concrete
- Manufacture of electrochemical flushing equipment in a laboratory scale
- Deduction of optimal reagent and decontamination conditions
- Manufacture and improvement of suitable electrochemical flushing equipment for contamination characteristics in pilot size
- Decontamination experiments of electrochemical flushing equipment in a pilot scale

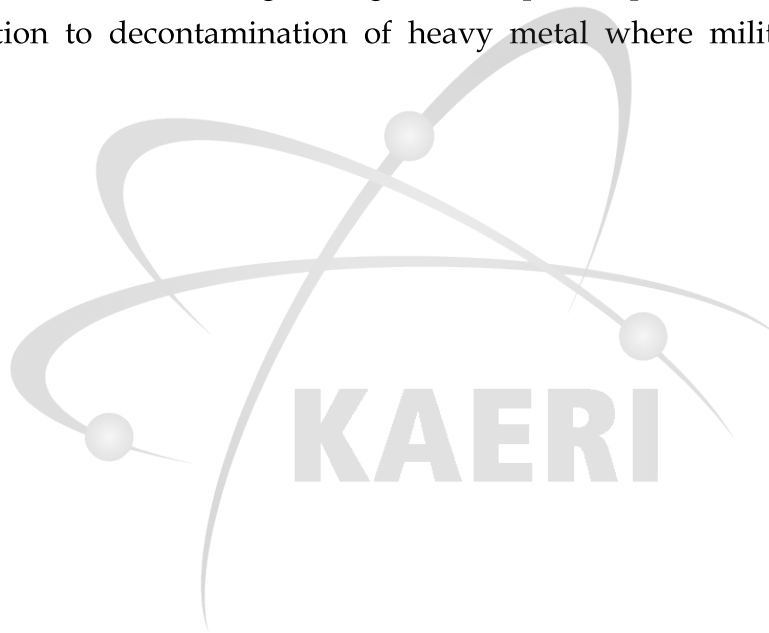
IV. Result of Project

A pilot size of electrochemical flushing equipment was manufactured suitable to the contamination characteristic of radioactive soil and concrete stored in KAERI radioactive waste storage. An optimal reagent and an optimal decontamination conditions were decided through many experiments. Also, The removal efficiencies of ^{60}Co and ^{137}Cs from the radioactive soil of 2,000Bq/kg were 99.9% and 94.3% by an electrokinetic-flushing decontamination by the application of an electric

current of 20 mA/cm² for 50 days. The removal efficiencies of ⁶⁰Co and ¹³⁷Cs from the radioactive concrete of 2,000 Bq/kg were 99.8% and 92.3% by electrokinetic decontamination after pretreatment by the application of an electric current of 20 mA/cm² for 40 days.

V. Proposal for Applications

- Decontamination of radioactive soil and concrete stored in KAERI radioactive waste storage, using the developed equipments through the scale-up
- Application when decontamination of radioactive soil and concrete stored in ko-ri and Young-kwang nuclear power plant.
- Application to decontamination of heavy metal where military and mine



CONTENTS

1. Introduction	1
2. Contamination characteristics analysis of TRIGA radioactive soil and concrete	2
(1) Survey of radioactive soil and concrete drums distribution after decontamination in KAERI	2
(2) Kind of contamination radionuclide research and radionuclide density survey	3
(3) Particles size, hydraulic conductivity, porosity survey	3
(4) Manufacture of Sham contamination soil and concrete	7
3. Manufacture of electrochemical flushing equipment in a laboratory scale	
(1) Manufacture of electrochemical flushing equipment in a laboratory size	8
(2) Development of running system in 24 hours a day	10
(3) Manufacture of regenerative apparatus in a laboratory scale	10
(4) Decide of optimal decontamination condition and optimal reagent in a laboratory size equipment	11
4. Manufacture and improvement of suitable electrochemical flushing equipment for contamination characteristics in pilot size	19
(1) Manufacture of electrochemical flushing equipment suitable to contamination characteristics	19
(2) Test and improvement of manufactured electrochemical flushing equipment	20
(3) Evaluation of contamination efficiency of manufactured electrochemical equipment	20
5. Decontamination experiments of electrochemical flushing equipment in a pilot scale	22
(1) Contamination efficiency test of radioactive soil and concrete of manufactured 50L size electrochemical flushing equipment	22

(2) Evaluation of quantity of waste water and test of efficiency of recycling equipment 29

6. Conclusion 30



목 차

가. 서론	1
나. TRIGA 방사성 토양 및 콘크리트의 오염특성 분석	2
(1) 원(연)에 보관 중인 제염 후 자체처분 대상 토양 및 콘크리트 드럼 분포 조사	2
(2) 오염핵종종류 조사 및 핵종별 농도 계측	3
(3) 입자 크기, 수리전도도, 공극률 등 측정	3
(4) 모의오염 토양 및 콘크리트 제조	7
다. 실험실규모 전기화학세정장치 제작 및 성능실험	8
(1) 실험실규모 전기화학세정장치 제작	8
(2) 24시간 가동 시스템 개발	10
(3) 실험실규모 전기화학세정폐액 재생장치 제작	10
(4) 실험실규모장치 최적 제염실험조건 및 설계인자 도출	11
라. 오염특성에 적합한 pilot 규모 전기화학세정장치 제작 및 개선	19
(1) 오염특성에 적합한 pilot 규모 전기화학세정장치 제작	19
(2) 제작된 전기화학세정장치 시운전 및 문제점 개선	20
(3) 제작된 전기화학세정장치의 모의오염 토양 및 콘크리트에 대한 제염효율 평가	20
마. Pilot 규모 전기화학세정장치 제염실증 시험	22
(1) 제작된 50L 규모 전기화학세정장치의 방사성 토양 및 콘크리트에 대한 제염효율 실증	22
(2) 발생 폐액량 평가 및 폐액재생장치 재생효율실증	29
바. 결론	30

표 목 차

Table 1. Radioactive concentration according to particle size	3
Table. 2 Contents of the TRIGA soil component	4
Table 3. Hydraulic parameters of the TRIGA soil	4
Table 4. Hydraulic parameters of the TRIGA concrete	4
Table 5. Removal efficiencies of metals in electrochemical waste- solution according to pH	10
Table 6. Electrochemical remediation experimental conditions and results	11
Table 7. Electro-chemical remediation experimental conditions and results with 50L equipment	22
Table 8. Metal concentration in waste-solution	29
Table 9. Metal concentration in waste-solution after pH adjustment	30

그림 목 차

Fig. 1. A number of concrete and soil drums for decontamination	2
Fig. 2. The mixture ratio of concrete and soil of drums requesting decontamination	2
Fig. 3. Accumulated weight percent versus particle size	5
Fig. 4. Zeta potential of TRIGA soil versus concentration of nitric acid ..	5
Fig. 5. The crushing and mixture of concrete	6
Fig. 6. Zeta potential of TRIGA concrete versus concentration of nitric acid	7
Fig. 7. Manufactured electro-chemical flushing equipment	9
Fig. 8. Electric current versus electrode type	9
Fig. 9. removal efficiency versus elapsed time according to reagent	12
Fig. 10. removal efficiency versus elapsed time according to reagent	13
Fig. 11. Removal efficiency with day under different nitric acid concentration	13
Fig. 12. Removal efficiency with day under different electric current	14
Fig. 13. Removal efficiency with day using distilled water	16
Fig. 14. Removal efficiency with day using 0.1 M nitric acid	16

Fig. 15. Removal efficiency with day using 0.2M hydrochloric acid	17
Fig. 16. Removal efficiency with day using 0.01M nitric acid under 4 after washing with 3 M hydrochloric acid	17
Fig. 17. Effluent(waste-solution) flow rate versus day under electric current 4	18
Fig. 18. Removal efficiency with day using 0.01M acetic nitric under 4 after washing with 3 M hydrochloric acid	18
Fig. 19. Manufactured electro-chemical flushing equipment	19
Fig. 20 Manufactured waste-solution treatment equipment	20
Fig. 21. Co ²⁺ and Cs ⁺ in soil removal efficiency versus elapsed time by 50L electro-chemical equipment	21
Fig. 22. Co ²⁺ and Cs ⁺ in concrete removal efficiency versus elapsed time by 50L electro-chemical equipment	21
Fig. 23. Removal efficiency for different reagents in a soil cell and removal efficiency with washing pretreatment	23
Fig. 24. Removal efficiency along the decontamination elapsed time for different radioactivity concentrations in radioactive soil	23
Fig. 25. Removal efficiency along the decontamination elapsed time for different particle sizes of radioactive soil	24
Fig. 26. Removal efficiency along the decontamination elapsed time for different electric currents in a soil cell	25
Fig. 27. Decontamination period required for decontaminating radioactive soil to a clearance radioactivity concentration level (100Bq/kg)	26

- Fig. 28. ^{60}Co and ^{137}Cs removal efficiencies along different reagents in a concrete cell after washing with H_2SO_4 27
- Fig. 29. Decontamination period required for decontaminating radioactive concrete to a clearance radioactivity concentration level (100Bq/kg) 28
- Fig. 30. Removal efficiency varying with recycle time of recycled nitric acid solution 28



방사성 토양 및 콘크리트 제염을 위한 pilot규모

전기화학세정장치 개발

Development of a pilot size of electrochemical flushing equipment for radioactive soil and concrete

가. 서론

원자력시설 주변 토양의 지질은 주로 실트 층으로 구성되어 있고 오염지역은 대부분 지표면에서부터 약 깊이 2 m 미만 내의 비 포화지역에 분포되어 있다. 이들에 대한 복원방법으로 국내에서는 주로 Soil washing 방법과 Agglomeration 방법을 사용하여 왔다. 국내 방사성핵종 오염토양은 수리전도도는 큰 편이지만 점토, 실트, 모래가 섞여있어서 Soil washing 적용 시 방사성핵종 제거효율이 낮고 다량의 폐액이 발생된다. 한편, Agglomeration 방법은 광범위하게 오염된 토양 표면에 고착제를 살포하여 토양으로부터 방사성핵종 침출을 저감시키는 방법으로 일시적인 처리 방법에 불과한 형편이므로 본 연구에서는 원연에서 보관하고 있는 방사성핵종 오염토양의 오염특성에 적합한 Pilot규모 전기화학세정장치를 제작하고 단기간에 방사성핵종 제거효율이 높고 폐액발생량이 적은 최적제염용액 및 최적제염조건을 도출하고자 한다. 즉 전기화학세정실험을 통해 제염용액 농도 및 주입량, 전압, 포화도, 제염기간, 전극 재질, 음극 pH 조절방법, 발생가스 방출 방안 등을 결정하도록 한다. 국내 오염토양에 적합한 Pilot규모 방사성핵종 오염토양 복원장치를 개발함으로써 최근 증가하는 국내 원자력시설 주변에서 발생된 방사성핵종 오염토양들을 복원하기 위한 기술수준 향상에 기여할 것이다.

나. TRIGA 방사성 토양 및 콘크리트의 오염특성 분석

(1) 원(연)에 보관 중인 제염 후 자체처분 대상 토양 및 콘크리트 드럼 분포 조사

- 원(연)에 보관 중인 제염 후 자체처분 대상 토양 및 콘크리트 드럼은 1,782 드럼이며, 이중 토양 드럼이 51.2 %, 콘크리트 드럼이 28.1%, 토양과 콘크리트가 섞인 드럼이 18.1% 이다[Fig. 1~2].

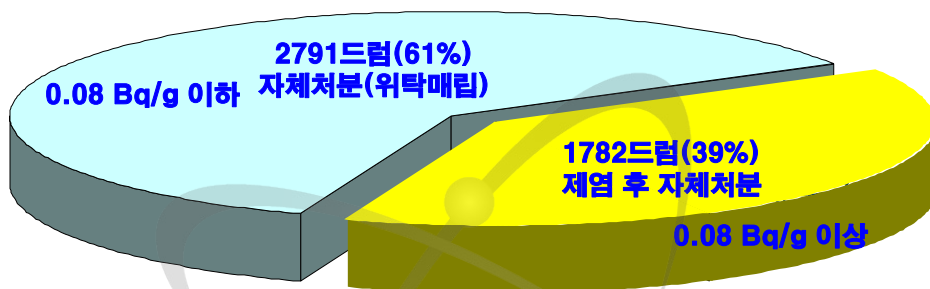


Fig. 1. A number of concrete and soil drums for decontamination

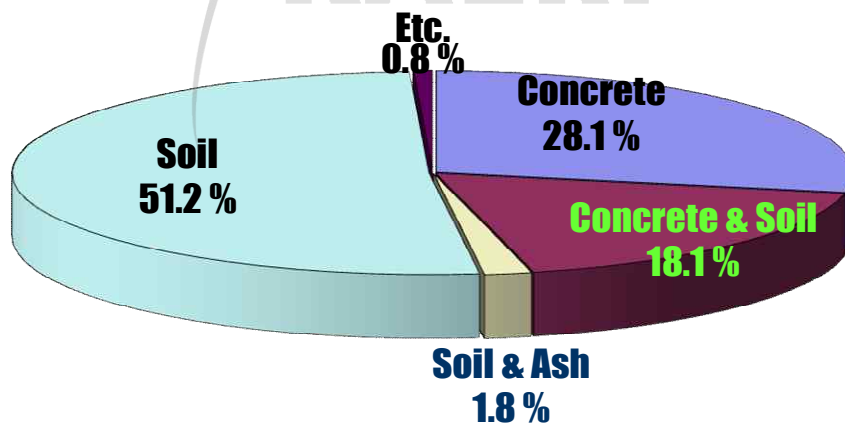


Fig. 2. The mixture ratio of concrete and soil of drums requesting decontamination

(2) 오염핵종종류 조사 및 핵종별 농도 계측

- TRIGA 방사성 토양과 방사성 콘크리트의 오염핵종은 Co와 Cs이며 방사능농도 범위는 각각 약 10~900 Bq/kg와 약 Cs 10~3,000 Bq/kg로 Cs의 농도가 높은 편이다[Table 1].

Table 1. Radioactive concentration according to particle size

Surface effective dose rate of waste drum	Particle Size	Volume (%)	Co-60 (Bq/kg)	Cs-137 (Bq/kg)
0.05mR/h above (7%)	>1.0mm	28.3	30.9-173.7	1.5-886.0
	0.063-1.0mm	61.2	125.2-895.3	16.3-3200.2
	<0.063mm	10.5	380.5-4325.0	47.1-9354.0
0.02-0.05mR/h (60%)	>1.0mm	48.5	2.6-21.0	0.3-31.1
	0.063-1.0mm	46.5	5.3-187.8	11.7-389.7
	<0.063mm	5.0	26.1-246.4	261.5-1453.7
0.02mR/h below (33%)	>1.0mm	52.4	43-15.2	2.5-7.0
	0.063-1.0mm	43.1	12.1-59.1	24.4-47.0
	<0.063mm	4.5	47.3-174.7	75.6-317.2

(3) 입자 크기, 수리전도도, 공극률 등 측정

- TRIGA 토양의 경우 다량의 모래를 함유한 사암 풍화토 층이며, 주성분은 SiO₂와 Al₂O₃, 그리고 K₂O 이며, 체적밀도(Bulk density)는 1.54g/cm³이며, 공극률은 42.6%이며, 평균포화도는 27%이며, 평균 수리전도도는 3.3×10⁻³ cm/sec 이며, pH는 6.5이며, 토양의 평균입도는 1.1mm 이며, 질산 0.01M사용 시 토양의 제타포텐셜은 -4.45 mV이다. [Table 2~4, Fig. 3~4].

Table. 2 Contents of the TRIGA soil componet

Component	Content(%)
SiO ₂	68.1
Al ₂ O ₃	16.7
K ₂ O	8.27
Fe ₂ O ₃	2.2
P ₂ O ₂	1.63
CaO	1.51
Na ₂ O	0.97
MgO	0.21

Table 3. Hydraulic parameters of the TRIGA soil

Bulk density (g/cm ³)	1.54
Porosity (%)	42.6
Hydraulic conductivity (cm/sec)	3.3×10 ⁻³
Water content(%)	27.0
pH	6.5

Table 4. Hydraulic parameters of the TRIGA concrete

Bulk density (g/cm ³)	1.65
Porosity (%)	38.8
Hydraulic conductivity (cm/sec)	2.7×10 ⁻³

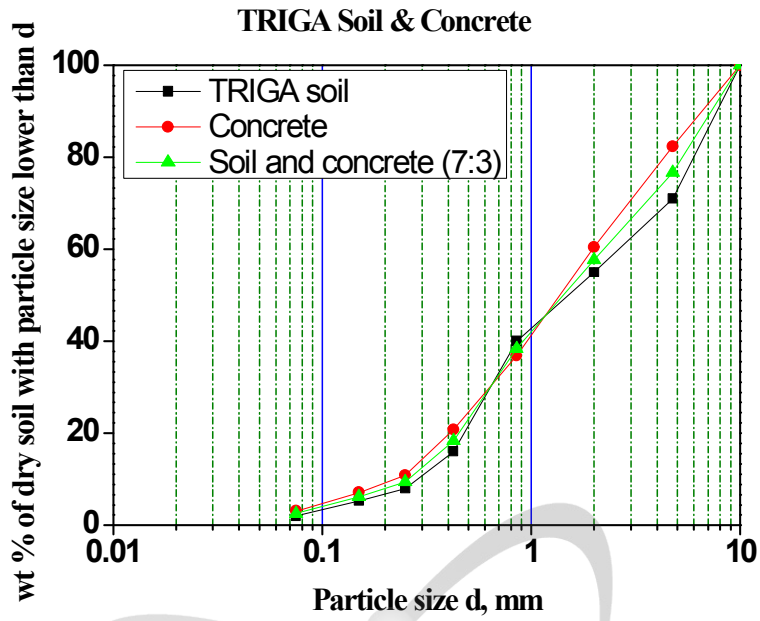


Fig. 3. Accumulated weight percent versus particle size

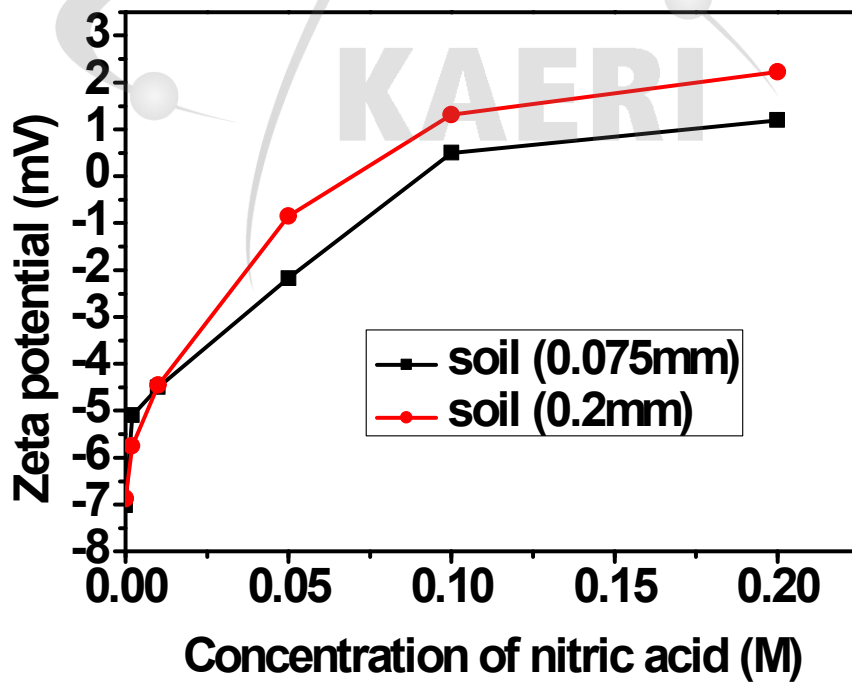


Fig. 4. Zeta potential of TRIGA soil versus concentration of nitric acid

- TRIGA 방사성 콘크리트는 20~50cm 크기로 200L 방사성폐기물 드럼에 보관하고 있는데 본 실험을 위해 파쇄기로 0.5cm 이하로 파쇄하였고, 파쇄된 콘크리트의 평균입도는 1.3mm 이고, 체적밀도는 1.65 g/cm^3 이며, 공극률은 38.8%이며, 평균 수리전도도는 $2.7 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 이며, 질산 0.01M사용 시 콘크리트의 제타포텐셜은 -5.42 mV이다.[Table 4, Fig. 5~6].



Fig. 5. The crushing and mixture of concrete

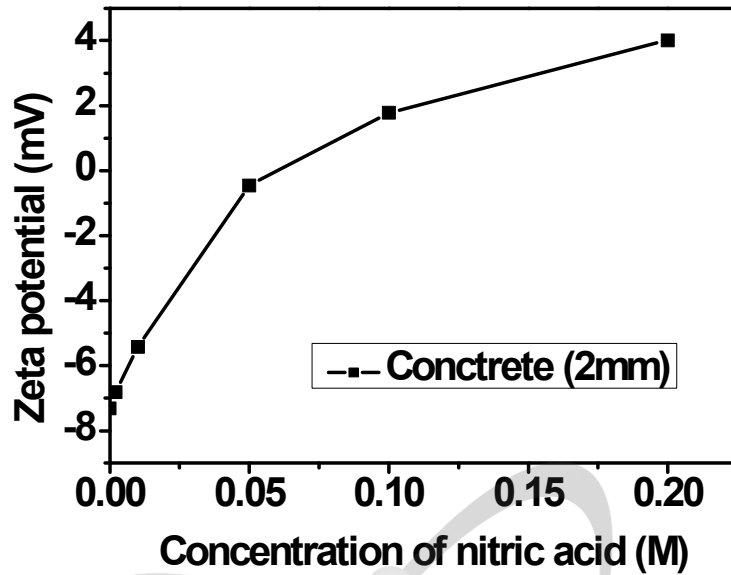


Fig. 6. Zeta potential of TRIGA concrete versus concentration of nitric acid

(4) 모의오염 토양 및 콘크리트 제조

- 원(연)에 보관된 TRIGA 방사성 토양을 굴착한 지역 부근의 비 오염토양을 굴착하여 0.01 M CO^{2+} 와 Cs^+ 으로 오염시킨 후 일주일 간 건조한 토양을 모의오염토양으로 사용하였고, 원(연)에 보관된 비 오염 콘크리트를 0.5cm이하로 파쇄하여 0.01 M CO^{2+} 와 Cs^+ 으로 오염시킨 후 일주일 간 건조한 콘크리트를 모의오염 콘크리트로 사용하였다.
- 모의오염토양의 CO^{2+} 와 Cs^+ 농도를 AAS 측정결과 각각 238mg/kg, 515mg/kg이고, 모의오염 콘크리트의 CO^{2+} 와 Cs^+ 농도를 AAS 측정결과 각각 224mg/kg, 430mg/kg으로 측정되었다.

다. 실험실규모 전기화학세정장치 제작 및 성능실험

(1) 실험실규모 전기화학세정장치 제작

- 제작된 전기화학세정장치는 아크릴 토양셀, 두개의 전극실, 세정제 저장조, 폐액 저장조, 그리고 Power supply로 구성되고 오염토양이 차 있는 아크릴 토양셀의 크기는 $9.5 \times 8.0 \times 15.0 \text{ cm}$ 이며 여과 막은 전극칸과 오염토양 사이에 위치하여 오염토양으로부터 이동하는 공극수에 포함된 토양입자의 방출을 방지하고, 세정제 저장조는 세정제 용액을 토양셀로 공급하도록 구성하였다[Fig. 7].
- 양쪽의 전극실은 여과막에 의해 토양으로부터 분리되고, 양전극이 용해되는 것을 방지하기 위해 양전극은 티타늄을 백금으로 코팅한 후 소성 가열한 DSA (Dimensionally Stable Anode), 흑연, 티타늄, 스테인리스 스틸 등에 대한 용융점을 측정된 결과 DSA전극이 높은 전류에 강하므로, 양전극으로 DSA전극을 선정했고, 음극은 용융점이 중간인 티타늄 전극을 선정하였다[Fig. 8].
- 본 장치는 콘크리트 혼합토양으로부터 음전극실로 이동한 양이온은 음전극실 바닥으로 배출시키고, 전기삼투에 의해 음전극실 또는 양전극실로 이동된 전해용액은 전극실 상부배출구로 배출되도록 제작하였다.

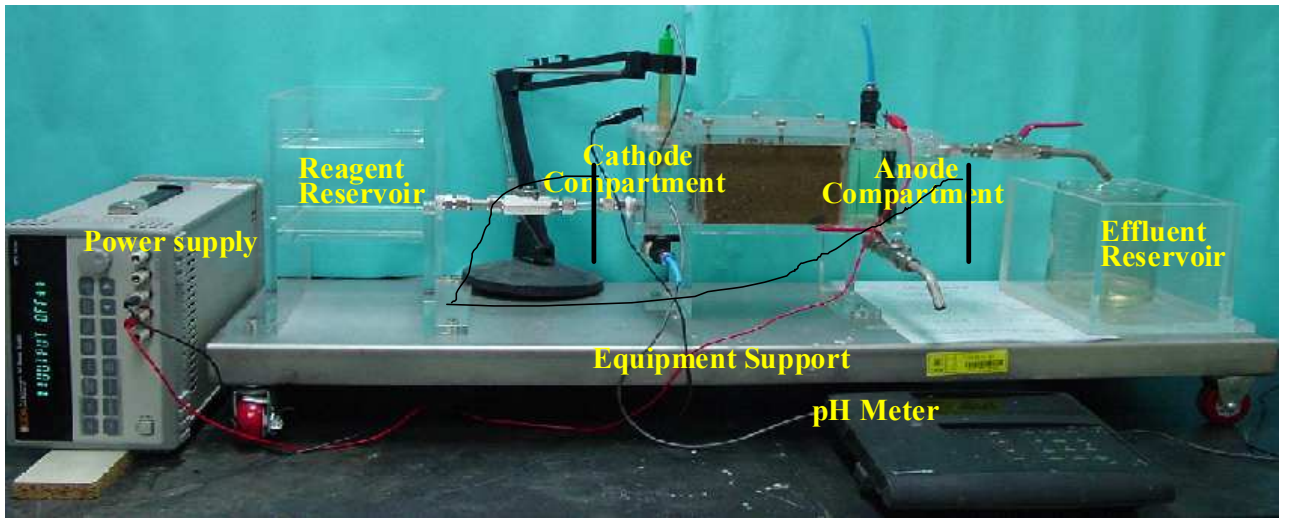


Fig. 7. Manufactured electro-chemical flushing equipment

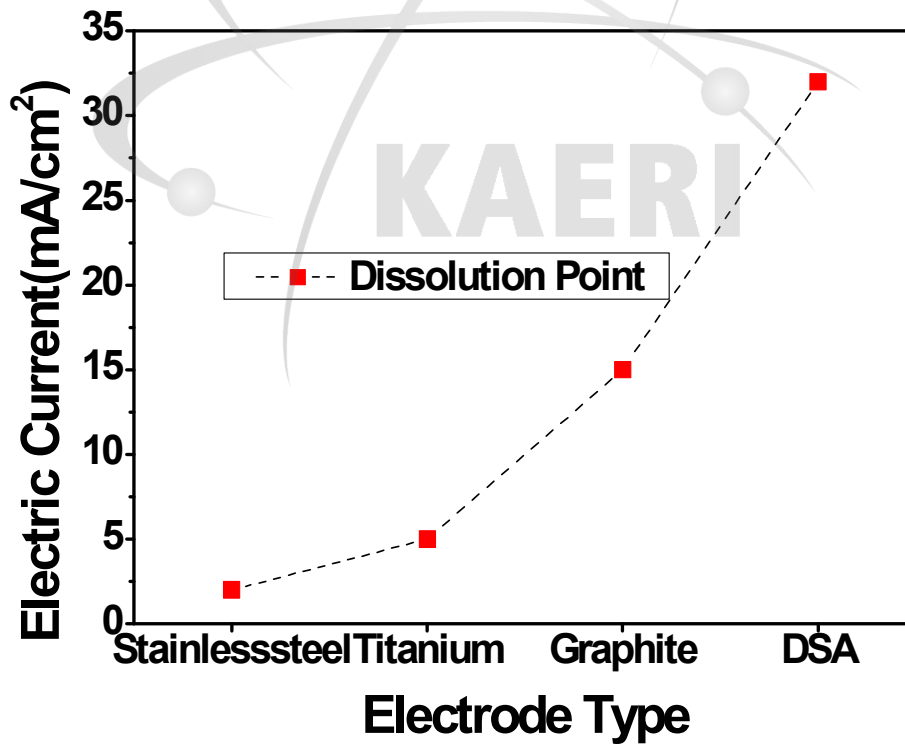


Fig. 8. Electric current versus electrode type

(2) 24시간 가동 시스템 개발

- 음전극실 pH 상승 억제 방안 도출
 - 전기화학 제염 시 음전극실에 OH^- 가 발생하여 pH가 상승함으로 질산용액을 음전극실에 주기적으로 주입하여 pH를 6이하로 유지한다.
- 세정제 저장조 및 수직 가스방출관 설치
 - 야간 및 휴일에 세정제를 공급할 수 있도록 충분한 부피의 세정제 저장조를 설치하고 양전극실과 연결한다.
 - 야간 및 휴일을 위해 세정제저장조에 다량의 세정제 주입 시 세정제가 넘치지 않도록 양전극실위에 수직 가스방출관을 설치하고, 충분한 세정제를 넣어줄 수 있도록 세정제 저장조의 넓이를 확장 한다[Fig. 7].

(3) 실험실규모 전기화학세정폐액 재생장치 제작

- 전기화학세정폐액 재생장치 제작
 - 전기화학세정폐액을 재사용하기 위한 실험실규모 침전조를 제작하였다.
- 모의 전기화학세정폐액내의 오염물 침전 실험
 - 모의 전기화학세정폐액 내에 NaOH를 주입하여 침전실험을 수행한 결과 pH 10에서 Cs 외에 Co, Fe, Ni은 평균 99%이상 제거되었고, 이 침전 처리한 폐액으로 전기화학세정 시 재사용한 결과 3회 재사용 시 원액 제거효율의 95%이상을 확보하였다[Table 5].

Table 5. Removal efficiencies of metals in electrochemical waste-solution according to pH

pH/Metal	Cs	Co	Fe	Ni
9	18 %	99.7 %	98 %	98.4 %
10	21 %	99.9 %	100 %	98.6 %
11	22 %	99.9 %	100 %	98.6 %

(4) 실험실규모장치 최적 제염실험조건 및 설계인자 도출

- 개발된 실험실규모 전기화학세정장치를 이용하여 모의 오염된 토양, 콘크리트 혼합토양, 그리고 콘크리트의 제염성능을 향상시키기 위해 세정제, 전류, 전처리 등의 파라미터를 변형하며 제염한 실험조건 및 코발트와 세슘의 제거효율 결과는 다음과 같다 [Table 6].

Table 6. Electrochemical remediation experimental conditions and results

Reagent(M)	Remediation time(days)	Removal efficiency		Electric current (mA/cm ²)	Effluent Volume (ml/g, 1.6kg)	Remark
		Co(%)	Cs(%)			
EDTA(0.01M)	15	Co(%) Cs(%)	84.5 62.9	4	-	Soil
Oxalic acid (0.01M)	15	Co(%) Cs(%)	91.4 85.0	4	-	Soil
Citric acid (0.01M)	15	Co(%) Cs(%)	87.5 74.2	4	-	Soil
Acetic acid (0.01)	15	Co(%) Cs(%)	92.5 85.9	4	-	Soil
Nitric acid (0.01M)	15	Co(%) Cs(%)	94.3 87.7	4	-	Soil
Nitric acid (0.05M)	15	Co(%) Cs(%)	94.0 85.6	4	-	Soil
Nitric acid (0.01M)	15	Co(%) Cs(%)	97.3 93.0	8	2.6	Soil
water	15	Co(%) Cs(%)	3.1 21.1	4	-	Soil&Concrete
Nitric acid (0.1M)	15	Co(%) Cs(%)	20.1 38.0	4	-	Soil&Concrete
Hydrochloric acid (0.2M)	15	Co(%) Cs(%)	2.0 68.2	4	-	Soil&Concrete
Nitric acid (0.01M)	15	Co(%) Cs(%)	95.4 92.5	4	3.2	Soil&Concrete (After concrete washing with 3.0M HCl for 4Hrs)
Nitric acid (0.1M)	15	Co(%) Cs(%)	0.8 55.0	4	-	concrete
Hydrochloric acid (0.2M)	15	Co(%) Cs(%)	1.0 65.0	4	-	concrete
Nitric acid (0.01M)	15	Co(%) Cs(%)	99.7 99.6	4	5.7	concrete (After concrete washing with 3.0M HCl for 4Hrs)

(가) 최적 제염용액 선정

- 논문 및 특허를 참조하여 전기화학세정공정의 평가 대상 세정제로 EDTA, Oxalic acid, Citric acid, Acetic acid, Nitric acid를 후보세정제로 선정하였다.
→ 후보세정제를 사용하여 전기화학세정 실험을 한 결과 제거효율이 가장 높은 질산을 최적세정제로 선정하였다[Fig. 9~10].
- 질산의 최적농도를 선정하기 위해 다른 농도의 질산을 사용하여 전기화학세정 실험결과 0.01M에서 코발트와 세슘의 제거효율이 가장 높았고, 0.05M 보다 0.01M 질산 사용 시 제거효율이 높은 이유는 0.01M에서의 제타포텐셜이 크기 때문이다[Fig. 4, 11].
- 질산을 세정제로 한 전기화학세정 실험에서 세정제 농도 0.01M, 전류 4mA/cm², 제염시간 15일 조건 제염 시: Co 제거율: 94.3%, Cs 제거율: 87.8% 확보하였다.
- 질산을 세정제로 한 전기화학세정 실험에서 세정제 농도 0.01M, 전류 8mA/cm², 제염시간 15일 조건 제염 시: Co 제거율: 97.3%, Cs 제거율: 93.0% 확보하였음[Fig. 12].

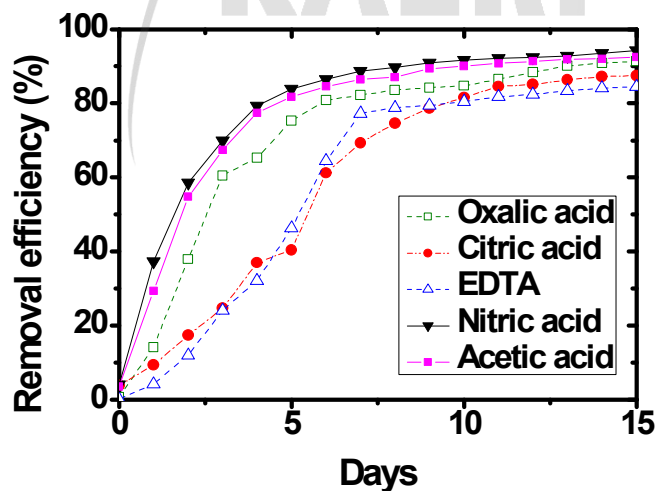


Fig. 9 CO²⁺removal efficiency versus elapsed time according to reagent

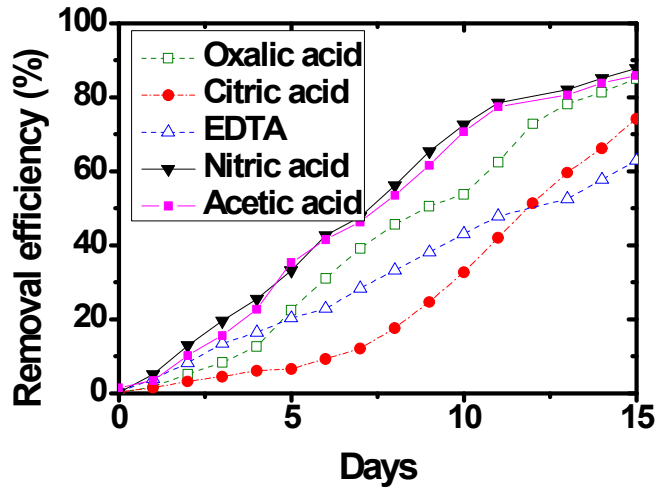


Fig. 10. Cs⁺ removal efficiency versus elapsed time according to reagent

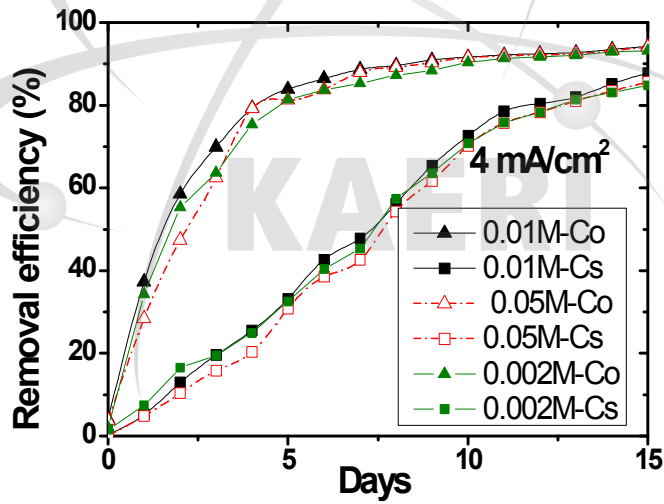


Fig. 11. Removal efficiency with day under different nitric acid concentration

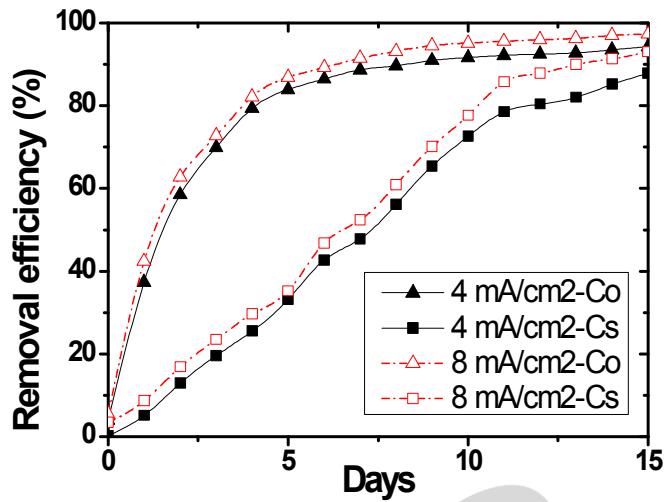


Fig. 12. Removal efficiency with day under different electric current

(나) 콘크리트 혼합 토양에 대한 최적 제염실험 조건 도출

- 오염된 토양과 파쇄 콘크리트를 7 : 3으로 혼합한 콘크리트 혼합토양을 질산, 증류수, 염산을 세정제로 사용하여 전기화학세정기술만으로 제염한 결과 혼합토양에서의 전기삼투방향은 양극이며, 전기이동은 음극이므로 코발트와 세슘의 제염효율은 증류수 사용 시 3.1%와 21.1%이고, 질산 사용 시 20.1%와 38.0%이며, 염산 사용 시 2.0%와 68.2%에 불과하였다[Fig. 13-15].
- 파쇄된 콘크리트의 pH를 저감하기 위해 염산으로 전 처리를 수행한다. 즉 콘크리트입자를 3.0 M의 염산용액에 1.25ml/g으로 혼합한 후 4시간 (0.17일) 동안 세척한다. 이때, 콘크리트입자는 염산과 반응하여 콘크리트 내의 시멘트가 CO₂로 분해 제거되며 콘크리트입자의 pH가 3.7로 낮아진다. 염산으로 세척한 콘크리트로부터 염산용액을 제거하고, 전 처리한 콘크리트와 오염 토양을 3 : 7로 혼합하여 전기화학세정장치의 동 전기셀에 넣고, 0.01M 질산으로 포화시킨 후 0.01M 질산을 세정제로 사용하여 전기화학세정실험을 수행한 결과 총 15일 동안 코발트이온과 세슘이온은 각각 95.4%와 92.5% 제거되었고 아래와 같은 최적제염조건이 도출되었다[Fig. 16].

- 전처리 : 3.0 M 염산용액 1.25ml/g으로 혼합하여 4 시간 세척함
- 최적세정제 : 질산
- 최적 세정제 농도 : 0.01M
- 세정제 주입량 : 3.2 ml/g
- 전류 : 4 mA/cm² 이상
- 음전극실 pH 조절 : 질산용액 사용
- 전기화학세정장치 제염기간 : 15 일 이상
- 전기화학세정 시 15일간 폐액 발생량은 3.2ml/g이며, 이것은 토양세척방법 적용 시에 발생된 폐액(50ml/g 이상)의 10% 미만 이다[Fig. 17].
- 콘크리트만을 염산 전처리 후 전기화학세정 제염 시 콘크리트로부터 코발트이온과 세슘이온은 각각 99.7%와 99.6% 제거되었다[Fig. 18]

(다) Pilot규모장치 제작을 위한 설계인자 도출

- 전류 : 4mA/cm² 이상
- 세정제 : 질산
- 세정제 농도 : 0.01 M
- 세정제 주입량 : 3.2ml/g
- 콘크리트와 토양 혼합비 : 3 : 7
- 양전극 : DSA 전극
- 음전극 : 티타늄 전극
- 가스 방출 : 음전극실과 양전극실에 가스 수직방출관 설치
- 장치 길이 : 15-20 cm
- 전기화학세정장치 제염기간 : 15 일 이상

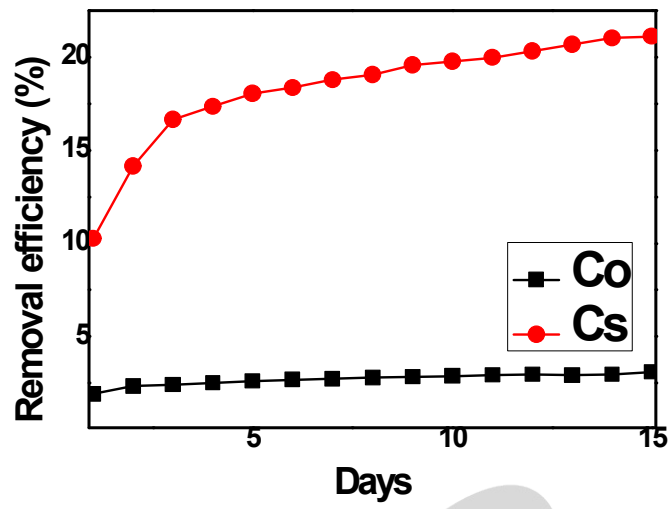


Fig. 13. Removal efficiency with day using distilled water

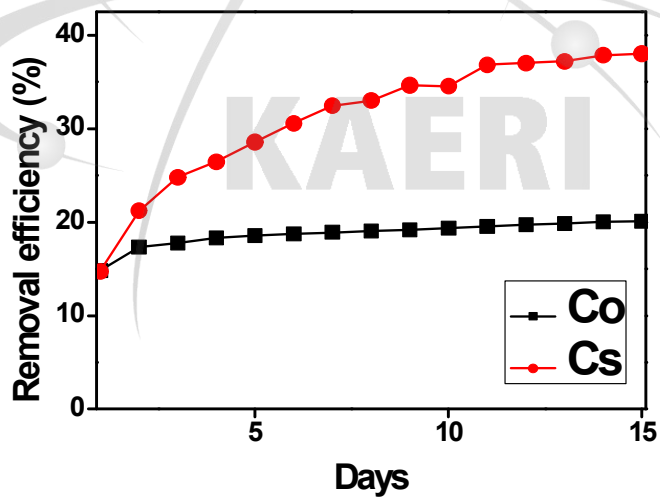


Fig. 14. Removal efficiency with day using 0.1 M nitric acid

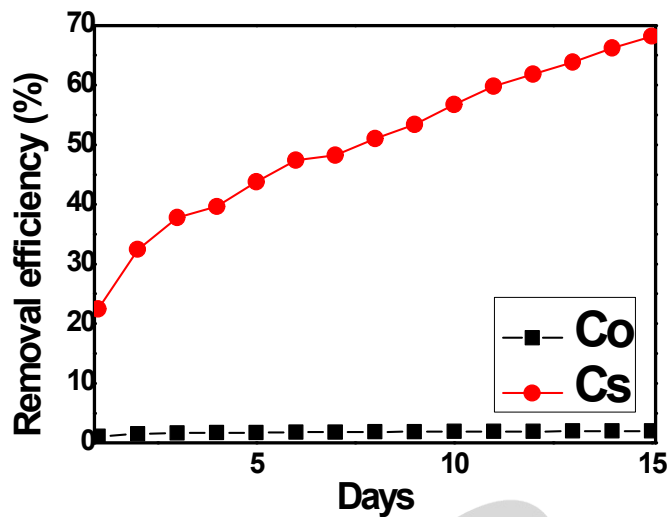


Fig. 15. Removal efficiency with day using 0.2M hydrochloric acid

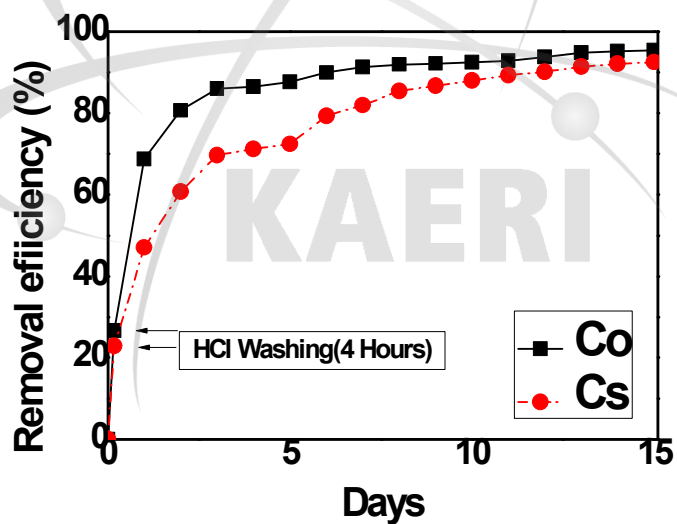


Fig. 16. Removal efficiency with day using 0.01M nitric acid under 4 mA/cm² after washing with 3 M hydrochloric acid

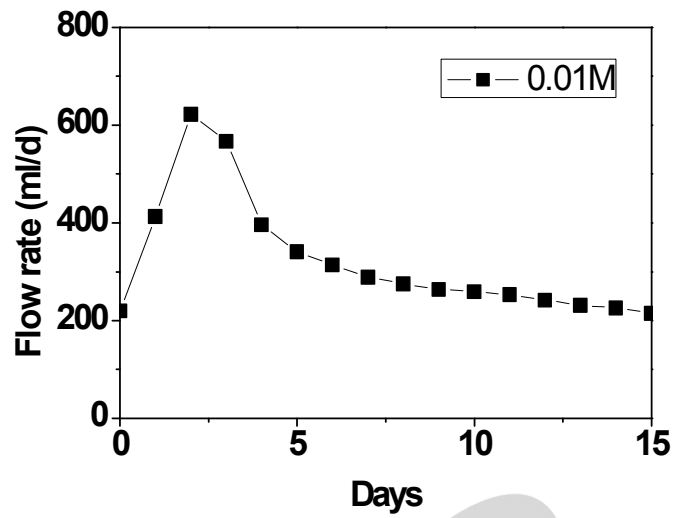


Fig. 17. Effluent(waste-solution) flow rate versus day under electric current $4\text{mA}/\text{cm}^2$

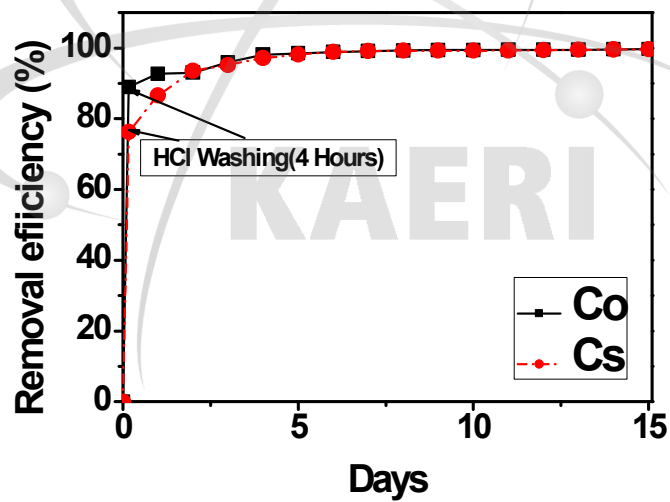


Fig. 18. Removal efficiency with day using 0.01M acetic nitric under $4\text{ mA}/\text{cm}^2$ after washing with 3 M hydrochloric acid

라. 오염특성에 적합한 pilot 규모 전기화학세정장치 제작 및 개선

(1) 오염특성에 적합한 pilot 규모 전기화학세정장치 제작

- 원자력연구원에서 보관중인 방사성 토양과 콘크리트의 오염특성에 적합한 50L의 pilot 규모 전기화학세정장치를 전년도에 제작한 1L 규모 전기화학세정장치를 Scale-up하여 제작하였다[Fig. 19].
- 제작된 50 L 전기화학세정장치는 아크릴 토양셀, 두개의 전극실, 세정제 저장조, 폐액 저장조, pH 조정조 그리고 Power supply로 구성되고 오염 토양이 차 있는 아크릴 토양셀의 크기는 44×62×64cm이며 여과 막은 전극칸과 오염토양 사이에 위치하여 오염토양으로부터 이동하는 공극수에 포함된 토양입자의 방출을 방지하고, 세정제 저장조는 세정제 용액을 토양셀로 공급하고, pH 조정조는 음극실의 pH상승을 제어한다.
- 50L의 Pilot 규모 전기화학세정장치 실험 중에 발생하는 폐액을 재사용하기 위해 폐액처리장치를 제작하였다[Fig. 20].



Fig. 19. Manufactured electro-chemical flushing equipment



Fig. 20 Manufactured waste-solution treatment equipment

(2) 제작된 전기화학세정장치 시운전 및 문제점 개선

- 제작된 50L 전기화학세정장치를 시운전하였을 때 3가지 문제점이 발생하였다. 첫 번째는 pH 조정조에 음극의 pH 상승을 저지하기 위해 높은 농도의 HNO_3 를 넣어 음전극실로 천천히 흘러들어가게 했는데 아크릴로 만든 pH 조정조가 높은 농도의 HNO_3 에 의해 녹아서 HNO_3 가 흘러 나오는 입구를 막아버림으로 pH 조정조의 재질을 PVC로 바꾸어 다시 제작함.
- 두 번째는 여과 막을 지지하는 철망 STS 304가 높은 전압과 높은 농도의 질산 때문에 음전극실 철망의 상부가 녹아내렸으므로 철망재질을 약 2배의 두께를 가진 STS 304로 바꾸어 다시 제작하였다.
- 세 번째는 전기화학세정 시험을 위해 power supply를 이용하여 양극과 음극 사이의 전류밀도를 $10\text{mA}/\text{cm}^2$ 으로 주었을 때 실험실 규모 실험결과를 근거로 예상했던 전압보다 높은 전압이 발생했다. 그러나 시험시간이 경과하여 장치내의 오염토양이 전류체로 변화하며 전압이 점차 감소하여 약 1일 경과후 예상했던 10V 이하로 낮아졌다.

(3) 제작된 전기화학세정장치의 모의오염 토양 및 콘크리트에 대한 제염 효율 평가

- 제작된 50L 전기화학세정장치를 이용하여 모의오염 토양에 대한 제염효율을 평가한 결과 Fig. 21과 같이 코발트는 10mA/cm² 하에서 15일 후 98.4 %가 제거같이 되었고, 세슘은 15일 후 94.9%가 제거되었음.
- 제작된 50L 전기화학세정장치를 이용하여 모의오염 콘크리트에 대한 제염효율을 평가한 결과 Fig. 22와 같이 코발트는 10mA/cm² 하에서 15일 후 99.6 %가 제거같이 되었고, 세슘은 15일 후 99.3%가 제거되었음.

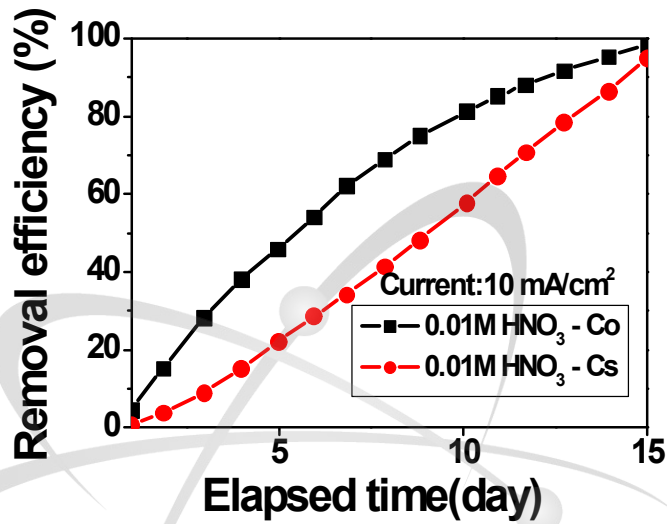


Fig. 21. Co²⁺ and Cs⁺ in soil removal efficiency versus elapsed time by 50L electro-chemical equipment

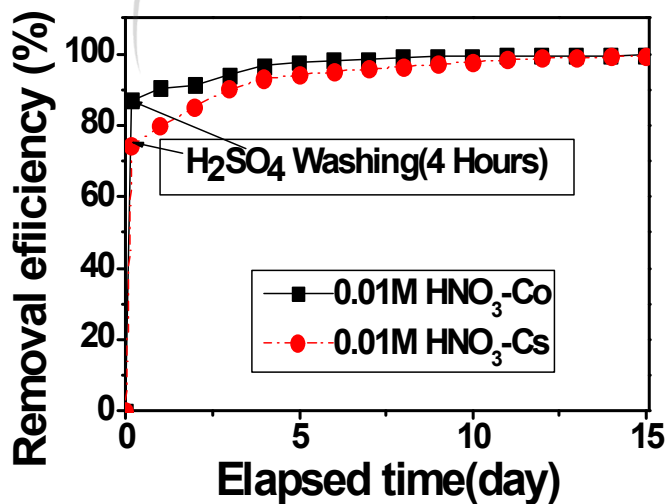


Fig. 22. Co²⁺ and Cs⁺ in concrete removal efficiency versus elapsed

time by 50L electro-chemical equipment

마. Pilot 규모 전기화학세정장치 제염실증 시험

(1) 제작된 50L 규모 전기화학세정장치의 방사성 토양 및 콘크리트에 대한 제염효율 실증

- 제작된 50L 규모 전기화학세정장치를 이용하여 여러 다른 조건하에서 방사성토양에 대한 제염시험을 수행하여 최적제염조건을 도출하였고 Table 8은 각각의 실증시험 조건 및 결과를 보여줌.

Table 7. Electro-chemical remediation experimental conditions and results with 50L equipment

Reagent	Initial Con. (Bq/kg)		Remediation time(days)	Removal efficiency(%)		Electric Current (mA/cm ²)	Waste solution (ml/g)	Particle size (mm)
	Co	Cs		Co	Cs			
Acetic acid (0.01M)	Co	75	20	Co	81.7	10	2.4	0.6
	Cs	120		Cs	55.3			
Nitric acid (0.01M)	Co	60	20	Co	84.6	10	2.5	0.6
	Cs	75		Cs	57.3			
Nitric acid (0.01M)	Co	1200	20	Co	98.7	10	2.6	0.6
	Cs	1650		Cs	61.2			
Nitric acid (0.01M)	Co	680	20	Co	99.1	10	2.6	1.2
	Cs	950		Cs	63.3			
Nitric acid (0.01M)	Co	770	20	Co	99.7	20	2.6	0.6
	Cs	1050		Cs	65.4			

- Fig. 23은 세정제로 초산과 질산을 사용하여 20일 간 전기화학제염을 수행하였을 때의 결과를 보여주며, 질산 사용 시 초산 사용 시보다 약간 높은 제거효율을 보여줌. 또한 질산 사용 시 같은 전류밀도 하에서 전압이 작으므로 전력소비를 감소시킬 수 있으므로 질산을 세정제로 사용하는 것이 유리함.

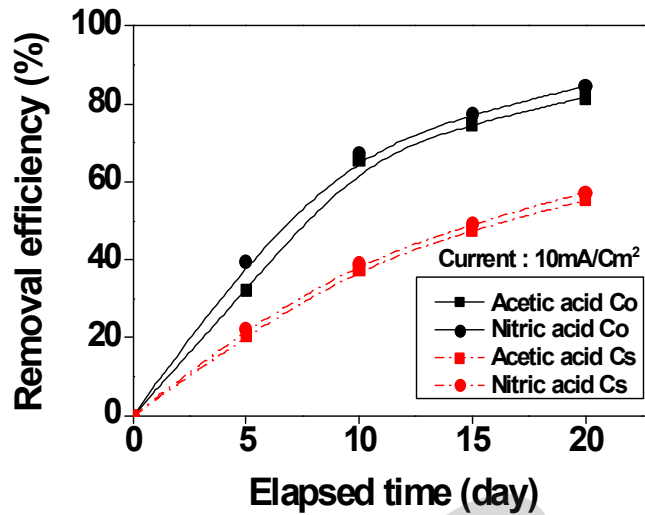


Fig. 23. Removal efficiency for different reagents in a soil cell and removal efficiency with washing pretreatment

- Fig. 24는 방사성토양 내의 초기 코발트와 세슘의 농도가 다를 때 20일간 전기화학제염 수행 후 제염결과를 비교한 것이며, 초기의 농도가 클 때 제거효율이 높았고, 초기의 농도가 클 때 코발트의 제거효율은 세슘의 제거효율보다 증가 폭이 큼.

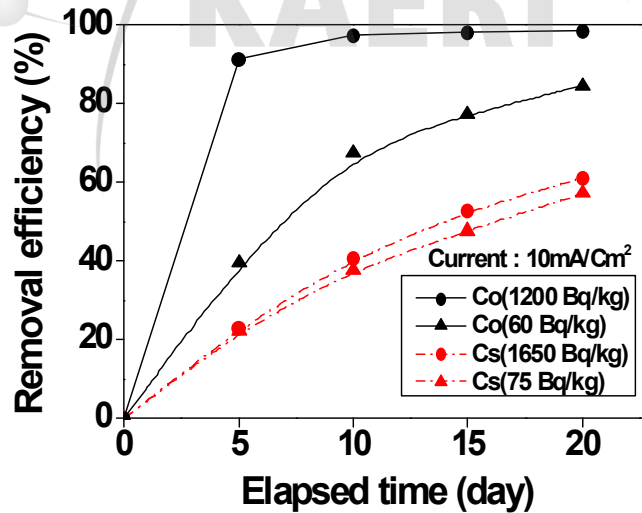


Fig. 24. Removal efficiency along the decontamination elapsed time for different radioactivity concentrations in radioactive soil

- Fig. 25는 전기화학세정장치의 토양셀 내에 주입한 방사성토양의 평균

입도가 다를 때 20일간 전기화학제염 수행 후 제염결과를 비교한 것이며, 토양의 평균입도가 클 때 제거효율이 높았고, 토양 평균입도가 0.6 mm에서 1.2 mm로 증가했을 때 세슘의 제거효율은 약 2% 증가함.

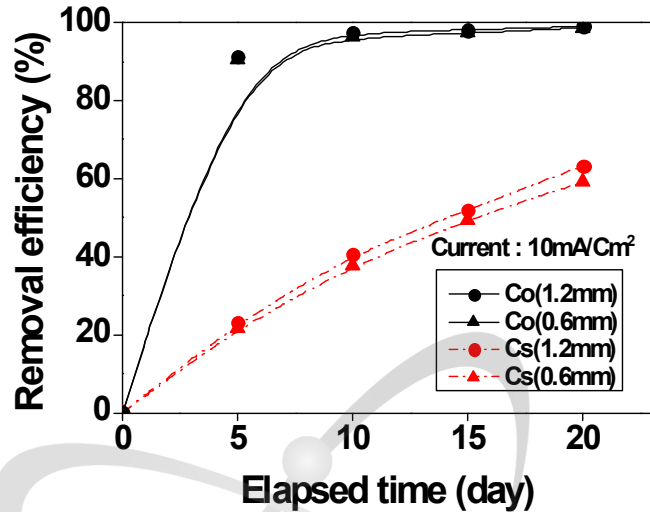


Fig. 25. Removal efficiency along the decontamination elapsed time for different particle sizes of radioactive soil

- Fig. 26은 전기화학세정장치 토양셀 내에 가해진 전류밀도의 변화에 따른 20일간 전기화학제염 수행 후 제염결과를 비교한 것이며, 토양셀 내의 전류밀도가 클 때 제거효율이 높았고, 전류밀도가 10 mA/cm²에서 20 mA/cm²로 증가시켰을 때 세슘의 제거효율은 약 2% 증가함.

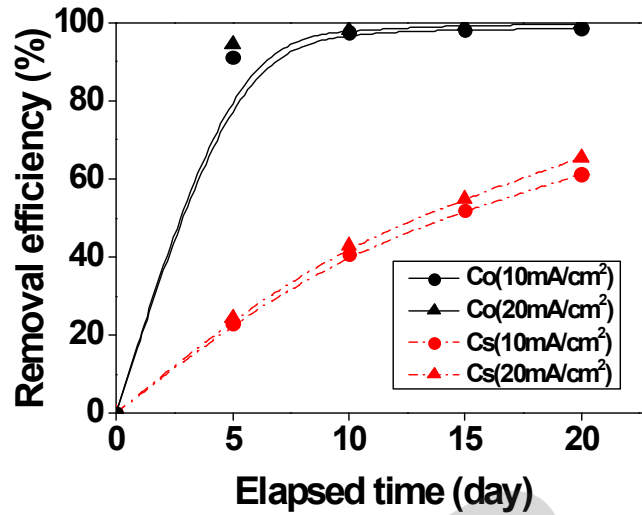


Fig. 26. Removal efficiency along the decontamination elapsed time for different electric currents in a soil cell

- Fig. 26은 전기화학세정장치 토양셀 내에 가해진 전류밀도의 변화에 따른 20일간 전기화학제염 수행 후 제염결과를 비교한 것이며, 토양셀 내의 전류밀도가 클 때 제거효율이 높았고, 전류밀도가 10 mA/cm²에서 20 mA/cm²로 증가시켰을 때 세슘의 제거효율은 약 2% 증가함.
- Fig. 27은 초기 농도가 다른 방사성토양을 자체처분허용농도(100Bq/kg) 이하로 제염하기 위해 필요한 시간을 실증실험을 통해 제시하였음. 즉, 초기농도 3,000 Bq/kg경우 약 60일 간의 전기화학세정 제염기간이 필요하고, 초기농도 2,000 Bq/kg경우 약 50일 간의 전기화학세정 제염기간이 필요하며, 초기농도 1,000 Bq/kg경우 약 40일 간의 전기화학세정 제염기간이 필요하고, 초기농도 500 Bq/kg경우 약 25일 간의 전기화학세정 제염기간이 필요하며, 초기농도 200 Bq/kg경우 약 10일 간의 전기화학세정 제염기간이 필요하였음.

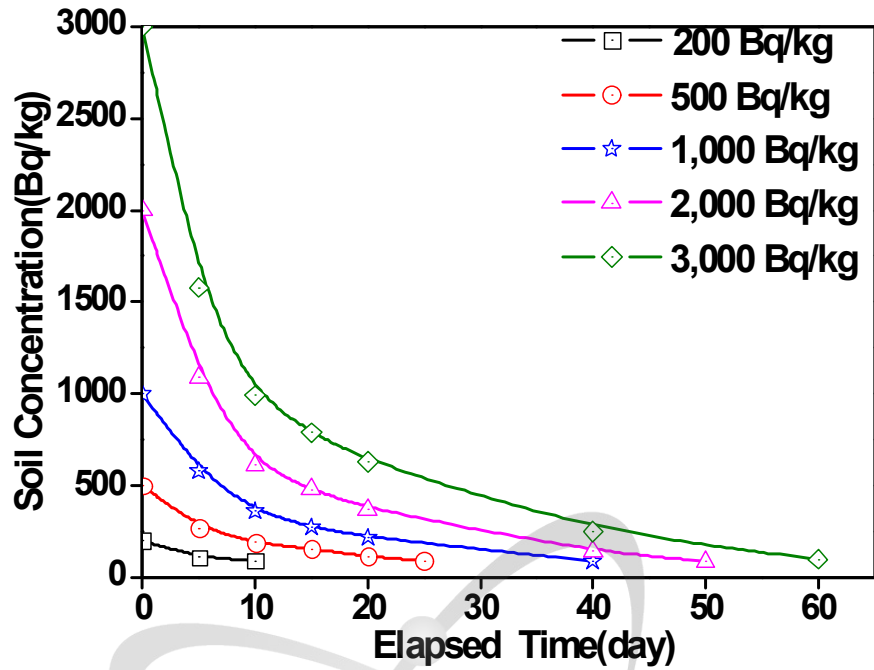


Fig. 27. Decontamination period required for decontaminating radioactive soil to a clearance radioactivity concentration level (100Bq/kg)

- Fig. 28은 전기화학세정장치로 파쇄된 방사성 콘크리트에 대해 전기화학세정을 수행한 결과를 보여줌, 파쇄된 방사성콘크리트의 pH를 낮추기 위해 먼저, 황산으로 4시간 세척을 시킨 결과 방사성콘크리트로부터 코발트와 세슘 약 80%와 40%가 제거되었고, 이 파쇄콘크리트를 전기화학세정장치에 넣고 20일간 제염시험을 수행한 결과 코발트와 세슘 99.6%와 88.2%가 제거됨.

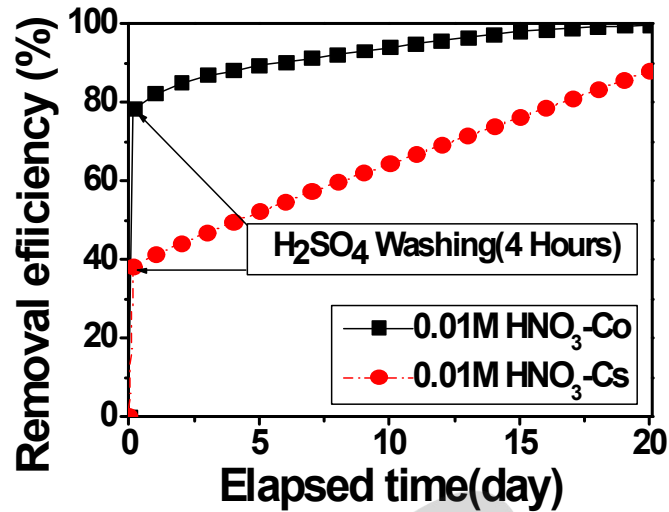


Fig. 28. ⁶⁰Co and ¹³⁷Cs removal efficiencies along different reagents in a concrete cell after washing with H₂SO₄

- Fig. 29는 초기 농도가 다른 방사성콘크리트를 자체처분허용농도 (100Bq/kg)이하로 제염하기 위해 필요한 기간을 실증실험을 통해 제시 하였음. 즉, 초기농도 3,000 Bq/kg경우 황산 세척 후 약 45일 간의 전기화학세정 제염기간이 필요하고, 초기농도 2,000 Bq/kg경우 황산 세척 후 약 40일 간의 전기화학세정 제염기간이 필요하며, 초기농도 1,000 Bq/kg경우 황산 세척 후 약 30일 간의 전기화학세정 제염기간이 필요하고, 초기농도 500 Bq/kg경우 황산 세척 후 약 15일 간의 전기화학세정 제염기간이 필요하였음.

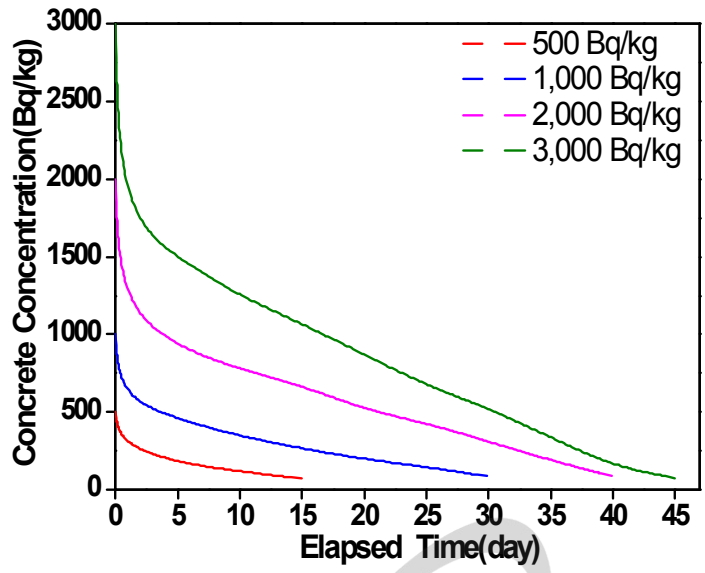


Fig. 29. Decontamination period required for decontaminating radioactive concrete to a clearance radioactivity concentration level (100Bq/kg)

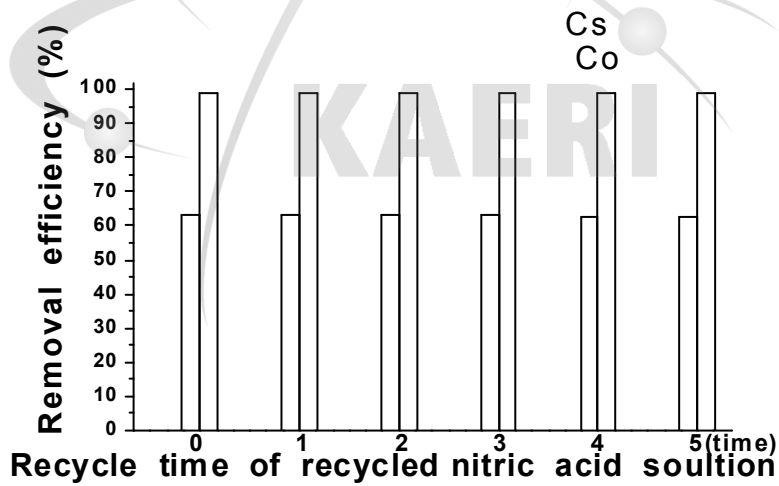


Fig. 30. Removal efficiency varying with recycle time of recycled nitric acid solution

Table 8. Metal concentration in waste-solution

Metal	ppm
Ca	33.3
Al	13.6
Fe	13.4
K	8.8
Si	7.8
Mn	6.0
Mg	4.8
Ni	2.2
Na	2.0
Cr	1.9
Ba	1.8
Cu	0.59
Sr	0.37
Zn	0.31
Cs	0.3
Co	0.2
Ce	0.11

(2) 발생 폐액량 평가 및 폐액재생장치 재생효율실증

- 전기화학세정 시 발생된 토양폐액량은 Table 8과 같이 20일간 2.6 ml/g 임. 그러나 방사성토양의 초기농도가 높은 경우 제염기간은 길어질 것이 예측되므로 평균 3 - 5 ml/g으로 예측되며 콘크리트 폐액도 비슷한 양으로 예측됨.
- 전기화학 세정 시 발생된 폐액내의 금속 농도분포는 Table 9와 같고, 코발트와 세슘의 농도는 0.2, 0.3 ppm에 불과 함.이 폐액에 NaOH를 가하여 pH를 높여가며 침전시켰을 때 폐액 내의 코발트와 세슘은 Table

10과 같이 pH 10에서 99.9%와 21%가 제거되었음. 즉, 침전물 제거 후 용액 내의 코발트는 거의 제거되며 세슘은 5배 이상 희석되고 21% 침전 제거됨. 이 용액에 질산을 첨가하여 pH를 2.4(질산 0.01M)로 맞추어 후 재사용함. 마지막 5일간은 토양공극 내의 세슘을 제거하기 위해 0.01M 질산 용액을 사용함. 동등방법으로 재생한 용액을 5회 사용 결과 Fig.30과 같이 제염효율은 원액의 95%이상으로 재생폐액의 제염효율이 검증됨.

Table 9. Metal concentration in waste-solution after pH adjustment

pH	Cs	Co	Fe	Ni
9	18	99.7	98	98.4
10	21	99.9	100	98.6
11	22	99.9	100	98.6

바. 결론

원(연)에 보관중인 방사성 콘크리트 및 토양의 오염특성에 적합한 실험실 규모 전기화학세정장치를 제작하고 이 장치를 이용하여 제염실험결과는 아래와 같음.

- 모의오염 콘크리트혼합 토양에 대해 염산으로 전 처리한 후 전기화학세정 시 15일 동안 코발트이온과 세슘이온은 각각 95.4%와 92.5% 제거됨.
- 모의오염 콘크리트혼합 토양에 대해 전기화학세정 시 15일간 폐액 발생량은 3.2 ml/g이며, 이것은 토양세척방법 적용 시에 발생된 폐액(50 ml/g 이상)의 10% 미만 임.
- 모의오염 토양에 대해 전기화학세정 시일 조건 제염 시 15일 동안 코발트이온과 세슘이온은 각각 97.3%와 93.0% 제거됨.
- 모의오염 콘크리트에 대해 콘크리트를 염산 전처리 후 전기화학세정 제염 시 콘크리트로부터 코발트이온과 세슘이온은 각각 99.7%와 99.6% 제거됨.
- 전기화학세정 시의 최적세정제와 최적실험조건을 도출하고, 2009연도에 제작할 Pilot규모 전기화학세정장치의 설계인자를 도출 함
- 초기 농도가 다른 방사성토양을 자체처분허용농도(100Bq/kg)이하로 제

염하기 위해 필요한 기간을 실증실험을 통해 제시하였음. 즉, 초기농도 3,000 Bq/kg경우 약 60일 간의 전기화학세정 제염기간이 필요하고, 초기농도 2,000 Bq/kg경우 약 50일 간의 전기화학세정 제염기간이 필요하며, 초기농도 1,000 Bq/kg경우 약 40 일 간의 전기화학세정 제염기간이 필요하고, 초기농도 500 Bq/kg경우 약 25일 간의 전기화학세정 제염기간이 필요하며, 초기농도 200 Bq/kg경우 약 10일 간의 전기화학세정 제염기간이 필요하였음.

- 초기 농도가 다른 방사성콘크리트를 자체처분허용농도(100Bq/kg)이하로 제염하기 위해 필요한 기간을 실증실험을 통해 제시하였음. 즉, 초기농도 3,000 Bq/kg경우 황산 세척 후 약 45일 간의 전기화학세정 제염기간이 필요하고, 초기농도 2,000 Bq/kg경우 황산 세척 후 약 40일 간의 전기화학세정 제염기간이 필요하며, 초기농도 1,000 Bq/kg경우 황산 세척 후 약 30일 간의 전기화학세정 제염기간이 필요하고, 초기농도 500 Bq/kg경우 황산 세척 후 약 15일 간의 전기화학세정 제염기간이 필요하였음.
- 전기화학 세정 시 발생된 폐액내의 코발트와 세슘의 농도는 0.2, 0.3 ppm에 불과 함.이 폐액에 NaOH를 가하여 pH를 높여가며 침전시켰을 때 폐액 내의 코발트와 세슘은 pH 10에서 99.9%와 21%가 제거되었음. 즉, 침전물 제거 후 용액 내의 코발트는 거의 제거되며 세슘은 5배 이상 희석되고 21% 침전 제거됨. 이 용액에 질산을 첨가하여 pH를 2.4 (질산 0.01M)로 맞춘 후 재사용함. 마지막 5일간은 토양공극 내의 세슘을 제거하기 위해 0.01M 질산 원액을 사용함. 동등방법으로 재생한 용액을 5회 사용 결과 제염효율은 원액의 95%이상으로 재생폐액의 제염효율이 검증됨.
- 음극실에 발생된 부식침전물은 음극실 침출액의 순환 및 pH 조정 그리고 DSA전극으로 교환 등에 의한 개선 필요함.

Reference

1. K. Popov, I. Glazkova, V. Yachmenev and A. Nikolayev, "Electrokinetic Remediation of Concrete: Effect of Chelating Agents," *Environmental Pollution*, 153, 22(2008).
2. D. Voinitchi, S. Julien and S. Lorente, "The Relation between Electrokinetics and Chloride Transport through Cement-Based Materials," *Cement & Concrete Composites*, 30, 157 (2008).
3. M. T. Harris, D. W. Depaoli and M. R. Ally, "Modeling the Electrokinetic Decontamination of Concrete," *Separation Science and Technology*, 32, 827(1997).
4. M. T. Harris, D. W. Depaoli and M. R. Ally, "Investigation of Electrokinetic Decontamination of Concrete," *Separation Science and Technology*, 32, 387(1997).
5. F. Braud, S. Tellier and M. Astruc, "Modeling of Decontamination Rate in an Electrokinetic soil Processing," *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 68, pp105-121(1998).
6. 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, 259(2001).
7. M.M. Page and C. L. Page, "Electroremediation of Contaminated Soils," *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, 128, 208(2002).
8. C. Chaiyaraksa and N. Sriwiriyanuphap, "Batch Washing of Cadmium from Soil and Sludge by Mixture of $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ and Na_2EDTA ," *Chemosphere*, 546, 129(2004).

9. 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), 987(1988).
10. B. Sun, F.J. Zhao, E. Lombi and S.P. McGrath, "Leaching of Heavy Metals from Contaminated Soil Using EDTA," Environ Pollut., 113, 111(2001).
11. R. Abumaizar and L.L. Khan, "Laboratory Investigation of Heavy Metal Removal by Soil Washing," J. Air Waste Manage. Assoc., 46, 765(1996).
12. B. Kornilovich, N. Mishchuk, K. Abbruzzese, G. Pshinko and R. Klishchenko."Enhanced Eletrokinetic Remediation of Metals-Contaminated clay," Colloids and Surfaces A:Physicochem. Eng. Aspects., 265, 114(2005).
13. 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, 249(2007).
14. K. Popov, I. Glazkova, A. Petrov and E. Sedykh, "Zeta-Potential of Concrete in Presence of Chelating Agents," Colloids and Surfaces, 299, 198(2007).
15. B. Sun, J. Zhao, E. Lombi and S.P. McGrath, " Leaching of Heavy Metals from Contaminated Soils Using EDTA," Environ. Pollut., 113, 111(2001).
16. R. Bassi, S. O. Prasher and B. K. Simpson, "Extraction of Metals from a Contaminated Sandy Soil Using Citric Acid," Environ. Prog., 19(4), 275(2000).
17. G.M. Nystrom, "Investigations of Soil Solution during Enhanced

- Electrodialytic Soil Remediation, " Report No. BYG-DTU R009, Denmark Technical University, 21, (2001).
18. R. J. Shiau, R.L. Smith and B. Aveller, "Effects of Steam Explosion Processing and Organic Acids on CCA Removal from Treated Wood Waste," *Wood Sci. Technol.*, 34, 377 (2000).
 19. 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, 297(2001).
 20. H.A. Elliot and N.L. Shastri, "Extractive Decontamination of Metal-Polluted Soils Using Oxalate," *Water Air Soil Pollut*, 110, 335(1999)
 21. W. Stumm, *Chemistry of the Solid-Water Interface*, p. 165, Wiley-Interscience, New York (1992).
 22. G. N. Kim, Y. H. Jung, J. K. Moon, and C. H. Jung, "Development of Electrokinetic Flushing Technology for Remediation of the Contaminated Site Around Nuclear Facilities, " *Journal of Korea Society of Waste Management*, 24(4), 146(2008).
 23. G.N. Kim, Y.H. Jung, J.J. Lee, J.K. Moon, C.H. Jung, U.S. Chung, "Development of electrokinetic-flushing equipment for a remediation of soil contaminated with radionuclides", *Journal of the Korean Radioactive Waste Society*, (2008).
 24. 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).
 25. S. Pamukcu and J.K. Wittle, "Electrokinetic removal of selected heavy metals from soil, " *Environ. Prog.*, 11(3), pp. 241-250(1992).

26. 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).
27. J. Y. Wang, X. J. Huang, J. C. M. Kao and O. Stabnikova, " Removal of hreavy metals from kaolin using an upward electrokinetic soil remedial(USER) technology, Journal of Hazardous Materials, B136, pp. 532-541(2006).
28. J. Y. Wang, X. J. Huang, J. C. M. Kao and O. Stabnikova, " Simultaneous removal of origanic contaminants and heavy metals from kaolin using an upward electrokinetic soil remediation process, Journal of Hazardous Materials, B144, pp. 292-299(2007).
29. 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).
30. J.C. Chao, A. Hong and R.W. Peters, Proceedings of the Conference on Hazardous Wastes Research, pp.142, UT, USA(1998).
31. G. N. Kim, W. Z. Oh, H. J. Won and W. K. Choi, "Removal of cesium and cobalt from soil around TRIGA reactor using electrokinetic method", J. Ind. Eng. Chem., 9(3), pp.306-313(2003).

서 지 정 보 양 식

수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드
KAERI/RR-3052/2009			
제목 / 부제	방사성 토양 및 콘크리트 제염을 위한 pilot규모 전기화학세정장치 개발		
연구책임자 및 부서명	김계남 (제염해체 기술 개발부)		
연구자 및 부서명	문제권, 최왕규(제염해체 기술 개발부), 양병일 손종식, 홍대석(원자력산업기술개발본부 조사시험부)		
출판지	발행기관	KAERI	발행년 2010
페이지	47p.	도표	있음(0), 없음() 크기 Cm.
참고사항			
공개여부	공개(0), 비공개()	보고서종류	연구보고서
비밀여부	대외비 (), __ 급비밀		
연구위탁기관	계약 번호		
초록 (15-20줄내외)	<p>원연에서 보관하고 있는 방사성핵종 오염토양 및 콘크리트의 오염특성에 적합한 Pilot규모 전기화학세정장치를 제작하고 단기간에 방사성핵종 제거효율이 높고 폐액발생량이 적은 최적제염용액 및 최적제염조건을 도출하였음</p> <ul style="list-style-type: none"> - TRIGA 방사성 토양 및 콘크리트의 오염특성 분석 - 실험실규모 전기화학세정장치 제작 및 성능실험 - 오염특성에 적합한 pilot 규모 전기화학세정장치 제작 및 개선 - Pilot 규모 전기화학세정장치 제염실증 시험 		
주제명키워드 (10단어내외)	TRIGA 방사성 토양 및 콘크리트 제염 Pilot 전기화학세정장치		

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET

Performing Org. Report No.	Sponsoring Org. Report No.	Standard Report No.	INIS Subject Code
KAERI/RR-3052/2009			
Title / Subtitle	Development of a pilot size of electrochemical flushing equipment for radioactive soil and concrete		
Project Manager and Department	Gye-Nam Kim (Decontamination and Decommissioning Department)		
Researcher and Department	Jei-Kwon Moon, Wang-Kyu Choi, Byeong-Il Yang(Decontamination and Decommissioning Department)		
	Jong-Sik Shon, Dae-Seok Hong(PIE& Radwaste Center)		
Publication Place	Publisher	Publication Date	2010
Page	47p. Ill. & Tab.	Yes(O), No ()	Size Cm.
Note			
Open	Open(O), Closed()	Report Type	Research Report
Classified	Restricted(), ___Class Document		
Sponsoring Org.		Contract No.	
Abstract (15-20 Lines)	<p>A pilot size of electrochemical flushing equipment will be manufactured suitable to the contamination characteristics of radioactive soil and concrete stored in KAERI radioactive waste storage. An optimal reagent and an optimal decontamination conditions should be decided through many experiments.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Contamination characteristics analysis of TRIGA radioactive soil and concrete - Manufacture of pilot-scale electrochemical flushing equipment - Manufacture and improvement of suitable electrochemical flushing equipment for contamination characteristics in pilot size - Decontamination experiments of electrochemical flushing equipment in a pilot scale 		
Subject Keywords (About 10 words)	TRIGA radioactive soil and concrete pilot-scale electrochemical flushing equipment		